

# 研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の 透水性変化予測解析

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2003年2月

清水建設株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構  
( Japan Nuclear Cycle Development Institute )  
2003

## 研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の透水性変化予測解析

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

郷家 光男\* 多田 浩幸\* 堀田 政國\* 若林 成樹\*

## 要 旨

核燃料サイクル開発機構東濃地科学センターでは、地質環境の調査・解析・評価技術の基盤整備と、深地層における工学技術の基盤整備を目的として、瑞浪市において超深地層研究所計画を進めている。本業務では、掘削影響領域の予測解析手法の整備・高度化に資するために、これまでに取得された土岐花崗岩のデータに基づき、クラックテンソルモデルによる応力解析を行い、その解析で得られた応力状態を用いて仮想割れ目モデルによる透水性変化予測に関する2次元解析を行った。検討の結果、以下のような知見を得た。

- 1) クラックテンソルモデルによる2次元応力解析の結果、立坑および横坑とも、岩盤が堅硬なケースでは、内空変位は微小であった。ただし、断層部では、大きな変位が発生した。
- 2) 仮想割れ目モデルによる透水性変化予測解析の結果、立坑および横坑とも、岩盤が堅硬なケースでは、掘削壁面から約1mの範囲で10倍以上の透水係数の増加を示し、最大で100倍以上に増加した。ただし、断層部では、掘削壁面から約4mの範囲で10倍以上の増加を示した。
- 3) 横坑において、同一深度でも坑道展開方向が変化すると、割れ目の方向や初期応力の影響により、透水係数の増加領域は変化した。例えば、GL-945mの横坑の側壁では、透水係数の最大増加率は110倍から670倍まで変化した。
- 4) 横坑の支保については、周辺岩盤が堅硬であるため、明瞭な支保効果は見られなかつた。

---

本報告書は、清水建設株式会社が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

機構担当課室：東濃地科学センター 瑞浪超深地層研究所 研究グループ

\* 清水建設株式会社 技術研究所

## Hydraulic conductivity change analysis of surrounding rock mass in excavating research drift

Mitsuo Gohke\*, Hiroyuki Tada\*, Masakuni Horita\*, and Naruki Wakabayashi\*

### Abstract

Tono Geoscience Center (TGC), Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) conducts the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) project in order to develop the comprehensive investigation techniques for the geological environment and the engineering techniques in the deep underground application. The purposes of this study were to contribute to the construction of rock mechanical modeling for MIU project. The virtual fracture model based on mechanical property on the Toki granite was applied to the 2-D hydraulic conductivity change analysis in excavating a research drift and a shaft. The crack tensor analysis model was introduced to the stress analysis before the hydraulic conductivity change analysis.

The results are as follows:

- 1) The crack tensor stress analysis showed very small displacement on the perimeter of a shaft and a drift in intact rock mass, while large displacement appeared in fault zone.
- 2) More than 10 times larger hydraulic conductivity from the initial one appeared in the extent of 1m from the perimeter of a drift and a shaft, in the hydraulic conductivity change analysis with the virtual fracture model for the intact rock mass. The maximum increase of hydraulic conductivity was up to 100 times from initial one. The fault zone showed more than 10 times larger hydraulic conductivity in the extent of 4m from the perimeter.
- 3) The extent of hydraulic conductivity change was affected by the direction of a drift due to the direction of fractures and the initial stress condition. For example, the rate of hydraulic conductivity increased from initial one changed 110 times to 670 times with the direction of a drift, at the side wall of a drift at the depth of 945m.
- 4) There was no clear effect to reduce the displacement by supports in the drift in intact rock mass.

---

This work was performed by Shimizu Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison: Underground Research Group, Mizunami Underground Research Laboratory, Tono Geoscience Center

\* Institute of Technology, Shimizu Corporation

## 目次

1.	はじめに	1
2.	業務概要	2
2.1	件名	2
2.2	実施期間	2
2.3	実施機関	2
2.4	納入場所	2
2.5	実施内容	2
2.6	参考技術資料	2
3.	研究坑道掘削に伴う周辺岩盤の透水性変化予測解析	3
3.1	解析の目的	3
3.2	解析の流れ	3
3.3	クラックテンソルモデルの概要	5
3.3.1	解析手法の概要	5
3.3.2	巨視的な応力とひずみの関係	6
3.4	仮想割れ目モデルの概要	9
3.4.1	仮想割れ目モデルの概念	9
3.4.2	仮想割れ目の透水係数と開口幅の算定	10
3.4.3	岩盤の透水テンソルの算定	11
3.5	解析領域	14
3.5.1	解析対象深度と坑道展開方向	14
3.5.2	立坑の解析領域と岩盤区分	14
3.5.3	横坑の解析領域と岩盤区分	14
3.6	初期応力および物性値	17
3.6.1	初期応力	17
3.6.2	岩盤基質部の物性値	17
3.6.3	割れ目の方向分布	18
3.6.4	岩盤の初期透水係数	24
3.6.5	トレース長とクラックテンソルの設定	25
3.6.6	割れ目の垂直剛性とせん断剛性の設定	31
3.6.7	仮想割れ目の透水係数と密度の設定	34
3.6.8	解析ケースと物性値のまとめ	36
3.7	立坑解析結果	39
3.7.1	変形量	39
3.7.2	応力	41

3. 7. 3 安全率	43
3. 7. 4 平均透水係数および変化率	45
3. 8 横坑解析結果	50
3. 8. 1 変形量	50
3. 8. 2 応力	53
3. 8. 3 安全率	56
3. 8. 4 平均透水係数および変化率	59
 4. 支保工の検討	 69
4. 1 解析ケースの設定	69
4. 2 支保パターンと物性値	69
4. 3 解析結果	70
4. 3. 1 変形量	70
4. 3. 2 応力	70
4. 3. 3 安全率	71
4. 3. 4 吹付けコンクリート応力	72
4. 3. 5 ロックボルト軸力	74
 5. 解析結果の評価	 76
5. 1 立坑解析結果の評価	76
5. 1. 1 坑道周辺岩盤の破壊領域の評価	76
5. 1. 2 坑道周辺岩盤の透水性変化の評価	76
5. 2 横坑解析結果の評価	77
5. 2. 1 坑道周辺岩盤の破壊領域の評価	77
5. 2. 2 坑道周辺岩盤の透水性変化の評価	77
5. 2. 3 横坑の支保の評価	78
 6. 今後の課題	 79
6. 1 土岐花崗岩における割れ目の垂直応力一透水係数関係に関する課題	79
6. 2 割れ目の3次元的分布を2次元展開したことによる誤差の検討	79
6. 3 原位置透水試験との比較による検証に関する課題	80
 7. おわりに	 82
参考文献	84

## 表目次

### 3. 研究坑道掘削に伴う周辺岩盤の透水性変化予測解析

表 3.6-1 初期応力	17
表 3.6-2 岩盤基質部の物性値	17
表 3.6-3 各ボーリング孔における岩盤区分の対象深度	18
表 3.6-4 各岩盤区分における割れ目の本数	18
表 3.6-5 岩盤区分ごとの初期透水係数	24
表 3.6-6 各ケースの岩盤区分と割れ目の平均間隔	27
表 3.6-7 $F_0$ の計算結果	27
表 3.6-8 立坑ケースのクラックテンソル	28
表 3.6-9 横坑 (GL-500m) ケースのクラックテンソル	28
表 3.6-10 横坑 (GL-945m) ケースのクラックテンソル	29
表 3.6-11 ケース1の垂直剛性・せん断剛性の算定結果	33
表 3.6-12 各ケースの割れ目の垂直剛性とせん断剛性に関するパラメータ	34
表 3.6-13 仮想割れ目の面積密度	36
表 3.6-14 立坑の解析ケースと入力物性値一覧表	37
表 3.6-15 横坑 (GL-500m) の解析ケースと入力物性値一覧表	37
表 3.6-16 横坑 (GL-945m) の解析ケースと入力物性値一覧表	37
表 3.7-1 粘着力と内部摩擦角	43

### 4. 支保工の検討

表 4.3-1 吹付けコンクリート応力一覧表	73
表 4.3-2 ロックボルト軸力一覧表	75

## 図目次

### 3. 研究坑道掘削に伴う周辺岩盤の透水性変化予測解析

図 3.2-1	透水性変化予測の解析フロー	4
図 3.3-1	クラックテンソルモデルの概要	5
図 3.3-2	割れ目の大きさと方向（3次元）	7
図 3.3-3	割れ目の大きさと方向（2次元）	7
図 3.4-1	室内試験による割れ目の垂直応力一透水係数関係	11
図 3.4-2	平行割れ目を有する岩盤	12
図 3.4-3	割れ目の2次元投影のイメージ	13
図 3.5-1	横坑の方向と座標系の設定	15
図 3.5-2	立坑解析メッシュ図	16
図 3.5-3	横坑解析メッシュ図	16
図 3.6-1	シュミットネット（下半球投影）による割れ目の方向のプロット図	19
図 3.6-2	シュミットネット（下半球投影）による割れ目の方向の頻度分布	20
図 3.6-3	割れ目トレースの法線ベクトルの相対頻度分布（立坑）	21
図 3.6-4	割れ目トレースの法線ベクトルの相対頻度分布（横坑, GL-500m）	22
図 3.6-5	割れ目トレースの法線ベクトルの相対頻度分布（横坑, GL-945m）	23
図 3.6-6	クラックテンソルの設定フロー	27
図 3.6-7	トンネル形状	30
図 3.6-8	地質平面図	30
図 3.6-9	地質断面図	30
図 3.6-10	地質断面図	30
図 3.6-11	垂直剛性とせん断剛性の設定フロー	32
図 3.6-12	せん断応力一せん断変位モデル	32
図 3.6-13	解析に用いる割れ目の垂直応力一透水係数関係	35
図 3.7-1	立坑解析結果 変形図	40
図 3.7-2	立坑解析結果 主応力図	42
図 3.7-3	安全率の定義	43
図 3.7-4	立坑解析結果 安全率分布図	44
図 3.7-5	立坑解析結果 平均透水係数分布図	47
図 3.7-6	立坑解析結果 透水係数変化率分布図	48
図 3.7-7	立坑における透水係数増大領域の比較	49
図 3.7-8	立坑における透水係数の最大増加率	49
図 3.8-1	横坑 (GL-500m) 解析結果 変形図	51
図 3.8-2	横坑 (GL-945m) 解析結果 変形図	52
図 3.8-3	横坑 (GL-500m) 解析結果 主応力図	54
図 3.8-4	横坑 (GL-945m) 解析結果 主応力図	55

図 3.8-5 横坑 (GL-500m) 解析結果 安全率分布図	57
図 3.8-6 横坑 (GL-945m) 解析結果 安全率分布図	58
図 3.8-7 横坑 (GL-500m) 解析結果 平均透水係数分布図	61
図 3.8-8 横坑 (GL-500m) 解析結果 透水係数変化率分布図	62
図 3.8-9 横坑 (GL-500m) の底盤における透水係数増大領域の比較	63
図 3.8-10 横坑 (GL-500m) の底盤における透水係数の最大増加率	63
図 3.8-11 横坑 (GL-500m) の側壁における透水係数増大領域の比較	64
図 3.8-12 横坑 (GL-500m) の側壁における透水係数の最大増加率	64
図 3.8-13 横坑 (GL-945m) 解析結果 平均透水係数分布図	65
図 3.8-14 横坑 (GL-945m) 解析結果 透水係数変化率分布図	66
図 3.8-15 横坑 (GL-945m) の底盤における透水係数増大領域の比較	67
図 3.8-16 横坑 (GL-945m) の底盤における透水係数の最大増加率	67
図 3.8-17 横坑 (GL-945m) の側壁における透水係数増大領域の比較	68
図 3.8-18 横坑 (GL-945m) の側壁における透水係数の最大増加率	68

#### 4. 支保工の検討

図 4.2-1 横坑支保パターン	69
図 4.3-1 変形図	70
図 4.3-2 主応力図	70
図 4.3-3 安全率分布図	71
図 4.3-4 吹付けコンクリート応力図	72
図 4.3-5 吹付けコンクリート要素番号図	73
図 4.3-6 ロックボルト軸力分布図	74
図 4.3-7 ロックボルト要素番号図	74

#### 6. 今後の課題

図 6.1-1 坑道軸にほぼ直交する割れ目	80
図 6.3-1 底盤注水試験の概念図（縦断図）	81
図 6.3-2 水理学的ゆるみ領域計測装置の概念図	81

## 1. はじめに

核燃料サイクル開発機構東濃地科学センターは、地質環境の評価のための体系的な調査・解析・評価技術の基盤整備と、深地層における工学技術の基盤整備を目的として、岐阜県瑞浪市において超深地層研究所計画を進めている。

この研究所計画では、同センター所有地（正馬様用地）において、地表からの試錐孔掘削ならびに各種調査が実施されている。そして、調査により取得した岩盤力学物性に基づき、正馬様用地の岩盤力学モデルが構築されている。また、核燃料サイクル開発機構は、釜石鉱山において掘削影響領域の特性を把握するために、坑道掘削時の変位計測などの様々な計測を実施している。さらに、これらの計測結果を基に、事後解析を実施し、様々な力学モデルを用いて不連続性岩盤のモデル化手法の適用性についても検討を行っている。

本業務では、超深地層研究所計画の第1段階における掘削影響予測解析手法の整備・高度化に向けて、不連続性岩盤に対する種々の解析手法の比較・検討等に資するため、クラックテンソルモデルによる応力解析を行い、坑道周辺岩盤の透水性変化を予測可能な仮想割れ目モデルによる解析を実施する。そして、水理学的特性変化に着目した掘削影響領域の指標データを提示できることを示し、今後の課題を明らかにする。

解析は立坑および横坑を対象とし、解析対象深度や坑道形状は超深地層研究所計画を参考にする。また、解析に用いる初期応力、岩盤物性値および割れ目の情報などは正馬様用地の岩盤力学モデル<sup>1)2)</sup>により設定する。それらのデータを用いてクラックテンソルモデルによる応力解析を行った後、その応力状態を用いて仮想割れ目モデルによる透水性変化予測解析を行う。そして、解析結果に基づき、坑道周辺岩盤の破壊発生の可能性、透水係数の変化、深度や坑道展開方向による水理学的影响範囲の違いなどについて考察を行う。さらに、横坑の解析ケースのうち、1ケースを選択して支保の検討も行う。

## 2. 業務概要

### 2. 1 件名

研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の透水性変化予測解析

### 2. 2 実施期間

自 平成 14 年 9 月 6 日

至 平成 15 年 2 月 28 日

### 2. 3 実施機関

清水建設株式会社 技術研究所

〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17

### 2. 4 納入場所

核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺 959-31

### 2. 5 実施内容

- (1) 仮想割れ目モデルを用いた透水性変化予測解析
- (2) 支保工の検討
- (3) 掘削影響の評価および報告書の作成

### 2. 6 参考技術資料

- (1) 技術資料①<sup>1)</sup>：「研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤への力学的影響評価解析」, JNC  
TJ7400 2002-007
- (2) 技術資料②<sup>2)</sup>：「土岐花崗岩中の割れ目を対象としたジョイントせん断試験」, JNC  
TJ7430 2001-002
- (3) BTV データ : MIU-1 孔, MIU-2 孔および MIU-3 孔のボアホールテレビ観察による不連続面データ

### 3. 研究坑道掘削に伴う周辺岩盤の透水性変化予測解析

#### 3. 1 解析の目的

ここでは、研究坑道の立坑部および横坑部を対象として、坑道掘削時の岩盤中の応力を有限要素解析により算定し、その結果を用いて仮想割れ目モデルによる透水性変化予測解析を実施する。この仮想割れ目モデルは、応力再配分により既存の割れ目の開口量が変化し、それによって岩盤の透水性が変化することに着目したモデルである。

そして、透水性変化予測解析の結果を基に、坑道周辺岩盤の透水係数変化の程度や範囲、坑道展開方向による水理学的影响範囲の違いについて考察を行う。また、応力解析の結果により、坑道周辺岩盤の破壊発生の可能性や支保の検討を行う。

#### 3. 2 解析の流れ

仮想割れ目モデルによる透水性変化予測解析を行うためには、坑道掘削後の周辺岩盤の応力状態を事前に求めておく必要がある。本業務では、この応力解析に岩盤中に存在する割れ目の影響を考慮できるクラックテンソルモデルを用いる。クラックテンソルの設定から透水性変化の評価までの解析全体の流れを図 3.2-1 に示す。解析の手順は以下のとおりである。

- ① 2次元断面上における個々の割れ目のトレースを求めて、割れ目のトレースの密度と法線ベクトルの方向分布よりクラックテンソルを求める。
- ② ①で求めたクラックテンソル、岩盤基質部のヤング係数とポアソン比、割れ目の垂直剛性とせん断剛性、初期応力、および、境界条件を基に、クラックテンソルモデルによる応力解析を行い、坑道掘削後の周辺岩盤の応力状態を求める。
- ③ 割れ目のトレースの方向分布と寸法、仮想割れ目の垂直応力-透水係数関係、初期応力を基に、仮想割れ目モデルにより初期応力状態の透水係数を求める。なお、この段階では、仮想割れ目群の面積密度は未定であるために、仮に、 $\rho=1$ を代入する。
- ④ ③で求めた透水係数と原位置の初期透水係数を基に、比例計算にて、仮想割れ目群の面積密度を求める。
- ⑤ ②で求めた坑道掘削後の周辺岩盤の応力、③で求めた仮想割れ目群の面積密度、割れ目のトレースの方向分布と寸法、仮想割れ目の垂直応力-透水係数関係を基に、仮想割れ目モデルにより坑道掘削後の周辺岩盤の透水係数を求める。
- ⑥ ⑤で求めた坑道掘削後の透水係数、原位置の初期透水係数を基に、坑道掘削後の周辺岩盤の透水性変化を評価する。

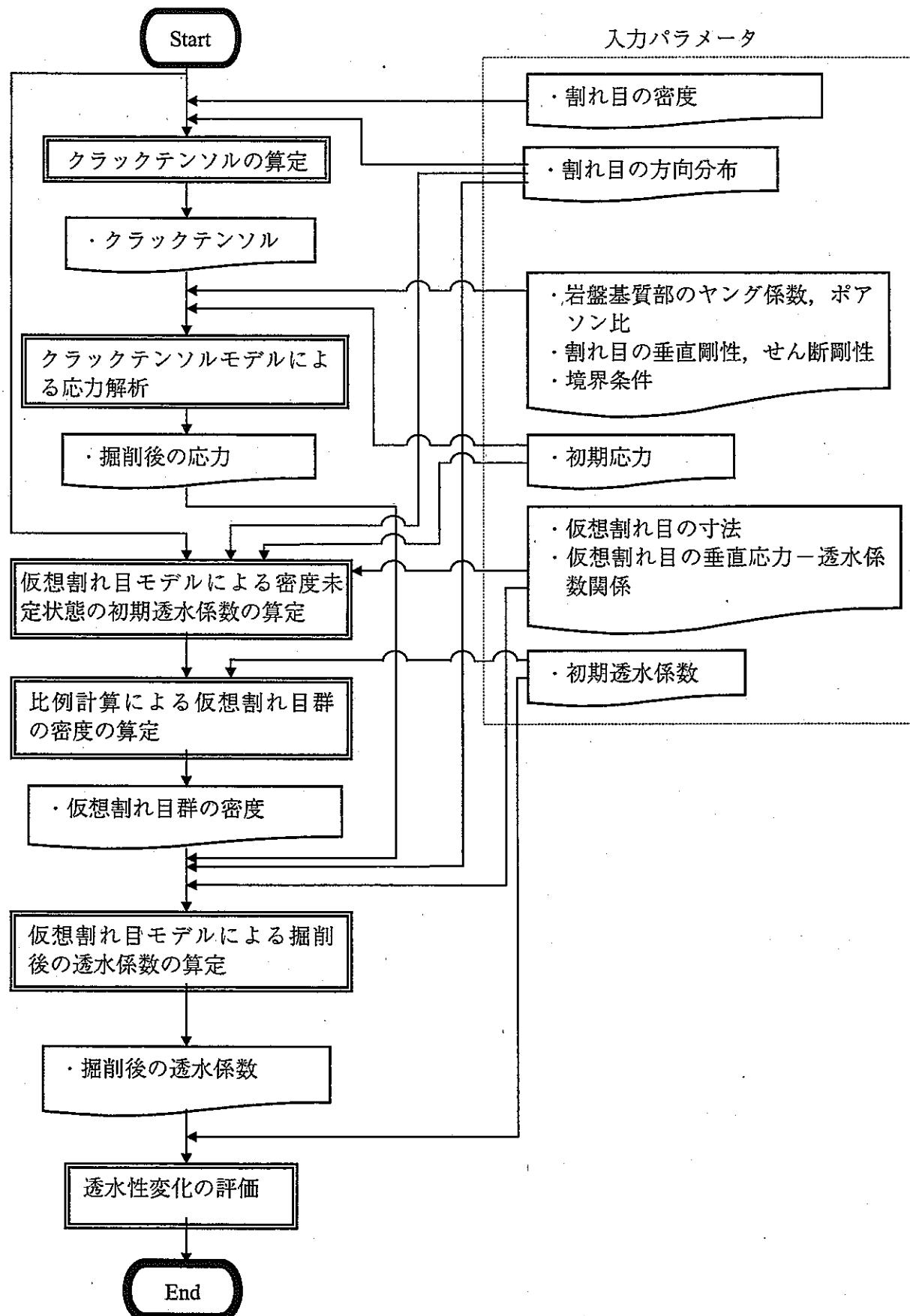


図 3.2-1 透水性変化予測の解析フロー

### 3. 3 クラックテンソルモデルの概要<sup>3), 4)</sup>

#### 3. 3. 1 解析手法の概要

クラックテンソルモデルは、岩盤中の割れ目群の幾何学的特性をクラックテンソルで表し、多数の割れ目を含む岩盤をそれと等価な連続体に置き換えて解析するモデルである。この解析手法は、割れ目が統計的な意味で均質に分布する岩盤領域に対して、巨視的な応力とひずみの関係を求め、不連続性岩盤を等価な異方弾性体としてモデル化する手法である。巨視的な応力とひずみの関係は、岩盤基質部に生じるひずみと割れ目に生じるひずみの和から定式化される。割れ目に生じるひずみは割れ目の垂直およびせん断方向に発生する相対変位の総和から得られる。割れ目による相対変位の総和は、割れ目の平行平板モデルと割れ目群の幾何学的特性を表すクラックテンソルを導入することによって求められる(図 3.3-1 参照)。

クラックテンソルモデルによる解析は、上記の巨視的な応力とひずみの関係を有限要素解析プログラムに組み込んだものである。

この解析の特徴をまとめると以下のようになる。

- ①割れ目群の幾何学的特性として割れ目の密度・大きさ・方向が考慮され、クラックテンソルで定量的に表現される。
- ②個々の割れ目は、垂直とせん断の方向の 2 つのスプリングで連結された平行平板でモデル化される。割れ目に生じるひずみは、各々のスプリングの垂直剛性とせん断剛性によって特徴づけられ、各々の剛性は割れ目の寸法効果と応力依存性を考慮した形式で定式化される。割れ目の剛性の応力依存性を考慮する場合には、非線形弾性解析となる。
- ③入力パラメータは、岩盤基質部のヤング係数とポアソン比、割れ目の垂直剛性とせん断剛性、クラックテンソルの 3 種類である。
- ④入力パラメータは、調査・試験に基づく実測データから求められるが、実岩盤の割れ

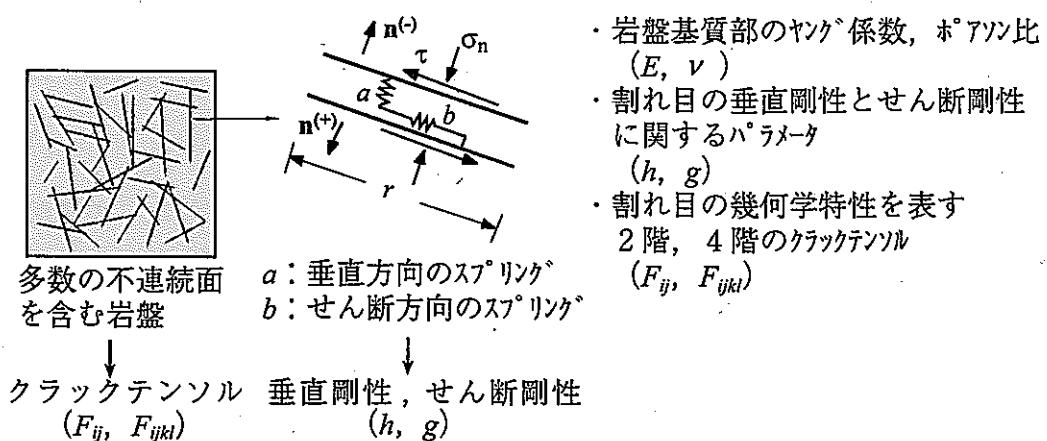


図 3.3-1 クラックテンソルモデルの概要

目の垂直剛性とせん断剛性を求めるためには、原位置試験や室内試験から原位置での応力レベルに応じた割れ目の剛性を評価する方法が必要である。また、クラックテンソルは、割れ目の走向・傾斜による方向分布データと割れ目のトレース長による寸法分布データから決定される。

### 3. 3. 2 巨視的な応力とひずみの関係

多数の割れ目を含む岩盤が巨視的な応力  $\sigma_{kl}$  を受けて弾性変形するとき、発生する巨視的なひずみ  $\varepsilon_{ij}$  が岩石基質部の弾性ひずみと割れ目の存在による付加的な弾性ひずみの二つの成分の和であるとすると、 $\varepsilon_{ij}$  と  $\sigma_{kl}$ との間には式 (3.3-1) の関係が成り立つ。

$$\varepsilon_{ij} = \left[ \frac{1}{E} \left\{ (1+\nu) \delta_{ik} \delta_{jl} - \nu \delta_{ij} \delta_{kl} \right\} + \left( \frac{1}{h} - \frac{1}{g} \right) F_{ijkl} + \frac{1}{4g} (\delta_{ik} F_{jl} + \delta_{jk} F_{il} + \delta_{il} F_{jk} + \delta_{jl} F_{ik}) \right] \sigma_{kl} \quad (3.3-1)$$

ここに、 $E, \nu$  は岩盤基質部のヤング係数、ポアソン比、 $F_{ij}, F_{ijkl}$  は割れ目の幾何学特性を表す 2 階、4 階のクラックテンソル、 $h, g$  は割れ目の垂直剛性とせん断剛性に関するパラメータ、 $\delta_{ij}$  はクロネッカーデルタをそれぞれ示す。

式 (3.3-1) 中の 2 階、4 階のクラックテンソル  $F_{ij}, F_{ijkl}$  は次式で定義される。

$$F_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^M (r^{(k)})^3 n_i^{(k)} n_j^{(k)} \quad (3.3-2)$$

$$F_{ijkl} = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^M (r^{(k)})^3 n_i^{(k)} n_j^{(k)} n_k^{(k)} n_l^{(k)} \quad (3.3-3)$$

ここに、 $M$  は考えている体積  $V$  中に含まれる割れ目の総数であり、 $r^{(k)}$  は  $k$  番目の割れ目を円で置き換えたときの直径  $r^{(k)} = 2(S^{(k)} / \pi)^{1/2}$  で割れ目の大きさを表し、 $n_i^{(k)}$  は割れ目の法線方向を向く単位ベクトル  $\mathbf{n}$  の座標軸  $X_i (i=1,2,3)$  への成分を示している (図 3.3-2 参照)。

2 次元断面での割れ目分布を考える場合には、2 階、4 階のクラックテンソル  $F_{ij}, F_{ijkl}$  は次式で定義される。

$$F_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^M (l^{(k)})^2 n_i^{(k)} n_j^{(k)} \quad (3.3-4)$$

$$F_{ijkl} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^M (l^{(k)})^2 n_i^{(k)} n_j^{(k)} n_k^{(k)} n_l^{(k)} \quad (3.3-5)$$

ここに、 $A$  は考えている断面の面積であり、 $l^{(k)}$  は  $k$  番目の割れ目のトレース長を示している (図 3.3-3 参照)。

また、個々の割れ目を二つのスプリングで連結された平行板でモデル化し、割れ目に作用する垂直応力  $\sigma_n$  とせん断応力  $\tau$  が垂直方向のスプリングとせん断方向のスプリングで伝達されるとすれば、割れ目の垂直剛性  $H$ 、せん断剛性  $G$  はそれぞれのスプリングの剛性で表され、最終的に次式で近似できる (図 3.3-1 参照)。

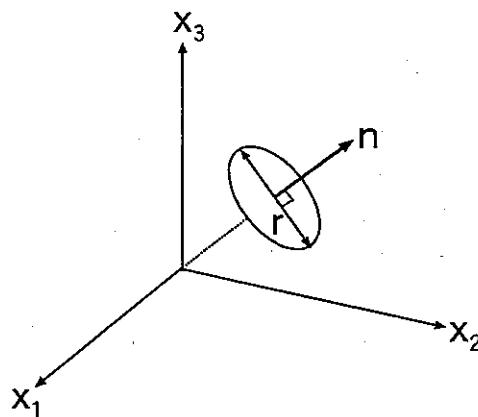


図 3.3-2 割れ目の大きさと方向（3次元）

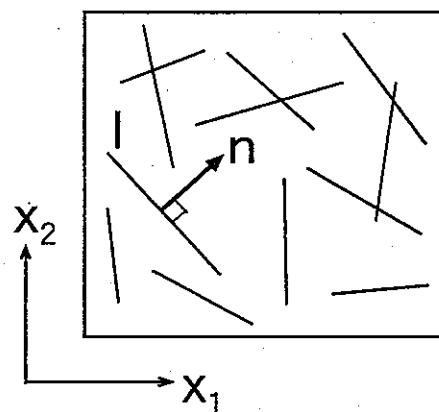


図 3.3-3 割れ目の大きさと方向（2次元）

$$H = \frac{1}{r} (h_0 + C \sigma_{ij} N_{ij}) = \frac{1}{r} h \quad (3.3-6)$$

$$G = \frac{1}{r} (g_0 + g_1 \sigma_{ij} N_{ij}) = \frac{1}{r} g \quad (3.3-7)$$

ここに,  $h_0$ ,  $g_0$ ,  $g_1$  は実験で求めるパラメータ,  $C$  は割れ目のアスペクト比,  $N_{ij}$  は次式で与えられる割れ目の方向分布によって定まる 2 階の構造テンソルである。

$$N_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M n_i^{(k)} n_j^{(k)} \quad (3.3-8)$$

式 (3.3-6) と式 (3.3-7) で表される垂直剛性  $H$  とせん断剛性  $G$  は全割れ目について平均化した剛性であり, 割れ目の大きさ  $r$  に反比例し, 垂直応力  $\sigma_n$  に依存するパラメータである。

今回は, 割れ目の剛性の応力依存性を考慮しないこととし, 不連続性岩盤をそれと等価

な異方線形弾性体に置き換えた解析を実施した。その際、式(3.3-6)と式(3.3-7)中の $h$ ,  
 $g$ は応力の次元を持つ定数となる。

### 3. 4 仮想割れ目モデルの概要<sup>5)</sup>

#### 3. 4. 1 仮想割れ目モデルの概念

仮想割れ目モデルとは、応力再配分により既存の割れ目の開口量が変化し、それによって岩盤の透水性が変化することに着目したモデルである。

仮想割れ目モデルによる透水性変化予測解析では、仮想的に割れ目群を発生させ、各割れ目の透水係数が応力依存性を有していることを考慮して、原位置で計測された初期透水テンソルを再現する。次に、この仮想の割れ目群と坑道掘削後の応力から掘削後の透水テンソルを算定して、岩盤の透水性がどのように変化するのかを評価する。岩盤中の割れ目には目視にて観察できるものもあれば、観察できないものも存在している。そして、観察された割れ目でも充填物によって透水性を有していない場合や、観察できなかった割れ目が岩盤の透水性にとって支配的である場合も考えられることから、原位置の初期透水テンソルから岩盤の透水性を支配している割れ目群を推定することを考えた。ただし、この推定された割れ目群は、目視観察で得られた割れ目群とは一致しないと考えられる。また、その実体を確かめることは非常に難しいことから、この割れ目群に「仮想」という言葉が用いられている。

この仮想割れ目モデルによる透水性変化予測に要するデータは、

- ① 岩盤の初期透水テンソル
- ② 初期応力
- ③ 掘削後の応力
- ④ 割れ目の垂直応力－透水係数関係

であり、透水テンソルが得られている場合には、原位置で計測された割れ目の方向分布のデータは必ずしも必要ではない。また、仮想割れ目モデルでは、割れ目の大きさに関するパラメータも仮想的なものとして取り扱う。

ただし、本業務の場合のように、透水テンソルが得られていない場合には、仮想割れ目群の方向分布を推定できないために、原位置で観測された割れ目の方向分布を仮想割れ目群の方向分布として扱う必要がある。また、割れ目の大きさに関する情報は、技術資料①と同じように、割れ目間隔から推定できることから、その推定値を解析に用いることとする。

したがって、本業務において、仮想割れ目モデルによる透水性変化予測に要するデータは、以下のようになる。

- ① 原位置で観測された割れ目の方向分布
- ② 割れ目のトレース長
- ③ 岩盤の初期透水係数
- ④ 初期応力
- ⑤ 掘削後の応力
- ⑥ 割れ目の垂直応力－透水係数関係

### 3. 4. 2 仮想割れ目の透水係数と開口幅の算定

仮想割れ目の透水係数は、実際の割れ目を含む岩石の室内透水試験から求める。割れ目の垂直応力-透水係数関係の例として、既存の試験結果を図 3.4-1<sup>6)</sup>に示す。割れ目の透水係数は、垂直応力の双曲線関数による近似式で表現できる。また、割れ目の透水係数は応力履歴に影響されることから、昇圧過程（掘削によって応力が増加する過程）における割れ目の透水係数  $k_f$  に対しては式 (3.4-1) が、降圧過程（掘削によって応力が低下する過程）における割れ目の透水係数  $k_{fu}$  に対しては、式 (3.4-2) が提案されている<sup>6)</sup>。

$$\log_{10} k_f = \frac{\sigma_n}{\alpha + \beta \sigma_n} + \log_{10} \gamma \quad (3.4-1)$$

$$k_{fu} = k_{f0} + (k_f - k_{f0}) D_r \quad (3.4-2)$$

ここに、 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ は実験定数、 $\sigma_n$ は割れ目に作用する垂直応力、 $k_{f0}$ は掘削前の応力状態に対応した割れ目の透水係数、 $D_r$ は降圧過程補正係数である。

岩盤の応力  $\sigma_{ij}$  と割れ目の法線ベクトル  $\mathbf{n}$  より垂直応力  $\sigma_n$  が算定できれば、式 (3.4-1)、または、式 (3.4-2) より割れ目の透水係数  $k_f$  を求めることができる。

また、割れ目を平行平板にてモデル化すると、その水理学的開口幅  $e$  は次式で算定できる<sup>7)</sup>。

$$e = \sqrt{\frac{12\mu k_f}{\rho_w g}} \quad (3.4-3)$$

ここに、 $\rho_w$ は水の密度、 $g$ は重力加速度、 $\mu$ は水の粘性係数である。

水の密度、および、粘性係数は温度によって変化する。本業務では、技術資料①<sup>1)</sup>と同様に、地下水温度を 15°C と仮定した。このとき、水の密度  $\rho_w$ <sup>8)</sup> と粘性係数  $\mu$ <sup>9)</sup> は、

$$\rho_w = 999.10 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$\mu = 1.138 \times 10^{-3} \text{ (Pa}\cdot\text{s)}$$

となる。

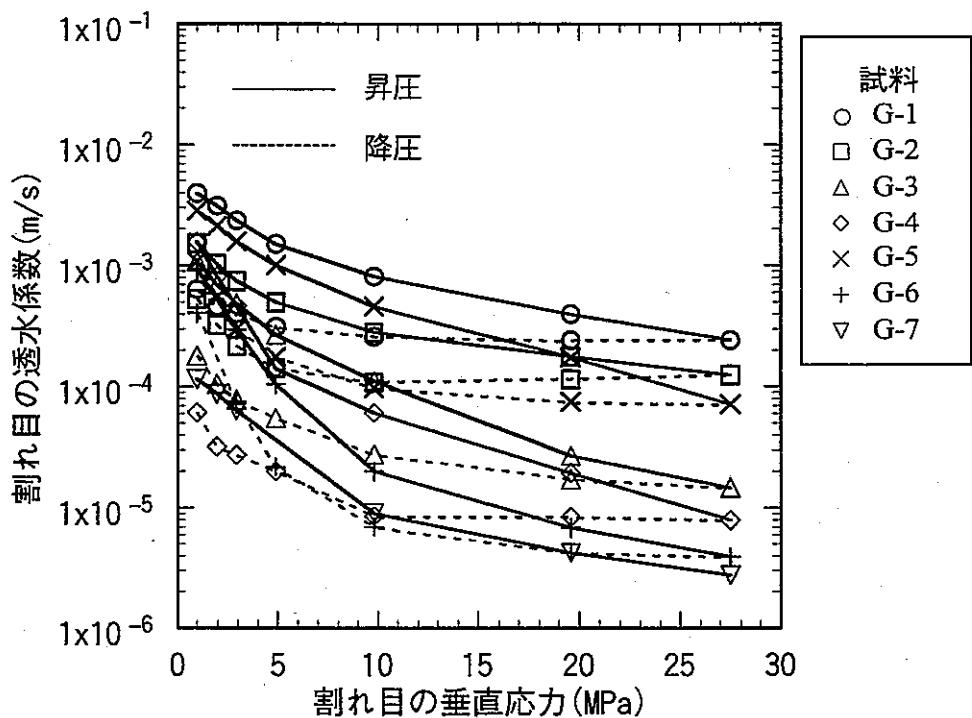


図 3.4-1 室内試験による割れ目の垂直応力一透水係数関係<sup>6)</sup>

### 3.4.3 岩盤の透水テンソルの算定

岩盤の透水テンソルは、各仮想割れ目の透水係数をその方向を考慮して重ね合わせることで求められる。

2次元問題では、平行平板内の直線流れを仮定することによって、割れ目の透水係数  $k_f$  と岩盤の透水係数  $k_r$  の関係を次式で表すことができる。

$$k_r = \eta e k_f \quad (3.4-4)$$

ここに、 $\eta$  は割れ目の密度である。

3次元問題を考えると、式 (3.4-4) は割れ目の透水係数に体積の重みを付けて平均化することで岩盤の透水係数を求めていると考えることができる。例えば、図 3.4-2 に示すような平行割れ目を有する岩盤では、割れ目に沿う方向における岩盤の透水係数  $k_r$  が次のように求められる。

$$k_r = \frac{\sum V_f}{V} k_f = \frac{ML^2 e}{L^3} k_f = \frac{M}{L} e k_f = \eta e k_f \quad (3.4-5)$$

ここに、 $V$  は岩盤の体積、 $V_f$  は割れ目の体積、 $M$  は割れ目の数である。

次に、これを一般化することを考える。すなわち、仮想割れ目の面内方向の透水係数は  $k_f$ 、面外方向は 0 であることから、これを全体座標に変換すると、一個の仮想割れ目の透水

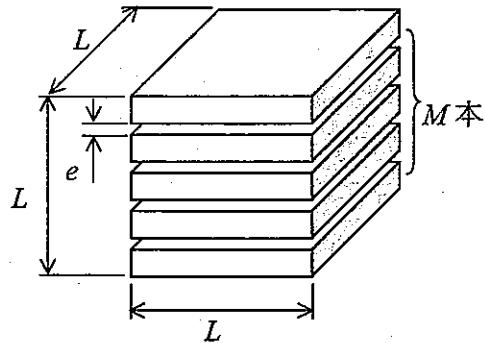


図 3.4-2 平行割れ目を有する岩盤

テンソル  $k_{ij}^f$  は、次のようになる。

$$k_{ij}^f = k_f (\delta_{ij} - n_i n_j) \quad (3.4-6)$$

ここに、 $\delta_{ij}$  はクロネッカのデルタ、 $n$  は割れ目の法線ベクトルである。式 (3.4-6) を体積  $V_f$  で重み付けをして平均化すれば、岩盤の透水テンソルを求めることができる。

各々の仮想割れ目は法線ベクトル  $n$ 、体積  $V_f$ 、透水係数  $k_f$  という特性を持っている。そして、ある任意の特性の組合せ  $(n, V_f, k_f)$  を考えたときに、この特性の組合せを持つ割れ目が岩盤の体積  $V$  中に  $N_f$  個あるものとすると、岩盤の透水テンソル  $k_{ij}^r$  と仮想割れ目の総数  $M$  は次のようになる。

$$k_{ij}^r = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^m V_f^{(k)} k_f^{(k)} (\delta_{ij} - n_i^{(k)} n_j^{(k)}) N_f^{(k)} \quad (3.4-7)$$

$$M = \sum_{k=1}^m N_f^{(k)} \quad (3.4-8)$$

ここに、上付き添え字の  $(k)$  は  $k$  番目の特性の組合せを意味している。また、 $m$  は特性の組合せの総数である。

仮想割れ目の平面形状をモデル化する方法としては、円、橍円および多角形が考えられる。ここでは、平面形状を直径  $r$  の円と仮定すると、体積  $V_f$  は次のようにになる。

$$V_f^{(k)} = \frac{\pi}{4} r^2 e^{(k)} \quad (3.4-9)$$

式 (3.4-9) より、各割れ目の特性値は  $(n, r, e, k_f)$  となる。岩盤の応力  $\sigma_{ij}$  が与えられると、法線ベクトル  $n$  から垂直応力  $\sigma_n$  を求めることができる。そして、垂直応力  $\sigma_n$ 、式 (3.4-1)、式 (3.4-2)、式 (3.4-3) から、透水係数  $k_f$  と水理学的開口幅  $e$  を求めることができる。よって、特性値の内、透水係数  $k_f$  と水理学的開口幅  $e$  は法線ベクトル  $n$  の従属変数であることがわかる。

したがって、式 (3.4-7) は式 (3.4-8) と式 (3.4-9) より、次のようになる。

$$\begin{aligned}
 k_{ij}^r &= \frac{M}{V} \sum_{k=1}^m V_f^{(k)} k_f^{(k)} (\delta_{ij} - n_i^{(k)} n_j^{(k)}) \frac{N_f^{(k)}}{M} \\
 &= \rho \sum_{k=1}^m \frac{\pi}{4} r^2 e^{(k)} k_f^{(k)} (\delta_{ij} - n_i^{(k)} n_j^{(k)}) D(\mathbf{n}^{(k)})
 \end{aligned} \tag{3.4-10}$$

ここに、 $\rho$  ( $=M/V$ ) は仮想割れ目の体積密度、 $D(\mathbf{n})$  ( $=N_f/M$ ) は法線ベクトル  $\mathbf{n}$  の相対頻度を示す関数である。

仮想割れ目モデルは、3次元解析を目的にして開発されたものであるが、2次元解析にも応用することができる。ただし、割れ目の幾何学情報が3次元的に得られている場合、その情報を2次元の情報に変換する必要がある。すなわち、割れ目を解析対象平面で切断して、その平面に現れたトレースを2次元解析に用いる割れ目の幾何学的情報とすればよい（図 3.4-3 参照）。2次元解析の場合、式 (3.4-10) は以下のようになる。

$$k_{ij}^r = \rho \sum_{k=1}^m l e^{(k)} k_f^{(k)} (\delta_{ij} - n_i^{(k)} n_j^{(k)}) D(\mathbf{n}^{(k)}) \tag{3.4-11}$$

ここに、 $\rho$  ( $=M/A$ ) は仮想割れ目群の面積密度、 $l$  は割れ目のトレース長、 $\mathbf{n}$  はトレースの法線ベクトルである。

2次元解析の場合、割れ目は解析対象平面上では直線で表されるが、面外方向に割れ目が連続しているものと考える。したがって、面外方向にも透水性は存在し、面外方向の透水係数も式 (3.4-11) で算定することができる。

以上により、仮想割れ目群の面積密度  $\rho$ 、トレース長  $l$ 、法線ベクトル  $\mathbf{n}$ 、ならびに頻度  $D(\mathbf{n})$  が定められれば、仮想割れ目モデルによる岩盤の透水テンソルを計算することができる。

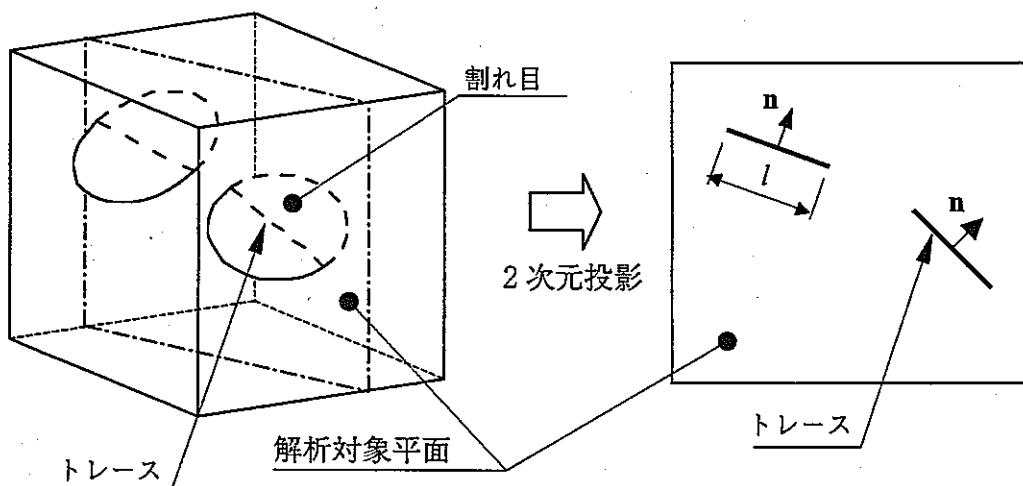


図 3.4-3 割れ目の2次元投影のイメージ

### 3. 5 解析領域

#### 3. 5. 1 解析対象深度と坑道展開方向

立坑の解析対象深度は、GL-200m, GL-500m, GL-945m の3深度とする。

横坑の対象深度は、中間ステージレベルとして GL-500m, 最終ステージレベルとして GL-945m の2深度とする。また、横坑では、坑道展開方向の影響を考慮するために、坑道軸方向を最大主応力に対して、 $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  の4方向に変化させた場合の解析を行う。最大主応力方向は N $45^\circ$  W 方向であるから、各展開方向は、最大主応力方向に対して $0^\circ$  とは N $45^\circ$  W 方向,  $45^\circ$  とは N 方向,  $90^\circ$  とは N $45^\circ$  E 方向,  $135^\circ$  とは E 方向になる。横坑の方向と座標系の設定を図 3.5-1 に示す。

解析ケースは立坑で3ケース、横坑で8ケース、合計11ケースとなる。

#### 3. 5. 2 立坑の解析領域と岩盤区分

立坑の解析をするにあたって、解析領域の考え方や岩盤区分は以下のとおりとする。

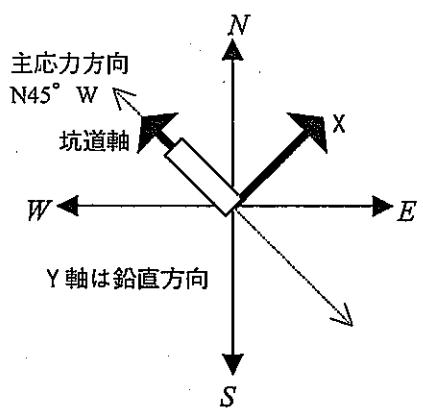
- ・解析領域は、立坑を中心として  $50\text{m} \times 50\text{m}$  の領域とする。また、掘削内径は  $\phi 7.3\text{m}$  の無支保とする（図 3.5-2 参照）。
- ・岩盤部はソリッド要素とする。
- ・初期応力は、技術資料①<sup>1)</sup>による値を要素に一様に与える。
- ・岩盤区分は、技術資料①<sup>1)</sup>より、GL-200m で Zone1, GL-500 で Zone2, GL-945m で月吉断層周辺部（断層下盤側）とし、物性値は一様とする。
- ・掘削解析時の境界条件は、全周にわたり固定条件とする。
- ・掘削解析は全断面掘削とする。
- ・解析対象平面の座標軸は E 方向を x 軸、N 方向を y 軸とする。また、紙面直交方向を z 軸とする。

#### 3. 5. 3 横坑の解析領域と岩盤区分

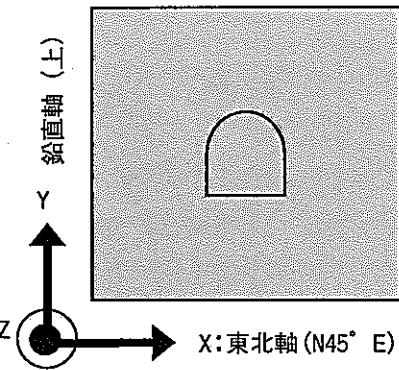
横坑の解析領域の考え方や岩盤区分は以下のとおりとする。

- ・解析領域は、横坑を中心として  $50\text{m} \times 50\text{m}$  の領域とする。また、横坑断面は馬蹄型で  $3\text{m} \times 3\text{m}$  の無支保とする（図 3.5-3 参照）。
- ・岩盤部はソリッド要素とする。
- ・初期応力は、技術資料①<sup>1)</sup>による値を要素に一様に与える。
- ・岩盤区分は、技術資料①<sup>1)</sup>より、GL-500m で Zone2, GL-945m で Zone3 とし、物性値は一様とする。
- ・掘削解析時の境界条件は、全周にわたり固定条件とする。
- ・掘削解析は全断面掘削とする。
- ・解析対象平面の座標軸は、鉛直上方を y 軸とするが、x 軸は展開方向よって図 3.5-1 のように変化する。また、紙面直交方向を z 軸とする。

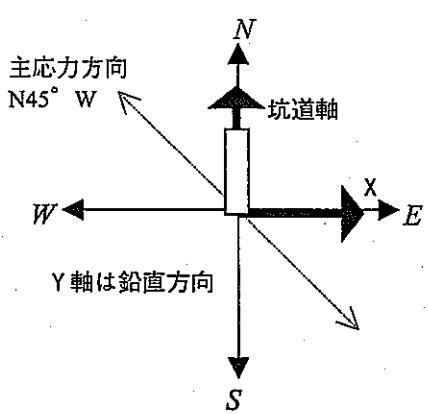
(1)  $0^\circ$  方向



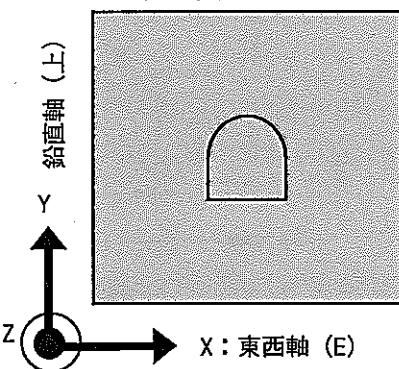
横坑解析平面座標系



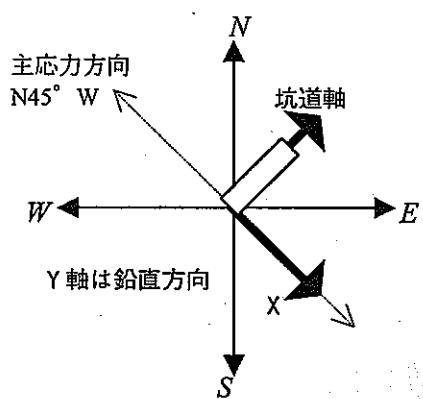
(2)  $45^\circ$  方向



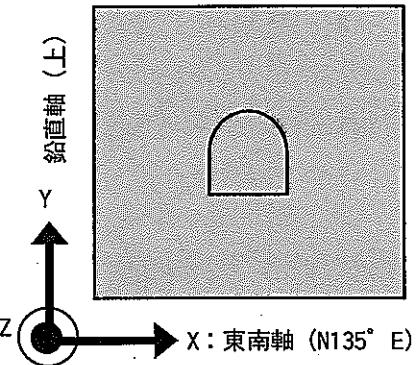
横坑解析平面座標系



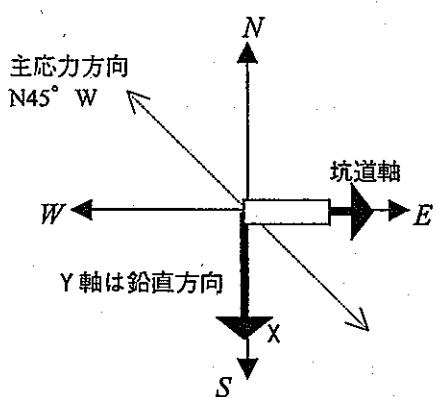
(3)  $90^\circ$  方向



横坑解析平面座標系



(4)  $135^\circ$  方向



横坑解析平面座標系

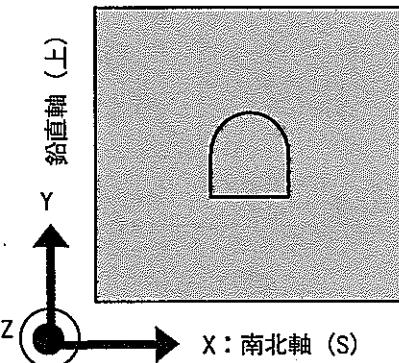
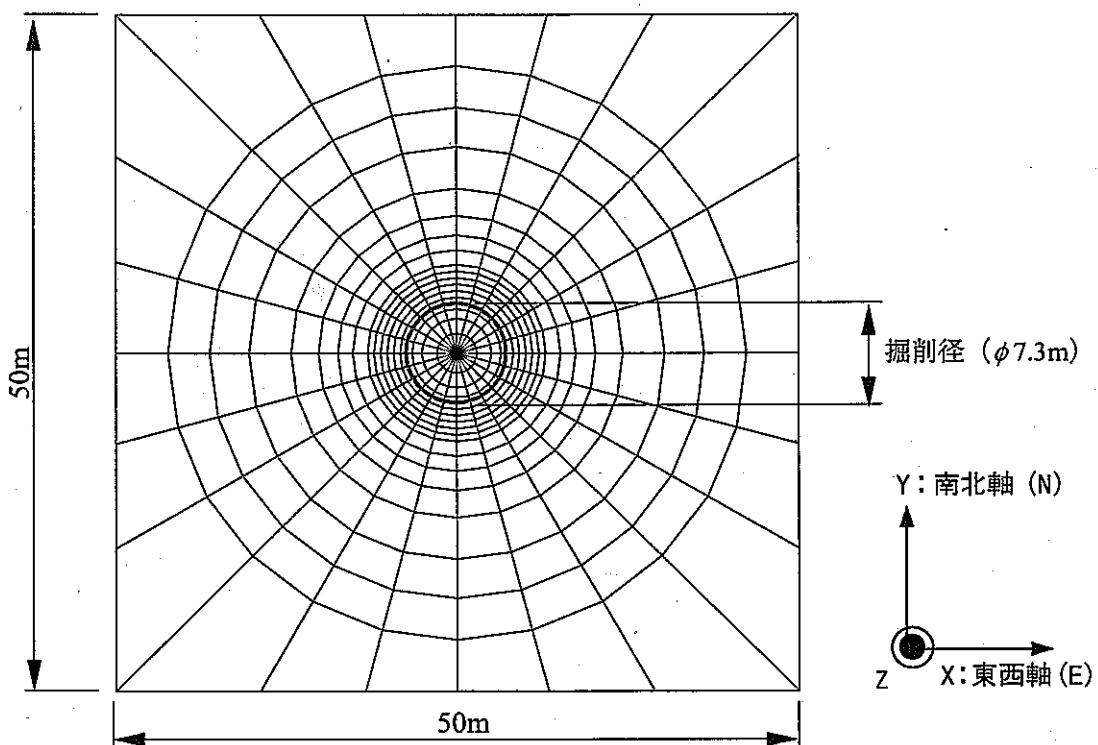
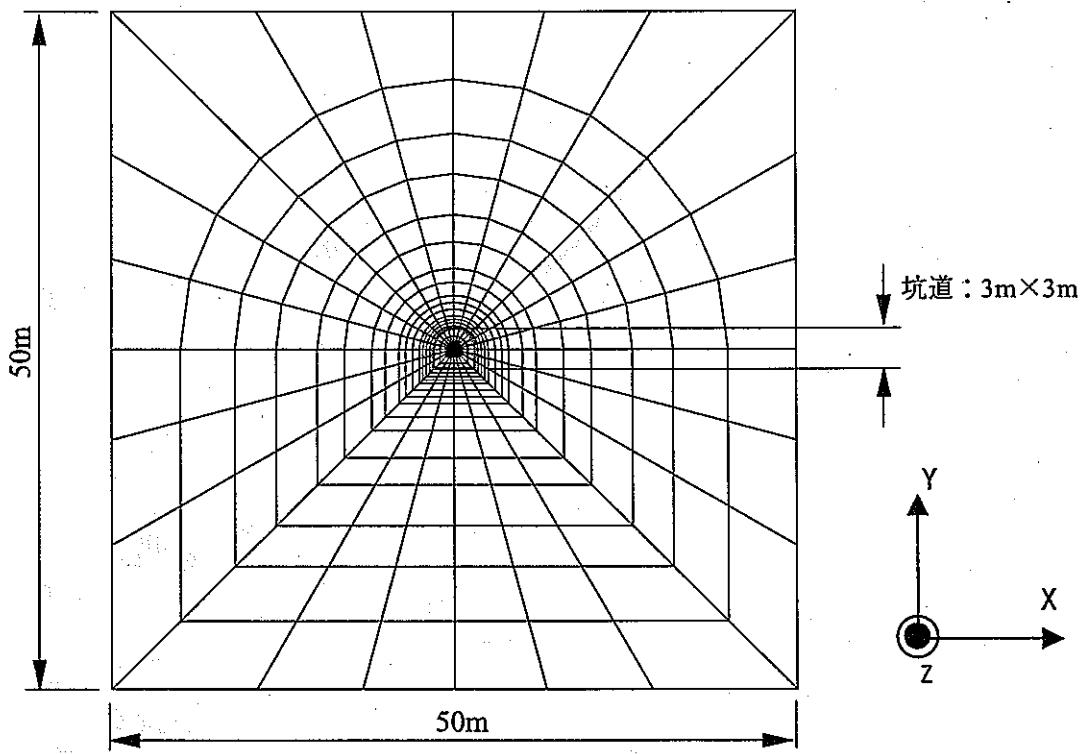


図 3.5-1 横坑の方向と座標系の設定



注) 図中の赤線は掘削境界を示す

図 3.5-2 立坑解析メッシュ図



注) 図中の赤線は掘削境界を示す

図 3.5-3 横坑解析メッシュ図

### 3. 6 初期応力および物性値

#### 3. 6. 1 初期応力

解析に用いる初期応力は、3次元応力解析で求められた応力状態を解析用の2次元断面に投影した値<sup>1)</sup>を用いる。各ケースの初期応力を表3.6-1に示す。

表 3.6-1 初期応力

部材	深度(m)	展開方向	初期応力		
			$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\tau_{xy}$ (MPa)
立坑	GL-200	—	14.99	17.92	-0.21
	GL-500	—	18.82	20.47	-5.30
	GL-945	—	3.18	19.50	-5.59
横坑	GL-500	0°	14.35	12.75	1.43
		45°	18.82	12.75	-0.59
		90°	24.95	12.75	-2.26
		135°	20.47	12.75	-2.61
	GL-945	0°	16.47	15.86	1.76
		45°	17.09	15.86	1.02
		90°	24.59	15.86	-0.32
		135°	23.69	15.86	-1.47

注) 初期応力は圧縮:正, 座標軸は図3.5-1, 図3.5-2, 図3.5-3を参照

#### 3. 6. 2 岩盤基質部の物性値

クラックテンソルモデルによる応力解析では、岩盤基質部のヤング係数とポアソン比が入力パラメータとして必要となる。なお、岩盤基質部では等方性を仮定する。各ケースの岩盤区分とその物性値<sup>1)</sup>を表3.6-2に示す。

表 3.6-2 岩盤基質部の物性値

部材	深度(m)	岩盤区分	ヤング係数 E(MPa)	ポアソン比 $\nu$
立坑	GL-200	Zone1	49,900	0.36
	GL-500	Zone2	49,400	0.34
	GL-945	月吉断層周辺部(断層下盤側)	3,500	0.36
横坑	GL-500	Zone2	49,400	0.34
	GL-945	Zone3	47,400	0.34

### 3. 6. 3 割れ目の方向分布

クラックテンソルモデルと仮想割れ目モデルは、割れ目の方向分布の影響を考慮することができるモデルである。このため、本業務では、MIU-1孔、MIU-2孔、MIU-3孔の各ボーリング孔で得られた割れ目の方向データを岩盤区分ごとに区分した後に、それぞれを重ね合わせることにより、岩盤区分ごとの割れ目の方向分布を設定した。

技術資料①<sup>1)</sup>によると、各ボーリング孔における岩盤区分の対象深度は表 3.6-3 のようになっている。

表 3.6-3 各ボーリング孔における岩盤区分の対象深度

ボーリング孔	岩盤区分			
	Zone1	Zone2	Zone3	月吉断層周辺部 (断層下盤側)
MIU-1	GL-90m～-400m	GL-400m～-700m	GL-700m 以深	—
MIU-2	GL-90m～-400m	GL-400m～-700m	GL-700m～-800m	GL-915m～-1000m
MIU-3	GL-90m～-400m	GL-400m～-600m	—	GL-715m～-800m

また、表 3.6-3 と BTV データにより、岩盤区分ごとの割れ目の本数は表 3.6-4 のようになる。

表 3.6-4 各岩盤区分における割れ目の本数

ボーリング孔	岩盤区分			
	Zone1	Zone2	Zone3	月吉断層周辺部 (断層下盤側)
MIU-1	1,001 本	619 本	1,091 本	—
MIU-2	1,505 本	473 本	321 本	747 本
MIU-3	1,300 本	697 本	—	468 本
合計	3,806 本	1,789 本	1,412 本	1,215 本

シュミットネットによる岩盤区分ごとの割れ目の方向分布を示すプロット図を図 3.6-1 に、また、頻度分布を図 3.6-2 に示す。

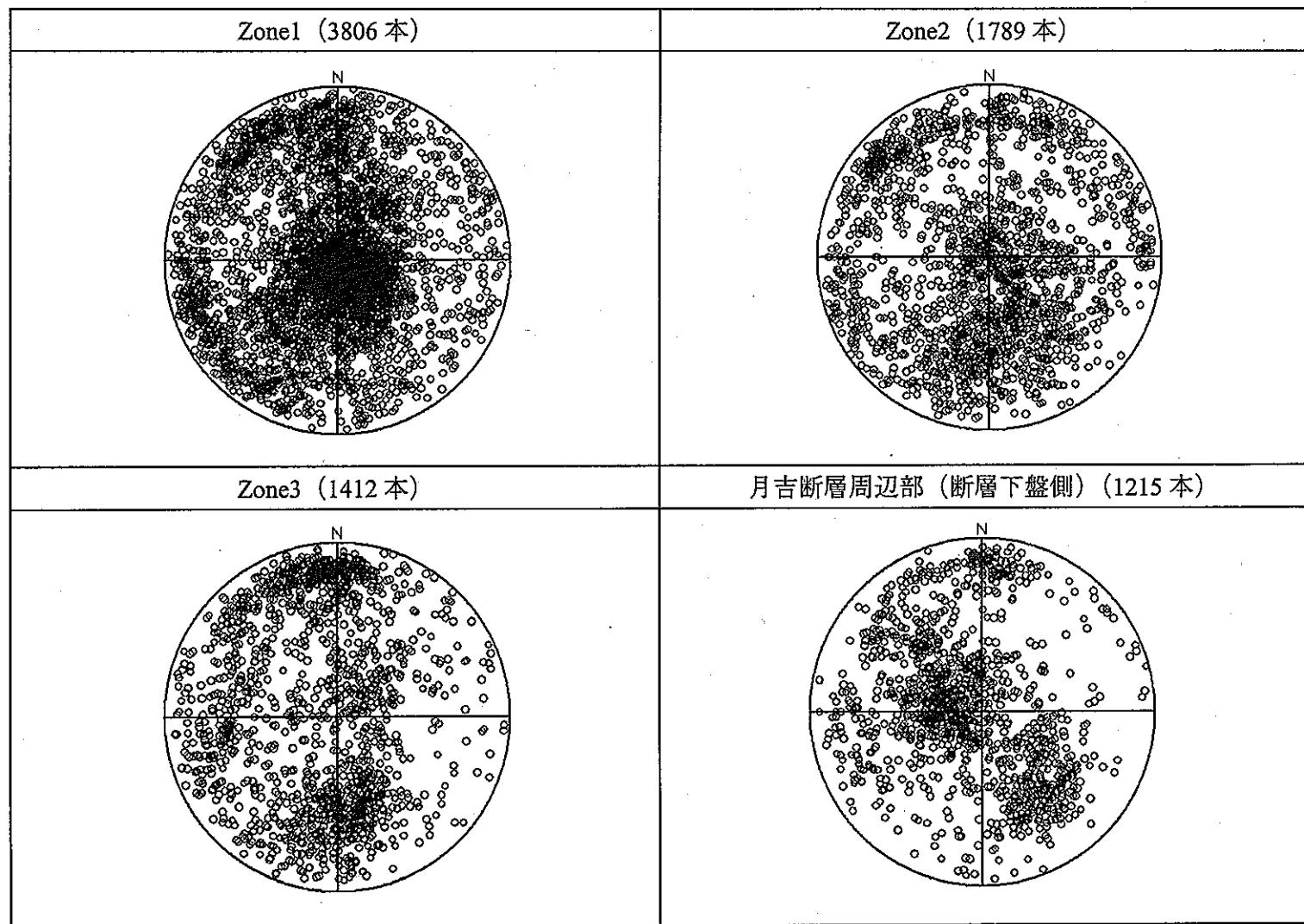


図 3.6-1 シュミットネット（下半球投影）による割れ目の方向のプロット図

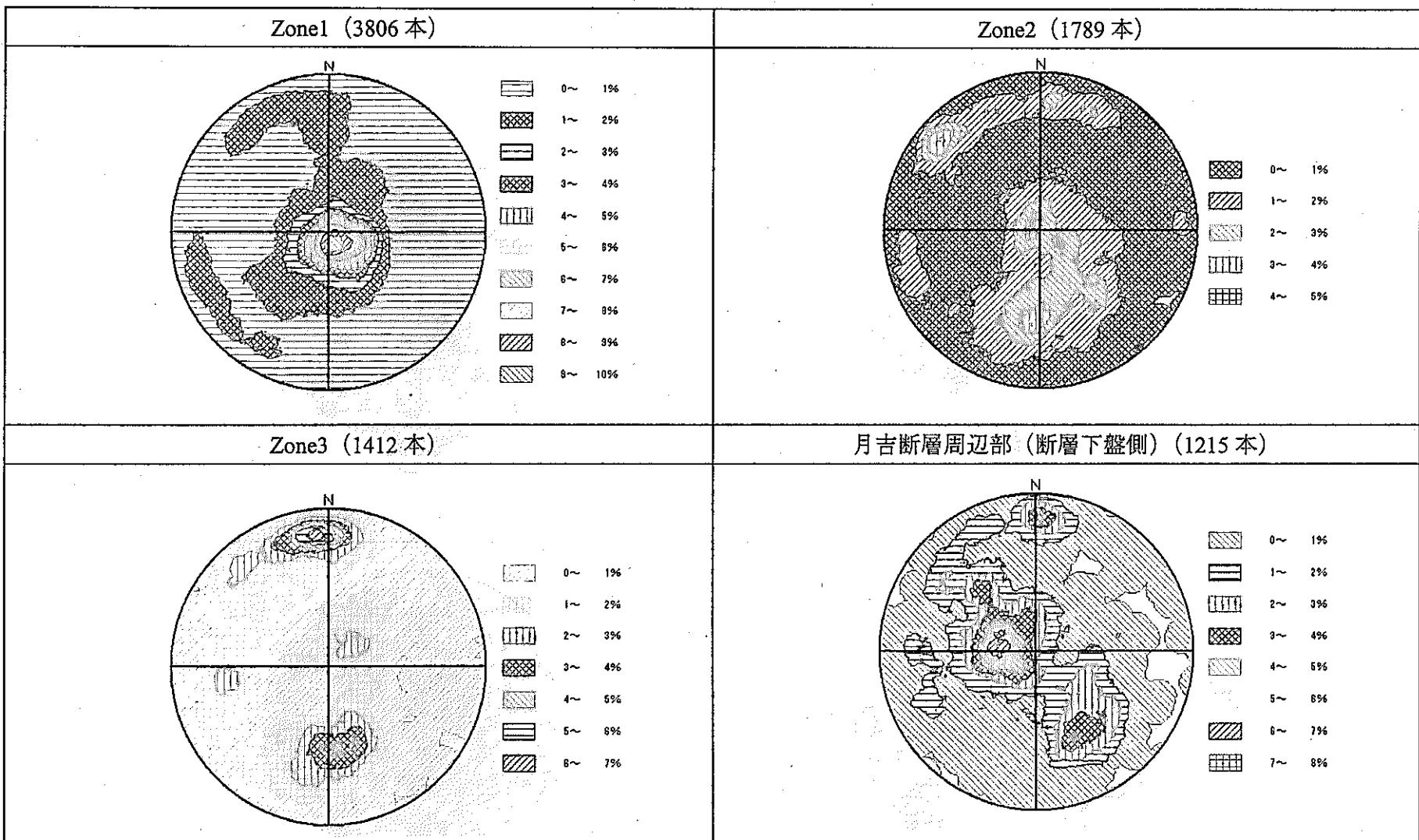


図 3.6-2 シュミットネット（下半球投影）による割れ目の方向の頻度分布

図 3.6-1 のように求められた割れ目の 3 次元方向分布を 2 次元の解析に適用するために、各割れ目を解析対象平面上に投影して、割れ目のトレースを求める。投影の方法のイメージは図 3.4-3 に示すとおりである。また、解析対象平面は「3. 5 解析領域」に示すとおりである。このようにして求められた解析ケースごとのトレースの法線ベクトルの相対頻度分布を図 3.6-3～図 3.6-5 に示す。

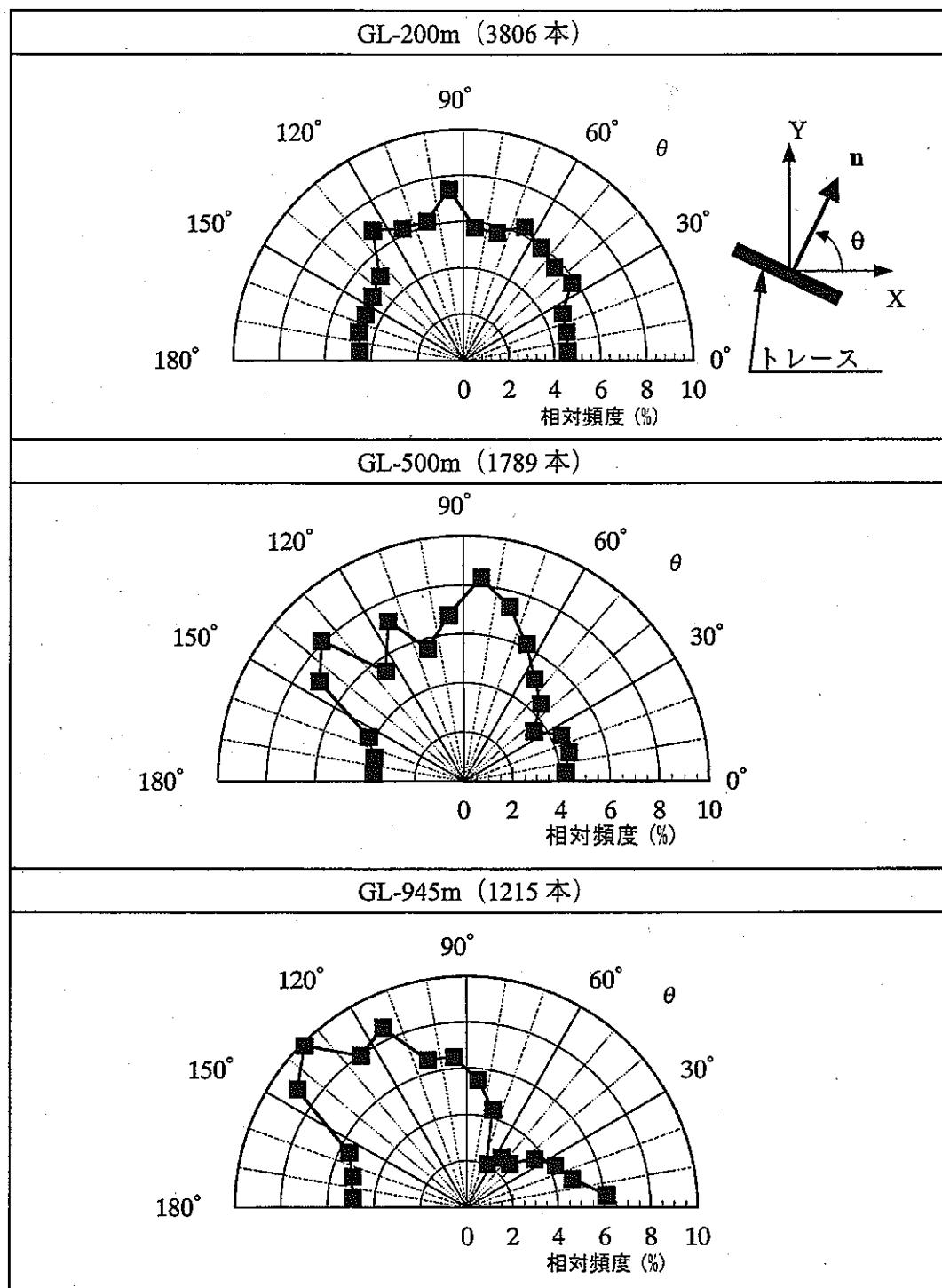


図 3.6-3 割れ目トレースの法線ベクトルの相対頻度分布（立坑）

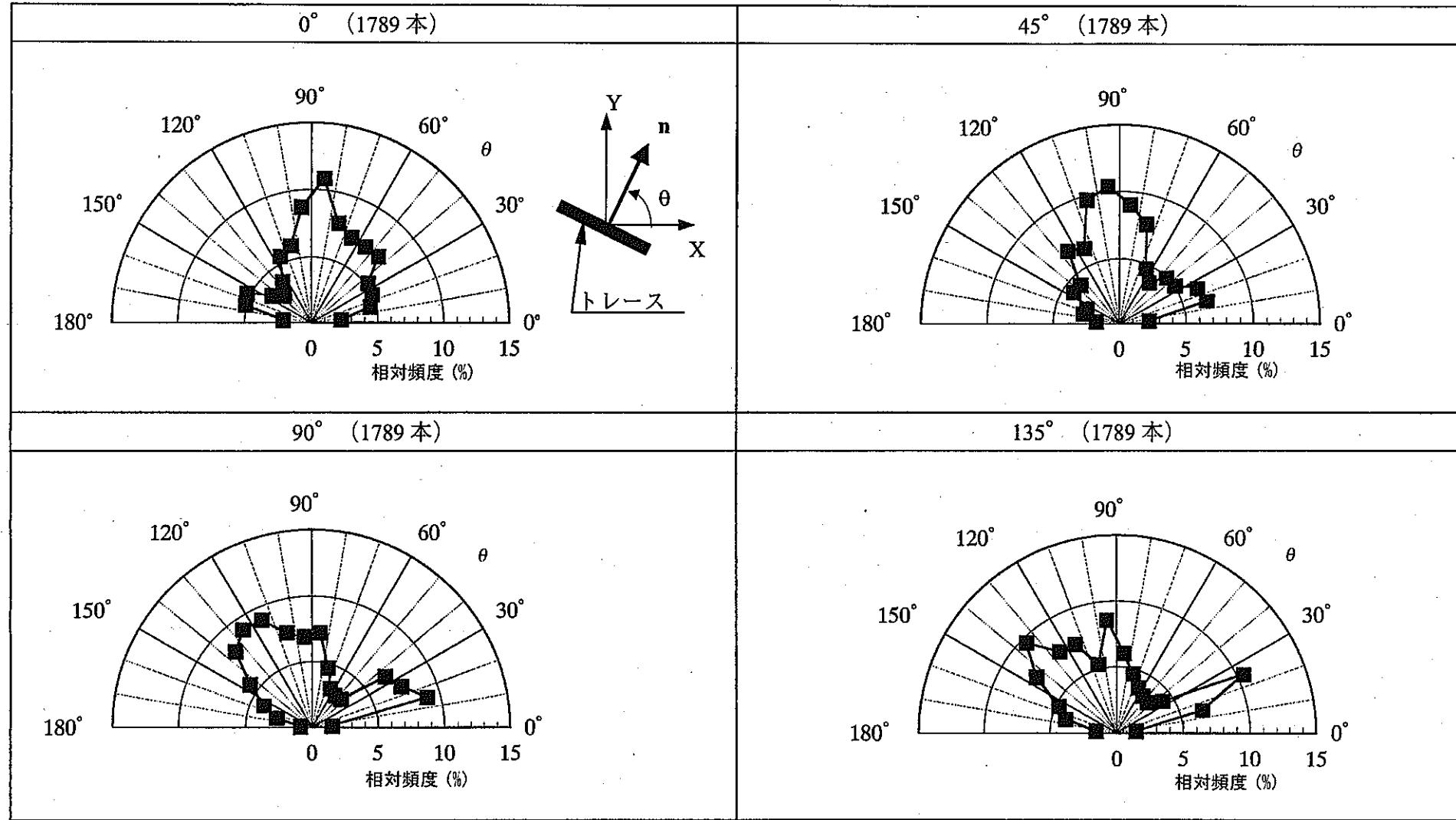


図 3.6-4 割れ目トレースの法線ベクトルの相対頻度分布（横坑, GL-500m）

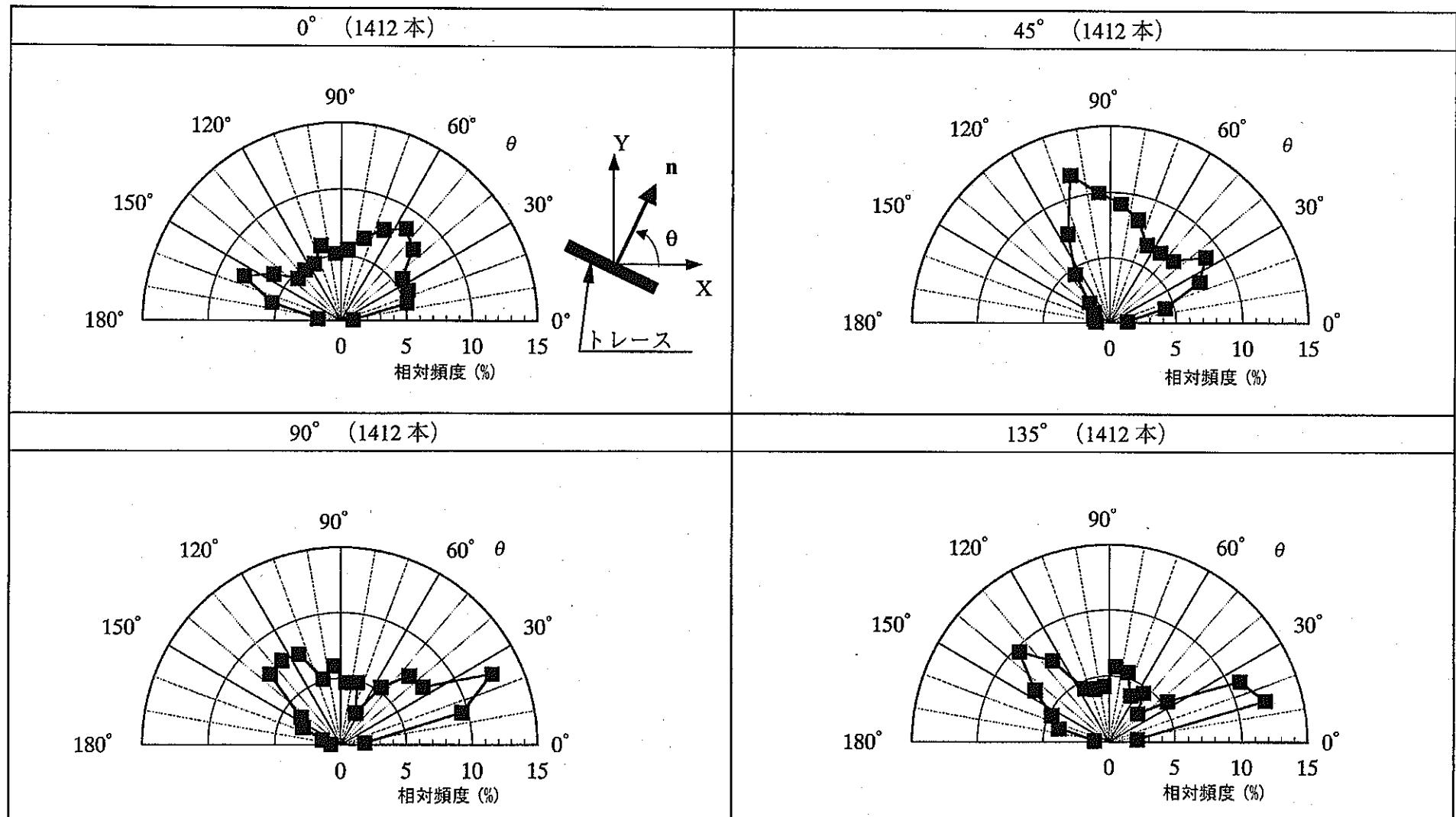


図 3.6-5 割れ目トレースの法線ベクトルの相対頻度分布 (横坑, GL-945m)

### 3.6.4 岩盤の初期透水係数

立坑および横坑を掘削後に坑道周辺岩盤の透水性変化を評価するためには、掘削前の岩盤の透水特性を定めておく必要がある。仮想割れ目モデルでは、掘削後の岩盤の透水特性は透水テンソルの形で得られることから、掘削前の特性値としては、テンソル量として得ておくほうが望ましい。原位置において岩盤の透水テンソルを計測した例としては、Hsiehら<sup>10)</sup>、青木ら<sup>11)</sup>、長ら<sup>12)</sup>の研究があるが、現状の原位置試験例では、特性値をスカラー量で得ていることのほうが多い。ただし、掘削前の透水特性をスカラー量でしか得ていなくても、透水性変化を評価することは可能である。すなわち、仮想割れ目モデルで得られた掘削後の透水テンソルを透水係数に変換することにより、掘削前後の透水性変化を調べることができる。

技術資料①<sup>13)</sup>によると、正馬様用地のボーリング孔（AN-1 孔, AN-3 孔, MIU-1 孔, MIU-2 孔, MIU-3 孔）での原位置透水試験結果を基にして、各岩盤区分の平均透水係数が求められている。よって、これらを各岩盤区分の初期透水係数として扱う。また、月吉断層破碎帯のデータは中心部と周辺部に区分されていないことから、月吉断層周辺部（断層下盤側）の初期透水係数は、月吉断層破碎帯の値を用いることとする。

各岩盤区分の初期透水係数を表 3.6-5 に示す。

表 3.6-5 岩盤区分ごとの初期透水係数

岩盤区分	初期透水係数 $k_{int}$ (m/s)
Zone1	$1.5 \times 10^{-8}$
Zone2	$6.5 \times 10^{-10}$
Zone3	$1.1 \times 10^{-8}$
月吉断層周辺部（断層下盤側）	$8.3 \times 10^{-8}$

### 3. 6. 5 トレス長とクラックテンソルの設定

クラックテンソルは、割れ目の走向傾斜による方向分布データと割れ目のトレス長による寸法分布データから決定される。通常、これらのデータはトンネル壁面や周辺露頭での不連続面調査から得られる場合が多い。しかし、今回は割れ目に関する情報はボーリング調査結果のみを用いた。ただし、ボーリング調査結果から割れ目の方向分布に関するデータは得られるが、割れ目の寸法分布に関するデータは直接的には得られない。そこで、割れ目の寸法分布に関しては、ボーリング調査結果から得られる割れ目の平均間隔のデータに基づいて設定することを試みた。

#### (1) トレス長とクラックテンソルの設定

クラックテンソルの設定に用いた割れ目は、各ケースの岩盤区分に含まれるすべての割れ目である。クラックテンソルの設定フローを図 3.6-6 に示す。手順は以下のとおりである。

- ① 各岩盤区分の割れ目の走向傾斜から各ケースの 2 次元断面上における個々の割れ目のトレス方向を求める（「3. 6. 3 割れ目の方向分布」 参照）。
- ② 割れ目のトレスの方向から式 (3.3-8) と式 (3.6-1) を用いて、各ケースの 2 階と 4 階の構造テンソル  $N_{ij}$ ,  $N_{ijkl}$  を計算する。

$$N_{ijkl} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M n_i^{(k)} n_j^{(k)} n_k^{(k)} n_l^{(k)} \quad (3.6-1)$$

ここで、 $M$ : 岩盤区分に含まれる割れ目の総数 (本)

$n^{(k)}$ :  $k$  番目の割れ目のトレスの法線ベクトル

- ③ 各岩盤区分の割れ目の平均間隔を算術平均から求める。平均間隔を求めた結果を表 3.6-6 に示す。
- ④ 各岩盤区分の割れ目の平均間隔から  $10000\text{m}^2$ あたりの累積割れ目頻度 (本) を求める。具体的には、幅  $1\text{m} \times$ 長さ  $10000\text{m}$  の領域に、長さを領域の幅に一致させた  $1\text{m}$  の割れ目が等間隔に分布するとして、この領域に含まれる割れ目の本数を求める。
- ⑤ 各岩盤区分の割れ目の平均トレス長を割れ目トレス長と割れ目頻度の関係を示した以下の式<sup>1)</sup>を用いて算出する。

$$C(L) = 7644L^{-1.8} \quad (3.6-2)$$

ここで、 $C(L)$ : 面積  $10000\text{m}^2$ あたりの累積割れ目頻度 (本)

$L$  : 割れ目トレス長(m)

$A$  :  $10000\text{m}^2$

- ⑥ 各岩盤区分の割れ目の平均トレス長と  $10000\text{m}^2$  の領域に含まれる割れ目の本数 (累積割れ目頻度) を用いて、式 (3.6-3) より 2 階のクラックテンソル  $F_{ij}$  の第 1 不変量で

ある  $F_0$  を算出する。 $F_0$  は  $F_{ij}$  の跡 (trace) と呼ばれ、割れ目の密度を表す量であり、2次元の場合、 $F_{ij}$  の成分である  $F_{11}$ ,  $F_{22}$  と  $F_0 = F_{11} + F_{22}$  の関係にある。 $F_0$  が大きいほど割れ目の密度が大きいことを示す。

各岩盤区分の  $F_0$  を算出した結果を表 3.6-7 に示す。同表より、各岩盤区分の  $F_0$  は 0.6 ~ 0.7 の範囲にあり、いずれも 1 を下回る結果となった。

また、この段階で求められた平均トレース長は、式 (3.4-11) の割れ目のトレース長  $l$  にも用いられる。

$$F_0 = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^M (L^{(k)})^2 \quad (3.6-3)$$

- ⑦ 各岩盤区分の  $F_0$  と上記②で求めた各ケースの 2 階と 4 階の構造テンソル  $N_{ij}$ ,  $N_{ijkl}$  を用いて、式 (3.6-4) と式 (3.6-5) より各ケースの 2 階と 4 階のクラックテンソル  $F_{ij}$ ,  $F_{ijkl}$  を決定する。

$$F_{ij} = F_0 N_{ij} \quad (3.6-4)$$

$$F_{ijkl} = F_0 N_{ijkl} \quad (3.6-5)$$

上記の方法から設定した各解析ケースの 2 階と 4 階のクラックテンソル  $F_{ij}$ ,  $F_{ijkl}$  を表 3.6-8~3.6-10 に示す。同表に示すクラックテンソルの基準軸 1, 2 は、各ケースの座標軸 X, Y に一致する。また、同表には 2 階のクラックテンソルの第 1 および第 2 主値のベクトル図も合わせて示した。第 1, 第 2 主値のそれぞれの方向は割れ目の方向における最大と最小の頻度を示している。なお、ここで示している方向とは、割れ目のトレースの法線方向を表している。

各ケースのクラックテンソルから割れ目分布の特徴は次のようである。

- a) 立坑の各ケースの第 1 主値の方向は初期応力の最大主応力方向とほぼ対応している。
- b) 横坑 GL-500m のケースでは、第 1 主値の方向は坑道展開方向が  $0^\circ \sim 135^\circ$  に変化するに伴い、 $75^\circ \sim 117^\circ$  に変化している。
- c) 横坑 GL-945m のケースでは、第 1 主値の方向は、坑道展開方向が  $0^\circ \sim 90^\circ$  の場合、 $57^\circ \sim 76^\circ$  の範囲にあるのに対し、坑道展開方向が  $135^\circ$  の場合は  $169^\circ$  と水平方向に近い方向となっている。

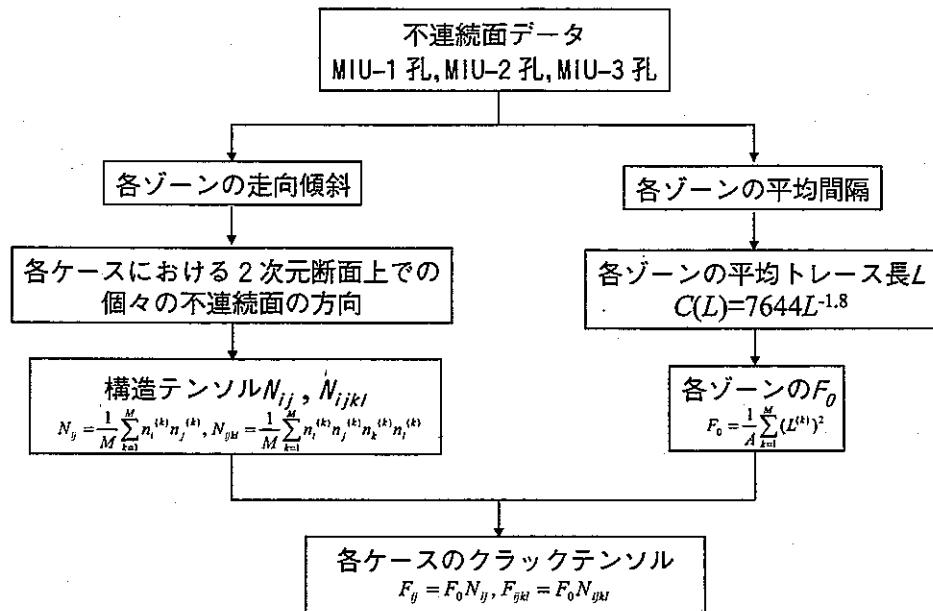


図 3.6-6 クラックテンソルの設定フロー

表 3.6-6 各ケースの岩盤区分と割れ目の平均間隔

部材	深度(m)	岩盤区分	割れ目の本数	平均間隔(m)
立坑	GL-200	Zone1	3806	0.25
	GL-500	Zone2	1789	0.47
	GL-945	月吉断層周辺部(断層下盤側)	1215	0.14
横坑	GL-500	Zone2	1789	0.47
	GL-945	Zone3	1412	0.30

表 3.6-7 F<sub>0</sub>の計算結果

岩盤区分	平均間隔(m)	10000m <sup>2</sup> あたりの本数(本)	トレース長(m)	F <sub>0</sub>
Zone1	0.25	40000	0.40	0.64
Zone2	0.47	21276	0.57	0.69
Zone3	0.30	33333	0.44	0.65
断層下盤側	0.14	71428	0.29	0.60

表 3.6-8 立坑ケースのクラックテンソル

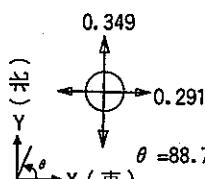
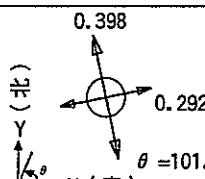
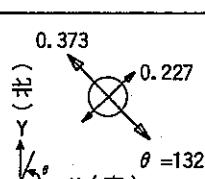
深度(m)	$\begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ Sym. & F_{22} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} F_{1111} & F_{1122} & F_{1112} \\ & F_{2222} & F_{2212} \\ Sym. & & F_{1212} \end{bmatrix}$	主値の方向・大きさ
GL-200	$\begin{bmatrix} 0.291 & 0.001 \\ Sym. & 0.349 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.210 & 0.081 & 0.002 \\ & 0.268 & -0.001 \\ Sym. & & 0.081 \end{bmatrix}$	
GL-500	$\begin{bmatrix} 0.296 & -0.021 \\ Sym. & 0.394 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.209 & 0.087 & -0.013 \\ & 0.307 & -0.008 \\ Sym. & & 0.087 \end{bmatrix}$	
GL-945	$\begin{bmatrix} 0.293 & -0.073 \\ Sym. & 0.307 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.217 & 0.076 & -0.031 \\ & 0.231 & -0.042 \\ & & 0.076 \end{bmatrix}$	

表 3.6-9 横坑(GL-500m) ケースのクラックテンソル

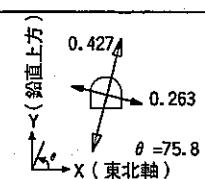
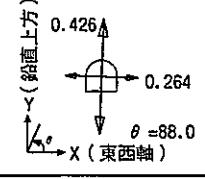
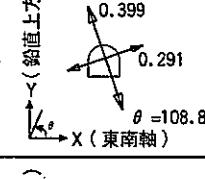
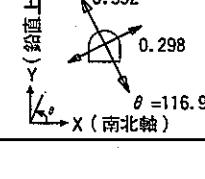
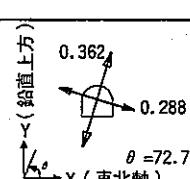
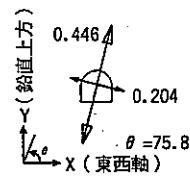
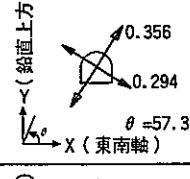
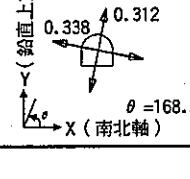
展開方向	$\begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ Sym. & F_{22} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} F_{1111} & F_{1122} & F_{1112} \\ & F_{2222} & F_{2212} \\ Sym. & & F_{1212} \end{bmatrix}$	主値の方向・大きさ
0°	$\begin{bmatrix} 0.273 & 0.039 \\ Sym. & 0.417 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.191 & 0.082 & 0.014 \\ & 0.335 & 0.025 \\ Sym. & & 0.082 \end{bmatrix}$	
45°	$\begin{bmatrix} 0.264 & 0.006 \\ Sym. & 0.426 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.185 & 0.079 & 0.014 \\ & 0.348 & -0.008 \\ Sym. & & 0.079 \end{bmatrix}$	
90°	$\begin{bmatrix} 0.302 & -0.033 \\ Sym. & 0.388 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.211 & 0.091 & 0.002 \\ & 0.297 & -0.035 \\ Sym. & & 0.091 \end{bmatrix}$	
135°	$\begin{bmatrix} 0.317 & -0.038 \\ Sym. & 0.373 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.224 & 0.093 & -0.007 \\ & 0.281 & -0.031 \\ Sym. & & 0.093 \end{bmatrix}$	

表 3.6-10 横坑 (GL-945m) ケースのクラックテンソル

展開方向	$\begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ Sym. & F_{22} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} F_{1111} & F_{1122} & F_{1112} \\ & F_{2222} & F_{2212} \\ Sym. & & F_{1212} \end{bmatrix}$	主値の方向・大きさ
0°	$\begin{bmatrix} 0.294 & 0.021 \\ Sym. & 0.356 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.202 & 0.092 & 0.003 \\ & 0.264 & 0.018 \\ Sym. & & 0.092 \end{bmatrix}$	
45°	$\begin{bmatrix} 0.219 & 0.057 \\ Sym. & 0.431 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.142 & 0.077 & 0.042 \\ & 0.354 & 0.015 \\ Sym. & & 0.077 \end{bmatrix}$	
90°	$\begin{bmatrix} 0.312 & 0.028 \\ Sym. & 0.338 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.219 & 0.093 & 0.036 \\ & 0.245 & -0.008 \\ Sym. & & 0.093 \end{bmatrix}$	
135°	$\begin{bmatrix} 0.337 & -0.005 \\ Sym. & 0.313 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.248 & 0.090 & 0.008 \\ & 0.223 & -0.013 \\ Sym. & & 0.090 \end{bmatrix}$	

## (2) $F_0$ の計測事例

上記のクラックテンソルの設定では、各岩盤区分の  $F_0$  は 0.6~0.7 の範囲にあり、いずれも 1 を下回る結果となった。そこで、既往の  $F_0$  の計測事例と比較を行った。比較した既往の計測事例は、石油備蓄用岩盤空洞周辺でクラックテンソルを求めた 2 つの事例である。以下に概要を示す。

### [事例 1] <sup>13)</sup>

- ・安山岩地山の不連続性が卓越するトンネル交差部(図 3.6-7,8)で計測した事例である。
- ・トンネルの地質展開図と切羽観察図(図 3.6-9)からクラックテンソルを決定している。
- ・式 (3.3-2), 式 (3.3-3) を用いて、3 次元のクラックテンソルを求め、それに 2 次元断面で得られた  $F_0$  を考慮してクラックテンソルを設定している。
- ・ $F_0=20$  となっている。

[事例 2] <sup>14)</sup>

- ・花崗岩地山の蓄用空洞で計測した事例である。
- ・空洞壁面のスケッチと走向傾斜データから、露頭で得られる割れ目の幾何学的な諸量からクラックテンソルを求める方法によってクラックテンソルを決定している。
- ・空洞側壁の 24m ごとの  $F_0$  は図 3.6-10 に示すように 3~9 の範囲にある。
- ・ $F_0=7$  以上の領域がアーチ部の湧水箇所と概ね一致している。

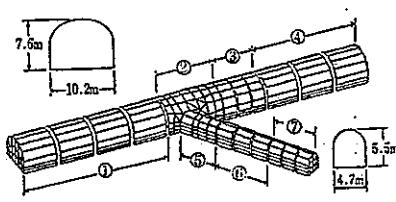


図 3.6-7 トンネル形状

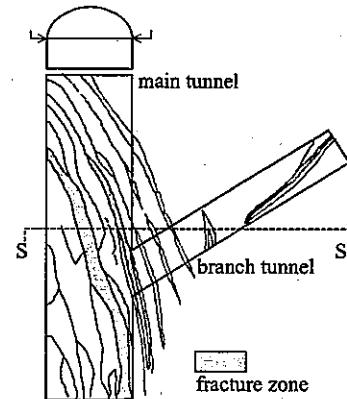


図 3.6-8 地質平面図

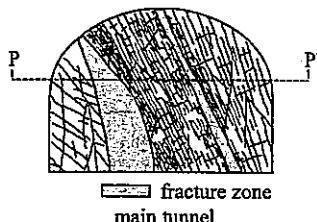


図 3.6-9 地質断面図

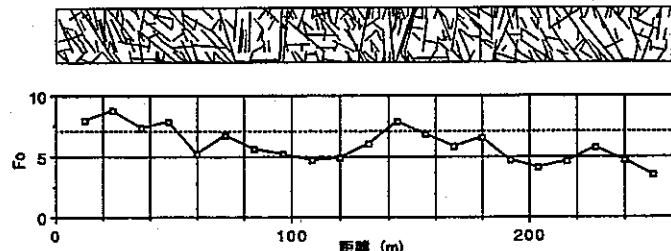


図 3.6-10 地質断面図

今回、MIU-1 孔、MIU-2 孔、MIU-3 孔の各ボーリングデータを基に設定したクラックテンソルの  $F_0$  は、上記の 2 つの計測事例より小さい値となっていることが分かる。すなわち、正馬様用地の土岐花崗岩は、上記の 2 つの計測事例と比較すると割れ目の密度が小さいことを示している。

### 3. 6. 6 割れ目の垂直剛性とせん断剛性の設定

割れ目の垂直剛性とせん断剛性は室内試験から求められるが、有効な試験データがない場合にはクラックの剛性に関する弾性解を用いることも可能である。垂直剛性とせん断剛性は割れ目に作用する垂直応力に依存する。そのため、解析で対象とする応力状態を考慮して、割れ目の剛性値を設定する必要がある。今回は、MIU-1孔、MIU-2孔、MIU-3孔のボーリングコアに対してのジョイントせん断試験<sup>2)</sup>が行われていることから、その試験データに基づいて割れ目の剛性を設定した。しかし、実施されたジョイントせん断試験では、供試体に作用させている垂直応力が小さく、解析で対象とする応力レベルと対応していない。そこで、せん断剛性については、ジョイントせん断試験で得られたせん断強度ピーク時のせん断変位  $u_p$  と割れ目の特性を表す指標である圧縮強度  $JCS$ 、粗さ係数  $JRC$ 、および、残留強度  $\phi_r$  を用いて設定することとした。以下に割れ目の剛性の設定方法について説明する。また、割れ目の垂直剛性とせん断剛性の設定フローを図 3.6-11 に示す。

- ① 垂直載荷試験の結果より垂直剛性  $H$  の平均値を求める。
- ② 垂直剛性  $H$  の平均値を用いて、式 (3.3-6) より垂直剛性に関するパラメータ  $h$  を算定する。その際、割れ目の大きさ  $r$  の平均値は供試体の寸法から求める。
- ③ 割れ目の特性を示す指標である  $JRC$ 、 $JCS$ 、 $\phi_r$  と各ケースの初期応力の平均応力を用いて各ケースの初期応力レベルにおけるせん断強度  $\tau_{max}$  を次式<sup>15)</sup>より算定する。

$$\tau_{max} = \sigma_n \tan \left( JRC \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_r \right) \quad (3.6-6)$$

ここで、 $\sigma_n$  は割れ目に作用する垂直応力であるが、ここでは各ケースの初期応力の平均応力を用いた。

- ④ 割れ目のせん断応力  $\tau$  とせん断変位  $\Delta u$  の関係において、せん断強度ピーク時のせん断変位  $u_p$  は垂直応力  $\sigma_n$  に関わらず一定である（図 3.6-12 参照）として、上記③で求めたせん断強度  $\tau_{max}$  をせん断試験より得られたピーク時のせん断変位  $u_p$  で除することによって、個々の供試体のせん断剛性  $G$  を算出する。
- ⑤ 上記④の方法により、各ケースのせん断剛性  $G$  の平均値を求める。
- ⑥ 各ケースごとに、せん断剛性  $G$  の平均値を用いて、式 (3.3-7) よりせん断剛性に関するパラメータ  $g$  を算定する。その際、割れ目の大きさ  $r$  の平均値は、垂直剛性に関するパラメータ  $h$  と同様、供試体の寸法から求める。

上記の方法より、垂直剛性とせん断剛性を算定した一例として、立坑 GL-200m の場合の計算結果を表 3.6-11 に示す。このようにして求めた各ケースの垂直剛性に関するパラメータ  $h$  とせん断剛性に関するパラメータ  $g$  を表 3.6-12 に示す。

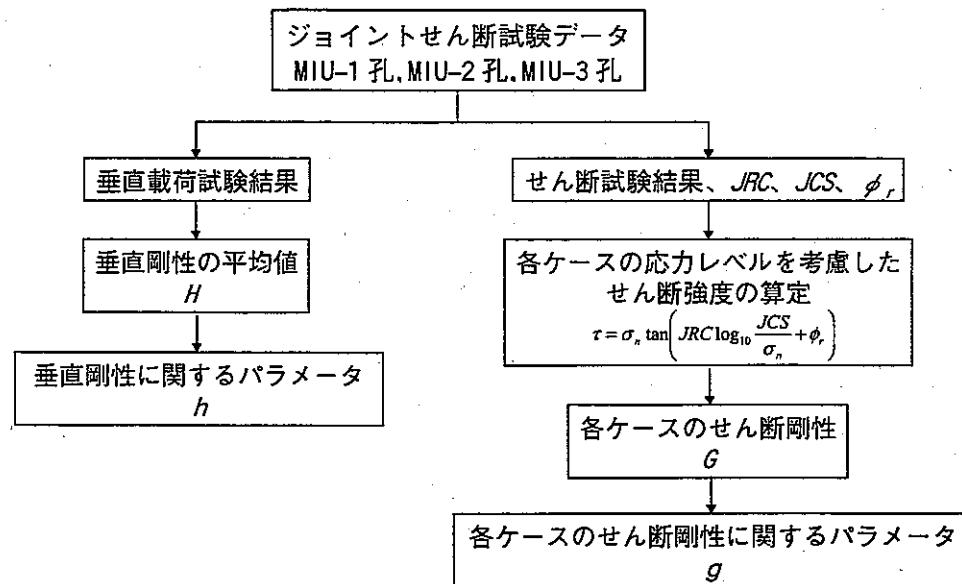


図 3.6-11 垂直剛性とせん断剛性の設定フロー

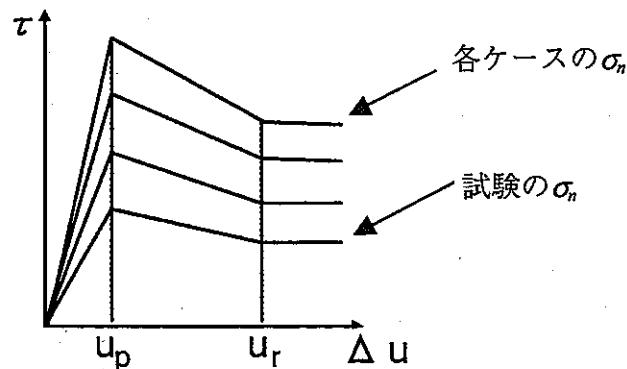


図 3.6-12 せん断応力ーせん断変位モデル

表 3.6-11 ケース 1 の垂直剛性・せん断剛性の算定結果

	<i>A</i>	<i>H</i>	JCS	JRC	$\phi_r$	<i>u<sub>p</sub></i>	$\tau_{\max}$	<i>G</i>	$\sigma_n$
	cm <sup>2</sup>	MPa/mm	MPa		°	mm	MPa	MPa/mm	MPa
1	32.70	95.600	37.600	15.630	21.300	0.373	8.368	22.411	16.500
2	31.85	667.200	54.700	11.880	24.000	0.525	9.597	18.284	16.500
3	31.55	235.100	56.500	13.900	24.100	0.007	10.123	1446.154	16.500
4	31.64	133.600	53.600	12.370	23.800	0.047	9.576	202.810	16.500
5	36.34	236.900	40.000	15.430	23.400	0.258	9.272	35.882	16.500
6	31.11	313.000	53.800	11.730	25.800	0.365	10.239	28.013	16.500
7	29.74	310.100	55.400	10.890	25.900	0.277	10.162	36.635	16.500
8	29.26	337.800	62.700	16.700	27.000	0.044	12.291	279.352	16.500
9	29.21	500.900	63.400	19.200	27.000	0.294	12.996	44.240	16.500
10	31.60	130.600	35.700	14.540	22.600	0.016	8.580	535.078	16.500
11	33.34	159.600	59.100	16.330	26.700	0.241	11.878	49.235	16.500
12	30.02	70.400	67.700	8.480	27.800	0.094	10.715	114.220	16.500
13	39.36	414.900	37.700	13.370	23.100	0.094	8.736	93.292	16.500
14	46.76	86.200	48.300	16.670	26.100	0.016	11.077	692.343	16.500
15	45.20	151.700	25.300	13.430	20.700	0.166	7.070	42.508	16.500
16	59.14	197.500	42.000	9.610	24.900	0.289	9.071	31.412	16.500
17	54.18	226.100	42.700	13.270	25.000	0.319	9.711	30.415	16.500
18	71.48	334.400	52.600	14.340	28.800	0.077	11.997	156.564	16.500
19	42.45	283.800	48.300	16.110	28.100	0.070	11.819	168.846	16.500
20	69.48	74.900	56.200	8.810	29.800	0.368	11.336	30.798	16.500
21	55.29	168.700	44.700	12.320	27.900	0.073	10.811	147.547	16.500
22	41.35	33.100	42.300	9.790	27.200	0.100	9.994	100.308	16.500
23	47.31	197.700	60.800	13.410	30.400	0.146	12.889	88.148	16.500
24	32.90	709.800	45.400	12.430	23.200	0.693	9.020	13.011	16.500
25	36.86	59.000	39.700	14.360	22.300	0.019	8.690	463.492	16.500
平均	40.80	245.144						194.840	

注)  $u_p$  は一定  $r=72.08\text{mm}$   $h=17,700(\text{MPa})$   $g=14,000(\text{MPa})$

表 3.6-12 各ケースの割れ目の垂直剛性とせん断剛性に関するパラメータ

	深度(m)	展開方向	垂直剛性に関する パラメータ $h$ (MPa)	せん断剛性に関する パラメータ $g$ (MPa)
立坑	GL-200	—	17,700	14,000
	GL-500	—	17,700	16,000
	GL-945	—	17,700	10,500
横坑	GL-500	0°	17,700	12,100
		45°	17,700	13,600
		90°	17,700	15,500
		135°	17,700	14,100
	GL-945	0°	17,700	13,900
		45°	17,700	14,000
		90°	17,700	16,400
		135°	17,700	16,200

### 3. 6. 7 仮想割れ目の透水係数と密度の設定

仮想割れ目の透水係数は、「3. 4. 2 仮想割れ目の透水係数と開口幅の算定」を参考にして、割れ目を含む岩石の室内透水試験から設定する。試験を行う割れ目は解析の対象となる現地から得られることが最も良い。ただし、土岐花崗岩に対するデータが存在しないことから、本業務では、図 3.4-1 に示されている既存のデータを用いることにする。

多田ら<sup>9)</sup>によると、図 3.4-1 に示されている試料のうち、G-1, G-2, G-4, G-5, G-6 は天然割れ目を含む花崗岩に対して試験を行ったものであると記載されている（ただし、産地に関する情報は記載されていない）。

岩盤の透水性の変化を重要視する施設の設計を考えたとき、解析による評価は実測値よりも保守的な値を与えることが望ましい。また、空洞掘削時の応力解放が透水性増大の要因であることを考えると、垂直応力が減少する割れ目には降圧過程の式を用いるべきであるが、昇圧過程の式を用いたほうが保守的な評価を与えることが期待できる。

したがって、本業務では、天然割れ目を含む花崗岩のデータの中で、最も大きな応力依存性を示した試料 G-6 を採用することにした。そして、仮想割れ目の透水係数と水理学的開口幅の算定に対して、試料 G-6 のデータにフィッティングした昇圧過程の式を用いた。

垂直応力  $\sigma_n$  (MPa) と割れ目の透水係数  $k_f$  (m/s) の実験式を式 (3.6-7) と図 3.6-13 に示す<sup>9)</sup>。

$$k_f = \frac{\sigma_n}{-2.44 - 0.28\sigma_n} + \log_{10} 2.2 \times 10^{-3} \quad (3.6-7)$$

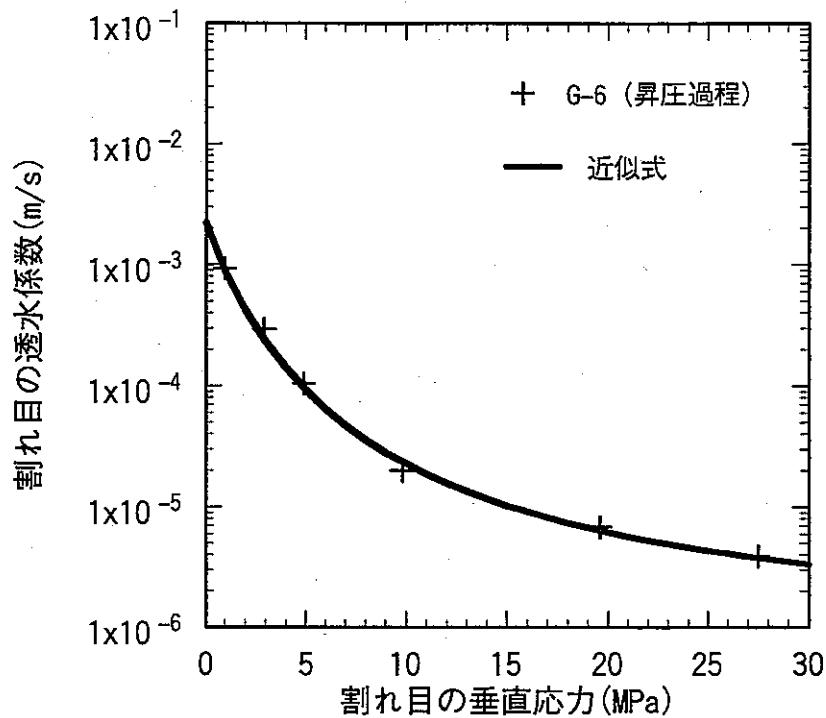


図 3.6-13 解析に用いる割れ目の垂直応力一透水係数関係

次に、仮想割れ目群の密度を設定する。式(3.4-11)によると、岩盤の透水テンソル  $k_{ij}'$  は仮想割れ目の面積密度  $\rho$  に単純に比例していることがわかる。したがって、面積密度  $\rho$  は、以下の手順にて算定することができる。

- (1) 割れ目のトレースの方向分布と寸法、仮想割れ目の垂直応力一透水係数関係、初期応力を基に、初期応力状態の透水テンソル  $k_{ij}'$  を式(3.4-11)で算定する。さらに、得られた  $k_{ij}'$  を用いて初期応力状態の平均透水係数を式(3.6-8)にて算定する。なお、このとき、仮想割れ目群の面積密度  $\rho$  は未定であるために、仮に、 $\rho=1$  を代入しておく。

$$k = \frac{1}{3} k_{ii}' \quad (3.6-8)$$

ここに、 $k$  は平均透水係数である。

- (2) (1)で求めた平均透水係数  $k$  と岩盤の初期透水係数  $k_{int}$  から、比例計算にて、仮想割れ目群の面積密度  $\rho$  を求める。

式(3.4-11)では、透水係数はスカラー量ではなく、テンソル量として求められる。また、岩盤の初期透水係数は、スカラー量で与えられていることから、式(3.4-11)で得られた透水テンソルを透水係数に変換する必要がある。本業務では、式(3.6-8)に示すように、透水テンソル  $k_{ij}'$  から求められる平均透水係数  $k$  を原位置の透水係数に相当するものと考えることとした。

以上のようにして求めた解析ケースごとの仮想割れ目の面積密度 $\rho$ を表 3.6-13 に示す。

表 3.6-13 仮想割れ目の面積密度

	深度(m)	展開方向	初期透水係数 $k_{in}$ (m/s)	仮想割れ目の面積 密度 $\rho$ (本/m <sup>2</sup> )
立坑	GL-200	—	$1.5 \times 10^{-8}$	1467
	GL-500	—	$6.5 \times 10^{-10}$	62.59
	GL-945	—	$8.3 \times 10^{-8}$	174.9
横坑	GL-500	0°	$6.5 \times 10^{-10}$	24.51
		45°	$6.5 \times 10^{-10}$	31.24
		90°	$6.5 \times 10^{-10}$	44.34
		135°	$6.5 \times 10^{-10}$	37.16
	GL-945	0°	$1.1 \times 10^{-8}$	909.6
		45°	$1.1 \times 10^{-8}$	962.3
		90°	$1.1 \times 10^{-8}$	1496
		135°	$1.1 \times 10^{-8}$	1500

### 3. 6. 8 解析ケースと物性値のまとめ

クラックテンソルモデルによる応力解析と仮想割れ目モデルによる透水性変化予測解析に用いる物性値を解析ケースごとにまとめたものを表 3.6-14～表 3.6-16 に示す。

表 3.6-14 立坑の解析ケースと入力物性値一覧表

ケース	深度(m)	岩盤区分	岩盤基質部		クラックテンソル $F_{ij}$		クラックテンソル $F_{ijkl}$						
			ヤング係数 $E(\text{MPa})$	ボアソン比 $\nu$	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{22}$	$F_{1111}$	$F_{1122}$	$F_{1112}$	$F_{2222}$	$F_{2212}$	$F_{1212}$
ケース 1	GL-200	Zone1	49,900	0.36	0.291	0.001	0.349	0.210	0.081	0.002	0.268	-0.001	0.081
ケース 2	GL-500	Zone2	49,400	0.34	0.296	-0.021	0.394	0.209	0.087	-0.013	0.307	-0.008	0.087
ケース 3	GL-945	断層下盤部	3,500	0.36	0.293	-0.073	0.307	0.217	0.076	-0.031	0.231	-0.042	0.076
ケース	垂直剛性に関するパラメータ $h(\text{MPa})$	せん断剛性に関するパラメータ $g(\text{MPa})$	初期応力(MPa)			トレース長 $l(\text{m})$	割れ目の方向分布	仮想割れ目の面積密度 $\rho(\text{本}/\text{m}^2)$	初期透水係数 $k_{im}(\text{m}/\text{s})$	割れ目の垂直応力－透水係数関係			
			$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$								
ケース 1	17,700	14,000	14.99	17.92	-0.21	0.40	図 3.6-3 参照	1467	$1.5 \times 10^{-8}$	式 (3.6-7) 参照			
ケース 2	17,700	16,000	18.82	20.47	-5.30	0.57		62.59	$6.5 \times 10^{-10}$				
ケース 3	17,700	10,500	3.13	19.50	-5.59	0.29		174.9	$8.3 \times 10^{-8}$				

注) 初期応力は圧縮: 正, 座標軸は図 3.5-2 参照

表 3.6-15 横坑(GL-500m) の解析ケースと入力物性値一覧表

ケース	展開方向	岩盤区分	岩盤基質部		クラックテンソル $F_{ij}$		クラックテンソル $F_{ijkl}$						
			ヤング係数 $E(\text{MPa})$	ボアソン比 $\nu$	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{22}$	$F_{1111}$	$F_{1122}$	$F_{1112}$	$F_{2222}$	$F_{2212}$	$F_{1212}$
ケース 4	0°	Zone2	49,400	0.34	0.273	0.039	0.417	0.191	0.082	0.014	0.335	0.025	0.082
ケース 5	45°				0.264	0.006	0.426	0.185	0.079	0.014	0.348	-0.008	0.079
ケース 6	90°				0.302	-0.033	0.388	0.211	0.091	0.002	0.297	-0.035	0.091
ケース 7	135°				0.317	-0.038	0.373	0.224	0.093	-0.007	0.281	-0.031	0.093
ケース	垂直剛性に関するパラメータ $h(\text{MPa})$	せん断剛性に関するパラメータ $g(\text{MPa})$	初期応力(MPa)			トレース長 $l(\text{m})$	割れ目の方向分布	仮想割れ目の面積密度 $\rho(\text{本}/\text{m}^2)$	初期透水係数 $k_{im}(\text{m}/\text{s})$	割れ目の垂直応力－透水係数関係			
			$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$								
ケース 4	17,700	12,100	14.35	12.75	1.43	0.57	図 3.6-4 参照	24.51	6.5×10 <sup>-10</sup>	式 (3.6-7) 参照			
ケース 5	17,700	13,600	18.82	12.75	-0.59			31.24					
ケース 6	17,700	15,500	24.95	12.75	-2.26			44.34					
ケース 7	17,700	14,100	20.47	12.75	-2.61			37.16					

注) 初期応力は圧縮: 正, 座標軸は図 3.5-1, 図 3.5-3 参照

表 3.6-16 横坑 (GL-945m) の解析ケースと入力物性値一覧表

ケース	展開方向	岩盤区分	岩盤基質部		クラックテンソル $F_{ij}$			クラックテンソル $F_{ijkl}$					
			ヤング係数 $E$ (MPa)	ポアソン比 $\nu$	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{22}$	$F_{1111}$	$F_{1122}$	$F_{1112}$	$F_{2222}$	$F_{2212}$	$F_{1212}$
ケース 8	0°	Zone3	47,400	0.34	0.294	0.021	0.356	0.202	0.092	0.003	0.264	0.018	0.092
ケース 9	45°				0.219	0.057	0.431	0.142	0.077	0.042	0.354	0.015	0.077
ケース 10	90°				0.312	0.028	0.338	0.219	0.093	0.036	0.245	-0.008	0.093
ケース 11	135°				0.337	-0.005	0.313	0.248	0.090	0.008	0.223	-0.013	0.090
ケース	垂直剛性に関するパラメータ $h$ (MPa)	せん断剛性に関するパラメータ $g$ (MPa)	初期応力(MPa)			トレース長 $l$ (m)	割れ目の方向分布		仮想割れ目の面積密度 $\rho$ (本/m <sup>2</sup> )	初期透水係数 $k_{in}$ (m/s)	割れ目の垂直応力－透水係数関係		
ケース 8	17,700	13,900	16.47	15.86	1.76	0.44	図 3.6-5 参照		909.6	1.1×10 <sup>-8</sup>	式(3.6-7) 参照		
ケース 9	17,700	14,000	17.09	15.86	1.02				962.3				
ケース 10	17,700	16,400	24.59	15.86	-0.32				1496				
ケース 11	17,700	16,200	23.69	15.86	-1.47				1500				

注) 初期応力は圧縮:正, 座標軸は図 3.5-1, 図 3.5-3 参照

### 3. 7 立坑解析結果

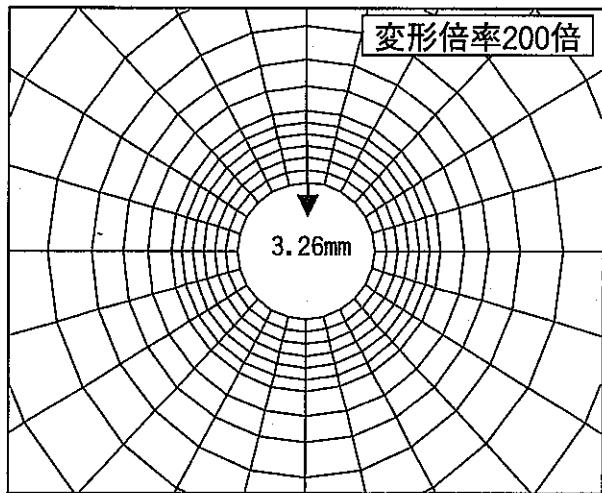
#### 3. 7. 1 変形量

立坑解析結果の変形量を図 3.7-1 に示す。

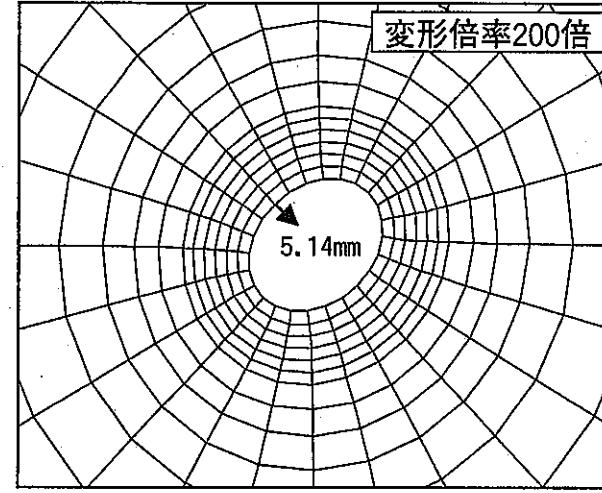
GL-200m のケース 1 では、初期応力の最大主応力の方向が水平面内のほぼ南北に一致し、ほぼ等方応力状態に近いことと、クラックテンソルの第 1 主値（不連続面分布の最強方向）の方向も南北に一致し、第 2 主値（不連続面分布の最弱方向）との大きさの差も小さいことから、立坑の変形モードはほぼ円形を保ち、最大変位量は 3.26mm となっている。

GL-500m のケース 2 では、最大主応力の方向が水平面内の北西～南東方向にあり、最小主応力との大きさの差も約 11MPa であること、クラックテンソルの第 1 主値の方向も北北西～南南東方向にあることから、立坑の変形モードは北西～南東方向に押しつぶされた形状となり、最大変位量は 5.14mm となっている。

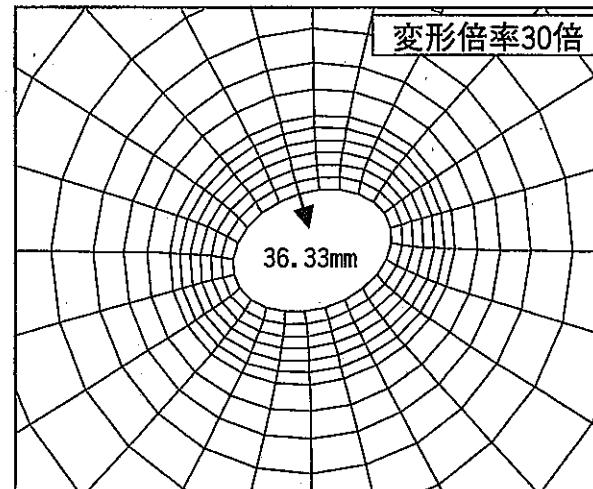
GL-945m のケース 3 では、岩盤基質部の物性が断層部の物性を用いているため、他のケースよりもヤング係数が 1/10 以下であり、最大主応力が北北西～南南東の方向にほぼ一軸化している。また、クラックテンソルの第 1 主値の方向も北西～南東方向にある。このため、立坑の変形モードは北北西～南南東方向に押しつぶされた形状となり、最大変位量は 36.33mm となり、非常に大きくなっている。



ケース 1 (GL-200m)



ケース 2 (GL-500m)



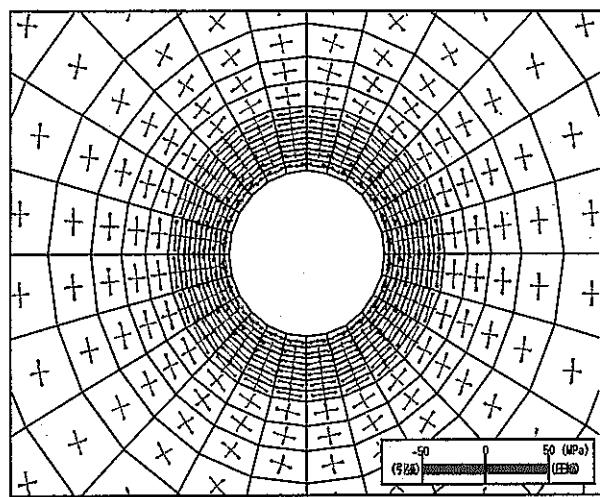
ケース 3 (GL-945m)

図 3.7-1 立坑解析結果 変形図

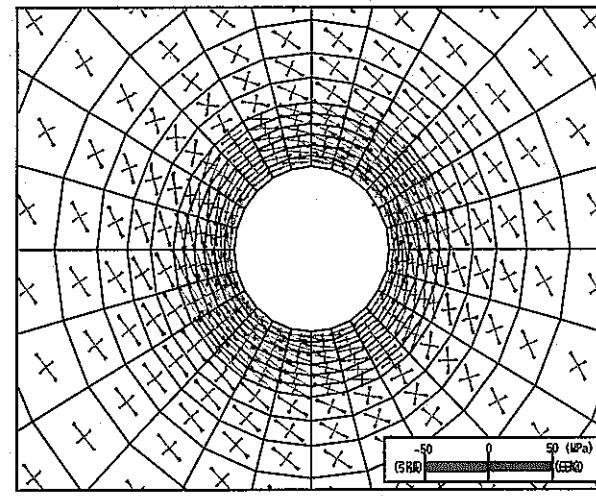
### 3. 7. 2 応力

立坑解析結果の主応力分布を図 3.7-2 に示す。

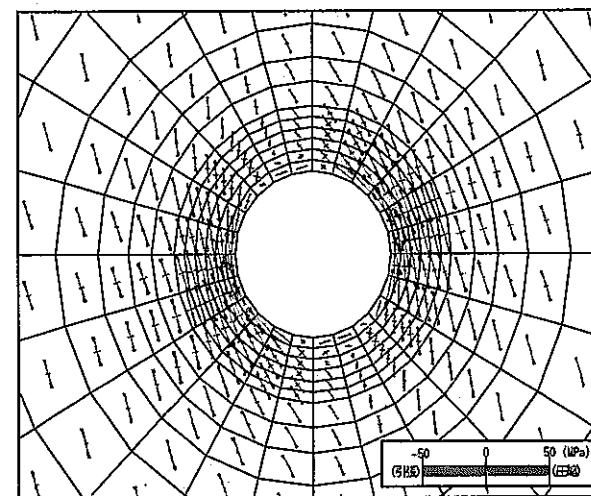
主応力分布は各深度での初期応力状態の影響を強く受けているが、掘削境界付近の岩盤では境界接線方向が最大主応力方向となる分布となっている。しかし、GL-945m のケース 3 では、極端に異方的な初期応力状態であるため、掘削境界付近の北西および南東付近の要素では引張応力（約 10MPa）が生じている。逆に北東および南西付近の要素では、初期応力の倍以上の圧縮応力（約 50MPa）となっている。



ケース 1 (GL-200m)



ケース 2 (GL-500m)



ケース 3 (GL-945m)

図 3.7-2 立坑解析結果 主応力図

### 3. 7. 3 安全率

安全率の評価には、モール・クーロンの破壊規準を用いた。粘着力  $c$  と内部摩擦角  $\phi$  を表 3.7-1 に示す。これらは室内試験により求められた各岩盤区分の平均値<sup>1)</sup>である。

安全率は、図 3.7-3 に示すように、応力円と破壊規準線との距離をもって評価し、次式で定義した。

$$FS = \frac{\min(L1, L2)}{d} \quad (3.7-1)$$

立坑解析結果の安全率分布を図 3.7-4 に示す。

GL-200m のケース 1 では、最大主応力が約 34MPa となっており、せん断破壊は発生せず安全率 ( $FS$ )  $\leq 1$  となる領域はない。

GL-500m のケース 2 では、初期応力の方向に依存して、北東・南西付近の要素において、最大主応力が大きな値となり、その最大値は約 52MPa となっている。しかし、せん断破壊は発生せず、安全率 ( $FS$ )  $\leq 1$  となる領域はない。

GL-945m のケース 3 では、初期応力が北北西～南南東の方向に一軸化しており、北西および南東付近の要素において、引張応力が生じている。その付近の要素は引張によって破壊している。安全率 ( $FS$ )  $\leq 1$  となる領域は掘削壁面から 8.5m まで広がっている。

表 3.7-1 粘着力と内部摩擦角

岩盤区分	粘着力 $c$ (MPa)	内部摩擦角 $\phi$ (°)
Zone1	35.25	52.44
Zone2	28.57	54.19
Zone3	28.67	56.18
断層下盤側	21.48	55.53

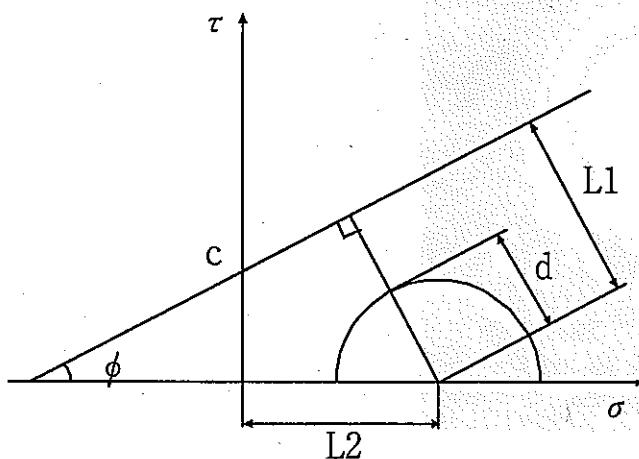
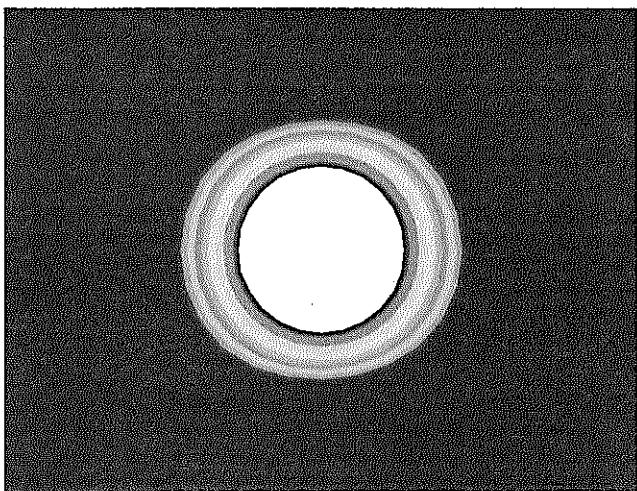
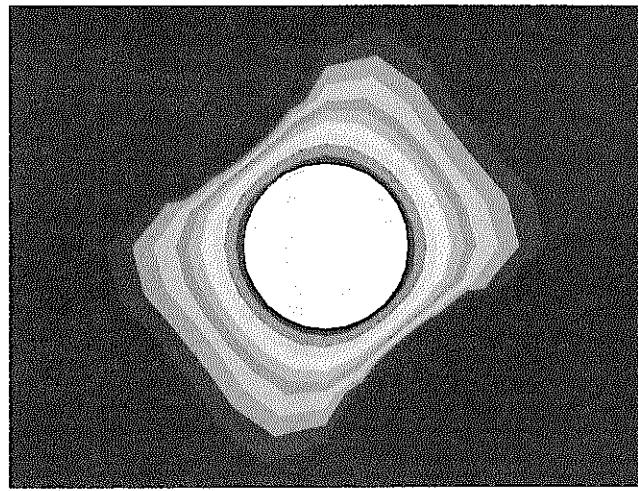


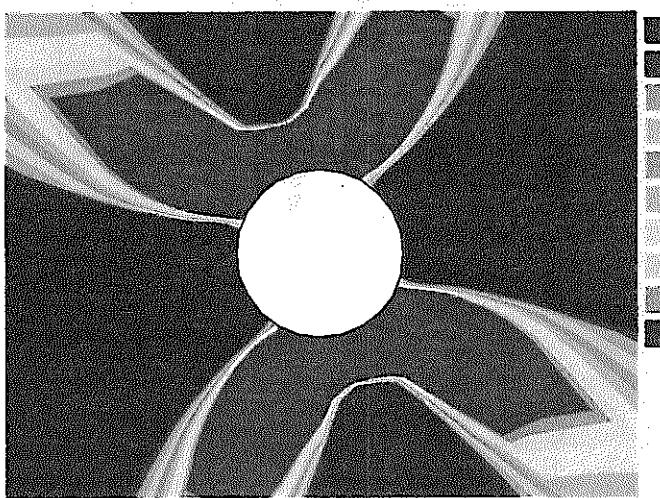
図 3.7-3 安全率の定義



ケース 1 (GL-200m)



ケース 2 (GL-500m)



ケース 3 (GL-945m)

図 3.7-4 立坑解析結果 安全率分布図

### 3. 7. 4 平均透水係数および変化率

立坑掘削後の周辺岩盤の透水テンソル  $k_{ij}$  を式 (3.4-11) で求め、その後、平均透水係数  $k$  を式 (3.6-8) により算定した。平均透水係数  $k$  の分布を図 3.7-5 に示す。この図では、各ケースの初期透水係数や透水係数の増減の程度が異なることから、カラーバーのスケールはケースごとに異なっている。

図 3.7-5 に示した掘削後の平均透水係数  $k$  を岩盤の初期透水係数  $k_{im}$  で除することにより、透水係数の変化率を算定した。透水係数の変化率の分布を図 3.7-6 に示す。

図 3.7-6 の透水係数変化率の分布から等倍率線を読みとり、壁面から最も離れた位置を解析ケースごとに示したものと図 3.7-7 に示す。

透水係数の最大増加率と初期応力の最大主応力を解析ケースごとに示したものと図 3.7-8 に示す。

図 3.7-5～図 3.7-8 より、ケース 1 (GL-200m) では、平均透水係数は坑道壁面の全周にわたって増加していることがわかる。そして、初期透水係数より 5 倍以上増加した領域は坑道壁面より約 1.3m の範囲、また、10 倍以上の増加は約 0.9m の範囲である。また、壁面近傍での最大増加率は約 62 倍であることがわかる。

技術資料①<sup>1)</sup>の解析結果によると、GL-200m で無支保 (Case1) の場合では、坑道周辺岩盤の等価透水係数は増加していないことから、解析結果の傾向は異なるものとなっている。

ケース 2 (GL-500m) でも、平均透水係数は坑道壁面の全周にわたって増加している。そして、5 倍以上増加した領域は約 1.6m、また、10 倍以上の増加は約 1.1m の範囲である。壁面近傍では 2 衍以上の増加を示した部分があり、最大増加率は約 140 倍であった。技術資料①<sup>1)</sup>の解析結果 (Case4) の透水係数分布図と比較してみると、透水係数が増大した領域の形状は近似していることがわかる。ただし、10 倍以上増加した範囲は壁面から 2.5m 以内となっていることから、増加領域は本解析結果のほうがやや狭くなっている。

ケース 3 (GL-945m) では、坑道周辺岩盤のうち、(立坑を時計に見立てて見てみると) 10 時～1 時の範囲と 4 時～7 時の範囲で平均透水係数が増加していて、2 時～3 時の範囲と 8 時～9 時の範囲では平均透水係数は減少していることがわかる。5 倍以上増加した領域は壁面から約 8.6m、また、10 倍以上の増加は約 3.7m の範囲で、壁面近傍の最大増加率は約 49 倍である。また、増加領域の形状は蝶の羽のような形状をしていて、これまでのケース 1 と 2 とは異なる傾向を示している。これは、初期応力が極めて偏った状態で作用している (解析面内の最大主応力=21.23MPa、最小主応力=1.45MPa) こと、最大主応力方向が N17° W で、割れ目のトレースの法線ベクトルが N30° W～N60° W あたりに卓越していて (図 3.6-3 参照)、両者がほぼ一致していることが影響して、このような極端な透水性変化を示したと考えられる。つまり、壁面近傍では、10 時～1 時の範囲と 4 時～7 時の範囲では半径方向応力  $\sigma_r$  が減少し、2 時～3 時の範囲と 8 時～9 時の範囲では接線方向応力  $\sigma_\theta$  が増加していること、これらの応力が割れ目に作用する垂直応力とほぼ一致したことが、このような変化を示した理由と考えられる。また、初期応力が一軸状態に近く、応力解放の影響が深部まで及んだことが、増加領域が深部まで広がった理由と考えられる。

技術資料①<sup>1)</sup>の解析結果 (Case7) と比較してみると、透水係数が増大した領域の形状は

近似していることがわかる。ただし、100倍以上増大した領域が壁面から2.9m以内となっていることから、増加率は本解析の結果のほうが小さめとなっている。

図3.7-6においてケース1と2を比較してみると、ケース2のほうが増加領域は広がっている傾向にある。割れ目のトレースの方向分布（図3.6-3 参照）によると、両者に際立った差は見られない。また、岩盤の物性も大きな差はないことから、初期応力の大きさがこのような差を生んだ原因と考えられる。

図3.7-8によると、透水係数の最大増加率は初期最大主応力と関連があることがわかる。これは、透水係数の最大增加は壁面近傍で起きているが、壁面近傍では、掘削により応力状態は初期応力状態から半径方向応力 $\sigma_r=0$ に変化する。そして、この応力変化が透水係数増加の直接的な要因となっているためと考えられる。

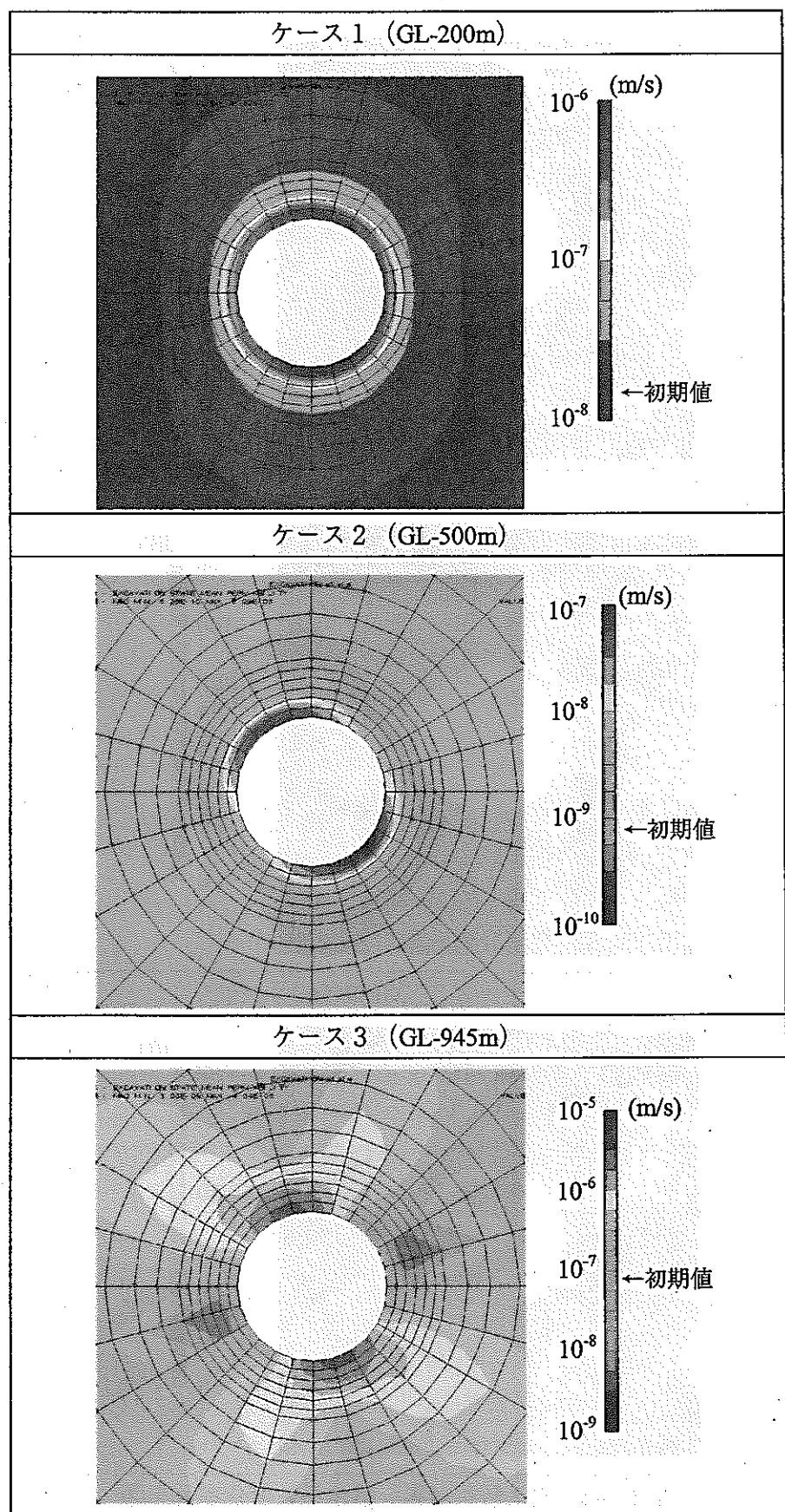
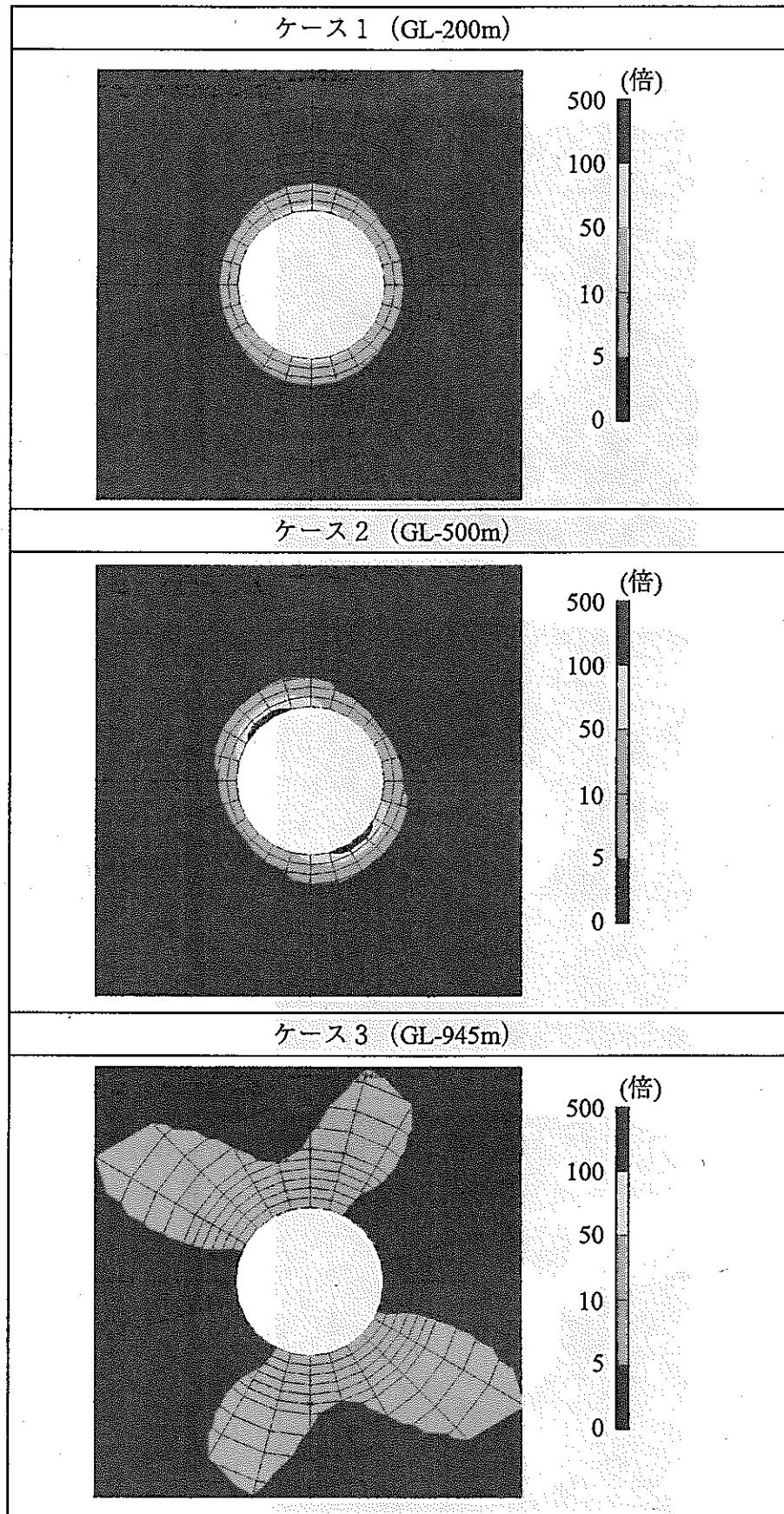


図 3.7-5 立坑解析結果 平均透水係数分布図



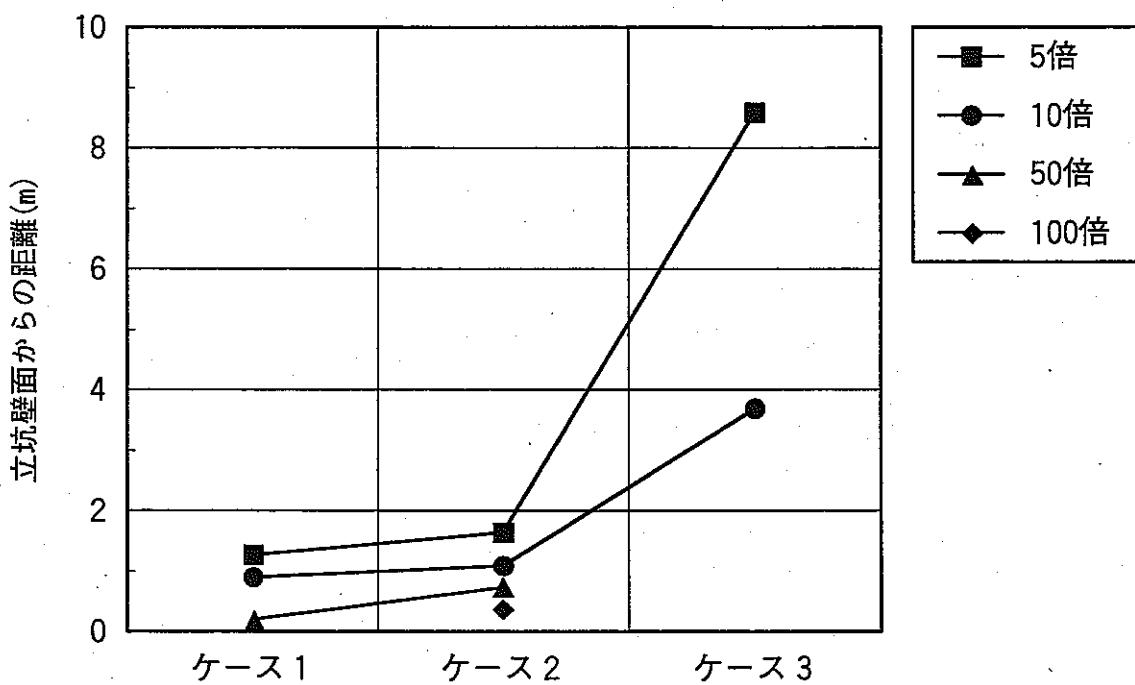


図 3.7-7 立坑における透水係数増大領域の比較

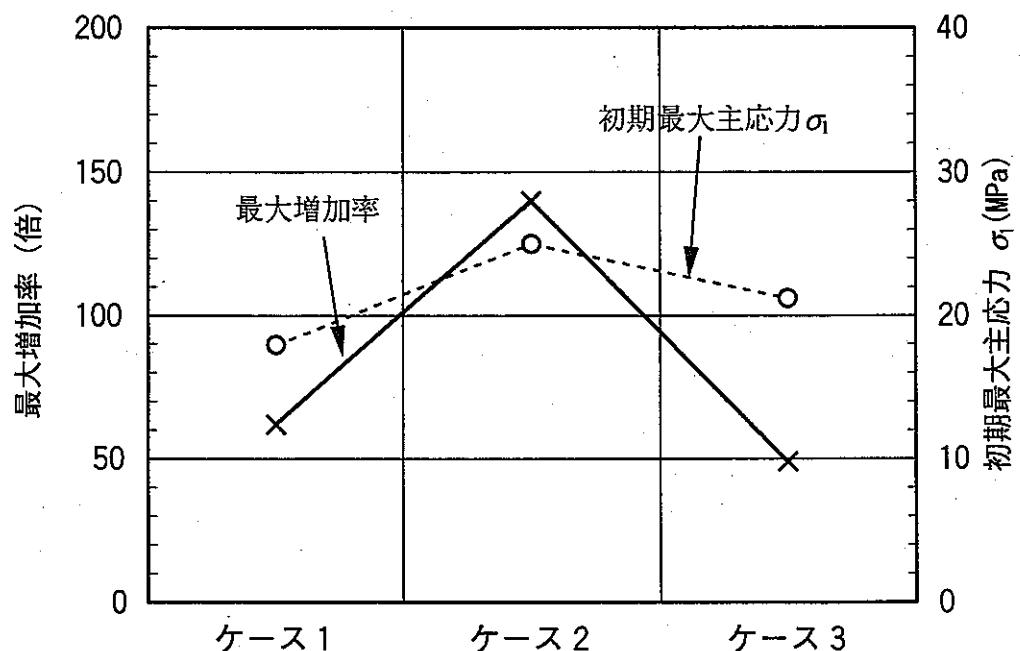


図 3.7-8 立坑における透水係数の最大増加率

### 3. 8 横坑解析結果

#### 3. 8. 1 変形量

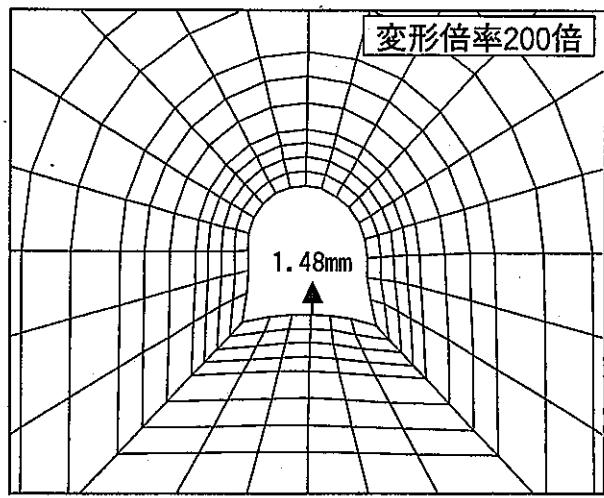
横坑の GL-500m および GL-945m における解析結果の変形量を図 3.8-1 と図 3.8-2 に示す。

各ケースの最大値は、GL-500m のケース 4～7 では 1.48～2.60mm, GL-945 のケース 8～11 では、1.74～2.42mm の範囲にある。

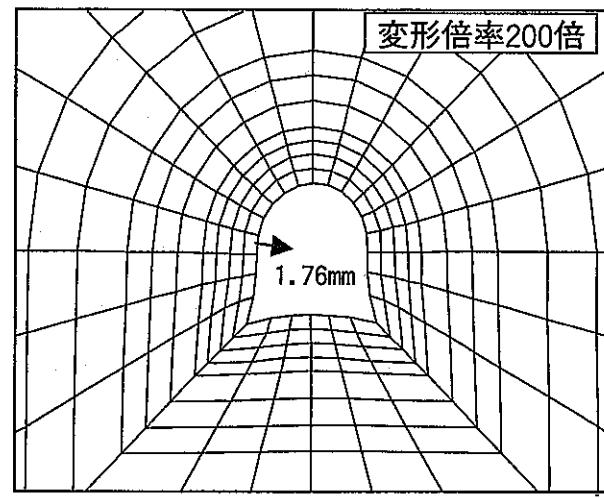
GL-500m のケース 4～7 では、展開方向 0° のケース 4 が最も変形量が小さく、展開方向 90° のケース 6 はその 2 倍弱の変形量となっている。最大の変形量は、展開方向 0° の場合（ケース 4），底盤部で生じているが、その他のケースでは坑道側壁部で生じている。展開方向 0° のケースで最大の変形量が底盤部に生じたのは、初期応力がほぼ等方的な応力状態であるのに対して、クラックテンソルの第 1 主値の方向がほぼ鉛直方向にあることによると考えられる。これに対して、その他のケースでは、初期応力の最大主応力が水平方向であるため、側壁部で最大の変形量になったと考えられる。

GL-945m のケース 8～11 では、展開方向 0° のケース 8 が最も変形量が小さく、展開方向 135° のケース 11 が最大の変形量となっている。最大の変形量は、展開方向 0° と 45° の場合（ケース 8, 9），底盤部で生じているのに対して、展開方向 90° と 135° の場合（ケース 10, 11）は坑道側壁部で生じている。展開方向 0° と 45° のケースで最大の変形量が底盤部に生じたのは、初期応力がほぼ等方的な応力状態であるのに対して、クラックテンソルの第 1 主値の方向がほぼ鉛直方向にあることによる。これに対して、展開方向 90° と 135° のケースでは、初期応力の最大主応力が水平方向であるため、側壁部で最大の変形量になったと考えられる。また、ほぼ同じ初期応力状態にある展開方向 90° と 135° のケースで、135° のケースの方が最大変形量が若干大きくなっているのは、135° のケースのクラックテンソルの第 1 主値の方向が 90° のケースよりも水平方向に近いことによる。

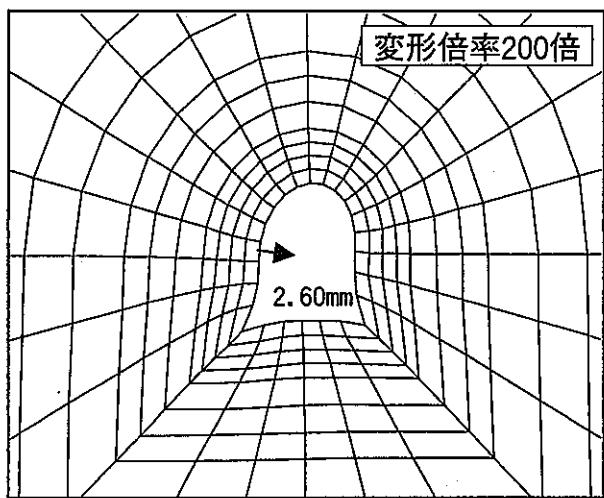
これらの結果から、馬蹄形形状の横坑断面では、最大の変形量を示す位置は初期応力の最大主応力方向と不連続面の卓越方向との相互関係に依存していると考えられる。



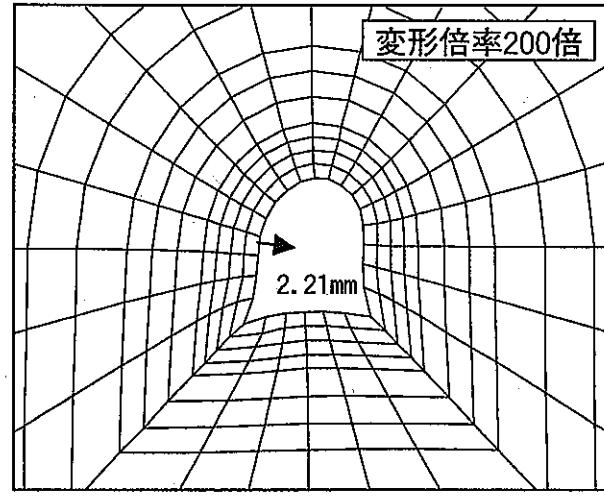
ケース4 (GL-500m, 展開方向 0°)



ケース5 (GL-500m, 展開方向 45°)

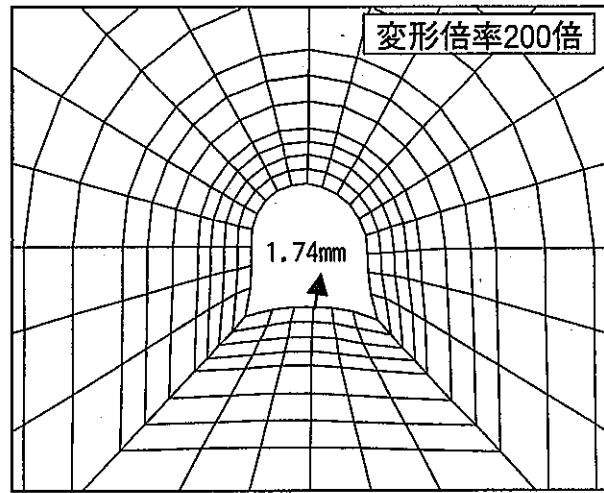


ケース6 (GL-500m, 展開方向 90°)

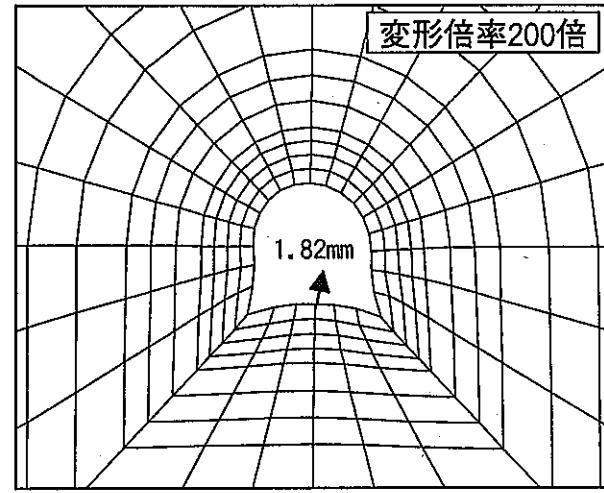


ケース7 (GL-500m, 展開方向 135°)

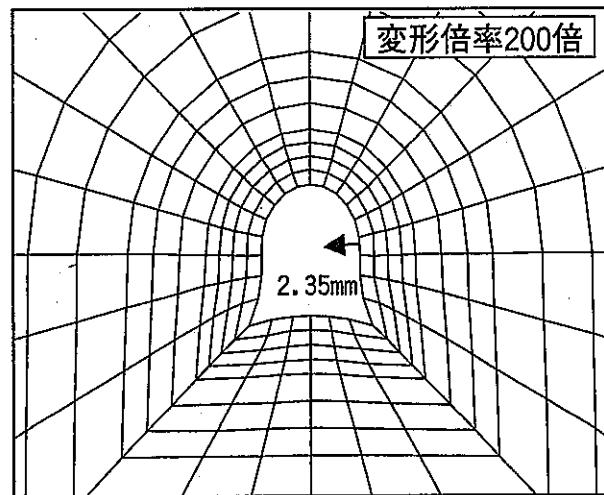
図 3.8-1 横坑 (GL-500m) 解析結果 変形図



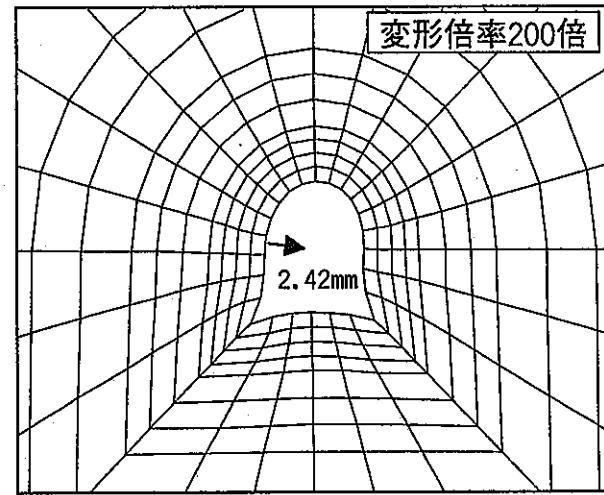
ケース 8 (GL-945m, 展開方向 0° )



ケース 9 (GL-945m, 展開方向 45° )



ケース 10 (GL-945m, 展開方向 90° )



ケース 11 (GL-945m, 展開方向 135° )

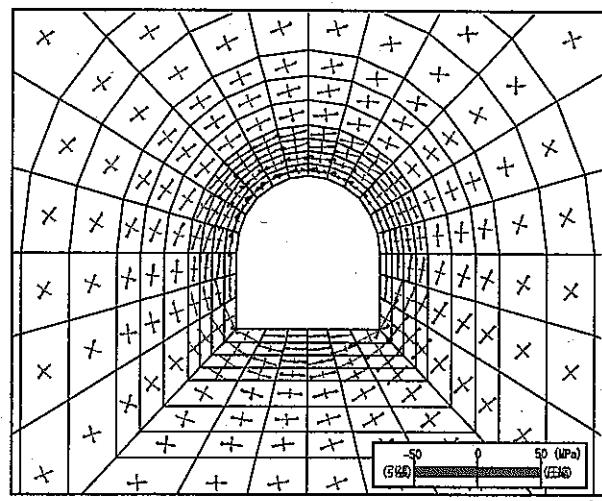
図 3.8-2 横坑 (GL-945m) 解析結果 変形図

### 3. 8. 2 応力

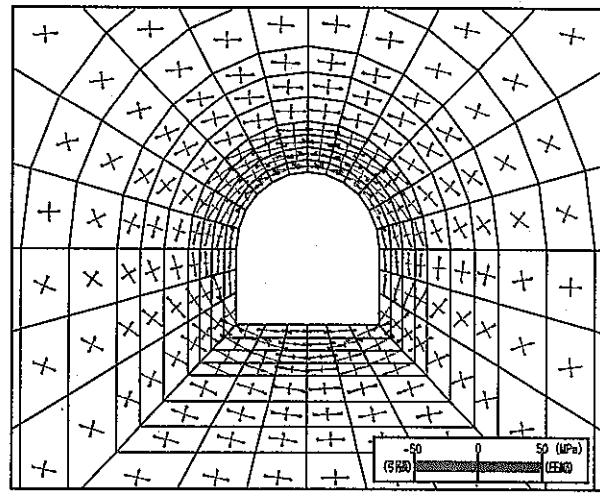
横坑の GL-500m (ケース 4 ~ 7) および GL-945m (ケース 8 ~ 11) における解析結果の主応力分布を図 3.8-3 と図 3.8-4 に示す。

主応力分布は各深度での初期応力状態の影響を強く受けているが、掘削境界付近の岩盤では境界接線方向が最大主応力方向となる分布となっている。

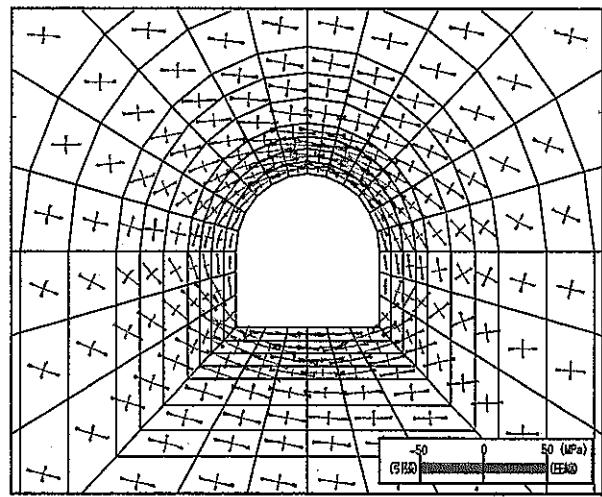
深度、坑道展開方向に関わらず、どのケースも、側壁部と底盤部(どちらも壁面から 0.25m の範囲)に引張応力が発生している。



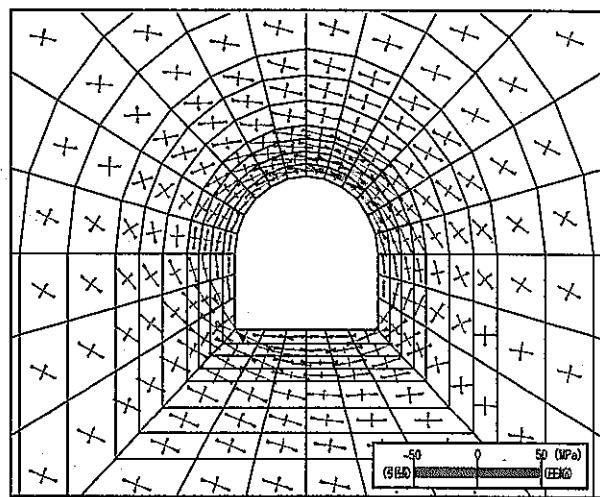
ケース4 (GL-500m, 展開方向  $0^\circ$ )



ケース5 (GL-500m, 展開方向  $45^\circ$ )

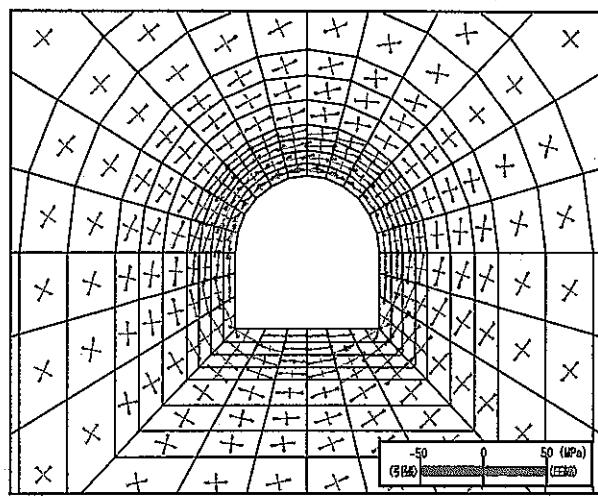


ケース5 (GL-500m, 展開方向  $90^\circ$ )

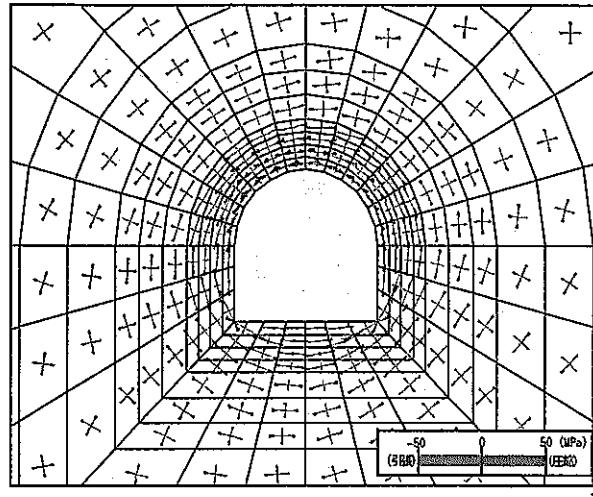


ケース6 (GL-500m, 展開方向  $135^\circ$ )

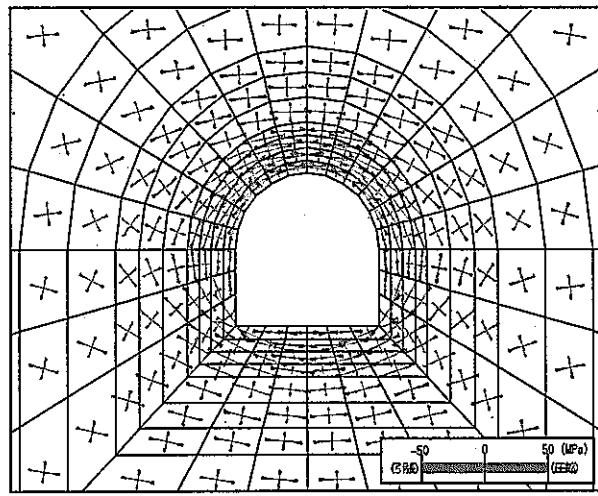
図 3.8-3 横坑 (GL-500m) 解析結果 主応力図



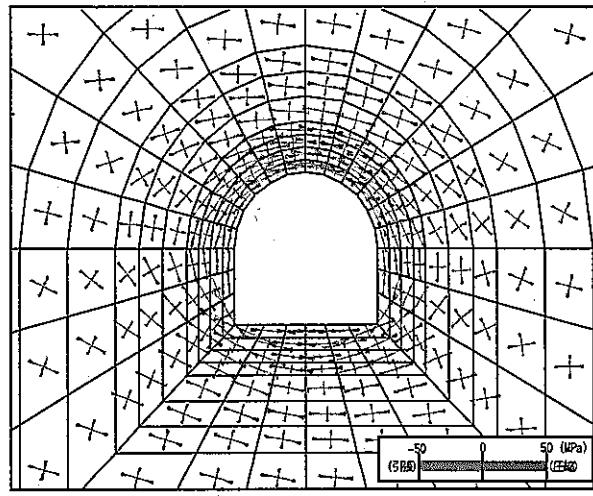
ケース 8 (GL-945m, 展開方向  $0^\circ$  )



ケース 9 (GL-945m, 展開方向  $45^\circ$  )



ケース 10 (GL-945m, 展開方向  $90^\circ$  )



ケース 11 (GL-945m, 展開方向  $135^\circ$  )

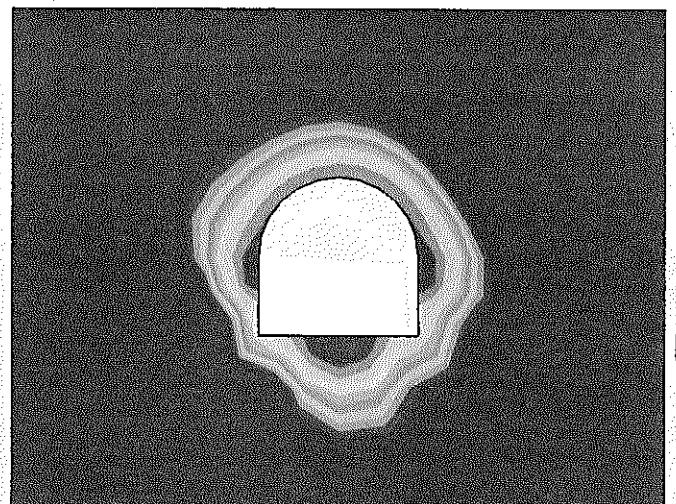
図 3.8-4 横坑 (GL-945m) 解析結果 主応力図

### 3. 8. 3 安全率

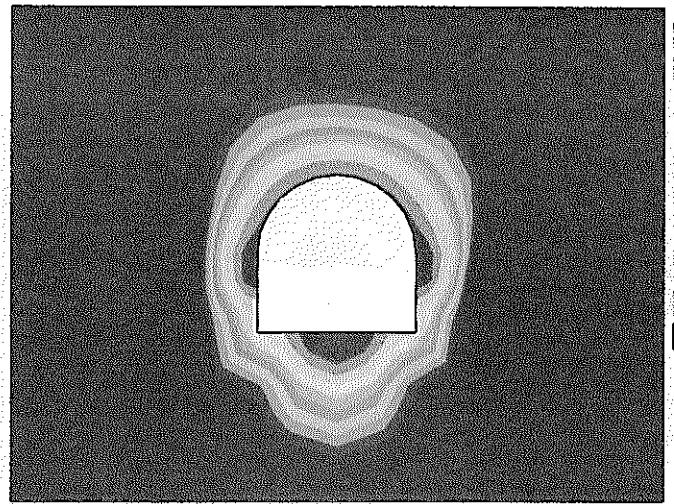
横坑の GL-500m および GL-945m における解析結果の安全率分布を図 3.8-5 と図 3.8-6 に示す。安全率の評価は立坑と同様の方法で行った。

GL-500m のケース 4 ~ 7 では、展開方向  $90^\circ$  のケース 6 で安全率 ( $FS$ )  $\leq 2$  の領域が壁面から 2m まで広がり、安全率 ( $FS$ ) = 2~3 の領域も広範囲に広がっている。これは、他のケースに比べて、最大主応力と最小主応力の差が最も大きいため相対的に応力円が破壊規準線に近づいたことによるものである。その他のケースにおいては、天端、両スプリングライン付近、底盤に安全率の低い領域が認められ、側壁部および底盤部（どちらも壁面から 0.25m の範囲）に安全率 ( $FS$ )  $\leq 1$  となる領域が生じている。これは側壁部・底盤部での引張応力の発生によるものである。

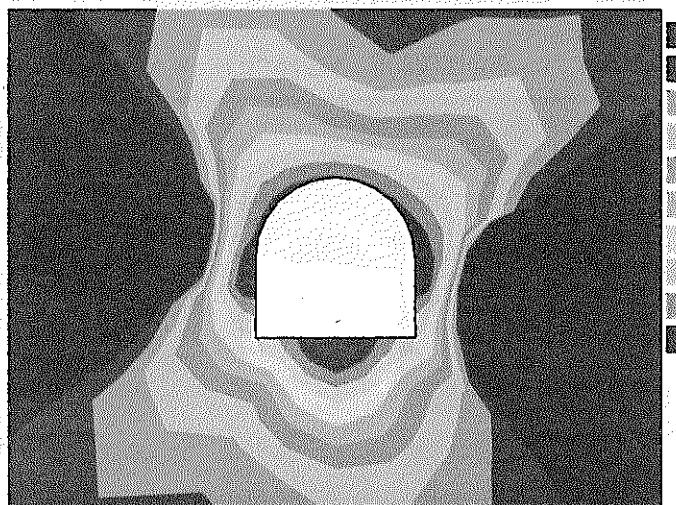
GL-945m のケース 8 ~ 11 では、どの展開方向のケースにおいても、安全率 ( $FS$ )  $\leq 2$  の領域は掘削壁面から 1.5m 以内である。天端、両スプリングライン付近、底盤に安全率の低い領域が認められ、側壁部および底盤部（どちらも壁面から 0.25m の範囲）に安全率 ( $FS$ )  $\leq 1$  となる領域が生じている。これは側壁部・底盤部での引張応力の発生によるものである。



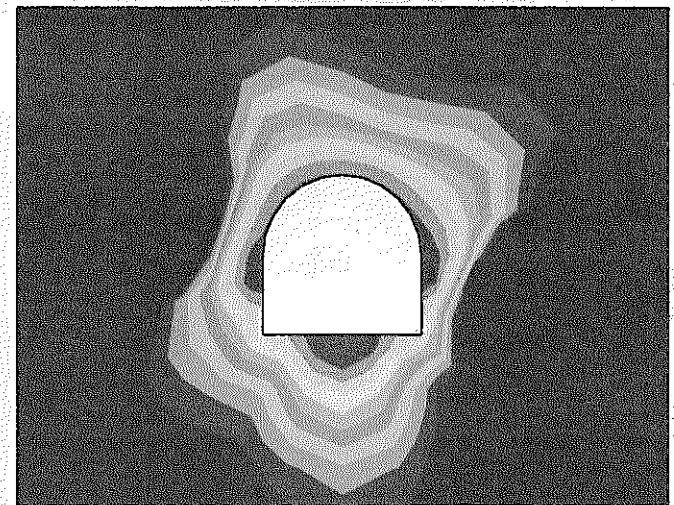
ケース 4 (GL-500m, 展開方向  $0^\circ$  )



ケース 5 (GL-500m, 展開方向  $45^\circ$  )

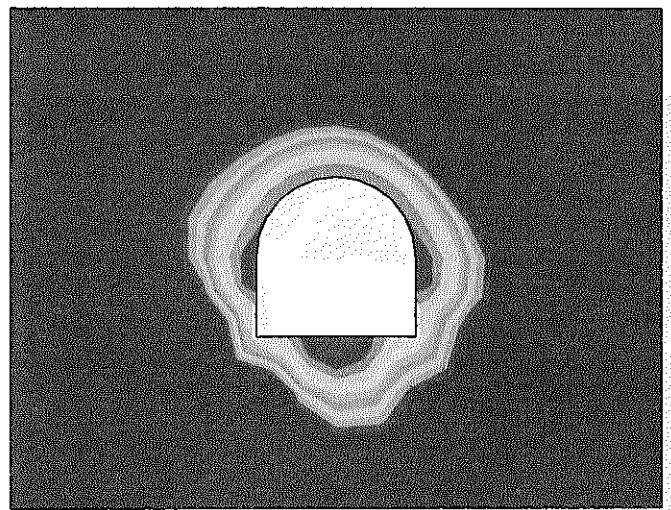


ケース 6 (GL-500m, 展開方向  $90^\circ$  )



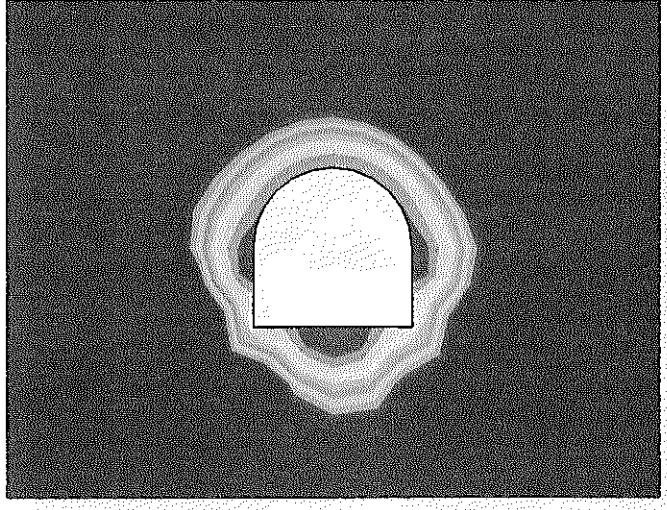
ケース 7 (GL-500m, 展開方向  $135^\circ$  )

図 3.8-5 横坑 (GL-500m) 解析結果 安全率分布図



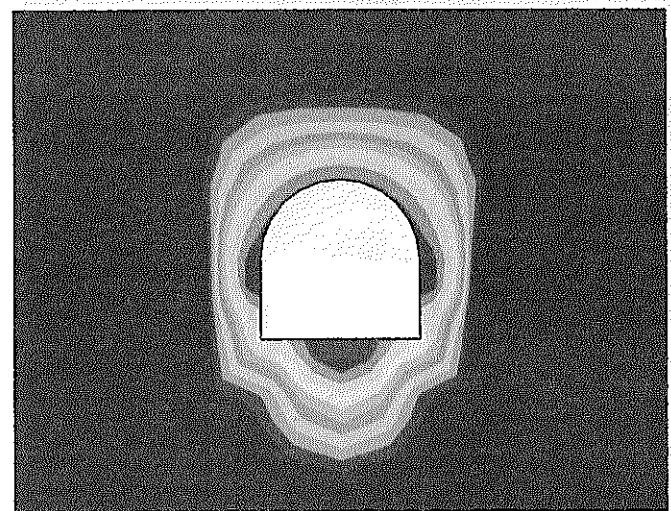
ケース 8 (GL-945m, 展開方向  $0^\circ$  )

3.0  
2.8  
2.6  
2.4  
2.2  
2.0  
1.8  
1.6  
1.4  
1.2  
1.0



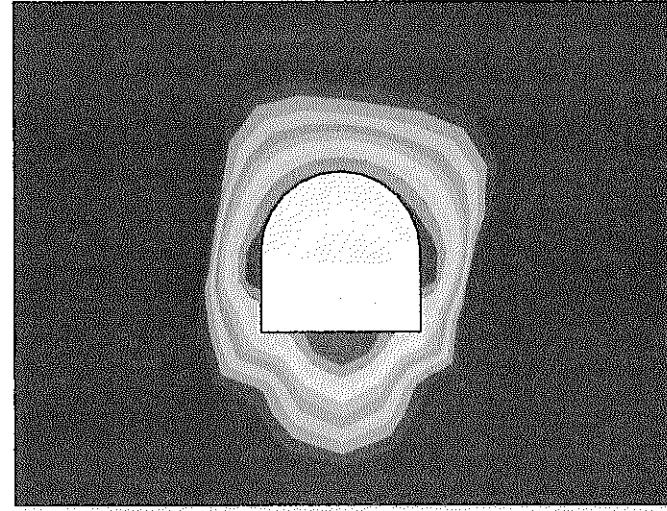
ケース 9 (GL-945m, 展開方向  $45^\circ$  )

3.0  
2.8  
2.6  
2.4  
2.2  
2.0  
1.8  
1.6  
1.4  
1.2  
1.0



ケース 10 (GL-945m, 展開方向  $90^\circ$  )

3.0  
2.8  
2.6  
2.4  
2.2  
2.0  
1.8  
1.6  
1.4  
1.2  
1.0



ケース 11 (GL-945m, 展開方向  $135^\circ$  )

3.0  
2.8  
2.6  
2.4  
2.2  
2.0  
1.8  
1.6  
1.4  
1.2  
1.0

図 3.8-6 横坑 (GL-945m) 解析結果 安全率分布図

### 3. 8. 4 平均透水係数および変化率

仮想割れ目モデルによる透水性変化予測解析に基づき、横坑掘削後の周辺岩盤の平均透水係数を算定した。GL-500m のケースの平均透水係数分布を図 3.8-7 に示す。そして、掘削後の平均透水係数を初期透水係数で除することにより透水係数の変化率を算定し、その分布を図 3.8-8 に示す。

図 3.8-8 の透水係数変化率の分布から底盤における等倍率線を読みとり、底盤面から最も離れた位置を解析ケースごとに示したものと図 3.8-9 に示す。また、底盤における透水係数の最大増加率を図 3.8-10 に示す。

図 3.8-8 の透水係数変化率の分布から側壁における等倍率線を読みとり、側壁面から最も離れた位置を解析ケースごとに示したものと図 3.8-11 に示す。また、側壁における透水係数の最大増加率と初期応力  $\sigma_x$  を解析ケースごとに示したものと図 3.8-12 に示す。

図 3.8-7 と図 3.8-8 によると、いずれの解析ケースにおいても、坑道の全周にわたって周辺岩盤の平均透水係数は増加していることがわかる。ただし、同一深度でも横坑の展開方向が変化すると、平均透水係数の分布や増加の程度が変化していることがわかる。

図 3.8-9 と図 3.8-10 によると、底盤において透水係数が 5 倍以上に増加した領域は、解析ケースによって異なるが、約 1.0~1.3m、10 倍以上の領域は約 0.9~1.0m となっている。また、底盤における最大増加率は約 420~520 倍となっている。増加領域の広がりに着目すると、ケース 4（展開方向 0°）と 5（展開方向 45°）がやや大きめになっている。これは、掘削解放力の作用方向と割れ目のトレースの法線方向が一致する場合には、割れ目に作用していた垂直応力  $\sigma_y$  が最も減少するため、透水係数増加率は最も大きくなることによる。つまり、各ケースとも底盤面の掘削解放力はほぼ鉛直上方に作用して、その大きさはどのケースでもほぼ同じであるが、ケース 4 と 5 では、トレースの法線ベクトルの卓越方向が掘削解放力の作用方向と一致したことによる影響を及ぼしたと考えられる。

図 3.8-11 と図 3.8-12 によると、側壁において透水係数が 5 倍以上に増加した領域は、約 0.8m~0.9m、10 倍以上の領域は約 0.6~0.8m、側壁における最大増加率は約 120~520 倍となっている。また、これらの図より、増加領域の大きさや最大増加率は初期応力  $\sigma_x$  に関連していることがわかる。これは、側壁の場合、掘削解放力はほぼ水平に作用すると考えられ、その大きさは、ほぼ初期応力  $\sigma_x$  に等しいためと考えられる。

GL-945m のケースの平均透水係数分布を図 3.8-13 に示す。GL-500m のケースの平均透水係数を示した図 3.8-7 と図 3.8-13 では、カラーバーのスケールは異なるものになっている。これは、深度によって初期透水係数や増減の程度が異なるためである。また、GL-945m のケースの透水係数変化率分布を図 3.8-14 に示す。

図 3.8-14 から底盤における等倍率線を読みとり、底盤面から最も離れた位置を解析ケースごとに示したものと図 3.8-15 に示す。また、底盤における透水係数の最大増加率を図 3.8-16 に示す。

図 3.8-14 から側壁における等倍率線を読みとり、側壁面から最も離れた位置を解析ケー

スごとに示したものを図 3.8-17 に示す。また、側壁における透水係数の最大増加率と初期応力  $\sigma_x$  を解析ケースごとに示したものを図 3.8-18 に示す。

図 3.8-13 と図 3.8-14 によると、GL-945m の場合も、坑道の全周にわたって周辺岩盤の平均透水係数は増加していて、横坑の展開方向により、平均透水係数の分布や増加の程度が変化していることがわかる。

図 3.8-15 と図 3.8-16 によると、底盤において透水係数が 5 倍以上に増加した領域は、約 1.0~1.3m、10 倍以上の領域は約 0.9~1.0m となっている。また、底盤における最大増加率は約 500~900 倍となっている。増加領域の広がりに着目すると、ケース 9 (展開方向 45°) がやや大きめになっている。これは、掘削解放力はほぼ鉛直方向に作用して、その大きさはどのケースでもほぼ同じであるが、ケース 9 におけるトレースの法線ベクトルの卓越方向が鉛直上方となっていることが増加領域の広がり方に影響を及ぼしたと考えられる。

図 3.8-17 と図 3.8-18 によると、側壁において透水係数が 5 倍以上に増加した領域は約 0.7~0.9m、10 倍以上の領域は約 0.5~0.7m、側壁における最大増加率は約 110~670 倍となっている。また、これらの図より、GL-500m の場合と同様に、増加領域の大きさや最大増加率は初期応力  $\sigma_x$  に関連していることがわかる。これは、GL-945m の場合も、側壁の掘削解放力はほぼ水平に作用すると考えられ、その大きさはほぼ初期応力  $\sigma_x$  に等しいためと考えられる。

GL-500m と GL-945m のケースを比較すると、透水係数の増加領域の大きさや最大増加率には、著しい差は見られない。これは、GL-500m の各ケースでは平均初期応力は 13.55~18.85MPa であるのに対して、GL-945m の各ケースでは 16.17~20.23MPa と、初期応力の大きさに 1.07~1.19 倍程度の差しかないこと、岩盤物性に著しい差がないこと、仮想割れ目の垂直応力—透水係数関係に同じものを用いたことによると考えられる。

図 3.8-7、図 3.8-8、図 3.8-13、および、図 3.8-14 と技術資料①<sup>1)</sup>の解析結果と比較してみると、透水係数が増大した領域の大きさや最大増加率のいずれも、本解析の結果のほうが大きめになっている。

GL-500m と GL-945m のケースの結果をまとめると、底盤における透水係数の増加領域の広がり方は、同一深度であれば掘削解放力はほぼ同等であることから、割れ目のトレースの方向分布に影響を受けていると考えられる。また、側壁での増加領域の広がり方は、初期応力  $\sigma_x$  の大きさに影響を最も受けていると考えられる。

したがって、坑道軸方向を初期応力の最大主応力に対して角度をつけた場合、角度に応じて側圧が大きくなり、側壁周辺岩盤の透水係数増大の領域が大きくなることになる。

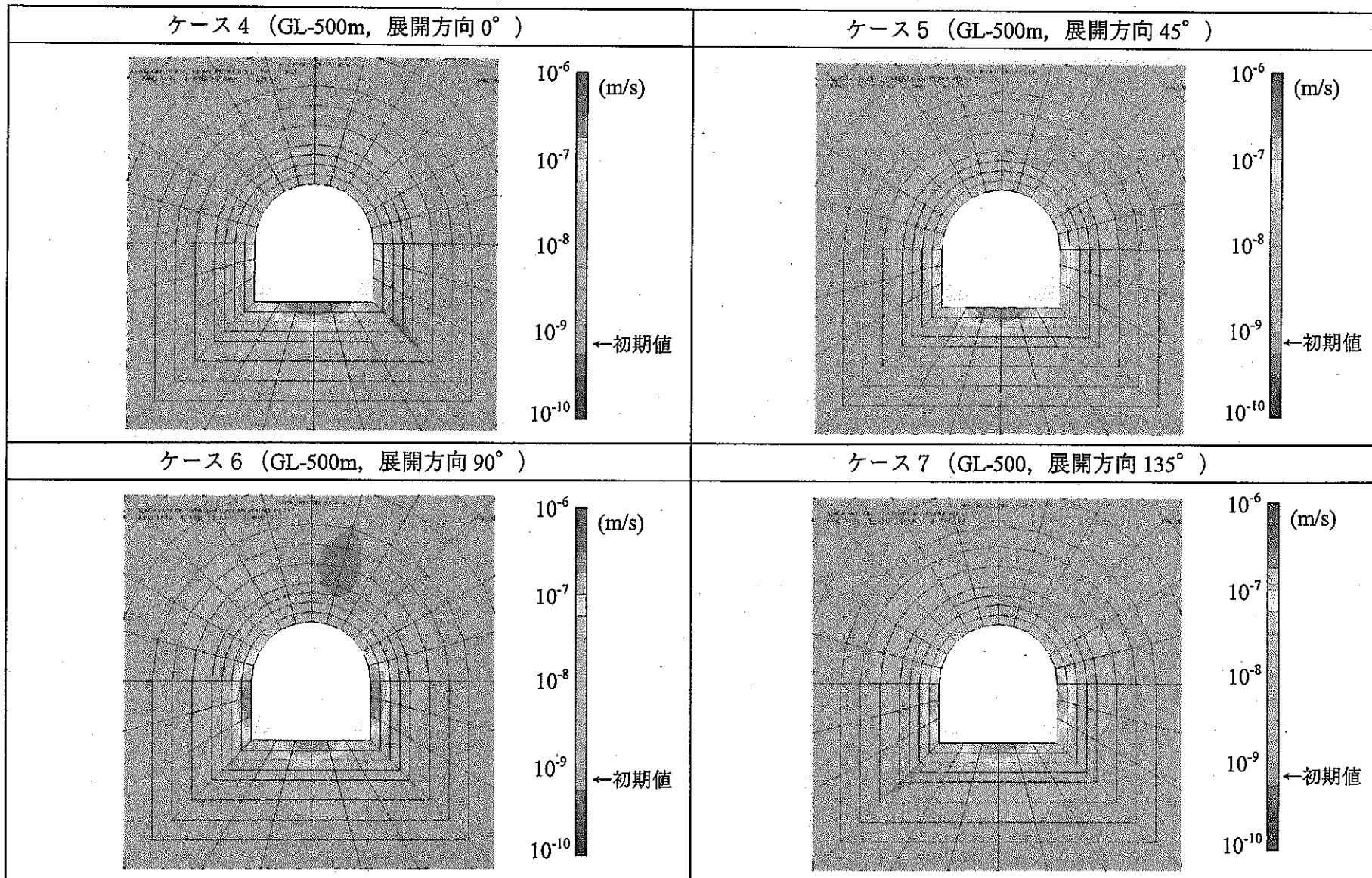


図 3.8-7 横坑 (GL-500m) 解析結果 平均透水係数分布図

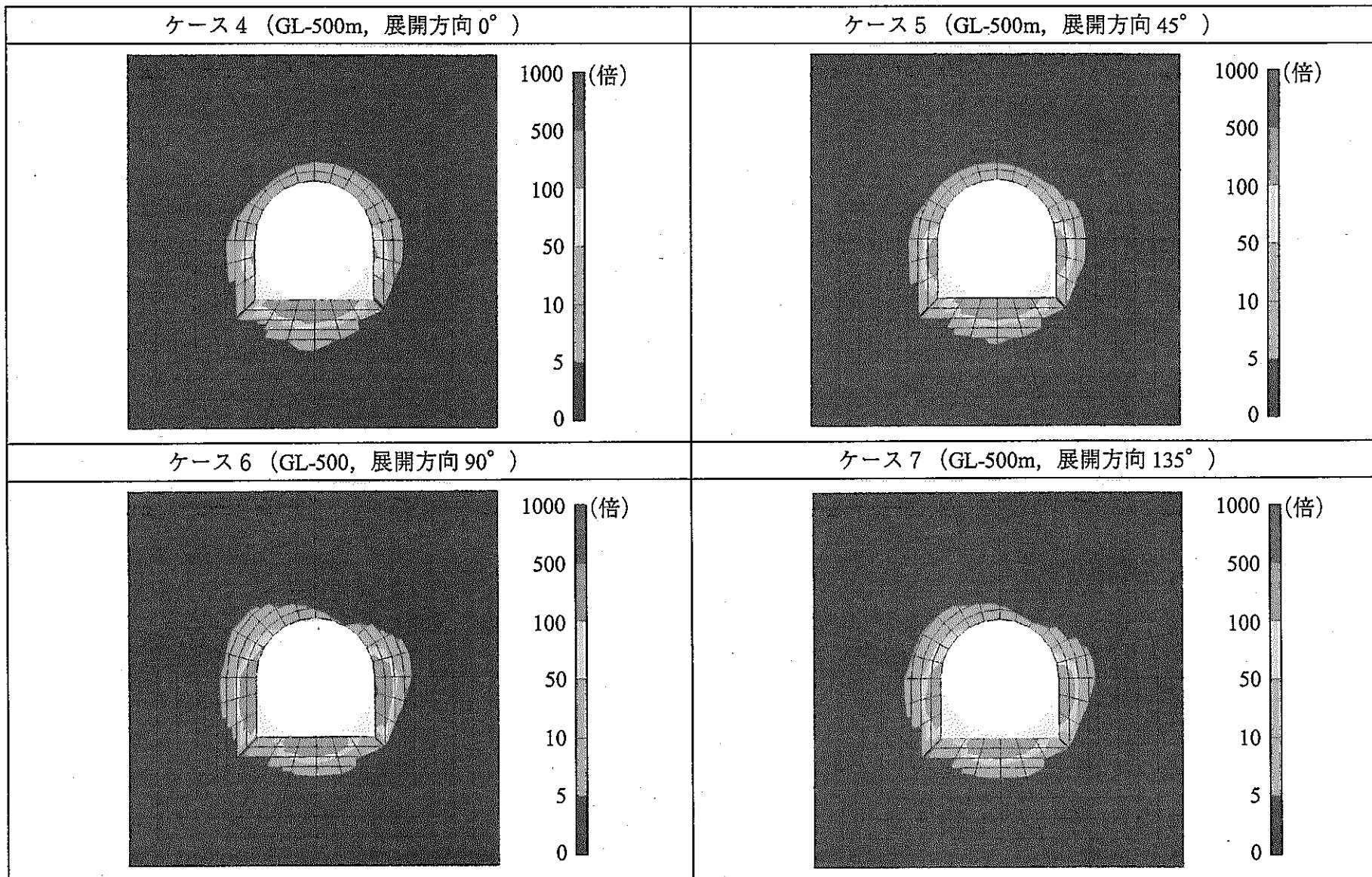


図 3.8-8 横坑 (GL-500m) 解析結果 透水係数変化率分布図

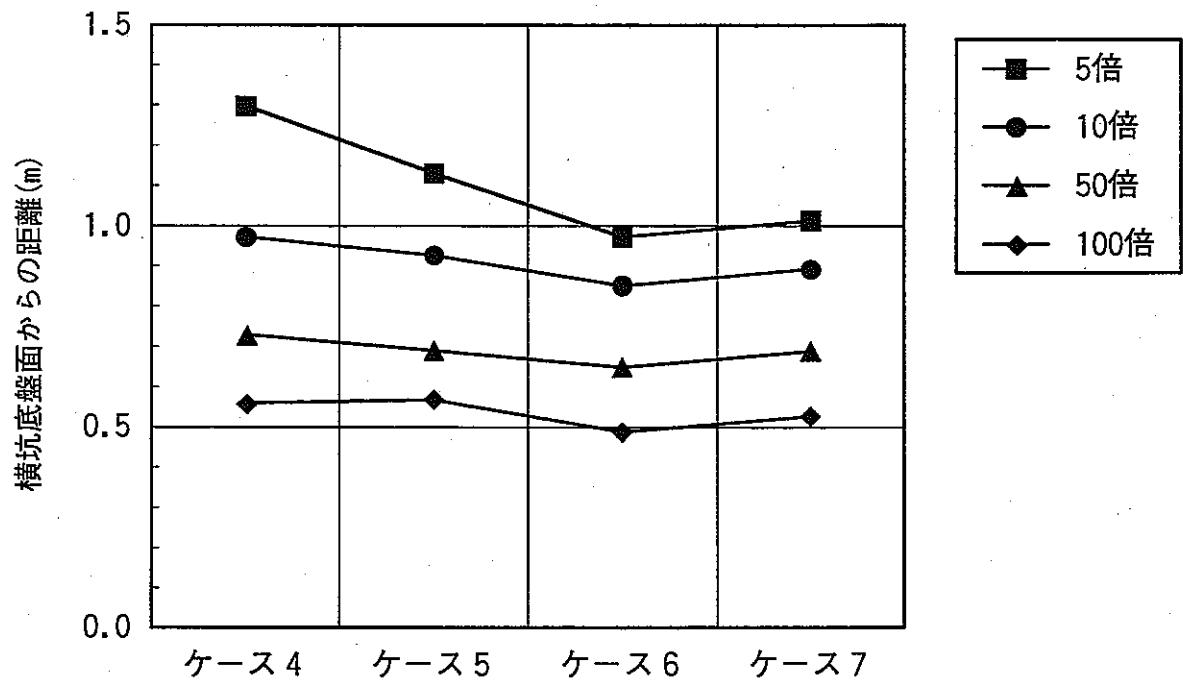


図 3.8-9 横坑 (GL-500m) の底盤における透水係数増大領域の比較

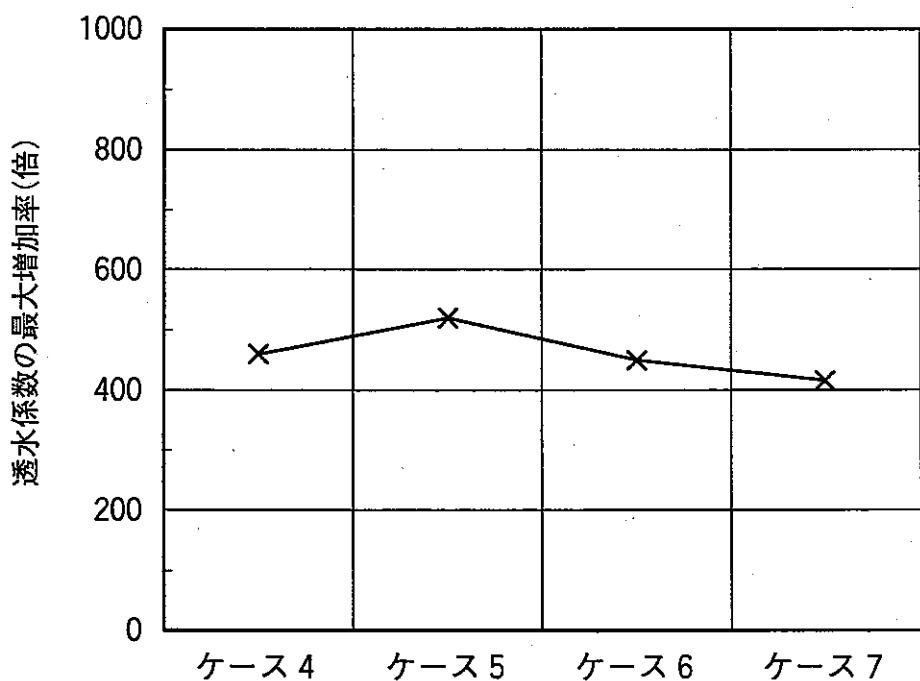


図 3.8-10 横坑 (GL-500m) の底盤における透水係数の最大增加率

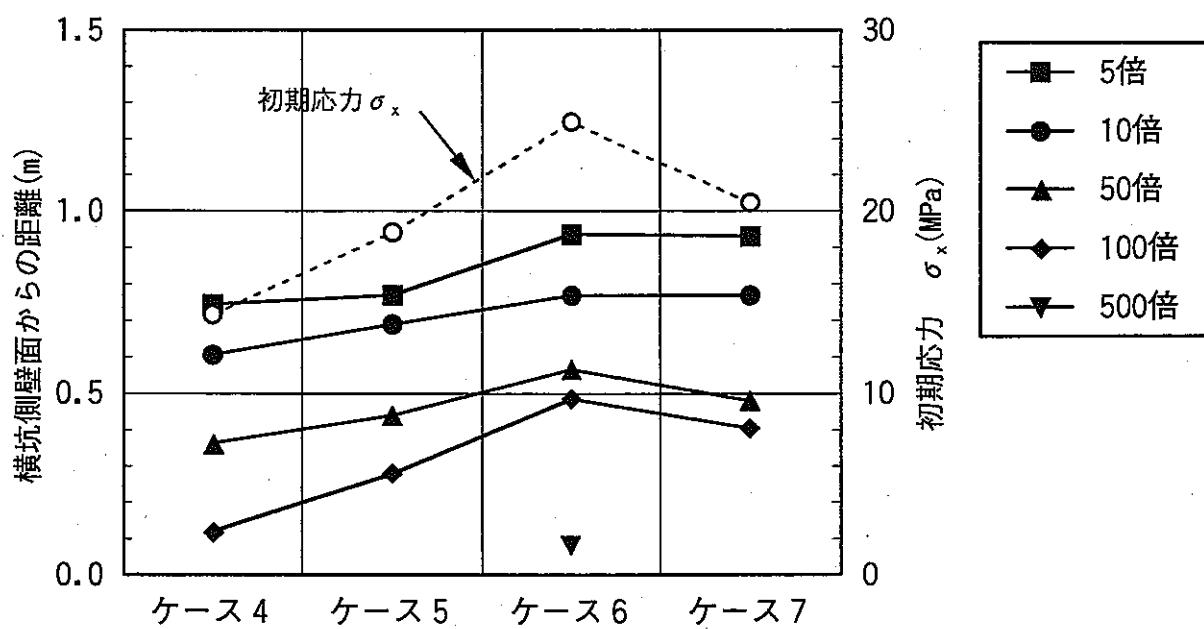


図 3.8-11 横坑 (GL-500m) の側壁における透水係数増大領域の比較

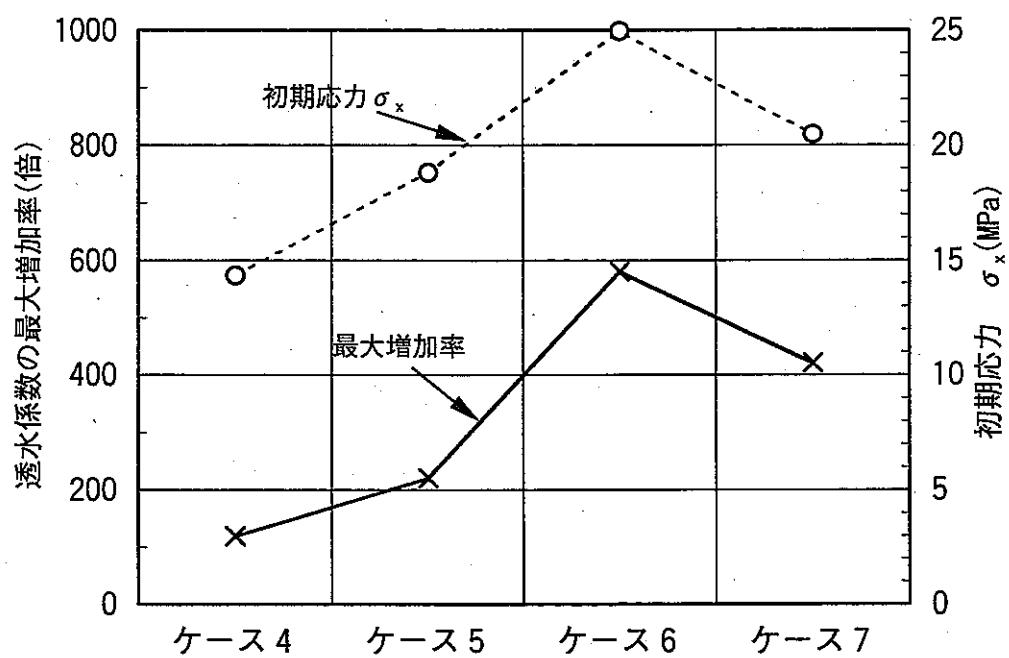


図 3.8-12 横坑 (GL-500m) の側壁における透水係数の最大増加率

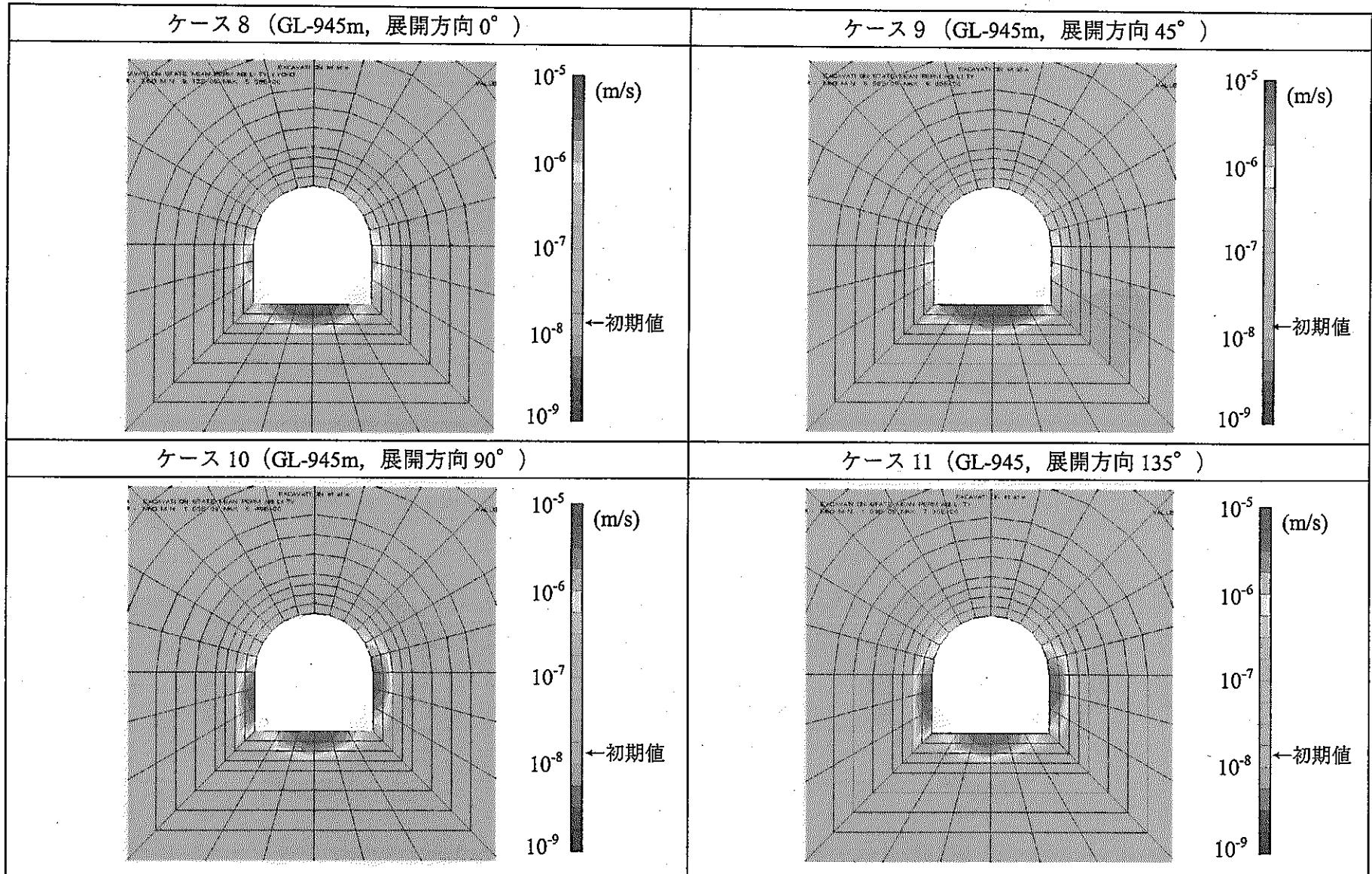


図 3.8-13 横坑 (GL-945m) 解析結果 平均透水係数分布図

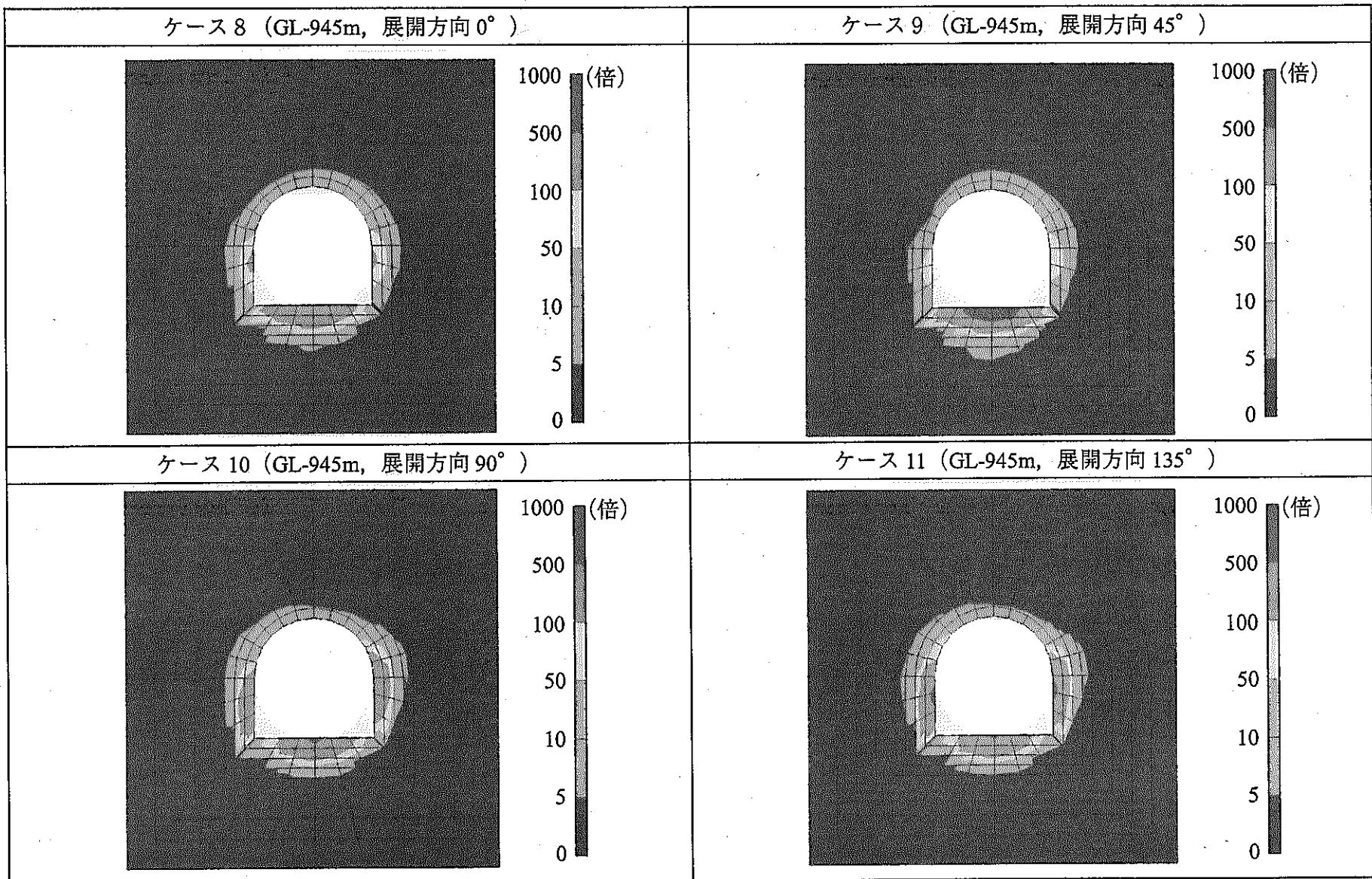


図 3.8-14 横坑 (GL-945m) 解析結果 透水係数変化率分布図

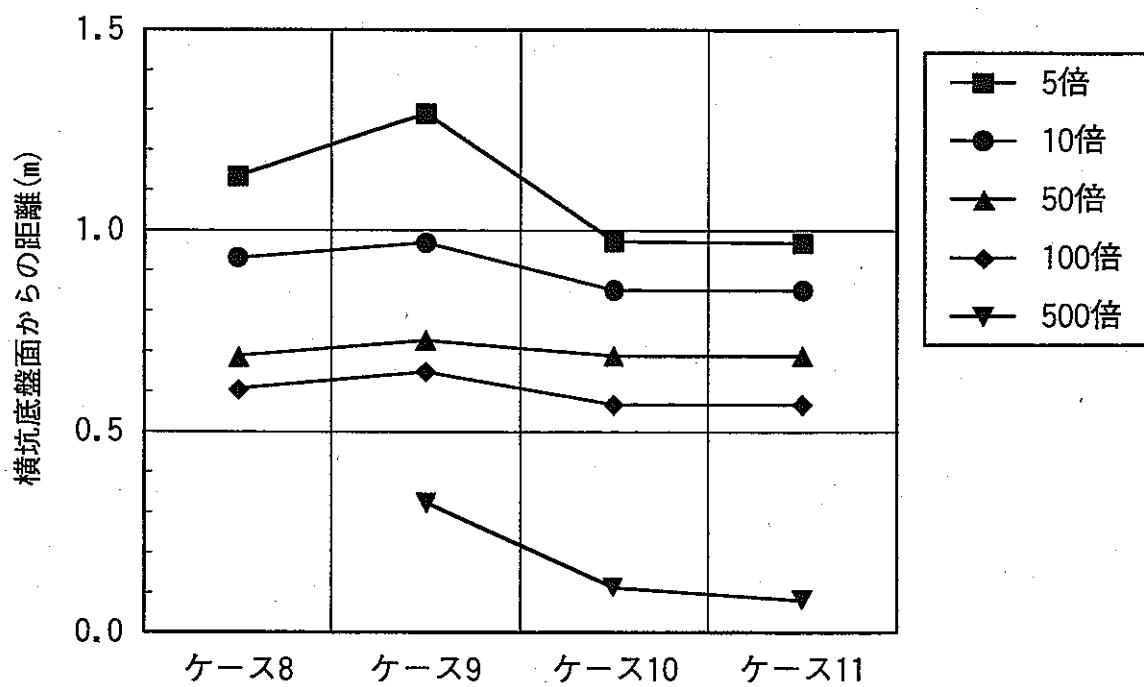


図 3.8-15 横坑 (GL-945m) の底盤における透水係数増大領域の比較

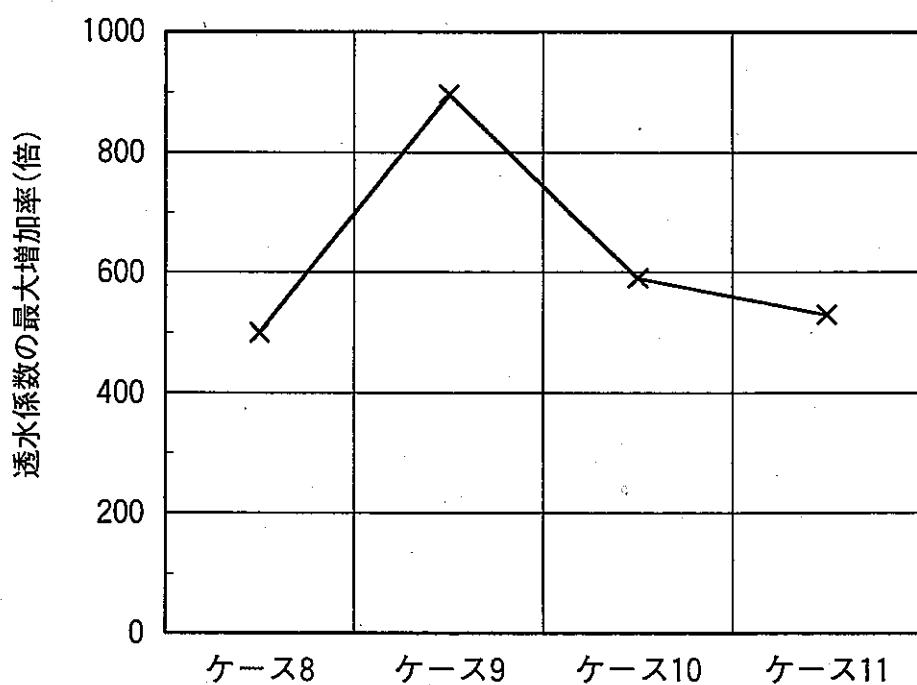


図 3.8-16 横坑 (GL-945m) の底盤における透水係数の最大增加率

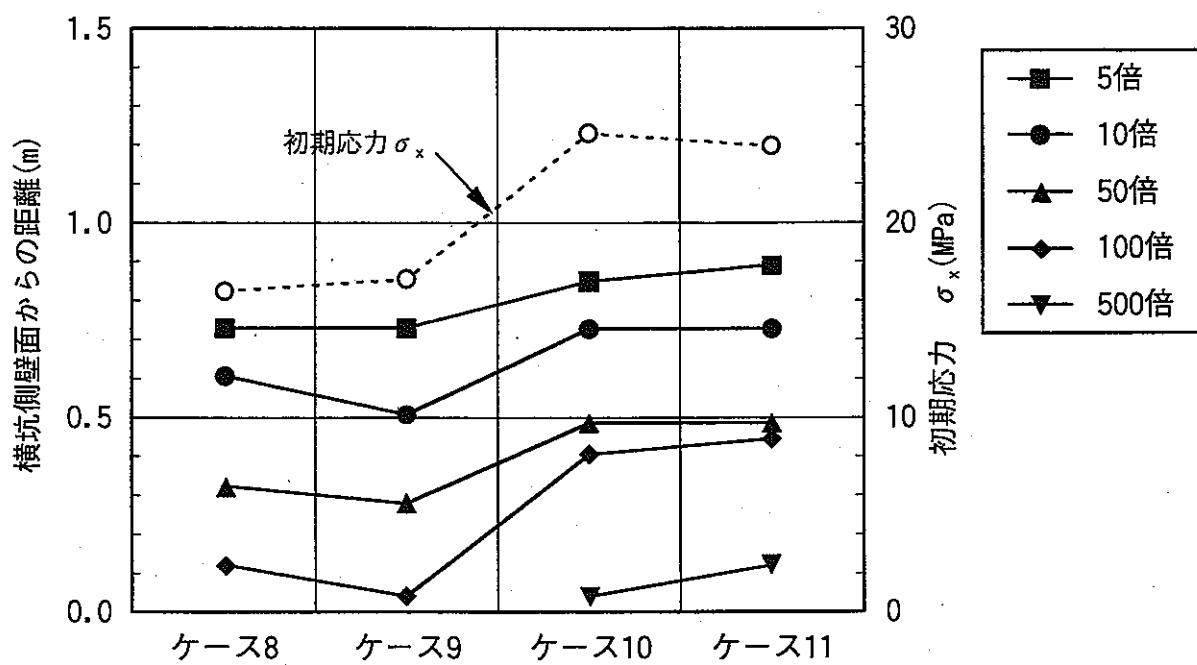


図 3.8-17 横坑 (GL-945m) の側壁における透水係数増大領域の比較

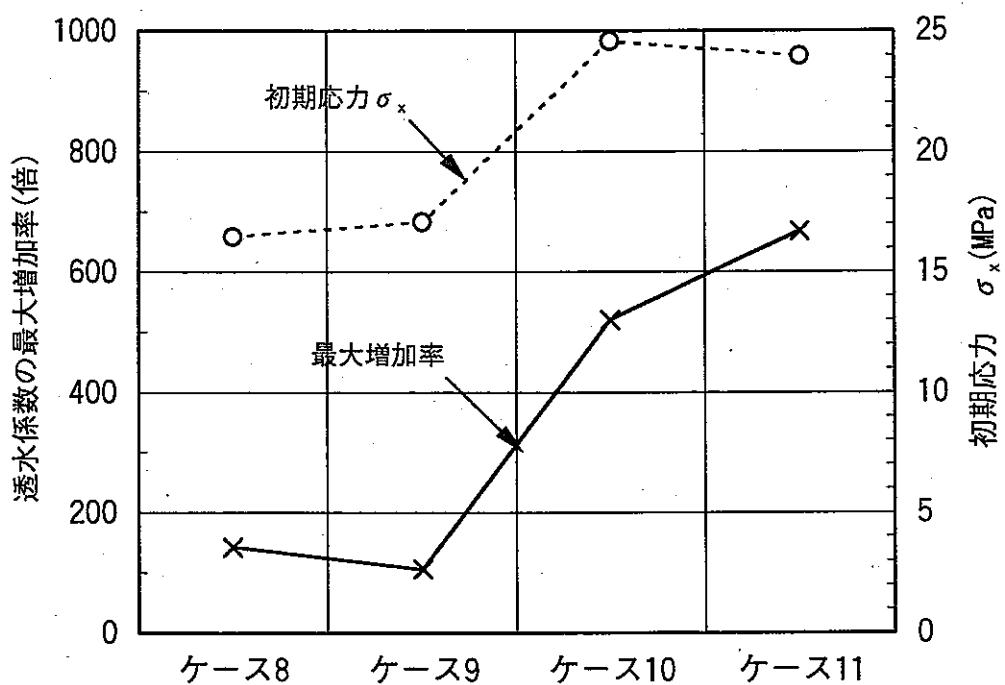


図 3.8-18 横坑 (GL-945m) の側壁における透水係数の最大増加率

## 4. 支保工の検討

### 4. 1 解析ケースの設定

支保工の検討の対象としたケースは、横坑の解析ケースの中でゆるみ域が最も大きくなると考えられるものとした。3章のP.57, P.58に示した図3.8-5と図3.8-6の安全率分布において、ケース6(GL-500m, 展開方向90°)の場合、安全率が最も低くなり、安全率2~3の領域が大きかった。そこで、ケース6について支保工の検討を行うこととした。

### 4. 2 支保パターンと物性値

横坑の支保部材は吹付けコンクリートとロックボルトとした。支保パターンを図4.2-1に示す。各部材の諸元と物性値を以下に示す。

#### ①吹付けコンクリート

- ・厚さ: 5(cm)
- ・弾性係数:  $3.4 \times 10^3$ (MPa)
- ・ポアソン比: 0.2

#### ②ロックボルト

- ・呼称寸法: TD21
- ・直径: 21(mm)
- ・長さ: 1(m)
- ・弾性係数:  $2.1 \times 10^5$ (MPa)
- ・断面積:  $3.46 \times 10^{-4}$ (m<sup>2</sup>)
- ・奥行き方向打設ピッチ: 2.5m

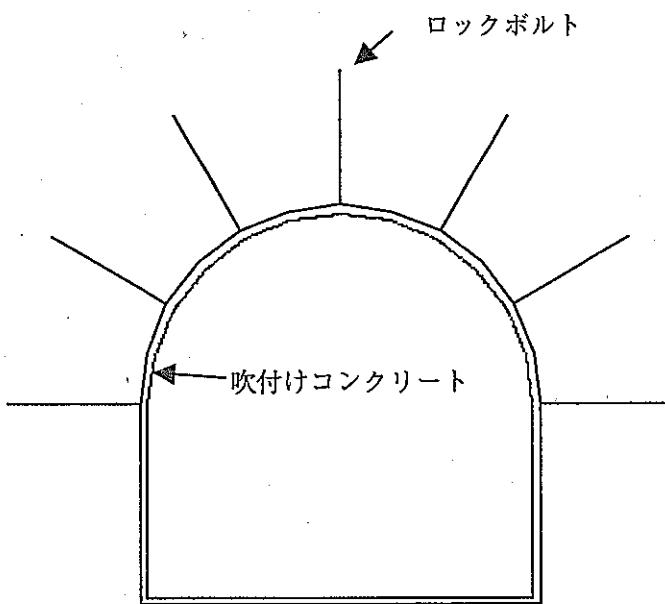


図4.2-1 横坑支保パターン

解析において、吹付けコンクリートはソリッド要素、ロックボルトはトラス要素でモデル化した<sup>1)</sup>。また、打設時期は応力解放率40%解放後とした<sup>1)</sup>。

#### 4. 3 解析結果

##### 4. 3. 1 変形量

横坑のケース 6 の支保工を考慮した解析結果の変形量を図 4.3-1 に示す。

変形量の最大値は側壁部で 2.59mm となった。支保のないケース 6 との変形量の差は、非常に小さく、わずかに 0.01mm である。

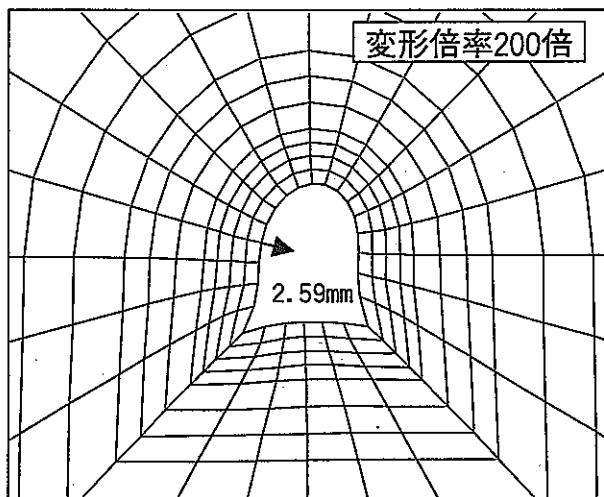


図 4.3-1 変形図

##### 4. 3. 2 応力

横坑のケース 6 の支保工を考慮した解析結果の主応力分布を図 4.3-2 に示す。

同図に示す主応力分布は、支保のないケース 6 の主応力分布とほとんど変化はない。

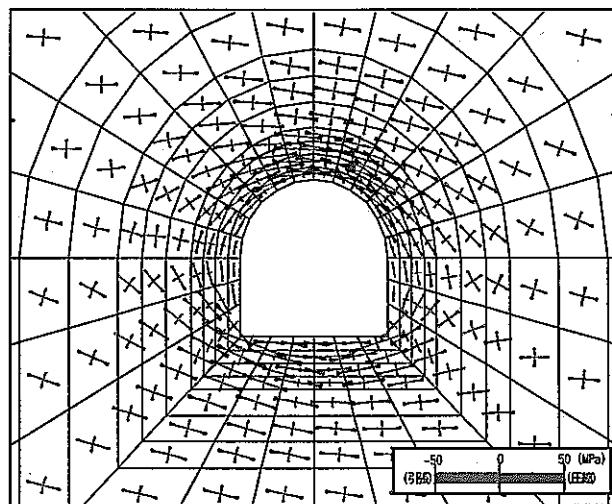
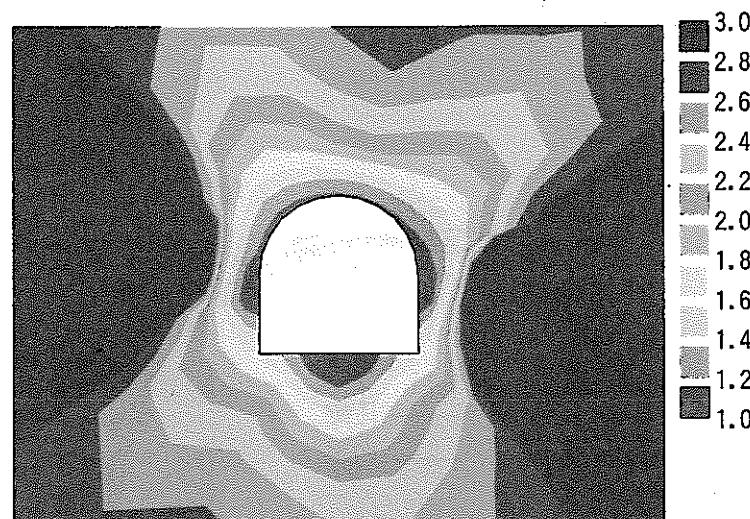


図 4.3-2 主応力図

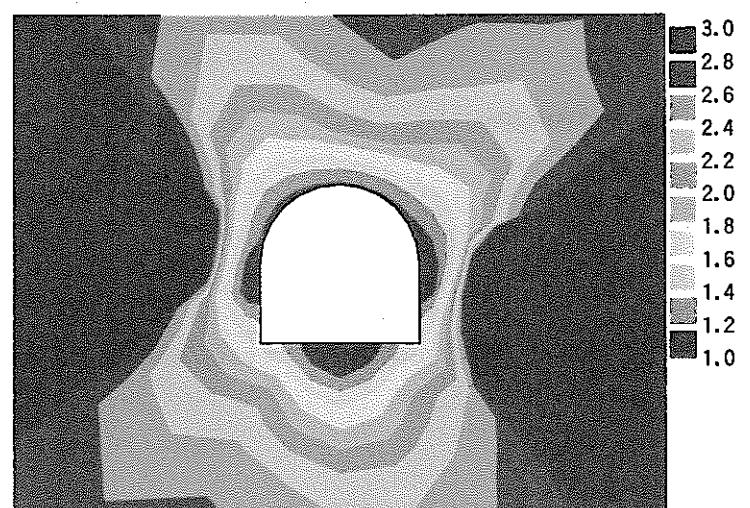
#### 4. 3. 3 安全率

横坑のケース6の支保工を考慮した解析結果の安全率分布を図4.3-3(a)に示す。また、比較のために、支保のない場合のケース6の安全率分布を図4.3-3(b)に示す。

同図によると、支保のある場合も支保のない場合も安全率分布にはほとんど変化はなく、安全率の最小値はわずかに0.02大きくなる。



(a) 支保のある場合



(b) 支保のない場合

図 4.3-3 安全率分布図

#### 4. 3. 4 吹付けコンクリート応力

吹付けコンクリートの応力分布を図 4.3-4 に示す。また、図 4.3-5 に示す要素番号について、各要素の最大および最小主応力値を整理し、表 4.3-1 にまとめた。

この結果、圧縮応力の最大値は側壁左下部で  $3.58 \text{ MPa}$  となっている。また、天端部で  $3.42 \text{ MPa}$  となっている。例えば、吹付けコンクリートの設計強度を  $18.0 \text{ MPa}$  としても、解析値は  $4 \text{ MPa}$  以内にあり、吹付けコンクリートに働く応力としては問題のない範囲にある。ただし、側壁部では、引張応力（最大で  $0.81 \text{ MPa}$ ）が生じている。

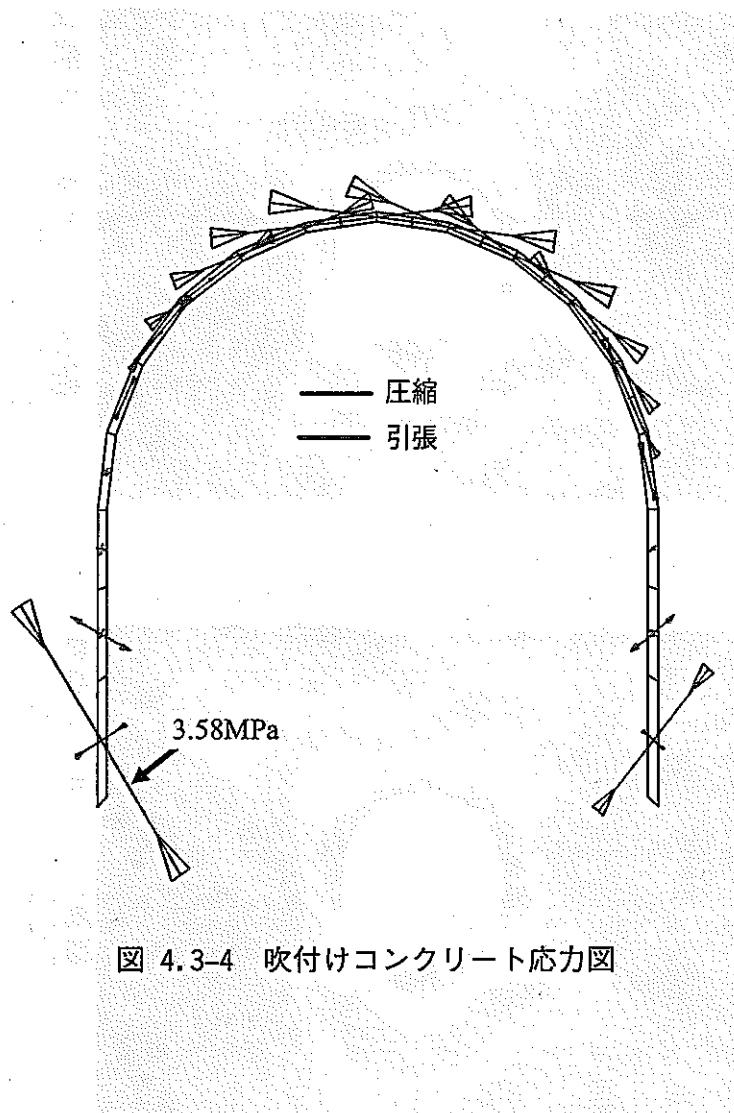


図 4.3-4 吹付けコンクリート応力図

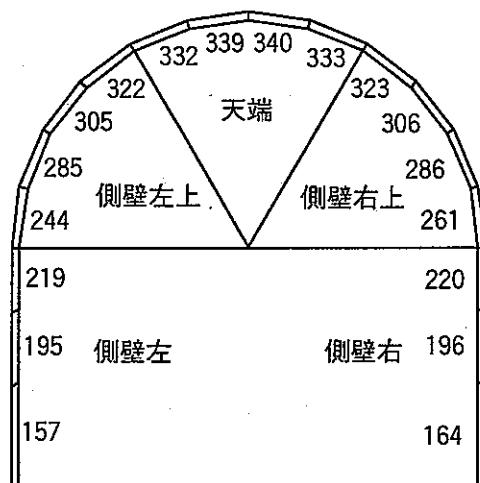


図 4.3-5 吹付けコンクリート要素番号図

表 4.3-1 吹付けコンクリート応力一覧表

位置	要素番号	最大主応力(MPa)	最小主応力(MPa)
側壁左	157	-0.69	-3.58
	195	0.81	-0.10
	219	0.12	-0.10
側壁左上	244	0.06	-0.09
	285	-0.01	-0.51
	305	-0.01	-1.08
	322	-0.03	-1.80
天端	332	-0.05	-2.54
	339	-0.07	-3.12
	340	-0.08	-3.42
	333	-0.08	-3.36
側壁右上	323	-0.07	-2.93
	306	-0.04	-2.25
	286	-0.03	-1.46
	261	0.03	-0.65
側壁右	220	-0.03	-0.06
	196	0.66	0.07
	164	-0.32	-2.07

(圧縮: -)

#### 4. 3. 5 ロックボルト軸力

ロックボルトの軸力分布を図 4.3-6 に示す。また、図 4.3-7 に示す要素番号について、各要素の軸力を整理し表 4.3-2 にまとめた。

この結果、軸力の最大値は No.6 の壁面から 0m～-0.25m の区間で 37.83kN となっている。想定しているロックボルトの降伏荷重 180kN、破断荷重 250kN に対して、ロックボルト部材は応力的に問題のない範囲にある。

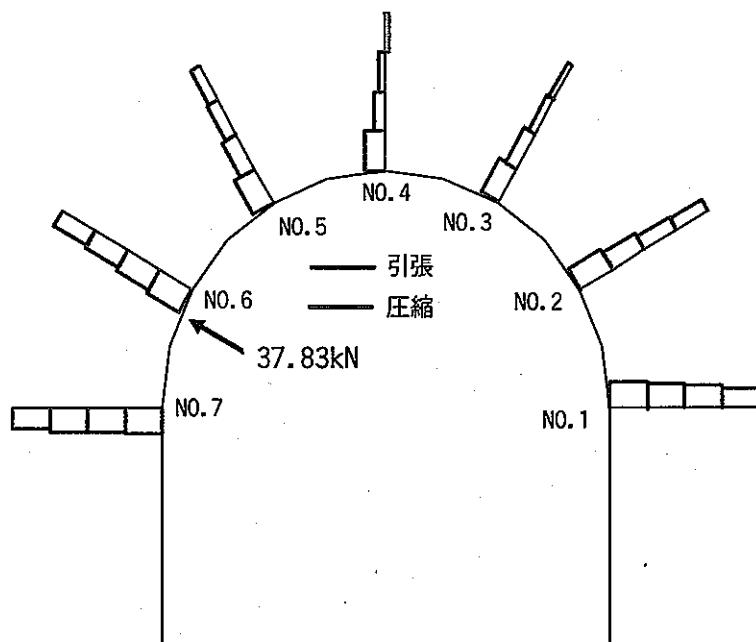


図 4.3-6 ロックボルト軸力分布図

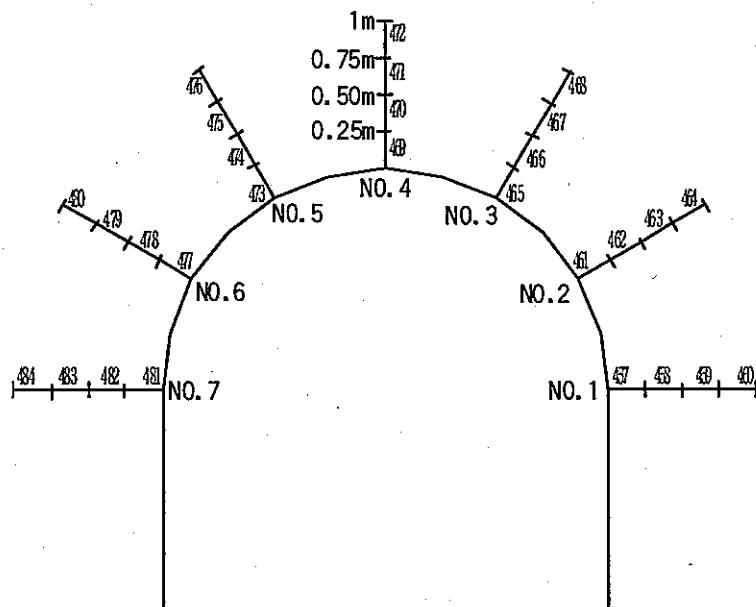


図 4.3-7 ロックボルト要素番号図

表 4.3-2 ロックボルト軸力一覧表

ボルト番号	深度	要素番号	軸力(kN)
No.1 (側壁右水平)	0m-0.25m	457	36.05
	0.25m-0.5m	458	33.63
	0.5m-0.75m	459	30.90
	0.75m-1m	460	27.38
No.2 (側壁右上)	0m-0.25m	461	31.90
	0.25m-0.5m	462	25.13
	0.5m-0.75m	463	20.38
	0.75m-1m	464	16.88
No.3 (天端右側)	0m-0.25m	465	28.53
	0.25m-0.5m	466	17.10
	0.5m-0.75m	467	10.96
	0.75m-1m	468	7.43
No.4 (天端中央)	0m-0.25m	469	29.40
	0.25m-0.5m	470	16.05
	0.5m-0.75m	471	9.55
	0.75m-1m	472	-7.07
No.5 (天端左側)	0m-0.25m	473	34.03
	0.25m-0.5m	474	24.50
	0.5m-0.75m	475	18.60
	0.75m-1m	476	14.70
No.6 (側壁左上)	0m-0.25m	477	37.83
	0.25m-0.5m	478	33.60
	0.5m-0.75m	479	29.10
	0.75m-1m	480	25.10
No.7 (側壁左水平)	0m-0.25m	481	35.43
	0.25m-0.5m	482	34.83
	0.5m-0.75m	483	33.10
	0.75m-1m	484	29.65

(引張:+)

## 5. 解析結果の評価

### 5. 1 立坑解析結果の評価

立坑解析では、深度ごとの挙動を把握するために、GL-200m, GL-500m, および, GL-945m の3つのレベルについて検討を行った。ここでは、解析結果をもとに坑道周辺岩盤の破壊領域や透水性変化について評価を行う。

#### 5. 1. 1 坑道周辺岩盤の破壊領域の評価

破壊領域は安全率で評価した。

GL-200m では、安全率が3以下の領域は掘削壁面から2~3mまで広がり、安全率が1を下回る領域はない。

GL-500m では、安全率が3以下の領域は掘削壁面から北東~南西方向に8~9mまで広がり、安全率が1を下回る領域はない。

GL-945m では、安全率が1以下の領域は掘削壁面から北西~南東方向と北北東~南南西方向の2方向に7~8mまで広がり、これらの領域において引張破壊が生じている。

#### 5. 1. 2 坑道周辺岩盤の透水性変化の評価

透水性変化は初期透水係数に対する変化率で評価した。

GL-200m では、透水係数の増加は壁面から約0.9mの範囲で10倍以上となり、その範囲は全周にわたっていた。

GL-500m では、壁面から約1.1mの範囲で10倍以上の透水係数の増加を示し、その範囲は全周にわたっていた。また、壁面近傍では100倍以上の増加を示した。両者は、トレースの方向分布も岩盤物性も似ていることから、初期応力の差が増加の程度の差を生じさせたと考えられる。

GL-945m では、特定の方向において透水係数の増加が見られ、その部分では壁面から約3.7mの範囲で10倍以上の増加となった。また、部分的に透水係数の減少も生じている。これは、初期応力の偏りと割れ目のトレースの方向による影響と考えられる。

## 5. 2 横坑解析結果の評価

横坑解析では、深度ごと（GL-500m, GL-945m）の挙動と同時に坑道展開方向ごとの挙動を把握するために、最大主応力方向に対して $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ , および,  $135^\circ$ の4方向を考慮して検討を行った。ここでは、解析結果をもとに坑道周辺岩盤の破壊領域や透水性変化について評価を行う。

### 5. 2. 1 坑道周辺岩盤の破壊領域の評価

立坑と同様、破壊領域は安全率で評価した。

GL-500m では、展開方向 $90^\circ$ （ケース6）の場合に安全率が2以下の領域が最も広い。これは、 $90^\circ$ に坑道を展開するケースは最大主応力が水平方向に大きくなるため、他のケースに比べて、安全率が低下する領域が広くなったと考えられる。

GL-945m では、展開配置方向に関わらず、安全率が2以下の領域は掘削壁面から1.5m以内である。どちらの深度においても、側壁部および底盤部（壁面から0.25mの範囲）に安全率が1を下回る領域が発生した。

### 5. 2. 2 坑道周辺岩盤の透水性変化の評価

立坑と同様に、透水性変化は初期透水係数に対する変化率で評価した。

GL-500m, および, GL-945m のいずれのケースでも、透水係数は坑道全周にわたって増加している。

GL-500m の各ケースでは、底盤面から約0.9~1.0mの範囲で10倍以上の透水係数の増加を示した。また、側壁面から約0.6~0.8mの範囲で10倍以上の透水係数の増加を示した。また、底盤および側壁のいずれも最大で2桁の増加も示した。

GL-945m の各ケースでは、底盤面から約0.9~1.0mの範囲で10倍以上の透水係数の増加を示した。また、側壁面から約0.5~0.7mの範囲で10倍以上の増加を示した。また、底盤も側壁も最大で2桁の増加を示した。

同一深度においても展開方向が変われば、透水係数増加の領域は変化するが、底盤では割れ目のトレースの方向に影響を受けていることがわかった。トレースの法線方向が上向きに卓越していれば、透水係数が増大する領域は大きくなるが、どの坑道展開方向になると上向き方向が卓越するのかは、3次元的な割れ目の方向分布をみて判断することになる。

また、側壁の透水性変化は側圧の大きさに影響を受けていることがわかった。すなわち、坑道軸方向を初期応力の最大主応力に対して角度をつけていくと、角度に応じて側圧が大きくなり、側壁周辺岩盤の透水係数増大の領域が大きくなることになる。

GL-500m と GL-945m のケースを比較すると、透水係数の増加領域の大きさや最大増加率には、著しい差は見られなかった。これは、GL-500m の各ケースの平均初期応力は 13.55~18.85MPa であるのに対して、GL-945m の各ケースでは 16.17~20.23MPa と、初期応力の大きさに 1.07~1.19 倍程度の差しかないこと、岩盤物性に著しい差がないこと、仮想割れ目の垂直応力-透水係数関係に同じものを用いたことによるものと考えられる。

### 5. 2. 3 横坑の支保の評価

吹付けコンクリートとロックボルトによる支保パターンについて、これらの支保部材をモデル化した解析を行った。その結果、支保で抑制された変位は 0.01mm しかなく、支保の明瞭な変位抑制効果は見られなかった。

ロックボルトに生じた軸力の最大値は 37.83kN となり、想定しているロックボルトの降伏荷重、破断荷重に対して、応力的に問題のない範囲にある。

また、吹付けコンクリートに生じた応力の最大値は 3.58MPa となり、吹付けコンクリートの設計強度に対して応力的に問題のない範囲にあり、天端部での肌落ち防止に対しては問題ない。ただし、側壁部には、わずかではあるが、引張応力（最大で 0.81MPa）が発生している。

側壁部の吹付けコンクリートに引張応力が生じた理由としては、

- ・ケース 6 の場合、側圧係数が 1.97 ( $\sigma_x=24.95\text{MPa}$ ,  $\sigma_y=12.75\text{MPa}$ ) と初期応力の水平方向が卓越している。
- ・式 (3.3-1) より岩盤のコンプライアンステンソルを算定し、コンプライアンステンソルから岩盤の弾性係数テンソル  $E_{ijkl}$  を求めると、その成分は  $E_{1111}=30,100\text{MPa}$ ,  $E_{2222}=26,500\text{MPa}$  (指標の 1 は x 方向, 2 は y 方向を示している) となる。すなわち、吹付けコンクリートのヤング係数 (3,400MPa) を比較すると、岩盤は明らかに堅硬であるために、図 3.8-1 や図 4.3-1 のように側壁がはらみ出すような変形をすると、それに追随して吹付けコンクリートが引っ張られてしまう。

ことによるものと考えられる。

## 6. 今後の課題

本業務で行った仮想割れ目モデルによる透水性変化予測解析に関する今後の課題について以下に述べる。

### 6. 1 土岐花崗岩における割れ目の垂直応力一透水係数関係に関する課題

仮想割れ目モデルは、既存割れ目に作用する垂直応力が変化すると、それに伴って開口幅が変化し、その結果、岩盤の透水性が変化することに着目したモデルである。したがって、このモデルを用いた透水性変化予測解析の結果は、入力される仮想割れ目の垂直応力一透水係数関係に最も左右される。今回の解析では、土岐花崗岩によるデータがないことから、花崗岩（ただし、産地は不明である）に対する既存の試験データより設定した。そして、解析結果が安全側になることを考慮して応力履歴の影響を無視し、さらに、最も大きな変化を示した供試体（図 3.4-1 の試料 G-6）の昇圧過程のデータを選定した。

以上のこと考慮すると、実際の透水性変化と比較した場合、今回の解析結果は過大なものになっている可能性がある。したがって、より現実的な結果を得ようとするならば、第一に、土岐花崗岩の割れ目に対して室内透水試験を実施し、そのデータから特性値をどのように設定するかが、最も重要な課題であると言える（割れ目の特性値によって、解析結果が左右されるのは、個別要素法のような力学解析も全く同じことであると考えられる）。

今回の解析では、すべての割れ目に対して、同じ特性値を与えて計算しているが、実際の岩盤中には、様々なタイプの割れ目が存在しているはずであり、すべてが同じ特性値を有しているとは考えにくい。ただし、観察されるすべての割れ目に対して試験することも非現実的である。そこで、考えられるアプローチとしては、観察される割れ目を分布位置、角度、形状、充填物の有無、変質の度合い等のパラメータによってカテゴリー別に分類し、そのカテゴリーごとの代表的な割れ目に対して室内透水試験を行って、土岐花崗岩に関するデータを蓄積していく方法が考えられる。そして、解析対象となる岩盤にはどのカテゴリーの割れ目が当たるのかを考慮して解析に適用することが考えられる。また、土岐花崗岩のデータを用いて透水性変化予測解析を行い、瑞浪深地層研究所計画の第2、第3段階の掘削影響領域に対する原位置透水試験と比較するならば、その前段階までにデータを蓄積しておくことが望ましい。

割れ目の垂直応力一透水係数関係に関する第二の課題としては、降圧過程の透水係数の取り扱いである。図 3.4-1 に示されているように、割れ目の室内透水試験を行うと、降圧過程の変化は昇圧過程よりも小さいことがわかる。また、応力再配分による透水性増大は降圧過程によるものであることから、より現実的な検討を行う場合には、降圧過程の影響も考慮した解析を行う必要があると考えられる。

### 6. 2 割れ目の3次元的分布を2次元展開したことによる誤差の検討

本業務の解析では、割れ目の法線ベクトルの3次元的な方向分布をそのままの形で利用せず、法線ベクトルを解析平面に投影して得られる2次元的な方向分布を利用している。この

とき、割れ目の挙動において、3次元と2次元の場合では誤差が生じる可能性がある。すなわち、図6.1-1に示すように、坑道軸に対してほぼ直交する割れ目があった場合、3次元の場合、坑道軸方向の応力はほとんど変化しないものとすると、割れ目の透水係数はほとんど変化することはない。しかし、2次元のトレスに展開してしまうと、割れ目に作用する応力は必ず変化することになるので、割れ目の透水係数は必ず変化するものになってしまう。

以上のような場合が積み重なると、2次元展開して解析した場合は3次元解析よりも過大評価してしまう可能性がある。したがって、2次元展開した場合、3次元解析とどの程度の差が生じるかを検討しておく必要がある。

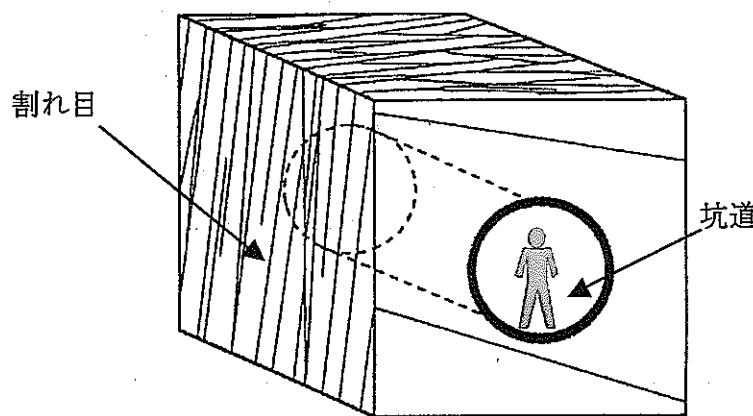


図 6.1-1 坑道軸にほぼ直交する割れ目

### 6.3 原位置透水試験との比較による検証に関する課題

本業務で使用した仮想割れ目モデルに限らず設計・検討に用いるモデルに対しては現場の観測値と比較することにより、その妥当性や適用性を検証することは非常に重要な課題である。

仮想割れ目モデルによる解析結果と原位置試験結果を比較した例としては、今までに一例しかない<sup>5)</sup>。したがって、今後、地下研究施設の設計や安全評価に対して、このモデルを適用していくためには、より多くの原位置試験との比較による検証を行って、その妥当性や適用性を見極めていく必要がある。よって、瑞浪深地層研究所計画の第2段階や第3段階で行われる掘削影響領域に対する原位置透水試験の結果を基にして、今回の解析結果の評価が行われることが期待される。また、今回の解析結果は図6.3-1に示す底盤注水試験<sup>16)</sup>や図6.3-2に示す水理学的ゆるみ領域計測装置<sup>17)</sup>を用いた試験計画に利用することもできると考えられる。

ただし、本業務では、正馬様用地のデータや既存の室内透水試験データを用いていることから、瑞浪深地層研究所サイトの岩盤物性や坑道形状などの条件が全く異なるのであれば、このままでは適用は難しいこと、また、割れ目の垂直応力-透水係数関係の取り扱いや方向分布の2次元展開の影響で過大評価している可能性があることに留意する必要がある。

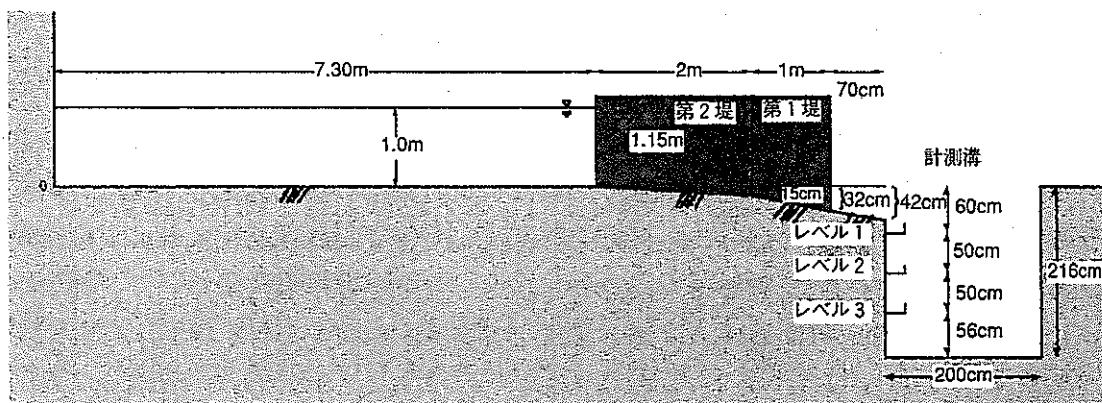


図 6.3-1 底盤注水試験の概念図（縦断図）<sup>16)</sup>

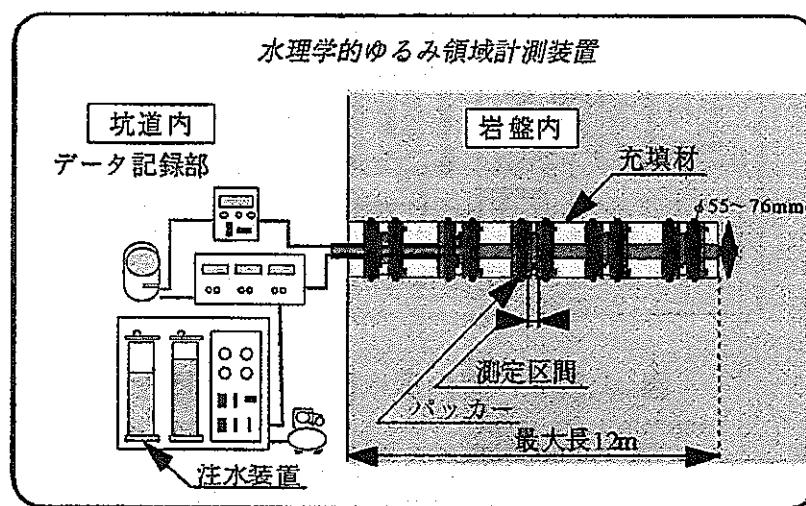


図 6.3-2 水理学的ゆるみ領域計測装置の概念図<sup>17)</sup>

## 7. おわりに

本業務では、超深地層研究所計画の第1段階における掘削影響予測解析手法の整備・高度化において、不連続性岩盤の種々の解析手法の比較・検討等に資するために、立坑および横坑を対象として、正馬様用地の岩盤力学モデルに基づいて、クラックテンソルモデルによる応力解析を行い、その解析で得られた応力状態を用いて仮想割れ目モデルによる坑道掘削に伴う周辺岩盤の透水性変化予測解析を実施した。そして、解析結果に基づいて、坑道周辺岩盤の破壊発生の可能性、透水係数の変化、深度や坑道展開方向による水理学的影响範囲の違いについて考察を行った。さらに、横坑の解析ケースのうち、1ケースを選択して支保の検討も行った。

検討の結果、以下のような知見を得た。

- 1) 不連続性岩盤の挙動を表現できるクラックテンソルモデルを用いて、立坑および横坑をモデルとした2次元応力解析を実施した結果、立坑のGL-200mとGL-500mのケースでは、岩盤基質部のヤング係数が49,900MPaおよび49,400MPaと堅硬であること、また、正馬様用地の土岐花崗岩は既往の計測事例と比較しても割れ目の密度が小さいことから、岩盤は堅硬であり、内空変位は5.14mmと微小であった。横坑では、展開方向により、岩盤の挙動に異なる結果が得られた。すなわち、最大主応力方向に坑道軸方向に一致させた場合は、内空変位は1.48mmであるのに対して、坑道軸方向を90°にした場合は、2.60mmに増加した。ただし、岩盤の変形挙動としては、微小なものにとどまっている。
- 2) 立坑を対象として、掘削の応力再配分の影響で透水性変化を表現できる仮想割れ目モデルを用いて透水性変化予測解析を実施した結果、岩盤が堅硬であるケースでは、壁面から、約1.1mの範囲で10倍以上の透水係数の増加が見られた。また、壁面近傍では100倍以上の増加を示したケースもあった。
- 3) 横坑を対象として、透水性変化予測解析を実施した結果、いずれのケースにおいても、坑道の全周にわたって透水係数の増加を示した。底盤面から約1mの範囲で、側壁面から1m以下の範囲で、それぞれ10倍以上の透水係数の増加が見られた。また、底盤面および側壁面近傍では100倍以上の増加を示した。
- 4) 同一深度でも横坑展開方向が変わると、透水係数の増加領域は変化した。この変化の傾向を考察した結果、底盤では割れ目のトレースの方向分布の影響を、側壁では側圧の影響を受けたものと考えられる。
- 5) 横坑の解析の結果、GL-500mとGL-945mのケースを比較すると、透水係数の増加領域の大きさや最大増加率において、両者には著しい差は見られなかった。これは、初期

応力や岩盤物性に著しい差がなかったこと、仮想割れ目の垂直応力－透水係数関係に同じものを用いたことによるものと考えられる。

- 6) 横坑の1ケースを対象として支保に関する検討を行った結果、対象となる岩盤は、吹付けコンクリートと比較しても明らかに堅硬なものであることから、明瞭な変位抑制効果は見られず、支保により抑制された変位は0.01mm程度であった。

今後の課題としては、以下の項目が挙げられる。

- a) 土岐花崗岩における割れ目の垂直応力－透水係数関係に関する課題
- b) 割れ目の3次元的分布を2次元展開したことによる誤差の検討
- c) 原位置透水試験との比較による検証
  - a) に関して、本業務では土岐花崗岩ではなく、他の花崗岩のうち最も大きな応力依存性を示したデータを用いたこと、また、昇圧過程のデータを用いことから、過大評価している可能性がある。よって、より現実な結果を得るためにには、土岐花崗岩の割れ目の透水係数に関するデータを蓄積し、それを反映させること、また、降圧過程の影響も考慮した解析を行っていくことが必要ある。
  - b) に関して、割れ目の方向分布を2次元展開した解析の場合、3次元解析よりも過大評価してしまう可能性がある。これに対しては、2次元解析と3次元解析の結果を比較することにより、その差を把握しておく必要がある。
  - c) に関して、今後、仮想割れ目モデルを設計等に活用していくためには、現場の観測値と比較することにより、モデルの妥当性や適用性を検証することが不可欠である。よって、瑞浪超深地層研究所計画の第2段階や第3段階の掘削影響領域に対する原位置透水試験の結果を基にして、今回の結果が評価されることが期待される。

## 参考文献

- 1) 森孝之, 他：“研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤への力学的影響評価解析”, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書 鹿島建設株式会社), JNC TJ7400 2002-007 (2002)
- 2) 畑浩二, 他：“土岐花崗岩中の割れ目を対象としたジョイントせん断試験”, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書 株式会社大林組), JNC TJ7430 2001-002 (2001)
- 3) Oda, M.: “An experimental study of the elasticity of mylonite rock with random cracks”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Vol.25, No.2, pp.59~69 (1988)
- 4) 山辺正, 他：“クラックテンソルによる節理性岩盤の弾性変形解析と入力パラメーターの決定に関する研究”, 土木学会論文集, No.382/III-7, pp.121~130 (1987)
- 5) 石井卓, 他：“仮想割れ目モデルによる空洞周辺岩盤の透水性変化予測手法”, 土木学会論文集, No.715/III-60, pp.237~250 (2002)
- 6) 多田浩幸, 他：“岩石割れ目の透水係数と応力の関係を用いた空洞周辺岩盤の透水特性変化の予測手法, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.139~144 (1994)
- 7) 例えば, ドミニコ, P.A., シュワルツ, F.W.: 地下水の科学 I - 地下水の物理と科学 -, 地下水の科学研究会誌, 土木工学社, pp.68 (1995)
- 8) 文部科学省・国立天文台編 : 理科年表, 丸善, pp.371 (2003)
- 9) 文部科学省・国立天文台編 : 理科年表, 丸善, pp.375 (2003)
- 10) P.A. Hsieh, et al.: “Field determination of three-dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media, 2. Methodology and application to fractured rocks”, Water Resources Research, Vol.21, No.11, pp.1667~1676 (1985)
- 11) 青木謙治, 他：“亀裂性岩盤の透水特性評価に対するクロスホール透水試験の適用性について”, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.441~446 (1990)
- 12) 長久, 他：“孔間透水試験による岩盤透水係数の三次元異方性評価”, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.447~452 (1990)
- 13) 多田浩幸, 他：“岩盤不連続面を考慮したトンネル交差部の応力・変形解析”, 土木学会論文集, No.511/III-30, pp.47~55 (1995)
- 14) 羽出山吉裕, 他：“クラックテンソル理論による地下空洞掘削時の原位置岩盤の透水性評価に関する一考察”, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.501~505 (1993)
- 15) N. Barton, S. Bandis: “Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice”, Rock Joints, pp.603~610 (1990)
- 16) 堀田政國, 他：“坑道底盤の坑軸方向透水性の計測”, 第29回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.166~170, (1999)
- 17) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第2次取りまとめ - 分冊1 わが国の地質環境”, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 99-021, pp.IV-81~IV-82, (1999)