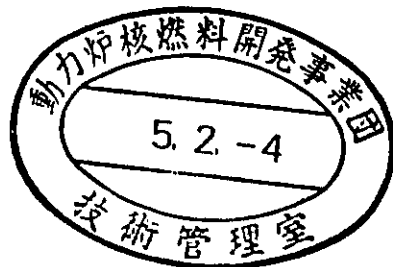


立坑掘削影響試験ワークショップ

— 発表論文集 —

1992年12月



動力炉・核燃料開発事業団

中部事業所

公開資料

PNC TN7410 92-052
1992年12月

立坑掘削影響試験ワークショップ

— 発表論文集 —

湯佐 泰久*

まえがき

この報告書は平成4年11月30日(月)にセラトピア土岐で開催された、立坑掘削影響試験ワークショップの発表論文と質疑応答などをとりまとめたものである。ワークショップは立坑掘削影響試験で得られた研究成果を総括し、今後の研究課題と取り組み方について、大学や民間会社を含めた技術者と情報交換を行い、相互理解を深めることを目的として行われた。

ワークショップでは活発な質疑応答が行われた。その内容は発表論文集とともに「質疑応答議事録」にまとめて記した。また、立坑掘削影響試験に関連した投稿論文や口頭発表論文集をリストとともに最後に付した。

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園戸959-31
動力炉・核燃料開発事業団
中部事業所 技術開発課

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1992

*中部事業所 環境地質課長

公開資料

PNC TN7410 92-052
1992年12月

Workshop on
Shaft Excavation Effects Project

-Proceedings-

Yasuhisa YUSA*

Abstract

This report describes a summary of the workshop on SBE project (Shaft Excavation Effects Project). The workshop was held in Toki-city on 30 November 1992. The purpose of this workshop is to summarize the results of SBE project, and to exchange information and to promote mutual understanding between research workers of universities, private corporations and staff of PNC.

These proceedings reproduce the papers presented at the workshop, together with a summary of the discussions and copies of all papers that are concerned with SBE project and are currently published.

* Manager of Waste Isolation Research Section.

立坑掘削影響試験ワークショップ プログラム

日時;平成4年11月30日

場所;セラトピア土岐・大会議室

[司会:池谷課長代理]

9:30~9:40	1. 開会挨拶	柴山所長
9:40~9:50	2. 立坑掘削影響試験の目的と位置づけ	湯佐課長
9:50~10:20	3. 工事・調査概要	杉原
10:20~10:30	[質疑]	
10:30~11:00	4. 立坑周囲のゆるみ領域の力学的・水理学的計測・評価	
11:00~11:10	(1) 変位・応力計測	佐藤
11:10~11:20	[コメント]	(山口大・水田教授)
11:20~11:50	[質疑]	
11:20~11:50	(2) 物性計測	松井
11:50~12:00	[コメント]	(鳥取大・木山教授)
12:00~12:10	[質疑]	
12:10~13:00	昼食	
13:00~13:45		[司会:湯佐課長]
13:45~14:00	5. 特別講演〔掘削影響研究の現状〕	(京大・谷本助教授)
14:00~14:10	[質疑]	
14:00~14:10	休憩	
14:10~14:40		[司会:池谷課長代理]
14:40~14:50	6. 立坑周辺地域の地下水流動の計測・評価	
14:50~15:00	(1) 水理地質構造調査・観測	中野
15:00~15:30	[コメント]	(埼玉大・渡辺助教授)
15:30~15:40	[質疑]	
15:40~15:50	(2) 水理解析	今井
15:50~16:20	[コメント]	(埼玉大・渡辺助教授)
16:20~16:30	[質疑]	
16:30~16:40	(3) 採水調査	瀬尾
16:40~17:00	[コメント]	(金沢大・中西助教授)
16:40~17:00	[質疑]	
16:40~17:00	7. 総括・閉会挨拶	坪谷副所長

立坑掘削影響試験ワークショップ出席者名簿

〔社外〕

渡辺 邦雄 (埼玉大学工学部助教授)
 大久保誠介 (東京大学工学部教授)
 中西 孝 (金沢大学理学部助教授)
 市川 康明 (名古屋大学工学部助教授)
 谷本 親泊 (京都大学工学部教授)
 木山 英郎 (鳥取大学工学部教授)
 水田 義明 (山口大学工学部教授)

北村 黎夫 (大成建設)
 山本 卓也 (")
 丸山 誠 (大林組)
 吉岡 尚也 (")
 飯塚友之助 (清水建設)
 堀田 政國 (")

〔社内〕

山本 正男 (理事)
 橋本 好一 (特任参事)
 大和 愛司 (本社 環境技術開発推進本部 副本部長)
 佐々木秀樹 (" 処分研究グループ 主幹)
 山川 稔 (" 地層科学研究グループ 主幹)
 武田 精悦 (" " 担当役)
 小川 豊 (" ")
 河本 治巳 (" ")
 原 啓二 (東海 環境技術開発部 地層処分開発室 担当役)
 棚井 憲治 (" ")

目次

	ページ
1. 立坑掘削影響試験の目的と位置づけ	1
2. 工事・調査概要	3
3. 立坑周囲のゆるみ領域の力学的・水理学的計測・評価	
(1) 変位・応力計測	9
(2) 物性計測	21
4. 立坑周辺地域の地下水流動の計測・評価	
(1) 水理地質構造調査・観測	33
(2) 水理解析	43
(3) 採水調査	53
5. 質疑応答議事録	60
6. まとめ	64
7. Appendix	
(1) 立坑掘削影響試験関連論文のリスト	
(2) 立坑掘削影響試験関連論文の目次	
(3) 立坑掘削影響試験関連論文集	

1. 立坑掘削影響試験の目的と位置づけ

湯佐泰久

〔概要〕

今回実施した立坑掘削影響試験の目的は、新第三系の堆積岩中での立坑掘削に伴う地質環境に対する影響を定量的に把握・評価すること、および、掘削影響評価についての既存計測・解析手法の有効性を評価することである。本試験は地層科学研究の一環として行われた。地層科学研究は対象を堆積岩系と結晶質岩系に分けて実施しており、今回は新第三系の堆積岩を対象とした研究である。このような研究は、地下構造物の適切な設計・建設および安全性評価のために重要・不可欠な掘削影響についての情報を提供する。

1. はじめに

地下に構造物を建設することが周辺の地質環境に何らかの影響を与えることは容易に想像できる。このような影響を計測・解析し発生メカニズムを把握にすることは、地下構造物を適切に設計・建設し安全性を評価するためには重要であり、技術の向上に寄与することが考えられる。特に、地層科学研究では、安定性を維持している部分であっても、岩盤特性や地下水の流れの変化を評価することが不可欠であると考えられる。

動力炉・核燃料開発事業団では、立坑の掘削に伴って発生する地質環境に対する影響を調査するために、中部事業所の東濃鉱山において、新第三系の堆積岩盤中に新たに立坑を掘削し様々な調査・計測を行ってきた。我々はこの研究を立坑掘削影響試験 (Shaft Excavation Effects Project : SBE Project) と名付けている。このような研究は国内に例はなく、世界的にも花崗岩・岩塩・粘土質岩などを対象とした研究は一部あるものの、新第三系の堆積岩を対象とした例はない。

2. 目的

立坑掘削影響試験の目的は、まず第一に、立坑掘削に伴う地質環境に対する影響を定量的に把握・評価することである。具体的には、立坑掘削に伴い様々な計測・解析を行い、影響の種類やその程度および拡がりを明らかにするということである。さらに、影響の発生する原因やメカニズムの解明も含まれる。

立坑掘削影響試験では基本的に既存技術により計測・解析を行うこととした。これにより掘削に伴う影響を評価するために既存技術がどの程度有効であるかが評価できる。この評価により今後の研究課題が明示され、研究開発の効率のよい進展を図るための情報が提供される。

3. 位置づけ

立坑掘削影響試験は地層科学研究の重要項目のひとつとして位置づけられている。地層科学研究については、「高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の重点項目とその進め方 (平成元年

12月19日、原子力委員会)で、「深地層中の現象を解明するという研究領域を新たに設定して、地層の科学的研究を着実に進めることが重要である」と認識され、「地層処分研究開発の考え方と進め方(平成元年9月26日、動力炉・核燃料開発事業団)」で「地層処分の基盤的な課題である地下深部における地質環境に関する地球化学、水理、熱、岩盤力学、地質構造等基礎的な研究領域に属する課題の研究を「地層科学研究」と位置付け、原位置試験や地下研究施設等において実施する」と規定された。地層科学研究の対象は堆積岩系と結晶質岩系の2岩系に分けられており、今回の試験は堆積岩系を対象とした研究の一部である。地層科学研究では原位置における調査試験の重要性が認識されており、そのために原位置試験や地下研究施設における研究を実施する計画となっている。立坑掘削影響試験は東濃鉱山での原位置試験の一部であり、本試験で得られた知見や抽出された問題点・課題は、地下研究施設における研究の計画立案や今後の研究開発を進めていくためにも活用できる点が少ない。

一方、掘削影響を定量化すること自体、「はじめに」で述べたように、地下構造物の設計・建設や安全性評価のための研究として位置づけることができる。立坑の掘削に伴う影響としては大別して2種類の影響が考えられる。ひとつは岩盤を破壊し空洞をあけることにより周辺岩盤を損傷したり応力状態が変化したりする影響である。これにより周辺岩盤の透水性や変形性といった岩盤特性が変化することが考えられる。このような岩盤特性の変化を計測し関連する事象を明らかにしてその関係を定量化することにより、岩盤のモデル化が可能となる。このようにして開発される岩盤モデルは、設計・建設手法の最適化や安全性評価のために重要な役割を果たす。

もうひとつの影響は、立坑の掘削に伴って立坑中に流出する地下水を排出することにより発生する周辺地域の地下水流動への影響である。この影響を評価するために、まず、事前調査によって対象地域の水理地質構造や水理的な条件を把握する。ここで得られる情報に基づき水理地質構造モデルを構築し初期条件・境界条件を設定し解析を行い影響を予測する。立坑掘削中および掘削後に立坑内への湧水量や周辺の地下水压分布の変化を観測し予測解析結果との比較を行い水理地質構造モデルを確認する。このような一連の手順により確認される水理地質構造モデルは、地下深部における地下水流動特性を的確に評価するために不可欠である。また、水理地質構造モデルを構築・確認する手法や観測手法の有効性が検討できる。

以上のように立坑掘削影響試験には、地層科学研究としての位置づけと掘削影響評価による地下構造物の設計・建設や安全性評価のうえでの位置づけがある。

4. 謝辞

今回の試験の多くの部分は、大成建設・大林組・清水建設・鹿島建設への委託研究として実施した。また、試験結果の解析・評価には、岩盤力学・水理学・地球化学関係の大学の諸先生方に貴重なご意見を戴いた。ここに各社の担当者の方々および諸先生方に謝意を表す次第である。

また、今回のワークショップの発表論文・質疑応答・議論およびこれまでに発表した論文などについては、技術資料としてとりまとめ公開する予定である。

2. 工事・調査概要

杉原弘造

〔概要〕

立坑掘削影響試験で掘削した立坑は、内径6mで深さ150mである。東濃鉱山において新第三系堆積岩中に掘削された。掘削工法は一般的な発破工法で、支保はショートステップにより施工された40cmの厚さのコンクリートである。立坑には各種の計測のために長さ20mの2本の水平坑道と、既存坑道との連絡のために2本の水平坑道が設けられた。調査は、立坑掘削に伴う影響が周辺岩盤への力学的・水理学的影響と周辺地域の地下水流動への影響のふたつ、すなわち「岩盤挙動調査」と「水理調査」として実施した。また、水理調査のために設置した観測孔において採水を行い、研究対象地区の地化学的な調査も実施した。

1. はじめに

今回の試験のために掘削した立坑の設計・施工にあたっては安全性のほか調査試験を行うに適したものとなるように配慮した。掘削工事は調査試験を主体として行うため通常の工事のように工事の進捗を図るのではなく、調査のための期間を確保することを優先した。調査は発生すると予想される影響毎に事前調査を行うなど、最終的な解析・評価を念頭において計画・実施した。ここでは、立坑掘削影響試験で実施した工事・調査の概要を示す。

2. 試験地域の概要

本試験は、岐阜県土岐市にある動燃の東濃鉱山で実施した(図-1)。この地域の地質概要を図-2に示す。海拔100~150mに不整合がありそれ以深は花崗岩の基盤である。不整合から海拔270m付近までは瑞浪層群という新第三系の堆積岩で、下位より土岐夾炭累層、明世累層、生俵累層と呼ばれる。ただし立坑掘削地点では生俵累層は見られない。これらの地層は主に凝灰岩質の砂岩・泥岩で部分的に礫岩をはさみ、土岐夾炭累層には炭質物をはさむ。海拔270m以浅は瀬戸層群と呼ばれる礫を含む固結度の低い第三系~第四系の堆積層である。また、この地域には月吉断層と呼ばれる断層がある。この断層はほぼ東西の走行で60°南傾斜であり、下盤となる北側が約30m落ちの逆断層である。

本地域には図-2に示すように、東濃鉱山の既存の調査坑道が展開している。立坑掘削影響試験のために掘削した立坑(第二立坑)は、既存の立坑(調査立坑)から約80m北東に位置している。

3. 第二立坑の概要及び施工方法

第二立坑は人員や資材の搬出入を考慮して内径を6mとし堆積岩の厚さから深度を150mとした(図-1)。各種計測のため第一・第二計測坑道(各々、幅4.5m、高さ4.5m、長さ20m)と、既存坑道との連絡のため上盤・下盤連絡坑道(各々、幅3m、高さ3m、長さ10m)の4本

本の水平坑道がある。立坑の掘削は通常の発破工法で行われ、1.2 m毎のショートステップで覆工されている。上部5 mまでは1.5 mの厚さ、5 mから立坑底までは40cmの厚さのコンクリートで覆工された。水平坑道の掘削は同じく発破工法で行われ、支保工法は第一計測坑道がNATM (The New Austrian Tunneling Method) で、それ以外は鋼製支保工と矢板による。

立坑の掘削は平成2年1月から開始し平成3年7月に終了した。

4. 調査の内容

立坑掘削による影響は、周辺岩盤への力学的・水理学的影響と周辺地域の地下水流動への影響に分けることができ、立坑掘削影響試験はこれらに対応する「岩盤挙動調査」と「水理調査」の2項目に分けて実施した。岩盤挙動調査は立坑近傍の領域が対象で、水理調査は岩盤挙動調査より広い領域が対象である。また、水理調査のために設置した観測孔において採水を行い、研究対象地区の地化学的な調査も実施した。

4. 1 岩盤挙動調査の内容

立坑掘削に伴って岩盤が影響を受ける領域をここではゆるみ領域と呼んでいる。ゆるみ領域の特性やその広がりなどを定量的に把握するために、立坑掘削前の状況を調査する事前調査を行うとともに、立坑掘削中及び掘削後の状況を調査する計測断面を立坑内に設定した。

測定項目は、地質構造・変位・応力・物性にわたることができる(表-1)。各計測断面や試験孔の配置は、岩相・深度・断層との位置関係などを考慮して、ゆるみ領域の発生状況に関する要因を評価できるようにした。

計測は既存手法を基本に行っており、上述した目的に合致するようなデータを得るうえで、現時点でどのような問題があるかを明確にすることも重要なテーマである。また、各種計測により得られたデータに基づき数値解析を行い、周辺岩盤においてどのような現象が起きていると考えられるかを検討・評価する。

事前調査では、地質状況の概略を把握するため地表で弾性波調査を行った。また、立坑掘削による岩盤の動きを計測するために立坑掘削壁から1 m離れた位置に180mの試験錐(CL-1, 2)を行い、このボーリング孔に挿入式傾斜計を設置した。

立坑掘削中の計測は2種類に分けられる。

①変形挙動に関する調査(図-3)

②力学的・水理学的特性変化に関する調査(図-4)

変形挙動に関する調査では、図-3に示す断面を設定し、立坑切羽が計測断面に到達した時点で各計測項目に対応する計測機器を設置し、掘削再開以後の経時変化を測定した。計測として、支保工にかかる応力を測定する覆工応力測定、支保工応力測定、背面土圧測定や、岩盤の変位を測定する岩盤内変位測定、内空変位測定、天端沈下測定などを行った。

力学的・水理学的特性変化に関する調査では、立坑切羽が図-4に示す計測断面に到達した時点で掘削前のデータを採取し、立坑切羽が計測断面から十分離れた時点で掘削後のデータを採取し、この両者を比較した。計測として、変形特性を測定する孔内載荷試験、透水特性を測定する透水試験、弾性波の伝播速度を測定する孔間弾性波測定、割れ目の分布を測定するポアホールテレビ観察などを行った。ジオトモグラフィーの計測は、第一計測坑道掘削後、第二計測坑道掘削後、立坑掘削終了後の3回行いデータを比較・検討した。ひずみの連続測定では第二計測坑道掘

削後、月吉断層の上盤と下盤にひずみ計を埋設し、立坑掘削中の周辺岩盤における応力変化にもなうひずみ変化を測定した。

各計測断面などにおける計測項目は表-1にまとめた。

4. 2 水理調査の内容

立坑の掘削は大口径の試験錐による揚水試験と同じであり、これによる水理的な影響を定量的に解析・評価するのが水理調査の目的である。

本調査の項目は、つぎの5項目である。

①水理地質構造調査

②表層水理調査

③MPシステム(Multiple Piezometer System)による水圧計測

④坑内湧水量調査

⑤地下水流動解析

水理地質構造調査では周辺岩盤の水理的特性とその三次元的な広がりを把握するため、図-5に示すTH-1~8, SN-4, AN-6の位置に130~200 mのボーリング孔を掘削し、各ボーリング孔において、コア観察、物理検層(電気、放射能、キャリパー)、ポアホールテレビ観察を行った。この結果に基づき、代表的な位置において各孔10点で透水試験を行い、透水係数分布を把握した。

表層水理調査では、地下水流動解析の上部境界条件となる地下水涵養量を把握するために、瀬戸層群を対象として地下水位と土壌水分を観測できる機器を合計9か所に設置した(図-5)。また、降水量などを測定するための気象観測設備と河川流量を測定するための河川流量計を1か所ずつ設置した。

TH-1~8, SN-4, AN-6にはMPシステムを設置した。これはカナダのWestbay社が開発した単一孔多区間水圧測定・採水システムである。パッカーにより測定区間を設けて、ポートという特殊なバルブをとおして、プローブにより水圧測定や採水ができる機器である。各ボーリング孔を14~34の測定区間に分割し、各区間にポートを設置した。水圧測定は立坑掘削開始前から始め岩盤内の水圧分布の初期条件とその立坑掘削による変化を観測している。測定は立坑掘削後8か月目の平成4年3月までは1~2週間に1回行い、現在は1か月に1回行っている。また、TH-1, 2, 3, 4, 6, 8, AN-6の特徴的と考えられる層準において採水を行った。立坑掘削開始直後から現在までに各採水点において2~9回の採水を行った。

坑内湧水量調査では既存の調査坑内で20か所と第二立坑において湧水量を測定している。第二立坑では掘削の進行に合わせ10深度において集水リングを設置し計測している。これらのデータは、水理解析の境界条件や確認データとなる。

地下水流動解析では、以上の各調査により得られるデータに基づき三次元飽和・不飽和浸透流動解析を行った。予測解析の結果は実測値と比較した。

5. スケジュール

立坑掘削影響試験の概略スケジュールを図-6に示す。立坑掘削終了後も設置した計測機器による長期観測を継続している。

6. 参考文献

- 1) 杉原弘造、他：東濃地域における立坑掘削影響試験-全体計画-，日本原子力学会「1991春の年会」要旨集，P524，1991年。
- 2) 柳澤孝一、他：東濃地域における立坑掘削影響試験-立坑掘削に伴う水理学的影響調査研究の概要-，日本原子力学会「1991春の年会」要旨集，P525，1991年。

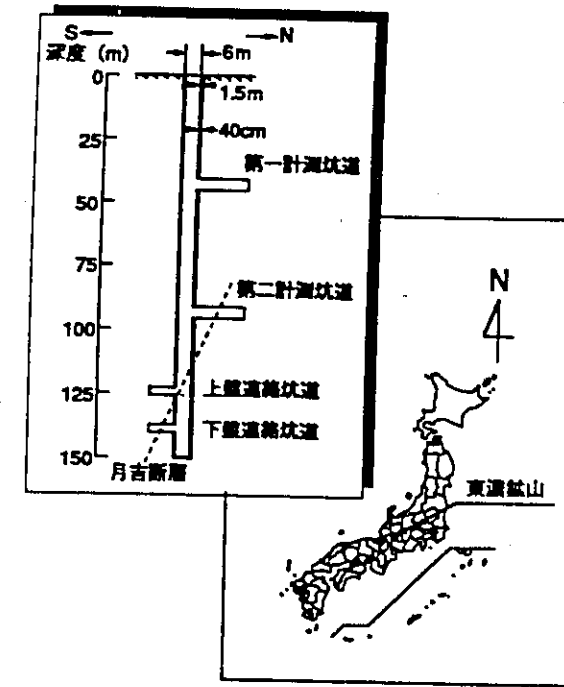


図-1 位置図および立坑図

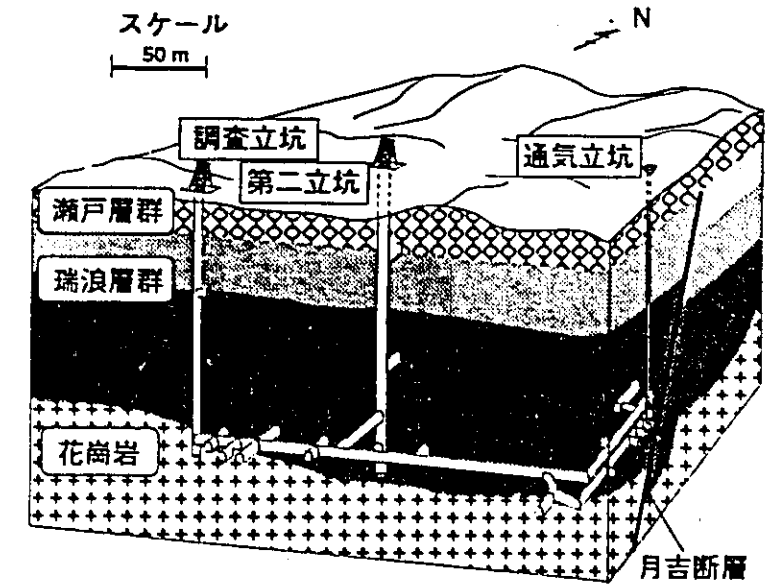


図-2 東濃鉱山地質・坑道概要図

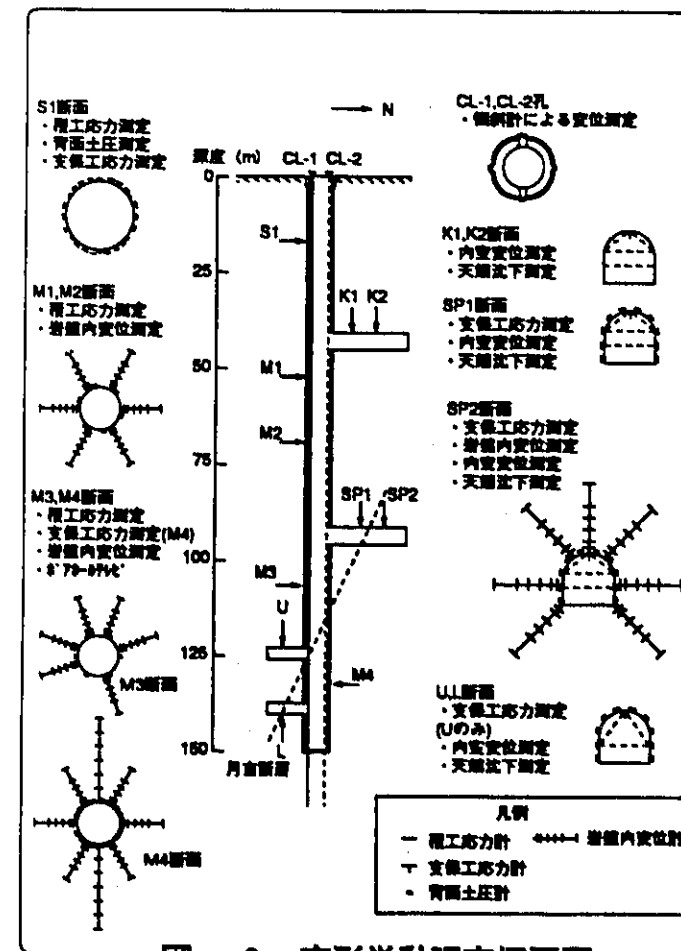


図-3 変形挙動調査概要図

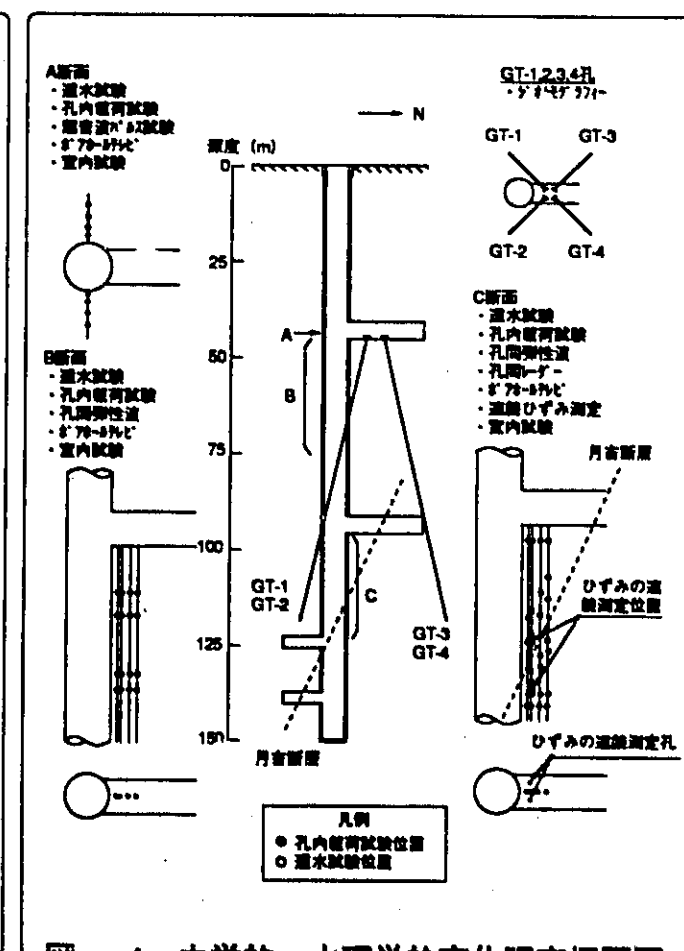


図-4 力学的、水理学的変化調査概要図

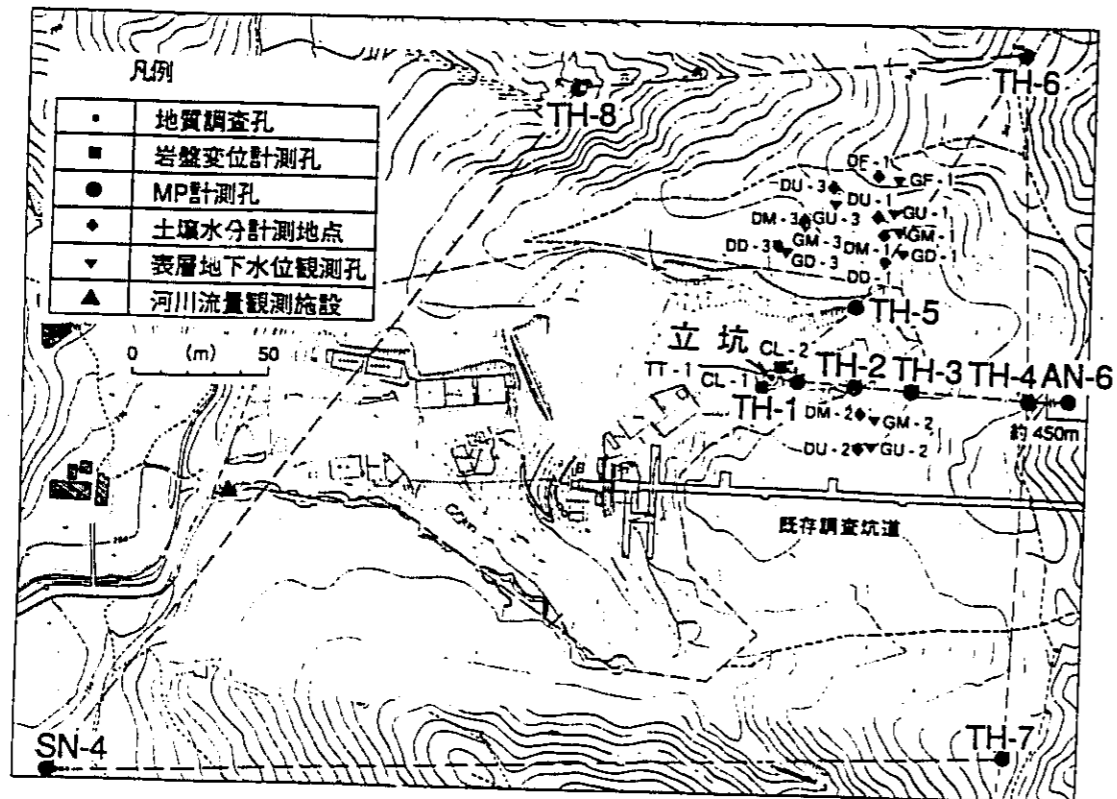


図-5 試錐および水理観測システム位置図

	元年度	2年度	3年度	4年度
(1)立坑掘削工事				
(2)水理調査 ・事前調査 ・観測, 採水 ・解析				
(3)岩盤挙動調査 ・事前調査 ・機器設置, 測定 ・解析				

図-6 立坑掘削影響試験工程

表-1 岩盤挙動調査測定項目

大項目	中項目	項目	M1	M2	M3	M4	S1	K1	K2	SP1	SP2	U	L	A	B	C	坑内	坑外	
地質 調査	弾性波探査 坑壁探査																切羽	4	
		岩盤 変位 支保層	内空変位・天端沈下 岩盤内変位 傾斜計による測定 覆工壁面変位 断面変位	○	○	○	○		○	○	○	○	○					5 2	2
応力 支保	岩盤 支保	初期応力測定 ひずみ連続測定 支保工応力 覆工応力 背面土圧	○	○	○	○	○			○	○	○						4 2	
		コア 変形性 透水性 弾性波	室内試験 孔内観測試験 透水試験 孔内弾性波 弾性波トモグラフィ 超音波パルス 孔内レーダー ポアホールテレビ			○	○								○	○	○	○	
特性 調査	電磁波 探査																		

注; ○=実施、数字=実施箇所数/孔数

3. 立坑周囲のゆるみ領域の 力学的・水理学的計測・評価 (1)変位・応力計測

佐藤稔紀、松井裕哉、杉原弘造

【概要】

本研究では、立坑掘削に伴う周辺岩盤の変形挙動と応力変化を計測し、数値解析結果と併せてゆるみ領域の評価を行った¹⁾。その結果、立坑掘削に伴う周辺岩盤の変形挙動と応力変化は、①地質、き裂に深く関係しており、②き裂頻度を考慮した物性値を用いることにより、弾塑性有限要素法解析で、ある程度の表現が可能であることが分かった。また、異なる4種類の方法で岩盤の初期応力を測定した。その結果、各手法の堆積岩への適用性が検討できた。

1. はじめに

立坑掘削に伴う周辺岩盤の変形挙動に影響を及ぼす要因には、地質、断層やき裂等の割れ目分布、覆工過程、深度の違いなどが考えられる。これらの影響を把握するために、立坑の4つの断面で地中変位計測を行った。また、立坑周辺岩盤のひずみを経時的に測定した。以下には、変位計測、応力計測、初期応力測定毎に、概要、結果、考察などを示す。

2. 変位計測²⁾

2.1 計測の概要

(1) 計測の位置と目的

図-1に立坑の断面と計測位置を示す。変位計測の目的は次のとおりである。M1およびM2断面では、明世累層と土岐炭層の層境の上下に設けて、地質の影響を検討した。M3断面では月吉断層の影響を検討した。M4断面では無覆工の期間を設け、覆工の効果を検討するとともに、12mの地中変位計を設置し、6mの地中変位計の最深部の動きを検討した。

(2) 計器の設置方法

立坑を各計測断面まで掘削した後、立坑切羽面の上方約1mに、地中変位計を設置するための水平ボーリング孔を立坑の半径方向に掘削した。これらのボーリング孔においてコア観察やポアホールスキャナーによる孔壁観察を行い、地質やき裂分布を調査した。

(3) 計測方法および頻度

岩盤の変位は電気信号に変換し、パーソナルコンピュータに取り込んだ。計測頻度は、1日に1、2回である。なお、初期値は立坑の掘削を再開する直前に計測した値とした。

2.2 計測結果

立坑掘削に伴って生じた変位は、全ての計測点で、立坑切羽が計測断面から3D (D:立坑内径=6m) 離れるまでに収束した。また、M2断面の立坑壁面近傍と、M3とM4断面の断層側

の測線で比較的大きな変位が生じた。図-2~3に各計測断面の変位分布図を示す。

2. 3 考察

M1~M4の各断面において計測された変位の大きさ、収束状況、分布に影響を及ぼす要因について各々検討する。また、数値解析の結果を検討する。

(1) 地質状況

明世累層内にあるM1断面ではほとんど変位は生じておらず、土岐夾炭累層内にあるM2断面では立坑壁面近傍に大きな変位が生じた。また、M2、M3、M4断面は土岐夾炭累層内であるが、M2断面は凝灰質泥岩、M3とM4断面は凝灰質砂岩と岩質が異なる。M2断面と覆工過程が等しいM3断面の断層と反対側の測線を比較すると、生じた変位はM2断面の方が大きい。

掘削に伴う変形性は岩相により異なり、また、岩質によっても異なると言える。

(2) 断層・き裂

M3とM4断面の測線の一部は月吉断層と交差している。変位は交差付近で生じており、変位の大きさは断層と交差していない測線より大きい。図-4にM3断面の孔壁観察結果を示す。き裂の頻度は断層側では1m当たり1~2本であり、断層と反対側は1本未満である。このように断層に向けた測線は他の測線よりき裂頻度が高く、M4断面でも同様の結果が得られている。このことから、変位の大きさは断層の存在やき裂頻度に依存していると言える。

(3) 覆工過程

M4断面の上下約1Dは他の部分とは異なり一時無覆工で掘削しているため、M4とM3断面の変位の分布を比較することにより、覆工過程の影響の検討が可能である。M4断面では立坑壁面に近づくにつれて変位が大きくなる傾向が見られる。一方、M3断面では生じた変位が立坑壁面近傍で抑制されている。このように、覆工が立坑掘削に伴う変位の発生を、立坑壁面付近で抑制していることが考えられる。

(4) 深度

一般に、深度が大きくなるにつれて岩盤内の応力は増加する。このため、掘削に伴う岩盤の変位は弾性係数が同程度であるなら深度に対応して大きくなることが予想される。しかし、比較的大きな変位が計測されたのはM2断面の立坑壁面近傍と、M3とM4断面の断層に向けた測線であり、深度との相関は見られない。

(5) 不動点の位置について

M4断面の計測結果から、立坑壁面から6mの位置でも変位が生じていることが分かったが、計測された変位は壁面変位と比較するとごく僅かである。図-5に内空変位と地中変位の計測結果の比較を示す。立坑掘削開始後の内空変位と地中変位の状況はほぼ一致している。変位の大きさは内空変位の方が若干大きく、立坑から1.2m離れた位置でも岩盤が変位している可能性がある。しかし、その差は小さく、立坑壁面近傍での掘削影響評価には影響しないと考えられる。

(6) 数値解析

①流動要素法による掘削影響評価

地中変位計測で得られた変位の実測値を用いて強制変位を与える逆解析を流動要素法⁹⁾により行った。入力定数は原位置および室内試験で得られた値を用いた。解析で得られたせん断応力と室内試験から得られたせん断強度と内部摩擦角を用いて安全率を求めた。その結果、変位を局所的に与えたにもかかわらず、安全率が1を下回る塑性域は発生していないことが分かった。

②有限要素法による軸対象解析

立坑掘削に伴う変位の収束状況を把握するために、有限要素法による軸対称弾塑性解析を行った。入力定数は立坑掘削の事前調査に基づいて決定した。M3断面の深度における解析結果を図-6に示す。壁面変位は切羽が2~3D離れた時点で収束している。計測結果では、全ての変位は切羽が3D離れるまでに収束しており、解析結果と調和的である。変位の大きさが実測値と合わなかったのは、入力した弾性係数が小さすぎたためと、覆工を考慮しなかったためである。

③3次元有限要素法解析

立坑掘削に伴う周辺岩盤の変形挙動には、断層の存在が大きく関与していることから、断層を取り込める3次元の有限要素法解析を行った。入力物性値はき裂間隔を考慮して決定した。き裂間隔が中程度(200~600mm)以下の場合には孔内載荷試験の結果を、き裂間隔が広い(600mm~)場合は室内試験の結果を用いた。解析結果の一例(M3断面)を図-7に示す。実測で得られた断層付近で変位が発生し、覆工の効果で変位が抑制されている状態が表現できたと言える。

2. 4 まとめ

立坑掘削に伴う周辺岩盤の変形挙動を地中変位計を用いて計測した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 掘削に伴う周辺岩盤の変形挙動は地質によって異なる。
- (2) 断層が存在する所やき裂頻度が高い所では掘削に伴う変位が増大する。
- (3) 深度の影響は地質や割れ目の影響に隠れて明確に捉えられなかった。
- (4) コンクリート覆工には変位の発生を抑制する効果がある。
- (5) 立坑壁面から6~1.2m離れた所でも変位が発生しているが、その大きさは壁面変位に較べるとごく僅かであり、立坑壁面近傍の評価には影響しない。

地中変位計で把握した岩盤の変形挙動を論理的に理解するため数値解析を行った。また、実測された変位を用いて逆解析を行った。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 安全率が1を下回る塑性域は発生していない。
- (2) 立坑掘削に伴う変位の収束状況は有限要素法軸対称解析ではば表現できる。
- (3) 変位の分布状況は3次元有限要素法解析によりほぼ表現できる。

3. 応力計測¹⁾

3. 1 計測の概要

(1) 計測の位置と目的

応力計測を行った位置は図-1に示してある。断層の上下に8成分ひずみ計²⁾を埋設し、立坑掘削に伴う周辺岩盤の応力状態が変化する過程を把握することを試みた。また、断層の上下での違いを検討する配置とした。

(2) 機器の設置方法

第2計測坑道を掘削後、立坑壁面から約2m離れた位置に鉛直ボーリング孔を2孔掘削した。深さは10.5mと28.0mである。コア観察の後、孔底にひずみ計を埋設した。

(3) 計測方法および頻度

岩盤のひずみは電気信号に変換し、パーソナルコンピュータに取り込んだ。計測頻度は、一発破毎である。なお、初期値は立坑の掘削を再開する直前に計測した。

3. 2 測定結果

測定された8成分のひずみから立坑の半径、接線、掘進方向のひずみ成分を求め、Hooke則により応力 σ_r 、 σ_t 、 σ_z を求めた。これらを立坑切羽位置の関係でプロットしたものが図-8である。立坑切羽がひずみ計を埋設したレベルに到達する以前から、半径方向の応力 σ_r は引張り側に、接線方向の応力 σ_t は圧縮側に变化していくことが分かる。一方、掘進方向の応力 σ_z はほとんど変化していない。变化した応力は切羽が1D離れるまでに収束している。

3. 3 考察

計測結果を理論的に解釈するために、有限要素法による軸対称弾塑性解析を実施した。計測結果から、掘削に伴う変形挙動はき裂頻度の影響を強く受けているため、解析に用いる入力物性値の弾性係数は、き裂間隔に応じて孔内載荷試験と室内試験の値を使い分けた。すなわち、き裂間隔が中程度の場合は孔内載荷試験の結果を、き裂間隔が広い場合は室内試験の結果を用いた。その他の値は室内試験の結果を用いた。解析結果を図-9に示す。実測結果と比較すると、断層下側ではおおむね傾向が一致しているが、断層上側では切羽の通過前後に挙動の違いが見られる。しかし、切羽が0.5D以上離れると解析結果とほぼ一致している。

3. 4 まとめ

立坑掘削に伴って周辺岩盤内に生じるひずみを先行埋設した多軸ひずみ計を用いて計測した。また、軸対象有限要素法解析を行い、計測結果と比較した。その結果、き裂間隔に応じた弾性係数を入力することにより、有限要素法解析で、立坑掘削に伴う応力場の変化をほぼシミュレーションできることが分かった。

4. 初期応力測定

4. 1 計測の概要

図-10に示すように、第2立坑の第1計測坑道からボーリング孔を掘削し、応力解放法(8成分ひずみ計)、ダブルフラクチャー法、水圧破碎法により初期応力を測定した。また、応力解放法のオーバーコアを用いてAE法を実施した。

4. 2 計測結果

応力解放法については、垂直応力はほぼ被り圧に等しい。また、3地点の測定結果はほぼ一致した。水平面内での主応力は東西方向であり、3次元的主応力は等方的であった。

水圧破碎法で得られた鉛直応力は被り圧の約2倍であったのに対し、ダブルフラクチャー法は約1.3倍であった。

AE法については、鉛直応力は被り圧の約半分であった。また、水平面内での最大主応力方向は東から南へ13°の方向であった。

各方法で得られた3次元主応力の値と、それを上半球に投影したものを図-11に示す。

4-3 考察

各方法で得られた主応力の値と方向はすべて異なっている。応力解放法は3地点の結果が一致し、一点で3方向の主応力が測定できることから測定結果の信頼性は高いと言える。ダブルフラクチャー法と水圧破碎法は、他の2つの方法に比べ求められた主応力値が大きい。この原因としては、測定孔の配置の関係で同一ポイントで測定できなかったことや測定地点の土被りが浅いために既存き裂や節理などの影響が考えられる。また、等方弾性体を仮定し導出した式を用いて応

力値を算定しているため、異方性の強い岩盤では応力値を求める場合に誤差が大きくなる可能性もある。AE法では、鉛直応力が被り圧の約半分であったことから、堆積岩でのカイザー効果から推定される応力の時間依存性を確認する必要がある。

4-4 まとめ

第2立坑第1計測坑道にて、4種類の方法を用いて岩盤の初期応力を測定した。その結果、被りが浅いため各方法で得られた応力値と方向は異なった。今回の初期応力測定では、応力解放法で得られた結果が最も信頼性が高いと考えられる。

5. おわりに

立坑掘削に伴う周辺岩盤の挙動を地中変位計と8成分ひずみ計を用いて計測し、数値解析結果と比較検討した。その結果、き裂や断層が岩盤の変形挙動に強く関与していることが分かった。また、立坑掘削に伴う岩盤の挙動は、弾塑性有限要素法を用いてある程度表現できることが分かった。解析の際には、き裂間隔を考慮した弾性係数の値を用いればよいことがわかった。また、初期応力の測定は、測定位置の被りが浅かったため、各測定方法で異なる結果が得られたが、応力値は水圧破碎法が、方向は応力解放法が信頼性があることが分かった。

6. 今後の課題

おもな課題として以下の項目が挙げられる。

- (1) 変形挙動に影響を及ぼすき裂の同定。
- (2) 複数深度における初期応力の測定。
- (3) 掘削に伴う物性の変化と変形挙動の関連づけ。

7. 参考文献

- 1) 杉原他、新第三系堆積岩における立坑掘削影響試験の概要、土木学会、「地下空間利用シンポジウム1992」講演要旨集
- 2) 佐藤他、立坑掘削影響試験-多点式変位計による岩盤の変位調査-、日本原子力学会、「1992春の年会」要旨集、B49
- 3) 木山他、連続体の大変形解析のための流動要素法(FLEM)の提案、土木学会論文集、No. 439、1991年12月号
- 4) 吉岡他、立坑掘削に伴うひずみの原位置計測とその数値解析、材料、投稿中
- 5) 金川他、オーバーコア法による3次元地圧計測法-埋設型8成分ひずみゲージの開発-、電力中央研究所報告、1986

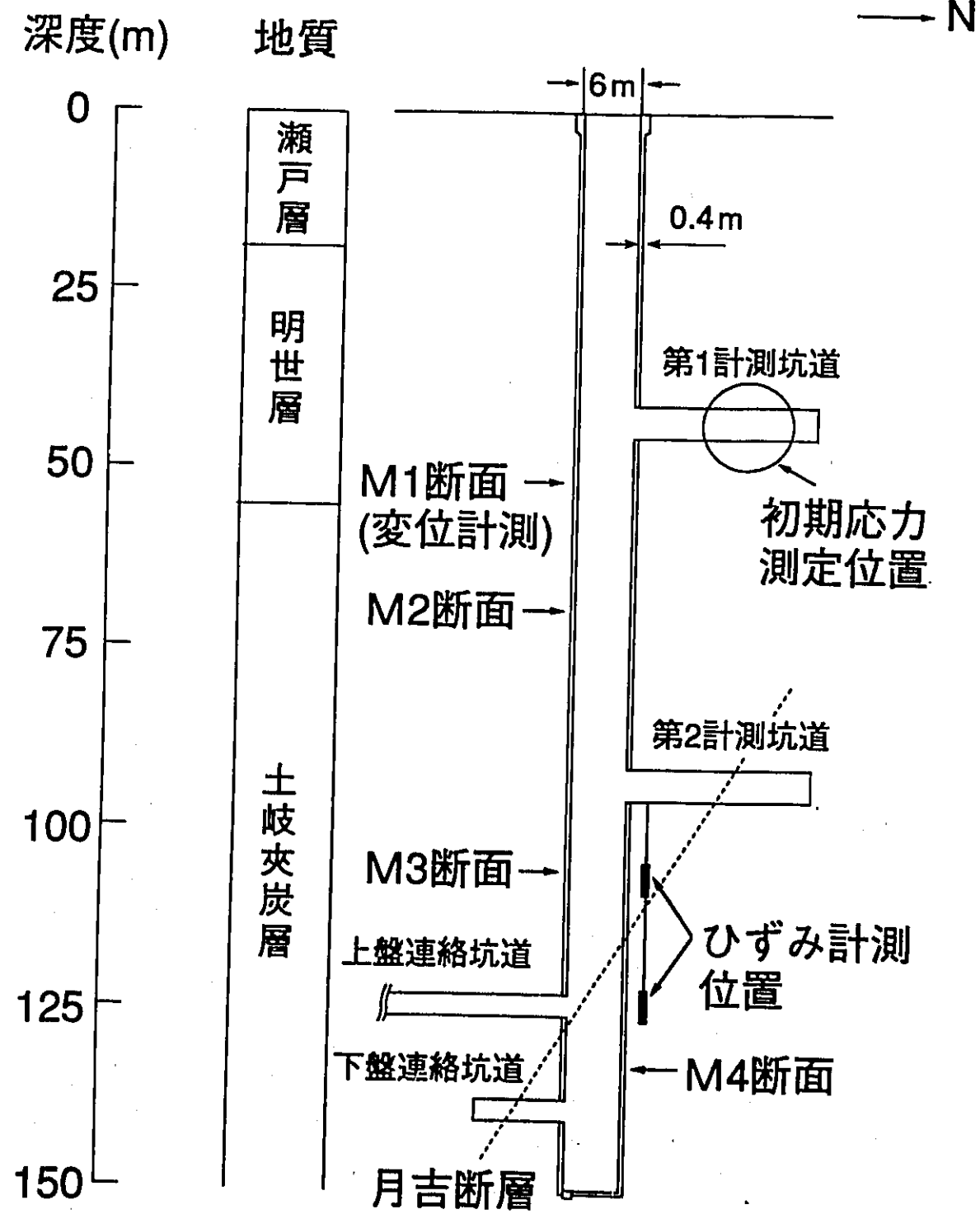


図-1 立坑断面図と計測位置

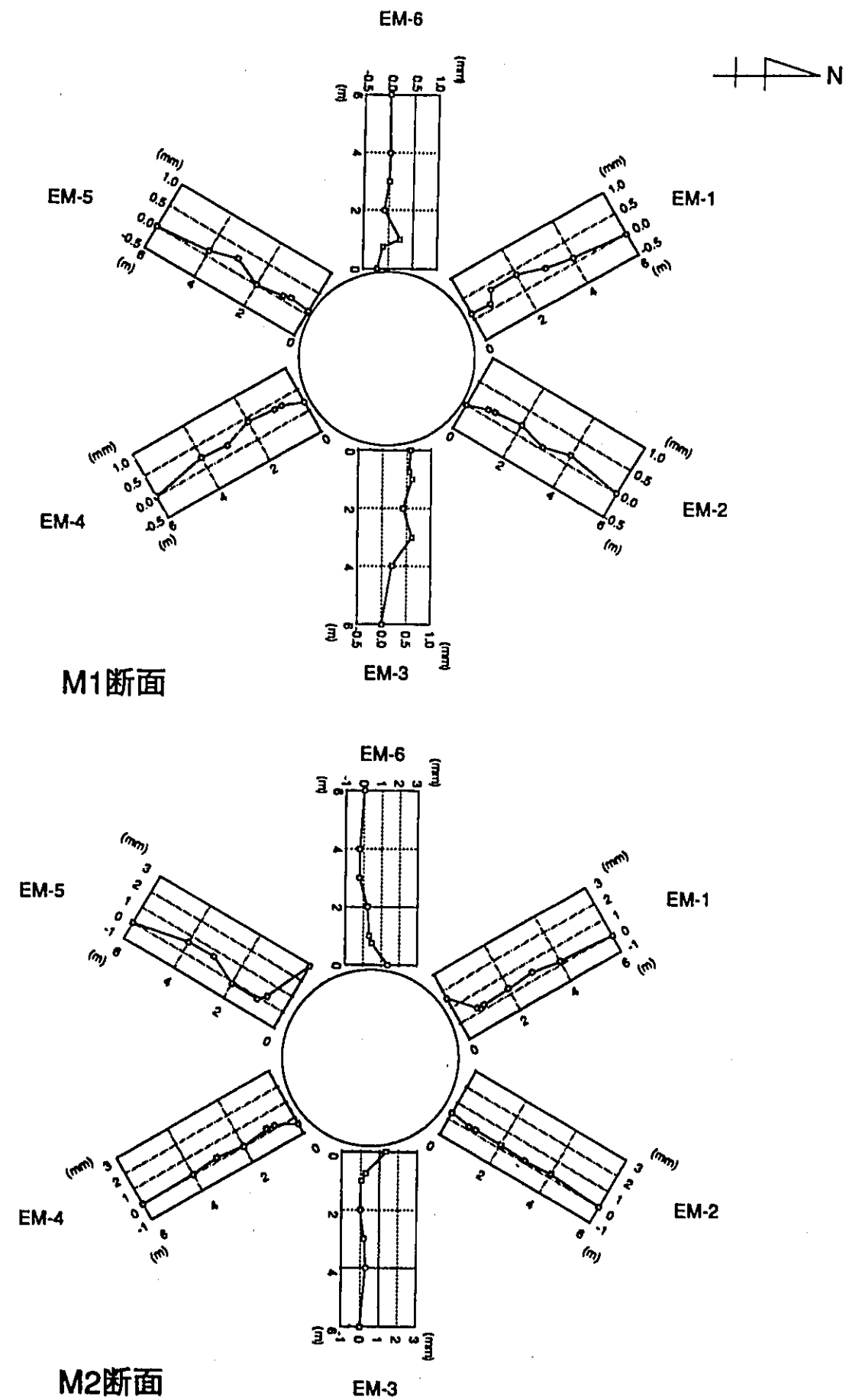
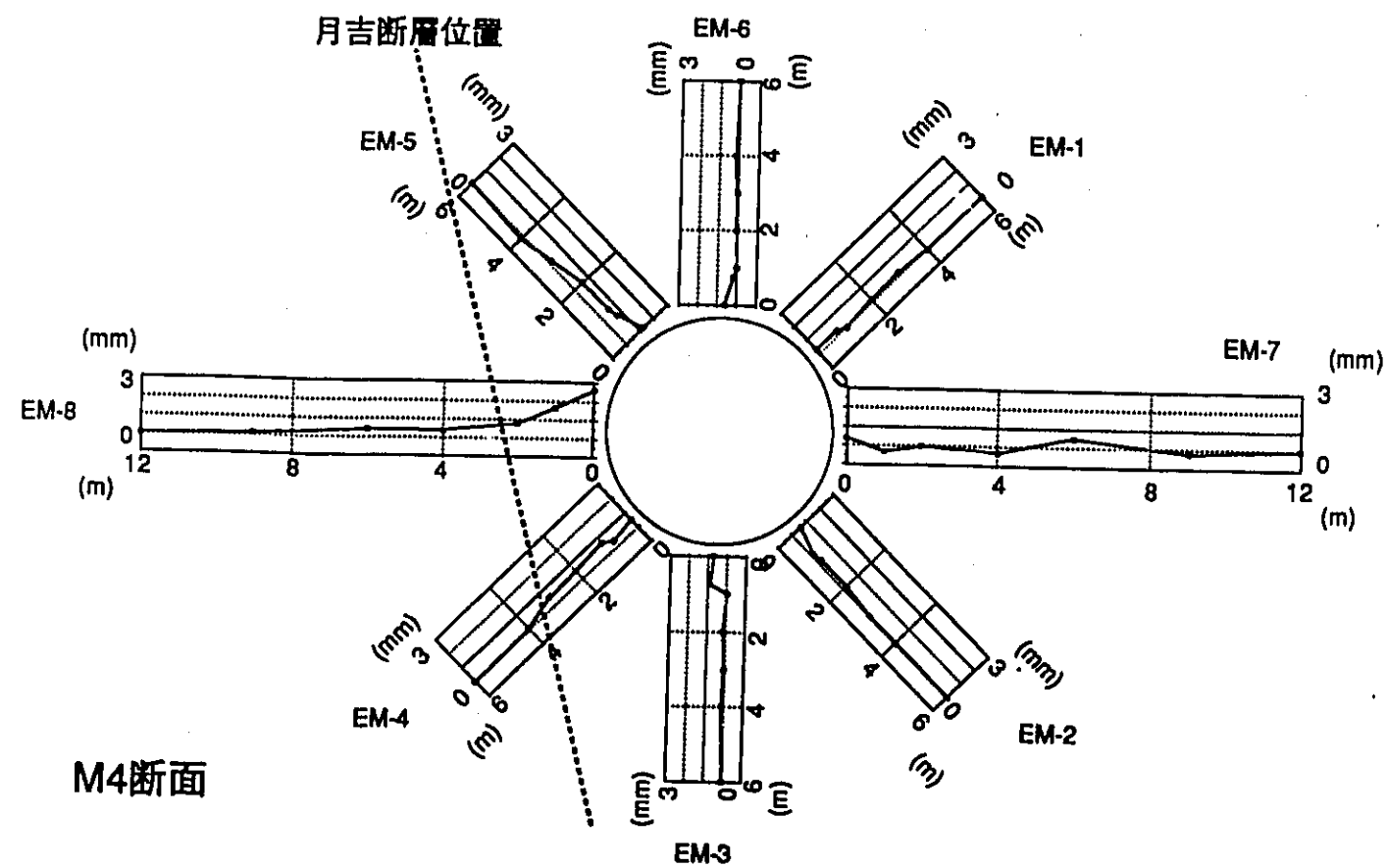
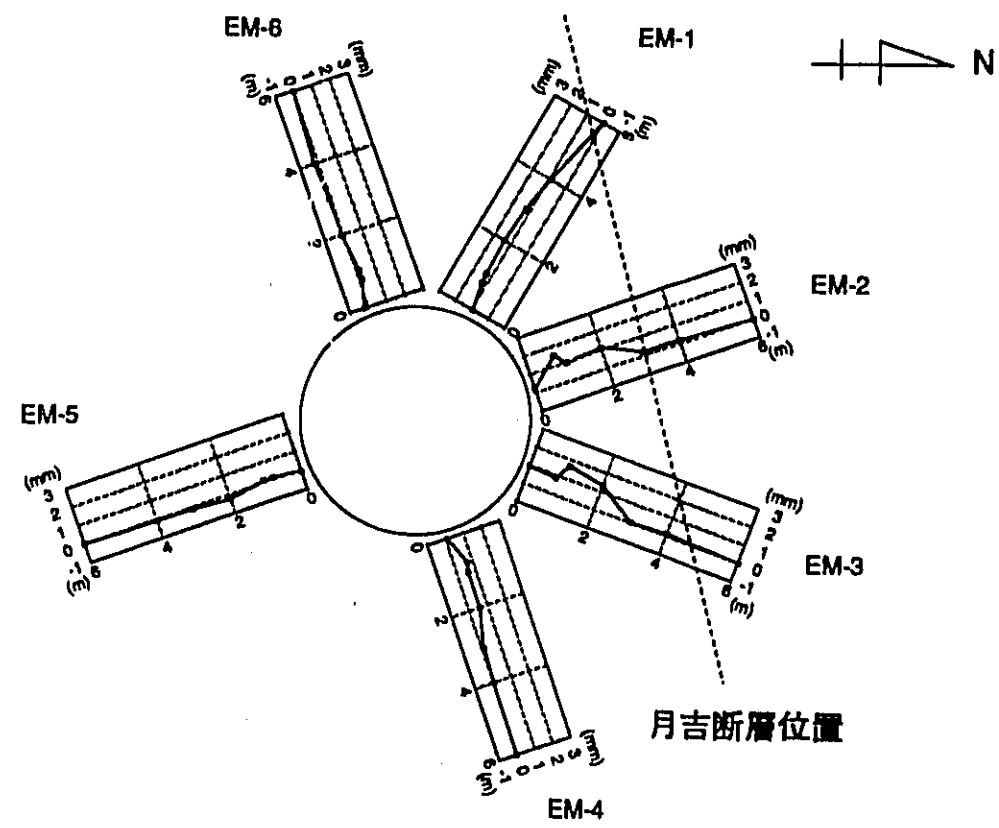


図-2 地中変位分布図 (切羽離れ3D)

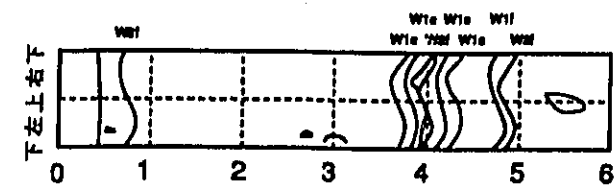
M3断面



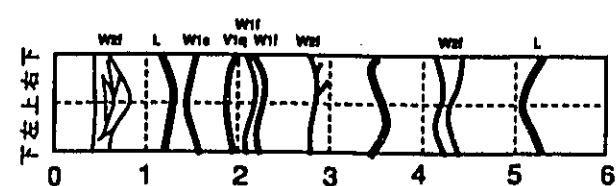
M4断面

図-3 地中変位分布図 (切羽離れ 3 D)

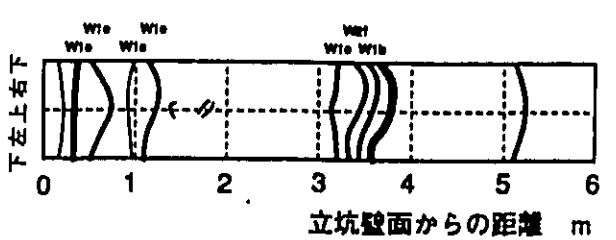
EM1



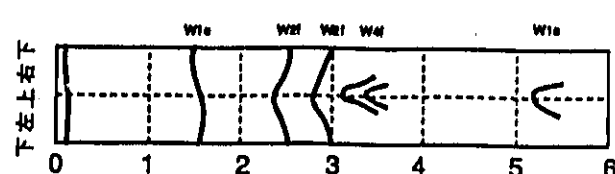
EM2



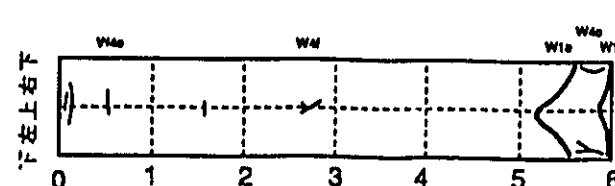
EM3



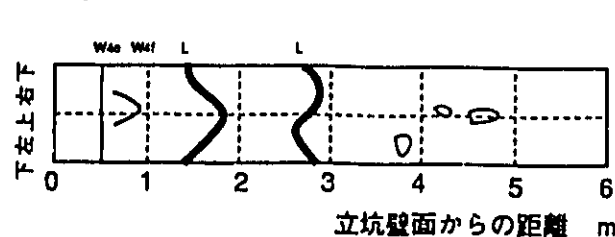
EM4



EM5



EM6



割れ目の型

開口した割れ目		Wo
密着した割れ目		Wc
剥離を伴う割れ目		Wl
破砕帯 (境界)		Wb
充填物を伴う割れ目	粘土を充填するもの	Jc
	グラウトミルクを充填するもの	Jm
鉱物の細脈	白色鉱物の細脈	Vq
	有色鉱物の細脈	Ve
層理および地質境界		L

割れ目の形状

単独の割れ目	1	
派生する割れ目を伴うもの	2	
平行する数本の割れ目からなるもの	3	
規則性のない割れ目 断続的な割れ目	4	

【例】

派生割れ目を伴う開口割れ目 W2o
不規則な白色鉱物の細脈 V4q

図-4 孔内観測図 (M3断面)

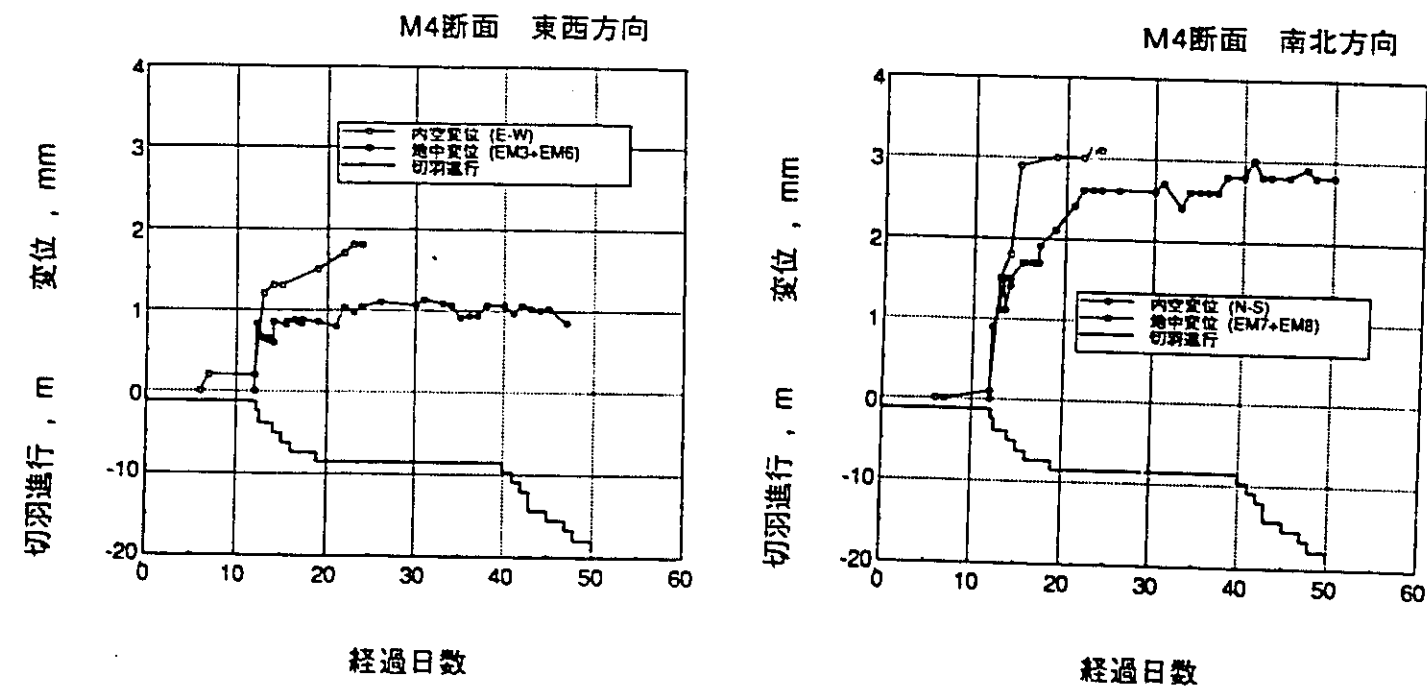


図-5 地中変位と内空変位の比較 (M4断面)

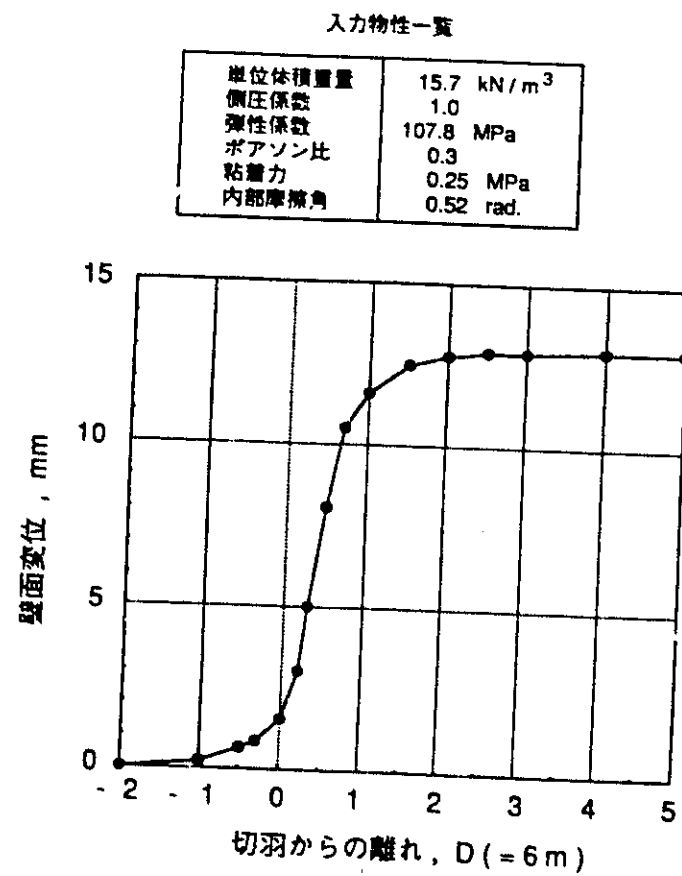


図-6 FEMによる軸対象弾塑性解析結果

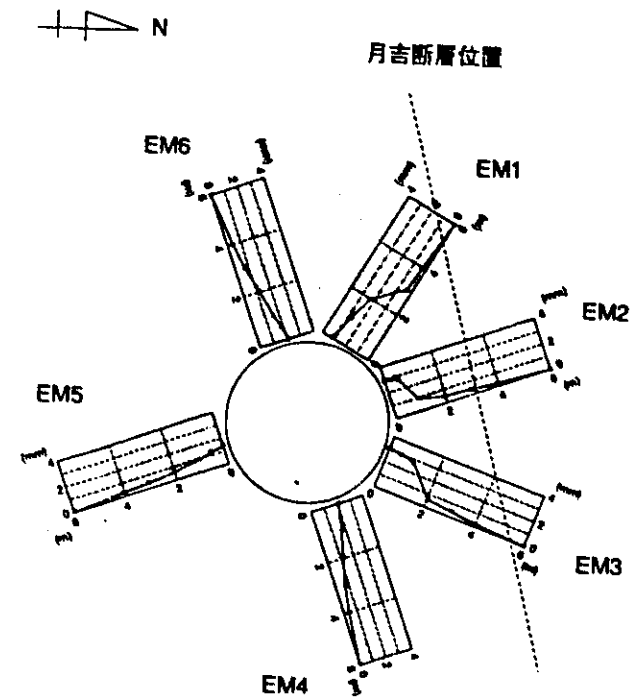


図-7 3次元 FEM 解析結果 (M3断面)

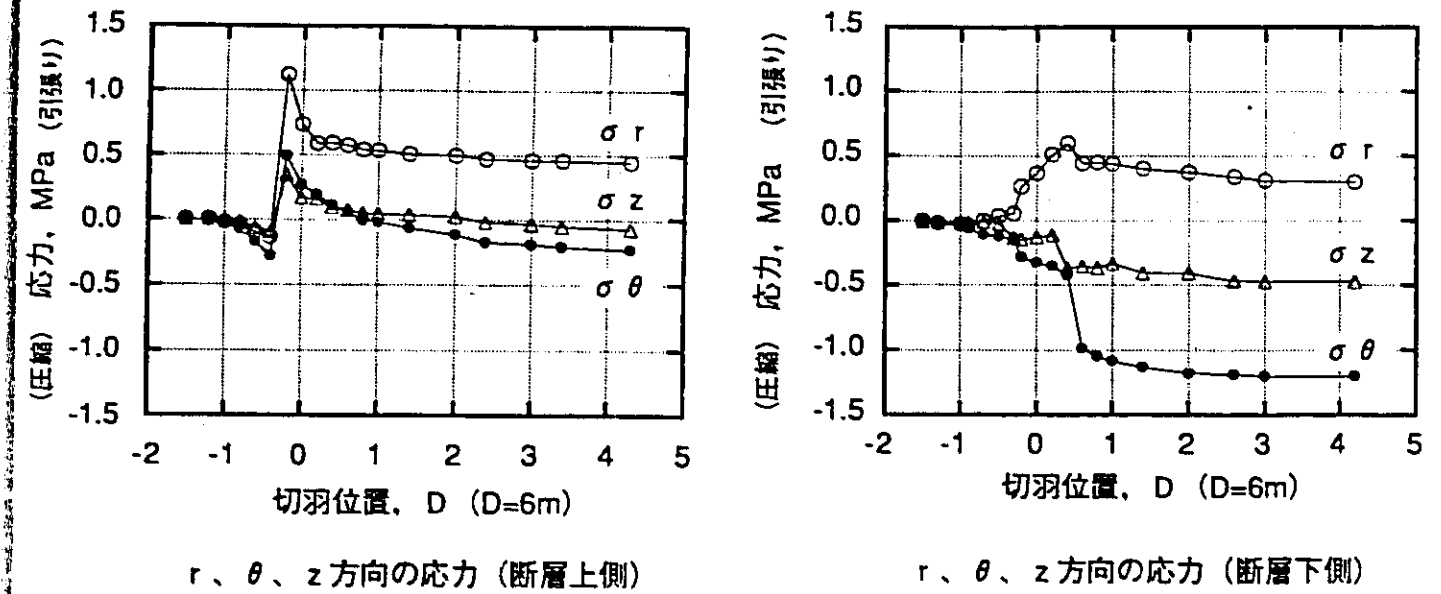


図-8 ひずみ計測結果

入力物性一覧

岩盤	単位体積重量	15.7 kN/m ³
	側圧係数	1.0
	弾性係数	1086 MPa
	ポアソン比	0.3
	粘着力	0.3 MPa
覆工	内部摩擦角	0.52 rad.
	弾性係数	3333 MPa
	ポアソン比	0.2
	厚さ	0.4 m

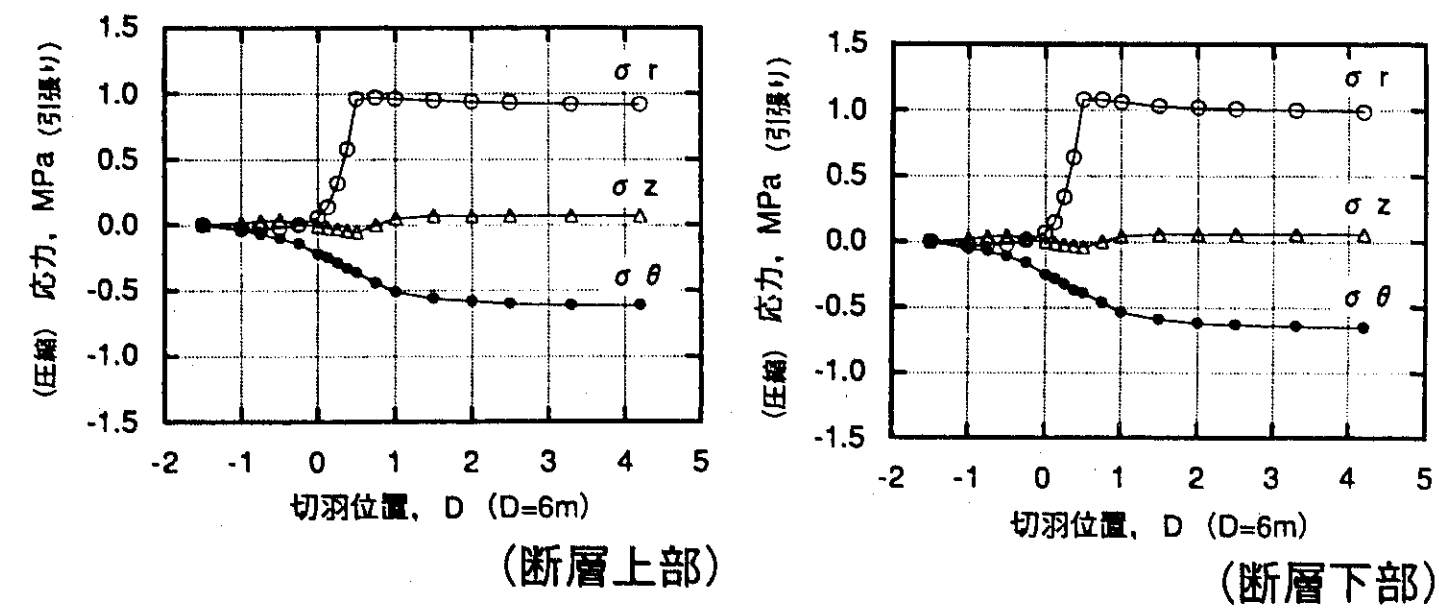


図-9 FEMによる解析結果

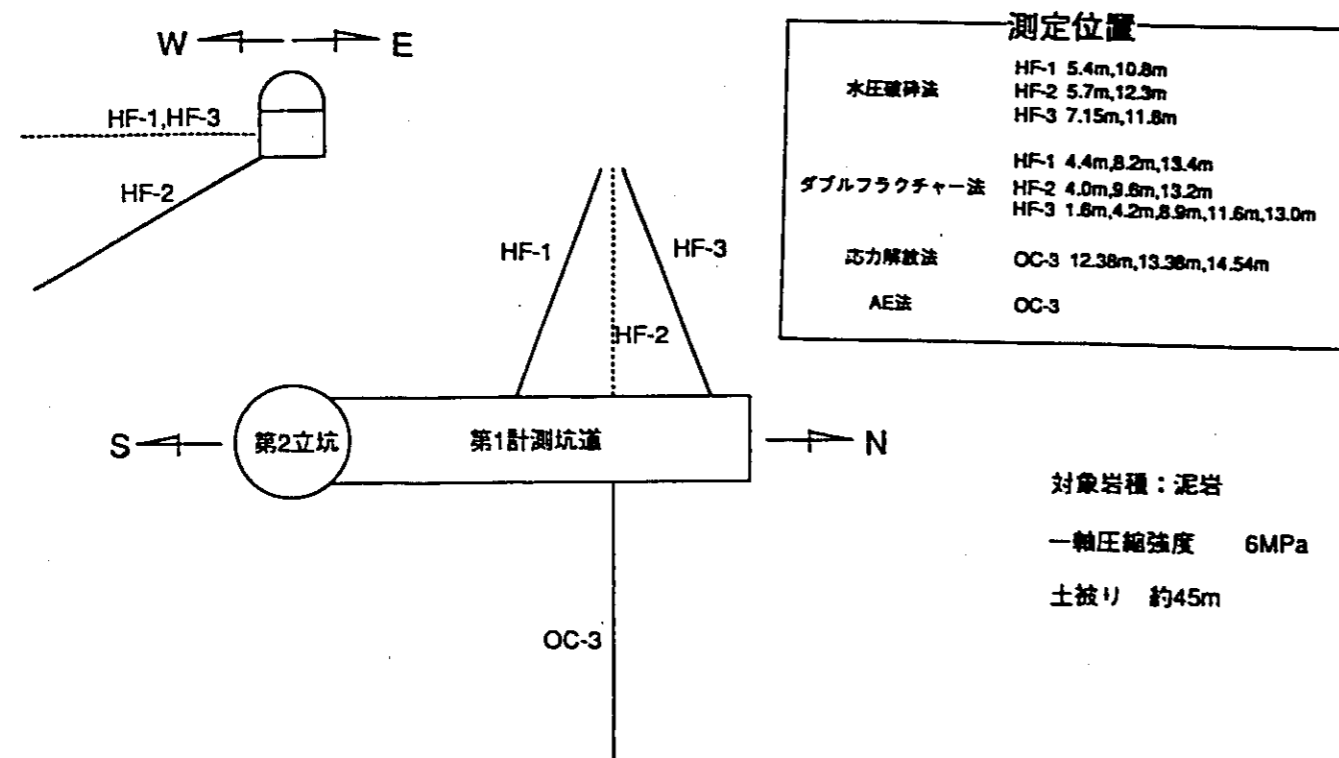


図-10 第2立坑第1計測坑道における初期応力測定位置

測定手法		初期応力値 (MPa)
ダブルフラクチャー法	σ_1	1.44
	σ_2	1.20
	σ_3	0.92
水圧破砕法	σ_1	1.88
	σ_2	1.52
	σ_3	0.93
応力解放法	σ_1	0.98
	σ_2	0.88
	σ_3	0.77
AE法	σ_1	0.48
	σ_2	0.37
	σ_3	0.29

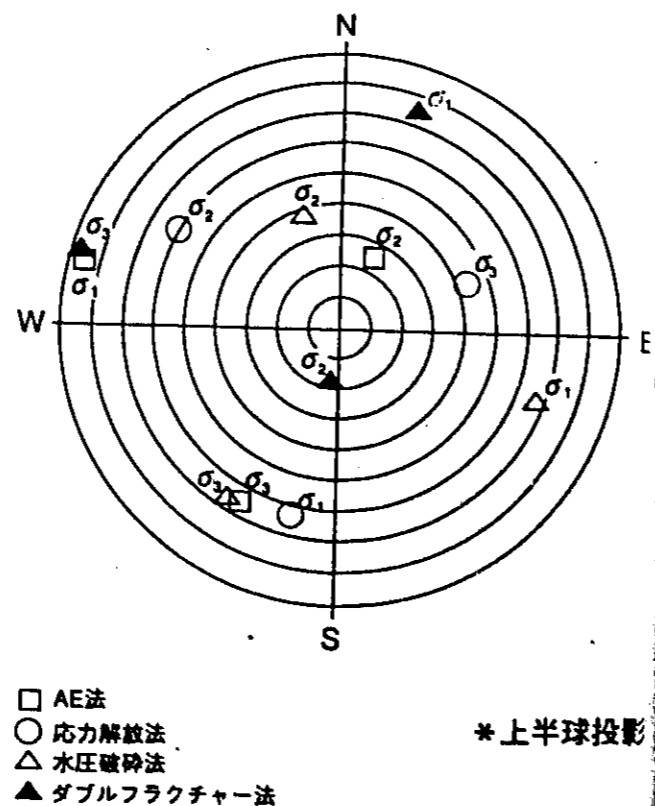


図-11 初期応力測定結果

3. 立坑周囲のゆるみ領域の力学的・水理学的計測・評価 (2) 物性変化

松井 裕哉, 杉原 弘造, 佐藤 稔紀

〔概要〕

本研究では、新第三系の堆積岩を対象として立坑掘削に伴う周辺岩盤の諸特性（変形特性、透水特性）の変化を計測・解析し、掘削影響の評価を行った。その結果、①取得されたデータを解析・評価した結果、立坑掘削によって特性変化の生じたと考えられる領域は、立坑壁面から1.3m程度（岩盤壁面から約1m程度）であると推定される。②取得した岩盤の力学的特性に関するデータからゆるみ領域を把握するために、永久変形係数を用い計測データの解析・評価を行った。その結果、永久変形係数は掘削影響を評価する上で一つの指標となることが示された。③弾性波トモグラフィーにより地質構造を概略的に把握することができた。しかし、本研究で実施したような測点配置では、断層のような薄い低速度層や空洞などは検出できないことがわかった。

1. はじめに

昭和62年度から実施した水平坑道における掘削影響試験では、坑道周囲の力学的・水理学的物性が変化すること、また室内試験結果に基づく数値解析により岩盤挙動の予測がある程度可能であることが示された¹⁾。これらの知見を踏まえ、立坑掘削影響試験の一環として実施した本研究では、立坑掘削前後の周辺岩盤の力学的・水理学的特性の変化に着目し掘削影響を評価するための原位置試験を実施した。主な原位置試験項目は、ポアホールスキャナーによる孔壁観察（掘削前後での地質状況の変化を調べる）、孔内載荷試験、透水試験（立坑周辺岩盤の力学的・水理学的特性の変化を調べる）などである。その他、より広い範囲の空洞周辺岩盤の変化状況あるいは地質状況を把握するために、孔間弾性波測定、弾性波トモグラフィーなどを行った。以下に、計測の概要、結果、考察などを示す。

2. 計測の概要

2.1 計測断面の位置とその設置目的

岩盤の力学的・水理学的特性変化に関する調査試験は、A、B、C断面と呼ばれる計測断面を設置し実施した。各断面の設置深度及び実施した調査試験項目は図-1に示す。各計測断面の設置目的は以下の通りである。

A断面：比較的一様な泥岩層（明世累層）における掘削の影響を把握する。

B断面：岩相の違い（明世累層、土岐夾炭累層）による掘削影響の違いを把握する。

C断面：月吉断層上下盤での掘削影響の違いを把握する。

また、第一計測坑道より4本のボーリング孔を掘削して、弾性波トモグラフィーを実施し、堆積岩における同手法の適用性も検討した。

2.2 特性変化の調査方法

特性変化の調査は、以下の手順で実施した。

- ①計測断面設置位置まで立坑を掘削する。
- ②計測用の試錐を掘削し、掘削前の測定（初期値）の測定を行う。
- ③立坑掘削を再開し、掘削が計測断面に影響を及ぼさなくなったと考えられる時点で掘削後の測定を実施する。
- ④掘削前後の測定結果を比較し、立坑周辺岩盤の特性変化を評価する。

計測用の試錐は、A断面では東西方向に計2本、B、C断面では立坑壁面から0.8、1.3、2.3、3.3mの位置に4本、立坑に平行に掘削した。なお、C断面では、立坑壁面から0.8、1.3mの地点に掘削されたボーリング孔(C-1, 2孔)が崩壊したため、新たにC-1'、C-2'孔を掘削し掘削後の測定を実施した。また、弾性波トモグラフィーは第二計測坑道の掘削前後で計測を実施し、その結果を比較した。

3. 計測結果及び考察

実施した原位置試験の計測結果及び考察を以下に述べる。また、特に力学的な特性の変化からゆるみ領域を把握するために、岩盤の非回復な変形量を表現できる永久変形係数を用いて計測結果を評価した。

3.1 計測結果

〔き裂の状況〕

A断面では、掘削後にき裂開口幅の変化あるいは新たに発生したき裂はほとんど認められなかった。B断面では、掘削後にB-1、B-2孔（立坑壁面からそれぞれ0.8m、1.3m）で多くのき裂の発生が確認された。特に、B-1孔では、開口幅1～2mmのき裂が他の孔に比べて多く、特徴的な縦割れのき裂も生じている。岩相としては、土岐夾炭累層にき裂の発生が多い。C断面では、C-1'、C-2'孔の断層上盤側（凝灰質砂岩層）で新たに発生したき裂が断層下盤側（礫岩層、炭質層）に比べ相対的に多く、孔内載荷試験区間及び透水試験区間にも多くのき裂が発生している。

〔力学的特性〕

A断面では、永久変形係数が立坑壁面から0.3mの地点では低下し、1.3、3.3mの地点では逆に増加した。また、変形係数も同様の傾向を示し、弾性係数はほとんど変化しなかった（図-2）。B断面では、明世累層の掘削後の永久変形係数が3.3mの地点まで増加している。変形係数についても永久変形係数と類似した傾向を示す。また、弾性係数は1.3mの地点で最大6倍程度増加している。一方、土岐夾炭累層では0.8mの地点で永久変形係数が減少し、1.3mでは逆に増加した。変形係数、弾性係数の変化も類似した傾向を示す（図-3）。C断面では、断層上盤側の凝灰質砂岩層では、立坑壁面から1.3mまで掘削後の永久変形係数が大きくなっている。変形係数はC-1, 2孔で約2倍程度増加しており、弾性係数はC-3孔で2倍程度増加している。また、断層下盤側の花崗岩レキ層では、3.3mの地点で永久変形係数が増加している。炭質層では、1.3～3.3mの区間で永久変形係数が増加している。断層下盤側では、変形係数、弾性係数とも上盤側で見られるような変化は生じていない（図-4）。

〔水理学的特性〕

A断面では、掘削前後の透水係数が全区間で低くなった（図-5）。B断面では、明世累層、土岐夾炭累層ともB-1孔では透水係数が2オーダー程度高くなった（図-6）。C断面では、断層上盤側（凝灰質砂岩層）では0.8、1.3、3.3mの地点で掘削後の透水係数が増加している。また、断層

下盤側では花崗岩レキ層において、3.3mの地点で掘削後の透水係数が低くなっている。炭質層では1.3mの地点まで透水係数が増加している（図-7）。

〔弾性波速度変化〕

孔間弾性波測定の結果、孔壁から0.8～1.3mの間の15m以浅の部分で30～50%もの弾性波速度の低下が生じた（図-8）。また、弾性波トモグラフィーの解析結果²⁾（図-9）では、地質構造の概略は把握できたが、月吉断層や掘削された空洞（第二計測坑道）を検出することはできなかった。また、掘削された空洞（第二計測坑道）内に受振点を設け、ここで観測されたデータも用いて解析を行った結果、空洞周辺に生じた低速度帯を検出した。

3.2 考察

〔き裂の状況〕

A断面では、掘削後の孔壁観察の結果から孔内載荷試験区間、透水試験区間内におけるき裂の発生や変化はほとんどないことが確認されていることから、計測断面の岩盤は連続体に近い挙動をしているものと考えられる。一方、B、C断面では岩盤壁面から1.3m地点まで掘削後に生じた開口幅の変化したき裂が多く、特にB-1孔では特徴的な縦割れのき裂が生じた。A断面とB、C断面における掘削後のき裂状況の差は、計測用ボーリング孔の配置の幾何学的な違いにより掘削による立坑周辺岩盤への発破や応力再配分の影響が異なっている可能性があるためと考えられる。また、岩盤の発破による損傷領域の範囲を解析³⁾した結果、岩盤壁面から0.4m（立坑壁面から0.8m）まで発破により岩盤が損傷する可能性があり、B-1孔の縦割れのき裂は発破により生じたものと考えられる（図-10）。B、C断面の土岐夾炭累層では、明世累層に比べ岩盤の強度が低いいため掘削後にき裂の発生が多いと考えられる。

〔力学的特性〕

A断面ではき裂がほとんどないことから、1.3m地点までの永久変形係数の変化は立坑壁面から0.8mと1.3mの地点の間まで塑性域（ゆるみ領域）が生じたためと考えられる。また、3.3mの地点での永久変形係数の増加は多重の応力集中帯の発生⁴⁾による可能性がある。一方、B断面の明世累層での永久変形係数や変形係数の変化は、土岐夾炭累層に比べき裂が少ないことから、掘削に伴う応力再配分による影響である可能性が高いと考えられる。土岐夾炭累層では、B-1孔（立坑壁面から0.8m）において孔内載荷試験位置の近傍に多数のき裂が発生しており、これらのき裂の影響で永久変形係数や変形係数が低下したと考えられる。また、B-2孔（立坑壁面から1.3m）での永久変形係数の変化は、B-1孔よりも新たに発生したき裂が少ないために掘削に伴う応力再配分の影響が強く表れ永久変形係数や変形係数が増加した可能性がある。C断面では、A、B断面と異なり、各係数の変化は応力再配分やき裂の影響だけでは説明できない複雑な変化を示している。断層上盤側におけるB-3孔を除く各係数の変化は掘削に伴う応力再配分によるものと考えられるが、B-3孔では永久変形係数には変化がないものの弾性係数が増加している。岩相変化の激しい地層であるため、試験地点が局部的に力学的性質の異なる岩盤であった可能性もあるが、変化が局所的であるため現時点ではその要因を特定するまでには至っていない。また、断層下盤側では、両岩層とも1.3mより離れた所で永久変形係数が増加しているが、弾性係数・変形係数にはほとんど変化がない。これらの変化は応力再配分の状況が断層上盤側と下盤側で異なること⁵⁾や特に炭質層は強度的に弱い岩相（3軸圧縮試験では拘束圧7.5kgf/cm²でピーク強度が34.5kgf/cm²）であるため計測方法（同一ポイントで掘削前後の試験を実施する）そのものによる影響も考えら

れる。しかし、このような変化を生じさせる要因は、現時点では特定できていない。

〔水理学的特性〕

A断面では、全測定区間で透水係数が低下しているが、掘削後の応力再配分による応力集中で岩盤中の間隙の閉塞したことや掘削後の透水試験時には不飽和状態（掘削後の透水試験時の間隙水圧はほぼ0）であった可能性があることなどによる影響が考えられる。B断面では、両岩相ともB-1孔（立坑壁面から0.8m）で透水試験区間に縦割れのき裂が生じており、この影響で透水係数が高くなったと考えられる。C断面では、断層上盤側の立坑壁面から1.3m地点まで透水係数が増加しているが、これは透水試験区間に生じているき裂の数の差やき裂開口幅の変化によるものと考えられる。一方、断層下盤側では花崗岩レキ層においてC-4孔で透水係数が低下し、炭質層においてはC-1孔で透水係数が増加している。C-4孔では、岩盤中の間隙が閉塞している（永久変形係数が増加している）ために透水係数が低下したものと考えられる。また、C-1孔では、き裂の発生や変化がないにも関わらず、間隙水圧が掘削前にくらべ1/3以下に低下していることから、掘削後の透水試験区間に存在する比較的粒度の荒い層が局所的な高透水性ゾーンになったことも考えられる。

〔弾性波速度変化〕

B断面の孔間弾性波試験で弾性波速度が減少したのは、既存の研究結果⁹⁾からき裂の発生による地下水面の低下（図-10）により、岩盤の飽和度の低下が主要因である可能性が高いと考えられる。弾性波トモグラフィーでは、GT-3・4断面において断層推定位置に低速度帯が検出されたものの、GT-1・3及びGT-2・3断面では断層推定位置では逆に高速度帯となっている。GT-1・3及びGT-2・3断面では、断層は一つのボーリング孔としか交差していないため、周りの物性を均質なものと仮定し同じパターンで薄い低速度帯を含んだモデルを作成し逆解析を実施した。その結果、このような測点配置では、薄い低速度帯の層を検出することはできないことがわかった。また、空洞を考慮したモデル解析を行い、空洞の検出可能性を検討した。その結果、第二計測坑道程度の大きさでは低速度帯は生じなかった。弾性波トモグラフィーにより岩盤内の空洞が解析されたという報告もあるが、今回の調査領域では、解析対象の領域が広いために比較的小規模の空洞を検出できなかったと考えられる。

4. まとめ

得られた結果をまとめると以下の様になる。

- (1) き裂の状況は、明世累層と土岐夾炭累層で違いが見られるが、これはボーリング孔の幾何学的な配置の違いや岩盤自体の強度差によるものと考えられる。また、立坑壁面から1.3m地点まで掘削後に生じたり開口幅の変化したき裂が多いことから、掘削による影響範囲は1.3m程度までと考えられる。
- (2) 力学的な特性については、断層の影響が及ばないA、B断面では立坑壁面から0.8m程度までゆるみ領域が発生している可能性が高い。ゆるみ領域の発生要因としては掘削に伴って生じる応力再配分や発破損傷などが考えられる。1.3mの地点ではゆるみ領域の発生の結果として生じる応力集中により岩盤の非回復な変形量が低下している可能性がある。一方、断層近辺での変形特性の変化は複雑であり、通常考えられているような掘削による応力再配分現象だけでは説明できない。このような変化を生じさせる要因としては、局所的な岩相の違いや断層上下盤での

応力再配分現象の違い、計測方法などの影響が考えられるが、現時点で要因を特定するまでには至っていない。また、断層の影響を受けないと考えられる岩盤における掘削による影響範囲は、立坑壁面から1.3m程度と考えられる。

- (3) 水理学的な特性については、透水係数が高くなった部分は、主として掘削後に試験区間内に発生したき裂の影響であると考えられる。一方、A断面の様にき裂のほとんどない岩相で透水係数が低くなった部分については、掘削に伴う応力再配分による岩盤中の間隙の閉塞や不飽和領域が発生したため透水係数を過小評価した可能性がある。主として透水係数の変化はき裂の影響を大きく受けるため、掘削による影響範囲は立坑壁面から0.8～1.3m程度であると考えられる。
- (4) (1), (2), (3)の結果を総合すると立坑掘削により周辺岩盤が力学的・水理学的に影響を受ける範囲は、立坑壁面から1.3m程度までと推定される。
- (5) 岩盤の力学的な特性の変化からゆるみ領域を把握するために、永久変形係数を用いて計測結果を解析・評価した。その結果、永久変形係数は岩盤のゆるみ領域を評価する上では一つの指標となることがわかった。
- (6) 立坑壁面近傍の弾性波速度の変化は、掘削によるき裂の発生などの影響により地下水面が低下し、岩盤の飽和度が低下したことが主要因であると考えられる。また、弾性波トモグラフィーの結果、比較的広範囲の地質構造を概略的に把握することができた。しかし、今回のような測点配置では月吉断層のように低速度帯の薄い層がある場合や岩盤中に掘削された空洞を検出することは困難であることが明らかになった。

5. おわりに

取得されたデータを解析・評価した結果から、立坑掘削によって周辺岩盤の力学的・水理学的特性が影響を受ける範囲は立坑壁面から1.3m程度（岩盤壁面から約1m）であると推定された。また、このような変化は、主に掘削による応力再配分、き裂の影響、不飽和領域の発生などにより生じたと考えられる。しかし、これらの要因だけでは解釈できない現象もあり、また考察した結果の妥当性を確認する必要がある。このため、今後の課題としては以下のような事項が挙げられる。

- ①堆積岩における掘削による応力変化と力学的・水理学的影響との関係
- ②ゆるみ領域の物性に関する計測・評価手法の開発
- ③ゆるみ領域を含む岩盤のモデル化手法の確立

①に関しては、今年度室内試験などにより確認していく予定である。また、②については数値解析を行う上で必要となるデータであり、ゆるみ領域の範囲は空洞壁面から1～2m前後の範囲に限られると考えられるため、この範囲の物性を定量的に把握できる計測・評価手法を開発する。③の数値解析については、これまでの研究結果から、FBM弾塑性解析によりある程度岩盤挙動をシミュレーションできると考えられる。しかし、岩盤挙動をより定量的にシミュレーションするためには、き裂の影響を考慮してゆるみ領域のモデル化を行う必要があると考えられる。このため、岩盤挙動のシミュレーションは当面FBM弾塑性解析を用い、き裂の影響を考慮できる既存のモデル化手法についてはその適用性を検討していく。

6. 参考文献

- 1) 杉原弘造, 二宮康郎: 堆積岩盤中における掘削影響評価 - 掘削によるゆるみ領域の計測評価手法の開発 -, PNC TR/GE 89-07, 1990
- 2) 杉原弘造, 吉岡尚也, 森田隆三郎, 川上純: 弾性波トモグラフィーによる地質構造調査 - 断層のある堆積岩盤への適用例 -, 第24回岩盤力学シンポジウム講演論文集 pp. 454~458, 1991
- 3) 小野寺透, 吉中龍之進, 齊藤直忠, 北川隆 訳: 岩盤地下空洞の設計と施工 第10章, 1965
- 4) 石田毅, 金川忠, 土山茂希, 百瀬洋一: 高周波AB測定による地下発電所空洞掘削時岩盤挙動の観測, 第23回岩盤力学シンポジウム講演論文集 pp. 311~315
- 5) 吉岡尚也, 杉原弘造, 木梨秀雄, 畑浩二, 丸山誠: 立坑掘削に伴うひずみの原位置計測とその数値解析, 材料学会 投稿中, 1992
- 6) 齊藤徳美, 阿部司, 九里尚一: 火成岩の風化による空隙組織の変化と弾性波速度との関係, 物理探鉱 第28巻 3号, pp. 11~21, 1975

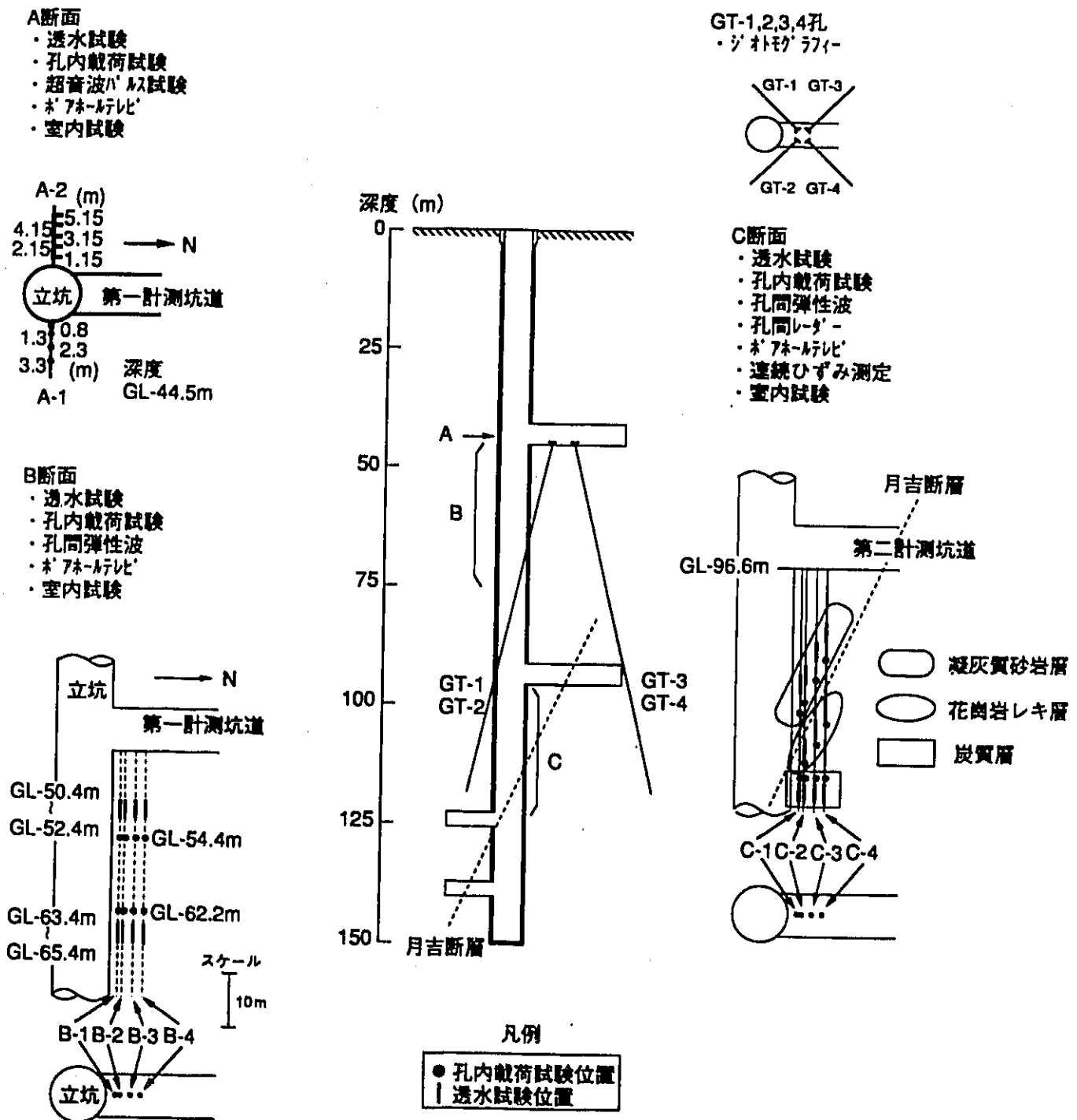


図-1 力学的・水理学的特性変化に関する調査概念図

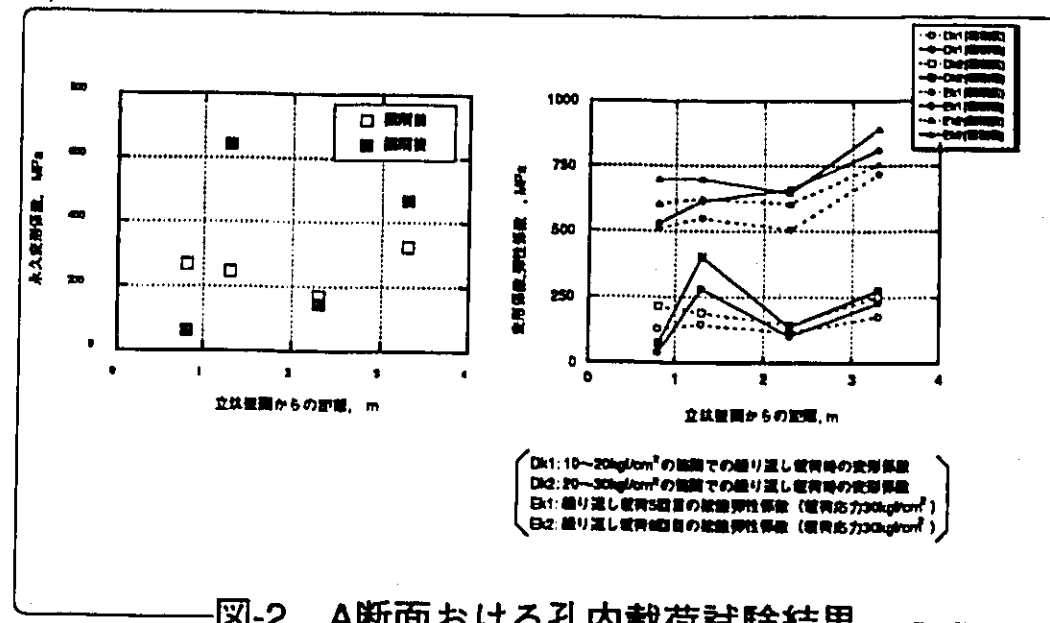
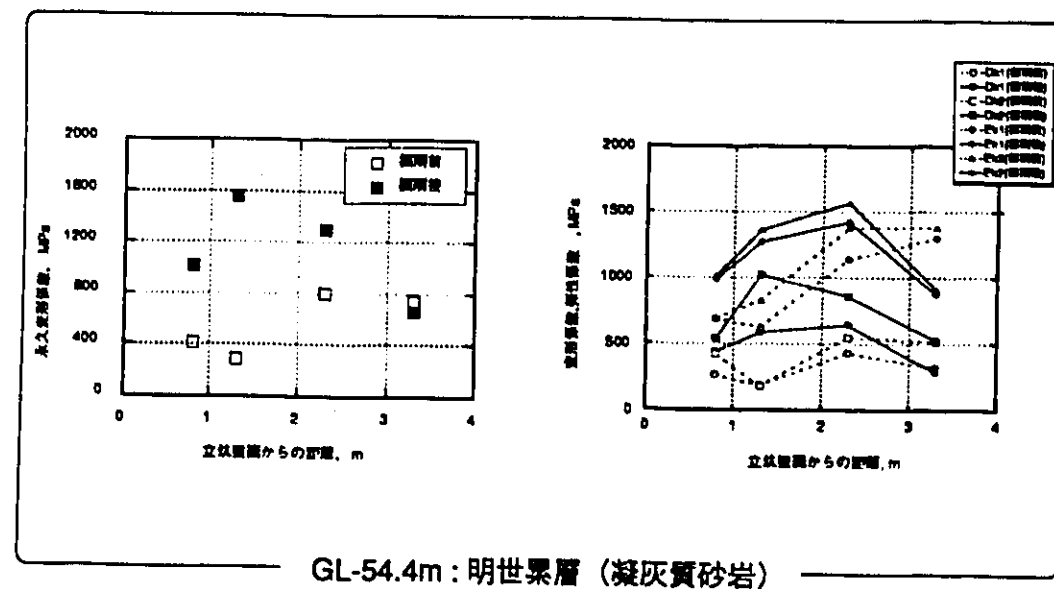
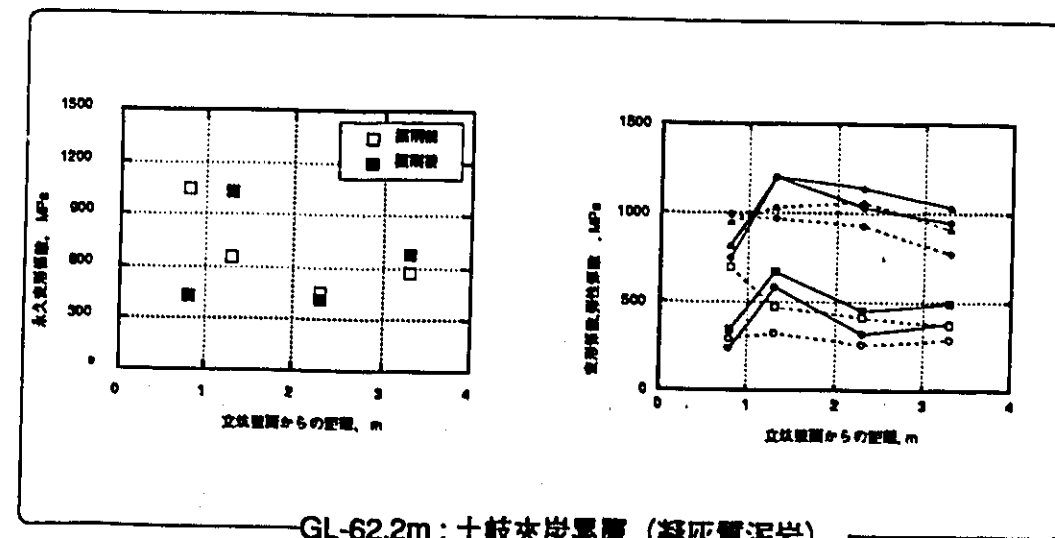


図-2 A断面における孔内載荷試験結果



GL-54.4m: 明世累層 (凝灰質砂岩)



GL-62.2m: 土岐夾炭累層 (凝灰質泥岩)

図-3 B断面における孔内載荷試験結果

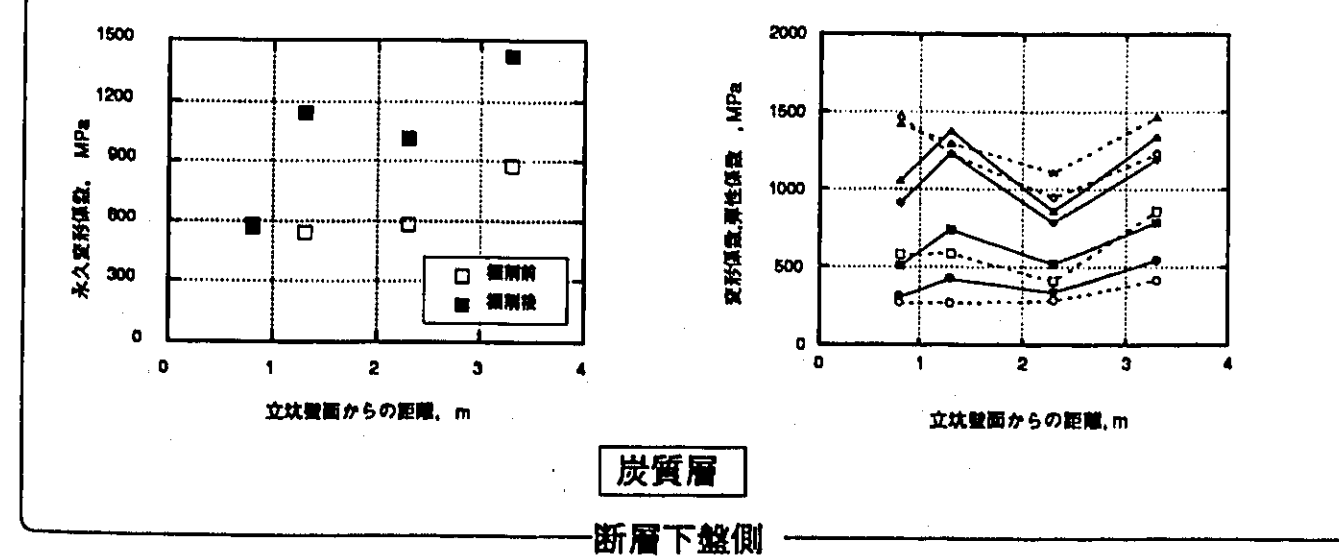
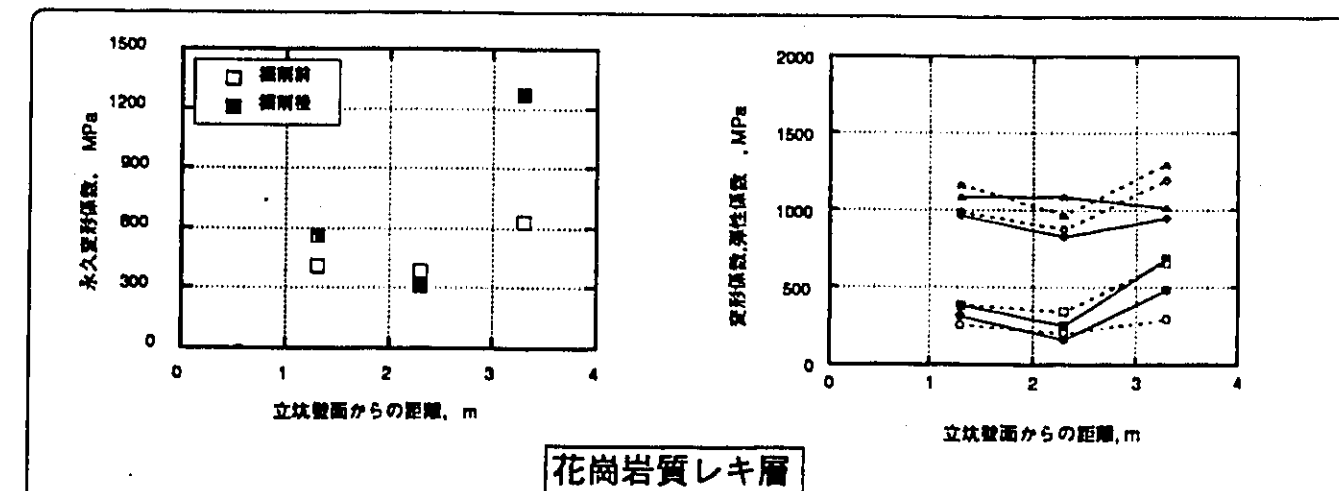
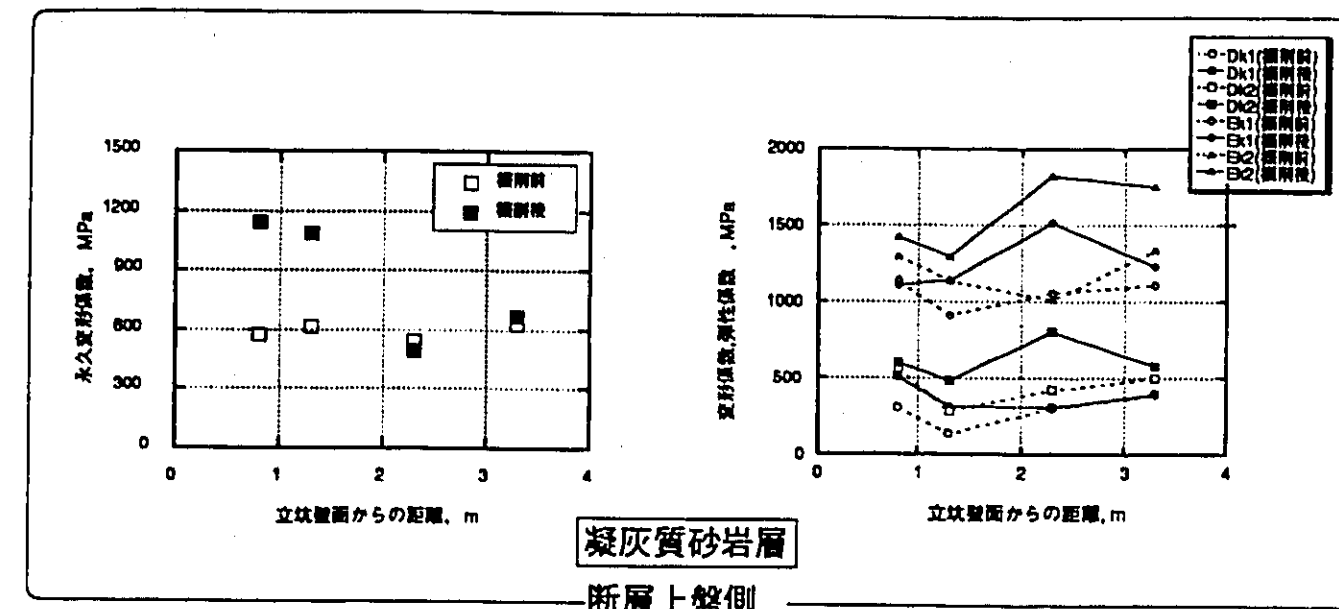


図-4 C断面における孔内載荷試験結果

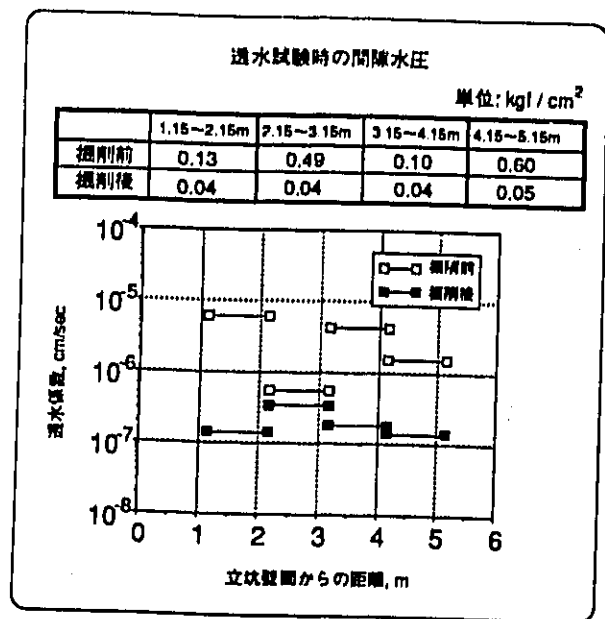


図-5 A断面における透水試験結果

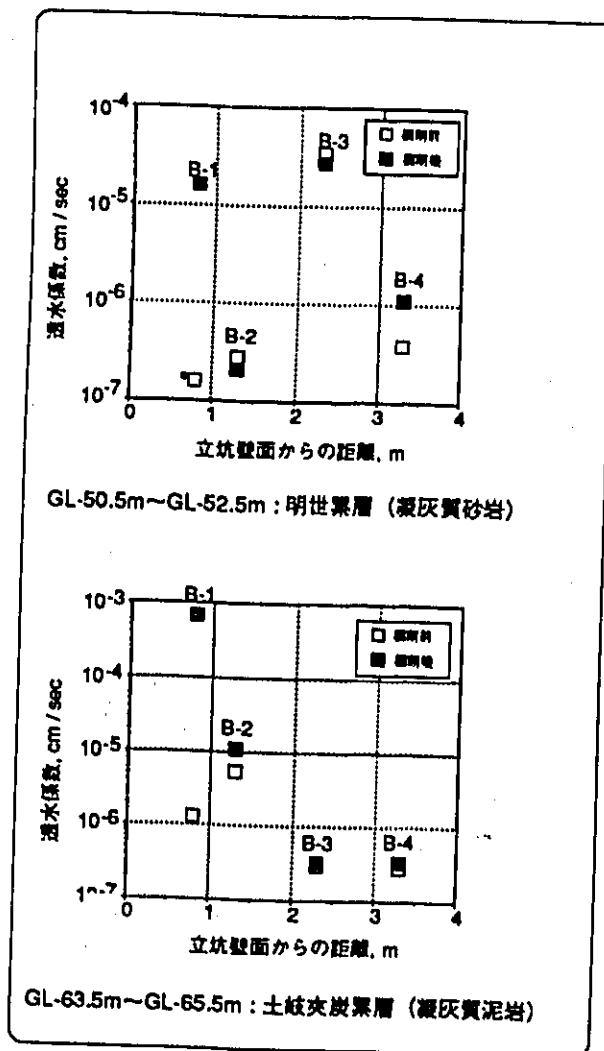


図-6 B断面における透水試験結果

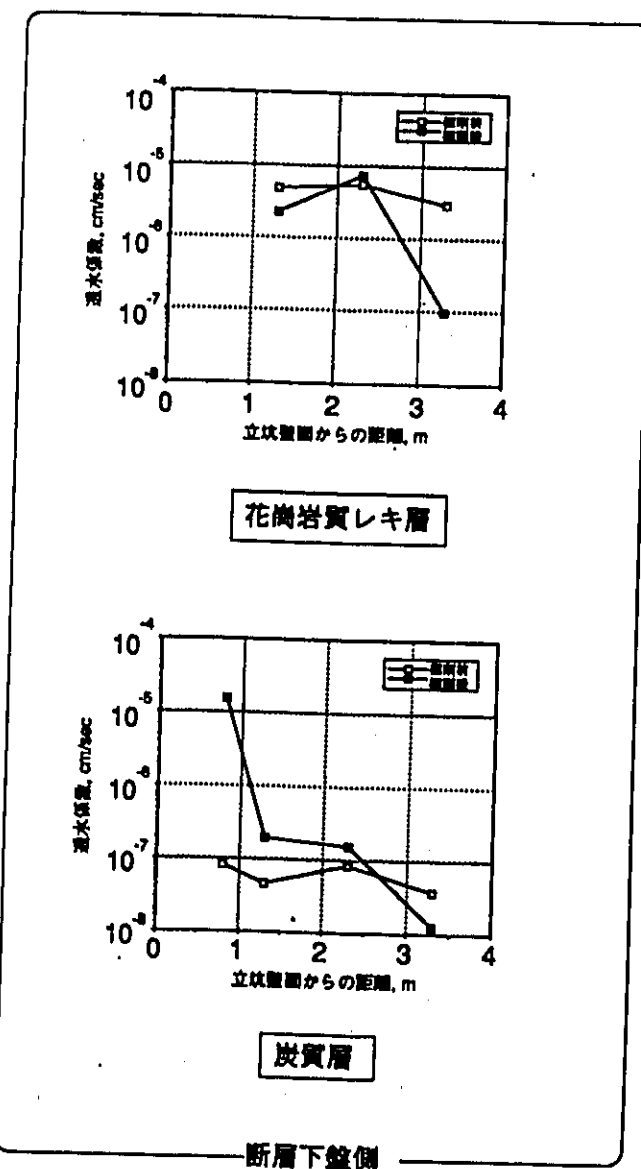
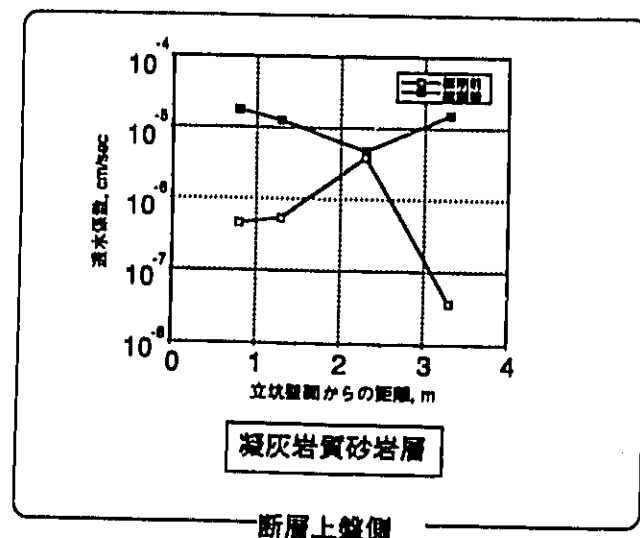


図-7 C断面における透水試験結果

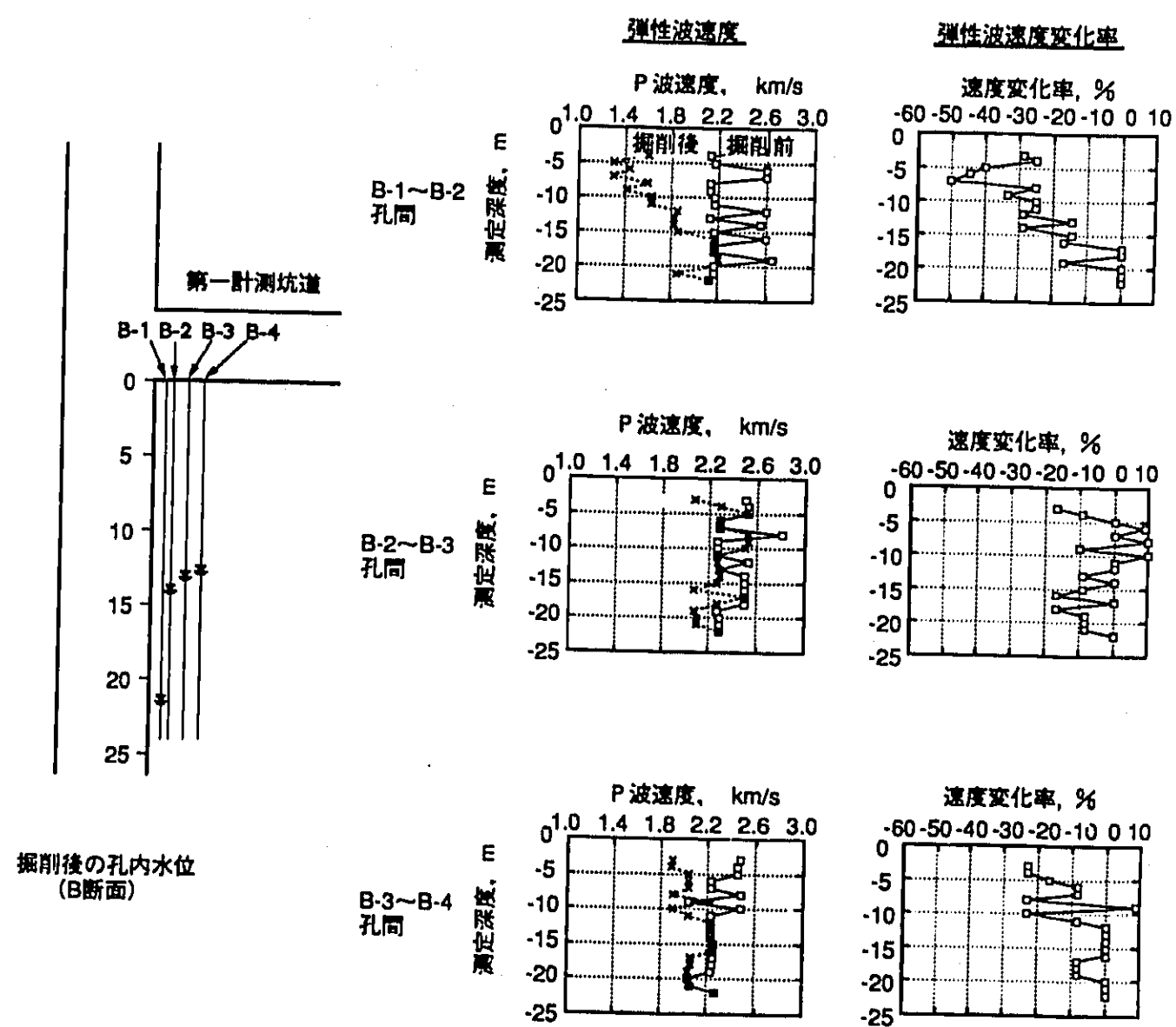
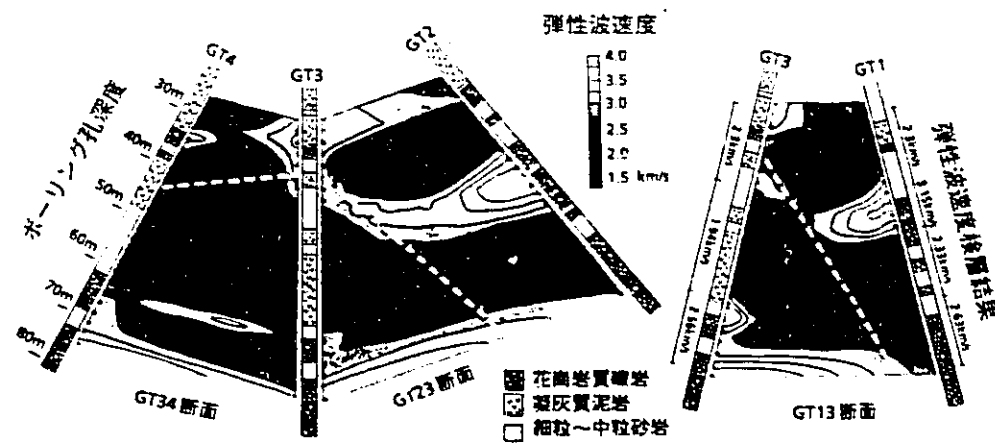
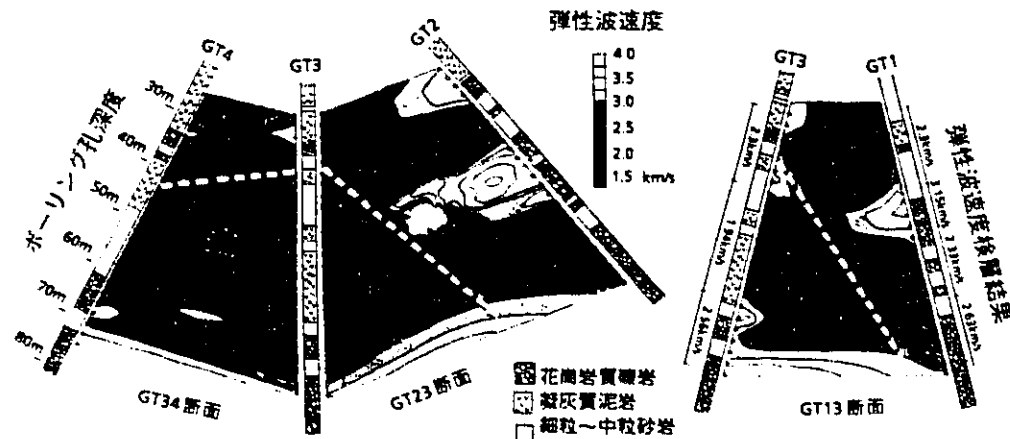


図-8 B断面における孔間弾性波測定結果



第一計測坑道掘削後の計測結果



第二計測坑道掘削後の計測結果

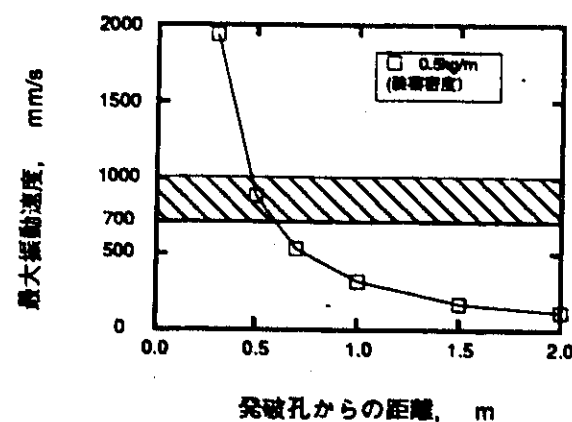
図-9 弾性波トモグラフィ解析結果

装薬量と最大振動速度の関係 (経験式)

$$V = \frac{k \cdot W^{\alpha}}{R^{\beta}}$$

$k = 500 \sim 1000$
 $\alpha = 0.7$
 $\beta = 1.5 \sim 2.0$

V: 最大発破振動速度 (mm/sec)
 W: 装薬量 (kg)
 R: 発破孔からの距離 (m)



岩盤が破壊する最大振動速度の下限値の範囲

図-10 最大振動速度と発破孔からの距離との関係

4. 立坑周辺地域の地下水流動の計測・評価

(1) 水理地質調査・観測

中野勝志、尾方伸久、若松尚則、柳澤孝一

〔概要〕

水理地質調査・観測は、立坑掘削による周辺岩盤内の地下水流動に与える影響を把握するために設定した地下水流動特性評価システムの一環として、立坑掘削開始以前に調査対象地域の表層から深層部までの水理地質状況を把握すると共に、立坑掘削前から掘削後における立坑周辺の間隙水圧分布や立坑への湧水量の変化を把握するために実施されている。

本稿では、この調査・観測を対象となる深度によって表層部の水収支について調査・検討している表層水理調査と、試錐孔を利用して深部岩盤中の水理地質状況および間隙水圧などの長期的な変化を把握するために実施されている深部水理調査に区分し、それぞれ調査で用いた調査手法や検討内容および調査結果について述べる。

なお、今日までの調査・観測により表層水理調査において表層から下層への地下水涵養量 0.5 mm/day が推定された。また、深部水理調査においても深部岩盤中の透水係数が把握されると共に、間隙水圧観測結果より、立坑掘削による周辺岩盤内の間隙水圧の低下は、立坑を中心に 100m 程度と考えられるなどの結果を得た。

1. はじめに

立坑掘削による周辺岩盤内の地下水流動に与える影響を正確に把握するために、①現象の把握(場の理解)、②水理地質構造モデルの構築(場のモデル化)、③地下水流動予測解析(シミュレーション)、④長期観測値との比較(モデルの検証)、で構成される地下水流動特性評価システムを設定し、調査・解析を進めている¹⁾。

本稿は、上述した地下水流動特性評価システムにおける①現象の把握と、④長期観測値との比較に係わる観測結果の一部に相当する調査について報告するものである。これらの調査の具体的な目的を以下に示す。

- (1) 立坑周辺表層部に広く分布する未固結堆積物から下層岩盤への地下水涵養量の推定
- (2) 立坑周辺表層部から深層部の水理地質状況の把握
- (3) 立坑掘削前から掘削後の水理学的な環境の変化の把握

2. 調査の概要

本調査の対象地域は、図-1に示す立坑を中心に約 300m 四方の区域に設定した。同調査地域の地質概要は図-2に示すように、下位より調査地域の基盤をなす先新第三紀の花崗岩、新第三系中新統の瑞浪層群と鮮新統の瀬戸層群からなる。また、調査地域中央部には花崗岩および瑞浪層群を切る走向傾斜 N80° E60° S の逆断層(月吉断層)が存在している。

本調査は対象となる深度によって①表層部の水収支について調査・検討している表層水理調査

と、②試錐孔を利用して深部岩盤中の水理地質状況および間隙水圧などの長期的な変化を把握するために実施されている深部水理調査に分けて進められている。

2.1 表層水理調査

(1) 水収支観測

表層部からの下層岩盤への地下水涵養量を推測するために、表層部に広く分布する瀬戸層群未固結堆積物を対象に土壌水分計、自由地下水面観測孔、河川流量計、気象観測装置を設置し、水収支観測を実施している。各観測機器の設置位置を図-1に示す。

(2) 表層部の水収支の検討と下層への地下水涵養量の算定

調査地域内における河川流量観測が開始されて間もないため、調査地域の東側に隣接する流域での河川流量観測地点の河川流量データを用いて、表層部の水収支の検討を行った¹⁾。なお、この流域の流域面積は0.535km²である。

流域における水収支は、次式で表すことができる。

$$P = E + Q + \Delta W + \Delta S + G \quad \text{..... (1)}$$

ただし、

P : 降水量 (mm)	ΔW : 土壌水分貯留変化量 (mm)
E : 蒸発散量 (mm)	ΔS : 地下水貯留変化量 (mm)
Q : 河川流出量 (mm)	G : 下層への涵養量 (mm)

(1)式において、一般に水文期間を1年にとれば、その流域の貯留量の変化($\Delta W + \Delta S$)は0として取り扱われることが多い。したがって、1年間での水収支を考える場合は次式が成り立つと考えられる。

$$P = E + Q + G \quad \text{..... (2)}$$

ここでは(2)式を水収支式と考え、1989年5月から1990年4月までの1年間の観測値を用いて表層部の水収支を検討した。なお、蒸発散量にはPenmanの可能蒸発散量に、0.7を乗じた中川の短草植被面可能蒸発散量を用いた^{2) 4) 5)}。図-3に降水量とPenmanの可能蒸発散量の変化を、図-4に河川流出高と降水量の変化を示す。日単位で求められた値から、月間合計および年間合計を求めると表-1のような値が得られた。これらの値を(2)式に代入すると、

$$G = P - E - Q = 199.4 - (0.7 \times 630.8) - 129.4 \\ = 207.5 \text{ [mm/year]} (=0.57 \text{ mm/day})$$

となり、表層部(未固結堆積物)から下層(岩盤)への1年間における地下水涵養量は207.5 mm/year (0.57 mm/day)と推定される。

2.2 深部水理調査

(1) 岩芯観察などによる地質調査

本調査地域周辺の地表踏査および試錐によって得られた岩芯の観察結果などの地質調査結果を基に本調査地域の3次元の地質構造を推定した¹⁾。その南北方向の断面を図-5に示す。また、本調査解析領域の地質構造の概要は次のとおりである。

- ①本調査地域の中央部は、下位より花崗岩、風化花崗岩、礫岩、凝灰岩、砂岩・泥岩、泥岩、未固結堆積物からなる。
- ②本調査地域の中央部には東西系の月吉断層が発達している。断層は逆断層であり、花崗岩から泥岩までの地層を切っており、未固結堆積物は切っていない。断層の走向傾斜はN80°E

60°であり、落差はおよそ30mである。

③断層の北側と南側では分布する地層が異なる。北側には、下位より花崗岩、風化花崗岩、礫岩、凝灰岩、砂岩・泥岩、泥岩、未固結堆積物の7層が分布する。南側には、未固結堆積物の直下に分布する泥岩を除く6層の地層が分布する。

④風化花崗岩とその上位の礫岩との間の不整合面は、本調査地域のほぼ中央において最も低く、調査地域の北側および南側の境界に近くなるに従い高くなっている。

(2) 原位置透水試験

深部岩盤中の地下水の流れを把握するためには、岩盤の透水係数を正確に測定することが必要となる。しかしながら、第2立坑周辺に分布する岩盤の透水係数は極めて低く、従来の測定方法では十分な精度でデータを取得することが困難と考えられた。このために、動燃事業団では、難透水性岩盤を対象に動燃式低水圧制御水理試験装置(動燃式JFT)と低圧ルジオン水理試験装置の2台の試錐孔を利用した原位置水理試験装置を開発し、本調査へ適用した^{1) 1)}。

開発した2台の水理試験装置の信頼性を確認するために、SN-4号孔の一部の測定区間においては両試験装置を用いて透水試験を実施した。その結果を表-2に示す。両試験装置の透水係数の測定範囲が重複する $10^{-8} \sim 10^{-7}$ cm/sオーダーにおいて両者の値は良く一致した。

本調査では、上述した試験装置の透水係数の測定範囲および岩芯観察・物理検層結果を参考にいずれかの試験装置を選択し、原位置透水試験を実施した。この結果を各試錐孔の測定深度に対する透水係数分布として図-6に取りまとめた。また、岩相に着目して透水係数の測定結果を取りまとめると、泥岩・シルト岩・凝灰岩は $5 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-8}$ cm/s、砂岩は $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-8}$ cm/s、礫岩は $1 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-7}$ cm/sに分布することがわかった。

(3) 見かけ比抵抗値と透水係数との関係

一般に、岩盤を対象とした原位置透水試験は多大な時間と経費がかかり、測定区間も不連続となる。これに対し、物理検層は岩盤の諸物性を迅速かつ連続的に測定することが可能であり、物理検層結果と透水試験結果とを組み合わせることにより試錐孔近傍の深度方向の水理学的特性を把握できる可能性がある。

Braceらは、室内物性試験により比抵抗値は孔隙率、透水係数と関係があるとしており¹⁾、物理検層の一つである電気検層により得られる見かけ比抵抗値と透水係数との間に良好な相関が認められれば、見かけ比抵抗値により試錐孔周辺の連続的な透水係数分布が推定できると考えられる。この観点に基づき、堆積岩の透水係数を支配していると考えられる粒度・固結度に着目して堆積岩を砂岩部および礫岩部に分け、原位置透水試験による透水係数値と電気検層による見かけ比抵抗値を比較した。

図-7は堆積岩中で測定された透水係数と見掛け比抵抗の関係を示したもので、比較的良い相関が得られていることがわかる。この結果を基に、深度方向に透水係数値を推定した一例を図-8に示す。砂岩部と礫岩部それぞれについて推定した結果、図中に示す原位置透水試験結果と良好な一致が得られ、電気検層の見掛け比抵抗値から透水係数を推定する方法の有効性が明らかとなった¹⁾。

(4) 間隙水圧観測

試錐孔を利用した間隙水圧観測は図-1に示したTH-1~8およびSN-4号孔で、第2立坑掘削開始の数カ月前より開始されている。また、測定装置にはカナダのWest bay社が開発

した単一孔多区間水圧測定・採水システム（MPシステム）を用い、それぞれの試錐孔で14～34区間の測定区間を設け、今日まで観測が継続されている”。

MPシステムを用いた間隙水圧の観測結果の一例を図-9に示す。図はTH-1、2、4、5号孔の第2立坑掘削以前、掘削開始後約300日、掘削終了直後（掘削開始後約530日）、掘削終了後約300日の計測データを示したものである。これらの観測結果より以下に示すことがわかった。

- ① TH-1号孔の間隙水圧の低下が最も顕著であった。間隙水圧の低下は第2立坑よりTH-2、3号孔と離れるに伴って減少し、第2立坑より東方向に約100m離れたTH-4号孔では顕著な間隙水圧の低下は認められない。
- ② TH-1号孔のEL147.68m（土岐夾炭累層）区間では約95mの最も大きな間隙水圧の低下が認められ、同区間では立坑掘削開始から終了まで連続的な低下傾向を示した。しかし、その他の間隙水圧の低下が認められた区間は、立坑掘削開始後300日までに顕著な低下を示し、それ以降はほとんど変化していない。
- ③ 第2立坑より断層をはさんで北東約40mのTH-5号孔では、EL169.31mとEL163.31mの2区間（土岐夾炭類層）で立坑掘削開始から終了時まで連続的な約30mの間隙水圧の低下が認められる。しかしながら、他のほとんどの区間では顕著な間隙水圧の低下は認められていない。
- ④ 花崗岩中に設置した測定区間の間隙水圧は、立坑掘削開始から掘削後において、ほとんど変化していない。
- ⑤ TH-6、7、8およびSN-4号孔では、ほとんど間隙水圧の低下は認められない。

(5) 湧水量観測

調査坑道内の湧水量観測は20カ所で定期的実施している。また、第2立坑への湧水量観測は立坑掘削の進行に応じて図-10に示すように、コンクリート覆工の裏側の10箇所に集水リングを設置して、調査立坑と共に測定を1回/週の頻度で実施している”。図-11に湧水量観測の結果を示す。また、併せて第2立坑掘削が開始された1990年1月からの30日毎の合計の降水量変化を示す。この観測により、以下に示すことがわかった。

- ① 調査立坑の全湧水量は、15～25ℓ/分程度であり、第2立坑の掘削にほとんど影響されていない。
- ② 第2立坑の全湧水量は掘削と共に増加し、掘削終了後は10～15ℓ/分程度でほぼ一定である。
- ③ 第2立坑に設置した集水リングでは、図に示した17、46.6、76.6、91.0mの4カ所で湧水量が観測されている。また、他の集水リングではほとんど湧水量は観測されていない。
- ④ 調査立坑の全湧水量、第2立坑の全湧水量および深度17mの集水リングの湧水量には数ℓ/分程度の変化が認められる。これらの湧水量と降水量と対比すると、その変化が一致していることがわかる。このことから、ここで観測された湧水量の変化は降水量の変化による影響を強く受けているものと考えられる。

3. 考察

これまでに述べた調査・観測結果および調査方法に関して、若干の検討を加える。表層水理調査において、表層から下層への地下水涵養量として0.57mm/dayという値が得られた。

この涵養量をcm/sオーダーに換算すると、約 6×10^{-7} cm/sとなり、表層部の直下に分布している瑞浪層群の泥岩、砂岩の透水係数（ $10^{-8} \sim 10^{-7}$ cm/s）とほぼ等しい値をとる”。このことから、表層部の未固結堆積物から下層の岩盤への地下水涵養量は、表層部の直下に分布している層（瑞浪層群泥岩、砂岩）の透水係数とほぼ同じ速度で行われていると考えることができる。

深部水理調査では、難透水性岩盤を対象に開発した動燃式低水圧制御水理試験装置と低圧ルジオン水理試験装置の測定範囲の重複する部分で、透水係数値が等しい値を示すことを確認し調査へ適用した。このために、この調査で得られた透水係数値は従来の測定結果に比べより信頼性の高いものであったと考える。また、電気検層の見かけ比抵抗値と透水試験結果に比較的良好な相関が得られた。このことから、電気検層と原位置透水試験を組み合わせることにより、試錐孔周辺の水圧の垂直分布を推定でき、水理地質構造モデルの構築に効果的に活用できると考える。

MPシステムを用いた間隙水圧の長期観測では、立坑掘削以前から掘削後にわたり1000日以上の実績があげられ、装置の有効性が示された。また、観測結果から立坑掘削に伴う間隙水圧の低下は、立坑からTH-1、2号孔と離れるに伴って減少し、東方向へ約100m離れたTH-4号孔では顕著な低下がほとんど認められない。このことから、立坑掘削に伴う間隙水圧の低下は、第2立坑を中心とした100m程度の範囲と考えられる。

最後に、これまでの調査・観測結果から、ここに適用した個々の調査機器の性能および、調査・観測手法は表層部から深層部までのデータを系統的に取得することができ、水理地質構造モデルの構築や地下水流動予測解析の入力および検証データの提供に有効であると考えられる。

4. まとめ

これまでに得られた調査・観測結果をまとめると以下に示すとおりである。

- ① 表層部の水収支観測の結果を基に、調査地域周辺の上層から下層への地下水涵養量を推定し、約200mm/year（0.5mm/day）の値を得た。
- ② 岩芯観察、地表踏査の結果より、本調査地域の3次元の地質構造の概要を推定した。
- ③ 原位置透水試験により、各試錐孔の測定深度に対する透水係数分布を取りまとめた。
- ④ 電気検層の見掛け比抵抗値から透水係数を推定する方法の有効性が明らかとなった。
- ⑤ 立坑掘削に伴う間隙水圧の低下はTH-1号孔で最も顕著な低下を示し、第2立坑より離れるに伴ってその低下は小さくなるなどの結果を得た。
- ⑥ 調査立坑および第2立坑における湧水量観測により、調査坑道内の湧水量は立坑掘削による影響はほとんど認められず、15～25ℓ/分程度である。また、第2立坑の湧水量は掘削と共に増加し、掘削後の湧水量は10～15ℓ/分程度でほぼ一定であるなどの結果を得た。

5. 今後の予定

表層水理調査の水収支観測は今後も継続する。また、植生および落葉構造などを考慮した表層部の水収支についても検討し、これまでの長期観測結果を含めて地下水涵養量の算定を行う。

MPシステムによる間隙水圧観測と坑内への湧水量観測は今後も継続し、より長期的な観測結果より立坑掘削による水理学的な環境の変化を把握する。

6. 参考文献

- 1) 柳澤孝一・今井 久・尾方伸久・大澤英昭・渡部邦夫 (1992) : 立坑掘削に伴う地下水流動影響調査研究—東濃ウラン鉱山試験立坑を例として—, 応用地質, 第33巻5号.
- 2) 中島 誠・斎藤 章・柳澤孝一・渡部邦夫 (1991) : 岩盤浸透流解析の涵養量の算定について, 土木学会, 第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 252-256.
- 3) Penman, H. I. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc., London, A, 193, pp120-145.
- 4) Penman, H. I. (1963): Vegetaion and Hydorogy. Tech. Common. No. 53. Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England, pp124.
- 5) 中川清隆 (1979) : 輪島における熱収支・水収支の気候学的推定, 金沢大学教育学部紀要, 第27巻, pp. 15-25.
- 6) 柳澤孝一・斎藤 章・西垣 誠・平田洋一 (1989) : 新しい現場透水試験法の開発と測定例, 土と基礎, 第37巻3号(378), pp. 47-52.
- 7) 尾方伸久・大澤英昭・中野勝志・柳澤孝一・西垣 誠 (1992) : 堆積岩の地質学的特性及び透水係数, 見掛比抵抗相互の関係とその水理地質構造モデル化への適用, 応用地質, 第32巻, 第6号, pp. 321-332.
- 8) Brace, W. F., J. B. Walsh and W. T. Frangos (1968): Permeability of Granite under High Pressure, Jour. of Geophy. Resh., Vol. 73, No. 6, pp. 2225-2236.

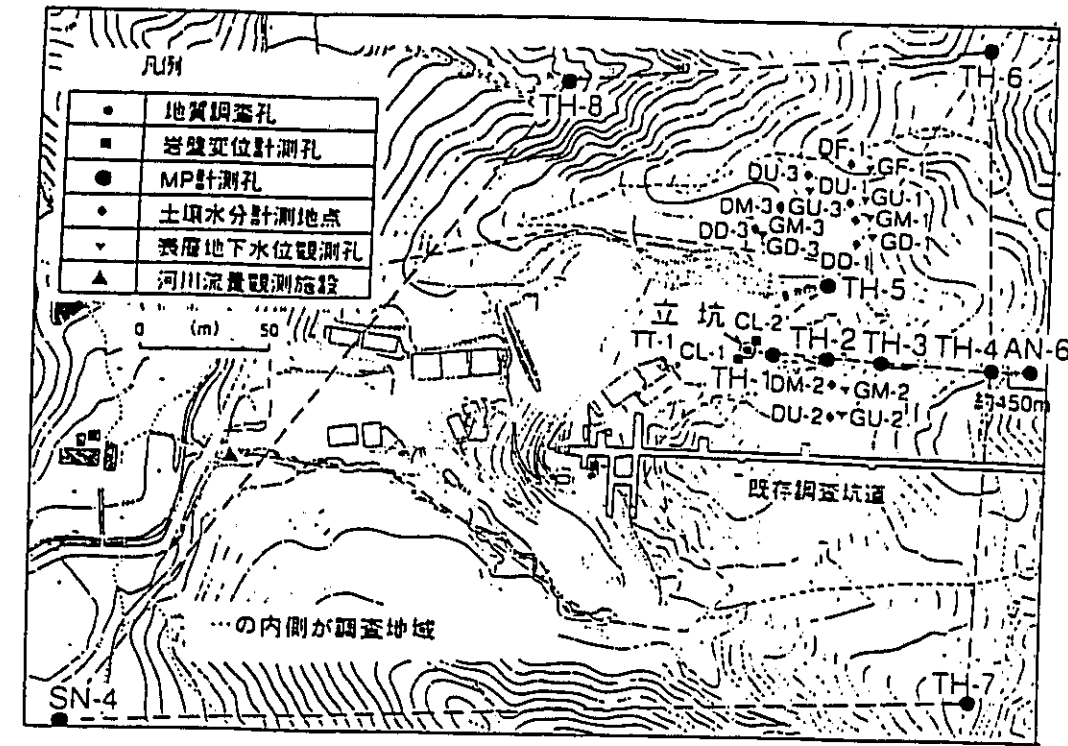


図-1 調査地域と観測施設の配置図

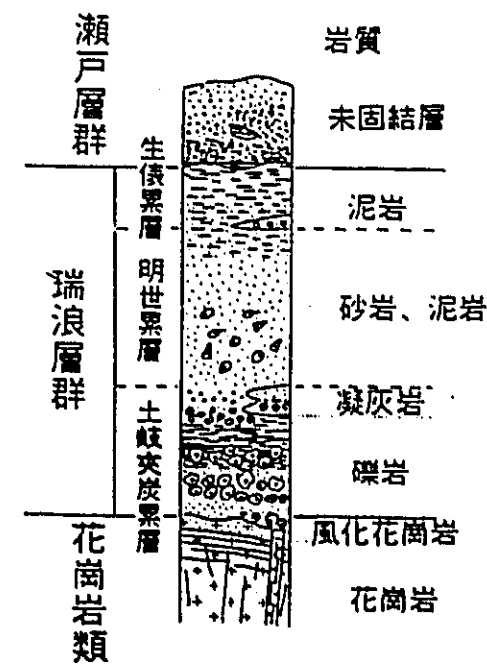


図-2 調査地域の模式柱状図

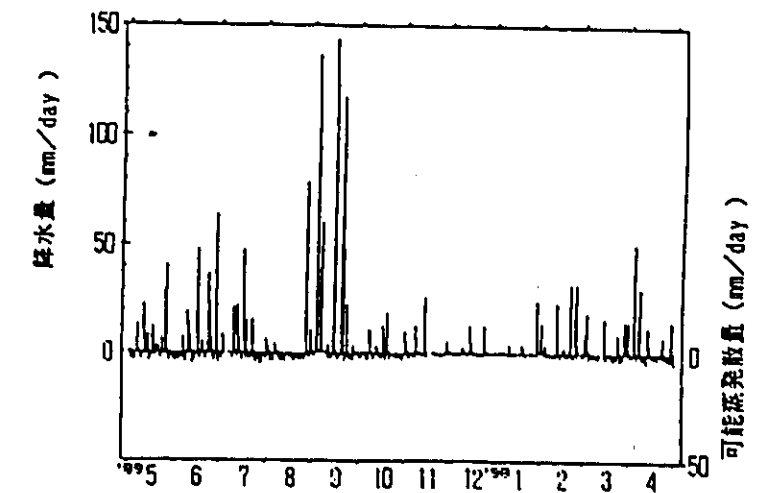


図-3 降水量とPenmanの可能蒸発散量の経年変化

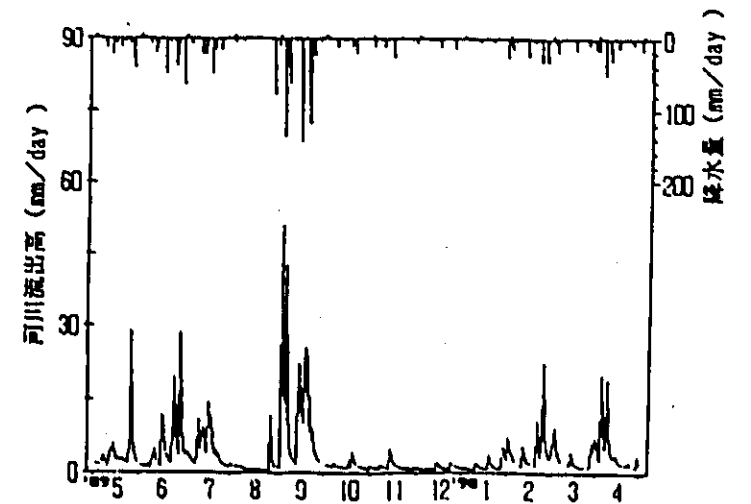


図-4 河川流出高の経年変化

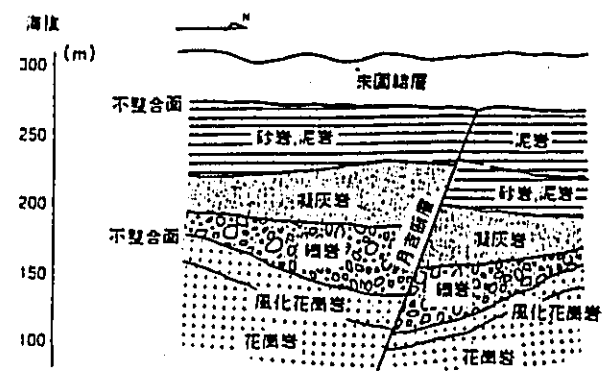


図-5 地質構造の概念図

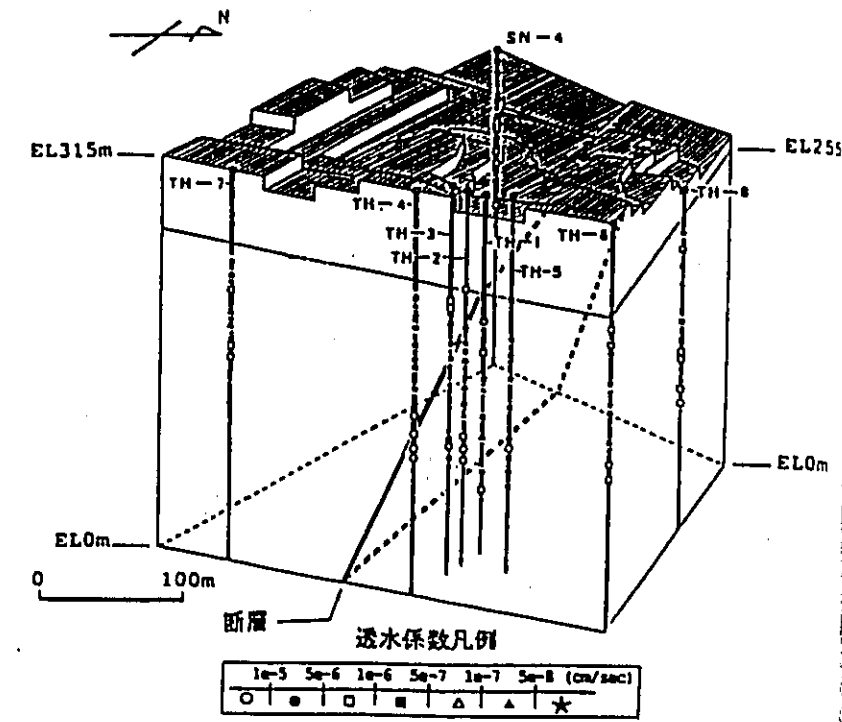
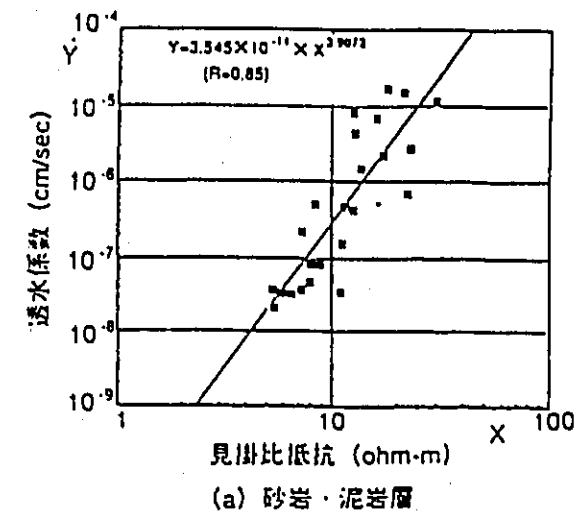
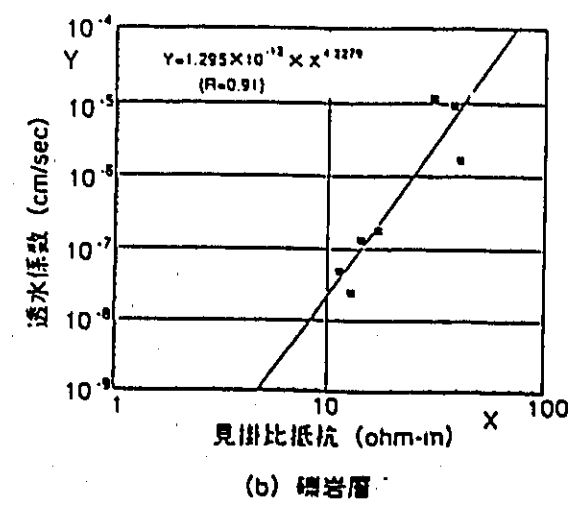


図-6 透水試験結果の一覧



(a) 砂岩・泥岩層



(b) 花崗岩層

図-7 見掛け比抵抗値と透水系数の関係

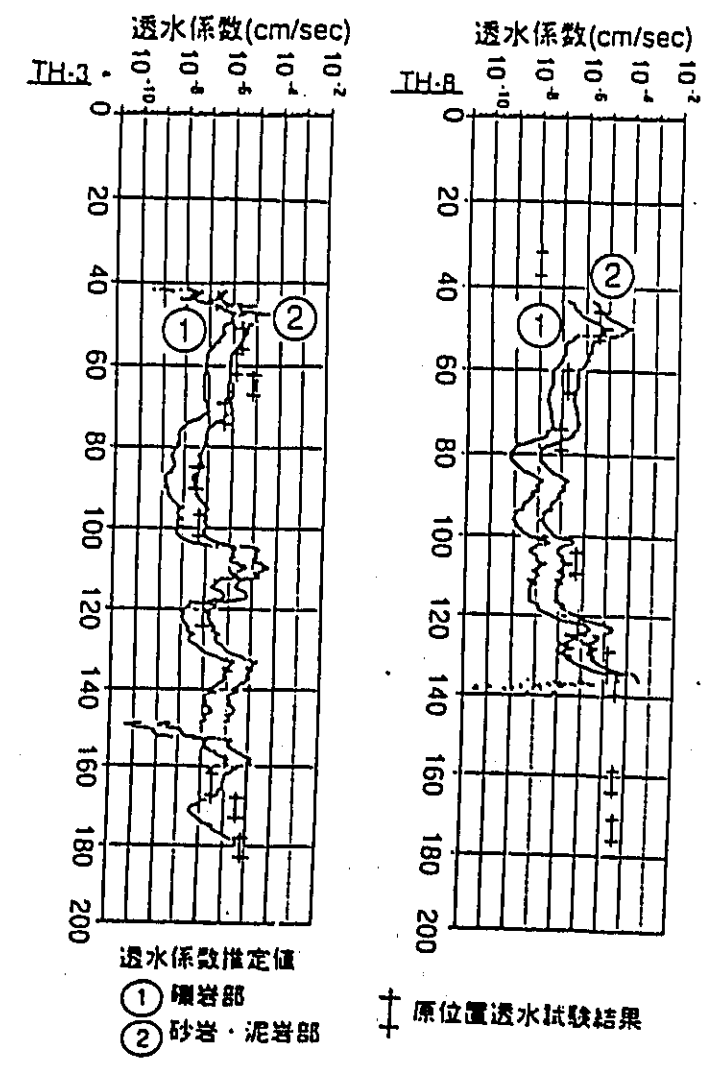
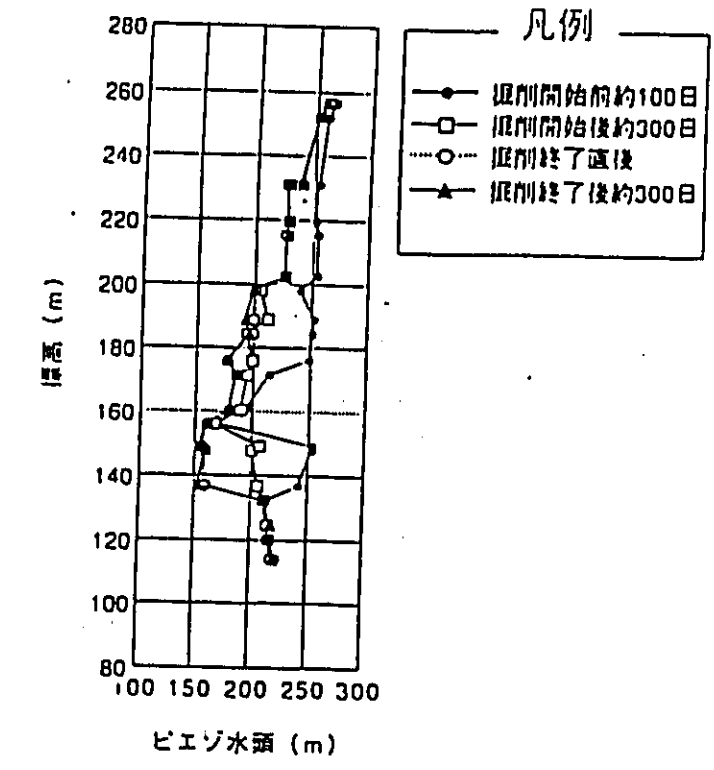
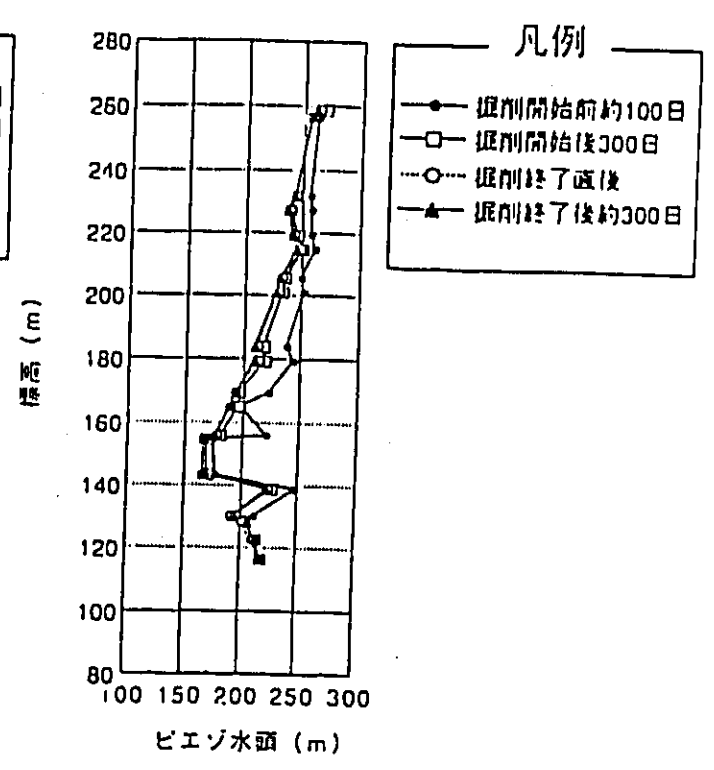


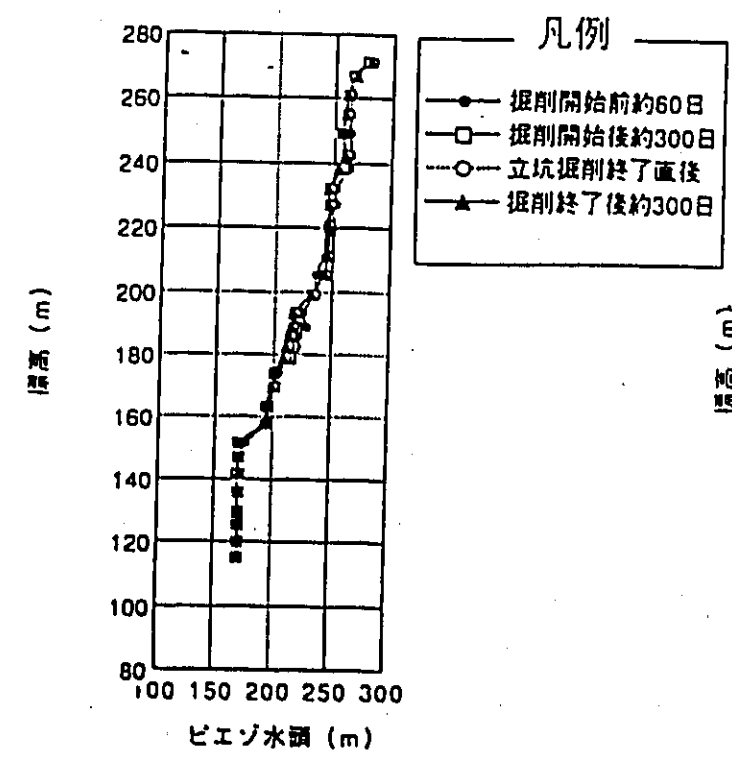
図-8 電気検層による透水系数値の推定



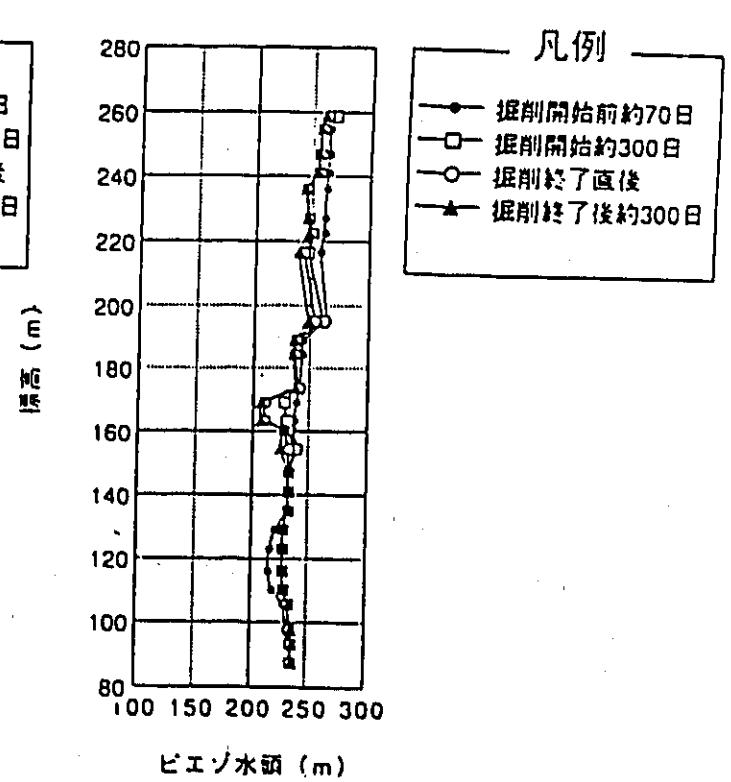
(a) TH-1



(b) TH-2



(c) TH-4



(d) TH-5

図-9 間隙水圧観測結果の一例

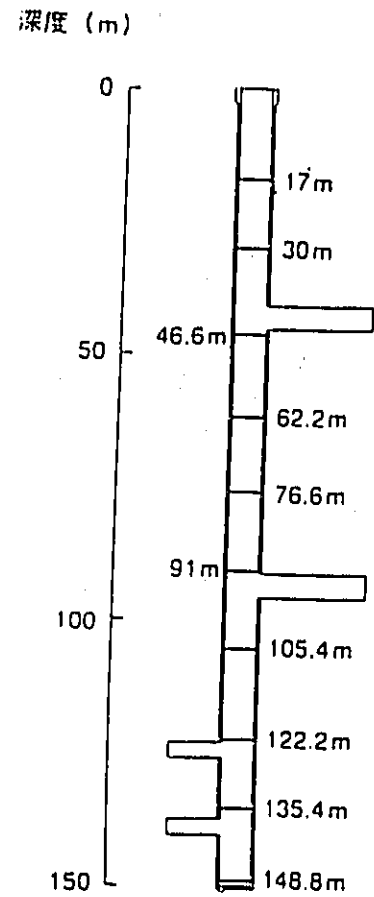


図-10 第2立坑の収水リングの設置位置

年	月	降水量 (mm)	Permanの可能蒸発量 (mm)	SPD 河川流量 (mm)
'89	5	168.5	66.2	117.8
	6	243.5	71.0	150.7
	7	180.5	70.9	139.0
	8	101.0	86.4	40.3
	9	646.0	52.1	343.5
	10	70.5	59.1	45.1
	11	55.5	27.8	38.2
	12	34.5	21.8	31.8
'90	1	42.5	20.0	45.1
	2	144.5	30.3	121.5
	3	110.0	53.0	92.3
	4	147.0	72.2	129.6
計		1944.0	630.8	1294.9

表-1 水収支観測結果

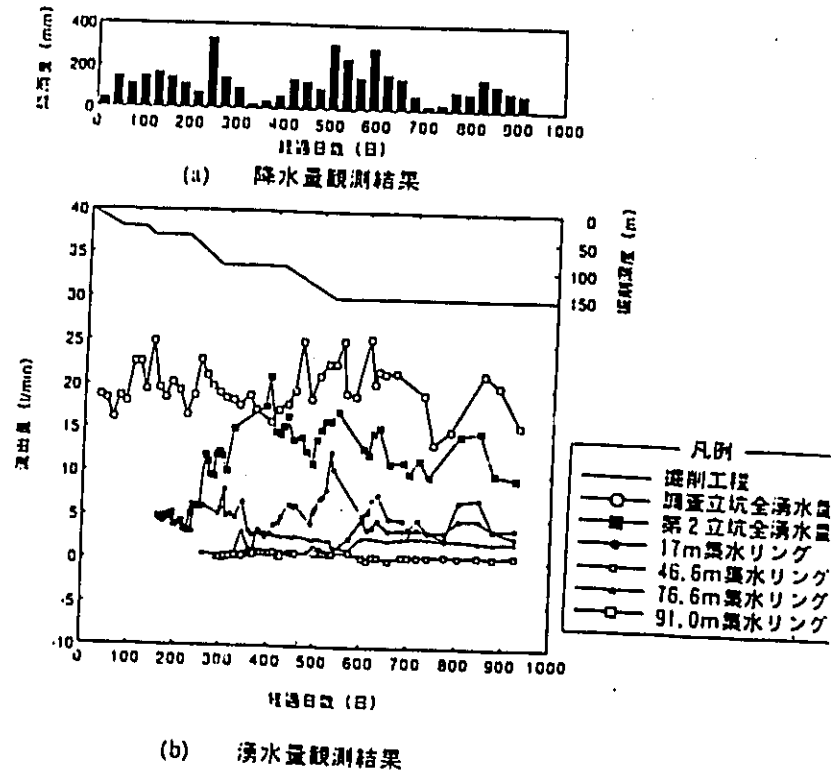


図-11 湧水量観測結果

測定深度(m)	透水係数 (cm/s)		岩相
	動燃式JFT	低圧ルジオン	
36.0~41.0	7.57×10^{-8}	2.56×10^{-7}	礫岩
51.0~56.0	6.81×10^{-8}	6.54×10^{-8}	礫岩
61.0~66.0	2.19×10^{-8}	2.96×10^{-8}	礫岩
69.0~74.0	5.82×10^{-8}	7.80×10^{-7}	礫岩
74.0~79.0	5.52×10^{-8}	5.08×10^{-8}	花崗岩風化部
80.0~85.0	2.99×10^{-8}	1.66×10^{-8}	花崗岩
89.0~94.0	2.07×10^{-8}	1.55×10^{-8}	花崗岩
94.5~99.5	5.53×10^{-7}	1.77×10^{-7}	花崗岩

表-2 動燃式JFTと低圧ルジオン水理試験結果の比較

4. 立坑周辺地域の地下水流動の計測・評価 (2)水理角分析

今井 久, 古屋和夫, 大澤英昭, 柳澤孝一

〔概要〕

この研究は、立坑掘削による周辺岩盤内地下水流動への影響について、掘削前の水理・地質調査結果に基づき予測解析を行い、掘削前から掘削中、掘削後にわたる長期モニタリングにより得られたデータと予測解析結果を比較して予測解析の妥当性を検討し、さらに立坑掘削の地下水流動に与える影響および立坑周辺の水理地質構造について考察したものである。予測解析により立坑周辺の間隙水圧の非定常変化、立坑内及び既存の調査立坑・坑道内への湧水量の非定常変化を算定した。この結果、①掘削影響範囲は立坑から約100メートル以内である、②立坑内への湧水量は掘削終了時最大量30ℓ/minとなる、③既存の調査立坑・坑道内への湧水量に対する影響は小さい、という結果を得た。予測解析と長期モニタリングによる実測値は概ね良好な一致を示し、予測解析の妥当性を確認した。また、立坑掘削影響を把握するために設定した一連の調査・解析よりなる地下水流動特性評価システムの有効性を確認した。

1. はじめに

立坑掘削に伴う周辺岩盤内の地下水流動に与える影響を正確に把握するために、一連の地下水流動特性評価システムを設定し、調査・解析を進めている。本稿では当システムで実施した地下水流動に与える立坑掘削影響の予測解析、観測値と予測解析の比較、および予測解析妥当性の検討・考察結果について報告する。

2. 予測解析の概要

2.1 解析手法

解析は、地形・地質構造の3次元性が高いこと、および立坑・坑道の存在により3次元的収束流となること、地質の不均質性および掘削影響により地下水挙動の非定常性が高いことを考慮して、既存の解析手法として最も利用度の高い有限要素法による3次元の非定常・飽和不飽和浸透流解析を実施することとし、解析コードとして、TAGSAC¹⁾を用いた。

2.2 モデル設定

(1) 解析領域・期間

解析領域は図-1の実線で示す約300m×300mの範囲とした。この領域境界はMP計測孔TH4, 6, 7, 8, SN4を含む、尾根線・谷線上に設定している。深さ方向には立坑深さの2倍の約300mを解析範囲とした。また、解析対象期間は掘削開始より3年間とした。

(2) 水理地質構造モデル

水理地質構造モデルは領域内で実施された地表踏査や岩芯観察に基づく地質学的知見、および

透水試験・電気検層による透水係数値の鉛直分布に基づき作成した。当試験領域での代表的な地質断面と、透水試験結果およびMPシステムによるピエゾ水頭分布を図-2に示す。本領域内の水理地質構造の特徴は4つあり、以下の通りである。

- ①花崗岩上の不整合面は領域中央で凹状をしている。
- ②月吉断層は粘土を含む難透水性逆断層である。
- ③未固結砂礫層直下の不整合面はほぼ水平に存在する。
- ④花崗岩と砂岩・礫岩層の間には、花崗岩風化部、礫岩より成る高透水性部が存在する。

以上4つの水理地質構造上の特徴および試錐孔TH1~8, SN4での約100点の透水試験値および電気検層による比抵抗分布より、図-3に示す水理地質構造モデルを構築した。モデルは図中mat1~mat12で示すように水理地質区分として12区分した。それぞれの透水係数、間隙率、比貯留係数²⁾の設定および地質を表-1に示す。各区分に対する透水係数は、原位置透水試験結果および室内透水試験結果を基にオーダーによる評価・設定をした。不飽和特性としては全て図-5に示す特性曲線に従うと仮定した。

(3) 要素分割形状

要素分割形状は、地形、MP計測孔と第2立坑、調査立坑・坑道位置、水理地質構造を考慮し、図-2に示す要素分割形状とした。立坑は表面積が実際のもので一致するように5m×5mの断面で深さ150mの形状とし、既存立坑・坑道も同様な観点より3m×3mの断面で、深さ125m、長さ163mとした。要素は8節点の6面体アイソパラメトリック要素を用いた。全要素数は3133、全節点数は3924である。

2.3 境界条件、初期条件の設定

(1) 境界条件

設定した境界条件を模式的に図-6に示す。

- ①上部境界：降雨による涵養量として気象、水文観測結果に基づき0.5mm/dayを与えた。さらに飽和箇所では圧力水頭ゼロとなる自由浸出面の条件も併せて設定した。
- ②下部境界：MP計測結果より150m以深は静水圧分布を示している、このことより不透水境界とした。
- ③側部境界：側部境界上に存在するMP計測孔TH4, 6, 7, 8, SN4での深度方向のピエゾ水頭値分布を、MP計測値および地下水位観測結果(年平均GL-15m)に基づき設定し、各MP孔間はTH4, 6, 7, 8, SN4に設定した分布に基づく既存の調査坑道のみを考慮した2次元解析および同一深度内での線型補間により側面上の境界値を設定した。
- ④調査坑道壁面および第2立坑壁面：壁面は自由浸出条件を与えた。
- ⑤第2立坑掘削：第2立坑掘削面位置は掘削工程に従い図-7に示す深度変化をする。解析では掘削工程に沿った該当要素の除去をおこない、掘削底面に該当する節点には図-7に示す非定常な境界条件を設定して掘削工程のモデル化を行った。

(2) 初期条件

初期条件は上記境界条件において既存調査立坑・坑道のみを考慮し、④⑤の第2立坑に関する境界条件は除き、第2立坑掘削前の境界条件での定常解析を実施し、その結果を初期条件とした。その妥当性については既存立坑・坑道内での湧水量の実測値と定常解析結果の対比、およびTH1, 2, 3, 5における深度方向のピエゾ水頭分布の実測値と計算値の対比(図-8)を行い確認した。

2.4 予測解析結果概要

予測解析結果の一例として、掘削最終時(530日)における立坑を含む鉛直断面内でのピエゾ水頭のコンター図、ダルシー流速ベクトル図を図-9に示す。立坑底部で動水勾配が大きく、立坑近傍で立坑内への収束的で流速の大きな流れが生じることがわかる。

予測解析について掘削を開始してから三年間(掘削開始より掘削終了まで530日、掘削終了後565日)のピエゾ水頭の変化、立坑・坑道に於ける湧水量の変化について検討した結果³⁾、立坑掘削の地下水流動への影響として以下のことを予測した。

- ①立坑掘削の影響は立坑から離れるにつれ小さくなり、その顕著な影響範囲は約100m以内である。
- ②立坑内への湧水量は掘削に伴い増加し、特に断層を過ぎ高透水性部に達した時点より急激な増加を示し、その最大湧水量は30ℓ/minとなる。
- ③既存の調査立坑・坑道への流出量は掘削終了近くで緩やかに減少し、その減少量は10%未満である。

3. 予測解析結果と実測値

3.1 MP計測孔でのピエゾ水頭分布の変化

TH1, 2, 3, 5におけるピエゾ水頭の掘削完了時の解析結果および実測値を図-10(a)~(d)に示す。TH1, 2, 3におけるピエゾ水頭分布は解析結果と実測値で調和的である。TH5におけるピエゾ水頭分布はBL160m以深で解析結果が実測値より小さくなっている。

3.2 掘削影響範囲

第2立坑からの距離と、掘削前から掘削終了後420日間(掘削開始より950日間)の水頭変化量の関係をBL210m、BL135m水平面内の予測解析結果と実測値について図-11に示す。水頭の変化量は立坑から離れるにつれ小さくなり、BL210mで100m、BL135mで50m以上離れると変化量はほとんどなく、実測・解析結果ともに同様な傾向を示している。BL210mでは実測値は解析結果より水頭変化量がやや大きな傾向も認められる。

3.3 ピエゾ水頭の非定常変化

ピエゾ水頭の非定常変化について代表例を図-12に示す。それぞれTH1の(a)EL210m、(b)EL135m近傍におけるピエゾ水頭の非定常変化の実測・解析値を合わせて示したものである。図中破線で立坑底面位置の変化を示す。

(a) BL210m近傍では立坑掘削に応じたピエゾ水頭の低下が実測・予測解析ともに認められる。17.5m離れた2計測点における水頭値はほぼ一致している。予測解析では実測に対して水頭変化がやや遅れているが、全体的によい一致をしている。

(b) BL135m近傍の4.5m離れた2点の計測点では、異なった水頭低下挙動を示している。解析結果は両者の中間的水頭低下挙動を示し、いづれの実測値とも一致していない。測点EL136.7mでは掘削に伴い掘削初期より低下を示すが、計測点BL132.2mでは掘削に伴う水頭変化は認められない。現時点ではこの2点間で約60mの水頭差が生じている。これに対し解析では、掘削開始より500日まではほとんど水頭変化はなく、500日より急激な水頭低下を示し、2つの実測値の中間的な結果となっている。また計測点BL136.7mと解析で掘削終了直前の水頭低下傾向は調和的である。

3.4 第2立坑・調査坑道内湧水量変化

第2立坑および調査立坑・坑道への湧水量の非定常変化を図-13に示す。第2立坑および調査立坑・調査坑道における湧水量の予測解析結果のほうが実測値よりも大きく、予測解析は実測値の1.5~2.0倍となっている。非定常変化の傾向に着目すると、第2立坑への湧水量は、予測解析・実測ともに掘削に伴う増加傾向を示している。調査立坑・坑道内への湧水量実測値は降雨によると考えられる流量の変動は示すが、平均的にはほぼ一定であり予測解析結果と調和的傾向を示している。

4. 考察

4.1 予測解析結果の妥当性

予測解析の結論①~③について掘削開始から現在まで約950日間における予測解析と実測値との対比により予測解析の妥当性を検討する。

(1) 掘削影響範囲

予測解析結果①では3年間(1095日)での顕著な影響範囲を100m以内としている。950日時点で第2立坑からの距離と水頭変化量の関係は調和的である。図-13に示すピエゾ水頭の非定常変化は530日以後水頭の低下は収まり、3年間での影響も950日の影響と同程度と考えられる。したがって影響範囲に関する予測解析は妥当であったと考えられる。

(2) 湧水量の非定常変化

湧水量に関する予測解析結果②③では、予測値は実測値の1.5~2.0倍の流量となっている。しかし湧水量の非定常変化傾向に関しては、予測解析と実測結果は調和的であり、オーダー的には妥当な透水係数値の設定であった。しかし、断層を過ぎ(解析上は掘削開始後440日から470日にかけて断層部を通過)高透水性部に達した時点より湧水量の急激な増加が予測されたが、実際には断層を過ぎても湧水量の急激な増加も認められず、予測と違った現象も認められた。このひとつの原因として解析上の断層部に対する要素分割の粗さが考えられる。

4.2 条件設定の妥当性

(1) 側方境界条件

側方境界条件は掘削にかかわらず定常的に設定した。境界上のTH4, 6, 7, SN4における掘削前と掘削完了時のピエゾ水頭の鉛直分布を図-14(a)~(d)に示す。掘削前と掘削完了時でピエゾ水頭の変化量は小さく、TH4で掘削の影響による水頭の低下が多少認められるが、全体的には境界上のMP計測孔でのピエゾ水頭の分布傾向はほとんど変化していない。このことより定常的に設定した側方境界条件は少なくとも掘削開始後950日までは妥当であったといえる。

(2) 第2立坑掘削部境界条件

第2立坑部は非定常に変化する掘削工程をモデル化した。図-12(a)に示すピエゾ水頭の非定常変化の解析結果と実測値の対比は、このモデル化手法が妥当であることを示している。

(3) 水理地質区分

図-12(a)で、EL210m近傍では17.5m離れた2点で計測されたピエゾ水頭値およびその変化挙動が一致しているが、(b)EL135m近傍では4.5m離れた2点での計測結果は大きく異なっている。このことは地下水挙動を正確に把握するための水理地質区分を適確に把握することの重要性と掘削影響試験が水理地質区分をより明瞭にし、場の水理地質区分を把握するのに有効であることを示している。

4.3 追解析

第2立坑および調査立坑・坑道内への湧水量に着目して、予測解析で設定した透水係数の見直しを行い、追解析を実施した。

(1) 透水係数設定の検討

図-13に示す湧水量の実測値と解析値の大きな違いとしては、以下の項目が上げられる。

- ① 調査立坑・坑道内への湧水量の解析値は実測値の約1.5倍である。
- ② 第2立坑内への湧水量の解析値は、実測値に対して掘削前半および掘削終了前において湧水量の増加が大きく、全体的に解析値は実測値の約2倍である。

上記①②より、調査坑道内および第2立坑底部における解析における湧水量を低下させるためにmat3, mat5の透水係数をそれぞれ1/2として、mat3が 5.0×10^{-8} cm/sec, mat5が 2.5×10^{-8} cm/secに設定した。掘削前半に相当する部分mat8, 10, 11に対しても1/2の透水係数、それぞれ 2.5×10^{-8} cm/sec, 5×10^{-8} cm/sec, 5.0×10^{-8} cm/secに設定した。

(2) 解析

追解析は上記透水係数設定を変更したのち、既存の調査立坑・坑道のみを考慮した定常解析を実施して、その結果を追解析の初期条件とした。追解析の結果得られた湧水量の非定常変化をCASE2として図-15に示す。第2立坑内および調査立坑・坑道内への湧水量の解析値は実測値に良く一致してきたことがわかる。予測解析(CASE1)と追解析(CASE2)のTH1, 2, 3, 5における掘削開始より950日のピエゾ水頭の分布を比較したものが図-16である。両者はほとんど一致しており、透水係数を変えたことによる水頭分布への影響が少なかったことがわかる。このことは、2倍程度の湧水量の違いが、水頭分布にほとんど影響することなく、解析上設定する湧水箇所周辺の透水係数の2倍程度の違いにより生じる可能性があるということを示している。

5. まとめ

以上、予測解析、予測解析と実測値との比較、考察より以下のことが確認できた。

- ① 地質調査、透水試験等に基づき構築した水理地質構造モデルおよび一連の解析手法(地下水流動評価システム)が全体的な立坑掘削の影響を把握する上で有効であること。
- ② 第2立坑の掘削影響範囲は100メートル以内にあること。
- ③ 立坑掘削影響試験という実規模試験が水理地質特性を把握するのに有効であること。

6. 今後の課題

今後、逐次計測データと解析結果とを比較検討していくに際して、計測されたデータを用いて数値解析的に水理地質構造を推定・同定する手法を開発していく必要があると考えられる。

7. 参考文献

- 1) 渡辺 邦夫, 藍沢 稔幸, 柳澤 孝一: 岩盤浸透流の3次元解析の考え方と多孔体モデルによる広域解析例, 第45回土木学会年次学術講演会概要集 pp.816~817, 1990
- 2) Domenico, P.A. and M.D.Miffin, "Water from Low-Permeability Sediment and Land Surface", Water Resou. Res., Vol.1, No.4, 1965
- 3) 今井 久, 柳澤 孝一, 大澤 英昭, 渡辺 邦夫: 立坑掘削の地下水流動予測解析, 第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 pp.317~321

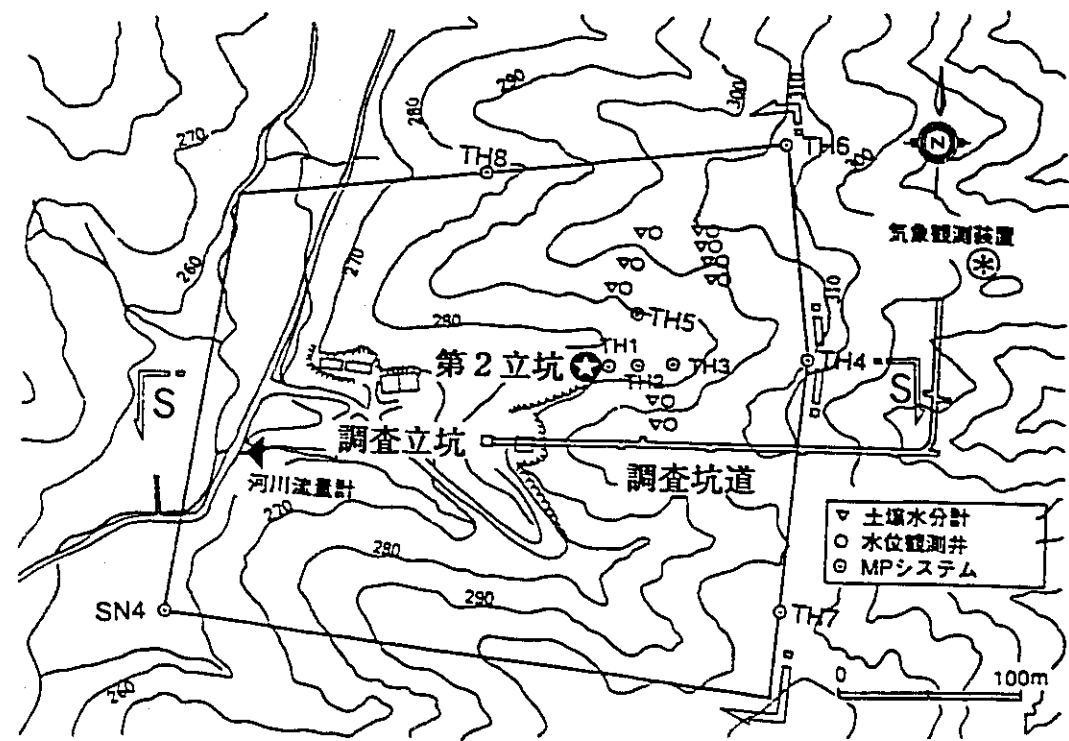


図-1 解析領域平面図

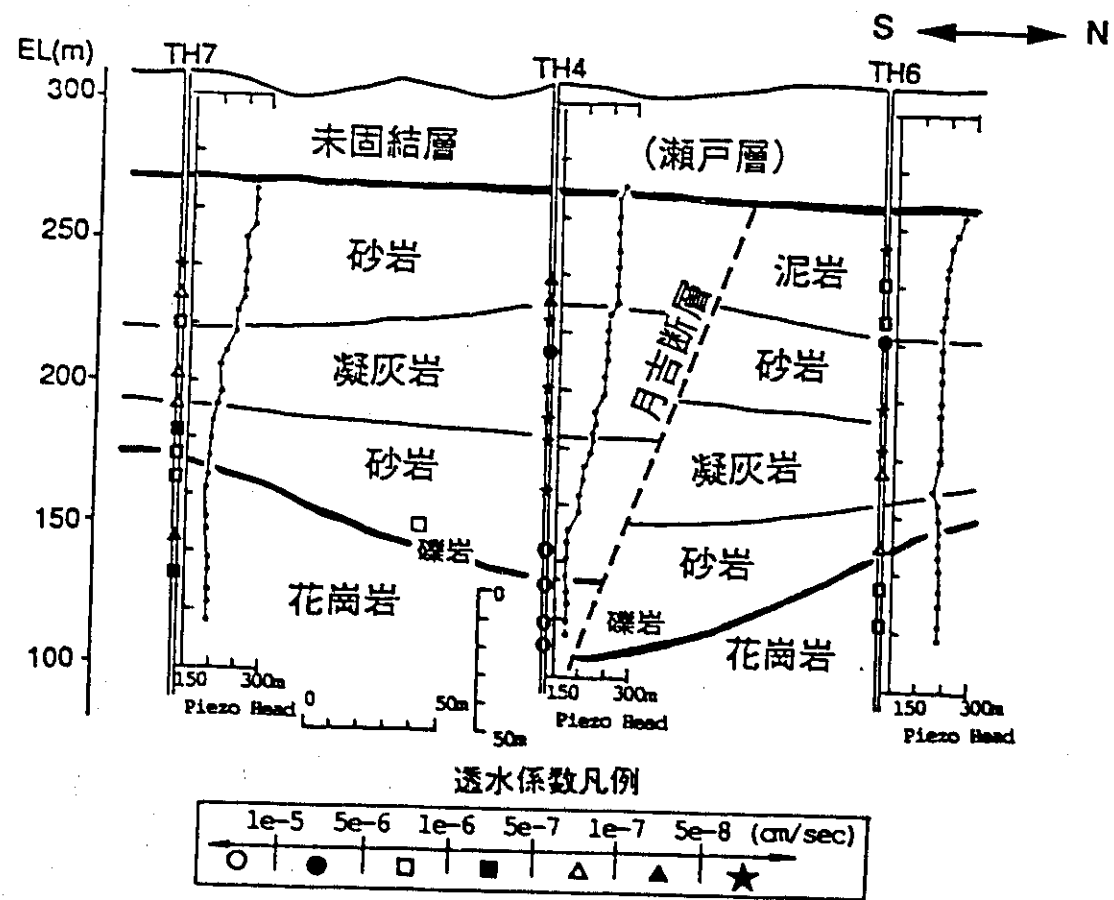


図-2 事前調査概要図(地質構造, 透水試験結果, 水圧計測結果)

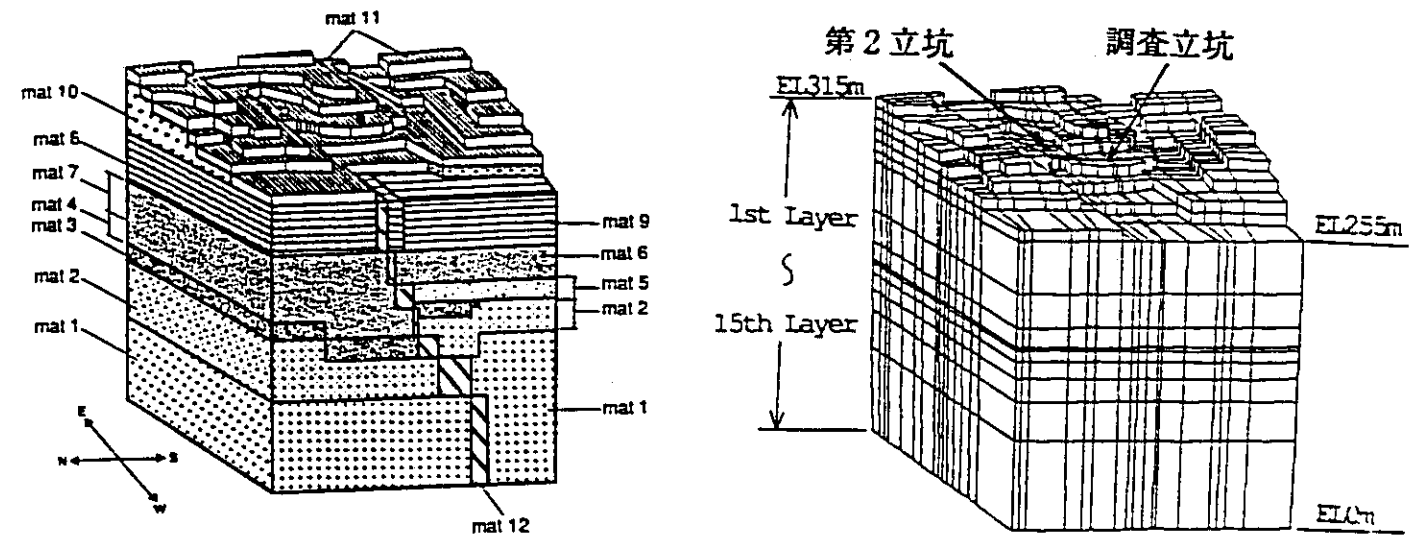


図-3 水理地質構造モデル図

図-4 要素分割形状図

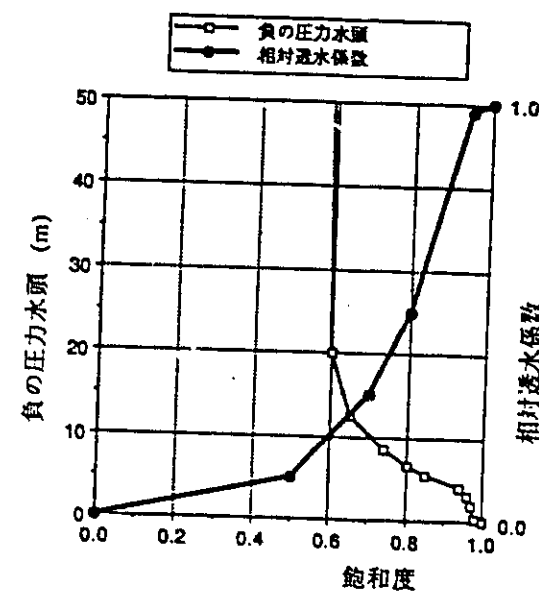


図-5 不飽和特性曲線図

表-1 水理地質構造モデル—水理特性値・地質対応表

区分	透水係数 (cm/sec)	間隙率	比貯留係数 (l/m)	地質
mat 1	1.00E-07	0.02	1.00E-04	花崗岩
mat 2	5.00E-06	0.1	1.00E-04	風化花崗岩
mat 3	1.00E-05	0.3	1.00E-04	風化花崗岩・礫岩
mat 4	1.00E-06	0.3	1.00E-04	砂岩
mat 5	5.00E-06	0.3	1.00E-04	砂岩
mat 6	1.00E-06	0.3	1.00E-04	砂岩・凝灰岩
mat 7	1.00E-06	0.4	1.00E-04	凝灰岩
mat 8	5.00E-06	0.4	1.00E-04	砂岩・泥岩
mat 9	1.00E-07	0.4	1.00E-04	砂岩
mat 10	1.00E-05	0.4	1.00E-04	未固結層(瀬戸層)
mat 11	1.00E-04	0.5	1.00E-03	表土
mat 12	1.00E-08	0.3	1.00E-04	粘土を含む断層

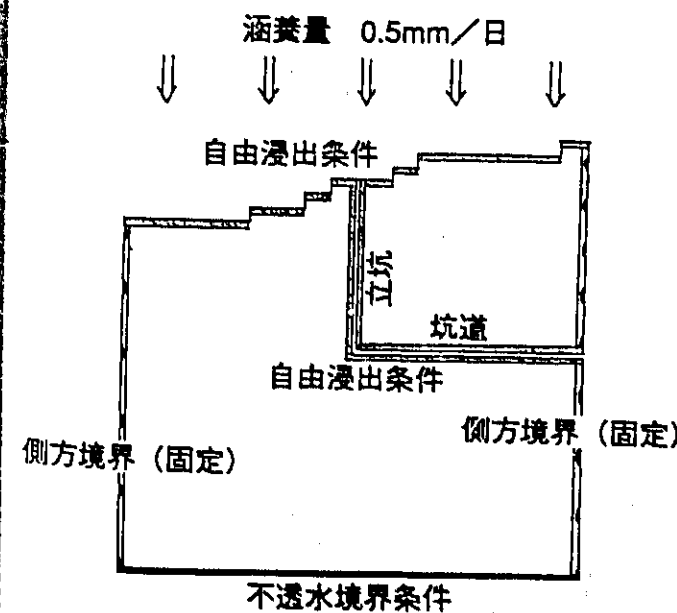


図-6 境界条件設定概要図

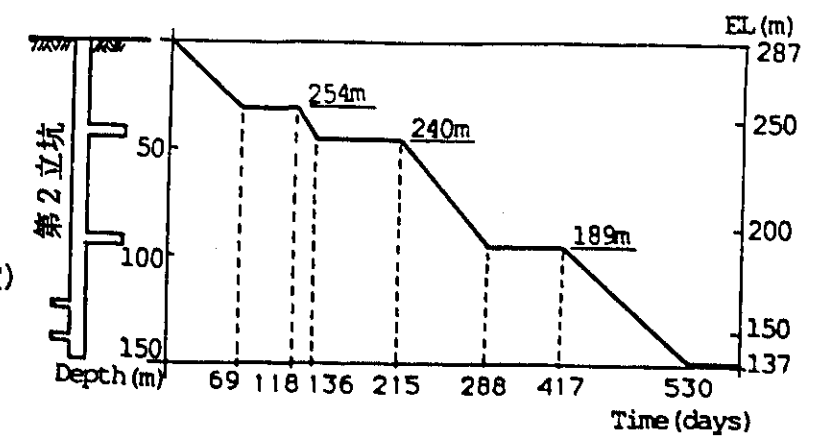


図-7 第2立坑掘削工程図

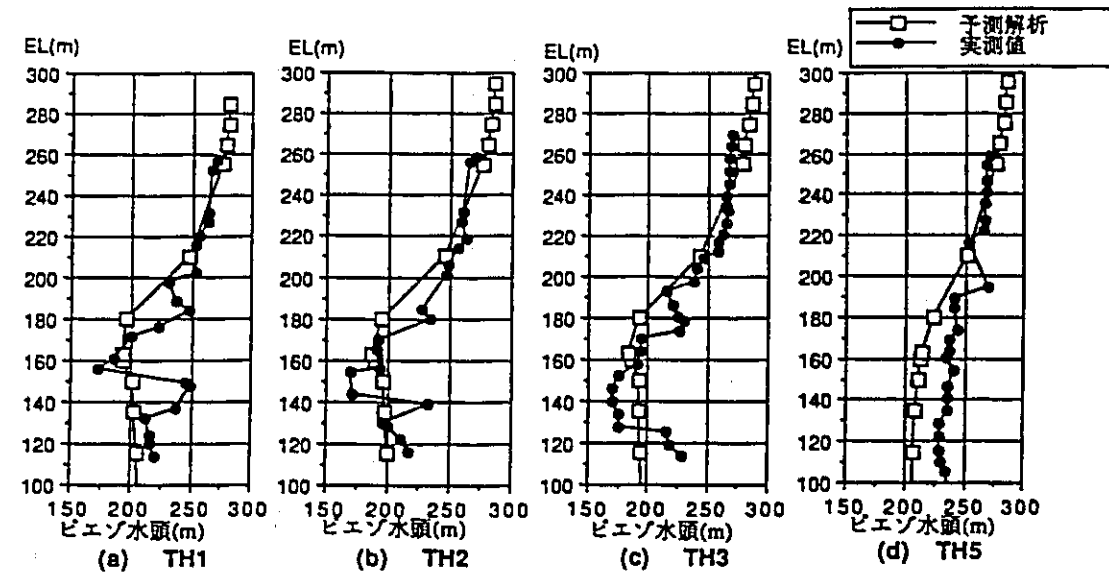
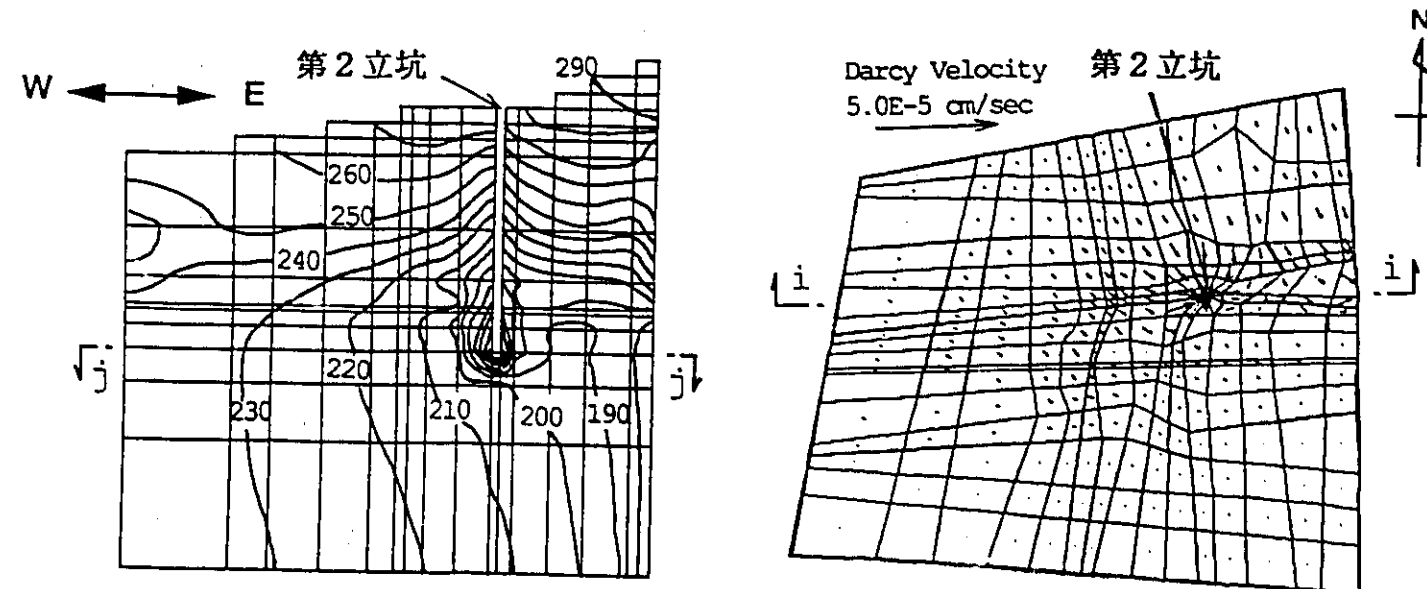


図-8 初期条件の解析値と実測値の比較図



(i-i) 鉛直方向断面内のピエゾ水頭コンター図

(j-j) EL135m平面内ダルシー流速ベクトル図

図-9 掘削終了時におけるピエゾ水頭コンター図およびダルシー流速ベクトル図

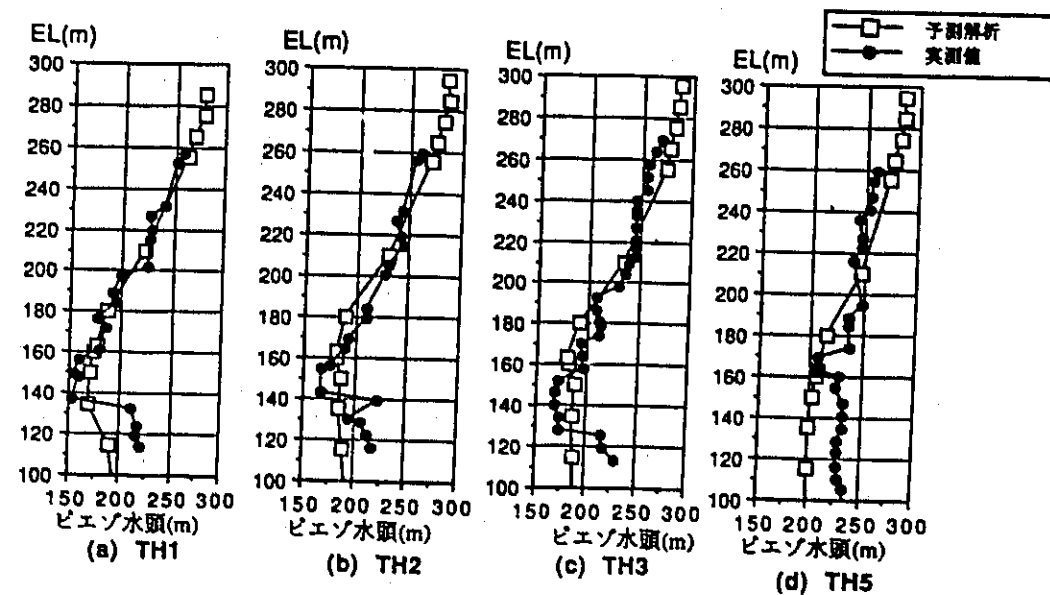
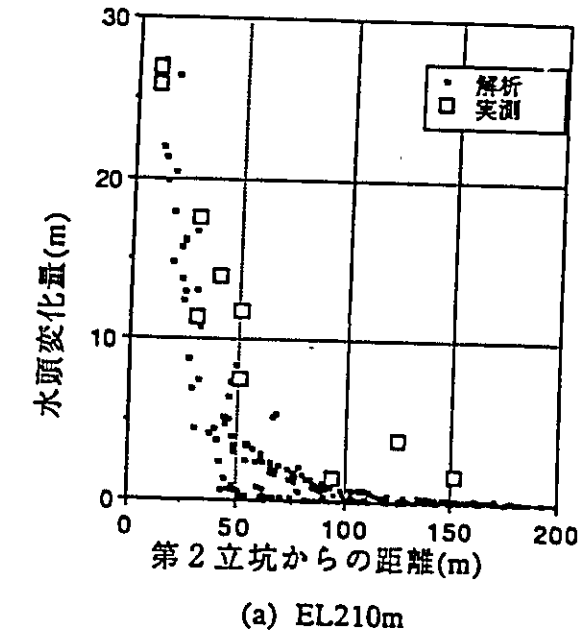
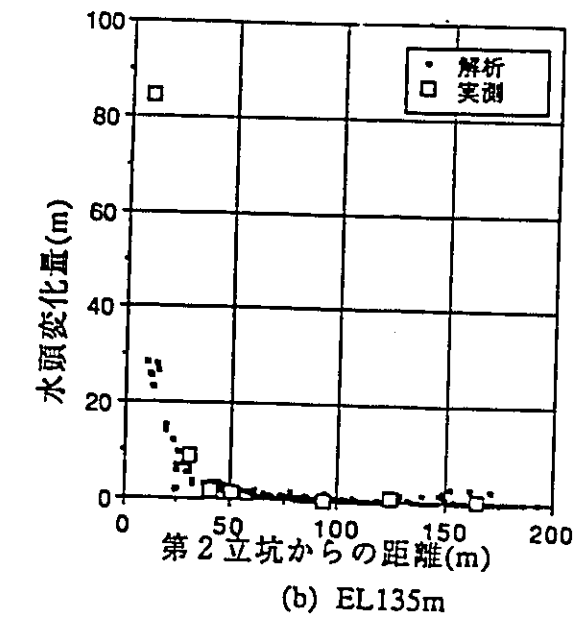


図-10 掘削開始後950日におけるピエゾ水頭の解析値と実測値の比較図

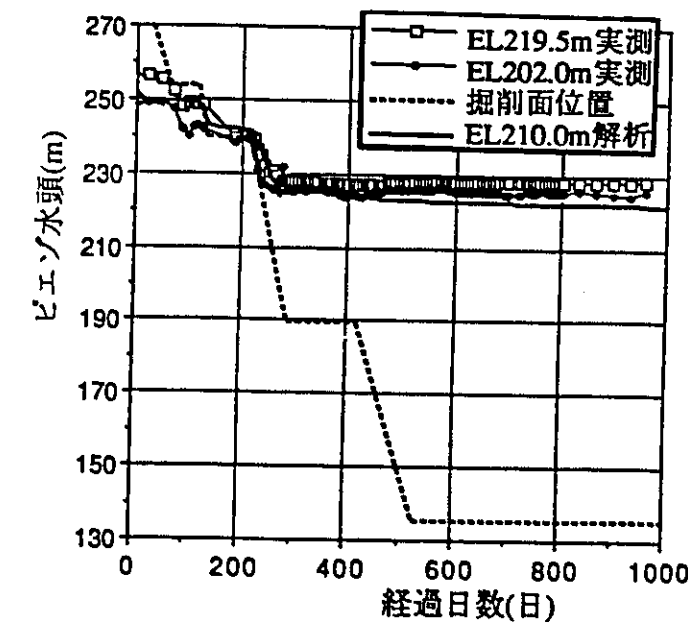


(a) EL210m

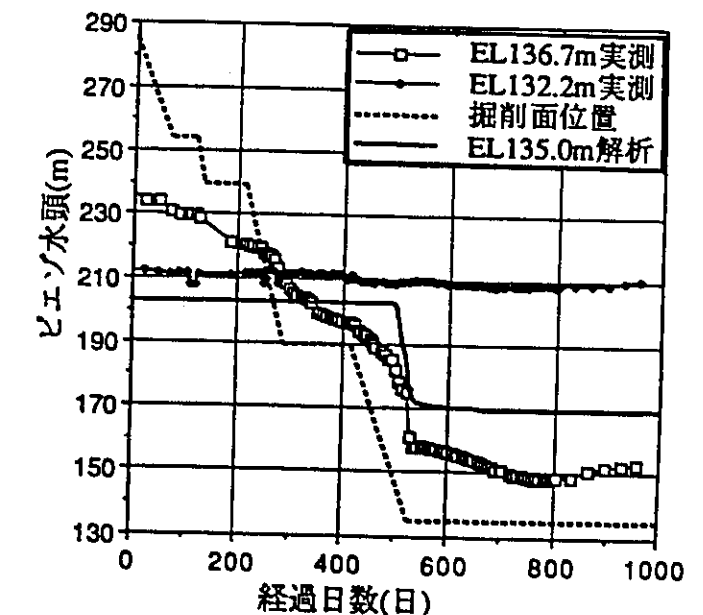


(b) EL135m

図-11 第2立坑からの距離と水頭変化量の解析値と実測値の比較図



(a) EL210m



(b) EL135m

図-12 TH1におけるピエゾ水頭の非定常変化の解析値と実測値の比較図

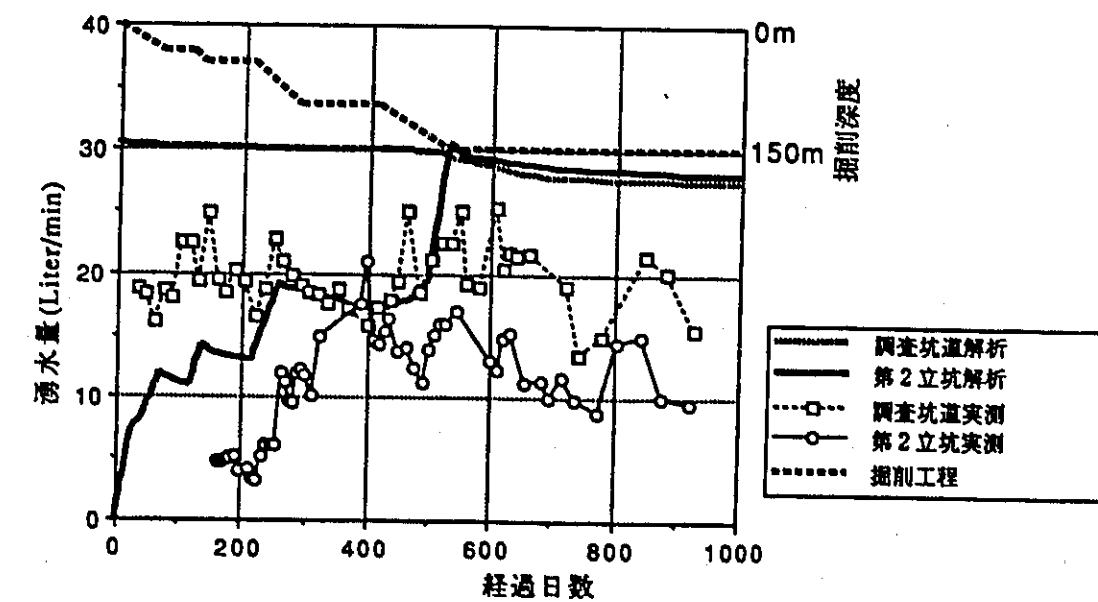


図-13 湧水量の非定常変化の解析値と実測値の比較図

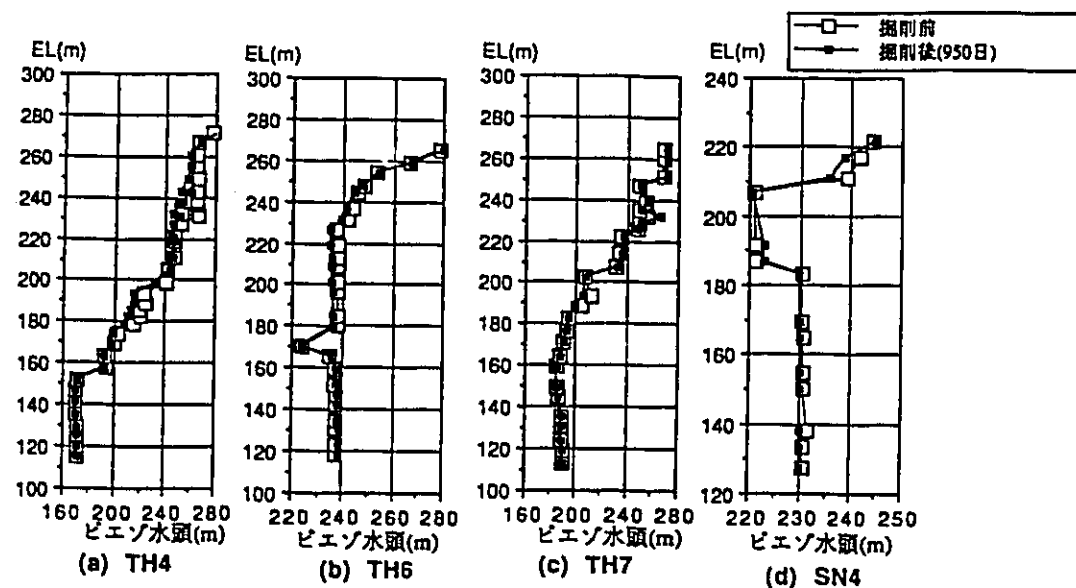


図-14 境界部における掘削開始前と掘削開始後950日のピエゾ水頭分布実測値の比較図

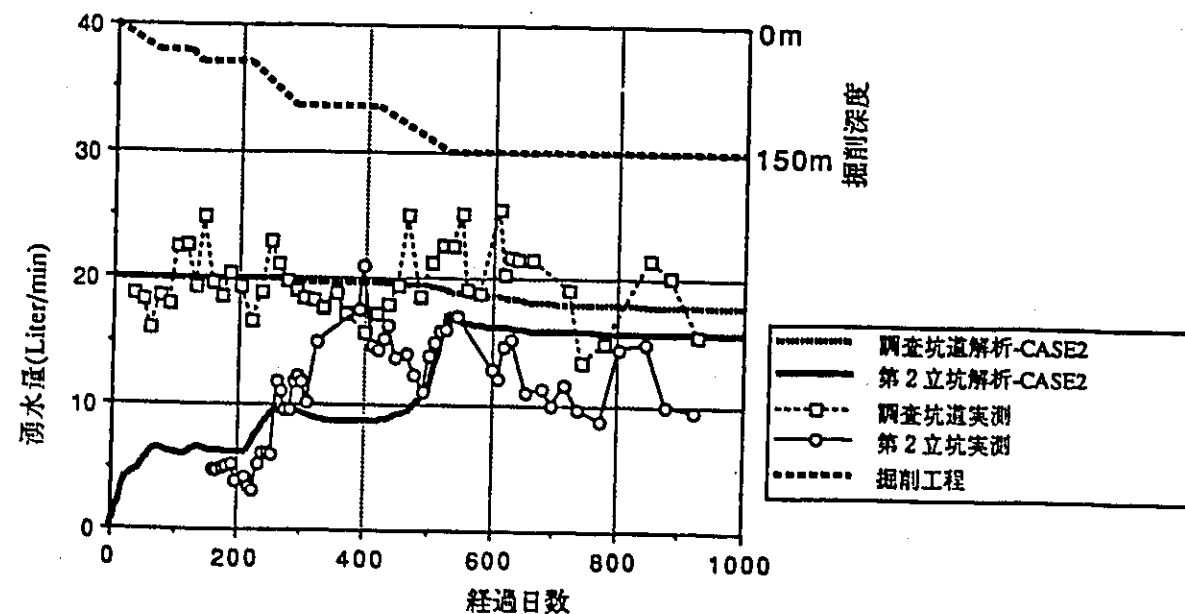


図-15 透水係数値を変えた場合の湧水量の非定常変化の解析値と実測値の比較図

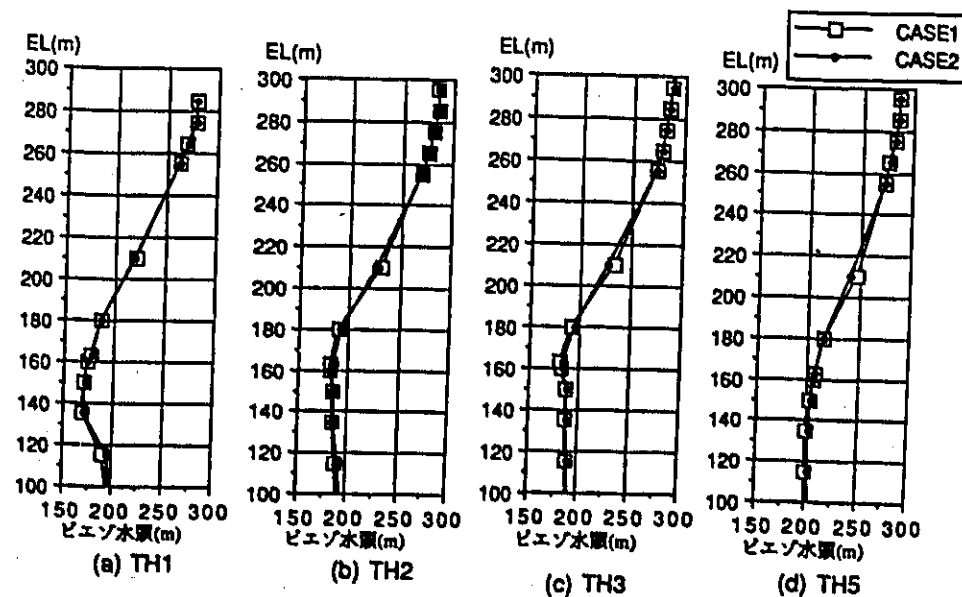


図-16 透水係数値を変えた場合の掘削開始後950日におけるピエゾ水頭分布への影響図

4. 立坑周辺地域の 地下水流動の計測・評価 (3)採水調査

瀬尾 俊弘、濱 克宏、太田 久仁雄

〔概要〕

立坑周辺地域の地下水流動の計測・評価では、立坑掘削にともなう生じる地下水流動の変化を把握すること、およびその評価手法の確立を目的としている。このうち、採水調査では立坑周辺のおもに堆積岩（瀬戸層群および瑞浪層群）中の地下水を採取し、その地球化学的特性データを取得することによって、立坑掘削による地下水の地球化学的特性への影響の把握を行った。また、同時に立坑周辺の地下水の地球化学的特性の三次元的分布の把握を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ①立坑掘削による地下水の地球化学的特性への影響は、現在までのところ認められていない。
- ②立坑周辺の地下水の地球化学的特性は三次元的に系統的な分布を示す。
- ③瑞浪層群中の地下水は降水起源であり、その最下部の地下水は一万数千年前の現在よりも寒い時期の降水が涵養したものと考えられる。

1. はじめに

地下水の地球化学的特性を把握することは、深部の地質環境特性を明らかにする上で非常に重要である。また、立坑などの坑道掘削の影響により坑道周辺の岩盤本来の力学的・水理学的特性が変化するとともに地下水の地球化学的特性も変化する可能性があると考えられる。

本調査は、立坑掘削による地下水の地球化学特性への影響を把握するとともに、立坑周辺の地下水の三次元的な地球化学的特性を明らかにすることを目的として実施した。

2. 地下水の採水および測定・分析方法

以下に、地下水の採水および測定・分析方法を示す。

2.1 採水ポイント

第2立坑周辺の300m×300m×200mの領域に掘削された7本の試錐孔（図1）を利用して、瑞浪層群（上位より生俵累層、明世累層、土岐夾炭累層）および花崗岩の各層準の合計26ポイントから地下水を採取した（図2）。また既存の水平坑道からの湧水、瀬戸層群から地表への湧水および雨水も採取した。

2.2 地下水の採水方法

試錐孔からの地下水の採水には、Multiple Piezometer System（以下、MPシステムと略す）を使用した。本システムは、図1に示す試錐孔に設置され、多重パッカーにより採水区間を区切ることによって、一つの試錐孔において多深度からの採水が可能な採水装置である。それぞれの採水区間の長さは5.1m、区間体積は約20ℓである。このMPシステムを用いた地下水の採水手

順を以下に示す(図3)。

- (1) 試錐孔を掘削する。
- (2) MPシステムを設置する。
- (3) 採水区間内の掘削水などを除去する。
- (4) 地下水を採水する。

目的の深度にもともと存在していた地下水(以下、地層水と呼ぶ)を採取するためには、上記の(1)~(4)の手順のうち、(3)の過程が特に重要である。すなわち、採水区間内に存在する掘削水やほかの深度の地下水(以下、孔内水と呼ぶ)をすべて除去する必要がある。本調査においては、採取した試料水の物理化学パラメータ(pH、電気伝導度)および主要な化学成分濃度(Si、Na⁺、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺、Cl⁻、F⁻、SO₄²⁻、アルカリ度)がほぼ一定の値を示すことをもって孔内水が除去できたと判断した。孔内水が除去された後、地層水を採取し、各種の測定・分析用の試料とした。なお既存水平坑道からの湧水、瀬戸層群から地表への湧水および雨水は直接、採取した。

2.3 測定・分析方法

採取した試料水について、上記の物理化学パラメータの測定・主要成分濃度の分析に加えて水素・酸素の安定同位体組成(δD 、 $\delta^{18}O$)および水素・炭素の放射性同位体(トリチウム、¹⁴C)濃度の分析を行った。

物理化学パラメータ値は、現場において採取した後、直ちに測定した。主要成分濃度は、試料水を実験室に持ち帰り、適切な前処理(蟻目ほか、1990)を施した後に測定した。物理化学パラメータは電極法、Na⁺、K⁺は原子吸光法、Si、Ca²⁺、Mg²⁺は誘導結合高周波プラズマ発光分光分析法、Cl⁻、F⁻、SO₄²⁻はイオンクロマトグラフ法、アルカリ度は滴定法により測定した。

δD 、 $\delta^{18}O$ はそれぞれ、亜鉛還元法(Coleman et al., 1982)、CO₂-H₂O同位体交換平衡法(Yoshida and Mizutani, 1986)を用いて質量分析計で測定した。トリチウムおよび¹⁴C濃度は、それぞれ液体シンチレーション法、加速器質量分析法(中村・中井, 1988)を用いて測定した。

3. 調査結果

3.1 地下水の採水実績

第2立坑の掘削を開始した直後から現在までに各採水ポイントにおいて2回から9回の採水を行った。1回の採水量は、数リットルから十数リットルである。全採水量は各ポイントによって異なるが、現在までに最高約190リットルの地下水を採取したポイントもある。なお各ポイントにおける採水間隔は約3ヶ月である。

3.2 立坑掘削による地下水の地球化学的特性への影響

TH-1号孔から採取した地下水のpHと電気伝導度の採水量にともなう変化の例(土岐夾炭層中の地下水、G. L. -70.8m)を図4に示す。このTH-1号孔は立坑の最も近傍(7m)に位置しているために、掘削による影響を最も受けやすいと考えられる。しかしながら、

電気伝導度に関しては、掘削の影響がほとんど観測されていない。すなわち、採水を開始した直後から、掘削深度が採水深度に達するまでの間の変化は、前述したように、採水区間内の孔内水が取り除かれ、地層水に置き換わっていくことによるものであると考えられる。掘削深度が採水深度に到達してから掘削が終了した現在までの間は、ほぼ一定の値を示しており、変化は認められない。一方、pHに関しては、採水開始から現在までほぼ一定である。主要溶存成分についても電気伝導度とほぼ同じ傾向を示す。これらのことより、現在までに、立坑掘削による地下水の地球化学的特性への影響はほとんどないと考えられる。

3.3 地下水の地球化学的調査結果

立坑周辺の地下水の地球化学的特性およびその三次元的分布について、以下のことが明らかになった。

(1) 主要成分濃度・物理化学パラメータ(太田ほか、1991、濱ほか、1992)

- ① 瑞浪層群中の地下水のpHは深度が増加するにしたがって、中性から弱アルカリ性へと変化する。また、基盤をなす花崗岩中の地下水はほぼ中性である。
- ② 溶存酸素濃度はどの深度においても非常に低濃度である(0.3ppm以下)。
- ③ 瑞浪層群中の地下水の主要成分濃度の変化は層準に関係なく深度に依存しており、その変化の傾向は、深度が標高約200m(地表標高約280~300m)を境に異なっている(図5)。すなわち、標高約200mより浅部においては、深度が増すほどNa⁺、HCO₃⁻は増加する傾向にあり、一方、Si、Ca²⁺は減少傾向にある。また標高約200mより深部ではNa⁺、HCO₃⁻濃度に大きな変化は認められず、さらにSi、Ca²⁺は低濃度である。したがって、立坑周辺の深度のより浅いところの地下水はNa⁺-Ca²⁺-HCO₃⁻型であり、より深いところの地下水はNa⁺-HCO₃⁻型である。

- ④ 上記の地下水組成データおよび瑞浪層群中の主要な構成鉱物のデータを用いた熱力学的解析から、地下水の組成は、おもに斜長石、スメクタイトとの反応によって形成された可能性が考えられる。

(2) 水素・酸素安定同位体

水素・酸素の安定同位体比の測定結果(δD - $\delta^{18}O$ 図)を図6に示す。この結果から以下のことが明らかとなった。

- ① 瑞浪層群・花崗岩中の地下水の δ 値は、中部地方の天水の範囲に入ることから、これらの地下水は降水起源である。
- ② 土岐夾炭層下部層中の地下水の安定同位体組成は、現在の降水や瀬戸層群中の地下水のそれとは異なり、 $\delta^{18}O$ 値が約1~1.5%低い(太田ほか、1992)。

(3) トリチウム濃度

- ① 瀬戸層群中の地下水のトリチウム濃度は、現在の東濃地域の雨水の値とほぼ等しい。
 - ② 瑞浪層群・花崗岩中の地下水のトリチウム濃度は深度によらず非常に低い(3TU以下)。
- 以上の結果から、瀬戸層群中の地下水は現在の降水が涵養したものであることが考えられる。また、瑞浪層群・花崗岩中の地下水は、少なくとも40年以上経過したものであることが考えられる(太田ほか、1992)。

(4) ¹⁴C濃度

地下水中の¹⁴C濃度の測定値をそのまま年代値の計算に用いることはできない。すなわち、本

調査地域において考えられる以下の三つの反応によって、 ^{14}C を全く失った炭素の供給を補正する必要がある(瀬尾ほか, 1992)。

- ・帯水層中の堆積性有機物の酸化による二酸化炭素の供給。
- ・帯水層中の堆積性有機物のメタン酸酵による二酸化炭素の供給。
- ・貝化石の溶解による炭酸水素イオンの供給。

以上の反応に対する補正を行った結果、土岐夾炭累層下部層中の地下水の ^{14}C 年代として13,000~15,000年の値が得られた。この年代値は、ウルム氷期の末期に相当するものであり、当時は、現在よりも気温が低かったと考えられる。また、上記のように現在の降水より土岐夾炭累層下部層中の地下水の $\delta^{18}\text{O}$ 値が約1~1.5%低い。このことは、現在の気象条件下では、年平均気温が約2~3℃低いことに相当する(Yurtsever, 1975)。したがって、土岐夾炭累層下部層中の地下水は、現在よりも気温の低かった時期の降水が涵養したものであることが考えられる。

4. まとめ

本調査により以下のことが明らかとなった。

- ①現在までに立坑掘削による地下水の地球化学的特性への影響は認められていない。
- ②pHは深度とともに中性からアルカリ性へと変化する。
- ③地下水の化学組成は深度とともに変化するがその傾向は、標高約200mを境に異なる。
- ④安定同位体組成、放射性同位体濃度より瑞浪層群中の地下水の起源は降水であり、ある程度時間が経過した水である。また瑞浪層群最下部中の地下水の年代は、一万数千年(^{14}C 年代値)を示し、現在よりも寒い時期の降水に由来すると考えられる。

5. 今後の予定

立坑掘削を終了してから現在まで、掘削による地下水の地球化学的特性への影響は認められていない。これは、地下水の流動が緩慢なため、地球化学的には掘削による影響が観測されていない可能性が高い。したがって、今後も各ポイントにおける地下水の採取および測定・分析を継続して、長期的なモニタリングを行う必要があると考えられる。

6. 参考文献

- 蟻目 清一郎・川村 静夫・那須 義和・中谷 省三・多賀 光彦(1990): 水の分析-第3版-
Yoshida, N. and Mizutani, Y. (1986): Preparation of carbon dioxide for oxygen-18 and determination of water by use of a plastic syringe. *Anal. Chem.*, 58, 1273
Coleman, M. L. et al. (1982): *Anal. Chem.*, 54, 993-995
太田 久仁雄・瀬尾 俊弘(1992): 東濃地域における深部地下水の地球化学的研究(II). 日本原子力学会, 1991年年会予稿集, 526.
太田 久仁雄・瀬尾 俊弘・水谷 義彦(1992): 東濃地域における深部地下水の地球化学的研究(III). 日本原子力学会, 1992年年会予稿集, 113.
濱 克宏・瀬尾 俊弘・太田 久仁雄(1992): 東濃地域における深部地下水の地球化学的研究(IV). 日本原子力学会, 1992年年会予稿集, 114.

中村 俊夫・中井 信之(1988): 放射性炭素年代測定法の基礎-加速器質量分析法に重点をおいて-。地質学論集, 29, 83-106.

瀬尾 俊弘・水谷 義彦・太田 久仁雄(1992): 岐阜県東濃地域における地下水の ^{14}C 年代と起源について。日本地下水学会, 1992年秋季講演会講演要旨集, 50-53.

Yurtsever, Y. (1975): Worldwide survey stable isotope in precipitation. Rep. sect. Iso Isotope Hydrol., IABA, November 1975, 40pp.

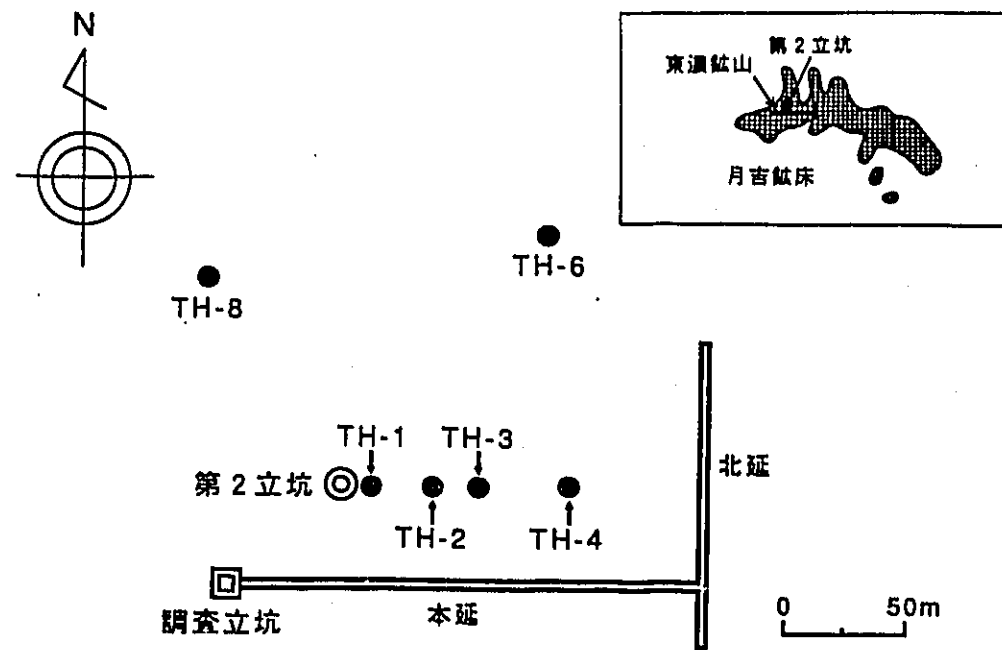


図1. 第2立坑周辺の試錐孔配置図

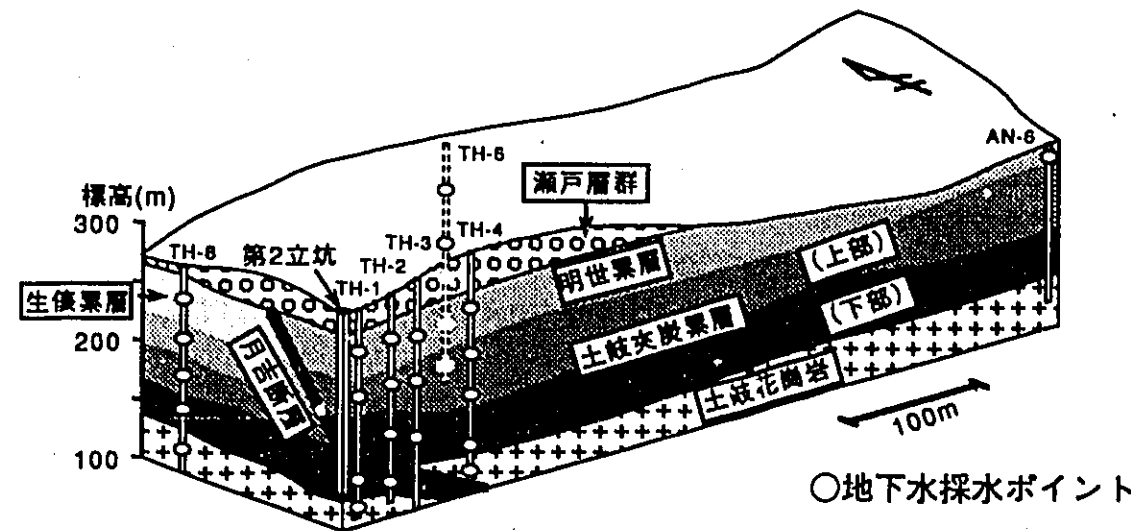


図2. 第2立坑周辺地下水採水ポイント位置図

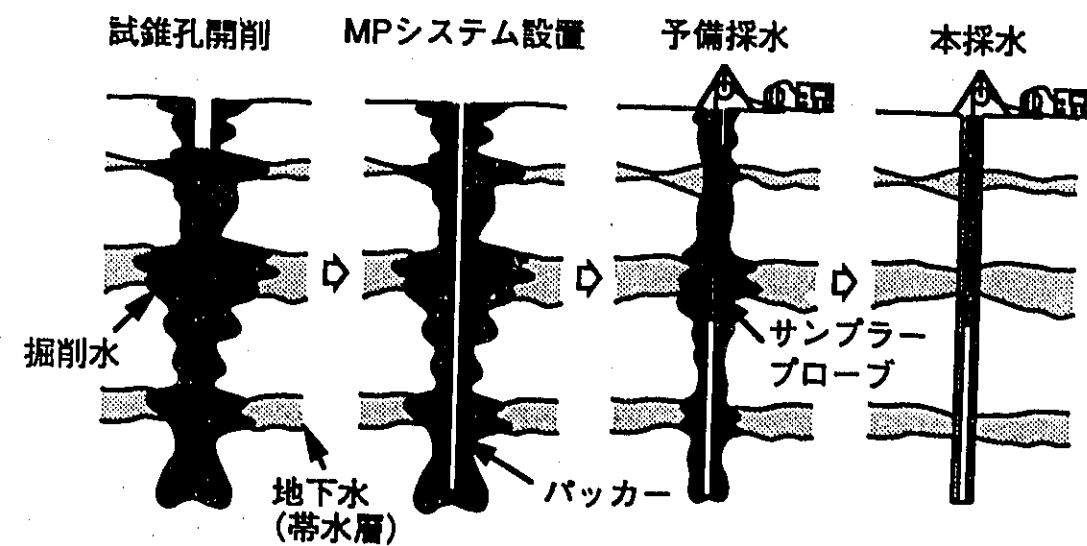


図3. MPシステムによる採水手順

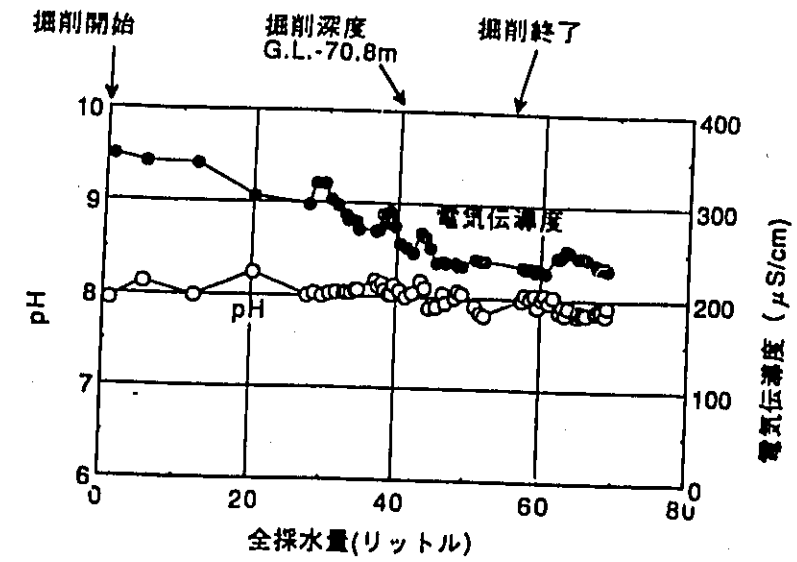


図4. 地下水の採水量とpH, 電気伝導度の変化

TH-1号孔土岐夾炭栗層上部層(G.L.-70.8m)

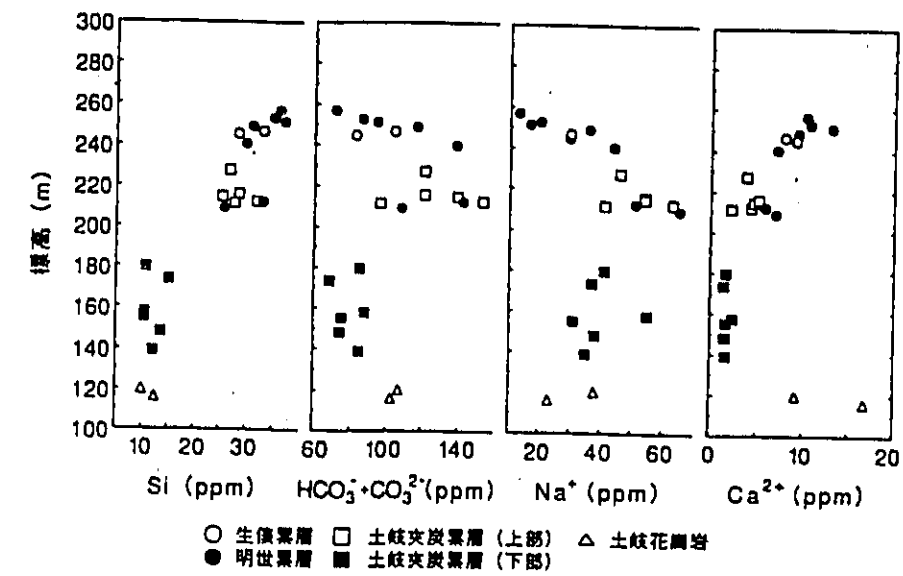


図5. 東濃地域の地下水の化学組成の深度分布

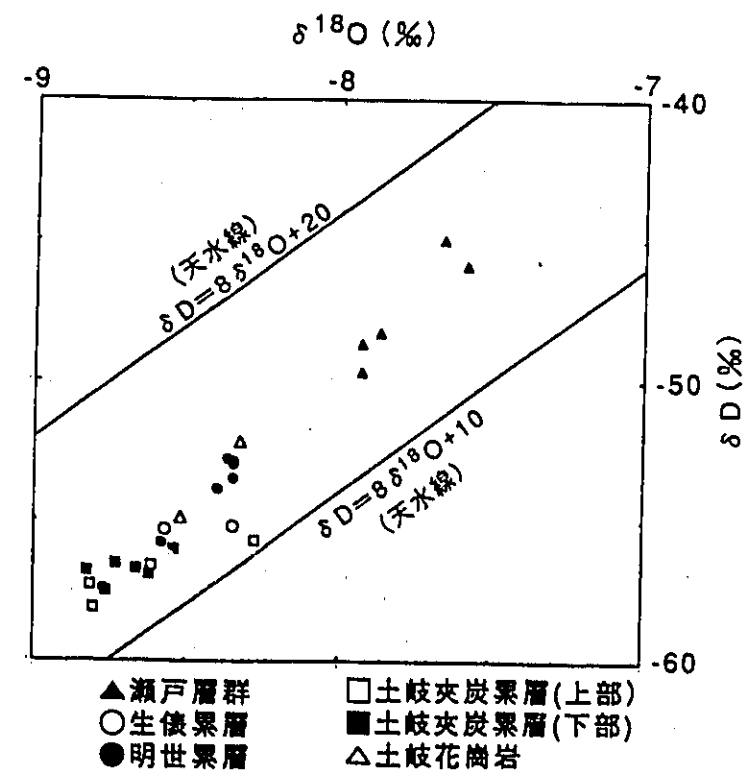


図6. 東濃地域の地下水のδD-δ¹⁸O図

5. 質疑応答議事録

1. 立坑掘削影響試験の目的と位置づけ (湯佐)

2. 工事・調査の概要 (杉原)

杉杖) 蒸発散量についてだが、蒸発パンで測定される量と実際の蒸発量は異なるのではないか。
杉原) 植生などを考慮して係数0.7を掛けている。係数は文献に基づいて決めているが、0.7を採用している。

水田) 地層科学研究の項目には熱があるが、今後、熱の研究はどのように進めていくのか。

湯佐) 以前、細倉鉱山などを利用して研究を行っており、ある程度モデル解析で説明がつく、という結論を得ている。今後は連成問題として取り扱っていききたい。

谷本) 海外のプロジェクトと比較して、我が国独特の問題は何であるか。

杉原) 例えば花崗岩については、スウェーデン、カナダ、スイスなどで研究を行っているが、日本の花崗岩と比較してき裂頻度が異なるし、地下水の量も多いと言われている。堆積岩については、岩塩や粘土質岩が海外で研究されているが、東濃の堆積岩と比較して強度や変形性やクリープ特性が異なっている。

谷本) 研究の原理が変わらずに量だけが異なるのか、あるいは原理が異なるのか。

杉原) 原理や量について考える前に、何がどうなっているのかを知る必要がある。そのために、立坑掘削影響試験の目的のひとつとして既存技術の適用性の評価を挙げた。これは、既存の技術で何が分かるのかあるいは何が分からないのかを把握するためである。データを評価していく上で、原理や量に関する課題を設定していきたい。

山川) 日本固有の問題点として、応力場が考えられる。応力場が変わっていることで、異方性を考慮しなければならない。

湯佐) 研究を進めていく上で、技術的な側面と社会的な側面がある。安全性を評価するということで、社会的な関わりがあり、これが日本独特のものである。また、例えば熱などの研究対象が海外と異なるのが技術的な側面である。この両方の側面をふまえながら研究を進めていきたい。

中西) 立坑の掘削開始日と調査孔の掘削期間を教えてください。

杉原) 立坑は正確には1月19日に掘削を開始した。調査孔は平成元年の1月から9月にかけて掘削した。

3. 立坑周囲のゆるみ領域の力学的・水理学的計測・評価

(1) 変位・応力計測 (佐藤)

水田) 覆工軸力の測定結果は変形挙動の測定結果を良く説明するものであるので、成果として報告書に載せるべきだろう。

ひずみ計測の中で軸対称解析結果を示しているが、覆工のモデル化が実際と合っていないのではないか。確認してほしい。

初期応力の測定では、応力解放法では測定したひずみの信頼性が高く、水圧破碎法ではき

裂を開口させる力の信頼性が高いのであって、弾性論を用いて応力を算定することにより信頼性が薄れるのである。第1計測坑道の東側と西側で、応力場が異なるのではないか。

木山) 断層はどのような状態であるのか。測定結果を見ると、断層面でシャープな動きはしていないようである。

佐藤) 断層の周りには破碎帯が分布しており、き裂頻度が高い。このような所で変形が大きい。また、断層変位計の測定結果から、断層と立坑で囲まれた部分がブロック状に動いている可能性もある。

市川) 覆工軸力は立坑の円周方向を測定しているから、必ずしも変位の測定結果と調和的であるとは言えない。

谷本) 変位挙動の解析は弾性体とみなした解析を行っているが、ゆるみ域が1m程度であることは無視できないと思われる。今後の課題として、数値解析については、ゆるみ域を考慮して、どの程度まで解析できるかについて検討してもらいたい。

市川) 現実の岩盤とモデルとのギャップをもっと埋めてほしい。三次元有限要素法解析はメッシュ切りの手間はかかるが、粗い解析でも良くシミュレーションできる。

佐藤) 解析についてはさらに検討を進めていきたい。

中西) ボアホールテレビのき裂観察では、どの程度のき裂まで識別できるのか。

佐藤) 0.1mmまで識別可能である。

3. (2) 物性変化 (松井)

木山) 永久変形係数が大きいということは、どのような現象を表しているのか。

松井) 残留変形量が減少するということである。

市川) 永久変形係数の測定方法は何か。

松井) ボアホールジャッキテストで求めた。

市川) 永久変形係数では解析に用いる力学モデルと結びつかないのではないか。

松井) 今回はゆるみ領域をとらえる指標として用いている。

市川) ゆるみ領域を表現するためには破壊と間隙の変化の両方をモデル化する必要がある。

木山) ゆるみ領域の定義を明確にし、どのパラメータを指標にするのかを検討する必要がある。

また、被り圧を考慮した場合、載荷圧で10kg/cm²以内で変形係数を求めるべきであろう。

武田) 目標は一般化である。事前の場の条件の把握に力を入れるべきである。また、岩相で区分するよりも岩盤を物質としてみた場合の破壊強度などで区分する方が意味がある。

市川) 弾性波トモグラフィの逆解析はどのように行ったのか。

長谷川) 解析対象領域の外側から回り込む破線はないとし、破線の屈折は考慮している。また、メッシュ内の速度は一定であると仮定し、繰り返し計算により最適解を求めた。

4. 立坑周辺地域の地下水流動の計測・評価

(1) 水理地質構造調査・観測 (中野)

渡辺) 表層水理調査に関する問題点は地下水の涵養量の算定手法である。特に、涵養量の算定に

用いている流出量、蒸発量については、調査地域表層部の落葉構造、植生、地形などを考慮した検討が今後重要になる。また、深部水理調査に関しては、立坑掘削時に生じる岩盤中の不飽和帯の特性を捉える必要がある。これらの問題は水文学者が解決するのを待つのか、動燃自らが行うのかを決めるべき段階にきている。

武田) 立坑の湧水量測定において、湧水の蒸発の検討は行っているのか。

中野) 湧水はほとんどの区間で閉鎖された状態で直接採水しており、坑内の湿度も極めて高いため、蒸発量は問題にならないと考えている。

柳澤) 既存坑道内において、坑道壁面からの蒸発量の計測を行った。これによると $2 \text{ mg/m}^2/\text{sec}$ 程度であり、無視しても問題ないと考えている。

堀田) 掘削終了後のモニタリングはいつまで継続するのか。

中野) データの一部には周期的な変動が認められるものもある。これが掘削による影響か季節変動によるものかは現在のところ明らかではないため、今後数年間は継続していきたい。

市川) 試錐孔の配置は、調査領域の地質を考慮して行ったのか。

中野) 今回設定した調査領域および試錐孔の配置は、地下水流動が主に地形の影響を受けることから、地形を考慮して設定した。

柳澤) 本調査領域を設定する以前に、広領域の地下水流動解析を実施しており、この結果についても考慮している。

市川) 物質移動を考える際、地下水の流速が重要であると考えられるが、ここでは流速の測定は行っているのか。

中野) 試錐孔を利用した流向・流速の測定は、本調査地域でも既に実施している。しかしながら得られた値が試錐孔周辺の流向・流速を代表するものか、検討が十分になされていない。

柳澤) 流向・流速の測定は以前に行っているが、よい結果は得られていない。これは、測定区間の岩盤が亀裂性岩盤であるため、局所的な流れが発生するためであると考えている。現在は流向・流速の測定を行う前に、岩盤の不均質性を評価する手法を開発中である。

4. (2) 水理解析 (今井)

渡辺) 水理解析を行うにあたり、①入力データの精度、②モデル化の精度、③数値解析の精度が問題になる。このうちモデル化精度を向上させることが一般に難しい。

解析の妥当性を評価する際には、解析結果と実測値がどの程度まで一致すればよいとするかが問題であり、今後はこのストラテジーを確立することが重要になる。

今井) モデル化の際には客観的な手法 (例えば地球統計学) を用いる必要があると考えている。

また、流量は解析値と実測値で約2倍の違いがあったが、透水係数を修正して再解析することにより、圧力分布に大きな影響を与えることなくこれらを合わせることができた。このことより、単に解析値と実測値を合わせるということではなく、両者の違いを議論する際の許容範囲として2倍というものが1つの目安として理解できないものかと考える。

市川) モデル化の改良の段階でパラメータアイデンティファイすることは重要であり、実測値も十分にあると思われるのでこれが可能である。

深部において観測値と解析結果のピエゾ水頭の値が合わないのは、モデルの底部を不透

水としたからではないのか。

今井) MP計測の結果150m以深では静水圧分布しているもので、鉛直方向の水の動きはないものと考え、不透水層とした。

水田) 当初0.5mm/dayの涵養量を設定して解析していたが、モデルの物性値 (透水係数) を修正して再解析した際に、涵養量が変わってしまわないのか。

今井) 涵養量に関してのチェックは行っていない。

木山) 掘削による影響を防ぐために、立坑周辺の試錐孔から圧力をかけてバランスさせる方法も考えられるが、可能であろうか。

今井) 都市土木などで工事例があるので、可能であると思う。

木山) 掘削の影響が、実際の坑道建設にどう関わってくるのか。

湯佐) 水理に関しては、影響範囲の大きさを知ることにより影響範囲内での水の流れを知ることが重要であり、今回は単なるポンピングテストを行ったといえる。埋め戻せば影響がほとんどなくなるであろう。

市川) 影響がなくなるとは言えないのではないのか。

湯佐) 全く影響がないとは考えていない。2Dといった近傍での評価は別に行う必要がある。

4. (3) 採水調査 (瀬尾)

中西) 立坑掘削と並行して、調査坑道内の本延70m、95m、120m地点の湧水について、ウラン同位体 (ウラン濃度および $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 放射能比) の連続測定を実施した。その結果激しい経時変動を示すことが明らかとなった。この変動は、酸化的な地下水と還元的な地下水の混合により生じている可能性がある。しかし、混合だけでは解釈できない変動もある。上記の3地点の地下水については、地下水から分離された懸濁物中のウラン同位体の測定も行っており、① $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 射能比が1より大きい、②ほぼ1である、③1以下である、の3種類があることがわかった。また、懸濁物中のウラン同位体は、地下水中のそれとは傾向が異なることもわかっている。前述のウラン同位体データの解析をさらに進めていくためには、試錐孔掘削および立坑掘削の工程を考慮して、測定データを見直す必要があると考えている。そして、変動の原因を検討しようと考えている。

地下水の地球化学特性を把握するためには、取得したデータの精度と確度に特に注意する必要がある。オクロ天然原子炉の発見には精度の高い同位体比の測定が大きく貢献した。また、地下水の地球化学特性値として最も一般的なデータの1つにpHがある。その測定は容易に行えると思われがちである。しかし、pHメータの形式や測定試料によって、その精度が異なるということに対して注意を払っていない場合が多い。したがって、一見簡単だと思われるpH測定でさえ、その値の信頼性については十分注意しなければならず、他のデータに関してもその精度と確度をよく吟味することが重要である。

中西) これまでのICPのデータは全てフロッピーなどで保存してあるのか。

瀬尾) 保存してある。

中西) それならば、今回発表されていない他の元素についても解析を行うと良いのではないか。

瀬尾) 再度、保存されているデータを見直して、解析を試みたいと思う。

6. まとめ

立坑掘削影響試験ワークショップの講演要旨集の最後にあたり、立坑掘削影響試験全体についてのまとめを述べる。

本試験においては各研究発表にあるように、各々の研究課題について様々な知見が得られた。それらは、ゆるみ領域の特性やそれに関係する事象・水理的な状況・地球化学的な特徴などや調査・観測・解析の手法に関することである。

しかし残された課題や新たに明らかとなった課題もある。個々の研究における今後の課題は、研究発表で示されたが、全体をふりかえると、各研究相互の関係や複数の研究に関連する課題といたことが重要であると考えられる。たとえば、水理調査により把握された周辺の水理的状況はゆるみ領域の水理的境界条件となる。地下水流動と地下水の水質形成やゆるみ領域内の特性変化の力学的な面と水理学的な面は相互に深く関連している。このようなことは連成問題としてとらえることができる。連成問題の研究は、個々の研究課題の解明や立坑掘削影響試験では対象としなかった物質の移行・固定に関する研究などの地下深部における諸現象の理解のために不可欠である。

立坑掘削影響試験の開始時に設定された目的は、ワークショップで示された研究成果により十分達成されたと評価している。さらに、現在も継続されている長期観測やこれまでに取得されたデータの詳細な解析により、今後とも各研究や上述した連成問題について、一層の成果が得られることが期待される。これらについては成果がまとまり次第、学会などに公表していく考えである。

最後に、本試験の実施にあたって様々なご協力・ご指導いただいた、力学・水理学・地球化学の分野の大学関係者や民間企業の関係者などの方々に謝意を表す次第である。今後とも地層科学研究を積極的に推進していく所存であるので、これまで以上にご協力・ご指導をお願いしたい。

7. Appendix

- (1) 立坑掘削影響試験関連論文のリスト
- (2) 立坑掘削影響試験関連論文の目次
- (3) 立坑掘削影響試験関連論文集

立坑掘削影響試験関連論文リスト

(国内)

題名	発表者	学会・会議名	時期
〔全体計画〕			
①東濃地域における立坑掘削影響試験；全体計画	杉原他	原子力学会 91年春の年会	91年3月
②立坑掘削影響試験	杉原	原子力学会 第7回廃棄物セミナー	91年7月
③新第三系堆積岩における立坑掘削影響試験の概要	杉原他	土木学会 地下空間利用シンポ	92年6月
〔岩盤挙動調査〕			
①立坑掘削影響試験（Ⅰ）； 力学的、水理学的特性の変化	松井他	原子力学会 91年秋の年会	91年10月
②立坑の掘削に伴う応力再配分の計測と その数値解析	吉岡他	土木学会 第24回岩盤シンポ	92年2月
③弾性波トモグラフィによる地質構造調査 ～断層のある堆積岩盤への適用例～	杉原他	土木学会 第24回岩盤シンポ	92年2月
④立坑掘削影響試験 多点式変位計による岩盤の 変位調査	佐藤他	原子力学会 92年春の年会	92年3月
⑤Preliminary Results of Study on Excavation Responses in Sedimentary Rock in JAPAN	杉原他	第29回万国地質学会	92年8月
⑥An Application of Geotomography to Sedimentary Rock with a Fault	川上他	”	
⑦弾性波を用いた岩盤特性調査法の研究—断層のあ る堆積岩盤への弾性波トモグラフィの適用とモデル解析—	長谷川 他	92年中部支部大会	
〔水理調査〕			
①東濃地域における立坑掘削影響試験； 立坑掘削に伴う水理的影響調査研究の概要	柳澤他	原子力学会 91年春の年会	91年3月
②立坑掘削影響試験（Ⅱ）；立坑周辺に分布する 難透水性岩盤の透水性と比抵抗値	尾方他	原子力学会 91年秋の年会	91年10月
③立坑掘削影響試験（Ⅲ）； 立坑掘削に伴う水理学的影響予測解析	今井他	”	91年10月
④岩盤浸透流解析の涵養量の算定について	中島他	土木学会 第23回岩盤シンポ	91年2月
⑤立坑掘削の地下水流動影響予測解析	今井他	土木学会 第23回岩盤シンポ	91年2月

⑥岩盤の水理学的特性の評価システム -東濃鉾山をテストサイトとして-	柳澤他	応用地質学会 平成3年度研究発表会	91年10月
⑦堆積岩岩盤における水理学的特性調査	尾方他	応用地質学会 平成3年度研究発表会	91年10月
⑧立坑掘削の地下水流動影響予測解析(Ⅱ)	今井他	土木学会 第24回岩盤シンポ	92年2月
⑨堆積岩の地質学的特性及び透水係数、見掛比抵抗 相互の関係とその水理地質構造モデル化への適用	尾方他	応用地質学会誌	92年2月
⑩The Shaft Excavation Effects Experiment on Hydrology in the Tono Research Field	古屋他	第29回万国地質学会	92年8月
⑪立坑掘削に伴う地下水流動影響調査研究 -東濃ウラン鉾山試験立坑を例として-	柳澤他	応用地質学会	92年12月
[地下水の地球化学調査]			
①東濃地域における深部地下水の地球化学的研究 (Ⅱ)	太田他	原子力学会 91年春の年会	91年3月
②東濃地域における深部地下水の地球化学的研究 (Ⅲ)	太田他	原子力学会 92年春の年会	91年3月
③東濃地域における深部地下水の地球化学的研究 (Ⅳ)	濱他	"	91年3月
④岐阜県東濃地域における地下水の ¹⁴ C年代と起源 について	瀬尾他	日本地下水学会 92年秋季講演会	92年10月

[国外]

題名	発表者	学会・会議名	時期
[水理調査]			
①The Shaft Excavation Effect Experiment: Development of Hydrogeological Model in Tono Research Field	Yanagizawa et al.	HLRWN 第2回国際会議	91年5月
②Development of Observation System and Data Acquisition for Hydrological Study -Shaft Excavation Effects (SEB) Project in a Sedimentary Formation in Japan -	Sugihara et al.	OECD/NEA SEDEワーク ショップ	91年10月
③A hydrological modelling process for sedimentary rock	Sugihara et al.	ISRM 第7回国際会議	91年10月

立坑掘削影響試験関連論文の目次

		ページ
1. 国内		
[全体計画]	- ①	A-1
	②	A-2
	③	A-43
[岩盤挙動調査]	- ①	A-53
	②	A-54
	③	A-59
	④	A-64
	⑤	A-65
	⑥	A-66
	⑦	A-67
[水理調査]	- ①	A-68
	②	A-69
	③	A-70
	④	A-71
	⑤	A-76
	⑥	A-81
	⑦	A-86
	⑧	A-89
	⑨	A-94
	⑩	A-106
	⑪	A-108
[地下水の地球化学調査]	- ①	A-127
	②	A-128
	③	A-129
	④	A-130
2. 国外		
[水理調査]	- ①	A-134
	②	A-142
	③	A-154

東濃地域における立坑掘削影響試験 - 全体計画 -

IV Shaft Excavation Effect Project in Tono Area - Project Overview -

IV

12

動燃事業団
中部事業所

○杉原弘造 吉岡尚也 柳沢孝一 松井裕哉
Sugihara Kozo Yoshioka Naoya Yanagizawa Koichi Matsui Hiroya

1. 目的

岩盤における立坑や水平坑道などの掘削は、岩盤本来の力学的、水理学的特性に影響を与え、坑道周辺の水理環境の変化を促し地下水流動に影響を与える。立坑掘削影響試験では、これらの現象を定量的に把握、評価することを目的としている。

このような研究は、地下空間を効果的に利用し、地下施設の設計、建設などを適切に行うために、重要かつ有益な情報を与える。

2. 内容

岐阜県土岐市にある動力炉・核燃料開発事業団中部事業所東濃鉱山に、仕上がり内径6m、深さ150mの立坑を掘削し各種の試験、計測を行う。この立坑には、計測坑道2本と既存坑道との連絡坑道2本の水平坑道がある。(図参照)

研究対象岩盤は新第三紀の堆積岩である。試験は大きく次の2項目に分けられる。

①岩盤挙動調査：立坑掘削により直接的に影響を受ける岩盤(ゆるみ領域)の物性、透水性の変化を評価する。

②水理調査：周辺地域の地下水流動の評価を行う。

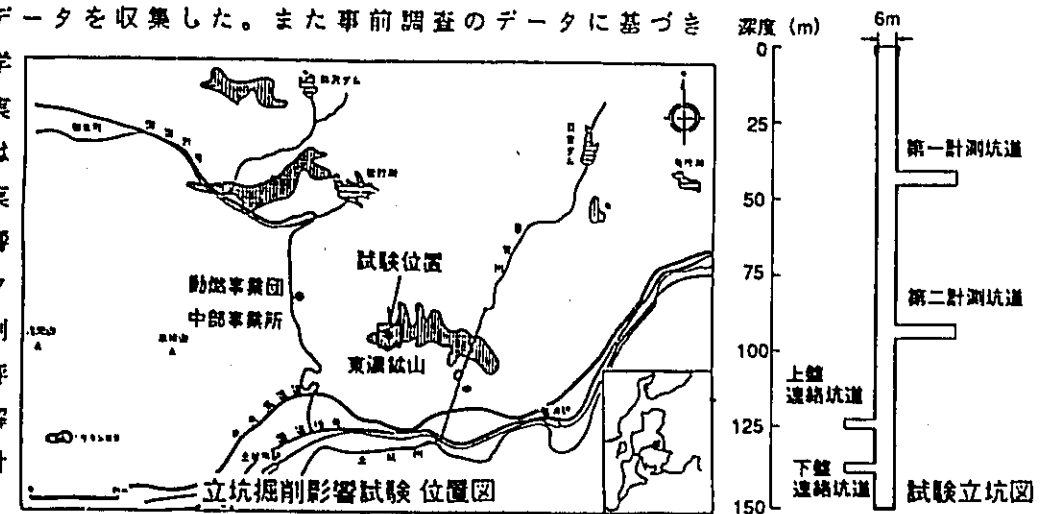
岩盤挙動調査では、立坑内に計測断面を設け変位、応力、物性を測定するが、特に物性(変形特性、透水性など)については掘削前後に計測を行い掘削の影響を評価する。

平成元年度当初より事前調査を開始した。立坑掘削は平成2年1月より開始し、平成3年6月に終了する予定であるが、試験は立坑掘削の前中後を通して実施する。

3. 現在の状況及び今後の予定

平成2年12月現在第二計測坑道の掘削まで終了した。事前調査では岩盤の地質や初期条件を把握するとともに、モニタリング機器の設置を行った。立坑掘削中はこれらの機器による計測を実施するとともに、立坑内の計測断面で変位、応力、物性の測定を行い、初期値や影響のデータを収集した。また事前調査のデータに基づき

力学的、水理学的予測解析を実施した。今後は各計測を継続実施し掘削の影響に関するデータを収集し、計測、解析手法の評価、現象の理解を進めていく計画である。



立坑掘削影響試験

動力炉・核燃料開発事業団

中部事業所 杉原弘造

1. はじめに

岩盤に立坑や水平坑道などの空洞を掘削すると、周辺岩盤が力学的、水理学的に影響を受けると考えられる。これらの影響を定量的に評価し、その発生メカニズムを明らかにすることは、将来の地層処分場の設計、建設、閉鎖技術の開発に重要な情報を与える意味で、また、地層処分システムにおける人工バリア性能評価の境界条件を設定する上で重要である。さらに、地下水流動に関する研究において、地下に坑道を掘削することは、その予測モデルの検証という重要な意味を持っている。

このような観点から、動力炉・核燃料開発事業団（以下動燃という）では、岐阜県にある中部事業所の東濃鉱山（図-1）において、堆積岩盤中に実規模の立坑を掘削し、これにより引き起こされる上記のような影響に関する研究を行っている。動燃ではこの研究を立坑掘削影響試験（SEEプロジェクト＝Shaft Excavation Effect Project）と名付けて、平成元年度当初より事前調査を開始し、平成2年1月より立坑掘削を開始した。¹⁾

立坑掘削影響試験のために掘削する試験立坑は、深度150mまで掘削する予定で、平成3年5月末現在140mまで掘削した。ここでは立坑掘削影響試験の概要と現況及びこれまでの結果について、平成3年4月末までに得られたデータに基づき報告する。

2. 立坑掘削影響試験の概要

2-1. 試験地域の地質概要

試験地域の地質概要図を図-2に示す。SL（海拔）100～150mに不整合があり、それ以深は花崗岩の基盤である。不整合からSL270m付近までは瑞浪層群と呼ばれる新第三紀の堆積岩で、下位より土岐夾炭累層、明世累層、生俵累層と呼ばれる。これらの地層は主に凝灰岩質砂泥岩で部分的に礫岩をはさみ、土岐夾炭累層には炭質物がはさまれる。SL270m以浅は瀬戸層群と呼ばれる礫を含む固結度の低い第三紀～第四紀の堆積層である。また、この地域には月吉断層と呼ばれる断層がある。この断層はほぼ東西の走行で60°南傾斜であり、見かけ上、下盤となる北側が約30m落ちた逆断層である。

本地域には図-2に示すように、東濃鉱山の既存の調査坑道が展開している。立坑掘削影響試験のために掘削している試験立坑は、この坑道の立坑から約80m北東に位置している。

2-2. 試験立坑の概要及び施工方法

試験立坑は、仕上がり内径6m、仕上がり深度150mで、上部5mまでは1.5m、それ以深は40cmのコンクリート覆工が施工される（図-3）。途中で各種の計測を行うために、第一、第二計測坑道（各々幅4.5m、高さ4.5m、長さ20m）及び既存の坑道と連絡するために上盤、下盤連絡坑道（各々幅3m、高さ3m、長さ10m）の4本の水平坑道がある。

岩盤の掘削は通常の発破工法で、覆工は1.2mのショートステップにより施工されている。水平坑道の掘削は同じく発破工法であるが、支保工法は第一計測坑道がNATM（The New Austrian Tunnelling Method）で、それ以外は鋼製支保工と矢板による。

2-3. 調査の内容

立坑掘削による影響は、周辺岩盤への力学的、水理学的影響と、周辺地域の地下水流動への影響に分けることができるので、立坑掘削影響試験は次の2項目に分けて実施している。

①岩盤挙動調査

②水理調査

岩盤挙動調査は比較的立坑近傍の領域を対象とし、水理調査は岩盤挙動調査より広い領域を対象としている。

両調査の位置付けを図-4に示す。立坑掘削に伴って発破を行い空洞をつくることや排水を行うことにより、影響領域が発生し地下水流動が変化する。これらを岩盤モデルや水理地質モデルにより解析、評価し、現象を理解しその手法を確立していくことは、地層処分システムの性能評価や地層処分場の設計、建設、閉鎖技術の研究において不可欠であると考えられる。

(1)岩盤挙動調査の内容

ここでやっている計測は既存手法による計測を基本に行っており、上述した目的に合致するようなデータを得る上で、現時点でどのような問題があるかを明確にすることも重要なテーマである。また、このような各種計測により得られたデータに基づき、数値解析によるデータの解析を行い、周辺岩盤においてどのような現象が起きていると考えられるかを検討、評価する。調査の流れを図-5に示す。

立坑掘削に伴って岩盤本来の特性が影響を受ける領域を本研究ではゆるみ領域と呼んでいる。このゆるみ領域の特性やその広がりなどを定量的に把握するために、立坑掘削前の状況を調査する事前調査を行い、立坑掘削中及び掘削後の状況を調査する計測断面を立坑内に設定した。

事前調査では、データ評価の基礎となる地質状況の概略を把握するために地表において弾性波調査を行った。また、立坑掘削による岩盤の動きを計測するために、立坑掘削壁から1m離れた位置に180mの試錐(CL-1, 2)を行い、このボーリング孔に挿入式傾斜計を設置し、立坑掘削前の初期値を測定した。

立坑掘削中の計測は、大きく2種類に分けることができる。

①支保工と周辺岩盤の変形挙動に関する調査(図-6)

②力学的、水理学的特性変化に関する調査(図-7)

支保工と周辺岩盤の変形挙動に関する調査では、挿入式傾斜計による測定に加え、図-6に示すような断面を設定し、掘削切羽が計測断面に到達した時点で各計測項目に対応す

る計測機器を設置し、掘削再開以後の経時変化を測定している。計測項目を表-1にまとめて示す。計測は、支保工にかかる応力を測定する覆工応力測定、支保工応力測定、背面土圧測定や、岩盤の変位を測定する地中変位測定、内空変位測定、天端沈下測定などを行っている。

力学的、水理学的特性変化に関する調査では、掘削切羽が図-7に示すような計測断面に到達した時点で各計測項目の掘削前のデータを採取し、掘削切羽が計測断面から十分離れた時点で掘削後のデータを採取し、この両者を比較している。計測項目を表-1にまとめて示す。計測は、変形特性を測定する孔内載荷試験、透水性を測定する透水試験、弾性波の伝播速度を測定する孔間弾性波測定、割れ目の分布を測定するポアホールテレビ観察などを行っている。

特に、ジオトモグラフィーの計測は第一及び第二計測坑道掘削後、立坑掘削終了後の3回行い、これらのデータを掘削前、掘削中、掘削後のデータとして比較、検討する予定である。また、連続ひずみ測定では第二計測坑道掘削後、月吉断層の上盤と下盤にひずみ計を埋設し、立坑掘削中の周辺岩盤における応力変化を測定し、立坑掘削終了後オーバーコアリングによりこのひずみ計を回収して残留応力を測定する予定である。

(2)水理調査の内容²⁾

立坑の掘削は大口径の試錐による揚水試験と同じ理屈であり、これによって引き起こされる水理的な影響を定量的に解析、評価するのが水理調査の目的である。調査の流れを図-8に示す。この調査により構築、検証される水理地質モデルは、処分場の性能評価においては重要なモデルとなる。

本調査の項目は、

①水理地質構造調査

②表層水理調査

(1)MPシステム(Multiple Piezometer System)による水圧計測

(2)坑内湧水量調査

⑤地下水流動解析

である。

水理地質構造調査では周辺岩盤の水理的な特性とその三次元的な広がりを把握するため

に、図-9に示すTH-1~8、SN-4、AN-6に130~200mのボーリング孔を合計10孔掘削し、各ボーリング孔において、コア観察、物理検層（電気、放射能、キャリパー）、ボアホールテレビ観察を行った。この結果に基づき代表的な位置において、各孔10点で透水試験を行い透水係数分布を設定した。

表層水理調査では、地下水流動解析をする場合の上部境界条件となる地下水涵養量を把握するために、瀬戸層群を対象として地下水位と土壤水分を観測できる機器を合計9か所に設置した（図-9）。また、降水量、蒸発量を測定するために気象観測設備を1か所設置し、河川流量を測定するために河川流量計を1か所設置した。

水理地質構造調査で掘削した合計10孔のボーリング孔（TH-1~8、SN-4、AN-6）には、MPシステムを設置した。MPシステムはカナダのWestbay社が開発した単一孔多区間水圧測定、採水システムで、図-10に示すように複数のパッカーにより測定区間を設け、ポートと呼ばれる特殊なバルブをとおしてプローブにより水圧測定や採水ができる機器である。各ボーリング孔を20~30の測定区間に分割し、各区間にポートを設置した。MPシステムによる水圧測定では立坑掘削開始前から測定を始め、岩盤内の水圧分布の初期条件とその立坑掘削による変化を観測している。測定は1~2週間に1回行った。

坑内湧水量調査では、既存の調査坑内で20か所と試験立坑において湧水量を測定している。試験立坑においては、掘削の進行に合わせて10層準の深度において集水リングを設置、計測を行う予定である。これらのデータは水理解析の境界条件や検証データとなる。

地下水流動解析では、以上の各調査により得られるデータに基づき三次元飽和不飽和地下水流動解析を行う。これまでに、立坑掘削前に得られたデータに基づき立坑掘削による地下水流動への影響の予測解析を行った。この結果は実測値と比較し、水理地質構造モデルの検証を行う。

2-3. スケジュール

立坑掘削影響試験の概略スケジュールを図-11に示す。立坑掘削終了後も設置した計測機器による長期観測を継続する計画である。

3. 試験の経緯と現況

平成3年5月末現在、立坑の掘削はGL（深度）-140mまで終了した。

岩盤挙動調査においては、平成元年12月までに事前調査を終了し、CL-1、2において傾斜計による測定を開始した。この計測は現在も1か月に2回実施している。

支保工と周辺岩盤の変形挙動に関する調査では、S1、M1、M2、M3、K1、K2、SP1、SP2に所定の計測機器を設置し、計測を継続している（図-6）。

力学的、水理学的特性変化に関する調査では、A、B断面における掘削前と掘削後の計測を終了した。C断面では掘削前の計測を終了した。ジオトモグラフィーの計測は掘削前と掘削中の測定が終了した。連続ひずみ測定はひずみ計の埋設が終了し、現在はひずみ変化の測定を行っている（図-7）。

水理調査においては、昭和63年度から一部試錐を開始し、平成元年度当初より本格的に事前調査を開始した。MPシステム設置孔については、掘削が終了したボーリング孔から順次、コア観察、物理検層、ボアホールテレビ観察を行い、この結果に基づいて透水試験位置を決定し透水係数を測定した。透水試験終了後MPシステムを設置し、順次平成元年9月から水圧分布の測定を開始した。平成元年12月までに全てのボーリング孔にMPシステムの設置が終了し、岩盤内の水圧の分布と変化が測定できるようになった。

表層水理調査では表層の地下水位計と土壤水分計を平成元年9月に、気象観測設備を平成2年1月に、河川流量計を平成2年3月に設置終了し、順次データ採取を開始した。

坑内湧水量調査では、既存の調査坑道の測定点を平成2年2月に設定し測定を開始した。試験立坑については、掘削工事の進捗に合わせて概ね15mに1か所ずつ集水リングを設置し、測定を行っている。

事前調査で得られた情報に基づいて、岩盤の水理地質構造を評価し、三次元の水理地質構造モデルを構築し、立坑掘削による地下水流動への影響の予測解析を行った。現在得られつつある現場での実測データとの比較を行っている。

4. これまでの結果

本研究は現在進行中であり、評価もまだ終了していない。ここではこれまで得られたデータのうち、比較的まとまっていて初期的な評価ができた以下の項目について述べる。

①岩盤挙動調査

- ・力学的、水理学的特性変化に関する調査 (A, B断面)
- ・支保工と周辺岩盤の変形挙動に関する調査 (M2断面)

②水理調査

- ・MP水圧計測
- ・水理予測解析

4-1. 力学的、水理学的特性変化に関する調査 (A, B断面)

A断面では、孔内載荷試験、透水試験、ポアホールテレビ観察、超音波パルス試験を、B断面では、孔内載荷試験、透水試験、ポアホールテレビ観察、孔間弾性波測定を、それぞれ行った (図-7)。これらの試験は全て掘削前と掘削後に行い、その結果を比較している。

A断面では立坑壁から東西に6mのボーリング孔を1孔ずつ (東側: A-1, 西側: A-2) 掘削している。B断面では第一計測坑道から立坑に平行に2.3mのボーリング孔を4孔 (立坑壁に近いほうからB-1~4) 掘削している。これらのボーリング孔は立坑壁から各々0.8, 1.3, 2.3, 3.3m離れている。GL-60m (第一計測坑道下盤から深度14.5m) に明世累層と土岐夾炭累層の境界があるので、地層の差による影響の程度の差を測定することが、B断面での計測の目的のひとつである。

孔内載荷試験はポアホールジャッキにより、10, 20, 30 kg/cm²の圧力で繰り返し載荷を行っている。A断面ではA-1で行っており、B断面では各孔において2点ずつ行っている。測定位置を図-12, 14, 15に示す。

透水試験は低圧ルジオン試験を行っており、0.25, 0.50, 0.75, 1.00 kg/cm²の有効圧力での段階的な注入試験を行っている。A断面ではA-2で行っており、B断面では各孔において2点ずつ行っている。測定位置を図-13, 16, 17に示す。

ポアホールテレビ観察はポアホールスキャナーにより、両断面の全ボーリング孔の全長で行っている。

超音波パルス試験では、東北大学で開発された回転探触子型割れ目検知計³⁾により割れ目の分布を測定する。A断面の2孔で実施した。

孔間弾性波測定はB-1あるいはB-4を起振孔として他のボーリング孔を受振孔とし、1mピッチで測定を行った。この結果に基づき各ボーリング孔間の弾性波速度を評価した。

A断面で行った孔内載荷試験結果を図-12に、透水試験結果を図-13に示す。この結果によると、弾性係数は掘削後大きくなり、透水係数は小さくなっている。弾性係数は坑壁に近いほど変化が大きく、透水係数は各測定区間における掘削後の透水係数がほぼ同じ値となっている、という傾向がある。またポアホールテレビ観察、超音波パルス試験では掘削前後で大きな差異は測定されなかった。

B断面で行った孔内載荷試験結果を図-14, 15に、透水試験結果を図-16, 17に示す。この結果によると、弾性係数はA断面と同じく掘削後大きくなっている傾向があるが、透水係数はB-1以外変化が少なくB-1ではA断面とは逆に大きくなっている。弾性波速度測定ではB-1, 2間で速度低下領域が現れた。また、ポアホールテレビ観察では各ボーリング孔のGL-60.5~65.5mの区間で割れ目が増加しているが、全体的には掘削前後で大きな差異は測定されなかった。

以上の結果から、次のことが明らかとなった。

- ①弾性係数は全般的に掘削後は大きくなっている。
- ②透水係数は立坑から1m以上離れると変化がないか小さくなっている。
- ③立坑壁から1m以内では透水係数は大きくなり弾性波速度が低下している。
- ④掘削前後での割れ目の変化は少ない。

①や②については、立坑掘削による周辺岩盤内の応力再配分により、地山アーチが形成され、空隙が閉塞することが原因の一つである可能性がある。明世累層では、カイザー効果を利用したAE (Acoustic Emission) 法により岩盤の初期応力を測定しており、図-18に示すような異方的な応力場が測定されている。この異方的な応力場が、A, B断面における結果の違いに関係している可能性もある。また③については、立坑掘削により発生した不飽和領域が影響している可能性がある。

しかし、現時点ではこれらの可能性に関する定量的な評価は終了していない。

4-2. 支保工と周辺岩盤の変形挙動に関する調査 (M2断面)

地中変位及び覆工応力の測定をM2断面で行った。地中変位は、機械式のアンカーを持つ6点式の地中変位計を立坑から水平に6か所設置し、各地中変位計において立坑壁より0.75, 1, 2, 3, 4, 6 mの位置の変位を測定した。覆工応力はコンクリート覆工中にコンクリート有効応力計を6か所埋設し測定した。これらの測定は地表のコンピューターで測定が行えるシステムになっている。

M2断面における地中変位と覆工応力の測定結果を図-19, 20に示す。地中変位量は立坑壁から1 m以内で多いが、その絶対量は測定断面の深度がGL-67.5 mと浅いため少ない。特に北東と南東方向はほとんど変位が測定されていない。また、覆工応力は北東、南西方向が大きくなっている。この結果は図-18に示した初期応力の方向と一致しているが、地中変位の傾向はこれらとは異なっている。

4-3. MP水圧計測

図-21にTH-1 (立坑から10 m東の地点)における水位分布の経時変化を示す。測定では水圧を測定しているが、図にはこれを水位に換算して示している。また、平成元年9月より測定を開始したが、図には、

- ①平成2年1月8日 (立坑掘削前, 立坑深度SL287 m)
- ②平成2年5月15日 (立坑掘削やぐら設置後, 立坑深度SL256 m)
- ③平成2年8月21日 (第一計測坑道まで掘削, 立坑深度SL241.5 m)
- ④平成3年3月11日 (第二計測坑道まで掘削, 立坑深度SL191 m)
- ⑤平成3年4月25日 (上盤連絡坑道まで掘削, 立坑深度SL160.4 m)

の時の測定値を示した。各測定日の立坑深度の相当する水位を図に示した。また、図には水圧が0を示すラインも示したが、MPシステムは負の水圧が測定できないため、測定値はこのラインの左側にはこない。このラインの上あるいは近くまで測定値がきているものは、ほぼ水圧が0になっていて、不飽和あるいはそれに近い状態になっていると考えられる。

図-21によると、TH-1における水位は立坑掘削に伴って徐々に低下しているのが

わかる。SL130 m以深は変化が少ないが、これらは基盤の花崗岩中の測定点である。

TH-1以外における水位変化を図-22~24に示す。これらの図には立坑掘削開始前のデータと平成3年4月末のデータを示した。TH-2, 3, 5には掘削の影響と考えられる水位変化が認められるが、その変化はTH-1に比べると少ない。それ以外の周辺のボーリング孔では立坑掘削によると考えられる変化はほとんど認められない。図には代表的な測定点としてTH-4, 7, 8のみ示したが、他のボーリング孔でも同様に変化は少ない。

このMP水圧計測結果は、予測解析結果の検証や水理地質構造の再検討に活用できると考えている。

4-4. 水理予測解析^{4), 5)}

予測解析を行うために、水理地質構造調査で行った透水試験及びコア観察の結果に基づき対象区域 (TH-6, 7, 8, SN-4で囲まれた領域, 図-9) の水理地質構造を設定した。この結果、対象区域を、①瀬戸層群未固結層, ②生俵累層シルト岩, ③明世累層砂岩泥岩, ④土岐夾炭累層砂岩泥岩, ⑤土岐夾炭累層礫岩, ⑥花崗岩風化部, ⑦花崗岩新鮮部, ⑧月吉断層の8つの水理地質構造に区分した。この区分に基づき三次元水理地質モデルを構築し、多孔質媒体近似モデルによる非定常飽和不飽和三次元有限要素浸透流解析 (プログラムコードTAGSAC⁶⁾) を行った。

まず、立坑掘削開始前のデータにより定常解析を行い、既存の調査坑道への湧水量やTH-1~3, 5における水位分布を実測値と比較したところ、ほぼ満足できる程度に一致したので、このモデルにより立坑掘削中及び掘削後の地下水の流れの変化を予測解析した。解析では試験立坑掘削工程を考慮し、非定常解析を行った (図-25)。また、上部境界条件は、表層水理観測結果から算出された0.57 mm/日という地下水涵養量⁷⁾に基づき、0.5 mm/日の地下水涵養量とした。

予測解析による試験立坑への湧水量、試験立坑最深部 (GL-150 m) での流線ベクトル及び試験立坑を横切る東西断面でのポテンシャル分布を図-26~28に示す。

試験立坑への湧水量は立坑掘削の進行に合わせ段階的に増加し、最終的には30 l/分程度となると予測された。図-26にはこれまでの実測値も示した。実測値は変動が大きく増加や減少の傾向は現時点では評価できないが、オーダー的には同じ湧水量が予測解析

されていることがわかる。

流線ベクトル図では、試験立坑へ向かう同心円的な地下水流動が支配的であり、また既存の調査坑道への地下水流れも解析対象領域中心部及び東側境界に認められる。

ポテンシャル分布図では、試験立坑へ流れ込むポテンシャル分布をしており、特に試験立坑最深部ではポテンシャル低下が大きい。

5. 今後の予定

今後の予定としては、岩盤挙動調査については、変形挙動と特性変化の関係を評価し、ここで用いた手法の問題点の抽出と改良を行う。水理調査については、各計測データによる予測解析の検証を行い、水理地質構造モデルを改良していく。

既に述べたように、試験立坑は現在掘削中であり、それに伴う各調査試験も継続中である。今後ともデータの採取を進めるとともに、データの解析、評価を行い、立坑掘削による影響を定量的に評価し、その発生メカニズムの解明を行っていく計画である。

6. 謝辞

本研究の多くは、大成建設、大林組、清水建設、鹿島建設への委託研究として実施している。ここに各社の担当者の方々に謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 杉原弘造, 吉岡尚也, 柳澤孝一, 松井裕哉 (1991) : 東濃地域における立坑掘削影響試験 -全体計画-, 日本原子力学会「1991春の年会」要旨集, P524
- 2) 柳澤孝一, 杉原弘造, 斉藤章, 大澤英昭, 今井久, 中島誠, 尾方伸久, 中野勝志, 長谷川健, 仙波毅 (1991) : 東濃地域における立坑掘削影響試験 -立坑掘削に伴う水理学的影響調査研究の概要-, 日本原子力学会「1991春の年会」要旨集, P525
- 3) 小林良二, 杉本文男 (1980) : 回転探触子型岩盤割れ目検知計による現場試験 -岩盤内の割れ目の分布と音速の変化に関する研究(統報)-, 日本鉱業会誌, 96 [1107], pp307~312
- 4) 今井久, 柳澤孝一, 大澤英昭, 渡辺邦夫 (1991) : 立坑掘削の地下水流動影響予測解析, 第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, PP317~321
- 5) K. Yanagizawa, H. Imai, H. Kawamura and K. Watanabe (1991) : The Shaft Excavation Effect Experiment: Development of Hydrogeological Model in Tono Research Field, HIGH LEVEL RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT, Proceedings of the Second Annual International Conference, Las Vegas, Nevada, April 28-May 3, 1991, PP1291~1298
- 6) 渡辺邦夫, 藍沢稔幸, 柳澤孝一 (1990) : 岩盤浸透流の3次元解析の考え方と多孔体モデルによる広域解析例, 第45回土木学会年次学術講演会概要集, pp816~817
- 7) 中島誠, 斉藤章, 柳澤孝一, 渡辺邦夫 (1991) : 岩盤浸透流解析の涵養量の算定について, 第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, PP252~256

表-1 岩盤挙動調査 測定項目

大項目	項目	測定場所	M1	M2	M3	M4	S1	K1	K2	SP1	SP2	U	L	A	B	C	坑内	坑外	
地質構造	弾性波探査 坑壁観察	弾性波探査 坑壁観察															切羽位	4	
			岩盤の変位	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○					
変位	岩盤内変位 傾斜計による測定 覆工継ぎ目挙動測定 断層の変位	内空変位、天端沈下 岩盤内変位 傾斜計による測定 覆工継ぎ目挙動測定 断層の変位		○	○	○		○	○	○	○	○	○					5 2	
			支保の変位		○	○	○												5 2
応力	岩盤の応力 支保の応力	初期応力測定 ひずみ計による連続測定 支保工応力測定 覆工応力測定 背面土圧測定																	
			支保の応力	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○					
物性	コアの物性 変形特性 透水性 弾性波	室内試験 孔内載荷試験 透水試験 孔内弾性波 弾性波トモグラフィ 超音波パルス 孔内レーダー ポアホールテレビ																	
			電磁波 視覚													○	○	○	○

注) ○: 実施 数字: 実施箇所数/孔数

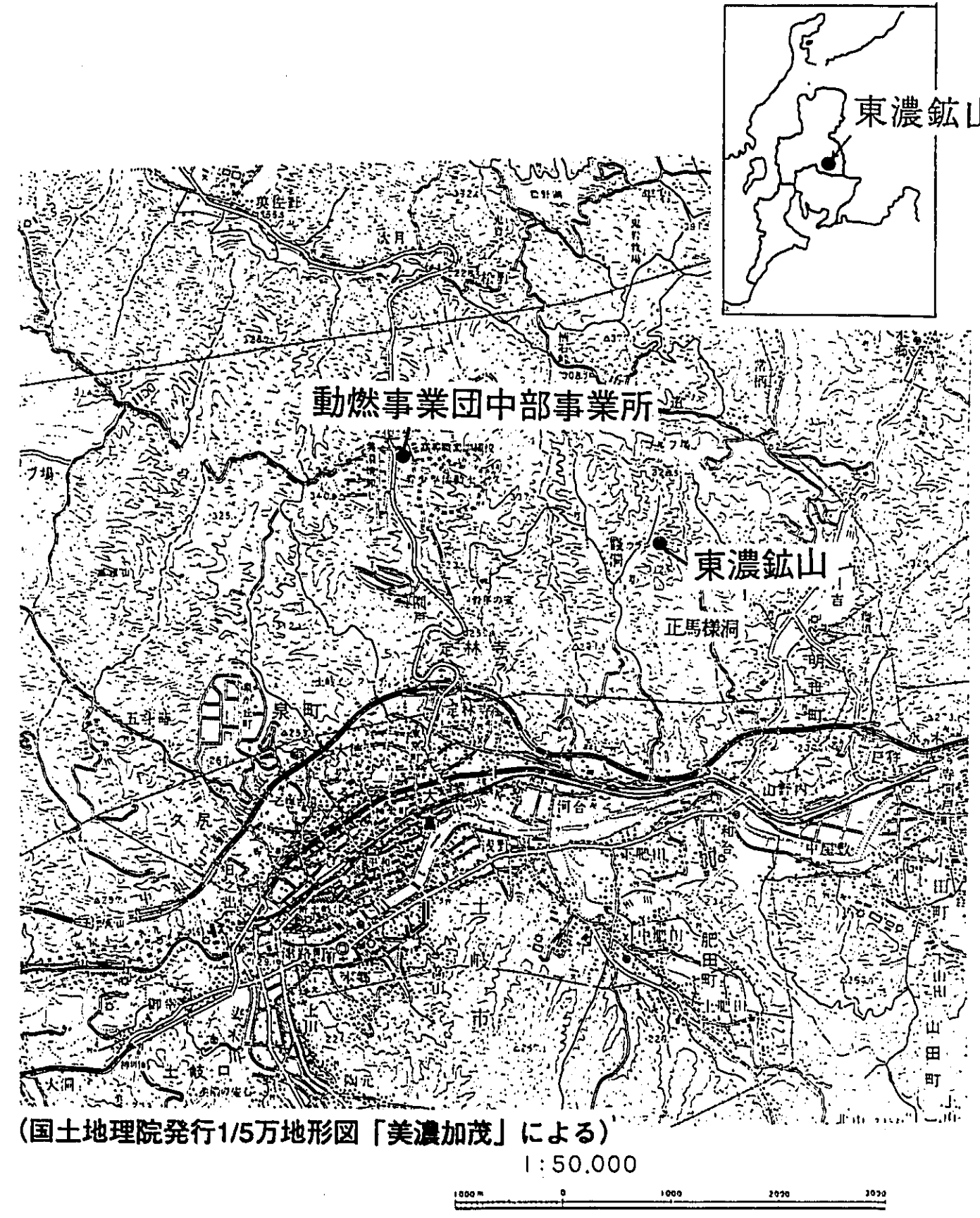


図-1 東濃鉱山位置図

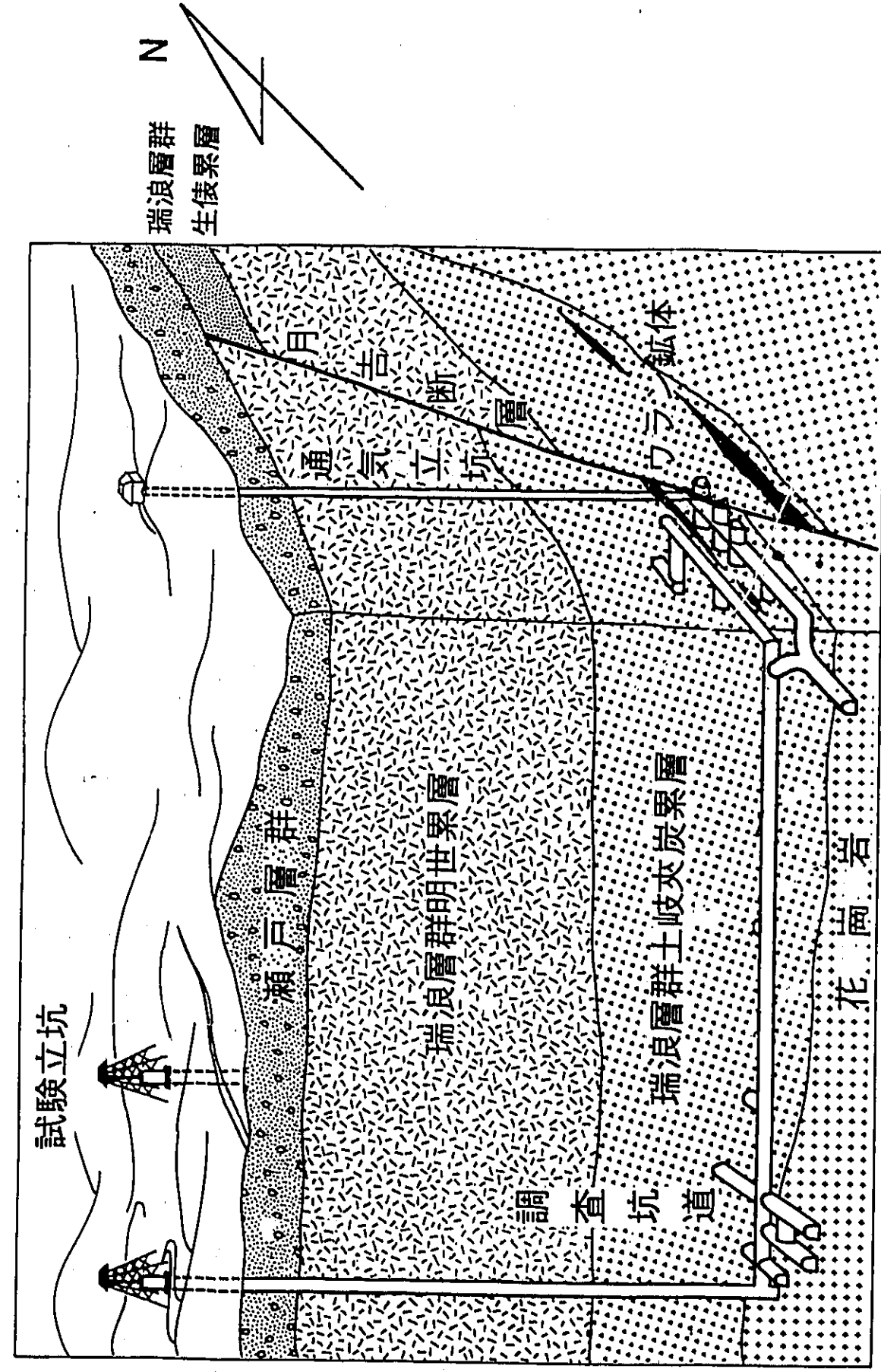


図-2 東濃鉱山地質概要図

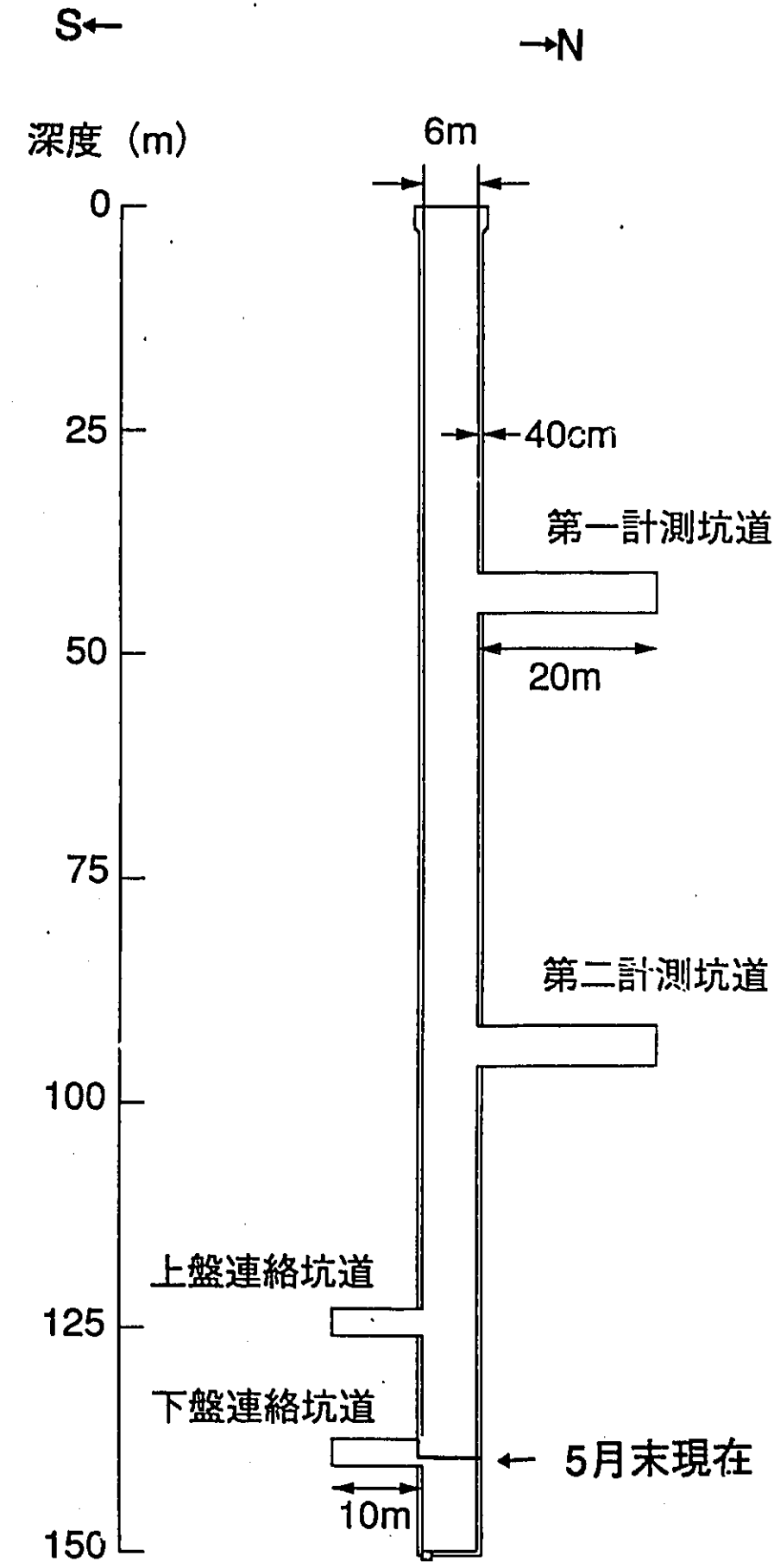


図-3 試験立坑図

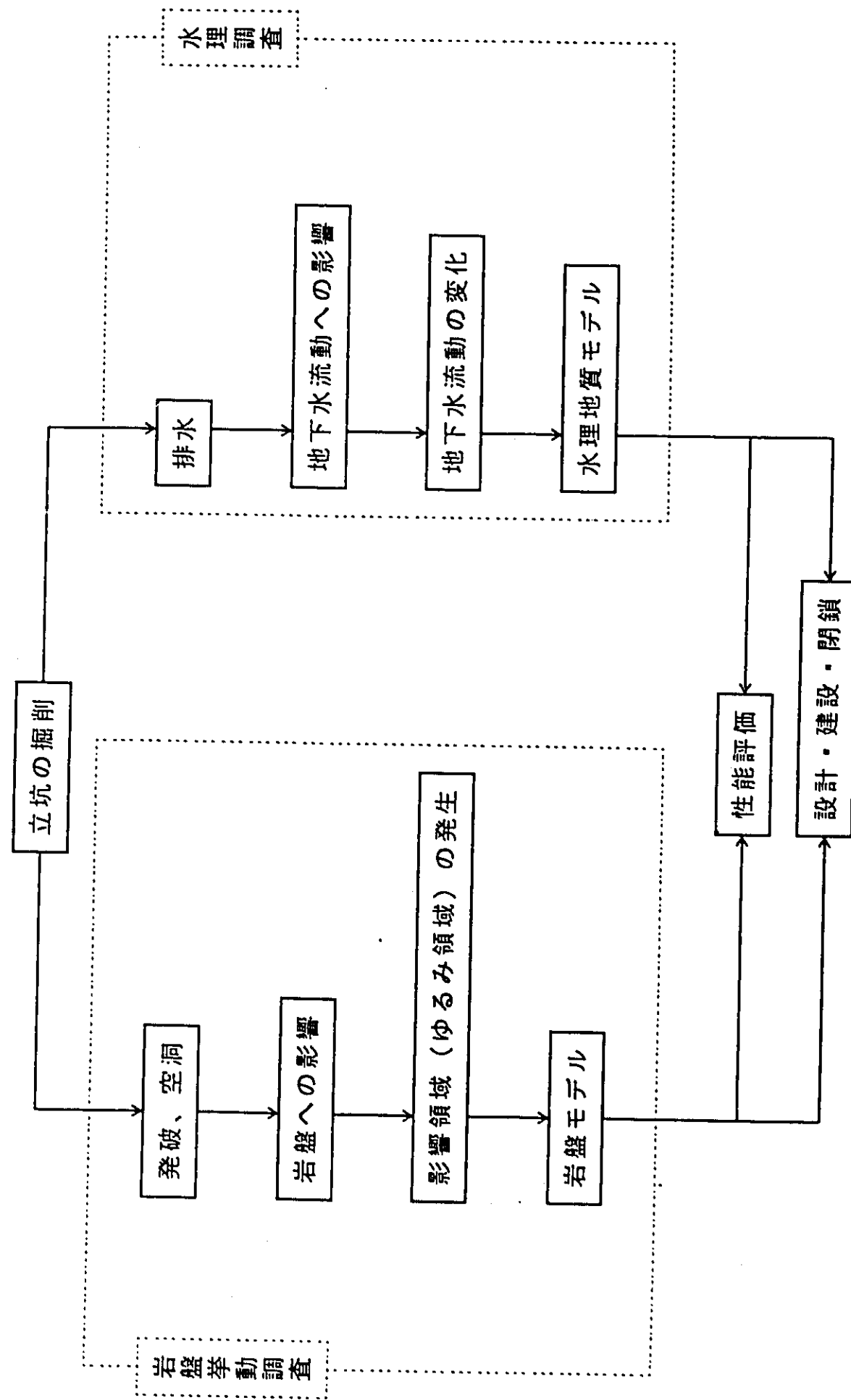


図-4 立坑掘削影響試験の位置付け

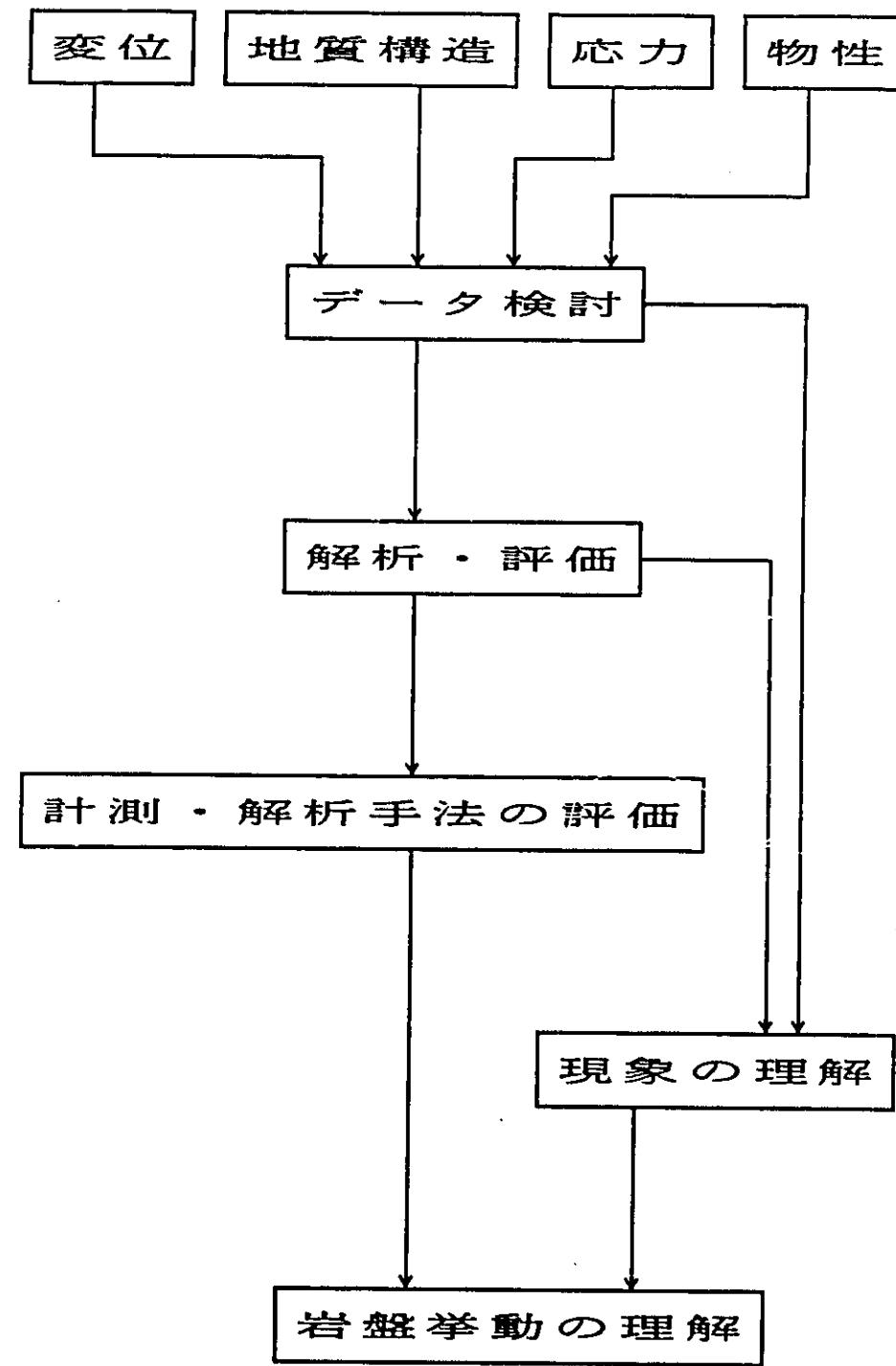


図-5 岩盤挙動調査の流れ

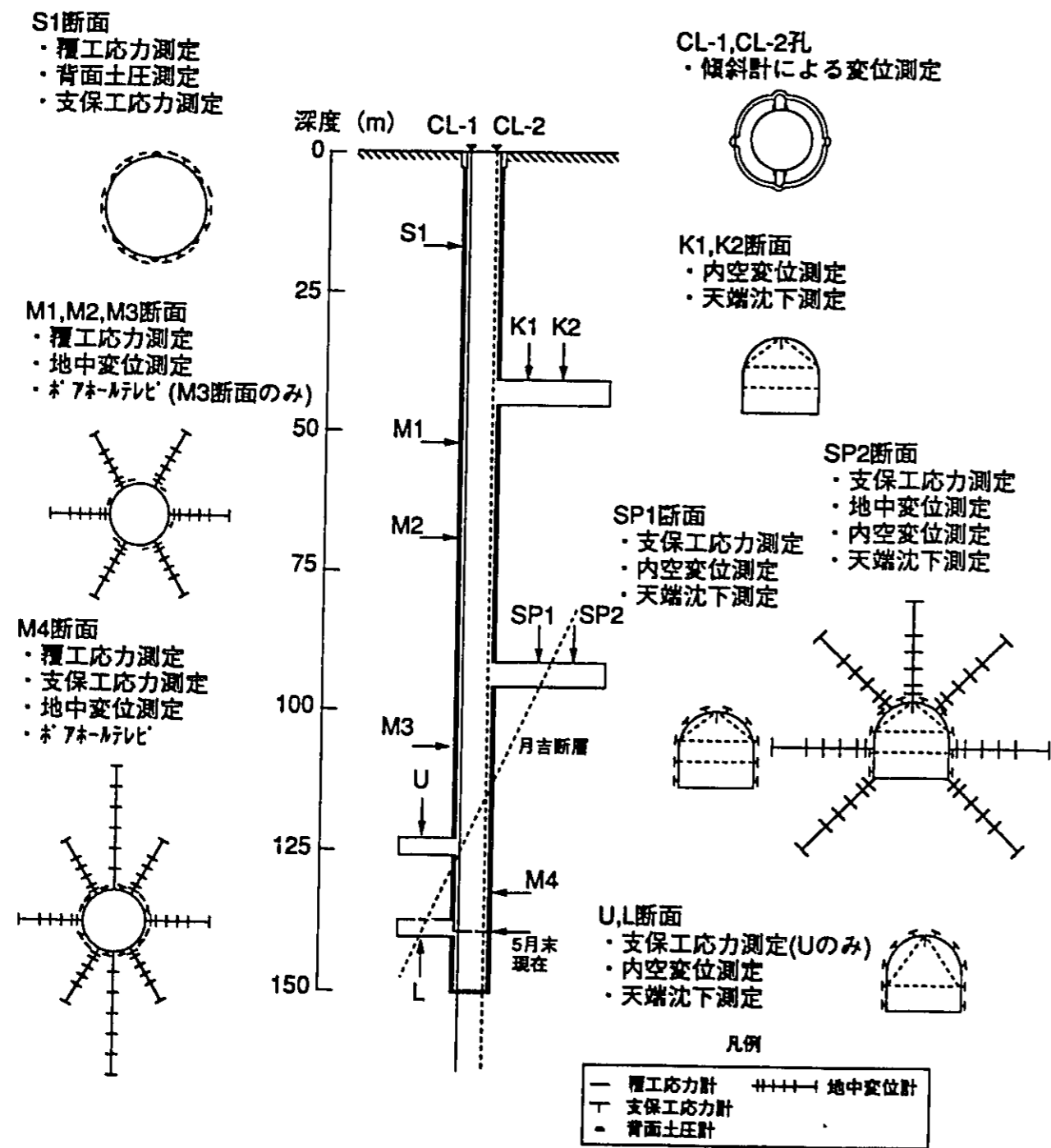


図-6 支保工と周辺岩盤の変形挙動に関する調査概念図

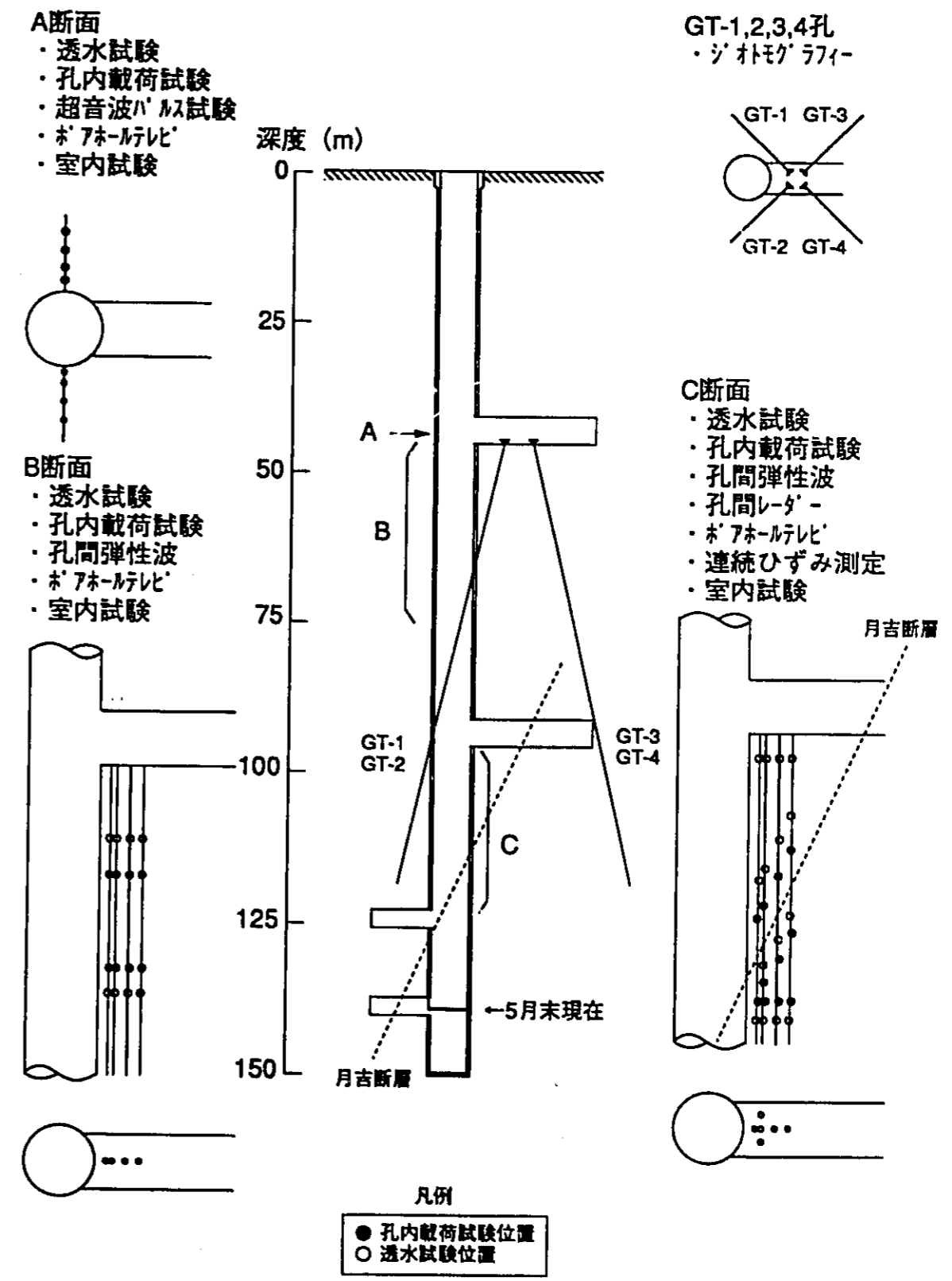


図-7 力学的・水理学的特性変化に関する調査概念図

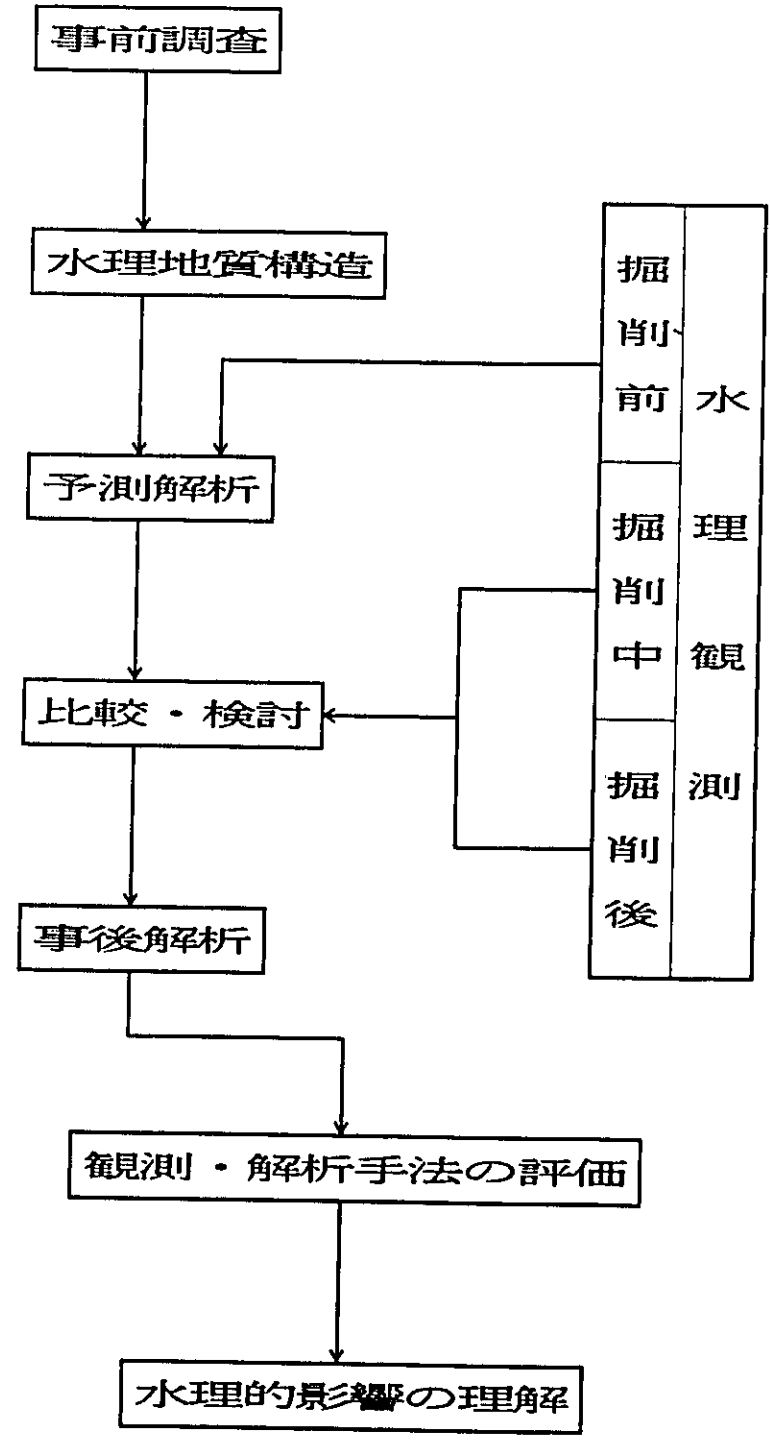
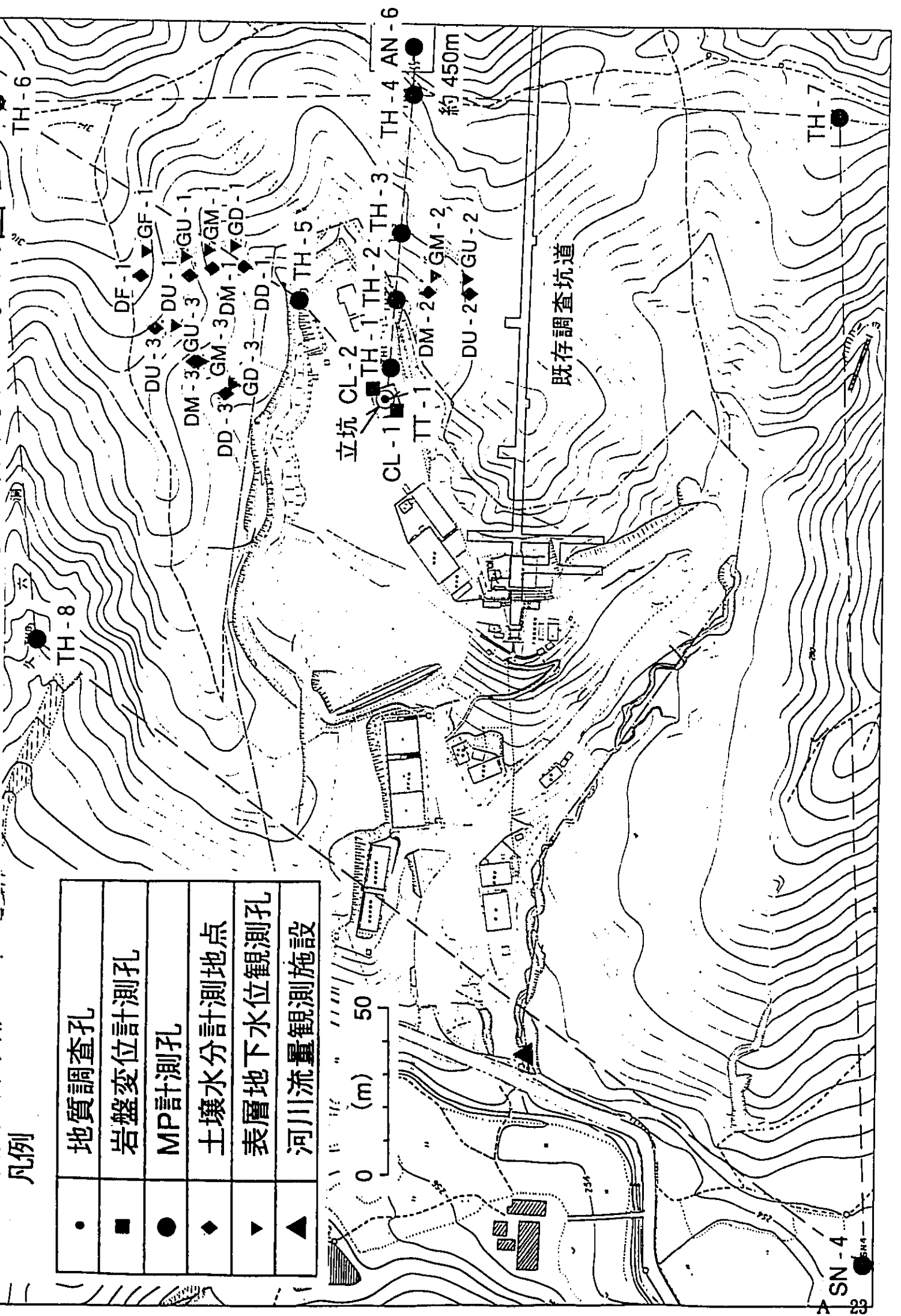


図-8 水理調査の流れ

図-9 立坑掘削影響試験 試錐及び水理観測システム図



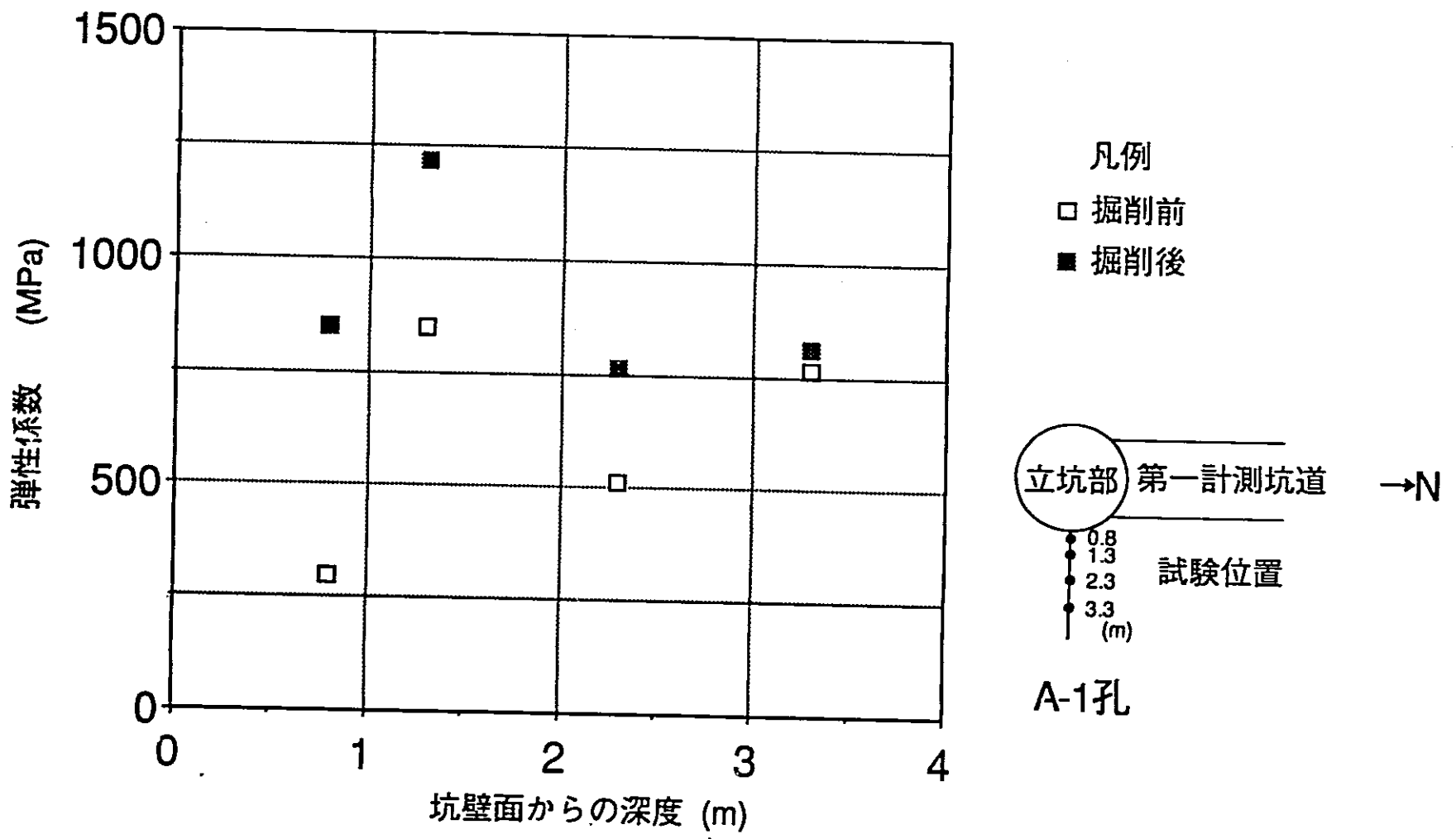


図-12 A断面における孔内载荷試験結果

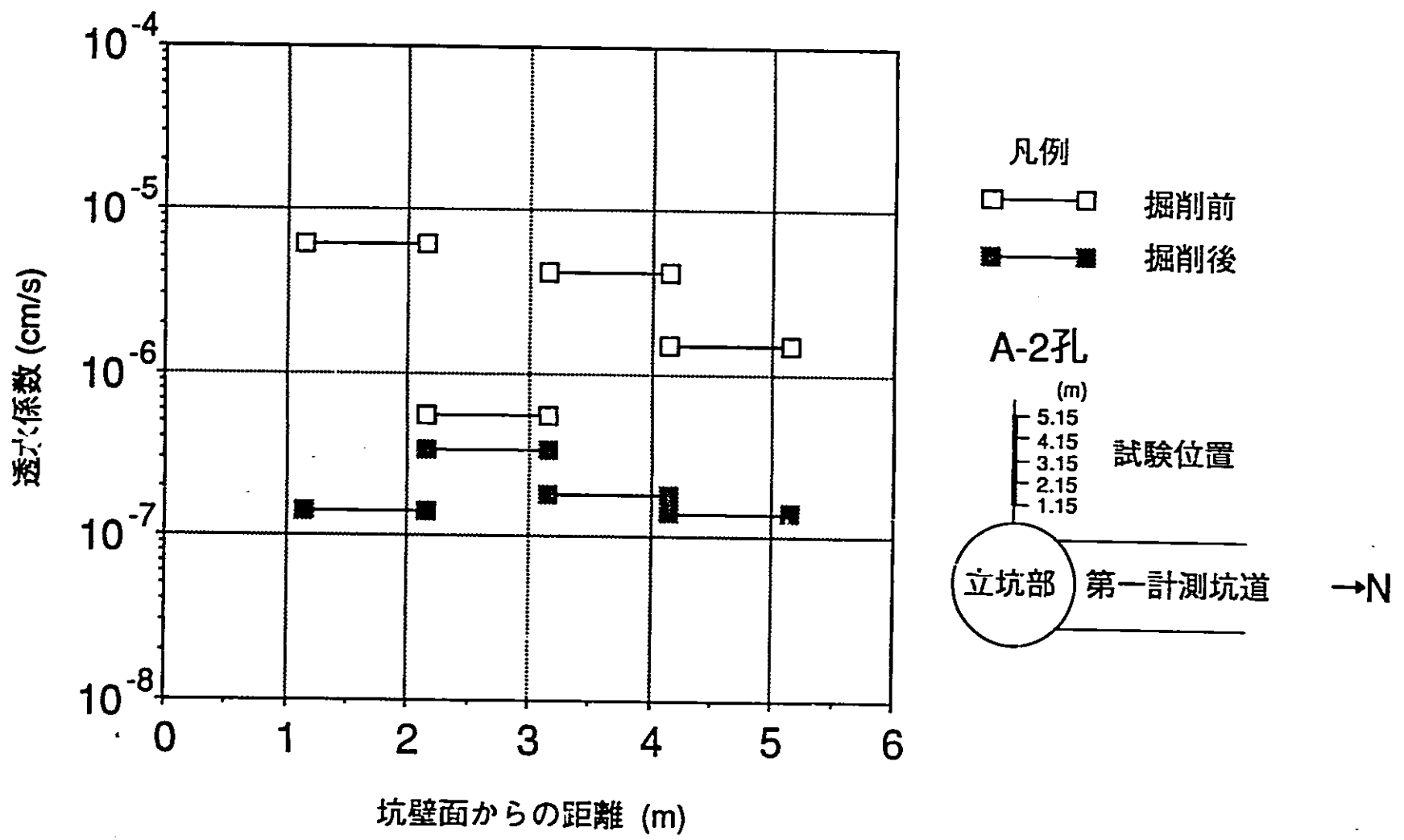


図-13 A断面における透水試験結果

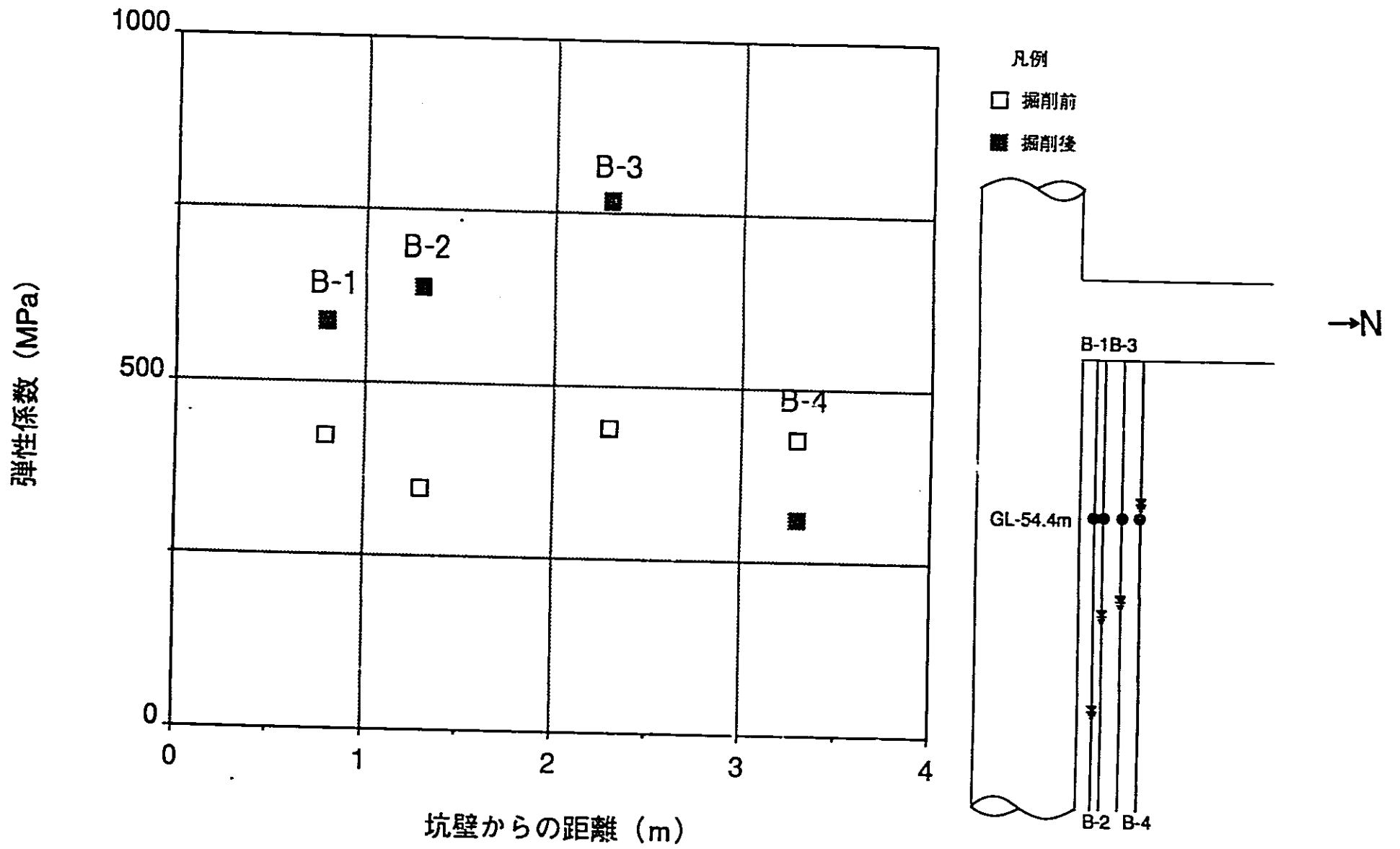


図-14 B断面における孔内载荷試験結果
(明世累層)

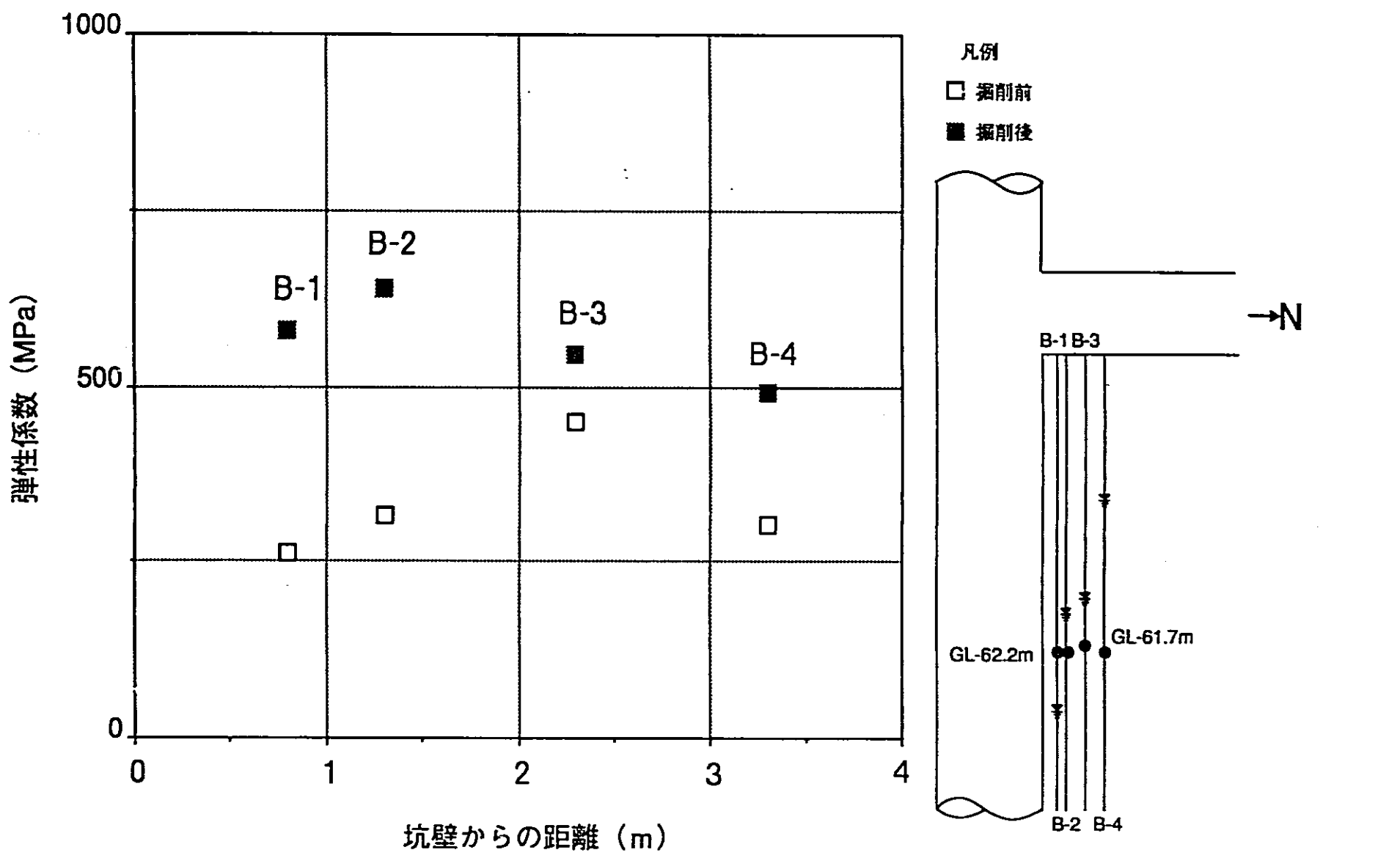


図-15 B断面における孔内载荷試験結果
(土岐夾炭累層)

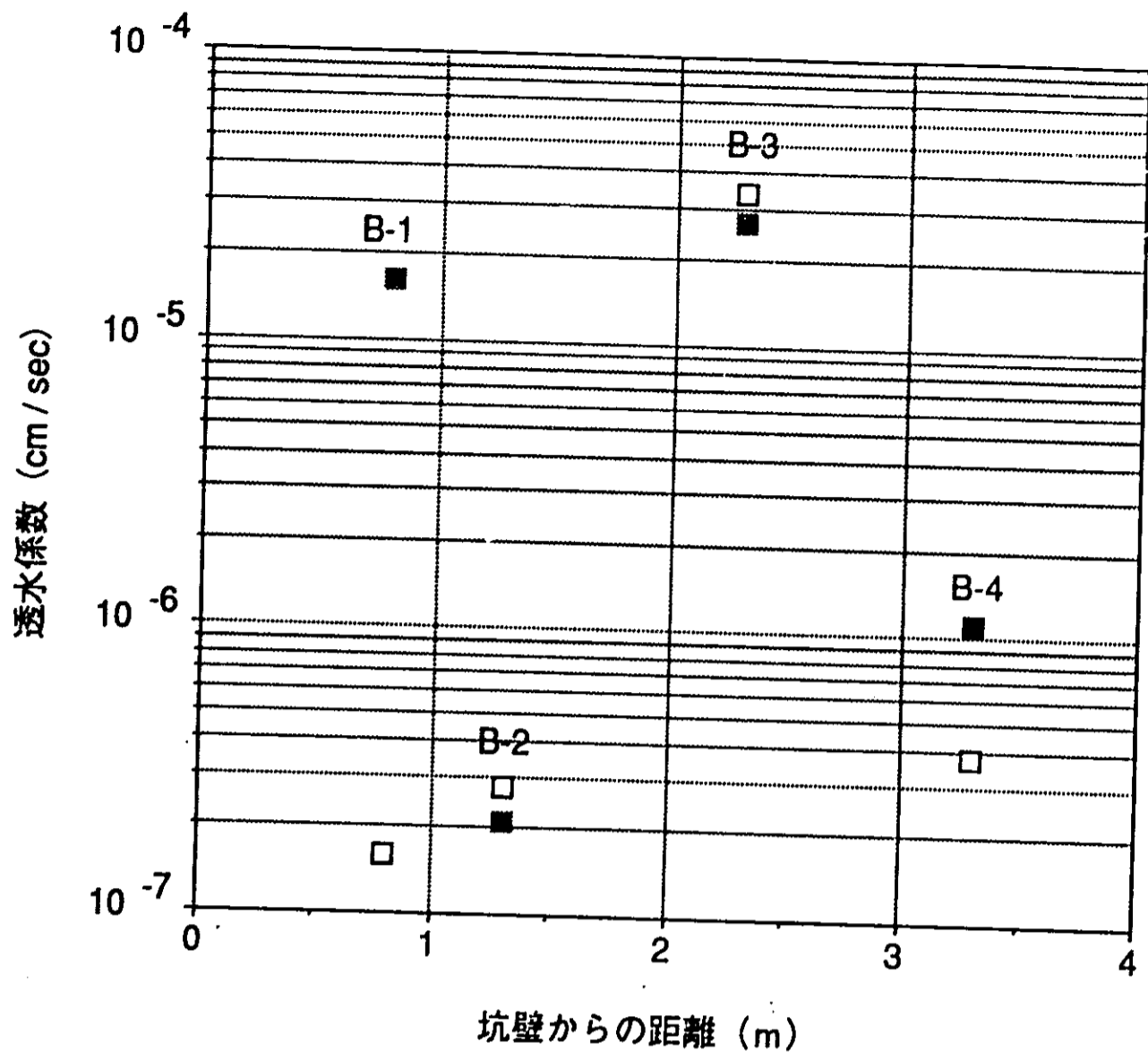


図-16 B断面における透水試験結果
(明世累層)

A-30

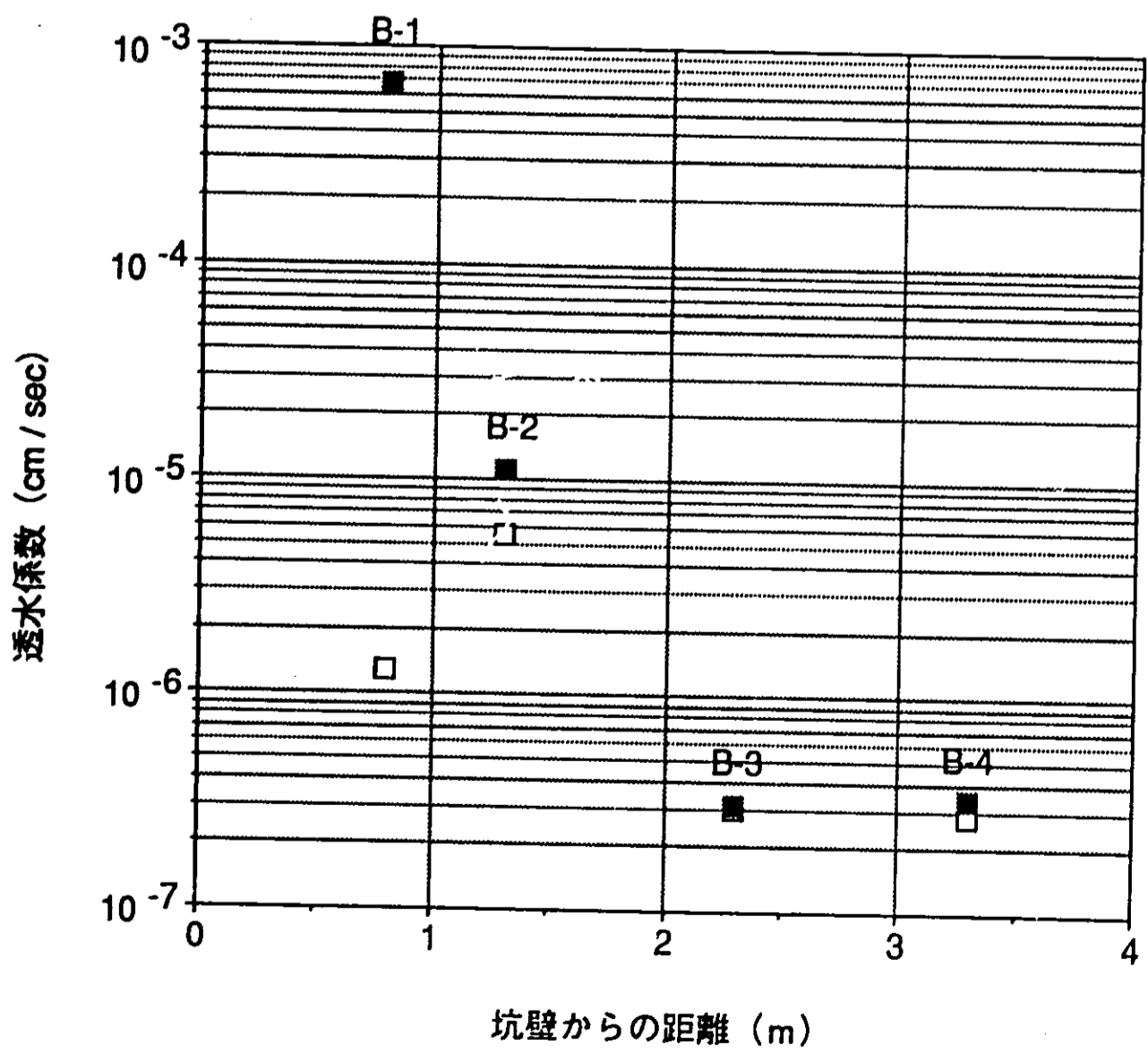


図-17 B断面における透水試験結果
(土岐夾炭累層)

A-31

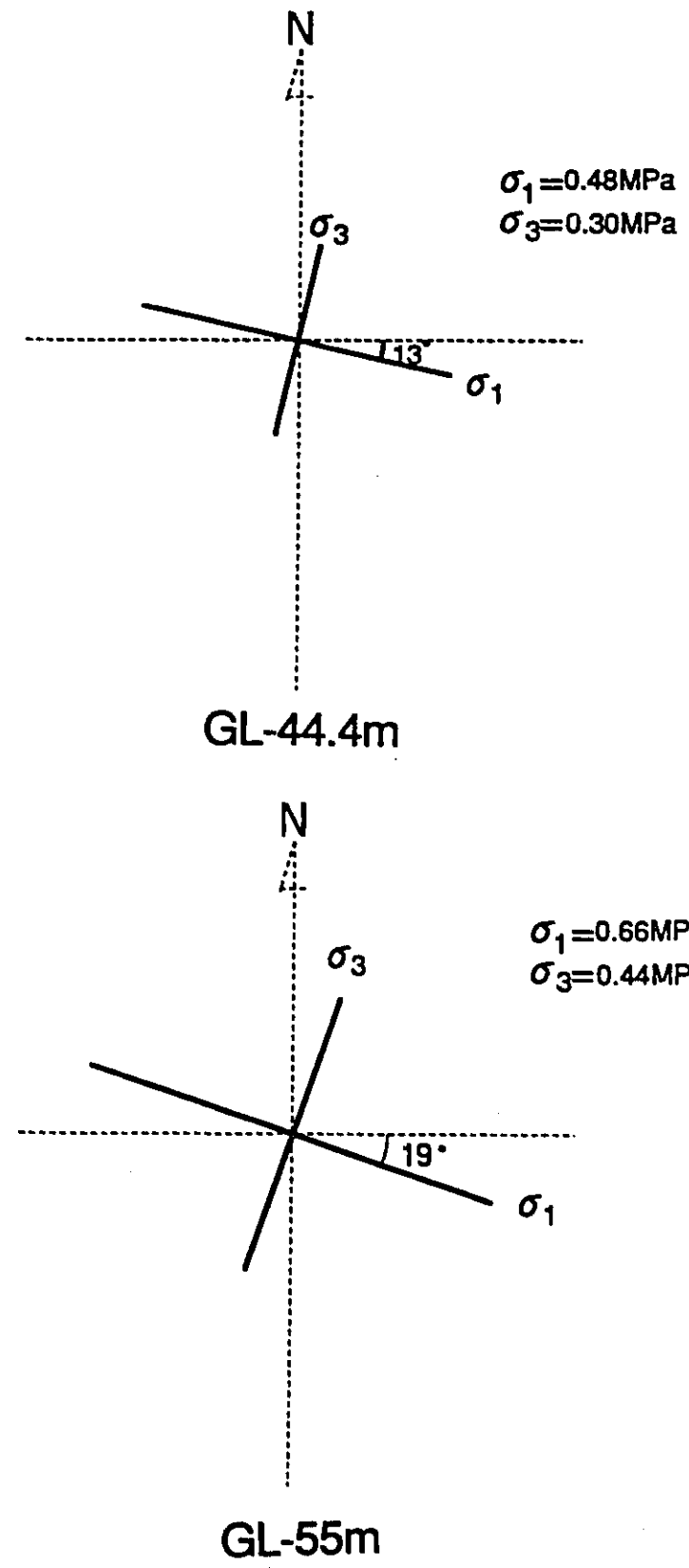


図-18 初期応力測定結果

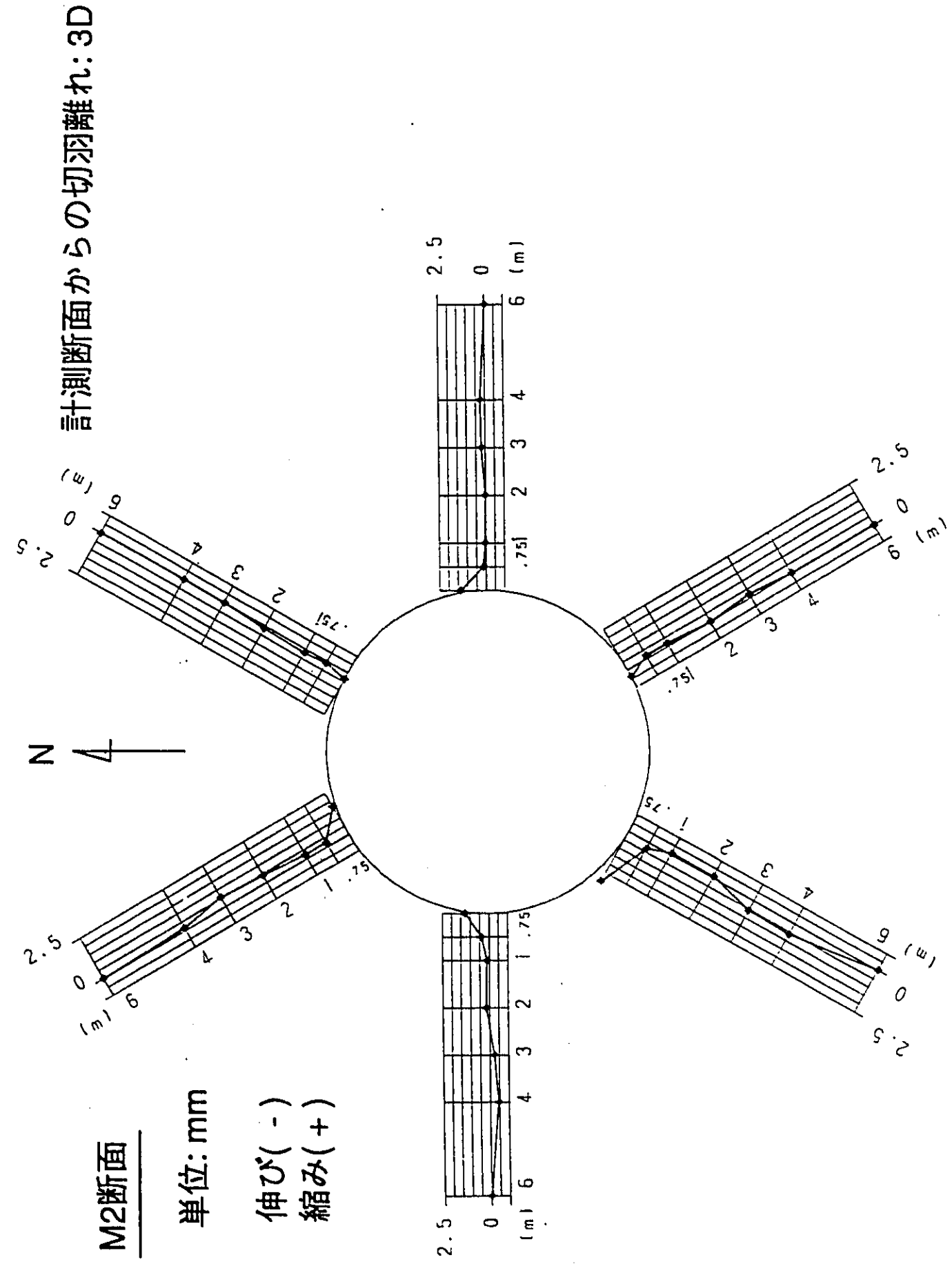
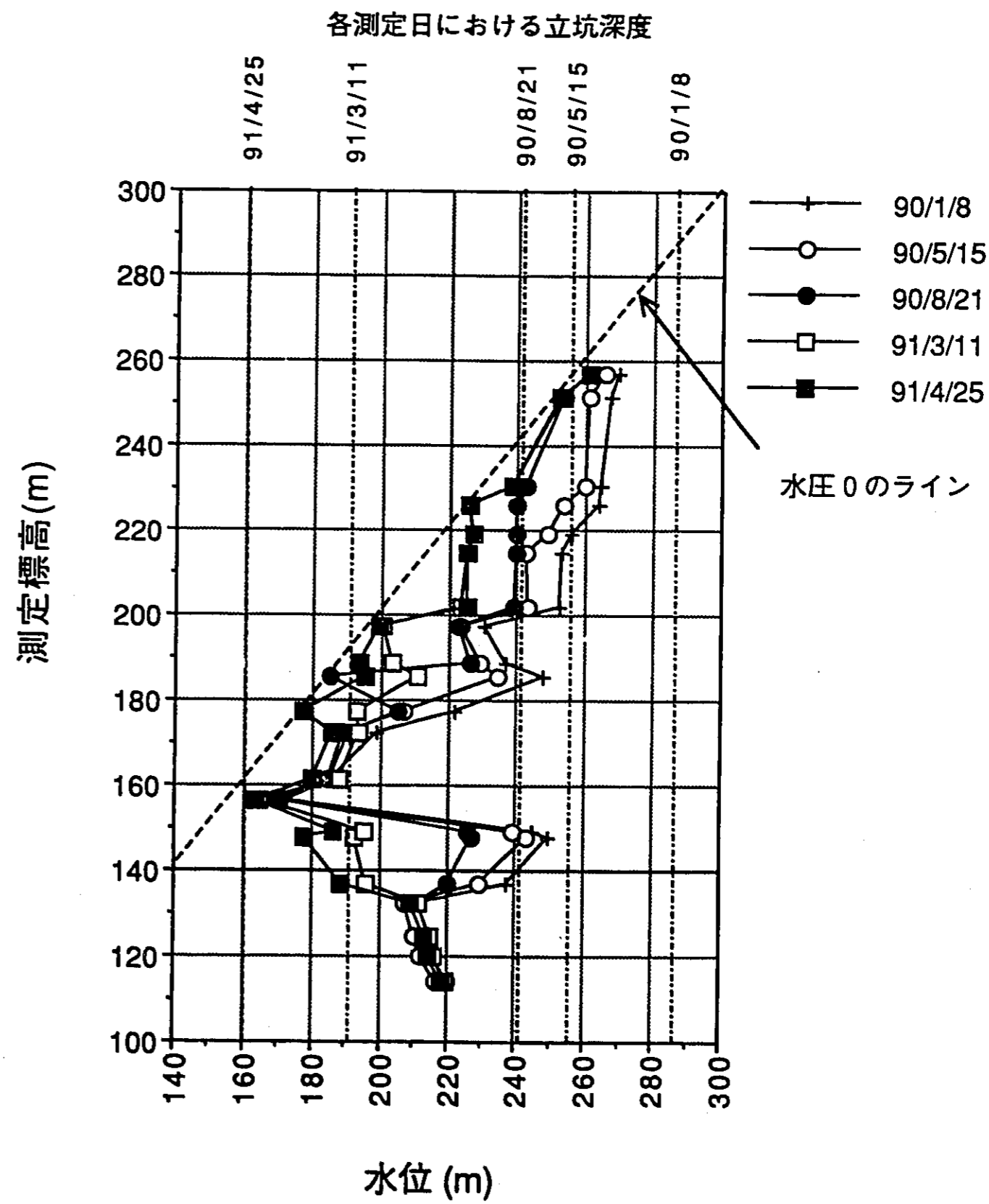
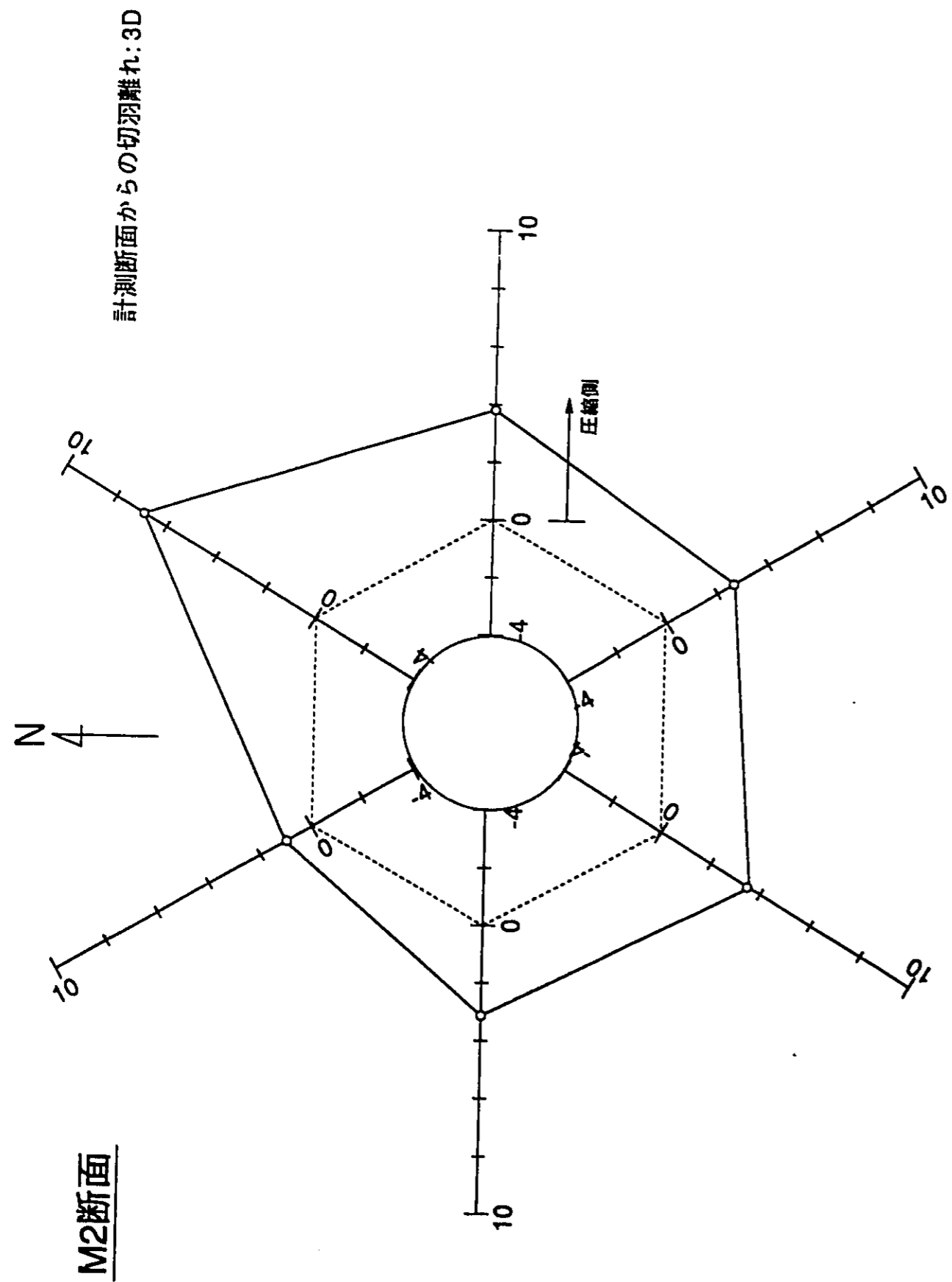
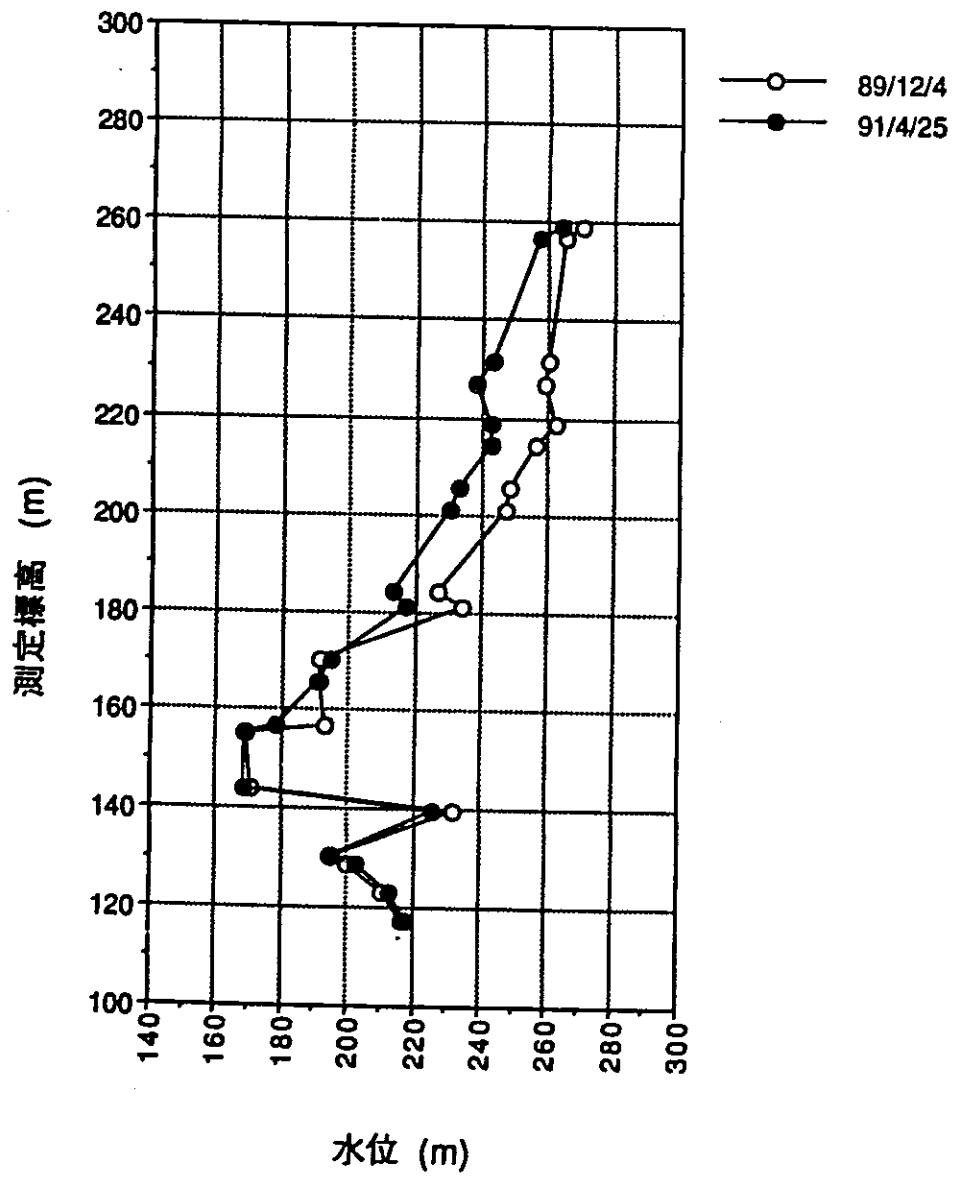


図-19 地中変位分布図



TH-2 水位経時変化



TH-3 水位経時変化

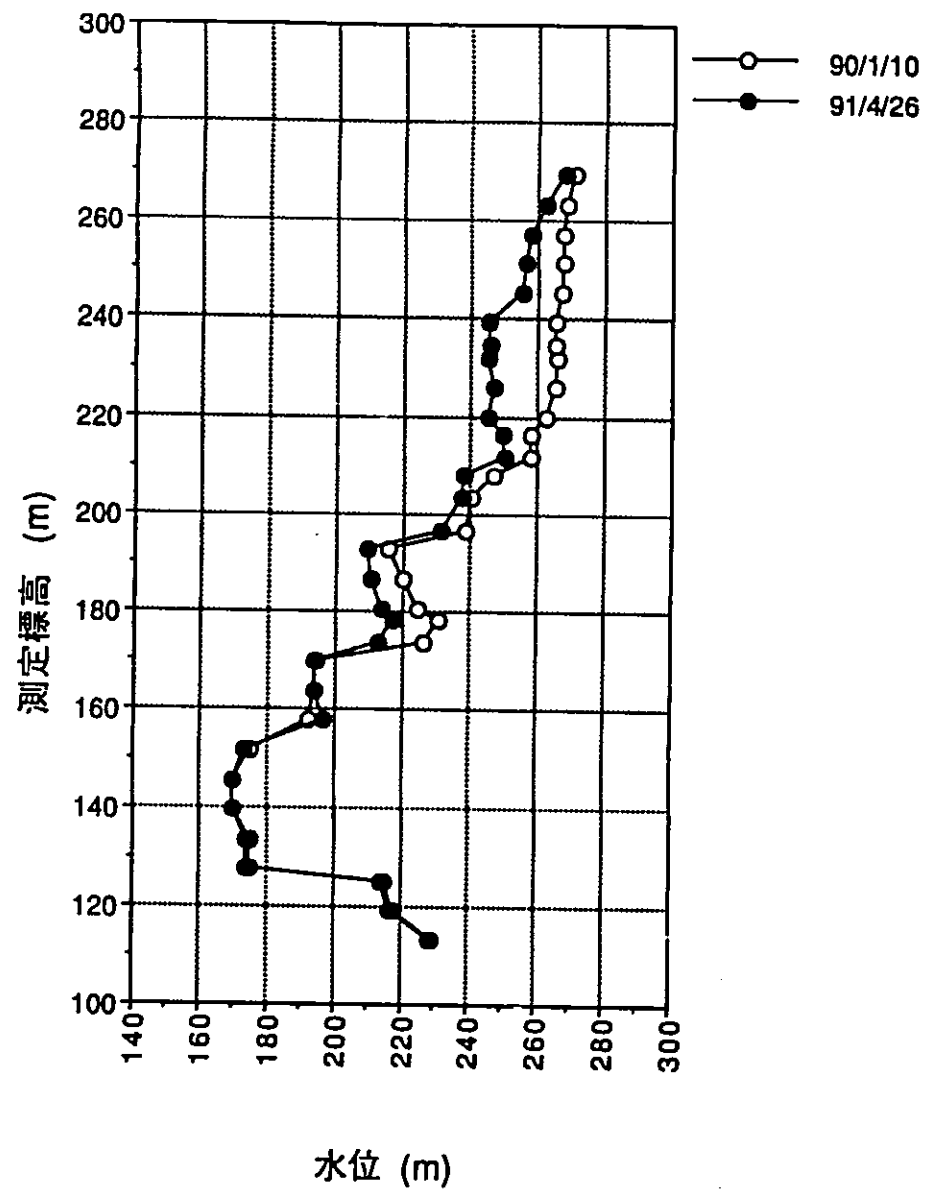
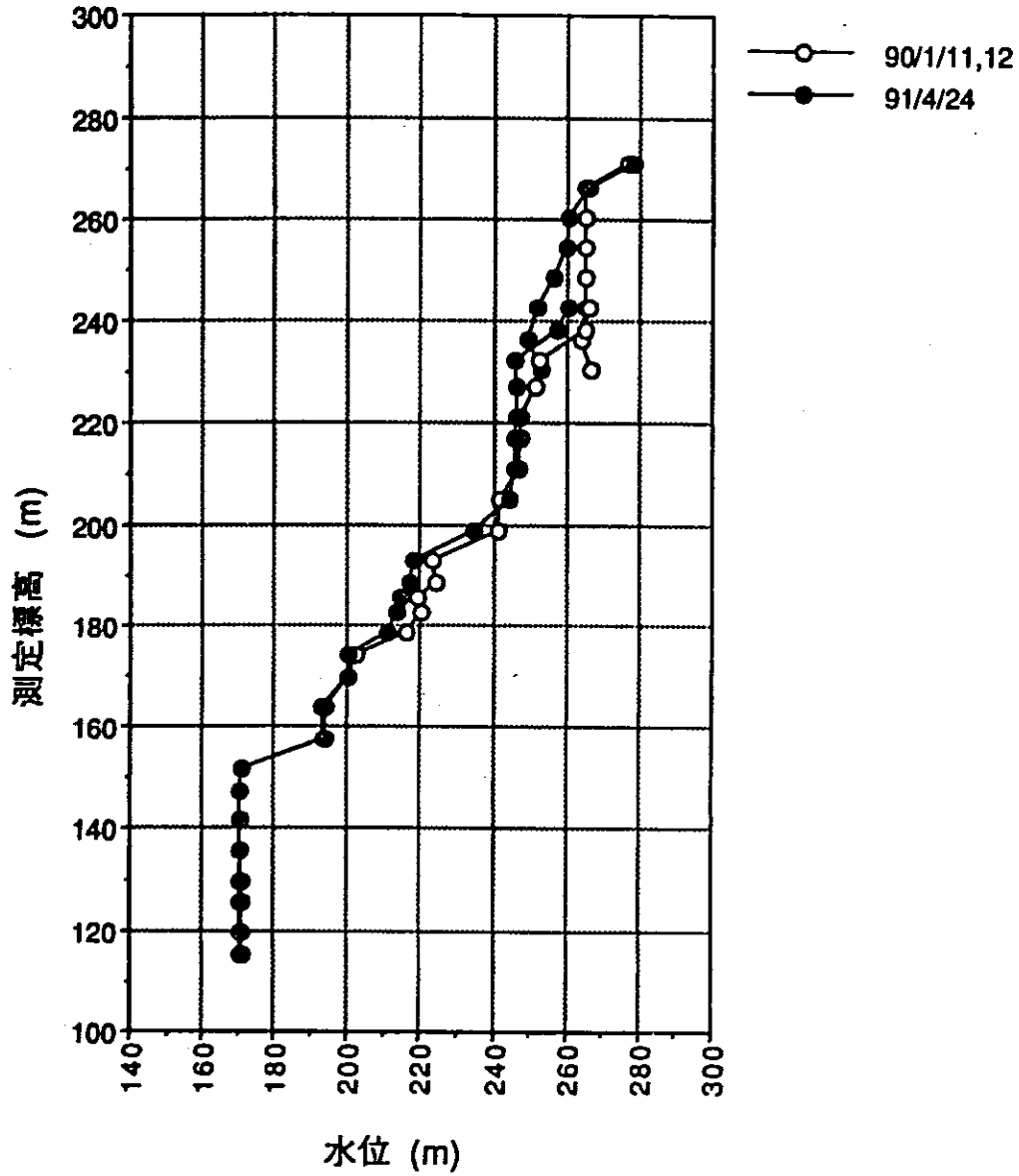


図-22 TH-2,TH-3の水位経時変化

TH-4 水位経時変化



TH-5 水位経時変化

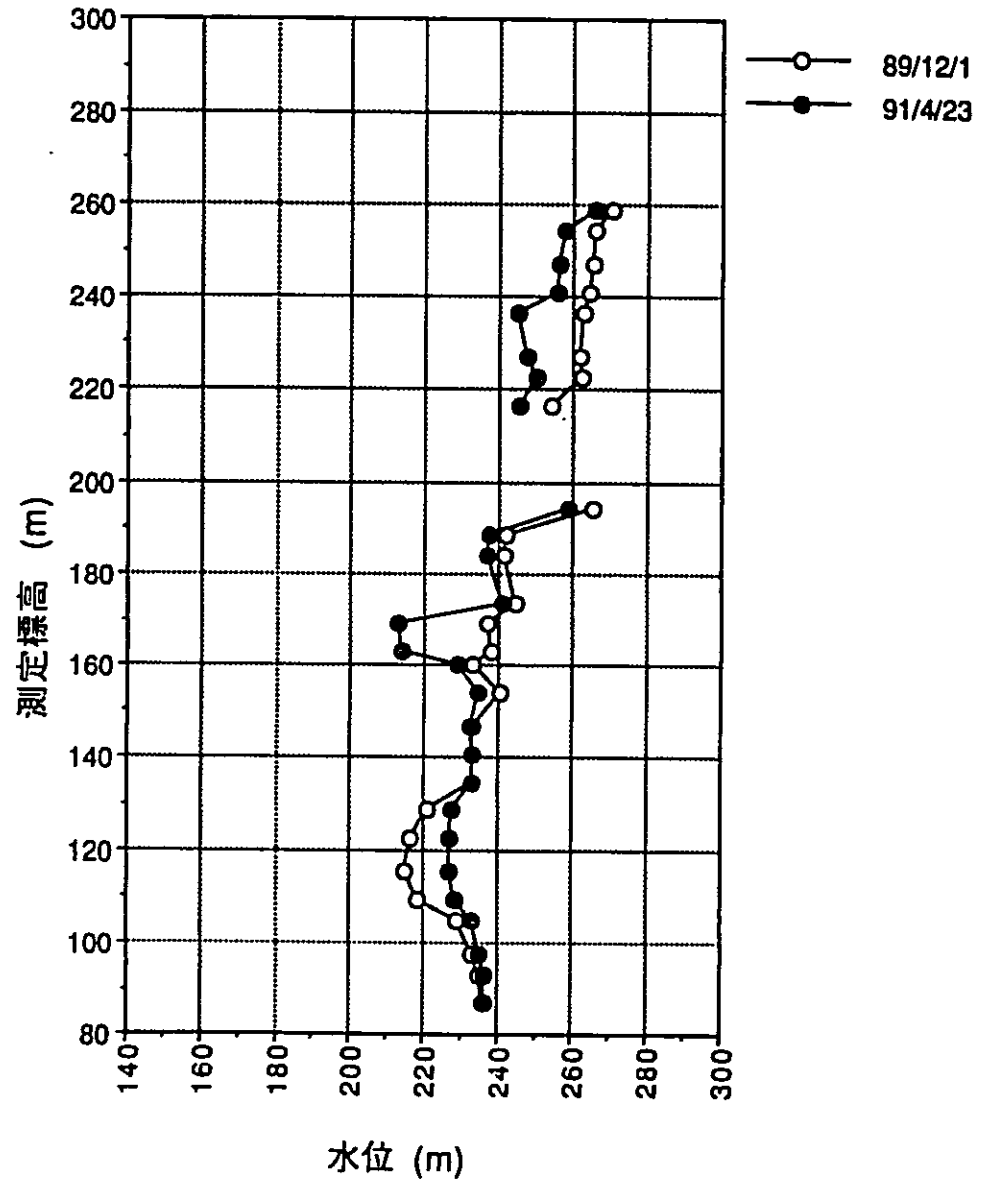
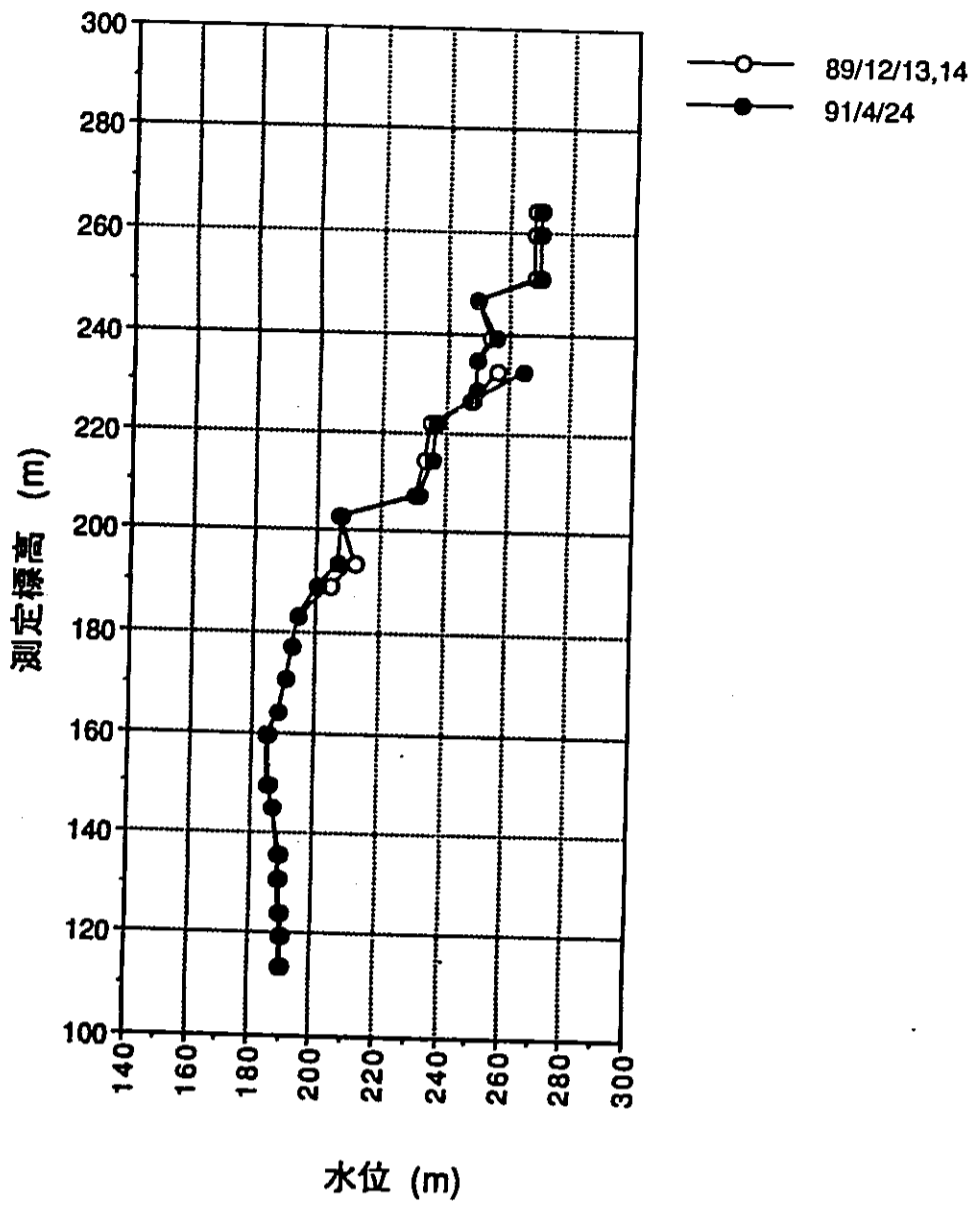


図-23 TH-4,TH-5の水位経時変化

TH-7 水位経時変化



TH-8 水位経時変化

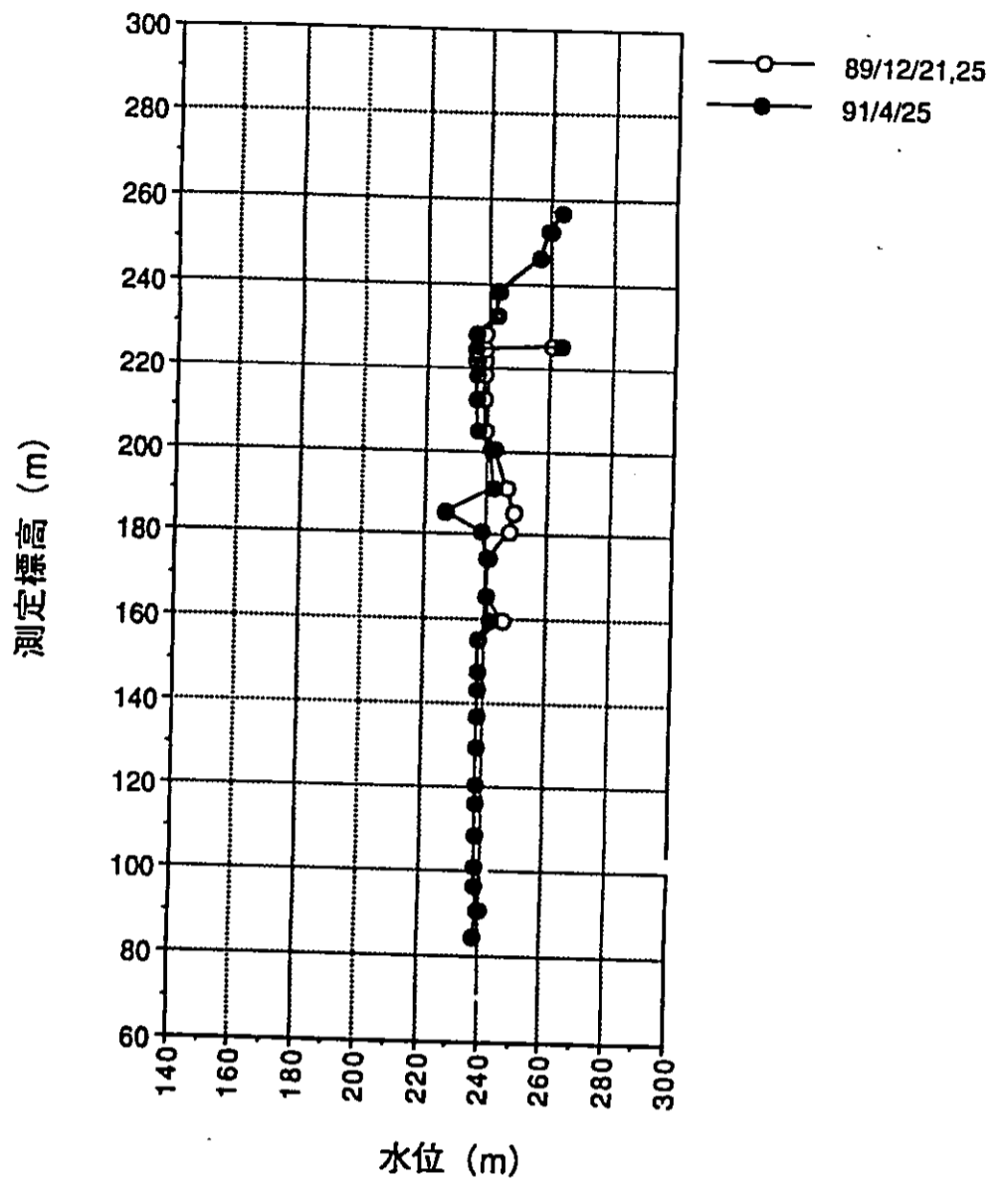


図-24 TH-7,TH-8の水位経時変化

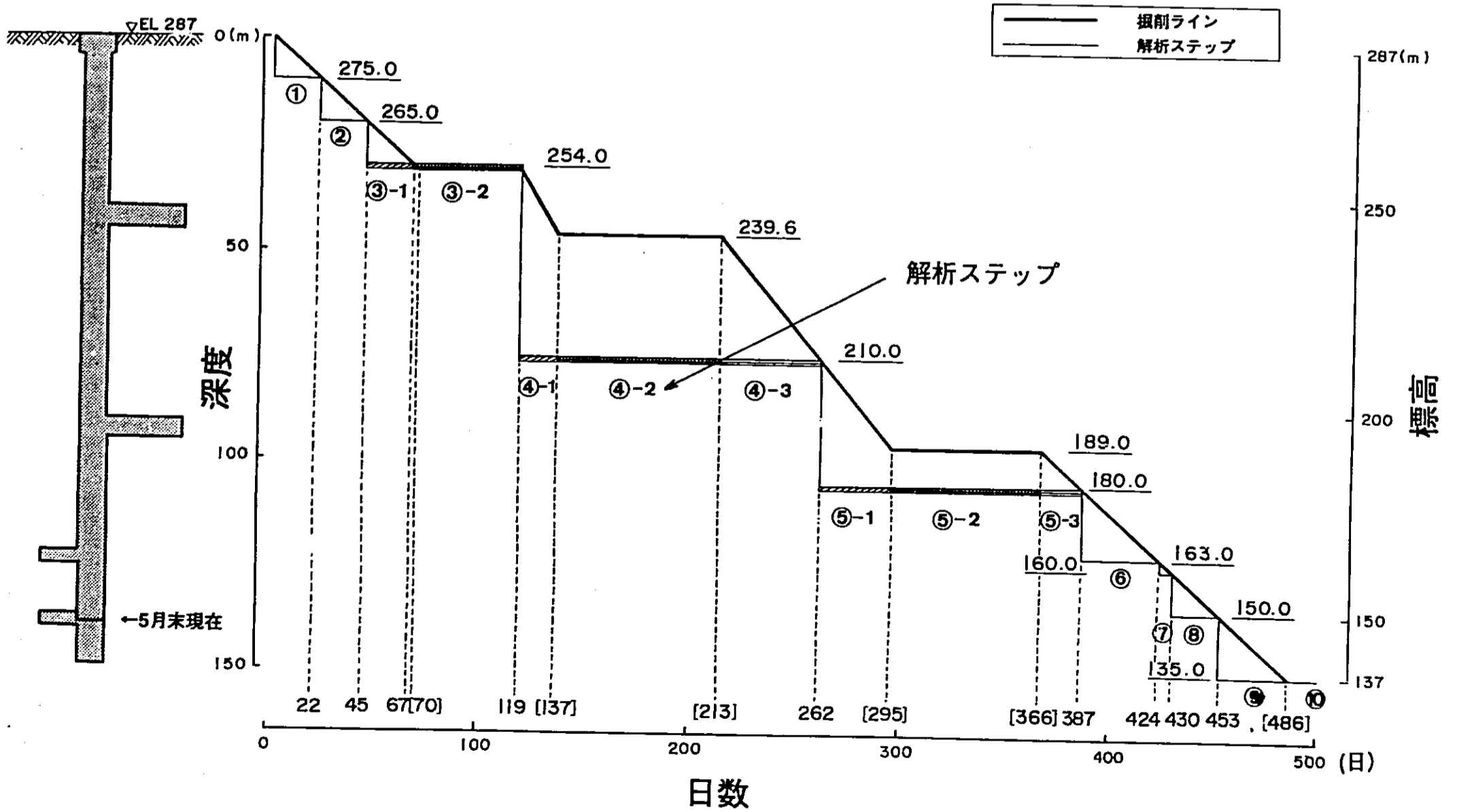


図-25 解析工程図

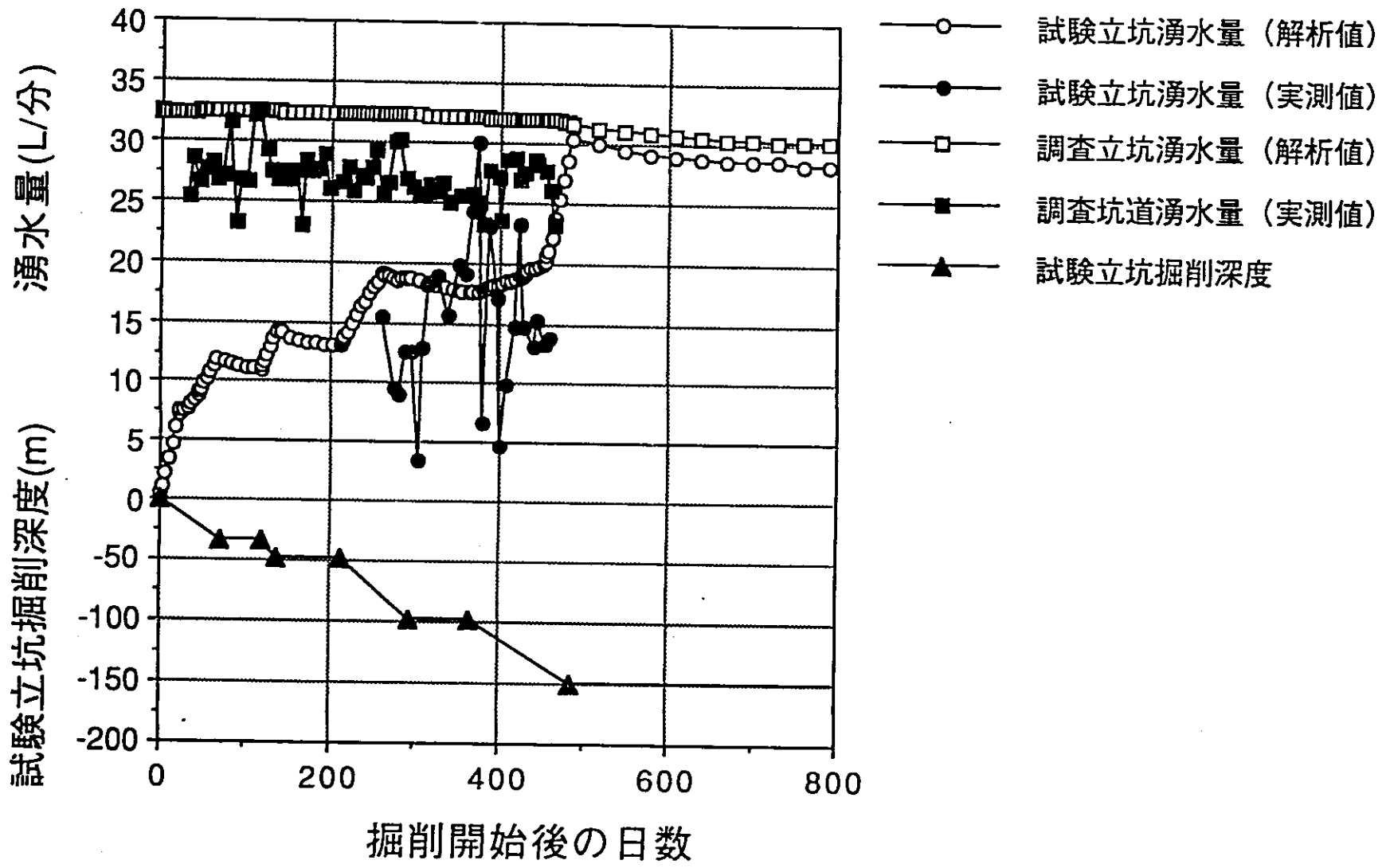
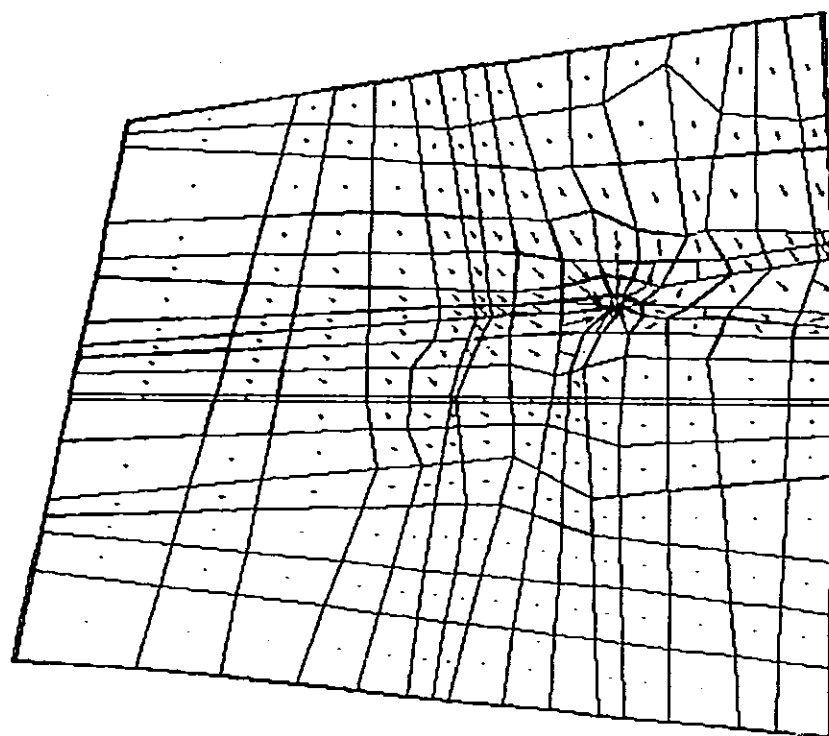


図-26 湧水量 解析項目、実測比較図

case = 15
time = 4.8600E+02

SEE Project Groundwater flow Analysis TAGSAC(Excavation)
DISTRIBUTION of VELOCITY VECTOR



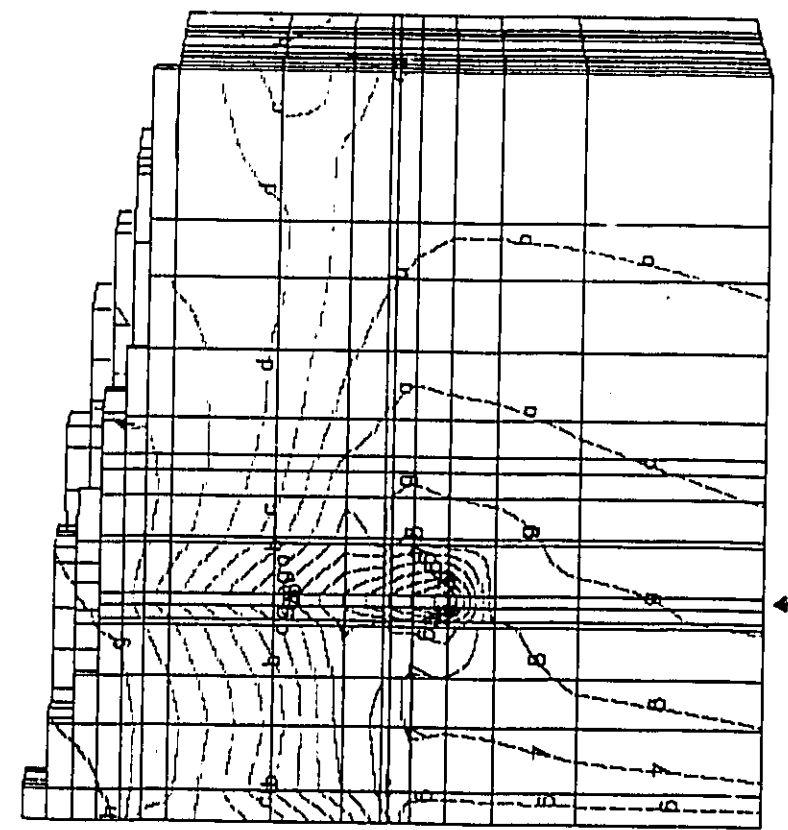
magnetic vector (jmag)
min= 0.00E+00 in elem 1367
max= 5.48E-07 in elem 2844

図-27 流線ベクトル図

SEE Project Groundwater flow Analysis TAGSAC(Excavation)
DISTRIBUTION of TOTAL-HEAD

case = 15
time = 4.8600E+02

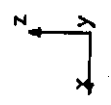
contour levels
1 = 1.300E+02
2 = 1.400E+02
3 = 1.500E+02
4 = 1.600E+02
5 = 1.700E+02
6 = 1.800E+02
7 = 1.900E+02
8 = 2.000E+02
9 = 2.100E+02
0 = 2.200E+02
1 = 2.300E+02
2 = 2.400E+02
3 = 2.500E+02
4 = 2.600E+02
5 = 2.700E+02
6 = 2.800E+02
7 = 2.900E+02
8 = 3.000E+02



試験立坑

TOTAL-HEAD (m)
min= 0.00E+00 at node 2881
max= 3.01E+02 at node 3911

図-28 ポテンシャル分布図



新第三系堆積岩における立坑掘削影響試験の概要
OUTLINE OF SHAFT EXCAVATION EFFECTS PROJECT IN NEOGENE SEDIMENTARY ROCKS

動力炉・核燃料開発事業団 杉原弘造 Kozo Sugihara *)
吉岡尚也 Hisaya Yoshioka *)
今井久 Hisashi Imai *)
松井裕哉 Hiroya Matui *)

SUMMARY

Evaluation of the effects induced by underground excavation is an important issue in order to design and construct a underground facility and to maintain its safety. Power reactor and nuclear fuel development corporation (PNC) excavated a shaft in Neogene sedimentary rocks and studied the excavation effects. Displacement, stress and physical properties were measured in the rock mass adjacent to the shaft and hydrological condition was monitored around the shaft. Numerical simulation was performed to understand the observed phenomena. The effected zone was found to be extended about 1m from the shaft wall. Numerical simulation of groundwater flow regime could predicted the hydrological influence induced by the excavation.

Keywords: Shaft (立坑), Excavation Effects (掘削影響)

1. はじめに

岩盤に立坑などの空洞を掘削すると、周辺岩盤が力学的、水理学的に影響を受けると考えられる。これらの影響を定量的に評価し、その発生メカニズムを明らかにすることは、地下深部の構造物を設計・建設し、安全性を確保するうえで、重要である。

動力炉・核燃料開発事業団(以下、動燃という)では、新第三系の堆積岩盤中に立坑を掘削し、これにより引き起こされる影響の研究を行っている。動燃ではこの研究を立坑掘削影響試験(SEEプロジェクト= Shaft Excavation Effects Project)と名付けて、平成元年度より開始した¹⁾。

この試験は、掘削影響を研究することを目的として、新たに立坑を掘削して行われている。このような試験は国内に例がなく、世界的にも花崗岩・岩塩・粘土を対象とした試験はあるものの、新第三系の堆積岩を対象とした例はない。

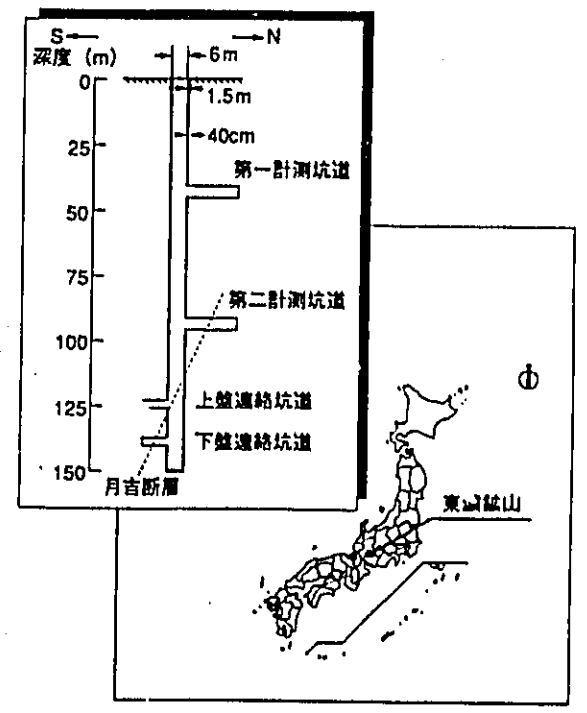


図-1 位置図および立坑図

*) Senior Research Engineer, Chubu Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC), 959-31 Sonodo, Jorinji, Izumi-cho, Toki-shi, Gifu-ken 509-51, Japan

による水圧計測

④坑内湧水量調査

⑤地下水流動解析

水理地質構造調査では周辺岩盤の水理的特性とその三次元的な広がりを把握するため、図-5に示すTH-1~8, SN-4, AN-6の位置に130~200mのボーリング孔を掘削し、各ボーリング孔において、コア観察、物理検層(電気、放射能、キャリパー)、ポアホールテレビ観察を行った。この結果に基づき、代表的な位置において各孔10点で透水試験を行い、透水係数分布を把握した。

表層水理調査では、地下水流動解析の上部境界条件となる地下水涵養量を把握するために、瀬戸層群を対象として地下水位と土壤水分を観測できる機器を合計9か所に設置した(図-5)。また、降水量などを測定するための気象観測設備と河川流量を測定するための河川流量計を1か所ずつ設置した。

TH-1~8, SN-4, AN-6にはMPシステムを設置した。これはカナダのWestbay社が開発した単一孔多区間水圧測定・採水システムである。パッカーにより測定区間を設けて、ポートという特殊なバルブをとおして、プローブにより水圧測定や採水ができる機器である。各ボーリング孔を20~30の測定区間に分割し、各区間にポートを設置した。MPシステムによる水圧測定は立坑掘削開始前から始め、岩盤内の水圧分布の初期条件とその立坑掘削による変化を観測している。測定は1~2週間に1回行った。

坑内湧水量調査では既存の調査坑内で20か所と第二立坑において湧水量を測定している。第二立坑では掘削の進行に合わせ10深度において集水リングを設置し計測している。これらのデータは、水理解析の境界条件や確認データとなる。

地下水流動解析では、以上の各調査により得られるデータに基づき三次元飽和・不飽和浸透流動解析を行った。予測解析の結果は実測値と比較した。

(3)スケジュール

立坑掘削影響試験の概略スケジュールを図-6に示す。立坑掘削終了後も設置した計測機器による長期観測を継続している。

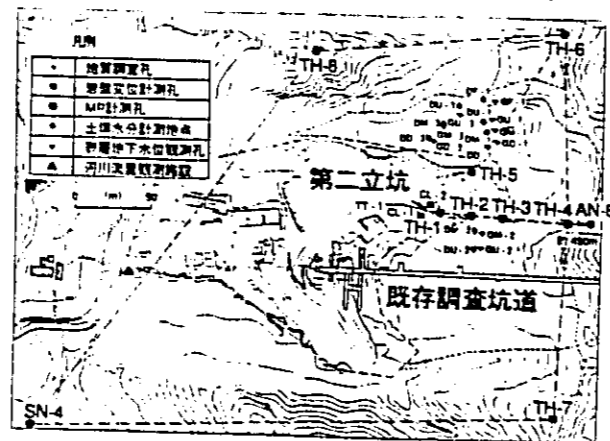


図-5 立坑掘削影響試験 試験坑及び水理観測システム図

	元年度	2年度	3年度	4年度
(1)立坑掘削工事				
(2)水理調査				
・事前調査				
・観測、採水				
・解析				
(3)岩盤挙動調査				
・事前調査				
・機器設置、測定				
・解析				

図-6 立坑掘削影響試験工程

3. 試験の経緯と現況(平成4年4月現在)

第二立坑の掘削は平成3年7月に終了した。

岩盤挙動調査では、平成元年12月までに事前調査を終了し、CL-1, 2での傾斜計による測定を開始した。傾斜計による測定はその後1~2か月に1回実施している。変形挙動に関する調査(図-3)では各計測断面に所定の計測機器を設置し計測を継続している。力学的、水理学的特性変化に関する調査(図-4)では全ての計測を終了し、現在は得られたデータの解析・評価を行っている。

水理調査においては昭和63年度から試験を開始し平成元年度当初より事前調査を開始した。MPシステム設置孔については、掘削が終了したボーリング孔から順次、コア観察、物理検層、ポアホールテレビ観察を行い、この結果に基づいて透水試験位置を決定し透水係数を測定した。透水試験終了後MPシステムを設置し、平成元年9月から順次、水圧分布の測定を開始した。平成元年12月までに全てのボーリング孔にMPシステムの設置が終了し、岩盤内の水圧の分布と変化が測定できるようになった。その後も1か月に1回の測定を継続している。

表層水理調査では、表層の地下水位計と土壤水分

計を平成元年9月に、気象観測設備を平成2年1月に、河川流量計を平成2年3月に設置終了し、順次データ採取を開始した。

坑内湧水量調査では、既存の調査坑道の測定点を平成2年2月に設定し測定を開始した。第二立坑については、概ね15mに1か所ずつ集水リングを設置し、測定を行っている。

事前調査で得られた情報に基づいて、岩盤の水理地質構造を評価し、三次元の水理地質構造モデルを構築し、立坑掘削による地下水流動への影響の予測解析を行い、実測データとの比較を行った。

4. 岩盤挙動調査の結果

変形挙動に関する調査および力学的・水理学的な特性変化に関する調査で得られたいくつかの計測結果について述べる。

(1)変形挙動に関する結果

ここでは、M3断面で行われた岩盤内変位の計測結果について述べる。

図-7は、計測断面から立坑切羽が掘削径Dの2倍(2D)および3倍(3D)進行した時点での岩盤内変位を示したものである。断層と交差する方向に埋設した多点式岩盤内変位計とそうでない方向に埋設した多点式岩盤内変位計を介して計測された変位の大きさは異なるが、立坑の切羽が2Dないし3D進行した時点ではどの方向とも収束している。

(2)力学的・水理学的な特性変化に関する結果

ここでは、A, B断面において掘削前後に行われた孔内載荷試験、C断面で行われたひずみの計測、GT-1~GT-4で掘削前(第一計測坑道掘削後)・掘削中(第二計測坑道掘削後)に行われた弾性波トモグラフィの結果について述べる。

A断面では立坑壁から東方向と西方向に長さ6mのボーリング孔を1孔ずつ掘削した。B断面では第一計測坑道から立坑に平行な鉛直下向のボーリング孔を4孔掘削した。これらのボーリング孔は長さ23mで立坑壁から各々0.8, 1.3, 2.3, 3.3m離れている。C断面では第二計測坑道からB断面と同じような計測を行うためのボーリング孔を4孔とひずみ計を埋設するためのボーリング孔を2孔掘削した。GT-1~GT-4のボーリング孔は第一計測坑道から掘られた。この4本のボーリングは上面が2m、下面が

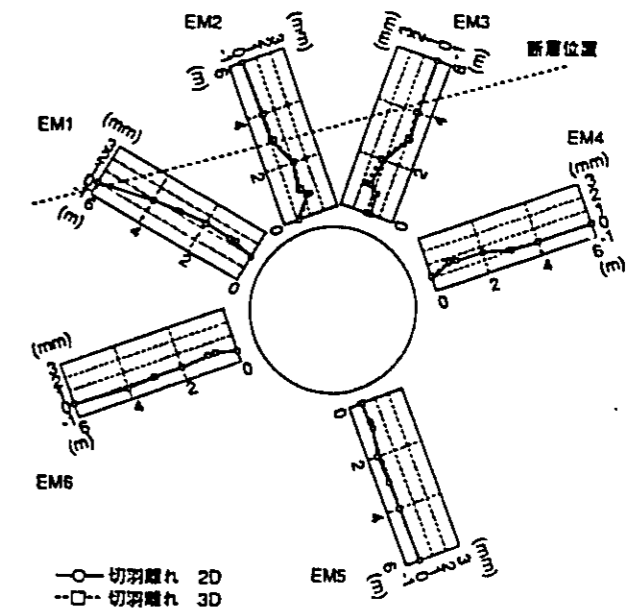


図-7 M3断面における岩盤内変位の計測結果

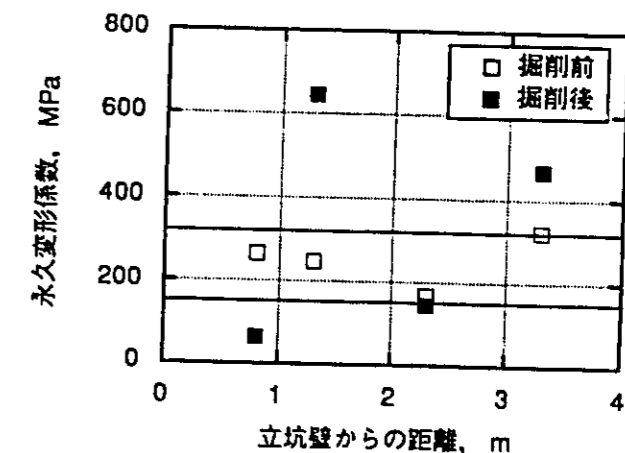


図-8 A断面における永久変形係数(泥岩)

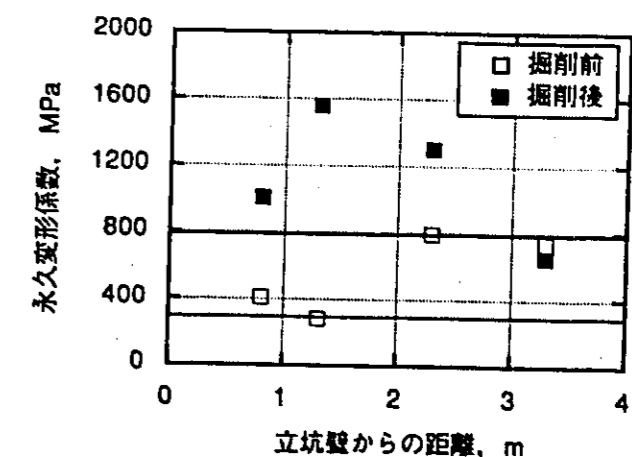


図-9 B断面における永久変形係数(凝灰質泥岩)

約40mの正方形となる正4角錐状の形を成す配置になっている。

A断面で行われた孔内載荷試験の結果を図-8に示す。岩種は泥岩である。試験は立坑壁からの距離の異なる4つの位置で行なわれた。この図は、孔内載荷試験の結果を縦軸に永久変形係数、横軸に立坑壁からの距離をとって示したものである。□印が掘削前、■印が掘削後の永久変形係数である。このように掘削に伴う力学的な特性変化を永久変形係数で評価したのは、永久変形係数が応力レベルに依存しないためである。ここで掘削前の永久変形係数に注目すると、同一岩種内での不均質性が表われている。したがって、同図には不均質性の変動幅、すなわち掘削前に得た永久変形係数の変動幅を実線で示した。掘削後に得た永久変形係数が変動幅よりも外側にプロットされた場合には、掘削による力学的な特性変化が生じたものと考えられる。図-8では、立坑壁からの距離が0.8mの位置において掘削後の値が掘削前の下限値よりもさらに小さくなっている。そのため、0.8mの位置の岩盤は掘削によって緩んだものと考えられる。

つぎに、B断面で行われた孔内載荷試験の結果を図-9に示す。岩種は凝灰岩質泥岩である。図-9では、掘削後に得た永久変形係数が実線で示した変動幅の内側か上限値を越えてプロットされている。これは応力再配分に伴って応力が集中し、しかもその状態が弾性限度内にあるためと考えられる。

図-10、11はそれぞれC断面における月吉断層の上側と下側で計測されたひずみを立坑の切羽位置との関係で示したものである。両図には、第二計測坑道から先行埋設した多軸岩盤ひずみ計を介して計測されたひずみを立坑の半径、接線、鉛直方向のひずみに直したものがプロットされている。縦軸のひずみは引張り側を正、圧縮側を負で表わしている。横軸の切羽位置Dはひずみ計を埋設した深度を基準レベルとし、この基準レベルと立坑切羽深度との離れを掘削径Dで表わしたものである。立坑の切羽が多軸岩盤ひずみ計を埋設したレベル(0D)を通過する手前より半径方向のひずみ(ϵ_r)と接線方向のひずみ(ϵ_θ)には変化が生じ、立坑切羽が掘削径の2倍(2D)以上進行すると ϵ_r と ϵ_θ との差はほぼ一定になる。一方、鉛直方向のひずみ ϵ_z は立

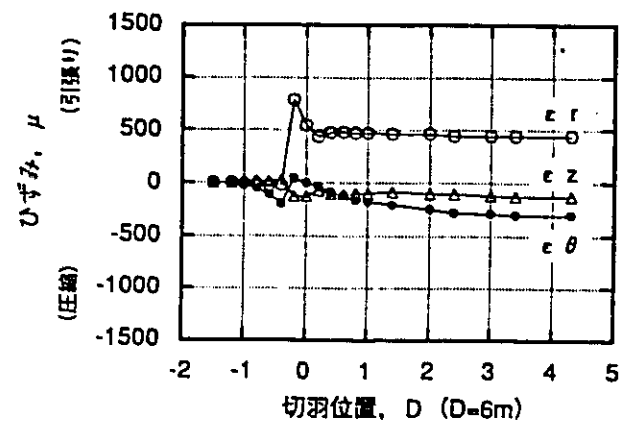


図-10 半径、接線、鉛直方向のひずみ (断層上側)

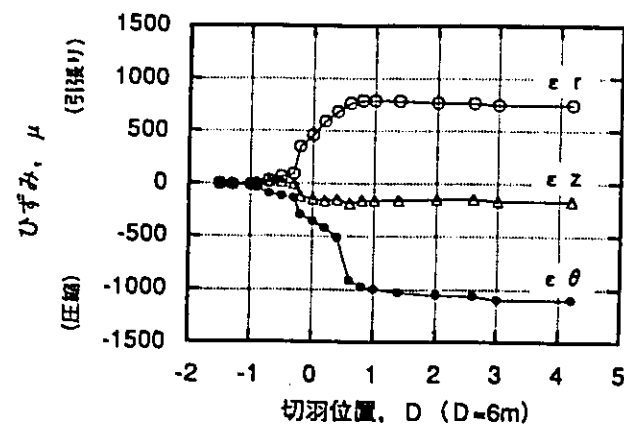


図-11 半径、接線、鉛直方向のひずみ (断層下側)

坑の切羽位置によらずほとんど変化していないことが図-10、11よりわかる。このようなひずみの変化は、谷本ら⁹⁾が応力再配分の概念として指摘している空洞壁面を空洞の中心に引きずり込む掘削外力の作用によって生じたものと考えられる。この掘削外力の解放のために生じたひずみのうち ϵ_r と ϵ_θ は、図-10と図-11で異なった挙動を示している。断層の上側と下側に埋設した多軸岩盤ひずみ計近傍における岩盤のき裂間隔はそれぞれ70cm程度と30cm程度であったため、このような岩盤内のき裂間隔の違いが影響したのと考えられる。

つぎに、GT-1~GT-4孔を利用して掘削前と掘削中に行われた弾性波トモグラフィの結果をそれぞれ図-12、13に示す。図-12において凝灰質の優勢な部分は低速度に、花崗岩の礫層部分は高速度に解析されており、地質状況やボーリング孔沿いの弾性波速度ともほぼ調和している。同図には月吉断層の推定位置を白の破線で示しているが、GT3・4断面では断層の近傍に低速度帯が検出されている。GT

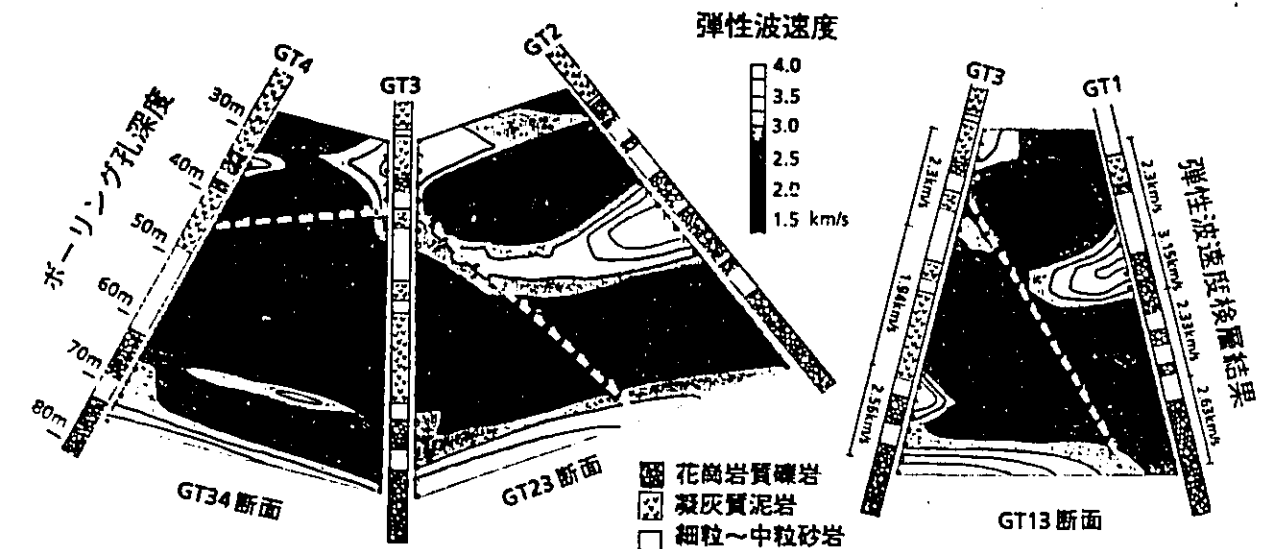


図-12 掘削前の弾性波トモグラフィ解析結果

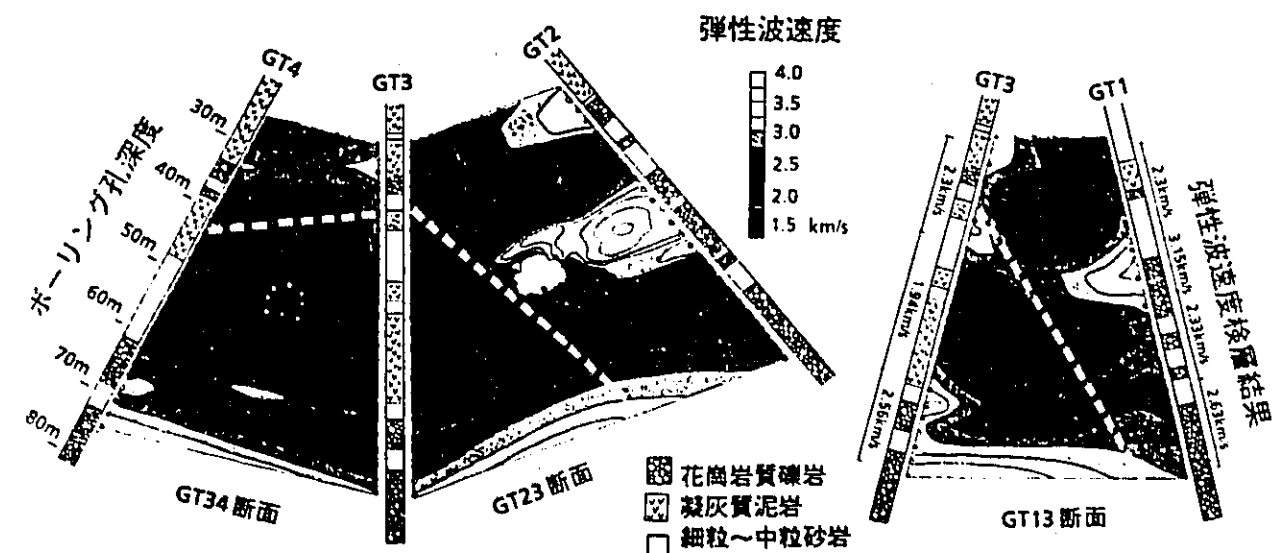


図-13 掘削中の弾性波トモグラフィ解析結果

1・3断面とGT2・3断面では、断層推定位置にその方向に対応して速度の変化帯があるが、逆に高速度帯になっている。一つのボーリング孔としか交差していない高角度の傾斜層は検出されにくいと言われており⁹⁾、GT1・3断面とGT2・3断面がその場合に相当していると考えられる。図-13の場合は第二計測坑道が掘削されていたため解析領域内部に測点を新たに設けることができた。そのため、GT2・3断面とGT3・4断面では掘削の影響によると考えられる低速度帯が顕著に検出されている。

5. 水理調査の結果

ここでは、これまでに水理調査で得られた結果の概要を述べる。

表層水理調査では0.57mm/日という涵養量が得られた⁹⁾。これは、1年間の土壌水分測定、表層水位測定、気象観測、河川流量測定により得られたデータに基づいており、数値解析の上部境界条件を決定する際の根拠を与えた。坑内湧水量測定の結果は、数値解析の結果を確証する際に用いた。

以下には、MPシステムで計測された岩盤内の水圧分布の変化と数値解析の内容について述べる。

(1)MP水圧計測

図-14にTH-1~4における水位分布の経時変

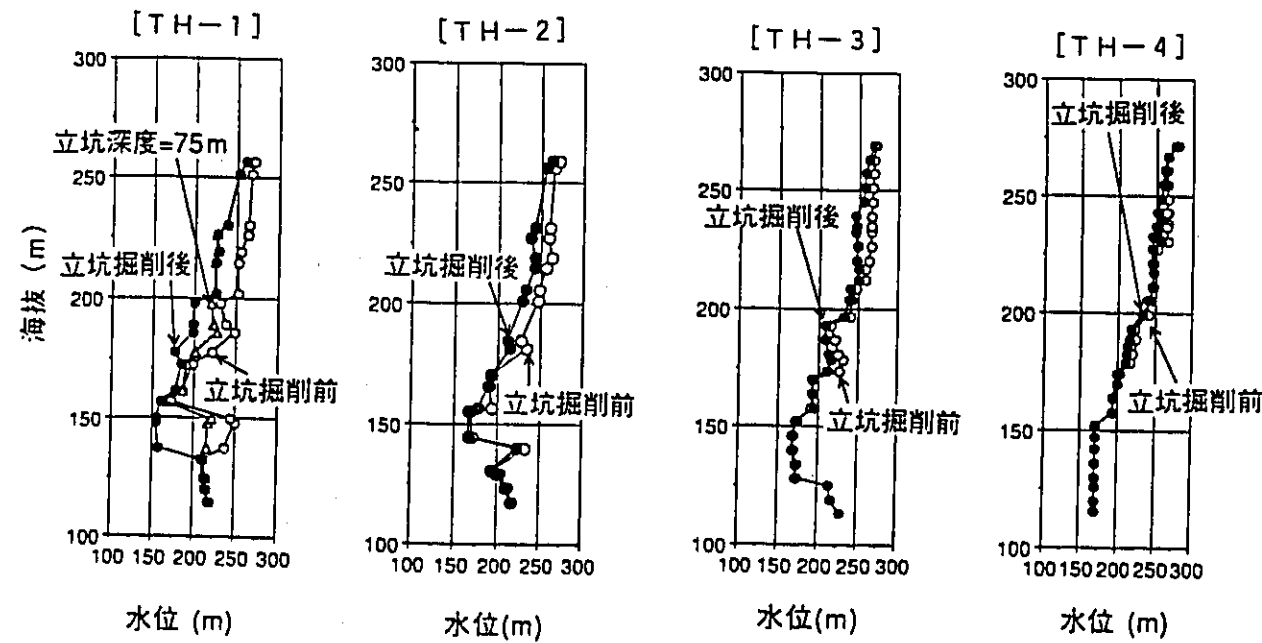


図-14 TH-1~4での水位変化

化を示す。これによるとTH-1（立坑から10m東の地点）での水位は、立坑掘削に伴って徐々に低下しているのがわかる。海拔130 m以深は基盤の花崗岩中の測定点であり、変化が少ない。

TH-2（立坑から30m東の地点）とTH-3（立坑から50m東の地点）には掘削の影響と考えられる水位変化が認められるが、その変化はTH-1に比べると少ない。TH-4（立坑から100 m東の地点）では立坑掘削によると考えられる変化はほとんど認められない。他のボーリング孔でも同様に変化は少ない。この結果から岩盤内の水圧分布は、第二立坑から半径約100 mの範囲内で影響を受けていると考えられる。

このMP水圧計測結果は、数値解析の境界条件の決定、結果の検証、水理地質構造の再検討に活用できる。

(2)水理解析

a)モデル設定・解析条件¹⁾

解析は第二立坑掘削前の状態を初期条件とし、立坑掘削工程を非定常な境界条件として、有限要素法を用いて行った¹⁾。

解析領域はTH-4, 6, 7, 8, SN-4で囲まれた約300 m四方の範囲とした。深度方向の範囲は地表より約300 m（立坑深さの2倍）の海拔0 mまでとした。解析モデルは地形、立坑・坑道、試錐孔などの位置・形状、水理地質構造を考慮して要素

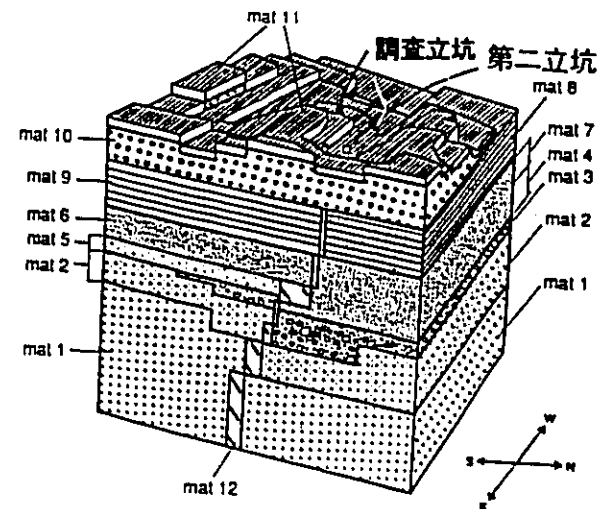


図-15 水理地質構造モデル

表-2 水理地質構造モデルの物性値

区分	透水係数 (cm/sec)	空隙率	比貯留係数 (l/m)	地質
mat 1	1.00E-07	0.02	1.00E-04	花崗岩
mat 2	5.00E-06	0.1	1.00E-04	風化花崗岩
mat 3	1.00E-05	0.3	1.00E-04	風化花崗岩・礫岩
mat 4	1.00E-06	0.3	1.00E-04	砂岩
mat 5	5.00E-06	0.3	1.00E-04	砂岩
mat 6	1.00E-06	0.3	1.00E-04	砂岩・凝灰岩
mat 7	1.00E-06	0.4	1.00E-04	凝灰岩
mat 8	5.00E-06	0.4	1.00E-04	砂岩・泥岩
mat 9	1.00E-07	0.4	1.00E-04	砂岩
mat 10	1.00E-05	0.4	1.00E-04	未固結層（瀬戸層）
mat 11	1.00E-04	0.5	1.00E-03	表土
mat 12	1.00E-08	0.3	1.00E-04	粘土を含む断層

分割を行った。水理地質区分は地質調査、透水試験結果に基づき設定し、図-15に水理地質構造モデルとして示す。表-2には水理地質12区分各々に設定した物性値および対応する地質を示す。断層はmat 12として示すが、モデル化の都合上、階段状の形状とした。

境界条件は上方より0.5mm/dayの涵養量を与え、下部境界は不透水条件とした。側方境界はTH 4, 6, 7, 8, SN 4にて事前に計測されたピエゾ水頭に基づき定常な水頭分布を設定した。立坑・坑道壁面は自由浸出条件とし、第二立坑内は掘削工程に従い自由浸出面が非定常に変化する境界条件を設定した。初期条件としては、既存調査坑道のみを考慮した（第二立坑掘削前の状態での）定常解析結果を用いて設定した。

b)解析結果¹⁾

掘削終了時の第二立坑を含む東西方向鉛直断面内のピエゾ水頭コンターを図-16に示す。立坑部は周囲よりピエゾ水頭は小さく周辺からの流入があることがわかる。また立坑底部でコンターは密となり大きな動水勾配が生じていることがわかる。

図-17にはMP計測孔TH-1, 2, 3, 5における掘削終了時のピエゾ水頭の鉛直方向の分布の解析値と実測値の対比を示す。TH-1, 2, 3におけるピエゾ水頭分布は解析と実測で調和的である。TH-5では海拔160 m以深で解析値が実測値より小さくなっている。

図-18に調査坑道への湧水量および第二立坑への湧水量の非定常変化の解析と実測の対比と第二立坑掘削工程を合わせて示す。実測値は工事に伴う排水等の影響を受けたデータは除き、約2週間ごとの平均値を示している。第二立坑および調査坑道における湧水量とも解析値のほうが実測値よりも大きく、解析値は実測値の1.5~2.0倍となっている。

第二立坑への湧水量は掘削に伴い増加している。これは解析・実測とも同様な傾向が認められる。また既存調査立坑・坑道への湧水は実測では降雨による変動は示すが、平均的にはほぼ一定であり、解析と実測は調和的であることがわかる。

今回の解析値と実測値の比較により、立坑掘削の地下水流動への影響が一連の調査解析手法にて評価しうることが確認された。しかし、解析・モデル化

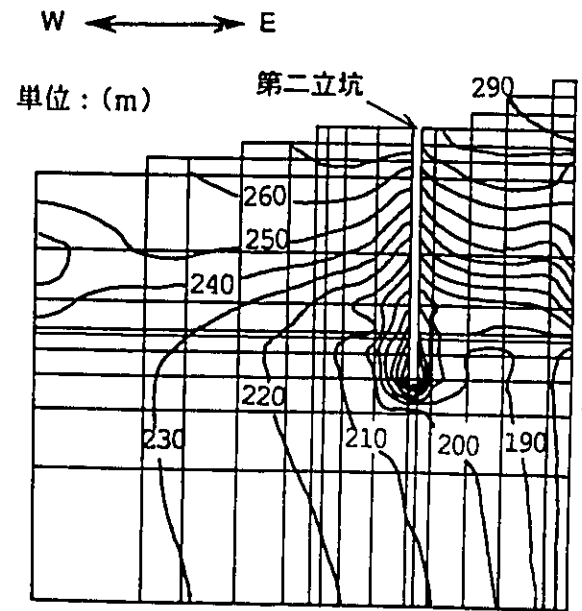


図-16 ピエゾ水頭コンター図

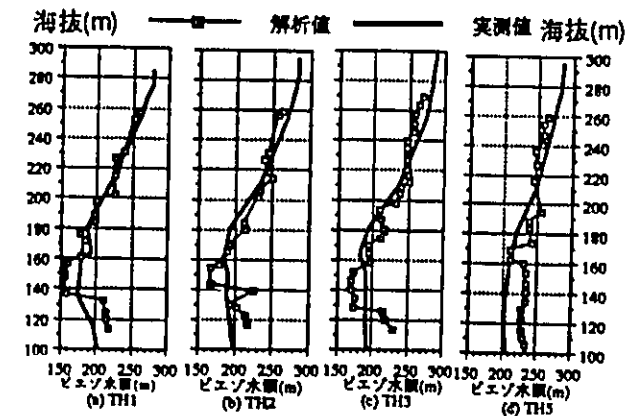


図-17 ピエゾ水頭の解析値と実測値の対比

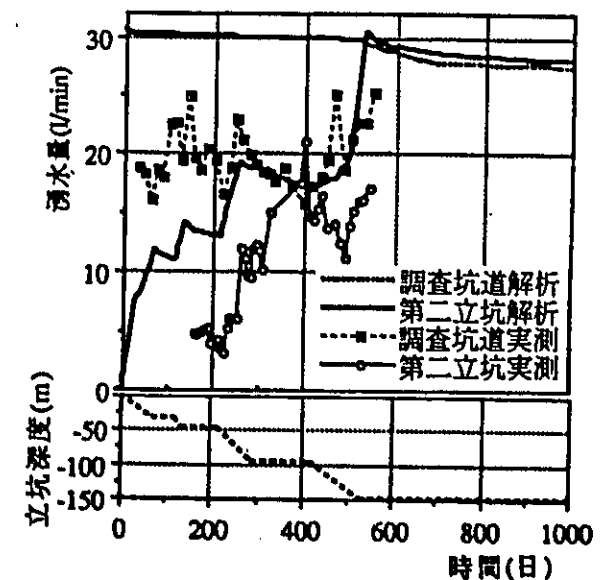


図-18 湧水量の非定常変化と掘削工程

手法ともまだ改善する必要がある。

6. まとめ

立坑掘削影響試験では、立坑掘削に伴い発生する周辺岩盤への影響を力学的、水理学的に計測・解析・評価するために、さまざまな現場計測・調査が行われ得られた情報に基づき数値解析が実施された。これにより以下のような知見が得られた。

- ①立坑壁面から1 mの範囲で永久変形係数の変化が認められる。
- ②弾性波トモグラフィにより、概略の地質構造が把握され、坑道周囲に低速度帯が検出された。
- ③周辺岩盤中の応力変化は、従来からいわれている応力再配分と同じ傾向を示した。
- ④周辺岩盤中の水圧は、立坑から半径約100 mの範囲で変化し、立坑に近いほど変化が大きい。
- ⑤事前調査の結果に基づき構築された水理地質構造モデルを用いて行った、飽和・不飽和三次元浸透流解析により、掘削影響を予測できた。

しかし残された課題や新たに生じた課題も多い。たとえば、以下の4点が挙げられる。

- ①計測手法の信頼性の検討。
- ②不飽和領域の評価。
- ③再配分応力状態の把握。
- ④物性と応力状態の関係評価。

本研究では膨大なデータが得られており、その解析・評価は、全てが終了したわけではない。また、長期的な影響の観測は現在も実施中であり、新たなデータが得られつつある。

今後とも、これらのデータの解析・評価を進めていくとともに、室内試験や新たな坑道掘削に伴う調査・試験を行い、上述した課題などの解決に取り組んでいく計画である。

7. 謝辞

本研究の多くは、大成建設、大林組、清水建設、鹿島建設への委託研究として実施した。また、誌面の都合上ご氏名は省略させて頂くが、結果の解析・評価については、岩盤、水理関係の大学の諸先生方に貴重なご意見を頂いた。ここに各社の担当者の方々および諸先生方に謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 杉原弘造、他：東濃地域における立坑掘削影響試験 - 全体計画 -，日本原子力学会「1991春の年会」要旨集，P524，1991年。
- 2) 柳澤孝一、他：東濃地域における立坑掘削影響試験 - 立坑掘削に伴う水理学的影響調査研究の概要 -，日本原子力学会「1991春の年会」要旨集，P525，1991年。
- 3) 杉原弘造、他：弾性波トモグラフィによる地質構造調査 - 断層のある堆積岩盤への適用例 -，第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.454~458，1992年。
- 4) 谷本親伯、他：切羽周辺での地山挙動を考慮したトンネル支保の基本概念，土木学会論文報告集，Vol.325，pp.93~106，1982。
- 5) 小澤岳史、他：傾斜層検出への孔間弾性波トモグラフィの適用に関するシミュレーション，物理探査学会第80回学術講演会論文集，pp.30~32，1989。
- 6) 中島誠、他：岩盤浸透流解析の涵養量の算定について，第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.252~256，1991。
- 7) K. Yanagizawa et al. : The Shaft Excavation Effect Experiment: Development of Hydrogeological Model in Tono Research Field, HIGH LEVEL RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT, Proceedings of the Second Annual International Conference, Las Vegas, Nevada, pp.1291~1298, April 28-May 3, 1991。
- 8) 渡辺邦夫、他：岩盤浸透流の3次元解析の考え方と多孔体モデルによる広域解析例，第45回土木学会年次学術講演会概要集，pp.816~817，1990。
- 9) 今井久、他：立坑掘削の地下水流動影響予測解析(II)，第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.71~75，1992年。

立坑掘削影響試験(Ⅰ) - 力学的・水理学的特性の変化 -
Shaft Excavation Effect Project (Ⅰ)
- Influence to Mechanical and Hydrological properties of Disturbed Zone -

動燃事業団
中部事業所

○松井 裕哉
Matsui Hiroya

杉原 弘造
Sugihara Kozo

吉岡 尚也
Yosioka Hisaya

1. はじめに

坑道掘削に伴う岩盤の影響領域を把握するための原位置試験として、東濃地域において150 mの立坑を掘削している。前回の原子力学会においては、本試験の全体計画について述べた。今回は実測結果に基づいた掘削影響領域の力学的・水理学的特性変化について述べる。

2. 研究内容

坑道掘削影響領域については、岩盤の変形特性と透水性の調査を掘削前・後で行い、両者を比較することによって評価できる。そのために、図-1のA断面(深度44.4 m)において、掘削前・後に孔内載荷試験、透水試験を実施した。

3. 結果と考察

立坑掘削壁面からの距離に関係なく、掘削前より掘削後の方が弾性係数は大きくなり、透水係数は低くなるという結果が得られた(図-2, 図-3)。この現象を理解するために、2次元弾塑性FEM解析を行った。解析に必要な入力パラメータのうち初期応力と弾性係数は、原位置での調査結果に基づいて決定した。また、他の定数に関しては、岩盤分類より推定した値を用いた。その結果、(1)掘削後の応力の再配分により弾性的な地山アーチが形成されていること、(2)この応力再配分のもとで、間隙等が閉塞したことが、弾性係数は大きくなり、透水係数は小さくなった原因と考えられることがわかった。

4. 今後の予定

他の調査により得られたデータも含め、掘削影響領域の総合的な評価を行う。さらに、最終的には力学・水理連成解析を実施する予定である。

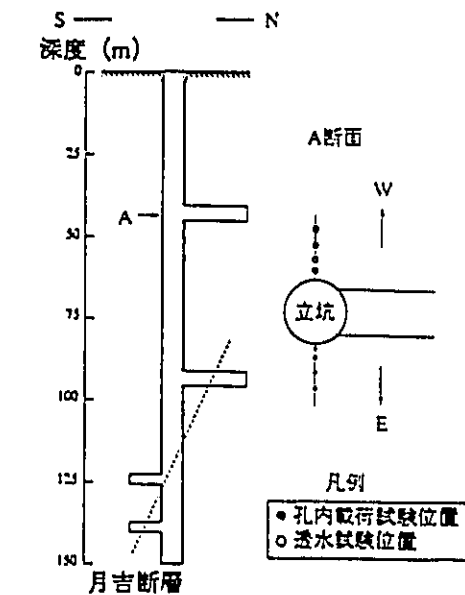


図-1 A断面における力学的・水理学的特性変化に関する調査

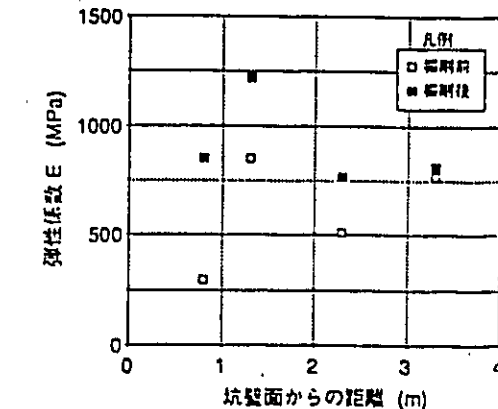


図-2 A断面における孔内載荷試験結果

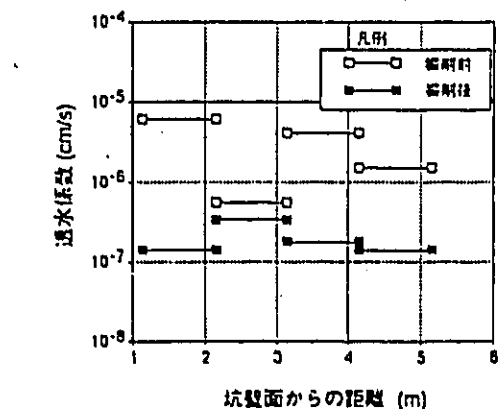


図-3 A断面における透水試験結果

(73) 立坑掘削に伴う応力再配分とその数値解析

動力炉・核燃料開発事業団 ○吉岡尚也
 動力炉・核燃料開発事業団 杉原弘造
 (株) 大林組 木梨秀雄
 (株) 大林組 畑 浩二
 (株) 日本パブリック 井上 朗

A Study on Stress Redistribution in Rock Formation by Shaft Excavation

Hisaya YOSHIOKA Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation
 Kozo SUGIHARA Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation
 Hideo KINASHI Obayashi Corporation
 Koji HATA Obayashi Corporation
 Akira INOUE Nihon Public Co.LTD

Abstract

An experimental and analytical study was carried out in order to evaluate stress redistribution of the sedimentary rock due to excavation of a shaft with a diameter of 6m and a depth of 150m. Stress variation in the rocks was measured using 8-element strain gauges embedded in two points around the shaft before excavation. An axisymmetric finite element analysis was conducted for comparison with the results of the measurements.

Following conclusions were obtained:

- 1) Stress in rocks tends to be drastically enlarged in a half of shaft diameter region apart from the shaft face.
- 2) Stability of underground space can be formed by the surrounding rock mass.

1. はじめに

乱されていない原位置岩盤には、自重等の作用により初期応力が存在する。このような初期応力を有した岩盤内に空洞を掘削すると、新たな力学的平衡状態に達しようとして空洞周辺の応力場が変化する。空洞周辺の初期応力場が変化していく現象を理解しておくことは、空洞の力学的な安定性を評価する上で有益な情報をもたらしてくれる。

Sauerら(1981)は、空洞を掘削することにより2重、3重に応力集中帯のシェルが形成されることを現場計測およびモデル実験から確認している。石田ら(1991)も、空洞掘削時にひずみを計測することにより、応力集中帯と免圧帯が形成されることを確認している。これらの現場計測結果を総括すると、空洞が適切な支保設計のもとで掘削される場合の力学的な安定性は、空洞周辺の岩盤によって保たれているとも言える。

著者らは、堆積岩地山に仕上がり内径6m・深さ150mの立坑を掘削する際に、岩盤内のひずみを経時的に計測することにより空洞周辺の応力場が変化していく過程を把握することを試みた。また、FEMによる軸対称弾塑性解析を実施し、原位置計測結果との比較検討を行った。以下、これらの結果について報告する。

2. 調査地点の地質概要および室内試験結果

2.1 調査地点の地質概要

立坑掘削地点の地層は、下位から上位に向かって約7000万年前に貫入した基盤岩の土岐花崗岩、その上に約2000万年前に堆積した土岐夾炭累層、明世累層、生俵累層そして約500万年前に堆積した瀬戸層群から成

っている。土岐夾炭累層は、主に花崗岩起源の砕屑性レキ岩相、凝灰質砂岩相、炭質相からなる。明世累層は、凝灰質中粒～細粒砂岩よりなり、生俵累層は凝灰質シルト岩からなる。瀬戸層群は花崗岩およびチャートなどのレキ岩相が主体である。また、調査地点には、走向N80°E、傾斜60°の月吉断層がある。この断層は、南側の地層が北側の地層の上に衝上している逆断層で、その垂直落差は30mという特徴を有している。月吉断層は立坑の掘削深度がG.L-120m付近に達した時点で現れる。

2.2 室内試験結果

立坑を掘削する前に、立坑中心部に調査ボーリングを行なった。この調査ボーリングで採取したコアを用いて一軸圧縮試験・透水試験などの室内試験を実施した。一軸圧縮強度については、最大が8.4MPa、最小が3MPaで、平均的には6MPaであった。透水係数については、最大が 10^{-7} cm/sのオーダー、最小が 10^{-10} cm/sのオーダーで、平均的には 10^{-8} cm/sのオーダーであった。

3. 計測方法

3.1 計測位置

計測は立坑壁面から半径方向への離れが2.06mで月吉断層の上層(G.L-106.5m)および下層(G.L-124m)の2か所に埋設したひずみ計を介して行なった(図-1参照)。

3.2 計測機器

計測には電中研式地圧ゲージとして使用実績が多い埋設型多軸岩盤ひずみ計を用いた(金川他,1986)。このひずみ計には、図-2のように8成分のひずみゲージがシステムティックに配置されている。

3.3 計測方法

計測は以下の手順で行なった。

1) 立坑を第2計測坑道の底盤レベルまで掘削し、さらにそのレベルで第2計測坑道(幅4.5m、高さ4.5mの楕円形状)を掘削した後、第2計測坑道から鉛直下向きのボーリング孔を2孔掘削する(図-1参照)。

2) 多軸岩盤ひずみ計を2つのボーリング孔にそれぞれ挿入し、ボーリング孔とひずみ計の間の空隙部分にはセメントモルタルを注入した。ひずみ計は図-2に示すNo.1ゲージが南北方向、No.2ゲージが東西方向となるように埋設した。

3) 第2計測坑道の底盤レベルから立坑未掘削部分が掘進される時、図-1に示すように先行埋設した多軸岩盤ひずみ計を介して、連続的にひずみを計測した。

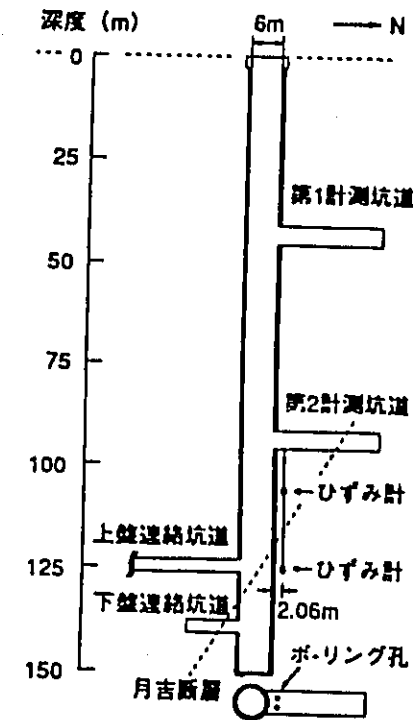


図-1 計測位置

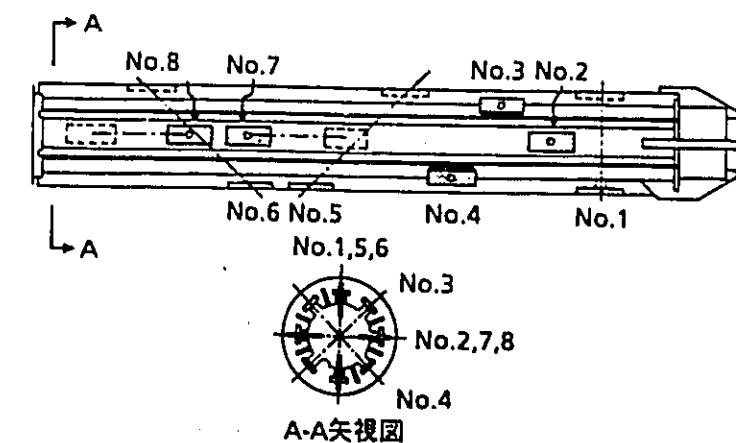


図-2 多軸岩盤ひずみ計におけるゲージ位置の概念図

4. 計測結果および数値解析

4.1 掘削に伴うひずみの変化

図-1の月吉断層の上側に埋設した多軸岩盤ひずみ計を介して立坑掘削中に計測したひずみのうち、No.1~No.4を立坑切羽位置との関係で示すと図-3のようになる。図の横軸は、漸次進行する立坑切羽位置を立坑直径Dで除し無次元化して整理したものであり、負符号は立坑切羽がひずみ計埋設レベルより手前であることを意味している。縦軸のひずみは引張り側を正、圧縮側を負で表している。図-3より、立坑切羽がひずみ計の埋設レベルに到達する直前から各成分のひずみが急激に変化するが、その後は切羽の進行とともに平衡状態に至っていることがわかる。

つぎに、観測された8成分のひずみから立坑の半径・接線・掘進方向におけるひずみ成分 $\epsilon_r, \epsilon_t, \epsilon_z$ を求め、これらを立坑切羽位置の関係でプロットしたものが図-4である。図-4より、立坑切羽がひずみ計を埋設したレベルに到達する直前から、半径方向のひずみ ϵ_r は引張り側に、接線方向のひずみ ϵ_t は圧縮側に変化していくことがわかる。一方、掘進方向のひずみ ϵ_z はほとんど変化していない。このようなひずみの変化は、谷本ら(1982)が概念的に指摘している空洞壁面を空洞中心に引きずり込む掘削外力の作用によって生じたものと考えられる。

さらに、計測したひずみから主ひずみ $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ を算出し、その方向をウルフネット(上半球投影法)上にプロットすると図-5のようになる。ただし、引張りひずみを○印、圧縮ひずみを●印で示した。図-5において、例えば最大主ひずみ ϵ_1 の方向は、立坑切羽がひずみ計埋設レベルに到達する前には(-0.4Dの場合)、方位がほぼ南北方向で南から上向きに約60°の傾斜を有しているが、切羽の通過とともにこの最大主ひずみ ϵ_1 の方向が大きく変化していることがわかる。そして、切羽通過後はほとんど変化が見られず、最終的には最大主ひずみ ϵ_1 の方向は(+3Dの場合)、方位が北からほぼ20°で傾斜が20°程度となる。立坑壁面を立坑中心に引きずり込む掘削外力のもとで生じた主ひずみの方向は、図-1に示している月吉断層の影響を受けているものと考えられる。

4.2 FEMによる数値解析

立坑掘削に伴う周辺岩盤挙動の計測結果を理論的

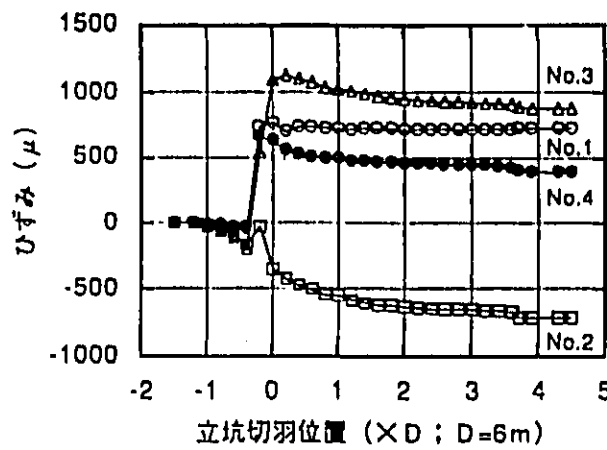


図-3 計測されたひずみと切羽位置の関係

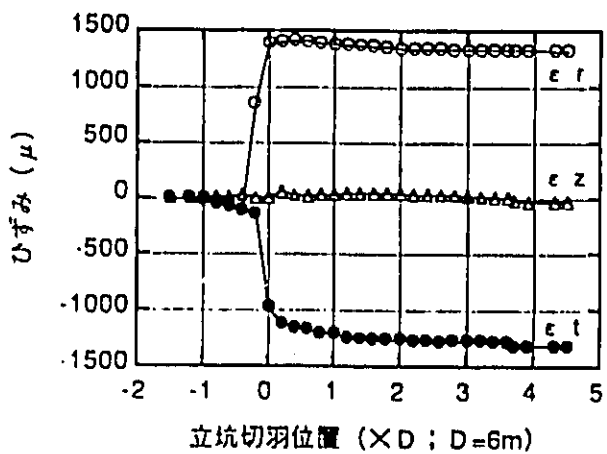


図-4 ひずみ成分と切羽位置の関係

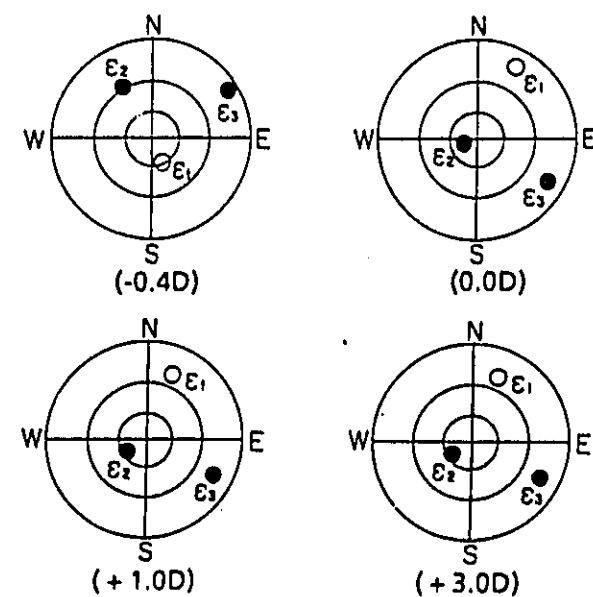


図-5 立坑掘削に伴う主ひずみ方向の変化

に解釈する目的で、FEMによる弾塑性解析を実施した。解析は切羽の進行を考慮でき、しかも簡便に実施できる軸対称とした。降伏条件式にはDrucker-Pragerの規準を用いた。覆工コンクリートを考慮するために掘削毎に軸対称シェル要素を付加した。初期応力は側圧係数を1.0とした自重解析により求めた。解析対象領域の岩盤および覆工コンクリートの入力物性値を表-1に示す。このうち岩盤の弾性係数は、多軸岩盤ひずみ計埋設位置周辺で行なった孔内載荷試験結果の平均的な値を用いた。ポアソン比と単位体積重量は室内試験結果より決めた。粘着力と内部摩擦角はBieniawski(1979)の岩盤分類に基づいて決めた。また、覆工コンクリートの弾性係数は、土屋(1985)の提唱する値を用いた。解析による立坑の半径・接線・軸方向のひずみ成分 $\epsilon_r, \epsilon_t, \epsilon_z$ を立坑切羽位置の関係でプロットすると図-6のようになる。解析結果(図-6)と計測結果(図-4)を比較すると、各ひずみ成分が変化していく傾向はよく一致していると言える。

つぎに、図-6に対応した応力成分 $\sigma_r, \sigma_t, \sigma_z$ を切羽位置の関係で示すと、図-7のようになる。掘削外力の解放により半径方向には引張り応力が、接線方向には圧縮応力が生じるが、切羽の進行に伴って平衡状態に至っていることがわかる。

4.3 計測したひずみに基づく応力の変化

計測したひずみから、立坑切羽の進行に伴う応力場の変化過程を考察するために、Hooke則により応力を算出した。計算に用いた弾性係数は、ひずみ計埋設位置周辺で実施した孔内載荷試験の結果に基づいて決めた。また、ポアソン比は0.3とした。算出した立坑の半径・接線・軸方向における応力成分 $\sigma_r, \sigma_t, \sigma_z$ を切羽位置の関係でプロットすると図-8、図-9のようになる。ただし、図-8は断層上側での応力変化を、図-9は断層下側での応力変化を示したものである。図-8に示した計測結果と図-7に示した解析結果を比較すると両者の傾向はおおむね一致していることがわかる。

図-9に示した断層下側での計測結果は、立坑切羽がひずみ計埋設レベルに到達するまでは断層上側における計測結果と同様な挙動をしている。しかしながら、切羽が計測位置を通過すると3成分の応力は圧縮側に転じ、図-7に示した解析結果とは異なる現象を示している。

表-1 入力物性値一覧

岩	単位体積重量 γ_k	15.7	kN/m ³
	側圧係数 K	1.0	
	弾性係数 E_k	1,086	MPa
	ポアソン比 ν_k	0.3	
盤	粘着力 c	0.3	MPa
	内部摩擦角 ϕ	0.52	rad.
覆	弾性係数 E_c	3,333	MPa
	ポアソン比 ν_c	0.2	
工	厚さ t	0.4	m

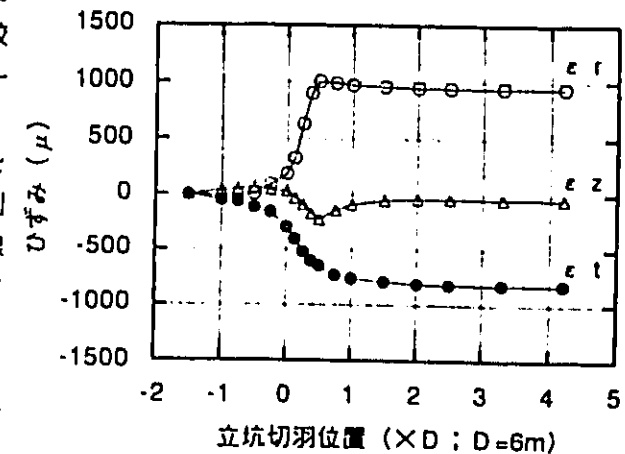


図-6 FEMによるひずみ計埋設位置のひずみの変化

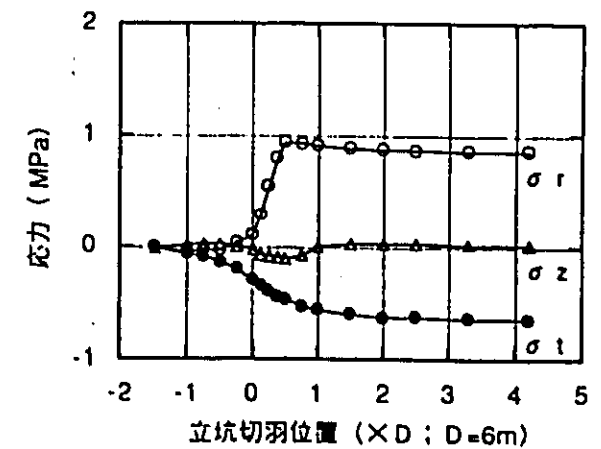


図-7 FEMによるひずみ計埋設位置の応力の変化

弾性波トモグラフィーによる地質構造調査 —断層のある堆積岩盤への適用例—

動力炉・核燃料開発事業団 正会員 ○杉原 弘造
 正会員 吉岡 尚也
 大成建設株式会社 正会員 森田隆三郎
 正会員 川上 純

Geologic Survey Using Seismic Tomography
 - Application to Sedimentary Rocks with a Fault -

Kozo SUGIHARA, Power Reactor And Nuclear Fuel Development Corporation
 Naoya YOSHIOKA, Power Reactor And Nuclear Fuel Development Corporation
 Ryuzaburo MORITA, Taisei Corporation
 Jun KAWAKAMI, Taisei Corporation

Abstract

Application of seismic tomography to sedimentary rocks of the Neogene period was studied. Since the presence of a fault had been known in the surveyed area, a possibility to detect a fault was also investigated. The seismic tomography was performed using 4 boreholes, and its results were analyzed in different cross sections.

The seismic profiles obtained by tomography survey were consistent with the geologic structure obtained from core observations. In addition, the location of the fault was well detected in several sections. It was however, difficult to detect the location of the fault, if neither of the two boreholes of a section cross the fault. In this case, the results of tomography survey may cause incorrect interpretation of the geologic structure.

1. はじめに

弾性波トモグラフィーは、岩盤内部の構造や物性の分布を可視化できる調査技術として注目されている。解析手法については、各方面で盛んに研究が進められ、精度の高い解析が可能となっている。一方、現場への適用性については、多くの実測事例をもとに検討する必要があるが、その数はまだ少なく十分な検討はなされていない。

筆者等は、弾性波トモグラフィーの原位置適用に関する一連の研究を行っている¹⁾²⁾。今回は、砂岩・泥岩の互層および礫層から成る堆積岩盤において、4本のボーリングを用いて弾性波トモグラフィーを実施し、地質構造調査への適用性について検討した。また、調査領域内にある断層の検出の可能性についても検討を

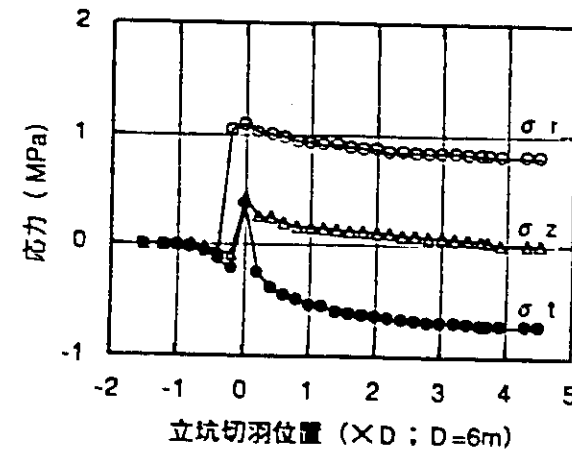


図-8 立坑掘削に伴う応力の変化(断層上側)

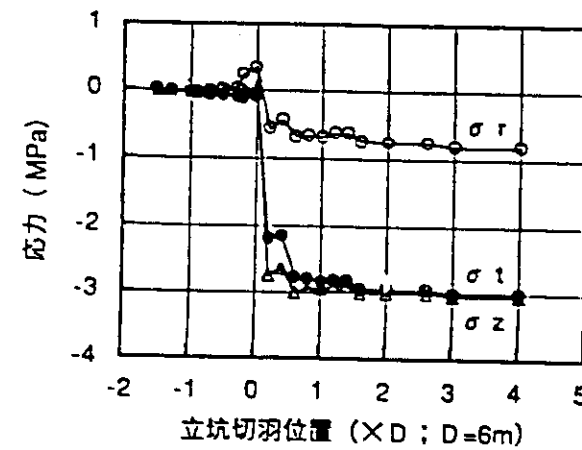


図-9 立坑掘削に伴う応力の変化(断層下側)

5. 考察

Sauer ら(1985)は、空洞周辺に複数の応力集中帯と免圧帯が交互に形成されることを確認しているが、断層下側での応力変化は空洞近傍に形成される応力集中帯に当たるものと考えられる。さらにSauer ら(1985)は、岩盤の不連続性が卓越するほど応力集中帯が顕著に現れることを指摘しているが、多軸岩盤ひずみ計を埋設したボーリング孔のコアを観察した結果、ひずみ計埋設位置周辺の平均的なき裂本数は断層の上側で1.4本/m、断層の下側で3.4本/mであったため、図-9に示した応力変化は岩盤の不連続性の影響を強く受けたものと考えられる。このような現象は、FEM解析では求められていない。しかし、図-8に示したように、き裂頻度が1.4本/m程度の岩盤状態での応力変化は、連続体を仮定したFEM解析でシミュレーションできることがわかった。

6. おわりに

空洞の力学的な安定性を評価することを目的として、原位置に先行埋設した多軸岩盤ひずみ計により、立坑掘削に伴う周辺岩盤における応力再配分過程の把握を試みた。今後は、再配分後の応力状態と空洞の長期安定性との関連性について検討していきたい。

参考文献

- 1) Sauer・谷本(1981)「応力測定と掘削による応力再配分過程」トンネルと地下 Vol.12-4 pp.57-64
- 2) 石田・金川・矢田・田中(1990)「空洞掘削時の応力再配分に着目した岩盤ゆるみ域測定法の提案」第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要集 pp.227-231
- 3) 金川・日比野・石田(1986)「オーバーコアリング法による3次元地圧計測法〜埋設型8成分ゲージの開発〜」電力中央研究所報告 385033
- 4) Bieniawski(1979)「The Geomechanics Classification in Rock Engineering Application」Proc.Int.Cong.on Rock Mechanics pp.41-48
- 5) 土屋(1985)「トンネル設計のための支保と地山物性値に関する研究」土木学会論文報告集 Vol.364 pp.31-40
- 6) 谷本・島(1982)「切羽周辺での地山挙動を考慮したトンネル支保の基本概念」土木学会論文報告集 Vol.325 pp.93-106

行った。

2. 現地調査の概要

調査は、岐阜県土岐市に位置する東濃鉱山内に掘削した立坑および横坑を利用して行った。調査位置の地質は新第三紀の堆積岩で、ほぼ水平に堆積した砂岩・泥岩の互層および礫層から構成されている。また、図-1に示すように、断層(走向N80°E、傾斜60°S、落差30m)が存在している。

弾性波トモグラフィーは、図-1に示すように、上部横坑から掘られた4本の長さ80mの傾斜ボーリング(GT1~GT4)を使用して行った。この4本のボーリングは上面が2m、下面が約40mの正方形となる正四角錐状の形を形成する配置となっている。弾性波トモグラフィー調査はこの4本のボーリングで作られる断面のうち、GT1~GT3、GT2~GT3、GT3~GT4の3断面について、上部横坑以深を掘削する前に第1回目を、掘削後に第2回目を行った。

図-2に各調査断面における測点の配置および断層の推定位置を示す。第2回目の調査断面GT3-4は下部横坑の切羽付近を通過し、GT2-3断面は下部横坑の中央部を斜めに横断している。起振点は各ボーリング孔内に4m間隔、受振点は2m間隔に設置した。また下部横坑掘削後の調査では、坑道内の壁面にも測点を設けた。断層は、調査断面GT3-4では水平から約20度、GT2-3およびGT1-3では55~60度で交差していると推測される。

以上のように調査断面を配置し、

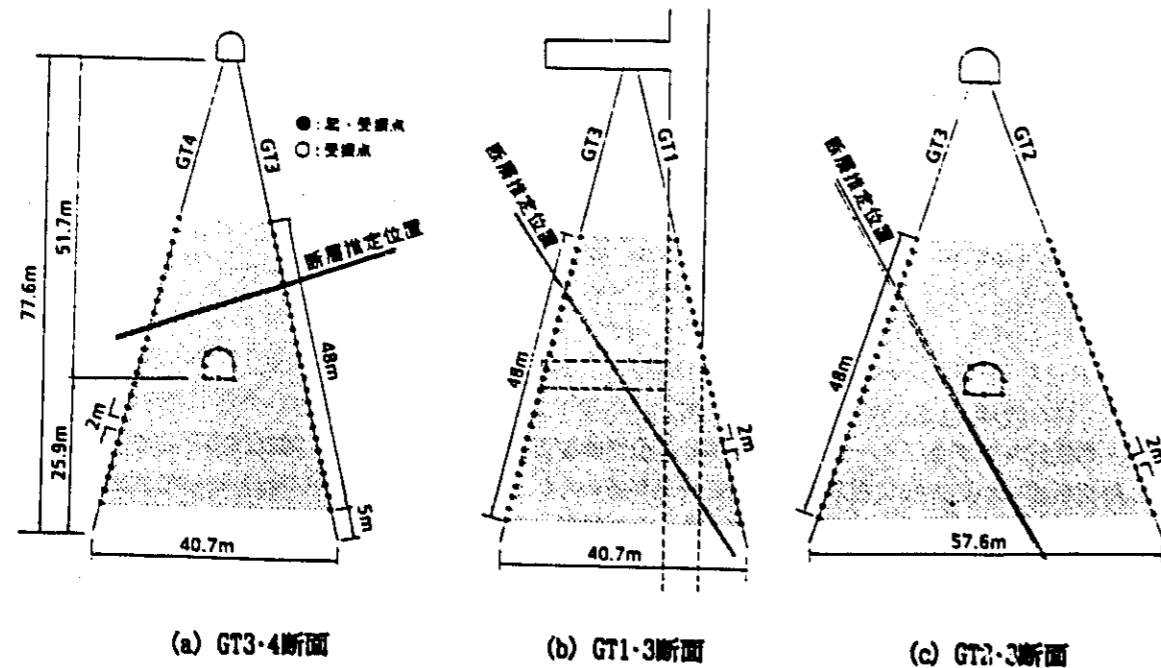


図-2 各調査断面における測点配置と断層推定位置

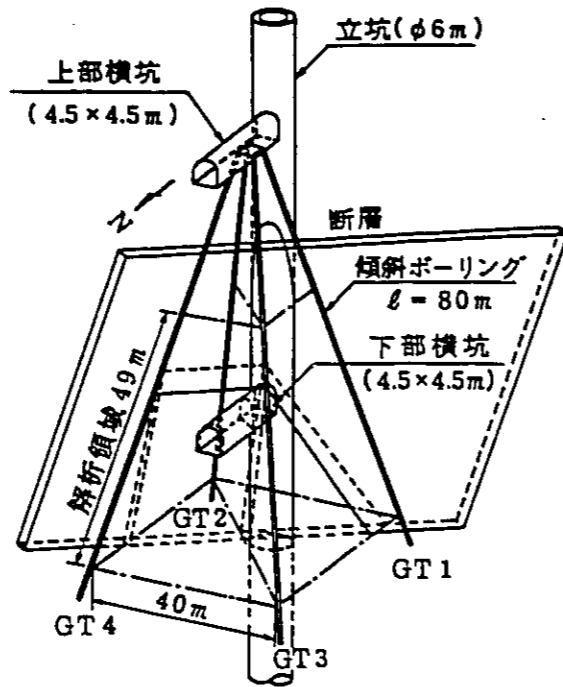


図-1 トモグラフィー調査断面の配置

- 1) 測点配置と断層位置の関係による断層の検出程度
 - 2) 掘削による空洞周辺の岩盤状況の変化
 - 3) 調査領域内に新たに測点を配置した場合の結果の違い
- 等について検討できるようにした。

3. 調査結果および検討

トモグラフィー解析にはCG法(共約勾配法)を用い、ホイヘンスの原理に基づく波面形成法を使用した。解析メッシュは、3m×3mとしたが、空洞周辺部ではより詳細な岩盤状況を知るために、最小1.4m×1.1mの細かいメッシュを使用している。

図-3,4にトモグラフィー解析結果を示す。図中には、ボーリングコアの観察結果から得られた岩相を示してある。また、解析領域内にある断層の推定位置を破線で示してある。ボーリング孔GT1とGT3については、

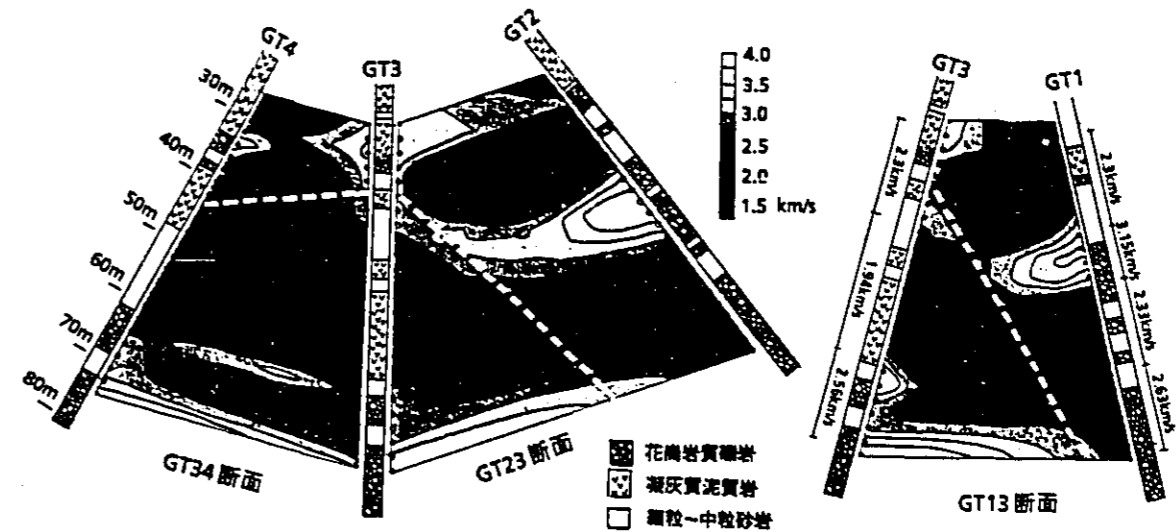


図-3 第1回目の弾性波トモグラフィー解析結果

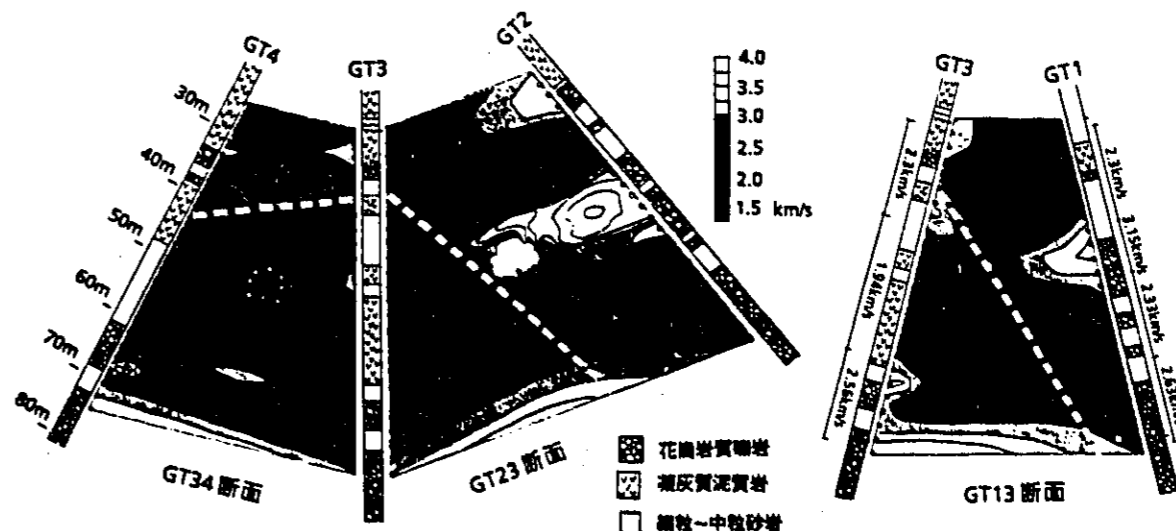


図-4 第2回目の弾性波トモグラフィー解析結果

孔底で起振し同一孔内で受振して測定したボーリング孔沿いの弾性波速度も示した。

3.1 ボーリング孔沿いの地質との対比

図-3に示したボーリング孔沿いの弾性波速度は、測定結果によると花崗岩の礫層部分では2.5~3.2km/sであり、他の部分では2.3km/s前後であると考えられる。また、ボーリング孔GT3の中央付近では2km/s以下となっており、凝灰質の優勢な部分は比較的低速度であると考えられる。

トモグラフィー解析結果においても、凝灰質の優勢な部分は低速度に、花崗岩の礫層部分は高速度と解析されており、地質状況およびボーリング孔沿いの測定結果と良く一致している。ただし、第1回目のGT1-3およびGT2-3断面のボーリング孔GT3の深度35m~40m付近では、凝灰質の優勢な部分が3.0km/s前後の高速度部と解析されており、地質との対応が悪い部分が一部認められる。各解析断面で共通なボーリング孔GT3沿いの速度分布は、全体的に良い整合性がみられる。

3.2 断層の検出について

GT3-4断面では断層推定位置に低速度帯が検出されている。一方、GT1-3およびGT2-3断面では、断層推定位置にその方向に対応する速度変化帯があるが、逆に高速度帯となっている。

一つのボーリング孔としか交差していない高角度の傾斜層は、検出されにくいと言われており、GT1-3およびGT2-3断面がその場合に相当していると考えられる。実際に図-5のようにGT2-3断面と同じパターンで低速度帯を含んだモデルを解析すると、図-6のように低速度帯が検出されず、断層以外の領域にもゴーストが現れた。

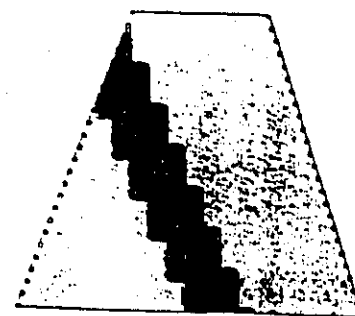


図-5 断層モデル

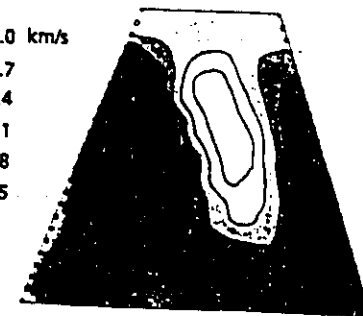


図-6 断層モデルの解析結果

GT2-3断面の第2回目の解析結果では、解析領域内部に測点を新たに

設けたため、断層付近にある高速度帯が消えて実際の地質構造に近く解析されている。しかし、断層で区切られた領域のみを通過する波線が存在しないため、断層はGT3-4断面のように検出されていない。

以上のように、測点の配置によっては断層が検出されないばかりでなく、他の領域にも悪影響を及ぼす可能性があることが分かる。前述したボーリング孔GT3の深度35m~40m付近における地質と解析結果との不一致は、断層によるゴーストが影響しているものと考えられる。

3.3 領域内部の地質の把握

図-7には、下部横坑掘削時に得られた下部横坑と解析断面GT2-3との交差部の地質分布を示す。GT2-3断面の第2回目の解析結果をみると、ボーリング孔GT2の中央部の礫層は、ほぼ水平に分布しているが、横坑周辺では横坑の上方のみに分布し、断層の手前で途切れていると解釈できる。これは、図-7の横坑周辺の地質状況と良く一致している。また、横坑の下部および断層側には、掘削の影響によるとみられる低速度帯が

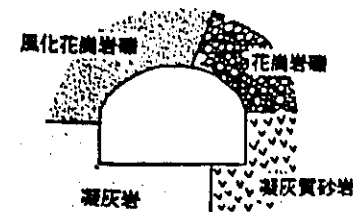


図-7 下部横坑の地質状況

現れており、トモグラフィー解析は領域内部の地質状況を良く示していると考えられる。一方、第1回目の解析結果は、解析断面の右側は第2回目とほぼ同じ速度分布となっているが、断層によ

るゴーストのため、断層は途中で折れ曲がり上方に連続しているという誤った解釈をする可能性があり、注意が必要であることが分かる。

3.4 空洞の把握

岩盤内の空洞の検出の可能性について検討する。図-8は、第2回目のGT2-3断面において、空洞内部からの波線を使用せず、第1回目と同様にボーリング孔からの波線のみを使用して解析した結果である。図-3の第1回目の解析結果と比較すると、中央付近の速度がやや低下しているが、空洞は検出されていない。

また、図-8と図-3の速度値の比をとり、空洞掘削による弾性波速度の変化率を求めると、図-9のようになる。解析断面の中央部に、水平方向の速度が低下した部分が認められるが、空洞の形は検出されていない。

弾性波トモグラフィーにより岩盤内の空洞が解析されたという報告もあるが、今回の調査領域は岩盤の速度コントラストが強いため、比較的小規模な空洞が検出できなかったと考えられる。

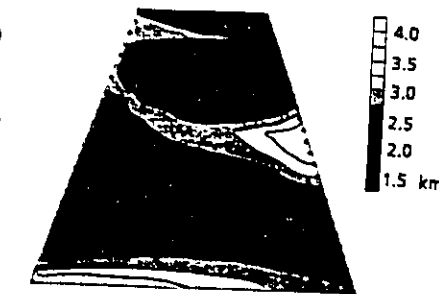


図-8 第2回目のGT2-3断面の解析結果 (空洞からの波線使用せず)

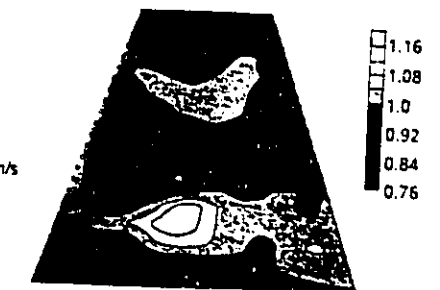


図-9 GT2-3断面の速度変化率 (空洞からの波線使用せず)

4. まとめ

砂岩・泥岩の互層および礫岩から成る堆積岩盤において、4本のボーリングを用いて弾

性波トモグラフィーを実施した。トモグラフィー解析結果は、ボーリング孔沿いの地質状況とほぼ一致しており、地質状況を良く示していた。ただし、断層付近では、地質との不一致がみられた。

解析領域内に断層がある場合は、断層が2本のボーリング孔と交差する場合は検出可能であるが、1本のボーリング孔としか交差していない場合は、断層が検出されないばかりかゴーストが現れ、誤った解釈をしてしまう可能性があることが分かった。また、今回のように速度コントラストが強い場合は、空洞の検出は困難であることが分かった。

以上の結果から、不均質岩盤でトモグラフィー調査を行う場合は、コア観察やボーリング孔沿いの弾性波速度調査などにより地質状況をよく検討して、総合的に評価することが必要である。また、解析結果を評価する場合には、地質状況との小さな不一致にも留意することが必要である。

<参考文献>

- 1) 二宮、杉原、伊藤、亀村、青木：ジオトモグラフィーによる地下空洞周囲緩み領域の評価について、第22回岩盤力学に関するシンポジウム、1990
- 2) K. Kamemura, T. Aoki, K. Ito, K. Sugihara, Y. Ninomiya: Field measurement and its numerical interpretation of disturbed zone around drift, International Association for Computer methods and Advances in Geomechanics, 7th Conference, 1991
- 3) 小澤、山田、佐々：傾斜層検出への孔間弾性波トモグラフィの適用に関するシミュレーション、物理探査学会第80回学術講演会論文集、1989
- 4) 高橋：弾性波トモグラフィー—岩盤調査への適用例—、平成元年度第1回岩盤力学委員会研究報告会「岩盤調査におけるジオトモグラフィー技術の現状」、1989

立坑掘削影響試験 -多点式変位計による岩盤の変位調査-

Shaft Excavation Effects Project
-Investigation on Rock Mass Displacement Using Extensometers-

動燃事業団 ○佐藤稔紀 松井裕哉 杉原弘造 吉岡尚也
中部事業所 SATO Toshinori MATSUI Hiroya SUGIHARA Kozo YOSHIOKA Hisaya

1. はじめに

坑道掘削に伴う岩盤や地下水流動への影響を把握するために、東濃地域において深度150mの立坑を掘削し、調査を行っている。これまでに原子力学会において、試験の全体計画¹⁾や掘削影響領域の力学的・水理学的特性変化²⁾などについて報告した。今回は、掘削に伴う岩盤の変位に関し、M3断面(深度:113m)における計測結果を基に報告する。

2. 調査内容

立坑をM3断面まで掘削した後(図-1)、多点式変位計を設置するためのボーリング孔を水平方向に6孔掘削した。コア観察あるいはポアホールスキャナーによる孔壁観察を行った後、多点式変位計を設置し、計測を行った。

3. 結果と考察

図-2にM3断面で観測された岩盤内変位を示す。図示した変位は計測断面から立坑切羽が立坑径D(=6m)の3倍進行した時のものである。この時点では変位の変化はほぼ収束している。また、観測された変位は断層がある方向とない方向では変位の大きさが異なる。これらの現象を理解するために、FEM軸対象解析を行った。この結果、変位の切羽進行に伴う変化は実測とほぼ一致した。また、コア観察や孔壁観察の結果、断層を含んだ孔ではき裂が多く観察された。同様の結果がM4断面でも得られた。変形挙動に影響を及ぼす因子として、応力状態や覆工の状況等が考えられるが、これらについては明確な関係は得られなかった。これらのことから、立坑掘削に伴う岩盤の変位には、断層やき裂の存在が大きく関与していることが分かった。

4. 今後の予定

長期観測を続けるとともに、変位計測に基づく影響領域の評価手法の検討と数値解析による現象の理解を進める。

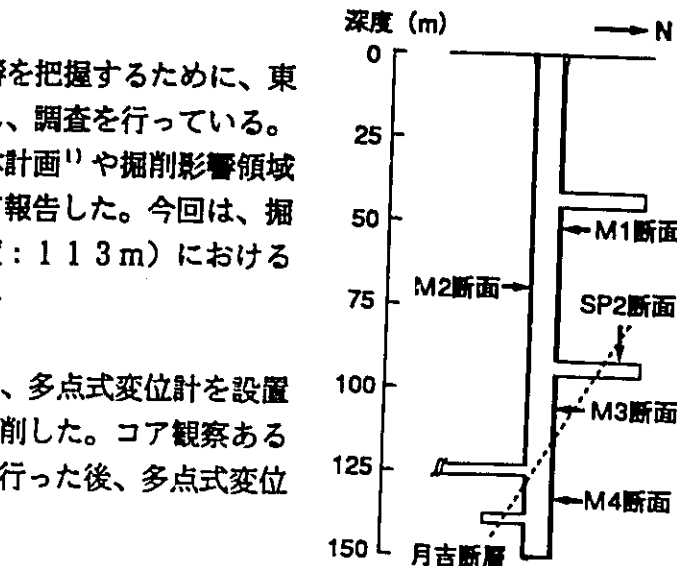


図-1 変位計測断面の位置図

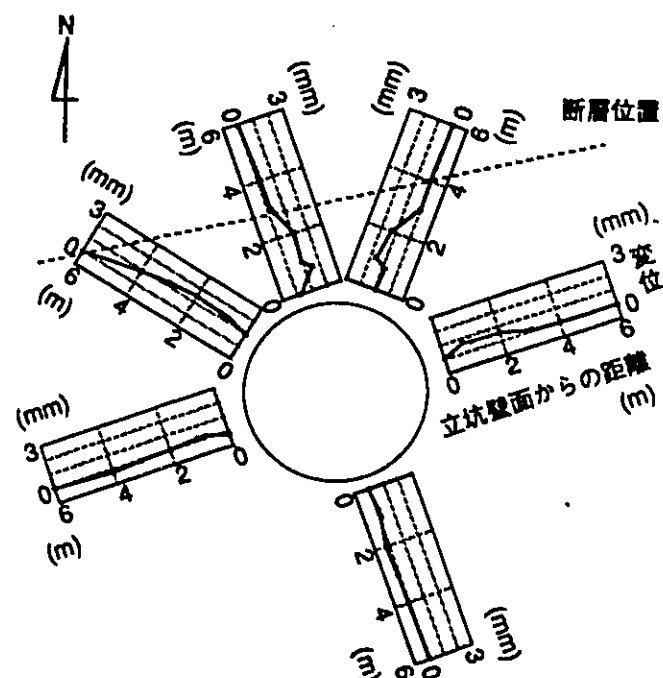


図-2 M3断面における岩盤内変位

5. 参考文献

- 1) 杉原他: 原子力学会1991年春の年会、K34
- 2) 松井他: 原子力学会1991年秋の年会、J39

PRELIMINARY RESULTS OF STUDY ON EXCAVATION RESPONSES IN SEDIMENTARY ROCK IN JAPAN

Kozo SUGIHARA, Hisaya YOSHIOKA, Hiroya MATSUI and Toshinori SATO (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation(PNC), Chubu Works, Japan)

Excavation of a vault is considered to cause some influences on the rock mass around it. It is essential to elucidate the excavation responses in order to assess the performance of geological disposal system of High Level Radioactive Waste and to design, construct and seal a repository. PNC excavated a shaft with a diameter of 6m and a depth of 150m in the Neogene sedimentary formation which is composed mainly of tuffaceous sandstone and mudstone, partly of conglomerates.

As a part of the Shaft Excavation Effects (SEE) Project, rock mass behaviour was studied aiming at evaluation of the influence on mechanical and hydrological properties of the rock mass adjacent to the shaft and understand the mechanism which causes the influence. In this study, the following measurements and numerical analysis were performed: (1)displacement; (2)rock mass stress variation; (3)permeability; (4)deformation modulus; (5)fracture distribution; (6)seismic velocity distribution; etc.

The result of the study implies that the rock mass was influenced by the shaft excavation within 1m from the shaft wall. In this zone, permeability and deformation modulus were changed and some fractures were generated. The rock stress variation are consistent with the result of two-dimensional FEM simulation. However, the displacement distribution could not be analysed by the simulation, as it was really complicated. Low seismic velocity zone was detected around the shaft by investigation of seismic tomography.

The study provided the valuable information on excavation responses. However, the following subjects are required to be examined: (1)accuracy and quality of data; (2)method for interpretation of the obtained data; (3)measurement design; (4)method for numerical simulation of rock mass heterogeneity. Furthermore, the following issues should be considered in the future; (1)relationship among displacement, rock mass stress and mechanical and hydrological properties; (2)long-term rock mass behaviour including creep characteristic.

•Speaker's name and mailing address: (Please type)
Kozo SUGIHARA

Chubu Works, Power Reactor & Nuclear
Fuel Development Corporation
959-31 Sonodo, Jyorinji, Izumi-cho,
Toki-shi, Gifu, Japan

Telephone: 0572-54-1271

Fax: 0572-55-4114

Telex: None

•Symposium Session Number and Session Title (first 2 or 3 words):

No. of 1st choice: II-19-3 Oral Poster Either (Check) Title: Engineering geology

No. of 2nd choice: II-19-6 Oral Poster Either (Check) Title: Advanced method

•No session fits my topic. (Please check)

•I submit another abstract of which I am the first author: Yes No (Please Check)

An Application of Geotomography to Sedimentary Rock with a Fault

Jun KAWAKAMI and Shigeru IHOSHI (Taisei Corporation, Japan); Kozo SUGIHARA and Naoya YOSHIOKA (Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation (PNC), Japan)

Attention has recently been drawn to geotomography method as an investigation technique to visualize geological structure and material properties of underground space. Theoretical studies of geotomography within the last decade have enabled to provide analytical results with high accuracy. On the other hand, there are very few field applications of the method.

Applicability of seismic tomography was studied in sedimentary rock of the Neogene period. Since the presence of a fault had been known in the surveyed area, a possibility to detect a fault was also investigated. The seismic tomography was performed using 4 boreholes (GT1-GT4).

Fig.1 shows the seismic velocity profiles obtained from the tomography survey. The results are consistent with the geological structure obtained from core observations, except in an area near GT3 at the depth of about 40m. In the section between GT3 and GT4, the location of the fault (indicated by dashed line in Fig.1) is detected in a low velocity zone. In the section between GT2 and GT3, however, the fault is located in a high velocity zone.

These results indicate that the location of a fault can be detected by the seismic tomography if both of boreholes intersect the fault. This inference is supported by the numerical analysis using a model with a fault intersected by one of two boreholes. Geotomography results should be evaluated together with the results of other surveys such as core observations and geophysical surveys in boreholes.

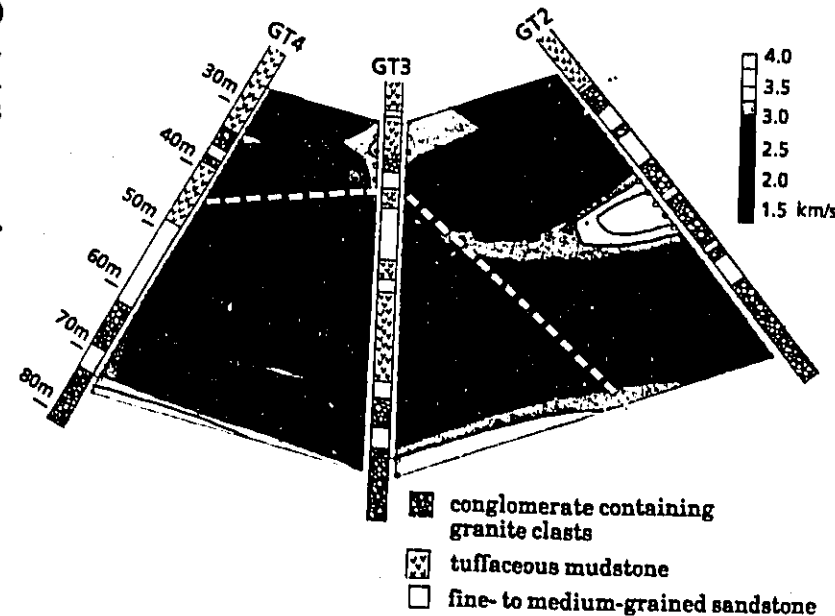


Fig.1 Seismic velocity profiles between GT2,GT3 and GT4

弾性波を用いた岩盤特性調査法の研究

— 断層のある堆積岩盤への弾性波トモグラフィの適用とモデル解析 —

動燃事業団中部事業所 ○長谷川健 仙波毅 杉原弘造

1. はじめに

坑道を掘削すると、その周辺岩盤の特性が変化すると考えられ、地下空洞の設計・建設、空洞の安定性の評価上、岩盤特性の変化を研究することは重要である。今回、岩盤の特性を調査する手法の一つである弾性波トモグラフィの適用試験とモデル解析を実施したので、その結果について報告する。

2. 適用試験の結果

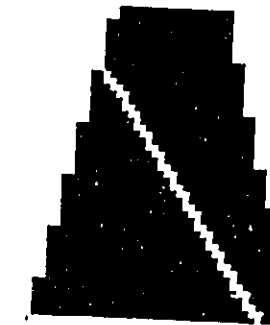
試験は、弾性波トモグラフィによる、1) 地質構成・岩相の把握の可能性、2) 岩盤中の断層(月吉断層)の検出の可能性、を検討する目的で実施した。その結果、弾性波速度の違いから岩相の把握が可能であることが確認された。しかし、月吉断層の位置には断層の存在を直接示すような低速度帯は得られなかった。さらに、月吉断層の位置の近傍に高速度帯が解析されたが、これが岩芯の観察結果と一部整合しておらず、断層に起因する偽像である疑いが生じた。

3. モデル解析結果

月吉断層を幅の狭い低速度帯として表現し、モデル解析を行った。モデルでは適用試験結果に基づき周囲の岩盤の弾性波速度を2500m/secとし、低速度帯の弾性波速度は1500m/secと設定した(図1(a))。解析結果(図1(b))にはこのような低速度帯は現れておらず、逆に、解析領域の左上部を除いて岩盤の弾性波速度が実際の値よりもやや低い値(約2450m/sec)として解析された。しかし、高速度の偽像はまったく現れず、前節で述べた高速度帯は断層に起因する偽像ではないことが確認できた。

低速度帯が解析できなかったのは、今回用いた発信点・受信点の組み合わせ(図2)では、ほとんど全ての波線が低速度帯を通過するため、低速度帯の幅に関する情報がほとんど得られなかったためであると考えられる。

はせがわ けん、せんば たけし、すぎはら こうぞう



(a) 月吉断層モデル



(b) 解析結果

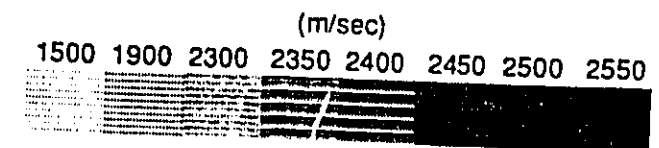


図-1 モデル解析結果

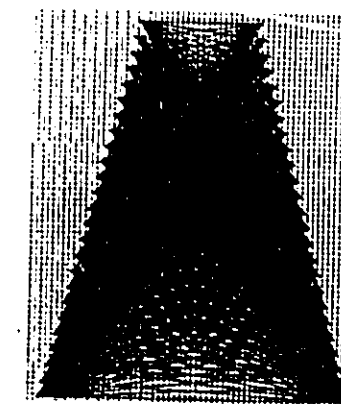


図-2 発信点・受信点の組合せ

4. 今後の予定

モデル解析を継続し、弾性波トモグラフィの適用性の把握や最適調査仕様の検討を行う。

5. 参考文献

- 1) 杉原他：第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、1992

K 35

東濃地域における立坑掘削影響試験
— 立坑掘削に伴う水理学的影響調査研究の概要 —
Shaft Excavation Effect Project Tono Area
Outline of the shaft excavation effect project on hydrology

動燃事業団 〇 柳沢 孝一 杉原 弘造 斎藤 章 大沢 英昭 今井 久
Yanagizawa Koichi, Sugihara Kouzo, Saito Akira, Ohsawa Hideaki, Imai Hisashi.
中部事業所 中島 誠 尾方 伸久 中野 勝志 長谷川 健 仙波 毅
Nakashima Makoto, Ogata Nobuhisa, Nakano Katsushi, Hasegawa Ken, Semba Takeshi.

1. はじめに

近年、地下深部岩盤を対象としたいろいろな地下空間利用計画が注目されている。これに係わる技術的課題の一つに地下水流動問題があり地下施設の設計・建設などを適切に行うためにも、立坑や水平坑道などの掘削による岩盤および周辺岩盤に含まれる地下水への影響を正確に把握することが重要である。このため現在動燃事業団・中部事業所では立坑掘削影響試験として東濃鉾山敷地内に仕上がり内径6m・深さ150mの立坑を掘削し、この中で実現後の立坑掘削時の周辺岩盤の地下水の挙動の把握を目的とした原位置試験を実施し、立坑周辺の地下水の流動評価をおこなうべく以下の調査解析を実施している。

2. 調査解析方法

立坑掘削による水理学的影響を評価するために、a.現象の把握(場の理解)、b.水理地質構造モデルの作成、c.地下水流動予測解析、d.長期観測値との比較検証という一連の手法システムを設定した。又、立坑掘削の影響範囲、地形等の境界条件を勘案して、立坑掘削地点を中心とした約300m四方の地域を調査対象区域として設定した。地表からの地下水涵養量を推測するため本地域地表部に広く分布する未固結層(瀬戸層群砂礫層)において9箇所に土壌水分計及び自由地下水面観測井を配置した。また、岩盤中(瑞浪層群泥岩、砂岩、礫岩及び花崗岩)の水理地質状況を把握する目的で、試錐孔を利用し、岩芯観察、物理検層、ポアホールテレビによる孔壁観察、水理学的な代表地点において原位置透水試験を行い透水係数の分布を調査し、さらに試錐孔内に配置されたマルチパッカー方式のケーシングシステム(MPケーシングシステム)により層別に止水された各帯水層毎の間隙水圧を連続的に計測している(図1)。

こうした調査結果をもとに三次元の水理地質構造モデルを作成し、多孔質媒体モデルによる非定常飽和不飽和三次元有限要素浸透流解析(使用プログラムコードTAGSAC)を実施し、立坑掘削前の水理学的状況を明らかにし、立坑掘削に伴う水理学的状況の変化を予測した。

3. 今後の予定

立坑周辺で観測している間隙水圧や立坑部の湧水量観測値等を用いてこうした予測解析結果の妥当性を検証し、水理学的影響評価システムを確立する予定である。



図1 立坑掘削影響試験 試錐孔及び水理観測システム図

J 40

立坑掘削影響試験(II)
— 立坑周辺に分布する難透水性岩盤の透水性と比抵抗値について —
Shaft Excavation Effect Project (II)
The relation between permeability and resistivity of the low permeable rock around the shaft

動燃事業団 〇 尾方 伸久 中野 勝志 大沢 英昭 柳澤 孝一
中部事業所 Ogata Nobuhisa Nakano Katsushi Ohsawa Hideaki Yanagizawa Koichi

1. はじめに

深部岩盤の水理学的特性を評価するためには、透水係数を原位置において正確に把握することが重要である。しかしながら、本地域に分布する岩盤の透水性は極めて低く、それを対象とした原位置透水試験は多大な時間と経費がかかり、計測区間も不連続となる。これに対し物理検層は岩盤の諸物性を迅速かつ連続的に計測できるという特徴をもっている。したがって、検層解析結果と透水試験結果を組み合わせることにより岩盤の連続的な水理学的特性が評価できる可能性がある。今回は、堆積岩で行った物理検層の一つである電気検層と原位置透水試験の結果との関係について検討した。

2. 調査解析結果

動燃事業団では、上述した透水性の低い岩盤を対象に「動燃式JFT水理試験装置」と「低圧ルジオン水理試験装置」を開発した。次に、これらの装置を用いて本地域に掘削した試錐孔を利用して水理試験を実施し、透水係数を求めた。電気検層については、堆積岩の透水性を支配していると考えられる粒度・固結度に注目し、大きく砂岩部と礫岩部に分け図-2電気検層と透水係数(礫岩部)の関係で検討した。また、礫岩部の中で直径1m以上の礫が認められる場合は、その礫の比抵抗値を削除した値を採用した。その結果、礫岩部においても砂岩部と同様に透水係数と比抵抗値との間に良い相関を得ることができた(図-1, 2)。これにより、本地域に分布する砂岩礫岩部の透水係数は電気検層による比抵抗値より推定可能であることが分かった。この結果から、比抵抗値は、岩芯、ポアホールテレビ観察結果と合わせて検討することにより、本地域の水理地質構造モデルの構築へ寄与しうることが明らかとなった。

3. 今後の予定

試錐孔での物理検層であるγ-γ検層、速度検層等は礫岩中の巨礫の分布が把握できるため、これらの検層結果と透水性の検討を実施する。また、深部岩盤の比抵抗分布を把握するための地表物理探査法である電磁法と組み合わせ、透水性の三次元的分布を推定できるようさらに技術開発を進めていく。

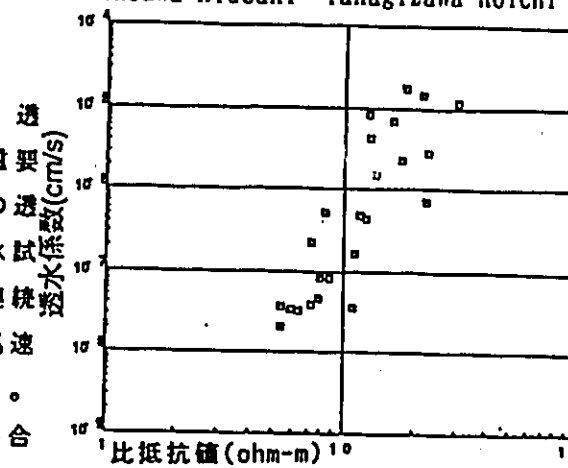


図-1 電気検層と透水係数(砂岩部)の関係

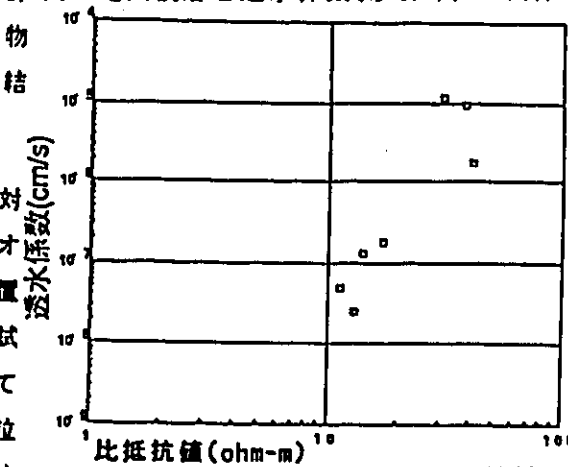


図-2 電気検層と透水係数(礫岩部)の関係

J 41

立坑掘削影響試験(Ⅲ)
 -立坑掘削に伴う水理学的影響予測解析-
 Shaft Excavation Effect Project (Ⅲ)
 The analytical prediction of the shaft excavation effect on groundwater flow

動燃事業団 中部事業所
 ○今井 久 Imai Hisashi
 柳澤孝一 Yanagizawa Koichi

1. はじめに

地下水流動に関する重要な研究として、モデルによる予測解析がある。この観点から、立坑周辺の表層部および下部岩盤の水理学的調査より作成した水理地質モデルを基に、立坑周辺岩盤に賦存する地下水への立坑掘削の影響を立坑掘削前・中・後に応じて非定常の地下水流動予測解析を行った。ここでその予測解析結果について報告する。

2. 解析方法

地下水流動解析は、各種水理調査より得られた水理地質モデルを基に多孔質媒体モデル(要素数3133, 節点数3924)による非定常三次元有限要素法浸透流解によって実施した。解析における境界条件は、表層調査より上部境界 0.5mm/日、MP計測による間隙水圧分布を側方境界、E10m以下を不透水性岩盤として設定した。また、立坑掘削による坑底部の深度(坑底部境界条件)の経時変化は図-1に示す掘削工程に沿うよう設定した。

3. 解析結果

立坑掘削工程に応じた立坑および立坑の南側に位置する既存坑道内への流出量の変化を図-2に示す。立坑への流出量は掘削に伴い増加し、掘削を中断すると低減する。また、断層を過ぎ高透水性部に達した時点より急激な増加を示し、最大流出量は30ℓ/minと予測される。既存立坑・横坑への流出量は掘削終了近くで緩やかに減少し、その減少量は10%未満と予測される。掘削終了時(486日)における立坑を含む鉛直断面でのピエゾ水頭のコンター図を図-3に示す。これによれば、立坑底部での動水勾配が大きく、立坑近傍で立坑部への収束的で流速の大きな流れが生じることが予測される。また、掘削による水頭変化の範囲は立坑より約100m以内であると予測される。

4. 今後の予定

現在、立坑掘削とあわせて立坑部への湧水量計測、MPシステムによる間隙水圧の観測を実施しており、これらの観測データと今回の予測解析結果を比較検討し、立坑掘削の水理学的影響評価のため、a.現象の把握、b.水理地質モデルの改良、c.地下水流動予測解析、d.長期観測値との比較検証というアプローチを順次進めていく予定である。

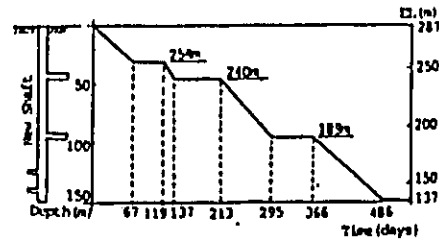


図-1 立坑掘削工程

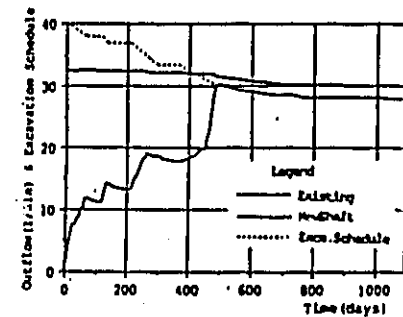


図-2 流出量変化

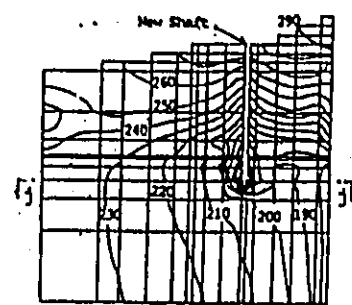


図-3 ピエゾ水頭コンター

(52) 岩盤浸透流解析の涵養量の算定について

動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所 ○中島 誠
 動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所 斎藤 章
 動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所 柳澤孝一
 埼玉大学 工学部 正会員 渡辺邦夫

Calculation of Recharge on Rock Mass Fluid Flow Analysis

Makoto NAKASHIMA ; Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation
 Akira SAITO ; Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation
 Koichi YANAGIZAWA ; Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation
 Kunio WATANABE ; Saitama University

Abstract

Recently, some projects has been planned to make facilities in deep underground space, because of its superior stable environment. To realise them, a lot of technical problems should be solved. Developing the techniques to evaluate the cavern excavation effect on the hydrological characteristics of rock mass surrounding the cavern, may be one of the most important problems.

Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation has been excavating a shaft 6m in diameter and 150m in depth, and has been investigating changes of hydrological characteristic in situ with a view to understand a movement of groundwater in rock mass surrounding the shaft.

In this study, recharge from unconsolidated formation situated in subsurface zone to rock mass had been calculated in order to decide the upper boundary conditions on rock mass fluid flow analysis. As the result of examination of water balance in subsurface zone, it is calculated that recharge is 207.5 mm/year (0.57 mm/day).

1. はじめに

近年、大深度地下開発に関する大きなプロジェクトが幾つか計画されているが、これらの研究開発課題の一つとして、地下空洞掘削に伴う周辺岩盤の水理学的影響の評価が挙げられる。動力炉・核燃料開発事業団中部事業所では、仕上がり直径6m、深さ150mの立坑を掘削し、実規模の立坑掘削時の周辺岩盤の地下水の挙動の把握を目的とした水理学的状況変化の計測調査を実施している。本報では、岩盤浸透流解析における上部境界条件の設定を目的として行った表層部(未固結層)から下層(岩盤)への涵養量の算定結果について述べる。

2. 立坑掘削に伴う水理学的影響調査解析の概要

立坑掘削による水理学的影響を評価するために、a.現象の把握(場の理解)、b.水理地質構造モデルの作成、c.地下水流動の予測解析、d.長期観測値との比較検証という一連のシステムの設定を行った。本調査の対象区域は、動力炉・核燃料開発事業団中部事業所・東濃鉱山敷地内の立坑掘削位置を中心とした約300m四方の地域である(図-1)。表層部からの地下水涵養量を推測するため、本地域表層部に広く

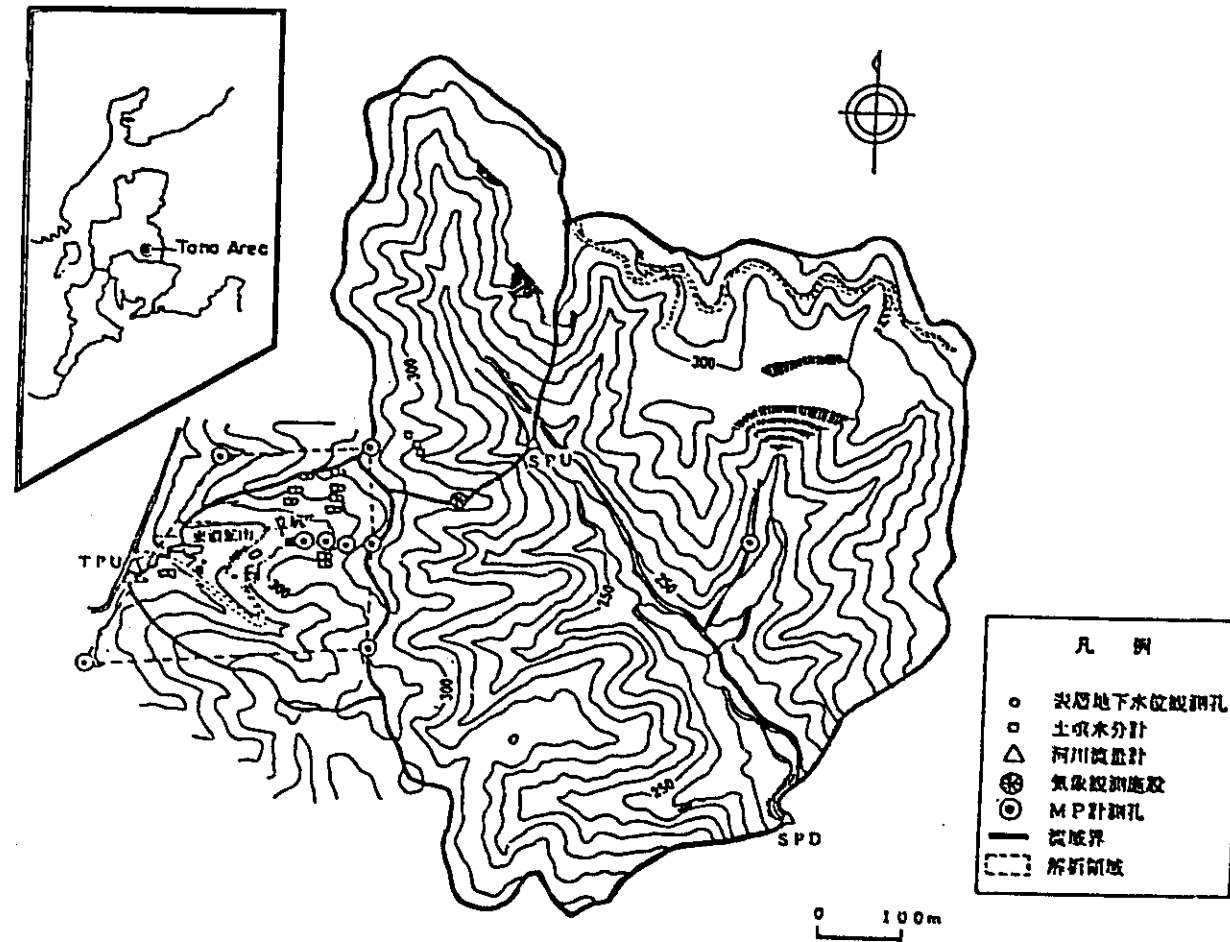


図-1 立坑周辺地下水流動調査位置図

分布する未固結層（瀬戸層群砂礫層）において9箇所にて土壌水分計及び自由地下水面観測井を配置し、また、気象観測施設、河川流量観測施設を各1箇所づつ設置して、長期連続観測を行っている。また、岩盤中（瑞波層群泥岩、砂岩、礫岩及び花崗岩）の水理地質状況を把握する目的で、試錐孔を利用し、岩芯観察、ボアホールテレビによるボーリング孔壁の観察、水理学的な代表点における原位置透水試験を行い透水係数の分布を調査し、さらに試錐孔内に設置されたマルチパッカー方式のケーシング（MPシステム）により層別に止水された各帯水層毎の間隙水圧を計測している。こうして現場計測されたデータは、データファイルに入力され、立坑掘削影響予測解析に活用されている（表-1）。

3. 表層部の水収支の検討と下層への涵養量の算定

解析対象区域内における河川流量観測が開始されて間もないため、調査対象地域の東側に隣接する流域での河川流量観測地点（SPD）の河川流量データを用いて、表層部の水収支の検討を行った。なお、SPDの流域面積は0.535 km²である。

表-1 立坑周辺地下水流動調査試験項目

項目	数量
①土壌水分観測 イ) 土壌水分計設置 ロ) 土壌水分観測	9箇所×8観測
②表層地下水観測 イ) 試錐、検層 ロ) 地下水観測システム設置 ハ) 地下水観測	約30m×9孔 9孔
③河川流量観測 イ) 河川流量計設置 ロ) 河川流量観測	1箇所
④気象観測 イ) 気象観測施設設置 ロ) 気象観測	1箇所
⑤孔内間隙水圧計測及び検水 イ) 試錐、検層 ロ) コア観測 ハ) ボアホールTV観測 ニ) 透水試験 ホ) PS検層 ヘ) MPシステム設置 ト) MP計測	130m×1孔, 180m×1孔, 200m×1孔 130m×1孔, 180m×1孔, 200m×1孔 130m×1孔, 150m×1孔, 180m×1孔, 200m×1孔 9孔 200m×2孔 10孔
⑥湧水量測定 イ) 観測湧水量測定 ロ) 新立坑湧水量測定	
⑦地下水質解析 イ) 3次元地下水流動解析	

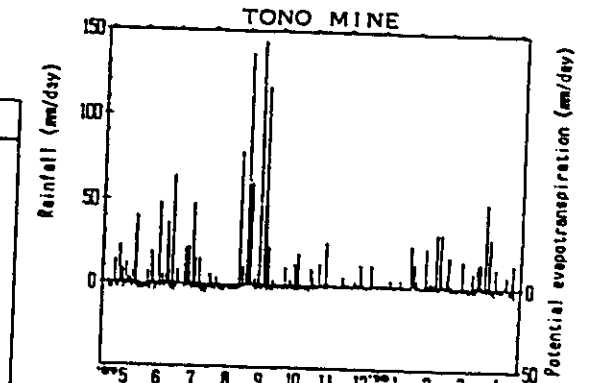


図-2 降水量、Penmanの可能蒸発散量の経年変化

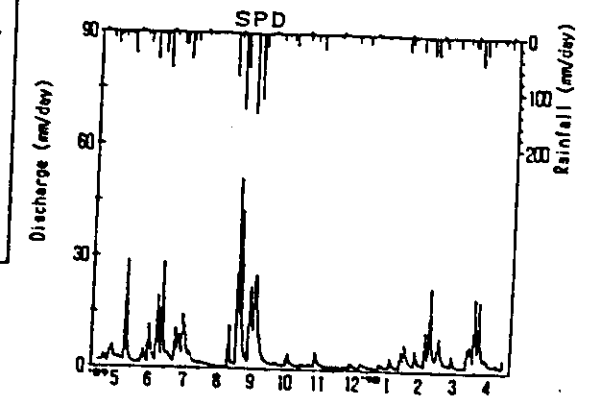


図-3 河川流出高（SPD）の経年変化

流域における水収支は、次式で表すことができる。

$$P = E + Q + \Delta W + \Delta S + G \quad \dots(1)$$

P: 降水量 (mm)

E: 蒸発散量 (mm)

Q: 河川流出量 (mm)

ΔW : 土壌水分貯留変化量 (mm)

ΔS : 地下水貯留変化量 (mm)

G: 下層への涵養量 (mm)

(1)式において、一般に水文期間を1年にとれば、その流域の貯留量の変化($\Delta W + \Delta S$)はゼロとして取り扱われることが多い。従って、1年間での水収支を考える場合には、次式が成り立つと考えられる。

$$P = E + Q + G \quad \dots(2)$$

本研究では(2)式を水収支式として考え、1989年5月から1990年4月までの1年間について表層部の水収支を検討した。なお、降水量については日積算値を、河川流出量については日平均値を用いた。

蒸発散量については、気象観測データをもとに推定する方法を採用した。Penman(1948, 1963)は、「植物で完全に覆われた地表面に十分に水が供給されている場合に失われる蒸発散量」を可能蒸発散量と定義しており、中川(1979)は、Penmanの可能蒸発散量に0.7を乗じたものを短草植被面可能蒸発散量としている。本研究では、植被面への水分の供給は十分にされていたと考え、この短草植被面可能蒸発散量を実蒸発散量とした。なお、蒸発散量の算出は、日単位でおこなった。

図-2に降水量とPenmanの可能蒸発散量の変化を、図-3に河川流出高の変化を示す。日単位で求められた値から、月間合計及び年間合計を求めると、表-2のような値が得られた。これらの年間合計値を(2)式に代入すると、

$$\begin{aligned}
 G &= P - E - Q \\
 &= 1944.0 - (0.7 \times 630.8) - 1294.9 \\
 &= 207.5 \text{ [mm/year]} \\
 &= 0.57 \text{ mm/day}
 \end{aligned}$$

以上の結果から、表層部(未固結層)から下層(岩盤)への涵養量として、 207.5 mm/year (0.57 mm/day)という値が得られた。この涵養量を cm/sec オーダーに換算すると、 $6.6 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ となり、表層部の直下に分布している瑞浪層群泥岩、砂岩の透水係数($10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ cm/sec}$)とほぼ等しい値をとる。このことから、表層部の未固結層から下層の岩盤への地下水涵養は、表層部の直下に分布している層(瑞浪層群泥岩、砂岩)の透水係数とほぼ同じ速度で行われていると考えることができる。

4. おわりに

立坑掘削に伴う水理学的影響調査解析(岩盤浸透流解析)の上部境界条件の設定を目的として、表層部の未固結層での水収支を検討し、以下に示す結果を得た。

- 1) 1989年5月から1990年4月までの1年間の気象観測データ及び河川流量観測データから、年間降水量 1944.0 mm 、河川流出高 1294.9 mm が得られた。また、短草植被面可能蒸発散量、すなわちPenmanの可能蒸発散量に0.7を乗じたものを実蒸発散量と考え、年間蒸発散量 441.6 mm を得た。

表-2 表層水理観測結果

年	月	降水量 (mm)	Penmanの 可能蒸発散量 (mm)	SPD 河川流量 (mm)	
89	5	168.5	66.2	117.8	
	6	243.5	71.0	150.7	
	7	180.5	70.9	139.0	
	8	101.0	86.4	40.3	
	9	646.0	52.1	343.5	
	10	70.5	59.1	45.1	
	11	55.5	27.8	38.2	
	12	34.5	21.8	31.8	
	90	1	42.5	20.0	45.1
		2	144.5	30.3	121.5
		3	110.0	53.0	92.3
		4	147.0	72.2	129.6
計	1944.0	630.8	1294.9		

- 2) 上記1)の値をもとに表層部の未固結層での水収支を検討した結果、表層部の未固結層から下層の岩盤への涵養量として、 207.5 mm/year (0.57 mm/day)という値が算定された。
- 3) 今回算定された表層部の未固結層から下層の岩盤への涵養量を cm/sec オーダーに換算すると $6.6 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ となり、表層部の直下に分布している泥岩、砂岩の透水係数($10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ cm/sec}$)とほぼ等しい値をとる。このことから、表層部の未固結層から下層の岩盤への地下水涵養は、表層部の直下に分布している泥岩、砂岩の透水係数とほぼ同じ速度で行われていると考えられる。

しかし、今回算定された涵養量は幾つかの仮定の上で求められたものであり、今後、さらに精度良く涵養量を推定するためには、

- ① さらに長期にわたる観測データの蓄積
- ② 蒸発散量の推定方法の検討
- ③ 土壌水分及び表層地下水位観測データ等による土壌水分貯留量変化、地下水貯留量変化の検討
- ④ 表層部の地下水流動特性の把握

等が必要であると考えられる。これらについては、今後の課題としたい。

[参考文献]

- 1) 開發一郎(1989): 土壌水の水収支. 気象研究ノート, 167, 91-112.
- 2) 中川清隆(1979): 輪島における熱収支・水収支の気候学的推定. 金沢大学教育学部紀要, 27, 15-25.
- 3) Penman, H.L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc., London, A, 193, 120-145.
- 4) Penman, H.L. (1963): Vegetation and Hydrology. Tech. Common. No. 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England, 124p

(66) 立坑掘削の地下水流動影響予測解析

動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所 ○今井 久
 動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所 柳澤 孝一
 動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所 大澤 英昭
 埼玉大学 工学部 正会員 渡辺 邦夫

Predictive Simulation of Shaft Excavation Effect on Groundwater Flow

Hisashi IMAI ; Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation
 Koichi YANAGIZAWA ; Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation
 Hideaki OSAWA ; Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation
 Kunio WATANABE ; Saitama University

Abstract

Shaft Excavation Effect (SEE) experiment has been started by Power Reactor and Nuclear Fuel development Corporation for the purpose of developing the evaluation technologies of mechanical and hydrological changed in the rock mass that are induced by a deep underground space excavation. The shaft of this experiment is 150m deep and 6m in diameter. In this experiment a predictive simulation of groundwater flow effected by the shaft excavation was carried out. Then the outflow profile into the shaft was estimated and the maximum outflow was estimated to be about 30 ℓ/min. And the transition of the piezometric head in the monitoring boreholes around the shaft and the remarkable affected area by the excavation were estimated. The area was estimated to be within 100 meters.

はじめに

大深度地下空間の有効利用に関する期待に伴い、これら実現のための研究課題として地下空洞掘削による周辺岩盤内の水理学的・力学的影響を定量的に評価するシステム確立の必要性があげられる。動力炉・核燃料開発事業団では仕上がり内径6m深さ150mの立坑を掘削し、立坑掘削の周辺岩盤内に与える水理学的・力学的影響を定量的に評価するための立坑掘削影響試験を実施している。今回、立坑掘削の水理学的影響について事前調査計測結果を基に予測解析を実施した。ここで、この予測数値解析結果について報告する。

1. 立坑掘削影響試験概要

試験は、岐阜県土岐市に位置する東濃鉱山の堆積岩中に仕上がり内径6m深さ150mの立坑を1990年1月より1991年6月にかけて一年半にわたり段階的に掘削し、周辺岩盤内の力学的、水理学的的計測を実施し、立坑掘削の影響を定量的に評価しようとするものである。図-1に示す試験領域内には、ウラン鉱床調査用立坑および横坑が既に存在するため、地下水流動予測には初期状態把握のための事前計測が必要となる。そこで、図-1に示すようなMPシステム、地下水位計、土壌水分計、河川流量計などを設置し、地下水流動に関する抱括的な計測を掘削前、掘削中、掘削後にわたり実施する。MPシステムとは1つのボー

リング孔内で深度方向の圧力分布を多点で計測できるバッカーが複数組ついたケーシングによる計測システムである。図-2に当該試験領域での代表的な地質構造断面と、透水試験結果およびMPシステムによるピエゾ水頭分布を示す。また、立坑掘削工程を図-3に示す。図-3は時間と掘削面の位置を示したもので、掘削は図に示すように当初工程として486日にわたり段階的に行われる。解析は有限要素法3次元飽和飽和浸透流解析コード(TAGSAC)¹⁾を用いて実施した。

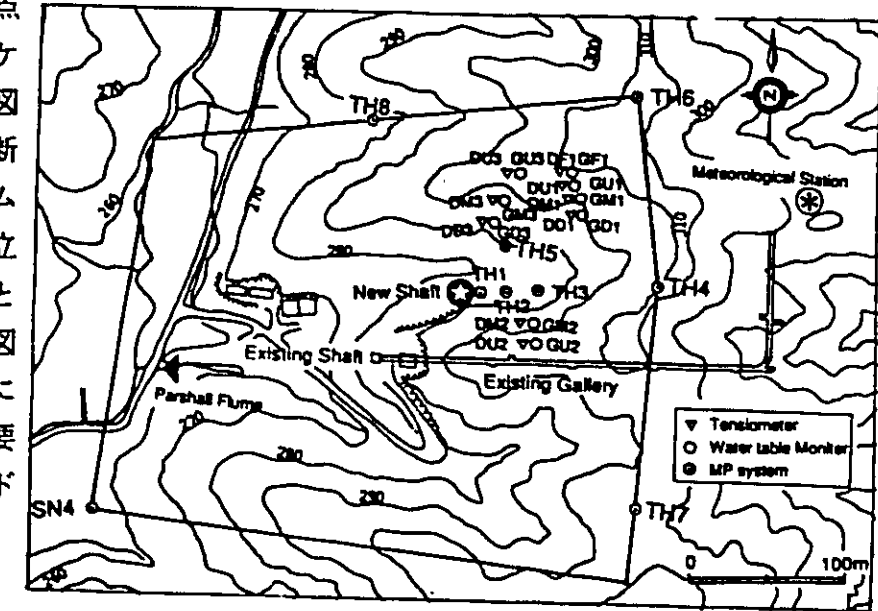


図-1 調査解析領域・計測施設配置図

2. モデル設定

(1) 解析領域、要素分割形状

解析領域は図-1の実線で示す約300m×300mの範囲とした。この領域境界はTH4, 6, 7, 8, SN4を含みまた、尾根線又は、谷線上に設定している。深さ方向には立坑深さの2倍の約300mを解析範囲とした。解析対象期間は掘削開始より3年間とした。要素分割形状は、形状、MP計測孔と立坑、既存坑道位置、水理地質構造を考慮し、図-4に示す要素分割形状とした。立坑は5m×5m×150mの形状とし、既存坑道は3m×3mの断面で、立坑深さ135m、横坑長さ163mとした。要素数は3133、節点数は3924となっている。

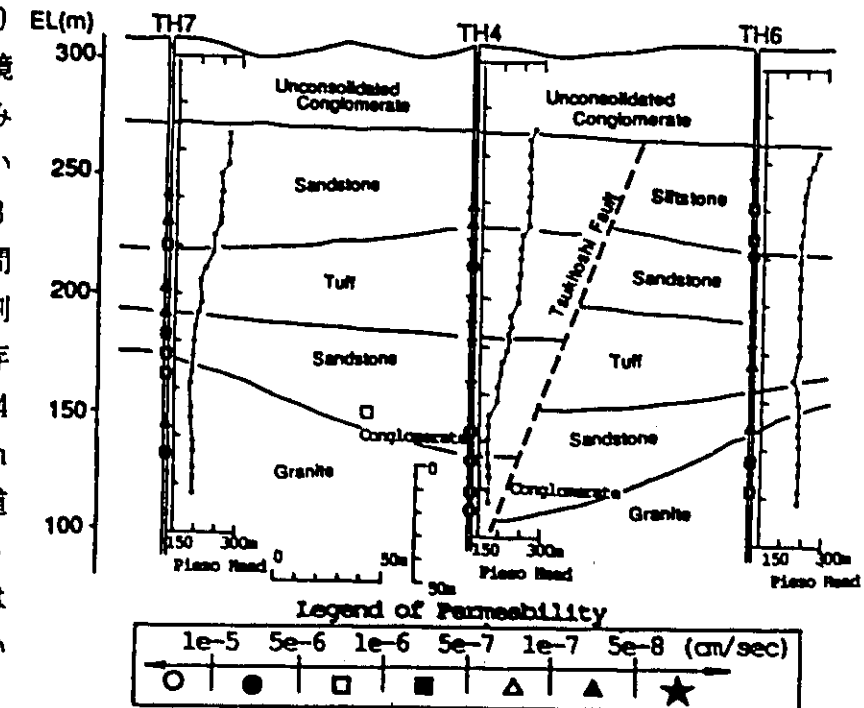


図-2 地質構造、透水係数・間隙水圧分布図

(2) 水理地質構造モデル

水理地質構造モデルは領域内で実施された透水試験による透水数値の分布およびウラン調査で得られた地質学的知見に基づき作成した。図-2に示す地質構造は基盤花崗岩の上に新第三系堆積岩が存在する。また新第三系は、礫岩、砂岩、泥岩、未固結礫岩により構成され、領域中央には東西走向、高角度南傾斜の月吉断層が存在する。

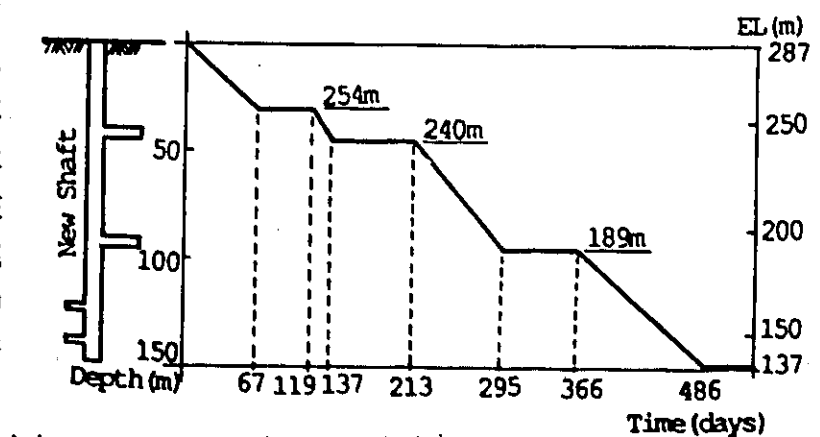


図-3 掘削工程図

本領域内の水理地質構造の特徴は4つあり、

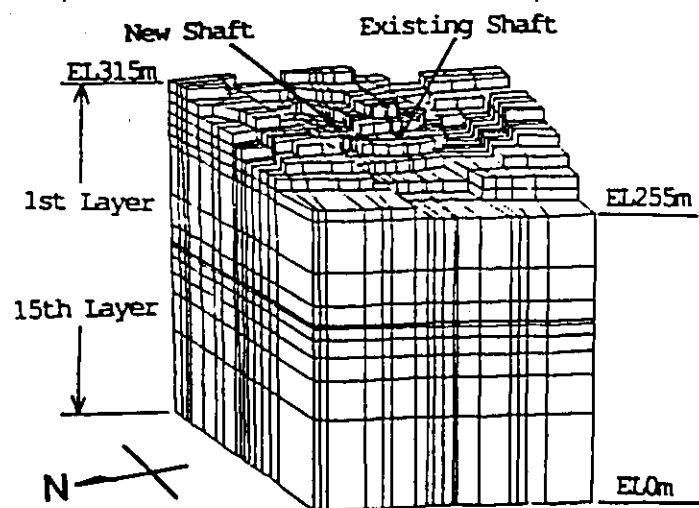


図-4 要素分割図

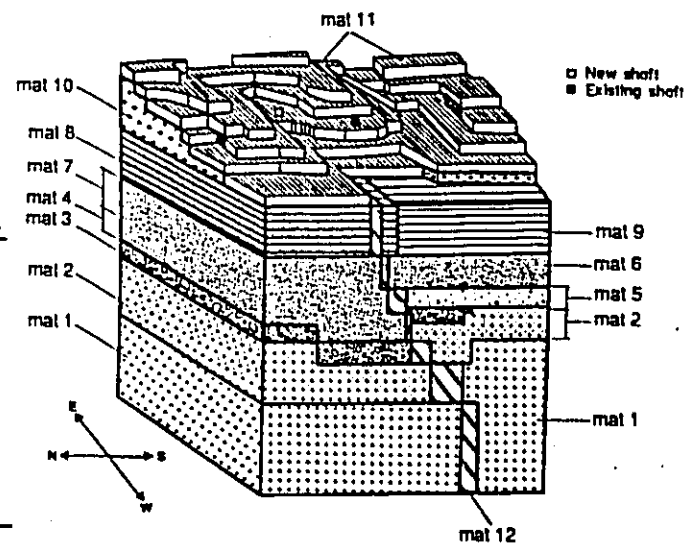


図-5 水理地質構造モデル

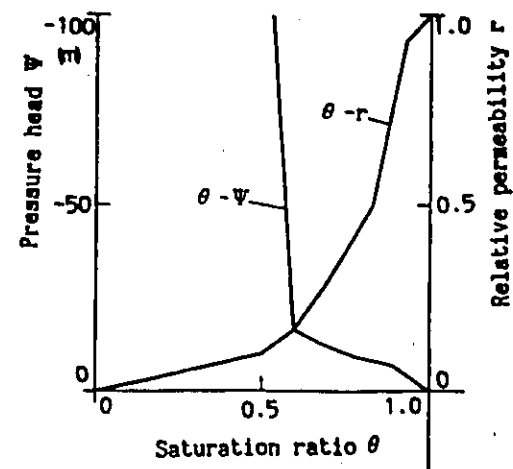


表-6 不飽和特性曲線

以下の通りである。

- ①花崗岩上の不整合面は傾域中央にむかって下向している。
- ②月吉断層は粘土を含む低透水面として存在する。
- ③未固結礫岩層の下の不整合面はほぼ水平に存在する。
- ④花崗岩と砂岩・礫岩層の間には、花崗岩風化部、礫岩より成る高透水性部が存在する。以上4つの水理地質構造上の特徴および図-1に示すTH1~8, SN4で100点の透水試験値の分布より、図-5に示す水理地質構造モデルを作成した。モデルは透水係数、空隙率、比貯留係数²⁾の設定の組合せ(表-1)より、mat1~mat12の12区分より成る。不飽和特性としては全て図-6に示す特性曲線に従うと仮定した。

3. 境界条件, 初期条件の設定

(1) 境界条件

境界条件は模式的に図-6に示す。

表-1 水理地質構造モデル-物性値・地質対応表

Part	Permeability (cm/sec)	Porosity	S.Storage (1/m)	Geology
mat1	1.00E-07	0.02	1.00E-04	granite
mat2	5.00E-06	0.1	1.00E-04	wheathered-granite
mat3	1.00E-05	0.3	1.00E-04	wh-gra.&conglomerate
mat4	1.00E-06	0.3	1.00E-04	sandstone
mat5	5.00E-06	0.3	1.00E-04	sandstone
mat6	1.00E-06	0.3	1.00E-04	sandstone&tuff
mat7	1.00E-06	0.4	1.00E-04	tuff
mat8	5.00E-06	0.4	1.00E-04	sandstone&siltstone
mat9	1.00E-07	0.4	1.00E-04	sandstone
mat10	1.00E-05	0.4	1.00E-04	unconsolidated-conglo
mat11	1.00E-04	0.5	1.00E-03	surface-soil
mat12	1.00E-08	0.3	1.00E-04	clay rich fault

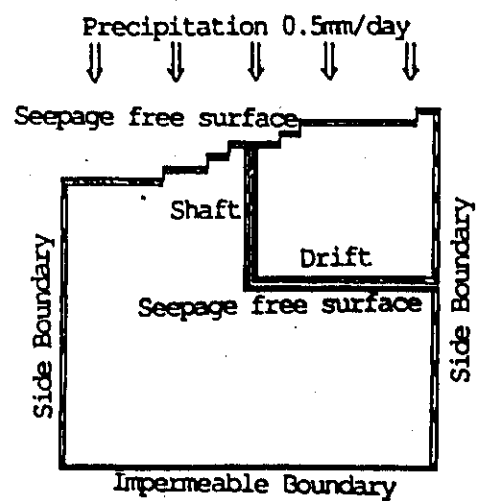


図-7 境界条件

- ①上部境界, 立坑横孔壁面: 自由浸出面の条件とした。ただし上部境界面は降雨による涵養量として気象, 水文観測結果に基づき0.5mm/dayを与えた。
- ②下部境界: 不透水境界とした。
- ③側部境界: 側部境界上に存在するMP計測孔TH4, 6, 7, 8, SN4での深度方向のピエゾ水頭値分布をMP計測値および地下水位観測結果(年平均GL-15m)に基づき設定し、各MP孔間はTH4, 6, 7, 8, SN4に設定した分布に基づく予備計算および同一深度内での線型補間により側面上の境界値を設定した。

(2) 初期条件

初期条件は上記境界条件において既存立坑・横坑のみ考慮し、試験立坑掘削前の状態での定常解析を実施し、その結果を初期条件とした。その妥当性については既存坑道内での湧水量の実測値と計算値との対比およびTH1, 2, 3, 5における深度方向のピエゾ水頭分布の実測値と計算値の対比を行い設定した水理地質構造モデルおよび境界条件が試験立坑掘削前の現象を表現し得ていることで確認した。

(3) 立坑掘削面内境界条件

掘削工程は図-3に示すような掘削面位置の変化をする。計算上では掘削を工程に沿った掘削工程該当要素の除去および掘削底面該当節点の境界値の制御によりモデル化した。さらに掘削壁面は自由浸出面の条件も与えた。

4. 予測解析結果

(1) MP計測孔でのピエゾ水頭変化

TH1, 2, 3, 5におけるピエゾ水頭値の変化予測解析結果を図-8(a)~(d)に示す。TH1, 2, 3, 5いずれも掘削により水頭値の低下が生じ、TH1, 2, 3と立坑に近いものほど水頭値の低下量も大きくなることが計算により示される。また掘削影響範囲について図-8にEL150m平面内の掘削開始から3年間での水頭値の変化量および立坑からの距離の関係を立坑からの距離による移動平均として示す。図-8より、掘削による水頭変化の大きな範囲は立坑より約100m内にあることがわかる。

(2) ピエゾ水頭分布

掘削最終時(486日)における立坑を含む鉛直断面内でのピエゾ水頭のコンタ図を図-10に示す。立坑底部で動水勾配が大きく、立坑近傍で立坑内への収束的で流速の大きな流れが生じることがわかる。

(3) 流量変化

立坑および既存坑道内の流出量の変化を図-11に示す。上方の破線は掘削工程線を示す。立坑への流出量

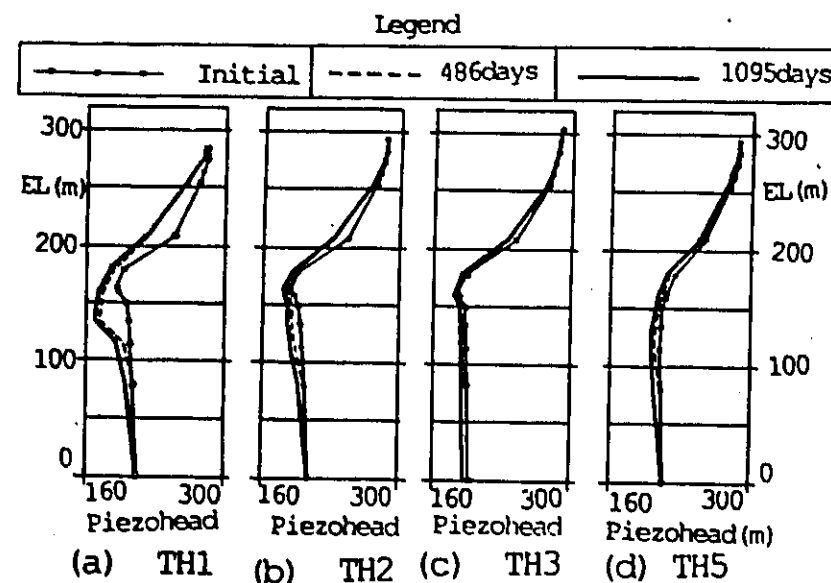


図-8 TH1, 2, 3, 5内でのピエゾ水頭分布変化

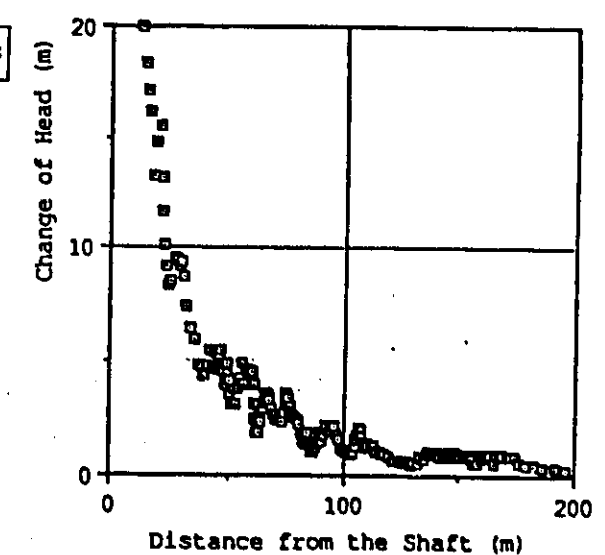


図-9 立坑からの距離と水頭変化量

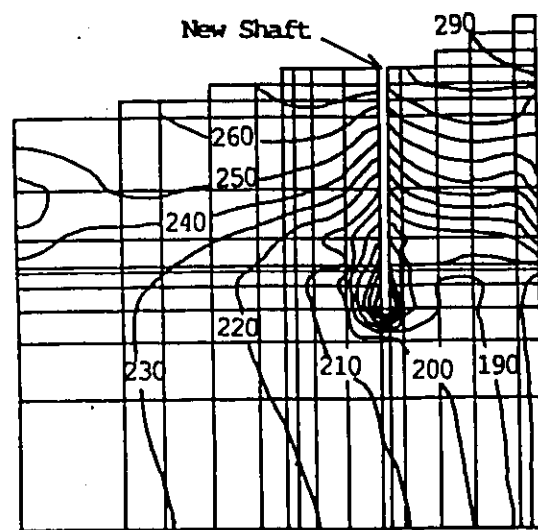


図-10 ピエゾ水頭コンタ図

は掘削に伴い増加し、また掘削を中断すると低減することがわかる。また月吉断層を貫き高透水性部に到達した時点(450日頃)より急激な流量の増加がみられる。最大流量は約30 l/minと想定される。既存坑道内への流出量の変化は、掘削終了近くなり緩やかに低減する。その低減量は掘削前の流出量の10%未満の減少と考えられる。

5. 結論

予測解析に結果以下のことが想定できる。

- ① 立坑掘削の影響は立坑から離れるにつれ小さくなり、その顕著な影響範囲は約100m内と考えられる。
- ② 立坑内への流出量は掘削に伴い増加し、特に断層を過ぎ高透水性部に達した時点より急激な増加を示す。そして最大流出量は30 l/minと想定される。
- ④ 既存の立坑、横坑への流出量は掘削終了近くで緩やかに減少し、その減少量は10%未満と想定される。

6. おわりに

現在、立坑掘削に伴うデータを取得中であり、それらと今回の予測解析結果を対比し、今回の予測計算結果をより精度の高いモデル化・計算手法開発における1つの過程として、現状での問題点の抽出および、データ取得とその反映方法の開発に向けて、検討を重ねていく予定である。

最後に数値計算の効率をよく行う上で、岡山大学工学部 西垣 誠助教授、(株)間組 小林 晃氏に貴重な御教示をいただいたことを記し、末筆ながら謝辞を表す次第である。

【参考文献】

- 1) 渡辺 邦夫, 藍沢 稔幸, 柳澤 孝一: 岩盤浸透流の3次元解析の考え方と多孔体モデルによる広域解析例, 第45回土木学会年次学術講演会概要集 pp.816~817, 1990
- 2) Domenico, P.A. and M.D.Miffin, "Water from Low-Permeability Sediment and Land Surface", Water Resou. Res., Vol.1, No.4, 1965

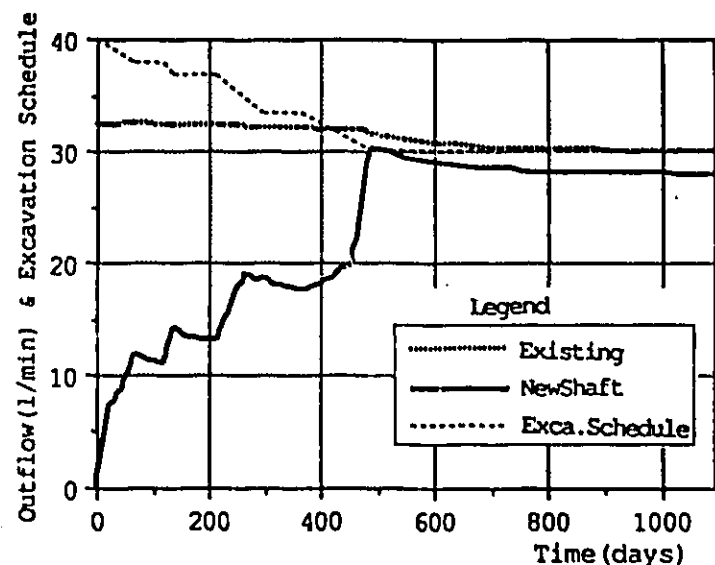


図-11 新立坑、既存立坑・横坑内流出量

動力炉核燃料開発事業団 中部事業所 ○柳澤孝一 今井久 古屋和夫
 埼玉大学 工学部 渡辺邦夫

1. はじめに

近年、地下深部岩盤を対象としたいろいろな地下空間利用計画が注目されている。これらに係わる技術的課題の一つとして地下水流動に関する問題があり、地下施設の設計・建設などを適切に行うためにも、立坑や水平坑道などの掘削による周辺岩盤に含まれる地下水への影響を正確に把握することが重要である。このため、動力炉・核燃料開発事業団では、立坑掘削影響試験として岐阜県土岐市中部事業所東濃ウラン鉱山敷地内に立坑を掘削し、立坑掘削に伴う周辺岩盤の水理学的影響を評価し、また、水理学的調査解析システムを確立するために実規模の原位置試験を実施した。

2. 調査試験研究概要

本試験地は、名古屋市北東約35km岐阜県土岐市東濃ウラン鉱山敷地内に位置し、標高約300m前後の丘陵地からなっている。地質は、基盤花崗岩・花崗岩を被覆する新第三紀中新世の礫岩・砂岩・泥岩・未固結砂礫層、ならびに沖積層からなる。また、花崗岩および瑞浪層群を切る走向傾斜N80°E60°Sの逆断層が発達している。

試験立坑は、仕上がり内径6m、仕上がり深度150mで40cmのコンクリート覆工が施工された。岩盤は発破工法にて掘削され、覆工は1.2mのショートステップ工法により施工された。工期は1990年1月より1991年7月にかけて1年半にわたった。

立坑掘削による水理学的影響を把握し、水理学的調査解析システムを確立するため、①場の理解(現状の把握) ②モデル化(水理地質構造モデルの構築) ③地下水流動予測解析(シミュレーション解析) ④長期観測値との比較検証、という一連の調査・評価システムを設定した。地下水の流れを正確に把握するには、対象領域の地下水の流れの特性が失われないように配慮しながら水理地質構造や涵養量などの場の条件を的確に理解し、簡略化・モデル化をすることが必要である。さらに、地下水流動解析では、境界条件・水理定数などの数値条件をいかに現実を反映した妥当な値に設定するかが重要な課題となる。調査解析において特に留意した項目としては、①降雨量・河川流出量・蒸発散量等の実測値に基づく涵養量の設定 ②原位置水理試験等による透水係数・間隙水圧等の設定 ③地表踏査・地球物理学的調査・試錐調査等のデータに基づく水理地質構造モデルの設定等である。また、立坑掘削の影響範囲、地形等の境界条件を勘案して立坑掘削地点を中心とした約300m



図-1調査試験位置図

四方を調査解析領域として設定した(図1)。

3. 場(対象領域)の理解

地表からの地下水涵養量を推定するため地表部に広く分布する未固結層(瀬戸層群砂礫層)を対象として自由地下水面観測井・気象観測施設・河川流量観測施設等を配置し、長期連続観測を実施している。その結果、試験立坑周辺の年間降雨量1,944mm/年、Penmanの実蒸発散量630.8mm/年、河川流出量1,294.9mm/年が記録された。この観測結果より、表層部より深部岩盤への涵養量(P)は、 $P = 1,944 - (0.7 \times 630.8) - 1,294.9 = 0.5 \text{ mm/日}$ と推定される²⁾。

また、岩盤中(瑞浪層群の泥岩・砂岩・礫岩、及び花崗岩)の水力地質状況を把握する目的で、試錐孔を利用し、物理検層、ボアホールテレビによる孔壁観察、岩芯観察、原位置透水試験等を実施した。深部岩盤の地下水の挙動を把握するには、岩盤の透水係数を正確に測定することが重要である。しかし、試験立坑周辺に分布する岩盤の透水係数は低く、従来の測定手法ではその値の信頼性に欠けるきらいがある。そのため、動燃事業団では難透水性岩盤を対象とする試錐孔を利用した原位置透水試験装置として、動燃式低水圧制御水理試験装置³⁾および低圧ルジオン水理試験装置を開発し、計測を実施した。その結果、図2に示す様な透水係数分布が得られた。

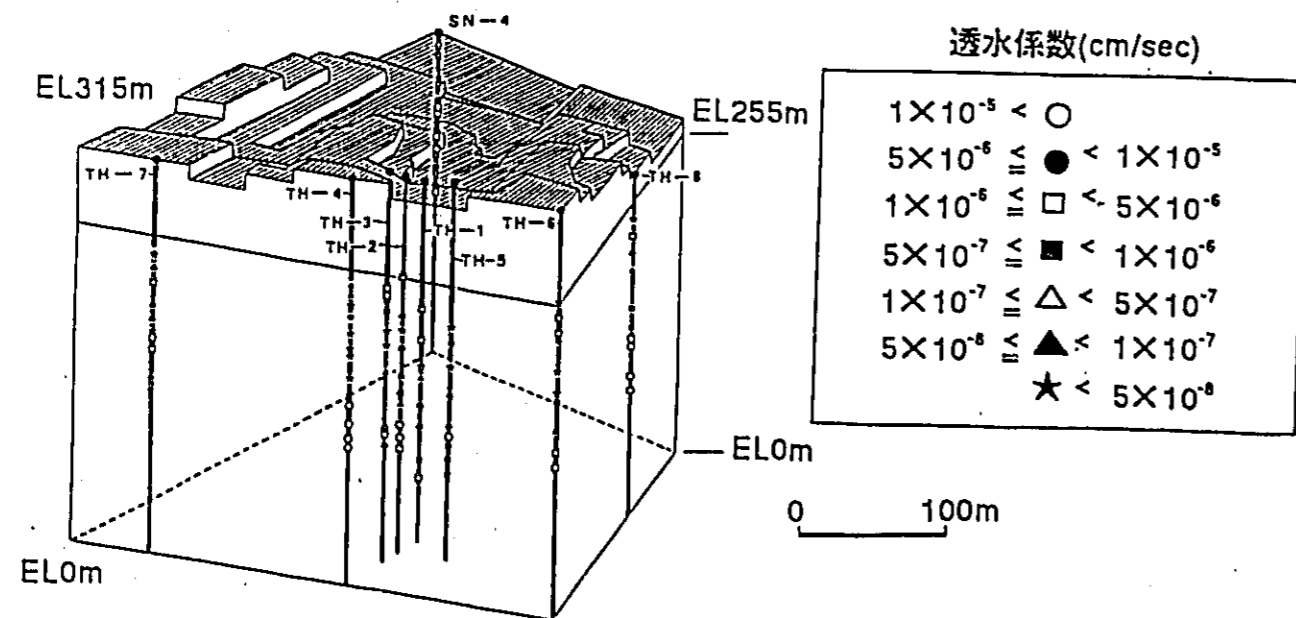


図-2透水係数分布図

4. 場のモデル化

本調査地域周辺において実施した地表地質調査および岩芯観察、物理検層等の結果をもとに本調査地域の地質構造モデルを構築した(図3)。さらに、原位置透水試験による透水係数と良い相関関係が認められた電気検層による比抵抗値と、粒度・固結度・分級度等の岩相の垂直方向の堆積学的層相変化に基づき地質構造モデルの水理学的特性について検討し、調査解析領域を12層に区分した水理地質構造モデルを構築した(図4)。なお、モデルの構築においては、次の事項について留意した。

- ①地質構造モデルの各層は、基本的に水理地質構造モデルの各層と対応する。
- ②ただし、同一層内で水理学的特性が著しく異なる部分が存在する場合には、複数の層に区分する。
- ③地質構造モデル上異なる複数の地層でも、水理学的特性が同じ場合には、水理地質構造モデル上は一つの層とする。

5. 地下水流動予測解析

5.1 境界条件及び初期条件

本解析では解析手法として地下水流動の場(表層未固結層及び深層岩盤)を多孔質媒体とする有限要素法による非定常三次元飽和不飽和浸透流解析法(全要素3,133、全節点3,924)を用いた。解析領域は、図1に示す実線で囲まれた約300m x 300mの範囲を設定した。この境界は、尾根線および谷線上に設定している。また、解析領域の深さの設定は試験立坑深さの約2倍の標高0mまでとした。

上部境界条件は、表層水理観測結果からの涵養量0.5mm/dayおよび自由浸出面条件を設定した。下部境界条件は流入のない不透水境界条件、既存坑道等の内部境界条件は自由浸出面条件、側方境界条件としては、解析領域の側部境界上に存在するMPシステム(多点式間隙水圧観測システム)による間隙水圧観測試錐孔でのピエゾ水頭分布に基づき設定した。初期条件は、試験立坑掘削前の状態での定常解析を実施し、その解析結果を採用した。これら初期条件等や水理地質構造モデルの妥当性は、既存坑道内の湧水量の実測値と計算値との比較(計算値/実測値=2)により確認した。

試験立坑の掘削工程のモデル化は、掘削部に相当する要素を掘削工程に従い解析領域から除去し、掘削壁面に対して自由浸出面の条件を与えながら掘削部底面を徐々に掘り下げることで実施した。

5.2 予測解析結果

試験立坑内に生じる湧水量の非定常変化を図5に示す。表層部未固結層区間の湧水量は固結岩部の湧水量より多く、また試験立坑掘削終了後の総湧水量は30ℓ/minとなり、約200日後にはほぼ一定湧水量28ℓ/minと予測される。

また、試験立坑を切る東西鉛直断面におけるピエゾ水頭分布(図6)見ると試験立坑掘削部は、上に凸状の形状をもつピエゾ水頭分布を示している。このことにより、立坑近傍は周辺岩盤より低いピエゾ水頭分布をしており、周辺岩盤より試験立坑部に向かって地下水の流れが生じていることが判る。また、試験立坑掘削開始直前と立坑掘削終了後1年半後の予測解析結果を比較すると、掘削影響の範囲としては立坑より約1

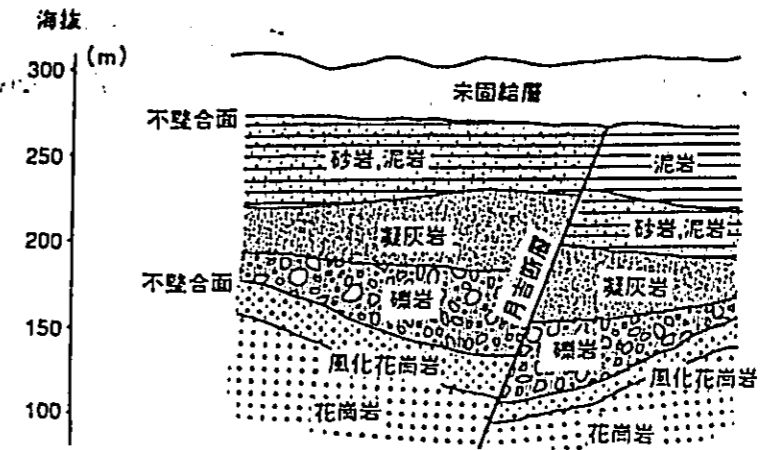


図-3地質概念図

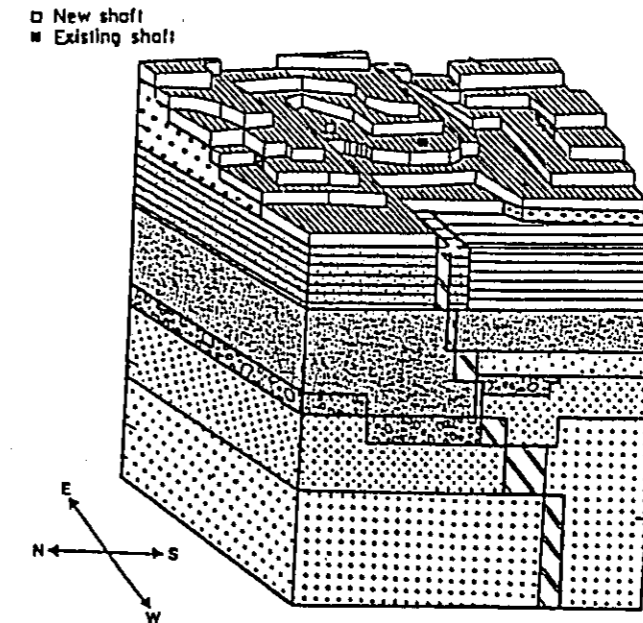


図-4水理地質構造図

0.0 m以内であり、立坑より離れるほどその影響は小さくなると予測される⁴⁾。

6. 長期観測値と予測解析結果の比較検討

試験立坑掘削影響予測解析結果の検証を行うため、MPシステムによる試験立坑周辺の試錐孔を利用した間隙水圧および試験立坑への湧水量の長期観測を継続しているが、試験立坑12.5 m掘削時点では、掘削の影響範囲は100 m以内であり、湧水量は15 l/minである。この観測結果は、予測解析結果と比較的良好一致している。

7. まとめ

今回の調査解析より、立坑掘削に伴う水理学的影響範囲は、立坑より100 m以内であることが予測された。また、今回実施した“水理学的調査解析システム”が有効であることが判明した。今後も長期観測を継続し、予測解析結果との比較検討を通じ水理学的調査解析システムの最適化を実施する予定である。

参考文献

- 1) 渡辺邦夫(1986): 山地小流域の地下水流出解析による流れ場の特性評価。応用地質, Vol. 27, No. 4, pp. 40-50
- 2) 中島誠, 齊藤章, 柳澤孝一(1991): 岩盤浸透流解析の涵蓋量の算定について。第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 252-256
- 3) 柳澤孝一, 齊藤章, 西垣誠, 平田洋一(1989): 新しい現場透水試験法の測定例。土と基礎, 37-7(378), pp. 47-52
- 4) 今井久, 柳澤孝一, 大澤英昭, 渡辺邦夫(1991): 立坑掘削の地下水流動影響予測解析。第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 317-321

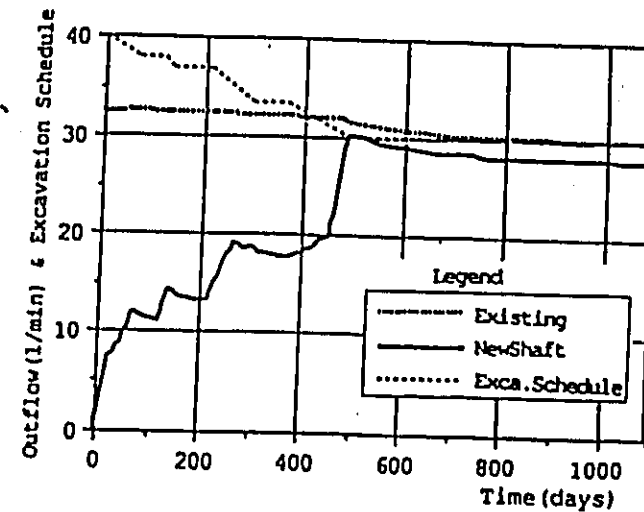


図-5湧水量予測変化図

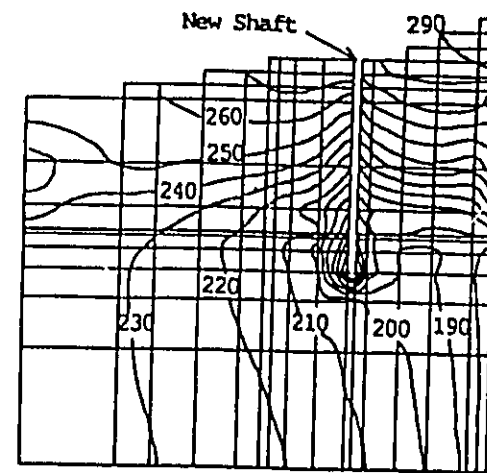


図-6ピエゾ水頭コンタ図

動燃事業団 中部事業所 ○尾方 伸久 中野 勝志 大澤 英昭 柳澤 孝一
岡山大学 工学部 西垣 誠

1. はじめに

近年、地下深部岩盤を対象とした様々な地下空間利用計画が注目されている。これらに係わる技術的課題の一つに地下水流動に関する問題があり、地下深部岩盤の透水係数分布をいかに正確に把握するかが、地下水流動解析結果の信頼性を大きく左右する。しかし試錐孔を利用した原位置透水試験による水理学的データの取得には多大の時間と経費を必要とする。このため動燃事業団では、立坑掘削影響試験の一環として実施された岩芯観察結果や試錐孔を利用した物理検層のうち電気検層結果、及び原位置透水試験結果を利用して岩相分布、岩相の見掛比抵抗分布より水理学的特性を推定する手法を検討した。その結果について報告する。

2. 調査地域及び地質概要

2.1 調査地域

今回、水理地質学的検討を実施したのは岐阜県土岐市に位置するウラン鉱山(東濃鉱山)周辺で、平成元年度から行われている立坑掘削影響試験領域でもある(図-1)。本調査領域には、既存立坑、横坑、ウラン鉱床精密調査で実施された試錐孔があり、試錐孔では岩芯観察及び物理検層が実施されている。また今回の立坑掘削影響試験のために掘削された試錐孔では、岩芯観察、物理検層、水理試験が実施されており、ウラン鉱床精密調査、立坑掘削影響試験両方のデータが活用できる地域である。



図-1立坑掘削影響試験試錐及び水理観測システム図

2.2 地質概要

本地域の地質は、中・古生層及び花崗岩類を基盤岩として、それを覆って新第三系と第四系が分布する。新第三系瑞浪層群は、基盤花崗岩を不整合で覆って分布する。その上位には瀬戸層群が、これらを不整合で覆って分布する(図-2)。

3. 原位置透水試験

水理地質構造モデルを構築する際に必要となる岩盤の透水係数を原位置で測定する方法としては、原位置透水試験がある。しかし、難透水性岩盤を対象として透水試験を行う方法等はあまり検討されていなかったのが現状である。そのため我々は、試錐孔を利用した単孔式の水理試験装置である低水圧制御水理試験装置



図-2 調査地域の表層地質

(以降、動燃式JFTと称す)と低圧ルジオン水理試験装置²⁾の2台を開発し、本調査領域の測定に用いた。動燃式JFTの原理については、柳澤ほか¹⁾に詳しく述べられている。ここでは低圧ルジオン水理試験装置についてその概要を示す。本装置は、透水係数の算定方法及び構造が簡単であり、動燃式JFTでは測定が困難となる 10^{-4} cm/sec以上の高透水性岩盤も容易に測定できるといふ長所を有する。そのため、これらの長所を生かして難透水性岩盤の測定ができる構造に改良し、本調査領域の難透水性岩盤の透水係数を測定した。データの信頼性を確認するためSN-4号孔の一部区間において、両試験装置を用いて試験を実施した(表-1)。

10^{-6} cm/secオーダーから 10^{-7} cm/secオーダーにおいては両試験装置のデータは良く一致している。実際には、岩芯観察や物理検層などの結果をもとに、試験装置の性能を考慮していずれかの装置を選択して測定を行った。

4. 地質学的特性と水理特性との関係

地下水流動解析を行うためには、水理定数の分布、異質性を考慮した水理地質構造モデルを構築することが必要不可欠である。しかし必要な水理定数(透水係数等)は、垂直方向・水平方向ともに取得できるデータの数は限られている。また岩盤はマイクロスケールからマクロスケールまで垂直方向・水平方向に異質性および異方性を有する。水理定数の分布を推定する方法としては、①地質学的特性と水理学的特性の関係を明らかにし、水理地質学的観点からの水理定数の分布を示す方法、②間隙水圧分布から透水係数とその異方性を逆算する方法等が考えられる。このうち、②は数学的に定量に算出できるものの多数のデータと水理地質学的なコンセプトを必要とし、②のみでは検証できないという欠点を有する。したがって今回は、第1段階として①の地質学的特性と水理学的特性の関係から、水理定数の分布・異質性を明らかにする方法について検討した。

水理地質学的な検討を行うには、まず個々の地質学的特性(堆積時の物理学的環境(粒度、分級度)、供給源(堆積物の種類)、続成作用、風化作用等)を空隙率を示すものと異質性を示すものとに整理し、これらのパラメータを水理学的特性に關係する物理検層・岩芯物性試験等で得られる岩盤の物性値に一度置き換えてから行うのが有効である。

そのため今回は、地質学的特性として岩相(個別の粒度に着目)と礫岩の基質部の特性をとりあげ、原位置透水試験結果(透水係数)との相関について検討した。

本調査領域の堆積岩は、深度方向に様々な岩相を示す。そのため代表的な、シルト岩・泥岩・凝灰岩部と砂岩部、礫岩部の3グループに岩相区分し検討を行った。その結果を図-3に示す。透水係数の分布は、岩相の主要構成粒子の粒径に対応して変化する傾向が見られ、各岩相ごとの高透水係数の分布は、シルト岩・泥岩・凝灰岩部から礫岩部に向かって透水係数が高くなっている。しかし、砂岩部や礫岩部においては、2つの範囲(砂岩部 10^{-6} と 10^{-8} cm/sec、礫岩部 10^{-3} と 10^{-8} cm/secオーダー)に集中する傾向が認めら

表-1 動燃式JFTと低圧ルジオン水理試験結果の比較

測定深度 (m)	透水係数 (cm/s)		岩相
	動燃式JFT	低圧ルジオン	
36.0-41.0	7.57E-8	2.56E-7	礫岩
51.0-56.0	6.81E-6	6.54E-6	礫岩
61.0-66.0	2.19E-6	2.96E-6	礫岩
69.0-74.0	5.82E-8	7.80E-7	礫岩
74.0-79.0	5.52E-6	5.08E-6	花崗岩風化層
80.0-85.0	2.99E-6	1.66E-6	花崗岩
89.0-94.0	2.07E-6	1.55E-6	花崗岩
94.5-99.5	5.53E-7	1.77E-7	花崗岩

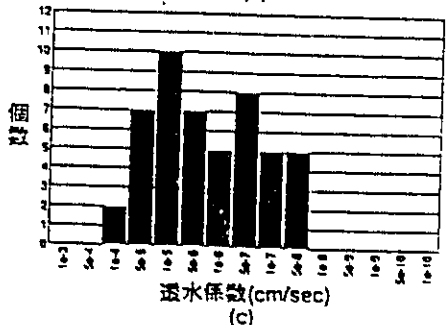
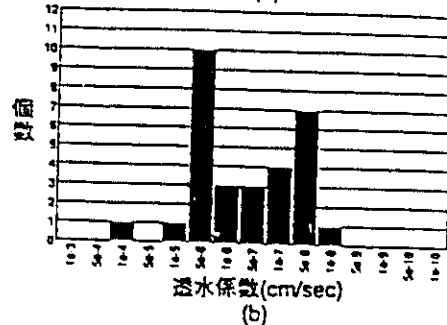
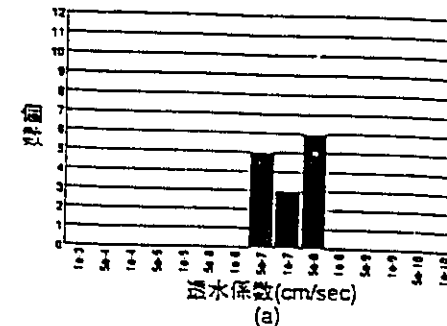


図-3(a) 泥岩・シルト岩・凝灰岩の透水係数分布
 図-3(b) 砂岩の透水係数分布
 図-3(c) 礫岩の透水係数分布

れた。このため砂岩部、礫岩部については、2つの分布傾向をより明らかにするため、砂岩部はその粒度によって凝灰質砂岩・細粒～中粒砂岩と中粒砂岩・中粒～粗粒砂岩部とに分け、礫岩部は基質部の粒度により凝灰質礫岩・細粒～中粒礫岩、中粒礫岩、中粒～粗粒礫岩部の4種類に細分割した。この結果、砂岩部においては、凝灰質砂岩・細粒～中粒砂岩部の透水係数は、 10^{-8} cm/secオーダーに集中し、中粒砂岩・中粒～粗粒砂岩部の透水係数は 10^{-6} cm/secオーダーに集中が見られ、より粒度が細くなるほど透水係数が低くなる傾向を示した。

また礫岩部も砂岩部と同様にその基質の粒度が細くなるに従い透水係数が低くなる傾向を示した(図-4)。

以上のことから、粒子が増加し、基質が減少するほど透水性は良くなるといえる。淘汰が進行するほど粒子間の空隙は大きく、しかも空隙の大きさが均一化され、透水性を左右すると考えられる。

5. 物理検層

孔内における物理検層は、試錐孔中にプローブを下ろして孔壁周辺の地層を直接的に探査する方法で、深度方向に岩盤の物性値を連続的に測定可能である。本領域で掘削された試錐孔では電気検層(比抵抗ノルマル法、電極間隔25cm, 100cm)、 γ - γ 検層、自然放射能検層が実施されている。今回は、各種調査において一般的に用いられている電気検層を取り上げて地層と透水係数との対比を試みた。

また室内物性試験結果では、比抵抗値は、空隙率、透水係数と関係があることが明らかとなっている³⁾。電気検層で得られた見掛比抵抗値と透水係数の良好な相関が認められれば、この物性値から透水係数が算出可能となる。電気検層によって測定された岩盤の見掛比抵抗値と透水係数を比較するにあたっては、100cmノルマルの値を用いて透水係数と比較した。また見掛比抵抗値を透水試験区間を代表する値とするため、透水試験区間の合成見掛比抵抗値とした。

つぎに堆積岩の透水性を支配していると考えられる粒度・固結度に着目し、大きく砂岩・泥岩部と礫岩部との2種類に分けてその関係を検討した。礫岩部においては、見掛比抵抗値は花崗岩等の巨隙の影響を受けるため、透水試験区間内で礫径1m以上のものが認められる場合は、その見掛比抵抗値を削除し礫岩部の見掛比抵抗値として透水係数と比較した。

図-5に堆積岩中で測定された透水係数と見掛比抵抗値の関係グラフを示す。見掛比抵抗値は孔内水の影響を受けるためその値そのものの誤差を考慮に入れる必要はあるが、比較的良好な相関が得られた。この結果を基に、深度方向に透水係数を推定した結果を図-6に示す。砂岩・泥岩部、礫岩部それぞれにつ

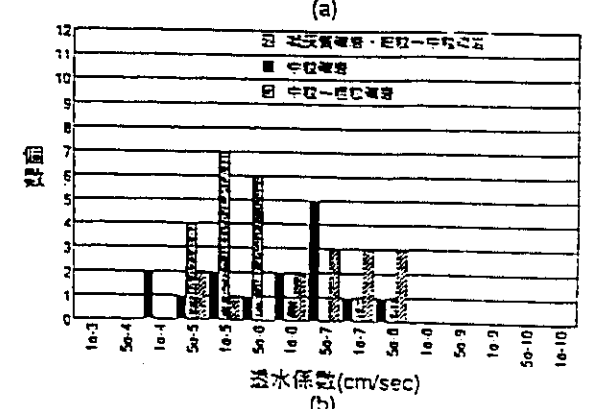
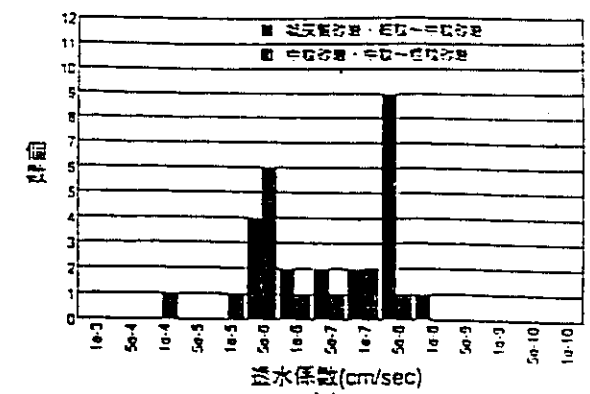


図-4(a) 砂岩の透水係数分布
 (凝灰質砂岩・細粒～中粒砂岩と中粒砂岩、中粒～粗粒砂岩の比較)
 図-4(b) 礫岩の透水係数分布
 (凝灰質礫岩・細粒～中粒礫岩、中粒礫岩、中粒～粗粒礫岩の比較)

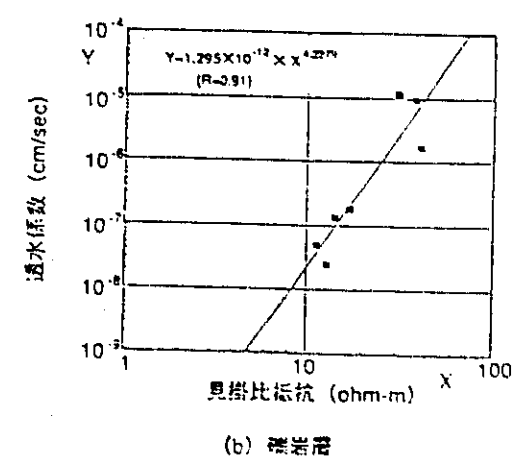
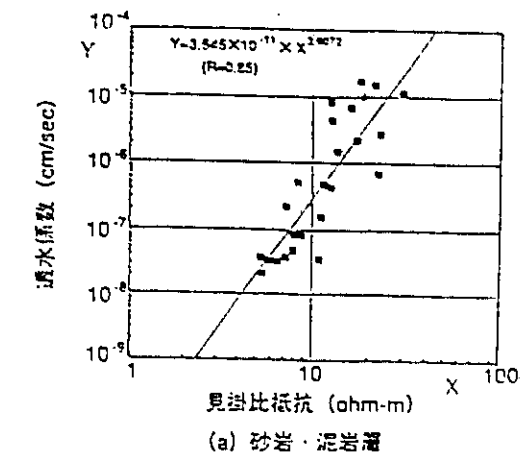


図-5 見掛比抵抗値と透水係数の関係

いて推定した結果、図中に示す原位置透水試験結果と良好な一致が得られた。このことは、電気検層の見掛比抵抗値から透水係数が推定可能であることを示している。

6. まとめ

対象としている地盤の浸透特性を評価するため、その水理試験法と他の岩芯観察あるいは物理検層結果との相関性が利用できないかどうか検討した。得られた結果は以下の通りである。

(1) 動燃式 JFT と低圧ルジオン水理試験装置の結果とは良い相関が認められた。したがって、比較的高い透水性を示す岩盤には低圧ルジオン水理試験装置を、低い透水性を示す岩盤には動燃式 JFT を用いれば良いことが分かった。

(2) 地質学的観点から粒度、分級度に着目して岩相を区分することにより、岩相の空隙率と透水係数に良好な相関関係が認められた。

(3) 電気検層から得られた見掛比抵抗値を、堆積岩の透水性を支配していると考えられる粒度・固結度に着目し、大きく砂岩・泥岩部と礫岩部に区分した。礫岩部においては、礫径 1m 以上のものが認められる場合はその見掛比抵抗値を削除して透水係数と比較した。その結果、良好な相関関係が認められた。

以上、岩芯観察結果や物理検層結果と、水理学的特性の関係が明らかとなったため、堆積岩岩盤における水理学的調査研究を行う際により効率的に作業を進める方法が確立できた。

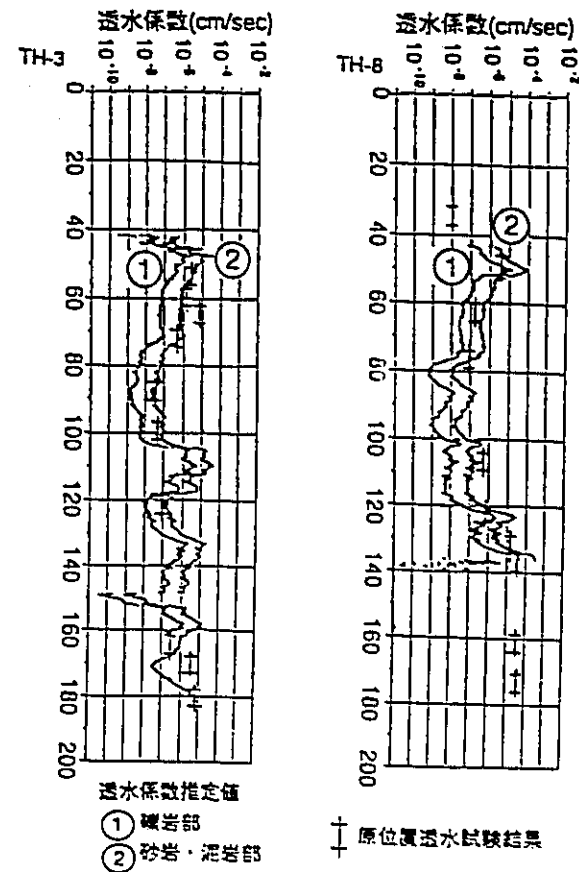


図-6 電気検層による透水係数値の推定

参考文献

- 1) 柳澤 孝一, 齊藤 章, 西垣 誠, 平田 洋一(1989): 新しい現場透水試験法(動燃式 JFT)の開発と測定例, 土と基礎, 37-7(378), pp. 47-52.
- 2) 柳澤 孝一, 中野 勝志, 平田 洋一: 定常法, 非定常法による原位置透水試験の比較検討(投稿準備中).
- 3) BRACE, W. F., J. B. WALSH and W. T. FRANGOS(1968): Permeability of Granite under High Pressure, Jour. of Geophy. Res., Vol. 73, No. 6, pp. 2225-2236.

(15) 立坑掘削の地下水流動影響予測解析 (II)

動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所 正会員 〇今井 久
 動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所 柳澤 孝一
 埼玉大学 工学部 正会員 渡辺 邦夫

Predictive Simulation of Shaft Excavation Effect on Groundwater Flow (II)

Hisashi IMAI ; Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation
 Koichi YANAGIZAWA ; Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation
 Kunio WATANABE ; Saitama University

Abstract

Shaft Excavation Effect (SEE) experiment has been conducted by Power Reactor and Nuclear Fuel development Corporation (PNC). A shaft of length 150m and diameter 6m was excavated from January 1990 to July 1991. Some hydrological parameters such as piezometric heads and inflows has been measured. A predictive simulation of shaft excavation effects on groundwater flow was carried out by a simulation code TAGSAC. The hydrogeological model was built up based on the geological structure and measured permeability. A comparison between the simulated results and the measured data showed good agreement. The hydrogeological model and the code were validated by the comparison. The SEE experiment was effective to understand the hydrological characteristics of the field.

はじめに

大深度地下空間の有効利用のための研究課題として、地下空洞掘削による周辺岩盤の水理学的・力学的影響を定量的に評価するシステム確立の必要性があげられる。動力炉・核燃料開発事業団では岐阜県土岐市にある東濃鉱山に仕上がり内径 6m 深度 150m の立坑を掘削し、立坑掘削の周辺岩盤に与える水理学的・力学的影響を定量的に評価するための立坑掘削影響試験を実施している。前回、立坑掘削の水理学的影響について事前調査計測結果を基に実施した予測解析の結果について報告¹⁾した。今回、掘削に伴い得られた実測値と、前回の予測解析結果の対比により予測解析の妥当性の検討を行ったので、ここに報告する。

1. 予測解析概要

(1) 解析領域の概要

東濃鉱山は標高 BL (標高) 250m~320m の丘陵地にある。その地形、立坑および各種計測施設の配置を図-1 に示す。解析領域は図中実線で示した尾根・谷線に囲まれた 300m×300m の範囲で、深度方向は立坑深さの約 2 倍の 300m (BL0m まで) とした。

本解析領域内には既に深さ約 130m の第 1 立坑および調査坑道が存在している。今回の試験で掘削した立坑は図中第 2 立坑として示す。また、ここでは地下水流動を包括的に把握するため、気象観測装置、河川流量計、MP システム (Multiple Piezometer System) などが設置され、掘削前から掘削後まで水圧や水収支に関する継続した計測が実施されている。MP システムとは、多数のパッカーの付いたケーシングを試験孔内に設置

し、各バッカー区間での圧力計測により鉛直方向での圧力分布を計測するシステムである。

本領域の代表的地質構造、立坑掘削前に計測されたピエゾ水頭および透数係数の分布を図-2に示す。これはTH6, TH4, TH7を含むほぼ南北方向の鉛直断面であり、東西方向に関しては本領域内ではほぼ同様な地質構造となっている。地質は基盤の花崗岩上を不整合に第三紀堆積岩、および瀬戸層と呼ばれる未固結層が覆う。また領域の中央部には粘土を含む高角度の逆断層が存在する。

(2)解析モデルの設定

解析は有限要素法を用いたため、地形、立坑、調査坑道、試錐孔などの位置、形状および、水理地質構造を考慮して要素分割を行った。水理地質構造モデルは図-3に示す。水理地質構造モデルは地質調査、透水試験結果に基づき作成した。水理地質区分は図-3に示すmat-1~mat-12の12区分とした。各区分に設定した透水係数、間隙率、比貯留係数および該当する地質を表-1に示す。不飽和特性は全て図-4に示す特性曲線に従うと仮定した。

(3)境界条件

①上部境界：涵養量として気象、水文

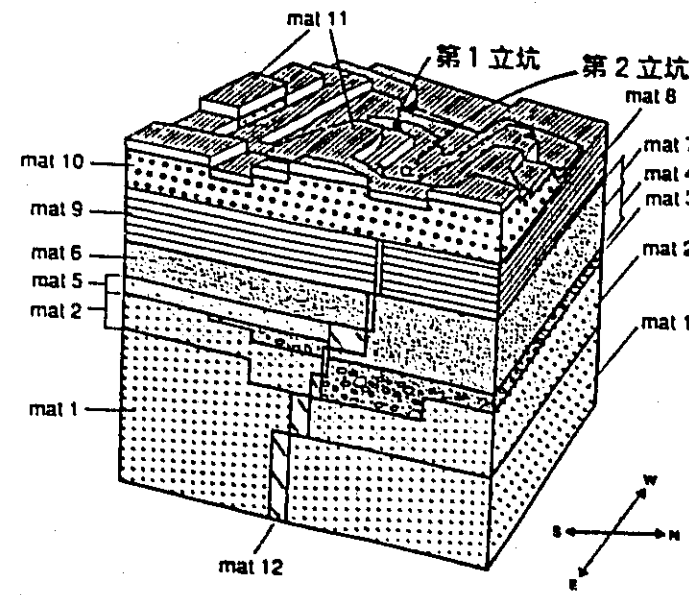


図-3 水理地質構造モデル

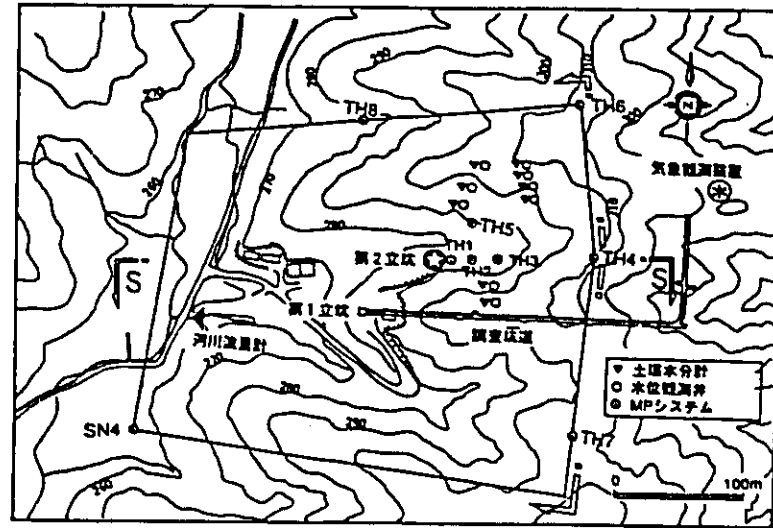


図-1 調査解析領域および計測施設配置平面図

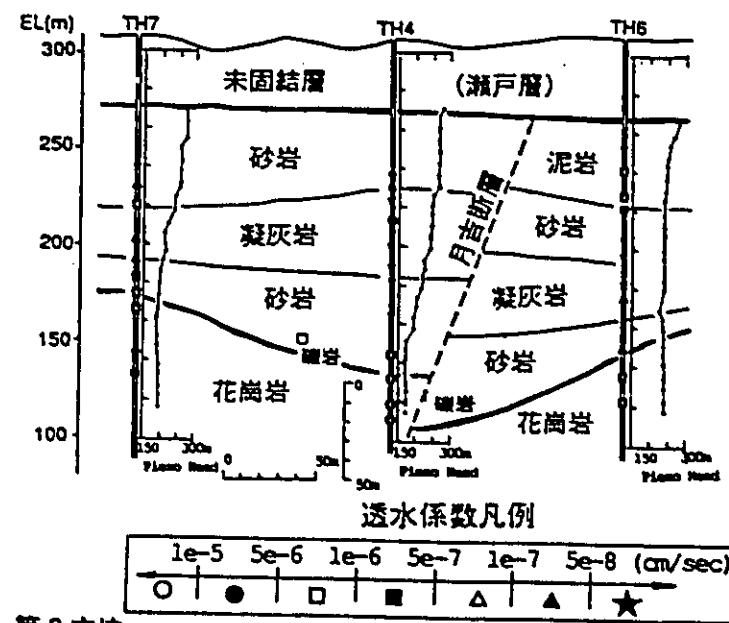


図-2 地質構造、ピエゾ水頭、透水係数分布

表-1 水理地質構造モデルの物性値

区分	透水係数 (cm/sec)	間隙率	比貯留係数 (l/m)	地質
mat 1	1.00E-07	0.02	1.00E-04	花崗岩
mat 2	5.00E-06	0.1	1.00E-04	風化花崗岩
mat 3	1.00E-03	0.3	1.00E-04	風化花崗岩・凝岩
mat 4	1.00E-06	0.3	1.00E-04	砂岩
mat 5	5.00E-06	0.3	1.00E-04	砂岩
mat 6	1.00E-06	0.3	1.00E-04	砂岩・凝灰岩
mat 7	1.00E-06	0.4	1.00E-04	凝灰岩
mat 8	5.00E-06	0.4	1.00E-04	砂岩・凝岩
mat 9	1.00E-07	0.4	1.00E-04	砂岩
mat 10	1.00E-03	0.4	1.00E-04	未固結層 (瀬戸層)
mat 11	1.00E-04	0.5	1.00E-03	粘土
mat 12	1.00E-08	0.3	1.00E-04	粘土を含む断層

観測結果に基づき0.5mm/dayを与え、自由浸出条件も付加した。②下部境界：不透水境界とした。③側部境界：境界上に存在するMP計測孔TH4, 6, 7, 8, SN4での深度方向のピエゾ水頭値分布をMP計測値および地下水位観測結果(年平均GL-15m)に基づき設定し、各MP孔間はTH4, 6, 7, 8, SN4に設定した分布に基づく予備計算および同一深度内での線形補間により側面上の境界値を設定した。④第1立坑壁面および第2立坑壁面：壁面は自由浸出条件を与えた。⑤第2立坑掘削：第2立坑掘削面位置は掘削工程に従い図-9に示す深度変化をする。そこで解析では掘削工程に沿った該当要素の除去をおこない、掘削底面に該当する節点には図-9に示す非定常な境界条件を設定して掘削工程のモデル化を行った。

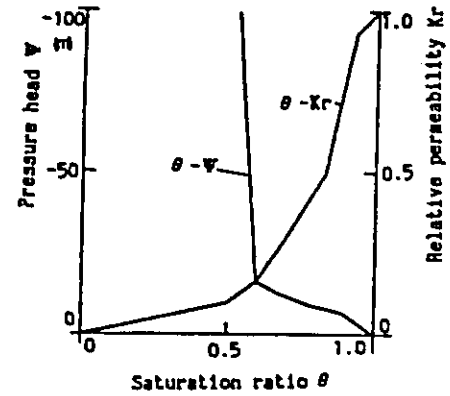


図-4 水分特性曲線

(4)初期条件

初期条件は上記境界条件において第1立坑・調査坑道のみを考慮し、第2立坑掘削前の状態での定常解析を実施し、その結果を初期条件とした。その妥当性については既存坑道内での湧水量の実測値と定常解析結果の対比およびTH1, 2, 3, 5における深度方向のピエゾ水頭分布の実測値と計算値の対比を行い確認した。

(5)前回示した予測解析の結果

- ①第2立坑掘削の影響は立坑から離れるにつれ小さくなり、その顕著な影響範囲は約100m内と想定される。
- ②第2立坑内への湧水量は掘削に伴い増加し、特に断層を過ぎ高透水性部に達した時点より急激な増加を示し、最大湧水量は30 l/minと想定される。
- ③第1立坑・調査坑道への湧水量は掘削終了近くで緩やかに減少し、その減少量は10%未満と想定される。

2. 予測解析結果と実測値

(1)MP計測孔でのピエゾ水頭分布の変化

TH1, 2, 3におけるピエゾ水頭の掘削完了時の解析結果および実測値を図-6(a)~(d)に示す。TH1, 2, 3におけるピエゾ水頭分布は解析結果と実測値で調和的である。TH5におけるピエゾ水頭分布はEL160m以深で解析結果が実測値より小さくなっている。

境界上のTH4, 6, 7, 8, SN4における掘削前と掘削完了時のピエゾ水頭の鉛直分布を図-7(a)~(e)に示す。掘削前と掘削完了時でピエゾ水頭の変化量は小さく、TH4で掘削の影響による水頭の低下が多少認められるが、全体的には境界上のMP計測孔でのピエゾ水頭の分布傾向はほとんど変化していない。

(2)掘削影響範囲

第2立坑からの距離と掘削前から掘削完了までの530日間での水頭変化量の関係をEL210m, EL135m水平面内の予測解析結果と実測値について示したのが図-7である。水頭の変化量は立坑から離れるにつれ小さくなり、EL210mで100m, EL135mで50m以上離れると変化量はほとんどなく、実測・解析結果ともに同様な傾向を示している。EL210mでは実測値は解析結果より水頭変化量がやや大きな傾向も認められる。

(3)ピエゾ水頭の非定常変化

(1)~(2)では時間断面におけるピエゾ水頭の空間的分布についてみてきたが、次に測定点の非定常変化について図-8に示す。それぞれTH1の(a)EL210m, (b)EL135m近傍におけるピエゾ水頭の非定常変化を実測・解析値を合わせて示す。図中破線で示したのは立坑底面位置の変化を示したものである。

(a)EL210m近傍では立坑掘削に応じたピエゾ水頭の低下が実測および予測解析とともにみられる。予測解析では実測に対して水頭変化がやや遅れているが、全体的によい一致をしている。

一方、(b)EL135m近傍では4.5m離れた2点の計測点では、異なった水頭低下挙動を示すことがわかる。計測点EL136.68mでは掘削に伴い掘削初期より低下を示すが、計測点EL132.18mでは掘削に伴う水頭変化は認めら

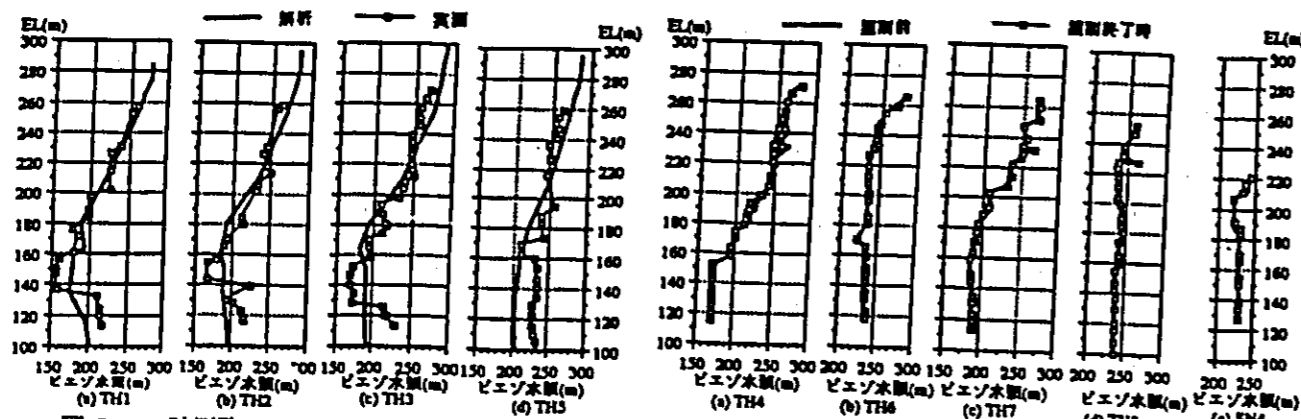


図-5 MP計測点における解析値と実測値の対比

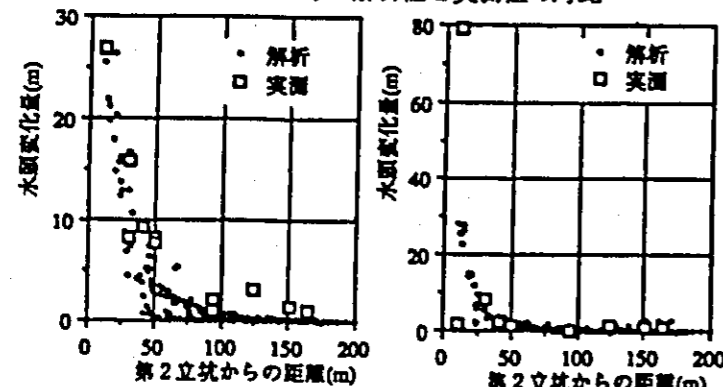


図-7 第2立坑からの距離と水頭変化量

れない。掘削終了時点ではこの2点間で約50mの水頭差が生じている。これに対し解析では、掘削開始より500日まではほとんど水頭変化はなく、500日より急激な水頭低下を示し、2つの実測値の中間的な結果となっている。また計測点EL136.68mと解析で掘削終了直前の水頭低下傾向は類似している。

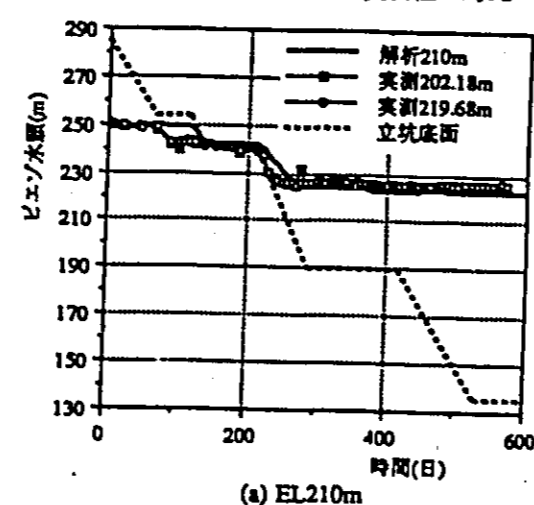
(4)第1立坑・第1立坑・調査坑道内湧水量変化

第2立坑および既存の第1立坑・調査坑道への湧水量の非定常変化を図-10に示す。実測値は工事に伴う排水等の影響を受けたデータは除き、約2週間ごとの平均値を示している。第2立坑および第1立坑・調査坑道における湧水量とも予測解析のほうが実測値よりも大きく、予測解析は実測値の1.5~2.0倍となっている。第2立坑への湧水量は、予測解析では掘削に伴い増加し、掘削最終段階で顕著な流量の増加が想定された。一方実測値は、掘削に伴う予測解析に類似した非定常変化を示し、掘削最終段階で湧水量の増加も予測解析と同様に認められる。しかし予測解析と異なり掘削休止時(300~400日)の湧水量増加が認められる。第1立坑・調査坑道内の湧水量実測値は降雨等によると考えられる流量の変動は示すが、平均的には湧水量はほぼ一定であり予測解析結果と調和的である。

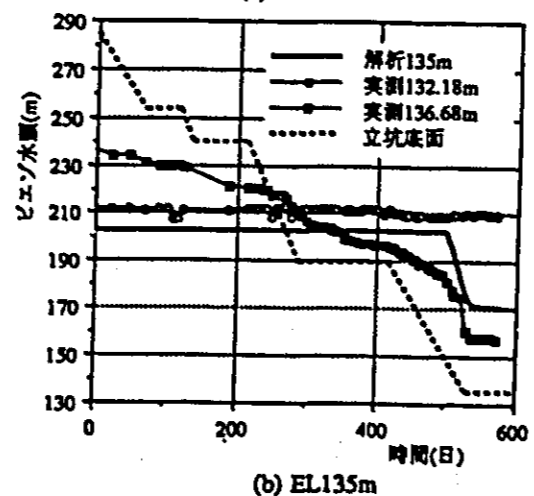
3. 予測解析妥当性の検討・考察

前回の予測解析の結果①~③について掘削開始から完了まで530日間における予測解析と実測値との対比により予測解析の妥当性を検討する。

図-6 境界部における解析値と実測値の対比



(a) EL210m



(b) EL135m

① 予測解析では3年間での顕著な影響範囲を100m以上としている。530日時点で第2立坑からの距離と水頭変化量の関係は調和的である。図-8に示すピエゾ水頭の非定常変化は530日以後水頭の低下は収まり、3年間での影響も530日の影響と同程度と考えられる。したがって影響範囲に関する予測解析は妥当であったと考えられる。

②③ 湧水量変化特性の傾向に関してはほぼ妥当なものであると考える。湧水量も解析結果は実測値の1.5~2.0倍となり、オーダー的には妥当な透水係数値の設定であった。しかし、断層を過ぎ高透水性部に達した時点より湧水量の急激な増加が予測されたが、実際には断層を過ぎても湧水量の増加や掘削面の水分変化も特に認められず、予測と違った現象も認められた。

側方境界条件は掘削にかかわらず定常に設定した。境界部で実測された掘削前後の水頭変化は少なく、定常に設定した方境界条件は少なくとも掘削終了時までに関しは妥当であった。

第2立坑部は非定常に変化する掘削工程をモデル化した。図-8に示すピエゾ水頭の非定常変化の解析結果と実測値の対比は、このモデル化手法が妥当であることを示している。また図-8で、EL210m近傍では17.5m離れた2点で計測されたピエゾ水頭およびその変化挙動が一致しているが、EL135m近傍では4.5m離れた2点での計測結果は大きく異なっている。このことは水理変化特性の水理地質区分による差の大きさと地下水挙動を把握するための水理地質区分を適確に把握することの重要性を示している。さらに掘削影響試験が場の水理地質区分を把握するのに有効であることを示している。また、水理地質の不均質性が地下水挙動に大きな影響を与えていることが理解される。

4. 結論

- ①地質構造、透水試験結果に基づき構築した水理地質構造モデルの有効性が確認された。
- ②今回用いた解析コード(TAGSAC)および立坑掘削のモデル化手法の妥当性が確認された。
- ③ピエゾ水頭の計測により局所的に地下水挙動が大きくなることが確認された。
- ④立坑掘削影響試験という実規模試験が場の水理特性を把握するのに有効であることが確認された。

おわりに

今回は地質構造調査・透水試験結果に基づくモデルにより解析を実施した。今後、電気検層²⁾・地下水化学組成分析結果³⁾など多角的観点からのモデル化手法を検討し、地下水流動評価手法の最適化・精度向上を実施していくことが必要であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 今井 久, 柳澤 孝一, 大澤 英昭, 渡辺 邦夫: 立坑掘削の地下水流動予測解析, 第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 pp.317~321
- 2) 尾方 伸久, 中野 勝志, 大澤 英昭, 柳澤 孝一, 西垣 誠: 堆積岩岩盤における水理学的特性調査, 日本応用地質学会 平成3年度研究発表会講演論文集 pp.146~149
- 3) 太田久仁雄, 瀬尾 俊弘: 東濃地域における深部地下水の地球化学的研究(Ⅲ), ㈱日本原子力学会「1991秋の大会」予稿集 p526

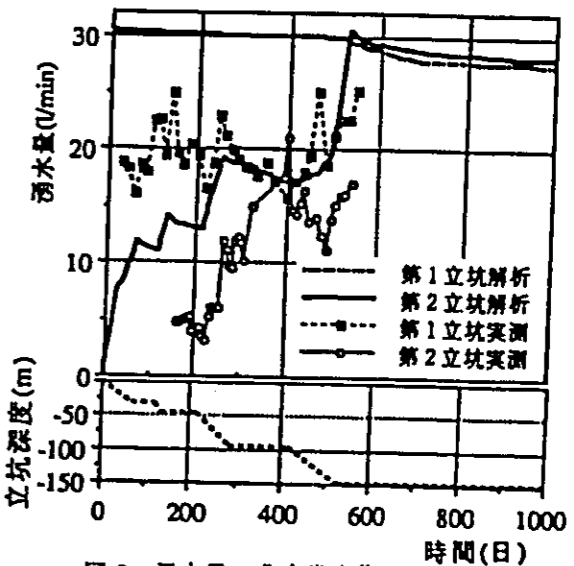


図-9 湧水量の非定常変化

堆積岩の地質学的特性および透水係数, 見かけ比抵抗相互の 関係とその水理地質構造モデル化への適用

尾方伸久*・大澤英昭*・中野勝志*・柳澤孝一*・西垣 誠**

Relationships among Lithology, Permeability and Resistivity and their Application to Modelling of Hydrogeology.

Nobuhisa OGATA*, Hideaki OHSAWA*, Katsushi NAKANO*,
Kouichi YANAGIZAWA* and Makoto NISHIGAKI**

Key words : 透水係数 permeability, 比抵抗値 resistivity, 水理地質構造モデル hydrogeological model

Abstract

For the sake of establishment of a hydrogeological model, the relationships among geological, geophysical and hydraulic properties were discussed, by the use of the data obtained from the rock formation at the Tono area.

Performances of hydraulic test equipments recently were also reviewed.

Results are summarized as follows:

- (1) The hydraulic conductivities by PNC Aquifer Test Method (JFT) are quite similar with those by low pressure Lugeon Test Method.
- (2) Lithology such as grain size and sorting coefficient correlates with hydraulic conductivity.
- (3) Apparent resistivity, measured by electric logging (100 cm normal), correlates closely with hydraulic conductivity.

The high correlation between geological and geophysical properties and hydraulic conductivity make possible to estimate hydraulic conductivities by means of lithology obtained by core logging and electric logging data.

The hydrogeological model was successfully constructed by this method.

1. はじめに

近年, 地層処分等, 地下深部岩盤を対象としたいろいろ

* 動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所 Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC), CHUBU Works.

** 岡山大学工学部土木工学科生産環境工学 OKAYAMA University Civil Engineering, Environmental Survey and Engineering.

るな地下空間利用計画が注目されている。これらに係わる技術的課題の1つに地下水流動に関する問題がある。地下深部岩盤中に存在する地下水の流れを評価するには, 一般にコンピューターシミュレーション解析を行うが, この際地形や水理地質構造をいかに簡略化しモデル化するか, 境界条件や透水係数などの水理定数をいかに現実に促した妥当な値に設定するのかが重要な課題となる。

特に地下深部岩盤の透水係数分布をいかに正確に把握

するが, 地下水流動解析結果の信頼性を大きく左右する。しかし一般に, 試錐孔を利用した原位置透水試験による水理学的データの取得には, 多大の時間と経費を必要とする。また, 断層等の水理地質構造的に脆弱な部分は, 一般に岩芯の回収率が低く, 岩芯による室内透水試験も不可能なことが多い。

このため動燃事業団では, 立坑掘削影響試験の一環として実施された地質調査結果, 試錐孔を利用した物理検層のうち電気検層結果, 原位置透水試験結果を基に岩相分布, 岩相の見かけ比抵抗分布から水理学的特性を推定する手法について検討を行ったので, その結果について報告する。

2. 調査地域の概要

2.1 調査地域

今回, 水理地質学的検討を実施したのは岐阜県土岐市に位置するウラン鉱山(東濃鉱山)周辺で, 平成元年度から行われている立坑掘削影響試験領域(図-1)である。本調査領域には, 既存立坑, 横坑, ウラン鉱床精密調査で実施された試錐孔があり, 試錐孔では岩芯観察, 物理検層が実施されている。また, 今回の立坑掘削影響試験のために掘削された試錐孔では, 岩芯観察, 物理検層, 水理試験が実施されており, ウラン鉱床精密調査,

立坑掘削影響試験両方のデータが活用できる地域である。

2.2 地質概要

本地域の地質は, 中・古生層および花崗岩類を基盤岩として, それを覆って新第三系と第四系が分布する。新第三系瑞浪層群は, 基盤花崗岩を不整合で覆って分布する。その上位には瀬戸層群が, これらを明瞭な不整合で覆って分布する。

2.2.1 基盤岩類

東濃地域には, 中生代~古第三紀の花崗岩が広く分布する(図-2(a))。この土岐花崗岩と呼ばれる花崗岩は岩相変化があまり大きくなく, 中粒~粗粒黒雲母花崗岩・斑状黒雲母花崗岩・中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩等から成り, 板状の節理が発達する¹⁾。

2.2.2 堆積岩

この地域の堆積岩は, 中新世の瑞浪層群および鮮新世~更新世の瀬戸層群から成り²⁾, 瑞浪層群はさらに下位より土岐夾炭層, 明世層, 生俣層に区別される³⁾(図-2(b))。

(a) 瑞浪層群

瑞浪層群の岩相は, 主として火山砕屑物と花崗岩砕屑物によって構成されており, ケイ化木と生物遺骸(貝化石岐夾炭層下部層が糸魚川⁴⁾の「土岐夾炭層」に, 同層上部層が「本郷層」にそれぞれ相当する。

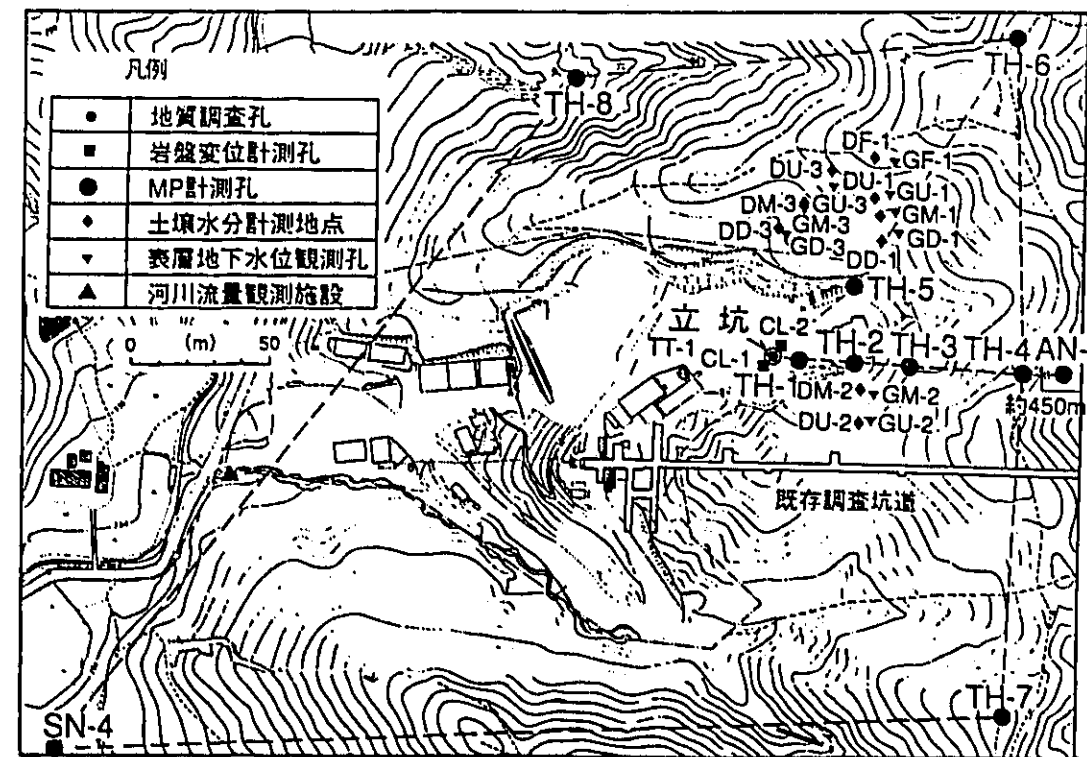


図-1 立坑掘削影響試験試錐孔および水理観測システム図

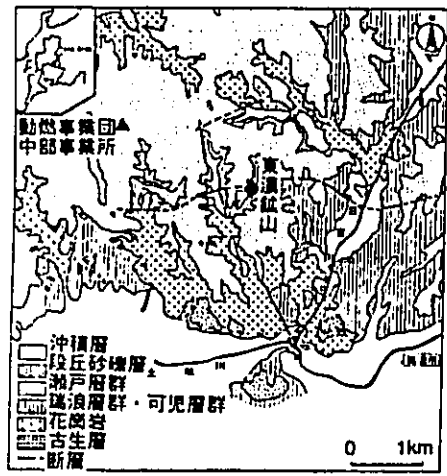


図-2(a) 調査地域の表層地質図

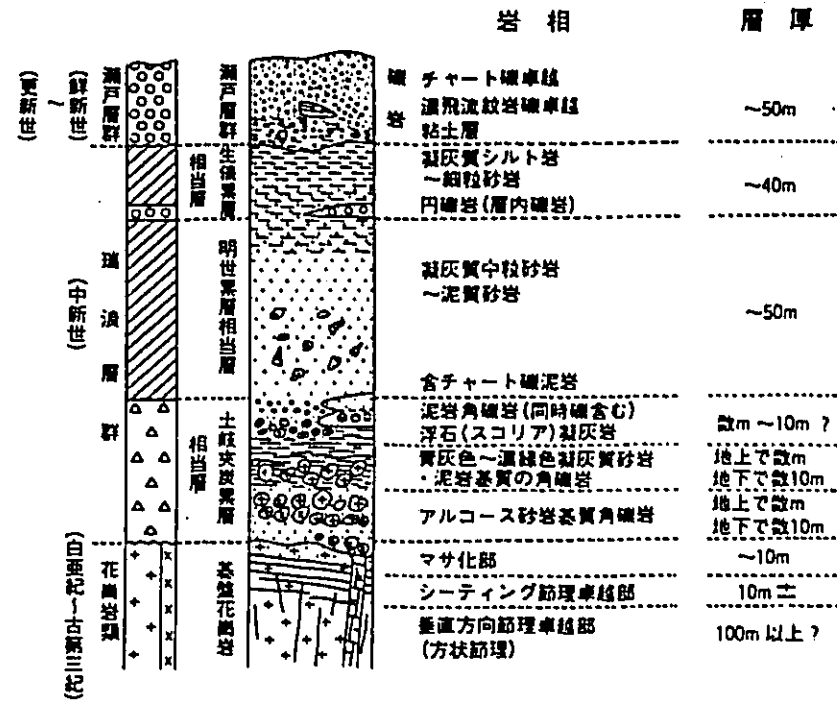


図-2(b) 調査地域の横式柱状図

石・植物化石などの大型化石等)が部分的に出現する。一般に下位ほど粒度が粗く最上部ではシルト質になっている。土岐炭炭層層は、アルコース質砂岩(花崗岩碎屑物質を多く含む砂岩)、角礫の花崗岩を含む巨礫~大礫岩から構成され、明世層層は凝灰質中粒砂岩を主体とする。生伏層層は凝灰質細粒砂岩、シルト岩を主体とする。(b)瀬戸層群

瀬戸層群は、下位の瑞浪層群や花崗岩とは不整合の関係を示しており、瑞浪層群がほぼ固結した後に調査地域を覆った堆積物である。細礫~大礫から成る円礫岩を主体とし、下位に粘土層や砂質粘土層の薄層(厚さ1~3m)を1~2層挟んでいる。その礫種は花崗岩・チャート・流紋岩・泥岩・火山岩で、基質は白色極細粒凝灰質ないしはアルコース質である。

3. 原位置透水試験

水理地質構造モデルを構築する際に必要となる岩盤の透水系数を原位置で測定する方法としては、原位置透水試験がある。しかし、難透水性岩盤を対象として透水試験を行う方法はあまり開発されていなかったのが現状である。そのため我々は、試験孔を利用した単孔式の水理試験装置である低水圧制御水理試験装置(以降、動燃式JFTと称する)⁴⁾と低圧ルジオン水理試験装置⁵⁾の2台を新たに開発し、本調査領域の測定に用いた。

3.1 試験装置の概要

動燃式JFTの原理等については、柳澤ほか⁴⁾に詳しく述べられている。ここでは低圧ルジオン水理試験装置についてその概要を示す。図-3に従来型のルジオン水理試験装置と、改良製作した低圧ルジオン水理試験装置の概念を示す。なおここで、低圧ルジオン水理試験装置を開発したのは以下の理由による。すなわち、従来型のルジオン試験はダム建設を対象としているため、透水試験の際の注入水圧が10 kgf/cm²程度と考えているが、ダムのように建設後高水圧が作用しない地盤内構造物に対しては、従来型のルジオン試験のように高圧で注水する必要がない。また、このような高圧注水試験より得た値を用いて地盤の浸透特性を評価すると、過大な値や過小な値になることがある。したがって、自然水位より少し高い圧力で岩盤に注水して地盤の浸透特性を評価する必要がある。

本装置は、透水系数の算定方法および構造が簡単であり、動燃式JFTでは測定が困難となる10⁻⁴ cm/s以上の高透水性岩盤も容易に測定できるという長所を有する。そのため、これらの長所を生かして難透水性岩盤の測定ができる構造に改良した。その改良点と特徴は、

- ① 低圧の注入圧力の制御を、レギュレータと加圧自動制御装置を用いることにより高精度な圧力制御を可能とした
- ② 容量の異なるアキュムレータにより大流量から極

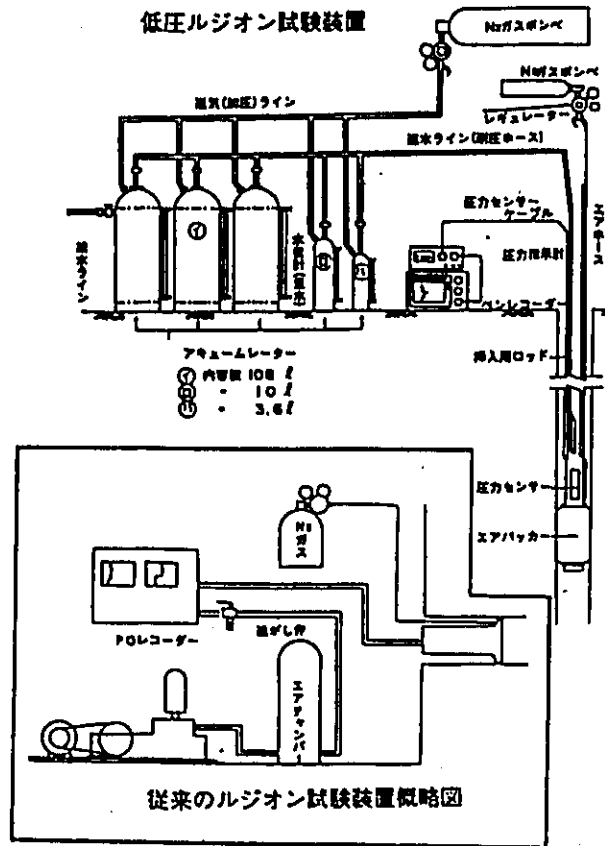


図-3 低圧ルジオン試験装置の概要

少流量まで高精度に測定可能とした
③ 圧力計を図-3に示すように透水試験の場所に設置し、注入圧力を高精度に連続モニタリング可能としたことである。

以上の改良を施した装置を用いて本調査領域の難透水性岩盤の透水系数を測定した。

3.2 原位置透水試験結果

図-4に、前述した2台の試験装置を用いて測定した本調査領域の透水試験結果を示す。また、SN-4号孔の一部の試験区間では、データの信頼性を確認するため両試験装置を用いて試験を実施した(表-1)。10⁻⁶ cm/sオーダーから10⁻⁷ cm/sオーダーにおいては、両試験装置のデータは良く一致している。したがって、岩芯観察や物理検層などの結果を基に、試験装置の性能を考慮して、いずれかの装置を選択して測定を行った。

4. 地質学的特性と水理特性との関係

4.1 水理地質学的特性

地下水流動解析を行うためには、水理定数の分布、異質性を考慮した水理地質構造モデルを構築することが必要不可欠である。しかし必要な水理定数(透水系数等)は、垂直方向・水平方向ともに取得できるデータ数は限

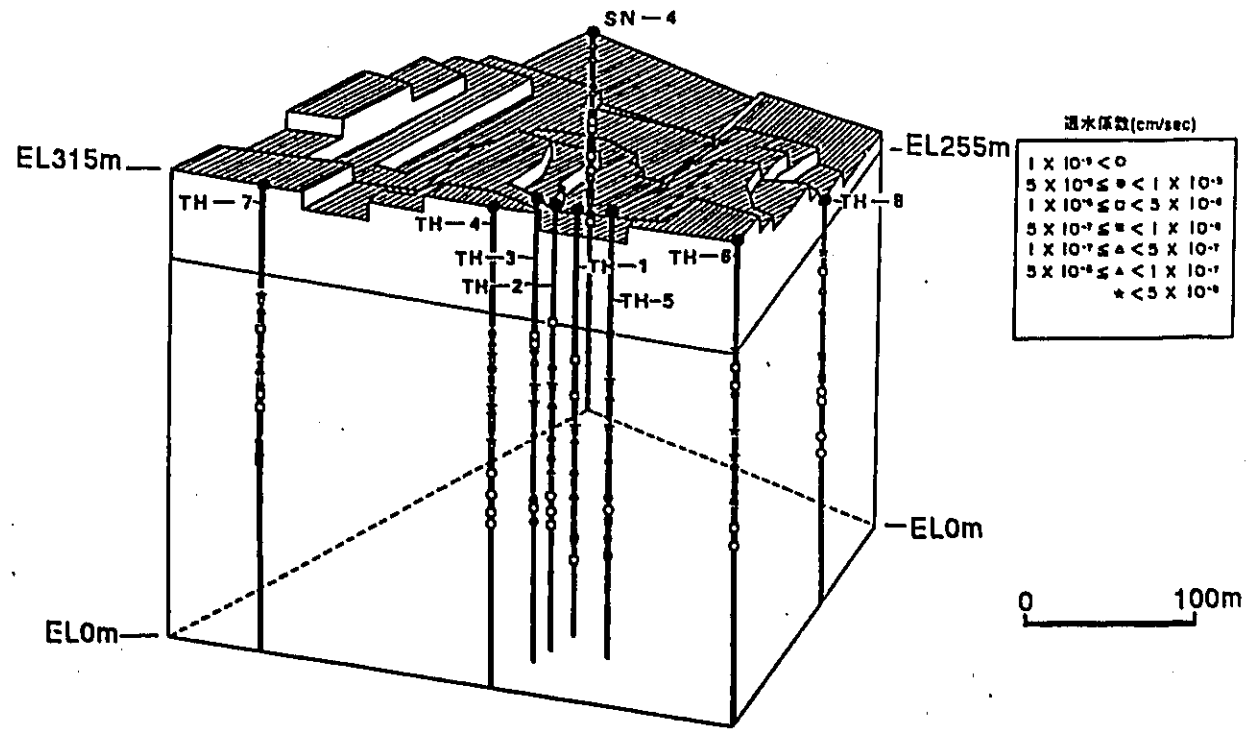


図-4 透水試験結果の一覧

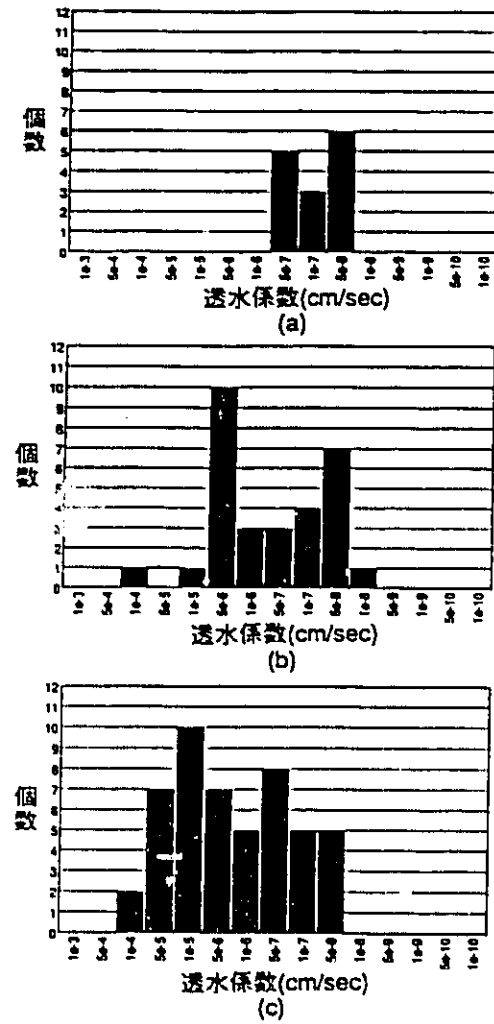


図-7 泥岩・シルト岩・凝灰岩、砂岩、礫岩の透水係数分布
(a) 泥岩・シルト岩・凝灰岩、
(b) 砂岩、(c) 礫岩

透水係数が高くなっている。また、各岩相における透水係数値の最低値は、 10^{-4} cm/s オーダーに入る。しかし砂岩部、礫岩部においては、2つの範囲（砂岩部 10^{-4} と 10^{-3} cm/s、礫岩部 10^{-5} と 10^{-3} cm/s オーダー）に集中する傾向が認められた。このため砂岩部、礫岩部については、2つの分布傾向をより明らかにするため、砂岩部はその粒度によって凝灰質砂岩・細粒～中粒砂岩と中粒砂岩、中粒～粗粒砂岩部とに分け、礫岩部は基質部の粒度により凝灰質礫岩・細粒～中粒礫岩と中粒礫岩、中粒～粗粒礫岩部の3種類に細分割し検討を加えた。その結果を図-8(a)、(b)に示す。この結果から明らかなように砂岩部においては、凝灰質砂岩・細粒～中粒砂岩部の透水係数は、 10^{-4} cm/s オーダーに集中し、中粒砂岩、中粒～粗粒砂岩部の透水係数は 10^{-4} cm/s オーダー

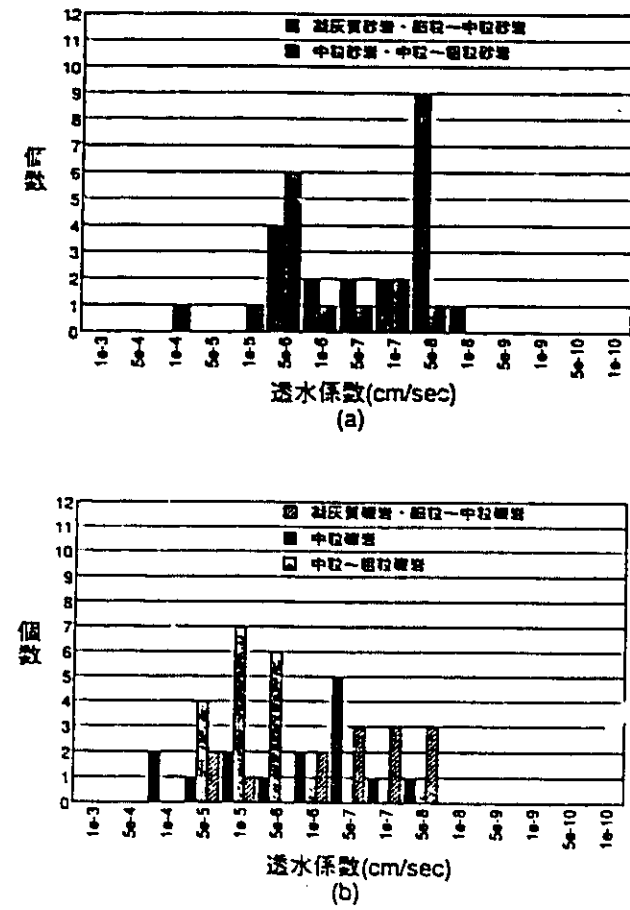


図-8 砂岩、礫岩の透水係数分布
(a) 砂岩（凝灰質砂岩・細粒～中粒砂岩と中粒砂岩、中粒～粗粒砂岩の比較）
(b) 礫岩（凝灰質礫岩・細粒～中粒礫岩、中粒礫岩、中粒～粗粒礫岩の比較）

に集中が見られ、より粒度が細くなるほど透水係数が低くなる傾向が認められる。また、礫岩部も砂岩部と同様にその基質の粒度が細くなるに従い透水係数が低くなる傾向を示す。

以上のことから、粒子が増加し、基質が減少するほど透水性は高くなるといえる。淘汰が進行するほど粒子間の空隙は大きく、しかも空隙の大きさが均一化され（図-5(a)）、透水性を左右すると考えられる。

5. 物理検層

孔内における物理検層は、試験孔中にプローブを下ろして孔壁周辺の地層を直接的に探査する方法で、深度方向に岩盤の物性値を連続的に測定可能である。本領域で掘削された試験孔では、電気検層（比抵抗ノルマル法、電極間隔25 cm, 100 cm）、 $\gamma\gamma$ 検層、自然放射能検層が実施されている。今回は、各種調査において一般的に用

いられている電気検層を取り上げて、地層と透水係数との対比を試みた。電気検層は、試験孔内に電流電極と電位電極を下ろして電流電極から地層中に電流を流し、それと近接する電位電極の電位を測定することにより、その地点の地層の比抵抗値を求めるものである¹⁰⁾。電気検層で測定される比抵抗値は、地質、孔径、孔内水の影響を受け“見かけ比抵抗値”となるが、孔壁における地質の変化を忠実に物性値として示し、地層の特性を把握することが可能である。また室内物性試験結果では、比抵抗値は孔隙率、透水係数と関係があることが明らかになっており¹¹⁾、電気検層で得られた見かけ比抵抗値と透水係数の良好な相関が認められれば、この物性値から透水係数の算出が可能となる。

5.1 比抵抗値と岩相の関係

電気検層結果および、その結果と岩相の関係をまとめたものを図-9に示す。この結果では、凝灰岩、凝灰質泥岩または砂岩の見かけ比抵抗値が最も低く約3~11 Ω mである。ついで泥岩（9~14 Ω m）、細粒砂岩（15~20 Ω m）、中～粗粒砂岩（14~30 Ω m）、礫岩（15~500

Ω m)の順に高くなる。花崗岩は風化部、割れ目集中部で種々の値（20~500 Ω m）を示す。また明世累層の細～中粒砂岩では、深度方向に徐々に見かけ比抵抗値が減少する傾向が見られ、凝灰質物質が増加する傾向を示している。明世累層相当層と土岐夾炭累層相当層の境界付近から数10 mは凝灰岩および凝灰質砂岩が分布し、最も低い見かけ比抵抗値を示す。

土岐夾炭累層では、基盤直上から礫岩→礫岩・砂岩（互層）→砂岩のサイクルが2層準存在し、徐々に見かけ比抵抗値が低くなる。土岐夾炭累層は全体的に深度方向へ高い見かけ比抵抗値を示す傾向があり、深度方向への花崗岩碎屑物質の増加が推定される。以上のことから、電気検層見かけ比抵抗値から、地層の垂直方向の異質性を連続的に物性値として観察することができる。

5.2 見かけ比抵抗値と透水性との関係

電気検層によって測定された岩盤の見かけ比抵抗値と透水係数を比較するにあたっては、100 cmノルマルの値を用いた。図-10に示すとおり、25 cmノルマルの測定値は各岩相に存在する巨礫の影響を強く受けており、

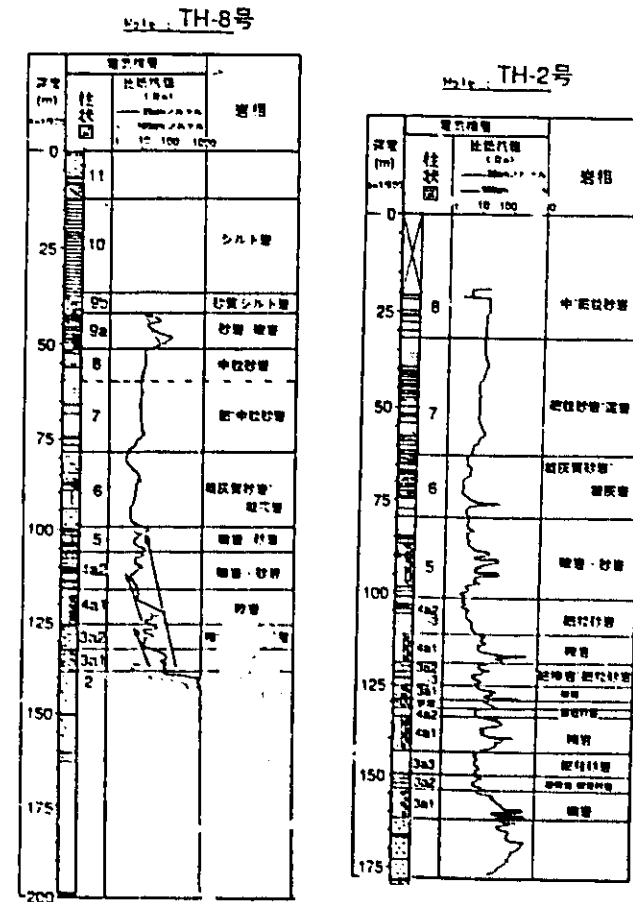


図-9 見かけ比抵抗値と岩相の関係

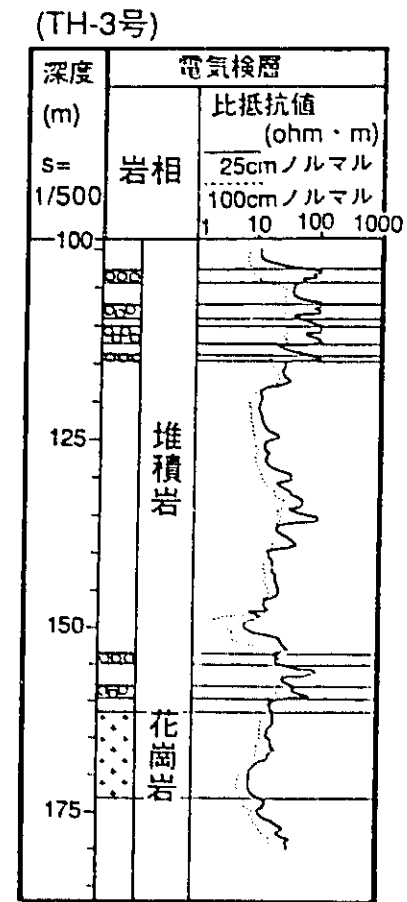


図-10 電気検層結果と花崗岩礫の影響

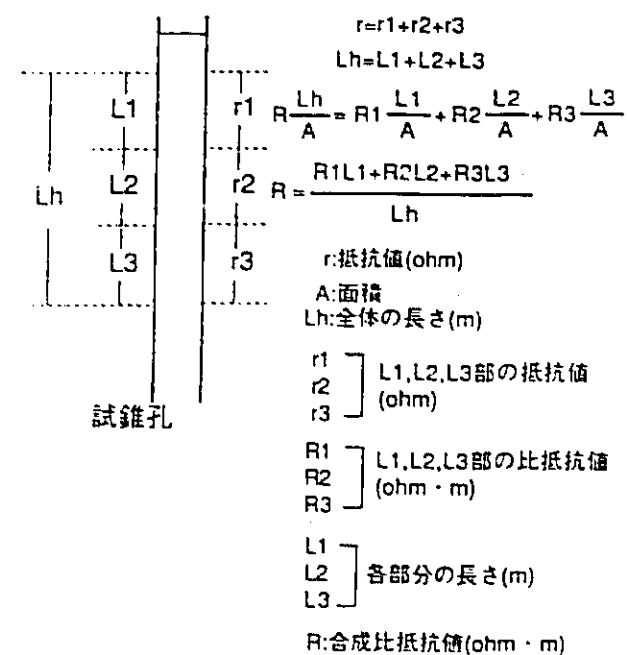


図-11 合成比抵抗の算出方法

基質部分の見かけ比抵抗値をあまり反映していない。そのため、巨礫の影響をあまり受けず（検出せず）基質部分を良く表している100 cm ノルマルの値を用いて透水係数と比較した。また、見かけ比抵抗値を透水試験区間を代表する値とするため、透水試験区間の合成見かけ比抵抗値とした（図-11）。

つぎに、堆積岩の透水性を支配していると考えられる粒度・固結度に注目し、大きく砂岩・泥岩部と礫岩部とに分けてその関係を検討した。礫岩部においては見かけ比抵抗値は花崗岩等の巨礫の影響を受けるため、透水試験区間で礫径1 m 以上のものが認められる場合は、その見かけ比抵抗値を削除し礫岩部の見かけ比抵抗値として透水係数と比較した。図-12に堆積岩中で測定された透水係数と見かけ比抵抗値の関係グラフを示す。見かけ比抵抗値は孔内水の影響を大きく受けるため、その値そのものの誤差を考慮に入れる必要があるが、比較的良好な相関が得られた。

この結果を基に、深度方向に透水係数値を推定した結果を図-13に示す。砂岩・泥岩部、礫岩部それぞれに

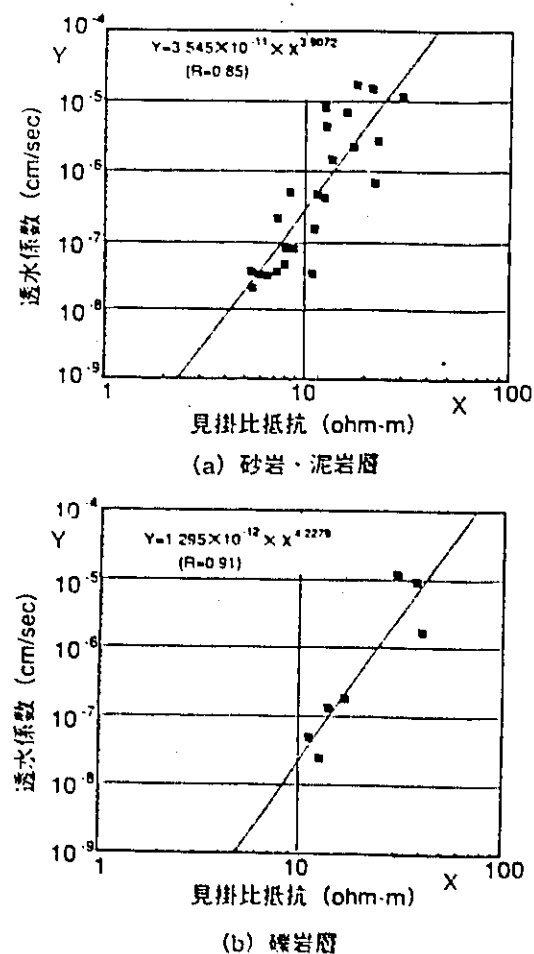


図-12 見かけ比抵抗値と透水係数の関係

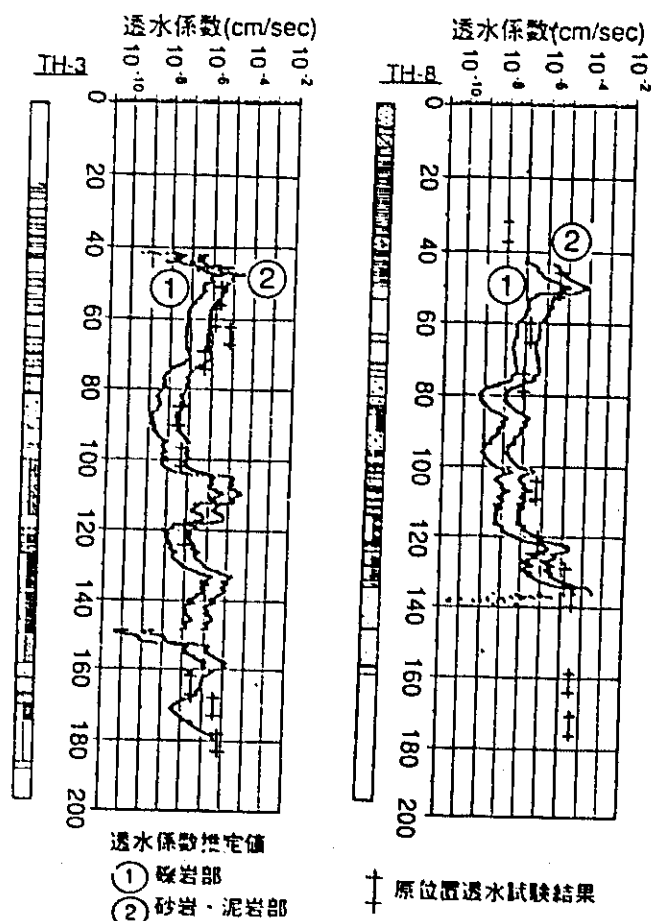


図-13 電気検層による透水係数値の推定

ついて推定した結果、図中に示す原位置透水試験結果と良好な一致が得られ、このことから電気検層の見かけ比抵抗値から透水係数を推定可能であると言える。

6. 水理地質構造モデルの構築

6.1 調査地域の水理地質学的特性

地層は、異なった堆積環境のもとで堆積プロセスにより地層と水平方向、垂直方向ともに異質性が存在し、透水係数の分布の把握を困難にする。山本⁶⁾は、異質性の特徴を(1)層状異質（例えば堆積岩の層状構造）、(2)不連続異質（例えば断層帯）、(3)漸移異質（例えば三角州・扇状地に認められる同時異相）の3つに分けている。このうち、(1)層状異質は地層の境界面と垂直方向の異質性、例えば砂岩と泥岩あるいは礫岩の互層

構造、すなわち礫岩→砂岩→泥岩と上方へ粒度が極端的に小さくなる級化構造であり、この異質性については地層と垂直方向の試錐を掘削し連続的に試験を実施することで把握できる。(3)漸移異質は、一般に地層面とは平行な方向の異質性（同時異相）が問題となる。この問題を解決するためには、多数の試錐・試験が必要となるが、地層の堆積時の環境（古地形・古地理）を考慮すれば異質性の方向、程度、特性がある程度予測可能であり、このことは水理地質構造モデルを作成するうえで重要である。

本地域では、図-14に示すように基盤花崗岩のチャ

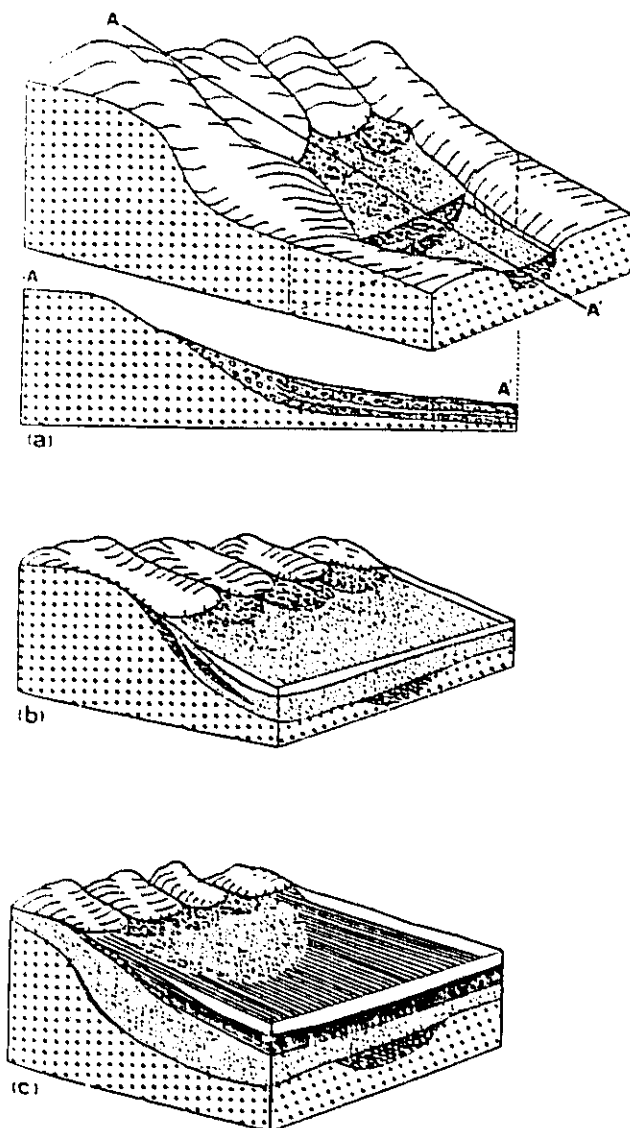


図-14 古地形・堆積環境と地層の異質性

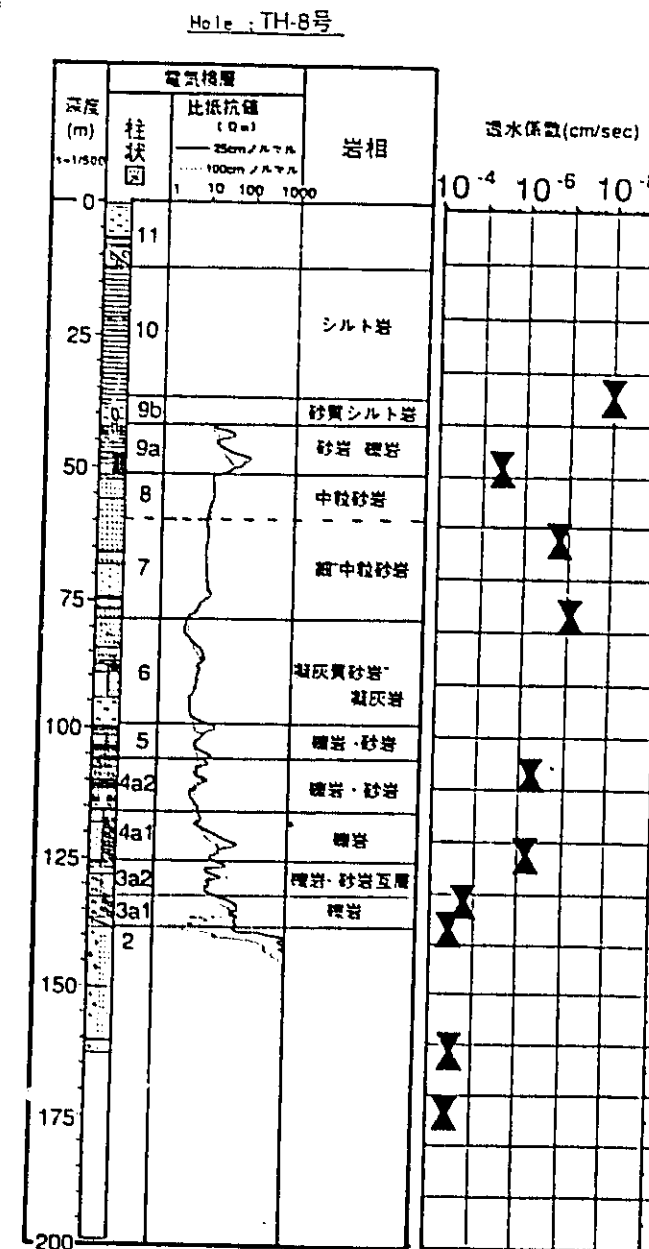


図-15 岩相・電気検層・透水試験結果

ンネル構造に支配される河川・湖成性の環境(図-14(a))から内湾(汽水から海水域へと変化(図-14(b),(c))へと変化し、その時期の古地形・古地理に支配されて岩相が分布している可能性が考えられる。河川・湖成性の環境ではチャンネル構造に沿って流下した土石流的堆積物が、勾配の緩やかな流域にたまる現象が認められ、チャンネルの形態に支配された異質性が認められる可能性が考えられる。また内湾性の環境では、内湾の出口方向(南東-南方向)に向かって粒度が漸移的に小さくなる可能性が考えられる。特にこれらの点は、広域にわたる異質性を考慮した水理地質構造モデルを作成する場合には重要である。

6.2 垂直方向への異質性と垂直区分

本稿では、地質学的特性と電気検層から得られた見かけ比抵抗値が透水係数と良好な相関関係を持つという結果に基づき、両データと原位置透水試験結果を用いて垂直方向への異質性の変化を考慮し、垂直区分を行った。図-15にはTH-8号の垂直区分と岩相、見かけ比抵抗値、透水係数の垂直方向の変化の特徴を示した。各層の特徴と透水性は以下のとおりである。

① 3a1~3, 4a1~3は下位から礫岩層(3a1, 4a1)→

礫岩・砂岩・泥岩互層(3a2, 4a2)→砂岩層(3a3, 4a3)へとサイクリックに変化する。また3a1~3→4a1~3に向かって見かけ比抵抗値が低くなり、花崗岩砕屑物主体の岩相から泥質、凝灰質物質が増加し透水係数が低くなる傾向を示す。また礫岩層(3a1, 4a1)、礫岩・砂岩・泥岩互層(3a2, 4a2)は、見かけ比抵抗値の変化も著しいと同時に水平方向の連続性も悪い。

透水係数は 10^{-5} ~ 10^{-7} cm/s オーダーの範囲内にある。

② 5層は主として礫岩から構成され、垂直方向への見かけ比抵抗値の変化も著しい。透水係数は 10^{-7} ~ 10^{-8} cm/s オーダーを示す。

③ 6層は凝灰質砂岩、凝灰岩から構成され、最も低い見かけ比抵抗値を示し、透水性は著しく低い(10^{-8} cm/s オーダーを示す)。

④ 7層は主として細~中粒砂岩、泥岩から構成され、見かけ比抵抗値の変化も小さい。見かけ比抵抗値は下位に向かって低くなる傾向が認められ、透水性も低下する。

⑤ 8層は中~粗粒砂岩から構成され、異質性も少ない。

⑥ 9層は礫岩層を主体とする9aと、砂岩、泥質岩を主体とする9bとに区分される。見かけ比抵抗値が高

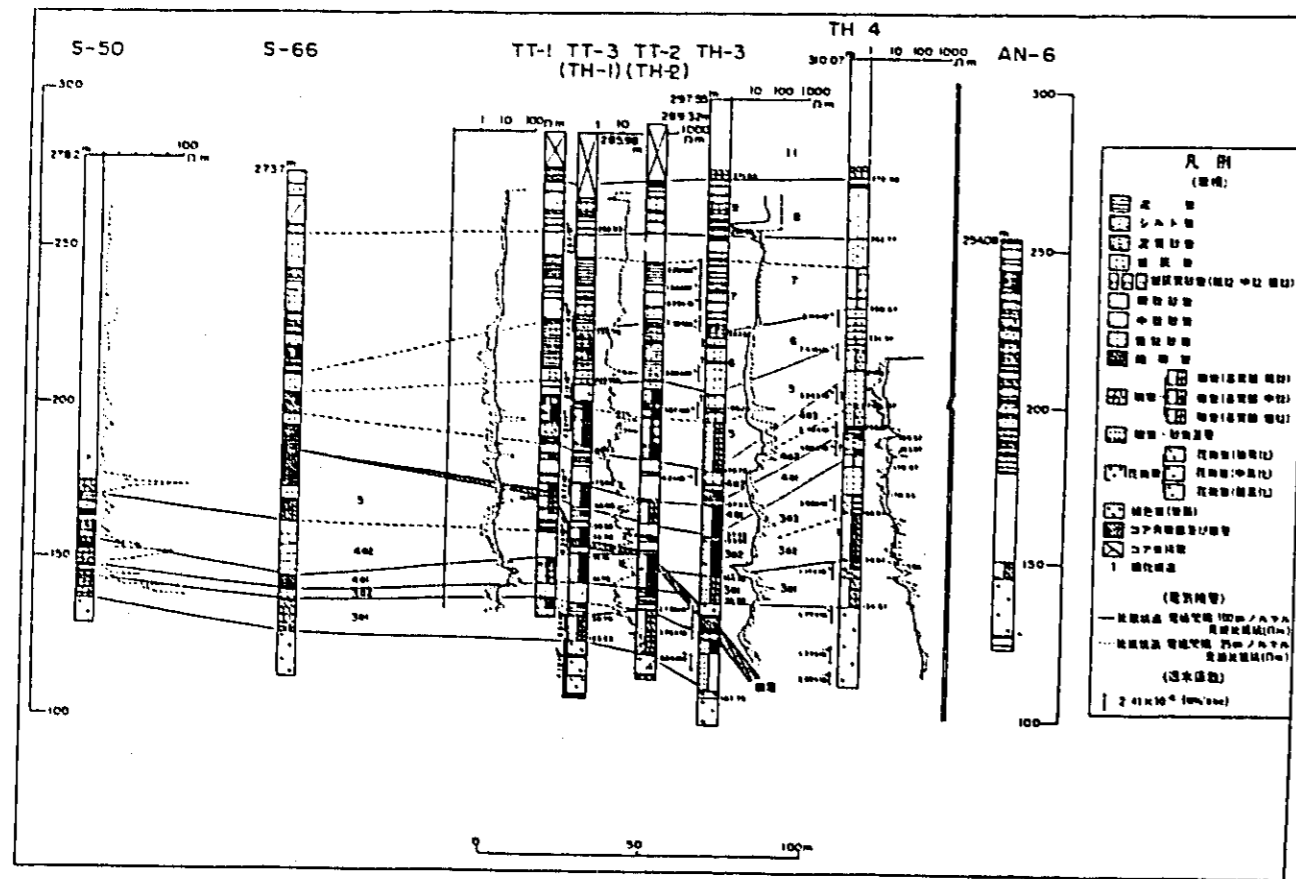


図-16 水理地質構造モデル(東西断面)

く、透水係数も高い(9a, 9b層は 10^{-6} cm/s オーダーを示す)。

⑦ 10層は主としてシルト岩から構成され透水係数が著しく低い(10^{-8} cm/s オーダーを示す)。

⑧ 11層は半固結~未固結の砂礫から構成され、透水性が著しく高い部分である。

以上、垂直区分についてのコンセプトをとりまとめた。

6.3 3次元水理地質構造解析

図-16に東西断面の代表例を示す。第6, 8層に関しては、水平方向の著しい異質性はこの地域では認められない。第7層は若干西から東へ透水性が低下する傾向が認められるが、本領域では一様と見ても差支はない。礫岩層を伴う5, 4, 3層では、各層帯で堆積サイクルは認められ、かつ物性的にも異質性が認められる。特に、3層でチャンネル中心部に向かって層厚が大きくなるだけでなく、透水係数が 10^{-5} cm/s オーダーのものが認められる。

7. まとめ

本研究では、対象としている地盤の浸透特性を評価するため、その水理試験法と他の岩芯観察あるいは物理検層結果との相関性が利用できないかどうか検討した。得られた結果は以下の通りである。

(1) 動燃式JFTと低圧ルジオン水理試験装置の結果とは良い相関が認められた。したがって、比較的高い透水性を示す岩盤には低圧ルジオン水理試験装置を、低い透水性を示す岩盤には動燃式JFTを適時利用すれば良いことがわかった。

(2) 地質学的観点から、粒度、分級度に着目して岩相を区分することにより、岩相の空隙率と透水係数に良好な相関関係が認められた。

(3) 電気検層から得られた見かけ比抵抗を、堆積岩の透水性を支配していると考えられる粒度・固結度に注目し、大きく砂岩・泥岩部、礫岩部に区分した。礫岩部においては、礫径1m以上のものが認められる場合はその見かけ比抵抗を削除して透水係数と比較した結果、良好な相関関係が認められた。

(4) 地質学的特性および電気検層から得られた見かけ比抵抗値が透水係数と良好な相関関係を持つことから、これらを考慮して垂直区分を試みた。その結果、水理地質構造モデルを作成することができた。

8. 今後の課題

今後原位試での透水試験データの蓄積をさらに一層進

めるにあたり、他の物理検層等も実施して以下の研究を続ける予定である。

(1) 水理地質学的データ(地質学的特性、地球物理学的特性、水理学的特性)を空隙率という観点から定量化し、透水係数を推定する。また、地表物理探査等で得られる広い領域の岩盤の見かけ比抵抗値との関係を把握する。

(2) 垂直方向・水平方向の地質学的特性の異質性と透水係数の分布やその異方性を検討し、堆積環境を考慮した水理地質コンセプトと、異質性・異方性を持った岩盤の透水係数の設定法を確立する。

(3) 実態に促した水理地質構造モデルを構築するための最適試錐孔間隔を決定する手法を確立する。

謝辞 本論文を取りまとめるに当たり、助言をいただいた埼玉大学工学部 渡辺邦夫助教授に心から御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 石原賢三, 鈴木康夫(1969): 東濃地方ウラン鉱床の基盤花崗岩類, 地質報告, No. 232, pp. 113-128.
- 2) 藤田和夫(1983): 日本の山地形成論, 青樹書局, 466 p.
- 3) 糸魚川淳二(1974): 瑞浪層群, 研究史, 瑞浪化石博覧会, No. 1, pp. 3-8.
- 4) 柳澤孝一, 齊藤 卓, 西垣 誠, 平田洋一(1989): 新しい現場透水試験法(動燃式JFT)の開発と測定例, 土と基礎, 37(7)(378), pp. 47-52.
- 5) 柳澤孝一, 中野勝志, 平田洋一: 定常法, 非定常法による原位置透水試験の比較検討(投稿準備中)
- 6) 山本莊賢(1989): 新版地下水調査法, 古今書院, 490 p.
- 7) DAVIS, S. N. (1969): Porosity and permeability of natural materials. Flow Through Porous Media, ed., R. J. M. De Wiest. Academic Press, New York, pp. 54-89.
- 8) SIPPEL, R. F. (1968): Sandstone petrology, evidence from luminescence petrography, Jour. sedim. Petr. Vol. 28, pp. 530-554.
- 9) SELLEY, R. C. (1978): Porosity gradients in North Sea oil-bearing sandstones, Jour. geol. Soc. Lond. Vol. 135, pp. 119-131.
- 10) 伊藤寿恒(1981): 深層ボーリングにおける物理検層の現状, 月刊地球, Vol. 3, No. 2, pp. 83-105
- 11) BRACE, W. F., J. B. WALSH and W. T. FRANGOS (1968): Permeability of Granite under High Pressure, Jour. of Geophys. Res., Vol. 73, No. 6, pp. 2225-2236.

(1991年8月15日受付, 1991年11月30日受理)

The Shaft Excavation Effects Experiment on Hydrology in the Tono Research Field

Kazuo FURUYA, Koichi YANAGIZAWA, Hisashi IMAI, Nobuhisa OGATA (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, Japan)

Descriptions are given of the study on the shaft excavation effects on hydrology around the Tono Uranium Mine, which lies about 40 km northeast of Nagoya in central Japan. A shaft of length 150m and diameter 6m has been excavated. The objective of this study is to evaluate the influence of the shaft excavation on groundwater flow system. The study consists of four steps;

The first step is to understand the field where groundwater flows. The second step is to simplify and model hydraulic conditions such as hydrogeological structure. These two steps were conducted based on the field data. In order to obtain these data, hill slope hydrological investigations were carried out by monitoring of rainfall, surface runoff, evaporation, soil retention and groundwater table. The approximate recharge in the the rock mass is 0.57mm/year. Also the borehole investigation was conducted including core logging, geophysical logging, permeability test and monitoring of hydraulic potential.

The third step is to predict the hydraulic effects of excavation by the use of a numerical model based on Darcy's law. The hydraulic effect induced by the shaft excavation was simulated by three-dimensional finite-element analysis of saturated-unsaturated flow in an equivalent porous media. The results of predictive analyses are summarized as follows; (1) The maximum inflow into the shaft is about 30 l/min at the final excavation stage. (2) Variation of the hydraulic potential in the rock mass decreases with distance from the shaft. (3) The hydraulically affected area by the shaft excavation is estimated to be within 100m.

At the final step, the results of the predictive analyses will be compared and examined with those of the measurement for validation of the model.

•Speaker's name and mailing address: (Please type)

Kazuo Furuya
Chubu Works, Power Reactor and Nuclear Fuel
Development Corporation
959-31 Sonodo, Joringi, Toki-shi, Gifu, 509-51,
Japan

Telephone: 0572-54-1271
Fax: 0572-55-4114
Telex: _____

•Symposium Session Number and Session Title (first 2 or 3 words):

No. of 1st choice: _____ Oral _____ Poster _____ Either _____ (Check) Title: _____
No. of 2nd choice: _____ Oral _____ Poster _____ Either _____ (Check) Title: _____

•No session fits my topic. _____ (Please check)

•I submit another abstract of which I am the first author: Yes _____, No _____ (Please Check)

II-20-5 O-14 5252

The Shaft Excavation Effects Experiment on Hydrology in the Tono Research Field

Kazuo FURUYA, Koichi YANAGIZAWA, Hisashi IMAI, Nobuhisa OGATA (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, Japan)

Descriptions are given of the study on the shaft excavation effects on hydrology around the Tono Uranium Mine, which lies about 40 km northeast of Nagoya in central Japan. A shaft of length 150m and diameter 6m has been excavated. The objective of this study is to evaluate the influence of the shaft excavation on groundwater flow system. The study consists of four steps;

The first step is to understand the field where groundwater flows. The second step is to simplify and model hydraulic conditions such as hydrogeological structure. These two steps were conducted based on the field data. In order to obtain these data, hill slope hydrological investigations were carried out by monitoring of rainfall, surface runoff, evaporation, soil retention and groundwater table. The approximate recharge in the the rock mass is 0.57mm/year. Also the borehole investigation was conducted including core logging, geophysical logging, permeability test and monitoring of hydraulic potential.

The third step is to predict the hydraulic effects of excavation by the use of a numerical model based on Darcy's law. The hydraulic effect induced by the shaft excavation was simulated by three-dimensional finite-element analysis of saturated-unsaturated flow in an equivalent porous media. The results of predictive analyses are summarized as follows; (1) The maximum inflow into the shaft is about 30 l/min at the final excavation stage. (2) Variation of the hydraulic potential in the rock mass decreases with distance from the shaft. (3) The hydraulically affected area by the shaft excavation is estimated to be within 100m.

At the final step, the results of the predictive analyses will be compared and examined with those of the measurement for validation of the model.

論文

立坑掘削に伴う地下水流動影響調査研究

—東濃ウラン鉱山試験立坑を例として—

柳澤孝一*・今井 久*・尾方伸久*
大澤英昭*・渡辺邦夫**

Shaft Excavation Effect Project on Groundwater Flow — Case Study at the Test Shaft in the Tono Mine, central Japan —

Koichi YANAGIZAWA, Hisashi IMAI, Nobuhisa OGATA,
Hideaki OSAWA and Kunio WATANABE

Key words : 立坑 shaft 水理地質構造モデル hydrogeological model 地下水流動解析 analysis of groundwater flow

Abstract

In order to evaluate the shaft excavation effect on groundwater flow, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation has been excavating the test shaft 6 meter in diameter and 150 meter in depth at the Tono Uranium Mine, Central Japan.

In this project, a hydrological evaluation system was set up to understand the shaft excavation effect on groundwater flow. This system consists of groundwater investigation, hydrogeological modeling, predictive simulation and long term observations of the groundwater flow.

The results are as follows :

- (1) From the hydrological observation during a year, the recharge rate from the unconsolidated formation situated in subsurface zone into the rock mass was calculated to be 0.57 mm/day.
- (2) The hydrogeological model was divided into 12 layers from the results of geological survey, geophysical logging and *in-situ* hydraulic tests.
- (3) From the results of the predictive simulation and observations, the area where pore pressure was changed by the excavation was within 100 meter around the shaft and it was proved that the inflow into the existing shaft and drift was not affected by the excavation.
- (4) The predictive simulation and measured data show good agreement.
- (5) The availability of the modeling and the simulation, and the efficiency of the hydrological evaluation system have been confirmed.

* 動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所 Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, Chubu Works

** 埼玉大学工学部 地質水理実験施設 Hydroscience and Geotechnology Laboratory, Saitama University

1. はじめに

近年、地下深部岩盤を対象としたいろいろな地下空間利用計画が注目されている。これらに係わる技術的課題の1つとして地下水流動に関する問題があり、地下施設的设计・建設などを適切に行うためにも、立坑や水平坑道などの掘削による周辺岩盤内の地下水への影響を正確に把握することが重要となっている。このため、動力炉・核燃料開発事業団では、立坑掘削影響試験として岐阜県土岐市中部事業所東濃ウラン鉱山敷地内に仕上がり内径6m・深さ150mの立坑を掘削し、立坑掘削に伴う周辺岩盤への水理的・力学的影響について実規模の原位置試験により調査研究を進めている。

本論は、立坑掘削の地下水流動に与える影響について、①立坑掘削事前調査として実施された表層部を対象とした水理調査(以下表層水理調査という)、②深部岩盤を対象とした水理調査(以下深部水理調査という)、③水理地質構造モデルの構築、④地下水流動予測解析、⑤長期観測値と予測解析結果との比較検討、⑥モデルの検証、という一連の地下水流動特性評価システムのうち①、②、③、④、および⑤の一部について報告する。

2. 調査試験研究概要

2.1 調査試験研究の目的

本調査試験研究は、立坑掘削に伴う周辺岩盤内の地下水流動に与える影響を調査解析することにより

- (1) 断層等の不連続面を有し、不均質性の卓越した岩盤の多孔質媒体としてのモデル化を試み、このモデルにダルシー則に基づく非定常3次元飽和不飽和浸透流解析を適用し、立坑掘削に伴う岩盤内の地下水流動特性を数値解析によりシミュレーション可能であることを確認すること
- (2) ①現象の把握(場の理解)、②水理地質構造モデルの構築(場のモデル化)、③地下水流動予測解析(シミュレーション)、④長期観測値との比較(モデルの検証)、という一連の地下水流動特性評価システムが調査領域の地下水流動特性および地下水流動の場の有する特性を把握するのに有効であることを確認すること

を目的に実施している。

2.2 試験位置および地形・地質概要

立坑掘削試験は名古屋市の北東約35kmの岐阜県土岐市東濃ウラン鉱山敷地内で実施されている。そこは標高300m前後の丘陵性山地からなっている。地質は、

試験地域の基盤をなす関東帯の苗木・上松型花崗岩、花崗岩を被覆する新第三紀中新世の瑞浪層群と鮮新世の瀬戸層群、ならびに沖積層からなる。花崗岩上部は、厚さ数mの風化部が認められる。瑞浪層群は、下部から土岐夾炭層、明世層、生炭層に区分されており、主としてシルト岩、泥岩、砂岩、礫岩およびそれらの互層からなり、亜炭層、凝灰岩層を挟む。瀬戸層群は花崗岩、瑞浪層群を不整合に覆って分布する。瑞浪層群は、花崗岩の旧河川路チャンネル凹部を埋めるように分布しており、土岐夾炭層中にウラン鉱床が賦存する。また、花崗岩および瑞浪層群を切る走向傾斜N80°E60°Sの逆断層が発達しているが、瀬戸層群には影響を与えていない。(図-1,6)

2.3 調査試験地周辺の水理地質概要

調査試験解析領域を含む本地域の大局的な地下水流動を把握するため、東濃鉱山を中心とし周辺を尾根および河川で境された南北約5km東西約6kmを対象に洪水期の比流量観測、河川水の電気伝導度を計測している。また、基盤花崗岩の割れ目・風化および堆積岩の粒度構成に着目し地表踏査・試験調査を実施し、併せて原位置透水試験も実施した。

その結果、本地域の水理地質的構成を大きく分類すると、上位より

- ①透水性の高い瀬戸層群
- ②透水性の低い瑞浪層群

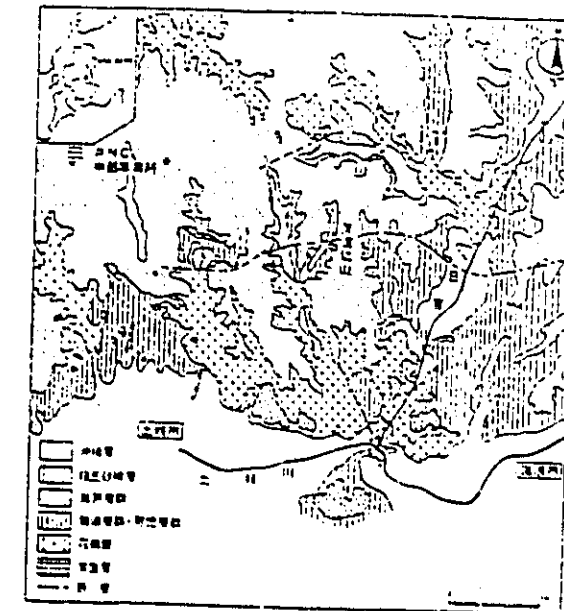


図-1 調査地域の地質図

- ③透水性の高い珪状層下部、およびその下に不整合面を介して存在する基盤花崗岩風化部
- ④透水性の低い基盤花崗岩

また、こうした調査結果に基づき、東濃鉱山を中心とした尾根および河川で境された南北約5km東西約6kmを対象に地下水流動解析を実施した³⁾。その結果、地表付近の地下水の流れは局所的な地形に沿ったものであり、地表下数十m以深の地下水の流れは、より大きな地形形状や水理地質構造により規制されていることがわかった。特に試験立坑周辺では、基盤花崗岩の上面形状によると考えられる北西から南東に向かう地下水の流れになっていることがわかった。

2.4 試験立坑の概要

試験立坑は、仕上がり内径6m、仕上がり深度150mで、厚さ40cmのコンクリート覆工が施工される。本試験立坑には、仕上がり内径4.5m、長さ20mの第一・第二計測坑道、仕上がり内径3m、長さ10mの4本の水平坑道が設けられる(図-2)。岩盤は発破工法を用いた1.2m毎のショートステップ工法により施工される。工期は1990年1月から1991年7月にかけて1年半にわたる⁴⁾。

2.5 水理学的調査試験研究の概要

ある地域内の地下水流動特性および地下水流動の場の有する特性を評価する方法を確立するため、立坑掘削影響試験の中で、その評価方法の適用を試みている。

ここでは、立坑掘削に伴う地下水流動特性への影響評価システムとして

- ① 場の理解：各種事前調査・試験による地下水流動の場の有する現象の把握と特性の把握
- ② 場のモデル化：①の結果に基づく水理地質構造モデルの構築
- ③ シミュレーション：①、②の結果に基づく地下水流動于測解析
- ④ モデルの検証：長期観測値と于測解析の比較

という4項目からなる一連の各種調査・解析による地下水流動特性評価システムを設定した。

具体的には、調査対象区域として、簡易な掘削影響範囲の事前検討結果と試験地周辺の地形形状等を勘案して、立坑を中心として約300m四方の区域に設定した。この区域内では、表層水理調査として地表からの地下水涵養量を推定するため、地表部に広く分布する未固結層(瀬戸層群砂礫層)を対象として自由地下水面観測井、気象観測施設、河川流量観測施設等を配置し、事前調査を実施している。また深部水理調査として、深部岩盤中

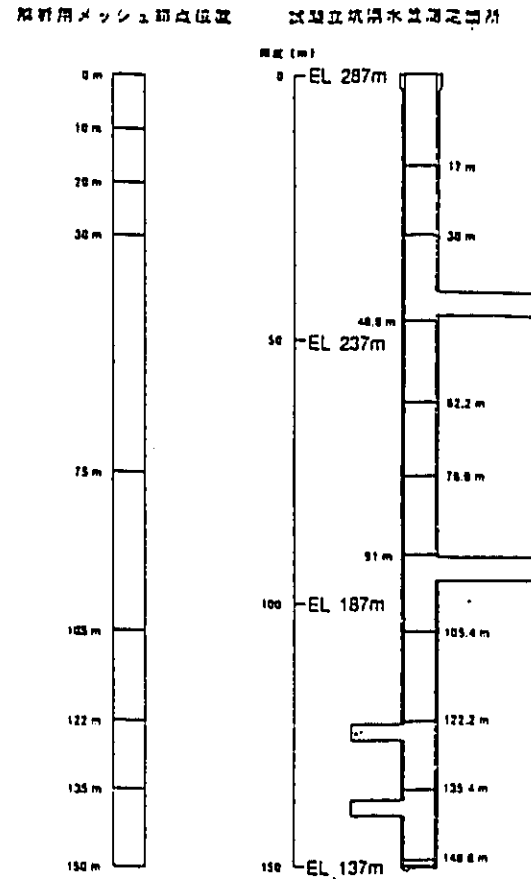


図-2 試験立坑概観図

(珪状層群泥岩・砂岩・礫岩および花崗岩)の水理地質状況を把握する目的で、試験坑を利用し、物理探層、ポアホールテレビによる孔壁観察、原位透水試験、岩芯観察等を事前調査として実施している。また、試験坑内にマルチパッカー方式のケーシングシステム(4.4.1MPシステムで詳述)を設置(常設)して層別に止水された各帯水層毎の間隙水圧の事前調査を実施している。こうした事前調査結果を基に3次元の水理地質構造モデルを構築し、3次元非定常飽和不飽和浸透流の有限要素法を用いた数値解析を適用して、立坑掘削中、掘削後の地下水流動の変化予測を実施している。さらに、表層水理調査の各種観測および深部岩盤内のMPシステムによる間隙水圧の計測は、掘削中、掘削後も継続されることになっている。

以上のように、本水理学的調査試験研究は、地下水流動をその流入から流出を包括的に捉え、さらに各過程での水理特性(水理定数)を直接的に捉えられるよう進められている。

3. 表層水理調査

3.1 水収支観測

表層部からの地下水涵養量を推測するために、表層部に広く分布する瀬戸層群未固結砂礫層を対象に、9箇所に土壌水分計および自由地下水面観測孔を配置した。また、気象観測施設、河川流量観測施設を各1箇所ずつ配置して長期連続観測を実施している。(図-3)

土壌水分計はポラスカップを使用した土壌水分感圧センサーで、土壌水分に平衡な圧力(正圧)および張力(負圧)を1計測地点につき8深度(20, 40, 60, 100, 150, 200, 300, 500cm深度)検知し、水理水頭値として地上部の計測装置でデジタル変換し、10分毎にデータロガーへ入力され、パーソナルコンピュータで収集している。

自由地下水面観測には、試験坑を利用してストレーナを介し水圧式の水位検出器を任意の深度に設定し、その信号をデジタル変換し、10分毎にメモリーカードに収録し、RS232Cを介してパーソナルコンピュータに転送している。

河川流量は、降雨量が季節毎に異なるためその流量も変化する。また、流域面積が異なると河川流量は大きく異なるため、対象流域に適した測定容量の計測機器を設置する必要がある。そのため本地域では、洪水期から大雨に対応すべく、観測流域面積に応じた大流量パージアルフリューム・小流量パージアルフリュームを1組としたフロート式流量計による河川流量計(測定範囲8~40000 l/min)を計測箇所を設置した。このデータは、デジタル変換により10分毎にメモリーカードに記録される。気象観測としては平均風向・平均風速・平均気温・平均湿度・日降水量・日日照量・日直射量・日示差放射量・日蒸発量・平均気圧を10分毎に測定し、パーソナルコンピュータに収録している。

3.2 涵養量の算定

調査解析対象領域内の河川流量観測が開始されて間もないため、表層部の水収支の検討は、調査解析対象領域の東側に隣接する流域での河川流量観測地点の河川流量データを用いて実施した。なお、この流域面積は0.535km²である。

流域の水収支は次式で表すことができる⁴⁾。

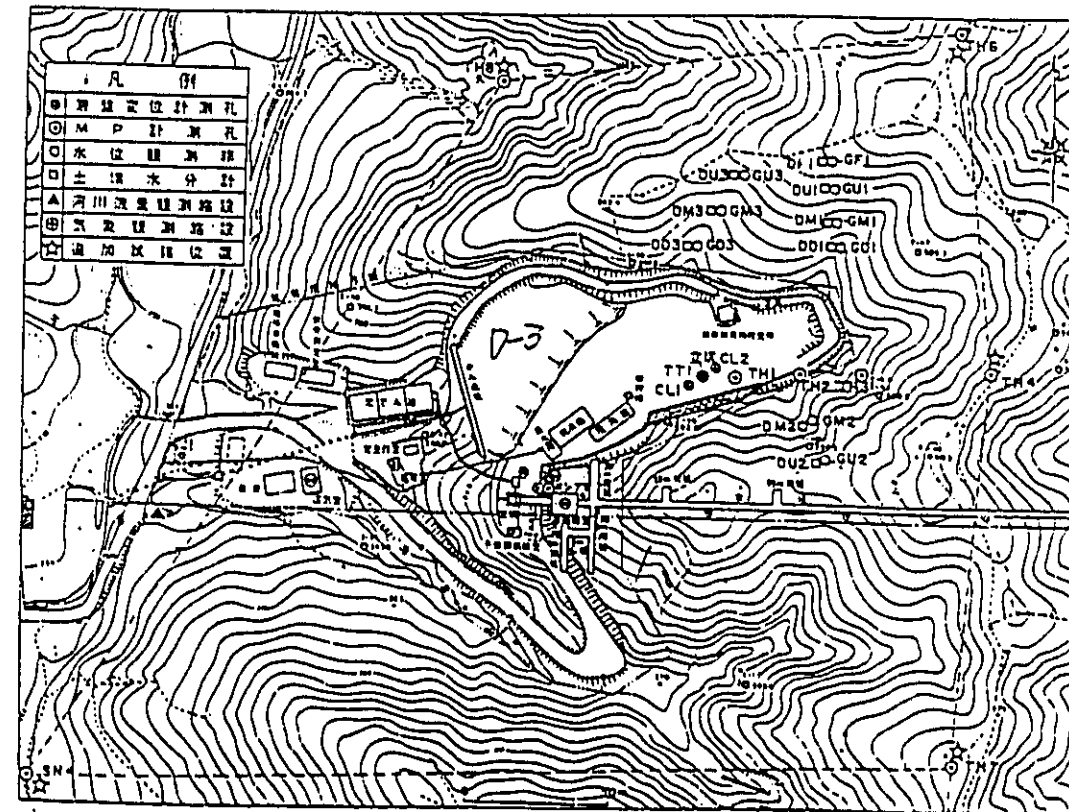


図-3 試験立坑周辺地下水流動調査施設配置図

$$P = E + Q + \Delta W + \Delta S + G \quad (1)$$

P : 降水量 E : 蒸発散量
Q : 河川流出量 G : 下部涵養量
 ΔW : 土壌水分貯留変化量
 ΔS : 地下水貯留変化量

(1)式において、水文期間を1年にとれば、その流域の貯留変化量($\Delta W + \Delta S$)はゼロと考えられる。したがって1年間での水収支は

$$G = P - E - Q \quad (2)$$

で表される。

本調査地域での河川流量観測結果および気象観測による降水量・Penmanの可能蒸発散量の1989年5月から1990年4月における1年間の観測結果を表-1に示す。中川¹⁾はPenmanの可能蒸発散量に0.7を乗じたものを短草植被面可能蒸発散量としている。本調査地域でも、植被面への水分は十分に行われていたと考え、この短草植被面可能蒸発散量を実蒸発散量とした。1989年5月から1990年4月まで1年間の降水量、Penmanの可能蒸発散量、河川流量の合計値を(2)式に代入すると、

$$\begin{aligned} G &= P - E - Q \\ &= 1,944.0 - (0.7 \times 630.8) - 1,294.9 \\ &= 207.5 \text{ mm/year} \\ &= 0.57 \text{ mm/day} \end{aligned}$$

表-1 水収支観測結果

年	月	降水量 (mm)	Penmanの可能蒸発散量 (mm)	SPD河川流量 (mm)	
'89	5	168.5	66.2	117.8	
	6	243.5	71.0	150.7	
	7	180.5	70.9	139.0	
	8	101.0	86.4	40.3	
	9	646.0	52.1	343.5	
	10	70.5	59.1	45.1	
	11	55.5	27.8	38.2	
	12	34.5	21.8	31.8	
	'90	1	42.5	20.0	45.1
		2	144.5	30.3	121.5
3		110.0	53.0	92.3	
4		147.0	72.2	129.6	
計	1944.0	630.8	1294.9		

となり、表層部(未固結層)から下層部(岩盤)へのこの1年間における涵養量は0.57 mm/day (6.6×10^{-7} cm/s)と推定される。

4. 深部水理調査

4.1 岩芯観察等による地質調査

本調査試験領域周辺の地質踏査および試錐による岩芯観察により、本領域に分布する基盤花崗岩は、上位よりマサ部、シーティング節理卓越部および垂直方向節理卓越部に区分される。瑞浪層群土岐夾炭層層は、花崗岩の巨礫～大礫からなる角礫岩、アルコース質細粒砂岩および泥岩から構成され、それらの岩相は下位から上位へと花崗岩質砕屑物の量比が減少しており、これに代わって火山砕屑物の量比が増大していくという変化を示している。明世層層は、凝灰質中粒砂岩を主体とするほぼ均質な岩相である。生徳層層は、シルト岩を主体とする地層であり、調査解析領域中央部を東西方向に分布する月吉断層の北側のみに分布する。瀬戸層群は、細礫～大礫からなる円礫を主体とし下部に粘土層や砂質粘土層の薄層(厚さ1～3m)を1～2層挟んだ未固結堆積物であり、下位の瑞浪層群および花崗岩を不整合に覆う(図-4)。既存坑道内で観察される月吉断層沿いには、青緑色を呈する砂質粘土が約5cm～150cmの幅で連続しており、粘土はスメクタイトおよび緑泥石からなる。

こうした地質調査結果を基に本調査地域の3次元の地質構造を推定した。その南北方向の断面を図-5に示

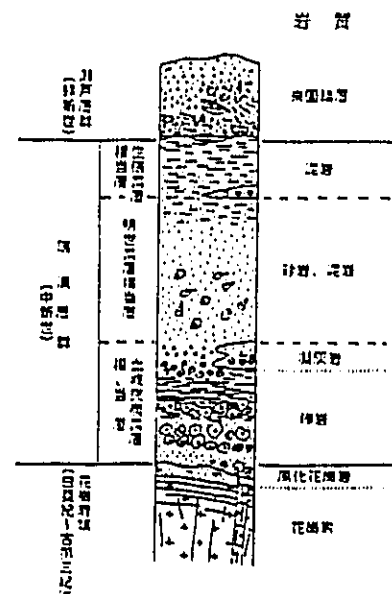


図-4 調査地域構式柱状図

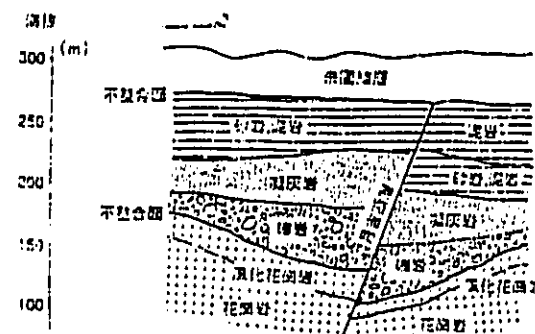


図-5 地質概念図

す。本調査解析領域の地質構造の概要は次のとおりである。

- (1)本調査地域の地質は、下位より花崗岩、風化花崗岩、礫岩、凝灰岩、砂岩・泥岩、泥岩、未固結層からなる。
- (2)本調査地域の中央部には東西系の月吉断層が発達している。断層は逆断層であり、花崗岩から泥岩までの地層を切っており、未固結層は切っていない。断層の走向傾斜はN80°E60°Sであり、落差はおよそ30mである。
- (3)断層の北側と南側では分布する地層が異なる。北側には、下位より花崗岩、風化花崗岩、礫岩、凝灰岩、砂岩・泥岩、泥岩、未固結層の7層が分布する。南側には、未固結層の直下に分布する泥岩を除く6層の地層が分布する。
- (4)風化花崗岩とその上位の礫岩との間の不整合面は、本調査地域のほぼ中央部において最も低く、調査地域の北側および南側の境界に近くなるに従って高くなっている。
- (5)凝灰岩および砂岩・泥岩、泥岩は水平に堆積している。
- (6)未固結層とその下位層との間の不整合面は水平である。

4.2 原位置透水試験

深部岩盤内の地下水の挙動を把握するには、岩盤の透水係数を正確に測定することが必要不可欠である。しかし試験立坑周辺に分布する岩盤の透水係数は極めて低く、従来の測定手法ではその値の信頼性に欠けるきらいがある。そのため動燃事業²⁾では、難透水性岩盤を対象とする試錐孔を利用した原位置透水試験装置として、動燃式低水圧制御水理試験装置および低圧レジオン水理試験装置を開発し計測を実施した。

4.2.1 動燃式低水圧制御水理試験装置

本試験装置は非常法による原位置透水試験装置であ

り、従来のJFT試験装置に対し、①水圧差による水撃効果の発生防止、②試験深度の変更によるロッド昇降作業の効率化、③難透水性岩盤での間隙水圧測定精度の向上、④難透水性岩盤での透水係数測定精度の向上、等の改良を実施した。本装置のハード面の特徴は、ロッド内にインナーバッカー・電磁バルブ・間隙水圧計を備えたゾンデを有する点であり、間隙水圧および 10^{-3} ～ 10^{-9} cm/sの透水係数を測定することができる。試験方法は測定区間を透水バッカーで閉鎖した後、水位変化量により透水係数を求める水位回復法、および水位変化量を圧力変化量として計測しその減衰より透水係数を求めるパルス法があり、対象岩盤の透水性に応じて選択することができる³⁾。

4.2.2 低圧レジオン水理試験装置

本試験装置は非常法による原位置透水試験装置であり、間隙水圧および 10^{-3} ～ 10^{-7} cm/sの透水係数を測定することができる。試験方法は測定区間を透水バッカーで閉鎖した後、一定の圧力にて注水し(測定区間の間隙水圧と注水圧力の差は1 kgf/cm²以下とする)、単位時間当たりの注水量にて透水係数を求める手法である。

4.2.3 水理試験結果

上記水理試験装置による透水係数値の信頼性を確認するために、試錐孔SN4の一部の試験区間においては両試験装置を用いて計測を実施した。その結果、両試験装置の測定範囲が重複する 10^{-6} ～ 10^{-7} cm/sにおいて両者の値は良く一致し、両試験装置による透水係数計測値の信頼性を確認した。

これら試験装置の透水係数計測範囲および岩芯観察・物理検層結果を参考にいずれかの試験装置を選択し、原位置透水試験を実施した。その結果を各試錐孔の計測深度に対する透水係数分布として図-6に取りまとめた。

また、岩相に着目して透水係数計測結果を取りまとめると、泥岩・シルト岩・凝灰岩は 5×10^{-6} ～ 1×10^{-8} cm/s、砂岩は 1×10^{-4} ～ 1×10^{-6} cm/s、礫岩は 1×10^{-4} ～ 5×10^{-7} cm/sに分布することがわかった。

4.3 見かけ比抵抗値と透水係数との関係

一般に、岩盤を対象とした原位置透水試験は多大な時間と経費がかかり、計測区間も不連続となる。これに対し、物理検層は岩盤の諸物性を迅速かつ連続的に計測することが可能であり、物理検層結果と透水試験結果とを組み合わせることで試錐孔近傍の深度方向の水理学的特性が把握できるものと考えられる。こうした観点により試錐孔を利用して電気検層・放射能検層・ポアホールテレビジョン・孔径検層・密度検層を実施した結果、

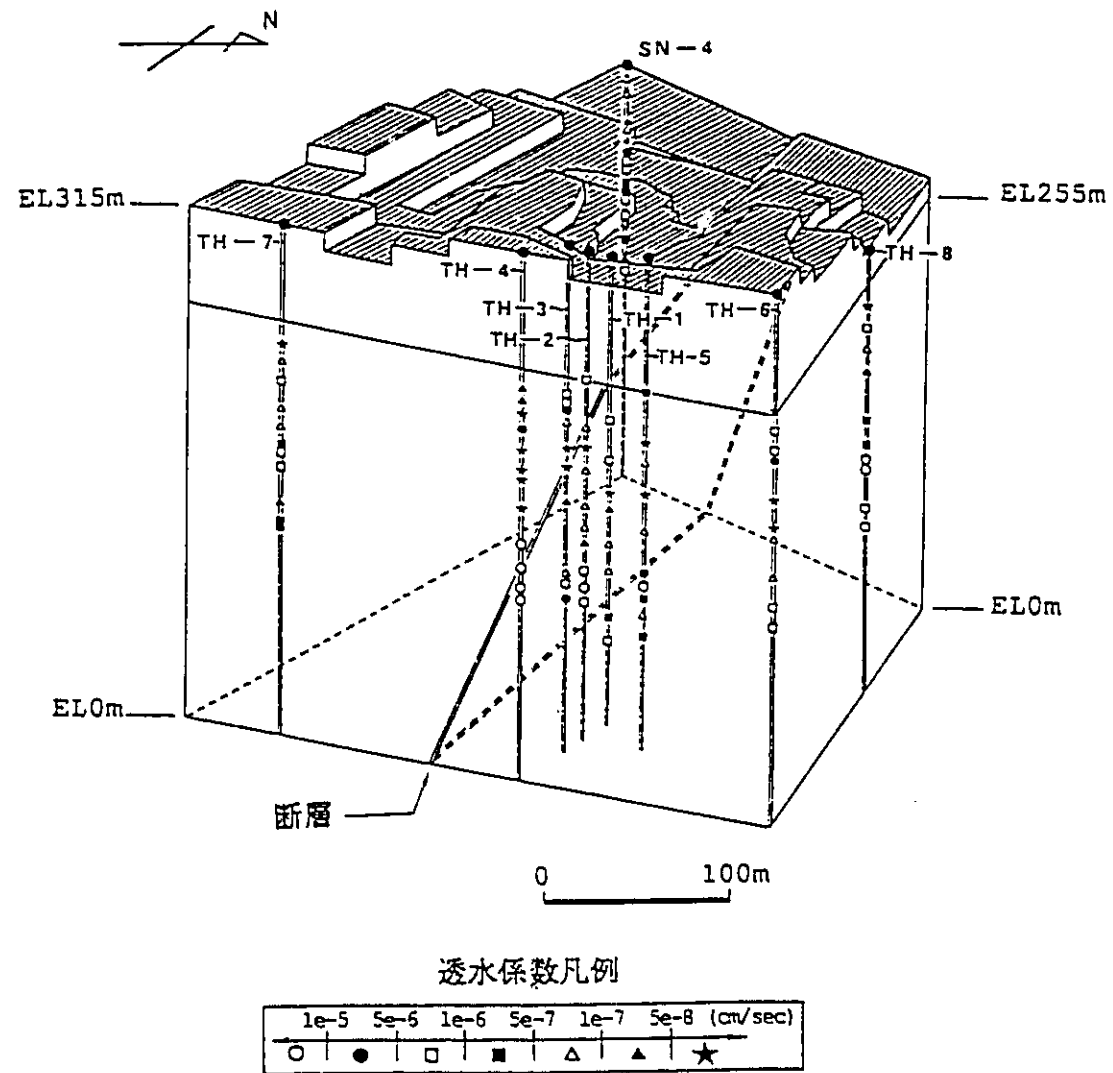


図-6 透水試験結果の一覧

100 cm ノルマル電気検層が特に有効であることが判明した。

電気検層は、試験孔内に電流電極と電位電極を下ろして電流電極から地層中に電流を流し、それと近接する電位電極の電位を測定することにより、その地点の地層の見かけ比抵抗値を連続的に求めるものである。BRACEからは、室内物性試験により比抵抗値は孔隙率、透水係数と関係があるとしており、電気検層による見かけ比抵抗値と透水係数との間に良好な相関が認められれば、見かけ比抵抗値による試験孔周辺の連続的な透水係数分布が求まる。こうした観点より、堆積岩の透水係数を支配していると考えられる粒度・固結度に着目して堆積岩を砂岩部および礫岩部に分け、原位置透水試験による透水

係数と電気検層による見かけ比抵抗値との比較検討を実施した。

砂岩部の透水係数は 10^{-5} ~ 10^{-8} cm/s、見かけ比抵抗値は5~40 Ω mであり、その相関も良い(図-7)。礫岩部においては、見かけ比抵抗値は花崗岩等の比抵抗値の高い巨礫の影響を大きく受けるため、透水試験区間の礫径1 m以上のものが認められる場合はその比抵抗値を削除し、礫岩部の比抵抗値とした。礫岩部の透水係数は 10^{-5} ~ 10^{-8} cm/s、比抵抗値は10~60 Ω mであり、その相関も良い¹⁰⁾(図-7)。

このような各岩相毎の電気検層による比抵抗値と透水係数との関係から、各試験孔周辺岩盤の透水係数の垂直分布を設定した。

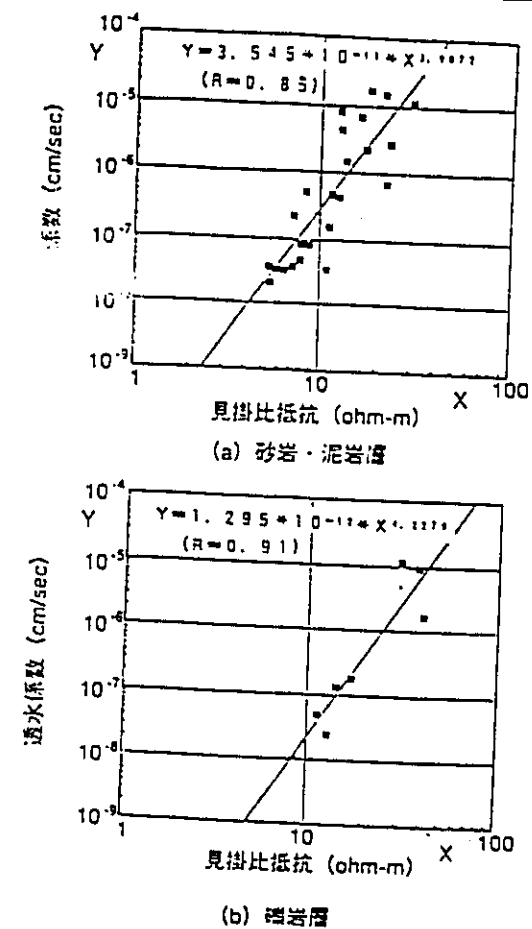


図-7 見かけ比抵抗値と透水係数との関係

4.4 間隙水圧計測

4.4.1 MPシステム

試験孔を利用した間隙水圧計測はTH1~8およびSN4で実施している。間隙水圧計測には、カナダのWest bay社が開発した単一孔多区間水圧測定・採水システム(MPシステム)を透水試験終了後直ちに試験孔に設置し、各試験孔において14~34区間の観測を実施している。MPシステムは、図-8に示すようにケーシングに取り付けられた複数のパッカーにより測定区間を区分し、ケーシング内に間隙水圧計内蔵のプロブを下ろし、ポートと呼ばれるバルブを通して各区間の間隙水圧が計測できる。また、採水プロブを下ろすことにより各区間の採水も可能であり、間隙水圧計測と合わせて各層の採水も実施している。

4.4.2 間隙水圧計測結果

MPシステムによる間隙水圧の計測は、掘削開始のおよそ半年前から継続されている。計測結果の1例を図-

14に示す。これはTH1, TH2, TH3, TH5における標高と計測されたピエゾ水頭の関係を示している。事前の観測からは間隙水圧の変化は認められていない。

4.5 湧水量測定

既存坑道内の湧水量観測は20カ所まで定期的を実施している。また、試験立坑への湧水量観測には、立坑掘削の進行に応じて図-2に示すように10深度のコンクリート覆工の裏側に集水リングを設置するとしており、測定を既存坑道内とともに1回/週の頻度で実施している。既存坑道内において事前に計測された総湧水量は25~30 l/分である。

5. 水理地質構造モデルの構築

5.1 調査解析領域の水理学的特性

本調査解析領域の水理学的特性(透水係数分布特性)について、電気検層により推定できる試験孔周辺の透水係数の垂直分布と、岩芯観察等による岩相の垂直方向の堆積学的層相変化(粒度・固結度・分級度等の変化)の関連について検討した。その結果を以下に示す。

(1)花崗岩は、およそ透水係数 1×10^{-7} cm/sと低い透水性を示す。

(2)風化花崗岩は、水理地質学的には2層に分類される。下部層は透水係数 5×10^{-6} cm/sであり、上部層は断層の北側全体および南側の断層近傍に分布し、透水係数 1×10^{-5} cm/sと高い透水性を示す。

(3)礫岩は、断層の北側では風化花崗岩の上部層と同様に透水係数 1×10^{-5} cm/sと高い透水性を示す。南側では透水係数 5×10^{-6} cm/sとやや高い透水性を示す。

(4)凝灰岩は、透水係数 1×10^{-6} cm/sとやや低い透水性を示す。

(5)砂岩・泥岩は、断層の北側では透水係数 1×10^{-6} cm/sとやや低い透水性を示す。南側では、透水係数 1×10^{-7} cm/sと低い透水性を示す。

(6)泥岩は、透水係数 5×10^{-8} cm/sの透水性を示す。

(7)未固結層は、水理地質学的には2層に区分できる。下部層は瀬戸層群に相当し、透水係数 1×10^{-5} cm/sとやや高い透水性を示す。上部層は表土層に相当し、透水係数 1×10^{-4} cm/sと高い透水性を示す。

(8)断層は、逆断層であること、断層粘土を伴うこと、既存坑道からの試験孔における間隙水圧が断層下盤と上盤とで10 m以上異なることから不透水性であると考え、透水係数を周辺岩盤より低い 1×10^{-8} cm/sと設定した。

5.2 水理地質構造モデル

本調査解析領域の地質調査による地質構造を基本とし

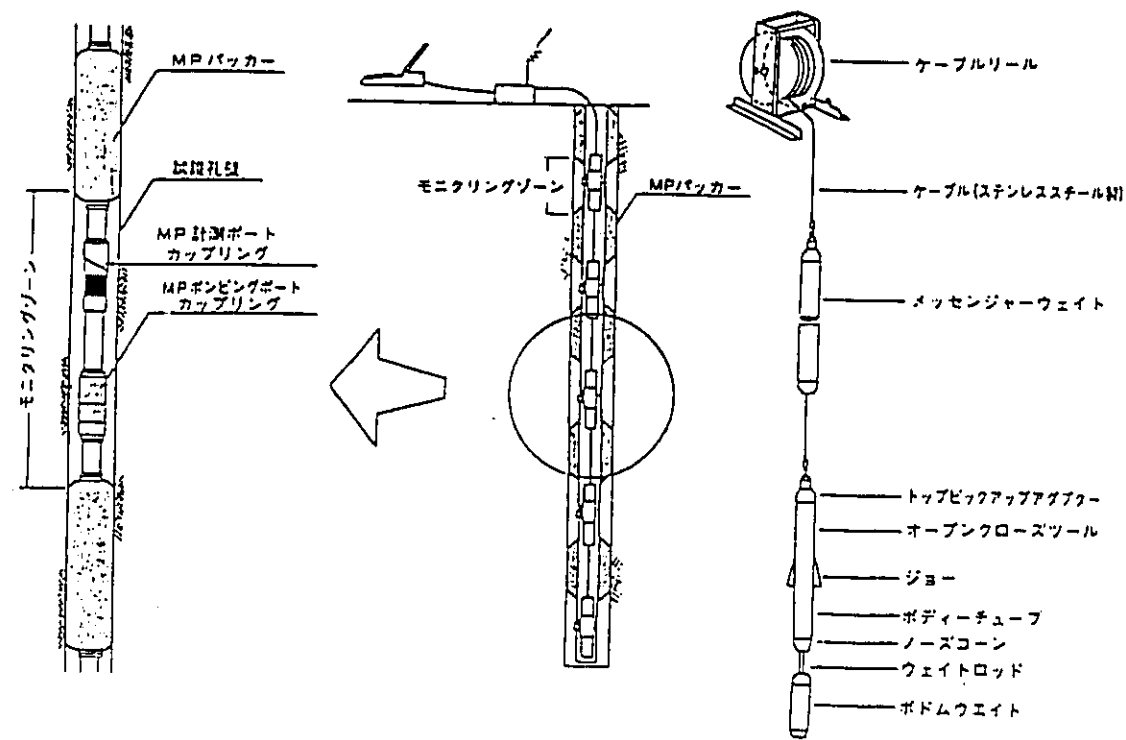


図-8 MPシステム概念図

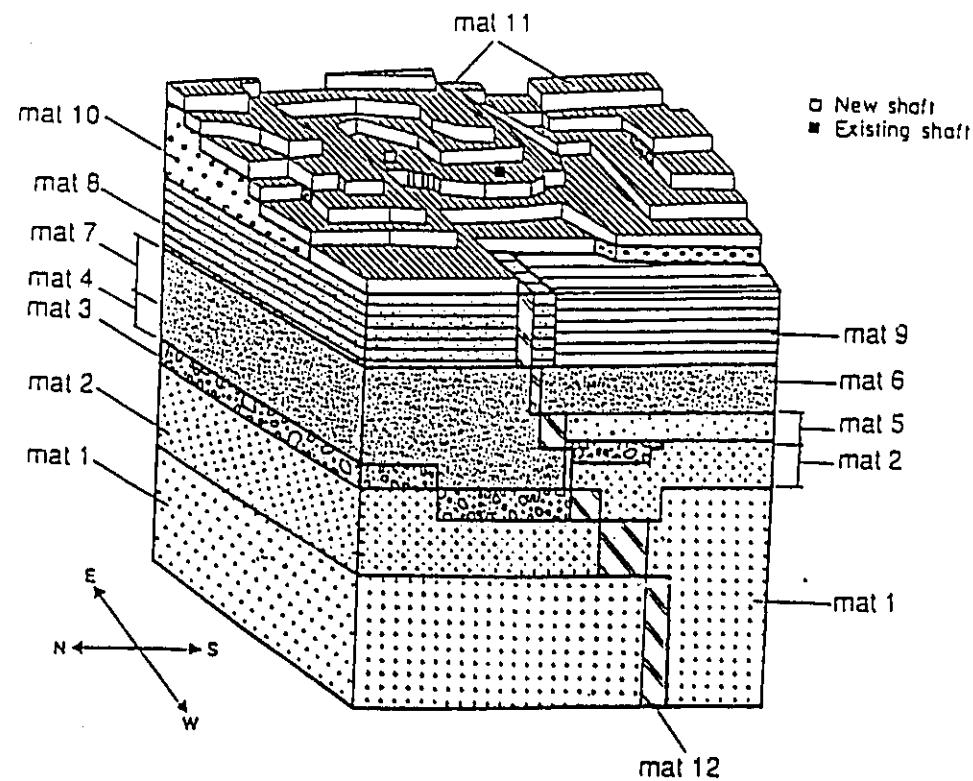


図-9 水理地質構造モデル図

表-2 水理地質構造モデルにおける各層の水理定数

区分	透水係数 (cm/sec)	間隙率	比貯留係数 (α^*)	地質
mat 1	1.0×10^{-11}	0.02	1.0×10^{-11}	花崗岩
mat 2	5.0×10^{-11}	0.1	1.0×10^{-11}	強化花崗岩
mat 3	1.0×10^{-11}	0.3	1.0×10^{-11}	強化花崗岩・輝岩
mat 4	1.0×10^{-11}	0.3	1.0×10^{-11}	砂岩
mat 5	5.0×10^{-11}	0.3	1.0×10^{-11}	砂岩
mat 6	1.0×10^{-11}	0.3	1.0×10^{-11}	砂岩・頁岩
mat 7	1.0×10^{-11}	0.4	1.0×10^{-11}	凝灰岩
mat 8	5.0×10^{-11}	0.4	1.0×10^{-11}	砂岩・泥岩
mat 9	1.0×10^{-11}	0.4	1.0×10^{-11}	砂岩
mat 10	1.0×10^{-11}	0.4	1.0×10^{-11}	未固結層(崩壊層)
mat 11	1.0×10^{-11}	0.5	1.0×10^{-11}	粘土
mat 12	1.0×10^{-11}	0.3	1.0×10^{-11}	粘土をまじり層

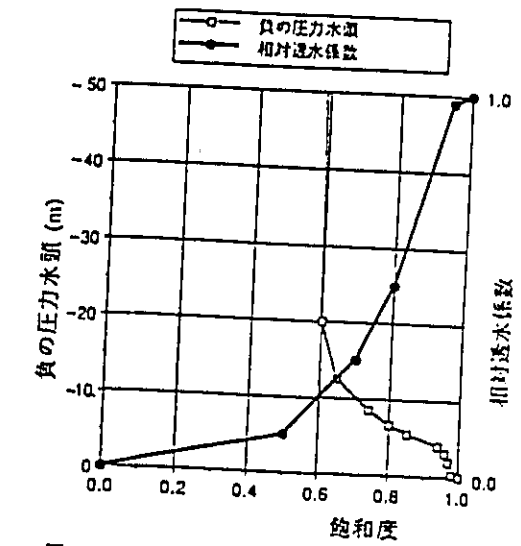


図-10 飽和度と相対透水係数・負の圧力水頭の関係

て、水理学的特性を考慮し、図-9に示す水理地質構造モデルを構築した。本モデルでは、調査解析領域を12層に区分した。各層の水理定数は、表-2に示すとおりである。不飽和特性に関しては、飽和土と相対透水係数・圧力水頭の関係を図-10に示すように設定した。なお、有効間隙率は岩芯による物性試験に基づき設定した。比貯留係数はDOMENICOら¹³⁾を参考に未固結層と固結層という区分により設定した。

また、モデルの構築においては次の事項について留意した。

- (1) 地質構造モデルの各層は、基本的に水理地質構造モデルの各層と対応する。
- (2) ただし、同一層内で水理学的特性が著しく異なる部分が存在する場合には、複数の層に区分する。
- (3) 地質構造モデル上異なる複数の地層でも、水理学的特性が同じ場合には、水理地質構造モデル上は1つの層とする。

6. 地下水流動予測解析

6.1 解析手法の検討

地下水流動解析手法は、地下水流動場を多孔質媒体モデルとしてダルシー則に基づく有限要素法を用いた3次元飽和不飽和浸透流解析を適用した。これは以下の理由による。

- (1) 実岩盤中ではダルシー則の適用の是非を論じることは難しい。しかし、特殊な条件を除けば岩盤中の地下水流動がダルシー則に従うという考え方が一般的であり

る¹²⁾。また菊地ら¹³⁾は、実岩盤中の試験孔を利用した定水位透水試験から注水孔と湧水孔間ではほぼダルシー則が適用できるとしている。

(2) 割れ目中の地下水流動の性質については、室内実験で割れ目のラフネスや形状に対する透水性の関係や三乗則の適用範囲等が研究されているが、これらはかなり微視的なものが多い¹⁴⁾。ストリッププロジェクトでは割れ目中の地下水流動の形態を複雑に連結したチャンネル流れ等の概念を示している。この流れの形態については、原位試験での検討も行われており、割れ目面でのチャンネル流れを示唆する結果が得られている¹⁵⁾。しかし、割れ目中の地下水流動については不明な点も多く、且つ解析対象領域内の割れ目分布・形状、割れ目と割れ目の関連性を把握することは非常に困難である。また、地下水流動の検討に考慮すべき割れ目の規模も明確にされていないのが現状である。したがって、地下水流動をダルシー則を前提とした多孔質媒体中の流れと捉えるのが妥当と考えられる。

(3) 立坑等の掘削に伴うその周辺での流れは3次元性の高い収束流であり、これを2次元で解析する場合と3次元で解析する場合で結果が異なる。3次元解析による湧水量は2次元解析のそれに比べてかなり大きくなるが、水面低下量は3次元解析の方が小さくなる^{16),17)}。さらに、水理地質構造の3次元性も加わるため、立坑等の掘削に伴うその周辺での地下水流動解析は3次元解析が望ましい。

(4) 本解析領域内の水理地質構造は形状が複雑であり、

かつ不均質性に富んでおり、このモデル化に際しては有限要素法の適用が適当であると考えられる。

6.2 解析手法

本解析では解析手法として、地下水流動の場(表層未固結層及び深層岩盤)を多孔質媒体とする有限要素法による非定常3次元飽和不飽和流解析法を用いた。解析コードは、TAGSACコード³⁾(Three dimensional Analysis of Groundwater flow Saitama university Code)をベースに、連立一次方程式の解法にPCG法(Preconditioned Conjugate Gradient method)を導入し、演算能力を高速度化したプログラムを使用した。今回の解析で使用した要素形状は六面体8節点のアイソパラメトリック要素である。

6.3 解析領域の設定

解析領域は、図-3に示す実線で囲まれた約300m四方の調査区域とほぼ等しい範囲を設定した。この領域境界はTH4, 6, 7, 8, SN4を含み、尾根線および谷線上に設定している。上田¹⁾は円形暗渠の取水量に関して、地表面と下部不透水境界の影響のない深さとして暗渠深さの2倍以上としており、今回の解析領域の深さの設定は試験立坑深さの約2倍の標高0mまでとした。

6.4 要素分割

要素分割は地形形状、水理地質構造モデルによる透水

係数区分、既存坑道の位置・形状、新立坑の位置・形状、MPシステムによる間隙水圧観測孔(TH1~8, SN4)位置などを反映させて行った。解析対象とするモデルは、水平方向の1層が255要素あり、モデル全体で15層からなり、全要素3,133、全節点数3,924の1次の六面体アイソパラメトリック要素からなる解析モデル形状である(図-11)。既存坑道は3m×3mの正方形断面とし、その深さは135m、横坑の長さ163mとし、試験立坑は5m×5mの正方形断面、その深さを150mとした。

6.5 境界条件および初期条件

上部境界条件としては、表層水理観測結果(1989年5月から1990年4月)を参考に涵養量0.5mm/dayを暫定的に設定した。また、上面境界で飽和状態が生じた場合は表面流出が生じるため、飽和部に関しては浸出面として取り扱う自由浸出面条件とした。下部境界条件は流出入のない不透水境界条件とし、既存坑道による内部境界条件は自由浸出面条件とした。また側面境界条件としては、側面境界上に存在するMPシステムによる間隙水圧観測孔TH4, 6, 7, 8, SN4で事前計測された深度方向のピエゾ水頭分布に基づき、図-12に示すように境界条件を設定し、これら計測孔間の境界条件は、計測孔の設定した境界条件に基づき事前解析や境界条件を設定された計測孔間での線形補間により設定した。

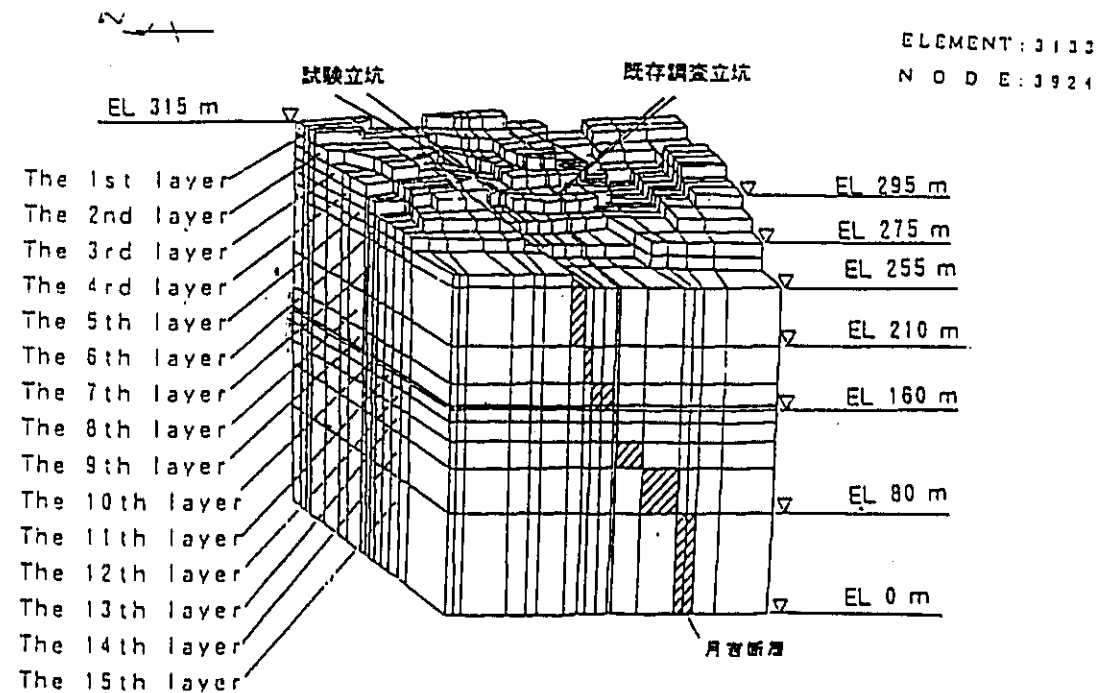


図-11 要素分割図

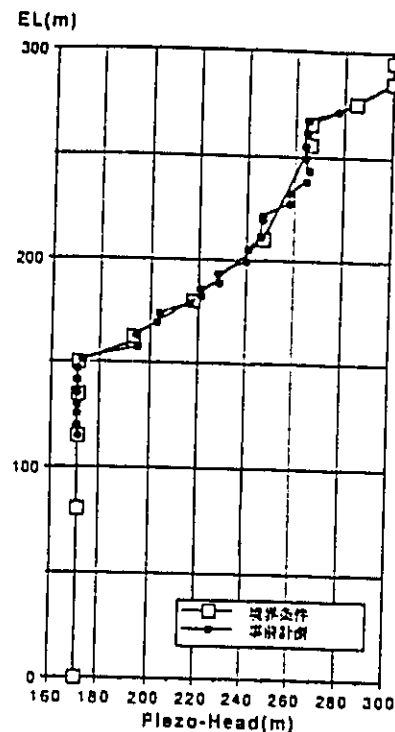


図-12 TH4における境界条件の設定

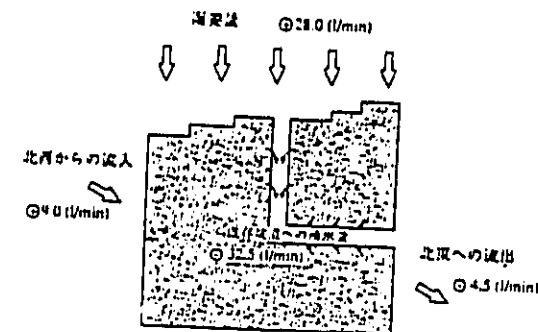


図-13 定常解析による水収支状況

初期条件は、上記境界条件において既存坑道(既存立坑・横坑)のみを考慮した試験立坑掘削前の状態で定常解析を実施し、その解析結果を採用した。定常解析では収束誤差を1cm以内として解析を実施した。水収支に関しては図-13に示す。初期条件の妥当性は、掘削前のTH1, TH2, TH3, TH5におけるピエゾ水頭および既存坑道内湧水量の実測値と定常解析結果対比により確認した。図-14にピエゾ水頭の解析結果と実測値の対比を示す。既存坑道内の解析領域範囲に相当する湧水箇所からの湧水量は約20 l/minであり、定常解析結果では約32.5 l/minとなっている。

6.6 試験立坑掘削工程のモデル化

試験立坑の掘削工程を図-15に示す。掘削工程のモ

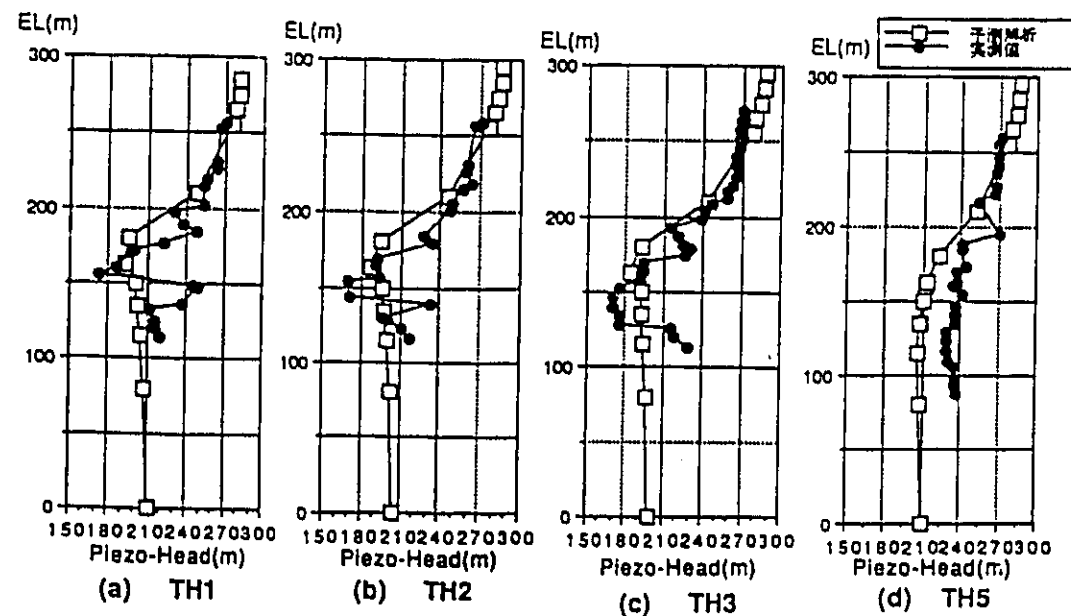


図-14 計測孔内ピエゾ水頭分布の定常解析結果と実測結果の比較

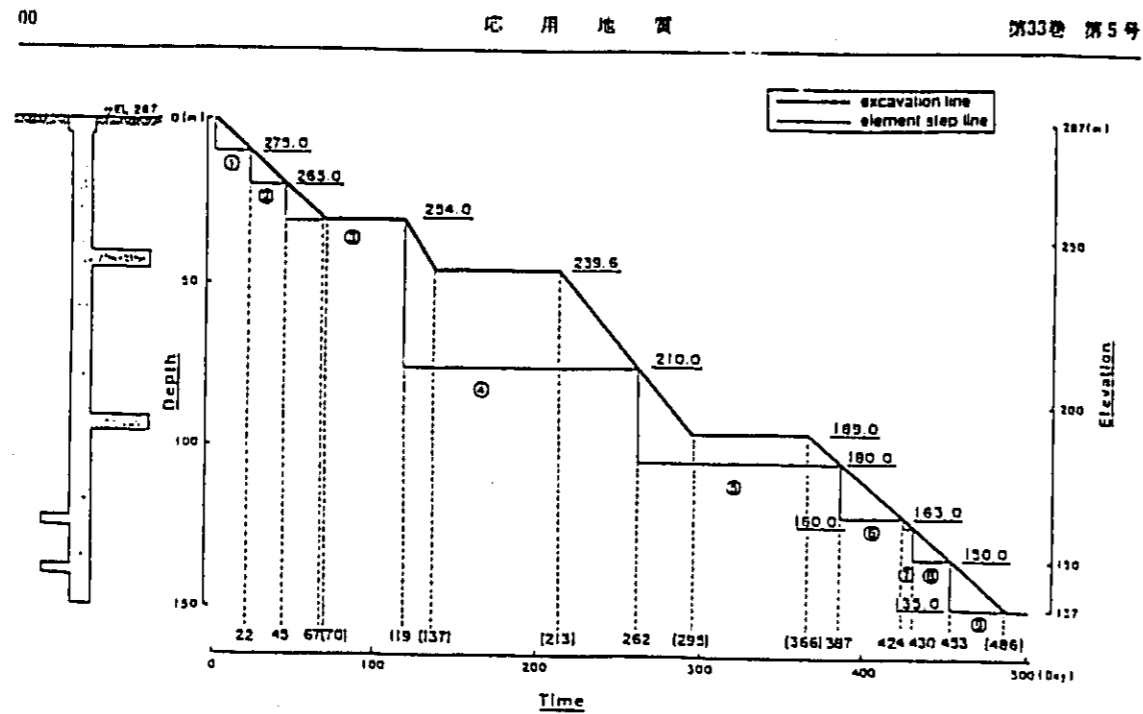


図-15 試験立坑掘削工程

デル化は、掘削部に相当する要素を掘削工程に従い(図-15. element step line ①~③) 解析領域から適時除去することとした。また、掘削壁面に対しては自由液出面の条件を与え、立坑底部に相当する節点に対しては、境界条件としてそのピエゾ水頭値を掘削工程(図-15 excavation line)に沿うよう時間とともに変化させることで掘削工程をモデル化した。また、解析対象期間としては試験立坑掘削開始から3年間とした。

7. 予測解析結果

7.1 ピエゾ水頭分布

試験孔 TH1, 2, 3, 5 でのピエゾ水頭値の深度方向の分布およびその変化予測結果を図-16に示す。ピエゾ水頭値の予測は、掘削開始前の初期値と掘削開始後67, 137, 295, 486日および掘削開始後1095日(3年)経過時点である。試験立坑と TH1, 2, 3 は同一直線上にあり、TH1, 2, 3 の順で試験立坑に近い位置にある。

ピエゾ水頭の低下量に着目して見ると、TH1, 2, 3 のいずれも EL135 m (試験立坑部では GL-152 m, 試験立坑最終坑底部より-2 m) で最大の低下量を示している。TH1 では35 m, TH2 では15 m, TH3 では5 m の低下となっており、試験立坑に近いほどピエゾ水頭の低下量が大きくなっている。

次に、試験立坑を含む南北鉛直断面内での掘削直前、掘削終了時(掘削開始後486日)、掘削終了約1年半後

(掘削開始後1095日)のピエゾ水頭コンターを図-17に示す。図-17(b), (c) からわかるように、試験立坑掘削部は上に凸の形状を持つピエゾ水頭分布を示している。これは同一水平面内では立坑周辺部は周辺岩盤より低いピエゾ水頭分布を示していることを示しており、周辺岩盤より試験立坑部に向かって地下水の流れが生じていることがわかる。また、試験立坑掘削開始直前と立坑掘削終了後1年半後の予測解析結果(図-17(a), (c))を比較すると、掘削影響の顕著な範囲は立坑より約100 m 以内であり、立坑より離れるほど掘削影響は小さくなるのが予測解析結果で認められる。

また、EL135 m (試験立坑部では GL-152 m) に相当し、試験立坑最終坑底部より-2 m) における掘削終了時の水平面のピエゾ水頭コンター図と流れベクトル図を図-18(a), (b) に示す。この図はピエゾ水頭が、立坑部で周囲より低いピエゾ水頭となる同心円状の分布を示していることを示している。このことから周囲より立坑部に水が集まっているのがわかる。また、立坑近傍でピエゾ水頭のコンター線が密になっており(動水勾配が大き)、立坑近傍での流速が大きくなっているのがわかる。

7.2 湧水量

試験立坑内および既存坑道に生じる湧水量の非定常変化を図-19に示す。ここで横軸は試験立坑掘削開始からの経過日数であり、縦軸は湧水量 (l/min) を示す。また、この図の上部に150 m 掘削する進捗状況(掘削

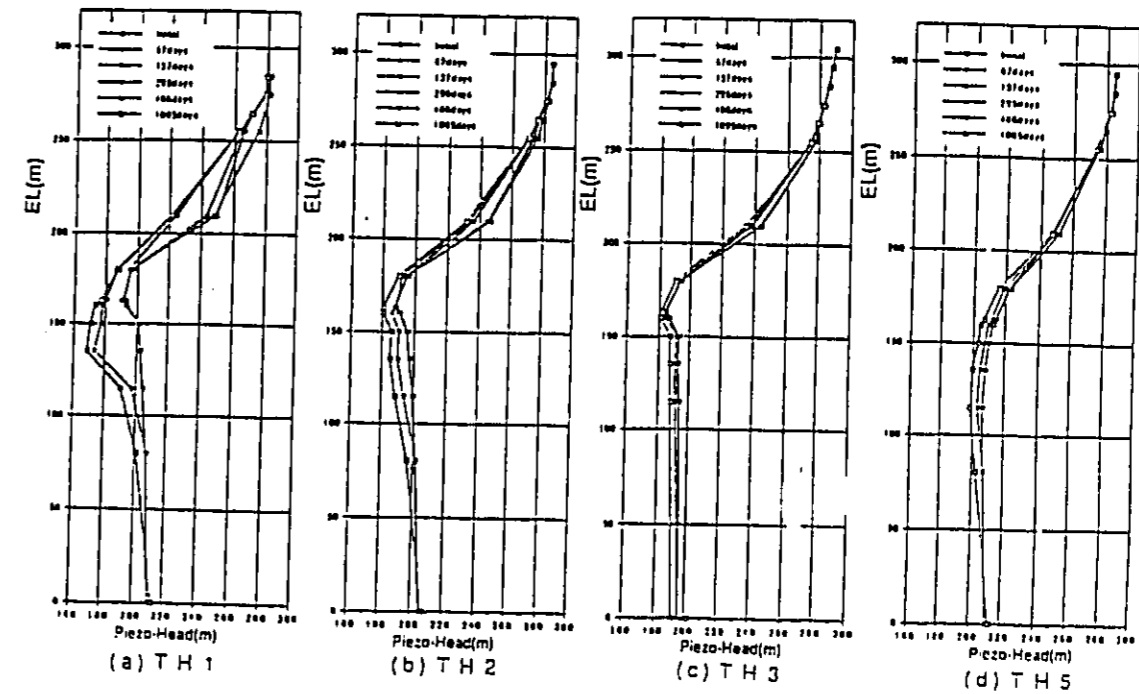


図-16 計測孔 TH1, 2, 3, 5 でのピエゾ水頭変化予測図

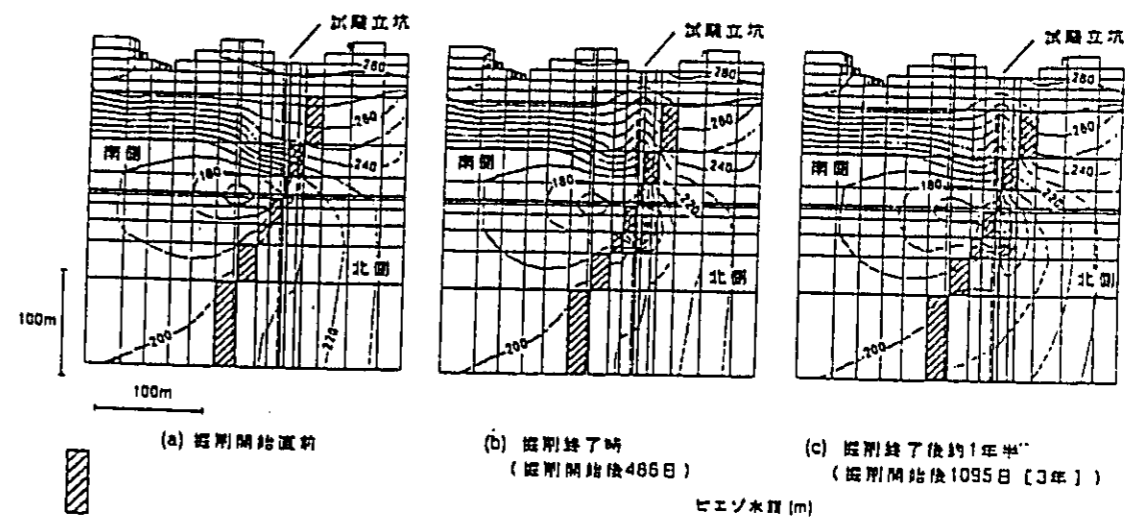


図-17 南北鉛直断面内ピエゾ水頭コンター図

工程)を示す。

試験立坑内への湧水量は、表層部未固結層に相当する GL-10 m 節点では掘削時は 8 l/min で、その後徐々に減少し、約200日後には 4 l/min の一定湧水量になると予想される。固結岩部 GL-20 m, GL-30 m, GL-75 m における節点での湧水量は 3~5 l/min で、徐々に減

少し、約100日後には一定湧水量となる。固結岩部および断層部における GL-105 m, GL-135 m の節点での湧水量は 1 l/min と少なく100日後には一定湧水量となる。

立坑掘削終了時の底部に相当する GL-150 m の節点では比較的透水係数が高いこともあり、11 l/min の

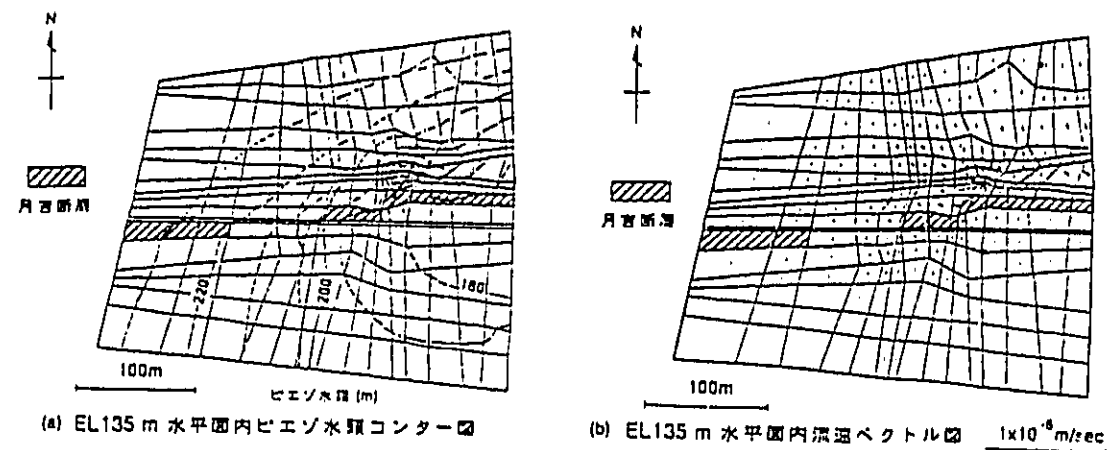


図-18 掘削終了時の水平面ピエゾ水頭コンターおよび流線ベクトル分布 (EL135) 図

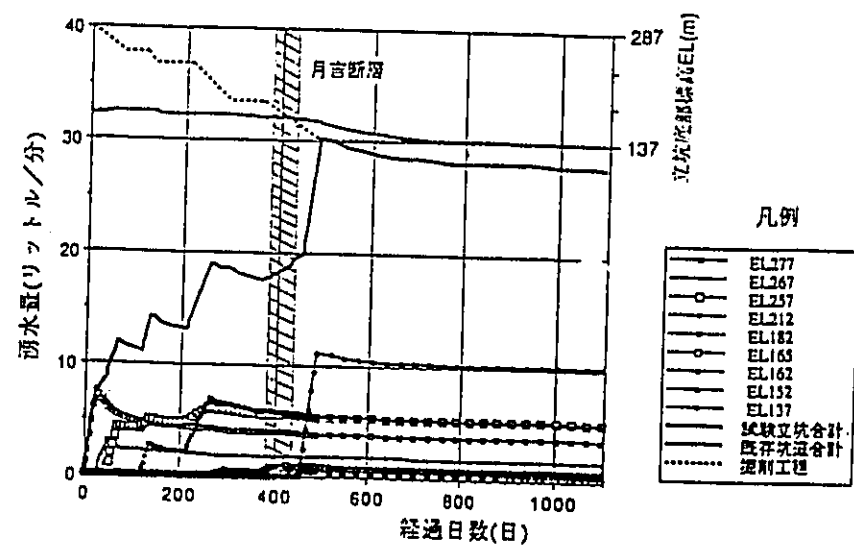


図-19 試験立坑内への湧水量の経時変化予測図

湧水量が予測され、約200日後には10 l/minで一定となる。以上、地表EL287 m (GL 0 m) から試験立坑最坑底部EL137 m (GL-150 m) までの掘削工程に応じた総湧水量は、掘削とその休止による湧水量の増減が一部あるが、全体的には掘削に伴う増加をし、試験立坑掘削終了時点の総湧水量は最大の30 l/minとなり、約200日後にはほぼ一定湧水量28 l/minになると予測される (図-19試験立坑合計)。

既存坑道内湧水量については、試験立坑掘削に伴う顕著な減少は認められず、長期にわたり徐々に減少しており、その減少量は試験立坑掘削前の流出量の10%未満である (図-19既存坑道合計)。

7.3 月吉断層近傍のピエゾ水頭分布と湧水量

図-17(a)に示す掘削直前のピエゾ水頭コンター図で、月吉断層を境に北側と南側では、北側のピエゾ水頭値が大きいことがわかる。さらに、試験立坑が月吉断層を貫き断層の南側から北側に達した段階では、試験立坑底部周辺においてピエゾ水頭コンター密度が高く、大きな動水勾配が発生することが図-17(b)よりわかる。

図-19に示すように、掘削終了直前 (掘削工程453日から掘削終了時まで) で急激な試験立坑内への湧水量の増加が予測されている。これは、月吉断層を試験立坑が貫き月吉断層直下の断層の北側にある高透水性岩盤 (アルコース質砂岩礫岩および風化花崗岩部に相当し、透水

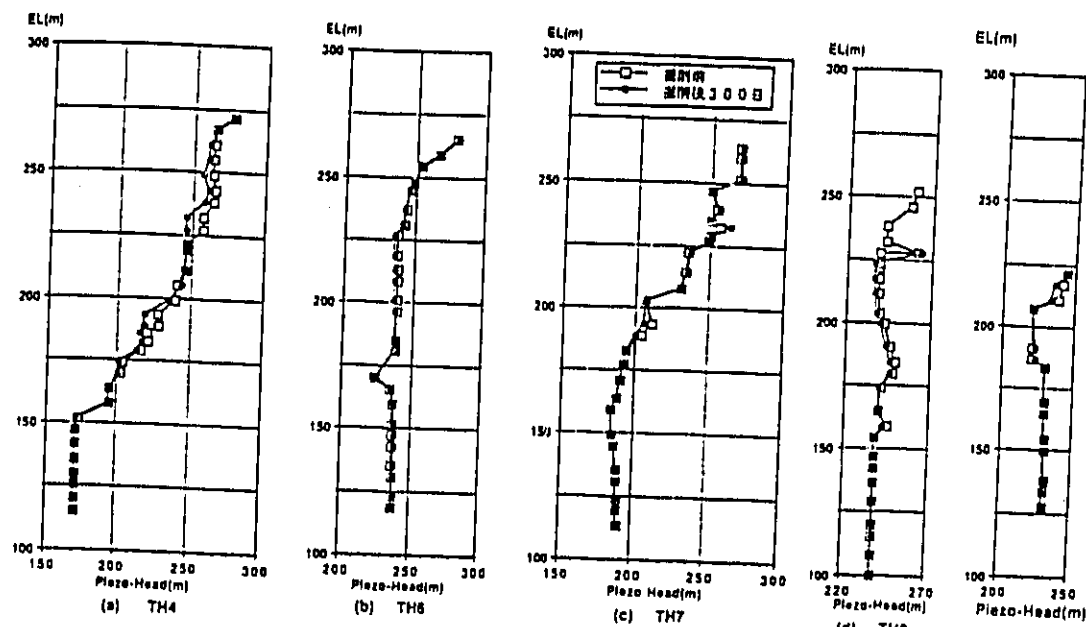


図-20 境界上の計測孔 TH4, 6, 7, 8, SN4における掘削前と掘削開始後300日におけるピエゾ水頭分布の実測結果の比較

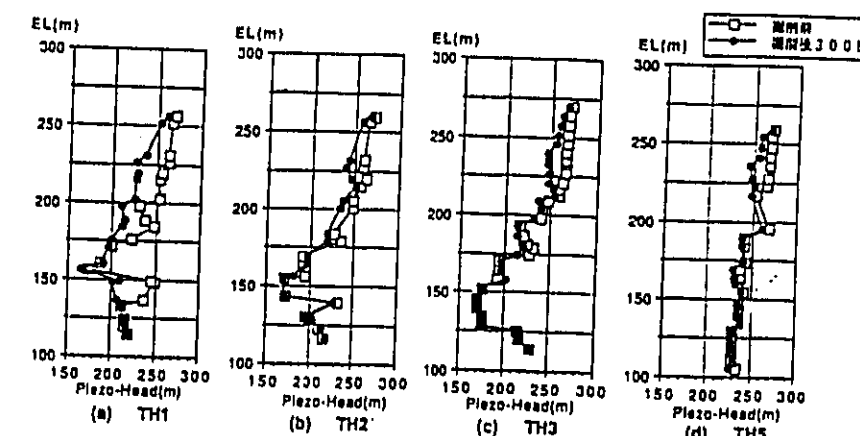


図-21 計測孔 TH1, 2, 3, 5におけるピエゾ水頭分布実測結果の掘削前と掘削開始後300日の比較

係数 10^{-5} cm/s) に到達し、さらにそこに図-17(b)で示された大きな動水勾配が生じたためだと考えられる。

8. 水理観測システムによる掘削影響長期観測

立坑掘削の水理学的影響を観測するため、瀬戸層群未固結層中の自由地下水面観測、瑞波層群堆積岩および基花崗岩中の間隙水圧分布観測、試験立坑および既存坑道の湧水量の観測を立坑掘削前・中と継続しており、立坑掘削後も数年は観測を継続する予定である。また、気象観測、河川流出量観測、土壌水分観測も併せて継続す

る予定である。

8.1 間隙水圧観測

1991年6月までの観測結果 (立坑掘削深度125 m) について示す。図-20に、本調査試験領域境界上の計測孔 TH4, TH6, TH7, TH8, SN4における掘削前と掘削開始後300日で計測されたピエゾ水頭分布の対比を示す。TH4で多少ピエゾ水頭の低下が認められるが、全体的には境界部でのピエゾ水頭はほとんど変化していないと考えられる。図-21に TH1, TH2, TH3, TH5にピエゾ水頭分布の同様な対比を示す。立坑に最も近い TH1で

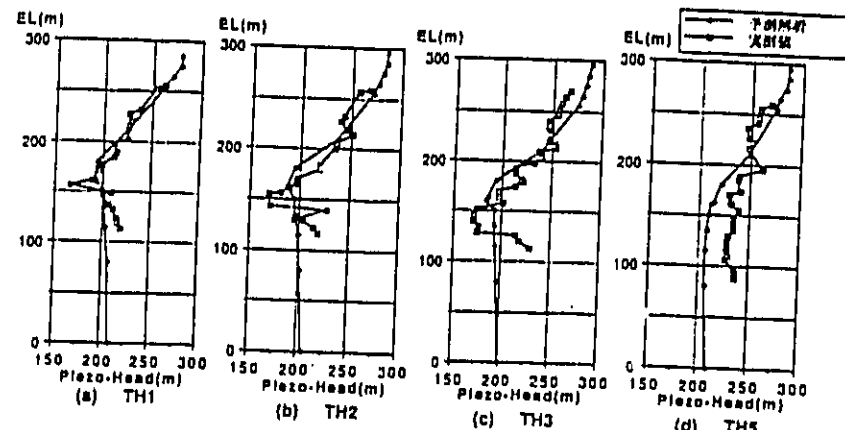


図-22 計測孔 TH1, 2, 3, 5 における掘削開始300日のピエゾ水頭分布の実測と予測解析結果の比較

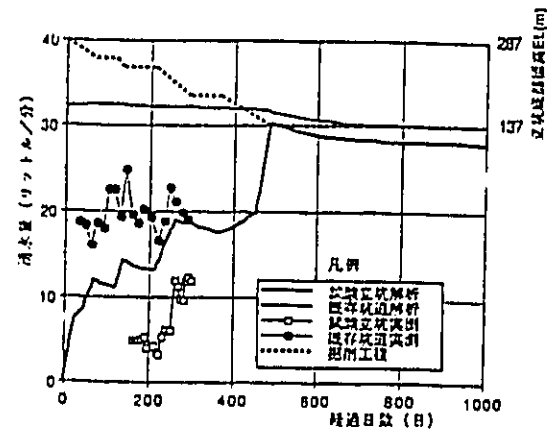


図-23 試験立坑・既存坑道内への湧水量の経時変化の実測と予測解析結果の比較

ピエゾ水頭の低下が著しい。TH2, TH3, TH5 に対して、TH1 ではより深部までピエゾ水頭の低下が認められる。この時点での掘削の影響範囲は100 m 以内であると考えられる。

長期観測と予測解析結果の比較として、図-22に TH1, 2, 3, 5 における掘削開始300日後のピエゾ水頭の鉛直方向の分布を示す。TH5 で実測値が解析結果より大きなピエゾ水頭になっている箇所があるが、両者の分布傾向は比較的良く一致している。

8.2 湧水量観測

図-23に掘削開始後300日までの試験立坑内総湧水量と既存坑道内湧水量(解析領域に対応した湧水箇所における湧水量の合計)の実測値と予測解析結果を併せて示す。また、この図の上部に掘削工程も示す。実測値は工事に伴う排水等の影響を受けたデータは除いて示して

いる。

既存坑道内の湧水量は20 l/min を中心にばらついてはいるが、全体的傾向としてはほぼ20 l/min の一定湧水量で、掘削に伴う変化はほとんどないと考えられる。一方、試験立坑内の湧水量には掘削に伴う増加傾向が認められる。

試験立坑および既存坑道内への湧水量の予測解析結果と実測値を比較すると、予測解析による湧水量は実測値の1.5~2.0倍となっている。変化傾向に着目すると、既存坑道内の湧水量は予測解析・実測ともに掘削に伴う変化はほとんど認められず、両者は調和的な傾向を示している。試験立坑内の湧水量については、掘削に伴い予測解析・実測とも同様な増加傾向を示している。現在まで(掘削開始より300日まで)の湧水量の予測解析結果は、実測値と調和的な傾向を示すと見える。

9. まとめ

東濃ウラン鉱山敷地内で実施している立坑掘削に伴う地下水流動調査研究での実施内容および現在までに得られた成果をまとめると以下のようになる。

- (1) 立坑掘削による水理学的影響を把握するために
 - ① 表層水理・深部水理事前調査による現象の把握(場の理解)
 - ② 水理地質構造モデルの構築(場のモデル化)
 - ③ 地下水流動予測解析(シミュレーション)
 - ④ 予測解析と長期観測値との比較(モデルの検証)
- という一連の調査・解析よりなる立坑掘削影響地下水流動特性評価システムを設定し、その適用の妥当性の確認を開始した。

- (2) 表層水理調査から、調査地域の未固結層表層部より深部への一年間の観測に基づく湧水量は0.57 mm/day と推定される。
- (3) 深部水理調査から、電気検層と原位透水試験を併用することにより、試験孔近傍の水理学的特性(透水係数分布特性)を推定した。
- (4) 地表地質調査、岩芯観察、物理検層等の結果を基に地質構造を推定した。
- (5) 地質構造を基に、上記(3)より導かれた試験孔周辺の水理学的特性から水理地質構造モデルを構築し、本調査領域を12層に区分した。
- (6) 地下水流動予測解析を実施した。

- ① 解析手法は地下水流動の場を多孔質媒体とする有限要素法による非定常3次元飽和飽和浸透流解析による(使用コード TAGSAC)。
- ② 試験立坑掘削工程のモデル化は、掘削部に相当する要素を掘削工程に従い解析領域から除去し、掘削壁面に対して自由浸出面の条件を与えながら掘削部底面のピエゾ水頭値を徐々に低下させる方法を用いた。
- ③ 予測解析の主な結果を以下に示す。
 - i) 立坑掘削の影響は、立坑から離れるにつれて小さくなり、その顕著な影響範囲は100 m 以内と推定される。
 - ii) 試験立坑への湧水量は掘削に伴い増加し、特に断層を過ぎて高透水性部に達した時点で急激に増加し、最大湧水量は30 l/min と推定される。
 - iii) 既存坑道内への湧水量は掘削に伴う顕著な低下は示さず、掘削終了後緩やかな低下を示す。

(7) 試験立坑掘削影響予測解析結果の検証を行うため、MP システムによる試験立坑周辺の試験孔を利用した間隙水圧および試験立坑への湧水量の長期観測を継続している。試験立坑125 m 掘削時点で、以下のことが確認された。

- ① 間隙水圧は TH1 で最も顕著な低下を示し試験立坑より離れるにつれてその低下は小さい。
- ② 掘削による間隙水圧の影響範囲は今までのところ100 m 以内である。
- ③ 既存坑道内の湧水量はほとんど変化していない。長期観測と予測解析結果の比較により以下のことが確認された。

掘削による間隙水圧への影響は、予測解析結果と実測結果でほぼ一致している。

試験立坑内、既存坑道内への湧水量は予測解析結果が実測値より大きい(1.5~2.0倍)。

しかし、予測解析の湧水量変化傾向は実測による変化

傾向と調和的である

以上、本稿において立坑掘削に伴う水理学的影響調査研究について報告し、第一段階として試みた試験立坑掘削による地下水流動影響解析結果を予測解析結果として示した。試験立坑掘削がまだ終了していない時点ではあるが、地下水流動予測解析結果と長期観測結果は比較的良く一致し、モデル化およびシミュレーションが可能であることが確認されつつある。また、本調査試験研究で適用した一連の地下水流動特性評価システムが、地下水流動特性を把握するのに有効であることも確認されつつある。現在、長期観測結果を取りまとめ中であり、間隙水圧の非定常変化等では興味深い圧力変動が記録されている。今後も、間隙水圧等の長期観測を継続し、予測解析結果との比較検討を通じて、より詳細な水理地質構造モデルの構築方法およびより精度の高いシミュレーション方法の検証を実施していく予定である。また、さらに必要となれば、新たな試験調査を実施し、水理地質調査手法の確立とモデルの検証を実施する予定である。

【謝辞】 本論文をとりまとめるに当たり、東京大学工学部小島孝二教授には有益な御助言をいただいた。また、数値計算を効率良く行う上で、岡山大学工学部 西垣誠助教授、岡崎組 小林晃氏に貴重な御教示をいただいたことを記し、末筆ながら謝辞を表す次第である。

参考文献

- 1) 山本勇・塩田哲也・原島文雄・藤本順吉・藤沼・松野修一郎(1974): 東濃地域のウラン鉱床の調査について。鉱山地質, 24, pp. 154-168
- 2) 柳澤孝一(1989): 広域地下水流動調査の状況について。日本原子力学会, 第5回放射線廃棄物セミナー資料集, pp. 163-203
- 3) 渡辺邦夫・笠沢健等・柳澤孝一(1990): 岩盤浸透性の三次元解析の考えと多孔体モデルによる広域解析例。土木学会, 第45回年次学術講演会要旨集, pp. 816-817
- 4) 杉原弘造(1991): 立坑掘削影響試験。日本原子力学会, 第7回放射線廃棄物セミナー資料集, pp. 87-127
- 5) 渡辺邦夫(1986): 山地小規模の地下水流出解析による流れ場の特性評価。応用地質, Vol. 27, No. 4, pp. 40-50
- 6) 開發一郎(1989): 土質水の水収支。気象研究ノート, 167, pp. 91-112
- 7) 中川博隆(1975): 鶴島における熱収支・水収支の気候学的推定。金沢大学教育学部紀要, 27, 15-25
- 8) 柳澤孝一・齊藤 軍・西垣 誠・平田洋一(1989): 新しい現場透水試験法の開発と測定例。土と基礎, 37-7 (378), pp. 47-52
- 9) BRACE, W. F., J. B. WALSH and W. T. FRANGOS

動力炉・核燃料開発事業団
中部事業所

○太田 久仁雄 瀬尾 俊弘
OTA Kunio SEO Toshihiro

- (1968): Permeability of Granite under High Pressure. Jour. of Geophys. Res., Vol. 73, No. 6, pp. 2225-2236
- 10) 尾方伸久・大塚英昭・中野勝志・岡澤孝一・西垣 誠 (1992): 堆積岩の地質学的特性及び透水性。見誤比低沈相互の関係とその水理地質構造モデル化への適応。応用地質, Vol. 32, No. 6, pp. 321-332
- 11) DOMENICO, P. A., M. D. MIFFLIN (1965): Water from Low-Permeability Sediments and land Subsidence, Water Res. Research, Vol. 1, No. 4
- 12) 伊藤 邦明(1982): 岩盤浸透性の低抗期について。土と基礎, Vol. 30, No. 12, pp. 27-32
- 13) 前地宏吉・三宅俊明・百田博宣・泉谷誠志・奥野哲夫・水戸義忠(1988): 節理性岩盤における岩盤浸透性の遅れモードに関する実験的研究。第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 381-385
- 14) Harald ABELIN (1986): Migration in a Single Fracture. An In Situ Experiment in a Natural Fracture, Royal Institute of Technology Department of Chemical Engineering S10044 Stockholm, Sweden
- 15) ABELIN H., Nerethleiks L., TUNBRANT S. and MORE-NO L. (1985): Final Report of the migration in a single fracture experimental results and evaluation, Stripa Project 85-03, SKB
- 16) 伊藤 邦・佐藤邦明(1984): 開削工事に伴う地下水の流れの三次元特性に関する検討。土と基礎 Vol. 32, No. 5
- 17) 百田博宣・橋本 太(1985): 多孔質地山の地下空洞を対象とした三次元地下水解析。第29回水理講演論文集, pp. 739-740
- 18) 今井 久・岡澤孝一(1990): 3次元飽和不飽和浸透流解析プログラム TAGSAC の概要。PNC TR/GE90-01, 動力事業団
- 19) 上田年比古・杉尾 晋(1971): 減圧水で満たされた円形暗渠の取水量について。土木学会論文報告集第194号, pp. 91-101
- 20) W. R. RIDGWAY and D. LARSEN, (1989): A Comparison of Two Multiple-level Ground-water Monitoring System, American Society for Testing and Materials, Philadelphia

(1991年8月15日受付, 1992年9月22日受理)

1. はじめに

深部地下水の地球化学的特性を正しく把握することは、地層処分システムにおける天然バリアの性能評価、とりわけ人工バリア材との相互作用や核種の化学的挙動を評価する上で極めて重要である。また、立坑等の坑道掘削の影響により岩盤本来の水理学的環境条件、特に坑道周辺における地下水の流動状況の変化が想定され、これによって地下水の地球化学的特性にも変化が生じる可能性がある。

本研究は現在、岐阜県東濃鉾山に掘削中の立坑周辺における地下水の地球化学的特性を明らかにし、掘削前、掘削中及び掘削後におけるその特性変化を把握することによって、地下水の流動状況や地球化学的条件の掘削による変化を捉えることを目的としている。

今回は、初期条件としての掘削影響前の地下水の化学組成について得られた知見を報告する。

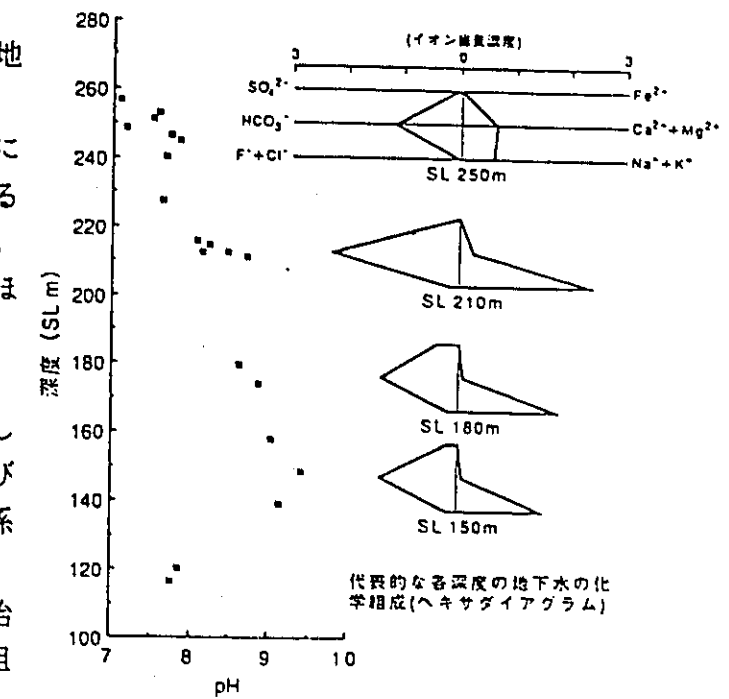
2. 実施内容

現在掘削中の立坑から10m~550mの距離において開削された数本の試錐孔にMPシステム(単一孔多区間モニタリングシステム)を設置し、当地域の基盤をなす花崗岩(約7000万年前)及びその上位を被う堆積岩から成る瑞浪層群(約2000~1500万年前)の各層準から地下水を採取している。採水にあたっては、現場において常時地下水のpH、電気伝導度を測定し、その値の安定をもって本来地層中に帯水していた真の地下水が得られたものと判断した。得られた地下水試料について、通常の化学分析の他、環境同位体測定($^{18}O/^{16}O$, D/H, 3H :いずれも現在分析中)も実施している。

3. 結果

これまでの調査により立坑掘削影響前の地下水組成について以下の結果が得られた。

- ① pHは、瑞浪層群においては、深部に行くに従って中性から弱アルカリ性へと変化するが、基盤をなす花崗岩中では中性である。
- ② 分析値によれば、瑞浪層群中の地下水はほとんどが $HCO_3^- - Na^+$ 型であるが、最上部では $HCO_3^- - Na^+ + Ca^{2+}$ 型である。
- ③ 熱力学的計算によれば、これまでに採取した地下水のほとんど全てがカルシウム及びマグネシウムモンモリロン石との平衡関係にある。
- ④ 現時点で立坑掘削前及び掘削中(掘削開始から約9ヶ月)に採取した地下水の化学組成に大きな違いは認められていない。



東濃地域における深部地下水の地球化学的研究 (III)

-地下水の起源・年齢について-

Geochemical Characterization of Groundwater at Tono Area, Gifu Pref. (III)

-Origin and Age of Groundwater-

動燃事業団 中部事業所 ○太田 久仁雄 瀬尾 俊弘 水谷 義彦*
 富山大学 理学部* OTA Kunio SEO Toshihiro MIZUTANI Yoshihiko

1. はじめに

地層処分に関する研究開発を進める上で、人工バリア材の化学的安定性や、地層中における核種の化学的挙動を直接的に支配する要因である、深部地下水の地球化学的特性を把握することは重要である。動燃事業団では、①東濃地域の地下水の地球化学的特性およびその三次元的分布の把握、②地下水の起源・年齢および流動状況の解明を目的として、地下水に関する調査・研究を実施している。今回は、地下水の起源・年齢について得られた知見について報告する。

2. 実施内容

岐阜県東濃鉾山の調査坑道内に開削された試錐孔からの湧水の採取、および第二立坑周辺に開削された試錐孔におけるMP（単一孔多区間モニタリング）システムを用いた採水を実施し、基盤の花崗岩とその上位の瑞浪層群（堆積岩）の各層準より地下水を採取した。さらに、最上位の瀬戸層群（未固結岩）から地表への湧水および雨水の採取を行った。得られた地下水試料について、水素・酸素の安定同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ・ δD ）、およびトリチウム（ ^3H ）と ^{14}C 濃度の測定を実施した。

3. 結果

- 当地域の地下水の δ 値は深度とともに変化し、化学組成と同様に大きく4つのグループに分けることができる（図1）。
- 瀬戸層群中の地下水の δ 値は現在の雨水とほぼ同一であり、また、トリチウム濃度が高いことから、瀬戸層群中の地下水は、現在の降水が涵養したものと考えられる。
- 瑞浪層群・花崗岩中の地下水の δ 値は、中部地方の天水の範囲に入ることから、これらの地下水は降水起源と考えられる。しかし、現在の同地域の降水よりも δ 値が低いことから、瑞浪層群・花崗岩中の地下水は、①現在の気候条件下でさらに標高の高い所の降水、②冬に対する夏の降雨量の割合が高かった時期の降水、③過去の気温の低かった時期の降水のいずれかに由来する可能性が考えられる。
- 瑞浪層群・花崗岩中の地下水のトリチウム濃度は極めて低濃度であるため、ある程度の時間が経過した地下水であると考えられる。また、瑞浪層群最下部の地下水の ^{14}C 濃度の測定結果からは、Dead Carbon（放射性炭素を全く失った炭素）の混入を補正して、その年代値として約15,000年が推定される。

4. 今後の予定

さらに多くの ^{14}C 濃度の測定を行い、化学組成・同位体組成の深度変化および水理地質のデータなどと併せて、本地域の詳細な地下水の流動状況を明らかにする。

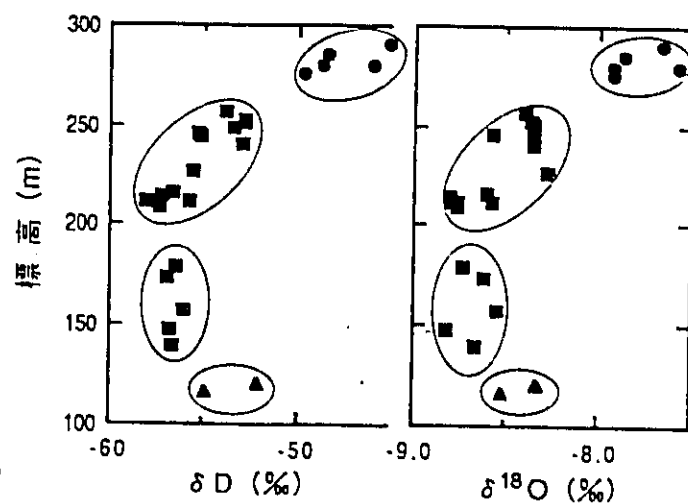


図1. 東濃地域の地下水の水素・酸素同位体組成と深度

東濃地域における深部地下水の地球化学的研究 (IV)
 -物理化学パラメータの測定手法とその深度分布について-

Geochemical Characterization of Groundwater at Tono Area, Gifu Pref. (IV)

-Method for Measurement of Physicochemical Parameter and its Depth Profile-

動燃事業団 中部事業所 ○濱 克宏 瀬尾 俊弘 太田 久仁雄
 HAMA Katsuhiko SEO Toshihiro OTA Kunio

1. はじめに

深部地下水の地球化学特性を把握することは、地層処分システムにおける人工バリア材の安定性や元素の化学的挙動を評価する上で重要である。地下水の地球化学的特性に関するデータのひとつに、pH、酸化還元電位(Eh)、溶存酸素濃度(DO)などの物理化学パラメータがある。これらのパラメータは、地下水を大気に開放することによって値が変化する可能性がある。

本研究の目的は、東濃地域の地下水について、物理化学パラメータの測定手法を確立し、その三次元的分布を把握することである。今回は、パラメータ測定のための予備試験結果と現在までに得られている測定結果について報告する。

2. 実施内容

- 不活性の雰囲気下で地下水の物理化学パラメータを測定するシステムを製作した。本システムは、MP（単一孔多区間モニタリング）システムを用いて、バッチ式で採水した地下水に適用できる。本システムを用いた採水・測定手順は以下のとおりである。①MP採水ボトルに不活性ガスを充填したのち、真空にする。②試錐孔内で採水する。③採水ボトル内の地下水を、不活性ガスで不活性雰囲気のグローブバッグ内へ送水する。④グローブバッグ内で地下水の物理化学パラメータ値を測定する。
- パラメータ測定のための予備試験を実施した。採水・測定の雰囲気を大気と不活性ガスの2つに設定し、その組み合わせを変えた4つの条件についてパラメータ値を比較し、パラメータ測定に最適な条件を求めた。
- 測定システムを用いて、東濃地域の地下水の物理化学パラメータを測定した。

3. 結果

予備試験として、現在までに行った測定から、以下の結果が得られた。

- pHは、採水・測定の雰囲気によらず、ほぼ一定の値を示す。Eh、DOは、採水・測定とも不活性の雰囲気で行った場合、最も低い値を示す。
- pHは、深度が増すに従って、中性から弱アルカリ性へと変化する。また、深部ほど還元的な雰囲気が強くなる。DOは、どの深度においても非常に低く、標高約220mより深部では、ほぼ0ppmである（図1）。

4. 今後の予定

測定の雰囲気の酸素濃度をさらに低くするなど、測定システムの改良を行う。また、さらに多くの物理化学パラメータ値を取得し、その三次元的分布を明らかにする。

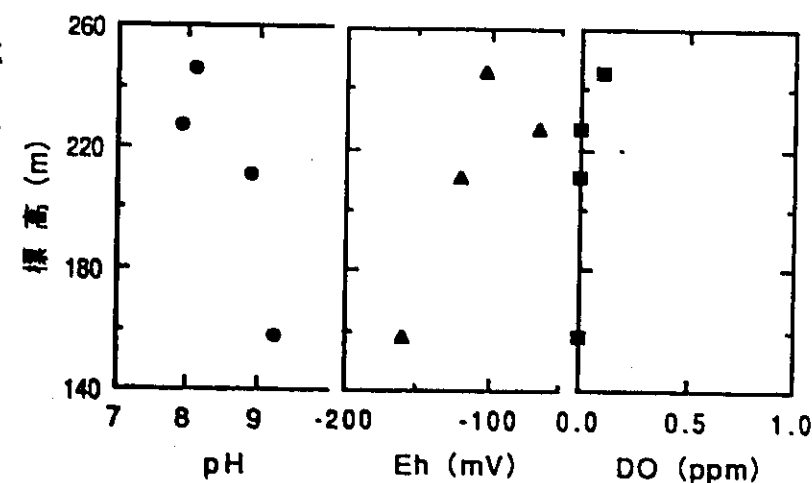


図1. 東濃地域の地下水の物理化学パラメータと深度

12. 岐阜県東濃地域における地下水の¹⁴C年代と起源について

○瀬尾 俊弘 (動燃事業団)・水谷 義彦 (富山大理)
太田久仁雄 (動燃事業団)

1. はじめに

岩盤中の地下水流動系の調査手法の一つに地球化学的な調査法が挙げられる。たとえば地下水が流動する過程において、地下水の水質はその流動場の地層との反応によって形成される。したがって、その三次元的な水質の変化を知ることにより、地下水の流動を推定することが可能と考えられる。一方、地下水の年代と起源に関するデータは、地下水の滞留時間や流動初期の状態を知る上で非常に有益な情報となる。これらの地球化学的手法を組み合わせ、さらに水理学的的手法による調査結果との比較によって、詳細な地下水流動系を明らかにすることができる。今回は、地球化学的手法のうち、岐阜県東濃地域のおもに堆積岩中の地下水の炭素の放射性同位体 (¹⁴C) と炭素・酸素・水素の安定同位体の調査結果をもとに、その年代と起源についての検討結果について報告する。

2. 調査地域の概要

調査地域は、岐阜県土岐市の東濃鉾山 (月吉ウラン鉱床) を中心とした領域である。この地域の地質は、先新第三紀の基盤岩 (土岐花崗岩) を新第三紀の礫岩・砂岩・泥岩からなる瑞浪層群 (下位より土岐炭累層、明世累層、生俵累層) が不整合で覆っている。さらにその上位には、鮮新世の砂礫層を主体とする瀬戸層群がこれらを不整合で覆って分布している (図-1、2)。

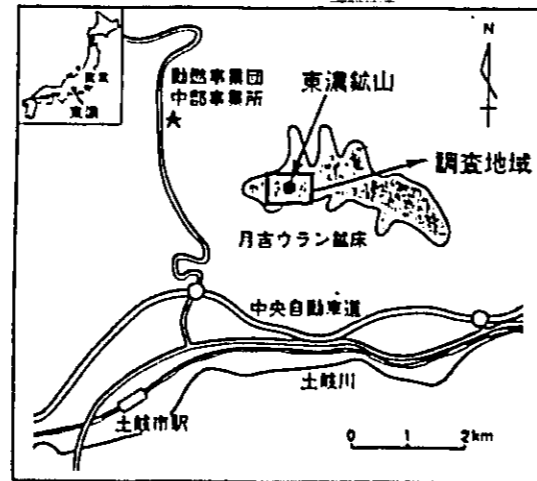


図-1. 調査対象地域の位置

3. 調査地域の地下水の水質の特徴

調査地域の地下水の水質については、これまでの調査 (太田・瀬尾, 1991, Yamakawa, 1991) により、以下の特徴が明らかとなっている。

- ① 瑞浪層群中の地下水は、深度が増加するほど中性から弱アルカリ性へと変化する。基盤をなす花崗岩中の地下水は中性である。
- ② 瑞浪層群上部層中の地下水は、Na・Ca-HCO₃型であり、深部になるとNa-HCO₃型へと変化する。

4. 調査の概要

(1) 地下水の採取

今回、対象とした地下水試料は、東

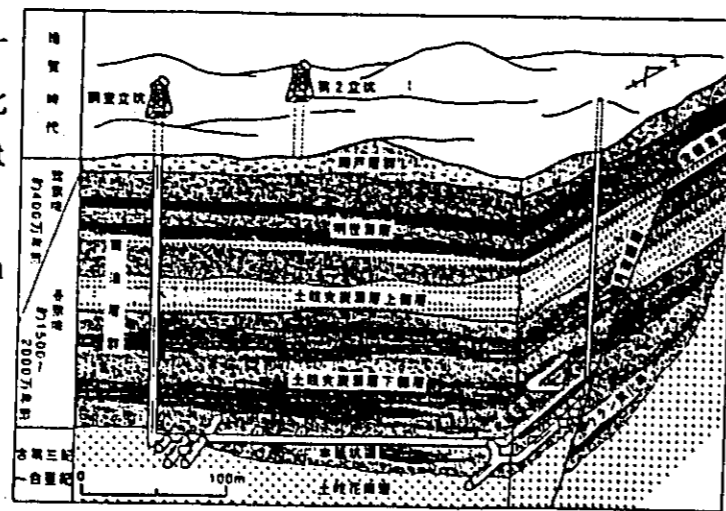


図-2. 調査対象地域の模式断面図

表-1. 地下水の化学組成および¹⁴C年代

No.	試料 番号	採取位置	pH	Na ⁺ ppm	K ⁺ ppm	Mg ²⁺ ppm	Ca ²⁺ ppm	F ⁻ ppm	Cl ⁻ ppm	SO ₄ ²⁻ ppm	全溶解 炭素 mM	11111 δ ¹³ C _{org} ‰	14C _{org} ‰MC	14C年代			
														補正1 年	補正2 年	補正2 年	
生俵累層																	
1.	TH-80	(GL-28.5m)	7.75	30.8	1.92	0.49	7.10	0.8	1.10	0.27	1.76	1	-15.4	31.36	9580±180	5570	2880
2.	TH-60	(GL-68.0m)	7.83	27.1	1.78	0.43	6.92	0.8	2.63	9.16	1.39	1	-18.5	35.36	8590±270	6110	3260
明世累層																	
3.	AN-6A/TU	(GL-14.0m)	7.69	43.7	1.10	0.36	6.27	0.7	1.27	2.61	2.28	2	-20.7	66.39	3390±110	1830	400
4.	TH-8A	(GL-64.0m)	7.98	47.7	1.20	0.18	4.46	1.0	1.27	0.41	2.31	5	-15.1	49.58	5800±120	1630	-360
土岐炭累層下部層																	
5.	TH-4TL	(GL-152.5m)	8.97	56.5	0.28	<0.02	2.58	3.7	4.57	38.8	1.46	2	-13.9	21.69	12630±280	7780	3670
6.	坑内KNA-2*		9.02	39.3	0.22	<0.02	2.30	3.7	1.06	0.25	1.55	0	-17.6	10.80	18400±570	15500	12840
7.	坑内KS-1*		9.14	44.6	0.33	<0.02	1.29	5.9	1.00	1.00	1.51	0	-14.0	6.71	22330±840	17540	13920
8.	坑内KNA-1*		9.12	39.9	0.17	0.04	1.91	3.9	0.92	<0.1	1.51	0	-17.0	7.81	21080±200	17940	15090
土岐花崗岩																	
9.	TH-8G	(GL-160.0m)	7.85	23.6	1.19	0.49	16.4	2.8	1.48	4.23	1.70	1	-17.8	28.71	10320±160	7510	5150

*: ボーリング孔からの湧水

土岐炭累層下部層中の地下水の¹⁴C年代 (補正值2) は、No. 5の試料を除いて13,000~15,000年である。No. 5はトリチウムが検出されていることから、ボーリング時の掘削水の影響が完全に排除されているかなどについて検討する必要がある。また、明世累層、生俵累層中の地下水の¹⁴C年代 (補正值2) は、-360~3,000年である。これもトリチウムが検出されていることから、上記のように掘削水の影響のほか、トリチウム濃度が現在の降水と同じ瀬戸層群中の地下水 (Yamakawa, 1991) のような浅層の地下水との混合も考慮する必要がある。このような混合が行われている地下水の年代測定には多くの問題があり、現段階では得られた年代値は参考値としてとり扱う必要がある。一方、花崗岩中の地下水は一試料だけの¹⁴C年代値 (5,150年) が得られたが、今後、試料数などを増やしてその値の信頼性を検討していかねばならない。

(3) 起源

これまでの酸素と水素の安定同位体比の調査から、調査対象地域の地下水は、降水起源であることが明らかとなっている。しかしながら、土岐炭累層中の地下水の安定同位体組成は、現在の降水や瀬戸層群中の地下水の値と異なり、δ¹⁸O値が約1~1.5‰低い (太田ほか, 1992)。このことは、現在の気象条件のもとでは、年平均気温が約2~3℃低いことに対応する (Yurtsever, 1975)。一方、土岐炭累層下部層中の地下水の¹⁴C年代値は、ウルム氷期の末期の相当し、当時は現在よりも気温が低かったと考えられる。さらに岐阜県の鍾乳洞における鍾乳石の同位体の研究から、約15,000年前の気温は現在よりも低かったことが明らかにされている (Nakai and Shirai, 1978)。以上のことから、土岐炭累層下部層中の地下水は、

濃鉱山の坑道内 (G. L. -130m) から掘削されたボーリング孔からの湧水と地表からのボーリング孔から採取されたものである。なお地表からのボーリング孔には、マルチパッカー方式のケーシング (MPシステム) が挿入されており、任意の深度からの採水が可能である。

(2) 地下水の分析

得られた試料について、主要溶存成分、 ^{14}C 濃度、炭素の安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) およびトリチウムの分析を行った。なお ^{14}C 濃度は、名古屋大学年代測定試料研究センターのタンデロン加速器質量分析計によって分析を行った。この分析計による ^{14}C の定量法は、従来の放射能測定法と比較して、測定に必要な炭素の量は2~5mgと従来のほぼ1/1000である、測定時間が数時間と短い、 ^{14}C 検出のバックグラウンド計数が極めて少ないため測定可能な年代の上限が大きいなどの長所をもっている (中村・中井, 1988)。

5. 結果と考察

(1) 地下水中の全溶存炭酸の起源に関するモデル

加速器質量分析計によって測定された ^{14}C 濃度は、%Modern carbon ($^{14}\text{C}_{\text{c}}$) として求められ、年代値 (t) は次式によって得られる。

$$t = 8267 \ln (100 / ^{14}\text{C}_{\text{c}}) \quad (1)$$

しかしながら、地下水中の ^{14}C 濃度から得られた年代は、必ずしも地下水の滞留時間を正しく表しているとは限らない。たとえば降水起源の地下水の場合、降水が地下へ涵養し流動する間に地下水にはさまざまな反応によって溶存炭酸が供給され、それにともなって ^{14}C 濃度が変化するからである。したがって調査対象地域に合った全溶存炭酸濃度の変化をモデル化し、そのモデルを用いて ^{14}C 濃度を補正して年代を求める必要がある。ここでは、調査対象地域で特徴的に起きていると考えられる全溶存炭酸濃度の変化について次のモデルを考えた。

①降水には、大気中の二酸化炭素が溶解しており、その降水が土壌中を通り地下へ浸透する際に、さらに多くの土壌二酸化炭素が供給される。地下水にこのようにして溶解した二酸化炭素は、 ^{14}C を含む炭素 (いわゆるModern carbon) よりなる。このような地下水の ^{14}C 年代を $t = 0$ 、すなわち $^{14}\text{C} = 100$ %Modern carbon と仮定する。

②土壌を通過した地下水中の全溶存炭酸濃度は、帯水層中において (反応1) 帯水層中の堆積性有機物の酸化による二酸化炭素の供給、(反応2) 帯水層中の堆積性有機物のメタン醗酵による二酸化炭素の供給、(反応3) 貝化石の溶解による炭酸水素イオンの供給といった過程を経て増加する。なおこれらの二酸化炭素および炭酸水素イオン中のいずれの炭素も ^{14}C を完全に失ったDead carbon である。

(2) ^{14}C 年代

上記のモデルから、地下水にはDead carbon が供給されるため、地下水中の ^{14}C 濃度が変化する。したがって、式(1)に測定で得られた ^{14}C 濃度をそのまま代入して年代値を求めた場合、 ^{14}C 年代は実際の値より大きく見積もられることになる。そのため $\delta^{13}\text{C}$ 値をもとに、反応2、3により地下水に加えられたDead carbon の寄与を補正 (補正1) し、さらに反応1についての補正 (補正2) も行った。それらの結果を表-1に示す。

現在よりも気温の低かった時期の過去の降水が涵養したものであると考えられる。

6. まとめ

今回調査により以下の結果が得られた。

①土岐夾炭累層下部層中の地下水の ^{14}C 年代値は、13,000~15,000年である。そのほかの地層中の地下水の ^{14}C 年代値については、今後の検討が必要である。

②土岐夾炭累層下部層中の地下水は、現在よりも気温の低かった時期の過去の降水が涵養したものであると考えられる。

終わりに、今回のタンデロン加速器質量分析による ^{14}C 濃度の測定は、名古屋大学理学部、中井信之教授 (当時) ならびに村井康弘氏によって行われたものである。ここに付記し謝意を表します。

7. 参考文献

- 太田久仁雄・瀬尾俊弘 (1991) : 東濃地域における深部地下水の地球化学的研究 (II), 日本原子力学会, 1991年年会予稿集, 526.
- 太田久仁雄・瀬尾俊弘・水谷義彦 (1992) : 東濃地域における深部地下水の地球化学的研究 (III), 日本原子力学会, 1992年年会予稿集, 113.
- Nakai, N. and Shirai, Y. (1978) : Paleoclimatic features in central Japan based on the stable isotope compositions of lake Biwa sediments and speleothems. Proceedings of the Japan Academy, Vol. 54, Ser. B, No. 3.
- 中村俊夫・中井信之 (1988) : 放射性炭素年代測定法の基礎-加速器質量分析法に重点を置いて-地質学論集, 29, 83-106.
- Yamakawa, M. (1991) : Geochemical behavior of natural radionuclides in the geological formation. Proceedings of 3rd International Symposium on Advanced Nuclear Energy Research "Global Environment and Nuclear Energy", 150-158.
- Yurtsever, Y. (1975) : Worldwide survey of stable isotope in precipitation. Rep. sect. Isotope Hydrology, IAEA, November 1975, 40pp.

THE SHAFT EXCAVATION EFFECT EXPERIMENT

Development of Hydrogeological Model in TONO Research Field

K. YANAGIZAWA, H. IMAI, H. KAWAMURA
Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC)
1-9-13, Akasaka
Minato-ku, Tokyo, 107
03(3586)3311

K. WATANABE
Saitama University
255, Shimookubo
Urawa, Saitama, 338
048(852)2111

ABSTRACT

The Shaft Excavation Effect (SEE) experiment has been carried out by Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC). Corresponding to this experiment, an evaluation system of the excavation effect on groundwater flow has been developed. PNC has been performing a comprehensive hydrogeological study programme in Tono research field. This paper presents the evaluation system and some results that were obtained on the way of the experiment. The system has a comprehensive hydrological investigation subsystems and some pre-excavation data. Prediction of hydraulic behavior is carried out. In the prediction, the remarkable affected area, profile of outflow into the shaft, and piezometric head transition in four monitoring boreholes were estimated.

INTRODUCTION

For the purposes of the establishment of technologies in the geological disposal system for high level radioactive waste and in effective use of underground space, it is necessary to establish the evaluation system which can estimate the mechanical and hydrological influences in the rock around the excavation. In this aspect, PNC has been performing a comprehensive hydrogeological study programme in Tono research field. The SEE experiment was started in December 1989 as a part of the study programme mentioned above. In this experiment, the excavation of a new shaft ($\phi 6.0\text{m} \times$ depth 150m) is planned and some monitoring systems have been installed around the shaft to evaluate the influence of the shaft excavation. This paper presents the evaluation system of the hydrological influence induced by the Shaft Excavation and some predictive results which were simulated with 3D-FEM code.

1. OUTLINE OF THE SEE EXPERIMENT

The SEE experiment is to construct a vertical shaft (the inside diameter of 6m and the depth of 150m) in sedimentary rock with blasting method. The

excavation was started in January, 1990 and is planned to be finished in May, 1991.

The objectives of the SEE experiment are summarized as follows.

- ① Evaluate the mechanical and hydrological characteristics of the rock mass which are influenced by the shaft excavation.
- ② Evaluate the groundwater flow around the shaft.
- ③ Develop the near-field model data set considering a mixing cell condition.

The SEE experiment site is in Tono mine, Toki city, Gifu prefecture where is in the center of Japan. Tono mine is in Tsukitoshi Uranium deposit. The topography around the shaft is hills as shown in Fig-1.

The investigation area is determined as the area bounded by the solid lines 300meters around. In this area, there are many boreholes were drilled to investigate the shaft excavation effect. Other monitoring equipments were also installed. The monitoring is planned to be carried out before, during and after the excavation.

The geology of the area consists of Neogene sedimentary rock overlaying late cretaceous granitic basement. The thickness of the sedimentary rock is approximately 150 ~ 200m and the sedimentary rock consists of sandstone, siltstone, tuff, conglomerate. The upper zone of the granite is weathered. A reverse Fault (Tsukiyoshi Fault) extends for east-west and dips south at high angle as shown in Fig-2.

The new shaft is constructed in the Uranium mine where investigation shaft and galleries have been already existing, so that the underground structure becomes so complicated. Fig-3 illustrates a 3D-view of the SEE experiment site underground structures. As shown in Fig-3, the shaft is planned to have several new drifts spreading from the shaft at the different levels to accommodate a series of experiments. One of them is No.1-measuring drift to study the mechanical behavior of the rock mass and the change of the hydrological characteristics of the rock mass. The second is No.2-measuring drift.

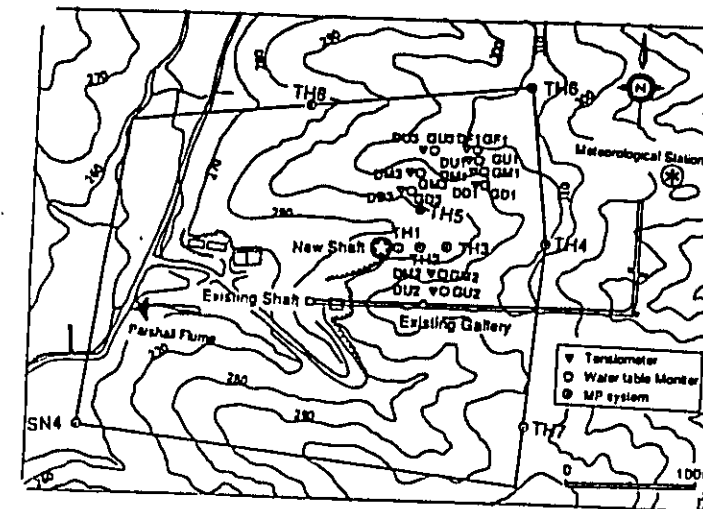


Fig-1 Investigation area of the SEE experiment and Location of the monitoring equipments

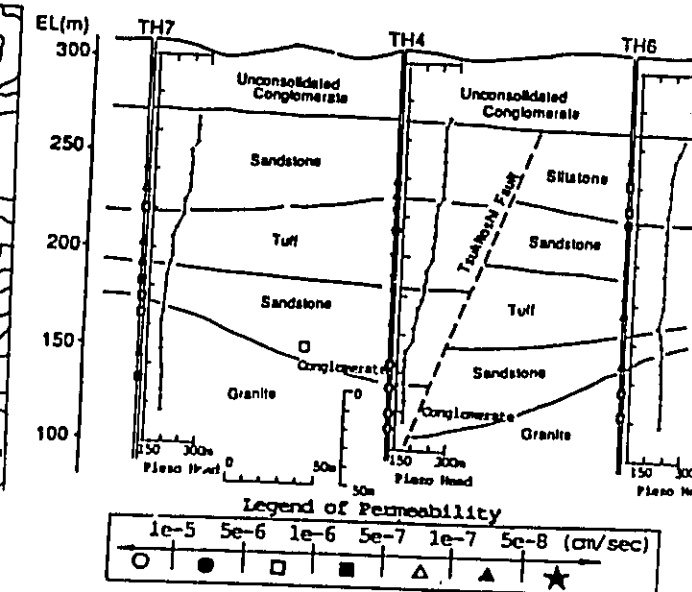


Fig-2 Geological structure, Measured Permeability distribution and Measured Piezometric head distribution

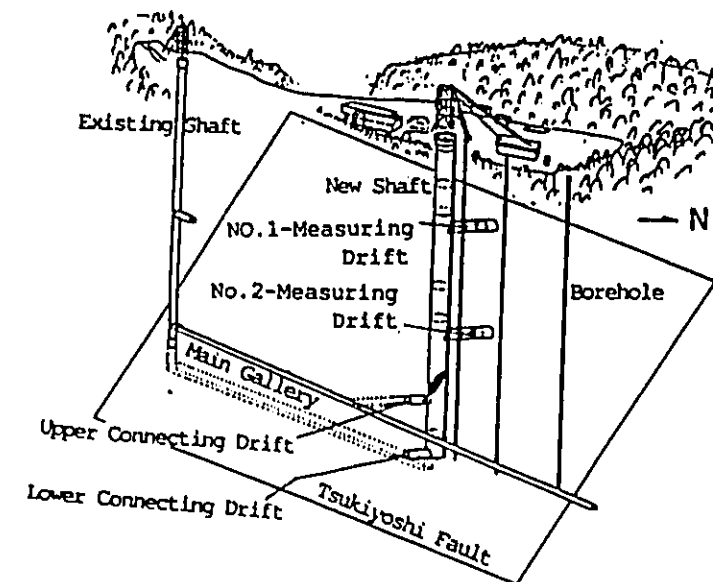


Fig-3 3D-View of the SEE-experiment site

The bottom ones are drifts to connect with the existing structures.

II. HYDROLOGICAL INFLUENCE EVALUATION SYSTEM

A. Framework of the Evaluation System

Our approach to define the shaft excavation effect on groundwater flow is composed of four steps as Fig-4 shown. The first step is to obtain a firm understanding of the hydrological and geological condition before the excavation. The second step is to develop the hydrogeological model based on data acquisition of the first step. The third step is to predict the excavation effect on the groundwater flow using some numerical

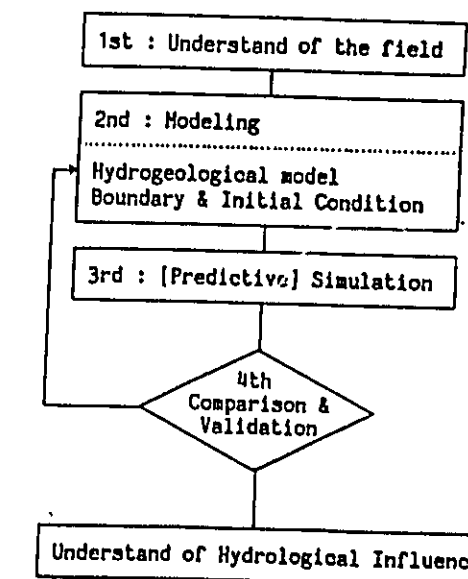


Fig-4 Flowchart for evaluation of the shaft excavation effect on groundwater flow.

simulation codes. The fourth step is to validate the model used in the prediction by the comparison between the calculated and the measured results. In this step, some modification of the model is required to get an acceptable agreement between the simulated and measured results. Then the acceptable agreement leads to the evaluation of the shaft excavation effect on groundwater flow.

B. Hydrological Investigation Subsystems

For the purpose of development of the hydrogeological model and of its validation, the comprehensive hydrological investigation subsystems have been developed around the shaft. The location of the monitoring equipments in the subsystems are shown in Fig-1. TH1, ~8 and SN4 are observed boreholes. Monitoring and test items are arranged in Table-1. In Table-1, each item is related to the obtained data and their applications. These items include the whole items concerning the groundwater flow, from rainfall to discharge and evapotranspiration.

In these measuring equipments, the MP system (Multiple Piezometer system) plays an important role in the evaluation system. The MP systems have been installed in the TH-series and SN4 boreholes. The MP systems provides groundwater data from multiple levels within a single drillhole. These data can include pore pressures, water samples, and hydrological parameter measurements. Pore pressure distribution along the casing of the MP system in each hole is planned to be monitored regularly before, during and after the shaft excavation. And the obtained MP data before, during and after the excavation are applied to the developing of hydrogeological model, determination of boundary conditions and model validation.

III. MODELING FOR THE PREDICTIVE SIMULATION

A. 3D-FEM Simulation Code

The 3D-FEM simulation code used in this study is TAGSAC (Three dimensional Analysis of Groundwater flow Saitama university Code). TAGSAC was developed to calculate unsteady saturated-unsaturated groundwater flow in porous medium. This code uses the Galerkin formulation for 8 node elements. The discretization in time uses the Crank-Nicholson scheme. Groundwater flow is solved in term of Piezometric heads.

B. The Element Division Shape

The Element division was arranged in consideration of the topological geometry and the underground structures. Fig-5 show the Element division shape for 3D-FEM simulation code. The size of this model is about 300m x 300m x 300m. There are 3133 elements and 3924 nodes. In this model, the shaft is shaped 5 meters square 150 meters deep, the existing shaft is shaped 3 meters square 135 meters deep and the existing gallery is shaped 3 meters square 163 meters long.

C. The Hydrogeological Model

The Hydrogeological model was determined based on the results of the field permeability test and the geological survey. Fig-2 presents the typical geological structure, measured permeability and piezometric head distribution of this area in the representative section of TH7-TH4-TH6. The basic

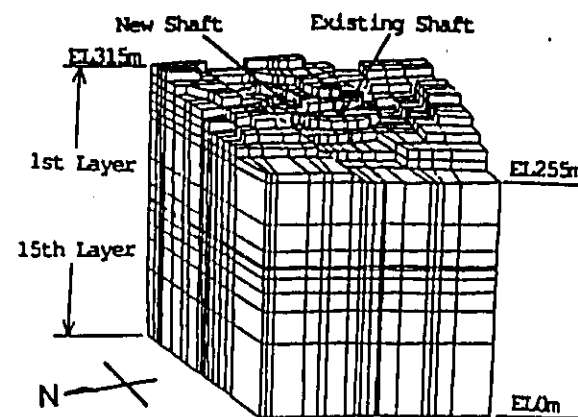


Fig-5 Element division shape for 3D-FEM simulation

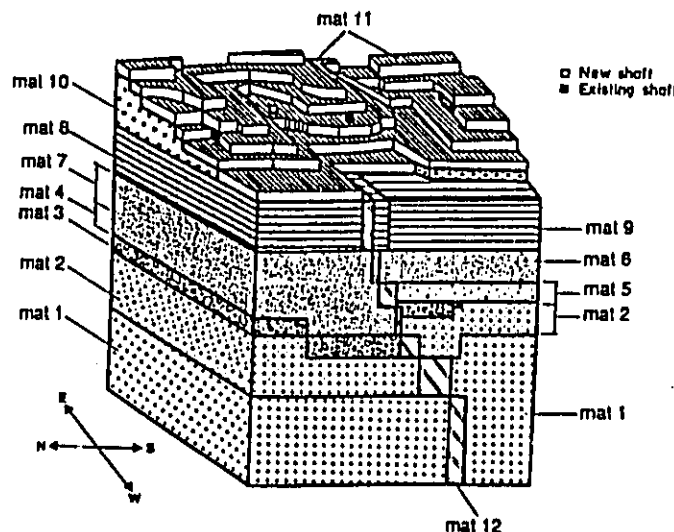


Fig-6 Hydrogeological model

Table-2 Permeabilities, Porosities, Specific storage coefficients and Geology in the Hydrogeological model

Part	Permeability (cm/sec)	Porosity	S.Storage (1/m)	Geology
mat1	1.00E-07	0.02	1.00E-04	granite
mat2	5.00E-06	0.1	1.00E-04	weathered-granite
mat3	1.00E-05	0.3	1.00E-04	wh-gra.&conglomerate
mat4	1.00E-06	0.3	1.00E-04	sandstone
mat5	5.00E-06	0.3	1.00E-04	sandstone
mat6	1.00E-06	0.3	1.00E-04	sandstone&tuff
mat7	1.00E-06	0.4	1.00E-04	tuff
mat8	5.00E-06	0.4	1.00E-04	sandstone&siltstone
mat9	1.00E-07	0.4	1.00E-04	sandstone
mat10	1.00E-05	0.4	1.00E-04	unsolidated-conglo
mat11	1.00E-04	0.5	1.00E-03	surface-soil
mat12	1.00E-08	0.3	1.00E-04	clay rich fault

Table-1 Subsystems of Hydrogeological Investigation

Methods	Facilities, equipments	Items	Results	Applications
Meteorological survey Hill slope hydrological survey Borehole investigation	Meteorological monitoring system Tensiometer Water table monitoring well Parshall flume Sampling tool Indoor measurement instruments Boring Machine PNC Low Pressure Lugeon Test system MP system PNC BAT Groundwater Sampling system Neutron logging equipments Borehole television system RAMAC system Outflow monitoring system Humidity measurement system	Monitoring of Evapotranspiration, Rainfall, Temperature, etc Monitoring of soil moisture Monitoring of water table Discharge measurement Test of soil physical properties in the laboratory Core logging Geological investigation by core Investigation of fracture (fracture pattern, filling materials, RQD etc) Test of physical properties in the laboratory Hydraulic Investigation in the borehole Permeability Test MP system for pore pressure measurement Water sampling Geophysical logging Neutron logging Borehole TV investigation RADAR investigation Monitoring of outflow Measurement of evaporation	Recharge rate Moisture characteristic curve* Permeability of soil Porosity of soil Lithofacies RQD* Fracture characterization Porosity, Density, etc Permeability Pore pressure Eh*, pH*, Electric conductivity* Groundwater composition* Porosity Fracture characterization and condition on the wall Fracture characterization Outflow Evaporation on tunnel wall	Upper boundary condition Parameters for simulation Hydrogeological model and Parameters for simulation Boundary & Initial condition and data for Validation Validation Hydrogeological model and Parameters for simulation Validation

* : These data were not used in this time

concepts of hydrogeological modeling of this area are as follows.

- i) Tsukiyoshi fault exists as low permeable zone in the center of this area.
- ii) The surface of unconformity above the granite is declining to the center of this area. There is a high permeable zone composed of the weathered granite and the conglomerate.
- iii) Unconsolidated conglomerate layer exists on the horizontal surface of unconformity.

The hydrogeological model (Fig-6) was derived from these concepts and measured permeability distribution. There are 12 parts classified according to the hydrogeological properties. Table-2 presents the three properties and the geology in each part. The representative results of property test were applied to the permeabilities and porosities. And the ordinary values were applied to the specific storage coefficients (S.Storage in Table-2). Moisture characteristic curve and related permeability curve under unsaturated condition were used for all parts as shown in Fig-7.

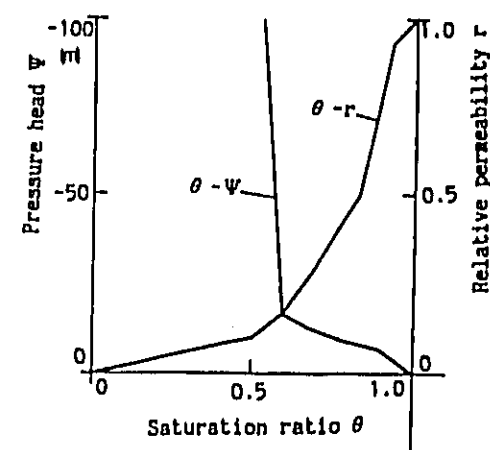


Fig-7 Moisture characteristic curve $\theta - \psi$ and Relative permeability curve $\theta - r$

D. Boundary Condition

Boundary condition is illustrated in Fig-8

- i) Upper surface : Water inflow is determined as 0.5mm/day based on the recharge estimated by the meteorological and hydrological survey. Upper surface combines the seepage free surface condition.
- ii) Shaft and Gallery wall : seepage free surface condition.
- iii) Lower surface : impermeable condition (i.e. no flow condition)
- iv) Side Surface : side boundary conditions are fixed corresponding to MP measurement values.

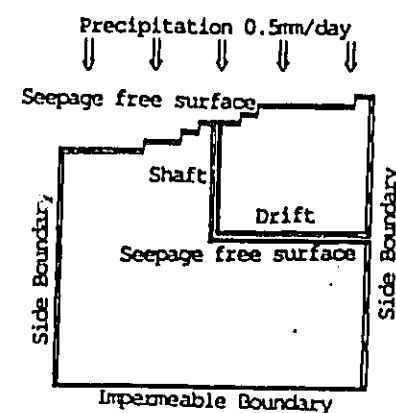


Fig-8 Illustration of the Boundary Condition

The fixed value distribution was performed by interpolation based on the approximated head distribution in TH4,6,7,8,SN4 and preliminary steady analyses. The approximation of piezometric head distribution was made in accordance with MP data and hydrostatic assumption (i.e.constant piezometric head distribution) that is applied to the upper and lower section where is lack of MP data as shown in Fig-9. Fig-9 shows an example in TH4. The constant values in upper section were determined based on the monitored watertable, and the values in the lower section was determined based on the measured pore pressures in the MP systems.

E. Initial Condition

The determination of initial condition can lead to reliable prediction of groundwater flow simulation. Then, the initial condition was obtained by the preliminary calculation concerned with the existing shaft and gallery. The preliminary calculation is carried out in the steady state condition. Successively it becomes important to examine the result for its validity as the initial condition. In this aspect, the comparisons of the

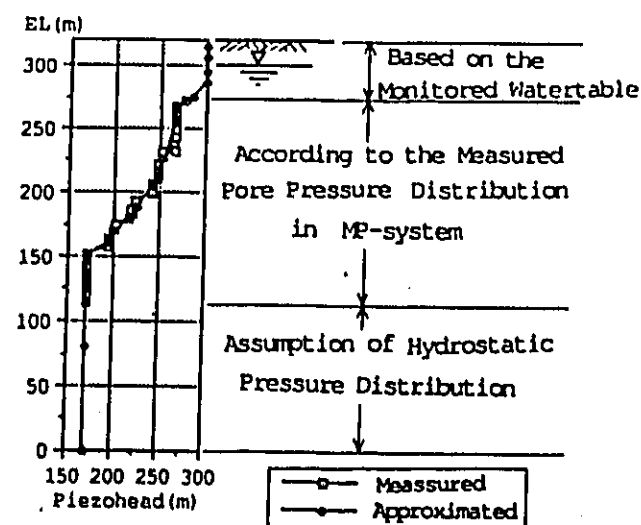


Fig-9 Approximation of piezometric head distribution

preliminary calculated piezometric head distributions in TH1,2,3 and 5 with the measured ones are in Fig-10. The comparison of calculated outflow into the existing shaft and gallery with the measured one is also presented in table-3. From these comparisons, the calculated results seem to be acceptable for the initial condition of the predictive simulation in terms of the tendency of the piezometric head distribution. Although the calculated piezometric head distributions do not fit the intensive changes of the measured ones, the calculated piezometric heads simulate the measured ones which trend to decrease with depth. The calculated total outflow is two times as much as the measured one. The difference of outflow between calculated and measured can be considered to be acceptable because the outflow tends to be easily changed by the change of some condition around the seepage face. Therefore this calculated result is considered to be applicable to the predictive simulation as the initial condition and the hydrogeological model, too.

IV. PREDICTION

A. Excavation Schedule and Its Modeling

The Excavation schedule is simplified and illustrated in Fig-11. There are four excavation stages. The duration of the excavation is 486 days. And the duration of the simulation is 1095 days (3 years), so this simulation follows about 600 days after the excavation. The simulation of the excavation is carried out by taking out the element corresponding to the shaft on the FEM model and controlling the values at the excavation face nodes considering the excavation schedule as shown in Fig-11.

B. Results

As the one of the predictive results, Fig-12 shows the simulated piezometric head transition in TH1,2,3 and 5. Fig-13 shows the relationship between the change of head in 3 years and the distance from the shaft. In Fig-13, both the change of head and the distance were arranged by the moving average method with respect to the order of the distance from the shaft. Fig-12 and 13 predict that the change of head induced by the excavation becomes smaller as the distance increases from the shaft. And the remarkable affected area is estimated to be within 100 meters. Fig-14 shows the contour map of calculated piezometric head in the east-west vertical section with the shaft at 486 days after the excavation. Fig-15 shows the distribution of Darcy velocity in EL 135m plane with the excavation face. Fig-14 and 15 show that the flow direction leads toward the Shaft, and that the head gradient and the Darcy velocity are large around the Shaft. The profiles of outflow into the Shaft and the existing shaft & gallery are presented in Fig-16. The maximum outflow into the Shaft is estimated to be about 30 l/min. The outflow profile shows a remarkable increase around 450 days when the excavation face have passed

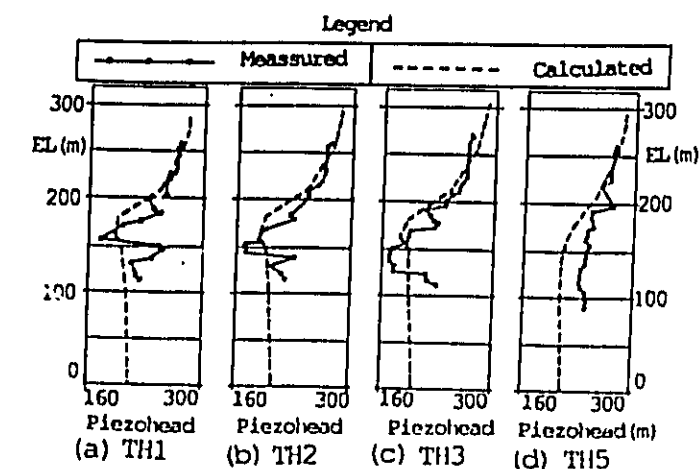


Fig-10 Comparison of the calculated piezometric head distributions with the measured ones in TH1,2,3 and 5 before the excavation

Table-3 Comparison of the preliminary calculated outflow into the existing shaft and gallery with the measured one.

	(l/min)			
	A	B	B-A	B/A
	Measured	Calculated	Difference	rate
Shaft	7.2	9.3	2.1	1.3
Gallery	9.1	23.2	14.1	2.5
Total	16.3	32.5	16.2	2.0

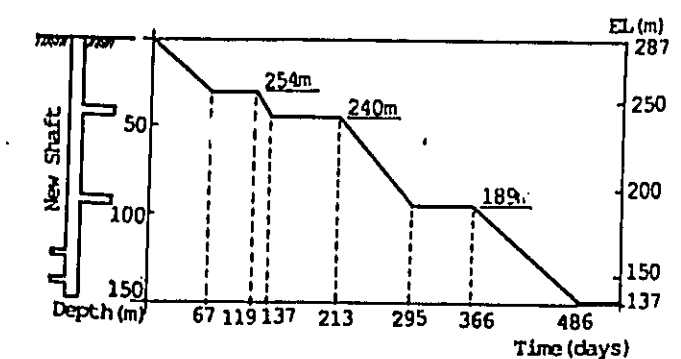


Fig-11 Excavation schedule

through the fault and reached the high permeable zone. The change of the outflow into the existing shaft and drift is estimated to be decreasing so gradually, and the decrease of the outflow will be not more than 10 % of the outflow.

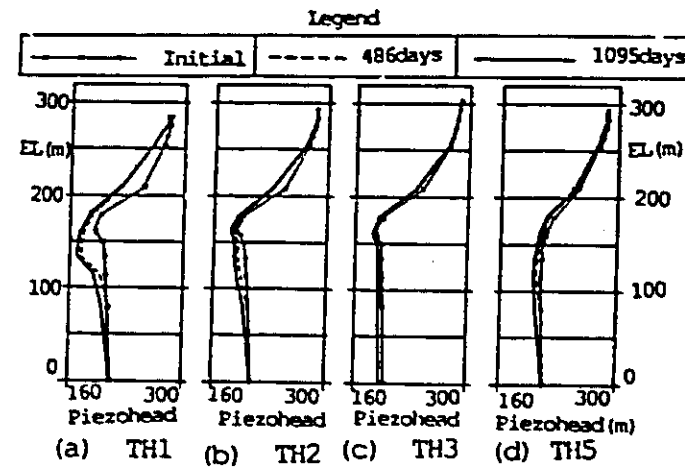


Fig-12 Calculated piezometric transition in TH1, 2, 3, and 5 during 3 years.

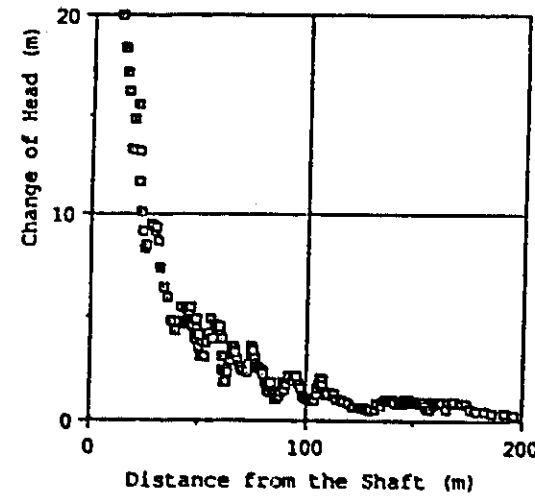


Fig-13 Relationship between the change of head in 3 years and distance from the Shaft in EL 150m plane.

C. Summary of The Prediction

The predicted phenomena induced by the shaft excavation are summarized as follows.

- i) The change of pore pressure is estimated to become smaller as the distance increases from the Shaft. And the remarkable affected area is estimated to be within 100 meters three years after the shaft excavation.
- ii) When the excavation face have passed through the Tuki-yoshi fault and have reached the high permeable zone, the outflow into shaft will be increasing rapidly. And the maximum estimated outflow is about 30 g/min just at the final excavation time.
- iii) The outflow into the existing shaft and gallery is estimated to be decreasing gradually, when the excavation is nearly final. The estimated

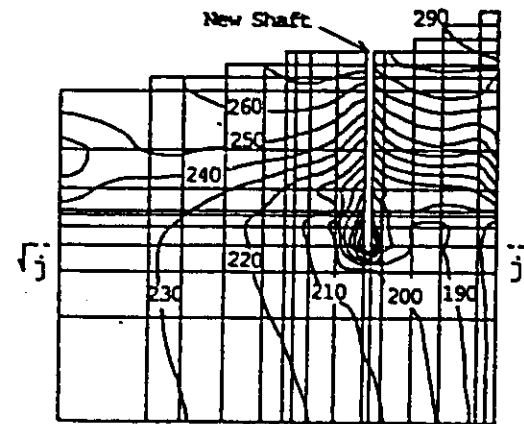


Fig-14 Contour map of calculated piezometric head in a vertical section (section i-i in Fig-15)

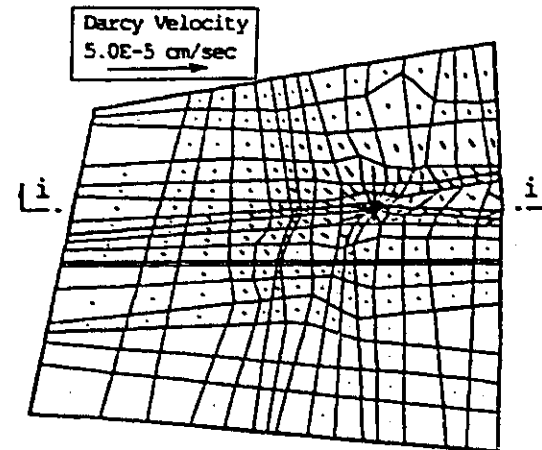


Fig-15 Distribution of calculated Darcy velocity in EL 135m plane (section j-j in Fig-14)

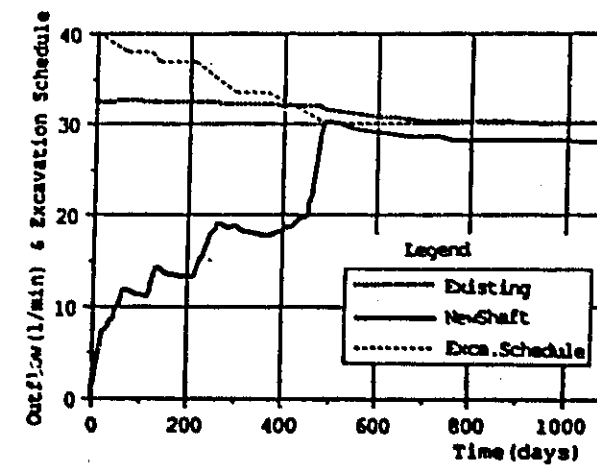


Fig-16 Profiles of calculated outflow into the New shaft and the existing shaft & gallery

decrease of the outflow into the existing shaft and gallery is about 10% of the outflow.

V. CONCLUSION

The comprehensive hydrological influence evaluation system for the SEE project has been developed and is passing through now. The pre excavation data were obtained and the hydrogeological model was developed. The hydrogeological model had its validity and proved the applicability to the prediction by the comparison of the calculated result with the measured data. The predictive simulation was finished and the predictive shaft excavation effect on groundwater flow was estimated. Therefore, we have reached the step to compare the predictive results with the measured data during the excavation in the hydrological influence evaluation system.

REFERENCES

1. W.R.Ridgway and D.Larssen and D.Larssen, "A Comparison of Two Multiple-level Ground-water Monitoring System." American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989.
2. Domenico, P.A. and M.D.Miffin, "Water from Low-Permeability Sediment and Land Surface", Water Resour.Res., Vol.1, No.4, 1965.

DEVELOPMENT OF AN OBSERVATION SYSTEM AND DATA ACQUISITION
FOR HYDROLOGICAL STUDY

- Shaft Excavation Effects (SEE) Project
in a Sedimentary Formation in Japan -

K.Sugihara, K.Yanagizawa, H.Yoshioka and H.Ohsawa
Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC)
JAPAN

Abstract

PNC has excavated a shaft in a Tertiary sedimentary formation and is studying the influence induced by the shaft excavation to establish site evaluation technique.

In order to study a hydrological aspect of the influence, we have developed a hydrological observation system which consists of subsurface hydrological observation, observation of water pressure and measurement of groundwater outflow. Based on the data obtained by this system, rate of groundwater recharge, influenced area of water pressure and rate of groundwater outflow have been successfully determined.

1. INTRODUCTION

The Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation (PNC) has excavated a shaft of 6m diameter and 150m depth as a part of the Shaft Excavation Effects (SEE) Project. The SEE Project aims to evaluate quantitatively the influence induced by the shaft excavation in order to establish site evaluation technique.

The influence is divided into two major parts:

- influence on rock mass adjacent to the shaft;
- influence on groundwater flow around the shaft.

We have developed a flow chart of hydrological study on the latter influence and it is composed of 6 items (Figure 1).

Prior to the shaft excavation, geological and geophysical investigations are carried out as the pre-excavation investigation to characterize a hydrological aspect of the site. Instruments of a hydrological observation system are installed and the hydrological condition during pre-excavation phase is observed. Then, a model of groundwater flow is developed and the predictive simulation is performed.

Data obtained during excavation phase and post-excavation phase are compared with the result of predictive simulation. Such comparison makes possible for us to improve and validate the model of groundwater flow.

Among these items of the study flow, the hydrological observation is described in this paper. The numerical simulation is already described in a separate manner [1].

2. OBJECTIVE OF OBSERVATION

Objective of the hydrological observation is to provide a suite of data for development and validation of a model of groundwater flow. For this purpose, it is necessary to develop a observation system in the study site. A developed and validated model of groundwater flow is essential to performance assessment of geological disposal system of HLW.

3. OUTLINE OF STUDY SITE

Study site of the SEE Project is the PNC's Tono Mine, central Japan (Figure 2).

The area is underlain by a sedimentary formation and granite basement. An unconformity between them is observable at 100-150masl.

The sedimentary formation is divided into two groups. Neogene sedimentary formations called "Mizunami group" overlie the granite basement. This group is mainly composed of tuffaceous sandstone and mudstone, and contains conglomerates partially. Organic materials are found in the lower part of the group. Tertiary to Quaternary sedimentary formations called

"Seto group" unconformably cover the Mizunami group at 270masl. This group is sediments which consist of sand and gravels.

The Mizunami group and the granite basement are cut by a fault called "Tsukiyoshi fault". This fault strikes east-west and dips 60° south. It is a reverse fault and the vertical displacement is about 30m.

As Figure 3 shows, a shaft and galleries of the Tono mine, referred as "Research Shaft and Galleries", have already been excavated in this area before the excavation of new shaft of the SEE Project, referred as "Test Shaft". The Test Shaft is located at about 80m northeast from the Research Shaft and the ground level at the Test Shaft is 287masl. The Test Shaft is excavated in the Seto group and the Mizunami group through the Tsukiyoshi fault (Figure 2). Its inner diameter is 6m and its depth is 150m and it has four drifts. From the surface to 5m below the surface, it is supported by concrete wall of 1.5m thickness and below 5m by concrete wall of 40cm thickness.

4. CONTENT OF OBSERVATION

The hydrological observation system developed here consists of three components:

- subsurface hydrological observation;
- observation of water pressure by MP (Multiple Piezometer) system;
- measurement of groundwater outflow.

The subsurface hydrological observation is performed in the Seto group to calculate the rate of groundwater recharge from the Seto group to the Mizunami group. The rate of groundwater recharge is the upper boundary condition of numerical simulation.

The observation of water pressure by MP system is performed in the Mizunami group and the granite basement to measure variation of waterlevel distribution during the shaft excavation. Data obtained by this observation is used to define the initial condition of numerical simulation and to validate a model of groundwater flow.

The rate of groundwater outflow into the shafts and galleries is measured to define the boundary condition of numerical simulation and to validate the model.

Figure 3 shows the locations of instruments of the hydrological observation. The study area is 300m x 300m around the Test Shaft and is a small drainage basin.

4.1 Subsurface hydrological observation

In order to calculate rate of groundwater recharge, it is necessary to measure amounts of rainfall, evapotranspiration, stream flow and soil water content. The following instruments are installed:

- meteorological observation system (rain gauge, evaporation pan, wind direction and speed recorder, thermometer, hygrometer, sunshine recorder, thermometer screen, ground thermometer);
- stream flow rate recorder (parshall flume);
- soil water content recorder (tensiometer);
- subsurface piezometer.

We installed a meteorological observation system, a parshall flume, nine tensiometers and nine subsurface piezometers (Figure 3). Data obtained by each instrument are automatically recorded every 10 minutes and can be handled by a personal computer.

4.2 Observation of water pressure by MP system

MP system is a special instrument developed by a Canadian company, Westbay Instruments Ltd. [2]. Many observation zones are isolated by packers and through special valves called "port" in each zone measurement of water pressure and water sampling can be performed by special tools called "probe".

Boreholes of up to 200m depth were drilled at 10 locations as shown in Figure 3 and MP systems were installed in these boreholes (TH1-TH8, AN6, SN4). The number of observation zones in the boreholes is from 14 to 34. The observation was commenced before the shaft excavation and the initial condition of waterlevel distribution and their variation induced by the shaft excavation have been observed. The measurement is performed every one or two weeks at each borehole.

4.3 Measurement of groundwater outflow

The measurement of groundwater outflow is performed at 20 points in the Research Shaft and Galleries. In the Test Shaft, rings for collecting groundwater outflow were installed at 10 depths as the shaft excavation was advanced. The measurement is performed using a graduated cylinder once a week.

5. RESULT OF OBSERVATION

The excavation of the Test Shaft began in January 1990 and was completed in July 1991. Installation of instruments of the hydrological observation system was started in September 1989 and data acquisition by each instrument was started just after its installation.

5.1 Subsurface hydrological observation

As examples of data obtained by the subsurface hydrological observation, Figure 4 and 5 illustrate the data of rainfall, evaporation and rate of stream flow from April 1990 to March 1991. Data of the other items above-mentioned of the subsurface hydrological observation were also obtained in the similar manner.

These data make possible to calculate the rate of groundwater recharge from the Seto group. Water balance in the Seto group is expressed by the following equation.

$$P=E+Q+dW+dS+G$$

P=rainfall, E=Evapotranspiration, Q=stream flow,
dW=increase in soil water content,
dS=increase in water storage, G=groundwater recharge
in all cases units normalized as equivalent mm

Providing that a observation period is one year, it is possible to consider "dW+dS" to be 0. Then,

$$P=E+Q+G$$

The values measured actually were used as P and Q. In terms of E, Penman's potential evapotranspiration [3,4] was calculated based on the value of evaporation measured actually. Considering vegetation of the area, we determined that the actual evapotranspiration was 70% of the Penman's potential evapotranspiration of the area.

The rate of groundwater recharge, which is calculated through the procedure described above, was 0.57 mm/day. Based on this value, 0.5 mm/day was used as the upper boundary condition of numerical simulation.

5.2 Observation of water pressure by MP system

As an example of data obtained by this observation, Figure 6 shows the variation of waterlevel distribution at TH1 which is located at about 10m from the Test Shaft. The waterlevel distribution at TH1 was varied as the shaft excavation was advanced.

Figure 7 and 8 show the waterlevel distributions before and after the shaft excavation at TH3 and TH4. TH3 is located at about 50m from the Test Shaft and TH4 is located at about 95m from it. The waterlevel distribution at TH3 was also varied; however the magnitude of variation is smaller than at TH1. The waterlevel distribution at TH4 was not varied significantly.

The waterlevel distributions at these boreholes indicate that the area where waterlevel is influenced by the shaft excavation is within the range of 100m from the Test Shaft. This range of the influenced area is consistent with that estimated by the predictive simulation.

5.3 Measurement of groundwater outflow

The rate of groundwater outflow into the Test Shaft was measured to be about 20 L/min. and that into the Research Shaft and Galleries to be 25-30 L/min. These values agree with the result of the predictive simulation. The measured value of the rate of groundwater outflow into the Test Shaft was considerably varied because the groundwater outflow into the

Test Shaft was drained together with water used for the shaft construction.

6. CONCLUSIONS

A hydrological observation system was successfully developed and some necessary data were obtained in order to develop and validate a model of groundwater flow. The following data are obtained:

- the rate of groundwater recharge is 0.57 mm/day;
- the area where the groundwater level is influenced by the shaft excavation is within the range of 100m from Test Shaft;
- the rate of groundwater outflow is about 20 L/min. into the Test Shaft, and 25-30 L/min. into the Research Shaft and Galleries.

The hydrological observation is continued to observe the annual variation of hydrological condition and the long-term influence induced by the shaft excavation.

The following items will be conducted in the near future:

- to validate the model of groundwater flow using the observed data;
- to establish methodology of development and validation of a model of groundwater flow.

[References]

- [1] Yanagizawa, K. et al. : "The Shaft Excavation Effect Experiment : Development of Hydrological Model in Tono Research Field", HIGH LEVEL RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT, Proc. the Second Annual International Conference, Las Vegas, Nevada, April 28 - May 3, 1991, 1291-1298.
- [2] Black, W.H. et al. : "MULTIPLE-LEVEL GROUND WATER MONITORING WITH THE MP SYSTEM", NWWA-AGU Conference on Surface and Borehole Geophysical Methods and Groundwater Instrumentation, Denver, CO., October 15-17, 1986, 41-61.
- [3] Penman, H.L. : "Natural evaporation from open water, bare soil and grass", Proc. Roy. Soc., London, 1948, A, 193, 120-145.
- [4] Penman, H.L. : "Vegetation and hydrology", Tech. Common., No.53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England, 1963, 124p.

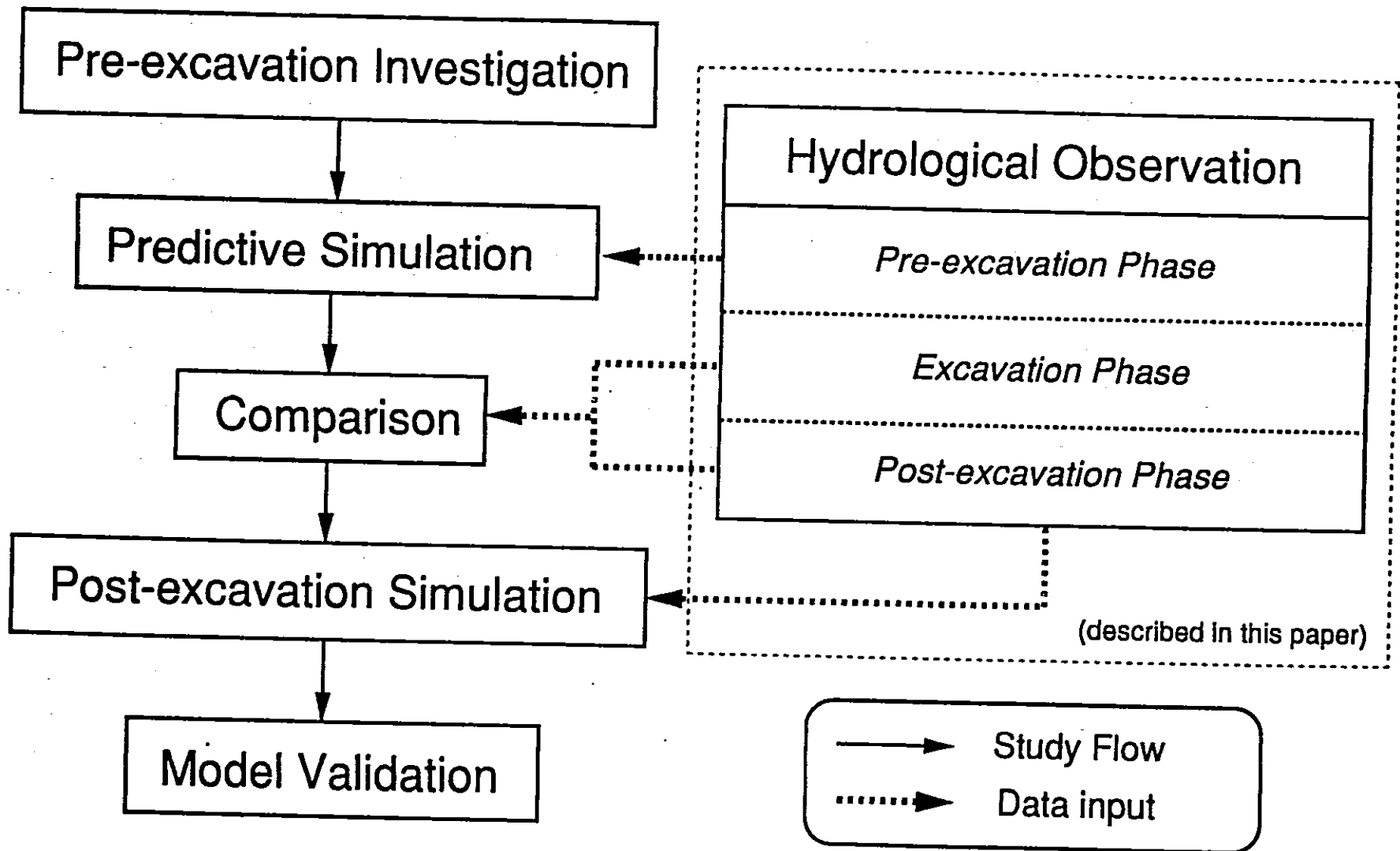


Figure 1 FLOW CHART OF HYDROLOGICAL STUDY

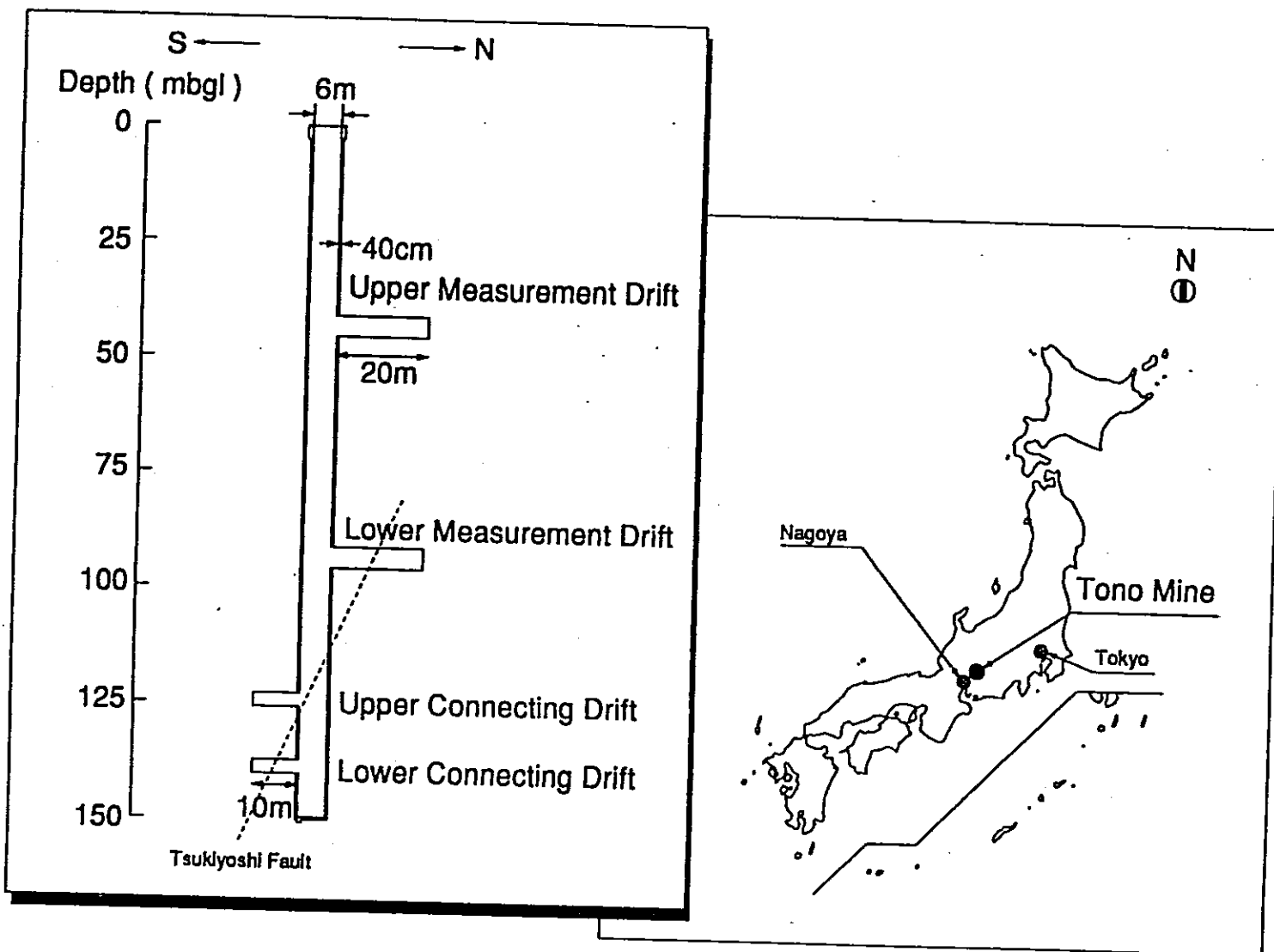


Figure 2 Location Map and Shaft Figure

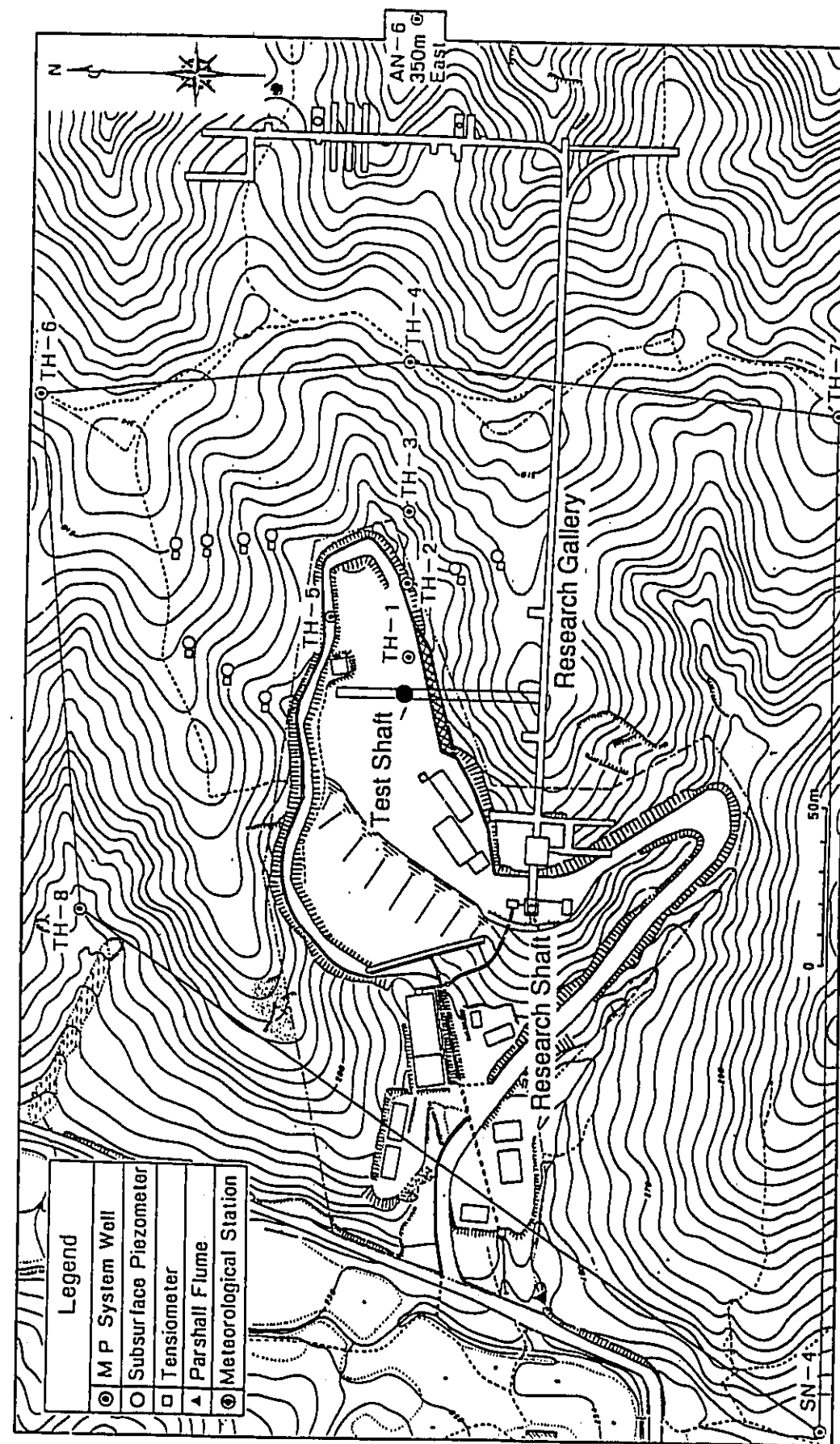


Figure 3 Location Map of Hydrological Observation System

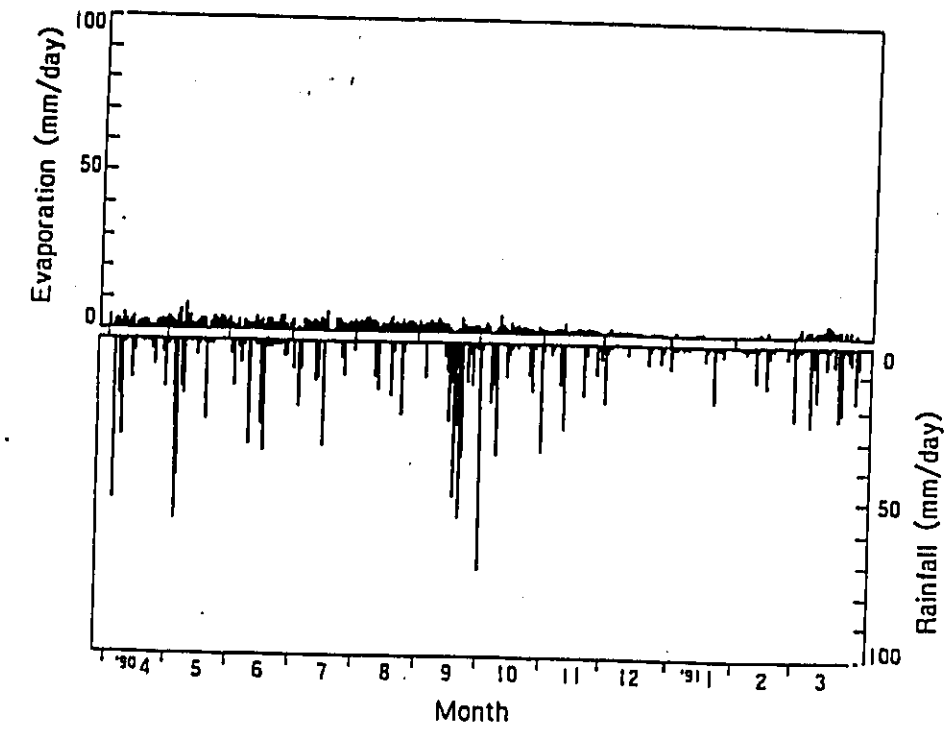


Figure 4 Rainfall and Evaporation

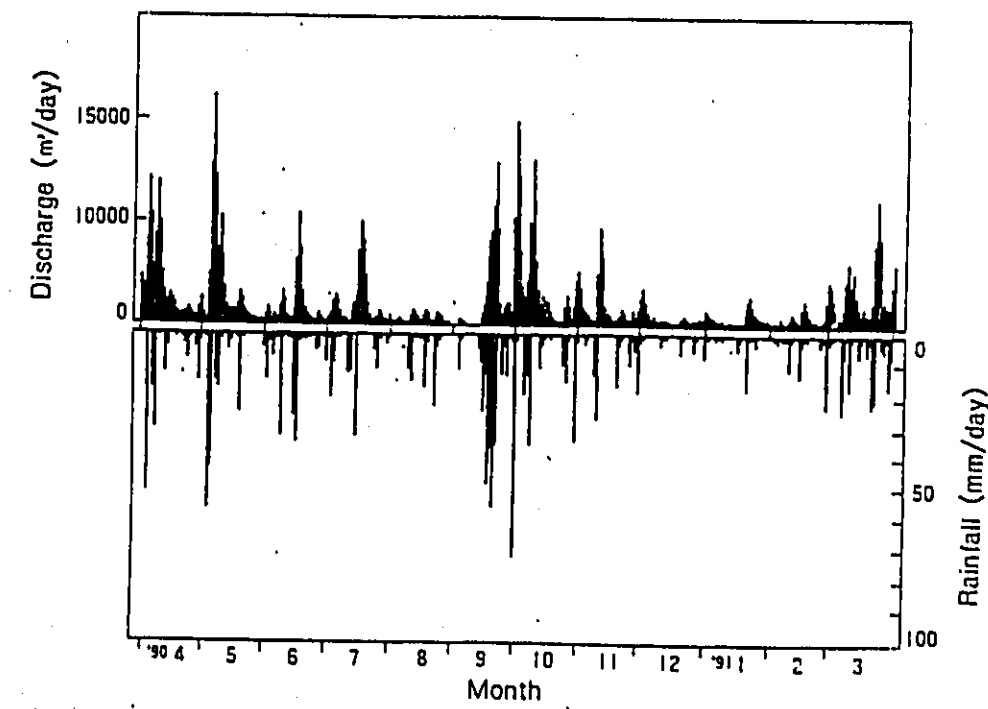


Figure 5 Rainfall and Stream Hydrograph

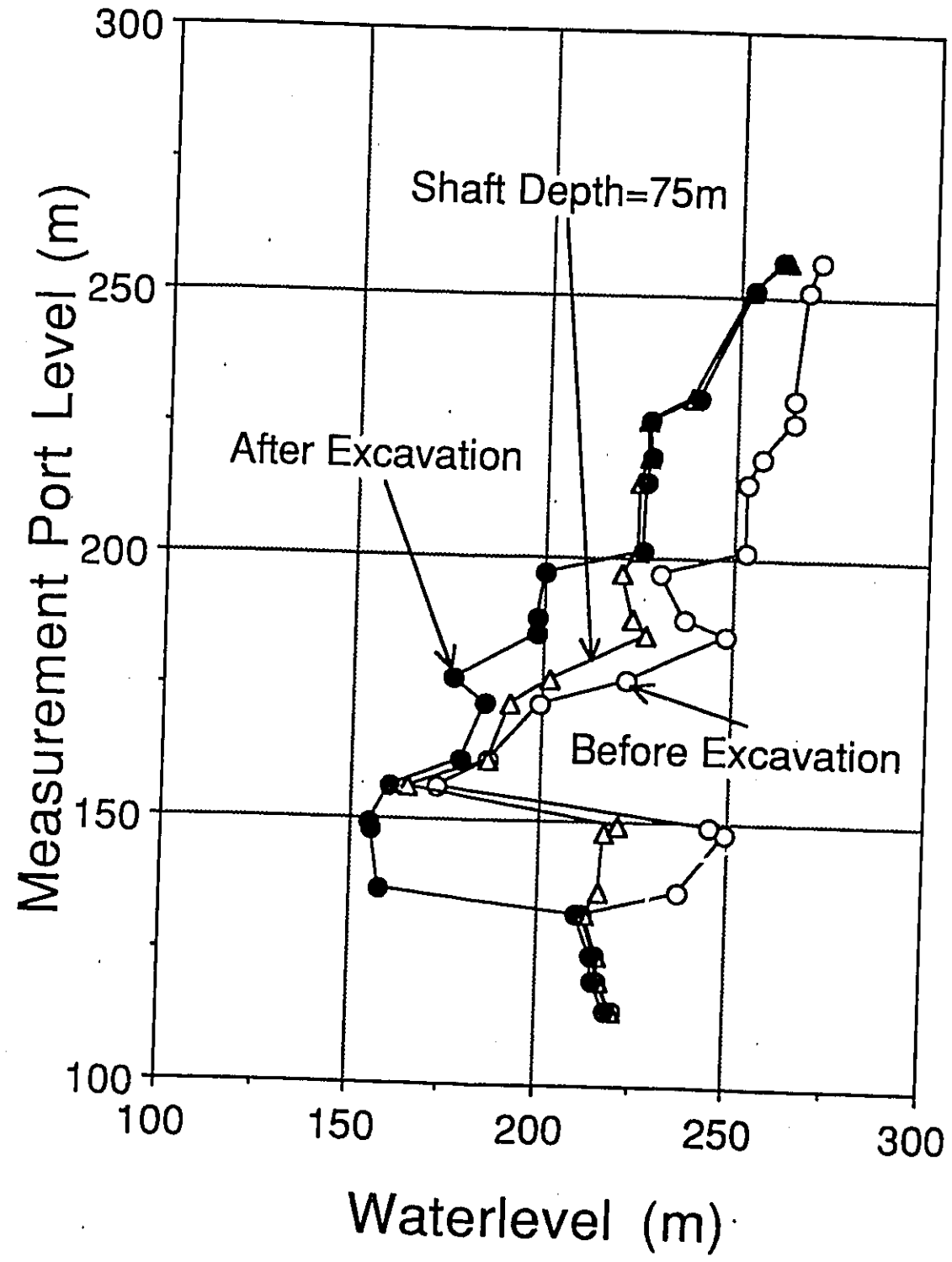


Figure 6 TH-1 Waterlevel Distribution

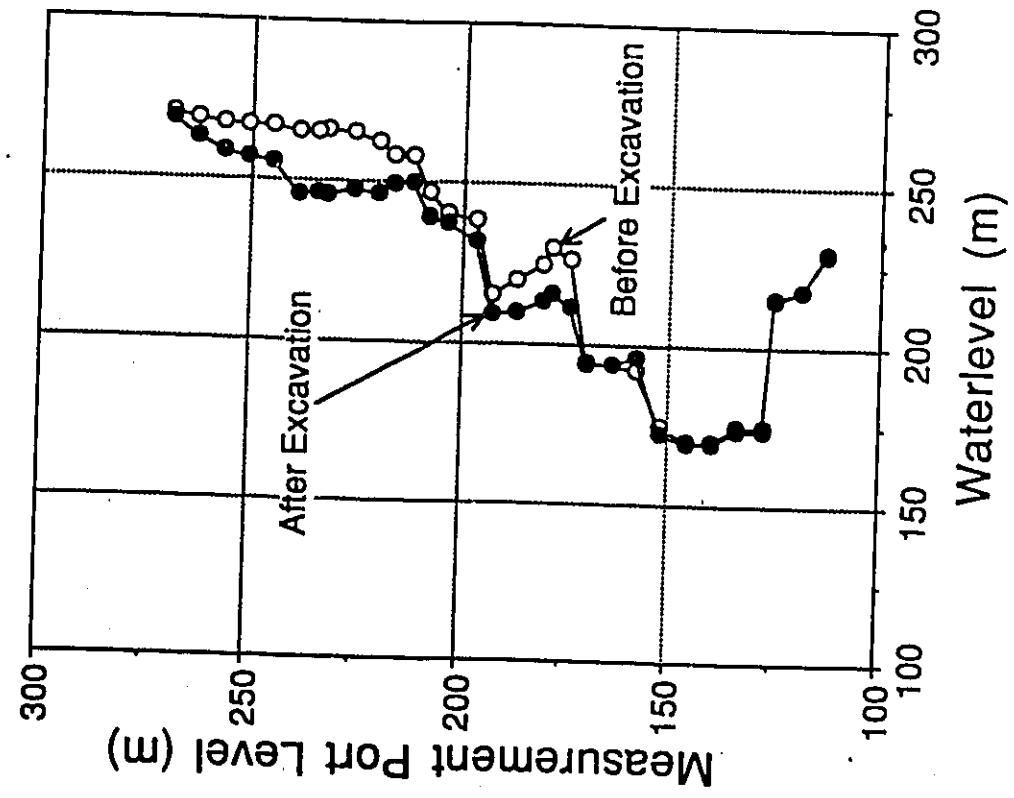


Figure 7 TH-3 Waterlevel Distribution

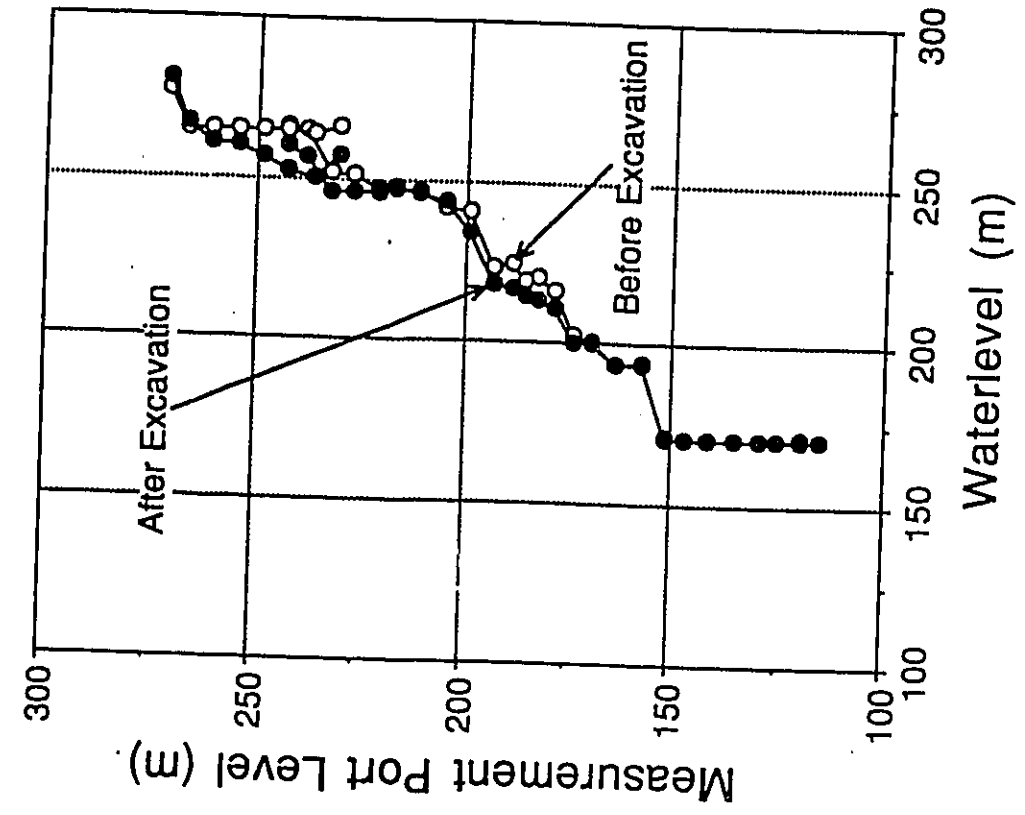


Figure 8 TH-4 Waterlevel Distribution

A hydrogeological modelling process for sedimentary rock
 Du processus de modélage hydrogéologique pour la roche sédimentaire
 Zu einem hydrogeologischen Modellierungserlauf für Sedimentgestein

Kozo Sugihara, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation Chubu Works, Gifu prefecture, Japan
 Masakuni Horita, Shimizu Corporation, Nuclear Power Division, Tokyo, Japan
 Tomonari Shirashi, Shimizu Corporation, Nuclear power Division, Tokyo, Japan

ABSTRACT: This paper proposes a procedure to develop a hydrogeological model of sedimentary rock based on field investigations. 14 boreholes were drilled up to 200m deep in a region of 300m x 300m for field investigations. 85 permeability measurements were performed in the boreholes together with rock core inspection, borehole TV inspection, and several logs including diameter log and electric conductivity log. 250 measurement points of water pressure in the rock formation were distributed in the boreholes and the measurement has been done every two weeks during one year. A hydrogeological model is developed based on these data. Therefore, lithology, water pressure profile and distribution of low and high permeable zones in the region are considered to develop the 3D hydrogeological model.

RESUME: Ce papier propose une procédure en vue de développer un modèle hydrogéologique de roche sédimentaire, basé sur des expériences sur place. 14 trous ont été creusés sur une profondeur de 200 mètres dans une région de superficie 300 m x 300 m en vue d'expériences sur le terrain. 85 mesures de perméabilités ont été réalisées sur les trous en question par inspection de morceaux de roche, contrôles TV et plusieurs fentes incluant une fente de diamètre et une autre pour tester, le potentiel conducteur électrique. 250 points de mesure de pression aquatique dans la formation du roche ont été installés dans les trous et ces mesures ont été conduites toutes les deux semaines sur une période d'une année. Un modèle hydrogéologique a été développé sur la base de ces données à trouver la procédure qui suit. Ainsi, la distribution de la roche, le profil de la pression aquatique et la distribution de basses et hautes zones de perméabilités de la région sont supposés aider à développer le modèle hydrogéologique à trois dimensions.

ZUSAMMENFASSUNG: Im vorliegenden Aufsatz wurde ein Verfahren auf Untersuchungen an Baugelände gegründetes eines hydrogeologischen Modells für Sedimentgestein vorgeschlagen. 14 Höhlen für die Untersuchungen wurden bis 200m in einem Bereich von 300m x 300m gebohrt. 85 Durchlässigkeitsmessungen wurden in den Bohrhöhlen durchgeführt, sowie Inspektionen von Gesteinskern, Inspektionen mit Fernsehen und verschiedene Bohrberichte über Durchmesser, elektrische Leitfähigkeit, usw. In den Bohrhöhlen wurde die Messung des Wasserdrucks an 250 Punkten alle 2 Wochen für ein Jahr durchgeführt. Durch die Messungen wurde klar, daß für die Verteilungen von Gestein, Wasserdruck und niedrige bzw. hohe durchlässige Zonen im Bereich das 3D hydrogeologische Modell geeignet ist.

Introduction

The research on groundwater flow is important in order to utilize underground space effectively. However, there are lots of technical subjects to understand the groundwater flow in deep underground. The groundwater flow is considered to be controlled by three factors. These are

- 1) geology,
- 2) permeability of each layer, and
- 3) hydraulic boundary condition.

Geology is closely related to hydrogeology. The permeability of each layer should be determined to evaluate the groundwater flow. Finally, the hydraulic boundary condition determines the hydraulic gradient to move groundwater. In this paper, the methodology to develop a hydrogeological model is presented together with several field investigations.

Location and Geology

The research area is Tono region in Chubu district of Japan, which locates in the central part of Japan. The topological map is shown in Fig.1. The research area is 300 m wide x 300 m long x 200m deep, and has a mine as shown in Fig.2.

As shown in Table 1, the area is composed of the Neogene sedimentary rock overlying the Paleozoic formations and the basement of the granitic rocks of late Cretaceous Age. A major fault is running through the central part of the area. It has N75°E in strike and 60°S in dip. In order to understand the geology of the area in detail, 14 boreholes at 10 locations as shown in Fig.1 were drilled and core observation, geophysical logs and borehole TV log were performed at these boreholes. Based on these investigations, the geology of the area was estimated as shown in Fig.3 and 4. The crack profiles of representative boreholes revealed by borehole TV log are shown in Fig.5.

Permeability Measurement

In order to understand the permeability distribution, 85 injection permeability tests in the boreholes were performed. The location of the tests were determined based on the core observation and geophysical logs such as calipers, electric conductivity, and borehole TV. The injection tests were performed with the injection interval of 5m isolated by a couple of packers. The results of the permeability tests are summarized in Table 2. They show that the permeabilities are from 10⁻⁸cm/sec to 10⁻³cm/sec.

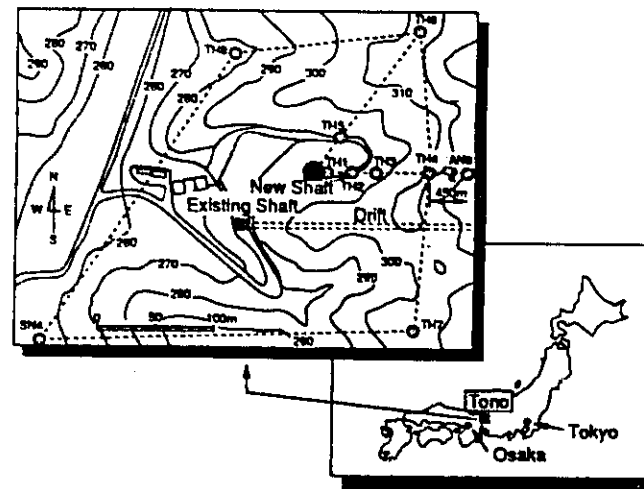


Fig. 1 Topological Map of the Research Area

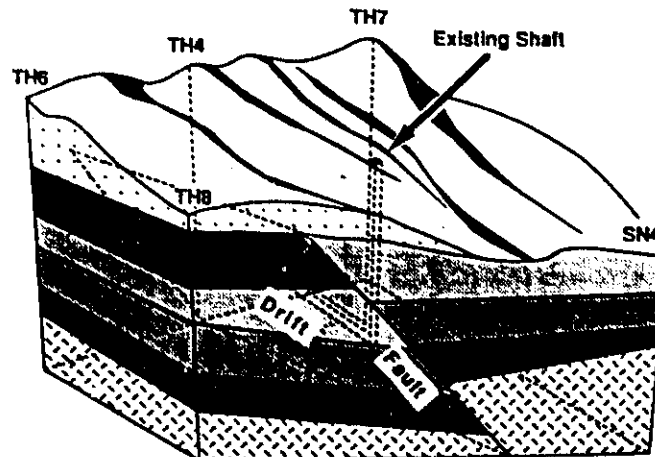


Fig. 2 View of the Research Region

Table 1 Geology of the Research Region

Formation Name	Geological Time	Lithology	
Seto Group	Pliocene age	clay, sand, gravel	
Mitsunami Group	Miocene age	Oldawa Formation	sandstone and mudstone with marine fossils
		Alayo Formation	arkosic siltstone and mudstone
		Toki Formation	igneous-bearing formation sandstone and mudstone
Granitic Rock	from late Cretaceous period to early Paleogene period	granite	

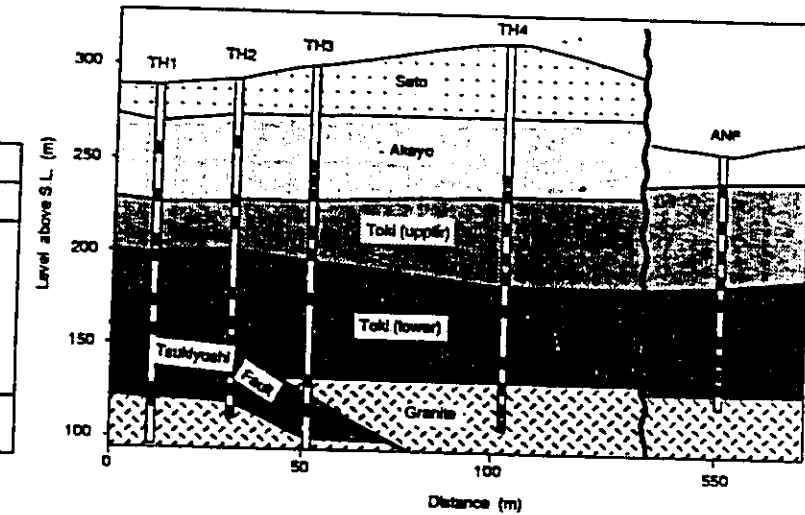


Fig. 3 Stratigraphy of the Cross Section from TH1 to AN6
 (The dark parts show the positions of permeability tests.)

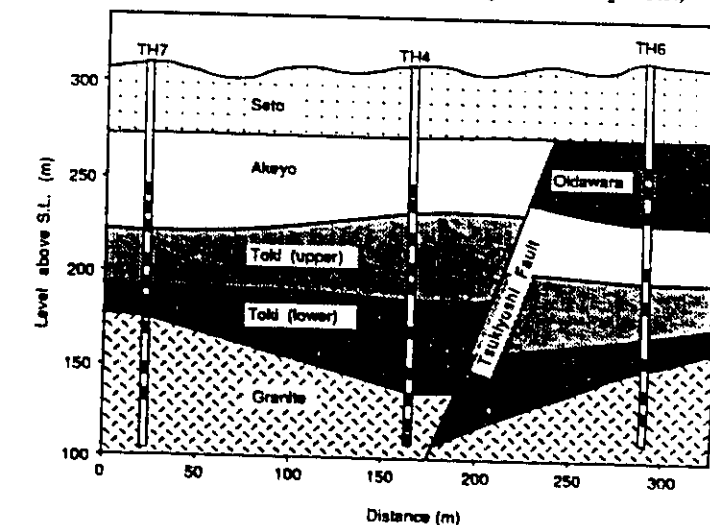


Fig. 4 Stratigraphy of the Cross Section from TH7 to TH6
 (The dark parts show the positions of permeability tests.)

Pressure Profile

The groundwater pressure profiles along the boreholes have been monitored every two weeks using MP-system (a casing with many packers) to estimate the continuity of hydrogeological zones and boundary condition. Most of the monitor zones have 5m intervals. Each borehole has 20 to 33 monitor zones. Two examples of groundwater pressure profiles are shown in Fig.6 and Fig.7. Groundwater pressure contours were drawn based on the measured groundwater pressure profiles. Fig. 8 and Fig. 9 show the groundwater pressure contours.

Hydrogeological Zoning

The groundwater pressure profile should be considered in the process of hydrogeological model development. The continuity of hydrogeological layers is mainly estimated from the geology and the groundwater pressure profiles. As horizontal layers are dominant in the region, the hydrogeological condition is also considered to be horizontal features. The zones with large hydraulic gradient were picked up from the groundwater pressure profiles, as the zones with large hydraulic gradient were estimated to be related to a relatively impermeable zone. Fig.10 and Fig.11 show the hydrogeological cross sections. In the figures dark

Table 2 Results of Injection Tests (Hydraulic Conductivities)

	TH1	TH2	TH3	TH4	TH5	TH6	TH7	TH8	AN6	SN4	Geometric Average	
											(Unit of Hydraulic Conductivity: cm/sec)	
Seto												
Oldawa												
Alayo												
Toki (upper)												
Toki (lower)												
Granite												

(S:sandstone Co:conglomerate F:fault W:weathered C:crack)

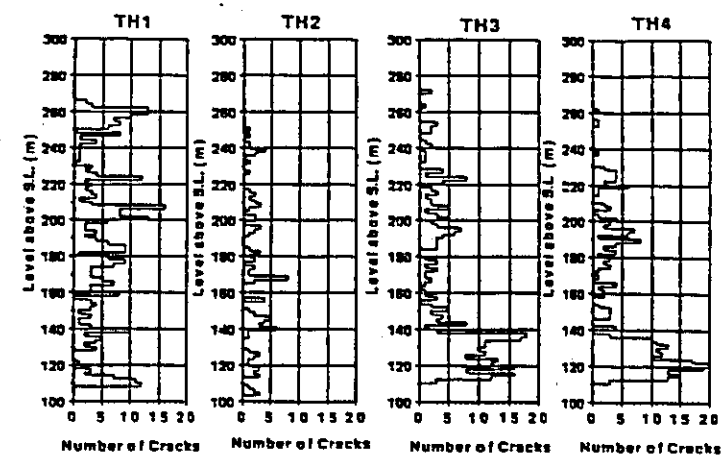


Fig. 5 Crack Profile of the Cross Section from TH1 to TH4

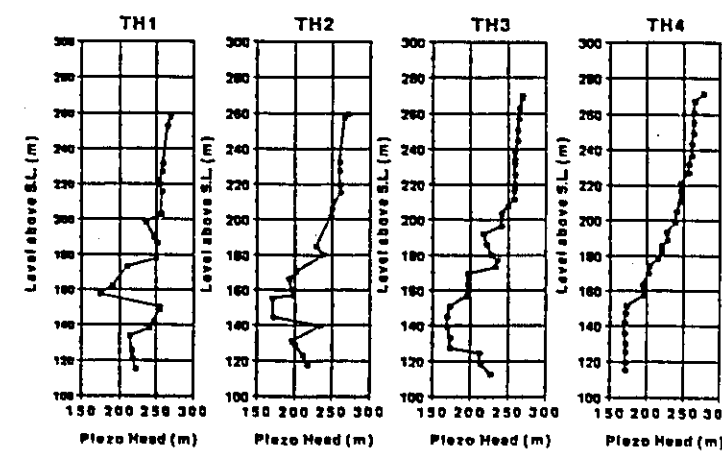


Fig. 6 Groundwater Pressure (Piezo Head) Profile of the Cross Section from TH1 to TH4

layers are relatively impervious layers and white layers are relatively pervious layers, respectively. And also based on the groundwater pressure profiles, relative permeabilities of each layer were estimated, as the vertical hydraulic gradient is considered to be related to the permeabilities of each layer.

Hydrogeological Model Development

In hydrogeological model development, judgement of the continuity of pervious layers is the most important issue. The three dimensional extension and continuity of impervious layers were carefully estimated considering the hydrogeological cross sections of the region. A three dimensional model was developed as shown in Fig. 12. The model will be discretized into a finite element mesh and evaluated by a numerical analysis.

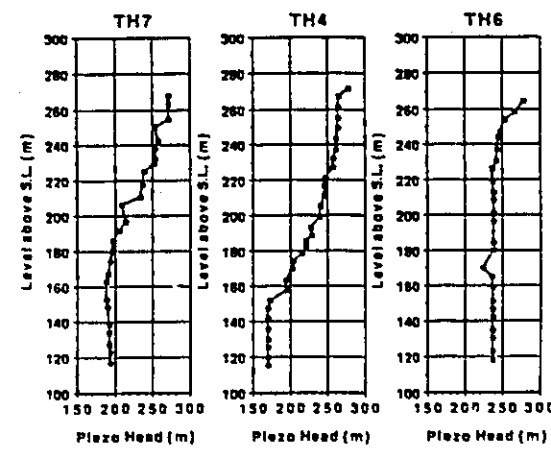


Fig. 7 Groundwater Pressure (Piezo Head) Profile of the Cross Section from TH7 to TH6

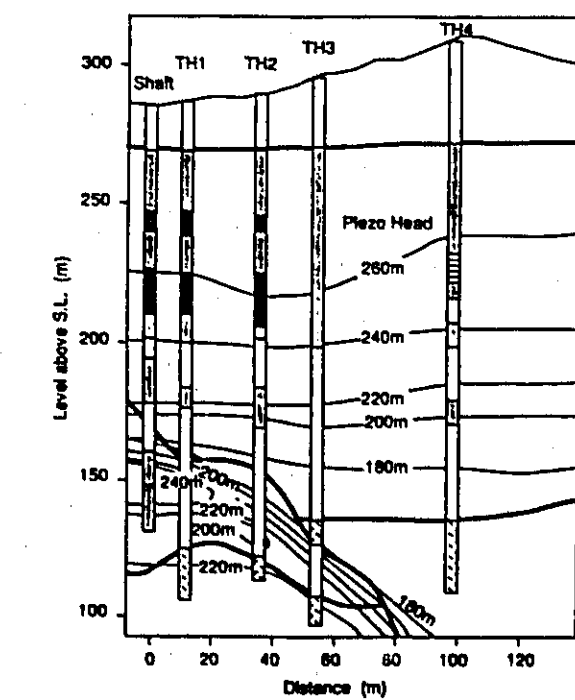


Fig. 8 Groundwater Pressure (Piezo Head) Contours of the Cross Section from TH1 to TH4

Legend: Sand and Clay, Sandstone, Mudstone, Conglomerate, Tuff, Granite

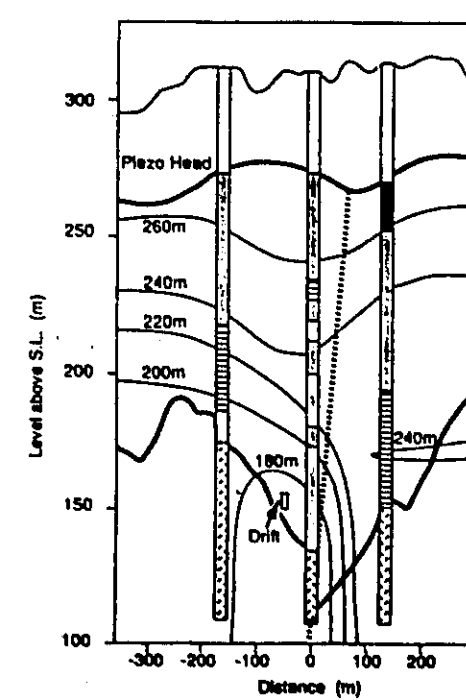


Fig. 9 Groundwater Pressure (Piezo Head) Contours of the Cross Section from TH7 to TH6

Legend: Sand and Clay, Sandstone, Mudstone, Conglomerate, Tuff, Granite

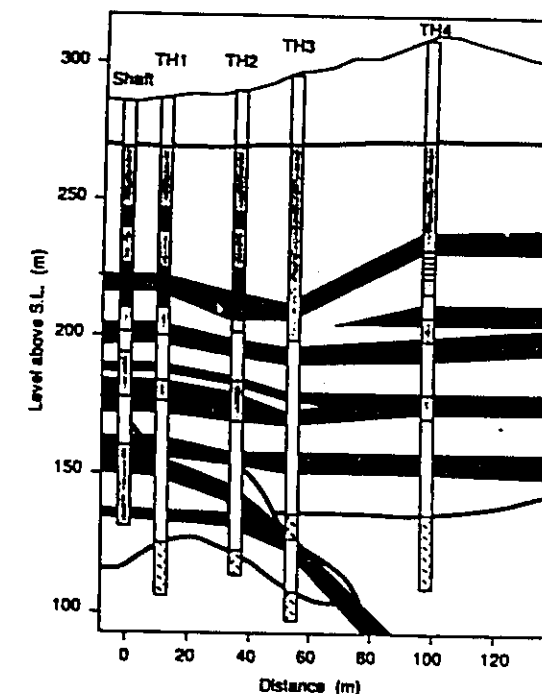


Fig. 10 Hydrogeological Profile of the Cross Section from TH1 to TH4 (The dark belts show impervious layers.)

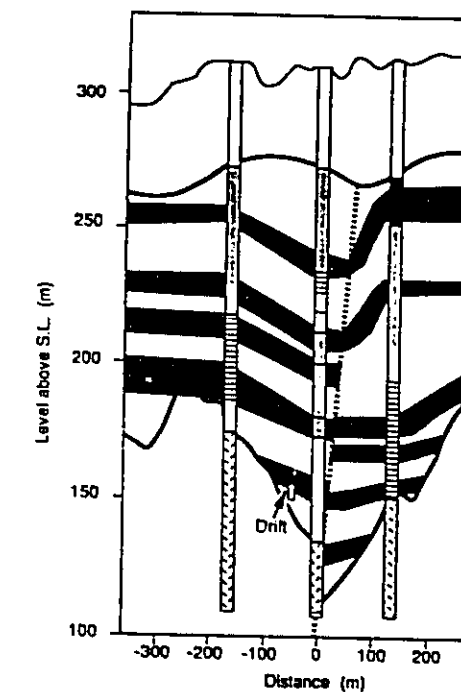


Fig. 11 Hydrogeological Profile of the Cross Section from TH7 to TH6 (The dark belts show impervious layers.)

Conclusion and Future Study

In this paper, a methodology to develop a hydrogeological model of sedimentary rock was introduced. The difficulty of the process is in the judgement of continuities of pervious zones and impervious zones and in the determination of the permeabilities of each zones. For the continuity of layers, the groundwater pressure profile and geological condition are mainly considered. Relative permeabilities were estimated from the groundwater pressure profile and the permeabilities of each layer were determined based on the permeability tests.

In the research area, a new shaft is under construction. Using the three dimensional model developed here will be used to predict the hydrogeological influence induced by the shaft excavation. Based on the comparison between the predictive analysis and the field measurement, the model and the methodology introduced here will be evaluated.

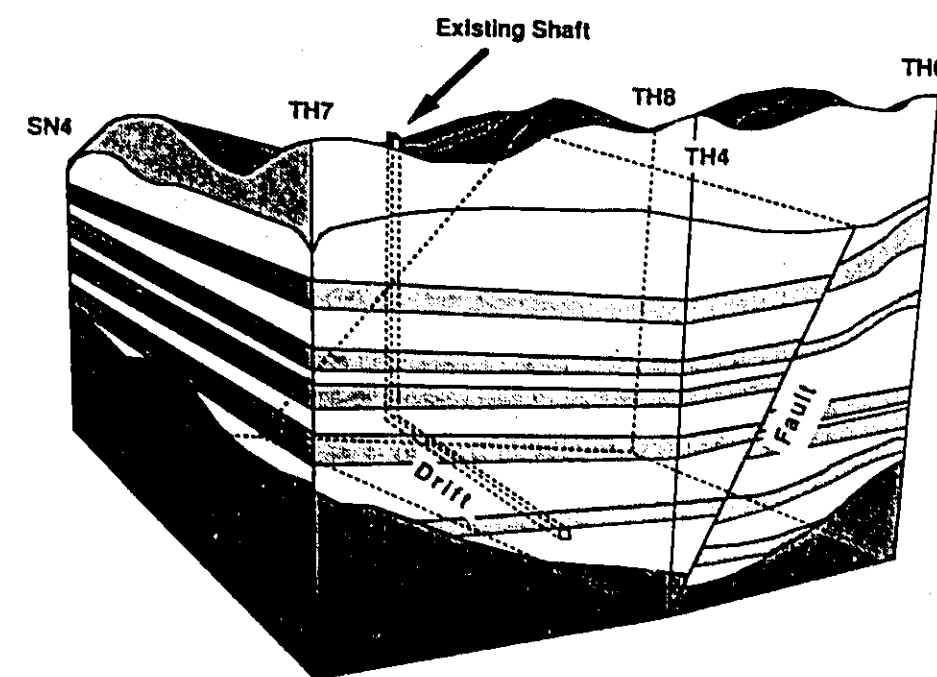


Fig. 12 3D View of Hydrogeological Profile of the Research Region

— 技術レポートリスト —

- TR/GE 89-01 清水和彦：地質環境データベースシステムの開発研究（基本設計），
PNC TN7410 89-029
- TR/GE 89-02 仙波毅・尾方伸久・坪田浩二：ボアホールレーダの我が国における花
崗岩岩盤への適用試験，PNC TN7410 90-003
- TR/GE 89-03 武田精悦（訳）：国際ストリパプロジェクト，PNC TN7410 90-004
- TR/GE 89-04 尾方伸久・大澤英昭：地下水特性調査技術開発の現状，検層技術(1)，
PNC TN7410 90-005
- TR/GE 89-05 尾方伸久・大澤英昭：地下水特性調査技術開発の現状，検層技術(2)，
PNC TN7410 90-006
- TR/GE 89-06 大澤英昭・吉田英一：深部花崗岩中の割れ目解析—花崗岩岩盤におけ
る割れ目特性およびその分布特性に関する研究—，
PNC TN7410 90-007
- TR/GE 89-07 杉原弘造・二宮康郎：堆積岩盤中における掘削影響評価—掘削による
緩み領域の計測・評価手法の研究開発—，
PNC TN7410 90-009
- TR/GE 89-08 柳澤孝一：広域地下水流動調査の現状について，PNC TN7410 90-021
- TR/GE 89-09 吉田英一：粘土質岩中における核種移行試験・研究—ベルギー・モル
原子力研究所との共同研究（その1）—，
PNC TN7410 90-019
- TR/GE 90-01 今井久・柳澤孝一：3次元飽和不飽和浸透流解析プログラムTAGSACの
概要，PNC TN7410 90-026

TR/GE 90-02 野原壯・瀬尾俊弘・落合洋治：ウラン鉱床を利用したナチュラルアナログ研究（その1）－ウラン系列核種の放射非平衡について－， PNC TN7410 91-030

TR/GE 90-03 吉田英一：粘土質岩中における核種移行試験研究－ベルギー・モル原子力研究所との共同研究（その2）－， PNC TN7410 91-017

TR/GE 90-04 柳澤孝一・今井久・斎藤章・大澤英昭・中島誠：立坑掘削影響試験における地下水流動影響予測解析， PNC TN7410 91-013

TR/GE 90-05 清水和彦：地質環境の長期的隔離能に係わる天然事象について(1)－気候変動と海面変動－， PNC TN7410 91-010

TR/GE 91-01 Yoshida, H., M. Yui and T. Shibutani: A Study of Influence Factor on Uranium Fixation in the Tono Uranium Deposit, Japan. PNC TN7410 91-061

TR/GE 91-02 中野勝志・斎藤章・花木達美：難透水性岩石を対象とした室内透水試験装置の開発， PNC TN7410 91-050

TR/GE 91-03 尾方伸久・大澤英昭・仙波毅・柳澤孝一：多変量統計解析手法を用いた結晶質岩盤の割れ目解析， PNC TN7410 92-001

TR/GE 91-04 石丸恒存・清水和彦：地質環境の長期的隔離性能に係わる天然事象について(2)－火山活動－， PNC TN7410 91-031

TR/GE 91-05 仙波毅・尾方伸久・長谷川健・岩崎浩・渡辺邦夫：ボアホールレーダーによる結晶質岩盤中の割れ目帯調査－釜石鉱山原位置試験場における調査について－， PNC TN7410 92-005

TR/GE 92-01 柳澤孝一， 古屋和夫， 大澤英昭， 若松尚則， 梅田浩司：我が国における地盤の透水性に関する調査・研究（その1）， PNC TN7410 92-015

TR/GE 92-02 佐藤稔紀・石丸恒存・杉原弘造・清水和彦：文献調査による我が国の岩石の物理的特性に関するデータの収集， PNC TN7410 92-018

TR/GE 92-03 瀬尾俊弘， 清水和彦：我が国における地下水の水質に関するデータの収集・解析， PNC TN7410 92-017

TR/GE 92-04 柳澤孝一， 今井久， 古屋和夫， 若松尚則， 梅田浩司：我が国を対象とした地下水流動解析－その1 中部日本を対象にした地下水流動解析－， PNC TN7410 92-019

TR/GE 92-05 柳澤孝一， 若松尚則， 梅田浩司， 今井久， 古屋和夫：我が国における水理地質学的特性に関する調査・研究， PNC TN7410 92-012

TR/GE 92-06 松井裕哉， 杉原弘造， 佐藤稔紀， 吉岡尚也：堆積岩地山における立坑周りの力学的・水理学的な特性変化， PNC TN7410 92-046

TR/GE 92-07 佐藤稔紀， 松井裕哉， 杉原弘造， 吉岡尚也：立坑掘削影響試験－地中変位計測に基づく掘削影響評価－， PNC TN7410 92-051