

## ニアフィールドの応力評価手法の開発(IV)

— 概要版 —

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究概要報告書)

技術資料		
開示区分	レポート No.	受領日
又	J/205 95-001	1995. 8. 3
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室		

1995年2月

大成建設株式会社

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒319-11  
茨城県那珂郡東海村大字村松4-33  
動力炉・核燃料開発事業団  
東海事業所  
技術開発推進部・技術管理室

# ニアフィールドの応力評価手法の開発(Ⅳ)

— 概要版 —

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究概要報告書)

1995年2月

大成建設株式会社

## ニアフィールドの応力評価手法の開発 (IV)

山本 卓也\*

## 要 旨

本研究は、人工バリアシステムの仕様と性能評価のためのニアフィールド条件を明らかにする研究の一環として実施したものである。この中で、特に重要な課題であるニアフィールドの応力評価手法の開発を目的として、本年度は昨年度に引き続き、掘削初期の空洞変形挙動評価、人工バリア及び周辺岩盤の長期挙動評価研究を実施した。

掘削初期の空洞変形挙動評価に関しては、平成3年度に実施した空洞安定解析の結果、深部地下空洞の設計手法の開発検討、および空洞変形挙動評価モデルの開発検討の2つが課題となった。深部地下空洞の設計手法の開発については、今年度は昨年度に引き続き、岩盤の物性値や計測データの得られている既存の空洞に対し、実測された先行変位を考慮した弾塑性モデルによる数値解析を行い、その適用性を評価した。また、空洞変形挙動評価モデルの開発検討については、昨年度実施した不連続体解析に関する文献調査結果に基づき、釜石鉱山での不連続面のデータや室内試験結果から解析モデルを設定した。最後に、掘削初期の空洞変形挙動評価に関する今後の課題を抽出し、整理した。

人工バリア及び周辺岩盤の長期挙動評価については、岩石の微視的構造を取り扱うための均質化理論を岩盤内の浸透問題に適用し、有限要素法により微視的特性を考慮した実流速を算定した。さらに、岩盤や岩石の超長期にわたる力学挙動を考慮する上での今後の課題をまとめた。

---

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

契約番号：060D0182

事業団担当部課室および担当者：東海事業所 環境技術開発部 地層処分開発室

間野 正

\*大成建設株式会社エンジニアリング本部エネルギー部

DEVELOPMENT OF NEAR-FIELD STRESS EVALUATION METHOD (PHASE IV)

T.Yamamoto\*

Abstract

This research was performed as part of a study to clarify the near-field conditions for specifications and performance evaluations of an artificial barrier system. The work carried out here includes the evaluation of tunnel deformation after excavation and the research into the long-term behaviour of the rock mass around the artificial barriers.

Through the research work performed in 1991 on the evaluation of tunnel deformation after excavation, two issues, the development on the design method of tunnels at depth and the evaluation of numerical model on tunnel deformation should be considered for a further research. The tunnels which field measurement data and rock mass properties are available were investigated. Displacement before excavation at the tunnel site selected here. Based on the literature survey, the tunnel deformation was numerically analyzed in order to evaluate the applicability of the elasto-plastic model.

Based on the literature survey last year the numerical model to solve the mechanical behaviour of a tunnel in a discontinuous rock mass is selected. Three different numerical techniques are applied to the tunnel excavation problem. The input data for the numerical analysis is derived from the data collected at the specific test site. The research plan on the stress evaluation in the near-field rock mass to be solved in the future is also discussed.

The homogenization theory to deal with the long-term behaviour of a rock mass around the artificial barriers is discussed. This theory is applied to the seepage problem through rock mass and the rate of seepage discharge is calculated by means of finite element analysis. The problems and future work are summarized when the homogenization theory is applied to the material which shows the time dependent behaviour.

---

Work performed by Taisei Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation. Contract No. 060D0182

PNC Liaison : Tadashi Mano, Geological Isolation Technology Sect., Waste Technology Development Division, Tokai Works

\*Taisei Corp., Engineering Division

## 全 体 目 次

	頁
1.掘削初期の空洞変形挙動評価研究	
1.1 はじめに	1-1
1.2 深部地下空洞の設計手法の開発	1-1
1.3 空洞変形挙動評価モデルの開発検討	1-27
謝辞	1-48
2.人工バリア及び周辺岩盤の長期挙動評価研究	
1.序論	2-1
2.非圧縮Stokes流の支配方程式と均質化の理論	2-1
3.モデル解析	2-8
4.結論	2-11
謝辞	2-12

1. 掘削初期の空洞変形挙動評価研究

# 目 次

	頁
1.掘削初期の空洞変形挙動評価研究	1-1
1.1 はじめに	1-1
1.2 深部地下空洞の設計手法の開発	1-1
1.2.1 嵐山トンネルの概要	1-3
1.2.2 計測データによる地山特性曲線の算出	1-5
1.2.3 軸対称解析による地山特性曲線	1-9
1.2.4 地山特性曲線の考察	1-10
1.2.5 原位置計測データの整理	1-12
1.2.6 平面ひずみ掘削解析	1-15
1.2.6.1 解析条件	1-15
1.2.6.2 解析結果および考察	1-19
1.2.6.3 まとめ	1-26
1.3 空洞変形挙動評価モデルの開発検討	1-27
1.3.1 不連続体解析入出力データの整理	1-27
1.3.1.1 解析手法の選定	1-27
1.3.1.2 各解析手法の入出力データの整理	1-27
1.3.2 解析モデルの作成	1-29
1.3.2.1 モデルの作成方法	1-29
1.3.2.2 不連続面データの整理	1-29
1.3.2.3 不連続体解析モデルの作成	1-32
1.3.3 処分坑道の解析	1-34
1.3.3.1 解析条件	1-34
1.3.3.2 解析結果および考察	1-37
1.3.4 まとめ	1-47
謝辞	1-48



## 1 掘削初期の空洞変形挙動評価研究

### 1.1 はじめに

本研究は、人工バリアシステムの仕様と性能評価のためのニアフィールド条件を明らかにする上で特に重要な課題であるニアフィールドの応力評価手法の開発を行うものである。本年度は、以下に示す掘削初期の空洞変形挙動評価研究を昨年度に引き続き実施する。

#### (1) 深部地下空洞の設計手法の開発

平成5年度には、弾塑性にひずみ軟化を考慮したモデル及びダイラタンシーを考慮したモデルを用いて事例解析を行い、設計手法の検討を行った。その結果、抽出された検討項目は以下のとおりである。

- ①ダイラタンシー特性の拘束圧依存性を考慮した空洞変形挙動評価手法の開発
- ②膨張性地山に対する空洞変形挙動評価手法の開発
- ③鍋立山トンネルに代り、解析対象にふさわしい現場計測データの取得
- ④各種構成方程式の有限要素法への導入

本年度は、③に着目して、道央自動車道路嵐山トンネルを対象とした解析を行い、設計手法の検討を行う。

#### (2) 空洞変形挙動評価モデルの開発

平成5年度は、粘弾塑性モデルまたは不連続体を扱えるモデルの文献調査を行い両モデルに関する基礎的な概念検討や問題点の抽出を行った。本年度は、不連続体を扱えるモデルを用いて処分坑道の掘削解析を実施し、モデル、手法間の相違について把握する。

### 1.2 深部地下空洞の設計手法の開発

今年度は、鍋立山トンネルに代り解析対象にふさわしい現場計測データとして、北海道縦貫自動車道嵐山トンネル現場計測データを対象とした解析を実施し、設計手法の検討を行う。

図-1.2.1に示すように、ニアフィールドの応力評価を有限要素法を用いて実施する場合、応力場を規定するパラメータは荷重項と剛性マトリックスの2つである。今年度の研究では、荷重項の中の地山特性曲線に着目して、原位置計測と三次元解析から算定したものとを比較検討する。次に、この地山特性曲線を用いて、施工段

階を考慮した平面ひずみ解析を実施し掘削に伴って発生する地中変位、支保工応力について、解析結果と計測値を比較検討する。研究のフローチャートを図-1.2.2に示す。

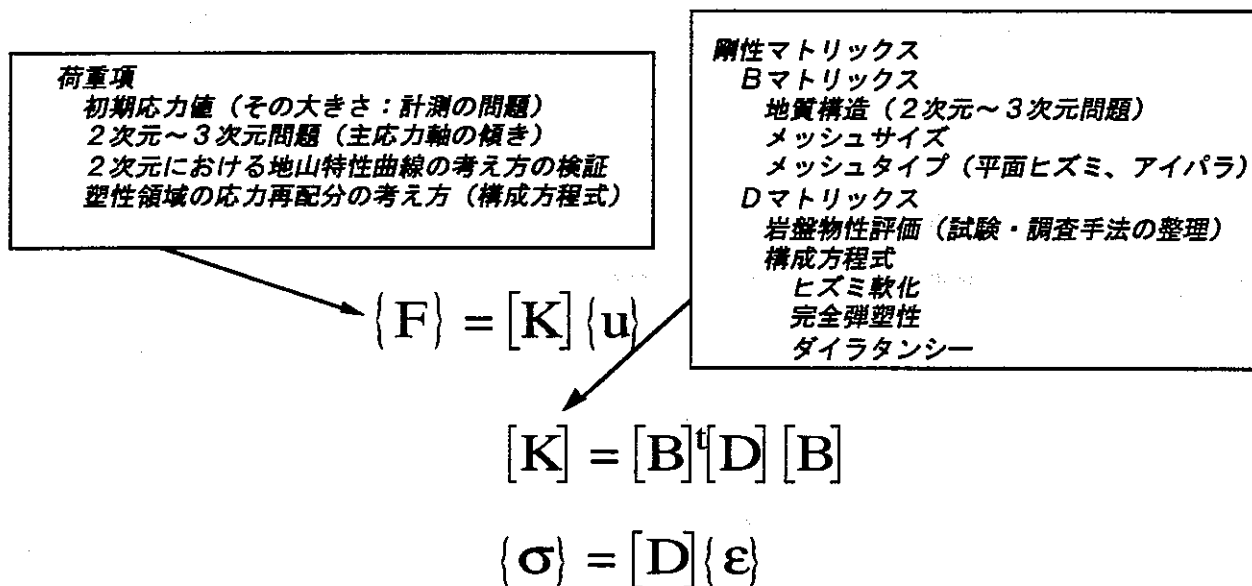


図-1.2.1 FEMによるニアフィールド応力評価パラメータ

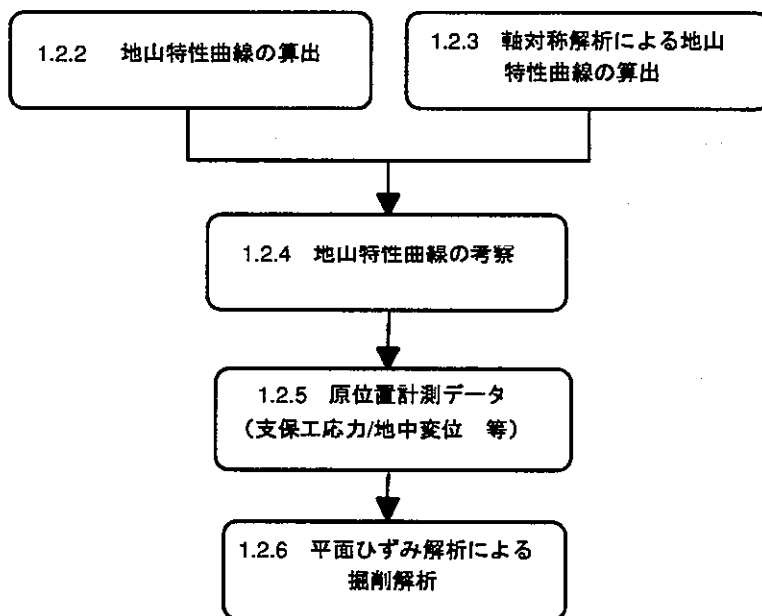


図-1.2.2 研究フローチャート

(1) 地山特性曲線の検討

原位置では、トンネルの掘削前から、地山の先行変位が計測されており、これを用いて地山特性曲線を算出する。(1.2.2 計測データによる地山特性曲線の算出)  
次に、原位置での地山特性曲線を得るために地山の境界条件(荷重条件)、物理条件(物性条件)を用いて軸対称解析を実施する。(1.2.3軸対称解析による地山特性曲線の算出)

原位置計測結果と解析結果から算出した地山特性曲線を比較し、嵐山トンネルの施工段階を考慮した解析に用いる地山特性曲線を検討する。(1.2.4地山特性曲線の考察)

(2) 施工段階を考慮した嵐山トンネルにおける掘削評価解析の実施

最初に解析結果の考察で用いるために、原位置計測データ(地中変位量、支保工応力)の整理を行う。(1.2.5 原位置計測データの整理)  
次に平面ひずみ掘削解析実施して設計手法として有限要素法を用いての検討を実施する。

1.2.1 嵐山トンネルの概要<sup>1),2)</sup>

北海道縦貫自動車道(札幌～旭川間)嵐山トンネルは、旭川市近郊の北西部にある嵐山(標高267m)を土被り147mで通過する延長1434mの2車線道路トンネルである。掘削は、NATMによる上半先進ショートベンチ工法(ベンチ長30m)であり、掘削は発破方式、ズリ出しはタイヤ方式、吹付けコンクリートは湿式を採用している。(図-1.2.1.1)

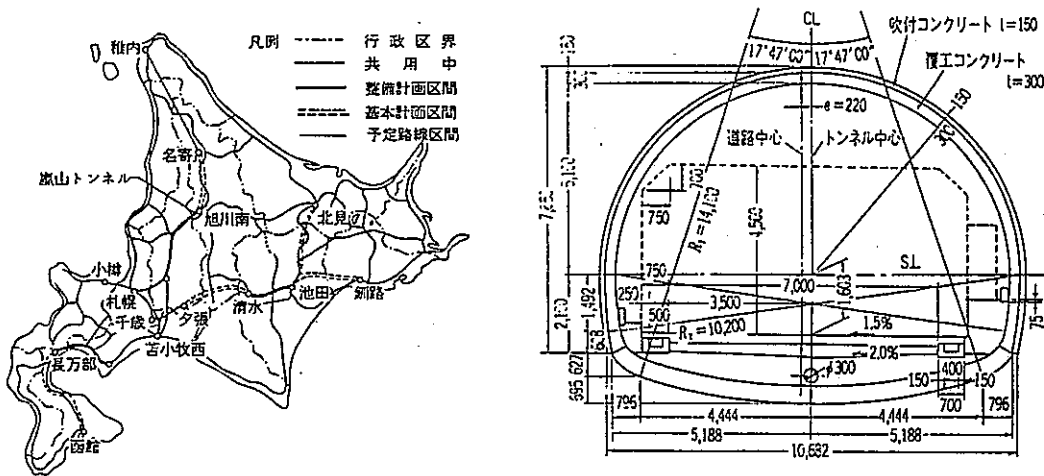


図-1.2.1.1 嵐山トンネル位置および標準断面図

(1) 地質

嵐山トンネルは日高山脈の西側に位置し、長さ約350kmの広域変成帯である神居古潭変成帯を通過する。(図-1.2.1.2)

地質は、千枚岩、結晶片岩(中生代の泥岩・火山灰・チャートなどが高圧・低温の変成作用によって再結晶して生成)、にカンラン岩と蛇紋岩が貫入している。地質構造は、南北の走向が卓越しており、尾根部に一部堅硬なカンラン岩があり、それをはさんで両側に葉片状～粘土状蛇紋岩が分布し、その外側に黒色、緑色、珪質、砂質などの結晶片岩が互層となって分布している。これらの地層は、トンネルと直交する走向で旭川側坑口方向に50～70°傾斜している。

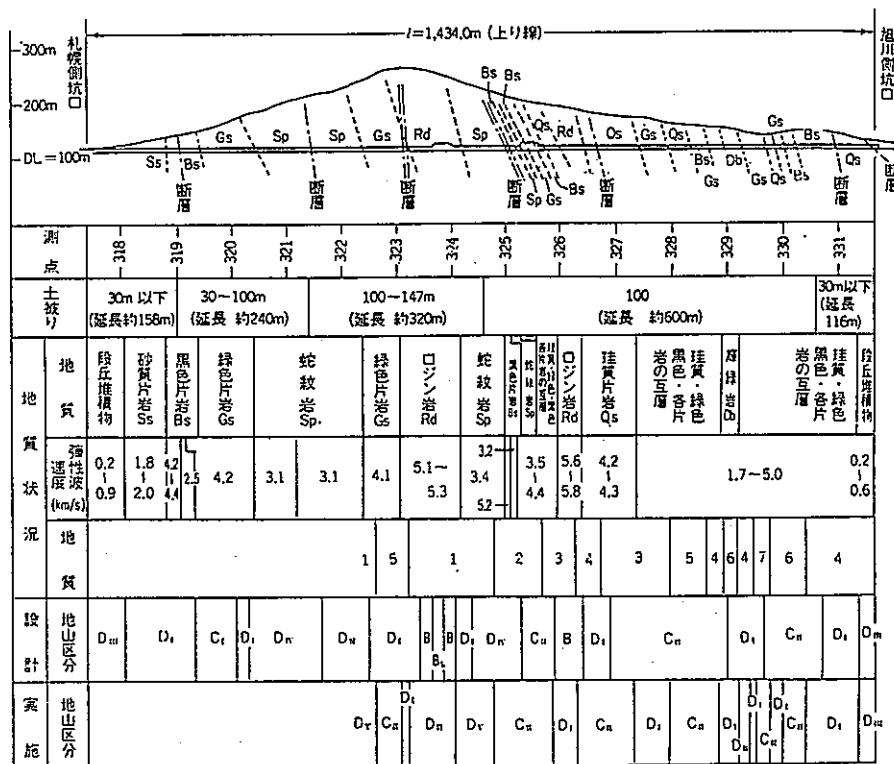
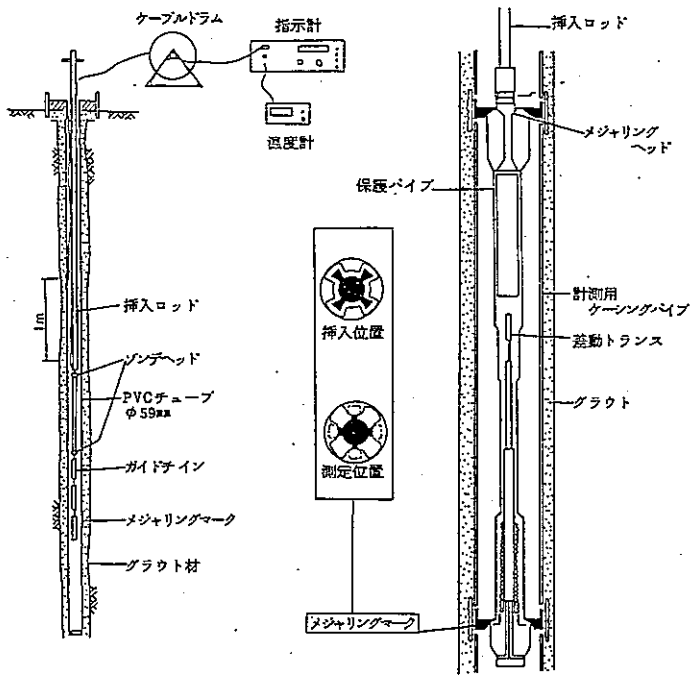


図-1.2.1.2 嵐山トンネル地質縦断図

(2) 計測項目

嵐山トンネルは一般に掘削が非常に困難な蛇紋岩地帯を通過する(総延長の30% : 400m)。嵐山トンネルでは日常の施工管理のための計測A(天端沈下・内空変位)、地山条件に応じて計測Aに追加する計測B(ロックボルト軸力、支保工応力、吹付応力、背面土圧、地中変位計測)が実施された。

さらに、掘削に伴う蛇紋岩の変形挙動を把握するために測点(STA.) 324+46.0, 50.0の位置で地山の先行変位をトリベックを用いて計測した。(図-1.2.1.3)



### 仕様一覧

(1) トリベックソナ	
測定深さ延長	1000mm
挿入方向 (Z)	差動トランス
検出センサー	20mm (±10mm)
測定範囲	±0.003mm
測定精度	<0.002mm/℃
温度係数	<0.002mm/℃
水平方向 (X, Y)	
検出センサー	サーボアナログセンサー
測定範囲	±5.5/±14.5° 切替式
測定精度	±0.003mm
温度係数	<0.005mm/℃
耐水性	15kg/l/cm <sup>2</sup>
動作温度	0℃~40℃
(2) アナログ指示計	
動作電圧	110V AC/12V DC
測定範囲	孔軸方向: ±10mm 水平方向: ±5.5/±14.5° 切替式
測定精度	孔軸方向: 0.001mm 水平方向: 0.015mm
動作温度	0℃~40℃
(3) 校正器	
インバースチール校正器	997.5mm及び1002.5mm
動作温度	0℃~40℃
(4) 計測用ケーシングパイプ	
メジャリングマーク	外径 70.0mm, 長さ 124.0mm (キャリング管)
PVCチューブ	外径 59.0mm, 内径 51.5mm, 長さ 980.0mm

図-1.2.1.3 トリベック概要

- 参考資料 1) 稲葉、西谷：神居古潭蛇紋岩地帯にトンネルを掘る道央自動車道嵐山トンネル Vol.19.1988.6 pp.25-36  
2) 稲葉、西谷：神居古潭蛇紋岩地帯にトンネルを掘る道央自動車道嵐山トンネル その2 Vol.20.5.1989.5 pp.15-23

## 1.2.2 計測データによる地山特性曲線の算出

トンネルの掘削解析においては、3次元的支持効果を便宜的に2次元解析に取り込むために応力解放法が用いられている。応力解放法とは、図-1.2.2.1に示すように切羽の進行と地圧の解放割合（内空変位）の発生割合の関係（特性曲線）をあらかじめ仮定して、掘削解放力を切羽の進行にあわせて、徐々に作用させる方法である。

嵐山トンネルでは、蛇紋岩部において掘削に伴う変位量および掘削による地山内応力再配分状況を把握するため、地上から2本の鉛直ボーリング（延長117m,112m）を行い、トリベックを用いてボーリング軸方向1m毎の3次元変位を計測している。ここでは、トリベックを用いた計測結果から地山特性曲線の算出を試みる。

### 1) 先行変位計測

図-1.2.2.1に示すように、3次元弾性体中での円孔掘削問題では、掘削に伴う変位は、検討位置から-2D（D：円孔の直径）から発生し、+3Dで収束する。

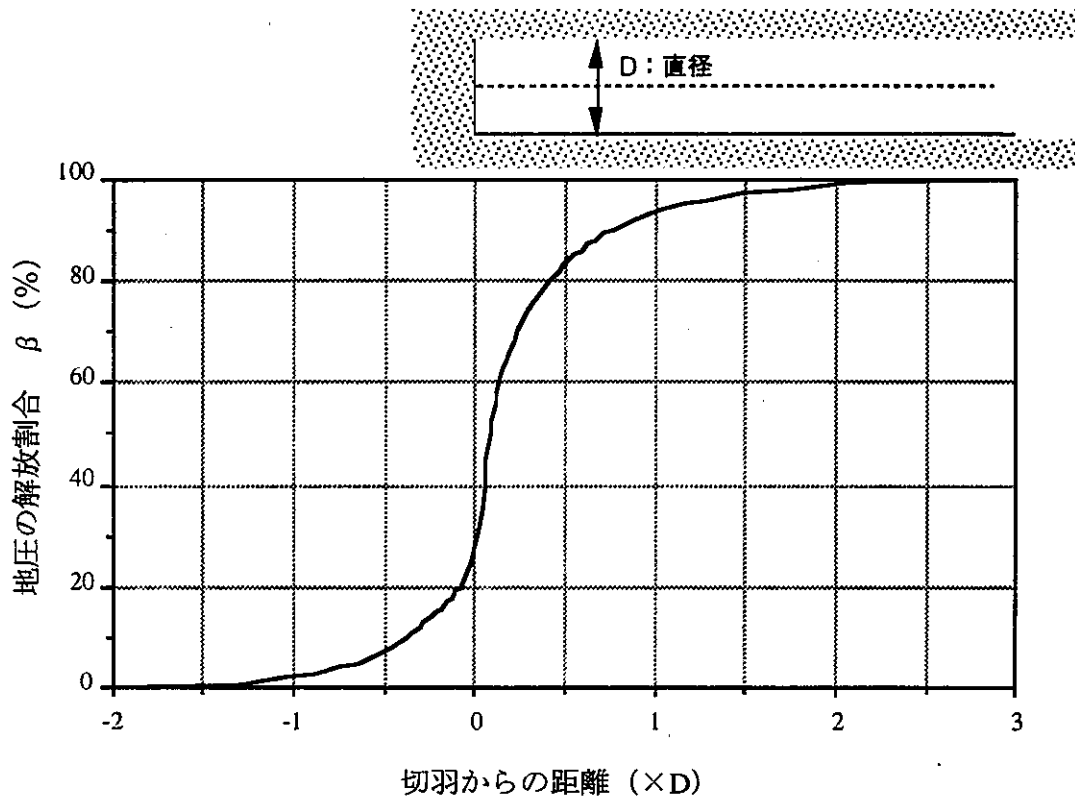


図-1.2.2.1 地山特性曲線 (弾性理論解)

図-1.2.2.2に切羽進行および計測一覧を示す。これから、トリベックによる計測は昭和62年9月26日 (上半:  $-5D$ 、下半:  $-10D$ ) に開始され、昭和63年1月30日 (上半:  $+15D$ 、下半:  $+17D$ ) に終了しており、トリベックによる計測は、掘削に伴う岩盤変位を、発生前から収束時まで実施されたことが分かる。また、嵐山トンネルでは、上半先進ベンチ工法を採用したので、上半が検討位置 (STA.324+48.0) から  $+3D$  進んだ時点では下半は  $-1.8D$  に位置しており、地山特性曲線の検討では、上半掘削による地山変位と下半掘削による地山変位を分離して考察することが可能と考える。

図-1.2.2.3に先行変位計測の概要図を示す。図中には、上半 (半円) の重心位置に等価円中心を一致させたものを示す。No.1孔 (計測深度95m) で得た垂直/水平変位から等価円中心への変位量を、No.2孔 (計測深度96,97m) で得た水平変位から等価円中心への変位量を用いて地山特性曲線を設定する。

図-1.2.2.4にNo.1孔、No.2孔による計測から得た地山特性曲線を示す、これから、切羽到達時 (切羽からの距離  $0.0D$ ) に最終変位量の約40%の変位が発生していることが分かる。

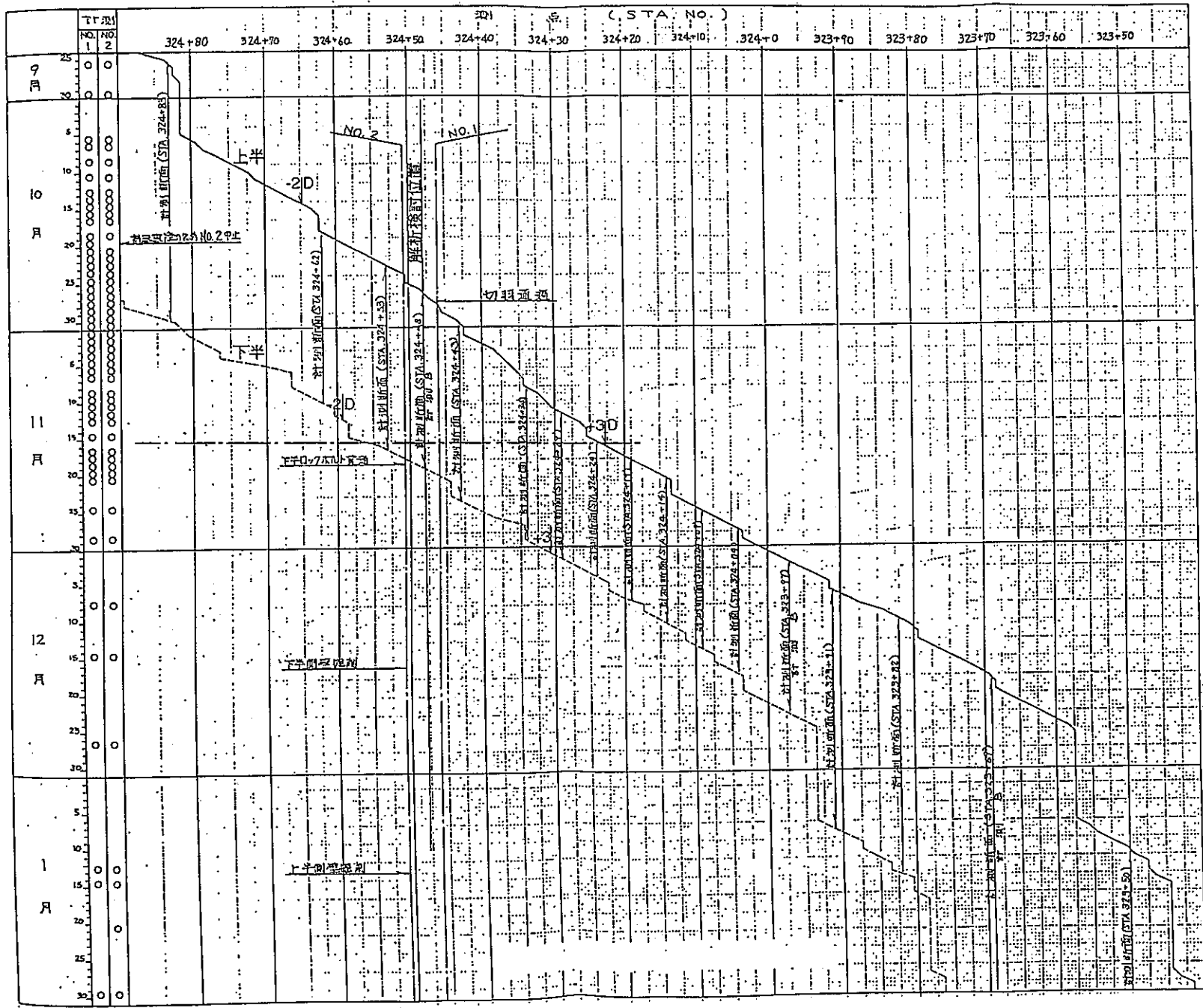


図-1.2.2.2 切羽進行および計測一覽

上半掘削断面積

$$A = \frac{1}{2} \pi r^2$$

$$= \frac{1}{2} \pi 5.85^2$$

$$= 53.76 \text{m}^2$$

等価円直径 (D)

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

$$= \sqrt{\frac{4 \times 53.76}{\pi}}$$

$$= 8.27 \approx 8.3(\text{m})$$

等価円中心

半円の重心位置と仮定する

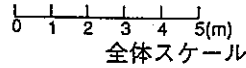
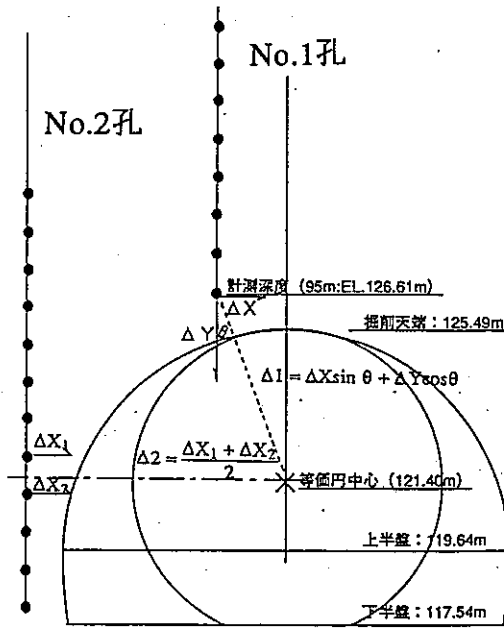
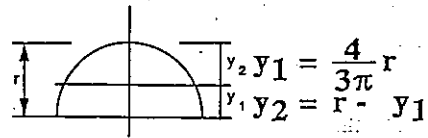


図-1.2.2.3 先行変位計測 概要

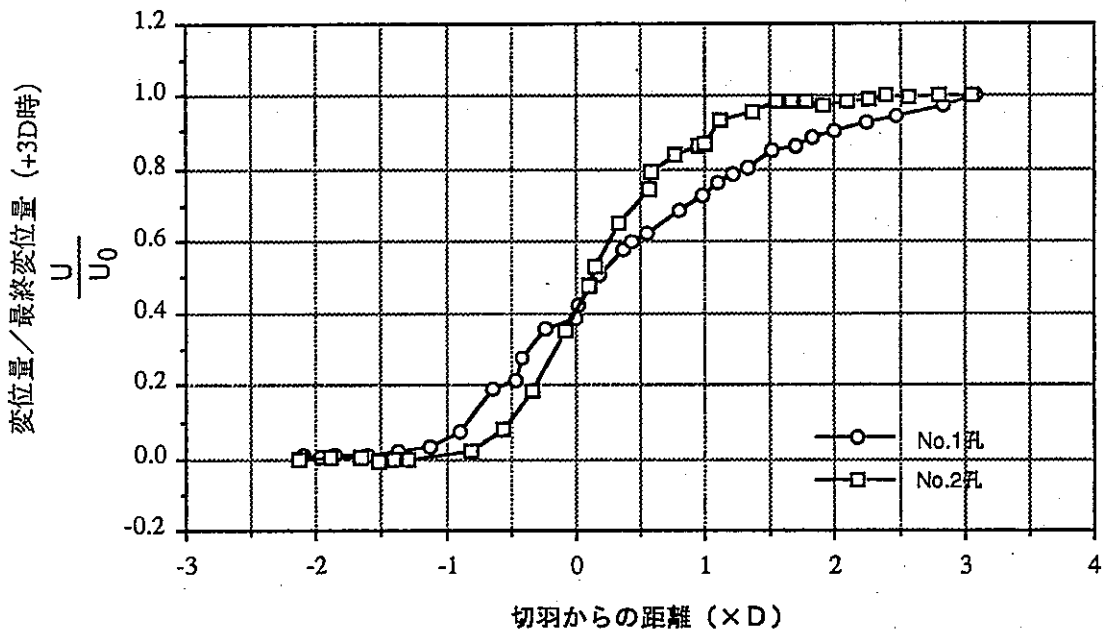


図-1.2.2.4 変位計測から算出した地山特性曲線



### 1.2.3 軸対称解析による地山特性曲線

3次元変位計測で得た地山特性曲線と比較するために、軸対称解析を実施して地山特性曲線を算出する。

#### (1) 解析条件

##### a) 解析モデル

円形トンネルの掘削問題を考える。解析モデルは、 $10D \times 5D$ とした。

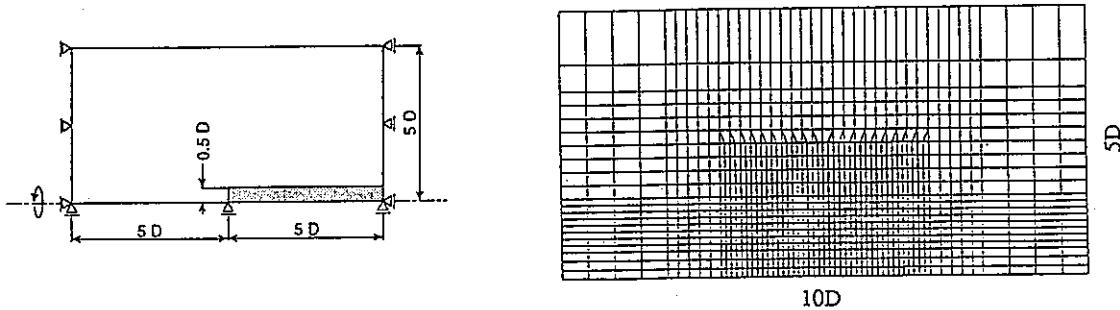


図-1.2.3.1 解析モデル概念

##### b) 解析ケース

解析は、線形弾性・完全弾塑性の2ケースとした。

解析ケース	岩盤の応力～ひずみ関係
1	線形弾性
2	完全弾塑性

図-1.2.3.2 解析ケース

##### c) 岩盤物性値

岩盤物性値は、検討位置周辺の三軸圧縮試験・孔内载荷試験結果から以下のとおり設定した。

- ・変形係数  $D$  ( $t/m^2$ ) : 30,000、ポアソン比  $\nu$  : 0.35
- ・粘着力  $C$  ( $t/m^2$ ) : 50.0、内部摩擦角  $\phi$  ( $^\circ$ ) : 15.0
- ・単位体積重量  $\gamma$  ( $t/m^3$ ) : 2.40、土被り  $H$  (m) : 95.0

#### d) 初期応力設定

初期応力の設定においては、嵐山トンネルの土被り圧

$$P_0 = \gamma \cdot H$$
$$= 2.40 \times 95.0 = 228.0 \text{ t/m}^2$$

を想定し、等方応力場 ( $\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_z$ ) とした。

#### e) 解析ステージ

解析は、最初に土被り相当圧の初期応力を設定し、検討位置の-2Dから+2Dまでは0.1D、+2Dから+3Dまでは0.2Dずつ掘削し、計47ステージを設定した。

### (2) 解析結果

図-1.2.3.3に軸対称解析結果から得た地山特性曲線を示す。ここで、解析結果としては空洞壁面変位を用いている。これから、弾性と比べて弾塑性解析の方が地山特性曲線はなだらかな性状を示すことが分かる。

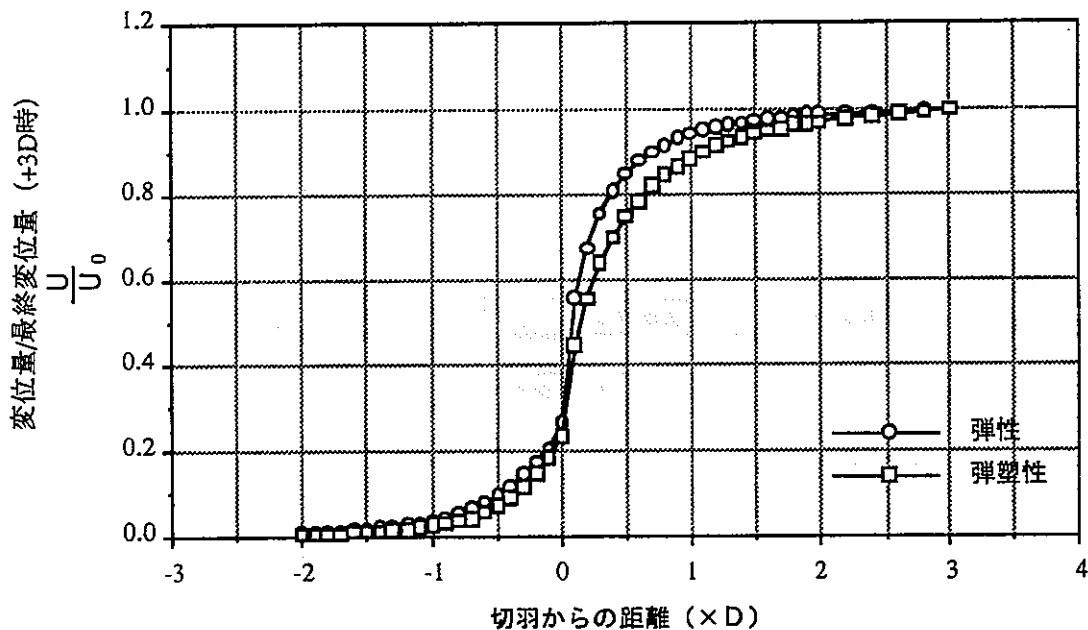


図-1.2.3.3 軸対称解析 (地山特性曲線)

#### 1.2.4 地山特性曲線の考察

計測によって得た地山特性曲線と軸対称解析から得た地山特性曲線を比較検討する。図-1.2.2.4に示したように、原位置計測によって地山特性曲線は2つ取得されている。このうち、トンネル上部には切羽先受け工のフォアパイリングが配置されており、No.1孔は切羽到達後に変位が抑制された可能性がある。したがって、考察

にはNo.2孔で得た地山特性曲線を用いることとする。

図-1.2.4.1に三次元弾性FEM解析による岩盤変位分布を示す。図中には、天端、天端より1D、2D、地表面の4点の変位から作成した地山特性曲線を示す。これから、地山特性曲線は、空洞壁面からの距離に応じてなだらかに変化していることが分かる。

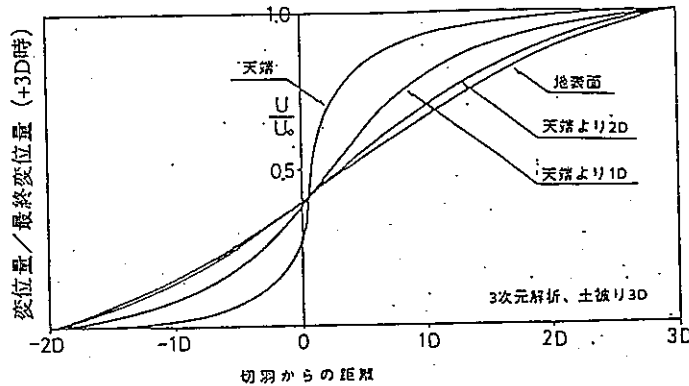


図-1.2.4.1 三次元弾性FEM解析による地山特性曲線<sup>3)</sup>

図-1.2.2.4から、No.2孔と等価円の距離が約2.0mであることから、軸対称弾塑性解析で得た空洞壁面から2.0m離れの位置での地山特性曲線とNo.2孔で得た地山特性曲線を比較する。(図-1.2.4.2)

図-1.2.4.1から、両者はよい相関を示すことがわかる。よって、掘削初期の空洞変形挙動解析では、軸対称解析で得た地山特性曲線を使用すれば、岩盤の3次元的な挙動を2次元解析上で表現することができると言える。

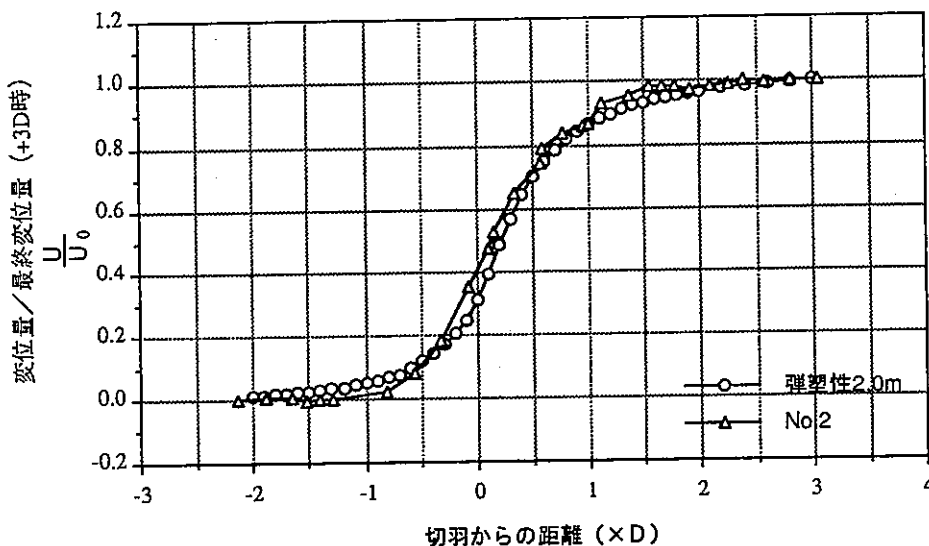


図-1.2.4.2 軸対称弾塑性解析・実測値地山特性曲線 (2.0m)

参考資料 3) 木村、亀村他：切羽の進行を考慮した掘削の解析について  
第16回土質工学研究発表会pp.1565-1568

### 1.2.5 原位置計測データの整理

嵐山トンネルの計測データを整理する。対象とした計測断面位置は、STA.324+48.0で、計測項目は、地中変位、ロックボルト軸力、支保工軸力/モーメント、吹付けコンクリート応力である。ここでは、計測結果の一例として地中変位分布、ロックボルト軸力図を示す。

- ・地中変位（図－1.2.5.1）

計測位置：上半に5測線（0,45,90,135,180度 反時計回りの角度）で計測

最終状態で、天端3mm,左側壁13mm程度の変位

計測結果は、左右非対称：左側壁13mm,右側壁7mm

- ・ロックボルト軸力（図－1.2.5.2）

計測位置：上半に5本（0,45,90,135,180度 反時計回りの角度）で計測

計測結果：ロックボルトの抜け出しなどによって理論解とは異なった 軸力

分布を示している。最大軸力は左45度で25 tが計測

これらは、切羽到達時から1日／1回の頻度で計測されており、ここでは上半掘削が検討位置から+3 D離れた状態での計測値を考察に用いる。

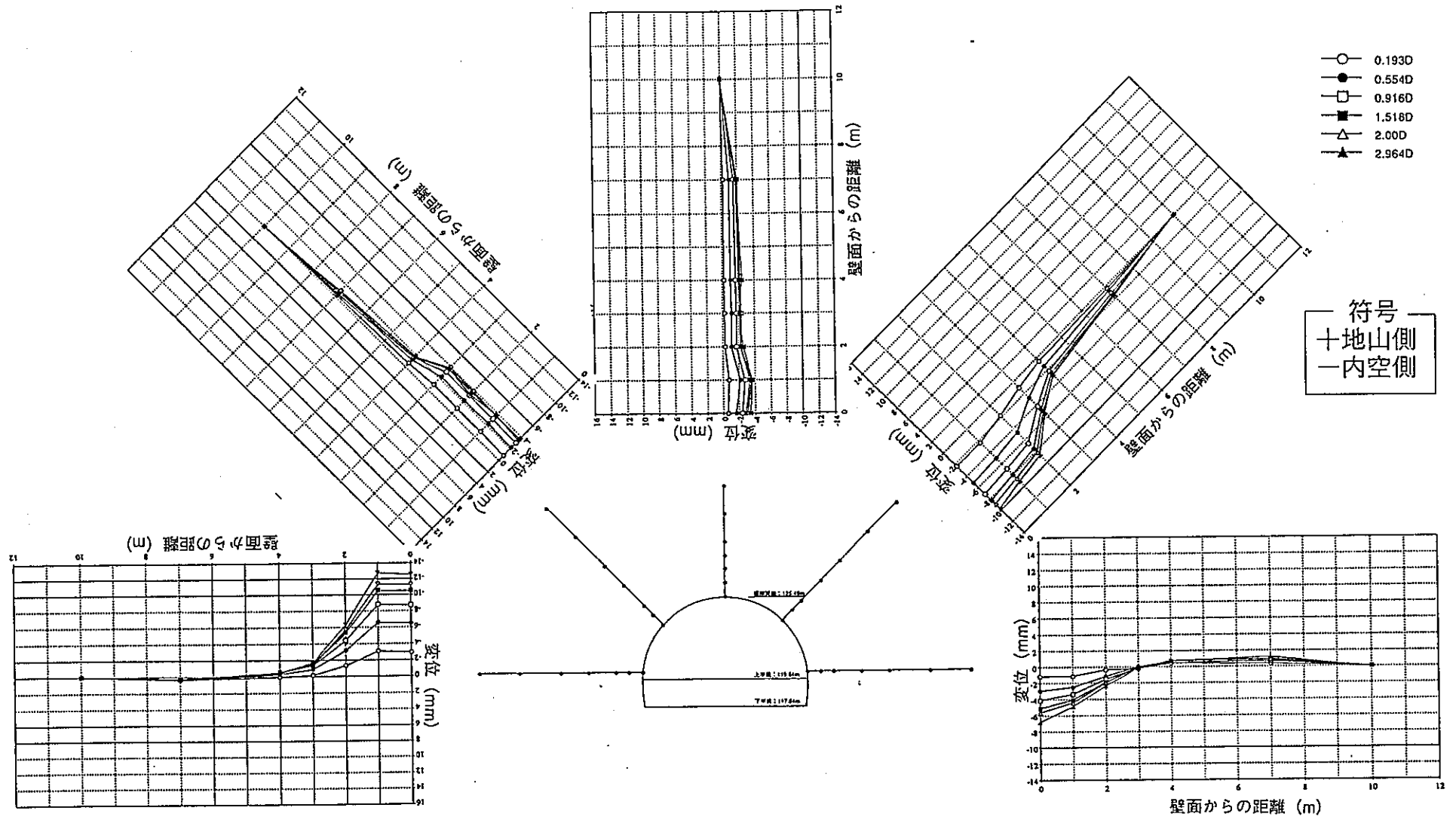


図-1.2.5.1 地中変位計測結果 (切羽離れ0.2D~3.0D)

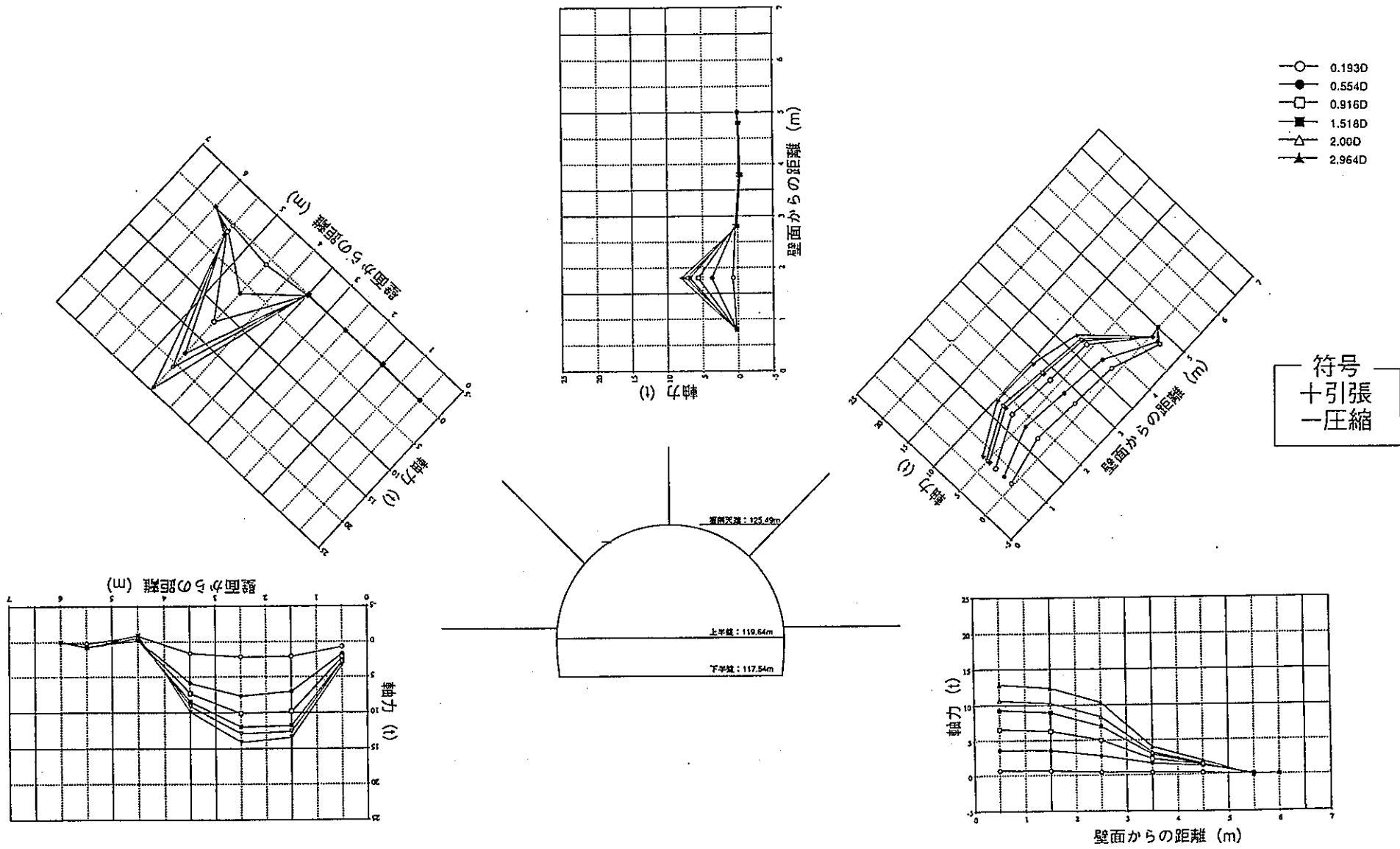


図-1.2.5.2 ロックボルト軸力計測結果 (切羽離れ0.2D~3.0D)

## 1.2.6 平面ひずみ掘削解析

嵐山トンネルを対象として、平面ひずみ掘削解析を行う。

### 1.2.6.1 解析条件

#### (1) 岩盤のモデル化

検討位置の地質は、蛇紋岩で、トンネル上部にかんらん岩が緩い傾斜で存在している。図-1.2.6.1に解析モデルを示す。

#### (2) 解析用物性値の設定

検討位置近傍では、室内試験（一軸、三軸圧縮試験）、原位置試験（孔内載荷試験）が実施されており、これを参考に解析用物性値を設定した。（表-1.2.6.1）

また、支保部材は実際に使用した支保材料の物性値を用いた。（表-1.2.6.2）

表-1.2.6.1 解析用岩盤物性値

	蛇紋岩	かんらん岩	備考
変形係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	3000	88000	水平ボーリング孔内載荷試験
粘着力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	5	—	三軸圧縮試験
内部摩擦角 (°)	15	—	三軸圧縮試験
ポアソン比	0.35	(0.2)	三軸圧縮試験 (推定値)
単位体積重量 (tf/m <sup>3</sup> )	2.4	(2.5)	三軸圧縮試験 (推定値)

表-1.2.6.2 解析用支保材料物性値

	弾性係数 E (t/m <sup>2</sup> )	断面積 A (m <sup>2</sup> )	断面2次モーメント I (m <sup>4</sup> )
鋼製支保 (H-200 @1.0m)	2.10E+07	6.35E-03	4.72E-05
吹付コンクリート (25cm)	4.00E+05	0.25	—
ロックボルト (D=25)	2.10E+07	5.07E-04	—

#### (3) 解析ステージおよび解析ケース (表-1.2.6.3)

嵐山トンネルでは、1回の進行（掘削長さ）は1.0mで施工は、

- ① 1m (≒0.12D : D=8.2m) 掘削
- ② 支保工・吹付コンクリート打設
- ③ 1m (≒0.12D : D=8.2m) 掘削
- ④ ロックボルト打設

の繰り返しである。したがって、支保工・吹付コンクリートに作用する解放力は

③以降の掘削によるもの、ロックボルトに作用する解放力は④以降の掘削によるものとなる。

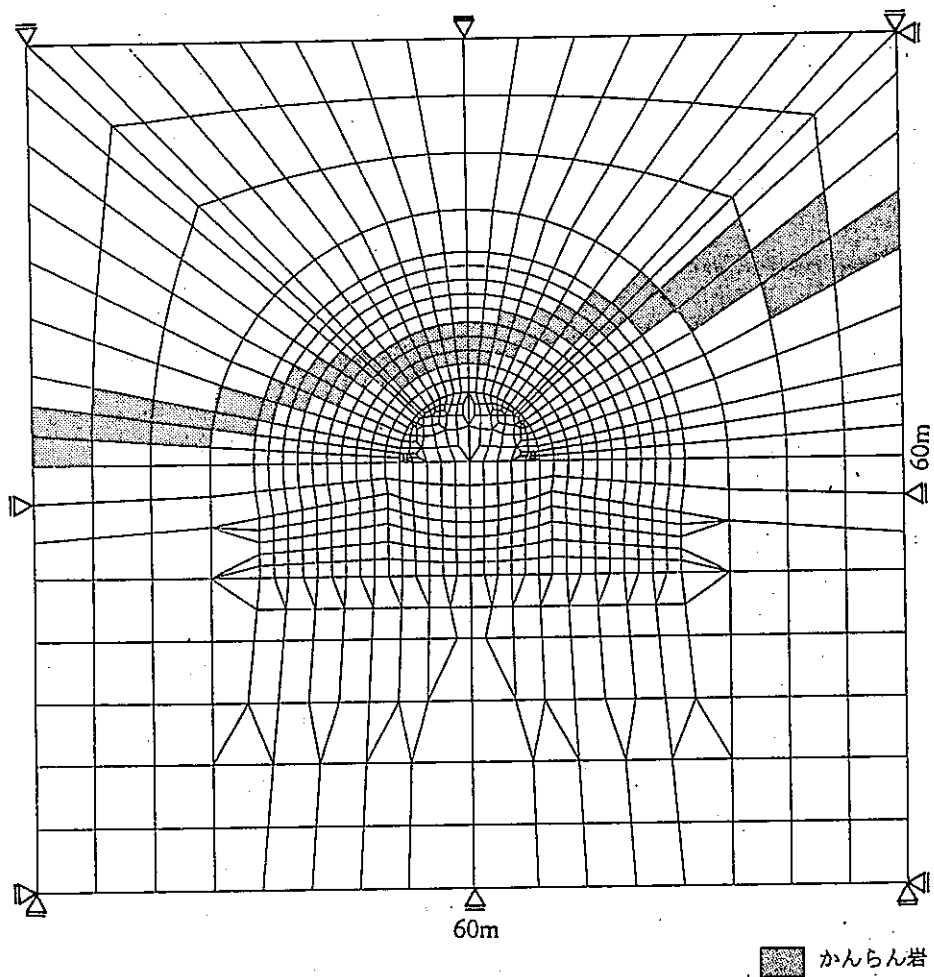


図-1.2.6.1 嵐山トンネル解析モデル (節点数 990 要素数1038)

表-1.2.6.3 解析ステージおよび解析ケース一覧

	STAGE1 初期応力設定	STAGE2 上半掘削	STAGE3 支保工/吹付付加	STAGE4 ロックボルト付加
図				
CASE1	同一	解放力56%	解放力11%	解放力33%
CASE2		解放力45%	解放力11%	解放力44%
CASE3		解放力45%	解放力11%	解放力44%



解析では、この施工段階を考慮して4ステージを設定した。

・ STAGE1：初期応力設定

トンネル天端位置で、初期応力を土被り圧（地山の単位体積重量：

$\gamma=2.4$  (tf/m<sup>3</sup>)、土被り厚：H=95m、側圧係数： $K_0=1.0$ ) と設定

垂直応力： $\sigma_v = \gamma \cdot H = 2.4 \times 95 = 228.0$  (tf/m<sup>2</sup>)

水平応力： $\sigma_h = K_0 \cdot \gamma \cdot H = 1.0 \times 2.4 \times 95 = 228.0$  (tf/m<sup>2</sup>)

・ STAGE2：上半掘削（切羽位置  $1m \doteq 0.12D$ ）

軸対称弾性・弾塑性解析で得た地山特性曲線（図-1.2.6.2）を用い

て、掘削解放力を

弾性解析（0.56：56%）、弾塑性解析（0.45：45%） と設定

・ STAGE3：支保工・吹付けコンクリート付加（切羽位置  $2m \doteq 0.24D$ ）

掘削解放力を

弾性解析（ $0.67-0.56=0.11$ ：11%）

弾塑性解析（ $0.56-0.45=0.11$ ：11%） と設定

・ STAGE4：ロックボルト付加（切羽位置+3.0D）

掘削解放力を

弾性解析（ $1.00-0.67=0.33$ ：33%）

弾塑性解析（ $1.0-0.56=0.44$ ：44%） と設定

解析ケースは、下に示す3ケースである。

・ CASE1：弾性解析

STA.324+48.0の岩盤をモデル化

解析には、軸対称弾性解析で得た地山特性曲線を使用

・ CASE2：弾塑性解析

STA.324+48.0の岩盤をモデル化

解析には、軸対称弾塑性解析で得た地山特性曲線を使用

・ CASE3：弾塑性解析（かんらん岩を無視）

STA.324+48.0のかんらん岩を無視し、均質岩盤（蛇紋岩）でモデル化

解析には、軸対称弾塑性解析で得た地山特性曲線を使用

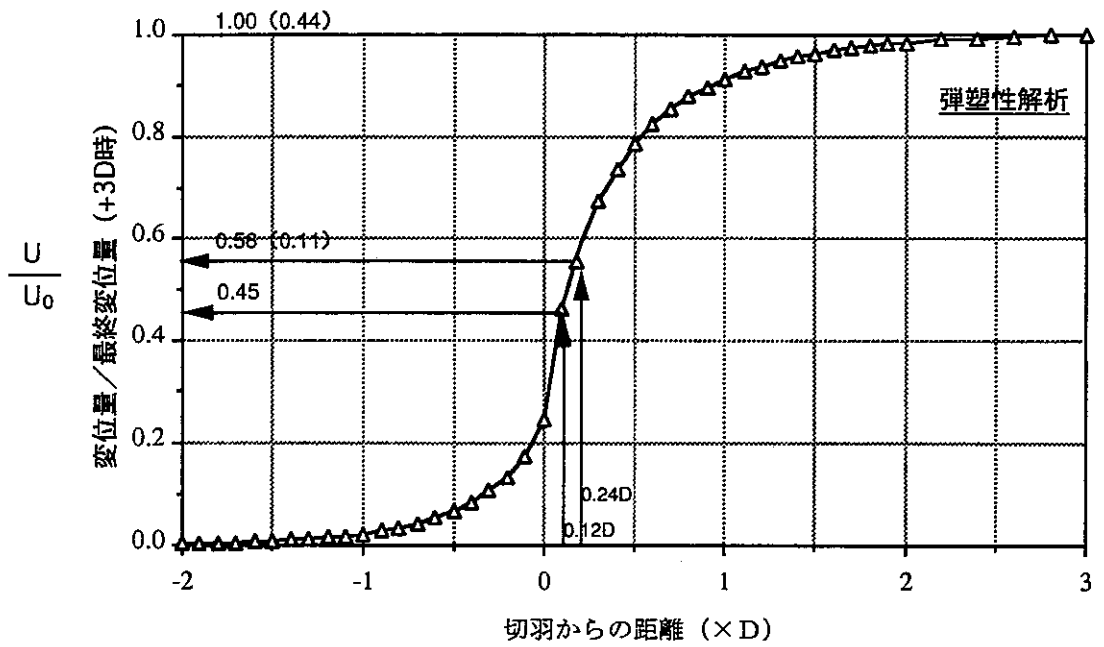
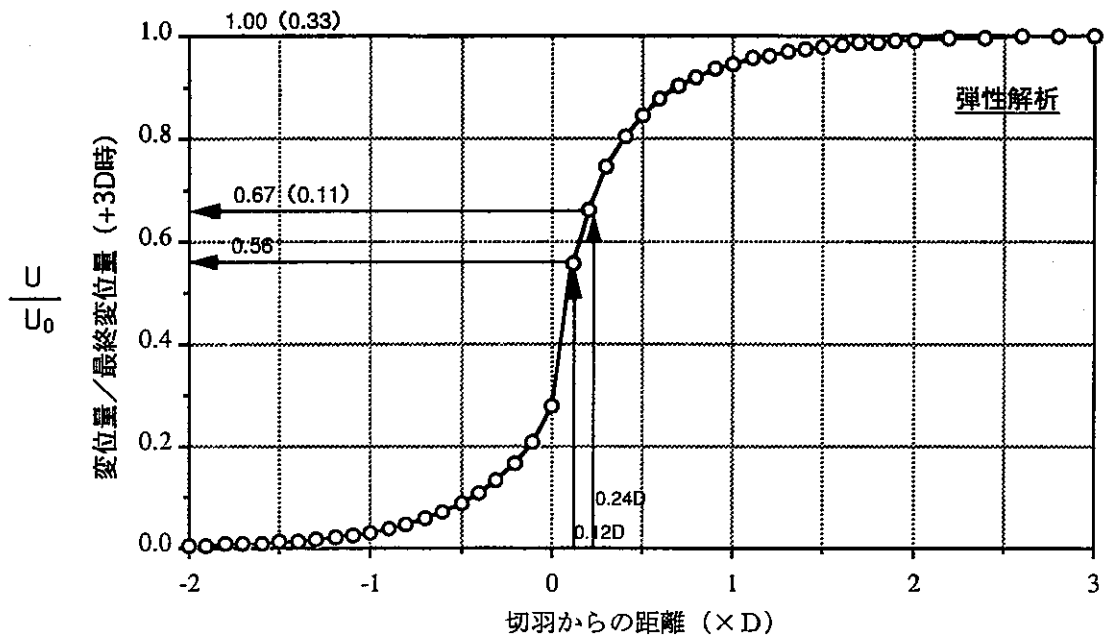


図-1.2.6.2 地山特性曲線

## 1.2.6.2 解析結果および考察

### (1) 変位

表-1.2.6.4に解析から得た内空変位、天端沈下および計測値を示す。解析結果のうち、内空変位・天端沈下の最大はCASE-3 (25.67mm,15.99mm) である。

表-1.2.6.4 内空変位・天端沈下一覧

計測値			
	①天端沈下 (mm)	②内空変位 (mm)	①/②
STA324+48.0	17.00	26.00	0.65
STA324+53.0	7.00	10.00	0.70
解析値			
	①天端沈下 (mm)	②内空変位 (mm)	①/②
CASE-1	7.64	10.22	0.75
CASE-2	10.36	12.98	0.80
CASE-3	15.99	25.67	0.62

これから、今回の解析対象位置である、STA.324+48.0の計測結果は、変形割合 (①/②)、変形量ともにCASE-3の解析結果が良い対応を示している。解析検討位置の岩盤構造をモデル化した解析結果 (CASE-2) が計測値と比較して小さい変位量しか示さなかった。図-1.2.1に示したように、解析で得られる坑道の変形量は、設定した初期応力、変形係数の大きさに依存しており、今回の解析結果が実測値と比較して小さかった原因として、この2つの設定値が実条件と異なっていることが考えられる。また、解析で得られる坑道の変形割合は、設定した初期応力の異方性、変形異方性に依存しており、変形割合が変形量と同様に実測値と解析値で異なっている原因の一つとして、今回の解析では初期応力設定を等方応力状態 (側圧係数=1.0) としたことが考えられる。

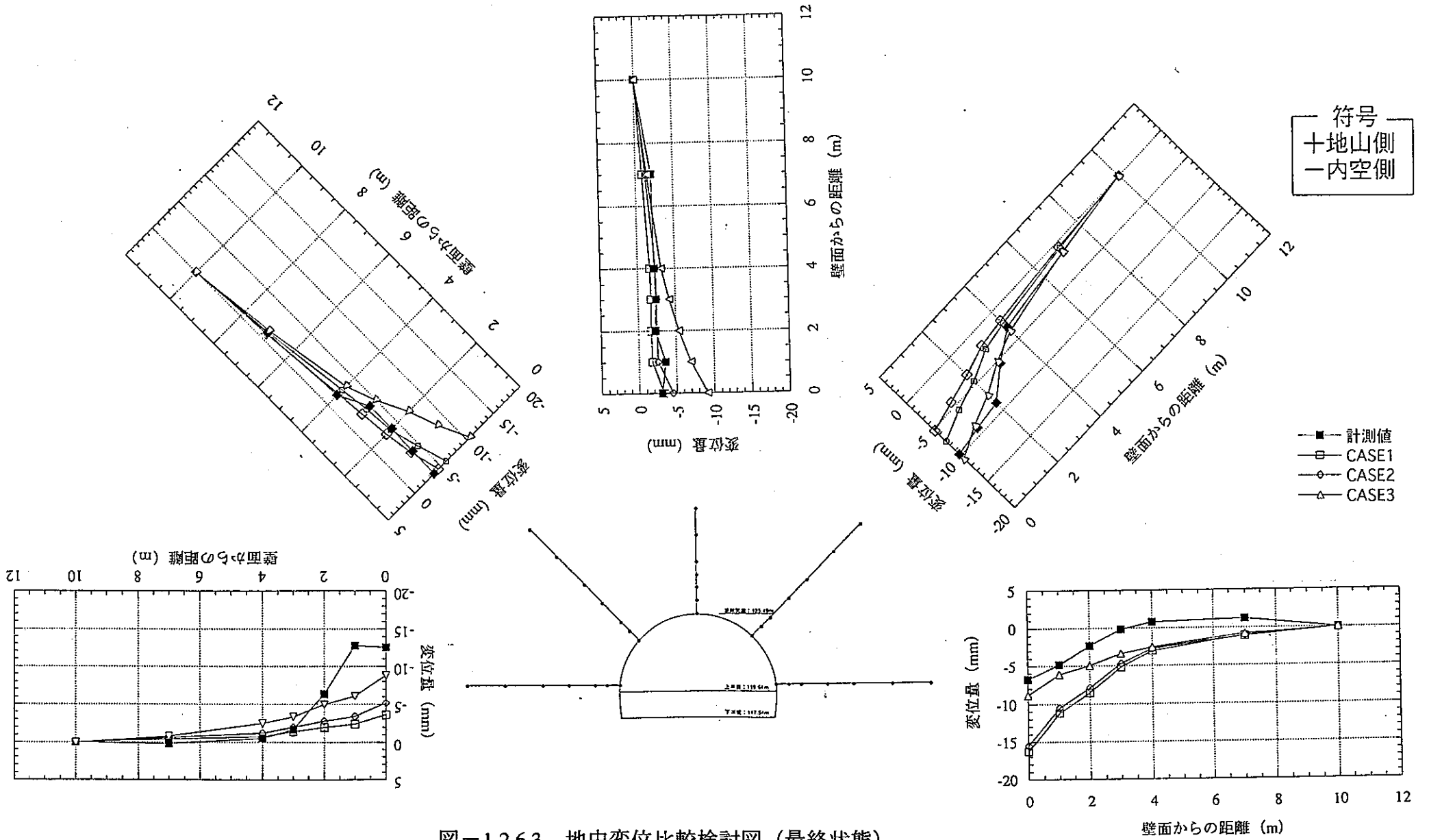
最終状態での地中変位分布図を図-1.2.6.3に示す。以下に、図中で示した各測線について解析結果と計測値を比較検討する。

#### ・測線左0°

計測では、地中変位は空洞壁面から3mの位置から発生し、空洞壁面での変位量は約13mmであった。解析では、地中変位は空洞壁面から7mの位置から発生し計測値を表現できていない。

#### ・測線左45°

計測では、地中変位は測線全体でほとんど発生せず、空洞壁面での変位量は約



図一1.2.6.3 地中変位比較検討図 (最終状態)

3.5mmであった。解析では、変位量、変位分布モードともに、CASE-1,2が計測値と良い相関を示している。これは、CASE-1,2において、トンネル上半左上方の堅硬なかんらん岩の存在を解析モデル上で評価しているためと考えられる。

・測線上方

測線左45°と同様に、計測では、地中変位は測線全体でほとんど発生せず、空洞壁面での変位量は約3.0mmであった。解析では、変位量、変位分布モードともに、CASE-1,2が計測値と良い相関を示している。これは、CASE-1,2において、トンネル上半左上方の堅硬なかんらん岩の存在を解析モデル上で評価しているためと考えられる。

・測線右45°

計測では、地中変位は空洞壁面から4mの位置から発生し、空洞壁面での変位量は約10mmであった。解析では、変位量、分布モードともにCASE-3が計測値と良い相関を示している。

・測線右0°

計測では、地中変位は空洞壁面から4mの位置から発生し、空洞壁面での変位量は約7mmであった。解析では、CASE-1、2が計測結果の分布モードと良い相関を示している。

地中変位量について計測値と解析値を比較検討した。その結果、変位量については、計測値と解析値は概ね良い相関を示した。特に、かんらん岩が測線上に存在している左45°、上方の計測結果と解析結果（CASE-1,2）は良い相関を示した。

(2) 応力

解析結果として、塑性域図を図-1.2.6.4に示す。これから、CASE-2の場合、トンネル上方にかんらん岩を評価した結果、天端変位が抑制され塑性域がこれを評価していないCASE-3と比較して縮小されていることが分かる。

(3) 支保工応力

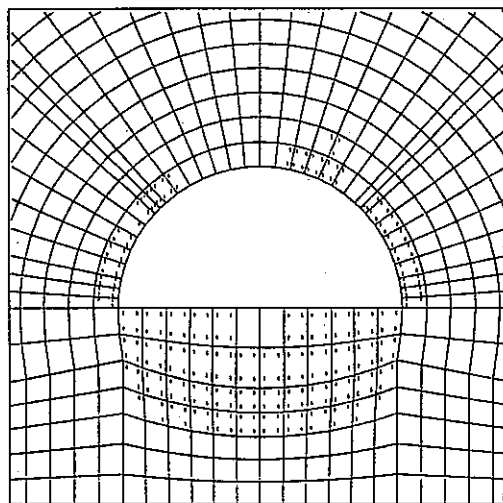
a) ロックボルト軸力

最終状態（STAGE-4）でのロックボルト軸力図を図-1.2.6.5に示す。ここでは、図中で示した各測線について解析結果と計測値を比較検討する。

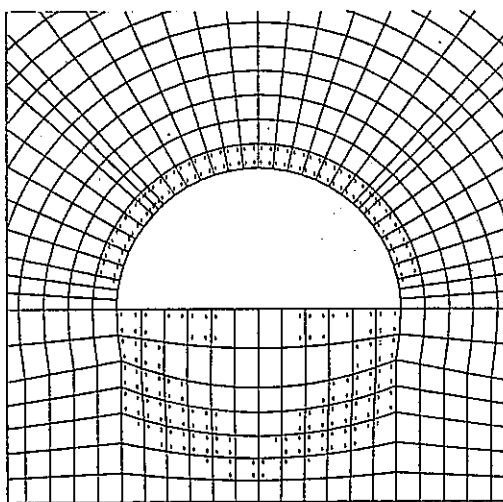
・左0°

計測値では、軸力が空洞壁面から3.5mの位置から発生している。これは、地中

CASE-2



CASE-3



0 5m

構造スケール

図-1.2.6.4 塑性域図 (最終状態)

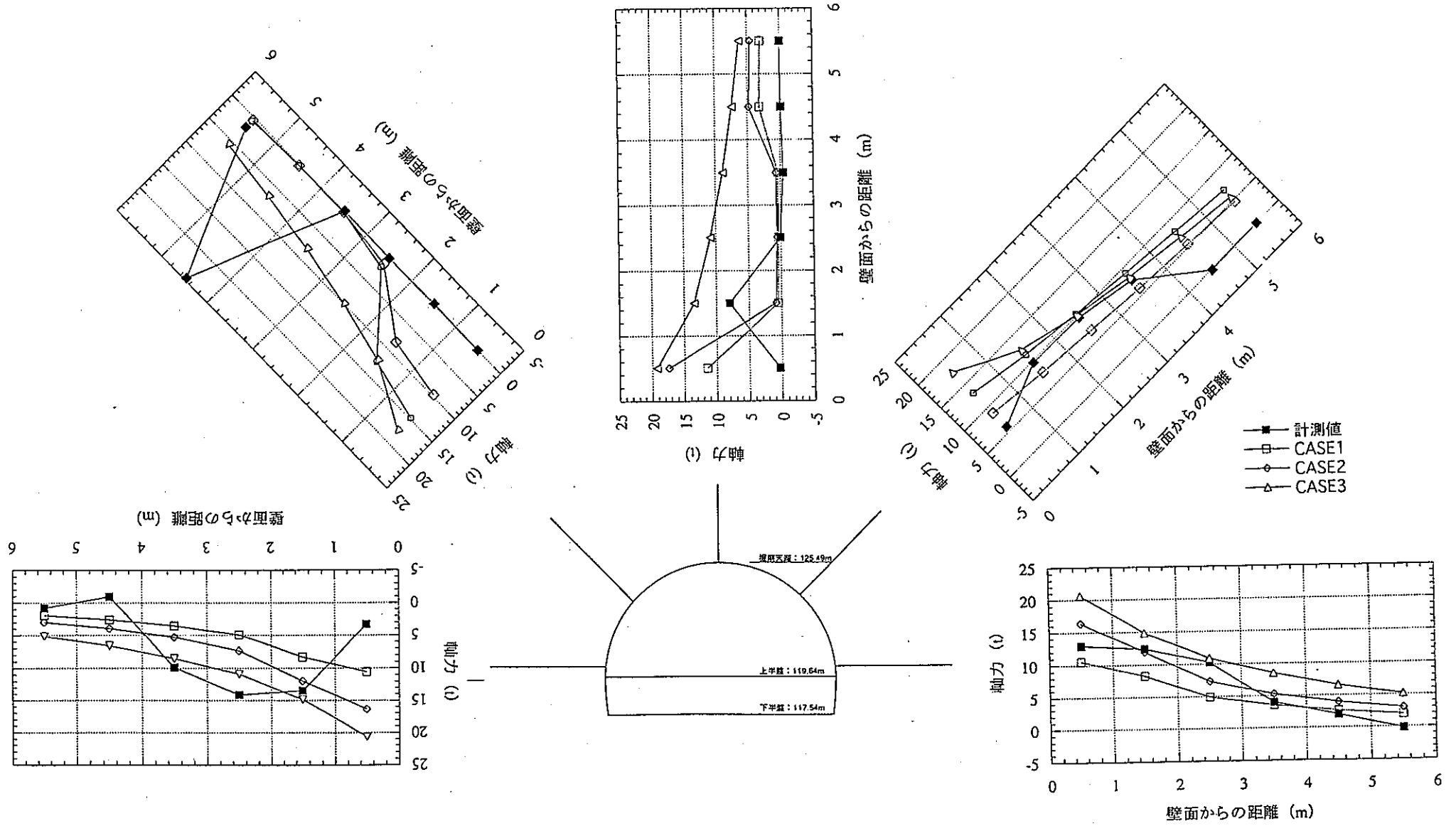


図-1.2.6.5 ロックボルト軸力比較検討図 (最終状態)

変位も空洞壁面から3.0mの位置で発生しており、良い相関を示している。

解析結果は、計測値（軸力の大きさ、分布モード）を評価できていない。これは、地中変位の場合と同様である。

- ・左45°

計測値では、壁面から4.5mの位置で約24tの軸力が発生している。前後の計測点（3.5、5.5m）の計測値と比較してこれは異常値と考えられる。解析値では、トンネル上方にかんらん岩を評価したCASE-2の場合と良い相関を示している。

- ・上方

左45°と同様に、トンネル上方にかんらん岩を評価したCASE-2の場合と良い相関を示している。

- ・右45°

計測値は、壁面から4.5m以深で軸力が発生していない。これは地中変位計測結果においても4.0m以深で変位が発生していないことに対応している。解析値との比較では、その値としては、CASE-1,2と良い相関を示している。

- ・右0°

計測値は、壁面から4.5mから軸力が発生している。軸力の最大値を、空洞壁面から0.5mの位置で約13tである。解析では、CASE-2の結果が、計測値を良く表現していることが分かる。

## b) 鋼製支保工軸力

鋼製支保工軸力の計測値および解析結果を図-1.2.6.6に示す。計測値が（-10t～60t）の軸力を示すのに対して、解析では（100t～270t）の軸力を示している。両者間の相違の原因として、解析では掘削解放力のすべてが支保工に作用するが、実挙動では、支保工と地山の間にはなじみがあり、掘削解放力のすべてが支保工に作用していないことが考えられる。したがって、解析値と比較して計測値の支保工軸力は小さくなった可能性がある。

## c) 吹付コンクリート応力

吹付コンクリート応力の計測値および解析結果を図-1.2.6.7に示す。これから川側、天端の吹付コンクリート応力に着目すると、CASE-1,2の解析結果と計測値は良い相関を示していることが分かる。



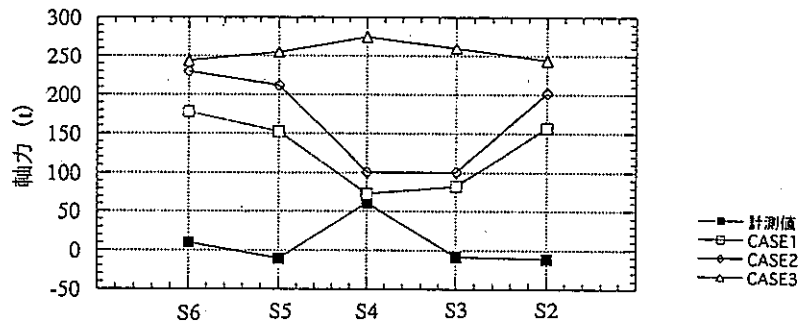
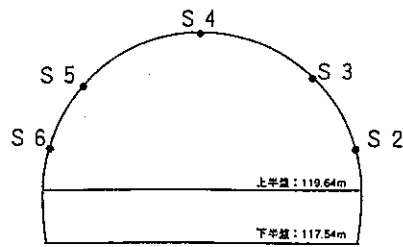


図-1.2.6.6 鋼製支保工軸力図 (最終状態)

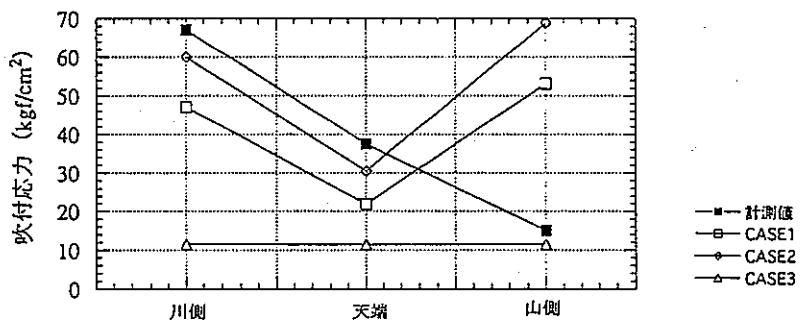
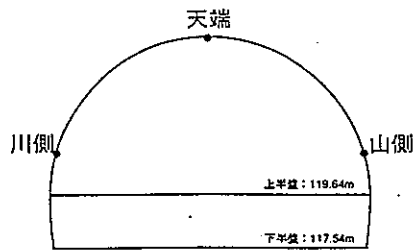


図-1.2.6.7 吹付コンクリート応力 (最終状態)

### 1.2.6.3 まとめ

今年度は、トリベックを用いた先行変位計測から算出した地山特性曲線、原位置試験から評価した岩盤物性、掘削時の地山観察結果に基づいた解析モデルを用いて有限要素解析で掘削初期の空洞変形挙動の評価を試みた。計測値と解析値を比較した結果、坑道変位、地中変位分布は有限要素解析で概ね表現することができた。

処分坑道の設計において考慮すべき事項は、

- ①空洞掘削による緩み域の発生
- ②空洞周辺の水理場の変化
- ③廃棄体の発熱による温度応力、熱対流
- ④緩衝材への地下水の湿潤・膨潤圧発生
- ⑤緩衝材への地下水の湿潤・膨潤圧発生
- ⑥処分坑道や処分ピットの長期クリープ変形
- ⑦緩み域の変化
- ⑧ガラスの溶解変質
- ⑨オーバーパックの腐食、膨張
- ⑩緩衝材の流出

といった熱-水-応力の連成現象である。

今年度の研究では、“①空洞掘削による緩み域の発生”の中の掘削初期の空洞変形挙動に着目した。その結果、掘削に伴う空洞周辺の岩盤挙動は従来の道路トンネルの設計で用いられている有限要素法解析を用いれば概ね評価できることが分かった。今回の検討で、掘削に伴う空洞周辺の岩盤挙動が評価できた要因として、解析手法、入力データとなる岩盤物性の評価、初期応力値の評価の三者が適切であったことが考えられる。

今年度までに得た知見から、今後の課題として以下に示す項目が考えられる。

- ①ダイラタンシー特性の拘束圧依存性を考慮した空洞変形挙動評価手法の開発
- ②膨張性地山に対する空洞変形挙動評価手法の開発
- ③三次元岩盤挙動の評価手法の整備
- ④他地点における評価手法（平成6年度実施）の適用

### 1.3 空洞変形挙動評価モデルの開発検討

平成5年度の研究では、粘弾塑性モデル、不連続体を取扱えるモデルの文献調査を行い、両モデルに関する基礎的な概念の整理や問題点の抽出を行った。

本年度は、不連続体を取扱える解析手法を用いて空洞掘削解析を実施し、手法間で解析機能を比較検討する。さらに、モデルパラメータの影響等を把握して、今後の不連続体モデルの開発に必要な課題や問題点等を考察する。

#### 1.3.1 不連続体解析入出力データの整理

##### 1.3.1.1 解析手法の選定

平成5年度には不連続体解析として表-1.3.1.1に示す8手法を対象として文献調査を実施した。文献調査では、手法毎に、解析手法の一般性、掘削機能の有無、岩盤応力の表示といった解析機能を調査した。

表-1.3.1.1 不連続体解析手法一覧

解析手法	解析手法の一般性	掘削機能の有無	岩盤応力の表示	総合評価
R.B.S.M.	○	○	×	×
D.E.M.	○	○	○	○
D.D.A.	△	×	○	×
ジョイント要素	○	○	○	○
損傷テンソル	×	○	○	×
異方性パラメータ	×	○	○	×
クラックテンソル	△	○	○	○
マイクロメカニクス	×	○	○	×

凡例 ○：最適 △：適 ×：不適

今年度は、上表で総合評価を最適と判断した以下の3手法を研究対象とした。

- ・有限要素法：クラックテンソル等価連続体要素 (F.E.M-CT)
- ・有限要素法：ジョイント要素 (F.E.M-J)
- ・個別要素法 (D.E.M.)

##### 1.3.1.2 各解析手法の入出力データの整理

不連続面を含んだ岩石の一面せん断試験を例として、各解析手法での入出力データを整理する。

今年度、研究対象とした3手法の入出力データを表-1.3.1.2に示す。

表-1.3.1.2 解析手法入出力データ比較表

解析手法	F.E.M-CT	F.E.M-J	D.E.M	
解析対象	<p>一面せん断試験</p>		<p>解析モデル</p>	
入力データ	<p>幾何学特性 変形特性の モデル化</p> $\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1-\nu^2 & -\nu(1+\nu) & 0 \\ -\nu(1+\nu) & 1-\nu^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \\ \frac{1}{G} \begin{bmatrix} F_{11} & 0 & F_{12} \\ 0 & F_{22} & F_{12} \\ F_{12} & F_{12} & F_{11}+12 \end{bmatrix} \\ + \left(\frac{1}{H} - \frac{1}{G}\right) \begin{bmatrix} F_{1111} & F_{1122} & 2F_{1112} \\ F_{1122} & F_{2222} & 2F_{2212} \\ 2F_{1112} & 2F_{2212} & 4F_{1212} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$ <p>幾何学特性：上式中の<math>k_s, k_n</math>の値 変形特性：上式中の<math>G, H</math> <math>G</math> (MPa/m) せん断剛性 <math>H</math> (MPa/m) 垂直剛性</p>	<p>幾何学特性：要素両端の節点座標 変形特性：ジョイント要素両端のせん断、垂直バネ剛性 <math>k_s</math> (MPa/m) せん断剛性 <math>k_n</math> (MPa/m) 垂直剛性</p>	<p>幾何学特性：ブロック内に設定した不連続面座標 変形特性：ブロック間に設定されるせん断、垂直バネ剛性 <math>k_s</math> (MPa/m) せん断剛性 <math>k_n</math> (MPa/m) 垂直剛性</p>	
	構造データ	<p>節点 No. X座標 Y座標 1 0.0 50.0 2 0.0 25.0 3 0.0 25.0 4 0.0 0.0 5 100.0 0.0 6 100.0 25.0 7 100.0 25.0 8 100.0 50.0</p> <p>要素 No.要素構成節点No. 1 1 2 3 4</p>	<p>節点 No. X座標 Y座標 1 0.0 50.0 2 0.0 25.0 3 0.0 25.0 4 0.0 0.0 5 100.0 0.0 6 100.0 25.0 7 100.0 25.0 8 100.0 50.0</p> <p>要素データ No.要素構成節点No. 1 1 2 7 8 平面要素 2 3 4 5 6 平面要素 1001 3 6 7 2 ジョイント要素</p>	<p>ブロック全体を設定する座標値 (x1,y1 x2,y2 x3,y3 x4,y4) block 0,0 100,0 100,50 0,50 不連続面を設定する両端座標値 (x1,y1 x2,y2) crack 0,25 100,25</p>
	物性データ	<p><u>岩盤基質部</u> 変形係数：D (MPa) ポアソン比：<math>\nu</math> 粘着力：C (MPa) 内部摩擦角：<math>\phi</math> (°) 引張強度：<math>\sigma_t</math> (MPa)</p> <p><u>不連続面</u> 変形特性 垂直剛性：<math>k_n</math> (MPa/m) せん断剛性：<math>k_s</math> (MPa/m)</p> <p><u>強度特性</u> 強度特性を、解析上で評価することは理論上不可能である。</p>	<p>粘着力：C (MPa) 内部摩擦角：<math>\phi</math> (°) 引張強度：<math>\sigma_t</math> (MPa)</p>	
出力データ	<p><u>岩盤基質部</u> 節点変位：<math>(u_i, v_i)</math> 要素内応力<math>(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})</math></p>			
	<p><u>不連続面</u> 不連続面の剛性を、岩盤基質部分の剛性で評価しているため、不連続面個々の変位量、応力値は評価できない</p>	<p>ジョイント要素両端のバネ応力の平均値 <math>\bar{\sigma}_0 = (k_n \cdot u_{ni} + k_n \cdot u_{nj}) / 2</math> <math>\bar{\tau} = (k_s \cdot u_{si} + k_n \cdot u_{sj}) / 2</math></p>	<p>不連続面の端に設定したバネ応力 <math>\sigma_0 = u_n \cdot k_n</math> <math>\tau = u_t \cdot k_s</math></p>	

- ・入力データ：データ数にやデータの評価方法は手法間で多少の相違があるが、解析に必要とされる不連続面の幾何学データ、不連続面の力学データといった情報は、手法間で相違がないことが分かる。
- ・出力データ：岩盤基質部の変位・応力の出力は、3手法で相違がない。不連続面の変位・応力の出力は、FEM-CTでは不可能であるが、FEM-J,DEMではその出力が可能である。

### 1.3.2 解析モデルの作成

#### 1.3.2.1 モデルの作成方法

不連続面を有する岩盤のモデル化手法として、既往の研究で報告されているものは、岩盤浸透流（フラクチャーネットワーク）に関するものがほとんどである。

岩盤のモデル化手法で力学問題を対象とした研究は数少なく、唯一報告されているNGI（Norwegian Geotechnical Institute）のBartonらによって実施されている例を以下に示す。（図-1.3.2.1）

報告では、モデルの作成方法の手順として

- ①亀裂の原位置計測データの取得
- ②3次元空間上で統計的に亀裂を発生
- ③2次元解析面でのトレース図の作成
- ④解析モデルの作成

の4段階で岩盤をモデル化している。

今回の研究では、NGIが実施したモデル化手法を採用する。解析対象は、釜石鉦山を想定し、不連続面の幾何学特性、強度変形特性の設定には、既往の研究成果を流用する。

#### 1.3.2.2 不連続面データの整理

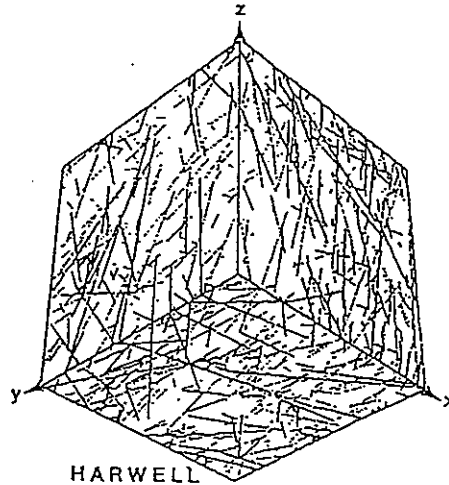
不連続面の幾何学データとして釜石鉦山での既往の研究成果<sup>1)</sup>を用いる。

##### (1) 調査位置および調査方法

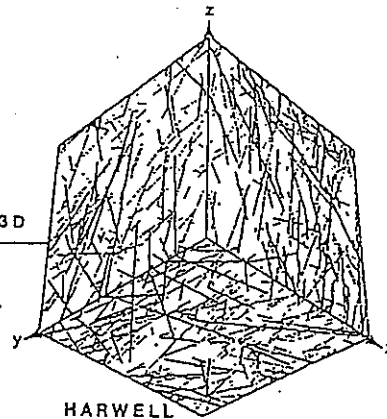
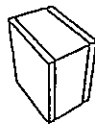
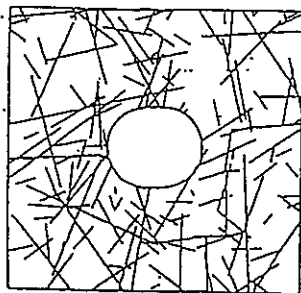
調査位置は、標高約575m、地表下約260mで栗橋花崗岩体に掘削された探鉦坑道（NW-坑道、NE-坑道）である。

亀裂の原位置計測データの取得

3次元空間上で統計的に亀裂を発生



DISTINCT ELEMENT MODELLING  
OF DISTURBED ZONES  
SURROUNDING VALIDATION DRIFT



解析の実施

参考文献

- STRIPA PROJECT 90-02 Site Characterization and Validation - Drift and Borehole Fracture Data, Stage
- STRIPA PROJECT 91-05 Disturbed Zone Modelling of SVC Validation Drift Using UDEC-BB, Models 1 to 8-Stripa Phase3
- STRIPA PROJECT 91-05 Disturbed Zone Modelling of SCV Validation Drift Using UDEC-BB, Models 1 to 8-Stripa Phase3

図-1.3.2.1 NGIによる岩盤モデル作成手順

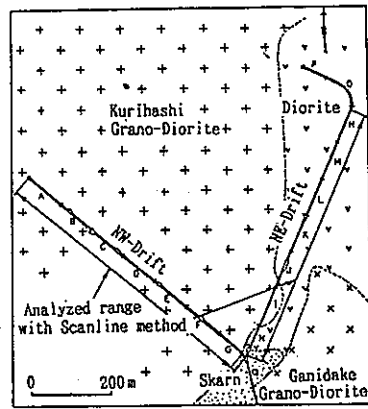


図-1.3.2.2 調査位置

不連続面の調査は、図-1.3.2.2でV字型になっている全長1623.7mのNW-坑道、NE-坑道を長さ100mの区間に分割し、スキャンライン法を用いて天端と両側壁について行った。

(2) 調査結果

1) 方向

NW-坑道、NE-坑道で得た不連続面のステレオ投影図、密度コンター図を図-1.3.2.3に示す。

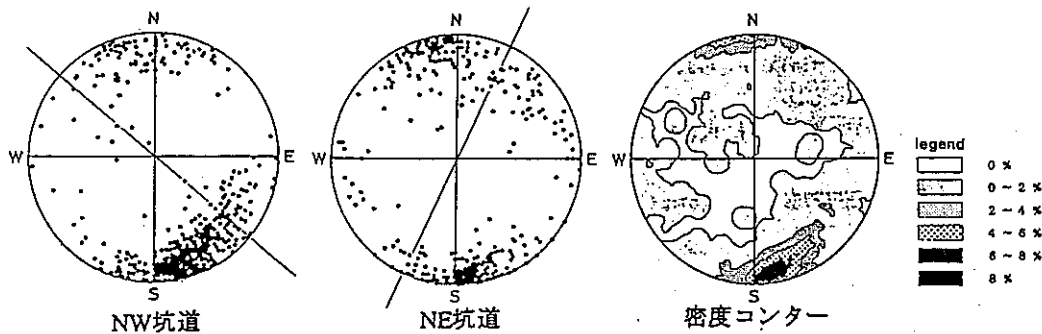


図-1.3.2.3 ステレオ投影・密度コンター

これから、不連続面の卓越方向は、N70E80Sである。上図から、NW-坑道、NE-坑道で得た不連続面の情報は、坑道方向が大きく影響しており、坑道と交差しづらい水平な不連続面等が計測されていないことが分かる。調査では、水平な不連続面の情報を得るために、鉛直ボーリングを実施して岩盤内不連続面の幾何学データを取得している。 図-1.3.2.4に鉛直ボーリング位置とボーリング調査で得た不連続面の方向と出現頻度分布を示す。

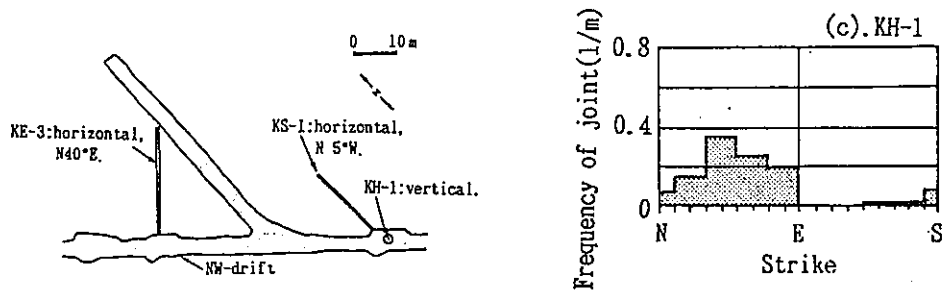


図-1.3.2.4 鉛直ボーリング位置および調査結果

## 2) 大きさおよび密度

不連続面の大きさはその形状を円盤と仮定した時の直径平均が5.00 (m) で大きさの分布は指数分布を示すことが報告されている。

不連続面の密度は、(単位体積当り0.060本/m<sup>3</sup>)と算出されている。

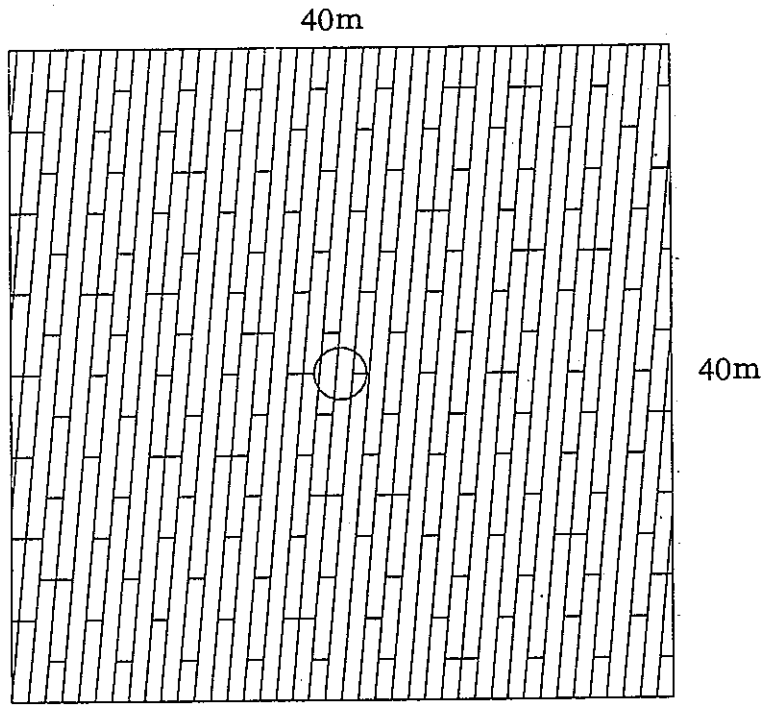
### 参考文献

- 1) 野口、飯島、中村ら、"岩盤における亀裂の計測とモデリング" 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集(1990) pp.43-48

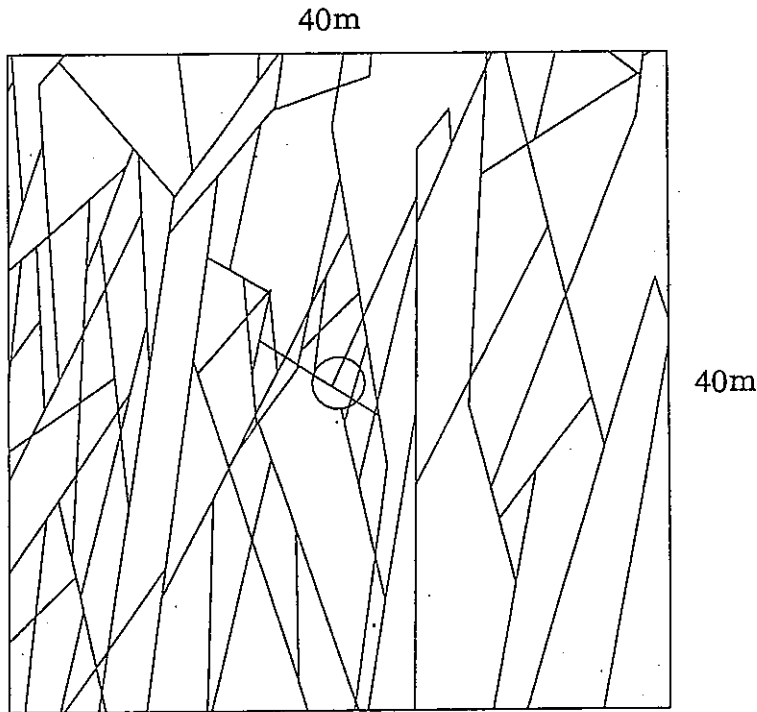
### 1.3.2.3 不連続体解析モデルの作成

図-1.3.2.1に示した方法を用いて、不連続体解析モデルを作成した。解析モデルとして、不連続面の方向の分布を考慮したランダムモデルと不連続面の方向をその平均方向で評価した格子モデルの2種を作成した。





格子モデル



ランダムモデル

図-1.3.2.5 不連続体解析モデル

### 1.3.3 処分坑道の解析

#### 1.3.3.1 解析条件

##### (1) 解析物性値

###### a) 岩盤基質部

釜石鉱山の栗橋花崗岩の室内一軸圧縮試験から、変形係数を60000 (MPa)、ポアソン比を0.267と設定した。

強度特性は三軸圧縮試験結果から粘着力C : 37.1 (MPa) ,内部摩擦角  $\phi$  : 45.2° と設定した。

###### b) 岩盤不連続面

###### ・せん断剛性

せん断剛性  $k_s$  は、Bartonの実験式から算出する。

$$k_s = \frac{100}{L_n} \sigma_n \tan \left\{ JRC_n \log \left( \frac{JCS_n}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right\}$$

$L_n = 5.0(\text{m})$  原位置における不連続面のトレース長さ平均

$\sigma_n = 33.1(\text{MPa})$  不連続面作用応力 (初期主応力平均を仮定)

$JRC_n$  原位置不連続面のJRC 通常は室内試験から次式で算定

$$JRC_n = JRC_0 \left( \frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02 JRC_0} \quad JRC_0 \text{ 室内試験で得たJRC} \quad JRC_0 = 4.481$$

$L_0 = 0.1(\text{m})$  室内試験における不連続面のトレース長さ

$JCS_n$  原位置不連続面の壁面強度 (MPa) 通常は室内試験から次式で算定

$$JCS_n = JCS_0 \left( \frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.03 JRC_0} \quad JCS_0 \text{ 室内試験で得たJCS (MPa)}$$

$$JCS_0 = 55.93(\text{MPa})$$

これから、解析ではせん断剛性を  $k_s = 448.2(\text{MPa}/\text{m})$  と設定した。

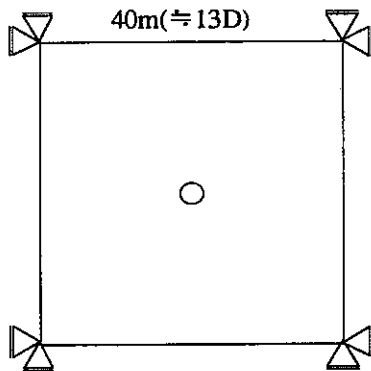
釜石鉱山で実施された室内試験結果から垂直剛性を  $k_n = 761300(\text{MPa}/\text{m})$  と設定した。

### 境界条件

境界条件は、平成3年度のものと同じとした。

拘束条件・初期応力条件を図-1.3.3.2に示す。

拘束条件



初期応力条件

処分坑道の位置で

$$\sigma_h = \gamma \cdot h = 2.7 \times 1000 = 2700(\text{tf} / \text{m}^2) \\ = 26.5(\text{MPa})$$

$$\sigma_v = K_0 \gamma \cdot h = 1.5 \times 2.7 \times 1000 = 4050(\text{tf} / \text{m}^2) \\ = 39.7(\text{MPa})$$

他の領域は、土被りに応じて線形補間

図-1.3.3.1 拘束条件・初期応力条件

### (3) 構造条件

構造条件は、平成3年度の研究で対象とした、処分坑道と同じとする。

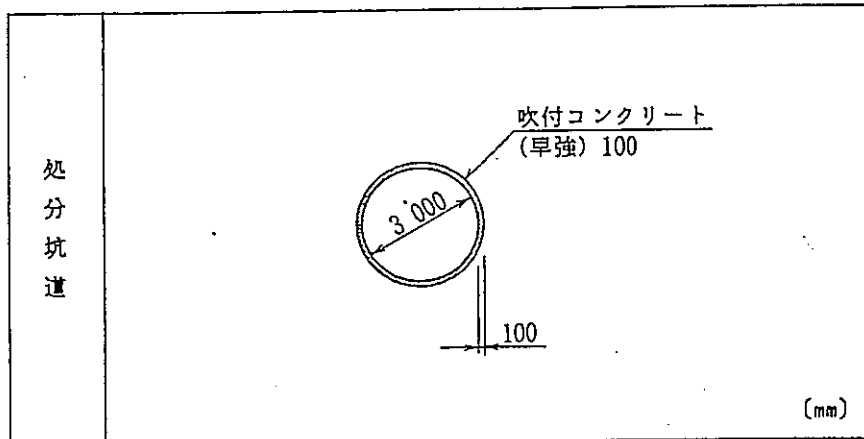


図-1.3.3.2 構造条件 (結晶質岩：1000m 処分坑道)

処分坑道の形状は、円形で、その内径は3.0mである。支保は、吹付コンクリート (t=100mm) を設定している

(4) 解析ケースおよび解析ステージ

解析では、3解析手法×2モデル×2物性の12ケースが考えられる。

表-1.3.3.1 解析ケース一覧

		モデル		解析手法			不連続面の剛性	
		格子	ランダム	等価連続体	ジョイント要素	個別要素法	考慮	考慮せず
1	CASE-K-C-1	○		○			○	
2	CASE-K-C-2	○		○				○
3	CASE-R-C-2		○	○			○	
4	CASE-K-J-1	○			○		○	
5	CASE-K-J-2	○			○			○
6	CASE-R-J-1		○		○		○	
7	CASE-R-J-2		○		○			○
8	CASE-K-D-1	○				○	○	
9	CASE-K-D-2	○				○		○
10	CASE-R-D-1		○			○	○	
11	CASE-R-D-2		○			○		○

しかしながら、等価連続体解析で、不連続面の剛性を無視した場合には、モデルによる相違が生じないことから、解析ケースは11ケースとした。

解析ステージは、平成3年度の研究と同様に、以下に示す3ステージを設定した。

ステージ1：初期応力の設定

ステージ2：坑道掘削（地山解放力80%）

ステージ3：吹付コンクリート付加（地山解放力20%）

### 1.3.3.2 解析結果および考察

最終状態 (Stage3) における坑道周辺の変位ベクトル図、主応力分布図を用いて解析結果の整理・考察を行う。なお、解析プログラムの相違から、手法間で出力図のスケールが一致していない。

#### (1) 解析手法間の相違

処分坑道の変形モードを見るために、表-1.3.3.2にStage2からStage3までに発生する①内空変位量、②天端～床盤相対変位、坑道変形比 (①/②) を示す。

##### a) 格子モデル剛性考慮せず

Stage3における坑道周辺の変位ベクトル・主応力分布図を図-1.3.3.3に示す。これから、坑道の変形は、水平変位 (内空変位) の方が垂直変位 (天端～床盤相対変位) よりも大きいモードとなっている。また、変位量は、

- ・ CASE-K-C-2 (水平変位 : 0.53mm 垂直変位 : 0.26mm 変形比 : 2.04)
- ・ CASE-K-J-2 (水平変位 : 0.45mm 垂直変位 : 0.21mm 変形比 : 2.14)
- ・ CASE-K-D-2 (水平変位 : 0.52mm 垂直変位 : 0.21mm 変形比 : 2.48)

である。これは、初期応力設定で側圧係数を1.5と仮定しているためである。以上から、格子モデルで亀裂の剛性を考慮しない場合、3手法間で変位量に多少の相違があるものの坑道周辺岩盤の変位分布や坑道の変形モードは概ね一致している。また、応力分布も同様に3手法間で概ね一致している。

##### b) ランダムモデル剛性考慮せず

Stage3における坑道周辺の変位ベクトル・主応力分布図を図-1.3.3.4に示す。これから、格子モデルと同様に、坑道の変形は、水平変位 (内空変位) の方が垂直変位 (天端～床盤相対変位) よりも大きいモードとなっている。これは、初期応力設定で、側圧係数を1.5と仮定しているためである。

- ・ CASE-R-C-2 (水平変位 : 0.53mm 垂直変位 : 0.26mm 変形比 : 2.04)
- ・ CASE-R-J-2 (水平変位 : 0.27mm 垂直変位 : 0.15mm 変形比 : 1.80)
- ・ CASE-R-D-2 (水平変位 : 0.39mm 垂直変位 : 0.22mm 変形比 : 1.77)

以上から、ランダムモデルで亀裂の剛性を考慮しない場合、3手法間で変位量に多少の相違があるものの変位分布や坑道の変形モードは概ね一致している。また、応力分布状況も同様に3手法間で概ね一致している。

表-1.3.3.2 解析結果 (内空変位・天端～床盤相対変位)

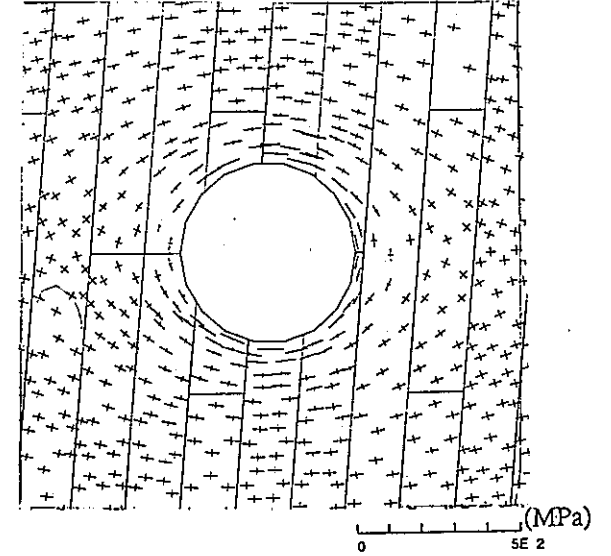
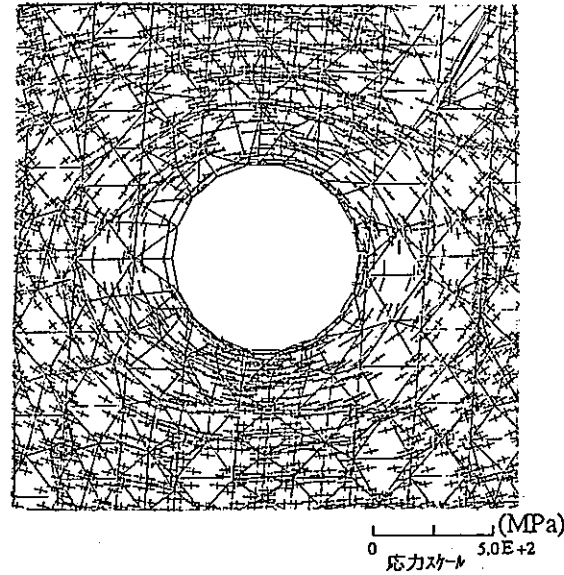
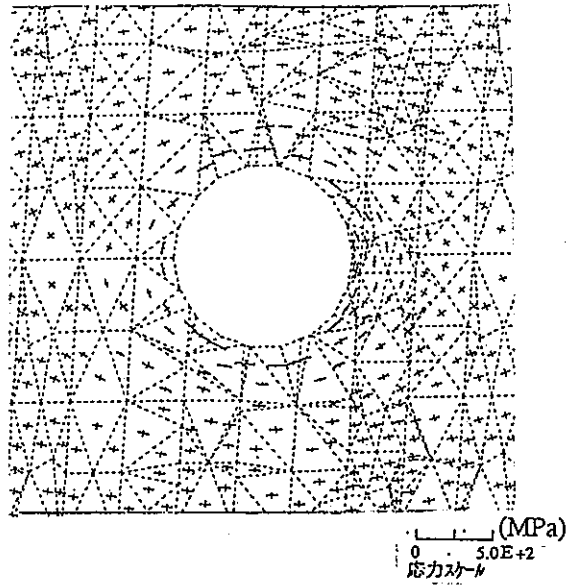
	①内空変位量 (mm)	②天端～床盤相対変位量 (mm)	変形比 (①/②)	備考
CASE-K-C-1	3.69	3.52	1.05	
CASE-K-C-2	0.53	0.26	2.04	
CASE-R-C-1	2.03	1.95	1.05	
CASE-R-C-2	0.53	0.26	2.04	CASE-C-K-1と同一
CASE-K-J-1	0.91	1.45	0.63	
CASE-K-J-2	0.45	0.21	2.14	
CASE-R-J-1	0.29	0.64	0.45	
CASE-R-J-2	0.27	0.15	1.80	
CASE-K-D-1	0.88	1.10	0.80	
CASE-K-D-2	0.52	0.21	2.48	
CASE-R-D-1	0.21	0.47	0.45	
CASE-R-D-2	0.39	0.22	1.77	

等価連続体解析 (FEM-CT)

不連続体解析ジョイント要素 (FEM-J)

不連続体解析個別要素法 (DEM)

応力



変位

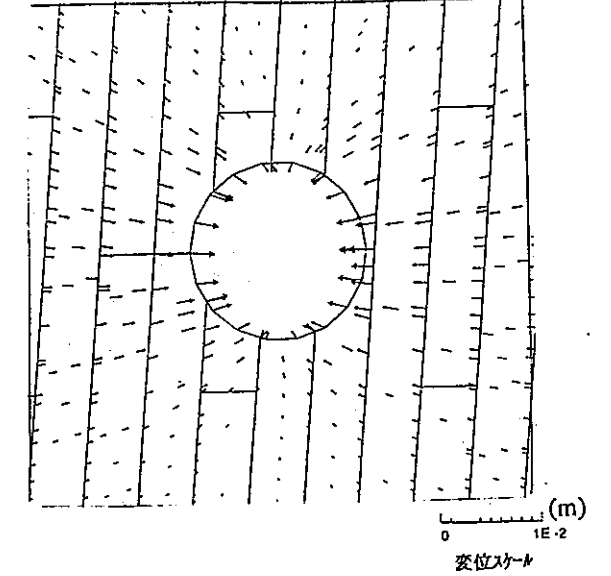
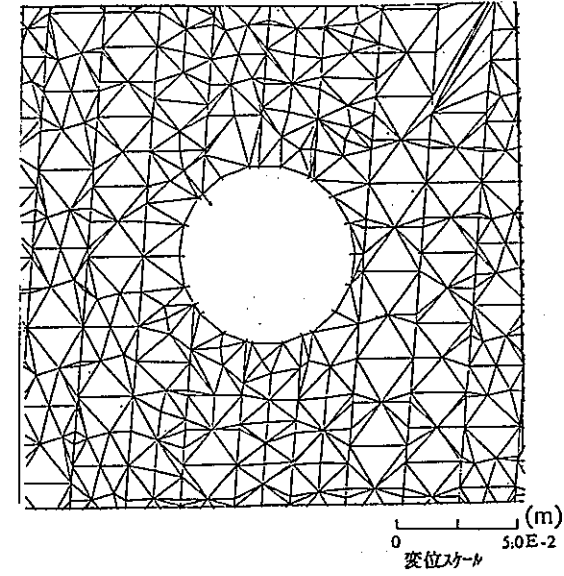
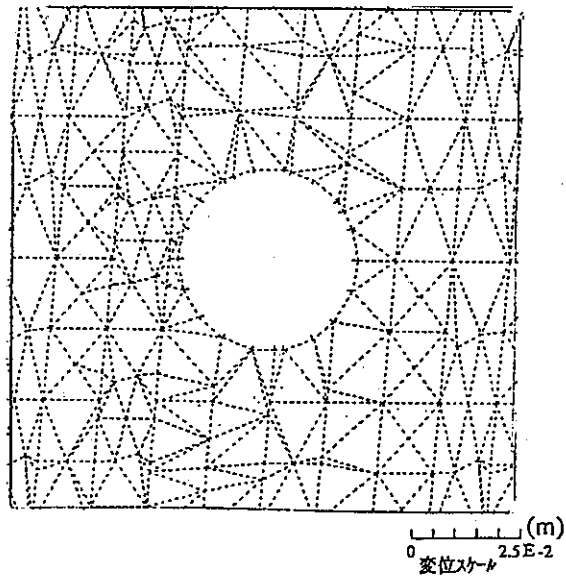
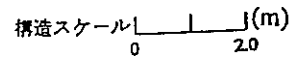


図-1.3.3.3 変位ベクトル・主応力図 (Stage3: 格子モデル 剛性考慮せず)

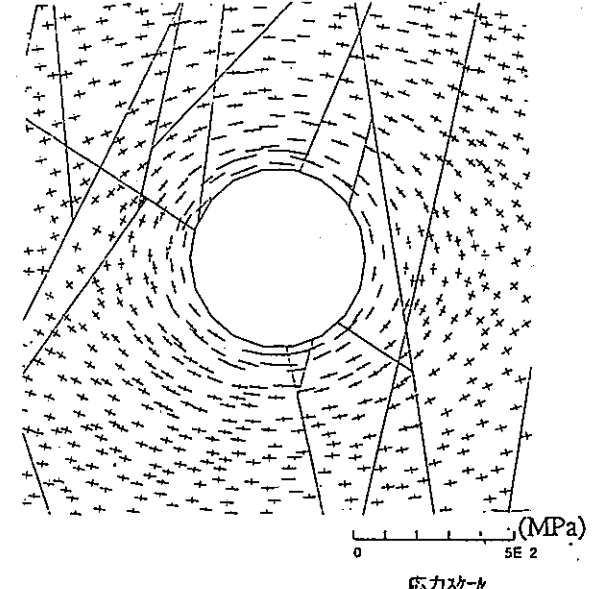
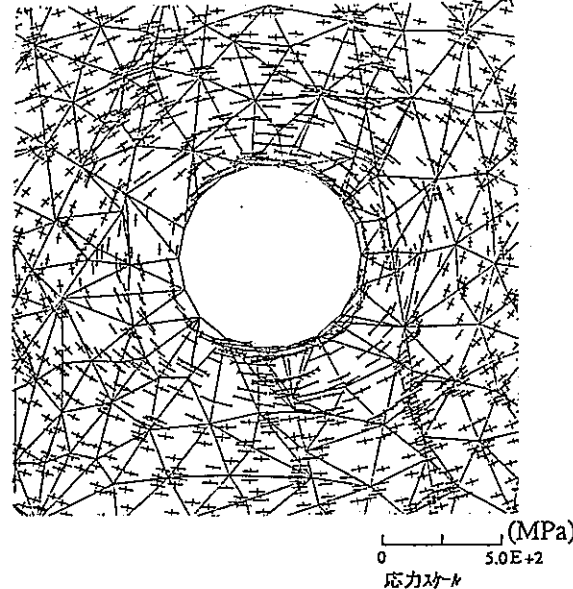
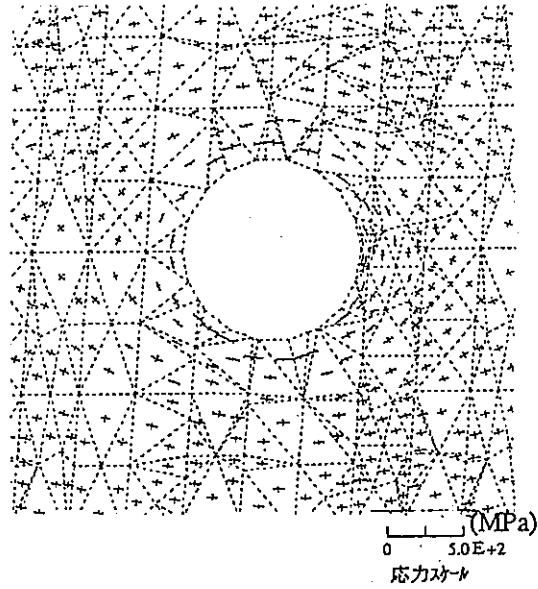


等価連続体解析 (FEM-CT)

不連続体解析ジョイント要素 (FEM-J)

不連続体解析個別要素法 (DEM)

応力



変位

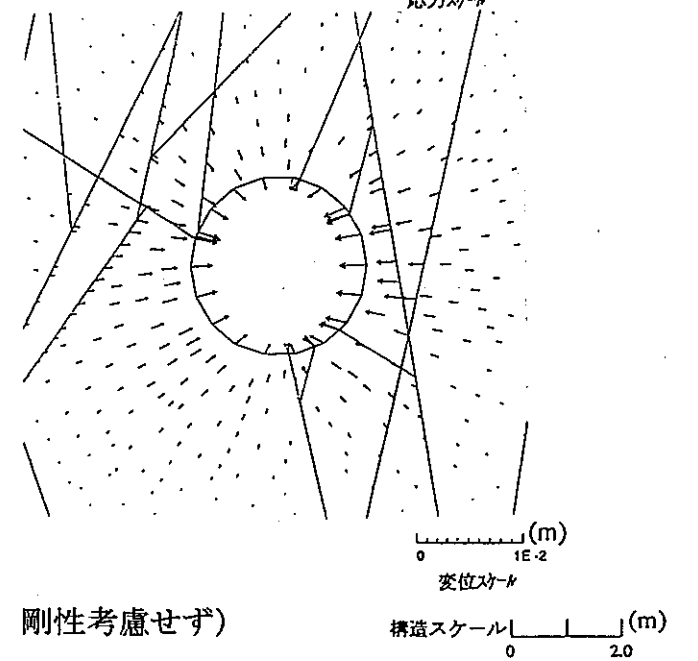
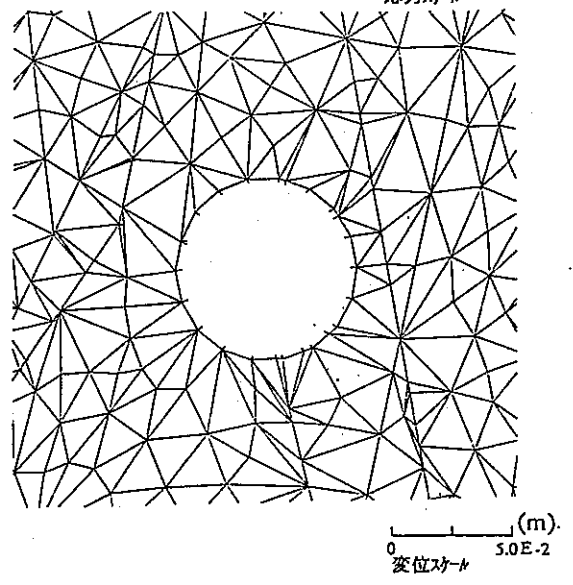
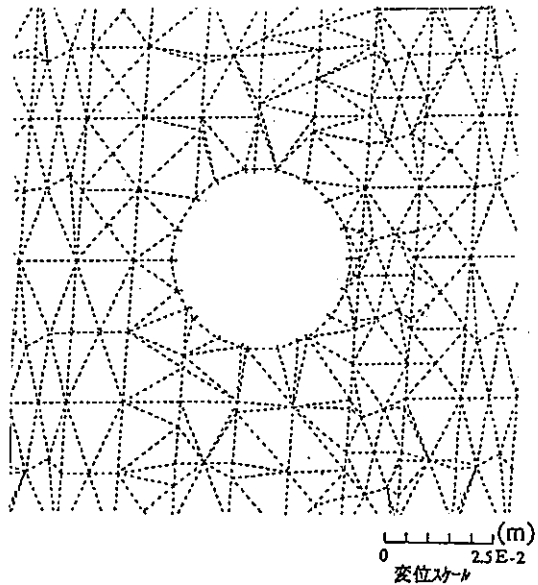


図-1.3.3.4 変位ベクトル・主応力図 (Stage3: ランダムモデル 剛性考慮せず)



#### c) 格子モデル剛性考慮

Stage3における坑道周辺の変位ベクトル・主応力分布図を図-1.3.3.5に示す。

変位量は、

- ・ CASE-K-C-1 (水平変位：3.69mm 垂直変位：3.52mm 変形比：1.05)
- ・ CASE-K-J-1 (水平変位：0.91mm 垂直変位：1.45mm 変形比：0.63)
- ・ CASE-K-D-1 (水平変位：0.88mm 垂直変位：1.10mm 変形比：0.8)

である。これから、等価連続体解析と不連続体解析間において坑道の変位量、変形モードに相違が生じていることが分かる。不連続体解析の場合、坑道掘削によって、坑道上下の岩盤ブロックが抜け出し、坑道の垂直変位が水平変位よりも大きくなったために変形モードが等価連続体解析と異なっている。また、不連続体解析 (FEM-J,DEM) 間では、変形量は異なっているが、その変形モードは概ね一致している。以上から、格子モデルを用いて、剛性を考慮した場合、等価連続体解析～不連続体手法間で変位量および変位分布に相違が生じている。また、不連続体解析間 (FEM-J,DEM) では、その変位量に多少の相違があるが、坑道の変形モードは両者間で良い対応を示している。

応力分布は変位分布と同様に等価連続体解析～不連続体手法間で異なっている。

#### d) ランダムモデル剛性考慮

Stage3における坑道周辺の変位ベクトル図、主応力分布図を図-1.3.3.6に示す。

また、変位量は、

- ・ CASE-R-C-1 (水平変位：2.03mm 垂直変位：1.95mm 変形比：1.05)
- ・ CASE-R-J-1 (水平変位：0.29mm 垂直変位：0.64mm 変形比：0.45)
- ・ CASE-R-D-1 (水平変位：0.21mm 垂直変位：0.47mm 変形比：0.45)

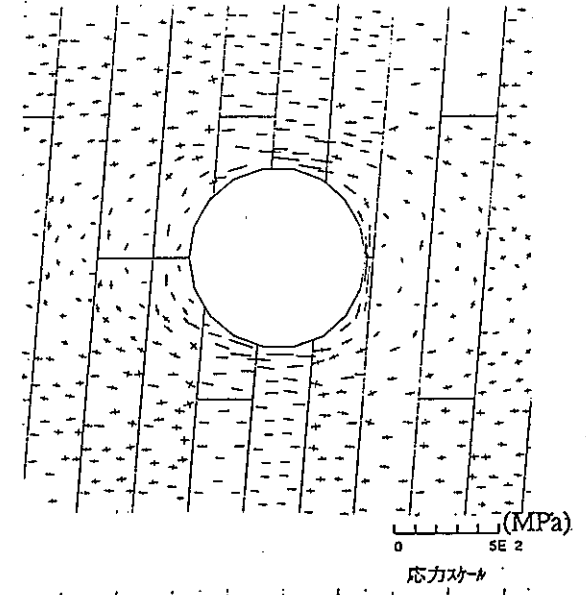
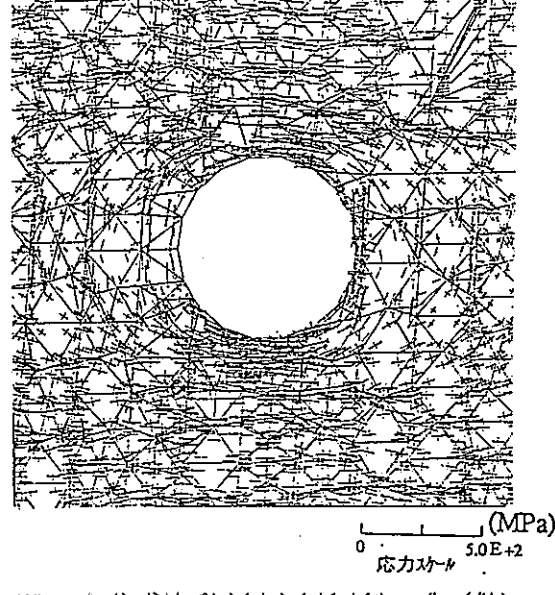
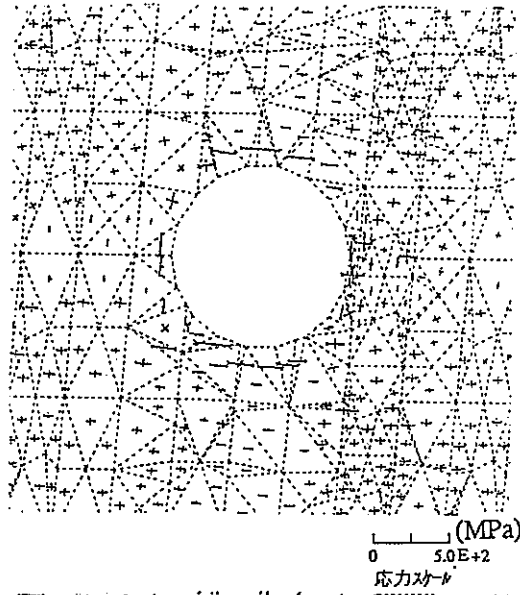
である。これから、坑道の変形は、等価連続体解析と不連続体解析間において相違が生じていることが分かる。これは格子モデルの場合と同様に、坑道掘削によって、坑道上下の岩盤ブロックが抜け出す変形モードとなり、その結果、岩盤の垂直変位が水平変位よりも大きくなったためである。また、不連続体解析 (FEM-J,DEM) 間では、変形量は異なっているが、その変形モードは概ね一致している。以上から、ランダムモデルを用いて剛性を考慮した場合、等価連続体解析～不連続体手法間で変位量および変位分布に相違が生じている。また応力分布も同様に等価連続体解析～不連続体手法間で異なっている。特に、不連続体解析では

等価連続体解析 (FEM-CT)

不連続体解析ジョイント要素 (FEM-J)

不連続体解析個別要素法 (DEM)

応力



変位

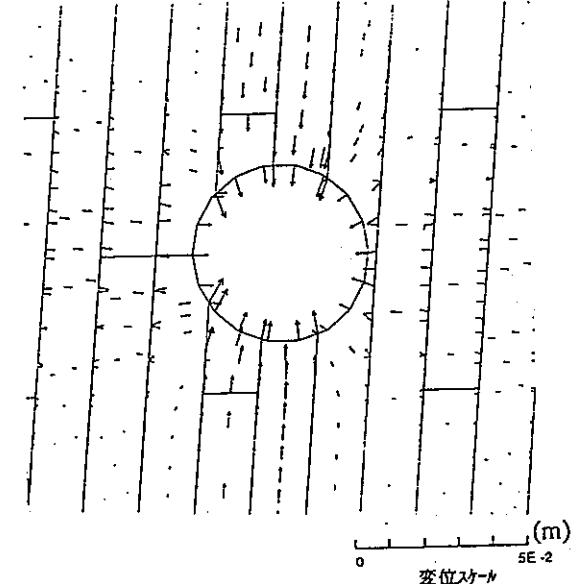
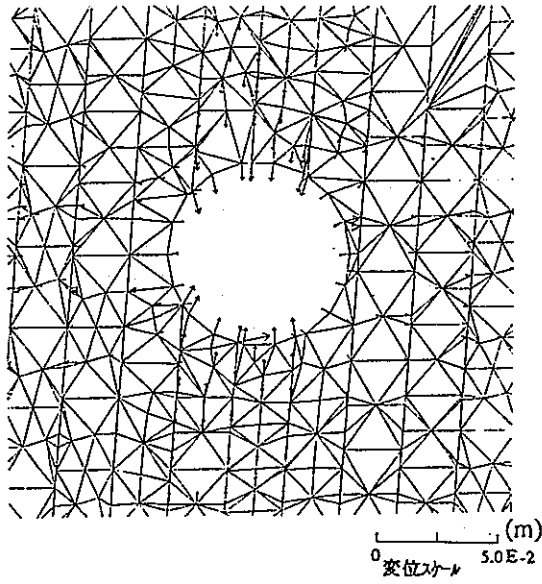
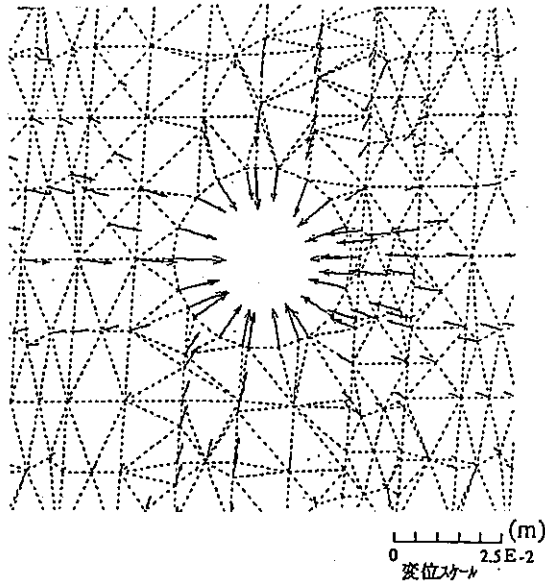
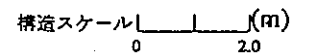


図-1.3.3.5 変位ベクトル・主応力図 (Stage3: 格子モデル 剛性考慮)

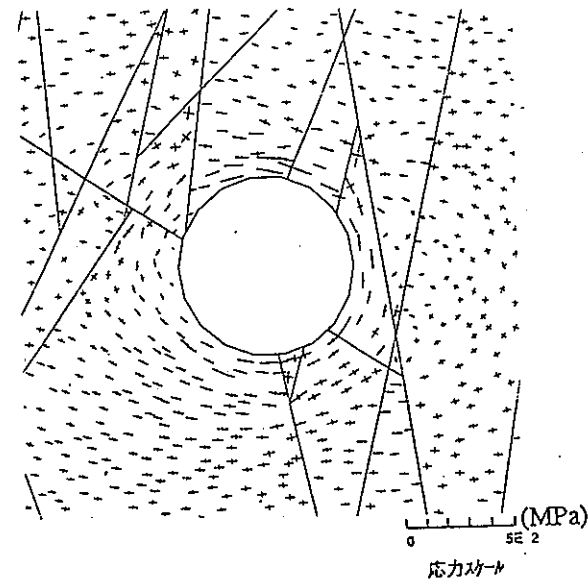
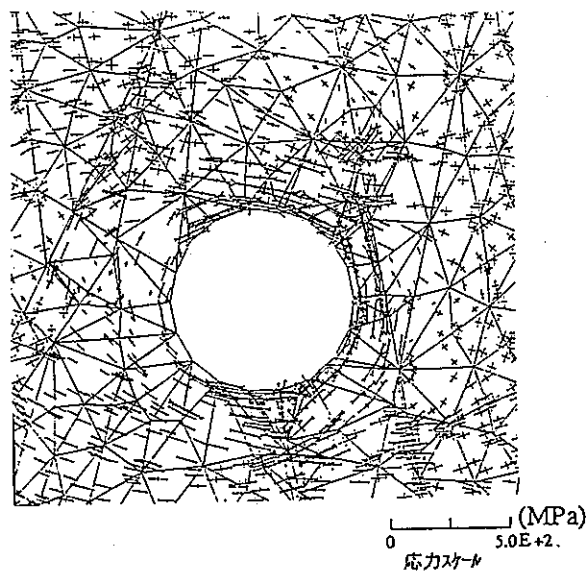
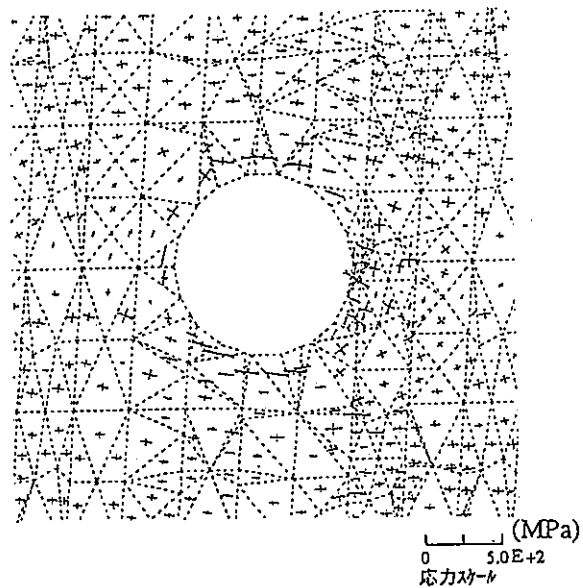


等価連続体解析 (FEM-CT)

不連続体解析ジョイント要素 (FEM-J)

不連続体解析個別要素法 (DEM)

応力



変位

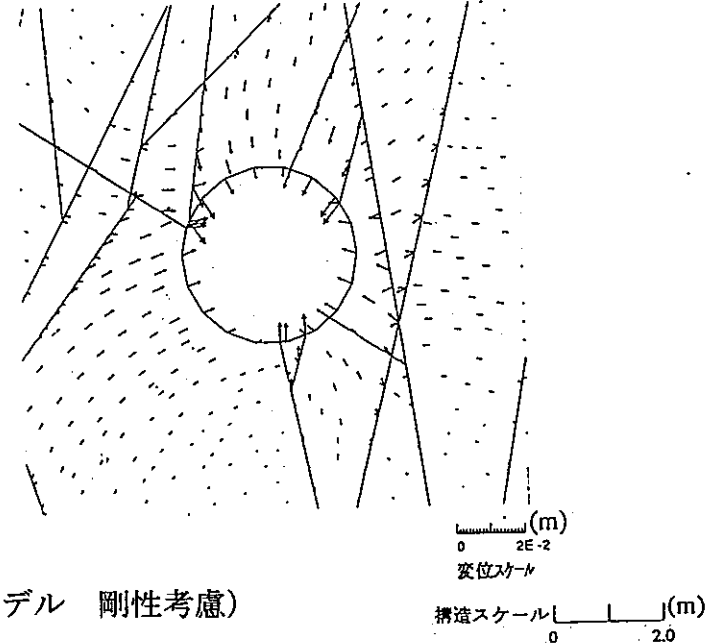
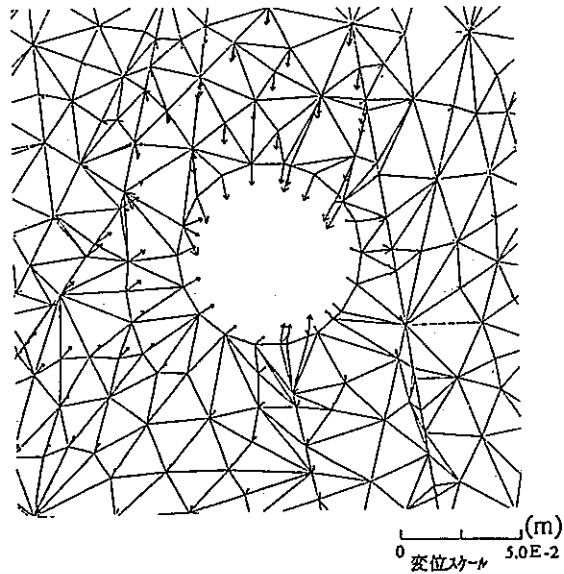
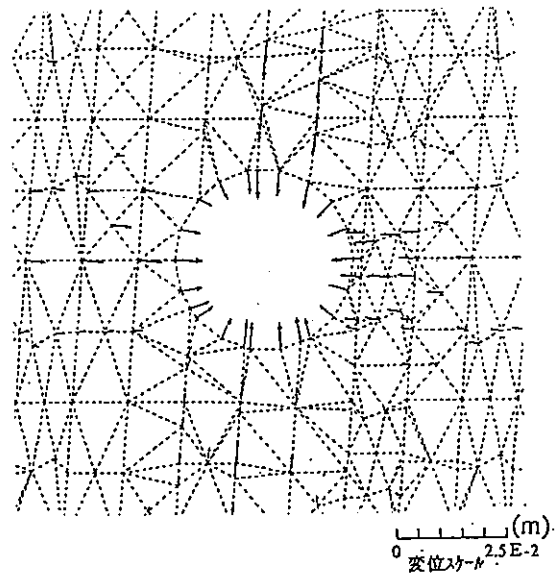


図-1.3.3.6 変位ベクトル・主応力図 (Stage3: ランダムモデル 剛性考慮)

坑道下部の岩盤ブロックでの引張応力の発生を評価しているが等価連続体解析ではこれを評価できていない。

## (2) 解析モデル間の相違

今回の研究で設定した、2つのモデル（ランダム・格子）の相違が解析結果に与える影響について考察する。

### a) 等価連続体解析

変位量は、

・ CASE-K-C-1（水平変位：3.69mm 垂直変位：3.52mm 変形比：1.05）

・ CASE-R-C-1（水平変位：2.03mm 垂直変位：1.95mm 変形比：1.05）

と、格子モデルの方が垂直・水平変位ともにランダムモデルよりも大きい結果となった。これは、クラックテンソルの第1不変量 $F_0$ （クラックの体積密度）が、

$$\begin{array}{cc} \text{格子モデル} & \text{ランダムモデル} \\ F_{ij} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.20 & -0.46 \\ \text{Syn} & 0.15 \end{bmatrix} & F_{ij} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.20 & -0.40 \\ \text{Syn} & 0.32 \end{bmatrix} \\ F_0 = F_{11} + F_{22} = 5.20 + 0.15 = 5.35 & F_0 = F_{11} + F_{22} = 3.20 + 0.32 = 3.52 \end{array}$$

と格子モデルの方がランダムモデルよりも大きいためである。

変形比は両モデルで1.05と一致している。

今回、作成した解析モデルでは、変形量に相違が生じたが、変形モードは一致している。

### b) 不連続体解析

ここでは、不連続体解析としてDEMを例に、解析モデルの相違について検討する。変位量は、

・ CASE-K-C-1（水平変位：1.10mm 垂直変位：0.88mm 変形比：1.25）

・ CASE-R-D-1（水平変位：0.21mm 垂直変位：0.47mm 変形比：0.45）

と、変形モード・変位量に大きな相違が生じている。これは、格子モデルにおいては、坑道上下にある岩盤ブロックが掘削によって坑道方向へ抜け出すといった変形が生じており、ランダムモデルでは、岩盤ブロックの面積が大きく、これが互いに噛み合っているために坑道方向への変形が抑制されているために変形量が小さく、変形モードに相違が生じている。坑道の変形モードは両者間で良い対応を示している。

応力の分布では特に坑道への抜け出しブロックでは引張応力の発生が認められる。このような引張応力の分布は、解析モデルによって、その発生位置が異なっている。

### (3) 解析手順の相違

処分坑道の掘削解析を通して、各解析手法の手順について整理する。

各解析手法の手順を図-1.3.3.7に示す。これから、不連続面の幾何学特性を解析モデルの構造データ上での評価方法がFEM-CT,FEM-J,DEMで大きく異なっている。

- ・ FEM-CT：幾何学特性をクラックテンソルで評価
- ・ FEM-J：不連続面の一本一本をジョイント要素で評価
- ・ DEM：不連続面をその端点座標で評価

これに伴って、解析構造データ数にも手法間で大きく異なっており、今回の研究で用いた格子モデルの場合で

- ・ FEM-CT：9000枚
- ・ FEM-Jで12000枚
- ・ DEMで60枚

である。

また、解析の実行では、FEMは解の唯一性が保障されており、一回の実行によって解を得ることが可能である。一方、DEMではその解析で用いる物性や解析のために設定した時間ステップ、時間ステップ数等によって解が収束しない場合があり、最終的に解を得るためには数回の実行が必要である、

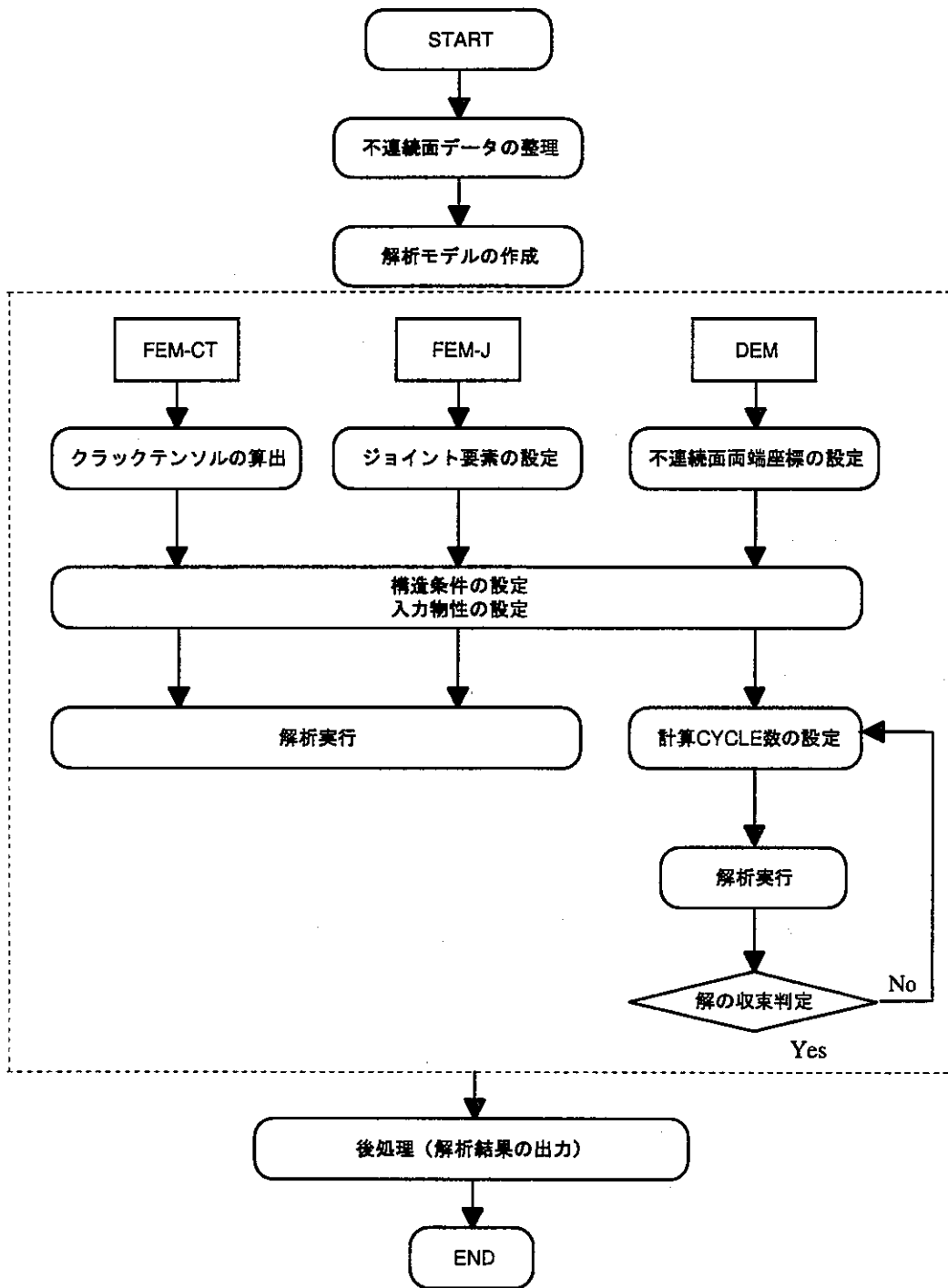


図-1.3.3.7 解析手順の相違

### 1.3.4 まとめ

不連続体解析を取扱える解析手法を用いて、処分坑道の掘削解析を実施し、手法間における解析機能の比較検討を行った。得られた知見を以下に示す。

#### (1) 入出力データ

- ・入力データは3手法（FEM-CT,FEM-J,DEM）で概ね一致している。
- ・解析によって得られる出力データとして、不連続面の応力や変位に関してはFEM-J,DEMでは出力可能であるが、FEM-CTでは不可能である。

#### (2) 解析機能

- ・施工段階を考慮した逐次掘削解析が3手法で実施可能である。
- ・FEM-CTでは不連続面の破壊を考慮することができない。

#### (3) 解析結果

- ・不連続面の剛性を考慮しなかった場合、3手法間で解析結果として得られる坑道の変形量は異なるものの、坑道の変形モードは概ね一致している。
- ・不連続面の剛性を考慮した場合、等価連続体解析（FEM-CT）と不連続体解析（FEM-J,DEM）ではその変形モードが異なっている。
- ・ランダムモデルのように、坑道周辺のブロックの変形が抑制された場合、坑道への変形が自由な格子モデルと比較してその変形量が小さく得られた。また、変形モードもモデル間で大きく異なっている。

#### (4) 解析手順

- ・構造データ上で不連続面の幾何学特性を評価する方法がFEM-CT,FEM-J,DEMで大きく異なっている。
- ・FEMは解の唯一性が保障されており、一回の実行によって解を得ることが可能である。一方、DEMではその解析で用いる物性や解析のために設定した時間ステップ、時間ステップ数等によって解が収束しない場合があり、最終的に解を得るためには数回の実行が必要である。

今回の研究では、限定したモデル、物性で検討しており、他のモデルや物性を適用した追加検討が必要である。また、今回の解析では、不連続面の破壊を無視しており、これを考慮した解析を実施し、解析手法間で比較検討することが必要である。空洞変形挙動評価にどの手法が適しているかの判断は、このような解析的研究の後に、原位置計測データとの考察によって実施する必要がある。

## 謝辞

本研究のうち、第1編 掘削初期の空洞変形挙動評価研究については、京都大学工学部土木工学教室 谷本親伯助教授から技術的なご指導を賜りました。ここに記して深く感謝いたします。



## 2. 人工バリア及び周辺岩盤の長期挙動評価研究

# 目 次

	頁
1. 序論	2-1
2. 非圧縮Stokes流の支配方程式と均質化の理論	2-1
2.1 多孔質体における流れの基礎式	2-1
2.1.1 Navier-Stokes流の支配方程式	2-1
2.1.2 境界条件	2-1
2.2 摂動方程式	2-1
2.2.1 Navier-Stokes方程式の摂動展開	2-3
2.2.2 非圧縮条件式の摂動展開	2-3
2.2.3 周期問題における境界条件	2-3
2.2.4 ユニットセル内における微視方程式	2-4
2.3 微視方程式の解について	2-4
2.3.1 微視方程式の正規化	2-4
2.3.2 特性流速関数 $v^t$ と流速 $V_i$ の比較	2-5
2.4 微視方程式の有限要素法近似	2-6
2.4.1 微視方程式の弱形式化	2-6
2.4.2 特性関数の離散化	2-6
3. モデル解析	2-8
3.1 ユニットセル内のPoiseuille流れと透水係数	2-8
3.2 平均透水係数（1次元Poiseuille流れについて）	2-8
3.3 二次元流れに関するケーススタディ	2-9
3.3.1 等方な透水係数を与えるユニットセルについて	2-9
4. 結論	2-11
謝辞	2-12

## 1. 序論

本研究では、地盤の浸透係数の算定について基礎的な研究を行う。この問題に関しては既に数多くの研究が発表され、データも多く存在しているが、地盤を構成する材料のマイクロ構造を考慮した理論は、未だ完成されていない。ここでは、地盤材料の幾何的な繰り返し構造を仮定した均質化手法を導入して二次元定常浸透問題をマイクロな視点で考察し、上記の経験的物性値の検討をする。

## 2. 非圧縮Stokes流の支配方程式と均質化の理論

### 2.1 多孔質体における流れの基礎式

#### 2.1.1 Navier-Stokes流の支配方程式

本論文で扱う流体は非圧縮性流体とし、

$$\rho = \text{constant} \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial V_k^\varepsilon}{\partial x_k} = 0 \quad (2.1)$$

Navier-Stokes流の方程式が以下のように整理される。

$$\rho \frac{DV_i^\varepsilon}{Dt} = -\frac{\partial P^\varepsilon}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 V_i^\varepsilon}{\partial x_k \partial x_k} + \rho X_i \quad (2.2)$$

#### 2.1.2 境界条件

Navier-Stokes流の境界条件は、つぎのようである。

- ・ 流体-固体条件  $\Gamma_v$  におけるNewton流体の仮定 (固定境界条件)

$$V_i^\varepsilon = 0 \quad \text{on } \Gamma_v \quad (2.3)$$

- ・ 圧力境界条件

$$P^\varepsilon = \hat{P} \quad \text{on } \Gamma_p \quad (2.4)$$

### 2.2 摂動展開

図2.1に示すように、2つの代表的スケールで表されるような微視的周期構造を有する材料を考える。ここで、材料全体の構造を記述するための座標を  $\mathbf{x}$  とし、さらに微視的構造を記述するための座標として、 $\mathbf{y} = \mathbf{x}/\varepsilon$  を導入する。 $\mathbf{y}$  は微視的変数

$x$  は巨視的変数と呼ばれる。また、周期構造の基本単位であり、スケールが  $\varepsilon$  であるような基本構造をユニットセルと呼ぶ。対象構造物を十分小さい  $\varepsilon$  の周期構造と仮定して、 $\varepsilon \rightarrow 0$  の極限をとれば、微視的構造を考慮に入れた平均的な挙動が得られることになる。

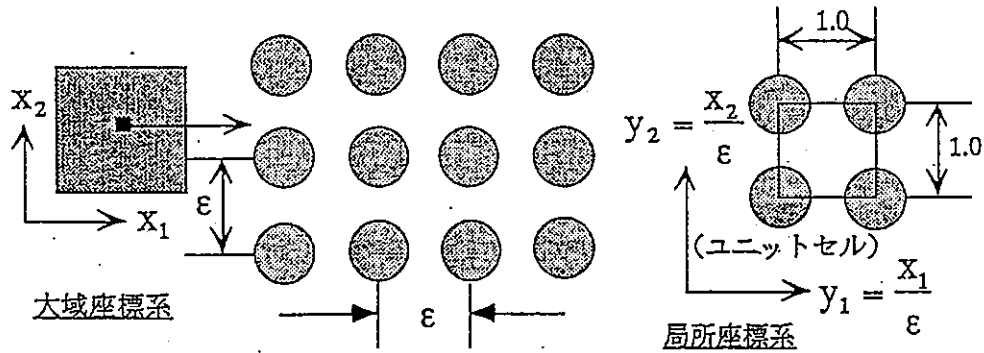


図2.1 微視的周期構造を有する材料とユニットセル

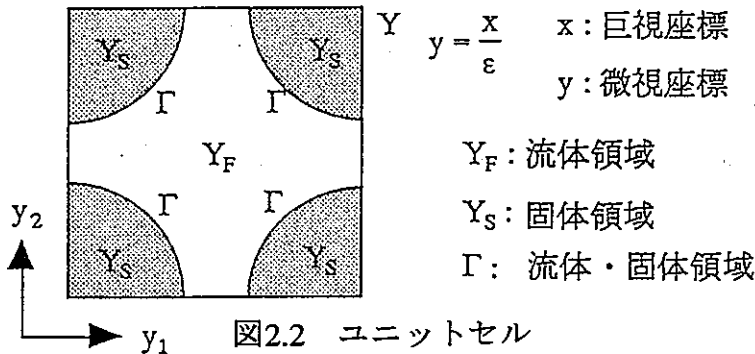


図2.2 ユニットセル

いま、巨視座標  $x$  に加え、微視的座標  $y$  を導入した周期  $Y$  の関数をつぎのように定義する。

$$\phi^\varepsilon(x) = \phi(x, y) \tag{2.5}$$

$$\phi(x, y) = \phi(x, y + Y) \tag{2.6}$$

$\phi^\varepsilon$  を  $\varepsilon$  について漸近展開すると、つぎのようになる。

$$\phi^\varepsilon(x) = \phi^0(x, y) + \varepsilon \phi^1(x, y) + \varepsilon^2 \phi^2(x, y) + \dots \tag{2.7}$$

先に示した流速、圧力、体積力を図2.2に示すユニットセル内で、それぞれ  $V_i^\varepsilon, P^\varepsilon, X_i^\varepsilon$  であるとし、以下のような微視的項を含む摂動展開を行うと、

$$V_i^\varepsilon(x) = \varepsilon^2 V_i^0(x, y) + \varepsilon^3 V_i^1(x, y) + \dots \tag{2.8}$$

$$P^\varepsilon(x) = P^0(x, y) + \varepsilon P^1(x, y) + \dots \quad (2.9)$$

$$X_i^\varepsilon(x) = X_i^0(x) + \varepsilon X_i^1(x, y) + \dots \quad (2.10)$$

と書ける。ここで  $\varepsilon$  は

$$x = \frac{y}{\varepsilon} \quad (2.11)$$

である。

### 2.2.1 Navier-Stokes方程式の摂動展開

摂動展開 (2.8) ~ (2.10) を式 (2.2) に代入すると、つぎのようである。

$$\begin{aligned} & \varepsilon^2 \rho \frac{DV_i^0}{Dt} + \varepsilon^3 \rho \frac{DV_i^1}{Dt} \\ &= -\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial P^0}{\partial y_i} + \left( -\frac{\partial P^0}{\partial x_i} - \frac{\partial P^1}{\partial y_i} + \mu \frac{\partial^2 V_i^0}{\partial y_k \partial y_k} + \rho X_i^0 \right) \\ & \quad + \varepsilon \left( -\frac{\partial P^1}{\partial x_i} - \frac{\partial P^2}{\partial y_i} + 2\mu \frac{\partial^2 V_i^0}{\partial x_k \partial y_k} + \mu \frac{\partial^2 V_i^1}{\partial y_k \partial y_k} + \rho X_i^1 \right) \\ & \quad + \varepsilon^2 \left( -\frac{\partial P^2}{\partial x_i^2} - \frac{\partial P^3}{\partial y_i} + \mu \frac{\partial^2 V_i^0}{\partial x_k \partial x_k} + 2\mu \frac{\partial^2 V_i^1}{\partial x_k \partial y_k} + \mu \frac{\partial^2 V_i^2}{\partial y_k \partial y_k} + \rho X_i^2 \right) \\ & \quad + \dots \end{aligned} \quad (2.12)$$

### 2.2.2 非圧縮条件式の摂動展開

摂動展開 (2.8) ~ (2.10) を同様に (2.1) 式に代入すると、つぎのようである。

$$\varepsilon^2 \left( \frac{\partial V_i^0}{\partial x_i} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial V_i^0}{\partial y_i} \right) + \varepsilon^3 \left( \frac{\partial V_i^1}{\partial x_i} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial V_i^1}{\partial y_i} \right) + \dots = 0 \quad (2.13)$$

$$\varepsilon \frac{\partial V_i^0}{\partial y_i} + \varepsilon^2 \left( \frac{\partial V_i^0}{\partial x_i} + \frac{\partial V_i^1}{\partial y_i} \right) + \dots = 0 \quad (2.14)$$

### 2.2.3 周期問題における境界条件

固定境界条件は流体-固体の境界でつぎのように書ける。

$$\varepsilon^2 V_i^0 + \varepsilon^3 V_i^1 + \dots = 0 \quad \text{on } \Gamma \quad (2.15)$$

したがって、

$$V_i^0 = 0, \quad V_i^1 = 0 \quad \dots \quad \text{on } \Gamma \quad (2.16)$$

である。また、流体部分 $Y_F$ の周期条件（境界 $\Gamma_F$ ）はつぎのように書ける。

$$V_i(\mathbf{y}; t) = V_i(\mathbf{y} + \mathbf{Y}; t) \quad (2.17)$$

$$P(\mathbf{y}; t) = P(\mathbf{y} + \mathbf{Y}; t) \quad (2.18)$$

## 2.2.4 ユニットセル内における微視的方程式

以上より、ユニットセル内で次のような方程式と境界条件が得られる。

$$\mu \frac{\partial^2 V_i^0}{\partial y_k \partial y_k} - \frac{\partial P^1}{\partial y_i} = \frac{\partial P^0}{\partial x_i} - \rho X_i^0 \quad \text{in } Y_F \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial V_i^0}{\partial y_i} = 0 \quad \text{in } Y_F \quad (2.20)$$

$$V_i^0 = 0 \quad \text{on } \Gamma \quad (2.21)$$

これらは微視方程式と呼ばれる。ここで、式(2.19)の右辺は巨視的な成分しか存在しないことから、次節でこの項による正規化を行なう。

## 2.3 微視方程式の解について

### 2.3.1 微視方程式の正規化

(2.19) ~ (2.21) 式から得られる解について以下のように特性関数 $v_i^k$ と $p^k$ を導入する。

$$V_i^0 = \left( \frac{\partial P^0}{\partial x_k} - \rho X_k^0 \right) v_i^k \quad (2.22)$$

$$P^1 = \left( \frac{\partial P^0}{\partial x_k} - \rho X_k^0 \right) p^k \quad (2.23)$$

これらを代入すると、(2.22) 式はユニットセル内において

$$\mu \frac{\partial^2 v_i^k}{\partial y_j \partial y_j} - \frac{\partial p^k}{\partial y_i} + \delta_{ik} = 0 \quad \text{in } Y_F \quad (2.24)$$

が成り立たなければならない。同様に (2.20) 式も次のように書き換えられる。

$$\frac{\partial v_i^k}{\partial y_i} = 0 \quad \text{in } Y_F \quad (2.25)$$

また (2.21) 式も (2.24) 式と同様に次のように書き換えられる。

$$v_i^k = 0 \quad \text{on } \Gamma \quad (2.26)$$

結局、(2.24) 式と (2.25) 式を解けばユニットセル内の流れが分かる。

### 2.3.2 特性流速関数 $v_i^k$ と $V_i$ の比較

・大域方程式 ( $V_i, P$  について)

支配方程式 (運動方程式)

$$\rho X_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 V_i}{\partial x_j \partial x_j} = 0 \quad (2.27)$$

連続式 (非圧縮条件式)

$$\frac{\partial V_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.28)$$

境界条件

$$\begin{array}{ll} V_i = 0 & \text{on } \Gamma \\ V_i = \bar{V}_i & \text{on } \Gamma_F \\ \text{or } P = \bar{P} & \text{on } \Gamma_F \end{array} \quad (2.29)$$

・微視方程式 ( $v_i^k, p^k$  について)

支配方程式 (運動方程式)

$$\delta_{ik} - \frac{\partial p^k}{\partial y_i} + \mu \frac{\partial^2 v_i^k}{\partial y_j \partial y_j} = 0 \quad (2.30)$$

連続式 (非圧縮条件式)

$$\frac{\partial v_i^k}{\partial y_i} = 0 \quad (2.31)$$

境界条件

$$\left. \begin{array}{l} v_i^k = 0 \quad \text{on } \Gamma \\ p^k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = p^k(\mathbf{x}, \mathbf{y} + \mathbf{Y}) \\ v_i^k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = v_i^k(\mathbf{x}, \mathbf{y} + \mathbf{Y}) \end{array} \right\} \text{(周期性の条件)} \quad (2.32)$$

(2.27) ~ (2.29)、(2.30) ~ (2.32) を比較すると、以下の2つの点に注目することができる。

1. (2.30) 式における  $\delta_{ik}$  は (2.27) 式中の物体力項  $\rho X_i$  に相当し、これを疑似物体力と呼ぶことにする。
2. 境界条件については、流体境界  $\Gamma_F$  に大きな違いが見られる。すなわち、Stokes 流れでは流速  $V_i$  や圧力  $P$  あるいはせん断力などの境界値を与える境界条件が設定されるのに対し、特性流速関数の方程式においてはユニットセルの周期性条件だけが与えられているという点異なる。

## 2.4 微視方程式の有限要素法近似

### 2.4.1 微視方程式の弱形式化

(2.27) ~ (2.32) 式群からユニットセルにおける弱形式化は以下に与えられる。

#### ・運動方程式

微視運動方程式の弱形式

$$\int_{Y_F} \left( \mu \frac{\partial V_i^k}{\partial y_j} - p^k \delta_{ij} \right) \frac{\partial (\delta v_i)}{\partial y_j} dv - \int_{Y_F} \delta v_k dv = 0 \quad (2.33)$$

を得る。

#### ・連続式

連続式の弱形式

$$\int v_i^k \frac{\partial (\delta p)}{\partial y_i} dv = 0 \quad (2.34)$$

が得られる。

### 2.4.2 特性曲線の離散化

形状関数  $\Phi_j$  と  $\Psi_r$  を用いて、特性関数  $v_i^k$  と  $p^k$  を次のように離散近似する。

$$v_i^k \doteq V_j^k \Phi_j \quad (j=1,2,\dots,m)$$

$$p^k \doteq P_r^k \Psi_r \quad (r=1,2,\dots,n)$$

ここで、 $v_i^k$  には2次の形状関数を用い、 $p^k$  には1次の形状関数を用いる。したがって、四辺形要素を用いた有限要素近似では、 $v_i^k$  に関しては9節点、 $p^k$  に関しては4節



点の形状関数を持つ複合四角形要素を用いる。(図2.3)

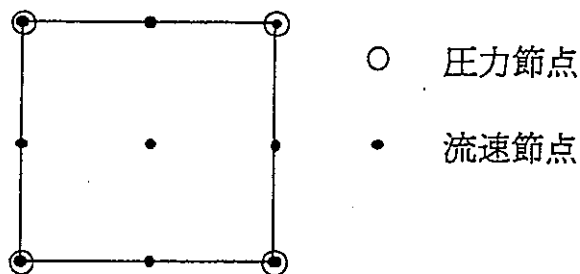


図2.3 流速・圧力複合要素

先述の形状関数を用い、(2.33) 式を離散化すると次式を得る。

$$\sum_{m=1}^L (K_{rs}^v V_{ir}^k + K_{as}^p P_a^k) \delta V_{is} = \sum_{m=1}^L \delta V_{is} F_s^k \quad (2.35)$$

同様にして、(2.34) 式をマトリクスで書くと次のようになる。

$$\int_{Y_F} v_i^k \frac{\partial(\delta p)}{\partial y_i} dv = 0 \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^L \int_{Y_m} v_i^k \frac{\partial(\delta p)}{\partial y_i} dv &\simeq \sum_{m=1}^L \int_{Y_m} V_{ir}^k \Phi_r \delta P_s \frac{\partial \Psi_s}{\partial y_i} dv = \sum_{m=1}^L V_{ir}^k \delta P_s \int_{Y_m} \Phi_r \frac{\partial \Psi_s}{\partial y_i} dv \\ &= \sum_{m=1}^L V_{ir}^k \delta P_s K_{rsi}^{vp} \end{aligned} \quad (2.37)$$

結局、マトリクス形で解くべき方程式は、次に示す連立一次方程式となり、これを境界  $\Gamma_F$  上における周期条件と境界  $\Gamma$  上での流速固定条件を導入して解けば良い。

$$\begin{bmatrix} K^v & K^{pv} \\ K^{vp} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V^k \\ P^k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F^k \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (k = 1, 2, 3) \quad (2.38)$$

### 3.モデル解析

微視方程式系についてその一般解を求めることは困難である。ここではまず、図3.1の平板間のPoiseuille流れ（一次元流れ）を参考に微視方程式の解を求め、さらに、二次元のStokes流れ問題の解を有限要素法によって求めて、比較検討する。

#### 3.1 ユニットセル内のPoiseuille流れと透水係数

図3.1に示すように、一次元方向にしか流れが生じないユニットセルを考える。

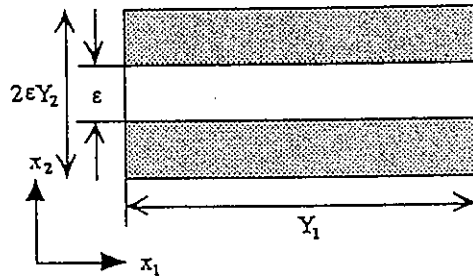


図3.1 一次元流れのユニットセル

特性流速関数 $v_1^1$ が図3.2に示すように、Poiseuille流れの一般解と相似な分布になる。

$$v_1^1 = \frac{1}{2\mu}(\varepsilon^2 b^2 - y_2^2) \quad (3.1)$$

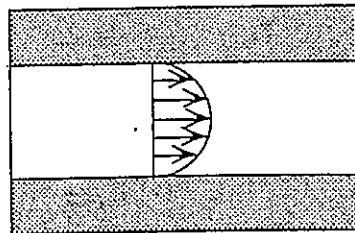


図3.2 Poiseuille流れ

#### 3.2 平均透水係数（一次元Poiseuille流れについて）

一次元Poiseuille流れについての平均透水係数は間隙率を $n$ とおけば、

$$K_x = \frac{\varepsilon^2 b^2}{3\mu} n \quad (3.2)$$

と求まる。

つぎにこのこの考えを二次元に拡張する、ここで一次元ではみられなかった水路の交差部分の影響を考慮することが必要である。ここではまず図3.3のように一次元の流れで用いたユニットセルの組み合わせで二次元の場合を表現することにする。交差部分の未知の影響を表す係数を微視的な $y_1$ 方向と $y_2$ 方向においてそれぞれ $\xi_1$ と $\xi_2$ という関数で表すと、近似的には透水係数はつぎのように与えられるであろう。

$$K_x = \xi_1 \frac{n_1 \varepsilon^2 b_2^2}{3\mu}, \quad K_y = \xi_2 \frac{n_2 \varepsilon^2 b_2^1}{3\mu} \quad (3.3)$$

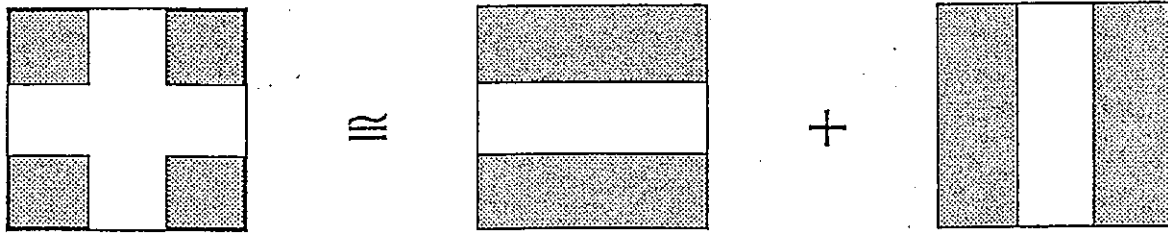


図3.3 二次元流れへの拡張の仮定

### 3.3 二次元流れに関するケーススタディ

つぎに有限要素解析により粒子間の二次元的な流れを交差する管路の流れと仮定して、ユニットセル内の特性流速関数の分布と平均透水係数を求める。用いるモデルは等方的な透水係数を与えるものと異方的な透水係数を与えるものについて図3.4に示すようなユニットセルとし、以下のようなパターンを用意した。

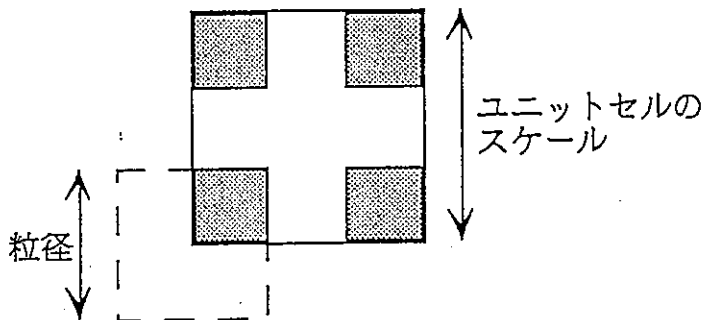


図3.4 ユニットセルのスケールの説明

等方的な透水係数を与えるようなユニットセルについて

- 例題 (a) : ユニットセルのスケールを固定し、間隙率と粒径を変化させる。
- 例題 (b) : 間隙率を固定して、粒径とユニットセルのスケールを変化させる。
- 例題 (c) : 粒径を固定して、間隙率とユニットセルのスケールを変化させる。

#### 3.3.1 等方な透水係数を与えるユニットセルについて

例題 (a) について

ユニットセル全体で積分平均をとって間隙率と平均透水係数の関係を求めると図3.5に示すグラフのようになる。さらに、3.2節で述べた表現による平均透水係数も、同様に破線でプロットした。この破線のグラフは水路の交差部分の影響が全くない

ことを意味し、実線で表した有限要素解析結果は交差部分で滑らかな二次元流れが妨げられる可能性があり、その分透水係数が低いのではないかと推測ができる。すなわち、未知係数 $\xi$ をこの関係により説明できる可能性を含んでいる。

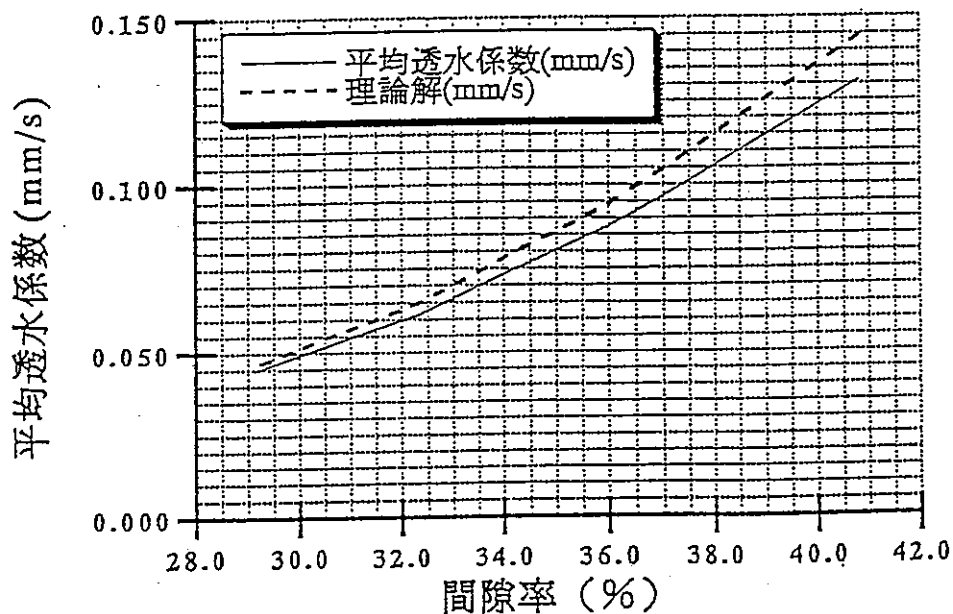


図3.5 平均透水係数の理論解とFEM解 (例題(a))

例題 (b) について

ユニットセルにおいて積分平均し、得られた平均透水係数と粒径との関係を図3.6に示す。この図において、粒径の増加とともに平均透水係数が増加しているが、これは他の2ケースに比べ注目すべき点である。

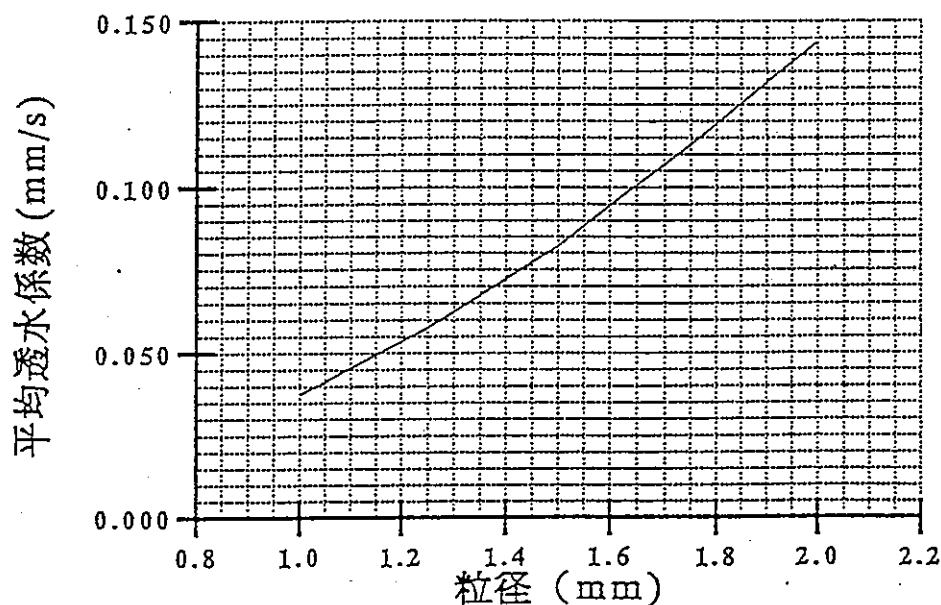


図3.6 平均透水係数 (例題(b))

#### 例題 (c) について

間隙率と平均透水係数との関係を図3.7に示す。このケースでは、例えば同じ土でも締め固められた土とそうでない土とによる平均透水係数の比較をすることに似ており、結果はゆるい土の方が平均透水係数が高くなっていることは自明である。

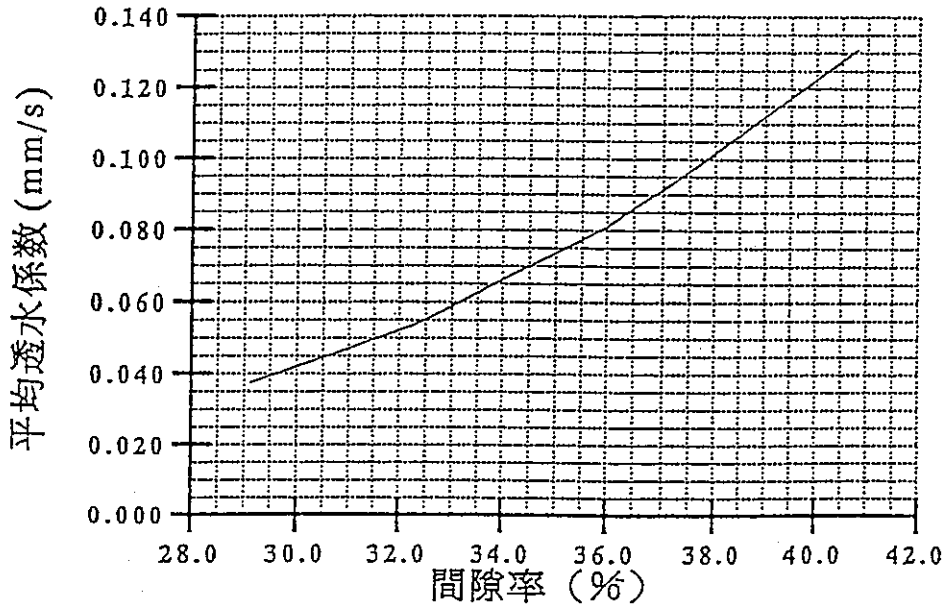


図3.7 平均透水係数 (例題(c))

#### 4.結論

多孔質体をミクロな粒子の周期構造に置き換えることによって粒子の形状、配置、大きさなどのパラメータのわずかな影響を反映した二次元平均透水係数を求めることができた。さらに、図3.5から一次元流れの平均透水係数の一般解と二次元での平均透水係数との間で整合がとれることが判った。ユニットセルの粒子の形状は有限要素メッシュの作り方によりある程度自在であるので、今回用いたような等方的なメッシュだけでなくいろいろな形状のメッシュを用いて異方的な透水係数を示す問題の解析や三次元へのプログラムの拡張などの応用が今後の課題として挙げられる。

## 謝辞

本研究のうち、第2編 人工バリア及び周辺岩盤の長期挙動研究は、名古屋大学工学部地圏環境工学教室 市川康明助教授に担当して頂きました。ここに記して深く感謝いたします。