

PNC ²N7410 94-022

社内資料

本資料は2000年3月31日付けで登録区分
変更する。

研究調整Gr【管理担当箇所名】

釜石鉱山における地層科学的研究 —第1フェーズ総括報告書—

1994年3月

動力炉・核燃料開発事業団

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払ってください。この資料の全部又は一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1994

~~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。~~
~~〒509-51 岐阜県土岐市泉町定林寺字園戸950-31~~
~~動力炉・核燃料開発事業団~~
~~中部事業所 技術開発課~~

~~Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Exploration and Mining Technology Development Section, Chubu Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 950-31, Sonodo, Jorinji, Izumi, Toki-shi, Gifu, Japan~~

~~動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1993~~

登録区分
2000.3.31
社内資料
変更表示
PNC N7410 94-022
1994年 3月

釜石鉱山における地層科学的研究 —第1フェーズ総括報告書—

新見 健⁽¹⁾ 大澤英昭⁽²⁾
柳澤孝一⁽³⁾ 杉原弘造⁽³⁾
吉田英一⁽³⁾ 濑尾俊弘⁽³⁾
北山 真⁽⁴⁾ 仙波 毅⁽⁵⁾
佐藤稔紀⁽²⁾ 笹本 広⁽⁶⁾
清水 功⁽⁷⁾

要　旨

釜石鉱山における地層科学的研究は、地下深部の地質環境特性に関するデータの取得、現象の理解、その現象解析モデルの開発・確立、および調査試験技術の開発・確立を目標として行われている。昭和63年度から開始された5ヵ年計画（以下、第1フェーズと呼ぶ）では、地下の基礎的な地質環境特性の把握と現象の理解および現有調査試験技術の適用性の確認の2つを目的に調査研究を行った。

試験実施場所は、栗橋花崗閃綠岩中に開削された釜石鉱山550mレベル坑道（地表下300m）の奥の2本の既存水平坑道およびその近傍約200m四方の範囲である。この他に、地表から掘削した試錐孔を利用した。また、地震観測については、550mレベル坑道およびその他のレベルの坑道にも地震計を設置して観測を行った。

その結果、地下の岩盤では水理的異方性が存在すること、それが岩盤中の割れ目の方向に関係していること、その調査のためにはレーダートモグラフィーが有効であることがわかった。地下水の起源は降水であること、トリチウムの分析結果からは、その滞留時間は少なく見積もっても40年以上を示す地下水が存在することが明らかにされた。また坑道掘削に伴い岩盤は弾性拳動をすること、岩盤特性の変化が生じる範囲は坑道壁面から2m程度であることがわかった。地震の研究では地下での揺れが、地上に較べて半分程度になることが判明した。岩盤内に充填したベントナイトの拳動に関して膨潤圧等のデータが得られた。

本報告書は、新見健と大澤英昭が主として作成し、それを、柳澤孝一、杉原弘造、吉田英一、瀬尾俊弘、北山真、仙波毅、佐藤稔紀、笹本広、清水功が一部加筆・修正したものである。

実施責任者：湯佐泰久（中部事業所環境地質課）

武田精悦（本社環境技術開発推進本部地層科学グループ）

- (1) : 電源開発株式会社（平成5年3月まで本社環境技術開発推進本部地層科学グループに所属）
- (2) : 釜石事務所駐在（中部事業所環境地質課）
- (3) : 中部事業所環境地質課
- (4) : 釜石事務所駐在（本社環境技術開発推進本部地層科学グループ、現在鹿島建設）
- (5) : " (中部事業所技術開発課)
- (6) : " (東海環境技術開発部地層処分開発室)
- (7) : 本社環境技術開発推進本部地層科学グループ

釜石鉱山における地層科学的研究 —第1フェーズ総括報告書—

目 次

	頁
1. はじめに	1
2. 対象領域の地質概要	2
3. 釜石鉱山の概要	6
3. 1 鉱山の坑道の位置と分布の概要	6
3. 2 鉱山周辺の既存試錐孔の位置	6
3. 3 鉱山周辺の降水量と気温	6
3. 4 鉱山の排水の概要	7
3. 5 鉱山の通気の概要	7
4. 試験研究の概要	12
5. 地質構造	14
5. 1 割れ目調査	14
5. 1. 1 調査方法	14
5. 1. 2 調査地域の割れ目の特徴	14
5. 1. 3 割れ目のモデル化手法	15
5. 1. 4 成果と課題	19
5. 2 物理探査	28
5. 2. 1 レーダトモグラフィー	28
5. 2. 2 比抵抗トモグラフィー	29
5. 2. 3 成果と課題	30
6. 地下水の水理特性	39
6. 1 原位置透水試験	39
6. 1. 1 単孔式透水試験	39
6. 1. 2 孔間透水試験	49
6. 1. 3 坑道規模透水試験	54

6. 1. 4 成果と課題	6 1
6. 2 間隙水圧のモニタリング	1 0 9
6. 2. 1 試験方法	1 0 9
6. 2. 2 試験結果	1 1 0
6. 2. 3 成果と課題	1 1 1
6. 3 地下水流動解析	1 2 2
6. 3. 1 多孔質媒体モデルを用いたKD-90 坑道への湧水量の予測	1 2 2
6. 3. 2 亀裂ネットワークモデルを用いた KD-90 坑道への湧水量の予測	1 2 3
6. 3. 3 成果と課題	1 2 5
6. 4 単一割れ目の地下水流動試験	1 3 0
6. 4. 1 試験方法	1 3 0
6. 4. 2 試験結果	1 3 0
6. 4. 3 成果と課題	1 3 0
6. 5 トレーサ試験	1 3 2
6. 5. 1 割れ目調査	1 3 2
6. 5. 2 試錐孔間圧力応答試験	1 3 2
6. 5. 3 染料トレーサ試験	1 3 3
6. 5. 4 非吸着性トレーサ試験	1 3 3
6. 5. 5 解析	1 3 4
6. 5. 6 成果	1 3 6
7. 地下水の地球化学特性	1 4 2
7. 1 地下水の化学組成と起源	1 4 2
7. 1. 1 調査方法	1 4 2
7. 1. 2 調査結果	1 4 2
7. 1. 3 成果と課題	1 4 3
7. 2 水—岩石反応試験	1 5 0
7. 2. 1 試験方法	1 5 0
7. 2. 2 試験結果	1 5 0
7. 2. 3 成果と課題	1 5 0

8. 岩盤力学	.....	154
8. 1 初期地圧	.....	154
8. 1. 1 測定方法	.....	154
8. 1. 2 測定結果	.....	154
8. 1. 3 成果と課題	.....	154
8. 2 挖削影響試験	.....	159
8. 2. 1 試験方法	.....	159
8. 2. 2 試験結果	.....	159
8. 2. 3 成果と課題	.....	160
9. 地震	.....	171
9. 1 地下深部地震動観測	.....	171
9. 1. 1 観測網と観測結果	.....	171
9. 1. 2 観測結果とモデル解析との比較	.....	171
9. 1. 3 成果と課題	.....	171
9. 2 地震時の地下水水理変動調査	.....	178
9. 2. 1 観測方法	.....	178
9. 2. 2 観測結果	.....	178
9. 2. 3 成果と課題	.....	178
10. 岩盤内充填粘土の挙動	.....	182
10. 1 岩盤内充填粘土挙動試験	.....	182
10. 1. 1 試験方法	.....	182
10. 1. 2 孔内載荷試験	.....	182
10. 1. 3 室内試験	.....	182
10. 1. 4 岩盤内充填粘土挙動試験	.....	183
10. 1. 5 課題と今後の予定	.....	183
11. まとめ	.....	187
引用文献	.....	189

1. はじめに

動燃事業団では、地下の基礎的な地質環境特性の把握と現象の理解、ならびに現有の調査試験技術の適用性の確認を目的として、釜石鉱山での花崗閃緑岩を対象に、昭和63年度（1988年3月）から平成4年度（1993年3月）までの5年間（これを「第1フェーズ」と呼ぶ）にわたり各種の試験研究を実施した（表-1-1）。この報告書は、1993年までに既に公表された報告内容を、第1フェーズの成果として取りまとめたものである。なお、より詳細な内容については、引用文献中の個々の報告書を参照されたい。

表-1-1 釜石鉱山における地層科学研究のスケジュールと概要

フェーズ	期 間	目 的	試験研究項目	場所
フェーズ1	1988年 ～1993年	<ul style="list-style-type: none">・地下の基礎的な地質環境特性の把握と現象の理解・現有調査試験技術の適用性の確認	<ul style="list-style-type: none">・地質構造・地下水の水理特性・地下水の地球化学特性・岩盤力学・地震・岩盤内充填粘土の挙動	550mレベル 坑道
フェーズ2	1993年 ～1998年	<ul style="list-style-type: none">・地下深部の詳細な地質環境特性の把握と現象の評価・調査技術の高度化と確立	<ul style="list-style-type: none">・深部地質環境特性の把握・掘削影響領域の評価・水理・物質移行試験・地震に関する試験研究・人工バリアに関する試験研究	250mレベル 坑道 550mレベル 坑道

2. 対象領域の地質概要

釜石原位置試験第1フェーズの対象領域は、岩手県釜石市の中心から西方約20kmの北上山地脊梁部に位置する釜石鉱山周辺領域である（図-2-1）。釜石鉱山は、北上山地を2分する早池峰-五葉山構造帯の南に位置し、地質的には、石炭紀～二疊紀の堆積岩、白亜紀の堆積岩、および火成岩とスカルン鉱床により構成される（図-2-2）。

石炭紀～二疊紀の堆積岩は南北の走向を示し、粘板岩、砂岩および石灰岩を主体とする。白亜紀の堆積岩は、緩傾斜で石炭紀～二疊紀の堆積岩類を不整合に覆い、安山岩質火碎岩を主体とする。火成岩類は岩質、分布および貫入時期から大きく次のように分類される（浜辺・野納、1976）。

- 早池峰-五葉山構造帯沿いに脈状に貫入した、カンラン岩～変ハシレイ岩
- 釜石鉱山近傍の蟹岳（標高967m）を中心に分布する閃緑岩やモンゾニ岩などを伴う花崗閃緑岩（蟹岳岩体、図-2-2）
- 遠野市を中心に広く分布する花崗閃緑岩（遠野岩体・栗橋岩体、図-2-2）

各岩体の貫入時期は深い岩体ほど新しくなっており、その年代はカンラン岩などが約4億5千万年前（蟹沢・大上、1989）、双方の花崗閃緑岩が約1億2千万年前（河野・植田、1965）とされている。蟹岳花崗閃緑岩は優白色の黒雲母角閃石花崗閃緑岩、栗橋花崗閃緑岩は中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩である。K-Arによる放射性年代測定によれば、両者とも1億2千万年前後の年代を示すが、鉱床の生成過程に関するデータなどから栗橋岩体の方が新しい岩石とされている（浜辺・野納、1976）。釜石鉱山の鉱床は、花崗閃緑岩周辺の石灰岩などの岩石との間に生成したスカルン帶に胚胎し、蟹岳花崗閃緑岩と密接に関係しているとされている。鉱床はこの岩体に沿って南北方向に配列しており、そのうち西翼の方が大規模で操業対象になっている（図-2-2）。

原位置試験は、釜石鉱山の既存坑道のうち標高550mに水平に掘削された550mレベル坑道を中心に実施された（図-2-3）。この地域には蟹岳花崗閃緑岩と栗橋花崗閃緑岩が分布している。蟹岳花崗閃緑岩は、優白色の黒雲母角閃石花崗閃緑岩で、この地域に鉱体をもたらした岩石である。一方、栗橋花崗閃緑岩は中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩で原位置試験の試験対象とした岩石である。

原位置試験が実施された550m坑道の最北部のNW坑道（1981年から2年間かけて掘削）およびNE坑道（1977年に掘削）には、栗橋花崗閃緑岩と蟹岳岩体に属する閃緑岩および一部スカルン帶が分布している（図-2-4）。フェーズ1における既存坑道での調査・研究および新規の試錐孔や試験坑道を用いた調査・研究は、栗橋花崗閃緑岩が分布する地域において展開した。

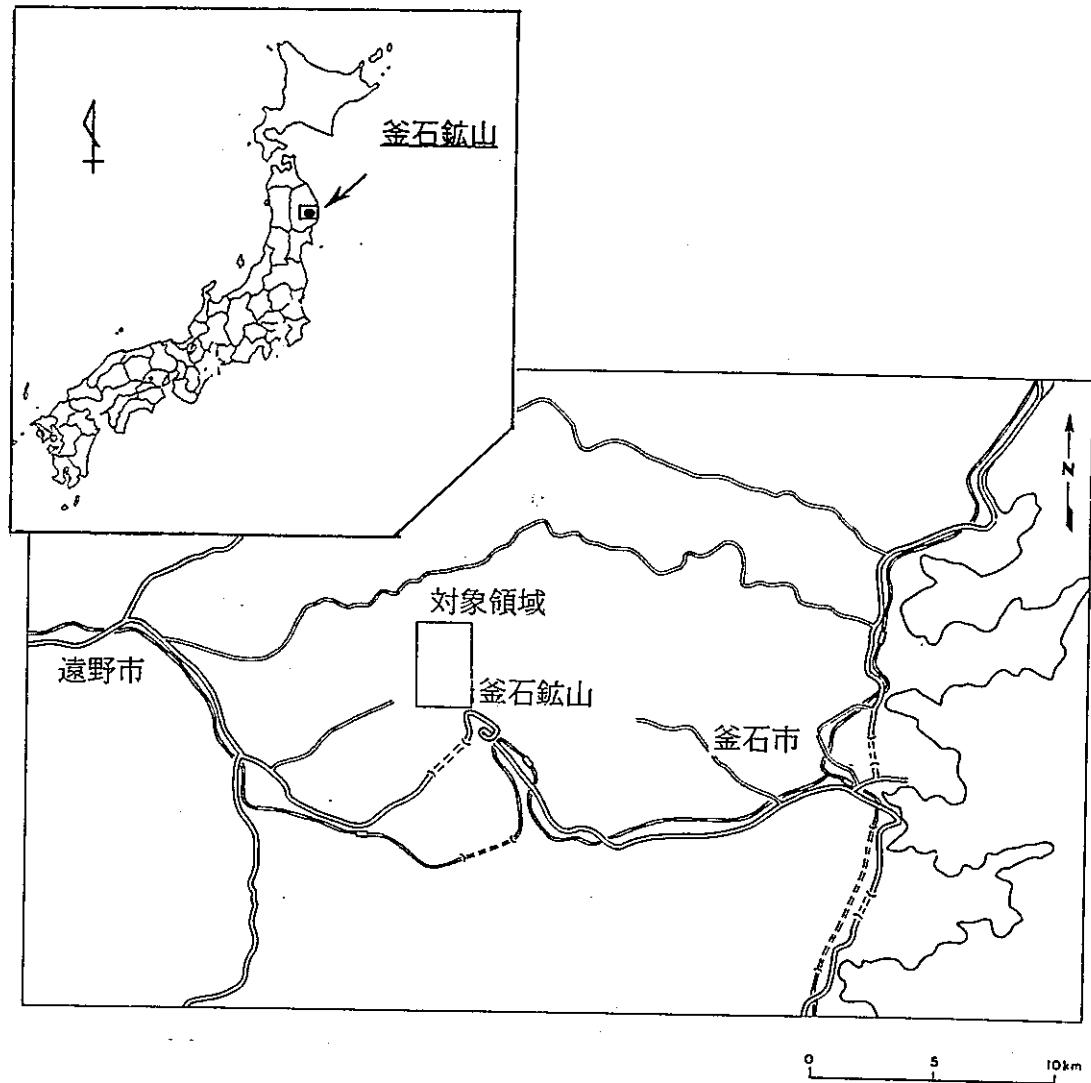


図-2-1 釜石原位置試験の対象領域

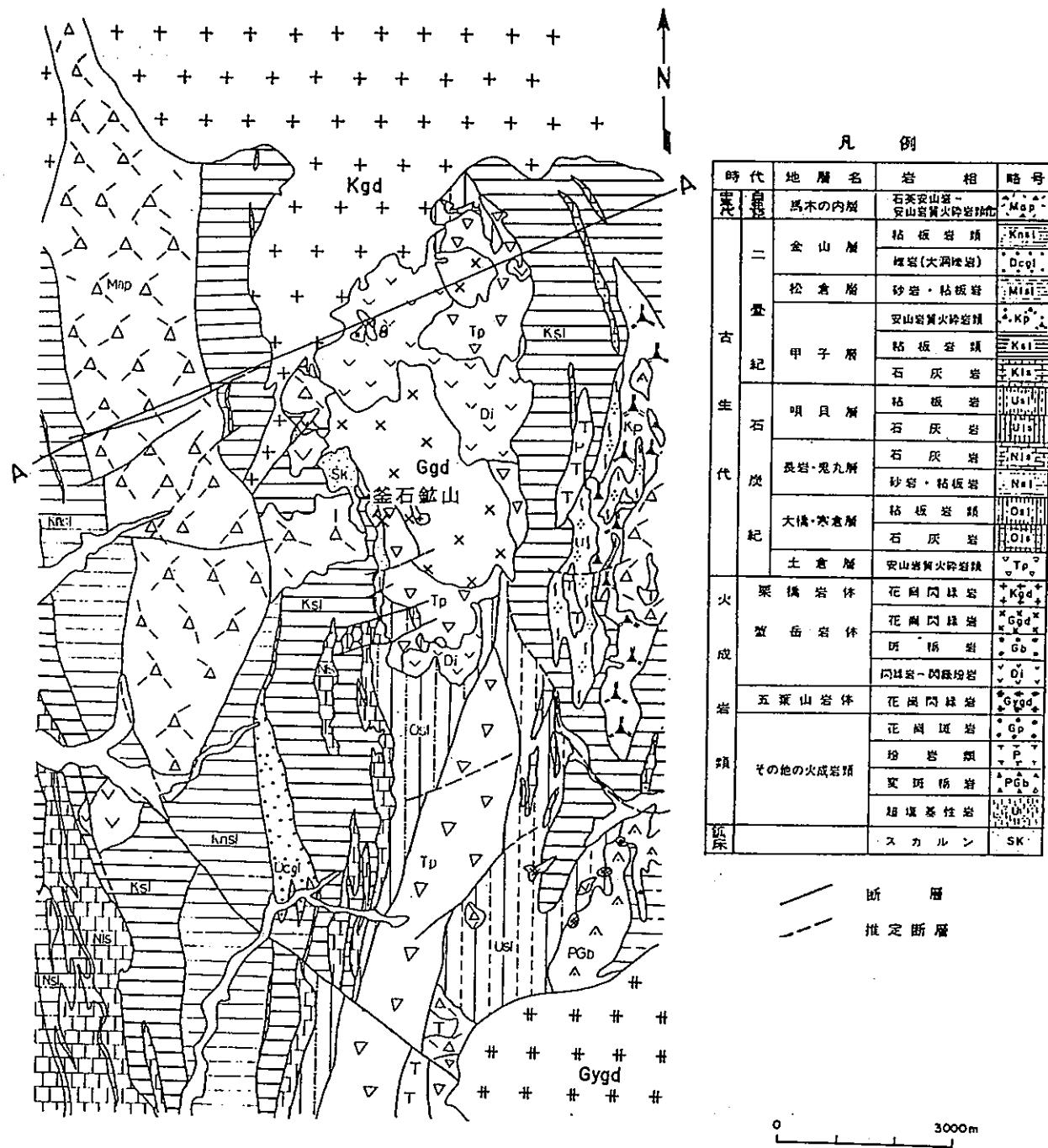


図-2-2 釜石鉱山周辺の地質図と地質断面図

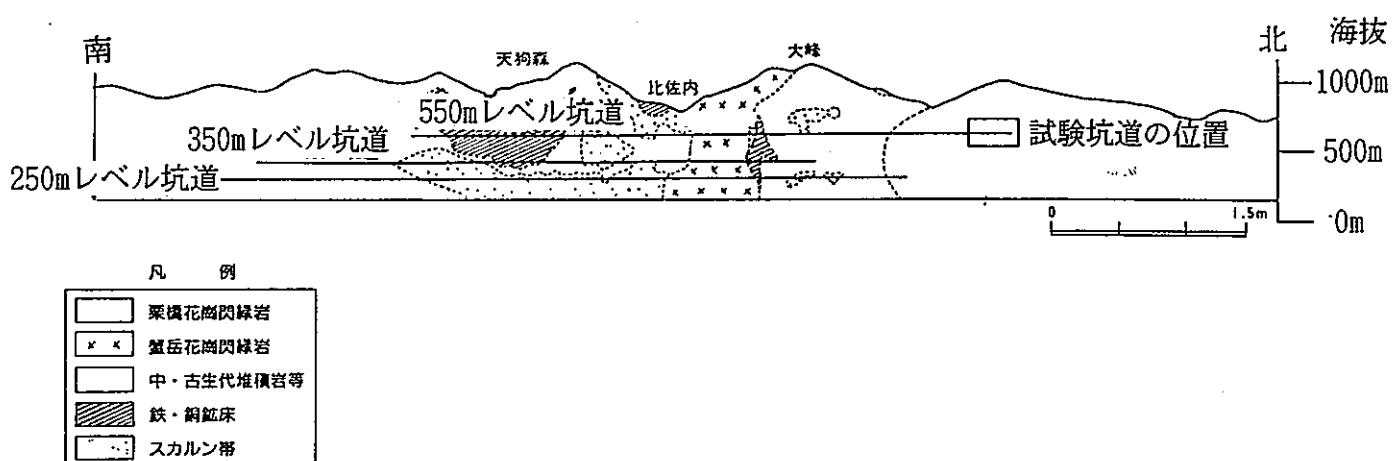


図-2-3 試験坑道の位置

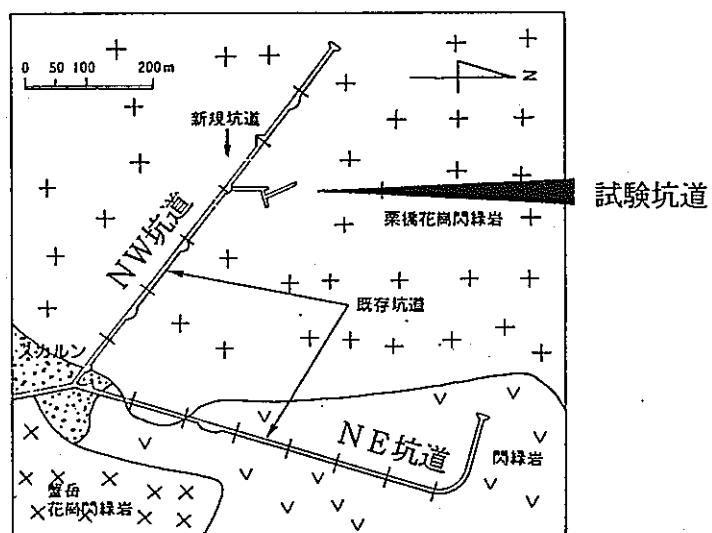


図-2-4 フェーズ1の原位置試験坑道周辺の地質図

3. 釜石鉱山の概要

3. 1 鉱山の坑道の位置と分布の概要

釜石鉱山の全ての維持坑道は、探鉱のために、蟹岳の西の鉱床群に掘削されたもので、その総延長は約140kmにわたる（図-3-1）。これらの坑道の掘削は大正時代から開始された。坑道は、大峰北部から大仙に至る南北約7500m、東西約1500m、上下は海拔950m～180mの770mの範囲に展開されている。

坑道は、概ね標高50m間隔に展開されている。これらの坑道のうち、大仙550mレベル坑道、滝の沢770mレベル坑道・820mレベル坑道・870mレベル坑道を除いた坑道は、立坑、斜坑、スパイラル坑道などで連結している（図-3-1）。

斜坑としては、新山斜坑（550m-250m間、高低差300m、傾斜26.5°、斜距離670m）、佐比内斜坑（800m-550m間、高低差250m、傾斜26.5°、斜距離600m）、大峰斜坑（865m-550m間、高低差315m、傾斜26.5°、斜距離700m）などが存在する（図-3-1）。

立坑としては、日峰中央立坑（680-250m間、高低差430m）、日峰第5立坑（530-180m間、高低差350m）、新山立坑（550m-350m間、高低差200m）をはじめ、20～30本の高低差100mから200mのものが存在する（図-3-1）。

坑口は、新山で250mレベル坑道、350mレベル坑道、500mレベル坑道、550mレベル坑道に、佐比内・大峰で725mレベル坑道、800mレベル坑道、865mレベル坑道、880mレベル坑道に、日峰で530mレベル坑道、680mレベル坑道に、天狗森で900mレベル坑道、950mレベル坑道に、そして大仙・滝の沢に数坑存在する。このうち、地下深部で相当規模で展開された坑道で坑口を有するものは、新山の250mレベル坑道、350mレベル坑道、500mレベル坑道、550mレベル坑道と、日峰の530mレベル坑道、680mレベル坑道の6坑道である。

3. 2 鉱山の既存試錐孔の位置

釜石鉱山周辺に、鉱床探査を目的とした試錐孔が掘削されている。

大峰鉱床北部では、550mレベル坑道21孔（総延長8772.3m）、250mレベル坑道で15孔（総延長4976.5m・孔外で9孔（総延長6511.8m）の試錐が実施された。掘削された試錐孔の位置・方位・傾斜・深度の一覧を表-3-1に示す。掘削された試錐孔の位置図は、森田ほか（1987）を参照されたい。大峰鉱床北部で掘削された試錐孔は、蟹岳複合岩体の花崗閃綠岩と閃綠岩、または栗橋花崗閃綠岩の内部また他の岩体との接触部付近で実施された。

また、昭和46～48年度にわたり、金属鉱業事業団が広域調査用試錐孔を掘削した。掘削された広域調査用試錐孔の位置・傾斜・深度の一覧を表-3-2に示す。試錐孔の位置図は、金属事業団（1975）を参照されたい。

3. 3 鉱山周辺の降水量と気温

釜石鉱山550m探鉱事務所坑外における気温を図-3-2に、350m鉱山本部事務所における降水量を、図-3-3に示す。各月の気温と降水量は、昭和49年1月～昭和61年12月迄の各月の平均値として示した。過去13年間における最大降水量は2137mm／年で、最小降水量は923mm／年である。

3. 4 鉱山の排水の概要

釜石鉱山において、定常に水が流出している坑口は、725m以下の坑道で、その主な坑口は、新山の250mレベル坑道、350mレベル坑道、350mレベル坑道、500mレベル坑道、550mレベル坑道と、日峰530mレベル坑道、680mレベル坑道の6坑道である。

各坑口からの流出量を図-3-4に示す。各月の流出量は、昭和49年1月～昭和61年12月迄の各月の平均値として示した。図-3-4は、下部坑道からより多くの流出が認められることを示している。たとえば、250mレベル坑道からの流出量が最も多く、350mレベル坑道と500mレベル坑道からの流出量がこれに次ぐ。これは、坑道が各箇所で立坑や斜坑などで連絡しており、水が下部の坑道に集中しやすい構造となっていること、250mレベル坑道は単一坑道として最も集水区域が大きいこと、などの原因による。また、釜石鉱山では、一般に、最下底坑道の試錐孔や割れ目帯に湧水が認められる。たとえば、50m下部に坑道が掘削されると急激に湧水が止まり、周辺の水が下部の坑道に引き落とされる現象が認められる。なお、坑内で観察される主な湧水個所は、規模の大きい割れ目帯と試錐孔である。

釜石鉱山の排水経路は、森田ほか(1987)を参照されたい。釜石鉱山における排水は基本的に自然排水である。250mレベル坑道以下に展開された200mレベル坑道と180mレベル坑道は現在水没している。

3. 5 鉱山の通気の概要

坑内通気には、夏型系統と冬型系統が存在する(森田ほか、1987)。鉱山の各坑口とそれを結ぶ主要坑道、立坑、斜坑、スパイラル坑道で連結した部分は、自然通気によるものである。しかし、それらから離れた立入などでは、ほとんど通気の動きはなくなり、必要に応じ風門や扇風機により、強制通気している。また、250mレベル坑道や550mレベル坑道などの盲坑道(行き止まりの坑道)では、強制通気を行っている。

表-3-1(1) 大峰鉱床北部の試錐孔一覧表

種別	坑内外	個所	試錐座	孔名	位置			方位	傾斜	深度	備考	
					X	Y	標高					
精外	坑	笛吹牧場		TK-1	-74.118.2	+72.479.0	896.08		-90°	901.0	孔底S4°E へ180m 孔底S26°E へ57m 孔底S26°E へ21.4m 孔底S70°E へ18m 孔底S45°E へ46m 孔底S26°W 61m	
		東又沢		-2	-74.644.2	+73.690.4	766.95		-90°	850.4		
		笛吹牧場		-5	-73.963.1	+72.053.5	932.20		-90°	700.5		
		"		-6	-74.422.9	+73.076.6	914.20		-90°	950.6		
		東又沢		-7	-74.058.4	+74.221.9	933.24		-90°	905.0		
		西又沢		-13	-75.022.1	+72.814.2	801.89		-90°	601.1		
		"		-14	-74.899.9	+73.146.7	769.42		-90°	601.4		
		笛吹牧場		-30	-73.493.3	+71.379.0	801.57	E	-30°	551.0		
		"		-31	-73.963.1	+72.052.2	933.29	W	-45°	450.8		
		小計		9孔						6,511.8		
	密試錐内	250m坑N押	9座	TK-21	-75.459.2	+72.284.5	259.06	S85°W	-30°	480.1		
				-22	-75.119.3	+72.213.9	260.23	S85°W	-30°	400.4		
				"	-75.119.9	+72.212.3	260.20	S85°W	-70°	351.0		
				8	-75.735.6	+72.349.1	257.63	N85°E	-30°	301.1		
		550m坑N押	14座	TK-33	-75.239.7	+72.994.6	573.69		-90°	350.1		
				"	-75.239.0	+72.995.8	573.69	N50°W	-70°	400.1		
				"	-75.240.6	+72.995.6	573.69	S50°E	-70°	302.3		
				"	-75.242.0	+72.994.8	573.85	S5°E	-50°	251.0		
				"	-75.241.8	+72.991.9	575.01	S55°W	±0°	201.5		
				15座	TK-38	-74.915.0	573.140.4	575.86	S85°W	-60°	500.3	
				16座	TK-39	-74.545.1	+73.139.4	577.96		-90°	350.3	
				"	-74.544.7	+73.140.8	577.96	S85°W	-50°	501.5		
				"	-74.545.4	+73.138.3	577.96	N85°E	-60°	401.1		
		小計		13孔						4,790.8		
		計		22孔						11,302.6		
自鉄内	坑	250m背の木坑道	2座	No. 1	-75.080.6	73.117.9	257.4	S85°W	±0°	304.1		
				2	-75.077.3	73.119.3	257.4	N35°W	±0°	277.6		
				3	-75.075.9	73.120.8	257.4	N5°W	±0°	276.4		
		250m坑N押	8座	No. 7	-75.738.8	72.347.2	257.63	S65°E	-30°	343.2		
				8	-75.738.8	72.347.2	257.63	S65°E	-20°	364.3		
				9座	No. 6	-75.459.2	72.284.5	259.06	N85°E	±0°	347.1	
				10座	No. 1	-75.132.5	72.216.0	260.20	N25°E	±0°	265.1	240L/分
				"	2	-75.134.2	72.217.4	260.20	N55°E	±0°	380.6	L/分

表-3-1(2) 大峰鉱床北部の試錐孔一覧表

種別	坑内外	個所	試錐座	孔名	位置			方位	傾斜	深度	備考			
					X	Y	標高							
企業探鉱	坑内	250m坑N押	10座	No. 3	-75.133.0 ^m	72.216.8 ^m	260.20 ^m	N35°E	±0°	320.7	100ℓ/分			
				" 4	-75.136.0	72.217.8	260.20	N85°E	±0°	321.8	400ℓ/分 孔底洒水 600ℓ/分			
				" 5	-75.132.1	72.204.8	260.20	N7-10E	±0°	243.0				
		550m坑NW押	1座	No. 1	-74.950.4	72.619.0	575.9		-90°	486.1				
				" 2	-74.950.9	72.617.4	575.9	S85°W	-30°	500.1				
				" 3	-74.947.9	72.621.4	575.9	N25°E	-57°	503.4				
		2座	No. 1	-74.808.8	+72.464.2	577.0	S85°W	-53°	432.8					
				" 2	-74.809.3	+72.464.4	577.0	S85°W	-70°	405.3				
				" 3	-74.809.6	+72.463.4	577.0	S85°W	-35°	539.2				
				" 4	-74.809.9	+72.461.9	577.0	S85°W	±0°	539.9				
				" 5	-74.807.6	+72.462.4	577.0	N50°W	±0°	366.3				
				" 6	-74.808.0	+72.462.8	577.0	N50°W	-25°	479.6				
				" 7	-74.807.2	+72.462.9	577.0	N35°W	±0°	457.8				
				" 8	-74.807.6	+72.463.1	577.0	N35°W	-20°	411.1				
				" 9	-74.808.6	+72.462.4	577.0	N65°W	-20°	392.5				
計				23孔						8,958.0				
合計				45孔						20,260.6				

表-3-2 広域調査用試錐孔一覧表

坑内外	個所	孔名	位置			傾斜	深度
			X	Y	標高		
坑外	遠野市上郷町佐比内 釜石市甲子町枯松沢 釜石市橋野町大平小屋 釜石市甲子町中川目	46 EATN-1 47 EATN-1 47 EATN-2 48 EATN-1	-77,385 -83,580 -75,900 -77,200	+72,410 +77,760 +77,410 +80,230	630m 190 570 320	-90° -90° -90° -90°	1,451 m 1,000.6 1,250.1 1,200.1

注：広域調査用試錐位置は実測していないため、X Y座標は2万5千分の1地形図から概略計算した。

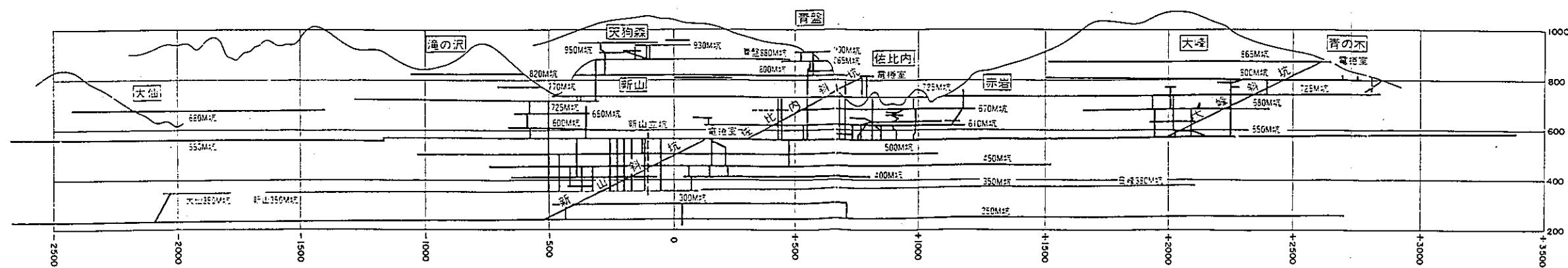
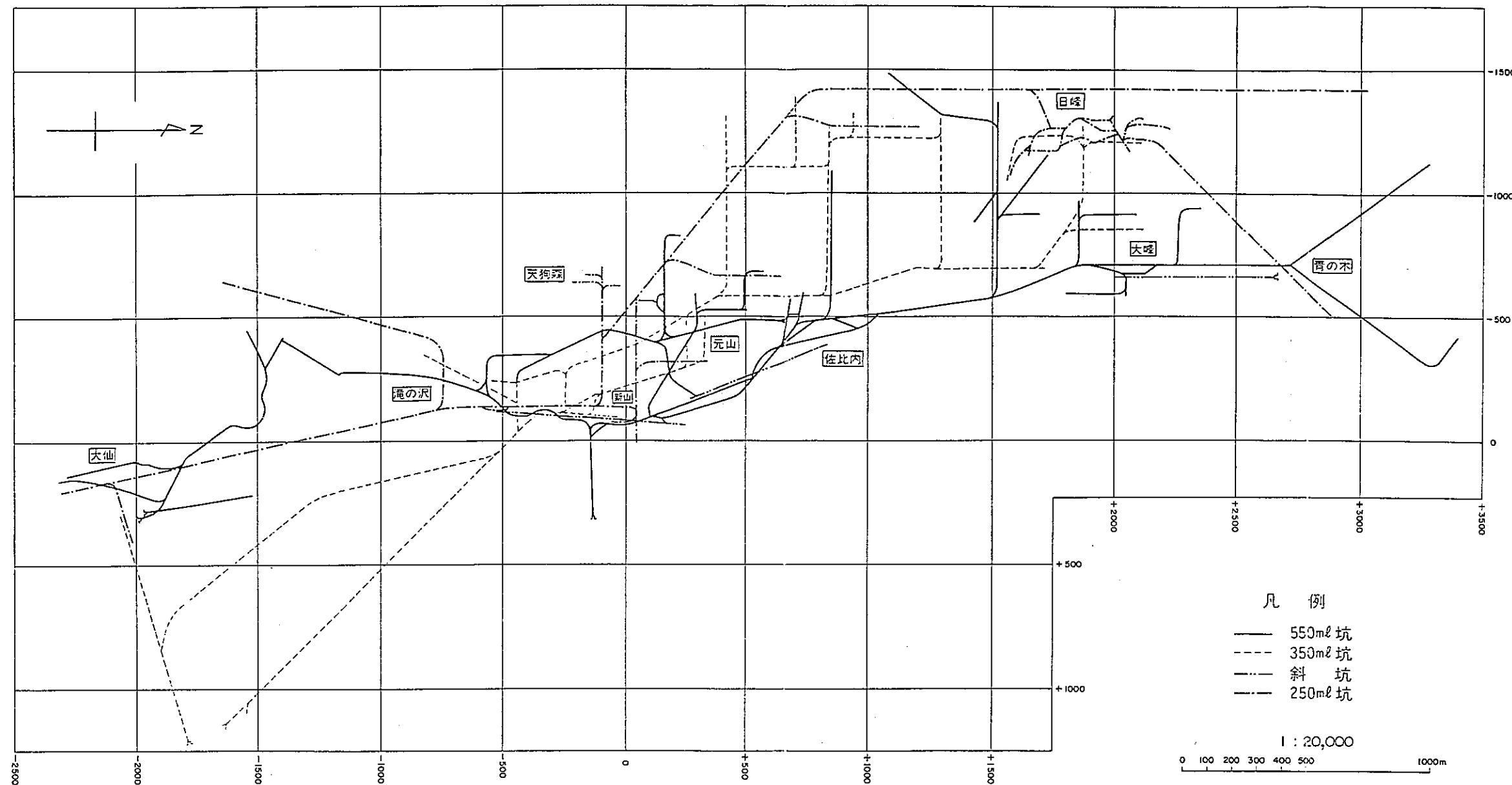


図-3-1 釜石鉱山の既存坑道位置図

上図：釜石鉱山主要坑道平面図

下図：釜石鉱山坑道縦断面投影図

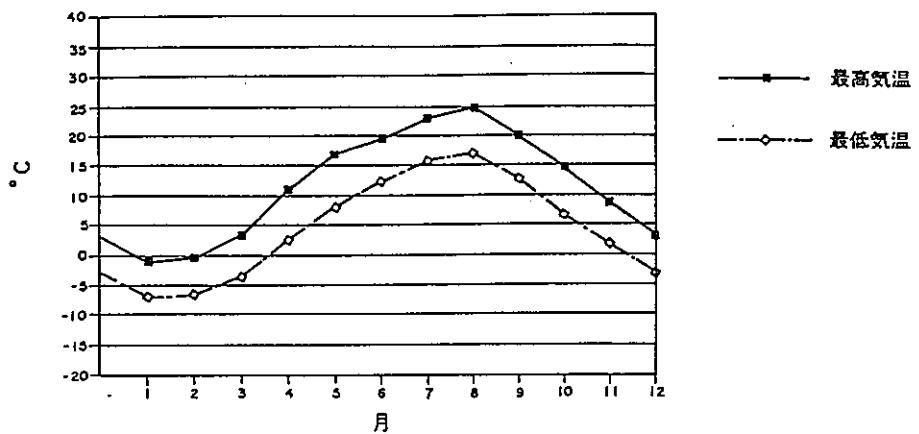


図-3-2 鉱山の年間気温図
(昭和49年1月～昭和61年12月)

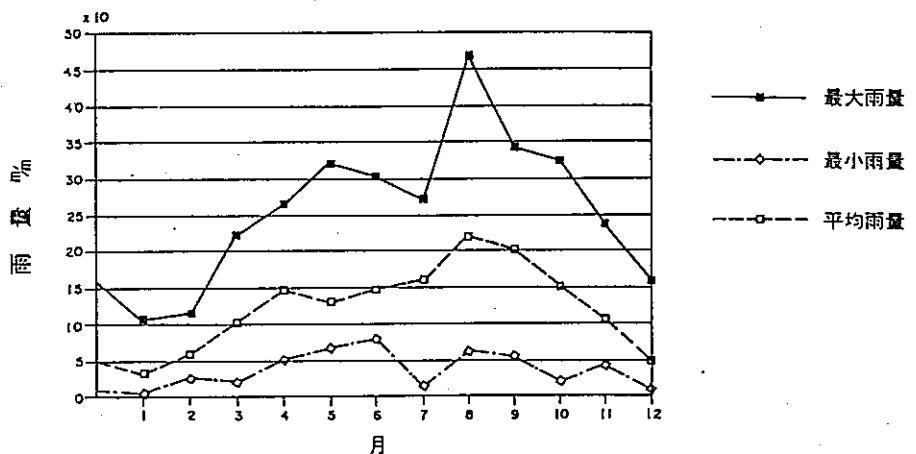


図-3-3 鉱山周辺の年間降水量
(昭和49年1月～昭和61年12月)

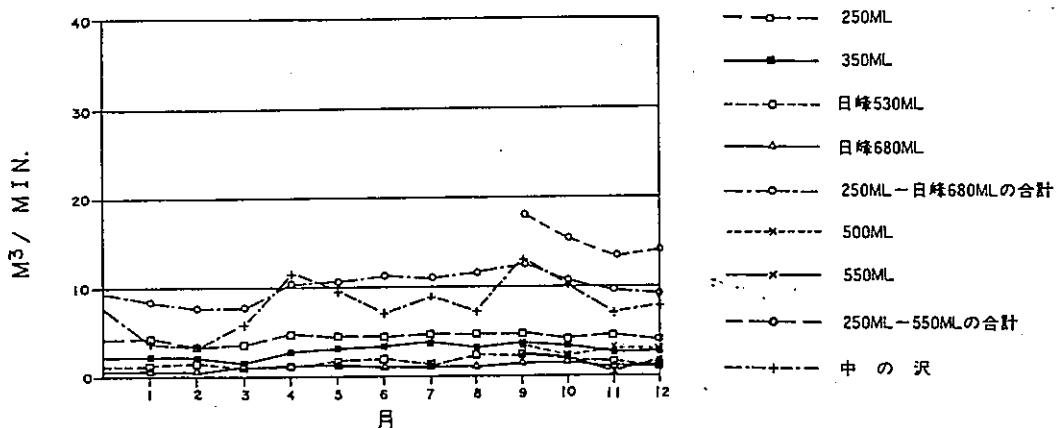


図-3-4 鉱山の孔口からの水の流出量
(昭和49年1月～昭和61年12月)

4. 試験研究の概要

第1フェーズでは、花崗閃緑岩の地質環境特性を把握するため、次の6研究分野を設定した。

①地質構造

NW坑道とNE坑道の壁面において割れ目調査を実施し(図-4-1(a))、割れ目の方向、大きさ、体積密度のモデル化手法について検討した。さらに、構築した割れ目のモデルに基づきモンテカルロ法を用いたシミュレーションを行い、割れ目の分布を推定した。また、花崗岩における試錐孔間の割れ目の分布を間接的に把握するための手法として、物理探査手法(レーダトモグラフィーと比抵抗トモグラフィー)を取り上げ、KD-90坑道周辺で周辺でその適用性を検討した(図-4-1(b))。

②地下水の水理特性

花崗岩における地下水の流動を把握するため、KG-1孔とKH-1孔、およびKD-90坑道周辺で原位置透水試験と間隙水圧測定を行い、水理特性に関するデータを取得した(図-4-1(b))。さらに、KD-90坑道への湧水量を予測するために、多孔質媒体モデルと亀裂ネットワークモデルの2つのモデル化手法を用いて解析を行った。

③地下水の地球化学特性

本地域での地下水の化学組成、起源および滞留時間を把握するため、NW、NE坑道とKG-1、KH-1孔において地下水を採取し、水質・同位体分析を行なった。また、室内の水-岩石反応試験により地下水の水質形成機構の解明を試みた。

④岩盤力学

NW、KD-88、KD-89坑道において、初期地圧の測定および坑道掘削によって生ずる掘削影響領域を評価するための調査・研究を行なった(図-4-1(a))。また、坑道掘削による力学的な影響を把握するために、弾塑性モデルを用いた有限要素法による解析を行った。

⑤地震

地震が地下深部岩盤に及ぼす影響を把握するために、地上と地下に地震計を設置し、地震観測を行い、地震動の深度方向の変化を検討した(図-4-1(c))。さらに、地震が地下水の挙動へ与える影響を調べるために、地震計に連動した水圧計および水量計さらには水質変化を調べるための採水装置を設置し、モニタリングを行った(図-4-1(c))。

⑥岩盤内充填粘土の挙動

岩盤内に粘土(ベントナイト)を配置した場合、このベントナイトは地下水を含むことにより膨潤し、周囲の岩盤には膨潤圧がかかる。このような、岩盤中に埋設した粘土と岩盤との相互作用を明らかにするため、NW坑道(図-4-1(a))において岩盤内充填粘土挙動試験を行なった。

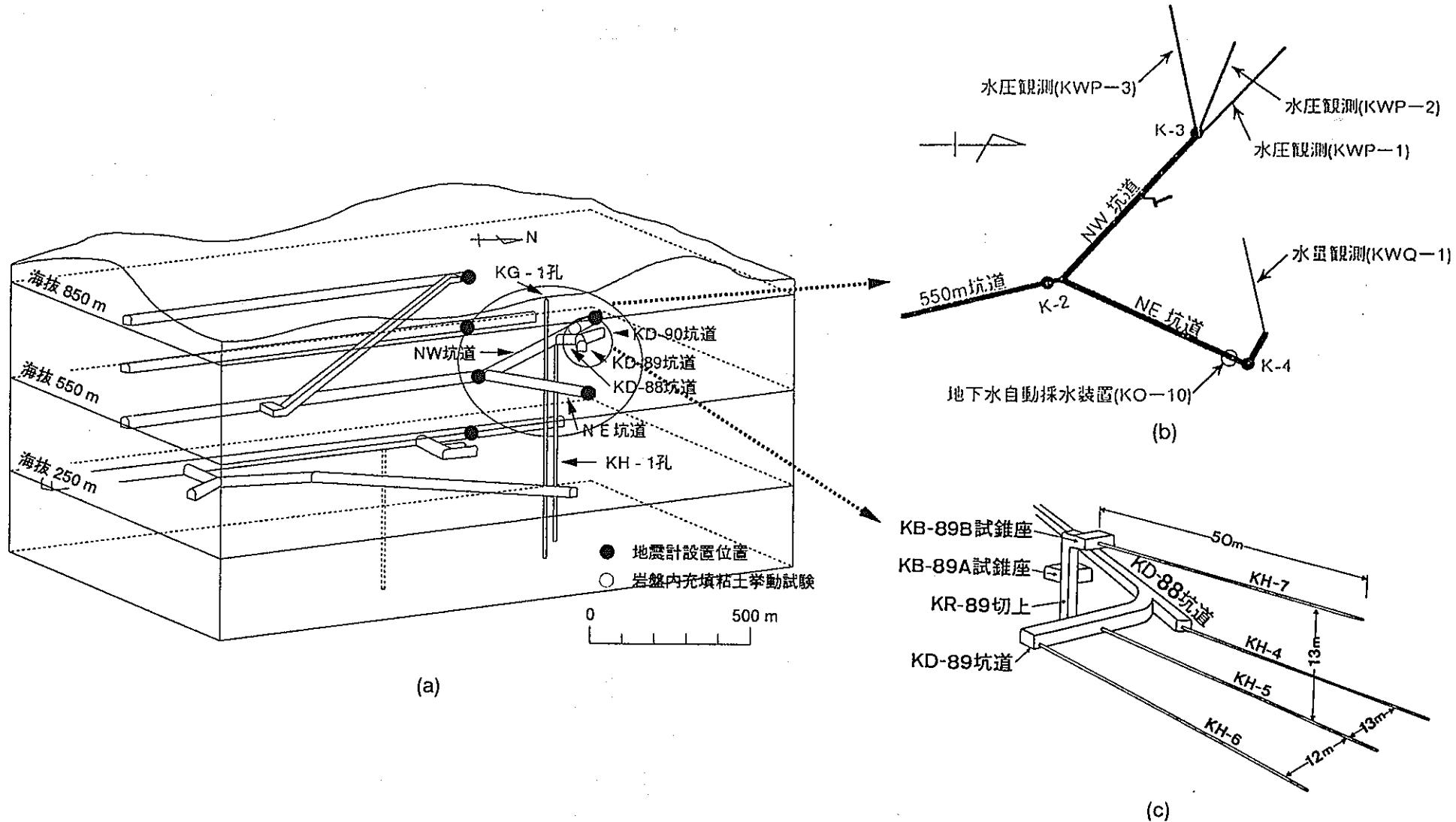


図-4-1 釜石原位置試験（第1フェーズ）実施場所

5 地質構造

原位置試験場(550m レベル坑道) の地質構造を把握するため、新規の試錐孔や坑道壁面において割れ目調査を実施した。また、上記データを用いて、割れ目のモデル化手法について検討した。具体的には、割れ目調査結果に基づき、割れ目の大きさと方向および密度についてスキャンライン法で評価し、確率モデルに基づき岩盤内の割れ目のモデル化を行った（野口ほか、1991b）。次に、充填鉱物が存在する割れ目の幅の分布特性を検討した。さらに、本原位置試験場で実施されたボーリング孔を対象として、上記で得られた諸量を用いてモンテカルロ法によるシミュレーションを行い割れ目の頻度と方向を推定した。最後に、推定した割れ目の頻度と方向を実測値と比較し、本モデル化手法の適用性について検討した。

5. 1 割れ目調査

5. 1. 1 調査方法

割れ目調査は、岩芯を用いた調査、ボアホールテレビによる調査（以下、BTV調査と呼ぶ）および坑道壁面における調査の3つに分けられる。

岩芯を用いた割れ目の記載は、表-5-1の項目について行った（野口ほか、1991a）。観察に際しては、試錐孔掘削時に生じたとみなされる人工的割れ目は排除した。割れ目データは、割れ目のモデル化のためにデータセットにした（岩崎ほか、1991）。

BTV調査は、試錐孔内にスキャナー式のテレビカメラを挿入し、撮影された画像により孔壁を観察する方法である。本調査により、コア観察のみでは取得不可能な割れ目のデータ（走向傾斜、間隙幅、湧水の有無）を収集し、上記データセットの充実を図った。

坑道壁面における割れ目調査では、表-5-1の項目について行った。本調査は、基本的に、坑道規模の岩盤の透水性や変形性に影響を及ぼすと考えられる長さ3m以上の割れ目を対象とした。割れ目の長さが3m未満の場合でも、湧水を伴う割れ目や3m以上連続する割れ目を切る割れ目については調査の対象に含めた。

5. 1. 2 調査地域の割れ目の特徴

KD-90坑道周辺には、互いに直交する3方向に計13孔の試錐孔がある（図-5-1）。このうちKH-5孔はKD-90坑道掘削前に削孔されたものである。KH-12、KH-15、KH-18孔は鉛直下向きの孔で、他の試錐孔は水平孔である。

調査された全ての割れ目の方向を区分するため、下半球投影シュミットネットに投影し面積比5%の小円を用いて密度分布を求めた（図-5-2）。その結果、3方向の卓越方向が認められた。最も卓越する方向はN40°E・60°NWであり、ついでN70°E・80°NW、そしてN20°W・90°の順となった。

次に、KD-90坑道周辺の割れ目の端形状、変質度、充填物の特徴を検討、以下の知見を得た。

①端形状

割れ目の端形状は、図-5-3に示すように4つに区分して記載した。このうち、他の

割れ目によって切られるもの（以下、Dタイプと呼ぶ）と岩盤内に消滅するもの（以下、Rタイプと呼ぶ）の2つに分類し、割れ目の卓越方向を検討した。Dタイプの割れ目の卓越方向は、全割れ目の卓越方向と一致した（図-5-4）。一方、Rタイプの割れ目の卓越方向は全割れ目の卓越方向と異なり、ほぼN20°W・90°である。

②変質度

割れ目周辺の母岩の変質程度ごとの割れ目方向の分布を図-5-5に示す。変質を伴う割れ目の方向はN40°E・60°NWに集中し、未変質の割れ目の方向はN20°W・90°に集中する傾向が認められた（岩崎ほか、1993）。

③充填幅

充填幅により、割れ目を3つに区分し（3mm以上、10mm以上、20mm以上）、割れ目の方向を検討した（図-5-6）。割れ目の充填幅が大きくなるに従って、N20°W・90°付近の割れ目よりも、N40°E・60°NWに集中する傾向が認められた（岩崎ほか、1993）。

5. 1. 3 割れ目のモデル化手法（野口ほか、1991b）

坑道と試錐孔における割れ目調査から得られたデータから割れ目の3次元的な分布の推定を試みた（野口ほか、1991b）。具体的には、割れ目調査結果に基づき、割れ目の大きさと方向および密度についてスキャンライン法で評価し、確率モデルに基づき岩盤内の割れ目のモデル化を行った。次に、充填鉱物が存在する割れ目の幅の分布特性を検討した。さらに、本原位置試験場で実施されたボーリング孔を対象として、上記で得られた諸量を用いてモンテカルロ法によるシミュレーションを行い、割れ目の頻度と方向を推定した。最後に、推定した割れ目の頻度と方向を実測値と比較し、本モデル化手法の安定性について検討した。

調査領域は、延べ1623.7mのNW坑道とNE坑道周辺である（図-5-7）。調査では、坑道の天盤にスキャンラインを設置し、このスキャンラインと交差する割れ目を対象に、半トレース長（割れ目のスキャンライン片側における長さ、図-5-8中のt）や割れ目の方向を計測した。

（1）解析方法

解析にあたっては、岩盤内に存在する割れ目はそれと等価な面積と方向を有する円盤状クラックで表現されるものと仮定する。体積Vの岩盤中に、その中心を持つN個の割れ目が存在する場合を考え、割れ目の堆積密度を $\rho_v = N/V$ で表すことにする。また、円盤状割れ目の直径および厚さをr、w、その単位法線ベクトルをnで表し、割れ目の分布密度はこれらの変数に対する確率密度関数 $P(r, w, n)$ で表せると仮定する。ここで簡略化のためr, w およびnは互いに独立であるものと仮定し、 $P(r, w, n)$ を以下の式(1)で与えることを考える。

$$P(r, w, n) = P_r(r) P_w(w) P_n(n) \quad (1)$$

ただし、 $P_r(r)$ 、 $P_w(w)$ 、 $P_n(n)$ はそれぞれr, w およびnについての確率密度関数

である。このような前提に立つと岩盤の割れ目群の分布特性は r および n に関する確率密度 $P_R(r)$ 、 $P_w(w)$ 、 $P_N(n)$ という 4 つの量で表現されることとなる。ここでは、スキャンライン法で割れ目を評価した結果からこれらの諸量を推定し、割れ目群のモデル化を試みた。以下にその方法を記述する。

①割れ目の方位に関する分布の推定法

岩盤壁面上に、長さ L 、方位ベクトル e^i のスキャンラインを設定すると、スキャンラインと交差する割れ目群の分布を表す確率密度関数 $P^L(r, n)$ は、式(2) で表される (M. Oda, 1982) 。

$$P^L(r, n) = L/N_L \cdot \rho_v \pi (r/2)^2 P_R(r) \cdot n_i P_N(n) \quad (2)$$

ただし、 N_L はスキャンラインと交差する割れ目数であり、 $n_i = |e^i \cdot n|$ である。従って、スキャンラインと交差する割れ目群の方位分布は式(3) の確率密度関数 $P_{N^L}(n)$ で与えられる。

$$P_{N^L}(n) = L/N_L \cdot \rho_v \pi \int (r/2)^2 P_R(r) dr \cdot n_i P_N(n) \quad (3)$$

(3) 式より、 n に関する確率密度関数 $P_N(n)$ は(4) 式となる。

$$P_N(n) = (L/N_L \cdot P_{N^L}(n)/n_i) / (\rho_v \pi \int (r/2)^2 P_R(r) dr) \quad (4)$$

ここで、後述するように式(4) の ρ_v と $P_R(r)$ に関する項は定数であるから、計測された割れ目の方位分布 $P_{N^L}(n)$ に重み $N_L/L \cdot n_i$ を乗ずれば、スキャンラインの方向および長さの影響が除去され、これから真の方向分布 $P_N(n)$ が推定されることがわかる。しかし、現実の計測量は有限であるため n_i が小さな値をとる割れ目に対するデータの信頼性は相対的に低下することになる。つまり、一方向のみのスキャンラインでは $P_N(n)$ を完全に推定することは困難である。しかしながら、このデータの信頼性の低い領域はスキャンラインを設定すれば、これらの結果を式(4) に基づいて合成することにより、 $P_N(n)$ を全領域にわたって推定することができる。

②割れ目の大きさの分布と体積密度の推定法

坑道壁面上に図-5-8 に示すような長さ L のスキャンラインを考え、それと交差する割れ目の半トレース長（スキャンライン片側における長さ）を計測した。 $P_R(r)$ を式(5) のような指数分布で与えると、半トレース長が c 以上となる割れ目の数 $N_L(c)$ は式(6) のようになる（金子ほか、1988）。

$$P_R(r) = \zeta \exp(-\zeta r) \quad (5)$$

$$N_L(c)/L = \rho_v \cdot \Theta \cdot \Omega \cdot F(c/\zeta) / \zeta \quad (6)$$

ただし、 Θ および Ω はスキャンライン方位 e^i と $P_N(n)$ で与えられる定数（金子ほか、1988）であり、関数 F は図-5-9に示すように与えられる（金子ほか、1988）。なお、坑道壁面上には坑道掘削による小さな割れ目が混合することが多い。小さな割れ目のぶんを ρ_v^* と $\zeta \exp(-\zeta^* r)$ で与えると、この場合の $N_L(c)/L$ は、式(7)で表される。

$$N_L(c)/L = \rho_v \cdot \Theta \cdot \Omega \cdot F(c \zeta) / \zeta^2 + \rho_v^* \cdot \Theta^* \cdot \Omega^* \cdot F(c \zeta^*) / \zeta^{*2} \quad (7)$$

従って、種々の c の値について c と $N_L(c)/L$ との関係を調べてそれを式(6)もしくは式(7)を適合させると未知量 ζ （すなわち $P_R(r)$ の定数部の値）と ρ_v が推定されるとなる。ここで、式(7)は統計的に十分な測定量に対して成立するが、実際の解析では計測されたサンプル集団に対して式(7)が適用される。このサンプル集団に対して求められた値を ρ_v^s 、 ζ^s とおくと、スキャンライン長 L が十分長い場合に ρ_v^s 、 ζ^s は母集団の値 ρ_v 、 ζ と一致するわけであるが、 L が限られている場合には、それらの母集団の値と異なることになる。このことについて、柴ら(1988)は半トレース長計測に関するモンテカルロシミュレーションを行っている。それによると、 ρ_v^s / ρ_v 、 ζ^s / ζ の分散は $\rho_v L / \zeta^2$ の増大に伴ってゼロに収束するが、同一の $\rho_v L / \zeta^2$ の値において ζ^s / ζ の分散値は ρ_v^s / ρ_v の分散値の大略半分以下となると報告されている。そこで、問題の簡略化のため $\zeta^s = \zeta$ とおき、サンプル集団の特性を ρ_v^s のみにより表現するものと仮定すると、 ρ_v^s は式(8)で与えられることになる。

$$\rho_v^s = G(X, L) \rho_v \quad (8)$$

ただし、 $G(X, L)$ は計測地点 X における長さ L のスキャンライン計測により得られたサンプル集団の偏りを表し、

$$G(X, L) \rightarrow 1 \quad (L \rightarrow \infty)$$

となる。従って、 $G(X, L)$ の評価が重要となるが、これは次のようにして近似的に評価される。まず、式(7)の右辺第2項が無視可能な程度に大きな半トレース長 C_0 について、十分な長さ L のスキャンラインと限られた長さ L のスキャンラインにおける測定値を、それぞれ $N_{L_\infty}(C_0)$ および $N_L(C_0)$ とおく。さらに、サンプル集団における Θ および Ω の変動を無視すると、式(7)および式(8)より次の関係が求められる。

$$N_L(C_0)/L = G(X, L) N_{L_\infty}(C_0)/L_\infty \quad (9)$$

式(9)は、比較的大きな割れ目についてのみ広範囲な計測を行っておけば、全域における計測記録から $N_{L_\infty}(C_0)/L_\infty$ が、また、半トレース長計測区間における計測記録から $N_L(C_0)/L$ が求められ、これにより、半トレース長計測区間の $G(X, L)$ が近似的に推定されることを示している。

③割れ目分布の推定

①から②で推定した諸量 ρ_v 、 $P_R(r)$ 、 $P_N(n)$ 、 $P_W(w)$ は、本領域の岩盤割れ目の分布形態を示すものである。従って、これらの諸量を用いてモンテカルロ法によるシミュレーションを行うと、種々の条件下で観察される割れ目の分布形態を推定することができる。

(3) 解析結果

①割れ目の方向に関する分布

割れ目の方向分布をシュミットネットを用いて割れ目面の極の下半球投影図で示すと、図-5-10(a), (b) に示すようになる。図には、スキャンラインの方向を実線で示している。図-5-10(a) および(b) を比較すると、極の分布は両者で若干異なっている。しかし、これらの極の分布をスキャンライン方向の関係でみると、ともにスキャンライン方向に平行な方向の割れ目の極が相対的に少なくなっていることがわかる。すなわち、これらの図は、式(3) の $P^\perp(n)$ に対応するものであることを考慮すると、両者の相違は計測したスキャンラインの方向の違いに起因するものと考えられる。そこで、図-5-10 の結果を式(4) を用いて方位補正を行い、これらを合成した結果を図-5-11に示す。なお、 $n_i < 0.174$ となるデータ、すなわちスキャンラインと割れ目のなす角度が $\pm 10^\circ$ 以内にあるデータは、信頼度が低いため解析から除外した。

②割れ目の大きさの分布と体積密度

半トレース長の計測結果を図-5-12に示す。図-5-12によれば c が1m以下で割れ目数が急増しているが、これは岩盤壁面付近の緩みに関係した微小割れ目に對応しているものと推察される。なお、この計測区間内で実施されたボーリング孔における割れ目調査によっても岩盤壁面から1m程度の深さの範囲で割れ目頻度が相対的に大きな値を示すことが確認されている。そこで、計測値に式(7) を適用し、 ρ_v^s および ζ^s を求めると、 $\rho_v^s = 0.06(1/m^3)$ 、 $\zeta^s = 0.2(1/m)$ となった。なお、図中の実線は式(7) による理論曲線を示し、破線は式(7) の右辺第2項を無視した場合の理論曲線を示している。図より、理論曲線は測定値の傾向をよく表現していることがわかる。また、図より、岩盤表面付近の微小割れ目群の影響は $c > 1m$ では無視可能であり、この条件下では式(7) の右辺第2項を省略した形式（式(6) に対応する）で表現されることもわかる。

坑道壁面における割れ目の半トレース長の計測は、 $c > 3m$ の割れ目が対象とされている。そこで、 $N_{L\infty}(c_0)/L_\infty$ をNW押し坑道全域における割れ目頻度の平均値で与えると、半トレース長計測区間の $G(X, L)$ が推定される。この結果、 $G(X, L) = 1.27$ 、 $\rho_v = 0.047(1/m^3)$ となった。これらのことから、割れ目の直徑分布は式(10)のようであると推定される。

$$\rho_v P_R(r) = 0.0094 \exp(-0.2r) \quad (10)$$

③充填鉱物が存在する割れ目の幅の分布

本領域の割れ目の大部分は方解石、緑泥石、石英、沸石類などの鉱物で充填されている。

従って、本原位置試験場の割れ目は鉱物で充填されたものとしてモデル化される。そこで、割れ目の幅を充填物の幅で表現することとした。NW、NE坑道のそれぞれについて割れ目幅の累積頻度を調べると図-5-13のようになる。図-5-13より、割れ目幅の累積頻度分布は片対数紙上で直線となり、その傾きは両坑道でほぼ等しいことがわかる。この結果は、割れ目の幅 w に関する確率密度関数 $P_w(w)$ が、 $P_R(r)$ と同様に指數分布で表されることを示している。 $P_w(w)$ は次式で示される。

$$P_w(w) = 0.013 \exp(-77w) \quad (11)$$

④割れ目分布の推定

①から③の結果得られた確率モデルを用いて、モンテカルロ法により、NW坑道と平行な長さ600mのスキャンラインを想定し、このスキャンラインと交差し、かつ半トレース長が3m以上となる割れ目の分布を推定した。その結果を図-5-14に示す。ただし、計算においては割れ目の中心座標の空間配置はランダム分布で与えられるものと仮定した（割れ目の中心座標を乱数で与えた）。図中の割れ目頻度の推定値は、実測した割れ目密度分布と対応するように、20m区間における $N_L(3)/L$ の値で示した。割れ目頻度の推定値と実測値を比較すると、両者の全体の傾向はほぼよい対応を示しており、本領域の割れ目が、上記の確率モデルでよく表現されていることが確かめられた。

また、本領域では、掘削方向が異なる多数の試錐孔が存在し、そこでは、ほぼ全長にわたってBTV調査を行っている（図-5-15）。これらの試錐孔調査による割れ目の走向別頻度を上記の確率モデルで推定し、その推定値と実測値を比較した。ここで、試錐孔壁面で観察される割れ目の分布関数は、試錐孔長を L 、試錐孔方位ベクトルを e^i とおけば式(2)で与えられ、試錐孔長 L が十分長い場合には、割れ目の方向分布は式(3)で与えられる。しかしながら、既述のように試錐孔長が限られている場合には、計測されるサンプル集団のもつ偏りを考慮する必要がある。この場合には、試錐孔壁で観察される割れ目の方向に対する頻度 $(N_L/L)P_{N^L}(n)$ は式(12)で与えられる。

$$(N_L/L)P_{N^L}(n) = G(X, L) \pi \rho v \int (r/2)^2 P_R(r) dr n_i P_N(n) \quad (12)$$

この場合の $G(X, L)$ は、未知量となるが、ボーリングを実施した付近の坑道壁面で推定された値で代用することも可能である。この仮定のもとに図-5-16(a)～(c)に示すボーリング孔について割れ目の走向別頻度を推定した。また、図-5-16(d)～(f)はそれぞれのボーリング孔においてBTV調査から得られた割れ目の走向の実測値を頻度分布で示したものである。両者を比較すると、若干のずれはあるが、いずれもよく対応している。

5. 1. 4 成果と課題

第1フェーズでは、550mレベル坑道を対象として、岩芯を用いた割れ目調査、BTV調査、坑道壁面における割れ目調査を実施し、割れ目の方向、端形状、変質度、充填幅の特

法で評価した情報を用い、確率モデルに基づき、岩盤内の割れ目のモデル化を行った。次に、充填鉱物が存在する割れ目の幅の分布特性を検討した。さらに、得られた確率モデルの諸量を用いてモンテカルロ法を用いたシミュレーションを実施し、550mレベル坑道で実施された試錐孔を対象として割れ目の頻度と方向を推定した。その結果、未知の領域に分布する割れ目の頻度や方向を、確率モデルを用いて、ある程度推定可能であることが示された。

しかしながら、本調査・解析では、確率モデルを用いた解析を行う際、岩相の分布や割れ目帯の分布が確率モデルの諸量に与える影響が十分が把握できていなかったため、確率モデルの諸量が解析の対象とした全領域で確率モデルの諸量が同じであると仮定して解析を行った。今後、岩相の分布や割れ目帯の分布がモデル化の諸量に与える影響を十分把握し、解析の対象領域を決定する必要がある。特に、岩相による割れ目の分布の違いや、割れ目帯とそれ以外の岩盤との定量的な区分が重要であると考える。

また、地質と地下水の水路・地下水の地球化学的特性・力学的特性との関係は明らかとなっていない。今後、原位置試験場の場を理解するためには、地質、地下水の地球化学特性、力学特性の総合的な検討が必要とされる。

表-5-1 記載内容の概要

項目	内容
割れ目の位置	坑道基準点に最も近い出現箇所を10cm単位で記載
間隙（幅）	間隙幅が変化する場合は最大値を記載。単位mm。
形状パターン	Planar, Curved, Irregular, Stepped に区分
端形状	調査範囲内の両端形状によって4区分
粗さ	滑らか～粗いの4区分
変位（量）	切った割れ目面の移動距離量をmm単位で記載
変質程度	母岩の変質程度を記載
変質部の色	割れ目に接する母岩の変質色を記載
変質部の幅	割れ目に接する母岩の変質幅を記載
充填幅	割れ目を充填する鉱物を量の多いものから記載
湧水量	幅が変化する場合は最大値を記載
半トレース長	乾燥・にじみ程度・滴水・流水の4区分 割れ目のスキャンライン片側における長さを記載

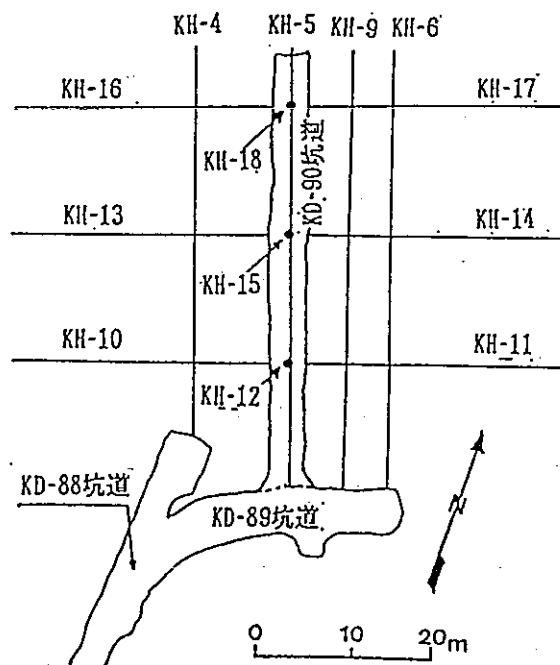


図-5-1 調査対象の試錐孔と坑道の位置図 (岩崎ほか, 1991)

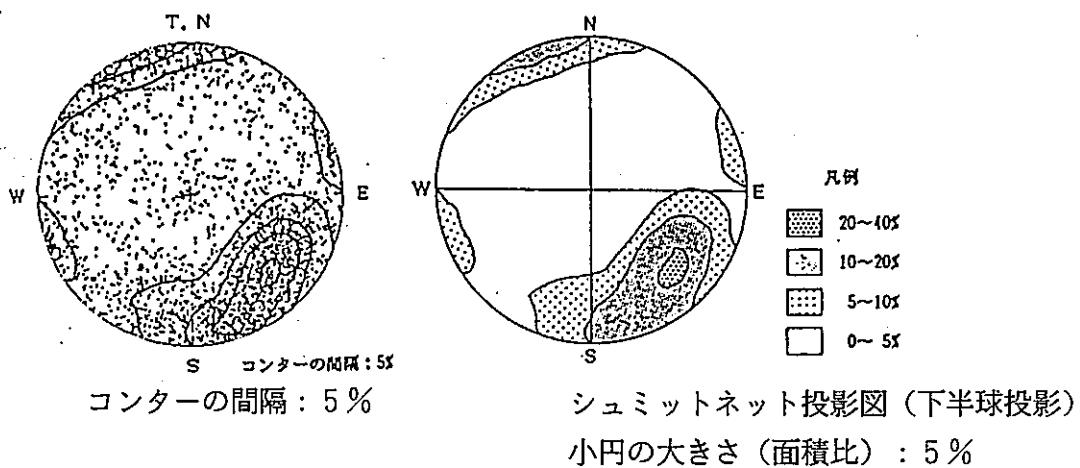


図-5-2 割れ目の方向(シュミットネット投影図)(岩崎ほか, 1991)

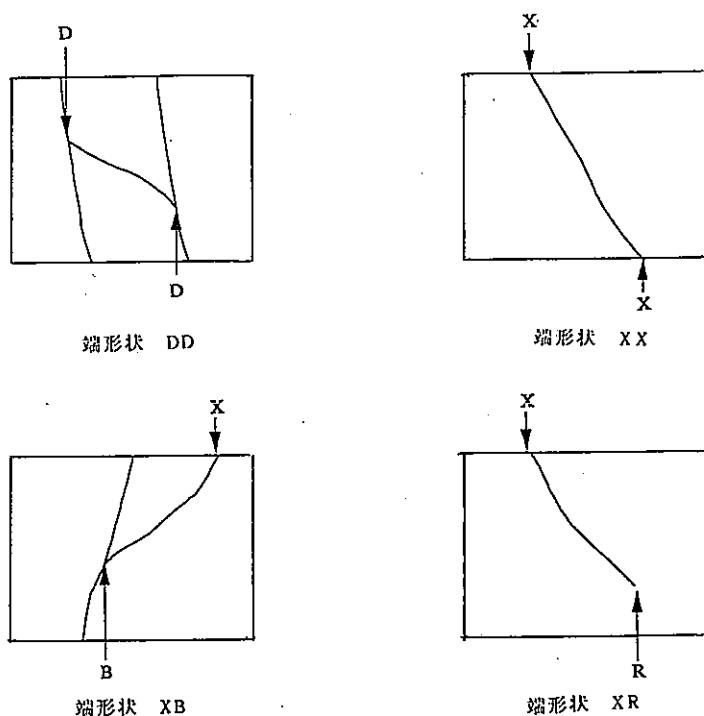


図-5-3 割れ目の端形状の区分

- X: 割れ目の端が調査範囲外へ延びるもの
- R: 割れ目の端が調査範囲内で消滅するもの
- D: 割れ目の端が調査範囲内で他の割れ目に切られるもの
- B: 割れ目の端が調査範囲内で他の割れ目から分岐するもの

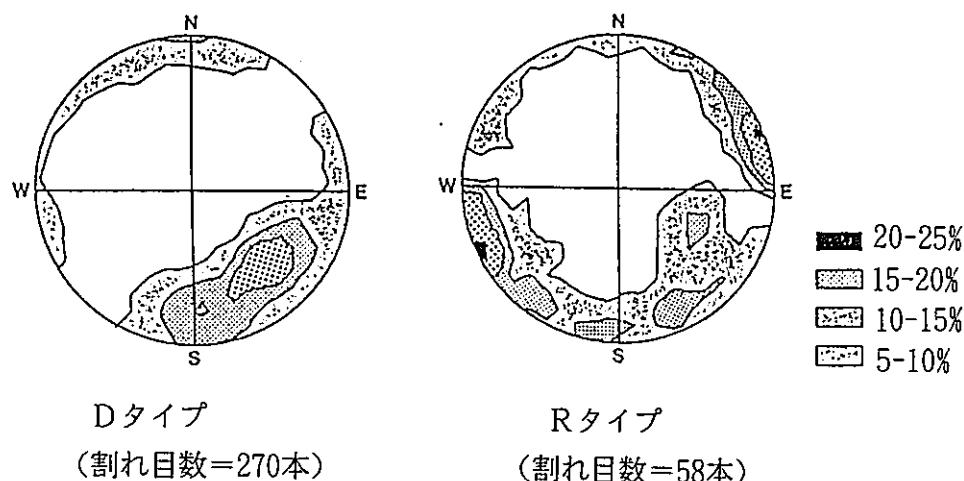


図-5-4 割れ目の端形状ごとの割れ目の方向 (岩崎ほか, 1991)

シュミットネット投影図 (下半球投影)

小円の大きさ (面積比) : 5 %

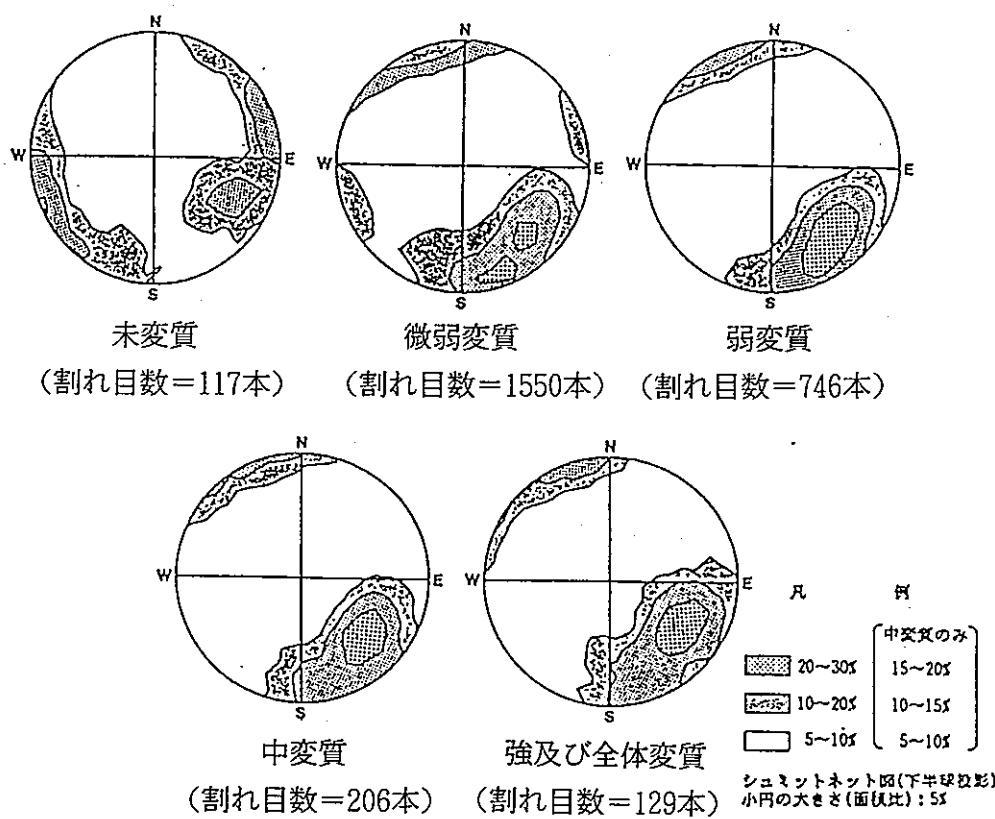


図-5-5 変質程度ごとの割れ目の方向 (岩崎ほか, 1991)

シュミットネット投影図 (下半球投影)

小円の大きさ (面積比) : 5 %

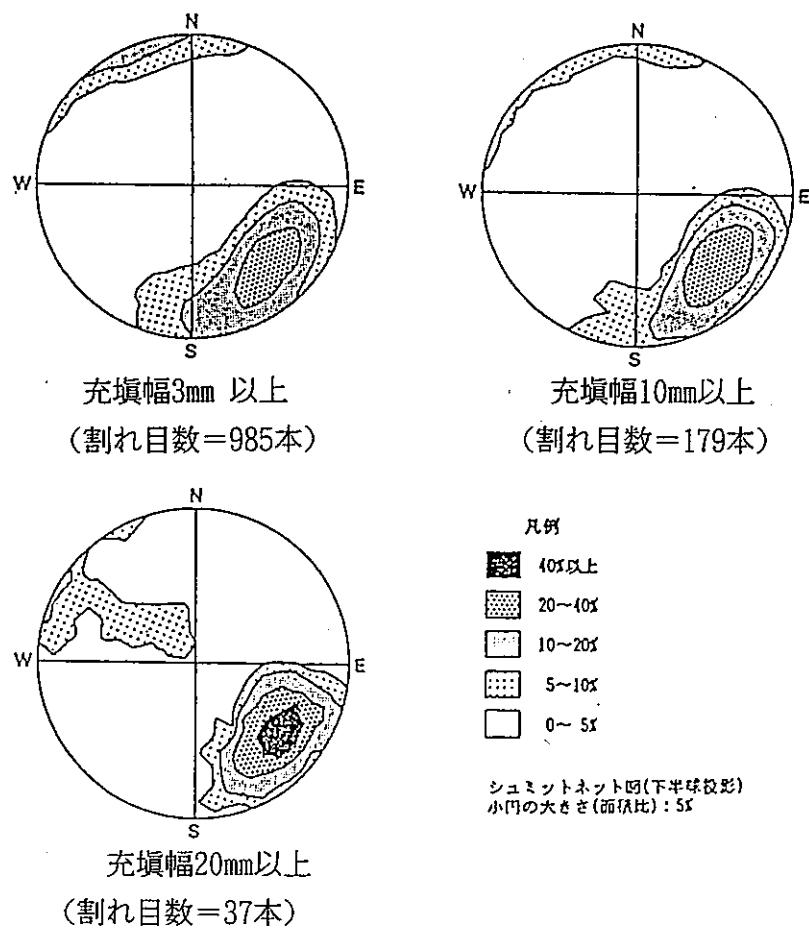


図-5-6 充填幅ごとの割れ目の方向 (岩崎ほか, 1991)

シュミットネット投影図 (下半球投影)

小円の大きさ (面積比) : 5 %

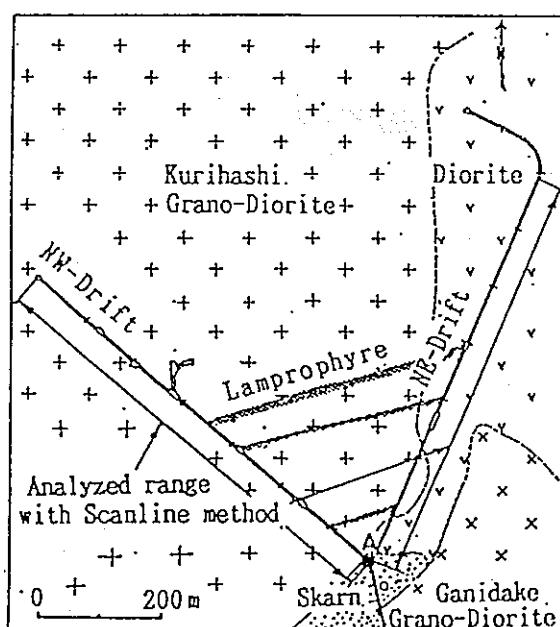


図-5-7 スキャンライン法で割れ目を計測した範囲 (野口ほか, 1991b)

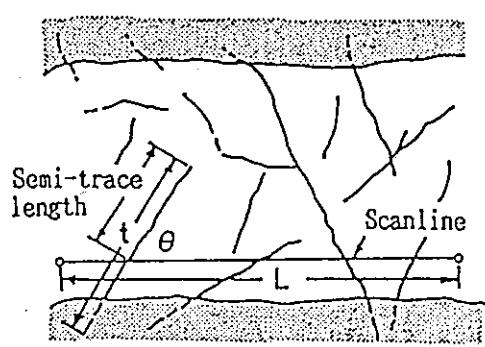


図-5-8 坑道壁面におけるスキャンライン法の概念（野口ほか, 1991b）

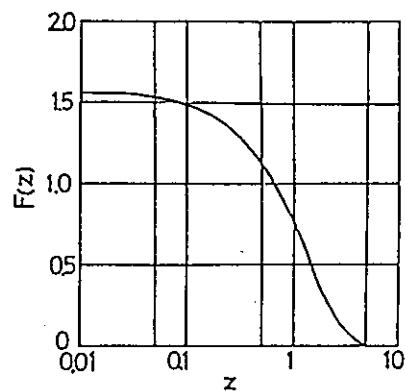


図-5-9 関数 $F(x)$

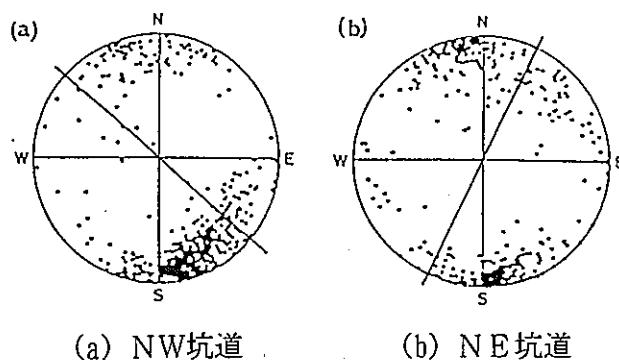


図-5-10 各坑道の割れ目の方向（シュミットネット投影図、下半球投影（野口ほか, 1991b）

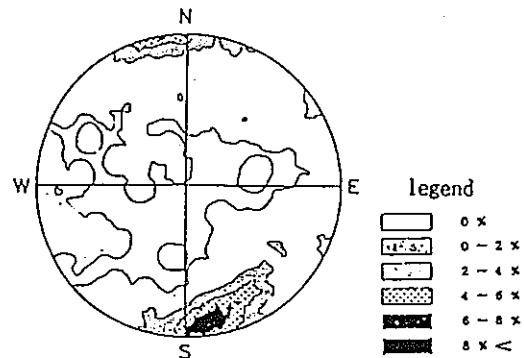


図-5-11 スキャンライン法で補正した後合成した割れ目の方向（野口ほか, 1991b）

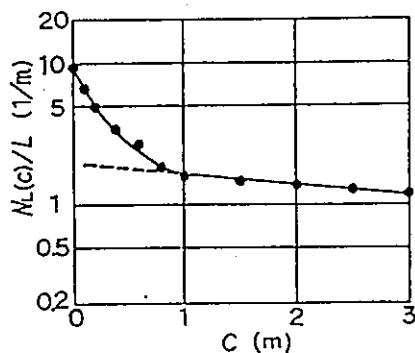


図-5-12 半トレース長の計測結果（野口ほか, 1991b）

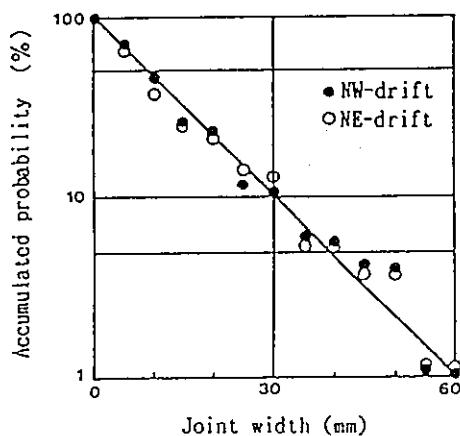
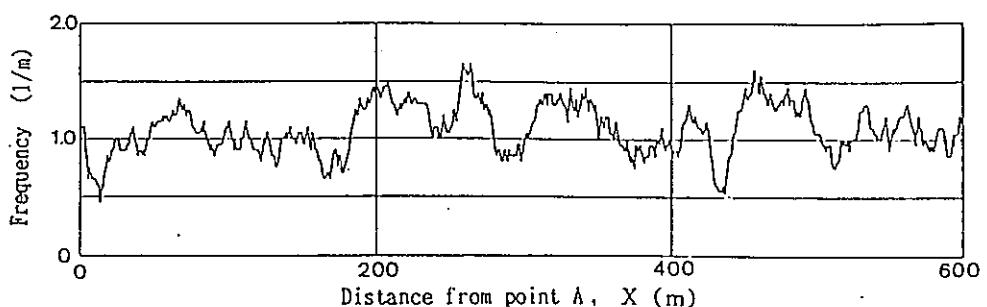
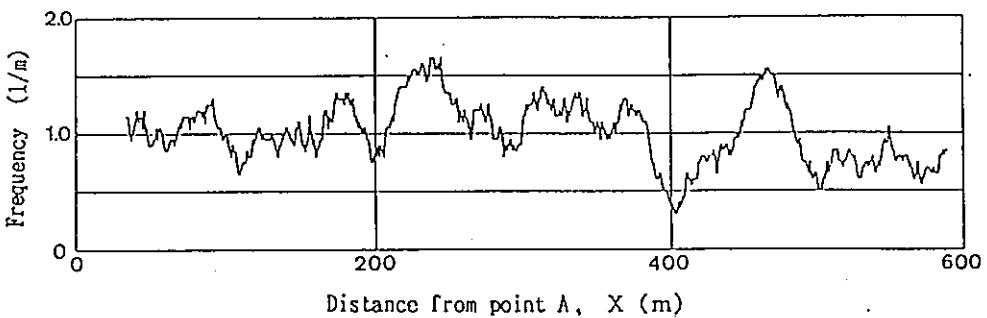


図-5-13 充填幅の累積頻度分布



モデル化で得られた諸量を用い、NW押し坑道を想定して、亀裂の位置はランダム分布と仮定した20m区間における $N_L(3)/L$ の値を示す。Xは点Aから坑道に沿った方向への距離である。



区間長20mの平均値で示す。半トレース長3m以上の亀裂を対象とした。

図-5-14 モンテカルロ法による割れ目の分布のシミュレーション結果

（上図）と実測値（下図）（野口ほか, 1991b）

点Aは図-5-7に示す。

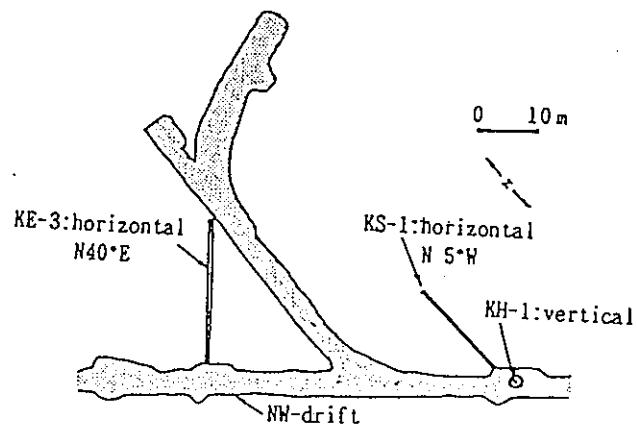


図-5-15 モデル化の結果の検証に用いた試錐孔の位置

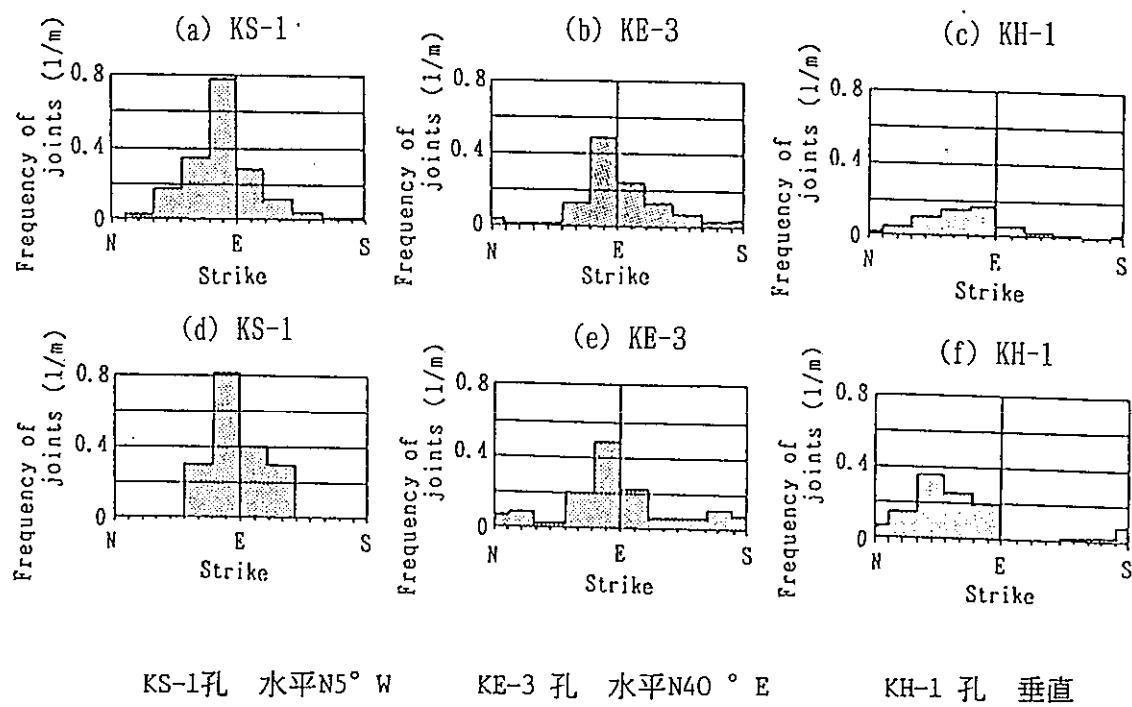


図-5-16 掘削方向の異なる試錐孔に交差する割れ目の走向頻度の予測値（上図）と実測値（下図）（野口ほか, 1991b）

5. 2 物理探査

5. 2. 1 レーダートモグラフィー（仙波ほか、1990）

①調査方法

レーダー法は、波長の短い電磁パルスを岩盤内に発信させ、電磁波の速度や減衰特性の変化に着目して、非破壊で岩盤の不均質性や不連続面等を調べる方法である。第1フェーズではスウェーデン廃棄物管理会社（SKB）が開発した試錐孔内用レーダーシステム（RAMAC）を用いて、孔間での適用試験を実施した。

本調査の実施場所は、図-5-17に示すKH-4～KH-7孔の位置で、KH-4・KH-5間、KH-5・KH-6間、KH-5・KH-7間、KH-4・KH-7間およびKH-6・KH-7間の全部で5平面について実施した。計測は、一方の孔にトランスマッタ（発信プローブ）を、他の孔にレシーバ（受信プローブ）を設置し、どちらも2m間隔で移動させて行った。データを取得したトランスマッタとレシーバの組み合わせを図-5-18に、測定仕様を表-5-2に示す。

②解析方法

トモグラフィー解析は、孔間の岩盤を1m×1mのセル（格子）に分割し（図-5-18参照）、各セル内の電磁波のスローネス（slowness、速度の逆数）は一定で、電磁波の伝播経路は直線と仮定して、CG法（共役勾配法、Conjugate Gradient method）を用いて行った。解析結果は、スローネスの基準値との差（これをスローネス残差、residual slownessと呼ぶ）で示した。基準値は、KH-5・KH-7間の測定波線のうち46本の平均伝播速度 $108\text{m}/\mu\text{sec}$ の逆数である 9259psec/m を用いた。

③解析結果

解析結果を図-5-19に示す。これと各孔の立体的な配置から、スローネス残差の大きい部分（電磁波速度の遅い部分）と小さい部分（電磁波速度の速い部分）について3次元的な連続性を推定すると、図-5-20のような、4つの低速度部と2つの高速度部が得られた。また、電磁波速度の遅い部分は周辺の岩盤に比べ割れ目が発達し、含水量が多くなっている部分であると推定された。

④考察・成果

この解析結果は、試錐孔で観察される割れ目や湧水の分布と、試験後KH-5孔の位置に掘削されたKD-90坑道の観察によって検証した。まず、ボーリング孔での割れ目調査によれば割れ目の卓越方向としてN30°～40°E系とN80°～90°W系が確認されたが、低速度部3と4が前者、1と2が後者と一致している。図-5-19中の黒丸はボアホールテレビで確認された湧水箇所を示したものであるが、湧水箇所は電磁波速度の遅いところとよく一致している。

次にKD-90坑道の坑道壁面観察結果と本解析結果を比較した。図-5-21に坑道壁面観察結果を示す。この坑道壁面の位置とトモグラフィー解析のセルの位置は、天盤がKH-5・KH-7間のKH-5から3番目、側壁がKH-4・KH-5間およびKH-5・KH-6間のそれぞれKH-5から2番目のセルに当たる。

坑道壁面観察結果とトモグラフィー解析結果とを比較してみると、トモグラフィー解析で得られた電磁波速度の遅い部分と壁面の割れ目密度の高い部分および湧水部分が、メートルオーダーでよく一致した。

以上のことから、レーダートモグラフィーは孔間距離が10数メートル程度の試錐孔に挟まれた領域内の非破壊調査法として、メートルオーダーで含水量の多い場所を予測することができる事が明らかとなった。

5. 2. 2 比抵抗トモグラフィー

①調査方法

比抵抗トモグラフィーは、岩盤内に流される電流によって生じる電場を計測し、得られたデータから岩盤の比抵抗分布を求めることにより、非破壊で岩盤の不均質性や不連続面等を調べる方法である。第1フェーズでは、KH-4・KH-5間、KH-5・KH-6間、KH-5・KH-7間の全部で3断面について比抵抗トモグラフィーを実施した（図-5-17参照）。

計測は、3極法を用いた。電極間隔は2mとし、遠電極を坑道延長ぞいに試験区域から約500m離れた地点に設置した。測定は、インライン測定（1孔の中だけの測定）とクロスホール測定（2孔間の測定）の両方を実施した。図-5-22にクロスホール測定パターンを示す。測定データの総数は3断面合計で5024であった。

②解析方法

トモグラフィー解析は孔間の岩盤を2m×2mのセルに分解し、各セルの最適な比抵抗値をマルカートの修正非線型最小二乗法により求めた。トモグラフィー解析は、岩盤の比抵抗を等方と仮定して実施した。

③解析結果

解析結果を図-5-23に示す。いずれの断面とも、10~20m, 40~50mの間に低比抵抗帯が、0~10mの間に高比抵抗帯が認められる。また、試錐孔近傍には試錐孔に平行な比抵抗分布が認められ、さらに、試錐孔に挟まれる領域の外側には試錐孔に接して高比抵抗帯が認められる。

④考察・成果

図-5-24には、ボアホールテレビにより観察された割れ目のうち、岩芯観察で開口割れ目と判断された割れ目の分布を示す。図中のKH-9孔はトモグラフィー調査後に掘削された試錐孔である。トモグラフィー解析結果と割れ目分布を比較すると、割れ目頻度の高い部分は低比抵抗帯の部分と良く一致し、低比抵抗帯は割れ目頻度の高い部分であることが推定された。

ボアホールテレビによる割れ目観察の結果によれば、この地域ではN30~40°Eの走向（試錐孔と直交方向）の割れ目が卓越していることが確認されているため、比抵抗分布は試錐孔と直交する構造になると予想される。トモグラフィー解析結果では、試錐孔に平行な構造が見られるが、このような構造は地質学的には認められない。また、KH-4・K

H-5断面とKH-5・KH-6断面はKH-5孔近傍で重複しているが、KH-5孔近傍の比抵抗分布には双方の断面の間に相違が見られ、インライン測定のデータのみを用いて解析した比抵抗断面とクロスホール測定のデータのみを用いて解析した比抵抗断面にも大きな相違が見られた。

本地域のように一方向の割れ目が卓越する岩盤では比抵抗の異方性が考えられるので、比抵抗の異方性を考慮したトモグラフィー解析を行った。解析は、ボーリング孔に平行な方向の比抵抗 R_x とこれに直交する比抵抗 R_y を考え、各セルの最適な R_x 比抵抗分布および R_y 比抵抗分布を求めた。解析結果を図-5-2.5に示す。 R_y 解析比抵抗断面では、比抵抗を等方と仮定した場合に現れたボーリング孔周辺の高比抵抗が全く現れず、KH-4, 5, 6孔間の連続性は良好である。 R_y 解析比抵抗断面においては、低比抵抗を示す区間の試錐孔の周辺に高比抵抗の歪みが残るが、断面間の連続性は大幅に改善された。

解析結果によると、 R_x の平均値は $11170 \Omega \cdot m$ 、 R_y の平均値は $7900 \Omega \cdot m$ となり、 R_x は R_y に比較し約30%大きい傾向を示す。このことは、この地域の割れ目が試錐孔に直交する方向に卓越する事と良い一致を示し、今回の解析法の妥当性が確認された。

以上のことから、一方向の割れ目が卓越する異方性の強い岩盤を対象に比抵抗トモグラフィーを実施する場合は、岩盤の比抵抗の異方性を考慮した解析を行う必要があることが明らかとなった。

5. 2. 3 成果と課題

物理探査は、岩盤の内部を非破壊で調査する手法である。フェーズ1では、レーダー法と比抵抗法を用いて孔間距離が10数mの領域において岩盤の含水量をメートルオーダで推定できた。今後は、岩盤内の割れ目や割れ目帯の特性やその分布・規模をさらに詳細に把握するための機器および調査・解析手法を開発する必要がある。

表-5-2 レーダートモグラフィー測定仕様（仙波ほか、1992）

KH-4・KH-5号孔間	
電磁パルスの中心周波数	6.0 MHz
サンプリング周波数	6.32 MHz
測定深度 トランスマッタ レシーバ	1. 2.0 m~4.5. 2.0 m (KH-5号孔) 1. 2.7 m~4.1. 2.7 m (KH-4号孔)
測定波線数の総数	419
解析に用いた波線の総数	354
KH-6・KH-5号孔間	
電磁パルスの中心周波数	6.0 MHz
サンプリング周波数	6.32 MHz
測定深度 トランスマッタ レシーバ	1. 2.0 m~4.3. 2.0 m (KH-5号孔) 1. 3.0 m~4.5. 3.0 m (KH-6号孔)
測定波線数の総数	439
解析に用いた波線の総数	356
KH-7・KH-5号孔間	
電磁パルスの中心周波数	6.0 MHz
サンプリング周波数	6.32 MHz
測定深度 トランスマッタ レシーバ	1. 2.0 m~4.5. 2.0 m (KH-5号孔) 1. 2.0 m~4.7. 2.0 m (KH-7号孔)
測定波線数の総数	482
解析に用いた波線の総数	425
KH-7・KH-4号孔間	
電磁パルスの中心周波数	2.0 MHz
サンプリング周波数	2.30 MHz
測定深度 トランスマッタ レシーバ	1. 2.7 m~4.1. 2.7 m (KH-4号孔) 1. 2.0 m~4.7. 2.0 m (KH-7号孔)
測定波線数の総数	504
解析に用いた波線の総数	246
KH-7・KH-6号孔間	
電磁パルスの中心周波数	2.0 MHz
サンプリング周波数	2.30 MHz
測定深度 トランスマッタ レシーバ	1. 3.0 m~4.5. 3.0 m (KH-6号孔) 1. 2.0 m~4.7. 2.0 m (KH-7号孔)
測定波線数の総数	552
解析に用いた波線の総数	254
サンプル数 ^a	512
スタッキング数	128

*1 レコード中のデータ数

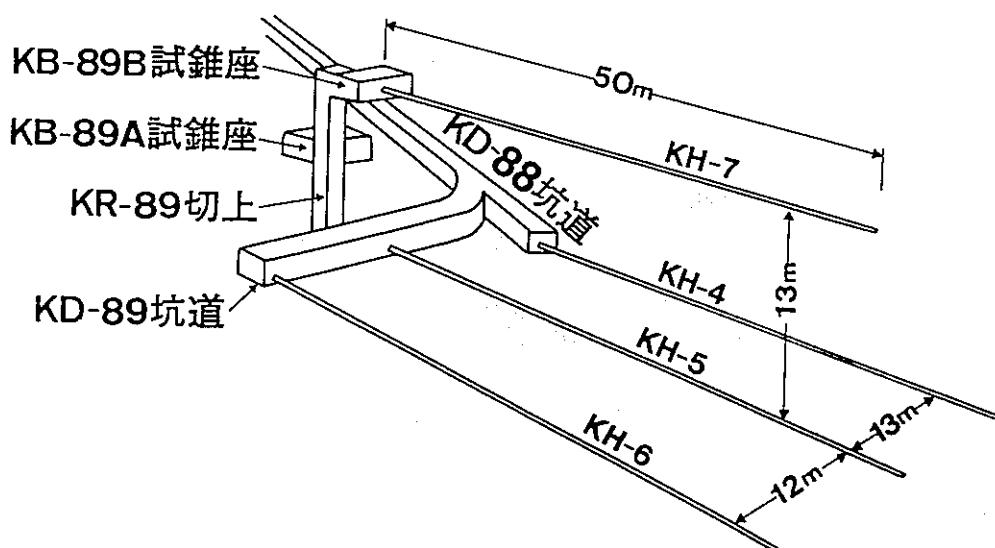
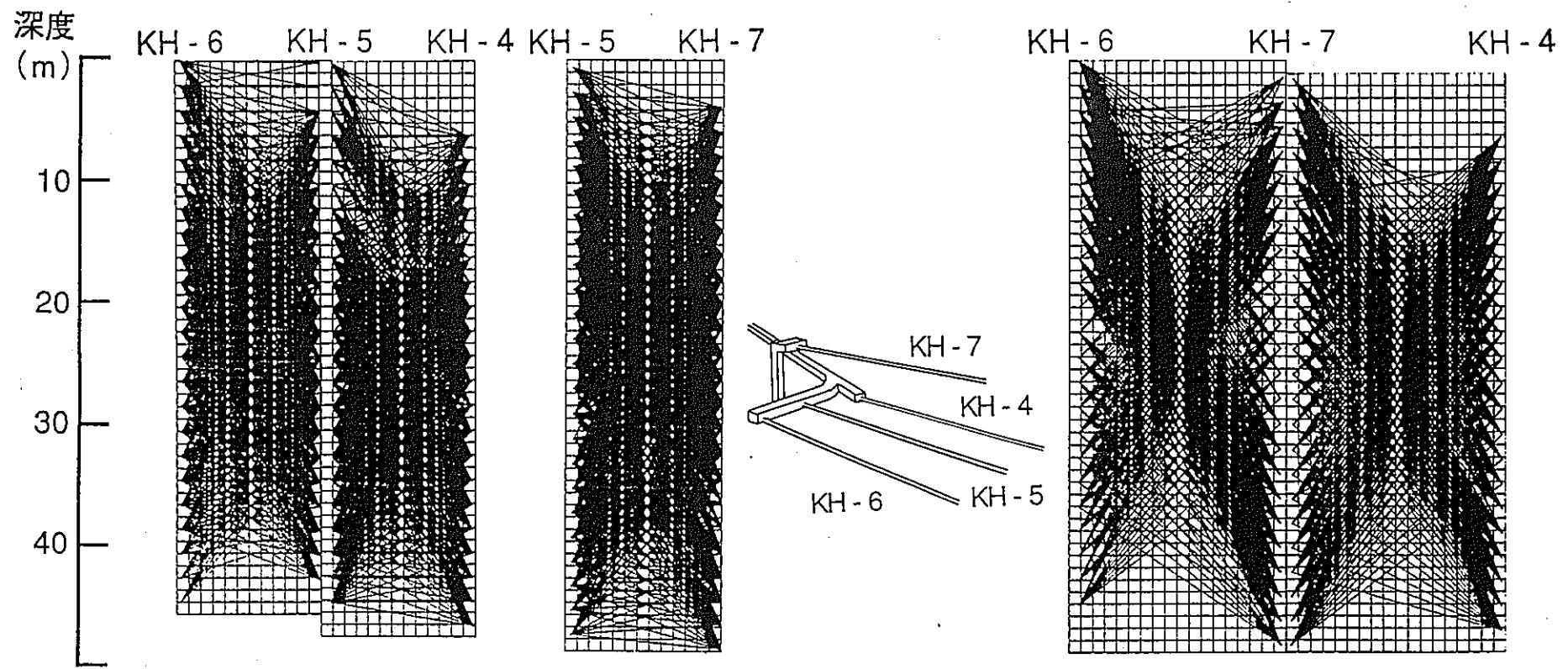


図-5-17 レーダートモグラフィー実施位置（仙波ほか、1992）



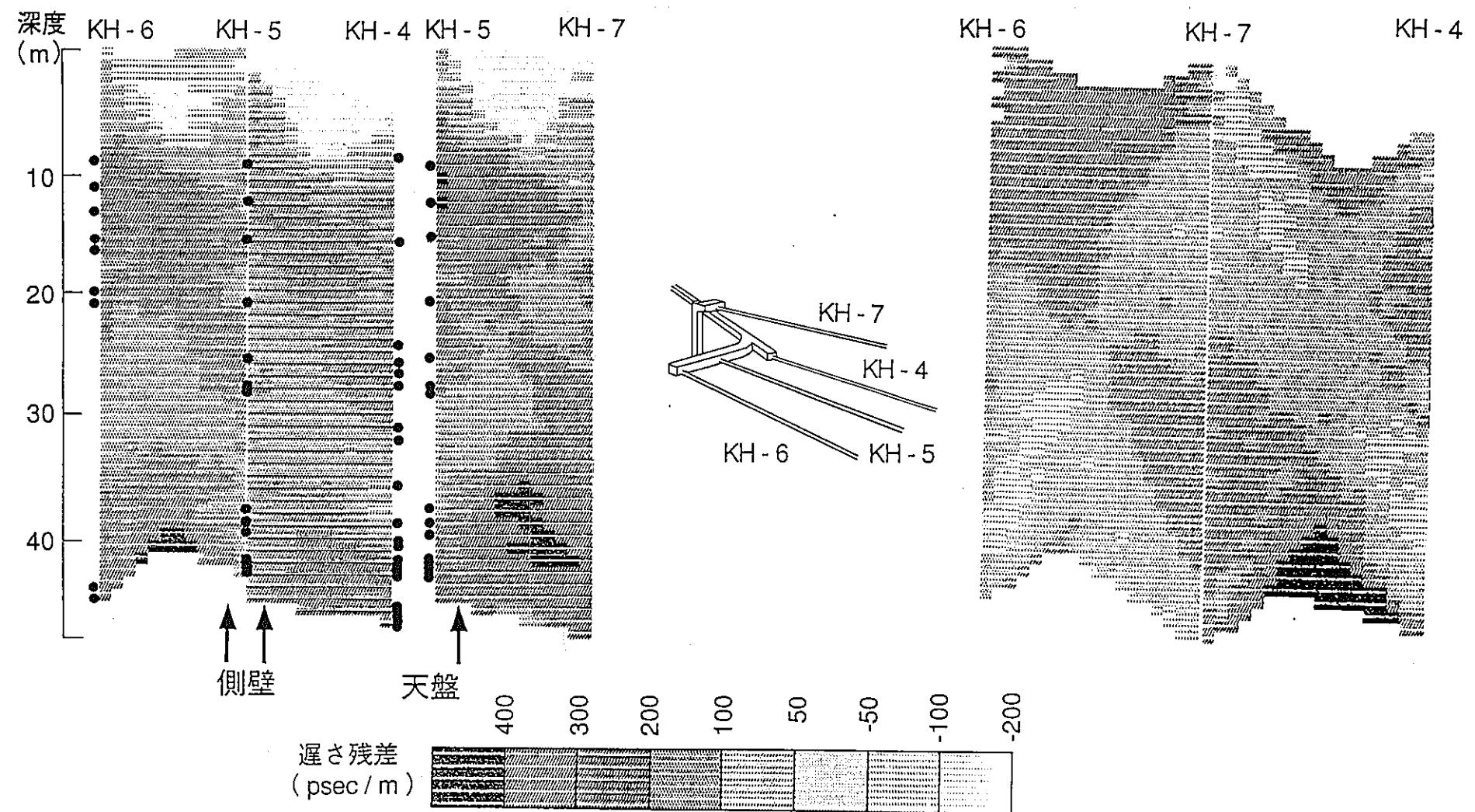


図-5-19 レーダートモグラフィー解析結果（仙波ほか、1992）

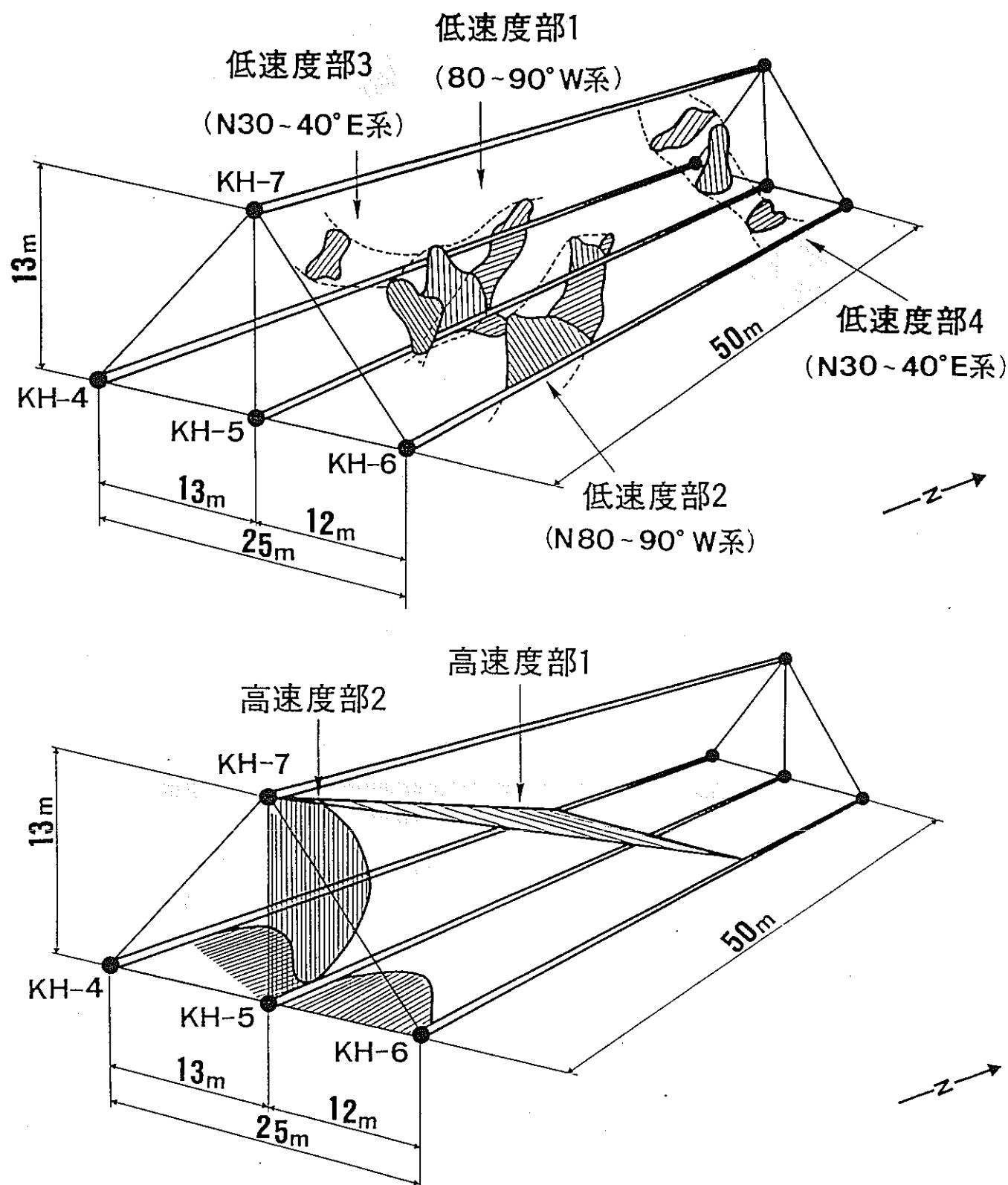


図-5-20 レーダートモグラフィーより推定される低速度部と
高速度部の3次元分布(仙波ほか、1992)

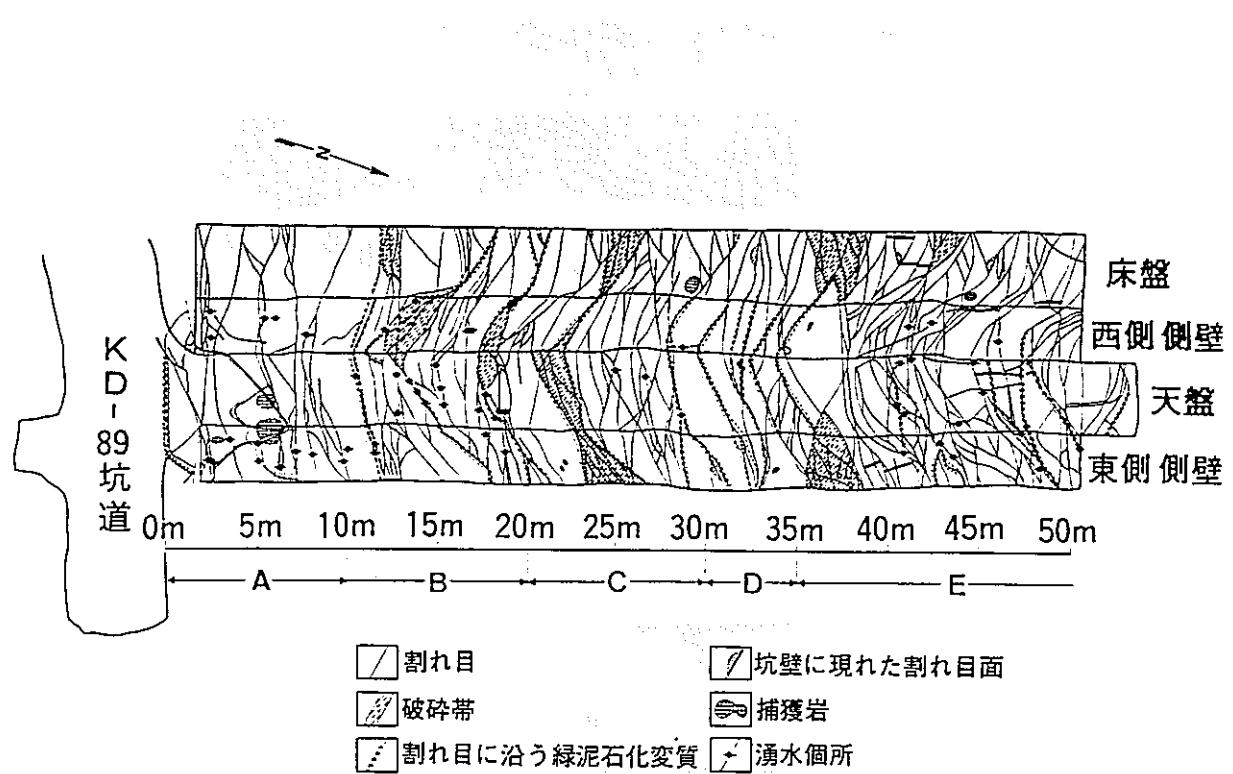


図-5-21 KD-90 坑道の壁面観察結果（仙波ほか、1992）

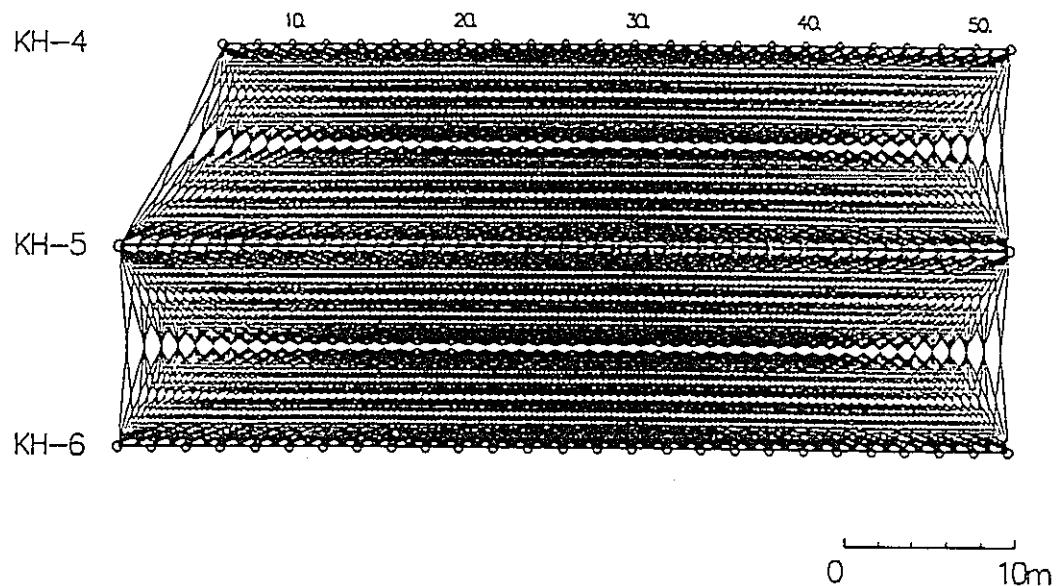
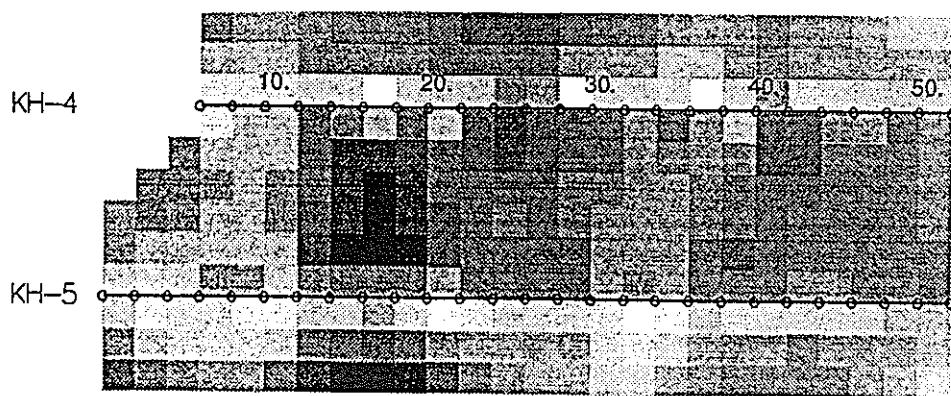
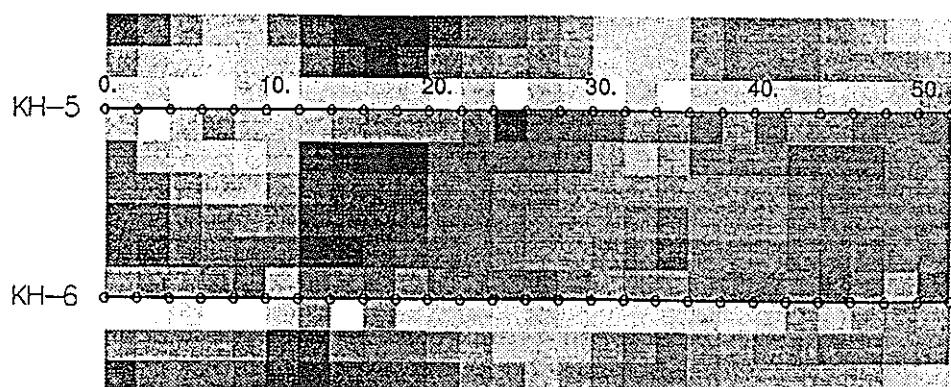


図-5-22 比抵抗トモグラフィー測定パターン（浜辺ほか、1990）



KH-4 ~ KH-5断面



KH-5 ~ KH-6断面

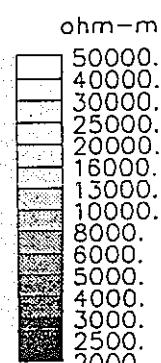


図-5-23 比抵抗トモグラフィー等方解析結果（横井、1990）

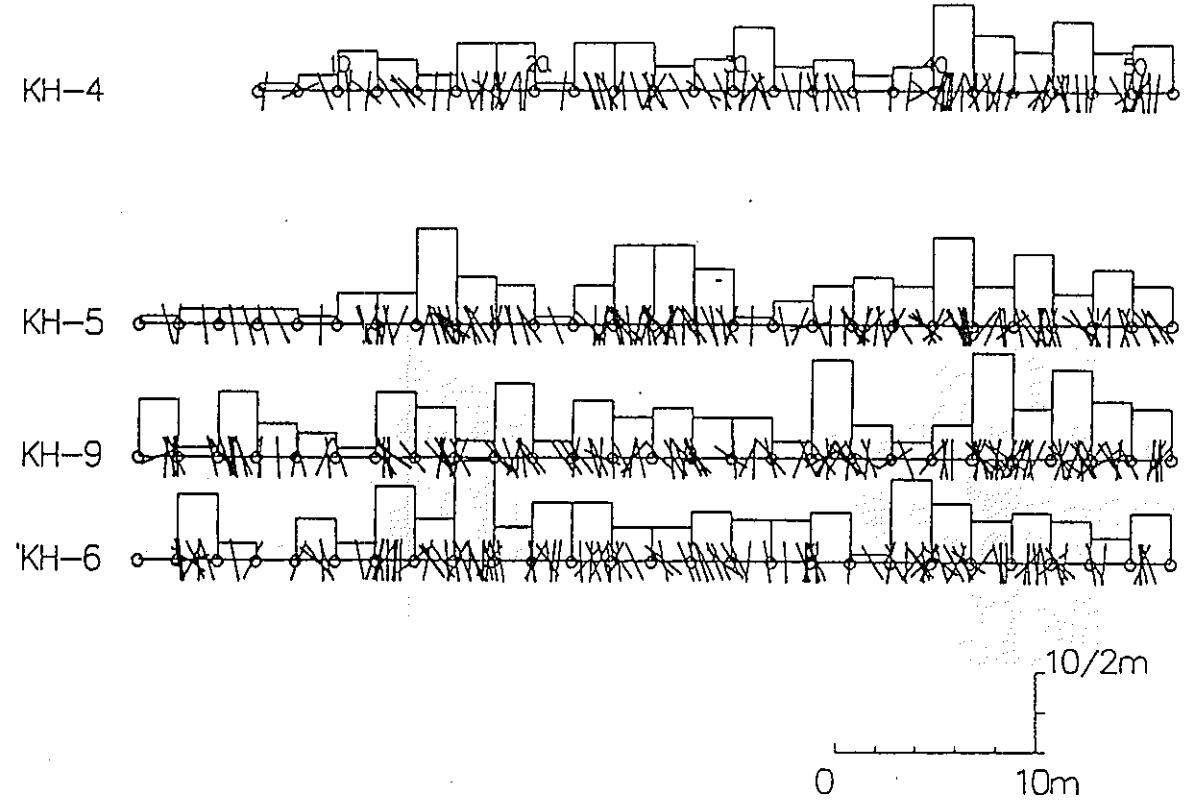
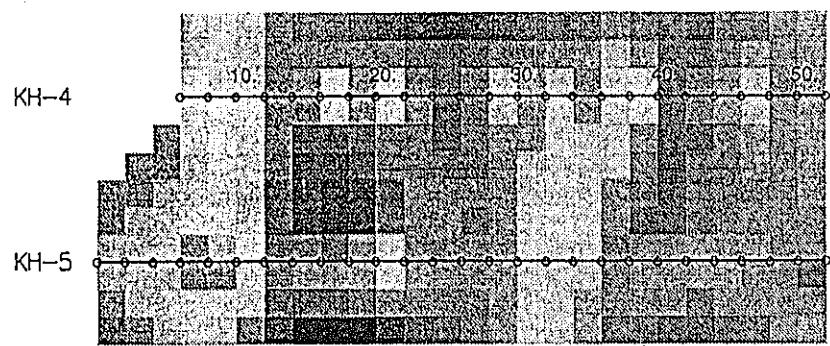
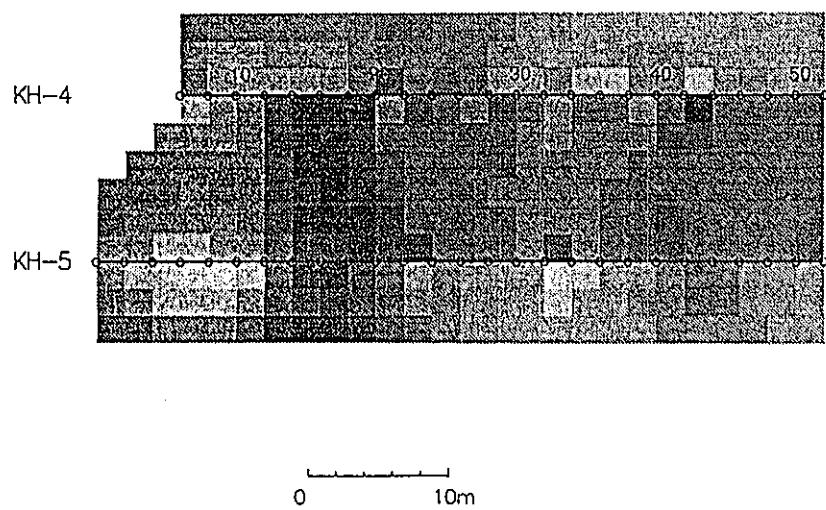


図-5-24 ボアホールテレビによる開口割れ目分布と割れ目頻度（横井、1990）

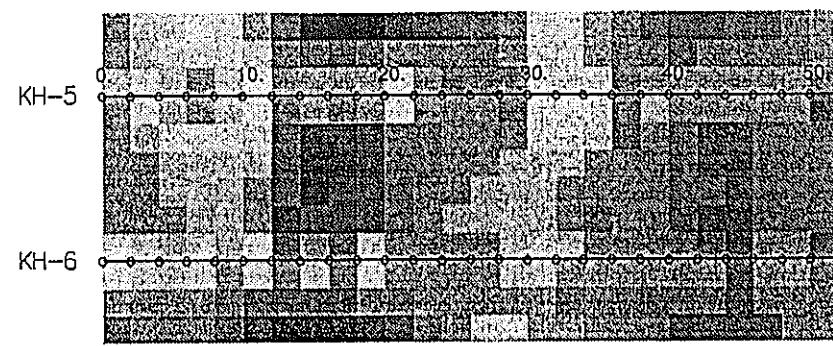


R_x 解析比抵抗断面

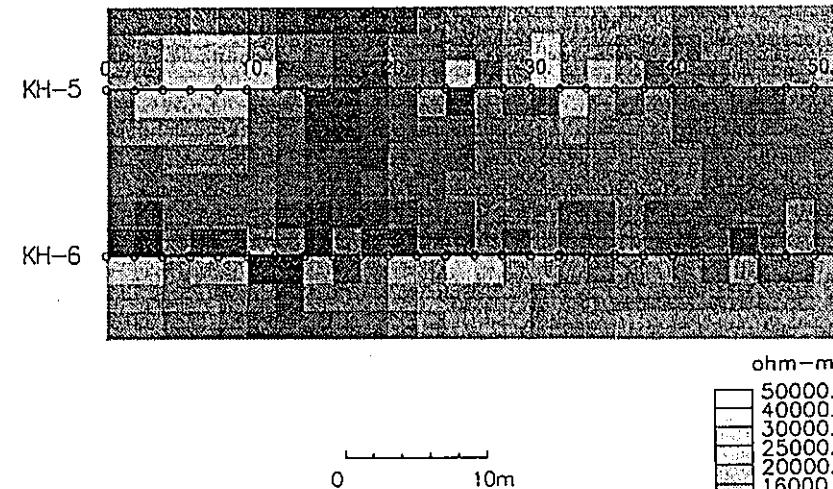


R_y 解析比抵抗断面

KH-4～KH-5断面



R_x 解析比抵抗断面



R_y 解析比抵抗断面

KH-5～KH-6断面

ohm-m
50000.
40000.
30000.
25000.
20000.
16000.
13000.
10000.
8000.
6000.
5000.
4000.
3000.
2500.
2000.

図-5-25 異方性を考慮した解析結果（横井、1990）

6 地下水の水理特性

6. 1 原位置透水試験

原位置透水試験は、1) 単孔式、2) 孔間、3) 坑道規模、の3つの透水試験方法を用いて行った（青山ほか、1989）。以下に、それぞれの測定結果について記述する。

6. 1. 1 単孔式透水試験

単孔式の原位置透水試験法は、一般に図-6-1に示すように定常法と非定常法の2つに区分される。第1フェーズでは、定常法試験として、①ルジオン試験装置と、②1000m級透水性試験装置（以下、Perm-10と呼ぶ：青山ほか、1992）を用いた透水試験が実施された。また、非定常法試験として、①従来のJFT試験装置、②新たに開発した動燃式JFT試験装置と、③Perm-10を用いた透水試験が実施された。

各試験装置による透水試験を実施した試錐孔は、以下の通りである（試錐孔の位置は図-6-2参照）。

- ・ルジオン試験装置を用いた定常法試験

- KH-2, KH-3, KH-5, KE-3, KE-6, KE-7の6孔（試錐孔はすべて水平）

- ・Perm-10を用いた定常法試験

- KG-1の1孔（試錐孔は鉛直）

- ・従来のJFT試験装置を用いた非定常法試験

- KH-1の1孔（試錐孔は鉛直）

- ・動燃式JFT試験装置を用いた非定常法試験

- KH-1の1孔（試錐孔は鉛直）

- ・Perm-10を用いた非定常法試験

- KG-1の1孔（試錐孔は鉛直）

以下に、各装置を用いた試験の方法、解析方法、解析結果の概要を記す。

(i) ルジオン試験装置を用いた定常法試験

① 試験方法

ルジオン試験は、定常法の一定水頭注入試験である。本試験装置を用いた試験として、(a) 低圧ルジオン試験、(b) 淵水圧湧水量測定の2種類について行った。以下に(a)と(b)の2種類の試験方法について述べる。

(a) 低圧ルジオン試験

注入水の圧力が高い場合、この圧力が岩盤内の割れ目などに作用し、岩盤の透水性が変化する可能性がある。本試験では、この点を考慮し、十分低い圧力レベル（最大2kgf/cm²）で試験を行う。試験方法は、試錐孔内のパッカーにより閉塞された測定区間に一定圧

の水を注入し、注入圧を複数段階設定して、それぞれの圧力に対応する平衡状態での注入量を測定する。このように、測定された注入圧と注入量の関係から透水係数を算出する。図-6-3に試験手順を示す。

(b) 湧水圧湧水量測定

試験区間に湧水がある場合には、湧水圧とその時の湧水量を測定すれば、これらの値は低圧ルジオントrialの注入圧および注入量の負の値に相等し、湧水圧と湧水量の関係から透水係数を算出することができる。図-6-4に試験手順を示す。

上記(a)(b)の試験は、同一の装置を用いて行った。図-6-5に試験装置の概要を、表-6-5に試験機材の一覧を示す。本装置で算出可能な透水係数の下限値は、流量の測定精度から検討すると 10^{-8} cm/sec 程度である。

KE-3孔では、6区間（試験区間長0.8m）で（表-6-3）、KE-6孔とKE-7孔では、各5区間（試験区間長0.6m）で試験が実施された（表-6-4）。また、KH-2孔とKH-3孔では、それぞれ9区間（試験区間長5m）、8区間（試験区間長5m）で（表-6-5）、KH-5孔では、15区間（試験区間長2.5m）で試験が実施された（表-6-10参照）。

②解析方法

解析は以下の通り実施した。解析にあたり、Darcy 則が適用できると仮定し、透水係数を求めた。

$$Q = k A \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここに、
Q : 透水量 (cm^3/sec)
k : 透水係数 (cm/sec)
A : 透水断面積 (cm^2)

$$\frac{\Delta H}{\Delta L} : \text{動水勾配}$$

(1)式より透水係数kは、

$$k = \frac{Q}{2 \pi L P} \ln \frac{L}{r} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここに、
L : 試験区間長 (cm)
r : 試錐孔半径 (cm)
P : 注入圧（湧水圧）から換算した水頭 (cm)

ここで、(2)式を展開すると、

$$P = \frac{\ln \frac{L}{r}}{2\pi L k} Q \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

となり、注入圧力 P と流量 Q は直線関係になる。その時の傾きを N とすると、

$$N = \frac{\ln \frac{L}{r}}{2\pi L k} \dots \dots \dots \quad (4)$$

よって、(4)式より透水係数 k は、次のようになる。

$$k = \frac{\ln \frac{L}{r}}{2\pi L} \frac{1}{N} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

③解析結果

表-6-6に低圧ルジオン試験結果から算出した透水係数、湧水圧湧水量測定結果から算出された透水係数、両透水係数の平均値、初期間隙水圧を示す。得られた透水係数は、 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/secオーダーを示した。

表-6-7に低圧ルジオン試験結果から算出した透水係数、初期隙水圧を示す。割れ目の少ない試験区間の透水係数は 10^{-9} cm/secオーダーを、開口割れ目や湧水割れ目が存在する試験区間の透水係数は $10^{-5} \sim 10^{-7}$ cm/secオーダーを、変質帯が存在する試験区間の透水係数は $10^{-7} \sim 10^{-9}$ cm/secオーダーを示した。

表-6-8と表-6-9に低圧ルジオン試験結果から算出した透水係数、湧水圧湧水量測定結果から算出された透水係数、両透水係数の平均値、初期隙水圧を示す。得られた透水係数は、 $10^{-4} \sim 10^{-8}$ cm/secオーダーを示した。

表-6-10に低圧ルジオン試験結果から算出した透水係数、湧水圧湧水量測定結果から算出された透水係数、初期隙水圧を示す。得られた透水係数は、 $10^{-5} \sim 10^{-8}$ cm/secオーダーを示した。また、低圧ルジオン試験結果から算出した透水係数と湧水圧湧水量測定結果から算出された透水係数を比較すると、1オーダーほどの違いが認められる(図-6-6)。

(ii) Perm-10を用いた定常法試験

①試験方法

Perm-10 は、試錐孔の所定深度の区間をダブルパッカーで隔離し、原位置の地下水圧を

測定とともに、地上からの一定圧力による注水によって定常試験を実施することで、岩盤の水理特性を計測する装置である。また、本試験は、透水性が著しく低い区間においては、ポンピングによる非定常試験が実施可能な装置である。図-6-7に試験装置の概要図を、表-6-11の本試験装置の仕様を示す。本装置の特徴を以下に示す。

- ・パッカーにより区切られた区間の地下水圧は、圧力0～150kgf/cm²の範囲を±0.08%FS（±0.12kgf/cm²）の精度で測定可能である。
 - ・定常試験ユニットでは、低圧注入法による透水試験が可能である。低圧制御および流量計測は地上で、圧力測定は原位置で実施される。流量測定は地上に設置した複数の径をもつ4連の水位計でなされているため、岩盤の透水性に応じた計測ができ、測定可能な透水性は10⁻⁵～10⁻⁸cm/secと広範囲に渡る。なお、定常透水試験ユニットの外径は52mmであり、適用孔径は66mm（ケーシングの場合内径55mm）以上である。
 - ・岩盤の透水性が著しく低い場合、孔内測定装置内にあるポンピングシステムを用いて、非定常試験を実施することにより、10⁻⁸～10⁻¹⁰cm/secの透水性の評価も可能である。なお、非定常透水試験ユニットの外径は70mmであり、適用孔径は76mm以上である。また、非定常透水試験ユニットは取り外すことができる。

定常注入試験は、一定注入時における流量と有効注入圧力から透水性評価を実施するものである。定常注入試験は図-6-8に示す手順で実施した。本試験では、ルジオン試験を参考として段階圧力を採用し、地上における制御圧力 1.5kgf/cm^2 、段階圧力 0.5kgf/cm^2 の6段階とした(図-6-9)。なお、実際に試験区間に作用する圧力は地上における注入圧力と地表面から地下水位面までの位置水頭の和となる。定常注入試験は、地上から、6段階の圧力で注入した時のそれぞれの流量計測をすることにより実施された。

なお、本試験は、地表から鉛直に掘削された試錐孔KG-1孔（孔長801.0m）の表-6-12に示す10深度区間（試験区間長5m）において実施された。

②解析方法

本試験結果は、放射状浸透流の式(6)により解析された。

$$k = \frac{Q \ln \frac{L}{r}}{2\pi L(H-h)} \dots \dots \dots \quad (6)$$

ここに、 H ：注入圧力水頭 (cm)
 h ：初期間隙水圧水頭 (cm)

③解析結果

表-6-12に定常試験データから算出された透水係数を示す。試験区間No.1とNo.7は割れ目の少ない部分で、またその他の区間は割れ目の多数存在する部分で実施された。試験区間No.7, No.10以外の試験区間では、有効圧力と注入両の関係が直線で近似できるデータが得られ、算出された透水係数は、 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/secオーダーを示した。

(iii) 従来法の J F T 試験装置を用いた非定常法試験

① 試験方法

本試験法は、一般に J F T (Johnson's Formation Test)あるいは湧水圧試験と称される手法である。本方法は、まず試錐孔の試験区間にパッカーとトリップバルブを設置し、試験区間の水圧が平衡になるのを待ってトリップバルブを開き、試験区間から湧水してくる水の上昇を経時時間とともに測定する方法である。図-6-10に試験装置の概要を表-6-13に使用した機器類の一覧表を示す。トリップバルブ、圧力センサーの設置位置は、トリップバルブの耐圧（常用35kgf/cm²）や圧力センサーの容量と分解能、重錘ケーブルの長さなどの関係で深度190m程度までに限定した。すなわち、深度200m以浅の測定ではパッカーの直上に圧力センサーとトリップバルブをセットし、これ以深の測定においては、圧力センサーとトリップバルブは深度180m～190m付近にセットした。また、パッカーと圧力センサー、トリップバルブとの間はA Q ロッドで接続した。この方法により、深部の測定においてはトリップバルブに加わる水圧を軽減し、孔壁の崩壊の防止を図った。測定は、図-6-11に示す流れで実施された。なお、本試験の場合、透水性が小さいと測定に長時間要することから、透水性の測定可能限界が相対的に定まる。今回、原位置試験の対象とした釜石鉱山の花崗岩の場合、比較的割れ目の多い部分にのみ本試験法の適用が可能である。試験区間長10mの場合、測定期間を一日以内とすると、10⁻⁷cm/secオーダー以上の透水係数まで測定可能である。

なお、本試験は、550mレベル坑道から鉛直方向に掘削した試錐孔K H - 1孔（孔長501.2m）の10深度区間（試験区間長10m）で実施された。試験区間は、微流量測定、温度検層、孔径検層、電気検層、R Q D結果をもとに割れ目の集中している深度区間を選択した（図-6-12）。

② 解析方法

試験結果は、Hvorslevの式を用いて解析され、透水係数が算出された。今回は、被圧透水層の式(7)を用いて透水係数を求めた。

$$k_h = \frac{d^2 \ln(2mL/D + \sqrt{1 + (2mL/D)^2})}{8L(t_{n+1} - t_n)} \ln \frac{H_n}{H_{n+1}} \dots \quad (7)$$

- ここに、
 d : 測定管の内径 (cm) 、 3.49cm (測定管A Q ロッドの内径)
 D : 孔径 (cm) 、 7.7cm (試錐孔径)
 L : 試験区間長 (cm) 、 1000cm
 t : 経過時間 (sec)
 H_n : t = t_nにおける圧力水頭 (cm)
 m : k_h/k_v (通常1とする)
 k_h : 水平方向の透水係数 (cm/sec)
 k_v : 垂直方向の透水係数 (cm/sec)

実際の場合 $m=1$ 、 $2mL/D > 4$ であるから、(7)式は、

$$k_h = \frac{d^2 \ln(4mL/D)^2}{8L(t_{n+1} - t_n)} \ln \frac{H_n}{H_{n+1}} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

(8)式を変形すると、

$$\log \frac{H_n}{H_{n+1}} = \frac{8 L k_h}{(2.3 d)^2 \log(4 m L / D)} (t_{n+1} - t_n) \dots \quad (9)$$

(9)式をセミログ表示すれば直線関係となるから、その傾きをNとすると、

$$N = \frac{8Lk_h}{(2.3d)^2 \log(4mL/D)} \dots \quad (10)$$

(10)式より水平方向の透水係数 k_h は、

$$k_h = \frac{(2.3 d)^2 \log(4mL/D)N}{8L} = \frac{0.66 d^2 \log(4mL/D)N}{L} \quad (11)$$

③解析結果

表-6-14に、KH-1孔における従来のJFT試験装置を用いた非定常試験の結果を示す。試験データから算出された透水係数は、 $10^{-4} \sim 10^{-7}$ cm/secオーダーを示した。

(iv) 動燃式 J F T 試験装置を用いた非定常法試験

①試験方法

本試験で用いた動燃式 J F T 試験装置は、動燃と大成基礎設計（株）が共同開発した試験機である。本試験装置の概要を図-6-13に示す。本試験装置は、J F T 法とパルス法2通りの方法で試験を行うことができる。通常は J F T 法が、透水性が極端に悪い場合はパルス法が用いられる。KH-1孔における試験では、すべての深度で J F T 試験が可能であった。J F T 法は一般的な試験法であり、図-6-14に示すようにバルブ解放後のピエゾメータ管内の水位上昇を測定し透水係数を求める方法である。水位は、インナーパッカーの先端に取り付けられている間隙水圧計で水圧として計測される。間隙水圧は、インナーパッカーを拡張させ閉鎖区間をつくり、先端の間隙水圧計で測定する。図-6-15に本試験を用いた試験の流れを示す。本試験装置の測定範囲は $10^{-4} \sim 10^{-9}$ cm/sec である。

なお、本試験は、550mレベル坑道から鉛直方向に掘削した試錐孔KH-1孔の5深度区

間（試験区間長10m）で実施された。

②解析方法

解析は、Hvorslevの単孔式透水試験の解析式(12)を用いた。

$$k = \frac{(2R_w)^2 \ln(mL/r_0)}{8L(t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2} \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

ここに、 R_w ：ピエゾメータ管内半径 (cm)

r_0 ：試錐孔半径 (cm)

t_n ：経過時間 (sec)

H_n ： $t = t_n$ における圧力水頭 (cm)

t_1, t_2 および H_1, H_2 は、 $t - \log H$ グラフから得られる直線から読み取った。 R_w は、間隙水圧計を吊っているケーブルの太さを考慮に入れるため実際のロッドの内径よりも小さい。

③解析結果

表-6-15に、本試験の結果を示す。試験データから算出された透水係数は $10^{-6} \sim 10^{-8}$ cm/secオーダーを示した。なお、表-6-15の間隙水圧は、海拔550mをGL-0mとして示している。

(v) Perm-10 を用いた非定常法試験

①試験方法

試験装置の概要是、「(ii) Perm-10 を用いた定常法試験」の試験方法に示した。

非定常法試験では、一定流量のポンピングアップに伴う間隙水圧の経時変化を測定する圧力水位低下試験、およびポンプ停止後の圧力回復過程を測定する圧力回復試験を連続的に実施する。非定常試験の手順は図-6-8に示す。

なお、本試験は、地表から鉛直に掘削された試錐孔KG-1孔の4深度区間（試験区間長5m）において実施された。

②解析方法

ダルシーの放射状浸透流式を産出量一定および無限境界のもとで無次元化すると圧力低下試験における圧力挙動は次式により表される。

$$P_i - P_{wf} = 141.2 \frac{q B \mu}{K h} [p_D(t_D, \dots) + s] \quad \dots \dots \quad (13)$$

$$t_d = \frac{0.0002637 K t}{\phi \mu c_t r_w^2}$$

P_i : 初期間隙水压

P_{w_f} ：降下压力

q : ポンプアップ量

B : 容積係数、流体の地層状態における容積 $[V]_{res}$ と地表における基準状態での容積 $[V]_{stc}$ により以下のように定義される。

$$B = [V]_{res} / [V]_{stc}$$

μ : 粘性

K : 浸透率

h : 試験区間長

ϕ : 間隙率

c_t : 全圧縮率、地層の圧縮率 c_f 、水の飽和率 S_w および圧縮率 c_w 、多層流状態の場合各流体の飽和率 S_1 および圧縮率 c_1 により以下のように定義される。

$$c_t = c_f + S_w c_w + S_l c_l$$

r_w : 試錐孔半徑

p_D : 無次元圧力

t_D : 無次元時間

$$p_D(t_D) = -\frac{1}{2} E_i \left(\frac{-1}{4t_D} \right)$$

$E_i(-x)$: 指数積分関数

$t_D > 100$ ならば

$$p_D = \frac{1}{2} [\ln(t_D) + 0.80907]$$

以上より試験区間の圧力は次のように表される。

$$p_{wf} = p_i - \frac{162.6 q B \mu}{K h} [\log t + \log \left(\frac{K}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) - 3.2275 + 0.6859 s] \quad (14)$$

測定圧力および \log (ポンプ作動時間) のプロットにおいては、直線部分が表されることになり、その傾き m と浸透率の関係は次のようになる。

$$m = - \frac{162.6 q B \mu}{K h} \dots \dots \dots \quad (15)$$

従って、

$$K = - \frac{162.6 q B \mu}{m h} \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

また、圧力回復試験における圧力挙動は、圧力低下試験において使用した式を重ねあわせることにより表される。

$$p_{ws} = p_i - \frac{141.2 q B \mu}{K h} \{ p_D (t_p + \Delta t_D) - p_D (\Delta t_D) \} \quad (17)$$

p_{ws} : 孔底圧力

t_p : ポンプアップ時間

Δt : ポンプ停止後の経過時間

$$p_{ws} = p_i - m \log \left(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

P_{ws} と $\log[(t_p + \Delta t)/\Delta t]$ プロット上の直線部分の傾きをmとすると、

$$m = \frac{162.6 q B \mu}{K h} \quad \dots \dots \dots \quad (19)$$

従って、

$$K = - \frac{162.6 q B \mu}{m h} \quad \dots \dots \dots \quad (20)$$

圧力低下試験の圧力挙動は、通常以下の3つの領域に区分される。

・初期領域

この領域では試錐孔周辺のスキンゾーンおよびunloadingの影響が現れる。

unloadingとは、試錐孔内で圧縮されていた流体が膨張して排出される状態であり、この間に計量される排出量は、地層内か流入する流体量とは等しくない。この領域を定量解析に用いることは少ないが、後述の中期領域が得られない場合にはタイプカーブを利用しての解析も可能である。

・中期領域

この領域での流動試錐孔圧力は、ポンプ作動時間の対数に対し直線となり、その傾きから浸透率、スキン効果の程度が求められる。

・後期領域

この領域での流動試錐孔圧力は、賦存状態の境界条件の影響を受ける。完全に閉じた層の場合、擬定常状態となり、排出は層内流体と岩石の膨張エネルギーによってなされ、圧力の降下は時間に比例する。

圧力回復試験の圧力挙動試験も通常以下の3つの領域に区分される。

・初期領域

この領域は、試錐孔周辺のスキンゾーンとafter flow の影響を受けている。after flowとは、試錐孔を密閉しても試錐孔の圧力が充分に高くなるまでは、密閉後も試錐孔内への流体の流れが完全にゼロにならない現象である。

・中期領域

この領域での解析が圧力回復試験の主目的であり、グラフから得られる直線を使って浸透率、スキン効果の程度、地層圧力などの情報を得ることができる。

・後期領域

この領域は、圧力伝播がreservoir の境界や産出半径あるいはガスキャップ、油層などの易動度の異なる部分に達した場合に生じる。

従って、試験の圧力結果は時間の対数に対してプロットされ、上述の中期領域の直線部から解析を実施する。また、スキン効果、after flowまたはunloading の影響中期領域が得られない場合は、タイプカーブマッチングにより浸透率の評価を行う。

③解析結果

表-6-1 2に非定常試験データから算出された透水係数を示す。試験データから算出された透水係数は、 $10^{-7} \sim 10^{-10}$ cm/sec オーダーを示した。

6. 1. 2 孔間透水試験（長ほか、1990）

Hsieh et al. (1985)が提案した孔間透水試験は、試験領域の岩盤を三次元均質異方性媒体（多孔質媒体）に近似する試験で、近似可能な場合は透水テンソルと比貯留量を算定できる。試験の特徴として、事前に透水テンソルの主軸を評価する必要がなく、任意の方向の試錐孔を用いて試験が行える。ただし、試錐孔の最低必要本数は、全て平行な場合は3孔、平行でない場合は2孔である。その実施方法は、複数の試錐孔にパッカーで区切った注入区間と水頭観測区間を配置し、一定流量を注入しながら観測区間の水頭増加量の経時変化を観測するものである。ここで試験領域は等ポテンシャル場と仮定し、6方向以上の観測結果を理論曲線とフィッティングして未知数である透水テンソルの6成分を決定する。Hsieh et al. (1985)は注入・観測区間を共に点と仮定した算定方法を示しているが、注入・観測区間長が相対的に大きい場合や透水係数の異方性の程度によっては、算定結果に誤差を生じる。このため算定に用いる観測結果に一定の基準を設けている。このような観測結果に対して奥野ほか(1990)は、注入・観測区間を有限長さの線と仮定した理論曲線を用いることで誤差が生じないよう算定方法に改良を加えており、本試験においても同算定方法を用いた。

①試験方法

試験位置周辺の坑道と試錐孔の配置図を図-6-16に示す。試験領域は、栗橋花崗閃綠岩が分布する地域であり、試験位置周辺の全長1500mの坑道を対象とした調査によると、割れ目の方向がN65°E 75°NWに卓越する地域である。

試験は、KD-8 9坑道の側壁ならびに切上りの上部から水平方向に約52m掘削したKH-5、KH-6、KH-7孔の平行する3本の試錐孔を用いて実施した。これらの間隔はそれぞれ11.6、12.4、17.0mである（図-6-17）。基本的にKH-5孔に注入区間を設け、KH-6、KH-7孔に観測孔を設けたが、後の試験ケースに示すように一部KH-7孔からの注入も行った。なお、KD-8 8坑道の先端から掘削したKH-4孔も観測孔として用いたが、他の試錐孔より間隙水圧が低いため、観測は行ったものの透水テンソルの算定には用いなかった。これは試験条件として比較的等ポテンシャル場にあることが望ましいためである。よって、後に述べる試験結果は、KH-5、KH-6、KH-7孔の3本の試錐孔周辺の透水特性を示すものである。

注入・観測区間は、試錐孔コア観察やBTV調査の結果から湧水の生じている割れ目位置に配置し、その区間長は2.5mとした。図-6-17に試験区間の配置図を示す。また、図-6-18に試験装置の概要図を図-6-19に圧力測定システムの概要図を示す。

試験ケースは、表-6-16に示すもので、Case AとCase CはそれぞれKH-5孔のAとC区間から注入を行い、他の12観測区間の圧力の経時変化を同時に観測する。また、Case DはKH-7孔の⑤、⑥、⑦、⑧の4区間から同時に注入を行い、KH-6孔の⑨、⑩、⑪、⑫の4区間で同時に観測を行う。なお、表-6-16に各試験の注入量を示した。

試験は、一定流量の注入を行う必要があるが、Case Dにおいては4区間にに対して一定圧力の条件で注入を行った。Hsieh et al. (1985)も一定圧力の条件で一部の試験を実施しており、その影響は比較的初期の応答に現れるが、透水係数の算定結果に有意な差は生じないことを示している。本試験においても試験開始後約数分で注入量がほぼ一定になるため、

結果に有意な差は生じないものと判断した。また、4区間から同時に注入を行った点については、これら4区間を含む1つの注入区間を想定し、この注入区間から注入した場合と応答は近似的に一致するものと仮定した。すなわち、KH-7孔の⑤区間の端部から⑧区間の端部までを1つの注入区間と仮定し、4区間の合計注入量で注入が行われたものとして以下の算定を行った。なお、以下では、各試験ケースの観測結果の表示として、例えばA区間から注入を行い⑤区間で観測した場合、Case A-⑤のように表す。

②解析方法

本孔間透水試験に用いられている理論解は、3次元の無限領域において任意の注入区間から注入を開始した後、観測区間における水頭増加量を与えるものである。解は、注入区間と観測区間を点または有限長さの線と仮定するもので、その組み合わせから表-6-17のような4ケースが誘導されている。

ここでは実務上の取扱い易さから、図-6-20に示すようなケース1を使うこととした。式(1)がその理論解である。

$$\Delta h = \frac{Q}{4 \pi G_{xx}^{1/2}} \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{S_s G_{xx}}{4 D t} \right)^{1/2} \right] \quad \dots \quad (1)$$

`erfc()`：補誤差関数

h : 水頭增加量

S_s : 比貯流量

D : 透水テンソルKの行列式

G_{xx} : 2 次形式

である。また、 D は透水テンソル K の行列式、 G_{xx} は 2 次形式であり、それぞれ次式で表される。

$$D = K_{11}K_{22}K_{33} + 2K_{12}K_{23}K_{13} - K_{11}K_{23}^2 - K_{22}K_{13}^2 - K_{33}K_{12}^2 \quad (2)$$

$$G_{xx} = X^T A X = x_i x_j A_{ij} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

ここに、 T は配置を意味し、テンソル表示は総和規約に従う。さらに、 A マトリックスは K マトリックスの余因子マトリックスであり、 X は注入点を原点とした場合の観測点の位置ベクトルである。

上記の理論解の変数を無次元化し、無次元化した時間 t_D と無次元化した水頭増加量 Δh_D の関係に変換すると次式が得られる。

$$\angle h_{PD} = \operatorname{erfc} \left\{ \frac{1}{(4 t_D)^{1/2}} \right\} \dots \dots \dots \quad (4)$$

ここに、無次元化した水頭増加量 Δh_{PD} と無次元化した時間 t_D は次式で与えられる。

$$\Delta h_{PD} = \frac{4\pi \Delta h G_{xx}^{1/2}}{Q} \dots \dots \dots \quad (5)$$

$$t_D = \frac{D_t}{S_s G_{xx}} \dots \dots \dots \quad (6)$$

図-6-2-1に各ケースの無次元化した水頭増加量と無次元化した時間との関係図を示した。これらの理論曲線は、時間とともに水頭増加量が増加し、一定値に漸近するという非定常過程を示している。また、ケース2～ケース4の各理論解には、次式に示すパラメータ α_1 、 β_1 が含まれている。

$$\alpha_1 = (2 R/L) [K_d(e_1)/K_d(e)]^{1/2} \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

$$\beta_1 = (2 R/B) [K_d(e_b)/K_d(e)]^{1/2} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

ここに、
 L : 注入区間長
 B : 観測区間長
 R : 注入区間と観測区間との距離
 e_1 : 注入区間方向の単位ベクトル
 e_b : 観測区間方向の単位ベクトル
 e : 注入区間と観測区間とを結ぶ方向の単位ベクトル
 $Kd(e_1)$: e_1 方向の透水係数
 $Kd(e_b)$: e_b 方向の透水係数
 $Kd(e)$: e 方向の透水係数

である。図-6-21に示した各ケースの理論曲線は、上記のパラメータが大きくなるに従ってケース1の理論曲線に漸近しており、ほぼ $\alpha_1 \geq 5.0$ 、 $\beta_1 \geq 5.0$ となる各理論曲線はケース1のそれと一致している。また、 $Kd(e_1)/Kd(e)$ と $Kd(e_b)/Kd(e)$ が大きくなると、注入区間方向および観測区間方向の透水係数が大きくなり、やはり注入および観測区間を点と見なしたケース1の理論解に近づくことを示している。

既述のように本試験ではケース1を使うが、その理論解が適用できるように試験条件を設定する。上記の漸近特性から、Hsieh et al.(1985)は $\alpha_1 \geq 5.0$ 、 $\beta_1 \geq 5.0$ をその基準として提案している。ここでもこれを用いることとした。しかし、式(7)、(8)に使う透水係数は、本試験で求まるものであるから、事前に上記の規準を満たしているか確認することはできない。したがって、事前情報から、 $Kd(e_1)$ 、 $Kd(e_b)$ 、 $Kd(e)$ を推定し、式(7)、(8)を満たすようなL、B、Rを設定し、試験を行う。この結果から得られた透水係数を用いて再度これらの条件が満たされていたかどうかを確認する必要がある。

③試験結果

試験結果から得られた圧力増加を図-6-22に示す。同図は試験開始時の圧力を規準として経過時間と圧力増加量を示しており、試験開始前約360分から開始後約900分までの観測結果を示している。ただし、Case Dは試験工程上、注入終了直後(約120分)で観測を終了している。また、試験開始時の各観測区間の間隙水圧を表-6-18に示す。

図-6-22より、全観測区間とも試験前から間隙水圧の増加が認められ、試験後もほぼ一定の割合で増加傾向を示していることがわかる。これは試錐孔掘削後、大気圧状態にあった試験区間にパッカーを設置したため、間隙水圧の回復過程にある。この補正方法として、⑫区間を除きほぼ同様かつ一定の増加傾向を示していることから、各試験前の時間と圧力増加の関係を回帰直線で近似し、試験中の間隙水圧から差し引くことで、注入による応答のみを抽出することとした。

試験結果は、Case AとCase Cから注入したときの各観測区間の水圧の応答結果を比較すると、Case Cの方が注入量が多いにもかかわらず(表-6-16参照)、各観測区間の応答は大きいことを示している。

次に、表-6-18から各試験開始時における観測区間の間隙水圧を見ると、⑤～⑪区間では約2.5～2.9kgf/cm²の値であるが、①～④と⑫区間では約0.4～1.4kgf/cm²と低い値を示している。特に試験方法でも述べたように、KH-4孔の①～④区間では全て低い値を示していることから、これらは透水テンソルの算定に用いないことにした。⑫については、応答が認められる場合にのみ算定に用いることとした。

④解析結果

③の試験結果から、透水テンソルの算定に用いた観測区間を表-6-19に示す。これらの合計18方向の観測値から注入による応答のみを抽出し、理論曲線とフィッティングした結果を図-6-23に示す。この結果を見ると、Case Aでは比較的一致しているものの、Case Cでは十分一致しないものが多い。これは対象としている岩盤には三次元均質異方性(多孔質媒体)と異なる特性をもつ領域があることを示している。

算定した透水テンソルを主透水係数と主軸方向で表し、比貯留量と共に表-6-20に

示す。さらに、透水テソルを透水槽円体で表示し図-6-24に示す。透水係数の主軸はそれぞれ 5.92×10^{-5} 、 1.94×10^{-5} 、 5.49×10^{-6} cm/sと求まり、異方性として1オーダーの差が求まった。これに対応する透水槽円体は、先の図-6-16に示す3本の試錐孔の内、各2本を含むx-y平面（水平面）、y-z平面（鉛直面）、y-ξ（傾斜面）で表している。その結果、最小二乗近似で求めた透水槽円体と観測値を比較すると、巨視的な傾向は一致しているが、特にCase Cにおいては一致しない観測値がある。なお、巨視的な傾向としては、水平面内（x-y平面）ではほぼ試錐孔軸に直交する方向の透水性が高く、試錐孔軸を含む鉛直面（y-z平面）では上下方向の透水性が高くなっている。

⑤考察

孔間透水試験から求まった透水性について、（i）透水係数の主軸と割れ目の走向傾斜の関係、（ii）観測した水理的応答と理論曲線の関係、からの考察を行う。

まず、試験領域周辺の割れ目の走向傾斜について述べる。試験位置周辺の割れ目の走向傾斜は、ほぼN65°E75°NW方向である（図-6-25）。これは周辺坑道壁面の観察より求められた値であるが、今回試験を行った試錐孔においてもBTV観測により割れ目の走向傾斜を調査した。その内、KH-5、KH-6、KH-7孔の3本の試錐孔では同様の分布特性を示しており、その卓越方向は周辺坑道壁面の観察から求められたN65°E75°NW方向とはほぼ一致することがわかる。

図-6-26には、割れ目の卓越方向N65°E75°NWと試験から求めた透水係数の主軸の方向を示した。この図から、透水係数の主軸の内、最大透水係数と中間透水係数は割れ目卓越面内にあり、最小透水係数は割れ目卓越面に直交することがわかる。このような対応関係は割れ目岩盤の透水特性として合理的な結果と考えられ、岩盤透水係数の主軸を適切に評価しているものと判断できる。

次に、観測した水理応答と理論曲線の関係について考察する。先の理論曲線のフィッティングでは、特にCase Cの観測において若干一致しない結果が得られた。その応答の特性としては、時間が経過しても圧力増加が収束せず、理論曲線よりも非定常過程が長期間続く。このような観測値に理論曲線をフィッティングしたため、先の透水槽円体はCase Cの観測値と一致しないと考えられる。非定常過程が長時間続く原因是、一部の割れ目で卓越した流れが生じている可能性がある。このような場合には浸透流が一次元的（パイプフロー）あるいは二次元的（平面内流れ）流動になるものと考えられる。

6. 1. 3 坑道規模透水試験

坑道規模での透水係数の測定は、KD-90 坑道において坑道排水量・動水勾配測定に基づく方法とベンチレーション（温風通気による壁面蒸発量測定）による方法で行った。

（1）坑道排水量・動水勾配測定に基づく方法

本試験では、図-6-27に示すKD-90 坑道において坑道規模の透水試験を実施し、坑道規模の透水係数を算出した。さらに、算出した透水係数を用いて、岩盤の透水性に関するREVの評価を試みた（福田ほか、1992）。以下に、その試験方法、解析方法、試験結果、解析結果の概要を記す。

①試験方法

本試験に使用するKD-90 坑道は、割れ目の卓越方向と直交するように掘削した。坑道規模は、 $3.5\text{m} \times 3\text{m} \times 50\text{m}$ とし、断面方向および長さの方向にそれぞれ2%、0.5%の傾斜をつけた（図-6-28）。

さらに、坑道周辺の間隙水圧を測定するために、NQサイズの試錐孔をKD-90 坑道に対して放射状に掘削した（図-6-29）。水平孔（孔長30）は坑道の左右両側に、床面から1mの高さに配置した。また、垂直孔（孔長30m）は坑道床面の中央に掘削した。これらの試錐孔は、5つある試験区間のうち1、3、5番目の区間の中央部（坑道入口から16.25m、31.25m、46.25m）に掘削した。各試錐孔には、坑道への動水勾配を把握するため、パッカーシステムが設置され、間隙水圧が測定された。遮水部分の長さが1mのパッカーを5個使用し、孔口部分も含めて各計測区間が4mになるようにした。図-6-29に示すように各孔の計測区間数は6区間とした。各計測区間から、圧力変形が少ないテフロンチューブを孔口まで導き、ブルドン管式圧力計と接続して、計54区間の間隙水圧を同時に測定可能なシステムとした（図-6-30）。間隙水圧測定は、1週間に1度行った。

坑道には、湧水量を測定するため、5つの堰を設置した。堰は坑道断面下部におよぶものとし、床面の傾斜のためにその計上は台形となるように設計した。堰の高さは、試験区間どうしの水の移動が生じないように、試験区間への湧水量を把握した後に決定した。湧水量測定には、各堰の最下部に開けた孔に取り付けたチューブを用いた。穴とチューブの隙間は、漏水を防ぐためにシールした。円滑に導水させるため、坑道入口に採水ポート（ $0.5\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ ）をほりこみ、その中でメスシリンダーを用いて計量を実施した（図-6-31）。

湧水量が一定になり定常状態に達した時点で、排水試験を実施した。排水試験については、間隙水圧および湧水量測定を1週間に1度実施した。

②解析方法

割れ目岩盤を等価多孔質媒体と下場合の透水性は、次式のような定常放射状流の式で計算できる。

$$K = Q / 2 \pi L_i$$

K: 透水係数

Q: 淌水量

L: 試験区間

i: 平均動水勾配

$$i = (P_e - P_w) / \ln(r_e/r_w)$$

r_e, r_w : 坑道中心からの距離

P_e, P_w : r_e, r_w における間隙水圧

各試験区間ごとの測定結果を重ね合わせて、5ケースの試験区間長(7.5m, 15m, 22.5m, 30m, 37.5m)に対応する透水係数を求めることができる。さらに、割れ目岩盤の透水性におけるスケール効果およびREVを評価することができる。図-6-32に試験全体の概念図を示す。

③試験結果

本試験では、坑道周辺の動水勾配を求めるために、放射状に試錐孔を配置し、間隙水圧測定を実施した。図-6-33(a)～(g)に計測孔KH-10～18(図-6-28参照)における間隙水圧の経時変化を示す。計測は平成3年2月23日より開始した。ここでは、4月末日までのデータを示した。間隙水圧の変化は、概ね30日で一定の値を取りはじめており、パッカー設置後約60日間においては定常状態に達していると判断した。また、間隙水圧の値は、0.3～1.5kgf/cm²の間で分布しており、現在までに原位置試験場において実施してきた測定値と比較しても妥当な値を示している。定常状態における各試錐孔の圧力分布を図-6-34(a)～(g)に示す。これは、各計測区間の中心と坑道中心との距離とその圧力値をプロットしたものである。理論的には、地下水流动の場が完全に放射状であるならば片対数グラフにおいて坑道壁面の0を通る直線で表されるべきものである。この直線の傾きが動水勾配に相当するものであり、透水性評価に必要な物理量であるので、図にはこの直線もあわせて示した。また、表-6-21に各試錐孔の圧力分布より求めた平均動水勾配(i)の値および実際の計測値のばらつきを考慮した直線の傾きの最大、最小もあわせて示す。その値は、3.25～8.78の間にばらついており、平均は4.85である。

湧水量は、各試験区間を堰で仕切り、湧水を導水することによって各試験区間ごとに計測した。湧水量データとしては、間隙水圧挙動が定常状態に達したと判断できる30日以降のデータの平均値を用いた。各区間の平均湧水量を表-6-22に示す。KD-90坑道における湧水量は、3.57～83.1cc/min/m、平均43.4cc/min/mであった。

④解析結果

透水性の評価に必要な全湧水量1628cc/minおよび平均動水勾配*i*=4.85が得られたが、放射状流を仮定しているため球状流的流入分を差し引かなければならない。ここでは、坑道壁面(天盤、床盤、側盤)周辺の間隙水圧は放射状分布、坑道先端面周辺の間隙水圧は半球状分布とし、両分布の境界の間隙水圧は等しいものと仮定した。つまり、試験区間への

湧水量は、坑道壁面からの放射状流と坑道先端面からの半球状流の重ね合わせになる。従って、試験区間長37.5mの場合、坑道先端部分への球状先端部分への球状流的な流入分は全湧水中の13%程度含まれるため、解析に用いる湧水量は放射状流入分1417cc/minとする。従って、KD-90坑道の坑道規模の平均的等価透水性は、試験区間37.5mへの全湧水量1417cc/minと全計測孔における i の平均値 $4.85 \text{から} 2.07 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ となり、間隙水圧のばらつきの誤差範囲では、 $1.14 \times 10^{-6} \text{～} 3.08 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ となる。つまり、岩盤透水性試験によるKD-90坑道の透水係数は $2.1 \times 10^{-6} \pm 1.0 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ と算定された。

⑤考察

排水試験では、区間長7.5m×5に区分して、湧水量は各区間にごとに間隙水圧分布は1区間おきに測定している。従って、7.5m(1区間)、15m(2区間)、22.5m(3区間)、30m(4区間)、37.5m(全区間)の区間にごとに透水性を求めることが可能である。なお、間隙水圧分布計測については1区間おきに計測を実施しており、測定値の存在しない区間もあるが、両隣の区間の平均値で代表させることとした。坑道断面の平均動水勾配 i は、坑道奥から5.39、4.78、4.39と減少しているため、測定値のない区間の代表値として平均値を使用することは妥当であると考える。また、平均動水勾配としては、同一断面における下方向、西側、東側の3方向の平均動水勾配の平均値を用いた。表-6-23に各試験区間にごとの湧水量、動水勾配、透水係数を示す。

また、図-6-35に各スケールごとの透水性の値を、図-6-36にスケールと相対誤差との関係を示す。ここでいう相対誤差REとは次の量である。

$$RE = |K - k| / K$$

ここで、 K は全試験区間における透水係数、 k はあるスケールにおける透水係数である。なお、図-6-36には、相対誤差変化が把握しやすいように、測定値を補間した曲線を示した。この結果は、スケール規模が20m以上になると、測定値とともに相対誤差の挙動がほぼ等しくなり、REVはほぼ20数%であることを示している。

(2) ベンチレーション試験

KD-90坑道においてベンチレーション試験を実施し、その試験方法の適用性を検討した（中村ほか、1991）。ベンチレーション試験は、微量の湧水量の測定方法として、既にスウェーデン、スリーパプロジェクトやスイス、グリムゼルサイトで行われている。以下に、試験方法、解析方法、試験結果を示す。

① 試験方法

本試験は、図-6-37に示すように、岩盤透水試験を実施した各区間の両端を隔壁により区切り、各区間に温風により通気を行い（以下、強制通気と呼ぶ）、その入気および排気に含まれる水分量の差から、蒸発量を算出する試験である。

岩盤奥側からの供給量以上に岩盤からの湧水を蒸発させた場合、試験坑道周辺では不飽和領域が発生すると考えられ、その時のベンチレーション試験で算出した湧水量を真の湧水量として評価することはできない。この不飽和領域の発生を防ぐための強制通気の条件としては、温度が試験区間内のそれと等しく、相対湿度ができるだけ小さいものが最適であると考えられるが、試験時間の面から現実的でない。そこで、本試験では、蒸発量が定常状態に達する時間を早める（以下、加速試験と呼ぶ）ために、ヒーターで加熱した空気を送風する（以下、温風通気と呼ぶ）こととする。この強制通気により不飽和領域が発生した場合、試験坑道周辺の間隙水圧は負圧（サクション）となる。従って、この加速試験が成立する目安とするために、試験坑道周辺の間隙水圧の経時変化を測定した。また、強制通気では蒸発しきれない試験区間内の湧水量を把握すため、堰による湧水量の測定もあわせて実施した。

図-6-38に試験レイアウトを示す。試験区間長は、一区間7.5mとし、（1）岩盤透水試験の試験区間と同一のものである。図-6-38に示した隔壁は、厚さ3cmの木材を基材とし、表面を断熱材（石膏ボード厚さ5mm）で被覆したものを用い、岩盤との境界部はセメントペースト、シリコンゴムを用いて綿密にシールした。さらに、各試験区間の入気、排気の送付管には直径30cmのブリキ製のダクトを用い、入気ダクトは床盤中央部に、排気ダクトは天盤近くにつり下げた。隔壁から跳ね返る流れで試験区間に入気させるため、入気ダクトは坑口から見て試験区間の奥まで延ばして設置した。排気ダクトは試験区間の手前側から坑口近くまで延ばして設置した。以下に、試験の手順を示す。

- ・各堰の位置に石膏ボード（断熱材）と木材により隔壁を設置し、外気を遮断する。
- ・各試験区間に入気および排気用のブリキ製ダクト（直径30cm）を設置する。
- ・入気ダクトをヒーター付きファンに直結し、試験区間に強制通気を行い、試験区間内の湧水を蒸発させる。
- ・試験区間内から排気ダクトを通して、試験区間に空気を排出させる。

各区間の蒸発量算出にあたっては、各区間にごとに、入気・排気のダクト内において、温度、相対湿度および温風をモニターした。温湿度センサの設置位置は、各ダクトの出口から30cmの地点でのダクトの中心とした。温風測定については、各ダクトの出口から45cmの地点でダクトの上端と下端まで2cmおきに行ない、風速の分布を把握した。なお、温度および相対湿度については、1時間ごとに自動計測し、風速分布については数日おきに手動で測定した。また、各区間の湧水量については、1日1回測定（3回測定し、その平均値

値を採用)した。試験坑道周辺の試錐孔における間隙水圧についても同様に、1日1回測定を行った。使用センサーおよび使用機器の使用を表-6-24～表-6-26に示す。また、KD-90坑道から掘削された試錐孔の配置を図-6-39に示す。

本試験は、表-6-27に示すように、強制通気の温度および相対湿度の条件に応じて、Stage I、II、IIIの3つの段階に分けて実施した。KD-90坑道周辺の通気は、原位置試験場の他の場所と比較して相対湿度が若干低いことから、Stage Iでは温風通気に先立って自然状態の空気による強制通気(以下、冷風通気と呼ぶ)を行った(区間5は温風通気)。次に、Stage IIにおいては全区間温風通気に切り替え、試験区間内の湧水の蒸発を促進させた。さらに、Stage IIIにおいては、再度全区間冷風通気に戻した。

②解析方法

蒸発量は、入気・排気の温度、相対湿度および流量を測定することにより、下式を用いて算出した。

$$E_v = Q_{out} \times S_{out} - Q_{in} \times S_{in}$$

E_v : 蒸発量

Q_{out} : 排気の流量

S_{out} : 排気の絶対湿度

Q_{in} : 入気の流量

S_{in} : 入気の絶対湿度

流量は、測定した風速にダクトの断面積を掛ける方法により算出した。図-6-40、表-6-28に示すように、各ダクト内を12のブロックに分割し、各測定値がおのおののブロックの平均値であるものと仮定し、各測定値に各ブロックの断面積を掛けたものの総和をとり流量を算出した。流量の算出には以下の式を用いた。

$$Q = \sum_{i=a}^1 (S_i \times V_i)$$

Q : 流量

S_i : 各ブロックの面積

V_i : 風速値

定常状態における坑道への湧水量および間隙水圧分布から求められる動水勾配から坑道規模の平均的な透水係数を算出した。透水係数は、KD-90坑道周辺のポテンシャル分布が放射状であり、坑道規模においては岩盤が多孔質媒体と見なせると仮定して、算出した。この条件を満たし、地下水流动場が飽和かつ定常状態にある場合、透水係数は、湧水量と圧力分布から以下の式で算出される。

$$K = Q / (2 \pi h_i)$$

$$\text{ここで、 } i = (P_e - P_w) / \ln(r_e/r_w)$$

k : 透水係数

Q : 淌水量

h : 試験区間長

P : ポテンシャル

r : 坑道中心からの距離

w, e : それぞれ坑道壁面、影響半径を表す添字

透水係数の算出は、上記の方法を用いた。しかし、湧水量は、試験坑道に向かって放射状に流入してくるものであるため、試験坑道奥側から流入してくる球状流の流入分を差し引く必要がある。ここでは、坑道壁面周辺の間隙水圧は放射状分布、坑道先端周辺の間隙水圧は半球状分布とし、両分布の境界の間隙水圧は等しいものと仮定し、坑道の先端効果について検討する。試験区間の湧水量は、坑道壁面からの放射状流と坑道先端からの半球状流の重ね合わせによるものであるとすると、放射状の流入分および半球状の流入分はそれぞれ以下の式で表される。

$$Q_r = \frac{2 \pi k L (h_e - h_w)}{\ln (r_e / r_w)} \quad (1)$$

$$Q_s = - \frac{2 \pi k (h_e - h_w)}{1/r_e - 1/r_w} \quad (2)$$

ここで、 Q_r : 放射状流の流入分

Q_s : 半球状流の流入分

k : 透水係数

L : 試験区間長

h : ポテンシャル

r : 坑道中心からの距離

w, e : それぞれの坑道壁面、影響半径を表す添字

上記2つの式より

$$Q_r = - \frac{L (1/r_e - 1/r_w)}{\ln (r_e / r_w)} \times Q_s \quad (3)$$

一方、試験坑道に流れ込む湧水量 Q_t は、以下のように放射状流入分と半球上流入分の和で

表される。

$$Q_t = Q_r + Q_s \quad (4)$$

(4) に(3) を代入すると、全湧水量中に占める半球状流の割合は、式(5) のように表される。

$$\frac{Q_s}{Q_t} = \frac{1}{1 - L \left(\frac{1}{r_e} - \frac{1}{r_w} \right) / \ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right)} \quad (5)$$

ここで、実際の坑道断面は矩形（幅3.6m×高さ3.5m）であるが、円形断面で近似し、その半径は等面積半径($r_w=1.85m$)とする。また、影響範囲 r_e は実際の計測区間が坑道壁面からおよそ30mであるため、 $r_e=31.85m$ とする。式(5)により、任意の試験区間長での全湧水量中に占める半球状流の割合を計算すると表-6-29のようになる。

③試験結果

各試験区間の湧水量および蒸発量の経時変化を図-6-41と図-6-42に示す。各試験区間の湧水量の経時変化をみると、Stage I からStage IIにかけて、いずれの試験区間においても湧水量は減少している。また、各ステージの最終段階での湧水量、蒸発量、全湧水量を表-6-30～表-6-32に示す。

試験期間中の間隙水圧計測結果から、KD-90坑道周辺では全体的に見て飽和状態であると見なして、KD-90坑道周辺の動水勾配を算出した。Stage IIの定常状態における各計測孔の間隙水圧分布を図-6-43～図-6-51に示す。これらの図は、各間隙水圧計測区間の中心から坑道中心までの距離とその間隙水圧との関係を示した図である。坑道周辺の地下水流动の場が完全に放射状であるならば、坑道周辺の間隙水圧分布は、片対数グラフにおいて坑道壁面の間隙水圧0を通る直線で表される。この直線が動水勾配に相当する。しかし、図-6-52(a)～(i)は、試験坑道周辺の間隙水圧の計測値にはばらつきがあり、比較的放射状に近い分布をするものとそうでないものとが存在する。ここでは、KD-90坑道周辺の間隙水圧分布は放射状であると仮定し、坑道壁面において間隙水圧0として、最小二乗法により計測値の近似を行った。図-6-52(a)～(i)には、この近似直線もあわせて示す。また、この近似直線の傾き、すなわち動水勾配の値を表-6-33に示す。表-6-33には、実際の計測値のばらつきを考慮し、各計測孔において坑道壁面の間隙水圧0の点と各間隙水圧計測区間の計測値とを結んだ直線の傾きの最大値、最小をあわせて示す。表-6-34より算出した動水勾配は1.08～14.16の間に分布しており、平均値は4.59である。

④解析結果

ベンチレーション試験から得られた湧水量と動水勾配から、坑道規模の等価な透水係数を算出した。ただし、試験区間長37.5mの場合、表-6-29より、坑道先端部分への球状流的な流入分は、全湧水中に13%程度含まれているため、解析に用いる湧水量は、ベン

チレーション試験で評価した全湧水量1770.7cc/minから坑道先端部分への球状流的な流入分を差し引いた放射状流入分1540.5cc/minとした。従って、KD-90坑道の坑道規模の平均等価透水係数は、試験区間37.5mへの全湧水量1540.5cc/minと全計測孔における動水勾配の平均値4.61から 2.38×10^{-6} cm/secとなり、間隙水圧のばらつきによる誤差範囲では、 $1.19 \times 10^{-6} \sim 3.82 \times 10^{-6}$ cm/secとなる。すなわち、ベンチレーション試験より得られたKD-90坑道周辺の平均的等価透水係数は、 $2.4 \times 10^{-6} \pm 1.3 \times 10^{-6}$ cm/secとなる。

⑤考察

ベンチレーション試験結果から算出された透水係数を用いて、REVの検討を行った。図-6-53にスケールごとの透水性のばらつきを、図-6-54にスケールと相対誤差との関係を示す。ここでいう相対誤差REとは次式で表される。

$$RE = |K - k| / K$$

ここで、
K : 全試験区間における透水係数
k : あるスケールにおける透水係数

図-6-53より、試験区間長7.5mにおける透水係数のばらつきは、 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ cm/secの範囲にある。REVを相対誤差0.1～0.2以下となるスケールと仮定すると、KD-90坑道周辺のREVは、ほぼ30m弱程度であるものと推定される。

6.1.4 成果と課題

深部の結晶質岩の透水性を把握するために、各種の透水試験（単孔式定常法試験、単孔式非定常法試験、孔間透水試験、岩盤透水試験）を実施した。その結果、本対象岩盤では①透水係数が $1.5 \times 10^{-5} \sim 1.1 \times 10^{-8}$ cm/secの範囲であり、平均値は 10^{-6} cm/secのオーダーであること、②透水性に異方性が存在すること、③REVは20数mであることがわかった。

しかしながら、透水試験の結果を解析する上で用いられる理論は、仮定（①水が飽和している、②どの方向のも均一に水が流れるなど）が前提にある。岩盤の性質が坑道の掘削により変化する領域ではこれらの仮定が成り立たず、既存の手法では性質の変化を定量的に評価することには限界がある。今後、岩盤の性質が坑道の掘削により変化する領域を定量的に把握するための試験研究を行っていく必要がある。

表-6-1 低圧ルジオン試験装置の機材の一覧（浜辺ほか, 1989）

名 称	仕 様	数 量	製作所
エアッカー	全長 1,006 mm ゴム長 645 mm (有効範囲 600mm) ゴム径 ϕ 62 mm 常用差圧 10kg f/cm^2	2	応用地質(株)
圧力センサー	200 psi ひずみゲージ式 最大 14kg f/cm^2 測定精度 0.5 % 印加電圧 10~15 V 出力 $100.00\text{mV}/\text{FS}$	2	応用地質(株)
デジタル インジケータ	MODEL-4919A 測定範囲 199.9 mV 表示精度 $\pm 1\%$	1	応用地質(株)
	FD-730C 表示 $4\frac{1}{2}$ 桁 表示精度 $\pm 0.05\%$	1	(株)三和電気 製 作 所
定圧注水 パネル	注入圧力 最大 6kg f/cm^2 精度 0.01kg f/cm^2 注入タンク (マリオット式) 中タンク容量 $5,000 \text{ cm}^3$ 精度 10 cm^3 小タンク容量 25 cm^3 精度 0.01 cm^3	1	応用地質(株)
給水タンク	容 量 118ℓ	1	応用地質(株)
エアコンプレッサー	ベビーコンプレッサー 0.75P-8sk 最大圧力 8kg f/cm^2	1	(株)東芝
高圧チューブ アルミバルブ ストレーナ管 メタカバ ブルドン管 レギュレータ 他	—————	1 式	—————

表-6-2 注入圧力段階（浜辺ほか, 1989）

注入圧力段階 (kg f/cm^2) (口元)																
0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00	0.75	0.50	0.25	0
昇圧段階										降圧段階						
注水時間は、各段階原則として10分とする。注水圧は、原則として最大 2 kg f/cm^2 とする。																

表-6-3 KE-3孔における低圧ルジオントライアル実施区間（浜辺ほか, 1989）

No.	試験区間(m)	区間長(m)
B-1	22.20~23.00	0.8
B-2	21.40~22.20	0.8
B-3	20.60~21.40	0.8
B-4	19.80~20.60	0.8
B-5	10.50~11.30	0.8
B-6	7.90~9.90	2.0

表-6-4 KE-6, KE-7孔における低圧ルジオン試験実施区間
(浜辺ほか, 1990)

No.	試験区間(m)	区間長(m)	区間状況
KE-6-1	13.55~14.15	0.6	割れ目少
KE-6-2	12.65~13.25	0.6	変質帶
KE-6-3	11.55~12.15	0.6	開口割れ目
KE-6-4	10.60~11.20	0.6	湧水割れ目
KE-6-5	9.20~9.80	0.6	割れ目少
KE-7-1	14.40~15.00	0.6	湧水割れ目
KE-7-2	12.90~13.50	0.6	変質帶
KE-7-3	12.10~12.70	0.6	開口割れ目
KE-7-4	10.60~11.20	0.6	割れ目なし
KE-7-5	9.80~10.40	0.6	割れ目なし

表-6-5 KH-2, KH-3孔における低圧ルジオン試験実施区間
(浜辺ほか, 1989)

No	KH-2孔			KH-3孔		
	試験区間(m)	低圧ルジオン試験	湧水圧測定	試験区間(m)	低圧ルジオン試験	湧水圧測定
1	1.00~6.00	○		2.00~5.00	○	
2	5.50~10.50	○		6.50~11.50	○	
3	10.50~15.50	○	○	11.50~16.50	○	
4	14.00~19.00		○	16.50~21.50	○	○
5	19.00~24.00		○	21.50~26.50	○	
6	24.00~29.00	○	○	25.00~30.00	○	
7	27.50~32.50		○	30.00~35.00	○	○
8	31.00~36.00	○	○	34.50~39.50	○	○
9	34.40~39.40	○	○			

(湧水圧測定は、本文中の湧水圧湧水量測定を示す。)

表-6-8 KH-2孔における低圧ルジオン試験結果
(浜辺ほか, 1989)

試験区間 (m)	透水係数 (cm/sec)			間隙水圧 (kgf/cm ²)
	低圧ルジオン試験	湧水圧測定	総合	
1.00~6.00	9.06×10^{-6}	—	9.06×10^{-6}	—
5.50~10.50	4.16×10^{-6}	—	4.16×10^{-6}	0.07
10.50~15.50	5.84×10^{-6}	8.43×10^{-6}	5.98×10^{-6}	0.42
14.00~19.00	—	7.27×10^{-6}	7.27×10^{-6}	0.62
19.00~24.00	—	5.51×10^{-6}	5.51×10^{-6}	0.33
24.00~29.00	3.64×10^{-6}	3.32×10^{-6}	3.47×10^{-6}	0.57
27.50~32.50	—	6.27×10^{-6}	6.27×10^{-6}	0.38
31.00~36.00	3.57×10^{-6}	5.55×10^{-6}	4.85×10^{-6}	0.58
34.40~39.40	2.46×10^{-4}	2.96×10^{-4}	2.94×10^{-4}	0.74

(湧水圧測定は、本文中の湧水圧湧水量測定を示す。)

表-6-9 KH-3孔における低圧ルジオン試験結果 (浜辺ほか, 1989)

試験区間 (m)	透水係数 (cm/sec)			間隙水圧 (kgf/cm ²)
	低圧ルジオン試験	湧水圧測定	総合	
2.00~5.00	2.23×10^{-7}	—	2.23×10^{-7}	—
6.50~11.50	7.35×10^{-6}	—	7.35×10^{-6}	—
11.50~16.50	7.25×10^{-6}	—	7.25×10^{-6}	—
16.50~21.50	4.63×10^{-7}	4.71×10^{-7}	4.67×10^{-7}	1.85
21.50~26.50	7.68×10^{-6}	—	7.68×10^{-6}	1.01
25.00~30.00	1.83×10^{-7}	—	1.83×10^{-7}	0.66
30.00~35.00	1.59×10^{-6}	1.42×10^{-6}	1.62×10^{-6}	3.59
34.50~39.50	3.49×10^{-5}	3.22×10^{-5}	3.34×10^{-5}	1.48

(湧水圧測定は、本文中の湧水圧湧水量測定を示す。)

表-6-6 KE-3孔における低圧ルジオン試験結果（浜辺ほか, 1989）

No.	試験区間 (m)	透水係数 (cm/sec)			間隙水圧 (kgf/cm ²)
		低圧ルジオン試験	湧水圧測定	平均	
B-1	22.20~23.00	2.60×10^{-8}	2.09×10^{-8}	2.41×10^{-8}	0.93
B-2	21.40~22.20	1.89×10^{-7}	1.33×10^{-7}	1.63×10^{-7}	1.27
B-3	20.60~21.40	2.13×10^{-7}	2.06×10^{-7}	2.21×10^{-7}	1.48
B-4	19.80~20.60	1.26×10^{-7}	1.41×10^{-7}	1.25×10^{-7}	1.41
B-5	10.50~11.30	5.25×10^{-8}	7.01×10^{-8}	6.21×10^{-8}	2.20
B-6	7.90~9.90	1.56×10^{-6}	3.25×10^{-6}	1.60×10^{-6}	0.46

(湧水圧測定は、本文中の湧水圧湧水量測定を示す)

表-6-7 KE-6, KE-7孔における低圧ルジオン試験結果（浜辺ほか, 1990）

No.	試験区間 (m)	掘削前	
		透水係数 (cm/sec)	間隙水圧 (kgf/cm ²)
KE-6-1	13.55~14.15	8.82×10^{-9}	0.21
KE-6-2	12.65~13.25	3.42×10^{-7}	1.51
KE-6-3	11.55~12.15	1.15×10^{-8}	0.70
KE-6-4	10.60~11.20	5.49×10^{-6}	1.57
KE-6-5	9.20~9.80	1.08×10^{-9}	0.01
KE-7-1	14.40~15.00	2.27×10^{-7}	0.39
KE-7-2	12.90~13.50	2.98×10^{-9}	0.03
KE-7-3	12.10~12.70	2.40×10^{-5}	2.51
KE-7-4	10.60~11.20	2.57×10^{-9}	0.18
KE-7-5	9.80~10.40	2.85×10^{-9}	0.25

表-6-10 KH-5孔における低圧ルジオン試験実施区間と結果（浜辺ほか、1990）

試験 No.	試験深度 (m)	間隙水圧 (kg/cm ²)	透水係数 (cm/sec)	
			低圧ルジオン試験	湧水圧測定
15	15.3～17.8	0.394	5.38×10^{-6}	2.40×10^{-6}
14	17.8～20.3	0.419	3.88×10^{-6}	5.89×10^{-5}
13	20.3～22.8	0.215	6.94×10^{-8}	1.79×10^{-6}
12	22.8～25.3	0.160	8.91×10^{-7}	3.41×10^{-6}
11	25.3～27.8	0.330	1.25×10^{-6}	4.48×10^{-6}
10	27.8～30.3	0.055	8.24×10^{-7}	1.82×10^{-6}
9	30.3～32.8	0.768	8.25×10^{-8}	5.42×10^{-8}
8	32.8～35.3	1.412	5.72×10^{-7}	7.88×10^{-7}
7	35.3～37.8	0.999	3.64×10^{-6}	2.91×10^{-6}
6	37.8～40.3	1.040	2.17×10^{-6}	3.12×10^{-6}
5	40.3～42.8	0.773	8.00×10^{-6}	1.04×10^{-5}
4	42.8～45.3	0.715	7.37×10^{-6}	1.18×10^{-5}
3	44.5～47.0	1.010	5.35×10^{-6}	7.00×10^{-6}
2	47.0～49.5	0.883	1.63×10^{-8}	7.60×10^{-8}
1	48.0～50.5	1.501	8.54×10^{-9}	1.34×10^{-8}
平均	—	—	7.75×10^{-7}	1.68×10^{-6}

(湧水圧測定は、本文中の湧水圧湧水量測定を示す。)

表-6-11 1000m級透水性試験装置(Perm-10)の仕様(青山ほか, 1992)

測定項目	性能仕様
間隙水圧	0~120 kgf/cm ²
透水係数	$10^{-5} \sim 10^{-10}$ cm/sec 低圧注入法 $10^{-5} \sim 10^{-8}$ cm/sec 非定常法 $10^{-8} \sim 10^{-10}$ cm/sec (drawdown, buildup法)

使用機器	機器仕様
@圧力センサー	測定範囲 0~150 kgf/cm ² (水晶発信型) 精度 総合 $\pm 0.08\%$ FS (標準偏差 $\pm 0.054\%$ FS) ①直線性: $\pm 0.005\%$ FS (0~120 kgf/cm ²) ②環境温度特性: $\pm 0.02\%$ FS (0.2~41 kgf/cm ²) ③伝送系及び計算誤差: $\pm 0.02\%$ FS
@水温センサー	測定範囲 -2~+55°C 精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ (HGP-10と同様)
定圧注水装置	注入圧力 最大 8 kgf/cm ² 注入流量 (マリオネット式) 測定範囲 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ cc/sec 流量測定 目視水位読み取りおよび 差圧水位計による水位自動読み取り
バッカー	準備品: 収縮時 $42\text{mm} \phi \times 1000\text{mm}$ L 適用口径 = 66mm ($L = \text{約}900\text{mm}$) ~ 100mm ($L = \text{約}700\text{mm}$) 太径用: 収縮時 $54\text{mm} \phi \times 1000\text{mm}$ L 適用口径 = 66mm ($L = \text{約}900\text{mm}$) ~ 120mm ($L = \text{約}700\text{mm}$) 試験区間長: 5, 10, 20m (可変)
@定流量ポンプ	小: 流量制御範囲 1~25cc/hour (容量: 25cc) 大: 流量制御範囲 20~500cc/hour (容量: 500cc) 精度: 総合 $\pm 8\%$ 以内 (標準偏差 $\pm 4.7\%$) ①回転速度検出の直線性: $\pm 4\%$ ②V/Fの誤差: $\pm 1.5\%$ ③伝送及び計算誤差: $\pm 0.5\%$ ④その他: $\pm 2.0\%$
ケーブル	適用深度 *1000m 導水管 内径 $9\text{mm} \phi$ 外径 $12\text{mm} \phi$ (全長1100m) 2重外装ケーブル: 電線 $0.9\text{mm} \phi \times 4$ 芯 (外径 $13.9\text{mm} \phi$) 導水パイプ 内径 $2\text{mm} \phi \times 2$ 本

注) * Perm-10 のケーブル及びワインチを1400m仕様に取り替えることにより、
深度1300m程度まで適用深度を向上させることが出来る。

@ 工場内試験の実測値より

表-6-12 1000m 級透水性試験装置(Perm-10)による試験結果
(青山ほか, 1992)

No.	試験深度 (m)	初期間隙水圧 (kgf/cm ²) ()内は非定常試験	透水係数 (cm/sec)	
			定常試験	非定常試験
1	57 ~ 62	4.95 (5.01)	8.0×10^{-9}	2.2×10^{-9}
2	87 ~ 92	0.18	1.7×10^{-7}	-
3	141 ~ 146	5.52	3.8×10^{-8}	-
4	223 ~ 228	*10.87 (10.75)	* 6.2×10^{-9}	5.4×10^{-7}
5	490 ~ 495	*34.91	* 1.7×10^{-7}	-
6	529 ~ 534	36.07	1.7×10^{-8}	-
7	610 ~ 615	*48.95 (*47.90)	* 3.0×10^{-10} ~ 7.0×10^{-10}	* 5.5×10^{-10} -
8	703 ~ 708	53.40	8.9×10^{-9}	-
9	742 ~ 747	57.71	1.2×10^{-7}	-
10	785 ~ 790	*78.78 (*72.21)	* 2.9×10^{-9} ~ 2.6×10^{-8}	* 2.9×10^{-9} -

注) No.7およびNo.10は有効圧力と注入量の関係がリニアにならなかったため、最小値と最大値で示した。

なお、非定常試験における透水係数は、非定常試験結果から算出される浸透率を地下水の容積係数1・粘度1cPとして換算したものである。

*) 初期間隙水圧が一定値とならなかった試験

表-6-13 JFT試験装置の仕様機器一覧(浜辺ほか, 1988)

名 称	仕 様	数 量	製 作 所
エアーパッカー	TT-23B, $\phi 42 \sim 100\text{mm}$ 鋼線入りラバーグラント $l = 650\text{mm}$, ダブルパッカー 仕様 最大差圧 25kgf/cm^2	1 式	N L C
圧力センサー	200Psi ケーブル 300m (14kgf/cm^2 最大 21kgf/cm^2)	1	応用地質
トリップバルブ	$\phi 43\text{mm} \times 300\text{mm}$, 耐圧 35kgf/cm^2	1 個	応用地質
重錘, 重錘ケーブル	電極 3 m ピッチ 20個付 $l = 200\text{ m}$	1 式	応用地質
デジタルインジケータ	MODEL-4919A 測定範囲 199.9 mV , 表示精度 $\pm 1\%$	1 式	応用地質
デジタルデータロガー	7V07 16 ビットCPU 測定点数 最大 1000 点 測定速度 0.1 秒/点 サーマルプリンタ, デジタル カセット MT 内蔵 ひずみ, 温度スキャナユニット	1 台	日本電気三栄
パーソナルコンピュータ	HP9825B CPU 64K バイト	1 台	ヒューレットパッカード
ディスクドライブ	9885M 460K バイト	1 台	ヒューレットパッカード
プリンター	82905A 160CPS	1 台	ヒューレットパッカード
プロッター	9872C A ₃ サイズ	1 台	ヒューレットパッカード
高圧チューブ	耐圧 200kgf/cm^2	500m	応用地質
ストレーナ管 ブルドン管ゲージ バルブ 積算流量計 ペーラー レギュレータ メジャーカップ 他雑品	10m 10kgf/cm^2 1 $1\ell/\text{min}$ 1000 cm^3	1 個 1 個 1 個 1 個 1 式	

表-6-14 J F T試験結果（浜辺ほか, 1988）

試験区間 深度 GL-(m)	計算に用いた水位 区間 GL-(m):A	区間Aの水位上昇所要 時間 $t_n + \tau - t_n$ (sec)	区間AのT-logH曲線 におけるlogHの値	T-logH曲線の勾配 $N = \frac{\log(H_n / H_{n+1})}{t_n + \tau - t_n}$	透水係数 kh(cm/sec)	備考
19.0~29.0	1.25~14.21	49	0.692	0.0141	3.1×10^{-4}	
69.5~79.5	8.43~34.28	28,948	0.567	0.0000196	4.3×10^{-7}	
	34.28~66.09	6,961	0.313	0.0000450	9.8×10^{-7}	
130.0~140.0	61.70~127.12	19,417	0.379	0.0000195	4.3×10^{-7}	
159.0~169.0	7.29~106.96	7,734	1.196	0.000155	3.4×10^{-6}	
	106.96~153.96	522	0.153	0.000293	6.4×10^{-6}	
175.5~185.5	0.69~3.25	1,733	0.259	0.000149	3.3×10^{-6}	
	11.24~163.20	1,319	1.330	0.00101	2.2×10^{-6}	
188.5~198.5	22.01~162.45	95,377	1.064	0.0000112	2.4×10^{-7}	
	162.45~185.88	5,530	0.071	0.0000128	2.8×10^{-7}	
288.0~298.0	-0.29~0.92	31,188	0.294	0.00000943	2.1×10^{-7}	
	0.92~187.23	12,884	2.481	0.000193	4.2×10^{-6}	
342.0~352.0	3.91~186.32	5,667	1.923	0.000339	7.4×10^{-6}	
369.0~379.0	-0.30~0.89	8,923	0.204	0.0000229	5.0×10^{-7}	
	4.00~185.95	8,546	1.883	0.000220	4.8×10^{-6}	
475.0~485.0	1.18~186.21	35,905	2.967	0.0000826	1.8×10^{-6}	

(GLは、孔口の位置を0mとして示した値である。孔口は標高575.55mである。)

表-6-15 動燃式JFT試験装置を用いた試験区間と試験結果（浜辺ほか, 1988）

No.	測定深度 (GL-m)	間隙水圧 (m)	透水係数 (cm/sec)
1	100.0 ~ 110.0	GL + 0.14	5.94×10^{-7}
2	103.0 ~ 108.0	GL + 0.10	2.77×10^{-8}
3	130.0 ~ 140.0	GL + 2.89	7.45×10^{-7}
4	235.0 ~ 245.0	GL + 0.95	1.66×10^{-6}
5	240.0 ~ 250.0	GL + 1.08	1.57×10^{-7}

(GLは、孔口の位置を0mとして示した値である。孔口は標高575.55mである。)

表-6-16 試験ケース（長ほか, 1990）

試験ケース	注入区間	注入量 (cc/s)	観測区間
Case A	A	4.45	①②③④ ⑤⑥⑦⑧ ⑨⑩⑪⑫
Case C	C	0.30	①②③④ ⑤⑥⑦⑧ ⑨⑩⑪⑫
Case D	⑤⑥⑦⑧	16.40	⑨⑩⑪⑫

表-6-17 理想化した試験区間の組み合わせ（浜辺ほか, 1990）

	注入区間	観測区間
ケース1	点とみなす	点とみなす
ケース2	線とみなす	点とみなす
ケース3	点とみなす	線とみなす
ケース4	線とみなす	線とみなす

表-6-18 試験開始時における観測区間の間隙水圧(kgf/cm²)
(長ほか, 1990)

試験 ケース	観測区間											
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
Case A	1.410	1.361	1.099	0.700	2.870	2.884	2.903	2.894	2.737	2.714	2.581	0.383
Case C	1.327	1.217	1.076	0.736	2.773	2.778	2.801	2.784	2.671	2.651	2.475	0.569
Case D	-	-	-	-	-	-	-	-	2.882	2.860	2.716	0.461

注) ここに示す間隙水圧は、各観測区間の間隙水圧にKII-6孔を基準として位置水頭(静水圧)を加えた値(ボテンシャル値)である。

表-6-19 透水テンソルの算定に用いた
観測区間 (長ほか, 1990)

試験ケース	観測区間
Case A	⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪
Case C	⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫
Case D	⑧⑩⑪

表-6-20 主透水係数と比貯留量 (長ほか, 1990)

透水係数 (cm/s)	y軸からの 方位(°)	方位 (°)	傾斜 (°)
$K_1: 5.92 \times 10^{-5}$	265.4	245.4	41.8
$K_2: 1.94 \times 10^{-5}$	80.5	60.5	48.2
$K_3: 5.49 \times 10^{-6}$	173.3	153.3	2.41

$$\text{比貯留量 } S_t = 8.50 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1}$$

表-6-21 各孔の動水勾配 i (浜辺ほか, 1990)

孔番	i (最大・最小)
KII-10	3.36 (2.34~5.37)
KII-11	5.51 (3.64~9.21)
KII-12	4.26 (2.01~10.79)
KII-13	4.80 (2.91~9.78)
KII-14	6.14 (3.78~12.27)
KII-15	3.40 (1.93~4.26)
KII-16	5.23 (4.13~10.00)
KII-17	6.73 (4.92~12.44)
KII-18	4.22 (3.56~4.92)
平均値	4.85 (3.25~8.78)

表-6-22 試験区間の湧水量 (長ほか, 1991)

試験区間*	湧水量(cc/min)
No. 1	623
No. 2	548
No. 3	26.8
No. 4	29.4
No. 5	401
合計	1628.2

*: 坑口側からのナンバリング

表-6-23 試験区間ごとの湧水量、動水勾配と透水係数（長ほか、1991）

区間長 (m)	湧水量 (cc/min)	動水勾配	透水係数 (cm/sec)
7.5	357	5.39	2.34×10^{-6}
	548	5.09	3.81×10^{-6}
	26.8	4.78	1.98×10^{-7}
	29.4	4.58	2.27×10^{-7}
	401	4.38	3.24×10^{-6}
15.0	853.1	5.24	2.88×10^{-6}
	56.2	4.68	2.12×10^{-7}
	430.4	4.48	1.70×10^{-6}
22.5	959	5.09	2.78×10^{-6}
	457.2	4.58	1.18×10^{-6}
30.0	1034	4.96	2.19×10^{-6}
	1005	4.71	1.89×10^{-6}
37.5	1416	4.85	2.07×10^{-6}

表-6-24 溫湿度センサの仕様（長ほか、1992）

名 称	HN-Qフランジ型センサ	
製 造	株式会社 チノー	
素 子	温度	白金測温抵抗体 Pt100Ω
	湿度	ポリマ薄膜フィルム
測定範囲	温度	0～80°C
	湿度	0～100% RH
測定精度	温度	±0.3°C
	湿度	±3% RH (at 25°C, 0～90% RHにて)
温度係数	温度	±0.04°C/10°C (基準 25°C)
	湿度	±1% RH/10°C (基準 25°C)

表-6-25 風速計の仕様（長ほか、1992）

名 称	V-01-AND3
製 造	株式会社 アイ電子技研
被測定流体	空気
測定範囲	0～10.0 m/sec
測定精度	±3% フルスケール ±1 digit

表-6-26 ファンヒータの仕様（長ほか, 1992）

名 称	製 造	電熱容量
熱風発生機III-27	株式会社 松村電熱機器製作所	27kw
FY-09KW-1	松下電工株式会社	9kw
熱風発生機III-9	株式会社 松村電熱機器製作所	9kw

表-6-27 ベンチレーション試験の日程（長ほか, 1992）

	実施期間	実 施 内 容
Stage I	1991.12.9	区間5温風送風開始
	1992.1.17	区間1, 2, 3, 4冷風送風開始
Stage II	1992.2.23	区間1, 2, 3, 4温風送風に切り替え
	1992.3.7	区間3, 4のファンヒーター交換
Stage III	1992.4.15	全区間冷風送風に切り替え
	1992.4.23	試験終了

表-6-28 各測定点のダクト上端からの距離（長ほか, 1992）

測定点	距離(cm)
a	4.0
b	6.0
c	8.0
d	10.0
e	12.0
f	14.0
g	16.0
h	18.0
i	20.0
j	22.0
k	24.0
l	26.0

表-6-29 任意の試験区間長での全湧水量に占める半球状流の割合
(長ほか, 1992)

試験区間長(m)	7.5	15.0	22.5	30.0	37.5
Q _s /Q _t (%)	42.7	27.1	19.9	15.7	13.0

表-6-30 各区間の湧水量, 蒸発量および全湧水量(Stage I)
(長ほか, 1992)

試験区間	湧水量(cc/min)	蒸発量(mg/sec)	全湧水量(cc/min)
区間1	570.4	180.0 (10.8cc/min)	581.2
区間2	567.3	174.0 (10.5cc/min)	577.8
区間3	16.8	70.0 (4.2cc/min)	21.0
区間4	9.9	23.0 (1.4cc/min)	11.3
区間5	410.4	1193.0 (71.6cc/min)	482.0
合計	1574.8	1640.0 (98.5cc/min)	1673.3

表-6-31 各区間の湧水量, 蒸発量および全湧水量(Stage II)
(長ほか, 1992)

試験区間	湧水量(cc/min)	蒸発量(mg/sec)	全湧水量(cc/min)
区間1	547.3	1343.0 (80.6cc/min)	627.9
区間2	450.7	2192.0 (131.5cc/min)	582.2
区間3	0.0	830.0 (49.8cc/min)	49.8
区間4	0.0	467.0 (28.0cc/min)	28.0
区間5	343.3	2325.0 (139.5cc/min)	482.8
合計	1341.3	7157.0 (429.4cc/min)	1770.7

表-6-32 各区間の湧水量、蒸発量および全湧水量(StageⅢ)
(長ほか, 1992)

試験区間	湧水量(cc/min)	蒸発量(mg/sec)	全湧水量(cc/min)
区間1	583.7	536.0 (32.2cc/min)	615.9
区間2	511.2	464.0 (27.8cc/min)	539.0
区間3	0.0	347.0 (20.8cc/min)	20.8
区間4	0.0	123.0 (7.4cc/min)	7.4
区間5	438.5	790.0 (47.4cc/min)	485.9
合計	1533.4	2260.0 (135.6cc/min)	1669.0

表-6-33 各孔の動水勾配(ベンチレーション試験結果)
(長ほか, 1992)

孔番	近似値	最小値	最大値
KH-10	2.66	1.08	4.35
KH-11	5.61	3.88	13.11
KH-12	5.02	2.53	11.34
KH-13	2.62	1.73	7.14
KH-14	6.73	4.15	13.31
KH-15	3.89	1.71	4.69
KH-16	3.48	2.33	9.54
KH-17	7.17	5.45	14.16
KH-18	4.16	2.77	5.08
平均値	4.59	2.85	9.19

表-6-34 試験区間ごとの湧水量、動水勾配および透水係数
(長ほか, 1992)

試験区間長(m)	試験区間	全湧水量(cc/min)	動水勾配	透水係数(cm/sec)
7.5	1	359.8	4.94	2.58×10^{-6}
	2	582.2	4.68	4.40×10^{-6}
	3	49.8	4.41	3.99×10^{-7}
	4	28.0	4.42	2.24×10^{-7}
	5	482.8	4.43	3.85×10^{-6}
15.0	1,2	882.2	4.81	3.24×10^{-6}
	3,4	77.8	4.42	3.12×10^{-7}
	4,5	510.8	4.43	2.04×10^{-6}
22.5	1,2,3	1009.2	4.68	2.54×10^{-6}
	3,4,5	560.6	4.42	1.50×10^{-6}
30.0	1,2,3,4	1085.7	4.61	2.08×10^{-6}
	2,3,4,5	1142.8	4.49	2.25×10^{-6}
37.5	1,2,3,4,5	1540.5	4.59	2.38×10^{-6}

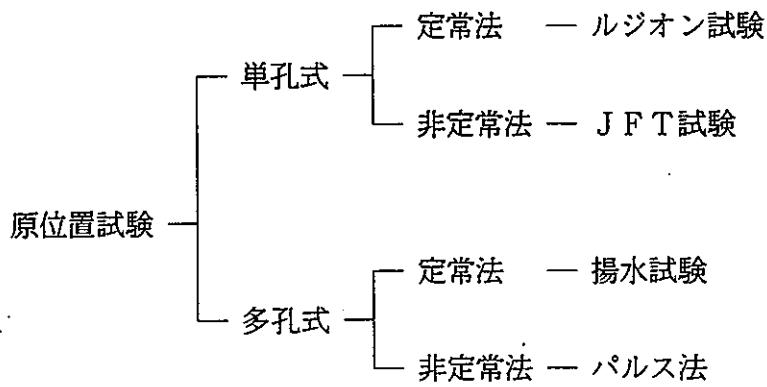


図-6-1 原位透水係数測定装置の分類（柳澤ほか, 1988）

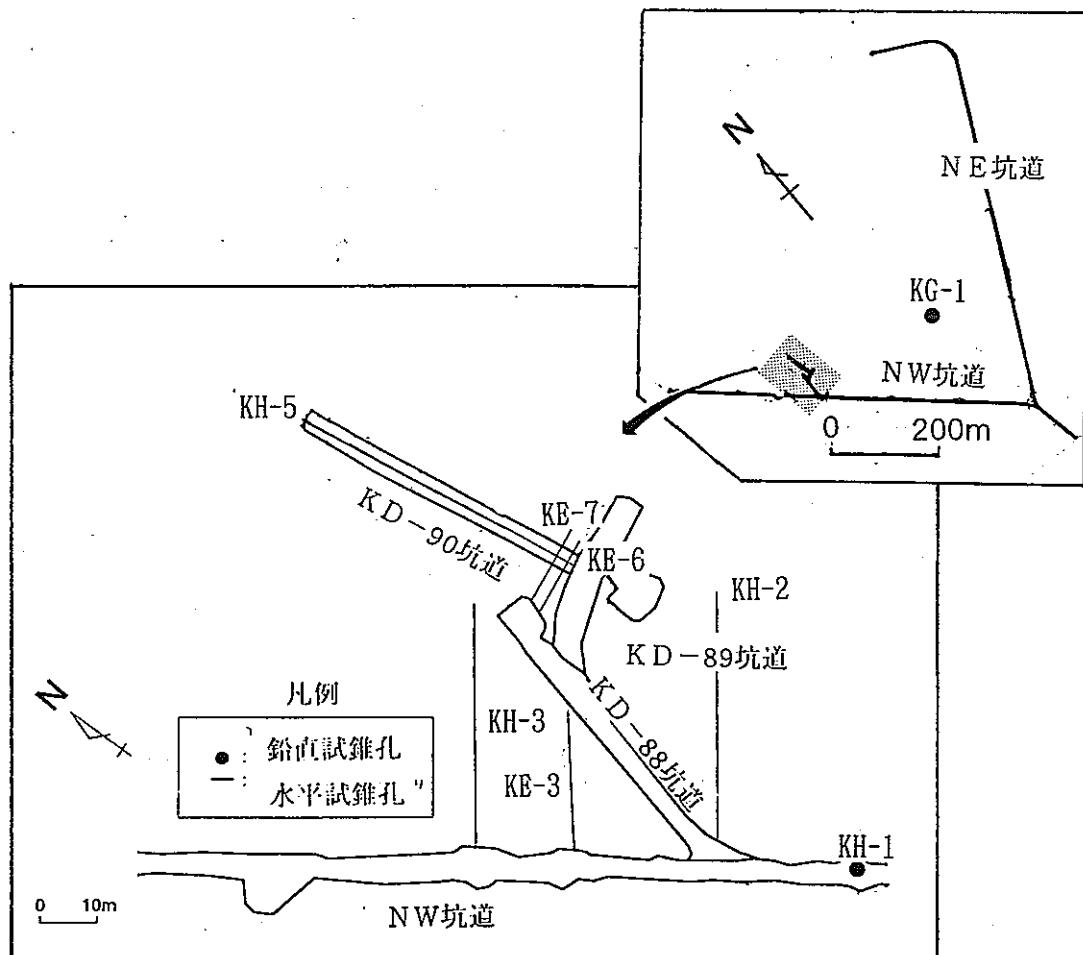


図-6-2 単孔式透水試験を実施した試錐孔位置図

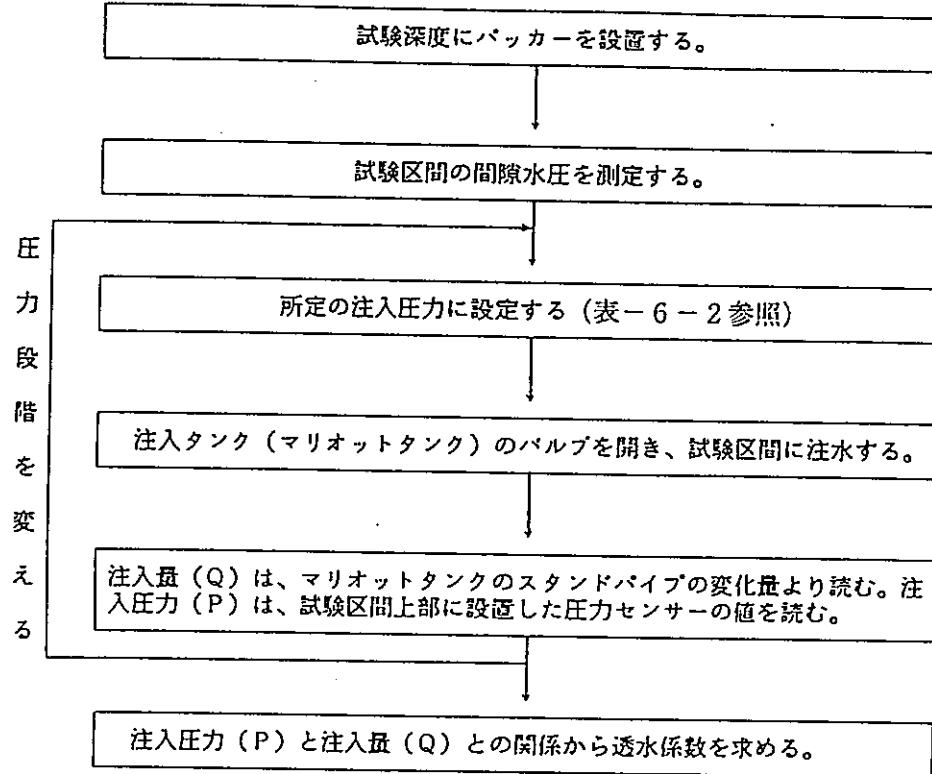


図-6-3 低圧ルジオン試験の流れ（浜辺ほか, 1989）

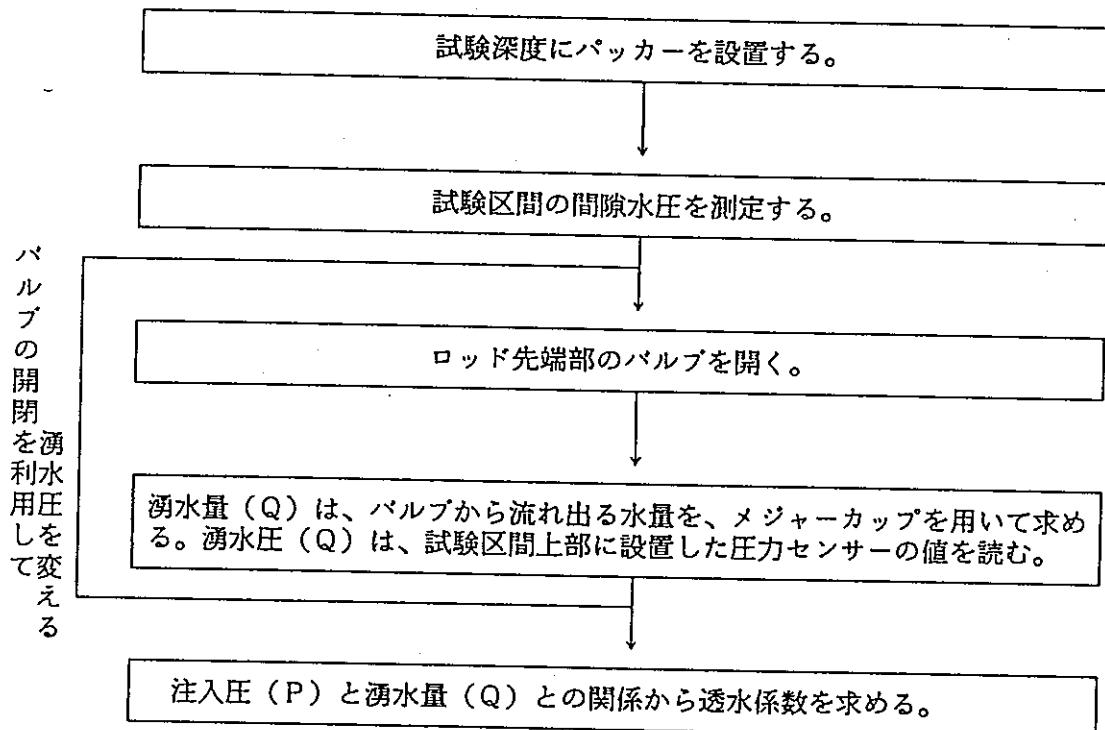


図-6-4 漪水圧湧水量測定の流れ（浜辺ほか, 1989）

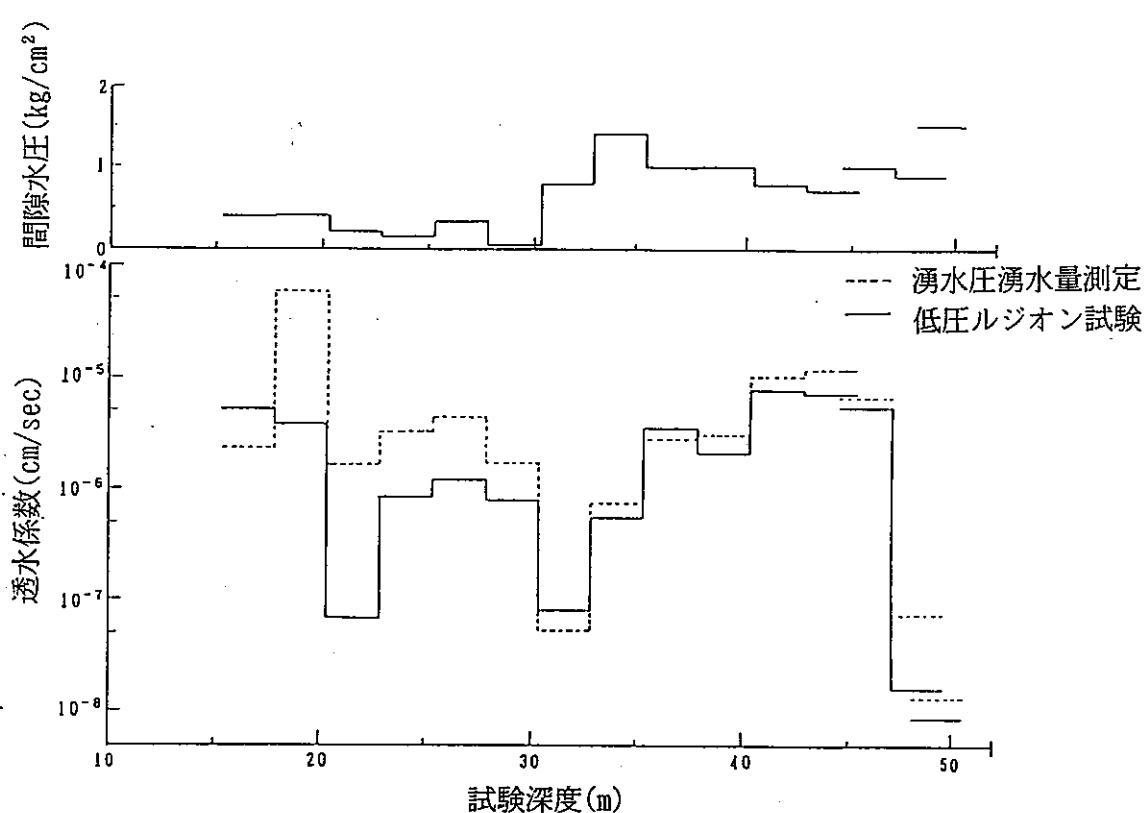
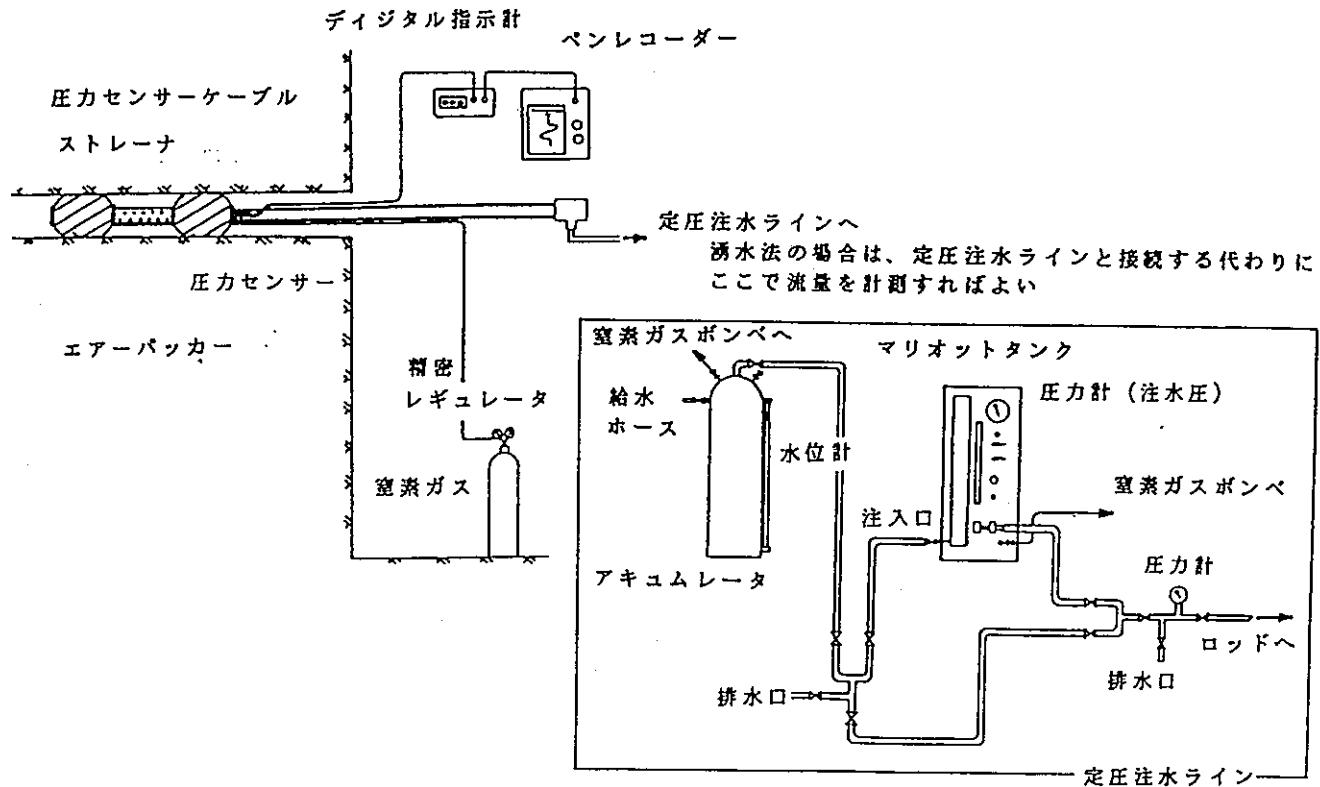


図-6-6 KH-5における低圧ルジオン試験の結果 (浜辺ほか, 1990)

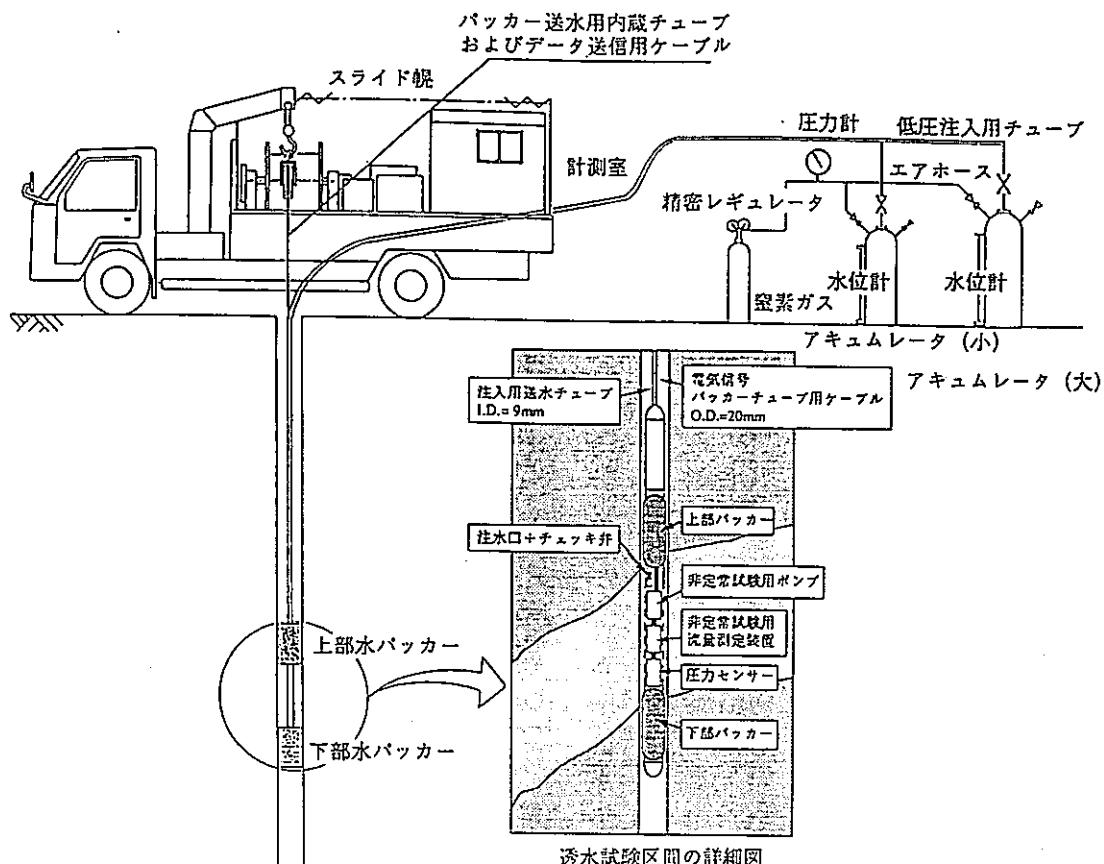


図-6-7 1000m 級透水性試験装置(Perm-10) の概要図 (青山ほか, 1992)

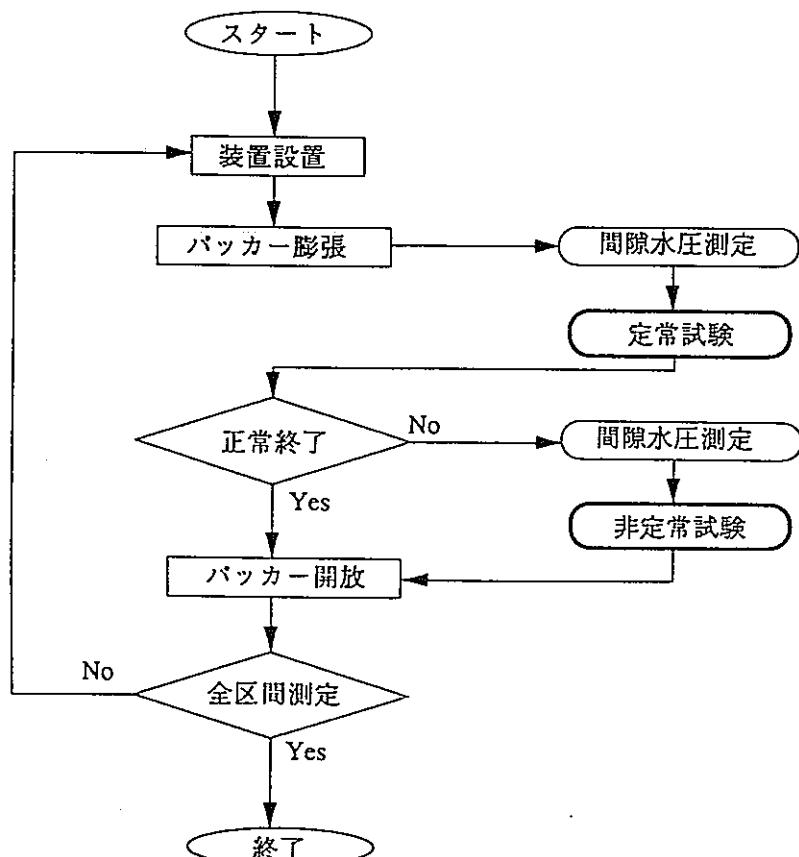


図-6-8 1000m 級透水性試験装置(Perm-10) を用いた試験の流れ
(青山ほか, 1992)

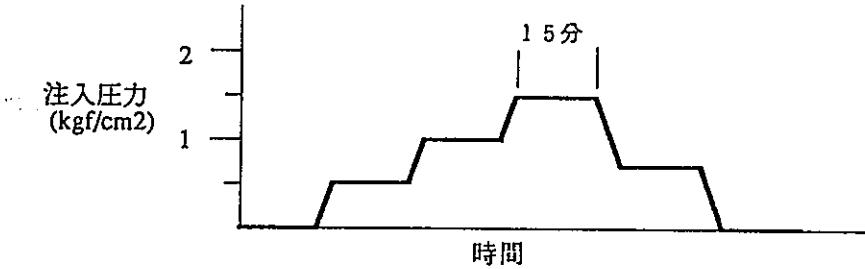


図-6-9 1000m 級透水性試験装置(Perm-10)を用いた定常透水試験の試験加圧注入パターン
(青山ほか, 1992)

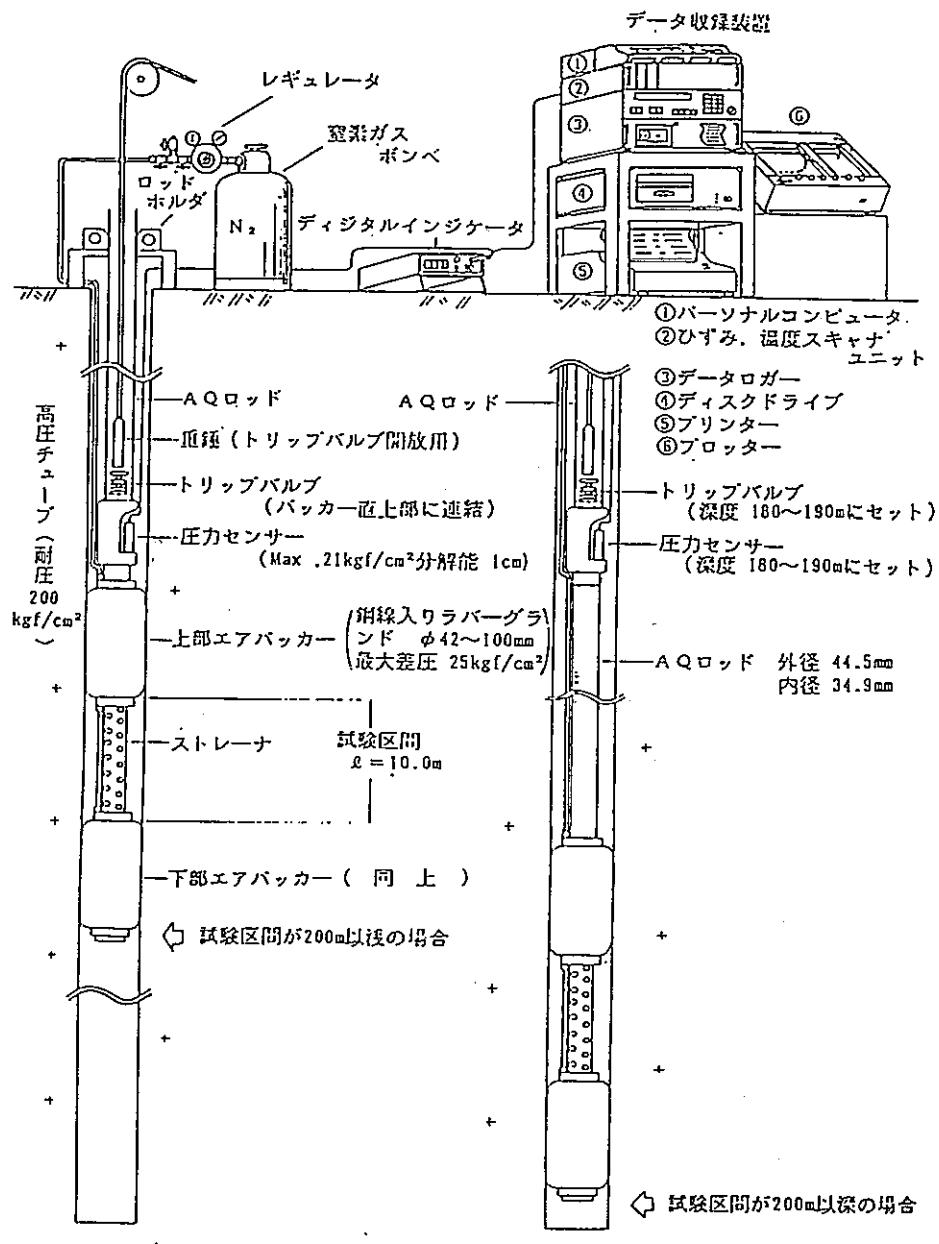


図-6-10 JFT試験装置の概要図 (浜辺ほか, 1988)

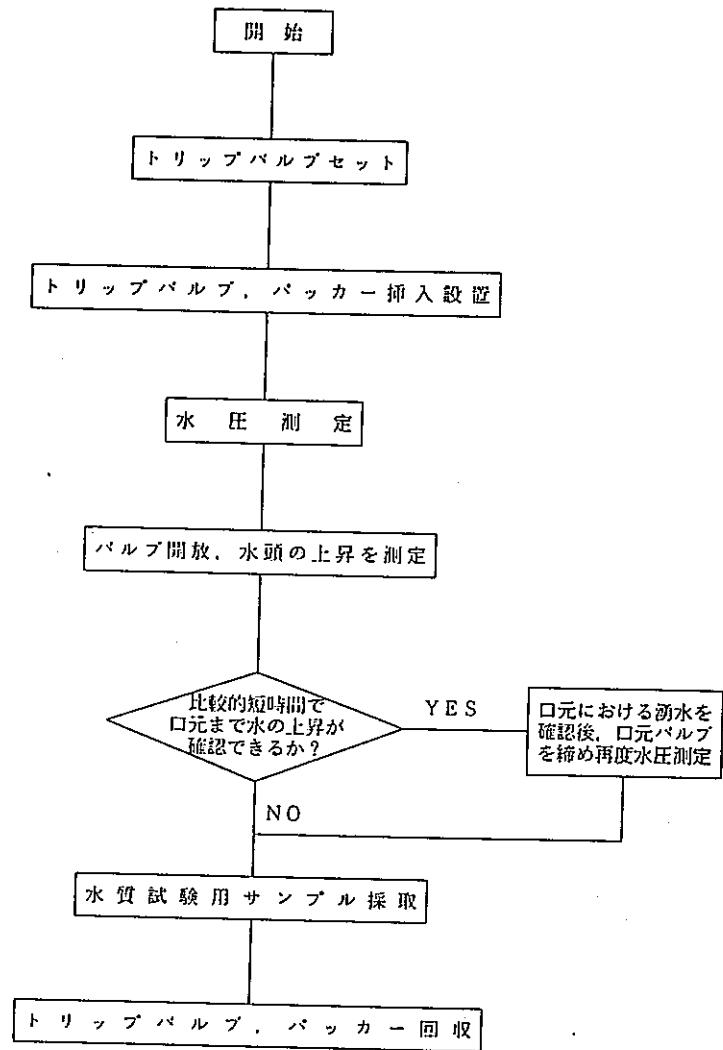


図-6-11 JFT試験装置を用いた試験の流れ（浜辺ほか, 1988）

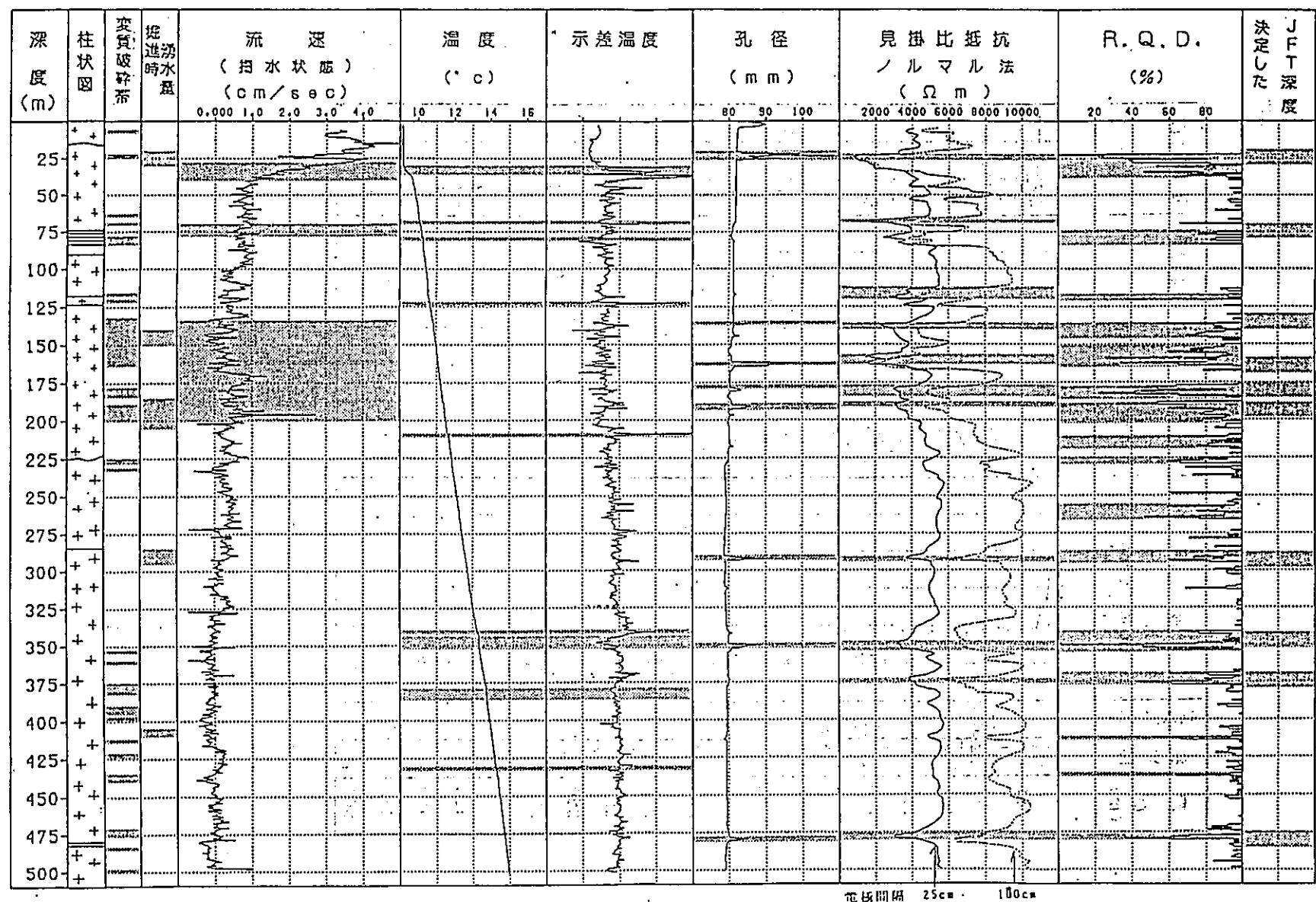


図-6-12 検層結果とJ.F.T.試験の実施区間(浜辺ほか, 1988)

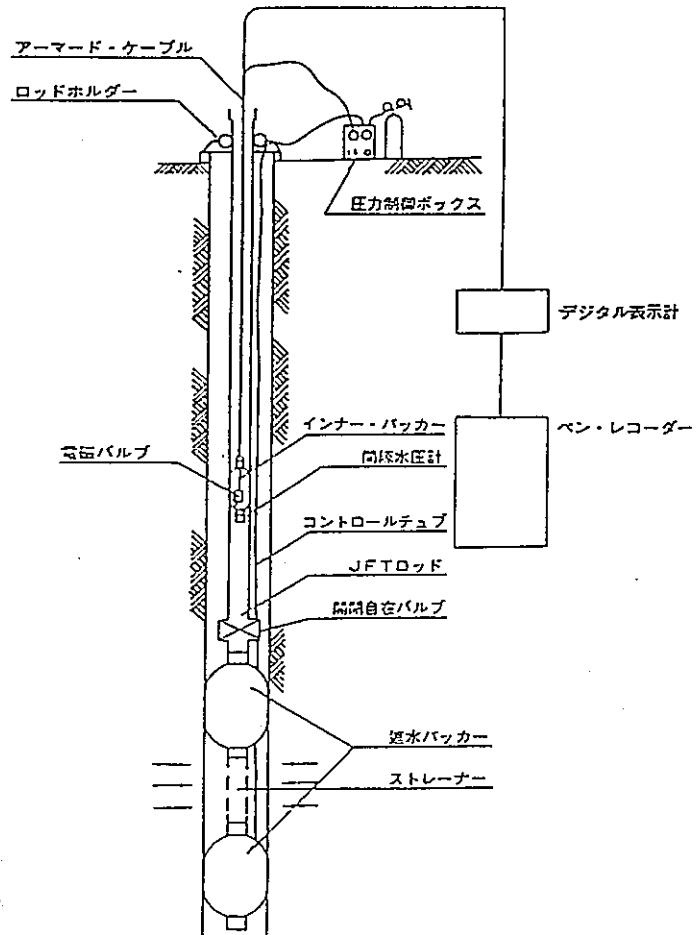


図-6-13 動燃式JFT試験装置の概要図（浜辺ほか, 1988）

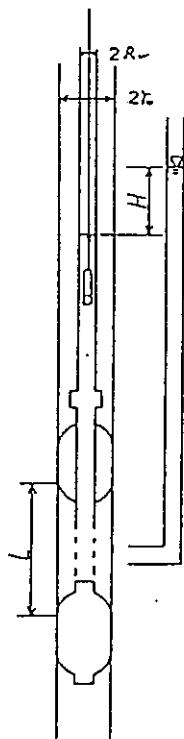
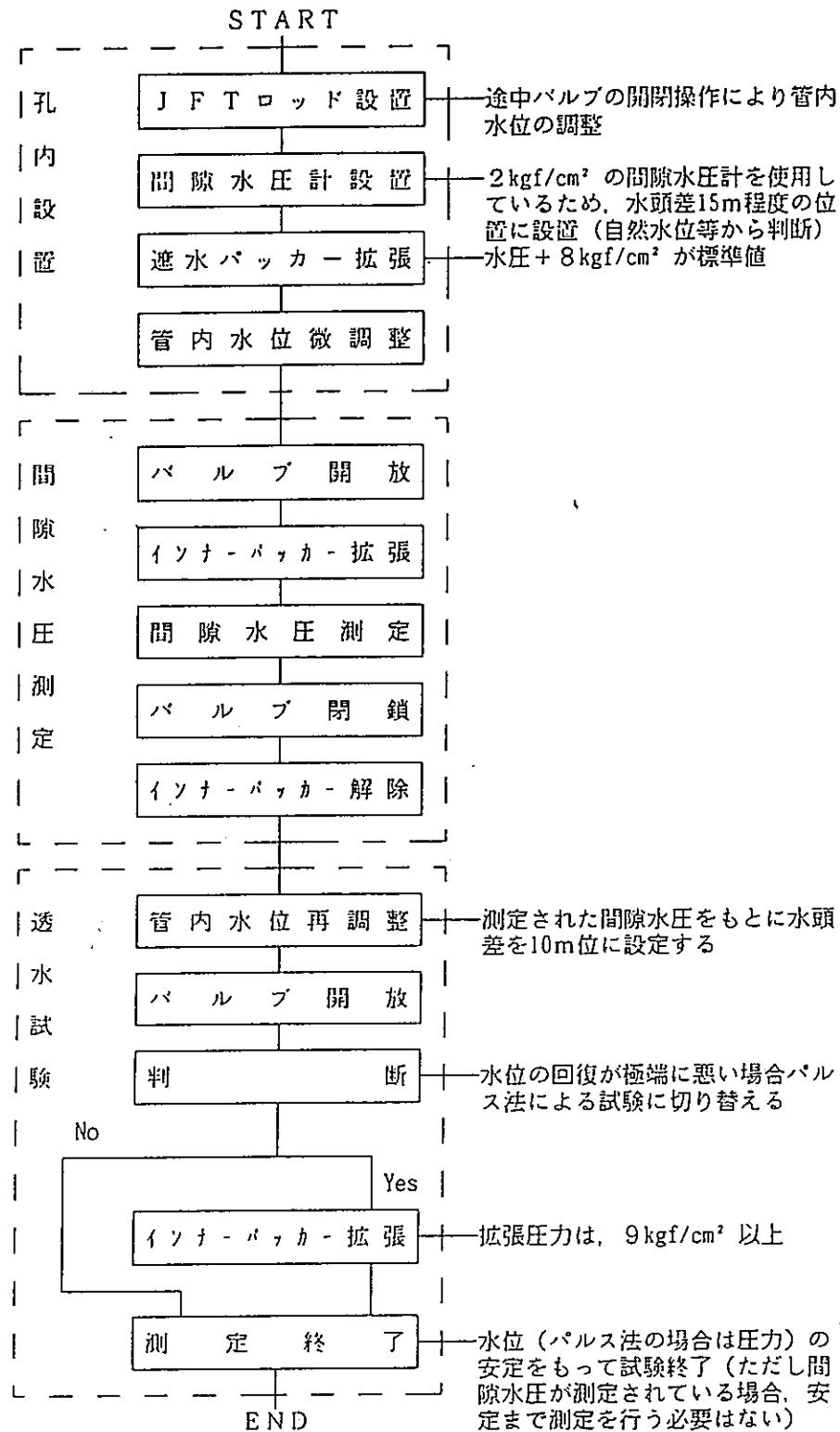


図-6-14 動燃式JFT試験装置を用いた透水試験の概要図（浜辺ほか, 1988）



測定の都合上、間隙水圧測定と透水試験の順番が逆の場合もある。

図-6-15 動燃式JFT試験装置の試験の流れ（浜辺ほか、1988）

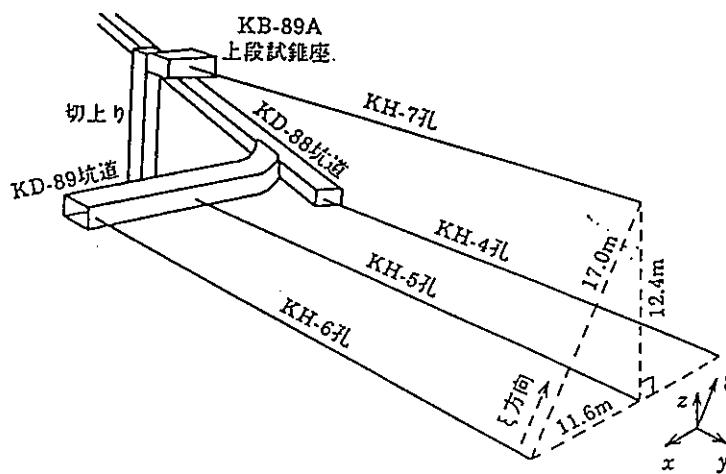


図-6-16 孔間透水試験に用いた試錐孔位置図（長ほか, 1990）

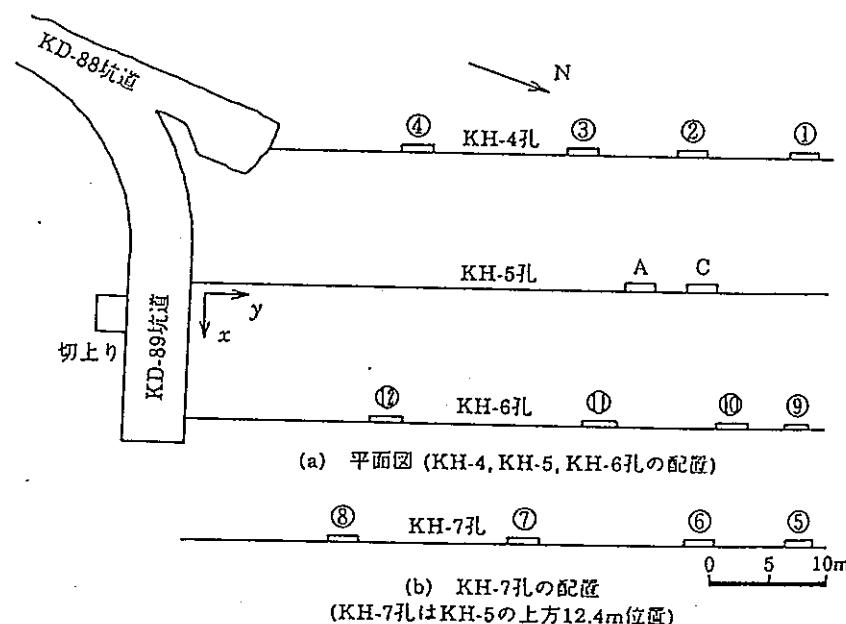


図-6-17 試験区間の配置図（長ほか, 1990）

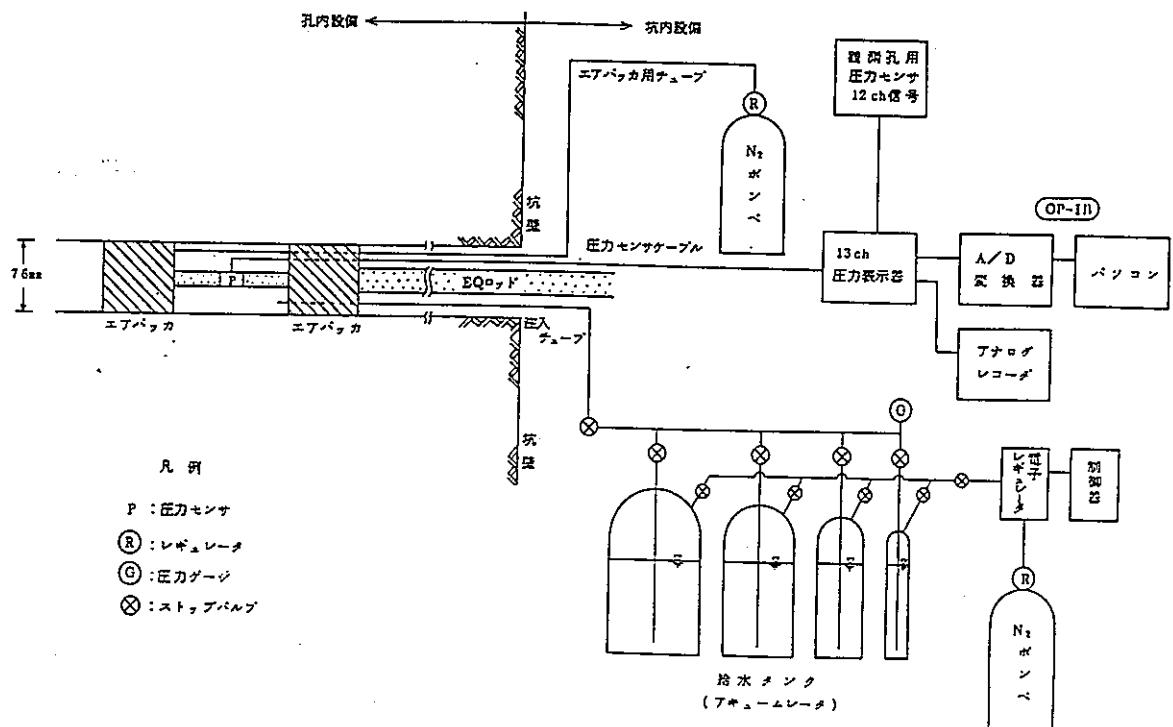


図-6-18 試験装置の概念図（浜辺ほか, 1990）

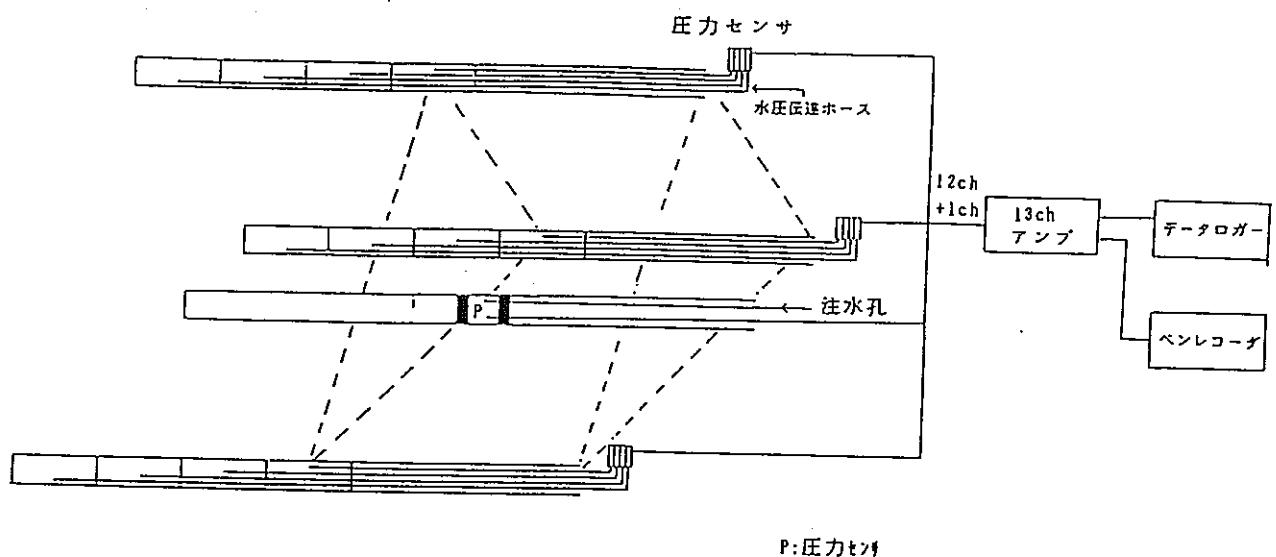


図-6-19 圧力測定システムの概念図（浜辺ほか, 1990）

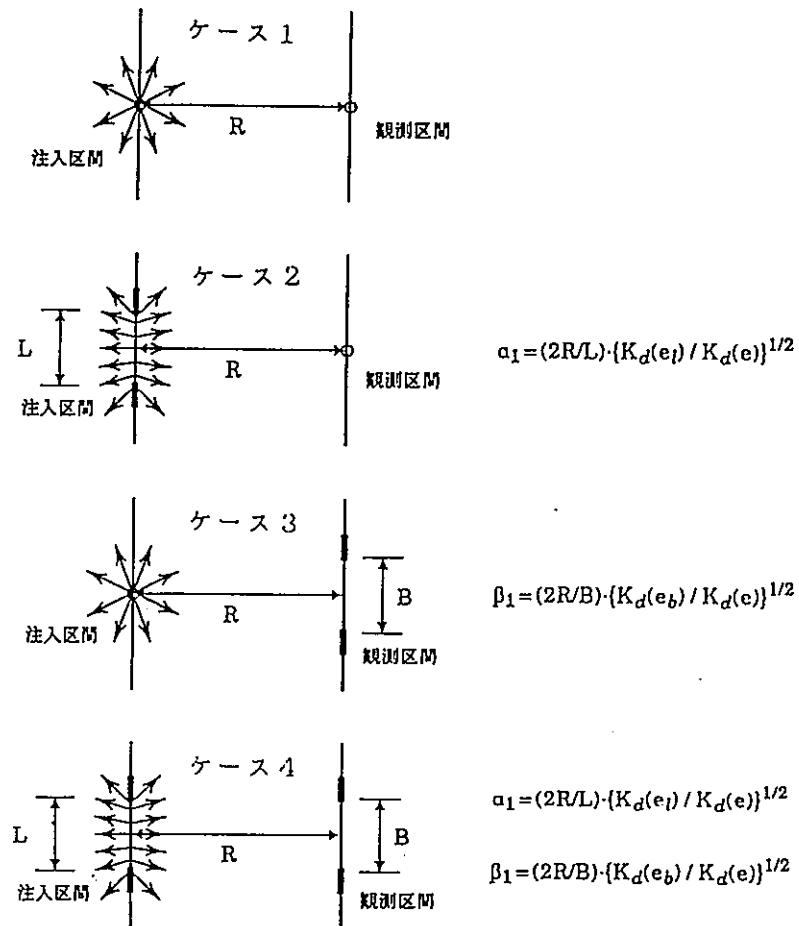


図-6-20 各理論の誘導ケース (浜辺ほか, 1990)

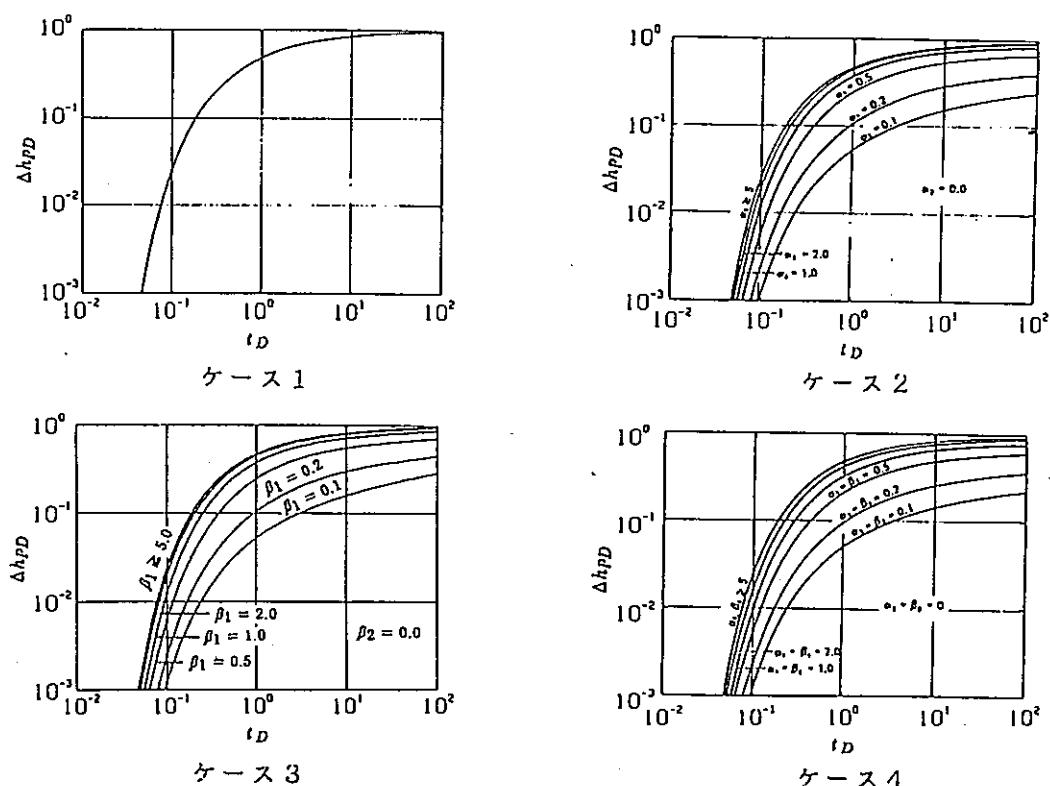
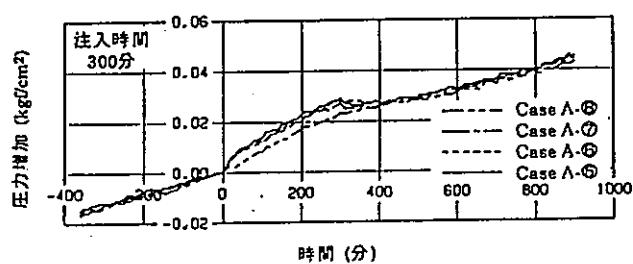
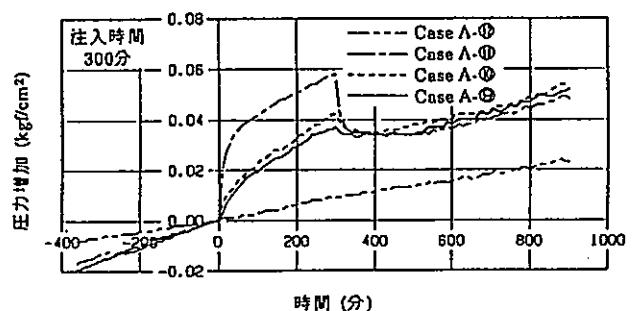


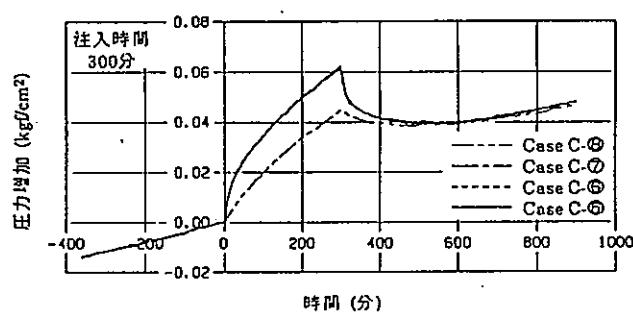
図-6-21 各ケースの理論曲線 (浜辺ほか, 1990)



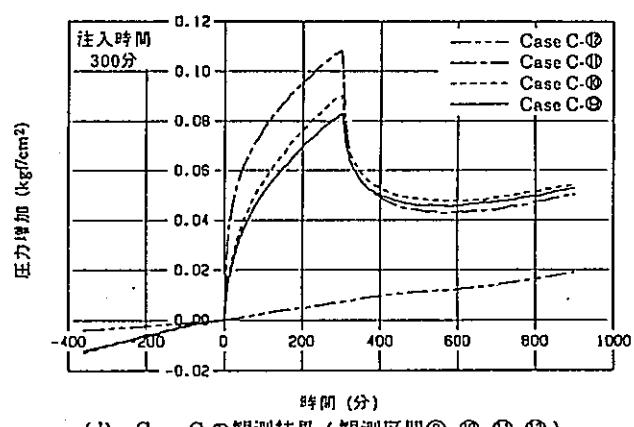
(a) Case A の観測結果 (観測区間④, ⑤, ⑥, ⑦)



(b) Case A の観測結果 (観測区間①, ②, ③, ④)



(c) Case C の観測結果 (観測区間④, ⑤, ⑥, ⑦)



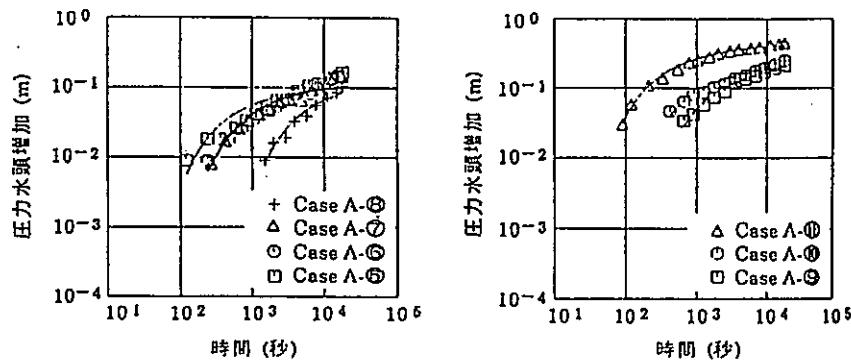
(d) Case C の観測結果 (観測区間①, ②, ③, ④)



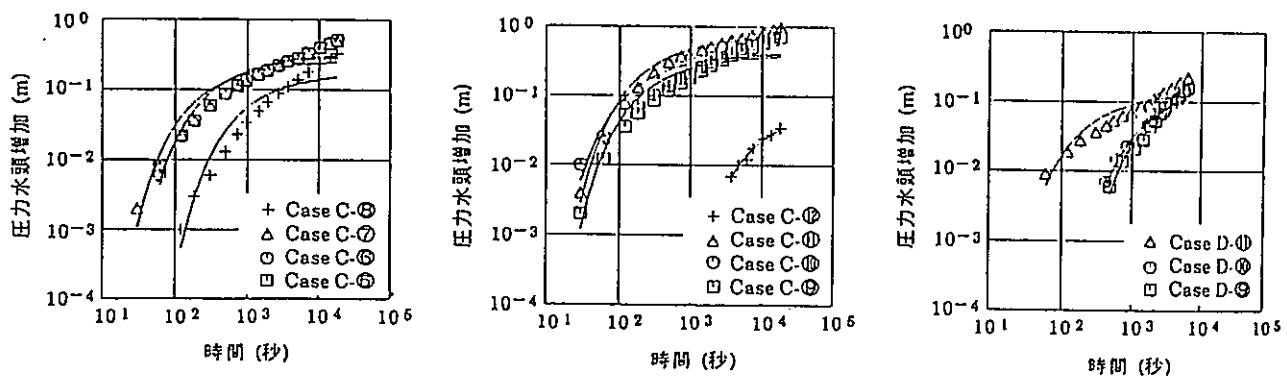
(e) Case D の観測結果 (観測区間④, ⑤, ⑥, ⑦)

図-3 観測区間の水理的応答

図-6-22 観測区間の水理的応答 (長ほか, 1990)

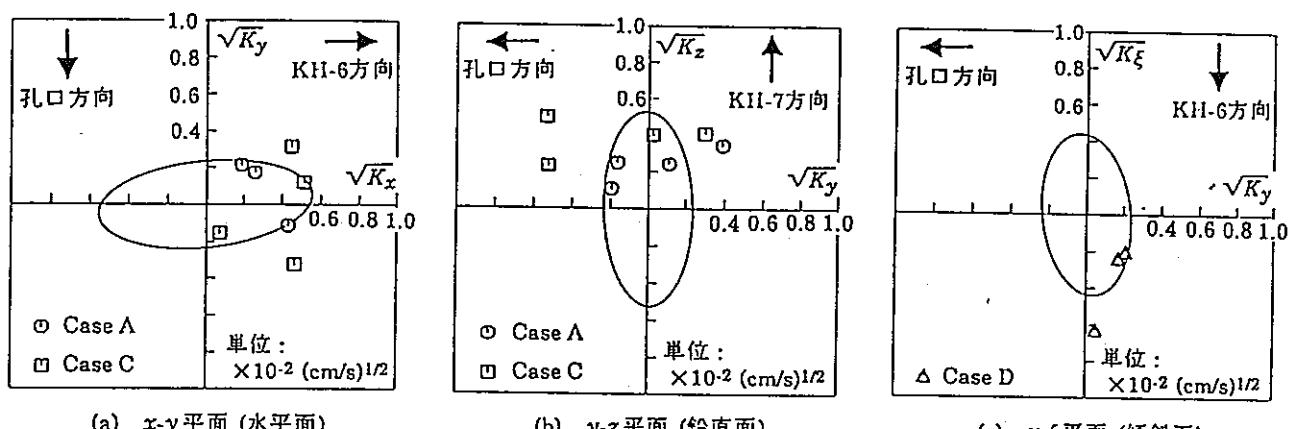


(a) Case A の結果 (観測区間④, ⑤, ⑦, ⑧) (b) Case A の結果 (観測区間④, ⑥, ⑩)



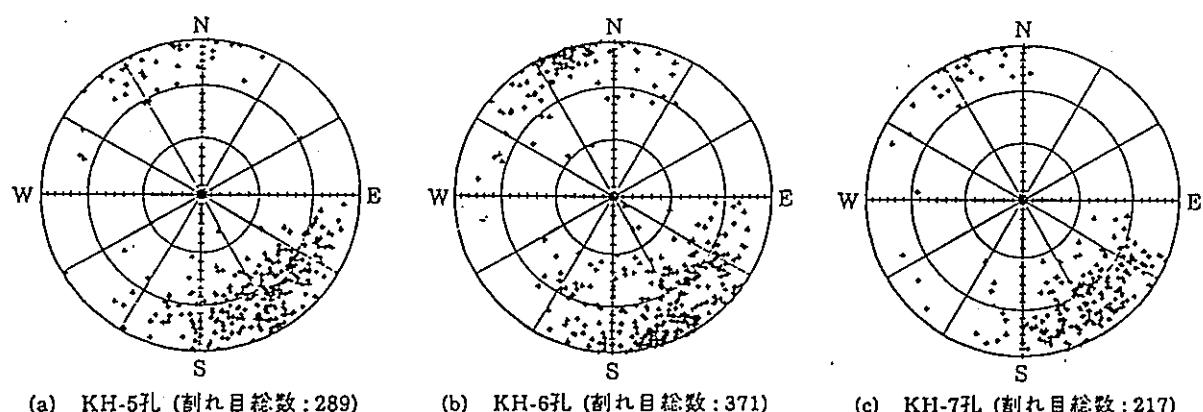
(c) Case C の結果 (観測区間④, ⑤, ⑦, ⑧) (d) Case C の結果 (観測区間④, ⑥, ⑩, ⑪) (e) Case D の結果 (観測区間④, ⑥, ⑩)

図-6-23 理論曲線とのフィッティング結果 (長ほか, 1990)



(a) x-y 平面 (水平面) (b) y-z 平面 (鉛直面) (c) y-ξ 平面 (傾斜面)

図-6-24 透水構造円体 (長ほか, 1990)



(a) KH-5孔 (割れ目総数: 289) (b) KH-6孔 (割れ目総数: 371) (c) KH-7孔 (割れ目総数: 217)

図-6-25 割れ目方向の調査結果 (下半球投影) (長ほか, 1990)

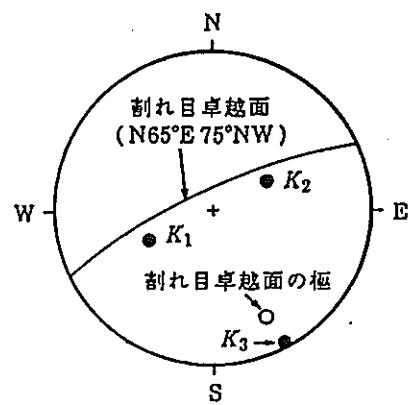


図-6-26 割れ目卓越面と透水係数の主軸の関係（ウルフネット下半球投影）
(長ほか, 1990)

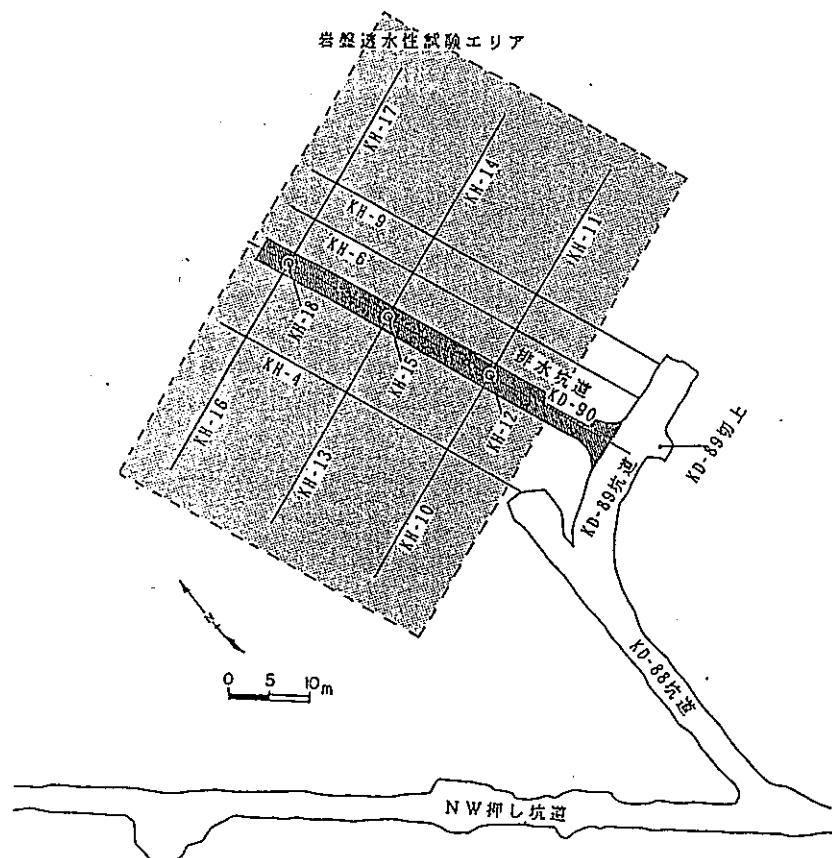


図-6-27 坑道規模の岩盤透水試験の試験領域 (長ほか, 1991)

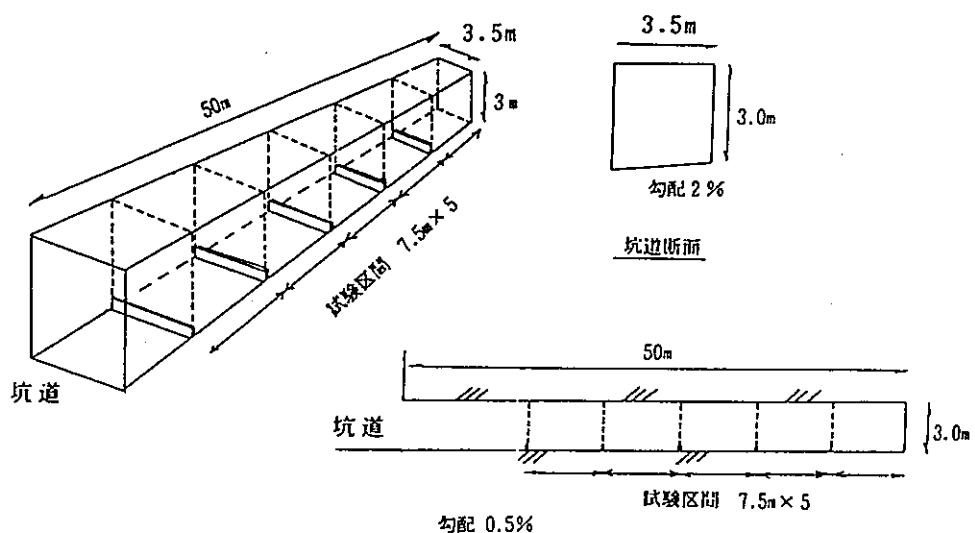


図-6-28 排水坑道の概要図（長ほか, 1991）

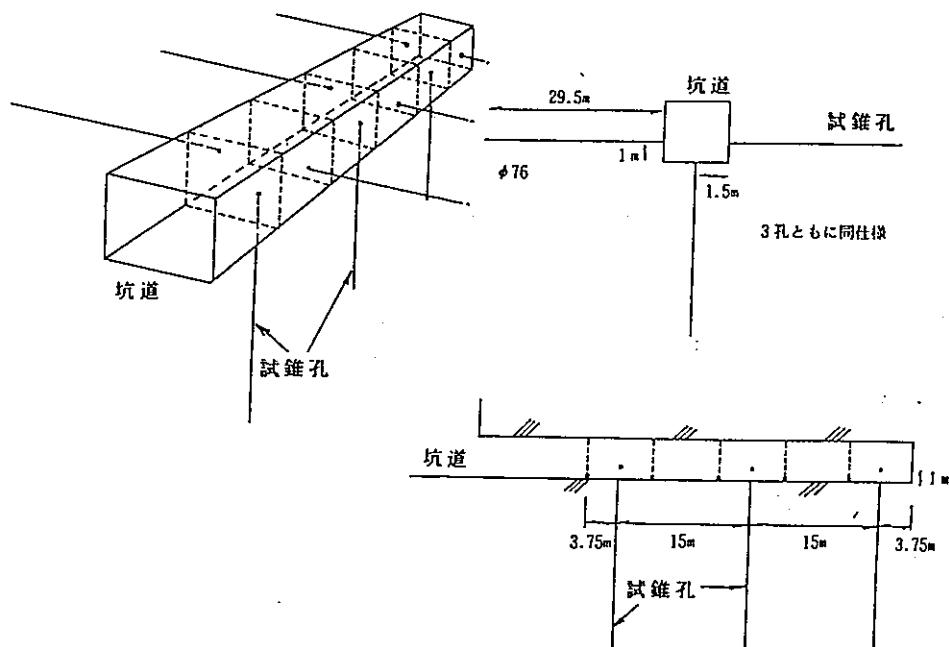


図-6-29 試錐孔の配置図（長ほか, 1991）

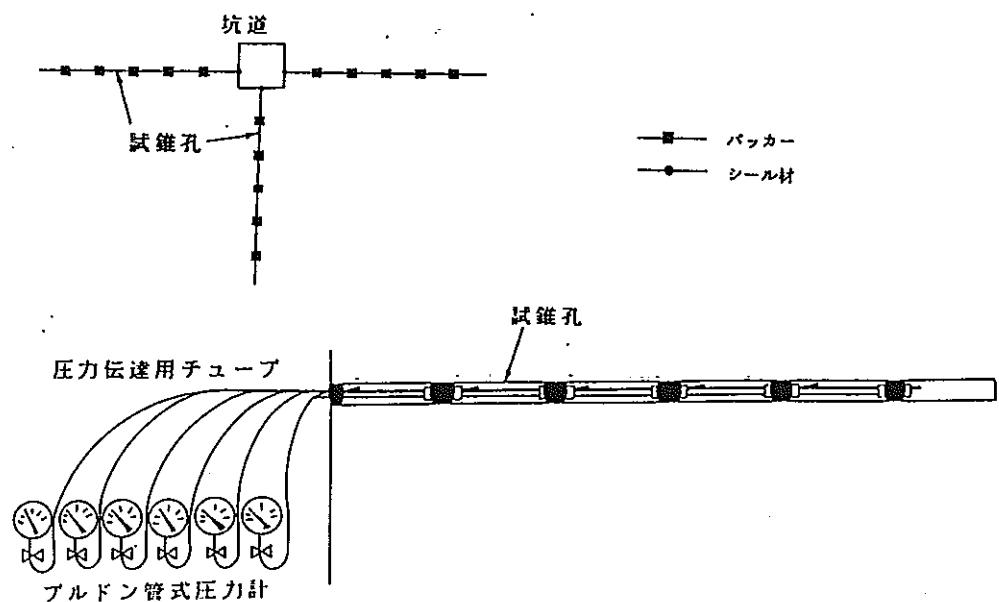


図-6-30 マルチパッカーシステムの配置と間隙水圧の測定状況
(長ほか, 1991)

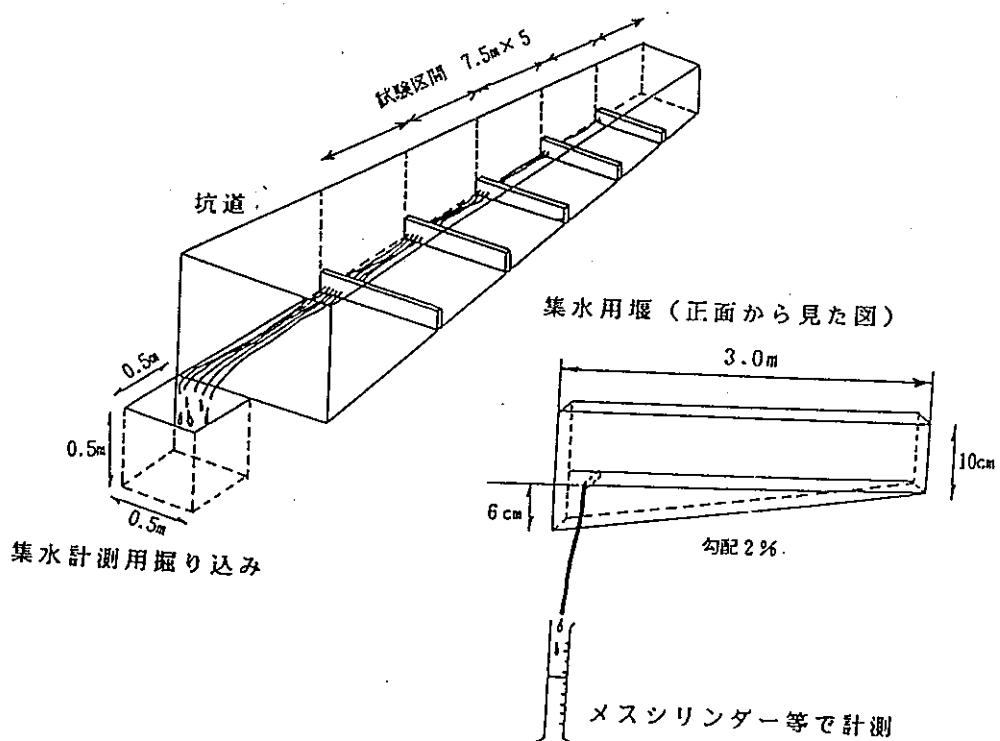


図-6-31 溝水量の測定の概要 (長ほか, 1991)

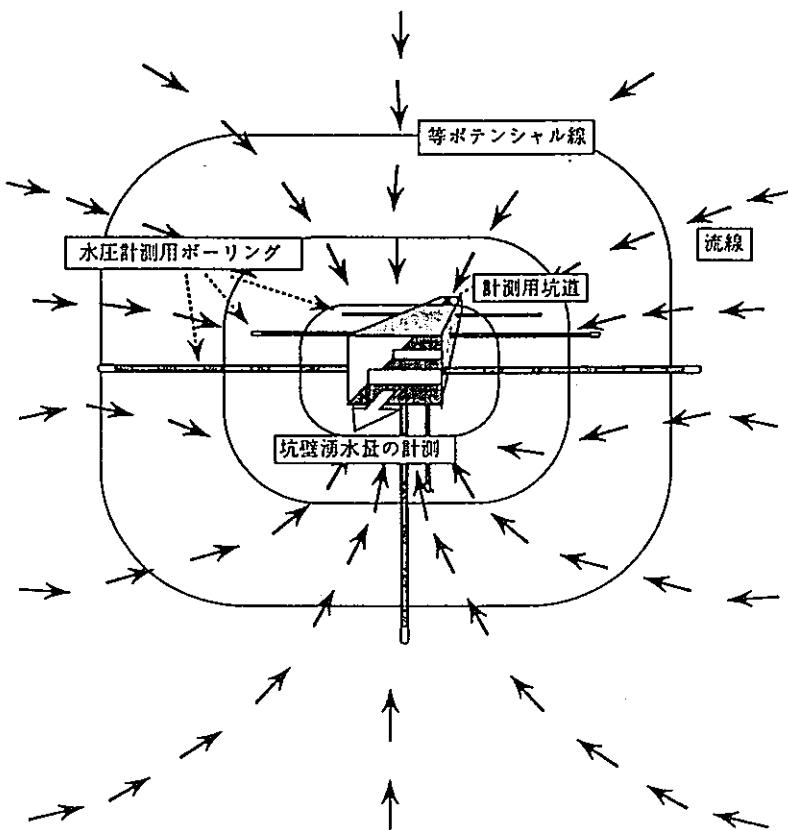


図-6-32 岩盤透水試験の概念図（長ほか, 1991）

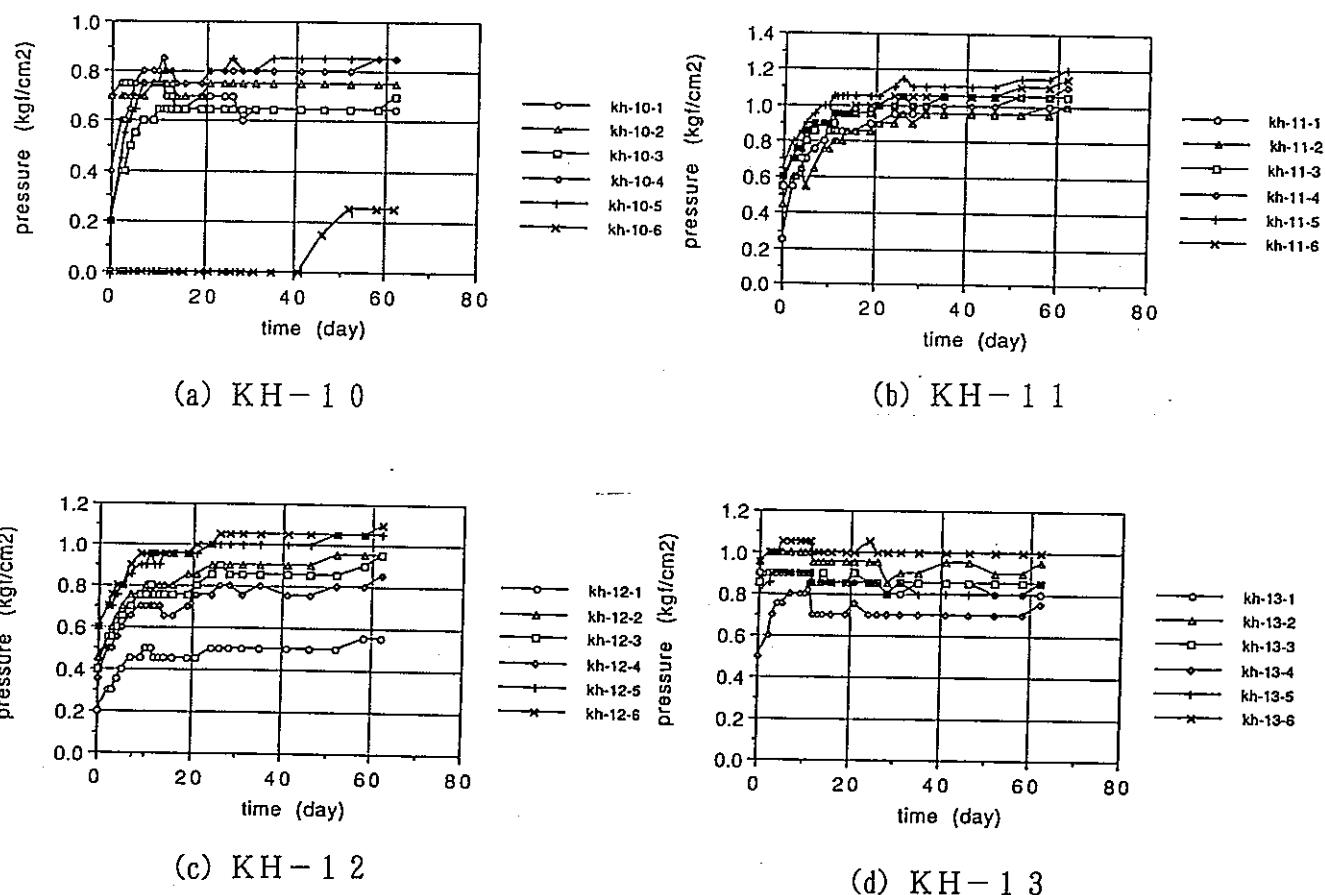
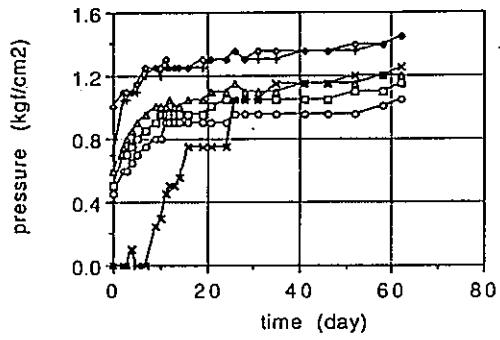
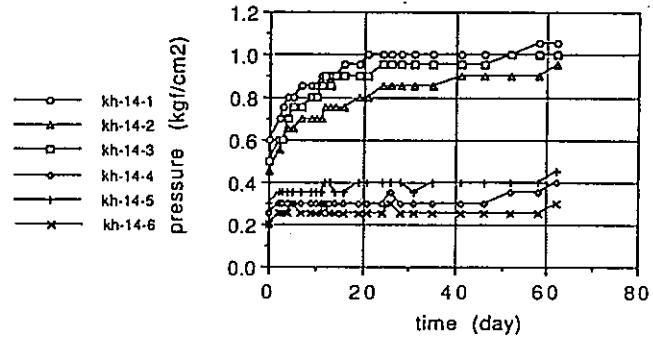


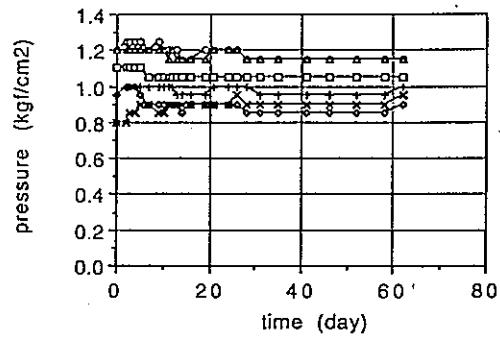
図-6-33(1) KH-10～KH-18孔における間隙水圧
(測定位置は、孔奥から孔口に向かう順にナンバリングしてある)
(長ほか, 1991)



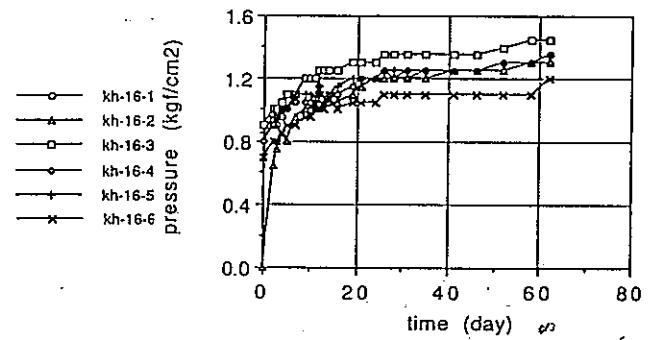
(e) KH-14



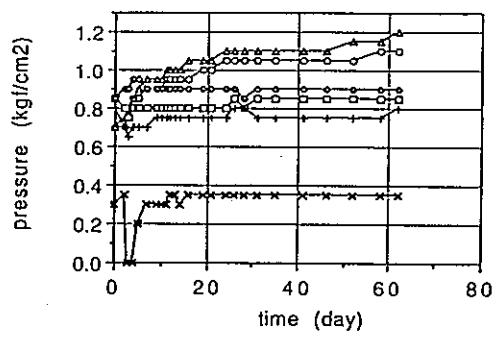
(f) KH-15



(g) KH-16

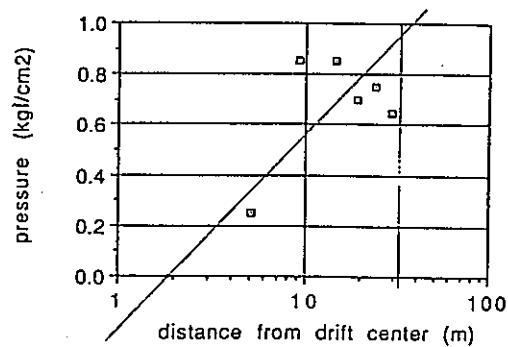


(h) KH-17

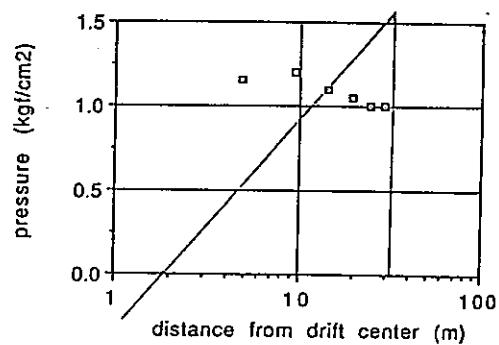


(i) KH-18

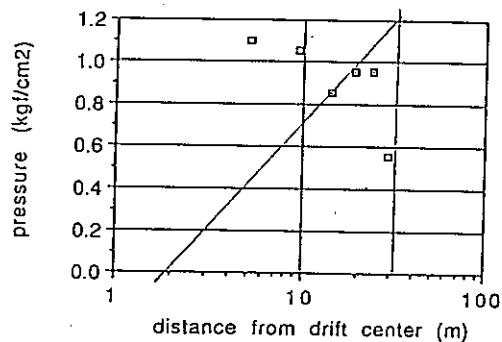
図-6-33(2) KH-10～KH-18孔における間隙水圧
(測定位置は、孔奥から孔口に向かう順にナンバリングしてある)
(長ほか, 1991)



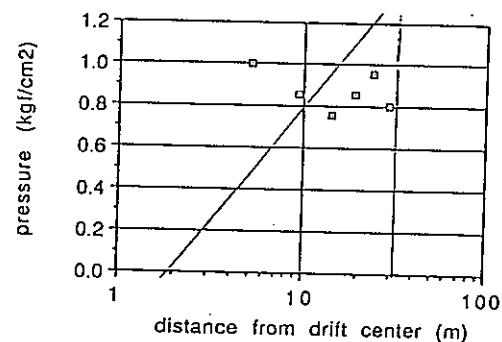
(a) KH-10



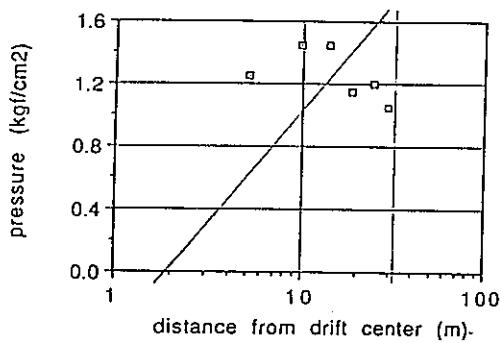
(b) KH-11



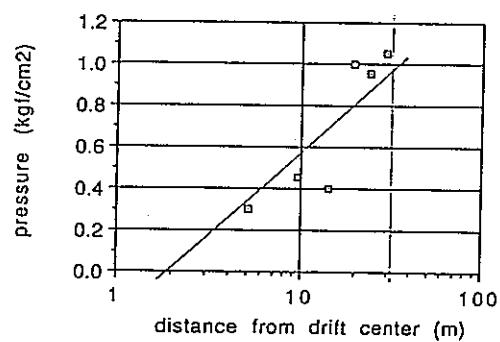
(c) KH-12



(d) KH-13

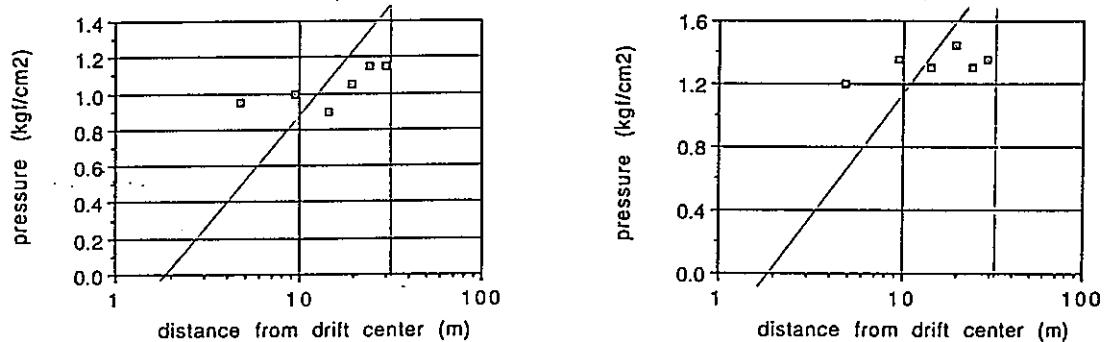


(e) KH-14



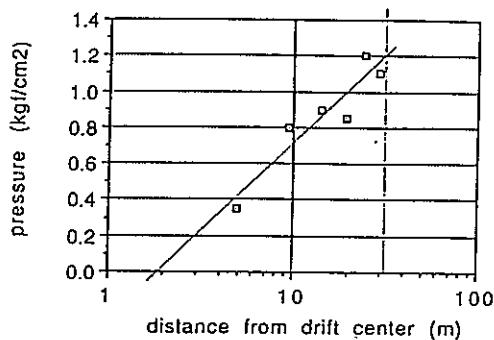
(f) KH-15

図-6-34(1) KH-10～KH-18孔における間隙水圧の分布
(長ほか, 1991)



(g) KH-16

(h) KH-17



(i) KH-18

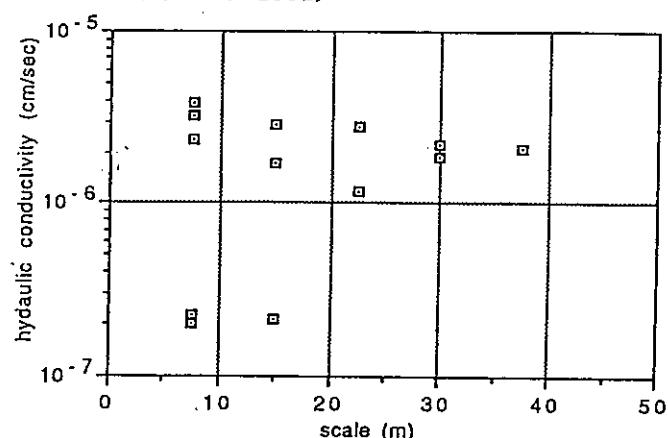
図-6-34(2) KH-10~KH-18孔における間隙水圧の分布
(長ほか, 1991)

図-6-35 排水試験区間による透水係数のばらつき (長ほか, 1991)

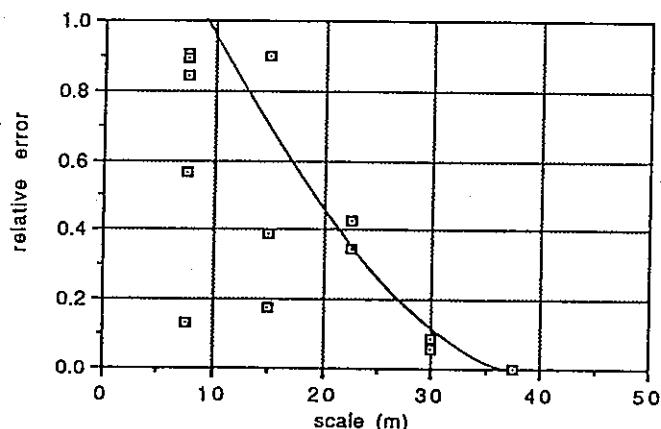


図-6-36 排水試験坑道の透水性におけるスケール効果 (長ほか, 1991)

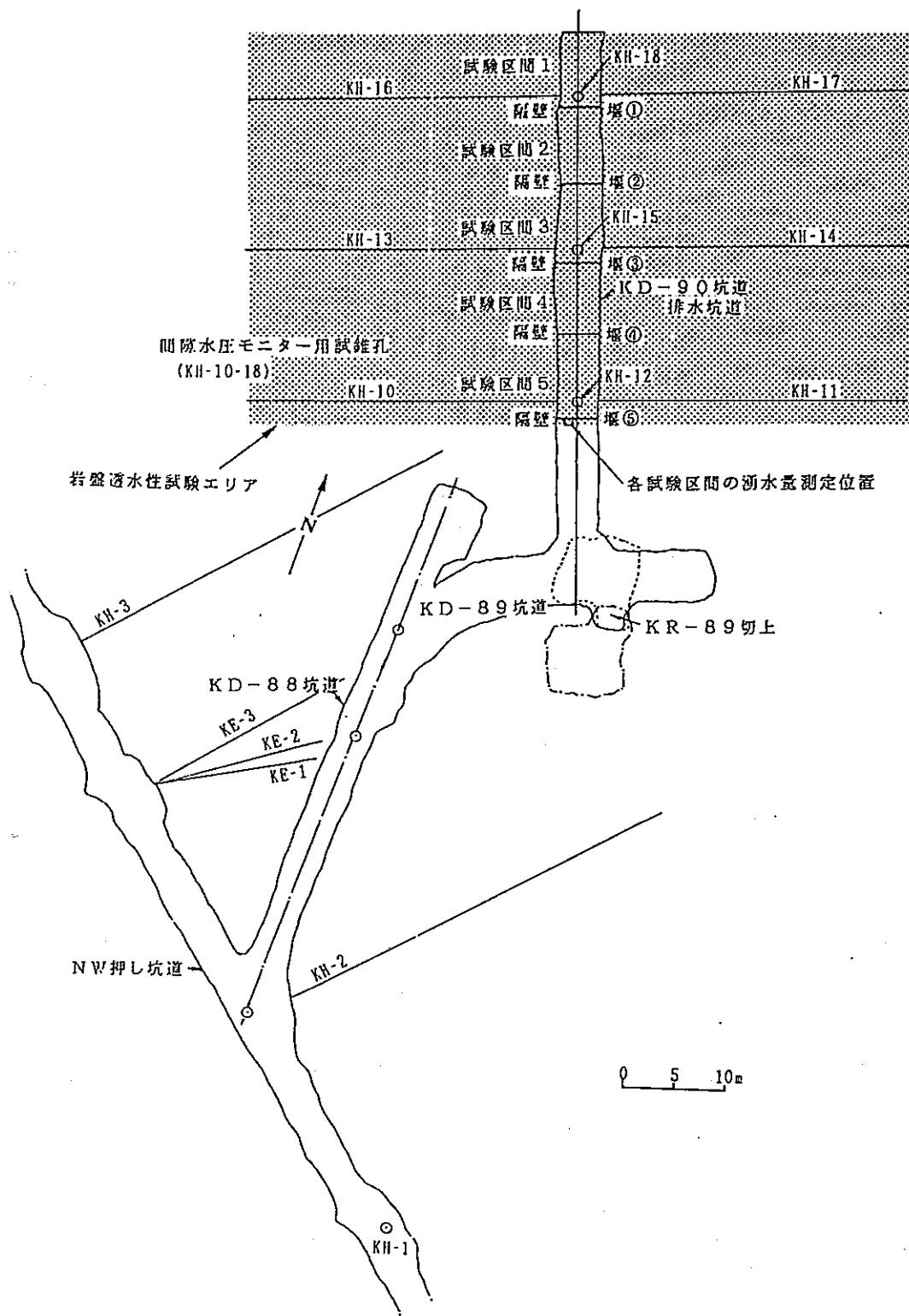
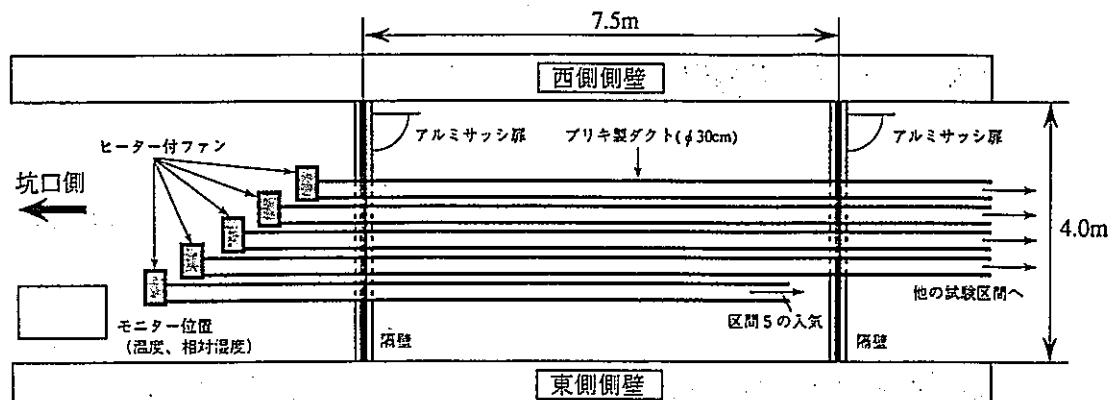
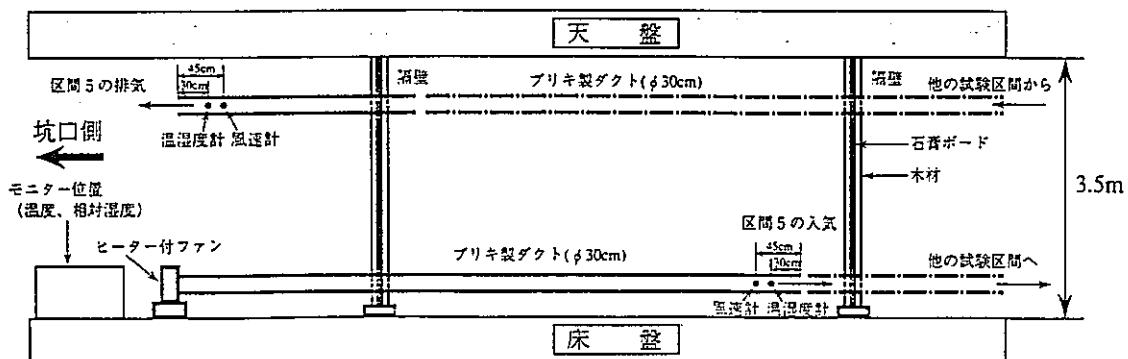


図-6-37 ベンチレーション試験位置と堰および隔壁の位置（長ほか、1992）



(a) 平面図



(b) 断面図

図-6-38 試験区間の設備 (長ほか, 1992)

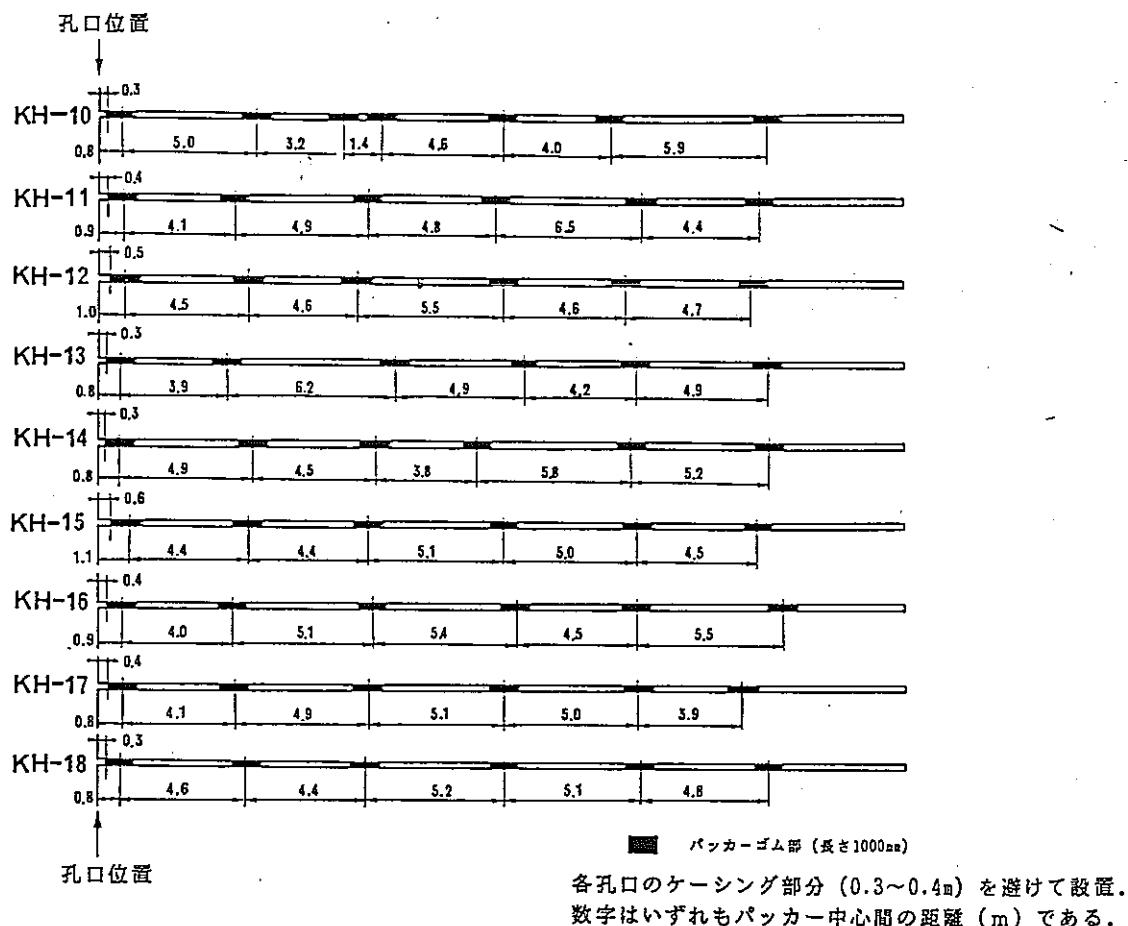


図-6-39 各孔における間隙水圧モニタリング用のパッカー位置図
(長ほか, 1992)

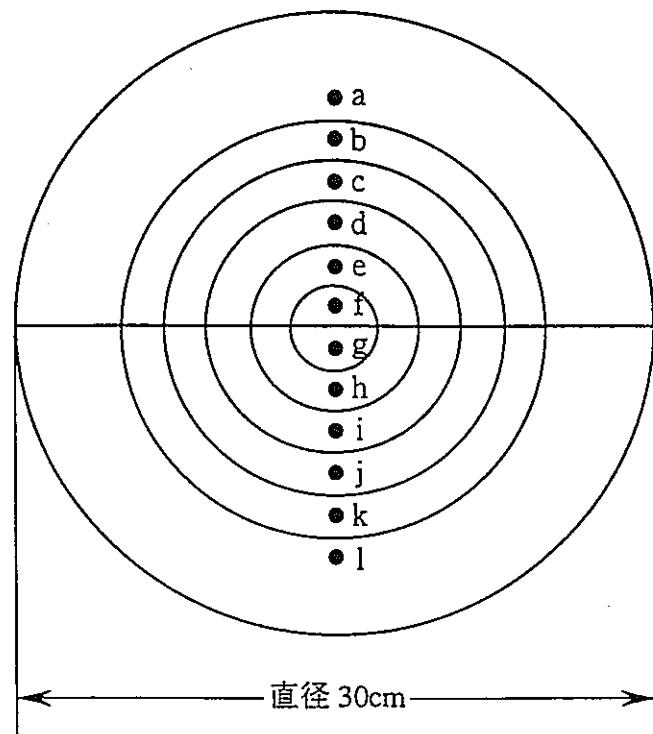


図-6-40 ダクト内の風速測定点（長ほか, 1992）

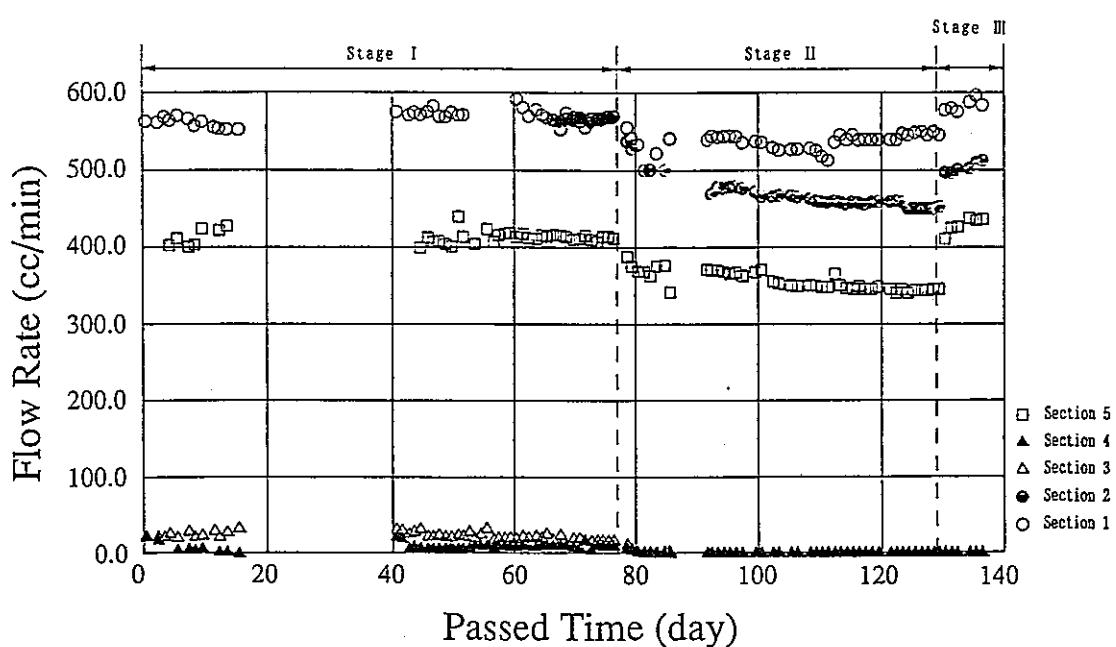


図-6-41 各区間の湧水量の経時変化（長ほか, 1992）

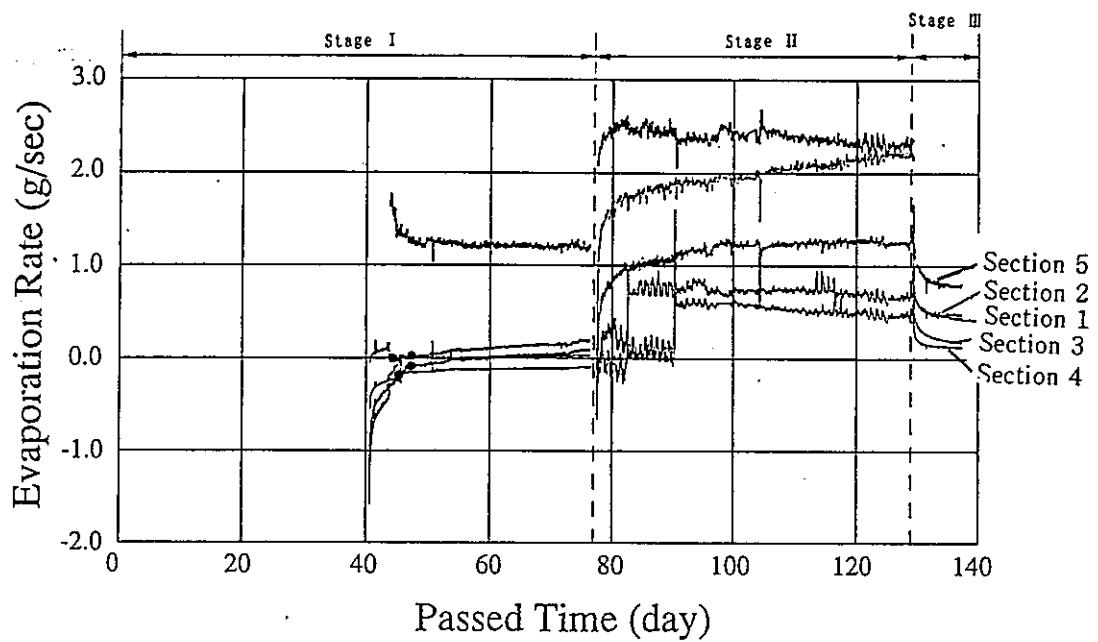


図-6-4-2 各区間の蒸発量の経時変化（長ほか, 1992）

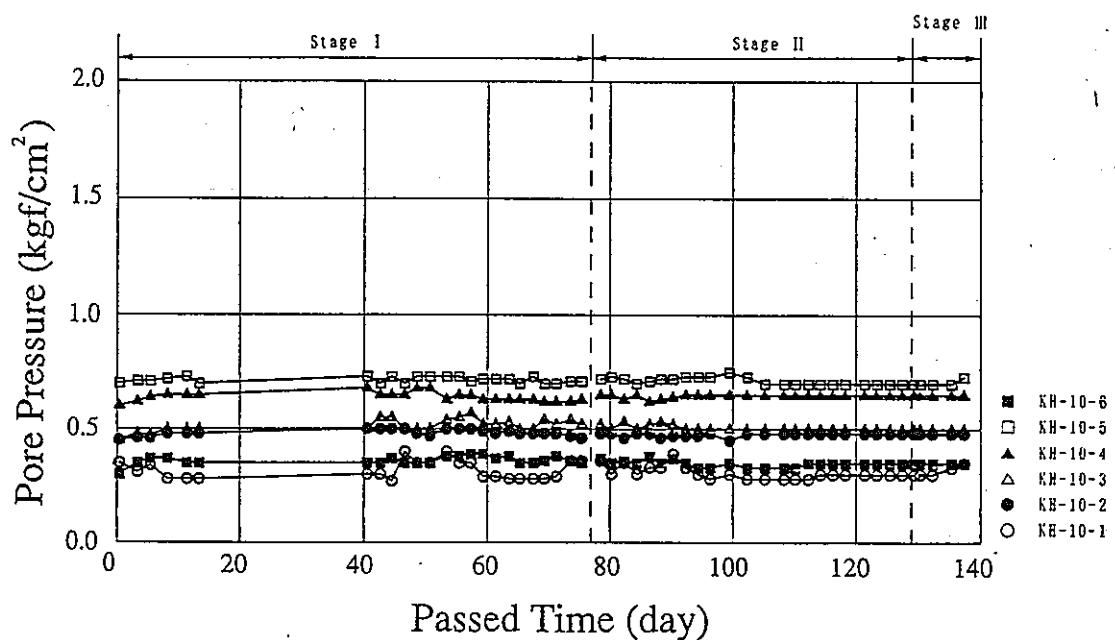


図-6-4-3 KH-10孔における間隙水圧の経時変化（長ほか, 1992）

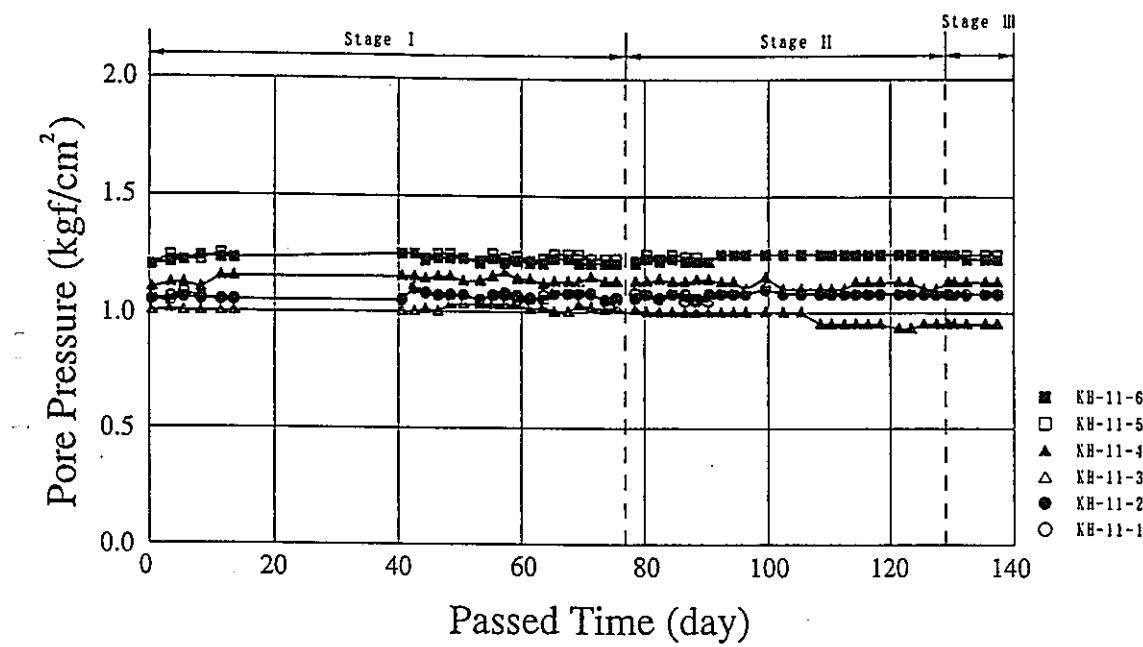


図-6-44 KH-11孔における間隙水圧の経時変化（長ほか, 1992）

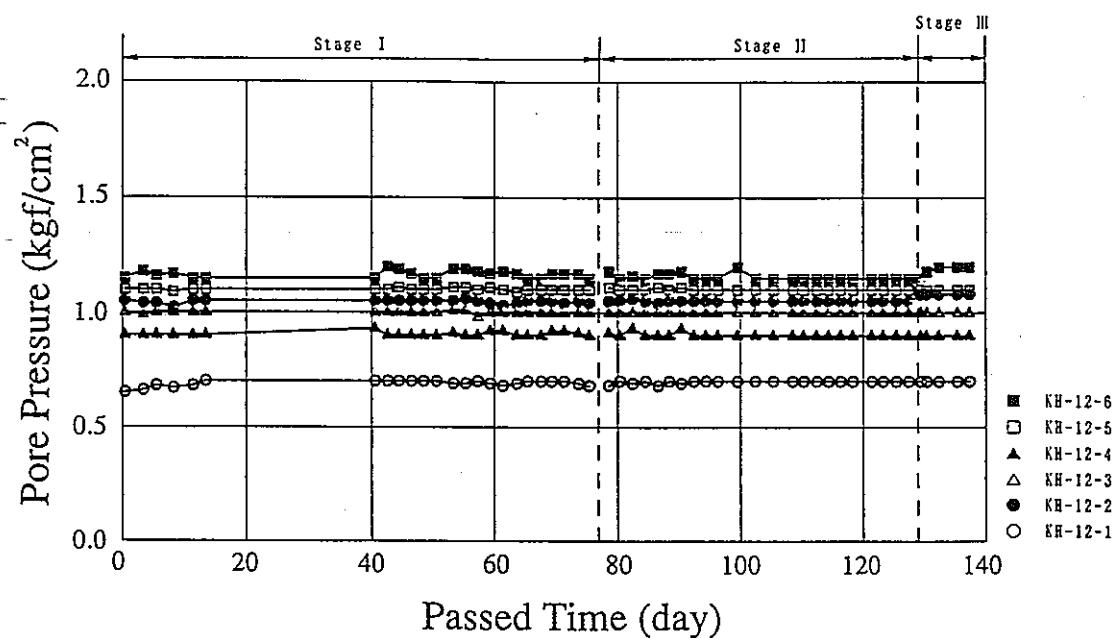


図-6-45 KH-12孔における間隙水圧の経時変化（長ほか, 1992）

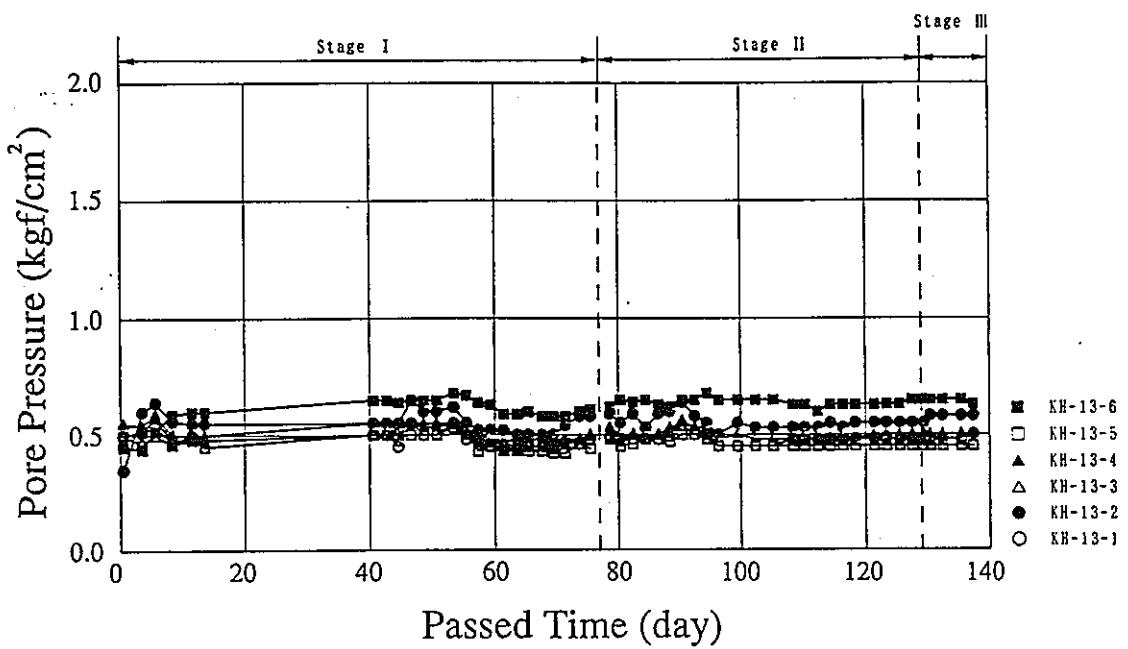


図-6-4-6 KH-13孔における間隙水圧の経時変化（長ほか, 1992）

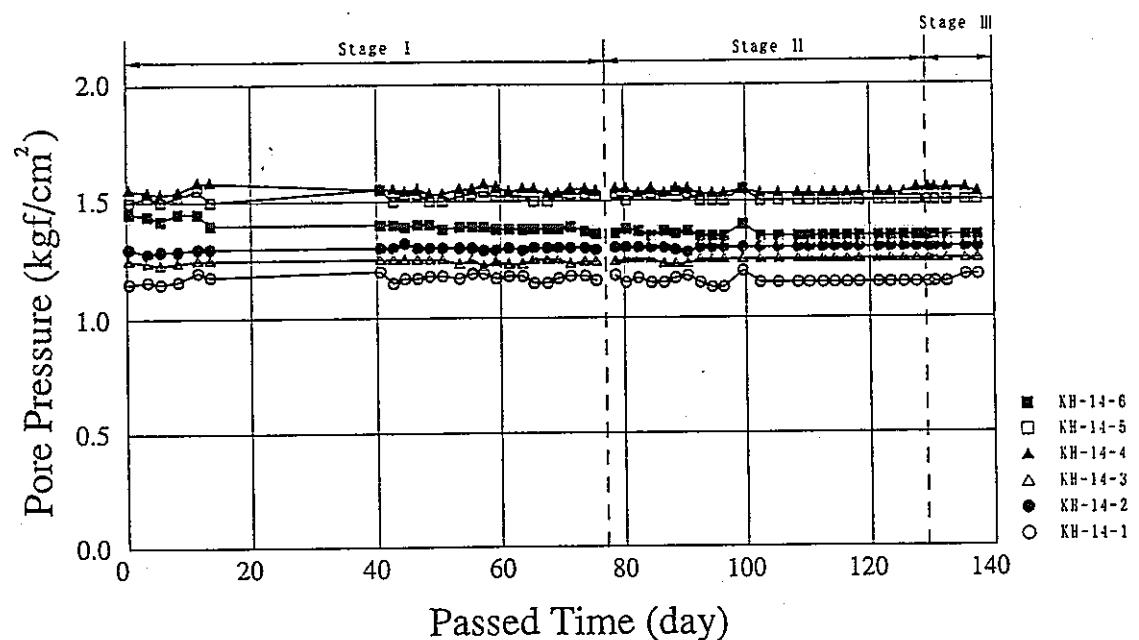


図-6-4-7 KH-14孔における間隙水圧の経時変化（長ほか, 1992）

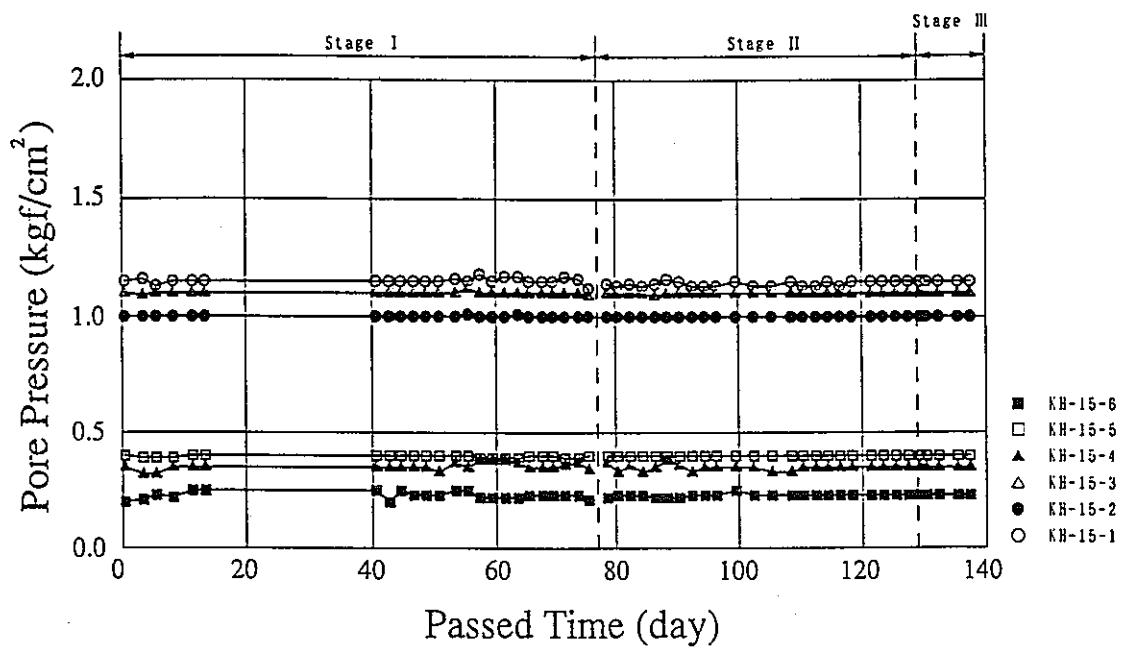


図-6-48 KH-15孔における間隙水圧の経時変化（長ほか, 1992）

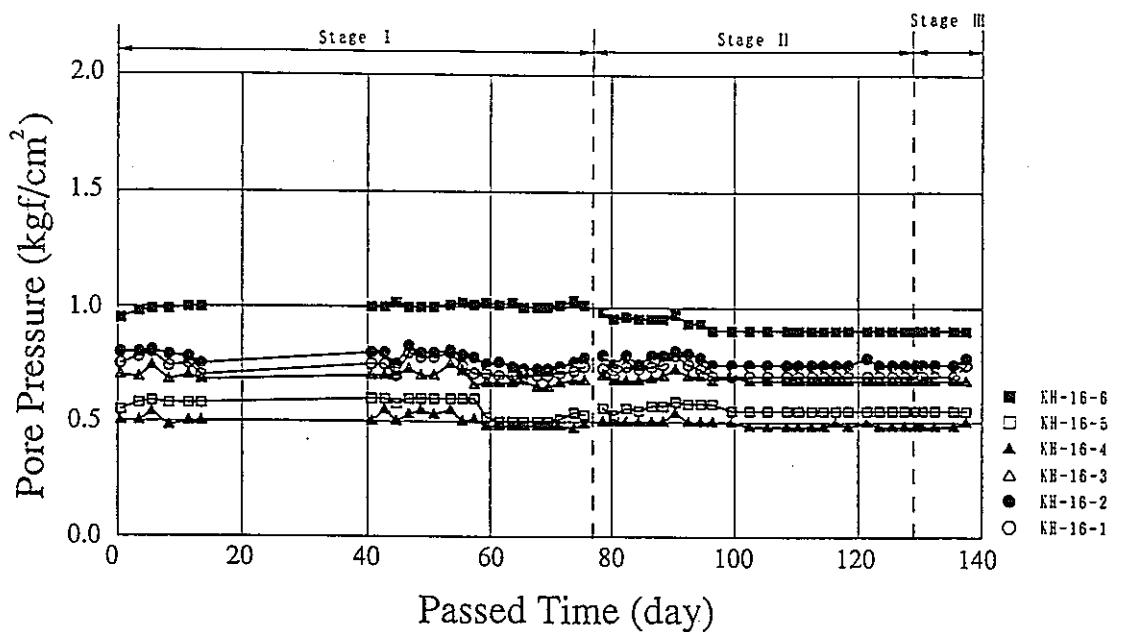


図-6-49 KH-16孔における間隙水圧の経時変化（長ほか, 1992）

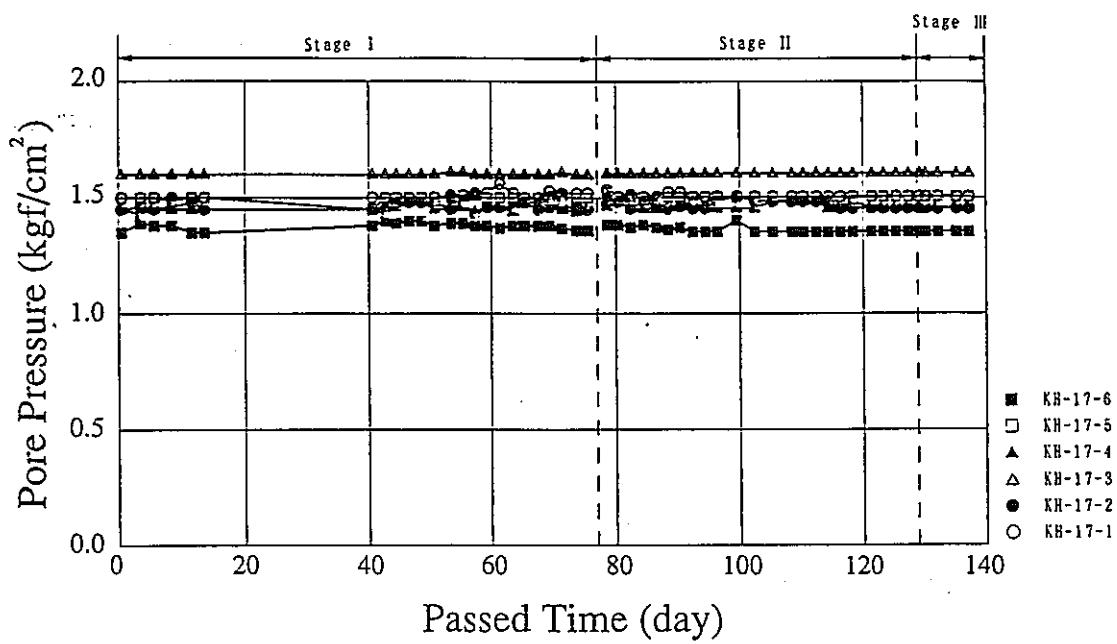


図-6-50 KH-17孔における間隙水圧の経時変化（長ほか, 1992）

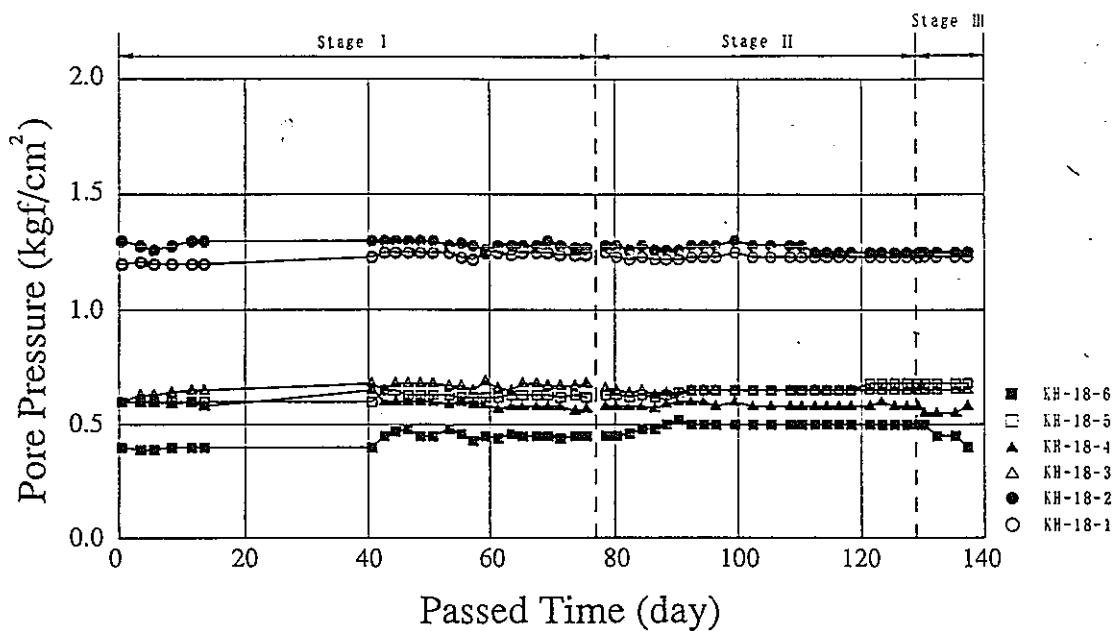
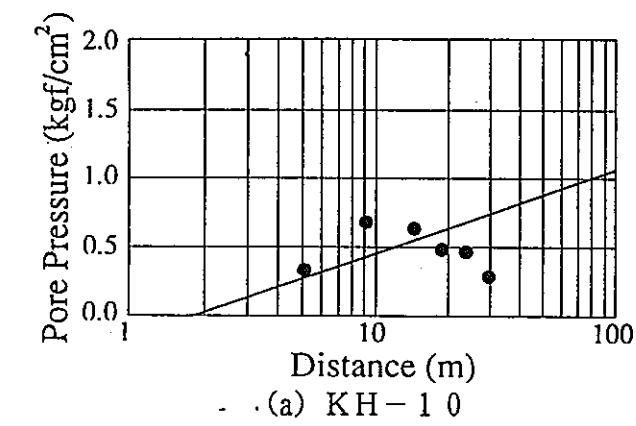
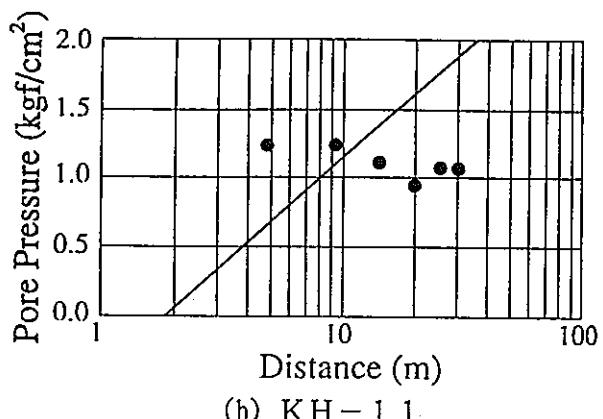


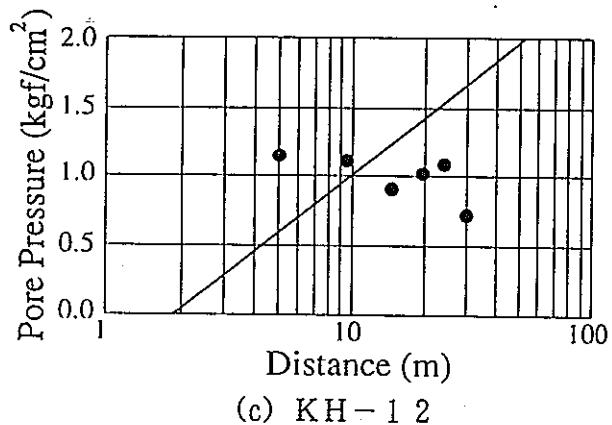
図-6-51 KH-18孔における間隙水圧の経時変化（長ほか, 1992）



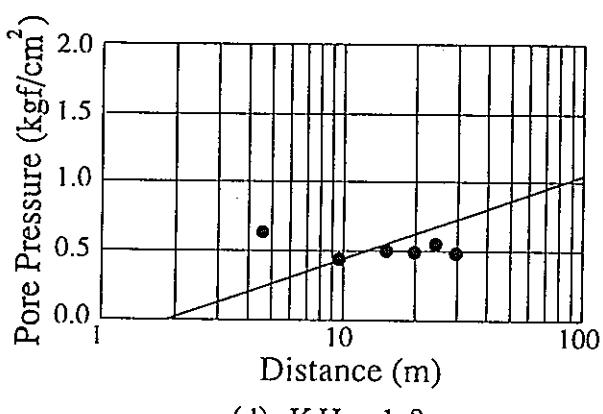
(a) KH-10



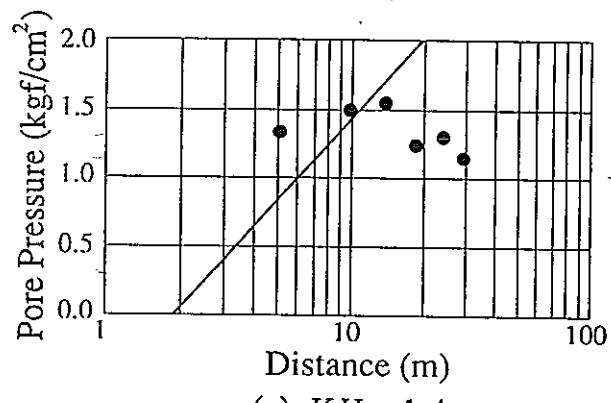
(b) KH-11



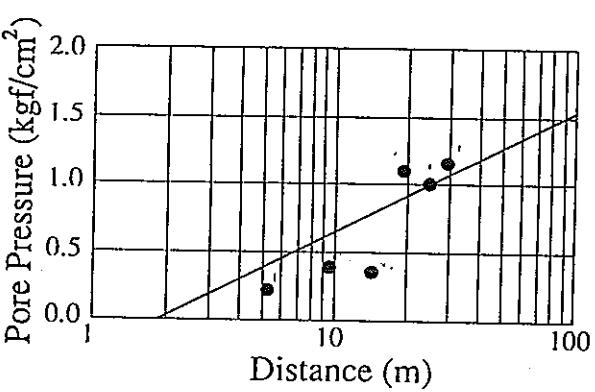
(c) KH-12



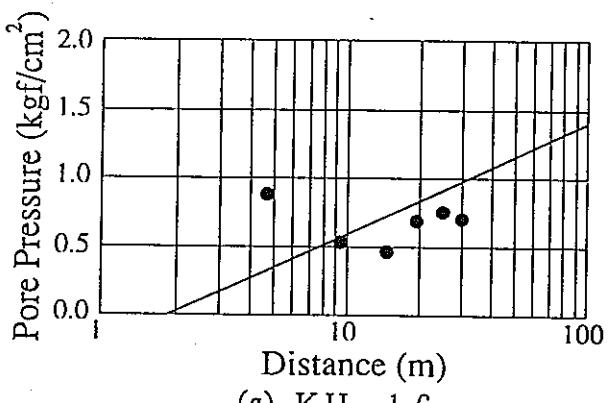
(d) KH-13



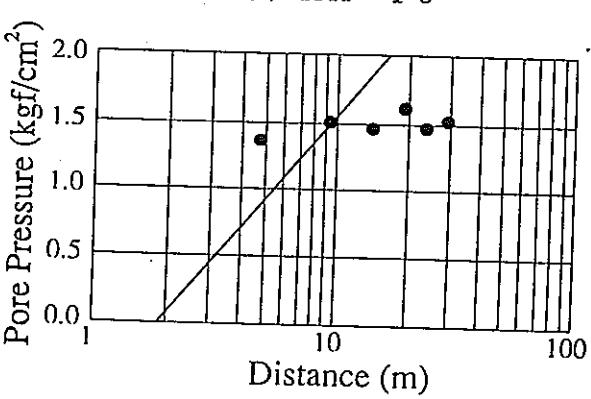
(e) KH-14



(f) KH-15



(g) KH-16



(h) KH-17

図-6-52(1) KH-10~KH-18孔における間隙水圧の分布
(長ほか, 1992)

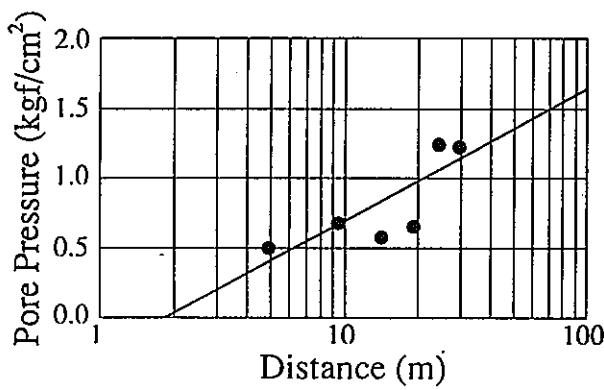


図-6-52(2) KH-10～KH-18孔における間隙水圧の分布
(長ほか, 1992)

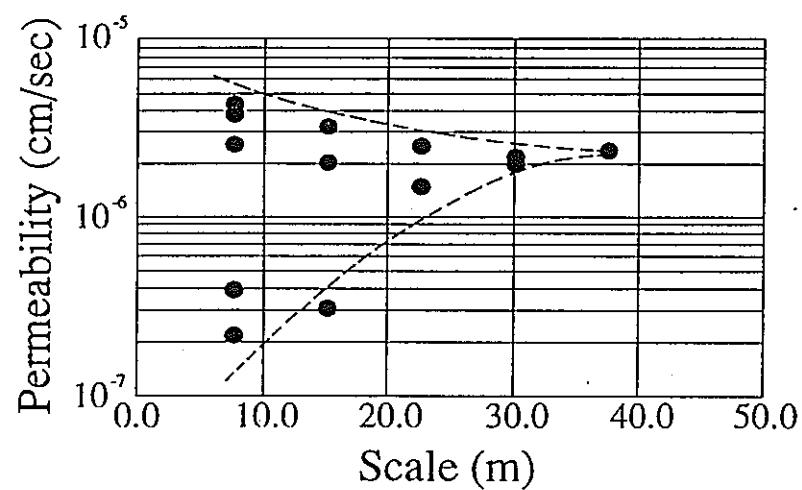


図-6-53 試験区間長による透水係数のばらつき (長ほか, 1992)

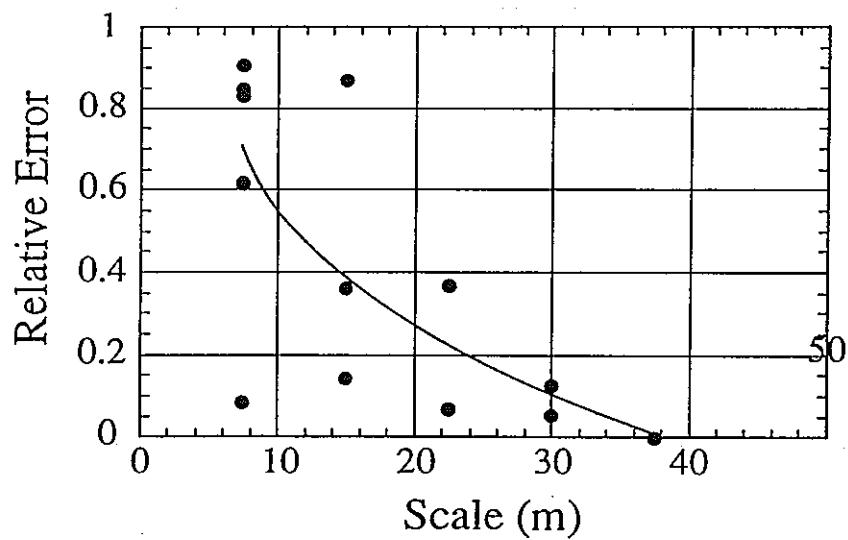


図-6-54 試験区間の透水性におけるスケール効果 (長ほか, 1992)

6. 2 間隙水圧のモニタリング

第1フェーズでは、KH-1～9孔、KG-1孔において間隙水圧のモニタリングを実施した。また、坑道規模透水試験では、KH-10～18孔において間隙水圧のモニタリングを実施した。間隙水圧のモニタリングを実施した試錐孔の位置を図-6-55と図-6-56に示す。なお、KH-10～18孔において間隙水圧のモニタリングの結果は、坑道規模透水試験を参照して欲しい。

6. 2. 1 試験方法

(1) KH-1孔における間隙水圧のモニタリング

KH-1孔は、透水試験終了後、6つのパッカーを設置し、5つの区間に区分した。設置したパッカーの位置と間隙水圧の計測区間を図-6-57に示す。これらのパッカーは長さ1mの水圧膨張式ゴムパッカーで、それぞれ内径2mm、外径4mmのジュロンチューブによって連結されている。各計測区間からの地下水は、ジュロンチューブにより孔口まで導いている。間隙水圧は、孔口から1.25mの高さに設置された架台に置かれたブルドン間式圧力計(読み取り精度0.2kgf/cm²)で計測した。従って、孔口における水頭は以下の式で換算される。

$$\text{ブルドン管による計測値}(\text{kg}/\text{cm}^2) \times 10.01 + 1.25\text{m}$$

(2) KH-2、3孔における間隙水圧のモニタリング

KH-2、3孔は、透水試験終了後(6.1 原位置透水試験参照)、4つのパッカーを設置し、4つの区間に区分した。設置したパッカーの位置と間隙水圧の計測区間を図-6-58と表-6-35に示す。これらのパッカーは長さ1mの水圧膨張式ゴムパッカーで、各試錐孔ごとに内径2mm、外径4mmのジュロンチューブによって連結され、計測区間から地下水を孔口まで導いた。間隙水圧は、孔口から1.25mの高さに設置された架台に置かれたブルドン間式圧力計(読み取り精度0.2kgf/cm²)で計測した。

(3) KH-4～9孔における間隙水圧のモニタリング

図-6-56、表-6-36に、KH-4～9孔に設置された試錐孔の位置とパッカーの位置を示す。パッカーは長さ1mの水圧膨張式ゴムパッカーで、各試錐孔ごとに内径2mm、外径4mmのジュロンチューブによって連結され、計測区間から地下水を孔口まで導いた。間隙水圧は、孔口から1.25mの高さに設置された架台に置かれたブルドン間式圧力計(読み取り精度0.2kgf/cm²)で計測した。

(4) KG-1孔における間隙水圧のモニタリング

KG-1孔には、単孔式透水試験終了後、MPケーシングシステムが設置された。図-6-59にMPケーシングシステムの概念図を、表-6-37にMPパッカーと計測ポートの位置を示す。間隙水圧測定は、初期採水終了後に実施した。間隙水圧測定は、水圧計測プローブをMPケーシング孔内に下ろし、各計測ポートと接合させて地上の計測モニターで読み

取る方式である(図-6-60)。圧力を計測できるポートは、MPケーシング(20個)とMPポートの計測ポート(10個)である。表層から800mまでの全ポートの測定を1回分の測定とし、3回の水圧測定を実施した。測定した月日は、1992年11月9日、24日、28日である。MPシステムによる水圧計測で使用した機器は、MOSDAXサンラープローブモデル2530、ポータブルコンピュータ、電動ケーブルリール、シーブ付き深度計、水位計である。

6. 2. 2 試験結果

(1) KH-1孔における間隙水圧のモニタリング

KH-1孔における間隙水圧のモニタリングは、モニタリングシステム設置後1988年7月17日から開始した。図-6-61(a)にKH-1孔における間隙水圧のモニタリング結果を示す。KH-1孔における間隙水圧期間中には、KH-4孔試錐座掘削、KE-4～7孔掘削、KE-6とKE-7孔における低圧透水試験、KD-8 9坑道掘削、KR-8 9切上掘削、KB-8 9AとKB-8 9B試錐座掘削、KH-4～9孔掘削、孔間透水試験が実施されている。

KH-1孔における間隙水圧は、パッカー設置後、全ての区間に同様に上昇し、2～3kgf/cm²に収束した。間隙水圧の収束は、孔口に近い区間から順に収束した(図-6-61(a))。最も孔口に近い計測区間1で約60日、区間4で約100日後に収束している。最も孔口に近い区間1の値は、約3kgf/cm²で、その他の区間は2.6～2.7kgf/cm²を示す。以上の結果は、間隙水圧は静水圧分布だという仮定から推定される値(地表からの深度約300mから推定すると約30kgf/cm²)からは非常に小さい値を示す。これは、NW坑道が掘削され割れ目帯を切断した時点での坑道への急速な排水や、鉱山の採掘跡空洞の影響が原因と考えられる。

また、間隙水圧は、全体に低下する傾向にある(図-6-61(b))。この傾向は、各区間ともKD-8 9坑道掘削時あるいはそのご顯著になり、KR-8 9切上および試錐座の掘削時期まで継続している。その後、試錐孔の掘削の影響は、最も坑道レベルに近い区間1にはでていないが、坑道レベルから約102m以深の区間2～5ではほぼ同程度の間隙水圧低下が認められる。

(2) KH-2, 3孔における間隙水圧のモニタリング

KH-2, 3孔における間隙水圧のモニタリングは、モニタリングシステム設置後1988年11月16日から開始した。図-6-62と図-6-63にKH-2, 3孔における間隙水圧のモニタリング結果を示す。KH-2, 3孔における間隙水圧期間中には、KH-4孔試錐座掘削、KE-4～7孔掘削、KE-6, 7孔における低圧透水試験、KD-8 9坑道掘削、KR-8 9切上掘削、KB-8 9A, 8 9B試錐座掘削、KH-4～9孔掘削、孔間透水試験が実施されている。

KH-2, 3孔における間隙水圧は、パッカー設置後、全ての区間に同様に上昇し、2～4kgf/cm²を示した。以上の結果は、間隙水圧は静水圧分布だという仮定から推定される値(地表からの深度約300mから推定すると約30kgf/cm²)からは非常に小さい値を示す。

また、KH-2孔における間隙水圧は、各区間とも、KE-4, 5孔の試錐孔掘削開始

時から顕著な低下を示している(図-6-62(b))。特に、孔奥の区間では、間隙水圧は0となった。

KH-3孔では、KE-4~7孔の掘削と試錐座掘削、KH-4~7孔の掘削の影響が顕著である(図-6-63(b))。間隙水圧が上昇している時期は、低圧透水性試験、孔間透水試験における注水に起因するものと考えられる。また、逆にKD-89坑道、KR-89切上の掘削の影響は顕著でない。

(3) KH-4~9孔における間隙水圧のモニタリング

KH-4~9孔における間隙水圧は、1988年6月8日から開始した。図-6-64(a)~(f)に、KH-4~9孔における間隙水圧の経時変化を示す。KD-89坑道から掘削したKH-4, 6, 9孔の間隙水圧は、坑道に近い区間ほど低く、岩盤深部で高くほぼ一定の値を示し、深部ほど早く収束する傾向を示す。

KH-7孔の間隙水圧は、比較的変化が少なく、各測定区間ごとの間隙水圧の差は小さい。KH-8孔における間隙水圧は、最も試錐座に近い測定区間のみ間隙水圧が低いものの、それより奥は、ほぼ一定で、KH-7孔とほぼ同様の値に収束している。

以上の結果から、間隙水圧の分布は、KD-89坑道の奥側のKH-6, 7孔側ほど高く、KH-5からKH-4孔側に向かって低下する傾向を示す。

(4) KG-1孔における間隙水圧のモニタリング

3回の水圧計測結果を図-6-65に示す。図-6-65は、標高に伴うピエゾ標高分布の関係として示した。

図-6-65は、KG-1孔では大きく以下の4つの滯水層と3つの難透水層に区分される可能性を示している。

- ・標高780m~725m(ピエゾ標高約780m)
- ・標高690m~565m(ピエゾ標高約690m)
- ・標高560m~300m(ピエゾ標高約660m)
- ・標高250m~0m(ピエゾ標高約600m)

6. 2. 3 成果と課題

第1フェーズでは、間隙水圧のモニタリングにより、試験場周辺の間隙水圧分布と、坑道開削および試錐孔掘削に伴う間隙水圧の変化を概略的に把握することができた。

しかし、既存坑道や割れ目帯の存在が間隙水圧の変化に与えている影響を定量的に把握することができなかった。また、第1フェーズでは、試錐孔へのパッカーの設置までの時間が長引いたことが、周囲の水圧低下を招く原因となった。

今後、間隙水圧のモニタリングシステムを用いて間隙水圧の経時変化を測定し、既存坑道や割れ目帯が、試験場周辺の間隙水圧分布に与える影響を定量的に把握していく必要がある。

表-6-35 KH-2とKH-3孔の間隙水圧モニタリング区間

試錐孔	KH-2	KH-3
区間1	40.2m - 31.7m	40.5m - 31.7m
区間2	30.2m - 20.2m	30.2m - 23.2m
区間3	18.7m - 11.2m	21.7m - 14.2m
区間4	9.7m - 2.2m	12.7m - 2.2m

表-6-36 KH-4~KH-9孔における間隙水圧測定区間

試錐孔名	孔口からのパッcker中心位置(m)				
	パッcker1	パッcker2	パッcker3	パッcker4	パッcker5
KH-4	10.5	16.0	23.5	31.0	38.5
KH-5	13.5	21.5	29.0	35.0	45.0
KH-6	15.5	23.5	29.5	38.0	45.5
KH-7	14.0	21.5	29.0	36.5	43.5
KH-8	11.5	17.5	26.0	33.0	41.5
KH-9	20.5	27.5	34.5	42.5	49.0

注) パッckerは孔口側からナンバーリングしている

表-6-37 MPパッカーと計測ポートの位置
(青山ほか, 1992)

計測ゾーン	MPパッカー				計測ポート
	設置番号	製造番号	深度(m)	ベントポート(m)	
①	2	120	791.8~793.0	793.0	788.6
	5	117	784.2~785.5	785.4	
②	12	118	747.0~784.2	748.2	743.7
	15	104	739.4~740.6	740.6	
③	37	116	615.1~616.4	616.3	611.9
	40	115	607.5~608.8	608.7	
④	54	119	534.3~535.5	535.5	531.0
	57	106	526.7~527.9	527.9	
⑤	63	105	495.5~496.7	496.7	492.2
	66	109	487.9~489.1	489.1	
⑥	110	108	228.5~229.7	229.7	225.3
	113	111	220.9~222.2	222.1	
⑦	127	110	144.7~145.9	145.9	141.4
	130	114	137.1~138.3	138.3	
⑧	139	101	93.8~95.1	95.0	90.6
	142	112	86.3~87.5	87.5	
⑨	146	103	67.0~68.3	68.2	63.8
	149	100	59.4~60.7	60.6	
⑩	154	102	40.2~41.4	41.4	36.9
	157	113	32.6~33.8	33.8	

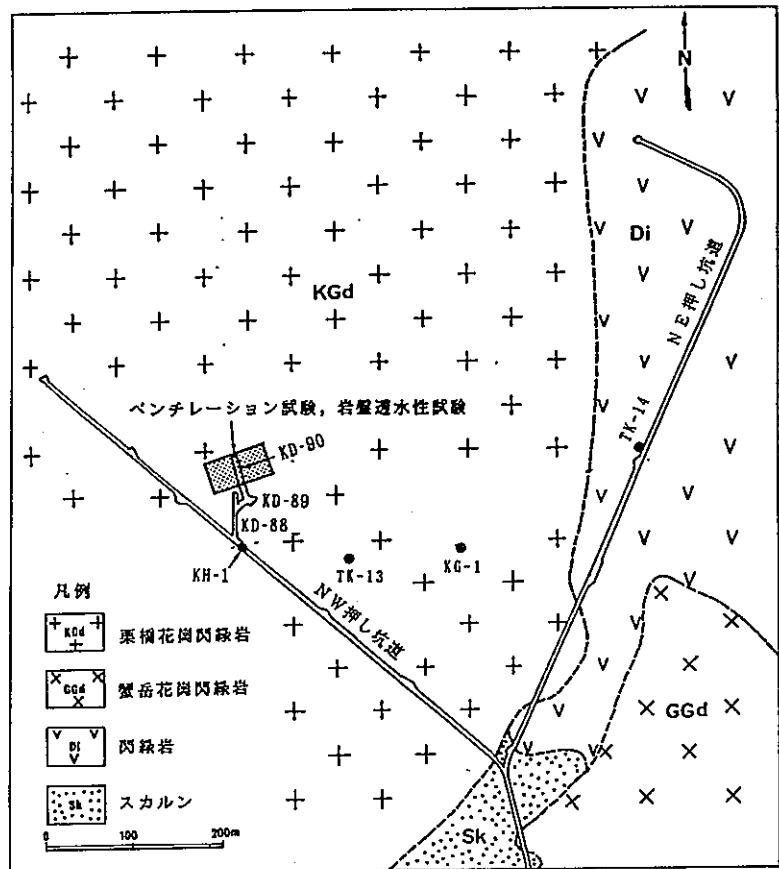


図-6-55 KG-1孔の位置図

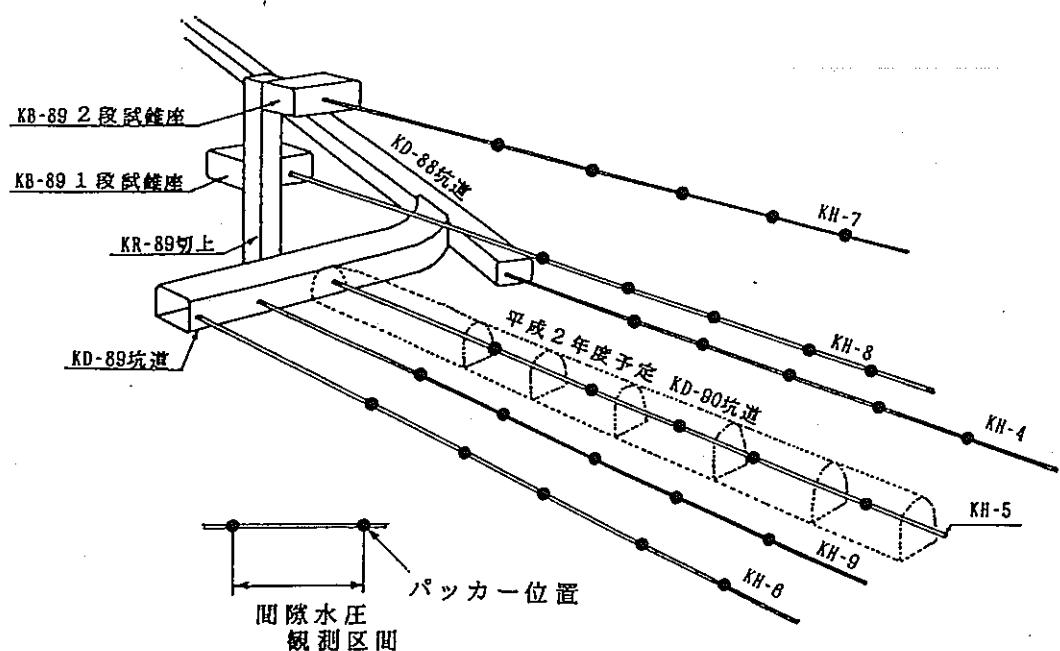


図-6-56 各試錐孔のパッカー設置位置図

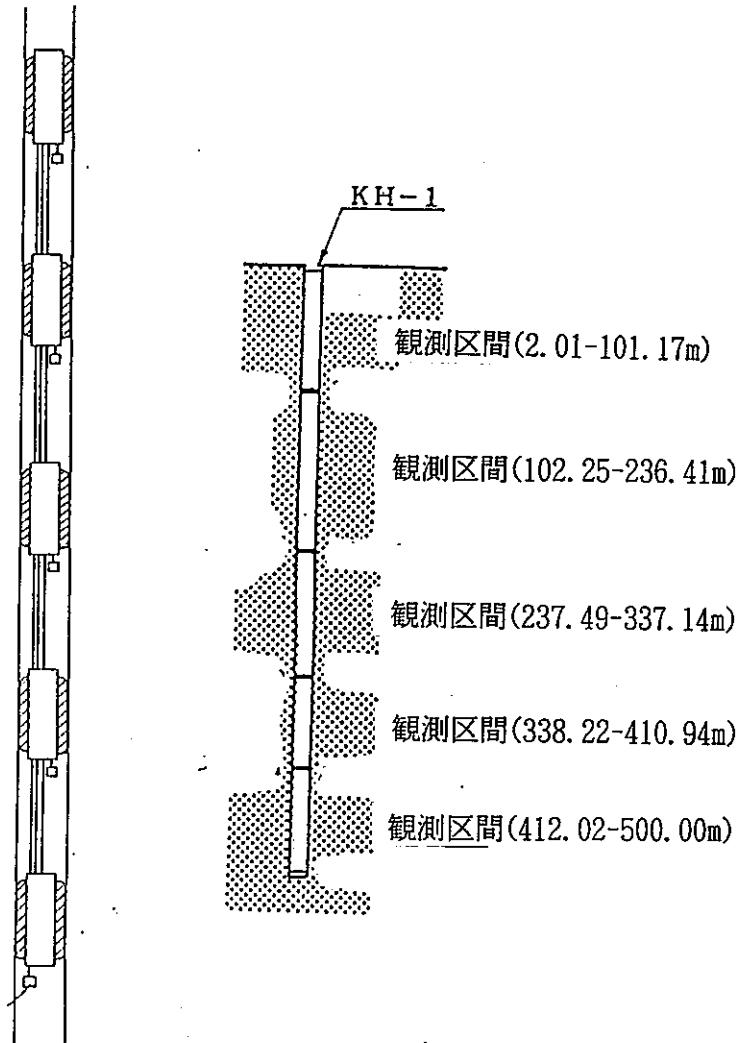


図-6-5 7 KH-1孔のパッカー設置位置と間隙水圧観測区間

(浜辺ほか, 1988)

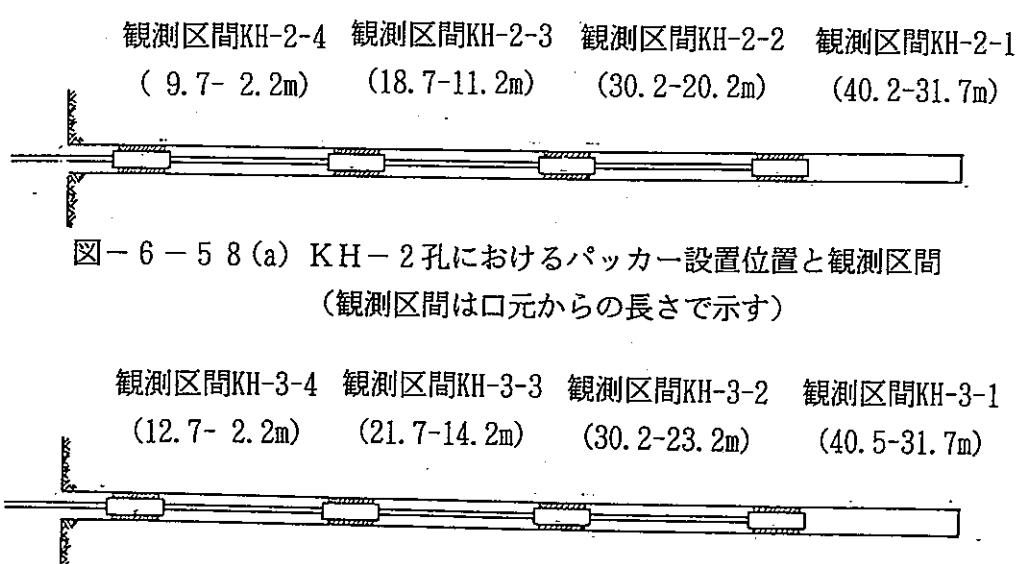


図-6-5 8 (a) KH-2孔におけるパッカー設置位置と観測区間
 (観測区間は口元からの長さで示す)

観測区間KH-3-4 観測区間KH-3-3 観測区間KH-3-2 観測区間KH-3-1
 (12.7- 2.2m) (21.7-14.2m) (30.2-23.2m) (40.5-31.7m)

図-6-5 8 (b) KH-3孔におけるパッcker設置位置と観測区間
 (観測区間は口元からの長さで示す)

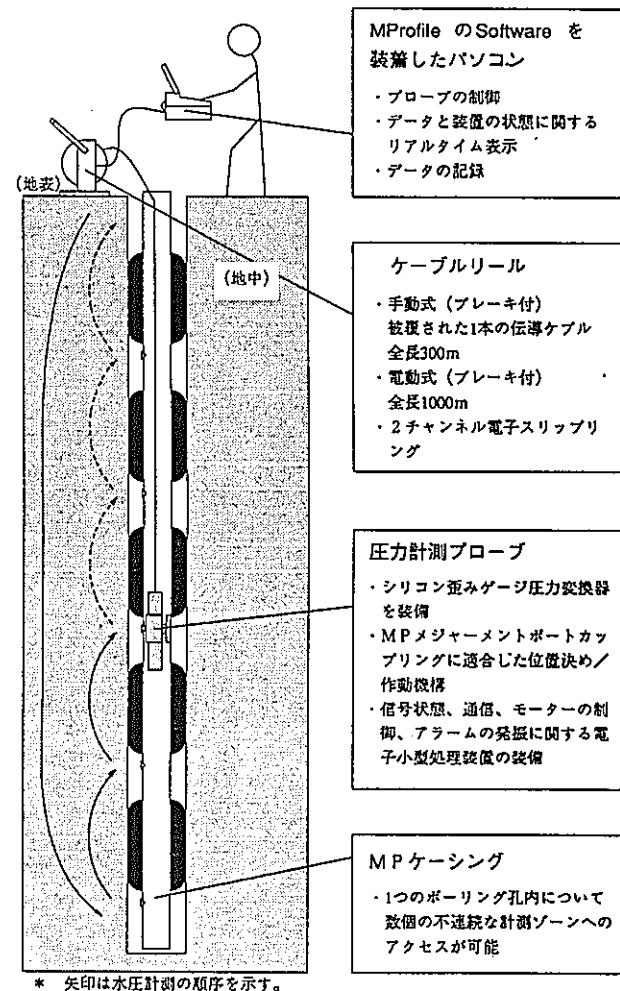
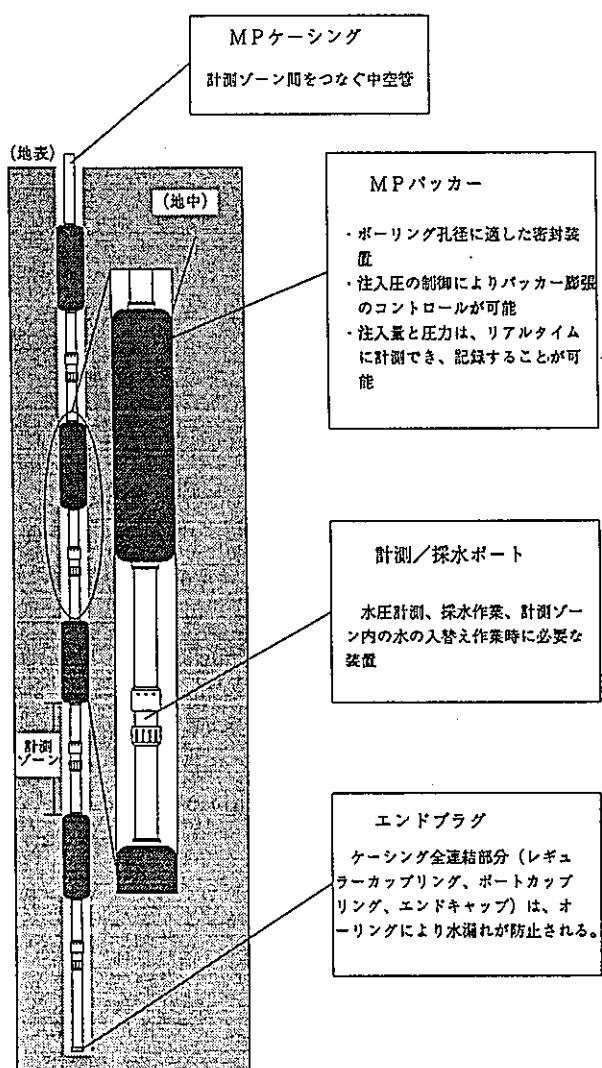
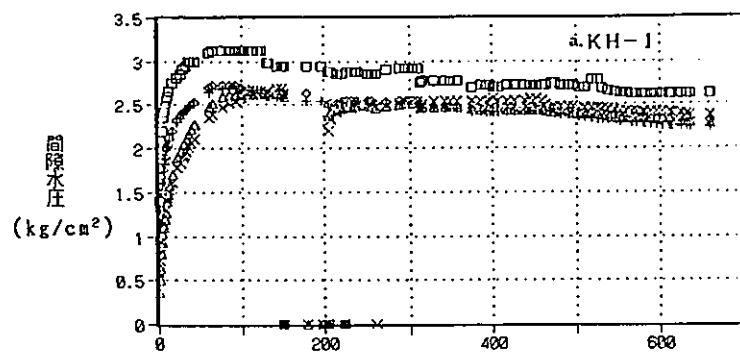
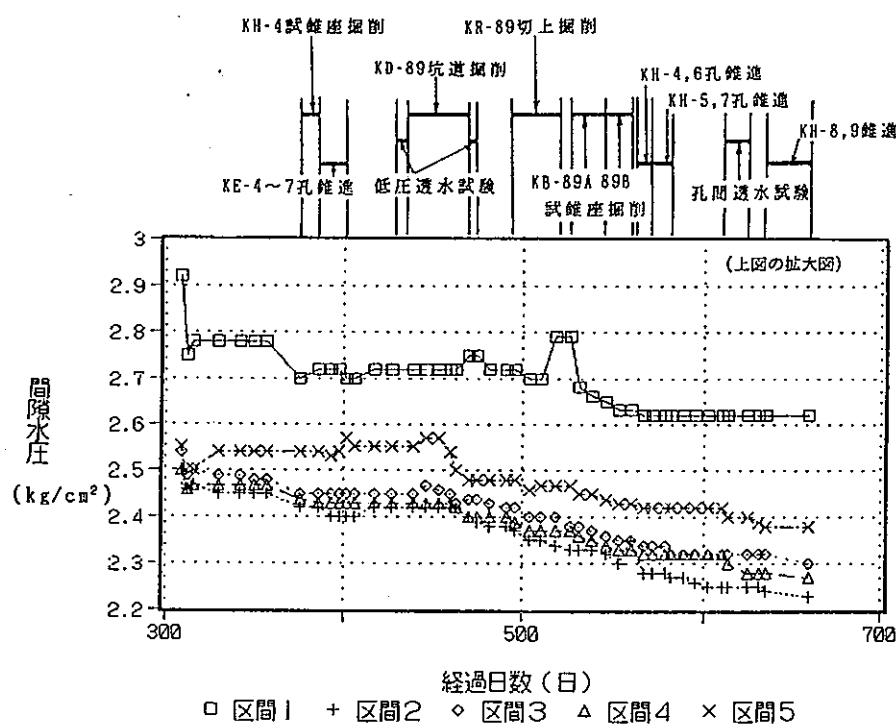


図-6-59 MPケーシングシステムの概念図
(青山ほか, 1992)

図-6-60 MPケーシングシステムによる水圧計測の概念図
(青山ほか, 1992)

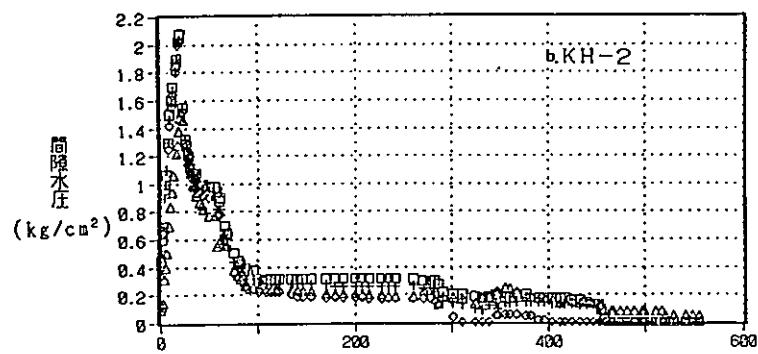


(a)

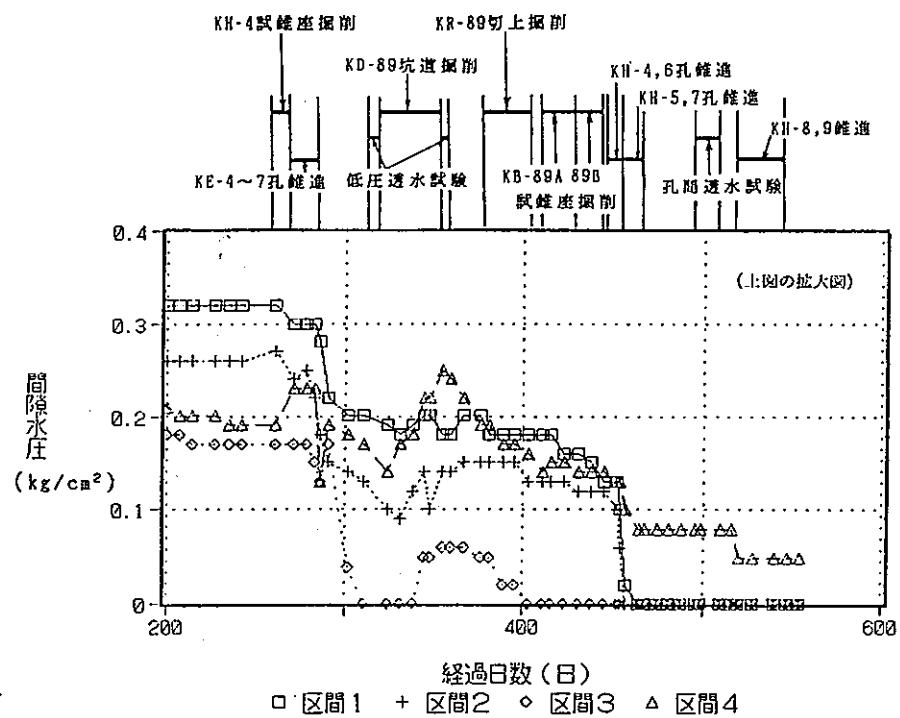


(b)

図-6-61 KH-1孔における間隙水観測結果
(グラフの上に、観測時の坑道内での作業内容を示す)
(浜辺ほか, 1990)

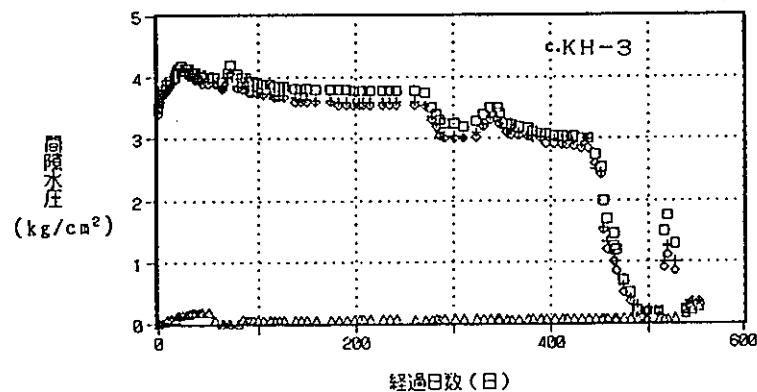


(a)

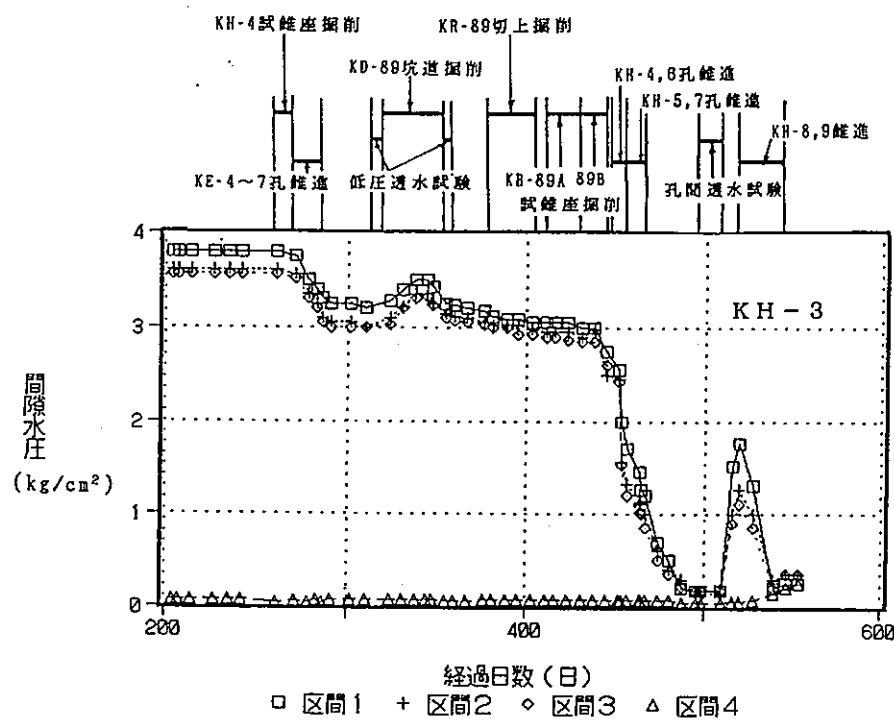


(b)

図-6-62 KH-2孔における間隙水観測結果
(グラフの上に、観測時の坑道内での作業内容を示す)
(浜辺ほか, 1990)

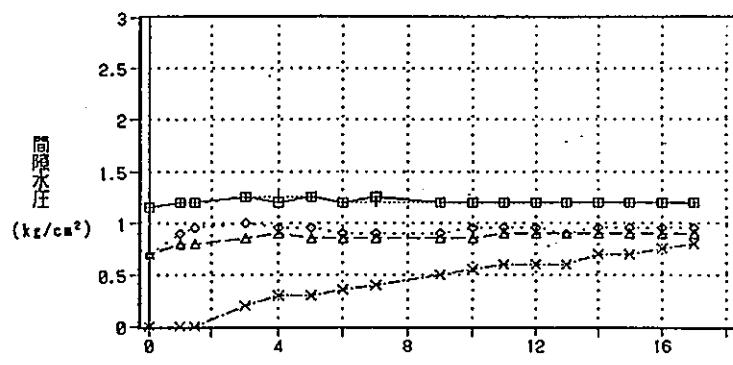


(a)

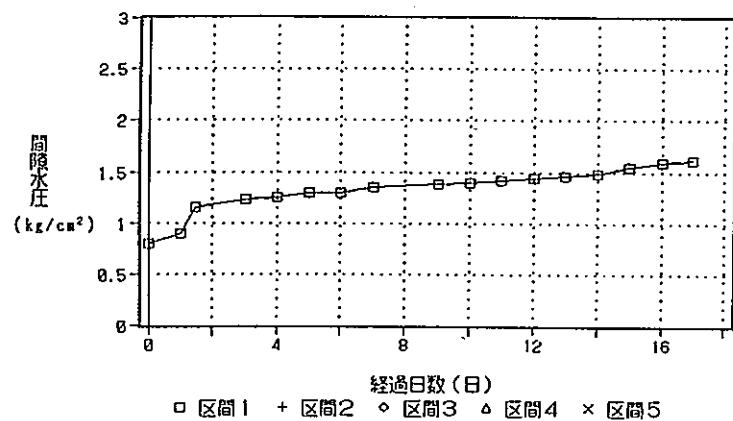


(b)

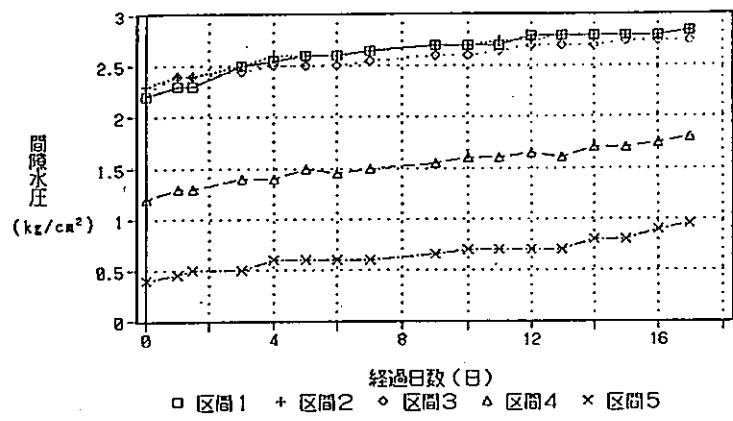
図-6-63 KH-3孔における間隙水観測結果
(グラフの上に、観測時の坑道内での作業内容を示す)
(浜辺ほか, 1990)



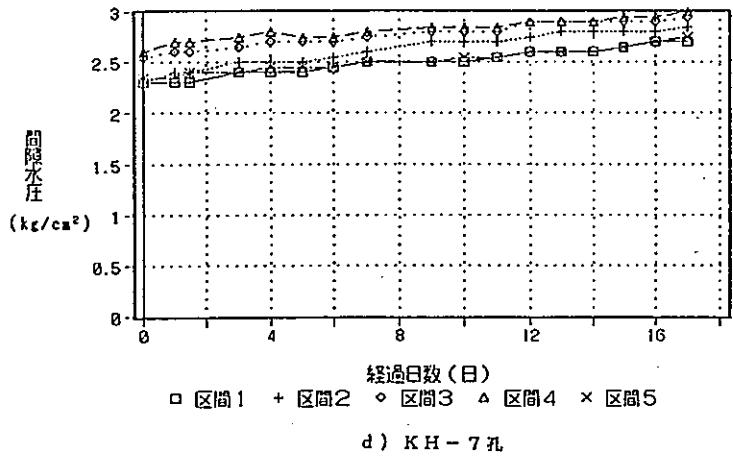
a) KH-4孔



b) KH-5孔

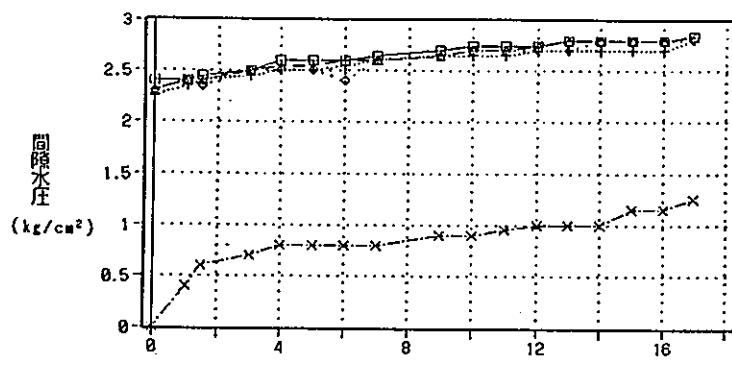


c) KH-6孔

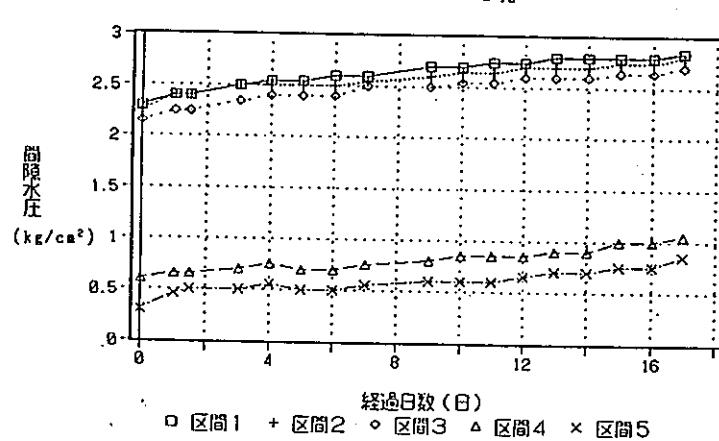


d) KH-7孔

図-6-64(1) KH-4～9孔における間隙水観測結果
(浜辺ほか, 1990)



e) KH-8孔



f) KH-9孔

図-6-6 4(2) KH-4～9孔における間隙水観測結果
(浜辺ほか, 1990)

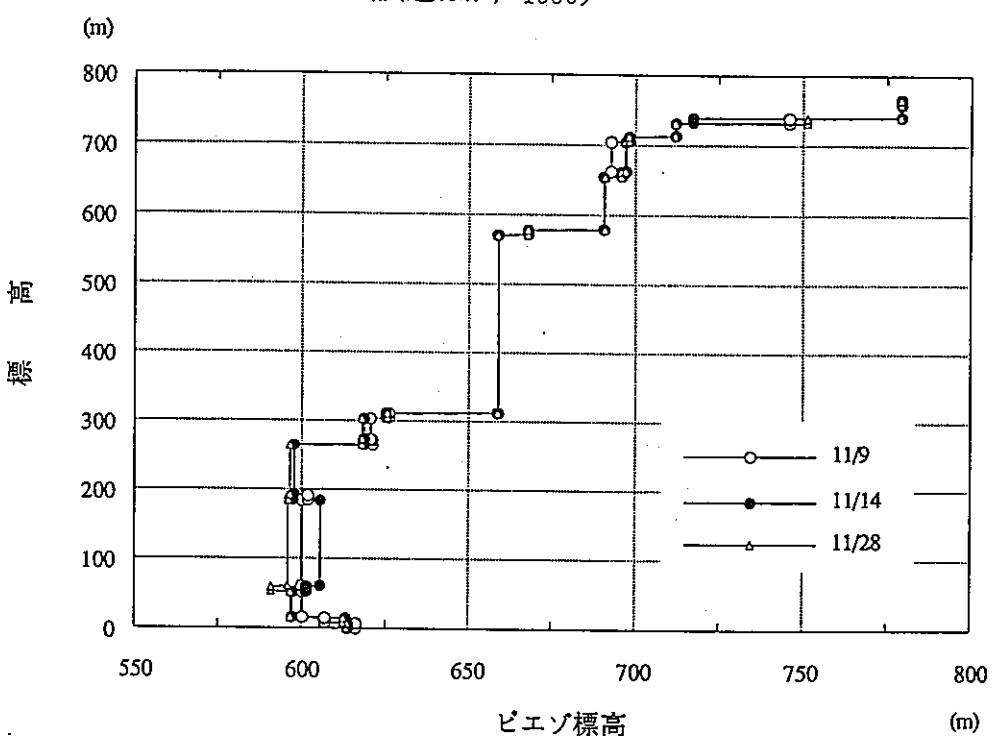


図-5.2 KG-1孔のピエゾ標高分布

図-6-6 5 KG-1孔におけるピエゾ標高分布
(青山ほか, 1992)

6. 3 地下水流動解析

KD-90 坑道への湧水量の予測を行うため、多孔質媒体モデルと亀裂ネットワークモデルの2つのモデル化手法を用いて解析を行った。

多孔質媒体モデルを用いて行った地下水水流動解析は、有限要素法による定常3次元飽和浸透流解析である。また、亀裂ネットワークモデルを用いた解析には、FracMan/Mafic コードが用いられた。

FracMan/Mafic コードは、割れ目を決定論的または統計的に発生させ、割れ目が形成する岩盤の不均質性をモデル化することが可能である。さらに、解析コードには、坑道周辺の割れ目の状況をより観察結果に近づけるため、新たに条件付き亀裂発生機能(conditioning 機能)が加えられたコードを用いた。また、FracMan/Mafic コードにより作成させた亀裂モデル用いて要素分割を行い、有限要素法による定常3次元飽和浸透流解析を実施した。

6. 3. 1 多孔質媒体モデルを用いたKD-90坑道への湧水量の予測

(1) 解析手法

本解析は、KD-90坑道掘削後のKD-90坑道への湧水量を概略的に予測するため、有限要素法による定常3次元飽和浸透流解析法を用いた。

(2) 解析領域と概念モデル

解析領域を図-6-66に、要素分割図を図-6-67に示す。解析領域は、主要領域の数倍程度とし、縦方向300m×横方向300m×深さ方向300mとした。解析領域の要素分割に際しては、坑道への湧水量や坑道周辺のポテンシャル分布を正確に再現するため、坑道形状や試錐孔における計測点の位置を考慮して、要素分割を行った。節点数は1360点、要素数は12212個、水平分割数は19層である。

水理定数としての透水係数は、解析領域内の試錐孔で行われた透水試験結果の平均的な値、 1×10^{-6} cm/sを用いた。なお、本解析は不均質性は考慮せず、全ての要素に同じ透水係数値 1×10^{-6} cm/sを設定した。

(3) 境界条件

境界条件は、この時点でポテンシャル分布の推定が困難であったことから、全境界を等ポテンシャル境界(従って側面境界は静水圧境界となる)とした。また、坑道部分は、大気圧に解放されているため、圧力ゼロ境界とした。

(4) 解析結果

表-6-38に坑道への湧水量の解析結果とその実測値を示す。湧水量計測は、各試験区間を堰で仕切り、湧水を導水することによって各試験区間にごとに実施した。湧水量データとしては、間隙水圧が定常状態に達したと判断された、KD-90坑道掘削後30日以降のデータの平均値を用いた。

浸透流解析の結果は、坑道の先端部ほど湧水量が多い傾向を示している。坑道で実測さ

れた湧水量も、湧水量測定区間2、3を除き、坑道の奥ほど湧水量が多くなる傾向を示した。

6. 3. 2 亀裂ネットワークモデルを用いたKD-90坑道への湧水量の予測

亀裂ネットワークモデルを用いたKD-90坑道への湧水量の予測は、3次元亀裂ネットワークモデル「FracMan/MAFIC」を用いて、有限要素法による定常3次元飽和浸透流解析を実施した(Uchida M. et al., 1993)。FracMan/Maficコードは、割れ目を決定論的または統計的に発生させ、割れ目が形成する岩盤の不均質性をモデル化することが可能である。さらに、解析コードには、坑道周辺の割れ目の状況をより観察結果に近づけるため、新たに条件付き亀裂発生機能(conditioning機能)が加えられたコードを用いた。

(1) 解析手法

本解析に用いた、FracMan/Maficは、以下の5つのコード群により構成されている。

- ①原位置亀裂データの統計的解析コード(FracSys)
- ②亀裂発生コード(FracWorks)
- ③有限要素作成コード(MeshMonster)
- ④メッシュ編集コード(EdMesh)
- ⑤行列演算コード(MAFIC)

これらの5つのコードを用いた解析の流れを図-6-68に示す。

本解析では、まず①のコードを用いて亀裂モデルの検討、亀裂半径の解析、亀裂の方向の解析、透水性亀裂の頻度と亀裂の透水量係数の解析を行なった。次に、上記の結果に基づいて、モンテカルロ法による②のコードを用いて、25の亀裂モデルを発生させた。発生させた亀裂モデルは、KD-90坑道の割れ目調査結果と比較され、条件付き亀裂発生機能(conditioning機能)が確認された。さらに、発生させた亀裂モデルより、③④のコードを用いて要素分割を行った。最後に⑤のコードを用いて有限要素法による定常3次元飽和浸透流解析を実施し、亀裂ネットワークモデルを用いたKD-90坑道への湧水量を予測した。

(Uchida M. et al., 1993)。なお、対象領域は、KD-90坑道を含む1辺200mの立方体領域である。

(2) 解析領域と亀裂モデル

①亀裂中心分布モデル

KD-90坑道における亀裂のトレース図(図-6-68)を用いて、亀裂モデルの検討を行った。亀裂中心分布モデルとして、Baecherモデル、BARTモデル、フラクタル・モデル、Nearest Neighborモデルを χ^2 検定した。その結果、フラクタル・モデルが、 χ^2 値は最も良好であった。しかし、場所ごとにフラクタル次元が異なること、またKD-90坑道周辺では、亀裂同志が著しく分岐や合流する特性を亀裂モデルに反映させることから、BARTモデルを採用した。

②亀裂半径

亀裂半径の解析は、通常亀裂のトレース長を解析して行うが、KD-90坑道では、多くの亀裂が本坑道全断面より大きいため、以下の手法を用いて検討を行った。

- ・KD-90坑道の1枚から3枚の壁面を亀裂が切る確率を、亀裂半径の平均値と標準偏差をパラメータにして、それぞれシミュレートする。なお、この場合、現場で観察された、亀裂の交差部でのterminationの確率50%をBARTモデルで表現した。
- ・KD-90坑道の実際の亀裂が、実際に1, 2, 3枚の壁面をそれぞれ切る確率と比較し、亀裂半径を推定する。

その結果、亀裂半径は平均値が7m、標準偏差が1.25mと推定された。

③亀裂の方向

亀裂方向は、KH-4～9孔におけるBTV観察から湧水亀裂が同定されており、そのデータを使用した。

亀裂の方向分布の密度関数の設定に際しては、亀裂セットの区分を行うことなく、モデル化を行う際に、実測された亀裂の方向データから直接サンプリングし、未測定の亀裂による分散を考慮して亀裂の方向を決定するBootstrap法を使用した。

亀裂方向の実測値とBootstrap法で発生させた亀裂方向を、図-6-70に示す。

④透水性亀裂の頻度と亀裂の透水量係数の決定

透水性亀裂の頻度と亀裂の透水量係数は、FracManのOXFILETモジュールを用いて解析される。解析には、KH-2, 3, 5, KE-1孔で実施された38個の透水試験データを使用した。解析の結果、1m区間に含まれる透水性亀裂の頻度は、1.01、透水量係数は対数正規分布で、平均値 $4.05 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 、標準偏差 $2.82 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ を得た。

⑤亀裂モデルの発生

解析に当たっては、今回新たに開発した条件付き亀裂発生機能(conditioning機能)を用いた。条件付き亀裂発生機能は、試錐孔または坑道で観測された亀裂の位置、方向、トレース長(坑道の場合)を再現するように亀裂を発生する機能であり、従来の統計的性質のみを再現する亀裂発生方法に較べ、モデルの現実性を増すことができる機能である。本機能を用い、KD-90坑道周辺の試錐孔での亀裂データを用いて、KD-90坑道の亀裂を推定した。亀裂のモデル化に際しては、一辺200mの立方体領域の全ての透水性亀裂をモデル化することは、現状のFracManでは不可能である。従って、KD-90坑道周辺の直径24mの領域は細かな亀裂までモデル化し、その周辺の岩盤については、規模の大きな亀裂のみをモデル化した。図-6-71(a)にKD-90坑道周辺の詳細領域の亀裂モデルを、図-6-72(b)に一辺が200mの立方体領域の亀裂モデルをの一例を示す。

発生された亀裂モデルを、KD-90坑道の割れ目分布と比較した。その一例を図-6-73に示す。その結果は、坑道北側の約10mの区間が良く一致していることが分かる。

なお、個々の亀裂モデルは、各パラメータの密度関数からのサンプリングを合成した結果得られたもの(realization)であるため、本解析では25個の亀裂モデルを発生させ、浸透

流解析に用いた。

(3) 境界条件

・外側境界条件の設定

KD-90 坑道周辺には、図-6-56に示すように24孔の試錐孔が掘削されており、そのうちKH-1～18孔においては間隙水圧のモニタリングが行われている。KD-88坑道掘削以前のデータから検討した結果、同一レベルのNW坑道から垂直下方に掘削した500m試錐、KH-1孔が最も自然な状態の圧力の指標となると考えた。

KH-1孔のデータが静水圧分布をとり、KD-90坑道レベルでの間隙水圧は、水頭で約30mであることから、モデル外側境界での圧力を、次式で与えることとした。

$$H = 30 - z$$

ここに、H：全水頭(m)

z：NW坑道(標高550m)を基準とした高さ

④解析結果

②で発生させて亀裂モデルを用いて、KD-90坑道への湧水量を予測した。本解析により予測されたKD-90坑道への湧水量と実測値を図-6-74に示す。図-6-74は、総湧水量が実測値1.4 l/minであるのに対して解析値は1.1 l/minと良く一致していること、区間ごとの湧水量についても実測値と解析値は傾向がよく一致していることを示している。

6. 3. 3 成果と課題

第1フェーズでは、KD-90坑道周辺への概略的な湧水量を予測するために、多孔質媒体モデルと亀裂ネットワークモデルを用いて解析を行ない、さらにその予測値と実測値を比較した。その結果、予測値と実測値は比較的よい一致を示した。

しかし、解析モデルの外側境界条件の把握のための間隙水圧データの不足と、坑道周辺の「ゆるみ領域」の把握の不十分さから、これらの水理モデルの妥当性を検討するには至っていない。今後、外側境界条件を把握するための間隙水圧モニタリングを継続および「ゆるみ領域」を定量的に把握するための試験研究を実施し、それらの結果に基づき水理モデルの妥当性を評価することが必要である。

表-6-38 KD-90坑道への湧水量の実測結果と解析結果の比較

試験 区間	湧水量 (cc/min)	
	測定値	解析値
No. 1	623	925
No. 2	548	688
No. 3	26.8	612
No. 4	29.4	554
No. 5	401	497
合 計	1628.2	3276

* : 坑口側からのナンバリング

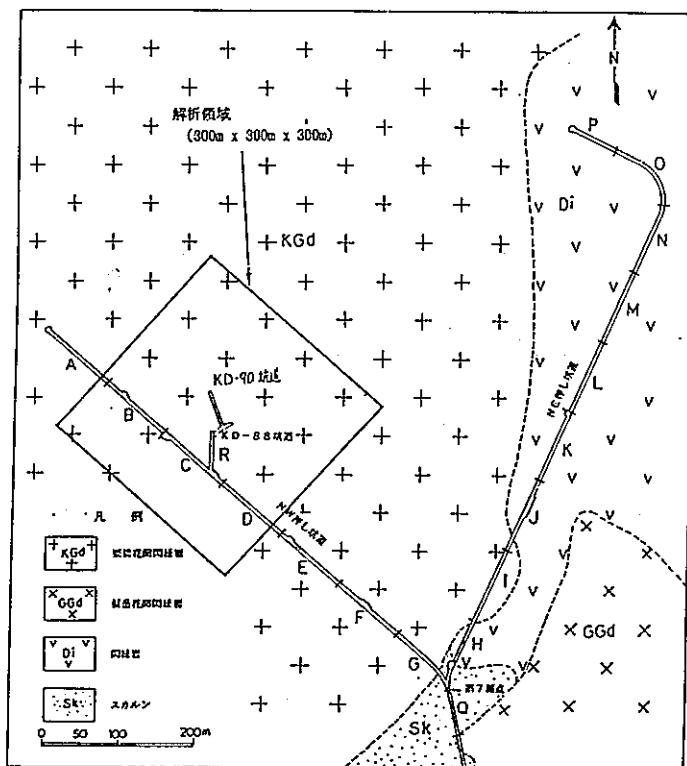


図-6-66 解析領域 (長ほか, 1991)

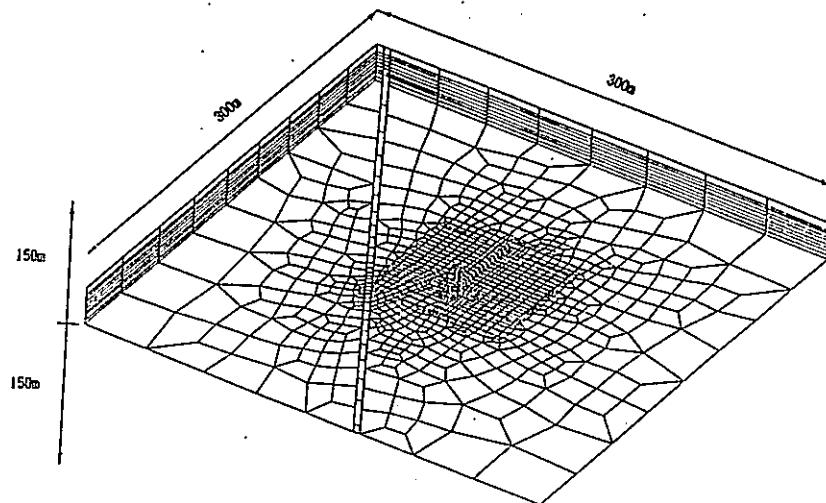


図-6-6-7 三次元要素分割図（長ほか、1991）

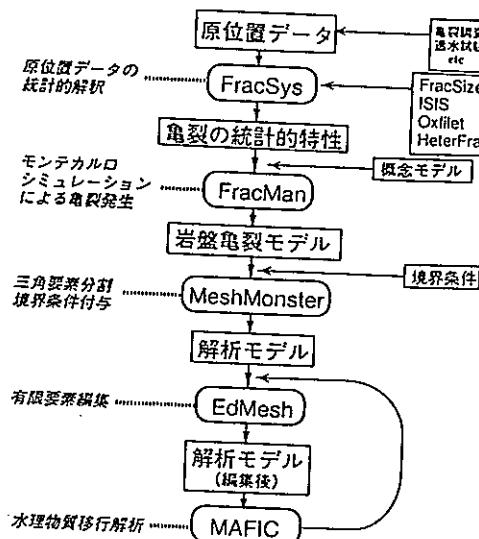


図-6-6-8 FracMan/MAFIC による解析の流れ

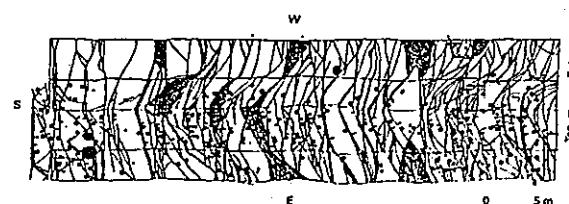


図-6-6-9 KD-90坑道の割れ目観察結果
(坑道の天盤と側壁を展開図で示す)

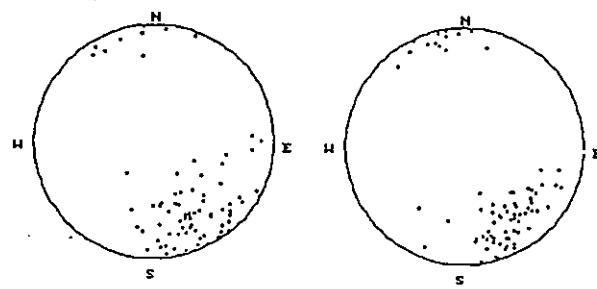


図-6-70 割れ目の方向の実測値（左図）とBootstrap 法で発生させた割れ目の方向（右図）（シュミットネット下半球投影図）

モデル化した 亀裂の半径	
KD-90坑道周辺	5～25 m
周辺岩盤	30～50 m

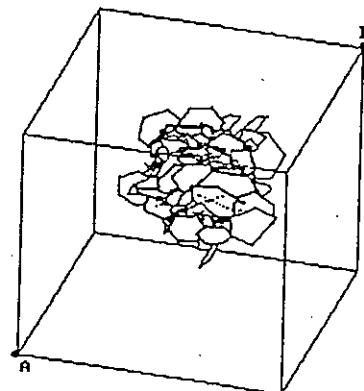


図-6-71 割れ目モデル（KD-90坑道周辺の割れ目の鳥瞰図）

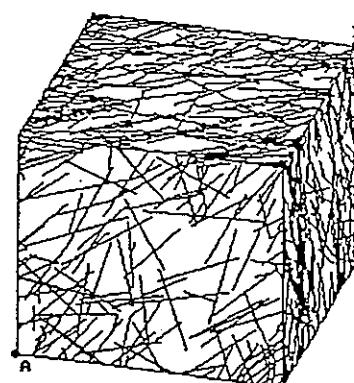


図-6-72 割れ目モデル（外側境界と交差する割れ目のトレース図）

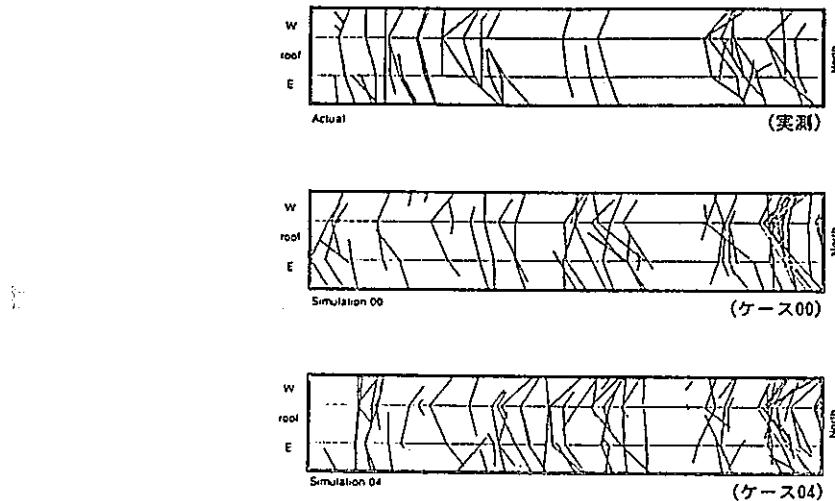


図-6-73 KD-90坑道の割れ目観察結果で確認された透水性割れ目の位置と
シミュレーションの結果得られた透水性割れ目の位置の比較

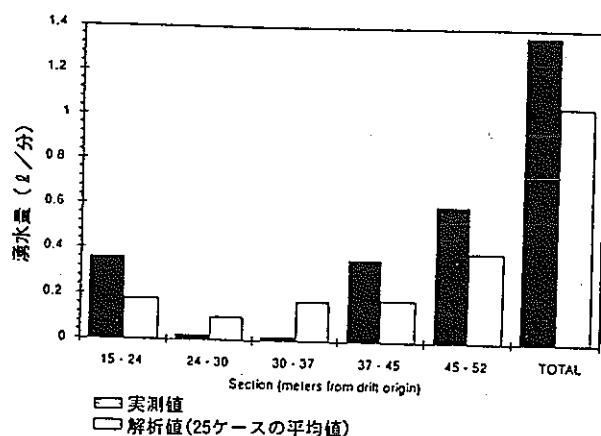


図-6-74 KD-90坑道への湧水量の実測値と解析値との比較

6. 4 単一割れ目の地下水流动試験

割れ目系岩盤内に掘削された空洞のごく近傍における地下水の流动を調べる際に経験されることは、場所によって湧水のない割れ目があること、湧水している割れ目でも湧水量の位置的な偏りや单一割れ目面内での流れの偏りなど、均質媒体とは考えられない現象が多いことである。

第1フェーズでは、NW坑道壁面に現れた单一割れ目にトレーサを注入し、実際に割れ目面を切り出すことにより割れ目面上の流れを調査し、割れ目面内の透水係数をパラメータとした2次元飽和不飽和浸透流解析でその流下状態を再現することを試みた（新見, 1992）。

6. 4. 1 試験方法と結果

試験は、まず、図-6-75に示すように坑道壁面に現れた单一割れ目の上下に注入孔と観測孔を削孔し、次に、注入孔からトレーサを注入し、観測孔の各区間の侵出量と到達時間を測定した。トレーサにはエポキシ樹脂に溶かしたエオシンを用いた。

6. 4. 2 試験結果

図-6-76にトレーサ注入後切り出したブロックと岩盤の割れ目上のトレーサの付着状況から復元したトレーサの流路を示す。注入圧は、 0.2kg/cm^2 の低圧で行い、ほぼ30分後には定常に達した。この時の注入量は、 1.0cc/min である。また、トレーサの到達時間は、12～14分程度であった。図-6-74より、トレーサの流路は、岩盤の奥に向かって斜め下方に細く流れるものと、広く薄く直下に流下するものの2つが認められ、注入区間に近い部分で分岐している。分岐している部分はトレーサが拡がっており、ここで流下を阻まれ滞留したものと推定される。また、割れ目面上に付着したエポキシ樹脂の厚さの測定結果では、トレーサが岩盤の奥に向かって斜め下方に細く流れている部分は $0.2 \sim 2\text{mm}$ であり、中には 2mm を越える部分も存在した。エポキシ樹脂の厚さの対数平均は、 1.03mm であった。

一方、図-6-77に示すように2次元飽和不飽和浸透流解析の結果、透水係数は流路の部分で $4.5 \times 10^{-4}\text{cm/sec}$ 、流路でない部分で $1.0 \times 10^{-6}\text{cm/sec}$ となった。

以上のように、本試験では、单一割れ目のチャンネリング現象を実験的に確かめることができた。

6. 4. 3 成果と課題

本試験により、坑道近傍の单一割れ目のチャンネリング現象を実験的に確かめ、主要な流路の厚みが 1mm にも達することを示した。また、飽和・不飽和浸透流解析により、流路の透水係数が $10^{-2} \sim 10^{-4}\text{cm/sec}$ のオーダーであり、流路でない部分とは二から四桁の違いがあることを示した。

ただし、解析手法に課題を残した。トレーサー到達時間は良く表現できたものの、流量の再現はできなかった。現有の解析手法の改良あるいは新たな理論に基づく数値コードの開発が望まれる。

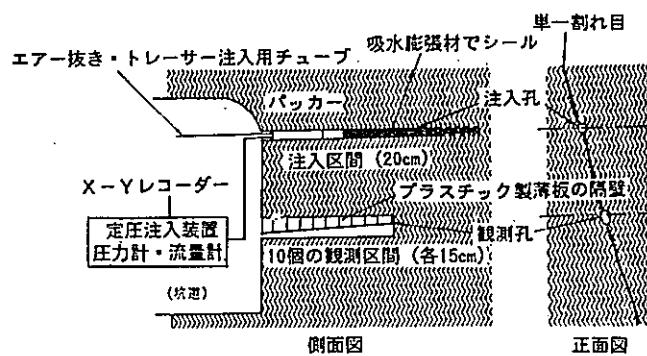


図-6-75 試験の概要

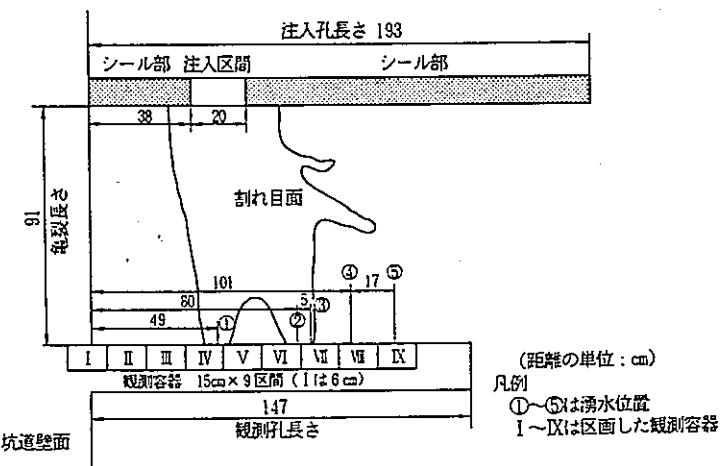


図-6-76 単一割れ目面において確認されたトレーサの流路

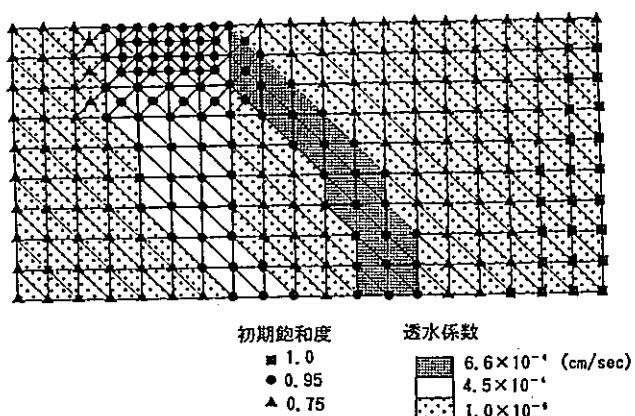


図-6-77 単一割れ目面における飽和透水係数および初期飽和度の分布

6. 5 トレーサ試験（内田ほか、1994）

坑道周辺の割れ目での物質移行に係わる水理学的特性および物質移行特性を把握することを目的とし、坑道に平行に錐進した2本の試錐孔間で非吸着性トレーサー試験を実施した。試験は、1990年に掘削したKD-90坑道中心の上方約7.4mと約12.5mにKD-90坑道と平行に錐進された試錐孔（KH-7孔、KH-8孔：図-6-78）を利用した。

本試験は、①割れ目調査、②試錐孔間圧力応答試験、③染料トレーサー試験、④非吸着性トレーサ試験の、4つの試験からなる。このうち、①～③の試験は、④の非吸着性トレーサ試験の対象とする割れ目を選定するために行われた。

6. 5. 1 割れ目調査

(1)調査方法

KH-5、KH-7、KH-8孔において岩芯観察とBTV調査を、またKD-90坑道において割れ目調査を行った。各データより湧水割れ目、開口割れ目、充填鉱物幅の大きい割れ目を抽出し、各割れ目の走向傾斜から各割れ目の延長方向を推定した。

(2)調査結果

割れ目の調査結果を図-6-79に示す。図-6-79中の破線は、走向傾斜データより推定して描いた割れ目の延長方向を示している。これらの割れ目の分布から、KH-7孔～KH-8孔～KD-90坑道間において連続した割れ目が存在する可能性の高い部分を推定した。

6. 5. 2 試錐孔間圧力応答試験

(1)試験方法

割れ目調査結果に基づき、図-6-79の1～5の番号の部分でKH-7孔～KH-8孔～KD-90坑道間で透水性割れ目の連続性を推定し、これを考慮の上KH-8孔に6個のパッカーを設置した。KH-7孔において、区間長3mのパッカー装置を孔口から3mづつ移動させながら定圧注水を行ない、KH-8孔の各パッカー区間における圧力応答を観測した。

次に、試錐孔間圧力応答試験の結果、KH-8孔で圧力応答が認められた注水区間A、B、Cで、圧力応答試験を行った。さらに、注水区間A、B、Cのパッカー間隔を0.72mに縮めて試験を行った。具体的には、KH-7孔の23m～26m（図-6-80中のAの区間）区間を4区間に、38m～44m区間（図-6-80中のB、Cの区間）を8区間に分け、合計12区間において定圧注水を行い、KH-8孔の各パッカー区間での圧力応答を観測した。

(2)試験結果

KH-7孔において、区間長3mのパッカー装置を孔口から3mづつ移動させながら定圧注水を行ない、KH-8孔の各パッcker区間における圧力応答を観測した結果、図-6-78に示す位置で圧力応答が認められた。

さらに、KH-8孔への圧力応答が認められた区間A, B, Cを0.72mに縮め、圧力応答試験を行った結果、図-6-8-1に示す位置で圧力応答が認められた。この結果は、KH-7孔口から24.44m(図-6-8-1中A-3)より奥とKH-8孔の48mより奥(図-6-8-1中III)の間では透水性割れ目の密度が高く、複雑なネットワークを形成しているものと考えられる。一方でKH-7孔口から23.00m~23.72mの区間(図-6-8-1中A-1)からKH-8孔30m~41mの区間(図-6-8-1中I)への圧力応答が観測されており、図-6-8-1を考慮すると、この区間においてKH-7孔~KH-8孔間の透水性割れ目の構造が比較的単純であり、単一の割れ目で連結している可能性があると考えられる。

以上のことから、KH-7孔の孔口から23.00m~23.72mの区間(図-6-8-1中A-1)をトレーサー試験の注入区間に決定した。

6. 5. 3 染料トレーサー試験

(1) 試験方法

試錐孔間圧力応答試験で特定されたKH-7孔の区間23.00m~23.72mにパッカーを設置し、そこより染料トレーサーを注入圧力2.5kgf/cm²の一定圧力で注入した。KH-8孔では、設置されていたパッカーを取り外し、ボアホールテレビを挿入してKH-8孔口から30m~41m付近で割れ目から湧出してくる染料を観察した。なお染料にはエオシンGを用いた。

(2) 試験結果

染料トレーサーをKH-7孔から注入を開始して約2時間後、KH-8孔の孔口より34.6m付近の割れ目から染料が湧出しているのが確認された。その後、KH-8孔口より33.7mと33.4m付近の2つの割れ目で染料が確認された。染料が湧出した状況から、KH-7孔から注入した染料の大部分はKH-8孔口から34.6m付近の割れ目から湧出したと考えられる。したがって、非吸着性トレーサー試験の対象割れ目はKH-8孔において孔口から34.6mに存在する割れ目に決定した。

6. 5. 4 非吸着性トレーサー試験

(1) 試験方法

6. 5. 1~6. 5. 3の結果に基づき、図-6-8-2に示すようにトレーサーの注入と観測区間を設定した。トレーサーには非吸着性の塩水(NaCl)を使用した。塩水の濃度測定は電気伝導度センサーで測定するものとし、その検量線は試験開始前に採水したKH-7孔とKH-8孔からの湧水を用いて作成した。KH-7孔とKH-8孔に設置したパッカー装置には、それぞれ注水ラインと採水ラインを、またパッカー区間内には圧力センサー、電気伝導度センサー、および温度センサーを備えている。試験は以下の手順で行った。

まず、トレーサーの注入開始より1日前からKH-7孔から所定の圧力(24および1.5kgf/cm²)で水を注入する。KH-8孔では採水ラインのバルブを開放する(その際、KH-8のパッカー区間では区間内圧力が僅かに残ることになる)。そして、KH-7孔およびKH-8孔のパッカー区間の区間内圧力がそれぞれ安定していると判断された後、水の注入から約1g/lの濃度に調整した塩水の注入に切り換えた。水注入から塩水注入への切

り換えには、水用と塩水用の2台の定圧注入装置を用意し、バルブの切り換えで行った。これより、注入圧力を変えることなくスムースな塩水注入への切り換えが可能となる。試験開始とともに注入区間と観測区間の電気伝導度、間隙水圧と温度をそれぞれ測定した。また、KH-7孔への注水量とKH-8孔からの排水量を隨時測定し、その量が一定に保たれていることを確認した。

(2) 試験結果

試験はKH-7孔の注入圧力とKH-8孔での区間内圧力をかえて2回行った。その試験条件を以下に記す。

- 1回目： KH-7孔の注入圧力 2.4kgf/cm^2
KH-8孔の区間内圧力 0.7kgf/cm^2
2回目： KH-7孔の注入圧力 1.5kgf/cm^2
KH-8孔の区間内圧力 0.5kgf/cm^2

その際の、KH-7孔の注入量とKH-8孔からの排水量は以下の通りであった。

- 1回目： KH-7孔の注入量 170 ml/分
KH-8孔からの排水量 90 ml/分
2回目： KH-7孔の注入量 57 ml/分
KH-8孔からの排水量 124 ml/分

1回目、2回目の試験結果をそれぞれ図-6-83、図-6-84に示す。試験開始直後においてトレーサーの注入濃度にはらつきがあるが、これは試験開始直後はトレーサー注水タンク内の塩水濃度が一様でなかったためと考えられる。

また、KH-8孔でのトレーサーの回収率は1回目が29.6%、2回目が71.6%であった。

6. 5. 5 解析

(1) 解析方法

① 割れ目のモデル化

割れ目のモデル化には、三次元亀裂ネットワークモデルFracMan/MAGICを用いた。本モデル化を用いた詳細な解析方法は、6. 3. 2を参照して欲しい。

釜石鉱山KD-90坑道付近の透水性割れ目の分布特性は、Uchida et al. (1993)によって調査され、KD-90坑道付近の4本のボーリング孔で観測された湧水割れ目の方向と位置を割れ目発生条件に加え(Conditioning)、KD-90坑道壁面の透水性割れ目パターンとKD-90坑道への湧水量の予測解析を行っている。

今回の解析では基本的に彼らのパラメータを用いて解析を行うこととした。ただし、トレーサー試験の対象割れ目においては、単一割れ目内の不均質性を考慮し、より詳細なモデル化を試みた。モデル化の手順を以下に記す。

まず、KH-7孔とKH-8孔の既存の割れ目データから染料トレーサー試験において決定した割れ目の走向、傾斜を求め、非吸着性トレーサー試験の対象割れ目を決定論的に発生させることとした(以下ではKH-7孔口から23.2mに位置する割れ目をFrac-7、KH-8孔口から34.6mに位置する割れ目をFrac-8とする)。ただし、割れ目の大きさについては、Frac-7、Frac-8ともに半径6mと仮定した。また、KH-7孔、KH-8孔それぞ

れのパッカーバー区間を横切る透水性割れ目はFrac-7、Frac-8のみであると仮定している。トレーサ試験の後にKH-7孔、KH-8孔でそれぞれ行った透水試験から得られた透水係数から求めたパッカーバー区間(区間長0.72m)の透水量係数は、Frac-7の透水量係数を $6.8 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 、Frac-8の透水量係数を $1.2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ とした。次に、KH-7孔とKH-8孔の既存の割れ目データから湧水割れ目と、充填鉱物幅が10cm以上の割れ目を抽出し、それらの位置と方向をConditioningすることとした。以上を表にまとめ、表-6-39に記す。また、割れ目モデルの概念図を図-6-85に示す。

②解析方法

上記の割れ目モデルを用いて、トレーサー試験1回目をParticle Tracking法で解析した。そして、Frac-7とFrac-8を約1mの大きさの要素に細分割し、透水量係数の不均質性を与えることとした。その際、透水量係数分布は地球統計手法(新井勝男, 1985)に基づく分布モデルを仮定し、試験の対象亀裂内の透水量係数の不均質性は、次式の指數モデルに基づく共分散 $C(r)$ を用いてシミュレートした。

$$C(r) = \sigma^2 e^{-(r/b)}$$

ここで、 σ : 標準偏差

r : 2点間の距離

b : 影響範囲

解析では、透水試験から得られた透水量係数数をその平均値に用い、標準偏差を平均値の0倍、0.1倍、1倍とした3ケースの解析を行なった。また、2点間の透水量係数に相関を持たせる場合($b >$ 要素の大きさ)とそうでない場合($b <$ 要素の大きさ)の2通りに分けて解析を行なった。

また、物質移行に係わる割れ目の間隙幅 A_t は、透水量係数とある相関性をもって変化すると考えられる。その関係を以下のように仮定した。

物質移行を考える場合は割れ目中の空隙の体積が問題となるが、空隙の体積を表すパラメータとして貯留係数が考えられる。割れ目内のチャンネルを管流路で代表した場合、その透水量係数は管流路半径の四乗に比例する。また、貯留係数はその空隙体積に比例することから、貯留係数は管流路半径の2乗に比例することとなる。しかし、貯留係数はdead-end pore等の空隙も表現するので、それを除いた部分が物質移行に寄与すると考える。したがって、物質移行上の間隙幅 A_t は、透水量係数の平方根に比例することとなり、次式で表現することができる。

$$A_t = a \times T^{1/2}$$

ここで、 T : 透水量係数

a : 比例定数

②解析結果と考察

本解析では、上記に1と5を与えた2ケースの解析を行なった。以上12ケースの解析結果から、2点間の相関性がなく、標準偏差が透水量係数の平均値の1倍、そして $a=1$ のケースで実測値にもっとも近い結果(図-6-86)を得た。

解析結果から比例定数 $a=1$ が得られた。対象割れ目の透水量係数の平均がほぼ $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ であることから、物質移行に係わる割れ目の平均間隙幅は、約 $3.2 \times 10^{-4} \text{ m}$ となる。

一方、割れ目の透水量係数に対応する水理学的間隙幅 A_c は

$$T = \rho \times g \times A_c^3 / 12u$$

ここで ρ : 流体密度

g : 重力加速度

u : 流体の粘性係数

で示され、これにより A_c を求めるとき $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$ となり、 At の約 $1/7$ 程度であることがわかる。このことは、試験の対象とした割れ目中の実流速は、三乗則に基づく流速よりも $1/7$ 倍程度遅いことを示している。

6. 5. 6 成果

釜石鉱山KD-90坑道において、坑道に平行に錐進した2本の試錐孔間で圧力応答試験と染料トレーサー試験を組み合わせて実施し、その間の透水性割れ目とその連結性を確認することができた。また、抽出された割れ目を対象にNaCl溶液を用いたトレーサー試験を実施した。そして、FracMan/MAFICを用いてモデル化を行い、物質移行に係わる割れ目間隙幅 At は三乗則から求められる割れ目の間隙幅の約7倍程度大きいことがわかった。

表-6-3-9 解析に用いたパラメータ

	Frac-7	Frac-8	Inner Region	Outer Region
走向・傾斜	N73E 63NW	N60E 76NW	bootstrap+conditioning	bootstrap
亀裂半径分布 m	6	6	対数正規分布 平均：7 標準偏差：1.25 範囲：5～25	対数正規分布 平均：25 標準偏差：10 範囲：30～50
透水量係数分布 m^2/s	6.8×10^{-8}	1.2×10^{-7}	対数正規分布 平均 4.05×10^{-7} 標準偏差 2.82×10^{-6} 範囲 $3 \times 10^{-9} \sim 1$	対数正規分布 平均 4.05×10^{-7} 標準偏差 2.82×10^{-5} 範囲 $3 \times 10^{-8} \sim 1$

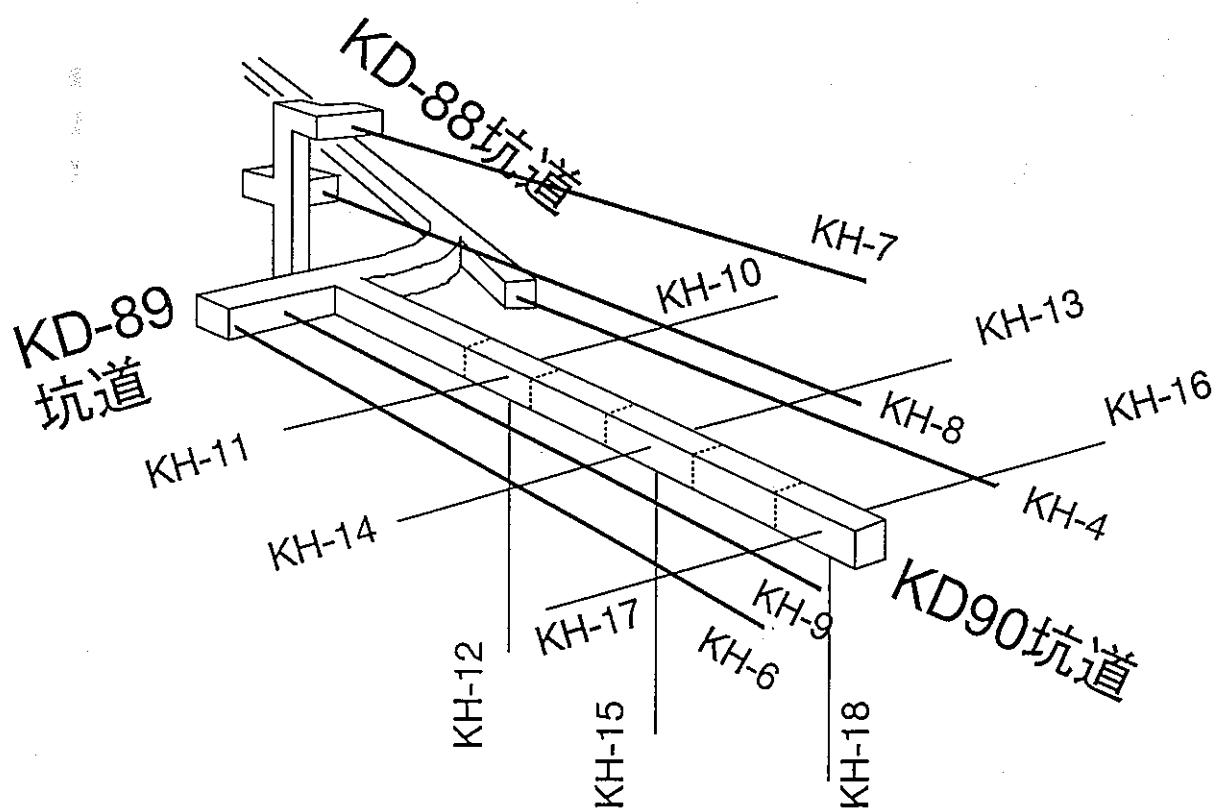


図-6-7-8 KD-90坑道付近の試錐孔配置図
(内田ほか, 1994)

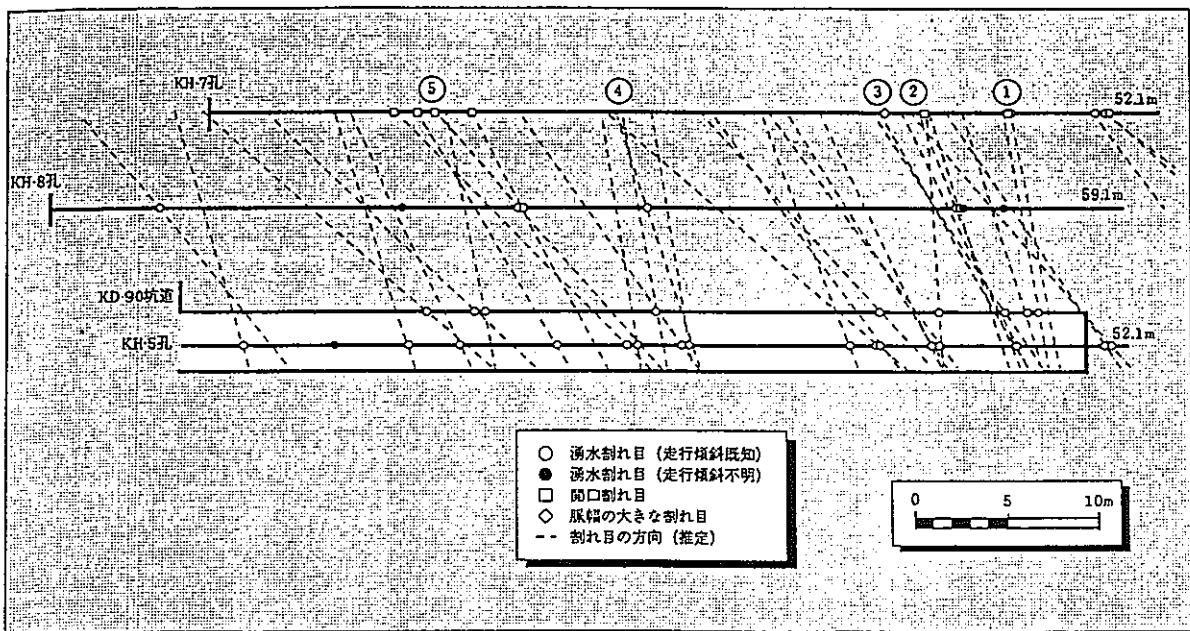


図-6-79 割れ目分布の推定図
(KH-7～KH-8～KD-90坑道垂直断面図)
(内田ほか, 1994)

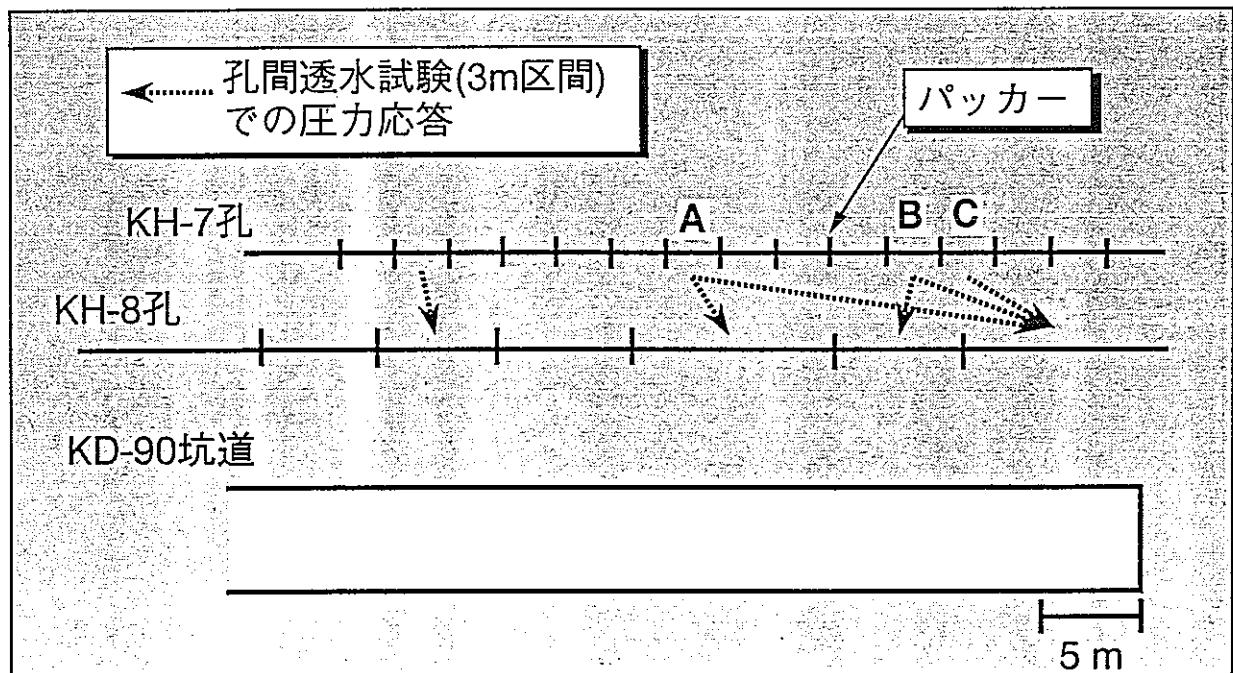


図-6-80 圧力応答試験(3m区間)結果 (内田ほか, 1994)

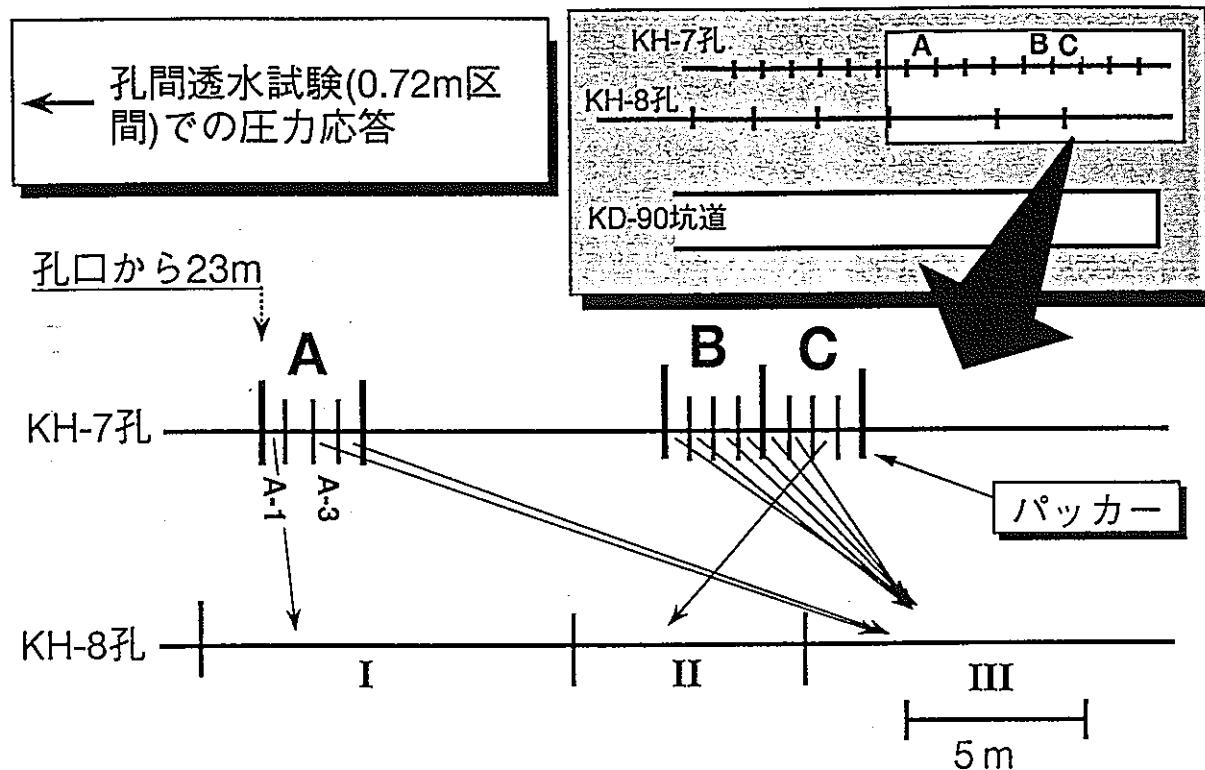


図-6-8-1 圧力応答試験 (0.72m) 結果 (内田ほか, 1994)

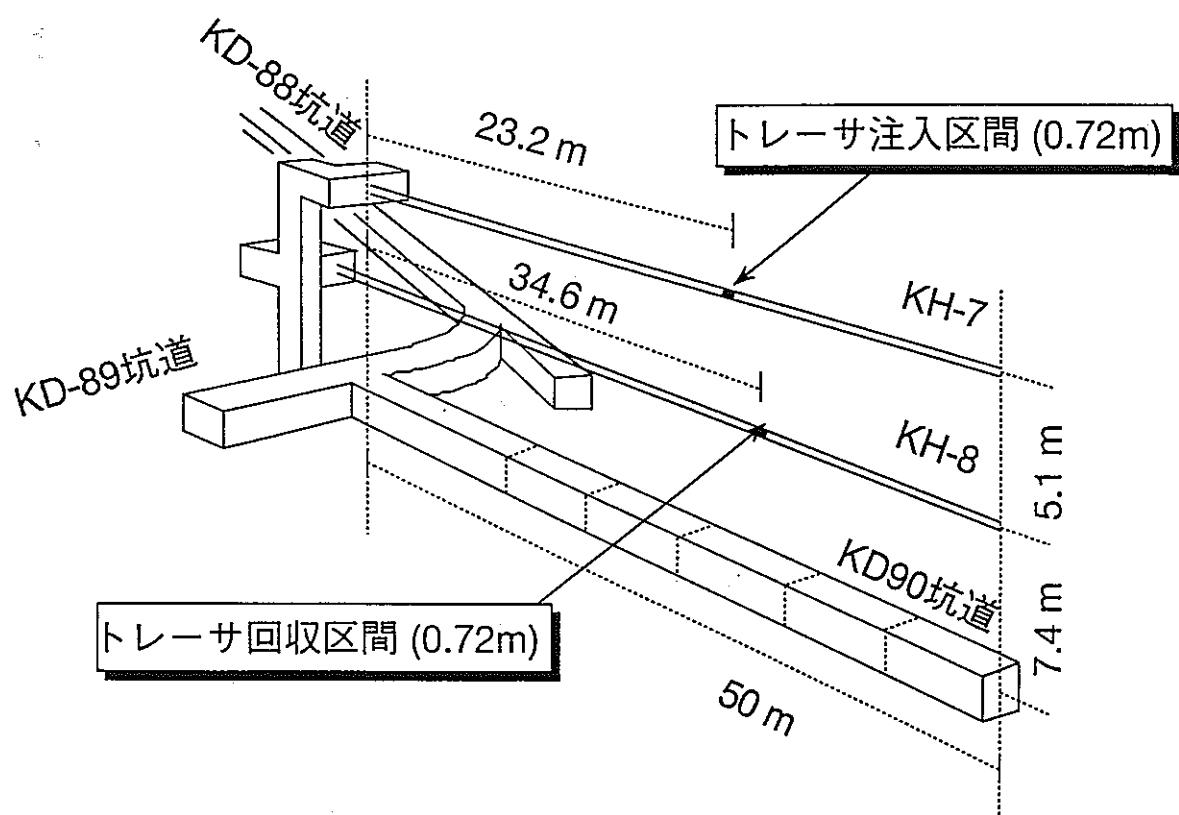


図-6-8-2 NaClトレーサ試験の注入区間と回収区間 (内田ほか, 1994)

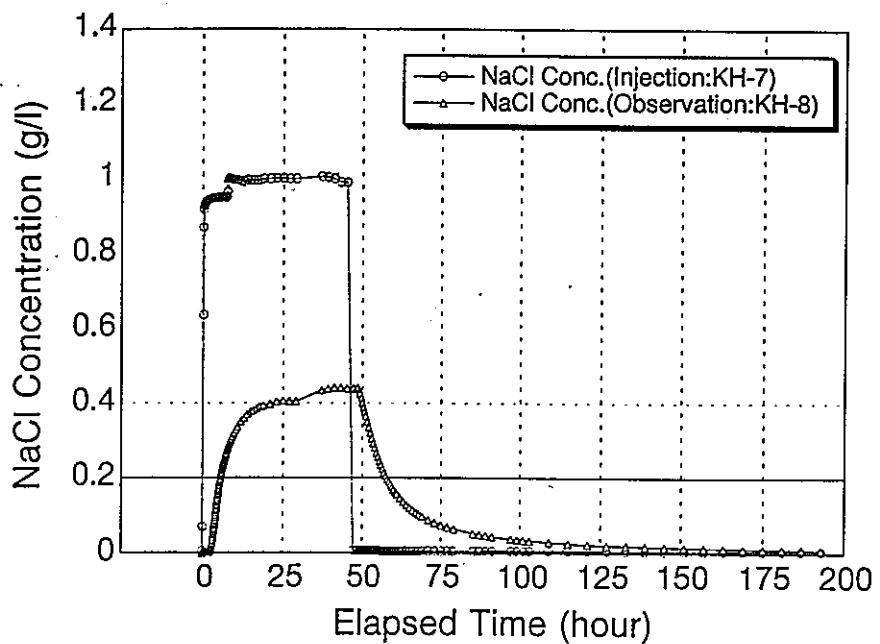


図-6-8-3 NaClトレーサ試験1の結果（内田ほか, 1994）

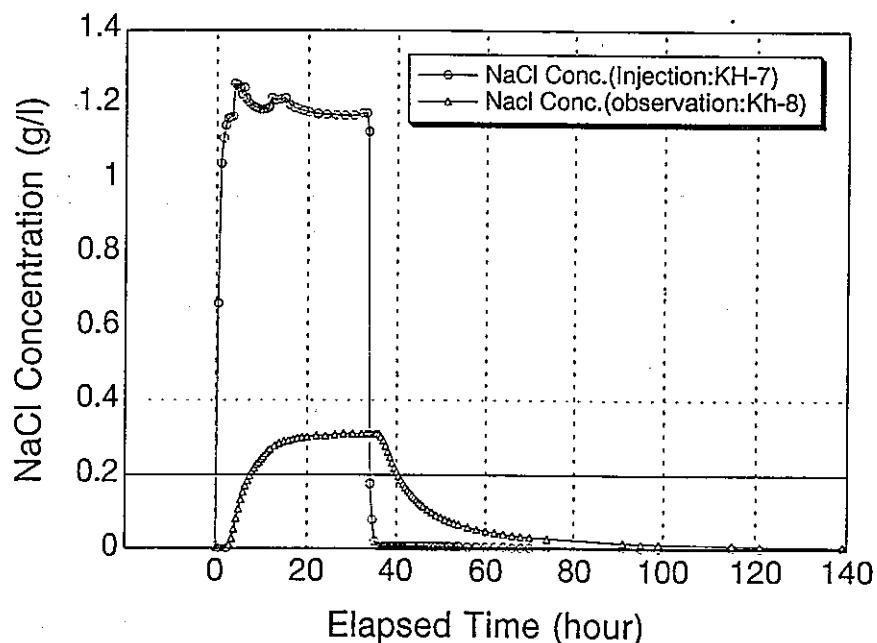


図-6-8-4 NaClトレーサ試験2の結果（内田ほか, 1994）

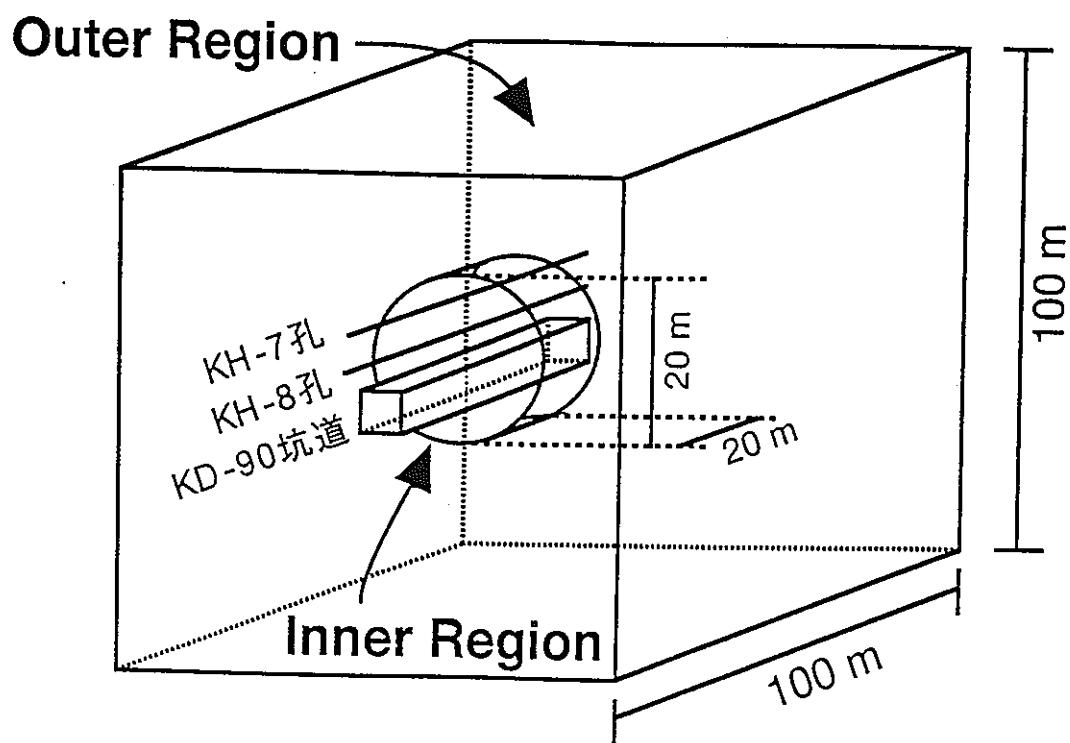
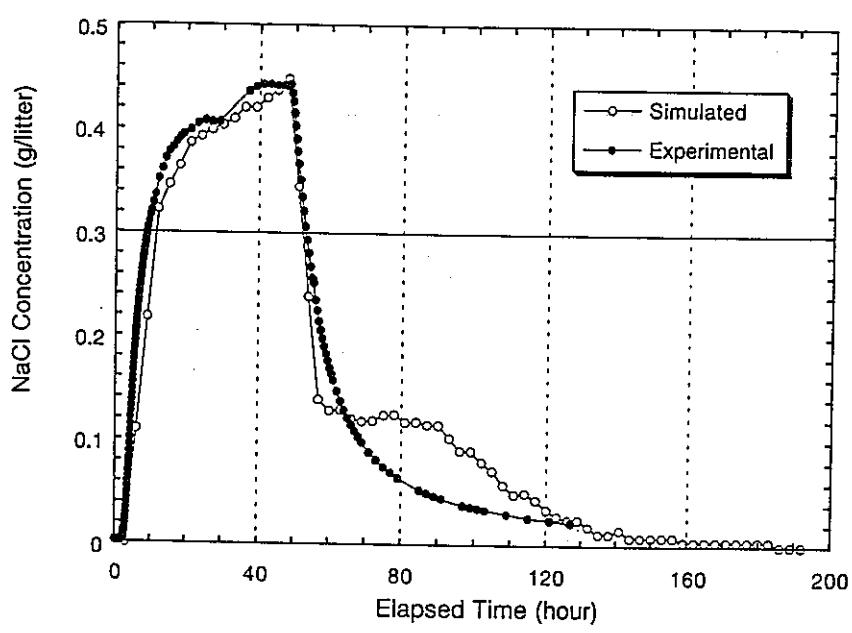


図-6-85 モデル概念図（内田ほか, 1994）



Simu.#=06, B=0.1, SDM=1.0, AF=1.0

図-6-86 NaClトレーサ試験1の解析結果（内田ほか, 1994）

7. 地下水の地球化学特性

7. 1 地下水の化学組成と起源

本地域の地下水の化学組成・起源などを明らかにするため、坑道壁面および試錐孔から湧水を採取し、地下水の主要な化学成分濃度、水素・酸素の安定同位体比およびトリチウム濃度の測定を行なった。

7. 1. 1 調査方法

採水はNWおよびNE坑道の湧水と、NW坑道から下向きに501.2m掘削されたKH-1孔および地表から下向きに801.0m掘削されたKG-1孔を対象に行なった。NWおよびNE坑道における地下水の採水は、湧水量や地質に偏りのない場所で行なった。坑道内で湧水を採取する場合、湧水している割れ目にドリルで穴をあけ、その穴にチューブを差し込み、なるべく外気との接触を防ぐように採水した。KH-1孔からの湧水を採取する場合も外気との接触を防ぐため、パッカーで遮水した区間からチューブで孔口まで導く方法で採水した。またKG-1孔からの湧水を採取する場合は、本孔に設置したMPケーシングの採水ポートを開けた後、地下水採水・水質測定装置(HGP-10)を挿入して採水を実施した。KG-1孔からの湧水は区間220m(GL-222.15~GL-228.52m)、区間490m(GL-489.09~GL-495.46m)および区間740m(GL-740.63~GL-747.00m)の3区間で行なった。

分析項目および分析方法については、表-7-1に示す通りである。

7. 1. 2 調査結果

(1) 地下水の水質

図-7-1にNW・NE坑道における採水位置と地下水のヘキサダイヤグラムを示す。NW・NE坑道における湧水の水質は、6つの型に区分される(図-7-2)。なお図-7-2には地表水、新規試験坑道であるKD-88坑道、250mレベル坑道およびKH-1孔の湧水の分析結果も記してある。

図-7-3に、KH-1孔におけるパッカー設置区間と各区間の地下水のヘキサダイヤグラムを示す。KH-1孔の地下水は、深度が深くなるにつれて $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ の増加が認められる。またKH-1孔の区間5(KH-1-5)では、他の区間に比べて SO_4^{2-} に富むことがわかる。

図-7-4に、KG-1孔における各採水区間の地下水のヘキサダイヤグラムを示す。KG-1孔の地下水の水質は、いずれの採水区間においても $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$ 型であることがわかる。

(2) 水素・酸素の安定同位体比

表-7-2にNW・NE・KD-88坑道、KH-1孔、KG-1孔の地下水および地表水の δD と $\delta^{18}\text{O}$ の測定結果を示す。また図-7-5に $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$ 図を示す。坑道、KH-1孔およびKG-1孔の地下水の同位体比は、ほぼ同地域の天水の範囲に入る。

図-7-6にKH-1孔の各区間における地下水の $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$ 図を示す。この図から深部の地下水の方が浅部の地下水に比べて水素・酸素の安定同位体比が軽くなることがわ

かる。

(3) トリチウム濃度

表-7-3にNW・NE・KD-88坑道、KH-1孔、KG-1孔の地下水の δD とトリチウム濃度(T.U.)の測定結果を示す。また図-7-7に δD -トリチウム図を示す。KH-1孔の地下水は4T.U.以下と、坑道から採取されたほとんどの地下水中的トリチウム濃度より低い値を示す。また、図-7-7によれば、NW・NE坑道(標高510mレベル)、新規坑道(KD-88坑道、標高510mレベル)、KH-131号の順にトリチウム濃度が低く、地下水の滞留時間が長くなる傾向がある。 δD からは同様の順に同位体化が弱くなり、相対的に高い標高から涵養されたものと解釈できる。これは、流動経路が長くなることにより滞留時間も増大するためと考えられる(長ほか、1991)。

(4) 考察

以上の結果から、本地域の地下水の化学組成・起源に関して、次の点が指摘できる。

- ①水質は6つの型に区分できる。これは地下水組成を規定する水-岩石反応の違いによるものと考えられる。すなわち、地下水と反応する岩石の種類の違い(たとえば図-7-2の①型と⑤型)や反応時間の違い(おなじく図-7-2の①型と②型)により、地下水の組成が異なる。さらに、それらの異なる組成の地下水の混合により、今回調査された地下水の水質は形成された。
- ②水素・酸素の安定同位体比は、ほぼ本地域の天水線の範囲に入ることから、これらの地下水の起源は降水と考えられる。また深度の深い地下水は、浅い地下水に比べて水素・酸素の安定同位体比が軽くなっている。これを安定同位体の高度効果と仮定すると、深部の地下水になるほど、より高い標高から涵養されている可能性がある。
- ③トリチウム濃度の違いから、深部の地下水は浅部に比べて古い地下水の可能性がある。

7. 1. 3 成果と課題

第1フェーズでは試験領域内の広範囲にわたり地下水を採取し、その地下水の水質分析や水素・酸素安定同位体比およびトリチウム濃度の測定を行ない、本地域の地下水の化学組成や起源を明らかにした。

今後の課題として、本手法の不確定要素(たとえば、同位体に関する前提条件のチェック)を少なくすることがデータの信頼性を高める上で重要である。また、坑道の湧水の水質が季節変動している可能性などをチェックする必要もある。

表-7-1 分析項目および分析方法（浜辺ほか、1989）

分析項目：主要化学成分 (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , SiO_2)
酸素・水素の安定同位体比、トリチウム濃度
現地測定項目（水温、pH、R pH、電気伝導度、酸化還元電位、流量）

分析方法

(1)陸水8成分分析法

Na^+ : フレーム光度法 (JIS K 0101) Ca^{2+} : 原子吸光法 (JIS K 0101)
 K^+ : フレーム光度法 (JIS K 0101) Mg^{2+} : 原子吸光法 (JIS K 0101)
 Cl^- : イオンメータ法 SO_4^{2-} : DR/3000
 HCO_3^- : Pアルカリ度およびTアルカリ度の硫酸標準液による滴定法
 SiO_2 : DR/3000

(2)同位体比分析方法

安定同位体組成は、 δ 値で表現され次式で定義される。単位は‰で表す。

$$\delta = (\text{R}_X / \text{R}_{ST} - 1) \times 10^3$$

添字X, STはおのおの測定試料および標準試料を示し、Rは対象とする同位体比 (D/H , $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) である。標準試料としてはSMOW (標準平均海水) を用いる。

水試料の同位体比分析にあたっては、 δD は H_2 ガス、 $\delta^{18}\text{O}$ は CO_2 ガスにして質量分析計 (Finnigan MAT Delta-K) を用いて行なう。分析試料のガス化への前処理は下記の方法による。

(a)水の δD 分析

水試料はファインピペットを用いて $5\ \mu\ell$ 採取する。採取した試料は反応容器 (グリースレスストップコック付き反応管) に入れ真空下、450°Cで約0.1gの金属亜鉛と反応させ H_2 ガスを発生させる。

(b)水の $\delta^{18}\text{O}$ 分析

5mℓの水試料を30mℓ(STP)の CO_2 ガスとともにガラス容器に封入し、25°Cの恒温水槽内で4時間振動させる。この結果、酸素水素同位体交換反応により、 CO_2 ガスは水の同位体比よりも41.15‰ほど ^{18}O に富む同位体組成比に固定される。この CO_2 ガスを質量分析計で測定することにより、試料水の同位体比を算出する。

(c)水のトリチウム分析

2ℓの水試料をいったん濾過・蒸留し、電解濃縮する。これを繰り返して数mℓまで濃縮し、液体シンチレーションカウンターで測定する (昭和52年科学技術庁マニュアル「トリチウム分析」に準ずる)。

表-7-2 NW・NE・KD-88坑道、KH-1孔、KG-1孔の地下水
および地表水の δD と $\delta^{18}\text{O}$ 測定結果(長ほか, 1991, 1993)

サンプルNo.	$\delta D(\text{\%})$	$\delta^{18}\text{O} (\text{\%})$	サンプルNo.	$\delta D(\text{\%})$	$\delta^{18}\text{O} (\text{\%})$
NW01	-67.1	-10.7	NE36	-70.4	-10.3
NW03	-74.8	-10.5	NE41	-66.4	-10.4
NW05	-65.8	-10.6	NE42	-64.7	-10.5
NW06	-72	-10.7	NE43	-72.1	-10.7
NW07	-66.2	-10.5	NE45	-66.5	-10.4
NW08	-64	-10.4	NE47	-65.6	-10.8
NW09	-63.7	-10.6	NE48	-63.9	-10.5
NW13	-68.9	-10.4	KD88	-68.6	-10.5
NW14	-62.9	-10.7	KD88	-72.6	-10.4
NW15	-73.3	-10.7	KD88	-73.8	-10.7
NW16	-66.2	-10.2	KH1-1	-68.1	-10.4
NW18	-64.9	-10.3	KH1-1	-67.8	-10.6
NW19	-68.9	-9.9	KH1-2	-71.1	-10.8
NW20	-64.6	-10.6	KH1-2	-77.2	-11.3
NW21	-67.7	-10.5	KH1-2	-76.8	-11.4
NE22	-71	-10.7	KH1-2	-74.5	-11.1
NE23	-80.4	-11.1	KH1-3	-77.1	-11.3
NE26	-62.6	-10.2	KH1-4	-78.3	-11.2
NE28	-72	-10.8	KH1-4	-79.1	-11.6
NE29	-67.6	-10.2	KH1-5	-78.2	-11.6
NE30	-68.6	-10.2	KG-1(740M)	-62.1	-10.5
NE32	-67.9	-10.2	KG-1(490M)	-64.8	-10.6
NE34	-65.6	-10.6	KG-1(220M)	-61.1	-10.1
			地表水	-65	-9.5

表-7-3 NW・NE・KD-88坑道、KH-1孔およびKG-1孔の
地下水の δD とトリチウム測定結果(長ほか, 1991, 1993)

サンプルNo.	$\delta D(\text{\%})$	トリチウム(T.U.)	サンプルNo.	$\delta D(\text{\%})$	トリチウム(T.U.)
NW01	-67.1	11.6	NE36	-70.4	10.4
NW03	-74.8	10.7	NE41	-66.4	9.9
NW05	-65.8	10.2	NE42	-64.7	9.9
NW06	-72	10.4	NE43	-72.1	9.8
NW07	-66.2	8.6	NE45	-66.5	9.3
NW08	-64	9.2	NE47	-65.6	10.3
NW09	-63.7	7.9	NE48	-63.9	11.3
NW13	-68.9	9	KD88	-68.6	5.1
NW14	-62.9	10.1	KD88	-72.6	7
NW15	-73.3	9.1	KD88	-73.8	5.6
NW16	-66.2	13.9	KH1-1	-68.1	9
NW18	-64.9	13	KH1-1	-67.8	3.1
NW19	-68.9	16.5	KH1-2	-71.1	1.5
NW20	-64.6	14.9	KH1-2	-77.2	1.6
NW21	-67.7	12.6	KH1-2	-76.8	1.2
NE22	-71	7.6	KH1-2	-74.5	0.47
NE23	-80.4	1.1	KH1-3	-77.1	1.8
NE26	-62.6	12.8	KH1-4	-78.3	2.9
NE28	-72	5.8	KH1-4	-79.1	2.1
NE29	-67.6	8.3	KH1-5	-78.2	0.86
NE30	-68.6	8	KG-1(740M)	-62.1	4.5
NE32	-67.9	9.9	KG-1(490M)	-64.8	5.3
NE34	-65.6	11.6	KG-1(220M)	-61.1	10.6

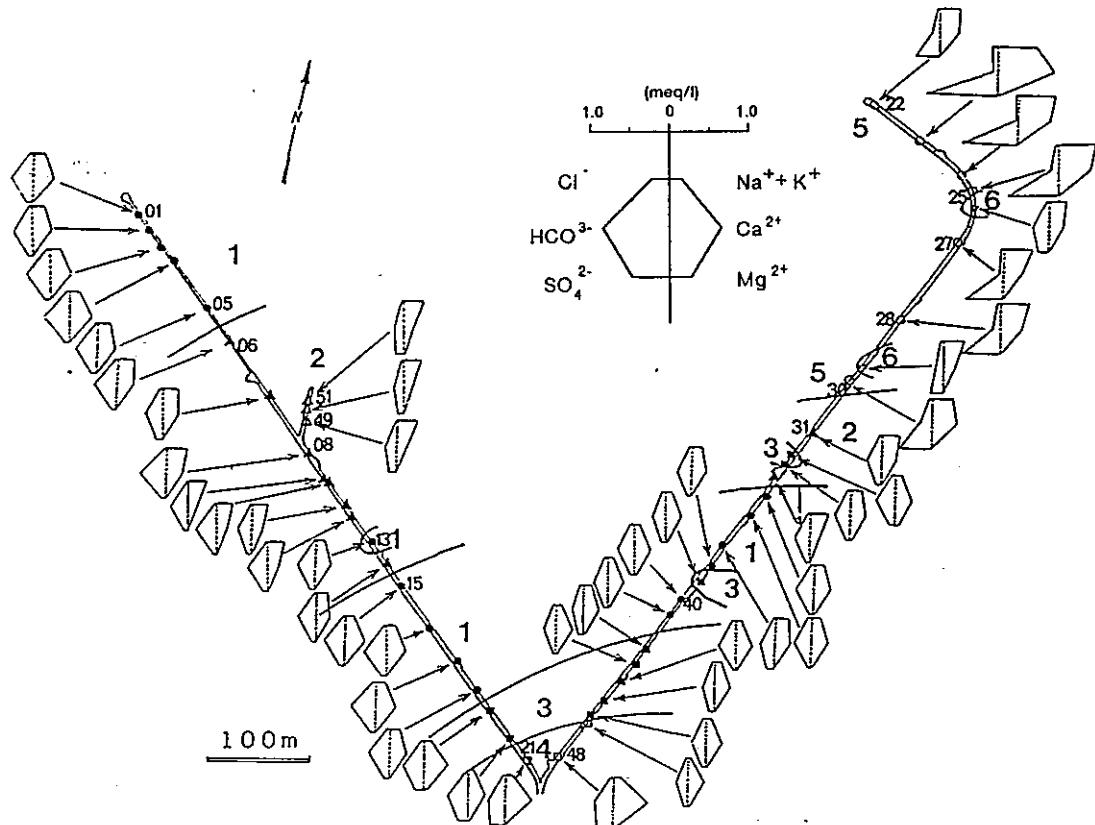


図-7-1 NW・NE坑道における採水位置と地下水のヘキサダイヤグラム
(図中の小さい数字は採水位置を示し、大きい数字は水質区分を表している。長ほか、1991)

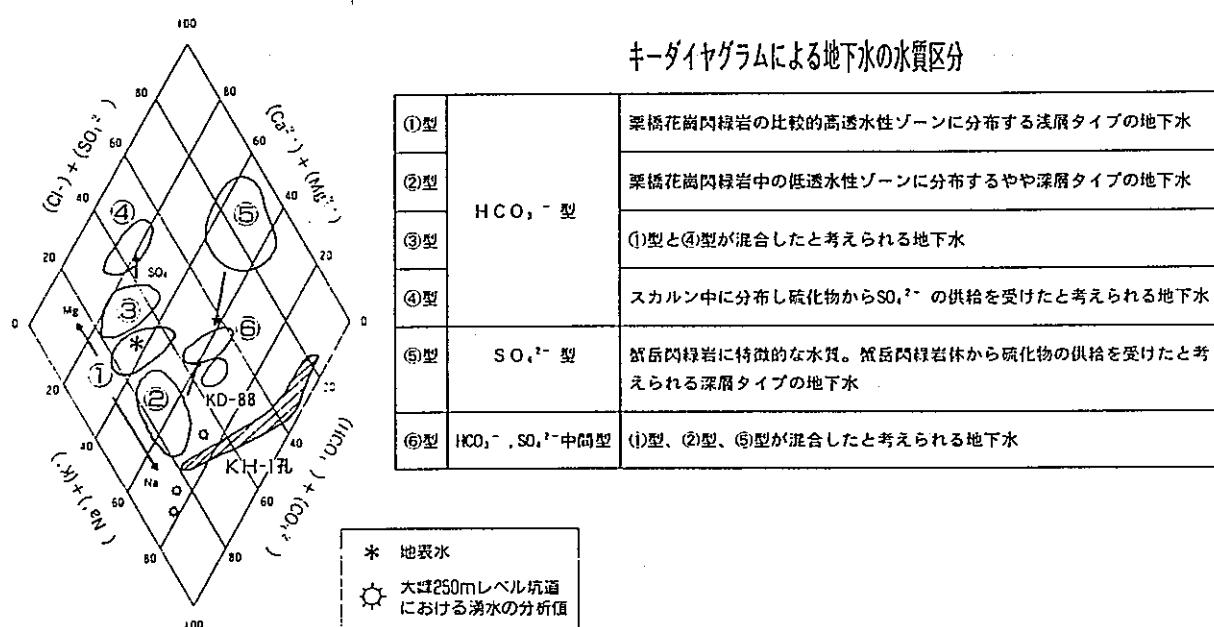


図-7-2 地下水の化学組成(キーダイヤグラム)と水質区分(長ほか、1992)

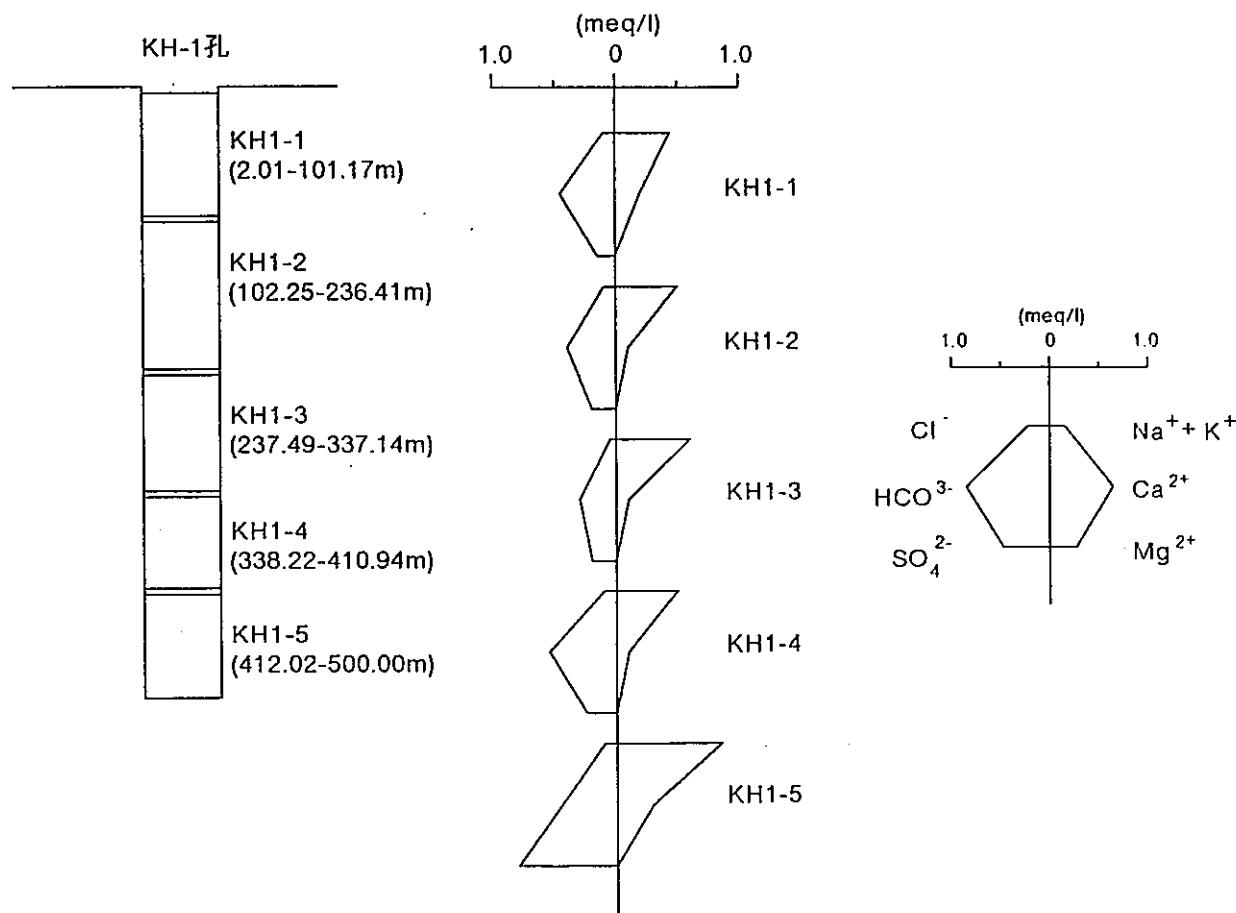


図-7-3 KH-1孔におけるパッカー設置区間と各区間の地下水のヘキサダイヤグラム（長ほか, 1991）

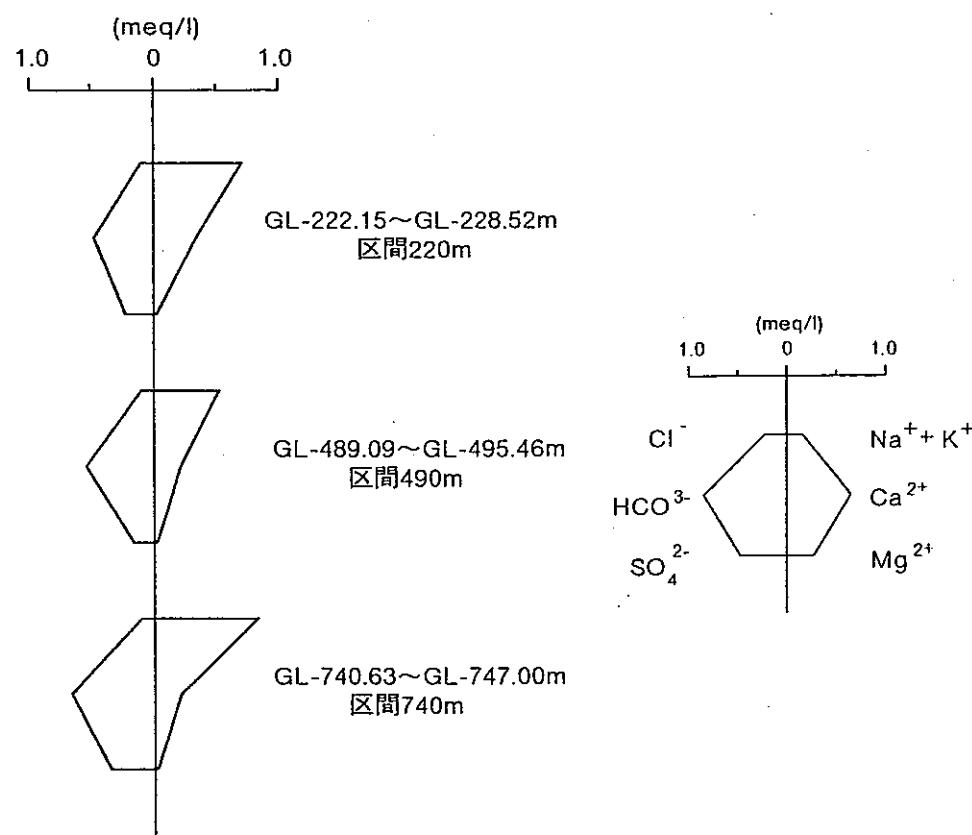


図-7-4 KG-1孔における各採水区間の地下水のヘキサダイヤグラム（長ほか, 1993）

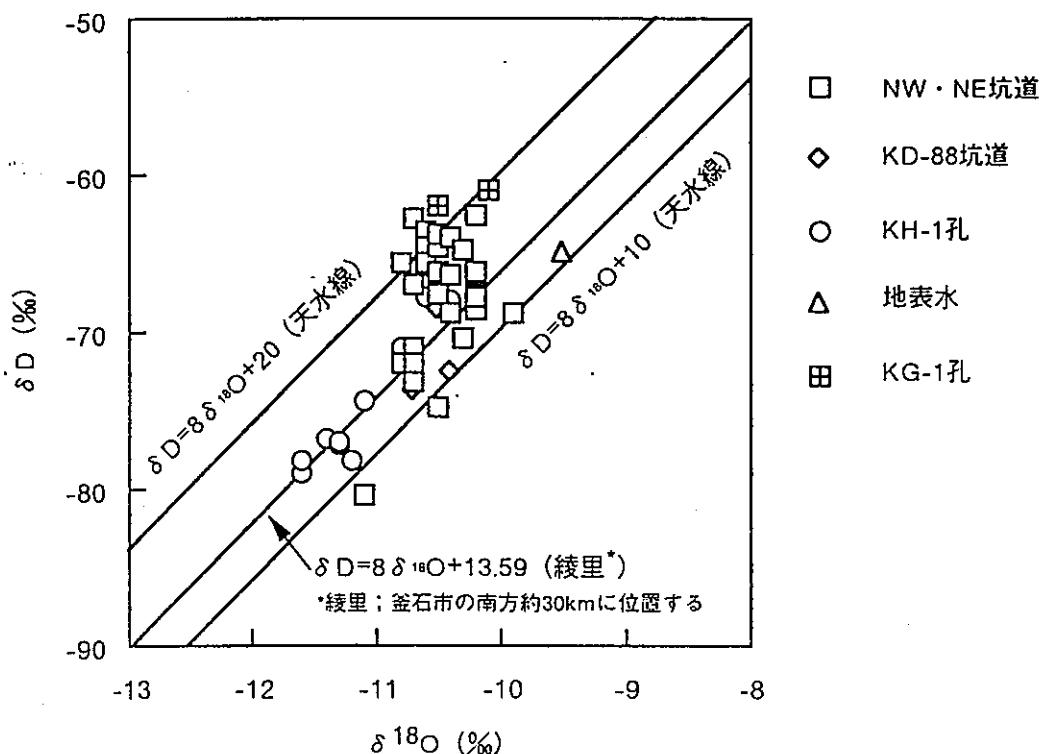


図-7-5 NW・NE・KD-88坑道、KH-1孔、KG-1孔の地下水
および地表水の $\delta D - \delta^{18}\text{O}$ 図（長ほか、1991、1993）

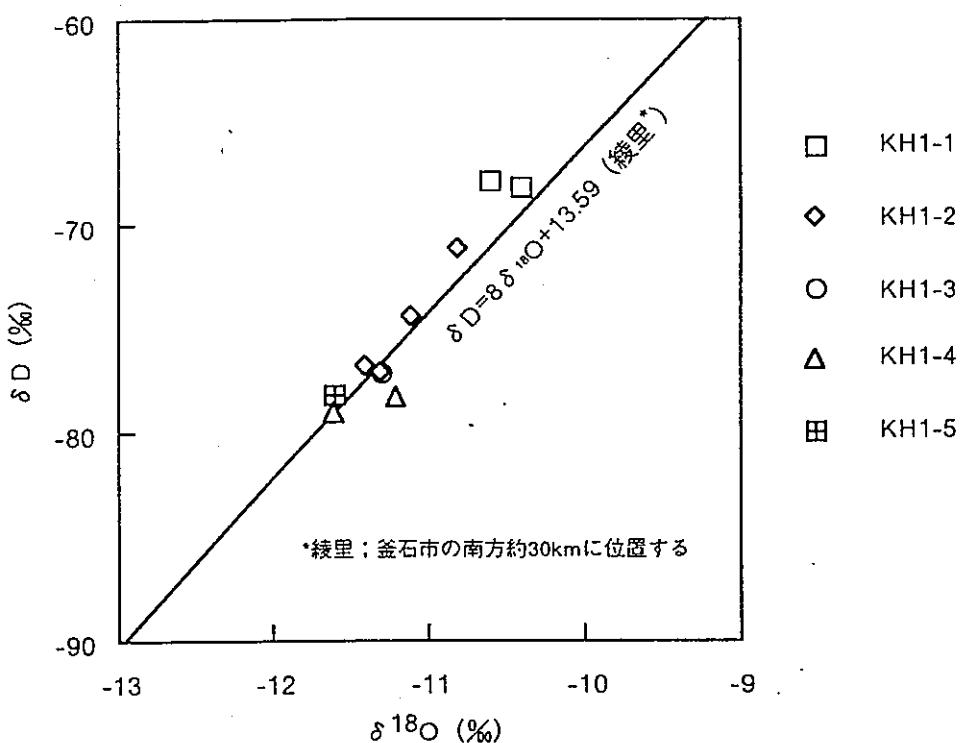


図-7-6 KH-1孔の各区間における地下水の $\delta D - \delta^{18}\text{O}$ 図
(長ほか、1991)

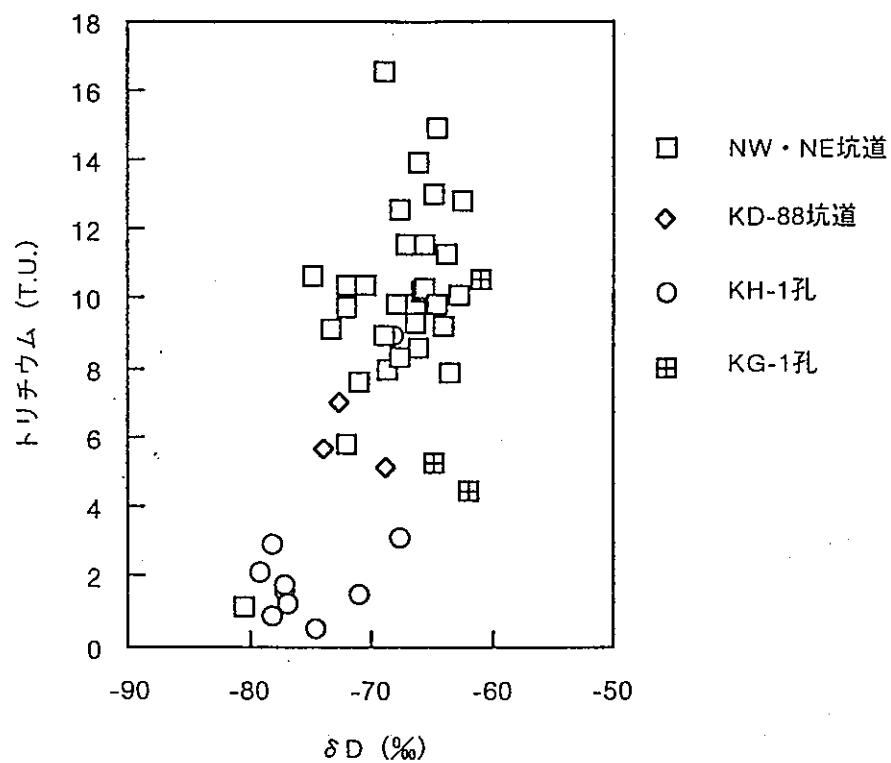


図-7-7 NW・NE・KD-88坑道、KH-1孔およびKG-1孔の地下水の δD -トリチウム図（長ほか、1991、1993）

7. 2 水／岩石反応試験

地下水の水質形成機構を明らかにすることを目的として、室内において水／岩石反応試験を行なった。

7. 2. 1 試験方法

表-7-4に試験に用いた試料の化学分析およびX線分析結果を示す。これらは、550m坑道および250mレベル坑道から採取した。

試験液としては、蒸留水およびCO₂飽和水（蒸留水に常圧でCO₂を吹き込み飽和させた溶液）を用いた。試験手順は以下の通りである。

- ①試料を110°Cで5時間乾燥させ、30メッシュ以下に粉碎する。
- ②試料10gを500ccの試験液（蒸留水およびCO₂飽和水）に投入し、25°Cの恒温水槽中で50往復/minの条件で振とう（反応）させる。
- ③反応後、1日、3日、9日、18日に試料を取り出し、5Aの濾紙で濾過する。
- ④濾過後の溶液のpH、電気伝導度の測定

溶液のイオン濃度(Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, Cl⁻, HCO₃⁻, SiO₂)の測定

7. 2. 2 試験結果

図-7-8に、試験液として蒸留水を用いた場合の浸出液のpHおよび電気伝導度の経時変化を示す。浸出液のpHは、9.4前後（ただし、鉱石の場合はpH=8前後）ではほぼ一定となる。一方、浸出液の電気伝導度は試験後1日で増大し、その後ほぼ一定となる。ただし鉱石の場合の電気伝導度は、試験期間中、増大しつづけた。

図-7-9に試験液として蒸留水を用いた場合の浸出液のヘキサダイヤグラムを示す。浸出液の溶存成分濃度は、鉱石の場合が最も増大する。

図-7-10に試験液としてCO₂飽和水を用いた場合の浸出液のpHおよび電気伝導度の経時変化を示す。浸出液のpHは5～6.5程度ではほぼ一定となる。一方、浸出液の電気伝導度は石灰岩の場合が最も著しく増大し、約1200μS/cmに達する。

図-7-11に試験液としてCO₂飽和水を用いた場合の浸出液のヘキサダイヤグラムを示す。浸出液は、全てCa²⁺-HCO₃⁻型を示す。

浸出液の溶存成分濃度について、試験液として蒸留水およびCO₂飽和水を用いた場合を比較すると、CO₂飽和水の場合の方が蒸留水の場合に比べて溶存成分濃度が著しく増大する傾向が認められる。

以上の試験結果より、①水／岩石反応における岩石の種類の違いとその岩石から溶出する成分が地下水の水質決定に影響を与えること、②試験液としてCO₂飽和水を用いた場合の方が、蒸留水の場合よりも浸出液の溶存成分濃度が増大することが認められた。

7. 2. 3 成果と課題

地下水の水質形成機構を実験的に把握するため、水／岩石反応試験を実施した。その結果、地下水の水質の特性は、岩石からの成分の溶出が大きく関与することを定性的に把握できた。また、溶液中のCO₂が水／岩石反応に与える影響に関する知見も得られた。

しかしながら、天然環境下での地下水の水質形成過程では、様々なタイプの地下水との混合やイオン交換反応による水質の変化なども考慮する必要がある。今後は、これらの要因による影響を把握するための室内試験を行いデータを蓄積していくことが重要である。

表—7—4 化学分析およびX線分析結果（長ほか、1991）

試料番号	岩石名	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	FeO (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	MnO (%)	H ₂ O ⁺ (%)	H ₂ O ⁻ (%)	T.S. (%)	TOTAL (%)
90-GY-01	栗橋花崗閃綠岩	62.2	16.2	0.99	4.67	0.52	5.52	2.39	3.36	1.80	0.13	0.12	1.29	0.31	0.02	99.52
90-GY-02	ざくろ石スカルン	35.8	8.87	15.5	2.15	0.18	31.4	0.69	0.02	0.22	0.12	0.57	0.57	0.12	0.43	96.64
90-GY-03	蟹岳閃綠岩	53.3	17.4	2.88	6.32	0.07	7.94	4.51	2.48	2.64	0.27	0.16	0.16	0.18	0.01	99.53
90-GY-04	甲子層頁岩	55.3	10.4	0.08	11.6	0.77	16.3	2.90	0.58	0.07	0.12	0.00	0.00	0.12	0.02	98.61
90-GY-05	鉱石（日峰鉱床）	31.0	1.75	22.4*	—	0.12	12.5	4.98	0.00	0.02	0.19	0.55	0.55	0.28	13.7	88.37
90-GY-06	石灰岩	0.21	0.05	0.09*	—	0.00	55.4	0.70	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.10	0.00	56.76

* TOTAL のFeをFe₂O₃として示す

試料番号	岩石名	X線分析結果
90-GY-01	栗橋花崗閃綠岩	石英○, 斜長石○, 角閃石△, 雲母類△, 緑泥石+
90-GY-02	ざくろ石スカルン	ざくろ石○, 方解石+, 石英+
90-GY-03	蟹岳閃綠岩	斜長石○, 角閃石○, 雲母類○, 石英○
90-GY-04	甲子層頁岩	石英○, 斜長石△, 磁鐵鉱△, 石英+, アンケライト+
90-GY-05	鉱石（日峰鉱床）	黃銅鉱○, 磁鐵鉄鉱△, 磁鐵鉱△
90-GY-06	石灰岩	石英○, 斜長石○, 緑泥石△, 溶沸石+, 束沸石+, 雲母類+

構成鉱物の量比：○（大量），○（中量），△（少量），+（微量）

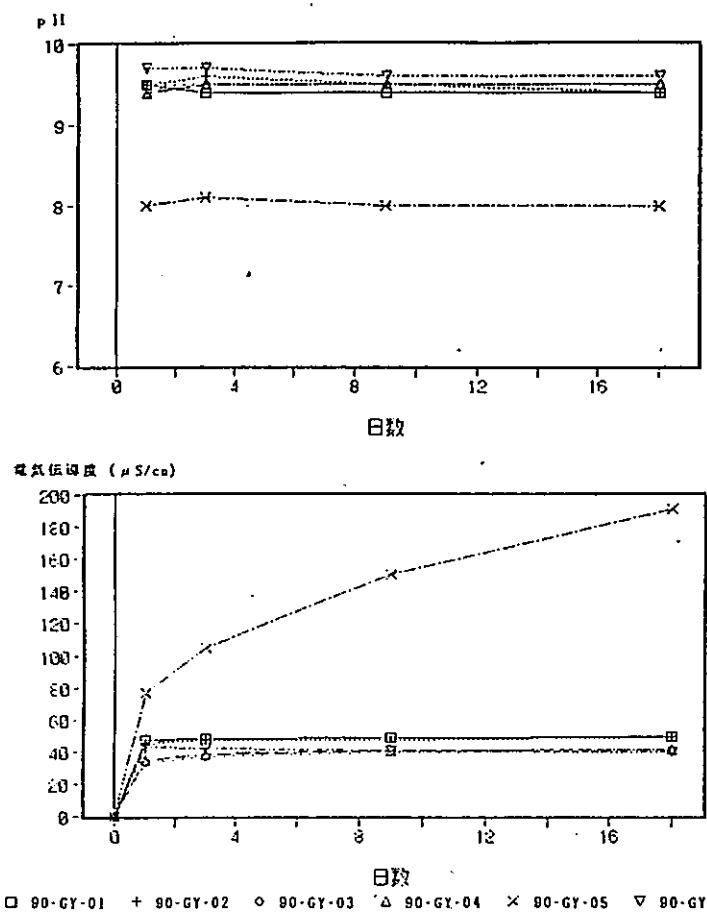


図-7-8 浸出液のpHおよび電気伝導度の経時変化（蒸留水の場合）
(長ほか, 1991)

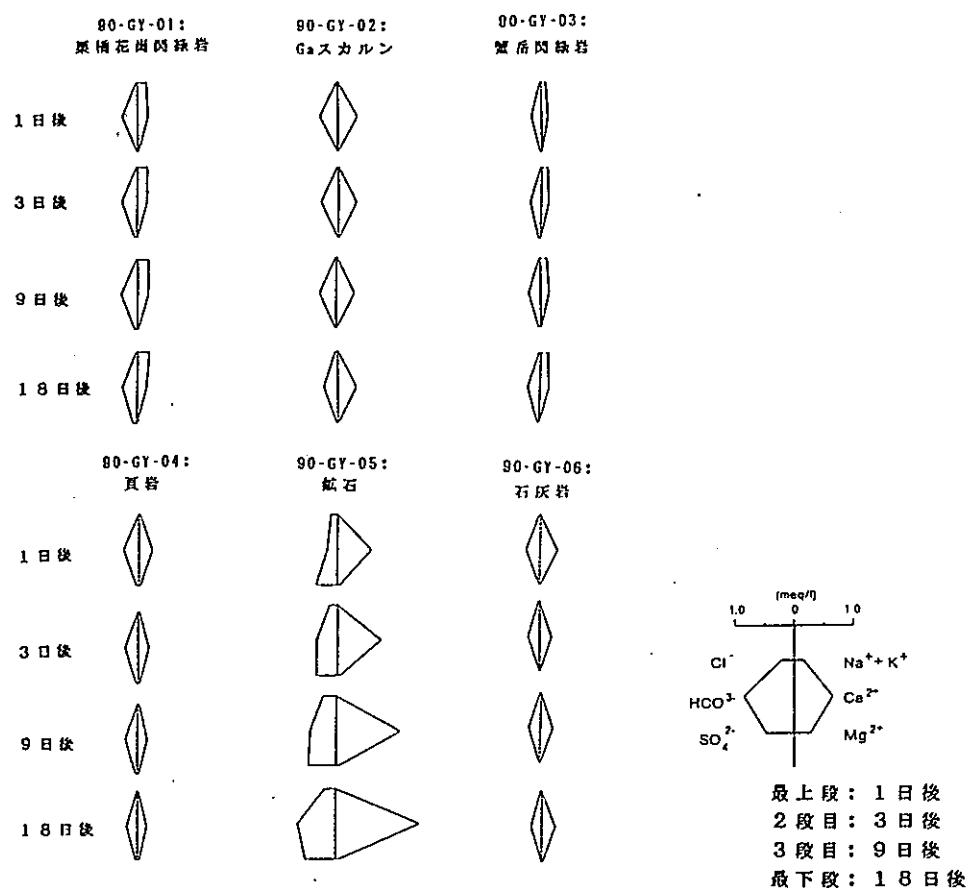


図-7-9 浸出液のヘキサダイヤグラム（蒸留水の場合）
(長ほか, 1991)

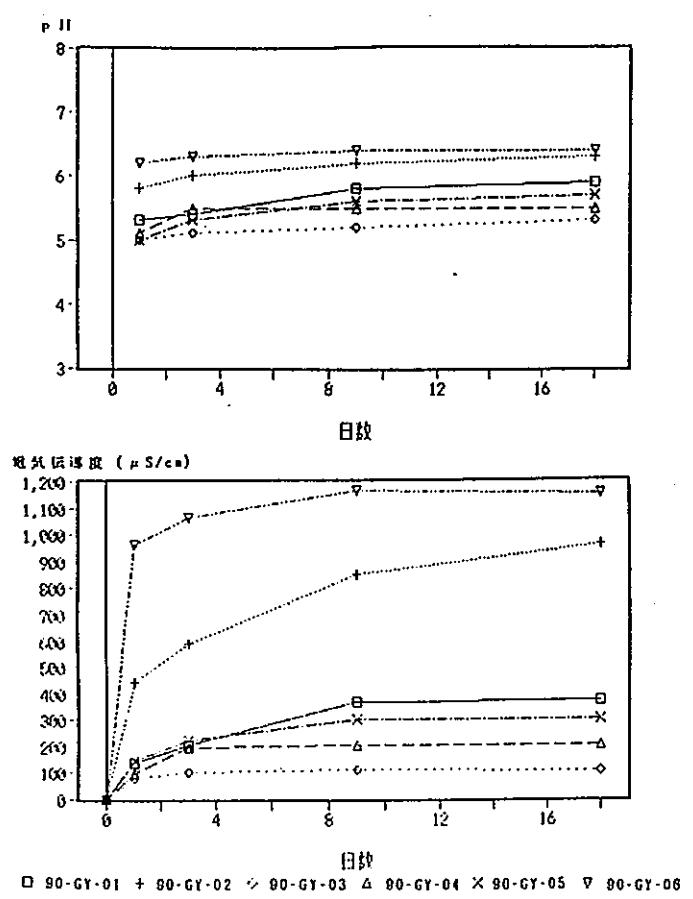


図-7-10 浸出液のpHおよび電気伝導度の経時変化(CO_2 飽和水の場合)
(長ほか, 1991)

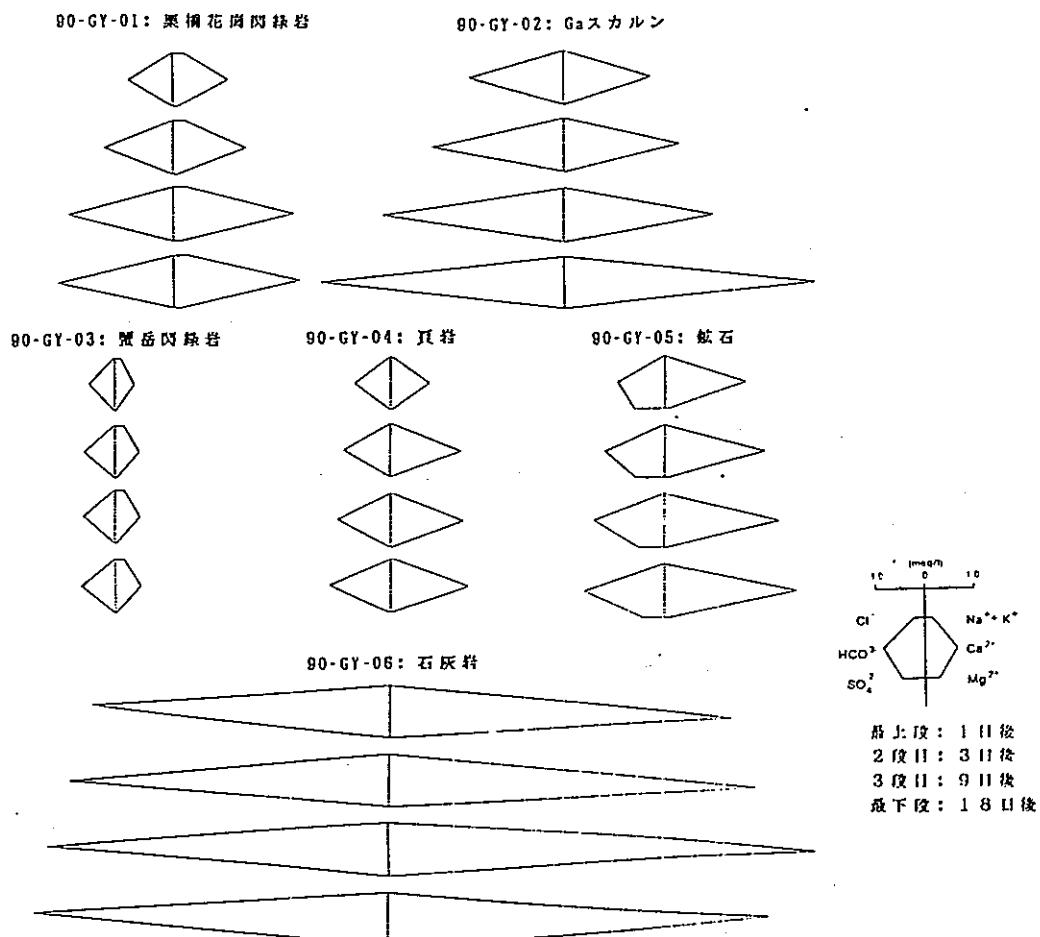


図-7-11 浸出液のヘキサダイヤグラム(CO_2 飽和水の場合)
(長ほか, 1991)

8. 岩盤力学

8. 1 初期地圧測定

8. 1. 1 測定方法

岩盤応力の測定方法にはいくつかの種類があるが、そのうち最も広く用いられている方法のひとつは応力解放法である。応力解放法には孔底ひずみ法や孔径変化法などの方法がある。本測定では、サイト近傍で割れ目からの湧水が認められたため、ひずみゲージが試錐孔内の湧水と接触しない構造を持つ3成分ボアホールゲージ（鈴木ほか、1968）を用いる孔径変化法を利用した。測定は、NW坑道のKH-1孔掘削場所周辺で、異なる3方向に掘削した試錐孔において実施した（図-8-1）。測定および解析の流れを図-8-2に示す。

8. 1. 2 測定結果

測定結果より計算した三次元応力状態を表-8-1に示す。鉛直応力は約9MPa、水平面内では、南北方向で約18MPa、東西方向で約15MPaである。また、これから換算した主応力の値は、最大および中間主応力がほぼ等しく、最小主応力の約3倍である。図-8-3に主応力の方向をステレオ投影であらわした。最大主応力の方位はN25°E、水平となす角度が2°である。

なお、既往の文献による東北日本の最大水平圧縮応力と今回の測定結果を重ね合わせると、図-8-4となる。

8. 1. 3 成果と課題

第1フェーズでは原位置試験場付近の岩盤の応力状態のデータが取得された。しかし、表-8-1に示した応力値の標準偏差が大きいことから測定結果の信頼性が低い。また、図-8-4に示したとおり、東北日本の最大水平圧縮応力の方向と測定結果が異なる。この原因には、坑道から比較的近い位置で計測したものがあるため、坑道の影響を受けている可能性があること、3本の試錐孔の位置が10~20mと離れたため、異なる地質状況において測定した可能性があることなどが考えられる。今後、複数の場所で複数の手法により応力を測定し、評価する必要がある。

表-8-1 三次元応力状態（浜辺ほか、1989）

a) 上下方向をZ軸、南北方向をy軸とした直交座標での応力状態

σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_z (MPa)	τ_{xy} (MPa)	τ_{yz} (MPa)	τ_{zx} (MPa)
15.25 (7.95)	18.22 (6.02)	8.88 (4.28)	2.01 (3.25)	2.37 (6.75)	4.23 (2.77)

() 内の値は標準偏差

b) 同上・主応力表示

主応力 (MPa)		主方向(各軸となす角)		
		x (°)	y (°)	z (°)
最大主応力 σ_1	19.24	65	25	92
中間主応力 σ_2	17.09	142	70	120
最小主応力 σ_3	6.03	63	104	150

測定深度

孔名	No.	孔口からの距離 (m)
KS-3 (垂直孔)	1	10.1
	2	12.2
	3	13.3
	4	14.7
KS-2 (水平孔)	1	6.6
	2	7.3
	3	8.2
	4	10.7
KS-5 (水平孔)	1	4.9
	2	5.6
	3	7.3

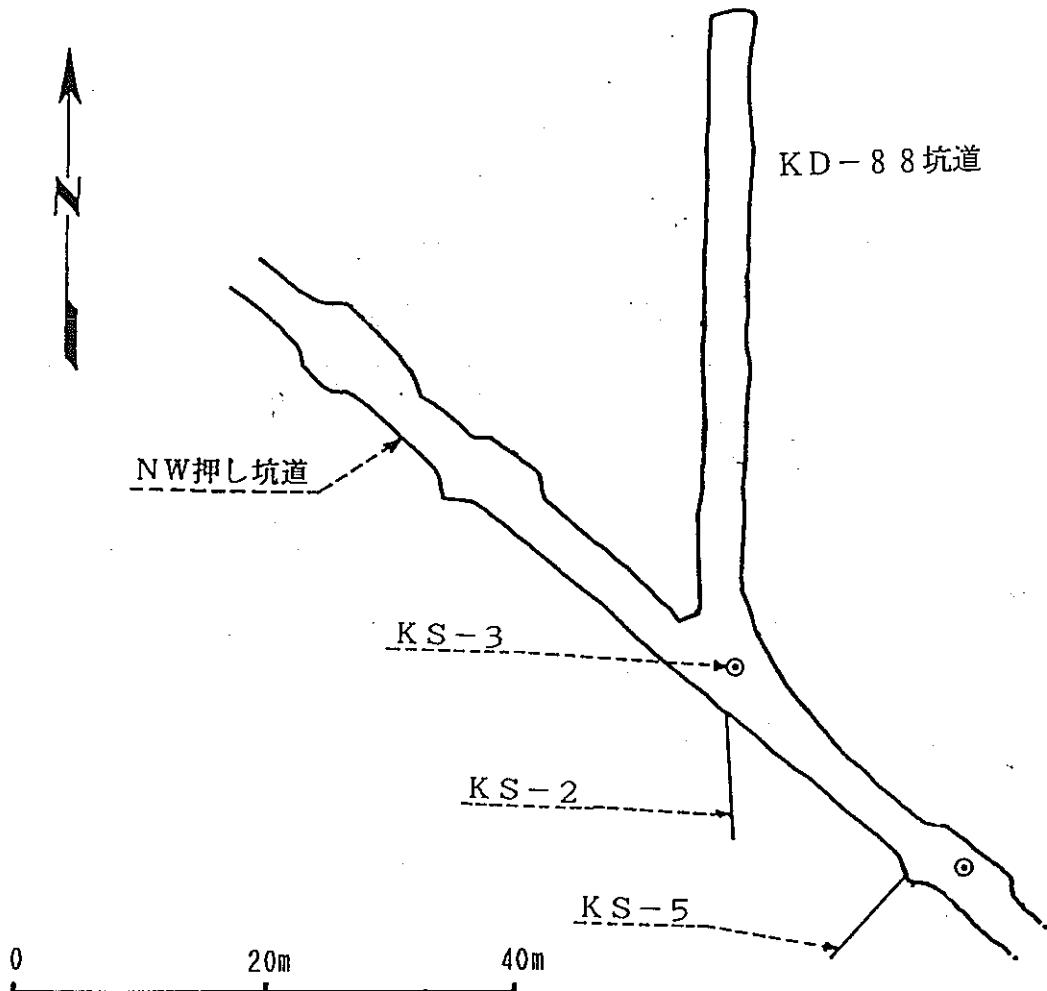


図-8-1 初期地圧の測定位置

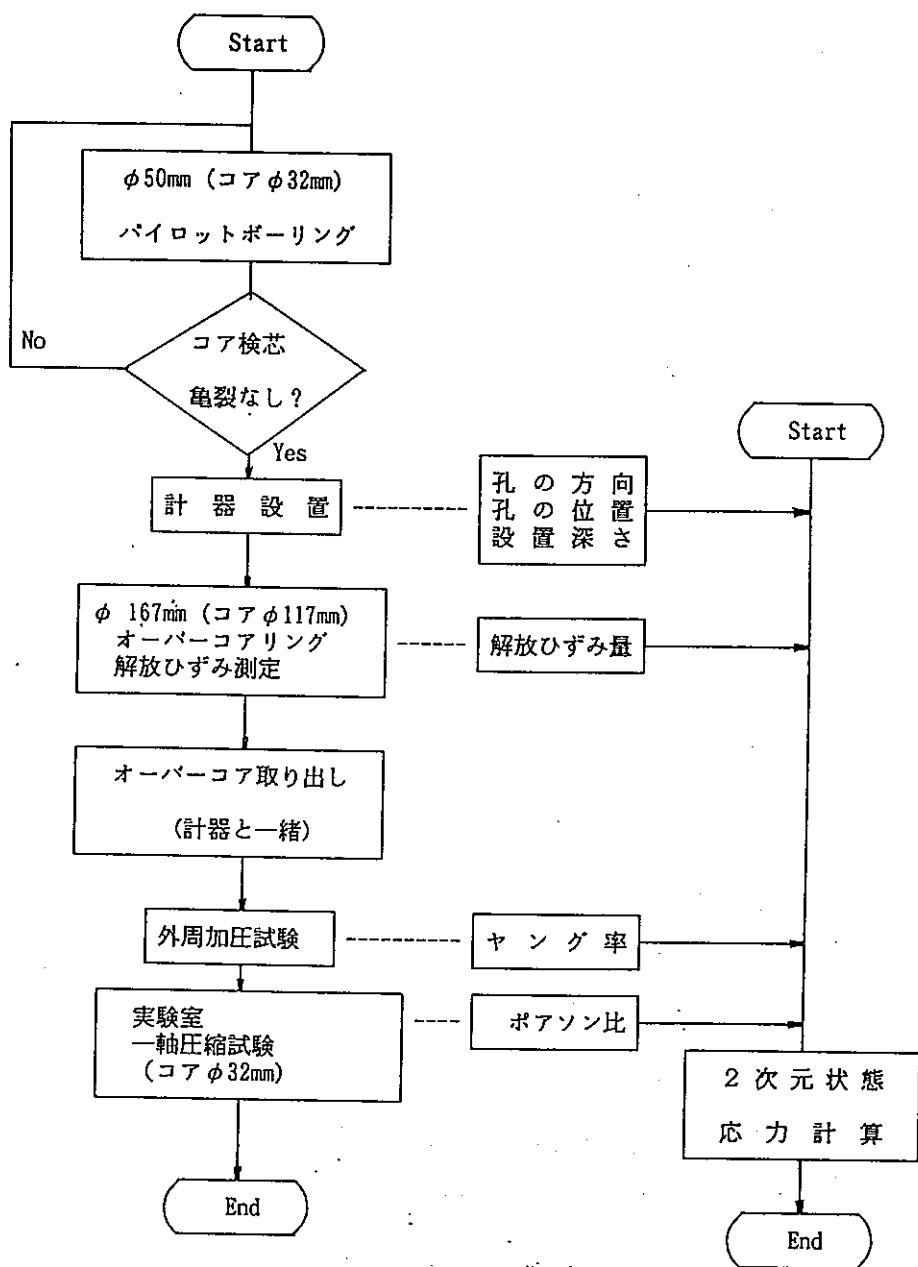


図-8-2 初期地圧の測定および解析の流れ（浜辺ほか、1989）

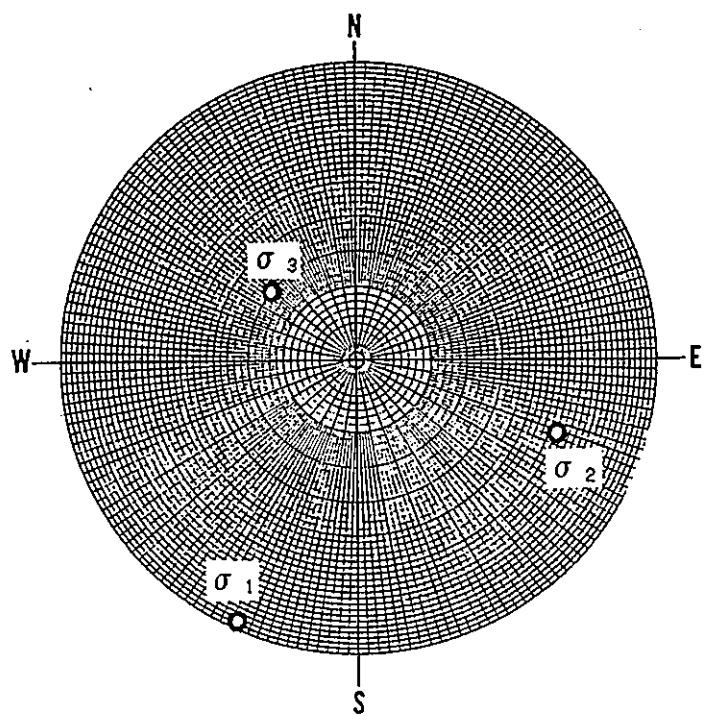


図-8-3 三次元応力状態のステレオネット図（下半球投影）（浜辺ほか、1989）

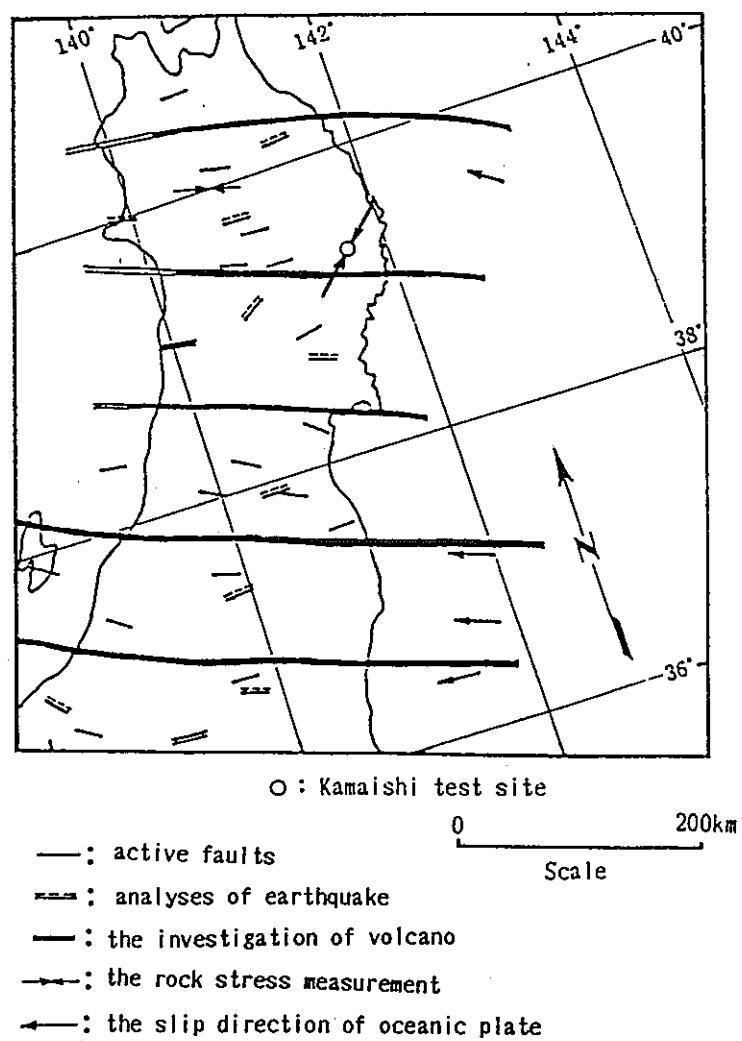


図-8-4 東北日本の最大水平圧縮応力と測定結果（浜辺ほか、1989）

8. 2 挖削影響試験

8. 2. 1 試験方法

本試験では、KD-8 8 坑道とKD-8 9 坑道の2本の坑道を掘削し、掘削中には周辺岩盤の地圧およびひずみの変化を、掘削前後に透水性および変形性を計測した。掘削工法と形状は、KD-8 8 坑道が通常の発破工法で、幅3m、高さ2.5mの馬蹄形、KD-8 9 坑道がスムースプラスティング工法で、幅5.2m、高さ3.2mの長方形断面である。掘削の方向は、KD-8 8 坑道は卓越割れ目に直交する南北方向、KD-8 9 坑道は卓越割れ目にほとんど平行である東北東方向である（図-8-5）。

地圧の計測は楔式地圧計を用いて実施した。地圧計はどちらの坑道においても壁面から1mと2.5m離れた位置に設置した。ひずみの変化は3成分埋設ひずみ計を用いて実施した。ひずみ計はどちらの坑道も壁面から1m離れた位置に設置した。透水性の変化は低圧ルジオン試験で、変形性は孔内載荷試験によって調べた。計測位置を図-8-6に示す。

8. 2. 2 試験結果

（1）KD-8 8 坑道における掘削影響試験

坑道掘削に先立ち、FEMによる軸対称弾塑性解析を行い、掘削に伴う地圧変化を予測した。初期条件として6.5MPaの等方応力と静水圧を与え、入力データの強度や変形係数などは寸法効果を考慮してコアの室内試験結果の約5分の1の値を用いた。

解析の結果は、塑性域は発生せず、掘削に伴う周辺の岩盤は弾性的に挙動していることが明らかとなった。坑道壁面から1m離れた位置での掘削に伴う応力の変化を図-8-7に示す。

測定結果を図-8-8に示す。鉛直方向の地圧（図-8-7の σ_θ に対応）は切羽通過後に圧縮状態となり安定する。切羽通過後に鉛直成分のひずみは圧縮側に変化し、坑道と直交方向のひずみは引張側に変化して安定する。これらの傾向は、数値解析の結果とよく一致しており、弾性挙動に対応するものである。定性的にはKD-8 8 坑道の場合は、壁面から1m程度離れた岩盤は弾性的な挙動を示したことが分かった。

坑道掘削前後のKE-3孔での透水試験の結果を表-8-2と図-8-9に示す。坑道壁面から約2mの範囲内では掘削前に比べ掘削後のはうが一桁近く透水係数の値が小さくなっている。これは、坑道掘削によって周辺岩盤に割れ目の発生や開口が起こらず、応力集中によって割れ目の一部が閉じることによって透水係数が小さくなったと解釈できる。また、坑道掘削前後のKE-3孔における孔内載荷試験で得られた変形係数を表-8-3と図-8-10に示す。壁面から1.2~13mの範囲では、掘削前後で明瞭な変化は見られず、塑性域が生じていないことを示す。

（2）KD-8 9 坑道における掘削影響試験

本坑道の断面形状は長方形であるため、事前解析は長方形断面による平面二次元弾塑性解析とした。初期応力としては、前項で述べた初期地圧測定の結果が得られたことから、鉛直方向の応力成分を9MPa、水平方向のそれを17MPaとした。入力データはKD-8 8 坑道の場合（図-8-7）と同一である。図-8-11に解析結果を示す。解析結果は、壁面のごく一部に塑性域（メッシュ図の黒色部）が発生するが、全体的には弾性的な挙動

を示す。鉛直方向の応力成分の分布は、坑道から離れるにつれて、ある距離で極大値をとった後に、初期応力値へと漸移する。

実測の結果、鉛直方向の地圧成分は、KD-88坑道と同様、壁面から1m、2.5mの両位置とも切羽通過後には圧縮状態となり安定した。一方、ひずみの変化は図-6-12に示すように、鉛直成分（図-8-11の鉛直方向応力に相当）が切羽通過後、引張り側となり安定した。これは、ひずみ変化の計測位置が壁面に近く、解析図（図-8-11）の壁面近傍の引張り側の領域に対応した変化が現れたとみなせれば、弾性的な挙動と解釈できるし、岩盤の一部が破壊して応力緩和に伴う伸びを捉えたとも考えられる。

KE-6、7両孔での坑道掘削前後の透水係数の変化を、表-8-4と図-8-13に示す。掘削前より掘削後の方が透水係数が小さくなつたところが多いが、壁面から1m離れた2区間では、掘削後に一桁大きい値となった。また、同試錐孔での掘削前後の変形係数の変化を表-8-5と図-8-14に示す。掘削前に比べて掘削後はわずかに変形係数が小さくなる傾向を示すが、透水係数の大きくなつた2区間では、変形係数も一桁小さくなっている。このことから、この2区間では岩盤の破壊ないし割れ目の開口等が発生したと考えられる。したがって、KD-89坑道では全体的には弾性的に挙動しているが、壁面から1m程度離れた範囲では、岩盤内の割れ目等の弱部で破壊し、これに伴うゆるみが発生したことが推定される。

8. 2. 3 成果と課題

2本の坑道を掘削し、掘削に伴う地圧、ひずみ、透水性、変形性の変化を調べた。事前予測解析と実測結果とを比較することにより、掘削に伴う周辺岩盤はほぼ弾性的な挙動をしていることが分かった。

しかしながら、以下に示す課題が残された。まず、2本の坑道の掘削工法を変えたものの、工法による掘削影響の違いを見るまでには至らなかった。これは、2本の坑道の断面が異なることと、卓越割れ目の走向に対する掘削方向が異なったことによる。また、透水性の変化については、不飽和域での測定であった可能性があり、得られた透水係数の値の信頼性が低いと考えられる。

今後、掘削に伴う周辺岩盤の挙動を定量的に評価するためには、岩盤の応力状態、力学特性、水理特性を正確に把握する必要がある。そのために、調査機器や手法、試験のレイアウトなどを十分に検討することが必要である。また、花崗岩の特徴である割れ目の分布と特性の把握、モデル化手法の確立、その他の特性との関連性についての調査が必要である。

表-8-2 KD-88坑道掘削前後のKE-3孔での透水係数の変化（福田、1990）

No.	試験区間 (m)	掘 削 前		掘 削 後	
		透水係数 (cm/sec)	間隙水圧 (kgf/cm ²)	透水係数 (cm/sec)	間隙水圧 (kgf/cm ²)
B-1	22.20～23.00	2.41×10^{-8}	0.93	4.97×10^{-9}	0
B-2	22.40～22.20	1.63×10^{-7}	1.27	4.41×10^{-8}	0.69
B-3	20.60～21.40	2.21×10^{-7}	1.48	2.28×10^{-7}	0.32
B-4	19.80～20.60	1.25×10^{-7}	1.41	1.67×10^{-7}	0.19
B-5	10.50～11.30	6.21×10^{-8}	2.20	1.42×10^{-6}	0.09
B-6	7.90～9.90	1.60×10^{-6}	0.46	8.80×10^{-7}	0.13

※試験区間は測定孔の孔口からの距離を示す。坑道壁面までの距離は24m。

表-8-3 KD-88坑道掘削前後のKE-3孔での変形係数の変化（福田、1990）

No.	試験区間	変形係数 (kgf/cm ²)	
		掘削前	掘削後
D-1	22.60～22.85	3.80×10^5	9.78×10^4
D-2	21.90～22.15	5.61×10^4	2.32×10^4
D-3	20.95～21.20	5.88×10^4	1.06×10^5
D-4	19.85～20.10	1.38×10^5	7.94×10^4
D-5	11.00～11.25	3.33×10^5	1.30×10^5

※載荷荷重レベル50～80kgf/cm² 付近での変形係数

表-8-4 KD-89坑道掘削前後の透水係数の変化(福田、1990)

No.	試験区間(m)	掘削前		掘削後	
		透水係数 (cm/sec)	間隙水圧 (kgf/cm ²)	透水係数 (cm/sec)	間隙水圧 (kgf/cm ²)
KE-6-1	13.55~14.15	8.82×10^{-9}	0.21	2.51×10^{-8}	0.13
KE-6-2	12.65~13.25	3.42×10^{-7}	1.51	6.95×10^{-8}	0.21
KE-6-3	11.55~12.15	1.15×10^{-8}	0.70	1.05×10^{-8}	0.01
KE-6-4	10.60~11.20	5.49×10^{-6}	1.57	1.56×10^{-6}	0.12
KE-6-5	9.20~9.80	1.08×10^{-9}	0.01	7.15×10^{-8}	0.00
KE-7-1	14.40~15.00	2.27×10^{-7}	0.39	3.18×10^{-8}	1.50
KE-7-2	12.90~13.50	2.98×10^{-9}	0.03	2.98×10^{-9}	0.07
KE-7-3	12.10~12.70	2.40×10^{-5}	2.51	1.00×10^{-6}	0.02
KE-7-4	10.60~11.20	2.57×10^{-9}	0.18	2.17×10^{-9}	0.10
KE-7-5	9.80~10.40	2.85×10^{-9}	1.25	2.15×10^{-9}	0.07

表-8-5 KD-89坑道掘削前後の変形係数の変化(福田、1990)

No.	試験区間	変形係数 (kgf/cm ²)	
		掘削前	掘削後
KE-6-1	9.50~9.75	2.21×10^5	4.95×10^4
KE-6-2	10.55~10.80	5.85×10^4	1.40×10^4
KE-6-3	11.70~11.95	2.43×10^4	1.85×10^4
KE-6-4	12.75~13.00	1.90×10^4	1.56×10^4
KE-6-5	13.55~13.80	2.83×10^5	1.41×10^4
KE-7-1	10.10~10.35	3.97×10^4	1.70×10^4
KE-7-2	10.90~11.15	3.73×10^4	1.91×10^4
KE-7-3	12.10~12.35	2.10×10^4	1.69×10^4
KE-7-4	13.25~13.50	3.20×10^4	2.33×10^4
KE-7-5	14.49~14.74	3.93×10^4	1.91×10^4

※載荷荷重レベル50~80kgf/cm²付近での変形係数

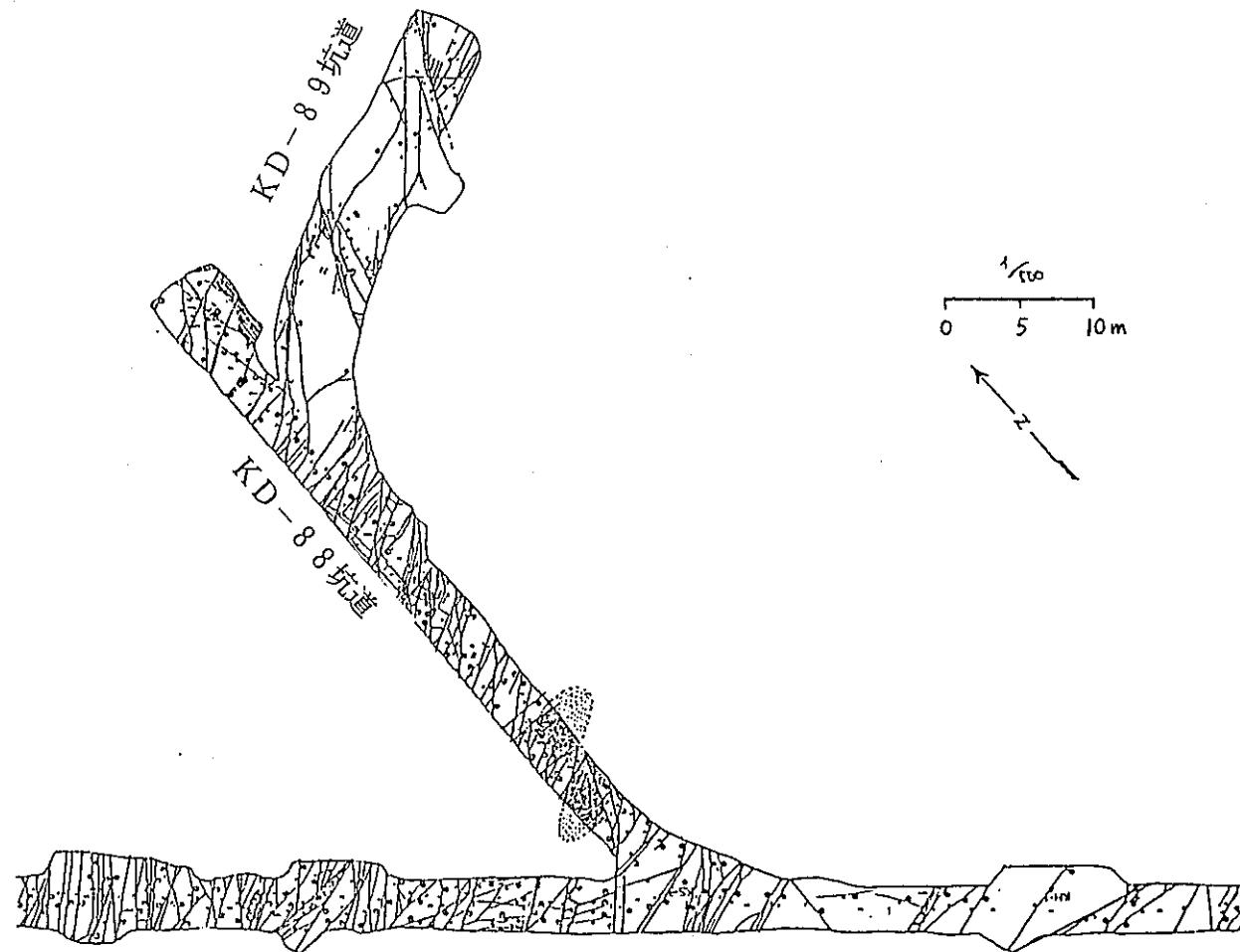


図-8-5 KD-8 8 坑道およびKD-8 9 坑道の割れ目分布（福田、1990）

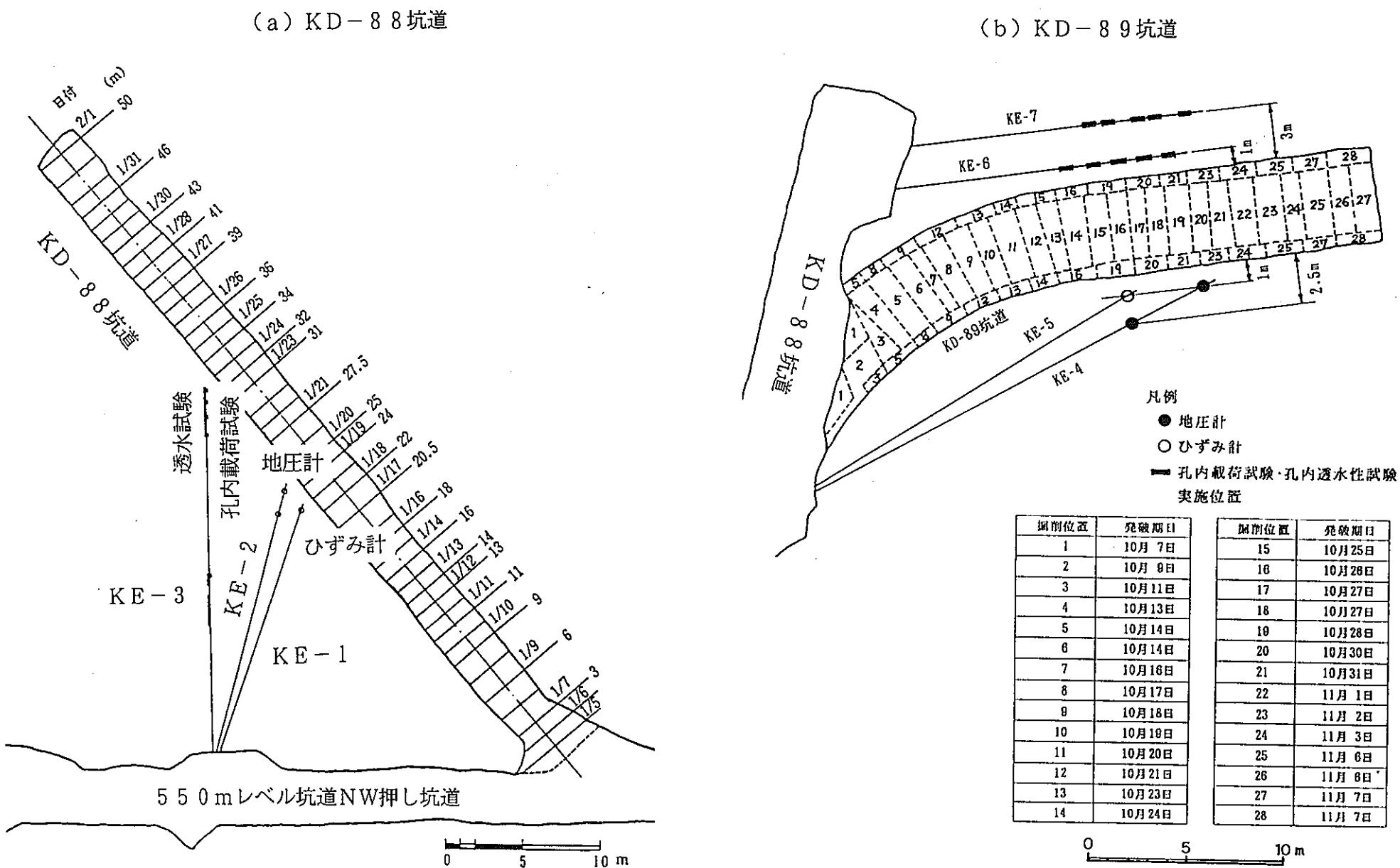


図-8-6 掘削影響試験のレイアウト (福田、1990)

使用した岩盤の材料特性パラメータ

ヤング率	$1.2 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
ポアソン比	0.2
内部摩擦角	55°
粘着力	47 kgf/cm^2
引張強度	21 kgf/cm^2
残留内部摩擦角	55°
残留粘着力	5 kgf/cm^2

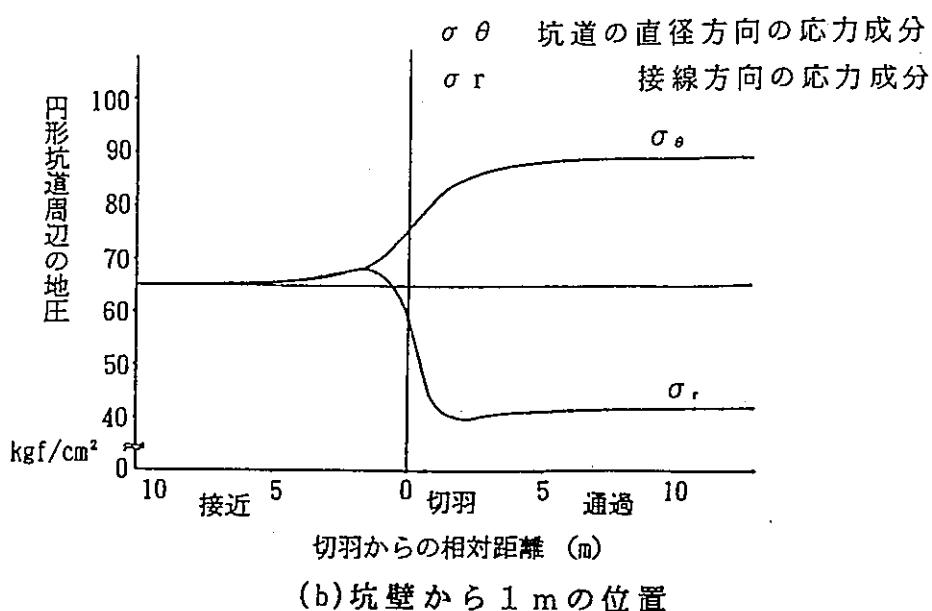
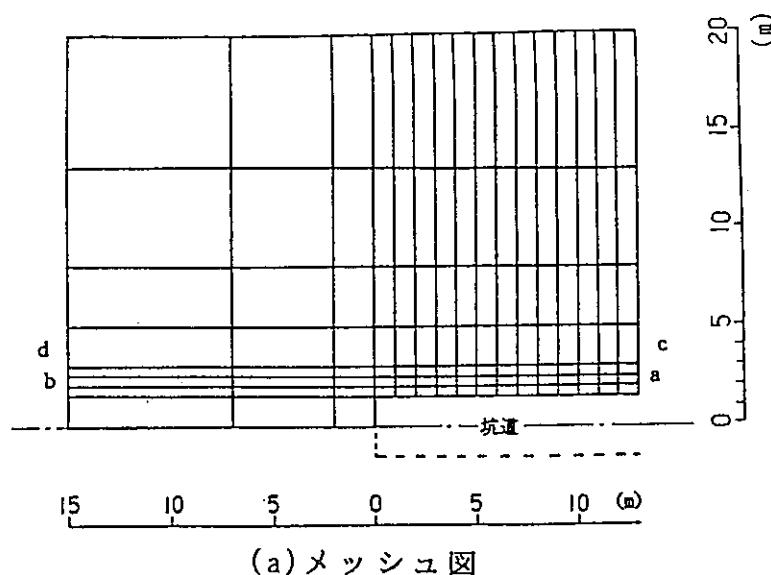


図-8-7 KD-88坑道を円形坑道と見なした場合の応力分布予測解析結果
(福田、1990)

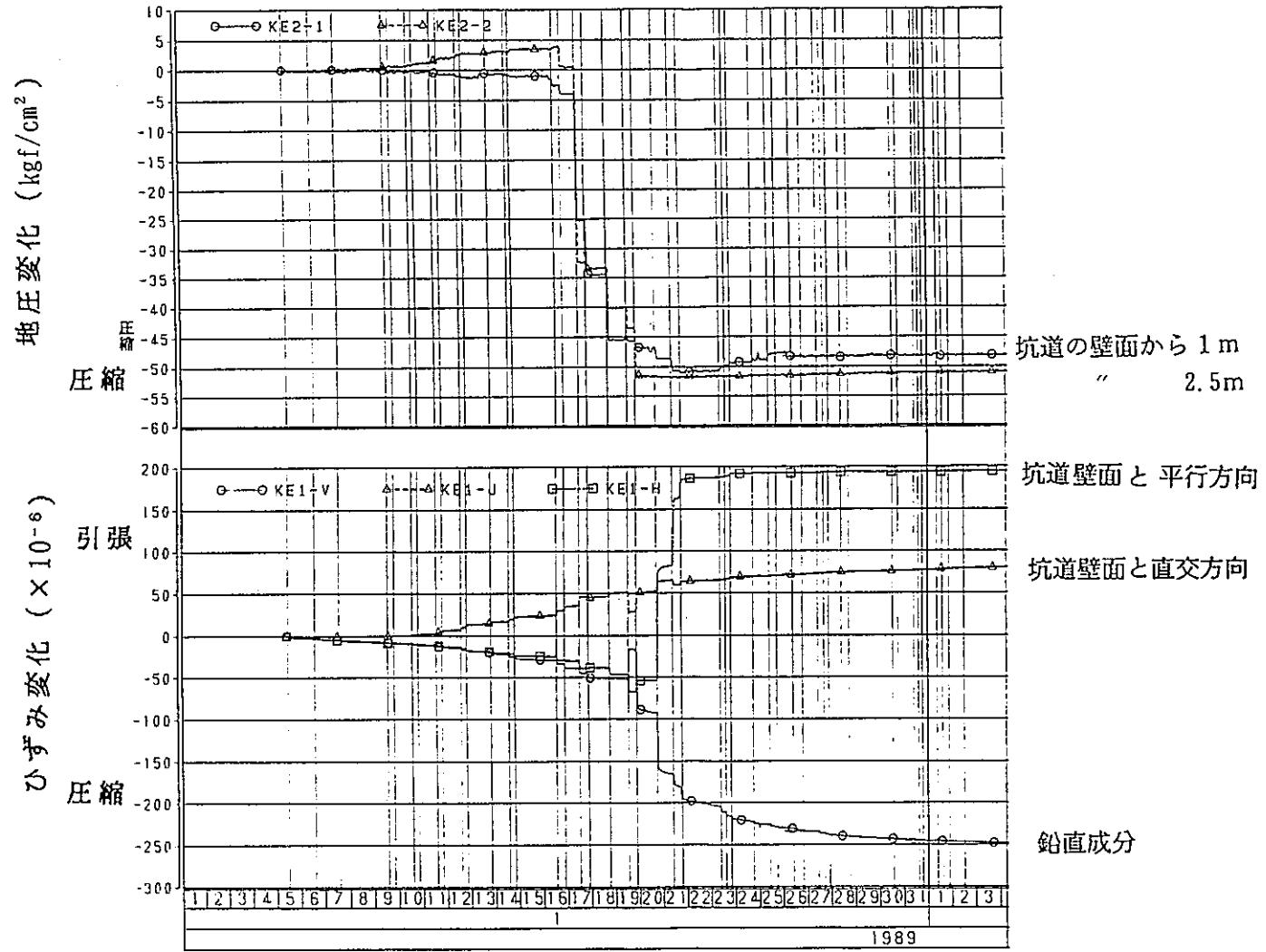


図-8-8 KD-8 8坑道掘削に伴う地圧変化とひずみ変化（福田、1990）

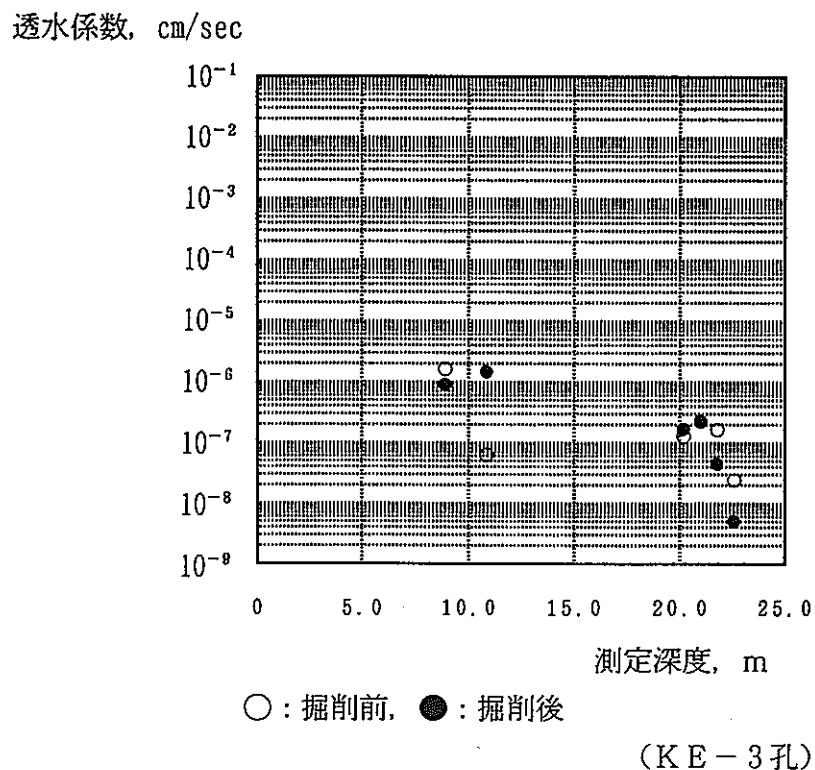


図-8-9 KD-88坑道掘削前後のKE-3孔での透水係数の変化
(福田、1990)

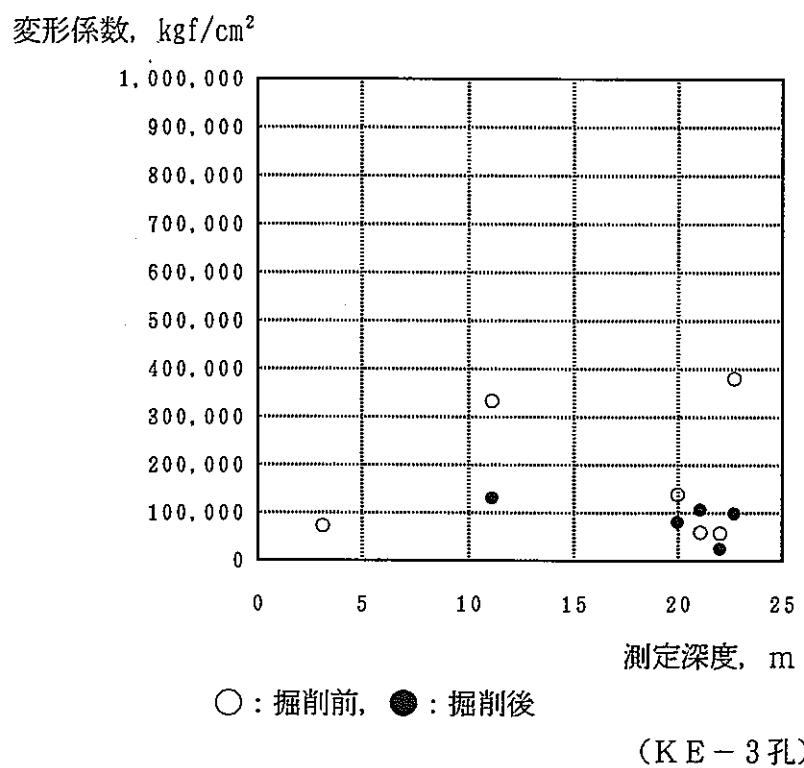


図-8-10 KD-88坑道掘削前後のKE-3孔での変形係数の変化
(福田、1990)

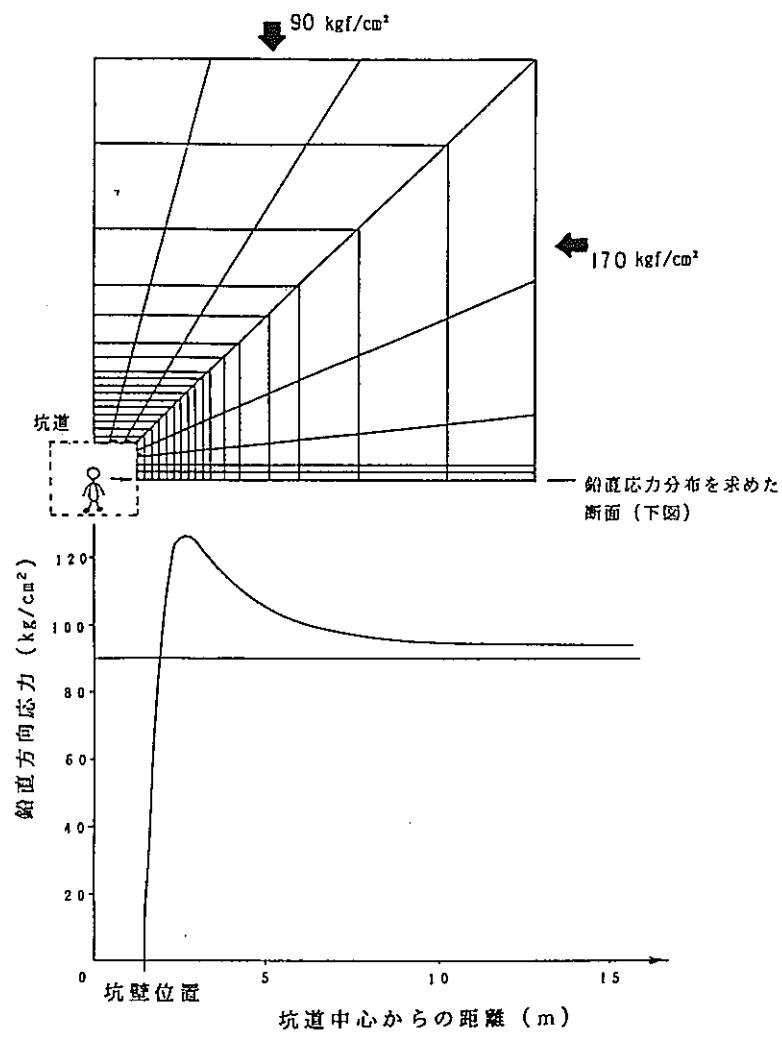


図-8-11 KD-8 9坑道の応力分布解析結果（福田、1990）

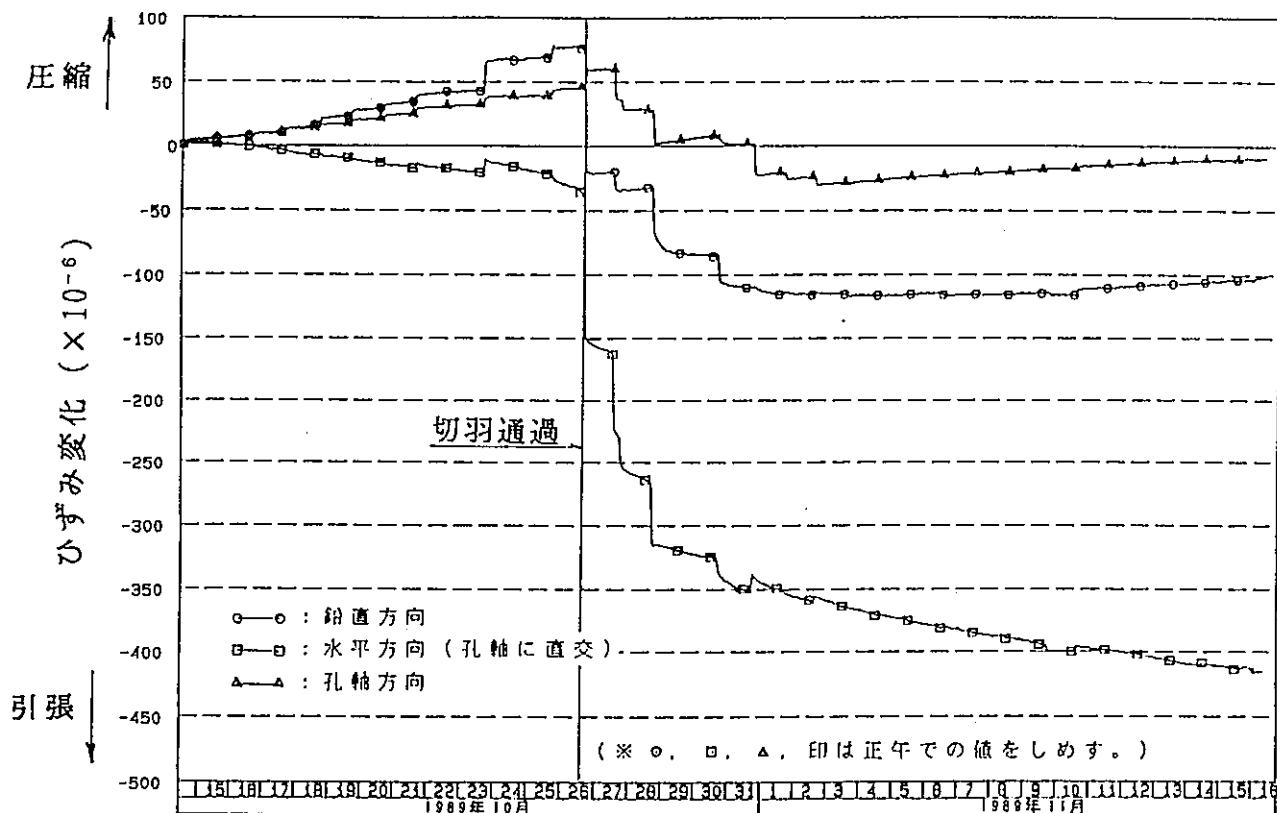
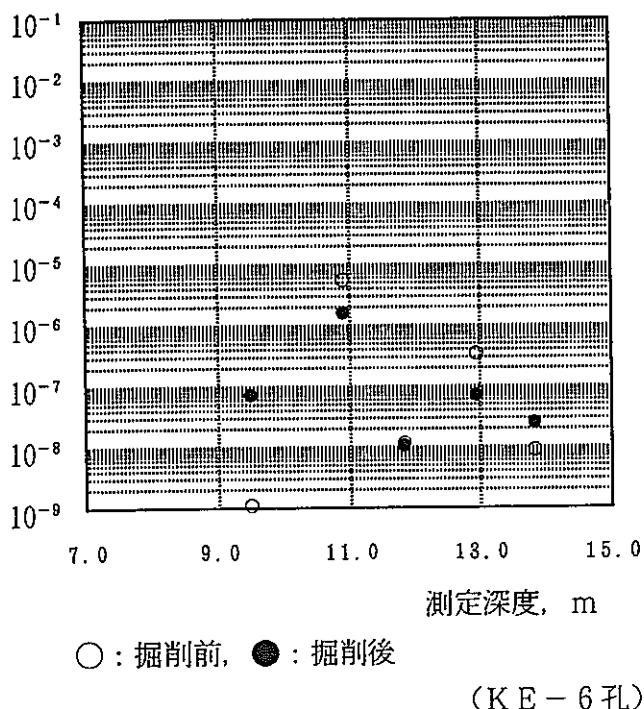


図-8-12 KD-8 9坑道掘削に伴うひずみ変化（福田、1990）

透水係数, cm/sec



透水係数, cm/sec

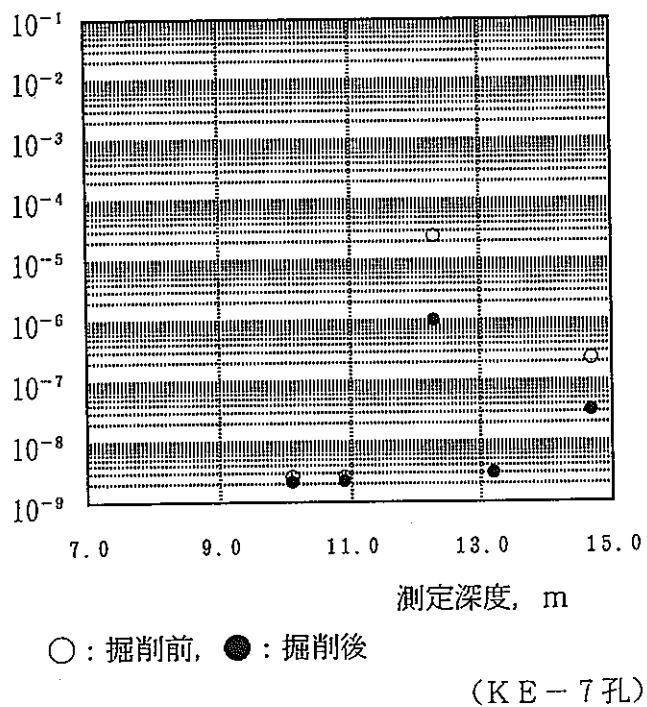
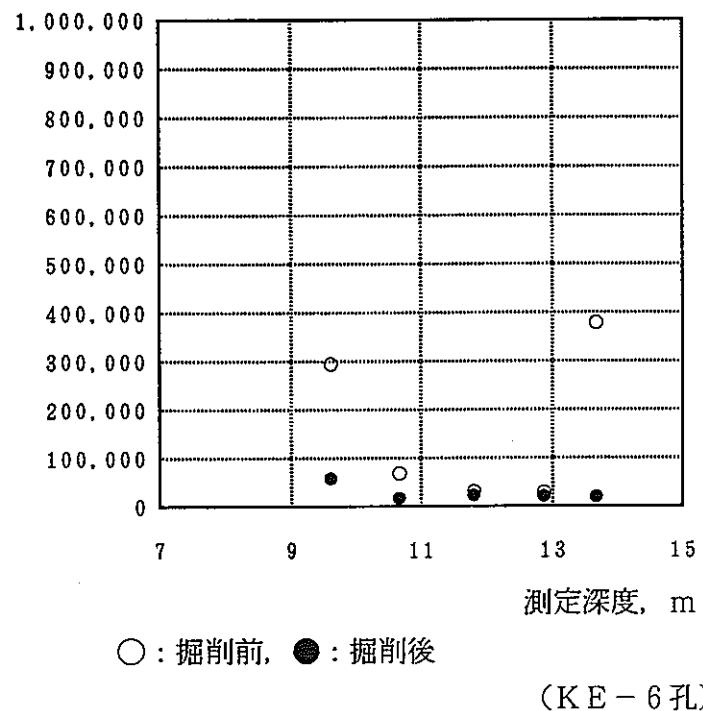


図-8-13 KD-89坑道掘削前後の透水係数の変化（福田、1990）

変形係数, kgf/cm²



変形係数, kgf/cm²

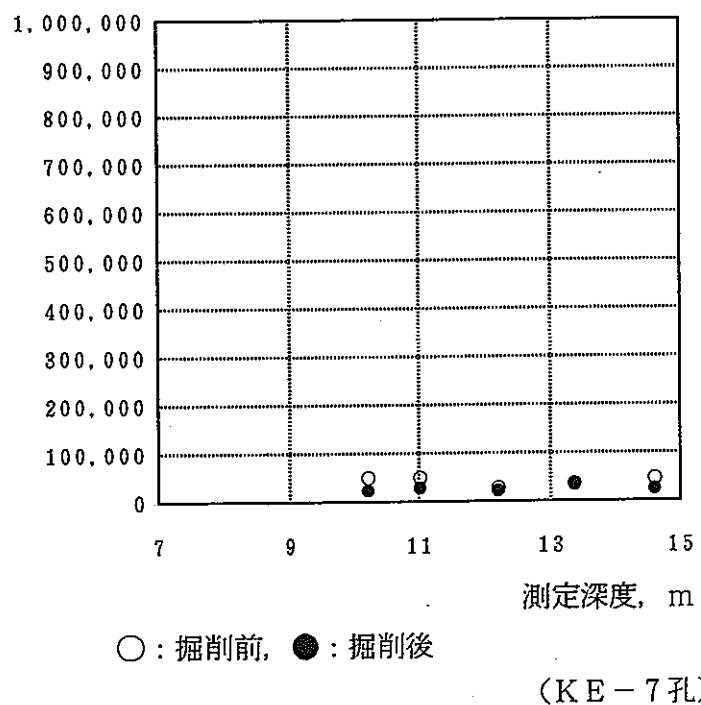


図-8-14 KD-89坑道掘削前後の変形係数の変化(福田、1990)

9. 地震

9. 1 地下深部の地震動観測

9. 1. 1 観測網と観測結果

地下深部の地震動特性を検討するために、坑道内に地震計を設置し地震観測を行っている。地震計は図-9-1に示すとおりK-1からK-6の6カ所に設置されている。地震計は550mレベル坑道で平面的に配置され、また地表から地下約600m(250m レベル坑道)まで上下に配置されている。このうち、K-1からK-4の地震計はNS方向(X), EW方向(Y), 鉛直方向(Z)の3成分観測で、速度帰還型加速度計を使用している。地震データはデジタル方式で収録しており、この方式は分解能が良く、微小地震動から強地震動まで観測できる。トリガーレベルはK-1とK-2のZ成分のAND回路で0.3galである。またK-5とK-6は遅れて設置したもので、各々独立したサーボ型加速度計を用いたデジタル強震計を使用している。トリガーレベルはK-5とK-6の3成分のOR回路で0.5galである。サンプリング周波数は全地震計とともに200Hzである。

観測は平成2年2月から開始し、平成5年1月までに120個の地震が観測された。年平均40個の地震を観測したことになる。これらの地震の震央位置は、気象庁発表によると概ね「岩手県沖」「宮城県沖」が多い。地震規模は、気象庁で発表されない小さなものから最大でM=7.8まで様々である。地表(K-1)での最大加速度は25gal(1993. 1. 15釧路沖地震)であり、大部分の地震は5gal以下と小さい。

9. 1. 2 観測結果とモデル解析との比較

地下深部の地震動評価には、地表と地下の地震動の違いを明らかにしておく必要がある。これまでに観測された120個の地震の内、全地震計が作動した地震は表-9-1に示す16個である。この地震についてK-1の最大加速度を1とした場合の地下低減率を図-9-2に示す。縦軸はK-1の設置深度を0mとした場合の各地震計の設置深度を、また横軸はK-1で観測された3方向の加速度に対するK-5, 2, 6で観測された各方向の加速度比を表す。図-9-2より、加速度は深度140m地点で地表に比べて約5割低減し、深度140mから615mまではあまり変化しないことがわかる。

こうした現象を表現する一般化モデルとして、S波重複反射理論解析を試みた。解析条件を表-9-2に、また解析結果を図-9-3に示す。なお、解析の入力加速度として、地震No. 75(表-9-1)のK-6の観測値(X, Y成分)を用いた。図-9-3より、計算から求めた応答加速度値は水平2成分(X, Y)ともに観測値とほぼ一致している。このことから、S波重複反射理論を用いたモデル解析により地下深部の加速度値を推定することが可能と判断される。

9. 1. 3 成果と課題

地震の観測により地表と地下の地震動(加速度)の違いを実測値で示すことができたとともに、その現象を理論的解析により示しうることが明らかにされた。

しかし、観測波形と理論波形との比較により、さらに詳細に地震動の增幅特性や地下深

部における入力レベルを明らかにするためには、観測点周辺の速度構造、特にS波速度と減衰定数を把握することが不可欠である。また、現状の一次元モデルでは不可能な地山形状の影響（平坦地の地表と地下の違いが山岳地帯のそれと同様なのか）の評価手法についても今後の課題である。さらに、地震の観測結果に基づき地震波の地下深部での振動特性を一般化するためには、振動特性と地震の種類（震源位置、マグニチュード、加速度）との関係を明らかにする必要がある。

表-9-1 (a) 1990年2月から1993年1月までに全地震計が作動した地震の一覧表

	37	38	46	61	71	75	83	85	88	99	101	104			
Earthquake	宮城県東方沖	岩手県北部	岩手県南部	北海道浦川沖	宮城県北部	岩手県沖	宮城県沖	青森県東方沖	三陸はるか沖	岩手県沖	宮城県沖	宮城県沖			
Origin Time	1991.1.16 23:49	1991.1.27 18:56	1991.6.15 10:21	1991.11.27 04:41	1992.3.13 23:10	1992.4.13 14:59	1992.5.16 12:03	1992.7.12 20:09	1992.7.18 17:37	1992.11.26 00:30	1992.12.15 16:25	1992.12.28 01:21			
Latitude	38°15.1'	39°46.0' 39°46.0'	39°28.1' 39°27'	42°00'	38°53'	39°07' 39°06'	38°53'	41°28'	39°23' 39°21'	39°28'	38°42'	38°56'			
Longitude	141°53.9' 142°00'	141°58.3' 141°55'	141°54.0' 141°55'	142°42'	141°36'	142°25' 142°28'	142°06'	142°03'	143°39' 143°41'	142°06'	141°41'	142°33'			
Depth(km)	49	68 73	61 63	67	95	53 58	51	65	0 30	21	75	34			
Magnitude	4.7	4.6 4.1	5.4 5.4	6.4	3.9	5.1 5.1	4.6	6.3	6.9 6.9	3.8	4.0	5.9			
Epicentral Distance(km)	118.6	58.1 59.2	27.4 27.2	312.4	46.6	67.9 72.6	59.6	242.9	171.3 174.0	41.6	66.6	86.6			
Hypocentral Distance(km)	127.9	89.4 94.0	66.8 68.6	319.5	105.8	86.2 92.9	78.4	251.4	171.3 176.6	46.6	100.3	93.0			
Obs. pt	Location	EL(m)	*	Max. Acceleration(gal)											
K-1	On the ground	865	X	3.09	6.71	14.81	1.33	2.53	16.87	10.87	3.81	4.49	8.71	3.11	17.57
			Y	4.11	13.04	18.13	1.95	3.61	21.02	12.34	4.53	4.98	7.37	3.21	19.41
			Z	3.20	4.21	10.77	1.19	1.41	21.33	9.96	4.10	4.89	4.89	1.78	13.39
K-5	Under ground	725	X	1.80	3.60	5.58	0.77	1.43	9.48	6.04	1.76	3.35	5.70	1.32	7.89
			Y	2.00	3.85	9.06	1.01	1.50	10.90	3.32	1.72	3.55	2.51	1.60	7.68
			Z	1.50	3.17	4.49	0.76	0.97	8.21	3.94	2.02	4.00	1.97	1.18	6.69
K-2	Under ground	550	X	1.48	3.67	7.81	0.68	0.96	8.85	4.12	1.33	2.85	5.77	1.05	7.57
			Y	1.77	3.51	6.50	0.99	1.37	10.05	3.50	1.64	3.04	2.87	1.35	7.60
			Z	1.65	2.91	4.16	0.80	0.70	11.80	3.67	1.72	3.06	3.19	0.69	7.16
K-3	Under ground	550	X	1.65	3.71	6.97	0.89	1.73	12.22	6.50	2.13	3.03	2.92	1.15	7.05
			Y	2.06	4.93	4.70	0.77	1.38	6.85	3.96	2.09	2.68	2.01	1.15	5.75
			Z	1.58	2.81	3.55	0.75	0.82	9.81	2.41	1.85	2.33	1.94	0.76	5.46
K-4	Under ground	550	X	1.31	3.58	8.34	0.72	1.11	10.77	4.01	1.74	3.60	3.36	1.23	6.71
			Y	1.55	2.80	4.39	0.79	1.20	10.38	4.20	1.87	2.58	2.15	1.23	7.95
			Z	1.24	2.10	3.98	0.72	0.52	5.86	3.01	1.91	2.76	2.17	0.73	5.50
K-6	Under ground	250	X	1.60	4.07	7.22	0.57	1.15	8.43	5.04	1.53	3.24	4.65	1.18	6.85
			Y	1.80	3.47	6.65	0.71	1.75	6.83	4.33	1.47	2.65	2.91	0.93	7.22
			Z	2.10	3.14	4.21	0.73	0.73	7.99	2.32	1.56	2.62	1.54	0.97	6.21

*X : NS(horizontal), Y : EW(horizontal), Z : UD(vertical)

注) 各地盤の諸元は、気象庁地質課資料によった。表中2段で地震諸元を示しているものは、

上段：気象庁地質課資料、下段：東北大大学資料によった。

表-9-1 (b) 1990年2月から1993年1月までに全地震計が作動した地震の一覧表

	109	116	119	120									
Earthquake	宮城県沖	宮城県沖	宮城県沖	仙路冲									
Origin Time	1992.12.28 19:31	1993.1.9 13:01	1993.1.13 10:32	1993.1.15 20:06									
Latitude	38°51'	38°54'	38°54'	42°51'									
Longitude	142°36'	142°36'	142°35'	144°23'									
Depth(km)	31	34	36	107									
Magnitude	5.4	5.0	5.3	7.8									
Epicentral Distance(km)	95.0	92.1	90.9	455.7									
Hypocentral Distance(km)	99.9	98.2	97.8	468.1									
Obs. pt	Location	EL(m)	*		Max. Acceleration(gal)								
K-1	On the ground	865	X	5.29	3.19	4.84	25.37						
			Y	4.90	3.14	7.22	24.56						
			Z	3.33	3.47	4.46	17.13						
K-5	Under ground	725	X	1.69	1.34	1.94	10.29						
			Y	1.70	1.58	2.95	12.78						
			Z	1.17	1.82	1.83	9.58						
K-2	Under ground	550	X	1.36	1.17	1.93	9.22						
			Y	1.35	1.66	1.98	10.03						
			Z	1.81	1.14	2.08	7.50						
K-3	Under ground	550	X	1.29	1.34	1.61	10.60						
			Y	1.48	1.33	1.69	9.60						
			Z	1.23	1.17	1.93	11.11						
K-4	Under ground	550	X	1.30	1.44	1.90	10.15						
			Y	1.11	1.56	1.76	7.76						
			Z	1.26	0.89	1.65	8.55						
K-6	Under ground	250	X	1.49	1.24	2.10	8.38						
			Y	1.14	0.86	1.49	7.89						
			Z	1.29	1.14	2.24	9.23						

*X : NS(horizontal), Y : EW(horizontal), Z : UD(vertical)

注) 各地震の諸元は、気象庁地質課資料によった。表中2段で地震諸元を示しているものは、

上段：気象庁地質課資料、下段：東北大大学資料によった。

表-9-2 解析条件(阿部, 1993)

計算諸元	重複反射理論解析
地盤特性の非線形特性	考慮しない
層区分数(総数)	30
解析に用いる最大周波数(Hz)	20.0
地震波を入力する層	地表部
減衰特性の周波数依存	考慮しない(一定値)
入力地震動時間間隔(sec)	$\Delta t=0.005$ (EQ. No. 75) $\Delta t=0.02$ (EQ. No. 120)
入力地震波形テソタル値個数(実波形部分個数)	4,096(2,400) EQ. No. 75 4,096(3,000) EQ. No. 120

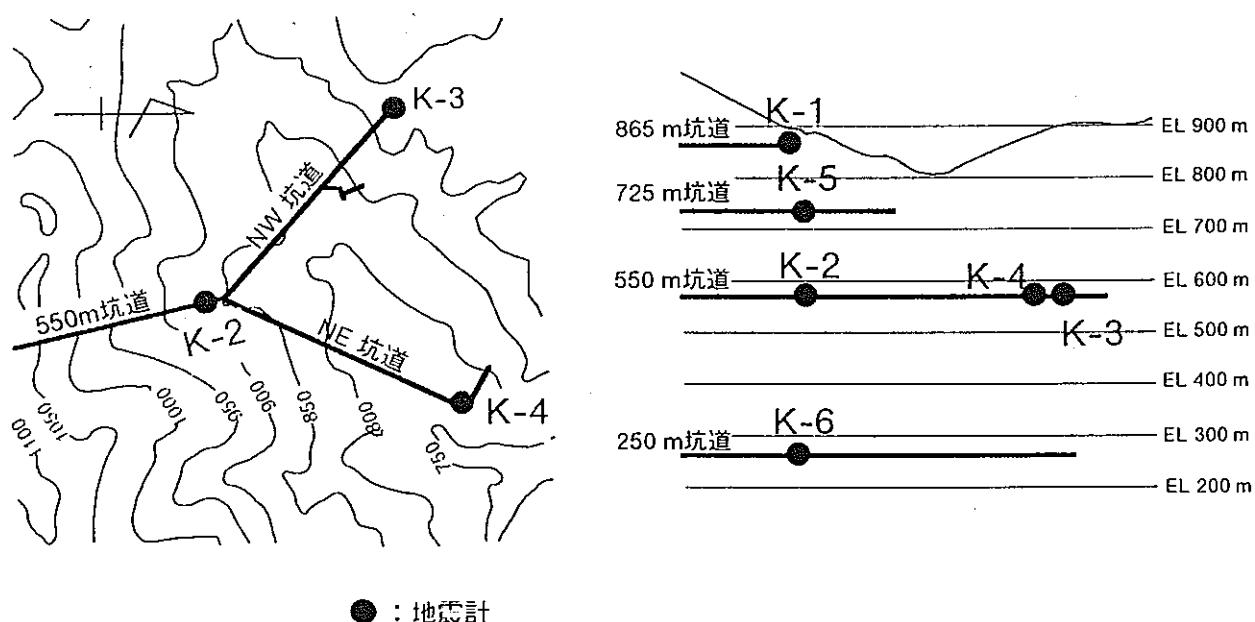


図-9-1 地震計の配置図(阿部、1993)

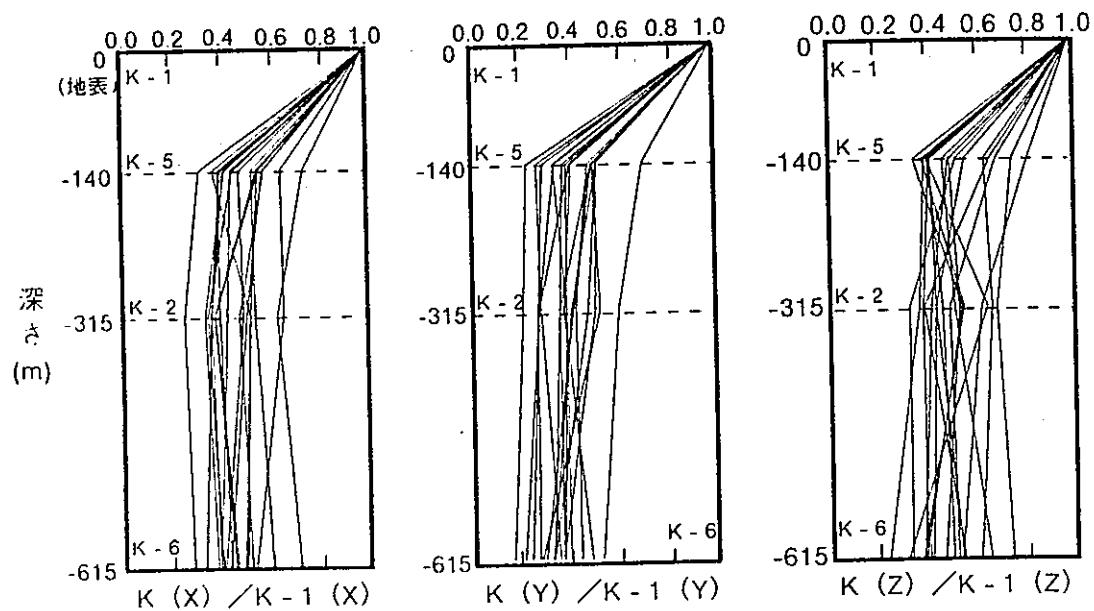


図-9-2 地表を1とした場合の地下の加速度比（阿部、1993）

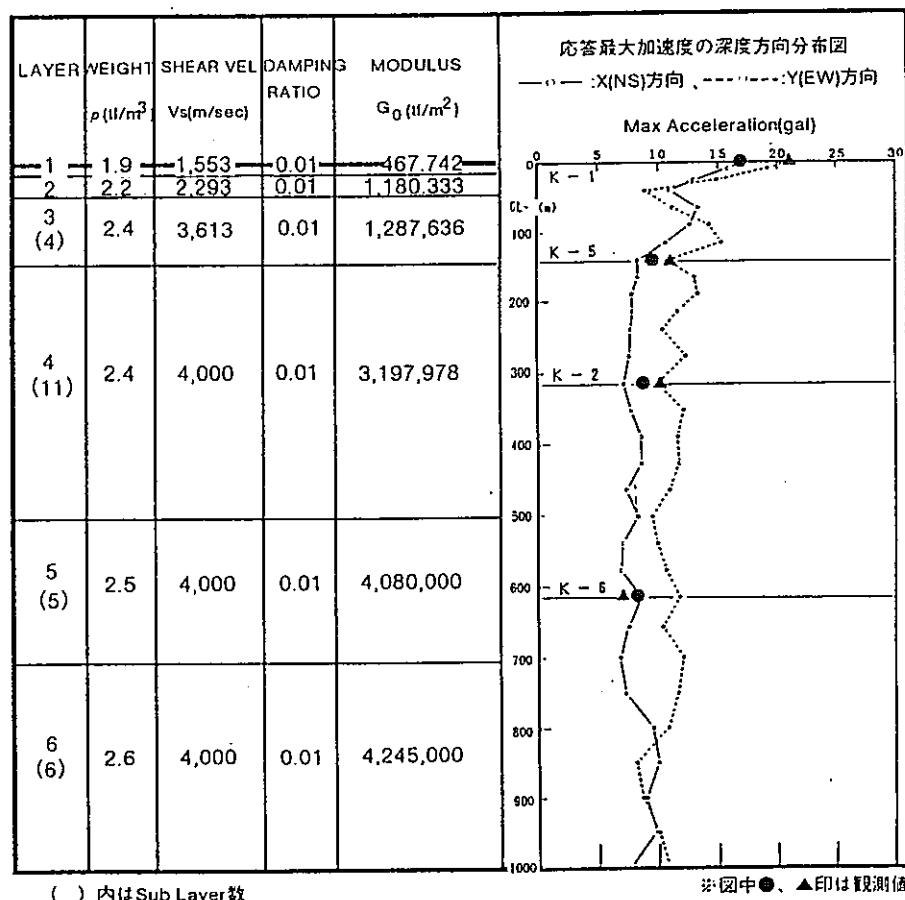


図-9-3 S波重複反射理論解析結果（阿部、1993）

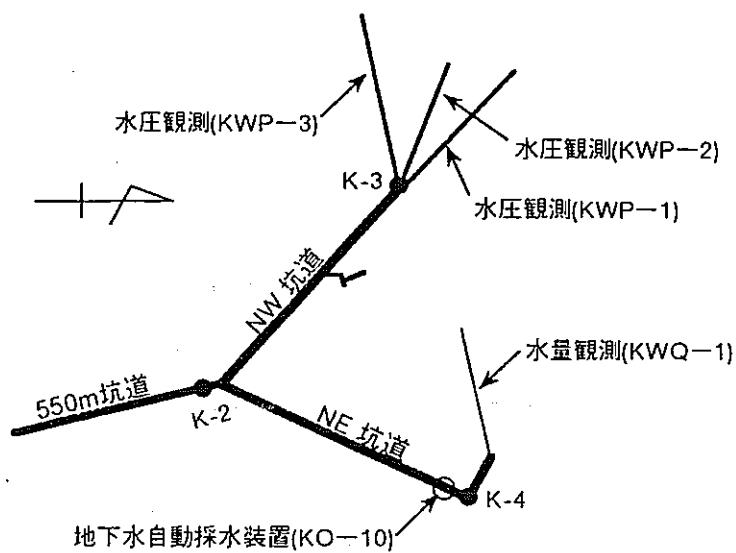
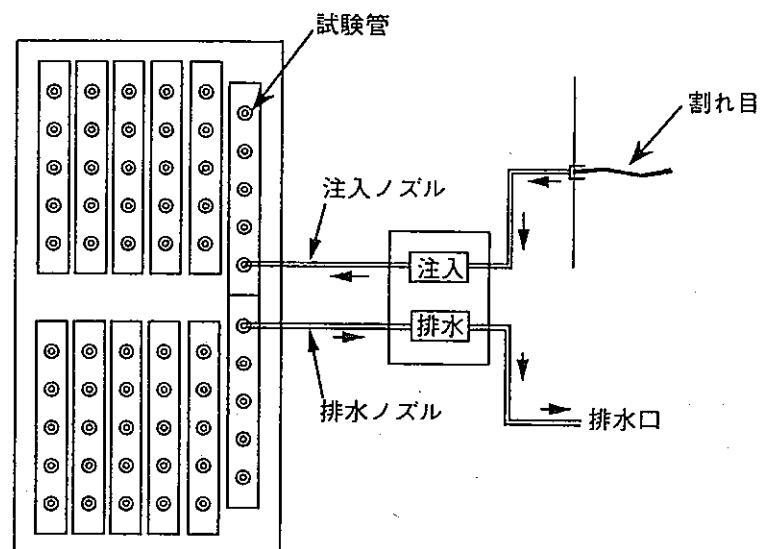
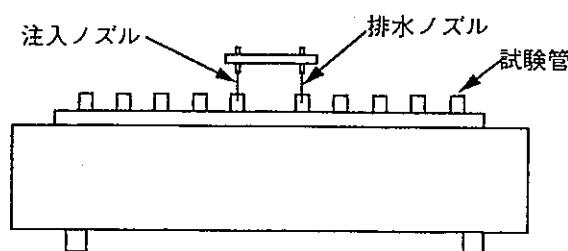


図-9-4 550mレベル坑道における地下水理観測網（原田、1992）



平面図



断面図

図-9-5 地下水自動採水システム（原田、1992）

9. 2 地震時の地下水水理変動調査

9. 2. 1 観測方法

地震時に地下水理がどのように変動するか、もし変動があった場合、地震後元に戻るのかを調査するために、550mレベル坑道に水圧計、水量計および採水装置を設置している。各設置場所を図-9-4に示す。水圧は、KWP-1～3孔の各孔口にセットされたひずみゲージ型圧力計により0.83秒間隔で常時計測されている。水量は、KWQ-1孔の孔口からの湧水を筒型の容器に貯留し、容器の底部から流出する水量を電磁流量計により常時計測している。計測間隔は0.83秒間隔である。KO-10では、坑道天盤の割れ目からの湧水を図-9-5に示すシステムにより採取している。本装置は、坑内で4gal以上の加速度が観測された時に起動するように設定されており、地震前24時間、地震後96時間（各4時間毎に100cc採水）の採水が可能である。地下水分析項目は Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , SiO_2 の8成分である。また、KO-10では、同じ割れ目からの湧水量を坑内の電気電動度セルに導き、電気電動度の常時計測も行っている。計測間隔は、0.83秒である。

9. 2. 2 観測結果

観測結果の一例を図-9-6～10に示す。これまでの観測結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) KWP-1～3孔で観測された水圧は、長期的な変動をしており、降水量の季節変動を受けていることが予想される（図-9-6）。
- 2) KWP-1～3孔で観測された地震後数時間程度の短期間の水圧変動を調査した結果、坑道内において最大加速度が1gal以上の場合水圧変動が観測される可能性があり、2gal以上では過半数の場合に水圧変動が観測されることが明らかになった。（図-9-7, 8）。
- 3) KWQ-1孔で観測された水量には、地球潮汐の影響を受けた日周期の増減変動が見られる（図-9-9）。しかし地震との関係は見られない。
- 4) 地震前後の地下水の溶存成分を調査した結果、わずかに2つの陰イオン(SO_4 , HCO_3)の変動が見られた（図-9-10）。

9. 2. 3 成果と課題

地震に係わる地下水理観測の結果、地震時の水圧、水質の変動を概括的に把握することができた。しかし、水圧、水量および水質の地震影響を評価するためには、さらにデータの蓄積が必要であるとともに、地震の種類（震源位置、マグニチュード、加速度）、降水量、地震時の岩盤ひずみや割れ目挙動、水質の長期的変動との関連を明らかにする必要がある。また、現象のメカニズムを明らかにし、地震時の地下水理挙動のモデル化手法を検討する必要がある。

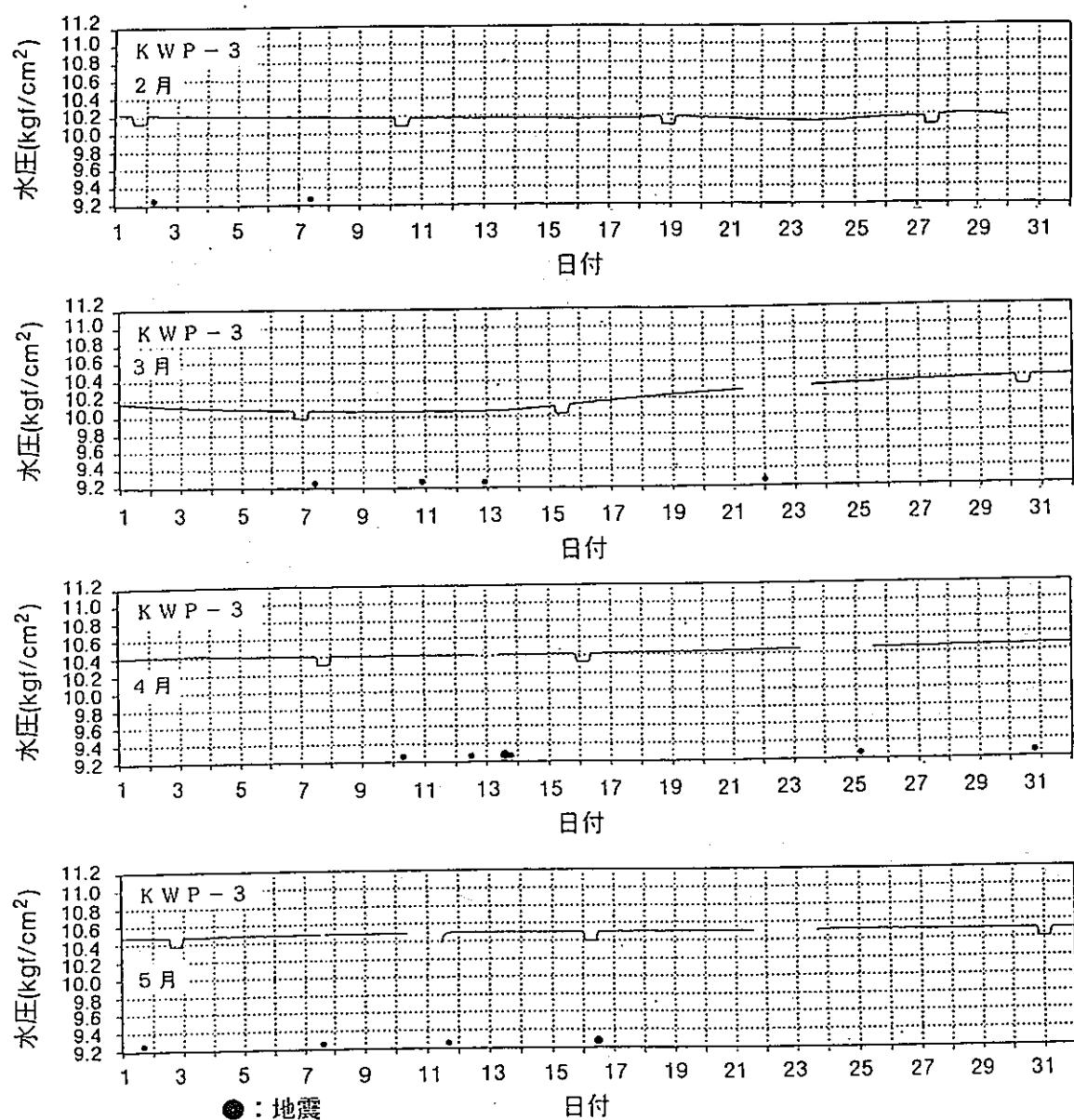


図-9-6 KWP-3孔の水圧の長期的変動（阿部、1993）
(1993年2月～1993年5月)

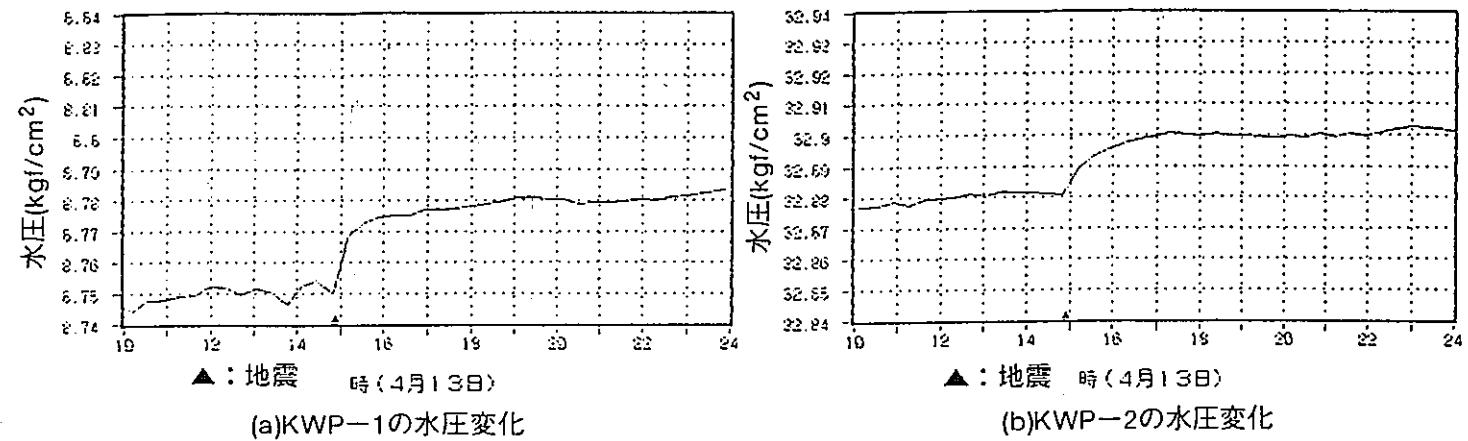


図-9-7 地震No.75における水圧変動（阿部、1993）

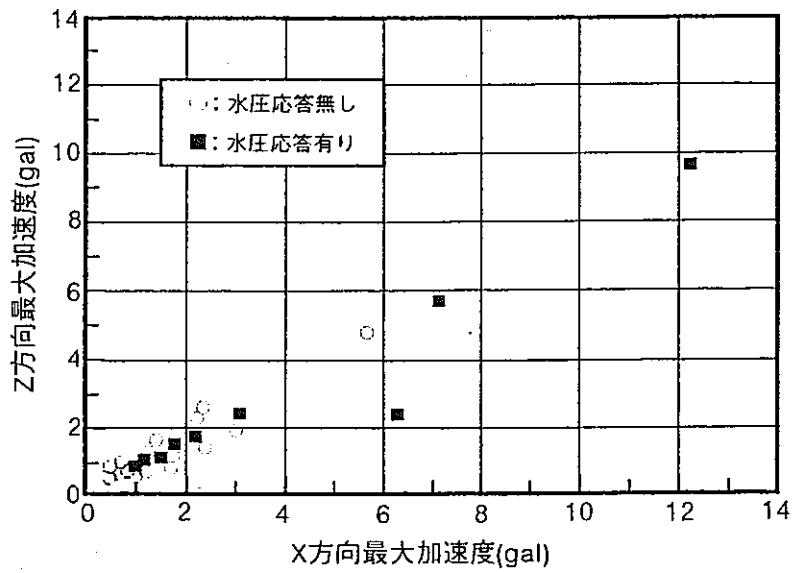


図-9-8 最大加速度（K-3観測値）と水圧応答の関係（阿部、1993）
(1992年1月～1992年12月)

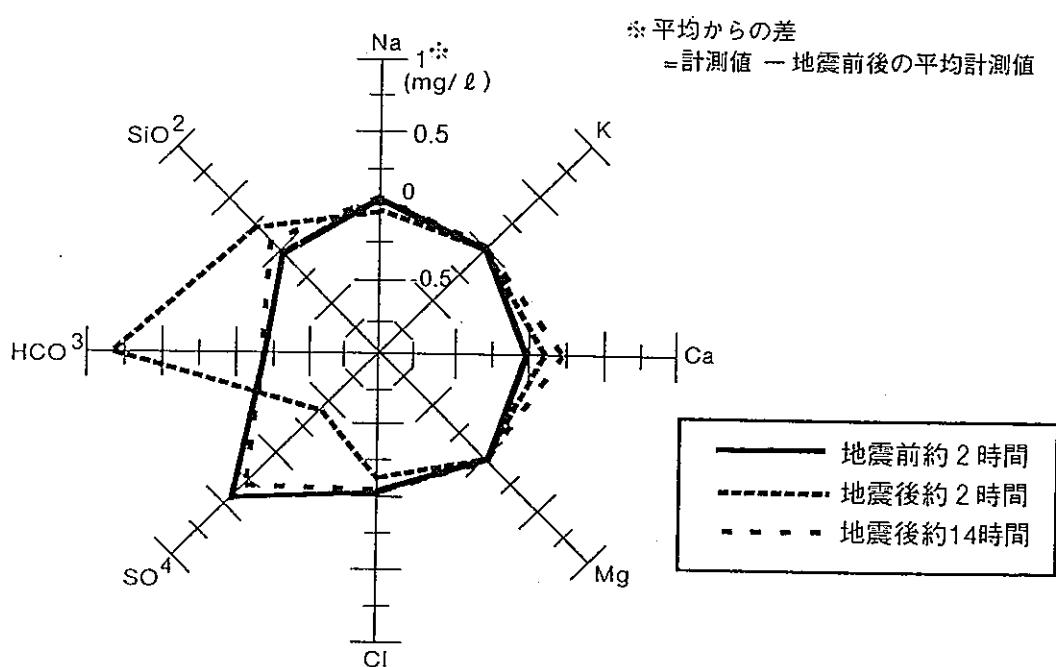
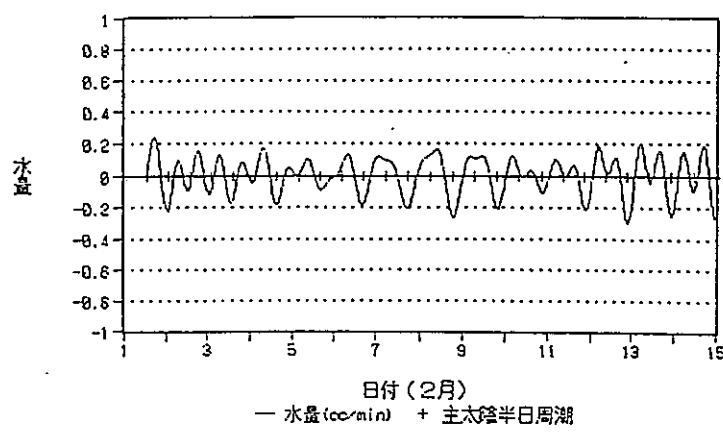


図-9-10 地震No. 104における地震前後の地下水溶存成分の変動 (阿部、1993)

10. 岩盤内充填粘土の挙動

10.1 岩盤内充填粘土挙動試験

10.1.1 試験方法

岩盤内充填粘土挙動試験は、岩盤の割れ目を介した地下水の侵入による粘土（ベントナイト）の膨潤状況を調べるものである。あわせて粘土中にヒーターを設けてニアフィールドでの伝熱特性を調査し、熱および粘土の膨潤が周辺岩盤におよぼす力学的な影響を明らかにする。

試験は、図-10-1に示すNW坑道床面の湧水割れ目を対象とした。この割れ目では過去に、東側側壁において「单一割れ目における地下水水流下試験」（浜辺ほか、1989）が実施されている。この割れ目周辺では、これに交差する大きな割れ目がほとんどなく、地下水水流下試験を実施した側壁以外でも本割れ目からの湧水が認められたことから、床面においても湧水の可能性が高いことが予想された。のことより、本試験において粘土への地下水の供給が十分に行われる判断される单一割れ目として本割れ目を選定した。

図-10-2に「割れ目」と試験孔の位置関係を示す。粘土充填孔は、 $\phi 310\text{mm}$ 、深さ1mで、床面から鉛直下向きに割れ目と交差するように穿孔した。また、充填孔の下方およびその周辺には周辺岩盤の挙動を観測するために4本の観測孔を穿孔した。各孔ともに $\phi 76\text{mm}$ 、深さ1.5mである。観測孔1、2、4は床面から鉛直下向きに穿孔し、観測孔3は、割れ目の挙動を観測するために、割れ目に沿って鉛直斜め下向きに穿孔した。また、図-10-3、4に観測孔および粘土内の計測機器位置を示す。粘土内には土圧計、水分計、間隙水圧計および熱電対を、観測孔内には歪み計と熱電対を設置した。なお、粘土中心には加熱試験用のヒーター（ $\phi 76.3\text{mm}$ 、長さ900mm）を設置した。図-10-4においてメッシュを施した部分がヒーターである。

10.1.2 孔内載荷試験

観測孔に設置した歪み計の計測値から変形量を換算する際に必要となる弾性係数を求めるため、観測孔の穿孔後に各孔で孔内載荷試験を実施した。試験法は等分布載荷法（エラストメータ200）とした。測定は各孔の中間点で行った。載荷パターンは、設定荷重まで増加し、その後除荷するという繰り返し載荷パターンを採用した。載荷荷重は、 50kgf/cm^2 毎に設定し、最高 200 kgf/cm^2 まで実施した。載荷速度および除荷速度はそれぞれ $5.0\text{ kgf/cm}^2/\text{min}$ および $10.0\text{ kgf/cm}^2/\text{min}$ である。

試験結果を表-10-1に示す。観測孔3を除いて「花崗岩における原位置試験」（浜辺ほか、1988）で実施された孔内載荷試験結果とはほぼ同じ値であった。観測孔3は、割れ目に沿った試錐孔であることから他の3孔に比べて値は小さくなっている。

10.1.3 室内試験

数値解析に必要となる栗橋花崗閃緑岩の岩盤物性を把握するために、各観測孔から得られたコアを用いて室内試験を実施した。試験項目は、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、圧裂引張試験、熱伝導率、比熱および熱膨張率である。試験結果を表-10-2に示す。

10.1.4 充填粘土挙動試験

粘土はあらかじめプレス機で半ドーナツ状ブロック（高さ10cm、外径30cm、内径8cm）に成形し、現地にて各計測機器をブロック内の所定の位置に埋設しながら高さ100cmの円柱状に組み立てた。その際、ブロック間の隙間および各計測機器やケーブルの隙間はベントナイト粉を転圧しながら充填した。その後、粘土を充填孔に設置した。充填孔と粘土ブロックとの隙間約5mmは釜石鉱山産のざくろ石スカルンを破碎した径2mm以下の砂を充填した。また充填後、粘土上端には、上向きの膨潤圧を抑えるためにふたを取り付け、さらにその上にロックボルトで床面に両端を固定した鋼材を渡した。

なお、使用した粘土は、国産のベントナイト（ケニゲルV1）であり、成形後の湿潤密度および含水比はそれぞれ 2.0kgf/cm^3 および10%である。

粘土充填前の試験対象割れ目から充填孔への湧水量は600cc/分であった。観測は粘土充填後2日目から開始した。観測開始日は平成5年2月26日である。観測開始後30日目までは常温下での観測を行い、31日目からヒーターの中心温度を80°Cに制御し加熱試験を開始した。なお、試験開始後、粘土上端に設置したふたの隙間から水とともに粘土が流出したため、この隙間を閉鎖する処置を施した。

試験開始から41日後の温度分布を図-10-5に示す。この結果、ヒーター中心温度が80°Cであっても、粘土と岩盤との境界（ヒーター中心から15cm）では20°C前後であった。また、観測孔1側および3側はそれぞれ割れ目と直交方向および割れ目方向であるが、両者の温度分布はほぼ同様であり割れ目の影響は見られない。

試験開始20, 31, 40日後の膨潤圧分布を図-10-6に示す。ここで膨潤圧は、粘土外縁から2cmまでの値である。膨潤圧の値は、場所によりかなりの偏りが見られ、試験開始後20日目に観測孔1側の粘土上方で最大 19kgf/cm^2 発生している。同材料を用いた室内試験結果から、膨潤圧は最大約 50kgf/cm^2 することがわかっているが、これと比較すると今回の試験では20日間で最大膨潤圧の約4割が発生することになる。また、31日後は加熱試験開始時であるが、膨潤圧の減少が見られる。

10.1.5 課題と今後の予定

粘土の膨潤圧を早期に発生させるためには、地下水の供給が十分に行われる環境が望ましい。今回試験の対象とした割れ目からの地下水の流出量が600cc/分と比較的多いところであった。

また、膨潤圧を正しく評価するためには、粘土を充填する試験孔を一つの閉鎖した系にすることが必要になる。しかし、今回の試験では粘土の充填直後から粘土内部に設置された計測用ケーブルを伝って外部に水とともに粘土が流出したため、膨潤圧を正しく評価できていない可能性がある。今後、原位置で同様な試験を行う場合にはこの点を考慮した施工方法を検討する必要がある。

表-10-1 孔内載荷試験結果一覧（長ほか, 1993）

	弾性係数(kgf/cm ²)
観測孔1	3.0×10^5
観測孔2	2.4×10^5
観測孔3	0.5×10^5
観測孔4	1.2×10^5

表-10-2 室内試験結果一覧（木山ほか, 1993）

岩盤物性	岩盤物性	室温	60°C	90°C
一軸圧縮強度(MPa)	119.8	2.71	2.61	2.54
ヤング率(MPa)	59,228		0.201	
ポアソン比	0.3		0.199	
圧裂引張強度(MPa)	11.0			
内部摩擦角(°)	22.6			
粘着力(MPa)	25.5			
	熱伝導率(W/m・K)			
	比熱(自然乾燥状態(cal/g・°C))			
	比熱(強制乾燥状態(cal/g・°C))			
	熱膨張率($\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$)			

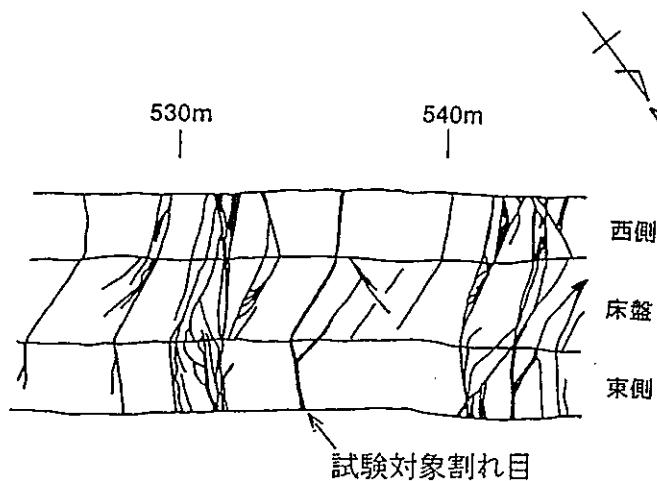


図-10-1 試験坑道の壁面観察結果（浜辺ほか, 1989）

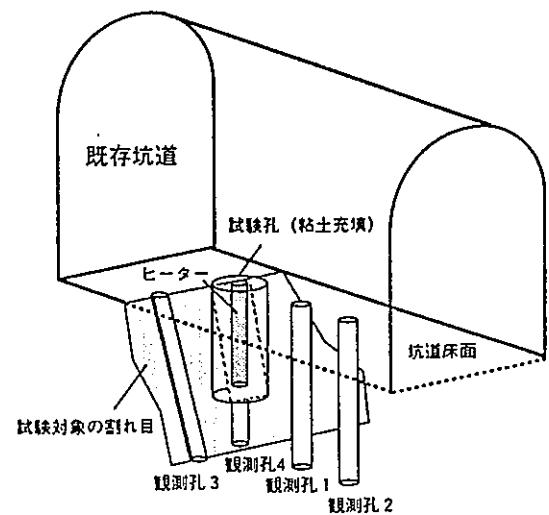
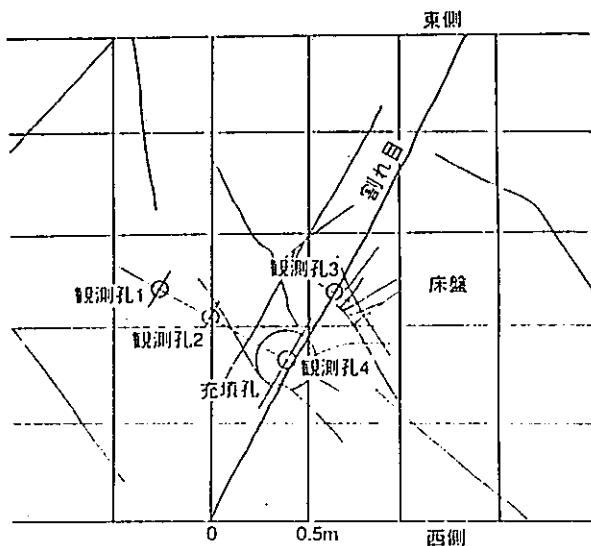


図-10-2 試験対象割れ目と試験孔の位置関係

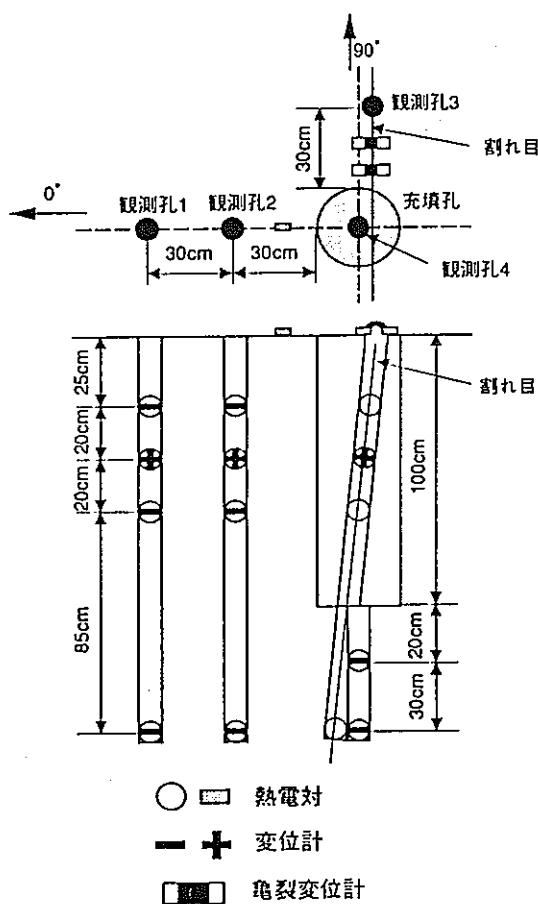


図-10-3 観測孔の計測機器設置位置

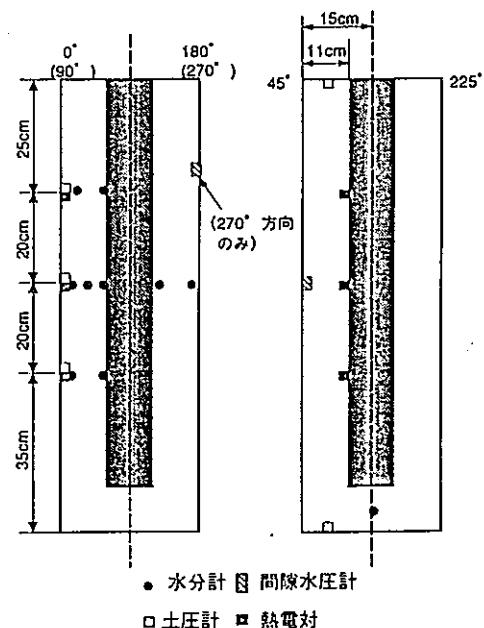


図-10-4 粘土内計測機器設置位置

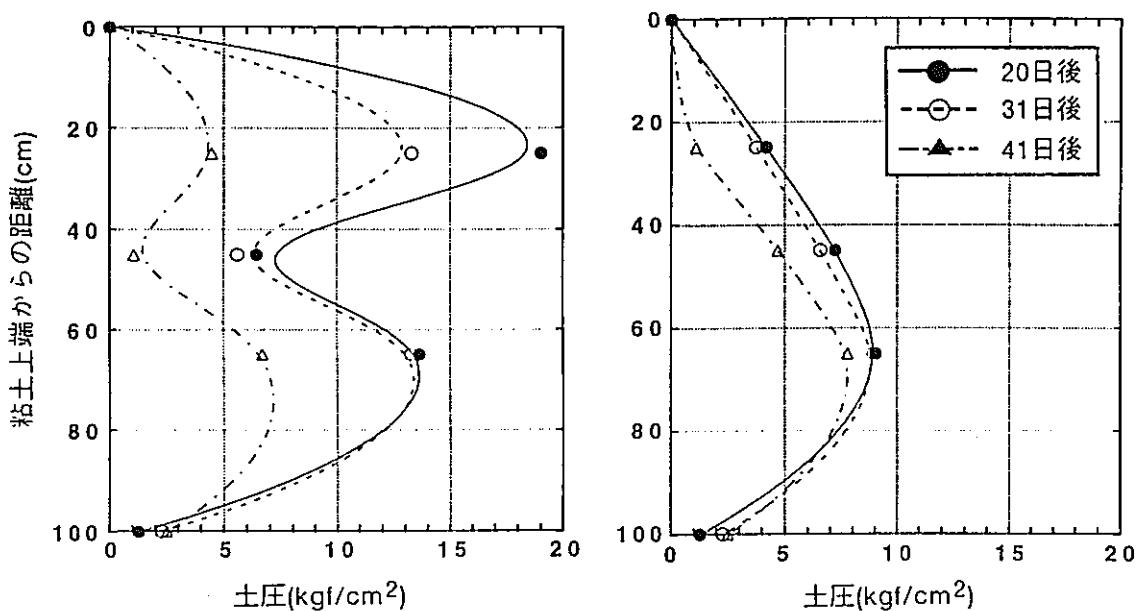


図-10-5 加熱試験後10日後の深度別の粘土内温度分布（長ほか, 1993）
 （左：観測孔1側の温度分布、右：観測孔3側の温度分布）

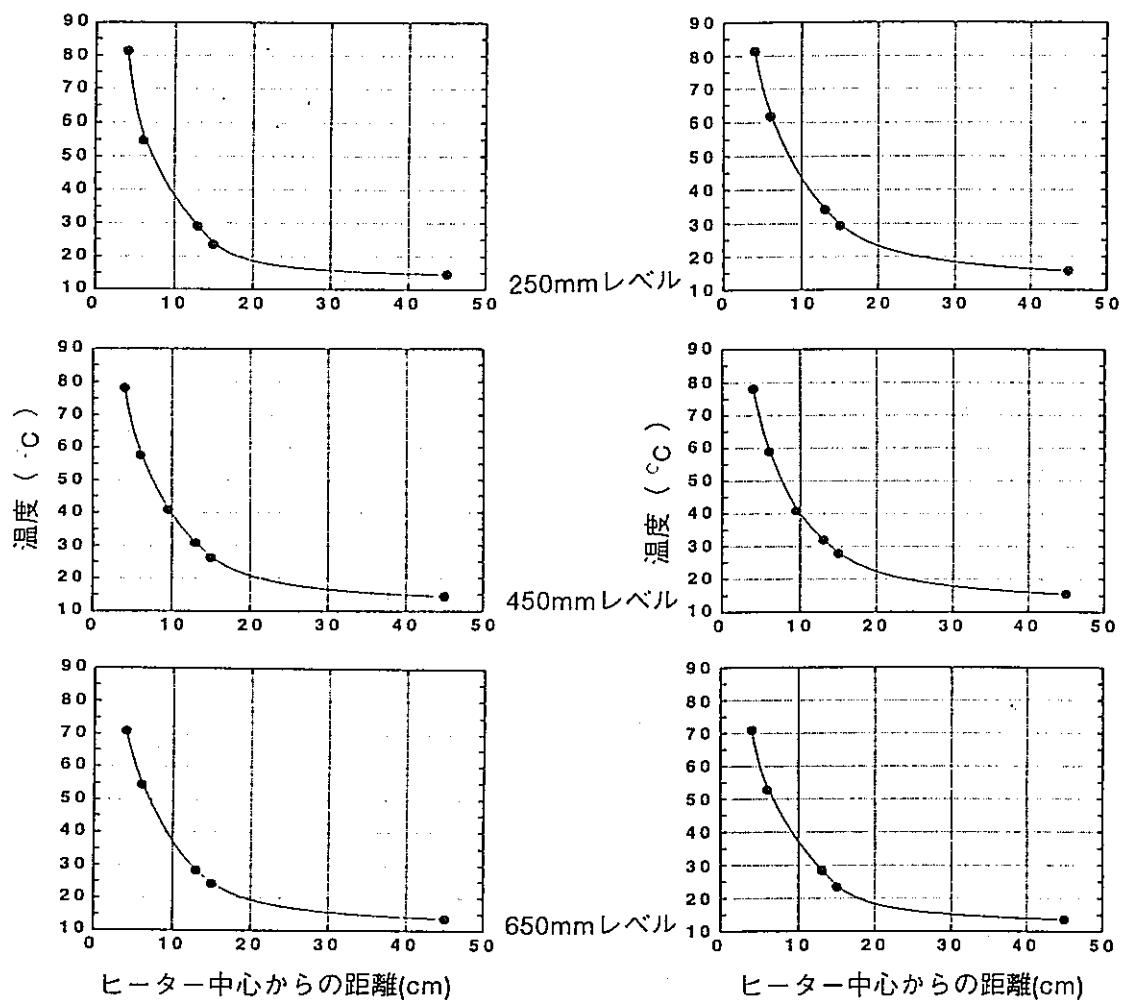


図-10-6 試験41日までの膨潤圧分布（長ほか, 1993）
 （左：観測孔1側の膨潤圧分布、右：観測孔3側の膨潤圧分布）

11 まとめ

釜石鉱山で結晶質岩を対象とした原位置試験研究を実施し、地下深部の基礎的な地質環境特性の把握と現象の理解、ならびに現有の調査試験技術の適用性の確認を行った。その結果をまとめると以下のようなになる。

①結晶質岩の地質構造を把握するために割れ目調査と物理探査（レーダートモグラフィー、比抵抗トモグラフィー）を行った。これらの調査の結果、原位置試験場周辺の割れ目の方向は、主に東北東の走向であり、含水比の高い割れ目帯や変質帯を低比抵抗帯、低速度帯としてある程度とらえることができた。

また、坑道の割れ目調査結果に基づき、統計学的な手法を用いたシミュレーションにより、観察されていない岩盤中の概略的な割れ目の分布の推定が可能であることがわかった。そして、透水性の高い所と低比抵抗帯や低速度帯の分布の関係を詳細に調べることで、岩盤内の透水係数に分布や広域的な岩盤中の地下水の流動経路の概略を推定できる可能性があることがわかった。

②結晶質岩の透水性を把握するため、各種の透水試験（低圧ルジオン試験、孔間透水試験、岩盤透水性試験など）を実施した。その結果、結晶質岩では、③透水係数は $1.5 \times 10^{-5} \sim 1.1 \times 10^{-8}$ cm/sの範囲であること、④透水性に異方性があること、⑤REVは20数mであること、などがわかった。これらの試験から結晶質岩の透水性の特徴をある程度把握できることが確認された。

また、坑道の割れ目調査のデータを用い、結晶質岩の透水性を解析した結果、透水性の異方性は孔間透水試験の結果と同じ傾向を示し、REVは岩盤透水性試験と同様に20数mであるという結果が得られた。このような手法を用いて、割れ目のある結晶質岩の透水性の異方性やREVを評価できる可能性があることがわかった。

③地下水の地球化学的な調査の結果、原位置試験場周辺の地下水は、その水質によって6タイプに分けられること、そして、安定同位体の分析結果から、標高の高いところに降った雨が地下深部に浸透している可能性があることがわかった。トリチウムの分析結果から、少なく見積もっても地下水の滞留時間が40年以上を示す地下水が存在することがわかった。また、地下水の水質分析結果を総合することにより、概略的な地下水の流動状況を推定できる可能性があることがわかった。

④岩盤力学的な調査では、掘削影響試験を行った。その結果、掘削により空洞周辺の岩盤の透水性や変形性に変化が生じること、その範囲は坑道壁面から2m程度であることが確認できた。また、KD-89坑道では、スムースプラスティング工法を用いたにもかかわらず坑道周辺の岩盤がゆるんだ可能性があり、掘削による岩盤の影響では割れ目の方向と坑道の方向の位置関係が重要であること、そして、連続体を仮定した有限要素法によるシミュレーションで、この岩盤の変形挙動を定性的に表現できることがわかった。

⑤地震に関する調査研究では、地震観測の結果、地下深部の最大加速振幅は、地表の最大加速度振幅の1/2程度であることがわかった。

⑥岩盤内充填粘土の挙動に関する試験では、膨潤圧等のデータが得られた。

引用文献

- 青山成夫・長久・福田和寛・吉岡 但 (1989):深部岩盤の透水性評価手法とその適用性. 地下空間利用シンポジウム講演論文集, 149-154.
- 青山成夫・石井卓・山本勇・堀田政國・堀江芳博・穂刈利之 (1992):1000m 級透水性試験装置の適用性試験. PNC ZJ1060 92-004, 動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書, 清水建設株式会社.
- 長 久・野口義文・穂刈利之・奥野哲也・日下部寧 (1990):孔間透水性試験による岩盤透水係数の三次元異方性評価. 第8回岩の力学国内シンポジウム, 447-452.
- 長 久・野口義文・森田誠也・中村直昭・岩崎浩・堀田政國・穂刈利之 (1991):花崗岩における原位置試験(平成2年度). PNC PJ1380 91-001, 動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書, 日鉄鉱業株式会社.
- 長 久・横井浩一・野口義文・森田誠也・中村直昭・岩崎浩・守屋俊文・堀田政國・穂刈利之 (1992):花崗岩における原位置試験(平成3年度). PNC ZJ1380 92-001, 動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書.
- 長 久・横井浩一・野口義文・森田誠也・中村直昭・岩崎浩・守屋俊文・堀田政國・穂刈利之・高原弘幸 (1993):花崗岩における原位置試験(平成4年度). PNC ZJ1380 93-02 動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書, 日鉄鉱業株式会社.
- 動力炉・核燃料開発事業団 環境技術開発推進本部 (1992):釜石原位置試験研究成果の概要. PNC TN1410 92-073 (パンフレット).
- 福田和寛 (1990):花崗岩中のトンネル掘削に伴う岩盤挙動と物性変化. 第8回岩の力学国内シンポジウム, 231-236.
- 福田和寛・野口義文・穂刈利之 (1992):花崗岩盤における巨視的透水係数の評価. 第24回岩盤シンポジウム講演論文集, 26-30.
- 浜辺修二・長 久・野口義文・飯島章夫・嶋田純・福田和寛 (1988):結晶質岩中の既存空洞における岩盤物性及び地下水状況調査(I). PNC SJ4380 88-002, 動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書, 日鉄鉱業株式会社.
- 浜辺修二・長 久・野口義文・山沢茂行・飯島章夫・宮下敦・森田誠也・飯塚友之助・福田和寛 (1989):花崗岩における原位置試験(昭和63年度). PNC SJ4380 89-002, 動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書, 日鉄鉱業株式会社.
- 浜辺修二・長 久・横井浩一・野口義文・飯島章夫・森田誠也・中村直昭・飯塚友之助・福田和寛・穂刈利之 (1990):花崗岩における原位置試験(平成元年度). PNC SJ4380 90-002, 動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書, 日鉄鉱業株式会社.
- 浜辺修二・野納敏尾 (1976):岩手県釜石鉱山付近の地質構造. 鉱山地質, Vol. 26, 93-104.
- Hsieh, P. A. and Neuman, S. P. (1985): Field Determination of the Three-Dimensional Hydraulic Conductivity Tensor of Anisotropic Media 1, Theory. Water Resources Research, Vol. 21, No. 11, 1655-1665.

- Hsieh, P. A. and Neuman, S. P. (1985): Field Determination of the Three-Dimensional Hydraulic Conductivity Tensor of Anisotropic Media 2, Methodology and Application to Fractured Rock. Water Resources Research, Vol. 21, No. 11, 1667-1676.
- 岩崎浩・中村直昭・野口義文・小池克明 (1991):亀裂データベースを利用した岩盤特性の評価. 日本応用地質学会平成3年度研究発表会講演論文集, 29-32.
- 岩崎浩 (1993):岩盤亀裂群の計測と“みずみち”的推定. 「移動現象論並び反応速度論的観点からの鉱床探査技術に関する調査研究委員会」研究成果報告書, 第6章.
- 金子勝比古・小池克明・野口義文・伊藤博之 (1990):岩盤き裂群の定量化—亀裂計測とモニタリング. 地下き裂のキャラクタリゼーションワークショップ論文集, 25-29.
- 蟹沢聰史・大上和良 (1989):日本地質図大系東北地方. 地質調査所, 朝倉書店.
- 環境技術開発推進本部 (1993):地層科学的研究 3. 釜石における原位置試験. 動燃技法, No. 85, 150-162.
- 河野善礼・植田良夫 (1965):本邦産花崗岩K-Ar dating (II), 北上産地の花崗岩類. 岩鉱, Vol. 53, 57-60.
- 木山保・中田雅夫・田村富雄・喜多治之 (1993):岩石の熱特性試験研究. PNC ZJ1176 93-001, 動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書.
- 新見健・野口義文・堀田政國 (1992):花崗岩盤における割れ目内流れに関する基礎的研究. 第24回岩盤シンポジウム講演論文集, 21-25.
- 森田宏・浜辺修二・長久 (1987):釜石鉱山の既存空洞とその周辺の各種状況調査. PNC SJ4380 87-001.
- 野口義文・岩崎浩・小池克明 (1991a):深部花崗岩体における亀裂情報のデータベース化とその利用. 第23回岩盤シンポジウム, 182-186.
- 野口義文・飯島章夫・中村直昭・小池克明・金子勝比古 (1991b):岩盤亀裂の計測とモニタリング. 資源と素材, Vol. 107, No. 7, 428-433.
- 中村直昭・横井浩一・藍澤稔幸・渡辺邦夫・野口義文 (1991):ベンチレーション試験時の近傍における飽和度の推定. 第23回岩盤シンポジウム, 177-181.
- 奥野哲男 (1990):クロスホール試験による岩盤透水試験の三次元異方性評価に関する検討. 土木学会第45会年次学術講演会講演概要集, 848-849.
- 仙波毅・尾方伸久・長谷川健・岩崎浩・渡辺邦夫 (1992):ボアホールレーダーによる花崗岩岩盤特性調査. 一釜石鉱山原位置試験場における調査結果について一. 応用地質学会誌, Vol. 32, No. 6, pp34-42.
- 資源・素材学会 (1991):地震に関する調査研究(VII). PNC ZJ1552 91-001.
- 資源・素材学会 (1992):地震に関する調査研究(VIII). PNC ZJ1552 92-001.
- 資源・素材学会 (1993):地震に関する調査研究(IX). PNC ZJ1552 93-001.
- 鈴木光・石島洋二 (1968):孔径変化法による盤圧測定の理論と実際. 材料, Vol. 17, No. 181, 858-861.
- 内田雅大・澤田淳・高原弘幸・渡辺邦夫 (1994):釜石原位置試験場KH-7, KH-8 孔間ににおけるトレーサ試験. 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 181-186.

Uchida, M., T. Doe, W. Dershawite and P. Wallmann (1993): Simulation of Fracture Flow of the Kamaishi Validation Drift. International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Vol. 1, 437-442.

綿抜邦彦 (1985):地下水と同位体, 日本地下水学会誌, Vol. 27, No. 4, pp15-22.

横井浩一 (1991):異方性を考慮した比抵抗トモグラフィーの解析, 物理探査学会第85回学术講演会論文集, pp242-246.