

トンネル等における地下深部開発事例研究

昭和61年3月30日

北海道大学工学部助教授

石 島 洋 二



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)

目 次

第1章	既存深部空洞の事例調査	.....
1 . 1	既存空洞に関する調査について	.....
1 . 2	既存空洞としてのトンネルと調査内容	..
1 . 3	地下深部の状態	.....
	1章の文献	.....
第2章	調査を行った空洞	.....
	空洞検索カード	.....
第3章	深部開発に伴って遭遇する諸現象とその対策	.....
3 . 1	緒言	.....
3 . 2	湧水	.....
3 . 3	坑内気象	.....
3 . 4	ガス突出	.....
3 . 5	岩石異常破砕	.....
3 . 6	深部化に伴う空洞変形	.....
3 . 7	盤ぶくれ	.....
3 . 8	山はね	.....
3 . 9	坑内火災	.....
3 . 10	地下深部での地震動	.....
	3章の文献	.....
	おわりに	.....

トンネル等における 地下深部開発事例研究

1. 既存深部空洞の事例調査

1.1 既存空洞に関する調査について

高レベル放射性廃棄物の地層処分に関連して、地下深部の空洞の開発・保存に際して現れる諸現象と問題点の摘出をトンネル等を中心とした事例に基づいて調査するよう、動力炉・核燃料開発事業団より委託された。委託に際して取り交わされた調書の仕様を次に示す。

1. 件名

トンネル等における地下深部開発事例研究

2. 目的

高レベル廃棄物は当面地下深部に廃棄物を埋設する地層処分が有力とされており、また、最近では高レベル廃棄物の貯蔵の段階においても、地下深部の空洞を利用することが考えられている。そのためには地下深部に空洞を設け、その空洞をある期間健全に保持することが必要である。地下深部での過去の経験は鉱山やトンネルなどに数多く存するが、それらの事例は体系的にまとめられることなく、個々に対応しているのが現状である。

しかし、地下深部における空洞の建設及び維持においては、増大する地圧や地熱、高圧の地下水の存在など地下深部であるがゆえの問題が存在し、それらの問題は高レベル廃棄物の貯蔵や地層処分においても直面する問題になると考えられる。

そこで、まず、既存の地下深部の空洞開発において存在した問題点の調査を行う。

3. 範囲

- (1) 既存空洞の事例調査
- (2) 既存空洞に関する検索カードの作成
- (3) 地下深部開発における問題点の抽出
- (4) 報告書の作成

4. 内容

- (1) 既存空洞の事例調査

過去にわが国で建設された地下空洞のうち、地下（かぶり厚さ）500 m以上のものを選び、地質、掘削工法と時期、開削時の変化及び事故事例などを文献により調査する。なお、地下深部で発生すると予測される現象が典型的に現れた事例や、掘削時期が極めて古いもの、空洞容積が極めて大きいものに関しては、わが国に限らず、また、地下500 m以内であっても調査の対象とする。

- (2) 既存空洞に関する検索カードの作成

上記の調査の結果を、別添検索カードを用いて整理し、適当な分類を行う。

- (3) 地下深部開発における問題点の抽出

事例調査の結果から、地下深部開発における問題点を摘出し、その対応の現状と今後の課題を検討する。

(4) 報告書の作成

上記(1)、(2)、(3)を取りまとめて、報告書を作成する。

5. 委託者側実施責任者

動力炉・核燃料開発事業団

核燃料部 廃棄物対策室 室長 新谷貞夫

6. 特記事項

本仕様書に明記なき事項および本仕様書に記載された事項につき、疑義が生じた場合には、委託者側と協議し決定するものとする。

7. 報告書等一覧表

	部 数	提出期限	提出先	検査	備考
実施計画書	5	契約締結後速やかに	廃棄物対策室	○	要承認
月報	2	月始め	同上		
中間報告書	5	(別途協議)	同上		
成果報告書	10	昭和61年3月31日	業務部業務課	○	A4判タイプ印刷
成果概要	20	同上	廃棄物対策室	○	和文および英文
打合せ議事録等	3	打合せ後速やかに	同上		

1.2 既存空洞としてのトンネルと調査内容

調査の仕様書では、主として我が国に存在する500m以上のかぶりを持つトンネルを中心に調査するようになっている。しかし、一般に大きなかぶりを持つトンネルは山岳トンネルしかなく、それも局部的にかぶりが大きいだけの場合がほとんどである。したがって、この条件を満たすトンネル事例は多くはない。このような状況下にあるので、トンネルの調査だけでは、深部岩盤に現れる諸現象を網羅することがむずかしい。そこで、調査範囲を鉾山の立坑、坑道にまで広げ、一部は、採掘切羽も調査対象に含めた。

現在（昭和61年度）、高レベル放射性廃棄物の地層処分試験場として北海道・幌延が候補に上っている。こういった事情を勘案し、第三紀層の深部空洞で起こる事象の予測に寄与し得るように、今回は道内の第三紀層内の既存空洞を重点的に調査した。

調査結果は検索カードに整理し（2章）、これらの結果を基に現象とそれに伴う問題点を個別に整理した（3章）。

1.3 地下深部の状態

1.3.1 緒言

地下深部は地圧や温度が平衡状態を保っている。こういったところに立坑やトンネルを開さくすれば、空洞周囲はそれまで保たれていた状態が乱され、新しい状態へと移行する。この過程で種々の現象が現れるわけである。本研究の目的は、地下深部における空洞開さく時にどのような現象が現れ、それがどのような問題を誘起するのかを調査することにあるが、そのためには、地下深部がどのような状態になっているかを、まず、知る必要がある。そこで、事例調査に先立って、これについて概括することにする。なお、深部に存在する個々の状態の中で地圧と地温は普遍的に存在するが、地下水やガスは偏在することは言うまでもないであろう。

1.3.2 地圧

地圧はそれが発生する原因によって2つに区別される。一つは初期地圧（一次地圧、絶対地圧、地山応力などとも呼ばれる）といわれるもので、空洞の開さく以前にその岩盤内に存在していた応力である。この応力がすべての地圧現象の原因になることは明らかで、地下空洞の設計、現象解明に重要な基礎データとなる。

岩盤は種々の応力状態を保存し得る能力を持っているので、過去に受けたさまざまな応力履歴を多少とも貯えており、その場所の現時点における初期応力の正確な状態は実測する以外に知ることはできない。近年、各国で初期応力の測定法が開発され、それによる測定が試みられるにつれて、次第に地下内部の応力状態が明らかになりつつある。それによると、初期地圧の中で鉛直応力成分はほぼ例外なくかぶり圧に等しくなっており、深度と共に確実に増大する。

水平応力成分も一般には深度と共に増大するが、その大きさに関しては鉛直応力成分におけるような一定の法則が存在せず、地域毎に差異がある。地表下1 kmまでは水平方向の応力成分の方が鉛直成分を上回ることが多いが、もちろん、逆の場合もある（図1-1参照）。

炭鉱では、すなわち、夾炭層地域では、一般に、水平方向の成分の方が鉛直

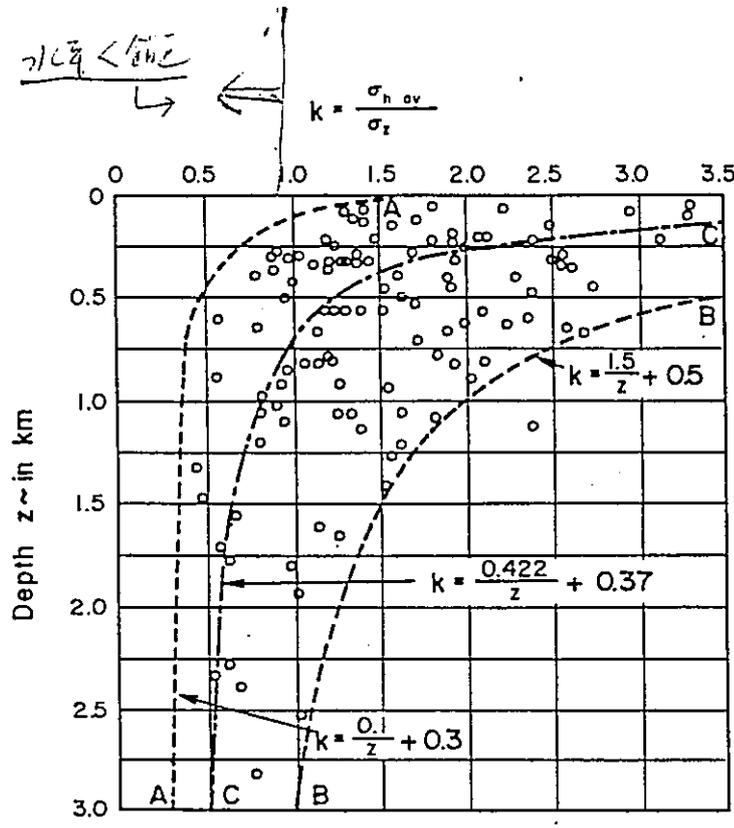
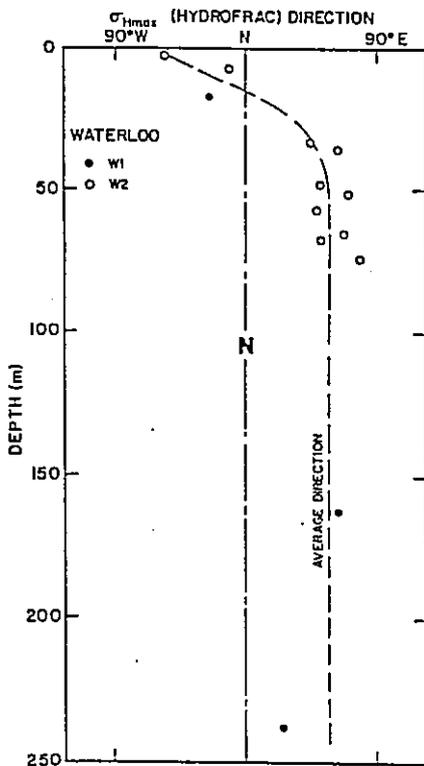


図1-1 初期地圧の水平応力成分と鉛直応力成分の比 (k) の深度分布

図1-2 初期地圧の最大水平応力成分の方向に関する深度分布



方向よりも小さい傾向になっているようである。また、現在最も深いと言われている南アの堆積鉱床型の金鉱山においても、深度4000mまでは同様の傾向を有している。

水平応力成分に関してはその最大値の方向が応用上、最も問題となる。しかし、これも1つの地域では一定というわけではなく、或る深度を境にして、その上下部では異なることもある(図1-2参照)。

我が国の場合、水平方向の応力成分に関しては全体的傾向として東西方向の応力成分が卓越しているが（図1-3参照）、これは、プレート運動を反映しているものと考えられる。

地下に空洞を開さくすると、その周辺の初期地圧応力場が乱されて新しい状態へと移行する。これに対応する応力場は二次地圧応力場と呼ばれる。この移行時に、岩盤の変形特性、強度特性によって山はねや盤ぶくれを含むさまざまな現象が現れるわけである。

1.3.3 地熱

地熱は一般に深くなるほど増大するが、その増加率は地域によりかなり異なる。北海道の幾つかの炭鉱で測定された地温増加率と地殻熱流量を表1-1に示した。羽幌炭鉱がやや高いのは、一般に、日本海側の値が大きい傾向を反映しているものと考えられる。

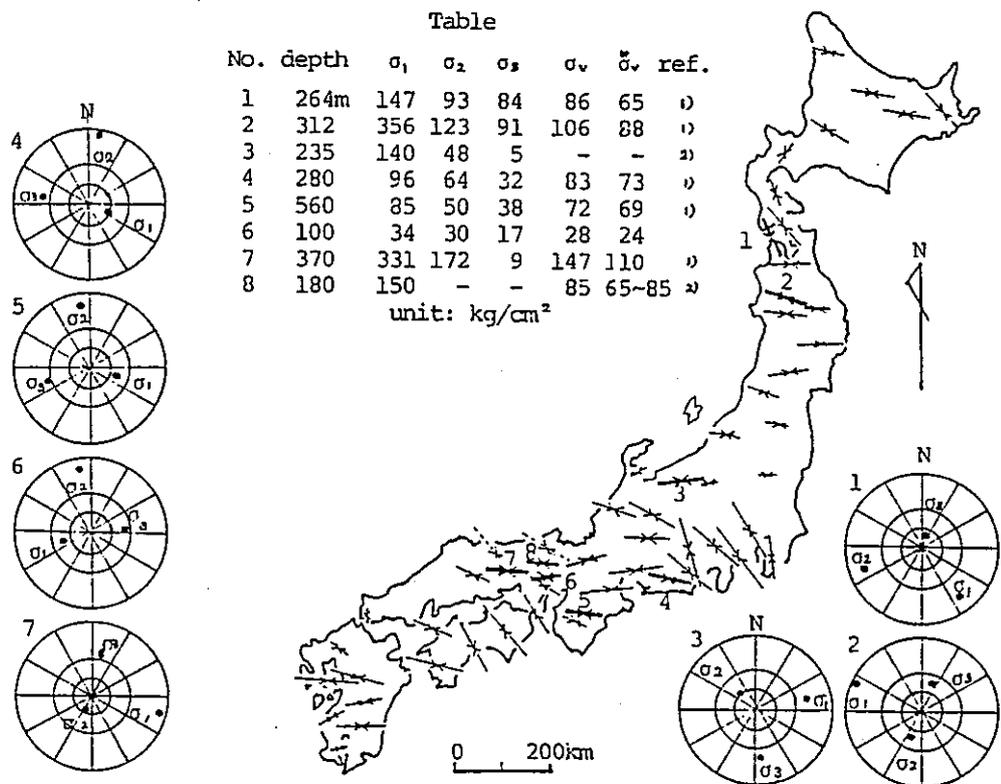


図1-3 日本列島の初期地圧状態（最大水平応力成分の分布）、岡による

表1-1 北海道の地熱状態

鉱山名	地温勾配 ℃/100m	熱伝率率10 ⁻⁴ cal/cm ² ·sec·℃	地殻熱流量 H.F.U
羽幌炭鉱	4.54	4.12	1.87
赤平炭鉱	2.49	4.31	1.07
芦別炭鉱	3.08	4.38	1.35
芦別炭鉱	3.81	3.74	1.42
芦別炭鉱	1.89	5.10	0.96
釧路炭鉱	2.32	3.62	0.84
新鉱	2.42	4.53	1.10
ペンケ2号坑	3.00	(4.53)	(1.35)
第1立坑	2.22	3.86	0.86
真谷地炭鉱			
豊羽鉱山(広域)	—		4.0
豊羽鉱山 付近		7.30	9.3~25.7
{ <ul style="list-style-type: none"> 北西部 南東部 最 平均 	10~20		
	20~30		
	50		
	23		

新=夕張新炭鉱, $1\text{HFU} = 10^{-6} \text{ cal/sec}\cdot\text{cm}^2$

堆積年代の若い裂か充填型鉱床は一般に地温が高い。その代表例は豊羽鉱山である(表1-1参照)。当鉱の場合、さらに、地表から岩盤中の割れ目に浸透し地熱により暖められた水が温泉水となって局部的に湧出し、坑内温度を一層高める原因になっている。

1.3.4 地下に存在する水

土木トンネルの施工においてはしばしば大湧水に達し、その量が70t/分に達する事例(青函トンネル)もある。その原因となる水は、たいていの場合、破碎帯に貯留されている。石灰岩地帯でも、しばしば大出水を起こす。これは石灰岩が地下水で侵食され、水路と空洞とが形成され、それらに大量の水が貯留されるためである。

しかし、トンネルからの湧水があると、これに伴ってその周辺の地下水位が低下することから、これらの水はいわゆる地表水であり雨水などにより涵養されていることがわかる。被圧水と呼ばれている場合の多くも地表水であると考えて差し支えない。

ところが、かぶりが500m以下では化石水に縫着することも多くなる。化石水とはその岩石の形成時に存在していた水が封じ込められ、そのまま保存さ

れているなど、年代が極めて古いものを言う。

北炭夕張新炭鉱において斜坑や立坑を開さくしたときに遭遇した含水層の事例を述べよう。ここでの地層断面図は図1-4のようになっており、幌内層、幾春別層、若鍋層中の砂岩層が含水層で、夕張層と幌加別層（これまでは古第三紀層）は水を含まず、それよりも下位の登川層函淵層（白亜紀）は再び含水層となっていることがわかっている。

塩素イオン濃度測定に基づく水質調査より（図1-5参照）、幌内層の上部は地表水であるが、若鍋層は化石水であることが明らかにされた。幌内層下部と幾春別層は地表水から化石水への過渡的状态になっている。したがって、当地区の水質分布は地表下300mより浅部が地表水、400~450mより深部が化石水になっているわけである。化石水は、たいていの場合、砂岩などの空隙の大きな地層中に空隙やき裂を充填する形で存在する。

水圧分布の事例について述べよう。夕張新炭鉱の立坑開さく時の調査では水圧（P）と深度（h）との間に極めて高い相関があり、

$$p = 0.1h - 3.8 \pm 1.5$$

p : 水圧 kgf/cm²

h : 深度 m

の関係が認められた。当鉱の場合、湧水の認められた最大深度は550mであ

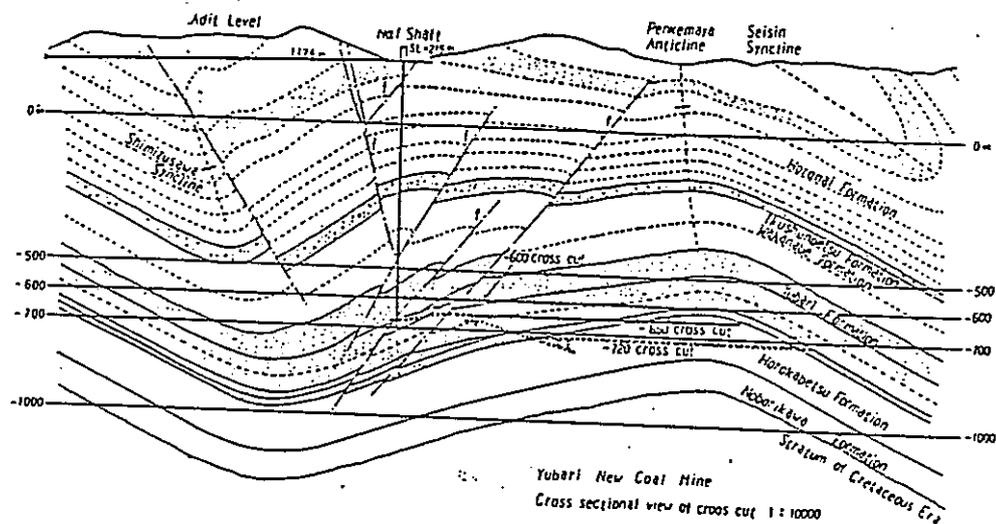


図1-4 夕張新炭鉱の地質断面

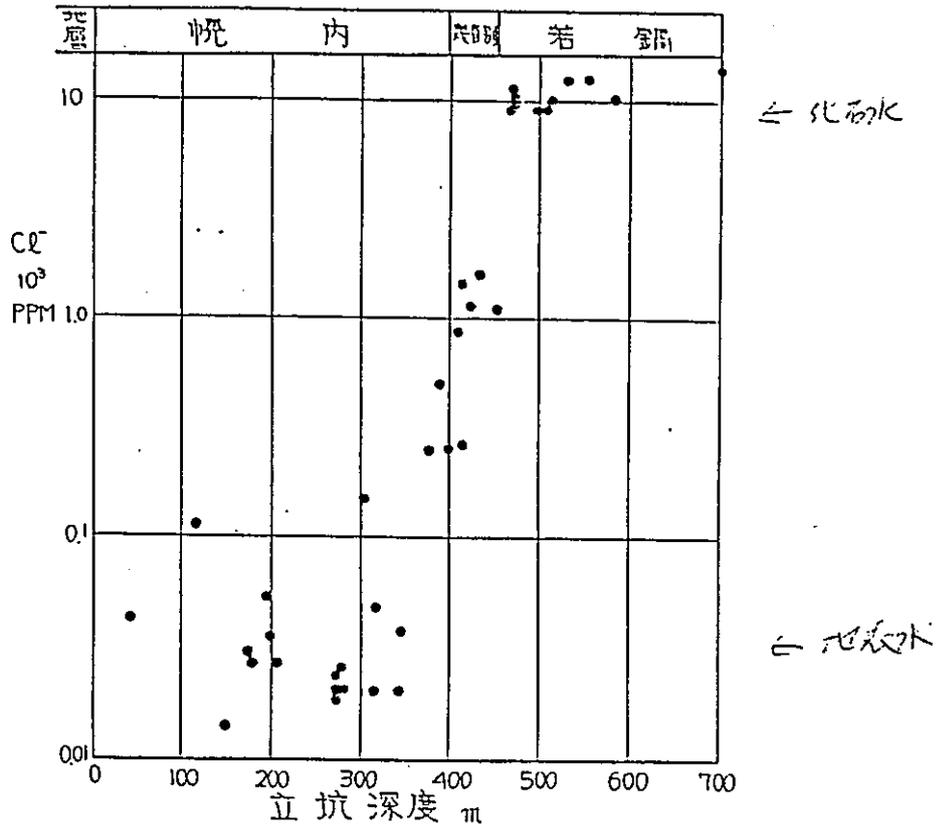


図1-5 地下水に含まれる塩素イオン濃度の深度分布
(夕張新炭鉱)

るから、約55 kgf/cm²の水圧を経験したわけである。上式において、数値の3.8は地下水位が地表下38mになっていることを意味している。

この例では、水圧分布が深度と共に静水圧的な増加を示したわけであるが、堆積層の間隙圧が異常高圧現象を示すことがある。異常高圧とは間隙圧がその地層の深度に相当する静水圧よりも大きい状態をいう。このような状態は明らかに地表水とは断絶していることを意味するわけで、この層中の水、ガス・石油の起源は地質年代的なものであることを示唆している。ルイジアナの油田帯では深度400~500mでもこのような異常高圧区域が存在している。

1.3.5 ガス

ガス突出を起すような大量のガスの起源はほとんどが生物であるといわれる。石炭層や岩塩はガス突出を起す代表的な地層である。ガスの主成分としてはメタンが多いが、炭酸ガスが卓越する場合もある。

ガス突出現象は 100~200m 以深で発生しており、深度が増すと共に発生頻度と規模は増える傾向にある。図1-6は石炭1トン当たりのガス湧出量の深さに伴う推移を示したものである。全体として、深くなるほど増加する傾向にあることが伺える。また、ガス圧も水圧と同様、深度と共に増大する。これらが深部でガス突出事故が多発する理由であると思われる。

炭層ガス突出の多い石狩炭田滝川地区、筑豊炭田田川地区などについては突出の起きやすい炭層が存在する。しかし、突出の少ない炭田や地区では突出が多い炭層を特定することはできない。炭層が累層をなしているときは、1番最初に手を付ける先行炭層がガス突出を起こしやすい。これは、先行炭層は採掘の擾乱をあまり受けておらずガス圧も高いためであろう。

厚い炭層や傾斜層では突出が起こりやすい。炭質的には水分・灰分が少なく炭化度の進んだ石炭の突出が多い。しかし、炭質が悪くてもぜい弱であったり、ガス量が多いと突出しやすいこともわかっている。

地質的には炭層が膨縮したり褶曲している箇所、含煤層（炭質頁岩）を持つ炭層での突出が多い。また、断層が5m以内に存在していた場合に多発してい

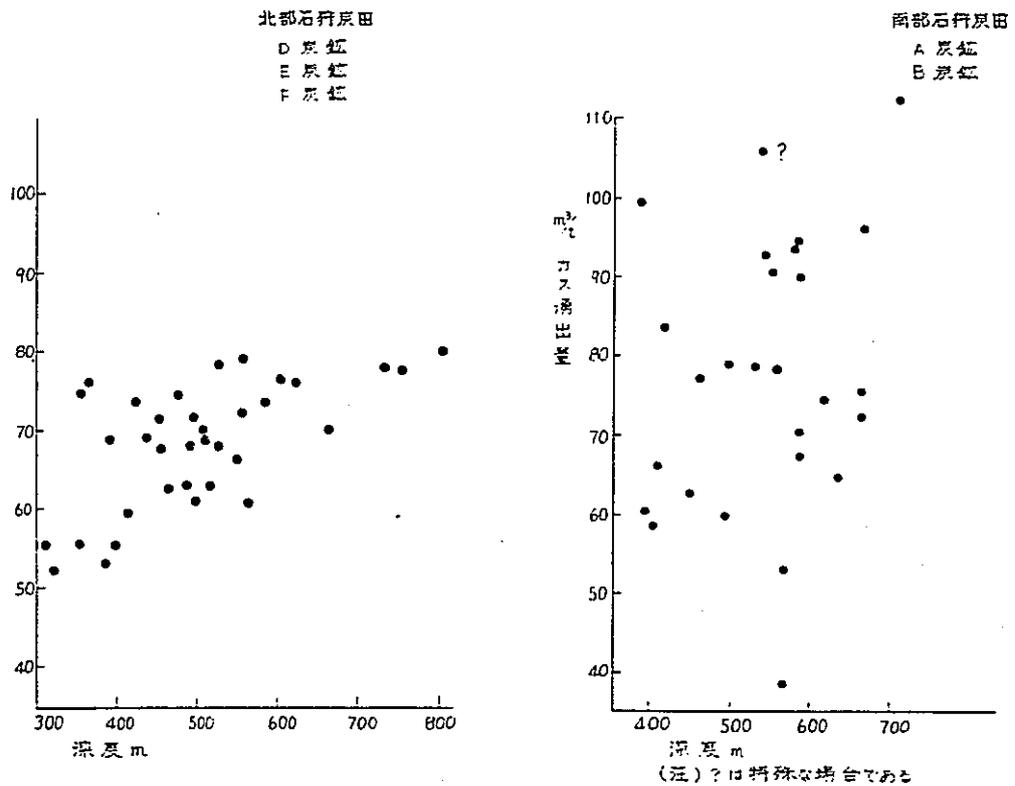


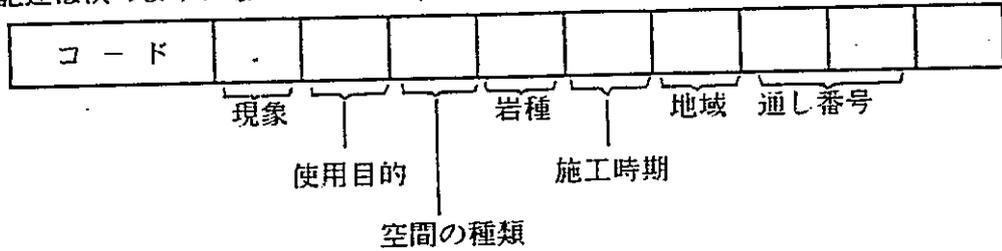
図1-6 ガス湧出量と採掘深度

る。要するに、地質的にもめているところで突出が起りやすいといえるだろう。

火山の近くの地層中には、これに関係したガスが含まれていることがある。特に、断層破砕帯があるところの中にガスが貯留されている可能性が高い。

2. 調査を行った空洞

調査対象は表2. 1に示す様に35例になるが、それぞれについて分類コードを付した。調査は現象に重点を置いたので、分類に際しても、どのような現象の事例を扱っているのかがわかり易いようにした。このため、分類コードの記述は次のようになっている（次頁のコード設定を参照）。



調査事例には調査仕様書に従い、図2-1に示す形式で調査結果を記したが、全ての項目が埋められたわけではないことを断っておく。

空洞検索カードのコード設定

1. コード設定の例

- 現象 ————— A : 湧水
 B : 温度、地熱
 C : ガス突出
 D : 異常破砕
 E : 盤ぶくれ
 F : 山はね
 G : 坑内火災
 H : 地震
- 使用目的 ——— 1 : 資源開発
 2 : 交通
 3 : その他
- 空洞の種類 ——— 1 : トンネル、坑道
 2 : 立坑、斜坑
 3 : 採掘空間
 4 : その他
- 岩種 ————— 1 : 堆積岩
 2 : 変成岩
 3 : 火成岩
 4 : その他
- 空洞施工時期 — 1 : 50年以前
 2 : 50年以内
- 地域 ————— 1 : 北海道
 2 : 東北
 3 : 関東
 4 : 北陸
 5 : 中部
 6 : 関西

- 7 : 中国
- 8 : 四国
- 9 : 九州
- 10 : アフリカ
- 11 : ヨーロッパ
- 12 : 北米
- 13 : その他

表 2. 1 調査対象空洞

- 1 大清水トンネル
- 2 関越トンネル
- 3 鍋立山トンネル
- 4 青函トンネル
- 5 中山トンネル四方木立坑
- 6 恵那山トンネル
- 7 新宇佐美トンネル
- 8 Tauernトンネル
- 9 Ariberg トンネル
- 10 Tarhela トンネル
- 11 Belledonneトンネル
- 12 Cioiosa トンネル
- 13 夕張新炭鉞第一立坑
- 14 夕張新炭鉞第一斜坑
- 15 夕張新炭鉞
- 16 平和第三立坑
- 17 幌内入気立坑
- 18 幌内炭鉞
- 19 南大夕張炭鉞
- 20 芦別炭鉞
- 21 朝日炭鉞
- 22 三池四山坑
- 23 奔別炭鉞
- 24 池島炭鉞
- 25 美唄炭鉞
- 26 歌志内炭鉞
- 27 豊羽鉞山
- 28 松峰鉞山

会館山

山の中へ入り
400m程まで
掘削済み。

会館

1600m程まで掘削済み

- 29 Champion Reef 鉞山
- 30 Kotredez 鉞山
- 31 Bakongy 山
- 32 Ibbenburen 炭鉞
- 33 Haus Aden 炭鉞
- 34 Radbod 炭鉞
- 35 Nordstern 炭鉞

コ ー ド	
名 称	
所 在 地	
使用目的	
施 工 者	
施工時期	
岩 種	
地下深度	
周辺の 地質	
空洞の 概要	規 模 支 保 現 状
既存 データ	岩 質 地下水 応 力
出典文献	
キ ー ワ ー ド	

図 2-1 空洞検索カード

3. 深部開発に伴って遭遇する諸現象とその対策

3.1 緒言

地層内では1章で述べたように、一般に深部ほど地圧や地温が増大するので、空洞の開さくはより困難性を増す。そして、深部においては特有の種々の現象が顕在化する。この章ではこれらの内で主なものについて概括を試みる。

3.2 湧水

3.2.1 湧水対策

地下深部で湧水がある場合には、湧水圧は大きいのが普通なので、その発生が予想されるときには十分な対策が必要である。まず、長孔先進ボーリングによって、掘進予定箇所の状態を正確に把握する。このとき、ボーリング装置には防噴装置を付け、高圧水の出現に対処しなければならない。また、深部の水は塩濃度が高く、水温も高いことが多いので、場合によってはその対策も必要であろう。

地下深部で取り得る湧水対策は2通りある。1つは水抜きである。湧水量がわずかであればこの工法を用いることができよう。しかし、深部では排水の揚程が大きいので、あまり大量の揚水は困難であろう。また、出水時に揚水能力を緊急に高めることも困難であろう。夕張新炭鉱の立坑開さく時に、坑口より401m下部で出水量が揚水能力を上回り、結局、切羽を放棄する事故が起こったのはその一例である。なお、このときには立坑内を湛水して湧水圧とのバランスを取り、次に、トレミー管を用いてセメントミルクを坑底に流し込みバルクヘッドを構築することに成功した。

大量の湧水が予想されるときには、先進グラウト工法が採用される。日本ではこの技術が進んでいるが、次に、この工法の事例を幾つか述べよう。

3.2.2 先進グラウト工法

青函トンネルにおいは、この技術が一つの作業サイクルとして施工中に組み入れられてからは工事が順調に進み、幾つかの大断層帯を無事突破し、貫通を見るに至った。図3-1はグラウトパターンを示したもので、セメントミルク

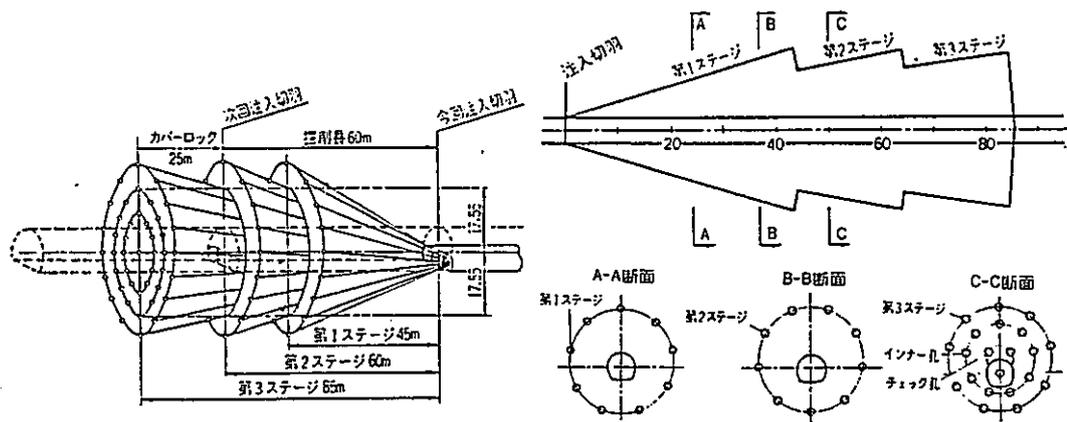


図3-1 グラウト注入の模式図（青函トンネル）

と水ガラスの混合液を最大80mの長孔を用いて数10kgf/cm²の圧力でトンネル掘進先方の岩盤中に圧入し、止水と岩盤固結化が計られている。

上越新幹線中山トンネル四方木立坑では湧水量2t/分が予想されたため、掘削に先立ち、立坑周辺に100m以上の注入孔を用い地盤注入を行った。その後掘削を開始したが、坑底で湧水があった場合には、そこで掘削を中止し、深さ30mの薬液注入を行って止水した。

夕張新鉱の第一立坑開さく時においては湧水が予想される場合、4～38本、長さ14～55mの注入孔を孔底より下向きに作孔し、セメントミルク注入を実施した。水圧は最大が55kgf/cm²と高圧であったので、孔の口元管の設置に注意し、この中にパッカーをかませて注入する方法を用いた。

3.3 坑内気象

3.3.1 深部空洞の気象環境

一般に地下空洞内の温度は地表よりも高いが、それに寄与する熱源としては次のものがある。

- (Ⅰ) 地熱や温泉
- (Ⅱ) 動力源からの発熱
- (Ⅲ) 鉱石や坑木の酸化熱

さて、これらの熱源の内、(Ⅰ)については1.3で述べた。(Ⅱ)の熱源については、機械で重装備された炭鉱の採掘切羽では特に問題となり、機械化

長壁切羽の場合、切羽の排気温度は入気温度より4～5°高くなる。(Ⅲ)の熱源は特殊な場合を除けば問題にならない。

この他にも、深部開発を長大な入気立坑によって行った時の温度上昇の要因として、空気の断熱圧縮がある。幌内炭鉱の入気立坑(775m長)の例では、この原因によって坑底の気流温度は坑口よりも4.2℃高くなっている。

幌内炭鉱の場合、地熱は低い方で、しかも、十分な通気が行われている。それでも、地表下1125mの坑底入気温度は31.2℃(8月平均)である。もし、立坑底からのトンネル掘進時における場合などのように、十分な通気の確保が困難であれば、切羽元の温度は一層高くなるであろう。また、切羽元では機械、作業員から放出される熱も付加されるので、高温となるのが普通であり、作業に際しては強制冷房の必要が起り得よう。

3.3.2 高温対策

坑内が高温の場合、まず、通気量を増大させ、それによって熱を排除する試みがなされる。これで対処しきれない場合には冷房が採用される。これには、各切羽で局部的に冷房する方法(豊羽鉱山、幌内炭鉱)の他に、立坑底で入気を冷却し、坑内全体を冷やす方法(幌内炭鉱)がある。

豊羽鉱山の場合、掘削直後の岩盤温度は壁面近傍でも100℃を越えるところが多い。このような場合には岩石発破に用いる火薬や雷管に特殊なものが必要である。

作孔やコンクリート打設に関しては、最近、地熱開発技術の進歩に伴い、180℃までならば技術的にそれほど問題ではなくなっている。

3.4 ガス突出

3.4.1 発生状況と地質環境

ガス突出とはトンネル掘進先で、多量のガスが小さく破砕された岩塊を伴って突発的に空洞内に飛び出る現象である。岩塩鉱山・炭鉱で多く、噴出ガスとしてはメタン(CH_4)、炭酸ガス(CO_2)が主である。我が国の炭鉱ではほとんどがガス突出を経験している。図3-2はこの内で北海道の炭鉱における事例を示したものである。

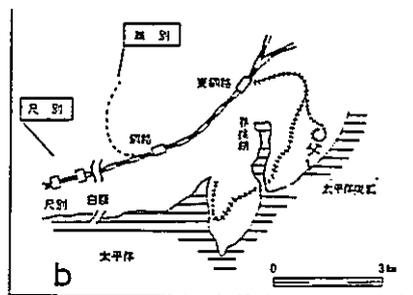
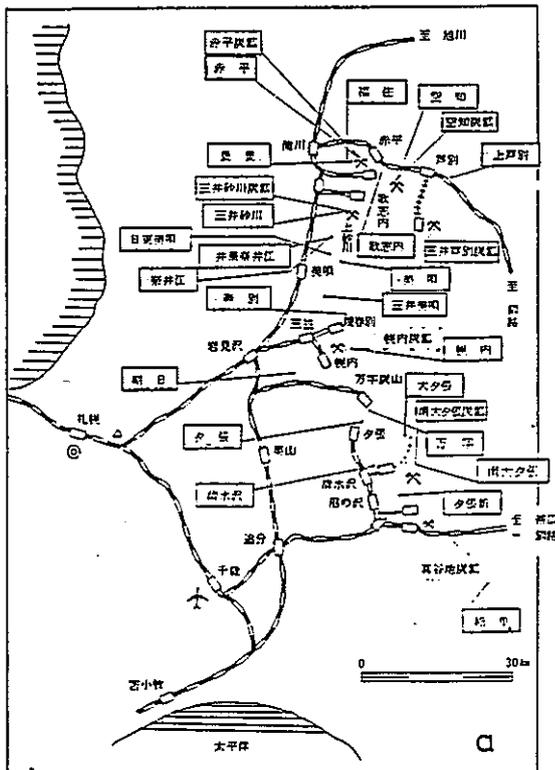
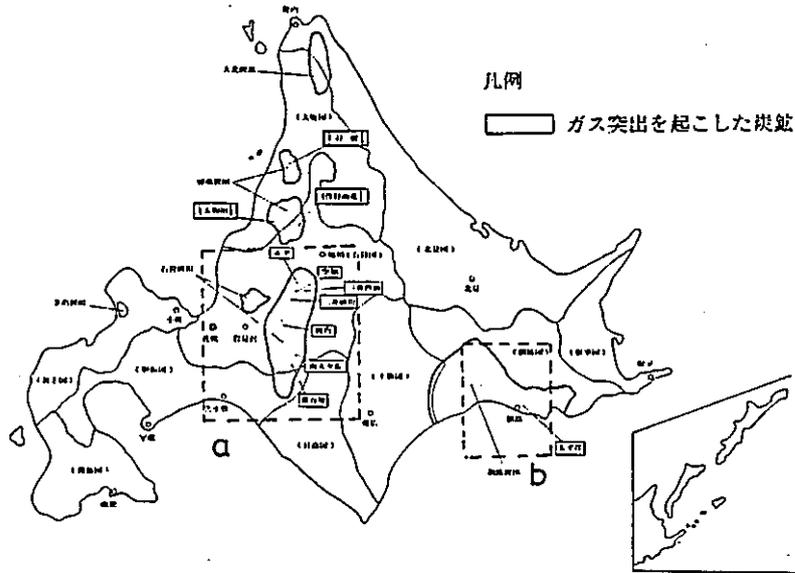


図3-2 北海道の諸炭鉱におけるガス突出箇所

石油ガスの開発に際しても含油（ガス）層に接近・縫着したとき、しばしば、暴噴現象が起こるが、これも現象的にはガス突出と同一と考えて差し支えない。いずれの場合にも、空隙やき裂に高圧のガスが含まれている層に空洞が接近するとき起こるわけで、夾炭層を始めとする堆積層ではこの現象の出現に対する配慮が必要であろう。

トンネル掘進においても、しばしば石油・ガスの噴出現象が報告されている

(鍋立山トンネルなど)。特に、火山が近くに存在する断層破碎帯では有害ガスが噴出する可能性がある。

以下には、主に本邦の炭鉱における110例のガス突出事例に基づく知見の概略を述べることにする。

ガス突出は粉炭などの突出物を伴うのが普通である。突出ガスの規模は最小で100立方m未満、最大で100,000立方m以上になっている。突出量はガスに比べると少なく、200立方m以下の場合が約70%である。

突出跡は空洞状になる。その寸法は幅、高さ、奥行がそれぞれ10、5、20m未満の場合がほとんどである。

3.4.2 前兆現象と作業との関連

発生した突出の中で半数以上は発生直前またはそれ以前に前兆を感じている。主な前兆現象としては、山鳴り、炭壁軟化、ガス濃度増加、崩落、高抜けなどである。

坑道が発破掘進、なかでも、一斉発破による掘進で掘削されている場合に突出が多い。これは発破が突出の引き金になっていることを暗示している。しかし、発破後30分以内に発生するケースが多いものの、発破後3時間以上経過した後で発生する、いわゆる「遅れ突出」もある。

作業箇所別にみると、岩石掘進における着炭際、沿層水平、沿層昇りでの突出が多い。

3.4.3 予知と予防

ガス突出は一種の破壊現象であるということがいえる。ただし、破壊には単に地圧が関連しているだけでなく、ガス圧も関連している。ガス源に坑道やボーリングが接近し、地圧、ガス圧の両方が擾乱を受けそれが強度限界を越えたときに突出するのであろう。したがって、ガス突出の予知法としては山はねと同様の手段を用いることができる。例えば、AEのモニタは有効であり、特に、掘進発破に伴って生じる突出の予知には効果的である。

突出の発生箇所はかなり特定できるので、そのような区域では十分な警戒と対策を行えばよい。炭鉱の場合、掘進に先立ってガス抜きボーリングを行うのが普通である。ボーリングの本数が少ないと突出の発生確率が大きくなる。す

なわち、本数が10本以下であった場合の突出は全体の70%に達している。このことからガス抜きボーリングの有効性が認められる。孔径は大きいほど有効なようである。赤平炭鉱では250mm径のボーリングを採用してから、突出発生は皆無に近くなった。しかし、岩塩の場合にはガス抜きボーリングの効果はほとんどないといわれている。両者の差異は、炭層と岩塩の力学的挙動の差異に起因するものと考えられる。

トンネル掘削時に有害ガスの包蔵地帯を突発する方法として、先進グラウトを実施し成功した事例がある。

3.5 岩石異常破碎

3.5.1 現象と発生箇所

岩石異常破碎は500m以深で見られる地圧現象の一つで、ガス突出と山はねの中間的な現象である。すなわち、岩石異常破碎とは岩石坑道掘進に際し、掘進発破直後に坑道引立面よりガスを伴って岩石片が飛出してくる現象で、飛出したずり量（出ずり量）は通常の破碎ずり量よりも多い。また、破碎箇所の坑壁面をみると、りん片状（玉ねぎ状）のひび割れが認められる。このような現象は夾炭層中の特定の砂岩層で起こるので諸外国では、ガス・岩石突出、または、ガス・砂岩突出と呼称されている。

北海道においては現在までに石狩炭田の7炭鉱で195の事例をみている。なお、九州地区では発生例がない。諸外国では、ソ連、東ドイツ、フランス、ハンガリーなどで報告がある。

異常破碎はガス突出に似てはいるが、出ずり量はガス突出に比較し数分の1であり、また、メタンを主とするガス湧出量は10数分の1である（図3-3参照）。破碎後はほとんどの場合、油臭を感知している。発生ガスを分析すると微量ではあるが石油系のガスが検出されている。

3.5.2 地質環境

異常破碎は新第三紀層（朝日炭鉱）で一例起こっている他は全て古第三紀層中で発生している。破碎の発生はほとんどの場合、砂岩層（どちらかといえば中一粗粒砂岩）中で発生しているが、石英質礫岩中에서도起こっている。一つの

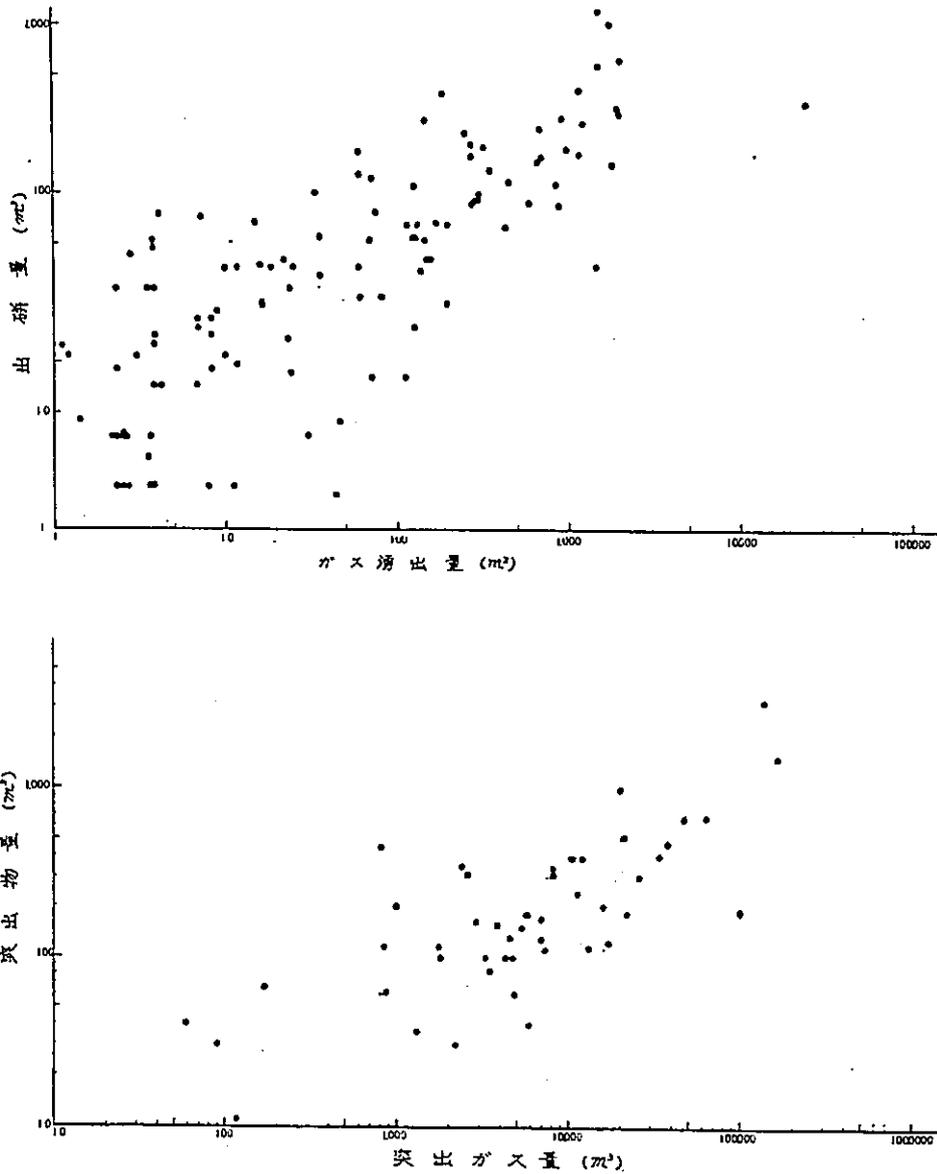


図3-3 岩石異常破砕（上）とガス突出（下）における突出規模

炭鉱でみると、発生は特定の層に限定されている。この特定砂岩層には相対的に空隙率が大きい（5%以上）という特徴が認められる。この地層中において異常破砕が一度起こるとその後の掘進においても起こることが多い。すなわち、破壊に連続性が認められる（図3-4参照）。

異常破砕に伴って発生するガスの主成分はメタンなので、石炭層がガスの主たる根源層になっているものと考えられる。また、発生箇所はたいていの場合、断層近傍に存在するので、断層の影響はガス突出の場合よりも明瞭であるといえる。地質構造的には、褶曲構造の軸または翼で発生している。

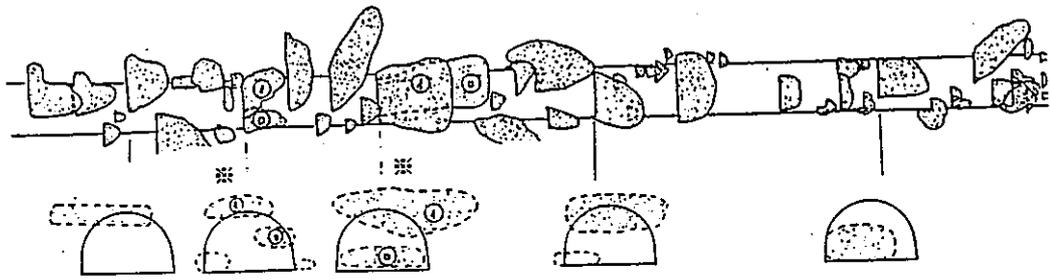


図3-4 岩石異常破碎の発生例（奔別炭鉱）

この層にコアボーリングを行うとデイスキング現象が認められる（幌内炭鉱の例）。この点は山はねの環境に似ているといえる。

3.5.3 作業環境と予知および対策

異常破碎は既述したように、掘進発破と同時に坑道引立て起こしており、ガス突出のように不時突出現象はないのが特徴といえる。ほとんど（87%）は一斉発破のときに発生しているが、分割発破においても起こっている。幌内炭鉱の場合、立坑保安炭柱区域は区域外に比べ破碎規模が大きい。これは高い地圧の下では破碎の規模が大きくなることを意味している。

先進ボーリングはガス突出におけるほど有効でなく、ボーリングをしてもガスが自噴しないことが多いといわれている。ただし、ガスが検出されることもあるし、臭気の観測、コアデイスキングの有無の観測は時として有効である。破壊音（AE）の観測はガス突出の場合と同じく有効で、発破に引き続き異常破碎が起こったか否かを遠方の安全地帯でモニタすることができる。

いずれにしても、掘進発破時の待避を確実に実施し、ガス湧出に伴う坑内火災などの2次災害の防止に注意するならば、異常破碎は起こったとしても何らの人災をもたらさない現象であるといえる。

3.6 深部化に伴う空洞変形

地圧は一般に深さに比例して増大する。一方、岩盤強度は深さによってあまり変化しないので、深部になるほど岩盤が受け持つ負担は大きくなる。この関係を定量的に表した指標として次式で示される地山強度比（C）がある。

$$C = \frac{\text{岩石の一軸圧縮強度}}{\text{かぶり圧}}$$

値は1.7 から 4.2 へ

$$\text{かぶり圧} = 0.25 \times \text{深度 (m)} \text{ kgf/cm}^2$$

深部に行くほど地山強度比は小さくなり、そこに坑道などの空洞を設ければ周囲岩盤が破壊しやすくなる。

破壊が起こればその部分がゆるみ、空洞の狭少化を招く。したがって、地山強度比が或る限界値以下になれば空洞の維持が悪くなることが当然予想される。図3-5は国内諸炭鉱の岩石坑道について、地山強度比と坑道維持の困難さの関係を示したものである。坑道維持の困難さは坑道補修の頻度、すなわち、盤打ちや拡大作業量を維持坑道全長で割った値で表している。図は地山強度比が小さくなるにつれ、それだけ坑道維持が困難になるという予想が実際に起こっていることを示している。特に、地山強度比が2以下では坑道維持が極めて困難になっていることが注目される。

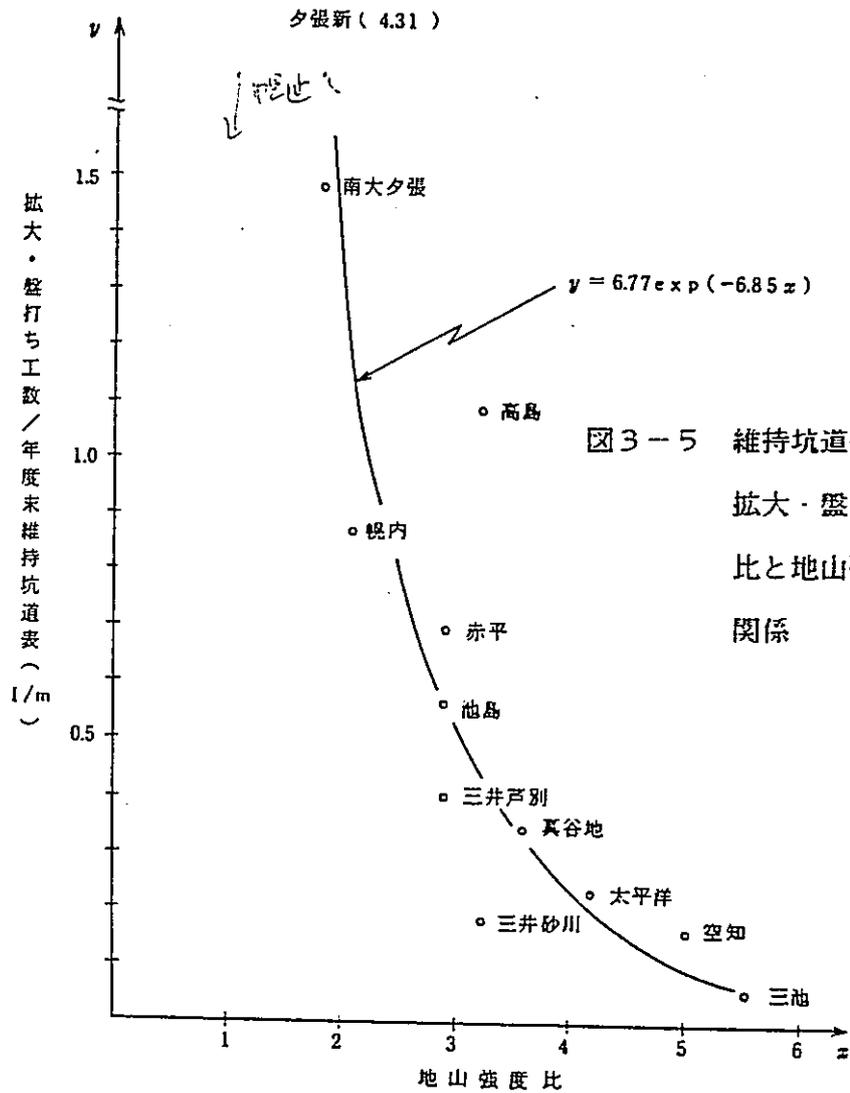


図3-5 維持坑道長に対する
拡大・盤打ち工数の
比と地山強度比との
関係

こういった、深部化に伴う空洞の狭少化はどのような岩盤に対しても一般に認められ、普遍的に発生する点で重要であるといえる。岩盤の特性によっては、こういった挙動の他に、別の地圧現象が認められ、あるいは、卓越することがある。その一つは山はねであり、もう一つは盤ぶくれである。これらの形態の差異は、主に、岩種、あるいは、地質構造の差異によってもたらされる。すなわち、均質な硬岩中や石炭層内では山はねが起りやすく、軟弱な泥質岩や変質岩内では盤ぶくれが起りやすい。既述したガス突出や異常破砕も地圧現象であるが、これらは、ガス源がない所では起らないし、ガスが関与するので純粋な地圧現象とは言えない。

3.7 盤ぶくれ

3.7.1 盤ぶくれ現象とその機構

空洞開さく後、周囲岩盤の変形が持続し、空洞が時間と共に次第に狭少化して行く現象がある。炭鉱や金属鉱山の坑道ではアーチ支保を入れるだけで踏前（下盤）には支保を施さないのが普通なので、この部分が弱く、狭少化はここに顕著に現れる。したがって、鉱山ではかかる現象は盤ぶくれと呼ばれる。浅部の地層においては、特定の軟弱岩盤、すなわち、膨張性岩盤中に空洞を設けるときにこのような現象が現れるので、トンネル工学分野においては膨張現象と呼ばれる。しかしここでは、時間と共に岩盤の破壊が進行し、空洞が狭少化する現象を全て盤ぶくれと呼ぶことにする。

盤ぶくれの一例を図3-6に示す。200日経過した後も坑道の変形は初期とほとんど変わっておらず、このままの状態が経過すれば坑道はやがて完全に閉塞し、その時点で初めて状態の変化がない安定が得られるようになると考えられる。

盤ぶくれは相対的に大きな地圧の下で、しかも、特定の岩盤中に起こる。地圧の大きさが地山強度比に換算して1.8～2.0以下だと盤ぶくれが起りやすい。鍋立山トンネルは典型的な膨張性トンネルであるが、この場合の地山強度比は0.2であった。

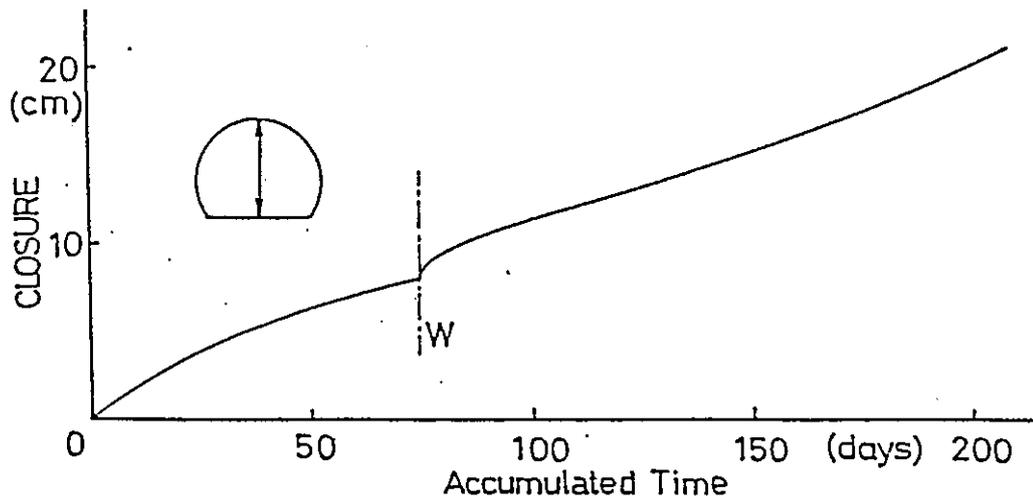


図3-6 深部坑道における盤膨れの例（夕張新炭鉱）、地表下860m

盤ぶくれを起こす岩盤は炭鉱の場合は頁岩である。頁岩の中でも特に水に鋭敏で、吸水に伴う強度低下が著しいものほど現象が激しく現れる。したがって同一の頁岩層内であっても、含水率の高い区域の坑道維持は低い区域に比べ悪いのが普通である。この現象はグリーンタフ地域の金属鉱山においても認められている。

浅部トンネルの場合には、頁岩（泥岩）の他に温泉余土、変質安山岩、緑泥片岩、風化花崗岩など種々の作用の下に破碎、風化、変質したいわゆる膨張性岩盤が盤ぶくれを起こす。

夕張新鉱は岩石坑道が地表下800m～1000mの厚い頁岩層（幌加別頁岩）中にあり、激しい盤ぶくれに悩まされ続け、ついに閉山するに至った。この場合の地山強度比は2.0以下で、測定によると、特に坑道踏前の岩盤に大きなゆりみ（破壊）域が形成されていた。

解析によると、この中に水が回り強度劣化が進行し、それが逐次、岩盤奥部に向かって進行するといったサイクルによって、盤ぶくれ現象を招いたものと解釈される。

3.7.2 対策

夕張新鉱の場合にも、もし、適切な支保対策を施していたならば盤ぶくれは防ぎ得たと考えられる。実際、ボルト支保やコンクリート吹付けで補強した場合には、かなりの改善効果が認められた。

最近、こういった効果的な支保を早期に施すと盤ぶくれに充分対処し得ることが実証されつつある。その典型例が鍋立山トンネルであろう。

ここでは地山強度比が0.2と極めて悪条件であったにもかかわらず、ボルトとコンクリート吹付け工法の併用（いわゆる、NATM工法）によってトンネルを完成するのに成功している。この工法は本来、炭鉱で開発されたものであるが、最近、深部炭鉱においても、ボルト支保で補強された坑道が強大な地圧の作用下でも維持できたという報告がなされている。

膨張性地山においては、ボーリングを打つことも困難で、従来は、しばしば作孔不能に陥っていた。最近、泥水ボーリングに際し、岩盤に合わせて調泥する技術が進歩したことや二重管ボーリングの採用によって貫層に成功する率が高くなっている。

3.8 山はね

3.8.1 山はねの形態と発生箇所

盤ぶくれは時間と共に逐次的に進行する破壊形態を取るが、突発的かつ破壊音や震動を伴って急激に進行する破壊形態は山はねと呼ばれる。通常、山はねはこの破壊が空洞壁上で起こり、破砕片が空洞内へ飛び出してくるものを指す。空洞より離れた岩盤内で起こり、空洞に直接的影響のないものは、普通、山鳴りと呼ばれる。山はねも山鳴りも同一の範疇に属する破壊現象である。

均質な硬岩中ではトンネルの応力集中部に山はねが発生する。破片はトンネル壁面に平行なりん片状となることが多い。これに対し、炭層の山はねは炭層だけが飛び出し、上下盤は全く変化が認められないことが多い。両者では破壊機構の細部に若干の差異があると考えられる。

トンネルにおける山はね発生の事例に関しては、海外の場合、アルプスの山岳部やノールウェイの北部地方での報告があるが、金属鉱山や炭鉱における事例に比べると圧倒的に少ない。これは日本の場合も同様である。トンネルで山はねが起こりにくいわけではなく、山はねが起こるようなかぶりの大きなトンネルを掘った事例が少ないためである。

3. 8. 2 山はねを起ししやすい岩盤・地質条件

山はねはいわゆるぜい性度の高い岩盤で発生する。もし、岩石の最大強度点以降の応力-ひずみ線図が下を向いている（負になっている）ならば、この岩石はぜい性的であるという。下向きの傾きが大きいほど、ぜい性度が高く、通常の試験機で岩石供試体を圧縮すると音を出して激しくかつ瞬間的に破壊し、破片が四散する。

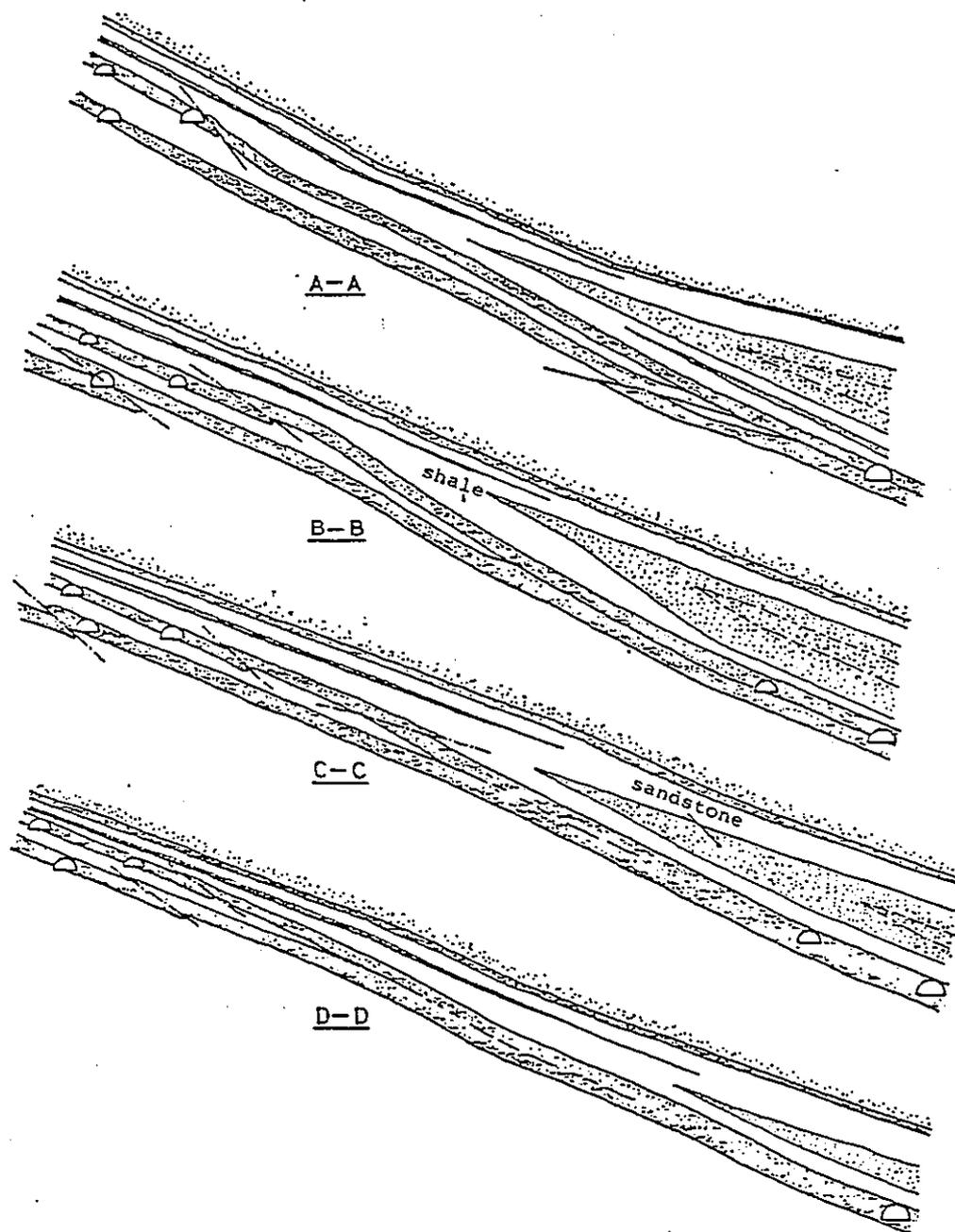


図3-7 山はね発生区域における天盤状況（南大夕張炭鉱）

注目すべきことに、石炭のように、それほどぜい性度が高くなくても、石炭よりも厚くて強い岩石で夾まれていると、全体としてのぜい性度は高くなる。炭層の山はねは炭層自体の強度・変形特性にはあまり依存せず、炭層の上下に厚い砂岩層があるかどうかによって山はねを起こしやすいかどうかが決まることがわかっているが、これは今述べたことによって説明される。

したがって、山はねを起こしやすい岩盤かどうかの判断はその岩盤の力学的性質だけでなく、その岩盤を含む地質構造にも注意する必要がある。

図3-7は南大夕張炭鉱での山はね発生箇所の地質状況を示したものである。当鉱の岩盤はどちらかといえば軟弱で、盤ぶくれ現象は呈するものの、山はねは発生しないものと考えられてきた。山はね発生箇所には、たまたま、厚く発達した砂岩層が炭層の天盤に分布していたわけである。

山はねは深さ600m以深で起こることが多いが、地表近くでも発生する。後者の場合、その地方の初期地圧は水平面内の応力が卓越した状態になっている（スカンジナビア地方や北アメリカ五大湖地方）。

3. 8. 3 山はねの発生箇所と規模

山はねは破壊現象の一種であるから、岩石強度に対し地圧が相対的に大きな環境の下で起こる。この場合にも地山強度比は一つの目安にはなるが、しかし、盤ぶくれ現象に対するほどには有効な指標になり得ない。なぜならば、山はねを起こすような岩盤は一般に硬く応力集中を起こす箇所で山はねが発生するからである。

トンネルの場合、岩盤が均質であれば、最大の応力集中箇所は引立より直径の1~2倍後方に位置する。清水トンネルの山はねは主にここで発生している。また、掘進の過程で作られる凹凸部も応力集中箇所になる。しばしば、引立部でも山はねが起こるが、こういう箇所は、弱面などの存在により強度が低下しているのであろう。立坑底部で発生する山はねもこの範疇に属する。これらの山はね現象はいずれも小塊が飛び出す程度のものが多い。

これに対し、金属鉱山や炭鉱では採掘活動により作られた空洞のために、しばしば、広範囲の応力集中域が形成される。一般に、鉱柱や炭柱はこういった応力集中源になる。この場合には発生する山はね規模も大きくなる。日本にお

ける最大規模の山はねは美唄炭鉱で発生しているが、やはり、炭柱内で起こっている。

3. 8. 4 山はねの機構・予知・対策

深部化炭鉱における山鳴りに関し、採掘に伴う山鳴りの位置、規模に関する数値モデル実験が行われている。モデルでは、採掘に伴って形成される空洞周辺岩盤の内で新たに破壊条件を満たす箇所で山鳴りを起こし、その破壊規模は破壊に伴うひずみエネルギー低下に等しいものとされている。これによって得られた予測は、地震計観測システムに基づく実測結果と良い一致を示すことが、かなりの数の事例について確認されている。したがって、少なくとも山はね機構の概略は明らかにされたものと考えられる。

予測計算と実測の一致から、予測計算が予知の有効な手段としても有用であると考えられる。もちろん、これと平行して、地震動やAEの観測、岩盤変位、地圧変化などの現位置計測が予知に必要であることは言うまでもない。ドイツの炭鉱においては坑道の山はね予知手段としてテストボーリングが採用されている。これは、坑壁よりオーガーボーリングを行い、排出されるくり粉が基準量を越えると危険と判定するものである。

対策としては、鉱山の場合、応力集中を招かない採掘方法を取ることが最も重要である。この点、柱房法よりは長壁式採掘法が優れている。

トンネルや立坑掘進の場合には、山はね防止対策として2つの方法が考えられる。一つは支保の強化である。大清水トンネルや関越トンネルでは、作業員の適切な待避を含む作業計画、掘進発破直後の仮支保（H鋼柱）の建込み、それに続くロックボルト打設とネットの張り付けなどにより、山はねに伴う人災をほぼ完全に防ぐことができた。

他の方法はトンネルの周囲岩盤をゆるめることである。ドイツの炭鉱では大口径（250mm前後）ボーリングによる坑道周囲のゆるめが山はね対策として採用されている。我が国の幾つかの炭鉱でも、これが用いられているが、主目的はガス突出防止に置かれている。

3.9 坑内火災

坑内空間は狭い上に、強制通気を行っているので、火災が発生すると、地表では小規模のものにしかならないような場合でも、重大災害につながる可能性が高い。

我が国の炭鉱で発生した坑内火災は1949年から1983年間に71件を数える。発生箇所はケーブルが一番多く、全体の1/4強を占める。次いで、圧縮機とベルトコンベア(9%)、熔断機(7%)が続いている。ケーブルによる火災の原因は落盤などによる損傷が半数を占め、絶縁不良がこれに次いでいる。ベルトコンベアからの火災はスリップや点検不良が主因である。

坑内火災の原因の特徴は、ケーブル火災の主因にみられるように、別の災害に付随して2次的に発生することが多いことである。深部で発生する異常破砕や山はねに付随して起こる坑内火災は、その場所に接近不可能なためにしばしば重大災害に結び付きやすい。

1975年に幌内炭鉱で発生した坑内火災は、結局消化しきれずに全山水没の止むなきに至った。その原因は異常破砕(地表下1200mで発生)であり、このときに噴出したガスに残火薬の火が付いたものである。1963年に美明炭鉱の地表下650mの長壁切羽の肩坑道で発生した山はねに際しては、ちょうど発生箇所に停車していた5t蓄電池式電気機関車が崩落ずりで破壊され、内部の電池が押しつぶされたためにそのターミナルが熔断し、ケーブルの焼損から火災へと発展した。坑道が閉塞していたために火源に接近できず、結局、この切羽を包囲密閉し水封を実施することにより、ようやく消火することができた。

3.10 地下深部での地震動

深部の長所の一つとして、地震に対し地表部よりも震動が小さく安全である点が挙げられる。深部鉱山で地震による被害があったという事例を聞いたことがない。幌内炭鉱では地表と坑内の地表下1100mに速度型センサーが配置されているが、地表部で地震の揺れを受感しても坑内では、ほとんど感じないことが数回観察された。新宇佐美トンネルでは地震時に坑口で最大加速度15.

2 g a l を記録したのに対し、坑内のかぶり 230 m の地点での値は 7.4 g a l と半分以下であった。

鉄道トンネルの事例研究によると、震源から 30 k m 離れるとほとんど地震の影響を受けないといわれている。また、震源に近いために発生した被害の場合でも、地震動そのものに原因するものは無く、トンネル直上の斜面崩壊やトンネルが横断する地震断層の変位に付随して発生したか、あるいは、トンネル上部のゆるみが拡大したために地圧の付加によって起こったかしたものばかりである。