

分置

# 長大地下構造物の建設技術 保守管理技術の調査

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1987年6月

株式会社 日建設計

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical Evaluation and Patent Office, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

1987年6月

## 地下長大構造物の建設技術、保守管理技術の調査

伊勢村 邦郎\*      高橋 剛弘\*  
尾ノ井 幸尋\*      長谷川 進\*  
高橋 敏弘\*      小坂 正明\*

### 要 旨

近年、これまでほとんど利用されることのなかった地下空間に、深地層試験場、高レベル放射性廃棄物の地層処分施設、無重力実験施設、地底総合開発研究施設などの長大な構造物が計画されるようになった。しかし、このような地下長大構造物は、これまでの建設技術、保守管理技術を単に深さ方向に延長するだけでは、捉えることは出来ず、既存の分野を越えた多角的側面からの検討を必要とする。

本調査は、このような観点から、

- 1) 既存の地下長大構造物の建設技術、保守管理技術の調査
- 2) 深地層における長大構造物の建設技術、保守管理技術についての問題点の検討
- 3) 今後、必要とされる技術開発項目の検討

を実施した。

その結果、建設技術については、既存の技術をベースに、より一層の低コスト化、高速化、安全化を計る必要があること、また、保守管理技術では、地下空間の居住空間としての維持管理技術について特に、積極的な基礎的研究と技術開発が必要であることが明らかとなった。

---

本報告書は、株式会社日建設計が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号: 610D289

事業団担当者: 田村 彰教 (環境資源部環境計画課)

\* 土木設計事務所

Study for the Construction and Maintenance Technologies  
of  
Large Scale Underground Structures

Kunio ISEMURA\*      Yoshihiro TAKAHASHI\*  
Yukihiro ONOI\*      Susumu HASEGAWA\*  
Toshihiro TAKAHASHI\*      Masaaki KOSAKA\*

Abstract

In recent years, the large scale underground structures, such as underground research laboratory, high level radioactive waste repository, deep shaft for microgravity facility, underground high technology development facility (GEOTOPIA Project) etc. have been planned. The deep underground space has not been utilized for this type of large structures. Therefore, the existing construction and maintenance technologies will not be directly applied or may not be sufficient for these structures and the improvement the existing technologies and new technology development will be highly requested.

From this point of view, we have conducted the study on the following items:

- 1) Review of the existing construction and maintenance technologies for underground large scale structures,
- 2) Study on the problems in using the existing construction and maintenance technologies for large scale structures in deep underground,
- 3) Study on the required technology development.

As a result, it has become clear that the new technologies based on the existing technologies are necessary to realize the construction of these structures with lower cost, rapid construction and higher safety. As for the maintenance technologies, the both fundamental research and technology development should be actively conducted with the recognition of the underground as a human living space.

---

Work performed by Nikken Sekkei Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

PNC Liaison : Akinori TAMURA (Waste Management and Raw Material Division,  
Waste Management Planning Section)

\* Civil Design Office

目 次

<b>1 調査の目的</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 地下空間利用技術に関する研究開発の必要性</b> .....	<b>2</b>
<b>1.2 本調査の目的</b> .....	<b>3</b>
<b>2 地下長大構造物の計画について</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1 概要</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2 計画の構成要素</b> .....	<b>7</b>
<b>2.3 調査と評価</b> .....	<b>11</b>
<b>2.4 トンネルの計画</b> .....	<b>17</b>
<b>3 地下長大構造物の建設技術の現況と問題点</b> .....	<b>31</b>
<b>3.1 概要</b> .....	<b>31</b>
<b>3.2 コンクリート打設と施工管理</b> .....	<b>33</b>
<b>3.2.1 目的</b> .....	<b>33</b>
<b>3.2.2 コンクリートの品質にかかわる要因について</b> .....	<b>34</b>
<b>3.2.3 まとめ</b> .....	<b>80</b>
<b>3.3 建設時の安全・環境管理</b> .....	<b>81</b>
<b>3.3.1 発破作業の計画と管理</b> .....	<b>87</b>
<b>3.3.2 火災・爆発災害</b> .....	<b>91</b>
<b>3.3.3 情報化施工管理</b> .....	<b>93</b>
<b>3.3.4 保安・防災技術</b> .....	<b>119</b>
<b>3.3.5 建設ロボット</b> .....	<b>124</b>

4	地下長大構造物の保守管理技術の現況と問題点 .....	132
4.1	概要 .....	132
4.2	空気調和・換気設備 .....	134
4.3	給排水・衛生設備 .....	143
4.4	採光・照明設備 .....	147
4.5	防災と災害時対策 .....	154
5	今後の技術開発の展望 .....	158

## 表目次

321	.....	.....
321	.....	.....
表2.2.1	地下空間利用技術の構成 .....	7
表2.2.2	地下空間建設時の基本適用技術 .....	11
表2.4.1	掘削方式と適応地質条件 .....	29
表2.4.2	書類作成時の留意点 .....	30
表3.2.1	ポルトランドセメントおよび混合セメントのJIS規格 .....	36
表3.2.2	水の品質 .....	37
表3.2.3	普通骨材の品質(JASS 5) .....	38
表3.2.4	鉱物自身の変質がコンクリート劣化の原因となるもの .....	39
表3.2.5	混和材料の種類 .....	40
表3.2.6	配合強度に関する規定(RC示方書、JASS 5、JIS) .....	46
表3.2.7	水セメント比の最大値(%) (JASS 5) .....	48
表3.2.8	単位セメント量の最小値(JASS 5) .....	49
表3.2.9	使用箇所による粗骨材の最大寸法(JASS 5) .....	50
表3.2.10	所用スランプ値 .....	51
表3.2.11	所用空気量 .....	53
表3.2.12	運搬時間の限界 .....	60
表3.2.13	コンクリートの運搬方法 .....	60
表3.2.14	コンクリートポンプの種類 .....	61
表3.2.15	ポンプ圧送が困難となる条件 .....	61
表3.2.16	各締め固め方法の効果の比較 .....	64
表3.2.17	補修工法と材料 .....	78
表3.3.1	トンネル工事における死亡災害の原因別分類 .....	82
表3.3.2	岩石試験結果 .....	102
表3.3.3	検討に用いた岩盤物性値 .....	102
表3.3.4	実測初期応力と解析結果の比較 .....	108
表3.3.5	情報化施工管理のための計測と目視観察 .....	112
表3.3.6	災害率の推移 .....	121

表3.3.7 トンネル工事における死亡災害の原因 .....	121
表3.3.8設備増強一覧表(出典:土木学会誌1983年2月号) .....	126
表3.3.9 M-1工法による施工例 .....	127
表3.3.10 土木工事においてロボット化が期待されるテーマ .....	131
表4.1.1地下空間利用に伴なう環境制御要素 .....	132
表4.2.1 屋内環境基準 .....	136
表4.2.2 必要換気量推奨値 .....	137
表4.3.1 対照表 .....	144
表4.3.2 消防法に基づく地下構造物の消防用設備等の設置基準 .....	145
表4.4.1 地下室採光方式の問題点 .....	148
表5.1 環境制御技術と地下環境の特徴の関連 .....	159
表5.2 地下空間環境制御技術の問題点と課題 .....	160



## 目 次

図2.3.1	計画の形成過程と思考過程	13
図2.3.2	計画の形成段階(高速道路の例)	14
図2.3.3	公共土木計画の目的と価値	17
図2.3.4	技術価値と経済価値	18
図3.2.1	配合設計の順序	45
図3.2.2	連続ミキサについて	56
図3.2.3	打設用シュート	62
図3.2.4	養生温度と圧縮強度の関係	66
図3.2.5	湿潤養生28日強度に対する各種養生方法の強度日	71
図3.3.1	落盤・肌落ちの事象の要因	83
図3.3.2	肌落ち発生場所	84
図3.3.3	肌落ち災害の多い作業	84
図3.3.4	肌落ち災害防止対策	85
図3.3.5	従来のトンネル工事の流れ	94
図3.3.6	情報化施工管理の概念	94
図3.3.7	チラタ地下発電所標準断面	98
図3.3.8	サイト平面図	99
図3.3.9	初期応力測定位置	100
図3.3.10	初期応力測定結果	101
図3.3.11	支保設計のための岩盤安定解析	103
図3.3.12	支保工配置図	104
図3.3.13	初期応力算定のための有限要素モデル	107
図3.3.14	初期応力算定結果(主応力分布図)	107
図3.3.15	地下発電所標準的断面と掘削手順	109
図3.3.16	掘削解析のための有限要素モデル	110
図3.3.17	有限要素法による掘削解析結果(局所安全係数の分布)	111
図3.3.18	計測計器配置図	113

図3.3.19	現場計測システム構成図	114
図3.3.20	目視観察による不連続面の分布	116
図3.3.21	計測岩盤変位の分布および経時変化(計測断面9)	117
図3.3.22	労働災害発生状況の推移	120
図3.3.23	本州側のポンプ室位置平面図	122
図3.3.24	坑内火災対策システム	123
図3.3.25	自動吹付けロボット見取図	125
図3.3.26	M1工法システム構成	127
図3.3.27	地中壁自動掘削システム	129
図4.1.1	地下空間利用の概念図	133
図4.2.1	セントラル空調方式の例	138
図4.2.2	ファンコイル+空調機方式の例	139
図4.2.3	パッケージ+空調機方式の例	139
図4.2.4	地下駅空調計画の例	140
図4.3.1	一般建物の地下の水のフロー	143
図4.3.2	地下空間内でのクローズドシステムの水のフロー	146
図4.4.1	現状の地下室採光方式の形態	147
図4.4.2	生物の利用している波長特性	149
図4.4.3	採光ダクトによる採光システムの概念図	150
図4.4.4	採光ダクトシステムの効率(P点の照度基準)	151
図4.4.5	光ファイバーによる採光システム概念図	152
図5.1	環境制御から見た地下空間の概念	159

## 1 調査の目的

建設技術は、住空間、交通の為の空間、エネルギーの為の空間など、人類に様々な形、用途を持った空間を提供するための技術と言える。そして、社会の発展とともに、地上には様々な形、機能を持った人工構造物が構築され続けてきた。しかし、地表空間は有限であり、その有効利用のための大規模化、高層化も、我が国のような急峻な地形、地震、台風、降雪といった厳しい自然条件のもとではおのずと限りがある。このようなことから、既に、比較的立地条件の良い地域の利用は、ほぼ飽和状態となっており、最近の、より高度な管理空間のニーズに対応して新たなサイトを求めることは、非常に困難な状況となっている。このような現状を反映し、建設分野ではリフレッシュ、リフォームが新たな市場として脚光を浴びている。

一方、原子力発電所の新立地方式の研究に例を見るように、新たな管理空間として海洋と地下が注目され、様々な研究が行われている。特に、地下空間は、遮蔽性、恒常性、安定性(耐震性)という大きな特徴を有しており、今話題となっている超電導電力貯蔵施設や、高レベル放射性廃棄物の地層処分施設などの近未来プロジェクトばかりでなく、

- ・都市交通網(高速道路、地下鉄など)の整備、拡充
- ・エネルギー、情報網(共同溝)の整備、拡充
- ・防災システム(地下河川・放水路、貯蔵施設など)の整備、拡充

等、今まさに焦眉の急として求められている都市再開発においても、重要な役割を担うものである。

## 1.1 地下空間利用技術に関する研究開発の必要性

我が国における大規模な地下空間利用は、10年程前から地下発電所や石油地下貯蔵を目的として始められた。このような岩盤内空洞を設計、施工するためには、従来の土を対象とした調査技術、解析・設計技術、施工技術では不十分であり、岩盤力学に立脚した新しい技術の研究開発が研究機関、大学、建設各社において精力的に行われてきた。

一方、地下空間利用の構想は、時代とともに大型化、長大化、又大深度化し、しかもその建設に当たってはより高い安全性と合理性を要求されるようになってきた。このような状況の中で、新たに求められている検討分野の例を挙げると、高レベル放射性廃棄物処分技術における、岩盤内の地下水流動予測や、熱発生に伴う岩盤力学、水理学的問題、構造物の超長期的安定の問題などがある。また、超電導電力貯蔵、LNG-LPG地下貯蔵においては、極低温下での岩盤の安定性や、温度分布の予測などが必要とされている。

また、最近話題となっている科技庁の地下利用プロジェクト(地底総合開発構想)は、これまでの限定された地下空間利用の概念から脱却し、無限の可能性を持った未踏の空間として地下を捉えようとするもので、地下空間の利用分野に関する研究開発とともに、建設分野に係わる様々な技術開発が要求されている。

実際、これらのプロジェクトを現実のものとするためには、

- ・低コストのトンネル掘削技術の開発
- ・低コストの換気空調システムの開発

を初めとする数多くの困難な課題を早急に解決して行かねばならない。ここにおいて、ハード(調査・計測技術、施工技術など)、ソフト(設計技術、居住性・安全性など環境に関する技術、保守管理技術など)両面にわたる新たな研究開発が強く望まれている。

## 1.2 本調査の目的

地下空間の効率的な利用に関する調査研究の推進

本調査は、深地層試験場、高レベル放射性廃棄物の地層処分施設、無重力実験施設、地底総合開発研究施設など、深地層に設置することが考えられる長大構造物の建設技術、保守管理技術について、単に、これまでの技術の延長線上で考えるだけでなく、多角的側面からの検討により、

- ① 内在する問題点の抽出
- ② 抽出された問題点に対する既存技術による対応の可能性の検討
- ③ 新たに技術開発が必要な項目の抽出および、その具体化策の検討

調査結果を踏まえ、今後の地下空間利用技術の具体的な研究開発計画策定に資することを目的とする。

建設技術は、大きく基礎技術、建設技術、保守・管理技術、利用技術に分けることができる。

建設技術は、大きく基礎技術、建設技術、保守・管理技術、利用技術に分けることができる。

また、それらは、以下に示すような技術により構成されている。

### 建設技術の構成技術

#### 基礎技術

岩盤力学

岩盤水理学

地球化学

地球科学

#### 建設技術

調査技術

設計技術

施工技術

施工管理、安全管理技術

#### 保守・管理技術

保守管理技術

環境の維持管理技術

防災技術

利用技術

貯蔵技術(物、エネルギーなど)

最先端技術の研究開発(無重力下での新材料開発など)

生産技術(野菜工場、超LSI工場など)

レジャー

地下空間利用を積極的に進めるためには、これらの技術がバランスを保ちつつ進歩していくことが必要である。これまでに、岩盤力学、調査技術、長大立坑の掘削技術など、どちらかといえど地下空間開発の中心的な役割を果たす技術については、多くの研究開発がなされ、少しずつではあるが成果も発表されてきている。

しかし、それらの技術を支える技術、例えば、物資や人員の搬入出の方法、建設に当たって大量に用いられる出あろうコンクリートの施工法、出来上がった地下空洞の運用法などについては、それほど深い検討はなされていない。

本調査では、そうした実際の地下空間利用を考えるにあたって必要とされる周辺技術にスポットを当て、基礎的な検討を加える。

## 2 地下長大構造物の計画について

### 2.1 概要

地下施設の計画は、本質的には何ら地上施設の計画と異なるわけではない。すなわち、人間が自然環境を人間生活により一層適合するように制御し、また、生活環境や社会環境を一層豊かにするための施設を技術的見地、経済的見地、社会的見地から検討し、その目的を達成するための手段を見い出すことが計画といわれる行為である。

したがって、計画は自然科学のみならず、社会科学、人文科学をも基礎として成り立つものであり、具体的には、システムの機能を現象的に分析し、システムとの働きを評価し、それを基礎として最適なシステムを設計する一連の行為を指している。

地下空間は、様々な特性を有しているが、その利用の計画に当たって特に留意すべき点をあげると、

- ① 公共的利用が多いこと
- ② 空間固定性
- ③ 空間閉鎖性

がある。

①の特性は、土木施設と共通することであり、個々の人間の生活上の個別的満足に結びつくことよりも、むしろ人間社会の集団生活に対する利便を図ることに向けられることが多い。この場合、一つのプロジェクトに異なった多くの立場が存在し、利害を共通しあえないことがある。例えば、地下鉄の計画を考えてみよう。利用者は、自己の通勤、通学等の時間の短縮から最短距離の建設を願うが、都市化の遅れた地域では、地下鉄が迂回しても、その地域を通過することを望む。地下鉄による思恵の少ない地域住民は、工事中の騒音、都市の過密化、混雑などの恐れから建設に反対する。このような中で、計画者はおのおのの立場にたって総合的に計画をたて、各立場への対応を考えることが重要である。まさしく、公共性とは何かは今、問われており、プロジェクト遂行上の重要な課題である。

②の特質も、土木施設と共通することであるが、地中に物理的に固定するということは巨額の投資を必要とするだけでなく、その物理的寿命が長いために、社会的機能としてのライフサ

イクルも必然的に長くなり、50～100年に及ぶことも少なくない。また、地下施設は特に、そのシステムの変更や取り替えは、きわめて難しい。したがって、計画が適当でないと、その影響するところは時間的にも、空間的にもきわめて大きく、計画の重要性を特に認識しなければなるまい。

③の特質は、その対応が適切ではないと、人命にかかわる重大な事故の発生につながりかねないことである。したがって、地下施設を計画する場合には、この安全性に十分な配慮をした技術的見地からの検討が重要である。

いずれにしても地下利用の目的は、私的利用であれ、公的利用であれ最終的には地上の補助空間として人間の生活をより向上させることになるから、地上利用計画と十分に整合性のとれた地下利用計画となるようにしなければならない。また、地下空間の特性である隔離性、固定性、恒温性等をいかに利用するかということが重要である。

また、産業革命以来急速に進歩をとげた自然科学は、極力主観を排し、客観的に諸現象をとらえようとしてきたが、計画にあたっての安全性などの自然系の問題に重点がおかれ、何が有効で何が便利なのかといった人文系の問題については、主観的判断を行わざるをえない状況にある。このために、地下施設のようにその有用性は定性的に認識されても建設コストが高いものについては、その価値の数量化が困難であることから、利用が進められにくい。これに対して、説得力のある価値基準をいかに提示できるかが、地下利用計画にあたって重要な課題である。



## 2.2 計画の構成要素

地下空間の利用に際して、地下空間利用の必要性とその目的を明確に定めることが必要であるが、私的構造物としての地下空間の利用、公共構造物としての広範囲な地下空間利用の目的は、住民に対する便益性、効率性が主たるものである。そして、単一の独立性をもつ施設の利用か、総合的、かつ関連性をもつ機能的利用かにより、その適用技術も自ら異なってくることは当然であり、その地域の自然条件、時間的条件等によっても適用技術は選択されなければならない。

地下空間を利用する場合の適用技術としては、表2.2.1に示すようにその施設を計画する計画技術、また、施設を機能的に安全に設計する設計技術、これらの設計された地下施設を建設する建設技術、および完成後の運用技術に大別される。

これらの技術は、地下施設の建設に対応するものであり、土木工学、建築工学的な側面は当然必要であるが、これらの地下施設を建設後快適な環境に保ったり、その目的を達成するためには、他の電気、機械、通信等の諸技術の助けを貸りることも重要であり、あくまでも各種技術の総合化によって成立するものである。

表2.2.1 地下空間利用技術の構成

順 序	要 求 条 件	考 慮 す べ き 事 項	適 用 技 術
1. 計 画	1. 機 能 性	・目的に合致した機能を確認	計画技術、環境技術
	2. 安 全 性	・安全な出入・心理的安全性確保	採光、照明、換気、保安、構造計画技術
	3. 経 済 性	・機能との関係を考慮	安全性技術、経済計画技術
	4. 適 応 性	・地質に適応した構造物の計画	地質調査、施設計画技術
2. 設 計	1. 規 模・構 造	・深度、形状への配慮	計画技術の適応と最適構造設計技術
	2. 地 盤 条 件	・地質(岩、土)、地下水等	調査技術
	3. 外 力	・土圧、水圧、地震等	応力解析技術、構造設計技術
	4. 機 能 条 件	・目的、安全性、居住性、移動性等	設備技術、通信技術、災害防止技術
3. 建 設	1. 掘 削	・安全性、経済性、工期等	建設技術、(掘削技術)
	2. ライニング	・掘削時発生現象防止対策	防護技術(止水、崩壊、予測対策技術)
	3. 設 備	・地山に応じたライニングの適用 ・防災面に留意した設備	急速防災技術(ライニング) 設備技術、通信技術、防災技術
4. 運 用	1. 機 能 性	・機能を発揮出来るメンテナンス	回収、浄化技術、エネルギー自給技術
	2. 安 全 性	・災害発生対策	保守、公害管理技術、通信、防災技術
	3. 経 済 性	・省エネルギーの管理	エネルギー省力化技術、保守技術

## (1) 計画の検討要素

地下空間利用を計画する場合、その計画、手段、方法等については、なんら地上空間利用を計画する場合と異なるものではない。すなわち、地下空間利用の場合においても、地下と異なる空間条件において、その施設の機能を満足させるように、その計画の主体、目的、対象、手段について検討がなされなければならない。

- ① 計画の主体については、それが私的計画か、公共的計画かによって異なる。私的計画の場合には、一般に単一独立的な施設計画の場合が多く、また、公共的計画の場合には、政府、都道府県、都市などの国家都市としての立場から、計画がなされる。
- ② 計画の目的については、私的計画の場合に個人は企業の利益の確保、公共的計画の場合には、公共福祉、所得倍増、経済社会発展、地域開発、公害防止、災害防止などの公共的利益の確保である。
- ③ 計画の対象については、地下空間の有する特性である隔離性、空間性、恒温性等を利用し、経済性、立地性、安全性、保存性、環境性などの機能を発揮させる施設が計画される場合が多い。
- ④ 計画の手段については、その施設、機能等を計画し、どのように実施すべきか等の手段が検討される。

## (2) 特殊条件の考慮

地下空間利用計画において、地上空間利用計画と異なる唯一のものは、地下空間は閉鎖空間であり、その対応が適切ではないと人命にかかわる重大なる事故の発生につながりかねないことである。したがって、その機能あるいは施設を計画する場合には充分その安全性について検討し、補助施設を具備することが必要である。

### (3) 計画の評価

地下空間利用のための施設計画、地上構造物のように単なる経済上の立場からだけで計画の適正さを評価、判定することはできない。

地下空間施設は、利用の目的が国家、都市の立場からの経済社会機能の向上、あるいは環境対策上の立場等があり、その目的によって評価や判断の基準が異なってくるものである。

すなわち、私的な地下空間利用の場合には、利潤の追求が目的であるため、経済的評価と機能発揮するまでの技術的評価を第1の優先事項と考える。

しかし、公共的な地下空間利用の場合には、社会的側面が主要であるため、この点よりの評価が最優先され、次に技術的な可能性とその技術の経済性により、その計画の優劣を評価するようになってくる。

この場合、社会的側面とはその施設建設の目的より考慮される。機能、防災、環境および立地等の評価である。また、技術的側面とは、構造物の計画、設計上の問題であり、経済的側面とは、この施設を建設した場合の総合的経済効果はもちろん、建設上の問題も含むものである。

したがって、計画の評価は、その地下空間利用施設の目的によって、評価の優先度が異なってくるものである。

### (4) 設計技術

設計技術は、施設、あるいは、構造物をその地下空間の条件に応じて、その機能を満足するように安全に、経済的に建設できるように設計するものである。

この設計は、必ずしも独立して存在するものではなく、地下空間利用の計画を立案する初期の時点からも考慮に入れられるべき事項である。そして、計画が具体化していくに従って、設計への負担が加わり、それが数量化されて、その計画の評価と選択の手段となっていくものである。

設計は計画の段階より実施の段階に移るにつれて、その施設の機能目的を満足させるために順次、地形、地盤条件、荷重等の把握、構造物の設計変量や制約条件の定式化、電子計算機を用いた応力変形解析、最適構造の選定などを行い、半永久的な耐久性のある構造物として設計しなければならない。

この設計条件設定のため、現地の調査にもとづく自然条件の把握が必要であり、また、地震等に対する対応のため、地質上の十分な資料も必要である。

また、設計は、構造物自体の耐久性確保の観点から行われることは勿論であるが、その機能を十分に発揮させる観点から運用上必要な排水設備、照明設備、換気設備、通信設備、および災害防止設備等の設備設計も必要である。特に、人間が地下において生活する場合の非常時の脱出設備等を充分考慮しておくことが、計画および設計上に重要な事項である。

#### (5) 建設技術

地下空間施設を建設する場合、各種地盤条件に対応しつつ、如何に安全に地下を掘削し、かつ経済的に地下空間構造物を建設するかが重要な問題である。地下掘削は、地盤の種類と状態、地下水の存在とその位置等によって、その掘削方法は変わってくる。すなわち、土質地盤中にトンネルを建設する場合には、機械シールド工法を用い、セグメントでトンネルの壁体を造りながら掘進する方法を用いたり、あるいは同じく土質地盤中に大空洞を建設する場合において、浅い場合には、銅矢板で土留めをしたり、地下水位が高い場合には、ウエルにより揚水をしたり、グラウトにて止水をしたりしつつ、地山の崩壊を防ぎながら掘削する開削工法が適用されたり、あるいは深い場合には、ケーソン工法、逆巻工法、などを用いて安全に構造物を建設するものである。

表2.2.2 地下空間建設時の基本適用技術

空洞種類			建設方法	
種類	手段	深度	土質地盤	岩盤
トンネル	掘削	浅	1) 開削工法 2) シールド工法	1) 発破工法 2) 機械掘削
		深	1) ケーソン工法 2) シールド工法	T. B. M 外
	ライニング		1) コンクリート 2) セグメント	1) 無ライニング 2) 鋼製支保工コンクリート 3) ロックボルト+吹付コンクリート
	止水		1) グラウト 2) 揚水	グラウト
大空洞	掘削		1) 開削工法 2) ケーソン工法	発破工法
	ライニング		1) 順巻工法 2) 逆巻工法 3) ケーソン工法	1) 無ライニング 2) 鋼製支保工 +コンクリート 3) ロックボルト +吹付コンクリート
	止水		1) グラウト 2) 揚水	グラウト

## 2.3 調査と評価

計画のための調査の目的は、計画の方針なり、方法を定めるに当たって、正確な判断をくだすのに役立つと思われる情報を得ることである。別の表現をすれば、その計画のおかれている環境(自然環境、経済環境、社会環境)を正しく認識し、これを計画にとり入れ、また計画の環境への影響を正しく測定する作業を調査と言うことができる。

調査は図2.3.1に示すように、各計画段階で目的に応じた質と量の調査が必要であり、自然条件、経済条件、社会条件について重要度に応じて行われる。

自然条件の調査には、地下施設をより経済的に、かつ安全に建設するための環境影響調査、気象調査、地下水調査、地質調査などがあり、計画が大規模化、具体化するに従って、一般に調査規模が大きくなる。この種の調査は、自然の力の解明や造られた施設との応答機構の解明などの技術的見地からの検討に利用される。

経済条件の調査には、G.N.Pの変動を予測するための調査、そのプロジェクトが地域社会に与える経済的影響調査、純経済的な利潤予測調査、財源調査等があり、基本計画を決定するまでの比較的初期の段階で重点的に行なわれる。これはそのプロジェクトの投資の適否について直接効果、間接効果を含めて貨幣評価するための入力データとなる。プロジェクトが国家的規模となると、そのデータ量も膨大なものとなるが、コンピュータ技術等の発達により、迅速に処理することができる。

社会条件の調査には、人口動態、住民の意識、土地利用状況、就業者動態、産業構造などの調査があり、公共的プロジェクトにおいては、特に重要な調査である。すなわち、公共的プロジェクトにおいては、その関連するところが広範囲に及び、その波及効果もきわめて入りこんでいるだけでなく、そのプロジェクトの必要性、有用性を決定づける重要な情報となる。

調査計画の立案にあたっては、まず、どのような情報を集めることが必要か、すなわち、情報の質の検討をしなければならない。このためには、対象となっている計画の目的および立場の認識を通じて調査の目的を明確にすること、計画の策定の過程において必要な情報の質の検討を通じ、調査対象と調査項目を明らかにすることが必要である。また、このように収集された多くの情報が整然と体系づけられ、整理される必要があり、情報の信頼性、情報から得られる事実等が、分析者に明確かつ容易に理解できるものでなければならない。

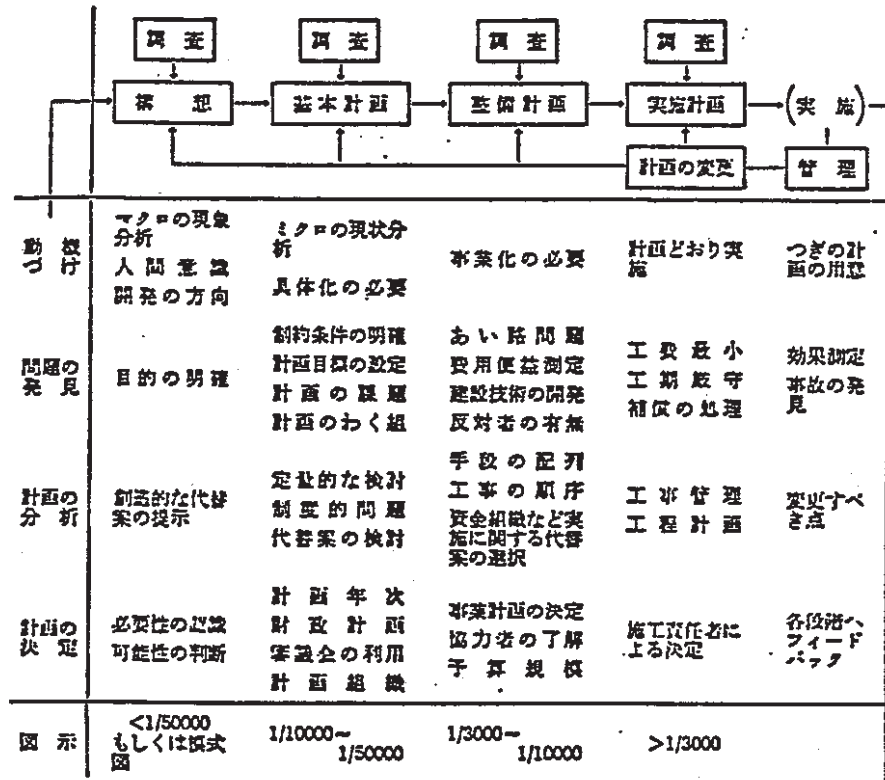


図2.3.1 計画の形成過程と思考過程

出典:土木計画序論、長尾義三著

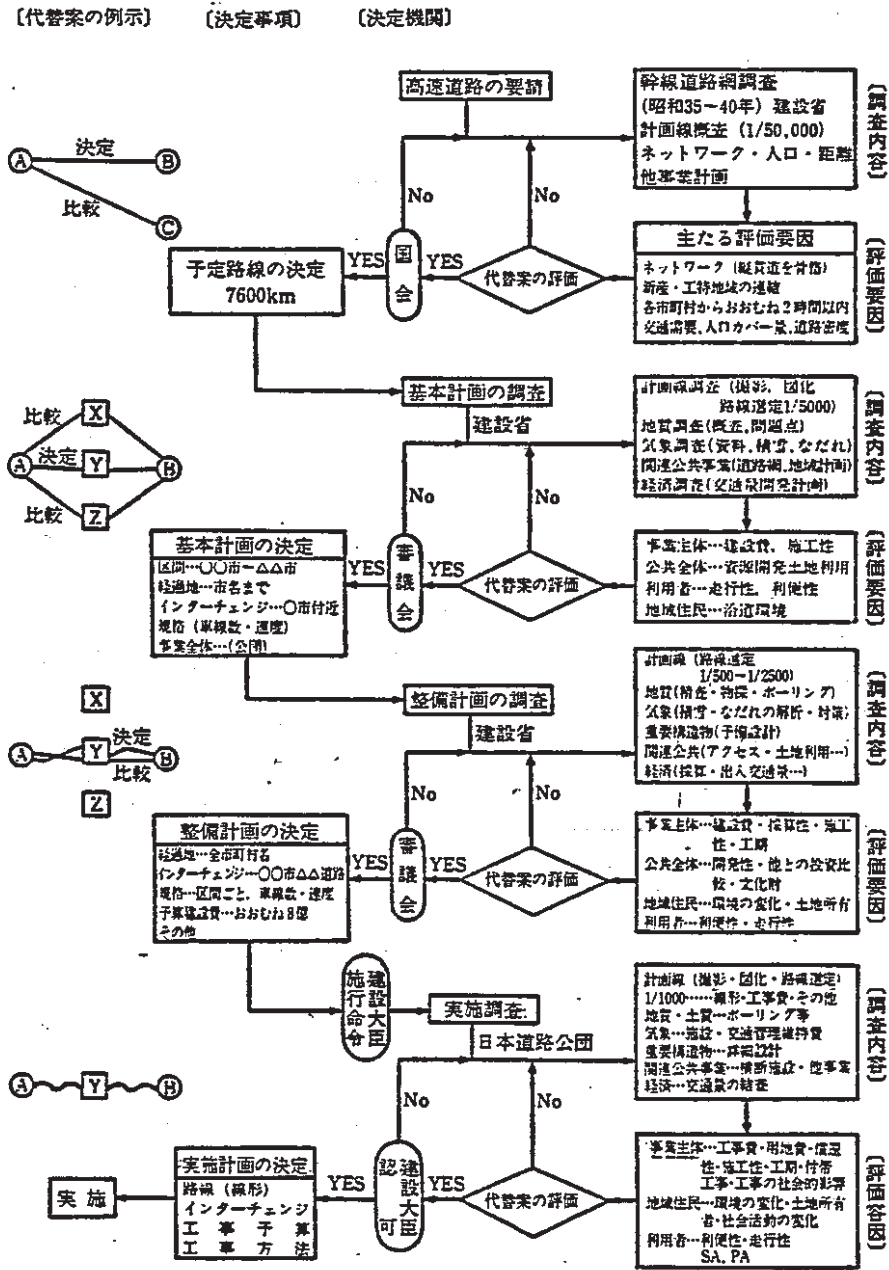


図2.3.2 計画の形成段階(高速道路の例)



さらに、どういうデータを、どれだけ、どういう方法で集めるかということは、必要な分析から判断されるデータの必要性和、データの収集に要する時間と費用とを比較検討してはじめて決めることができる。

地下利用における調査は、以上述べたように、何ら一般構造物と基本的にかわるものではないが、プロジェクトに対する投資額が大きいこと、取壊しが困難なことなどから、特に、的確な調査が要求されている。

既に述べたように、計画の各プロセスにおいては常に評価を行うことが要求される。計画における評価はある目的を達成するために、考えられるいくつかの計画案の中からどれが最適であるかを解釈し、判断するためのデータを提供するものである。したがって、評価にあたっては決定者である計画者の価値観、目的を良く理解し、計画の目的設定との関連を分析者が客観的に取りくめるように、極力、数量化し、意志決定者の判断が鋭敏となるように心がけなければならない。

評価の方法は、一般に評価すべき項目(例えば経済性、安全性、快適性など)ごとに評価指標(例えば貨幣、応力など)を定め、これらの指標について計画の評価が可能となる基準(例えば費用便益率、安全率など)、いわゆる評価基準を設定しなければならない。価値基準には、技術価値基準の他に経済価値基準、社会価値基準が考えられる。これらは、人間の幸福のある側面を指標で現わし、それに定量的基準を与えたものと言える。

したがって、評価はこれら三つの側面から総合的に行ったものでなければならないが、現実には数量化の観点から言えば、技術価値、経済価値、社会価値の順に難しい問題となる。例えば、地下利用についてみると、街路での電線の埋設は、建設費のアップとなるが、都市景観美を確保できる。この社会価値を経済価値と同様の指標(例えば貨幣)でどのように定量的に評価するかが、非常に難しい問題である。このようなことについて客観的評価が行えるように研究が種々行われているが、自然の力の解明や、つくられた施設との応答機構の解明などの技術的見地からの検討ほどには強い関心が払われておらず、今後の研究に期待するところが多い。

また、計画のレベルによって、技術的評価、経済的評価、社会的評価の優先度が異なり、これらの重み付けをどのようにするかなどの問題もある。特に、公共的地下空間利用の場合には、その評価を建設コストや維持管理コストなどの狭義の経済価値だけによって、その計画の適否を評価することは適当ではなく、シビルミニマムやナショナルミニマム的な評価基準が必要となってくる。しかし、現状の地下利用計画では、狭義の経済価値が優先されており、これ

は中・長期的なプロジェクトに対する国民の価値基準があまり明確でないことが、大きな要因の一つであると考えられる。このため、公共性と言うことについて、国民的合意が得られるような評価方法を研究し、長期的な観点にたった都市計画や国土利用計画が可能な環境づくりを行って、快適で豊かな国土建設に地下が活用されることが望まれる。

#### (1) 経済価値

経済価値に対する考え方は、利用主体によって大きく異なる。すなわち、地下空間を営利目的に利用して直接利潤を得る私的計画と空間利用に関して国家や地域社会に種々の便益をもたらす公的利用計画に大別できる。

私的利用計画においては、直接投資した資金に見合う利潤や効果を期待して行われるので、一般経済原則、いわゆる“狭義の経済原則”が適用され、建設コストを中心とした経済性評価が行われる。

一方、公的利用計画においては、社会的効果の拡大によって国民経済あるいは地域経済の発展に寄与するところがあるため、社会的効果があるとの合意が成立している場合には、内部採算性はあまり問われないという性質を有している。しかし、経済性に対してまったく問題にされないかというのではなく、特に最近の立地上の制約、財政上の制約等から効率的な投資が強く求められており、地下利用によって生ずる社会的便益をどう評価するかがこの分野における重要な課題となっている。特に、社会資本整備の場合には、地下空間利用によってどのような社会的便益が生じ、それが国民の福祉や経済にどのような好しい効果をもたらすかなどを的確に評価することが国民の合意を得るうえからも重要なことである。

これに対して、種々の社会的効用を貨幣価値で表わそうという努力がなされており、いわゆる費用便益解析(Cost-Benefit Analysis)等も行なわれている。しかし、公共の福祉を貨幣表示で説明することの適否や生命や生活心情に関することをどのように評価するかなどその評価基準は曖昧であり、いかなる解析手法も定量化には役立っているものの近似的な表現方法にすぎない。このため、地下空間の利用の社会的効果を体系的に調査して実態を把握し、基本的関係を明確にする必要があり、地下利用の必要性を経済評価のなかに極力反映させることが必要である。

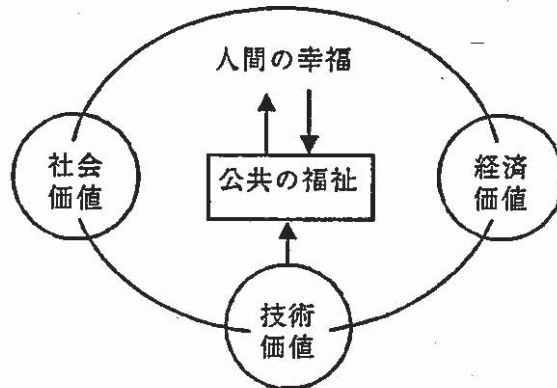


図2.3.3 公共土木計画の目的と価値  
出典:土木計画序論、長尾義三著

## (2) 社会価値

貨幣価値を離れて、社会の絶対的要請として要求されるある水準への達成度をもってその価値を評価しようとするのが、社会価値である。

このような水準は、人間が平等に生をうけている以上、社会が最低に保証しなければならず、国力にあわせたその社会の適切な水準を有するべきである。1968年の東京都中期計画で用いられたシビルミニマムの考え方はこの現われであり、住民が安全、健康、快適、能率的な都市生活を営む上で最低の条件である。シビルミニмумはナショナルミニмумに対応する。

国民の価値観の多様化、相克化の進むなかで、この基準をどのように定めるかということが、問題であるが、域圏住民のコンセンサスや受益者の負担の思考などによって定めることも一方法である。

特に、地下施設の建設コストは地上施設にくらべて高いのが一般であるから、社会価値に対する評価が重要であり、中・長期的観点にたった国土利用計画、域圏整備計画を進め、子孫に残す貴重な財産として狭義の経済原則にとらわれない適切な評価が必要である。

また、社会価値は一般に時間とともに変動していく性質をもつものであるから、プロジェクトの長いものについては広く国民のコンセンサスを得ることを基本として、ある程度の社会・経済変動予測をふまえた計画とする必要がある。

## (3) 技術価値

地下施設の性能を評価するのが技術価値基準である。施設の性能とは、外力に対する安定性はもちろんのこと、維持・補修・寿命に関する品質、能力、容量などの生産性等も含まれる。これらの評価方式には、工学的な因果法則に基づくものと永年の経験から求められたものがある。図2.3.4に示すように、一般に性能を良くすれば費用は増加するが、過度な性能は必要ではないから、(性能/費用)の極大点が得られるような水準が好ましい。しかし、技術価値基準も将来の技術革新や社会需要、あるいは社会状況によって変動するものであるから、経済変動予測や社会変動予測が伴わなければならないが、実際にはかなり困難な問題である。一方、自然現象のもつ種々の不確実性を確率論的にとらえたり、信頼性設計法などの新しい設計手法の研究が行われており、より合理的な技術評価をめざして努力されている。

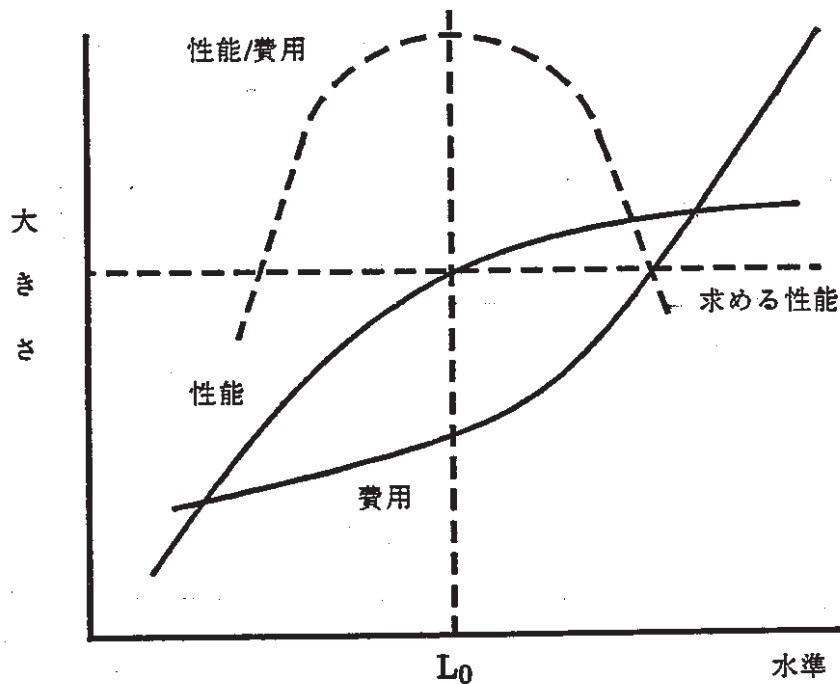


図2.3.4 技術価値と経済価値  
出典:土木計画序論、長尾義三著

いずれにしても、以上述べた種々の評価基準は個々に独立したものでなく、相互に関連している。例えば、環境基準のように、技術価値基準から出発し、経済的、社会的評価を受けて、一つの価値基準となる場合もあり、結果的に技術価値基準を大きく上回ることもあり得る。ま

た、計画の段階的進行、すなわち、上位計画から下位計画に進むにつれて、各価値基準の重みづけが異なってくる。例えば、地域開発計画のように大規模な長期の計画には、社会価値基準が、機能計画のような中規模のプロジェクト計画には経済価値基準が、また、個々の施設計画では技術価値基準が優先される。

このような中で、評価にあたって重要なことは、その施設の目的がなんであるかを良く理解し、評価の重みづけを誤らないようにすることである。

## 2.4 トンネルの計画

これまでに地下長大構造物の計画に当たっての基本的考え方、その実施項目等の概要を述べてきたが、ここではそれらの具体的事例としてトンネルの場合を紹介する。

### (1) 路線選定

- 1 トンネルの位置は、需要・サービスが最大になるルートで出来るだけ地形、地質が良好なところをなるべく短いトンネルで通過するように選定すべきである。
- 2 トンネルの位置は、坑口の位置、作業坑の位置、換気立坑度の付帯設備、工専用道路の配置等施工の便宜を考えて選定する必要がある。

トンネル位置の決定は建設計画において最も重要な作業の1つである。路線は先づ地質条件の最上のところを通すようにすべきであるが、トンネルだけ良い所へ選定しても、前後の明り区間が悪くては何もならない。したがって、地質条件のほかに、

- ① 駅・インターチェンジ等の位置
- ② 地形
- ③ 気象
- ④ 国立公園等の自然環境保全地域、砂防指定、文化財等の法的規制
- ⑤ 騒音、振動、濁水、大気汚染等の環境
- ⑥ 供用後の保守条件
- ⑦ 運転条件
- ⑧ 鉱業権、水利権等の権利
- ⑨ 用地、建物等の補償条件
- ⑩ 工費、工期等の施工条件

等を考慮した比較ルートを作成したあと、個々のルートの組み合わせ的な優劣を比較し、その中でルートの大筋を決定する。

トンネルの位置は共用後にその機能や目的を果しうる範囲で出来るだけ地質が良好なところを、なるべく短いトンネルで通過するよう選定するのが原則である。その場合、坑口位置の選定はトンネル計画とくに重要で、地形、地質のほか完成後の維持管理や公害問題、工事中の仮設備のことも考慮しておく必要がある。

トンネルの位置選定にあたって、最も注意を払わなければならない特殊地質条件には、次のようなものがある。

④ 活断層

一般に活断層とは有史時代に動いた断層で、多くは地震に関係している。中央構造線は活断層の代表である。

④ 破砕帯、幅の広い断層及び褶曲帯

破砕帯、幅の広い断層及び褶曲帯は、土圧、地耐力不足、突発湧水等が原因となって工費の増大をきたし、特殊工法を必要とするので、破砕帯を横切らなければならない時は、出来るだけ破砕帯に直交させるとともに、幅の狭い区間を選ぶように心がけるべきである。

④ 被圧含水層

透水性の岩盤の不透水質岩盤を止水壁とした被圧水が含まれていると、掘削の際土砂流出を伴った突発湧水が起り、切羽崩壊等の事故が発生する。この地層の突破には特殊工法を必要とする。

④ 不透水層に覆われた第3紀、第4紀の固結度の低い含水砂礫層及び含水火山噴出物

これらの帯水層は、掘削中崩壊を起こす可能性が大きいとともに、地下水の枯渇や地表沈下を招く恐れがあり、かつ流砂現象が後々まで続くと覆工背面に空隙を生ずる恐れもある。

◇ 膨脹性地質

膨脹性を有する岩石は蛇紋岩、温泉余土、変朽安山岩、石墨片岩、輝緑岩質又は集塊岩質片岩、第3紀グリーンタフ地域のような泥岩と凝灰岩、断層破砕帯等である。膨脹機構としては、塑性地圧による膨脹、吸水膨脹、応力解放による膨脹が考えられる。これらの膨脹性岩石のトンネルは、掘削中は勿論のこと、完成後も膨脹を続けることがある。

◇ 支持力が低い軟弱地盤

トンネルの支保基盤面での支持力が $20\sim 30\text{t/m}^2$ 以下の場合の沈下を起し易い。このような問題のある地質としては第4紀のシルト、粘土、含水砂礫層、第3紀の泥岩、未固結凝灰岩、その他の岩石の著しい風化変質帯や破砕帯である。

◇ 山麓部の偏圧地形

山岳トンネルは谷間に沿って路線選定する場合が多く、土被りや川側の地山が薄い場合は偏圧をうけ易い。特に坑口付近は偏圧地形の所を掘削する機会が多いので、坑口は等高線に直角に、かつ山の鼻の出張り地形に入れるよう配慮すべきである。

◇ 滑動性の崖すい

崖すいは、土砂の安息角に近い状態でようやく平衡を保っているものである。このためか何等かの力が加われば安定を崩して滑動する危険を常にもっている。そのためトンネルは、これを避けるか、崖すいの下の基盤に入れるべきである。

◇ 崩壊性地氾り及び移動性地氾り崩土

移動性地氾り崩土及び崩壊の恐れのある地氾り地は絶対にこれを避けるべきである。大規模な地氾り地については概略調査の段階から詳細な調査が必要で、地氾り断面解析やボーリングによって地氾り面を確認して、トンネルを地山の盤の中に入れるようにする。

地氾りは特殊な地質例えば、新3紀層の泥岩が分布している地域、温泉作用等のために変質した火山岩、火山破屑岩の発達する地域、結晶変岩等変成岩の発達する造山帯の山地に多発しているので、これらの分布地域では十分な調査が必要である。地氾りは崩壊跡がはっきりしないことも多く、何段にも割れ目が出来て等高線が乱れて、浸食による地形と



形が異なることで見分けることが出来る。なお、地這り地として、建設省、農林省発行の「全国地這危険箇所一覧表」がある。

◆ 含水扇状堆積物

固結度の悪い砂礫層で扇状地が構成されこれが含水している所を掘ると、湧水による土砂流出で工事が難渋する。また、地表部の湧水問題が生じる可能性が多い。

◆ 地熱、ガス等

地熱又は可燃性ガス等の出る場所では、作業員の安全と健康に重要な関係がある。工事が困難となる地熱の発生する原因としては、温泉余土に含まれる硫化鉄鉱の吸水、酸化による発熱や温泉熱、高温泉の噴出等がある。

又可燃性ガスが発生する場合、爆発事故のおそれがある。特に、第3紀層の油田、ガス田、炭田、等の地帯はそのおそれが十分あるのであらかじめ地質調査を十分に行い出来るだけこれを避けるべきである。

以上の注意点の他、一般には良好な地質がなるべく多く存在するように、又トンネルの土被りは、土圧、湧水を極力小さくするため、地表への悪影響や防災上の問題を考慮して選定すべきである。

## (2) 線形計画

- 1 トンネルの平面線形は、直線が最も望ましいが、これにより難しい場合でも構造規格で定められている最小曲線半径よりも大きい径を採用することが望ましい。
- 2 道路、鉄道等のトンネルの縦断線形は、0.3~2%の間で、使用目的・延長・施工性等を検討して出来るだけ緩い勾配を採用することが望ましい。
- 3 水路トンネルの縦断勾配は、通水量、通水断面積、流速等の相互関係を考慮して設定すべきである。

道路トンネルでは、出口付近にある程度の曲線を設けることにより、まぶしさを減少させる効果がある。また200m程度以下の短いトンネルでは、入口から出口が見通せる直線とするのがよい。

トンネル完成後の湧水を排水溝等によって自然流下させるには、通常0.1%以上の勾配があればよいが、施工中の湧水を自然流下させるため、湧水が少ない場合でも0.3%程度、多い場合は、0.5%程度の勾配が必要である。又施工中のズリ出しや材料運搬等のためには急勾配では安全上の問題と能率の低下をきたし、2%程度以上の勾配ではその影響が大きい。又、道路トンネルでは2%をこえると自動車の排気ガス濃度は急上昇するという調査結果がある。

## (3) 断面計画

トンネルの内空断面は、所要の建築限界及び換気・保守用通路等必要な断面積を包含し、土圧等の荷重を考慮して、最も経済的な断面形状にしなければならな

PNC TJ4027 87-003

トンネル断面は土圧に対して経済的に対応し得るものがよく、通常3心あるいは5心円からなる馬蹄型を用いる場合が多い。

断面が大きくなると土圧も大きくなり、地質不良の場合の施工が著しく困難となる。従って複線型断面にかえて単線型断面のトンネル2本併設の方が、施工上、経済上、有利となる場

合があるので、計画に際ては、地質その他の条件を考え、比較検討のうえ決定しなければならない。

(4) 施工計画

1 建設工事の注文者等仕事を他人に請け負わせている者は、施工方法、工期等について、安全で衛生的な作業の遂行をそこなうおそれのある条件を附さないよう配慮しなければならない。 (安衛法3条の3)

2 重大な労働災害を生ずるおそれのある

① 長さが3,000m以上のずい道

② 長さが1,000m以上3,000未満であって深さが50m以上の道路として使用する立坑の堀削を伴うずい道

の建設の仕事を開始しようとするときは、その計画を仕事の開始の日30日前までに労働大臣に届出なければならない。 (安衛法88条の3、安衛則89条の2、91条)

3 前項以外のずい道等の建設の仕事を開始しようとするときは、その計画を仕事の開始の日の14日前までに所轄労働基準監督署長に届出なければならない。

(安衛法88条の4、安衛則90条、91条)

4 前2項を届出をしようとする者は届書に次の書類を添えて提出しなければならない。

① 仕事を行う場所の周囲の状況及び四隣との関係を示す図面。

② 建設等をしようとする建設物等の概要を示す図面。

③ 工事用の機械、設備、建設物等の配置を示す図面。

④ 工法の概要を示す書面又は図面。

⑤ 労働災害を防止するための方法及び設備の概要を示す図面。

⑥ 工程表

(安衛則91条)

5 ずい道工事の計画を作成するときは、仕事から生ずる労働災害の防止を図るため、労働省令で定める資格を有する者を参画させなければならない。

(安衛法88条5、安衛則92条の2)

- 6 ずい道等の掘削の作業を行うとき、あらかじめ、調査により知り得たところに適応する施工計画を定め、かつ、当該施工計画により作業を行わなければならない。

施工計画は、次の事項が示されているものでなければならない。

イ 掘削の方法

- ロ ずい道支保の施工、覆工の施工、湧水若しくは可燃性ガスの処理、換気又は照明を行う場合にあつては、これらの方法。

(安衛則 380条)

- 7 (1) 請負業者は、あらかじめ工事実施に必要な施工計画書を監督職員に提出しなければならない。

この場合次の事項について記載するものとする。

- ① 工事概要
- ② 実施工程表
- ③ 現場組織表
- ④ 主要機械
- ⑤ 主要資材
- ⑥ 施工方法
- ⑦ 施工管理
- ⑧ 緊急時の体制
- ⑨ 交通管理
- ⑩ 安全管理
- 11 仮設備計画
- 12 その他

- (2) 監督員が特に指示した事項については、さらに詳細な施工計画書を提出しなければならない。

(共通仕様書 103条)

掘削工法は、地形、地質、環境条件、トンネル断面、工期等を考慮して決定するが、不確定要素が多い場合や、地質に多様な変化がみられる場合等は、状況の変化に容易に対応できる工法としなければならない。

我が国で一般的に採用されている主な掘削工法には、次の工法がある。

- ① 全断面工法
- ② 上部判断面先進工法
- ③ 底設導坑先進工法
- ④ 側壁導坑先進工法
- ⑤ 上半先進ベンチ工法

掘削の進行に伴って岩質や自然条件等が大巾に変化した場合、その条件に適応した掘削工法に変更するとか、安全確実な補助工法を併用する等が行われる。

特殊な工法とそれに適応する地質については、表2.4.1に示す。

着手にあたっては、安衛則第91条に定める書類を作成する時の留意点を表2.4.2に示す。

表2.4.1 掘削方式と適応地質条件

区分	工 法	方 式	適 応 地 質
人力 爆破	導坑先進工法	(a) 側壁導坑先進リングカット 逆巻工法	① 膨張性地質, ② 地山分類 5~7
		(b) 中央底設導坑先進リングカ ット逆巻工法	① 膨張性地質, ② 偏圧作用地質, ③ 幅広い 破砕帯, ④ 地山分類 5~7
		(c) 中央底設導坑先進上部 半断面工法	① 地山分類 3~5
		(d) 中央底設導坑先進全断面 工法	① 地山分類 1~3
		(e) 側壁導坑先進全断面工法	① 地山分類 2~4 (途中に断層破砕帯, 湧水 対処)
	部分掘削工法	(a) 上部半断面リング掘りベン チカット併進工法	① 膨張性地質 (変化が激しく湧水の多い場合不適當)
		(b) 上部半断面工法	① 地山分類 1~3 ② 湧水が少く延長余り 長くない場合
		(c) きのこ型全断面工法	① 地山分類 1~3
	全断面工法	全断面工法	① 地山分類 1~3 (湧水が少い)
機械	機械掘削工法	(a) 圧縮破砕式工法	① 岩の圧縮強度 600~1,300kg/cm <sup>2</sup>
		(b) 切削破砕式工法	② 地山分類 3~4
		(c) ビッグジョン式圧砕工法	③ 割れ目かんかく D < 20~40cm
		(d) ロードヘッダー式工法	
		(e) シールド工法	
		(f) 圧 気 工 法	① ルーズな含水砂礫層又はシルト層
		(g) 其 の 他	(水圧 3kg/cm <sup>2</sup> 以下)
特殊	特殊工法	(a) ウェルポイント式水抜き 工法	① 新生代の固結度の悪い地質・砂礫層, 火 山噴出物堆積物段丘の滞水層
		(b) 迂回坑水抜き工法	① 被圧水を伴った破砕帯, ② 岩目や洞穴の 大湧水
		(c) 先進ボーリング水抜き工法	① 上記同様
		(d) 注 入 工 法	① 上記同様
		(e) 凍 結 工 法	① ルーズな含水砂層, 砂礫層, シルト層
		(f) ケーシングチューブ工法	① 軟質地層, 地表沈下を許されない場合
		(g) 坑 導 式 工 法	① 崩壊性含水破砕帯, ② 崩壊性含水砂礫層 ③ 膨張性地質

表2.4.2 書類作成時の留意点

安衛則第91条に定める書類の名称	添付を要する書類	作成上の留意点	関連条文
仕事を行う場所の周囲の状況及び四隣との関係を示す図面	地図（正確なもの）	作製者が明らかなものであること。（例えば、国土地理院発行のもの等）	
建設等しようとする建設物等の概要を示す図面	工事の完成図	平面、断面図であること	
工事用の機械、設備、建設物等の配置を示す図面	現場の見取図の中に建設物等の位置を示した図面	宿舍、事務所、作業小屋等の位置が明らかにされたもの	
工法の概要を示す書面又は図面	地質調査の図面及び説明書	形状、地質、地層が明らかにされたもの	安衛則 379 条
	施工計画図	掘削方法、順序、ずい道支保工の施工、湧水ガス処理等が明らかにされたもの	安衛則 380 条
	ずい道支保工組立図	部材の配置、寸法、材質が示されたもので主要部分の強度計算書、部材の取付時期、順序、部材の結合部が明らかなもの。強度計算の基礎とした土荷重の高さを明らかにしてあること	安衛則 390 条 1 394 条
	ずい道型枠支保工組立図	主要部分の強度計算書、部材の取付時期、部材の結合部が明らかなもの	安衛則 397 条 398 条
	圧気工法による掘削工法の概要を説明した図面	掘削工法の概要を説明した図面	掘削は別途必要であること
労働災害を防止するための方法及び設備の概要を示す書面又は図面	発破作業計画書	火薬庫の管理、火薬の保管量、1日の使用量、待避方法等が明らかなもの 1日の消費見込量が、 火薬、爆薬 25kg以下 雷管 250個以下 導爆線 500m以下 の場合は火薬取扱所を設けなくてよい	安衛則 318 条 321条の2 火取則52条
	車両系建設機械、運搬機械の運行による危険防止対策書	構造、転落、接触事故対策が明らかなもの	安衛則152～157条 364条
	坑口付近の崩壊による危険防止対策書	出入口付近の崩壊、上石の落下による危険防止対策が明らかなもの	安衛則 385 条
	照明計画書	照明設備配置が明らかなもの	安衛則 388 条



### 3 地下長大構造物の建設技術の現況と問題点

#### 3.1 概要

地下長大構造物の建設技術は、多くの技術により成り立っている。トンネルを例としてそれらを挙げて見ると、次のようになる。

調査	調査	地形・地質調査
		環境調査
	試験	室内試験
		原位置試験
	測量	
計画	路線選定	
	断面、勾配設定	
設計		
施工	掘削	工法(NATM、先進導坑etc)
		工法(発破、機械掘削etc)
		ずり処理
	支保工	鋼アーチ
		ロックボルト
		吹き付けコンクリート
	覆工	型枠
		コンクリート
		裏込め注入
		湧水処理
	特殊工法	注入
		水抜き
		パイプルーフ
		凍結

安全・環境

圧気

照明

換気

排水

濁水と地表沈下

騒音、振動

事故防止

地下長大構造物の建設にあたって必要とされる技術は、基本的にはここに掲げたものと同じ出があるが、各々の技術の詳細は、建設地点が地下深部出であるという条件を考慮し、十分検討されねばならない。ここでは、このような観点から、コンクリートの施工と、安全・環境について、その技術の現状と問題点を検討する。

## 3.2 コンクリート打設と施工管理

### 3.2.1. 目的

地下長大構造物の建設に当たっては、地下にトンネルにしろ空洞にしろ、ある大きさの空間を構築する。この際、地圧や地下水の湧出から空間を守るための構造部材としてコンクリートが使用されることは容易に予想される。ではこのような、深度が相当大きく、空間も相当大きな地下長大構造物の建設に当たって、コンクリートを使用する場合、いったいどのような問題が生じるのであろうか。このような観点から、ここでは現在得られる情報の範囲で、コンクリート工学の面から考えられる関係項目を整理して、各項目を支配する不確定要因すなわち影響要因についてとりまとめた上、コンクリートの使用上問題となるであろう検討課題を明らかにして、このうち、調査や試験等を実施して検討することが必要なものと、相当の研究開発を要するようなものについてコメントする。

### 3.2.2. コンクリートの品質にかかわる要因について

コンクリートの品質にかかわる要因について検討するためには、1)どのような場所にどのような形式の構造物をどのような規模で構築するかという設計上の要因と2)構造物が構築される場所すなわちサイトの岩盤の温度や含有鉱物の種類や地下水の水質などの環境に関する要因が明確にならなければ、非常に一般論的なものとなる。ここでは当然サイトが特定されているわけではないので、設計上の要因と環境に関する要因が全く明白でないという前提にたつて、一般的に長大構造物を建設するに当たってのコンクリートの品質に関する要因についてコメントする。

コンクリートの品質に関する要因の内、大項目に位置するものは次の通りである。

- A 材料要因
- B 材料の貯蔵要因
- C 配合要因
- D 製造要因
- E 運搬、打ち込み要因
- F 養生要因
- G 耐久性要因

以上の大項目別に、これを構成する小項目について、長大地下構造物建設上で問題となる点について述べ、この小項目に影響する要因を抽出した。この影響要因の中で、特に検討を要する要因については、サイトの調査や材料試験を実施する必要があるもの(調査試験)と研究開発の必要なもの(研究開発)とに分けて示した。

予想される注意事項、問題点に関する影響項目について順に検討した。

## A 材料要因

材料要因には次の項目が小項目として考えられる。

A-1 セメントの種別

A-2 水の種別

A-3 骨材の種別

A-4 混和材料の種別

### A-1 セメントの種別

セメントの種別は表3.2.1にあるJIS規格で定められたセメントがあり、このうち強度発現に必要な日数で早強セメントが使用されたり、部材の厚さが大きいいため発熱量を低減させるため高炉セメントを使用したり、海水中のイオウの影響をとりのぞくために耐硫酸塩セメントを使用したりする。したがって影響項目としては以下のものがここではあげられる。

#### (影響項目)

セメントの性能、構造物の種類、断面寸法、位置、工事の時期、工期  
岩盤の地球化学的性質、地下水の水質

表-3.2.1 ポルトランドセメントおよび混合セメントの JIS 規格

項目		JIS R 5210—1986					JIS R 5211—1979			JIS R 5212—1979			JIS R 5213—1979		
		ポルトランドセメント					高炉セメント			シリカセメント			フライアッシュセメント		
		普通	早強	超早強	中麻熟	耐硫酸塩	A種	B種	C種	A種	B種	C種	A種	B種	C種
比表面積(cm <sup>2</sup> /g)		>2500	>3300	>4000	>2500	>2500	>3000	>3000	>3300	>3000	>3000	>3000	>2500	>2500	>2500
凝結	始発(min)	60以後	45以後	45以後	60以後	60以後	60以後	60以後	60以後	60以後	60以後	60以後	60以後	60以後	60以後
	終結(h)	10以内	10以内	10以内	10以内	10以内	10以内	10以内	10以内	10以内	10以内	10以内	10以内	10以内	10以内
安定性		膨張性ひびわれまたはそりができてはならない。													
圧縮強さ (kg/cm <sup>2</sup> )	1日	—	>65	>130	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	3日	>70	>130	>200	>50	>70	>70	>60	>50	>70	>60	>50	>70	>60	>50
	7日	>150	>230	>280	>100	>140	>150	>120	>100	>150	>120	>100	>150	>120	>100
	28日	>300	>330	>350	>230	>280	>300	>290	>280	>300	>260	>210	>300	>260	>210
水和熱 (cal/g)	7日	—	—	—	<70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	28日	—	—	—	<83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
化学成分	酸化マグネシウム(%)	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<6.0	<6.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0
	三酸化いおう(%)	<3.0	<3.5	<4.5	<3.0	<3.0	<3.5	<4.0	<4.5	<3.0	<3.0	<3.0	<3.0	<3.0	<3.0
	強熱減量(%)	<3.0	<3.0	<3.0	<3.0	<3.0	<3.0	<3.0	<3.0	<3.0	—	—	<3.0	—	—
組成化合物	珪酸三カルシウム(%)	—	—	—	<50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	アルミン酸三カルシウム(%)	—	—	—	<8	<4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
混合材の分量(wt%)		—	—	—	—	—	5 超え 30 以下	30 超え 60 以下	60 超え 70 以下	5 超え 10 以下	10 超え 20 以下	20 超え 30 以下	5 超え 10 以下	10 超え 20 以下	20 超え 30 以下

注:(1) ポルトランドセメントおよび混合セメントの日本工業規格は1973年に大幅な改正が行われた。主要な改正点は次のとおりである。超早強セメントの新設、圧縮の強さ値の増加、比表面積、凝結始発、水和熱、化学成分の改正、比重、88μ残分、曲げ強さの廃止。また、1978年の改訂では耐硫酸塩セメントが新設された。1979年の改正では普通ポルトランドセメントにおいては5%以下で混合材を加えてもよいとなった。(混合材の種類については規定あり)

## A-2 水の種別

水の種別は表3.2.2にのJASS-5に示したもので、油、酸、塩類、有機不純物懸濁物などを一定量以上含まず、コンクリートの品質や鋼材の品質に悪影響をおよぼさないものであればよい。このような水を大量に工事に必要な量を必要な時期に入手可能であれば良い。予想されるのは、地下水などの湧水や沢などの表面水が対象となるであろう。したがってここでは影響項目としては以下のものがあげられる。

## (影響項目)

地下水の水質、対象水の賦存量

表3.2.2 水の品質

水の品質規定 [JASS 5]	
項 目	品 質
懸濁物質の量	2 g/l以下
溶解性蒸発残留物の量	1 g/l以下
塩素イオン	200 ppm以下
セメントの凝結時間の差	始発は30分以内、 終結は60分以内
ミルタルの圧縮強度の比率	材令7日および材令28日で90%以上

高耐久性コンクリートの水質基準  
[JASS 5]

試 験 項 目	許 容 量
色 度	5度以下
濁 度	2度以下
水素イオン濃度 (pH)	5.8~8.6
蒸 発 残 留 物	500 ppm以下
塩 素 イ オ ン	200 ppm以下
過マンガン酸カリウム消費量	10 ppm以下

A-3 骨材の種類

骨材は表3.2.3に示したような粘土塊の試験や洗い試験などのJISの試験に適合するものを使用するが、最近、表3.2.4にまとめたような鉱物自身の性質がコンクリートの劣化の原因となるような問題があり、JISの規格以外に調査しなければならない品質が問題となっている。すなわちアルカリ骨材反応を生じるような鉱物を含有していたり、膨潤性の粘土鉱物を多量に含有するような骨材であってはいけない。したがってコンクリートの打設量に大きく関係するが、品質が保障できる骨材を調達できる原石山が適当な位置にあるかいなが重要となってくる。したがってここでは影響項目としては以下のものがあげられる。

(影響項目)

骨材の鉱物学的な性質、骨材の賦存量、サイトと原石山との距離

表3.2.3 普通骨材の品質(JASS 5)

種類	項目 コンクリートの種類	項目							
		絶乾比重	吸水率 (%)	粒形判定の実積率 (碎石) (%)	粘土量 (%)	洗い試験によって失われる量 (%)	有機不純物	塩分 (NaCl) (%)	安定性 (%)
砂利および碎石	一般	2.5 以上	3.0 以下	55 以上	0.25 以下	1.0 以下 <sup>(1)</sup>	—	—	—
	高耐久性	2.5 以上	2.0 以下	59 以上	0.25 以下	1.0 以下 <sup>(1)</sup>	—	—	12 以下
砂	一般	2.5 以上	3.5 以下	—	1.0 以下	3.0 以下	試験溶液の色が標準色液より濃くないこと	0.04 以下	—
	高耐久性	2.5 以上	3.0 以下	—	1.0 以下	2.0 以下		0.02 以下	10 以下

注：(1) 碎石の場合；洗い試験で失われるものが碎石粉であるときは、1.5% 以下とする。  
 特記のある場合は、一般のコンクリートに対し、絶乾比重 2.4 以上、吸水率 4% 以下および砂の塩分 0.1% 以下の砂利、砂を用いることができる。



表3.2.4 鉱物自身の変質がコンクリート劣化の原因となるもの

分類	鉱物名	反応形態
	含鉄ブルーサイト コーリンサイト	含鉄ブルーサイトの酸化・炭酸化による膨張を伴う新鉱物の形成
沸石	ローモンタイト レオンハルダイト	乾燥の繰り返しによる粉状化
長石	正長石 歪長石	セメント中に放出したK, Naと共存, シリカ鉱物との膨張反応
粘土鉱物	モンモリロナイト サポナイト 加水雲母 イライト 絹雲母 膨潤性緑泥石	吸水膨張乾燥収縮
硫化物	黄鉄鉱 白鉄鉱 黄鉄鉱	酸化して石膏を生成した後, さらにエトリンサイトを形成し膨張
硫酸塩	石膏 硬石膏 明礬	セメント中のC <sub>3</sub> Aと反応して, エトリンサイトを生成し膨張
酸化物	ライム (CaO) ペリクレス (MgO) ウスタイト (FeO)	水和膨張

※アルカリ骨材反応の要因になると考えられている。

## A-4 混和材料の種類

混和材料とは表3.2.5に示したようなものが対象となる。このような混和材料の種類別はコンクリートの種類や配合と関係するが、特にコンクリートを運搬する距離や方法で流動化剤の種類、量が変化する。長大構造物が対象であるから当然、長距離のトンネルを建設する場合が予想されるので、超距離運搬の為の流動化剤に関する開発などの検討すべき点がでてくる。また施工手順、打設温度などで、遅延剤などの種類、量が決まってくる。つまり地下の深部であれば、当然地温が高くなっていくので凝結が早くなるのでこれを遅らすことが必要となってくるので、これも開発などの検討すべき点がでてくる。したがってここでは影響項目としては以下のものがあげられる。

## (影響項目)

混和材料の性能、コンクリートの種類、配合、運搬距離、方法、打設温度

表3.2.5 混和材料の種類

	混和剤	混和材
1	界面活性作用により、コンクリートのワーカビリティや気象作用に対する抵抗性(凍結融解の繰り返し作用および中性化)などを改善させるもの—コンクリート用化学混和剤(AE剤、減水剤、AE減水剤)	ボラゾン作用のあるもの—フライアッシュ、火山灰、珪酸白土
2	強度の増大あるいは流動性を改善するもの—高性能減水剤(高強度用減水剤、流動化剤)	潜在砕硬性のあるもの—高炉砕碎スラグ粉末
3	凝結および硬化時間を調節するもの—促進剤、遅延剤、急結剤	硬化過程において膨張を起こさせるもの—コンクリート膨張剤
4	防水効果を与えるもの—防水剤	オートクレーブ養生によって高強度を生じさせるもの—珪砂質微粉末
5	空気泡の作用により充填性を改善したり、重量を軽減するもの—起泡剤、発泡剤	その他—増量材など
6	その他—鉄筋コンクリート用防せい剤、保水剤、着色剤など	

以上から材料要因において検討すべき課題は以下の通りである。

(設計)

構造物の種類、断面寸法、位置、工事の時期、工期、サイトと原石山との距離  
コンクリート運搬距離

(調査試験)

岩盤の地球化学的性質、対象水の水質、対象水の賦存量、骨材の賦存量  
コンクリートの種類、配合、コンクリート運搬方法、打設温度

(研究開発)

セメントの性能、混和材料の性能

## B 材料の貯蔵要因

材料の貯蔵の中で特に問題となると思われるのはセメントである。その他には骨材、混和材料、鉄筋が対象となる。これらは地表で貯蔵する場合には、通常の建設工事でコンクリート標準示方書にのっとっておこなっているレベルで問題とならないと思われるので、ここではこれを一時的でも地下空洞内部に貯蔵する場合についての問題を考える。なお貯蔵要因には次の項目が小項目として考えられる。

- B-1 セメントの貯蔵
- B-2 骨材の貯蔵
- B-3 混和材料の貯蔵
- B-4 鉄筋の貯蔵

### B-1 セメントの貯蔵

セメントの貯蔵にはセメントの材料としての品質の問題と貯蔵スペースの問題である。地下空間に貯蔵することで予想されることは、温度が高いことと湿度が非常に高いことである。したがってセメントの変質が心配される。このようなセメントの変質が生じるとセメントの比重が変化し、当然所定の強度が得られなずまた凝結が遅くなるなどの現象が起こる。またセメントの温度が8℃変化することにより、コンクリートの練り上がり温度が1℃変化するので、極端に高い温度のセメントの使用には注意が必要である。

貯蔵スペースの問題としては、地下ということで空間を得るということは全てコストに影響してくるので、非常に合理的な貯蔵と搬入、搬出方法を考案する必要があるであろう。したがってここでは影響項目としては以下のものがあげられる。

#### (影響項目)

- サイトの温湿度、セメントの温度、湧水の影響度、セメントの貯蔵スペース
- セメントの貯蔵容器、地下への搬入・プラントへの搬出方法

## B-2 骨材の貯蔵

骨材の貯蔵はセメントほどの質的な変化は生じないと考えられるが、貯蔵による粒度組成の変化と水分含有量の変化が問題となるであろう。前者は骨材を高いところから落としたり、骨材を斜めに転がるような場所を設けないことへの注意が必要である。後者は地下水にさらされたりしないような配慮が必要である。貯蔵スペースの問題としては、セメントと同様である。したがってここでは影響項目としては以下のものがあげられる。

### (影響項目)

骨材の貯蔵スペース、骨材の貯蔵容器、骨材の貯蔵方式、  
地下への搬入・プラントへの搬出方法

## B-3 混和材料の貯蔵

混和材料の貯蔵はセメントや骨材に比較して品質的に安定しており、量的に少ないため問題となる要素はとりたてて無いと考えられる。

## B-4 鉄筋の貯蔵

鉄筋は貯蔵期間中の腐蝕が問題となる。特に地下では湿度が高かったり、地下水の水質によっては腐蝕を促進する環境であることが予想されるので、十分な保護が必要である。貯蔵スペースの問題としては、セメントと同様である。したがってここでは影響項目としては以下のものがあげられる。

### (影響項目)

サイトの温湿度、地下水の水質、鉄筋の貯蔵方式、  
地下への搬入・プラントへの搬出方法

以上から材料の貯蔵要因において検討すべき課題は以下の通りである。

(設計)

貯蔵スペース、貯蔵容器、貯蔵方式、地下への搬入・プラントへの搬出方法

(調査試験)

セメントの温度、サイトの温湿度、湧水の影響度、地下水の水質

C 配合要因

配合要因はどのような構造物をどこにどのように建設するかによって当然決まることである。配合要因には次の項目が小項目があり、これらの小項目の関係は図3.2.1に示した通りである。

- C-1 配合強度
- C-2 水セメント比
- C-3 単位水量
- C-4 単位セメント量
- C-5 粗骨材最大寸法
- C-6 スランプ
- C-7 細骨材率
- C-8 空気量
- C-9 混和材料の使用量

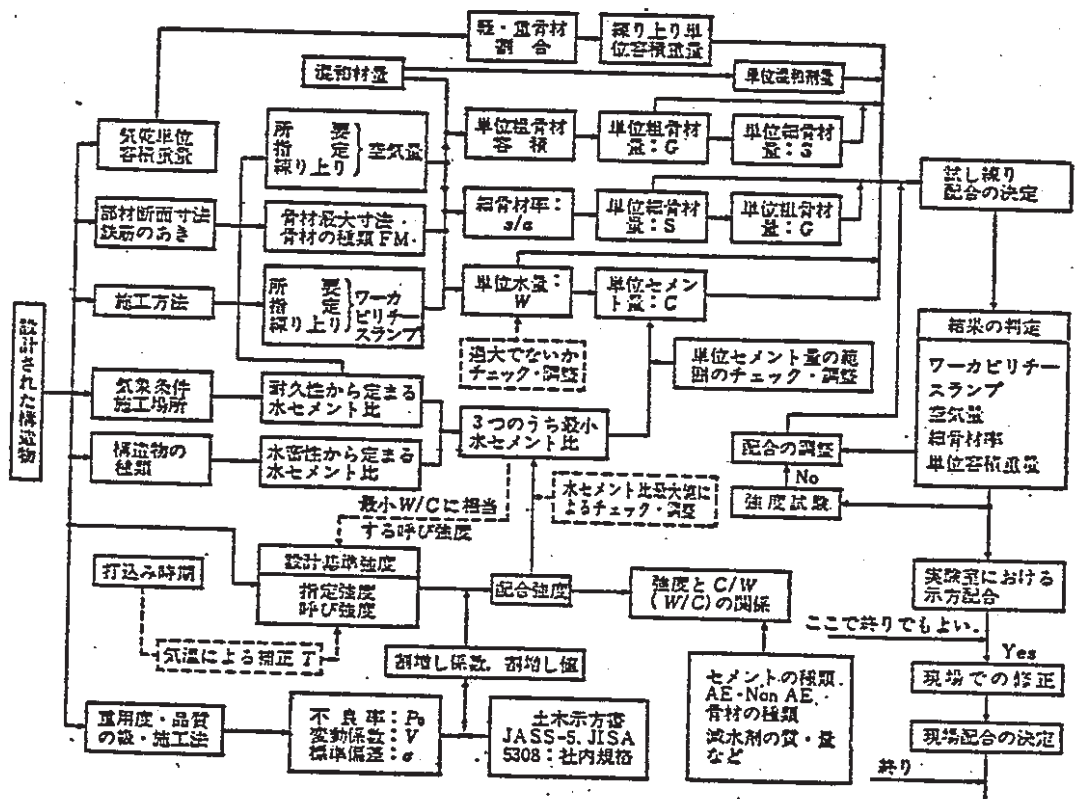


図3.2.1 配合設計の順序

C-1 配合強度

配合強度は最初に述べた設計要因で決定する。したがってここでは特別な検討要因は加えない。補足であるが、構造物の設計において基準とした圧縮強度(場合によっては曲げ強度)に対して過少とならないことを保証するために、現場におけるコンクリートのばらつきに応じて表3.2.6にある規定を満足するように定めている。

(影響項目)

構造物の種類、コンクリートの要求品質

表3.2.6 配合強度に関する規定(RC示方書、JASS 5、JIS)

	RC示方書			JASS 5		JIS A 5308
	無筋および鉄筋コンクリート	舗装コンクリート	ダムコンクリート	一般	高強度コンクリート 設計基準強度の大きい 高耐久性コンクリート	レデ-ミクストコンクリート
(RC示方書、JASS 5) 設計基準強度または気温補正強度に対する不良の確率 (JIS) 呼び強度の値に対する不良の確率	5	(1/5) 曲げ強度	1/4	4	2.3	4
(RC示方書) 設計基準強度の80%に対する不良の確率 (JASS 5) 最小限界値 (JIS)	—	(1/30) 曲げ強度	1/20	設計基準強度の80%	設計基準強度の90%	設計基準強度の85%
(JASS 5) 材令28日で設計基準強度の70%に対する不良の確率 [構造物コンクリートの強度管理の材令が28日を超え91日以内の場合]	—	—	—	4	2.3	—



## C-2 水セメント比

水セメント比は構造物の耐久性に深く関係してくる。通常水セメント比は所要の強度や耐久性を考えて定めなければならない。この場合一般的には、考慮すべき事項は次の通りである。

- 凍結融解作用に対する抵抗性
- 中性化にたいする抵抗性
- コンクリート中の鉄筋の防錆性
- 一般気象作用にたいする抵抗性
- 化学的作用、摩耗作用にたいする抵抗性

これらの耐久性に対して大きな影響力を持つ水セメント比の限界値については、表3.2.7に示したRC示方書、JASS5で述べられている。

地下構造物では特に、コンクリートの露出条件と関連する地下水の水質などの供用環境を検討する必要が生じるであろう。したがって影響項目としては、以下のものが挙げられる。

### (影響項目)

コンクリートの要求品質、サイトの温湿度、地下水の水質

表3.2.7 水セメント比の最大値(%) (JASS 5)

コンクリートの種類		セメントの種類	
		ポルトランドセメント 高炉セメントA種 シリカセメントA種 フライアッシュセメントA種	高炉セメントB種 シリカセメントB種 フライアッシュセメントB種
普通コンクリート	一般, 流動化コンクリート	65	60
	高耐久性コンクリート	60	55
軽集約コンクリート	一般, 流動化コンクリート	60	60
	高耐久性コンクリート	55	55
海水の作用を受けるコンクリート	潮の干満および常時波しぶきを受ける部分	45	
	常時海水中にある部分	50	
	時折波しぶきを受ける部分	55	
高強度コンクリート 水密コンクリート		55	
寒中コンクリート 凍結融解作用を受けるコンクリート しゃべい用コンクリート		60	
水中コンクリート		場所打ちぐい 60, 地中壁 55	

耐久性から定まるコンクリートの水セメント比の最大値 [RC示方書]

A. コンクリートの耐凍害性をもととして水セメント比を定める場合における AE コンクリートの最大の水セメント比 (%)

構造物の露出状態	気象条件	気象作用が激しい場合または、凍結融解がしばしば繰返される場合		気象作用が激しくない場合、氷点下の気温となることがまれな場合	
	断面	薄い場合 <sup>(1)</sup>	一般の場合	薄い場合 <sup>(2)</sup>	一般の場合
(1) 連続してあるいはしばしば水で飽和される部分 <sup>(1)</sup>		55	60	55	65
(2) 普通の露出状態にあり、(1)に属さない場合		60	65	60	70

B. コンクリートの化学作用に対する耐久性をもととして水セメント比を定める場合

- (a) 硫酸根 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>として0.2%以上の硫酸塩を含む土や水に接するコンクリートに対して表3.4-7の(a)に示す値以下とする。
- (b) 融氷剤を用いることが予想されるコンクリートに対しては表3.4-7のうち(b)に示す値以下とする。

C. コンクリートの水密性をもととして水セメント比を定める場合には55%以下を標準とする。

注:(1) 水路, 水槽, 橋台, 橋脚, 掘壁, トンネル覆工等で水面に近く水で飽和される部分および, これらの構造物のほか, 桁, 床版等で水面から離れてはいるが融雪, 流水, 水しぶき等のため, 水で飽和される部分。  
 (2) 断面の厚さが20cm程度以下の構造物の部分。

### C-3 単位水量

単位水量は設計要因で決定するが、可能な限り小さくする。

(影響項目)

コンクリートの要求品質

### C-4 単位セメント量

単位セメント量は、一般に水セメント比と単位水量とから算出する。一般的な単位セメント量の最少値は表3.2.8の通りである。しかし水和発熱量との関係があるので、断面寸法との関連を検討する必要があるであろう。影響項目としては以下のものがあげられる。

(影響項目)

コンクリートの要求品質、断面寸法

表3.2.8 単位セメント量の最小値(JASS 5)

種 類		単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )
普通コンクリート	一般、流動化コンクリート	270
	高耐久性コンクリート	300
	高強度コンクリート	
軽量コンクリート	一般、流動化コンクリート	290
	高耐久性コンクリート	320
	高強度コンクリート	
海水の作用を受けるコンクリート		300
水中コンクリート	場所打ちぐい	300
	地 中 壁	350

**C-5 粗骨材最大寸法**

粗骨材最大寸法は特記によるほかは、構造物の種類、部材の最少寸法、鉄筋のあき、鉄筋に対するかぶりの厚さなどを考慮して表3.2.9のJASS5を参考にして選定するので、構造物の設計要因で決定する。

(影響項目)

構造物の形状、地下水の水質、断面寸法

表3.2.9 使用箇所による粗骨材の最大寸法(JASS 5)

使用箇所	粗骨材の最大寸法 (mm)	
	砂 利	砕石・高炉スラグ砕石
柱・はり・スラブ・壁	20, 25	20
基礎	20, 25, 40	20, 25, 40

注：鉄筋のあきの 4/5 以下かつかぶり厚さ以下

C-6 スランプ

スランプは運搬と打設条件に関わることで影響される。通常のスランプの標準値は表3.2.10の通りである。影響項目としては以下のものがあげられる。

(影響項目)

コンクリートの要求品質、運搬方法、運搬時間、打設方法、締め固め方法

表3.2.10 所用スランプ値

所要スランプの標準値 [JASS 5]

種 類	所要スランプ (cm)	
普通 コンクリート	一般の場合	18以下
	流動化剤を用いた場合	ベースコンクリート 15以下 流動化コンクリート 21以下
軽 量 コンクリート	一般の場合	21以下
	流動化剤を用いた場合	ベースコンクリート 18以下 流動化コンクリート 21以下
高耐久 性 コンクリート	一般の場合	12以下
	流動化剤を用いた場合	ベースコンクリート 12以下 流動化コンクリート 18以下
高強度コンクリート プレストレストコンクリート マスコンクリート しゃへい用コンクリート	15以下	
水中コンクリート	21以下	

所要スランプ標準値の範囲 [RC示方書]

種 類	所要スランプ (cm)	
無筋コンクリート	(通 常) 3~8	
鉄筋コンクリート	一般の場合	5~12
	断面の大きい場合	3~10
舗装コンクリート	2.5 (沈下度で30秒)	
ダムコンクリート	2~5	
軽量骨材コンクリート	5~12	
水中コンクリート		
トレミー, コンクリートポンプ	13~18	
底開き箱, 底開き袋	10~15	
場所打ちぐいおよび地下連続壁に使用する水中コンクリート	15~21	

### C-7 細骨材率

細骨材率は単位水量の場合戸同様である。

#### (影響項目)

コンクリートの要求品質

### C-8 空気量

空気量は粗骨材の最大寸法その他に応じて、コンクリート容積の3~6%とするのが一般的である。コンクリートの空気量は運搬、ポンプ圧送、振動締め固めなどによって多少減少することを見こんで定められる。表3.2.11に所要空気量の標準値の範囲を示した。影響項目としては以下のものがあげられる。

#### (影響項目)

コンクリートの要求品質、運搬方法、時間、打設方法、締め固め方法

表3.2.11 所用空気量

所要空気量の標準値 [RC示方書]

種		類	所要空気量 (%)	
無筋および鉄筋コンクリート			3~6	
軽骨材コンクリート			4~7	
海洋コンクリート	凍結融解作用を受けるおそれのある場合	飛沫帯	粗骨材の最大寸法 25 mm	6
			粗骨材の最大寸法 40 mm	5.5
		海上大気中	粗骨材の最大寸法 25 mm	5
			粗骨材の最大寸法 40 mm	4.5
	凍結融解作用を受けない場合			4
舗装コンクリート			4	
ダムコンクリート	耐久性をもととする場合	ウェットスクリーニングを行い、40 mm 以上の粗骨材を取り除いた値	5.0±1.0	

所要空気量の標準値 [JASS 5]

種	類	所要空気量 (%)
普通コンクリート	一般	3~5
	流動化コンクリート	4
軽骨材コンクリート	一般	5
	流動化コンクリート	5
水密コンクリート		4
凍結融解作用を受けるコンクリート	粗骨材の最大寸法 40 mm	4.5
	粗骨材の最大寸法 25, 20 mm	5

### C-9 混和材料の使用量

混和材料の使用量はC-1～C-8までの小項目と密接に関係するので、設計要因以外の影響項目は次の通りである。

#### (影響項目)

コンクリートの要求品質、サイトの温湿度、運搬方法、時間、打設方法  
締め固め方法、断面寸法

以上から配合要因において検討すべき課題は以下の通りである。

#### (設計)

構造物の種類、形状、断面寸法、コンクリートの要求品質、コンクリートの運搬方法  
運搬時間、打設方法  
締め固め方法、断面寸法

#### (調査試験)

サイトの温湿度、地下水の水質



## D 製造要因

製造要因には次の項目が小項目として考えられる。

### D-1 計量

### D-2 練り混ぜ

計量、練り混ぜはどのような装置を使用するかということである。計量、練り混ぜはコンクリート全数量、一回打設量、工期に通常左右されるが、地下構造物内で製造する場合を仮定すると、使用するミキサーなどのプラントをどのような規模で設置できるかがポイントとなる。すなわちスペースの問題である。大きなスペースをさくことが可能であればバッチミキサーが、小スペースならば図3.2.2に示した連続ミキサーが使用されるが省スペースで計量誤差の少ない、練り混ぜ性能の良い設備のが求められる。影響要因は以下の通りである。

#### (設計)

コンクリート全数量、一回打設量、工期、設備用スペース

#### (研究開発)

計量、混練方法(省スペース)

連続ミキサは砂、砂利、セメント、水を連続的に移動させて回転羽で練り混ぜ、練り上がったコンクリートを他方から連続的に排出するものである。連続ミキサは砂、砂利、セメントの計量を体積で行っているため、砂の含水率の違いで計量誤差が大きくなる。セメントも湿度で誤差を生じる傾向がある。

連続ミキサ模式図

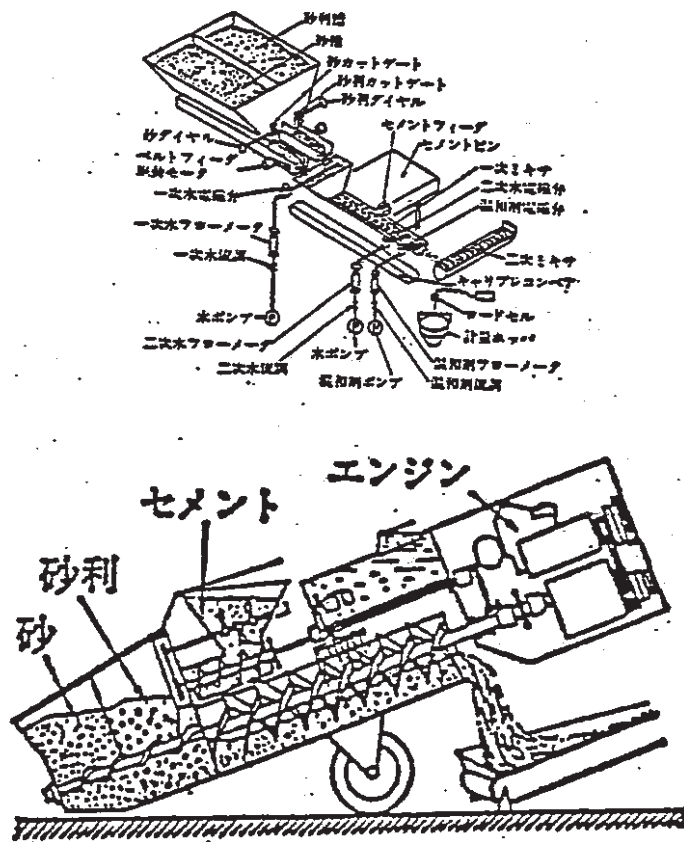


図3.2.2 連続ミキサについて

## E 運搬、打ち込み要因

地下構造物では立坑や長距離の横坑が多くなりスペースが限定されると予想されるため、コンクリートの打設においては、非常に合理的な作業の進め方が要求される。またコンクリートあるいはコンクリートを製造するため材料の運搬方法が重要な点になることが考えられる。運搬、打ち込み要因には次の項目が小項目として考えられる。

E-1 作業工程

E-2 設備、運搬路

E-3 人員配置

E-4 打ち込み区画、位置、順序、打継目の処置

E-5 締め固め

### E-1 作業工程

作業工程は当然のことながらコンクリートの全数量、一度に打設する量、施工の難易によって左右される。影響項目は以下の通りである。

(影響項目)

コンクリート全数量、一回打設量、施工の難易

## E-2 設備、運搬路

運搬中に生じるコンクリートの品質変化は、主として材料分離、ワーカビリチーの低下スランプ、空気量、凝結時間の変化などである。このような変化が生じると締め固めが不十分となったり、コールドジョイントの発生につながるので、表3.2.12に示すように運搬時間の限度を規定しており、注意が必要である。

設備、運搬路は表3.2.13に示すようにプラントから工事現場までの運搬と現場内における打設箇所までの短い距離の運搬に分けられる。これらは機械の種類、形式などの機械本体の大きさと必要とされる能力と設備用スペース、運搬距離などの空間量との兼ね合いで決定される。例をあげるとプラントから工事現場までの運搬には、トラックミキサートラックアジテータ、ダンプトラック、ホップトラックなどが使用され、現場内における打設箇所までの短い距離の運搬には、バケット、ポンプ、ブレーサ、シュート、ベルトコンベアなどが使用される。

バケットとはミキサから排出されるコンクリートをバケットに受け、これをクレーン、トラッククレーン、ケーブルクレーン、トラクトロッコなどで打設場所に運搬するもので、通常硬練りコンクリートに使用される。

ポンプは表3.2.14に示したような駆動原理によって分類される。ポンプは輸送管の配管ができれば、建物内部、トンネル、橋、水中などの狭い場所でも運搬ができ、一般に広く使用されている。しかし表3.2.15に示したように、水平距離、垂直圧送高さスランプ、単位セメント量などに限界があり、この点が今後の研究開発の対象となると考えられる。

ブレーサは輸送管内のコンクリートを圧縮空気で圧送するもので、トンネルなどの狭い場所で使用されている。輸送距離は水平換算で、150~200mが安定圧送の限度である。

シュートには図3.2.3に示した、スネイクシュートなどの縦シュートと斜めシュートがある。スネイクシュートは上部の送り込み装置と下部のフレキシブルホースからなりホース内に空気を混入せずコンクリートを一定の塊にして簡欠的に送り込む。摩擦抵抗力にため自由落下しないので材料の分離が少なく、下部での飛散衝撃、騒音が緩和されて施工環境が改善される。この方法によって地下400m地点へのコンクリートを垂直流下させた記録がある。斜めシュートは材料分離を生じやすいのでなるべく使用しない。

ベルトコンベアは硬練りコンクリートを水平に近い方向に連続して運搬するのに適している。

しかしこれらの機械の種類、形式は例えば、コンクリートを骨材、セメント、水を個別に運搬して打設直前で練り混ぜするか、練り混ぜたものを運搬するかで機が異なる。したがって運搬システムにおいては開発すべき点が多いと考えられる。影響項目は以下の通りと考えられる。

(影響項目)

コンクリートの運搬性能、距離、設備用スペース、コンクリートの要求品質

表3.2.12 運搬時間の限界

区分	JIS A 5308 (1978)	RC示方書	JASS 5 (1986)			
限定	練りませから荷卸し	練りませから打終りまで	同 左			
限度(分)	90 <sup>(1)</sup>	温暖で乾燥しているとき	60	外気温 25℃以上	高耐久性 60	一般 90
		低温で湿潤なとき	120	25℃未満	90	120

注：(1) 購入者と協議のうえ運搬時間の限度を変更（短縮または延長）することができるとしている。一般に暑い季節にはその限度を短くするのがよい。  
JISではダンプトラックでコンクリートを運搬する場合の運搬時間の限度を60分以内としている。

表3.2.13 コンクリートの運搬方法

分類	運搬機械	運搬方向	運搬時間 運搬距離	運搬量 (m <sup>3</sup> )	動力	適用範囲	備 考
主として プラント現場 からの運搬	トラックミキサー トラックアジテータ ダンプトラック ホッパ積載トラック	水 平	10~90分	1.0~6/台	機 関	遠 方	{ 一般の長距離運搬に適する。 { やむを得ない場合の中距離。
主として 現場内運搬	コンクリートバケツ	水 平	10~50 <sup>(m)</sup>	0.5~1.0/回	クレーン	一 般 的	分離が少なく場内運搬に適する。
	コンクリートタワー	垂 直	50~120	0.2~0.6/回	電 動 機	高 所 運 搬	水平方向を手押し車・ポンプ・ベルトコンベヤなどの組合せ方式がある。
	手 押 し 車	水 平	10~60	0.05~0.2/台	人 力	小規模工事 特殊工事	振動しないカート道が必要。
	コンクリートポンプ	水 平	500 90	30~85/h	機 関	高 長 所 離	使用機種を選び、打設速度に注意すれば硬練りにも使用できる。
	ベルトコンベヤ システム	ほぼ水 平 斜 下 面	5~100 5~30	10~50/h 10~50/h	電 動 重 力	硬練り用 地下構造物 補助手段	やや分離が生ずる。 軟練りによいが分離を生じやすい。

表3.2.14 コンクリートポンプの種類

		駆 動 原 理	特 徴
ピ ス ト ン 式	機 械 式	電動機の回転運動をクランク機構によって往復運動に変えピストンを駆動してコンクリートを圧送する。吸入弁と吐出弁はロッドの動きに連動してカムによって開閉する。	部品交換が容易。 構造が簡単である。 故障を発見しやすい。
	液 圧 式	シリンダ内のピストンに力を加える媒体に油と水の方式があり後者の場合は水温上昇防止にクーラーを取り付け水を循環させている。一般には油圧装置によって直接コンクリートピストンに直線運動を伝えるもので、2個のピストンを交互に駆動してシリンダ内からコンクリートを押し出すもので各機種ともこの方式には大きな差はない。	駆動部分が大きくとれ容量大。 吸入、吐出弁の摩耗が少ない。 衝撃振動が小さい。 吐出量を調節できる。 弁の開閉時の骨材のかみ込みに無理な力がかからない。
ス ク イ ズ 式	駆動は油圧モーターでおこない 図 5.1-2 のように円形の真空室で回転するローラーが内蔵されポンプ本体内周壁に張り付けられたゴムパットにポンピングチューブを押ししながら回転しチューブ内にあるコンクリートをトランスファーホースを經由して圧送する。ローラー通過後チューブ内にコンクリートは吸入され、これらの動作を連続的に起こって圧送する。	構造が簡単。 取扱いが容易。 ポンピングチューブと輸送管内径が同一。 ポンピングチューブの破損以外は故障箇所が少ない。 吐出量を調節できる。	

表3.2.15 ポンプ圧送が困難となる条件

- (a) 水平換算距離が 300 m を越す場合
- (b) 垂直圧送高さが、軽量コンクリートで 60 m、普通コンクリートで 70 m を越す場合
- (c) 軽量コンクリートの圧送前のスランブが 20 cm 以下の場合
- (d) 普通コンクリートのスランブが 10 cm 以下の場合
- (e) 軽量コンクリートの単位セメント量が 300 kg/m<sup>3</sup> 未満の場合
- (f) 下向き配管、または下りこう配の先に水平配管が接続している場合
- (g) 人工軽量骨材を使用する場合で、骨材のプレウェッチングが不十分な場合

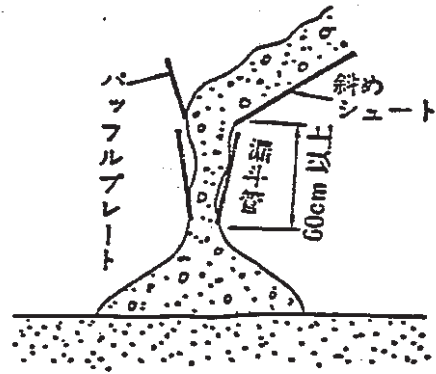
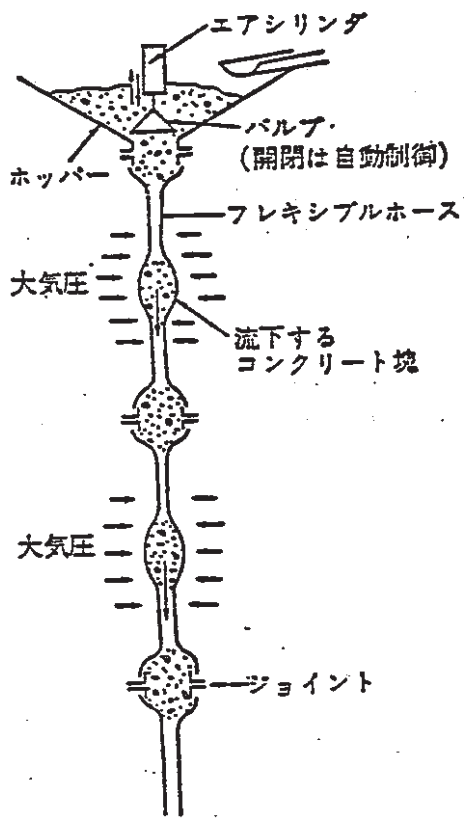


図3.2.3 打設用シュート



### E-3 人員配置

人員配置は設備、運搬路と同様である。

### E-4 打ち込み区画、位置、順序、打継目の処置

打ち込み区画、位置、順序、打継目の処置の内、打ち込み区画、位置はコンクリートの供給能力、工程、構造物の形状、打ち込み能力、型枠、打継目に左右される。打継目の処置は要求されるコンクリートの性能、例えば透水係数などに影響される。したがって影響項目は以下の通りと考えられる。

#### (影響項目)

コンクリート計量、練り混ぜ性能、工程、構造物の形状、打込能力、型枠  
打継目

### E-5 締め固め

締め固めはコンクリートの空隙を少なくし、鉄筋、埋設物などとよく密着させ、型枠のすみずみまでコンクリートを均一に密実にし、構造物に要求される性能を満たすために十分におこなわなければならない。一般に締め固めの方法としては表3.2.16に示したものがある。影響要因は以下の通りである。

#### (影響項目)

締め固めの機械の種類、性能、構造物の形状、コンクリートの要求品質

表3.2.16 各締め固め方法の効果の比較

方法	主たる効果	適用範囲
挿入型パイプ	振動によってコンクリートを液性化させ、脱泡・締固め・せき板とのなじみをよくすることのすべての面に効果がある。	硬練り、軟練りを問わずすべてのコンクリートの締固めに威力を発揮できる。
型わくパイプレータ	振動をせき板に伝達させることによって、内部コンクリートを加振させる。しかしその影響範囲は、表面部に限られ、内部コンクリートを大盤に締固めることはできない。	主として表面から見えるジャンカ・豆板の減少に役立つ。挿入型パイプレータが使用できない壁の締固めには有効。
つき	コンクリートを液性化させることができないので、締固めよりはスペーシング効果のほうが主になる。	軟練りコンクリートにしか適用できない。パイプレータを挿入できない箇所に使うことはある。
たたき	型わくとコンクリートとのなじみをよくする効果が主である。せき板面の水塗をつぶすのには役立つ。音によりコンクリートが詰っているかどうか判断できる。	打放しコンクリートには有効。

以上から運搬、打ち込み要因において検討すべき課題は以下の通りである。

(設計)

構造物の形状、コンクリート全数量、一回打設置、コンクリートの要求品質  
コンクリート計量、練り混ぜ性能、打設性能、型枠、打継目、設備用スペース  
コンクリートの運搬距離、工程

(研究開発)

コンクリートの運搬方法

F 養生要因

養生要因には次の項目が小項目として考えられる。

- F-1 温度条件
- F-2 湿度条件
- F-3 有害作用

セメントの水和反応は養生温度によって異なり、一般に温度が高いほど早く、低いほど遅い。温度と強度との関係を図3.2.4に示す。

地下構造物では、温度条件は当然のことながら、温度が一定でかつ高くなる状況が考えられる。また部材も大きくなることも考えられるため、温度ひびわれ抑制の対策と暑中コンクリート対策についてそれぞれ留意する必要がある。

温度ひびわれ抑制の対策として、低発熱のセメントを使用したりするような材料的な方策はここでは当然として、地下空間ということで制限因子となるスペースと関係した設備に関する温度ひびわれ抑制の対策についてまとめた。

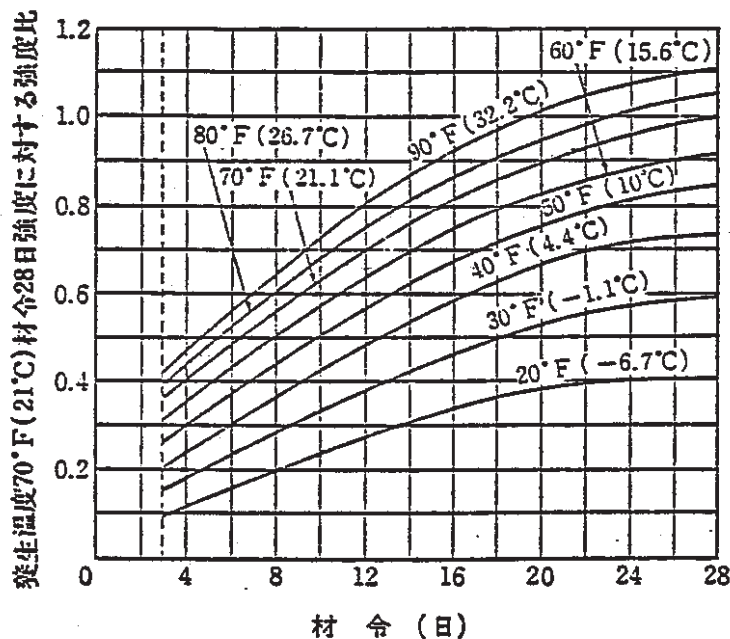


図3.2.4 養生温度と圧縮強度の関係

## F-1 温度条件

コンクリートの打設温度は、打設後の温度上昇速度、最大温度上昇、温度降下速度などに影響を及ぼす。打設温度が小さいほど部材温度の上昇速度最大値、降下速度は小さくなり、応力発生に寄与する温度差は低減する。したがって、コンクリートの打設温度をできるかぎり低く抑えることがひびわれの抑制に効果がある。

### <コンクリート打設前の対策>

#### a)コンクリート製造時の材料温度を管理する。

- ・骨材ストックヤードにおいて、骨材を直射日光から防護する。
- ・骨材ストックヤードにおいて、粗骨材に散水する。
- ・高温セメントの入荷を避ける。
- ・練り混ぜ水にできるだけ低温の水を使用する。
- ・レデーミクストコンクリートを購入する場合には、納入時温度の指定を行なう。

#### b)材料のプレクーリング

- ・冷水の使用(水を使用する,冷却配管を設置する,液体窒素を混入する。)
- ・冷風の使用(冷風設備の設置,液体窒素の吹込み。)
- ・骨材の冷水浸漬による冷却
- ・骨材のストックビンにおける冷水・冷風吹付けによる冷却
- ・骨材の輸送経路における冷室の通過

#### c)コンクリートの直接冷却

- ・練り混ぜ水の一部にアイスフレークを使用する。
- ・液体窒素を現着時にミキサ車内に直接噴射する。
- ・液体窒素を練り混ぜ時にミキサ内に直接流入する。

このようなプレクーリング方法を行なうためには、冷水プラント、冷風プラント、製氷プラント、液体窒素取扱い設備など特別な設備を備える必要があり、かなりの設備投資を行なうことになる。したがって、他の制御手段についても十分検討し、総合的判断を行なう必要がある。

コンクリートの直接冷却方法は、コンクリートの打設温度を最も直接的に低下させるため、ブレーキング方法として非常に有効である。

練り混ぜ水の一部にアイスフレークを使用した例では、練り混ぜ水の50~60%をアイスフレークで置換し、真夏においても10℃以上のコンクリートの練り上り温度の低減が可能となった例がある。しかし、この場合練り混ぜ時間を長くする必要があり、コンクリートの製造能力がアイスフレークを使用しない場合に比較して低下する。

コンクリートそのものを液体窒素により直接冷却する方法は、オーストリアで開発され近頃日本にも導入されたものであり、海外での施工実績は多い。練り混ぜ水の一部にアイスフレークを使用する方法では、練り混ぜ水に対するアイスフレークの置換率には限度があるため、打設温度の抑制にも限界があるが、液体窒素の場合には、コンクリートの冷却は液体窒素の気化熱との熱交換によって行なわれるため、原理的にはコンクリートの温度を自由にコントロールすることができる。したがって、今後、マスコンクリート施工に対するこの方法の適用が拡大してゆくものと考えられる。

### <コンクリート打設後の対策(パイプクーリング)>

ダムや長大橋のアンカレジなど非常に大きな構造物、あるいは橋脚、浮体構造物など高強度のコンクリートが要求される構造物では、材料面、施工面のみによつてのひびわれ対策の効果が得られにくい場合が多い。このような場合、パイプクーリングによるコンクリートの強制冷却は温度ひびわれの抑制に非常に有効な手段である。

パイプクーリングの冷却媒体として水を使用する方法と空気を使用する方法とがある。冷却水として河川水や地下水を使用することができるが、十分な冷却効果が得られない場合には、冷水設備を設けなければならない。空気を使用する場合にも冷風装置が必要である。

パイプクーリングを行なうにあたっては、所定の効果をあげるように、パイプの径や間隔、通水・通気の温度、量および期間などについて十分検討する必要がある。通水・通気の方法(冷却速度、冷却期間、冷却順序の組合せ)が不適當であると、かえつて部材間、部材内部での温度差が大きくなりひびわれの発生を助長する、また冷却水温度をさげることによつて管の回りにひびわれが生じる場合もあるので、計画にあたっては注意が必要である。

暑中コンクリート対策としては以下の点に留意を払う必要が生じると考えられる。

#### a) スランプの減少

練り上がり温度が高いほどスランプは減少し、同一のスランプを得るのに要する単位水量は増加する。したがつて単位セメント量を水セメント比一定となるように調整しない限り、水セメント比が水量増加分だけ増加して、強度低下をもたらすことになる。

#### b) 空気量の減少

コンクリートの温度が高いと空気量が減少するので、一定空気量を保つためにはAE剤の使用量を増加する必要がある。

#### c) 凝結時間の短縮

温度が高いと水和反応が早く起こるためセメントは、早く凝結する。例えば、振動機の締め固めが有効な限度とされている貫入抵抗500psiと比較すると、20℃では凝結時間が4時間30分であるものが、30℃では3時間に短縮することようになる。このため暑中コンクリートでは、

打ち込みを終了する以前に凝結し、十分な締め固めを行なえないで、コールドジョイントを生じる危険性がある。これを防止するには計画的な打設や凝結遅延剤の使用が必要となる。

#### d)スランプロスの増加

運搬中にスランプが低下するのは避けられない性質であるが、温度が高いとこれが著しくなる。長距離トンネルが対象となるような地下構造物では、このことは大きな問題となる。したがって遅延型のAE減水剤を練り混ぜ終了の直前に添加して、スランプロスを防止するような対策が必要である。

#### e)強度の低下

暑中コンクリートの強度低下の原因は、スランプの低下に対処するための水セメント比の増加によるものの他に、水セメント比を一定としてもセメントの高温での水和によって半透膜が早く形成され、以後の水和反応を妨げることにより起こることが知られている。したがってセメントの発熱量との兼合いがあるが、暑中にはセメント量を多少増量するなどの対策がとられている。

#### f)ひび割れの増加

一般の暑中コンクリートでは初期乾燥ひび割れと温度上昇によるひび割れとがあるが、地下空間では湿度が高いと予想されるため前者のひび割れに対してはネガティブとなるであろう。後者については始めに述べた通りである。

以上から影響要因は以下の通りと考えられる。

#### (影響要因)

サイトの温湿度、クーリング方法、遅延剤の性能



F-2 湿度条件

湿度条件はコンクリートの強度発現に対して重要である。コンクリートが硬化する際、セメントの水和作用が完全におこなわれるために必要な水セメント比は22~27%くらいと言われている。実際にコンクリートの使用される練り混ぜ水は、ワーカビリティの確保のためにこれよりはるかに多い。したがってフレッシュコンクリートに含まれる水量がそのまま保持されれば、コンクリートの硬化のための水を補給する必要は全くない。ところがコンクリートの表面から急激に乾燥すると、内部のコンクリートからも水が引き出されて十分な水和反応が得られなくなる。図3.2.5に示したように、各種養生方法と強度比との関係から明らかなように湿潤養生期間によって著しい影響を受ける。しかし地下の湿度条件は高いことが予想されるので、これはコンクリートの性能の面からみても非常に有利であるものである。影響要因は以下の通りと考えられる。

(影響要因)

サイトの温湿度要因

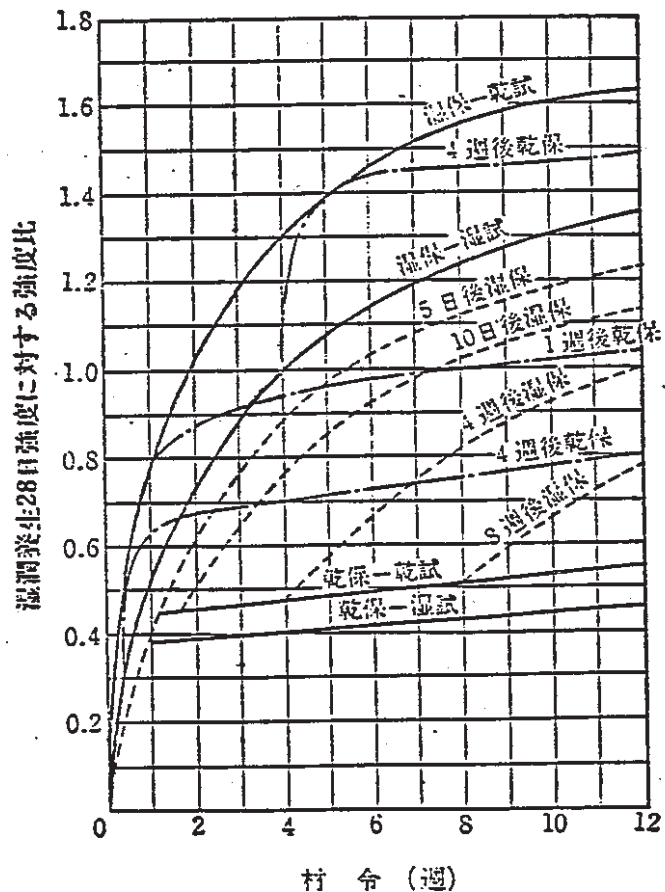


図3.2.5 湿潤養生28日強度に対する各種養生方法の強度日(H.J.Gilkeyの実験報告)

### F-3 有害作用

有害作用には荷重、振動、打設中の水の混入、養生水の水質があげられる。この中では打設中の水の混入、養生水の水質が地下空間では注意すべき点となるであろう。打設中の水の混入は地下水の混入が考えられるし、養生水の水質は地下水の水質が必ずしも良好であるとは言いがたい場合も多々あると考えられる。なお地下水の水質がコンクリートの性質に与える影響については、耐久性で検討する。影響要因は以下の通りと考えられる。

#### (影響要因)

湧水の影響度、地下水の水質

以上から養生要因において検討すべき課題は以下の通りである。

(設計)

ケーリング方法

(調査試験)

サイトの温湿度、湧水の影響度、地下水の水質

(研究開発)

遅延剤の性能

## G 耐久性要因

耐久性要因には次の項目が小項目として考えられる。

### G-1 材料要因

### G-2 物理的環境要因

### G-3 化学的環境要因

### G-4 補修、補強要因

## G-1 材料要因

材料要因には使用される材料それぞれの耐久性が関係する。これは既にA材料要因として大項目にとりあげ検討してあるので、ここでは耐久性から見た場合の補足となる点についてのみ簡単に述べる。

例えばセメントであれば、初期に所定の強度が発現し、しかも長期にわたって水和反応が進ようなものが耐久性の点からは理想である。したがってこのような材料の開発が必要となる可能性がある。

骨材ではJISの試験に適合するものは当然として、現在研究の対象となっている鉱物組成とコンクリートの耐久性との関係を明確にして、材料として使用する必要が生じるであろう。

混和材料についても化学的に安定なことが必須であろう。

鉄筋については防食対策を施すことは必要になるであろうが、現在のところ材料的にはエポキシ鉄筋と耐塩性鉄筋などが開発や実施が行われている。前者は鉄筋の表面にエポキシ樹脂を塗って防食するものであり、後者はコンクリート中に溶存した酸素と鉄筋から溶出したタンゲステンなどの金属とが反応してカソード反応を活発するためその対反応である金属を溶出させるアノード反応を促進するためアノード領域は溶出した金属イオンが作る腐食物に被覆されこの被覆が不動態被膜として機能するものである。しかしこれらのものについての耐久性はまだ不確定であるし、新しい材料の開発も必要と考えられる。影響項目は以下のとおりである。

(影響項目)

セメントの性能、骨材の品質、混和材料性能、鉄筋の性能、防食材料の性能

G-2 物理的環境要因

物理的環境要因とは温度変化、湿度変化、凍害、地震、不等沈下、地圧などがあげられるが、地下の場合温度変化、湿度変化、凍害は無視してよく、地震の影響も一般的にみて地下深いほど影響は少ないと考えられる。ここでは岩盤からコンクリートに働く力が最も重要であると考えられる。これについてはサイトの地質的特性の評価が主体となる。

(影響項目)

サイトの温湿度

### G-3 化学的環境要因

化学的環境要因とは

- 1)コンクリートそのものの劣化や組織の破壊を引き起こすもの
- 2) コンクリートを中性化(正確には炭酸化)することによって鉄筋の腐蝕を引き起こして劣化するもの
- 3)鉄筋の腐蝕に直接関係するもの

とがある。

1)については主として地下水の水質や岩盤の風化変質により地下水に溶存した成分がコンクリートを侵す。代表的な例をあげると、地下水中に硫酸イオンがあればこれとコンクリート中の遊離石灰とが反応して石膏を生じ、石膏とアルミン酸カルシウムとが反応してエトリンガイトが生成する。この2つの反応はともに体積の増加があるためコンクリートは破壊される。また酸性の温泉水とコンクリートが接触すると、温泉水に硫酸イオンがあれば前述の反応が引き起こされるし、塩酸酸性であればコンクリート中のセメント水和生成物と塩酸が反応して組織が脆弱になり、新たに生成した塩化カルシウムの溶解度が高いため容易に溶出して組織が破壊する。

2)については炭酸イオン濃度が高いような地下水とコンクリートが接触すると、コンクリート中のセメント水和生成物に含まれている水酸基が、炭酸イオンと反応して炭酸化する。これによってコンクリートのpHが中性に近づいて、鉄筋の不動態被膜が不安定となって、鉄筋の腐蝕を誘発する。

3)については、例えば地下水中に塩素濃度が高いと鉄筋の不動態被膜を破壊して鉄がイオン化されて溶出して腐蝕が引き起こされる。

以上のように化学的環境要因は極めてサイトの地球化学的な特性に規定されることが分る。したがって影響要因としては以下の通りである。

(影響項目)

サイトの温湿度、地下水の水質、岩盤の地球化学的性質

#### G-4 補修、補強要因

補修、補強要因はコンクリートの打設直後の欠陥部分を対象とするもので、どのような方法で実施するか、材料としてどのようなものを使用するかという点が課題となるであろう。工法別にみると表3.2.17に示したように、まずひび割れの補修工、コンクリート表面の防護工、断面補修工に分けられる。これらの目的は補強だけではなくて、剥離、欠落部、豆板、空洞部分を補うことやさらには、防水、防湿、止水、遮塩などがあげられる。地下構造物にはさらに新しい性能が要求されるかもしれない。

材料としてはセメント系、アスファルト系、ゴム系、ポリマーセメント系、レジンモルタル系、樹脂系、FRPなどが用途、価格などによって使用されている。これも新しい材料の開発が必要となると考えられる。したがって影響項目としては以下の通りである。

#### (影響項目)

補修・補強材料の性能

表3.2.17 補修工法と材料

工法	効用性	種別	材料系	備考	
表面防護工	防水、防湿、止水、遮熱、 損傷片の落下防止、劣化防止	ポリマー合剤 工法	空隙充填系 コーティング系 遮水系	メタアクリル酸メチル ニボキシ系、アクリル系、ポリ ニステル系、シリコン系、シラン系	
		コーティング 工法（コンク リート塗装）	樹脂系 アスファルト・タ ール系	ニボキシ系、ポリウレタン系、 ポリニステル系、ビニールニス テル系	
		ライニング工 法	モルタル系 FRP系 アスファルト・タ ール系	グラスファイバー補強	
		モルタル吹付 け工法	モルタル		
		シート工法	ゴム系、樹脂系		
		板取付け工法	タイル、FRP、鋼板		
断面補修工	割傷、欠損、 腐食、劣化、 露筋	打替え工法	セメント系	普通セメントモル タル、同コンク リート、 超高性能セメント (モルタル・コン クリート)	ジェットセメント
		充填工法	無収縮モルタル		収縮セメント
		パッチング 工法	複合系（セメ ント+樹脂）	ポリマーセメント モルタル ポリマーセメント コンクリート	ゴムラテックス系、樹脂ニマ ルジョン系、水溶性系
		プレパク トコンク リート工法	樹脂系	レジンモルタル、 レジンコンクリート	ニボキシ系、ポリニステル系、 ビニールニステル系
ひび割 れ	防水、補強	注入工法	セメントグラウト 樹脂系	ニボキシ系、ポリウレタン系	
		シール工法	樹脂系 モルタル		



以上から耐久性要因において検討すべき課題は以下の通りである。

(設計)

荷重

(調査試験)

サイトの温湿度、地下水の水質、岩盤の地球化学的性質、骨材の品質

(研究開発)

セメント、混和材料、鉄筋、防食材料、補修・補強材料

## まとめ

地下長大構造物建設上で検討すべき要因について述べてきたが、これらの要因は設計段階での検討で大部分が決定するものとサイトの地質、水理などに関する調査や採取した試料の各種試験を実施して決まるものやこれからの研究開発を必要とするものとの、以下に示すように分類される。

### 1)設計段階での検討

- a.構造物の種類、形状、断面寸法、荷重
- b.工事の時期、工期
- c.コンクリート全数量、一回打設量、供給能力
- d.資材の貯蔵容器、方式、地下への搬入・プラントへの搬出方法
- e.設備用スペース
- f.コンクリートの要求品質
- g.コンクリートの運搬時間、距離
- h.打設方法、締め固め方法、型枠、打継目
- i.クーリング方法

### 2)調査、各種試験による検討

- a.セメントの温度、打設温度
- b.サイトの温湿度、湧水の影響度、岩盤の地球化学的性質、地下水の水質
- c.原石山の地質(骨材の品質)、サイトと原石山との距離

### 3)研究開発が必要

- a.コンクリート等の運搬方法、計量・練り混ぜ方法
- b.セメント、混和材料、鉄筋、防食材料、補修・補強材料

### 3.3 建設時の安全・環境管理

トンネル建設工事における労働災害の代表にあげられていた落盤災害は、昭和30年代後半以降、本格的に導入されるようになった鋼アーチ支保工により急激に減少した。それ以前の本製支保工の場合には、その構造、強度に大きな弱点があり、かつ切広げや覆工にからんで木はずしという盛替え作業があつて、はなはだ危険な状態を避けえなかつたことから当然であつたともいえる。

鋼アーチ支保工が採用された初期には、設計や施工の不適切、強大な土圧に対抗できる大断面部材の開発が遅れていたこともあつて、落盤の発生することもあつたが、その後のトンネル掘削工法の進歩や、大型H形鋼のアーチ支保工の出現により、最近では発生をみることは少なくなつた。現在では落盤に代つて肌落ちといわれる現象による災害が目立つようになっている。

肌落ちと落盤の区別については人によって見解が異なるようであるが、ここでは、日本トンネル技術協会「トンネル工事における肌落ち等による危害防止に関する技術基準の研究報告書」に示された定義に従ふことにする。すなわち肌落ちとは、トンネル工事において掘削断面の周辺地山のゆるんだ土砂、岩塊、岩片等の崩落・剥落等の現象をいい、支保工、矢板等の支保構造物が全面的に破壊するような大規模なトンネル地山の崩壊を落盤とする。

表3.3.Iは、過去数年間におけるトンネル建設工事中の死亡災害を原因別に示したものであるが、この中で土砂崩壊・落盤に分類された災害はほとんど肌落ちによるものと考えてよい。なお、この表にみられるように死亡災害の原因のトップは建設機械(軌道装置を含む)によるものである。

この統計とは別に、かつて山陽新幹線Ⅱ期工事のトンネル建設工事における労働災害の分析を試みた際、休業4日以上を負傷件数約1900件のうち、落石、肌落ちによるものが1/4近い450件を含めていることが判明した、肌落ちの規模も最大径が30cm以下というかなり小規模なものが全体の60%程度であつた。この調査の対象となつた工事の地質的条件の影響も考えられるが、現在のトンネル工事においても、この種の災害防止対策は軽視することはできないものと考えられる。

落盤・肌落ち発生の要因を大きく分けると、掘削地山の自然的要因と、掘削に伴う地山応力の変化およびゆるみとそれに対応した支保条件等の人為的要因がある。これに掘削後の経過時間が関係して落盤・肌落ちの事象となる。これらの関係を示したのが図3.3.1である。

表3.3.1 トンネル工事における死亡災害の原因別分類

災害の種類		昭和										計	%
		48	49	50	51	52	53	54	55	56			
墜落による災害		6	8	3	2	7	4	4	4	2	40	7.9	
飛来・落下・倒壊による災害		0	0	6	1	2	2	2	2	2	17	3.4	
土砂崩壊・落盤による災害		34	24	15	9	13	4	15	7	6	127	25.0	
機 械 に よ る 災 害	クレーンなどによる災害	0	2	6	2	3	4	0	1	2	20	3.9	
	自動車などによる災害	10	10	4	1	6	4	3	5	2	45	8.9	
	建設機械などによる災害	44	32	25	10	5	11	8	10	9	154	30.4	
感電による災害		2	3	0	1	0	0	0	1		7	1.4	
爆発・火災などによる災害				5	13	2	12	19	4	2	57	11.2	
取扱運搬など災害				1	0	1	1	1	1		5	1.0	
その他の災害		18	7	2	1	0	2	3	1	1	35	6.9	
合 計		114	86	67	40	39	44	55	36	26	507	100	

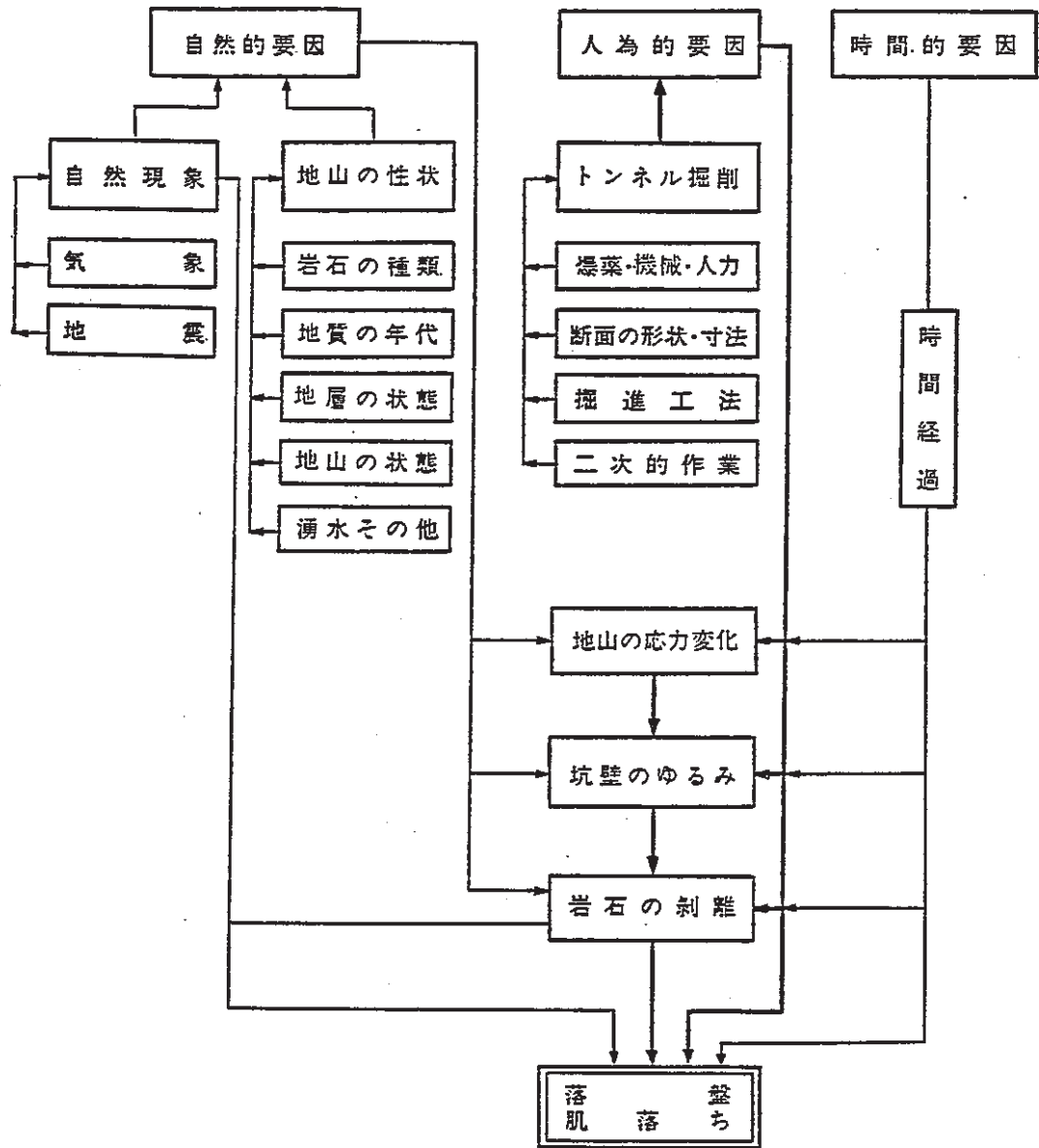


図3.3.1 落盤・肌落ちの事象の要因

落盤の防止はトンネル掘削にとって最重点に考慮すべき問題であり、これについては第II編で詳述されているので、ここでは肌落ちに主眼をおいて述べることにする。過去の調査によると、肌落ちの発生する場所としては切羽のかがみ、アーチ、側壁部分はもちろん、覆工が完了していない箇所および坑口付近を含め、トンネルの作業全域にわたっており、支保工建込みが行われたところでも矢板のない場合には発生している。また肌落ち災害に遭遇する機会の多い作業としては、支保工の建込みの作業、せん孔作業、こそく作業の順となっている。(図3.3.2、3.3.3)

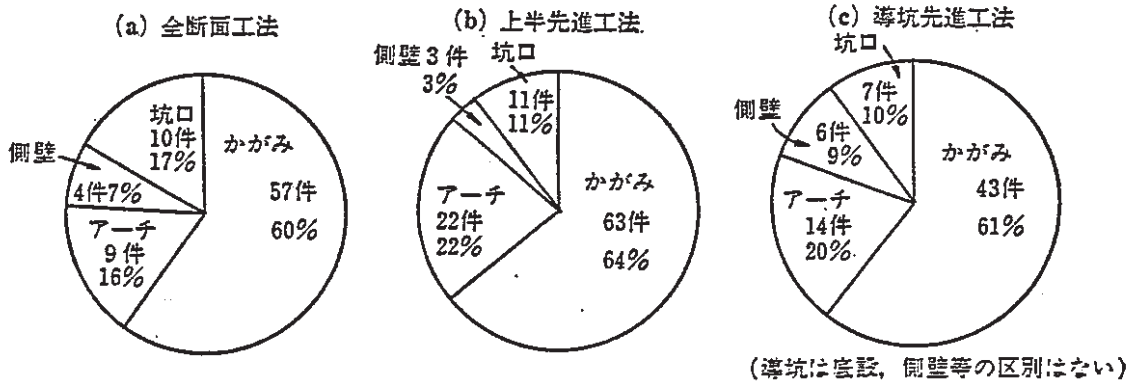


図3.3.2 肌落ち発生場所

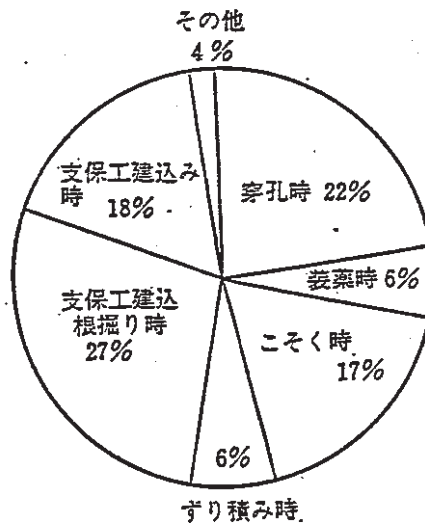


図3.3.3 肌落ち災害の多い作業

最近のNATM工法の導入により、切羽部分における肌落ち発生の態様は若干変化していることも考えられるが、発破工法が用いられる限り、爆破後の肌落ちの防止は重要なことである。

肌落ち防止の対策については、その事象が図3.3.1に示したとおり、地山の性状、掘削方式、発破工法、支保工等々に関連することから、トンネル技術全般にかかわるものであり、図3.3.4はそれらを一括して示したものである。

この中で災害防止対策として重要と考えられるのは、こそくの徹底と各作業ごとに浮石の点検を行い、これの除去を図ることであり、必要に応じ防護措置を講ずることである。こそくおよび点検は、いずれも指名された熟練者によって行わせなければならない。発破直後のこそくは、作業手順を定め作業時間を十分確保することが必要である。特に大断面の場合には、こそくのための足場等の設備の用意や、バックホウ等機械力による方法を併用することが望ましい。

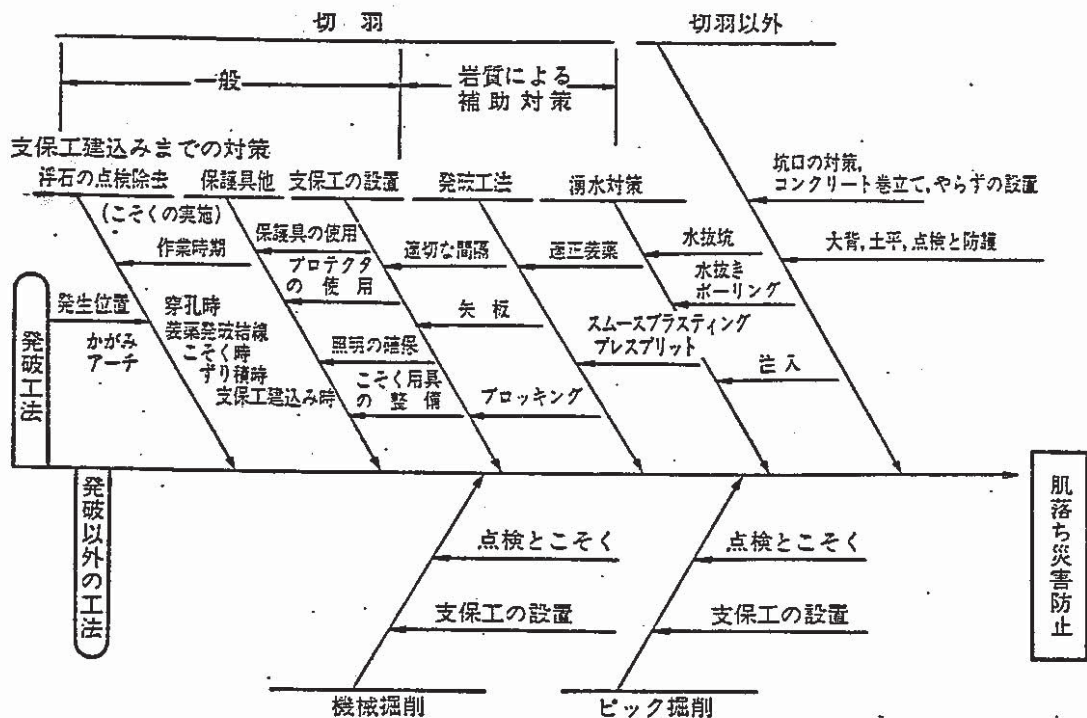


図3.3.4 肌落ち災害防止対策

地下工事、トンネル工事においては、地盤中に賦存する有害ガスによってもたらされる災害がある。有害ガスの種類としては、酸素欠乏空気、硫化水素、炭酸ガス、メタン等の可燃性ガスがあげられる。これらは空気と置換された場合、窒息または中毒という死亡に直結する災害の因となるものであり、可燃性ガスは空気と混合し爆発、災害の原因となることから、これら有害ガスに対する安全対策は特に重要となる。

この種の災害の防止対策としては、まず有害ガスの存在を確認することが必要であり、閉塞された空間において作業が行われる場合には、必ず検知器等により測定を行わなければならない。もしも有害ガスが検出されたならば新鮮な空気による換気手段を講じ、希釈または置換する。さらに常時、ガス濃度の測定を行い、許容濃度をこえる場合には、作業員を退避させる等の措置が必要となる。可燃性ガスの場合には、火気管理を厳重に実施しなければならないことはもちろんである。



### 3.3.1 発破作業の計画と管理

発破作業はダム工事、トンネル工事をはじめ、道路工事、砂防工事、港湾工事等の岩盤の掘削を必要とする工事において広く実施されているが、取扱う物が火薬類といういわば爆発の危険性のあるものであるところから、発破作業自体が他の作業に比べ、大規模な災害につながりやすい危険性を有している。この発破作業中に、火薬類の取扱い方法、発破方法、作業方法の不適正等による爆発災害がしばしば発生している。

発破作業に伴う災害として、ダムやトンネルの工事では、

- ① 電気雷管の導通試験中、親ダイの装填後、発破効果をあげるための心抜きバカ孔を穿孔中、不発ダイナマイトを探索中、ジャンボで穿孔中等に残留ダイナマイトが爆発する等による災害
- ② 導火線を雷管に取付け中、湧水で点火に手間どっている間、ダイナマイト装填中等に突然爆発する災害
- ③ 連絡の誤り、退避不十分等から爆破する災害
- ④ 高熱トンネルの切羽で装填中にダイナマイトの自然爆発による災害、親ダイ、雷管の入った箱をもってたき火にあたっていたときに爆発する災害
- ⑤ ダイナマイトの装填中の落石による爆発災害
- ⑥ 発破時にメタンガスが爆発したりする災害
- ⑦ 現場小屋の火災によるダイナマイトの爆発災害
- ⑧ 発破後の岩石飛来災害

等がみられる。また、道路工事や砂防工事では、発破後ののり面上部の崩落、岩石飛来災害、発破準備中の墜落災害等がみられる。

発破作業はいったん災害が発生すれば、死亡等の重篤な災害につながるおそれがある非常に危険な作業であり、トンネル工事その他の掘削工事において発破作業の計画と管理は十分慎重になされなければならない。

#### (1) 火薬類の取扱い管理

工事現場で使用する火薬類は、専用の火薬庫に貯蔵し、そこから毎日の発破に必要な最少量を火薬類取扱所または火工所(少量の場合)に運び、ここで火薬類の管理および発破の準備をする。火薬類の数量が少量の場合は、都道府県知事の指示する安全な場所(庫外貯蔵所)に貯蔵する。火薬類の紛失、盗難等がないようにする。火薬類の貯蔵および消費にかかわる保安に関しては、火薬類取扱保安責任者に責任があるが、発破の準備技士が行うものであり、それぞれ所定の資格を必要とする。火薬類の取扱い上の注意事項と運搬上の注意事項について関係者に十分周知徹底を図り、取扱運搬時の安全を確保する。

火薬類は、使用前に不良品の有無について点検、検査要領を定め、適切に管理するとともに不良火薬類の処理を適切に行うことが大切である。

## (2) 発破作業の計画(準備)

①発破用器材の準備 発破用器材としての雷管口締器、雷管挿入孔あけ棒、込め棒、キューレン、ブローパイプ、込め物(アンコ)、防水剤、火薬類運搬容器、警戒用用具等、および導火線発破用器材としての発破時計、捨て導火線、点火具等や、電気発破用器材としての発破器、抵抗測定器、導通試験器等は、使用前に点検し、不良なものは修理し、または完全なものと同様に取替えておかなければならない。

②発破方法の決定 発破の方法は、導火線発破と電気発破との2種類あるが、前者は、後者のように確実に発破時刻を制御することはできないが、熟練により単独発破、同時発破または段発発破を行うことができる。後者は、単発発破、斉発発破、MS発破、DS発破、これらの併用した段発発破等の方法があるが、迷走電流のある場所では行わせてはならない。現場の状況によって、これらのうちのどの方法を採用するかを慎重に決定しなければならない。

③火薬類の選定および薬量の決定 火薬類の選定にあたっては、発破現場のトンネルまたは明りの別、岩石の硬度、発破の後ガス、使用する火薬類の爆力、耐水性および経済性等を十分に考慮することが大切である。また、装薬量の決定にあたっては、切羽の大きさ、岩石の硬度および層の状況、これらに対応して採用する穿孔の長さおよび本数本数等のいろいろな要素を考慮することが必要である。

④装薬の準備 導火線発破については、導火線を雷管に取付けた後(火薬類取扱所または発破現場近くの安全な場所)、薬包に雷管を取付ける(発破現場近くの安全な場所)。電気発破については、雷管の取付け、発破母線の配線、脚線の結線、脚線・発破補助母線・発破母線の結果を適切に行った後、全回路の抵抗測定または導通試験を行う、その場合、計算値と実測値とを比較し、異常のないことを確認した後でなければ母線を発破器端子に接続してはならない。なお、この測定で適正な結果が得られない場合には、不良箇所を徹底的に調査することが必要である。

⑤穿孔 穿孔は最大起砕量を得るため、発破現場の状況に応じて穿孔の直径(通常1cmほど大きいもの)、角度(トンネルではVカット、ピラミッド等)の適正なものを選定する。前回の孔尻を穿孔してはならない。

⑥装填 発破孔の掃除・点検はブローパイプまたはキューレンで孔座まで十分に掃除し、発破孔の位置、深さを十分点検すること。装薬は、薬包を1個ずつ手を添えて慎重に木製の込め棒で行う。込め物(アンコ)は、粘土で薬包状に成形し、ほとんど乾燥させたものを使用するとともに孔口までていねいに詰める。水孔における発破はできるだけ電気発破を採用するほか、70℃以上の高温孔では、火薬類の選定、注水、点火時間に特に留意する。

⑦点火 点火の準備には、発破時計等時間表示具を用意し、全部の結線等の状態を再確認し、点火具の機能点検の実施、点火順序・点火本数・点火責任区分の明確化、退避の道順の明確な指示確認を行ったり、関係者への予報、退避の確認を確実に行う。点火作業は発破技士等の一定の資格のある者が行い、かつその者のうちから指揮者を選任し、その者の指示に従って行うことが必要である。退避の指示は明確に関係者全員に行うとともに、点火前に危険区域から労働者が退避したことを確認する。点火途中でも時間表示具が危険を報じた場合はただちに退避させる。

⑧発破後の措置 発破が終了した場合、導火線発破については、爆発音数と点火数との確認、発破後15分以上の経過確認(接近禁止、後ガス、浮石の除去)、待機時間後の孔尻の確

認、残留薬の有無の点検を確実に行う。電気発破については、発破後の発破母線の取りはずし(再点火防止措置)、発破後5分以上の経過確認(接近禁止)、残留火薬の処置等を確実に  
行う。

◎不発火薬類の処置 発破後の点検の結果、不発の装薬、残留薬等の不発火薬類がある  
ことが予想される場合、不発火薬類については、注水、圧縮空気によるとり出しを慎重に  
行わなければならない。回収不能の場合、不発孔と並行として穿孔し、新たに発破を行う  
(間隔:機械掘り60cm以上、手掘り30cm以上)。ずりの中に不発火薬類が混入しているおそれ  
のある場合には、ずりに散水し、静かにとり出す。不発火薬類の回収不能の場合には、そ  
の場所に赤色旗等で危険表示をする。

### 3.3.2 火災・爆発災害

火災・爆発災害に関連する作業および労働災害の特徴を述べると次のとおりである。火災・爆発災害は、トンネル工事、上下水道工事、地下鉄工事等でのトンネル坑内における掘削作業中に、地山から発生したメタンガス、天然ガス等、可燃性のガスとの接触により坑内の火災、爆発災害がしばしば発生している。また、トンネイ等の坑内で使用するジャンボ削岩機の解体作業中に、ガス溶断の火花が可燃物に引火し坑内火災が発生したり、運転中のドーザショベルのオイルがもとで坑内火災が発生している。坑内での火災・爆発災害はいったん発生すると、多数の労働者をまきぞえにする大規模な災害に発展する。一方、資材小屋等での薪ストーブにかけた軽油による引火爆発災害や、寄宿舍でのタバコの残り火等による火災も毎年多数発生している。このほか、溶解アセチレンによるガス溶接・溶断作業中、またはアーク溶接機による部材、構造物、タンク等の溶接中の火傷もあげられる。

土木工事における火災・爆発災害の特徴は、主としてトンネル坑内での火災・爆発と資材小屋、寄宿舍等の火災に大別されるので、それぞれの防止対策について述べることとする。

#### (1) トンネル坑内での火災・爆発の防止

- ① 可燃性ガスの濃度を測定する者を指名し、その者に、毎日作業開始前、中震以上の地震の後および可燃性ガスに関し異常を認めたとときに、可燃性ガスの濃度測定を行わせて、その結果を記録しておくこと。
- ② 測定の結果、可燃性ガスによる爆発・火災のおそれのあるときは、ガス濃度の異常上昇を早期に把握するための自動警報装置に設けること。また、可燃性ガスが存在するときは、ライター等の発火具の坑内持込み禁止措置を講ずること。
- ③ 可燃性ガスの突出のおそれがあるときは、ボーリングによるガス抜きを行うこと。
- ④ トンネル等の内部で可燃性ガスおよび酸素を用いて金属の溶接・溶断を行うときは、付近にあるほろ、木くず等の可燃物を除去すること。
- ⑤ トンネル等の内部で火気またはアークを使用する場所では、防火担当者を指名し、その者に火災防止に必要な措置を行わせること。
- ⑥ ⑤の場所、配電盤、変圧器等を設置する場所には、消火設備を設けること。

⑦ トンネル等の内部における可燃性ガスの濃度が爆発下限界の値の30%以上であるときは、労働者を安全な場所に退避させ、点火源となるものの使用の停止、通風、換気等の措置を講ずること。

⑧ トンネル等の建設の作業を行うときは、トンネル等の長さの等の区分に応じ、報告設備、通話装置、携帯用照明器具、呼吸用保護具等を設けること。

⑨ トンネル等で出入口からの距離が1000m以上の場所において作業を行うもの、および深さが50m以上となる立坑の堀削に伴うもの、ならびに圧気工法でゲージ圧力1kg/cm<sup>2</sup>以上のものでは、救護のための機械等の備え付け、管理ならびに救護訓練等を行うこと。

## (2) 資材小屋、寄宿舍等の火災防止

① 火気の使用場所ごとに火元責任者を定め、火気の取締りを行うこと。

② 作業場内で火気を使用する場合、防火責任者の承認、可燃物の側でのたき火の禁止、火気使用場所近くの消火器・砂・防火用水の備え付けを行うこと。

③ 溶接・溶断等の作業での周囲の可燃物の整理、監視人の配置、残火の確認を行うこと。アスファルト・コールタール溶解作業等の場合は、釜場の離脱禁止を徹底させること。また、強風時のたき火の禁止を徹底させること。

④ 場内での喫煙場所の指定、吸殻入れの設置、くわえタバコの禁止の徹底を図るとともに、終業時の場内火元の完全消火の確認すること。

⑤ 釜場、風呂場等のたき口付近の大量の燃料の持込み禁止、油布等易燃性のものの持込み禁止、ガソリン、塗料、油類等の周辺での火気使用厳禁表示、周辺の整理整頓を励行させること。また、危険物貯蔵場所の表示を行わせること。

⑥ 通路の出入口、階段等の避難通路の表示、整理整頓の励行、寄宿舍の2以上の階段または出入口の設置を行うこと。

⑦ 煙突は、火粉による燃焼防止のため、軒からの高さ60cm以上を突出し、建物との接触部には不燃性のめがね等を使用すること。

⑧ 電気・ガス等の器具の整備、ストーブの火気使用上の注意事項の徹底を図ること。

⑨ 火災発生時の通報体制を確立し、通報要領を関係者に配付しておくこと。

### 3.3.3 情報化施工管理

地下に大規模な構造物を建設するにあたっては、従来の構造物に比べ、より合理的で安全な施工が求められる。このため、施工中に構造物や周辺地盤の挙動計測を実施し、その結果を事前の予測結果と照らし合わせ、次の段階の施工へ反映させる、いわゆる、情報化施工管理が行われる。しかし、大規模な構造物の場合、従来の構造物にない様々な問題点があり、その挙動をこれまでの技術の延長上の計測や数値解析などによる情報によって捉えることには、かなりの困難が伴う。ここに、大規模(大深度、大断面、長大)な構造物であることを念頭においた新たな情報化施工管理手法の開発が求められる。

#### 1) NATM

大規模地下構造物の安定を保ちつつ、遅滞なく工事を進めて行くためには、現場の状況を出るだけ正確に把握し、迅速かつ適確に判断を下すことが肝要である。情報化施工管理手法は、トンネル工法においてはNATMとしてよく知られているものである。NATMはヨーロッパにその源を発するもので、地山の強度を積極的に評価するトンネル工法あるいはトンネル設計手法である。このような考え方は、トンネル施工の長い歴史の中でも部分的に採られていたものであり、NATMのすべてがまったく新しい工法と言う訳ではない。しかし、NATMの真髄は、今まで個々の問題としてとらえられてきたトンネルの設計手法およびそれらの考え方を含めて総合的に評価し、施工を進めようする所にある。

従来のトンネルは、図3.3.5に示すような手順により調査、設計、施工が進められてきた。すなわち、まず調査、試験を行ない設計条件を設定し、支保の設計、施工へと進む一方向の流れでしかなかった。これでは掘削の進行とともに変化する、あるいは明らかとなる地山の状況を設計、施工へフィードバックし、合理的な支保の設計や安全な施工を行なうことは難しい。

これに対し、情報化施工管理手法では図3.3.6に示すように調査、設計、施工は計測および地山観察を媒体として有機的に結合されており、現場の状況を直ちに設計、施工に反映することが可能となる。ただしこのためには、各々の項目について次に述べる事が満足されている必要がある。

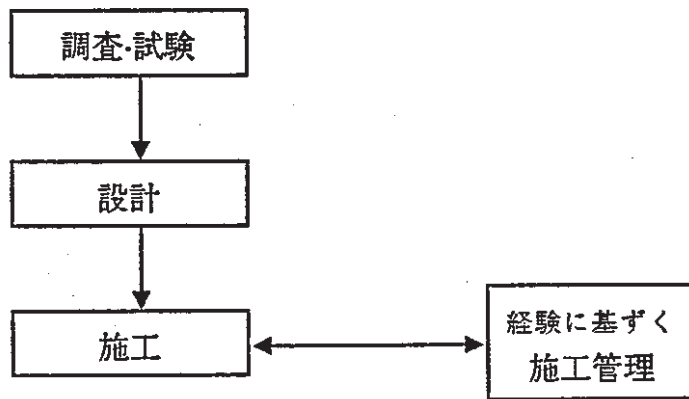


図3.3.5 従来のトンネル工事の流れ

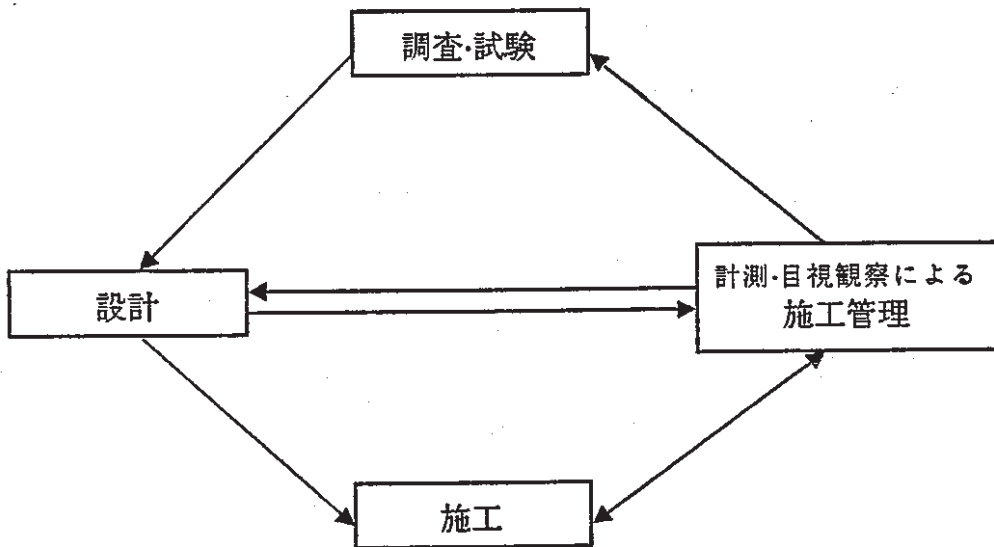


図3.3.6 情報化施工管理の概念



調査……設計に用いる解析法の持つ精度に充分対応し得る信頼性を持っていること。

設計……施工法や地山の力学的特性、地山形状等を評価できる解析であること。

施工……解析や計測の結果と対比できる程度の精度を有していること。

計測、観察……地山や支保の状況、挙動を十分な精度で把握できること。また、設計へのフィードバックを有効なものとするための即時性を有していること。

ここで留意しなければならないのは、情報化施工管理手法では各項目が有機的に結合し合っているため、各々の項目の精度が全体の精度に影響を及ぼすことである。例えば、調査における岩盤試験等が不十分で岩盤の物性の詳細が不明であるにもかかわらず、設計の段階で有限要素法を用いた粘弾塑性解析等の高度な解析を実施しても、解析により得られた結果は、調査段階での粗い精度しか持たないことになる。このような場合、初期の設計段階では、解析解に基づく手法や、線形弾性の有限要素法による方法で充分であり、空洞施工初期段階の計測結果のフィードバックにより解析の精度を順次向上させて行くことを考えるべきである。

即ち、まず事前設計案の安全性について、簡易な理論式や弾性有限要素を用いて検討し、次に試験施工または本工事の一部施工後、その計測結果を解析値と照合する。そして、解析値が設計値を十分な精度で説明できるよう解析条件、入力データの修正を行ない、再解析の必要があれば、はじめて弾塑性解析などのより高級な設計手法を用いる。このような方法が最も合理的であり経済的となる。

## 2) 長大構造物における問題点

現在、トンネルの標準工法となっているNATM(New Austrian Tunnelling Method)では、情報化施工の理念に基づきトンネルの一次支保工を、経験的手法と解析的手法を組合せた評価手法により決定している。すなわち施工開始前に、支保工を、これまでの経験と実績から設定された標準パターンの中から岩盤分類に基づき決定する。そして、地盤条件が変化した場合場合には、計測結果とその解析的検討により支保工を適宜変更追加し、その対策が十分か否かは、それ以後の計測とその解析によって判断する。こうして、岩盤や地盤の状況に応じた安定かつ最少限の支保工を構築するのである。

しかし、こゝで対象とするような大規模な地下構造物においては、次に挙げるような理由により、通常のトンネルに対して用いられる手法での対応は非常に困難となる。

- |     |   |
|-----|---|
| 大深度 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・同種の条件のもとで建設された構造物が少ないため、構造物の安定性を経験(情報)によって評価することができない。</li> <li>・大深度を対象とした地質調査手法が確立されていず、十分な地質情報が事前に得られない。</li> </ul> |
| 大断面 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・施工の進展とともに断面形状が変化するため、既に施工された箇所へ再度接近するのは難しく、支保工の追加には多大な費用と大幅な工期延長を必要とする。</li> </ul>                                    |
| 長大  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・資材の搬入、ずりの搬出あるいは情報の伝達がラインによって成されるため、その効率、事故対策などに問題がある。</li> </ul>  |

こうしたことを克服し、大規模地下構造物の安全で、合理的な施工を達成するためには、施工の進展とともに明かとなる地山の状況を正確に把握し、それ以降の施工による地山の挙動を精度よく予測し、支保工の規模と掘削方法を逐次、的確に見直していく必要がある。

ここでは、これまでの計測を中心とする手法に替えて、大規模地下構造物の情報化施工管理手法として、地質観察を中心とする手法を提案するとともに、世界でも有数の大規模地下空洞であるチラタ発電所工事における実施例をもとに提案する手法の有効性を示す。

### 3) 大規模地下構造物の情報化施工例

#### ① 地下発電所工事概要

チラタ水力発電所建設工事は、インドネシア共和国ジャワ島西部のチタルム川中流に高さ125mのフィルダムと、最大出力50万KW(これは将来100万KWへ増設される)の地下発電所を建設する工事である。

本工事は、大きくダム工区と地下発電所工区に区分される。ダム工区は、コンクリート表面遮水壁型フィルダム(堤高125m、堤頂長425m、堤体積3,896,000m<sup>3</sup>)の施工を中心とし、それに付帯する仮排水路トンネル、余水吐トンネル、底部排水路トンネル、原石山(骨材および盛り立て材)および周辺道路などの工事より成る。

地下発電所工区は、地下空洞を中心とし、その他周辺坑、取水口、導水路トンネル、水圧鉄管道路、放水道トンネル、サージタンクなどの工事より成る。中でも発電所のための地下空洞は、図3.3.7に示すように高さ49.5m、全幅35mの大断面である上、延長は253mと長く、掘削量320,000m<sup>3</sup>の世界でも屈指の規模となる。

この地下空洞は、NATMの思想に基づき、吹付けコンクリート、ロックボルト、ロックアンカーにより支保される。掘削に当っては、地山の目視観察と計測および数値解析を中心とする施工管理を行ない、合理的かつ安全な工事を目指した。

#### ② 地形・地質

本工事地点は、スマトラ、ジャワ、小スンダ諸島、セレベス島へ帯状に連続する新第三紀のスンダ造山帯に属する安山岩質火砕岩および海成層より構成され、褶曲構造が発達し、一部変質作用を受け緑色化している。本地域では、スンダ造山帯がほぼ東西に延びるため、地形・地質的特徴はその方向に強く表われている。周辺域は赤色土でおおわれる準平原地形(標高約300m)が広がるが、サイトはNWW-SEE方向に長く延びる山稜の周りをチタルム川が大きく迂回して流れる地点に位置している。チラタ水力発電所計画は、図3.3.8に示すようにこの地形的特徴を生かして各構造物が配置されている。

地質は、層序的に下位から新第三紀の泥質岩類および火山砕屑岩類、第四紀の火山砕屑物、段丘堆積物および崩積土などからなっている。全般に、走向は山稜長尾根方向とほぼ一致し、

南へ傾斜する単斜構造である。山稜北縁部から北域は、泥岩が分布し、チタルム川方向に軸を持つ背斜構造が確認される。流域には大規模地すべり地形が発達している。地下発電所工区周辺の地質は、一部泥岩が認められるが、ほとんど火山砕屑岩から構成されて、全体的に変質している。強度的には、健全な岩体が大半であるが方解石の細脈やクラックも多く、青灰色の粘土を挟在する断層が数本認められる。

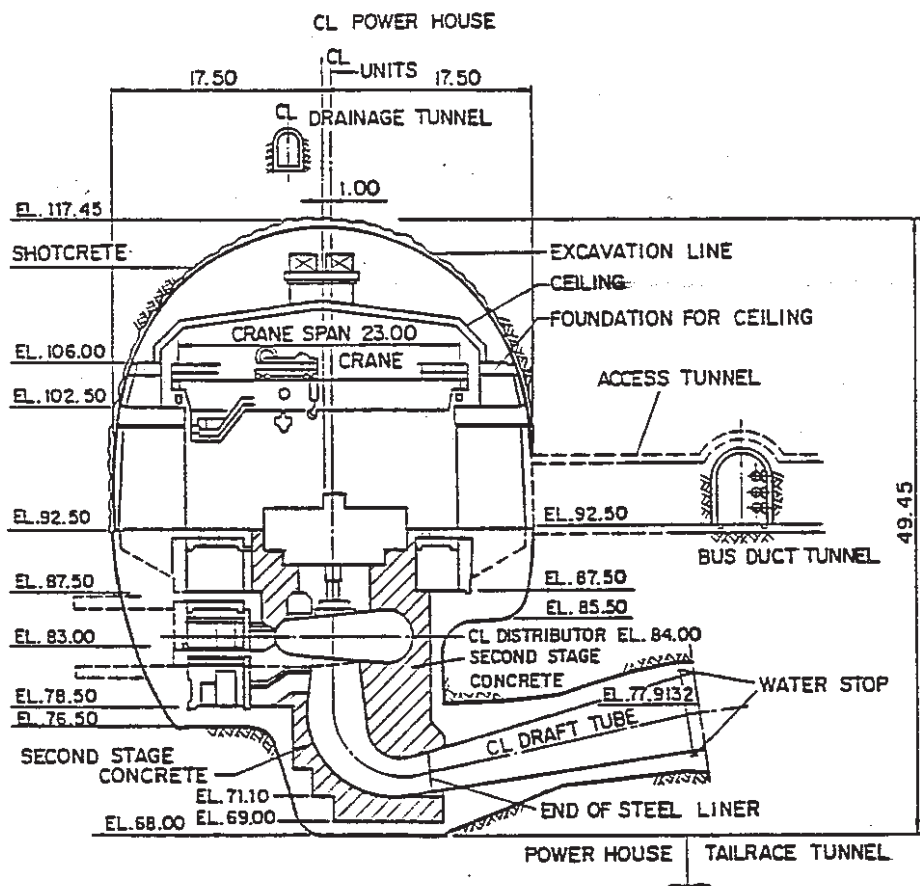


図3.3.7 チラタ地下発電所標準断面

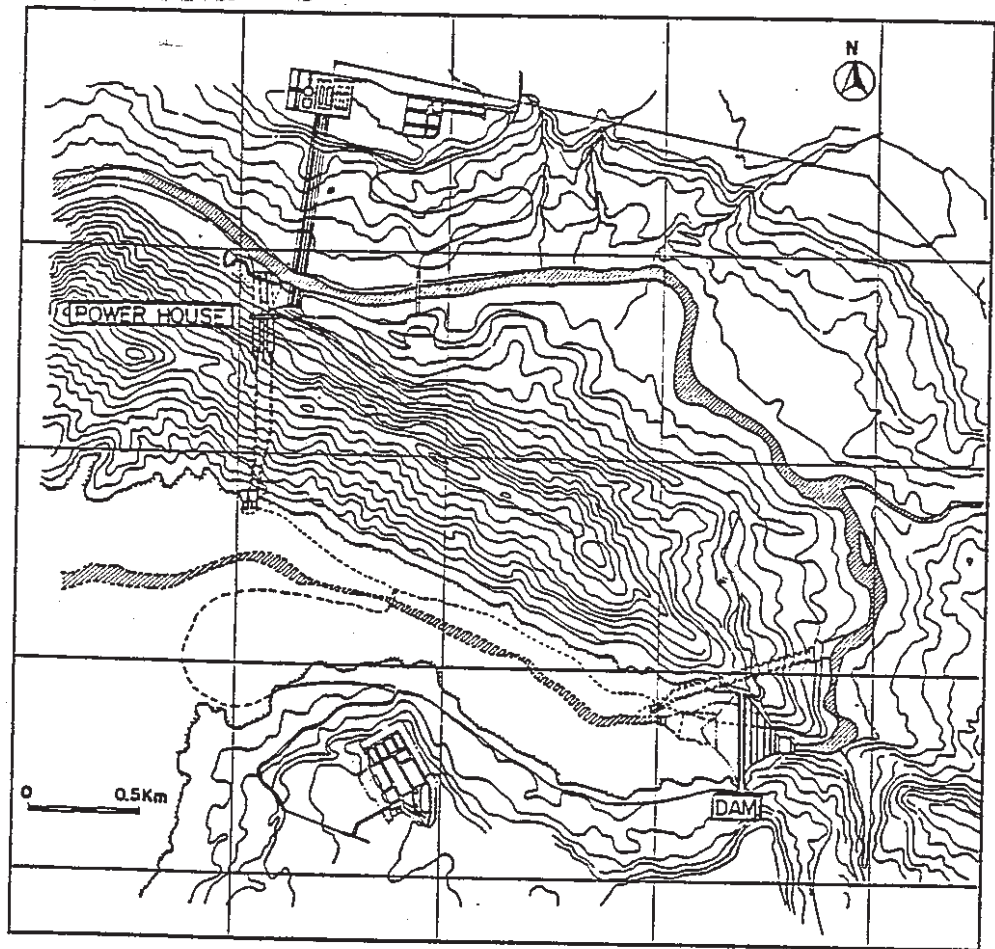


図3.3.8 サイト平面図

③ 調査と試験

地下空洞建設地点では排水トンネルを兼ねた試掘横坑が掘削され、坑内地質観察と原位置変形試験と岩盤せん断試験およびオーバーコアリング法による岩盤の初期応力測定が実施された。またボーリングによる地質調査時に採取された数多のコア試料に対して物理試験、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、弾性波試験などの他、AE(Acoustic Emission)測定が行なわれた。以下にこれらの結果の概要を記す。

<初期応力測定結果>

初期応力測定は、地下発電所のほぼ中央断面の図3.3.9に示す位置において実施された。その結果図3.3.10に示すような3次元の応力状態が得られた。また以下の項目が考察された。

- ① 主応力の方向は、ほぼ地山の地形状況を反映したものとなっている。
- ② 鉛直応力は、斜面の影響により、直上の土被り100mに対応する土被り圧よりも大きい。
- ③ ①~②より初期応力は、ほぼ地形状況を反映したものとなっており、異常な地殻応力が作用している懸念はない。

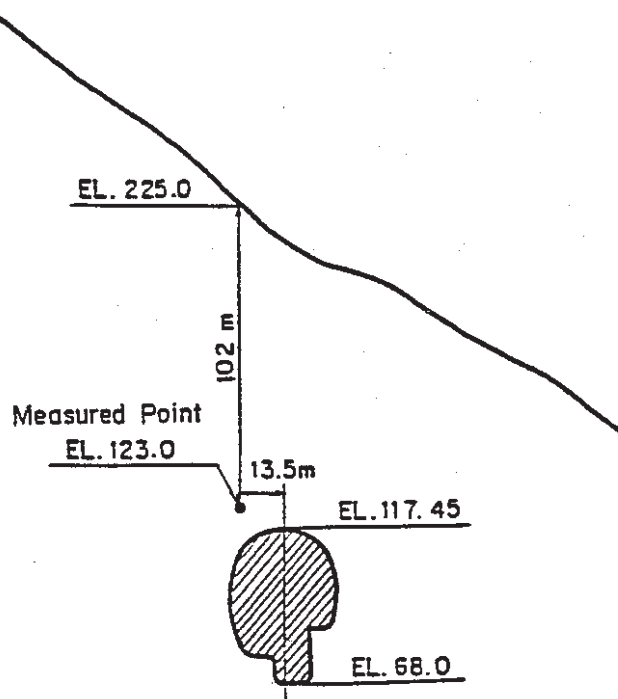


図3.3.9 初期応力測定位置

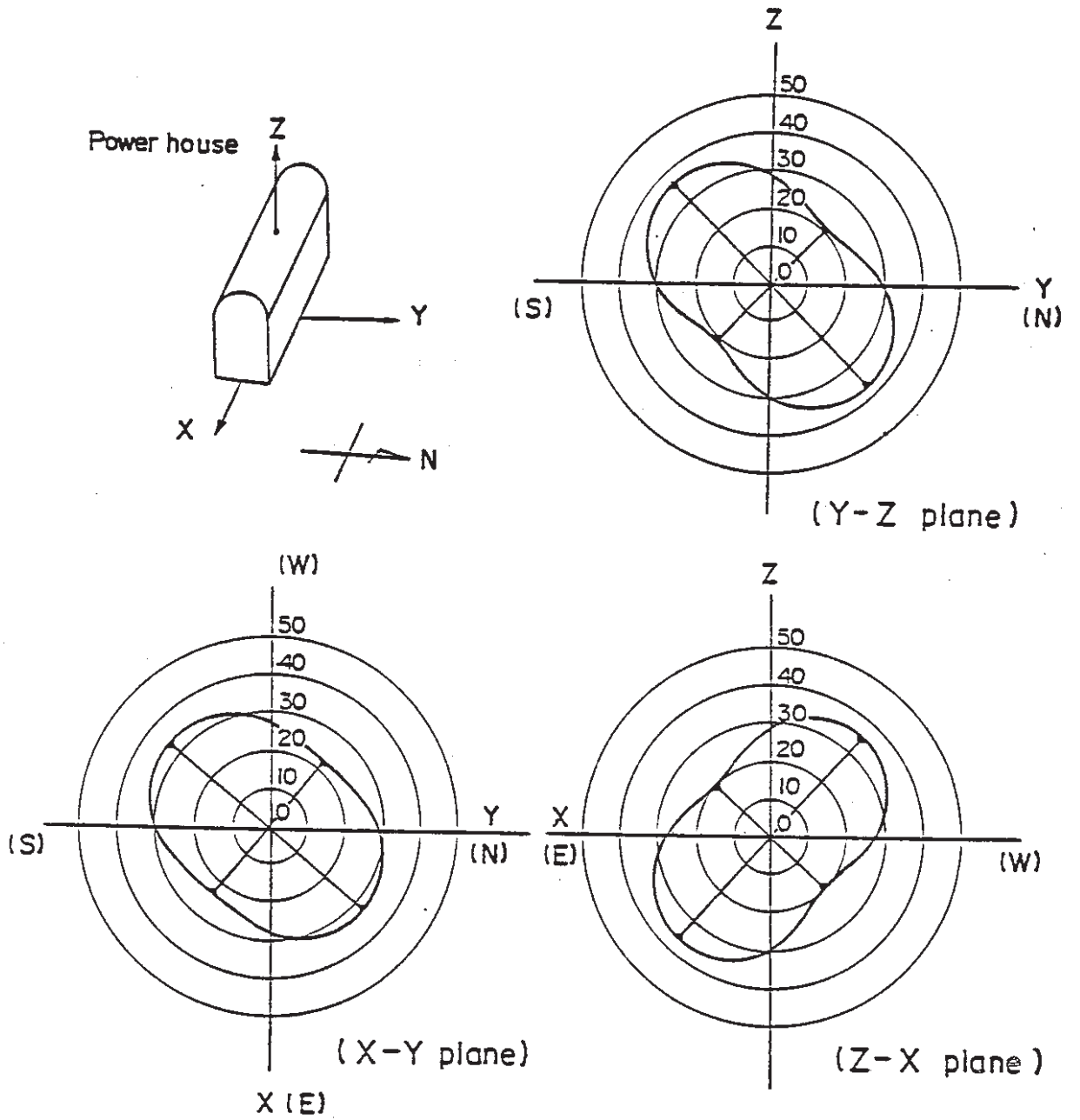


圖3.3.10 初期応力測定結果

## &lt;岩の特性&gt;

コア試料を用いて一軸、三軸圧縮試験、割裂試験、弾性波速度測定などが行なわれた。これらの結果は、表3.3.2にまとめて示す通りである。表から明らかなように、ヤング係数と粘着力、一軸圧縮強度の標準偏差は、他のものに比べて非常に大きくなっている。これは、これらの物性が不連続面の存在に大きく影響を受けることを示している。従って、実際にはコア試料より多くの不連続面を含んでいるであろう岩盤のマスとしての力学特性を決めるに当っては十分な注意が必要である。

以上の結果と、原位置岩盤試験結果に基づき表3.3.3に示す岩盤物性値を設定した。

表3.3.2 岩石試験結果

	Mean value	Standard deviation
Young's modules (kg/cm <sup>2</sup> )		
Static	17.8 x 10 <sup>4</sup>	4.7 x 10 <sup>4</sup>
Dynamic	19.0 x 10 <sup>4</sup>	5.0 x 10 <sup>4</sup>
Poisson's ratio	0.32	0.05
Cohesion (kg/cm <sup>2</sup> )	53.5	16.3
Internal friction angle (degree)	53.2	2.5
Uniaxial compression strength (kg/cm <sup>2</sup> )	279.0	121.0

表3.3.3 検討に用いた岩盤物性値

Unit weight	$\gamma$ (tf/m <sup>3</sup> )	2.6
Young's modulus	E (kgf/cm <sup>2</sup> )	44,000
Poisson's ratio	$\nu$	0.3
Cohesion	C (kgf/cm <sup>2</sup> )	20.0
Internal friction angle	$\phi$ (°)	50.0



④ 支保の設計

地下空洞の隅角部周辺の応力集中を避けるためと、空洞周辺岩盤全体にわたる応力のスムーズな流れを可能とすることを目的に卵型空洞が採取されるとともに、吹付けコンクリート、ロックボルトとプレストレストアンカーが岩盤支保工として選定された。

これらの支保工の規模は図3.3.11に示すような岩盤マスの極限平衡状態での安定解析により検討された。その結果決定された支保工の配置を図3.3.12に示す。

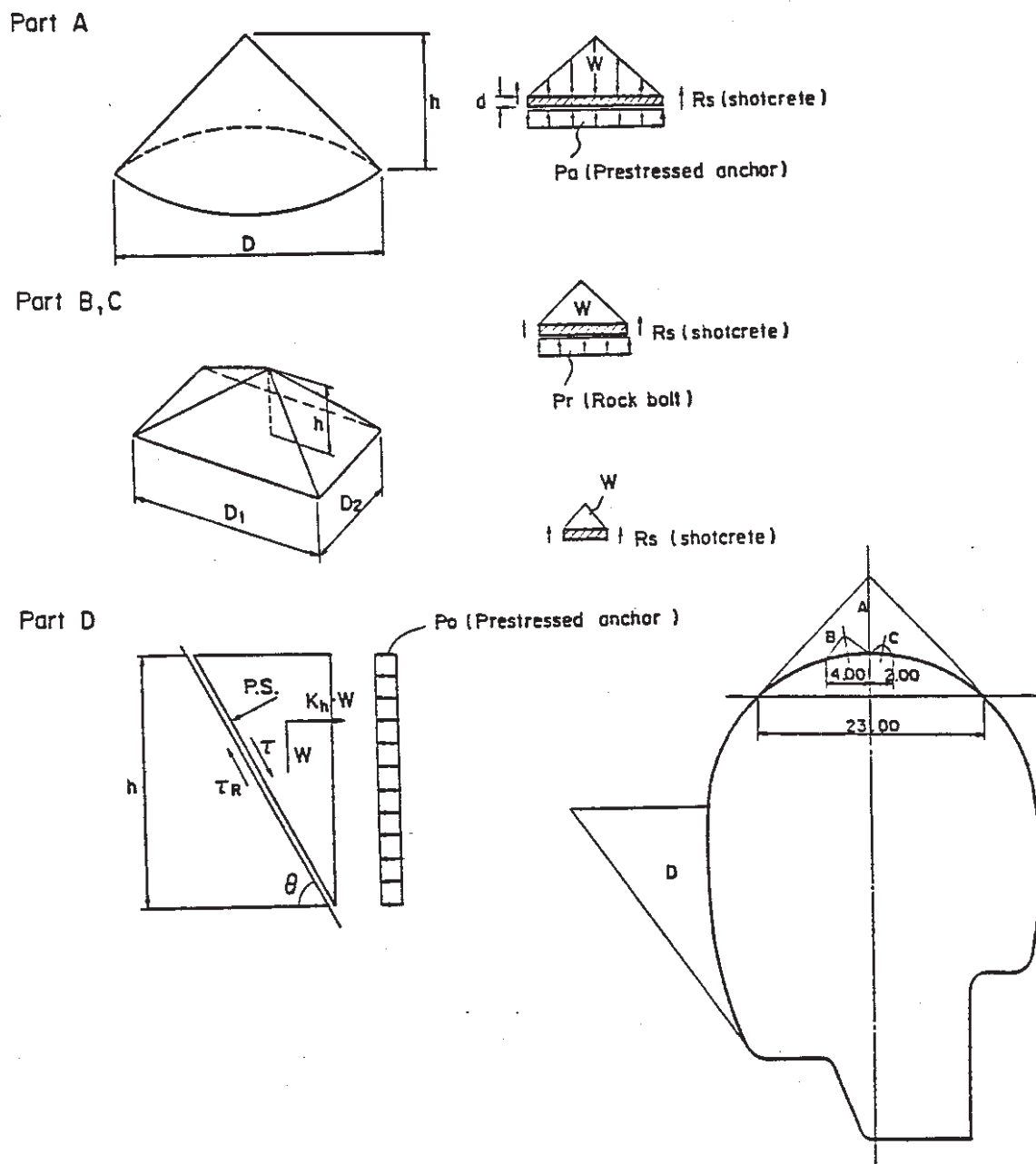


図3.3.11 支保設計のための岩盤安定解析

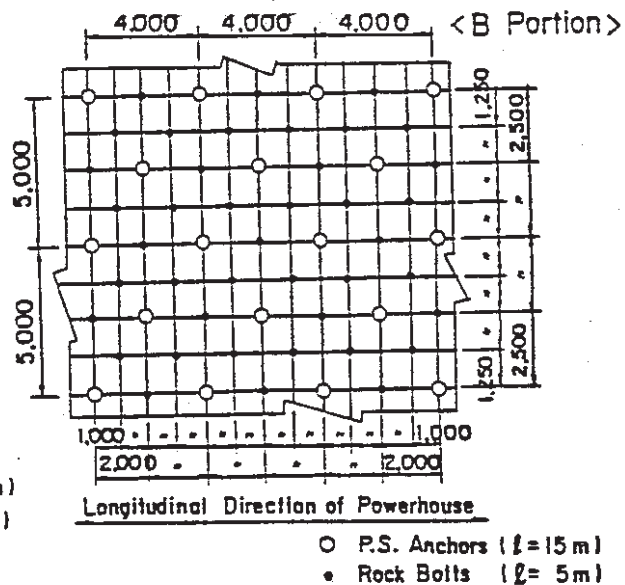
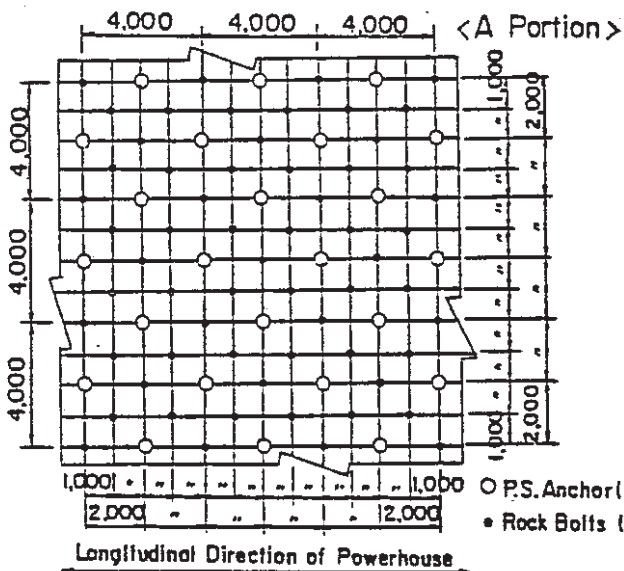
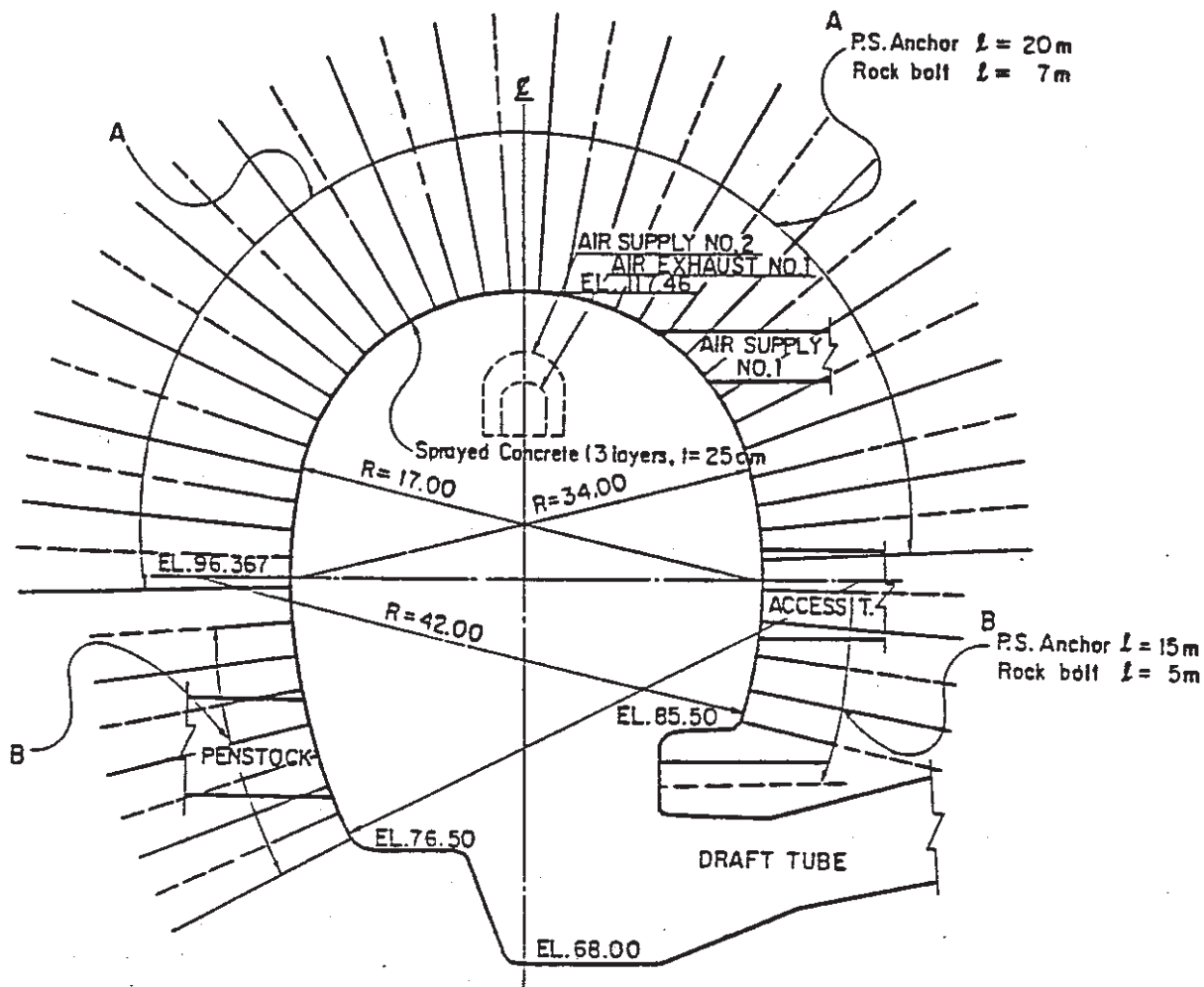


图3.3.12 支保工配置图

⑥ 有限要素法による解析

岩盤に構築される空洞の応力、変形問題に有限要素法を適用する場合、以下の項目について十分な検討を行ない、解析条件を正しく評価することが肝要である。

<地盤条件>

- ・初期地圧: 地圧の大きさ、方向
- ・岩盤の物性: 応力ひずみ関係  
強度特性  
強度や変形の異方性および時間依存性  
節理や亀裂などによる不連続性
- ・地質構造: 地層構成  
断層や破碎帯などの位置と傾斜

<施工条件>

- ・切羽の影響: 3次元効果
- ・支保効果: 吹付けコンクリート、ロックボルトなどの剛性  
地山との接触状態  
支保の施工時期
- ・掘削手順:

これらは地下空洞およびその周辺地山の挙動に影響を及ぼす要因であり、その評価の良し悪しが解析の精度、信頼性を左右する。しかしながら、これらの要因のすべてを解析に取入れることは、現実にはほとんど不可能である。そこで、解析に当っては、対象とする地下空洞の諸条件と解析の目的を吟味し、解析目的に対してより大きな影響を与える因子を抽出し、合理的な解析モデルを設定する必要がある。

### <初期地圧の設定>

初期地圧は、地下空洞の挙動に大きな影響を及ぼし、解析における初期条件の中でも重要な要素の一つである。初期地圧は、地盤続成作用や侵蝕による除荷、あるいは構造運動などの地史的荷重履歴に依存している。特に、造山帯、活断層などの周辺では、構造的な荷重により水平方向地圧が鉛直方向のそれを上回っている事例も見られ、初期地圧の設定に当たっては、地質学的な面も含めた十分な検討を行なう必要がある。

地下発電所や石油地下備蓄などの岩盤内大空洞では、その重要性に鑑みオーバーコアリングによる応力解放や、AE法により初期地圧の推定が行なわれる。しかしながら、オーバーコアリングによる初期地圧の測定は、i)多大な労力と時間を要する。ii)測定結果が岩盤の微視的構造特性に影響を受け易い、などの問題点を有している。従って、必ずしも十分な数の測定が行なわれず、解析の対象とする領域全体の初期地圧状態を精度良く推定することが困難となる場合がある。一方、AE法は、比較的簡単に実施することができるが、結果の信頼性に今一つ問題が残る。

初期地圧の設定手法としては、このような測定に基づくものの他、自重応力計算によるものがある。これは、地形、地質上の条件を考慮した解析モデルを作成し、自重を作用させることにより応力計算を行なうものである。この解析においては、地山構成材料の単位体積重量、変形係数、ポアソン比が入力物性値として用いられる。ここで留意しなければならないのは、初期地圧の算定に用いられるポアソン比は、応力-変形解析に用いられるそれとは工学的意味が異なっていることである。即ち、初期地圧算定時のポアソン比は、水平地盤における鉛直方向地圧に対する水平方向地圧の比、側圧係数に対応するものであり、必ずしも応力-変形解析で用いられるポアソン比と一致する必要はない。

オーバーコアリングにより求められた初期応力値の検証という意味もあり、地下発電所周辺の地形をモデル化し、自重計算を行なった。この時のモデルを図3.3.13に示す。計算方法は有限要素法による弾性計算である。物性値は表3.3.3に示す値を用いたが、ポアソン比を0.3、0.4、0.45と変化させ、応力値を計算した。

計算された応力分布の例を図3.3.14に示す。また、初期応力実測点での計算された応力を表3.3.4に示す。ポアソン比の増加にしたがって第2主応力が水平に近づいてゆく状態が示されている。この表から、ポアソン比が0.45の場合が、実測値とよい対応を示していることが分る。ここでは、ポアソン比0.45の自重解析結果を測定結果に基づき修正し、初期地圧を設定した。

初期応力の修正方法としては、初期応力算定モデルにおいて水平方向に任意の応力を加える方法と、算定された主応力状態を測定結果と一致させるべく係数を乗する方法とがあるが、ここでは、後者の係数を乗する方法を採用した。

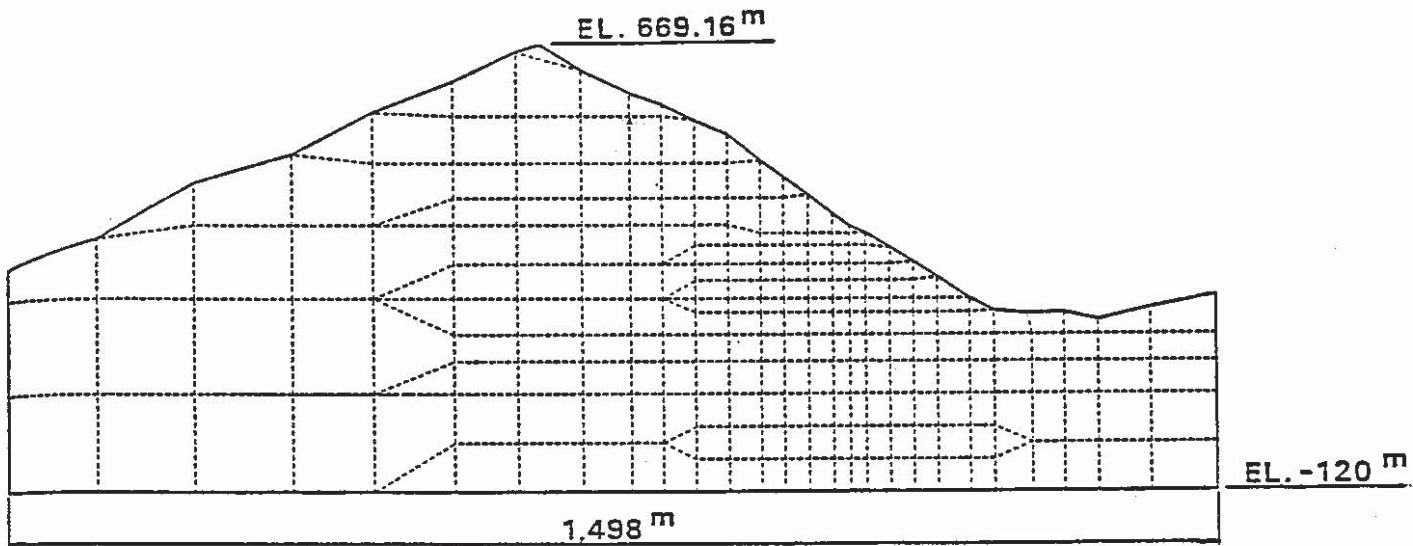


図3.3.13 初期応力算定のための有限要素モデル

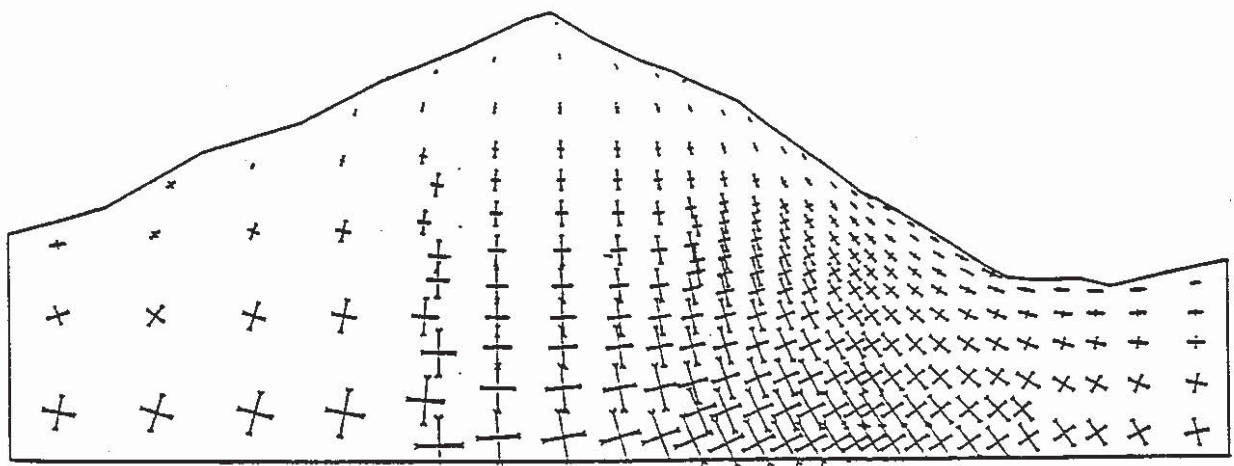
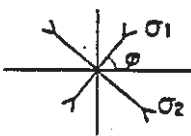

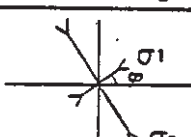
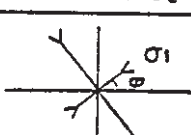


図3.3.14 初期応力算定結果(主応力分布図)

表3.3.4 実測初期応力と解析結果の比較

	$\sigma_x$ (tf/m <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (tf/m <sup>2</sup> )	$\tau_{xy}$ (tf/m <sup>2</sup> )	$\sigma_1$ (tf/m <sup>2</sup> )	$\sigma_2$ (tf/m <sup>2</sup> )	$\varphi$ (deg)	Principal Stress
Measured	-294	-290	80	-211	-372	45.7°	
Analyzed $\nu = 0.3$	-143.98	-287.78	85.49	-104.18	-327.58	24.97°	
Analyzed $\nu = 0.4$	-192.67	-277.23	87.41	-137.85	-332.05	32.09°	
Analyzed $\nu = 0.45$	-223.28	-270.82	88.62	-155.30	-338.80	37.49°	

<数値解析モデルと結果>

地下発電所空洞の標準的断面とその掘削手順を図3.3.15に示す。解析に当って岩盤を弾性体と仮定し、岩盤物性値として、前掲表3.3.3に示したものをを用いた。一方、本空洞の支保は、吹付けコンクリート、ロックボルト、プレストレストアンカーにより構成されるが、解析においては、25cm厚の吹付けコンクリートは平面要素により、また、ロックボルトとプレストレストアンカーは棒要素によりモデル化した。

解析は、図3.3.15の掘削手順を考慮して行なわれた。解析に用いた有限要素モデルおよび解析結果の1例を図3.3.16、3.3.17に示す。

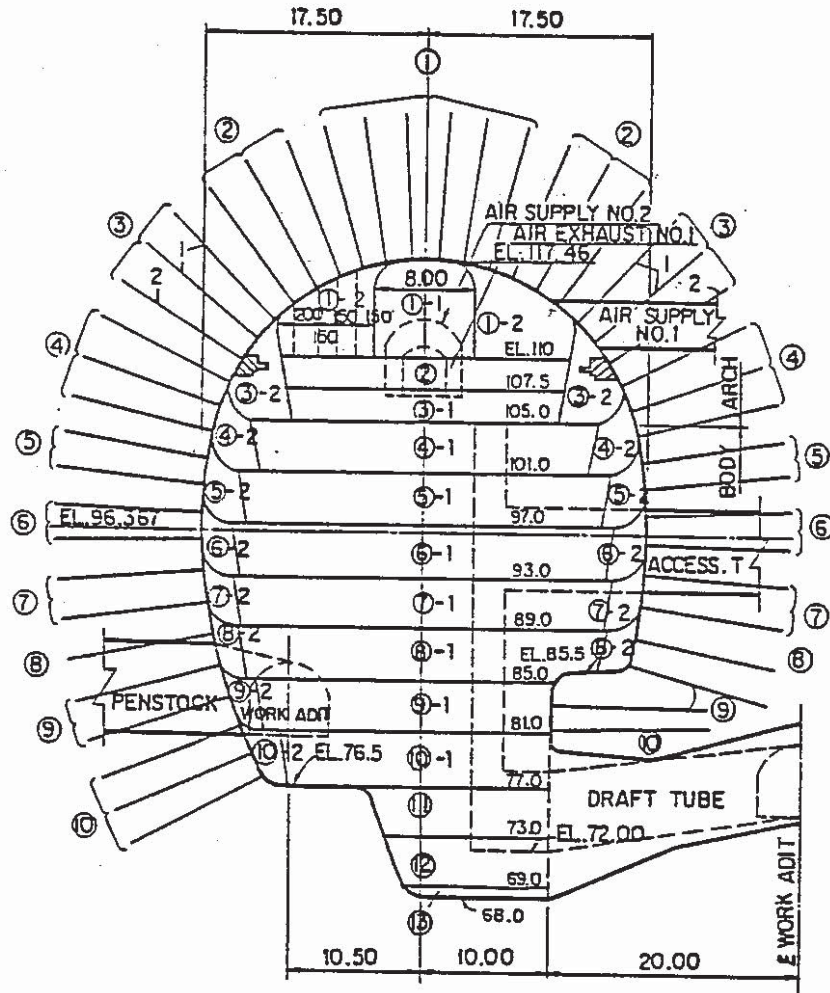


図3.3.15 地下発電所標準的断面と掘削手順

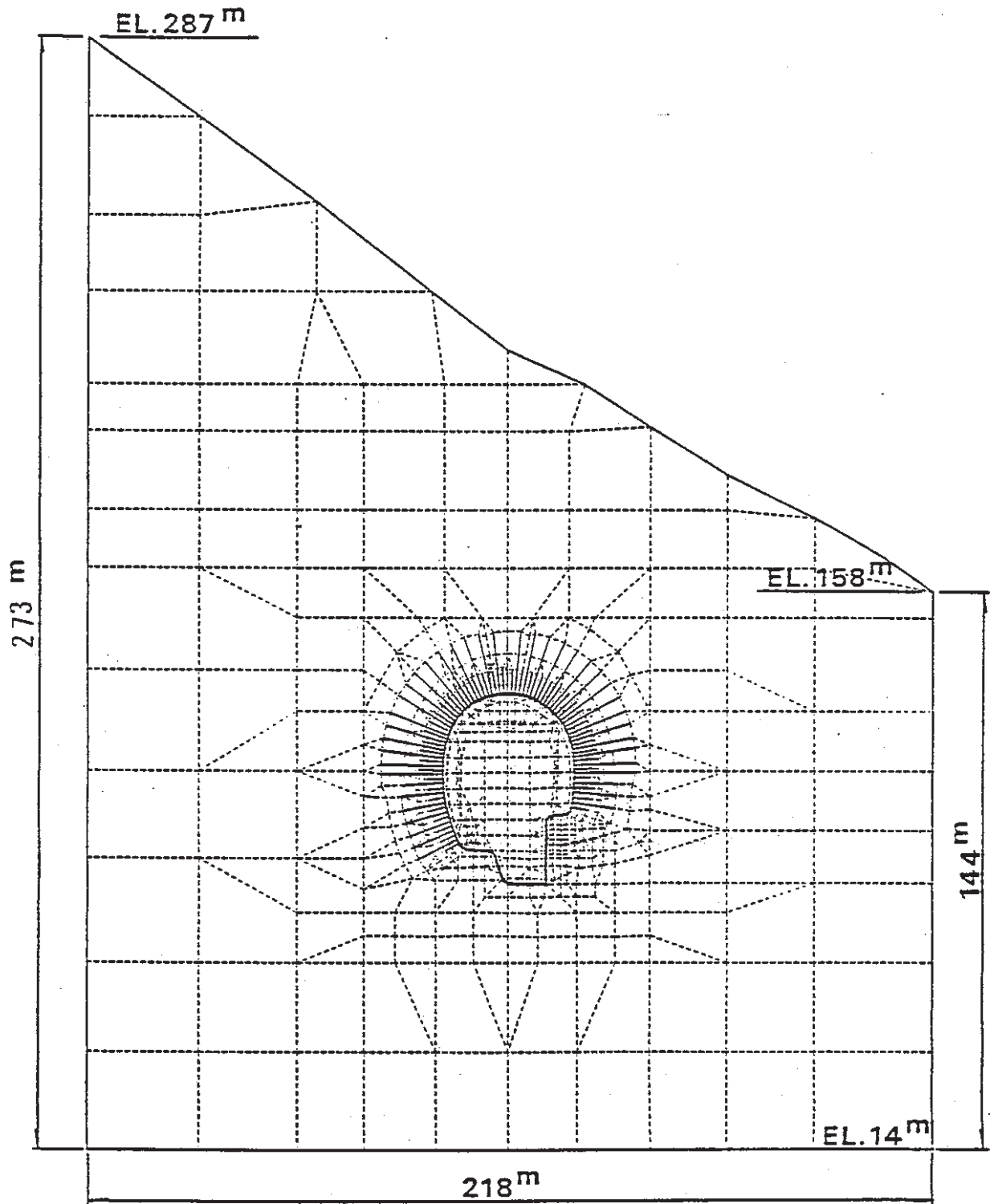


図3.3.16 掘削解析のための有限要素モデル



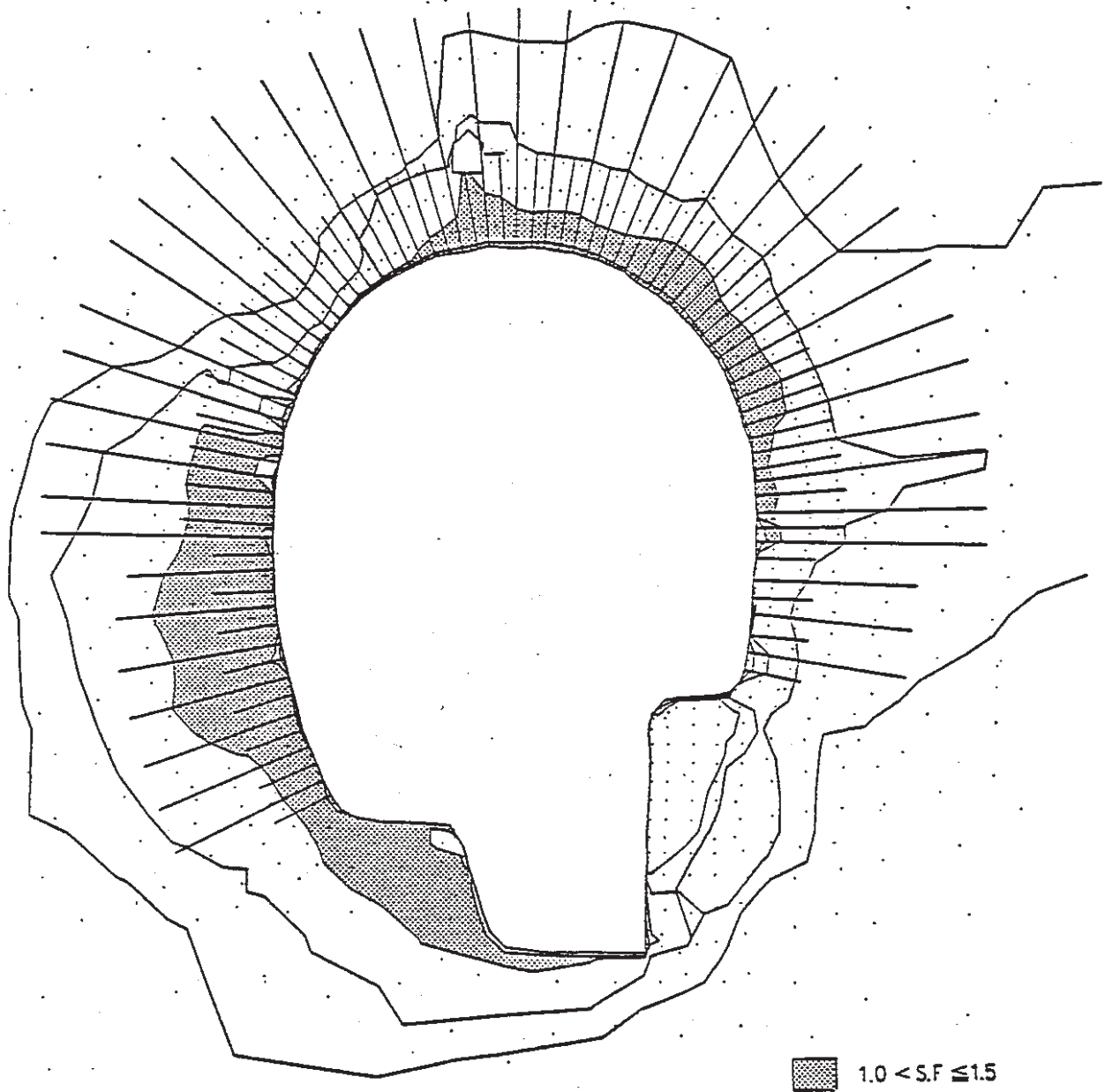


図3.3.17 有限要素法による掘削解析結果(局所安全係数の分布)

## ⑤ 情報化施工管理

情報化施工管理の概念に基づき計測と目視を実施した。計測項目と目的、手法等を表3.3.5に示す。これらの莫大な数の計測機器は、計22の断面と妻壁部に配置された。図3.3.18は、代表的な断面における計測機器の配置を示したものである。

表3.3.5 情報化施工管理のための計測と目視観察

計測項目	目的	計器	精度 容量	計測 頻度	点数
アンカー軸力	1)導入力の管理 2)岩盤挙動の観察	ストレイン ゲージ	1ton 200ton	1回/週	277
岩盤変位	1)岩盤挙動の観察 2)ゆるみ領域の推定 3)解析結果の検討	エクステンソ メータ	0.1mm 100mm	1回/週	276
ロックボルト 軸力	1)支保効果 2)岩盤挙動の観察	変位計	0.1mm 30mm	1回/週	225
天端沈下 内空変位	1)岩盤挙動の観察 2)解析結果の検討	測量 コンバージェ ンスメータ	1mm 1mm 50m	1回/週	24 6
クラック変位	1)断層やクラックの 挙動観察	変位計	0.1mm 10mm	必要に 応じ	
気温	1)計測データの修正	温度計	0.5°C 100°C	1回/週	2
切羽の地質	1)岩盤の局所的 安定性の検討 2)地質情報の再検討	目視観察		掘削毎	

(計測頻度は現場の状況によって修正される)

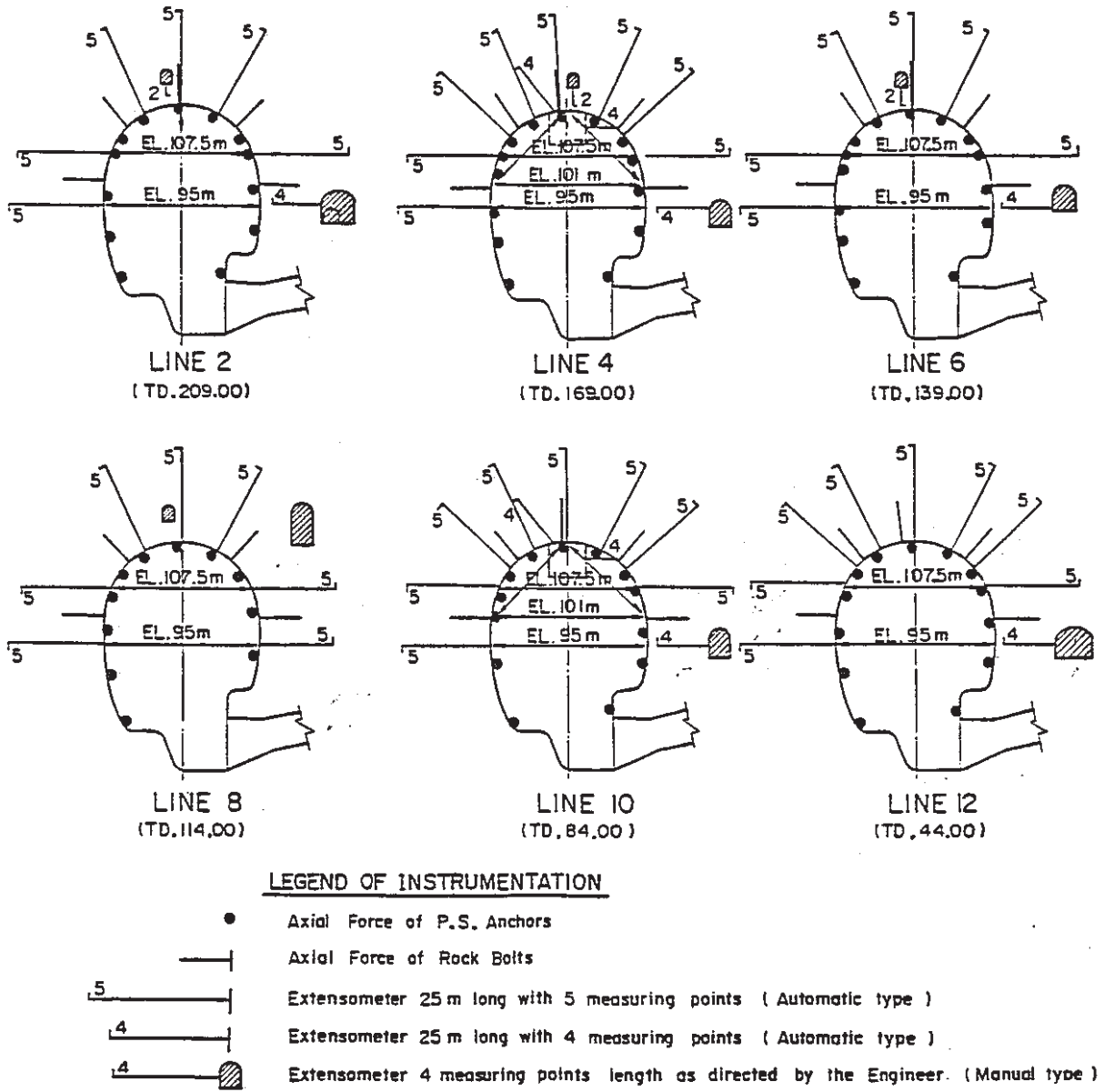


図3.3.18 計測計器配置図

空洞掘削の進展とともに日々変化する地盤の状態を正確に把握し、日常の安全確認を行なうとともに、より合理的な施工管理を行なうためには、必要最小限の計測機器を、その設置目的を十分に勘案した上で、適切な位置に設置する必要がある。更に、計測された結果は、短時間内に図(経時変化図、分布図)や表としてまとめられ、現場技術者の判断材料として提供されねばならない。このため、本空洞の計測に、パーソナルコンピュータを中心とした自動計測システムを導入した。図3.3.19に、そのシステムの内容を示した。このような自動化により初めて、より信頼度の高いデータを短時間の内に得ることが可能となる。

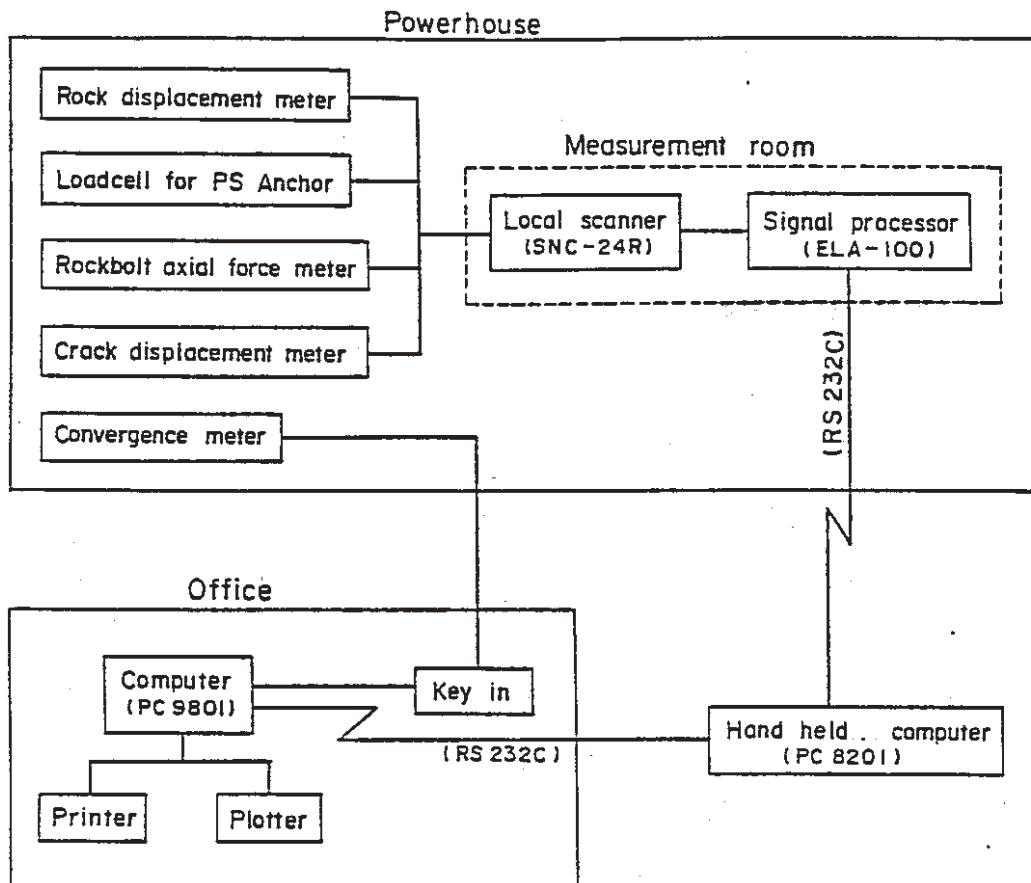


図3.3.19 現場計測システム構成図

これまでに述べてきたような入念な準備の下、地下発電所空洞の掘削は、アーチ導坑より開始された。

計測と目視の結果は、週1回EngineerとContractorの担当者より構成されるGeological Meetingにおいて検討された。これは現場の状況についてEngineer, Contractorを問わず正しい認識を持つとともに、適切な対応策を遅滞なく実施する上で非常に重要なことである。

図3.3.20、3.3.21に、地山の目視観察により得られた主要な不連続面の分布と、計測断面9において計測された岩盤変位の分布図および経時変化図を一例として示す。このような、計測と地質観察の結果、本空洞の挙動は岩盤内に存在する大小様々な不連続面に起因する局所的挙動と巨視的な弾性挙動とに大別されることが明らかになった。後者の巨視的に弾性的であると見なされる地盤挙動の傾向、大きさなどは、事前解析により予測されるものとはほぼ一致しており、設計条件の再検討、支保の再設計などは不必要であると判断された。一方、不連続面の存在に起因する地山挙動については、地質観察の結果に基づき、局所補強工(増しP.S.アンカーとロックボルト)を実施し対拠した。これらの補強工の有効性は、計測により確認された。

工事は、盤下げ掘削中に大規模なキープロックの存在が明らかとなったが、掘削ごとの地質観察結果を中心とする検討を通して、逐次的確な補助工が実施された。その結果、チラタ水力発電所工事における世界でも屈指の大規模地下空洞の掘削は予定通り、無事完了した。

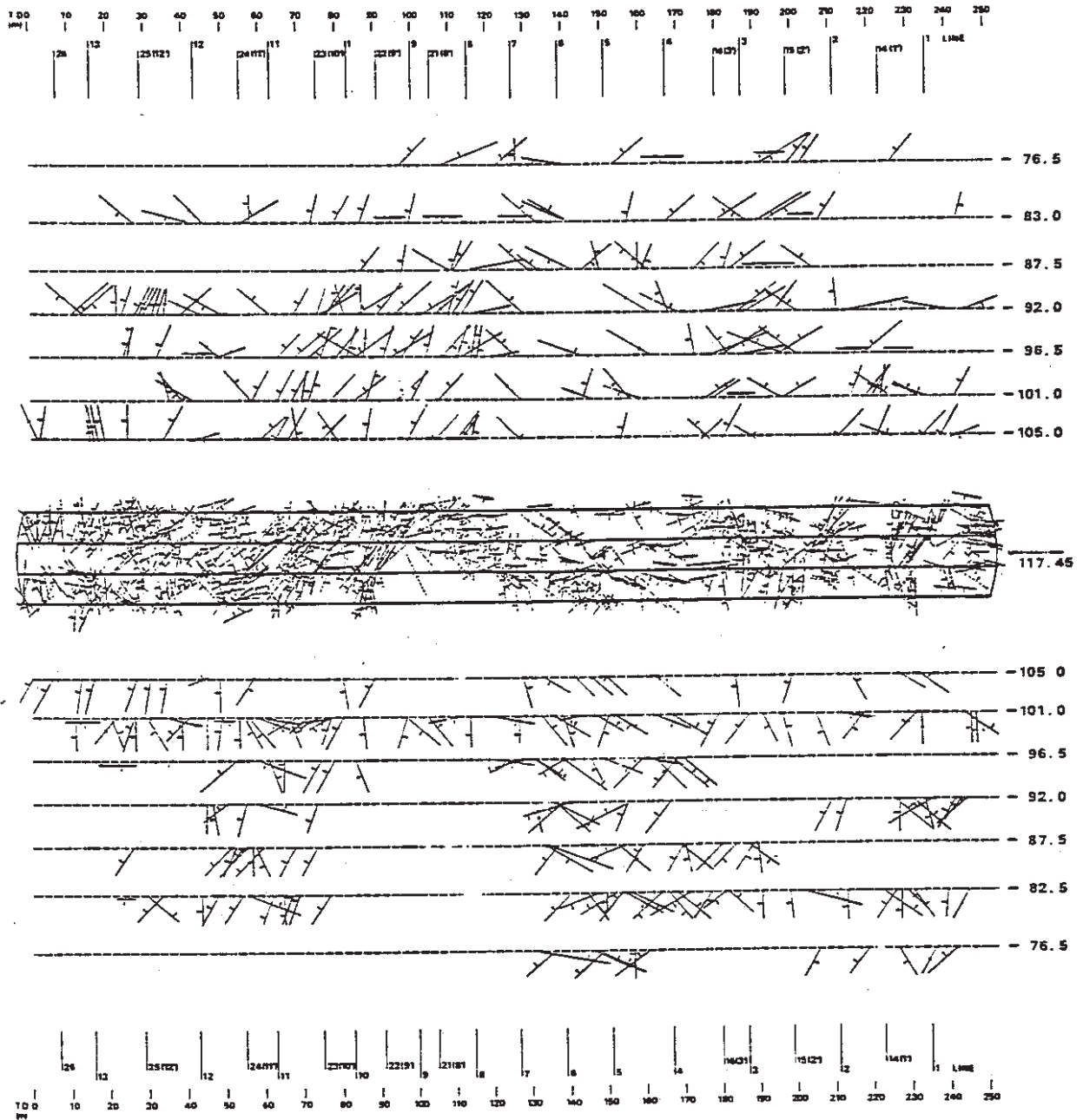


図3.3.20 目視観察による不連続面の分布

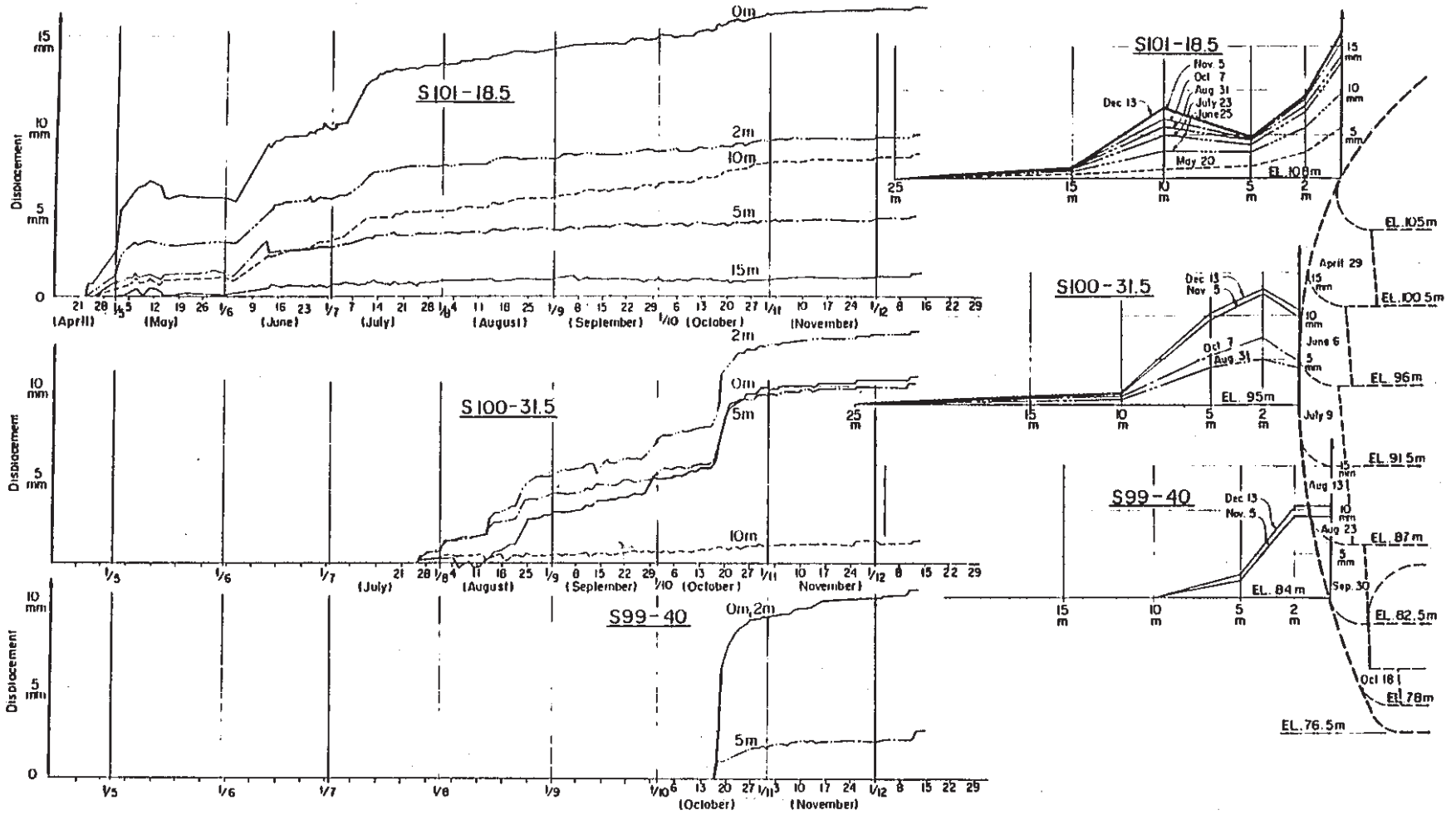


図3.3.21 計測岩盤変位の分布および経時変化(計測断面9)

参考文献

- 1) K.Kamemura, S.Husuni, T.Harada and Y.Shishido ; Construction of Underground Powerhouse Cavern-CIRATA Hydroelectric Power Project, ITA International Congress of Large Underground Openings, Firenze, Italy, June, 1986
- 2) K.Kamemura, N.Homma, K.Shibata, T.Harada and S.W.Soetomo ; Observational Method on Large Rock Cavern Excavation, International Symposium on Large Rock Caverns, Helsinki, Finland, August, 1986
- 3) N.Homma and K.Kamemura ; Observational Method on Large Underground Structures, International Symposium on Engineering in Complex Rock Formations, Beijing, China, November, 1986
- 4) 本間、亀村; 目視観察データに基づく岩盤評価手法、第18回岩盤力学に関するシンポジウム、土木学会、1986



### 3.3.4 保安・防災技術

#### (1) 概要

建設工事の中でも地下工事は、作業環境が悪く、安全性の面においても地山崩壊、湧水、ガス爆発、火災などの危険にさらされている。過去の労働災害総計をみるとトンネル工事の災害発生率、災害強度のいずれもが他部門に比べて著しく悪かった。

しかし、近年の施工技術の進歩、特に機械力の導入による省力化、工法の改良、開発などによって改造されつつあるが、それにもかかわらず他産業に比べてまだまだ高い災い災害率であり、一層の努力が必要である。

特に最近では、地下工事が大型化しており、災害を防止するには工事全体をシステムとして原因の分析を行い、要因相互の関連、災害の及ぼす影響などを解明して、総合的な安全対策を考える必要性がとらえられている。

このような考え方は、世界最長の青函トンネルの保安・防災対策としてとり入れられ、成果をあげている。

一方、今後の地下利用の深部化に対応するには、建設ロボット技術や情報化施工技術はもちろんのこと、システムとしての保安・防災技術の改良を一層活発に行わなければならない。

#### (2) 現状

##### 1) 労働災害の概況

建設業における労働災害は、他産業に比べて高く、また重大災害の発生も多い(図3.3.22参照)。

このうち、トンネル関係災害率の推移をみると年々減少の傾向にはあるが、建設業の中でも依然として高い(表3.3.6、3.3.7参照)。

死亡災害の原因をみてみると、建設機械による災害の減少が著しく、改善がみられるが、一時に大量の死傷者が発生するガス爆発災害、火災によるものや土砂崩壊・落盤による災害が上位を占めている。

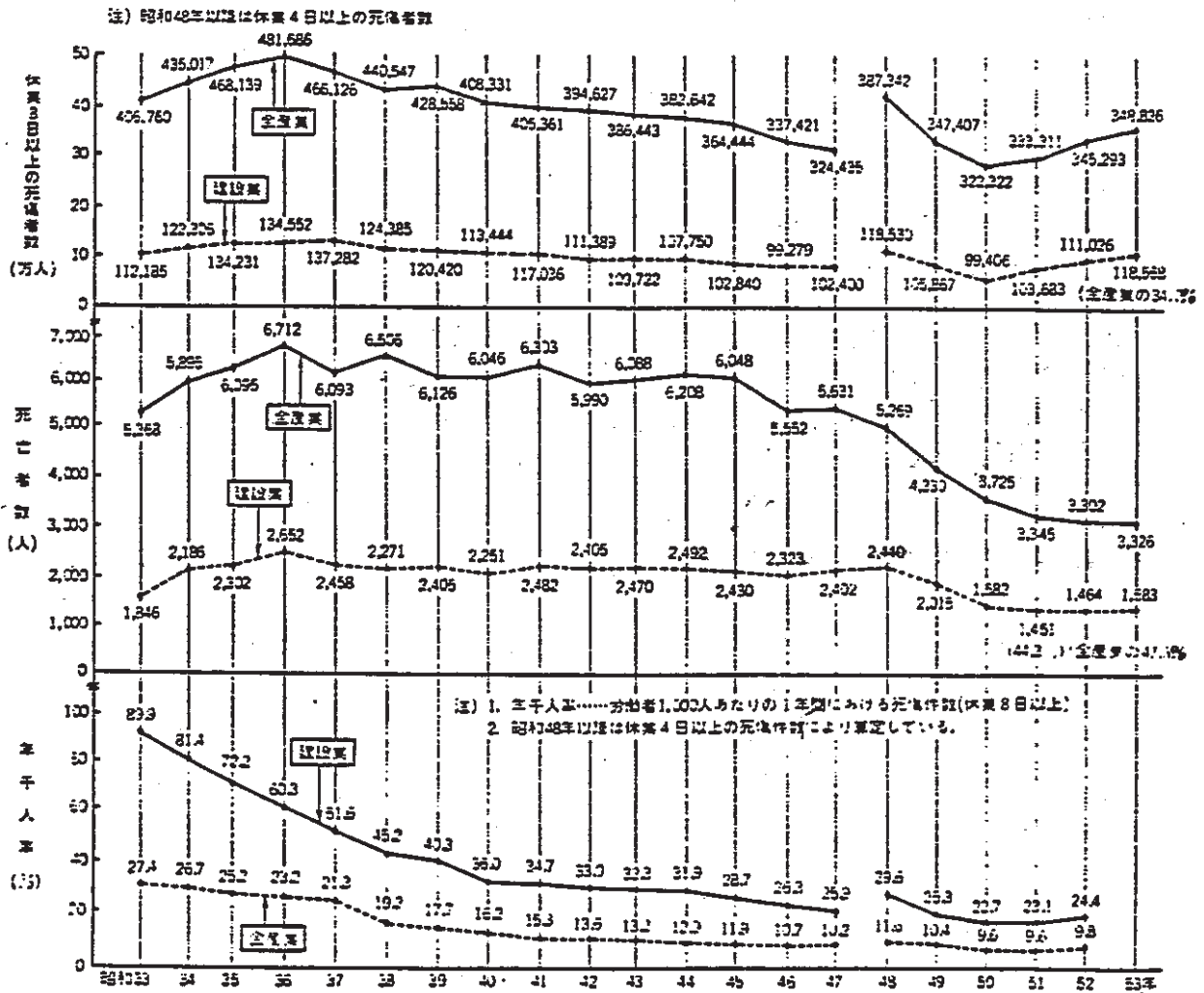


図3.3.22 労働災害発生状況の推移

表3.3.6 災害率の推移

	建設業 度数率・強度率		トンネル 新設事業		水力発電 施設等 新設事業		地下鉄 建設事業	
	41	15.53	3.45	24.33	3.21	24.71	12.47	20.14
42	13.93	2.76	33.67	14.41	15.71	6.14	43.78	0.49
43	19.86	3.10	43.01	5.41	12.85	5.22	23.60	13.29
44	15.61	3.47	32.26	7.25	12.64	8.61	21.03	5.35
45	15.44	3.56	26.29	2.24	13.19	7.54	10.01	2.81
46	15.50	2.85	32.12	13.26	17.40	4.26	11.44	0.89
47	14.14	3.62	36.28	9.28	17.32	4.88	9.57	2.90
48	14.22	2.86	27.68	5.87	18.19	6.08	12.15	4.02
49	12.34	2.89	25.48	5.33	11.93	4.28	14.41	9.45
50	8.22	1.80	16.15	5.23	10.53	3.37	9.57	3.22
51	5.96	2.26	11.95	5.61	5.26	0.87	6.23	2.38
52	7.63	0.97	14.26	1.62	8.07	2.11	5.26	2.66
53	8.43	1.28	16.82	2.47	6.46	3.53	5.39	2.85

出典：トンネルと地下1980年5月号

表3.3.7 トンネル工事における死亡災害の原因

	48	49	50	51	52	53	54	計(%)	
墜落による災害	6	8	3	2	7	4	4	34(7.7)	
飛来、落下、倒壊による災害	0	0	6	1	2	2	2	13(2.9)	
土砂崩壊・落盤による災害	34	24	15	9	13	4	15	114(25.6)	
クレーンなどによる災害	0	2	6	2	3	4	0	17(3.8)	
自動車などによる災害	10	10	4	1	6	4	3	38(8.5)	
建設機械などによる災害	44	32	25	10	5	11	8	135(30.3)	
感電による災害	2	3	0	1	0	0	0	6(1.3)	
爆発・火災などによる災害				5	13	2	12	19	51(11.5)
取扱運搬など災害				1	0	1	1	1	4(0.9)
その他の災害	18	7	2	1	0	2	3	33(7.4)	
合計	114	86	67	40	39	44	55	445(100)	

2) 青函トンネルにおける保安・防災技術

i) 異常出水対策

世界最長の海底トンネルを成功させるために、異常出水に対する防災強度を高めるとともに、設備能力を上回った出水に対しても水没区間ができるだけ少なくなるような対策がとられている。特に災害発生に対して一時対策だけでなく、二次、三次の対策がなされていることが注目され、今後の地下工事において取り入れられなければならない。

ii) 坑内火災対策

海底部工事は、長大で複雑な坑道内に作業箇所が散在していることから、特に火災対策に対して十分な配慮がなされている。

ここでは坑道換気方式を採用していることもあって、火災発生の際の影響が著しく大きくなることが考えられるため、地下街や高層ビルにおける火災対策設備に相当するシステムが採用されている(図3.3.24参照)。

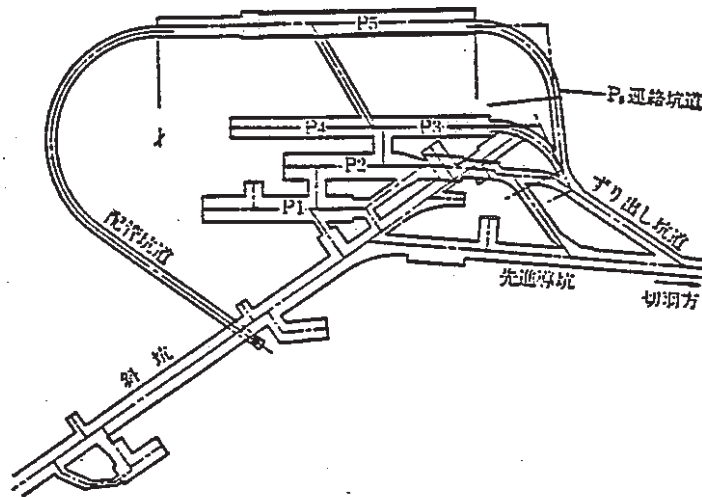


図3.3.23 本州側のポンプ室位置平面図

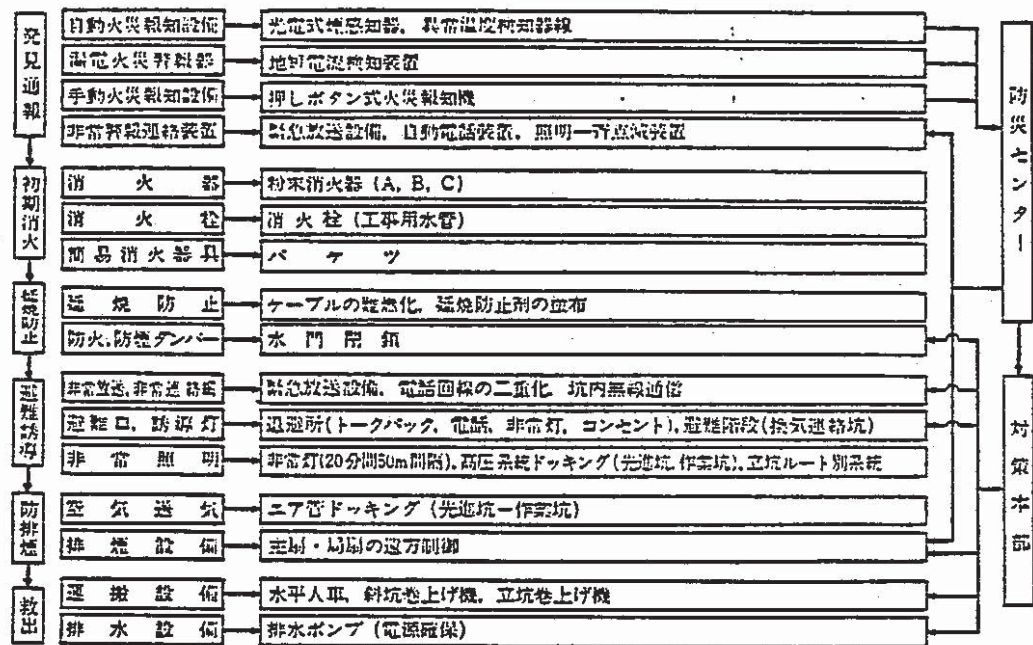


図3.3.24 坑内火災対策システム

出典:土木学会誌1983年2月号

### 3) 今後の課題

トンネルの長大化、立坑の大深度化などの要求に応えるために、機械設備の大型化、高速化が進められているが、これに伴い災害のポテンシャルも増大している。加えて、広範囲の地質、複雑化する工事条件に対応していかなければならない。

特に、地下空間利用を推進するための各種の施工技術が開発されるであろうが、これらと安全技術とにギャップが生じないように常に安全技術の見直しを行っていかねばならないと考える。

これにはハード的な技術だけでなく、人間的特性を追求する人間工学的な面や総合的な安全対策を進めるためのシステム科学などのソフト的技術を開発しなければならない。

建設ロボット技術、崩壊の予知技術の発展に加えて、早急に解決しておかなければならない重要な技術である。

### 3.3.5 建設ロボット

#### (1) 概要

我が国において本格的な機械化施工が初めて行われたのは、佐久間ダム建設工事(1952年着工)である。

その後、国土復旧、高度経済成長を達成するために多くの社会資本整備が必要とされ、これに対応するための建設機械技術が欧米から導入され、さらに、我が国の地質に適するよう改良が加えられ、独自のものも開発された。これによって、地下発電所、鉄道トンネル、地下街などの工事において、省力化、工期短縮、コストダウンに大きな役割を果たした。

また、環境問題に対する認識の高まりに対応するために、低騒音・低振動の建設機械技術が開発され、特に地下空間の高密度利用が進んでいる都市施設の建設において活躍している。

一方、最近の地下利用における建設工事の傾向を見てみると、地下空間の大型化、大深度化の要求により高品質、高精度の施工技術への対応がせまられている。更に都市部においては、周囲からの制約が多く、工事条件は悪化する一方である。

このような問題のほかに、若年労働力の不足と労働者の高齢化の問題、多産業に比べて相変わらず高い労働災害率の問題、技術老働力の不足による生産性の低さの問題などがあり、地下空間利用を推進していくには、これらの諸問題に対処していかなければならない。

この対応策の一つとして、より高度な機械化施工による工事の自動化、無人化、ロボット化が本格的に推進されようとしている。

#### (2) 現状

現在における建設機械のロボット技術は、従来の施工機械の自動化の延長線上にあり、いわゆる製造業における産業用ロボットと比べて水準は低く、ロボットと言えない面があるが、最近開発されたものとして次のようなものがある。

##### 1) 水中作業用機械の無人化、自動化

本州四国連絡橋の海中橋脚基礎付近の海底地形や地盤の調査を目的に開発されたものであり、テレビカメラと超音波地形測量器を備え、海上から遠隔操作で調査を無人で安全に行うことができるようになった。

今後、水深の深い場所での沈埋トンネルの建設やパイプラインの埋設において利用が進められると思われるが、光の届かない海底や土砂の散乱のある水中においては、超音波技術の応用が期待される。

## 2) 自動吹付けロボット

吹付けコンクリート施工時の悪環境から作業員を解放することと、施工品質の向上を目的に開発されたもので、トンネル工事や発電所工事で多いに用いられている(図3.3.25参照)。

最近は特にNATMの普及によって吹付けコンクリートは主要な支保材として考えられており、迅速で高品質な施工を行う必要性からますます普及すると考えられる。

しかし、本機はあくまでも従来ノズルマンが行っていたノズル操作を自動遠隔操作化したものにすぎず、無人化などに向けて一層の改良が必要である。

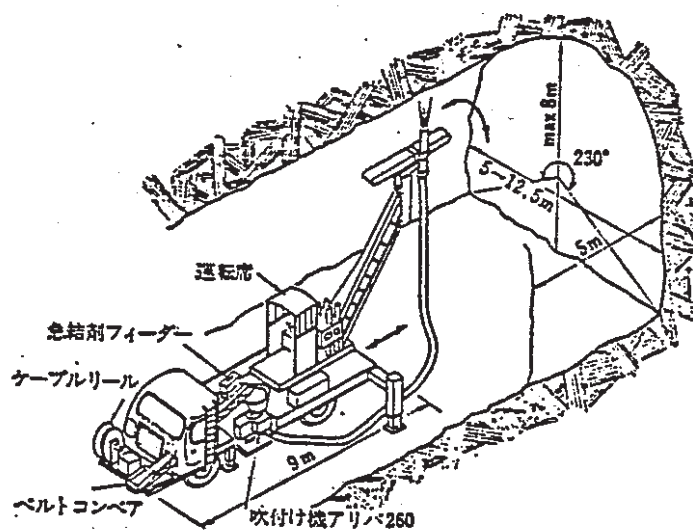


図3.3.25 自動吹付けロボット見取図

出典:土木学会誌1982年1月号

3) 小断面シールド機械の無人化、自動化

最近のシールド工法に対する要望の1つに、直径が1m前後の小断面シールドトンネル工法の開発がある。小断面シールドは、トンネル断面が小さいことから、人力による作業が困難であり、このために横坑の作業は無人化しなければならない。

この開発が電々公社によって行われており、通信用トンネルとして用いられている(表3.3.8および図3.3.26参照)。

本工法はシールド機で土砂の掘削を行い、後続に材としてヒューム管を連結し、立坑内に据付けられた押管装置等でヒューム管を前方へ前進させていくものである。

今後、掘進長の延長、曲線部の施工、広範囲の土質への適用が課題である。

表3.3.8設備増強一覧表(出典:土木学会誌1983年2月号)

項目	工区	当初設備	増強後の設備	備考
排水ポンプ	電 機	5 m <sup>3</sup> /min×10 台=50 m <sup>3</sup> /min	5 m <sup>3</sup> /min×10 台 12 m <sup>3</sup> /min×5 台 } 110 m <sup>3</sup> /min	12 m <sup>3</sup> /min ポンプは電機・言語共用可能
	管 路	5 m <sup>3</sup> /min×6 台=30 m <sup>3</sup> /min	5 m <sup>3</sup> /min×10 台 12 m <sup>3</sup> /min×4 台 } 98 m <sup>3</sup> /min	
配 管	電 機	φ300 mm×4 系列	φ300 mm×10 系列	通水能力 120 m <sup>3</sup> /min
	管 路	φ200 mm×1 系列 φ300 mm×3 系列	φ200 mm×1 系列 φ300 mm×9 系列	通水能力 116 m <sup>3</sup> /min
ポンプ室	電 機	P1, P2, P3: 10 台分	P1, P2, P3, P5: 18 台分	ポンプ予備 3 台分
	管 路	P1, P2: 10 台分	P1, P2, P3: 18 台分	ポンプ予備 4 台分
変 電 所	電 機	1万8000 kVA	2万3000 kVA	110 m <sup>3</sup> /min 排水時所要電力 1万2700 kVA
	管 路	1万3000 kVA	1万8000 kVA	98 m <sup>3</sup> /min 排水時所要電力 1万700 kVA
<del>非常用変電所</del>	電 機	7250 kVA	1万6875 kVA	
	管 路	5875 kVA	1万3875 kVA	
先導導坑石笠空溜	電 機	U形深 5 m <sup>3</sup> /min	コンクリート排水路 110 m <sup>3</sup> /min	先導導坑の施設強化を兼ねて逐次延長してゆく
	管 路	U形深 5 m <sup>3</sup> /min	コンクリート排水路 90 m <sup>3</sup> /min	
排水処理装置	電 機	20 m <sup>3</sup> /min×2 基=40 m <sup>3</sup> /min	20 m <sup>3</sup> /min×3 基=60 m <sup>3</sup> /min	PH 調整を硫酸ガス注入により行う
	管 路	5 m <sup>3</sup> /min×2 基=10 m <sup>3</sup> /min	5 m <sup>3</sup> /min×2 基 10 m <sup>3</sup> /min×2 基 } 30 m <sup>3</sup> /min	
非常用水門	電 機	—	先導導坑、作業坑、運送坑3か所	必要により逐次増設する
	管 路	—	先導導坑、作業坑、運送坑3か所	必要により逐次増設する
排水坑道	電 機	—	斜坑排水坑道 313 m	ポンプ揚程の低減
	管 路	—	先導導坑排水坑道 1131 m	排水路断面の確保



表3.3.9 M-1工法による施工例(出典:建設の機械化1982年3月号)

場 所	施工長	土 質	記 事
埼玉県川越市	112m	関東ローム, 砂れき	
茨城県郡珂郡大宮町	154m	砂れき (玉石混り)	国鉄水郡線下越
京都市南区	153m	砂, 粘土互層	国道1号線横断
宮城県仙台市	187m	凝灰石	

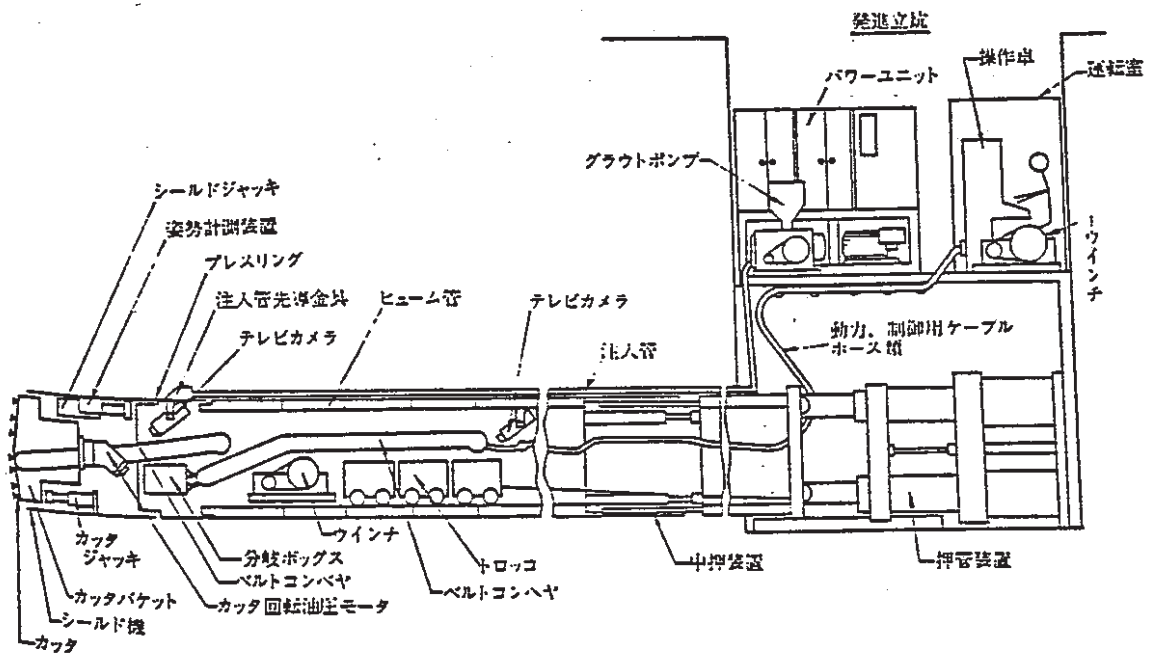


図3.3.26 M1工法システム構成

出典:建設の機械化1982年3月号

#### 4) 大深度地中連続壁用掘削機

従来の地中連続壁工法の精度では、50mを越す地下構造特の土留め、止水壁としての信頼性に欠ける。地下式 LNGタンクなどの貯蔵施設においては、敷地の有効利用等の利点から大深度化が必要であり、この建設を可能にするために高精度の 100m級大深度連続地中壁工法の開発が必要であった。

従来の方法では所定の精度が得られないために、掘削機に設置してある計器等からコンピューターによりフィードバック制御を行っている。東京電力(株)、東京ガス(株)の地下式 LNGタンクの建設や日本鉱業(株)水島製油所の地下式原油タンクの建設が生かされている。

今後、このような技術は深部立坑などの建設に不可欠であると思われるが、経済性、施工性の面でまだまだ改良すべき点もある。

#### 5) その他

その他、ブルドーザーのリモートコントロール化、自動削孔ロボットなどが開発されている。

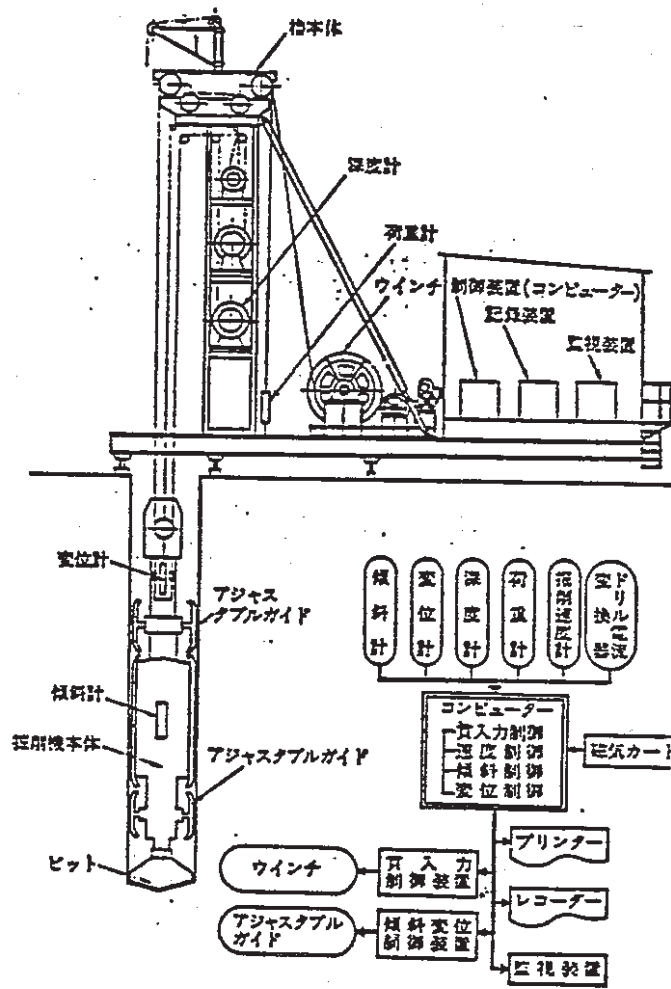


図3.3.27 地中壁自動掘削システム

出典：土木学会誌1982年1月号

### (3) 今後の課題

概要においても述べたが、今後の地下空間利用は、大型化、大深度化の方向にあり、これに対応できる建設機械技術の開発がますます必要である。

特に、建設ロボット技術には次のようなことが期待される。

#### 1) 作業環境の改善

大深度化に伴い高土圧、高水圧下における危険な作業環境が増える。安全性を確保するために、危険作業のロボット化が望まれる。

#### 2) 生産性の向上

技能労働者の減少や高齢化問題の発生に伴う生産性の低下やコストアップを防止するだけでなく、地下空間利用の経済性を向上させなければならない。

#### 3) 特殊工事

高熱トンネルや高レベル放射性廃棄物処理など、人間が近づくことの困難な工事においては建設ロボットが必要になる。当面、ロボット化が期待されている具体的なテーマをあげると、表3.3.5のようになる。

これらの技術開発にあたっては、近年発展の著しいエレクトロニクス技術に負うところが大きく、技術的な協力や共同開発体制が必要である。

表3.3.10 土木工事においてロボット化が期待されるテーマ

テ ィ マ	ロボット化の必要性	期待効果		
		安全	環境	省人・省力
鉄 筋 作 業	鉄筋工の減少と高効率化。	○		○
シールド工法セグメント組立て	ボルトの数が多く、挿入結付けに時間がかかる。	○	○	○
コンクリート吹付け	粉塵等による作業環境が悪い。	○	○	○
コンクリート解体	振動、粉塵、騒音等により作業環境が悪い。	○	○	○
NATMにおけるロックボルト打込み	ロックボルトの数が多く、打込みに時間がかかる。	○	○	○
トンネル無人掘削	災害発生率が高い。	○	○	○
トンネル火災自動装置	1孔ごとに手で検査するので時間がかかる。	○		○
グリーンカット清掃の自動化	多くの労務費がかかる。		○	○
重機の自動運転	組み合わせにより作業効率の低下、重大災害の発生率が高い。	○		○
ニューマチックケーソンの自動掘削	高圧気で作業環境が悪い。	○	○	○
大水深潜水作業	高圧気で作業環境が悪い。	○	○	
重機・車両の防墜	防墜員と重機車両との接触事故が多い。	○		○
トンネル工事列車の自動運転	事故の発生率高い。	○		○

## 4 地下長大構造物の保守管理技術の現況と問題点

### 4.1 概 要

ここで言う保守管理技術とは、地下空間利用施設のうち、主として生活施設・都市施設として利用する場合に、人間に居住ないし作業環境として必要な環境制御技術である。

すなわち、生産施設・貯蔵施設・輸送施設あるいは防災施設の機能確保のための運用技術については、それぞれの施設機能を設定しないと、その運用技術についての問題点が検討できない。もっとも、これらの施設に関しても居住ないし作業環境としての運用技術は含まれている。

#### (1) 環境制御技術の分類と検討項目

表4.1.1に示すように、人間が地上の施設で生活する場合に必要な環境制御要素は、地下空間利用施設においても必要となるが、特に地下空間利用に伴い検討を要する項目(表4.1.1で○印のある対応技術)について取り上げ、現状とその問題点・今後の展望について以下に述べる。

表4.1.1 地下空間利用に伴う環境制御要素

制 御 要 素	対 応 技 術	検 討 項 目	備 考
空間の温度・湿度	空気調和, 換気設備	○	
空気の清浄度			
空間の明るさ～光	採光・照明設備	○	
空間内発生騒音	—		建築的に対応
エネルギーのアクセス(電力・ガス)	電気設備, ガス設備		エネルギー供給事業者の対応
水の供給・処理	給排水衛生設備	○	
廃棄物の処理	—		
人・物のアクセス	搬送設備他		空間計画に既存技術を対応
情報の伝達	電気設備他		空間計画に既存技術を対応
災害時の安全(火災・侵水)	防災設備他	○	

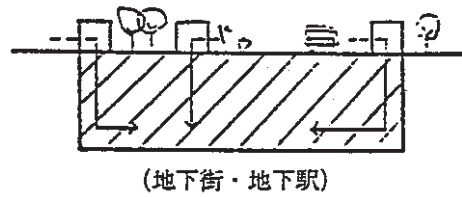
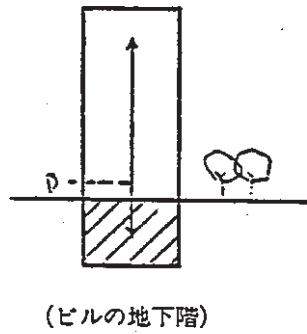
(2) 現状の把握・展望の内容

各検討項目ごとに次の4点に関して可能な範囲で述べる。

- ① 現状の対応技術(設備)を地下利用空間施設に適用した場合の問題点。
- ② 経済性・安全性・環境保全・法的規制についても可能な限り言及する。
- ③ 現状の地下利用空間施設における対応技術の適用例。
- ④ 各対応技術(設備)のあるべき姿と技術課題。

(3) 地下利用空間の概念

現 状



将 来

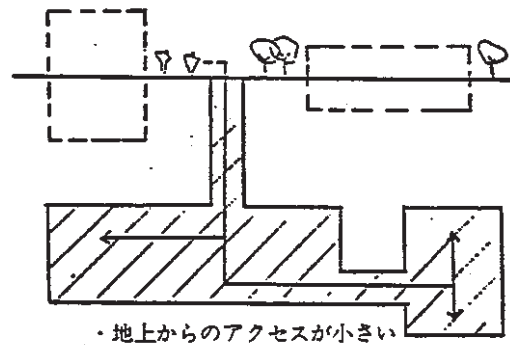
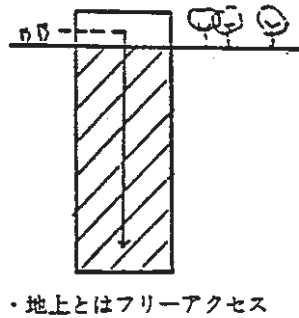


図4.1.1 地下空間利用の概念図

## 4.2 空気調和・換気設備

### (1) 地下空間空調計画の特殊性

地下の空間の温度、湿度、気流、空気清浄度の制御を目的とする空気調和・換気設備は、制御技術的には地上空間で現在用いられている技術がそのまま適用可能で、何ら変るところはない。しかしながら、計画にあたっては留意すべき特殊性がいくつかある。これらを列挙すると、

- ① 熱負荷的には内部負担が主で、年間を通じて外部負荷変動の影響は小さい。外部負荷は、取入れ外気の負荷を除外すると土壌の熱容量の影響下に形成される特異な熱性状を示すことから、これらを利用した省エネルギー設計が必要とされる。
- ② 多湿になる傾向があるため、湿度制御が重要である。
- ③ 空気が汚染しやすいので、必要換気量の設定、空気浄化設備が重要である。
- ④ 地上空間とフリーアクセスになっている場合、通過通風等自然換気の影響が大きい。
- ⑤ 地上部における冷却塔・給排気塔・煙突等の設置場所に工夫を要する。
- ⑥ ダクトスペースが極端に制約を受けるケースが多い。

等々である。

これらのほか、従来、地上空間でほとんど問題視されていなかった、放射性物質ラドン(Rn222)についての考慮も必要となる可能性がある。ラドンによる放射線の発生は、通常のコンクリート壁体やその他の建築材料においてもみられるが、特に土壌からの発生が多く、米国のデータによれば、コンクリートの50~100倍の発生量があるとされている。現在のところ人体への影響については不明な点が多いが、米国ではすでに社会問題となっており、地下空間に長期間にわたって滞在することを計画する場合には、何らかの対策を検討することも必要となってこよう。



## (2) 必要換気量と環境基準

地下空間における空気環境の質および、これを望ましい水準に保つための必要換気量は、その考え方、設定根拠が地上空間の場合と何ら変るところはない。したがって、現在一般建築物について定められている基準・推奨値がそのまま準用されることになると思われる。表4.2.1と4.2.2に屋内環境基準および必要換気量推奨値を示す。両表とも人間が居住ないし作業する空間を中心としているが、このほか、地下駐車場・地下交通施設(トンネル)に対してはそれぞれ現行の駐車場法施工令、自動車ターミナル構造設備令などが適用されることが考えられる。

また、地上空間との空気関係を極端に制限しなければならないような空間、例えばシェルターなどの場合、表4.2.2の必要換気量を遵守することはできず、空気の再循環率を高めなくてはならない。この場合は空気の再使用に伴って、炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)やその他の有害物質の除去および酸素の供給が必要となってくる。有害物質のうち粉塵(煙も含む)、臭気等については除塵フィルタ、活性炭フィルタの使用によって比較的容易に除去できるが、一酸化炭素(CO)、炭酸ガスの吸収あるいは無害化は容易ではなく、現状では必要換気量の外気導入に代わるものとして、高圧容器からの酸素放出などによるしか手段はない。

表4.2.1 屋内環境基準

<p>建築物における衛生的環境の確保に関する法律 (昭45.法20号)</p>	<p>労働安全衛生法 (昭47.法57号)</p>	<p>ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) 日本産業衛生学会</p>
<p><b>目的</b> 多数の者が使用し、又は利用する建築物の維持管理に關し、環境衛生上必要な事項を定める事により、その建築物における衛生的な環境の確保をはかり、もって公衆衛生の向上および増進に資する事を目的とする。</p> <p><b>特定建築物</b> 1. 興行場、百貨店、集金場、図書館、博物館、美術館又は遊技場 2. 店舗又は事務所 3. 学校教育法第一条に規定する学校以外の学校 4. 旅館 (延べ面積3000㎡以上、学校では2000㎡以上)</p> <p><b>建築物環境衛生管理基準</b> 中央管理方式の空調機設置で居室 ・浮遊粉じん 0.15mg/㎡以下 ・CO 10ppm以下 ・CO<sub>2</sub> 1000ppm以下 ・温度 17～28℃ ・湿度 40～70% ・気流 0.5m/sec以下 中央管理方式の機械換気設置(空気を浄化しその流量を調整して供給)も上記に準ずる</p>	<p><b>目的</b> 労働基準法と相まって、労働災害の防止のための危害防止基準の確立、責任体制の明確化および自主的活動の促進の措置を講ずる等その防止に關する総合的計画的対策を推進することにより職場における労働者の安全と健康を確保するとともに、快適な作業環境の形成を促進する事を目的とする。</p> <p><b>労働安全衛生規則</b> (昭47.労働省令32号) 第三編 衛生基準 第1章 有害な作業環境 ・坑内の作業場におけるCO<sub>2</sub> 15%以下 第2章 保護具等 第3章 気候及び換気 ・気候 10㎡/人以上 ・換気・開放部分(窓などが床面以上の2/3以上) ・気温が10℃以下では換気時 1m/sec以下 第4章 採光及び照明 第5章 温度及び湿度 ・坑内 37℃以下</p> <p><b>事務所衛生基準規則</b> (昭47.労働省令43号) 事務所(事務作業に従事する労働者が主として使用するもの)に適用する。事務所(これに附屬する食堂及び炊事場を除く)の衛生基準には労働安全衛生規則第三編の規定は適用しない。 第二章 事務室の環境管理 ・気候 4mをこえる高さにある空間を除き 10㎡/人以上 ・換気・窓その他の開口部 1/20 以上 ・室におけるCO 50ppm以下 CO<sub>2</sub> 5000ppm以下 ・温度・10℃以下は暖房 ・空調機や設置等による調整 中央管理方式で室に供給される空気 ・浮遊粉じん 0.15mg/㎡以下 ・CO 10ppm(外気汚染ひどい時は20ppm) ・CO<sub>2</sub> 1000ppm 以下 ・気位 0.5m/sec 以下 ・気温 17℃～28℃ ・湿度 40～70%</p> <p><b>職場快適基準検討結果報告(労働省-中央労働災害防止協会)</b> 1. 快適温度 湿度(非常に低い) 作業量(低い) 夏 24～27℃ 20～25℃(作業時) 冬 20～23℃ 18～20℃(暖房時) 湿度 50～60% 風速 0.5m/s以下 2. 空気の清浄度 CO<sub>2</sub> 1000ppm以下 CO 検出されない 浮遊粉じん 0.15mg/㎡以下 3. 必要換気量 気候 10～13㎡/人 必要換気量 30㎡/人/h</p>	<p>TLV (Threshold Limit Values) 許容濃度 作業環境空気中の汚染物質の濃度でその濃度に毎日くりかえし暴露されてもほとんどすべての労働者に健康への悪影響がみられないと考えられる濃度。 (しかし悪人の有害物質に対する感受性は個人ごとにより異なるため、少数ではあるけれどもTLVまたはそれ以下の有害物質によって不快感を生じたり、さらに少数ではあるが既往症の悪化がみられたり職業病にかかることもありうる) ・職場での労働者の健康被害を予防するための手引 ・物質の毒性の相対的比較、生活環境の大気汚染の許容濃度、労働者の疾病および身体条件の診断の根拠や検証等に利用したり、適用してはならない。 ・安全と危険との明らかな境界を示したものではない。</p> <p>TLV-TWA (Time Weighted Average Concentration) 1日8時間または週40時間の通常の労働時間中の時間加重平均濃度で、殆んど全ての労働者にその条件にくりかえし、暴露されても健康への悪影響はみられない濃度</p> <p>TLV-STEL (Short Term Exposure Limit) 15分以下の時間連続的に暴露されても ① 刺激を感じたり ② 慢性または非可逆的組織変化 ③ 麻痺作用によって事故をおこしやすくなったり自覚心が失われたり、作業能力の著しく低下したりする事のない最高濃度 (1日4回以内、暴露時間60分) その日のTWAをこえない事</p> <p>TLV-C (Ceiling) 瞬間的にでもこえてはならないもの ・粉じん 第1種 遊離性酸 30%以上 2mg/㎡ 第2種 30%未満 5mg/㎡ 第3種 その他 10mg/㎡ 石綿 5μm以上の石綿繊維で2繊維/㎡ (≒ 0.12mg/㎡) ・CO 50ppm ・CO<sub>2</sub> 5000ppm ・O<sub>3</sub> 0.1ppm ・NO<sub>2</sub> 5ppm ・SO<sub>2</sub> 5ppm</p>

表4.2.2 必要換気量推奨値

種別	No.	名称	衛生工程協会規程 (1939)				1人当り (m <sup>3</sup> /h-p)	その他の日本法規
			採面積当り(m <sup>2</sup> /h-m <sup>2</sup> ) (最小限)					
			第1種 換気法	第2種 甲 換気法	第3種 乙 換気法	備考		
住宅	1	居室	8	8	10		各種の室はその条件により次の4種の換気法が適用される。 1. 第1種 2. 第2種 3. 第3種 以上の第1種、第2種の場合外気量は 35(m <sup>3</sup> /h-p) 換し点換気室を するときは半減で きる。 3. 第3種 自然換気口△と換 気装置(甲)△が 成れば外気も導入し 得るもの 35(m <sup>3</sup> /h-p) (乙)△の面積に 外気も導入し得る もの 45(m <sup>3</sup> /h-p) 4. 第4種 自然換気口と換気 機(自然換気)	① 労働安全衛生規則 (昭 22) ② 改正居住安全条例 (昭 25) ③ 建築基準法 (昭 25) 換気は有効な部分 = 採面積の 1/20 以上 天井高さ 2.1m 以上 ①
	2	アパルト						
	3	ホールの換気						
	4	廊下						
事務所	5	事務室	10	10	12	事務用記憶 室を含む	面積 50m <sup>2</sup> 以上の場合 天井高 3m 以上 ②	
	6	所長室						
	7	副所長室						
	8	職員用室						
工場	9	作業部					天井高 4m 以下) 10m <sup>3</sup> /h 以上 30m <sup>3</sup> /h-p 以下の場合 採面積の 1/16 以上の室 (成程外気は 採換される) をとる ①	
	10	教室						
	11	実験室						
	12	演習室	12	12	15			
学校	13	アパルト					75 m <sup>3</sup> /h-m <sup>2</sup> 空室のとき 1/3 まで減じられる ② 採面積 300m <sup>2</sup> 以上のとき天井高 4m 以上 (換気換気の場合を除く) ③	
	14	小講堂	15	15	20	(天然光)		
	15	工場(一般)	15	15	20	(作業室)		
	16	特殊工場						
商業	17	娯楽・遊技場		10	10	採面積 15m <sup>2</sup> 以上	換気の種類と同じ。公衆堂等にも適用	
	18	車庫						
	19	手洗い室						
	20	浴室(浴室)						
公共	21	大講堂					換気の種類と同じ。公衆堂等にも適用	
	22	劇場						
	23	演習室	25	25	30	(小会議室、 小集会室)		
	24	談話室・ロビー	15	15	20	待合室、多層 階段を含む		
飲食	25	喫茶・カフェ	20	20	25		換気の種類と同じ。公衆堂等にも適用	
	26	カフェテリア						
	27	レストラン	25	25	30	調理用		
	28	野用	25	25	25	非調理用		
その他	29	別荘(住宅用)	60	60	75	富貴用女室 付室	換気の種類と同じ。公衆堂等にも適用	
	30	住宅用	35	35	45	非富貴用女 室付室		
	31	理髪店	12	12	15			
	32	浴場		30	30	一 般		
衛生	33	浴室		20	20	公 衆 用	換気の種類と同じ。公衆堂等にも適用	
	34	浴室		20	20	一 般		
	35	更衣室		20	20	公 衆 用		

### (3) 現状の地下空間空調計画例

現在までの地下構築物の例として、最も一般的なのは、ビルの地下階を除けば、地下街および地下駅である。

地下街は、地上空間における屋外に相当する部分(通路などの共用部分)と、通常の屋内空間を合わせもっているため、地下空間の将来像を考える場合にも比較的共通点が多い。したがって、この地下街に対する空調方式設定の考え方を述べ、更に地下駅については実際の空調・換気実施例を紹介する。

#### 1) 地下街の空調方式

地下街の空調方式決定に際して留意すべき事項は、

- ① 公共部分と店舗部分、物販店と飲食店など内部負荷量の多寡および日変動が相違する空間が混在するため、系統分けする必要がある。
- ② 店舗ごとに負荷変動パターンが異なるので、個別温度制御を可能とすることが必要である。

等々である。以下に空調方式の例を示す。

#### A. セントラル空調方式

特長: 設備費は一般に低廉であるがダクトサイズは大きくなり、また、個別室温制御が難しい。

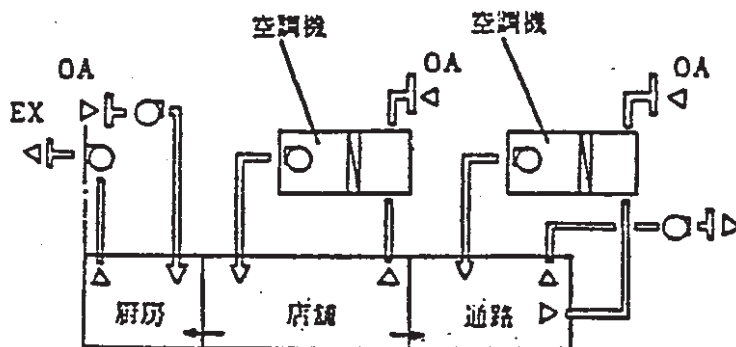


図4.2.1 セントラル空調方式の例

B. ファンコイル+空調機方式

特長: 個別室温制御が可能である。一方、空調機ゾーニングはAと同じであるため、同様に店舗ブロック内店舗間の空気混合が多くなる。すなわち脱臭などに注意が必要となる。

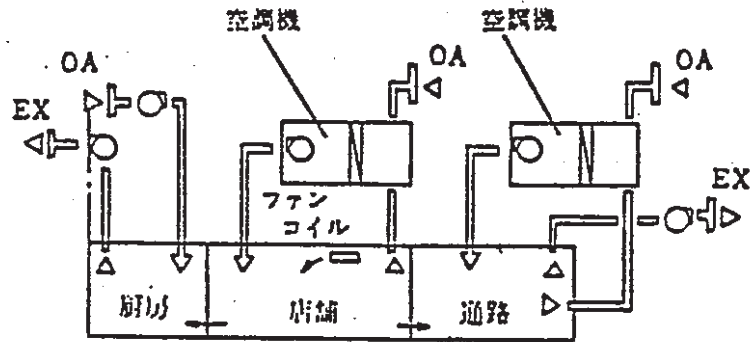


図4.2.2 ファンコイル+空調機方式の例

C. パッケージ+空調機方式

特長: 空調機ゾーニングの影響、個別室温制御についてはBと同じであるが、店舗内にパッケージ設置スペースが必要となる。

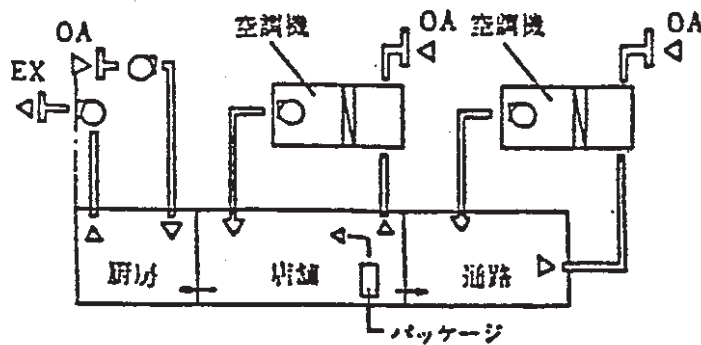


図4.2.3 パッケージ+空調機方式の例

上記A.B.Cの3方式は、現状の空調方式として最もポピュラーなものである。次に、地下駅空調計画の実例を紹介する。

2) 地下駅空調計画例

これは、新幹線上野駅の事例であるが、空調方式は前出のAおよびB(一部)を併用している。地下駅の空調計画上特異な点は、列車の出入に伴う列車風換気である。

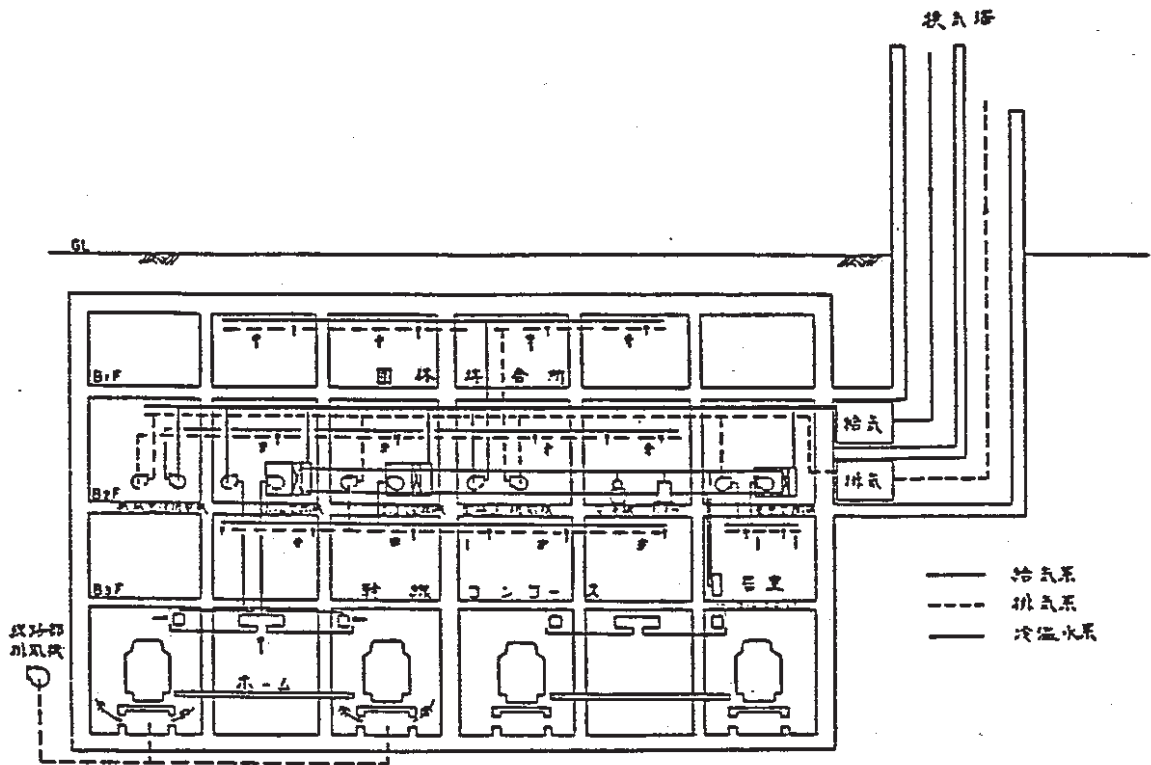


図4.2.4 地下駅空調計画の例

(4) 今後の課題

地下空間の特殊性を考慮した上、現状の問題点を解決するための検討課題を列挙すると以下のとおりである。

① 新しい換気方式の開発

地熱利用給気方式など周囲の土壤に囲まれている点を利用した、新しい換気方式の開発が必要である。

② 熱・空気・湿気環境解析技術の開発

地下空間のこれら環境に対する特性が地上とは異なるという認識で、予測のための計算体系、すなわち空気調和・換気装置の設備容量の決定を可能にする解析技術を完成する必要がある。

③ 地下空間用設備機器システムの開発

地下空間の特質から考えて、ヒートポンプを中心に据えて、暖房・冷房・除湿・ぜん換交換・排気・一般換気・自然エネルギー利用等の諸機能を配置した設備システムが考えられる。

④ 地下大空間の空調方式

現状の地下街・地下駅等にみられるような比較的天井高の低い空間でなく、地中に都市を実現するような規模を考えたとき、このような大空間に対する空調には、温度分布、気流分布の構成等に極めて難しい問題が発生すると考えられる。

⑤ ラドン等放射性物質への対策

土壌中からはラドンの発生が多いことを既に述べたが、その現状把握は必ずしも十分ではなく、また生体影響についても不明な点が多い。今後はこれらの性状を明らかにするとともに、必要な対策とその効果についても研究を進めておく必要がある。

⑥ 空気の再使用に伴う諸問題の解決

空気を繰返し循環して使用することが必要となる場合、有害物質を除去せねばならないが、現段階では一酸化炭素、炭酸ガス等の気体状物質の処理が困難であるなど、難しい問題が多い。将来の課題として、地下空間内での空気使用のクローズドシステムが確立すれば、新鮮外気導入に制約がある場合に極めて有用であり、地下空間利用の可能性を飛躍的に高めるものとなるだろう。



### 4.3 給排水・衛生設備

#### (1) 現状技術の地下空間への利用

地下空間は、地上と結びついている形態とクローズドシステムになっている形態の2つに分かれる。

地下空間が地上と結びついている形態としては、主に建物の地下室、地下道、地下街などがあげられる。これらは100mまでの深さはないが給排水・衛生設備の観点から見た場合、基本的に100mの深さの地下空間も同じものと言える。

そこで一般の建物の地下等について考えてみると、水のフローとしては図4.3.1に示すようになる。

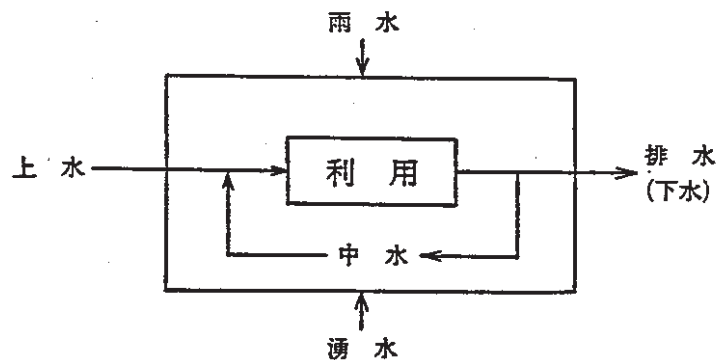


図4.3.1 一般建物の地下の水のフロー

ここにおける水の流れは、上水としては受水槽または水道本管からの直結給水や地上建物の高置水槽からの給水がなされている。排水としては地上階又は地下において利用された水が流下式により雑排水槽・汚水槽等に貯えられ、最終的にポンプによって地上へ排出される。この上水から排水への途中のプロセスとして中水が導入される場合には、中水処理施設および中水給水装置(ポンプ等)が必要となる。その他のものとして、湧水、雨水の侵入および火災時のスプリンクラーからの放水後の水の排出があるが、これらは排水の場合と同様にポンプによって地上へ導入することになる。このように述べた方法について、地上空間利用と地下空間利用での違いを表4.3.1に示す。

表4.3.1 対照表

	地 上	地 下
上 水	1. ポンプ揚水による高置タンク方式 2. 水道直結方式 3. 圧力タンク方式	1. 水道直結方式 2. タンクからの動式給水方式
中 水	1. 水処理施設 2. ポンプ揚水による高置タンク方式 3. 圧力タンク方式	←
排 水 (雑排水、汚 水)	1. 流下式で地上で放流	1. 流下式で槽に収集してポンプ排水
雨 水	1. 地上で放流	1. 流下式で槽に収集してポンプ排水
湧 水	1. 湧水槽に貯めてポンプ排水	←
そ の 他 の 水 (スプリンクラー)	1. 流下式で地上で放流	1. 水槽に集めてポンプ排水

この表により、地上空間では重力式とポンプ方式による利用形態が逆転している。また、表に示した地下空間に対する方式は、既存建物の地下室等においてすでに行われていることであり、地上空間と結びついている地下空間に対しては、現状の給排水衛生設備で充分対応が可能である。ただし、地上空間に比べて地下空間では、水を地上あるいは地中から引き入れ、それを利用し、その後の利用価値が無くなったあとには地上までポンプによって排水しなければならない。また全ての排水を一系統で行うことは、メンテナンス上からも衛生的に考えても避けるべきであり、複数の系統で行うべきである。

この排水を排出する方法としては土壌浸透があるが、量的にも地下空間の周囲環境を考慮した場合、期待は薄いものである。

地下空間も一般の建築物と同様に建築基準法、消防法およびその用途に応じた関係法令の適用を受けるものとする表4.3.2に示すようになる。

表4.3.2 消防法に基づく地下構造物の消防用設備等の設置基準

区 分	面積等	設置すべき消防用設備等
一般建築物の地階	該当する防火対象物の別 地階の床面積の合計 700m <sup>2</sup> 以上	連結散水設備*
	延べ面積150m <sup>2</sup> ** 以上700m <sup>2</sup> 未満	屋内消火栓設備
地 下 街	延べ面積700m <sup>2</sup> 以上1000m <sup>2</sup> 未満	屋内消火栓設備、連結散水設備*
	延べ面積1000m <sup>2</sup> 以上	スプリンクラー設備、連結送水管
地 下 駐 車 場	200m <sup>2</sup> 以上	水噴霧消火設備、泡消火設備、二酸化炭素消火設備、ハロゲン化物消火設備または粉末消火設備
電気室・ボイラー室	床面積200m <sup>2</sup> 以上	二酸化炭素消火設備、ハロゲン化物消火設備または粉末消火設備

\* 送水口を附置したスプリンクラー設備、水噴霧消火設備、泡消火設備、二酸化炭素消火設備、ハロゲン化物消火設備または粉末消火設備が基準通りに設置されている部分については不用。

\*\* 主要構造物が耐火構造で、壁および天井の仕上げを不燃材料、準不燃材料もしくは難燃材料とした場合には450m<sup>2</sup>。主要構造部を耐火構造としたその他の防火対象物または簡易火建築物で、壁および天井の仕上げを上記と同様にした場合には300m<sup>2</sup>。

## (2) 今後の課題

今後の課題としては、地上と地下が常に結びついている形態に対しては特に無いものと思われる。

一方、完全に地上との結びつきを少なくしたクローズドシステムについては、図4.3.2に示す水のフローがあり、その地下空間内で循環をすることになる。この場合には水を利用した後の雑排水または場合によっては汚水を処理して飲料水のレベルまで再生する技術が必要となる。

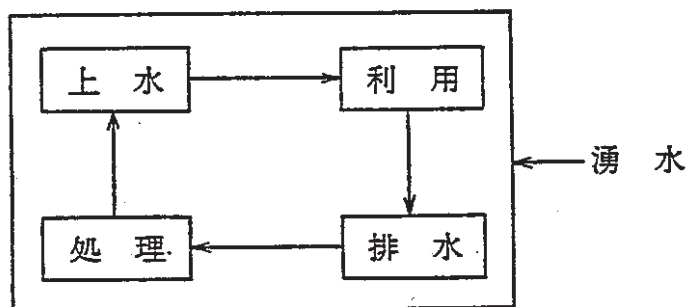


図4.3.2 地下空間内でのクローズドシステムの水のフロー

更に、水は使用回数が増加するたびに量が減じていくため、最終的には水不足の状態が生じてくることになる。このことは空気に関しても言えることでありもし完全に地上との連絡を断ってしまう場合には、水、空気、食料などを何らかの方法で手に入れる技術の開発が問題となるであろう。

## 4.4 採光・照明設備

### (1) 現状技術の概要

地下室利用のための照明設備は、現在の照明設備が夜間において、すなわち採光の全く無い場合において、対象とする室の所要照度を満足させることを前提として行われていることから、必要照度を確保する技術としては、それほど大きな変化は考えられない。

一方、昼間においては窓からの採光が室内環境に与える影響は非常に大きく、人工照明と自然照明(採光)の両者によって、室内の明視環境が形成されていると言える。

建築基準法においては、住宅の完全な地下居室を禁止することとともに、居室開口部の大きさを規定し、昼間の住居生活に必要な明るさを採光によって確保している。

現状の地下室採光は、地下室前面にドライエリアを設けたり、トップライトを設けたりする地上とのつながりを持った半地下タイプの構造によって、採光を得ようとしている。図4.4.1は現状の地下室採光方式の代表的な形態を示す。これらの方式は、地下室の用途や立地条件により決定されるが、いずれの方式も表4.4.1に示すような問題があると言える。

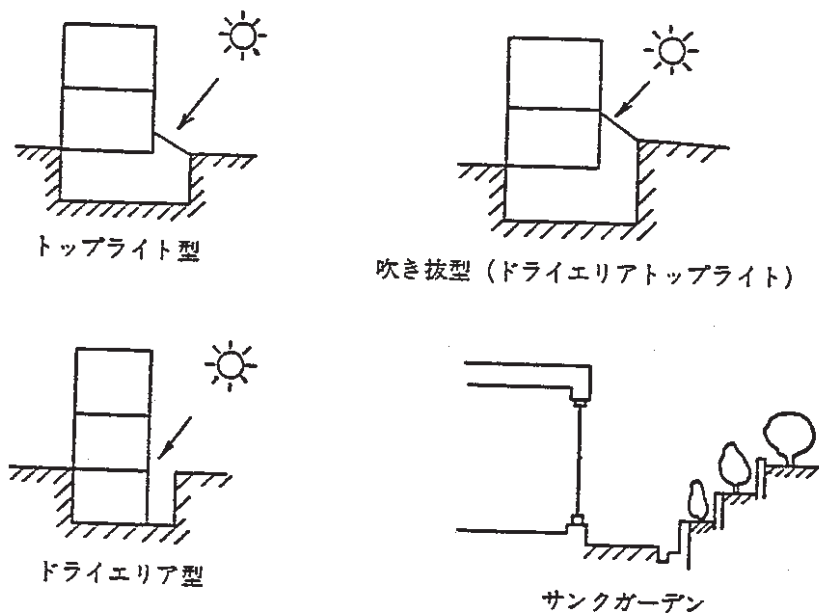


図4.4.1 現状の地下室採光方式の形態

表4.4.1. 地下室採光方式の問題点

問題点	問題の内容	採光方式
排水がしにくい	地下に排水がたまるため、ポンプ排水が必要で、設備費や維持費およびメンテ費が高い	ドライエリアやサンクガーデンタイプに発生
無駄な敷地がある	十分な採光を得るために、余分な敷地がある	すべての採光方式において発生
採光が不十分	開口部が地表面以下のレベルになるため、隣接建物障害物により日影になる	同上
安全上問題がある	地表面近く透明屋根材があるため破損しやすい	トップライト型や吹き抜け型に発生
漏水がある	屋根材のシーリング劣化によるトラブルが多発する	同上
工事費が高い	擁壁工事や廃土処理費が高い	ドライエリアやサンクガーデンタイプに発生
	地上階と地下階の平面計画が異なるため建築費が高い	トップライト型や吹き抜け型に発生

## (2) 採光・照明に要求される機能

地下室の用途、規模、構成等によって、利用の形態も種々様々である。したがって、採光・照明に対する要求は時間的にも空間的にも変化し、その水準も各種考えられるが、明視環境に対する量的質的要求機能をまとめると次のように考えられる。

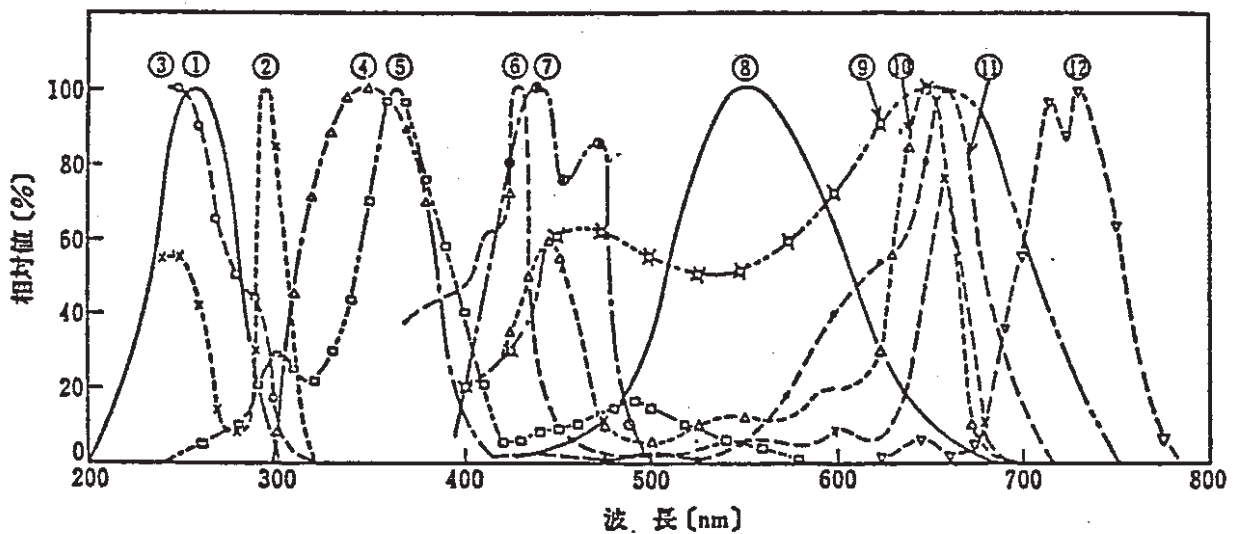
### 1) 量的要求

夜間における人工照明設備による、十分な照度が確保されなければならない。この照度レベルは、既存建物における建物種類、部屋別、作業別の照度基準を満足させるものである。人工照明におけるレベルは、その部屋の用途、使用目的によって設定されるものであり、どこに(地上か地下か)設置される部屋であるかは、それほどの意味は持たない。

## 2) 質的要求

照度レベルに対して、対象室における光の質的な性状に対する要求がある。たとえば、照度分布、光の方向性、色彩性等は質的要素として重要な役割を持つが、人工光と自然光とではその性格が大いに異なり、採光により量を確保することが質の確保への近道となることがある。また、採光の確保に伴い、必然的に満たされている要求には、窓からの眺望、開放感、視覚情報等がある。開口部が存在する場合には、その効果や意味の重要性に意識が働きにくい、地下利用に関しては、量的要求と同列に扱われるべき課題であろう。

昼光による照明環境は時刻や天候に応じて変化することを特色とし、居住の快適性・変化を与えるものである。したがって人工照明を主体とする照明環境を形成するには、その設備の調節性、多様性が要求されることになる。また図4.4.2に示すような生物と波長特性についても無視することができない場合もある。



① 殺菌作用, ② 紅斑作用 (Luckiesh), ③ 紅斑作用 (Everett), ④ 色素沈着, ⑤ 昆虫の視力, ⑥ 葉緑素 a の吸収特性, ⑦ 植物の霜光性, ⑧ 標準比視感度, ⑨ 光合成 (きゅうり), ⑩ 葉緑素合成, ⑪ 光形態形成, ⑫ 光形態形成の逆反応

図4.4.2 生物の利用している波長特性

### (3) 地下採光のための光伝送技術

太陽の光を地下に導入するために利用可能な技術としては、その伝送路の大きさ、効率を無視することはできない。採光のための光伝送方式としては、鏡面反射を利用するものと全反射を利用するものがあり、開発・実用化されようとしている。

#### 1) 採光ダクトによる採光

無窓の部屋に自然光をダクト内部の鏡面反射を利用して導入し、照明光源として利用する方式が提案され、実用化されている。この方式は、屋外の天空光(散乱光)を導入して室内光源として利用することを目的としているが、伝送路としては、直射光の伝送も受光部を変えることにより可能である。図4.4.3にその概念図を示す。

このシステムによる伝送効果は、ダクトの面積と長さによって異なる。図4.4.4に被照明で効率を示すが、ダクト面積が小さくなるほど、また長さが長くなるほど、採光効率が低下することがわかる。このシステムは光源として天空光を対象としている場合、比較的安定して伝送量が得られるが、被照明が大きくなるとダクト面積も大きくする必要がある。なお、この方式においては多重反射を利用するため、ダクト内表面の反射率を高くすることが重要である。したがって、表面材料の安定性、ほこり、汚れ等による反射率の低下などについて十分注意する必要がある。

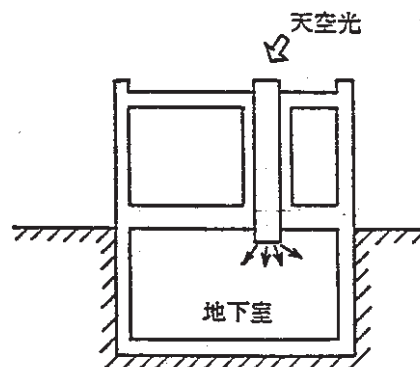


図4.4.3 採光ダクトによる採光システムの概念図



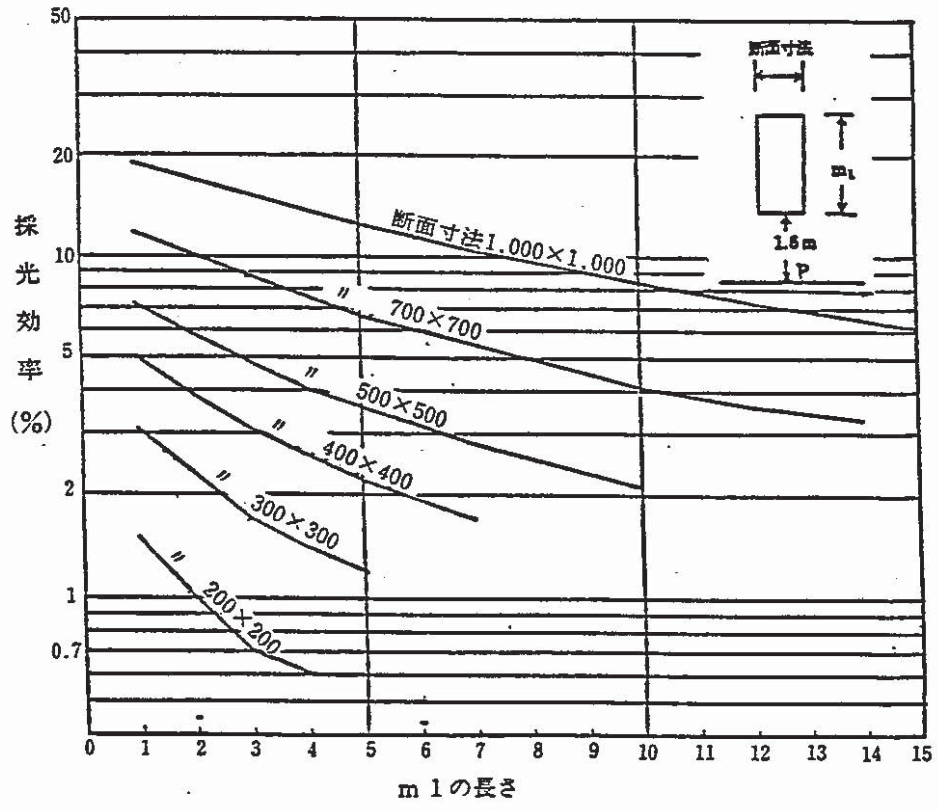


図4.4.4 採光ダクトシステムの効率(P点の照度基準)

## 2) 光ファイバーによる太陽光伝送

太陽直射光を集光して、光ファイバーにより伝送し、採光に利用するシステムである。

このシステムは、図4.4.5に概念図を示すように、光源部、光学系(集光)、伝送部(バンドル化した光ファイバーケーブル)、端末(出射部)から構成されている。また直射光を利用するため、太陽追跡用駆動部とそのための制御部を必要としている。

光ファイバー利用の採光用光伝送は、伝送路としての光ファイバーの有する柔軟性と低損失化により、地下のあらゆる場所に太陽光を導入することが可能である。一方、光ファイバーをバンドル化する必要性から、伝送効率もバンドル化した光ファイバーの断面積に対するコア部の面積によって支配される。したがって、コア比率の高い光ファイバーが必要となる。

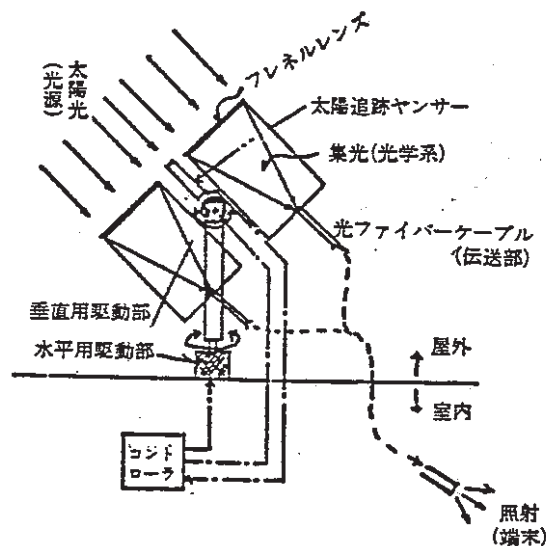


図4.4.5 光ファイバーによる採光システム概念図

このような光ファイバーを伝送路として採光は、直射光のみと集光して利用するため、入力が非常に不安定であり、人工光との併用が必要である。また、伝送路としては高密度のエネルギー伝送が可能であるが、現状の光ファイバーは高価であり、かなりのコストダウンが不可欠であろう。以下に伝送光の利用について分類する。

- ① 太陽光を地下に導入することに意義があり、供給の不安定さは大きな問題とならない場合(日光浴等)。
- ② 安全照明として、光源が対象場所と離れていることが望ましく、人工光も光ファイバーで送る場合(防爆等)。
- ③ 太陽の分光特性が重視される場合(演色性等)。

#### (4) 地下室における採光、照明の課題

地下室における採光、照明においては地下の大きさ、深さ等によって、また対象とする場所の用途、使い方等によって従来の建物の採光、照明と同等に扱うことが可能な場合もある。ここでは、地下空間の利用に関連して、解決すべき課題について述べる。

##### 1) 採光に関する課題

- ① 採光の意義の再確認 : 人工照明により補える場合と、自然光の生体への影響(生理、心理)等を考慮する必要がある場合との分類および、採光の重要度の確認。
- ② 採光方式の検討 : 光ダクト、光ファイバー等の光伝送路の伝送効率の向上と、それに伴う技術開発や従来方式の見直し、改良。

##### 2) 照明に関する課題

- ① 地下室照明のための照度基準、照度分布の検討。
- ② 自然光と同等の質を持った照明器具の開発。(採光に代替可能)
- ③ 非常用照明とその電源に関する検討。

##### 3) その他の課題

- ① 地下の明視環境における心理的研究

## 4.5 防災と災害時対策

本項では地下空間の防災のうち、特に火災を対象とし、地震、風水害などについては触れていない。

### (1) 地下空間における防火上の問題点の特異性

地下空間の防災上の問題点は、地上建築物のそれとかなり異なると思われる。以下に、それらの主なものを列挙する。

- ① 壁面の窓、扉などが無く、密閉度がかなり高いため火災時の熱が外部へ放出せず、長時間にわたりかなりの高温になる。
- ② 密閉空間のため給気が不十分で、火災は燻焼となる。不完全燃焼に伴い、多量の煙、ガスが発生し、開口部が少ないため短時間に充満し、この状態が長時間続く。したがってガスや酸欠による窒息死、中毒死の危険が極めて高い。地下空間の火災では、居住者は上方に避難しなければならない。これは、火災による熱や煙が蓄積する方向に人間が向わなければならないことを意味している。
- ③ 外部からの侵入路がかなり限られることと、これが熱、煙の通路となる可能性が高いため、消防活動が困難になる。
- ④ 密閉空間の火災では、暗黒の世界になる恐れがあり、これが居住者の心理面に作用し、パニック状態に陥りやすい。

### (2) 地下空間における防火計画上の問題点と課題

前記の特異性を踏まえて、地下空間の防火計画上特に重要と思われる問題を、地下街やトンネルの火災事例からの教訓を含めて考察してみると、概略以下のようなよう。

#### 1) 防 火

感知器、通報連絡設備などは高温のため、特に出火点付近において損焼すると考えられる。高温に耐えるための技術的対策と、損焼した場合のシステムとしての対応策の両面から考えて、感知器類の高信頼度設計をし、通報の確度をあげる必要がある。

消火設備について考えてみると、自動消火設備は冷却効果だけを持つ水噴霧設備だけでなく、消煙効果を併せ持つものが望ましい。また換気、排煙ダクトの消火および冷却方式を考慮しないと、高熱のため、その設備自体が火災になり、その結果本来の目的を果たし得ないことがある。

延焼防止、耐火設計の観点からは、密閉空間における燻焼火災の火の挙動を十分把握するためのデータの蓄積が望まれる。また、内装材の使用に当っては、その保温性との関連において、フラッシュオーバーに到るまでの時間に差を生じるなども考えられるので、十分な検討が必要である。

その他、防火区画のゾーニングの考え方、材料の防火、耐火性能などに関しても、地下空間火災の特異性の観点から再検討を必要としよう。

## 2) 防・排煙

地下空間の火災では、特に大量の煙とガスが充満し易く、これが熱気によって高まった圧力により限られた通路にかなりの勢いで流れ込むことが考えられる。防・排煙計画は、地下空間の防災対策上最も重要な問題の一つといえる。

密閉空間での防排煙計画を考える上で、まず、現象そのものを十分解明しておく必要がある。煙の挙動は火災室と他室の温度差、圧力差により生ずる空気の流れに支配される。この性状に関するデータを蓄積することは、防・排煙システムを計画する上で重要である。

次に、煙の流れを制御するための方法の一つとして圧力制御による排煙ゾーニングなどを考える場合、その効果予測を正確にするために、建物内部の構造、区画を気密化し、排煙効果の高い排煙口の有効な配置方法などについて検討する必要がある。また、多層階の場合、自然排煙方式がとれず、機械排煙設備では給気系統の確保が難しいとすれば、発生した煙をすべて吸引、排除することはせず、長時間煙の拡散を押え閉じ込めることを基本に考える方式などの検討も考えられる。

地下空間では、他に煙の逃げ場所がないため、全ての煙が地下空間内に充満するので、防煙区画はなるべく小さくし、他の区画へ移動し難いようにする必要がある。適正な区画の大きさを決める方法についても検討を要する。

その他、消防活動を容易にするための、鎮火後の重い、湿った煙の有効な除去方法、給気口と排煙口が同一レベル(例えば地表面付近など)であるための問題、機械排煙装置の信頼性の向上などに課題が残されていると考えられる。

### 3) 避 難

居住者の避難方向が熱、煙の蓄積される方向になるため、その分離方法、長期蓄煙スペースの確保、あるいは防煙、防ガスを考慮した退避所の完備など、避難計画の基本となる指針が必要となろう。

地下空間では、階段は歩行速度の低下と煙の侵入により安全なスペースとならないため、避難行動距離の算定法を再検討する必要がある。また、多層の場合、地上への避難には非常用エレベータを使わざるを得ない。エレベータロビーの加圧制御の検討、エレベータ自体の信頼性の検討を要する。

このほかに、地下空間では地上建物のように窓、扉、屋上、バルコニーなど、避難上有効な外部との接触スペースが無く、心理的にもパニック状態を起こし易いので、この面からも十分な対策をとることが望ましい。

### 4) 消化活動

地上との連絡通路が限られている上、それらが熱気と濃煙で充満し、消防隊員の侵入が不可能とならないように、その計画法を検討する必要がある。また、侵入後の活動を容易にするため、特に排煙設備は重要と思われる。これについては既述したとおりである。

### 5) その他

総合防災システムの一環として防火システムを位置付けることは、地上建築物に対する考え方と同じである。防災センターの位置は地上階が望ましく、地下に設ける場合、最悪の状態においてもその機能を発揮できるようにしておく。

地下空間の火災時には、暗黒の世界となる恐れが多い。非常時の照明、給・排気、加圧、エレベータ用の電源等が必要であるが、これには自家発電機のほか、即時に使用できるバッテリーなどの非常電源を設けておくことが望ましい。

(3) 法 規

地下空間の防災に関する法規としては、建築基準法、同施行令、建設省告示、消防法、同施行令などにその記述がある。これらは、過去多く地下街の防災計画を考える上でその防火区画、防・排煙区画および設備、その他について適用されてきている。しかし、これらはいずれも小規模で浅い構造物を対象と仕手おり、今後の大規模で深い地下空間の利用に当たっては、現行の法体系について抜本的な検討を必要とする。

## 5 今後の技術開発の展望

地下空間利用計画の基本理念は、地上の補助空間として利用することにある。すなわち、地下空間の利用にあたっては、地下空間施設の果すべき役割りを十分に認識して計画をすることが重要である。

地下空間利用計画にあたっての主な課題を具体的に列記すると次のようである。

### ① 整合性のとれた計画の推進

地下は、生活をより豊かにするための補助空間であるから、地上施設計画と十分に整合性のとれた計画でなければならない。また、国土利用計画などの上位計画との整合性や各省庁、地方自治体間等の計画との整合性をもたらすための調整が必要である。

### ② 長期的ビジョンに基づいた計画の推進

地下空間施設は、巨額の投資を必要とするだけでなく、その物理的寿命が長いために、社会的機能としてのライフサイクルも必然的に長くなり、50～100年に及ぶこともめずらしくない。さらに、そのシステムの変更や取り替えがきわめて困難であるため、国あるいは都市の長期計画ビジョンに基づいた計画的利用を行なうことが重要である。

### ③ 地下利用のメリットを数量化

地下利用計画の妥当性を評価するには、技術的側面、経済的側面、社会的側面の3側面からの検討が必要である。地上施設の社会的側面での評価が適切に行なわれなければ、特に公共的施設計画においては、地下利用が推進されないこととなる。

国民の価値観の多様化、相克化は一層この傾向を助長しているが、地下利用のメリットをいかに合理的に数量化し、説得力のある価値基準を提示できるかが、今後の課題である。

### ④ 多くの不確実性に対処する研究

プロジェクトの計画・設計・施工・管理の各段階においては必然的に多くの不確実性が存在する。自然科学を基礎とする土木工学や建築工学は、これまで多くの問題を理論解析値に基づく確定値問題として取り扱ってきた。このような不確実性を消滅させるための研究は、それが理論上可能であっても、膨大な費用と時間と労力が必要となるなどの困難を伴うことがある。また、理論的に解明されたといっても、実用面には不確実性による重大な問題を残すこともある得る。



したがって、現実のプロジェクト担当者にとっては、不確実性は存在するものとして、それを解明しようとする事よりは、それにいかに対処するかの技術の研究・開発が、もう一方で必要である。

地下空間の居住環境の運用、制御を考える上でこの観点から改めて地下空間をとらえると、図5.1および表5.1のようになる。特に特徴的な点は、密閉、上下動線の長さ、そしてそれからくる心理的不安であろう。前各節に述べられた事項は、これらの特徴に係わっているので、まとめの意味で各節の問題点、課題を表5.2に示す。

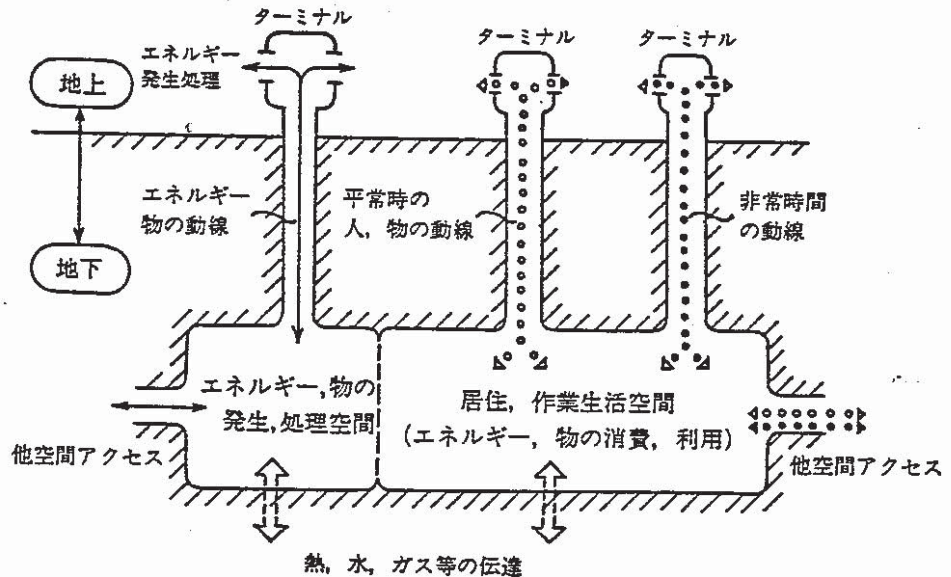


図5.1 環境制御から見た地下空間の概念

表5.1 環境制御技術と地下環境の特徴の関連

地下環境 の特徴 環境 制御技術	外 気 が な い	密 閉	高 温 安 定	多 湿 傾 向	土 質 多 様	土 中 の 環 境 の 伝 播 の 遅 さ	気 圧 増 加	上 下 に 長 い 動 線	不 安 心 理
空気調和, 換気	◎	○	○	○		○	○	○	
給排水, 衛生			○	○	○			○	
採光, 照明	○	○						○	○
防 災	○	◎						◎	◎

◎関連重要

○関連あり

表5.2 地下空間環境制御技術の問題点と課題

	問 題 点	今 後 の 課 題
空気調整・換気	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 内部空間負荷が主体</li> <li>2. 土との伝熱</li> <li>3. 水蒸気、ガスが溜りやすい</li> <li>4. 堅穴的ダクトはドラフトが大きい</li> <li>5. 地上の空調、換気設備の設置場所</li> <li>6. ラドン (Rn22.2) 放射線の可能性</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 地熱利用等土の特徴を生かした換気方式の開発</li> <li>2. 熱・空気、湿気環境解析技術の開発</li> <li>3. 地下空間用設備機器システムの開発</li> <li>4. 地下大空間空調方式の検討</li> <li>5. ラドン等放射性物質対策</li> <li>6. 空気再使用上の技術開発</li> </ol>
給排水衛生	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 排水は地上へ揚げる</li> <li>2. 排水の土壌浸透は不可</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 複数の排水系の開発</li> <li>2. クローズドシステムの場合の技術開発</li> <li>3. 従来技術で殆んど対応可能と考えられる</li> </ol>
採光・照明	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 自然採光には堅穴必要</li> <li>2. 堅穴のスペース確保困難</li> <li>3. 堅穴の水、雨仕舞</li> <li>4. 外部眺望、開放感が得られない</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 光のニーズに対して、自然か、人工かの区分けの明確化</li> <li>2. 自然採光技術としての光ダクト、光ファイバ技術の向上</li> <li>3. 自然光に代替できる人工光の開発</li> <li>4. 非常用照明</li> <li>5. 地下の明視環境における心理的研究</li> </ol>
防 災	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 火災性状が地上に比べ、高温、多煙、燃焼となる</li> <li>2. 酸欠、有毒ガス発生の危険性が高い</li> <li>3. 火、煙の移動と避難の方向が上方へ重なる</li> <li>4. 消防活動のアクセスが困難</li> <li>5. 暗黒世界でのパニック</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 火災、煙感知器、通報連絡器の耐高熱、高信頼性の確保</li> <li>2. 冷却、消煙効果兼備の消火設備の開発</li> <li>3. 換気、排煙、通信系統等の冷却、保護、信頼性の確保</li> <li>4. 密閉空間での燃焼火災の性状の解明</li> <li>5. 防火区画、ゾーニングの地下空間火災特性からの見直し</li> <li>6. 煙、ガスの挙動現象そのもののデータ蓄積</li> <li>7. 煙、ガスの流れの制御—封じ込め、透導等—方法の検討</li> <li>8. 適正な防火区画決定方法の検討</li> <li>9. 鎮火後の煙の除去方法</li> <li>10. 避難計画、基本指針が必要</li> <li>11. 避難行動特性の物理、心理面からの検討</li> <li>12. 避難用エレベータ、照明、給排気設備の信頼性の確保</li> </ol>

地下空間利用は追いつめられて地下へもぐる都市型、利用メリットのある傾斜地型、地下の良さを追及する積極型の三方向があるといわれるが、いずれの場合も基本的には既存の技術でほとんど対応可能であるが、上表の防災についての問題や課題との対応をふまえた上で、安全が最優先される。また、求められるニーズの質の見直し、地中という特徴を利用した技術、あるいは地中環境の特異性の解明とその対応技術の開発、さらには地中環境基準の設定検証などが進められるべきと考える。