JNC　TJ1400　2001－002(1)

堆積岩を対象とした深地層の研究施設工程および防災に関する研究（平成12年度）

（核燃料サイクル開発機構 委託研究内容報告書）

2001年3月

大成建設株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。
〒319-1194　茨城県那珂郡東海村村松４番地４９
核燃料サイクル開発機構
技術展開部　技術協力課
Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section, Technology Management Division
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1194, Japan

©核燃料サイクル開発機構（Japan Nuclear Cycle Development Institute）
2001

JNC TJ1400 2001-002(1)
2001年3月

堆積岩を対象とした深地層の研究施設工程および防災に関する研究（平成12年度）

杉原　豊*

要　　旨

深地層の研究施設は、深部地質環境に関する知見を一層充実させるとともに2000年レポートによって示された地層処分技術や知見を実際の深地層での研究を通じて具体的に確認することを目的とすると同時に、一般の人々が深地層を実際に見て体験できる場として計画されている。

平成10年度は、堆積岩を対象とした深地層の研究施設の地下施設（以下地下施設とする）へのアクセス坑道に関して、基本レイアウト、支保設計、施工方法について概念的な検討を行った。

平成11年度は、地下施設を公開する場合の法規制内容、および可燃性ガスが地下施設の建設および操業に及ぼす影響を調査し、防災上重要な通気システムの検討を行った。この調査検討結果に基づき、地下研究施設が建築基準法の適用を受ける場合と受けない場合について地下施設の概念を構築し、それぞれの場合の概略スケジュールを検討した。

本年度は、地下施設の構造的な特徴を考慮し、地下施設における防災、特に火災時の避難や換気を効率的に行えるレイアウトを検討した。検討にあたり、サイクル機構より提示された地下施設の基本レイアウト（立坑案および斜坑案）の特徴を明らかにし、防災を考慮したレイアウトを提示した。その結果、防災を考慮した場合の地下施設のレイアウトは、当初案から非常時の避難や換気のための立坑および斜坑を追加し、避難設備や退避空間を確保することにより安全性が増加するものと考えられた。防災を考慮した場合の地下施設の建設工程は、アクセスとしての立坑や斜坑の同時着工を仮定すれば当初案と変わらない。

次に、地下施設が堆積岩地点の地下深部で施工されることを考慮し、地下施設の建設工程に影響を与えると考えられるガス、湧水、押出し等の検討を行った。ガスが建設工程に与える影響については、トンネルおよび炭鉱の事例調査の結果、掘削機械や設備の防爆化、ガスの調査、保安設備の設置の影響が大きいことが分かった。

また、地下施設の建設や維持にとって重要な空洞安定性評価の手法について調査および検討を行った。空洞安定性を評価する手法については、類似条件での施工事例が少ないことから、数値解析による手法が適当であること、坑道周辺岩盤のひずみを空洞安定性評価の指標として適用できること、空洞安定性を解析する際の精度だけでなく、解析に用いる入力物性値の精度も向上させる必要のあることが示された。

本報告書は、大成建設株式会社が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：120D0187

サイクル機構担当部課室および担当者：立地推進部　　研究主幹　山崎　眞一

*　大成建設株式会社エンジニアリング本部計画グループ

JNC TJ1400 2001-002(1)
March, 2001

Feasibility study on construction and accident prevention of the URL

Y. Sugihara[1)]

ABSTRACT

The Underground research laboratory (URL) programme hosted by sedimentary rocks is aimed to obtain deep geological characteristics of sedimentary rocks and to confirm the applicability of the investigation methods for the geological environment and the engineering technologies for the geological disposal such as described in the H12 report. In addition, the URL is aimed to have public people experience a deep geological environment in order to understand a deep geological disposal of HLW.

The conceptual layout, design of support and construction method of access drift were considered in the previous report of 1998 [JNC TJ1410 98-001].

The regulations written in relevant laws, that will be applied to the URL, on visitors and equipments were investigated in the report of 1999 [JNC TJ1410 2000-001]. The potential accidents caused by the inflammable gas were investigated and the appropriate air circulation system was considered. Furthermore, the conceptual structure and the schedule of the URL are discussed in the cases of applying and not applying the building standard.

In this report, the structure of the URL was studied from the viewpoint of protection against accidents especially fire protection because the URL was planned to be constructed at depth and the entrance was limited. The reference structure of the URL including the shaft case and the inclined drift case, which was presented by the JNC. The shaft or inclined drift for evacuation and ventilation with fire protection room and facility was added in the modified structure of the URL. Construction schedule of the modified structure of the URL was almost the same as the reference structure .

Influence of the phenomena such as inflammable gas, groundwater inflow and tunnel wall deformation in sedimentary rock mass on the schedule of the URL was investigated based on the previous database of tunnel and coal mine . From the investigations on inflammable gas, it was noted that the use of flameproof construction machine and electrical apparatus, gas monitoring system and additional ventilation facility influenced too much on the schedule .

Estimation method of stability analysis of the drift within the URL constructed in sedimentary rock mass was investigated based on the case study of the tunnels with deep cover and small rock strength. It is noted that numerical analysis such as FEM is appropriate and that strain of the rock mass around the drift is effective index for the drift stability estimation. For this purpose, it is necessary to consider the preciseness of both numerical method and input data for the stability estimation of the drift of the URL.

Work performed by Taisei Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute
JNC Liaison : Site Planning Division・・・・・・・・・・Shinichi Yamasaki
1) Taisei Corporation, Engineering Division

堆積岩を対象とした深地層の研究施設　工程および防災に関する研究（平成 12 年度）

担当者一覧

実施責任者	杉原　豊
実施担当者	山本　卓也
研究業務担当	森川　泰成
	中濱　慎司
	亀村　勝美
	小原　伸高
	桑田　尚史
	杉原　豊
	山本　卓也
	窪田　茂
	井尻　裕二
	畑　明仁
	五十嵐孝文

目　　次

頁

1.　はじめに..... 1-1

2.　研究の目的..... 2-1

3.　地下施設の工程および防災に関する検討..... 3-1
3.1　目的..... 3-1
3.2　地下施設の防災に関する検討..... 3-3
3.2.1　地下施設の基本的な防災検討..... 3-3
3.2.2　地下施設の具体的な防災検討..... 3-12
3.2.3　まとめと今後の課題..... 3-48
3.3　地下施設の工程に関する検討..... 3-51
3.3.1　基本レイアウトの建設工程の検討..... 3-51
3.3.2　建設工程に影響を与える因子に関する検討..... 3-55
3.3.3　防災を考慮したレイアウトの建設工程の検討..... 3-82
3.3.4　まとめと今後の課題..... 3-87

4.堆積岩を対象とした施設設計に関する検討..... 4-1
4.1　目的..... 4-1
4.1.1　検討の目的..... 4-1
4.1.2　検討の内容..... 4-1
4.1.3　検討方針..... 4-2
4.2　空洞安定性評価手法の検討..... 4-5
4.2.1　既往の空洞安定性評価手法（設計手法）の調査..... 4-5
4.2.2　空洞安定性評価手法（設計手法）の比較評価..... 4-27
4.3　トンネル支保設計にあたり必要となる入力条件、問題点・課題点..... 4-93
4.3.1　空洞安定性評価手法（設計手法）と必要となる入力条件..... 4-93
4.3.2　問題点・課題点..... 4-99
4.4　まとめ..... 4-101

5.　まとめと今後の課題..... 5-1

付録

付録A:地下施設の防災に関する検討　資料集
付録B:堆積岩を対象とした施設設計に関する検討　参考文献集
付録C:鉱山における災害事例と対策の調査　資料集

図　目　次

頁

図 3.2.2-1　立坑レイアウト案 3-12
図 3.2.2-2　斜坑レイアウト案 3-12
図 3.2.2-3　横坑道内からの出火を想定した場合の火災進展別の
火災被害シナリオ 3-15
図 3.2.2-4　立坑･斜坑からの出火を想定した場合の火災進展別の
火災被害シナリオ 3-16
図 3.2.2-5　基本レイアウト案での全体図（立坑案１） 3-22
図 3.2.2-6　防災を考慮したレイアウト案での全体図（立坑案２） 3-23
図 3.2.2-7　基本レイアウト案での全体図（斜坑案１） 3-24
図 3.2.2-8　防災を考慮したレイアウト案での全体図（斜坑案２） 3-25
図 3.2.2-9　２方向避難の確保（予備ステージ部分） 3-26
図 3.2.2-10　縦方向の２方向避難の確保（立坑案の場合） 3-26
図 3.2.2-11　機械力に依存しない避難ルートの確保（立坑案の場合） 3-27
図 3.2.2-12　給気による避難経路の安全性確保（斜坑案の場合） 3-28
図 3.2.2-13　坑道に隣接する安全空間（立坑案の場合） 3-28
図 3.2.2-14　立坑に隣接する退避空間（立坑案の場合） 3-29
図 3.2.2-15　防災を考慮したレイアウト案におけるバックアップ
対策案（立坑案） 3-31
図 3.2.2-16　排煙計画の概要（防災を考慮したレイアウト案） 3-32
図 3.2.2-17　安全空間の仕様（防災を考慮したレイアウト案） 3-33
図 3.2.2-18　防災を考慮したレイアウト案におけるバックアップ
対策（斜坑案） 3-35
図 3.2.2-19　防災を考慮したレイアウト案における排煙計画 3-38
図 3.2.2-20　避難用斜坑の断面図 3-39
図 3.2.2-21　安全空間･退避空間の平面図
（右図：安全空間、左図：退避空間） 3-40
図 3.2.2-22　底部レイアウト案
（上：基本レイアウト案、下：防災を考慮したレイアウト案） 3-40
図 3.2.2-23　基本レイアウト（立坑案）での全体図 3-43
図 3.2.2-24　防災を考慮したレイアウト（立坑案）での全体図 3-44
図 3.2.2-25　基本レイアウト（斜坑案）の全体図 3-45
図 3.2.2-26　防災を考慮したレイアウト（斜坑案）の全体図 3-45
図 3.2.2-27　地下研究施設の底部レイアウト案 3-47
図 3.3.1-1　立坑案（基本レイアウト） 3-52
図 3.3.1-2　斜坑案（基本レイアウト） 3-52
図 3.3.2-1　メタンガス濃度と爆発限界の関係 3-56

図 3.3.2-1　推定式（1）概念図 3-57
図 3.3.3-1　防災を考慮したレイアウト(立坑案) 3-83
図 3.3.3-2　防災を考慮したレイアウト(斜坑案) 3-84
図 4.2.2-1　設計手法の分類 4-28
図 4.2.2-2　地山特性曲線と支保特性曲線の関係 4-32
図 4.2.2-3　理論解析手法の分類 4-34
図 4.2.2-4　Kirsch の解および Einstein の方法におけるモデル図 4-36
図 4.2.2-5　2 次元平面ひずみ問題モデル図 4-40
図 4.2.2-6　計算手順 4-41
図 4.2.2-7　FEM 解析モデル 4-45
図 4.2.2-8　FEM 解析の流れ 4-46
図 4.2.2-9　材料非線形特性の概念図 4-48
図 4.2.2-10　接線弾性係数の算定 4-51
図 4.2.2-11　破壊基準と破壊余裕度 4-51
図 4.2.2-12　破壊包絡線の補正 4-51
図 4.2.2-13　破壊包絡線に対する応力円の基準化 4-52
図 4.2.2-14　k および m の設定 4-52
図 4-2-2.15　①②局所安全率の定義 4-57
図 4.2.2-16　③局所安全率の定義 4-58
図 4.2.2-17　④局所安全率の定義 4-59
図 4.2.2-18　双曲線による応力-ひずみ曲線の近似 4-60
図 4.2.2-19　室内試験による限界ひずみと一軸圧縮強度との関係 4-62
図 4.2.2-20　限界ひずみと変形係数の関係 4-62
図 4.2.2-21　原位置岩盤のひずみと一軸圧縮強度の関係 4-63
図 4.2.2-22　室内試験と原位置試験にって得られる強度-ひずみ関係の比較 .. 4-63
図 4.2.2-23　原位置岩盤の限界ひずみと一軸圧縮強度 4-64
図 4.2.2-24　Aydan らの仮定した応力? ひずみ関係 4-69
図 4.2.2-25　状態ひずみ比とトンネルの安定性の状況の対応関係 4-69
図 4.2.2-26　(a) シラスの応力? ひずみ関係 4-70
図 4.2.2-26　(b) 神戸層泥岩の応力? ひずみ関係 4-70
図 4.2.2-26　(c) 大谷石の応力? ひずみ関係 4-71
図 4.2.2-26　(d) 舟入石の応力? ひずみ関係 4-71
図 4.2.2-27　内空変位経時変化図の例 4-76
図 4.2.2-28　吉川らの最大変位と最大変位速度の関係図 4-76
図 4.2.2-29　JH の最大内空変位と初期変位速度の関係 4-77
図 4.2.2-30　初期変位率と最終変位率の関係 4-77
図 4.2.2-31　地山および支保部材の変状と内空変位量の関係 4-82
図 4.2.2-32　地山強度比とひずみの関係 4-84

図 4. 2. 2-33　内空変位量と土被りの関係（寒風山トンネル） 4-85
図 4. 2. 2-34　JH の施工実績における見かけの弾性係数とひずみ
および支保工の変状の有無の関係..... 4-86

表 目 次

頁

表 3. 1-1　調査研究の進め方 3-2
表 3. 2. 1-1　地下施設に関わる基準一覧表 3-8
表 3. 2. 1-2　抽出した事故･災害事例一覧 3-9
表 3. 2. 2-1　地下研究施設における火災被害、及び防災コンセプトを考慮した火災対策一覧表 3-19
表 3. 2. 2-2　各対策の計画概況 3-29
表 3. 3. 1-1　掘進速度および工費の設定 3-53
表 3. 3. 1-2　立坑案（基本レイアウト）の建設工程 3-54
表 3. 3. 1-3　斜坑案（基本レイアウト）の建設工程 3-54
表 3. 3. 2-1　貯留層解析に必要な主要データ 3-58
表 3. 3. 2-2　山岳トンネルでのメタンガスが発生した事例 (1) 3-60
表 3. 3. 2-3　山岳トンネルでのメタンガスが発生した事例 (2) 3-62
表 3. 3. 2-4　山岳トンネルでのメタンガスが発生した事例 (3) 3-63
表 3. 3. 2-5　山岳トンネルでのメタンガスが発生した事例 (4) 3-64
表 3. 3. 2-6　鉱山でのメタンガスが発生した事例 3-66
表 3. 3. 2-8　トンネルにおける湧水対策と地下研究施設への適用性 3-73
表 3. 3. 2-9　湧水対策の事例調査結果 3-74
表 3. 3. 2-10　高湧水部における注入実績 3-75
表 3. 3. 2-11　トンネルにおける押出し対策と地下研究施設への適用性 3-77
表 3. 3. 2-12　押出し対策の事例調査結果 3-78
表 3. 3. 2-13　寒冷地におけるトンネルの施工事例 (1) 3-80
表 3. 3. 2-14　寒冷地におけるトンネルの施工事例 (2) 3-81
表 3. 3. 3-1　防災を考慮したレイアウト (立坑案) の建設工程 3-85
表 3. 3. 3-2　防災を考慮したレイアウト (斜坑案) の建設工程 3-86
表 4. 2. 1-1　調査対象トンネル (1) 4-9
表 4. 2. 1-2　調査対象トンネル (2) 4-10
表 4. 2. 1-3　調査対象文献リスト (1) 4-11
表 4. 2. 1-4　調査対象文献リスト (2) 4-12
表 4. 2. 1-5　調査対象文献リスト (3) 4-13
表 4. 2. 1-6　調査対象文献リスト (4) 4-14
表 4. 2. 2-1　数値解析手法の特徴 4-30
表 4. 2. 2-2　主な理論解析手法の特徴 4-35
表 4. 2. 2-3　入力データ 4-41
表 4. 2. 2-4　数値解析手法の特徴 4-44
表 4. 2. 2-5　掘削安定解析に用いる物性データ例 4-50
表 4. 2. 2-6　地山強度比による空洞の安定性評価方法 4-56

表 4.2.2-7　スクィーズィングレベルの設定 4-72
表 4.2.2-8　　内空変位と天端変位の計測頻度 4-74
表 4.2.2-9　Franklin の管理基準と処置..... 4-74
表 4.2.2-10　トンネル設計の許容値の例 4-76
表 4.2.2-11　JR 指針におけるトンネル設計における支保部材の許容値の例 4-80
表 4.2.2-12　トンネル設計手法一覧 4-91
表 4.2.2-12　空洞安定性評価指標と適用性 4-92
表 4.3.1-1　FEM 解析における入力物性値例..... 4-94

1. はじめに

深地層の研究施設においては、施設の建設と調査研究が同時に行われること、見学者の入坑が想定されることが大きな特徴である。深地層の研究施設は、施設の深度が大きく、地下施設から地上へのアクセスが限定されていることから、一旦災害が起こると甚大な被害に至ることが予想される。したがって、地下施設の初期の検討段階から、地下施設における防災の検討を十分に行っておくことがきわめて重要である。また、堆積岩地点においては、ガスの湧出が想定されていることから、施設の建設と調査研究、見学者の入坑に影響を及ぼすことが懸念される。

このような状況を考慮し、「堆積岩を対象とした深地層の研究施設　工程および防災に関する研究(平成 12 年度)」を実施する。本年度の研究については、平成 11 年度の「堆積岩を対象とした深地層の研究施設　研究施設建設に関する検討」および平成 10 年度の「堆積岩を対象とした地下へのアクセス坑道に関する研究」に基づくものである。

2. 研究の目的

堆積岩を対象とした深地層の研究施設においては、施設建設と調査研究が同時に行われると共に見学者の入坑も想定される。一方、火災や堆積岩特有のガスの湧出等がそれらの活動、行為に影響を及ぼすことが懸念される。

また、本施設は、地上構造物と異なり、大気に解放された出入口が限られている上、立坑昇降設備等の共用設備は、複数の契約工期を通して継続的な維持管理が必要となると想定される。

本件は、このような状況において、施設建設・調査研究、見学が事故無く行われるために必要となる対策について、建設工程や調査研究に与える影響を把握すること、施設建設・調査研究、見学が事故無く行われるために重要となる防災システムの考え方を明確にすること、を目的として実施する。さらに、本施設を安全に建設、維持することを目的として深度や支保を設定する際に重要となる、空洞安定性評価手法についての調査、評価も併せて行う。

これらの成果は、今後、堆積岩を対象とした深地層の研究施設の設計、建設に資するものとする。

3．地下施設の工程および防災に関する検討

3.1 目的

サイクル機構が計画している地下研究施設では、その研究内容を一般公開するために、研究者だけでなく見学者の入場を予定している。しかし地下深度 500m という環境下において、見学者の安全性を確保する対策をどの様に実施すれば良いか、未知の部分が多い。また以下の 8 つの項目に示されるように、地下研究施設内で発生すると想定される災害は多岐にわたり、それらの多くは複合的な被害様相を呈すると予想される。そこで本章では、地下研究施設完成後において見学者が入場した段階を想定し、その際に非常に危険性が高いとされる火災を調査対象とした。

(a) 火災
(b) 爆発
(c) 有毒ガス湧出、酸欠
(d) 落盤
(e) 湧水
(f) 電気的事故
(g) 坑道などの構造物の破壊
(h) 有毒物、危険物の流出　等

次ページに調査研究の進め方（表 3.1-1）を示す。このように、調査研究は大きく以下の２つに分類され、その下に細目毎に資料をまとめた。

(1) 地下研究施設の基本的な防災検討
　1) 建築物における火災対策の基本構成
　2) 地下研究施設の火災事例の分析
(2) 地下研究施設の具体的な防災検討
　1) 地下研究施設における防災的課題の抽出
　2) 防災計画のコンセプトの構築
　3) 防災計画の具体化

「地下研究施設の基本的な防災検討」では、防災を考慮した地下研究施設のレイアウトを考える上で、盛り込むべき内容を提示する。例えば、超高層建物といった建築物における火災対策の実例、また、建築基準法や消防法での防火規定を整理し、火災対策で基本となる項目を概略的に説明する。また、地下研究施設の火災対策を考える上で、基礎的資料となる火災事例を整理する。この火災事例より、地下研究施設で発生すると想定される火災の被害様相をまとめる。

「地下研究施設の具体的な防災検討」では、サイクル機構から提示された立坑案と斜坑案の２つの地下研究施設の概要を示し、それぞれの施設の利用計画を概略的に説明する。また、地下研究施設で発生すると考えられる火災被害を場所毎・火災進展別に整理を行い、各火災対策との関連を説明することで、防災計画の方針を具体的に記述する。

表3.1-1　調査研究の進め方

■地下研究施設の基本的な防災検討

調査研究項目	調査研究概要	作業項目	研究成果
1．地下研究施設の基本的な防災検討	・地下ホール建設計画や超高層建物等、これまで当社が対応した物件の防災計画例を例示して、基本レイアウトの参考資料とする。	(1) 当社代表物件の抽出 (2) 当社代表物件の防災計画の整理 (3) 各防災計画毎の具体的対策の整理	(1) 各物件、各防災計画毎の具体的対策の一覧表

■地下研究施設の具体的な防災検討

調査研究項目	調査研究概要	作業項目	研究成果
1．地下研究施設における防災的課題の抽出	・既往文献の調査により、地下研究施設における防災的課題点を整理し、堆積岩を対象とした深地層の研究施設での火災被害シナリオを構築する。	(1) 地下施設における災害事例の調査 (2) 各災害要因（火災性状、煙流動）の整理 (3) 火災被害シナリオの構築	(1) 災害事例報告集 (2) 災害要因及び防災対策との関連表 (3) 時間フェーズ別の災害被害シナリオ表
2．防災計画のコンセプトの構築	・上記の火災被害のシナリオを用いて、当該地下研究施設における防災計画のコンセプトを各防災対策別に構築する。	(1) 災害被害シナリオに対する防災コンセプトの整理 (2) 防災コンセプトを考慮した具体的防災対策の整理	(1) 災害被害シナリオと防災コンセプトとの関連表 (2) 防災コンセプトを考慮した防災対策一覧表
3．防災計画の具体化	・上記の防災コンセプトを当該施設のプランに反映させるため、各防災項目を検討し、防災も考慮した具体的なプランを提案する。	以下の各防災対策を地下研究施設のスペックと照らし合わせて、プラン案として整理する。 (1) 地下研究施設内の区画の設定	(1) 防災ゾーン概念図 (2) 従来施設における各区画性能の設定 (3) 各防災ゾーンにおける必要性能の設定
		(2) 避難安全及び消防活動支援のための煙制御システム案の設定	(1) 地下研究施設における煙制御システムの概略案
		(3) 安全性の高い避難方法の設定	(1) 避難方法と安全区画との関連等、避難計画の体系化

3.2 地下施設の防災に関する検討

3.2.1 地下施設の基本的な防災検討

(1) 建築物における火災対策の基本構成

ここでは、地下研究施設の火災対策を考える上で基礎的資料となる、「地上の建築物における火災対策の基本構成」を具体的な事例をもとに説明する。なお具体的な事例として、地上の建築物において性能的な防災対策を実施している「法 38 条大臣認定（現在の名称はルートCによる大臣認定)」を参考とし、その中でいくつかの火災対策技術の実例を説明する。

1) 法 38 条大臣認定物件の整理

建築物の火災対策の基本構成を考えるにあたり、超高層建築物等の建築防災的な対策を参考にした。そこで、「法 38 条大臣認定」という性能的に火災対策を適用した物件の一覧表を付属資料に添付する。

抽出した物件は、「法 38 条大臣認定」が増加し始めた 1980 年代からの建物を対象とした。また法 38 条認定項目として以下の対策を対象とした。

(a) 加圧防煙
(b) ドーム、アトリウム、防煙区画、排煙
(c) オープンエレベーター、オープンエスカレータ
(d) ドーム、アトリウム等の屋根耐火
(e) 耐火構造、木構造、無耐火被覆
(f) 避難
(g) 空気、開閉又は開放型屋根ドーム

これら火災対策のうち、地下研究施設で特に考慮すべき項目として、煙制御システムが挙げられる。地下研究施設では地下深度が 500m あり、またいくつかの立坑及び横坑道によって構成されているため、火災時の煙挙動は複雑な動きをすると予想される。また見学者にとって、火災による火炎自体より、その伝播速度が速い煙による被害が大きいと考えられる。そのため、地下研究施設において煙制御システムは重要な火災対策の一つに挙げられる。

なお、具体的な煙制御システムとして、「加圧煙制御システム」を付属資料[1)]に添付する。この「加圧煙制御システム」は給気ファンによって空気を避難経路等に与え、これにより避難扉等の開口部間に圧力差が設定されることで、煙の侵入を防ぐ煙制御システムである。従来の機械排煙設備と比較した場合、機械排煙設備が排煙ダクト内の温度が 280℃に上昇した際、停止するのに対して、「加圧煙制御システム」は外気を導入するため、継続的に新鮮空気を避難経路に供給出来るメリットがある。以上のメリットを有するために、「法 38 条大臣認定」の付属資料でも示すように、いくつかの地上の建築物において、この煙制御システムが導入されている。

2) 地下施設等の火災対策実例

地下研究施設の火災対策を立案するために、既に建設された地下施設での火災対策を整理した。対象とした物件は以下の 2 物件である。各物件の火災対策の概要を付属資料に添付する。

(a) 青函トンネル

(b) 地下コンサートホール

(a) 青函トンネル[2)]

青函トンネルの火災対策の特徴として以下の 2 点が挙げられる。

①各種の火災対策設備を集中配置

②避難経路や火災時の換気を確保

このように各種の火災対策設備を集中配置することによって、全体的な設備コストを抑えるだけでなく、火災対策設備が有効に機能しない場合を想定して、何重もの安全性を施すフェイルセーフ的な火災対策が採用されている。設置されている火災対策設備を以下に示す。

①火災検知設備：火災の早期発見

・地上出入口部：赤外線温度式火災検知器

・トンネル内部：減光式煙感知器

・定点近傍　　：赤外線温度式火災検知器

②排気、換気設備：在館者の煙暴露防止、酸欠等の防止

・通常時：各斜坑口の給気ファンで送風、換気流は斜坑→ 先進導坑→海底中央部の連絡坑→本坑→両坑口（縦流式の換気）で換気。

・火災時：遠隔制御による風門の開放により、換気流を直接定点に送風。立坑口に設置した排気ファンにより煙を排出。

③消火設備：初期火災の鎮火、延焼防止

消火設備として、定点には水噴霧設備（水噴霧ヘッド 5m 間隔、放水片側 40m 毎に制御）、消火栓（避難誘導路入口付近 40m 間隔、放水量 130l/min）給水栓を設け、さらにトンネル外の新津軽二股及び新湯の里の各信号所に消火栓を設置。

④避難誘導設備

定点で乗客が安全に避難出来るように、以下の避難誘導設備を設置。

・降車台　　：非常用プラットホームで、上下線に延長 500m

・待機場所　　：列車から避難した乗客が一時待機する場所

・照明設備　　：100 ルクス程度の明るさを確保

・ITV カメラ　：避難経路の各所に設置、函館司令センターで監視

・非常放送設備：定点全体で放送が可能。現地と司令センターで放送可

(b) 地下コンサートホール[3)]

この地下コンサートホールは、山の地中に約 3,700m^2 のホール等を計画した大規模建築物である。空間構成として、大きく３つに分類（ホールブロック、回遊歩道ブロック、車道ブロック）されており、地上までの避難距離が長いために、回遊歩道ブロック（避難経路）に一時滞留場所となる安全区画を形成した。火災対策の基本方針を以下に示す。

①各ゾーン別の防災計画の策定

・ホール
・エントランスホール
・アクセスルート
・廊下
・後方諸室

②火災を発生させない（＝可燃物及び出火源の制限）計画

・内装不燃化
・持ち込み可燃物の制限
・火気使用場所の特定
・場内監視／不使用施設の施錠化

③情報伝達が迅速に行えるシステム

・来館者に対する事前の防災教育
・きめ細かい情報伝達
・音、光等を駆使したインテリジェント情報伝達システム
・災害弱者への配慮

④施設の各場所から容易にアプローチ出来る計画

⑤機械力による施設全体の気流をコントロールした煙制御

・２本の歩行者用アクセスルートを給気経路と設定
・竪坑を排煙経路と設定
・外気→歩行者アクセスルート→付室→廊下→室→竪坑→外気の流れを確保
・空調換気システムによる気流のコントロール

⑥信頼性有る防災設備の設置

・バックアップ体制の強化
・非常電源供給の信頼性を向上
・排煙設備の信頼性の向上
・フェイルセーフ
・消火設備は自動消火

⑦自動・人力・自然消火の併用、及び消火水の電力・情報系統への影響防止

⑧消防活動支援設備の充実

・車両用アクセスルートを消防隊専用進入路（非常用 ELV 代用）と位置付け

・災害弱者の位置特定対策

・酸素濃度、有毒ガスの検知

・無線通信設備の設置

⑨災害を未然に防ぐための日常の維持管理

・維持管理体制（管理組織、防災センターの連携）

・可燃物持ち込み、集積（入口でのチェック）

・出火防止監視

・設備の日常点検

・防災訓練

以上、青函トンネル、地下コンサートホールの 2 つの実物件において計画された火災対策を示した。これら火災対策は、各建物が持つ火災時の危険性を軽減させるために設置されたものであるが、その設置目的は以下に示すように 4 つの共通項目があると考えられる。

これら共通の対策項目は、地下研究施設においても重要な対策であり、これらの安全性能を満たす具体的な火災対策を実施していく必要がある。

①研究者や見学者がいち早く出火を知る対策

②研究者や見学者が煙に巻かれない対策

③研究者や見学者が火や煙に対して安全な場所へ避難出来る対策

④延焼火災を防ぎ、消防活動が容易に行える対策

3）建築基準法及び消防法等等の法規制の一覧表[3)]

地下研究施設の火災対策を検討する上で、地下施設に対する法規制及びその基準値を整理することは、地下研究施設の具体的な防災対策において重要であると考えられる。そこで、地下施設に関わる法規制を、建築系、設備系、管理系の観点から整理を行った。なお、地下施設の火災対策を規定する法規制として、以下の 5 種類の法律を取り上げた。

(a)建築基準法
(b)消防法
(c) 5 省庁通達
(d)建設省告示
(e)鉱山保安法

次ページに地下施設に関わる法規制の一覧表（表 3.2.1-1）を示す。これより建築基準法と建設省告示では、防火区画や避難施設等、特に建築的対応における火災対策を主に規制していることが分かる。

また消防法は、特に消火設備に関して規制を行っている。さらに5省庁通達は、地下街規制を目的に昭和 48 年に制定された法律であり、消防、建設、警察、運輸、資源エネルギー庁（いづれも当時の名称）から構成された委員会において通達された法律である。地下街規制を目的にしているために、建築基準法よりも厳しい法規制の内容となっている。

さらに鉱山保安法は、鉱山労働者の就業に関わる安全の確保を図るために定められた法律である。そのため掘削に関わる基準、坑道の支保、通風量の基準や通風に関わる設備等は明記されているが、火災自体を対象とした対策、また坑道レイアウトに関わる基準は明確にされていない。

表3.2.1-1　地下施設に関わる基準一覧表

	関係法令	建築基準法	消防法	5省庁通達	建設省告示	鉱山保安法	その他
建築系	1. 階数	・制限無し	・駐車場、機械室階を除いて一層	－	－	－	－
	2. 耐火性能	・1時間耐火以上	・1時間耐火以上	－	－	－	－
	3. 防火区画	・内装の程度により、100～500m²以内毎	－	・200m²以内毎	－	－	－
	4. 内装制限	・地下道：内装及び下地とも不燃材料 ・各構え：不燃材料または準不燃材料	－	・内装及び下地とも不燃材料 （看板、広告、装飾品等、全て）	－	－	－
	5. 地下道の幅	・5m以上	－	・6m以上	－	－	－
	6. 地下道の天井高さ	・3m以上	－	－	－	－	－
	7. 歩行距離	・30m以内	－	－	－	・石炭坑において、その奥部では 二以上の通路を地表に連絡させる	－
	8. 地下道の勾配	・1／8以下（段は不可）	－	－	－	－	－
	9. 地上に通じる階段の幅員	・140cm以上	－	・150cm以上	－	－	－
	10. その他	・歩行距離50m以内毎に、防災地下広場 （地上に通じる二以上の階段、採光・ 排煙のための吹抜け）を設置	－	－	－	・非常はしご道の設置	－
設備系	11. 火気	－	－	－	－	・裸火の使用制限	・厨房は集中的に配置、区画化 ・高電圧大電流ケーブルは接続箇所を極力減
	12. 電気電源	・地下道：床面において10ルクス以上	－	－	・非常用予備電源 ・30分間の作動	－	・非常用予備電源 ・停電後、約40秒で作動 ・非常用照明設備 ・定点（一時避難場所）は100ルクス
	13. 排煙設備 （通風設備）	・地下道：設置義務有り ・機械排煙 ・地下街：120m³／min以上で、 かつ1m³／min・m²以上 ・排煙口 ・地下街：排煙口の一つに至る水平距離が30m以下	・地下街：1000m²以上、設置義務有り	－	・機械排煙 ・地下道：5m3／sec以上 ・排煙口 ・地下道：防煙区画部分に1以上	・通風、換気、除じん等の措置 ・通気量設定 ・一人につき毎分3m3以上 ・車両系鉱山機械の 定格出力1kwあたり3m3以上	・機械排煙 ・強制換気＋排煙ファン、常に風上に 向かって避難 ・自然排煙 ・地下広場は自然排煙 ・排煙口 ・地下広場の排煙口開口面積は床面積 の1／50以上
	14. 消火設備	－	以下の床面積以上の場合、設置義務有り ・屋内消火栓：150m²以上 ・スプリンクラー：1000m²以上 ・ハロゲン化物消火設備：設置不可 ・二酸化炭素消火設備：設置不可 ・自動火災報知設備：300m²以上 ・漏電火災警報器：300m²以上 ・火災報知設備：全ての地下街 ・非常警報設備：全ての地下街 ・誘導灯：全ての地下街 ・連結散水設備：1000m²以上 ・連結送水管設備：1000m²以上 （水平距離50m以下毎） ・非常用コンセント設備：1000m²以上 ・無線通信補助設備：1000m²以上	－	－	－	－
	15. 消防隊進入口	－	－	－	－	－	・前室有り、二重区画、前室に給気 ・救急車、バスの駐車スペース
管理系	16. 日常の維持管理	－	・火災の予防 ・防災施設、設備の点検、整備 ・一般利用者への防災指導	－	－	・作業用材料の整頓及び機器の手入れ ・危険業務に関する保安教育 ・有毒ガスの測定	－
	17. 非常時の体制	・防災センター：1000m²以上、設置義務有り	・消火活動 ・避難誘導活動	・防災センター：必ず設置	－	・集中監視室の設置 ・一酸化炭素自己救命器の携帯	・火災対策設備の集中化 ・避難消火活動の一元化 ・一酸化炭素と酸欠対策 ・酸素ボンベ ・高圧空気 ・医療品

参考文献：1.「防災安全性についての研究報告書」，（財）日本建築センター 大規模地下建築物研究会，1994.3

(2) 地下研究施設の火災事例の分析[4)]

地下研究施設の火災対策を考える上で、その施設内で発生すると予想される火災状況を整理し、その教訓を得ることは重要である。ここでは、災害事例を以下の観点から抽出し、その中でも地下研究施設で参考となる火災事例について詳細に資料を整理した。表 3.2.1-2 に抽出した事故・災害事例の一覧表を示す。なお詳細に検討した火災事例（ハッチを付けた部分）は付属資料に添付する。

(a)発生原因、拡大要因が地下空間に特有な災害

(b)不測に発生、また規模が大きい災害

(c)対策的な観点から有用な災害

(d)資料が多く、話題性があった災害

表 3.2.1-2　抽出した事故・災害事例一覧

No.	施設種別	災害分類	施設名称	発生日時	人的損害		物的損害の概要
					死亡	負傷	
1	地下街	工事	東京駅八重洲地下街	1970.11.27	0	0	隣接建物B3の駐車場浸水
2	地下街	爆発・破裂	静岡駅前ゴールデン街	1980.8.16	15	238	建物14億円、商品7億円
3	地下街	火災	JR大阪駅前地下街	1989.12.27	0	4	通路部分天井側壁220m2焼損
4	地下駐車場	中毒・酸欠	東京都臨海ビル地下駐車場	1987.6.9	3	2	無し
5	地下駐車場	犯罪	三会堂ビル地下駐車場	1990.3.14	1	1	不明
6	地下駐車場	中毒・酸欠	東京都建設会社社宅有料駐車場	1990.12.29	2	0	無し
7	その他建築物	工事	米国ガス地下貯蔵基地	1985.11.5	2	0	ﾌﾟﾗﾝﾄの10%破壊：数億円
8	建築物地階	火災	富国生命ビル	1978.4.6	0	0	地下2-5階のダクト焼損
9	〃	火災	船橋東武百貨店地下変電室	1986.6.14	3	0	消防の推定：約18億円
10	〃	中毒・酸欠	日大理工学部9号館地下1階講堂	1986.11.2	0	44	無し
11	〃	停電	阪急梅田地下街	1987.5.11	0	0	無し
12	〃	火災	阪急ターミナルビル地下三番街	1988.5.19	0	0	厨房天井裏約10m2焼損
13	鉱山	爆発・破裂	北炭夕張新鉱	1981.10.16	93	39	消火のための注水による水没
14	鉱山	火災	三井三池炭鉱　有明鉱	1984.1.18	83	16	坑道の計450mが焼損
15	鉱山	爆発・破裂	三菱高島炭鉱	1985.4.24	11	4	ﾌｰﾁ枠の変形、成木の落下など
16	鉱山	〃	三菱南大夕張炭鉱	1985.5.17	62	24	不明
17	地下　駅舎	火災	名古屋地下鉄栄駅変電室	1983.8.16	2	3	整流器と電気配線焼損
18	地下　駅舎	火災	ロンドン地下鉄キングスクロス駅	1987.11.18	31	53	約600m2焼損
19	地下鉄ﾄﾝﾈﾙ	工事	大阪市営地下鉄2号線工事現場	1970.4.8	79	420	26棟、延べ面積2,170m2焼損
20	地下鉄ﾄﾝﾈﾙ	火災	ボストン地下鉄	1975.7.2	0	34	車両2両焼損
21	地下鉄ﾄﾝﾈﾙ	交通災害	東西線東陽町―南砂駅間	1990.9.8	0	0	無し
22	鉄道ﾄﾝﾈﾙ	工事	有楽町地下新東海道本線工事現場	1971.12.21	0	3	ﾍﾞﾙﾄｺﾝﾍﾞﾔｰ、ｼｰﾙﾄﾞ機械等焼損
23	鉄道ﾄﾝﾈﾙ	火災	ｻﾝﾌﾗﾝｼｽｺBART海底トンネル	1979.1.17	1	46	車両2両全焼
24	鉄道ﾄﾝﾈﾙ	工事	上越新幹線大清水ﾄﾝﾈﾙ工事現場	1979.3.20	16	1	ｼﾞｬﾝﾎﾞ削岩機1台、矢板114m2焼損
25	鉄道ﾄﾝﾈﾙ	火災	近鉄東大阪線生駒トンネル	1987.9.21	1	48	特高電線、通信ｹｰﾌﾞﾙを焼損
26	道路ﾄﾝﾈﾙ	火災	東名高速日本坂トンネル	1979.7.11	7	2	ﾄﾝﾈﾙ内天井崩落、車両189台
27	道路ﾄﾝﾈﾙ	火災	中国自動車道境トンネル	1988.7.15	6	5	車両13台焼損
28	道路ﾄﾝﾈﾙ	中毒・酸欠	兵庫県城山トンネル	1988.8.13	0	16	無し
29	ﾗｲﾌﾗｲﾝ	工事	広島市下水道トンネル	1981.6.21	0	7	無し
30	ﾗｲﾌﾗｲﾝ	火災	世田谷通信ケーブル	1984.11.16	0	0	ｹｰﾌﾞﾙ焼損、壁面ｺﾝｸﾘｰﾄ剥離

参考文献：「地下空間に関わる安全・防災対策に関する調査研究報告書」，（社）日本損害保険協会等,1991.10

表3.2.1-2の災害事例から、火災シナリオを作成する上で必要となる火災発生・拡大要因の内容を以下に示す。この内容をもとに、火災進展状況に照らし合わせ、地下研究施設で起こりうる火災被害状況を整理する。なお各項目後に記載されている事例番号は表3.2.1-2の各火災事例番号に対応している。

1) 地下建築物関連

・防煙シャッターが開けられなかった（事例3）
・管理形態が複雑で、通報が遅れた（事例3）
・空気呼吸器の耐久限度を超えボンベの空気がなくなったのに気づかず、消防隊員が死亡した（事例5,24）
・遮断弁が作動しなかった（事例7）
・ダクトや非常階段を通じて煙が拡散した（事例8）
・ダクトの排気口付近に可燃物があったため延焼した（事例8）
・排煙設備が設置されていなかった（事例8）
・煙で目や喉が痛み、視界が1m程度だったため、避難が困難だった（事例8）
・熱と有毒ガスのために固定消火設備（ハロゲン）が使えなかった（事例9）
・非常用電源である自家発電装置が停止し、防災機器が使えなかった（事例9）
・ダクト用消火設備があったが、作動しないものがあった（事例12）
・吸気口が排気口から3mしか離れていなかったため、排出された煙を再び取込んだ（事例12）
・防火シャッターを下ろしたところ混乱した（事例12）
・火災発生場所を誤って連絡したため火災現場に向かって避難した（事例14）
・坑内の救急センターは密閉不十分で煙が流入した（事例14）
・消火栓に給水する揚水ポンプが火災によるケーブル焼損で停止、水量不十分で消火できなかった（事例14）
・地下1階と2階が防火区画されておらず、出火点の確認、救助活動に手間取った（事例17）
・電源事故のため、離れた場所でスパーク等により出火した（事例17）
・エスカレータが木製で延焼が速かった（事例18）
・燃えた場所のすぐ近くのトイレから数人救出された（事例18）
・スプリンクラー（手動）や消火栓が役立たなかった（事例18）
・構造に不案内な警察官が誤って指示を出したため、火の方向に避難した（事例18）
・消防への通報が遅れた（事例3,12,20,23,25,27）
・消火器が不発で初期消火に失敗した（事例24）
・1つの故障が周辺の多くのビルを巻き添えにした（事例11）
・非常用照明の日常の明るさとのギャップが大きく、心理的影響・混乱の発生があった（事例11）

2) 鉱山・トンネル

・中に生存者がいる可能性があり、注水による消火になかなか着手できなかった（事例 13）

・消火栓や排煙設備等の消防設備がなかった（事例 20）

・圧気工法による工事現場では消防活動が困難である（事例 22）

・火元までの距離が長く消防隊が進入できなかった（事例 22,30）

・排煙システム操作のミスでサブトンネルが安全ゾーンにならなかった（事例 23）

・トンネルの風通しがよく、直近の斜坑が煙突になり煙が拡大した（事例 24）

・トンネルを吹き抜ける風にあおられ延焼した（事例 26）

・スプリンクラーは作動したがタンクの水を使いきってしまった（事例 26）

・消火栓が出火場所のすぐ近くにあったため使えず、隣のものは届かなかった（事例 26）

・後続車に進入禁止を知らせる表示が不適切だった（事例 26,27）

・近くに水利がなかった（事例 27）

・要救助者の探索に時間がかかった（実はいなかった）（事例 30）

・現場に人がおらず、初期消火できなかった（事例 30）

・洞道内への進入口が限定される（事例 30）

・洞道は狭く行動が制約され、消防活動に危険がともなう（事例 30）

・地上との進入隊員との無線連絡ができず、恐怖をともなう（事例 30）

・高温によるコンクリート壁の爆裂、注水による熱風の吹き返しや多湿等、消防隊員の疲労が激しい。洞道内を冷やさない限り前進不可能（事例 30）

・排気口からは延焼状況の把握が不可能（事例 30）

・管理者の対応が遅れた（事例 28）

・病院到着までに長時間かかる（事例 28）

・交通量が増えたのに換気設備の見直しがされなかった（事例 28）

・渋滞でトンネル内に有毒ガスが充満した場合、脱出手段、連絡手段がない（事例 28）

3.2.2 地下施設の具体的な防災計画

(1) 地下研究施設のレイアウト案

ここでは、サイクル機構から提示された立坑案と斜坑案の 2 つの地下研究施設の概要を示す。図 3.2.2-1 と図 3.2.2-2 にそれぞれのレイアウト図を示す。

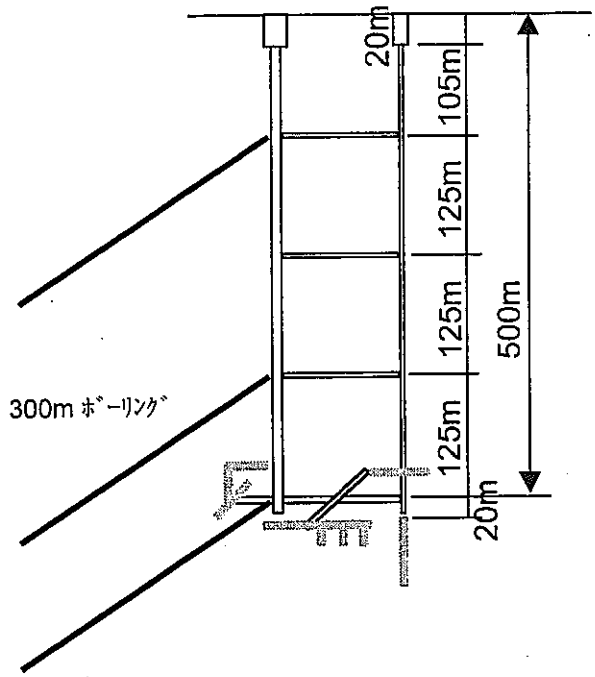


図 3.2.2-1 立坑レイアウト案

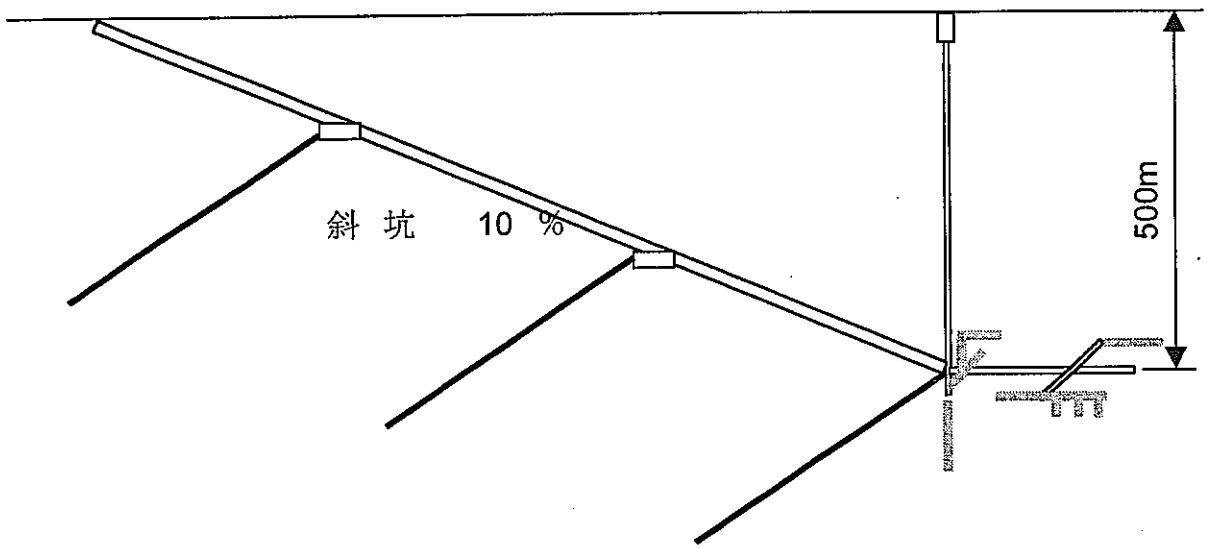


図 3.2.2-2 斜坑レイアウト案

(2) 施設概要及び施設利用計画

サイクル機構から提示された立坑レイアウト案は主に、500m の深度を持つ２つの立坑（換気立坑、主立坑）と、125m の深度間隔で設置された３つの予備ステージ、及び底部のステージから構成されている。

また、サイクル機構から提示された斜坑レイアウト案は主に、500m の深度を持つ１つの立坑（換気立坑）と、約 160m の深度間隔で設置された２つの予備ステージ、及び底部のステージから構成されている。以下、地下研究施設の各部での利用形態を以下に示す。

1) 主立坑

(a)施設完成前：掘削機械移動通路

(b)施設完成後：昇降設備設置位置
実験用資材運搬路

2) 換気立坑

(a)施設完成前：昇降設備設置位置
ずり運搬路
資材運搬路
換気設備設置位置

(b)施設完成後：換気設備設置位置
実験用資材運搬路

(c)施設完成後：昇降設備設置位置
実験用資材運搬路

3) 試験坑道

(a)施設完成後：各種計測実施位置
見学箇所

4) 連絡坑道

(a)施設完成後：各種計測実施位置
見学箇所
資材置場
立坑設備保守基地

またサイクル機構から提示された立坑レイアウト案では、研究者や見学者は主立坑内に設置された非常用エレベータを利用して、地下深部に移動することが計画されている。またサイクル機構から提示された斜坑案については、勾配 10%の点を考慮して、車両等を利用した移動が計画されている。

(3) 地下研究施設における火災シナリオの構築

ここでは、前章でまとめた「地下研究施設の火災事例の分析」をもとに、地下研究施設で発生すると考えられる火災被害を場所毎・火災進展別に整理を行い、各火災対策との関連を示す。

火災シナリオは明確に定義されていないが、火災被害の原因となる項目を整理し、その各項目間の関連を構築することで、火災進展状況がどのような状況設定のもとで発生するのかを検討する点で有効な資料となる。そこで地下研究施設の火災シナリオを構築する上で、以下に示す観点から整理を行うこととした。

1) 火災進展（4段階）

火災進展を以下の4段階設定し、各段階において対策の奏功に応じて、その後の火災進展の状況を変えるシナリオとする。

(a)第1段階：出火～初期拡大

(b)第2段階：横坑道火災拡大 or 立坑・斜坑火災拡大

(c)第3段階：立坑・斜坑火災拡大 or 横坑道火災拡大

(d)第4段階：火災盛期

2) 状況設定（4種類）

状況設定を以下の4種類設定し、各々の想定において状況設定を変えることによって、その後の火災進展の状況を変えるシナリオとする。

(a)出火点の想定

(b)防災設備の設置、起動

(c)坑道内の在館者の行動

(d)管理、消防隊の運用

以上の観点から、地下研究施設で発生すると考えられる火災被害を場所毎・火災進展別に整理を行い、各火災対策との関連を示す。なお、横坑道内からの出火を想定した場合の火災進展別の火災被害シナリオを図 3.2.2-3 に、また立坑・斜坑内からの出火を想定した場合の火災進展別の火災被害シナリオを図 3.2.2-4 に示す。

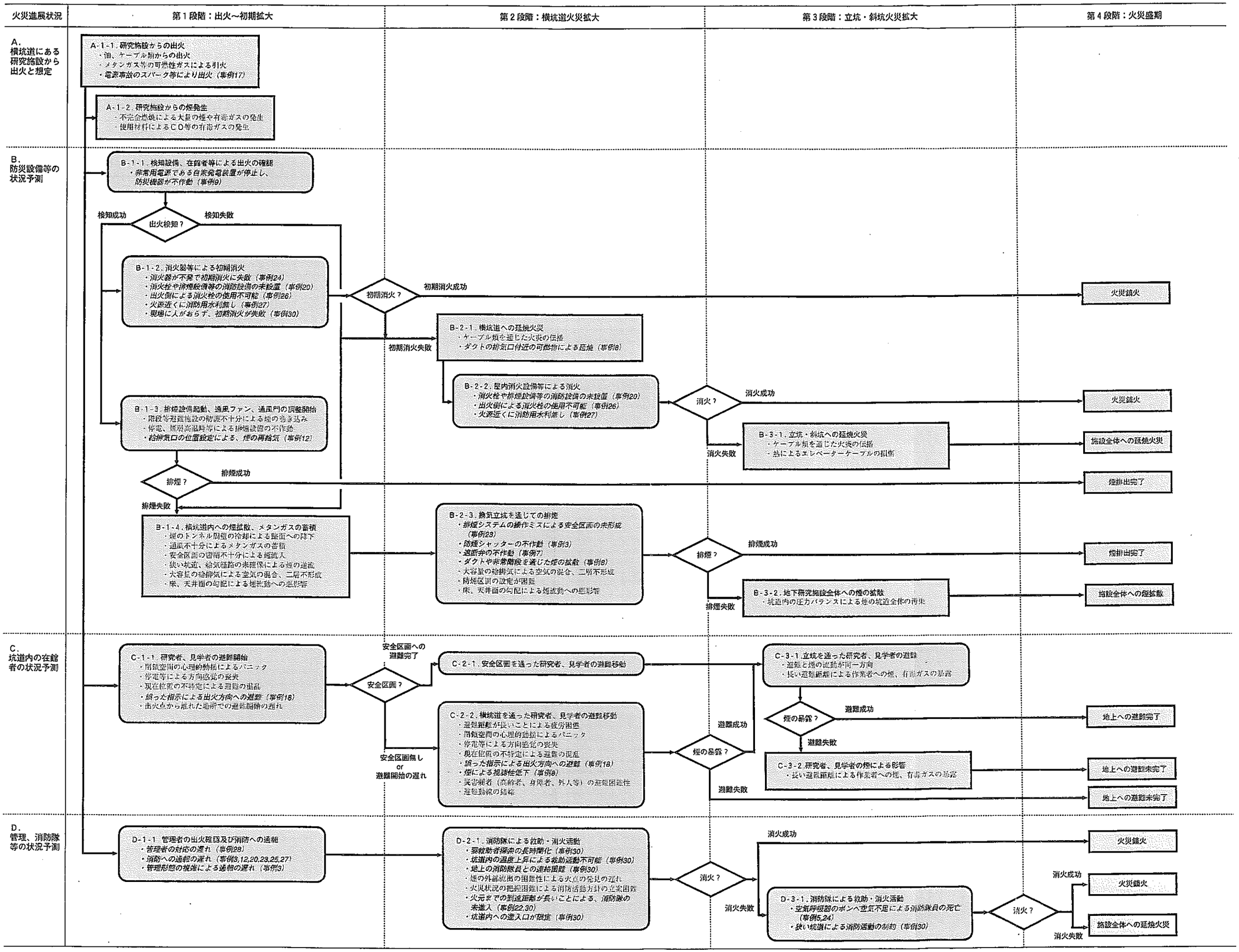


図3.2.2-3　横坑道内からの出火を想定した場合の火災進展別の火災被害シナリオ

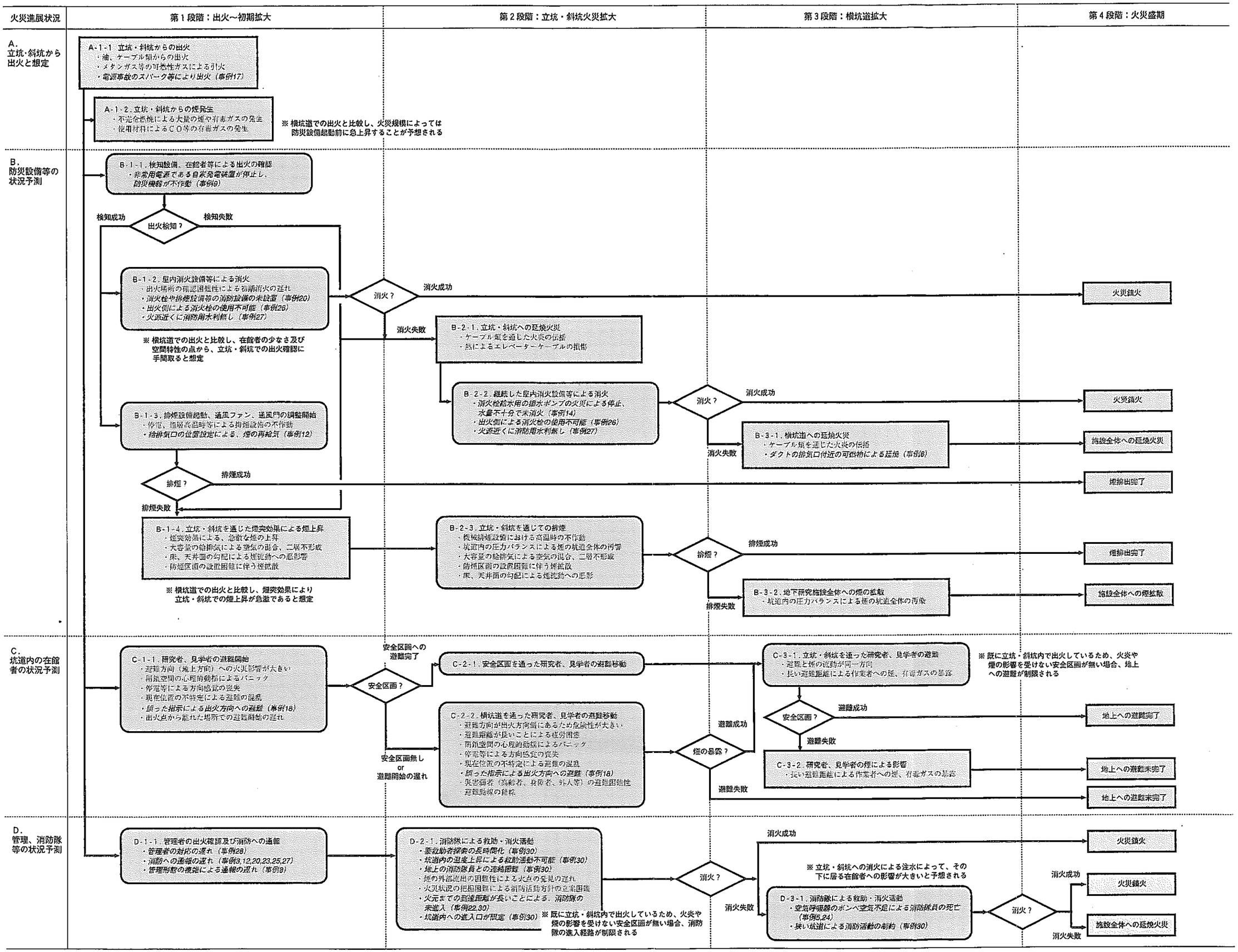


図3.2.2-4　立坑・斜坑からの出火を想定した場合の火災進展別の火災被害シナリオ

(4) 地下研究施設での防災計画の方針

火災シナリオの構築により、地下研究施設における火災被害の進展状況と火災対策との関係が明らかとなった。そこで具体的な火災対策を地下研究施設に適用するために以下の観点から整理を行った。次ページに地下研究施設における火災被害、及び防災コンセプトを考慮した火災対策の一覧表（表 3.2.2-1）を示す。

1) 想定される火災被害及び危険性から見た防災基本コンセプトの構築
2) 防災基本コンセプトに応じた各種火災対策

1) 想定される火災被害及び危険性から見た防災基本コンセプトの構築

想定される火災被害及び危険性を以下の 5 つに分類し、火災事例及び火災シナリオにおいて抽出した被害様相を箇条書きで整理した。

(a)火災性状
(b)煙性状
(c)避難行動
(d)救助活動
(e)消火活動

これら被害様相に対し、地下施設等の火災対策実例を参考にして、防災基本コンセプトを構築した。防災基本コンセプトは大きく 6 つに分類され、その項目毎にさらに細かい分類を行って、具体的対策との関連を示す形となる。以下にその内容を示す。

1) 可燃物及び出火源の制限といった火災発生の抑制
    1-1. 油類や火気器具等、火源及び熱源、可燃物の使用制限
    1-2. 場内監視、及び不使用施設の施錠化
    1-3. ケーブル類の不燃化、耐熱化
2) 火炎や煙の延焼拡大防止
    2-1. 研究施設、坑道、ポンプ等の防火、防煙区画化
    2-2. 竪穴区画等、煙伝播の拡大防止
    2-3. 通風、通風門を重視した排煙計画
    2-4. 安全区画への煙の侵入防止及び煙制御システムの設置
    2-5. 換気立坑を利用した煙の地上への排出
3) 火災位置、在館者の確認が正確かつ迅速に把握出来る防災システムの設置
    3-1. 火災の早期発見、要救助者の状況を把握出来る防災システムの設置
    3-2. 的確な避難誘導が出来る防災システム
4) 火炎や煙の影響を受けない安全区画の設置
    4-1. 安全区画に併設される付室（バッファゾーン）の設置
    4-2. 安全区画への新鮮空気の供給
    4-3. 避難の縦動線確保のための主立坑とエレベータ用立坑の分離

5) 救助・消防対策のバックアップ体制

5-1. 現場操作の消火設備の設置

5-2. 自動又は遠隔操作消火設備の設置

5-3. 消防隊の進入路の確保

5-4. メイン及びサブ防災センターの設置

5-5. 鉱山用の消火、救助用資機材の配備

6) 災害を未然に防ぐための日常の維持管理の充実

6-1. 見学者の事前の防災教育

6-2. 消火、避難訓練の実施

6-3. 消防防災設備等の維持管理

表 3.2.2-1　地下研究施設における火災被害、及び防災コンセプトを考慮した火災対策一覧表

場所		通常時の利用形態	想定される火災被害及び危険性		防災基本コンセプト	考慮すべき具体的な火災対策	各法規制による基準		
大分類	小項目		大項目	小項目			建築基準法（地下街の基準含む）	消防法	鉱山保安法／石炭鉱山保安規則
地下施設共通	－	－	・火災性状	・油、ケーブル類からの出火 ・ケーブル類を通じた火災の伝播 ・*電源事故のスパーク等により出火（事例17）* ・喫煙や放火その他を原因とする出火 ・*ダクトの排気口付近の可燃物による延焼（事例8）*	（1）可燃物及び出火源の制限といった火災発生の抑制 1-1. 油類や火気器具等、火源及び熱源、可燃物の使用制限 1-2. 場内監視、及び不使用施設の撤去化 （2）火炎や煙の延焼拡大防止 *2-1. 研究施設、坑道、ポンプ等の防火、防煙区画化*	・火気使用、可燃物制限 ・内装不燃化 ・什器、備品、ケーブル類の不燃化 ・実験施設、電気設備等の区画化	－ ・仕上げ及び下地ともに不燃 － ・防火区画：内装により100～500㎡ ・防煙区画：内装により100～500㎡	－ － － － －	・裸火の使用不可 － － ・巻揚機械室、ポンプ室等防火区画 ・油脂類貯蔵庫等は耐火構造
			・煙性状	・不完全燃焼による大量の煙や有毒ガスの発生 ・機械排煙設備における高温時の不作動 ・使用材料によるＣＯ等の有毒ガスの発生 ・階段等避難施設の防護不十分による煙の巻き込み ・火災の進展に伴う煙の高温 ・停電、煙層高温時等による排煙設備の不作動 ・*給排気口の位置設定による、煙の再給気（事例12）*	（2）火炎や煙の延焼拡大防止 *2-1. 研究施設、坑道、ポンプ等の防火、防煙区画化* *2-2. 竪穴区画等、煙伝播の拡大防止* *2-3. 通風、通風門を重視した排煙計画* *2-4. 安全区画への煙の侵入防止及び煙制御システムの設置*	・実験施設、電気設備等の区画化 ・通風、通風門による煙制御計画 ・排煙設備（機械、加圧）	同上 ・必要換気量：30㎥／人・h ・機械排煙： ・排煙量：地下道 5㎥／sec以上 ・排煙口：水平距離30m以下 ・加圧排煙：別資料参考	－ － －	－ ・通風量の確保 －
			・避難行動	・避難と煙の流動が同一方向 ・長い避難距離による作業者への煙、有毒ガスの暴露 ・閉鎖空間の心理的動揺によるパニック ・停電等による方向感覚の喪失 ・現在位置の不特定による避難の混乱 ・避難距離が長いことによる疲労困憊 ・*誤った指示による出火方向への避難（事例18）* ・酸欠状態の可能性 ・*防火シャッターの降下による混乱（事例12）* ・*煙による視認性低下（事例8）* ・災害弱者（高齢者、身障者、外人等）の避難困難性 ・避難動線の錯綜	（4）火炎や煙の影響を受けない安全区画の設置 *4-1. 安全区画に併設される付室（バッファゾーン）の設置*	・避難階段、特別避難階段 ・付室、避難路等の安全空間の設置 ・非常用エレベータ	・壁構造：耐火構造 ・内装：仕上げ及び下地ともに不燃 ・開口部：遮煙性のある防火設備 ・階段の幅員：140cm以上 ・設置個所：歩行距離30m 以内 ・地下道の幅：5m以上 ・地下道の天井高さ：3m以上 ・地下道の勾配：1／8以下(段不可) ・乗降ロビーの壁等：耐火構造 ・乗降ロビー床面積：10㎡／基以上 ・非常用予備電源を設置 ・屋内消火栓等の消火設備を設置	－	・非常はしご道の設置 －
			・救助活動	・*要救助者探索の長時間化（事例30）* ・*病院到着までの長時間化（事例28）* ・*地上の消防隊員との連絡困難（事例30）*	（3）火災位置、在館者の確認が正確かつ迅速に把握出来る防災システムの設置 3-1. 火災の早期発見、要救助者の位置、状況を把握出来る防災システム 3-2. 的確な避難誘導が出来る防災システム （5）救助・消防対策のバックアップ体制 5-1. 現場操作の消火設備の設置 5-2. 自動又は遠隔操作消火設備の設置 5-3. 消防隊の進入路の確保 （6）災害を未然に防ぐための日常の維持管理の充実 6-1. 見学者の事前の防災教育 6-2. 消火、避難訓練の実施 6-3. 消防防災設備等の維持管理	・自動火災報知設備 ・酸素濃度、有毒ガスの検知 ・消火器 ・屋内消火栓設備 ・非常用照明設備 ・避難誘導灯 ・ＩＴＶ ・非常放送設備 ・非常電話、無線通信補助設備 ・非常用コンセント ・防災資機材（担架、空気呼吸器等） ・防火、入退出管理の徹底	－ － － － － － － － － － － －	・床面積300㎡以上に設置 ・床面積1000㎡以上に設置(ガス漏) ・個数：延べ面積／50㎡ ・床面積150㎡以上に設置 ・地下道：床面10ルクス以上 ・設置義務有り － ・設置義務有り ・床面積1000㎡以上に設置 ・床面積1000㎡以上に設置 － －	－ ・有毒ガスの測定 ・設置義務有り ・油脂類貯蔵庫等に設置義務 － － － ・警報連絡装置の設置 ・電話等、通信設備の設置 － ・一酸化炭素自己救命器具の設置 －
			・消火活動	・煙の外部流出が困難であることから、火点の発見が煙に妨げられる。 ・*生存者の可能性による注水消火の未着手（事例13）* ・*消火栓給水用の揚水ポンプの火災による停止、水量不十分で未消火（事例14）* ・*消火器が不発で初期消火に失敗（事例24）* ・*消火栓や排煙設備等の消防設備の未設置（事例20）* ・*出火側による消火栓の使用不可能（事例26）* ・高温によるｺﾝｸﾘｰﾄ壁の爆裂、注水による熱風吹返しや多湿等、消防隊員の疲労困憊 ・*火源近くに消防用水利無し（事例27）* ・*現場に人がおらず、初期消火が失敗（事例30）* ・火災状況の把握困難による消防活動方針の立案困難 ・*非常用電源である自家発電装置が停止し、防災機器が不作動（事例9）* ・*熱と有毒ガスのために消火設備が使用不可（事例9）* ・*管理者の対応の遅れ（事例28）* ・*消防への通報の遅れ（事例3,12,20,23,25,27）*						
立坑/斜坑	主立坑/主斜坑	（施設完成前） ・掘削機械移動通路 （施設完成後） ・昇降設備設置位置 ・実験用資材運搬路	・火災性状	・熱によるエレベーターケーブルの損傷 ・外気供給の限定による、燻焼状態の火災	（1）可燃物及び出火源の制限といった火災発生の抑制 1-1. 油類や火気器具等、火源及び熱源の使用制限 1-3. ケーブル類の不燃化、耐熱化 （2）火炎や煙の延焼拡大防止 *2-1. 研究施設、坑道、ポンプ等の防火、防煙区画化*	・火気使用、可燃物制限 ・内装不燃化 ・什器、備品、ケーブル類の不燃化 ・実験施設、電気設備等の区画化	同上	－	同上
			・煙性状	・煙突効果による、急激な煙の上昇 ・避難方向の限定 ・防煙区画の設定が困難	（2）火炎や煙の延焼拡大防止 *2-3. 通風、通風門を重視した排煙計画* *2-4. 安全区画への煙の侵入防止及び煙制御システムの設置* *2-5. 換気立坑を利用した煙の地上への排出*	・通風、通風門による煙制御計画 ・排煙設備（機械、加圧）	同上	－	同上
	換気立坑	（施設完成前） ・昇降設備設置位置 ・ずり運搬路 ・資材運搬路 ・換気設備設置位置 （施設完成後） ・換気設備設置位置 ・実験用資材運搬路	・避難行動	・地上到達までに煙に汚染 ・地上まで数百メートル以上の歩行が必要 ・急激な上昇による避難途中での煙の暴露	（4）火炎や煙の影響を受けない安全区画の設置 4-2. 安全区画への新鮮空気の供給 *4-3. 避難の縦動線確保のための主立坑とエレベータ用立坑の分離*	・避難階段、特別避難階段 ・付室等の安全空間の設置 ・非常用エレベータ	同上	－	同上
			・救助活動 ・消火活動	・*坑道内の温度上昇による救助活動不可能（事例30）* ・*空気呼吸器のボンベ空気不足による消防隊員の死亡（事例5,24）* ・*火元までの到達距離が長いことによる、消防隊の未進入（事例22,30）* ・*坑道内への進入口が限定（事例30）* ・呼吸器のボンベの容量の制約が消火活動の大きな障害	（3）火災位置、在館者の確認が正確かつ迅速に把握出来る防災システムの設置 3-1. 火災の早期発見、要救助者の位置、状況を把握出来る防災システム 3-2. 的確な避難誘導が出来る防災システム （5）救助・消防対策のバックアップ体制 5-4. メイン及びサブ防災センターの設置 5-5. 鉱山用の消火、救助用資機材の配備	・自動火災報知設備 ・酸素濃度、有毒ガスの検知 ・非常用照明設備 ・ＩＴＶ ・非常放送設備 ・非常電話、無線通信補助設備	－	同上	同上
横坑道	試験坑道	・各種計測実施位置 ・見学箇所	・火災性状	・外気供給の限定による、燻焼状態の火災	（1）可燃物及び出火源の制限といった火災発生の抑制 1-1. 油類や火気器具等、火源及び熱源の使用制限 1-3. ケーブル類の不燃化、耐熱化	・火気使用、可燃物制限 ・内装不燃化 ・什器、備品、ケーブル類の不燃化	同上	－	同上
			・煙性状	・煙のトンネル周壁の冷却による路面への降下（二層は不形成） ・*排煙システムの操作ミスによる安全区画の未形成（事例23）* ・安全区画の密閉不十分による煙流入 ・狭い坑道、給気経路の未確保による煙の逆流 ・*防煙シャッターの不作動（事例3）* ・*遮断弁の不作動（事例7）* ・*ダクトや非常階段を通じた煙の拡散（事例8）* ・坑道内の圧力バランスによる煙の坑道全体の汚染 ・床、天井面の勾配による煙流動への悪影響	（2）火炎や煙の延焼拡大防止 *2-3. 通風、通風門を重視した排煙計画* *2-4. 安全区画への煙の侵入防止及び煙制御システムの設置*	・通風、通風門による煙制御計画 ・排煙設備（機械、加圧）	同上	－	同上
	連絡坑道	・各種計測実施位置 ・見学箇所 ・資材置場 ・立坑設備保守基地	・避難行動	・地上到達までに煙に汚染 ・地上まで数百メートル以上の歩行が必要 ・長時間範域出来る空間性能確保の困難性	（4）火炎や煙の影響を受けない安全区画の設置 *4-1. 安全区画に併設される付室（バッファゾーン）の設置* 4-2. 安全区画への新鮮空気の供給	・避難階段、特別避難階段 ・付室等の安全空間の設置 ・非常用エレベータ	同上	－	同上
			・救助活動 ・消火活動	・*坑道内の温度上昇による救助活動不可能（事例30）* ・*狭い坑道による消防活動の制約（事例30）*	（3）火災位置、在館者の確認が正確かつ迅速に把握出来る防災システムの設置 3-1. 火災の早期発見、要救助者の位置、状況を把握出来る防災システム 3-2. 的確な避難誘導が出来る防災システム （5）救助・消防対策のバックアップ体制 5-4. メイン及びサブ防災センターの設置 5-5. 鉱山用の消火、救助用資機材の配備	・自動火災報知設備 ・酸素濃度、有毒ガスの検知 ・消火器 ・屋内消火栓設備 ・非常用照明設備 ・避難誘導灯 ・ＩＴＶ ・非常放送設備 ・非常電話、無線通信補助設備 ・防災資機材（担架、空気呼吸器等）	－	同上	同上

2) 防災基本コンセプトに応じた各種火災対策

ここでは、それぞれの防災基本コンセプトに対して、各種火災対策を設定し、火災対策の詳細な内容をまとめた。これにより、各種火災対策がどの火災被害に対して設定された対策であるかを明確にすることが出来る。

①可燃物及び出火源の制限といった火災発生の抑制

・火気使用、可燃物制限
・内装不燃化
・什器、備品、ケーブル類の不燃化

②火炎や煙の延焼拡大防止

・実験施設、電気設備等の区画化
・通風、通風門による煙制御計画
・排煙設備（機械、加圧）

③火炎や煙の影響を受けない安全区画の設置

・避難階段、特別避難階段
・付室、避難路等の安全空間の設置
・非常用エレベータ

④火災位置、在館者の確認が正確かつ迅速に把握出来る防災システムの設置

⑤救助・消防対策のバックアップ体制

⑥災害を未然に防ぐための日常の維持管理の充実・自動火災報知設備　共通項目

・酸素濃度、有毒ガスの検知
・消火器
・屋内消火栓設備
・非常用照明設備
・避難誘導灯
・ＩＴＶ
・非常放送設備
・非常電話、無線通信補助設備
・非常用コンセント
・防災資機材（担架、空気呼吸器等）
・防火、入退出管理の徹底

(5) 防災を考慮した地下研究施設のレイアウト案

ここでは、これまで上述してきた火災対策を踏まえて、地下研究施設のレイアウトに影響を与える火災対策、及び防災を考慮したレイアウト案を示す。

なおレイアウト案は、サイクル機構から提示された「基本レイアウト案」、さらに「防災を考慮したレイアウト案」、各々を立坑案及び斜坑案において整理する。
ただし、基本レイアウト案と防災を考慮したレイアウト案は以下の点を考慮して計画しており、防災を考慮したレイアウト案として両極にあるものとして位置付けた。

1) 基本レイアウト案

防災を検討するにあたり、そのモデルとして設定したレイアウト案である。このレイアウト案では、サイクル機構から提示された案の主骨格は変更せずに、見学者の安全性を高める対策を計画した。そのためこのレイアウト案は、主立坑部分に建築基準法を考慮した対策（例えば防火区画等）を計画したが、主に設備的対応で安全性を高める計画とした。

また、主立坑以外の部分については鉱山保安法レベルの対応、つまり防護器具レベルの対応に留め、空間的に特別な対策は計画していない。よって、安全空間の設置や主立坑の火災対策等、安全対策を限定した計画案として位置付けた。基本レイアウト案を図 3.2.2-5 と図 3.2.2-7 に示す。

2) 防災を考慮したレイアウト案

3-7 頁に記載しているが、鉱山保安法は、鉱山労働者の就業に関わる安全の確保を図るために定められた法律であるため、レイアウトに関わる基準は明確にされていない。一方、建築基準法では在館者の火災に対する安全な基準が規定されている。
また現段階では、見学コースが明確に計画されていないため、地下研究施設全体を見学コースと設定している。

このことより、防災を考慮したレイアウト案は建築基準法レベルの火災対策を考慮してレイアウトを計画した案と位置付けた。よって基本レイアウト案と比較して、見学者の火災時の安全性をより重視した案となっている。防災を考慮したレイアウト案を図 3.2.2-6 と図 3.2.2-8 に示す。

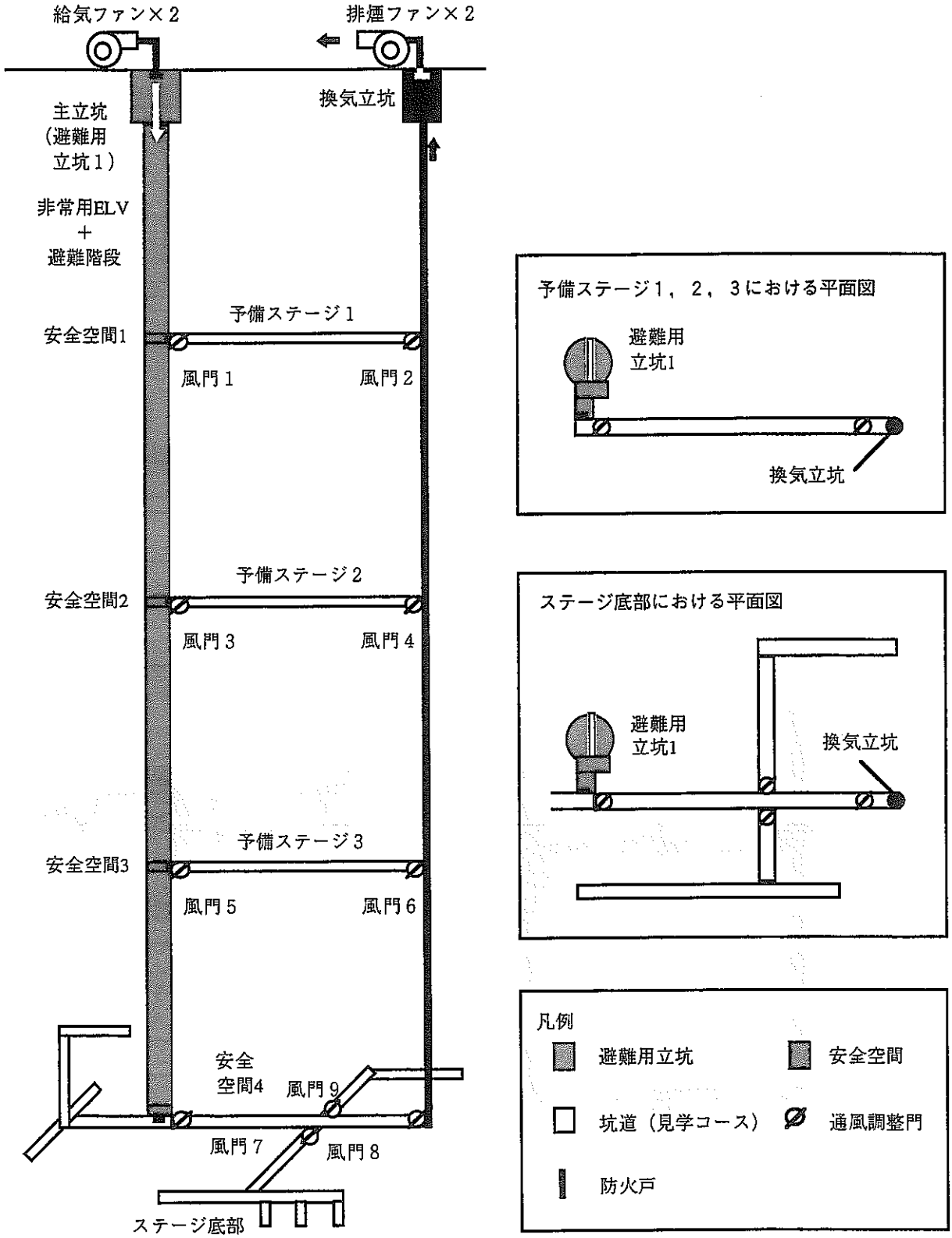


図 3.2.2-5　基本レイアウト案での全体図（立坑案１）

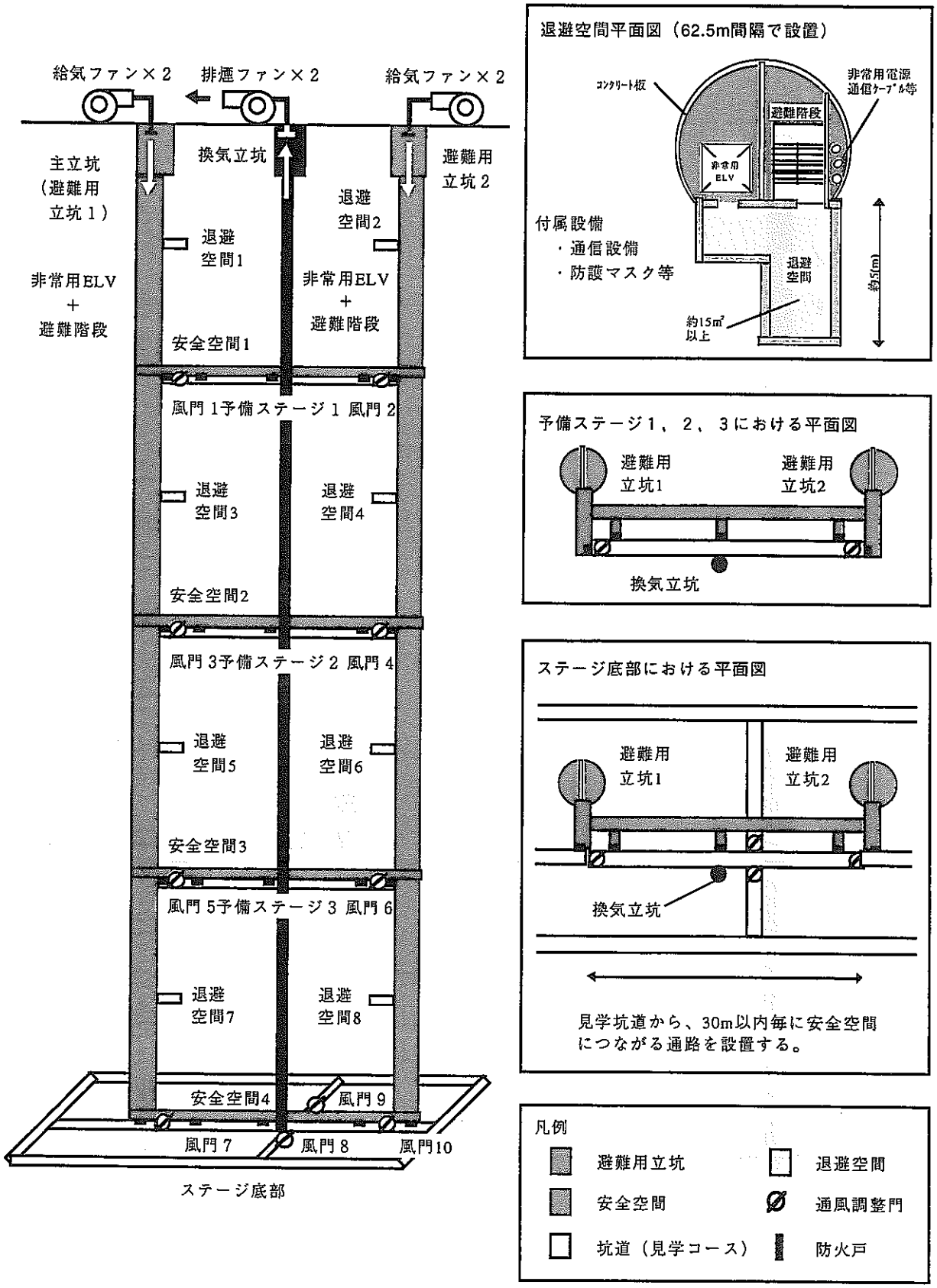


図 3.2.2-6　防災を考慮したレイアウト案での全体図（立坑案2）

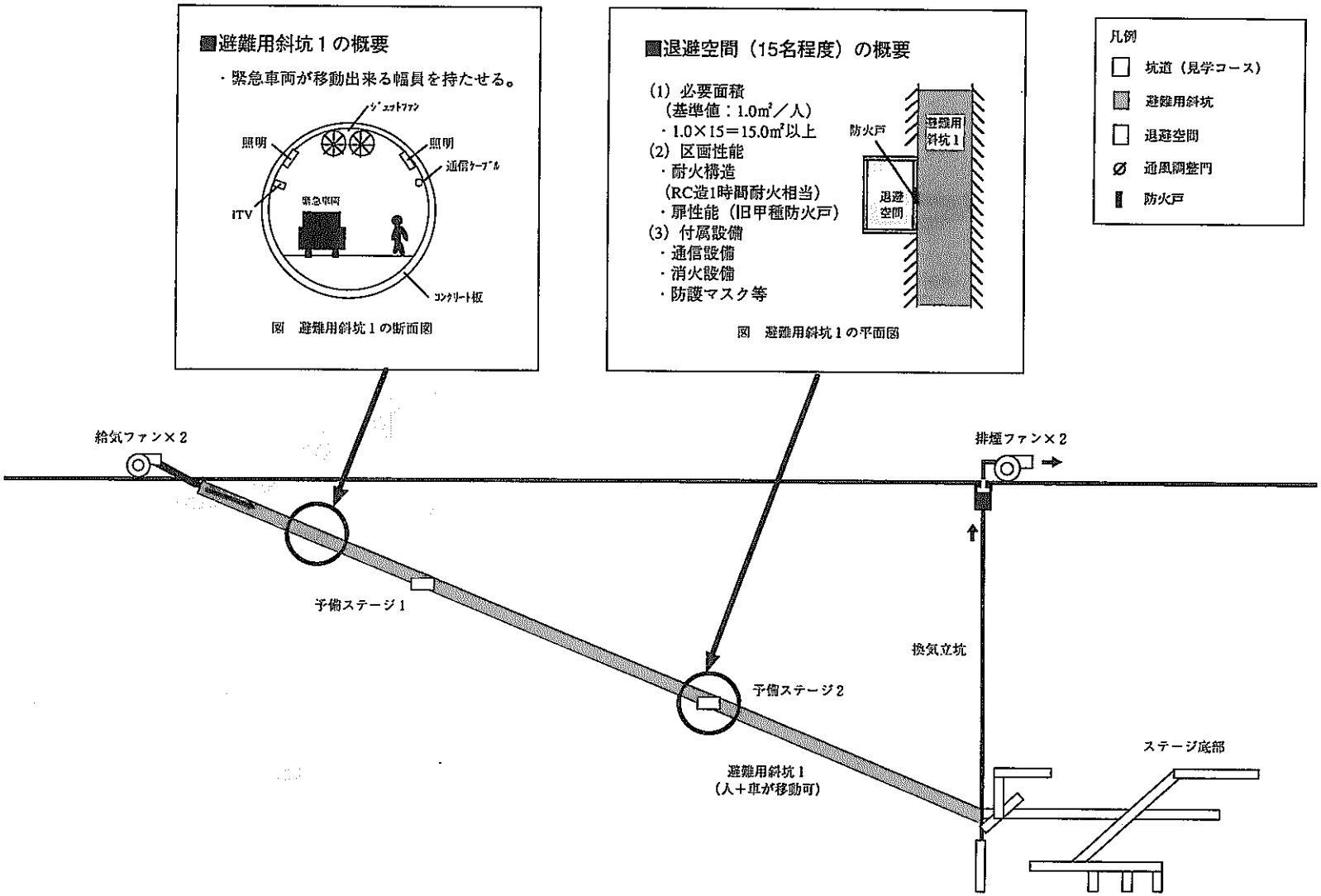


図3.2.2-7　基本レイアウト案での全体図（斜坑案１）

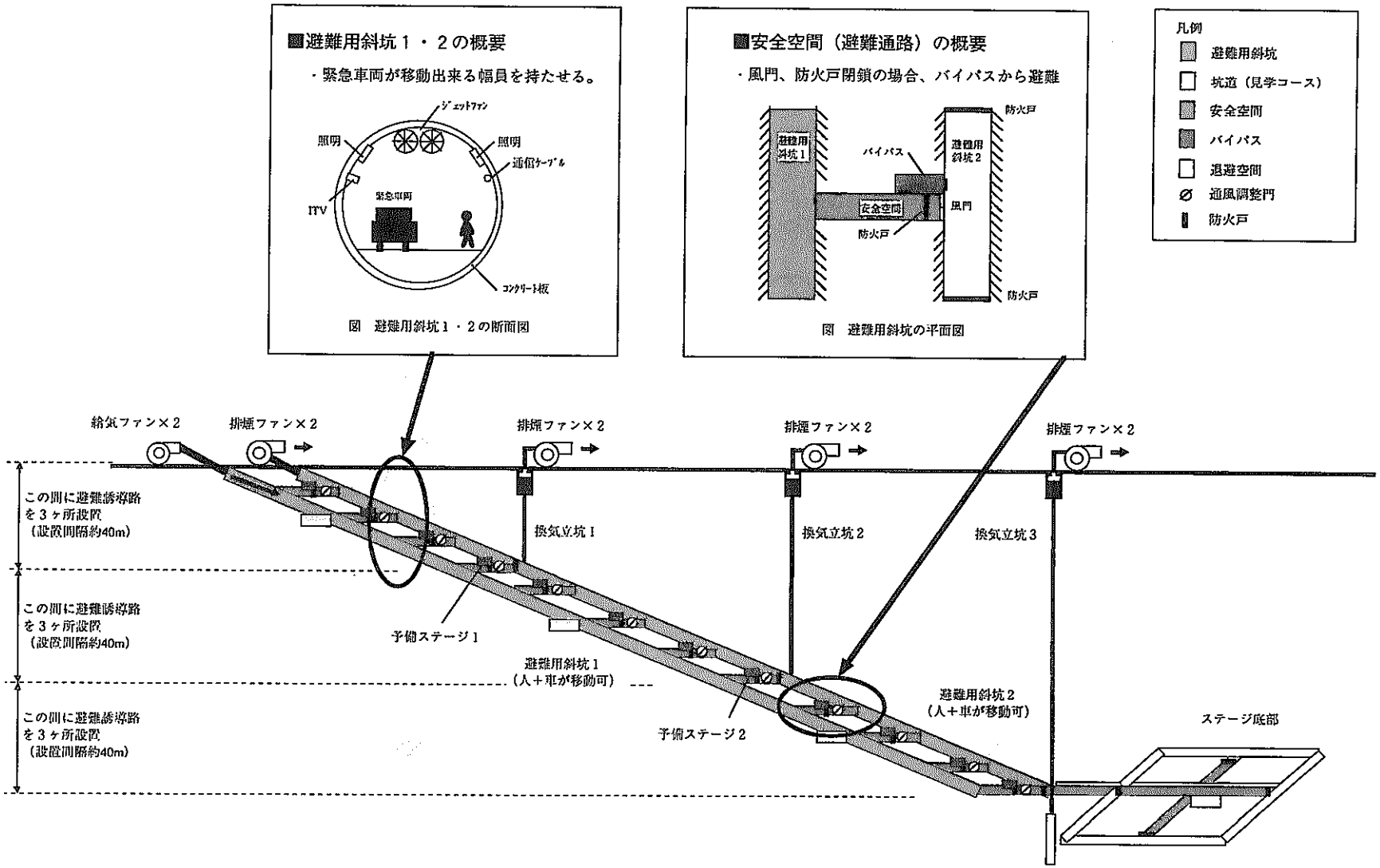


図3.2.2-8　防災を考慮したレイアウト案での全体図（斜坑案２）

①レイアウトに影響を及ぼす対策項目の整理

ここでは建築防災計画の観点から対策項目を列挙して、その内容を示す。そして、「基本レイアウト案（立坑案１、斜坑案１）」及び「防災を考慮したレイアウト案（立坑案２、斜坑案２）」において、計画された対策項目を表にまとめる。

a) 対策１：坑道（特に見学コース）では２方向避難を確保する。

この対策は、避難方向先が火災によって閉ざされた場合でも、別な避難経路を確保することを目的とする。「防災を考慮したレイアウト案」では、施工途中の坑道を除き、火災発生の方向と別方向に経路が確保される計画としている。

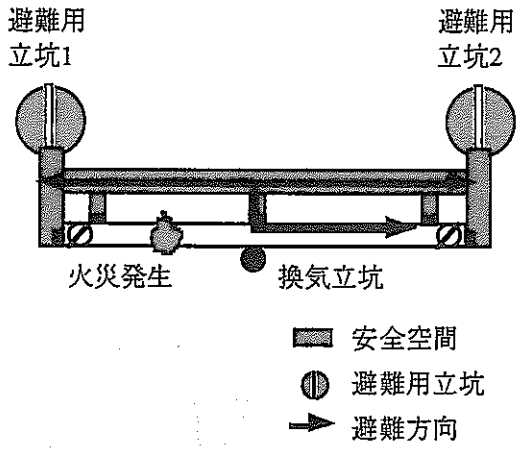


図 3.2.2-9　２方向避難の確保（予備ステージ部分）

b) 対策２：縦方向の避難経路を２方向確保する。

この対策は、地上への避難経路となる主立坑が火災や煙によって閉ざされた場合でも、別な立坑に設置された非常用 ELV や避難階段を通じて地上へ避難出来る経路を確保することを目的とする。

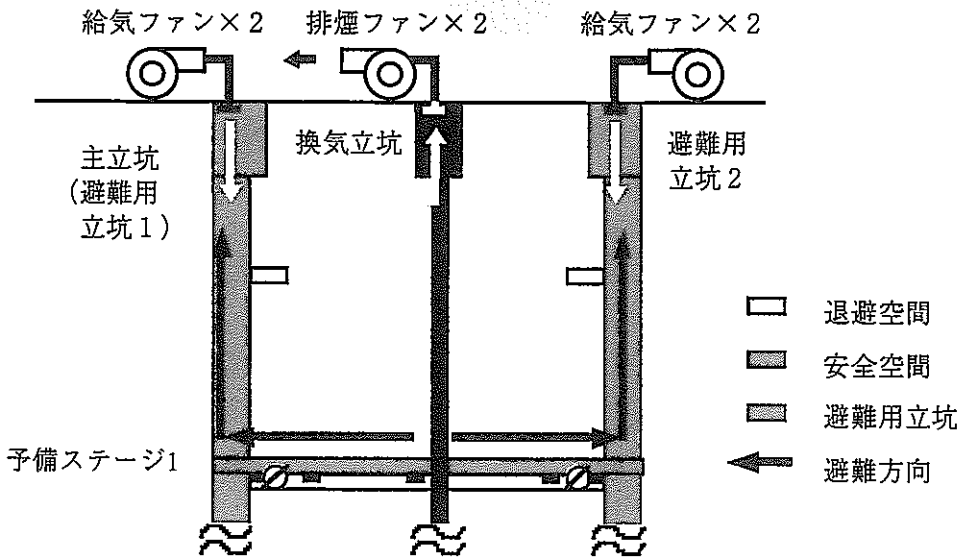


図 3.2.2-10　縦方向の２方向避難の確保（立坑案の場合）

「防災を考慮したレイアウト案」では、主立坑とは別に避難用立坑を設置し、仮に主立坑が利用出来ない場合でも、予備ステージ部の安全空間を通じて、避難用立坑から地上へ避難が可能となる計画としている。

c) 対策３：避難階段等、機械力に依存しない避難ルートを確保する。

深度 500m の地下研究施設での移動手段として、非常用 ELV の利用が想定される。火災時に非常用 ELV を利用するには、何重ものバックアップ対策が必要である。しかし、この非常用 ELV が火災時に利用出来ない場合を想定し、機械力に依存しない避難ルートの確保を目的とする。

「基本レイアウト案」及び「防災を考慮したレイアウト案」ともに、機械力に依存しない地上への避難ルートの確保のために、避難階段の設置を計画している。

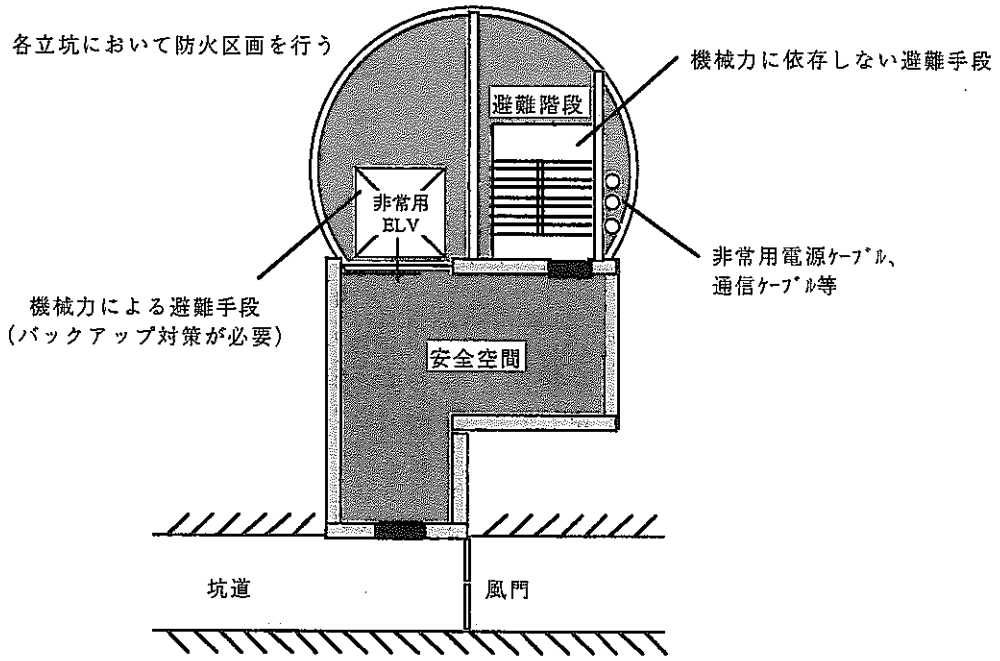


図 3.2.2-11　機械力に依存しない避難ルートの確保（立坑案の場合）

d) 対策４：避難方向は給気上流側とし、煙に巻かれないようにする。

この対策は、給気ファンにより避難経路の上流側から空気を送り出すことで、安全空間と見学コース間に圧力差を設けて煙の侵入を防ぎ、避難途中に煙に巻かれることなく、避難を完了させることを目的とする。

「基本レイアウト案」及び「防災を考慮したレイアウト案」ともに、主立坑または斜坑において給気ファンにより空気を送り出し、煙の侵入を防ぐ計画としている。

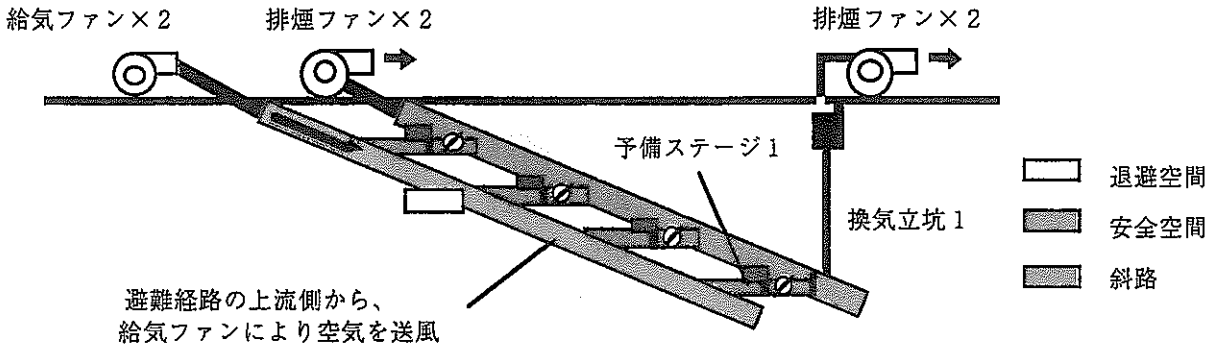


図 3.2.2-12　給気による避難経路の安全性確保（斜坑案の場合）

e) 対策５：坑道（特に見学コース）に隣接する安全区画を設置し、見学者から火、煙の影響を防ぐ。

坑道内で発生した火災に対し、避難者が煙・火に巻かれることなく、迅速に安全な場所に避難出来る安全空間の設置を目的とする。「防災を考慮したレイアウト案」では、予備ステージ部において、並行した形で安全空間を設置し、２方向避難を確保した計画としている。

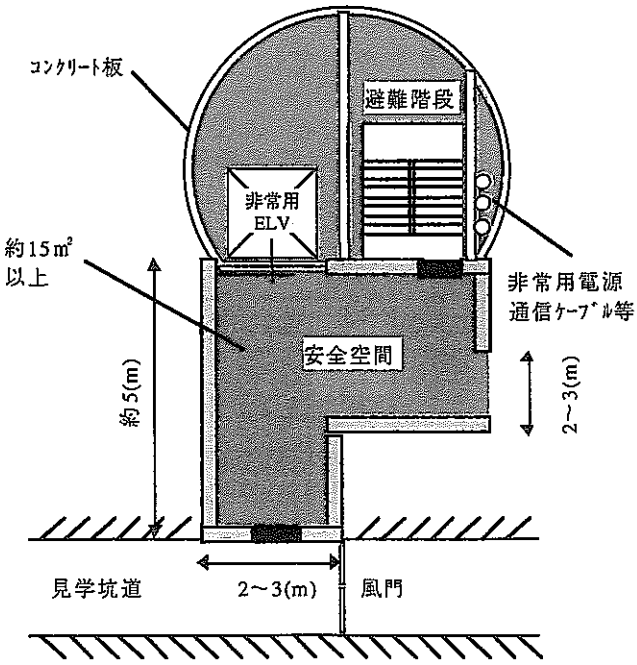


図 3.2.2-13　坑道に隣接する安全空間（立坑案の場合）

f) 対策６：消防隊用の救助・消防活動の経路、活動拠点を確保する。

深度 500m の地下研究施設で火災が発生した場合、救助活動及び消防活動は地下研究施設の移動距離の長さにおいて、非常に困難が伴うと予想される。そこで地下研究施設内に消防隊用の救助・消防活動の経路、活動拠点を確保することで、迅速な活動が可能となることを目的とする。

「基本レイアウト案」及び「防災を考慮したレイアウト案」ともに、退避空間や安全空間を設置することで、消防隊用の救助・消防活動の経路、活動拠点を確保する計画としている。

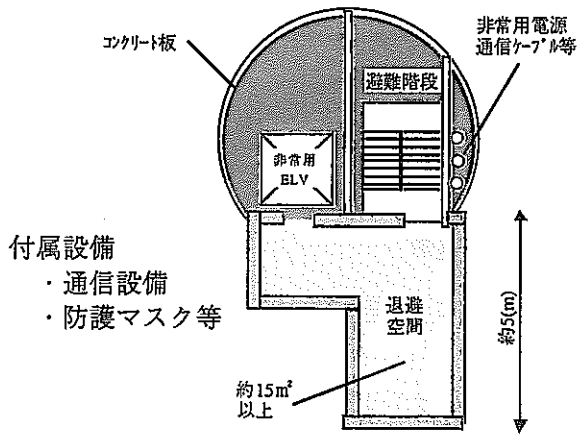


図 3.2.2-14　立坑に隣接する退避空間（立坑案の場合）

「基本レイアウト案」及び「防災を考慮したレイアウト案」における、立坑案と斜坑案での各対策の計画概況を表 3.2.2-2 に示す。防災を考慮したレイアウト案は対策１～対策６までを考慮した計画案をなっている。

表 3.2.2-2　各対策の計画概況

レイアウト	名称	立坑／斜坑数	避難手段	設置数	接続階	対策１	対策２	対策３	対策４	対策５	対策６
基本	立坑案１	避難用１本	・非常用ELV	１基	５ヶ所	×	×	○	○	×	×
		排煙用１本	・避難階段	１ヶ所	５ヶ所						
防災考慮	立坑案２	避難用２本	・非常用ELV	２基	９ヶ所	○	○	○	○	○	○
		排煙用１本	・避難階段	２ヶ所	５ヶ所						
基本	斜坑案１	斜坑１本	・緊急車両	１基	１ヶ所	×	×	○	○	×	×
		換気立坑１本	・斜坑	１本	１ヶ所						
防災考慮	斜坑案２	斜坑２本	・緊急車両	１基	12ヶ所	○	○	○	○	○	○
		換気立坑３本	・斜坑	２本	12ヶ所						

○：実施、×：未実施

②立坑におけるレイアウト案

(1) 利用想定

利用想定は、「基本レイアウト案（立坑案１）」と「防災を考慮したレイアウト案（立坑案２）」ともに、以下の設定を行った。特に両レイアウト案ともに、見学者が避難の遅れによって煙に巻かれることを避けるために、見学は引率者による誘導を前提とする。

(a)見学ゾーンは地下研究施設全体とする。

地下研究施設内における各種研究場所が明確となっていないため、現段階では見学ゾーンを地下研究施設全体と設定した。ただし施工箇所といった危険箇所については進入禁止の掲示を行う等、明確にその危険性を明示させる。

(b)引率者による見学を前提とする。

深度 500m の地下研究施設では、現在位置が特定し難いだけでなく、見学者にとって不案内な場所である。災害時に迅速に安全な空間へ避難が出来るように、引率者による見学を前提とする。

(c)地下研究施設の入出坑には、主立坑の非常用 ELV を利用する。

深度 500m の地下研究施設の見学では、主立坑に設置された非常用 ELV を利用して、見学コースである施設底部へ移動する。

(2) 避難計画

避難計画は、「基本レイアウト案（立坑案１）」と「防災を考慮したレイアウト案（立坑案２）」に共通する項目と、各レイアウト案における個別の避難計画を各々設定した。

「基本レイアウト案（立坑案１）」と「防災を考慮したレイアウト案（立坑案２）」における避難計画の違いは、後者は避難経路のバックアップ対策を考慮した計画となっており、より安全な避難経路を確保したレイアウトとなっている。そのため、「防災を考慮したレイアウト案（立坑案２）」では、地上への避難経路として主立坑とは別に避難用立坑をさらに１本設け、予備ステージ部では並列した形で安全空間を設置した計画となっている。図 3.2.2-14 に「防災を考慮したレイアウト案（立坑案２）」におけるバックアップ対策案を示す。

1) 共通項目

・地上への避難移動を原則とし、バックアップ対策を強化した非常用エレベータを利用する。

2) 基本レイアウト案（立坑案１）における避難計画

・避難時に利用する主立坑を１本、排煙用に利用する換気立坑を１本設置する。
・非常用 ELV の利用不能を想定し、代替用の避難階段を１ヶ所設置する。
・火、煙からの影響を防ぐ安全空間を、主立坑と各ステージ間に４ヶ所設置する。

3) 防災を考慮したレイアウト案（立坑案２）における避難計画

・熱、煙の影響を受けない避難用立坑を２本設置し、避難及び消火活動時に利用する。

・避難階段を避難用立坑内に各々設置する。また階段途中に退避空間を設置する。

・見学ゾーン（予備ステージ、ステージ底部）に併設して、安全空間を設置する。

また避難手順は、「基本レイアウト案（立坑案１）」と「防災を考慮したレイアウト案（立坑案２）」において、非常用 ELV の利用台数、避難階段数は異なるが、その内容は同じである。以下にその避難手順を示す。

1) 見学者は引率者の誘導により近接の安全空間へ避難し、熱･煙からの影響を防ぐ。

2) 主立坑内の非常用 ELV により、見学者を地上に避難させる。

3) 非常用 ELV が利用不能の場合、避難階段を利用して地上へ避難する。

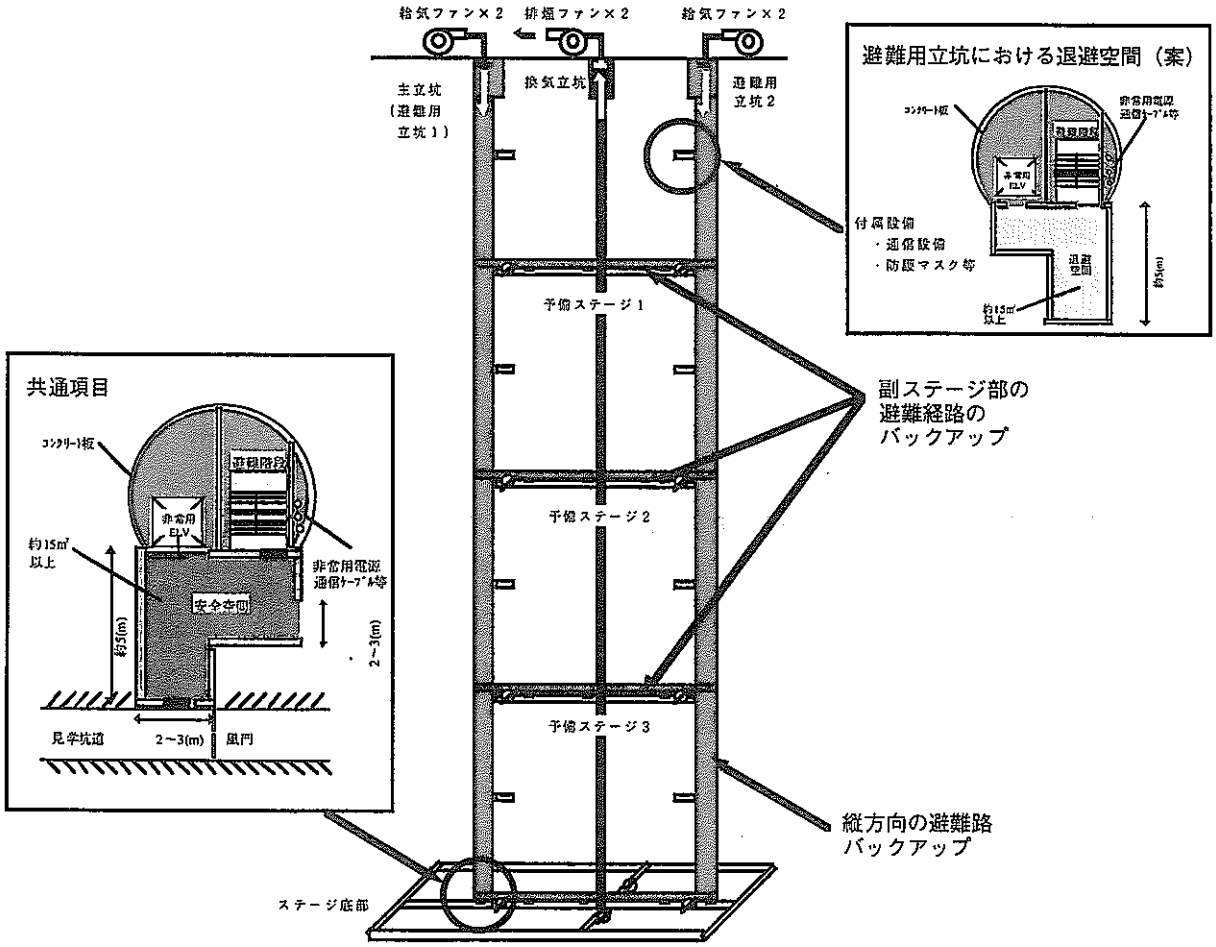


図 3.2.2-15　「防災を考慮したレイアウト案」におけるバックアップ対策案

(4) 排煙計画

「基本レイアウト案（立坑案１）」と「防災を考慮したレイアウト案（立坑案２）」ともに排煙計画は共通である。以下にその内容を示す。

対応１：地下研究施設の煙は、換気立坑を通じて排煙ファンにより排出される。

対応２：一時退避場所となる安全空間と坑道間に、防火戸を設置して煙の侵入を防ぐ。

対応３：避難時に利用される主立坑への給気により、煙の侵入を防ぐ。

対応４：給気により、安全空間－坑道間との間に差圧を設け、煙の侵入を防ぐ。

対応５：バックアップとして排煙･給気ファンは１ヶ所にそれぞれ２台ずつ設置する。

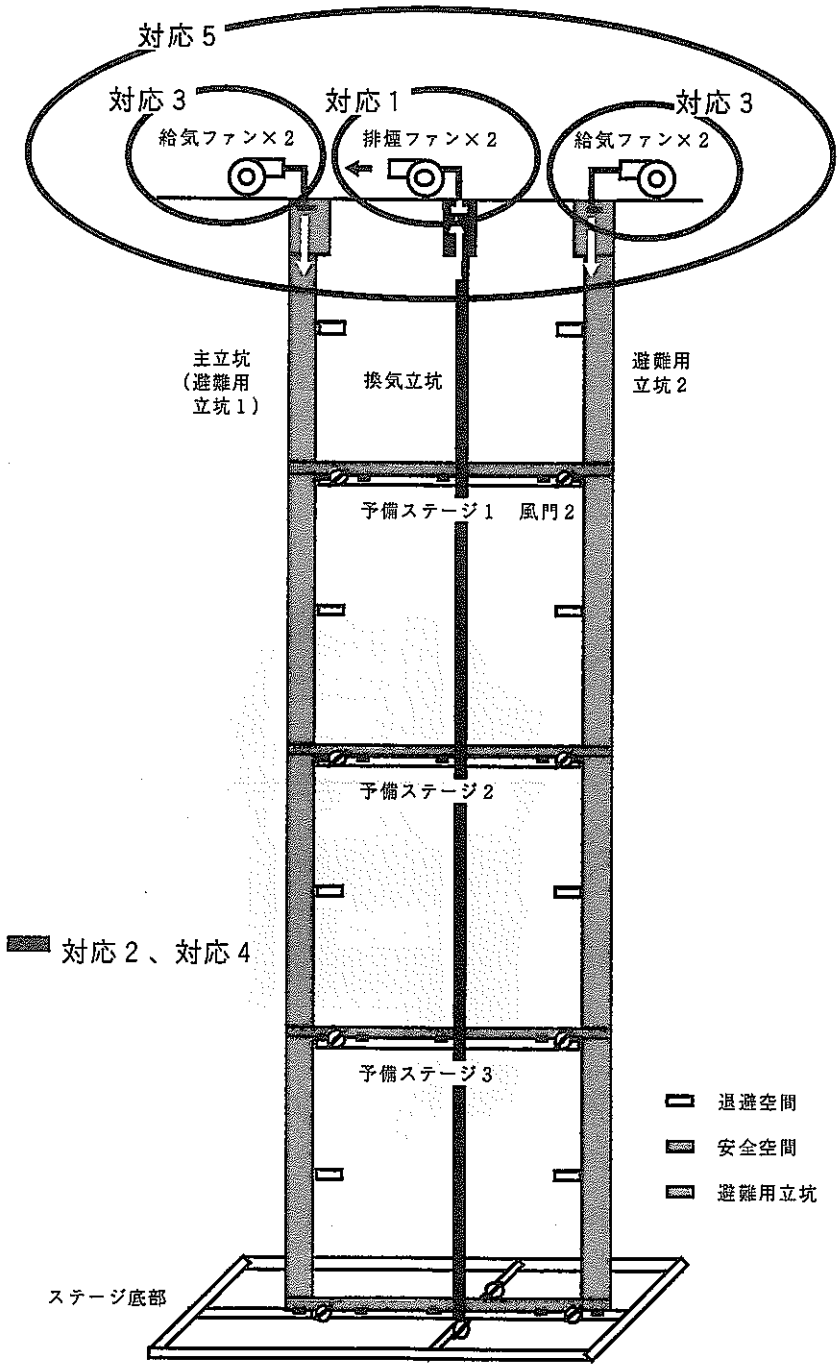


図 3.2.2-16　排煙計画の概要（防災を考慮したレイアウト案）

(5) 安全空間の仕様

図 3.2.2-17 に安全空間の仕様の一例を示す。なお安全空間の必要面積は、地上の建築物において、一時的避難場所の基準値 1.0 ㎡／人以上を利用した。そしてこの基準値に非常用 ELV の搭乗人数約 15 名を掛け合わせて算出した。

1) 必要面積（基準値：1.0 ㎡／人以上）
   - 1.0×15＝15.0 ㎡　以上
2) 非常用 ELV
   - 定員：約 15 名
   - 定格速度：60m／min
   - 籠内法：1.8m×1.5m
3) 避難階段
   - 避難階段基準を参考
4) 区画性能
   - 耐火構造（RC 造 1 時間耐火相当：厚さ 7cm 以上）
   - 扉性能（旧甲種防火戸）
5) 付属設備
   - 通信設備、消火設備、防護マスク等
   - 通信ケーブル類は別区画に設置

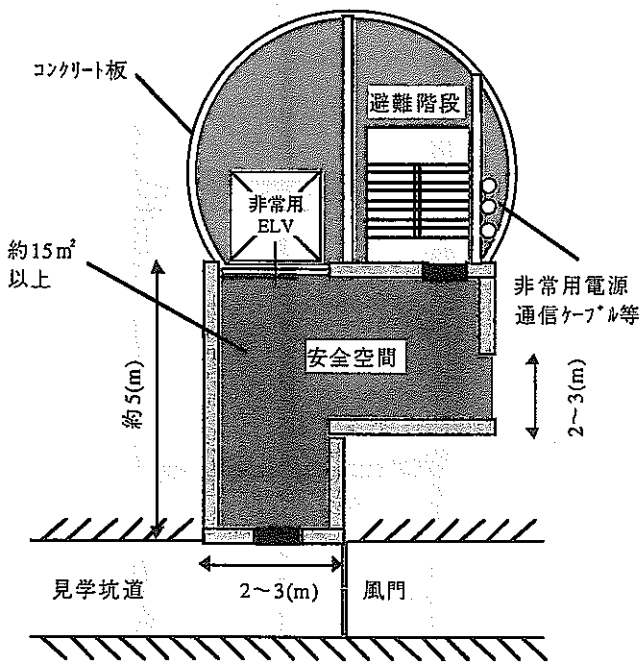


図 3.2.2-17　安全空間の仕様（防災を考慮したレイアウト案）

③斜坑におけるレイアウト案

(1) 利用想定

利用想定は、「基本レイアウト案（斜坑案１）」と「防災を考慮したレイアウト案（斜坑案２）」ともに、以下の設定を行った。立坑案と同様、両レイアウト案ともに見学者が避難の遅れによって煙に巻かれることを避けるために、見学は引率者による誘導を前提とする。

また立坑案の利用想定と比較して、地下研究施設の入出坑に非常用 ELV を利用するのではなく、電気自動車を利用する点が異なる。なお電気自動車自体が可燃物になることを避けるために、仕様材料の不燃化を行う必要がある。

・見学ゾーンは地下研究施設全体とする。

立坑案と同様、地下研究施設内における各種研究場所が明確となっていないため、現段階では見学ゾーンを地下研究施設全体と設定した。ただし施工中等、危険箇所については進入禁止の掲示を行う等、明確にその危険性を明示させる。

・引率者による見学を前提とする。

立坑案と同様、深度 500m の地下研究施設では、現在位置が特定し難いだけでなく、見学者にとって不案内な場所である。災害時に迅速に安全な空間へ避難が出来るように、引率者による見学を前提とする。

・地下研究施設の入出坑には、不燃化された電気自動車を利用する。

深度 500m の地下研究施設の見学では、約 10%の勾配である斜坑内を、不燃化された電気自動車を利用して、見学コースである施設底部へ移動する。

(2) 避難計画

避難計画は、「基本レイアウト案（斜坑案１）」と「防災を考慮したレイアウト案（斜坑案２）」に共通する項目と、各レイアウト案における個別の避難計画を各々設定した。「基本レイアウト案（斜坑案１）」と「防災を考慮したレイアウト案（斜坑案２）」における避難計画の違いは、立坑案と同様に後者が避難経路のバックアップ対策を考慮した計画となっており、より安全な避難経路を確保したレイアウトとなっている。

そのため、「防災を考慮したレイアウト案（斜坑案２）」では、避難用斜坑１に並行した形で避難用斜坑２を設置し、地上への避難経路を２経路確保している。またこの斜坑間は安全空間とバイパスによって接続しているため、仮に安全空間の防火戸が閉鎖となった場合においてもバイパスを通じて、避難出来る計画となっている。図 3.2.2-18 に「防災を考慮したレイアウト案（斜坑案２）」におけるバックアップ対策案を示す。

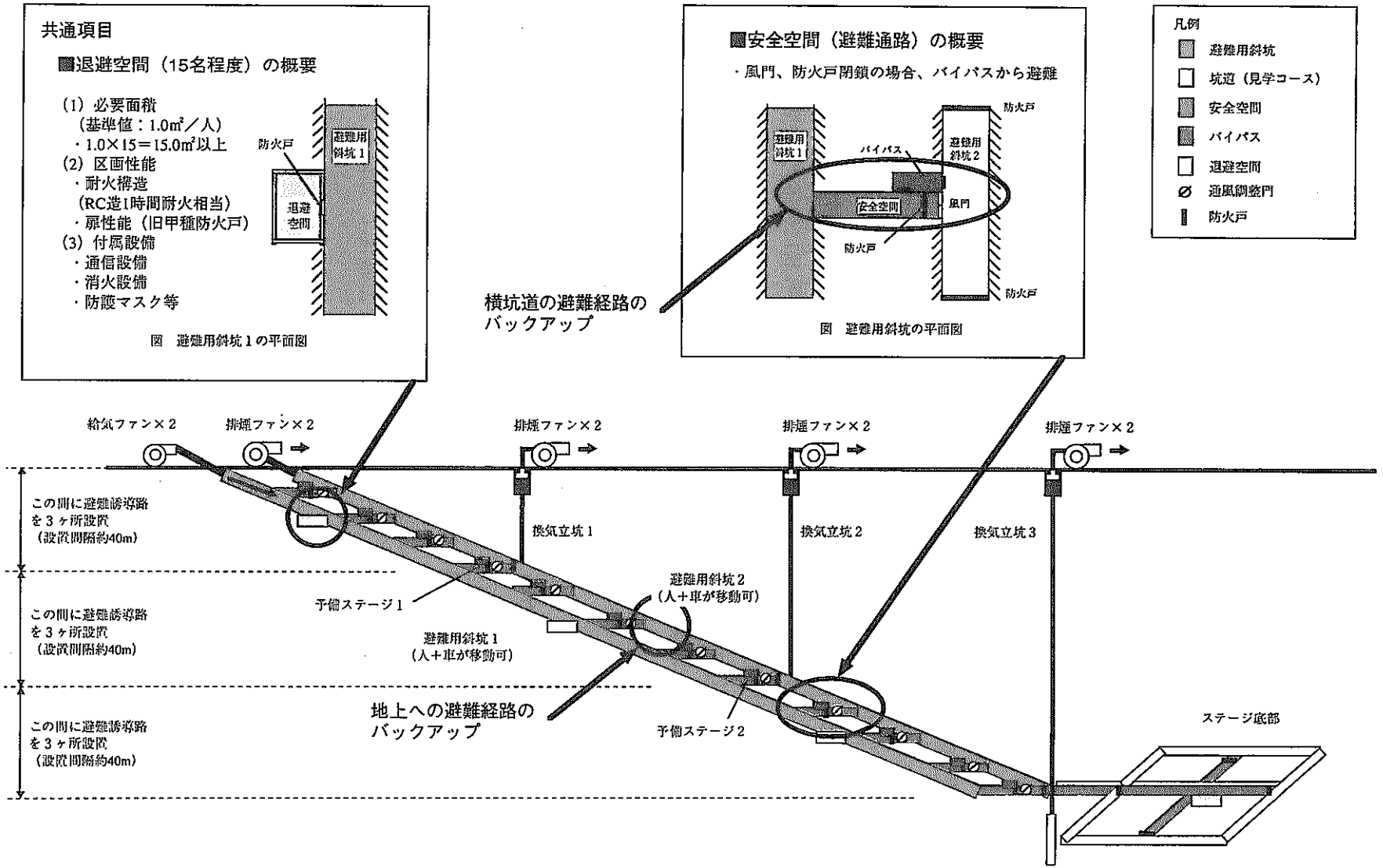


図3.2.2-18　「防災を考慮したレイアウト案」におけるバックアップ対策

1) 共通項目

・見学者は引率者の避難誘導により、避難用斜坑を通じて地上へ避難する。

・地上までの避難距離が長いため、緊急車両による地上への移動も考慮する。

2) 基本レイアウト案（斜坑案１）における避難計画

・避難時に利用する斜坑は１本、排煙用に利用する換気立坑を斜坑とステージ底部の間に１本設置する。

・熱、煙の影響を受けない退避空間を予備ステージの２ヶ所に設置する。

3) 防災を考慮したレイアウト案（斜坑案２）における避難計画

・避難用斜坑１・２により、地上への避難経路を２経路確保する。

・避難用斜坑２が区画形成により地上へ移動出来ない場合、避難用斜坑２から最寄りの避難経路を通じて、避難用斜坑１へ避難する。

・避難用斜坑２－安全空間にバイパスを設置、風門閉鎖後も避難可能とする。

また避難手順は、「基本レイアウト案（斜坑案１）」と「防災を考慮したレイアウト案（斜坑案２）」では、地上への避難は同じであるが、斜坑本数が異なるためにその避難手順も異なる。各々の避難手順について以下にその内容を示す。

1) 基本レイアウト案（斜坑案１）における避難手順

・見学者は引率者の避難誘導のもと、地上への避難を開始する。

・避難用斜坑１を利用して、地上へ避難する。

・状況に応じて予備ステージに設置された退避空間に滞在させる。

・火災状況に応じて、緊急車両を利用した見学者の避難も考慮する。

2) 防災を考慮したレイアウト案（斜坑案２）における避難手順

・見学者は引率者の指示のもと、最寄りの避難通路へ避難する。

・避難用斜坑２が区画形成により地上へ移動出来ない場合、安全空間内を移動し、避難用斜坑１へ避難する。

・避難用斜坑１・２では、緊急車両による避難移動を行う。

・ステージ底部の見学者は隣接の安全空間へ移動して、熱･煙の影響を防ぐ。

(4) 排煙計画

排煙計画は、「基本レイアウト案（斜坑案１）」と「防災を考慮したレイアウト案（斜坑案２）」に共通する項目と、各レイアウト案における各々の排煙計画を設定した。以下にその内容を、また次ページに「防災を考慮したレイアウト案」の排煙計画を示す。

1) 共通項目

・対応１：避難用斜坑では煙の侵入を防ぐため、給気ファンにより内圧を高める。

・対応２：ﾊﾞｯｸｱｯﾌﾟ対策として、排煙･給気ﾌｧﾝは１ヶ所に各々2台ずつ設置する。

2) 基本レイアウト案（斜坑案１）における避難計画

・対応３：斜坑とステージ底部の間に１本設置された換気立坑から、排煙ファンによって煙を排出する。

3) 防災を考慮したレイアウト案（斜坑案２）における避難計画

・対応４：出火場所に応じて防火戸を閉鎖し、各換気立坑から煙を排出する。

・対応５：避難用斜坑１と避難通路間に防火戸を設置して漏煙を防ぐ。

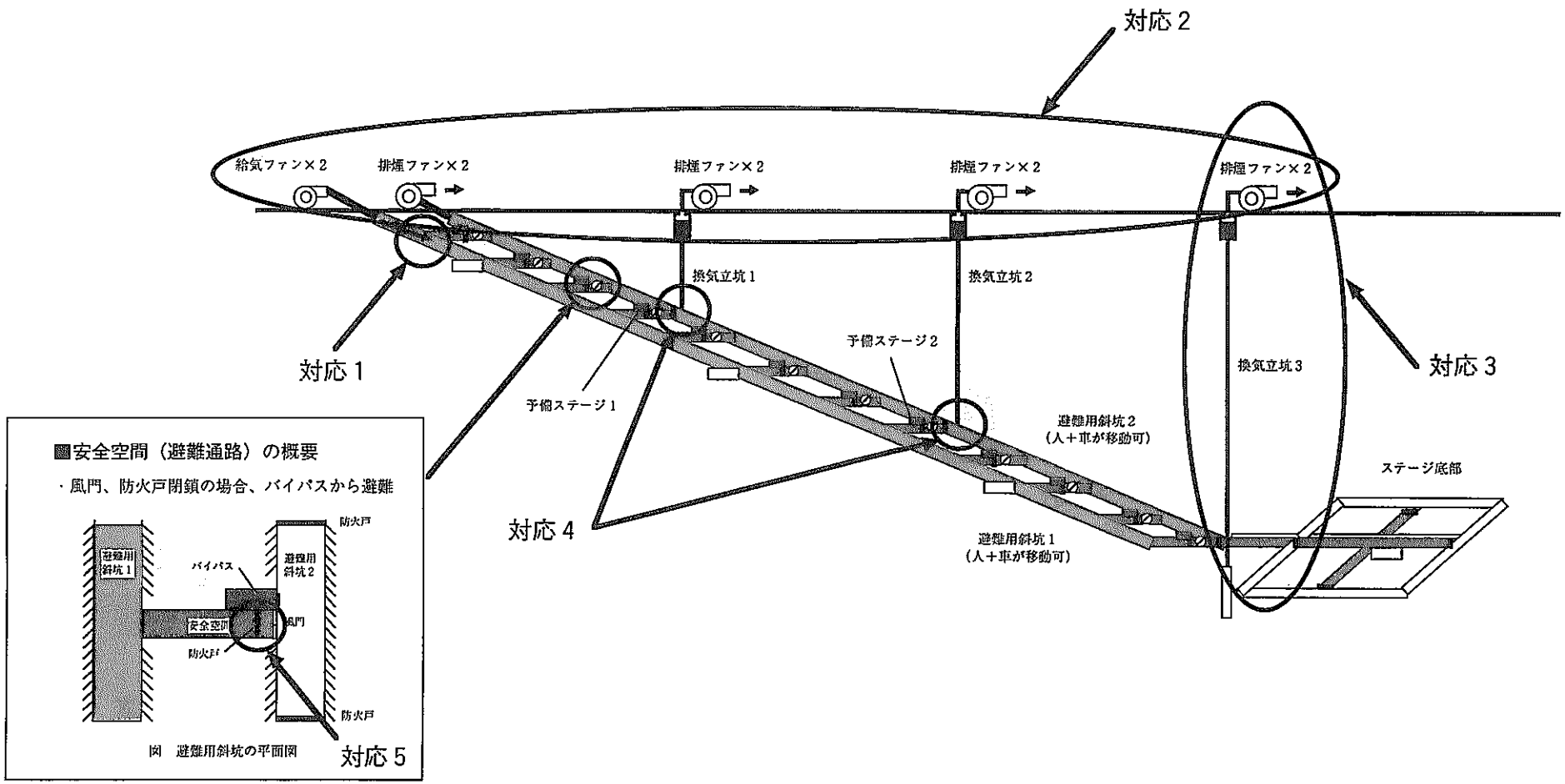


図3.2.2-19　防災を考慮したレイアウト案における排煙計画

(5) 避難用斜坑の仕様

避難用斜坑（基本レイアウト案では１本、防災を考慮したレイアウト案では２本）では、避難時に緊急車両が通過出来る幅員を持たせる。なお「防災を考慮したレイアウト案（斜坑案２）」では斜坑が２本設置されているため、一方の避難用斜坑を消防活動用として利用することで、避難活動と消防活動の交錯を減らした計画案となっている。避難用斜坑の仕様案を図 3.2.2-20 に示す。またこの避難用斜坑には、途中何カ所に退避空間を設置し、地上との連絡や一時的な避難場所として利用する計画案とした。

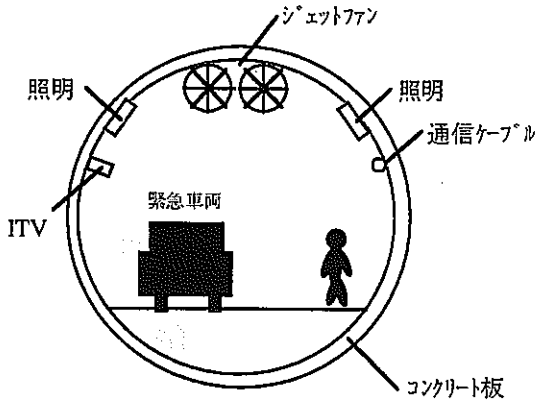


図 3.2.2-20　避難用斜坑の断面図

(6) 安全空間・退避空間の仕様

「基本レイアウト案（斜坑案１）」では退避空間を予備ステージの２ヶ所に設置したレイアウト案となっている。また「防災を考慮したレイアウト案（斜坑案２）」では退避空間を避難用斜坑１の途中３ヶ所に、さらに安全空間を避難用斜坑１と避難用斜坑２の間に 12 ヶ所及びステージ底部に設置して、避難安全性を高めたレイアウト案とした。以下に退避空間、安全空間の概要を示す。

1) 退避空間の仕様（避難者数 15 名規模の場合）

・必要面積（基準値：1.0 ㎡／人以上）

　・1.0×15＝15.0 ㎡　以上

・区画性能

　・耐火構造

　　（RC 造 1 時間耐火相当：厚さ 7cm 以上）

　・扉性能（旧甲種防火戸）

・付属設備

　・通信設備、消火設備、防護マスク等

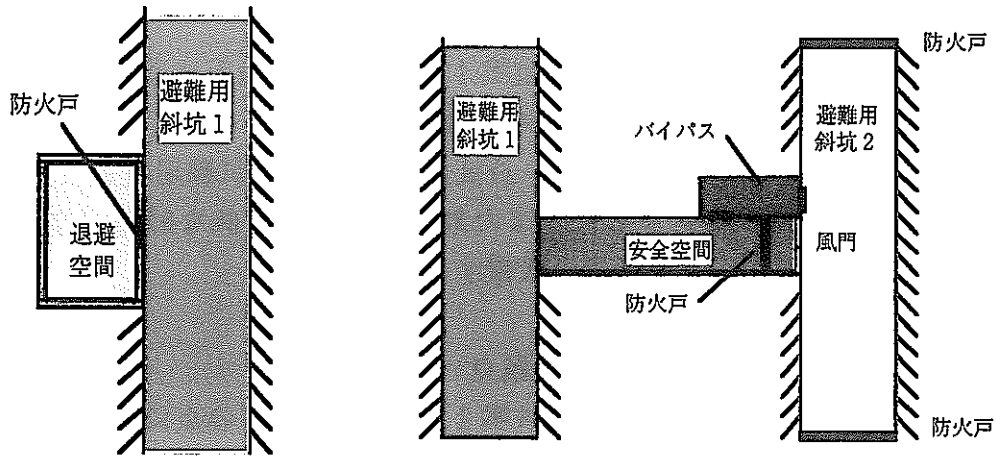


図 3.2.2-21　安全空間・退避空間の平面図（右図：安全空間、左図：退避空間）

(7) 地下研究施設の底部レイアウト案

先に示した図 3.2.2-6 と図 3.2.2-8 では「防災を考慮したレイアウト案（立坑案２、斜坑案２）」の全体像を図示した。この中で、地下研究施設の底部は「基本レイアウト案（立坑案１、斜坑案１）」と異なった形状となっているが、この場所は立坑や斜坑の本数と関係なく対策を計画した部分であるため、別途この項目で説明することとした。以下に、その内容とレイアウト図を示す。

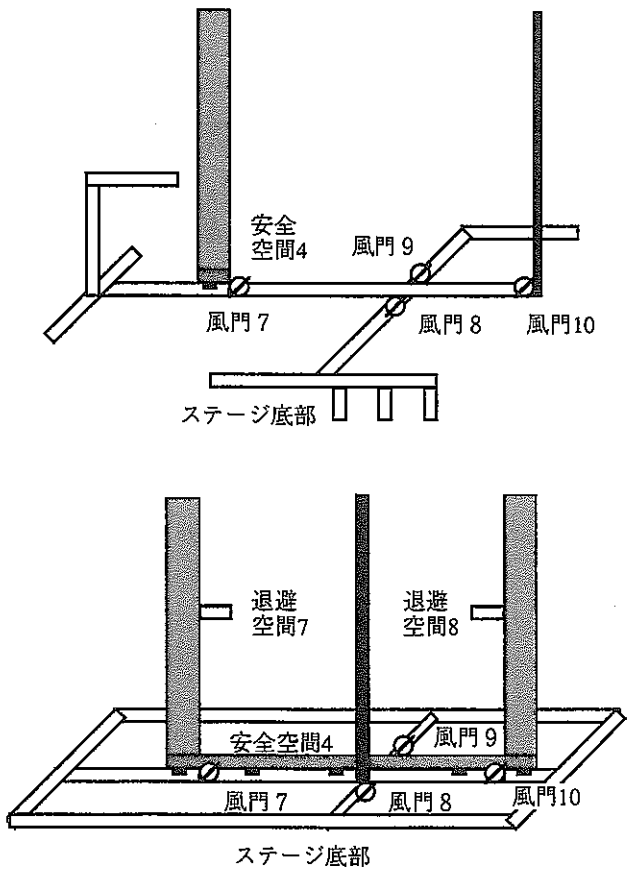


図 3.2.2-22　底部レイアウト案（上：基本レイアウト案、下：防災を考慮したレイアウト案）

1) 利用想定

「基本レイアウト案（立坑案１、斜坑案１）」では、試験用坑道（見学コース）が水平及び垂直に展開しており、坑道末端部は行き止まりとなっている。一方、「防災を考慮したレイアウト案（立坑案２、斜坑案２）」では、試験用坑道（見学コース）を回廊形式で水平展開する計画した。また地上への避難可能な経路（立坑もしくは斜坑）をつなぐ避難専用の安全空間を設置する計画とした。

2) レイアウトの違いによる防災上の課題点

「基本レイアウト案（立坑案１、斜坑案１）」では、以下の点において防災上の課題点がある。

・火災発生場所によっては、地上への避難経路に隣接する安全区画４に到達出来ない可能性がある。
・主立坑に通じる横坑道が１方向のみであるため、仮に主立坑近辺で火災が発生した場合、避難者が坑道内に閉じ込められる可能性がある。
・主立坑と換気立坑をつなぐ経路が１本しかないため、坑道内の煙流出経路と避難経路が同じになる可能性がある。

一方、「防災を考慮したレイアウト案（立坑案２、斜坑案２）」では、試験用坑道と並行した形で安全空間を設置するため、出火場所に関係なく２方向避難が確保され、煙の影響を受けない避難が可能となる。

以上、「基本レイアウト案（立坑案１、斜坑案１）」と「防災を考慮したレイアウト案（立坑案２、斜坑案２）」とを対比させ、地下研究施設内に見学者を入坑させるために必要な対策をレイアウト面からまとめた。次ページ以降に、上述した内容を整理した資料を添付する。

表 3.2.2-3　各レイアウト案の長所と短所

種別		立坑／斜坑数	避難手段	長所	短所
立坑	案１	２本	・非常用ELV ・避難階段	・立坑３本より、低いコスト	・安全空間までの距離が長いため、煙に汚染され易い ・立坑が煙に汚染されると、地上経路が絶たれる ・火災発生場所によっては、避難用立坑に到達不可 ・煙と避難の経路が同じになる可能性が大 ・非常用ELV1基のため、避難と消防が錯綜
	案２	３本	・非常用ELV ・避難階段	・避難先を二方向確保 ・地上への避難経路が2つの階段で確保 ・非常用ELV2基のため、避難と消防に分離利用	・立坑３本のため、高コスト ・普段利用され難い階段が、2ヶ所設置 ・非常用ELVが2基設置等、設備負担大 ・避難経路確保による、長い坑道距離
斜坑	案１	斜坑１本 立坑１本	・緊急車両 ・斜坑	・緊急車両による避難のため、ｼｽﾃﾑ自体が簡易 ・斜坑２本より、低いコスト	・長い移動距離（約５km） ・退避空間までの距離が長いため、煙に汚染され易い ・斜坑が煙に汚染されると、地上経路が絶たれる ・火災発生場所によっては、避難用斜坑に到達不可 ・斜坑1本のため、避難と消防が錯綜 ・緊急車両の搬送能力が、非常用ELVより低い
	案２	斜坑２本 立坑３本	・緊急車両 ・斜坑	・避難先を二方向確保 ・避難用斜坑１へのｱｸｾｽ場所多数 ・緊急車両による避難のため、ｼｽﾃﾑ自体が簡易 ・斜坑2本のため、避難と消防に分離利用	・避難経路確保による、長い坑道距離 ・長い移動距離（約５km） ・緊急車両の搬送能力が、非常用ELVより低い

立坑案１（基本レイアウト）

■利用想定

(1) 見学ゾーンは地下研究施設全体とする。
(2) 引率者による見学を前提とする。
(3) 地下研究施設の入出坑には、主立坑内の非常用ELVを利用する。

■避難計画

(1) 避難時に利用する主立坑を1本、排煙用に利用する換気立坑を1本設置する。
(2) 地上への避難移動を原則とし、ﾊﾞｯｸｱｯﾌﾟ対策を強化した非常用ｴﾚﾍﾞｰﾀを利用する。
(3) 非常用ELVが利用不能を想定し、代替用の避難階段を１ヶ所設置する。
(4) 火・煙からの影響を防ぐ安全空間を、主立坑と各ステージ間に４ヶ所設置する。

■避難手順

(1) 見学者は引率者の誘導により最寄りの安全空間へ避難し、熱・煙からの影響を防ぐ。
(2) 主立坑内の非常用ELVにより、見学者を地上に避難させる。
(3) 非常用ELVが利用不能の場合、避難階段を利用して地上へ避難する。

■排煙計画

(1) 地下研究施設内の煙は、換気立坑を通じて排煙ファンにより排出される。
(2) 一時退避場所となる安全空間と坑道間に、防火戸を設置して煙の侵入を防ぐ。
(3) 避難時に利用される主立坑内への給気により、煙の侵入を防ぐ。
(4) 給気により、安全空間－坑道間との間に差圧を設け、煙の侵入を防ぐ。
(5) ﾊﾞｯｸｱｯﾌﾟとして、排煙・給気ファンは1ヶ所にそれぞれ2台ずつ設置する。

■安全空間の仕様（非常用ELV乗降ﾛﾋﾞｰ、付室の仕様を参考）

例）安全空間４（非常用ELVの乗員数を対象）
(1) 必要面積（基準値：1.0m²／人以上）
・1.0×15＝15.0m² 以上
(2) 非常用ELV
・定員：約15名
・定格速度：60m／min
・籠内法：1.8m×1.5m
(3) 非常用階段
・避難階段基準を参考
(4) 区画性能
・耐火構造
（RC造1時間耐火相当：厚さ7cm以上）
・扉性能（旧甲種防火戸）
(5) 付属設備
・通信設備、消火設備、防護マスク等
・通信ケーブル類は別区画に設置

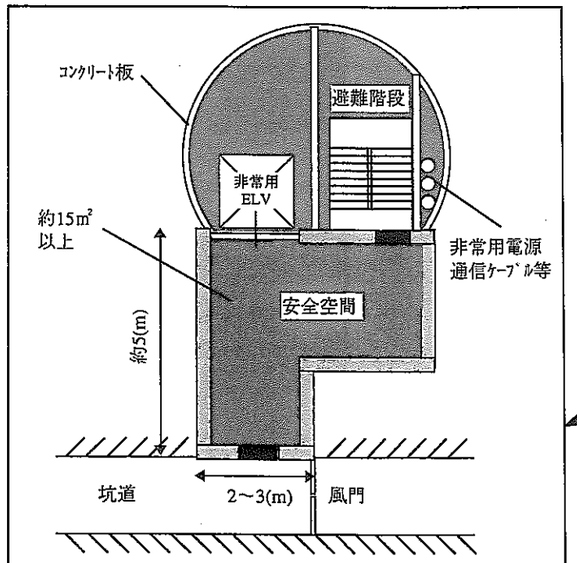


図　安全空間４の平面図

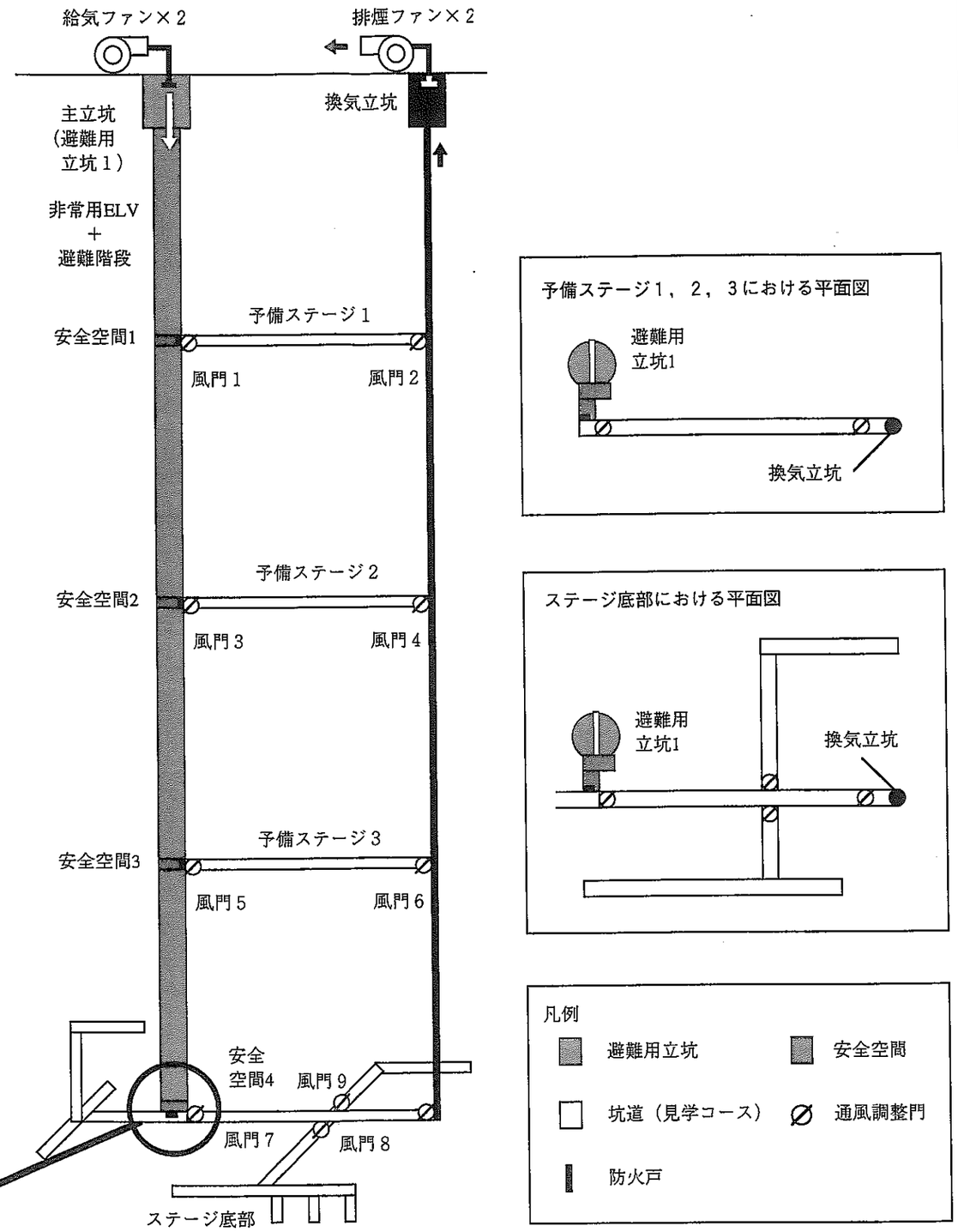


図3.2.2-23　基本レイアウト（立坑案）での全体図

立坑案２（防災を考慮したレイアウト案）

■利用想定

（1）見学ゾーンは地下研究施設全体とする。
（2）引率者による見学を前提とする。
（3）地下研究施設の入出坑には、主立坑内の非常用ELVを利用する。

■避難計画

（1）熱・煙の影響を受けない避難用立坑を2本設置し、避難及び消火活動時に利用する。
（2）地上への避難移動を原則とし、ﾊﾞｯｸｱｯﾌﾟ対策を強化した非常用ｴﾚﾍﾞｰﾀを利用する。
（3）避難階段を避難用立坑内にそれぞれ設置する。また階段の途中に退避空間を設置する。
（4）見学ゾーン（予備ステージ、ステージ底部）に併設して、安全空間を設置する。

■避難手順

（1）見学者は引率者の誘導により最寄りの安全空間へ避難し、熱・煙からの影響を防ぐ。
（2）避難用立坑1・2に設置された2基の非常用ELVにより、見学者を地上に避難させる。
（3）非常用ELVが利用不能の場合、2ヶ所の避難階段を利用して地上へ避難する。

■排煙計画

（1）地下研究施設内の煙は、換気立坑を通じて排煙ファンにより排出される。
（2）一時退避場所となる安全空間と坑道間に、防火戸を設置して煙の侵入を防ぐ。
（3）避難用立坑内1・2への給気により、地上への避難経路での煙の汚染を防止する。
（4）給気により、安全空間－坑道間との間に差圧を設け、煙の侵入を防ぐ。
（5）ﾊﾞｯｸｱｯﾌﾟとして、排煙・給気ファンは1ヶ所にそれぞれ2台ずつ設置する。

■安全空間の仕様（非常用ELV乗降ﾛﾋﾞｰ、付室の仕様を参考）

例）安全空間４（非常用ELVの乗員数を対象）
（1）必要面積（基準値：1.0㎡／人以上）
・1.0×15＝15.0㎡ 以上
（2）非常用ELV
・定員：約15名
・定格速度：60m／min
・籠内法：1.8m×1.5m
（3）非常用階段
・避難階段基準を参考
（4）区画性能
・耐火構造
（RC造1時間耐火相当：厚さ7cm以上）
・扉性能（旧甲種防火戸）
（5）付属設備
・通信設備、消火設備、防護マスク等
・通信ケーブル類は別区画に設置

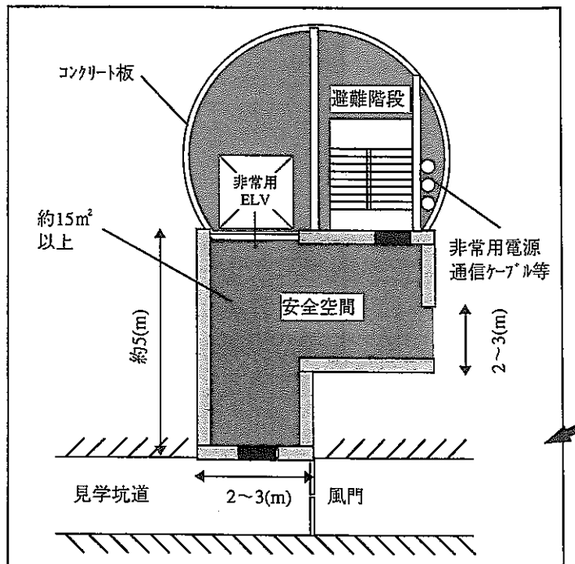
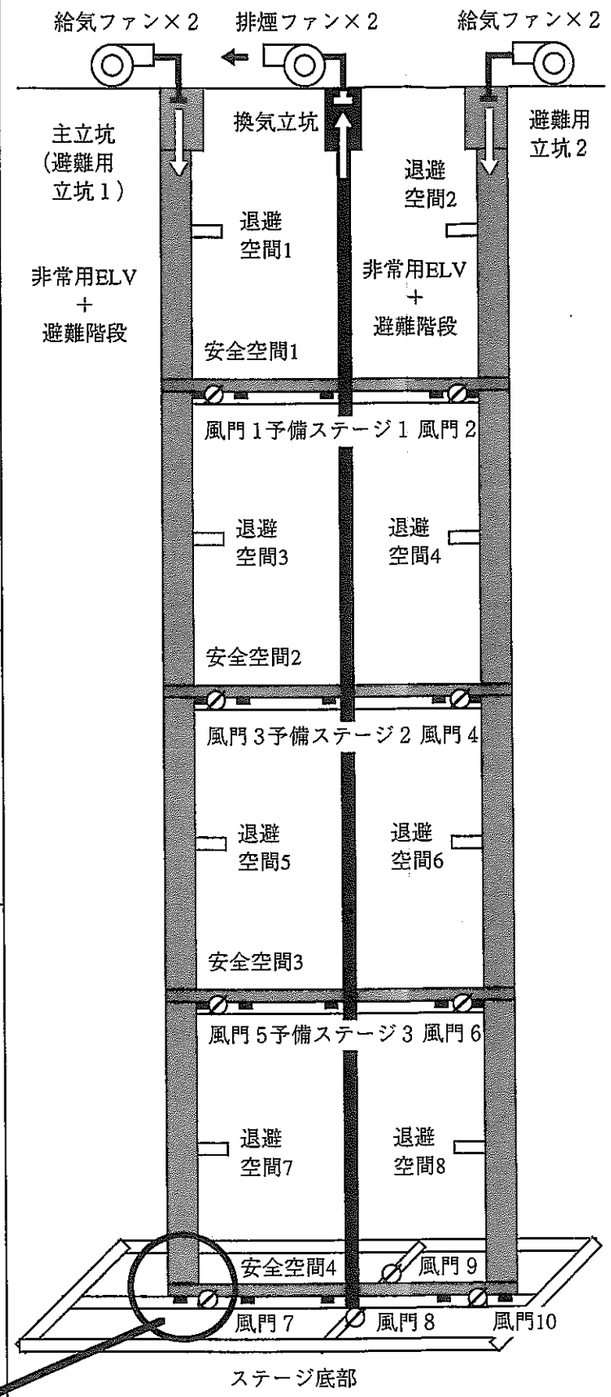
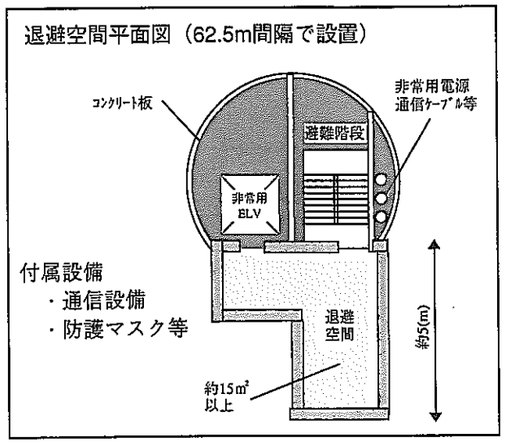
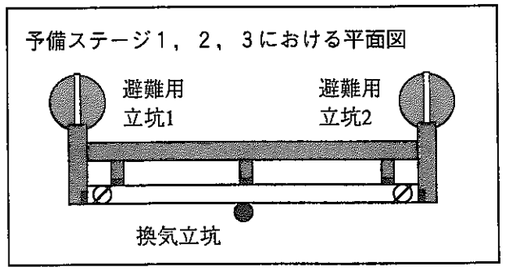
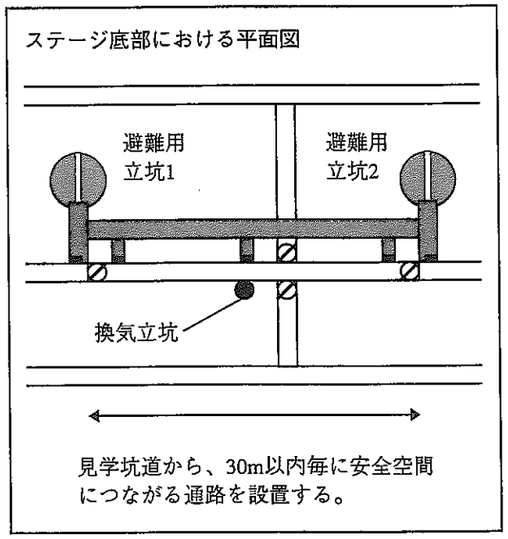


図　安全空間４の平面図









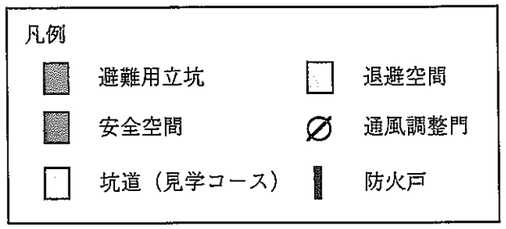


図3.2.2-24　防災を考慮したレイアウト（立坑案）での全体図

斜坑案１（基本レイアウト）

■利用想定

（1）見学ゾーンは地下研究施設全体とする。
（2）引率者による見学を前提とする。
（3）地下研究施設の入出坑には、不燃化された電気自動車を利用する。

■排煙計画

（1）換気立坑から排煙ファンによって煙を排出する。
（2）避難用斜坑１では、煙の侵入を防ぐために、給気ファンにより内圧を高める。
（3）ﾊﾞｯｸｱｯﾌﾟとして、排煙・給気ファンは１ヶ所にそれぞれ２台ずつ設置する。

■避難計画

（1）見学者は引率者の避難誘導により、避難用斜坑１を通じて地上へ避難する。
（2）熱・煙の影響を受けない退避空間を予備ステージ部の２ヶ所に設置する。
（3）地上までの避難距離が長いため、緊急車両による地上への移動も考慮する。

■避難手順

（1）見学者は引率者の避難誘導のもと、地上への避難を開始する。
（2）避難用斜坑１を利用して、地上へ移動する。
（3）状況に応じて予備ステージに設置された退避空間に滞在させる。
（4）火災状況に応じて、緊急車両を利用した見学者の避難も考慮する。

■避難用斜坑１の概要

・緊急車両が移動出来る幅員を持たせる。

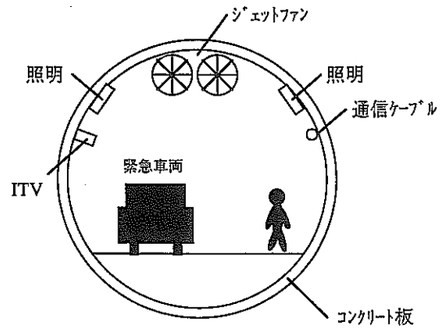


図　避難用斜坑１の断面図

■退避空間（15名程度）の概要

（1）必要面積
（基準値：1.0m²／人）
・1.0×15＝15.0m²以上
（2）区画性能
・耐火構造
（RC造1時間耐火相当）
・扉性能（旧甲種防火戸）
（3）付属設備
・通信設備
・消火設備
・防護マスク等

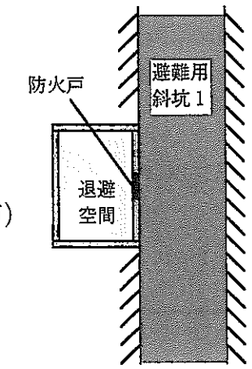


図　避難用斜坑１の平面図

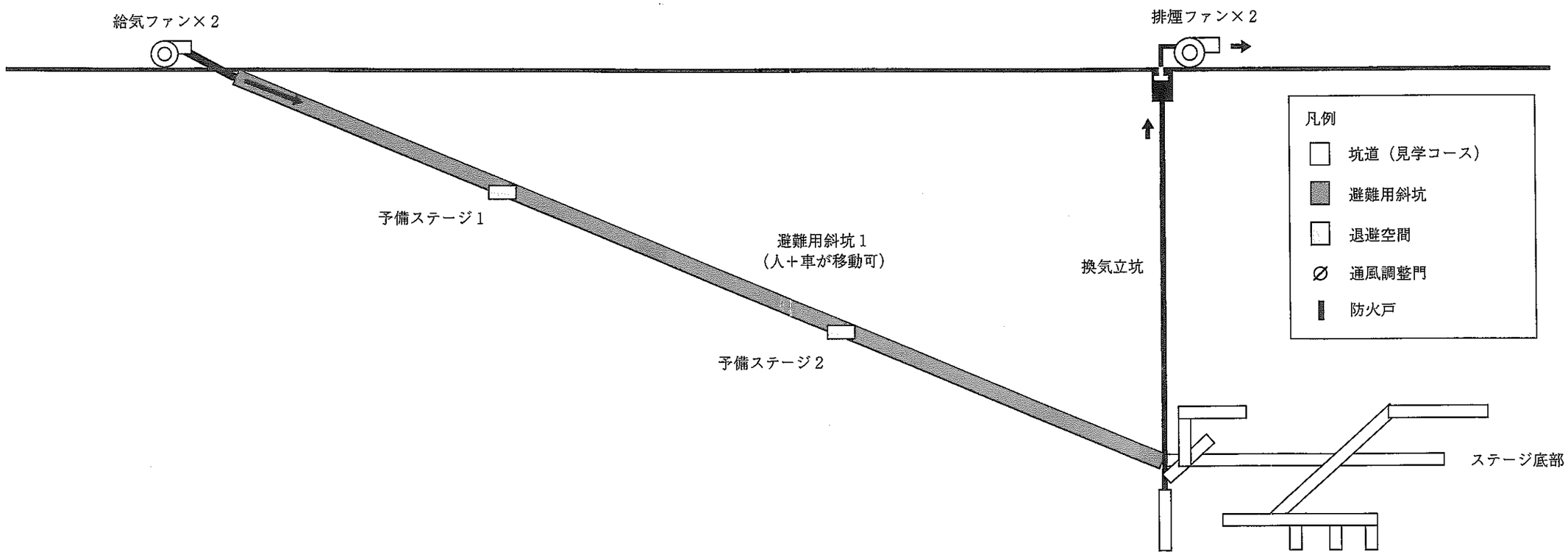


図3.2.2-25　基本レイアウト（斜坑案）の全体図

斜坑案２（防災を考慮したレイアウト案）

■利用想定

(1) 見学ゾーンは地下研究施設全体とする。
(2) 引率者による見学を前提とする。
(3) 地下研究施設の入出坑には、不燃化された電気自動車を利用する。

■避難計画

(1) 避難用斜坑１・２により、地上への避難経路を２経路確保する。
(2) 避難用斜坑２が区画形成により地上へ移動出来ない場合、避難用斜坑２から最寄りの避難通路を通じて、避難用斜坑１へ避難する。
(3) 避難用斜坑２－安全空間にバイパスを設置、風門閉鎖後も避難可能とする。
(4) 避難距離が長いため、退避空間の設置、緊急車両による避難も考慮する。

■避難手順

(1) 見学者は引率者の指示のもと、最寄りの避難通路へ避難する。
(2) 避難用斜坑２が区画形成により地上へ移動出来ない場合、安全空間内を移動して、避難用斜坑１へ避難する。
(3) 避難用斜坑１・２では、緊急車両による避難移動を行う。
(4) ステージ底部の見学者は隣接の安全空間へ移動して、熱・煙の影響を防ぐ。

■排煙計画

(1) 出火場所に応じて防火戸を閉鎖し、各換気立坑から煙を排出する。
(2) 避難用斜坑１では煙の侵入を防ぐため、給気ファンにより内圧を高める。
(3) 避難用斜坑１と避難通路間に防火戸を設置して漏煙を防ぐ。
(4) ﾊﾞｯｸｱｯﾌﾟとして、排煙・給気ファンを１ヶ所にそれぞれ２台ずつ設置する。

■避難用斜坑１・２の概要

・緊急車両が移動出来る幅員を持たせる。

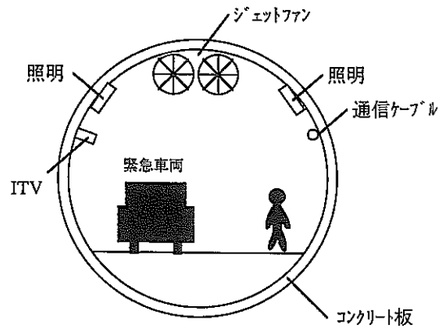


図　避難用斜坑１・２の断面図

■安全空間（避難通路）の概要

・風門、防火戸閉鎖の場合、バイパスから避難

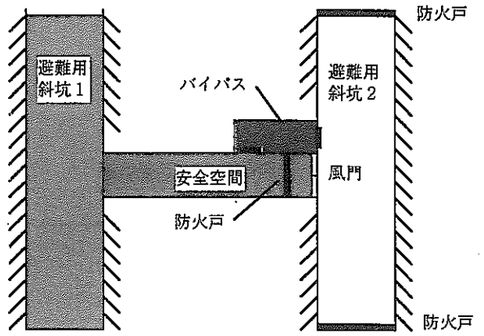


図　避難用斜坑の平面図

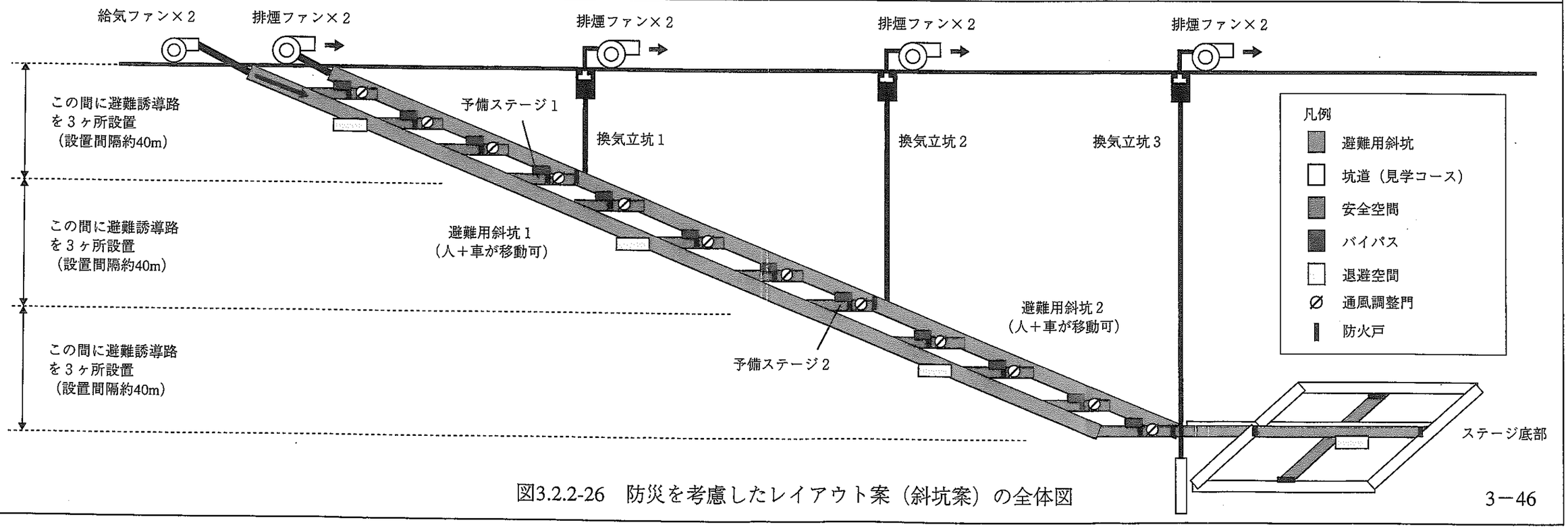


図3.2.2-26　防災を考慮したレイアウト案（斜坑案）の全体図

地下研究施設の底部レイアウト案

■基本レイアウト

■利用想定

(1) 試験用坑道（見学コース）が水平及び垂直に展開

(2) 坑道末端部では行き止まり

■防災上の課題点

(1) 火災発生場所によっては、安全区間に到達不可

(2) 避難方向が１経路のみ

(3) 避難と排煙の経路が同一

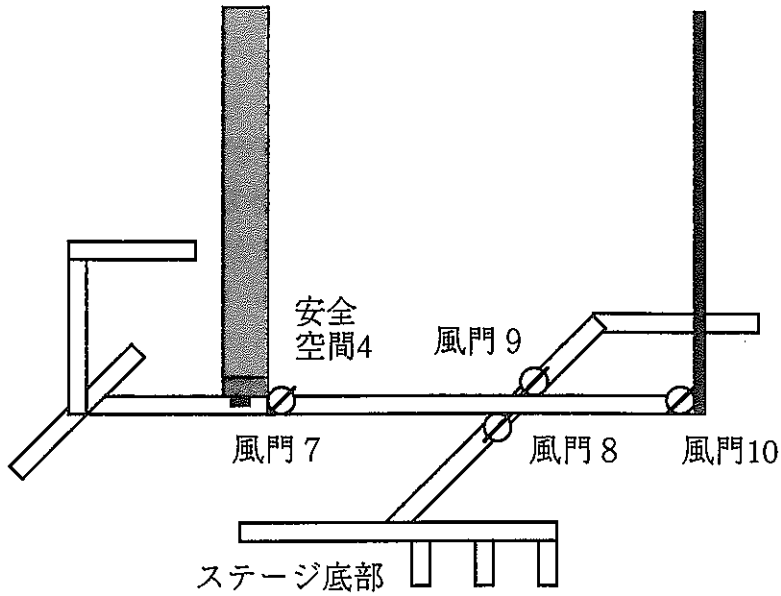


図　基本レイアウトにおける底部

■防災を考慮したレイアウト案

■利用想定

(1) 試験用坑道（見学コース）が回廊形式で水平に展開

(2) 地上へ避難可能な経路（立坑、斜坑）をつなぐ避難専用の安全空間を設置

■防災を考慮した点

(1) 出火場所に関係なく、２方向の避難経路を確保

(2) 煙の影響を受けない安全空間を通じた避難

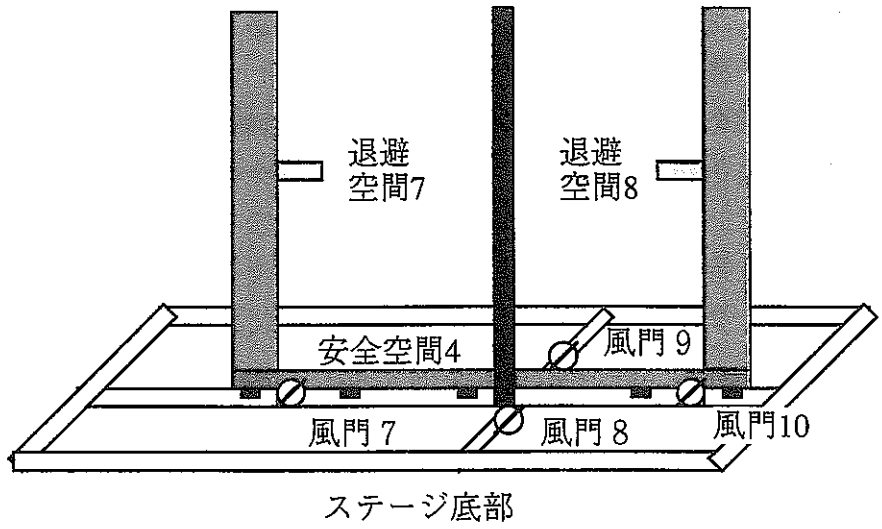


図　防災を考慮したレイアウト案における底部

図3.2.2-27　地下研究施設の底部レイアウト案

3.2.3 まとめと今後の課題

3.2 章では、地下研究施設に見学者を入坑させる上で重要となる火災対策を、災害事例や地下研究施設での火災シナリオ、また防災を考慮したレイアウト案等からまとめた。

(1) 「3.2.1 章　地下施設の基本的な防災計画のまとめ」

「建築物における火災対策の基本構成」では、地下研究施設の具体的な防災の基礎的資料として、性能的な火災対策が取られた「法 38 条大臣認定」物件、地下研究施設（青函トンネル、地下コンサートホール）での火災対策事例、また地下施設に関わる法規制をまとめた。

また「法 38 条大臣認定」物件では煙制御に有効な加圧防排煙システムの内容を、地下研究施設の火災対策事例では防災のコンセプト及び防災施設・設備の仕様を、さらに地下施設に関わる法規制では建築基準法、消防法、5 省庁通達、建設省告示をもとに、建築系・設備系・管理系の観点から法規制の一覧表をまとめ、地下研究施設で考慮すべき対策及びその法的根拠を明らかにした。

「地下研究施設の火災事例の分析」では、既存の研究資料から参考となる 6 つの火災事例を取り上げた。そしてこれら実際に発生した火災事例をもとに、地下研究施設の火災対策を考える上で必要となる火災発生要因や被害拡大要因を抽出し、地下研究施設で想定される火災被害の様相（火災シナリオ）を作成する基礎的資料をまとめた。これより、火災対策の不備といったハード面の火災対策だけでなく、初期対応の不手際や火災発生後の避難誘導の失敗等、ソフト面の火災対策の重要性が明らかとなった。

(2) 「3.2.2 章　地下施設の具体的な防災計画のまとめ」

「地下研究施設のレイアウト案、施設概要及び施設利用計画」では、サイクル機構から提示された立坑案と斜坑案の概要を示し、各レイアウト案の各部（主立坑・斜坑、換気立坑、試験坑道、連絡坑道）の予想される利用形態をまとめた。この利用形態を前提として、その後の章で具体的な防災対策をまとめた。

「地下研究施設における火災シナリオの構築」では、「地下研究施設の火災事例の分析」で整理された各被害項目を提示された地下研究施設に適用し、想定される火災被害を地下研究施設の場所毎・火災進展別にまとめた。これによりどの対策が奏功しない場合、最終的にどの様な火災被害に進展するのかを明らかにした。これにより、地下研究施設の防災を考える上で、重要となる対策と設置場所の基礎的資料をまとめた。

「地下研究施設での防災計画の方針」では、「地下研究施設における火災シナリオの構築」で明らかとなった、地下研究施設における火災被害の進展状況と火災対策との関係から、火災対策の一覧表を整理した。この表中には、想定される火災被害及び危険性から見た防災基本コンセプトの構築、防災基本コンセプトに応じた各

められている。これより、地下研究施設の各場所においてどの対策を取るべきか判断しやすい内容となっている。

「防災を考慮した地下研究施設のレイアウト案」では、これまでまとめてきた火災対策等の中で、地下研究施設に影響を与える6つの火災対策を示し、「地下研究施設のレイアウト案」で提示された立坑案と斜坑案の各々において、ベースとなる「基本レイアウト案」と、防災を考慮したレイアウト案を示した。レイアウト案の提示では、利用想定、避難計画、排煙計画の観点から整理を行うとともに、避難安全性の向上として取り上げた安全空間の仕様等を具体的に提示し、それら対策がどのような火災安全対策として機能するかを明らかにした。

(3) 本章の考察

本章では地下研究施設の防災を検討する上で、「どの様な火災状況を想定し、どの様に見学者等を安全に避難させるか」という防災の基本計画から、具体的に防災を考慮した地下研究施設のレイアウトまでを提示した。特に防災を考慮したレイアウト案では、以下の点を考慮して立案した。

1) 基本レイアウト案

基本レイアウト案は防災を検討するにあたり、そのモデルとして設定したレイアウトである。本章ではレイアウトを変更しない範囲内で、見学者の安全性を高める方策を整理した。しかし縦の避難動線が一方向しかない等、いくつかの課題点が残る。

2) 防災を考慮したレイアウト案

基本レイアウト案をもとに、見学者が施設内全域を見学するという前提で、見学者の安全性を確保したレイアウト案である。なお見学者の安全性確保に関して、建築基準法及び消防法等、地上施設で採られるレベルを設定した。

以上の2つのレイアウト案は、防災を考慮したレイアウト計画では両極に位置するが、地下深度500mという環境下において、見学者の安全性を確保するためには、防災を考慮したレイアウト案レベルの対策は必要と思われる。
ただし地下研究施設は地上施設と異なり、引率者による見学・避難誘導といった特殊要因もあり、その安全基準の明確な設定は難しい。このように、本章での検討結果は定性的な検討に留まっているが、今後煙流動や避難移動といった以下に示す定量的な解析を実施し、様々な対策のブラッシュアップを行う必要があると考えられる。

1) 火災発生パターンに応じた煙流動解析と排煙計画の有効性の検討
2) 避難解析による避難完了時間の把握と煙汚染による被害の検証
3) 解析結果に基づく避難計画及び消防計画の再立案

(4) 今後必要となる情報

今後、煙流動や避難移動といった定量的な解析を実施し、様々な対策のブラッシュアップを行うためには以下の情報が必要となる。これら情報の中には、仮定条件も一部必要となると思われるが、特に地下研究施設の利用形態をより詳細に決めていく必要がある。

1) 火災発生パターンに応じた煙流動解析と排煙計画の有効性の検討

火災発生パターンを定義するために、施設の利用形態（研究ゾーン、通路、設備室等）を明確にするとともに、ゾーン毎の持ち込み可燃物量を設定する情報が必要となる。またその可燃物から発生する煙の流動解析に必要となる、地下施設内の環境設定（坑道長さ、断面積、壁面仕様、坑道内温湿度等）の情報が必要となる。

2) 避難解析による避難完了時間の把握と煙汚染による被害の検証

避難時間算出において、見学者の属性･人数、また見学ゾーンの設定が情報として必要となる。特に見学ゾーンとその利用形態は防災対策のレベルに影響を与えるため、明確に見学ゾーンを計画する必要がある。

3) 解析結果に基づく避難計画及び消防計画の再立案

消防隊の駆け付け時間や消火活動の対応可否を検討するために、地下研究施設と消防施設との距離設定、消防資機材、消防隊員人数等の情報が必要となる。

参考文献

1)「火災時の煙に関する性能評価と安全設計」，日本建築学会 煙性状・避難小委員会，1997.10.3

2)「トンネル火災の現状と対策」，日本火災学会，1997.1

3)「防災安全性についての研究報告書」，（財）日本建築センター 大規模地下建築物研究会，1994.3

4)「地下空間に関わる安全・防災対策に関する調査研究報告書」，（社）日本損害保険協会等，1991.10

3.3　地下施設の工程に関する検討

ここでは、地下施設の建設工程に関する検討を行う。

先ず初めに、サイクル機構より提示されたレイアウト（基本レイアウトおよび建設工程）について検討を行う。

次に、建設工程に影響を与える因子の検討を行い、基本レイアウトに対する適用性を検討する。

また、防災を考慮することによる影響を検討するため、3.2での検討結果から得られた防災を考慮したレイアウトについて、建設工程の検討を行う。

3.3.1 基本レイアウトの建設工程の検討

(1) 目的

地下施設の工程に関する検討の基本とするため、基本レイアウトに対する建設工程の検討を行う。

(2) 基本レイアウト

サイクル機構より提示された基本レイアウトのうち、立坑案を図3.3.1-1に、斜坑案を図3.3.1-2に示す。

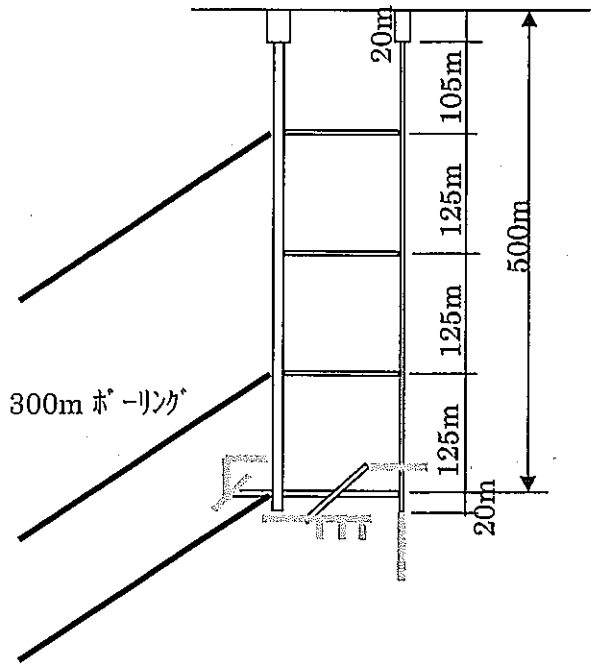


図 3. 3. 1-1　立坑案（基本レイアウト）

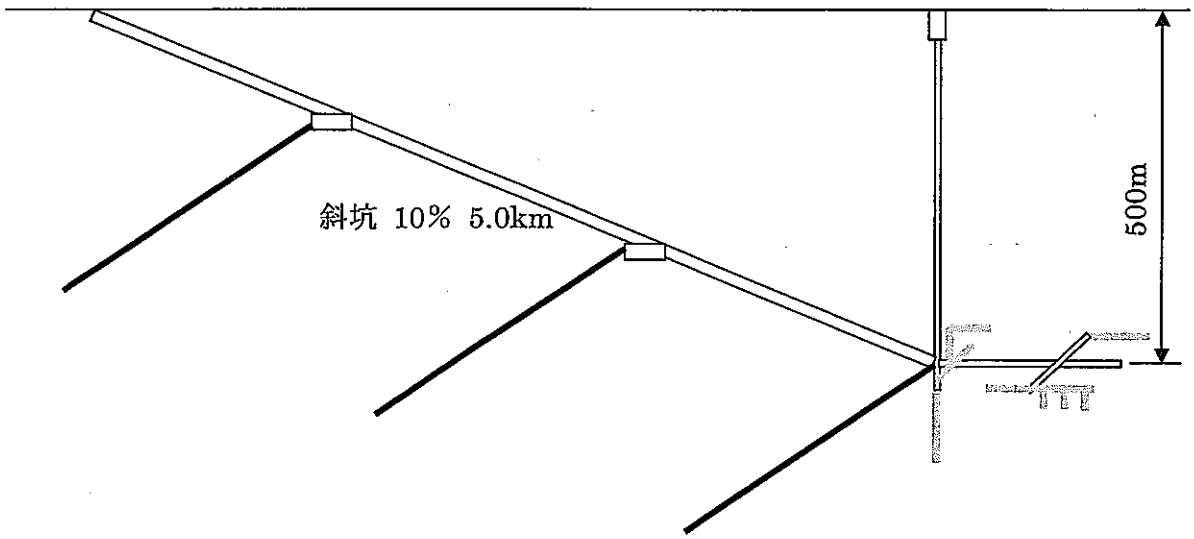


図 3. 3. 1-2　斜坑案（基本レイアウト）

(3) 建設工程の検討条件

地下施設の各部位の掘進速度については、今回の検討目的を考慮し、サイクル機構の提示から表 3. 3. 1-1 のように概略設定した。

表 3. 3. 1-1　掘進速度の設定

部位	仕様／工法	掘進速度 [1]
主立坑	仕上がり内径φ6. 0m／ｼｮｰﾄｽﾃｯﾌﾟ工法	25m／月
換気立坑	仕上がり内径φ6. 0m／ｼｮｰﾄｽﾃｯﾌﾟ工法	25m／月
アクセス斜坑	仕上がり内径φ7. 0m程度の三心円馬蹄形（複線断面）／機械掘削	60m／月
連絡坑道（底部水平坑道）	仕上がり内径φ4. 5m程度の三心円馬蹄形（単線断面）／機械掘削	30m／月
予備ステージ	立坑方式の場合、深度100m毎に1ヶ所、断面は底部水平坑道と同一／機械掘削	1. 5ヶ月／ヶ所
坑内ボーリング	300m／本	6ヶ月／本

1）掘進速度はサイクル機構より提示

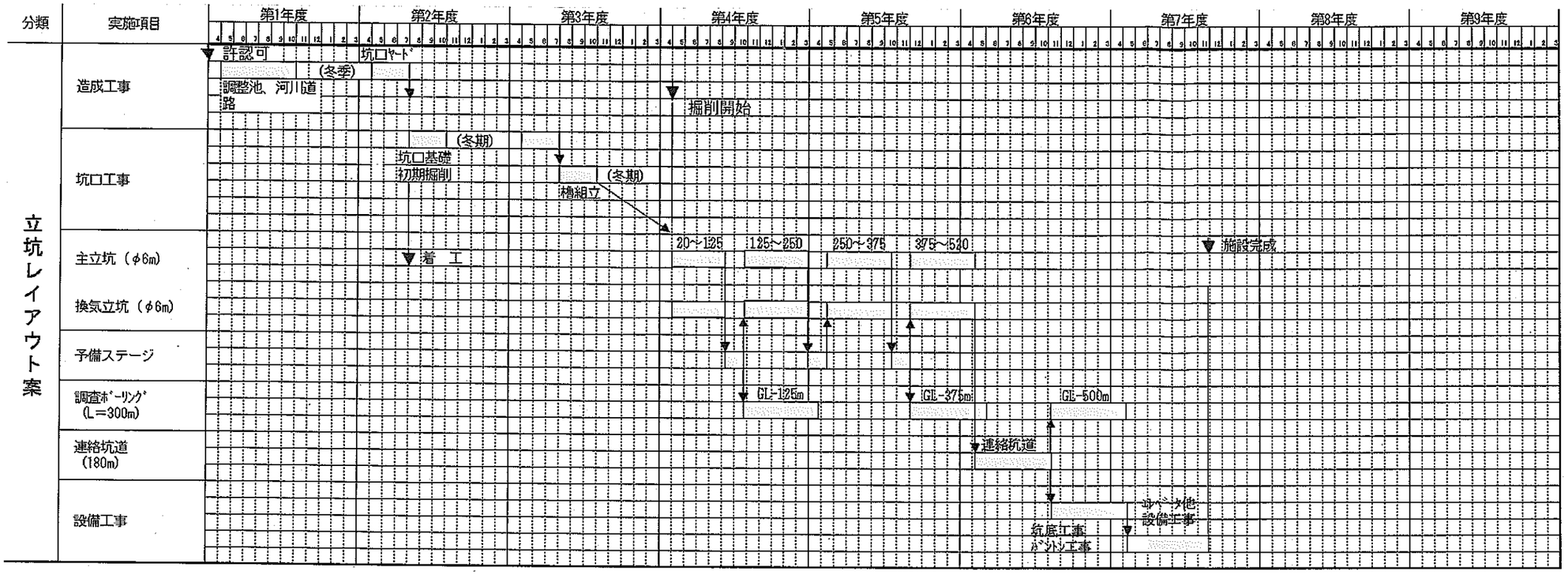
(4) 建設工程の検討結果

立坑案および斜坑案（基本レイアウト）の建設工程をそれぞれ表 3. 3. 1-2 および表 3. 3. 1-3 に示す。

基本レイアウトのうち、立坑案では第 2 年度に着工すれば、第 7 年度に施設完成の見込みで、施設完成までに約 64 ヶ月を要する。

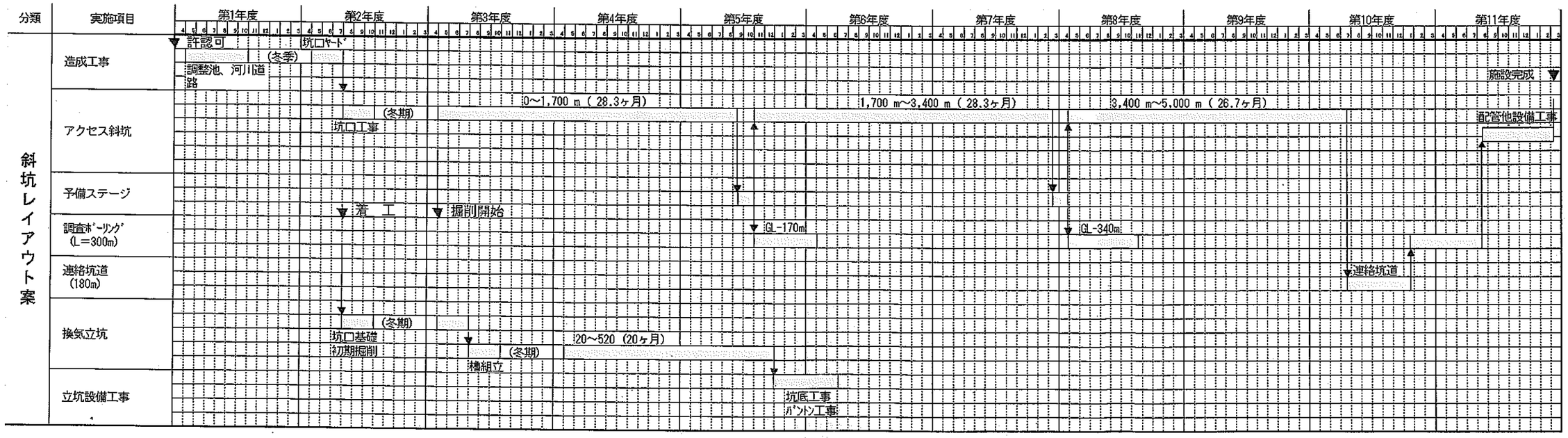
斜坑案では第 2 年度に着工すれば、第 11 年度に施設完成の見込みで、施設完成までに約 115 ヶ月を要する。

表 3.3.1-2　立坑案（基本レイアウト）の建設工程



*換気立坑と主立坑は、同一断面、同一工程と仮定した。

表 3.3.1-3　斜坑案（基本レイアウト）の建設工程



3.3.2 建設工程に影響を与える因子に関する検討

(1)目的

当該地点は堆積軟岩から成ることから、地下研究施設の施工中または共用中にガス発生、湧水、地山の押出し等の突発的な事象が予想される。これらの事象は地下研究施設の建設工程に何らかの影響を与えると考えられるため、その程度を事前に把握し、余裕を持った建設工程を考慮しておくことが必要である。

また、冬期における施工についても、同様の理由から、上記項目に含めて検討を行うことが必要である。

(2)調査対象と調査項目について

調査項目は、ガス、湧水、地山の押出し、季節的制約の 4 項目とした。

ガスについては、炭鉱における事例も参考になると考えられることから、山岳トンネルに加えて炭鉱での事例も併せて調査した。先ず、ガス発生量を推定する方法について調査したうえで、ガス対策の内容やそれが建設工程に与える定性的な影響を事例調査により検討した。

湧水、地山の押出し、季節的制約については、山岳トンネルを対象に、その対策が主として建設工程に与える概略の影響を事例調査により検討した。

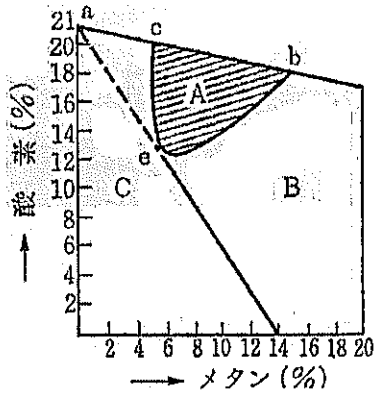
(3)ガス対策についての調査結果

調査対象はトンネルおよび鉱山とした。トンネルのうち、シールドトンネルについてもメタンガスが発生した事例はあるが、深地層の研究施設とは掘削深度、掘削方法、支保工などの仕様が大きく異なるため対象外とし、トンネルについての調査対象は山岳トンネルのみとした。先ず、メタンガスの性状について述べ、その後、ガス発生量を予測する手法の調査結果を、さらにトンネルおよび鉱山における事例調査結果を示す。

1)メタンガスの性状について

メタンガスは、無味・無臭・無色の可燃性ガスで、その比重は空気に比べ 0.554 と極めて軽い。爆発限界は 5～15%であるが、9%のときがその爆発力は最も激しく、5%以下になれば火源の周りで青炎を放って燃焼するが、他の部分へは伝播しない。また、15%以上になると火源の周りで青炎を放って燃焼するが、爆発はしない。さらに濃度が増すと酸素量が不足し燃えなくなる。しかし、濃厚な場合は必ず空気と混合し、爆発限界のガスになる。

メタンの爆発限界を図示すると、図 3.3.2-1 のようになる。A の範囲が爆発限界、B の範囲は適量の空気が混入すると爆発限界へ移行することを示している。C の範囲にあれば爆発しない。



a：酸素21%，窒素79%の通常組成の空気
c：爆発限界の下限
b：爆発限界の上限
a, c, b：メタンが下欄のパーセントが加わった場合の酸素のパーセントを示す。
A：爆　発
C, B：不　爆

図 3.3.2-1　メタンガス濃度と爆発限界の関係

2)ガス発生量を予測する手法の調査

トンネル掘削に伴うメタンガス発生量の推定方法としていくつかの方法があるが、いずれも多くの仮定に基づかざるを得ず、十分な精度を持つとは言えない。

以下に、ガス発生量を予測する手法として、推定式による方法と数値解析による方法を示す。

(i)推定式による方法

(a)影響範囲の設定による発生量の推定(平松の式)

トンネル掘削によるメタンガスを含んだ地山への影響範囲を想定し、ボーリングコア内のガス含有量分析結果をもとにトンネル内への湧出量を以下の式により想定する。

$$Q_G = \pi \cdot \left(\frac{D + 2\beta D}{2}\right)^2 \cdot (X + \alpha D) \cdot \gamma_t \cdot q \cdot \frac{1}{24 \times 60} \quad \cdots\cdots (1)$$

ここに、

Q_G:メタンガス湧出量(m^3/min)

D:トンネル掘進径(m)

X:1 日のトンネル掘進長(m)

γ_t:地盤の単位体積重量(t/m^3)

q:メタンガス濃度の測定値(m^3/t)

α:切羽前方の影響範囲に関する係数

β:半径方向の影響範囲に関する係数

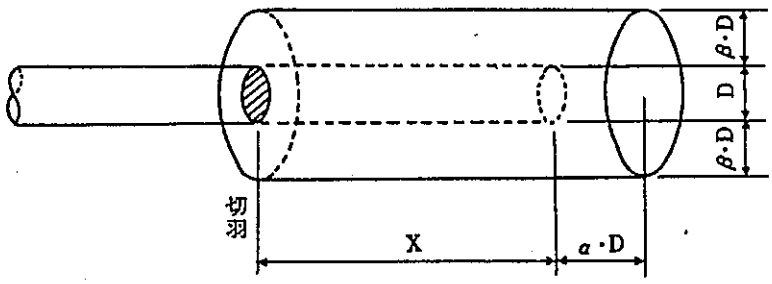


図 3.3.2-2 推定式(1)概念図

(b)水溶性ガスが大部分とみなして湧水量と溶存量より推定する方法

地下水に溶解しているメタンガスが掘削に伴う静水圧の低下により遊離湧出するとき、以下の式で水溶性ガス発生量が求められる。

$$Q_G = Q_W \cdot \alpha(1+p) \quad \cdots\cdots (2)$$

ここに、

Q_G:メタンガス湧出量(m^3/min)

Q_W:想定湧水量(m^3/min)

α:メタンガスの溶解度(Bunsen 吸収係数、水温 15℃で気体の分圧が 1 気圧のとき 0.0369)

p:水圧(kgf/cm^2)

(ii)数値解析による方法

石油・ガス開発で用いられている貯留層解析法について述べる。

貯留層解析法は、貯留岩や流体の特性を基に、種々の条件下におけるガスの排出経時変化を予測解析する方法であり、具体的には以下の段階により実施される。

①貯留岩や流体等の各種データの取得

②モデルによる数値シミュレーション

貯留層解析には種々のデータが用いられるが、そのうち主要なデータは、表 3.3.2-1 に示すとおりである。これらのデータは、ボーリング孔を利用した試験や、ボーリングにより採取されたコアや流体試料の分析により得られる。

表 3.3.2-1　貯留層解析に必要な主要データ

	主要データ
貯留特性	孔隙率 浸透率(絶対浸透率、有効浸透率) 飽和度 毛細管圧力
流体特性	流体の種類 組成 圧力(初期地圧、圧力の経時変化) 排出量 温度 性状(粘性等)

(石炭層ガスの予測方法)

坑内炭鉱開発に際しては生産性や安全確保上炭層ガス発生予測を行う必要がある。また近年石炭層ガスをクリーンエネルギー資源として単独に開発すること(コールベットメタン開発)も進められている。したがって、坑内炭鉱でのガス湧出量や石炭層ガス回収量予測にモデルを作成してのコンピュータシュミレーション技術が広く用いられている。現在世界中で種々のシミュレーション用ソフトが使用されているが基本的には、

①石炭層中のガス流体の流動を予測する方法

②岩盤力学に基づき採掘による上下盤応力変化からガス発生量を予測する方法

のいずれかの方法が用いられる。

①の方法は炭鉱開発にもコールベットメタン開発にも適用可能なことから広く普及しており、代表的ソフト（商品名）としては「COMET2(米国、Advanced Resources International,INC.)」、「COALGAS(米国、S.A.Holditch & Associates,INC)」等がある。

COMET2、COALGAS 等のソフトを使用してシュミレーションが可能な項目は下記のとおりである。

a)原位置炭層ガス資源量

b) 坑道展開中のガス湧出量

c) 採炭切羽へのガス湧出量

d) 地表ガス抜き試錐によるガス回収量

e) 沿層ガス抜き試錐によるガス回収量

f) 貫層ガス抜き試錐によるガス回収量

g) 払跡ガス抜き試錐によるガス回収量

②の、採掘による上下盤応力変化からガス発生量を予測する方法は、採掘炭層からの湧出ガスに加えて採掘の影響を受けた上下盤の応力変化領域あるいは緩み領域中の未採掘炭層や含炭質物層からの湧出ガス量を推定する手法であり、ロングウォール採炭切羽からの湧出ガス量の推定や採炭切羽へのガス抜き試錐計画等で多く利用さ

れている。代表的ソフト（商品名）としては「ROOFGAS/FLOORGAS（豪州、Lunagas Pty Ltd.）」等がある。

ROOFGAS/FLOORGAS では、採炭切羽上盤については連続剥離解析を、下盤については弾塑性解析を行う。したがって、入力データとしては上下盤を含む地層やガス包蔵量等の地質データや採炭方法の基礎的データ以外に、岩石強度や地山応力等の岩盤データを必要とする。

（石油・ガス開発分野での予測方法）

石油・ガス開発に際しては可採埋蔵量の変化状況、生産レートの挙動、最適生産計画等を知る必要上、種々の条件下での油・ガス層の挙動をシュミレーションする「油・ガス層シュミレーション」が広く使われている。地層中に石油やガスが賦存する地域では、この油・ガス層シュミレーション技術を応用して地下施設を建設した場合のガス発生量予測が可能と考えられている。

石油・ガス開発調査では、試掘、石油・ガス層評価（含石油・ガス層シュミレーション）の順で実施される。

試掘は油・ガス徴個所の確認や、油・ガス層の概略能力を把握すると共にその後に行う油・ガス層評価に要する各種データを取得することを目的として実施される。

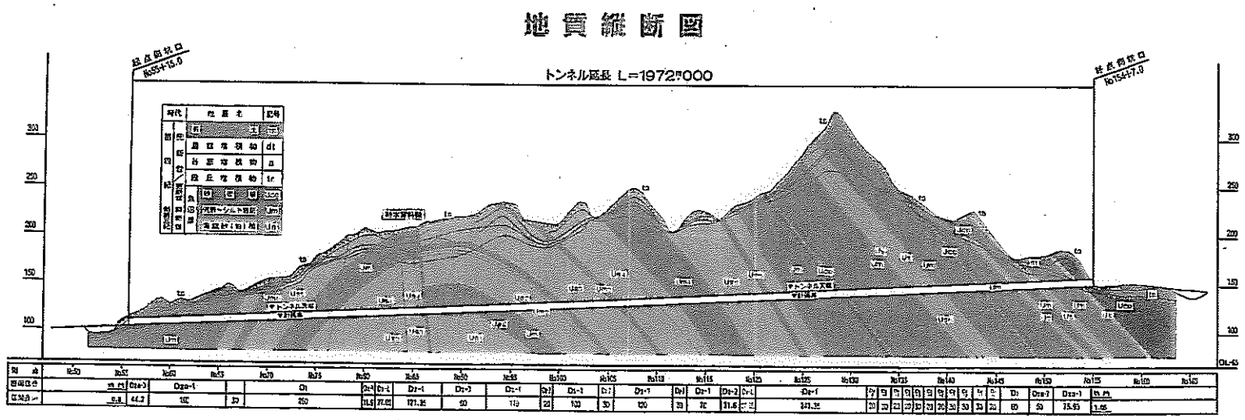
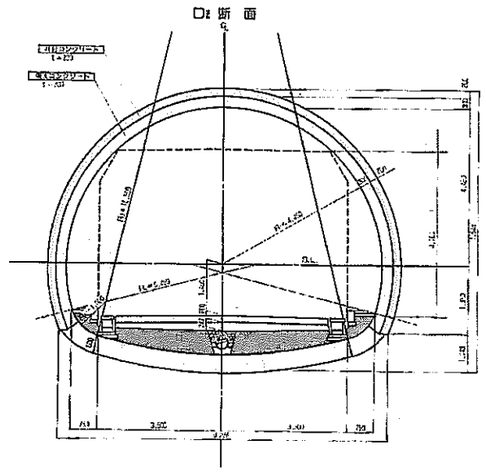
油・ガス層シュミレーションは、油・ガス層評価の一環としてさまざまな条件下における油・ガス層の挙動を予測するため、試掘等により得られたデータに基づき行われる。シュミレーションソフトウェアは現在多数存在し、石油公団油層研究室のみでも現在 IMEX,GEM,STARS の三種のソフトが使用されている。

3)トンネルおよび鉱山における事例調査結果

トンネルについては、Sトンネル、Kトンネル、Nトンネル、Mトンネルでの事例を表 3.3.2-2 から表 3.3.2-5 にまとめた。

鉱山については、10 地点の鉱山における事例を表 3.3.2-6 にまとめた。

表 3.3.2-2 山岳トンネルでのメタンガスが発生した事例(1)

地点名	Sトンネル
発注者	新潟県
施工時期	平成 4 年 11 月～平成 13 年 3 月
施工方法	機械掘削、NATM
対象地質	更新世の魚沼層内にある。魚沼層泥岩、砂岩、礫岩から成る層厚 600-1000m の堆積層である。 本トンネルのほぼ中央に位置する背斜軸付近で泥岩はキャップロック的役割をなし、砂岩はガスの胚胎層を形成していたと考えられる。
標準断面図 地質縦断図	 地質縦断図 
断面(m^2)	$60m^2$
掘進延長(m)	1,972m
メタンガス湧出量 v(%)	背斜軸付近で約 100 ﾘｯﾄﾙ/min の湧水とともにメタンガス・石油の湧出を確認した。 湧水孔孔口、支保工と吹付けコンクリートとの境目、ロックボルトの座金の裏で検出したメタンガス湧出量は、0.25-0.8vol%であった。 気圧一定時の坑道での濃度はほぼ 0%で、気圧の低下時に濃度が上昇する傾向があった。

メタンガス対策 （建設工程について）	一例として、その5工事の建設工程を以下に示す。 その5工事の内容（トンネル工事 延長：620m、掘削工期：10.8ヶ月、注入他：3.2ヶ月）

	対　策	概　要	工　程 （全体）
1	調査コアー ボーリング	・切羽前方の地質、メタンガスの有無・含有量・種類、湧水の有無等を調査する目的である。 ・上半切羽より　L＝155m	７日 （昼夜）
2	先進調査 ボーリング	・切羽前方のメタンガスの存在、突発性ガスの有無を確認し、調査する目的である。 ・上半切羽より30m毎に40m×2本（左右各１本、カバーロック10m） ・削孔はドリフタージャンボによる。	40m×2本の施工に0.5方
3	さぐり削孔 ボーリング	・先進調査ボーリングの他に、更に綿密にガスの有無、ガス噴出の有無を確認する目的である。 ・上半切羽より10m毎に15m×2本（断面内、カバーロック5m）	15m×2本の施工に0.25方
4	ガス測定員の配置	・メタンガス測定（定時、火気取扱い作業時、他）のため、専任の測定員を置いた。	
5	自動警報装置、 自動検知電源遮断装置	・坑内の切羽（風管先端より30m後方）および100m毎に検知器を設置し、自動警報、自動電源遮断装置を設置した。	
6	換気設備：換気容量、 運転時間	・通常の換気設備の約2倍の換気容量をもつ設備を2系列設置した。 ・１系列については作業休止期間も運転した。	
	換気設備：非常用電源	・停電時の換気設備の動力のために、非常用電源設備を設置した。 200KVA 発電機、自動切替え設備	

出典	大成建設（株）土木技術資料、他

表 3.3.2-3 山岳トンネルでのメタンガスが発生した事例(2)

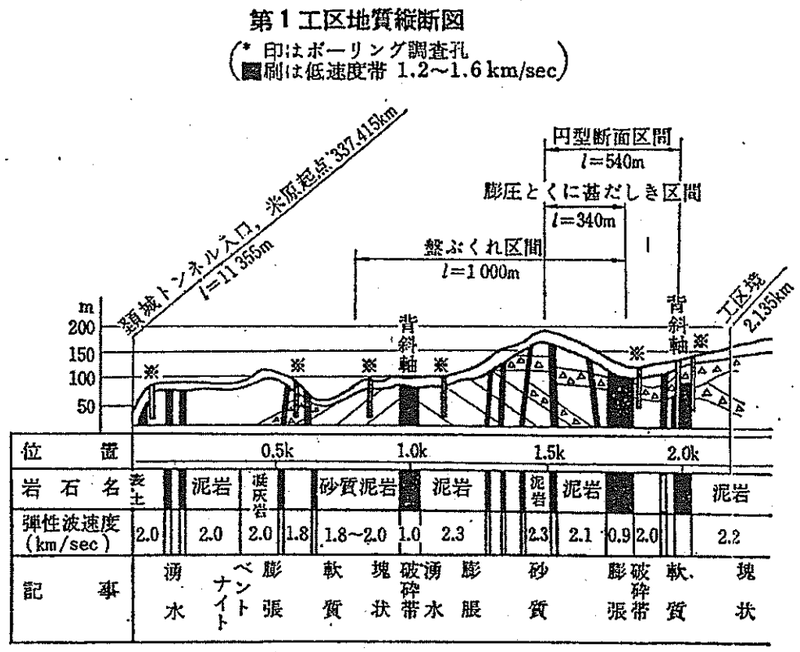
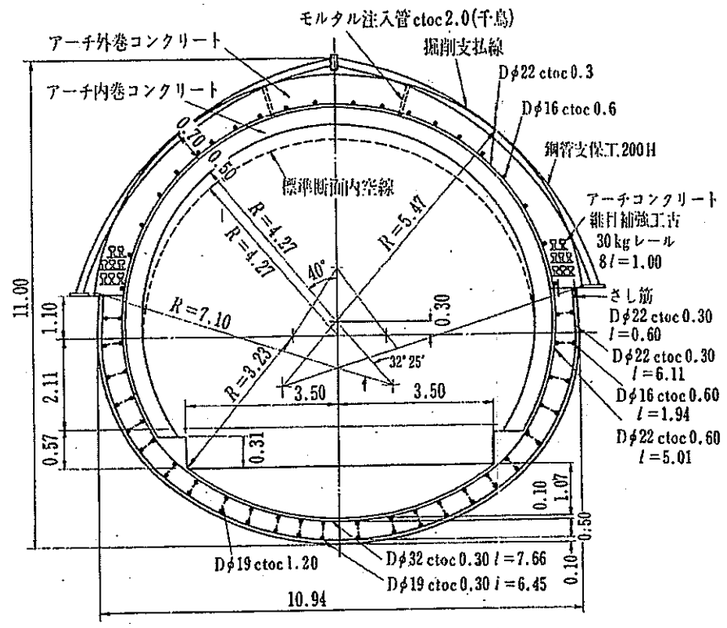
地点名	Kトンネル
発注者	国鉄
施工時期	昭和 41 年 2 月～昭和 44 年 3 月
施工方法	底設導坑先進上部半断面掘削逆巻方式を標準
対象地質	泥岩、シルト岩、砂質泥岩を主とし、一部に凝灰岩、ベントナイト層をはさんでいる。 糸魚川ー静岡構造線地帯にあるため地質構造的に極めてもまれた地域で、大きな褶曲と多数の断層がある。
地質縦断図		 地質縦断図　　標準断面図
断面(m²)	68.4 m²
掘進延長(m)	11,355 m
メタンガス湧出量 v(%)	記述なし。
メタンガス対策	・掘削方式は、地質の変化が激しいと予想されたので、地質調査ができ、あらかじめ湧水をしぼることができるよう、底設導坑先進上部半断面掘削逆巻方式を標準とした。 ・調査ボーリングの結果、メタンガスの湧出することが分かったので、炭鉱において取られている安全対策を参考にしてガス検定の追加示方を行い、これを忠実に実行したため事故なしで済んだ。 ・ガス検定等のために約 4,000 万円の経費をかけた。 ・本トンネルの施工にあたり、「北陸本線糸魚川～直江津間地質調査委員会」が組織された。 ・この委員会で地表踏査、航空写真の判読、弾性波調査、ボーリング調査など約 3000 万円をかけて調査を行い、特にルート上避けるべき危険な地すべり地帯を抽出した。
他の施工上の問題点	膨張性土圧
出典	金原、美藤、原:強大な膨張性土圧を受けた頸城トンネルの施工、土木学会誌 54-5、1969

表 3.3.2-4 山岳トンネルでのメタンガスが発生した事例(3)

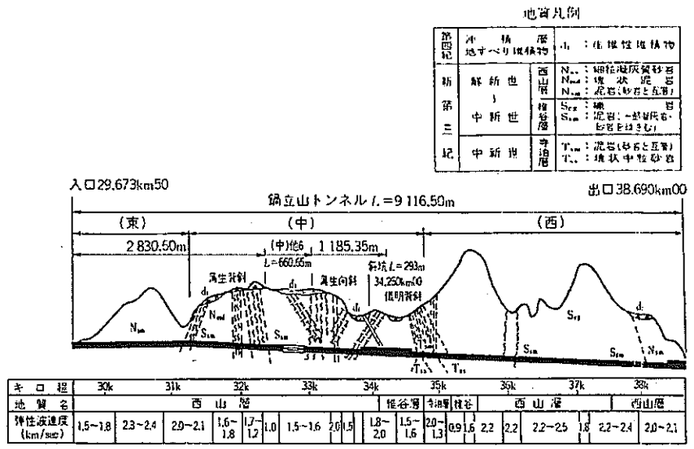
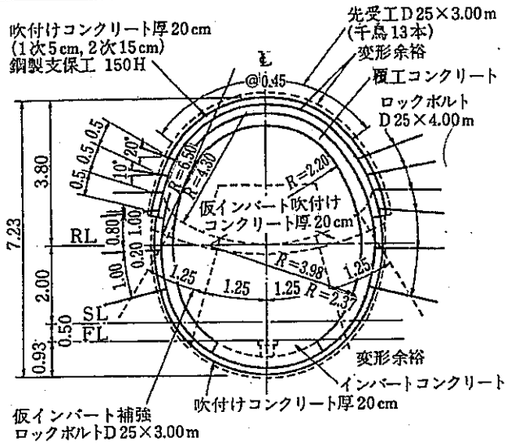
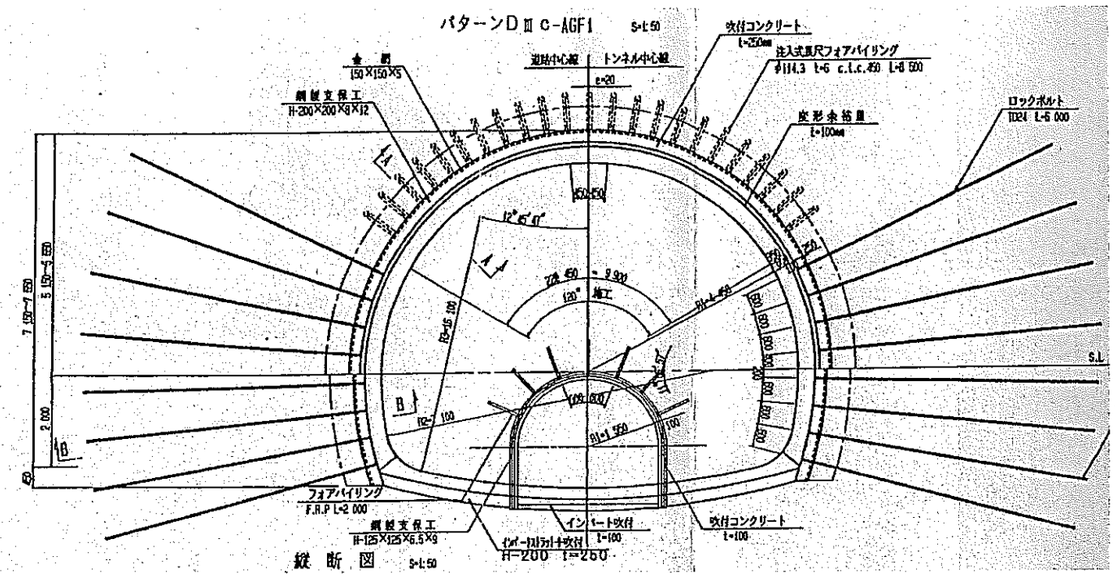
地点名	Nトンネル
発注者	日本鉄道建設公団
施工時期	昭和 48 年 12 月～平成 4 年 10 月
施工方法	NATM、機械掘削 上半は防爆型カッターローダー(CL101UB)、下半は防爆型バックホウ(YS30-E)を使用した
対象地質	主に泥岩から成る。
	 地質縦断図  断面図
断面(m²)	約 40m²
掘進延長(m)	645m(中 6 工区); 全長 9,117m
メタンガス湧出量 v(%)	記述なし。
メタンガス対策	この地域(東頸城地域)は古くから石油および天然ガスの産出で知られており、泥岩などにおいても断層を伴った褶曲構造などの地層中に胚胎する。 構造性ガスで地山崩壊などに伴い大量な遊離ガスの発生の危険があり、施工実績、地質調査の結果でも可燃性ガスの湧出が予想されたため、中 6 工区の掘削においても爆発災害の防止を最重点に安全対策に万全を期した。 1.ガス検知体制: 検定器により毎日切羽ごとにガス検定を行った。ガス自動警報装置は、安全限界濃度(1.0%)に装置をセットし、坑口付近で集中管理を行った。 ガスクロマトグラフによる分析の結果、メタンガスが全体の 99.5%を占めた。分析結果から、混合ガスの爆発下限界値から作業基準を以下のように定めた。 ・0.5%未満:平常作業 ・0.5%以上:作業規制、ガス測定強化 ・1.0%以上:作業中止、退避 ・ 1.5%以上:電源遮断 2.換気設備: 未施工区間でのガスの停滞、ガス湧出のおそれから、既設の換気立坑(φ900mm)による強制排気式と送気式の併用とした。 3.防爆設備: ・掘削箇所ー覆工箇所の設備は耐圧防爆構造とした。 ・覆工箇所ー立坑間の電気設備、配線は安全増防爆構造とした。 ・掘削箇所ー覆工箇所において稼働する機械および同区間を走行するものは耐圧防爆構造とした。
他の施工上の問題点	膨張性土圧
出典	谷、小島:超膨張性地山へ再挑戦 北越北線鍋立山トンネル、トンネルと地下、第 17 巻 10 号、1986

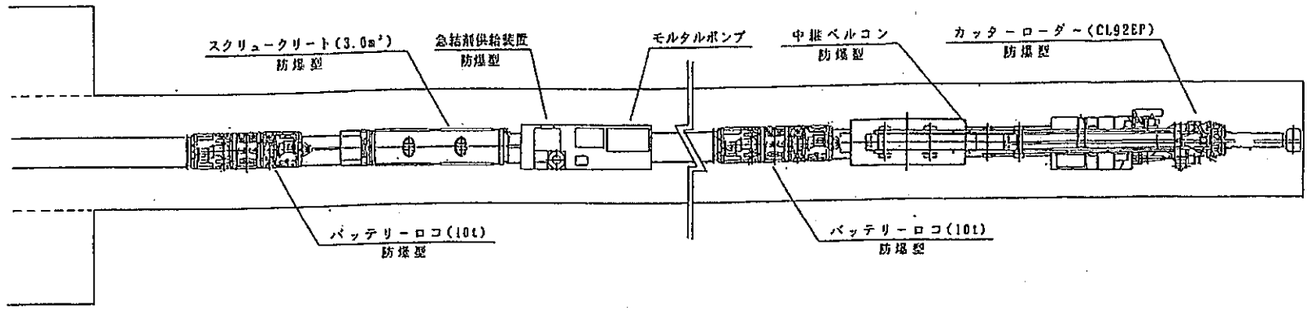
表 3.3.2-5 山岳トンネルでのメタンガスが発生した事例(4)

地点名	Mトンネル
発注者	新潟県
施工時期	平成 4 年 9 月～平成 11 年 3 月
施工方法	NATM、機械掘削 坑口部は側壁導坑先進上半リングカット工法 以後、上半先進ショートベンチカット工法、底設導坑先進工法
対象地質	砂岩・泥岩の互層(トンネル全線で新第三紀の椎谷層) 坑口から約 850m 付近を背斜軸とする褶曲構造
支保パターン図	 支保パターン図(底設導坑部)
断面(m^2)	掘削断面積:本坑部約 70m^2、底設導坑部 8.8 m^2
掘進延長(m)	トンネル掘削延長 1,070m、底設導坑掘削延長 654m
メタンガス湧出量 v(%)	掘削時に背斜軸部付近でメタン、エタン、プロパン、ブタンから成るガスが発生し、爆発下限界が 1.7%まで低下した。 背斜軸部の両側区間では成分がほとんどメタンから成るガスが発生し、爆発下限界は約 5.0%であった。 切羽での可燃性ガス濃度は最大 12%LEL(0.6%)であり、換気量の増強により改善された。
メタンガス対策	1.メタンガス対策について 1)調査工事 コア評価(コア観察、ガス分析等を行う。)、湧水評価(湧水が認められる場合は、湧水圧および湧水量の測定、湧水採取とガス分析を行う。)、ガス評価(ガス泄出が認められる場合は、掘削完了後ガス圧およびガス量を測定し湧出区間を特定する。また、ガス分析を行う。) 掘削状況評価(掘削排水にガス混入の有無を確認し、1 日 3 回以上ガス検知器によりガス湧出箇所の特定を行う。) コア、湧水、ガスは所定の採取法で採取し分析機関でガスクロマトグラフ法により分析した。ガス検知器は接触燃焼式、本質安全防爆構造を使用した。

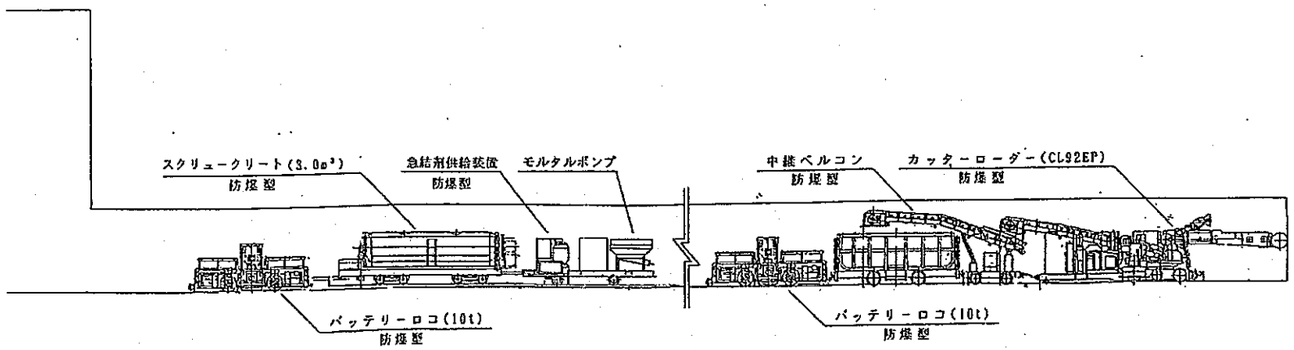
2)底設導坑

調査導坑とガス抜きを兼ねてメタンガス湧出が想定された650m間で掘削面積8.8 m^2の底設導坑を先進させた。
内燃機関の防爆改造が不可能なため底設導坑先進レール工法を採用した。

底設導坑施工次第図を以下に示す。
カッターローダー(CL92EP)、バッテリーロコ、中継ベルコン、給結剤供給装置、スクリュークリートは防爆仕様となっている。



底設導坑施工次第図(平面図)



底設導坑施工次第図(断面図)

(3)施工機械および坑内電気設備の防爆化
施工機械および坑内電気設備をすべて防爆構造とした。防爆の構造上、期間および費用の点から改造および変更が容易にできないことから計画時より慎重に検討した。
(4)換気計画

掘削時に切羽から発生した可燃性ガスを直接坑外に排気するように吸出し方式とし、既設の本坑部に可燃性ガスが滞留しないようにした。
導坑内でメタンレアーを発生させないため、風速0.5m/s以上を確保する必要があり、換気量を毎分300m^3以上とした。また、切羽での停滞を防ぐため局所換気を併用した。

2.防爆費用について
上記650m区間で、諸設備、機械費の防爆のための変更分の割合は約75%増加した。

他の施工上の問題点	(1)補助工法について 天端付近より湧水を伴う砕石状の泥岩の崩落が数度わたり発生した。この切羽安定のため、多種の補助工法が必要であった。 また、背斜軸上部には手堀り縦井戸による石油採掘跡が多く残されており、トンネル坑内への可燃性ガス発生や原油流入を防止するために石油井戸閉塞を行った。 この石油井戸閉塞のための補助工法の費用が増加した。 (2)補助工法の費用 上記補助工法の全体工事金額に対する割合は約52%であった。
出典	内部資料

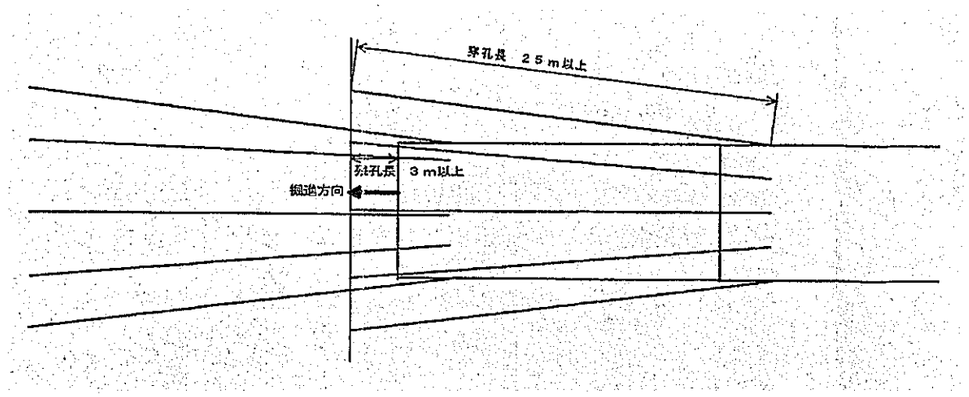
表 3.3.2-6 鉱山でのメタンガスが発生した事例

地点名	鉱山における事例(合計 10 事例)	
	石炭鉱山において実施されているガス対策について、ガス湧出量の少ない場合と多い場合について、炭鉱において実施されたガス対策の内容と実施に要した工事費、工程の実例調査を行った。工程の検討にあたっては、設備の仕様のための許認可に必要な期間も考慮した。 以下に、ガス湧出量の少ない場合と多い場合でのメタンガス対策を比較して示す。	
メタンガス対策	ガス湧出量の少ない場合 (例:三池炭鉱、太平洋炭鉱等)	ガス湧出量の多い場合 (例:三井芦別炭鉱、空知炭鉱等)
使用制限品目	可燃性ガス、又は引火性液体の蒸気が存在する場所で使用する電気機器は、爆発の危険を防止するためそれぞれのガス、又は蒸気の種類に応じた防爆構造のものでなければならない(平成 11 年度「地下研究施設の概念の研究」参照)。 ガス湧出量の比較的少ない炭鉱でも、坑内で使用する機械、器具については使用を制限されていた。鉱山保安法並びに鉱山保安規則では、作業者の安全確保及びそれぞれの使用条件に対応する検定用品でなければ使用してはならないと定めている。	
メタンガス対策の基本的な考え方	通気設備:	
	全体的に見ればガス湧出量が少なく、坑外までガスを誘導する必要のない場合にも、地山内では可燃性ガスは高濃度で存在することから、規定濃度以下に希釈する過程で必ず爆発限界値内を通過する。したがって、ガス湧出量に拘わらず、ガスの存在には十分の注意が必要である。	坑内の気流中に混入する可燃性ガスをガス抜により減少させる。しかし、総ガス湧出量に対する坑外誘導量の割合(ガス抜率)は30～60%であり、100%ガス抜によりガス去勢することは不可能である。よって適正な風量を確保できる扇風機、風管等の通気設備を設置する必要がある。また天盤のくぼみ、高落箇所等は空気より軽い可燃性ガスが高濃度のまま溜まっていることがあり、そのような箇所にはエアームーバー等により換気を行い可燃性ガスの濃度を低減する必要がある。
	ガス抜き:	
	坑外へのガス誘導を行っていなかったガス湧出量の少ない炭鉱でも、特定の個所から可燃性ガスの湧出が見られる場合、ボーリング機械により穿孔し、その孔に管を差し込み、ブースター等により誘導し、主要排気坑道に放流し、作業場の可燃性ガス含有率を低減させる方法を採っていた。	親風に放流しても総排気中の可燃性ガス濃度が 1.5%を超える場合、坑外にブロアーを設置して吸引する方法を取る。石狩炭田にあった全ての坑内掘り炭鉱でいわゆるガス抜を行っていた。また、一度使用した空気は他の作業現場に流さないように全ての作業現場で独立した排気ルートを持つ構造としていた。 ガス突出警戒区域の指定を受けた坑道では、先進ボーリングを 3 本以上、これを含んでガス抜ボーリングを5本以上、口径は 65mm 以上で、穿孔長 25m 以上、残孔長を岩石では 3m 以上、沿層では 5m 以上残す。また、穿孔全孔についてガス誘導設備を設置した上、ガスの自噴量、自噴圧を計測し、原則として自噴圧、自噴量がなくなるまでガス抜を行うが、自然発火防止のためガス濃度を勘案しながら経過を見て実施していた。 坑道からのガス抜だけでは気流中の空気中ガス濃度を規定値内に維持することが困難な場合、坑道に直角に5m程、穿孔機が自由に動ける大きさに掘り込み(ボーリング座)ガス抜孔を増してガス抜を行った。ガス抜期間の実例としては、1～3 日が平均的であるが、岩石坑道が炭層、断層破砕帯を貫縫する場合等、長い場合は1ヶ月に及ぶ場合もあった。
	保安設備:	
	坑内において掘進切羽等ガスの発生の恐れがある箇所には可搬式の可燃性ガス自動警報器を携帯し、作業開始前に設置して、作業中のガス濃度をチェックすることが鉱山保安規則により義務付けられている(第 259 条)。また、ガス湧出量の多い坑道や排気坑道には、定置式のガス検知器を設置し、常時監視しなければならない。 三池炭鉱を始め日本の炭鉱は坑外の中央指令室に集中監視システムを構築し、24 時間体制でガス濃度を始めとした様々な坑内情報を集中管理するシステムが取られていた。また、代表的可燃性ガスであるメタンガスは空気より軽く坑道天盤のくぼみ、高落個所等に高濃度で滞留する。よってメタンガス検定器等による日常の点検のほか、エアームーバーを設置してガスを拡散する等の対策が必要である。	坑内の作業現場では坑内保安の資格を持った係員が精密可燃性ガス検定器(炭鉱の場合はメタン用)を携帯し、発破作業の前後、作業の区切りごとに作業場周辺のガス濃度を測定し、既定値以上のガスを確認した時には作業を中断し、ガス排除にあたる。また、係員のつかない作業場では定置式ガス警報器を設置しガス濃度が既定値以上になると警報を発し周知できるようにしている。しかし、この方法では連続計測、作業場でない箇所のガス濃度の変化を計測することはできないため、坑内の作業場の入排気、主要分流坑道に、メタン用、一酸化炭素用のセンサーを設置し坑外の集中監視センターで常時監視している。 また、入坑者は全員が一酸化炭素用自己救命器を携帯することが義務付けられており、ガス突出警戒区域で作業する者は酸素呼吸器の携帯を義務付けられている。その他、作業箇所から主要坑道までは 40m 毎にエアマント、発破の点火位置にはビニールハウス、作業区域毎に退避所を設置し、ガス突出災害に限らず坑内災害から入坑者を守る設備としている。
ガス対策に要した工事費	防爆機器:	

	ガス湧出量の少ない場合、掘進切羽に大型の電動掘進機、積込機を使用することができた。三池炭鉱、太平洋炭鉱等では三井三池製作所製 S300 型ロードヘッダーを岩盤掘進用に導入し、2～3m／方と能率を上げていた。 そのほか坑内で用いられる電気設備は、特免区域以外では全て防爆機器を用いなければならない。近年国内での炭鉱数減少に伴い、防爆機器メーカーも少なくなり、防爆品は特注のために極めて高額なる例が少なくない。また、防爆機器はその構造から容積や重量が非防爆品に比べ大きくなり輸送や据付にかかるコストも増大する。	三井芦別炭鉱、空知炭鉱等ガス湧出量の多い炭鉱では、岩盤においても掘進には削岩機、積込機等圧縮空気を動力にした機器を使用していた。 圧縮空気は坑外のコンプレッサーで作られ、坑内にパイプで送られるため、設備費が嵩み、効率も悪いが、火気が存在しないためガスに対しては安全で、掘進速度は通常 1.2m／方であった。
	通気・保安設備：	
	ガスの湧出量が少ない場合、掘進切羽に送る入気の量は少なくて済む。局部通気設備は湧出ガス量によって設備仕様が決まる。主要通気についても生産箇所の奥部化、深部化が進むと通気の確保が困難となる。	ガスが多い場合は設備コストの増大を招く。 保安設備のうち、最も重要なものが集中監視設備である。
	先進ボーリングおよびガス抜：	
	通常、新山に坑道を掘進する場合、先進ボーリングを行う。これはガス対策ばかりでなく、地質状況、断層、帯水層の有無をチェックするためでもある。方向は掘進する向きに側壁より両側に 2 本、口径 55mm 以上で、穿孔長は 25m 以上行う。この場合、必要に応じガスの自噴量、自噴圧の測定、及び繰り粉の量等を検査し、地質状況を把握する。ガスが自噴する場合は自噴圧がなくなるまで掘進を再開することはできない。 穿孔を行う場合、ボーリング機械、穿孔用ポンプ、排水用ポンプ、ケーシングパイプ、誘導パイプ、ブースター等が必要となる。低いレベルで湧出する可燃性ガスを穿孔孔より排出する場合、穿孔長は 30m 程度で十分である。 ボーリング機械は鉱研工業、利根の機械が我が国の炭鉱で実績があるが、電動機を炭鉱防爆仕様にする必要があり、防爆モーターは、わが国の炭鉱が少なくなったことより、メーカーも受注生産としており現在の価格は不明である。 ポンプについても、穿孔用では揚程 20～30m、吐出量 70 ﾘｯﾄﾙ／分程度のもので十分であるがこれも防爆モーターであることが必要である。 穿孔工事は据付、穿孔、誘導準備、機械撤去等で 2 作業方×2 名＋電気工事が必要である。	先進ボーリングは、共通である。 ガス抜の場合、穿孔作業にかかる費用は、ガス発生量が少ない場合と同じであるが、ガスを坑外に誘導するための設備が加わる。炭鉱の場合は、採炭時の切羽へのガス湧出量を低減させるため近傍坑道から採掘対象炭層に向け積極的にガス抜ボーリングを行った。この場合、1採炭場から 20～30m^3/min の誘導量を確保するため、口径6～8インチの誘導パイプを主要坑道の誘導主パイプまで敷設した。また、坑外に設置したガス抜用ブロアーまでは坑内全主要坑道に12～16インチの誘導主パイプを敷設していた。平均誘導量は約 40m^3/min、ブロアーは吸い込み側－3000mmH2O、吐出側＋1500mmH2O、流量 72m^3/min、所用動力130kwであった。
ガス対策工程	防爆検定：	
	防爆検定は、以前は北海道と九州にあった公害資源研究所で行っていた。国内メーカーの場合は構造を示す書類、図面等を提出し審査を受け、小さな物なら実物を持ち込み、大きな機械では工場まで検査が入る。炭鉱用防爆構造規格は日本工業規格（JISC0901）に定められている。 検定に要する期間は、ロードヘッダーのような大きな機械になると約 4～6 ヶ月かかり、検定費用も 500 万円程度かかる。海外から輸入する場合は、たとえ輸入元の国の坑内使用許可を取っているものでも日本に検定規格にあわないと改造を行う必要がある。	
	通気設備：	
	局部扇風機による押し込み通気では風管（帯電防止加工ビニール製）を使用し、新鮮な空気を掘進切羽に送る。この場合、風管の摩擦抵抗により、管径 1m のものを使用し、出力 50kW の扇風機を使用しても、風管の延長は 1200m が限度である。これ以上の出力の扇風機の使用にはビニール風管の維持が困難となり、鉄製の風管を使用することになる。このため炭鉱では送風限界に至る以前に入気、排気、この 2 本の坑道を結ぶ風道といった通気回路を造り、局部扇風機を前進させていた。三池炭鉱では主要坑道を掘進する際は、本、連2本の坑道を並行に掘進し、300m～500m 間隔でこの2本の坑道をつなぐ風道を掘進していた。	

先進ボーリング：

掘進作業は穿孔長の残尺に合わせ、一時中断し、穿孔、ガス湧出量、繰り粉のチェック後再開される。



ガス抜き：

坑道からボーリングを行う方法

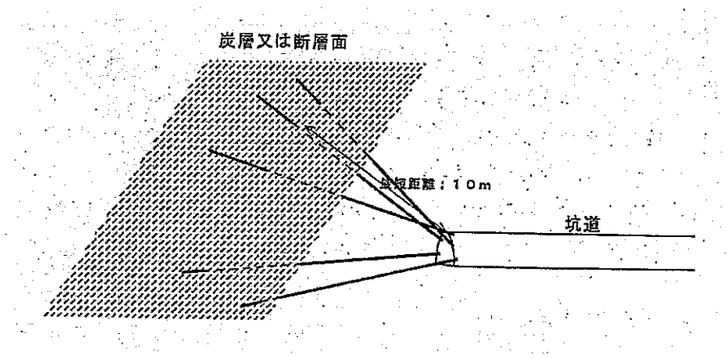
先進ボーリングとして、掘進方向に 7～12°の開きを持つ孔を3本穿孔し、2本は炭層あるいは断層面に最短距離方向に穿孔し、ガス抜を行う。

この場合、機器据え付けから穿孔終了まで 3 作業方、ガス自噴量、自噴圧減少まで 1～3 日が平均である。

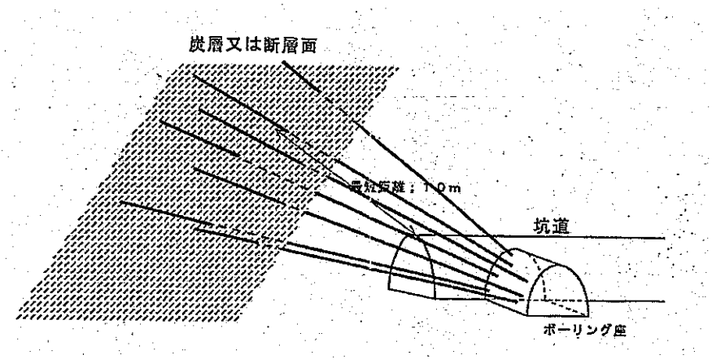
ボーリング座を設けボーリングを行う方法

坑道の進行方向に垂直に坑道の片側、あるいは両側に穿孔機が自由に方向を定めることができる程度のボーリング座を掘り込み、対象となる炭層や断層面に対してボーリングを行いガスを誘導する方法で、あらかじめガス量が多いと予想される場合に行われる。坑道からのボーリングだけではガスが抜けきらない場合には、併用して行うこともある。

この場合は穿孔中にガスが噴出する恐れがあることから、常に仮吸引ができるよう、ボーリング孔の口元に仮誘導装置を据え付けて穿孔を行う。このため穿孔は 1～2 本／作業方に制限され、本数もガスの湧出状態により増孔する可能性が大きいことから、ボーリング作業に 1 週間～10 日、ガスの自噴量、自噴圧が減衰するまで 1 週間程度、長い場合は 1 ヶ月に及ぶ場合もある。



坑道からボーリングを行う方法



ボーリング座を設けボーリングを行う方法

参考資料

通商産業省立地公害局監修：ガス突出技術指針、1983
通商産業省環境立地局監修：鉱山保安規則、1996
通商産業省立地公害局監修：鉱山保安テキスト、1985
(財)石炭技術研究所、(社)資源・素材学会：炭鉱保安技術要覧、1992

4)ガス対策についての調査結果のまとめ

3)において、建設工程・建設費に影響を与える因子に関する検討を目的とし、メタンガスについての発生量の予測方法やメタンガス対策の基本的な考え方を山岳トンネルおよび石炭鉱山を対象として調査した。

調査結果を以下にまとめる。

(i)事例調査件数

事例調査の件数は、山岳トンネル4件、石炭鉱山10件である。

(ii)地質状況とメタンガスの賦存状況

山岳トンネルの事例では、褶曲を受けた泥岩、砂岩等の互層から成る堆積層の背斜軸付近でキャップロック的な役割を果たす泥岩の下部にメタンガスが存在する場合が多い。

石炭鉱山の事例では、炭層の中にメタンガスが存在する場合が多い。

(iii)メタンガス対策の基本的な考え方

山岳トンネルおよび石炭鉱山では、以下のようなメタンガス対策を講じている。

①調査ボーリング

切羽前方の地質、メタンガス有無や性状、湧水の有無等を調査する。これは山岳トンネルでも石炭鉱山でも実施されている。

②メタンガス発生量の推定

①の調査ボーリング調査結果に基づく方法や他の方法によりメタンガス発生量を推定する。

③メタンガス対策の基本方針の設定

山岳トンネルでは、換気による希釈を主体とする方法(Sトンネル、Nトンネル)や、調査とガス抜きや水抜きを兼ねた底設導坑先進(Kトンネル、Mトンネル)による場合がある。

石炭鉱山では、換気によるメタンガスの希釈、ガス抜き、坑外への誘導による方法がある。メタンガス発生量が小さい場合は、坑外への誘導は行わない。

ボーリングによるガス抜きは山岳トンネルでも石炭鉱山でも実施されている。

④メタンガスの濃度別作業規制の設定

SトンネルやNトンネルでは、メタンガスの濃度別作業規制が設定されている。

平常作業時のメタンガス濃度が上限値を下回るように換気量が設定されている。

⑤メタンガス検知体制の確立

メタンガス検知体制の構成要素として、自動警報装置の設置、自動検知電源遮断装置の設置、メタンガス測定員の配置、非常時の連絡・退避体制の規定、安全教育の徹底がある。

⑥火源管理

火源管理として、電気機械器具の防爆構造化、発火源の坑内持ち込み禁止、摩擦・火花・静電気の管理がある。

(iv)メタンガス発生量の予測方法

メタンガス発生量の予測方法として、推定式による方法と数値解析による方法がある。推定式による方法には、トンネルの掘削影響範囲の設定により発生量を推定する方法と、湧水量と溶存量から推定する方法がある。数値解析による方法は、石油・ガス開発で用いられている貯留層解析法によるものである。

S トンネルでは、推定式による方法に基づきメタンガス発生量を算出し、メタンガス対策検討の参考とした。

(v)工程への影響

①工程への影響

山岳トンネルについては、メタンガス対策を構ずることによる工程の延伸分については記述がなかった。ただし、S トンネルでは、調査コアボーリングに昼夜で 7 日、先進調査ボーリングに 0.5 方、さぐり削孔ボーリングに 0.25 方をそれぞれ要した。

石炭鉱山の事例調査により、防爆検定のための日数として、ロードヘッダーのような大型機械の場合は 4～6 ヶ月要した例があることが分かった。防爆構造は、わが国の防爆構造規格に合致している必要があるため、輸入品の場合は改造が必要となる場合がある。石炭鉱山での通気設備では、1,200m を越えるような延長の場合は風管を鉄製にするか、あるいは入気・排気坑道を結ぶ風道を設ける必要があり、このための工程が増加となる。

(vi)防爆構造について

電気機械器具の防爆構造については、以下のような規定および通達がある。

爆発の危険のある場所で使用する電気機械器具（労働安全衛生規則第 280 条）

事業者は、第 261 条（通風等による爆発または火災の防止）の場所のうち、同条の措置を講じても、なお、引火性の物の蒸気または可燃性ガスが爆発の危険のある濃度に達するおそれのある箇所において電気機械器具を使用するときは、当該蒸気またはガスに対しその種類に応じた防爆性能を有する防爆構造電気機械器具でなければ、使用してはならない。

トンネル工事における可燃性ガス対策について　建設省通達（昭和 53.7.26　官技発 329）

〔火源対策〕

可燃性ガスが存在し危険な濃度に達する可能性のある場合は、使用する電気設備機器は防爆構造のものを使用する。

(4) 湧水対策についての調査結果

地下施設の施工時には、多かれ少なかれ湧水に遭遇することが考えられる。既往の湧水対策事例を調査し、湧水の規模に応じた対策工の規模や建設工程への影響について事前に検討しておくことは、地下施設の施工を効率的に進めるためには重要なことである。

地下研究施設の湧水対策については、現段階においては湧水の発生地点や湧水量を想定するための基礎的なデータが十分ではないことから、対策工の規模や建設工程への影響を定量的に検討することは困難であると考えられる。

しかしながら、ここでは、湧水の規模に応じた対策工の規模や建設工程への概略的な影響を把握する上での参考とするため、先ず山岳トンネルについての一般的な湧水対策を示し、その対策の地下研究施設への適用性を表 3. 3. 2-8 に示した。

また、湧水が問題となった具体的な事例を調査し、地質的特徴、事前の予測方法、現象と施工上の対策について表 3. 3. 2-9 にまとめた。湧水への対処が工期に与える影響を検討する上での参考とするため、高湧水部における注入実績を表 3.3.2-10 に示す。

表 3. 3. 2-9 によれば、湧水を予測することを目的とし、以下のような方法が採られている。

- 数値解析による湧水量の予測と掘削に伴う予測値の見直し
- 事前ボーリングによる地質や被圧水を有する層の確認
- 航空写真解析による断層破砕帯や滞水層の確認
- 電気探査（比抵抗影像法）、弾性波探査による地山等級の調査
- パイロット坑からの湧水状況からの湧水区間の推定

表 3.3.2-8　トンネルにおける湧水対策と地下研究施設への適用性

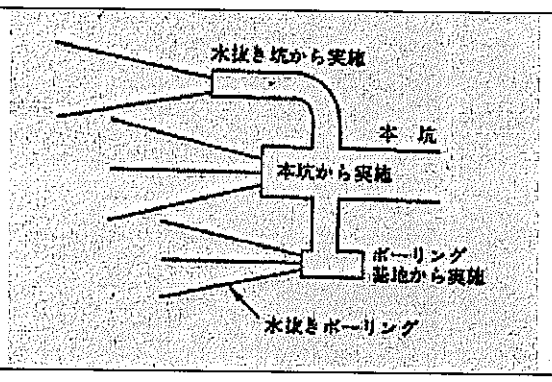
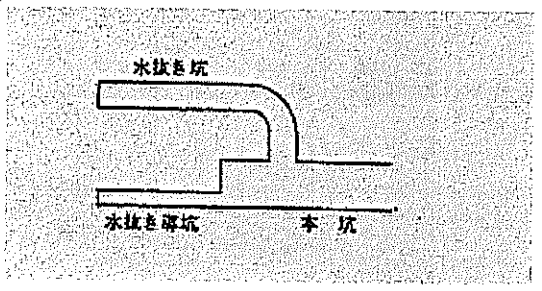
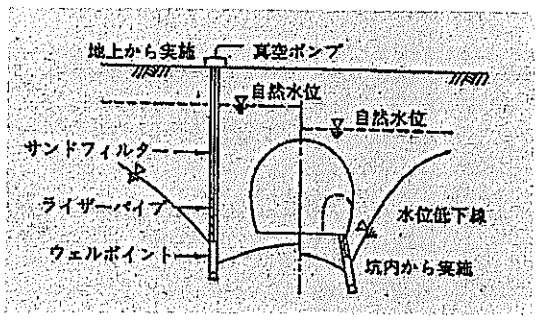
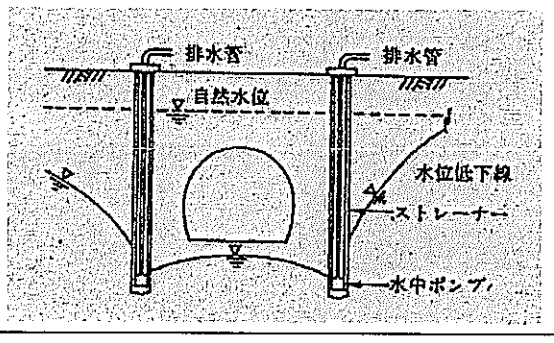
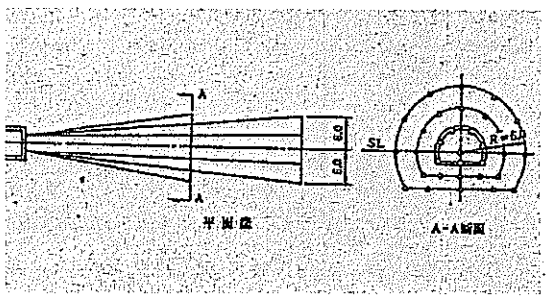
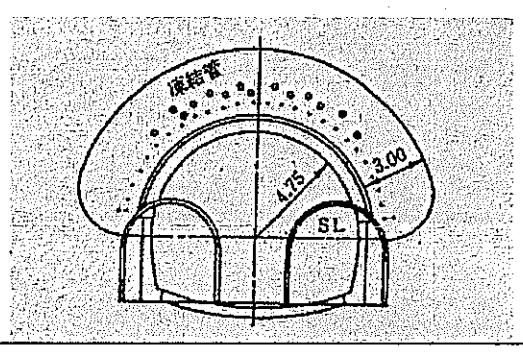
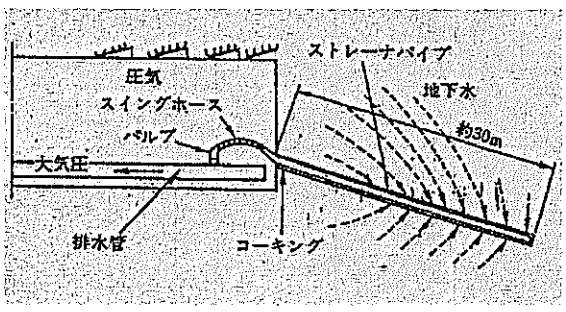
湧水対策		工法の概略図	特　徴	地下研究施設への適用性	実績例	評　価
排水工法	水抜きボーリング		・切羽、側壁等から切羽前方に向かってボーリングを行い地下水を排水して、水圧、地下水位を下げる方法である。 ・ボーリング本数を増やし、排水効果を高めることができる。 ・バキュームあるいは圧気と併用することにより効率を上げることも可能。	・破砕帯部、粘土層背面の湧水帯における水抜きに有効であると考えられる。 ・状況に応じ削孔方法・ボーリング延長の変更、ボーリングの追加が可能で、対応範囲が広い。 ・断面が小さく、地下水位低下に時間を要する。	津軽トンネル、塩嶺トンネル等実施例は多い。	○
	水抜き坑		・湧水量が多い場合に適用される。小断面の導坑を先進させて、水を抜くもので、水抜きボーリングを併用することが多い。	・水抜き坑を本坑に先立って施工する必要があり、水理条件として複雑になる。 ・水抜き坑施工のための水抜きが必要となり現実的でない。	安房トンネル、塩嶺トンネル	△
	ウェルポイント		・ウェルポイントと称する集水管を地盤に設置し、地盤に負圧をかけて地下水を吸引する方法である。 ・ウェルポイント設置位置からの地下水位低下は 5～8mが限界である。	・土被りが大きい箇所では、地表からの適用は極めて困難である。 ・坑内からの実施では効果があると考えられる。	六甲トンネル、小原トンネル、津軽トンネル	△
	ディープウェル		・地表から大口径のボーリングを行い、坑底に水中ポンプを入れ自然排水し、地下水位を低下させる工法である。 ・一般に 50～60mが限度。	・土被りが大きい箇所では、地表からの適用は極めて困難である。	津軽トンネル、国分川分水路トンネル、生田トンネル	×
止水工法	注入工法		・切羽前方や周辺地山中にセメントミルク、水ガラス等の薬液を注入し、地山の亀裂や空隙等の水みちを閉塞することにより地山を改良し、切羽等からの湧水に対し止水を図る。	・周辺地盤の性状を大きく変えてしまう可能性があるため、必ずしも適していると言えない。	青函トンネルを代表とする。	×
	凍結工法		・トンネル周辺地山を凍結状態にして、地山の透水性を低下させて止水、あるいは地山強度を上げて切羽の安定および変位の抑制を図る。 ・地山の凍結に時間を要し、工程に大きく影響する。	・周辺地盤の性状を大きく変えてしまう可能性があるため、必ずしも適していると言えない。	布引トンネル	×
	圧気工法		・坑内の圧力を高くし、地山の水圧に対して抵抗し、地山の安定を図る。 ・切羽の安定と切羽からトンネル覆工間の止水を行うのが主な目的である。 ・圧気のみで止水することは困難である。	・周辺地盤の性状を変えてしまう可能性があるため、必ずしも適していると言えない。	東京電力京浜潮田線、中部電力北豊田・南武平町線	×

表 3.3.2-9　湧水対策の事例調査結果

名称	地質的な特徴	現象の予測について	現象および対策工
栗山トンネル	下総台地を東西に貫く延長 1820mの複線鉄道トンネルである。未固結な砂層を土被り 8-14mで掘削する都市型トンネルである。 トンネル掘削の対象は成田砂層は、均等係数が 2.2 前後の均質で細粒分含有率の小さい砂層であり、地下水位がトンネル天端付近にあり、流砂現象が懸念された。	ディープウェル工法についてあらかじめ揚水試験を行い、地山の透水係数や限界揚水量を測定した。 また、この結果に基づき準三次元解析により地下水位の変化を解析し、排水計画を設計した。 解析結果を参考にして、ディープウェルは 30mの千鳥配置とした。	ウェルポイントについては、施工実績から 2 列 1mピッチで 60m間を施工するとして揚水量を 6.5 l/min と設定した。 ディープウェルの揚水量は当初計画では 200 l/min と予測したが、実際は最大 255 l/min であった。 ディープウェルの揚水開始時期はきわめて重要であるので、これを施工過程に応じて設定した。 ウェルポイント 1 本あたりの揚水量については、ほぼ解析条件を満足する結果となった。
鹿屋分水路	鹿屋市の洪水処理対策として計画された延長 2609mの分水路である。このうち河川トンネルの 1609m部分はしらす中にあり、また住宅密集地であった。	これまでに実績が皆無の地下水位以下のしらすを掘削するため、独自に調査・試験を行った。 地下水位以下では切羽が自立しないことが分かったので、地下水対策として、重力排水工法、ディープウェル工法、ウェルポイント工法、圧気工法、薬液注入工法、凍結工法について検討し、湧水量や付近に与える影響、安全性、施工性の観点から最適な工法としてウェルポイント工法を選択した。 掘削工法については、地山の緩みや地表面に与える影響、工事費、施工性等の観点からサイロット方式の NATM とした。	きわめて高い透水性を有する地層を掘削するため地下連続壁工法を採用した。トンネルと地下連続壁との離れについては、トンネル掘削への影響を考慮して有限要素法により設定した。 地下連続壁の施工後、ディープウェルにより揚水したが地表面陥没が生じたため、急激な大量排水は危険となった。 当初想定の量より多く揚水しても地下水位が下がらず、地下連続壁に漏水が確認されたので、これを薬液注入により止水して対処した。その結果、地下水位が低下し施工を行うことができた。
加久藤トンネル	堆積岩類の四万十層群の砂岩、粘板岩を基盤としてその上部をえびの層群と呼ばれる凝灰角礫岩を主とする地層と、薩摩火山岩類の安山岩や凝灰角礫岩の火山噴出岩類が覆う。 最大土被りは約 400m、一軸強度は 2～230MPa である。	検討委員会による湧水予測シミュレーションし、掘削の進行に伴い予測値以上の湧水があり、シミュレーションを数回見直した。 また、パイロット坑での湧水状況から大量湧水区間を特定した。	最大 12t／min の湧水による軟弱地山の崩壊や路盤の泥濘化が発生した。 パイロット坑から本坑部への水抜きボーリング、水抜き導坑の掘削、止水薬液注入の 3 段階を実施した。その結果、切羽の押出し、土砂の流出も皆無であった。
中山トンネル	良質な安山岩と閃緑ヒン岩と、これに堆積する第四紀火山噴出物堆積層は土砂状で、かつ水頭約 200mの多量の地下水で飽和されている。 最大土被りは約 400m、安山岩の一軸強度は 50～100MPa である。火砕岩層の透水係数は、10^{-4}～10^{-5}cm/s である。	立坑施工時にも高圧多量湧水に難航し、ディープウェルや薬液注入工法を併用した経緯がある。調査結果から未固結凝灰岩が豊富な地下水を貯留し、水圧が 2MPa という高圧を呈することが分かった。	最大 110t／min の異常出水が発生した。 出水箇所の充填止水と本坑の再掘進を目的として、セメントミルク、モルタル主体の坑道閉塞および LW 溶液型主体の地山補強注入を地表から実施した。
御牧原トンネル	第四紀および新第三紀の小諸層群と呼ばれる火山破屑岩を主体とした堆積岩からなる。 主な岩種は、砂岩、泥岩、凝灰質泥岩、凝灰角礫岩、砂、礫、泥岩互層、砂礫、軽石凝灰岩、火山礫凝灰岩である。 最大土被りは約 200m、亀裂の多い泥岩の一軸強度は 50MPa 以下である。	地表面からの事前ボーリングにより、被圧水を持つ砂層の存在を確認した。岩石試験結果から膨潤性を評価した。	未固結被圧帯水層区間で水抜き鉛直ボーリングから湧水とともに土砂が噴出した。含水砂層と泥岩の互層部分でパイピング現象とともに土砂噴出が発生した。 砂の流出に対してはストレーナーを採用した。また、鉛直および水平ボーリングを追加した。コンクリートにより空洞を充填した。
肥後トンネル	砂岩、粘板岩、チャート、粘板岩とチャートの互層からなる。最大土被りは約 600mである。	航空写真解析による断層破砕帯の断裂構造解析を行い、断層破砕帯や滞水層の存在を確認した。また、切羽からの長尺ボーリング（300m）を実施し、地質の確認を行った。	坑道全体で湧水量の予測値 6.4t／min に対し、最大 25t／min であった。突発湧水は 2.5t／min であった。 短尺および長尺の水抜きボーリングを実施したが根本的解決とはならず、水抜き坑（幅 2.5m×高さ 2.3m）を先行して施工し十分な水抜き効果を得た。
松本トンネル	砂岩、泥岩、安山岩質溶岩、凝灰角礫岩の互層構造である。 最大土被りは約 150mである。	電気探査（比抵抗影像法）、弾性波探査により地山等級を調査した。また先行ボーリング（φ70mm、長さ 30m）により、地山状態や湧水の有無を確認しながら施工した。	切羽の天端から最大 3t／min の湧水が発生した。 対策として、水抜きボーリング、切羽天端へのウレタン注入式ミニパイプルーフ、切羽鏡に対し吹付けコンクリートおよびウレタン注入を実施した。

表 3.3.2-10　高湧水部における注入実績

ﾄﾝﾈﾙ名	地質	湧水圧力	湧水量	施工法	施工期間
青函ﾄﾝﾈﾙ	安山岩溶岩、凝灰角礫岩、砂質泥岩	2.4～2.7MPa	多量	切羽から薬液注入（ＬＷ）	
丹那ﾄﾝﾈﾙ	頁岩、凝灰岩		210m^3/min	切羽からｾﾒﾝﾄﾐﾙｸ注入	
新神戸トンネル（第２六甲ﾄﾝﾈﾙ）	花崗閃緑岩	2.0MPa	12m^3/min	切羽から薬液注入（ＬＷ）	70m 間の帯水層突破に７ヵ月
東北新幹線蔵王ﾄﾝﾈﾙ	安山岩溶岩	0.6MPa	2m^3/min	切羽から薬液注入(ＬＷⅡ号、ＭＩ-Ⅰ号)	100m の破砕帯突破に約１年
上越新幹線中山ﾄﾝﾈﾙ	凝灰角礫岩	2.0MPa	190m^3/min	直上 360m から薬液注入（ｾﾒﾝﾄﾐﾙｸ、ＬＷ、溶液）	坑道閉塞注入以来約 13 ヵ月の坑外注入
国道 150 号安房ﾄﾝﾈﾙ	砂岩、粘板岩	0.9MPa	7.2m^3/min	切羽から薬液注入（ＬＷ）	昭和 59 年度 36m、昭和 60 年度 72m の掘削
山陽新幹線福岡ﾄﾝﾈﾙ	緑色片岩	1.5～2.0MPa	5～8m^3/min	切羽から薬液注入→ｾﾒﾝﾄﾐﾙｸ注入	調査ﾎﾞｰﾘﾝｸﾞから注入完了まで２ヵ月
万之瀬川導水路ﾄﾝﾈﾙ	砂岩、頁岩	2.5MPa	2.5～5.1m^3/min	切羽から薬液注入（ＬＷ）	一ヶ所（21m～41m）45 日～130 日の注入

（清水･大林･鹿島･大成，1999）

(5)押出し対策についての調査結果

山岳トンネルの既往の施工事例において押出しが発生した場合の対策工について整理した。

地下研究施設では、岩盤の初期状態と地下施設を掘削することによる坑道周辺岩盤への影響を評価することが1つの重要な研究項目であると考えられる。

押出し対策については、現段階においては押出しが発生する地点や押出しの規模を想定するための基礎的なデータが十分ではないことから、対策工の規模や建設工程への影響を定量的に検討することは困難であると考えられる。

しかしながら、ここでは、湧水の規模に応じた対策工の規模や建設工程への概略的な影響を把握する上での参考とするため、先ず山岳トンネルについての一般的な押出し対策を示し、その対策の地下研究施設への適用性を表3.3.2-11に示した。

また、押出しが問題となった具体的な事例を調査し、地質的特徴、事前の予測方法、現象と施工上の対策について表3.3.2-12にまとめた。

表3.3.2-12によれば、押出しを予測することを目的とし、以下のような方法が採られている。

- 既往の崩壊事例の調査
- ボーリング調査、弾性波探査、坑内平板載荷試験等の事前調査・試験の実施
- 計測データによる変形の予測
- 数値解析による変形の予測
- 上記2つの組合せ（計測データによる変形の予測と数値解析による変形の予測の併用）

表 3.3.2-11　トンネルにおける押出し対策と地下研究施設への適用性

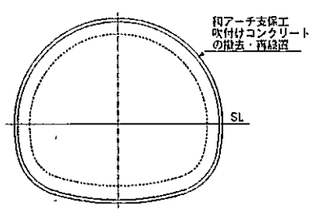
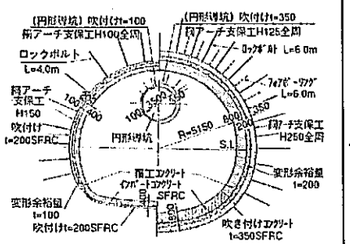
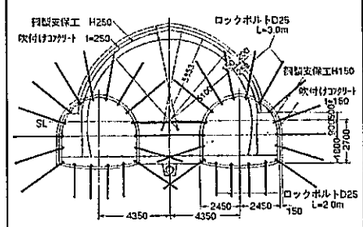
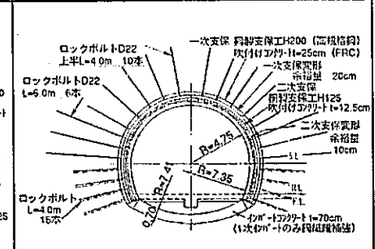
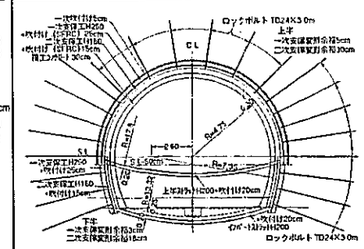
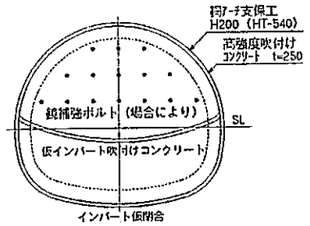
対策工法	縫い返し	先進導坑（頂設）	先進導坑（側壁）	二重支保工A	二重支保工B	支保工・吹付けｺﾝｸﾘｰﾄ仕様の変更
工法概要図						
工法概要	標準設計の支保で上半掘削を進行させ、比較的大きな変形を許容しつつ計測を実施する。その後、計測結果に基づき、二次覆工厚が不足する部分を取り撤し、適正な支保規模で施工し直す工法。 実績的に大きく下記２パターンに分かれる。 ・予め縫い返しを計画して行う場合。 ・予期せぬ地山挙動により、対処的に施工する場合。 縫い返し後の変形は小さかったという事例もあるが、変状を抑止できなかった事例も同程度にある。	以下に列挙する各効果を期待して、切羽中央部に先進導坑を掘削し、膨張性地圧に対処する工法である。先進導坑は、7～10mを1ｻｲｸﾙとして組み込む場合と、別班で長距離を先進する場合が考えられる。 ・芯抜き効果により「塑性地圧をいなす」。 ・水抜き効果により流砂などの崩壊性地山に対処する。 ・加背割りを小さくすることにより切羽安定を図る。 ・先進導坑からの事前補強が可能である。	以下に列挙する各効果を期待して、切羽側壁部に先進導坑を掘削し、膨張性地圧に対処する工法である。 ・水抜き効果により流砂などの崩壊性地山に対処する。 ・加背割りを小さくすることにより切羽安定を図る。 ・側壁導坑からの事前補強が可能である。 ・基礎コンクリート設置により、特に沈下が懸念される場合には有効である。	上半先進時の一次支保工として、標準設計による支保工を施工し、予め地山を変形させる。引き続き二次支保工として、高規格鋼アーチ支保工およびＦＲＣ吹付けコンクリートを施す工法。結果的に二重支保工となるが、一次支保の局部的な座屈やクラックを許容する点で右記工法Ｂとは異なる。	上半先進時の一次支保工として、標準設計による支保工ではなく、膨張性の主要因となる塑性地圧に対して剛な支保を設計し、施工する工法。予め地山を変形させることをせずに、塑性領域を極力小さく抑えることに主眼を置いた工法である。 実績的には、高規格鋼アーチ支保工を用いて支保を２重にして、吹付けコンクリートを高強度化することが行われている。したがって、設計掘削量は増加し、左記工法Ａと同規模となるが、大きな変形を許容しない点で工法Ａとは異なる。	上半先進時の一次支保工として、支保規模を1～2ランク上げ、高規格鋼アーチ支保工および高強度吹付けコンクリートを採用して、設計掘削断面積を大きく変更せずに、掘削する工法である。 基本的には、補助ベンチ付きミニベンチ工法ないしはマイクロベンチ工法で早期閉合し、インバート形状も円形断面に近くなるようにRを小さくして、変形抑制効果を高めることが行われる。
工法の得失	・予期せぬ地山挙動により、対処的に施工する場合には、施工機械の編成などに大きな変更が発生し、切羽進行が阻害される可能性がある。 ・ズリ出し方法をベルトコンベア方式などにしている場合は、縫い返しのためにベルトコンベアの移設などの手間が発生する。また、換気設備の変更などの仮設備変更が余儀なくされる。 ・縫い返し時に、既に打設したロックボルトの処理が手間取る。 ・廃棄物が発生し、環境上の負担となる。	・特に早期閉合を目標としてミニベンチもしくはマイクロベンチ工法を行う場合、ベンチ長が短くなるため、切羽安定の一層の確保が必要となり、補助工法の追加が必要となる。 ・前方の地山を目視にて確認できるメリットがあり、対策範囲を予め特定することが可能である。 ・導坑支保取り壊し時に、廃棄物が発生するため、環境上の負荷が発生する。 ・導坑掘削のための機械編成が別となる。	・特に早期閉合を目標としてミニベンチもしくはマイクロベンチ工法を行う場合、ベンチ長が短くなるため、切羽安定の一層の確保が必要となり、補助工法の追加が必要となる。 ・前方の地山を目視にて確認できるメリットがあり、対策範囲を予め特定することが可能である。 ・導坑支保取り壊し時に、廃棄物が発生するため、環境上の負荷が発生する。 ・水平方向の変形に対しての配慮が必要となる。 ・導坑掘削のための機械編成が別となる。	・標準支保規模で、膨圧による変形（Ａ計測など）を把握し、適合する二次支保工を検討する必要がある。 ・二次支保工の設置を予定して一次支保工の変形余裕量を設定する必要があるため、30cmから50cmの変形余裕量を考慮する必要がある。 ・比較的大きな変形を許容させるため、吹付けコンクリートは、崩落防止のために靭性を持たせたＦＲＣ（ファイバー混入）構造とすることが望ましい。 ・縫い返しのような廃棄物は発生しない。	・変形を可能な限り抑止するため、吹付けコンクリートは、耐力増強のためにＦＲＣ（ファイバー混入）構造とすることが望ましい。また、支保工も高規格化（SS400→HT540）し、降伏点を上げることが必要となる。 ・試験施工区間の変形収束値の実績を利用して、二次覆工コンクリート数量を最適化することが可能となる。 ・縫い返しのような廃棄物は発生しない。	・支保剛性は左記2案よりも小さいため、変形抑制効果も大きくは期待できないが、支保耐力上昇分と、補助工法との併用で、総合的に効果を得ようとする工法である。 ・膨張性の程度によっては、効果が小さい場合もあると考えられる。 ・掘削断面積は大きく変更にはならないが、一次支保施工後の変形の推移によっては、長期にわたるクリープ的な時間依存性の変形を考慮して、二次覆工に力学的な機能を追加する必要がある場合がある。 ・縫い返しのような廃棄物は発生しない。
施工の特徴	・膨張性地山に限らず、多くの変状トンネルにおいて実施されてきた施工方法である。 ・取り壊し、再設置となるために適正な規模の支保の設定が鍵である。大変状の場合には再設置した支保規模でも対処できず、多大な追加対策が実施されている例が多い。 ・変状が発生した不良地質区間を取り壊すため安全上、特段の配慮を要する。（監視員の増員など）	・導坑掘削により前方地山を予め目視でき、掘削時のＡ計測などから地山のマクロな物性値を予測できることが最大の特徴である。 ・導坑を利用して、導坑内部での各種調査や事前対策工が可能である。 ・導坑掘削に最適な機械編成と断面積の選定により、効率的な施工が可能である。	・導坑掘削により前方地山を予め目視でき、掘削時のＡ計測などから地山のマクロな物性値を予測できることが最大の特徴である。 ・導坑を利用して、導坑内部での各種調査や事前対策工が可能である。 ・導坑掘削に最適な機械編成と断面積の選定により、効率的な施工が可能である。	・上半掘削時および下半掘削時の変形量を把握することで、より精度の高い設計および施工が実施可能となる。この場合、一部区間をミニベンチ掘削し、支保応力や変形の計測を行うことが必要となる。 ・取り壊しが発生しないため、縫い返しの施工よりは格段に安全性が高まる。切羽から離れた地点の縫い返しよりも施工効率は高い。	・上半掘削時および下半掘削時の変形量を把握することで、より精度の高い設計および施工が実施可能となる。この場合、一部区間をミニベンチ掘削し、支保応力や変形の計測を行うことが必要となる。 ・取り壊しが発生しないため、縫い返しの施工よりは格段に安全性が高まる。切羽から離れた地点の縫い返しよりも施工効率は高い。 ・変形を小さく抑えるため、二次覆工コンクリート量を抑制することができる。	・上半掘削時および下半掘削時の変形量を把握することで、より精度の高い設計および施工が実施可能となる。この場合、一部区間をミニベンチ掘削し、支保応力や変形の計測を行うことが必要となる。 ・取り壊しが発生しないため、縫い返しの施工よりは格段に安全性が高まる。切羽から離れた地点の縫い返しよりも施工効率は高い。 ・変形を小さく抑制できれば、二次覆工コンクリート量を抑制することができる。
併用補助工法	縫い返し前後の変形抑止のため、下記補助工法を併用する場合が多い。 ・6m～8mの増しロックボルト ・崩落防止のための注入工法 ・インバート仮閉合 ・インバートＲ変更（円形断面に近づける）	切羽安定および変位対策が不十分な場合には下記工法が有効である。 ・鏡吹付けコンクリート ・中～長尺鏡ボルト ・インバート仮閉合 ・インバートＲ変更（円形断面に近づける）	切羽安定および変位対策が不十分な場合には下記工法が有効である。 ・鏡吹付けコンクリート ・中～長尺鏡ボルト ・インバート仮閉合 ・インバートＲ変更（円形断面に近づける） ・4.5～6mの増しロックボルト	加背割りは変わらないため、切羽安定および変位対策が不十分な場合には下記工法が有効である。 ・鏡吹付けコンクリート ・中～長尺鏡ボルト ・インバート仮閉合 ・インバートＲ変更（円形断面に近づける） ・4.5～6mの増しロックボルト	同　左	同　左
地下研究施設での適用性	・大規模な押出しが発生する場合は実績面からは有効な方法であると考えられるが、建設工程や建設費に与える影響が非常に大きいことから現実的とは言えない。	・導坑を利用した調査が可能であるが、建設工程や建設費に与える影響が少なからずある。	同　左	・あらかじめ地山の変形を許容することから、ゆるみをできる限り小さくする仕様の場合は適用できない。	・地山の変形を可能な限り抑止することから、ゆるみをできる限り小さくする仕様の場合は適用可能である。	・建設工程や建設費に与える影響が小さいと考えられ、変状の規模が小さい場合は現実的な工法である。
評価	△	△	△	○	○	○
実績例	実施例多数	上信越自動車道 日暮山トンネル トンネルと地下1999, 11月号, pp17-23	中央自動車道 恵那山トンネル中津川方（2期線） トンネルと地下1981, 11月号, pp47-57	北陸新幹線 飯山トンネル冨倉工区 トンネルと地下2000, 11月号, pp7-16	北陸新幹線 朝日トンネル トンネルと地下1998, 12月号, pp7-17	上信越自動車道 太郎山トンネル 発表報文無し（施工中）

表 3.3.2-12　押出し対策の事例調査結果

名称	地質的な特徴	現象の予測について	現象および対策工
寒風山トンネル	高知県側は泥質片岩から、愛媛県側は塩基性片岩、珪質片岩からなる。 最大土被りは約 900m、一軸強度は 14～30MPa である。	土被り 600mに達するまでの計測データによる変形の予測および数値解析による予測を併用した。	土被り 400mを超えると天端沈下量および内空変位量が顕著に増加した。 対策として、シリカヒュームを用いた早強高強度吹付けコンクリート、ねじり棒鋼を用いたロックボルト、鋼製支保工等を使用した特殊な支保パターンを採用した。
加久藤トンネル	堆積岩類の四万十層群の砂岩、粘板岩を基盤としてその上部をえびの層群と呼ばれる凝灰角礫岩を主とする地層と、薩摩火山岩類の安山岩や凝灰角礫岩の火山噴出岩類が覆う。 最大土被りは約 400m、一軸強度は 2～230MPa である。	以下の湧水に関する予測のみで、押出しに関する予測は特に記述されていない。 検討委員会による湧水予測シミュレーションし、掘削の進行に伴い予測値以上の湧水があり、シミュレーションを数回見直した。また、パイロット坑での湧水状況から大量湧水区間を特定した。	湧水に続く軟弱な凝灰角礫岩では、流出崩壊と路盤の泥濘化が発生した。また大変形が発生した。 これに対し、計測管理による支保パターンの変更や各種補強対策（増しボルト、PC 鋼棒、上下半仮閉合、ウレタン注入等）を選定し無事突破した。
恵那山トンネル	全般に花崗岩が熱水変質作用を受け、脆弱になった灰白色の粘土層からなる。 最大土被りは約 450m、一軸強度は 1.7～4.0MPa である。	膨張の予測は行っているが、定量的な予測ではない。	はらみ出し箇所についてははつり補修を実施した。覆工コンクリートに SFRC を使用した。増しボルトとして、総ねじ PC 棒鋼（16 本／m）をはつり掘削前に実施した。それでも変位が基準値を超える場合は増し吹付けを実施した。
梶原第一トンネル	西坑口側は 40°から 50°の急勾配を有する尾根傾斜面であるが、厚い崖錐層の下部は強風化し破砕された粘板岩、砂岩からなる崩壊性地山である。 最大土被りは約 60m、西側坑口では最大 7mである。	設計段階において、西側坑口付近では過去に数度の表層崩壊が発生していたこと、水平ボーリング調査と弾性波探査から強風化・破砕帯の存在が確認されていた。崩壊性地山におけるトンネル掘削では、斜面表層部の崩壊を誘発する可能性が非常に高いことが設計段階から予想されていた。 さらに、施工計画時の FEM 解析と坑内平板載荷試験から、地耐力不足と天端および肩部の崩壊も予想されていた。	坑口部については、支保パターンを JH 標準坑口パターンより 1 ランクアップして設計した。 また、ロジンジェットフォアパイリング工法に加え、法面補強ボルトを採用した。また、上半足元部についてはロジンジェットサイドパイリングを追加した。
朝日トンネル	安山岩溶岩、安山岩質凝灰角礫岩、流紋岩、流紋岩質凝灰角礫岩からなる。 最大土被りは約 400mである。	有限要素法による変形の予測を行った。	破砕帯において強大な地圧による支保工の押出し、変形、破断が見られた。 対策として、高耐力支保工の採用、早期の断面閉合、十分な変形余裕量の確保、注入式鏡ボルトの施工、注入式先受けボルトを採用した。

(6)寒冷地対策についての調査結果

今回の検討地点は、寒冷地であることから、地下研究施設の建設工程を検討する際にその影響の程度を事前に考慮しておくことは重要である。

ここでは、トンネルの寒冷地対策として特別に実施された事例を、H トンネルおよびT トンネルを対象として調査した。その結果を表 3.3.2-13 および表 3.3.2-14 に示す。

表 3.3.2-13　寒冷地におけるトンネルの施工事例(1)

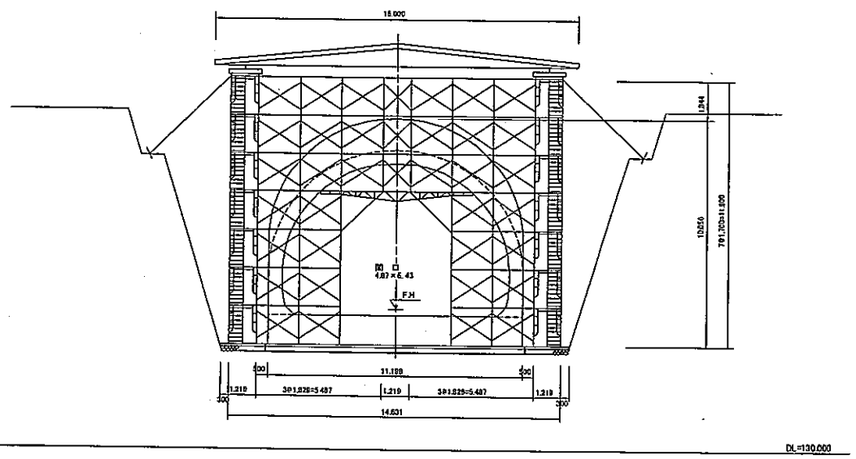
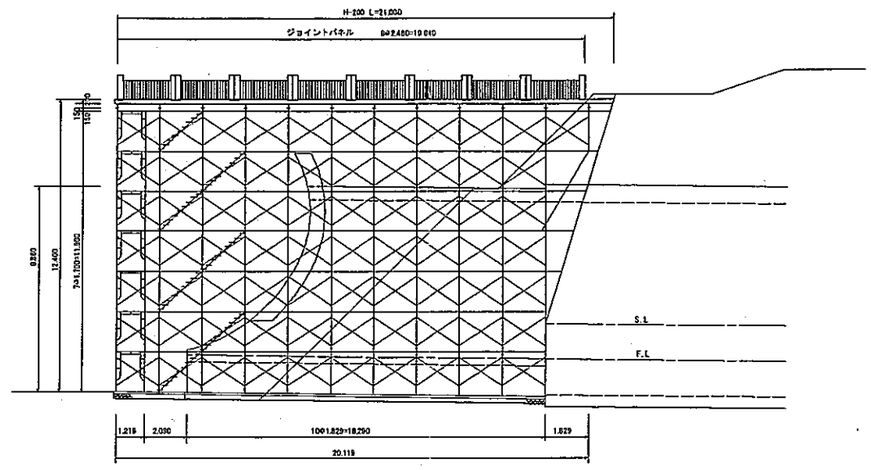
地点名	Hトンネル
寒冷地対策	Hトンネルで実際に行った寒冷地対策について以下に示す。 1. 冬期間の除雪・排雪は必ず必要である。 2. 仮建物、基礎構造物の防寒養生 特別な施工を伴う場合は、上屋囲い（添付図-1, 2 参照）が必要である。 3. 寒冷地対策は、全体工期に影響する。通常の歩掛りに対して 0.8 掛け程度であろう。 4. 生コン等（吹付けコンクリートを含む）の冬期仕様（暖房費）が必要である。 5. 施工機械の水廻りの防寒対策として、水の代替えとして不凍液を使用した。
	 添付図-1　坑口部仮囲い（正面図）
	 添付図-2-1　坑口部仮囲い（側面図）
出典	現地作業所担当者へのヒアリングによる。

表 3.3.2-14　寒冷地におけるトンネルの施工事例(2)

地点名	T トンネル
寒冷地対策	T トンネルにおいて実際に行った寒冷地対策を以下に示す。 1. 坑内の温度が低下すると吹付けｺﾝｸﾘｰﾄの初期強度発現に悪影響を与えるので、坑口付近に簡単な防風扉（上側のみ）を設置した。 2. 吹付けﾓﾙﾀﾙの温度を上げるために、温水設備（ﾉｯﾁﾀﾝｸ+暖房設備）を設置した。
出典	当時施工管理担当者へのヒアリングによる。

3.3.3　防災を考慮したレイアウトの建設工程の検討

(1)目的

3.3.1 において検討した基本レイアウトに対する建設工程との比較を行うことにより、防災を考慮することによる建設工程への影響を把握するため、防災を考慮したレイアウトについての建設工程の検討を行う。

(2)防災を考慮したレイアウト

防災を考慮したレイアウトのうち立坑案を図 3.3.3-1 に、斜坑案を図 3.3.3- 2 に示す。

立坑案では、主立坑に隣接する避難用立坑を考慮した。これらの立坑については併行して施工することを考える。主立坑と避難用立坑の離間距離については、施工性や掘削時の力学的な影響を考慮して設定すべきであり、その離間距離は 3D～5D（D は立坑径 6m）程度必要であると考えられる。ここでは、離間距離を 3D 程度の 20mと仮定した。

斜坑案でもアクセス斜坑に隣接する避難用斜坑を考慮し、立坑案と同様に離間距離を 20mとした。

(3)建設工程の検討条件

建設工程の検討条件は、3.3.1 での条件と同様とした。

(4)建設工程・建設費の検討結果

防災を考慮した立坑案および斜坑案のレイアウトについての建設工程の検討結果を、それぞれ表 3.3.3-1 および表 3.3.3-2 に示す。

防災を考慮したレイアウトのうち、立坑案では第2年度に着工すれば、第7年度に施設完成の見込みで、施設完成までに約 64 ヶ月を要する。退避空間の工程は立坑の工程に含むものとした。また、安全空間の施工は予備ステージと併行して施工するものとした。

斜坑案では第2年度に着工すれば、第9年度に施設完成の見込みで、施設完成までに約 115 ヶ月を要する。退避空間の工程は立坑の工程に含むものとした。また、避難用連絡坑の施工は予備ステージと併行して施工するものとした。

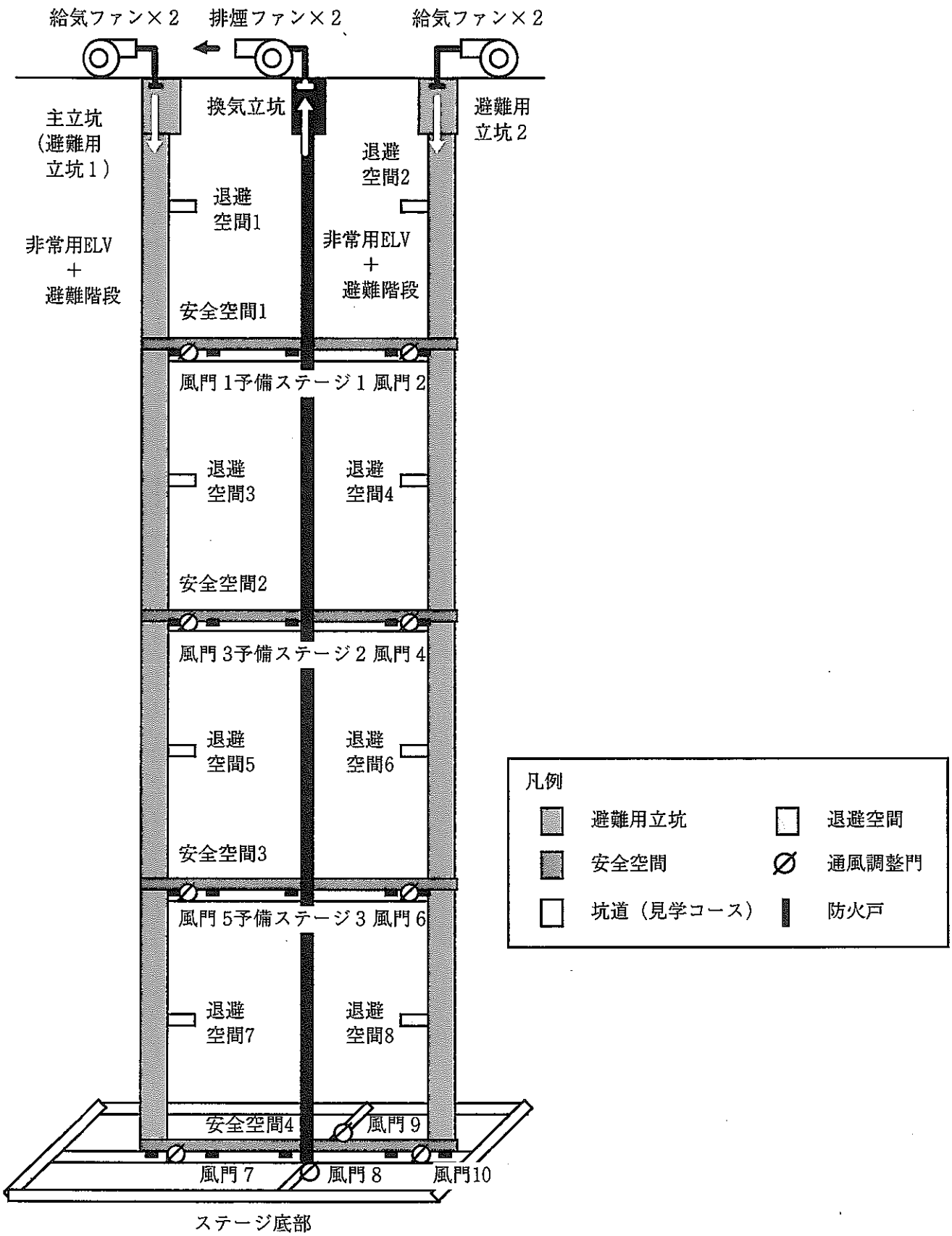


図 3.3.3-1 防災を考慮したレイアウト(立坑案)

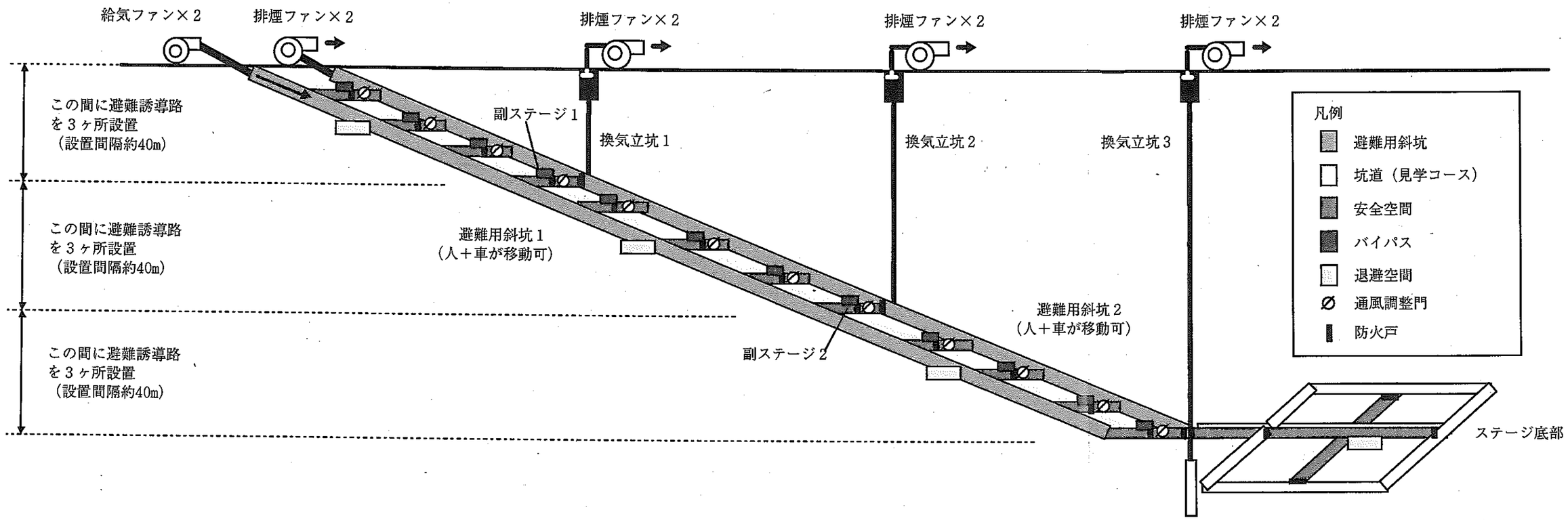
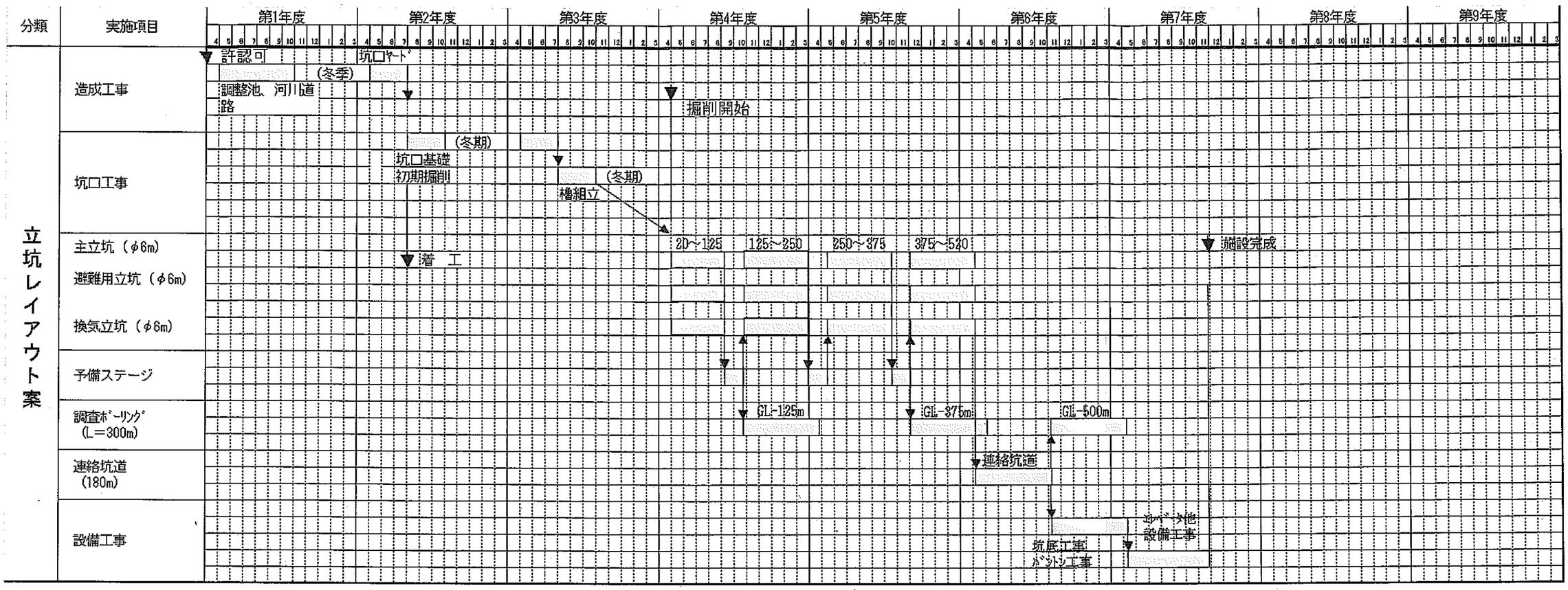


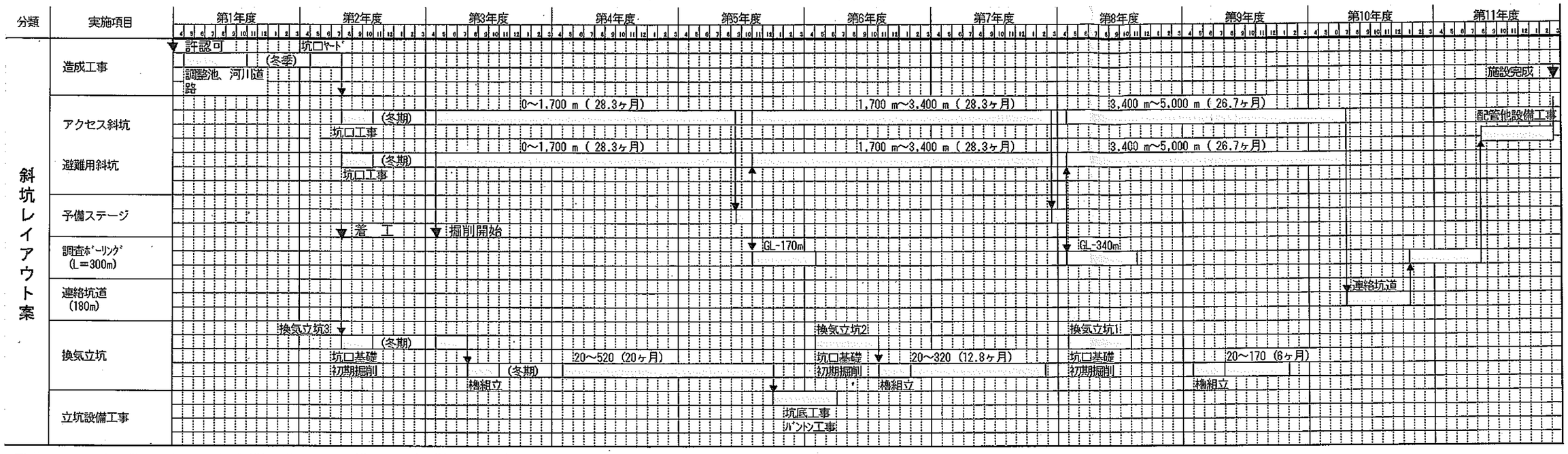
図 3.3.3-2 防災を考慮したレイアウト(斜坑案)

表 3.3.3-1 防災を考慮したレイアウト(立坑案)の建設工程



・ 退避空間の工程は立坑の工程に含むものとした。また、予備ステージに隣接する安全空間の施工は予備ステージと併行して施工するものとした。

表 3.3.3-2 防災を考慮したレイアウト(斜坑案)の建設工程



・予備ステージに隣接する安全空間の施工は予備ステージと併行して施工するものとした。

3.3.4 まとめと今後の課題

防災を考慮した場合の地下施設のレイアウトについて、地下施設の工程に関する検討を行い、サイクル機構より提示された基本レイアウトと比較した。また、可燃性ガス、湧水、地山の押出し、冬期施工の制約のような事象が、建設工程に与える概略の影響を事例調査により明らかにした。その結果得られた知見を以下に示す。また、今後の課題を併せて示す。

(1) 地下施設の建設工程の検討

地下施設の掘進速度をサイクル機構から提示された資料から概略設定することにより、サイクル機構より提示された基本レイアウト（立坑坑底部までの深度 520m）の工程を求めた。立坑案では、第 2 年度に着工すれば第 7 年度に施設完成の見込みで、施設完成までに約 64 ヶ月を要する。斜坑案では、第 11 年度に施設完成の見込みで、施設完成までに約 115 ヶ月を要する。

防災を考慮した場合の施設レイアウトの建設工程については、立坑案では、第 2 年度に着工すれば第 7 年度に施設完成の見込みで、施設完成までに約６４ヶ月を要する。斜坑案では、第 9 年度に施設完成の見込みで、施設完成までに約 115 ヶ月を要する。ただし、防災を考慮した場合の施設レイアウトでの立坑および斜坑の増加分（避難用立坑および避難用斜坑）は同時着工が可能であり、退避空間や安全空間の施工は立坑（または斜坑）や予備ステージと併行して施工できるものと仮定した。

今後の課題として、立坑、斜坑および水平坑道の掘進速度の信頼度の向上が考えられる。このためには、施工上問題となることが考えられるメタンガスや湧水等の影響の程度を事前に把握し、対策工に要する建設工程を把握しておく必要がある。

(2) 建設工程に影響を与える因子に関する検討

可燃性ガス、湧水、地山の押出し、冬期施工の制約のような事象が、建設工程に与える概略の影響を事例調査に基づき示した。

1)メタンガスの影響について

可燃性ガス、主としてメタンガスが建設工程に与える影響については、山岳トンネル4事例および石炭鉱山10事例を調査し、メタンガス対策として濃度検知を行いながら濃度別作業規制を定めメタンガスの希釈や排除のための換気対策を講じた事例および、調査とガス抜きのための底設導坑を先進させ防爆仕様の機械や設備を使用した事例等が示された。換気設備の増強、機械・設備の防爆化や保安設備は、建設工程に与える影響が大きいことが分かった。

メタンガス発生量の推定については、推定式による方法と石油・ガス開発分野で利用されている数値解析による方法が示された。

メタンガス発生の程度や発生箇所については、建設工程に少なからず影響を与えると考えられることから、メタンガス発生の程度や発生箇所を予測するための具体的な方法については今後検討する必要がある。

2）湧水の影響について

湧水の影響については、湧水が問題となった具体的な事例を調査し、地質的特徴、事前の予測方法、現象と施工上の対策についてまとめた。また、湧水への対処が工期に与える影響を検討する上での参考とするため、高湧水部における注入実績を示した。

調査の結果、湧水を予測することを目的とし、以下のような方法が採られていることが分かった。

- 数値解析による湧水量の予測と掘削に伴う予測値の見直し
- 事前ボーリングによる地質や被圧水を有する層の確認
- 航空写真解析による断層破砕帯や滞水層の確認
- 電気探査（比抵抗影像法)、弾性波探査による地山等級の調査
- パイロット坑からの湧水状況からの湧水区間の推定

湧水の発生箇所やその程度を地下施設建設前の調査段階で把握することは限界があると考えられる。このため、地下施設建設前のボーリングや物理検層等の調査結果、地下施設建設中の探りボーリングや物理探査の結果、さらに数値解析による方法を適切に組合せることにより、湧水の発生箇所やその程度を建設段階ごとに予測することが重要であり、かつ現実的な方法であると考える。

3）押出しの影響について

押出しの影響については、建設工程への影響に関する事例は十分ではないが、湧水や押出しへの対策工法とその特徴および地下施設への適用性が示された。

また、トンネル壁面の押出しが問題となった具体的な事例を調査し、地質的特徴、事前の予測方法、現象と施工上の対策をまとめた。その結果、押出しを予測することを目的とし、以下のような方法が採られていることが分かった。

- 既往の崩壊事例の調査
- ボーリング調査、弾性波探査、坑内平板載荷試験等の事前調査・試験の実施
- 計測データによる変形の予測
- 数値解析による変形の予測
- 上記 2 つの組合せ（計測データによる変形の予測と数値解析による変形の予測の併用）

押出しの発生箇所やその程度を地下施設建設前の調査段階で把握することは限界があると考えられる。このため、地質条件の類似した既往の事例調査による押出しの程度の予測を行ったうえで、地下施設建設前のボーリングや物理検層等の調査結果、地下施設建設中の探りボーリングや物理探査の結果、さらに数値解析による方法を適切に組合せることにより、押出しの発生箇所やその程度を建設段階ごとに予測することが重要であり、かつ現実的な方法であると考える。

4）冬期施工について

冬期施工については、除雪、囲いによる養生、温水設備、不凍液の使用等の一般的な寒冷地対策が適用できるものと考えられる。

4. 堆積岩を対象とした施設設計に関する検討

4.1 目的

4.1.1 検討目的

堆積岩を対象とした深地層の研究施設を、安全に現実的な支保で建設、維持することを目的として、施設の深度や支保を設定する際、現状においては、地山の限界ひずみや、局所安全率等が安定性評価指標として用いられているが、地下深部の堆積岩を対象とした場合、必ずしも現実の岩盤挙動を正確に反映しているとは言い難い。よって、現状技術での堆積岩を対象とした空洞安定性評価手法の限界を把握し、その限界を踏まえた上で、安全な深度および支保を設定する必要がある。

本検討は、本施設を安全に建設、維持することを目的として深度や支保を設定する際に重要となる、空洞安定性評価手法についての調査、評価を行うものである。

4.1.2 検討内容

(1) 空洞安定性評価手法の調査、検討

堆積岩における空洞安定性評価手法について、「堆積岩を対象とした地下へのアクセス坑道に関する研究」「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－」における手法の他、初期地圧が大きい地盤にトンネルを施工した場合の文献調査に基づき現状の技術における手法を挙げ、それぞれの適用性や現実の岩盤挙動の再現性の観点から比較評価を行う。

(2) 必要となる入力条件、問題点、課題点の提示

(1)の評価結果に基づき、空洞安定性評価手法を本施設の設計に適用するにあたって必要となる入力条件、問題点、課題点を提示する。

4.1.3 検討方針

(1) 検討のポイント

本検討は下記の点に着目して進めることとした。

①手法が確立されていない土被りの大きなトンネルの設計

本検討は、既往の施工事例が少ないと考えられる、大土被りで初期地圧が大きな地点におけるトンネルの安定性評価手法についての検討であり、大土被りであること（初期地圧が大きいこと）を考慮した設計手法は確立されていないことから、既往の設計・施工事例がどのような安定性評価を行っているかについて調査を行う必要がある。

②堆積軟岩中のトンネル設計

本検討は、堆積岩を対象とした深地層の研究施設の設計に関する検討であるが、施設を建設する深度が大きいのに対して施設周囲の岩盤は必ずしも十分な強度を有していないと予想されており、いわゆる堆積軟岩中の大深度トンネルであることを考慮した設計手法について調査を行う必要がある。

③トンネル支保の設計

本検討の対象は堆積軟岩中の大土被りのトンネルであり、既往の研究成果によれば素堀りでは空洞安定性が確保できず、剛性を有した支保が必要であるとされている。すなわち、本検討での空洞安定性評価手法とは、空洞安定性を確保するために必要な支保仕様を決定するための、トンネル支保の設計手法であると考えることができる。

(2) 検討の進め方

a) 既往の設計手法の調査（現状の技術における手法の調査）

①既往の研究成果の整理

・「堆積岩を対象とした地下へのアクセス坑道に関する研究」「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－」の報告内容のうち、堆積岩を対象とした深地層の研究施設の建設に関わるトンネル支保設計手法の報告内容について、確認と整理を行う。

②トンネル施工事例調査

・大土被りで初期地圧が大きい条件でトンネルを施工した事例調査を行う。

・事例調査では初期地圧の大きいトンネルの支保設計手法、設計（計算）と計測結果との関係に着目する。

・公開されている文献を対象にトンネル施工事例の収集を行う。主な対象文献は下記の通りとする。調査対象として適していると判断されたトンネルの情報については必要に応じて別途収集を行う。

　・トンネルと地下（1973年～2000年）

③大深度トンネル支保設計に関する文献調査

・大土被りで初期地圧が大きい条件でのトンネル支保設計に関する研究について文献調査を行う。

・主として堆積軟岩におけるトンネル設計手法を対象とする。

④トンネル支保設計手法の整理・比較評価

・トンネル支保設計手法（現状の技術における手法）の整理を行う。

・収集した事例のうち調査対象として適していると判断されたものについて、下記の点に着目して実績の分析・評価を行う。

　・適用した設計と実際の挙動について

　・計算によるシミュレーションの有無

　・計算方法、入力条件について

・空洞安定性の評価指標について整理を行う。

・空洞安定性評価手法（トンネル支保設計手法）とその評価指標について比較評価を行い、適用性に関して検討を行う。

※堆積軟岩中のトンネルでは膨張性地圧がしばしば問題となるが、「大深度」「初期地圧」に着目した今回の検討では膨張性地圧に着目した検討は対象外とする。

b) トンネル支保設計にあたり必要となる入力条件、問題点、課題点の提示

①トンネル支保設計にあたり必要となる入力条件

a)での検討結果に基づいた空洞安定性評価手法（トンネル支保設計手法）を本施設の設計に適用する際に必要となる入力条件について整理を行う。

②問題点、課題点の提示

同じく、現状の技術における空洞安定性評価手法（トンネル支保設計手法）を堆積軟岩中の大深度トンネルである本施設の設計に適用する際の問題点、課題点を提示する。

4.2 空洞安定性評価手法の検討

4.2.1 既往の空洞安定性評価手法（設計手法）の調査

4.2.1.1 既往の研究成果の整理

本節では、下記の既往の研究成果のうち、本検討に関わる内容について、特にトンネルの安定性評価の指標に着目して要旨を整理した。

・「堆積岩を対象とした地下へのアクセス坑道に関する研究
（核燃料サイクル開発機構　委託研究内容報告書）」
1998 年 10 月　大成建設株式会社

・「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性
－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－」
1999 年 11 月　核燃料サイクル開発機構

(1) 「堆積岩を対象とした地下へのアクセス坑道に関する研究」

〔要旨〕

・一次支保は専ら地山の初期応力の解法にあて、二次覆工に緩み荷重を負担させるとの考えで一次支保、二次覆工の試設計を行った結果、支保工厚は 50～60cm 程度となる。

・初期地圧が大きいため、周辺地山を弾性範囲をこえて変形させて初期応力を解放させることを前提とした一次支保の設計方法を採用した。

・荷重として水圧を考慮しない。

・一次支保の設計は弾塑性理論にもとづく理論解析手法（岡の方法）を用いる。

・掘削により解放される地山応力は、剛な一次支保で受けるのではなく、柔な一次支保で受けて地山の変形を許容する。

・計算上の一次支保は吹付コンクリート（f'ck＝18N/mm^2 程度の一般的な強度）とする。

・空洞安定性評価（＝トンネル支保の安定性評価）の指標は、一次支保（吹付コンクリート）の発生応力とし、その基準は設計基準強度以内とする。

・二次覆工は地山の変形が収束した後に打設するものとする。二次覆工には初期地圧の解放応力とは別途に設計荷重（緩み荷重）を設定し、発生応力が許容応力度以内という基準により安定性評価を行う。

・初期地圧が大きな場合、変形させることにより地山の応力をある程度解放させなければ支保で地山の応力を支えることは困難である（支保の発生応力が過大となる）。

(2) 「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性
－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－」

〔要旨〕

・軟岩系岩盤については、深度 500m 程度を超えると解析上は現実的な支保工厚で建設することが難しくなる。

・坑道支保工の設計手法は、標準支保パターンに代表されるような経験にもとづく方法と力学的な計算にもとづく方法の 2 つに分類できるが、地層処分場と同等の大深度における施工事例が少ないこと等から、経験にもとづく設計手法を適用することはできず、計算にもとづく方法により支保工仕様を求めることにした。

・理論解析手法は、弾塑性理論解にもとづく岡の方法を用いた。数値解析手法は、適用実績が多いことから地山を均質な連続体でモデル化した有限要素法による弾塑性解析（モール・クーロンの破壊基準）を用いた。

・地山物性値は一軸圧縮強度 qu＝25MPa～5MPa の 5 種類（SR-A～SR-E）に類型化した検討用設定値を使用した。

・トンネルの安定性評価指標は下記の通りとした。

理論解析	有限要素法解析	判定基準
支保工応力度	支保工応力度	許容応力度
－	岩盤の局所安全率	Fs＝1.5
岩盤の直ひずみ	最大せん断ひずみ	限界ひずみ $\log \varepsilon_c = -0.25\log E - 1.22$ $\gamma_0 = (1+\nu)\varepsilon_0$（＝0.57%）

・理論解析による解析結果では、岩盤の力学物性により岩盤自身の支持力で空洞が安定する深度は異なり、相対的に軟弱な岩盤ほど岩盤自身で安定する深度は浅くなる。深度 500m とするとき、一軸圧縮強度 qu＝10MPa, 5MPa（SR-D、SR-E）の軟岩系岩盤では計算上の必要支保厚が 1m 以上になる。

・軟岩系岩盤の場合、理論解析手法で求めた支保工仕様の妥当性を有限要素法による数値解析で確認することができた。

4.2.1.2 トンネル施工事例調査

(1) 調査方法

堆積岩を対象とした深地層の研究施設は深度 500m 程度という、既往の施工事例が少ないと考えられる大深度に計画されており、初期地圧の大きな地下空洞の支保設計が問題となっている。本節では、初期地圧の大きなトンネルの支保設計手法の検討に関して示唆を含む事例を見いだす目的で、最大土被りが 200m 程度以上の大深度トンネルを対象に文献により施工事例を収集した。立坑については、トンネルの支保設計手法を準用できることをふまえ、事例収集の対象外とした。また、地下発電所等の大規模地下空洞は、対象地質や断面形状が大きく異なることから調査対象として適切でないと考え対象外とした。

調査対象文献は公開されているものとし、トンネルの施工事例を収集することを考慮して下記の文献とした。また、検討対象として適していると判断されたトンネル事例については、必要に応じて他の文献にも情報を求めた。

・トンネルと地下（1973 年～2000 年）

施工事例の収集においては、下記の点に着目した。

・施工事例の少ない深部のトンネルの安定性の根拠となる既往のトンネル施工実績データを提示する。
・既往の設計手法によれば、大深度トンネル（初期地圧大）では剛性の大きな支保が必要となるが、従来の施工実績より現実的な支保部材がどの程度の規模なのかを明らかにする。
・安定性評価指標の適用性や評価基準の設定に関する検討を行うことができるような施工実績データを得る。
・堆積軟岩特有のクリープ現象によるトンネル挙動の計測事例や、支保設計に反映させた事例があれば参考とする。

(2) 調査結果

調査の結果、上記に該当するトンネル事例は 72 件収集することができた。調査対象トンネル名および調査文献リストを次頁に示す。

表 4.2.1-1　調査対象トンネル(1)

No.	トンネル名	用途	最大土被り	軟岩	硬岩	記　事
1	鬼峠トンネル	ＪＲ、鉄道	300 m		○	
2	白宗トンネル	水資源、水路	450 m		○	
3	第2六甲山トンネル	神戸市、道路	300 m		○	
4	月山第1･第2トンネル	建設省、道路	200 m		○	
5	福岡トンネル	国鉄、新幹線	450 m		○	
6	青山トンネル	私鉄、鉄道	300 m		○	
7	赤倉トンネル	国鉄、鉄道	450 m	○		
8	笹子トンネル	ＪＨ、道路	600 m		○	
9	大清水トンネル	国鉄、新幹線	1,700 m		○	
10	中山トンネル	国鉄、新幹線	400 m	○		
11	蔵王トンネル	国鉄、新幹線	450 m	○		
12	鍋立山トンネル	国鉄、鉄道	300 m	○		
13	中呂発電所放水路Ｔ	中電、水路	550 m		○	鋼製支保工補強
14	新鳥居トンネル	建設省、道路	400 m		○	
15	関越トンネル	ＪＨ、道路	1,000 m		○	
16	浦佐トンネル	ＪＲ、新幹線	200 m	○		
17	第3白坂トンネル	国鉄、鉄道	200 m	○		
18	新和田トンネル	建設省、道路	250 m	○		
19	第2名塩トンネル	国鉄、鉄道	250 m	○		
20	新宇佐美トンネル	国鉄、鉄道	280 m		○	地山強度比 可縮支保工
21	木原トンネル	ＪＨ、道路	200 m	○		
22	横谷トンネル	熊本県、道路	300 m	○		
23	恵那山トンネル	ＪＨ、道路	1,000 m		○	
24	藤白トンネル	ＪＨ、道路	250 m		○	
25	駒止トンネル	福島県、道路	300 m		○	
26	塩嶺トンネル	国鉄、鉄道	300 m	○		
27	新榎トンネル	新潟県、道路	200 m	○		
28	明神トンネル	ＪＨ、道路	400 m	○	○	
29	高見トンネル	建設省、道路	300 m		○	
30	多紀連山トンネル	ＪＨ、道路	240 m		○	
31	小坂川発電所導水路	中電、水路	300 m		○	
32	坂梨第1トンネル	ＪＨ、道路	250 m	○		
33	地蔵トンネル	国鉄、鉄道	200 m		○	
34	生駒トンネル	私鉄、鉄道	500 m		○	
35	北神トンネル	私鉄、鉄道	300 m		○	
36	第2新神戸トンネル	神戸市、道路	350 m		○	

表 4.2.1-2 調査対象トンネル(2)

No.	トンネル名	用途	最大土被り	軟岩	硬岩	記　事
37	丸子トンネル	建設省、道路	250 m	○		
38	子不知トンネル	ＪＨ、道路	250 m		○	
39	飯山トンネル	国鉄、鉄道	350 m	○		
40	万之瀬川導水路2号Ｔ	鹿児島県、水路	400 m			
41	常盤トンネル	ＪＨ、道路	200 m		○	
42	八田原トンネル	ＪＲ、鉄道	250 m		○	
43	阪奈トンネル	奈良県、道路	500 m		○	
44	雁坂トンネル	建設省、道路	850 m		○	
45	大山トンネル	ＪＨ、道路	300 m		○	
46	笹ケ峰トンネル	ＪＨ、道路	450 m		○	
47	八鬼山トンネル	三重県、道路	400 m		○	
48	一本松トンネル	ＪＨ、道路	300 m	○		NTL
49	安房トンネル	建設省、道路	550 m		○	
50	会田トンネル	ＪＨ、道路	300 m		○	
51	第三紫尾山トンネル	ＪＲ、新幹線	350 m			
52	肥後トンネル	ＪＨ、道路	600 m		○	
53	加久藤トンネル	ＪＨ、道路	350 m		○	
54	新親不知トンネル	ＪＲ、新幹線	300 m		○	
55	第1朝日トンネル	ＪＲ、新幹線	350 m		○	
56	第2今泉トンネル	ＪＲ、新幹線	(300m以上)	○		
57	五里ケ峰トンネル	ＪＲ、新幹線	500 m		○	
58	松の木3号トンネル	秋田県、道路	300 m		○	
59	八重原トンネル	ＪＲ、新幹線	200 m	○		
60	竜ケ岳トンネル	ＪＨ、道路	250 m	○		
61	八ツ口トンネル	石油資源開発 ガスパイプライン	250 m		○	ｼﾝｸﾞﾙｼｪﾙ
62	森トンネル	ＪＨ、道路	250 m		○	
63	宮ケ瀬ダム導水路Ｔ	建設省、水路	750 m		○	TBM
64	一ノ瀬トンネル	ＪＲ、新幹線	300 m	○		
65	滝里発電所導水路	北電、水路	200 m		○	TBM
66	寒風山トンネル	建設省、道路	900 m		○	高強度吹付コン
67	市振トンネル	ＪＨ、道路	300 m			
68	岩手トンネル	ＪＲ、新幹線	230 m			
69	鞍手山トンネル	ＪＨ、道路	250 m			
70	朝日トンネル	ＪＲ、鉄道	400 m			高耐力支保工 早期閉合
71	栗東トンネル	ＪＨ、道路	200 m			
72	田上トンネル	ＪＲ、鉄道	400 m			

表4.2.1-3　調査対象文献リスト(1)

No.	出典	年月	タイトル	トンネル名	最大土被り	現象
1	トンネルと地下	1971.09	強大な膨張性土圧を克服	紅葉山線　鬼峠トンネル	300 m	
2	トンネルと地下	1973.01	水資源長大トンネルの施工	木曽川右岸　白宗トンネル	450 m	
3	トンネルと地下	1973.01	第2六甲山トンネルの計画と現状	第2六甲山トンネル	300 m	
4	トンネルと地下	1973.03	月山道路トンネルの計画と施工	月山第1・第2トンネル	200 m	
5	トンネルと地下	1973.08	毎分23tの異常湧水に挑む	三陽新幹線　福岡トンネル東工区	450 m	
6	トンネルと地下	1974.05	片サイロット工法による青山トンネルの施工 近鉄・大阪線複線化工事	青山トンネル	300 m	
7	トンネルと地下	1974.10	膨張性地山を抜く円型断面の施工	北越北線　赤倉トンネル	450 m	
8	トンネルと地下	1974.11	上半崩落の復旧工	中央道　笹子トンネル	600 m	
9	トンネルと地下	1975.06	新幹線現場見て歩き　新潟県の巻	大清水トンネル	1,700 m	
10	トンネルと地下	1978.12	完成間近の大清水トンネル	大清水トンネル	1,700 m	
11	トンネルと地下	1975.06	湧水と闘う立坑工事	上越新幹線　中山トンネル	400 m	
12	トンネルと地下	1977.04	膨圧トンネルにおけるロックボルト工	上越新幹線　中山トンネル	400 m	
13	トンネルと地下	1975.09	断層突破１年間の苦闘	東北新幹線　蔵王トンネル	450 m	
14	トンネルと地下	1978.04	強大な地圧に挑む（1）	北越北線　鍋立山トンネル	300 m	
15	トンネルと地下	1978.05	強大な地圧に挑む（2）	北越北線　鍋立山トンネル	300 m	
16	トンネルと地下	1978.06	強大な次圧に挑む（最終回）	北越北線　鍋立山トンネル	300 m	
17	トンネルと地下	1993.01	19年ぶりに導坑貫通の鉄道トンネル	北越北線　鍋立山トンネル	300 m	
18	トンネルと地下	1995.07	超膨圧トンネル掘削完了	北越北線　鍋立山トンネル	300 m	
19	トンネルと地下	1978.07	阿寺断層を抜く	中呂発電所放水路トンネル	550 m	鋼製支保工補強
20	トンネルと地下	1978.11	国道19号のネックを解消	新鳥居トンネル	400 m	
21	トンネルと地下	1979.01	本格化した関越トンネル工事（1）南工区の現況	関越トンネル	1,000 m	
22	トンネルと地下	1979.02	本格化した関越トンネル工事（2）北工区の現況	関越トンネル	1,000 m	
23	トンネルと地下	1984.09	破砕帯偏土圧による変状とその対策	関越トンネル谷川換気用立坑	1,000 m	
24	トンネルと地下	1985.08	関越トンネルを回顧する	関越トンネル	1,000 m	
25	トンネルと地下	1988.06	大型機械を駆使した急速施工	関越自動車道　関越トンネル・	1,000 m	

表4.2.1-4　調査対象文献リスト(2)

No.	出典	年月	タイトル	トンネル名	最大土被り	現象
26	トンネルと地下	1979.03	土砂流失と膨圧地帯を貫く	上越新幹線　浦佐トンネル	200 m	
27	トンネルと地下	1979.04	NATMの試験施工と考察	篠ノ井線　第3白坂トンネル	200 m	
28	トンネルと地下	1979.05	高含水比の細砂層を貫く	国道142号　新和田トンネル	250 m	
29	トンネルと地下	1980.03	硬岩におけるNATMの施工 福知山潜宝塚～篠山口間複線化	第2名塩トンネル	250 m	
30	トンネルと地下	1980.07	超膨張性地山におけるNATMの施工（1）	伊東線　新宇佐見トンネル	280 m	地山強度比、可縮支保工
31	トンネルと地下	1980.08	超膨張性地山におけるNATMの施工（2）	伊東線　新宇佐見トンネル	280 m	地山強度比、可縮支保工
32	トンネルと地下	1980.08	えびのカルデラ縁辺部地すべり谷を掘る	九州自動車道　木原トンネル	200 m	
33	トンネルと地下	1981.02	県境を貫く	国道219号　横谷トンネル	300 m	
34	トンネルと地下	1973.10	620mの換気立坑工事	恵那山道路トンネル	1,000 m	
35	トンネルと地下	1981.05	第2期恵那山トンネルの断層掘削	恵那山トンネル	1,000 m	
36	トンネルと地下	1984.08	トンネル分岐部の大断面掘削	中央自動車道　恵那山トンネル （2期線）中津川方	1,000 m	
37	トンネルと地下	1981.08	片岩地帯におけるNATM	海南湯浅道路　藤白トンネル	250 m	
38	トンネルと地下	1981.09	膨張性地山におけるNATM	国道289号　駒止トンネル	300 m	
39	トンネルと地下	1982.01	湧水区間におけるNATM	中央東線　塩嶺トンネル岡谷方	300 m	
40	トンネルと地下	1983.12	中央東線塩嶺トンネルの総まとめ	中央東線　塩嶺トンネル	300 m	
41	トンネルと地下	1982.05	超膨張性地山区間と湧水区間におけるNATM	国道351号　新榎トンネル	200 m	
42	トンネルと地下	1982.12	古生層多層地山におけるNATM	四国横断自動車道　明神トンネル	400 m	
43	トンネルと地下	1983.01	中央構造線沿いを掘る	国道166号　高見トンネル	300 m	
44	トンネルと地下	1983.08	日本海と大平洋の最も低い峠を貫く	近畿自動車道　多紀連山トンネル	240 m	
45	トンネルと地下	1983.09	小断面トンネルでの急速施工の試み	中部電力・小坂川発電所導水路	300 m	
46	トンネルと地下	1983.10	秋田・青森県堺を貫く	東北自動車道　坂梨第１トンネル	250 m	
47	トンネルと地下	1984.02	NATMで丹波古生層に挑む	山陰本線　地蔵トンネル	200 m	
48	トンネルと地下	1984.03	生駒山に3本目のトンネルを掘る	東大阪生駒電鉄東大阪線 生駒ﾄﾝﾈﾙ	500 m	
49	トンネルと地下	1984.09	新神戸駅の下を抜く	北神急行電鉄　北神トンネル	300 m	
50	トンネルと地下	1986.02	第2新神戸トンネルの計画と施工	第2新神戸トンネル	350 m	

表4.2.1-5　調査対象文献リスト(3)

No.	出典	年月	タイトル	トンネル名	最大土被り	現象
51	トンネルと地下	1986.10	偏平大断面道路トンネルの施工	静清バイパス　丸子トンネル	250 m	
52	トンネルと地下	1988.03	子不知衝上断層を克服	北陸自動車道　子不知トンネル	250 m	
53	トンネルと地下	1988.06	膨圧層克服に自信を深めた飯山トンネル 北陸新幹線調査坑試験報告	飯山トンネル	350 m	
54	トンネルと地下	2000.11	二重支保工法で膨張性地山を克服	北陸新幹線 飯山トンネル富倉工区	350 m	
55	トンネルと地下	1988.08	25kgf/cm^{2}の高水圧と毎分14.5m^{3}の大湧水を克服	万之瀬川導水路2号トンネル	400 m	
56	トンネルと地下	1989.06	神居古潭変成帯をNATMで貫く	道央自動車道　常磐トンネル	200 m	
57	トンネルと地下	1989.11	ダム建設に伴う既設鉄路の付替え成る	JR西日本福塩線　八田原トンネル	250 m	
58	トンネルと地下	1990.05	金剛生駒国定公園直下に長大トンネルを掘る	一般国道308号　阪奈トンネル	500 m	
59	トンネルと地下	1990.09	土かぶり200mで山はね現象に遭遇	国道140号　雁坂トンネル	850 m	
60	トンネルと地下	1990.11	柱状節理の石英斑岩を全断面工法で貫く	上信越自動車道　大山トンネル	300 m	
61	トンネルと地下	1991.03	土予国境の三波川変成帯に挑む	四国横断自動車 笹ケ峰ﾄﾝﾈﾙ南工事	450 m	
62	トンネルと地下	1991.04	三重県最長の道路トンネルを掘る	国道311号　八鬼山トンネル	400 m	
63	トンネルと地下	1991.04	NTL工法の試験施工	長野自動車道　一本松トンネル	300 m	NTL
64	トンネルと地下	1992.03	高熱帯と高水圧低速度帯を克服して調査坑が貫通	一般国道158号　安房トンネル	550 m	
65	トンネルと地下	1995.11	安房トンネルの本坑が貫通 高圧帯水火山噴出物層と高熱帯を克服	安房トンネル	550 m	
66	トンネルと地下	1998.08	標高1,790mから450mの立坑を掘削	一般国道158号 安房ﾄﾝﾈﾙ換気立坑	550 m	
67	トンネルと地下	1992.04	新第三紀泥岩を補助ベンチ付き全断面で掘削	長野自動車道　会田トンネル	300 m	
68	トンネルと地下	1992.04	九州新幹線(八代・西鹿児島間)最長のﾄﾝﾈﾙを掘る	第3柴尾山トンネル	350 m	
69	トンネルと地下	1993.08	既設作業坑の拡幅計画	九州縦貫自動車道　肥後トンネル	600 m	
70	トンネルと地下	1994.04	縦貫道全通に向けて最後の難関を克服	九州自動車道　加久藤トンネル	350 m	
71	トンネルと地下	1999.11	断層破砕帯の湧水を新たな水抜き工で突破	北陸新幹線　新親不知ﾄﾝﾈﾙ西工区	300 m	
72	トンネルと地下	1994.04	日本海沿岸に延びる新幹線 北陸新幹線糸魚川・魚津間の施工計画	新親不知トンネル 第１朝日トンネル	300 m 350 m	
73	トンネルと地下	1994.06	蛇紋岩地山をNATMで掘る	九州新幹線　第2今泉トンネル	(300m以上)	

表4.2.1-6　調査対象文献リスト(4)

No.	出典	年月	タイトル	トンネル名	最大土被り	現象
74	トンネルと地下	1996.03	SFRC二次覆工で蛇紋岩膨圧区間を克服	九州新幹線　第2今泉トンネル	(300m以上)	
75	トンネルと地下	1994.11	NONEL雷管とANFO爆薬による長孔発破	北陸新幹線 五里ヶ峯ﾄﾝﾈﾙ上田工区	500 m	
76	トンネルと地下	1995.09	電子雷管によるスムースブラスティングの効果	国道108号改良工事 松の木3号ﾄﾝﾈﾙ	300 m	
77	トンネルと地下	1996.06	土かぶり200mの未固結砂層を抜く	北陸新幹線　八重原ﾄﾝﾈﾙ東工区	200 m	
78	トンネルと地下	1993.12	大型自動断面掘削機で大断面に挑む	盤越自動車道　竜ケ岳トンネル	250 m	
79	トンネルと地下	1996.02	凝灰岩の変質帯を長尺鏡ボルトで突破	盤越自動車道　竜ケ岳トンネル	250 m	
80	トンネルと地下	1996.03	ﾌｧｲﾊﾞｰ補強ﾓﾙﾀﾙ吹付けによる小断面ﾄﾝﾈﾙの施工	新潟～仙台ガスパイプライン 八ツ口トンネル工事	250 m	シングルシェル
81	トンネルと地下	1996.07	鋼管膨張型ボルトで亀裂性地山を掘る	上信越自動車道　森トンネル	250 m	
82	トンネルと地下	1996.08	TBMによる高速施工に挑戦	宮ケ瀬ダム導水路トンネル	750 m	TBM
83	トンネルと地下	1997.05	複雑な地質を克服した北陸新幹線トンネル群	一ノ瀬トンネル	300 m	
84	トンネルと地下	1997.09	日本最大径のTBMによる導水路の施工	北海道電力　滝里発電所導水路	200 m	TBM
85	トンネルと地下	1998.01	高強度吹付けｺﾝｸﾘｰﾄにより大土かぶりを克服	一般国道194号　寒風山トンネル	900 m	高強度吹付コン
86	トンネルと地下	1998.03	供用線近接の避難坑拡幅による2期線施工	北陸自動車道　市振トンネル	300 m	
87	トンネルと地下	1998.05	SFRC覆工で収束しない変位に対抗	東北新幹線　岩手ﾄﾝﾈﾙ女鹿工区	230 m	
88	トンネルと地下	1998.08	高強度吹付けコンクリートの施工試験	盤越自動車道　鞍手山トンネル	250 m	
89	トンネルと地下	1998.12	鋼製支保工の高耐力化と早期閉合で膨圧を克服	北陸新幹線　朝日トンネル東工区	400 m	高耐力支保工、早期閉合
90	トンネルと地下	1999.01	新鮮花崗岩における大断面ﾄﾝﾈﾙ支保構造の検証	第二名神高速道路　栗東トンネル	200 m	
91	トンネルと地下	1999.03	発破掘削に連続ベルコンずり出しシステム	九州新幹線　田上トンネル	400 m	

(3) トンネル施工事例研究

前項で収集した 72 件のトンネル施工事例の中で、土被りが大きく、大きな初期地圧とトンネル支保の関係について考察されている事例を抽出し、研究する。

該当する事例は次の 3 件であった。以下に、各事例についてのデータシートと考察内容の要旨を整理する。

(50) 会田トンネル
(66) 寒風山トンネル
(70) 朝日トンネル

a) 会田トンネル

〔要旨〕

・最大土被り約 300m、新第三紀層（泥岩、砂岩、礫岩）の 2 車線道路トンネル（長野県）
・土被りが大きいほど変位量が大きくなる傾向はあるものの、両者に明確な相関関係はみられなかった。これは地質特性によるものと考えられる。
・不良地山部では一次支保に変状が見られ、対策として主に増しロックボルトを採用した。

b) 寒風山トンネル

〔要旨〕

・土被り 400m～900m の比較的同一の地質中に施工された 2 車線道路トンネル（愛媛・高知県境）
・主な地質は泥質片岩であり、剥離性・異方性が強く一軸圧縮強度は 220kgf/cm^2 程度であった。
・地質条件が一定で土被りが変化する場合の施工事例として参考になると考えられる。
・土被りが 400m を越えた付近から天端沈下量や内空変位量が増加しはじめ、一次支保に顕著な変状が発生した。この変状は土被りが大きく地圧が高いことによる支保耐力不足が原因と推定された。
・支保の見直し等の検討に用いる岩盤物性値は計測データをもとに逆解析により

推定した。

・支保の検討には、変位を許容する考え方ではなく、変位を抑制するために地圧に対して剛に押さえる考え方を採用した。

・変状対策として、高強度吹付コンクリートを主体とする特殊支保パターンを採用し、支保耐力（支保内圧）を高めることにより安定性を確保した。

・安定性評価指標は、主に許容変位（許容限界ひずみ）であり、これより求められる必要支保内圧を満足する特殊支保パターンを土被り厚ごとに設定している。

c) 朝日トンネル

〔要旨〕

・新幹線トンネル（富山県）

・断層破砕帯において、土被り 400m に対して一軸圧縮強度が 1.9～3.4kgf/cm^2 と地山強度比が極端に小さい凝灰岩破砕帯粘土や礫混じり粘土層が出現し、強大な地圧の作用により支保部材の押出し、変形、破断などの現象が発生した。

・X線分析の結果、膨張性モンモリロナイトは極微量であり、主に地山の強度不足による変状であると推測。

・対策として、上半仮閉合、インバート早期閉合を実施し効果をあげた。

・支保耐力の絶対的不足が考えられたため、鋼製支保工を重ね合わせて建て込むことにより高耐力化を図り、変位速度、変位量を減少させることに成功した。

・地山強度比が 0.1 を下回るような強度の小さい地山でのトンネルの安定化には、掘削外力に見合う支保剛性と断面性能が必要である。支保部材の保有耐力を活かすには、変形余裕を大きく取り、トンネルの形状を円形にして早期断面閉合による軸力構造体の構築が最も有効である。

表 4.2.1-7　トンネル施工事例データシート（会田トンネル）

トンネル名	会田トンネル	No.	50
用途	高速道路、長野自動車道		
発注者	日本道路公団	施工者	大成・佐藤JV、鉄建・東急JV
施工場所	長野県東筑摩郡	施工期間	
最大土被り	300m	地形	
地形・地質	新第三紀中新世の泥岩、砂岩及び礫岩から構成され、南側は泥岩優勢、北側は砂岩優勢で各に安山岩が数カ所貫入している。それらを第四紀の段丘堆積物及び崖錐堆積物が覆っている。		
硬岩・軟岩	軟岩～硬岩		
岩盤物性	一軸圧縮強度qu＝150～400kgf/cm2、平均で200kgf/cm2以上 弾性波速度：2.5～3.3km/s		
断面形状			
吹付コンクリート	5, 10cm	鋼製支保工	H-125
ロックボルト	L=3.0, 4.0m		
覆工コンクリート		インバート	変状区間のみ設置
工法	NATM	掘削方法	
加背割	全断面掘削	掘削方法	
掘進長	1.0～2.0m	ベンチ長	
計測情報	○		
計測項目	内空変位		
計測関係その他	内空変位と土被りの関係		
現象	ロックボルト頭部変形、支保工変形・座屈（変状状況一覧表あり）		
対策			
解析・検討			
備考			

概要図

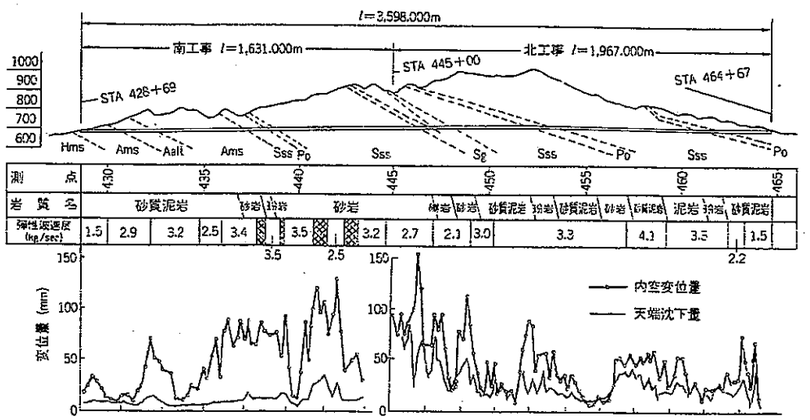


図-5　地質縦断図および変位図（上り線）

文献	トンネルと地下（1992.4）

トンネル名	会田トンネル

資料

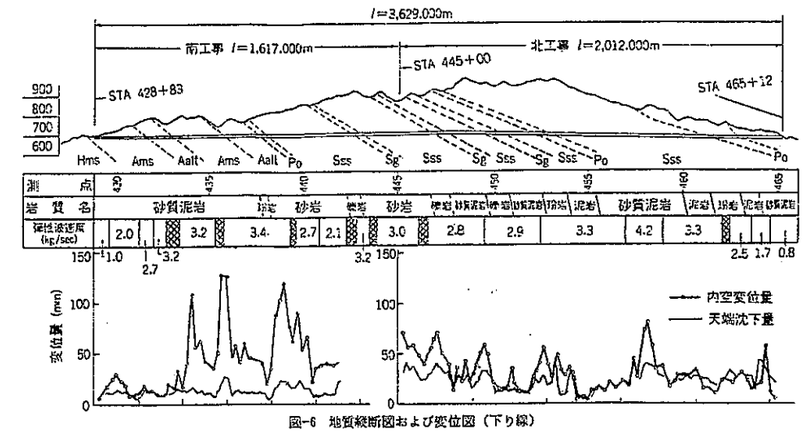


図-6　地質縦断図および変位図（下り線）

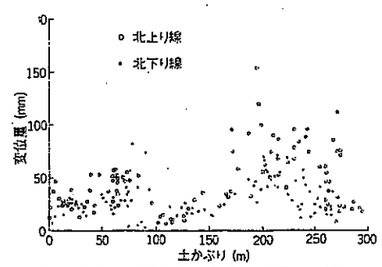


図-7　土かぶりと最終内空変位量の相関図（北工事）

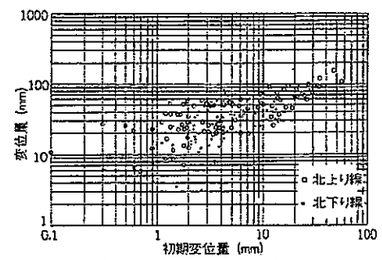


図-9　初期変位量と最終内空変位量の相関図（北工事）

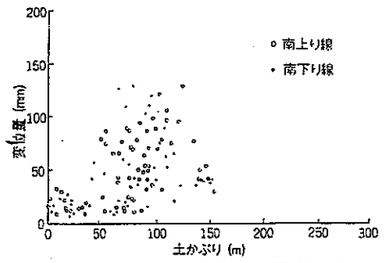


図-8　土かぶりと最終内空変位量の相関図（南工事）

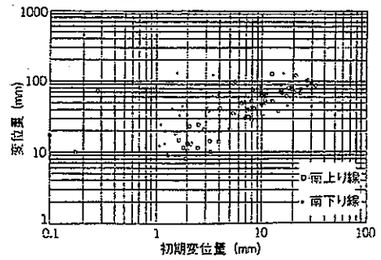


図-10　初期変位量と最終内空変位量の相関図（南工事）

表 4.2.1-8　トンネル施工事例データシート（寒風山トンネル）

トンネル名	寒風山トンネル	No.	66
用途	道路、国道194号		
発注者	建設省	施工者	鹿島・大成ＪＶ
施工場所	愛媛・高知県境	施工期間	
最大土被り	900m	地形	
地形・地質	トンネルの地質は約75%が泥質片岩（黒色片岩）からなり、片岩特有の片理面が発達し、剥離性および異方性が強い。		
硬岩・軟岩	硬岩		
岩盤物性	単位体積重量γ＝2.674kgf/cm3、静弾性係数E＝329,000kgf/cm2 ポアソン比ν＝0.03（逆解析） 一軸圧縮強度qu＝219kgf/cm2 内部摩擦角φ＝50°（逆解析） 弾性波速度：3.5～6.0km/s（原位置）		
断面形状	上半内空半径4.8m、H＝7800mm、W＝9928mm		
吹付コンクリート	30cm	鋼製支保工	H-250 ctc1.0m
ロックボルト	L=4.0m		
覆工コンクリート	40cm	インバート	50cm
工法	NATM	掘削方法	発破
加背割			
掘進長		ベンチ長	
計測情報	◎		
計測項目	内空変位、地中変位、ﾛｯｸﾎﾞﾙﾄ軸力、吹付コン応力、鋼製支保工応力、二次覆工応力		
計測関係その他	土被り量と天端沈下量、最大変位量、変状発生、必要支保厚、予測変位など記載有り。		
現象	土被りが400mを越えた付近から、高地圧による支保耐力不足により内空変位量が増大。 特殊支保の採用による変位抑制効果はみられたが、大きな支保の変状を生じた箇所有り。		
対策	高強度吹付コンクリートを主体とする特殊支保パターンの採用し、支保内圧を高めることにより安定性を確保した。		
解析・検討	有り（Kastnerの方法、Hoek&Brownの方法を用いた逆解析的な弾塑性解析等）		
備考			

概要図

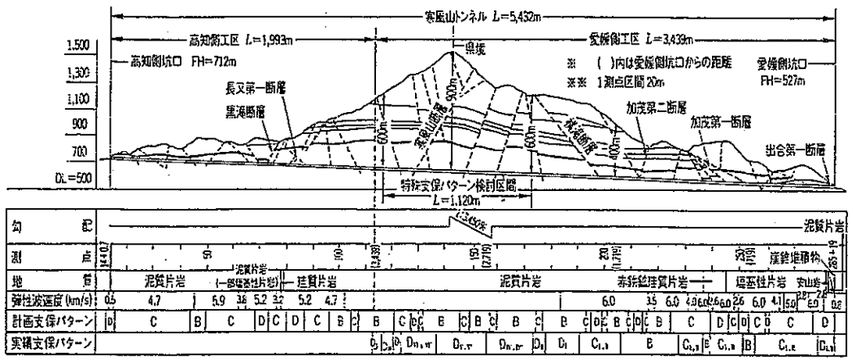


図-3　地質縦断図

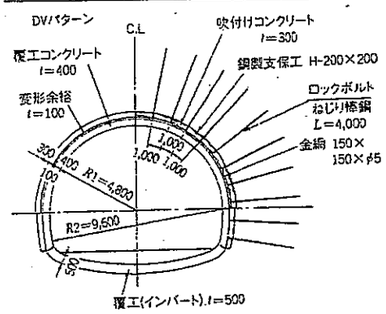
文献	トンネルと地下（1998.1）

トンネル名	寒風山トンネル

資料

表-3　高土かぶりにおける特殊支保パターンの諸元

		一般部特殊支保パターン			非常駐車帯部特殊支保パターン	
土かぶり		600～700m	700～800m	800～900m	600～700m	700～800m
計画延長		508m	256m	260m	32m（1か所）	32m（2か所）
支保パターン		DⅣ	DⅤ	DⅥ	DⅣ－L	DⅤ－L
覆工厚さ	(cm)	40 （インバート）50	40 （インバート）50	40 （インバート）50	40 （インバート）50	40 （インバート）50
吹付けコンクリート	(cm)	30 σ7＝250kgf/cm²	30 σ7＝290kgf/cm²	35 σ7＝290kgf/cm²	35 σ7＝290kgf/cm²	40 σ7＝290kgf/cm²
金網		上下半	上下半	上下半	上下半	上下半
ロックボルト	ボルト長 (m)	L＝4.0 耐力18tf	L＝4.0 耐力18tf	L＝5.0 耐力18tf	L＝5.0 耐力18tf	L＝6.0 耐力18tf
	間隔（延長方向×周方向）(m)	1.0×1.2	1.0×1.0	1.0×1.0	1.0×1.0	1.0×0.75
鋼製アーチ支保工	種類	H-200	H-200	H-250	H-200	H-250
	ピッチ (m)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	場所	全断面	全断面	全断面	全断面	全断面
支保耐力	吹付けコンクリート	14.6	17.5	20.3	14.1	16.1
	ロックボルト	1.5	1.8	1.8	1.8	2.4
	鋼製支保工	3.2	3.2	4.6	2.2	3.2
	合計 (kgf/cm²)	19.3	22.5	26.7	18.2	21.7
土かぶり別推定内圧 (kgf/cm²)		土かぶり700m 17.8	土かぶり800m 21.5	土かぶり900m 25.1	土かぶり700m 17.8	土かぶり800m 21.5



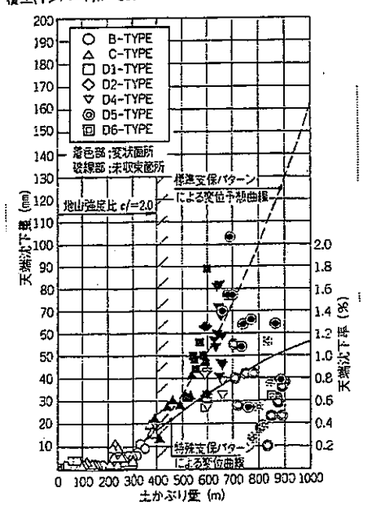


図-12　天端沈下量－土かぶりの関係

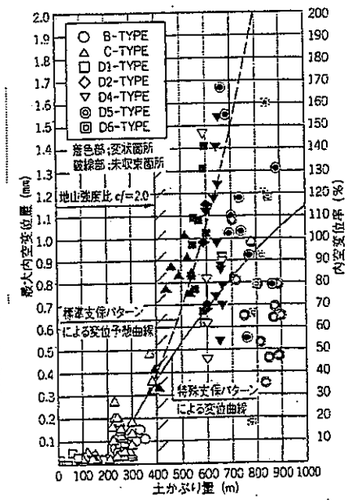


図-13　最大内空変位量－土かぶりの関係

表 4.2.1-9　トンネル施工事例データシート（朝日トンネル）

トンネル名	朝日トンネル	No.	70
用途	鉄道、北陸新幹線		
発注者	日本鉄道建設公団	施工者	清水・大豊・加賀田JV
施工場所	富山県朝日町	施工期間	平成6年3月～平成11年7月
最大土被り	400m	地形	
地形・地質	白亜紀～古第三紀安山岩質凝灰角礫・流紋岩質溶結凝灰岩、新第三紀安山岩質溶岩・凝灰質砂礫層、泥岩層		
硬岩・軟岩	硬岩～軟岩		
岩盤物性	（破砕帯） 湿潤密度γ＝2.67～1.94kgf/cm3、自然含水比1.1～12.3% 粘着力C＝0.35～3.46kgf/cm2、内部摩擦角φ＝0～3度 一軸圧縮強度qu＝219kgf/cm2		
断面形状	上半内空半径4.75m、H＝7850mm、W＝9500mm、掘削断面積約72m2		
吹付コンクリート	10～12.5cm	鋼製支保工	H-125
ロックボルト	L=3.0m		
覆工コンクリート	30cm	インバート	
工法	NATM	掘削方法	発破
加背割	補助ベンチ付き全断面工法、一部上半先進工法		
掘進長		ベンチ長	
計測情報	○		
計測項目	内空変位、地中変位、ﾛｯｸﾎﾞﾙﾄ軸力、吹付コン応力、鋼製支保工応力		
計測関係その他			
現象	破砕帯部において天端沈下、内空変位が増大し、ロックボルト頭部破断、鋼製支保工の変形・破断。 高強度吹付コンクリート（SFRC）を使用するも変状が増大。		
対策	上半仮閉合、インバート早期閉合、高耐力支保工を二重に建込み高耐力化を図り、変位速度、変位量を減少させることに成功した。		
解析・検討			
備考			

概要図

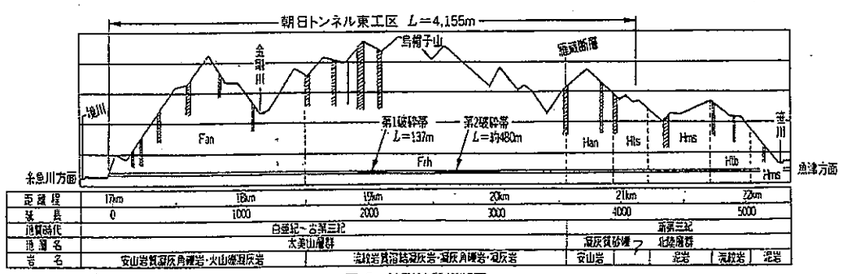


図-3　地形地質縦断図

文献	トンネルと地下（1998.12）

トンネル名	朝日トンネル

資料

表-2　岩石試験結果一覧

No	採取場所	採取日	土の湿潤密度試験 JSF T 191		土の一軸圧縮試験 JSF T 511	三軸圧縮試験 JSF T 520,521		X線分析	特記
5	19k600m（坑口から2,620m）第2破砕帯	H9.4.24	——		(kgf/cm²) 132.63	——		膨張性モンモリロナイトの存在確認微量のため影響なし	破砕帯部の比較的良質な岩石試料を抽出
6	19k710m（坑口から2,730m）第2破砕帯	H9.6.23	湿潤密度(g/cm³)	2.22	(kgf/cm²) 1.861	試験方法	[UU]	——	ボーリングコア試料
			乾燥密度(g/cm³)	2.01		c(kgf/cm²)	0.57		
			自然含水比(%)	10.1		φ度	3		
						圧縮強さ(kgf/cm²)（側圧 1.0kgf/cm²）	1.34		
8	19k721m（坑口から2,741m）第2破砕帯	H9.6.23	湿潤密度(g/cm³)	2.21	(kgf/cm²) 3.422	試験方法	[UU]	同上	ボーリングコア試料
			乾燥密度(g/cm³)	2.04		c(kgf/cm²)	0.35		
			自然含水比(%)	8.4		φ度	0		
						圧縮強さ(kgf/cm²)（側圧 1.0kgf/cm²）	0.71		
9	19k740m（坑口から2,760m）第2破砕帯	H9.7.25	三軸クリープ試験［CD］実施中						B計測点
11	19k960m（坑口から2,980m）第2破砕帯	H10.4.30	湿潤密度(g/cm³)	2.67	(kgf/cm²) 738			——	ボーリングコア試料 切羽左半：硬質安山岩
			乾燥密度(g/cm³)	2.63					
			自然含水比(%)	1.1					
12	20k003m（坑口から3,022m）第2破砕帯	H10.5.10	湿潤密度(g/cm³)	2.35	——	試験方法	MST[UU]	同上	ボーリングコア試料 切羽右半：粘土質凝灰岩
			乾燥密度(g/cm³)	1.94		c(kgf/cm²)	3.46		
			自然含水比(%)	12.3		φ(度)	1.98		
						圧縮強さ(kgf/cm²)（側圧 2.0kgf/cm²）	0.26		

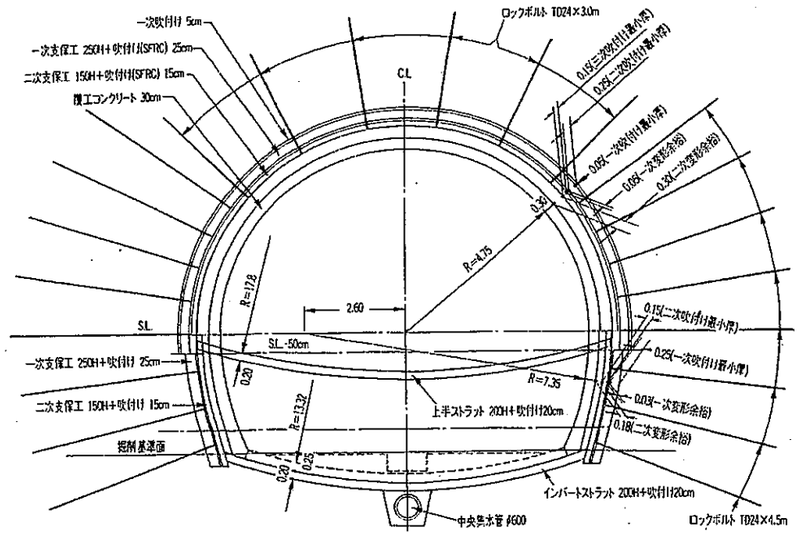


図-16　高耐力支保工

(4) トンネル施工事例研究のまとめ

土被りが大きく初期地圧が大きなトンネルの施工事例を収集し、初期地圧とトンネル支保の関係について考察されている事例を抽出、研究した。

以下にまとめとして整理する。

①岩盤物性、支保工仕様、初期地圧および計測データ等の一連のデータが揃っている事例・文献は非常に少なく、ほとんど見いだすことができなかった。定量的なデータが充実している事例としては、寒風山トンネル１件のみであった。

②クリープ現象に関わるトンネル挙動や、トンネル支保設計について言及されている文献は見いだすことができなかった。

③土被りが大きなトンネルでは施工時に一次支保の変状などの不具合が起きている事例が少なくないが、支保工の見直しや補助工法の採用によりそれを克服し、最終的には全てのトンネルで掘削を完了させている。

④一次支保の仕様は、吹付コンクリート、鋼製支保工、ロックボルトの組合せで、断面寸法や地山等級により相違はあるものの、支保内圧に換算すると 0.2～1.0N/mm^2 程度の範囲がほとんどである。一部に剛性の高い一次支保を採用している事例もあるが（寒風山トンネルなど）、それでも最大支保内圧 2.5N/mm^2 程度である。これは、大土被りの場合には、土被りから想定される初期地圧の 10～15%に相当する。

⑤設計時には標準支保パターンによる設計が適用され、施工時に不具合が生じた場合には支保の見直しや補助工法の併用により対応している事例が多いが、その効果は計測により確認され、施工法検討に用いたトンネル支保設計の計算根拠が明確になっている事例はほとんど見いだすことができなかった。

⑥施工時の変状に対しては、変状を抑えるためにより剛性の大きな支保を採用する場合が多いと考えられる。

4.2.1.3 大深度トンネル支保設計に関する文献調査

(1) 調査方法

堆積軟岩における土被りが大きく初期地圧が大きなトンネルの支保設計に関する研究文献を調査するため、データベースによる文献収集を試みた。主に、科学技術振興事業団が提供する科学技術に関する文献や研究テーマ情報などの有料検索情報システム JOIS のデータベース「JICST」を利用して、キーワード検索を行った。

検索は、キーワードとして「大土被り」「トンネル」「支保設計」「堆積岩」「クリープ」に着目して複数の組み合わせについて行い、検索結果のタイトルおよび要旨を参考に、有用な内容を含むと思われるものの抽出を試みた。

また、上記の文献検索では抽出されないが、有用な内容を含む研究報告が掲載されている可能性がある「トンネルと地下」については、別途に文献を求めた。

(2) 調査結果

a) 文献検索結果

検索条件（キーワード）とその検索結果の文献数を以下に示す。

①「重圧 or 大地圧 or 高地圧」AND「支保 or 設計」：対象文献数＝28

②「大土被り or 高土被り or 土被り大 or 土被り高」：対象文献数＝12

③「大深度 or 大土被り or 高土被り or 土被り大 or 土被り高」AND「堆積 or 軟岩」：対象文献数＝8

④「高土圧 or 大土圧 or 土圧高 or 土圧大」AND「トンネル or 地下空洞」：対象文献数＝1

⑤「坑道 or 鉱山 or 炭坑」AND「重圧 or 大地圧 or 高地圧 or 大深度」AND「支保 or 設計」：対象文献数＝50

⑥「炭坑 or 坑道」AND「深部 or 地圧」AND「支保 or 設計」：対象文献数＝33

⑦「堆積軟岩」AND「クリープ or 時間依存性」：対象文献数＝26

⑧「堆積軟岩」AND「時間依存性」：対象文献数＝13

⑨「軟岩」AND「変形係数」：対象文献数＝56

これらの検索結果について文献タイトルと要旨により内容を確認したところ、本検討に役立つ知見が記されていると考えられる文献は残念ながら見いだすことができなかった。

b) その他の文献調査結果

データベース検索以外の方法で個別に調査した結果、見いだすことができた本検討の参考になると考えられる文献を以下に列挙する。

①真下英人：土被りが大きいトンネルの支保設計に関する一考察、トンネルと地下、1999.2

②梨本・高森・今田：大深度低強度地山におけるトンネル設計の合理化、土木学会論文集、第427号／IV-14、1991年3月

③福島啓一：トンネル構造解析の新しい提案、トンネルと地下、1999.4

(3) 文献内容の整理

前項の調査結果より抽出した文献について、土被りが大きく初期地圧が大きなトンネルの支保設計手法の検討に有用な内容を含むと考えられる点について、その概要を整理する。

a) 真下：「土被りが大きいトンネルの支保設計に関する一考察」

〔要旨〕

・土被りの非常に大きいトンネルの周辺地山の挙動および支保工の基本特性を弾塑性理論解を用いたパラメトリックスタディにより検討し、地山特性曲線法と実挙動の整合性を実際のトンネル（寒風山トンネル）を対象とした解析と現場計測結果との比較により確認した。

・トンネルの周辺地山に塑性領域の発生を抑制するのに必要な支保圧は初期応力の比は、地山強度比と内部摩擦角 ϕ によって決まり、地山強度比が小さい領域においては ϕ の影響が非常に大きい。また、トンネル変位および塑性領域の範囲は、地山強度比、内部摩擦角、残留粘着力、脆性率の影響を大きく受ける。特性曲線法を用いて土被りの大きなトンネルの支保規模の設定を行う場合には特にこれらの地山物性値に着目する必要がある。

・既存の支保部材の組み合わせにより地山に与えることのできる支保圧は、塑性領域の発生を抑制するのに必要な圧力に比較すると非常に小さいため、塑性領域の発生が抑制できるのは非常に限られた条件の場合となる。また、塑性領域が発生する場合、支保工の変形性能がトンネルの変形特性に追随できるのは非常に限られた条件の場合となる。従って、土被りが非常に大きいトンネルの場合には、既存の支保部材の組み合わせでは塑性領域の発生あるいは支保部材の変状を防ぐことには限界があり、これらをある程度許した設計の考え方を取る必要がある。

・地山条件によっては地山特性曲線法により塑性領域の発生を防止するのに必要な概略の支保規模、概略の発生変位量の把握が可能となる場合があるが、支保規模の違いによる発生変位量の差を評価することには限界がある。

・本研究の結果は、地山が連続体の挙動を示すことを前提とした円形トンネルの理論解にもとづくものであり、亀裂の影響、緩み荷重の発生、時間依存性などは考慮していない。

b) 梨本・高森・今田：「大深度低強度地山におけるトンネル設計の合理化」

〔要旨〕

・今までトンネルの設計目標として地山特性曲線上の最小支保圧が注目されてきたが、経済性を追及するためには掘削量も考慮する必要がある。

・最小支保圧よりも最小掘削範囲の方がはるかに広範囲の地山に存在する。

・最小掘削範囲を与える変位は、最小支保圧のそれより小さい

・最小掘削範囲と最小支保圧に対応する施工費には大きな差はみられない。

・最小掘削範囲に対応する施工費と最小施工費との間にはわずかの差しかみられない。しかも、最小掘削範囲を与える変位は最小施工費のそれより小さい。同じような施工費であるならば、変位が小さく覆工が厚くなる最小掘削範囲を設計目標にすべきである。

c) 福島：「トンネル構造解析の新しい提案」

〔要旨〕

・現状のトンネルの設計で用いられている計算手法はかなり現実とは違う点があるが、この計算結果は現実のトンネル工事の計画・設計・施工法の選定に強い影響を与えている。

・現状のトンネルの設計で用いられている計算手法と実際との違いによる不都合を避けるために改善すべき点がいくつかある。すなわち、三次元の計算を行う、地山の降伏条件を実際に近いものにする、降伏に伴う体積変化を考慮する、地山の強度変化を考慮する、時間による強度変化・変形を考慮する、などである。

・また、計算結果の評価方法について次のような考え方をするべきである。すなわち、地山が塑性状態になることとトンネルの安定との関係をはっきりさせる、支保工の剛性は施工法も考慮して考える、地山と支保の相互作用を考慮する、などである。

・上記をふまえて、より実状に近い計算をするために新しい FEM 計算手法を提案している。

・従来の計算法から変更または新しく取り入れた点は、次の通りである。すなわち、降伏条件の変更、降伏に伴う体積変化の考慮、体積変化に伴う強度変化の考慮、時間による強度変化の考慮、時間による変形の進行、軸対称計算と疑似三次元計算の組み合わせによる三次元的な計算、などである。

・この新しい計算法により、次のようなことを明らかにすることができる。すなわち、①掘削面近くの応力の変化、②トンネル径と変位、圧力の関係、③変位と圧力の関係、④トンネル長さ方向の応力分布、などである。

・計算結果よりわかったこととして、①地山応答曲線と最低支保工圧力の計算が可能となった、②従来の計算ではトンネルは平面ひずみ状態にあることが当然の前提とされていたが、この前提が誤りであり、しかもそれは切羽付近に限らないことが明らかとなった、③同じ支保工を設計しても施工法により安全性が変わってくることを明らかにし、その計算を可能とした、の 3 点を挙げている。

4.2.1.4　既往の設計手法調査のまとめ

土被りが大きく初期地圧が大きなトンネルの支保設計に関する既往の設計・施工実績、研究論文等の文献調査を行った。

以下にまとめとして整理する。

①岩盤物性、支保工仕様、初期地圧および計測データ等の一連のデータが揃っている事例・文献は非常に少なく、ほとんど見いだすことができなかった。定量的なデータが充実している事例としては、寒風山トンネル1件のみであった。

②クリープ現象に関わるトンネル挙動や、トンネル支保設計について言及されている文献は見いだすことができなかった。

③土被りが大きなトンネルでは施工時に一次支保の変状などの不具合が生じている事例が少なくないが、支保工の見直しや補助工法の採用によりそれを克服し、最終的には全てのトンネルで掘削を完了させている。

④一次支保の仕様は、吹付コンクリート、鋼製支保工、ロックボルトの組み合わせで、断面寸法や地山等級により相違はあるものの、支保内圧に換算すると 0.2～1.0N/mm^2 程度の範囲がほとんどである。一部に剛性の高い一次支保を採用している事例もあるが（寒風山トンネルなど）、それでも最大支保内圧 2.5N/mm2 程度である。これは、大土被りの場合には、土被りから想定される初期地圧の 10～15%に相当する。

⑤設計時には標準支保パターンが適用され、施工時に不具合が生じた場合には支保の見直しや補助工法の併用により対応している事例が多いが、その効果は計測により確認され、施工法検討に用いたトンネル支保設計の計算根拠が明確になっている事例はほとんど見いだすことができなかった。

⑥設計段階では変位を許容させる設計方針を採用しつつも、施工時の変状に対しては変状を抑えるために、より剛性の大きな支保で押さえる対策が採用される事例が多い。

⑦既往の設計に用いられている計算手法は現実の挙動と合致しない点が多いため、三次元計算を前提とした新しい計算手法を導入すべきとの提案もなされている。

4.2.2 空洞安定性評価手法（設計手法）の比較評価

4.2.2.1 空洞安定性評価手法（設計手法）の整理

(1) 目的

空洞安定性評価手法すなわちトンネルの設計手法の分類とまとめを行う。特に、堆積岩を対象とした深地層の研究施設の施設設計に適用することをふまえ、空洞安定性評価手法とはすなわちトンネル支保設計手法であるとの観点で比較評価を行う。

(2) トンネルの設計手法の分類

トンネルの設計には、周辺地山の緩み荷重がトンネルに作用するものとして、明りの構造物と同様に荷重を支持するよう支保工および覆工を構築しようとする考え方と、トンネル周辺地山が掘削による応力再配分によって、それ自体安定するように支保または覆工を力学的に検討しようとする考え方の2つがある。吹付コンクリートとロックボルトの支保が一般的になっている今日では、後者の考え方が主流となっている。しかし、地山条件とその力学的特性の把握の困難さなどの問題もあり、現状では理論的・数値解析的手法のみではトンネル周辺地山の応力状態を的確に推定できず、トンネルの合理的設計が十二分に行われていない。また、切羽ごとに変化する地山条件や土被り厚と支保設計が適合するように施工中の設計の修正・変更が必要である。

このような状況から、掘削に先立って行う事前設計では、設計条件を考慮して以下の手法の中から適宜選択して行うのが一般的である。

①標準支保パターンによる設計（実績・経験に基づく方法）

②類似条件による設計

③解析的手法による設計

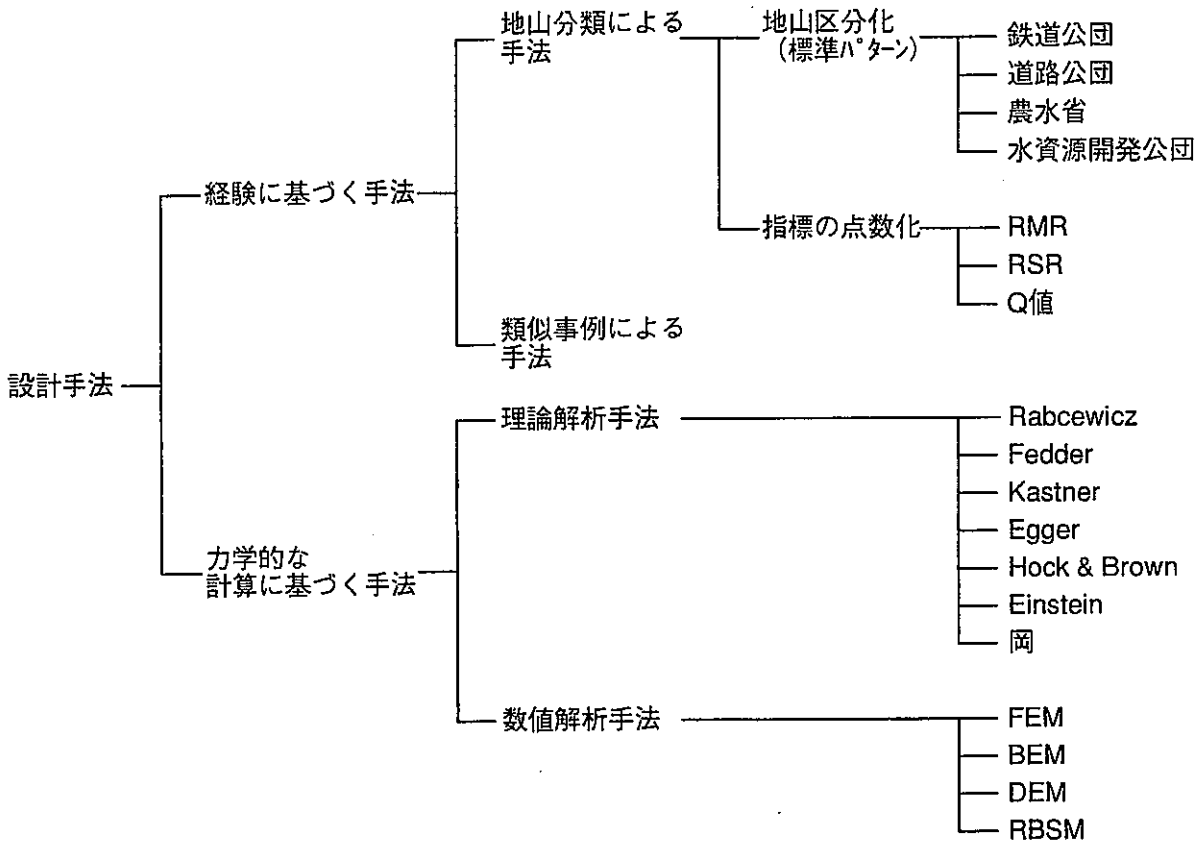


図 4.2.2-1　設計手法の分類 [5)]

(3) 標準支保パターンによる設計・類似条件による設計

断面形状がほぼ一定で、工事件数の多い道路や鉄道トンネルの場合には、地山等級ごとに標準支保パターンを設定してこれを適用することが多い。標準支保パターンは既往のトンネル工事における実績や経験および支保の作用効果に関する検討結果等に基づいて作成されている。これは各地山等級に対する代表的な支保パターンを示したものであり適用に当たっては各地山ごとの特殊条件や地山等級の幅を勘案する必要がある。また、土被りが大きいまたは小さい、膨圧が予想される地山、切羽が不安定と思われる地山、地すべり地帯および断層破砕帯等の特殊条件に対しては別途支保パターンを検討する必要があるとされている。

計画するトンネルの近傍に既設トンネルがあり、その施工実績が得られている場合には、これを参考にして、より的確な設計が可能となる。地域的に離れていても地山条件がほぼ同じと見なせる場合や、断面形状等の設計条件が多少異なる場合でも全体の類似性によっては適用が可能となる。また、著しい膨張性地山など、特殊な地山の支保設計を行う場合には、調査坑や試験工事区間による試験施工を行い、その結果を設計に反映させることも行われる。

堆積岩を対象とした深地層の研究施設の場合、多くの道路や鉄道トンネルと異なり、これまでにあまり施工事例のない大深度での坑道掘削（トンネル掘削）となるため、経験に基づくこれらの設計手法の適用には問題が残ると考えられる。従って、空洞の力学的安定性を確保するために必要となる支保工の仕様を定める設計手法としては解析的手法を採用すべきであると考えられる。

(4) 解析的手法による設計

掘削断面の形状、掘削手順、支保部材の規模と設置時期の設計を行うための解析的手法には、理論解析に基づいた設計手法や FEM に代表される数値解析による設計手法がある。これらの解析的手法は、地山を支保部材の主体として評価する考え方に立ったものである（図 4.2.2-1）。理論解析に基づいた設計手法と数値解析（FEM）に基づいた設計手法の特徴を表 4.2.2-1 に示す。

表 4.2.2-1　数値解析手法の特徴[23)]

	理論解析手法	数値解析手法（FEM）
1．トンネル断面	一般には円形断面を仮定	任意断面形状について可能
2．地質	単一層のみ可能	1．複合地層、異方性についても取り扱い可能。 2．断層など特殊重要な地質分離面も取り扱うことが可能。
3．地山の初期応力状態	1．無限境界に作用する外圧として設定するのが普通。 2．自重により初期地圧を想定することも可能であるが煩雑である。	自重と側圧係数による設定が主であるが、条件により調整が可能である。
4．非線形計算破壊仮定	地山の応力ーひずみ曲線は、 1．双曲線モデル 2．バイリニアモデル 3．トリリニアモデル について可能。 破壊過程の追跡は不可能。	地山の応力ーひずみ曲線は 1．双曲線モデル 2．バイリニアモデル について可能。 連続体力学の仮定に基づく解析のため、破壊領域発生以後の追跡は仮定との矛盾が生じる。
5．クリープ計算	一般には扱っていない	扱うことが可能である
6．変形計算	初期の手法では変形計算を行っていないものが多いが、変形計算を行うものが多く提案されてきている。	必ず行われるが、微小変形理論に基づいているため、大変形の解析結果に対する信頼性が低い。
7．掘削段階支保手順	一般には不可能である	掘削段階支保手順を追って解析できる。切羽による半ドーム効果も導入可能。
8．吹付コンクリート、ロックボルトなどの支保部材の効果	理論解析手法に用いることが可能な評価法（内圧など）で導入することは可能である。	地山物性値の改良などの他、棒要素、面要素、等価節点外力として解析に導入できる。
9．計算の難易度と計算コスト	電卓でも可能であり、即応性を有し、計算コストは安い。	大型コンピュータを必要とし、計算コストも高い。
10．総合	計算コストは安く、手軽ではあるが、解析のための仮定に対する信頼性に疑問もあり、得られる情報量も少ない。	得られる情報が多く、断面形状の比較、掘削方法の比較など、複雑な計算も可能であるが、プログラムの内容、モデル化に統一性がなく、計算精度に比較して内容の信頼性は低い。

解析的手法による設計にあたっては、その内容、特徴を十分把握して、対象となる地山に対する適用性を十分考慮して利用すべきである。

特に注意を要するのは次の事項である。

①地山をモデル化する応力-ひずみ関係の設定

②地山の初期応力状態の設定

③トンネル縦断方向の変形挙動に関する評価法

④支保部材（吹付コンクリート、ロックボルト、鋼製支保工など）のモデル化

⑤適性は地山の力学定数と降伏規準の評価

⑥解析仮定および解析手法に基づく解析結果の特異性に対する評価

⑦解析結果を判断する規準の明確化とその評価

これらの重要事項の取り扱いについては、統一的な見解はいまだ確立されてはおらず、各解析手法や数値解析コードによりさまざまであるのが実状である。

4.2.2.2　理論解析手法

(1) 理論解析手法概要（地山特性曲線）

理論解析手法は古くから多くの研究者によって、種々の条件下での解が得られている。トンネルの設計は、理論解と支保内圧を考慮した特性曲線（支保内圧～壁面変位曲線）によっている。特性曲線は、トンネルの掘削によって生じるトンネル壁面の圧力と変位を、初期地圧と地山の変形特性（弾性、完全弾塑性、ひずみ軟化など）から力学的に求められる。

例えば、Kastner の弾塑性モデルを用いて、数種類の地山の材料特性の組合せと土被りに応じて、いくつかの応力～変位曲線を事前に作成しておき、これらから変位・緩み域を予測し、さらにその地点の支保内圧を推定するのが地山特性曲線である。いま掘削周辺地山の 3 次元的挙動の解析を平面ひずみ問題として行うとすれば、図 4.2.2-2 に示すように、トンネル周辺地山に作用する半径方向力は掘削によって解放され、初期応力（P_A）状態から弾性限界（P_C）へ、さらには最終的には応力ゼロへと減少する。それに反して半径方向の変位は増加し、最終的には収束状態となる。図中、切羽のはるか前方では初期応力（P_A）状態にあり、切羽が進むにつれて前方変位が発生し初め、切羽付近では弾性挙動を示し、ほぼ弾性限界に近い状態と考えられる。実際のトンネル施工では、地山の挙動計測用の評点は切羽に近い B～C 間に初めて設置可能であり、それ以前の変形挙動は実測不可能である。切羽 B が A に向かって進行するに連れて、変位挙動は地山特性曲線上の点 C、D を通り E 点へと移る曲線で示され、や

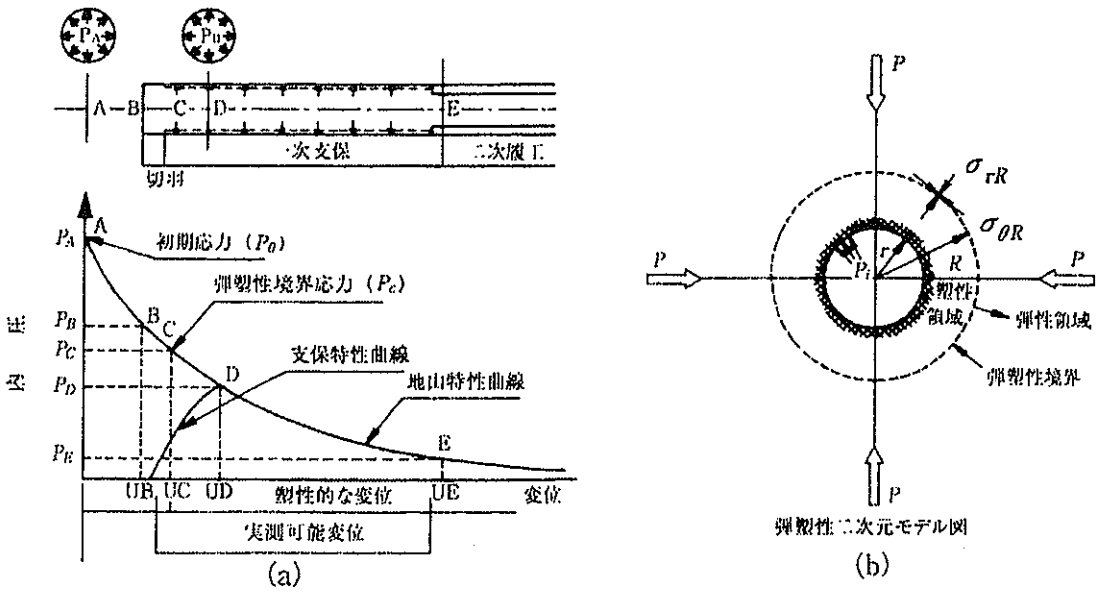


図 4.2.2-2　地山特性曲線と支保特性曲線の関係 [14)]

がて収束に向かう。この際、曲線上の点 A から B ないしは C 点までの挙動は実測不可能な変位である。また、点 C から D さらには E へ向かう変位挙動のうち、トンネルの切羽の進行距離が 1D（D：トンネルの掘削径）以内で、その変位の 60 から 70%が出現し、以後はごく緩慢な変位挙動を示すことはよく知られている事実である。

一方、支保に作用する反力と変位の関係を示す支保特性曲線（UC 近傍点～D 点）と地山特性曲線との交点（点 D）が特定化すべき支保内圧であり、地山はこれにより安定化するとする。この支保反力は支保部材の定量的な部材力の算定によって支保耐力として換算され、許容内空変位、許容応力および許容非弾性領域などとの相関によって特定化される。トンネルが耐荷力を失わず安定であるためには、地山が破壊を生じるまでに支保工を機能させる必要があり、この地山の破壊が始まる際の地山ひずみが許容限界ひずみで、地山の強度特性によっても異なるが、ほぼ 0.5～2.0%程度である。このことから、トンネルの変位は無限に許されるのではなく、適当な支保耐力と支保剛性を有する一次支保によって空洞の安定を確保しなければならない。いわゆる変形余裕量の設定に際してもこれらについて十分に検討しておく必要がある。

理論解析手法はそれぞれの研究者の名前で呼ばれており、そのうち代表的なものを挙げると以下のとおりとなる。

①Kirsch の解：弾性地山の応力解

②Einstein の方法：弾性地山の応力解と厚肉円筒理論の連成解によってトンネルの壁面変位および支保部材の応力を求める。

③Kastner の方法：モール・クーロンの破壊条件を用いた完全弾塑性の応力解

④Egger の方法：Kastner の応力解をもとに、トンネル周辺地山の変位解を求め、ロックボルトの設計に適用できる。

⑤Hoek & Brown の方法：地山の破壊条件が放物型であるとする ladanyi の解による完全弾塑性地山の応力・変位解で、地山と支保の相互作用の解析を特徴とする

⑥Rabcewicz・岡の方法：モール・クーロンの破壊条件とひずみ軟化を考慮した弾塑性地山の応力・変位解で、無限地山中の地山せん断破壊時の力の釣合いによる支保部材の設計に適用

⑦谷本の方法：ひずみ軟化を考慮した弾塑性地山の応力・ひずみ・変位解より支保工内圧と壁面変位の関係を求め。許容変位量より必要支保工荷重を求める

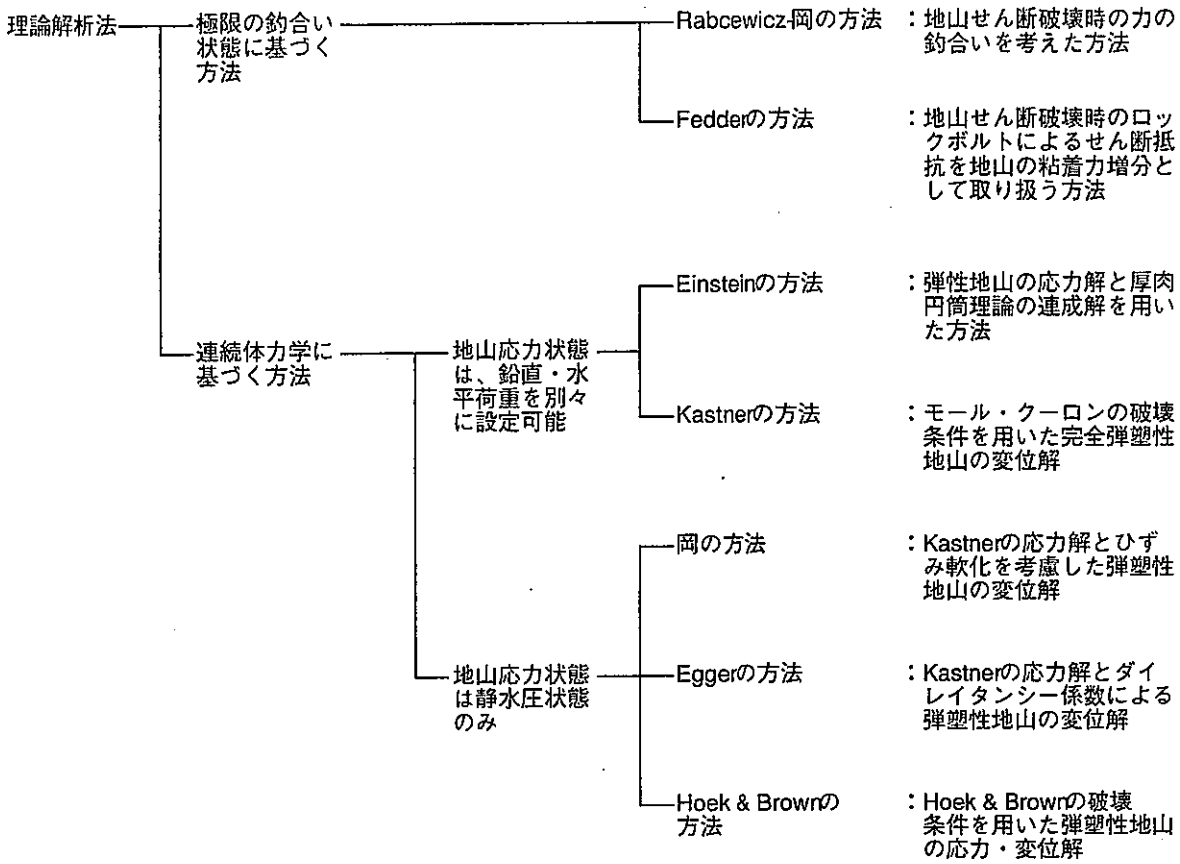
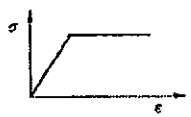
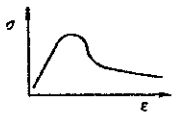
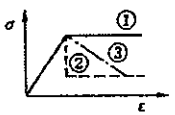
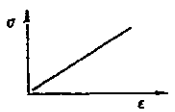
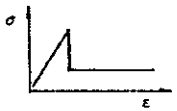


図 4.2.2-3　理論解手法の分類 [5)]

表 4.2.2-2　主な理論解析手法の特徴[5)]

	Rabcewicz-岡	Kastner	岡	Egger	Einstein	Hoek & Brown
地山モデル	弾塑性体	弾塑性体	弾塑性体	弾性体	弾性体	弾塑性体
降伏後の地山挙動	——	完全弾塑性 	ひずみ軟化（c, ϕ を塑性ひずみの関数で表現） 	①完全弾塑性 ②急激劣化 ③徐々劣化 	弾性 	急激劣化（ひずみは塑性論の関連流れ則で計算） 
破壊規準	Mohr-Coulomb の規準 ($\tau=c+\sigma\tan\phi$)	Mohr-Coulomb の規準 ($\tau=c+\sigma\tan\phi$)	Mohr-Coulomb の規準 ($\tau=c+\sigma\tan\phi$)	Mohr-Coulomb の規準 ($\tau=c+\sigma\tan\phi$)	Mohr-Coulomb の規準 ($\tau=c+\sigma\tan\phi$)	Hoek & Brown の規準 ($\sigma_1=\sigma_3+\sqrt{m\sigma_c\sigma_3+s\sigma_c}$)
初期地山応力	静水圧状態のみ	側圧係数により鉛直・水平荷重を別々に設定可能	静水圧状態のみ	静水圧状態のみ	側圧係数により鉛直・水平荷重を別々に設定可能	静水圧状態のみ
トンネル形状	円　形	円　形	円　形	円　形	円　形	円　形
支保工	内圧効果として以下を考慮可能 ・吹付けコンクリート ・鋼アーチ支保工 ・ロックボルト ・地山（ロックボルトが存在する時のみ）	——	内圧効果として以下を考慮可能 ・吹付けコンクリート ・鋼アーチ支保工 ・ロックボルト	内圧効果として以下を考慮可能 ・吹付けコンクリート ・鋼アーチ支保工 ・ロックボルト	円筒モデルとして以下を考慮可能 ・吹付けコンクリート ・鋼矢板	内圧効果として以下を考慮可能 ・吹付けコンクリート ・鋼アーチ支保工 ・ロックボルト 各支保の剛性を剛性定数で表現
特徴	・トンネル周辺地山の破壊を考慮した極限設計法 ・ロックボルトによる支保耐力（せん断耐力）は，せん断すべり面で囲まれた壁面に対してのみ作用するものとする ロックボルトの長さが長くなると支保耐力が減少するなど現実にそぐわない点がある（谷本による改善案がある） ・周辺地山や支保部材の変形は考慮されていない ・変位が得られない	・地山内の応力性状が評価できる	・さまざまな地山挙動（ひずみ軟化）に対する壁面変位・塑性域が評価できる ・入力定数（塑性ひずみと c, ϕ の関係）が難しい ・応力を求める過程としてKastner の方法が用いられている	・掘削開放率が考慮できる ・さまざまな地山挙動（完全弾塑性，急激劣化，徐々劣化）に対する壁面変位・塑性域が評価できる ・応力を求める過程としてKastner の方法が用いられている	・初期地山応力が等方でない場合に有効 ・支保部材と地山の応力伝達を考慮した以下の解析が可能 Non-slip（円周方向に力を伝達） Full-slip（円周方向には力を伝達しない） ・地山モデルは弾性体しか扱えない	・地山物性を m と s の材料定数で評価している ・支保工の剛性は剛性定数で表すことができる
備考						

以下に、代表的な理論解析手法について支保工荷重の設定方法に着目して概要を説明する。

(2) Kirsch の解（弾性モデルによる理論解析）

弾性範囲内で挙動する地山、すなわち圧縮強度が初期応力の 2 倍以上の岩盤で、節理間隔が広く、しかも密着しているような場合には、その中に構築されるトンネルは、無限媒体中に一定の断面を有する長い円孔と考えることができる。これは平面ひずみ状態にある有孔板の応力・変形問題と同じである。

図 4.2.2-4 に示す均質等方性の半無限地山中の円孔における 2 軸状態の弾性解は Kirsch によって与えられている。

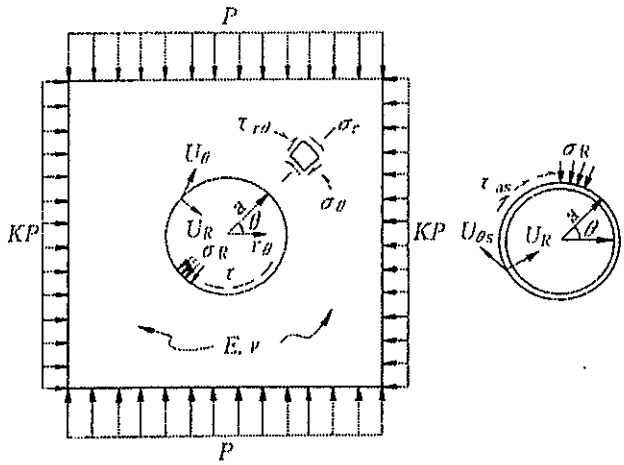


図 4.2.2-4　Kirsch の解および Einstein の方法におけるモデル図 [14)]

すなわち、半径 a なる円孔周辺に極座標（r、θ）で示される点を仮定し、応力を σ_γ、σ_θ、$\tau_{\gamma\theta}$ とすれば、これらは、

$$\sigma_r = \frac{P_1+P_2}{2}\left(1-\frac{a^2}{r^2}\right)+\frac{P_1-P_2}{2}\left(1-\frac{4a^2}{r^2}+\frac{3a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta \qquad (4.2.2\text{-}1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_1+P_2}{2}\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right)-\frac{P_1-P_2}{2}\left(1+\frac{3a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta \qquad (4.2.2\text{-}2)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{P_1-P_2}{2}\left(1+\frac{2a^2}{r^2}-\frac{3a^4}{r^4}\right)sin 2\theta \qquad (4.2.2\text{-}3)$$

で表される。ここに、σ_γ および σ_θ は半径および接線方向の応力で、$\tau_{\gamma\theta}$ はせん断応力である。

また、弾性挙動に伴うトンネルの変位量も Kirsch の解から求められ、半径方向の変位は上述の平面ひずみ状態では次式によって与えられる。

$$U_r = \frac{P_1 + P_2}{4G}\frac{a^2}{r} + \frac{P_1 - P_2}{4G}\frac{a^2}{r}\left[4(1-\nu) - \frac{a^2}{r^2}\right]\cos 2\theta \qquad (4.2.2\text{-}4)$$

$$U_\theta = -\frac{P_1 - P_2}{4G}\frac{a^2}{r}\left[2(1-2\nu) + \frac{a^2}{r^2}\right]sin2\theta \qquad (4.2.2\text{-}5)$$

ここに、U_r、U_θは図 4.2.2-4 に示したように、それぞれ半径方向の変位および接線方向の変位で、Gはせん断弾性係数、νはポアソン比を表す。

(3) Kastner の解

Kastner は、完全弾塑性体の地山において等方圧の土圧が作用する場合（側圧係数 K=1）にモール・クーロンの降伏条件を用い、円形トンネル周辺の応力分布を求めている。

モール・クーロンの降伏条件は次式で示される。

$$\sigma_\theta = \zeta\sigma_r + q_u \tag{4.2.2-6}$$

$$\zeta = (1+sin\phi)/(1-sin\phi) \tag{4.2.2-7}$$

ここに、ζ：受働土圧係数

ϕ：岩盤の内部摩擦係数

qu：一軸圧縮強度

円孔の断面に作用する内圧を P_i とすると、塑性領域（$a < r \leqq R$）における応力は次式で示される。

$$\sigma_r = \left(P_i + \frac{q_u}{\zeta-1}\right)\left(\frac{r}{a}\right)^{\zeta-1} - \frac{q_u}{\zeta-1} \tag{4.2.2-8}$$

$$\sigma_\theta = \zeta\left(P_i + \frac{q_u}{\zeta-1}\right)\left(\frac{r}{a}\right)^{\zeta-1} - \frac{q_u}{\zeta-1} \tag{4.2.2-9}$$

一方、弾性領域（$r \geqq R$）における応力は、弾塑性境界応力を $\sigma_r = \sigma_{r,R}$、$\sigma_\theta = \sigma_{\theta,R}$ とすると、次式で与えられる。

$$\sigma_r = P - (P - \sigma_{r,R})\frac{R^2}{r^2} \tag{4.2.2-10}$$

$$\sigma_\theta = P + (P - \sigma_{r,R})\frac{R^2}{r^2} \tag{4.2.2-11}$$

ただし、弾塑性境界 R、境界における応力 $\sigma_r = \sigma_{r,R}$、$\sigma_\theta = \sigma_{\theta,R}$ は次式のようになる。

$$R = a \cdot \left[\frac{2}{\zeta+1} \cdot \frac{q_u + P(\zeta-1)}{q_u + P_i(\zeta-1)}\right]^{\frac{1}{\zeta-1}} \tag{4.2.2-12}$$

$$\sigma_{r,R} = \frac{1}{\zeta+1}(2P - q_u) \tag{4.2.2-13}$$

$$\sigma_{\theta,R} = \frac{1}{1+\zeta} + (2\zeta P + q_u) \tag{4.2.2-14}$$

また、弾塑性解析において、側圧係数 K<1 の場合に近似的に弾性・塑性領域の境界を以下の方法で求めている。

地山がモール・クーロンの破壊基準に従うとすると、

$$\frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\theta)sin\phi + \left\{\left(\frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{r\theta}^2\right\}^{\frac{1}{2}} = C \cdot \cos\phi \tag{4.2.2-15}$$

完全弾性解と弾塑性解における弾性・塑性領域境界の応力は異なるが、近似的に完全弾性解とすると、σ_r、σ_θ、$\tau_{r\theta}$は Kirsch の解の式(4.2.2-1)、式(4.2.2-2)、式(4.2.2-3)で与えられる。

これらを式(4.2.2-15)に代入すると、弾塑性境界は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}&\left\{-P(1+K)\xi^2+P(1-K)\left(1-2\xi^2+3\xi^4\right)\cos 2\theta\right\}\\&\quad+P^2(1-K)^2\left(1+2\xi^2-3\xi^4\right)^2 sin^2 2\theta\\&=\left[2\cdot C\cos\phi-P\left\{-(1+K)-2(1-K)\xi^2\cos 2\theta\right\}sin\phi\right]^2\end{aligned} \tag{4.2.2-16}$$

ここに、ξ =a/r

上式に P、K、C、ϕ の具体的な値を代入して、θ の各値に対する ζ の値を求めれば、θ 線上の弾塑性境界が求まる。

さらに、円形トンネルの半径 a、地山弾性係数 E、ポアソン比 ν、一軸圧縮強度 q_u、内部摩擦角 ϕ、地山の初期応力 P_0 および支保工が内壁に作用する圧力 P_i（支保工反力）を与えれば、塑性域の幅 Re、壁面変位 U および平均的塑性ひずみ ε_p は次式で表される。

$$R_e=a\left[\frac{2\{P_0(\zeta-1)\}+q_u}{(1+\zeta)\{(\zeta-1)P_i+q_u\}}\right]^{1/(\zeta-1)}-a \tag{4.2.2-17}$$

$$U=\frac{1}{2\mu}\left\{P_0-\frac{2P_0-q_u}{1+\zeta}\right\}\cdot\frac{R^2}{a} \tag{4.2.2-18}$$

$$\varepsilon_p=\frac{P_0(\zeta-1)+q_u}{\mu(1+\zeta)}\left\{\frac{R}{a}-\frac{1}{\zeta}\cdot\frac{R^\zeta-a^\zeta}{R^{\zeta-1}(R-a)}\right\} \tag{4.2.2-19}$$

ここに、$\zeta=(1+sin\phi)/(1-sin\phi)$、$\mu=E/2(1+\nu)$

(4) Hoek & Brown の方法

a) 地山モデルと破壊基準

Hoek & Brown は、地山の破壊条件を放物型として取り扱う Ladanyi の解を用いて、岩盤と支保の相互作用の解析を行っている。地山は等方、等質の弾性体と仮定する。初期状態の地山は線形弾性であり、弾性係数 E およびポアソン比 ν で表現できる。地山の破壊基準は次式で定義される。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \left(m \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + s \cdot \sigma_c^2\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (4.2.2\text{-}20)$$

ここに、σ_1、σ_2 ：最大および最小主応力

σ_c ：インタクト・ロックの一軸圧縮強度

m、s ：破壊前の岩盤の材料定数

破壊後は地山は完全塑性を示し、次式に従うものとする。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \left(m_r \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + s_r \cdot \sigma_c^2\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (4.2.2\text{-}21)$$

ここに、m_r、s_r：破壊後の岩盤の材料定数

なお、塑性点で岩盤は体積膨張し、ひずみは関連流れ則で計算されるものとする。また、トンネルは半径 r_i の円形とし、2 次元平面ひずみ問題として取り扱うものとする。

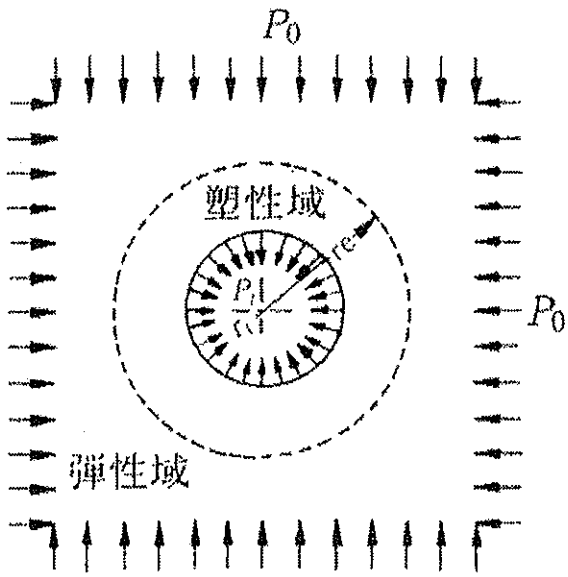


図 4.2.2-5　2 次元平面ひずみ問題モデル図 [14)]

さらに、初期応力 P_0 は水平および鉛直方向で等しく、静水状態で作用するものと仮定する（図 4.2.2-5）。

支保工は、吹付けコンクリート、鋼製支保工、ロックボルトおよびこれらの組合わせによる支保システムについて支保圧力を計算することができる。支保工の剛性は剛性定数で表すことができ、トンネル周壁に均一な放射状圧力 P_i が作用するものと考える。

b) 計算手順と入力データ

計算フローを図 4.2.2-6 に入力データを表 4.2.2-3 に示す。

c) 理論式

①地山特性曲線

$$M=\frac{1}{2}\left\{\left(\frac{m}{4}\right)^2+mP_0/\sigma_c+s\right\}^{\frac{1}{2}}-\frac{m}{8} \qquad (4.2.2\text{-}22)$$

$$D=\frac{-m}{m+4\left\{m(P_0-M\sigma_c)/\sigma_c+s\right\}^{\frac{1}{2}}} \qquad (4.2.2\text{-}23)$$

$$N=2\left(\frac{P_0-M\sigma_c}{m_r\sigma_c}+\frac{s_r}{m_r^2}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (4.2.2\text{-}24)$$

もし $P_i \geq P_0-M\sigma_c$ ならば、トンネル周辺岩盤は弾性的であり、次式が成り立つ。

$$u_i=r_i\frac{1+\nu}{E}(P_0-P_i) \qquad (4.2.2\text{-}25)$$

もし $P_i < P_0-M\sigma_c$ ならば、トンネル周辺岩盤に塑性域が生じ、この場合は次式が成り立つ。

$$u_e=r_e\frac{1+\nu}{E}M\sigma_c \qquad (4.2.2\text{-}26)$$

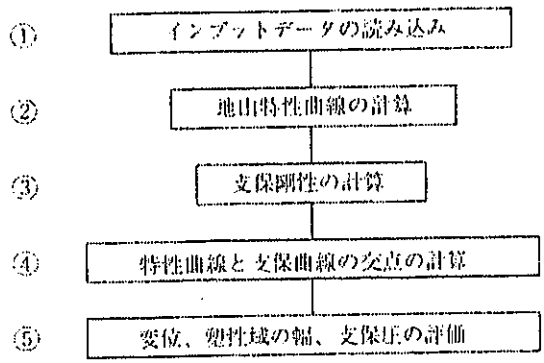


図 4.2.2-6　計算手順 [14)]

表 4.2.2-3　入力データ [14)]

記　号	項　　目
r_i	トンネルの半径
P_0	初期応力
σ_c	インタクト・ロックの一軸圧縮強度
E	岩盤の弾性係数
ν	岩盤のポアソン比
m, s	破壊前の岩盤の材料定数
m_r, s_r	破壊後の岩盤の材料定数
γ_r	破壊後の岩盤の単位体積重量
E_c	吹付けコンクリートの弾性係数
ν_c	吹付けコンクリートのポアソン比
t_c	吹付けコンクリートの厚さ
σ_{cc}	吹付けコンクリートの一軸圧縮強度
E_s	鋼製支保の弾性係数
A_s	鋼製支保の断面積
I_s	鋼製支保の断面二次モーメント
S	鋼製支保のトンネル軸方向設置間隔
l_b	ロックボルトの長さ
d_b	ロックボルトの直径
E_b	ロックボルトの弾性係数
Q	アンカーとヘッドの荷重一変形定数
T_{bf}	引抜試験から求めた極限破壊荷重
s_c	円周方向のロックボルト間隔
s_t	トンネル軸方向のロックボルト間隔
u_{i0}	支保設置前の初期変位

ここに、$r_e = r_i \cdot \exp\left\{N - 2\left(\frac{P_i}{m_r \sigma_r} + \frac{s_r}{m_r^2}\right)^{\frac{1}{2}}\right\}$

$r_e / r_i \leq \sqrt{3}$ に対して $R = 2D \cdot \ln(r_e / r_i)$

$r_e / r_i > \sqrt{3}$ に対して $R = 1.1D$

$$e_{av} = \frac{2(u_e / r_e)(r_e / r_i)^2}{\left\{(r_e / r_i)^2 - 1\right\}\left(1 + \frac{1}{R}\right)}$$

$$A = (2u_e / r_e - e_{av})(r_e / r_i)^2$$

$$u_i = r_i\left\{1 - \left(\frac{1 - e_{av}}{1 + A}\right)^{\frac{1}{2}}\right\}$$

②支保の剛性

各支保部材の剛性は以下の式で示される。

・吹付けコンクリート

$$K_c = \frac{E_c\left\{r_i^2 - (r_i - t_c)^2\right\}}{(1 + \nu_c)\left\{(1 - 2\nu_c)r_i^2 + (r_i - t_c)^2\right\}} \tag{4.2.2-27}$$

$$P_{sc\max} = \frac{1}{2}\sigma_{cc}\left\{1 - \frac{(r_i - t_c)^2}{r_i^2}\right\} \tag{4.2.2-28}$$

・鋼製支保工

$$K_s = \frac{E_s \cdot A_s}{S \cdot r_i} \tag{4.2.2-29}$$

$$P_{ss\max} = \frac{3E_s I_s}{S \cdot r_i^3} \tag{4.2.2-30}$$

・ロックボルト

$$K_b = \frac{r_i}{s_c s_l}\left(\frac{4l_b}{\pi d_b^2 E_b} + Q\right)^{-1} \tag{4.2.2-31}$$

$$P_{sb\max} = \frac{T_{bf}}{s_c s_l} \tag{4.2.2-32}$$

・複合支保システム

$$K = K_c + K_s + K_b \tag{4.2.2-33}$$

③地山特性曲線と支保特性曲線の交点（必要な支保圧）

・単一の支保システムの場合（$P_i < P_{s\max}$ に対して）

$$u_i = u_{i0} + P_i \cdot r_i / k \tag{4.2.2-34}$$

・複合支保システムの場合

$$u_{1\max} = r_i \cdot P_{s1\max} / k_1 \tag{4.2.2-35}$$

$$u_{2\max} = r_i \cdot P_{s2\max} / k_2 \tag{4.2.2-36}$$

$$u_{12} = r_i \cdot P_i / (k_1 + k_2) \tag{4.2.2-37}$$

$u_{12} < u_{1\max} < u_{2\max}$ または $u_{12} < u_{2\max} < u_{1\max}$ に対して

$$u_i = u_{i0} + r_i \cdot P_i / (k_1 + k_2) \tag{4.2.2-38}$$

$u_{12} > u_{1\max} > u_{2\max}$ に対して

$$P_{12\max} = u_{1\max} (k_1 + k_2) / r_i \tag{4.2.2-39}$$

$u_{12} > u_{2\max} > u_{1\max}$ に対して

$$P_{12\max} = u_{2\max} (k_1 + k_2) / r_i \tag{4.2.2-40}$$

ここに　k_1　：システム１の支保剛性

k_2　：システム２の支保剛性

$P_{s1\max}$　：システム１の支保圧

$P_{s2\max}$　：システム２の支保圧

4.2.2.3　数値解析手法

(1) 数値解析手法概要

数値解析手法は、理論解析手法に比べて下記のような利点を有している。

・地山の不均質性や異方性が考慮できる。

・地山の初期応力状態を実状にあわせて設定可能である。

・任意のトンネル形状を考慮できる。

・施工手順を追って解析できる。

・支保部材は棒要素、梁要素、ソリッド要素などによるモデル化のほか、等価節点外力としてもモデル化できる。

・任意点の変形や応力の出力が可能である。

トンネル掘削時の地山や支保工の変位や応力の推定及び地山の安定性評価のための数値解析手法には、地山を連続体と見なす有限要素法(FEM)や、境界要素法(BEM)、さらには地山を不連続体と見なす個別要素法（DEM）、離散化極限解析法（RBSM）などがある。それぞれの解析法の特徴を表 4.2.2-4 に示す。解析目的に応じて最適な解析手法を選定する必要がある。

現時点においては有限要素法（FEM）による掘削解析が最もよく行われており、過去の適用実績が多いことから結果に対する信頼性も高いと考えられる。

表 4.2.2-3　数値解析手法の特徴 [5)]

	FEM	BEM	DEM	RBSM
長所	・元来、連続体力学に基づいた解析法だが、ジョイント要素により、不連続性も考慮できる	・トンネル形状を実状に近い形でモデル化することが可能	・大変形の問題や崩壊過程の解析ができる ・FEMと比べ、計算時間が短い	・FEMと比べ、分離やすべりなどの現象を的確に表現できる ・小型コンピュータで容易に計算が可能
短所	・微小変形を対象としており、破壊現象を伴う問題には不適	・微小変形を対象としており、また、弾性論を基本としているため、破壊現象を伴う問題には不適 ・不連続面のモデル化は不可	・計算時間が短い ・物性パラメータの設定が困難	・変位が問題となる場合は精度が悪い ・物質パラメータの設定が困難 ・要素分割の方法による影響大
使用実績	多い	FEMより少ないがRBSM、DEMより多い	少ない	少ない

(2) 有限要素法（FEM）による数値解析

トンネルの応力・変形問題や支保力の算定に関する数値解析手法として最も代表的なものが有限要素法（FEM）である。解析はモデルの設定方法により、平面ひずみ解析、軸対称解析、三次元解析に大別される。このうち最もよく用いられるのは平面ひずみ解析である。この平面ひずみモデルでは切羽前面の地山による変形の拘束の影響を考慮できない点が問題となる。

静水圧分布の地山応力を仮定した軸対称モデルによる解析結果や、いくつかの地山挙動の実測例によれば、この切羽の影響は切羽の前方のトンネル径の 3 倍程度以内であるとされ、この領域内の断面の解析を行う場合には、切羽の影響を考慮した掘削解放力を作用させて解析する方法が一般に行われている。

図 4.2.2-8 に FEM によるトンネル挙動解析の手順を示す。解析は、地山形状、地山物性などの初期条件と初期地圧の設定を行い、その後に掘削や支保の施工等による地山の変位、応力の変化分を算定し、各解析ステップの地山の変位、応力状態を求める。掘削の効果は、掘削前に掘削領域側から掘削面に作用していた応力を逆方向に作用させることにより考慮する。

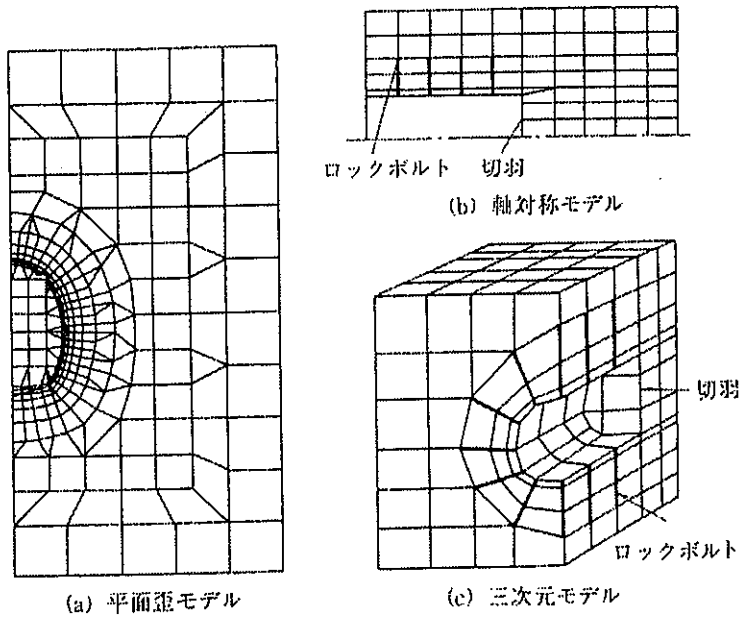


図 4.2.2-7　FEM 解析モデル [14)]

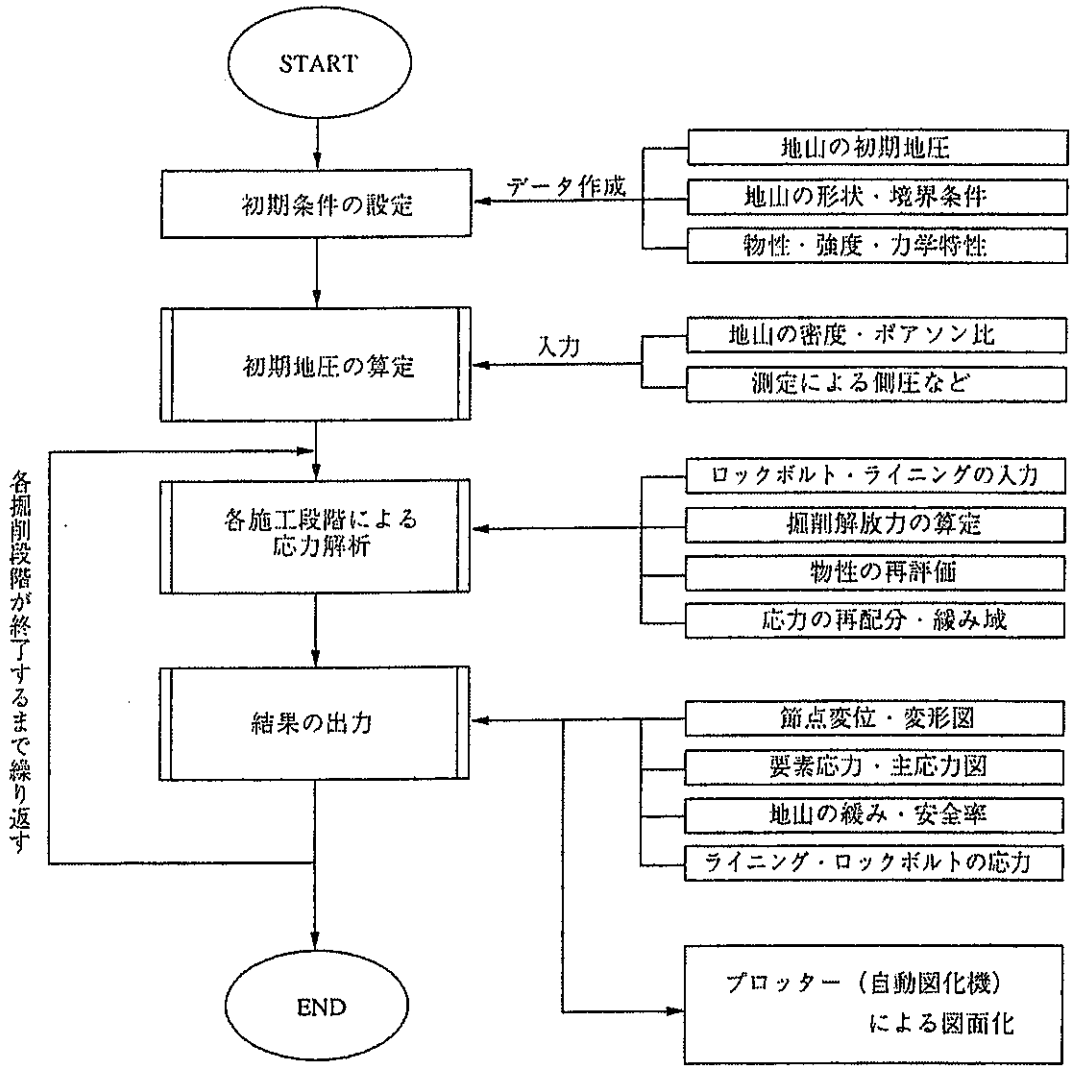


図 4.2.2-8　FEM 解析の流れ [14)]

a) 基礎式

地山を連続体として、FEM により解析する場合、要素の荷重と変位の間には次のような基礎式が成立する。

$$\{F\} = \int [B]^T [D][B] d(vol)\{\delta\} - \int [N]^T \{P\} d(vol) \qquad (4.2.2\text{-}41)$$

ただし、{F}　　：節点力ベクトル

{ δ }　　：節点変位ベクトル

{P}　　：物体力ベクトル

vol　　：要素の体積

[B]　　：節点変位とひずみを関係づけるﾏﾄﾘｯｸｽ

[N]　　：節点変位と要素内の任意の点の変位を関係づけるﾏﾄﾘｯｸｽ

[D]　　：応力～ひずみマトリックス

また、節点変位が求まれば、各要素のひずみや応力は以下の式により求められる。

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}$$

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}$$

[B]、[N]マトリックスは、成分が座標の関数であり、{P}は自重から求められるので、[D]マトリックスを決定すれば、{ δ }について解くことができる。

b) 変形特性のモデル化

一般に地盤・岩盤解析は複雑な応力－ひずみ特性を示すこと、設計上地山の降伏はある程度許容されることなどから、トンネル掘削問題では非線形弾性解析、または弾塑性解析が行われることが多い（図 4.2.2-9）。

非線形弾性解析と弾塑性解析はともに材料の剛性が応力状態によって変化することを考慮するものである。非線形弾性解では、接線剛性が応力の関数として変化する。この場合、応力が低下する除荷の過程は、載荷の過程と同じ経路をたどる。弾塑性解析は、応力状態が一定の降伏関数に達した場合に、流れ則に従い

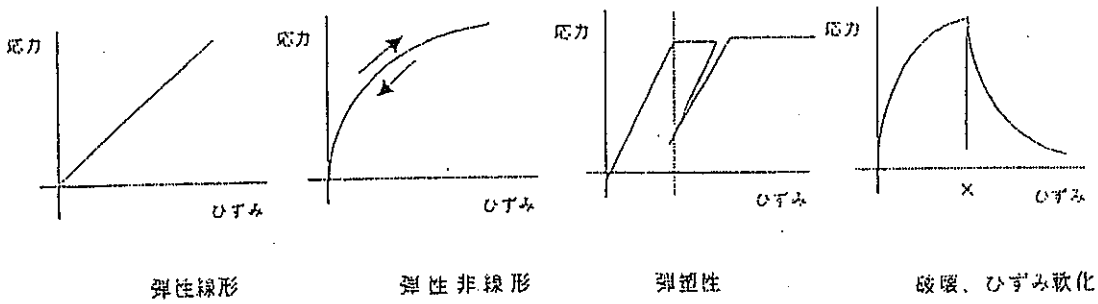


図 4.2.2-9　材料非線形特性の概念図

塑性ひずみに移り変わる状態で、塑性後は除荷した後に永久ひずみが残る。また、降伏後破壊が進行し、破壊による応力解放が起きて応力低下が生じる場合にはひずみ軟化を考慮する必要がある。

c) 幾何学的非線形（大変形解析）

ひずみが小さい条件では、微小変形理論により対象の形状自体は変化がないとしてひずみを定義するが、変形が大きくなるとひずみを定義するための形状自体が変化すると考える必要がある。このような条件が生じる場合には幾何学的非線形（大変形）解析を行う必要がある。トンネルの支保構造設計においては、トンネルの崩落に至る大きな変形まで検討するような場合には、幾何学的非線形解析を行う必要が生じる。また、大きな変形や破壊により幾何学的構造が移り変わる状態も幾何学的非線形解析で扱う必要があり、その場合には個別要素法（DEM）の使用や、有限要素法（FEM）に接触、分離を判断するため特殊な要素を導入した接触解析を行う必要が生じる。

堆積岩を対象とした深地層の研究施設の場合は、掘削時の変形（緩み）をあまり大きくできないと考えられること、既往のトンネル設計実績等を考えると、幾何学的非線形を考慮する必要はないと考えられる。

d) 時間依存性

数値解析において時間依存性の考慮の方法としては、次の 3 種類に分類される。

・静的解析：構造物に対する静的（時間で変化しない）荷重の載荷とそれによる変形を取り扱う。時間への依存性を考慮しない、定常状態の解析。
・粘弾性解析：一定応力下で時間経過にしたがってひずみの増加がみられるクリープ特性を考慮する。
・地震応答解析や衝撃解析など、静的な荷重に対する応答の時間変化を計算する。

通常、トンネルの支保構造設計においては、静的解析が行われる。静的解析は構造系に一様な荷重がかかり続け、構造系自身も時間によって変化しないという考え方の下でのモデル化である。実際のトンネル掘削の問題は、掘削による切羽の進行、支保の建て込み、支保部材のコンクリート、地盤改良材の硬化などの時間によって変化する要素を含んでいる。しかし、そのすべての過程を時間を追って解析することは、モデル化の複雑さと計算時間などの制約から現実的ではない。また、時間依存のパラメータは材料試験等では確かめにくい。

したがって実際の解析では、掘削のステージ毎に構造系と荷重条件を変えて静的解析を行うのが普通である。この場合は各ステージで指定された掘削断面は一気

に掘削され、支保部材は設置当初から有効な支保効果が発揮され、地山・支保部材の特性は時間によって変化しないという仮定のもとで計算が行われる。したがって、支保の剛性・強度が発揮されるのに時間がかかる場合や、地山のクリープ特性が問題となる場合には扱いに注意が必要であり、期待する剛性・強度を最終的に発現するものと同じとしてよいか、クリープによる変位の増加がないか、等についても検討してモデル化しなければならない。そのため、問題によっては時間項を考慮した粘弾性解析の実施も検討する必要がある。

最近は、個別要素法（DEM）、不連続変形法（DDA）、有限差分法などを用いて運動方程式を解く手法が用いられるようになってきて、時間項を含んだ解析が適用されつつあるが、解析上の時間に関連する特性は実験等により確かめるのが難しいため、これらの設定には注意を要する。

e) 解析次元

トンネル切羽は三次元的な構造であるが、三次元解析は時間がかかり、データ設定も難しいため、ある断面を取り出しての二次元解析とすることが多い。この場合には奥行き方向の非均質性の影響をどのように考慮するか検討が必要である。特に次のような点が問題となる。

①トンネルの掘削解析の着目点は切羽の通過の前後であり、掘削以前も切羽後方の掘削領域の影響を受け、掘削後も切羽前方地山による支持効果が期待できる、この効果は通常掘削解放力を順次適切な割合で載荷していくことでモデル化される。どのように解放力を載荷するかは支保の設置状況等にも依存するので、三次元解析による検討や計測結果、経験的知見等を元に検討する必要がある。

②トンネル掘削の二次元解析では「平面ひずみ条件」が仮定される。これは奥行き方向に対しては変形が拘束されてひずみが生じず、応力のみが生じるという条件である。また、最大主応力 $\sigma 1$ と最小主応力 $\sigma 3$ は解析平面の中に生じると考え、塑性、破壊の判定もそれに基づいて行う。これらはいずれも坑口付近など、地表面や空洞の近傍では成立しない。

f) 支保部材のモデル化

①吹付コンクリート、鋼製支保工のモデル化

FEM 解析において、吹付コンクリートをモデル化する方法は、次の２つがある。

・曲げ剛性、軸剛性をもつビーム要素にモデル化する方法

・地山などと同じソリッド要素にモデル化する方法

このうち、後者の方法により曲げモーメント、軸力を求めるには得られた要素

応力から換算する必要があるが、前者の方法では解析結果から直接得られる。なお、吹付コンクリートは材令によって変形特性、強度特性が変化するので、物性値の設定に関しては、この点についての留意が必要である、

②ロックボルトのモデル化

FEM 解析において、ロックボルトをモデル化する方法としては、主に次の 2 つの方法が考えられる。

・ロックボルトを所定の断面積、軸剛性、強度をもつ線材（ロックボルト要素）としてモデル化する方法。

・ロックボルトを施工することによる効果を、地山物性値が改善されるとして、モデル化する方法。

g) 入力データ、出力項目

①入力データ

掘削安定解析の入力データのうち、物性データの例としては表 4.2.2-5 に示す項目がある。この表のうち非線形特性指数の設定法について以下に示す。

表 4.2.2-5　掘削安定解析に用いる物性データ例 [14)]

物性データ			適用
単位体積重量		γ (tf/m^3)	
静的強度特性	粘着力	C (tf/m^2)	クーロンの破壊基準を用いる場合 $\tau = C + \sigma \tan\phi$
	内部摩擦角	ϕ (°)	
	せん断強度	τ_R (tf/m^2)	モールの破壊基準を用いる場合 $\tau = \tau_R,\ 1 - \sigma/\sigma_t$
	引張強度	σ_T (tf/m^2)	
静的変形特性	初期変形係数	D_{0x}, D_{0y} (tf/m^2)	直交異方性が考慮できる
	破壊時変形係数比	D_f/D_0	1/100をとることが多い
	初期せん断剛性	G_{0xy} (tf/m^2)	$D_{0x} = D_{0y}$ のときブランクにしておけば，$G_{0xy} = D_0/2(1+\nu_0)$ で与えられる
	緩み定数	k	
	応力～ひずみの非線形特性指数	m, n	mは変形係数に対して，nはポアソン比に対して
	初期ポアソン比	ν_{0x-z}, ν_{0y-z}	ν_{0x-z} は x 方向に変形を加えたときの z 方向の変形量
	破壊時ポアソン比	ν_f	0.45～0.49をとることが多い
クリープ特性	クリープ率	α	Voigt モデルによる $\varepsilon_c = \alpha \cdot \varepsilon_e \cdot (1 - e^{-\beta t})$ ここで，ε_c はクリープひずみ，ε_e は弾性ひずみ，t は時間(日)
	遅延係数	β (1/日)	

○三軸圧縮試験における応力～ひずみ曲線より、任意の各点での傾き $D_i(D_0 \geq D_i \geq D_f)$ を読みとる（図 4.2.2-10）。

○各点において $(D_i - D_f)/(D_0 - D_f)$ の値を計算し、これに対応して式(4.2.2-42)より破壊余裕度 R'（k=1.0）を求める。破壊余裕度 R は増分法の各計算ステップで発生している応力と破壊基準から、次式で表される（図 4.2.2-11）。

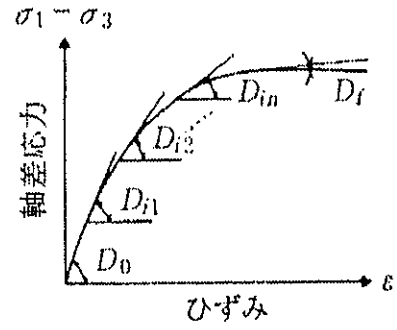


図 4.2.2-10　接線弾性係数の算定 [14)]

$$R = k \cdot min\left\{\frac{d_1}{L_1}, \frac{d_2}{L_2}\right\} \qquad (4.2.2\text{-}42)$$

ここに、k：緩み定数

この破壊余裕度 R'の求め方として、三軸圧縮試験の破壊時の応力円が破壊包絡線に接するようにするために、次の 2 通りの考え方がある。

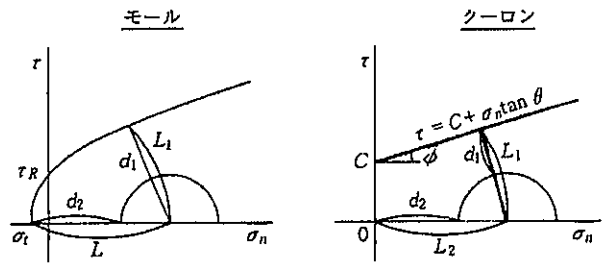


図 4.2.2-11　破壊基準と破壊余裕度 [14)]

1) 破壊包絡線を補正する方法

試験体個々に、破壊包絡線を破壊時のモールの応力円に接するように決め、R'を求める方法である。すなわち、引張強度は圧裂試験値 σ_t^*を用い、せん断強度 τ_R^*を破壊時応力円に接するようにして求めたのち、任意の σ_{1i} に対する R'を求める（図 4.2.2-12）。

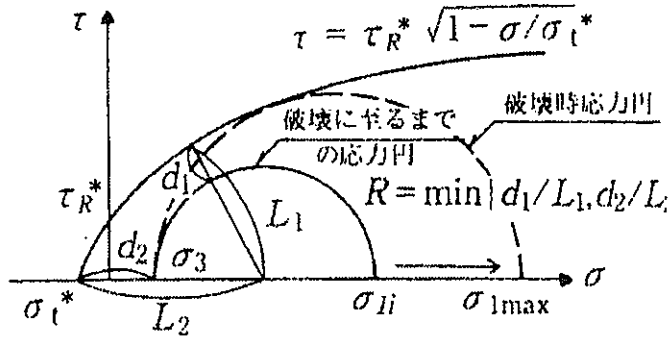


図 4.2.2-12　破壊包絡線の補正 [14)]

2) 三軸圧縮試験の破壊時の応力円を基準化する方法

破壊包絡線は、設計用定数として定めたσ_t、τ_Rを用い、これに試験体個々の破壊時の応力円が接するように、σ_{1max}を補正する方法である。すなわち、σ_{1max}を破壊包絡線に接するσ_{1max}^*に補正する。R'は各応力レベルにおける軸差応力に

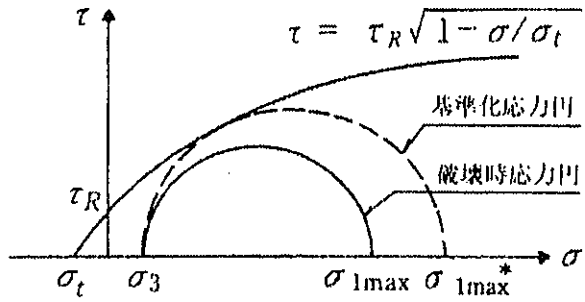


図 4.2.2-13　破壊包絡線に対する応力円の基準化[14)]

○$(D_i-D_f)/(D_0-D_f)$とR'をプロットする。

○プロットした点によく合うk（緩み定数）、および下式により、よく合うmの値を求める。

$$\frac{D_i-D_f}{D_0-D_f}=\begin{cases}1 & (R\geq 1.0)\\ R^m & (0<R<1.0)\\ 0 & (R=0)\end{cases}$$

(4.2.2-43)

ここで、$k=b/a$、$R=kR'$

（図 4.2.2-14）

なお、ポアソン比についても非線形の関係式は変形係数の場合と同じである。

$$\frac{\nu_i-\nu_f}{\nu_0-\nu_f}=\begin{cases}1 & (R\geq 1.0)\\ R^n & (0<R<1.0)\\ 0 & (R=0)\end{cases}$$

(4.2.2-44)

岩盤では、試験結果は参考として、n=m/2 としている場合が多い。

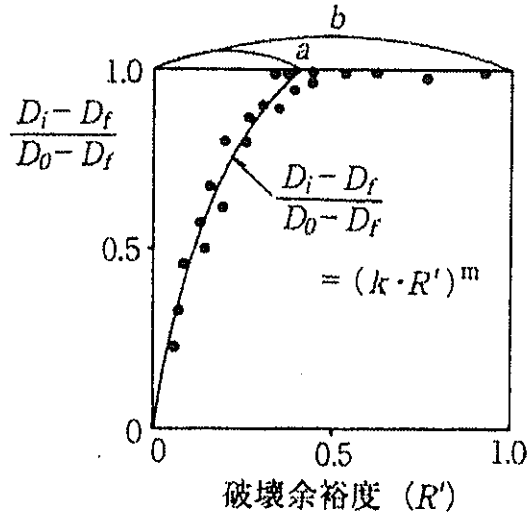


図 4.2.2-14　k および m の設定[14)]

②出力項目

掘削安定解析の出力項目としては次のようなものが得られる。

・変位量	δ_x、δ_y	(m)	(節点ごとに出力)
・水平応力	σ_x	(tf/m^2)	(要素ごとに出力)
・鉛直応力	σ_y	(tf/m^2)	(要素ごとに出力)
・せん断応力	τ_{xy}	(tf/m^2)	(要素ごとに出力)
・最小主応力	σ_{min}	(tf/m^2)	(要素ごとに出力)
・最大主応力	σ_{max}	(tf/m^2)	(要素ごとに出力)
・破壊余裕度	R		(要素ごとに出力)
・局所安全係数	$F_s = 1/1-R$		(要素ごとに出力)

4.2.2.4　空洞安定性評価指標の検討

(1) 空洞安定性評価に用いる指標

空洞安定性の評価に用いる指標について概説し、その適用性を検討する。

地下空洞の設計に適用する空洞安定性の評価に用いる指標にとしては、下記のような性質を有していることが必要であると考えられる。

・設計（解析）段階において定量的に評価可能であること。

・実施工時に計測可能であること。

また、既往の研究・計測事例との対応が可能であると実績との比較評価が可能となる点で望ましい。

一般的に用いられている評価指標としては主に以下の２種類に大別される。

・応力評価方式

・ひずみ評価方式

ここでは、現状の技術において空洞安定性評価指標として用いられているもの、提案されているものなど、本検討の対象になると考えられる以下の９種類の指標について整理する。

①地山強度比［応力評価］

②局所安全率［応力評価］

③限界ひずみ［ひずみ評価］

④状態ひずみ比（壁面ひずみ比）［ひずみ評価］

⑤変位（内空変位量）［ひずみ評価・応力評価］

⑥変位速度

⑦ゆるみ領域（塑性領域）［応力評価］

⑧透水性

⑨一次支保応力［応力評価］

(2) 各評価指標の概要

a) 地山強度比

地山強度比は、岩石・岩盤の一軸圧縮強度（qu）と土被りによる荷重（γ·h）の比で表されるものである。

地山強度比＝qu／(γ·h)

ここで、qu　：岩石または岩盤の一軸圧縮強度

γ　：岩石または岩盤の単位体積重量

h　：土被り高さ

日本鉄道建設公団や日本道路公団によると、岩盤の一軸圧縮強度を推定する場合、以下の準岩盤強度σc'を用いてよいとあるが、亀裂等の存在が無視できる地山では岩石の一軸圧縮強度を適用してもよいともある。

$$\sigma_c' = \left(\frac{V_p}{v_p}\right)^2 \cdot q_u \qquad (4.2.2\text{-}45)$$

ここで、V_p　：岩盤の弾性波速度

ν_p：岩石の弾性波速度

qu　：岩石の一軸圧縮強度

弾性理論解析によれば、掘削壁面の接線方向応力σ_θ=2·γ·h になることから、地山強度比が２以上であれば、空洞周辺の岩盤の応力状態は弾性状態であり安定であるといえる。このように地山強度比は空洞安定性を評価する上で簡便かつ重要なパラメーターであるといえる。

日本鉄道建設公団や日本道路公団では地山等級分類の指標として、岩盤の弾性波速度と組み合わせる形で地山強度比を等級分類の指標に用いている。特に軟岩地山や土砂地山の場合、健全な地山と不健全な地山の速度差が小さいため弾性波速度は地山等級区分の良い指標にはならないとの指摘もあり、地山強度比が地山等級分類の重要なパラメーターになっている。このことは、岩種および岩盤の弾性波速度が同じでも地山強度比によって地山等級を違えていることに表現されている。また、表 4.2.2-6 のように、岩石の一軸圧縮強度から地山強度比を算定して、空洞の安定性を評価する岩盤分類もある。

表 4.2.2-6　地山強度比による空洞の安定性評価方法[29)]

q_u/σ_v	トンネルタイプ	地圧の性質	内空断面直径（m） 2～3	内空断面直径（m） 4～5
			実測以外地圧の定量的な予想が困難であるが通常下記のような支保工を使用する。	
≦2	Dタイプ	押出し性～膨張性	H－125×125 間隔 0.8～1.0m インバートストラット付き（場合によっては不必要）	H－125×125 間隔 0.8m またはH－150×150 間隔 1.0m インバートストラット付き（場合によっては不必要）
2～4	Cタイプ	軽度の押出し性～地圧が大きいと推定される場合	同	上
			H－100×100 間隔 1.0m （場合によってはインバートストラット付き）	H－125×125 間隔 1.0m （場合によってはインバートストラット付き）
4～6	B_2タイプおよびCタイプの1部	地圧が大きいと推定される場合	ゆるみ高さを 2.0mとして支保工を設計する H－100×100 間隔 1.20m または同程度の強度をもつ鋼管支保工	ゆるみ高さを 5.0mとして支保工を設計する H－125×125 間隔 1.0m または H－150×150 間隔 1.2m
6～10	B_1タイプ	地圧があると推定される場合	ゆるみ高さを 1.0mとして支保工を設計する H－100×100 間隔 1.50m または同程度の強度をもつ鋼管支保工	ゆるみ高さを 2.5mとして支保工を設計する H－100×100～H－125×125 間隔 1.50m
>10	Aタイプ	地圧がほとんどないと推定される場合	無支保，ロックボルトまたはモルタル吹付け	同　上

（注）(1) $q_u/\sigma_v \leqq 2$ の場合，岩が泥岩，ケツ岩で乱した岩の吸水膨張性が大（またはスレーキング性が大）なら押出し性や膨張性は一層顕著でライニングは鉄筋コンクリートとしなければならない可能性があり，$q_u/\sigma_v < 1$ の場合はインバートにはインバートストラットが必要である。

(2) 岩の一軸圧縮強度 q_uは原則としてダブルコアチューブを用いて採取した代表的コアについて得られたものとする。その際，岩は自然含水比のまま試験するよう十分注意しなければならない。採取後，現場において直ちに圧縮試験を行うことが望ましい。

このように、トンネル支保設計の最も基本となる地山等級区分に地山強度比が用いられていることなどから、地山強度比が空洞安定性評価の重要な指標の一つであることは間違いのないことである。ただし、鉄道トンネルや道路トンネルのようなほぼ同一の断面形状で、地山等級分類により標準支保パターンとしてトンネル支保の設計ができるものと異なり、あまり多くの類似事例がない深地層の研究施設の設計に当たっては、地山強度比よりトンネル支保を決定する手法がない現状では、適用するにふさわしい評価指標とはいえないと考えられる。また、支保内圧が大きい場合には地山強度比2以下でも安定性が保たれている事例がある、トンネル支保の効果を考慮することができない、などの点もトンネル支保設計という観点からは適用が難しい。ただし、設計の際に他の指標とともに空洞安定性の評価を行う参考指標として役立つものと考えられる。

b) 局所安全率

構造部材の安全率は破壊荷重と設計荷重の比で表される。この考え方と同様に、地山が破壊する応力状態と掘削に伴って生じる地山の応力状態の比を用いて坑道周辺の岩盤の安定性を評価する指標として局所安全率がある。

荷重は一般にスカラー量であるから、そのままの値の比をとれば安全率を求めることができる。一方、応力はテンソル量であることより、その定義の仕方には幾つかの考え方がある。

①平均主応力を固定して定義する方法

中間主応力に依存しない Mohr-Coulomb 型、Hoek-Brown 型の降伏・破壊基準を用いるときの局所安全率は図 4.2.2-15 を参照して、次式のように定義される。

$$F_s = \frac{D_1}{\tau_{\max}} \quad \text{または} \quad F_s = min\left(\frac{D_1}{\tau_{\max}}, \frac{D_2}{\tau_{\max}}\right) \tag{4.2.2-46}$$

② σ_n を固定して定義する場合

$$F_s = \frac{d_1}{\tau_{\max}} \quad \text{または} \quad F_s = min\left(\frac{d_1}{\tau_{\max}}, \frac{D_2}{\tau_{\max}}\right) \tag{4.2.2-47}$$

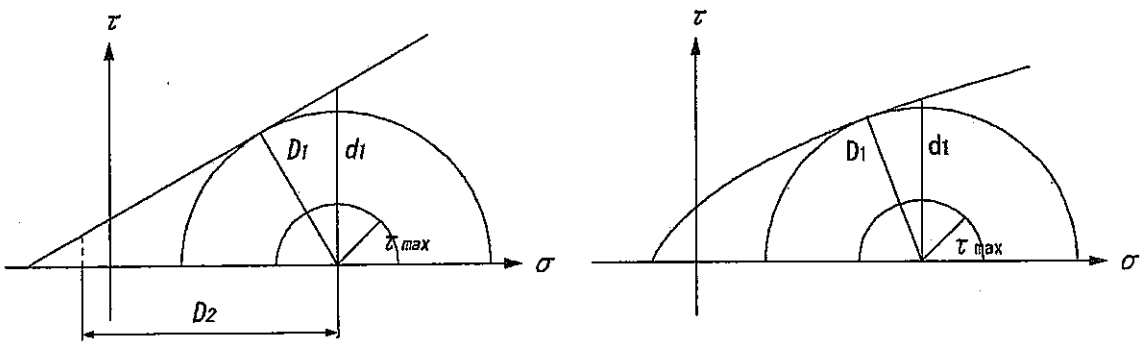


図 4.2.2-15　①②局所安全率の定義

③最小主応力を固定して定義する方法

$$F_s = \frac{T_{\max}}{\tau_{\max}} \tag{4.2.2-48}$$

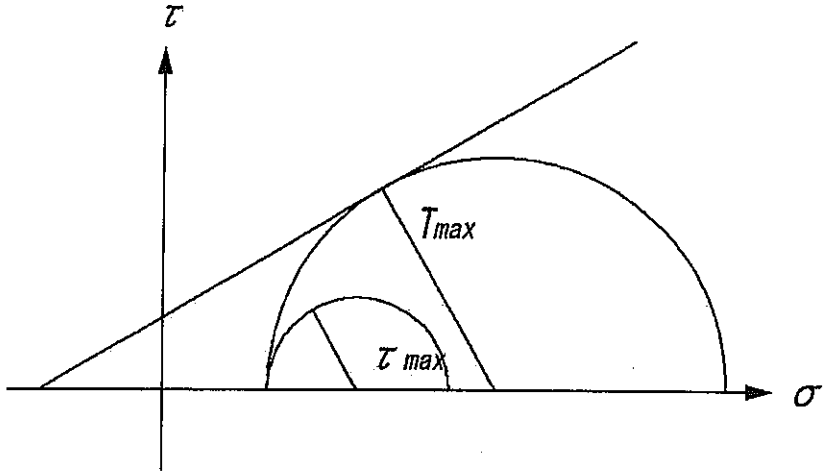


図 4.2.2-16　③局所安全率の定義

④応力空間において掘削時の応力変化の向きを固定して定義する方法

掘削後の地山の応力状態が降伏・破壊基準にどの程度接近しているかではなく、掘削によって坑道壁面に作用する見かけの掘削解放応力（掘削相当外力）を坑道（構造）に作用する荷重系と見なし安全率を定義する。

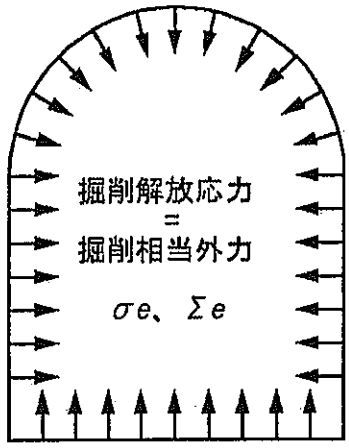
すなわち、掘削解放応力を基準値として、着目地山の応力が降伏・破壊に至るのは、この掘削解放応力の何倍が坑道の掘削面に作用したときに生じるかと定義することにより、次式で安全率を定義した。

$$F_s = \frac{\Sigma_e}{\sigma_e} \tag{4.2.2-49}$$

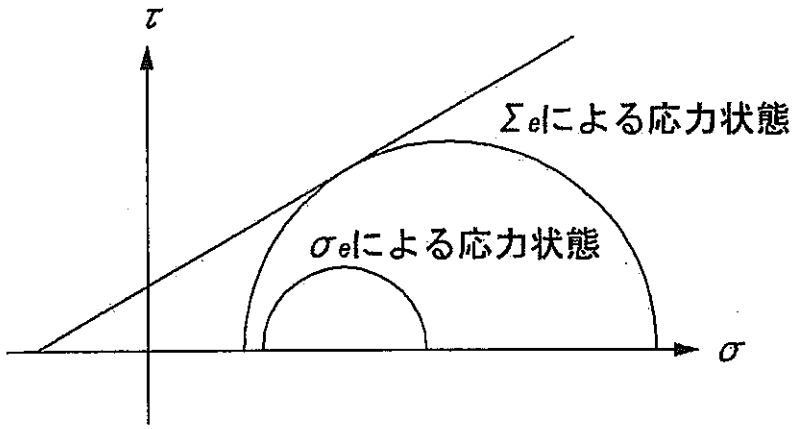
このことは図 4.2.2-17 に示されるように、応力空間において掘削相当外力が作用して地山の応力状態が a から b に移ったとき、その応力ベクトル方向の降伏・破壊曲面への距離を用いて表すことを意味している。すなわち、次式で表される。

$$F_s = \frac{\ell\Sigma_e}{\ell\sigma_e} \tag{4.2.2-50}$$

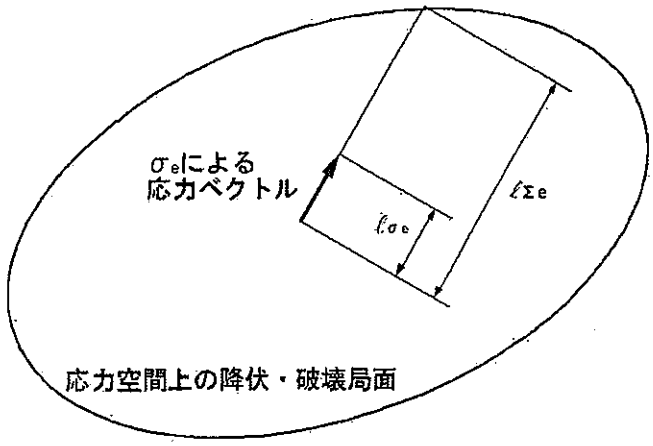
局所安全率の目標値をどの程度とするかについて、JNC の「第 2 次取りまとめ」では、単独の坑道および坑道の離隔距離の影響について、各 1.5 を目安としている。



(a)　掘削時の解放応力と降伏時の掘削相当外力



(b)　掘削時と降伏時の着目点のモールの円表示



(c)　応力空間上での定義

図 4.2.2-17　④局所安全率の定義

c) 限界ひずみ

ひずみによる空洞安定性評価方法として桜井らにより提案された限界ひずみに基づく方法がある。これは、岩盤の安定性を応力ではなく、ひずみで評価する方法である。

トンネルの現場計測で岩盤の応力を直接測定するには、限られた範囲でしか測定できないなどの制約が多い。また、変位計測から間接的に応力を推定する場合、応力-ひずみ関係を仮定しなければならないことや初期応力の大きさや方向も不明なため、得られる結果の精度は低いものとなる。一方、変位測定は応力測定に比べて精度も良く、計測も容易である。このような理由により、桜井らは現場においては計測が容易な変位から岩盤のひずみを算定し、このひずみと岩盤の破壊ひずみを比較することによりトンネルの安定性を評価する方法（直接ひずみ制御法）を提案している。

i) 岩石の限界ひずみと破壊ひずみ

土および岩石の一軸圧縮強度試験により得られる応力-ひずみ曲線を双曲線を用いて表すと、次式で与えられる（図 4.2.2-18）。

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{b + a \cdot \varepsilon} \qquad (4.2.2\text{-}51)$$

ここに、a：双曲線モデルにおける終局強度の逆数

b：初期弾性係数の逆数

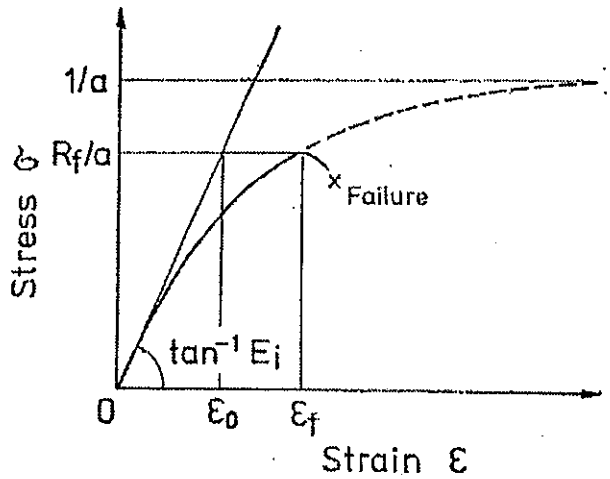


図 4.2.2-18　双曲線による応力-ひずみ曲線の近似 [15)]

破壊強度を表すパラメータ R_f を一軸圧縮強度 σ_c と双曲線モデルにおける終局強度の比と定義すると、一軸圧縮強度 σ_c は次式で与えられる。

$$\sigma_c = \frac{R_f}{a} \tag{4.2.2-52}$$

また、一軸圧縮強度 σ_c と初期弾性係数 E_i から限界ひずみ ε_0 は次式で定義される。

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_c}{E_i} \tag{4.2.2-53}$$

式(4.2.2-51),(4.2.2-52),(4.2.2-53)から破壊ひずみ ε_f、限界ひずみ ε_0 および破壊強度を表すパラメータ R_f には以下のような関係がある。

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_0}{1-R_f} \tag{4.2.2-54}$$

桜井は様々な土や岩石の限界ひずみ ε_0 について求めていて、一軸圧縮強度 σ_c との関係を図 4.2.2-19 に示している。この図によると、限界ひずみ ε_0 は一軸圧縮強度 σ_c の増加とともに減少する傾向があることがわかる。

また、横軸の一軸圧縮強度 σ_c の代わりに変形係数で整理して、変形係数と限界ひずみ ε_0 との関係を示したものが図 4.2.2-20 である。この図によると、一点斜線で示されている限界ひずみ ε_0 の領域が点線で分けられている。土木学会関西支部は NATM の施工実績からゾーン I は崩壊領域、ゾーン II は不安定領域、ゾーン III はやや不安定領域に相当すると述べている。

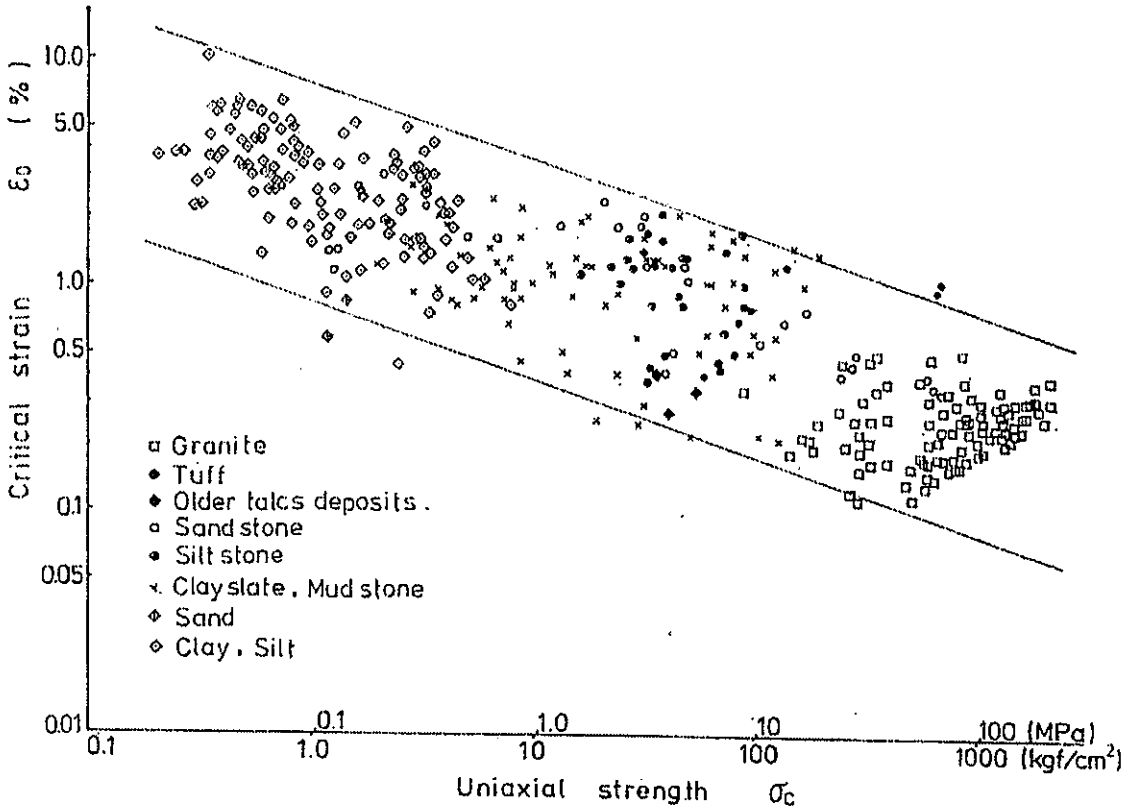


図 4.2.2-19　室内試験による限界ひずみと一軸圧縮強度との関係 [15)]

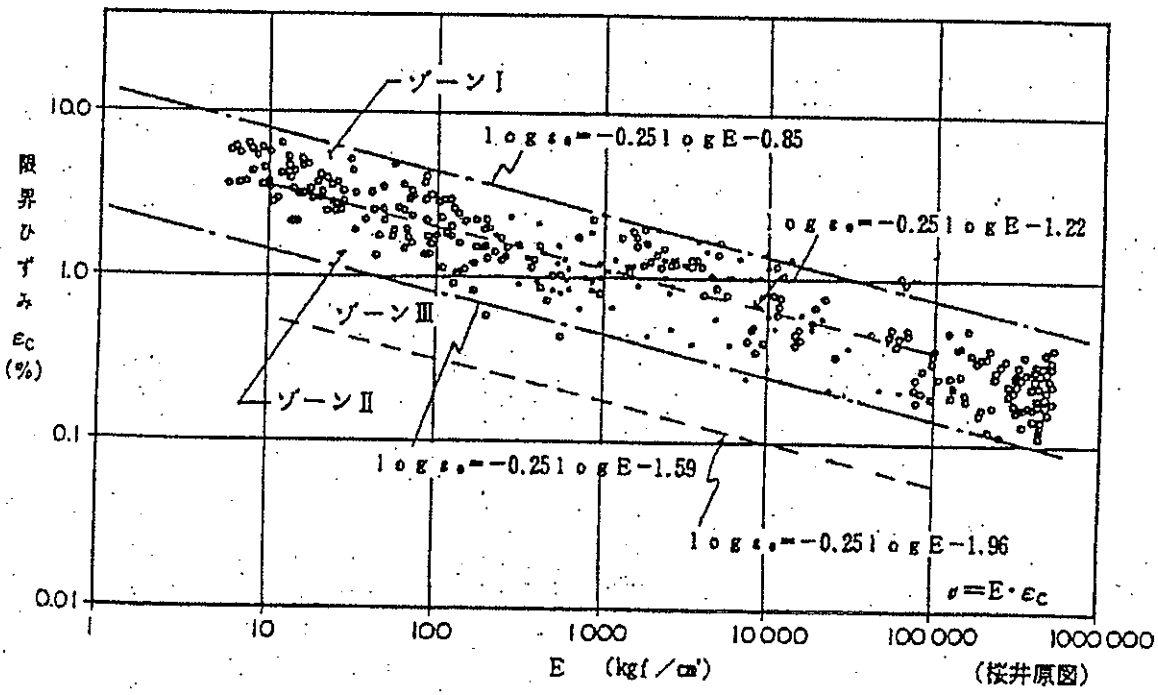


図 4.2.2-20　限界ひずみと変形係数の関係 [26)]

ii) 岩盤の限界ひずみと破壊ひずみ

桜井らは岩盤試験結果から岩盤の限界ひずみ ε_{0R} を求めていて、図 4.2.2-21 のようになることを示している。この図から岩盤の限界ひずみ ε_{0R} は、ほぼ 0.1～1.0% の範囲となり、岩石の限界ひずみ ε_0 の範囲とほぼ同じであることがわかる。また、一軸圧縮強度が低い場合でも小さい限界ひずみが測定されている。

岩盤の限界ひずみ ε_{0R} は室内試験で得られる値とほぼ同じであるが、割れ目などの影響により強度が低下するために、岩盤の限界ひずみ ε_{0R} のデータ群は図 4.2.2-22 のように左へ平行移動する。それによって、強度の低い場合でも小さい限界ひずみ ε_{0R} が測定されている様に見えると考えられる。

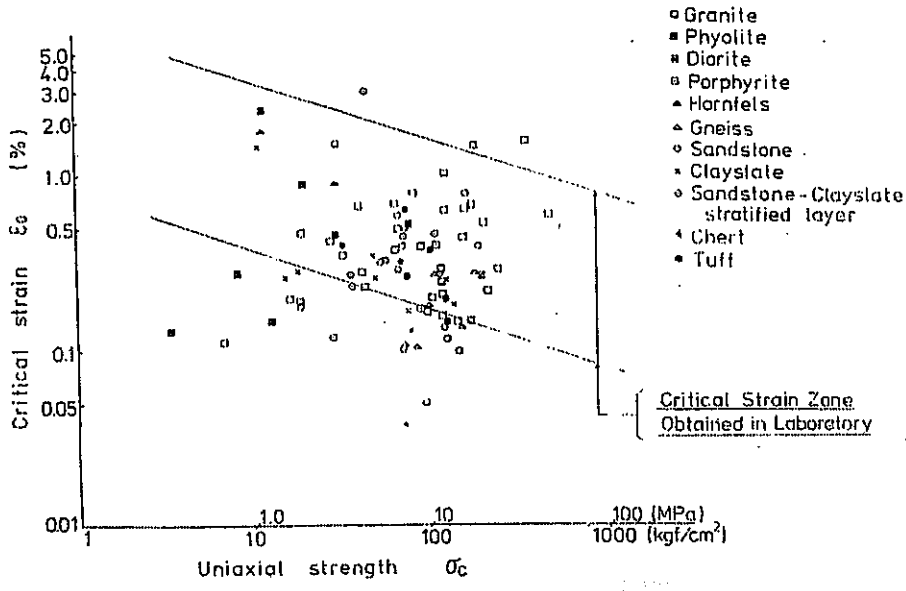


図 4.2.2-21　原位置岩盤の限界ひずみと一軸圧縮強度の関係 [15)]

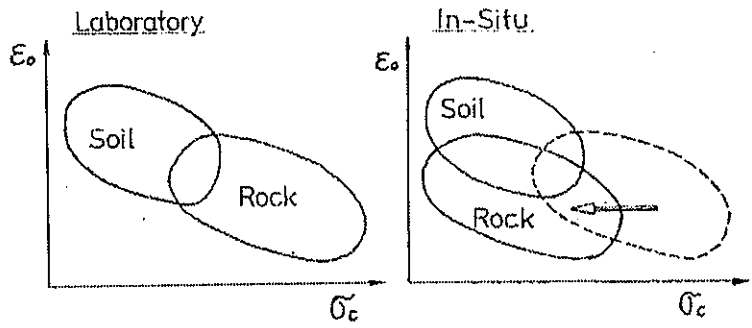


図 4.2.2-22　室内試験と原位置試験によって得られる強度-限界ひずみ関係の比較 [15)]

割れ目などの影響で岩盤の強度は低下するが、弾性係数も同程度低下するために、結果的に限界ひずみは割れ目の影響を受けず、一定になっている。これらより、桜井らは、限界ひずみが割れ目の影響をあまり受けない材料固有のものであることを示して、岩盤の限界ひずみ ε_{0R} は岩石の限界ひずみ ε_0 と同じであると考えている。

岩盤の強度と弾性係数において、割れ目などの不連続面の影響による低減率をそれぞれ m、n とすると、岩盤の限界ひずみ ε_{0R} は次式で表される。

$$\varepsilon_{0R} = \frac{\sigma_{CR}}{E_R} = \frac{m\sigma_c}{nE} = \left(\frac{m}{n}\right)\cdot\varepsilon_0 \qquad (4.2.2\text{-}55)$$

ここに、σ_{CR}　：岩盤の一軸圧縮試験

E_R　：岩盤の初期弾性係数

今、m=n であれば、岩盤の限界ひずみと岩石の限界ひずみは等しくなる。

m、n は原位置試験結果と原位置試験で採取された岩石の結果を比較することによって得られる。実際に実施された試験の岩盤と岩石の限界ひずみを図 4.2.2-23 に示す。

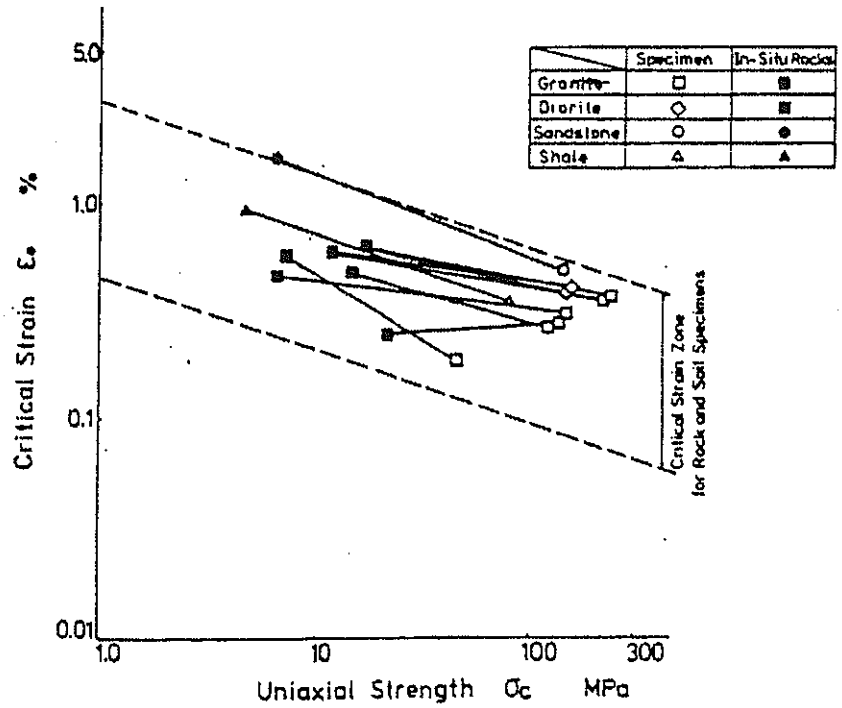


図 4.2.2-23　原位置岩盤の限界ひずみと一軸圧縮強度 [50)]

図 4.2.2-23 より、m/n は 1.0～3.0 の値を示していて、岩盤の限界ひずみは岩石のそれよりも大きくなる傾向がある。また、岩盤の限界ひずみは一軸圧縮強度が低下すると増加する傾向を示していて、岩石試験から得られている限界ひずみと強度の関係の範囲内にあることがわかる。これにより、図 4.2.2-19 に示されている関係が

岩盤においても成り立つと考えられる。

岩盤の一軸圧縮強度 σ_{CR} を直接求めることは難しいが、原位置せん断試験から岩盤の粘着力 C_R と内部摩擦角 ϕ_R を得て、それらから次式で推定することができる。

$$\sigma_{CR} = \frac{2C_R \cdot \cos\phi_R}{1 - sin\phi_R} \qquad (4.2.2\text{-}56)$$

また、変位計測結果の逆解析から低減率 m を得ることによって、岩盤の一軸圧縮強度 σ_{CR} を推定することができる。岩盤の一軸圧縮強度 σ_{CR} が推定できれば、図 4.2.2-19 から岩盤の限界ひずみ ε_{0R} を推定することができると考えられる。

ここまでで、岩石と比較したときに、岩盤の限界ひずみは変わらないという考え方と変わるという考え方があることがわかる。これに関して桜井は、施工管理の面からは、安全側の値として m/n=1.0 を用いるのがよいと考えられる、と述べている。

次に、岩盤の破壊ひずみについて考える。岩盤の破壊強度を表すパラメータ R_{fs} は、岩石試験と同様の考え方から、平板載荷試験によって得られる荷重-変位曲線とせん断試験結果から求めることができ、岩盤の破壊ひずみ ε_{fs} は次式により求められる。

$$\varepsilon_{fs} = \frac{\varepsilon_{0R}}{1 - R_{fs}} \qquad (4.2.2\text{-}57)$$

原位置試験が行えない場合は岩石試験より得られる R_f を R_{fs} とするか、最も保守側となる選択として R_{fs}=0 とすればよいとある。

岩盤の破壊ひずみ ε_{fs} を試験結果から直接得るためには、原位置での試験が必要となる。しかし、原位置での試験が行えない状況の場合、ボーリングコアなどの岩石資料から岩盤の破壊ひずみを推定せざるを得ない。この時、岩盤の破壊ひずみを最も保守的に推定することが考えられる。R_{fs}=0、m/n=1.0 とすることにより、岩盤の破壊ひずみは最も保守的になり、岩盤の破壊ひずみ ε_{fs} は次式で与えられる。

$$\varepsilon_{fs} = \varepsilon_0 \qquad (4.2.2\text{-}58)$$

iii）三軸応力状態における破壊ひずみ

前節までは、一軸応力状態における破壊ひずみの算定方法について述べたが、実際のトンネル周辺の岩盤は支保の拘束を受けていることから三軸応力状態である。したがって、三軸応力状態における破壊ひずみを評価する必要がある。

モール・クーロンの破壊基準から、破壊時の主応力差は、以下のようになる。

$$(\sigma_1-\sigma_3)_f=\frac{2\sigma_3\cdot sin\phi+2c\cdot\cos\phi}{1-sin\phi} \tag{4.2.2-59}$$

ここに、　ϕ　：内部摩擦角

C　：粘着力

$(\sigma_1-\sigma_3)_f$　：破壊時の主応力差

一軸圧縮試験で圧縮力 s を受けている状態は三軸圧縮試験で ϕ_3=0 とした場合と同じということと、一軸圧縮強度 σ_c は三軸状態で σ_3=0 としたときの破壊時の主応力差と解釈されることから、一軸状態における応力 s と一軸圧縮強度 σ_c の比は、式(4.2.2-59)から次のようになる。

$$\frac{\sigma}{\sigma_c}=\frac{\sigma_1-\sigma_3}{(\sigma_1-\sigma_3)_f}=\frac{(1-sin\phi)\cdot(\sigma_1-\sigma_3)}{2\sigma_3\cdot sin\phi+2c\cdot\cos\phi} \tag{4.2.2-60}$$

接線弾性係数 E_t は式(4.2.2-59)と(4.2.2-60)から、次のように表される。

$$E_t=\frac{d\sigma}{d\varepsilon}=E_i\left\{1-\frac{R_f(\sigma_1-\sigma_3)(1-sin\phi)}{2\sigma_3\cdot sin\phi+2c\cdot\cos\phi}\right\}^2 \tag{4.2.2-61}$$

同様に接線せん断弾性係数 G_t も次式によって表される。

$$G_t=G_i\left\{1-\frac{R_f(\sigma_1-\sigma_3)(1-sin\phi)}{2\sigma_3\cdot sin\phi+2c\cdot\cos\phi}\right\}^2 \tag{4.2.2-62}$$

ここに、G_i は初期せん断弾性係数である。

$\tau=(\sigma_1-\sigma_3)/2$、$d\gamma=d\tau/G_t$ とすると、σ_3 が一定の条件のもとで破壊時のせん断ひずみ γ_{max} は積分することで求められ、式(4.2.2-59)と $\tau_{max}=(\sigma_1-\sigma_3)_f/2$ の関係から、破壊時のせん断ひずみ γ_{max} は次式となる。

$$\gamma_{max}=\int_0^{\tau max}\frac{1}{G_t}d\tau$$

$$=\frac{1}{G_i}\frac{\tau_{max}}{1-\dfrac{R_f(1-sin\phi)\tau_{max}}{\sigma_3\cdot sin\phi+c\cdot\cos\phi}}$$

$$=\frac{c\cdot\sqrt{\dfrac{1+sin\phi}{1-sin\phi}}+\dfrac{sin\phi}{1-sin\phi}\sigma_3}{G_i(1-R_f)} \tag{4.2.2-63}$$

ここに、τ_{max}は破壊時のせん断応力である。

最大せん断ひずみについて、三軸状態に対する一軸状態の比を M とすると、式(4.2.2-63)から次のようになる。

$$
\begin{aligned}
M &= \frac{\gamma_{\max(triaxial)}}{\gamma_{\max(uniaxial)}} \\
&= \left(1+\frac{\sigma_3 \cdot tan\phi}{c}\right)\left(\frac{1-R_f}{1-R_{fT}}\right) \\
&= \left\{1+\frac{\sigma_3}{\sigma_c}(\kappa-1)\right\}\left(\frac{1-R_f}{1-R_{fT}}\right)
\end{aligned}
\qquad (4.2.2\text{-}64)
$$

ここに、$\gamma_{max(triaxial)}$ ：三軸状態の最大せん断ひずみ

$\gamma_{max(uniaxial)}$：一軸状態の最大せん断ひずみ

桜井らは、岩盤内の最小主応力が分かれば、上式より倍率 M を求めることができ、したがって、三軸状態の岩盤の破壊ひずみ ε_F が次式で与えられるとした。

$$\varepsilon_F = M \cdot \varepsilon_{fs} \qquad (4.2.2\text{-}65)$$

実際の適用に当たり、桜井らは三軸状態の限界ひずみの増分を安定性評価の余裕度と考え、実際には一軸状態の限界ひずみを用いて施工管理やトンネルの安定設計に用いることを述べている。

d) 状態ひずみ比（壁面ひずみ比）

川本、Aydan らは「トンネル掘削に伴う二次応力が周辺岩盤の強度を超えて岩盤を破壊させ、さらに掘削が進むにつれて破壊領域がトンネル壁面から地山内部へと進行し、破壊した岩盤マスがトンネル内空へと押し出す現象」をスクィーズィングと定義した。また、岩石の三軸試験から定義される状態ひずみとスクィーズィングを生じる坑道壁面のひずみによるスクィーズィングの程度に対する区分を提案している。

図 4.2.2-24 に示すようなピーク強度後の完全塑性流動とその後のひずみ軟化、残留状態を考慮した応力～ひずみ関係を用いて、それぞれのひずみによる力学的状態を定義し、これを「状態ひずみ」と呼んでいる。Aydan らは各状態ひずみは次のように定義している。

弾性限界ひずみ（ε_e）　：初期の直線部分の延長線とピーク点を通る水平線の交点のひずみ値

ピークひずみ（ε_p）　：ピーク時のひずみ値

軟化開始のひずみ（ε_s）：軟化過程の直線分の延長線とピーク点を通る水平線との交点のひずみ値

流動開始のひずみ（ε_f）：流動過程の漸近線と軟化過程の直線部との交点のひずみ値

スクィーズィングの状態は地山材料が降伏した後のひずみ挙動に関連するものと考え、弾性限界ひずみで除して正規化した値を判定基準とすることを考え、次のように状態ひずみ比を定義した。

$$\eta_e = 1 \tag{4.2.2.66}$$

$$\eta_p = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_e} \tag{4.2.2-67}$$

$$\eta_s = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_e} \tag{4.2.2-68}$$

$$\eta_f = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_e} \tag{4.2.2-69}$$

これらの値を、図 4.2.2-26 に示されるようなシラス、神戸層泥岩、大谷石、船入石についてそれぞれ整理している。これらから、状態ひずみ比は拘束圧に依存しないことを示した。また、これらの状態ひずみ比について、一軸圧縮強度との関係を

次式のように与えた。

$$\eta_p = 2\sigma_c^{-0.17} \tag{4.2.2-70}$$

$$\eta_s = 3\sigma_c^{-0.25} \tag{4.2.2-71}$$

$$\eta_f = 5\sigma_c^{-0.32} \tag{4.2.2-72}$$

これらの室内試験結果をもとに、Aydan らはスクィーズィングにより大きな変位を生じるトンネル周辺地山のひずみ状態として図4.2.2-25に示される5つの状態を考え、これが室内試験の応力～ひずみ状態と対応させることが可能であると考えた。よって、トンネル壁面の弾性限界状態における壁面ひずみ ε^e_θ に対する各状態の壁面ひずみ ε^a_θ の比が表4.2.2-7のどの区分に入るかによって、坑道の安定性、変形係数（スクィーズィングレベル）を判定できるとした。ここに、坑道壁面のひずみ比 $\varepsilon^a_\theta / \varepsilon^e_\theta$ を Aydan らは「壁面ひずみ比」と呼んでいる。この壁面ひずみ比と表4.2.2-7は坑道の安定性の指標となると考えられる。

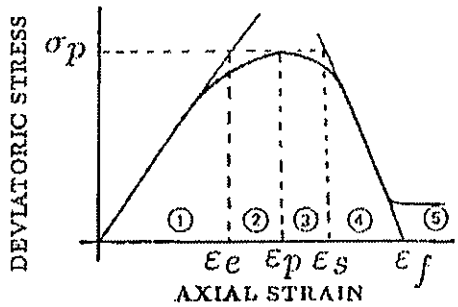


図4.2.2-24　Aydan らの仮定した応力～ひずみ関係[44)]

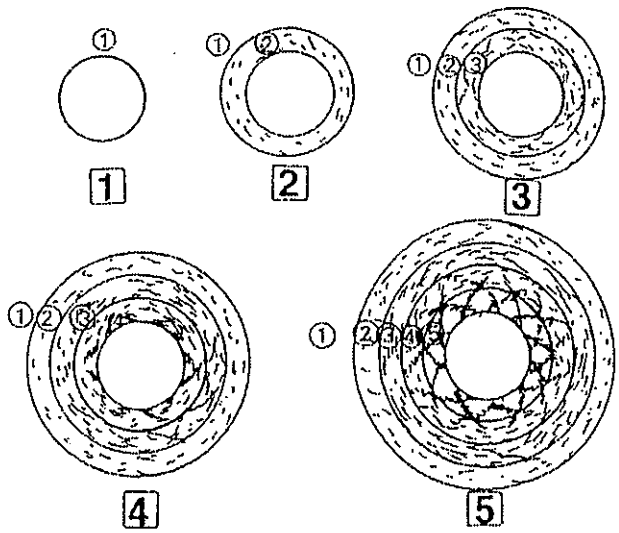


図4.2.2-25　状態ひずみ比とトンネルの安定性の状況の対応関係[44)]

表 4.2.2-7　スクィージングレベルの設定[44)]

Table 1　Definition of squeezing levels

分類番号	スクィーズィングレベル	記号	定義式	推定されるトンネル挙動
1	無し	NS	$\varepsilon_\theta^a/\varepsilon_\theta^e \leq 1$	壁面変位は切羽距離 2 D でほぼ収束し、その大きさは弾性計算によって求められる程度である。
2	軽い	LS	$1 < \varepsilon_\theta^a/\varepsilon_\theta^e \leq \eta_p$	壁面変位は切羽距離 2 D でほぼ収束するが、その変位量は弾性計算によるものより大きくなる。
3	中位	FS	$\eta_p < \varepsilon_\theta^a/\varepsilon_\theta^e \leq \eta_s$	切羽距離 2 D を超えても変位は継続し、かなり大きくなるが、やがて収束する。
4	激しい	HS	$\eta_s < \varepsilon_\theta^a/\varepsilon_\theta^e \leq \eta_f$	切羽通過後大きな変位が急速に押し出すような現象を呈し、収束する様子は見せない。盤ぶくれ現象も起こる。
5	非常に激しい	VHS	$\eta_f < \varepsilon_\theta^a/\varepsilon_\theta^e$	切羽は自立せず、壁面は絶え間なく押し出し、縫い返して強固な支保で補強しない限り変位は止まらない

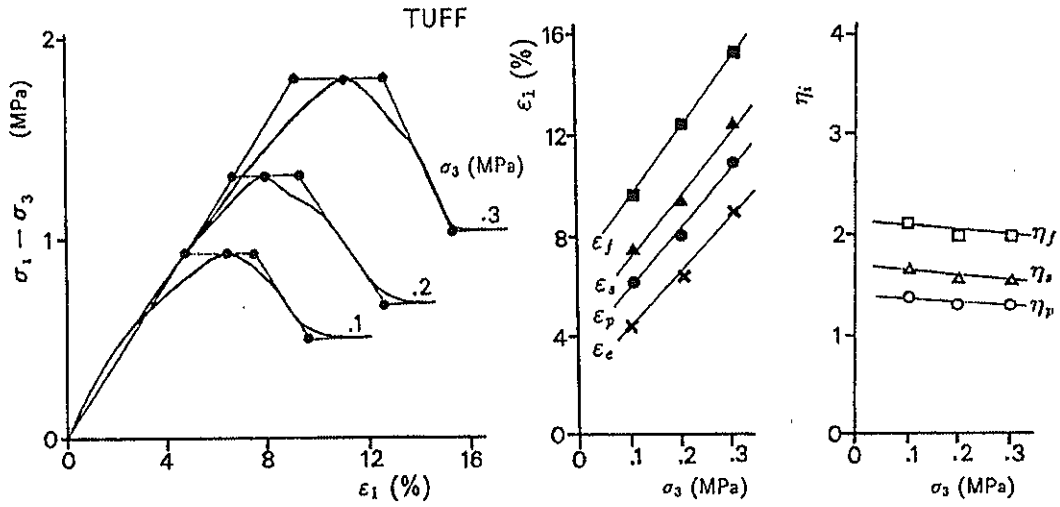


図 4.2.2-26(a)　シラスの応力～ひずみ関係 [46)]

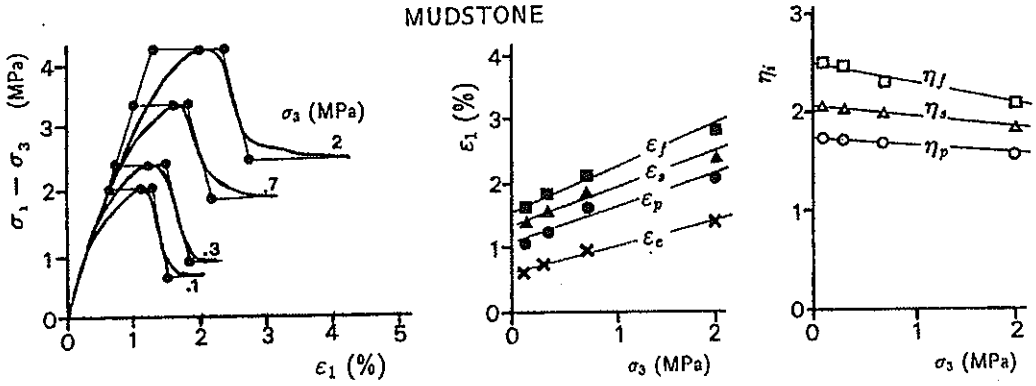


図 4.2.2-26(b)　神戸層泥岩の応力～ひずみ関係 [46)]

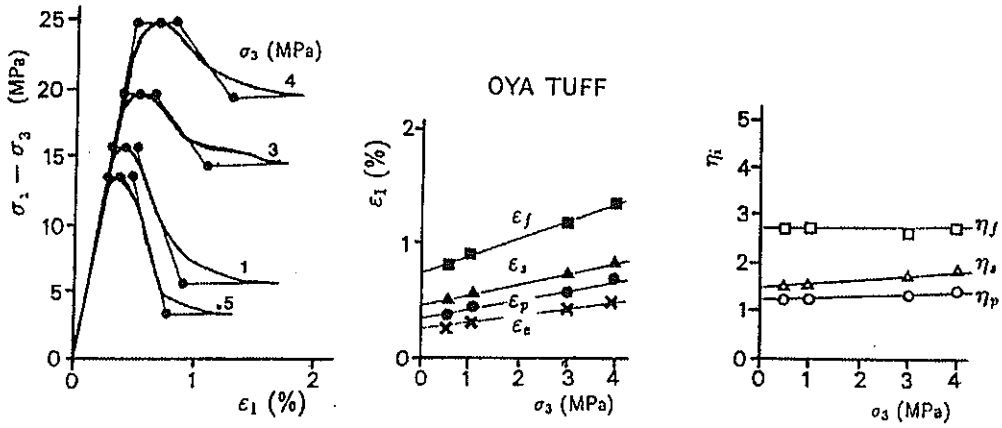


図 4.2.2-26(c)　大谷石の応力～ひずみ関係 [46)]

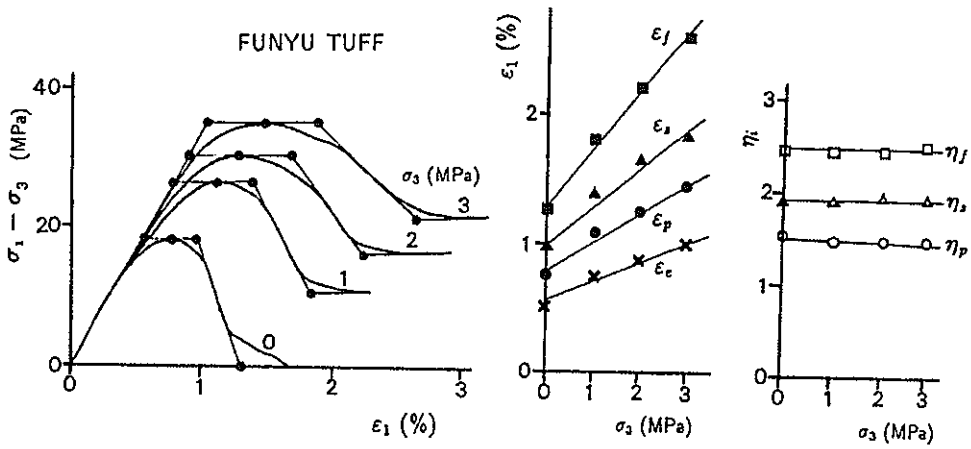


図 4.2.2-26(d)　舟入石の応力～ひずみ関係 [46)]

e) 変位（内空変位）

内空変位や天端沈下はトンネルの安定性を評価するための基本的な指標として、主に施工管理の目的で計測され、安定性の評価や支保パターンの変更等の判断は、事前に設定された管理基準値との比較により行われるのが一般的である。

この管理基準値は、地山特性や掘削形状（主に掘削断面積）により異なるもので、限界ひずみの考え方や数値解析により各現場毎に設定されるものである。従って、変位量は空洞安定性評価指標のひとつではあるが、その評価基準は地山ひずみや局所安全率等の指標から決定されるものであり、変位量のみで安定性の評価を行うことはできない。

f) 変位速度

天端変位や内空変位はトンネルの安定性を評価するための基本的なデータとして計測されている。計測頻度は変位速度や切羽からの距離により、表 4.2.2-8 を目安として実施されている。これらの計測データは、図 4.2.2-27 に示されるような計測経過時間と内空・天端変位に関する関係図が得られる。このデータから施工管理基準として、切羽到達直後の変位速度による安定性の評価方法や変位速度から最終変位を予測して安定性の評価をするための幾つかの研究がなされている。

表 4.2.2-8　内空変位と天端変位の計測頻度 [29)]

測定頻度	変位速度	切羽からの離れ
1～2回／1日	10mm／日以上	0～1D
1回／1日	10～5mm／日	1D～2D
1回／2日	5～1mm／日	2D～5D
1回／週	1mm／日以下	5D以上

Franklin は内空変位の変位速度を用いた管理基準値を表 4.2.2-9 のように与えている。ただし、対象地山の定義が示されていない。

表 4.2.2-9　Franklin の管理基準と処置 [47)]

注意レベル	管理基準	処置
1	内空変位の速度が切羽で 5mm/day より大きくなる。あるいは、吹付けコンクリートに部分的なクラックが生ずる。地下水が浸透する。	責任技術者に報告する。
2	内空変位の速度が切羽で 10mm/day、後方で 5mm/day より大きくなる。吹付けコンクリートにかなりのクラックが生ずる。地下水の浸透あり。	責任技術者に報告すると同時に、支保工、ロックボルト、吹付けコンクリートを追加施工する。
3	変位が加速される。クラックや地下水の浸透がレベル 2 をさらに越える。	責任技術者に報告する。掘削を停止し暫定的に鋼製支保工と長尺ロックボルトを施工する。調査を行う。

吉川らは、NATM の施工において断面形状と掘削方法ごとに計測開始初期の最大変位速度(mm/day)と最終変位量(mm)の関係が図 4.2.2-28 のように強い相関があることを示した。同様に JH は図 4.2.2-29 に示すように同様の関係が得られることを報告している。

内空変位の時間変化は、切羽の進行速度や切羽からの距離に関連する成分とクリープなどの地山材料の時間依存性による成分とに分けられる。切羽の進行による影響が地山のクリープによる影響よりも支配的であると考えられるため、上述の場合は主に切羽の進行に伴う内空変位の挙動を表しているとみなすことができる。

谷本らは、このような計測開始初期の変位量と変位率から安定性を評価する場合には、計測開始位置が統一されなければならないと考え、切羽距離に対する変位量の近似関数を適用して、切羽から 0.3D 進行した地点における内空変位の変化率と最終変位の関係を既往のトンネル実績から整理して、図 4.2.2-30 を得ている。

変位速度と最終変位量に強い相関があることから、谷本らは上述の検討において切羽位置と内空変位の関係を表す近似関数について検討をおこなっており、その中でワイブル分布曲線が良い適応性があることを報告している。同様に、切羽位置と内空変位の関係をある近似関数を仮定することによって最終変位を予測する方法がある。その一つとして、近藤は「2 倍時変位法」と呼ばれる最終変位量の予測方法を提案している。

変位速度は施工時の管理に適用する場合には重要な安定性評価指標であるとされているが、計測結果に基づく指標であり、事前設計の段階で定量的に評価することが難しい。

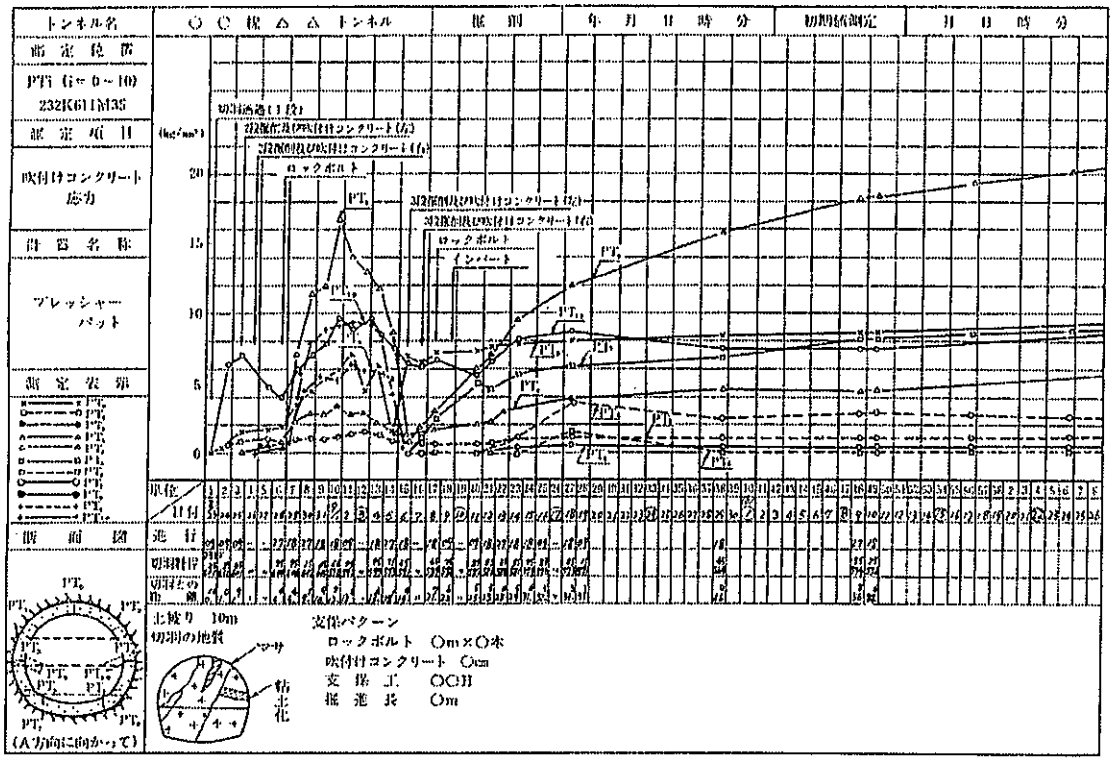


図 4.2.2-27　内空変位経時変化図の例 [30)]

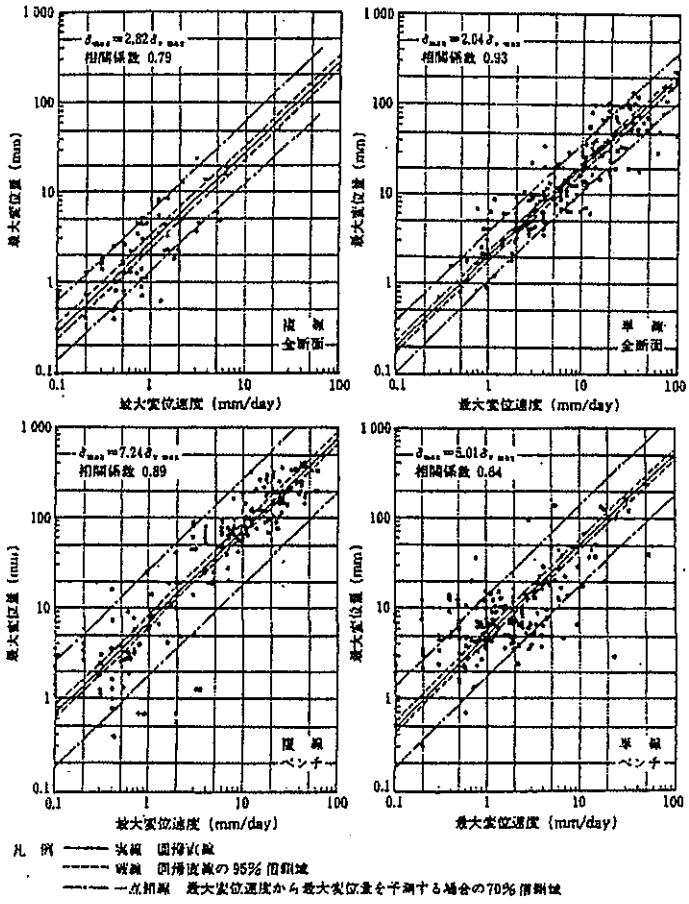


図 4.2.2-28　吉川らの最大変位と最大変位速度の関係図 [30)]

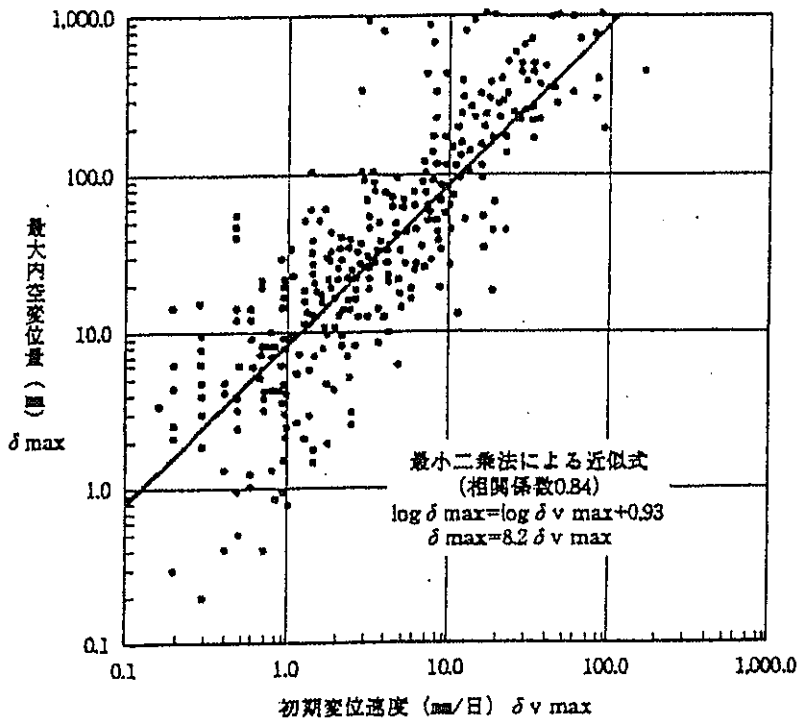


図 4.2.2-29　JH の最大内空変位と初期変位速度の関係 [32)]

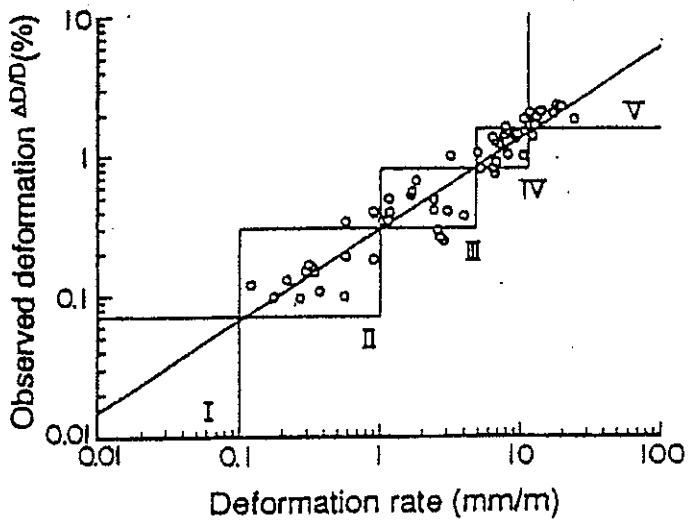


図 4.2.2-30　初期変形率と最終変形率の関係 [16)]

g) 緩み領域（塑性領域）

坑道掘削に伴い応力状態が岩盤の強度より高くなる場合には、坑道周辺より塑性領域あるいはゆるみ領域が発生する。ゆるみ領域と塑性領域の区別は現状では明瞭ではないので、ここでは非弾性領域を示すものとして考える。

日本道路公団の要領においては、解析結果における地山の塑性化して広がることに対する評価方法はまだ確立していないとしている。一方日本鉄道建設公団の指針によれば、ゆるみ領域は壁面応力が地山の一軸圧縮強度に達すると発生し、ゆるみ領域がトンネル直径の 20%を越えると急激に大きくなるとしている。このため、同指針ではトンネル径の 20%を上回らないという基準を地山の安定性を評価する一つの目安として示し、支保部材が仮設構造物の場合にはこの基準を許容値として採用することを例示している。地下石油備蓄では大断面の空洞であることと貯蔵する原油の空洞外への漏水を防止する観点から、電研方式でのゆるみ領域を安定解析から求め、隣接する空洞のゆるみ領域と接合しない条件について検討している。

地層処分施設固有の特徴としては、緩み領域の透水性の変化に対する規制も考えられ、安定設計に当たっては坑道周辺のゆるみ領域についての把握が重要となる。

表 4.2.2-10　トンネル設計の許容値の例 [30)]

設計の考え方		力学的には支保部材を本設構造とする場合	支保部材は施工中の仮設構造とする場合	支保部材を強度いっぱいまで使用する場合
地山の安定性	塑性領域	-	≦0.20D	-
主として対象となる地山		V_N、IV、III_N	II_N、I_N、I_L	I_S

D：トンネルの外径

JNC の「第 2 次取りまとめ」では、坑道の支保仕様を設定するに当たり、理論解を用いて壁面のひずみが限界ひずみ以下となるように設定し、その妥当性と処分坑道の連接による処分坑道周辺の岩盤の安定性は、局所安全率と限界せん断ひずみを用いて以下の観点で評価している。

・局所安全率が 1.5 を下回る領域が大きく分布しないこと

・最大せん断ひずみの大きさや分布領域が大きく変化しないこと

「第 2 次取りまとめ」の軟岩における解析結果の評価では、局所安全率を下回る領域が坑道壁面より 190cm、最大せん断ひずみの目標値（限界せん断ひずみ）を上回る領域が 110cm ほど発生しているが、支保工の応力度が許容値内であり、力学的安全性は確保できるとしている。ただし、局所安全率、最大せん断ひずみが目標値を越える領域の大きさを考慮して、不安定となる部分においてはロックボルトなど

の補強工が必要であると考えている。

このような判定は、局所安全率や最大せん断ひずみを目安に坑道周辺の岩盤の不安定領域、すなわち、ゆるみ領域を求め、安定性の評価を行っていることと等価であると考えられる。

h) 透水性

空洞周辺の地盤の透水性を空洞設計の評価指標とする試みもなされている。地盤の透水性が施設の要求性能に重要な関わりがある場合、設計上の評価指標のひとつとして考慮する必要があると考えられるが、空洞の安定性そのものを評価する指標ではない。

i) 一次支保応力

日本鉄道建設公団の指針においては、管理基準値の設定にあたり、支保部材の変状から設定する方法について述べられている。ここでは、吹き付けコンクリートやロックボルトの変状がそのときの荷重、変位（変形状態）を反映しているとの観点から、吹き付けコンクリートの破壊ひずみやロックボルトが破断する変位（ひずみ）を目安とする方法が示されている。

また、同指針では安定解析結果の評価において、支保工部材の許容値は「建造物設計標準」に基づくが、設計における支保部材の役割に応じて、許容値の取り方も変更できるとしている。このため、支保部材を本設構造物として取り扱う場合には、同基準で指定されている許容応力度を用いるが、仮設部材と見なす場合には、許容応力度の割り増しを許している。

加えて、変位が非常に大きなトンネルの施工などの特殊条件下においては、支保部材が破壊しなければよいとの観点から、部材の強度目安（許容値）とする考えも示されている。表 4.2.2-11 に同指針におけるトンネル設計における支保部材の許容値の例を示す。

表 4.2.2-11　トンネル設計における支保部材の許容値の例 [30)]

設計の考え方		力学的には支保部材を本設構造とする場合	支保部材は施工中の仮設構造物とする場合	支保部材を強度いっぱいまで使用する場合
支保部材の応力	吹き付けコンクリート応力 σc(kgf/cm^2)	$\leq \dfrac{0.85 f'_{ck}}{\gamma_c \gamma_b \gamma_t}$	$\leq \dfrac{0.85 f'_{ck}}{\gamma_t}$	$\leq 0.85 f'_{ck}$
	ロックボルト応力 σs(Mpa)	≦180（SD295 の場合） ≦200（SD345 の場合）	≦295（SD295 の場合） ≦345（SD345 の場合）	
主として対象となる地山		V_N、IV、III_N	II_N、I_N、I_L	I_S

f'_{ck}：吹付けコンクリートの設計基準強度

γ_c：吹付けコンクリートの材料係数（=1.3）

γ_b：吹付けコンクリートの部材係数（=1.15）

γ_t：吹付けコンクリートの構造係数（=1.1）

この事例では基本的に支保部材の健全性を確保することを前提としている。設計検討において支保部材の発生応力・軸力等が大きく、部材の強度を上回る場合、以下の二つの対応が考えられる。

①部材の強度を高める

②支保部材の設置時期をずらし岩盤に荷重分担を大きくすることにより、支保部材の荷重分担を低減する

支保部材の破壊が坑道の全体の安定性を失わせる条件の場合には、坑道全体の安定性の評価基準として用いることが可能であるが、支保部材の破壊が坑道の安定性に直接つながらない場合には評価基準として二次的な取り扱いとなると考えられる。

(3) 空洞安定性評価指標に関する考察

前項で現状技術において空洞安定性評価に用いらている（または提案されている）指標について整理を行った。ここでは指標の基準値設定の参考として、文献等からわかる範囲で施工実績を取り上げ、考察する。

a) 地山および支保部材の変状と内空変位量の関係

日本道路公団では、既往の施工実績における支保部材の変状と内空変位の関係を図4.2.2-31のように整理している。すなわち、

・吹付コンクリートのクラックは約30mm以上の内空変位で生じている。

・ロックボルトのプレート変状は約60mm以上の内空変位で生じている。

・鋼製支保工の変状は約60mm以上の内空変位で生じている。

これらは2車線高速道路断面の施工実績データが多いと考えられることから、この内空変位を用いて求められたひずみは、トンネル代表径をD＝10.0mとして、30/10000＝0.3%～60/10000＝0.6%となる。ここで、実際に計測される以前に一次支保に既にひずみが生じていることを考慮すると、この先行変位の割合を50%とすれば、一次支保に変状が生じるひずみは0.6～1.2%程度ということになる。

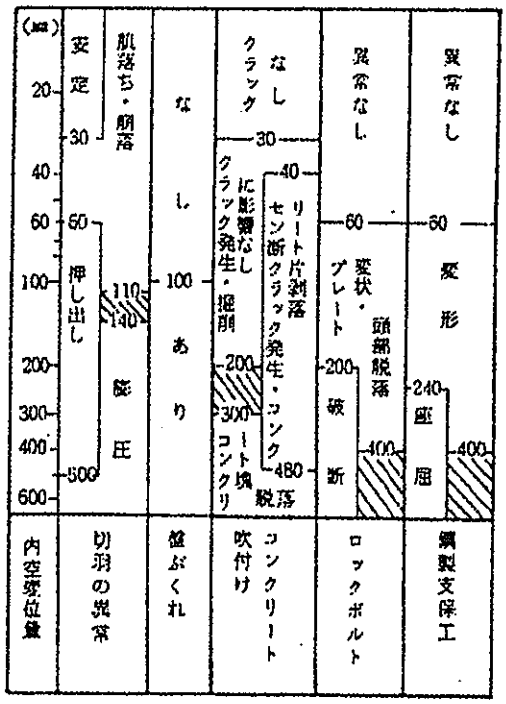


図4.2.2-31　地山および支保部材の変状と内空変位量の関係[33)]

この実績調査より、一次支保に変状を生じさせるトンネル壁面のひずみ量の目安を得ることができる。しかし、一次支保に変状が生じたこと（たとえば吹付コンクリートにクラックが生じたこと）とトンネル全体の安定性とは別に考えなければならない問題であり、この関係は明確にはされていない。従って、ここで得られている 0.6～1.2%というひずみ量をそのまま空洞安定性の評価基準とすることはできない。

b) 地山強度と変形率の実績

安定性評価のための指標である地山強度比がどのような値や範囲となっているかを既往文献による施工実績データより考察する。

北川らの文献によれば、図 4.2.2-32 のように地山強度比とひずみの関係を整理している。これによれば、

・地山強度比は最小で 0.1 程度、最大では 80 程度と、広い範囲に分布している。

・地山強度比が 1.0～2.0 以下になるとひずみ量が増大する傾向を示している。

この結果は、地山強度比が 2 以下となると、弾塑性理論において塑性領域が発生し変形量が大きくなることと良い対応を示しており、安定性評価の参考になる。同時に地山強度比が 2 以下の場合で変形量が大きくなりながらも、地山全体が不安定になることなくトンネルの掘削が完了している事例があることも示しているといえる。

また、地山強度比は初期地圧に対して地山がどの程度安定性が得られるかを表す比率であり、トンネル支保の効果を考慮できないため、軟岩地山の場合この指標により支保の設計が可能になるというわけではない。

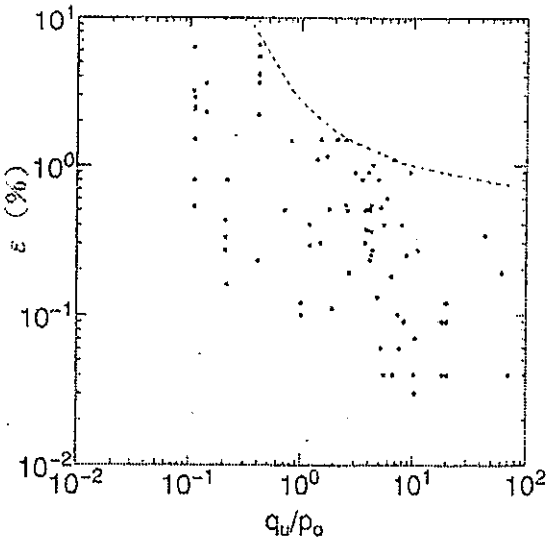


Fig.17 Relationship between ground strength ratio and measured strain

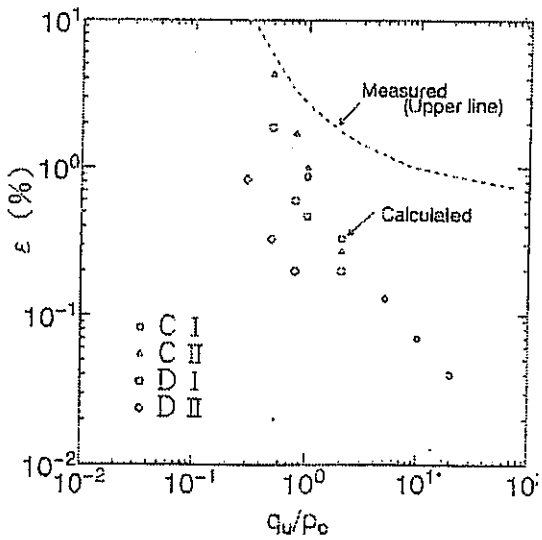


Fig.20 Comparison of calculated and measured strain

図 4.2.2-32　地山強度比とひずみの関係 [8)]

c) 地山強度比と支保圧比

前述したように、地山強度比はトンネル支保の効果が考慮されていない。ここでは一次支保の効果を把握するために、寒風山トンネルの事例より地山強度比と支保圧、および施工時の不具合の有無の関係を考察する。

図 4.2.2-33 は横軸に土被り量をとっているが、当該トンネルの場合は岩盤の一軸圧縮強度が大きくかわらないため、地山強度比の逆数に比例するものである。すなわち、土被り量が大きいほど地山強度比が小さくなるということになる。

これによると、やはり地山強度比が 2 以上の場合には変形は小さく、変状も生じていない。地山強度比が 2 以下の場合、無支保の場合には壁面の地山は塑性域が発生して周辺地山の安定性が低下すると考えられるが、支保内圧が大きい場合には、支保の不具合が発生せず施工される傾向があるといえる。

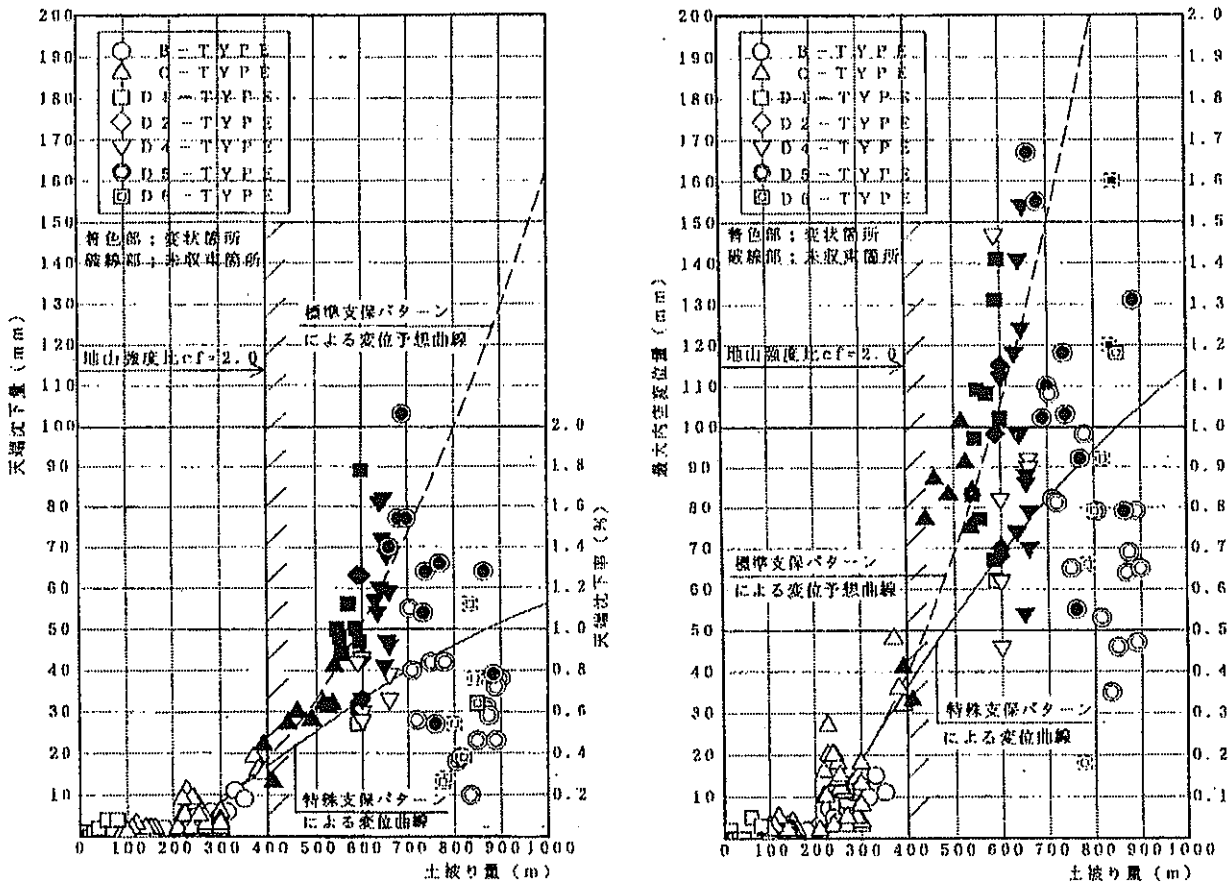


図 4.2.2-33　内空変位量と土被りの関係（寒風山トンネル）[4)]

d) 施工実績における限界ひずみについて

清水らの文献によれば、日本道路公団における山岳トンネルの施工実績について、計測変位と支保の変状との関係を図 4.2.2-34 に整理している。これより次のことがいえる。

①みかけの弾性係数が数 10,000kgf/cm^2 以上では変状のあった断面となかった断面の区別が明確ではない。

②みかけの弾性係数が数 100～数 1,000kgf/cm^2 では両者の区別が比較的明確である。

これよりみかけの弾性係数が数 1,000kgf/cm^2 以上では桜井による限界ひずみレベル II 以上で支保の変状を生じているものの、最大で 5%程度までひずみを許して施工していることがわかる。

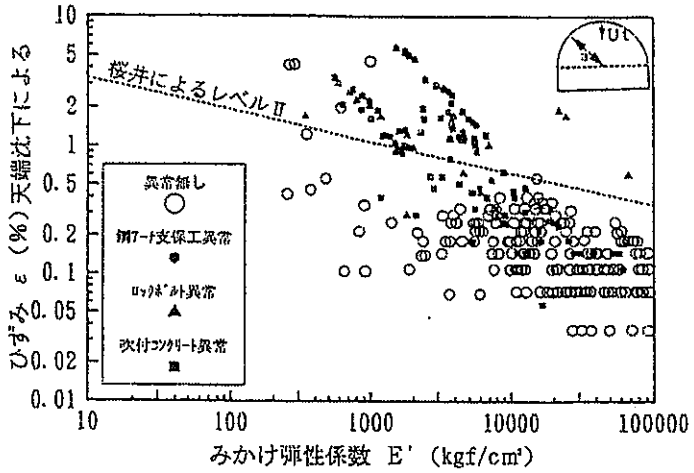


図- 天端沈下によるひずみと支保工の変状

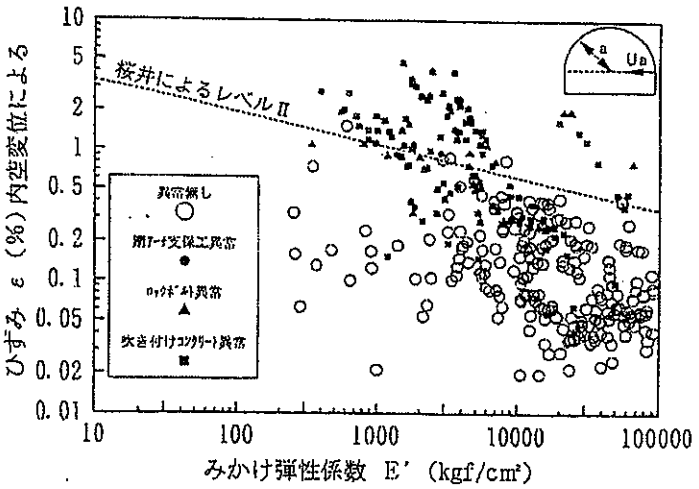


図- 内空変位によるひずみと支保工の変状

図 4.2.2-34 ＪＨの施工実績における見かけの弾性係数とひずみおよび支保工の変状の有無の関係 [17)]

e) 安定性評価指標に関するまとめ

現状の技術において空洞安定性評価の指標として用いられるものについて整理を行った。この評価指標を深地層の研究施設の設計に適用する際の適用性を考慮したまとめを以下に示す。

① 地山強度比は空洞安定性評価のための重要な指標であり、ＪＲ、ＪＨなどのトンネルの岩盤等級区分に用いられている。しかし、施工実績によればこの地山強度比の値は広い範囲に分布しており、また、地山強度比は支保の内圧効果を考慮できないため、大深度で初期地圧が大きいトンネルの安定性評価（トンネル支保設計）に適用するのは難しい。

② 局所安全率は部分的な地山の不安定状況をある程度定量的に評価できるが、塑性領域が発生してもトンネルの安定は維持されている場合があるなど、終局的な地山全体の不安定性との関連は明確でない。

③ より合理的な設計を行うためには、設計段階での安定性評価指標を施工時に確認できることが望ましいが、局所安全率などの応力に基づく指標は、精度よい応力の現場計測が困難であることから適用が難しいと考えられる。

④ トンネル周辺地山のひずみ量は、施工時の精度よい計測が可能であり、空洞安定性の評価指標として適用できると考えられる。既往の施工実績を調査すると、桜井の提案する限界ひずみより大きなひずみを生じながらも安定性が確保されている事例が存在することがわかり、評価基準を緩和できる可能性があると考えられる。

⑤ 状態ひずみおよび状態ひずみ比は、桜井の限界ひずみを越えた変形を許容した場合の安定性の評価指標を与えるため、大深度、低強度地山におけるトンネルの場合に合理的な評価を行える可能性がある。ただし、評価基準の設定に関しては、この指標によりトンネル支保の設計を行った事例が文献調査の範囲では見いだすことができす、実施設計への適用には施工実績との比較等による慎重な検討が必要であると考えられる。

⑥ 内空変位の変位速度や変位量は、施工時の安定性予測等に有用な情報を与える

が、設計段階で定量的に空洞の安定性評価を行う指標としては適用できない。

⑦ ゆるみ領域幅を安定性の評価基準とする場合、その基準値としてはＪＲなどで使用されている目安があり参考になるが、ゆるみ領域の広がりで空洞の安定性をの評価を行う手法は確立されていないのが現状である。

⑧ 地山の透水性は、それ自体を空洞安定性評価の指標とすることはできないが、施設の要求性能として考慮する場合には、設計段階から評価を行う必要が生じる。ただし、現状の技術において掘削による透水性へ与える影響を定量的に予測する手法は確立されていない。

⑨ 支保部材の応力は、支保部材の健全性を評価するために必要な評価指標であるが、支保部材の破壊が空洞全体の安定性を損なうか否かについての定量的な評価は現状の手法では困難であり、空洞安定性評価指標としては二次的な取り扱いと考えるべきである。

4.2.2.5　空洞安定性評価手法（設計手法）の選定とその適用性に関する検討

前項までで述べたように、大深度坑道の空洞安定性評価すなわち大深度トンネルの支保設計にあたっては、同様の条件下での既往の設計・施工実績が少なく、経験や類似事例に基づく設計手法では十分な安定性評価は困難であると考えられ、空洞安定性評価（トンネル支保設計）は解析的手法によらざるを得ないと判断される。

理論解析：一般に簡便

数値解析：細かな設定条件を考慮可能、多くの評価指標を出力可能

解析的手法には理論解析手法と数値解析手法とがあり、いづれの手法も基本とする地山の応力－ひずみ関係や支保効果の評価は同一理論で評価可能であるが、空洞安定性評価（トンネル支保設計）に特に重要なパラメータである初期地圧の設定や施工手順の評価が可能であり、また得られる情報が多い数値解析手法が望ましいと考えられる。ただし、数値解析手法は理論解析手法に比べて大きな労力を要し、また使用するプログラムによる差異が存在するなどの面を有するため、理論解析手法を併用して解析結果を比較しながら安定性評価を行うことが必要であると考えられる。

数値解析手法のうちどの手法を採用するかについては、硬岩と異なり軟岩の場合は地山を連続体でモデル化した解析により十分掘削挙動のシミュレートが可能であると考えられる点をふまえ、他の数値解析手法と比較してより実績が多く、従って結果に対する信頼性も高い有限要素法（FEM）が最適であると考えられる。

また、空洞安定性の評価は、下記の指標に着目するのが適切であると考えられる。

・トンネル周辺地山のひずみ（壁面ひずみ）

・支保部材応力

ロックボルト等の支保の設計の際には、以下の指標を副次的なものとして参考にできると考えられる。

・ゆるみ領域（塑性領域）幅

ただし、いずれの指標もついても評価基準は画一的なものではなく、既往の実績や施設に要求される性能（仕様）等により変わってくるものであることに留意する必要がある。トンネル周辺地山のひずみについては、桜井の限界ひずみを許容値とする考

え方がしばしば採用されるが、調査によれば、この限界ひずみを越えて建設されている事例が少なからず存在することをふまえて、より合理的な設計を行うためには基準値を緩和する考え方を採用することも考えられる。

次頁に、トンネル設計手法および空洞安定性評価指標と適用性についてのまとめを一覧表により示す。

表4.2.2-12　トンネル設計手法一覧

設計手法				解析モデル													出力項目									
				形状		応力－ひずみ関係				降伏条件		ﾀﾞｲﾚｲﾀﾝｼｰ		支保効果			変位・ひずみ		応力	安全率	ゆるみ領域	支保発生応力（断面力）			初期応力	
				円形	任意	弾性	完全弾塑性	弾性・残留	ひずみ軟化	ﾓｰﾙ・ｸｰﾛﾝ	Hoek&Brown	考慮不可	考慮可	内圧	その他モデル	三次元効果	壁面	地中				吹付コン	鋼製支保工	ﾛｯｸﾎﾞﾙﾄ	静水圧状態	側圧係数
経験に基づく方法	標準支保ﾊﾟﾀｰﾝ（地山区分化）	建設省																								
		日本道路公団																								
		日本鉄道建設公団																								
		農林水産省																								
		他																								
	指標の点数化	RMR																								
		RSR																								
		Q値																								
	類似事例に基づく方法																									
解析に基づく方法	理論解析	極限の釣合い状態に基づく方法	Rabcewicz-岡の方法																							
			Fedderの方法																							
		連続体力学に基づく方法	Einsteinらの解	○		○				○		○		○			○	○	○	○		○	○	○		○
			Kastnerの方法	○			○			○		○		○			○	○	○	○	○	○	○	○		○
			岡の方法	○			○		○	○		○		○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	
			Eggerの解	○			○	○	○	○			○	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	
			Hock & Brownの解	○					○		○		○	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	
			久武の解																							
	数値解析	連続体モデル	FEM		○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			BEM		○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			FDM		○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			MBC、EQCなど																							
		不連続体モデル	FEM		○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			Keyblock																	○				○	○	○
			RBSM		○							○		○	○	○	○	○	○			○	○	○	○	○
			DEM		○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			DDA		○																					

表4.2.2-13　空洞安定性評価指標と適用性

安定性評価指標	特　徴	設計時の定量的評価	施工時に計測可能か	既往の事例との対応	設計適用実績	適　用　性	
①地山強度比	・空洞安定性を評価する上で簡便かつ重要なパラメータであり、岩盤等級区分に用いられている。 ・地山強度比が2以上であれば空洞周辺の岩盤の応力状態は弾性状態であり、安定であると判断できる。 ・トンネル支保の効果を考慮できない。 ・支保内圧が大きい場合に、地山強度比が2以下でも安定性が保たれている事例がある。	○	△	△	○	・地山強度比から支保仕様を決める事例もなくはないが、支保仕様の決定に対しては情報不足である。 ・施工実績によれば地山強度比は広い範囲に分布しており、また、支保の内圧効果を考慮できないため、大深度で初期地圧が大きいトンネルの安定性評価（トンネル支保設計）に適用するのは難しいと考えられる。	△
②局所安全率（応力）	・局所安全率の定義方法は複数存在する。 ・地山の部分的な不安定状況を定量的に評価できる。 ・終局的な地山全体の安定性との関連が明確でない。 ・施工現場での精度よい計測が難しい。	○	△	○	○	・坑道周辺地山に塑性領域が発生してもトンネルの安定は維持されている場合があり、トンネル周辺地山全体の安定性を局所安全率のみで評価するのは難しいと考えられる。 ・より合理的な設計を行うために必要であると考えられる施工時の現場計測が困難であることからも、応力に基づく評価指標は適用が難しいと考えられる。	△
③坑道周辺地山ひずみ（限界ひずみ）	・施工時の現場での計測が容易である。 ・事例では限界ひずみを越えても建設されているものがある。 ・拘束圧による影響の評価方法に検討を要する。	○	○	○	○	・トンネル周辺地山のひずみ量は、施工時の精度良い計測が可能であり、空洞安定性の評価指標として適用できると考えられる。 ・施工実績によれば、深部の坑道周辺地山が桜井の限界ひずみを越えても支保効果により安定を維持している事例があり、既往の設計手法で適用されている限界ひずみによる評価基準を緩和できる可能性がある。ただし、どの程度のひずみレベルまでを許容するかについては、さらに検討を要する。	○
④状態ひずみ比（ひずみ）	・弾性限界ひずみを越え、ピーク強度後のひずみ軟化、残留強度状態までの判定基準を与えることができる。 ・壁面ひずみ比ごとにスクィージングレベルや推定されるトンネル挙動が提案されており、現実的な坑道の安定性評価の指標となる。 ・拘束圧に依存しない。	○	○	△	△	・ひずみを評価指標とした場合の評価基準として参考にすることができる。 ・この評価基準によりトンネル支保の設計や事後解析を行った事例がないため、実施設計への適用には施工実績との比較等による慎重な検討が必要である。	△
⑤変位量	・変位量自体を規定するような設計仕様の場合には空洞設計の際の評価指標となり得る。 ・施工現場での計測が容易である。	○	○	○	△	・同一地山でも掘削形状により許容される変位量は異なるため、変位量自体を安定性評価の指標として適用するのは一般に難しい。	△
⑥変位速度	・現場計測における初期変位速度より最終変位量を推測して安定性の評価を行う方法が提案されている。 ・設計段階では定量的に評価することが困難である。	×	○	△	△	・設計段階での評価が困難であることから、設計時の評価指標としては適切ではないと考えられる。	△
⑦ゆるみ領域（塑性領域）	・ゆるみ領域の定義は必ずしも明確ではないが、塑性領域（非弾性領域）と考える場合が多いようである。 ・ゆるみ領域の幅を安定性評価の目安とする事例もある（ＪＲ）。 ・ゆるみ領域の幅が設計仕様となるような場合には空洞設計の際の評価指標となる。 ・支保設計（ロックボルト）の際の指標として用いられることがある。	○	△	△	△	・ゆるみ領域の広がりで空洞の安定性の評価を行う手法は確立されていない。	△
⑧透水性	・設計段階で定量的に予測するのは困難である。 ・要求性能からゆるみ領域における透水性の変化が評価指標となる可能性がある。	△	△	△	△	・空洞の安定性そのものを評価する指標ではない。	△
⑨一次支保応力	・一次支保の健全性を評価するために必要な評価指標である。 ・一次支保部材の破壊が空洞全体の安定性を損なうか否についての定量的な評価が現状の手法では困難である。 ・一次支保部材の役割に応じて許容値の取り方を具体的に示している例もある（ＪＲ）。	○	○	△	△	・支保部材の健全性の評価のためには必要である。 ・空洞安定性評価指標としては二次的な取り扱いと考えるべきである。	△

4.3 トンネル支保設計にあたり必要となる入力条件、問題点、課題点

4.3.1 空洞安定性評価手法（設計手法）と必要となる入力条件

(1) 入力物性値概要

ここでは、空洞安定性評価手法として前節で採用した有限要素法（FEM）を実際に適用する場合に必要となる入力物性値について整理を行う。

地下空洞、トンネルの設計に用いられる FEM 解析では、使用する解析プログラムに応じて次のような各種の入力物性値が必要である。

①初期地圧
②地山の変形特性
③地山の強度特性
④地山のクリープ特性
⑤切羽進行のパラメーター
⑥覆工（支保）の材料特性

一般に、これらの入力物性値の感度分析によれば、トンネルの変形モード（天端沈下と内空変位の比率）に最も影響を及ぼすのは初期側圧係数であり、変位量や吹付コンクリート応力、ロックボルト軸力、鋼製支保工応力等の支保部材応力の大きさに最も大きな影響を及ぼすのは初期変形係数であるとされている。また、地山強度比の小さい領域で、トンネル周辺地山に塑性領域の発生を抑制するのに必要な支保圧の算定結果に大きく影響を及ぼすのは内部摩擦角であるとの研究報告がある。従って、これらの入力パラメータは特に精度の良い入力物性値の設定が求められる。

表 4.3.1-1　FEM 解析における入力物性値例

入力物性値			備　考
初期地圧	土被り	H	地形
	単位体積重量	γt	室内試験
	初期側圧係数	K0	孔内試験
初期地圧	鉛直応力・水平応力		孔内試験（初期地圧測定）
地山の変形係数	初期変形係数	D0	室内試験、孔内試験、孔内検層、コア観察
	破壊時変形係数	Df	
	初期ポアソン比	$\nu 0$	室内試験、コア観察
	破壊時ポアソン比	νf	室内試験、コア観察
	弾性限界	REL	室内試験、コア観察
地山の強度	粘着力	C	室内試験、コア観察
	内部摩擦角	ϕ	室内試験、コア観察
	引張強度	σt	室内試験、コア観察
地山のクリープ特性	粘性倍率	$\alpha 1$	クリープ試験
	時間係数	$\beta 1$	クリープ試験
切羽進行パラメータ	応力解放率※		（3次元解析）
支保工物性値	吹付コンクリート弾性係数		（材料試験等・標準値）
	ロックボルト応力ーひずみ特性		
	ボルトと地山の摩擦力		
	ボルトの孔径		

※）2次元解析の場合

(2) 入力物性値

a) 初期地圧

地山の初期応力はトンネル掘削問題では後に掘削解放力として載荷され、計算結果に大きな影響を与えるが、計測が難しい項目であり、仮定として与える場合が多い。

初期地圧に関する入力物性値には、以下の３つのパラメータがある。

①土被り　　H

②初期側圧係数　K_0

③単位体積重量　γ_t

これらの設定方法を以下に示す。

①土被り　H

トンネル天端ち地表面との距離（m）を土被りＨとする。

②初期側圧係数　K_0

初期側圧係数 K_0 は、地山の初期応力における水平方向主応力 σh と鉛直方向主応力 σ_V の比（$K0=\sigma_h/\sigma_V$）として定義される。

初期側圧係数は、初期地圧の測定結果から求めることもできるが、一般のトンネルでは行われることはまれであり、以下のような方法で求められる。

①水平成層地山を前提として弾性論により求める方法

②FEM の自重解析により求める方法

③施工時の変位計測結果（天端沈下と内空変位の比率）から逆解析により求める方法

④変位計測データを用いて弾性論から求める方法

⑤地質工学的な要因から推定する方法

このうち、一般には①、②の方法が用いられ、施工時には精度が向上する③あるいは④の方法が用いられることが多い。深度が大きい場合には、地表までモデル化した自重解析によることは不可能であり、初期応力測定を行っていない場合には、鉛直土被り厚と側圧係数 K_0 を用いて地山の応力状態を設定する場合が多い。しかし、深度が大きく初期地圧が大きい場合には、特にこの初期地圧の設定値が掘削時の地山挙動を大きく左右することになるため、できる限り精度の高い入力物性値を得るためには原位置での初期応力測定を行い、その結果により地山応力を設定するのが望ましい。

側圧係数の設定に関してはＪＲやＪＨの研究結果によれば、下記のように定めてよいとしている。

（ＪＲ）

H≦50m の場合　：$K_0=0.015\times H+0.25$

H＞50m の場合　：K_0＝1.0

（ＪＨ）

H≦75m の場合　：K_0＝0.01×H+0.25

H＞75m の場合　：K_0＝1.0

③単位体積重量　γ_t

物性試験から求められた値を用いることを原則とする。なお、トンネル上部がいくつかの地層から構成されている場合には、地層ごとの値を設定することが必要である。

b) 地山の変形特性

地山の変形特性としては、変形係数、ポアソン比、各種の非線形パラメータ等があるが、解析プログラムの力学モデルに応じて地山全体としての値を設定することが必要である。

ここでは入力物性値の一例を示す。

①初期変形係数 D_0、破壊時変形係数 D_f

地山の変形係数は、解析結果に最も大きな影響を与える物性値であるが、FEM 解析では地山全体としての値を入力する必要がある。

地山の変形係数はトンネル掘削の影響範囲と試験における供試体の大きさが異なるなどの理由から、物性試験で得られた値がそのまま地山の物性を表すとは限らないので、試験の特性を十分考慮して入力値を設定することが必要となる。D_0 の決定方法としては、以下のような方法がある。

・物性試験から求められた値を低減する方法

・変位計測データを用いて逆解析手法により求める方法

・地山等級に応じた標準値を用いる方法

②初期ポアソン比 ν_0、破壊時ポアソン比 ν_f

地山のポアソン比 ν_0 は 0.1～0.4 程度の値を示す。ポアソン比 ν_0、ν_f は供試体の物性試験より求められる。

③弾性限界 REL、非線形パラメータ n

三軸圧縮試験における応力－ひずみ曲線より求めることができる。

c) 地山の強度特性

地山の強度特性としては、モール・クーロンの破壊基準に基づく粘着力C、内部摩擦角 ϕ、引張強度 σt がある。これらの強度特性値については、供試体の強度試験や原位置試験により求めることができる。粘着力Cと引張強度 σt については、供試体試験結果を用いる場合には、変形係数と同様に亀裂の影響を考慮して低減して用いることが必要となる。内部摩擦角 ϕ は亀裂の影響をあまり受けないので、三軸圧縮試験から得られた値を用いてもよいとされている。

d) 地山のクリープ特性

堆積軟岩においてクリープ特性を解析上考慮する必要がある場合がある。地山のクリープ特性としてはフォークトモデルにおける粘性倍率 $\alpha 1$ と遅延係数 $\beta 1$ があり、供試体や原位置のクリープ試験から求めることができるが、原位置試験が実施される

ことはまれであり、一般には供試体試験結果より求める場合が多い。

e) 切羽進行のパラメーター

現在のところ FEM 解析による場合には、地山を二次元の断面として扱い、地盤の非線形変形特性には破壊接近度法を用いるプログラムを用いることが多い。この場合には、実際の掘削に伴う三次元的な影響を二次元断面として扱うため、切羽進行に伴う掘削相当外力の算定方法の考え方がプログラムによって異なる。これにはいくつかの方法があるが、一般的には次の２種類に大別される。

①掘削面の応力を逐次解放する方法

②切羽の進行をクリープ関数で表現する方法

f) 支保部材に関する入力物性値

①吹付コンクリート

吹付コンクリートは通常のコンクリートと異なり若材令で変形を受けるため、弾性変形以外にも相当量のクリープ変形や乾燥収縮変形を示す。このことを考慮して入力物性値としての弾性係数を設定する必要がある。

②ロックボルト

ロックボルトはその材質により完全弾塑性的な特性を示すものやひずみ軟化し非線形的な特性を示すものがある。このことをふまえて、FEM 解析におけるロックボルトは弾性体として取り扱う場合もあるが、バイリニアモデルや指数関数モデルで扱う場合も多い。

また、解析プログラムによってはロックボルトと地山のすべりをモデル化できるものもあるが、この場合、充填モルタルと地山のせん断強度のいづれか小さいほうを採用するなどの方法がある。また、このときロックボルトの穿孔径が摩擦力に大きく影響するため、設定値に注意する必要がある。

③鋼製支保工

一般にビーム要素でモデル化されることが多いが、吹付コンクリートと一体化されるため、吹付コンクリート厚に換算してモデル化される場合もある。ビーム要素の場合は線形モデルまたはバイリニアモデルでモデル化される。

4.3.2 問題点・課題点

ここまで、空洞安定性評価手法について検討を行い、計算手法と評価指標について提案を行ってきた。ここでは、その手法を用いて実施設計を行うにあたっての問題点、課題点について述べる。

(1) 評価指標と評価基準

① 本検討において、より合理的な空洞安定性評価手法を考えた際に、評価指標として坑道周辺地山のひずみに着目し、しばしば適用される限界ひずみよりも大きなひずみを許容した評価基準を適用できる可能性を提示したが、この評価基準の設定には、更なる施工実績の詳細な調査・分析と理論的な考察が必要である。

② 支保工の安定性評価は、既往の設計手法で採用されているように支保発生応力を評価指標とすることが考えられるが、より合理的な設計を行うためには、支保の破壊と空洞全体の安定性の関係を考慮した評価方法が必要であるが、これは現状技術における設計手法では考慮されていない。

③ 設計における安定性の評価基準を既往の考え方より緩和できる可能性は示されたと考えられるが、これは安全率をより小さくするということに他ならないため、切羽補強工など、施工時の対応が増加する可能性も考慮する必要がある。

④ 安定性の評価基準の設定には、施設の要求性能や施工時・完成後の安全裕度の規定が不可欠である。また、これを定量的に評価基準の設定に反映させることは、現状の設計手法では相当な困難が予想される。

(2) 設計条件

⑤ 空洞安定性評価は多くの条件をパラメータとして考慮できる数値解析的手法により行うことが考えられるが、合理的な安定性評価を行うためには、解析（設計）手法のみの精度を高くしてもアウトプットの精度が高くなるわけではなく、併せて入力物性値の精度も高くすることが必要である。すなわち、事前調査によりできる限り多くの地質情報を得ること、さらに解析の入力条件として調査結果に対し適切な評価を加えることが重要である。

⑥ 深地層の地下研究施設の実施設計に際しては、設計条件としての要求仕様を明確にする必要がある。例えば、支保工材料や支保工厚、地山のゆるみ領域幅の制約等がある場合、それらを空度安定性評価手法に反映させる必要がある。同様に、施設完成後のメンテナンス（定期的な変状の計測や必要に応じた支保の補修・補強）の有無や、施設の重要度の違いによる重みづけ、二次覆工を施工するか否か、二次覆工に力学的意味を期待するか否かなどにより空洞安定性の評価基準もかわってくるものと考えられる。

(3) その他

⑦ 堆積軟岩特有のクリープ現象など時間依存性の地山挙動に対して、設計段階でこれを評価して支保の設計に反映させる手法は確立されたものがなく、さらなる研究、検討が必要である。

4.4 まとめ

堆積岩を対象とした深地層の研究施設を安全に建設、維持することを目的として、施設の深度や支保を設定する際に重要となる空洞安定性評価手法について、施工実績や研究論文の文献調査により現状技術の整理と本施設の設計に対する適用性について検討を行った。その結果を以下に示す。

1) 土被り 200m 程度以上の大深度トンネルの支保設計に関する設計・施工事例の収集を試みたが、岩盤物性、支保工仕様、初期地圧および計測データ等の一連のデータが揃っている大深度トンネルの設計・施工事例に関する文献は非常に少なく、ほとんど見いだすことができなかった。

2) 最大土被り 900m の寒風山トンネルの事例は岩盤物性、支保工仕様、計測データ等のデータが比較的充実しているため、事例研究の対象として取り上げて検討を行った。

3) 大深度トンネルの支保設計に関する具体的な手法の提案、および解析と施工実績（計測結果）との比較評価をしている研究は少なく、上記の寒風山トンネルの事例を除いて、見いだすことはできなかった。

4) 土被りの大きなトンネルの施工実績を調査した結果、調査できたものだけでも最大土被り 400m 以上の事例は 23 件、そのうち堆積岩で軟岩の事例は 2 件あった。

5) 土被りが大きなトンネルの施工実績をみると、施工時にトラブルが起きている事例は少なくないが、その原因は、地山の崩壊、膨張性地圧による大変形、湧水、山はね等様々であり、高地圧による支保工の強度不足によると考えられるトラブル事例は調査した範囲では少なかった。

6) 上記のような施工中にトラブルの生じた現場も、薬液注入等の補助工法の採用や支保工の見直しなどによりそれを克服し、最終的には掘削を完了させ、供用されている。

7) 土被りが大きいなど大きな地圧が予想される場合でも、事前設計では標準支保

パターンを適用していると推測されるものが多く、土被りの大きさを考慮した設計事例を見いだすことはできなかった。

8) 実績調査による一次支保の仕様は、多くの場合支保内圧に換算すると 0.2～1.0 N/mm^2 程度の範囲がほとんどであり、一部に剛性の高い一次支保を採用している事例で最大支保内圧 2.5N/mm^2 程度である。これは大土被りの場合には、土被りから想定される初期地圧の 10～15%に相当する。

9) 土被りが大きいなど大きな地圧が予想される場合、事前設計の段階では、変位を許容させて一次支保への作用荷重が過大にならないような設計方針をとるべきとの提案がなされている。その一方で、施工時の変状等のトラブルに対する現場での対策は、剛性の大きな支保で押さえる必要があると判断されている事例が見うけられる。設計方針と変状発生時での現場での捉え方のギャップがあることがわかる。

10) トンネルの施工実績調査の結果、土被りや地山強度比に着目すると、深地層の研究施設は、既に経験している荷重条件の範囲内と予想されることがわかった。

11) トンネルの施工実績調査の結果、地山強度比が小さい場合でも支保内圧が大きければ施工時のトラブルが発生していない場合があることが事例から示された。

12) 実績によれば施工時のトンネル壁面のひずみは、既往の設計や施工時の管理にしばしば用いられている限界ひずみを越えている場合がある。

13) 支保仕様の既往の実績は、土被りが非常に大きくても支保圧 2.5N/mm^2 程度であり、地層処分施設の既往の研究における支保設計で得られている仕様よりは軽いものになっている。このことから、より合理的な支保設計（空洞安定性評価）を行うことができる可能性があると考えられる。

14) 現状技術における空洞安定性評価手法（トンネル支保設計手法）について調査、整理を行った。

15) 空洞安定性評価手法（トンネル支保設計手法）としては、経験に基づく手法と

して、標準支保パターンによる方法、類似事例による方法があること、解析的手法として、円形断面を対象とした理論解析手法と、任意形状断面も考慮できる数値解析手法に分類できることを示した。

16) 解析的手法に適用する岩盤の変形特性としては、弾性、非線形弾性、弾塑性、粘弾性を目的に応じて使い分けられていること、強度特性としては Mohr-Coulomb 型と Hoek-Brown の放物型が用いられていることを示した。

17) 深地層の研究施設の設計に適用する空洞安定性評価手法（トンネル支保設計手法）は、類似条件の施工事例が多くないことにより、解析的手法によるべきであり、また、より現実に近い解析条件により解析が行うことができ、様々な指標について評価することができる数値解析手法が適当であるとの考えを示した。

18) 様々な種類がある数値解析手法の中では、実績が最も多く有限要素法（FEM）によるのが良いとの考えを示した。実際の設計にあたっては、理論解析手法は数値解析手法に比べて比較的簡便に計算が行えることから、参考として併用するのがよいと考えられる。

19) 深地層の研究施設の設計に適用する空洞安定性評価（トンネル支保設計）の指標としては、より合理的で余裕度を少なくした評価を行えるものとして、トンネル周辺岩盤のひずみを適用するのがよいと考えられる。また、同時に併用する指標として支保部材の健全性を評価するための支保応力が必要である。

20) これは、岩盤の局所安全率などの応力による評価指標とくらべて、ひずみ（変形）による評価指標は施工時の確認（計測）が容易に行えることから、既往の施工実績の詳細な分析を行うことにより、より合理的で余裕度の少ない基準値を設定できる可能性があるためである。

21) すなわち、安定性評価においては、主にトンネル壁面ひずみを指標し、その基準値としてトンネルの施工実績をふまえて、限界ひずみよりも緩和した値を設定できる可能性がある。

22) 支保設計の評価手法として、ゆるみ領域の幅も二次的な指標として参考になる

と考えられる。

23) 提案した空洞安定性評価手法（トンネル支保設計手法）を本施設の設計に適用するに当たっての具体的な入力条件を提示した。

24) 手法についての文献調査により、入力条件の中で、空洞安定性評価（トンネル支保設計）において、変形量や支保工応力の大きさに大きな影響を与えるパラメータは初期変形係数、岩盤の強度特性モデルに大きな影響を与える物性値は内部摩擦角であること、解析条件としては初期応力（初期側圧係数）であることを提示した。

〔問題点・課題点〕

25) 本検討において、より合理的な空洞安定性評価手法を考えた際に評価指標として坑道周辺地山のひずみに着目し、しばしば適用される限界ひずみよりも大きなひずみを許容した評価基準を適用できる可能性を提示したが、この評価基準の設定には、更なる施工実績の詳細な調査・分析と理論的な考察、施設の要求性能や安全度を考慮した検討が必要である。

26) より合理的な安定性評価を行うためには、解析（設計）手法のみの精度を高くしてもアウトプットの精度が高くなるわけではなく、入力物性値の精度も高くすることが必要である。すなわち、事前調査によりできる限り多くの地質情報を得ること、さらに解析の入力条件として調査結果に対し適切な評価を加えることが重要である。

27) 堆積軟岩特有のクリープ現象など時間依存性の地山挙動に対して、設計段階でこれを評価して支保の設計に反映させる手法は確立されたものがなく、さらなる研究、検討が必要である。

参考文献

1) 岩井勝彦、中田雅博、矢野寛：トンネル切羽安定性の評価手法に関する一考察、トンネルと地下、第29巻3号、pp41-48、1998.

2) 岡行俊：NATMにおける支保理論、施工技術、第10巻　第11巻、pp6-12、1977

3) 岡林信行、田沢雄二郎、松川久俊、今田徹：高土被りトンネルへの高強度吹付けコンクリートの適用に関する一考察、土木学会論文集、No.546/VI-32、pp.145-156、1996

4) 尾上誠一、松川久俊：高強度吹付けコンクリートを用いた高地圧対策工、日本トンネル技術協会・第40回施工体験発表会、1997

5) 鹿島建設土木設計本部編：土木設計の要点③ トンネル／土地造成、鹿島出版会、1994

6) 金子岳夫、堀井秀之、吉田秀典：MBC解析に基づく大深度トンネルに対する支保設計手法、土木学会論文集、2000

7) 川本眺万、Aydan,O.、赤木知之：日本におけるスクィージングトンネルの実態、第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.191-195、1992

8) 北川隆、吉中龍之進、稲垣大介：軟岩トンネルにおける特性曲線の解釈と適用、第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.255-260、1990

9) 北川隆、稲垣大介：軟岩トンネル掘削時の周辺岩盤の変形挙動、土木学会論文集、No.463/III-22、pp.105-114、1992

10) 國村省吾、Petr Kabele、堀井秀之：軟岩地山掘削時におけるトンネル支保工の効果について、第34回地盤工学研究発表会、pp.1753-1754、1999

11) 後藤守、岡崎和彦、尾上誠一：高強度吹付けコンクリートにより大土かぶりを克服　一般国道194号　寒風山トンネル、トンネルと地下、第29巻1号、pp.17-24、1998

12) 後藤守、岡崎和彦、尾上誠一：高土被りにおける支保パターンの施工について（寒風山トンネル）、第22回日本道路会議、pp.144-145

13) 今田徹：岩盤力学入門、トンネルと地下、第16巻11号、pp.65-66、1985

14) 今田徹、岡林信行、野間正治：山岳トンネルの施工、鹿島出版界、1996

15) 桜井春輔：トンネル工事における変位計測結果の評価法、土木学会論文報告集、第317号、pp.93-100、1982

16) 島田巌乃、谷信弘、谷本親伯：初期変形速度に基づくトンネル岩盤分類の適用性評価、第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.271-275、1989

17) 清水則一、有本宏之、古川浩平、中川浩二、佐藤淳、中田雅博：山岳道路トンネルにおける変位計測結果と支保工の変状、土木学会第 49 回年次学術講演会、III-57、pp.1136-1137、1994
18) ジオフロンテ研究会：山岳トンネルの新技術、1991
19) 白川幸男、岡崎和彦、恒石和義：高地山被りにおける支保パターンの設計について（寒風山トンネル）、第 21 回日本道路会議論文集、pp.112-113、
20) 杉原弘造、亀村勝美、二宮康郎：堆積軟岩での発破による掘削影響の現場計測に基づく検討、土木学会論文集、No.589/III-42、pp.239-250、1998
21) 瀬崎満弘、Aydan,O.、川本眺万：特性曲線法に関する考察、土木学会論文集、No.499/III-28、pp.77-85、1994
22) 谷本親伯：NATM-1、森北出版、1983
23) 土木学会：トンネル標準示方書［山岳工法編］・同解説（平成 8 年版）、1996
24) 土木学会：トンネルライブラリー第 2 号　ロックボルト・吹付コンクリートトンネル工法（NATM）の手引書、1974
25) 土木学会：軟岩評価－調査・設計・施工への適用－、1985
26) 土木学会関西支部：都市 NATM の設計施工マニュアル
27) 豊原正俊、早坂治敏、江戸川修一：鋼製支保工の高耐力化と早期閉合で膨圧を克服　北陸新幹線　朝日トンネル東工区、トンネルと地下、第 29 巻 12 号、1998
28) 梨本裕、高森貞彦、今田徹：大深度低強度地山におけるトンネル設計の合理化、土木学会論文集、No.427/IV-14、pp.183-191、1991
29) 農林省構造改善局：土地改良事業計画設計基準（昭和 50 年 8 月改訂）　第 6 章トンネル
30) 日本鉄道建設公団：NATM 設計施工指針、平成 8 年 2 月
31) 日本応用地質学会：岩盤分類　応用地質特別号、1984
32) 日本道路公団：設計要領　第三集　トンネル、1997
33) 日本トンネル技術協会：地山評価のあり方に関する研究、昭和 60 年 2 月
34) 松本嘉司、西岡隆：トンネルの設計理論、共立出版、1992
35) 久武勝保、伊藤富雄、朝倉俊弘：軟岩の非線形性を考慮したトンネル理論解析、土木学会論文集、No.400/III-10、pp.39-43、1988
36) 平嶋健一、熊坂博夫、桜井英行、柴田善央：二次元平面内荷重下での円形・楕円形トンネルを有する粘弾性岩盤の変位解析、土木学会論文集、No.475/III-24、pp.29-37、1993
37) 平嶋健一、熊坂博夫、三谷泰浩、柴田善央：面外せん断荷重下での円形・楕円

形トンネルを有する粘弾性岩盤の変位解析、土木学会論文集、No.475/III-24、pp.143-146、1993
38) 福島啓一：わかりやすいトンネルの力学、土木工学社
39) 福島啓一：トンネル構造解析の新しい提案、トンネルと地下、第30巻4号、1999
40) 堀井、宇野、吉田、芥川、打田、森川、山辺、多田、京谷、伊藤：等価連続体解析手法による塩原発電所空洞掘削時挙動の比較検討、土木学会論文集、No.659/III-52、pp.211-227、2000
41) 真下英人：土被りが大きいトンネルの支保設計に関する一考察、トンネルと地下、第30巻5号、pp.49-57、1999
42) 山地宏志、櫻井春輔：ひずみ制御によるトンネル支保工の最適化　土木学会論文集、No.448/III-19、pp.83-89、1992
43) Aydan、赤木、伊東、瀬崎：スクィージングロックにおけるトンネル周辺岩盤の変形を考慮した支保工の設計法、第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、No.11、pp.51-55、1991
44) Aydan、赤木、伊東、川本：スクィージング地山におけるトンネルの変形挙動とその予測方法について、土木学会論文集、No.448/III-19、pp.73-82、1992
45) Aydan、赤木、川本：スクィージング地山におけるトンネル挙動の予測方法とその適用、第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、No.41、pp.196-200、1992
46) Aydan、赤木、川本：スクィージングレベルの判定規準となるパラメータ（状態ひずみ比）について、第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、No.89、pp.426-430、1993
47) Franklin, J. ：Some practical Considerations in the plann of field instrumentation、Proc. of Int. Sympo. Field Measurements in Rock Mechanics. Zurich. 1977, pp1-11
48) Jiang、江崎、木村：ひずみ軟化特性を考慮した地下空間の安定解析、第 8 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.273-278、1990
49) Jiang、江崎：トンネル支保設計のための解析理論とその適用性、第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、No.11、pp.46-50、1991
50) Sakurai, S. ：DISPLACEMENT MEASUREMENTS ASSOCIATED WITH THE DESIGN OF UNDERGROUND OPENINGS、International Symposium in Geomechanics Zurich, September 5-8, 1983

5. まとめと今後の課題

3章および4章での検討結果から得られた知見を以下にまとめる。また、その際に抽出された今後の課題を併せて示す。

(1) 地下施設の工程および防災に関する検討

地下施設の建設や調査・研究、さらに施設の見学が安全に行われるために重要となる防災システムの考え方を明確にすることを目的として、サイクル機構より提示された基本レイアウトを防災の観点から、特に火災に着目したシナリオに基づいて検討した。この防災を考慮した場合の施設レイアウトの建設工程を、当初の基本レイアウトと比較して示した。また、可燃性ガス、湧水、地山の押出しのような事象、や冬期施工の制約が、建設工程に与える概略の影響を事例調査により明らかにした。以下に得られた知見を示す。

1) 地下施設の防災に関する検討

地下施設の基本的な防災検討として、「法 38 条大臣認定」の物件や青函トンネル、地下コンサートホール等での火災対策の事例を調査した。その結果、防災のコンセプトや防災施設・設備の仕様の例が示された。また、地下施設に関連する法規制を調査し、建築系・設備系・管理系の観点から地下施設において考慮すべき対策と法的根拠をまとめた。

既存の火災事例の研究資料を調査し、地下施設での火災発生要因や被害拡大要因を抽出して地下施設で想定される火災シナリオ（火災被害の様相）を作成する基礎資料とした。この調査により、火災対策の不備といったハード面の火災対策や、初期対応の不手際のようなソフト面の火災対策の重要性が明らかになった。

地下施設の具体的な防災検討として、上記の調査結果に基づき、サイクル機構より提示された基本レイアウト（立坑案および斜坑案）で想定される火災被害を火災発生の場所ごとに、また、火災進展の段階ごとにまとめた。その結果、対応行動の正否によってどのような火災被害に進展するかが明らかになり、地下施設の防災を考慮する上で重要となる行動と対策を取るべき場所が示された。

次に、火災に対する具体的な対策としての防災基本コンセプトを、地下施設の場所ごとに火災性状、煙性状、避難行動、救助活動、消火活動の項目で示した。これに対

応する防災基本コンセプトは、「火災発生の抑制」、「火炎や煙の延焼拡大防止」、「火災位置や研究員・見学者位置の把握ができる防災システムの設置」、「火炎や煙の影響を受けない安全区画の設置」、「救助・消防対策のバックアップ体制」、「災害を未然に防ぐための日常の維持管理」の6種類から成る。これに応じた火災対策がサイクル機構より提示された基本レイアウト（立坑案および斜坑案）を検討する上で必要な項目として具体的に示された。

以上の検討に基づき、基本レイアウト（立坑案および斜坑案）と防災を考慮した場合のレイアウトを作成した。レイアウトの検討にあたり、地下施設のレイアウトに影響を与える項目として以下の6つを設定した。

・坑道では2方向避難を確保する
・縦方向の避難経路を2方向確保する
・機械力に依存しない避難経路を確保する
・避難方向は給気上流側とし煙に巻かれないようにする
・坑道に隣接する安全区画を設置し、見学者への火や煙の影響をなくす
・消防隊用の救助・消防活動の経路や活動拠点を確保する

その結果、立坑本数2本の基本レイアウトに対し、立坑本数3本で非常用エレベータと避難階段が設置された案が、火災時の安全性をより重視したレイアウトとして提示された。斜坑案については、斜坑本数1本の基本レイアウトに対し、斜坑本数2本で、換気立坑が2本追加されたレイアウトとして提示された。また、地下施設の底部では、基本レイアウトが坑道が行き止まりとなっているのに対し、回廊形式の坑道が火災時の安全性をより重視したレイアウトとして提示された。

以上の2つのレイアウトは、防災の観点からは両極に位置するが、地下深度500mという防災上未知の環境下において、見学者の安全性を確保するためには、防災を考慮したレイアウト相当の対策は必要であると思われる。

防災の観点からの今回の検討結果は定性的な検討に留まっているが、今後煙流動や避難移動といった以下に示すような解析や検討を実施し、様々な対策のブラッシュアップを行う必要があると考えられる。

① 災発生パターンに応じた煙流動解析と排煙計画の有効性の検討

火災発生パターンを定義するために、施設の利用形態（研究ゾーン、通路、設備室等）、ゾーン毎の持ち込み可燃物量を設定する情報、地下施設内の環境設定（坑

道長さ、断面積、壁面仕様、坑道内温湿度等）の情報が必要となる。

② 避難解析による避難完了時間の把握と煙汚染による被害の検証

避難時間の算出において、見学者の属性･人数、また見学ゾーンの設定に関する情報が必要となる。特に、見学ゾーンとその利用形態は防災対策のレベルに影響を与えるため、見学ゾーンの明確な計画が必要となる。

③ 解析結果に基づく避難計画及び消防計画の再立案

消防隊の駆け付け時間や消火活動の対応可否を検討するために、地下研究施設と消防施設との距離設定、消防資機材、消防隊員人数等の情報が必要となる。

2) 地下施設の工程に関する検討

地下施設の掘進速度をサイクル機構から提示された資料から概略設定することにより、サイクル機構より提示された基本レイアウトの工程を求めた。立坑案では、第2年度に着工すれば第7年度に施設完成の見込みで、施設完成までに約64ヶ月を要する。斜坑案では、第11年度に施設完成の見込みで、施設完成までに約90ヶ月を要する。

1)で検討した防災を考慮した場合の施設レイアウトの建設工程については、立坑案では、第2年度に着工すれば第7年度に施設完成の見込みで、施設完成までに約64ヶ月を要する。斜坑案では、第9年度に施設完成の見込みで、施設完成までに約115ヶ月を要する。ただし、立坑および斜坑の増加分（避難用立坑および避難用斜坑）は同時着工が可能であり、退避空間や避難用連絡坑の施工は立坑（または斜坑）や予備ステージと併行して施工できるものと仮定した。

また、可燃性ガス、湧水、地山の押出しのような事象や冬期施工の制約が、建設工程に与える概略の影響を事例調査に基づき示した。可燃性ガス、主としてメタンガスが建設工程に与える影響については、山岳トンネル4事例および石炭鉱山10事例を調査し、メタンガス対策として濃度検知を行いながら濃度別作業規制を定めメタンガスの希釈や排除のための換気対策を講じた事例および、調査とガス抜きのための底設導坑を先進させ防爆仕様の機械や設備を使用した事例等が示された。換気設備の増強、機械・設備の防爆化や保安設備は、建設工程に与える影響が大きいことが分かった。メタンガス発生量の推定については、推定式による方法と石油・ガス開発分野での数値解析による方法が示された。メタンガス発生の程度や発生箇所を予測するための具

体的な方法について今後検討する必要がある。

湧水や押出しの影響については、それらが問題となった事例を調査し、その事例の中で湧水や押出しの程度を予測する方法を整理した。湧水や押出しの発生箇所やその程度を地下施設建設前の調査段階で把握することは限界があると考えられ、地質条件の類似した既往の事例調査を行ったうえで、地下施設建設前のボーリングや物理検層等の調査結果、地下施設建設中の探りボーリングや物理探査の結果、さらに数値解析による方法を適切に組合せることにより、湧水や押出しの発生箇所やその程度を建設段階ごとに予測することが重要であり、かつ現実的な方法であると考える。

冬季施工については、寒冷地対策としての一般的な対策が適用できることが分かった。

今後の課題として、立坑、斜坑および水平坑道の掘進速度の信頼度の向上が考えられる。このためには、施工上問題となると予想されるメタンガスや湧水等の影響の程度を事前に把握し、対策工に要する建設工程を把握しておく必要がある。

(2) 堆積岩を対象とした施設設計に関する検討

堆積岩を対象とした深地層の研究施設を安全に建設、維持することを目的として、施設の深度や支保を設定する際に重要となる空洞安定性評価手法を検討した。施工実績や研究論文を調査の対象とし、現状技術を整理して本施設の設計に対する適用性を検討した。その結果、以下のことが知見として得られた。

大深度トンネルの空洞安定性評価に関して、詳細なデータが揃っている施工事例や実施工で実証されている研究事例は非常に少ないが、深地層の研究施設の土被りや地山強度比は既に経験している範囲にあること、大深度トンネルでは施工中にトラブルが生じているが、いずれも補助工法や支保工の見直し等により克服し、施工を完了させていることが分かった。

深地層の研究施設の設計に適用する空洞安定性評価手法（トンネル支保の設計手法）については、類似条件の施工事例が多くないことから解析的手法によるべきであり、より現実に近い解析条件で解析を行うことができ様々な指標について評価することが可能な有限要素法のような数値解析手法が適当であると考えられる。また、深地層の研究施設の設計に適用する空洞安定性評価（トンネル支保設計）の指標としては、より合理的で余裕度を少なくした評価を行えるものとして、トンネル周辺岩盤のひずみを適用するのがよいと考えられる。同時に併用する指標として支保部材の健全度を評価するための支保応力が必要である。

空洞安定性評価の指標として挙げたトンネル周辺岩盤のひずみについては、その基準値を適正に設定することが今度の課題の１つである。そのためには、更なる施工実績の調査・分析や理論的な考察、地下施設の要求性能や安全度を考慮した検討が必要である。また、空洞安定性評価を合理的に行うため、解析や設計の精度だけでなく、入力物性値の精度も高くすることが必要である。堆積軟岩に特有の時間依存性の地山挙動については、設計段階でこれを評価し支保設計に反映させる手法は未だ確立されていないため、更なる研究や検討が必要である。

付録 A:地下施設の防災に関する検討　資料集

法３８条大臣認定、及び消防防災システム評価に関わる防災計画実施物件一覧

評定時名称	評定年度	竣工	設計者	法38条認定項目							消防防災システム評価				総合操作盤評価
											概要評価	詳細検討			
				加圧防煙	ドーム，アトリウム，防煙区画，排煙，	オープンエレベータ，オープンエスカレータ	ドーム，アトリウム等屋根耐火	耐火構造，木構造，無耐火被覆	避難	空気，開閉又は開放型屋根ドーム		総合防災	新システム（放水銃等）	新システム（ネットワーク他）	
・ヤングピラミッド新築工事	1986	1987.10	当社		○										
・愛知県新文化会館（仮称）栄地区	1988	1992.06	Ａ＆Ｔ	○	○	○									
・ＮＨＫ名古屋放送センタービル		1991.08	日建、当社	○	○	○									
・（仮）ホテルニューオータニニュータワー		1991.01	当社	○											
・日本空港ビルディング新旅客ターミナルビル		1993.07	設計室	○	○	○									
・千葉新町地区第一種市街地再開発事業施設建築物	1989	1992.12	タカハ、当社	○											
・白馬コルチネリゾートビラ		1989.12	Ａ＆Ａ		○	○									
・（仮称）千代田生命研修センター跡地建替計画		1996.12	当社	○											
・（仮）サッポロファクトリー	1990	1993.03	当社		○	○	○					○			
・（仮称）丸の内野村ビル		1994.01	当社	○	○		○								
・渋谷区役所前駐車場	1991	1992	三菱地所	○											
・初島クラブ		1994.07	当社		○	○									
・神戸アーバンスポーツドーム		1993.03	当社		○					○					
・（仮）中央病院跡地開発ビル		1995	日本設計		○	○									
・Ａプラザ	1992	1995	―		○	○									
・ＪＲ東海名古屋ビル		1999	KPF、坂倉、当社	○					○		○	○		○	○
・（仮称）神戸ファッションプラザ	1993	1997.03	昭和設計、当社		○	○		○	○				○		
・（仮称）東海大学湘南校舎15号館		1995.02	当社					○							
・（仮称）新宿南口ＪＲ・小田急共同計画		1998.02	当社	○	○	○		○	○						
・（仮）鎌倉シネマワールド	1994	1995.07	MD建築事務所、当社					○							
・（仮称）こまつドーム		1997.04	山下設計、当社		○			○		○					
・札幌コミュニティドーム	1995	1997.04	三菱地所、当社		○			○					○		
・初台ＲＣビル		1997.12	NTTファシリティ、当社	○											
・（仮）新さっぽろホテル		1996.05	石本建築		○	○	○								
・九電熊本跡地計画	1996	中止	当社		○	○	○								
・さいたまアリーナ		1999	日建、当社		○		○	○	○		○		○	○	
・法務省浦安総合センター	1997	1998.01	法務省		○										
・ホテルニュー王子新ホテル		1999.03	当社	○	○		○	○						○	○
・小樽開発		1999.11	観光企画、当社		○									○	○
・西口新都心ビル		2000.11	日建、当社	○	○	○		○	○					○	○
・シェラトンホテル別棟		1998.10	当社				○	○							
・臨海副都心青海Ｓ.Ｔ.街区	1998	1999.03	当社		○			○	○						
・永田町２丁目計画		建設中	当社	○				○							
・つきみ野サティ	1999	2000.11	当社、日産建設	○				○	○						
・Ｎ計画新築工事	2001	2001.08	当社他	○					○						
件数合計				16	23	13	7	13	8	2	2	1	4	5	4

○：該当項目
：別紙資料作成項目

2

加圧煙制御システムの概要

■加圧煙制御の概念

・遮煙：室間に差圧を設けて煙の侵入を防止する。

・希釈：給排気により侵入した煙の濃度を低くする。

■評価基準の設定

評価基準は、避難状況や消防活動に対応し、設定される。例えば、付室加圧、階段加圧で廊下ー火災室間を遮煙位置とする場合、最低以下の表のような評価基準が必要と考えられる。これらは、遮煙位置の設定だけでなく、防災計画の方針によって異なる。

表　評価基準の設定例

	火災室避難	火災階避難	消防活動時	廊下漏煙時
付室加圧	煙層高さ＞扉高さ	廊下圧力＞火災室圧力（火災室扉上端）	付室圧力＞廊下圧力（付室扉上端）	付室圧力＞廊下圧力（付室扉上端）
階段室加圧	煙層高さ＞扉高さ	廊下圧力＞火災室圧力（火災室扉上端）	付室圧力＞廊下圧力（付室扉上端）	付室圧力＞廊下圧力（付室扉上端）
ELV単独加圧	―	―	ELVシャフト＞廊下（ELV扉上端）	ELVシャフト＞廊下（ELV扉上端）

■遮煙条件による給気排気量の簡易計算

開口部における圧力差分布は、盛期火災時のように一様混合に近い状態か、初期火災時のように上下２層に成層化されているかが想定される。遮煙するためには、この圧力差に応じた空気を開口部に流す必要がある。その開口流量は、一様混合、成層化によって以下の設定となる。

（1）一様混合の場合

$$m = 2/3\,\alpha B\,\{2g\,\rho a\,(\rho a - \rho)\}^{0.5} H^{1.5}$$

（2）成層化の場合

$$m = \alpha B\,\{2g\,\rho a\,(\rho a - \rho)\,(H - Za)\}^{0.5}\,(2/3\,(H - Za) + Za)^{1.5}$$

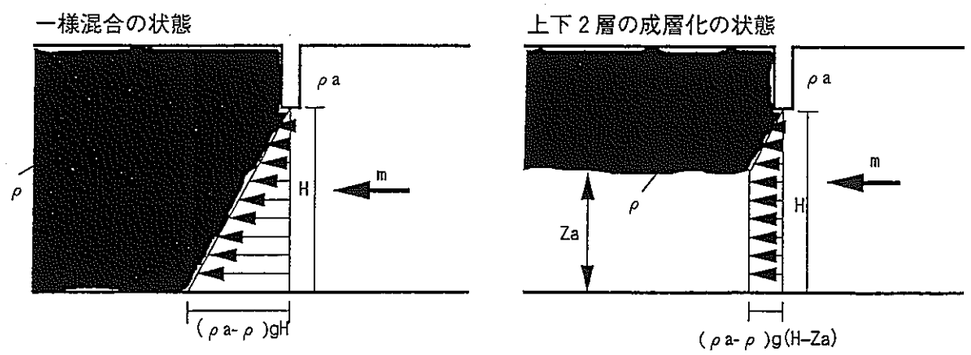


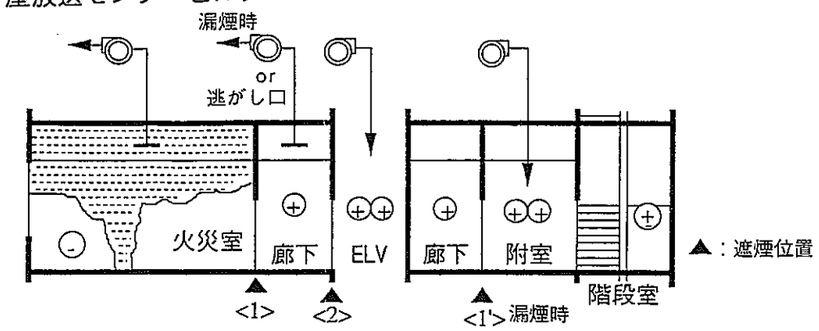
図　遮煙位置における遮煙条件（圧力差分布、開口流量）

■加圧煙制御システムの例示

火災階の避難路や非火災階を煙汚染から守るように遮煙位置が設定されることが多い。遮煙位置としては、火災室扉、廊下扉（水平避難区画等の扉）、付室扉、階段室扉、エレベータ扉の位置が一般的に考えられる。

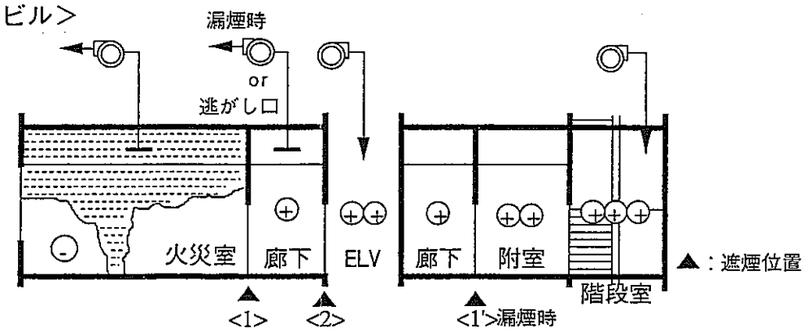
火災拡大による火災室扉等の遮煙位置での遮煙性能の低下に対しては、避難状況を考慮した上で、遮煙位置を移動し、移動した位置でも遮煙が出来るようにする必要がある。

＜ＮＨＫ名古屋放送センタービル＞



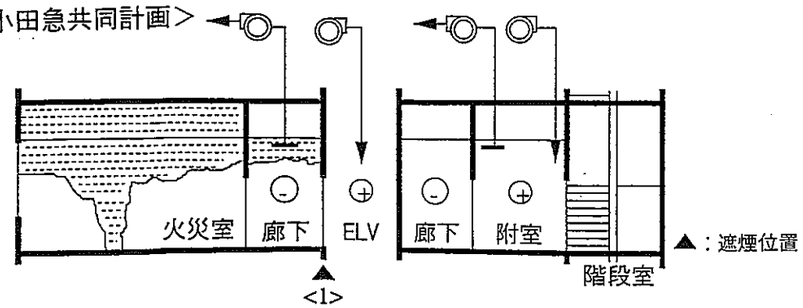
a)附室加圧［遮煙位置：廊下ー火災室間、エレベータシャフトー廊下間、附室ー廊下間（廊下漏煙時）］

＜Ｎ計画新築ビル＞



b)階段室加圧［遮煙位置：廊下ー火災室間、エレベータシャフトー廊下間、附室ー廊下間（廊下漏煙時）］

＜新宿南口・小田急共同計画＞



c)エレベータシャフト単独加圧［遮煙位置：エレベータシャフトー廊下間］

図　圧力差による煙制御の概念図

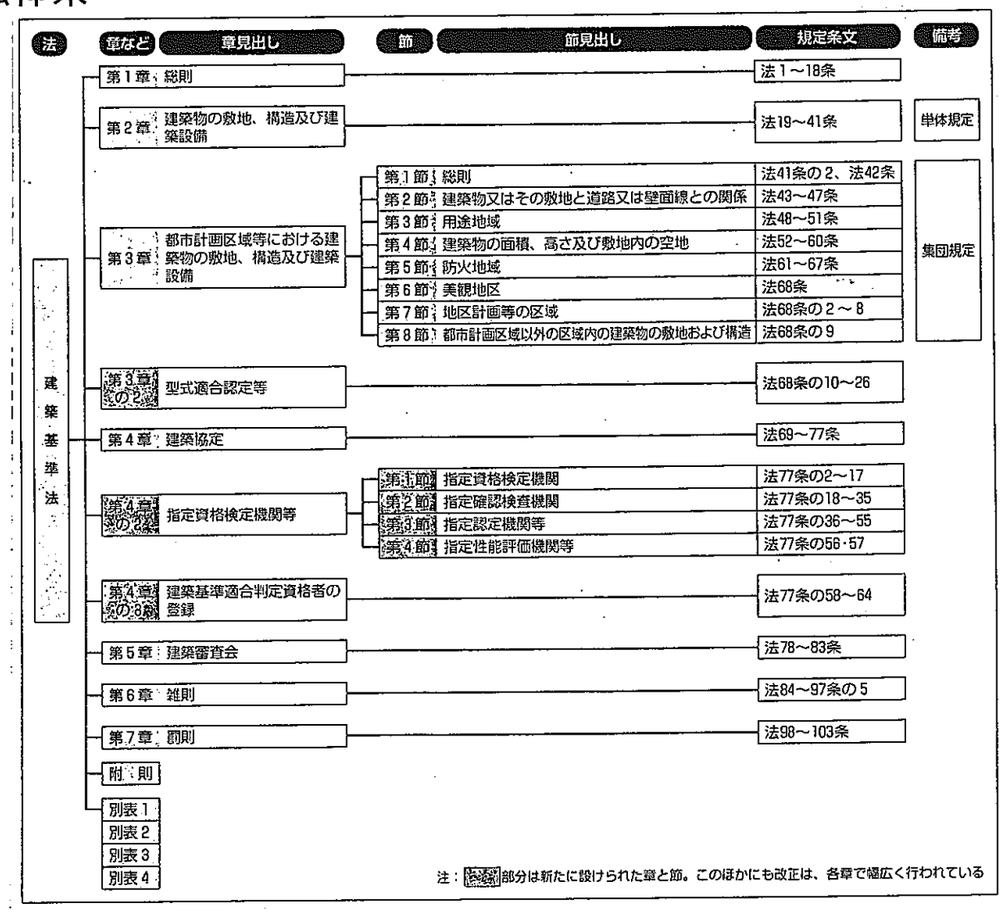
参考文献：「火災時の煙に関する性能評価と安全設計」，日本建築学会　煙性状・避難小委員会，1997.10.3

改正建築基準法の概要（その１）

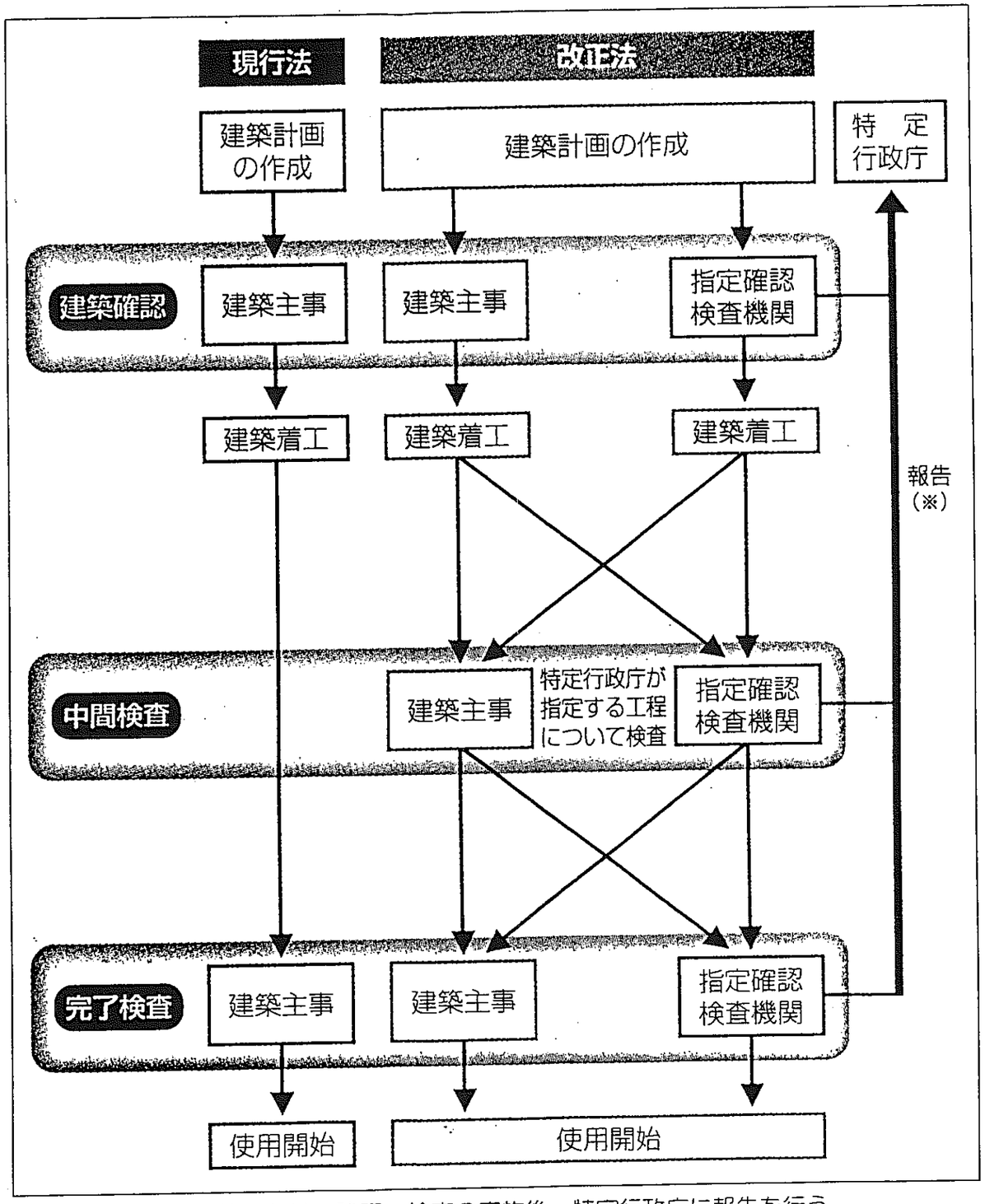
■改正のポイント

種類	項目	ポイント	関係条項	施行(公布の日から起算)
建築確認等手続きの合理化	建築確認検査の民間開放	「建築基準適合判定資格者」制度を創設	法５条、法５条の２、法77条の２～17、法77条の58～64関係	１年以内
		「指定確認検査機関」制度を創設	法6条の2、法7条の2、法7条の4、法77条の18～35関係	
建築規制内容の合理化	建築基準の性能規定化などの基準体系の見直し	建築基準を「性能規定化」	法２条、法20～24条、法25条、法27条、法30条、法31条２項、法37条、法62～64条関係	２年以内
		「型式適合認定」制度等を創設	法６条の３、法７条の５、法68条の10～26、法77条の36～57関係	
		準防火地域での木造３階建て共同住宅の建築を容認	法27条	１年以内
		採光義務を緩和	法28条１項	２年以内
		日照義務を廃止	旧法29条	即日
		地階での住宅居室禁止を改め	法29条関係	２年以内
	土地の有効利用に資する建築規制手法の導入	「連担建築物設計」制度を創設	法86条～法86条の６関係	
		接道義務の特例適用を特定行政庁の許可事項に変更など	法43条１項ただし書、法44条１項二号、法53条４項三号関係	１年以内
	中間検査の導入	「中間検査」制度を創設	法７条の３・４関係	
建築規制の実効性の確保	建築確認等に関する図書の閲覧	特定行政庁の台帳整備を義務化、閲覧制度を拡充	法12条５・６項、法93条の２関係	１年以内
	罰則関係の整備	罰則規定を強化	法98～103条関係	

■法体系



■建築確認・検査手続きの流れの変更点



※ 「指定確認検査機関」は、確認・検査の実施後、特定行政庁に報告を行う

参考文献：「建築知識」，（株）建築知識, pp.81～pp.159, 1998.11

改正建築基準法の概要（その２）

■建築物の火災安全上の要件（防火総プロ）

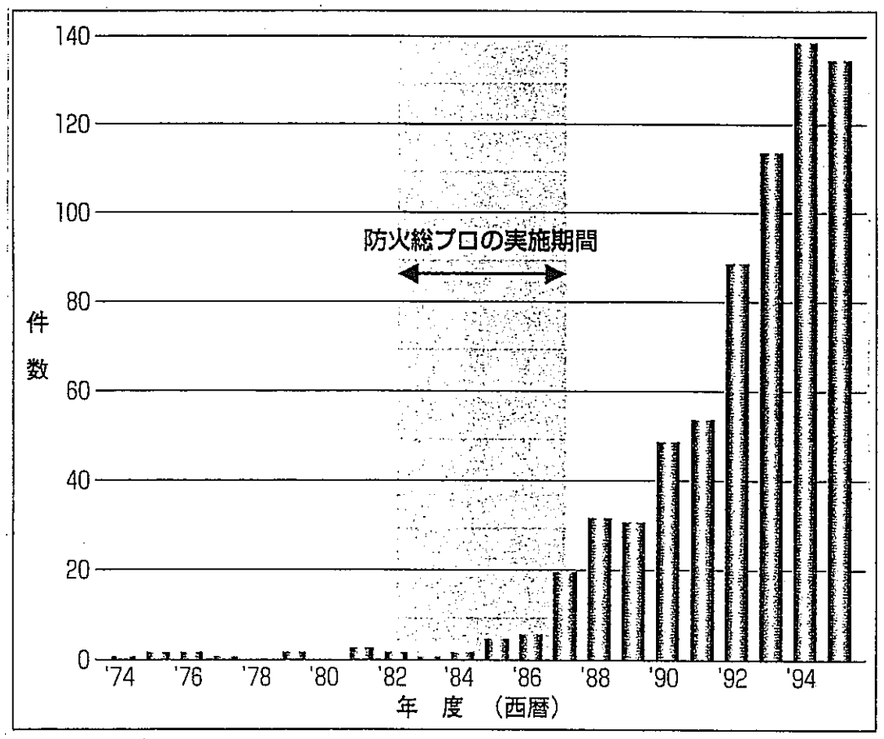
単体建築物の火災安全上の要件

- (1) 出火防止
- (2) 著しい危険物に対する安全措置
- (3) 人命安全の確保
  - ① 適切な避難計画の確保
  - ② 燃焼による危険の著しい材料の使用制限
  - ③ 安全な避難場所の確保
  - ④ 安全な避難経路の確保
- (4) 他人の財産等権利の保護
  - ① 他人の建築物への延焼防止
  - ② 他人の建築物、空間へ支障を及ぼす倒壊の防止
  - ③ 他人の空間への延焼防止
  - ④ 区分所有される建築物の火災後再利用
- (5) 消防活動の確保
  - ① 消防活動の拠点の確保
  - ② 火災規模の制限

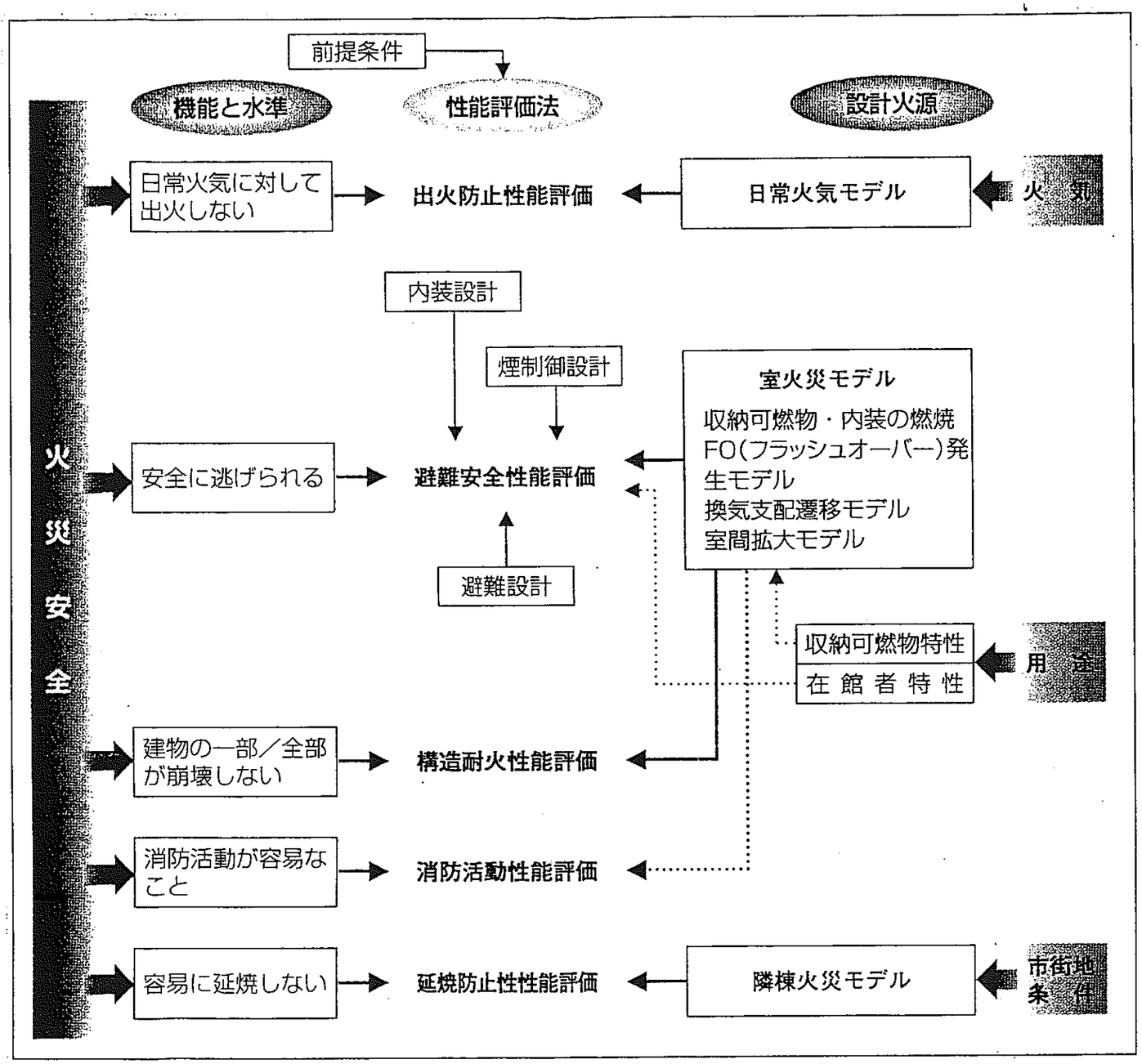
市街地の火災安全上の要件

- (1) 防火地域の建築物
  - ① 都市防災幹線道路の保護
  - ② 都市防災拠点の保護
- (2) 準防火地域の建築物
  - ① 市街地火災の延焼拡大抑制

■大臣認定（38認定）を受けた防災計画の件数の推移



■火災安全性能評価のフレーム



参考文献：「建築知識」，（株）建築知識, pp.81～pp.159, 1998.11

青函トンネルの防災対策の概要

■火災対策の基本的考え方

・背景：長大トンネル（延長距離53.85km, 下り勾配12／1000）における危険性の増大

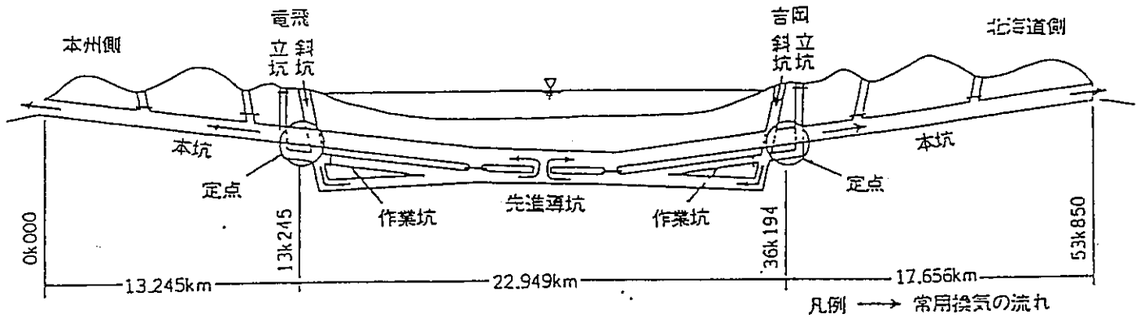
・対策：トンネル内に安全な場所を確保（列車は状況に応じて定点に停車）

　　・各種の火災対策設備を集中配置

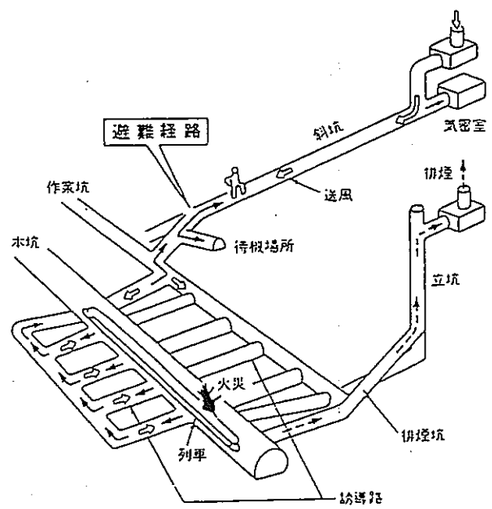
　　・避難経路や火災時の換気を確保

■定点の概要

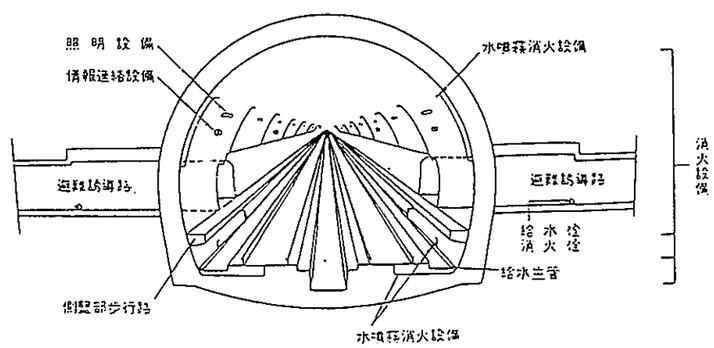
・定点は、乗客の避難経路や火災時の換気を考慮して竜飛と吉岡の斜坑と立坑の間に設置。定点は、本坑に並行して両側に設置された誘導路、40m間隔で本坑と誘導路を繋ぐ13本の連絡誘導路、待機場所等から構成。



図―1　定点位置図



図―2　定点の火災対策設備の概念図



図―3　本坑内の火災対策設備の概念図

■各種防災設備の概要

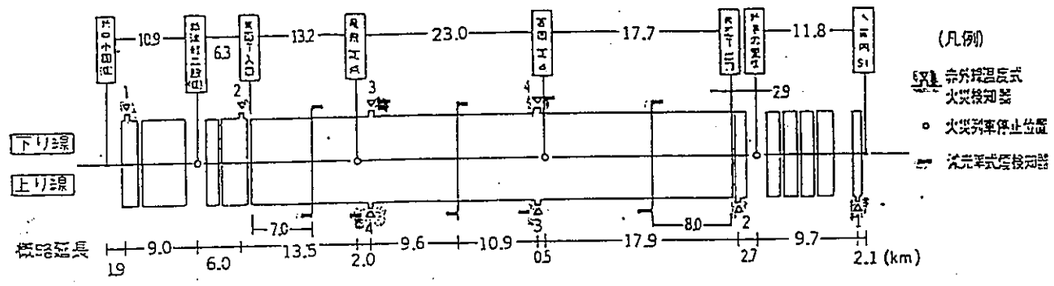
（1）火災検知設備

各部に以下の火災検知設備を設置し、火災の早期発見に努めている。

・地上出入口部：赤外線温度式火災検知器

・トンネル内部：減光式煙感知器

・定点近傍　　：赤外線温度式火災検知器



図―4　火災検知器設備位置図

（2）換気・排煙設備（図―2参照）

・通常時：各斜坑口の給気ファンで送風、換気流は斜坑→ 先進導坑→海底中央部の連絡坑→本坑→両坑口（縦流式の換気）で換気。

・火災時：遠隔制御による風門の開放により、換気流を直接定点に送風。立坑口に設置した排気ファンにより煙を排出。

（3）消火設備（図―3参照）

消火設備として、定点には水噴霧設備（水噴霧ヘッド5m間隔、放水片側40m毎に制御）、消火栓（避難誘導路入口付近40m間隔、放水量130l/min）給水栓を設け、さらにトンネル外の新津軽二股及び新湯の里の各信号所に消火栓を設けている。

（4）避難誘導設備

定点で乗客が安全に避難出来るように、以下の避難誘導設備を設置。

・降車台　　：非常用プラットホームで、上下線に延長500m

・待機場所　　：列車から避難した乗客が一時待機する場所

・照明設備　　：100ルクス程度の明るさを確保

・ITVカメラ　　：避難経路の各所に設置、函館司令センターで監視

・非常放送設備：定点全体で放送が可能。現地と司令センターで放送可

参考文献：「トンネル火災の現状と対策」, 日本火災学会, pp.7～24, 1997.1

R地下コンサートホールの防災対策の概要

■火災対策の基本的考え方

(1) 各ゾーン別の防災計画の策定
- ホール
- エントランスホール
- アクセスルート
- 廊下
- 後方諸室

(2) 火災を発生させない（＝可燃物及び出火源の制限）計画
- 内装不燃化
- 持ち込み可燃物の制限
- 火気使用場所の特定
- 場内監視／不使用施設の施錠化

(3) 情報伝達が迅速に行えるシステム
- 来館者に対する事前の防災教育
- きめ細かい情報伝達
- 音、光等を駆使したインテリジェント情報伝達システム
- 災害弱者への配慮

(4) 施設の各場所から容易にアプローチ出来る計画

(5) 機械力による、施設全体の気流をコントロールすることによる煙制御
- ２本の歩行者用アクセスルートを給気経路と設定
- 竪坑を排煙経路と設定
- 外気→歩行者アクセスルート→付室→廊下→室→竪坑→外気の流れを確保
- 空調換気システムによる気流のコントロール

(6) 信頼性有る防災設備の設置
- バックアップ体制の強化
  - 非常電源供給の信頼性を向上
  - 排煙設備の信頼性の向上
- フェイルセーフ
  - 消火設備は自動消火

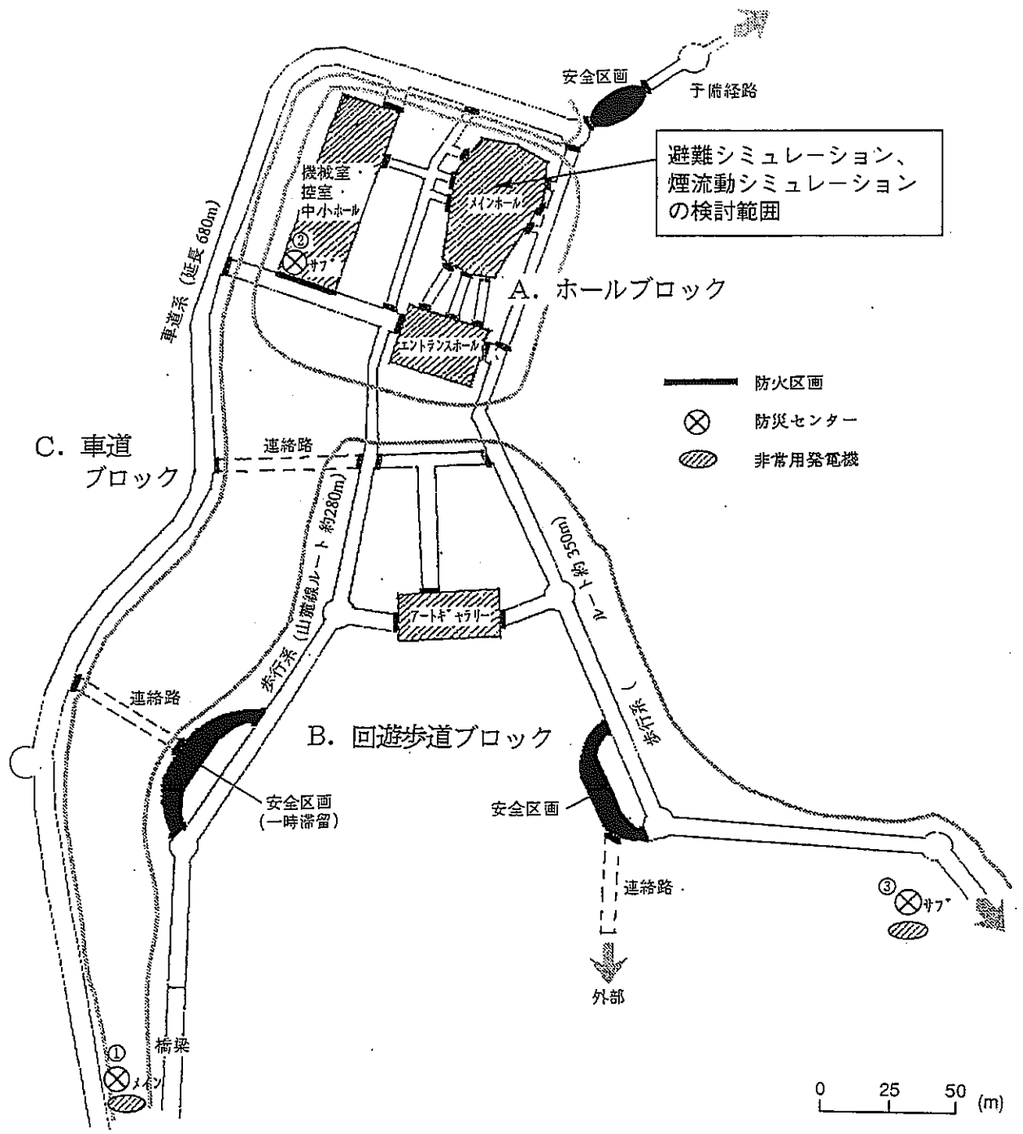
(7) 自動・人力・自然消火の併用、及び消火水の電力・情報系統への影響防止

(8) 消防活動支援設備の充実
- 車両用アクセスルートを消防隊専用進入路（非常用ELVの代用）として位置付け
- 災害弱者の位置特定対策
- 酸素濃度、有毒ガスの検知
- 無線通信設備の設置

(9) 災害を未然に防ぐための日常の維持管理
- 維持管理体制（管理組織、防災センターの連携）
- 可燃物持ち込み、集積（入口でのチェック）
- 出火防止監視
- 設備の日常点検
- 防災訓練

■R地下コンサートホールの防災計画図

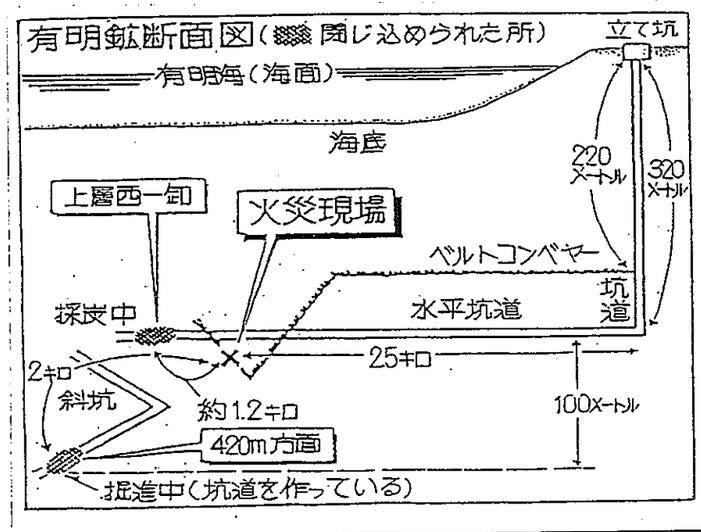
R地下コンサートホールは、山の地中にホール等、約3,700m2の規模で計画された地中利用の大規模建築物である。空間構成として、大きく３つに分類（ホールブロック、回遊歩道ブロック、車道ブロック）されており地上までの避難距離が長いという空間的特徴により、回遊歩道ブロック（避難経路）には一時滞留場所となる安全区画が形成されている。



参考文献：「防災安全性についての研究報告書」，（財）日本建築センター，大規模地下建築物研究会，1994.3

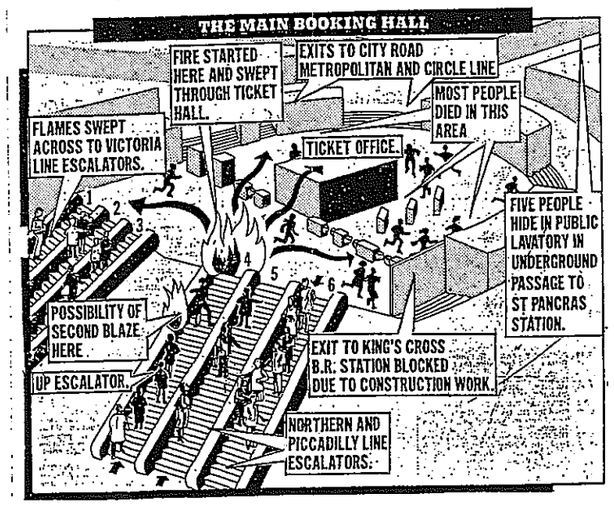
■災害データベース（三井三池炭坑 有明鉱 坑内火災）

No.	14
施設種別	鉱山
災害分類	火災
施設名称	三井三池炭鉱　有明鉱　坑内火災
発生日時	1984年1月18日（水）13時50分頃発生　19日16時07分遺体収容，生存者救出完了
発生場所	福岡県三池郡高田町大字昭和開1番地　三井炭鉱三池坑有明区域
概要	坑内を巡回中の電気保安係員が物の焼ける臭いを感じて原因を探索したところ、220mベルトコンベア連絡斜抗の第3量門付近に火の手が上がっているのを発見、ベルトコンベアを停止するとともに指令センターに火災発生を連絡した。指令センターでは、火災箇所の風下などの現場へ誘導無線で連絡を試みたが応答がなく、緊急事態と判断、まず出火箇所の風下の作業員、さらには全坑の作業員に退避命令を出した。火災は、第1発見者の電気保安係員などが消火栓を用いて消火しようとしたが、同消火栓への給水をする2系統の揚水ポンプのうち1系統が停止したために水量が不足し、その他の水源からの送水が円滑に行かなかったため、さらに下方に燃え移っていった。消火活動および湧水などにより坑内底部の水位が上昇したために放水による消火は困難となり、密閉による窒息消火を行なった。避難命令発令当時、坑内には652名が作業していた。そのうち避難命令により559名が自力脱出、93名が取り残され、うち83名が遺体で収容された。また、自力脱出した者および救出された者のうち16名がCO中毒や火傷により入院した。
人的被害	死者83人 負傷者16人（CO中毒）
物的被害	坑道　計450mが焼損。うち約300mの区間は、成木やゴムベルトなどがほとんど焼損し、表面から5～10cmの深さの部分の落炭が焼損および熱変質。
その他被害	有明鉱　57日間操業停止 兄弟鉱2鉱（四山、三川）　19日間操業停止
発生要因	220m BC（ベルトコンベア）連絡斜抗内の揚炭用10号ベルトで、BCキャリア台の鉄製スタンドが熔接部分の腐食で傾き、ベルトを運ぶローラーと摩擦。この熱により付近の落炭が蓄熱発火、延焼した。
拡大要因	◆現場付近に約10m間隔で設けられた通気門が焼け落ちた。これによって空気が大量に流れることで火勢が強まるとともに、COをたっぷり含んだ空気が作業員のいる坑道奥へ流れていった。 ◆監視センターからの退避命令で一時火災発生箇所を謝って伝えた（？）ため、坑道奥の作業員が火災現場に向かって避難した。 ◆坑内の救急センター（避難所）は密閉不十分だったため煙が流入、圧気バルブを用いて空気を出せば使えたにもかかわらず使用されなかった。
消防活動・避難等	【消火活動】第一発見者らが消火栓により消火活動。同消火栓への給水をする2系統の揚水ポンプのうち1系統が火災によるケーブルの焼損、地絡によって停止したために水量が不足し、その他の水源からの送水が円滑に行かなかったため、消火活動ができなくなった。また、消火活動および湧水などにより坑内底部の水位が上昇したために放水による消火は困難となり、密閉による窒息消火を行った。 【救助活動】14時40分に先発隊の7名が救助のため入坑、その後15時40分ころからその他の隊も逐次入坑し、消火、密閉、探検、救出などの作業にあたった。その結果、1月19日16時07分に死亡者83名の遺体収容と10名の生存者救出を終えた。
復旧状況	2月6日　兄弟鉱2鉱（四山、三川）19日ぶりに操業再開 3月15日　有明鉱　57日ぶり操業再開　3月19日より全面操業

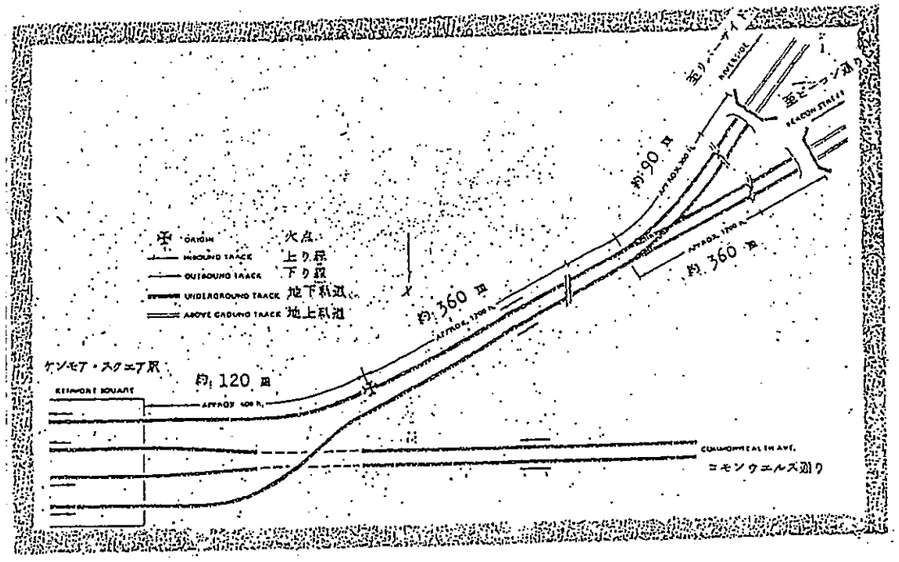
関連事項・コメント	【炭鉱の概要】 当時、我が国で最大の産炭量を誇っていた三井石炭工業三池鉱業所の3坑（四山、三川、三池）のひとつ。昭和26年に蔵内鉱業から日鉄鉱業が鉱業権を取得、42年に出水のため一時採炭が中止されたが、48年、三井石炭鉱業が鉱業権を獲得、開発を再開していた。当時の産炭量は月産約13万トン、四山、三川両鉱と比べて産出量は少ないものの、硫黄分が少ない良質炭で、坑口から切り羽までの坑道の距離が短いなど経済性にすぐれており、3つの山の中では最も有望視されていた。全国に先駆けてロボット最短方式を導入したりコンピュータによる集中監視システムを整えるなど、保安面では最新の設備を誇っていた。 【保安設備の概要】 ◆集中監視システム：メタンガス濃度、CO濃度、煙などの感知および換気扇などの作動状況をコンピュータにより集中監視していた ◆消火施設：機械座など必要箇所に手持ち消火器あるいは自動消火設備。坑道などに消火器具･消火栓。 ◆救急センター（避難所）：12箇所に避難所（各50人収容）。連絡用の誘導無線用誘導線、電話機、篭居のための圧気バルブ、予備のCOマスク、酸素発生式自己救命器などが配備。 【拡大要因-つづき】 ◆消火栓へ給水する揚水ポンプが火災によるケーブル焼損で停止、水量が十分ではなくなって消火ができなかった。 【その他】 ◆事故後、鉱業所長、鉱長らが書類送検されたが、「事故原因は特定されたが、非常に偶発的で過失責任を問うのは困難」との判断から不起訴。 ◆遺族らも訴訟を起こしたが、和解。 ◆この事故を契機として、COマスクのJIS規格が全面改正。吸気温度の測定法が欧米並に高度なものになり、検定条件（CO濃度などの条件）も厳しくなった。また、マスクの原理上高熱になることは避けられないことから、耐熱訓練を計画し、訓練用装置「COマスク吸熱訓練装置」が開発された。
出典等	1)新聞各紙 2)三池炭鉱坑内火災事故調査委員会報告書
関連図表	

■災害データベース（ロンドン地下鉄キングスクロス駅火災）

No.	18
施設種別	地下駅舎
災害分類	火災
施設名称	ロンドン地下鉄キングスクロス駅火災
発生日時	1987年11月18日（水）19:30炎上　19日1:46鎮火
発生場所	ロンドン北部地下鉄キングスクロス駅ピカデリー線エスカレータ
概要	火災は1987年11月18日の夕方、大勢の乗客で込み合っている7時30分すぎに、それもロンドンで最も乗降客の多いキングスクロス地下鉄駅構内で起こり、死者は消防隊員1名を含めて31名、負傷者は53名というロンドン地下鉄火災の中で最大の惨事となった。火災が起こったのは、ピカデリーラインの改札口ホールに向かうエスカレータ下部の機械室からである。炎上後あっと言う間にフラッシュオーバーが起きた。ちょうど夜のラッシュ時間帯だったことから、エスカレータには地下鉄を降りてきた乗客が鈴なりで、出火後もさらに乗客が降りてきたことや、火災のあった同じ改札口ホールに接続しているエスカレータへの誤った避難指示があったことなどもあり、大混乱となった。
人的被害	死者31名（1名は消防士） 負傷53名
物的被害	エスカレータ　及び中央切符売り場約600平方m
その他被害	特に明記無し
発生要因	踏板と幅木の隙間からマッチか何かが入り、およそ6インチ下にグリースが溜まっていたり、洋服などから出る綿ごみがその上に1インチぐらい溜まっており、それに火が付いたと考えられている。 HSE(Health Safety Executive)の実物大の火災実験によると、マッチを落としてから7分半で火災が始まっており、タバコの場合は3本で同様の結果になったと報告されている。
拡大要因	◆エスカレータが木製で延焼が速かった ◆事故前に何度もあったぼやを軽視、油断した ◆誤った避難誘導 ◆情報伝達がうまくいかなかった ◆スプリンクラーが作動しなかった ◆背景要因として、人員削減による清掃要員・回数の削減
消防活動・避難等	◆火災が始まったのはおよそ7時20分ぐらいと考えられているが、実際にはもっと長くくすぶっていたのかもしれない。その後、急速に火災が成長して、エスカレータの下の空間の幅木やケーブルなどの可燃物を燃やしながら酸欠状態になって大量の煙を発生させ、7時30分ごろに火の手が見えはじめ、パニックが起こったと記録されている。それからしばらくして風穴があき、大量のガスが一瞬にして爆燃したようである。記録によると36分に消防に通報され、消防士が調べているうちに突然フラッシュオーバーが起こり、最初の死者が出たとあり、その後、火災は大量の煙と有毒ガスを出しながら燃え続け、およそ4時間後に鎮火している。消防隊が到着したところで5～6フィートの炎が激しく燃えていたと報告されている。 ◆火災が起こったエスカレータから人々を避難させ、ヴィクトリアンラインのホームの方に流れた人たちに避難指示を出したために、多くの人がヴィクトリアンラインのエスカレータに乗り、火に包まれている改札口ホールへ向かってしまった。
復旧状況	特に明記無し
関連事項・コメント	【駅の概要】ロンドンの金融街北西に位置しており、地下鉄5駅が交差する市内でも最も乗降客の多い駅。地上はスコットランドなどへの国鉄線ターミナル駅でもある。年間の乗降客は7300万人（20万人／日）。キングスクロス駅は1863年にメトロポリタンラインができたときからの駅デザイン、その後、ピカデリーライン（1906）、ノーザンライン（1907）、ヴィクトリアライン（1968）と浅いところを走るサークルラインの地下鉄5路線が交差し、極めて複雑な地下空間を構成している。最も深いところを走っているのがノーザンラインで、次がピカデリーライン、そしてヴィクトリアラインと続くが、それらは相互に階段や短いエスカレータで結ばれており、この3線の改札口ホールは一緒になっている。

関連事項・コメント	【拡大要因追加】 ◆このエスカレータは側板内部にスプリンクラが設置されていた。スプリンクラのボタンや消火栓のホースのある場所が、工事用の仮囲いで目隠しされており、初期消火には役立たなかった。 ◆このスプリンクラは設置当初は自動化されていたが、頻繁に作動するので、手動に直した。 ◆事故の背景要因として、人員削減等によって駅員の数も清掃担当者の数も少なくなり、緊急時に正しい情報を伝える人が不足していたことや、清掃もかつては2週に1回やっていたのが最近では3ヵ月に1回と減らされていたため火災の延焼媒体をつくってしまったなと、管理面の問題も大きかった。 ◆火災発生の相当前から煙が出るなど以上現象が発見されていたが、そのような現象はたびたび起こっているため、また大したことはないと軽く見て油断していた（新聞報道によると火災になったピカデリー線のエスカレータでも11月7日、11日と煙を出したが、事故当日までその原因調査をやっていなかったようである）。 ◆駅員や急を聞いて駆け付けた駅の構造に不案内な警察官が、誤って避難指示を出したために、多くの人がヴィクトリアンラインのエスカレータに乗り、火に包まれている改札口ホールへ向かってしまった。 ◆駅員が乗客を避難させる最良の手段と思って、くすぶっているエスカレータを運転し続けたため混乱が大きくなった。 ◆ロンドンの地下鉄ではいざという時のための避難計画がなく、安全全般を総活する担当者もいなかった。 【コメント】 ◆切符売り場の横にあったトイレから数人が救出された。多くの火災でこうした小空間に逃げ込み、熱と煙を防いで生き延びた例がある。逃げ遅れ者を救う最後の手段として、日常使うちょっとした空間を利用した篭城可能な場所ができないだろうか。 ◆この火災では、管理面の問題も数多く指摘された。一般に、火災というと不燃材がどうかという工学的発想でみてしまうが、災害時の情報の問題も含め、施設管理のための人間の存在の大切さという視点を教訓とする必要がある。 ◆火災時に地下鉄を運転しつづけたことは、それにうまく乗り込んで助かった人たちがいる反面、空気の流れによって火災を加速させたという問題も残った。
出典等	1)Investigation into the King's Cross Underground Fire,HMSO(1988.11) 2)村上直：ロンドン地下鉄火災の教訓、セキュリティNo.49(1988.04) 3)安田火災：安全技術ニュースNo.88-1(1988.02)
関連図表	

■災害データベース（ボストン地下鉄火災）

No.	20
施設種別	地下鉄トンネル
災害分類	火災
施設名称	ボストン地下鉄火災
発生日時	1975年7月2日9:08火災発生
発生場所	マサチューセッツ湾交通営団グリーン線ケンモア・スクエアー駅付近
概要	7月2日のラッシュアワーの午前9時、駅の手前120mの地点で地下鉄電車の最後尾車両が電気的な故障をおこした。この車両を移動させた後、後続の列車が信号の指示に従って動き出し、前の電車が故障を起こした箇所にさしかかった時、1両目の車両天井部分で火災が発生した。乗務員はただちに乗客を避難させたが、混乱の中で消防への通報が20分も遅れた。ボストンとブルックラインの消防が出動し消火にあたったが、トンネル内には消火栓も無く、地上からホースを延長するなど、熱気と煙の中で活動は困難を極めた。
人的被害	消防34人が有毒ガスを吸入した疑い。
物的被害	2両焼損
その他被害	特に明記無し
発生要因	◆先行する列車の事故で架線が切断し垂れ下がり、後続の列車がこれに接触しスパーク、屋根の防音材に着火した。 ◆先行列車の事故後、後続列車の運転手は薄い煙の発生に気づいたが、信号の指示に従って前進してしまった。
拡大要因	◆トンネル内に消火栓や排煙設備等の消防設備が無く、消火活動に支障をきたした。 ◆消防への通報が出火から20分も遅れた。
消防活動・避難等	◆避難 火災発生場所が駅から120m程度であったため大きな災害とならなかったが、消防隊が出火してから20分も過ぎて通報を受けて到着した時点でもまだ避難中の乗客がいたことを考えると避難にも相当の混乱もしくは問題があったと思われる。 ◆消火活動 駅舎に近かったことが多少幸いしたが、消火栓等が無かったことから、地上からホースを延長するなど、熱気と煙の中で活動は困難を極めた。鎮火に要した時間は不明。
復旧状況	特に明記無し
関連事項・コメント	【車両】ブルマン標準GE展望窓型。金属ボディーの内側に防音材がありその上をファイバーボードで仕上。座席はファイバーグラス入りの化学繊維、床はビニールタイル。窓の大半は硝子だが一部にプラスチックも使われていた。 【コメント】 最初の事故後に被害状況等の確認を十分に行わずに運行を開始してしまったことが問題。
出典等	1)Fire Journal 1976.3の翻訳資料
関連図表	

■災害データベース（サンフランシスコ高速鉄道（ＢＡＲＴ）海底トンネル火災）

No.	23
施設種別	鉄道トンネル
災害分類	火災
施設名称	サンフランシスコ高速鉄道（BART）海底トンネル火災
発生日時	1979年1月17日（水）18:00
発生場所	米国カリフォルニア州、オークランドとサンフランシスコを結ぶ海底トンネル内
概要	約50人の乗客を乗せてオークランドからサンフランシスコに向かった7両編成の列車が、海底トンネルに入り約1.6km進んだ所で火災となった。火災は最後尾の車両から発生、座席にポリウレタンフォームが使われていたために有害な煙が大量に発生した。通報の遅れや排煙装置の作動ミスによりトンネル内に大量の煙が広がった。被災車両の反対側のトンネルに停止していた列車が救出用の車両にあてられた。乗客は猛煙の中を救助隊の誘導によりなんとか救出用列車に乗り移って避難し、病院に収容された。猛煙の中での避難・消火活動は困難を極め、消防士1名が死亡。7時間に及ぶ消火活動が行われた。事故後、安全対策が十分に実施されるまで操業は停止し、4月5日にようやく運転を再開した。
人的被害	死亡：1名（消防士） 負傷：46名
物的被害	車両2両全焼
その他被害	◆運転再開までの操業休止損害約450万ドル ◆車両2両全焼の損害額8万ドル以上
発生要因	◆同日16:30に、脱線防止用部品の（不完全な取付け）脱落･火災が起きた。火災はすぐに収まったが、脱落の衝撃の影響が残り事故列車でショートが発生火災になったようである。なお、最初の事故後7列車が無事に通過しており、なぜこの列車だけが火災となったかはわからない。
拡大要因	◆消防への通報の遅れ ◆排煙システムの操作のミス →救援列車を送る際に混乱 →サブ・チューブは加圧されて安全ゾーンとなるはずだったがそうならず、消防局員が死亡 ◆主に燃え草となった座席のポリウレタンフォームについては、不燃性のものとするための助成金250万ドルを1年前に政府から支給されていたが、実施していなかった。
消防活動・避難等	【消防活動の開始】混乱と間違った情報でオークランド消防隊の出動が遅れ、換気シャウト入り口に到着したのが18:23分であった。また、サンフランシスコ消防への出動要請も18:30にはじめて行われた。 【被災列車からの避難】被災車両に到着した消防隊員は、車両前方に乗客を集め通路への誘導を開始した。はじめのうち消防隊員は、乗客の何人かに自分達の呼吸器の酸素を吸わせたりしていた。煙が徐々に濃くなり救出作業が難しくなってきて、乗客は「ここから出してくれ！」「助けてくれ！」「もうだめだ！」などと大声を出しはじめた。この時点で、指揮者が乗客に酸素を吸わせていることが全体の避難を送らせていることに気づき、それを禁じた。最後の4～5人は恐怖におののり列車から離れようとせず、一人一人連れ出さねばならなかった。 【消火】指揮者は後の会見で「救助隊の到着が3分か5分遅れたら、乗客は全員死亡していただろう」と言っている。避難が終了した時点で、消防隊員の呼吸器の酸素は殆ど無く、脱出中に1名が死亡。電源遮断の確認に時間を要し、その後も5分毎の交代が必要な高熱の中での消火作業で、翌日の午前1時半にようやく鎮火した。
復旧状況	サンフランシスコ及びオークランドの消防局は、事故調査委員会による改善点への対応が完了しない限り事故が発生しても協力しないとの生命を出したため、海底トンネルは5月下旬まで使用できなかった。このことは、市民や通勤者に大きな影響を与え、市の経済にも混乱を発生させた。

関連事項・コメント

【BARTの概要】
BART(Bay Area Rapid Transit)は、サンフランシスコの都心と郊外を結ぶ全コンピュータ制御の高速交通システムである。通勤者による道路混雑の緩和、車による大気汚染緩和、ガソリン消費量の削減を目的としており、郊外では地上、都心では地下鉄となっている。

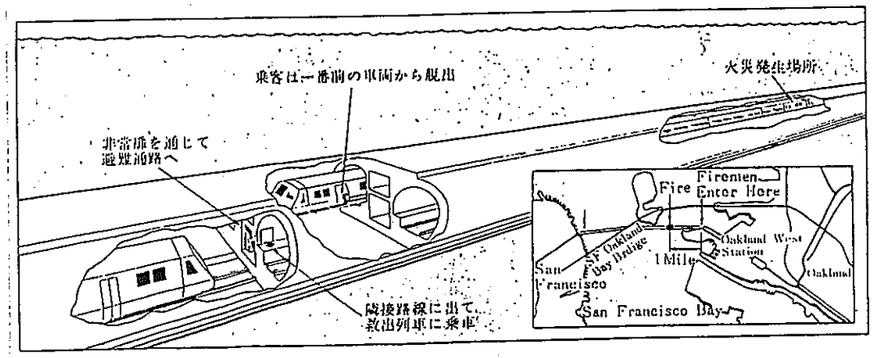
【BARTの安全設備】
地下駅部分は不燃化が徹底しており、スプリンクラも配備されている。地下トンネルには、本線と並行してサブ・トンネルを設置し、火災時等には加圧された安全ゾーンとなるように計画されていた。事故のあった海底トンネルは、全長5760m。両側のトンネルからは約100m毎に配置された避難口があり、避難者は、手で触れると開く常時閉鎖式扉を通じて安全ゾーンに進入できる。

【コメント】
◆座席の不燃化が実施されていなかった背景は何であろうか？
◆乗客が満員であれば、大被害となったであろう
◆パニック状態となった乗客の一部は、列車の外に出ようとせず消防隊員がやっと連れ出したようである。緊急時の籠城に至る心理状況や環境条件の検討、籠城設備の検討なども必要であろう。
◆逆方向に向かっていて被災車両の救援にあてられた列車には、ほぼ満員の1000人が乗っていた。乗客を下ろすために時間のかかること、被災列車のいるトンネルとは区画されていることから煙の侵入はないとの判断で、乗客をのせたまま現場に向かったようである。ところが、実際にはかなりの煙が侵入しており2次災害の危険もあり、この措置には強い批判がでたようである。この事故では40人程度の避難者数であったが、大量の避難者がいる場合には救援列車が必要である。ただし、次の様な運用上の課題があろう。
・大量の避難者をどう誘導してスムーズに救援列車に乗せるか
・危険が迫った時にどの時点で発車するか。そうした場合に交替の救援列車を送り避難者収容が可能か？
・この事故では、救援列車が100マイル／30秒の加速度で発車し、この際に瞬間的に100マイル以上もの突風が発生して消防隊員がなぎ倒された。列車風は、火災の拡大、煙の拡散にも大きな影響を与えるため注意が必要である。

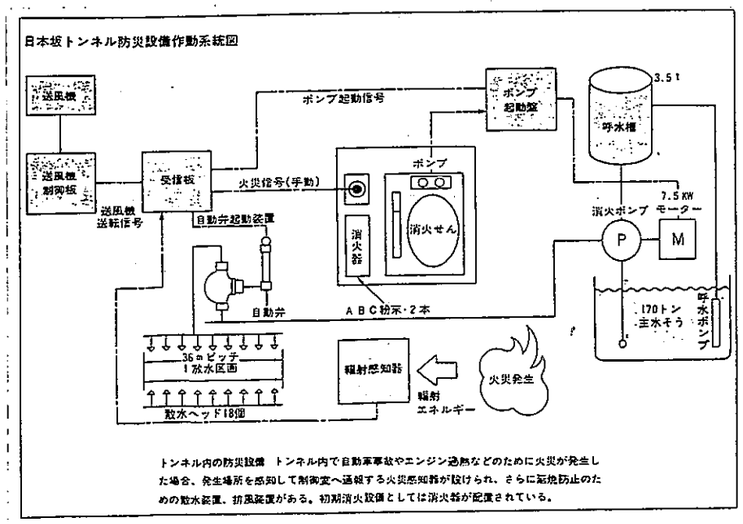
出典等

1)海底40メートルのバート地下鉄火災：防災、no.206
2)成沢：BART海底トンネル火災：建築防災、1979.9
3)成田：海底トンネル内の列車火災：安全工学、vol.18,no.4(1979)

関連図表



■災害データベース（東名高速日本坂トンネル火災）

No.	26
施設種別	道路トンネル
災害分類	火災
施設名称	東名高速日本坂トンネル火災
発生日時	1979年7月11日（水）18時25分頃発災、14日（土）12時頃ほぼ鎮火、18日15時完全鎮火
発生場所	静岡県焼津市野秋　東名高速道路下り線　日本坂トンネル
概要	東名高速道路日本坂トンネル内下り線の静岡側出口付近で、大型トラックや乗用車など6台が玉突き衝突、炎上した。トンネル内にいた車の乗員はほとんどが徒歩で無事に避難したが、設置されていたスプリンクラや排煙設備が十分な機能を果たさず、放置された車両189台は次々と延焼した。火災は、約65時間かかってようやく鎮火したが、トンネルの全面復旧には60日間かかり、その間国内の物資流通が混乱した。
人的被害	死者7人（玉突き衝突車両の乗員） 軽傷2人
物的被害	◆トンネル内天井崩落など（防災設備の充実も含め、総工費34億円） ◆トンネル内放置延焼車両189台
その他被害	◆通行不能による国内流通の混乱 ◆車両のガソリン、軽油、重油などが高速道側溝伝いに川へ流出、水田へ流入のほか、アワビ、サザエなどを養殖中の海洋を汚染
発生要因	（主因） トンネル内出口手前の渋滞最後尾でトラック、ライトバンなどが玉突衝突、乗用車の燃料タンクから漏れたガソリンに電気系統の火花が引火し炎上した。 （背景要因） ◆午後2時頃2件の交通事故により富士-静岡間のインター閉鎖。下り線大渋滞。5時の閉鎖解除とともに普段の2倍の車両が一気に下り線を走り始めた。 ◆トンネルの勾配が中央でやや高くなる「への字型」であり、スピードの出やすい形状だった ◆トンネル出口先にPA及びICがあり渋滞していた
拡大要因	◆焼津側（事故現場側）から入る海風が静岡側へ抜けるようになっており、その風にあおられて延焼した。 ◆スプリンクラは作動したが、タンクの水を使い果たして止まってしまった。 ◆消火栓が出火場所のすぐ近くにあったため使えずに、隣の消火栓を用いようとしたが届かなかった。 ◆消火栓の使用方法がわかりにくく、操作ミスのため水が出なかった。 ◆公団が当初「静岡側」と通報したため、焼津側の現場に消防隊が到着したのは50分後だった。
消防活動・避難等	【消防活動】公団からの「静岡側で火災」の通報により静岡消防本部が出動、トンネル内500mほど進入した。避難者よりさらに1kmほど先と教えられ、さらに進んだものの煙が流れてきたため危険と判断、消防車と一時退避を命じたエンスト（酸欠による？）。火災は焼津側と判断してトンネル外に出た。公団に確認すると間違いと判明し、焼津市消防本部が出動したが、現場に到着したのは約50分後だった。トンネル内には消防用の消火栓、連結送水管などがなく、出口付近の3基の地上式消火栓もトンネル内スプリンクラと貯水槽を共有していたため水圧低下、火災現場から1.5km（静岡側）から離れた河川からホースをつないで放水した。トンネル内は無線も使用できず、現場の状況がなかなかわからなかった。煙と高熱のため消火活動も思うに任せず、熱のため放水が燃焼物に到達する前に水蒸気になるほどで、ほとんど自然鎮火を待つような状態だった。 【避難】ほとんどの人が事故を知り徒歩で避難。軽いCO中毒や気管支炎などに罹った人もいた。避難用に設けられていた上り線との連絡通路はほとんど使われなかった。
復旧状況	◆7月18日17時、上り線で対面交通により開通開始（ただし大渋滞） ◆9月9日17時、60日ぶりに下り線全面開通
関連事項・コメント	【拡大要因-つづき】 ◆「進入禁止　火災」の電光表示板は、日本坂トンネルの手前にある小坂トンネルのさらに手前にあった。入口で出口まで見渡せる小坂トンネルでは火災がないことがはっきりわかったので、運転者の多くは表示板を見ながらも信頼せずに走行を続けてしまった。 【防災設備】 火災感知器344基（走行、追越車線両側に12m間隔） 水噴霧消火装置（ヘッド4m間隔で計1024ヶ所、貯水容量170万t）起動ボタンにより噴霧するウォーターシャワー方式 消火栓（48m間隔、42ヶ所。30mホース及び粉末消火器2本） 非常電話（125m間隔、16ヶ所。走行車線側のみ） 排煙装置（6基） 監視用テレビカメラ（200m間隔、11ヶ所） 屋外給水栓（トンネル坑口に3ヶ所。消防隊専用） 避難通路（500m間隔で3ヶ所、上下線連絡通路あり） ◆トンネル内には、消防隊用の消火栓、連結送水管などはなかった。 ◆消火栓は48m間隔で設置され長さ30mのホースが格納されていたが、出火場所が消火栓の直近で近付けず、隣の消火栓のホースは届かなかった。 ◆12日10時40分頃排煙装置がファンの焼き切れによって故障、機能停止。 ◆各種の防災設備（誘導灯など）を支える電気ケーブルが火災により損傷、設備は使用不可能になった。 【その他】 ◆トンネル完成時に発煙筒をたいて行なった実験の結果、海風の効果が判明しており、焼津側で火災事故が発生した場合には最悪の事態となることが指摘されていた。
出典等	1)玉突き車両火災、Alloo-119,Vol.3,No.10(1979)
関連図表	

■災害データベース（中国自動車道境トンネル火災）

No.	27
施設種別	道路トンネル
災害分類	火災
施設名称	中国自動車道境トンネル火災
発生日時	1988年7月15日21時20分事故発生
発生場所	広島県佐伯郡吉和村　中国自動車道境トンネル上り線
概要	境トンネルは長さは459mだが、半径610mの急カーブのうえ3.9%の強い下り傾斜。事故は、霧雨の金曜日の午後9時20分頃、クレーン車（4tユニック車）が境トンネル上り線の追い越し車線をふさぐような形で停車したことに端を発した。事故発生を知らずに進入してきた後続の大型トラックや乗用車が次々と追突し、しばらくして自動車より漏れたガソリンに引火、車内に閉じ込められたり、避難しようとして後続の車両にひかれるなどで5名が死亡した。近くに水利がなく中継送水が必要なため、消防隊が本格的な放水を開始したのは、覚知後約1時間たってからであり、その後2時間程で鎮火した。昭和54年の日本坂トンネル以来約10年を経過し、この間特に大きなトンネル事故もなく、大事故が起きるとすれば長大トンネルだろうというような防災関係者や管理者の意識のあった中で起きたこの事故は、その後高速道路トンネルの安全対策を大幅に見直すきっかけとなった。
人的被害	死者6名（内1名は自殺） 重軽傷5名
物的被害	◆乗用車･貨物自動車10台焼損 ◆最後尾のトラックにいた牛13頭死亡
その他被害	特に明記無し
発生要因	◆スピードの出し過ぎによるスリップ。 ◆背景要因 境トンネルは半径610mの急カーブのうえ3.9%の強い下り傾斜でスピードが出やすかった。
拡大要因	◆通報の遅れ。 ◆後続車両が進入禁止の表示に気付かないもしくは無視してしまった。
消防活動・避難等	◆死者5名のうち、2名は車に閉じ込められた形で死亡、3名は避難途中にはねられて死亡した。最初の追突から5分たたない頃に出火し、死者5名のうち3人は車から脱出し出口方向に走り出した。トンネル手前の情報板に「進入禁止」が表示されたのが、出火の15分以上後。事故を知らずにトンネル内にトラックが進入し、煙の中で避難者に気付くのが遅れ3人が轢かれた。 ◆消防活動 21:30　覚知。21:47に現場到着し、水槽付消防車での消火活動と救助活動開始。 22:36　水利の中継が確保され本格的に消火活動開始。 23:45　呼吸器や照明車などの応援隊が到着し、検索活動強化。 16日　0:25分　鎮火。
復旧状況	特に明記無し
関連事項・コメント	【トンネルの概要】 ◆中国自動車道は中国山地を縫って走る山岳ハイウェイで、トンネルが多く別名「もぐら道」と呼ばれるほどである。境トンネルは山口県境～広島北ジャンクションの間にある22のトンネルの連続する区間の1つである。

関連事項・コメント	【道路構造上の問題点】 ◆境トンネルは長さは459mだが、半径610mの急カーブのうえ3.9%の強い下り傾斜。約1km先に他からの合流点があるため先を争ってトンネルを通過しようとする車も多く、開通以来10件の事故が起きておりその内の6件がスピードオーバーによるものだった。 ◆中国自動車道は非分離区間（片側1車線・対面交通）が多いという特徴があり、このジャンクション間は、全長37kmの内3箇所合計19kmが非分離区間であった。ドライバーは、非分離区間では慎重に走るが分離区間（片道2車線以上）になると途端にスピードをあげる。経済的問題からまず片道1車線で開通することが多く、分離･非分離空間が生じる。 【コメント】 ◆後続車のトンネル内進入が被害を拡大させた。通報の遅れ、進入禁止措置の遅れ、警報にドライバーが反応しないなどが問題点としてあげられる。 ・ドライバーの通報の遅れは、事故時の心理や事故の衝撃などによりやむを得ない面がある。異常な振動や音を検知できる様なセンサーと停止車両を検知できる様なセンサーを開始して組み合わせるなどの検討ができないだろうか。 ・高速道の場合、物流への影響から通行禁止措置はなかなか行ない難い。従って、センサーの誤報等の問題から異常が検知されてもすぐに緊急停止措置を取り難く、確認行為が必要となるため時間がかかるという問題がある。 ・警報表示板に「進入禁止」表示が出た場合、「気付かない」もしくは「気付いても進入する」ドライバーが非常に多いようである。音によって知らせる、赤信号の設置を検討する等が必要ではないか。 ◆火災事の対応（車両停止位置･方法、避難方法）などの周知が必要。 【事故後の安全対策】 ◆日本道路公団では、急カーブでスピードを出しやすいトンネルを調査し、特に危険性の高いトンネルについては、トンネル入り口に凸凹を付けて強制的にスピードを落とさせたり、注意を喚起するような点滅灯を設置するなどの対策を実施。 ◆建設省は、当該事例や城山トンネル酸欠事故などの車の過密や高速化から起きる事故について、現行の道路規格のままでは安全性に問題があるとして、21世紀に向けての設計速度の高速化や車両の大型化等を考慮した見直し作業を開始した。 【その他】 ◆事故後に自殺した先頭で立ち往生したクレーン車の運転士（47）について、労働基準監督署は「事故の重大性から判断力を失い、事故直後に精神的な錯乱状態に陥り、発作的に自殺を図ったとみられ、業務との因果関係がある」として労災と認定した。
出典等	1)新聞：1988.7.16読売夕刊、1988.7.23読売夕刊、1988.8.18朝日、1988.8.21読売、1988.9.16読売夕刊 1990.3.8毎日夕刊 2)境トンネル事故に学ぶ安全施設の使い方：JAF MATE、vol.26,no.9(1988) 3)高速自動車国道トンネルの悲劇：近代消防、vol.26,no.10(1988) 4)救助、消火活動の概要：近代消防、vol.26,no.10(1988)

付録 B:堆積岩を対象とした施設設計に関する検討　参考文献集

文献集

①高強度吹付コンクリートにより大土かぶりを克服
一般国道 194 号　寒風山トンネル ……1

②高強度吹付コンクリートを用いた高地圧対策工 ……9

③高地山被りにおける支保パターンの設計について
（寒風山トンネル） ……19

④高土被りにおける支保パターンの施工について
（寒風山トンネル） ……21

⑤鋼製支保工の高耐力化と早期閉合で膨圧を克服
北陸新幹線　朝日トンネル東工区 ……23

⑥土かぶりが大きいトンネルの支保設計に関する一考察……34

施　工

高強度吹付けコンクリートにより大土かぶりを克服
一般国道194号　寒風山トンネル

後藤　守*　　岡崎和彦**
尾上誠一***

1. はじめに

一般国道194号寒風山トンネルは，高知・愛媛両県にまたがる四国山地の主脈をなす石槌山系のうち寒風山(標高1,763m)付近の直下を貫く延長5,432m，最大土かぶりは，県境で900mに達する四国で最長の道路トンネルである(図-1)．トンネルは本坑，作業坑，それをつなぐ連絡坑よりなり，工事は平成元年1月に作業坑に着手し，平成6年10月に作業坑が，平成8年11月に本坑がそれぞれ貫通している(写真-1)．

本坑掘削においては，土かぶりが400mを越えた付近から天端沈下量および内空変位量が増大し，それに伴って顕著な支保の変状が生じ始めた．

その対策として，シリカヒュームを混入した高強度吹付けコンクリートを主体とする特殊支保パターンを導入し，掘削を完了した．

本稿は，その経緯と実績について報告するものである．

なお，作業坑の施工については，すでに本誌(Vol.22, No.4. 1991)で報告しているので参考願いたい．

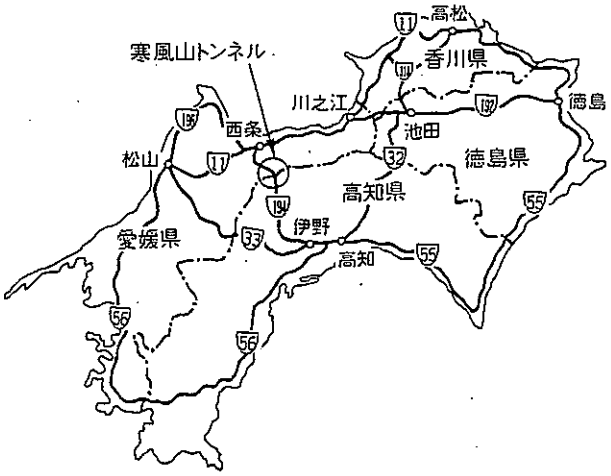


図-1　位置図

写真-1　愛媛側坑口

2. 工事概要

工事名：寒風山トンネル工事
工事場所：自)高知県土佐郡本川村一の谷
　　至)愛媛県西条市藤之石字川来須
工　期：昭和63年9月23日～平成10年2月20日
延　長：5,432m
工事内容：本　坑　L=5,432m
　　作業坑　L=5,437m
　　連絡坑　15か所
標準断面図を図-2に示す

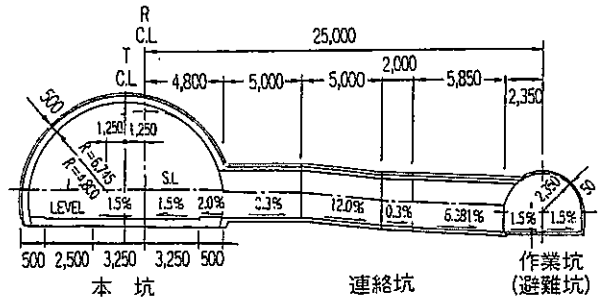


図-2　標準断面図

3. 地形・地質

3-1　地形概要

本トンネルは，四国の中央部を東西に延びる四国山地の主脈をなす石槌山系のうち，寒風山(標高1,763m)付

---

*建設省四国地方建設局土佐国道工事事務所所長
**　〃　〃　工務課長
***　〃　〃　建設監督官

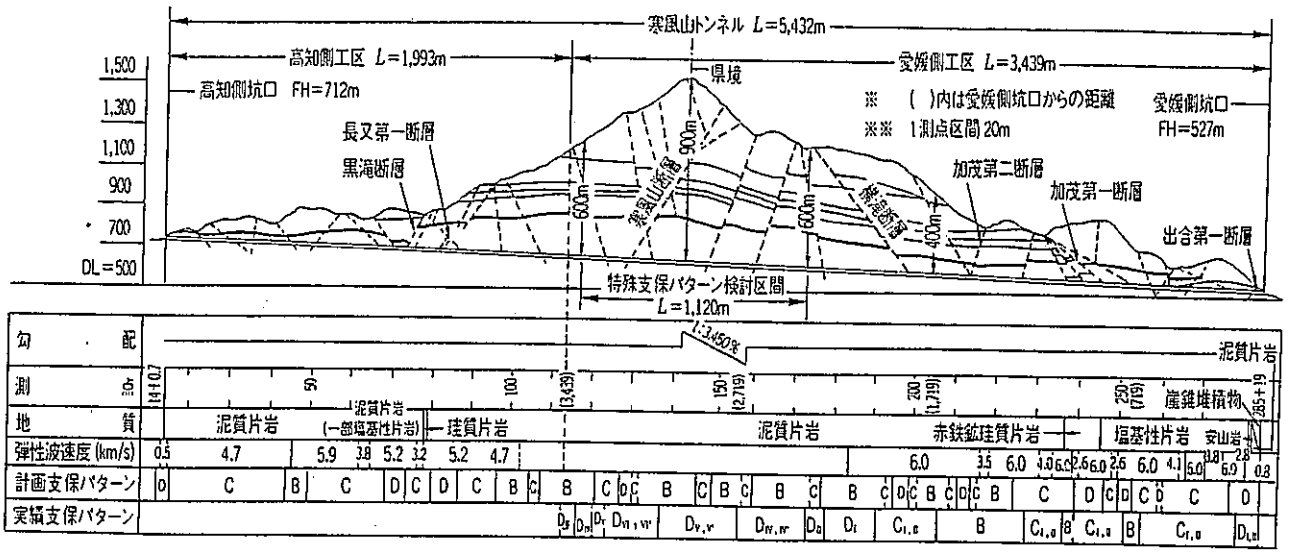


図-3　地質縦断図

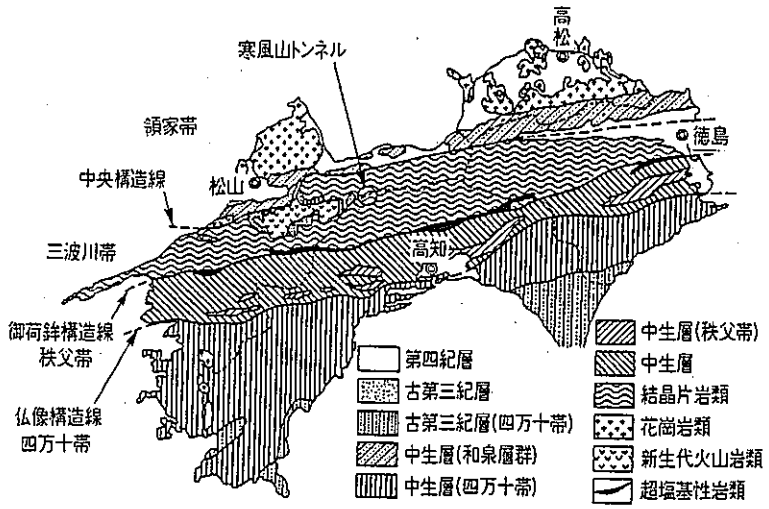


図-4　地質概要図

近を貫く．この山脈は稜線にて愛媛県と高知県の県境となり，愛媛県側(北面)では中央構造線の断層崖に位置する急斜面からなる．

一方，高知県側(南面)は標高500～1,000mの急峻な山地で，ともに早壮年期の地形をなし，河川はV字谷を形成している．

3-2　地質概要

トンネル区間の地質は，三波川変成帯吉野川層群の三縄層が分布する(図-3, 4)．

この三縄層は，上部層，主部層，下部層に区分されるが，愛媛側坑口から1,000m(加茂第1断層)を境に，高知県側に泥質片岩(黒色片岩)を主体とする下部層が，愛媛県側には塩基性片岩(緑色片岩)・珪質片岩を主体とする主部層が出現した．

断層破砕帯については，愛媛県側坑口より出合第1，加茂第1，加茂第2，横滝，寒風山の各断層が確認できたが，当初懸念されていた突発湧水(予想最大湧水量20 m^3/min)はなく，トンネル全体の湧水は0.8m^3/min程度にとどまった．

支保の変状が発生している区間の岩質はトンネル全体の75%を占める泥質片岩(黒色片岩)である．その特性は，結晶片岩特有の片理面が発生しており，剥離性および異方性が強く，新鮮な岩塊の一軸圧縮強度は，200kgf/cm^2程度であった．

また，比較的安定した層においては片理面が水平であったのに対し，断層付近では片理面が垂直に近くなり，非常に揉まれて油目状態で出現することもしばしばあった．

4．施　工　方　法

4-1　坑口部の施工

愛媛側坑口部の地形は，トンネル坑口上方に35～40度程度の急斜面の地形が存在し，地質は粘土および玉石混じり角礫を主体とするN値が20程度の崖錐堆積物で，厚

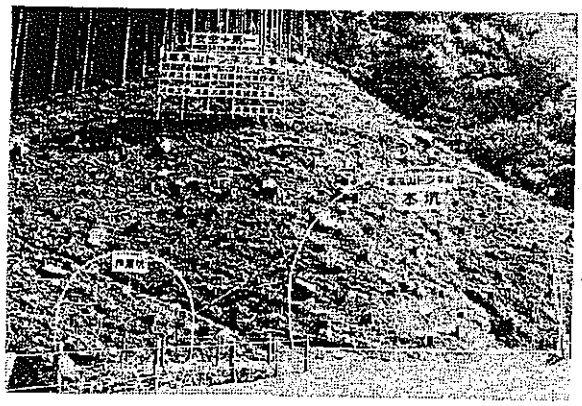


写真-2　愛媛側坑口着工前状況

さは15～20mに達すると想定された(写真-2).

本坑坑口は，この崖錐堆積物の急斜面末端部に位置しており，斜面に対して約45度の角度で斜交して進入する構造であった.

事前調査および作業坑掘削時の動態観測などの結果，本坑掘削時において，①崖錐堆積物の地すべり，②切羽崩壊，地表面の沈下・陥没などが懸念されたため，その対策工を検討した.

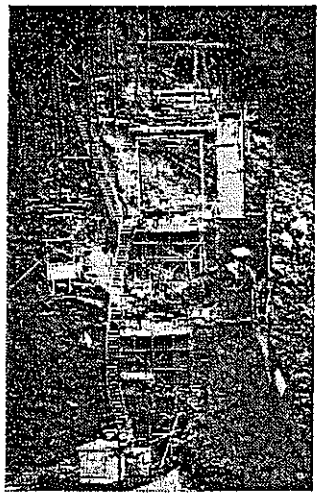


写真-3　深礎杭施工状況

地すべり対策としては，当初計画していた抱き擁壁と押さえ盛土案に加え，地すべり抑止工として深礎杭とアンカー工法を採用した(写真-3，図-5～7).

切羽崩壊，地表面の沈下・陥没対策としては，薬液注入による地盤補強工を採用した.

本坑薬液注入の範囲は，上部半断面で掘削線の外側3.5mで施工した(写真-4).

一方，崖錐区間のトンネル掘削は側壁導坑先進とし，上半部坑口部にあたっては，掘削に先立ち押さえ盛土を行う手段として，上半3ピース支保工による仮巻き工法

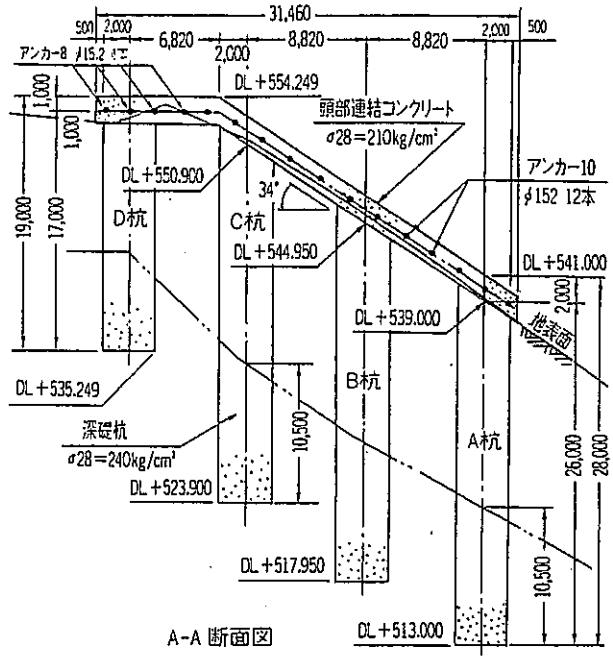


図-6　深礎杭工縦断図

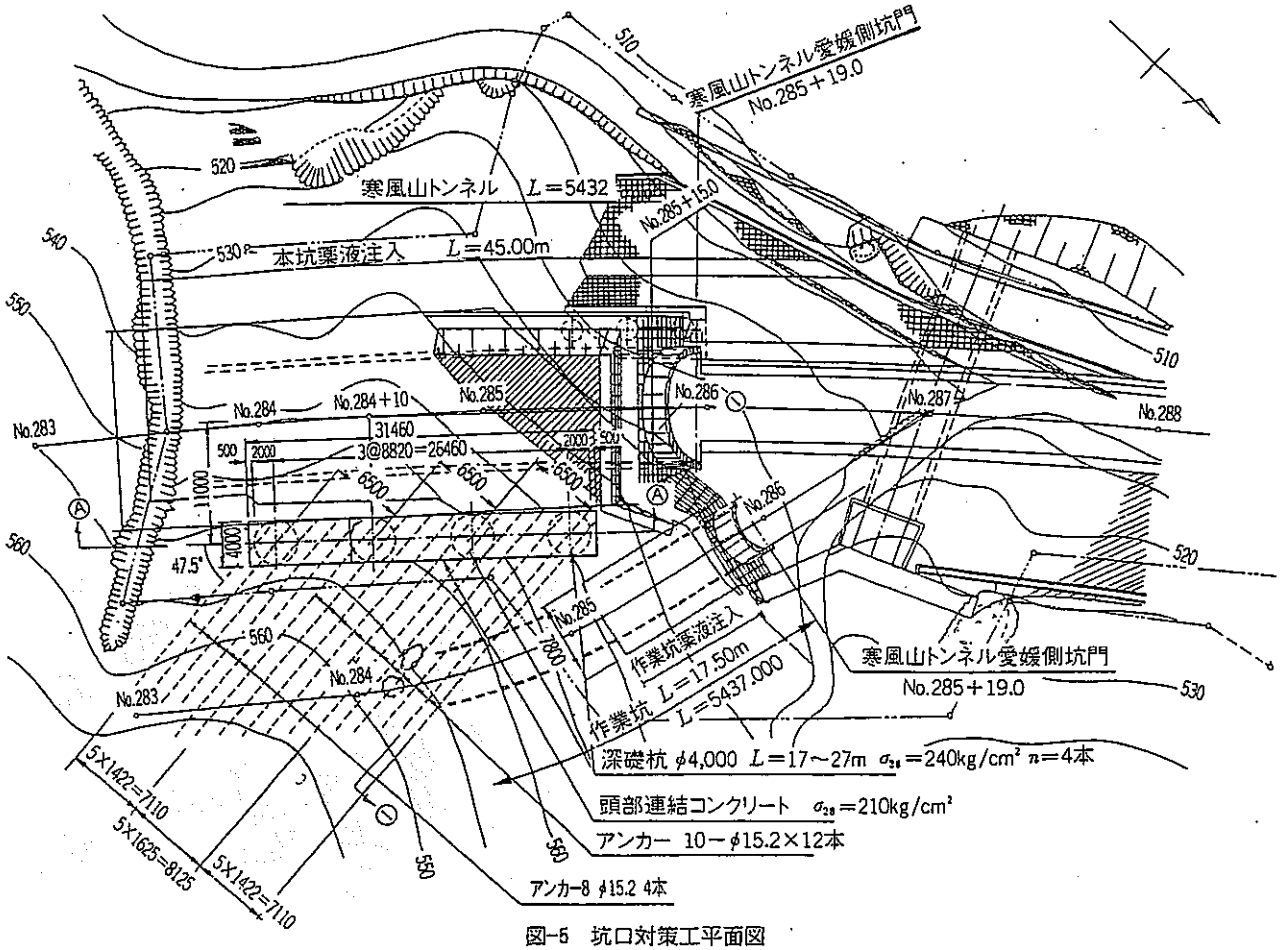


図-5　坑口対策工平面図

で施工した(写真-5).

4-2　掘削工法

掘削工法は，全延長発破工法によるNATM，タイヤ方式とした.

掘削は，上部半断面先進ショートベンチ工法で，上下半交互併進とし，ベンチ長は40～80mを標準とした.

図-8に本坑施工要領図を示す.

4-3　主要機械

施工機械を表-1に示す.

本坑削孔状況およびずり出し状況を写真-6, 7に示す.

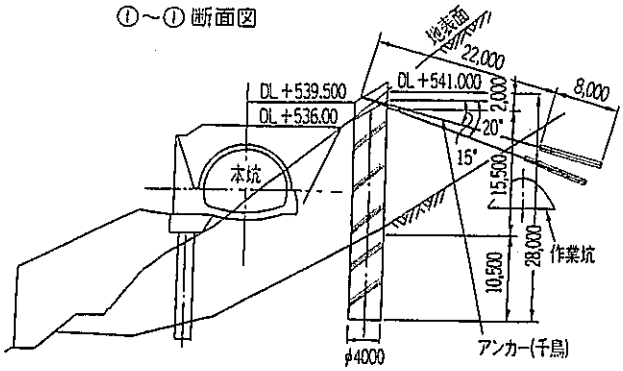


図-7　深礎杭工横断図

表-1　主要機械一覧表

名　称	仕　様	台数	用　途
ジャンボ	油圧3ブーム H175	1台	削孔
ホイールローダ	2.1m³ 両サイドダンプ	1台	坑内ずり積み込み
ダンプトラック	20t積み	5台	坑内ずり運搬
油圧ブレーカ	1t級	1台	コソク
バックホウ	0.7m³	1台	コソク，踏まえ処理
吹付け機		1台	コンクリート吹付け

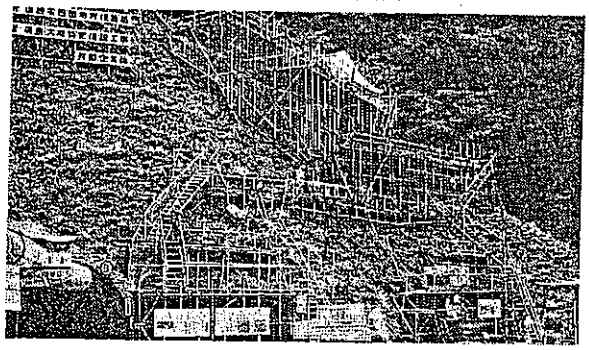


写真-4　薬液注入状況

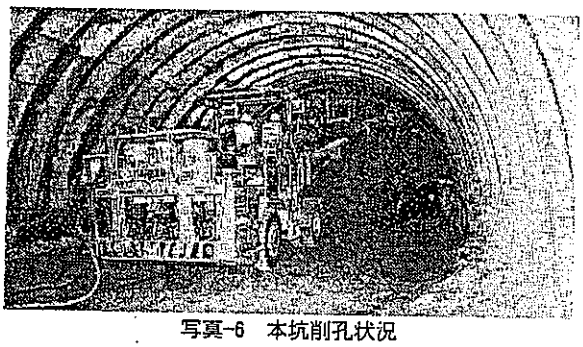


写真-6　本坑削孔状況

写真-5　本坑上半部坑口付け

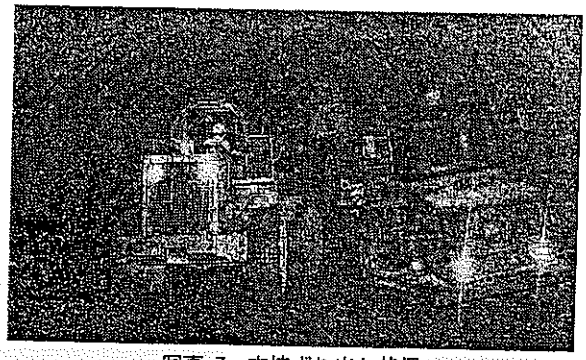


写真-7　本坑ずり出し状況

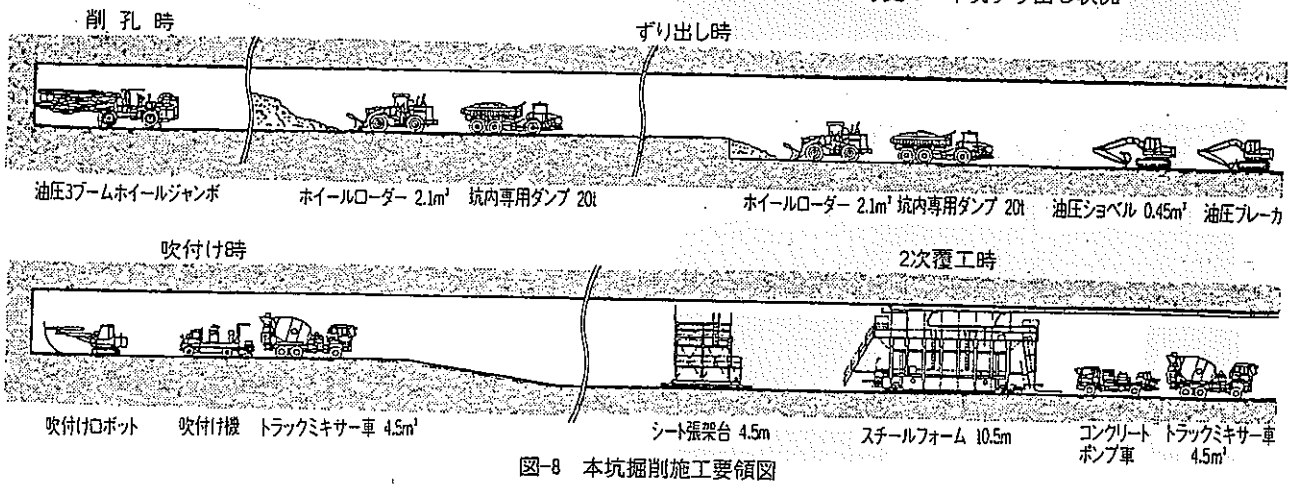


図-8　本坑掘削施工要領図

19

5．標準支保パターンでの支保の変状

本坑トンネルの施工において，坑口部を除いては，標準支保パターンB～CⅠ(一部CⅡ)でとくに大きな変状もなく施工できた．しかし，土かぶり400m付近(愛媛坑口から1,650m地点)から地山強度比($Cf=\sigma c/\gamma\cdot H$)が2.0以下となり，顕著な支保の変状が生じ始めた(写真-8, 9)．

図-9, 10は，標準支保パターンで施工した坑口～土かぶり600m区間における天端沈下量一土かぶり，最大内空変位量一土かぶりの関係を示したものであり，以下のような特徴がある．

① 天端沈下量・内空変位量とも，土かぶりの増加とともに増大し，土かぶり400m(地山強度比$Cf=2.0$を境にして，その傾向は顕著になり支保の変状が発生している．

② 天端沈下量一土かぶり一変状の関係についてみると，支保の変状が発生し始める天端沈下率は，おおむね0.3%(15mm)を境にし天端沈下率は0.6%(30mm)以上ではすべての支保パターンで変状が発生している．

③ 最大内空変位量一土かぶり一変状の関係についてみると，支保の変状が発生し始める内空変位率(0.6～0.7%(60～70mm) 以上ではすべての支保パターンで変状が発生している．

写真-8　DⅠ区間の変状

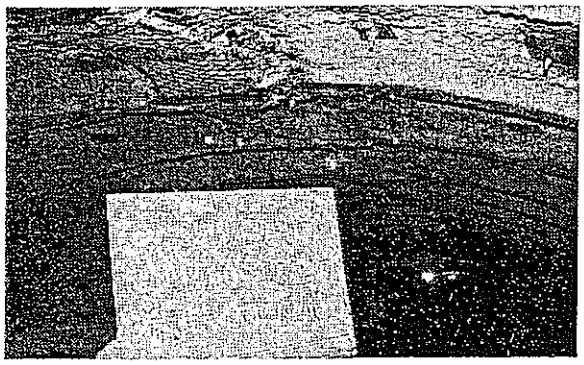


写真-9　DⅡ区間の変状

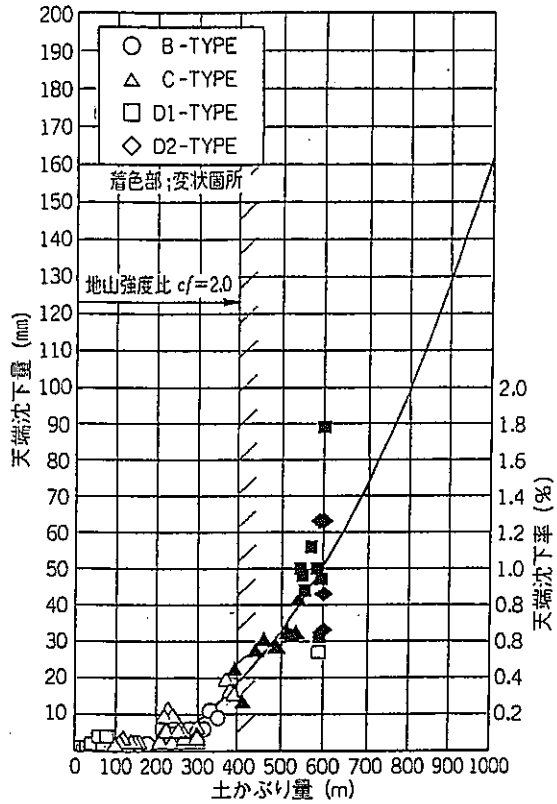


図-9　天端沈下量一土かぶり一変状の関係

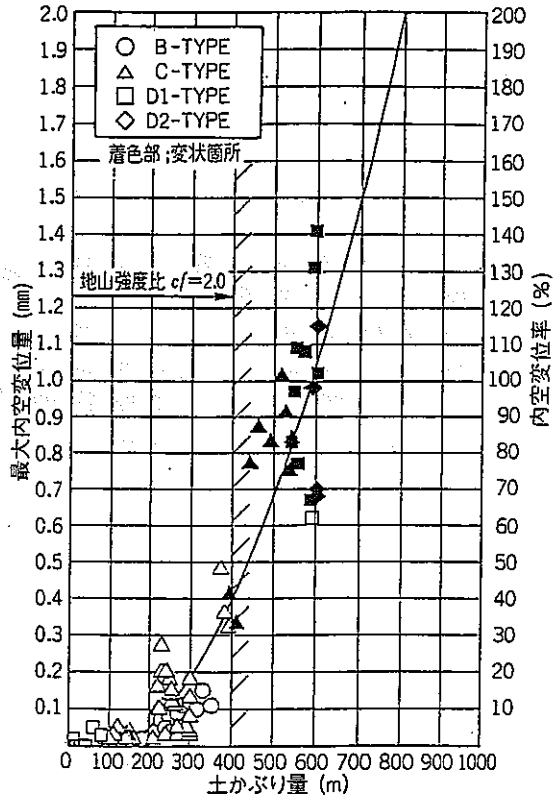


図-10　最大内空変位量一土かぶり一変状の関係

6．特殊支保パターンの計画

6-1　基本計画

膨張性地山や高土かぶり条件下のトンネルにおける支

保の方法としては，変位を許容する考え方もあるが，ここでは変位を抑制するために地圧に対して剛に押さえる考え方を基本とし，土かぶりごとの必要内圧に相当する支保耐力を有する特殊支保パターンを計画した．

支保耐力の算出については，Hoek&Brown の式により算出した．

土かぶり別推定内圧については，新たな地山特性曲線と支保特性曲線との交点から推定することになるが、ここでは土かぶり 500m以下の区間での弾塑性解析とトンネル掘削時の変位計測の結果およびトンネルの許容変位などより弾塑性境界応力を算出し，500～600mでは支保圧が弾塑性境界応力の 47%で支保に変状を示していることから，弾塑性境界応力の 60%と推定したものである．なお、詳しくは参考文献1）「最新 山岳トンネルの施工」で紹介している．

6-2 土かぶりごとの支保パターンの計画

（1） 吹付けコンクリート

吹付けコンクリートの高強度化とその厚さの割り増しにより支保耐力の向上を図った．

吹付けコンクリートの高強度化の手段としては，高強度コンクリート用混和剤として注目されているシリカヒュームを用いることとした．

吹付けコンクリートの設計基準強度は，標準支保パターンでは材令28日で180kgf/cm²と規定しているのに対し，高土かぶりでは地圧がトンネル掘削後早い時期に作用するため，早期強度がとくに重要と考え，設計基準強度を材令7日で規定し，土かぶりに応じて250kgf/cm²，290 kgf/cm²の2種類とした．配合を表-2に示す．

（2） ロックボルト

ロックボルトの材質については耐力 18tf のねじり棒鋼を用い，長さについては土かぶりごとの地山特性曲線で解析した岩盤の塑性領域に応じて計画した．

（3） 鋼製支保工・金網

鋼製支保工は吹付け厚さに応じてその部材を大きくし，

表-2 高強度吹付けコンクリートの配合

配合	設計基準強度 kgf/cm²	スランプ cm	空気量 %	細骨材率 %	W/C %	単位量 kg/m³			高性能AE減水剤 %
						C	W	Sif	
①	σ28＝180	10±2	4±1	62	59.7	360	215	—	C×0.7
②	σ7＝250	20±2	4±1	70	59.7	360	215	25	C×2.5
③	σ7＝290	20±2	4±1	70	53.8	400	215	25	C×2.3

表-3 高土かぶりにおける特殊支保パターンの諸元

		一般部特殊支保パターン			非常駐車帯部特殊支保パターン	
土かぶり		600～700m	700～800m	800～900m	600～700m	700～800m
計画延長		508m	256m	260m	32m（1か所）	32m（2か所）
支保パターン		DⅣ	DⅤ	DⅥ	DⅣ－L	DⅤ－L
覆工厚さ (cm)		40 (インバート)50	40 (インバート)50	40 (インバート)50	40 (インバート)50	40 (インバート)50
吹付けコンクリート (cm)		30 σ7＝250kgf/cm²	30 σ7＝290kgf/cm²	35 σ7＝290kgf/cm²	35 σ7＝290kgf/cm²	40 σ7＝290kgf/cm²
金網		上下半	上下半	上下半	上下半	上下半
ロックボルト	ボルト長 (m)	L＝4.0 耐力18tf	L＝4.0 耐力18tf	L＝5.0 耐力18tf	L＝5.0 耐力18tf	L＝6.0 耐力18tf
	間隔(延長方向×風方向)(m)	1.0×1.2	1.0×1.0	1.0×1.0	1.0×1.0	1.0×0.75
鋼アーチ支保工	種類	H-200	H-200	H-250	H-200	H-250
	ピッチ (m)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	場所	全断面	全断面	全断面	全断面	全断面
支保耐力	吹付けコンクリート	14.6	17.5	20.3	14.1	16.1
	ロックボルト	1.5	1.8	1.8	1.8	2.4
	鋼製支保工	3.2	3.2	4.6	2.2	3.2
	合計 (kgf/cm²)	19.3	22.5	26.7	18.2	21.7
土かぶり別推定内圧 (kgf/cm²)		土かぶり700m 17.8	土かぶり800m 21.5	土かぶり900m 25.1	土かぶり700m 17.8	土かぶり800m 21.5

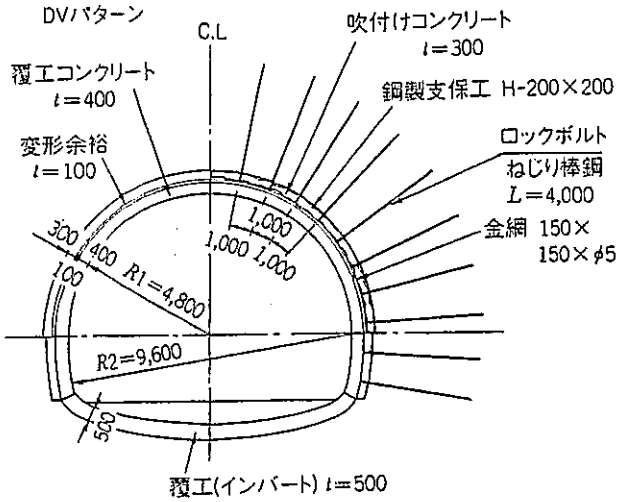


図-11　特殊支保パターンの標準断面図

最大サイズは施工性も考慮しH-250で計画した.

また，吹付けコンクリートとできるだけ一体として働くよう鋼製支保工の前後の金網を配置し，吹付け厚の中につつみ込む構造とした.

（4）　二次覆工コンクリート

NATMにおける二次覆工コンクリートの厚さは，標準支保パターンにおいては，30cmが標準であるが高土かぶり下では異常変位も想定されたため，覆工の補強(補強鉄筋)なども考慮し，40cmで計画した.

以上にもとづいて，高土かぶりにおける特殊支保パターンをその土かぶりに応じて，以下のように設定した.

また，諸元を表-3 に，標準断面を図-11に示す.

7．特殊支保パターンによる実績

図-12, 13 は，特殊支保パターンで施工した区間を含めた天端沈下量一土かぶり，最大内空変位量一土かぶりの関係を整理したものである.

ここで，天端沈下量，最大内空変位量とも標準支保パターンで予測した変位曲線に対し，特殊支保パターンにおける変位曲線の方が全体的に下回っており，変位抑制の効果が現れている.

なお，変位予想曲線は実測データをもとにした近似曲線である.

しかし，部分的にみれば特殊支保パターンにおいても天端沈下量が100㎜，最大内空変位量が170㎜近くに達しており，大きな変状が生じている箇所も存在する．これは，当トンネルが複雑な地層構成からなるため，数値解析を行った岩盤より悪い地質に遭遇したためと考えられる.

これらの区間は，主に増し吹付けコンクリート(t= 5～10cm)および増しロックボルト(L=5.0～6.0m)で補強することにより地山の安定を図った(写真-10).

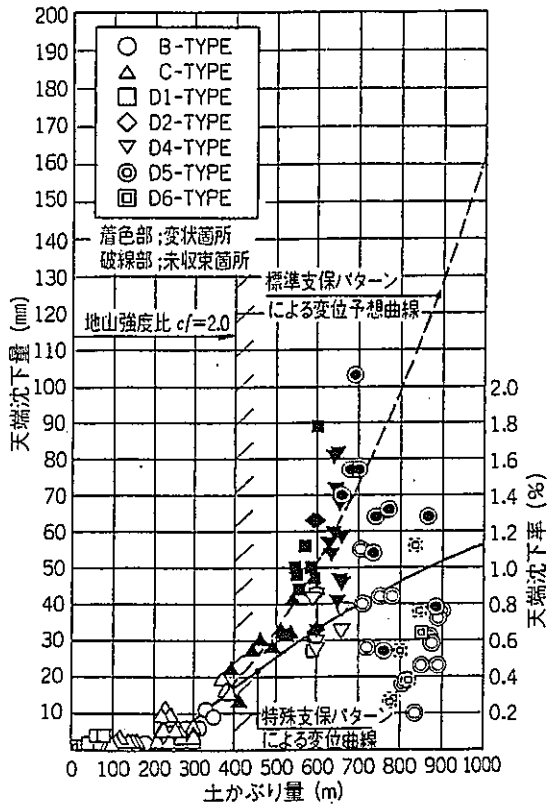


図-12　天端沈下量一土かぶりの関係

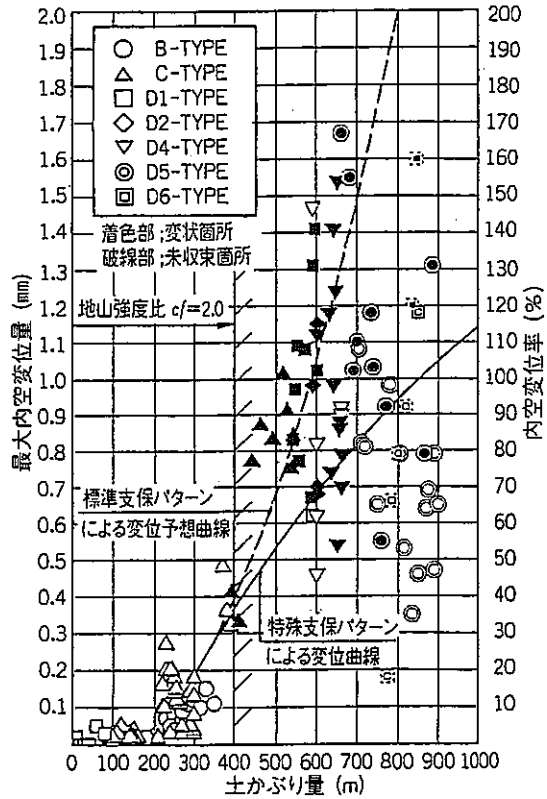


図-13　最大内空変位量一土かぶりの関係

8．お　わ　り　に

当工事においては，発注者，施工者，および学識経験

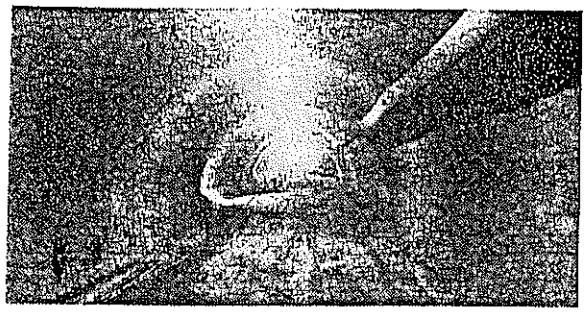


写真-10 最大土かぶり部施工状況

者を含めた技術検討連絡会が定期的(年1回)に開催されており，今回報告の対策案はその場において検討され，採用されるに至ったものである．

本稿が今後の同様な施工の参考となれば幸いである．

参 考 文 献

1）今田撤・岡林信行・野間正治：最新 山岳トンネルの施工，鹿島出版会，pp29～36，1996.
2）白川幸男・岡崎和彦・尾上誠一：土木技術，pp40～48，1996.7.

◇好評発売中◇

地 質 工 学 概 論

京都大学教授・工学博士　菊地　宏吉 著

B 5判　本体 4,757 円　(送料 380 円)

土木技術に携わる技術者は，計画・調査・設計・建設および完成後の保守にいたるまで地質工学とは深いかかわりをもっており，地質学に関する一般的な知識を有していないと目的に応じた適切な設計・施工ができずに重大な欠陥を見落すことにもなりかねない．

本書は，土木技術者がぜひとも必要とする知識を念頭において，土木分野の幅広い構造物に適用できる土木工学と地質学の境界領域である地質工学について現実に即して平易に解説している．

★主要目次★

第1編　地質工学の基礎知識
　第1章　地質学の基礎知識
　第2章　岩石・岩盤の工学的特性
　第3章　地質調査法
　第4章　地質図作成法
　第5章　岩石・岩盤の試験
　第6章　節理性岩盤の調査・評価・モデル化
　第7章　岩盤分類
第2編　各種土木構造物の地質調査法
　第1章　構造物の種類と近年の傾向
　第2章　ダムの地質調査
　第3章　地下空洞の地質調査
　第4章　トンネルの地質調査
　第5章　橋梁基礎の地質調査
　第6章　鉄塔基礎の地質調査
　第7章　斜面の地質調査
第3編　岩盤改良のための地質調査法
　第1章　岩盤改良工法
　第2章　グラウチング工法における地質調査
　第3章　岩盤引締め工法における地質調査
　第4章　岩盤改良工における改良効果の検討

株式会社 土木工学社

〒162 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂
電話　(03)3267-2888（代）　振替00110-8-190072

高強度吹付けコンクリートを用いた高地圧対策工

尾上　誠一 *1　　松川　久俊 *2

1.はじめに

寒風山トンネルは、一般国道194号のうち愛媛・高知県境に位置し、四国山地の主脈をなす石鎚山系の寒風山（標高1,763m）付近を貫く、全長5,432mの四国で最長の道路トンネルであり、県境付近での土被りは900mにも達する。

本坑掘削において、土被り400mを越えた区間より著しい支保の変状が生じ始め、土被り600m以上の区間について計画時の標準支保パターンでは更に大きな変状の発生が予想されたため、トンネル支保工に高強度吹付けコンクリートを主体とする特殊支保パターンを採用した。採用に当っては当現場で得られた計測データを用い逆解折，弾塑性解折を行い、土被り毎の必要支保圧を推定し、それに見合う支保パターンを計画した。これらの適用区間は1,120mにも及んだ。その結果、高土被り（高地圧）下においても特に大きな変状もなくトンネルを構築でき、高強度吹付けコンクリートを用いるトンネル支保工に関する設計・施工上の多くの知見が得られたので報告する。

2.工事概要

2.1　工事概要

工　事　名　：　寒風山トンネル工事
発　注　者　：　建設省四国地方建設局
施工業者　：　鹿島・大成特定建設工事共同企業体
施工場所　：　愛媛県西条市藤之石地先
工事内容　：　本　　坑　3,439m　（掘削断面　約86㎡）
　　作業坑　3,439m　（掘削断面　約18㎡）
　　連絡坑　10箇所　（掘削断面　約10㎡）

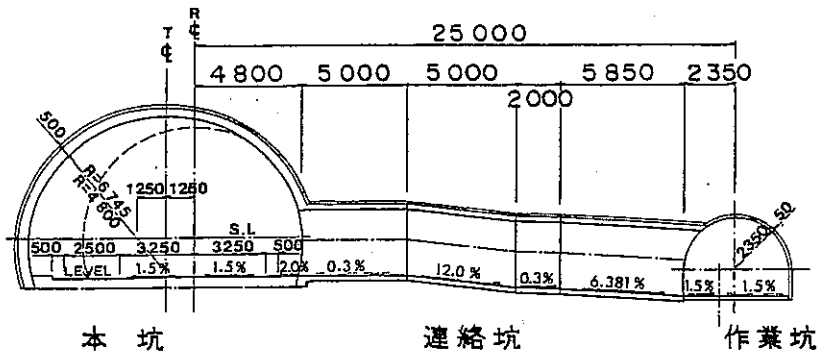


図-2.1　トンネル標準断面図

*1　建設省　四国地方建設局土佐国道工事事務所　寒風山監督官
*2　鹿島・大成特定建設工事共同企業体所長

2．2　地質概要

トンネル区間の地質は、三波川変成帯吉野川層群の三縄層が分布する。この三縄層は、上部層、主部層、下部層に区分されるが、坑口から 1,000m（加茂第 1 断層）を境に高知県側に泥質片岩（黒色片岩）を主体とする下部層が、愛媛県側には塩基性片岩（緑色片岩）・珪質片岩を主体とする主部層が出現した。

断層破砕帯については、坑口より出合第 1、加茂第 1、加茂第 2、横滝、寒風山の各断層が確認できたが、当初懸念されていた突発湧水（予想最大湧水量 20t/min）は無く、トンネル全体の湧水量は、800ℓ/min 程度にとどまった。（図-2．2参照）

支保の変状が発生している区間の岩質は、トンネル全体の 75％を占める泥質片岩（黒色片岩）である。その特徴は、結晶片岩特有の片理面が発達しており剥離性及び異方性が強く、新鮮な岩塊の一軸圧縮強度は 220 kg f/cm² (21.6MPa) 程度であった。（表-2．1参照）また、比較的安定した層においては片理面が水平であったのに対し、断層付近では片理面が垂直に近くなり、非常に採まれて油目状態で出現することがしばしばあった。

表-2．1　地山資料試験結果

採取場所			本坑 No179+00（黒色片岩）			
試験片No.			1	2	3	平均
単位体積重量 γ		(gf/cm³)	2.720	2.675	2.642	2.679
乾燥重量		(gf/cm³)	2.704	2.662	2.613	2.660
含水比		(%)	0.6	0.5	1.1	0.73
超音波試験	P波速度	Vp (km/sec)	3.05	4.03	3.67	3.58
	S波速度	Vs (km/sec)	1.51	1.98	1.70	1.73
	動弾性係数	Ed (kgf/cm²)	1.69×10^5	2.87×10^5	2.12×10^5	2.23×10^5
	動ポアソン比	νd	0.338	0.341	0.363	0.347
強度試験	圧縮強度	σc (kgf/cm²)	217	299	142	219
	静弾性係数	Es (kgf/cm²)	3.89×10^5	4.34×10^5	1.64×10^5	3.29×10^5
	静ポアソン比	νs	0.117	0.271	0.245	0.211

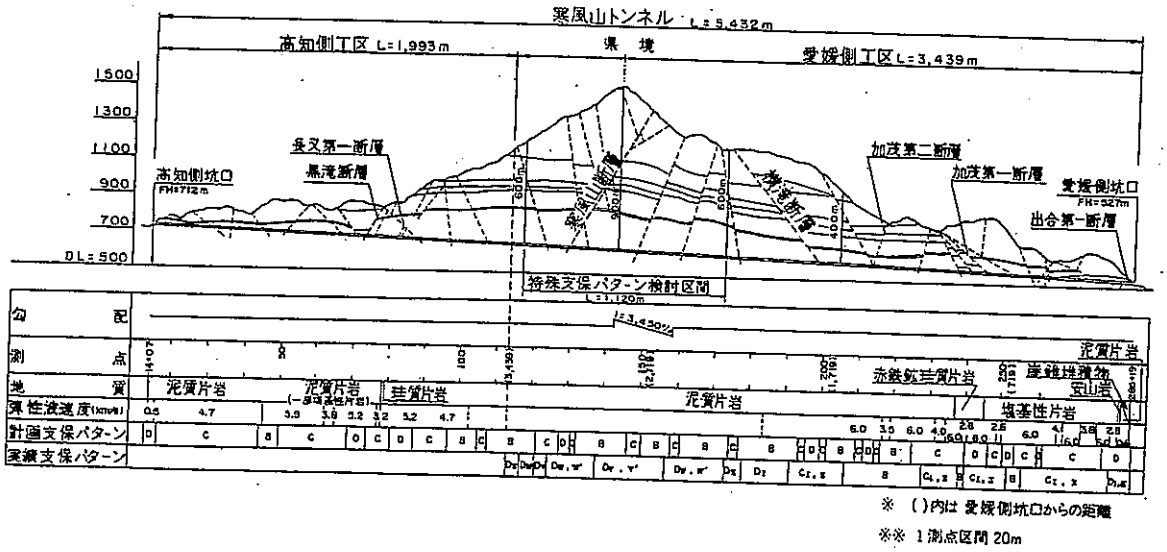


図-2．2　トンネル地質縦断図

25

3.標準支保パターン区間におけるトンネル変状の発生とその原因

3.1　トンネル変状の発生状況

本坑トンネルの施工において坑口部を除いては、標準支保パターンB～CⅠ（一部CⅡ）で特に大きな変状もなく施工してきた。しかし、土被り400m付近（坑口から1,650m地点）から顕著な支保の変状が生じ始めた。

そこで、計測工の充実（三次元計測システムの導入及び計測頻度増加）を図り、早めの支保パターンの変更（CⅡ→DⅠ→DⅡ）を行いながら、土被り600m付近（坑口から2,240m地点）まで施工を行った。

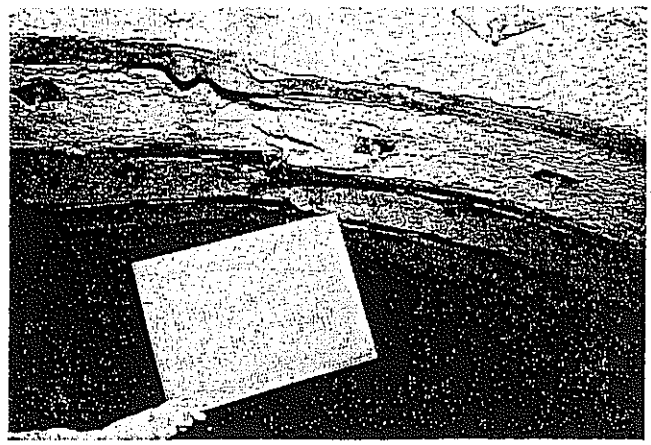


写真-3.1　本坑支保工の変状状況

表-3.1は、標準支保パターンで施工した土被り390～600m区間の施工経過を要約したものである。この区間の計測データ、支保の変状状況から、土被りが増加するにつれ以下の様な変位挙動が顕著になってきた。

1)　内空変位量、天端沈下量が大きい。土被り600mでのDⅠ区間において、その最大値がそれぞれ146mm、92mmに達し、全ての支保部材に顕著な変状が発生している。（写真-3.1参照）

2)　土被りの増加と共にクリープによる変位が増加し、収束日数が最大で1年を越えている。

表-3.1　標準支保パターン区間施工経過（土被り390～600m）

支保パターン	測点	区間長(m)	土被り(m)	計測値			支保の変状			対策工		摘要
				最大内空変位量	最大天端沈下量	収束日数(日)	吹付コンクリート	ロックボルト	鋼製支保工	上半部	下半部	
CⅠ	No.203+15.2～No.203+4.7	10.5	390	40	22	90	天端せん断クラック	――	――	R.B(3m)天端	――	CⅡパターンに変更
CⅡ	No.203+4.7～No.203+5.9	18.8	400	31	15	90	――	――	――		――	
CⅡ－L	No.203+5.9～No.200+13.9	32.0	400～430	33	13	80	川側せん断クラック	川側プレート変形ボルト一部破断	――	R.B:4m上半・川側	――	拡幅部
CⅡ	No.200+13.9～No.191+4.3	189.6	430～540	101	41	70～110	川側・天端せん断クラック 川側・下半はく離	川側・天端プレート変形ボルト一部破断	天端座屈	R.B:3m上半・川側	――	DⅠパターンに変更
DⅠ	No.191+4.3～No.184+15.9	128.4	540～580	109	53	170～270	川側・天端せん断クラック	川側・天端プレート変形ボルト一部破断	天端・肩部座屈	R.B:4m上半・全周	R.B:6m下半	
DⅠ－L	No.184+15.9～No.183+3.9	32.0	580～590	65	50	150～170	川側クラック	川側SL部プレート変形ボルト一部破断	――	――	――	拡幅部
DⅠ	No.183+3.9～No.178+4.9	99.0	590～600	146	92	390	川側・天端せん断クラック	川側・天端プレート変形ボルト一部破断	天端座屈	R.B:4m天端・吹付concl上半	インバート	DⅡパターンに変更
DⅡ	No.178+4.9～No.175+0.0	64.9	600	115	64	300	天端せん断クラック	天端プレート変形ボルト一部破断	天端座屈	R.B:4m天端・吹付concl上半	インバート	

R.B：ロックボルト

26

図-3.1，図-3.2は、標準支保パターンで施工した坑口から土被り600m区間における天端沈下量－土被り－変状，最大内空変位量－土被り－変状の関係を示したものであり，以下の様な傾向が見られた。

1）　天端沈下量，最大内空変位量とも，土被りの増加とともに増大し，土被り400m（地山強度比 Cf=2.0）を境にして，その傾向は顕著になり支保の変状が発生している。

2）　天端沈下量－土被り－変状の関係についてみると，支保の変状が発生し始める天端沈下率はおおむね 0.3%（15mm）を境にし，天端沈下率 0.6%（30mm）以上では全ての支保パターンで変状が発生している。

3）　最大内空変位量－土被り－変状の関係についてみると，支保の変状が発生し始める内空変位率は，おおむね 0.3%（30mm）を境にし，内空変位率 0.6～0.7%（60～70mm）以上では全ての支保パターンで変状が発生している。

4）　土被り 900m では天端沈下量で 100mm、最大内空変位量で 200mm を越える変位量が予想された。

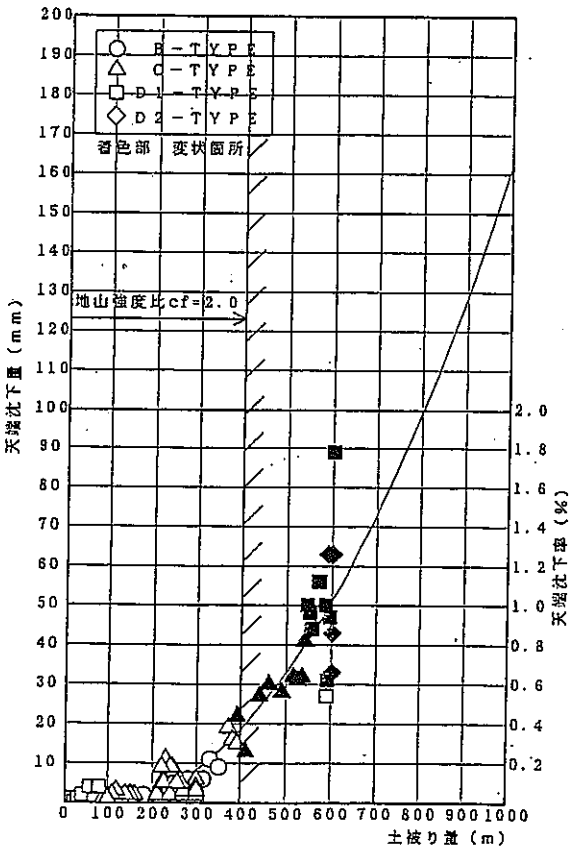


図-3.1　天端沈下量－土被り－変状の関係

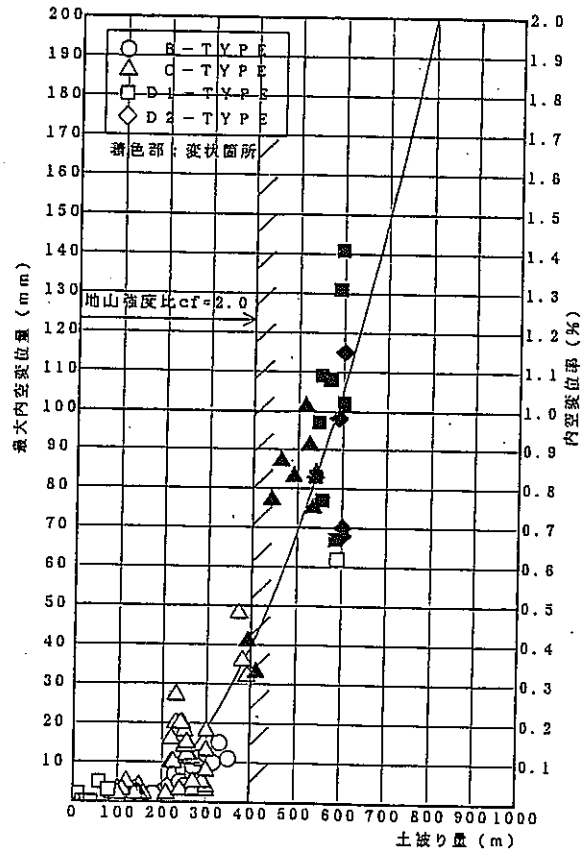


図-3.2　最大内空変位量－土被り－変状の関係

27

3.2　トンネル変状発生の原因

トンネル変状の発生状況より、土被りが 400m を越す部分より地山強度比が 2.0 以下となり、トンネル周辺には塑性領域が形成され、その土圧が支保構造に作用して支保の変状が生じている事が推定された。

そこで、当現場で得られた土被り 600m 迄の計測データをもとにその結果と整合する岩盤の物性値を逆解析的にトライアルで求め（表-3.2参照）この結果に基づいて弾塑性解析を行い、土被り毎の地山特性曲線（図-3.3参照）を描き、トンネル変状発生の原因を検証した。

表-3.2　逆解析的に求めた岩盤物性値

パラメータ	物性値
岩盤の粘着力　C(kgf/cm²)	20
岩盤の内部摩擦角φ(°)	50
岩盤の弾性係数　E(kgf/cm²)	3.0×10⁴
岩盤のポアソン比ν	0.3

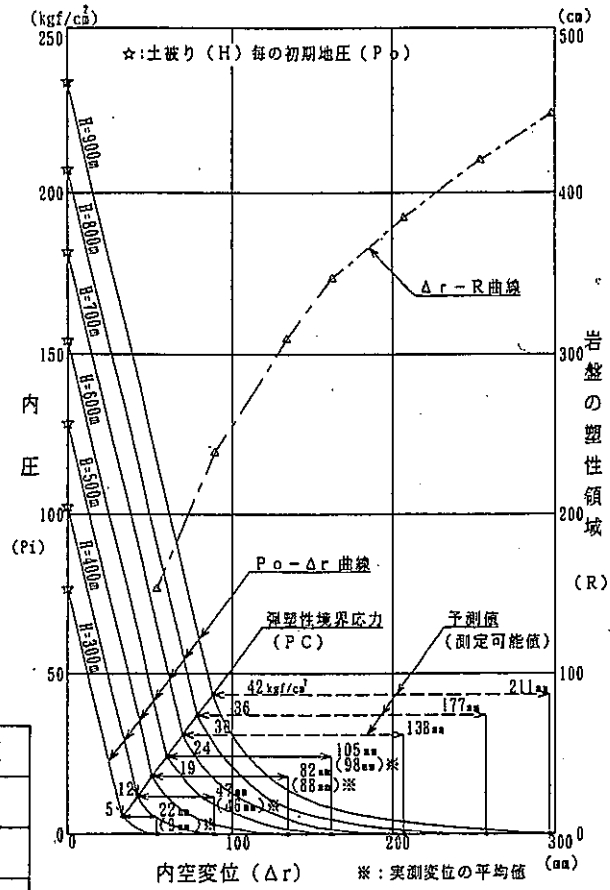


図-3.3　標準支保パターンにおける地山特性曲線

1）　土被り毎の必要内圧の推定

表-3.3に土被り毎の地山特性曲線より得られた弾塑性境界応力をもとに土被り毎の必要内圧を推定した。

表-3.3　土被り毎の必要内圧（必要支保圧）の推定

土被り (H)	初期地圧 (Po)	弾塑性境界応力 (Pc)	必要内圧 (Pi)
300m	78(kgf/cm²)	5.4(kgf/cm²)	3.2(kgf/cm²)
400m	104(　〃　)	11.5(　〃　)	6.9(　〃　)
500m	136(　〃　)	19.0(　〃　)	11.4(　〃　)
600m	156(　〃　)	23.6(　〃　)	14.2(　〃　)
700m	182(　〃　)	29.7(　〃　)	17.8(　〃　)
800m	208(　〃　)	35.8(　〃　)	21.5(　〃　)
900m	234(　〃　)	41.9(　〃　)	25.1(　〃　)

Pi=Pc×0.6 [1)]で推定

2）標準支保パターン別の支保耐力の推定

各支保部材の支保耐力の推定に当たっては、Ｈｏｅｋ＆Ｂｒｏｗｎの式[2)]を用いて算出した。

表-３.４　標準支保パターンの推定支保耐力

		標準支保パターン				
支保パターン		B	CⅠ	CⅡ	DⅠ	DⅡ
覆工厚さ（cm）		30	30	30	30	30(i=50)
吹付けコンクリート（cm）		5	10	10	15	20
金網		――	――	――	上半	上下半
ロックボルト	ボルト長（m） 耐力（tf）	l=3.0 12	l=3.0 12	l=3.0 18	l=4.0 18	l=4.0 18
	断面間隔（m）	2.0	1.5	1.2	1.0	1.0
	断面本数（本） 間隔（m）×ピッチ（m）	11上半 2.0×1.5	14 1.5×1.5	14 1.2×1.5	17 1.0×1.2	17 1.0×1.2
鋼製支保工	種類	――	――	H-125	H-125	H-150
	ピッチ（m）	――	――	1.2	1.0	1.0
	場所	――	――	上半	全断面	全断面
支保耐力	吹付けコンクリート（kgf/cm²）	2.0	4.0	4.0	5.9	7.8
	ロックボルト（kgf/cm²）	0.4	0.5	1.0	1.5	1.5
	鋼製支保工（kgf/cm²）	――	――	1.2	1.6	2.0
	合計（Ｐｓｔ）（kgf/cm²）	2.4	4.5	6.2	9.0	11.3

表-３.４で求められた標準支保パターン別の支保耐力と表-３.３で推定した土被り毎の必要支保圧を比較すると、ＤⅡパターンにおいても土被り 500m に相当する支保耐力しかなく、作用する土圧に対し標準支保パターンの支保耐力が不足しており、連続して発生しているトンネル変状発生の原因と判断された。

一方図-３.３土被り毎の地山特性曲線からも標準支保パターンでの土被り 900m における最大内空変位量は 200mm を越える結果となり、変状発生の限界最大内空変位量が 60～70mm であることから考えると更に大きな変状が発生し、安全性を含めた施工面に問題が生じる事が予想され、土被り 600m 以上の区間については、特殊支保パターンの必要性が解析結果からも明らかになった。

参考引用文献

1）岡林信行、田沢雄二郎、松川久俊、今田徹：高土被りトンネルへの高強度吹付けコンクリートの適用に関する一考察、土木学会論文集 No.546/Ⅳ-32、P145-156、1996.9

2）Ｈｏｅｋ,Ｅ＆Ｂｒｏｗｎ,Ｅ.Ｔ　岩盤地下空洞の設計と施工　P179-247、1985.2

４.高土被りに対する特殊支保パターンの計画

特殊支保パターンの支保耐力は、表-３.３で推定した土被り毎の必要内圧（必要支保圧）に見合うものとし、各支保部材を組み合わせて設定した。

図-４.１は表-３.４で示した支保耐力の構成のうちＤⅡパターンにおけるものをグラフ化したものである。これによると全体支保耐力のうち吹付けコンクリートの占める割合が

29

約７割程度あることに着目し、特殊支保パターンの計画に当たっては、吹付けコンクリートの高強度化とその厚さの割増により支保耐力の向上を目指した。

ここで高強度吹付けコンクリートを採用したのは、吹付厚さの割増だけではその厚さが 50cm 以上となり、施工技術的にも経済的にも不合理と判断したためである。

一方吹付けコンクリートの高強度化の方法としては、高強度コンクリート用混和材として注目されているシリカフュームを用いた。吹付けコンクリートの設計基準強度は、標準支保パターンでは材令 28 日で 180kgf/cm² (17.6MPa) と規定されているのに対し、高土被り下では地圧がトンネル掘削後早い時期に作用するため、早期強度が特に重要と考え設計基準強度を材令７日で規定し、土被りに応じて 250kgf/cm² (24.5MPa) 、290kgf/cm² (28.4MPa) の２種類で計画した。

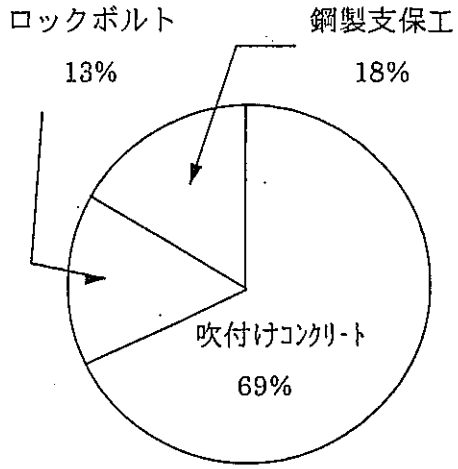


図-４.１　ＤⅡパターン支保耐力構成図

表-４.１　土被り別特殊支保パターンの設計

		特殊支保パターン				
土被り (m)		600～700		700～800		800～900
総延長 (m)		160		230		260
支保パターン		DⅣ	DⅣ'	DⅤ	DⅤ'	DⅥ
覆工厚さ (cm)		40 (インバート) 50	同左	40 (インバート) 50	同左	40 (インバート) 50
吹付けｺﾝｸﾘｰﾄ ※ (cm)		30 (σ7＝250 kgf/cm²)	35 同左	30 (σ7＝290 kgf/cm²)	40 同左	35 (σ7＝290 kgf/cm²)
金網		上下半	〃	上下半	〃	上下半
ロックボルト	ボルト長 (m)	L＝4.0 耐力18 tf	〃	L＝4.0 耐力18 tf	〃	L＝4.0 耐力18 tf
	間隔 (延長方向×周方向) (m)	1.0×1.2 (17本)	〃	1.0×1.0 (21本)	〃	1.0×1.0 (21本)
鋼製支保工	種類	H－200	〃	H－200	〃	H－250
	ピッチ (m)	1.0	〃	1.0	〃	1.0
	場所	全断面	〃	全断面	〃	全断面
支保耐力	吹付けコンクリート ※	14.6	17.2	17.5	20.7	20.3
	ロックボルト	1.5	同左	1.8	同左	1.8
	鋼製支保工	3.2	〃	3.2	〃	4.6
	合計 (kgf/cm²)	19.3	21.9	22.5	26.1	26.7
土被り別推定内圧 (kgf/cm²)		17.8 (土被り700m)	同左	21.5 (土被り800m)	同左	25.1 (土被り900m)

5.高土被り区間の施工実績

5.1　高強度吹付けコンクリートの施工実績

1）高強度吹付けコンクリートの配合

シリカフュームを用いた高強度吹付けコンクリートの配合は、鹿島技術研究所研究結果[1) 2)]及び現場で使用している従来配合をベースとして試験練りにより表-5.1の通りとした。

表-5.1　高強度吹付けコンクリートの配合

配合	設計基準強度 kgf/cm²	スランプ cm	空気量 %	細骨材率 %	W/C %	単位量，kg／m³			高性能AE減水剤 %
						C	W	SiF	
①	σ28=180	10±2	4±1	62	59.7	360	215	—	Cx0.7
②	σ7 =250	20±2	4±1	70	59.7	360	215	25	Cx2.5
③	σ7 =290	20±2	4±1	70	53.8	400	215	25	Cx2.3

配合①は標準支保パターンにおける従来配合で、②、③が高強度吹付けコンクリート用の配合を示す。

参考引用文献

1）田沢雄二郎、本橋賢一、横関康祐、岡田浩司：シリカフュームを混和した吹付けコンクリートの現場施工実験、シリカフュームを用いたコンクリートに関するシンポジウム論文報告集、P139～144、1993.11

2）田沢雄二郎、本橋賢一、横関康祐、岡田浩司：高強度・高靭性吹付けコンクリートの現場施工実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.1、P1,273～1,278、1995.6

2）高強度吹付けコンクリート強度実績

表-5.2に高強度吹付けコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。その結果配合No2、No3の材令7日におけるコアー強度は、各々262kgf/cm²（25.7MPa）、326kgf/cm²（31.9MPa）であり、両配合とも設計基準強度σ_7=250kgf/cm²（24.5MPa）、290kgf/cm²（29.0MPa）を上回った結果が得られた。

表-5.2　高強度吹付けコンクリートの圧縮強度試験結果

配合	供試体の種別	7日強度，kgf/cm²			28日強度，kgf/cm²			備考
		平均	標準偏差	変動係数 %	平均	標準偏差	変動係数 %	設計基準強度 kgf/cm²
①	標準養生	211	19.2	9.1	316	26.8	8.5	σ28=180
	コアー	—	—	—	216	15.3	7.1	n=19
②	標準養生	273	14.4	5.3	426	30.2	7.1	σ7= 250
	コアー	262	12.5	4.8	328	44.5	13.5	n= 6
③	標準養生	418	43.5	10.4	548	47.0	8.6	σ7= 290
	コアー	326	32.4	9.9	388	49.5	12.8	n=20

2）高強度吹付けコンクリートの施工実績

一方高強度吹付けコンクリートの施工性に関しては、特殊支保パターン区間において約15,600m³の施工を行った結果、両配合とも吹付機からの吐出は良好でその施工能力も

10m³/H 以上を確保できた。

吹付けコンクリートの付着も良好で跳ね返り量の測定結果は、両配合とも 20%を下回っており、従来配合に比較して少ないことが確認された。

5.2　高土被り区間の計測実績

土被り 600m 以上の区間に対し、特殊支保パターンを本格的に導入するにあたり、試験施工区間を含む計測結果の評価を行い、計測管理基準の見直しを行った。図-6.1は、坑口～D Vパターン試験施工区間の最大変位速度－最大内空変位量の関係を示したものであるが、両者には強い正の相関がある。この図から、吹付けコンクリートのせん断クラック、ロックボルトの破断等の大きな変状を生じた最大内空変位量は 60～70mm 付近であり、その時の最大変位速度は 10mm/day 程度である。また、最大内空変位量が 100mm を越える場合は、上記変状のほかに鋼製支保工の座屈も伴っておりその時の最大変位速度は 20mm/day 程度であった。

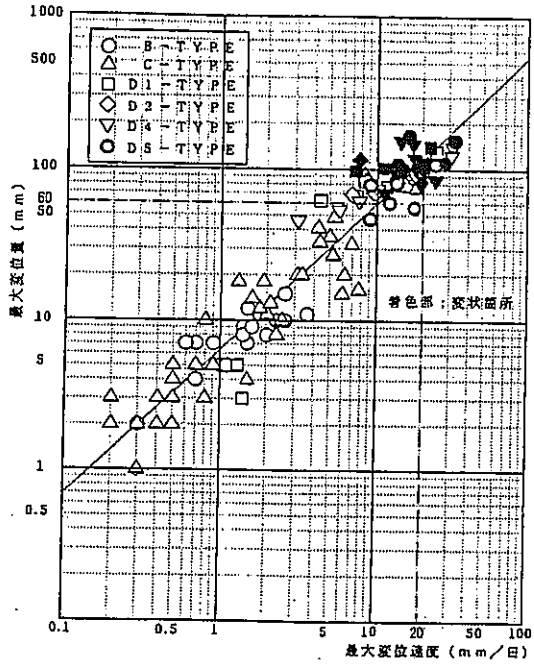


図-5.1　最大変位速度－最大内空変位量の関係図

以上の様な事から、図-5.2に示す高土被り区間の計測管理フローを作成し、以後の施工において補強対策工、支保パターンの変更等に活用した。

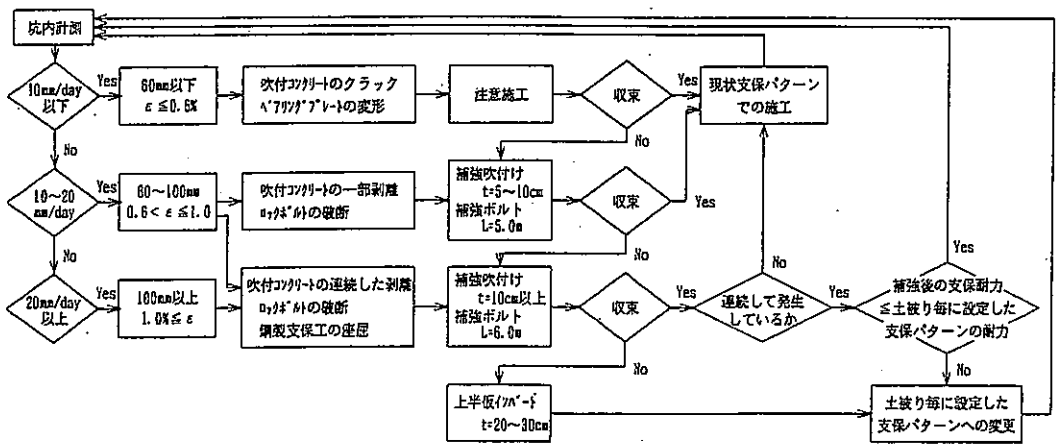


図-5.2　高土被り区間の計測管理フロー図

図-5.3、5.4は、特殊支保パターンで施工した区間を含めた天端沈下量－土被り、最大内空変位量－土被りの関係を整理したものである。ここで、天端沈下量、最大内空変位量とも標準支保パターンで予測した変位曲線に対し、特殊支保パターンにおける変位曲線のほうが下回っており、変位抑制の効果が現れている。

32

しかし、部分的に見れば特殊支保パターンにおいても天端沈下量が 100mm、最大内空変位量が 170mm 近くに達しており、大きな変状を生じている箇所も存在する。これは、当トンネルが複雑な地層構成からなるため、解析を行った岩盤より悪質部の地層に遭遇したためと考えられる。これらの区間は主に増し吹付けコンクリート（t＝5～10 ㎝）および増しロックボルト（L=5.0～6.0m）で補強することにより地山の安定を図った。

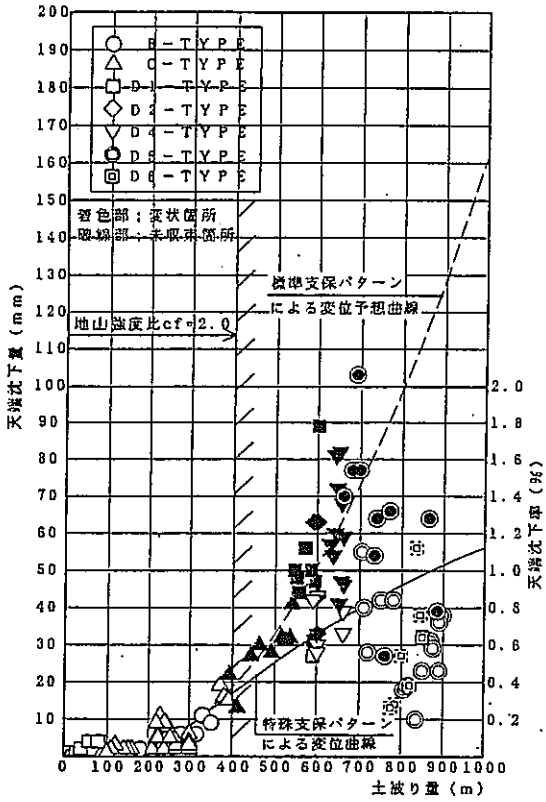


図-5.3　天端沈下量－土被りの関係

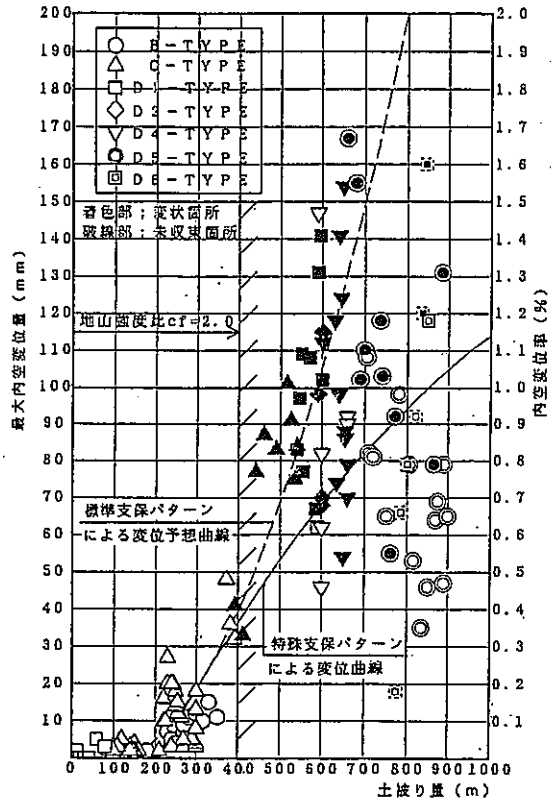


図-5.4　最大内空変位量－土被りの関係

6．むすび

膨張性地山や高地圧（高土被り）下のトンネルにおいて、その変状対策として高強度吹付けコンクリートを設計時から組み込んで実工事に適用された事例はほとんどなかった。

当寒風山トンネル工事においては、企業者、施工者及び第三者の権威者を含めた技術検討連絡会が定期的（年 1 回）に開催されており、今回報告の対策案はその場において検討され、採用されるに至ったものである。

そしてその適用区間の延長は、1,120m にも及び使用した高強度吹付けコンクリートの量は 15,600m³（シリカフューム使用量は 390t）に達する大規模な対策工となった。

現在これら貴重な新技術は、岩手トンネル、紫尾山トンネルをはじめとする難工事に展開され成果が上がっている。

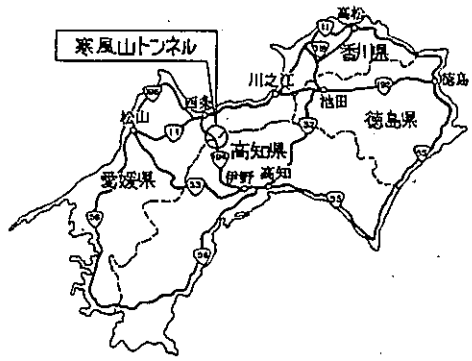
最後に計画から施工まで寒風山トンネルにおいては、これまで前述の技術検討連絡会の委員の方々を始めとする実に多くの方々が携わってこられた。これらの方々に誌面をお借りして、お礼申し上げます。

高地山被りにおける支保パターンの設計について（寒風山トンネル）

四国地方建設局　土佐国道工事事務所　白川幸男
同　岡崎和彦
同　○恒石和義

1．はじめに

一般国道194号の高知・愛媛県境に建設している寒風山トンネルは、四国山地の主脈をなす石鎚山系の一つである寒風山（標高1，763m）直下を貫く延長5，432m、縦断勾配3．45％の長大トンネルであり、権限代行として施工を行っている。本トンネルは施工規模、複雑な地質状況、断層からの集中湧水等を勘案し、本坑の外に作業坑（避難坑）および本坑と作業坑を連絡する連絡坑で構成されている。トンネルは2工区での施工とし、愛媛県側工区は昭和63年度に着工、高知県側工区は平成4年度に着手し、作業坑については、平成6年9月に貫通しており、現在本坑の掘削を進めている。愛媛県側工区の作業坑、本坑掘削時において、地山被りの増加に伴い内空変位の増大や支保工の変状が発生したことから当トンネルで収集した各種データを基に解析を行い、高地山被りにおける支保パターンの設計を行ったので以下に報告する。



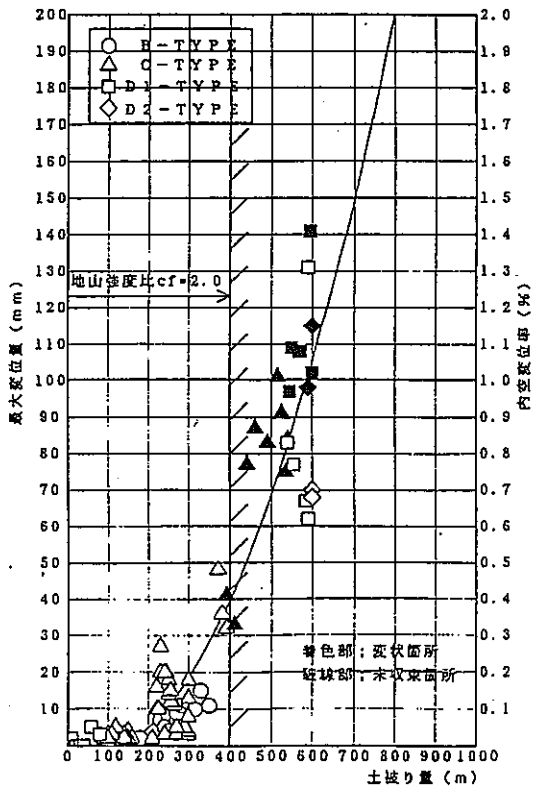
図－1　位置図

2．地質概要

トンネルルート沿いの地質は、三波川帯に属する結晶片岩類が分布する。トンネルの地質の大部分は泥質片岩となっている。当現場の泥質片岩（黒色片岩）の特徴としては、結晶片岩特有の片理面が発達し、剥離性に富んでおり、異方性が強い。

3．地山被りの増加に伴う支保の変状対策

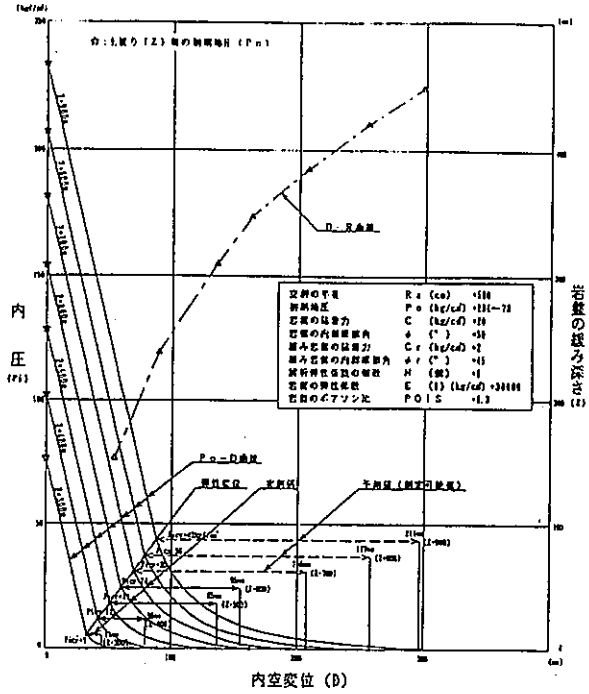
当トンネルは地山被りが非常に高い（最大900m）ため、大きな地山応力が内在する。そのため、三波川結晶片岩類は比較的硬岩よりなる地質にもかかわらず、地山被り400m付近より天端沈下量・水平変位量が大きくなり、支保工（吹付コンクリート・ロックボルト・鋼製支保工）に変状が生じ始めたことから、地山被り600m付近までは支保工のランクアップ（CⅠ→CⅡ→DⅠ→DⅡ）と補強工（増しボルト・増し吹付）で対応し施工を行った。しかしながら、DⅡパターンで施工した区間においても、支保の変状が激しくなったため、当トンネルで収集したA計測データ、地山資料試験データを基に逆解析・弾塑性解析を行い、支保の変状対策を検討した。変状の原因として、地山資料試験データの結果から地山被りが400mを越えると地山強度比が2．0以



図－2　最大内空変位量－土被り－支保工の変状関係

34

下となり、トンネル周辺の地山は降伏して塑性領域が生じ内圧（支保力）の不足で変位量が増大し、変状が発生していると推定された。また、逆解析・弾塑性解析を行い、ＣＨ級（建設省分類Ｂ）岩盤の地山の被り毎の地山特性曲線を描き、これより得られた弾塑性境界応力を基に地山被り毎の必要内圧を推定した。これによると、現状のＤＩ、ＤⅡパターンでは地山被り４００～５００ｍに相当する支保耐力程度しかなく、連続して発生している支保工の変状の原因と判断された。これらの検討により今後直面する高地山被り（６００ｍ以上）に対する対策が不可欠と判断し高地山被りに対する新規支保パターンを設計した。



図－３　地山等級Ｂにおける土被り毎地山特性曲線

４．高地山被りに対する支保パターンの設計

地山被り毎に推定した必要内圧に見合う支保パターンを設計するに当たり、支保耐力の構成のうち、荷重負担率の高い吹付コンクリートに着目し、吹付コンクリートの高性能化（高強度、低粉塵、低リバウンド）による支保耐力向上を目指した。吹付コンクリートの高性能化の手段として、シリカヒューム混入の吹付コンクリートを採用することにした。

表－３　高地山被りに対する支保パターン

		一般部新規支保パターン		
地山被り		600～700m	700～800m	800～900m
既延長 (H6.11.30)		160m	230m	260m
支保パターン		DⅣ	DⅤ	DⅥ
覆工厚さ (cm)		40 (ﾌﾟﾚﾊﾞｰﾄ)50	40 (ﾌﾟﾚﾊﾞｰﾄ)50	40 (ﾌﾟﾚﾊﾞｰﾄ)50
吹付コンクリート厚 (cm)		30 σ7=250kgf/cm²	30 σ7=290kgf/cm²	35 σ7=290kgf/cm²
全断		上下半	上下半	上下半
ロックボルト	ボルト長 (m)	L=4.0 耐力18t	L=4.0 耐力18t	L=5.0 耐力18t
	間隔(横断×縦断) (m)	1.0×1.2 (17本)	1.0×1.0 (21本)	1.0×1.0 (21本)
鋼アーチ支保工	種類	H-200	H-200	H-250
	ピッチ (m)	1.0	1.0	1.0
	場所	全断面	全断面	全断面
支保耐力	吹付コンクリート厚	14.6	17.5	20.3
	ロックボルト	1.5	1.8	1.8
	鋼製支保工	1.6	1.6	2.3
	合計 (kf/d)	17.7	20.9	24.4
地山被り対応推定内圧 (kf/d)		地山被り700m 17.8	地山被り800m 21.5	地山被り900m 25.1

表－１　地山被り別予測変位
（地山等級Ｂについて）

地山被り (Z)	初期地圧 (po)	弾塑性境界応力 (picr)	予測変位（解析値） 初期変位（弾性変位） (Ue)	全変位 (Uo)	塑性変位 (Ui=Uo-Ue)	実測変位 (U)	ゆるみ域 (R)
400	104	11.5	40.1	87.8	47.7	38.0	2.42
500	136	19.0	60.7	133.1	82.4	85.1	3.13
600	156	23.6	57.4	161.9	104.5	94.6	3.48
700	182	29.7	66.0	204.4	138.4		3.86
800	208	35.8	74.6	252.0	177.4		4.19
900	234	41.9	83.2	294.2	211.0		4.48

表－２　地山被り毎の必要内圧（必要支保耐力）Ｐｉの推定

地山被り (Z)	初期地圧 (po)	弾塑性境界応力	必要内圧 (pi)	摘要
400m	104 (〃)	11.5 (〃)	6.9 (〃)	pi=picrx0.6 で推定（発破直後から支保力を与える迄の時間のずれによる係数として0.6を採用）
500m	136 (〃)	19.0 (〃)	11.4 (〃)	
600m	156 (〃)	23.6 (〃)	14.2 (〃)	
700m	182 (〃)	29.7 (〃)	17.8 (〃)	
800m	208 (〃)	35.8 (〃)	21.5 (〃)	
900m	234 (〃)	41.9 (〃)	25.1 (〃)	

５．おわりに

高地山被りに対する支保パターンを計画するにあたり、本トンネルの技術的課題と併せて安全かつ合理的な施工を行うことを目的として設立された「寒風山トンネル技術検討連絡会」の委員及び関係者の皆様にこの場を借りて深く感謝の意を表すとともに、今後も引き続きご指導をお願いする次第である。

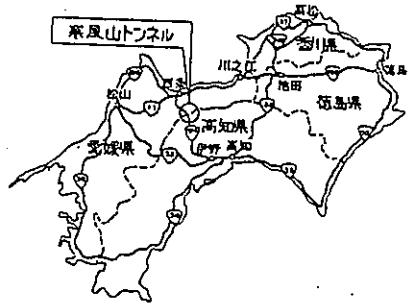
38

高土被りにおける支保パターンの施工について（寒風山トンネル）

四国地方建設局　土佐国道工事事務所　後藤　守
同　岡崎和彦
同　○尾上誠一

1．はじめに

一般国道１９４号の高知・愛媛県境に建設している寒風山トンネルは、四国山地の主脈をなす石鎚山系の一つである寒風山（標高１，７６３m）の直下を貫く延長５，４３２m縦断勾配３．４５%の長大トンネルであり、権限代行として施工を行っている。トンネルは２工区での施工とし、愛媛県側工区は昭和６３年度に着工、高知県側工区は平成４年度に着手し、平成８年１１月に貫通した。ここでは高土被り区間（６００m以上）における特殊支保パターンにより施工した事例を報告する。



図－１　位置図

2．地質概要

トンネル区間の地質は三波川帯に属する結晶変岩類が分布する。トンネル全体の７５%を占める泥質片岩（黒色片岩）があり、その特徴は結晶片岩特有の片理面が発達し、剥離性及び異方性が強く新鮮な岩塊の一軸圧縮強度は２００ｋｇｆ／ｃm2 程度であった。

3．土被りの増加に伴う支保の変状対策

土被り４００m（地山強度比Cf=2.0以下）を境にして、顕著な支保の変状が発生している。図－２は土被り６００m迄の計測データを基に、逆解析・弾塑性解析を行い地山特性曲線を描き必要内圧を推定した。土被りごとの必要内圧に見合う支保耐力を有する支保パターンを計画した。

4．高土被りに対する特殊支保パターンの設計

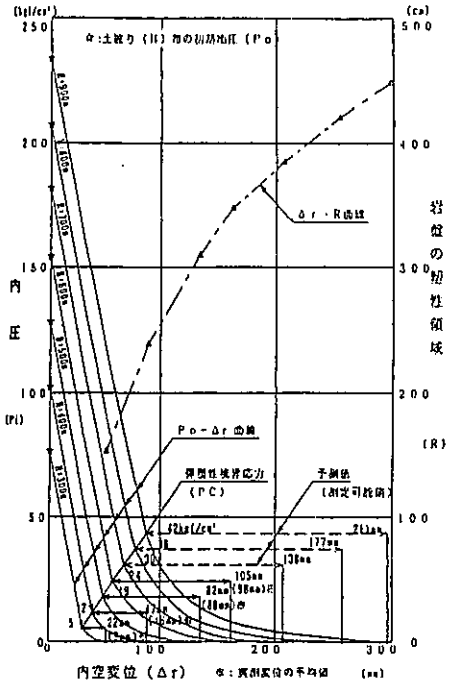
吹付コンクリートの支保耐力構成に占める割合が大きいことに着目し、吹付コンクリートの高強度化と、厚さの割増を行った。その高強度化にはシリカフューム混入の吹付コンクリートを採用し、その土被りに応じた諸元を表－１に示す。

5．施工実績

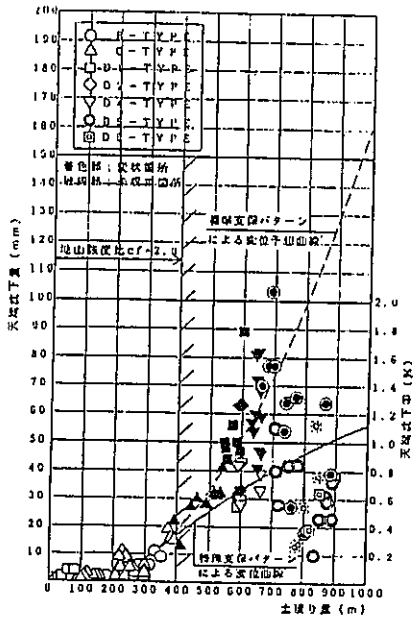
図－３、図－４に変状の関係を示す。これらの図より天端沈下量・最大内空変位量とも標準支保パターンにおける変位予想曲線より全体的に下回っており、変位抑制の効果が見られる。

(4) トンネル部会

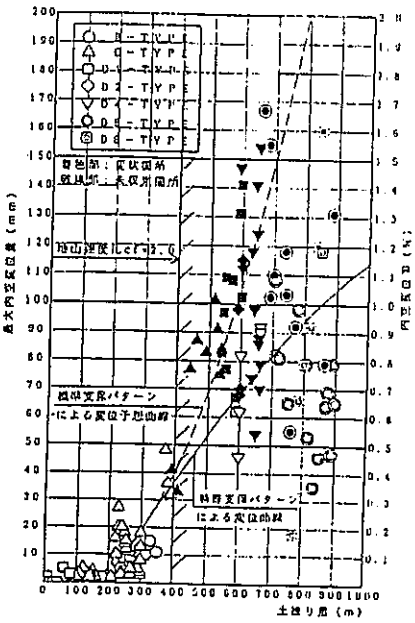
計測結果の評価を行い、表－２の計測管理フローを作成し、以後の施工に活用した。



図－２　標準支保パターンによる地山特性曲線



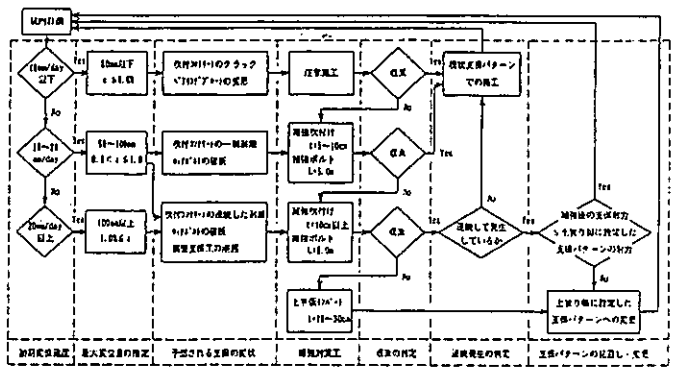
図－３　天端沈下量－土被り変状の関係



図－４　最大内空変位量－土被り変状の関係

		標準支保パターン	特殊支保パターン		
土被り (m)		－	600～700	700～800	800～900
計画延長 (m)		－	508	256	260
支保パターン		DⅡ	DⅣ	DⅤ	DⅥ
覆工厚さ (cm)		30	40	40	40
インバート厚さ (cm)		50	50	50	50
吹付コンクリート (cm) 設計基準強度(σ7:kgf/cm2)		20 σ28-180	30 250	30 290	35 290
全断		上下半	上下半	上下半	上下半
ロックボルト	ボルト長 (m)	L=4.0 耐力18.0t	L=4.0 耐力18t	L=4.0 耐力18t	L=5.0 耐力18t
	間隔(延長方向×周方向)(m)	1.0×1.2	1.0×1.2	1.0×1.0	1.0×1.0
鋼製支保工	種類	H-150	H-200	H-200	H-250
	ピッチ (m)	1.0	1.0	1.0	1.0
	場所	全断面	全断面	全断面	全断面
支保耐力	吹付コンクリート(Psc kgf/cm2)	7.8	14.6	17.5	20.3
	ロックボルト(Psb:kgf/cm2)	1.5	1.5	1.8	1.8
	鋼製支保工(Pss.kgf/cm2)	2.0	3.2	3.2	4.6
	合計 (Pst kgf/cm2)	11.3	19.3	22.5	26.7
土被り別推定内圧 (kgf/cm2)		土被り500m相当 11.4	土被り700m 17.8	土被り800m 21.5	土被り900m 25.1

表－１　特殊支保パターンの諸元



表－２　高土被り区間の計測管理フロー

6. おわりに

高土被りに対する支保パターンを計画・施工するにあたり、本トンネルの技術的課題と併して安全かつ合理的な施工を行うことを目的として設立された「寒風山トンネル技術検討連絡会」の委員ならびに関係者の皆様に本誌面をお借りしてお礼を申し上げます。

施　工

鋼製支保工の高耐力化と早期閉合で膨圧を克服

北陸新幹線　朝日トンネル東工区

豊原正俊*　早坂治敏**
江戸川修一***

1. はじめに

北陸新幹線の糸魚川・魚津間は，暫定整備計画に基づき平成5年9月に工事実施計画の認可を受け，平成6年3月にトンネル工事に着手した(図-1).

この区間は，新潟県の西糸魚川(仮称)信号場から富山県の東魚津(仮称)信号場に至る延長約40kmの路線で，このうちの約59%，23.7kmがトンネル区間である.

富山県と新潟県との県境付近に位置する朝日トンネル(図-2)は，起点方から掘削を開始し，現在約3kmを掘削完了しているが，平成9年4月から延長約500mに及ぶ断層破砕帯に遭遇し掘削作業が難航している．この破砕帯では，トンネルの土かぶり400mに対して一軸圧縮強度が1.9～3.4kgf/cm²と地山強度比が極端に小さい地質，すなわち凝灰岩の破砕帯粘土や礫混じり粘土層が切羽全面に出現した．強大な地圧が作用するため，支保部材の押し出し，変形，破断などの現象が発生した．内空変位は最大554mmにおよび，6か月以上経過しても完全な収束には至らなかった.

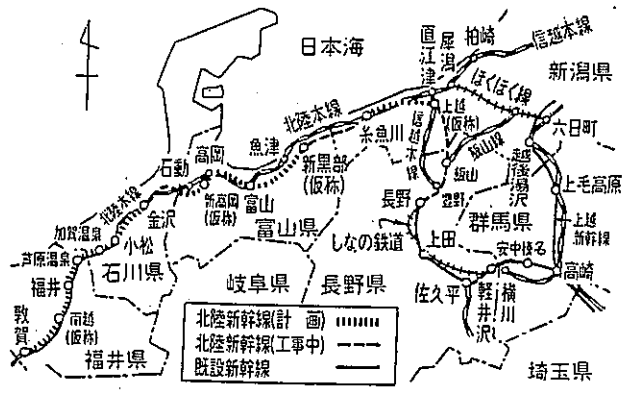


図-1　線路概要図

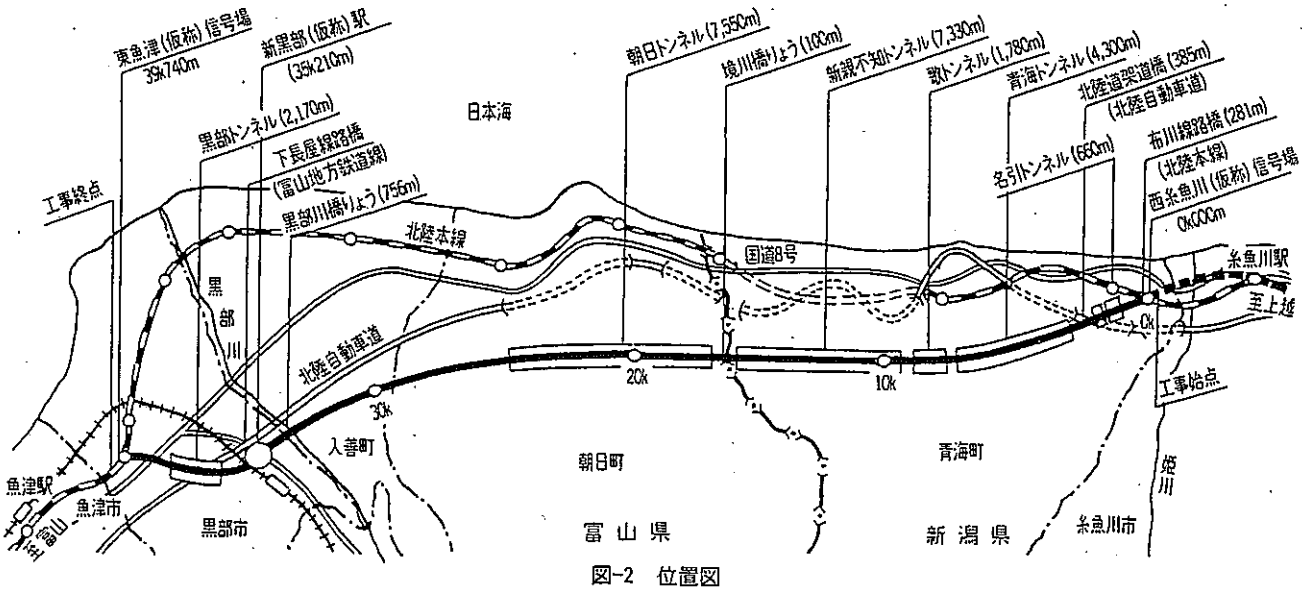


図-2　位置図

本稿は，断層破砕帯における施工状況，トンネル変形特性，切羽から実施した先進地質調査ボーリングの結果および対策工などの効果について報告するものである.

＊日本鉄道建設公団北陸新幹線第二建設局工事第四課課長
＊＊　〃　〃　朝日鉄道建設所所長
＊＊＊清水・大豊・加賀田北陸幹朝日T(東)他2特定建設工事共同企業体工事主任

2. 工　事　概　要

工事名称：北陸幹(糸・魚)・朝日T(東)
工　　期：平成6年3月17日～平成11年7月26日
工事内容：掘削延長　L=4,155m(全長7,550m)
　　掘削断面積　約72m²
　　縦断勾配　3/1000
掘削工法：補助ベンチ付き全断面工法,
　　一部上半先進工法
掘削方式：発破タイヤ方式，コンテナ輸送方式ずり処理

3. 地　質　概　要

本トンネル付近の地質は，起点方から中生代白亜紀～古第三紀の太美山層群，新第三紀中新世～鮮新世の北陸層群の順に分布する[1]．起点方は安山岩質溶岩，安山岩質凝灰角礫岩が主であり，岩石の強度も大きくトンネル掘削はおおむね順調であった(図-3)．

坑口から1,800m付近では，全体的に赤褐色のかなり変質した流紋岩質溶結凝灰岩に変化した．また，坑口より2,000m付近からは，緑色や赤褐色の凝灰岩層が頻繁に現れるようになり，一部では完全に粘土化するまで破砕が進行している地質であった．

新第三紀の北陸層群は，坑口から3,600m付近で上記太美山層群と雁蔵断層を介して接しているものと推定され，安山岩質溶岩，凝灰質砂礫層，泥岩層からなっている．

4. 施　工　概　要

4-1　掘　削

坑口から2,710mまでは，補助ベンチ付き全断面工法で掘削し，その後，第2破砕帯に入ってから一部上半先進工法に変更，現在はショートベンチカット工法に変更し，切羽は3,050mに到達している(平成10年9月現在)．補助ベンチ付き全断面工法では，発破によるNATMを採用し，2ブームホイールジャンボ2台を使用した．ずり処理は積み込み機械に電動式ローディングショベルを，輸送トラックにコンテナ方式を採用し，ずり処理作業の効率化，安全性向上，坑内環境の改善を図っている[2]．

主要な施工機械を表-1に示す．

表-1　使用機械一覧

用途	機械名	型式	能力・容量	台数
掘削・積み込み	2ブームホイルジャンボ	JTH2RS-150	2ブーム 1ゲージ	2
	ホイルローダー	950F	2.1m³	1
	油圧ブレーカー	REGA320 S-55	1300kg級	1
	油圧ショベル	REGA320	0.7m³	1
	ローディングショベル		2.65m³	1
	キルナコンビ	K-300-320		2
	コンテナ	K-300コンビ用	山積み18m³	15
吹付け	吹付け機	アリバー285 ロボット30G	一体型SF-1E	1
	急結材供給装置	PAC250		1
換気・送気	コントラファン	MFA125P2 -SC5-VP1700φ	2000m³/min	1
	コントラファン	MFA110P2 -SC3-VP1200φ	1500m³/min	1
	コンプレッサー	KST-75ER	12m³/min	2
覆工	シート張り台車		L=4.5m	1
	セントル		L=12.0m	1
	コンクリートポンプ	MKW-35SM	35m³/h	1
坑外設備	バッチャープラント	SMK-500DKB-TME	22.5m³/h	1
	濁水処理設備		150m³/min	2

4-2　支保パターン

支保パターンは坑口から1,770m地点までの地山等級III_Nパターンと，その後3,050m地点までの地山等級$\mathrm{I}_{N\sim S}$パターンの2つに大別できる．

代表的な支保パターンを図-4に示す．

5. 第2破砕帯の掘削(延長約480m)

5-1　破砕帯概要

5-1-1　位　置

坑口からの距離　2,573～約3,050m地点

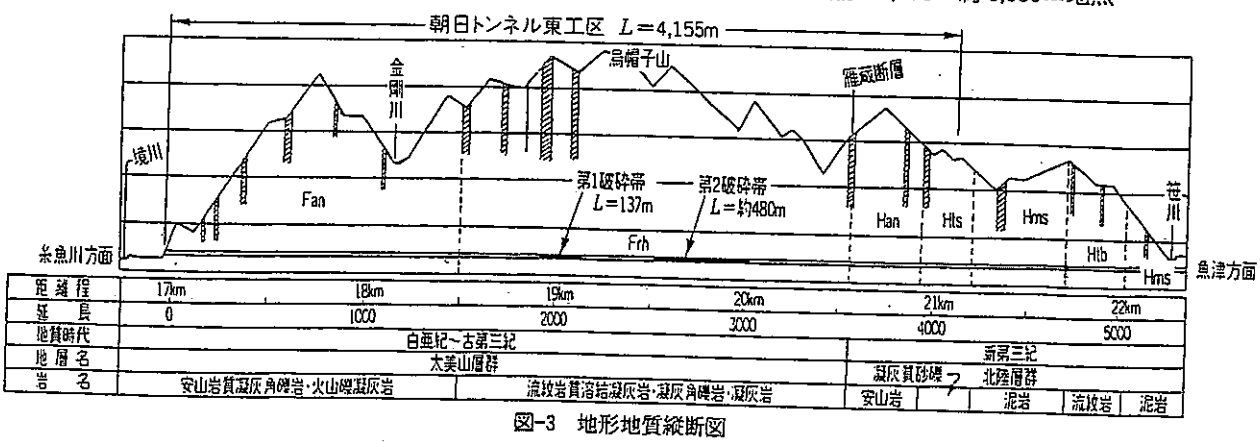


図-3　地形地質縦断図

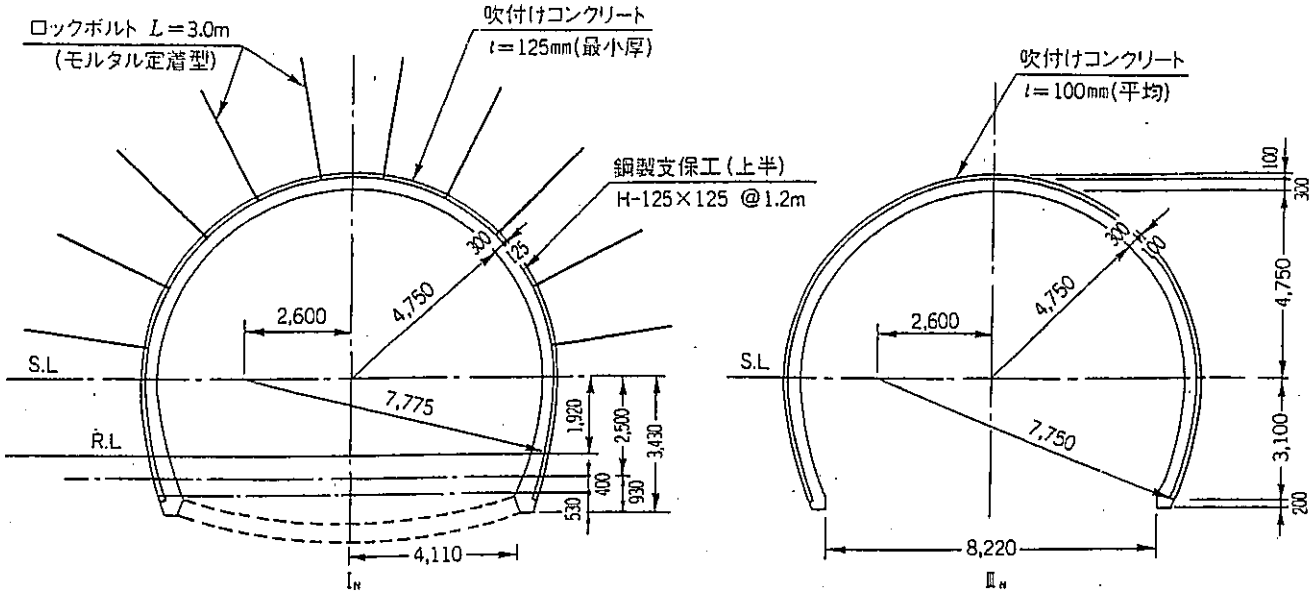


図-4　標準断面および支保パターン図

表-2　岩石試験結果一覧

No	採取場所	採取日	土の湿潤密度試験 JSF T 191		土の一軸圧縮試験 JSF T 511	三軸圧縮試験 JSF T 520,521		X線分析	特記
5	19k600m (坑口から2,620m) 第2破砕帯	H9.4.24	—		(kgf/cm²) 132.63	—		膨張性モンモリロナイトの存在確認微量のため影響なし	破砕帯部の比較的良質な岩石試料を抽出
6	19k710m (坑口から2,730m) 第2破砕帯	H9.6.23	湿潤密度(g/cm³)	2.22	(kgf/cm²) 1.861	試験方法	[UU]	—	ボーリングコア試料
			乾燥密度(g/cm³)	2.01		c(kgf/cm²)	0.57		
			自然含水比(%)	10.1		φ度	3		
						圧縮強さ(kgf/cm²) (側圧 1.0kgf/cm²)	1.34		
8	19k721m (坑口から2,741m) 第2破砕帯	H9.6.23	湿潤密度(g/cm³)	2.21	(kgf/cm²) 3.422	試験方法	[UU]	同上	ボーリングコア試料
			乾燥密度(g/cm³)	2.04		c(kgf/cm²)	0.35		
			自然含水比(%)	8.4		φ度	0		
						圧縮強さ(kgf/cm²) (側圧 1.0kgf/cm²)	0.71		
9	19k740m (坑口から2,760m) 第2破砕帯	H9.7.25	三軸クリープ試験〔CD〕実施中						B計測点
11	19k960m (坑口から2,980m) 第2破砕帯	H10.4.30	湿潤密度(g/cm³)	2.67	(kgf/cm²) 738			—	ボーリングコア試料 切羽左半：硬質安山岩
			乾燥密度(g/cm³)	2.63					
			自然含水比(%)	1.1					
12	20k003m (坑口から3,022m) 第2破砕帯	H10.5.10	湿潤密度(g/cm³)	2.35	—	試験方法	MST[UU]	同上	ボーリングコア試料 切羽右半：粘土質凝灰岩
			乾燥密度(g/cm³)	1.94		c(kgf/cm²)	3.46		
			自然含水比(%)	12.3		φ(度)	1.98		
						圧縮強さ(kgf/cm²) (側圧 2.0kgf/cm²)	0.26		

5-1-2　地質状況

凝灰岩層が破砕粘土化し，礫混じり固結粘土層および変質脆弱化した火山礫凝灰岩層が分布する．これらの破砕層がトンネル断面とほぼ平行に交わるのが特徴である．

破砕帯の粘土および岩石試料を採取して，一軸圧縮試験，三軸圧縮試験，および膨潤性粘土鉱物の有無を調べるためにX線分析を行った．その結果は一軸圧縮強度で1.9kgf/cm²から3.4kgf/cm²と比較的良質な凝灰岩部分で130kgf/cm²であった．土かぶり400mを考慮すると，固結粘土層の地山強度比は0.1以下という結果である．

また，X線分析の結果では膨張性モンモリロナイトの存在を確認できたものの極微量なためトンネルに対する

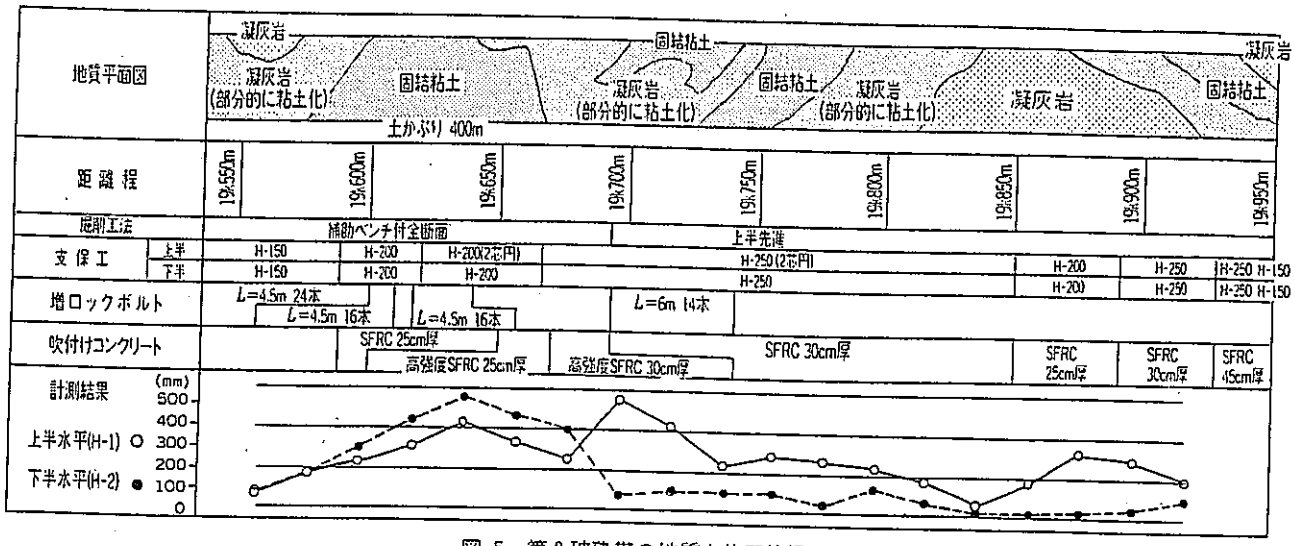


図-5　第2破砕帯の地質と施工状況

悪影響はないとみられ，当破砕帯で発生したトンネルの変形は，主に地山の強度不足に起因するものと思われる．試験結果の一覧表を表-2に示す．なお，この破砕帯区間の湧水量は最大100ℓ/min程度と少量であった．

第2破砕帯の地質状況を図-5に示す．

5-2　施工状況

支保パターンなどの施工状況については図-5に示す．

5-2-1　坑口から2,520～2,710m

平成9年3月18日，坑口より2,520m以降から初期変位速度が増大傾向を示しはじめた．支保パターンは逐次変更し，進行長0.8m，鋼製支保工H-250，吹付けコンクリートはSFRC，ロックボルト24本(3mおよび6m)，インバート吹付けt=250mm，変形余裕量150mmに，さらに吹付けコンクリートには高強度コンクリート(SFRC)を使用するパターンも採用したが，相次いでロックボルト頂部ナットの破断や鋼製支保工の変形・破断などの現象が発生した．

トンネルの変形は，水平方向の変位が天端沈下をはるかに卓越していたので，変形余裕量を水平方向に大きく確保するため2芯円鋼製支保工を採用するなど，効率的な掘削断面確保に留意した．

補助ベンチ付き全断面区間では，この後，掘削して4か月を経ても完全には変形が収束せず，下半水平変位量が最大554mmに達している地点もある．このときの変位量増加の特徴は，以下のとおりである．

① 掘削後3週間，切羽からの距離4D(D：トンネル直径)のときに最終変位量550mmの50%相当の約250mmに達した．その後3か月以上を経て，閉合などこの間の対策工実施にも拘らず，変位量は550mmに達した．

② 掘削後4か月を経て，変位速度は減少傾向から増加傾向に転じた(1→5mm/日まで徐々に増加)．

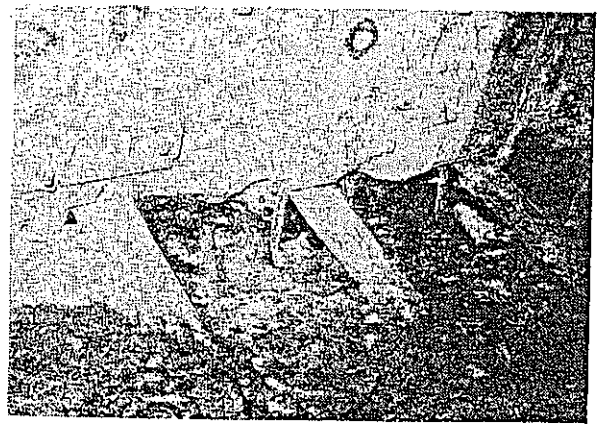


写真-1　上半支保工・ストラット接合部の破壊状況

5-2-2　坑口から2,710～2,951m

(1)　上半掘削

2,710m地点から斜路造成後，上半掘削を開始した．支保パターンは，鋼製支保工H-250，進行長0.8m，SFRC吹付けコンクリート，H-200鋼製ストラットによる上半仮閉合とした．

上半仮閉合の結果，変位速度は激減したが，一方ではストラットとアーチ支保工の接合部付近で支保工やストラットの座屈破壊が発生し，上半支保工の交換を余儀なくされた(写真-1)．

(2)　下半掘削

上半掘削中も緩やかに変形を続け新たに支保工のクラック・変形が生じていた区間の復旧と，これに続く下半掘削を開始した．下半掘削の影響で，計測の上半水平測線に20～40mm/日の大きな変位速度が観測されたが，上半掘削時からの累計変位量は一部を除きおおむね補助ベンチ付き全断面工法の場合と同等程度である．また，下半切羽が進むにつれて，前方約40mの範囲で再び上半の変位速度が増加し，健全性をどうにか保っていた鋼製ストラットやH-250上半鋼製支保工が変形する現象もみ

られた．ただし，下半水平測線の動きは，上半を先行して掘削したため，かなり小さくなっている．中央集水管およびストラット閉合を切羽直近まで施工しているため，閉合後の動きはとくに下半水平測線において大きな改善がみられた．収束傾向を示しながらも容易に安定しない変形状況はこれまでと同様であるが，一部の区間では掘削後8週間で変位速度1㎜/月以下まで収束した区間もでてきている．

6. 先進地質調査ボーリング

6-1　先進ボーリングの目的

上半切羽では，ジャンボドリルによるさぐり削孔の結果，前方約20mに比較的硬質な岩と少量の帯水層を確認できた．このため，下半掘削の期間を利用して水抜きを兼ねた前方の地質調査を行うことにした．

6-2　ボーリング状況と結果

地質調査が目的なので仕様はオールコアとし，工法選定では二重管リバースサーキュレーションコアリング[3]を採用し，目標深度は200mとした(写真-2)．

これまでの切羽観察では地質の変化が不規則かつ急で，前方の地質予測が困難であったため，切羽から前方に向かって左右それぞれに調査を行い，平面的な地質の拡がりをも把握できるようにした．

これまで破砕帯掘削中は，変質脆弱化し，あるいは粘土化した火山礫凝灰岩で占められていた切羽の前方に，新鮮で硬質な安山岩および火山礫凝灰岩が存在していることが判明した(図-6，写真-3)．

また，この硬質な岩層は所々に水脈となる亀裂を伴っていて，多量の被圧地下水が存在することもわかった．No.1ボーリング(深度311m)では，調査のためのコアを採取しながらいくつかの大きな帯水層を突破し，最終的には約5 m³/minの水を集水することができた．このときの口元での湧水圧は9.4kgf/cm²であった．

前方では比較的硬質な地質と，多量の湧水に恵まれたため，リバース工法によるコアリングが非常に効率的な成果を上げる結果となった．先進ボーリング実績工程と

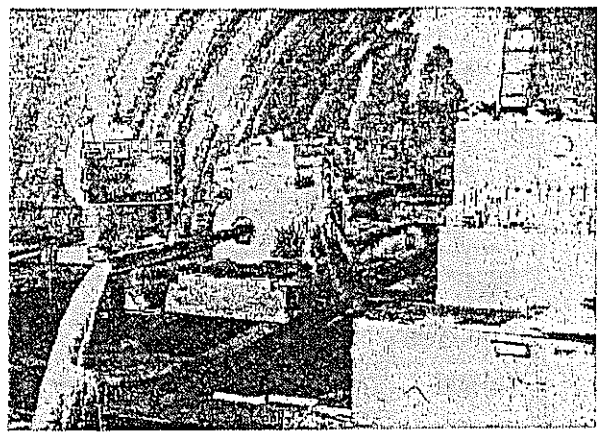


写真-2　先進ボーリング

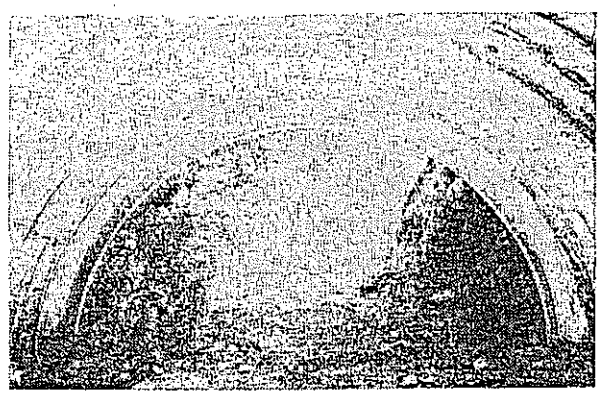


写真-3　切羽状況(硬質安山岩(左)，粘土化した凝灰岩(中央)，変質凝灰岩(右)

リバース工法の概要図を図-7，8に示す．

6-3　対策工検討への活用

前方への掘削再開にあたり対策工を検討するなかで，ボーリング結果を以下のように活用することができた．

- 前方の硬質安山岩は，走向とトンネル中心線が鋭角に交差するため，約60m前方まではSL平面上で脆弱層を突破できない．したがって，脆弱層の変形に対抗するために，トンネル側壁部の安山岩の層厚を1D(10m)とすれば，延長100m程度の対策工区間が必要であることが判明した．
- 前方では，被圧水を持った硬質な安山岩と粘土化した火山礫凝灰岩が切羽を半分ずつ占有することになる．

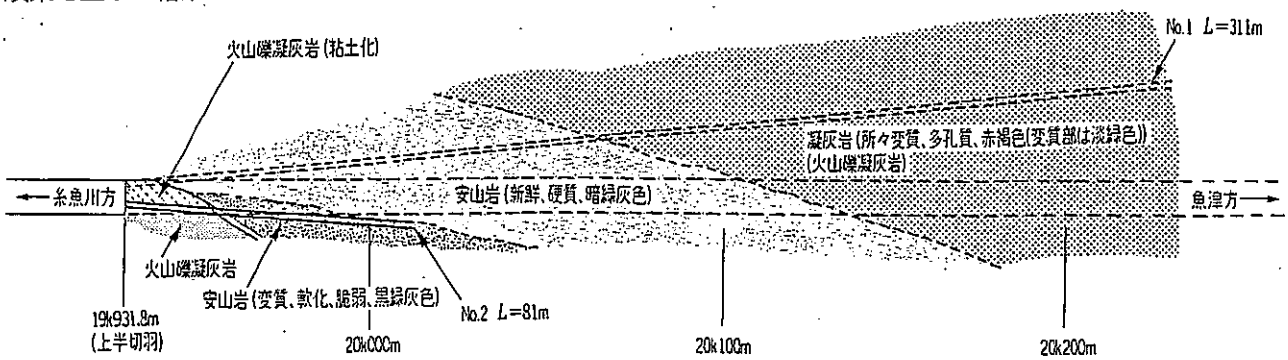


図-6　水平ボーリングによる地質調査結果

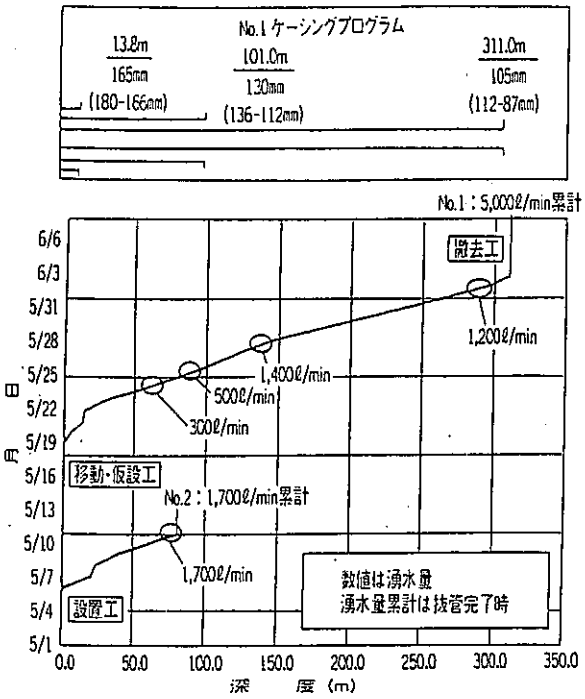


図-7　先進ボーリング実績工程

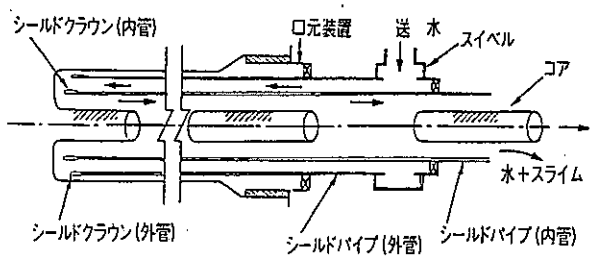


図-8　二重管リバースサーキュレーションコアリング

したがって，湧水による粘土部分の鏡の崩落が懸念されるため，ウレタンの鏡注入および先受け注入の導入を検討することにした．

7. トンネル変形計測

7-1　B計測

B計測の計器配置図を図-9に示す．

（1）　地中内変位

地中内変位の経日変化および区間ひずみ分布を図-10, 11に示す．これらから以下のことがわかる．

・天端部では，深度12mを計測の不動点と見なしても，深度10m位置の変位量は約20mm内空側に変位することから，掘削影響は数10mに及ぶことが想定される．

（2）　ロックボルト軸力

ロックボルト軸力分布を図-12に示す．これから以下のことがわかる．

・約4～6％の大きなレベルのひずみが認められる右SL部では，ロックボルトの軸力分布に明瞭なピークは現れず，なだらかに分布する．

・約2％程度のひずみが発生するような天端や左SLの地山では，ロックボルト軸力計測で一般に現れるような明確なピークが深度2～3mの位置に現れる．

（3）　吹付けコンクリート軸応力

吹付けコンクリート軸応力の経日変化を図-13に示す．これから以下のことがわかる．

・天端部では，トンネル形状が円形である形状効果により変位は拘束され，約100kgf/cm²の圧縮応力となる．

計測項目	記号		数量
ロックボルト軸力測定	⊢⊸	RB1～RB5	6m：5か所×7測点
地中内変位測定	⊢⊸	E1～E5	20m：1か所×8測点 12m：4か所×8測点
吹付けコンクリート応力測定	△	T1～T5	5か所
鋼支保工応力測定	□	G1～G5	5か所(N,M,Q)

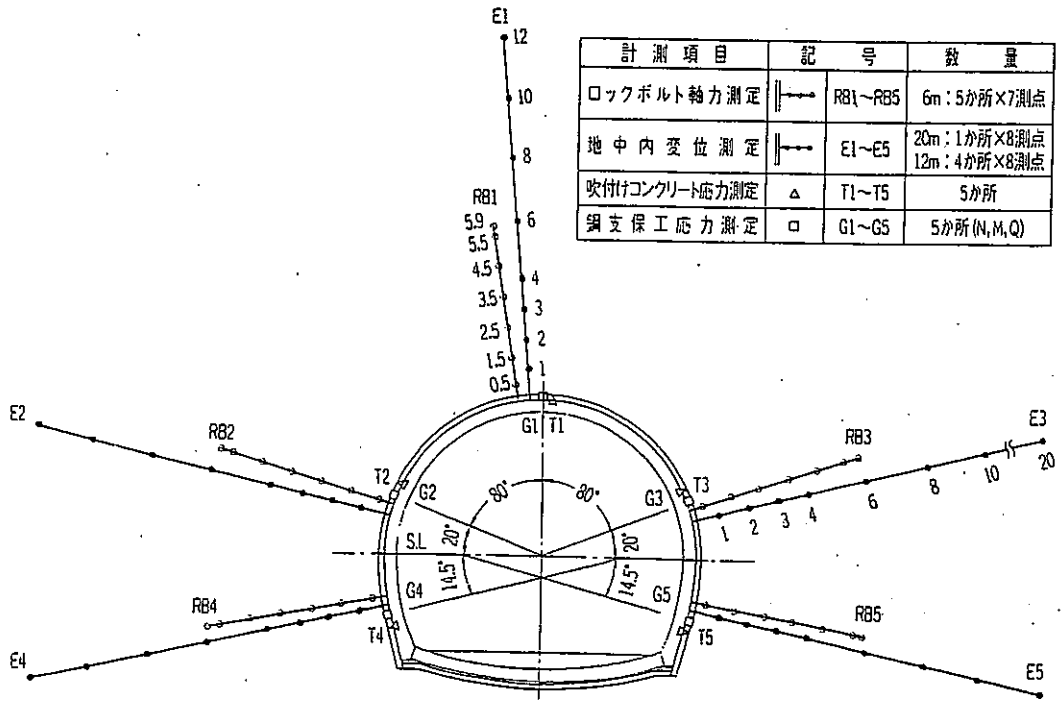


図-9　計器配置図

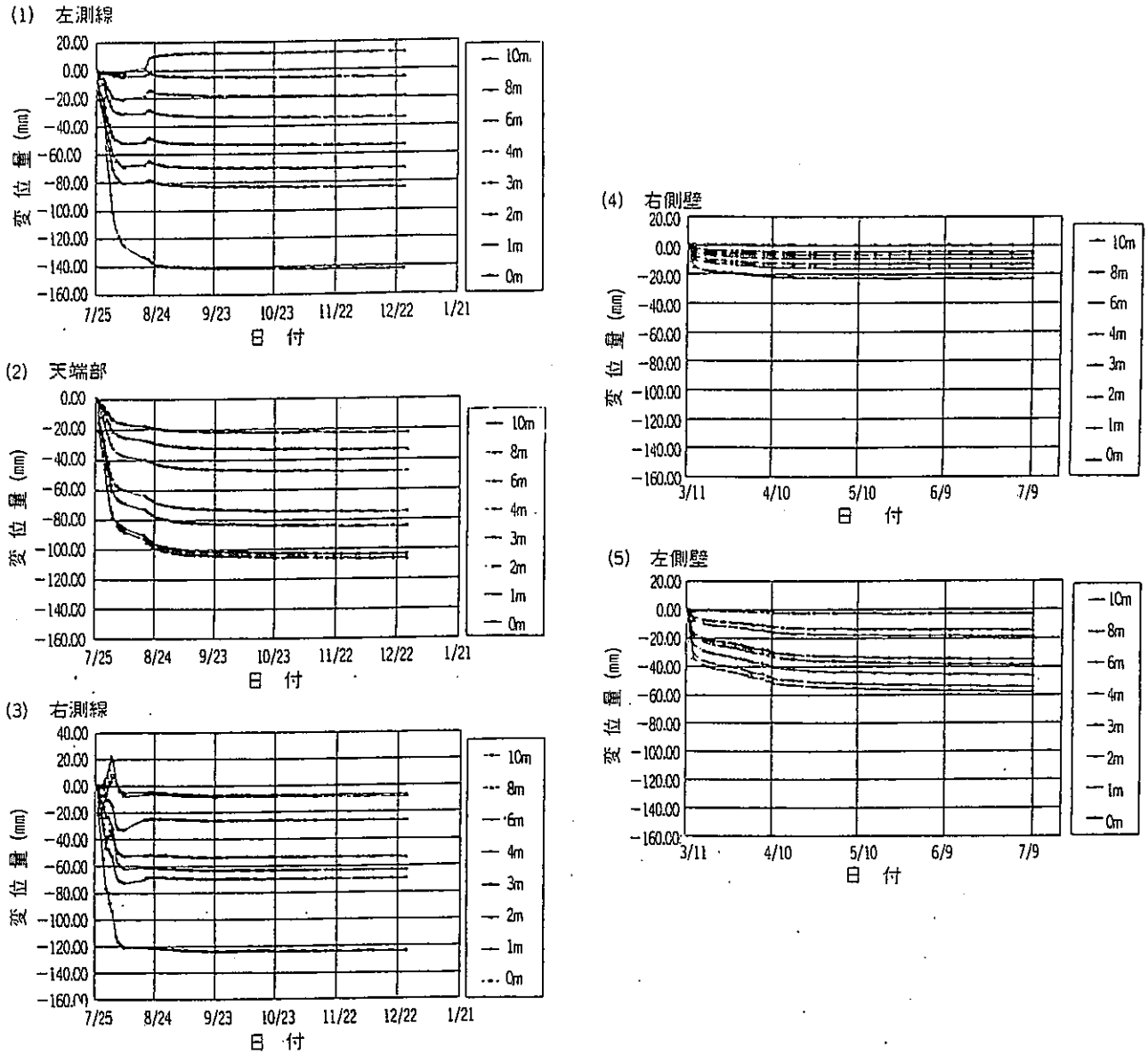


図-10　地中内変位経日変化図

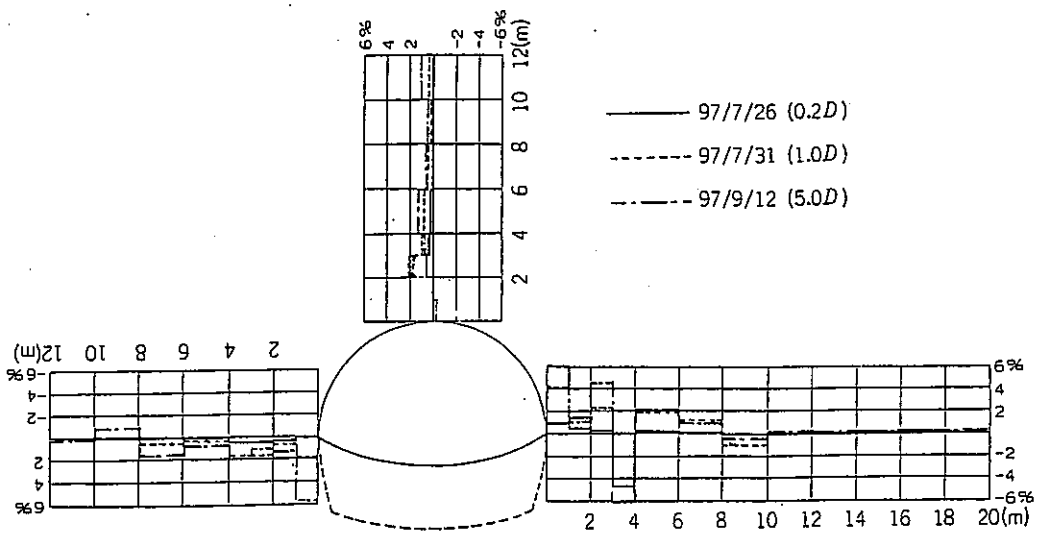


図-11　地中内区間ひずみ分布図

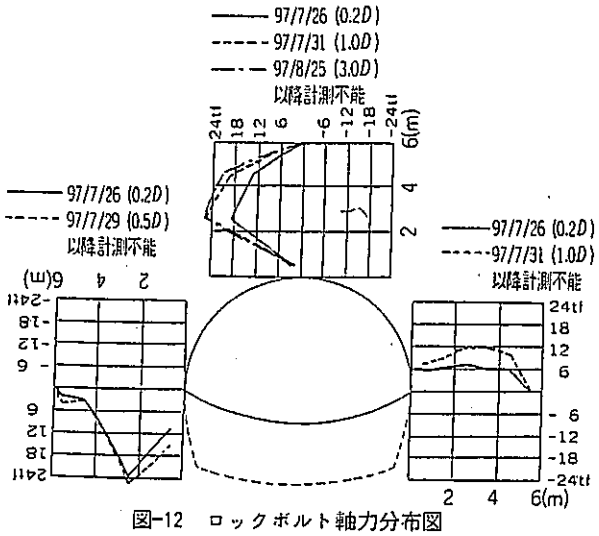


図-12　ロックボルト軸力分布図

・左 SL 部では，天端部での変位拘束と，背面地山と吹付けコンクリート間の十分な付着により，約120kgf/cm² の圧縮応力となる．

・右 SL 部では，約4～6％の大きなレベルのひずみがトンネル周辺地山に分布する．ここでは，吹付けコンクリートに地圧が軸応力として円滑に伝達されない（図-13，右 SL 軸応力参照）．

・下半部では，インバート閉合の拘束効果によって，吹付けコンクリート軸応力がかなり大きな値を示す．

（4）　鋼製支保工断面力

鋼製支保工軸力の経日変化を吹付けコンクリート軸力とともに示し，これと吹付けコンクリートとの軸力分担率の経日変化を図-14 に示す．また，鋼製支保工曲げモーメントの経日変化を図-15 に示す．

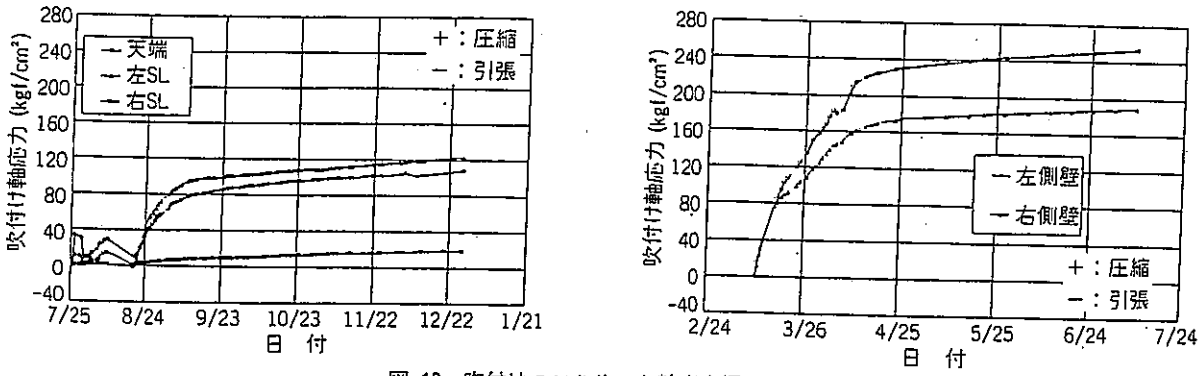
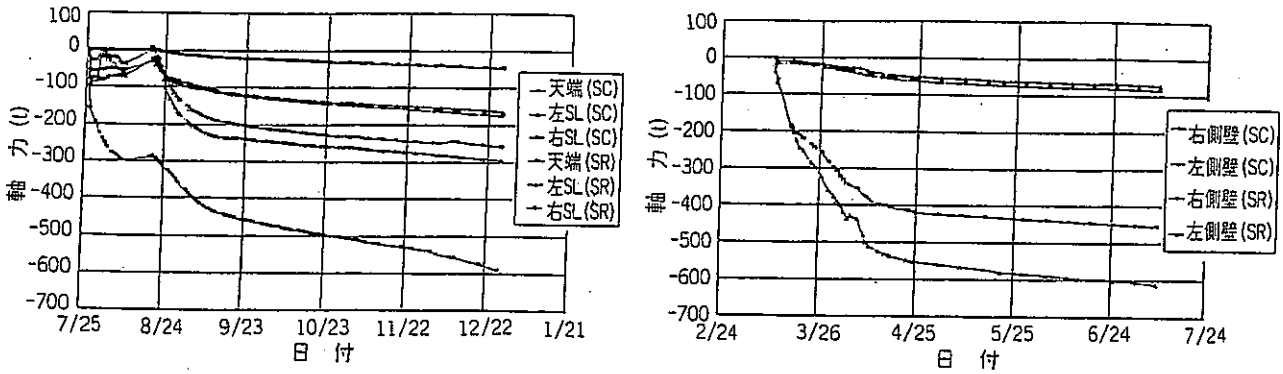
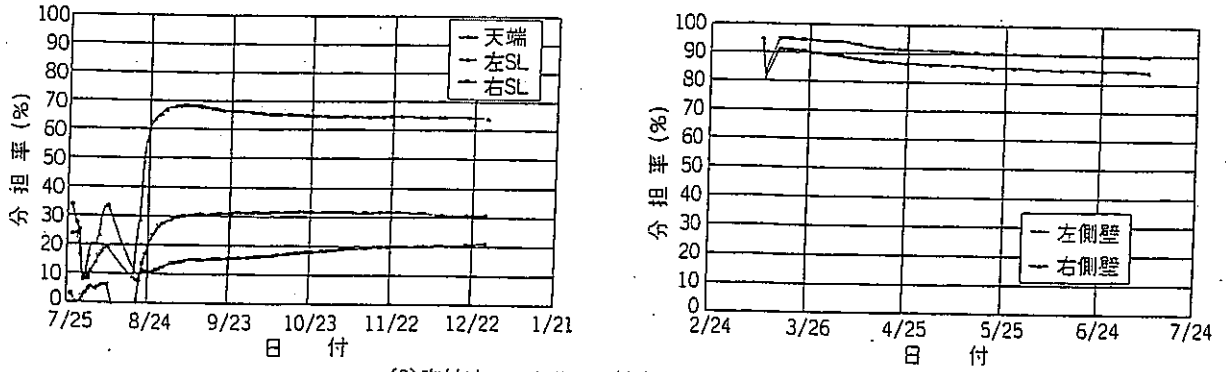


図-13　吹付けコンクリート軸応力経日変化図



(1)吹付けコンクリート(SC)と鋼製支保工(SR)の軸力経日変化図



(2)吹付けコンクリート軸力分担率の経日変化図

図-14　経日変化図

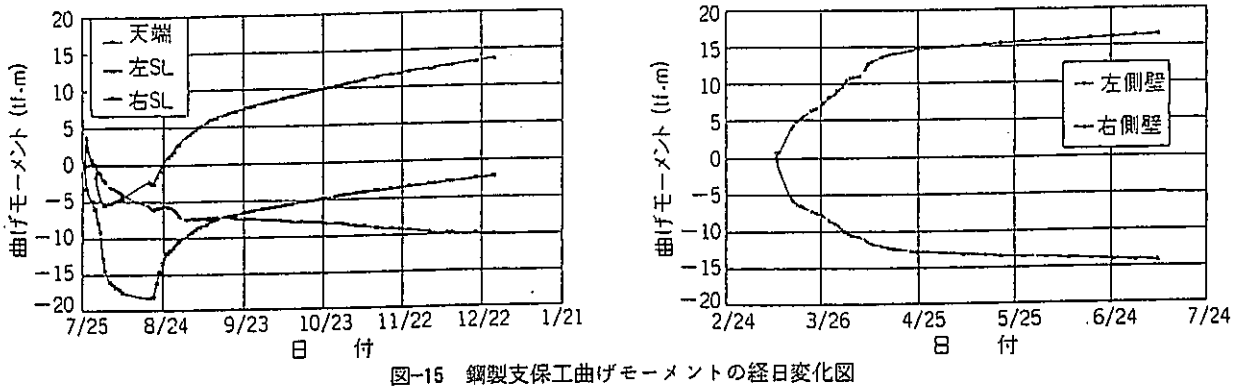


図-15　鋼製支保工曲げモーメントの経日変化図

7-2　有限要素法解析

大変形をシミュレーションできる力学モデルとその適用性を計測値などで調べた．その後に，これを用いてトンネル変形特性を数値解析的に把握した．

ここでは，詳細を省くが，解析結果ではトンネル掘削面から約10mの領域では内空側に大きく変位し，それ以深の変位は小さい．

7-3　得られた知見と考察

7-3-1　支保効果

上半先進工法区間のB計測で得た計測データをもとにして支保効果を推察すると，以下のとおりとなる．

（1）　ロックボルト

長さ4～6mのロックボルトの補強効果は，約2%程度のひずみが発生する地山では軸力分布に明らかなピークが現れることから，その有効性を確認した．また，約4～6%の大きなレベルのひずみがトンネル周辺に分布する右SL部のような地山では，明らかなピークは現れないものの約12tfのロックボルト軸力が発生することから，ある程度有効に機能したと考える．

しかし，計測の不動点を掘削面から12mおよび20mとする地中内変位計測からの地中変位量は，深度10m位置で約5～20mm程度トンネル内空側に変位する．このことから，長さ4～6mのロックボルトによる地中変位の拘束効果は地山全体の変位に対しては期待できない．

（2）　吹付けコンクリート

トンネル掘削により約4～6%の大きなレベルのひずみがトンネル周辺に分布する地山では，吹付けコンクリートに地圧が軸力として円滑に伝達されないため，変位拘束効果はあまり期待できない．さらに薄肉構造の吹付けコンクリート側壁端部は水平方向除荷に対して構造力学的にフリーとなり，変位拘束効果は期待できない．しかしながら，トンネル形状が円形となる天端部では，この形状効果による変位拘束が期待できる．

これらのことから，トンネル掘削面を支保部材で閉合した構造系として構築できれば，吹付けコンクリートが保有する耐力以内で変位拘束効果は発揮できる．このことからも吹付けコンクリートは，有効で主要な支保部材と考える．

（3）　鋼製支保工

曲げ応力度が部材の耐力をはるかに超えて発生していても，鋼製ストラットによる仮閉合によってトンネル形状の保持は期待できる．

さらにトンネル掘削により約4～6%の大きなレベルのひずみがトンネル周辺に分布する地山では，吹付けコンクリートによる変位拘束効果はあまり期待できない結果となったが，鋼製支保工はこのような地山でも鋼製ストラットによる仮閉合などにより支保効果を発揮する．これらのことから，鋼製支保工は吹付けコンクリートとともに主要な支保部材であると考える[9]．

7-3-2　安定化策

計測結果と解析結果から，地山強度比が0.1を下回るような強度の小さい地山でのトンネル掘削時の有効な安定化策は，以下のものが考えられる．

- 地山強度比が0.1と極端に小さい地山でのトンネルの安定化には，掘削外力に見合う支保剛性と断面性能が必要である．また，支保部材の保有耐力を活かすには，変形余裕を大きく取り，トンネル形状を円形にして早期断面閉合による軸力構造体の構築がもっとも有効である．
- 切羽自立性の高い地山では，切羽直近で早期断面閉合が可能である補助ベンチ付き全断面工法が上半先進工法に比べて優位な場合が多い．不安定な切羽では，短いベンチ長で下半とインバートを同時施工とする早期断面閉合が有効である．

8. 高耐力支保工の効用と効果

8-1　対策工の条件

（1）　インバート早期閉合：これまでの掘削状況から，インバート早期閉合による変位の抑制はもっとも重要である．

（2）　支保剛性：H-250鋼製支保工および30cm厚の吹付けコンクリートが破壊される状況や，収束まで長期

に及ぶ地山の変形特性を考慮すると，支保耐力の絶対的な不足が考えられる．

（3） 変形余裕量：変形を完全に抑制することは不可能と思われるので，十分な変形余裕量を確保しておくことが必要である．大きな変形余裕量で健全な支保を保つにはやはり，十分な支保剛性が必要となる．

8-2　高耐力支保工

前項の条件から，必要な支保剛性の条件を満たすために，鋼製支保工を重ね合わせて建て込むことを考えた．支保工寸法や形状（パイプ状など）を変更するなどの案は，施工性の悪さ，調達の不便性など不利な点も多いと思われたからである．決定した対策工パターンは，以下のとおりである（図-16）．

掘削変形余裕量：300mm
鋼製支保工：外側 H-250，内側 H-150
吹付けコンクリート：外側 t＝300mm，内側 t＝150mm
（上半）SFRC，（下半）プレーン
ロックボルト：TD24-3m×6本，
TD24-4.5m×16本
インバート：H-200 鋼製ストラット
（補強リブ付き），
吹付けコンクリート　t＝200mm，
中央集水管　φ600mm

後述するとおり，従来のように切羽が安定するかどうかは不確実と判断し，ベンチ長 12～24mの上下半交互併進にて掘削することにした．

8-3　切羽安定化策

ボーリングの結果から，切羽の半分を占めると予想される粘土が湧水によって流され崩壊することが懸念された．大規模な止水注入工も検討したが，粘土層と帯水した硬質安山岩層の境界が鏡面で明瞭に現れれば，部分的な遮水注入で対処できると判断した．

そこで，切羽安定化策には注入式鏡ボルト，注入式先受けボルトを採用し，注入材にウレタンを使用した．

施工要領を図-17 に示す．

8-4　高耐力支保工の効果

平成 10 年 7 月 28 日，坑口から 2,951m地点より高耐力支保工を採用して掘削を進めた．

現在までに明らかになった効果を述べる．

（1） 計測結果

高耐力支保工区間とその直前の区間における上半水平測線の計測結果の比較を図-18 に示す．掘削は上半，下半各 12mを交互に掘進した．また，下半の閉合は，中央集水工とともに 1 スパンを 4 mで施工した．

比較から明らかなことは，

① 初期変位速度：重ね合わせた支保工のうち，内枠

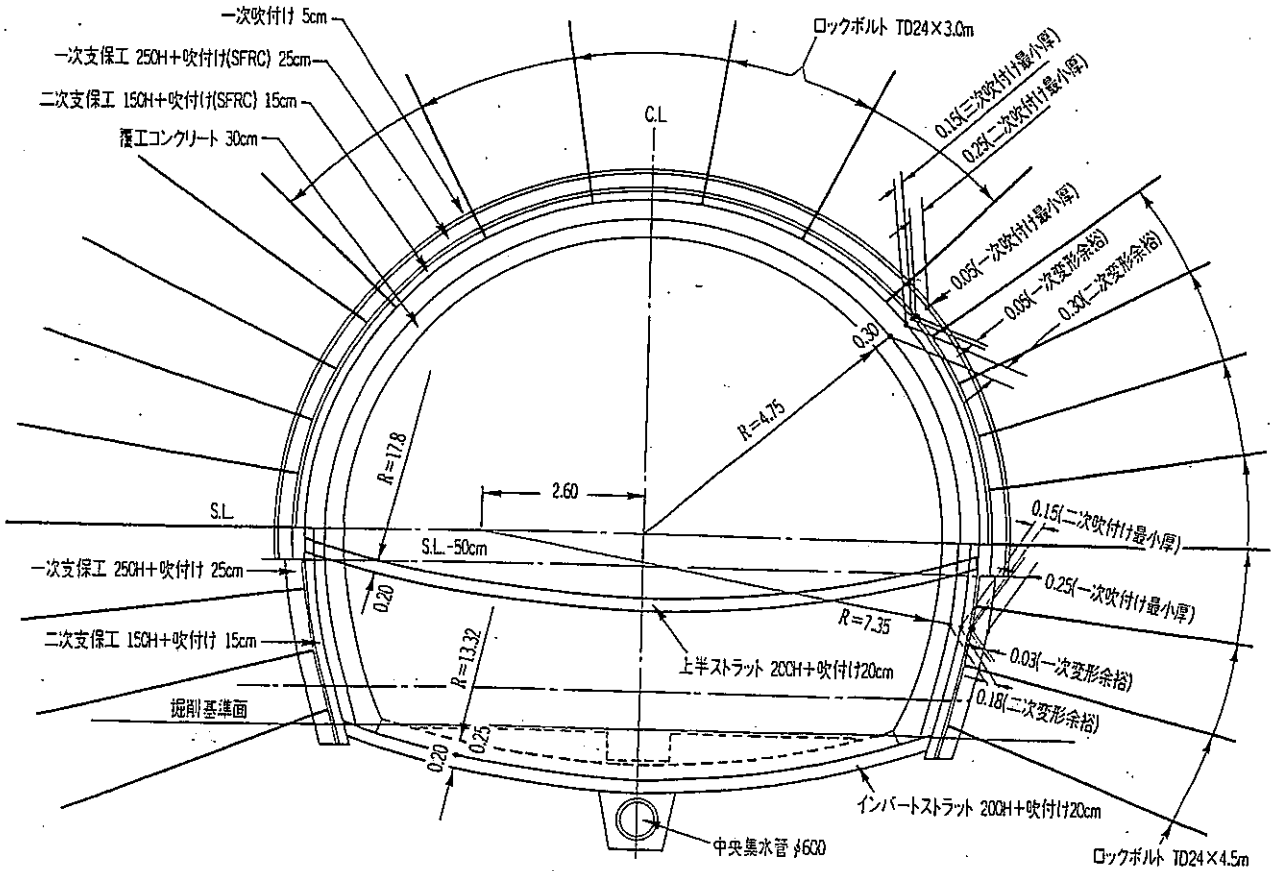


図-16　高耐力支保工

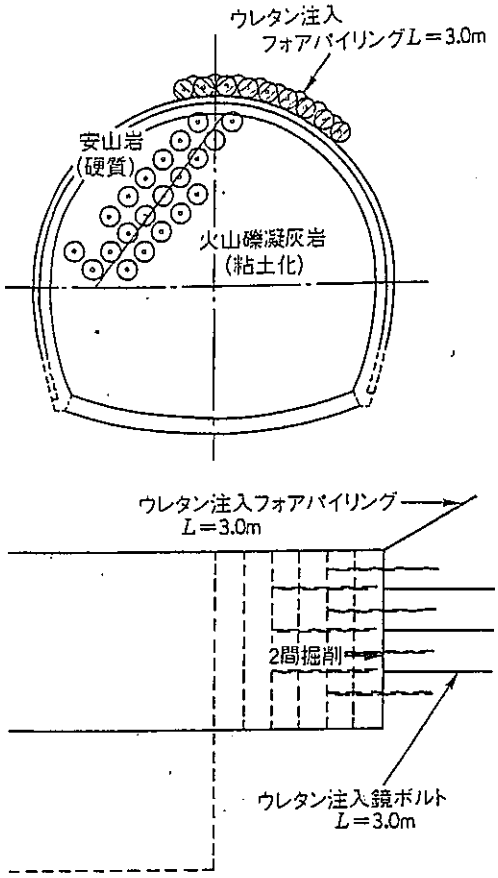


図-17　注入工

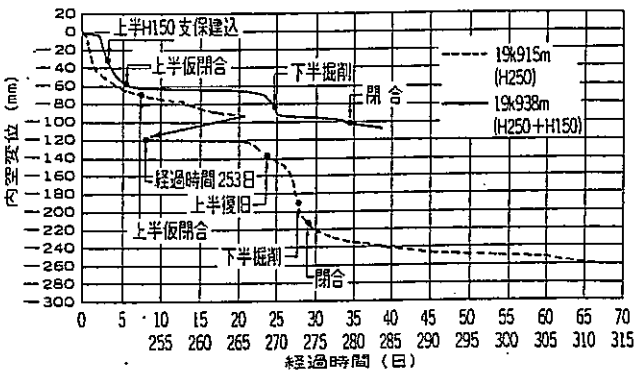


図-18　内空水平変位の比較(上半)

のH-150を建て込むと，変位速度が減速する．

② 累計変位量：収束前であるが，明らかに変位量は減少しており，通常の支保工区間に比べてかなり小さい．

③ 早期閉合効果：インバートストラットによる早期閉合は，これまで同様効果が大きいが，鋼製支保工を重ね合わせた場合はとくに顕著に現れている．

（2） 考　察

初期変位の速度が類似した高耐力支保工区間の測点と通常の支保工区間の測点との比較では，支保工の保有耐力の違いが閉合効果にも影響していることがわかる．早期閉合の効果を十分に得るためには，やはり相応の支保耐力が必要であると思われる．

閉合の結果，最終変位量も当然小さくなるので，吹付けコンクリートのクラックや鋼製支保工の座屈など，支保部材の健全性に影響する因子は，この高耐力支保工区間では回避できると思われる．

9. ま　と　め

第2破砕帯掘削中の状況は，以下のとおりであった．

① 内空変位量が大きく，変形余裕量を超えて設計の覆工巻き厚を侵し，最大554mmに達した．

② 土圧によって，吹付けコンクリート，ロックボルト，鋼製支保工などの支保部材に変形・破壊を生じた．

③ 湧水はなく切羽が自立するため，掘進は可能である．

以上の状況下で，早期閉合や変形余裕量増加などの対策では不十分であることから，有効な支保部材である鋼製支保工と吹付けコンクリートの耐力向上を目指し，鋼製支保工の重ね合わせパターンをサイクル化して試みた．

10. お　わ　り　に

これまでに蓄積されたデータや解析結果，先進ボーリングデータを活用して試行した高耐力支保工の施工結果については，現在途中経過を報告するにとどまるが，データ蓄積がさらに進むにつれて，その効果を明らかにすることができるであろう．

また，これまでの経緯から今後も土かぶりが大きく，一軸圧縮強度が極端に小さい地質構成の破砕帯に遭遇することが十分に考えられる．坑口から3,600m付近には雁蔵断層と呼ばれる活断層が存在するとも言われている．そのときには，今回の実績と経験を十分に活かし，貫通点到達に向けて鋭意努力していきたい．

参　考　文　献

1）日本鉄道建設公団富山新幹線建設準備事務所：北陸新幹線，青海～魚津間　地質概要，pp.16～18，1992.2.

2）佐々木忠俊・西川一正：電動式ローディングショベルとコンテナダンプによる効率的なずり処理工法，北陸新幹線朝日トンネル(東)，建設の機械化，No.573，pp.11～16，1997.11.

3）北川修三・早坂治敏：青函トンネル新技術ミニ事典，土木施工，Vol.29，No.3，pp.48～59，1988.3.

4）北村　章・平野邦彦・深沢成年・早坂治敏：青函トンネル本坑最深部施工時の地山挙動と支保効果について，土木学会論文集，No.385／VI-7，pp.106～115，1987.9.

研究

土かぶりが大きいトンネルの支保設計に関する一考察

真下英人*

1. はじめに

吹付けコンクリート，ロックボルト，鋼製支保工などを支保部材とする山岳工法によるトンネルの支保設計の基本的な考え方は，トンネル周辺地山の安定を図り，トンネル掘削時に発生する変形量を所定の量に収めるのに必要な内圧を支保圧として地山に与えることにある．トンネル周辺地山の安定を図るという観点からは，地山が弾性状態にあれば基本的に地山は安定しており，また，地山が弾性領域にある場合にはトンネルの機能に必要な内空断面を侵すほどの大きな変位は発生しにくいことから，地山に塑性領域を発生させないような支保圧を与えることが支保設計を行う場合の一つの基準となる．しかし，既存の支保部材によって与えることのできる支保圧には限界があるため，地山条件によっては塑性領域の発生を防ぐことが困難となる．その場合は，支保部材の変状を極力防ぐとともに発生変形量を内空断面の確保や緩み荷重の発生防止の観点から定まる変形量内に収めることが支保設計を行う際の一つの基準となる．

ところで，支保工の設計法としては，地山の弾性波速度などを指標として地山をその性状により，いくつかの等級に区分してこれまでの実績からあらかじめ設定した標準支保パターンをあてはめる方法が一般に用いられている．しかし，土かぶりが非常に大きく，地山強度に比較して土かぶり圧が卓越する場合には，標準支保パターンでは対応できないほどの非常に大きな荷重がトンネルに作用するために上述した考え方にもとづいた独自の支保パターンの設定が必要となる場合がある．これまでの施工実績によれば，とくに泥岩，粘板岩，頁岩，泥質片岩などの泥質岩系の地山でこのような対応が多く取られている．現在のところ，このような標準支保パターンが適用できない場合の支保工の設計法として理論解析あるいは数値解析などの解析的手法が用いられる場合が多い．必要な支保規模を設定する方法の一つとしてトンネル変形量とトンネル壁面に作用する内圧との関係を示す地山特性曲線に支保工変形量と支保工に作用する荷重(支保圧)との関係を示す支保工特性曲線を重ねる方法，いわゆる地山特性曲線法の適用が考えられる．しかし，標準支保パターンが適用できないほどの大きな荷重が作用する場合には，トンネル周辺地山に塑性領域の発生を考慮した弾塑性の取り扱いが必要となり，地山物性値の設定法，実挙動との整合性など地山特性曲線法を適用するに際して不明な点が多く残されている．

また，土かぶりが大きいトンネルの支保規模を設定するうえで，既存の支保部材が与えることができる支保圧と地山挙動との関係をあらかじめ把握しておくことは非常に重要となる．

本研究では，このようなトンネル掘削に伴って周辺地山が破壊する土かぶりが非常に大きいトンネルの支保規模を地山特性曲線法により設定する場合に着目すべき地山物性値，支保工の特性と地山挙動との関係に関して弾塑性理論解を用いたパラメトリックスタディにより考察を加えるとともに，地山特性曲線法と実挙動との整合性を実トンネルを対象にした解析と現場計測結果との比較により検証した．

2. 解析方法

2-1 地山特性曲線

地山特性曲線は，トンネル周辺地山の力学的特性，とくにピーク強度以降の応力とひずみの関係に大きく支配されるが，上述したような問題となる泥質岩系の地山においてはピーク強度後はひずみ軟化の挙動を示すため，ピーク強度以降の挙動にひずみ軟化特性を考慮した弾塑性理論解を地山特性曲線に用いることとした．ひずみ軟化特性を考慮した弾塑性理論解としてはBrownら[1]が塑性領域の体積変化の影響を考慮し，破壊規準に自ら求めた経験的規準を適用した解を求めており，北川ら[2]はBrownらの理論解析法にMohr-Coulombの破壊規準とひずみの拘束圧依存性を加味した解を求めている．

*建設省土木研究所道路部トンネル研究室長

本研究では，これらを基本として以下の条件下における弾塑性理論解を用いることとした．

① 地山は等方均質で，初期応力状態は圧力p_0の静水圧状態にあるものとする．

② トンネル形状は半径R_0の円形とし，平面ひずみ状態にある．

③ 応力とひずみの関係は，図-1に示すようにピーク強度後の挙動がひずみ軟化を示した後，残留状態(流動状態)に達するトリリニアーモデルを用いることとし，ピーク強度時の軸ひずみに対する残留状態に達したときの軸ひずみの比をαとする．

④ 破壊規準としてMohr-Coulombの破壊規準を考え，ピーク強度はc，ϕ，残留強度はc_r，ϕ_rで表される．

⑤ 地山は破壊後，体積膨張を起こすものとし，主ひずみと体積ひずみとの関係は図-2に示すトリリニアー型を考える．ひずみ軟化領域における最大主塑性ひずみと最小主塑性ひずみとの比をh，塑性流動領域における最大主塑性ひずみと最小主塑性ひずみとの比をfで定義する．

2-2 支保工特性曲線

吹付けコンクリートおよび鋼製支保工に作用する支保圧p_c，p_sと変位u_c，u_sとの関係については薄肉円筒理論から求まる次式により与えることとした．

吹付けコンクリート：

$$u_c = \frac{R_0 \cdot p_c}{k_c} \qquad (1)$$

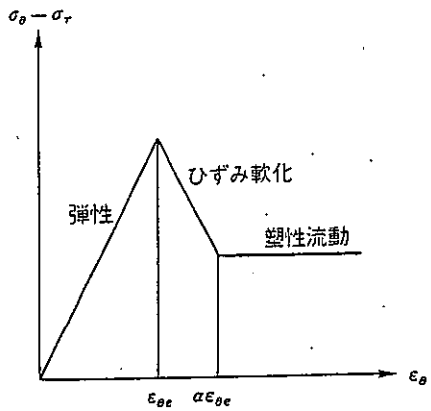


図-1 解析に用いた応力とひずみの関係

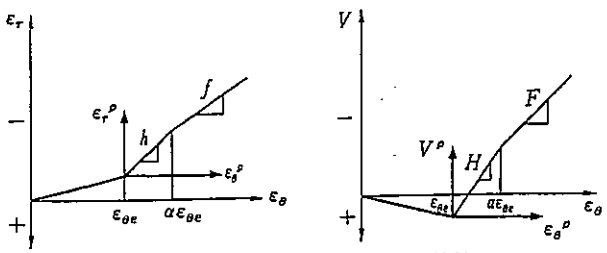


図-2 塑性領域におけるひずみ特性

ここに，

$$k_c = \frac{E_c \cdot h_c}{R_0}$$

鋼製支保工：

$$u_s = \frac{R_0 \cdot p_s}{k_s} \qquad (2)$$

ここに，

$$k_s = \frac{E_s \cdot A_s}{R_0 \cdot d_s}$$

ただし，E_c：吹付けコンクリートの弾性係数
h_c：吹付けコンクリートの厚さ
E_s：鋼製支保工の弾性係数
A_s：鋼製支保工の断面積
d_s：鋼製支保工の建て込み間隔

をそれぞれ表す．

ロックボルトについては，その効果の評価が難しいがここでは計算を容易にするため図-3に示すように，断面内に換算ピッチd_bで打設されたロックボルトは，1本が$d_b \cdot d_s$の面積の吹付けコンクリートに一様な内圧p_bを与え，その反力としてロックボルトに発生する軸力$N_{rb}=p_b \cdot d_b \cdot d_s$はロックボルトの先端部において地山に伝達されるものと考えた．ロックボルトの効果をこのようにモデル化するとロックボルトと一体構造となった吹付けコンクリートに支保圧p_cが一様に作用したときの吹付けコンクリートに発生する変位u_cは次式により与えられる．

$$u_c = \frac{R_0 \cdot p_c}{k_{cb}} \qquad (3)$$

ここに，

$$k_{cb} = \frac{k_c}{1 - \dfrac{1}{\left(\dfrac{d_b \cdot d_s \cdot l_b \cdot E_c \cdot h_c}{E_b \cdot A_b \cdot R_0^2} + 1\right)}}$$

ただし，E_b：ロックボルトの弾性係数
A_b：ロックボルトの断面積
l_b：ロックボルトの長さ

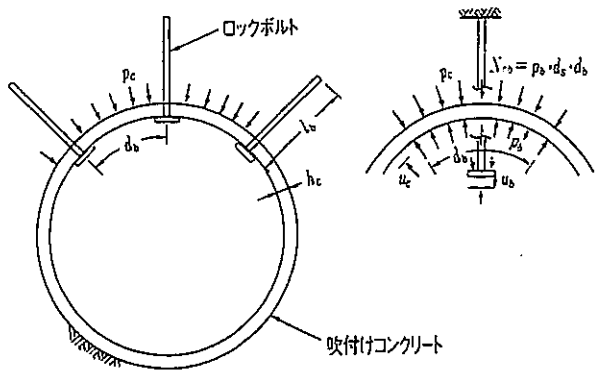


図-3 ロックボルトモデル

また，吹付けコンクリート，鋼製支保工，ロックボルトから構成される支保工に作用する支保圧 p_i と支保工に発生する変位 u_c との関係は次式で与えられる．

$$p_i = \frac{k_{cs} \cdot u_c}{R_0} \qquad (4)$$

ここに，$k_{cs}=k_{cb}+k_s$

支保剛性と支保圧との関係については，各支保部材が降伏する支保圧以下の場合には式(4)に示した支保剛性を有するが，降伏する支保部材が発生した場合のそれ以降の剛性は降伏していない部材のみの剛性を考えることとし，最大支保圧(耐荷力)$p_{c\,max}$ は次式により与えることとした．

$$p_{c\,max} = \frac{\sigma_{c\,max} \cdot h_c}{R_0} + \frac{N_{rb\,max}}{d_b \cdot d_s} + \frac{\sigma_{s\,max} \cdot A_s}{R_0 \cdot d_s} \qquad (5)$$

ここに，$\sigma_{c\,max}$：吹付けコンクリートの圧縮強度

$N_{rb\,max}$：ロックボルトの破断強度

$\sigma_{s\,max}$：鋼製支保工の圧縮強度

3. パラメトリックスタディによる地山挙動と支保工の検討

地山特性曲線をひずみ軟化を考慮した弾塑性モデルを使用して求める場合には多くの地山物性値の設定が必要となるが，すべての物性値を精度よく求めることには限界がある．

また，得られる物性値の多くは点の情報であり，地山全体の代表値とするには不確定な要素が残る場合が多い．したがって，支保規模を地山特性曲線法により設定する場合は，各物性値が地山特性曲線に及ぼす影響度を事前に把握し，地山物性値の中でとくに重要な物性値を明らかにしておく必要がある．

このため，各地山物性値をパラメータとしたパラメトリックスタディにより，各物性値が地山特性曲線に及ぼす影響を塑性領域の発生および変位に着目して検討した．さらに，これらの結果を用いて既存の支保部材が与えることができる支保圧，変形性能と地山挙動との関係について考察を行った．

3-1 解析に用いた物性値

表-1 はパラメトリックスタディに用いた基本物性値である．地山の初期応力 p_0 は土かぶり 400m 程度の地山の全土かぶり圧に相当する 100kgf/cm² とした．一軸圧縮強度 q_u，内部摩擦角 ϕ，脆性率 α，ひずみ軟化領域および塑性流動領域における縦ひずみと横ひずみの比 h，f，ポアソン比 ν は，一般的な軟岩を想定して設定し，弾性係数 E については $E=100q_u$ の関係[3] を用いた．また，残留強度の粘着力 c_r および内部摩擦角 ϕ_r はそれぞれ $c_r=c/2$，$\phi_r=\phi/2$ と仮定して設定した．なお，対象トンネルの大きさは標準的な 2 車線の道路トンネルの掘削幅とほぼ同一の外径となるように R_0=600cm とした．

表-1　パラメトリックスタディに用いた基本地山物性値

初期応力 p_0(kgf/cm²)	100
弾性係数 E(kgf/cm²)	10,000
ポアソン比 ν	0.3
一軸圧縮強度 q_u(kgf/cm²)	100
粘着力 c (kgf/cm²)	28.9
内部摩擦角 ϕ(°)	30
残留強度の粘着力 c_r(kgf/cm²)	14.4
残留強度の内部摩擦角 ϕ_r(°)	15
脆性率 α	1.5
ひずみの比(ひずみ軟化領域) h	1.5
ひずみの比(塑性流動領域) f	1.5

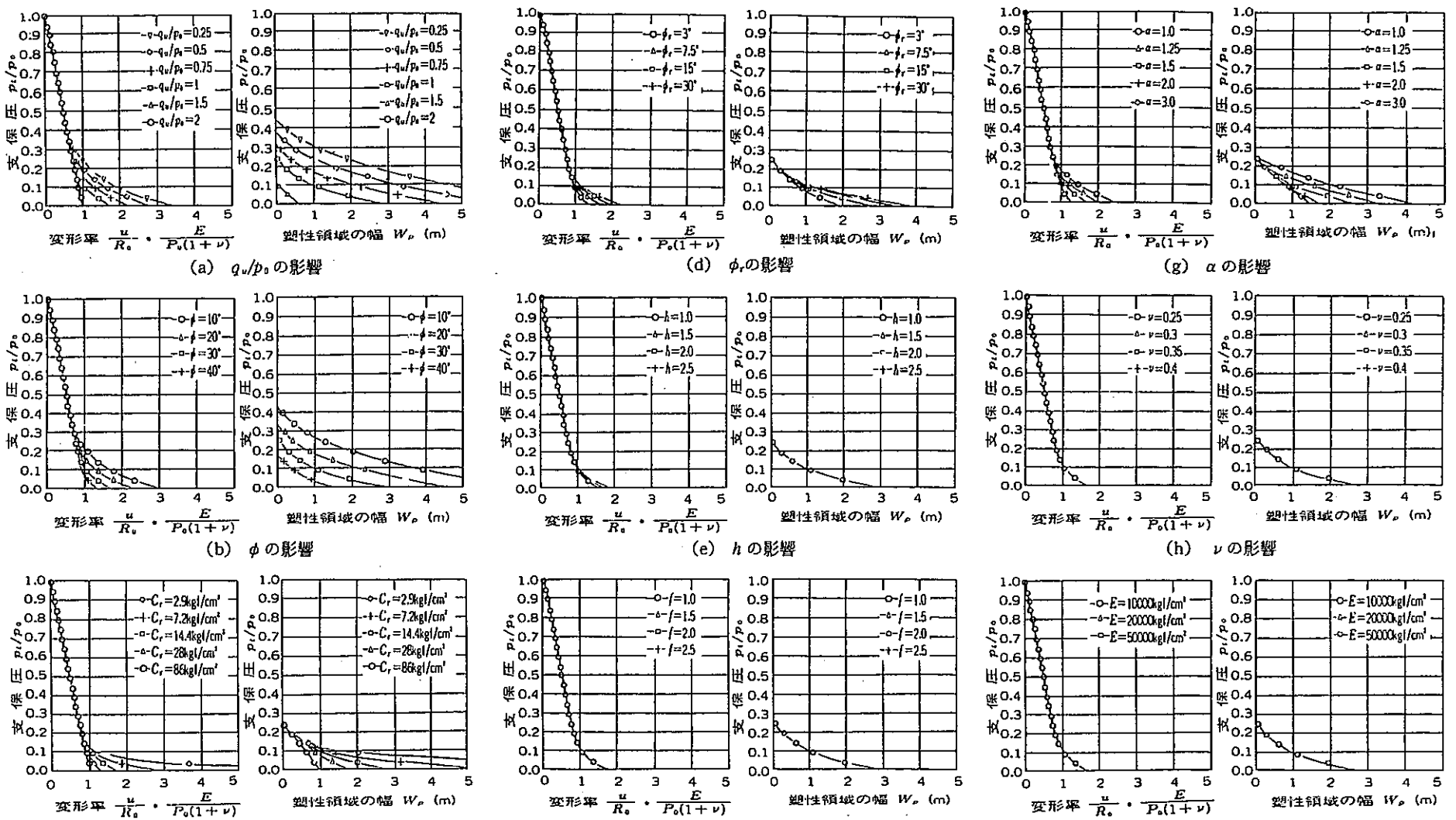
3-2 解析結果と考察

(1) 塑性領域の発生

図-4 は各物性値が地山特性曲線および塑性領域におよぼす影響を示したものである．ただし，各図の支保圧 p_i および変位 u は p_0 および $R_0 \cdot p_0 \cdot (1+\nu)/E$ によりそれぞれ規準化している．塑性領域が発生するときの支保圧 p_{cr} は，地山強度比 q_u/p_0 および内部摩擦角 ϕ の影響を大きく受けるが，その他の地山物性値の影響は受けないことがわかる．

図-5 は，地山強度比 q_u/p_0 および内部摩擦角 ϕ を p_0 が 100kgf/cm² の場合と同一の値にして初期応力 p_0 を50 kgf/cm² とした場合の地山特性曲線である．塑性領域が発生するときの支保圧 p_{cr} の初期応力 p_0 に対する比率 p_{cr}/p_0 は，初期応力が 100kgf/cm² のときと同じ値を示しており，q_u/p_0 および ϕ が同じであれば p_{cr}/p_0 は初期応力に関係なく一定の値を示すことがわかる．したがって，ある初期応力に対して p_{cr}/p_0 と q_u/p_0 および ϕ との関係を求めておけば，これらの関係を用いてトンネル周辺地山に塑性領域の発生を抑制するのに必要となる支保圧を任意の初期応力に対して求めることが可能となる．

図-6 は地山特性曲線から塑性領域が発生するときの p_{cr}/p_0 を求め，q_u/p_0 および ϕ との関係を示したものである．ϕ が一定であれば p_{cr}/p_0 は q_u/p_0 と比例関係にあり，また，q_u/p_0 が小さい領域においては ϕ の影響が非常に大きいことがわかる．したがって，塑性領域の発生を抑制するのに必要な支保圧は，地山強度比のみならず内部摩擦角にも支配される．とくに地山強度比が小さい場合は内部摩擦角の評価が重要となる．また，図-6 からは，道路トンネルに用いられる標準的な支保工によって地山に塑性領域の発生を抑制することができるのは非



(a) q_u/p_0 の影響　(b) ϕ の影響　(c) C_r の影響　(d) ϕ_r の影響　(e) h の影響　(f) f の影響　(g) α の影響　(h) ν の影響　(i) E の影響

図-4　地山物性値が地山特性曲線・塑性領域に及ぼす影響

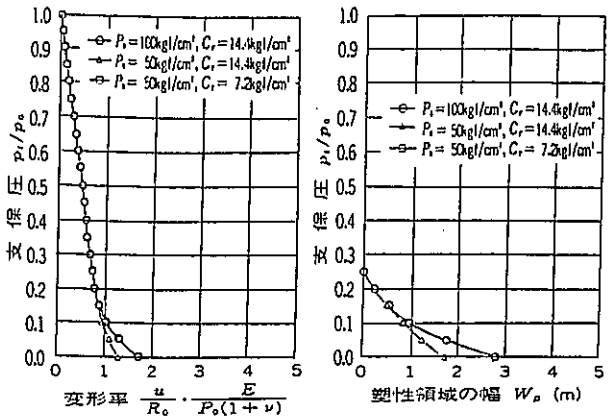


図-5　初期応力が地山特性曲線・塑性領域に及ぼす影響

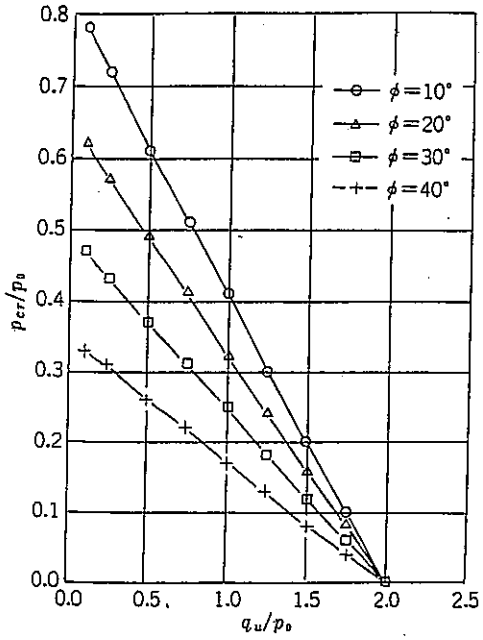


図-6　塑性領域が発生するときの支保圧と地山強度比・内部摩擦角との関係

常に限られた条件の場合であり，多くのトンネルでは塑性領域の発生は避けられないこともわかる．例えば，地山強度比が1で内部摩擦角が30°の場合，塑性領域の発生を抑制するためには初期応力の約25%の支保圧が必要となるが，道路トンネルに適用される標準支保パターンにおいてもっとも重い支保となるD_{II}パターンを用いた場合においても期待できる支保圧(耐荷力)は最大でも10kgf/cm²程度であるため，支保工の内圧効果により塑性領域の発生を防ぐことができるのは初期応力が40kgf/cm²程度までの地山であり，土かぶりにして150m程度となる．

以上，要するに地山特性曲線を用いてトンネル周辺地山に塑性領域の発生を抑制するのに必要となる支保圧を求める場合は，地山強度比q_u/p_0と内部摩擦角ϕに着目すればよいが，通常用いられる支保工により塑性領域の発生を抑制できるのは非常に限られた条件の場合となる．

（2）　変位抑制と支保工の安定

変位および塑性領域の範囲に及ぼす地山物性値の影響については，図-4から地山強度比q_u/p_0，内部摩擦角ϕ，残留粘着力c_r，脆性率αの影響が大きいこと，残留内部摩擦角ϕ_rはq_u/p_0，ϕ，c_r，αに比較すると影響は小さいこと，ひずみ軟化領域および塑性流動領域における縦ひずみと横ひずみの比h，fの影響は小さいことがわかる．ただし，残留内部摩擦角ϕ_rは，地山強度比，内部摩擦角，脆性率が小さい領域においては影響が大きく現れること，また，h，fは地山強度比，内部摩擦角，脆性率が小さい領域においても影響は比較的小さいことが別途実施した解析結果により明らかとなっている．弾性係数Eおよびポアソン比νについては，塑性領域の範囲には影響は全く及ぼさず，変位に関しても$R_0\cdot p_0\cdot(1+\nu)/E$により規準化すれば影響が現れないことがわかる．なお，初期応力p_0の影響に関しては，図-5(p_0=50kgf/cm²として残留粘着力c_rを変化させた場合の結果も示したもの)から，一軸圧縮強度q_uと残留粘着力c_rを除く物性値が同一でq_u/p_0，c_r/p_0が同一であれば変形率および塑性領域の範囲は初期応力に関係なく一定となることがわかる．

図-7は支保圧がゼロの場合の変形率と内部摩擦角および地山強度比との関係を示したものである．変位に対しては上述したように地山強度比q_u/p_0，内部摩擦角ϕ以外にも脆性率α，残留粘着力c_rの及ぼす影響が大きいため，本図だけを用いて変位の絶対量を予測することはできない．しかし，変形は地山強度比が1.5を切ると急激に増加する傾向にあり，また，内部摩擦角が大きい地山は小さい地山と比較すると地山強度比の影響の程度

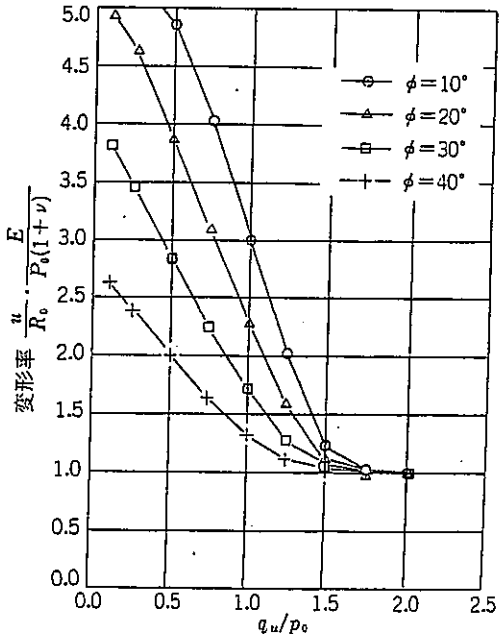


図-7　変形率と地山強度比・内部摩擦角との関係

が小さいことがわかる.

次に，図-4 で得られた変形率を用いて支保工の安定性に関して考察を加えると，トンネルの周辺地山に塑性領域が発生した場合は，トンネルには支保工の変形性能を越えた変形が発生し，支保工に変状が発生するケースが多くなることがわかる. 例えば, 前述した道路トンネルに適用される D_{II} パターンの場合は変形率 u/R_0 が最大でもおおむね 1% を越えた場合には，支保工に変状が発生するため, 初期応力 100kgf/cm², 弾性係数 10,000kgf/cm²，ポアソン比 0.3 の地山にトンネルを掘削した場合には，支保工の変形率 $u/R_0 \cdot E/(p_0 \cdot (1+\nu))$ の値が 0.77 を越えた場合に支保工に変状が発生することになる. 支保工は地山の初期応力が 30% 解放された状態で施工されるものと考えると支保工特性曲線の開始点は $u/R_0 \cdot E/(p_0 \cdot (1+\nu))$ の値が 0.3 の位置となるため，地山特性曲線と支保工特性曲線の交点における $u/R_0 \cdot E/(p_0 \cdot (1+\nu))$ の値が 1.07 を越えた場合には支保工に変状が発生することになる.

一方，D_{II} パターンの支保工の耐荷力は最大でも 10 kgf/cm² 程度であるため，地山特性曲線における $p_i/p_0=0.1$ のときの $u/R_0 \cdot E/(p_0 \cdot (1+\nu))$ の値が 1.07 を越えると支保工特性曲線は地山特性曲線と $p_i/p_0=0.1$ のレベルで交差することになり，支保工には耐荷力を越えた支保圧が作用することになる. 図-4 に示すように塑性領域が発生する場合の多くは $p_i/p_0=0.1$ のときの $u/R_0 \cdot E/(p_0 \cdot (1+\nu))$ の値が 1.07 を越えており，支保工の変形がトンネルの変形に追随できるのは非常に限られた条件の場合であることがわかる.

以上，要するに周辺地山に塑性領域が発生してトンネルの変形量まで検討する必要がある場合は，地山強度比 q_u/p_0，内部摩擦角 ϕ，残留粘着力 c_r，脆性率 α の評価が重要となるが，支保工の変形性能がトンネルの変形に追随できるのは非常に限られた条件の場合となる.

4. 実トンネルでの検証

パラメトリックスタディからは，地山特性曲線法を用いる場合に着目すべき地山物性値および通常の支保工により対応できる地山条件は限定されることが明らかとなったが，これらの結果は地山が連続体を前提とした理論どおりの挙動を示すと考えた場合の結果である. このため，これらの妥当性および地山特性曲線法と実挙動との整合性を検証するために，土かぶりが大きい寒風山トンネル[4]での計測データを用いて掘削時の挙動と解析値との比較を行った.

4-1 対象トンネルの概要

対象とした寒風山トンネルは 2 車線の道路トンネルである. 最大土かぶりは 890m で，主要地質は，塩基性片岩混じりの泥質片岩である. 一軸圧縮強度は 200kgf/cm² 程度であり，土かぶりがもっとも大きい地点における地山強度比は約 0.8 となる. 本トンネルの地形は掘進距離の増加に伴って順次土かぶりが大きくなっており，ある土かぶりの地点から支保工に変状が発生して標準的な支保パターンでは対応できなくなったため，掘削時の変位計測結果に応じて支保パターンを表-2 に示すような D_I から D_{VI} までの 5 パターンに変化させた. とくに，支保パターン D_{IV}，D_V，D_{VI} においては支保工の耐荷力の向上を図るためにシリカヒュームを混入させた高強度の吹付けコンクリートを使用した.

表-2 使用した支保パターン

支保パターン	D_I	D_{II}	D_{IV}	D_V	D_{VI}
吹付けコンクリートの厚さ h_c(cm)	15	20	30	30	35
ロックボルトの長さ l_b(m)	4	4	4	4	5
本数 n (本)	17	17	17	21	21
周方向換算ピッチ d_b*(m)	2.1	2.1	2.1	1.7	1.7
縦断方向ピッチ d_t (m)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
鋼製支保工の種別	H-125	H-150	H-200	H-200	H-250
覆工厚さ(cm)	30	30	40	40	40
インバート厚さ (cm)	45	50	50	50	50

※ $d_b=2\pi R_0/n$　n：ロックボルトの本数，R_0：トンネル半径

4-2 現場計測と解析結果の比較

同一断面に対して複数の支保パターンを適用した土かぶり 600m，660m およびもっとも重い支保パターンを適用した 850m の断面について地山特性曲線法から得られる解析結果と計測結果の比較を行い，その整合性を検証した. なお，本トンネルはショートベンチカット工法により掘削が行われており，厳密解を求める場合には段階掘削の影響を考慮する必要があるが，本研究では簡便な取り扱いとして全断面掘削で考えた.

各土かぶりにおいて採用した支保パターンおよび現場計測から得られた最大内空変位量および最大天端沈下量を表-3 に示す. 各支保パターンの最大内空変位量 u_h は 115～173mm，最大天端沈下量 u_c は 43～106mm となり，u_h のトンネル直径 $2R_0$ に対する変形率 ε_h ($=u_h/2R_0$) は

表-3 支保パターンと発生最大変位量の関係

土かぶり (m)	600			660		850
適用支保パターン	D_I	D_{II}	D_{IV}	D_{IV}	D_V	D_{VI}
内空変位量 u_h(mm)	146	115	112	163	173	168
変形率 ε_h(%)	1.3	1.0	1.0	1.4	1.5	1.5
天端沈下量 u_c(mm)	92	63	43	89	106	71
変形率 ε_c(%)	1.6	1.1	0.8	1.6	1.9	1.3

1.0～1.5%，u_cのトンネル半径R_0に対する変形率ε_c（$=u_c/R_0$）は0.8～1.9%となった．ただし，変形率を求める場合のトンネル半径R_0の代表長は560cmとした．また，各支保パターンとも吹付けコンクリートの圧壊，せん断クラック，鋼製支保工の座屈，ロックボルトの頭部破断などの変状が発生したため，増し吹付けコンクリート，増しボルトなどにより対応した．

次に，ボーリングコアを用いた岩石試験および孔内水平載荷試験から求めた地山の物性値(表-4)を用いて得られた土かぶり$h=600$m の地点における地山特性曲線に支保パターンD_I，D_{II}，D_{IV}の支保工特性曲線を重ねて示したものを図-8 に示す．表-4 の地山物性値のうち通常の岩石試験から直接求めることができないα，h，fについてはこれまでに報告されている岩石試験結果を参考に求め，c_r，ϕ_rについては$c/2$，$\phi/2$と仮定したうえで，地山特性曲線に及ぼす影響の大きいc_rについてはある幅を持たせた値を与えてある．また，支保工特性曲線の横軸の開始点は，切羽到達までの応力解放率を30%と考えて地山特性曲線における支保圧が初期応力の70%のときに発生する変形率の位置とした．D_Iパターンについては，支保工特性曲線と地山特性曲線は支保工が降伏する最大耐荷力8.4kgf/cm²のレベルで交差し，そのときの支保工の変形率は約1.0%となるのに対して，観察・計測結果から得られる掘削時の最大内空変位量の変形率は1.3%で支保部材に変状が発生した．同様にD_{II}パターンについては，両曲線は最大耐荷力10.9kgf/cm²のレベルで交差し，そのときの変形率は0.9%となるのに対して，掘削時における最大内空変位量の変形率は1.0%で支保部材に変状が発生した．さらに，D_{IV}パターンについては両曲線は最大耐荷力17.8kgf/cm²のレベルで交差し，そのときの変形率は0.8%となるのに対して，掘削時における最大内空変位量の変形率は約1.0%で支保部材に変状が発生した．

表-4　解析に用いた基本地山物性値

弾性係数 E(kgf/cm²)	16,000
ポアソン比 ν	0.3
一軸圧縮強度 q_u(kgf/cm²)	204
粘着力 c(kgf/cm²)	55
内部摩擦角 ϕ(°)	32
残留強度の粘着力 c_r(kgf/cm²)	27.5 (10～30)
残留強度の内部摩擦角 ϕ_r(°)	16
脆性率 α	1.5
ひずみの比（ひずみ軟化領域）h	1.5
ひずみの比（塑性流動領域）f	1.5

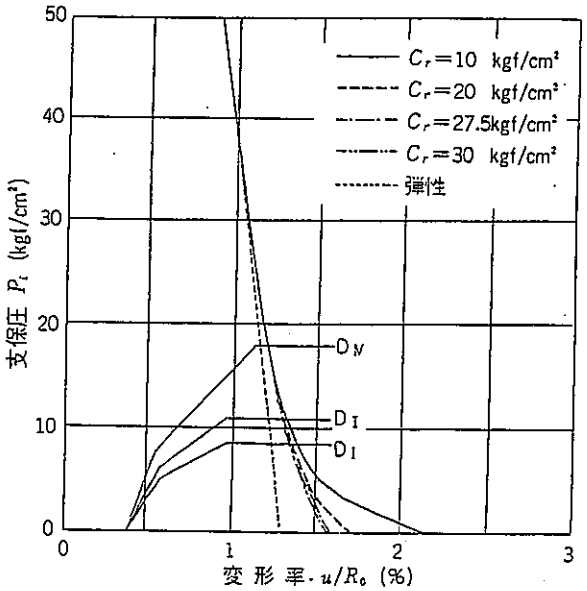


図-8　地山特性曲線と支保工特性曲線($h=600$m)

図-9, 10 は土かぶりが660m，850m の断面について同様に地山特性曲線と支保工特性曲線を示したものである．土かぶりが660m の断面においては，D_{IV}パターンでは最大耐荷力17.8kgf/cm²のレベルにおいて約1.0%の変形率が発生して両曲線は交差し，D_Vパターンでは最大耐荷力20.2kgf/cm²のレベルにおいて約1.0%の変形率が発生して両曲線は交差することがわかる．これらに対して掘削時の観察・計測結果によればD_{IV}，D_Vパターンいずれの断面においても支保部材に変状が発生し，最大内空変位量の変形率はD_{IV}パターンでは1.4%，D_Vパターンでは1.5%となった．

また，土かぶりが850m の断面については，解析結果では最大耐荷力25.8kgf/cm²のレベルで両曲線は交差し，発生する変形率は1.4～1.7%となるのに対して掘削時の最大内空変位量から求まる変形率は1.5%で支保工に変状が発生した．

以上のように，いずれの断面においても採用された支保パターンの支保工特性曲線は最大耐荷力のレベルで地山特性曲線と交差するために支保部材に変状が発生することになり，実挙動においても程度に差があるもののいずれの断面においても変状が発生した結果が得られている．支保工の変形量についても解析値と計測値は多少の差が認められるものの比較的整合した結果が得られており，地山特性曲線法の適用により必要な支保規模，発生変位量をある程度把握することは可能と判断される．ただし，土かぶり600m での検討結果からわかるように塑性領域の発生が小規模な場合には地山特性曲線法から求まる各支保パターンの変形量の差は非常に小さく，変形量を指標として支保の規模を決定することには限界があると言える．また，支保規模に関しては土かぶり660m

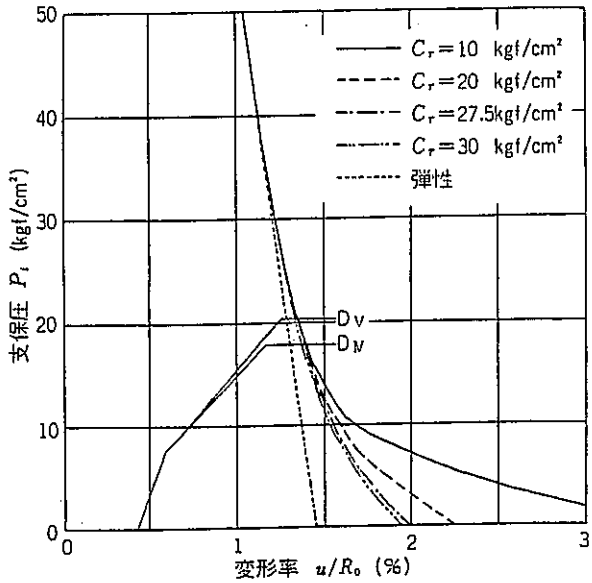


図-9 地山特性曲線と支保工特性曲線(h=660m)

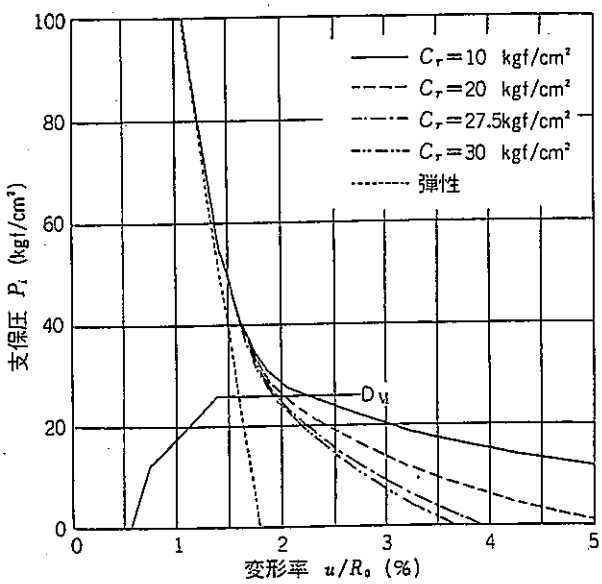


図-10 地山特性曲線と支保工特性曲線(h=850m)

程度までであれば，高強度吹付けコンクリートを使用することにより塑性領域の発生を完全に防ぐことはできないものの最小限に抑えることは可能となるが，土かぶりが850mにもなると，高強度の吹付けコンクリートの使用により与えることができる20数kgf/cm²程度の支保圧では，塑性領域の発生を防ぐことは不可能であり，支保設計には塑性領域の発生をある程度許した考え方が必要となることがわかる．

さらに，施工中に支保部材に変状が発生した場合には変状対策を考えなければならないが，支保規模を大きくして支保部材に変状を全く発生させないようにすることにも限界があり，支保規模の設定にあたっては支保部材に最小限の変状を許したうえで補強を行う考え方が必要なことがわかる．

5. ま と め

土かぶりが非常に大きいトンネルの周辺地山の挙動および支保工の基本特性を弾塑性理論解を用いたパラメトリックスタディにより検討するとともに，地山特性曲線法と実挙動との整合性を実際のトンネルを対象にした解析と現場計測結果との比較により検証した．検討の結果明らかとなった主な点は以下のとおりである．

① トンネルの周辺地山に塑性領域の発生を抑制するのに必要な支保圧 p_{cr} と初期応力 p_0 との比 p_{cr}/p_0 は，地山強度比 q_u/p_0 および内部摩擦角 ϕ によって決まり，ϕ が一定であれば p_{cr}/p_0 は q_u/p_0 と比例関係にあり，また，q_u/p_0 が小さい領域においては ϕ の影響が非常に大きい．また，トンネルの周辺地山に塑性領域が発生する場合のトンネルの変位および塑性領域の範囲は，地山強度比 q_u/p_0，内部摩擦角 ϕ，残留粘着力 c_r，脆性率 α の影響を大きく受ける．

したがって，地山特性曲線法を用いて土かぶりが大きいトンネルの支保規模の設定を行う場合にはとくにこれらの地山物性値に着目する必要がある．

② 既存の支保部材の組み合わせにより地山に与えることができる支保圧は，塑性領域の発生を抑制するのに必要な圧力に比較すると非常に小さいため，塑性領域の発生が抑制できるのは非常に限られた条件の場合となる．また，トンネルの周辺地山に塑性領域が発生する場合，支保工の変形性能がトンネルの変形特性に追随できるのは非常に限られた条件の場合となる．

したがって，土かぶりが非常に大きいトンネルの場合には，既存の支保部材の組み合わせでは塑性領域の発生あるいは支保部材の変状を防ぐことには限界があり，これらをある程度許した設計の考え方をとる必要がある．

③ 地山条件によっては地山特性曲線法により塑性領域の発生を防止するのに必要な概略の支保規模，概略の発生変位量の把握が可能となる場合があるが，支保規模の違いによる発生変位量の差を評価することには限界がある．

6. お わ り に

本研究の結果は，地山が連続体の挙動を示すことを前提とした円形トンネルの理論解にもとづくものであり，亀裂の影響，緩み荷重の発生，時間依存性などは考慮していない．

したがって，本研究は土かぶりが大きいトンネルの挙動のある一面を論じたに過ぎず，得られた結果があては

56

まるトンネルは限られることは言うまでもないことである．とくに，亀裂が卓越するようなトンネルにおいては不連続体の挙動を考慮した別のアプローチが必要になり，今後の課題も多く残されている．

しかし，トンネルの理論として地山特性曲線法の概念が現れてから久しいが，実挙動との比較について報告された事例は非常に少なく，実態が不明なこと，土かぶりが大きいトンネルに対して個別に高度な数値解析法を用いた支保設計は行われているが，設定された支保規模が周辺地山の挙動との関係においてどのような位置づけになっているのか必ずしも明確でないことに対して一つの手がかりが得られたのではないかと考えられる．本研究が今後土かぶりが大きいトンネルの支保設計を考えるうえで参考になれば幸いである．

参考文献

1) Brown, E. T., Bray, J. W., Ladanyi, B. and Hoek, E.: Ground Response Curves for Rock Tunnels, J. Geotech. Engng Div., ASCE, Vol. 109, pp. 15–39, 1983.
2) 北川隆，稲垣大介：軟岩トンネル掘削時の周辺岩盤の変形挙動，土木学会論文集，No. 463/Ⅲ-22, pp. 105–114, 1993.
3) 吉中龍之進，山辺正：軟岩の変形特性について，埼玉大学建設系研究報告，No. 11, pp. 65–85, 1981.
4) 後藤守，岡崎和彦，尾上誠一：高強度吹付けコンクリートにより大土かぶりを克服，一般国道194号寒風山トンネル，トンネルと地下，第29巻1号，pp. 17–24, 1998.

【新刊のご案内】

P.A.ドミニコ，F.W.シュワルツ著

地下水の科学 各B5判 全3巻

地下水の科学研究会　大西　有三　監訳

第Ⅰ巻	地下水の物理と化学	本体価格4,078円	〒380円
第Ⅱ巻	地下水環境学	本体価格4,272円	〒380円
第Ⅲ巻	地下水と地質	本体価格3,689円	〒340円

本書は様々な環境問題を地下水理学の立場から本格的に取り扱うため，水の物理学・化学的性質，地球の状況，水資源としての地下水の状況，地下水の水理学的特性とその調査方法など多岐にわたっており，地質学者，水理地質の実務者，地球化学者ならびに流体力学に関心のある地球物理学者，または，地質学を学ぶ学生など広範に満足させる内容となっている．

<第Ⅰ巻　主要目次>

■序論■岩石における空隙の起源と透水性■地下水の動き■岩石の弾性的な性質と流れの方程式■水理試験（モデル，方法と応用）■溶質と粒子の輸送■汚染物質の水理地質学入門

<第Ⅱ巻　主要目次>

■地下水の化学■化学反応■物質輸送の数字理論■地下水による物質輸送（水質編）■地下水による物質輸送（地質編）■物質の輸送のモデル■輸送プロセスとパラメータ同定■水質浄化の対策

<第Ⅲ巻　主要目次>

■水資源■堆積盆水環境における地下水■地殻における地下水■地下水流動における熱輸送

株式会社 土木工学社　〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂
電話 (03)3267-2888（代） 振替00110-8-190072

57

付録C:鉱山における災害事例と対策の調査　資料集

1．鉱山における災害事例と対策の調査

深地層研究所の立地条件を検討する際に考慮すべき事項として、

・地表下数百m程度の深度を有する位置に到達する

・対象岩盤が堆積岩であり、ガス湧出の可能性がある

・地下に人が入り作業、研究あるいは見学をする

等が挙げられる。

これらの条件を考慮し、深地層研究所の防災計画に資するための地下施設の災害事例と対策の調査を行う対象として鉱山を選択した場合、石炭鉱山を取り上げるのが適当であると考えられる。

調査は以下の順序で行う。

先ず産業別災害発生状況により、鉱業の災害率が高いことを確認する。

次に石炭鉱山における災害発生状況を時系列的に概観する。

災害の種類は大きく頻発災害と重要、重大災害に区分される。それぞれをさらに事由別に整理する。

この区分毎に、個々の災害について調査を行う。

頻発災害については、発生頻度、重大災害の可能性の有無、本研究所への関連性等の観点から、３事由を取り上げ更に細部検討を加える。

重要、重大災害については、それぞれが上記立地条件を考慮した場合、災害発生の可能性がないとは言えず、かつ、発生した場合に与える影響の大きいこと等を考慮して、個々の災害について検討する。

1.1 産業別災害発生状況

産業別の災害発生状況のうち、全産業及び関連業種について度数率、強度率の推移を比較する。表 1-1、図 1-1 に、昭和 48 年から 59 年の度数率の推移を示す。

表 1-1 産業別災害率（度数率）

年	全産業	鉱業	建設業	ずい道新設事業
S48	6．67	58．46	14．22	27．68
49	5．11	31．83	12．34	25．48
50	4．77	29．93	8．22	16．15
51	4．37	24．97	5．96	11．95
52	4．32	28．04	7．63	14．26
53	3．91	24．43	8．43	16．82
54	3．65	24．08	6．92	19．72
55	3．59	23．40	6．67	15．90
56	3．23	20．21	4．55	10．75
57	2．98	16．43	2．71	10．25
58	3．03	14．06	2．28	3．29
59	2．77	13．20	2．20	5．70

［出典］：「石炭鉱山保安統計集」（昭和 60 年 9 月、鉱業労働災害防止協会）p.168

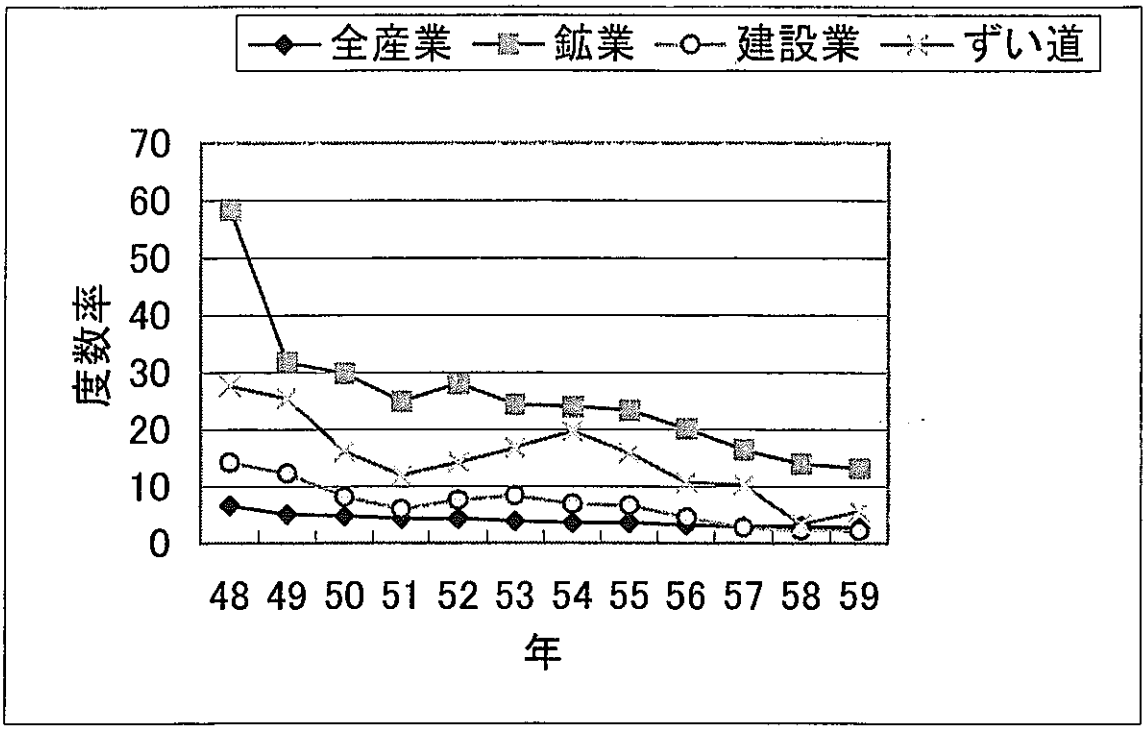


図 1-1　産業別災害率（度数率）

災害率（度数率）については、各業種とも減少傾向にあるが、鉱業については際立って高いことがわかる。ずい道と比べても約 2 倍となっている。自然を相手とする地下作業に伴う悪条件が他業種に比較して多い等種々の理由が挙げられる。

次に強度率の推移を表 1-2、図 1-2 に示す。

表 1-2　産業別災害率（強度率）

年	全産業	鉱業	建設業	ずい道新設事業
S48	0.64	5.41	2.86	5.87
49	0.45	5.50	2.89	5.33
50	0.43	5.43	1.80	5.23
51	0.36	3.44	2.26	5.61
52	0.42	4.95	0.97	1.62
53	0.35	2.99	1.28	2.47
54	0.36	4.37	1.47	8.45
55	0.32	2.58	0.90	1.61
56	0.37	9.21	0.90	1.80
57	0.32	2.59	0.55	1.58
58	0.30	2.53	0.88	1.26
59	0.34	8.37	0.03	0.86

[出典]：「石炭鉱山保安統計集」（昭和 60 年 9 月、鉱業労働災害防止協会）p.168

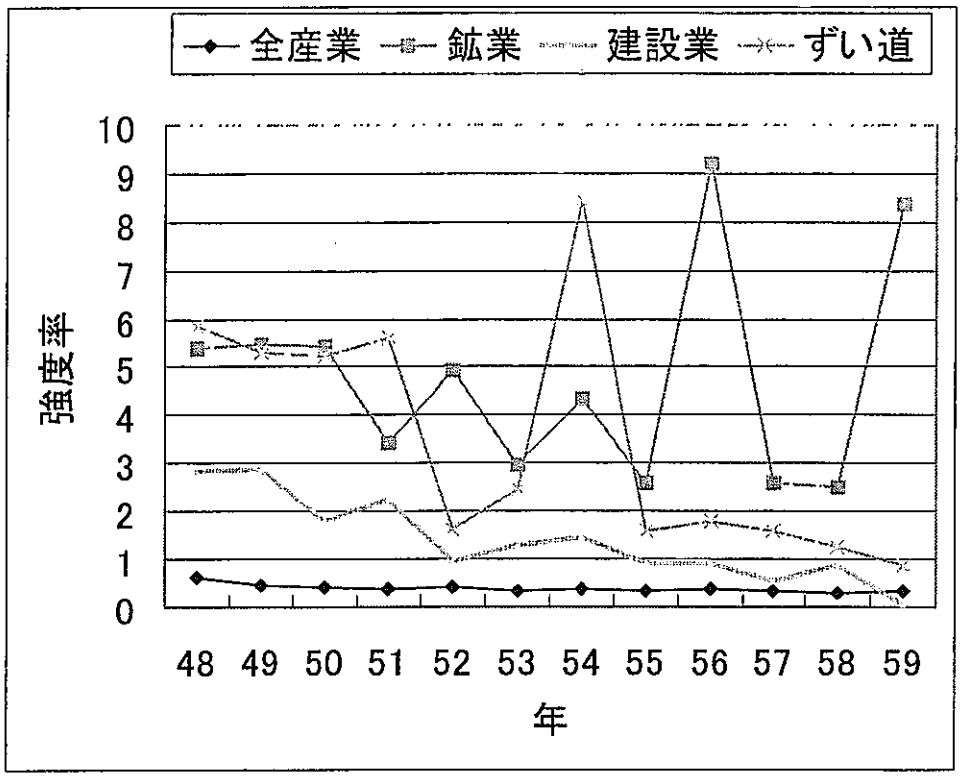


図 1-2　産業別災害率（強度率）

強度率も全体の傾向としては、漸減傾向にあるように見えるが、ずい道及び鉱山においては、時々極端なピークが生じている。これは度数率では現われてこないが、両業種においては大災害が発生していることによる。鉱山においては後述するように石炭鉱山の災害によるものである。

鉱山においては、保安対策技術の向上等による努力にも拘わらず、稼行区域の深部化、奥部化等による条件悪化あるいは新たな災害要因の発生等により、災害の根絶には至っていない。

1.2 石炭鉱山の災害状況の概要

石炭鉱山における、昭和47年から平成2年までの災害の発生状況の概要は、表1-3のとおりである。これを図示すると図1-3、図1-4、図1-5のようになる。

表1-3 石炭鉱山災害発生状況

年	災害回数	強度率	度数率
昭和47年	11,291	8.63	83.17
昭和48年	6,156	6.32	58.87
昭和49年	3,058	5.97	33.57
昭和50年	2,607	6.81	29.66
昭和51年	2,356	3.67	26.80
昭和52年	2,127	6.52	32.61
昭和53年	1,817	3.44	22.41
昭和54年	1,541	5.21	19.92
昭和55年	1,319	3.19	17.19
昭和56年	1,083	13.29	16.63
昭和57年	989	3.11	13.75
昭和58年	684	2.31	10.04
昭和59年	625	14.71	10.76
昭和60年	447	9.98	8.38
昭和61年	234	2.06	5.80
昭和62年	196	1.47	4.30
昭和63年	146	1.43	4.49
平成元年	150	1.96	5.14
平成2年	90	0.82	2.83

[出典]:「平成2年度　鉱山保安年報」(平成3年版、通商産業省立地公害局編) p.12

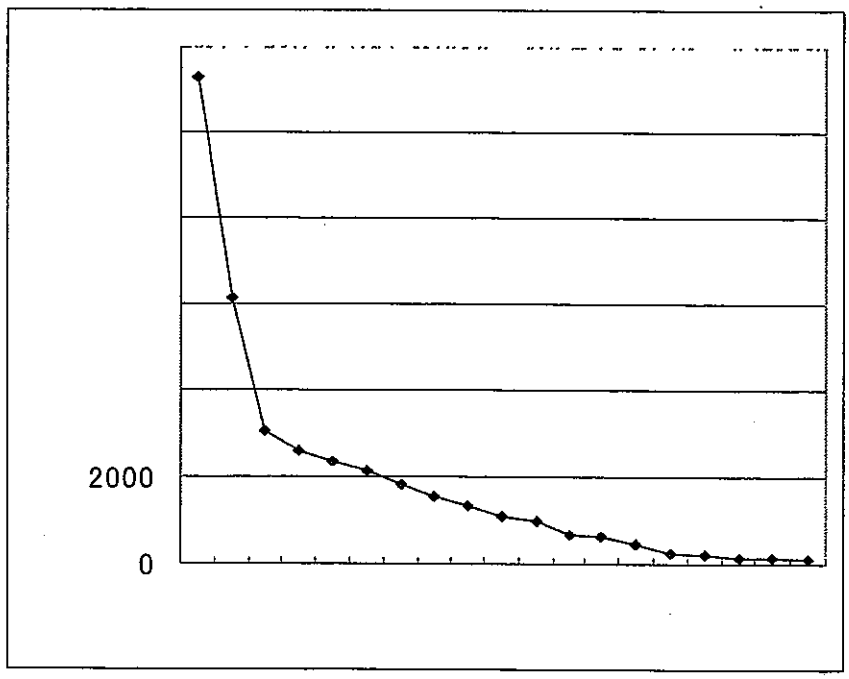


図1-3　災害回数推移

災害回数は着実に減少している。これは炭鉱数、労働者数の減少によるとも考えられるので、次に度数率の推移を図 1-4 に、強度率の推移を図 1-5 に示す。

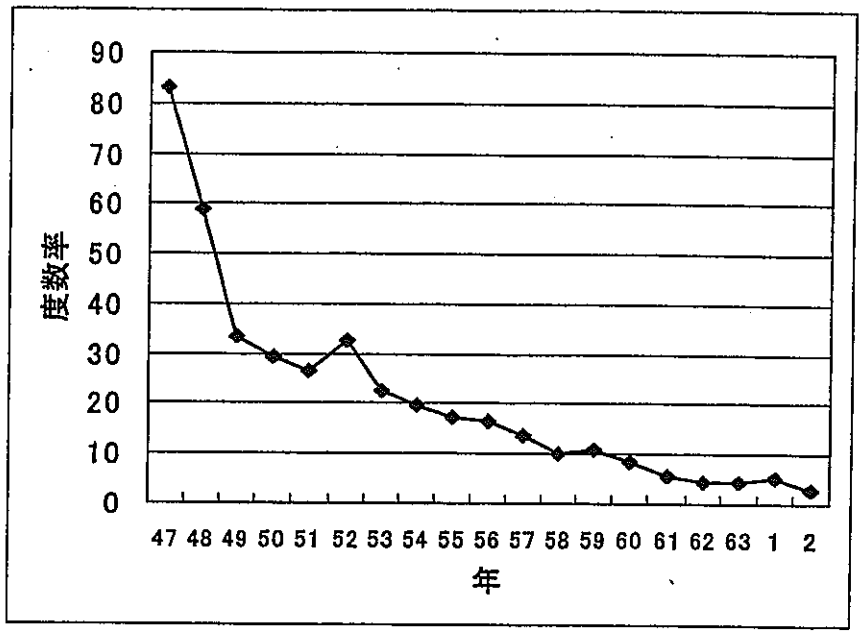


図 1-4　災害率（度数率）推移

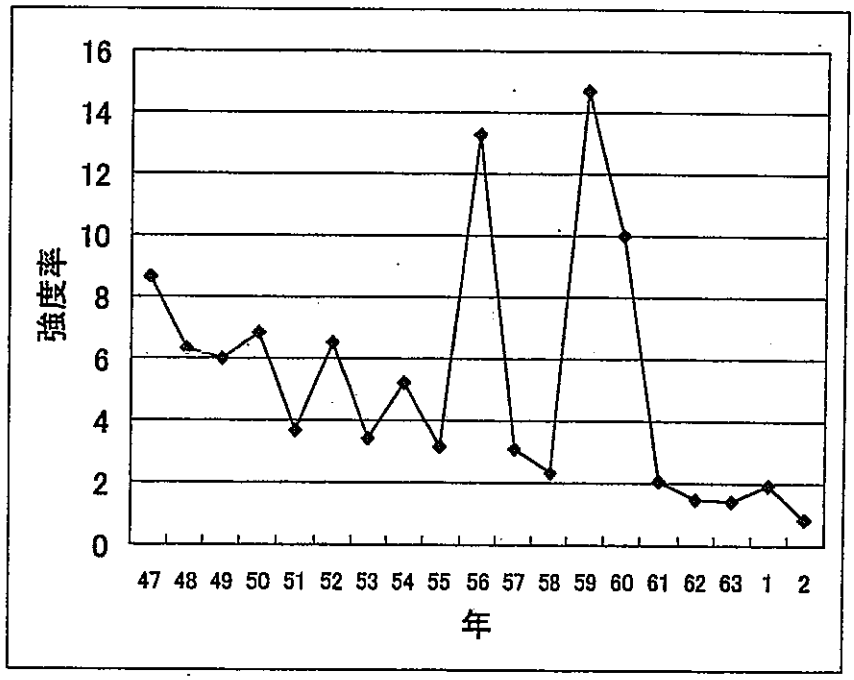


図 1-5　災害率（強度率）推移

これらを総括すると災害発生回数は年々減少し、昭和 47 年と比較すると平成 2 年は約 1 2 5分の 1 に大幅減少となっている。表には挙げていないが、この間労働者の数は約 6 分の 1 に減少している。

度数率では約３０分の1、強度率では約１０分の１になっている。

これは各種保安運動の推進、保安技術の向上、保安設備の高度化等による災害撲滅への取組の結果である。但し、前項でも述べたように強度率が特定年度でピークを示しているのは、大災害が時折発生しているためであり、大災害の根絶が大きな課題である。

1.3 災害の種類

前項までに地下産業における災害の発生状況を概観した。以下、内容について分析していく。鉱山保安規則によれば、災害は内容により表1-4のように区分される。

表1-4　災害の区分

区　分	内　　容
頻発災害	重要、重大災害以外の災害
重要災害	次のいずれかに該当する災害 (イ) 鉱山保安規則第96条第1項第1号に該当する災害 火災、ガスの爆発、炭じんの爆発、ガス突出若しくは山はね、自然発火、水害、風害、雪害、震災若しくは火薬類の紛失、盗難その他の火薬類の事故 (ロ) 死亡者1人以上を生じた災害 (ハ) 同時に休業4週間以上の負傷者を含むり災者3人以上を生じた災害 (ニ) 同時にり災者5人以上を生じた災害
重大災害	重要災害のうち、同時に死亡者3人以上又はり災者5人以上を生じた災害

[出典]：「平成8年度　鉱山保安年報」（平成9年版、通商産業省環境立地局編）p.2

鉱山における災害には、他産業と同様な内容のものもあれば、鉱山特有のものもある。

鉱山保安法に基づき提出することとされている「災害月報」の様式によれば、坑内関係についての事由別災害の種類については、次の通りとなっている。

・落盤又は側壁の崩壊
・浮き石の落下（前項以外）
・ガス又は炭じんの爆発
・ガス中毒又は窒息
・ガ ス 突 出
・山　は　ね
・自 然 発 火
・発破又は火薬類のため
・立坑巻揚装置のため：チエン又はロープの切断
　　その他
・前項以外の運搬装置のため：チエン又はロープの切断

鉱車の逃走又は脱線
鉱車に接触又は挟撃
車両系鉱山機械又は自動車のため
その他

・出　　水
・火　　災
・機械のため
・電気のため
・飛石又は転石
・工具のため
・粉じんのため
・落下物又は倒壊物のため
・取扱中の器材鉱物等のため
・墜　　落
・転　　倒
・そ　の　他　　[出典]:「鉱山保安規則」(平成9年版、通商産業省環境立地局監修) p.434

これらを頻発災害と重要災害に整理すると、表 1-5のようになる。頻発災害でもり災者数によっては、重要、重大災害となる。

表1-5　頻発災害と重要災害

頻発災害	重要災害
・落盤又は側壁の崩壊 ・浮き石の落下（前項以外） ・ガス中毒又は窒息 ・立坑巻揚装置のため： 　チエン又はロープの切断 　その他 ・前項以外の運搬装置のため： 　チエン又はロープの切断 　鉱車の逃走又は脱線 　鉱車に接触又は挟撃 　車両系鉱山機械又は自動車のため 　その他 ・機械のため ・電気のため ・飛石又は転石 ・工具のため ・粉じんのため ・落下物又は倒壊物のため ・取扱中の器材鉱物等のため ・墜　　落 ・転　　倒 ・そ　の　他	・ガス又は炭じんの爆発 ・ガ ス 突 出 ・山　は　ね ・自 然 発 火 ・出　　水 ・火　　災

頻発災害は、その名の通り頻発する可能性は大きいが、通常り災者数は限定される内容のものであり、重要災害は、重大災害に直結する可能性を有し、操業に影響するところが大である災害である。以下、頻発災害と重要・重大災害に大きく区分して調査していく。

1.4 頻発災害

1.4.1 頻発災害の概要

頻発災害の昭和 41 年から昭和 59 年までの事由別発生状況は、表 1-6 の通りである。

表 1-6　頻発災害発生状況

事由別	全り災者数	発生割合%	死亡者数	発生割合%
落盤・側壁崩壊	60,667	29.6	679	46.0
運搬	19,254	9.4	448	30.4
転倒・墜落	18,073	8.8	34	2.3
飛石・転石	19,024	9.3	17	1.2
落下物・倒壊物	11,752	5.7	13	0.9
取扱中の器材・鉱物	43,785	21.4	16	1.1
機械・電気	4,128	2.0	35	2.4
工具	6,507	3.2	5	0.3
ガス中毒・窒息	60	0	38	2.5
発破・火薬類	232	0.1	36	2.4
その他	21,485	10.5	155	10.5
計	204,967	100.0	1476	100.0

[出典]：[石炭鉱山保安統計集]（昭和 60 年，鉱業労働災害防止協会）p.6～p.8

事由別の災害発生割合を一部まとめた形で図示すると、図 1-6 のようになる。

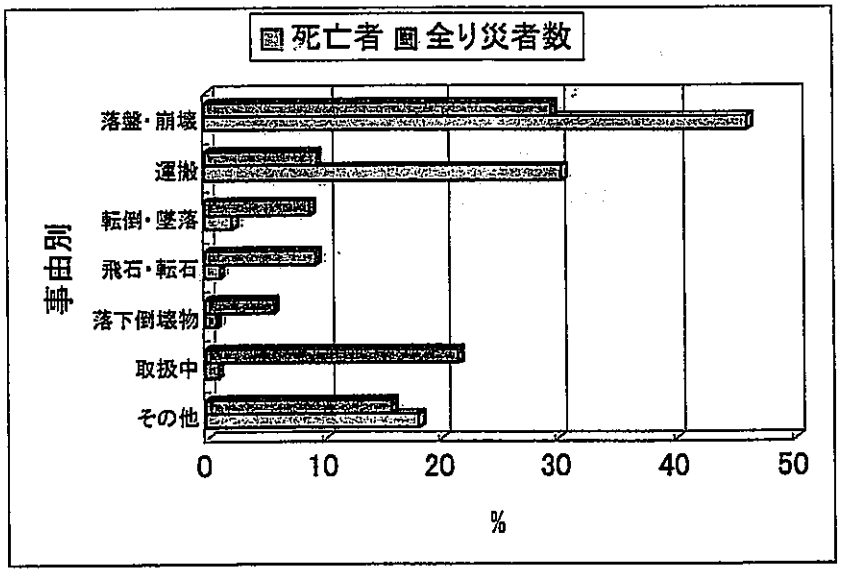


図 1-6　頻発災害発生割合

災害頻度では、落盤・側壁崩壊と取扱中の器材・鉱物によるもので全体の半分を占める。一方死亡者数でみると、落盤と運搬だけで４分の３を占める。

落盤・側壁崩壊災害は、最も発生しやすい災害であるだけに、死亡者数も多い。

又り災者数と死亡者数の関係で見ると、り災頻度は多いが死亡災害になるのは稀である事由と、死亡災害になり易い事由のある事が分かる。

災害事由別に、死亡者の全り災者数の対する割合を、表1･7に示す。

表1･7　死亡者数の全り災者数に対する割合

事 由 別	死亡者／全り災者×100（%）
落盤・側壁崩壊	１．１２
運搬	２．３３
転倒・墜落	０．１９
飛石・転石	０．０９
落下物・倒壊物	０．１１
取扱中の器材・鉱物	０．０４
機械・電気	０．８５
工具	０．０８
ガス中毒・窒息	６３．３３
発破・火薬類	１５．５２
その他	０．７２
計	０．７２

ガス中毒・窒息について圧倒的に死亡者の割合が多いのは、その災害の性格から当然である。発破・火薬類により災害についても同様である。これらは災害に遭遇する機会のあるのは、限られた者である事が多いので、頻度はごく少ない。

坑内で問題になるのは、次いで死亡に結びつく割合の多い、運搬、落盤・側壁崩壊である。これらは頻度から考えても、坑内条件によっては頻発災害のうち最重要課題としている炭鉱もある。

以上の頻発災害のうち、内容、頻度等を勘案し、深地層研究所計画に際し考慮すべき災害として、

- 落盤・側壁崩壊による災害
- 運搬による災害
- ガス中毒・窒息による災害

を取り上げ、内容の調査を行う。

1.4.2 落盤・側壁崩壊による災害

1) 災害発生状況

落盤・側壁崩壊による災害（以下「落盤災害」と略称する。）は、坑内という特殊な作業環境から、り災者数及び死亡者とも最も多い災害であるのは、前項で見た通りである。

発生状況について、死亡者数についてみると、箇所別、作業別事例は、以下のようになっている。事例は、昭和 50 年～昭和 59 年の累計数字である。落盤災害の箇所別死亡者数を、表 1-8 に示す。

表 1-8　落盤災害の箇所別死亡者数

箇所		死亡者数	%	死亡者数	%
採炭切羽	自走枠払	17	19.3	46	52.3
	欠口払	15	17.1		
	鉄柱払	14	15.9		
水平坑道	水平坑道	14	15.9	27	30.7
	ゲート坑道	7	8.0		
	中段坑道	4	4.5		
	立入坑道	2	2.3		
傾斜坑道	昇	8	9.1	12	13.6
	斜坑	4	4.5		
その他	ボーリング座	2	2.3	3	3.4
	その他	1	1.1		
計		88	100.0	88	100.0

[出典]：[石炭鉱山保安統計集]（昭和 60 年，鉱業労働災害防止協会）p.148

死亡者の割合は採炭切羽で半数を超え、次が水平坑道となっている。合わせて 8 割を超えている。これらの箇所に従事する労働者の数が多いことと、作業箇所においては天盤、側壁が露出する機会の多いことを考えれば当然の結果である。

次にどのような作業のときにり災するかをみるため、箇所別・作業別死亡者数について調べると表 1-9 のとおりである。

表 1-9　箇所別・作業別死亡者数

作業＼箇所	採炭切羽	水平坑道	傾斜坑道	その他	計	%
仕繰拡大、山固め作業中	5	4	4		13	14.8
施枠作業中	3	4	2	1	10	11.4
枠回収作業中	7	1			8	9.1
充填作業中	6	1			7	7.9
通行、待機中	4	2	1		7	7.9
コンベア布設中		6			6	6.8
自走枠操作中	5				5	5.7
点検利払中	4	1			5	5.7
穿孔作業中	1	1	1		3	3.4
積込、炭かき作業中	1		1	1	3	3.4
カッター切削、修理中	3				3	3.4
火薬装填、結線中	1	1			2	2.3
雑作業中	2	2	2		6	6.8
その他		3		1	4	4.6
不明	4	1	1		6	6.8
計	46	27	12	3	88	100.0

[出典]：[石炭鉱山保安統計集]（昭和 60 年，鉱業労働災害防止協会）p.149

坑内の作業は多岐に亘っているので、表の通り特定の作業が大きな比率を占めているということはない。この種の災害を防止するためには、各作業に際して坑内作業の特性として作業環境が時々刻々変化することを前提にして、危険予知のアンテナを常に張りながら、かつ、確実な安全作業を心がける事が大事である。

2) 災害事例

以下、災害事例の記述に際し、現場用語あるいは特殊用語がたびたび用いられる事になるが、都度の説明は行わず、末尾に用語集としてまとめて簡単な解説を付す事にする。

災害事例は「石炭鉱山重要災害事例集（昭和51年～昭和60年）」（昭和62年3月、鉱業労働災害防止協会）より抽出した。内容は、加工、省略等を行っている部分がある。

事例1：発破後天盤を押さえる先受を延長したが、延ばし過ぎたため、矢木をテコにして手前に戻している時天盤が崩落し腰部に当たり、り災す。（死亡1名）

・原因

長時間空延の状態にあった天盤が、潜在亀裂、油目等の介在により、剥離しやすい状態にあったのに加えて、発破の震動で更にゆるみ、点検、利払不十分による浮石が時間の経過とともに剥離落下したものである。

・対策

点検、利払の強化について：

利払作業は長柄のツル、金テコ等適切な器具を配置し、作業前、作業中入念な点検とともに確実に浮石を落とすこと。

点検利払の結果、落ちない浮石については、差矢木等により仮受けを行う。

切羽休止後の空延部分の点検については、特に綿密な点検利払を行う。

施枠時の落盤対策強化について：

引立面は掘進方向に対して不揃いにならぬよう修正し、引立と最終枠との空延を適正な距離とするよう穿孔長並びに枠間等を留意して実施する。

一時休止する空延部分については、先受、差矢木等により処置する。

大加背坑道における施枠時の落盤対策強化のため、鏡面押えの他、天盤側壁を防護するための側壁先受等を使用する。

事例2：採炭中ドラムカッターが松岩に出合い、カッターマンが裸天井部の下で上盤の松岩点検中、天盤が剥離落下し下敷きとなり、り災す。（死亡1名）

・原因

り災者が払炭壁の裸天井部に入る時、十分天井の打診点検等を行わずに入ったためと思われる。

・対策

やむを得ず裸天井で作業を行う時は、目視点検だけでなく、十分打診点検を行い、必要に応じて事前に枠出し又は差し坑木を行って立ち入る。

1.4.3 運搬災害

1) 災害発生状況

坑内の運搬方式については、炭鉱毎に特徴のある方式を採用しているので、その内容も様々である。落盤同様、死亡に至る災害を抽出して内容を調査する。

昭和 50 年から 59 年に発生した箇所別の死亡者数について、その累計を表 1-10 に示す。

表 1-10　箇所別死亡者数

箇　所	死亡者数	%
斜　坑	25	29.8
大坑道	14	16.7
立　入	9	10.7
坑道分岐箇所	9	10.7
操車坑道	7	8.3
沿層坑道	6	7.1
B・C坑道	6	7.1
盤下坑道	3	3.6
水平掘進箇所	3	3.6
立　坑	1	1.2
その他	1	1.2
計	84	100.0

[出典]：「石炭鉱山保安統計集」（昭和 60 年月、鉱業労働災害防止協会）p.150

表から、斜坑、大坑道等主要運搬ルートと考えられる箇所での死亡災害が多い事がわかる。これは主要坑道には大型運搬設備があり、運搬スピードも速く、かつ、従事する者の数も多い事等の要因が考えられる。

次に運搬設備の機種別の死亡者数について、表 1-11 に示す。

表 1-11　機種別死亡者数

機種別	死亡者数	%
B・L	35	41.6
斜坑鉱車	18	21.4
小型巻上機	12	14.3
B・C	6	7.1
エンドレス巻	4	4.8
鉱　車	4	4.8
人　車	2	2.4
P・C	1	1.2
マンロープ	1	1.2
立坑ケージ	1	1.2
合　計	84	100.0

[出典]：「石炭鉱山保安統計集」（昭和 60 年月、鉱業労働災害防止協会）p.150

これによるとB・L（バッテリーロコ）によるものが最も多い。B・Lは、資機材、石炭、搬出ズリ（ボタ）、充填ズリその他多様なものの運搬に使用され、また採用している炭鉱が多いことと、脱線、挟撃、接触等災害の機会が多く発生する可能性があるからであると考えられる。

直接の死亡要因について、表1-12に示す。

表1-12　要因別死亡者数

要因別	要因まとめ	死亡者数		%
待避位置不良	作業方法の不良、不完全	8	37	44.0
前方確認不良		6		
B・C点検、補修手順不良		5		
巻運転操作不良		4		
相互連絡不充分		6		
車止め操作の不完全		3		
器具の取扱、積込不良		3		
信号の誤操作、誤認		2		
列車操作手順不良	安全作業要領不履行	10	26	31.0
一旦停止不履行		7		
搭乗位置、方法不良		6		
付添誘導位置不良		2		
運行中の列車横断		1		
無資格者運転	違反行為	1	2	2.4
盗乗		1		
車道不良	管理不良	3	4	4.8
坑道狭小、保安間隔不足		1		
転倒	その他	3	15	17.8
脱線（不明）		4		
不明		8		
計		84		100.0

[出典]：「石炭鉱山保安統計集」（昭和60年月、鉱業労働災害防止協会）p.151

上に見たように箇所、機種等多種に亘るため、要因の種類も多い。要因のうち内容的に似たものをまとめて、「要因まとめ」として示した。その結果大まかな要因としては、

- 作業方法の不良、不完全
- 安全作業要領不履行
- 違反行為
- 管理不良
- その他

となり、要因の殆どは個人の行動に起因するものである事がわかる。この点は落盤とも異なって、運搬災害の特徴である。

運搬作業は、運搬設備を扱うという作業であり、落盤の場合ほど自然環境の急激な変化は少ないが、動くものを取り扱う作業である。従って決められた事項の遵守、確認と指差

称呼による安全作業の確実実施等により、災害防止を図らなければならない。

2) 災害事例

事例1：坑道掘進引立付近で脱線した台車をレバーブロックで修復中のところに、引立より実車が流れてきて追突したため、台車上でレバーを操作していたり災者が巻き込まれ、り災す。(死亡1名)

・原因

発生要因：

空台車の脱線修復作業中、追突した実車のショックにより振り落とされたか、飛び降りたか推定の域を出ないが、押し流された空台車の下に巻き込まれ、り災したと推定される。

欠陥要因：

脱線掛け作業者と切羽元作業者相互間の連絡が不十分であった。

切羽元列車間を決められた通り連結していなかった。

作業分担が不明確であった。

・対策

水平掘進作業場周辺での脱線修復作業は

事前に切羽作業者と連絡打ちあわせを確実に行う。

前後に見張人をおくか、又はストッパーを確実にする。

水平掘進作業で立置線（移動複線、複線等）までホイストにより曳き出した実車は確実に連結し原則として差ピンを実施する。

上記対策を関係者全員に周知徹底させる。

事例2：B．Lでズリ4車を後押し運転中、棹取が先頭車に乗り列車を誘導している時、ポイントが渡り線側になっているのに気付き、ポイントを替えすべく飛び降りようとしたか、又は、すべり落ちたかにより先頭車に巻き込まれり災した。(死亡1名)

・原因

棹取が後押し運転中の先頭車に乗り列車を誘導中ポイントが渡り線になっているのに気付きポイントを替えすべく飛び降りようとしたか、又は、すべり落ちたかにより先頭車に巻き込まれり災したものと推定される。

・対策

決められた箇所以外は、機関車による後押しは禁止する。

機関車で後押しするときは次によること。

棹取は歩行を厳守し、原則として軌道外で且つ安全な位置で誘導する。

運転員は進行方向の監視を確実に行い、異常を認めた時は直ちに運転を停止する。

軌道の分岐箇所を列車が通過する時は緩速度（最徐行）運転とする。

棹取は進行方向の転轍器の替せ方向を事前に確認し、且つ的確に操作する。

機関車を運転する軌道の転轍器は、その替せ方向が容易に識別する事ができる措置を強化する。

上記対策を関係者に教育し、周知徹底を図る。

1.4.4 ガス中毒・窒息による災害

1) 災害発生状況

前述したようにガス中毒・窒息による災害は、死に直結する災害であるといえる。昭和40年から59年までのガス中毒・窒息による災害発生の合計は、表1-13の通りである。

表1-13 ガス中毒・窒息による災害発生状況

回数	り災者数			
	死亡	重傷	軽傷	計
53	44	16	14	74

[出典]：「石炭鉱山保安統計集」（昭和60年月、鉱業労働災害防止協会）p.154

発生要因と原因ガスの関係（死亡者のみ）は表1-14の通りである。

表1-14 発生要因と原因ガス（死亡者のみ）

発生要因	ガスの種類			計	%
	CH_4	CO_2	CO		
発生ガスの停滞	14	2		16	36.4
坑道ガス停滞（禁柵内）	12			12	27.3
昇ガス停滞（禁柵内）	9			9	20.4
払跡よりのガス流出	3			3	6.8
発破の跡ガス			2	2	4.5
旧坑よりのガス流出		1		1	2.3
密閉内よりのガス流出	1			1	2.3
計	39	3	2	44	100.0

[出典]：「石炭鉱山保安統計集」（昭和60年月、鉱業労働災害防止協会）p.154

石炭鉱山においては、対象ガスの種類としてはメタンガスが殆どであり、炭酸ガス、一酸化炭素は特殊な場合である。

発生要因のうち最も多い「発生ガスの停滞」については、ガス停滞に気付かず、或いは警戒をせず（ガス計測をせず）に、停滞箇所に立ち入ったものと思われる。ガスの停滞箇所については、坑内作業に携わる者は日常の教育により心得ているはずであるが、慣れからくる油断があったと考えられる。

メタンガスについてみると、上記「発生ガスの停滞」以外は、坑内においてもともとガスの停滞の可能性のある箇所である。特に「禁柵（きんさく）」は落盤・停滞ガス等の危険が存在する恐れがあるという理由でとられた措置であるので、ガス検定は必須事項である。従ってこ

れを怠ったか、不十分であったためにり災したと思われる。

発生箇所と行動の関係は表 1-15 の通りである。

表 1-15 発生箇所と行動

行動＼箇所	坑道	昇	切羽	斜坑	旧坑	密閉箇所	崩落取明箇所	計	%
巡視立入り	5	4	1					10	22.7
作業中	4	1	3					8	18.2
作業立入り	1	4		1				6	13.6
道具取立入り	3	1						4	9.1
用便立入り	1			1	1			3	6.8
巡視点検中	1					1		2	4.6
発破施行中		2						2	4.6
その他（禁柵内立入）	3	5					1	9	20.4
計	18	17	4	2	1	1	1	44	
%	40.9	38.5	9.1	4.6	2.3	2.3	2.3		100

［出典］：「石炭鉱山保安統計集」（昭和 60 年月、鉱業労働災害防止協会）p.155

巡視中が最も多いが、り災者は坑内保安技術職員資格の保有者の筈であり、ガス検定器具を所持していたと思われる。慣れによる、ガスという目に見えないものに対する警戒感の欠如が災害に結びついた結果である。

その他の行動についても、要注意箇所であるとの認識は少なからずあった中での行動と考えられる。

り災者の中には教育を受け指導する立場にある者が相当数含まれていると考えられる。変化する現場状況に対する保安の目は、日々新たにしていかなければならないという教訓とその定着、徹底を図る事の難しさを教えてくれる。

2) 災害事例

事例 1：板張りし、ビニールで覆った仮密閉作業中の坑道箇所で、作業員が中食で現場を離れている間に巡視中の係長が、仮密閉の枠組を乗り越えて奥部に進入し、ガス窒息のため、り災者す。（死亡者 1 名）

(5) 原因

仮密閉内に立ち入った原因については不明である。

(5) 対策

全鉱山労働者及び係員に対し、木柵内立入禁止を再教育し、周知徹底させた。

災害箇所と類似箇所及び坑内全般の立入禁止柵、立入禁止札を見直し、必要箇所は補修した。

立入禁止の結柵、又は密閉遮断等の作業を実施する場合、作業員が現場を離れる

ときは立入禁止の標示をするとともに、奥部の坑道状況、ガス状況を明確に標示する掲示板を取付けるようにした。

事例2：該坑道でボーリング作業中ガスが急増したので退避したが、その後調査のため入坑した3名が、ガス流出防止のため設けられた遮断幕内に入り、ガスのため倒れた。1名は自力脱出し応援を求め2名を救出したが、1名は蘇生し、1名は死亡した。
（死亡1、軽傷1、計2名）

(5) 原因

深ボーリング座付近の生吸引実施中の間抜け箇所で、山鳴りが引金となって、炭層亀裂が更に発達すると共に周辺のボーリング孔の一部にスライムが詰まり、吸引不良、内圧増加を惹起し、炭層亀裂より高濃度ガスが坑道に流出したものと推定される。

そのガス急増事故処理後状況把握（推定）のため、遮断幕内に進入し酸欠のため窒息したものである。

(5) 対策

(5) 先進ボーリング対策は従来の対策の徹底を図るほか、特に水孔のボーリング終了時は、スライム及びドレンの点検排除を強化する。

(2) 高濃度のガスを封じている遮断幕内には原則として進入しない。但し、保安改善処置及び状況把握等の緊急を要し、やむを得ず進入する場合は保安技術管理者又は副保安管理技術者の許可を得る。

(3) 穿孔作業中のガス測定及び携帯式ガス自動警報器によりガス状況を把握するほか、ガス増加時の処置方法（仮吸引、穿孔中止、ロット抜吸引、座入口張切り吸引、通気設備の点検整備、退避、坑道遮断幕作動、連絡、報告等）についての遵守励行の徹底を図る。

(4) ガス急増時の対策は別途樹立し、徹底を図る。

(5) 上記対策について関係者に教育し、実施徹底を図る。

1.4.5 頻発災害総括

以上見てきた通り、頻発災害は発生回数が非常に多く、同じような災害が繰り返し発生している。

背景としての坑内作業の特殊事情を列挙すると、以下のような点が挙げられる。

・相手は自然であり、現場条件は刻々変化する。定点で見ると変化は一般に悪化という方向に進む可能性が高い。

・長期的に見て、操業の進展に伴い深部化、奥部化が進む結果、以前にはなかった保安上の問題が出現したり、同じ問題でも程度が悪化するする事がある。

・最先端の現場は、暗闇の中でキャップランプが唯一の照明の場合が多い。

・個人の毎日の作業現場は、同一箇所であるとは限らない。同一作業とも限らない。

・3交代の作業が多いこともあり、前日の状況と同一条件という場合は、殆どない。

・炭鉱毎に、炭層の賦存状況をはじめとして、操業条件が異なり、又同一炭鉱においても炭層、区域、時期等により条件が変化する事がある。

このような条件を前提として、頻発災害を防止する取組としては、次のようなものが行われている。

・坑内骨格構造の整備
・坑道支保の強化
・運搬等の施設の整備
・効果的な教育・訓練
・全体としての保安意識向上運動

災害事例で明らかな通り、ヒューマンファクターに起因する災害が非常に多い。従ってそれぞれの炭鉱毎に特有の条件を考慮して、管理面に万全を期すことは勿論であるが、ヒューマンエラーの根絶に傾注している。

1.5 重要・重大災害

1.5.1 重要・重大災害の概要

前記頻発災害に挙げた事由による災害でも、り災者数によって重要、重大災害になるが、特殊災害（爆発、突出、山はね、自然発火、火災、出水）については、り災者数に関わらず少なくとも重要災害として扱われる。この項では、特殊災害による重要、重大災害について述べる。

昭和41年から59年までの重要・重大災害の発生状況は表1-16、図1-7のとおりである。

表1-16　重要・重大災害の発生状況

事由別	件数	死亡者数
ガス又は炭じん爆発	61	257
ガス突出	51	195
山はね	10	16
自然発火	77	8
坑内火災	22	131
坑内出水（死亡災害のみ）	5	12
計	226	619

［出典］：「石炭鉱山保安統計集」（昭和60年9月、鉱業労働災害防止協会）p.84～140

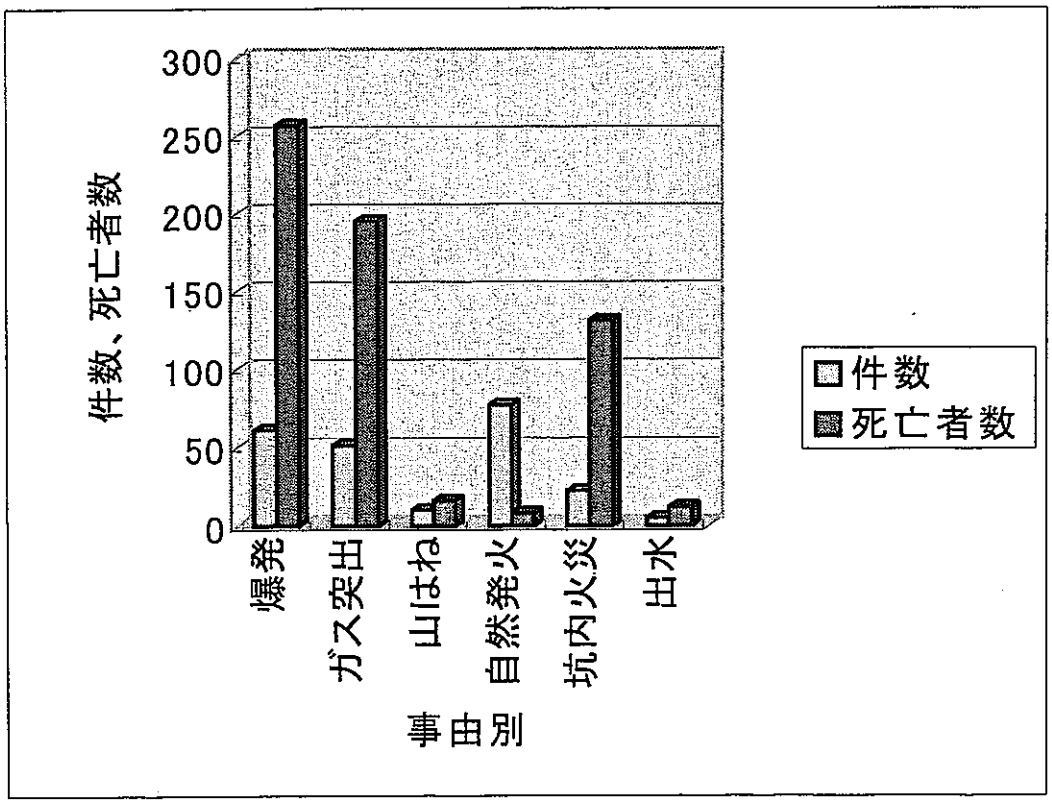


図1-7　重要・重大災害の発生状況

件数と死亡者数の関係から理解できるように、爆発、ガス突出、坑内火災等は、ひとたび災害が発生すると、大災害となる可能性が大きい。

相対的に自然発火は、災害に至るまでにある程度の時間的な経過を必要とするので、徴候の発見、退避の措置がとりやすい場合が多く、り災者は比較的少ない。

山はね、出水は発生箇所が限定されており、件数は少ない。

これらの災害は、必ずしも全炭鉱に共通して常時発生する可能性が大きいということではない。各炭鉱における石炭の賦存状況の違い、操業形態の違い等により発生可能性に差が出てくる。また炭鉱内の特定区域、特定炭層等による差違もある。いずれにせよこの種の災害は、最悪の場合全鉱に及ぶ大災害となる危険性を有しているため、その発生防止のための取組みが続けられている。

以下、事由別に個々に調査する。

1.5.2 坑内火災

1) 総説

一般に鉱山の坑内で発生する火災を称して坑内火災といっており、これは大別すると露出火災と潜伏火災に分類される。前者は、燃焼現象が坑道あるいは切羽の表面で確認されるものであって、通常これのことを坑内火災と称することが多い。後者は、表面における発汗、発熱等の現象あるいは坑内ガス組成の変動で確認できる場合もあるが、燃焼現象（緩やかな酸化反応）が地層内部あるいは払跡内で進行するため視覚による確認が困難な火災であって、通常は自然発火といわれている。

坑内火災がもたらす主要なものとして熱、煙、ガスが考えられる。これらは坑内火災の予防、消火の観点から重要である。熱は通気への影響を及ぼす浮力効果の主役を演じるとともに、高温による坑道変形をもたらす。また、熱は火災風下側の温度分布を支配する重要な要素である。煙は発煙濃度と量、性状と組成あるいは分布が問題となる。ガスは発生速度と量、有害・有毒性、組成と分布、火災密閉内等に見られる二次爆発の問題等を生ずる。

坑内火災では基本的な要素が複雑に絡み合っているため、一つの事象を追求するだけでは問題は解決されない。例えば、燃焼性を低下させたために、かえって有害ガスの発生が問題となるといったことが生ずる。

炭鉱の深部化、奥部化の進行に伴い、坑内火災の重要性が指摘されている。その予防のため、坑内に導入する資材の坑内火災防止の観点からの事前検査並びに坑道の不燃化、難燃化に力が注がれている。また、坑内火災を検知するため、各種の火災検知器が導入されている。坑内集中監視装置により、火災のみでなく各種情報を得るようになってきたが、異常判断はまだ経験と勘に頼る部分があるため、更なるソフトの開発を期待しなければならない。初期消火に使用される消火設備にも多くの種類があるが、火災の種類と規模による使い分け等適切なシステムの開発が必要である。

2) 坑内火災の性状と特性

坑内火災であっても物が燃える点では、一般火災と異なるところはないが、坑内という条件から、次のような特異点が挙げられる。

① 坑内特有の火源の存在

坑内では一般火災の火源となるもののほかに、次のような火源がある。

・発破

・自然発火

・ガス炭じん爆発

・その他坑内特有の火源

② 煙及び有害ガスと通気の関係

坑内では一般に機械力による強制通気を行っており、入気、排気の関係でその方向はおおむね一定の方向と考えられるので、次のような状況が想定される。

・坑内で火災が発生すると、煙と共に一酸化炭素、炭酸ガス、その他有害ガスが通気

の流れに乗り風下に流れていく。

・風下にいる者の避難が遅れると、火災現場と無関係な者まで煙による窒息、有害ガス中毒によって多数り災することになる。

・火災の進展に伴って通気門や局部扇風機、風管などが焼け落ちると、従来の通気系統が乱れ、通気が止まってガスが停滞し爆発の原因となる。

・通気の方向が逆になって有害ガスのため消火救出作業者がり災することもある。

③ ガス・炭じん爆発、自然発火現象への移行

・通常の状態ではガスのない箇所でも、火災による通気変動からガスが停滞して爆発が起こる危険性がある。

・坑道の壁や、充填を通じて採掘跡が高温となると、自然発火の初期状態と同じ兆候となり、自然発火へと移行する。

④ 消火方法の問題

・消火作業上の制約：

風上の狭い坑道内からしか消火作業が行えない。

煙および有害ガスの入気側への逆流がある。

風上側でも有害ガスの観測を十分行って作業をする必要がある。

消火に時間がかかる（消火人員、ホースの放水口数の制限）。

風下側に延焼が拡大するが、酸素が不足するに従い風上側に燃えてくる恐れがある。

・水源：

坑内における消火用水源としては、例外を除き、散水管や配水管によるが、管の直径、ポンプ能力等から水量、水圧が制約される。また、平常坑内水の少ないところでは、水源の水量に限度がある場合がある。

非常時の水源確保の手段としては、圧気管の転用、主排水管から分岐させる非常用取り出し口の設置、火災現場に集中給水できるような散水管系統のバルブ配置等の事前準備措置を考慮しておく必要がある。

⑤ 燃焼帯とその移動

可燃物が連続的に存在する坑道において坑内火災が発生すると、初期において着火源付近で燃焼するが、徐々に風下側に燃焼が伝播して、火災が延焼・拡大する。延焼帯は通気方向に移動する。

坑内火災が延焼・拡大する条件として、通気量、可燃物量及び着火源強度がある。これらの条件は互いに独立したものではなく、一定の関係が認められる。

一般に可燃物の延焼は通気速度が増すとともに速くなり、激しい燃焼状態になる。坑内火災では通気速度に対応した長さの火災帯が形成され、その延焼速度は通気速度に比例して大きくなる。

可燃物量と通気速度の関係についても、一定の通気速度で最も激しい火災性状を示し、通気速度がそれ以上になると通気の冷却効果が増大して火災ガス温度は低下する。通気速度が小さい条件下では安定した延焼を生じにくい。

このように、通気速度は坑内火災の延焼特性を支配する重要な要素の一つであると

いうことができる。

坑道内の可燃物量は坑内火災の性状に大きな影響を与える。坑道単位体積当たりの可燃物量がある一定範囲において、最も激しい燃焼状態を示す。可燃物量が少ない条件下では燃焼伝播を生じにくい。

着火源の強度は、その後の坑内火災の性状を支配する一つの要素であり、安定した延焼を持続するには一定以上の着火源が必要である。着火源が相対的に小さい場合には、富酸素型の火災条件を示し比較的緩やかに延焼するのに対して、着火源が大きい場合には、短時間で富燃料型の火災条件に移行して激しい燃焼状態となる。

⑥ 傾斜坑道における延焼特性

斜坑などの傾斜した坑道に発生する火災は、水平坑道と比べて性状が異なると言われている。実験によれば、上向き通気が行われている場合では、延焼速度が倍増することもある。下向き通気の場合では延焼速度が小さくなり不安定な延焼状態を示す。強制通気を行わない場合でも、大きな着火源を与えれば上向きに安定した延焼を維持する。このような傾斜坑道における特有な火災性状は、火災熱の浮力効果に基づく坑道内の通気状態の変化によるものと考えられる。特に、上向き通気の場合では延焼が加速的に進行するので、消火活動などにおいては十分な注意を要する。

⑦ 坑内火災時の通気圧力損失

坑道内で火災が発生すると、その箇所での温度やガス組成の変化のため、通気回路網内の通気圧と風量の分布が乱される。このため、正常な通気の維持が困難となり、最悪の場合には通気方向の逆転が生じたり、有害な火災ガスが坑内作業箇所へ流入する事態もあり得る。したがって、坑内火災時に生ずるこのような通気の乱れを的確に把握することが、安全で適切な避難誘導、救護活動あるいは消火活動を行うために必要となる。

参考資料:「炭坑保安技術要覧 第4編　坑内火災」(平成2年3月、石炭技術研究所、資源・素材学会編)

「坑内火災」(北海道鉱山保安技術職員養成所)

3) 坑内火災発生状況

昭和41年から59年までの坑内火災災害発生状況は、表1-17のとおりである。

表1-17　坑内火災災害発生状況

発生件数			22
り災者数	死　亡	131	175
	重　傷	39	
	軽　傷	5	

[出典]:「石炭鉱山保安統計集」(昭和60年9月、鉱業労働災害防止協会) p.133

平均すると年に1件以上の発生があり、この中には多数の死亡者を伴う大災害が生じていることが想像できる。

箇所別発生件数を表 1-18 に、原因別発生件数を表 1-19 に示す。

表 1-18　箇所別発生件数

箇　所　別	発生件数
沿層坑道	4
ゲート坑道	3
ＢＣ坑道	6
斜　　坑	2
坑内詰所	1
昇	3
大　坑　道	1
そ　の　他	2
計	２２

［出典］：「石炭鉱山保安統計集」（昭和 60 年 9 月、鉱業労働災害防止協会）p.133

表 1-19　原因別発生件数

原　因　別	発生件数
ケ　ー　ブ　ル	4
ベルトコンベア	6
発　　破	1
溶　断　機	1
ボ　ー　リ　ン　グ	3
ト　ロ　リ　ー　線	1
流　体　継　手	2
そ　の　他	2
不　　明	2
計	２２

［出典］：「石炭鉱山保安統計集」（昭和 60 年 9 月、鉱業労働災害防止協会）p.134

ベルトコンベアを火源とするＢＣ坑道の火災が最も多い。ベルトコンベアあるいはケーブル等の連続した可燃物がある坑道、または可燃物としての炭層が連続している沿層坑道、ゲート坑道という火災拡大を生じやすい条件のあることが分かる。

4) 災害事例

事例１：引立付近でボーリング中、口元から煙が出てきたので注水したが消えず退避、密閉水封した。（り災者なし）

・原因

沿層箇所の先進ボーリングを乾式で実施中、繰粉の出が悪くなり、ロッドが重くなった状態でさく孔を続行したため、回転による摩擦で過熱し、炭層部か可燃性ガスに着火し火災となったものと考えられる。直接原因としては、作業者が散水ホースをボーリングマシンに取付けてさく孔中いつでも放水できる状態にしていなかったため初期消火ができなかったものである。

・対策

① 原則として湿式ボーリングを行う。

② やむを得ず乾式ボーリングを行う場合は、副保安技術管理者の許可を受け下記対策を実施する。

イ. さく孔開始前にスイベルに水ホースを取付け、直ちに湿式ボーリングに切替える態勢にする。

ロ. 非常用消火ホースを用意して放水できる態勢とする。

③ 監督管理が充分行われるよう係員のチェック体制を強化する。

④ ボーリング作業の保安教育を定期的に実施する。

事例2：テールプーリーがズリで埋まったため、ベルトスリップにより発煙したので直ちに放水消火した。（り災者なし）

・原因

ベルトが運転再開されたとき、第2ベルト原動運転番は不在、さらに第1ベルト原動運転が仮眠中であり監視が行われていなかった。また、第1ベルト原動機のスリップリレー装置は機能が停廃されていたため、第2ベルト落口に搬出された石炭、ズリがかけ込み現象を起こしてスカートを乗り越え、第1ベルトのテール部付近に約3 m^3の石炭、ズリが蓄積した。このため、テールドラムとベルト間に石炭、ズリが詰まり第1ベルトのスリップを誘発し、駆動ドラムとベルトの間に発熱を起し発火したものと思われる。

・対策

① 保安装置が故障の場合は、運転装置が十分に監視できる体制の人員を配置する。

② 保安装置については、日常点検を強化するとともに機器については常に修理可能な体制をとる。

③ ベルト関係者に対しベルト管理に関する再教育を実施する。

事例3：ポンプ専用のがい装ケーブルが自然劣化又は外的損傷により短絡を生じ、遮断器は動作したが、調査せぬまま再送電したため故障箇所の短絡火花で成木が延焼した。（り災者なし）

・原因

ポンプ専用線（60sq 紙絶縁鉛被鋼帯がい装ケーブル）が、自然劣化または外的損傷のいずれかにより、地絡・短絡を生じたため、同系統の油入遮断器が動作したが、故障状況を調査せぬまま再送電したため、故障箇所の短絡火花が坑道の成木等に延焼し、坑内火災に発展した。（り災者なし）

・対策

① ケーブルに損傷を与えないよう、適当な防護施設をして作業を行う。

② 変電所の過電流リレーの適正な調整をする。

事例4：ＢＣスラスターブレーキのブレーキバンドの締付け過ぎによりライニングが過熱発煙した。（り災者なし）

・原因

発煙の原因は、ＢＣ電動機のスラスターのブレーキハンドルの締過ぎのため、ライニングが過熱発煙したものである。

・対策

① スラスター部の点検が困難な構造であるため、点検窓を大きく取る。

② カップリングの径は現在 180mm であるため、300mm に変えて、ブレーキ効果を上げる。

③ 現在フレームとの固定はギヤーボックスのみであるため、これをギヤーボックス、電動機各々を固定する。

事例5：トロリー線がアーチ枠に接触し漏洩電流により矢木が発火、直ちに放水消火した。（り災者なし）

・原因

電車大坑道を架空線式電気機関車が運行されたとき、何らかの原因で架空線を吊っているスパンワイヤの右側が切断され、架空線継手箇所がアーチ枠に接触したため、アーチ枠を通じてアーチの角面に喰い込んでいた左側壁裏側の湿潤したボケ矢木に電流が漏洩し、アーチと矢木間にスパーク、過熱現象が生じ矢木が焼け、火種状態となった。該坑道の通気量は 1,352m³/min であり、火種は矢木裏を通る漏気にあおられ加熱火床面積が拡大されたものと考えられる。早期に発見できなかったのは、煙および臭気がアーチ枠裏側の空洞に一時的に滞留していたためと思われる。（り災者なし）

・対策

① アーチ枠と架空線の接触防止としてハンガ線の吊り方について、点検、保守管理体制の強化を図る。

② 消火設備の強化、電車坑道全域にわたり消火栓を設置する。

③ 保安教育の強化

事例6：引立手前７ｍの右側壁からボーリング中、黒煙が出て付近の矢木に延焼したが直ちに放水消火した。（り災者なし）

・原因

ボーリングさく孔機と炭壁が離れ過ぎていたのでロッドがぶれた状態で回転し、このため孔内崩落を起し、さく孔ができない状態になったにもかかわらず無理にさく孔を続けたので、崩落炭とビット先の摩擦により温度が上昇、加熱され孔中の可燃性ガスに引火したものと思われる。

・対策

① ジャミング時は直ちにボーリングを中止して送水し、係員に連絡しその指示に

従う。

② ワンタッチ方式の確実な実施。バルブは圧気と水を色別する。

③ 原則として単独作業は行わない。

④ 送水の有無を確認するため、口付け時のさく孔はすべて注水を行う。次方でさく孔を継続する場合は、送水を確認後実施する。

⑤ 管理者の許可を得た場合以外はボーリング座より実施する。

⑥ ボーリング作業者に対する教育を徹底する。

事例7:P.Cの過負荷により流体継手の油温が上昇したが、可溶栓が所定の油温で作動せず、高温に達した油が発火した。(り災者なし)

・原因

パンツアーコンベアのトラフに過大の負荷がかかり、そのためシンクレアの油温が上昇したが、可溶栓が所定の油温で作動せず、高温に達した油が発火し、電動機下の空木積を焦がした。

・対策

過負荷によるP.Cシンクレア油の発火防止のため、次の措置を講ずる。

① 可溶栓は正規のものを使用する。

② シンクレアの油量は適正なものとする。

③ 電動機のサーマルリレーのセット値を適正なものに調整する。

事例8：泥水処理用ポンプのベアリングの保持器の破損により、ポンプ軸の回転が不円滑となり、駆動伝達用の非難燃性Vベルトがスリップして発熱発火した。

(り災者なし)

・原因

ポンプの組合わせアンギュラ玉軸受の下部ベアリングの保持器の破損により、ポンプ軸の回転が不円滑となり、非難燃性のVベルトが発熱・発火したものである。

・対策

坑内に設置の「動力伝導にベルトを使用している機器」については、ベルトの発煙・発火による事故を防止するため、保護装置および監視体制を強化する。

事例9：払に押込通気をしている局扇のケーブルが外力により断線過熱を繰返して発火したもので放水消火した。(重傷1名)

・原因

扇風機用の電源ケーブル60sqおよび30sqのうち、燃焼切断している60sqケーブルが何時かの時点に外力により芯線の一部が断線し、その破損箇所が局部的に過熱、さらに断線過熱の繰り返しが生じ遂に発火し、他の電線ケーブルと遊休ケーブルおよび周辺の矢木類に類焼したものと思われる。

・対策

周知の徹底と教育：

管理者はケーブル、電気機器等火源の管理の強化およびケーブル保守管理の強化の周知徹底と教育をあらゆる指揮系統、会議等を通じて早急に行う。

電気施設設置時の事前点検の強化：

ケーブルの損傷の有無、サイズおよび亘長の適否等設備時の点検を密に行う。なお、連続負荷に使用するケーブルは特に慎重に検討して選定する。

ケーブルの日常管理の強化：

挟圧、埋没の防止、作業箇所のケーブル防護、吊架保守、異常張力の防止、ケーブル上への器材等の搭載禁止、一般鉱山労働者による管理の強化を図る。

なお、連続負荷のケーブルは温度監視を特に強化する。

定期点検の強化：

６ヶ月に１回を目途に行っている精密検査時に連続負荷に使用しているケーブルは損傷箇所の有無、過熱箇所の有無について精密に点検する。

消火体制に関する指揮命令系統の確立。

事例 10：箱型調量門付近で B.C のキャリアローラーと内側ローラースタンドとが異常接触し、その発熱により落炭が蓄熱発火し、風下作業者がり災す。

（死亡８３、重傷１６、計 99 名）

・原因

一般のＢＣ布設坑道における坑内火災の火源としては

① 裸火の不始末による失火等

② 石炭の自然発火

③ ケーブル等電気施設による発火

④ ＢＣ等の機械施設による発火

等が想定されるが、現場調査の結果、①～③の可能性はなく、④について種々の実証試験及び検討の結果並びに現地調査の結果からみて、次の経緯により火災に至ったものと判断される。

① 調量門箱門内のキャリア台のローラの角と、溶接部付近でフレームから外れたローラスタンドとの間で異常摩擦が生じ温度が上昇した。

② この発熱により、発熱部分と接触する状態で調量門内に堆積していた落炭が蓄熱発熱した。

③ さらに火は、木とビニール等で構成された箱型調量門に移り、坑道に使用されていた坑木並びに落炭、ベルト、ケーブル等に延焼し拡大した。

・対策

当面対策

① 火災発生の防止

イ. 坑内火災防止の観点から改めてＢＣの保守管理面の点検・再評価を行うことと

し、必要に応じ保守管理要員の増員を行うこと。

ロ. さらに、保守管理要員の配置状況等を勘案し、ベルトの片寄り等によるトラブルを生じ易いところには、片寄りリレー等トラブル防止に必要な保護装置を適切に配置すること。

ハ. 掘進ボタ等大塊の前処理を徹底（小割の実施等）するとともに、ベルト周辺の掃除を徹底し、落炭、落ボタを除去すること。

ニ. ＢＣ布設坑道においては、箱型調量門は廃止すること。

② 早期発見・通報

イ. ＢＣ設置位置等現場の状況を考慮し、保守管理要員、煙感知器等の配置の適正化を図ること。

ロ. 坑内火災発生時は、初期対応が重要であることに鑑み、すべての鉱山労働者が早期対応に寄与するよう通報等に関する教育の徹底等を図ること。

③ 連絡指令体制の強化

イ. 連絡指令体制を再点検し、必要があれば緊急電話回線の増加等、警報連絡装置の整備拡充を図ること。

ロ. 緊急時における退避命令が迅速になされるよう、指令員の権限を明確にするとともに退避命令等に係るマニュアルの作成、指令員の教育等について再検討を行うこと。

④ 消火

イ. 坑内湧水等をポンプにより揚水し、これを消火用水源に利用している炭鉱にあっては、停電時等におけるバックアップのための水源を別途確保しておくこと。

ロ. 消火栓、消火ホースその他の消火施設を適切に配置するとともに、迅速かつ適切な初期消火を可能とするため消火施設の設置位置、取り扱い方法についての教育の徹底を図ること。

⑤ 退避訓練その他

種々の災害発生を想定し、既存の避難所に関し、構造（気密性等）、設置位置、設置数等の見直しを行い、その適正化を図るとともに避難所の使用に関する教育の徹底を図ること。

ＣＯマスク等救命器の性能及び使用方法の教育の徹底を図ること。

緊急時においても状況に応じた脱出経路の判断が行えるよう、全鉱山労働者に対し坑口までの退避訓練を実施するほか、坑内の要所にわかりやすい坑内略図を掲示すること等により、日常より坑内状況を確実に把握させておくこと。

・今後の課題

坑内火災による災害は、炭鉱の坑内火災に対する予防対策の強化と緊急時の保安管理システムを整備することの重要さを改めて指摘するに至ったことに鑑み、先の当面の対策に加え、今後下記項目についてその適用の可能性、具体的な適用方法を総合的に検討し、あるいは研究開発を進めることにより抜本的な坑内火災対策を樹立することが肝要である。

① 適用の可能性、具体的かつ計画的な適用方法について総合的な検討を必要とする事項

イ.ＢＣ等の機器の運転に伴う火災発生防止機能の向上及び保守管理の適正化について検討すること。

ロ.坑道及び坑内施設の不燃化、難燃化について検討すること。また、消火密閉その他の火災拡大防止対策等について検討すること。

ハ. 火災の早期発見のための各種集中監視センサーと人との適切な配置による監視体制のあり方および異常時における坑内状況の的確な把握方法について検討すること。

ニ. 緊急指令体制および指令員に対する教育のあり方について検討すること。

② 研究開発を必要とする事項

イ.携帯用酸素マスク、緊急時坑内連絡用通信技術について引き続き研究開発を進めること。

ロ. 初期消火、火災拡大防止技術の多様化および通気制御技術の開発を進めること。

ハ. 災害時の探検作業等の自動化技術の開発を進めること。

ニ. 坑内火災の特性把握その他坑内火災の防止および被害拡大防止の観点から必要な基礎研究及び技術開発を更に進めること。

5) 災害対策技術

① 坑内可燃物の難燃化

鉱山の坑内には様々な可燃物が存在する。石炭鉱山の場合、採掘対象の石炭自体が代表的な可燃物であり、沿層坑道などではこれも火災拡大に重要な役割を果たす。わが国では炭壁火災が伝播する災害は比較的少なく、そのほとんどの場合が自然発火に起因すると言われている。

その一方で、採掘、運搬あるいは坑道維持のために坑内に搬入される資機材の中にも多くの可燃物がある。なかでも坑木類は坑内の広範囲に存在するため、坑内火災拡大・伝播の危険性の観点からみると、最も重要な可燃物といえる。

坑木以外にも、いくつかの高分子機材や油脂類が坑内火災を拡大する可能性をもつ。なかでもケーブルとコンベアベルトは、上記のように坑内火災の主要因であるばかりでなく、それ自体が坑道に沿って長距離にわたり布設されている可燃物であることから、これらが一度坑内火災に巻き込まれると、火災伝播の媒体となる可能性をもつ。

したがって、坑内で使用する機材については、たとえばコンベアベルト、ケーブル、ゴムホース等で、難燃性の評価を考慮して使用品の選択を行っている。

② 検知技術

イ. 検知素子

坑内火災の早期発見は、災害及び被害を最小限にとどめる意味から欠かせない。従来は巡回者や作業者による役割が大きかったが、近年の火災検知技術の著しい進歩に

伴い自動検知システムの構築がなされている。

火災の検知の対象は熱および光、煙、ガスである。坑内で使用されている検知素子は次のとおりである。

・温度検知器：

温度検知器は外気の温度上昇を感知し、警報を作動させるもので、主なものとしては、熱電対や熱抵抗型、定温式及び作動式温度検知器、光ファイバ温度センサ等がある。

・煙検知器：

火災により発生する燃焼粒子は、燃焼の初期においては粒径が 0.1μm 以下の極めて微細なものであるが、燃焼過程が進行するにつれて微粒子の濃度が高くなるとともに凝結が始まり粒径が大きくなる。煙検知器はこれらの燃焼生成物を検知するもので、イオン化式と光電式の２種類に分けられる。

・一酸化炭素検知器：

火災時には何種類もの燃焼生成ガスが発生するが、ガス検知器はこのガスを検知することにより火災の発生を感知する。対象としては一酸化炭素および窒素化合物、硫黄酸化物などがあり、検知素子としては定電位電解式センサが使用される。

ロ. 火災検知器の配置とシステム

・火災検知器の配置

法的規制：

鉱山保安規則では坑内における巻揚機械室、コンプレッサ室、ポンプ室、扇風機室、変電設備設置箇所、油脂類貯蔵箇所、主要油入開閉器室、ベルトコンベアを運転する坑道で火災の発生または危険を感知する装置の設置を義務付けているほか、その他必要箇所として充電所、ベルトコンベアの駆動部付近などが運用あるいは指導の形で指定されている。実際にはこれらの箇所を最低限とし、各炭鉱の実状に応じた設置を行っている。

また規則で、一酸化炭素の含有率の増加、煙の発生その他の坑内の状況の変化により、との規定から、CO 計も火災検知器として煙感知器などと同等に扱われている。

箇所別検知法：

設置箇所を分類すると、坑内に設けられた室内にある機械類や可燃物の火災を想定した箇所（室内検知箇所）と、それに比べ通気の多い坑道などに設置された機械類等の火災を想定した箇所（坑道中検知箇所）がある。

室内検知箇所の場合、検知器としては煙感知器が多く使われるほか、回転機械の軸受けなど過熱箇所が特定できるところには温度検知器が設置されている。

坑道内検知箇所の場合、通気量が多く、岩粉散布や粉じんの発生する箇所もあることなどから、温度検知器や煙感知器の利用は条件の整ったところに限られ、CO 濃度計が多く用いられる。

ハ. 火災検知システム

坑内の保安情報の集中監視化が進み、数多くの情報が処理、記録されている。近年、コンピュータを用い、それらの情報を実時間処理するシステムが導入されている。

保安監視システム開発の一環として、各災害に対応した監視情報処理プログラムが開発され、各炭鉱の実状に応じて進展させている。たとえば、アナログ情報で得られるCO濃度についての、発破の影響の除去をはじめとするデータの選別、CO濃度変化の解析、判断による異常の検出の処理基準の決め方等である。

③ 火災拡大防止技術

イ. 坑道の難燃化、不燃化

坑内の主要必要箇所は、鉱山保安規則の定めに則り、次のような構造としている。

坑内における巻揚機械室、コンプレッサ室、変電設備設置箇所、一定のベルトコンベアの駆動装置および主要なプーリの設置箇所ならびに蓄電池式電気機関車用充電設備設置箇所は、防火構造（鉄網モルタル、しっくい等の不燃性物質で覆った構造）のものとしている。

坑内における油脂類貯蔵箇所、主要変電設備設置箇所および主要油入開閉器室は、耐火構造（コンクリート、れんが等の不燃性物質をもって堅固に築造した構造）とし、かつ、必要があるときは、他と遮断できる構造としている。

不燃化、難燃化の工法：

不燃化、難燃化の工法には、次のようなものがある。

坑道等のコンクリート覆工

坑道等のコンクリート矢木による覆工

坑道等のセメント・モルタル吹付け

坑道等の鉄板による覆工：ただし、坑道壁面と鉄板の間に砂、フライアッシュ等を充填、坑道壁面の可燃物（坑木、矢木等）と鉄板の間に不燃材（ロックウール保温材、グラスウール保温材、グラスウールブランケット等）を挿入あるいは自動散水装置の設置が必要。

坑道等の不燃材での覆工：ただし、不燃材については石綿スレート、石膏ボード、木毛セメント板、パーライト混入硬質ロックウール板等を用い、不燃材の防火効果を低減させないよう施工すること。

自動散水装置の設置：ただし、必要な放水量、放水圧力を有し、早期に散水を自動的に開始できるようセンサを取付けること。

ロ. 消火技術

坑内火災は、坑内構造の特殊性、すなわち強制通気が行われていること、ガス・炭じん爆発への配慮が必要なこと、逆流煙による消火活動の阻害などの特異な条件を備えていることにより、火災の発達の段階で消火への対応が大きく異なってくる。

・ 法規と消火設備

鉱山保安規則に定められた、消火設備と設置箇所は次のとおりである。

自動消火設備の設置箇所：

坑内コンプレッサ室、油脂類貯蔵所、主要変電設備設置箇所および主要油入開閉器室。

消火栓の設置箇所：

ベルトコンベア駆動部および布設坑道、内燃機関車もしくは架空線式電気機関車を運行する坑道および動力用電線を配線した坑道では当該坑道の起点、終点およびそれから100mごとの箇所、油入電気機器の設置箇所。

消火栓および自動消火設備以外の消火設備を設置する箇所：

巻上機室、コンプレッサ室、扇風機室、変電設備設置箇所、主要油入開閉器室、油脂類貯蔵所、坑内事務所、火薬類取扱所、ベルトコンベアの駆動部およびその他の必要箇所。これらの箇所には消火栓のほか、消火器、消火砂、岩粉等を設置する。

上記のほか、次のような自主的な強化対策を実施している。

主要機器（ポンプ室、充電所、クラッシャ、冷房機）設置箇所の風上側の有効な位置に消火栓、ホース及びノズル等を設置。

移動用電気機械（コンティニアス・シャトルカ等）には消火器、消火砂を搭載し、走行範囲の坑道には20～30m毎に消火用取出口を設置。

採炭作業場および掘進作業場付近には消火用取出口を取付け、ホースを設置。

その他管理者が指定した箇所には、消火栓、ホース、ノズルを設置。

蓄電池式機関車には消火器、ホースを搭載。

・その他の消火法

泡末消火：

泡沫消火は、坑内火災の初期消火に失敗し直接消火が不可能となったときに注水消火に代わって行われる方法で、遠隔のところから泡沫を送気する方法である。

原理は、中性洗剤溶液を水流と混合して網に噴霧し、扇風機により送られた空気で網の前面に膨張率500～750倍の軽い泡を発生させ、通気圧で火災帯に送泡消火するものである。この高膨張泡沫の特徴は、気体と同様に流動性に富んでいるので、遠隔のところから坑道内を火災帯に連続的に坑道断面一杯に流送し、空気遮断による窒息効果を第一とし、二次的に泡沫のもたらす水による冷却効果により消火する方法である。

坑内消防車：

消火設備は蓄電池式機関車（バッテリロコ）の電池を利用して駆動されるポンプと炭車を連結し水バックとした5輌編成からなり、火災発生時にはバッテリロコで牽引して現場に急行し、初期消火活動を行うものである。

ハ. 新消火技術

・液体窒素急速気化による消火

坑内火災がかなり発達した段階で不活性ガスを入気側の通気に導入し、入気の酸素濃度を低下させて消火あるいは抑制する方法である。この液体窒素の急速気化の概念は、気液混合型の特殊ノズルを用いて液体窒素を極めて細かい液滴として気流中へ噴霧し、気流の熱により気化潜熱を与えて短時間のうちに多量の液体窒素を気化させようとするものである。

・不活性ガスと泡沫の複合消火

窒素等の不活性ガスを通気に導入し、火災区域に通気に乗せて運び消火する場合は上述したが、通気による不活性ガスの搬送距離が長くなると、拡散による不活性ガスの濃度低下すなわち、酸素濃度の増加につながる。これに対処する方法として、不活性ガスを用いて泡沫を発生させ、この泡沫の中に不活性ガスを封入して火災区域に泡沫とともに流送し消火する方法である。

・急速通気制御による火災抑制・消火

耐熱性のシートで作られたパラシュート状の設備を坑内の通気の力を利用して膨らませ、坑道を遮断し、結果的に通気を急速遮断し火災を制御する方法である。パラシュートによる火勢の抑制の次の手段として、不活性ガスの利用や直接消火により、完全消火の達成を図る。

・空気袋を使った密閉

直接消火による消火が困難な場合、または失敗した場合、密閉によって消火を行うが、密閉構築時間を短縮する方法として、空気袋を使って密閉する方法が開発されている。これは密閉構築箇所が素面(すめん)作業を行う状態にないとき、救命器装着の救護隊により短時間で実施することもできる。

密閉の本体は本体空気袋（大、中、小）と補助袋により構成される。構築順序は、先ず防炎幕を張設して作業の安全を確保した後、支え網（奥、手前）を張り、その中に空気袋を挿入する。空気袋へ給気し密閉度を高めるよう袋の整理、調節を行い完了する。

④ 研究開発

イ. 耐火災型地下通信システムの開発

地下空間で火災が発生し、通信系がダメージを受けると緊急退避の情報伝達がうまくできなくなり、被害を大きくすることになる。したがって、無線通信あるいは有線通信の通信系を確保することは安全対策上から重要である。

本研究は、火災時における通信系の特性を明らかにし、火災に強い通信方式を開発するため試験、検討を行うものである。研究は、九州石炭鉱山技術試験センターにおいて実施されている。

坑内無線システムの開発を行い、その機能や坑道空間における電波伝播特性についての現場試験による、システム評価等を行っている。

ロ. 坑内火災煙対策技術

坑道形状・傾斜による火災煙および熱気流の流動特性や坑内火災時の煙流動と消火方法等の研究が、九州石炭鉱山技術試験センターにおいて実施されている。

参考資料：「炭坑保安技術要覧　第4編　坑内火災」（平成2年3月、石炭技術研究所、資源・素材学会編）
「坑内火災」（昭和58年4月、北海道鉱山保安技術職員養成所）
「鉱山保安規則（総集編）」（平成9年版、通商産業省環境立地局監修）
資源環境技術総合研究所九州石炭鉱山技術試験センターホームページ
「資源と素材」（2000年12月号ほか、資源・素材学会）
「坑内火災事例集」（昭和60年3月、北海道炭鉱技術会、九州炭砿技術連盟）

1.5.3 自然発火

1) 総説

石炭の新破砕面は空気中より酸素を吸着し、それと結合する。すなわち、酸化する性質があって、その結果として炭酸ガスを発生すると同時に、若干の発熱がある。それを外部から冷却しなければ逐次温度が上昇し、それによって酸素との結合が益々旺盛となり、遂に発火するに至る。これが自然発火である。

石炭の自然発火の原因に影響を及ぼしている要因は非常に多く、その解明のため多くの研究が行われている。要因を列記すると次のようになる。

・内部要因（石炭の性質に関するもの）：

揮発分及び酸素含有量

石炭の水分含有量および孔隙率

石炭の岩石学的組成

石炭のパイライトを含む化学的組成と鉱物質

石炭の脆弱性

・外的要因（坑内の環境と採掘条件に関するもの）：

. 雰囲気等の要因

環境の湿分

環境の温度

通気方式および気流速度あるいは漏気（酸素濃度）

.地質及び採掘上の要因

炭層および上下盤岩石の熱伝導性と熱拡散性

採掘方法

バクテリア

2) 石炭の性質と自然発火

石炭の揮発分及び酸素含有量と酸素吸収量との関係については、それぞれある値で最大値を示す。

一般的に固有水分の多い低炭化度の褐炭は、自然発火しやすいとされている。これは、石炭中の固有水分が気流と接触して蒸発するとき、石炭に多くの細かい亀裂が入り、これにより生じた新鮮な面は酸素と結合しやすく、気流中の酸素に接触して急速に酸化されるからである。

石炭のパイライトが自然発火の原因であるとの考えがあったが、必ずしもその含有量と自然発火の関係は認められていない。ただし、２％以上の硫黄含有量の石炭は自然発火しやすいといわれ、また、別の表現ではパイライトが集中的に存在しているような石炭では、その集中点を中心に自然発火がしやすいといわれている。その他の無機成分については、あるものは自然発火を促進する触媒として作用し、別の成分は、逆に発生を抑制する触媒として作用するといわれているが、確証されているわけではない。

脆弱な石炭は、採掘時の発破や機械力により、また、地圧の作用により圧砕されて粉

化されやすい。そのため、石炭の比表面積は著しく増加し、酸素の吸収速度が加速される。石炭の表面積が増加すると初期の酸化作用が促進され、発熱が急速に進み温度の上昇を生じるため、石炭の粒度が自然発火と関係があるといえる。そのため、脆弱な粉化しやすい石炭は自然発火しやすいことになる。

これを坑内の石炭の状態で例示すると、断層、褶曲等地質構造の変動によって破砕された石炭、盤圧によって破砕された石炭（たとえば過小な残柱、坑道の交叉点）あるいは採炭跡に残留する石炭等がこれにあたる。

3) 坑内の環境と自然発火

炭鉱の坑内温度は、一年を通してほぼ一定しているため、夏季と冬季および一日の中でも昼と夜等で湿度の異なる坑外の大気が坑内に流れ込むと、石炭表面との間に水分の授受が絶えず行われていると同時に、熱の授受も行われている。

石炭の温度と酸素吸収量との関係は、60℃を超えると酸素吸収量に急速に影響が現れ、自然発火が発生しやすくなる。100℃を超えると一段と酸素吸収量が大きくなり、酸化が連鎖反応的に進行し始める。

坑内では残炭柱や炭壁に亀裂が入り、気流が短絡して漏風が生じ、自然発火を起こすことがある。また、採掘跡の充填の気密性が不十分なため気流の短絡が生じ、あるいは扇風機の負圧を増加することにより生じた通気圧の増加等のために、自然発火が起こりやすくなる。つまり、通気圧の変化により生ずる気流が石炭の発熱に関与している。また、通気量、通気速度も自然発火に重大な影響を及ぼすが、いずれにしても、新鮮な石炭表面を酸化するのに十分な酸素を供給し、酸化したときに発生した酸化熱を拡散せずに蓄熱する程度の風速が自然発火に必要である。

通気抵抗の変化、気流方向の変更等も自然発火の発生条件の一つとなる。

4) 採掘条件と自然発火

採掘に伴う自然発火の可能性については、採掘箇所や採掘方法により発生要因は一定でないが、新しい空気流による石炭の酸化と、それに伴う熱の蓄積する条件が重なった場合に発生する。

程度の差はあれ、どのような採掘方法でも自然発火は起こり得る。また、採掘跡の処理の仕方により起こりやすさに違いが出てくる。

新しい炭壁面が空気にさらされてから自然発火が発生するまでには、ある程度の期間が必要である。最も早い場合は一週間程度であり、長期間経過後にも発生事例がある。採掘後の経過期間については、自然発火を起こす条件がそろえば、いつでも発生する可能性があると考えられる。

発生箇所としては、切羽の始発部、終掘部および断層通過部等石炭が粉化しやすい箇所で、通気量として漏気程度の流れのところである。したがって、特定箇所として自然発火の発生源となる箇所が存在しているわけではなく、気流を完全に遮断しにくい箇所があれば、外的条件さえそろえば、発生の可能性があるといえる。

参考資料：「炭鉱保安技術要覧　第3編　自然発火」（平成2年3月、（財）石炭技術研究所、（社）資源・素材学会

5) 発生状況

昭和24年以降昭和59年までにわが国の炭鉱で発生した自然発火は、296事例を数える。

昭和41年から59年までの発生状況は、表1-20のとおりである。

表1-20　自然発火発生状況

発生件数			77
り災者数	死亡	8	337
	重傷	279	
	軽傷	50	

［出典］：「石炭鉱山保安統計集」（昭和60年9月、鉱業労働災害防止協会）p.120

箇所別発生件数は、表1-21のとおりである。

表1-21　箇所別発生状況

箇所別		発生件数	
払関係	払跡	9	33
	払ゲート坑道	9	
	払	4	
	払終掘部	4	
	払始発部	2	
	旧採掘跡	5	
密閉			12
沿層			15
立入			4
目抜			2
斜坑			4
大坑道			3
昇			1
ボーリング孔			2
機械室			1
計			77

［出典］：「石炭鉱山保安統計集」（昭和60年9月、鉱業労働災害防止協会）p.120～121

要因別発生件数は、表1-22のとおりである。

表 1-22　要因別発生件数

要　因　別	発 生 件 数
残炭払跡漏風	12
密　閉　漏　風	12
残　　炭　　柱	8
亀　裂　漏　風	13
崩　　落　　炭	5
払跡断層残炭	2
三　角　炭　柱	6
旧採掘跡残炭	1
高　落　箇　所	2
不　　明	16
計	77

［出典］：「石炭鉱山保安統計集」（昭和 60 年 9 月、鉱業労働災害防止協会）p.122

発生状況を概説すると以下のようである。

自然発火発生数は、冬期間に比較的多く発生している。

炭層数が多く賦存し、断層も多い地質条件を有する地域の炭鉱で自然発火発生数が多い傾向がある。断層線のもろい石炭の存在などで複雑な漏気回路が生まれやすいこと等が一因になっているのではないかと考えられる。

厚層を採掘してきた炭鉱においても発生数が多い。厚層の完全採掘の困難さや漏気防止の難しさが一つの要因として考えられる。

地質状況：

各地区において、自然発火の多い炭層は存在する。その理由は断定できないが、これらの炭層はいずれもその地区の主力炭層であり、採掘頻度が最も高かったためではないかと推定される。

厚層での自然発火が多い傾向がある。厚層は、これらの採掘頻度が高いのみならず、歴史的にみると採炭において上盤際あるいは下盤際などに未採掘炭を残した場合が多かったと考えられる。また、充填を完全に行うことの困難さも一因をなしていると推定される。

地圧で破壊されやすい弱い炭柱、断層部残炭柱、上位炭や冠炭の亀裂崩落個所、密閉内の坑道などでの発生数が多い。いずれも適度の漏風または通気の迂回路になりやすく、酸化蓄熱に好都合とみなせる箇所である。

作業環境：

自然発火と深度の間には一定の関係は見当たらない。

採炭方式が前進式である場合、総ばらし払、全充填払のいずれにおいても自然発火が多い。柱房式採炭においても多く発生している。

採掘後発生までの期間をみると、採掘後 1 年以上経過した箇所での発生が非常に多い。

酸化蓄熱の環境条件が整えば、いつでも自然発火のおそれがあることを示している。

処置状況：

自然発火箇所についての処置としては、直接消火で対応しきれない場合や、将来的に再発火を防止するために、当該箇所を包囲して密閉措置を講ずる場合が多い。

密閉所要時間は密閉方法や箇所数により様々である。仮密閉を除き、最短時間は5時間、最長時間は288時間である。

自然発火発生後、密閉開始までの時間は1～10時間であった場合が多い。他方発生後48時間以上経過して密閉を開始した場合もかなりある。この中には、直接消火実施後最終的に密閉に踏み切ったという場合も含まれる。

自然発火事例中7～8件に1回水封が行われている。多くの場合、ある限定されたレベルや区域に対して行われ、それに要する期間は2～3日程度から1箇月以上の場合まで様々である。確実な消火と他区域への拡大防止と現場の再開をねらったものと考えられる。

その他：

自然発火が発生したときは、臭気、発煙、CO濃度増加で察知した場合が多い。

わが国の炭鉱における自然発火は、昭和48年頃から、絶対数のみならず出炭100万トン当たり発生数も減少してきている。これは、フライアッシュ充填法の普及、採掘法の改善、ガス吸引法の改善、採掘跡の早期密閉、その他総合的な対策が向上した結果と考えられる。ことに昭和43年ころから普及してきたフライアッシュ充填法は、漏気防止の有効な技術の一つであったと評価できる。

参考資料：「自然発火災害事例集」（昭和61年3月、北海道炭鉱技術会、九州炭砿技術連盟）

6) 発生事例

事例1：上位層の採掘跡と通気短絡を起こし、上位層採掘時踏前に残した炭が蓄熱酸化し、払跡で自然発火が発生、払内および払跡を流送充填し消火した。（り災者なし）

・原因

払断層部の崩落箇所は充填ズリ上に空木を組んで山固めを実施したが、取り明け不能のため切替昇を上げて払面に貫通させた。断層部の充填ははね込み充填であったため密度が不十分であった。

以上より充填ズリ沈下等により空木組みで受け込んだ天盤が緩み亀裂が生じ通気回路を作り崩落上部に残した炭と短絡し自然発火に至ったものと推定される。

・対策

累層採掘の下位層の断層部の採掘に対しては、施枠を強化する。

累層採掘の下位層時に崩落させた場合、上位層に残炭があるときは、充填は特に入念に行うとともに、岩粉流し込み、あるいは流送充填により崩落箇所をてんそくし通気を遮断する。

断層部の差し込み炭を完全に除去し、採掘跡は充填を入念に行うか、あるいは可及的速やかに流送充填等の方法によりてんそく通気の遮断を行う。

事例2:戸門箇所の三角炭柱部分で入排気の差圧が高かったため亀裂部から漏風し自然発火が発生し、包囲密閉す。(り災者なし)

・原因

この箇所は約2年前に掘削された鋭角の炭柱部で、3重門が設置してあり、入排の差圧が高かったため(差圧水柱 56mm)亀裂を生じ、漏風していたことが原因と思われる。

・対策

沿層坑道の高差圧箇所で、自然発火のおそれがある箇所は巡回を強化する。

巡回者には自然発火に関する教育を行う。

要注意箇所はセメント注入等の処置を行う。

事例3:(徴候)払内の払跡ばれ込み内から異臭があり、ガス測定の結果 CO が 80ppm あったので払跡へのフライアッシュ流送、注入等の処置をしたが好転せず包囲密閉す。(り災者なし)

・原因

断層出現のため払跡に多量の残炭が生じた、払の進行が遅れた、風量が必要以上に多く払跡漏風を促進させた等のほか、この炭層は過去に自然発火の経験がないことにより断層部および残炭に対する措置が甘かったため、酸化現象が促進し自然発火の徴候に至ったものと判断される。

・対策

(1) 払が断層を通過するに際し、実技面で払跡残炭を少なくする方法をとるが、やむを得ず炭を残す場合はバラ岩粉の投入等の処置を行う。

(2) ゲート側の充填については、漏気検査の頻度を高め、必要に応じ吹付等による漏気防止対策を行う。

(3) 主扇に近い払で、排気筋に戸門を設ける場合、断層通過前に3枚戸とする。

(4) 払跡に残炭を残すおそれのある断層部を通過する場合のゲート側充填は断層前後各 10m の木れんが巻を実施するほか、さらにズリ積の中に岩粉袋詰 0.6m でビニルサンドする。

(5) CO 連続監視装置を導入して、各主要分流排気の気流中に設置し、異常湧出の早期発見につとめる。

事例4:スライシング下段払で、上段払の断層差し込み炭が残っていて、この炭が払跡の漏風により白煙化し、肩坑道までたなびいてきたため、払の包囲密閉に着手し、排気側密閉破損のため水封消火す。(り災者なし)

・原因

上段払始発部付近において落差約 1.5m の逆断層が出現し、この差し込み炭が坑道冠及び上段払深袖巻き充填の冠に残り、これが弱小炭柱となり時間の経過とともに圧砕され亀裂の発達に加え下段払の採掘に伴ってさらに促進し、払跡への漏風酸化

を助長し発熱自然発火に至ったものと推定される。

・対策

断層等により坑道冠(かんむり)に石炭が残る箇所の採掘にあたっては、自然発火防止上特に次の点に注意する。

掘進時：断層部の坑道は冠にできるだけ炭をつけない。

採炭時：袖巻き充填冠に炭を残さないようにする。

漏風防止対策：袖巻き充填を強化し漏風を防止する。特に追流送を確実にする。

下段払採炭時深坑道を充填する。

事例５：旧坑道の取明(とりあけ)掘進で、途中で冠に炭柱が残り、これが弱小炭柱となり、炭柱の亀裂に通気短絡し蓄熱発火す。(り災者なし)

・原因

この坑道は若干の昇勾配で設定され全加背 FA 流送充填が行われていたが、払肩坑道として再度使用するため取明掘進が水平に展開したため、途中に冠に炭柱が残る形となった。これが弱小炭柱となり坑道取明掘進後２ヶ月以上経過していたため炭柱の亀裂が発達し、さらに高落ち箇所に局部通気の戻り風が滞留し炭柱の亀裂に通気短絡し酸化蓄熱が助長され自然発火に至ったものと推定される。

・対策

弱小炭柱を残さないような掘進方法を検討し実施する。

やむを得ず炭柱を残す場合は弱小炭柱とならないよう安全炭柱とする。

弱小炭柱は原則として早急に除去する。その間は適当な間隔で測定孔を設け、指定ランクとし、留点温度計を使用し、状況変化の早期発見に努める。

事例６：坑道の回収作業を担当していた係員が異臭を感じ、さらに煙がただよっているのが認められたので、直接消火作業を行うとともに包囲密閉を行った。(り災者なし)

・原因

奥の既回収坑道の炭柱が時間の経過とともに崩落し、亀裂が生じ、酸化蓄熱して自然発火に至ったものと推定される。

・対策

掘採にあたっては原則として弱小炭柱を残さないようにする。

やむを得ず弱小炭柱が生じた場合は観測体制を強化し、早期に除去するか状況により箱巻き等による漏気防止の措置を講ずるとともに、パイロメーター観測管を挿入し監視体制の強化を図り異常時に対処する。

採掘終了後は３ヶ月を目途とし撤収、密閉計画を確実に実施する。

上記対策は関係者に教育を実施し、その周知徹底を図る。

事例７：巡回中の係員が終掘払の肩坑道で異臭を感じ、検査したところ、払跡の踏前残炭から発煙しているのを発見、ゲート側は通常のフライアッシュ密閉、肩側はフライ

アッシュの流し込みによる密閉（水封）を施した。（り災者なし）

・原因

この払跡には踏前に炭が破砕された状態で残っていた、風量は払稼働中から災害発生時まで逐次減少し冠部に変化を与えた、払機材回収作業により風みちが上部払跡を通過することになり酸素供給を助長した、等の状況により、踏前残炭が日時の経過とともに酸化蓄熱し、さらに同所付近の通気変化に伴いこれが促進し発煙に至ったものと推定される。

・対策

払冠およびゲート坑道の漏風防止対策の強化を図る。

弱小炭柱に対する自然発火防止対策の強化を図る。

観測体制を強化し、自然発火徴候の早期発見に努める。

各必要区域、必要箇所における緊急資材の配備ならびに早期かつ的確に密閉できるよう外囲の構築を実施する。

撤収切羽について、散水設備、ガス集中監視センサー等各種保安施設を切羽の撤収完了するまで設置管理する。

FA 流送能力の増強のため、可搬式充填設備を設置する。

自然発火災害防止、保安対策の周知徹底および教育の強化、緊急時の的確な連絡体制の確立を図る。

各種保安設備の見直しおよび管理強化に努める。

事例８：公休日の巡回係員が立入で異臭と煙を発見し、指令室に報告し、マインゼムを着装して放水しながら探索したが煙のため火源の確認できず、状況悪化し包囲密閉す。（り災者なし）

・原因

払終末部と立入間の残炭柱が掘進後１年以上経過しており、かつ採掘に伴う先行圧等により擾乱を受け酸化蓄熱し自然発火に至ったものと推定される。

・対策

公休日払関係の作業休止箇所の巡回は１方１回とする。

集中監視の勤務体制は、手順書を作成し関係者への教育ならびに手順書を指令室に掲示し、平常日体制は１番方に補助人員１名を配置、２，３番方については交代時１時間勤務がラップする体制をとる。また休日体制は２名／方制とする。

立入炭柱は完全採掘とする。やむを得ず立入炭柱を残す場合は立入より十分な距離を置くとともにパーロメーターまたは留点温度計を挿入し温度を測定する。

事例９：仕繰拡大中炭層貫縫箇所で異常が発見されたので穿孔、注水等手当を行ったが急変し発火の事態に至ったので包囲密閉す。（り災者なし）

・原因

炭層貫縫部狭小区間周辺の亀裂発達した軟弱炭層が通気の渦流現象および通気短

絡により酸化蓄熱現象が進行していたところ、注水作業に伴い酸素の供給が急速に増加したため酸化蓄熱を助長し、発煙発火に至ったものと推定される。

・対策

主要坑道における炭層貫縫箇所の対策強化：吹付、函巻の的確な実施と観測体制の強化

沿層坑道の対策強化：払跡の早期密閉と要注意箇所、弱小炭柱、立入の着炭等の防止対策観測体制の強化

事例 10：集中監視で CO の異常を検出し、調査の結果、払肩跡方から臭気と CO が流出しているのを発見し、密閉す。(り災者なし)

・原因

この区域は過去に自然発火及びその徴候は発生しておらず、その原因は確定できないが、次の条件が競合し CO が発生したと考えられる。

払跡に近接上位層が崩落し、存在していた。

払跡方漏気にさらされる時間が他の区域より長くなった。

深坑道は二度使用するため、坑道を維持し漏風通気の可能性があった。

・対策

密閉完了まで定点観測を行い、CO の変動を監視する。

払ゲート坑道は、密閉奥部は再使用しない。

稼行炭層の上部 5m 以内に炭層が存在する場合、または自然発火のおそれがある残炭が払内に存在する場合、または類似払においてはゲート坑道跡方には 30m 毎に仮密閉を行う。

7) 自然発火の予知

自然発火進行の過程は、石炭と空気中の酸素との結合速度により左右されるので、石炭および環境の温度が低い時点では比較的緩慢な現象であるが、温度の上昇に伴い急速な発火状態に進展する。したがって、早い時点で自然発火の徴候を発見し、対策のための十分な時間を得ることができれば、災害に至る前に鎮静化することが可能である。

自然発火の進行状態を、表 1-23 に示す。

表 1-23 自然発火の進行状態

期間	温度（℃）	現　　象	発生ガス
緩慢な酸化期間	25～30	局部温度上昇	石炭中の水分と吸蔵ガスを発散する
	30～40	水蒸気発生、発汗現象	
	40～50	坑道乾燥、木材腐敗臭	
	50～60	排気にかすかなパラフィン臭	
初期発熱期間	60～100	温度上昇が速くなる（特に 84℃付近から急に速くなる）	H_2O、CO（80℃前後から）
	100～150	温度上昇が一層急になる、自然発火特有の臭気増す	CO_2（150℃前後から）
	150～200	温度が急激に上昇する	
	200～300	石炭は少し分解し、刺激性の臭気が強くなる	CH_4（250℃前後から）またエタン、エチレン等を発生する ガス量は温度上昇に比例して多くなる
前期発熱期間	300～500	石炭に着火し石炭の低温乾留が起こる	多量の煙、種々のガスを発生する（上記のほか H_2 もでる）
後期発熱期間	500～800	石炭の二次分解がおこる、コーライト及び発生ガスが燃焼する	益々多量の煙及びガスを発生し最後に発煙する

自然発火の現象を早期に発見するためには、徴候の初期段階において平常と異なる諸要因を検知する必要がある。

実用化されている検知要因としては次のものがある。

・石炭あるいは炭層温度の上昇

・発生ガスの組成変化

・臭気の変化　等

① 発生ガスによる検知

イ. 温度と発生ガス

石炭温度の上昇につれて、各種ガス成分の濃度が指数関数的に上昇するので、早期検知のための有効な指標となる得ることがわかる。

現在指標ガスとして、CO、C_2H_6、C_3H_8、C_2H_4、C_3H_6、i-C_4H_{10}、n-C_4H_{10} およびベンゼン、トルエン、キシレン等のうちいくつかに注目し、使用している。

特定のガス成分の濃度変化に注目するばかりでなく、CO／O_2 欠損、CO2／O_2 欠損、各種アルカン比（C_2H_6／CH_4、C_3H_8／CH_4、C_4H_{10}／CH_4 など）なども有効な指標となり得るといわれている。

自然発火時の密閉ガス分析結果の例を示すと、

・微量成分と呼ばれる成分が全般的に多くなっている

・COの発生がある
・C_2H_6、C_3H_6、C_4H_{10}等オレフィン系炭化水素の発生がある
となっている。

ロ. COの計測

坑内で発生する自然発火の広域監視法として、排気気流中のCO濃度の測定は古くから行われている。

センサとして定電位電解式COセンサを用い、集中監視体制がとられている。

計測箇所には次のようなものがある。

・主要排気坑道の気流中
・主要分流および払関係排気等
・ガス誘導施設（坑外へ直接ガス誘導するものに限る）のガスパイプ
・自然発火の発生しやすい箇所の通気短絡および坑道の維持期間を考慮し、保安技術管理者が特に自然発火の恐れが多いと認めた箇所
・自然発火の徴候を察知した箇所および徴候又は発生により坑道等を密閉した箇所
・その他（坑内火災の項で述べた主要設備設置箇所等多数）

② 温度による検知

温度の計測による自然発火の監視・早期発見法は古くから試みられてきた。この方法の欠点としては、石炭の熱伝導度が極めて低く、いわば断熱材的オーダーであるために、温度受感部が自然発火による高温域から少しでも離れた位置にあると、実際の温度よりかなり低い温度しか示さず、発見が遅れる可能性が高いことである。

温度観測法としては、自然発火の危険がある残炭や炭柱内に鉄管を挿入しておき、その内部に温度計をセットして温度上昇を観測するもので、温度計としては、アルコール水銀温度計、熱電対、サーミスタ温度計、パイロメータ等が使われる。

③ 臭気による検知

自然発火の進展の程度によって発生する臭気が異なることから、経験を積んだ坑内係員によればかなりの精度で発火箇所及び進行の程度を推定できる場合がある。

自然発火に伴う臭気を、表1-24に示す。

表1-24 自然発火に伴う臭気

臭　気	原　因	推定温度℃
古臭	バクテリアの発酵	40～60
腐敗臭	有機物の腐敗	40～60
酸味臭	芳香族有機酸の形成など	80～200
芳香臭	有根酸エステルの形成など	80～200
甘酸臭	酸味臭、甘味臭の合成	80～200
にんにく臭	アミン類など窒素化合物による	80～200
池臭 タール臭 木の煙る臭	パラフィン、ナフサ、タール等による臭気で石炭分解初期のもの、特に石炭酸の臭気は強い	200～300
刺激臭	パラフィン、ナフサの分解、酸化等で強烈な刺激臭	

8) 自然発火の予防

① 採掘上の予防

採掘後は時間の経過とともに酸化時間も長くなるので、一定区域毎に区域全体を包囲密閉し、通気を遮断してしまうのが望ましい。

層間が接近しているときは、採掘の影響で亀裂の発生による通気短絡を防ぐため、上位層から採掘するのが望ましい。

その他厚層の採掘、充填法、下部レベルの採掘、切羽始発部、終掘部、後退式採炭方式、採掘速度、坑道周辺等それぞれに合った予防法がとられている。

不用坑道、不用空間は早期に密閉する。

② 通気上の予防

通気短絡を起こしやすい条件としては、

・主要扇風機の負圧が高いとき

・入排気坑道間の圧力差が大きいとき

・局部的に通気抵抗の大きい箇所があるとき

等があり、特に留意すべきこととしては、

・入排気坑道が沿層中にあって、接近しているとき

・坑道断面積が狭く、通気圧が高く通気抵抗が大きいとき

・メタンガス排除のため、高負圧で風量の増加を図ったとき

・坑内作業場冷却のため、通気量を増加したとき

・通気変更のため、通気方向や通気量の増減がしばしば行われたとき

・不用箇所の密閉後れや、密閉不良により漏気が進入したとき

等が挙げられる。

通気上の対策としては、

・主扇負圧の調整

・坑道断面の維持

・坑内構造の簡素化

・通風による冷却

等により対応することになる。

③ 流送充填の効果

フライアッシュ（FA）は充填材料として、当初は袋詰めとして使われた。昭和40年代に入り、FAに水を加えて液状にして流送運搬する技術が実用化された。これにより自然発火発生は大幅に減少したということができる。水の替わりに坑内水を使用したり、選炭排水を使用したり、硬度を増すためにセメントを加える方法等がある。

FA流送充填には次の利点がある。

・気密性に優れる

・流送充填の能率が高い

・FAは取り扱いやすい

④ 防止上の監視体制

自然発火防止のための監視体制は、大別すると、人による監視・観測と機器による監視である。

現在は機器による監視が定着している。しかし、自然発火の判定など異常時の対応については人による監視と採取ガスの分析による判定が優先しているのが現状である。

⑤ 消火方法

坑内火災の項で述べているので、この項では省略する。

参考資料:「炭鉱保安技術要覧 第3編　自然発火」(平成2年3月、(財)石炭技術研究所、(社) 資源・素材学会)

1.5.4 爆　発

1) 総説

本項では、ガス爆発と炭じん爆発及びこの両者がほぼ同時に発生するガス・炭じん爆発について述べる。

メタンの爆発に際しては、100 以上の反応が複雑に関与しているとされ、さらに爆発が発生する箇所の諸条件によって、反応は複雑に変化する。メタンという一見単純に見える可燃性ガスの爆発でさえ、まだ完全に解明されていない。ましてや固体粒子が加熱されガスを放出して、それが燃焼し隣接粒子に熱エネルギーを与えるというプロセスの繰り返しで発生する炭じん爆発の理解は複雑怪奇とさえいえる。

しかし、爆発のプロセスを完全に理解していなくても、爆発現象そのものをよく理解していれば防止対策は立てられる。

これらの爆発災害は炭鉱における最も重大な災害であり、その対策に早くから着手している。

メタンの場合は通常、メタン容積百分率５～15％を爆発限界としている。メタン爆発の最強爆発点は 9.5％前後である。炭じんとメタンが共存する状況では、爆発下限界が低下する。

炭じんについては、どのような炭じんでも爆発を起すというわけではなく、爆発を起す炭じんを爆発性炭じんという。炭じんの爆発性は工業分析による揮発分、水分や灰分などの不燃性物質含有（混合）率、および炭じんの粒度などによって影響を受けるほか、爆発性の有無は着火源の強さ・大きさによっても変わり得る。一般に炭じん爆発の対象となる炭じんの粒度は数百ミクロン以下のものと考えられている。

ガス・炭じん爆発の着火源としては次のようなものがある。

発破

電気エネルギー

静電気

自然発火と坑内火災

摩擦火花

参考資料：「炭鉱保安技術要覧　第１編　ガス・炭じん爆発」（平成３年３月、（財）石炭技術研究所、（社）資源・素材学会）

2) 災害発生状況

昭和 41 年から 59 年までの、ガス・炭じん爆発災害の発生状況は、表 1-25 のとおりである。

表 1-25　ガス・炭じん爆発災害の発生状況

発生件数			61
り災者数	死亡	257	502
	重傷	210	
	軽傷	35	

[出典]：「石炭鉱山保安統計集」（昭和 60 年 9 月、鉱業労働災害防止協会）p.95

発生箇所別の発生件数は、表 1-26 のとおりである。

表 1-26　発生箇所別の発生件数

発生箇所	発生件数
昇	7
払	15
沿層坑道	8
立入	6
卸	2
払跡	5
機械室	1
大坑道	2
斜坑	1
目抜	2
立坑	6
その他	6
計	61

[出典]：「石炭鉱山保安統計集」（昭和 60 年 9 月、鉱業労働災害防止協会）p.95

発生原因別の発生件数は、表 1-27 のとおりである。

表 1-27　発生原因別の発生件数

原因別		発生件数
発破		27
自然発火		4
電気関係	ケーブル	1
	電気品	2
	トロリー線	1
	静電気	4
	小計	8
裸火	マッチ類	4
	溶接・切断器	7
	小計	11
摩擦火花		2
打撃火花		2
不明		7
計		61

［出典］：「石炭鉱山保安統計集」（昭和 60 年 9 月、鉱業労働災害防止協会）p.96

発生箇所は昇、払、沿層坑道のような炭層が露出し、ガス発生の多い箇所が半数以上を占め、原因としては発破が圧倒的に多い。可燃物と火源の関係で、炭鉱の特殊性が表われている。

近年静電気を原因とする災害が注目され、種々の対策がとられるようになった。

3) 災害事例

事例 1：排気立坑の櫓補修作業中のガス爆発

立坑櫓の補修整備作業において、アセチレン溶断器でワイヤロープを溶断中、溶断片が立坑内に落下し、可燃性ガスに着火、爆発した。（重傷 1 名）

・原因

立坑で観測中（坑口より 7m 下）のメタンガスは当日最大 1.25%、最小 0.7%であったが、その下部はガスが停滞し爆発限界に至っていたため、溶断中の火花が立坑口囲いのいずれかの隙間より入り込み落下して、爆発の原因になったものと推定される。

・対策

保安管理機構を強化して立坑作業の安全を図る。

排気立坑の今後の作業手順は次のとおりとする。

現状の風筒の解体。スカフォードの吊り込み。坑口ドア並びに坑口座張りの取付け。風管延長。

上記工事完了後本櫓の修繕工事を実施するものとし、火気使用時の防護措置は次の要領による。

火気使用時は必ず局扇を運転し立坑内のガス排除を実施するとともに、火気使用前および火気使用中の排気立坑内のガス観測を励行する。

火気使用伺等の諸手続きならびに火気使用時の安全係員立ち会い等は、従来通り厳守する。

特に坑口周辺の溶断、火花等の落下を防止するためホールディングドアその他の空隙を密封する。

なお、本樋その他坑口直上の溶接溶断作業において坑口周辺に溶断火花等の落下を防止するため、亜鉛板、その他にて一時仮受けし坑口周辺への落下を防止するほか散水を実施する。

事例２：入気立坑の側壁が崩壊し停滞ガスに衝撃火花でガス爆発

立坑の側壁が崩壊し通気が遮断され、炭層等より湧出した可燃性ガスが立坑内に停滞した。このガスに側壁崩壊により発生した衝撃火花が着火し爆発したと推定される。（り災者なし）

・原因

盲立坑内の炭層および断層貫縫箇所の崩落により、炭層および断層面に新山（あらやま）が露出し、ガス湧出があり、崩落ズリの下部閉塞によって通気が遮断され、盲立坑内にガスが停滞していた。たまたま崩壊による落下物（鉄筋、コンクリート塊、岩石等）が、坑壁又は下部異物（鉄筋、コンクリート塊、岩石等）に衝突して発生した火花等により、停滞ガスに引火し、ガス爆発を起したものと思われるが、ほかに炭層の自然発火についても、災害後の観測及びガス分析結果より発生した事実を技術的に裏付ける要素は認められないが、現地調査不可能なことからこれを全く否定することもできない。

・対策

盲立坑風道の施工にあたっては、地質条件（炭層、断層等）、耐用年数等を考慮して、支保枠、巻厚等の強化を図る。

主要通気坑道では支保上の異常が発見されて補修困難な場合は、通気的に支障を来さないよう速やかに措置を講ずる。

なお、該立坑は密閉する計画である。

事例３：排気立坑開さく中のガス爆発

坑口築造後、27.4m掘削工事を行い、止水工事のためセメント注入作業中、立坑のパイロットホールを伝い立坑に上がってきたメタンガスに引火してガス爆発した。（死亡３、重傷２、軽傷２、計７名）

・原因（想定原因）

可燃性ガスについて

立坑、水平坑道をビニール密閉したため、内部がガスタンクとなり、４吋(インチ)のケーシングパイプを通して可燃性ガスが立坑に流出したものと思われる。

火源について

電気施設関係および裸火等について調査したが原因不明。

・対策

保安管理体制の見直しを行い、特にこの立坑関係については機械電気を含め、その体制の強化を図る。

保安技術職員および鉱山労働者に対して、再教育を実施する。

請負作業に対するダブルチェック体制を見直し、特にこの立坑関係についてはダブルチェック管理体制を強化する。

この立坑関係についてはさらに次の事項を実施する。

集中監視室で毎方定期連絡をとり、異状の有無を相互確認連絡簿を備え記録する。

坑口周辺に火気使用禁止区域を設定し、さらに坑口検身の強化徹底を図る。

保安技術職員によるケーシングパイプ内を含めた規定のガス測定を確実に実施する。

可燃性ガス検定器の管理責任者に電気保安係員を選任し整備強化を図る。

保安施設は定まったとおりの使用条件で使用し、特別の場合は副保安技術管理者の許可を受け、保安係員の指揮のもとに行う。

可燃性ガス自動警報器を設置し坑内電気品とインターロックする。

事例４：異常発破により停滞ガスに着火爆発

発破により湧出した可燃性ガスと通気の死角にあった可燃性ガスにより形成された爆発性混合気が、発破から生じた火炎が火源となり爆発したものと思われる。

（死亡２５、重傷８、計３２名）

・原因

通気的に死角となった凹部に停滞していた高濃度ガスが発破によりかくはんされ、また、新面から湧出したガスにより爆発性混合気が形成されたところに、たまたま施行した発破が何等かの異常発破状態となり、上記停滞ガスに引火し爆発したものと推定される。

・対策

通気：風道の整備、無効漏風の防止等により局部扇風機の親風風量の確保を図る。

各パネルの立入掘進にあたっては最下位層着炭前に独立通気回路を確立し、沿層展開にあたっては掘採計画に即した合理的通気を行う。風下側シリーズ通気については解消に努める。

作業区切り毎等に、所定の範囲、方法等により確実なガス測定を実施する。

局所、高落箇所等については測定棒等によるガス観測の強化を図り早期把握に努めるとともに、エアージェット等による適切な処置により停滞ガスの排除に努める。

ガス抜きボーリングの強化を図る。（詳細略）

安全発破の強化を図る。（詳細略）

爆発伝播防止施設の強化を図る。（詳細略）

炭じん処理の強化を図る。（詳細略）

電気工作物の保守管理の強化を図る。（詳細略）

保安教育の徹底を図る。(詳細略)

事例5：ガス突出災害のり災者救出作業中、静電気により爆発

前日のガス突出によるり災者の救出活動中、救護隊員等の身体又はビニールシート取扱中に静電気の放電火花が周辺のガスに着火し爆発したものと思われる。

(死亡10名)

・原因

現場実況見分及び当時の現況を想定した試験を行った結果、静電気であることが推定された。さらに推測するに、二次災害発生当時ボーリング座付近で、ガス誘導管の補修、ガス漏出防止のため、救護隊員が進入していたことが判明しており、これらの者が、携行したビニールシートを急に剥離したとき、あるいは、帯電状態にあった救護隊員等の身体またはビニールシートが鋼枠等の物体に接触したとき、静電気による放電現象が発生し周辺の可燃性ガスに着火した可能性が強い。

・対策

高分子材料製シート類は、圧気管の断管等により突出炭が吹き上げている場所で取り扱う場合、あるいは、粉炭等が付着した状態で取り扱う場合には、特に危険な静電気が発生・帯電する恐れが多いので、このような状況下においては、帯電防止性能を有するものを使用するとともに、散水、水噴霧等により湿潤な状態にすること。

さらに、突出炭は導電性が低く、かつ、それ自体静電気が帯電している場合も考えられるので、突出炭が堆積した箇所へ進入するときは、十分な湿潤状態の保持に努めること。

また、これらの対策を確実に実施するため、平素から鉱山労働者に対する教育を徹底するとともに、緊急作業にあたっては、現状の把握、対策の指示に遺漏なきを期すること。

事例6：ボーリング作業中、静電気により爆発

ボーリング作業中ブローパイプと繰粉の摩擦により静電気が発生し、ボーリング座に停滞していたガスに着火、ボーリング作業者がり災した。(死亡5名)

・原因

貫層ボーリング座内に停滞したメタンガスとスライム排出にポリパイプを使用し、スライム排出あるいは吹出し、吹付けによって発生した静電気等によりガス燃焼を起し、その後ガス爆発に至ったものと推定される。

・対策

穿孔作業においてはガス停滞を防ぐための局扇による通気を行う。

穿孔作業中は、スライム詰まりの防止策をとるとともにアースをとり、また散水設備を設ける。穿孔作業は仮誘導体制で行う。

穿孔中の排気はメタンセンサーで監視する。

ボーリング作業を行う箇所にはガス自動警報器を携帯させる。

事例７：払跡密閉を開放し枠回収中、自然発火によりガス爆発す

払終掘後一時仮密閉し、資材撤去のため再開放し撤収作業中ガス爆発す。（自然発火が火源と推定）（り災者なし）

・原因

終掘後６ヶ月を経過する間に、肩、深坑道の板、ビニール張りの設置、撤去による通気変動により、払終掘部から払跡へかけての漏気が酸化蓄熱を助長して自然発火に至り、この火源に同坑道の通気停止によりガスが漸増し、ガス爆発に至ったものと推定される。

・対策

払終掘部は長さ 10m 以上流送密閉を行う。

終掘部は 10m 以上の流送又は岩粉詰めを行い、肩坑道は旧面より 20m 間に亘り厚さ 1m 以上の岩粉敷込みを行う。

払終掘後の肩、深坑道は原則として３ヶ月以内に坑道入口において密閉を行う。やむを得ず遅延する場合には通気を行い開放監視を行う。

事例８：滲出停滞ガスが電気のスパークにより着火、爆発す。

密閉からガスが滲出し、かつ、扇風機を長時間停止していたため通気不良によりガスが停滞していたところに信号ケーブルに通電した際スパークし、爆発、付近の作業員がり災したものと考えられる。（死亡１１、重傷４、計 15 名）

・原因

局部通気施設の運転が長期間停止していたため、密閉奥部等から滲出停滞したガスに、巻揚機運転合図信号・運行表示灯用ケーブルに通電が行われた結果、そのケーブルの絶縁不良部において短絡が生じスパークが発生し、着火した可能性が強いと考えられる。

・対策

当該災害発生箇所は、しばらく休止状態にあり、また長期間にわたりガスがほとんど検出されなかったこと等から当該箇所に対する安全感が先に立ち、その結果、当該箇所のガス管理に問題が生じたものと思われる。また、当日の作業着手に際しては、作業管理体制および作業手順に関し安全に対する配慮に遺漏のあったことが考えられる。

この種災害の発生防止のためには、密閉箇所の点検等日常のガス管理および電気設備の点検・整備等を厳正に行うとともに、安全の確認を前提とし作業管理体制および作業手順の見直しとこれらについての保安教育を充実することが肝要である。

事例９：地圧変動に伴う異常湧出ガスが静電気（推定）により爆発す

災害発生区域にあった AE センサ（微小岩盤破壊音検出装置）のデータ解析および

払周辺の応力解析の結果、払進行に伴う地圧変動により炭層等の急激な破壊を惹起せしめ、これに伴ってボーリング孔を伝わって急速に湧出したと推定されるガスに、ボーリング座用局部通気のエアーゼット風管内に粉塵が混入し発生したと推定される静電気が放電、着火し爆発したものと考えられる。(死亡 62、重傷 15、軽傷 2、計 79 名)

・原因

ガス源としては、爆発地点近傍のボーリング座において、ガス誘導停止中のボーリング孔閉塞用ビニールカバーまたは誘導用蛇腹管が、ガス異常湧出のため離脱し、坑道内にガスが流出したためと考えられる。

また、ガス異常湧出の理由として、上下段払の進行に伴って、上段払周辺の地圧が変化し、断層等の介在のもとで炭層等の急激な破壊を惹起せしめ、極めて短時間に異常ガスが湧出し、これに伴ってボーリング孔を伝わってガスが急速に湧出したものと推定される。

着火源としては、坑内外の試験の結果、風管内に粉じん等が混入し、高速で流動する場合であって、接地が適切になされていなければエアージャットのノズルおよび風管本体に、ガスが着火するに十分な静電気が発生することが判明した。

これらのことと、ガス抜きボーリング座の近傍の吹き付けおよび変質炭じんの付着方向等を考え合わせると、ボーリング座内のガス排除のためのエアージェットのノズルおよびこれと組み合わせているビニール風管に係る静電気が着火源となった可能性が濃厚である。

・対策

ボーリング座の施設管理強化（詳細略）

ガス異常湧出対策の強化（詳細略）

その他のガス源対策およびガス観測体制の強化（詳細略）

ビニール風管等坑道内において静電気を帯電するおそれのある施設については、改めて点検を強化し確実な接地等適切な管理を行うとともに、そのための作業手順を整備すること。

事例 10：ガス突出災害り災者救出のためガス払作業中、静電気により爆発

前日のガス突出災害によるり災者の救出のためガス払作業中、風管等による静電気火花によりガスに着火、爆発り災す。(死亡１１、重傷９、計 20 名)

・原因

ガス突出発生後、濃厚なメタンガスを排除するため、破損されずに残存していたビニール風管に新たなビニール風管を接続しながらガス排除作業を行った。この際微粉炭じんによる風管・しゃ断幕および（酸素呼吸器ケース及び着衣を含む）との接触摩擦によって静電気が帯電したものと推定され、この静電気より放電火花が発生し、気流中のメタンに着火したものと推定される。

・対策

イ. 火源防止対策の強化（詳細略）

静電気帯電防止対策の強化

漏洩電流防止対策の強化

炭じん爆発防止対策の強化

ロ. 救護活動の強化（詳細略）

ハ. その他の対策の強化

中央管制室においては、保安関係情報、計測記録の解析、把握が的確に行い得る人員を配置させるとともに、その教育・訓練に万全を期すべきである。さらに、異常状態の早期把握と現場との適切な対応が迅速に行えるよう体制の見直し、強化が図られなければならない。

4) ガス・炭じん爆発の防止

ガス・炭じん爆発を防止するためには、次の２つの条件をクリアすることが肝要である。

・可燃性ガス（主として CH_4）や炭じんの爆発限界濃度の雰囲気を作らないこと

・ガス・炭じんに着火するような火源エネルギーを作らないこと

この二つの条件が重なり合った場合に爆発災害が発生する危険性が増大するので、このいずれかを抑制することによって爆発を未然に防止することができる。

ここでは爆発限界濃度の雰囲気を作らないための対策を述べる。

① ガス爆発防止対策

炭鉱においては、炭層から湧出する可燃性ガスは爆発限界以下になるように通気を行うことによって対応している。

過去の災害事例から可燃性ガス停滞の原因を整理すると、次のようになる。

(イ) 一時的な原因によるもの

可燃性ガスの急激な増加：

地質条件の急激な変化に伴う増加

採掘跡からの押出し

自然発火による乾留ガスの押出し

炭層の亀裂からの噴出

発破孔からの可燃性ガスの噴出

発破に伴う可燃性ガスの噴出

ガス突出

岩石中の亀裂からの噴出

崩落箇所からの噴出

通気の停止または風量の減少

局部扇風機の停止、休止

通気坑道の閉塞

不注意による通気阻害
通気施設の運転停止

(ロ) 慢性的な原因によるもの
炭層条件の変化
通気施設の不完全
局部通気施設の不完全
通気施設の欠如
自然通気力の減少

(ハ) 特殊な原因によるもの
貫通先からの流入
他の箇所からの流動、停滞
密閉、禁柵内、採掘跡への立入り
試錐孔からの噴出

主要坑道においては十分な通気量が確保されており、ガス濃度は低い状態で維持されている。しかし、掘進坑道のように袋坑道となっている箇所や、高落箇所にはガスが停滞しやすく爆発災害の危険性が大きい。また、台風などの低気圧襲来時には採掘跡、古洞から蓄積ガスが坑道内に押出してくるが、このような箇所もガス爆発の危険性がある。

局部通気の方式として吹込式と吸出式が通常用いられているが、局部通気に一度使用した空気の一部または全部が再びもとの局扇に吸い込まれてその局部を循環する、いわゆる車風の状態はガス濃度の増加につながり危険であるので、局部扇風機の管理方式を適切に行うことが重要である。

ガス爆発防止のための基本的な事項は次のように要約することができる。

・精密可燃性ガス検定器あるいは可燃性ガス自動警報器および集中監視装置の適切な運用によるガス存在の確認
・適切な通気によるガスの希釈、排除
・ガス抜きボーリング、密閉等の実施による気流中への湧出ガス量の抑制

② 炭じん爆発防止対策

炭じん爆発を未然に防止するには、次のような対策を確実に実施することが必要である。

・炭じんの発生を防止すること
・発生した炭じんを沈降させ、掃除、除去すること
・炭じんの爆発性を失わせること
・爆発の火源をなくすること

(イ) 炭じん発生の防止

炭じんは採炭切羽、沿層掘進切羽、石炭積込箇所で最も多く発生する。近年、深部

化による炭層の亀裂の増大、機械化採炭による粉化率の増加等により、微粉炭の割合は著しく大きくなっている。そのほか、運搬途中などにおいて石炭が乾燥しているときには大量に発生する。この対策としては次のようなものがある。

・炭壁注水　　・採炭機による散水
・湿式さく岩機　　・水タンピング
・噴霧発破　　・噴霧器による浮遊炭じんの除去

(ロ) 堆積炭じんの除去

発生炭じんを絶無にすることは不可能であるので、堆積炭じんは実状に応じ次のように定期的に清掃除去することが必要である。

・残炭及び落炭の処理　　・坑道堆積炭じんの処理
・乾式清掃　　・炭じんの固着

(ハ) 炭じんの不活性化

炭じんを不活性化させる方式として、散水法と岩粉散布法がある。

散水によって爆発性炭じんを不爆にするには付着水分を 30%以上にする必要があるが、炭じんはぬれにくく、また蒸発によって付着水分が減少するので繰返し散水することが肝要である。

岩粉散布法は炭じんに不燃性の岩粉を加えることによって、炭じんの爆発性を抑制しようとするもので、炭じん爆発防止対策の中で最も効果のあるものとされている。用いられる岩粉の種類、岩粉散布率、散布の方法等を検討し、効果的に実施することが必要である。

参考資料：「炭鉱保安技術要覧　第１編　ガス・炭じん爆発」（（財）石炭技術研究所、（社）資源・素材学会）

1.5.5 ガス突出

1) ガス突出の定義

ガス突出にはガス噴出に近いものから山はねに類似したものまで多種多様の様相があり、一概に定義づけることは難しいが、1979 年 8 月の鉱山保安技術検討委員会ガス突出・山はね防止対策部会報告書によれば、次にように定義している。

「地層中に存在するガスが地層の一部の破砕されたものとともに、坑内空洞内に急激に噴出する現象」

参考資料：「ガス突出技術指針」（昭和 58 年 12 月、通商産業省立地公害局監修）

2) ガス突出の発生機構

ガス突出は実測、実験などの手段によって把握しにくい現象であるため、その発生機構に関し種々の仮説が提示されてはいるものの、定説を得るには至っていない。これまで提案されてきた仮説を概括すると、包蔵されている高圧ガスが原因であるとするガス説、採掘による地圧状態の変化あるいは地質学的残留応力が原因であるとする地圧説およびガスと地圧変化の両者に原因があるとするガス・地圧説の 3 つに大別される。これらを概念的にまとめてみると図 1-8 のようになる。

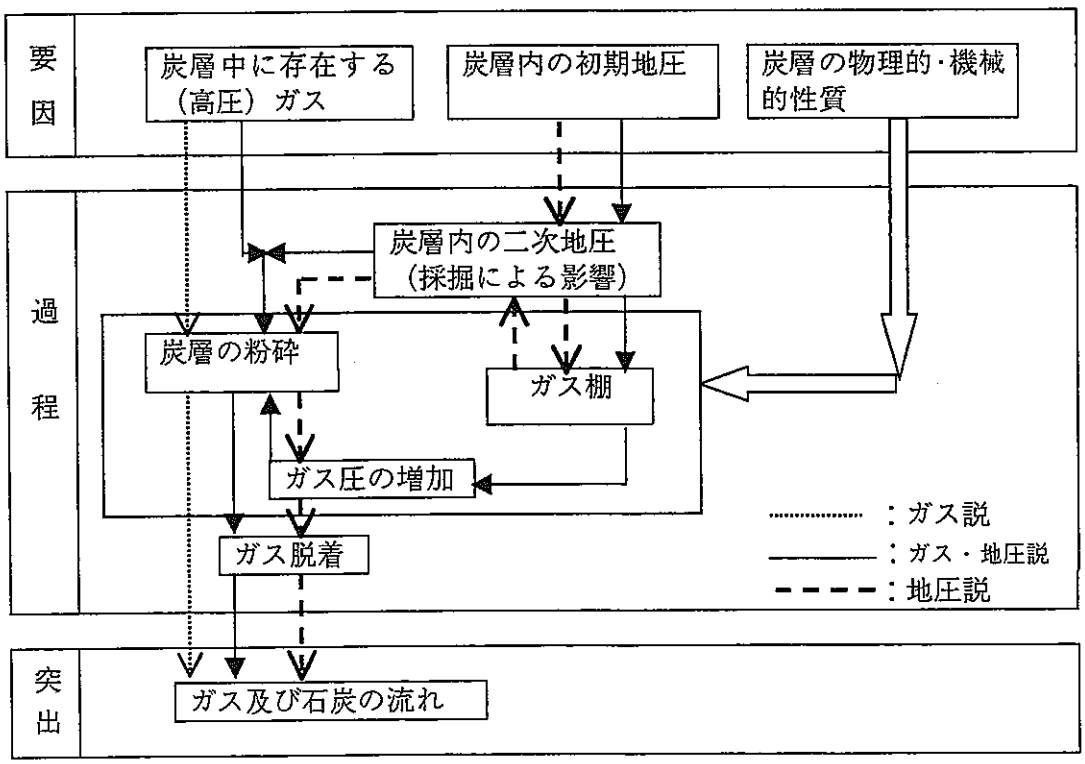


図 1-8　ガス突出発生機構に関する仮説

参考資料：「ガス突出技術指針」（昭和 58 年 12 月、通商産業省立地公害局監修）

「炭鉱保安技術要覧　第 2 編　ガス突出・山はね」（平成 3 年 3 月、（財）石炭技術研究所、（社）資源・素材学会）

3) ガス突出の発生状況

わが国においては、1926年に最初に記録されて以来、1981年までに897件のガス突出が発生している。最大規模のものは、突出ガス量約60万m^3、突出物量約4,000m^3に及ぶ。

昭和41年から59年までのガス突出災害の発生状況は、表1-28、表1-29、表1-30のとおりである。

表1-28　発生件数、り災者数

発生件数			51
り災者数	死亡	195	421
	重傷	142	
	軽傷	84	

[出典]：「石炭鉱山保安統計集」（昭和60年9月、鉱業労働災害防止協会）p.84

表1-29　箇所別発生件数

箇所	発生件数
沿層坑道	15
昇	4
立入	9
払	8
ゲート坑道	7
卸	2
大坑道	4
目抜	1
ボーリング座	1
計	51

[出典]：「石炭鉱山保安統計集」（昭和60年9月、鉱業労働災害防止協会）p.84

表1-30　発生時の作業別件数

作業別	発生件数
発破	20
誘導発破	2
ピック掘中	1
施枠中	2
積込中	3
待避中	4
穿孔中	3
点検・切付中	1
掘進作業中	10
採炭作業中	4
不明	1
計	51

[出典]：「石炭鉱山保安統計集」（昭和60年9月、鉱業労働災害防止協会）p.85

ガス突出には様々な前兆があり、その主な内容には次のようなものがある。

- ガス濃度増
- 山鳴り
- 重圧
- 炭壁張出し・押出し
- 油臭
- ジャミング
- ガス濃度不安定
- 発破後のガス低減後れ
- 炭かみ・地山かみ
- 盤ぶくれ
- 炭壁かえり
- 落炭・落石
- 小突出数回発生
- ホヤ層・含媒層
- ガス湧出
- 炭壁軟化
- 震動
- 崩落・高抜け
- 断層・盤折れ
- 炭層貧化・山丈変化

発生時の突出物関係（報告された 110 件対象）は表 1-31、表 1-32 のとおりである。

表 1-31　突出物の突出距離

突出距離 m			5 未満	5～10	10～20	20～50	50～100	100 以上	不明	計
掘進	岩石	水平		2	5	13	6		3	29
		昇				2	1		3	6
		卸		1	1					2
	沿層	水平	2	7	11	5	5	2	6	38
		昇		1	5	6			5	17
		卸		2	2	1	2		1	8
払			1		2	2		1	4	10
計			3	13	26	29	14	3	22	110

[出典]：「石炭鉱山保安統計集」（昭和 60 年 9 月、鉱業労働災害防止協会）p.87

表 1-32　突出物と突出ガス量の関係

突出ガス量 m^3 ／ 突出物量 m^3	100 未満	100～500	500～1000	1000～5000	5000～1万	1万～5万	5万～10万	10万以上	不明	計
10 未満	1	1							4	6
10 ～ 50	3	3	2	7	1				7	23
50 ～ 100			1	6	2	2			4	15
100～ 500		1	2	13	10	17		2	4	49
500～ 1000				2		3	1	1		7
1000～5000						1		2		3
不明		1					1		5	7
計	4	6	5	28	13	23	2	5	24	110

[出典]：「石炭鉱山保安統計集」（昭和 60 年 9 月、鉱業労働災害防止協会）p.87

4) 災害事例

事例 1：引立面は着炭中で、発破直後圧風がありガス突出が発生した。（り災者なし）

・原因

災害後における突出粉炭量、空洞の位置形状等からみて、引立のほぼ前方に内包されていたガスエネルギーが発破の衝動によりカバーロックを破り、ガスとともに粉炭が噴出したものと思われる。

・対策

炭層を貫縫する際は、ボーリング孔を増孔し、ゆるめボーリングを実施する。

坑道が屈曲して掘進する場合、上記ボーリングのほか、屈曲部を通過した時点で炭層確認およびガス抜き担保のため、効果的ボーリングを実施する。

事例２：掘進作業において、発破のため退避して間もなくガスが突出し、排気側の掘進作業員がこのガスをかぶりり災した。（死亡１名）

・原因

ガス突出の原因：掘進の進行に伴い断層に接近し、当方（かた）の発破施行によりカバーロックが減少し、発破の衝撃も影響してガス抜き空白地帯の奥部に内包していたガスエネルギーが、カバーロックを破り突出したものと思われる。

り災者発生の原因：ガス突出により濃厚なガスが流れ、り災者は一度は救急バルブに退避したが、何等かの理由により救急バルブより出たため、り災したものと思われる。

・対策

当該区域をガス突出警戒区域にする。

ボーリング孔の増強

ガス抜きボーリング孔の残孔長の増強とガス自噴量による掘進制限

独立分流形態でない通気方式における同時掘採作業の制限

ボーリングによる地層、断層の解析強化とその体制の確立

救急バルブ等への退避訓練、遮断幕の作動試験の実施

ビニールハウスまたは救急バルブに退避したときは、係員の指示があるまで、その場所を離れないよう実地訓練する。

対策の周知徹底を図る。

事例３：発破点火と同時に平常の発破音より大きい異常音と圧風を感じ、ガス突出と判断し、全員退避した。（り災者なし）

・原因

全面一斉発破をしたところ、発破の衝撃により岩石の異常破砕に伴ってガスが異常湧出したものと思われる。

・対策

点火位置は十分な入気量のある親風の位置とし、発破時の退避の範囲は当該切羽の排気筋ならびにそれにつながる袋坑道と、その他保安技術管理者が指定する箇所とする。

ボーリング孔については、ガス濃度、自噴量、自噴圧、臭気等の観測を行い状況変化をチェックし、変化のあった場合はガス誘導の強化、ボーリング孔の増強および定期的にガス分析等の措置を行う。

発破孔のガス測定を綿密に行い、その変化に注意して対処する。

異常破砕発生時、影響がおよぶ範囲並びに逆流が予想される範囲の電気工作物についてはガスセンサとインターロックする。

当該坑道の岩相を精査して、地質柱状図を作成し、岩石異常破砕発生箇所と対比し、地層状態の適確な解析判断に努める。

事例４：沿層坑道で一斉発破したところ炭層内に介在していた断層箇所に内包していたガスが噴出しガス突出す。（り災者なし）

・原因

突出の状況、空洞の位置、形状、炭層内に介在している断層状況から判断すると、炭層は擾乱を受け全般に軟弱となり、ガス抜き不十分のため奥部に内包していたガスエネルギーが発破施行が引き金となって、カバーロックを破りガス突出したものと推定される。

・対策

ガス突出警戒区域の設定

沿層坑道の断面、地層擾乱等に対する強化対策

ガス誘導集合管の測定

事例５：沿層坑道掘進切羽でローダ積込作業中、引立奥部に断層があり、この部分からカバーロックを破り突出し、作業者が埋没り災した。（死亡３名）

・原因

空洞検査の結果、引立先進方向には正断層が介在していた。また、探査、ガス抜きボーリングは、掘進方向に対して右側に集中するか、ガス抜きを十分達成できない状態にあったことからして、ガス去勢が不十分であったことに加え、災害前日に発破をかけており、当日、ズリ積みしていたと推定され、これらが断層奥部に刺激を与え、亀裂の増大により、遂に平衡を失い粉炭を伴って突出したものと思われる。

・対策

掘削予定箇所を適確に把握するため、探査ボーリングを実施し、探査ボーリングは地質状況を適確に把握できる方向とする。

ガス突出警戒区域を定める。

ガス抜きボーリングの担保範囲を定める。

ガス突出防止対策強化区域を定める。

事例６：払準備の沿層坑道を掘進中、発破施行直後に突出物を伴い、ガス突出が発生した。作業者は退避し無事であった。（り災者なし）

・原因

該坑道は、坑道内に断層を包含しながら掘進をしていたが、たまたま発破を施行したところ、発破の震動により発破と同時にこの地層擾乱帯に内包されていたガスエネルギー等が、カバーロックを破壊して、ガス突出が発生したものと推定される。

・対策

先進ボーリングの強化

ガス抜きボーリングの強化

事例７：掘進作業中突然ガス突出が発生した。３名は現場周辺の空気供給設備に入り難を逃れていたところを救護隊に救出されたが、引立付近にいた他の３名が突出炭に埋没し、り災した。(死亡３名)

・原因

この坑道は断層間を掘進していたが、ガス抜きが不十分であったと判断される。発破後において通常と異なるガス増加現象があり、担当係員は原因究明のため現場を離れたが、その際鉱員に対し退避指示をなすべきところ不明確であったため、鉱員は退避機会を失しり災したものと推定される。

突出は引立面奥部断層間の破砕帯が時間の経過とともに増大し、破砕帯に内包されていたガスエネルギーが遂にカバーロックを破壊し突出に至ったものと推定される。

・対策

先進ボーリングの強化

ガス抜きボーリングの強化

不時突出の前兆等異常時の措置

集中監視体制の強化

保安設備等の強化

管理体制の強化

教育の徹底

事例８：集中監視室において、ガス自動警報器が作動し、同区域内の局扇が停止した標示で異常事態が発生したと判断し、全坑に退避命令を発した。調査結果この掘進箇所でガス突出が発生したことが判明した。(死亡８３、重傷１９、軽傷２０、計 122 名)

・原因

当該炭層は地表に全く露出していないので、石炭化過程で発生したメタンガスは大気へ逸散し難いような地質条件であった。また、地表からのボーリングの結果、ガス包蔵量は多かったものと考えられる。掘進方向に擾乱帯が確認された。先進ボーリング時のメタンガスの噴出、山鳴り、坑道掘進の進行に伴う炭層の軟弱化傾向等、予兆前兆とみられるいくつかの現象が事前に現れていた。

以上のような状況の中で、発生したものであり、奥部に対するガス去勢が不十分であったことが原因と考えられる。

・対策

ガス突出：

今次災害は、既採掘区域と隔絶した処女区域において発生したことに鑑み、今後類似の区域を採掘する場合には、その自然条件の事前把握ならびに切羽前方の地層の変化および採掘に伴うガス等の挙動などの解析評価を十分に行うことが必要であり、今後のガス突出対策は先ず情報の把握を大前提とし、これが確実に実施されてはじめて、適切な防止対策が可能となるものと考える。

採掘予定区域の基礎的な地質特性、岩石特性、ガス抜き特性の事前把握等適切な坑道展開に配慮するとともに、探査ボーリングによる自然条件の事前把握と合わせ、ガス抜きボーリング、先進ボーリングの解析を十分に実施することにより、掘進方向の状況の変化の確認に努め、さらにボーリングおよび掘進作業中における各種事象を継続的に監視、把握し、対策の強化および異常時の対応に遺漏なきを期することが肝要である。

なおそのためには、同上作業にあたって集中監視室（指令室）との連携を密にすることも必要となる。

有効なガス抜きおよび適切な効果判断を可能とするよう、ガス抜き担保範囲、誘導管理を勘案して、坑道の設定位置、ガス抜き座の位置・間隔、座当たりのボーリング本数等を定める必要がある。

貫層ボーリングによるガス抜き量の計測はブロック別に連続的に行うとともに、特に掘進方向を担保するボーリング孔については、必要に応じボーリング孔を指定し孔別に計測することも検討すること。また、掘進開始の決定に際しては、先進ボーリングによるガス去勢のチェックと合わせ、担保範囲の包蔵ガス量に対するガス抜き量によるチェックも考慮する必要がある。

ガス抜き量、減衰傾向等に異常が認められる場合は、掃孔、増孔等により事実確認を行うとともに、必要な場合には、ゆるめボーリング等の追加対策の実施を検討すること。

救急設備等：

この災害の反省に立って、特に次の対策を実施する必要がある。

ガス突出によって影響を受ける範囲に設けられる散水管、圧気管等の接続箇所は、堅牢に施工し、特に坑道分岐箇所の配管は、外力により容易に断管することのないよう敷設すること。また、その管理を強化すること。なお、断管に備え、予備継手、非常用工具等を適当な箇所に配置しておくこと。

ガス突出によって影響を受ける区域に通ずる圧気管および散水管は緊急時の使用に支障を来さないよう二系統化を確保するとともに、適当な箇所で切り替えが可能な措置を講ずること。

ガス突出によって影響を受ける範囲に敷設する誘導線は、緊急時の連絡を確保するため容易に損傷しないよう措置すること。

救急袋、ビニールハウス等の空気供給設備は、必要な位置まで適当な間隔で整備

増強するとともに、設備の維持管理を徹底すること。

ガス突出警戒区域の一次排気に設ける集中監視用メタン計測器は、測定範囲の大きいものの使用を検討することとし、ガスの挙動が常時的確に把握できるようにすること。

救助活動：

この災害の反省に立って、救助活動に万全を期するため、次の点に配慮する必要がある。

救助活動にあたっては、統制のとれた指揮命令系統を確保するとともに、異常事態に適切かつ迅速に対応し得るよう、本部と前進基地の間における綿密な報告、連絡を確実に行うこと。

救護隊員の教育訓練の徹底を図ること。

事例 9：発破施行直後、発破の衝撃により岩石の異常破砕を伴い、ガスが異常湧出した。（り災者なし）

・原因

発破の衝撃によりほとんど引立前方と、やや引立右方向側（発生当時の物件の移動状況等）から岩石の異常破砕を伴ってガスが湧出したものと思われる。

・対策

警戒区域の察知方法：図面等のチェック、先進ボーリングのチェック

岩石異常破砕警戒区域の設定範囲：油臭

保安体制：管理体制、異常を認めた時の措置、保安設備、教育

事例 10：炭層を逢着中の切羽面において、ツルハシで冠部を切付中に炭壁の抜け上がりが生じ、続いてガス突出が発生し、退避中の２名が逃げ遅れ窒息、り災した。（死亡２名）

・原因

穿孔作業直前に鏡押えを外し、さらに切羽冠部の軟弱な石炭の部分を差切るべくツルハシで掘削中、その石炭が崩壊し抜け上がり、空洞が形成され、ガス突出を誘発したものと推定される。

・対策

炭層を貫縫又は沿層で掘進する場合、鏡面押えは外さない。

大断層またはその近傍において炭層を貫縫または沿層にて通過する場合、冠部の炭層の崩落を防止する措置を講ずること。

加背外、ゆるめボーリングを実施する。

5) ガス突出対策

①計画段階

イ. 自然条件の把握（採掘条件の広域的把握）

ボーリングによる把握

過去の採掘実績の調査

ロ. 骨格構造に対する配慮

掘採予定区域の自然条件の先行把握

効果的な予防対策の実施に適した骨格坑道の設計

独立分流の確保

ハ. 採掘方法に対する配慮

② 予知対策

イ. 自然条件の把握（採掘区域の局所的評価）

ロ. 予知方法

ガス状況に関する測定：ガス自噴圧・自噴量の測定

気流中のガス濃度（ガス湧出量）の測定

石炭のガス保有量の測定

地圧状況に関する測定：炭層穿孔時の繰粉量の測定

破壊音（AE）の測定

応力変化の測定

炭壁の張り出し量の測定（上下盤接近量の測定）

炭層の物理的・機械的性質に関する測定：

石炭の亀裂に関する調査（ΔP指数の測定）

石炭の強度に関する調査

その他：ディスキング現象の調査

ハ. 現場における予知技術

先進ボーリングによる予知

坑道掘進時の予知

払突出の予知

岩石突出の予知

③ 予防対策

イ. 掘採に先立つ広域対策

地圧制御に関する対策：保護炭層の先行採掘

免圧帯の利用

応力集中区域の計画的回避

放圧坑道の設定

注水による炭層湿潤

ガス制御に関する対策：地山ガス抜き
払跡ガス抜き

ロ. 掘採時の局所対策

地圧制御に関する対策：放圧ボーリング
先進導坑掘削
スリット掘削
放圧発破
放圧空洞の設定
滑走防止対策

ガス制御に関する対策：ガス抜きボーリング
高圧注水による水力破砕

その他の方法によるもの：緩速掘進
逆立入方式
沿層卸向掘進の優先採用
切羽付近の天盤制御

参考資料：「ガス突出技術指針」（昭和 58 年 12 月、通商産業省立地公害局監修）

1.5.6 山はね

1) 定義

一般的に総称されている山はねという言葉には、坑内空洞（坑道、採掘切羽等）の周辺岩盤（炭層を含む。）が小さい範囲で突発的に破壊する小規模な現象から、ある区域という大きな範囲で突発的に崩壊または隆起により坑内空洞がほとんどつぶされるような大規模な現象まで、非常に幅広い範囲にわたる現象を包含していると考えられる。したがって、破壊時に放出されるエネルギーの大小によって、細分化して表現されることがある。

この項においては、山はねとは、坑内空洞の周辺岩盤内に応力が集中し、その応力に耐え切れなくなった岩石あるいは石炭が、突発的にぜい性破壊を起こし、自由面にはね出してくる現象であるとする。

2) 危険領域

発生要因等から山はね発生の危険領域と思われる箇所を箇条書きに列挙すると、次のようである。

①自然条件

・深度の深い箇所：地表から炭層までの深さが 300m 以上
・造山運動の残留応力が生じ易い箇所：地質構造の動いている箇所
・断層、褶曲付近の残留応力が生じ易い箇所
・特殊断層付近の残留応力帯
・地層の走向・傾斜が急変する箇所
・上盤に曲げ応力の高い砂岩層または砂質頁岩が存在する箇所
・上盤の砂岩層と炭層が直接接する箇所
・（上盤の厚さ）／（炭層の厚さ）の比が大きな値をとる箇所
・下盤は容易に盤膨れしない程度に硬い箇所
・炭層の層厚が厚い箇所
・炭層の膨縮した箇所

② 掘採条件

・採掘の影響を受けた保安炭柱箇所
・坑道貫通箇所
・採掘終了部と準備坑道等の接する箇所
・掘進切羽の先行圧と採炭切羽の先行圧または周縁圧の合成する箇所
・採炭切羽が平行に接近する坑道
・採掘跡に平行に掘進する坑道
・採炭切羽が採掘跡に接近する箇所
・採炭切羽における先行圧と周縁圧の合成する箇所
・総バラシ払における先行圧等の生じ易い箇所

・充填の不十分な採炭切羽

・未採掘炭層部と坑内空洞が鋭角に配置されている箇所

参考資料：「山はね事例集」（昭和 58 年 7 月、札幌鉱山保安監督局監修）

3) 発生状況

昭和 24 年から昭和 57 年までの山はねの発生は 21 事例である。発生状況の推移は、表 1-33、図 1-9 のとおりである。

山はねについては、昭和 51 年の省令の改正により報告の義務が生じ、昭和 54 年の省令改正により事由別災害種類欄に「山はね」が新しく追加された。したがって、改正以前の災害は、「落盤」、「坑内火災」および「坑内その他」に整理されていた。「災害月報」による山はねとしての報告災害は 2 件のみである。

表 1-33 災害発生状況

年	件数	り災者数
昭和24-25年	6	5
26-30年	2	14
31-35年	0	0
36-40年	0	0
41-45年	5	29
46-50年	1	2
51-55年	6	11
56-57年	1	2

［出典］：「山はね事例集」（昭和 58 年 7 月、札幌鉱山保安監督局監修）p.50

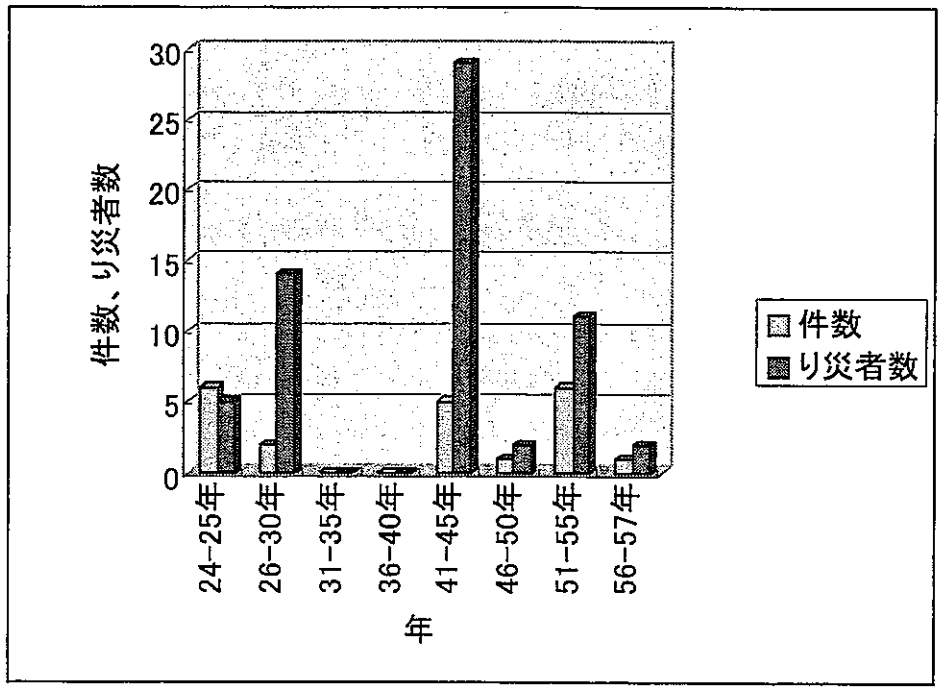


図 1-9 災害発生状況

4) 災害事例

事例 1:沿層掘進作業箇所の後方で突然山鳴りがあり、切詰より約 65～170m 間が盤膨れし、作業中の仕繰員、機械員計 12 名の内 1 名が間洩れボタで頭部を負傷（微傷）した。（り災者なし）

・原因

次の要因が複合して発生したものと推定される。

上層採掘の際、未採掘の区域が残置されていた。

坑道下盤に厚い軟弱層が介在していた。

坑道の周辺に断層が存在していた。

掘進開始直後から発破直後に山鳴りが連続して発生していた地域であった。

・対策

発破後 5 分間は切羽に立ち入らない。

炭壁の切付けを十分に行う。

作業台の上下で同時作業を行わない。

作業台の左右の隙間からの間洩れを防止するため、炭壁にロットを打ち込み、板囲い等を行う。

事例 2：沿層掘進延先に断層が出現し、当方穿孔作業中突然「ドーン」という音と同時に鏡面の下段左側炭壁が崩落し、穿孔中の 1 名がり災した。（重傷 1 名）

・原因

次の要因が複合して発生したものと推定される。

坑道延先が上層採掘跡の採掘端に接近していた。

坑道延先に断層が出現していた。

・対策

掘進において、上層の採掘跡から地山に 300m 以内に接近して断層の存在が明確となった場合、各方 5m 程度のハンド・ボーリングにより食い締め、繰粉量等をチェックする。

異常を認めた場合は、炭柱の切付けの強化、ゆるめ発破、発破後 5 分間は切羽立入り禁止、とする。

事例 3：採炭作業中 2 回にわたって突然山鳴りがあり、払中央付近において盤膨れが発生したが、作業員は退避し異常はなかった。（り災者なし）

・原因

次の要因が複合して発生したものと推定される。

上位層である上層の未採掘区域及び採掘跡が存在していた。

採掘端の影響地帯とスクウェアゾーンの競合する箇所であった。

・対策

放圧発破の実施

待機時間の設定
カッティング方式の変更
払面作業の見直し
枠移設作業の見直し
カッター操作の見直し
連絡体制の確立

事例4：カッティング終了後7～30セット間の天井が鳴り、トラフと炭壁間が1m位下盤が隆起し、払内で作業中の19名の内退避中に4名がり災した。(重傷4名)

・原因

炭層内は放圧発破により応力が解放されていたが、4カット目が放圧された範囲よりさらに奥部を採掘したため、潜在していた応力が次の要因と複合して脆弱部に集中し、解放されたものと推定される。

地盤の隆起、膨縮の激しい地質変動地帯に接近してきた。

払は大きな褶曲地帯の直下に位置し、潜在応力が集中しやすい要件を内包していた。

払進行が速かったため、吊天(つりてん)となっていた。

・対策

警戒区域の設定
計測の実施
技術的対策の実施
管理体制の強化

事例5：払内で人工天盤敷込み作業中、山鳴りと同時に盤膨れし、一部炭壁が崩れを生じ、2名がり災す。(重傷2名)

・原因

次の要因が複合したため応力が高まり、山鳴りと同時に払の下盤が盤膨れしたものと推定される。

払は上層払の終掘端の直下である。

払は別の上層払（採掘跡）の始発部に接近していた。

天盤が堅固で吊天となっていた。

下盤が逐次隆起し薄層帯に接近していた。

・対策

払進行の調整
作業員の立入り規制
放圧発破の実施方法見直し

作業方法、払状況に異常が生じた場合には、管理者の許可を受けた後でなければ作業に着手しない。

上記対策を関係保安技術職員および作業員に周知徹底させるための教育を行う。

事例6：採炭作業中、山鳴りを伴い払上部および坑道で突然下盤が隆起し、その衝撃により天盤や鉄柱に打ち当たり4名がり災した。(死亡1、重傷3、計4名)

・原因

2層の接合部で、かつ、合盤(あいばん)の堆積状況に著しい膨縮があり、異常堆積箇所であった。

払肩部周辺に未採掘炭柱が集中していた。

払中で稼行丈が低くなっていた箇所があった。

払上部にばん折れが介在していた。

・対策

払の進行方向の変更

盤上坑道を設定し、放圧を図る。

放圧ボーリングの実施強化

AE、油圧カプセル等の観測強化

山鳴り発生状況の記録

払面稼行丈の確保

払周辺の資材は整理整頓し不要資材の早期揚坑に努める

異常時の報告

事例7：払作業中、突然山鳴りとともに、異常盤膨れが発生し、4名が挟撃、打撲等によりり災す。(死亡2、重傷2、計4名)

・原因

原因としては、地質構造的特殊性或いは累層採掘時の特性等によって応力が集中し、災害が発生したものと推定される。

終端からの走り断層のため、大天(おおてん)の荷の影響を受けた

放圧発破の効果が足りなかった

断層出現のため、払進行速度の変化が激しかった

下盤炭層の変化の状況調査を行っていなかった。

予知の段階で、払内におけるテストボーリングを実施していなかった

等が考えられる。

・対策

作業規制

管理体制

観測の実施

技術的対策（払管理の強化、放圧対策）

5) 予知対策

① 机上における危険領域の把握

山はねの危険性のある警戒区域を前述「危険区域」に記述した自然および掘採条件等より事前に把握して定めておく。

②現場における危険領域の把握

・テスト・ボーリング

・地層破壊音（AE）・微小地震活動（MA）の計測

・岩盤変位量等の計測

6) 予防対策

① 採炭法上の対策

切羽進行速度の制限と払跡の強制崩落

充填密度の向上

② 応力集中域を坑内構造物の近隣からより内部に移行させる技術

放圧ボーリング

放圧発破

放圧注水

放圧坑道

参考資料：「山はね事例集」（昭和 58 年 7 月、札幌鉱山保安監督局監修）

1.6 課　題

前項までに、石炭鉱山における各種災害について調査した結果を述べた。

言うまでもなく、石炭鉱山の坑内と深地層研究所の地下施設とは、目的、施設内容、操業条件、検討の対象者等は異なっている。しかしながら、災害の表面に現れた事象の裏には、本研究所計画にとって参考となるあるいは検討すべき点があると考えられる。

以下に、本調査から得られた今後の防災計画における課題と考えられる事項を列挙する。

個々の災害発生防止対策は別途検討することとして、課題は重大災害（特に火災）を想定し、平常時の情報監視システム、災害拡大防止対策、避難対策、災害時に必要と考えられる設備等について整理する。

(1) 平常時の情報監視システム

- 通気系統を考慮して、センサーの種類、設置箇所、監視システムに組込むものと組込まないものの区別。風量を考慮した計測感度の選定。
- 通気量、通気方向を考慮した各計測項目の正常値と異常値の判断基準の設定。計測項目の組合せによるリアルタイム異常判定解析ソフトの開発。
- 通気量、通気方向およびその変更の監視システムへの組込み。
- 所内人員の人数、位置等のリアルタイム把握システム。

(2) 災害拡大防止対策

- 災害時の通気変更手段およびその遠隔操作方法。災害による設備ダメージ回避方法。
- 災害時に必要な通気量維持のための設備容量の確保（予備設備を含む）。

(3) 避難対策

- 一時避難所、長期避難所の設定（位置、数量、空間体積）と篭居に必要な設備内容、容量（新鮮空気、水、食料）およびその供給、維持対策。
- 脱出経路の確保と入気（量、方向）の確保のための必要坑道数、断面。
- 脱出方法の選定と設備の確保。
- 災害時における双方向連絡の手段と設備の維持。
- 避難指令システム。

(4) その他

- 建設の各段階における災害拡大防止対策の設定（想定災害および対応設備、入所者数およびその種類）。
- 防爆構造設備の設定と配置箇所、坑道仕様。

上記の課題を考慮して、研究所の具体的な設計の際には、坑道数、配置、断面積、設備の種類、容量を検討項目に加えていくことが望ましいと考えられる。

1.7 まとめ

深地層研究所計画に際しては、防災に関する考え方を明確にし、慎重且つ詳細な防災システムの構築が必要である。地下施設の建設、操業に関わる災害は多岐に亘るが、本研究所の場合は立地条件の特徴として、

・地表下相当の深度を有する位置に到達する

・対象岩盤が堆積岩であり、計画箇所近辺の地質状況からガス湧出の可能性がある

・地下における対象人員は、作業、研究或いは見学等、不特定を想定している

等が考えられる。

本調査は、地下災害の経験を数多く有する石炭鉱山における災害事例調査を行い、本研究所の防災計画の立案に資することを目的としたものである。

石炭鉱山における災害は、他産業同様のものから、金属等の他の鉱山とも違った特徴をもった内容のものまで、その種類は多い。したがって、調査は先ず災害の種類を整理することから始めた。

災害は大きく頻発災害と重要･重大災害に分類される。頻発災害は管理者側に起因する施設の不備、管理面のミスという少数の災害事例を除けば、原因のほとんどは作業者の行動によるものである。したがって、災害対策についても、石炭鉱山という特殊な現場条件を踏まえた危険予知、ヒューマンエラーの回避に向けての、反復訓練、教育が重要であると考えられる。頻発災害のうち、深地層研究所においても可能性が考えられる「落盤災害」、「運搬災害」および「ガス中毒･窒息による災害」については、より具体的に発生状況、災害要因、災害事例（状況、原因、対策）を調査した。

重要･重大災害の種類は、「坑内火災」、「自然発火」、「爆発」、「ガス突出」、「山はね」等がある。いずれもひとたび災害が発生すると、多数のり災者の生じるおそれがあり、大災害になる可能性を持つものである。内容的に本研究所の防災計画上の重要度には濃淡があるが、個々の災害について内容の詳細調査を行った。

調査は、災害の定義を含めその性状、機構、特性等の解説を先ず行い、発生状況、発生事例、災害予知対策、防止対策等について行った。操業中の国内炭鉱は２炭鉱のみとなっている現状では、災害防止技術の研究は限られた分野のみとなっているが、研究機関等による最近の研究開発についても可能なものは調査した。

災害事例は「山はね」（７例）以外は 10 例を調査し、それぞれ状況、原因、対策の順に記した。

災害事例と本研究所計画とは、現場条件、操業条件等全く異なるとは言え、内容を詳細に分析すれば、今後の防災システムの構築にあたっては、参考となる点が数多いと考えられる。「自然発火」、「爆発」、「ガス突出」等の災害は、二次災害として坑内火災に移行することも考えられるので、特に「坑内火災」については、深地層研究所にとって最も重要視すべき災害であると考えられる。

本調査の結果に基づき、今後の研究所計画において、防災に関して解決すべき課題を前項に整理した。

項に整理した。

[用語集]

あいばん　合盤　parting
炭層中に層状をなして介在し比較的厚い場合の砂岩、頁岩などをいう。

あらやま　新山
未だ採掘されていない区域をいう。

うきいし　浮石　loose rock, scale
天盤側壁部の岩石や石炭に亀裂が入り剥離して崩落または倒壊しやすい危険な状態にあるものをいう。

おおこうどう　大坑道
坑内採掘の全域にのびている幹線の走向坑道をいう。たいてい採掘炭層の下盤に位置し、主要運搬に用いている。

おおてん　大天　main roof
採炭切羽の天盤のうち、無充填払、総ばらし払等で容易に破壊沈下する直接天盤の上部にある天盤をいい、切羽がある進度に達すると一時に大崩落をなしてくるものである。

おやかぜ　親風
ある通気系統の本流から一部局部通気に取り分ける場合その本流の気流をいう。

かがみおさえ　鏡押え
切羽面または坑道詰めの正面壁が崩壊するのを防止するときの支保をいう。

かせ　加背　cross sectional area, gallery cross section
坑道の大きさを表示する用語で、枠の笠木長と枠脚長または枠幅と枠高さをもって示す。

かたこうどう　肩坑道　top road
採炭部の上位にある坑道。普通、採炭切羽において、炭層の傾斜沿いに、その場所よりも上位側を肩部といい、これに続く坑道を肩坑道という。

かたばんこうどう　片盤坑道　butt level
一般に炭層の走向にほぼ平行に掘さくした坑道。普通、炭層部に掘さくされたものを沿層片盤坑道といい、岩石部に掘さくされたものを岩盤片盤坑道という。

かっくち　欠口　step advance
カギ型に切羽面に掘り込みを作ったところをいう。

かっくちさいたん（かっくちはらい）　欠口採炭（欠口払）　step advance mining
切羽面に欠口をつけて採炭する場合をいう。「欠口払」ともいう。

からこづみ　空木積（空木）　open crib, empty crib
坑木を井桁に積み重ね天盤を支えるもので、切羽支保としてまた坑道の高抜けの枠上支保に行う。単に「空木」ともいう。

ききはらい　利払
発破又は掘削機械により掘削した後の裸の側壁天盤を打診しながら浮石を除去して安全状態

にする作業。

きゅうこう　旧坑　old mine
昔の採掘跡。旧坑の中で、とくに採炭切羽の採炭した跡箇所を払跡といい、旧坑道（活用されていない密閉された坑道）と区別して呼ぶ場合がある。また単に旧坑道のことを旧坑ということもある。

きょうどりつ　強度率　accident severity rate
労働災害による労働日数の損失によって災害の重軽度を表わすもので、 1,000 労働時間当たりの労働損失日数で表示される。その計算方式は、

$$\frac{\text{損失日数}}{\text{稼働延時間}} \times 1{,}000$$

きりかえのぼり　切替昇
切羽が崩落又は断層に当たった時、その部分の切羽面を新しく掘進して切替える。あるいは昇坑道が崩壊して使用に耐えない場合別に昇坑道を掘替える。このように切替えを行う昇をいう。

きりつけ　切付け
側壁、天盤の浮石や周壁の凸部をツルハシやコールピックで掘り取る作業をいう。

きりつめ　切詰
①坑道の先端部のこと。②軌道、コンベア等の敷設長の短縮を行うことをいう。

きりは　切羽　working face
石炭、金属などの鉱山において石炭、鉱石などを採掘し、または坑道掘進を行っている作業箇所。広義では、採掘作業箇所のことであるが、普通、単に切羽といえば採炭作業箇所のことをいう場合が多い。また切羽区別を明確にするために、作業の名称、作業の方式、作業の内容などを付していうことがある。

きんさく　禁柵　fence for off limit
規定以上のメタンガス、その他の有毒ガスが停滞し又は停滞するおそれがある場合、あるいは落盤、その他の危険防止のため通行遮断又は一時作業業中止のため通行不必要な場合に、通行遮断のため警標を付して設けた柵。

げーとこうどう　ゲート坑道（ゲート）　gate roadway, gateway
片盤坑道の積込口と採炭坑道が離れている場合、切羽より積込口まで切羽炭の運搬のために設けられる小加背の坑道をいう。略称「ゲート」。

くるまどめ　車止め　car stopper
炭車の自走を防止するため軌道の中に設ける器具をいう。

さおとり　棹取　mine car attendant, mine car hauler
斜坑巻または機関車等による運搬作業で、炭車の操作に従事する運搬員をいう。

さきうけ　先受け　fore pole, fore support, spile
掘進時掘削して積み込み支保を完了するまでは、引立元は裸天井であるため、保安のため本枠をつけるまで最終枠とその前の枠の笠木から長い梁を吊るして差し出し、この上に次の枠の一部または矢木をあてて裸部の仮支えを行うことをいう。

さくこう　さく孔　drilling

(1) 手掘りまたはさく岩機によって発破孔などを開けること。さく孔機構によって打撃さく孔、回転さく孔及び回転打撃さく孔にわける。

(2) (1)によって開けた穴。せん孔ともいい、その深度によって発破孔のごとく数十 cm ないし数 m のものと、数十 m ないし数千 m のものがある。

さしきり　差切り　forepoling

普通地山掘削後露出した周壁の支柱を行うが、軟弱な岩盤中の掘進の際は後からの支柱は間に合わず、そこで本枠の後方から枠裏を通して掘削地山に多数の矢木又は板、曳割等を並べて打ち込み、打ち込みが進まなくなったらその内側の岩盤を掘削する。これを少しずつ繰返し所定枠間のとれるまで掘削が進むと本枠をつけて支柱する。このような軟弱岩盤の掘削支柱法をいう。

しくり　仕繰　repair

縮小又は変形した坑道を拡大修復すること。その作業内容によって拡大、追切り、取明け、保全などに区別することがある。特に、膨れ上がった床面を掘り下げて、坑道の修復を行うことを盤打ちという。

じそうしほ　自走支保　self-advancing support, walking props, walking support

幾組かの水圧鉄柱とカッペを組合わせて操作装置により自動的に移動できるようにした組立支柱をいう。

じゅうてん　充てん（填）　filling, stowing, packing

採掘跡、その他の坑内空間などを廃石（捨石）、土砂または選鉱尾鉱などで詰めること。この目的は切羽天盤統制、鉱害防止、坑道保持などのためである。またこの方法は、重力を利用した流し込み充填、機械力を活用した機械充填、水の力を媒介した水力充填、空気の圧力を媒介した空気充填などがある。これは採掘費が高くなる欠点があるが、採掘実収率が高く作業が安全で沈下を防止するなどの利点がある。

じんしゃ　人車　man car, man-riding car

炭鉱（または鉱山）の坑内において、人員の輸送に使用される軌道走行式の車輌。斜坑用は巻上機・ロープ使用運行形式の運搬に使用されることが多いので、外形ならびに搭乗座席の構造は傾斜した坑道上の運行に適した形や角度でつくられている。水平用は機関車による牽引方式をとることが多い。

すいへいこうどう　水平坑道　level

ほぼ水平に掘削した坑道。この坑道の代表的なものとして片盤坑道、立入坑道、中段坑道などがある。開坑、炭層開発が行われた坑内は、水平坑道、斜坑及び立坑の集団であり、それが組織的な形態を備えている場合に坑内構造という。

ズリ　rock, coal waste, coal refuse　⇨ぼた

そうばらし　総ばらし　full caving

払跡全域（普通は肩深両端に一部充填を行う）の天盤を崩落するにまかせる払後処理をいう。

そくへき　側壁　wall

坑道及び切羽の両側面。採炭、掘進の結果、そこに天盤、側壁、床面が露出する。特に採炭作業箇所の側壁を採炭切羽といい、掘進作業箇所における掘進方向面のたて壁を掘進切羽という。

たていれこうどう　立入坑道　cross cut

鉱体外から鉱体に向けてこれを貫くように、又は鉱体の伸長方向に交差して掘進する坑道。一

般に、主要走向坑道より炭層を直角の方向に貫くように掘進される坑道をいい、単に立入ともいう。坑道は、その経路、方向、傾斜、用途などに応じて種々の名称で呼ばれている。

たておき　立置
列車編成または実空車の入替操作のため所定の場所に一時炭車を止めて控えておくこと。

たておきせん　立置線
立置のために設けられた軌道の線路をいう。

たまいし　玉石　boulder, cobble stone
炭層中にたまたま見られる硬い塊の石をいい、硅化木のこと。

たんしゃ　炭車　mine car
炭鉱において採掘された石炭を坑内から搬出することを主目的とした軌道走行式の車輌。実際には石炭以外にもボタや資材の運搬にも使用される。炭鉱以外での鉱山では鉱車と呼ばれている。

ちゅうだんこうどう　中段坑道（中段）　sublevel
上部片盤と下部片盤の間に片盤に平行して掘削する小加背の坑道で、その位置により下部から上添中段、中割中段、肩（または冠）中段等に区別して呼んでいる。
別に冠、踏前に対してその中間部を示す意味で「中段」という場合もある。

ちゅうぼうしきさいたん　柱房式採炭　chamber and piller method
（急傾斜炭鉱の場合）一定の採炭区域を定め、片盤坑道より巾 7～8m の広巾昇を昇巾と同じ巾の炭柱を残して次々に昇掘進して、予定位置に達すると順次上部から炭柱払を行う採炭法。

てっぽうこうどう　鉄砲坑道
掘進延先のように坑道先が他の坑道と連絡することなく行詰まりの状態にある坑道をいう。

てんばん　天盤　roof
坑道及び切羽の天井にあたる部分。採炭、掘進の結果そこには天盤、側壁、床面が露出する。特に天盤はそのまま放置しておくと、浮き石が落下、亀裂が発生、次いで崩落し作業の障害ならびに就業者に危険を及ぼすので、これを防止する必要がある。天盤のこの現象を制御するのが炭鉱での主要作業である。

どすうりつ　度数率
労働災害発生の頻度を表わす数値で、100 万労働時間当たりのり災者数として表示される。その計算方式は、

$$\frac{\text{り災者数}}{\text{稼働延時間}} \times 1{,}000$$

とりあけ　取明け　reopening of seal
崩落により通行不能となった箇所の崩落物を取り片付け支柱を行い元通りにする場合、あるいは密閉をはずしその奥の坑道を元通りに又は廃棄した坑道を再び使える坑道に仕繰直しする場合をいう。
のぼり　昇
上部に向かって掘られる傾斜坑道。

はさみ　はさみ（炭層の）　parting in coal seams
炭層の中で石炭にはさまれている経済的価値のない岩石。一般には炭質頁岩、頁岩、ときに砂

岩、凝灰岩などがある。レンズ状、くさび状、帯状、層状など各種の形態があり、厚さも 1mm 以下から数 m に及ぶものがあり、膨縮も激しく、賦存の広がりも大小さまざまである。

ぱねる　パネル　panel
　採炭のため隣の区画との間が厚い炭柱で隔てられ、通気、運搬などが独立している区画。通常長方形。またそのような採炭法を指す。

はらい　払　face
　採炭切羽のこと。

ひったて　引立　face, heading, tunnel face
　掘進切羽または坑道切詰めをいう。

ふくろこうどう　袋坑道
　鉄砲坑道をいう。

ふまえ　踏前　floor, sill
　坑道の床面をいう。

ほあんぎじゅつしょくいん　保安技術職員　safety technician,technical safety staff
　鉱山の保安管理で直接に保安に関する作業の指揮監督にあたる法定職員をいう。

ほあんぎじゅつかんりしゃ　保安技術管理者　safety manager, safety supervisor
　保安統括者を補佐して保安に関する技術的事項を管理する者。

ぼた　ボタ（硬）　rock, coal waste, coal refuse
　原炭中に含まれる岩石。ズリともいう。炭層中に存在する砂岩、頁岩などのはさみが主であるが、時には炭層の上、下盤の岩石が石炭とともに採掘され原炭中に入ってくる場合もある。慣用的には、ぼた山というように廃石を指すこともあるが、学術的には必ずしも適当ではない。

まついわ　松岩　petorified wood in coal seam
　玉石と同じ。

まぬけ　間抜け
　枠と枠の間から天盤が崩落すること。

めぬき　目抜き　thirl, thirling
　相接近した２つの坑道を連絡させる小坑道をいう。

やまなり　山鳴り　rock noise
　天盤が崩落する時の地鳴り。

やぎ　矢木　lagging
　枠と枠との間の天井、側壁を囲うのに使用する細い坑木をいう。

参考資料：「資源・素材・環境技術用語集」（平成８年１月、（社）資源・素材学会編）
「炭鉱用語集」（三井鉱山株式会社芦別鉱業所編）