

機械による掘削影響試験の事前調査・解析

－平成6年度実施分－

杉原弘造
菊地正也
安達哲也
佐藤紀代
石島文代

1995年10月

動力炉・核燃料開発事業団
東濃地科学センター

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959-31

動力炉・核燃料開発事業団

東濃地科学センター 技術開発課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed
to: Geotechnics Development Section, Tono Geoscience Center,
Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 959-31,
Jorinji, Izumi-machi, Toki-shi, Gifu-ken 509-51, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel
Development Corporation) 1995

公開資料

P N C T N 7 4 1 0 9 5 - 0 4 9

1995年10月

機械による掘削影響試験の事前調査・角牟木町 —平成6年度実施分—

杉原弘造* 菊地正* 安達哲也* 佐藤稔紀* 石島文代*

要 旨

岩盤中に空洞を掘削すると空洞周辺の岩盤の力学的・水理学的な性状（変形性、透水性や応力、間隙水圧）が変化すると考えられる。このような力学的・水理学的な性状が変化した空洞周辺の岩盤領域（以下、掘削影響領域という）は、地下施設の設計・建設や安全性の評価において、考慮すべき重要なもののひとつと考えられる。

動燃事業団が地層科学研究の一環として、これまで東濃鉱山において実施してきた掘削影響研究の結果、掘削影響領域の大きさや掘削影響領域の発生に関する要因などが明らかとなった。しかし、これらは発破により坑道を掘削した場合であるため、機械による掘削影響試験を行い、掘削影響領域の工法依存性を評価することとした。あわせてこれまでに掘削影響研究のために改良・開発した機器や、これまでの掘削影響研究で評価されていない機器・手法の掘削影響評価への適用性を評価することとした。この研究により、工法別の掘削影響領域に関する情報がそろい、地下施設の建設方法の選定や岩盤の力学的安定性など安全性の評価に必要な情報が取得できると考えられる。

機械による掘削影響試験は、平成4年度に計測用の坑道の掘削から開始し、平成5、6年度に事前調査・解析を行った。平成7年度に機械（ロードヘッダ）による坑道掘削および掘削中の調査を行い、平成8年度以降、事後調査・解析を実施する計画である。

平成6年度の事前調査・解析の目的は、平成5年度に引き続き①試験坑道周辺岩盤の掘削前の力学的特性・条件を把握すること、および、②数値解析により坑道掘削に伴う岩盤の変位や応力変化を予測することである。平成6年度に実施した事前調査・解析は、①コア観察および孔内壁面観察、②孔内岩盤変位計の設置および計測、③事前解析である。この報告書では、平成6年度に実施した事前調査・解析の内容と結果について報告する。

* 動力炉・核燃料開発事業団 東濃地科学センター 地層科学研究開発室

PNC TN7410 95-049

October, 1995

Machine Excavation Effects Experiment

-Investigations and numerical analysis at pre-excavation stage in FY1994-

Kozo SUGIHARA*, Tadashi KIKUCHI*, Tetsuya ADACHI*,
Toshinori SATO*, and Fumiyo ISHIJIMA*

Abstract

Excavation of a shaft or a horizontal drift in a rock mass probably affects the rock mass around the underground openings. It is necessary in the design, construction and safety assessment of underground facilities to consider the properties and extent of the EDZ (Excavation Disturbed Zone; the zone where rock properties and rock conditions have been changed due to excavation).

In-situ experiment on excavation disturbance has been carried out in the Tono mine and the controlling factors of properties and extent of the EDZ due to blasting has been studied. In order to evaluate dependence of the change of properties and extent of the EDZ on excavation method, Machine Excavation Effects Experiment has been carried out. In FY 1992, a horizontal drift for measurements was excavated. A horizontal drift parallel to the measuring drift is scheduled to be excavated by a machine in FY 1995. The investigations and numerical analysis before excavation of the test drift were carried out in FY 1993 and FY 1994.

The objectives of the investigations and numerical analysis carried out in FY 1993 and 1994 are as follows:

- to measure and evaluate the rock properties and the rock conditions around the test drift before excavation, and
- to predict the displacements and stress change during excavation of the test drift.

The investigations and numerical analysis in FY 1994 consist of the following items:

- core logging and borehole wall observation,
- installation of extensometers, and
- numerical analysis with the Finite Element Method.

This report describes the details of the investigations and numerical analysis carried out in FY 1994.

*Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation
Tono Geoscience Center
Geological Environment Research Section

〔目 次〕

	ページ
1. はじめに	1
2. 平成 6 年度の事前調査・解析の概要	2
3. コア観察および孔内壁面観察	5
4. 孔内岩盤変位計の設置および計測	19
5. 事前解析	25
6. まとめ	42

1. はじめに

岩盤中に立坑や水平坑道などの空洞を掘削すると、空洞周辺の岩盤の変形性や透水性といった力学的・水理学的特性と、応力や間隙水圧といった力学的・水理学的状態が変化すると考えられる。このような力学的・水理学的な性状が変化した空洞周辺の岩盤領域（以下、掘削影響領域という）は、地下施設の設計・建設や力学的安定性など安全性の評価において、考慮すべき重要なもののひとつと考えられる。

動燃事業団では地層科学研究の一環として、昭和62年度以来、岐阜県土岐市の東濃鉱山において水平坑道や立坑を掘削し、掘削影響領域の力学的・水理学的特性とその広がりや、掘削影響領域の発生に関する要因の研究などを、掘削影響研究として実施してきた^{1) 2)} ^{3) 4)}。その結果、坑道掘削に発破工法を用いた場合には掘削影響領域が坑道周囲の約1mの範囲で存在すること、掘削影響領域は主に、き裂の発生と変化・応力の再配分・不飽和領域の発生に伴い発生していると考えられることが明らかとなった。しかし、このような変化は主に発破損傷に起因していると考えられたため、機械による掘削影響試験を行い、この結果とこれまでの発破掘削による掘削影響試験の結果を比較することとした。一般には、機械による坑道掘削は発破による坑道掘削に比べて周辺岩盤への影響が小さいといわれており、岩盤への影響が異なる場合の掘削影響領域に関する情報が得られることにより、地下施設の設計・建設方法の選定や、岩盤の力学的安定性など安全性の評価に必要な情報が取得できると考える。また、あわせてこれまでに掘削影響研究のために改良・開発した機器や東濃鉱山での掘削影響研究で評価されていない機器・手法の掘削影響評価への適用性を評価することとした。

機械による掘削影響試験は、平成4年度に計測用坑道の掘削を開始し、平成5、6年度に事前調査・解析を行った。平成7年度は機械（ロードヘッダ）による坑道掘削と、掘削中の調査を行い、さらに平成8年度以降、事後調査・解析を実施する計画である。

平成6年度は平成5年度⁵⁾に引き続き、事前調査として岩盤変位測定用の試錐を行い、コア観察と、孔内壁面観察、孔内岩盤変位計の設置と初期値の測定、そして平成5年度の解析モデルに対し対象岩盤構造をより詳細に反映したモデルで坑道掘削時の事前解析を実施した。この報告書では、今回の事前調査・解析により、孔内岩盤変位計の初期値設定方法と坑道掘削予定岩盤の力学的性状を把握するとともに、坑道掘削に伴う岩盤変位や応力変化は、岩盤の初期応力の大きさ・方向、堆積面の傾斜、掘削影響領域の影響を受けるということが予測できたので、その内容と結果について報告する。

2. 平成 6 年度の事前調査・解析の概要

2. 1 試験位置

機械による掘削影響試験の研究対象としている場所は、東濃鉱山の北延N A T M坑道である（図 2. 1）。北延N A T M坑道は、新第三紀堆積岩である瑞浪層群土岐夾炭累層下部層に掘削されており、地表下およそ135mに位置する。北延N A T M坑道の詳細図を図 2. 2 に示す。平成 4 年度には計測用の坑道（以下、計測坑道という）を15m掘削した。計測坑道は、高さ 3 m、幅 3 m の馬蹄形である。平成 5 年度には、計測坑道から平成 7 年度に機械による掘削を計画している坑道（以下、試験坑道という）に向けて計測用の試錐が行われたが、引き続き平成 6 年度もここで岩盤内変位測定用の試錐を行い、機械掘削による影響評価試験のための事前調査を実施した。予定される試験坑道は高さ 2.4 m、幅 2.4 m の馬蹄形で長さ 25 m である。

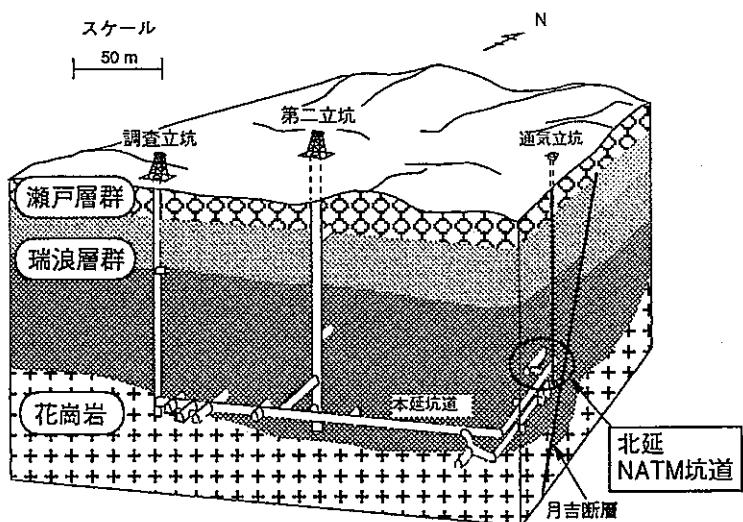


図 2. 1 東濃鉱山の地質・坑道の概要

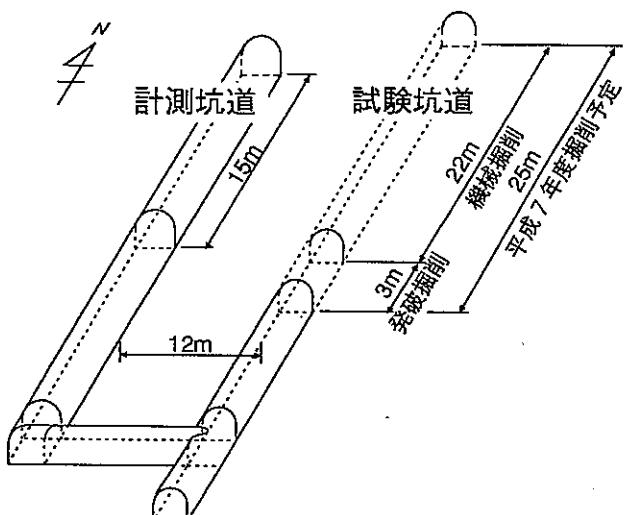


図 2. 2 試験に関する坑道の配置

2. 2 試験の目的

第1章で述べたように、機械による掘削影響試験の目的は次のとおりである。

- ①岩盤への影響が小さいと考えられる工法（機械掘削工法）を用いた場合の掘削影響領域の力学的・水理学的特性とその広がりについて情報を取得する。
- ②上記①と岩盤への影響が大きいと考えられる工法（発破掘削工法）を用いた場合を比較し、掘削影響領域の掘削工法依存性を評価する。
- ③掘削影響研究のために改良・開発された機器、およびこれまで東濃鉱山での掘削影響試験で未使用の機器・手法の適用性を評価し、掘削影響評価のための計測・解析手法を改良する。

平成5年度及び6年度はこの試験の事前調査であり、その目的は次のとおりである。

- ①試験坑道周辺岩盤の掘削前の力学的・水理学的な特性・状態を把握する。
- ②数値解析により坑道掘削に伴う岩盤の変位や応力変化を予測する。

2. 3 試験の内容

平成6年度に実施した機械による掘削影響試験の内容を平成5年度実施と併せて以下に示す。

表2.1 試験の内容

平成5年度実施	平成6年度実施
①コアを用いた室内岩石特性試験 ②コア観察および孔内壁面観察 ③孔内載荷試験 ④透水試験 ⑤弾性波トモグラフィー ⑥比抵抗トモグラフィー ⑦初期応力測定 ⑧事前解析	①コア観察および孔内壁面観察 ②孔内岩盤変位計の設置および初期値の計測 ③事前解析

図2.3に事前調査のために掘削した試錐孔の配置を、表2.2に各試錐孔の仕様などを示す。

孔内岩盤変位計は、今まで1ボーリング孔内に6測点のアンカーを固定し、壁面との相対変位を測定する多点式変位計（（株）東亜測器社製：EM-150-M型）を使用していたが、計測機器の精度を比較するため、今回は、測定仕様が異なりしかも東濃鉱山において未使用の計器であるスライディングミクロメーターも隣接位置に設置した。この計器は、1mおきにメジャリングマークを装備したケーシングを孔内に設置し、プローブを挿入しながら孔軸方向変位の測定を行う計器（スイス SOL EXPERTS 社製）である。

事前解析では平成5年度および6年度の調査により取得されたデータに基づき、平成5年度に用いた解析モデルと比べて岩盤構造をより詳細に反映するように解析モデルを見直した。さらに初期応力設定の相違（大きさ・方向）および掘削による影響領域を考慮することが解析結果に与える影響を検討した。

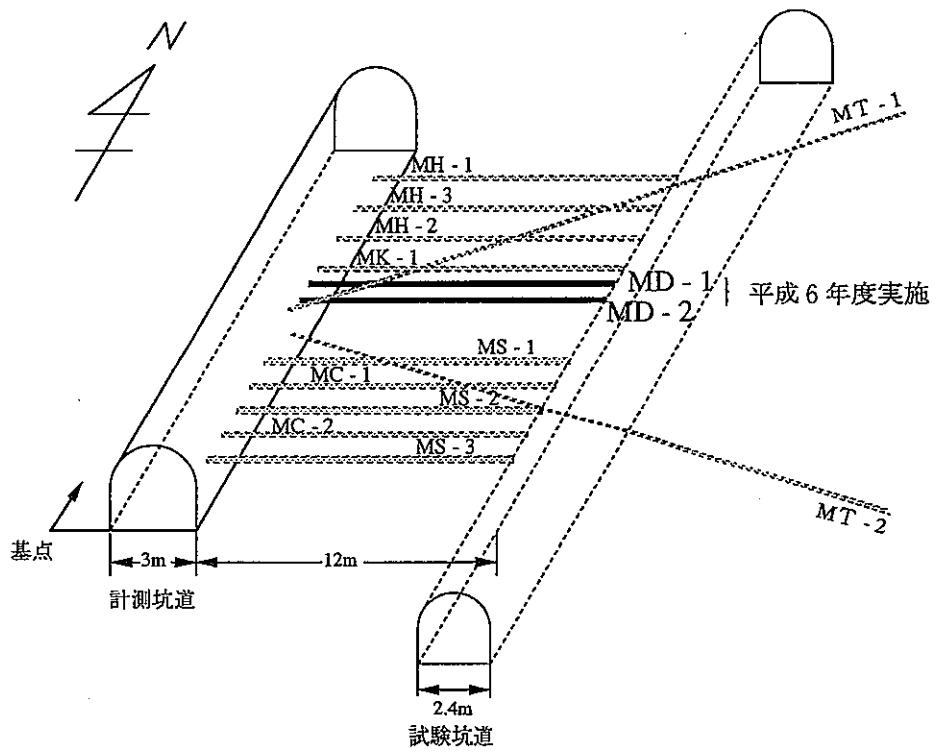


図2.3 計測用ボーリング孔の配置

表2.2 計測用ボーリング孔の仕様

実施年度	孔名	孔径 (mm)	孔長 (m)	※ 角度 (°)	※※ 基点から の距離 (m)	用 途
平成5年度	MH - 1	86	12	-1	13	透水試験
	MH - 2	86	12	-1	11	
	MH - 3	86	12	-1	12	
	MK - 1	66	12	+1	9	孔内載荷試験
	MT - 1	66	26	+25	7	トモグラフィ調査
	MT - 2	66	24	-15	7	
	MC - 1	66	12	+3	4	応力測定チェック孔
	MC - 2	66	12	+3	2	
	MS - 1	218	11	+3	5	
	MS - 2	218	10.5	+3	3	応力測定
	MS - 3	218	10	+3	1	
平成6年度	MD - 1	76	12	+1	8.4	岩盤内変位測定 (多点式変位計)
	MD - 2	116	12	+1	7.6	岩盤内変位測定 (スライディング・ミクロメーター)

※+：上向き， -：下向き ※※図2.3参照

3. コア観察および孔内壁面観察

3. 1 概要

本観察の目的は、孔内岩盤変位計を設置するボーリング孔2孔（MD-1孔： $\phi = 76\text{mm}$ 、MD-2孔： $\phi = 116\text{mm}$ 、それぞれ上向き 1° の水平孔、孔長=12.0m）のき裂や岩相等の分布の情報を取得することである。本観察および平成5年度に実施した観察結果より、坑道を掘削する前の岩盤の地質状況やき裂分布を推定した。

3. 2 試験方法

孔内岩盤変位計を設置するためのボーリング孔（MD-1、2孔）から採取されたコアの地質観察を実施した。また、これらのボーリング孔の孔内壁面観察を実施した。

(1) コア観察

以下の項目について観察を行った。

- ・岩相、色調
- ・コアの形状、回収率、R Q D
- ・風化や変質部分の有無
- ・き裂（形状、角度、変質部の有無、充填物）

(2) 孔内壁面観察

観察装置には、平成5年度の調査と同様に、B I P (Borehole Image Processing) システムを用いた。機器の構成を図3.1に示す。

観察は、以下の手順で実施した。

コーン型反射鏡、テレビカメラ等を内蔵したプローブをボーリングロッドの先端に装着し、手動ワイヤーウインチを用いてボーリング孔内に挿入しながら、テレビカメラで孔壁を撮影した。この時、ウインチからの同期信号とともに、画像展開処理装置で連続した展開画面を再構成し、磁気テープにデジタル記録した。また、孔壁全周画像および展開画像をVTRに録画した。

磁気テープに記録された画像データを、室内システムによって解析処理し、壁面のき裂情報（き裂の走向／傾斜、形状および開口幅）を得た。

き裂情報の抽出は、パソコンのモニタ上で行うため、分解能はモニタの解像度とA/D変換の精度に影響される。モニタ上で表示する展開画像の大きさは決まっているため、横方向の分解能は口径によって異なる。展開画像の分解能を表3.1に示す。

各ボーリング孔の観察長さは、MD-1孔が11.75m、MD-2孔が11.47mであった。

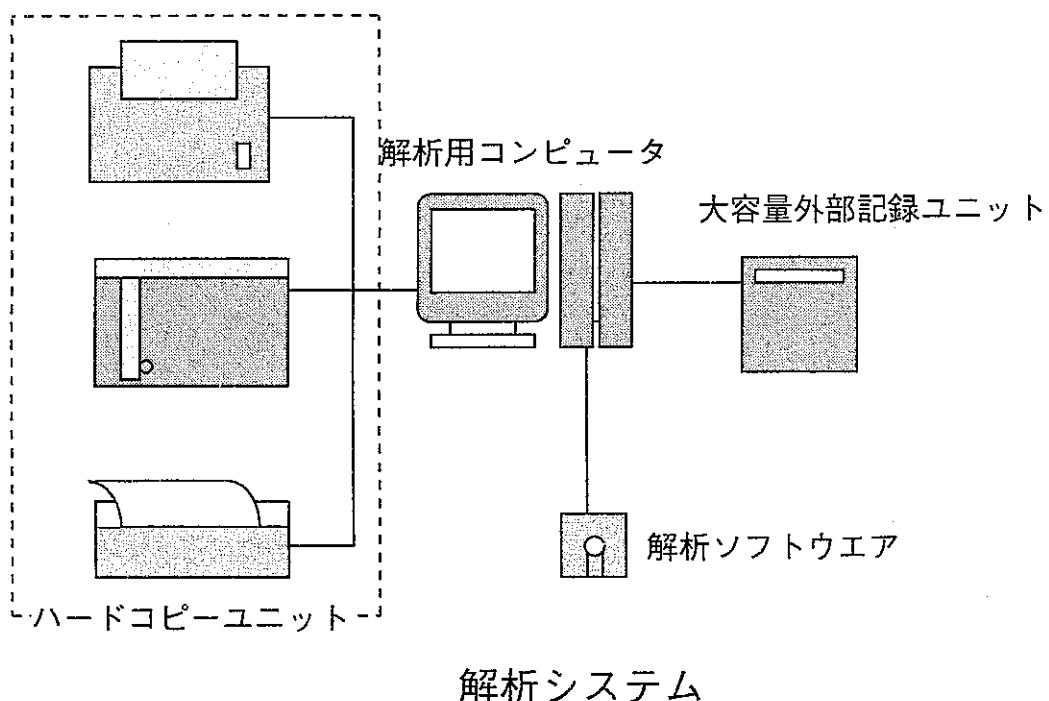
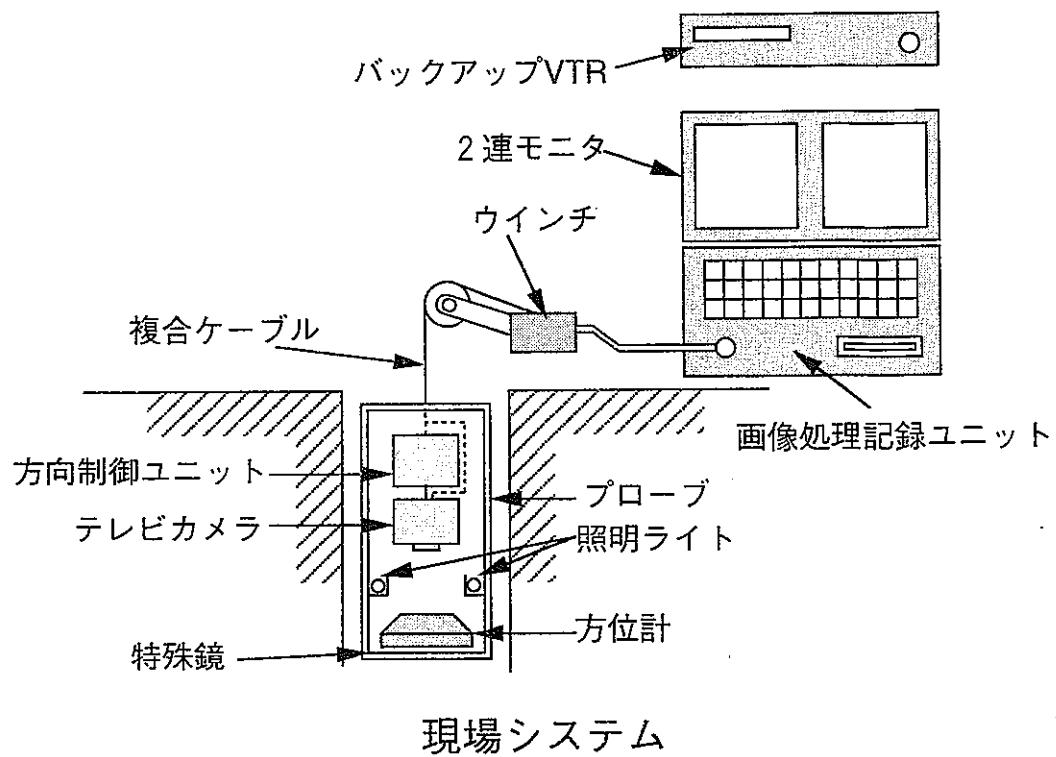


図 3.1 機器の構成

表3.1 展開画像の分解能

	口径(mm)	横方向 ドット数 (dot)	横方向 分解能 (mm/dot)	縦方向 ドット数 (dot)	縦方向 分解能 (mm/dot)
MD-1孔	76	360	0.66	400	0.50
MD-2孔	116		1.01		0.50

3.3 結果

(1) 観察結果

コア観察結果を図3.2および図3.3に、コア形状区分の判定基準を表3.2に示す。両ボーリング孔のコア観察および孔内壁面観察の結果は以下の通りである。ただし、深度は計測坑道壁面からの距離である。

(a) コア観察

①MD-1孔

- ・深度3.4mまでは泥岩、以深は主に粗粒砂岩および礫岩から成っている。
- ・全部で55本のき裂が認められた。ただし、コアの断面の形状等から明らかにコア採取時に折れたと思われる部分（以後人工き裂と呼ぶ）もき裂に含めた。
- ・深度5~10mの範囲に、合計1.8mのコアロスがあった。
- ・コア形状は、ⅡおよびⅢが全体の8割を占める。
- ・R Q Dは、深度8~10mが50%以下、その他は50%以上である。

②MD-2孔

- ・深度6m付近までは主に泥岩、以深は主に礫岩から成っている。
- ・人工き裂を含めて、全部で49本のき裂が認められた。
- ・深度6.8~11.1mの範囲に、合計0.8mコアロスがあった。
- ・コア形状は、8.4~9.7mがV~VI、その他はほぼⅢ以上である。
- ・R Q Dは、深度1~8mおよび11~12mが75%以上、その他は75%以下である。

(b) 孔内壁面観察

①MD-1孔

- ・コア観察で確認された泥岩と礫岩の境界面が、深度3.3m近辺から低角度で現れた（N14° E11° E）。
- ・全部で30本のき裂が認められた（1mあたり2.6本程度）。
- ・深度0~3.2mは細粒の岩石、深度5.5~7.5mは粗粒と細粒の岩石が断続的に分布しており、その他の部分は粗粒の岩石であった。

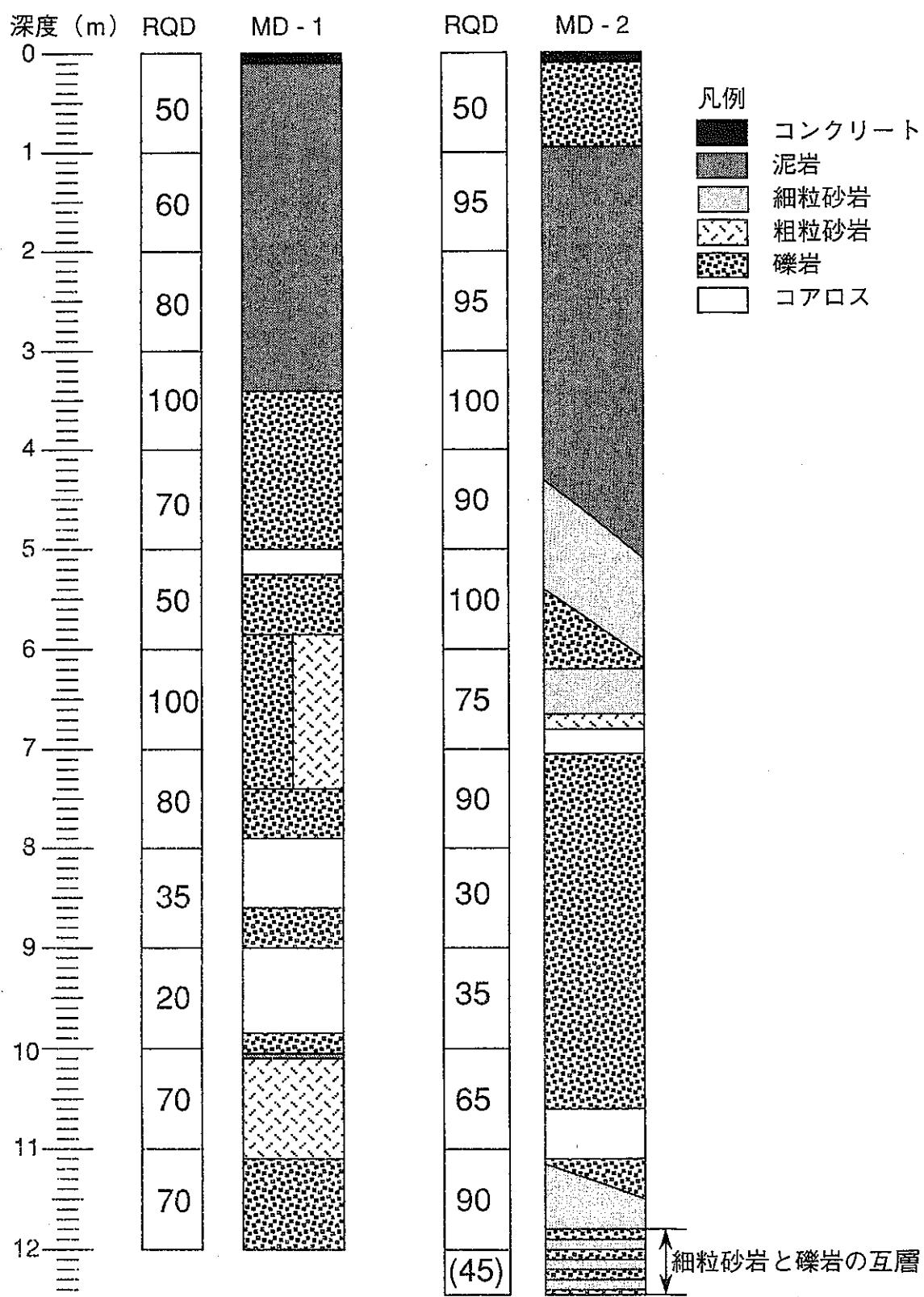
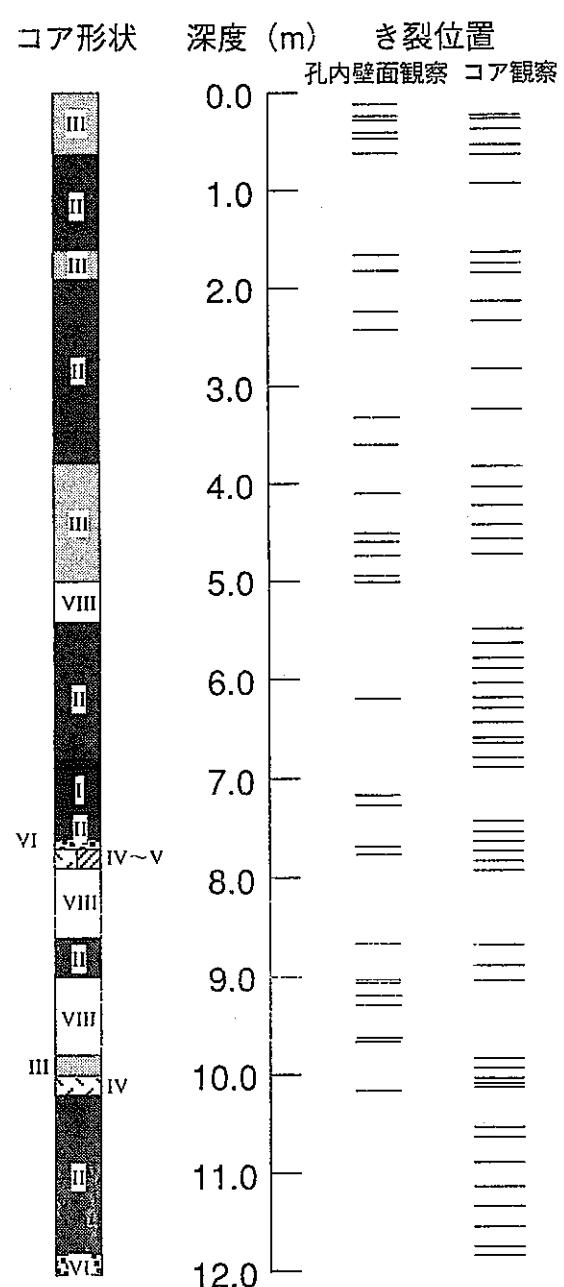
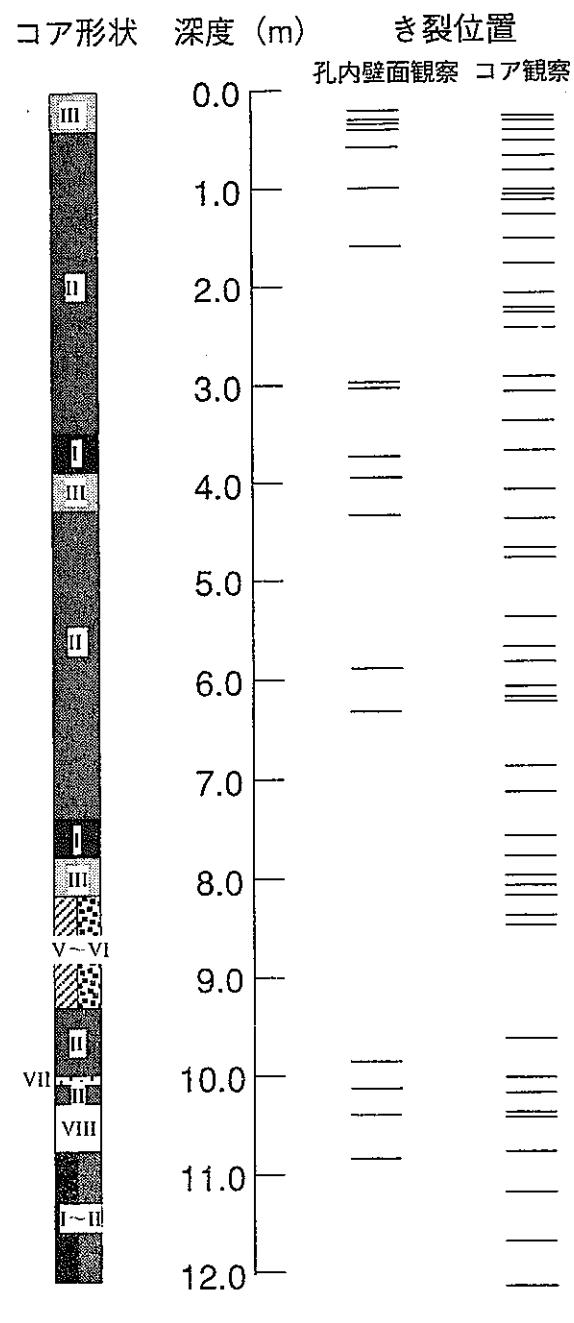


図 3.2 コア観察結果 (地質・RQD)



(MD - 1)



(MD - 2)

図 3.3 コア観察結果 (コア形状・き裂位置)

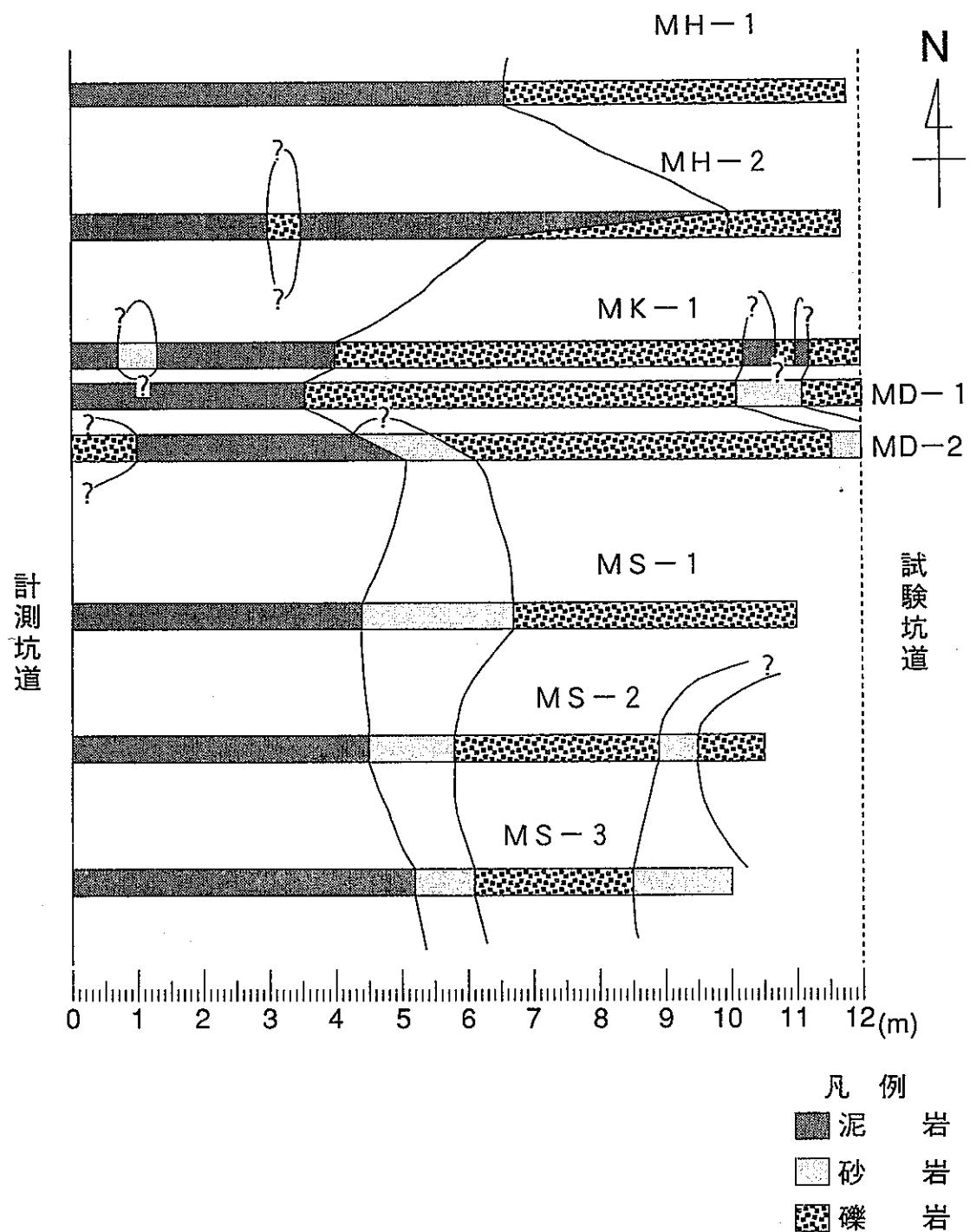


図 3.4 北延NATM坑道付近の地質推定図

表3.2 コア形状の区分判定表⁶⁾

記号	模式図	コア形状
I		長さが50cm以上の棒状コア。
II		長さが50~15cmの棒状コア。
III		長さが15~5cmの棒状~片状コア。
IV		長さが5cm以下の棒状~片状コアで、かつコアの外壁の一部が認められるもの。
V		主として角礫状のもの。
VI		主として砂状のもの。
VII		主として粘土状のもの。
VIII		コアの採取ができないもの。スライムも含む。

②MD-2孔

- ・コア観察で確認された細粒砂岩と礫岩の境界面が、深度5.8m近辺から低角度で現れた(N29° E26° E)。
- ・全部で17本のき裂が認められた(1mあたり1.5本程度)。
- ・深度0.9~5.4mは細粒の岩石、深度5.4~5.8mは粗粒と細粒の岩石が断続的に分布しており、その他の部分は粗粒の岩石であった。

(c) 観察結果のまとめ

図3.2および図3.3のコア観察結果および平成5年度に実施したコア観察結果より作成した坑道付近の推定地質図を図3.4に示す。コア観察および孔内壁面観察の結果は、以下のようにまとめられる。

- ・MD-1孔およびMD-2孔において、礫岩、砂岩および泥岩が分布しており、坑道壁面に近い部分では主として細粒の岩石(泥岩や細粒砂岩)、壁面から離れた部分では主として粗粒の岩石(粗粒砂岩や礫岩)が分布している。この傾向は、平成5年度に実施した観察結果と同様である。
- ・孔内壁面観察より、コア観察の方が、岩相が詳細に区分された。
- ・MD-1孔では3m付近、MD-2孔では5m付近に細粒の岩石と粗粒の岩石の境界面が存在し、それらの傾斜角は比較的低い。
- ・礫岩部では、コアが回収出来ない部分があった。
- ・き裂の本数は、孔内壁面観察よりもコア観察のほうが多く認められた。これは、今回のコア観察では、コアが分離している部分は、人工き裂も含めて全てき裂としたためであると考えられる。
- ・孔内壁面観察で確認されたき裂の本数は、MD-1孔では1mあたり2.6本、MD-2孔では1mあたり1.5本程度であった。

(2) 得られたき裂の走向・開口幅

平成5年度に実施した孔内壁面観察では、観察されたき裂を開口幅によって4つ(20mm以上、10~20mm未満、5~10mm未満、0~5mm未満)に区分した。その結果、観察されたき裂総数の94%は開口幅5mm未満であることが分かった⁵⁾。今回は、この結果をもとに分

類の区分を見直し、密着しているき裂と開口しているき裂に分類することとした。ここでは、開口幅が1mm未満のものをヘーグラック、1mm以上のものを開口き裂とし、それについてき裂の卓越方向と出現頻度を求めた。き裂の卓越方向は、下半球投影法によるシュミットネットを用いて求めた。

表3.3に、平成6年度に実施した孔内壁面観察によって得られたき裂の出現頻度と卓越方向を、表3.4に、平成5年度と平成6年度に実施した孔内壁面観察の結果を合わせて示す。

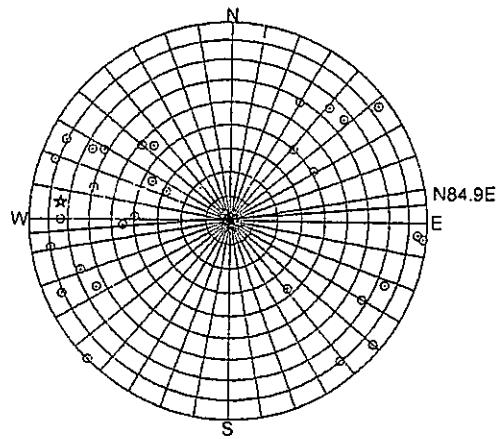
また、図3.5に平成6年度に実施した孔内壁面観察によって得られたき裂の極分布を、図3.6に平成5年度実施分と平成6年度実施分の結果を全て合わせたき裂の極分布を示す。

表3.3 き裂頻度と卓越方向(平成6年度実施分)

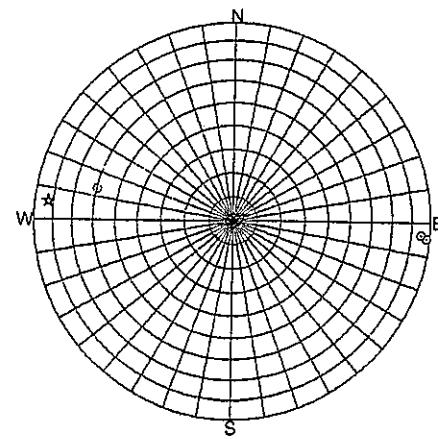
ボーリング孔	MD-1			MD-2		
	全体	開口き裂	ヘーグラック	全体	開口き裂	ヘーグラック
き裂本数 (本)	30	3	27	17	4	13
頻度 (本/m)	2.6	0.3	2.3	1.5	0.3	1.1
走向傾斜の 卓越極	N 6° E 77° E	N 7° E 83° E	N 6° E 74° E	N13° E 72° E	N 6° W 78° E	N22° E 72° E

表 3. 4 き裂頻度と卓越方向（平成 5 年度・平成 6 年度実施分）

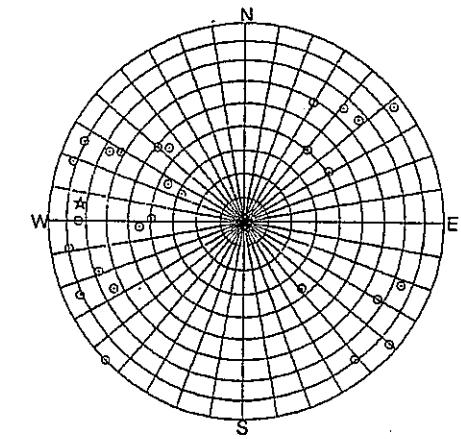
実施時期	平成 5 年度			平成 6 年度		平成 5 年度			
	MH - 1	MH - 2	MK - 1	MD - 1	MD - 2	MT - 1	MT - 2	MC - 1	MC - 2
ボーリング孔	MH - 1	MH - 2	MK - 1	MD - 1	MD - 2	MT - 1	MT - 2	MC - 1	MC - 2
口径 (mm)	86	86	66	76	116	66	66	66	66
観察長 (m)	11.9	11.0	11.5	11.75	11.47	22.6	23.1	11.6	11.6
総き裂数 (本)	42	35	22	30	17	11	31	9	11
頻度 (本/m)	3.5	3.2	1.9	2.6	1.5	0.5	1.3	0.8	0.9
走向傾斜の卓越極	N 3° W 89° E	N 8° E 76° E	N 15° E 79° E	N 6° E 77° E	N 13° E 72° E	N 58° W 37° E	N 1° W 65° W	N 14° E 42° E	N 35° W 86° W



卓越方向: N 6° E 77° E
全体

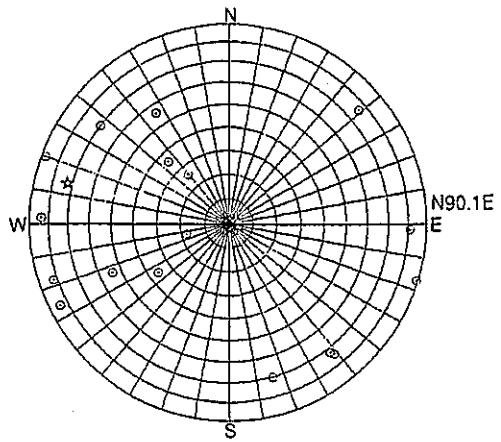


卓越方向: N 7° E 83° E
開口き裂

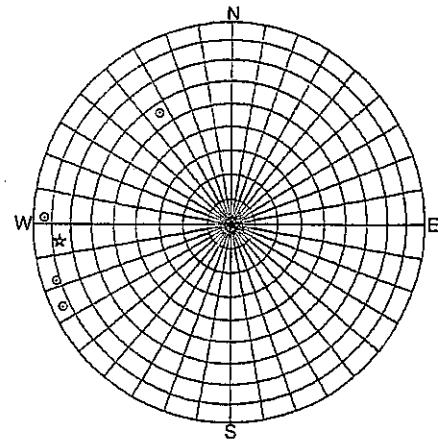


卓越方向: N 6° E 74° E
ヘアークラック

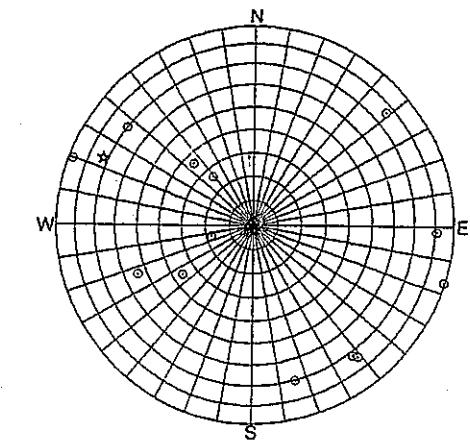
(MD - 1, ボーリング孔軸方向: N84.9° E)



卓越方向: N 13° E 72° E
全体



卓越方向: N 6° W 78° E
開口き裂

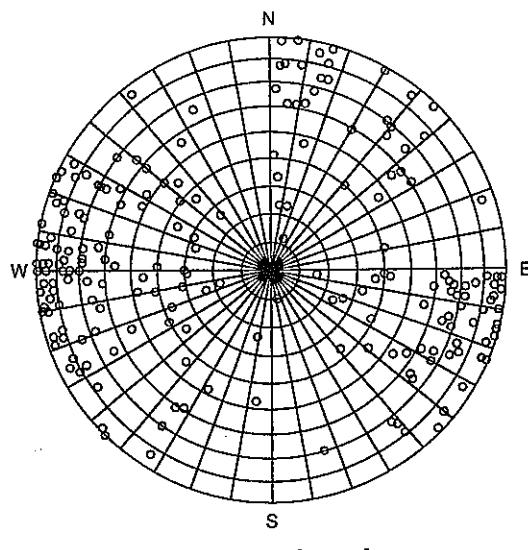


卓越方向: N 22° E 72° E
ヘアークラック

(MD - 2, ボーリング孔軸方向: N90.1° E)

★: 卓越極

図 3.5 き裂極分布 (シュミットネット投影・平成 6 年度実施分)



卓越方向 : N 5° E 84° E

図 3. 6 き裂極分布 (平成 5 年度・6 年度実施分合計)

これらの図表より、以下のことが分かる。

- ・MD-1孔およびMD-2孔で観察されたき裂(47本)の85%(40本)がヘアークラックであった。
- ・MD-1孔のき裂数(30本)は、MD-2孔のき裂数(17本)の約1.8倍であった。
- ・き裂の出現頻度は、北側(計測坑道先端)にあるボーリング孔ほど大きい傾向がある。
- ・き裂の卓越方向は、MD-1孔がN 6° E 77° E、MD-2孔がN 13° E 72° Eであった。これは、両ボーリングの孔軸方向(MD-1孔: N 84.9° E、MD-2孔: N 90.1° E)とほぼ直交している。平成5年度実施分も合わせたき裂の卓越方向も、この傾向とほぼ一致している(N 5° E 84° E)。ただし、ボーリング孔軸方向の走向を持つき裂や水平き裂の観察は困難であるので、ボーリングの孔軸方向が観察結果に影響を与えていた可能性がある。
- ・MD-1孔、MD-2孔ともに、開口幅によるき裂の卓越方向の違いはほとんど認められなかった。

3. 4 考察

孔内壁面観察によって得られたき裂の出現頻度は、MD-1孔とMD-2孔の離間距離が0.8mと非常に近接しているにもかかわらず、両者の差が大きい。また、コア観察と孔内壁面観察でも、き裂の出現頻度に差が認められる。ここでは、MD-1孔とMD-2孔のき裂の出現頻度の相違およびコア観察と孔内壁面観察の相違について検討する。

(1) き裂の出現頻度の相違

孔内壁面観察によって得られた各ボーリング孔のき裂の出現頻度は、MD-1孔が2.6本/m、MD-2孔が1.5本/mと大きく異なっている。

き裂の観察結果に影響する要因として、以下の項目があげられる。

・孔内の地質

礫質の岩石の場合、ボーリング孔壁面に現れる土粒子や礫の径がき裂の開口幅よりも大きくなり、き裂か否かの判断がしにくくなるので、き裂の抽出が困難になる。

・固結度

固結度が低い部分は、ボーリング孔壁面が崩れやすくなっているためにき裂の判別が困難になり、高い場合は観察装置の分解能よりも開口幅が小さい密着き裂の観察が困難になる。

・ボーリングの施工条件

穿孔時の機械振動により、ボーリングコアに人工き裂が発生すると考えられる。これらの人工き裂は、穿孔速度や孔径により発生数が異なると考えられる。

・孔内壁面観察の分解能

き裂の抽出は、パソコンのモニタ上で行う。モニタ上では、縦横のドット数が決まっているので、孔径が大きい程1ドットが表す長さが長くなり、分解能が低下する。

コア観察結果より作成した地質構成比を図3.7に示す。泥岩・細粒砂岩を細粒グループ、その他を粗粒グループと仮定すると、各グループの構成比は、

MD-1孔：細粒28%、粗粒71%

MD-2孔：細粒56%、粗粒43%

となり、MD-1孔の方がき裂が抽出しにくいと思われる粗粒の岩石の構成割合が多くなっている。実際に観察されたき裂は、MD-1孔の方が多いことから、MD-1孔とMD-2孔のき裂数の違いは、地質の影響であるとは言えない。

コア形状構成比を図3.8に示す。I～IIIを細粒グループ、IV以上を粗粒グループと仮定すると、各グループの構成比は、

MD-1孔：細粒77%、粗粒23%

MD-2孔：細粒83%、粗粒17%

であり、両ボーリング孔で大きな差異はないと言える。

以上のことから、両ボーリング孔のき裂頻度の差は、穿孔速度等のボーリングの施工条件や、孔径が異なることによる孔内壁面観察の分解能の違いによるものと考えられる。

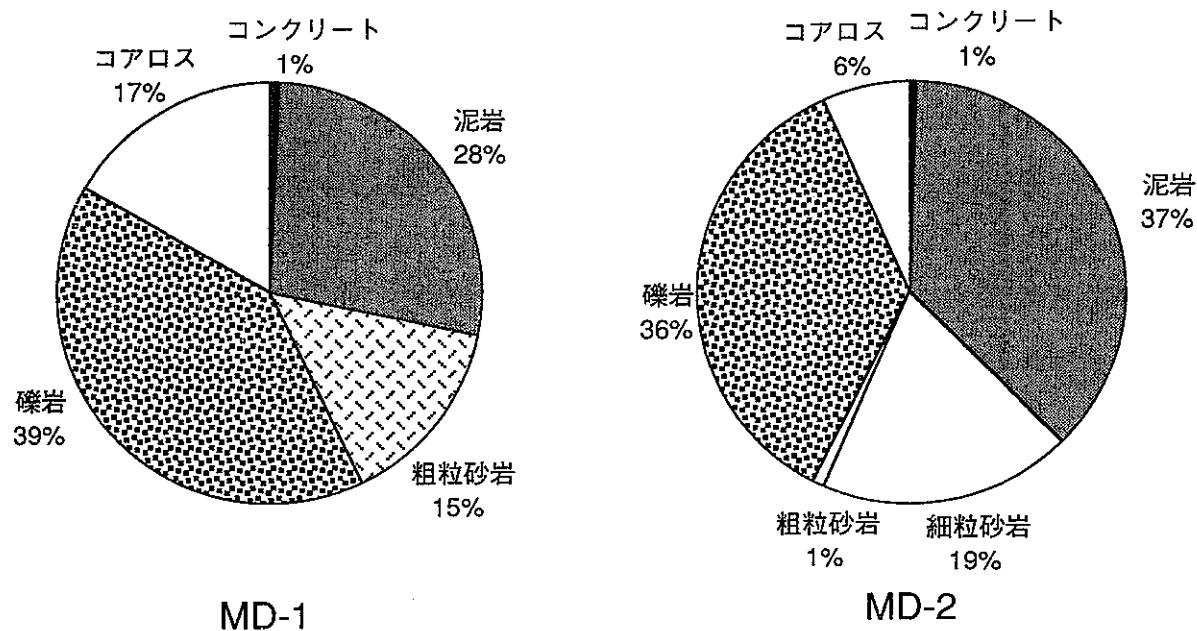


図 3.7 ボーリングコア地質構成比

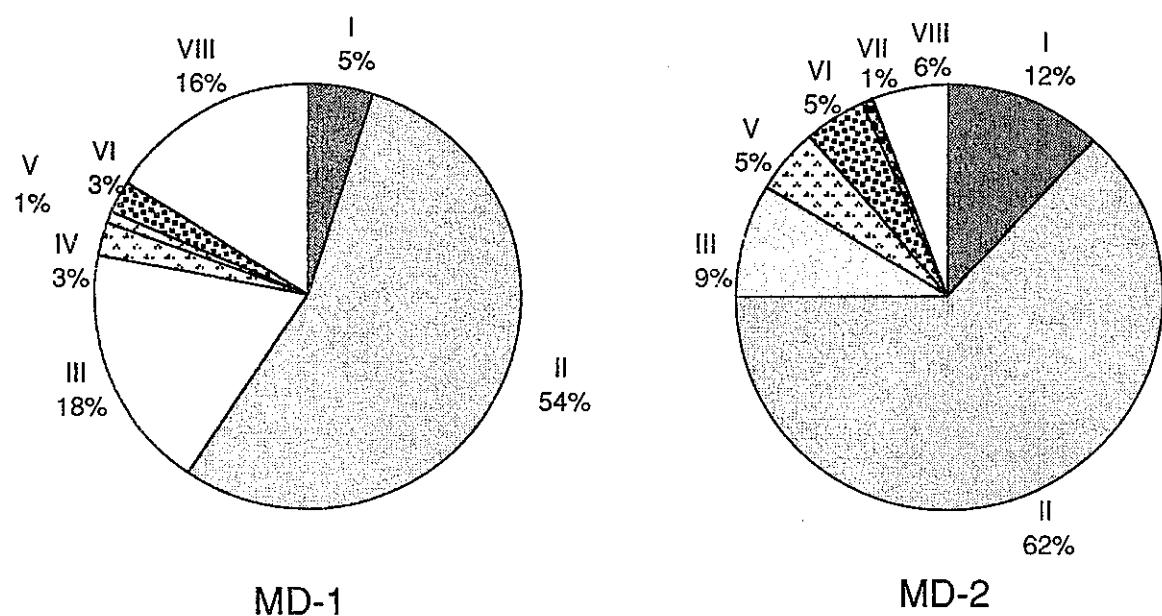


図 3.8 ボーリングコア形状構成比

(2) 孔内壁面観察とコア観察の相違

図3.3によれば、コア観察で確認されたき裂は、MD-1孔が55本、MD-2孔が49本であるのに対し、孔内壁面観察で確認されたき裂は、MD-1孔が30本、MD-2孔が17本であり、き裂数に大きく差が見られる。この理由として、以下の項目が考えられる。

- ・コア形状IIの部分では、MD-1孔についてはコア観察で確認されたき裂が20本であるのに対し、孔内壁面観察では1本しか確認されていない。また、MD-2孔については、コア観察で確認されたき裂が28本であるのに対し、孔内壁面観察で確認されたき裂は9本である。固結度が高い場合、孔内壁面観察によるヘーグラックの抽出が困難であることから、開口幅1mm未満のヘーグラックが一部しか確認出来なかったと思われる。
- ・穿孔時の振動や衝撃により、ボーリングコアにき裂が生じることが考えられる。コア観察では、前項で述べたように特に礫岩部の人工き裂と天然き裂の識別が困難であったので、き裂本数を実際よりも多く評価していると思われる。

3.5まとめ

坑道掘削前の岩盤の地質状況やき裂分布を把握するために、孔内岩盤変位計を設置するボーリング孔について、採取されたコアの地質観察を行うとともに、コーン型反射鏡を利用したカメラ方式であるBIPシステムを用いて孔内壁面観察を実施した。

得られた結果をまとめると、以下のようなになる。

- ・両ボーリング孔とも、礫岩、砂岩および泥岩が分布しており、坑道壁面に近い部分では細粒の岩石、壁面から離れた部分では粗粒の岩石が分布していた。
- ・MD-1孔では3m付近、MD-2孔では5m付近に細粒の岩石と粗粒の岩石の境界面が存在し、それらの傾斜角は比較的低かった。
- ・孔内壁面観察で確認されたき裂の本数は、MD-1孔では1mあたり2.6本、MD-2孔では1mあたり1.5本程度であった。
- ・平成5年度に実施した孔内壁面観察結果も含め、き裂の卓越方向はボーリング孔軸に対してほぼ垂直であった。また、き裂の出現頻度は、坑道の奥にあるボーリング孔ほど大きくなる傾向が見られた。
- ・MD-1孔とMD-2孔でき裂の本数が大きく異なる原因として、ボーリングの施工条件や孔内壁面観察の分解能の相違が考えられた。
- ・き裂の本数は、コア観察のほうが多く認められた。その理由として、孔内壁面観察では全てのヘーグラックが確認出来なかった可能性があること、穿孔時にボーリングコアに人工き裂が生じ、これが天然き裂と区別しにくいために、コア観察では実際よりもき裂本数を多く評価した可能性があることがあげられた。

4. 孔内岩盤変位計の設置および計測

4. 1 目的

孔内岩盤変位計による計測は坑道の掘削に伴う岩盤内変位を捉えることが目的である。今回実施した孔内岩盤変位計の設置および計測は、機械掘削による岩盤内変位を捉えることと、計器の有効性と問題点を把握することを目的として実施した。

4. 2 孔内岩盤変位計による測定の概要

今回用いた計器は多点式変位計（東亜測器社製：EM-150-6M型）とスライディングミクロメーター（スイス、SOL EXPERTS 社製）の2種類である。昭和63年度に実施した発破掘削に伴い発生する岩盤の変位量と今後実施する機械掘削に伴い発生する岩盤の変位量を比較するために、今回の計測では、多点式変位計は発破掘削の際に使用した計器と同様の計器を用いた。また、計器の有効性と問題点を把握するために、多点式変位計とは構造や測定仕様が異なるスライディングミクロメーターを用いて計測を実施した。それぞれの計器の仕様と概念図を表4. 1～4. 2、図4. 1～4. 2に示す。

表4. 1 多点式変位計の仕様

項目		仕 様	メーカー
本体部	変位計	適用孔径 : 66, 76mm	(株)東亜測器 (EM-150-6M)
		読み精度 : ±0.01mm	
		固定方法 : 加圧式	
		点数 : 最大 6 点	
		接続方法 : 鋼製ワイヤー (φ5mm)	
計測部	ノギス	デジマチックノギス 読み精度 : 1/100mm	(株)東亜測器 (DM-15)

表4. 2 スライディングミクロメーターの仕様

項目		仕 様	メーカー	
本体部	ケーシング	内径 : 最大 75mm	スイス SOL EXPERTS 社	
		適用孔径 : 最小 116mm		
計測部	プローブ	基準長 : 1m	スイス SOL EXPERTS 社	
		測定範囲 : 10mm (±5mm)		
		感度 : 1mあたり1/1000mm		
	指示計	測定範囲 : ±5mm	応用地質(株)	
		最小読み値 : 1/1000mm		
表示		液晶ディスプレー		
インターフェース		RS-232C 出力		
電源		交流100V, 直流12V		

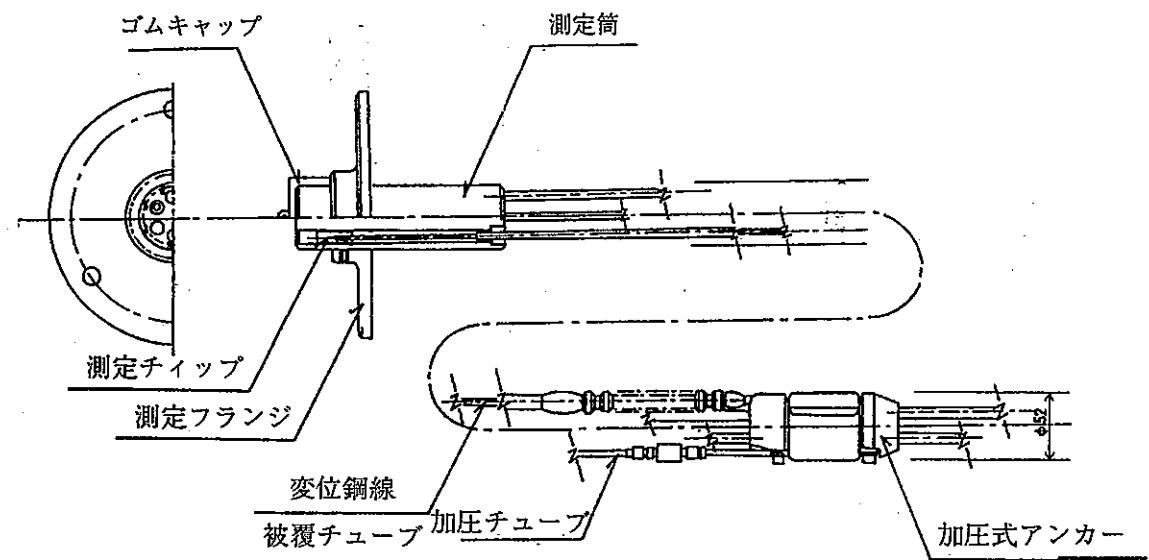


図4. 1 多点式変位計の概念図

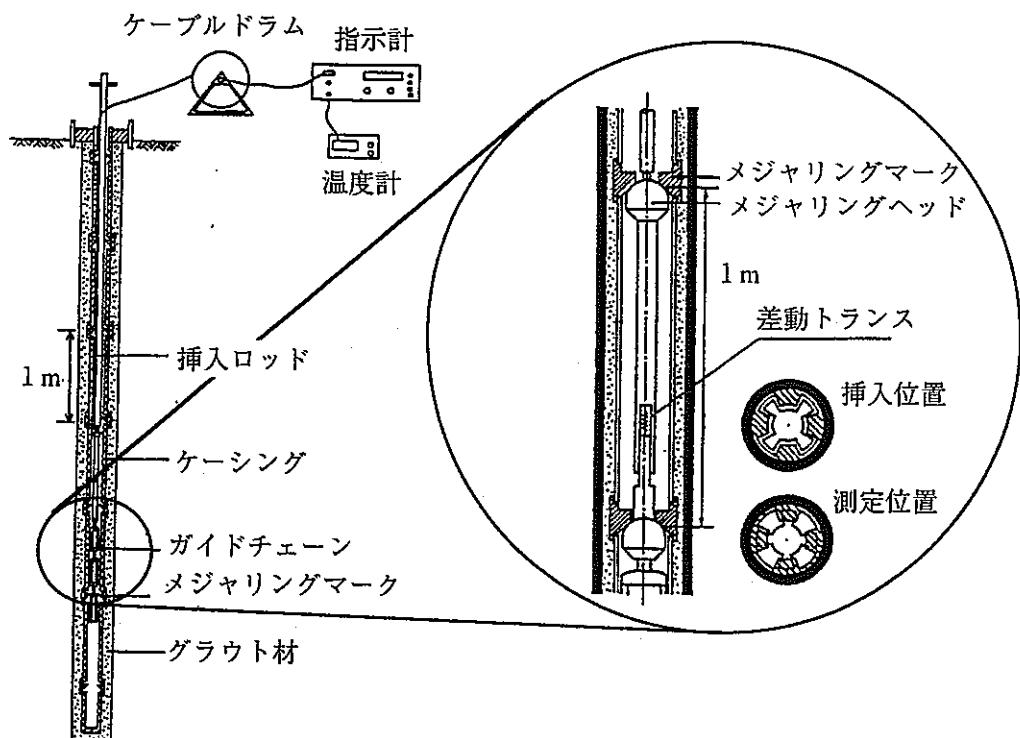


図4. 2 スライディングミクロメーターの概念図

多点式変位計による測定は、試錐孔内に6点のアンカーを設置し、それぞれのアンカーと坑道壁面との相対距離を計測することにより行われる。各測定点の変位量は、アンカーに接続されている変位鋼線を通じて測定チップの変位量となり、この変位量がデジマチックノギスで測定される。

スライディングミクロメーターによる測定は、試錐孔内に1mおきにメジャリングマークが装備された塩化ビニル製ケーシングを設置し、メジャリングマーク間の変位を差動トランスを内蔵したプローブを用いて測定することにより行われる。いずれも3～5回測定を行い、最頻値を測定値とする。

4. 3 孔内岩盤変位計の設置状況

図4.3に孔内岩盤変位計を設置した試錐孔とそれぞれの計器の測定点の位置を示す。多点式変位計はMD-1孔に、スライディングミクロメーターはMD-2孔にそれぞれ設置した。スライディングミクロメーターの最深部の計測点は、試験坑道壁面の予定位置から0.5m（試錐孔深度11.5m）とした。スライディングミクロメーターのケーシングには1mおきにメジャリングマークが装備されているため、計測点は試験坑道壁面の予定位置の0.5mから1mピッチとなる。多点式変位計の計測点は、発破掘削時の計測結果やスライディングミクロメーターによる計測結果と比較するため、それぞれの計測点と可能な限り一致させ、試験坑道壁面の予定位置から0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.5, 6.5m（試錐孔の深度11.5, 11.0, 10.5, 9.5, 7.5, 5.5m）の6点とした。発破掘削時の計測点は、坑道壁面から0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0, 6.0mである。孔内岩盤変位計の設置方法を以下に示す。

(1) 多点式変位計

- ①試錐孔の掘削（MD-1孔： $\phi 76\text{mm}$ 、孔長12.0m、床盤から1.15mの高さから試験坑道軸に直角、水平から1°上向き）

- ②多点式変位計の挿入

- ③アンカーの固定（ポンプによる加圧）および固定フランジの設置

(2) スライディングミクロメーター

- ①試錐孔の掘削（MD-2孔： $\phi 116\text{mm}$ 、孔長12.0m、床盤から1.15mの高さから試験坑道軸に直角、水平から1°上向き）

- ②ケーシングの挿入

- ③グラウト材（固化後には、瑞浪層群の岩石の強度（6.6MPa）、変形係数（2.8GPa）に近くなるように配合したグラウト材を用いた）の注入・固化

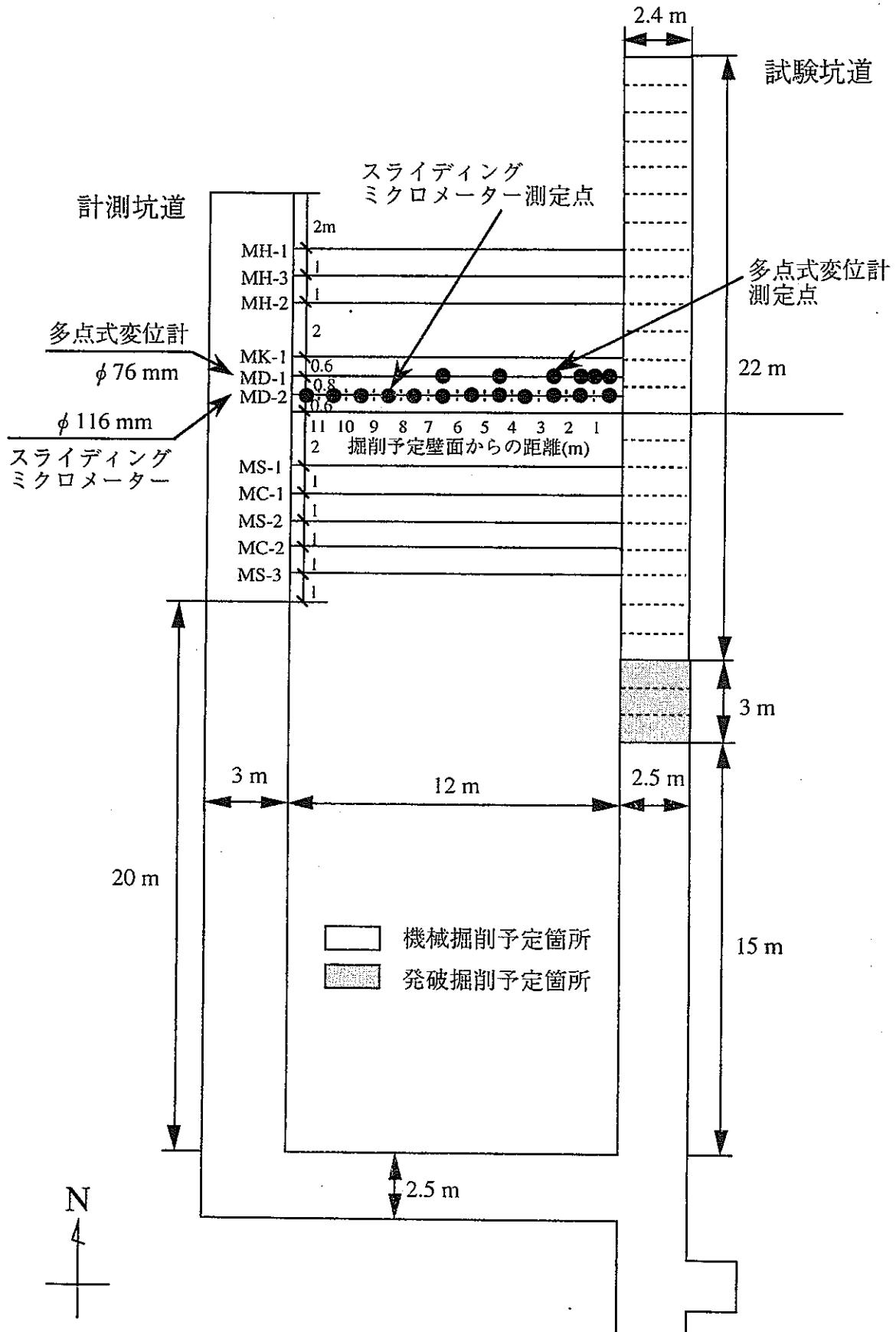


図4.3 MD-1、MD-2孔の位置および孔内岩盤変位計の測定点

4. 4 岩盤内変位の測定結果

坑道掘削前の岩盤内変位の初期値を取得するために、変位計の設置直後に1回、2か月後に1回、計2回の測定を実施した。

(1) 多点式変位計

測定結果を表4.3に示す。測定精度を最小読み取り値の10倍とした場合、多点式変位計の測定精度は0.1mmとなる。1回目と2回目の測定結果で、測定精度以上の差が測定されたのは、計測No.2とNo.3である。その他の測定点で測定された変位量は測定精度以下の量であった。

(2) スライディングミクロメーター

測定結果を表4.4に示す。測定精度を最小読み取り値の10倍とした場合、スライディングミクロメーターの測定精度は0.01mmとなる。1回目と2回目の測定結果で、測定精度以上の差が測定されたのは、11か所の計測点のうち8か所であった。計測No.9とNo.10では0.06mmと0.11mmの変位量が計測された。この値は測定精度の5～10倍以上に相当する。その他の測定点で測定された変位量は測定精度以下の量であった。

4. 5 考察

岩盤内変位の計測を実施した1回目と2回目の間に、岩盤内変位を発生させるような坑道掘削などのイベントはなかった。したがって、多点式変位計を用いた計測の結果で測定精度以上の変位量が生じたのは、アンカーを固定した後にこれらのアンカーと孔壁の接触状態が変化したためと考えられる。この部分は粗粒砂岩が分布しており、アンカーと孔壁が十分に接触していなかった可能性がある。また、スライディングミクロメーターによる計測の結果で測定精度以上の変位量が生じたのは、モルタルの固結状態が一様ではなく、ケーシング、モルタル、孔壁の接触状態が変化したためと考えられる。

2回の測定の結果、いずれの孔内岩盤変位計でも精度以上の変位量が計測されたため、今回の測定結果から初期値を設定することは出来ない。このため、平成7年度に予定している試験坑道掘削の前に測定を実施し、変位していないことを確認する必要がある。さらに、変位していないことを確認するためには、各測定機器の繰り返し測定精度、時間依存的な変位の発生の有無、人的誤差について把握する必要がある。

4. 6 まとめ

機械掘削による岩盤内変位を捉え、発破掘削による岩盤内変位との相違を把握することと、孔内岩盤変位計の岩盤内変位を計測することに対する有効性と問題点を把握することを目的として、多点式変位計とスライディングミクロメーターを設置し、設置直後と2か月後の計2回の測定を実施した。その結果、いずれの孔内岩盤変位計でも精度以上の変位量が計測された。このため、数回の計測を実施して変位量の変動の無いこと、あるいは、実用上の測定精度を把握した上で、初期値を求める必要がある。

表4.3 多点式変位計による計測結果

計測 No.	計測位置 試験坑道壁 面からの距離	計測区間	1回目 H6.12.26 (mm)	2回目 H7.2.13 (mm)	1回目と 2回目の 差 (mm)
1	0.5m	孔口～11.5m	15.44	15.48	0.04
2	1.0m	孔口～11.0m	16.35	16.45	0.10
3	1.5m	孔口～10.5m	16.05	16.15	0.10
4	2.5m	孔口～9.5m	15.42	15.41	-0.01
5	4.5m	孔口～7.5m	14.64	14.65	0.01
6	6.5m	孔口～5.5m	14.34	14.40	0.06

- : 縮み、 + : 伸び

表4.4 スライディングミクロメーターによる計測結果

計測 No.	計測区間	1回目 H6.12.26 (mm)	2回目 H7.2.13 (mm)	1回目と 2回目の差 (mm)
1	10.5～11.5m	1000.220	1000.187	-0.033
2	9.5～10.5m	999.384	999.369	-0.015
3	8.5～9.5m	999.983	999.962	-0.021
4	7.5～8.5m	999.929	999.952	0.023
5	6.5～7.5m	999.945	999.923	-0.022
6	5.5～6.5m	999.834	999.839	0.005
7	4.5～5.5m	999.946	999.905	-0.041
8	3.5～4.5m	999.964	999.966	0.002
9	2.5～3.5m	999.847	999.779	-0.068
10	1.5～2.5m	999.892	999.782	-0.110
11	0.5～1.5m	1000.193	1000.199	0.006

- : 縮み、 + : 伸び

5. 事前解析

5. 1 概要

平成5年度に実施した事前解析⁵⁾は、以下の2項目について検討を行った。

- ・対象岩盤を互層構造を考慮し、層の傾きを無視して解析モデルを作成し、試験坑道掘削による周辺岩盤の応力状態の変化や変位分布を予測解析した。
- ・解析モデルに岩相や異方性を考慮して行った解析と等方均質モデルを用いて行った解析を比較して、応力状態の変化や変位分布がどの程度異なるかを検討した。

本年度の事前解析は、以下の3項目について検討を行う。

- ・対象岩盤の構造を平成5年度より正確にモデル化するために、互層構造および層の傾きを考慮して解析モデルを作成し、平成5年度に引き続き、試験坑道掘削による周辺岩盤の応力状態の変化や変位分布を予測解析する。
- ・初期応力設定の相違（大きさ・方向）により応力状態の変化や変位分布がどの程度異なるかを検討する。
- ・昭和63年に実施した解析¹⁾と同様に掘削影響領域（ここでは、掘削により力学物性が変化した領域）を解析モデルで考慮することにより応力状態の変化や変位分布が考慮しない場合とどの程度異なるかを検討する。

解析手法は、平成5年度の事前解析と同様に、2次元平面ひずみ状態での有限要素法による弾塑性解析であり、使用した解析コードは、電力中央研究所作成のNONSAC(NONlinear Static Analysis of structure Change)である。

5. 2 解析方法

(1) 解析モデルの設定

(a) 解析対象断面および解析手法

解析対象断面は、解析結果と計測結果を比較できるようにするため、平成5年度と同様に岩盤内変位計測を行う断面(MD-2孔：図2.3参照)近傍とした。

解析手法は、平成5年度の事前解析と同様に、2次元平面ひずみでの有限要素法による弾塑性解析であり、使用した解析コードは、電力中央研究所作成のNONSACである。

(b) 岩盤のモデル化

解析モデルを図5.1に示す。岩盤のモデル化は、以下の手順で行った。

①地層の分布状況の評価

計測坑道および昭和63年度に掘削した試験坑道の切羽観察図に基づき模型を作成し、概略的な地層構造を検討した。その結果、堆積面は坑道軸方向に対してはほぼ水平とみなせるが、水平方向に対しては西から東へ下向きに約10°～20°傾斜していることが分かった。

平成5年度は、地層構造を水平としてモデルの作成を行ったが、本年度は、対象岩盤の構造を正確に解析モデルに反映するため、地層構造を10°東落ちと設定した。

②地質の分類

平成5年と同様に、解析断面の地質を固結度が高い細粒グループと固結度の低い粗粒

グループとに分類するため、計測坑道から試験坑道を挟むように掘削されたボーリング（MT-1孔、MT-2孔：図2、3参照）のコア観察図およびコア写真をもとにコア形状図を作成した。これは、東濃鉱山周辺の岩盤については、コア形状が岩石の固結度を最も良く反映している要素であると考えられるためである。具体的には、コア形状の判定区分（表3.2参照）におけるコア形状がI～IIIのものを細粒グループ、IV以上のものを粗粒グループとした。

③解析領域の設定

解析領域は、平成5年度の事前解析と同様に、坑道径（D）の3倍以上を坑道壁面からそれぞれ上下左右に確保し、坑道を中心とし $26.5\text{m} \times 26.5\text{m}$ の領域とした。

④解析モデルの設定

①、②で分割した地質構造のうち、層厚が50cmを下回るものについては、解析領域の大きさ（ $26.5\text{m} \times 26.5\text{m}$ ）に対して十分小さく、解析結果に影響を及ぼさないと判断して平成5年度の事前解析と同様に簡略化した。ただし、坑道周辺の要素幅は、平成5年度の事前解析から判断して、より詳細な解析を実施するため、要素幅を25cmと細かく設定した。また、解析メッシュを作成する際には、岩盤内変位を測定する点が解析メッシュ上の節点となるように考慮した。

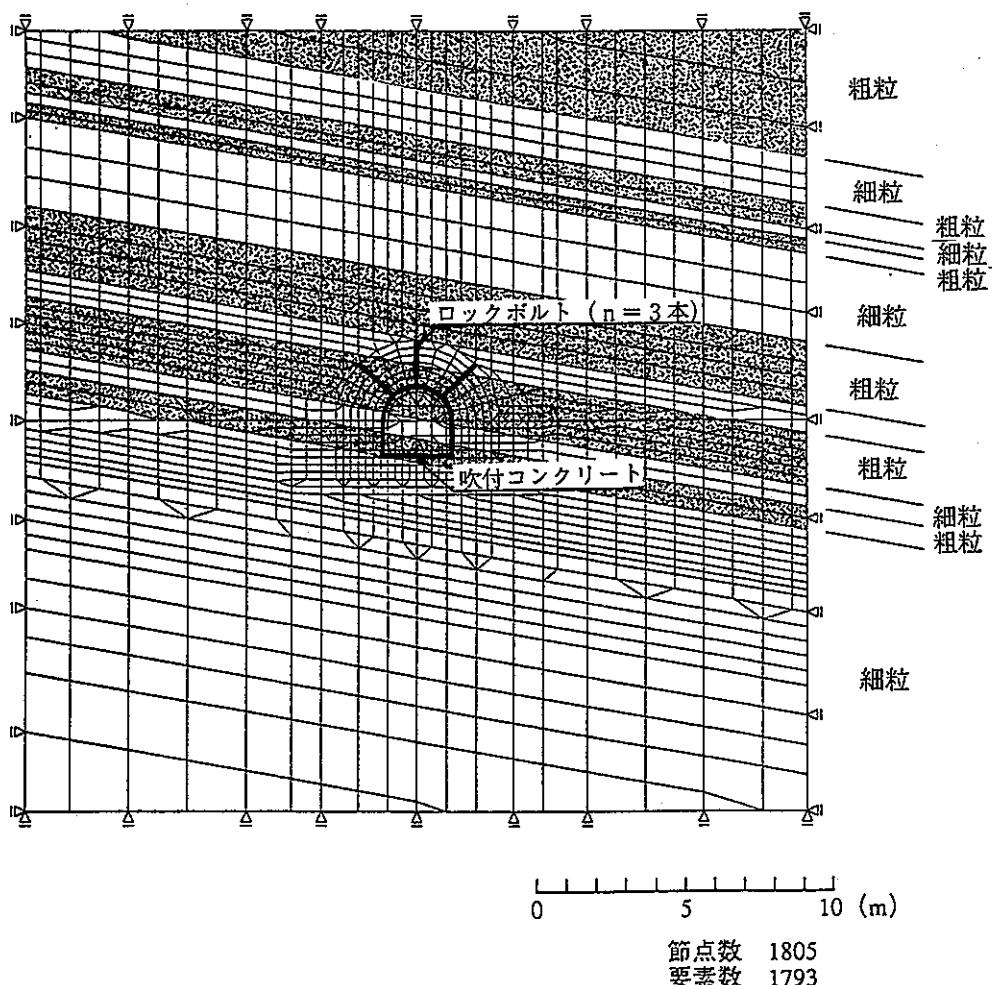


図5.1 解析モデル

(2) 解析用物性値の設定

解析用物性値のうち岩盤物性値を表5.1に、支保工物性値を表5.2に示す。

この解析用物性値の設定にあたっては、平成5年度と同様に室内試験と孔内載荷試験の結果をもとに設定した。坑道掘削を行う地点の地質状況は、大きく2つの岩種に分けられるため、解析用物性値についても粗粒グループと細粒グループに分けてそれぞれ設定した。また、掘削影響領域をモデル化することにより岩盤内変位および局所安全係数の分布がどの程度変化するのか検討するため、健全部と掘削影響領域を設定した。各物性値の設定根拠について以下に述べる。

(a) 変形特性・強度特性

① 健全部

変形特性、強度特性とも平成5年度と同じく以下のように設定した。変形特性については、解析の対象とする岩盤の深度に相当する拘束圧 ($\sigma_3 = 2.94 \text{ MPa}$) での三軸圧縮試験における割線弾性係数 E_{50} を基に解析用物性値を設定した。また、強度特性については、平成5年度実施した三軸圧縮試験の結果に基づいて解析用物性値を設定した。

② 掘削影響領域

既往の研究¹⁾を参考とし、掘削影響領域の物性値および坑道壁面からの幅を以下のように設定した。

掘削影響領域の変形特性として、変形係数は健全部の30%、ポアソン比は健全部と同一とした。また、強度特性として、粘着力は健全部の30%、内部摩擦角は健全部と同一とした。変形特性および強度特性の健全部との比率は、既往の研究により得られた値である。掘削影響領域の幅は、既往の研究は発破掘削であったため坑道壁面から0.8mであった。しかし、今回の試験坑道の掘削は機械掘削であるため掘削影響領域の幅は発破掘削の場合より小さくなると考えられるので、試験坑道壁面から0.5mとした。

(b) 支保工

試験坑道では、支保工として吹付コンクリートとロックボルトを用いる予定であるため、平成5年度の事前解析と同様に、解析でも支保工を考慮した。吹付コンクリートは厚さ7cm、ロックボルトは1.5m × 3本とし、解析上は吹付コンクリートをビーム材で、ロックボルトをトラス材でモデル化した。支保工の物性値は、JIS規格に基づき設定した。なお、支保工の寸法および物性値はすべて平成5年度の事前解析と同値である。

(c) 荷重条件

荷重条件は、解析対象断面の近傍の坑道下盤から1.0m上方のレベル (MS-1, 2, 3孔: 図2.3参照) で平成5年度行った電中研式8成分ひずみゲージを用いた応力解放法 (OC法) およびAE法から得られた初期応力値をもとに、大きさおよび方向の異なる4種類の値を選定した。坑道下盤から1.0m上方の初期応力値を表5.3に示す。各初期応力の設定根拠は以下のようである。

OC法では初期応力値を3点で計測した。しかし、3つの測定値にはばらつきがあり、さらに、測定点2で一部のひずみゲージが異常挙動したため、測定点2で得た計測値を単独

で用いて応力を算定することができなかった。そのため、解析では測定点1、測定点3それぞれの初期応力値、および3つの測定点全ての計測データから算定した初期応力値の計3種類の初期応力値を用いた。

平成5年度に行った事前解析では、AE法から得られた初期応力値をもとに、初期応力値を水平方向 $\sigma_h=2.87\text{ MPa}$ 、鉛直方向 $\sigma_v=1.85\text{ MPa}$ とし、水平／鉛直方向のせん断応力を考慮せず、この両者を主応力と仮定した。今年度は、岩盤の堆積面の傾きを考慮することから、AE法による計測結果をそのまま用い、水平／鉛直方向のせん断応力（ $\tau_{hv}=0.47\text{ MPa}$ ：主応力方向 21.2° の傾きに相当）を考慮した。

解析領域全体における初期応力値は、地表面での初期応力値を0とし、測定点における初期応力値が計測結果となるよう線形補間により設定した。

初期応力値として種々ある測定法の内OC法が最も信頼性が高い。しかし、OC法による測定値にはばらつきがあったため、本年度の検討では、OC法で得られた3つの計測データから算定した初期応力値を基本ケースとした。

(3) 施工段階のモデル化

今回の解析では2次元平面ひずみモデルを用いたが、岩盤の応力状態の変化や変形挙動には切羽と解析対象断面の距離が関係する。切羽の進行による解析対象断面での掘削解放力の変化を3次元的に考慮するために、施工段階を以下に示すような3つのステージにモデル化した。

STAGE-1：初期応力の設定（解析断面からの切羽位置： $-2D$ ）

STAGE-2：坑道掘削時（解析断面からの切羽位置： $0.33D$ ）

STAGE-3：最終状態〔坑道掘削完了時〕（解析断面からの切羽位置： $3D$ ）

ここで、Dはトンネルの直径であり、負の値は切羽が解析断面まで到達していないことを、正の値は切羽が解析断面を通過したことを示す。解析上は、坑道掘削を瞬時に行なったと仮定したときの掘削解放力を P_0 とし、切羽の進行に対応して、坑道掘削部に

$$P = \beta P_0$$

の力を作用させることにより、施工段階をモデル化した。ここで、 β はそれぞれの切羽位置での地圧の解放の割合を表す。STAGE-1では $\beta=0$ 、STAGE-2では $\beta=0.8$ （掘削解放力の80%を作用）、STAGE-3では $\beta=1.0$ （掘削解放力の残り20%を付加することにより合計100%）とした。

掘削影響領域の物性変化はSTAGE-2で、支保工の剛性はSTAGE-3で考慮した。

(4) 解析ケース

解析ケースの一覧を表5、3に示す。平成5年度は変形係数の異方性の違いについて4ケース（CASE-1～CASE-4）検討を行った。本年度は、設定した初期応力の相違（大きさ・方向）に着目してCASE-5～CASE-8およびCASE-10とCASE-11を設定した。さらに、岩盤モデルの相違（堆積面の傾きの有無）についてCASE-5とCASE-10、掘削影響領域の考慮の有無についてCASE-5とCASE-9を設定した。

ケース名（CASE-Number）は、平成5年度事前解析からの通し番号とした。（平成5年度事前解析CASE-1～CASE-4、平成6年度事前解析CASE-5～CASE-11）

表 5. 1 岩盤物性値一覧

		変形特性		強度特性	
		変形係数	ポアソン比	粘着力	内部摩擦角
		D (GPa)	ν	C (MPa)	ϕ' (°)
健全部	粗粒	1.47	0.4	1.96	10
	細粒	1.96	0.4	2.94	10
掘削影響領域	粗粒	0.44	0.4	0.59	10
	細粒	0.59	0.4	0.88	10

表 5. 2 支保工物性値一覧

吹付コンクリート (t=7cm)		ロックボルト (l=1.5m)	
E (GPa)	ν	E (GPa)	A (cm ³)
3.33	0.167	206	5.067

表5.3 解析ケース一覧

	初期応力					岩盤モデル		掘削影響領域		比較項目		
	OC法(応力解放法)			AE法		平成5年度モデル	平成6年度モデル	考慮せず	考慮	初期応力	岩盤モデル	掘削影響領域
	測定点1,2,3 より設定	測定点1 より設定	測定点3 より設定	主方向を 水平と仮定 (平成5年度実施)	主方向考慮	地層構造 水平	地層構造 10° 傾斜					
主応力概念図												
最大主応力 (MPa)	1.67	1.52	1.69	2.87	3.05							
最小主応力 (MPa)	1.47	1.32	0.87	1.85	1.67							
角度 α (°)	58.2	85.0	51.0	0.0	21.2							
平成5年度実施	CASE-1			○		○		○				
	CASE-2			○		○		○				
	CASE-3			○		○		○				
	CASE-4			○		○		○				
本年度実施	CASE-5	○						○	○	○	○	○
	CASE-6		○					○	○	○		
	CASE-7			○				○	○	○		
	CASE-8				○			○	○	○		
	CASE-9	○						○		○		○
	CASE-10	○					○		○	○	○	
	CASE-11				○	○		○	○	○		

5. 3 解析結果

(1) 変位分布

(a) 坑道掘削による変位増分

坑道掘削後に実際に測定できる内空変位は、STAGE-2（坑道掘削時）からSTAGE-3（最終状態）までの変位増分である。表5.4にこの間の各解析ケースにおける天端沈下、下盤から1.25mの水平方向の内空変位、下盤の浮上りを示す。値は全て坑道側への変位量を正としている。

基本ケース（CASE-5）での変位増分は、天端沈下0.30mm、水平内空変位0.69mm、下盤浮き上がり0.37mmと予想される。

(b) 坑道の変形モード

坑道の変形モードを各ケースで比較するため、坑道内空の鉛直方向の変位量と水平方向の変位量から変形比を、さらに、鉛直から時計周りに45°方向の変位量と135°方向の変位量から変形比を算出した。前者（水平鉛直方向）を表5.5に、後者（斜め方向）を表5.6に示した。同表には、初期応力の応力比も同様に算出し示している。

変形比は、1.0に近づくほど坑道に等方的な変形が生じたことを示す。また、鉛直方向、水平方向の比率が1.0より小さいと水平方向に比べ鉛直方向がつぶれた横長の変形を示し、1.0より大きいと鉛直方向に比べ水平方向がつぶれた縦長の変形を示す。また、斜め方向は、比率が1.0より小さいと45°方向がつぶれた変形を、比率が1.0より大きいと135°方向がつぶれた変形を示す。

等方的な初期応力を設定したCASE-5, 6, 9, 10は、変形も等方的であり、異方的な初期応力を設定したCASE-7, 8, 11は、変形も異方的である。また、その方向は初期応力の方向と強い相関がある。

(c) 岩盤内変位分布

岩盤内変位のうち、下盤から上方1.0mレベルの水平方向の岩盤内変位分布のグラフと水平方向の岩盤内変位分布のモードのグラフを、比較するCASEごとにまとめ、図5.3～図5.10に示す。

岩盤内変位は試験坑道に向かう方向が正である。岩盤内変位のモードは、試験坑道壁面の変位量で各測点の岩盤内変位を無次元化したものである。

基本ケース（CASE-5）での試験坑道壁面の変位量は1.73mmと予想され、試験坑道壁面から1.5mの位置での変位は、その50%程度と予想される。

(2) 応力分布

(a) 局所安全係数の分布

岩盤の安定性を評価するために、図5.11、図5.12に最終状態（坑道掘削完了時）であるSTAGE-3の坑道周辺岩盤の局所安全係数の分布を示す。局所安全係数は次式により定義されるもので、その値が1.0を下回ると、数値解析上はその領域の岩盤が塑性状態にあることを示す。

$$\text{局所安全係数} = a / b$$

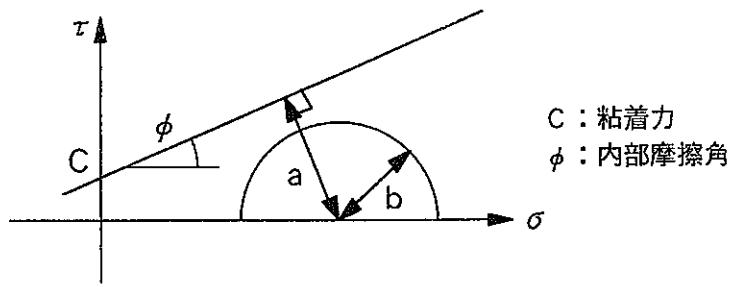


図 5. 2 局所安全係数の定義

解析の結果、局所安全係数が1.0を下回る領域がほとんど発生しなかったことから、ここでは、局所安全係数が2.0以上の部分を安定領域、それ以下になる領域を掘削により安定性が低下した領域として評価した。

基本ケース（CASE-5）での安定性低下領域は天端左および下盤に限定され、その幅も最大で25cm程度である。掘削影響領域を考慮したCASE-9のみほぼ坑道の全周に幅 50cm程度の安定低下領域が発生した。

表5. 4 坑道掘削時 (STAGE-2) から最終状態 (STAGE-3) までの変位増分

	天端沈下 (mm)	水平内空変位 (mm)	下盤浮上り (mm)
CASE-5	0.30	0.69	0.37
CASE-6	0.29	0.59	0.35
CASE-7	0.25	0.54	0.31
CASE-8	0.30	1.34	0.42
CASE-9	0.42	1.00	0.54
CASE-10	0.26	0.61	0.37
CASE-11	0.25	1.19	0.42

表5. 5 内空変位とその比率 (水平・鉛直方向)

	①水平内空変位 (mm)	②鉛直内空変位 (mm)	水平鉛直変形比 ①/②	水平鉛直応力比
CASE-5	0.69	0.67	1.03	0.94
CASE-6	0.59	0.64	0.92	0.87
CASE-7	0.54	0.56	0.96	0.88
CASE-8	1.34	0.72	1.86	1.55
CASE-9	1.00	0.96	1.04	0.94
CASE-10	0.61	0.63	0.97	0.94
CASE-11	1.19	0.67	1.78	1.55

表5. 6 内空変位とその比率 (斜め方向)

	③斜め45度 (mm)	④斜め135度 (mm)	斜め方向変形比 ③/④	斜め方向応力比
CASE-5	0.57	0.44	1.30	1.12
CASE-6	0.44	0.45	0.98	0.95
CASE-7	0.64	0.15	4.27	1.91
CASE-8	0.47	1.07	0.44	0.67
CASE-9	0.76	0.65	1.17	1.12
CASE-10	0.49	0.39	1.26	1.12
CASE-11	0.45	0.94	0.48	0.67

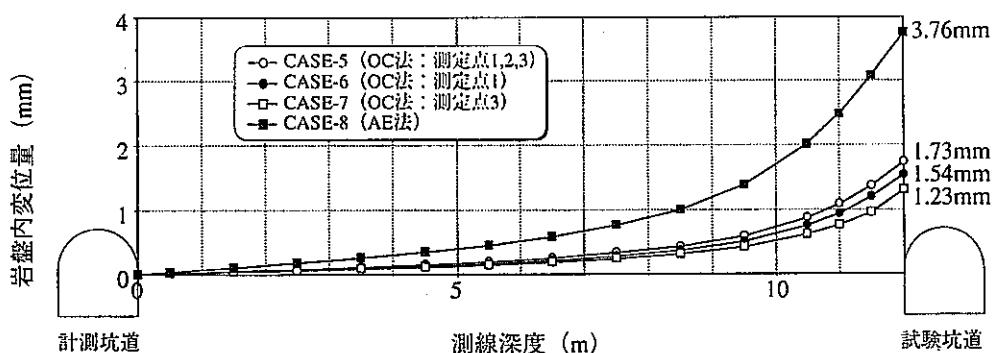


図 5. 3 水平方向の岩盤内変位分布図 (CASE-5～CASE-8 : STAGE-3)

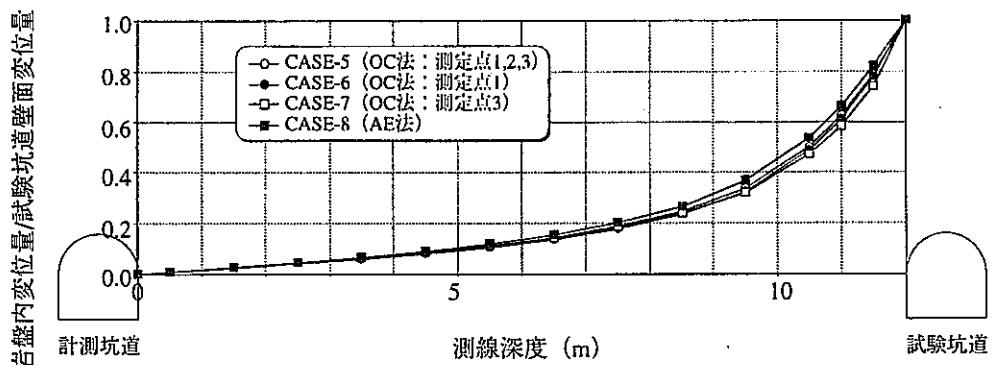


図 5. 4 水平方向の岩盤内変位モード図 (CASE-5～CASE-8 : STAGE-3)

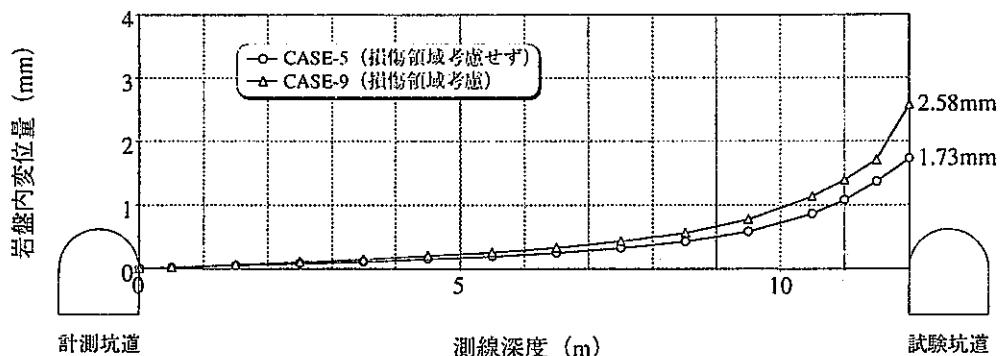


図 5. 5 水平方向の岩盤内変位分布図 (CASE-5, CASE-9 : STAGE-3)

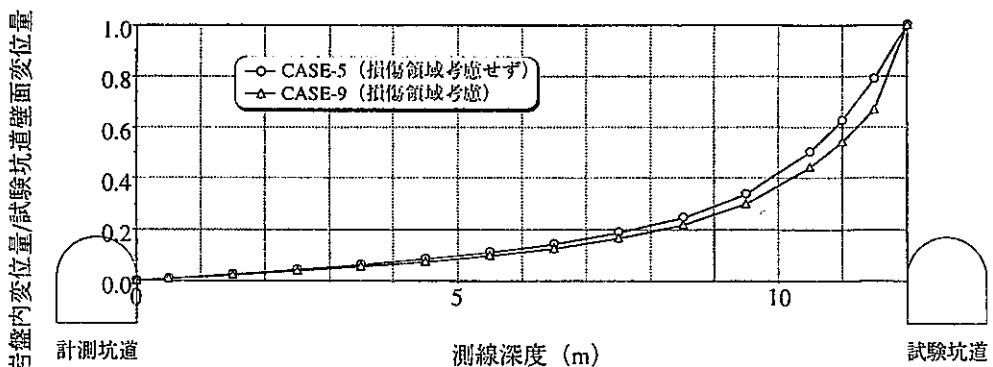


図 5. 6 水平方向の岩盤内変位モード図 (CASE-5, CASE-9 : STAGE-3)

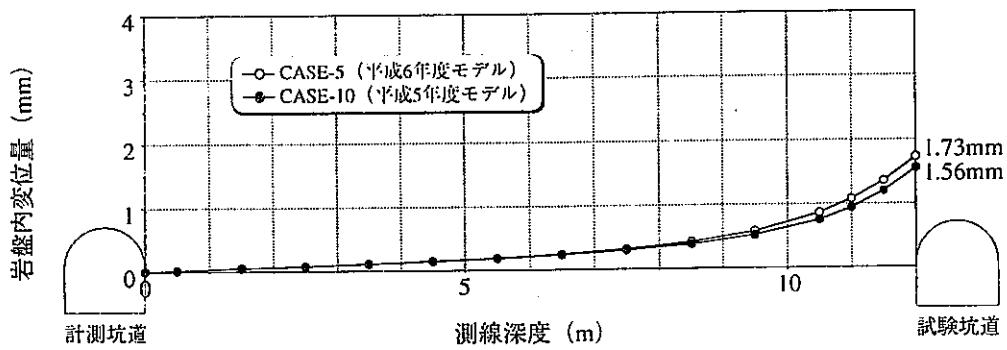


図 5. 7 水平方向の岩盤内変位分布図 (CASE-5, CASE-10 : STAGE-3)

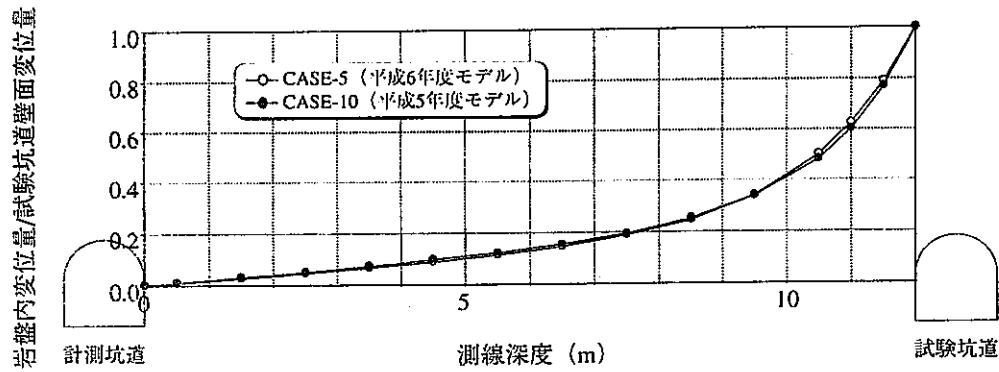


図 5. 8 水平方向の岩盤内変位モード図 (CASE-5, CASE-10 : STAGE-3)

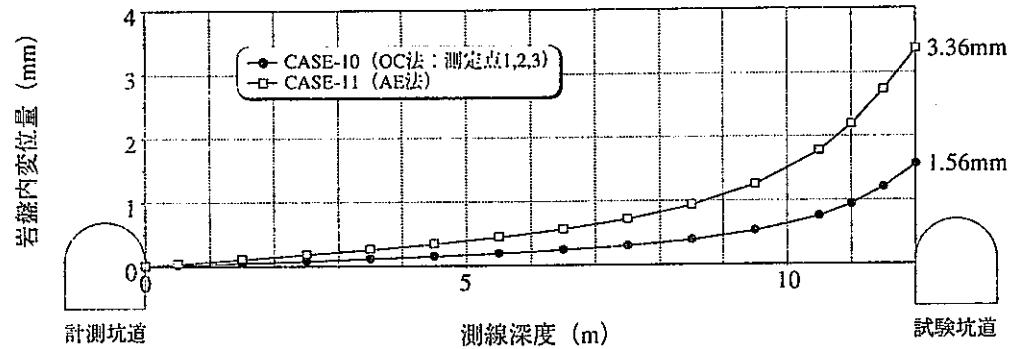


図 5. 9 水平方向の岩盤内変位分布図 (CASE-10, CASE-11 : STAGE-3)

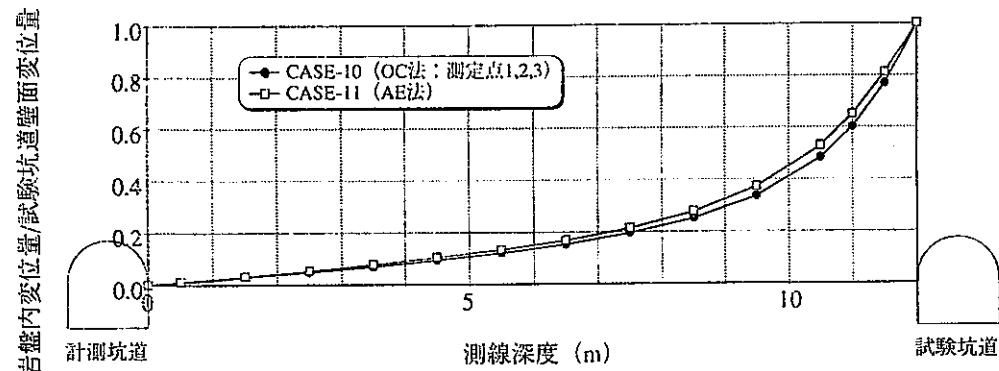


図 5. 10 水平方向の岩盤内変位モード図 (CASE-10, CASE-11 : STAGE-3)

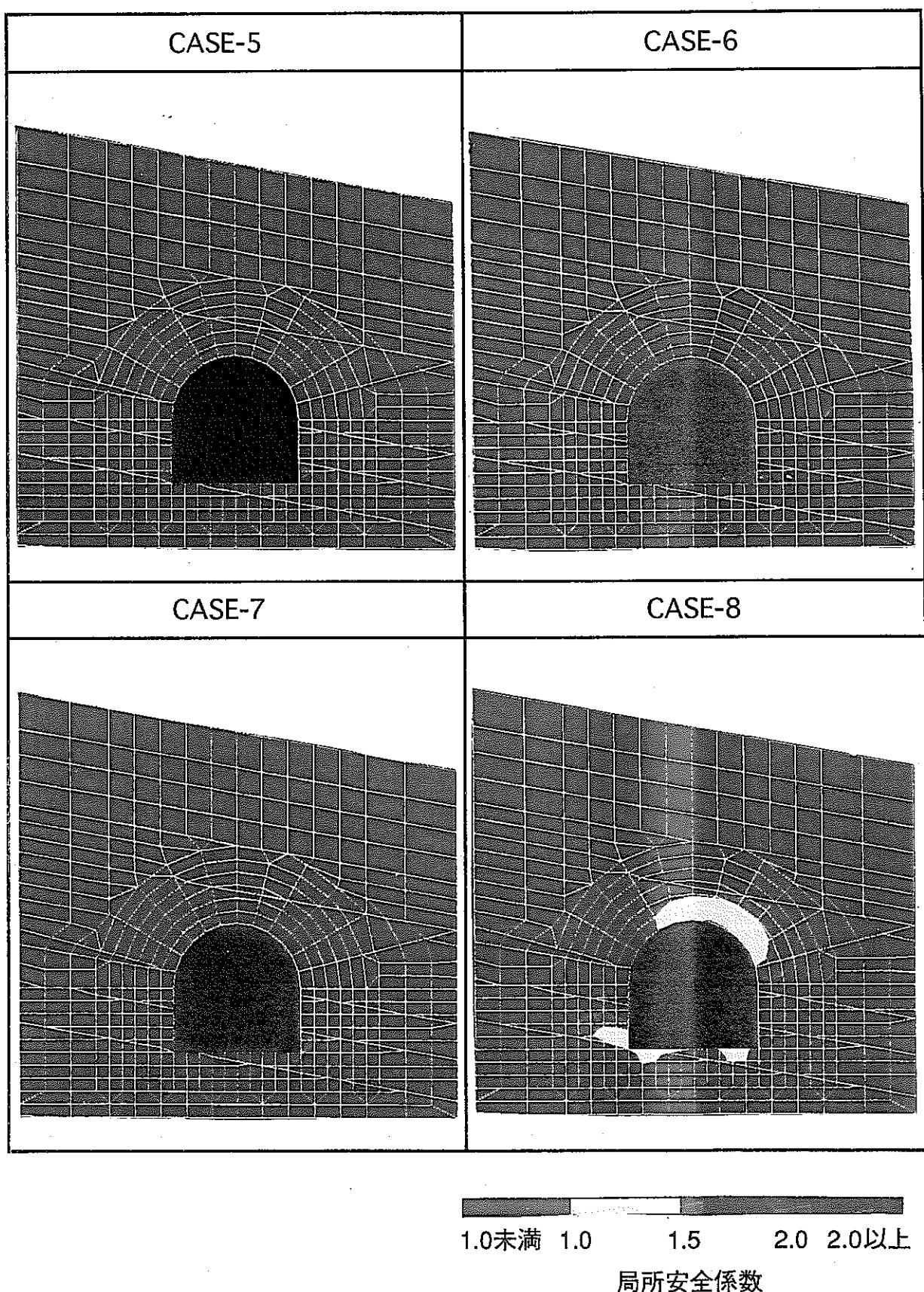


図5.11 局所安全係数の分布 (STAGE-3：最終状態)

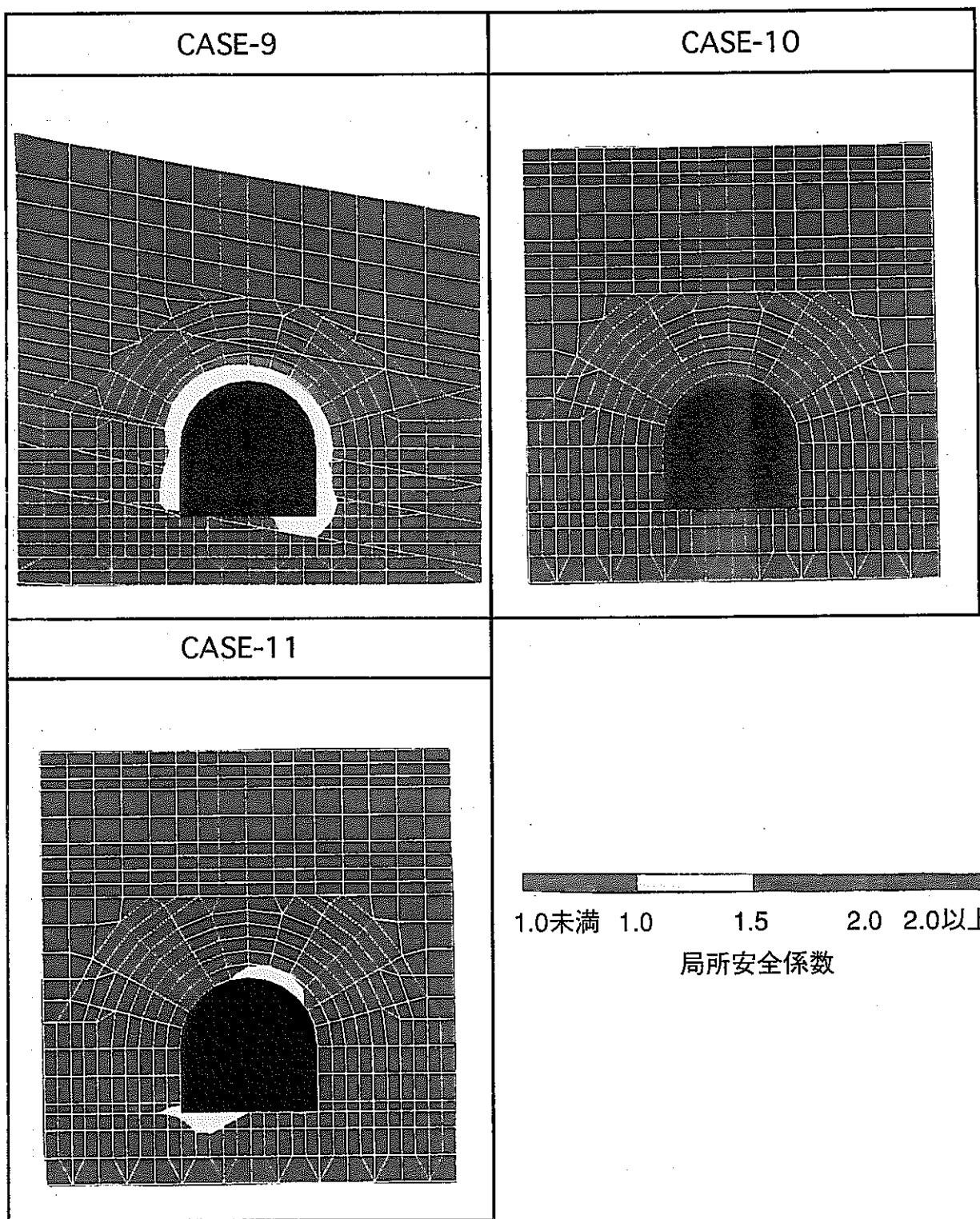


図5.12 局所安全係数の分布 (STAGE-3: 最終状態)

5. 4 考察

(1) 初期応力の相違による影響 (CASE-5～CASE-8 の比較、CASE-10とCASE-11の比較)

(a) 変位分布

①坑道壁面の変形

表5.4～表5.6から、以下のようなことが考察される。

最大主応力値が最も大きいCASE-8 ($\sigma_1=3.05\text{MPa}$) の、主方向に近い水平方向の変位が最大変位 (1.34mm) となる。他の値は、初期応力に大きな差がないため、同程度の変位量 (天端沈下: 0.25mm～0.30mm, 水平内空変位: 0.54mm～0.69mm, 下盤浮上がり: 0.31mm～0.42mm) となっている。ただし、CASE-7 に関しては、最小主応力が0.87MPaと他に比べ小さい値であるが、その方向が51°と鉛直水平方向から離れた角度であるため、水平・鉛直方向の変位に対して影響が少なかったと考えられる。

初期応力状態をほぼ等方的に設定したCASE-5, 6 は掘削による変形モードもほぼ等方的である。初期応力が異方的であるCASE-7, 8 について、CASE-7 は、斜め方向の応力比が1.9であるのに対し、同一方向の変形比が4.3となり、ともに1.0より大きな値を示し異方的であることがわかる。また、CASE-8 も同様に、水平・鉛直方向の比が1.6であるのに対し、同一方向の変形比が1.9となった。これらのことから、均質な力学特性を持つ岩盤はもとより、力学特性の異なる2種類の層からなる互層構造である岩盤を掘削した場合でも、最大主応力の方向に大きな変形が発生することが考えられる。

②坑道周辺の岩盤内変位

図5.3および図5.4から以下のようなことが考察される。

解析結果から、試験坑道壁面での変位量は、CASE-5 (1.73mm), CASE-6 (1.54mm), CASE-7 (1.23mm), CASE-8 (3.76mm) という結果であった。これに対し、岩盤内変位のモード (図5.4) に着目すると、4つのケースでほとんど差がないことが分る。

初期応力の大きさおよび方向の相違によって岩盤内変位の大きさのみに相違が確認された原因是、坑道に対して水平方向の変位は、水平方向の初期応力の大きさに応じて相対的に変化するためである。よって、初期応力の設定の相違は、岩盤内変位でみる限り、変位量には影響を及ぼすが、そのモードに及ぼす影響は少ないと言える。

図5.9および図5.10に示すCASE-10とCASE-11の比較からも同様の結果が得られる。

(b) 応力分布

図5.11に示す、坑道周辺の局所安全係数の分布から安定性低下領域の発生位置や幅に与える影響について考察する。OC法の結果に基づき初期応力を設定したCASE-5, 6, 7 には安定性低下領域が殆ど発生せず (最大でCASE-7: 幅25cmの範囲)、局所安全係数もすべて1.5以上である。これに対して、AE法の結果に基づき初期応力を設定したCASE-8 では坑道の天端右に局所安全係数1.0未満の領域が発生し、天端右 (幅75～100cmの範囲) や下盤 (幅75～100cmの範囲) に安定性低下領域が確認できる。この相違が生じた原因として、OC法での応力の平均 (CASE-5: 1.57MPa, CASE-6: 1.42MPa, CASE-7: 1.28MPa) がAE法での応力の平均 (CASE-8: 2.36MPa) と比較して小さかったことと、AE法での応力が異方的であったことが考えられる。

CASE-10とCASE-11の比較からも同様のことが考えられる。

今回の解析において、初期応力の設定の相違は、安定性低下領域でみる限りその影響は大きいと言える。初期応力の大きさは安定性低下領域の大きさ（壁面からの幅）を決定し、初期応力の方向は安定性低下領域の分布位置を決定すると考えられる。

(2) 岩盤モデルの相違による影響 (CASE-5 と CASE-10 の比較)

(a) 変位分布

①坑道壁面の変形

表 5.4～表 5.6 から、以下のようなことが考察される。

地層を 10° 傾けたモデル (CASE-5) と、地層を水平と見なしたモデル (CASE-10) の変形量を比較すると、天端沈下で 0.30mm と 0.26mm 、水平内空変位で 0.69mm と 0.61mm 、下盤の浮上がりは両ケースとも 0.37mm となった。以上のように両ケースの差はわずかであった。変形のモードについても両ケースともほぼ同程度の値を示している。

この、わずかの差が生じた原因は、地層を 10° 傾けたモデル (CASE-5) では、坑道周辺（天端、下盤）の岩盤が粗粒グループであるのに対し、地層が水平なモデル (CASE-10) では、坑道周辺の岩盤のほとんどが細粒グループとなっているためと考えられる。この 2 つのグループの変形係数の違いは、粗粒が 1.47GPa 、細粒が 1.96GPa であり、その差が小さいために CASE-5 と CASE-10 の差も小さくなつたと考えられる。

②坑道周辺の岩盤内変位

図 5.7 および図 5.8 から以下のようなことが考察される。

坑道壁面の変形と同様に両ケースの差はわずかであることが分る。岩盤内変位およびそのモードに対しても、両ケースのモデルを構成している 2 種類の岩盤の変形特性に大きな差がないことが、CASE-5 と CASE-10 の差を小さくしたと考えられる。

(b) 応力分布

図 5.11 および図 5.12 に示す、坑道周辺の局所安全係数の分布から安定性低下領域の発生位置や幅に与える影響について考察する。

地層を 10° 傾けたモデル (CASE-5) では、天端と下盤で安定性低下領域が発生したのに対し、地層を水平と見なしたモデル (CASE-10) では安定性低下領域はほとんど発生しなかった。

これは、CASE-5 は坑道周辺（天端、下盤）位置の岩盤が粗粒グループであるのに対し、CASE-10 では坑道周辺の岩盤のほとんどが細粒グループであるためであり、粗粒グループに比べ細粒グループは、力学特性の粘着力 (C) が大きいためと考えられる。

岩盤モデルの地層の傾きの有無により、坑道周辺の力学特性の異なる層の配置が変化するため、それに伴い安定性低下領域の分布も変化すると考えられる。つまり、安定性低下領域の分布は、岩盤の力学特性の粘着力が小さいほど広くなると考えられる。

(3) 掘削影響領域を考慮することによる影響 (CASE-5 と CASE-9 の比較)

(a) 変位分布

①坑道壁面の変形

表 5.4～表 5.6 から、以下のようなことが考察される。

掘削影響領域を考慮していないCASE-5に対し、考慮したCASE-9は変形量が大きくなっている。天端沈下で0.30mmに対し0.42mm、水平内空変位で0.69mmに対し1.00mm、下盤浮上がりで0.37mmに対し0.54mmである。坑道壁面の変形モードは、鉛直水平方向の比(CASE-5 : 1.0, CASE-9 : 1.0)、斜め方向の比(CASE-5 : 1.3, CASE-9 : 1.2)ともにほぼ同じ値となっている。

以上より、掘削影響領域を考慮することにより、坑道壁面の変形の絶対量には影響を及ぼすが、坑道壁面の変形モードに及ぼす影響は少ないと言える。

②坑道周辺の岩盤内変位

図5.5および図5.6から以下のようなことが考察される。

解析結果から、試験坑道壁面での岩盤変位量は、掘削影響領域を設定しない場合(CASE-5) 1.73mmで、掘削影響領域を設定した場合(CASE-9) 2.58mmである。岩盤内変位のモード(図5.6)に着目すると、試験坑道壁面から0.5mの位置での変位量は、掘削影響領域を設定しない場合(CASE-5) 坑道壁面変位量の80%程度であり、掘削影響領域を設定した場合(CASE-9) 坑道壁面変位量の65%程度であり、両者に差がある。

掘削影響領域を考慮することにより坑道周辺の変形係数が低下し、変位量が大きくなり、さらに、坑道近傍での岩盤内変位の発生の割合が大きくなると考えられる。

(b) 応力分布

図5.11および図5.12に示す、坑道周辺の局所安全係数の分布から安定性低下領域の発生位置や幅に与える影響について考察する。

掘削影響領域を設定しない場合(CASE-5)、安定性低下領域は天端左および下盤に限定され、その幅も最大で25cm程度である。それに対し、掘削影響領域を設定した場合(CASE-9)、安定性低下領域は坑道壁面全周に発生し、その幅は50cm程度であり掘削影響領域の設定範囲とほぼ一致している。

掘削影響領域を考慮することにより坑道周辺の粘着力が小さくなり、坑道周辺の安定性が低下すると考えられる。

5. 5 まとめ

試験坑道掘削時の坑道周辺岩盤における応力状態の変化や岩盤の変位分布を予測し、またこのような応力状態や変位分布に対する岩盤のモデル化、初期応力（大きさ・方向）さらに掘削影響領域といったパラメータの影響を把握することを目的とし、2次元平面ひずみ状態での有限要素法による弾塑性解析を実施した。

得られた結果をまとめると以下のようなになる。

(1) 初期応力の相違による影響

- ・解析対象岩盤の互層の構造および傾斜を考慮し、OC法の3測点から初期応力を算定した解析モデルである基本ケース（CASE-5）の結果より、実際に測定することができる坑道掘削時から最終状態までの変位増分は、天端沈下で0.30mm、水平内空変位で0.69mm、下盤浮上がりで0.37mmと予測された。また、計測地点における水平方向の岩盤内変位の最大値は、試験坑道の壁面で1.73mmと予測された。
- ・初期応力の最大主応力方向に坑道の変形が大きく発生し、初期応力が異方的であれば、坑道の変形モードも異方的となる。
- ・初期応力が大きいほど坑道周辺岩盤の変位量は大きくなる。しかし、初期応力の大きさの違いによる岩盤内変位モードの差は少ない。
- ・試験坑道を掘削することによって破壊状態に達する領域はほとんど生じず、坑道周辺岩盤はほぼ弾性的な挙動を示すことが分った。

(2) 岩盤モデルの相違による影響

- ・解析対象岩盤を構成している粗粒部と細粒部の変形特性の差が小さいために、堆積層の傾きの有無による坑道周辺岩盤の変位量の差は少ない。
- ・解析対象岩盤を構成している粗粒部と細粒部では変形特性に加え強度特性も異なるため、坑道周辺の強度特性の粘着力が小さい粗粒部が多くなると、弾性範囲内ではあるが安全性低下領域は大きくなる。

(3) 掘削影響領域を考慮することによる影響

- ・掘削影響領域を考慮することにより、坑道周辺岩盤の変位量は大きくなり、特に掘削影響領域を考慮した坑道近傍での変位量が大きくなる。しかし、坑道壁面の変形モードには影響を与えない。
- ・掘削影響領域を考慮した範囲の粘着力が小さくなるため、その範囲内の局所安全係数が低下する。

6.まとめ

試験坑道周辺岩盤の掘削前の力学的・水理学的な特性・状態を把握すること、および、数値解析により坑道掘削に伴う岩盤の変位や応力変化を予測することを目的として、平成5年度に引き続き各種の事前調査・解析を実施した。この結果、以下の成果が得られた。

(1) コア観察および孔内壁面観察

- ・計測坑道と試験坑道の間には礫岩、泥岩および砂岩が分布しており、主として、坑道周辺に近い部分は細粒の岩石、壁面から離れた部分では粗粒の岩石が分布している。細粒の岩石と粗粒の岩石の境界面の傾斜角は、比較的低い。
- ・孔内壁面観察で観察されたき裂の本数は、MD-1孔では1mあたり2.6本、MD-2孔では1.5本程度であった。この差の原因として、ボーリングの施工条件や孔内壁面観察の分解能の相違が考えられる。
- ・き裂の卓越方向は、ボーリング孔軸に対してほぼ直角であった。この傾向は、平成5年度実施分と概ね一致している。但し、ボーリングの方向が観察結果に影響している可能性がある。

(2) 孔内岩盤変位計の設置および計測

- ・岩盤内変位を測定するため、従来から使用している多点式変位計と東濃鉱山では未使用機器であるスライディングミクロメーターを設置し、初期値を測定した。
- ・設置直後と2ヶ月後の測定結果は、この期間内に外的変動要因がないにもかかわらず、両機器ともに一部の計測点で測定誤差以上の値が得られた。この要因として、多点式変位計はアンカーと孔壁の接触状態の変化が、スライディングミクロメーターはケーシング、モルタル、孔壁の接触状態が変化したためと考えられる。
- ・初期値設定は、坑道掘削前に数回の測定を実施して、変位量の変動がないことを確認しその値を初期値とする必要がある。

(3) 事前解析

平成5年度の解析モデルに対し、対象岩盤構造をより正確に反映するため初期応力の大きさ・方向、岩盤の堆積面の傾斜、掘削影響領域を考慮した解析モデルでこれらの影響を把握した。

- ・初期応力の相違による影響は、初期応力の最大主応力方向に坑道の変形が大きく発生し、初期応力が異方的であれば坑道の変形モードも異方的となる。また、初期応力が大きいほど周辺岩盤の変形量は大きくなる。
- ・岩盤モデルの相違による影響は、解析対象岩盤を構成している粗粒部と細粒部の変形特性の差が小さいため、堆積層の傾きの有無による坑道周辺岩盤の変位量の差は少ない。
- ・掘削影響領域を考慮することによる影響は、特に掘削影響領域を考慮した坑道近傍での変位量が大きくなるが坑道壁面の変形モードには影響を与えない。また、掘削影響領域を考慮した範囲の粘着力が小さくなるため、その範囲内の局所安全係数が低下する。

これらにより、試験坑道周辺岩盤の掘削前の力学特性・状態を把握すること、および、坑道掘削に伴う岩盤の変位などをより詳細に予測すること、という当初の目的は達成されたと考える。また、今回、設置した孔内岩盤変位計の初期値を測定して、計測機器の有効性と問題点を把握することができた。

今後は、平成7年度に機械掘削により試験坑道を掘削し、掘削中の調査を行うとともに平成8年度以降、事後調査・解析を順次実施していく計画である。

平成5年度および6年度の事前調査・解析による成果のうち、コア観察および孔内壁面観察で明らかとなった地質とき裂の状況と、事前解析で得られた岩盤変位量と内空変位量および応力変化は、坑道掘削中および掘削後での調査により確認される。

7. 謝辞

今回の事前調査・解析のうち、大部分は、大成建設と大林組への委託研究として実施した。ここに記して関係者に謝意を表します。

8. 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－掘削による緩み領域の計測・評価手法の研究開発－，動燃公開資料 PNC TN7410 90-009 TR/GE 89-07
- 2) 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，動燃公開資料 PNC TN7410 94-046 TR/GE 92-06
- 3) 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－，動燃公開資料 PNC TN7410 92-051 TR/GE 92-07
- 4) 湯佐泰久：立坑掘削影響試験－ワークショップ－発表論文集－，動燃公開資料 PNC TN7410 92-052 TR/GE 92-08
- 5) 杉原弘造・大石清隆・榎利博・石島文代：機械による掘削影響試験の事前調査・解析－平成5年度実施分－，動燃公開資料 PNC TN7410 94-049 TR/GE 94-02
- 6) 土質工学会：岩の調査と試験，1989

—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）：国際ストリバプロジェクト， 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：広域地下水流动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动影響予測解析， 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 H. Yoshida, 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帶調査－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 濱尾俊弘・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・杉原浩弘・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

TR/GE 92-08 湯佐泰久：立坑掘削影響試験ワークショップ－発表論文集－,
PNC TN7410 92-052

TR/GE 93-01 H. Yoshida, T. Seo, T. Nohara, K. Ota, K. Hama, K. Kodama, T. Iwatsuki :Data
Compilation of Geoscientific Studies of Tono Uranium
Deposits, Central Japan, PNC TN7410 94-015

TR/GE 94-01 前川恵輔・梅田浩司・小出馨・今井久・柳澤孝一：我が国を対象とし
た地下水流動解析－その2 東北日本を対象とした地下
水流動解析－, PNC TN7410 94-029

TR/GE 94-02 杉原弘造・大石清隆・榎 利博・石島文代：機械による掘削影響試験
の事前調査・解析－平成5年度実施分－,
PNC TN7410 94-049

TR/GE 95-01 横 利博：ボーリング孔からの湧水および遮水パッカーの効果に関する予備解析， PNC TN7410 95-002

TR/GE 95-02 稲葉秀雄・前川恵輔・小出 韶・柳澤孝一：我が国を対象とした地下水水流動解析－その3 北海道を対象とした地下水水流動解析－，
PNC TN7410 95-012