JNC TJ7400 2005-051

1

図書室

研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の亀裂伸展予測解析

(核燃料サイクル開発機構　契約業務報告書)

平成15年2月

株式会社　間組

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
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

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)　2005

JNC TJ7400 2005-051

研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の亀裂伸展予測解析

（核燃料サイクル開発機構　契約業務報告書）

平成15年2月

株式会社　間組

2003年2月

研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の亀裂伸展予測解析
（核燃料サイクル開発機構　契約業務報告書）

雨宮　清*、茂呂吉司*

要旨

超深地層研究所計画の研究テーマのひとつである地質環境の調査技術・評価手法の開発を目的として、亀裂性岩盤中の坑道掘削に伴う周辺岩盤の亀裂伸展範囲を予測することができる亀裂伸展解析コードFRACOD（FRACOM社開発）を用いて、数値解析を実施した。この解析コードの特徴は、掘削近傍での亀裂の発生、伸展および結合を予測することができる。また、亀裂の発生や伸展に伴って発生するAEや微少振動の発生位置やその相対的な大きさも予測することができる。

解析に用いる入力データは昨年度までの核燃料サイクル開発機構の室内試験などをもとに決定した。モデル化に際して、一軸圧縮試験結果を模擬することにより、パラメータの物性を検証した。これらをもとにして、GL-200m、GL-500m、GL-945mでの無支保状態の坑道掘削を模擬した掘削影響解析を実施した。

その結果、本研究より得られた知見は以下のとおりである：

- GL-200mの立坑では安定性が確保される。
- GL-500mの立坑では、壁面にはNE/SW方向に剥落が発生しうる。
- 月吉断層内のGL-945mの立坑は安定性が確保できない。壁面には、引張による破壊がNW/SE方向で、剥落がNE/SW方向で起こりうる。
- GL-500mおよびGL-945mのN45W方向の横坑の安定性が最も高い。
- GL-500mおよびGL-945mのN45E方向とE方向の横坑の安定性は低く、天端の剥落、岩盤の崩落、盤ぶくれ等が発生しうる。

以上のように、本研究において、亀裂伸展解析コードFRACODは、亀裂が発生し、伸展した領域を用いて掘削影響領域を定量的に示すことができ、立坑および横坑の掘削影響領域を研究する上で、非常に有効であることがわかった。

本報告書は、株式会社間組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
*株式会社　間組　技術・環境本部　原子力部

February 2003

Prediction Analysis of Fracture Propagation and Initiation during excavation of Research Tunnels
(Document Prepared by Other Institute, Based on the Contract)
(Disclosed Information)

Kiyoshi AMEMIYA*, Yoshiji MORO*

Abstract

A fracture propagation code, FRACOD, developed by FRACOM Ltd is used to perform the numerical study for the purpose of development of geological environmental investigation and evaluation as one of MIU project. The code has the capacity of predicting fracture initiation, propagation and coalescence in the vicinity of excavations. It can also predict the locations and relative magnitude of Acoustic Emission (AE) or Microseismicity (MS) due to fracture initiation and propagation.

The input parameters used in the modeling are based on the recent laboratory tests results carried by JNC. Prior to the main modeling work, a series of numerical uniaxial compression tests have been conducted to verify the parameters used for the modeling. The numerical uniaxial compression tests have also provided quantified description of the scale effect of the rock mass at MIU site for modeling the shaft and galleries. With these results, numerical analysis of excavation tunnels and shafts without supports was carried out.

The main findings obtained from this study include:

- Shaft on GL- 200m is unlikely to have major instabilities.
- Shaft on GL- 500m is likely to experience spalling in the NE/SW walls.
- Shaft on GL- 945m in the Tsukiyoshi Fault is expected to experience major instabilities. Tensile failures (loose blocks) are expected to occur in NW/SE walls, while spalling will occur in the NE/SW walls.
- Galleries in the N45W direction are predicted to be stable on GL- 500m and GL- 945m. N45W is found to be the most stable gallery orientation.
- Galleries in N45E and E direction are expected to be unstable. Arch spalling, block falls and floor failure are likely to occur.

This study has also demonstrated that the fracture propagation code FRACOD is effective in investigating the excavation disturbed zones (EDZ) around the shaft and gallery because FRACOD is possible to directly quantify the EDZs using the zone of fracture initiation and propagation.

This work was performed by Hazama Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.
JNC Liaison: Research Group, Mizunami Underground Research Laboratory, Tono Geoscience Center
*Nuclear Power Department, Technology and Environment Division, Hazama Corporation

目次

1 はじめに ····· 1

2 FRACOD の理論的背景 ····· 2
2.1 FRACOD における亀裂の模擬 ····· 2
2.2 亀裂伸展のモデル化 ····· 4
2.3 亀裂発生のモデル化 ····· 6
2.3.1 健全な岩盤における亀裂の発生 ····· 6
2.3.2 境界での亀裂の発生 ····· 7
2.3.3 不均一な亀裂発生 ····· 9
2.4 AE の予測 ····· 10
2.4.1 AE 位置選定 ····· 10
2.4.2 AE の大きさ ····· 12

3 入力パラメータの収集と解析 ····· 14
3.1 岩盤変形パラメータ ····· 14
3.2 岩盤強度パラメータ ····· 14
3.3 亀裂の変形と強度パラメータ ····· 14
3.3.1 既存亀裂の特性 ····· 15
3.3.2 発生した亀裂の特性 ····· 15
3.4 破壊じん性のパラメータ ····· 16
3.4.1 試料と試料調整 ····· 16
3.4.2 試験方法 ····· 17
3.4.3 試験結果 ····· 21
3.4.4 結論 ····· 26
3.5 初期応力 ····· 26
3.6 掘削形状および方位 ····· 27
3.7 亀裂ネットワーク ····· 27
3.8 まとめ ····· 28

4 解析結果の評価方法と同定解析
4.1 解析結果の評価方法 ····· 30
4.1.1 変位 ····· 30
4.1.2 安全率 ····· 30
4.1.3 岩盤の強度 ····· 30
4.2 同定解析 ····· 31
4.2.1 一軸圧縮試験の予備解析 ····· 31
4.2.2 亀裂剛性の感度解析 ····· 35
4.2.3 スケール効果 ····· 36

5　研究坑道の掘削に伴う亀裂伸展予測 …… 39
5.1　立坑の予測解析 …… 39
5.1.1　明瞭な亀裂がない場合の予測解析 …… 39
5.1.2　明瞭な亀裂がある場合の予測解析 …… 46
5.2　横坑の予測解析
5.2.1　明瞭な亀裂がない場合の予測解析 …… 54
5.2.2　明瞭な亀裂がある場合の予測解析 …… 67

6　入力パラメータの感度解析 …… 79
6.1　GL-500m の立坑 …… 81
6.2　GL-500m の横坑 …… 84
6.3　まとめ …… 84

7　支保の評価および提案 …… 87
7.1　推奨する支保 …… 87
7.2　支保の検討 …… 89
7.2.1　立坑 …… 89
7.2.2　横坑 …… 93

8　まとめ …… 97

参考文献 …… 98

図 目 次

図-1 亀裂の成長に対する G_I と G_{II} の定義 …… 5
図-2 健全な岩盤中での引張あるいはせん断亀裂の発生 …… 7
図-3 2つの隣接要素の結合部分での接線応力 …… 8
図-4 境界からの亀裂の発生のモデル …… 9
図-5 応力/強度比の関数としての亀裂発生確率 …… 10
図-6 急な亀裂の運動によって引き起こされるAEイベント …… 11
図-7 亀裂伸展によって引き起こされるAEイベント …… 11
図-8 亀裂の発生によって引き起こされるAEイベント …… 12
図-9 シェブロン・ベンド試験片（CB試験片） …… 17
図-10 垂直せん断剛性試験の載荷方法と荷重のプロット …… 18
図-11 PTS試験のための試料の形状、主な負荷、組み立て及び寸法 …… 20
図-12 健全な試験片の岩盤剛性を除去した後の最後の負荷サイクル（K_{nI} と K_{nL}） …… 22
図-13 最後の載荷サイクルの 除荷ブランチ（K_{nI} と K_{nL}） …… 22
図-14 拘束圧がモードⅡ破壊じん性 K_{IIC} に及ぼす影響 …… 24
図-15 一軸圧縮応力を受けた岩石サンプルの亀裂開始、伝播および最終的な破壊の予測プロセス … 33
図-16 一軸圧縮試験の予備解析からの数値応力－ひずみ曲線 …… 34
図-17 岩盤強度の新鮮な亀裂剛性への感度 …… 35
図-18 スケール効果を調べるためにFRACODを使って解析した6サンプルの概念的な比較 …… 36
図-19 FRACODを用いて予測されるスケール依存性と健全な岩石と石炭の経験曲線との比較 …… 38
図-20 立坑の予測解析結果（GL-200m） …… 44
図-21 立坑の予測解析結果（GL-500m） …… 42
図-22 立坑の予測解析結果（GL-945m） …… 44
図-23 初期の亀裂パターンと最終亀裂パターン（GL-500m） …… 48
図-24 亀裂発生前の安全率分布と亀裂発生後の変位図（GL-500m） …… 49
図-25 初期の亀裂パターンと最終亀裂パターン（GL-945m） …… 51
図-26 亀裂発生前の安全率分布と亀裂発生後の変位図（GL-945m） …… 52
図-27 坑道の幾何学形状と方位 …… 54
図-28 予測結果（GL-500m、方位=N45W） …… 56
図-29 予測結果（GL-500m、方位=N） …… 57
図-30 予測結果（GL-500m、方位=N45E） …… 58
図-31 予測結果（GL-500m、方位=E） …… 59
図-32 横坑のアーチおよび壁面のAEイベントの発生予測（方位=N45E） …… 60
図-33 予測結果（GL-945m、方位=N45W） …… 62
図-34 予測結果（GL-945m、方位=N） …… 63
図-35 予測結果（GL-945m、方位=N45E） …… 64
図-36 予測結果（GL-945m、方位=E） …… 65
図-37 横坑の2次元平面上の見かけの亀裂方位 …… 67
図-38 予測結果（GL-500m、方位=N45W） …… 69
図-39 亀裂発生前の安全率分布と亀裂発生後の変位図（GL-500m、方位=N） …… 70

図-40　予測結果（GL-500m、方位=N）……70
図-41　予測結果（GL-500m、方位=N45E）……71
図-42　予測結果（GL-500m、方位=E）……72
図-43　予測結果（GL-945m、方位=N45W）……74
図-44　予測結果（GL-945m、方位=N）……75
図-45　予測結果（GL-945m、方位=N45E）……76
図-46　予測結果（GL-945m、方位=E）……77
図-47　入力パラメータを変化させた場合の岩盤強度予測値……80
図-48　岩盤特性値を用いた場合の立坑壁面亀裂の比較（GL-500m、明瞭な亀裂は考慮しない場合）・82
図-49　岩盤特性値を用いた立坑壁面の亀裂予測の比較（GL-500m、明瞭な亀裂を考慮した場合）…83
図-50　岩盤特性値を用いた横坑周辺の亀裂の比較（GL-500m、方位=N45W、明瞭な亀裂は考慮しない場合）
……85
図-51　岩盤特性値を用いた横坑周辺の亀裂の比較（GL-500m、方位=N45W、明瞭な節理を考慮した場合）
……86
図-52　立坑の安定性に対する支保の効果（GL-200m）……90
図-53　立坑の安定性に対する支保の効果（GL-500m）……91
図-54　立坑の安定性に対する支保の効果（GL-945m）……92
図-55　立坑の安定性に対する支保の効果（GL-500m、明瞭な亀裂を考慮した場合）……92
図-56　横坑の安定性に対する支保の効果（GL-500m、方位=N45W）……93
図-57　亀裂をもつ横坑の安定性に対する支保の効果（GL-500m、方位=N45W）……93
図-58　横坑の安定性に対する支保の効果（GL-500m、方位=N45E）……94
図-59　亀裂をもつ横坑の安定性に対する支保の効果（GL-500m、方位=N45E）……94
図-60　横坑の安定性に対する支保圧力の効果（GL-945m、方位=N45W）……94
図-61　亀裂をもつ横坑の安定性に対する支保の効果（GL-945m、方位=N45W）……95
図-62　坑道の安定性に対する支保圧力の効果（GL-945m、方位=N45E）……96
図-63　亀裂をもつ坑道の安定性に対する支保の効果（GL-945m、方位=N45E）……96

表 目 次

表-1 健全な岩盤の岩盤変形パラメータ …… 14
表-2 各深度におけるせん断剛性および垂直剛性 …… 15
表-3 今回使用したCB試験片の寸法 …… 18
表-4 今回使用したPTS試験片の寸法 …… 19
表-5 各深さレベルに対するK_{IC}およびK_{CIC}の平均値 …… 21
表-6 上昇ブランチに対するK_{nI}およびK_{nL}（10-25kN） …… 21
表-7 下降ブランチに対するK_{nI}およびK_{nL}（10-25kN） …… 21
表-8 各深さレベルに対するK_{IIC}の拘束圧による回帰分析のためのパラメータ …… 25
表-9 拘束圧が0での$K_{□C}$と拘束圧が30MPa以上での破壊じん性 …… 25
表-10 各深度における破壊じん性値 …… 25
表-11 各深度における初期応力 …… 26
表-12 各深度の主応力 …… 26
表-13 横坑における解析用初期応力 …… 26
表-14 掘削形状および方位 …… 27
表-15 今回のFRACOD数値解析で考慮する亀裂セット …… 28
表-16 数値解析で使用した力学特性 …… 29
表-17 岩盤の強度 …… 30
表-18 一軸圧縮試験の予備解析で用いた入力パラメータ …… 31
表-19 岩体強度の新鮮な亀裂剛性への感度 …… 35
表-20 解析した供試体寸法と対応する一軸圧縮強度(UCS) …… 37
表-21 異なる深さでの立坑の安定性に関する結果のまとめ …… 45
表-22 垂直な立坑のFRACOD数値解析用の亀裂セット …… 46
表-23 異なる深さでの立坑の安定性に関する結果のまとめ …… 53
表-24 異なる深さでの坑道の安定性に関する結果のまとめ …… 66
表-25 様々な横坑方位での2次元坑道モデルでモデル化した亀裂セット …… 67
表-26 異なる深さでの明瞭な亀裂をもつ坑道の安定性に関する結果のまとめ …… 78
表-27 感度解析のパラメータの範囲 …… 79
表-28 入力パラメータを変化させた場合の岩盤強度予測値 …… 79
表-29 立坑と横坑の不安定性についての予測結果と推奨する支保のまとめ …… 88

1　はじめに

地層科学研究施設の建設で、掘削影響領域（Excavation Disturbed Zone 、EDZ）を評価することは重要である。核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構と称する）は瑞浪地区の地下1000m程度の深部に展開する花崗岩帯を対象として、超深地層研究所計画に基づいた様々な調査研究をおこなっている。その中での研究坑道の掘削にあたり、これまで種々の予測解析評価がなされてきた。

一般に、花崗岩にみられる亀裂性岩盤の力学的挙動の評価方法には、以下の3つに分類される。

(1)連続体評価：大きな亀裂性岩盤は等価な連続体として考慮される

(2)明確な亀裂評価：岩盤中の個別の亀裂を明確にモデル化する

(3)亀裂力学評価：上記2つの評価方法における亀裂評価手法を亀裂力学原理によってモデル化する

本研究では、上述における3番目の手法にもとづいた亀裂伸展解析コードFRACOD（以下、FRACODと称する）を用いて、超深地層研究所計画における坑道掘削の予測解析評価を行った。

FRACODは岩盤中の亀裂の発生、伸展と結合を模擬するために設計された[1)]。FRACODは進行中のÄspö鉱柱安定性試験(APSE)[2)]などのスウェーデンの放射性廃棄物処分計画研究プロジェクトで数多く使われている。また、深部の試錐孔でしばしば発生するボアホールブレイクアウトのモデル化にも用いられている[3)]。FRACODでは以下のことを予測することができる。

- 掘削された坑道周辺岩盤中の亀裂の発生
- 既存亀裂の伸展と結合および掘削近傍で新しく形成される亀裂
- 亀裂の発生や伸展に伴うAEや微小振動の発生位置と相対的規模

本研究では以下に示すケースの解析を実施した。

- 亀裂分布のある場合とない場合での、GL-200m、-500m、-945m（月吉断層中）での立坑の解析
- 亀裂分布のある場合とない場合での、GL-500m、-945mでの横坑の解析、ただし掘削方向はN45W、N、N45E、Eの4方向

本報告書では、超深地層研究所計画のためのFRACODによる岩盤における亀裂伸展のモデル化手法および坑道掘削の影響による亀裂伸展予測解析結果について報告する。

2 FRACODの理論的背景

FRACODは、弾性で等方の岩盤での亀裂の発生や伸展を模擬するために設計された2次元の解析コードであり、変位くい違い法 (Displacement Discontinuity Method: DDM) 原理を用いて、岩盤中の亀裂のすべり・開口を含む亀裂の明確な発生過程、亀裂の発生、亀裂の伸展を予測する。亀裂のすべり、発生および伸展におけるFRACODの数式の簡単な記述を以下に示す[1]。

2.1 FRACODにおける亀裂の模擬

FRACODはDDMに基づいているため、岩盤の不連続性（クラック、ジョイント、亀裂など）は、反対側の不連続表面も含んだDDM要素を用いて模擬できる。N個の岩盤不連続要素に対して、合計2n個の支配方程式が作られる。そこでは、不連続要素の変位不連続量が未知数である。変位不連続量は支配方程式のシステムを解くことにより求められる。

無限弾性岩盤における岩盤不連続体に対して、支配方程式のシステムは以下のように記述できる。

$$\left.\begin{aligned} \sigma_s^i &= \sum_{j=1}^{N} A_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^{N} A_{sn}^{ij} D_n^j - (\sigma_s^i)_0 \\ \sigma_n^i &= \sum_{j=1}^{N} A_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^{N} A_{nn}^{ij} D_n^j - (\sigma_n^i)_0 \end{aligned}\right\} \quad i=1 \text{ to } N \qquad (1)$$

ここで、

σ_{is} ： i番目の不連続要素に対するせん断応力

σ_{in} ： i番目の不連続要素に対する垂直応力

$(\sigma_{is})_0, (\sigma_n)_{i0}$ ：初期応力を亀裂のせん断方向と垂直方向に変換したせん断応力および垂直応力

A_{ss}^{ij}、A_{sn}^{ij}、A_{ns}^{ij}、A_{nn}^{ij} ：影響係数

D_s^j, D_n^j ：連立方程式における未知数であるj番目の不連続要素の変位不連続量

岩盤の不連続性には3つの状態（開口、弾性接触状態、すべり）がある。1つの亀裂のために導かれた支配方程式（1）は、接触やすべりの状態のクラックの場合にも簡単に拡張することができる。異なる亀裂の状態に対して、支配方程式は、亀裂のせん断応力と垂直応力(σ_s^i とσ_n^i)に基づいて記述することができる。開口亀裂$\sigma_s^i = \sigma_n^i = 0$ の場合に対しては、以上の検討より、支配方程式（1）を以下のように修正できる。

$$\left.\begin{aligned} \sigma_s^i = 0 &= \sum_{j=1}^{N} A_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^{N} A_{sn}^{ij} D_n^j - (\sigma_s^i)_0 \\ \sigma_n^i = 0 &= \sum_{j=1}^{N} A_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^{N} A_{nn}^{ij} D_n^j - (\sigma_n^i)_0 \end{aligned}\right\} \quad \text{i=1 to N} \qquad (2)$$

2つの亀裂表面が弾性接触状態にあるとき、σ_s^i と σ_n^i の大きさは亀裂の剛性(*Ks*、*Kn*)と変位不連続量(D_s^j, D_n^j)に依存する。

$$\begin{aligned} \sigma_s^i &= K_s D_s^i \\ \sigma_n^i &= K_n D_n^i \end{aligned} \qquad (3)$$

ここで、
K_s：亀裂のせん断剛性
K_n：亀裂の垂直剛性

式（3）を式（1）に代入し、簡単な数学的操作をすると、支配方程式は次のようになる。

$$\left.\begin{aligned} 0 &= \sum_{j=1}^{N} \overset{ij}{A}_{ss} \overset{j}{D}_s + \sum_{j=1}^{N} \overset{ij}{A}_{sn} \overset{j}{D}_n - (\overset{i}{\sigma}_s)_0 - K_s \overset{i}{D}_s \\ 0 &= \sum_{j=1}^{N} \overset{ij}{A}_{ns} \overset{j}{D}_s + \sum_{j=1}^{N} \overset{ij}{A}_{nn} \overset{j}{D}_n - (\overset{i}{\sigma}_n)_0 - K_n \overset{i}{D}_n \end{aligned}\right\} \quad \text{i=1 to N} \qquad (4)$$

表面のすべりを伴う亀裂に対しては、$\overset{i}{\sigma}_s$ と $\overset{i}{\sigma}_n$ の大きさは以下のとおりになる。

$$\overset{i}{\sigma}_n = K_n \overset{i}{D}_n$$

$$\overset{i}{\sigma}_s = \pm \overset{i}{\sigma}_n \tan\phi = \pm K_n \overset{i}{D}_n \tan\phi \qquad (5)$$

ここで、
ϕ_i：亀裂表面の摩擦角
σ_s の記号はすべり方向に依存。

以上の検討より、式（1）は以下のように示される。

$$\left.\begin{aligned} 0 &= \sum_{j=1}^{N} \overset{ij}{A}_{ss} \overset{j}{D}_s + \sum_{j=1}^{N} \overset{ij}{A}_{sn} \overset{j}{D}_n - (\overset{i}{\sigma}_s)_0 \pm K_n \overset{i}{D}_n \tan\phi \\ 0 &= \sum_{j=1}^{N} \overset{ij}{A}_{ns} \overset{j}{D}_s + \sum_{j=1}^{N} \overset{ij}{A}_{nn} \overset{j}{D}_n - (\overset{i}{\sigma}_n)_0 - K_n \overset{i}{D}_n \end{aligned}\right\} \quad \text{i=1 to N} \qquad (6)$$

亀裂の変位不連続量($\overset{j}{D}_s, \overset{j}{D}_n$)は慣用的な手法、例えばガウス要素法などを用いて、$_i$支配方程式（1）を解くことによって得られる。もし、亀裂が開口しているならば、亀裂表面の応力(σ_s, σ_n)は0である。もし、亀裂が接触あるいは滑っているならば、応力は式（3）あるいは式（5）を用いて計算することができ、それぞれの亀裂要素の状態はモールクーロンの破壊基準を用いて以下のように決定される。

(1)開口亀裂: $\overset{i}{\sigma}_n > 0$

(2)弾性亀裂: $\overset{i}{\sigma}_n < 0, |\sigma_S| < c + |\overset{i}{\sigma}_n| \tan\theta$

(3)すべり亀裂: $\overset{i}{\sigma}_n < 0, |\sigma_S| > c + |\overset{i}{\sigma}_n| \tan\theta$

ここで、c：粘着力

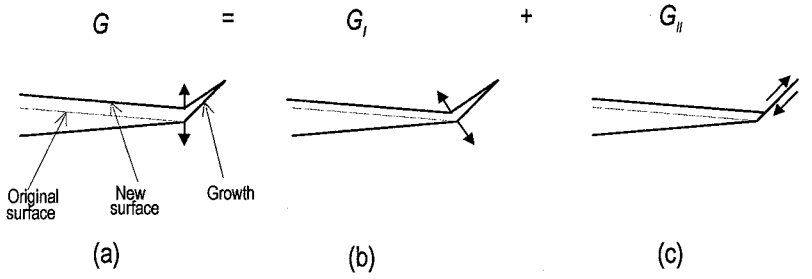
もし、亀裂がすべりを経験しているのなら、c = 0 である。圧縮応力は負の値として考える。

2.2 亀裂伸展のモデル化

引張とせん断の破壊は岩盤において共通の現象である。それゆえ、岩盤の亀裂伸展を効率的に予測するために、モードⅠとモードⅡの亀裂伸展に対する亀裂の基準が必要である。巨視スケールにおける既存亀裂の基準は２つのグループに分けることができる。それらは主応力（ひずみ）に基づいた基準とエネルギーに基づいた基準である。前者は最大主応力基準と最小ひずみ基準から構成される。後者は最大ひずみエネルギー開放率基準（G-基準）と最小ひずみエネルギー密度基準（S-基準）から構成される。直応力（ひずみ）に基づいた基準はモードⅠの亀裂伸展にのみ適用可能で、それらは主引張応力（ひずみ）に依存している。モードⅡの伸展に適用するためには直応力（ひずみ）だけではなく、せん断応力（ひずみ）も考慮しなければならない。この点から、亀裂の先端でのひずみエネルギーがすべての応力とひずみの要素に関係しているので、エネルギーに基づいた基準はモードⅠとモードⅡの両方に適用可能であると思われる。

これまで、Shen と Stephansson の研究[4]において、G-基準と S-基準はモードⅠとモードⅡの伸展に適用可能かどうか調査され、そして、どちらのモードも直接適用できないことがわかり、その研究において、もともとの G-基準が改良され、拡張された。もともとの G-基準は、最大 G 値の方向におけるひずみエネルギー開放率が基準値 Gc に達したときに、亀裂の先端がその方向に伸展することを表している。G-基準はモードⅠとモードⅡの亀裂じん性エネルギーでは区別しない。ほとんどの工学的材料において、破壊メカニズムの違いから、モードⅡ亀裂じん性はモードⅠの亀裂じん性よりかなり大きな値を示す。混合したモードとモードⅡの亀裂伸展に適用された G-基準は、基準値 G_c を G_{Ic} と G_{IIc} の間から注意深く選ばなくてはならないので、使うのが難しい。

そこで Shen と Stephansson の研究[4]において、修正 G-基準、すなわち、F-基準が提案された。亀裂先端において、F-基準を用いて、結果生じるひずみエネルギー開放率（G）は２つの部分に分けられる。１つはモードⅠ変形（G_I）によるもので、もう１つはモードⅡ変形（G_{II}）によるものである。その垂直成分の合計は破壊荷重のやその方向を決定するのに使われる(図-1)。もし、亀裂が任意の方向で単位長さに成長し、表面のせん断剥離なしに新しい亀裂が開口したら、亀裂の成長に伴う物体の周りにおけるひずみエネルギー損失は G_I である。同様に、もし新しい亀裂が表面のせん断ずれだけだとしたら、ひずみエネルギー損失は G_{II} である。F-基準の原理は以下のように表現できる。



(a)G：開口及びせん断変位の両方を持つ成長、(b)G_I：開口変位を持つ成長、(c)G_{II}：せん断変位を持つ成長

図-1　亀裂の成長に対する G_I と G_{II} の定義

(1) 亀裂先端での任意の方向（θ）において、F-値は存在し、それは次のように計算される。

$$F(\theta)=\frac{G_I(\theta)}{G_{Ic}}+\frac{G_{II}(\theta)}{G_{IIc}} \qquad (7)$$

(2) 亀裂の先端の伸展の可能性のある方向は、F 値が最大値に達したときの方向($\theta=\theta_0$)である。

$$F(\theta)\Big|_{\theta=\theta_0}=\max. \qquad (8)$$

(3) 最大の F 値が 1.0 に達したとき、亀裂の先端は伸展する。すなわち、

$$F(\theta)\Big|_{\theta=\theta_0}=1.0 \qquad (9)$$

F-基準は、実際は G-基準より一般的な形をしており、モードⅠとモードⅡの伸展を同時に考慮して使うことができる。ほとんどの場合において、最大引張方向（G_{Ic}=最大、G_{IIc}=0）あるいは最大せん断方向（G_{IIc}=最大、G_{Ic}=0）において、その最大値に達する。これは、有限長さ（たとえば要素の長さ）の亀裂伸展は単純なモードⅠか単純なモードⅡであることを意味する。しかし、伸展の過程において、亀裂の成長はモードⅠとモードⅡの間をいきかうため、一般的には、２つの混合したモードが存在する経路を形成する。

F-基準は FRACOD において DDM 手法を用いて実行されている。この基準を用いて、FRACOD は、引張（モードⅠ）とせん断（モードⅡ）と２つのモードの組合せを予測することができる。

2.3 亀裂発生のモデル化

既存亀裂の伸展に加えて、境界や健全な岩盤で、新しい亀裂は発生する。ここでは、確率論的手法を組合せて、亀裂の発生を調べる基準の使い方について記述する。

2.3.1 健全な岩盤における亀裂の発生

岩盤強度の0.3倍から0.6倍の応力レベルにおいて微視亀裂の形成がはじまる。これは、室内試験において、観察されている[5]。微視亀裂は結合し、最終的に巨視亀裂を形成する。FRACODは巨視スケールにおける亀裂の伸展だけを模擬するために設計されたので、岩盤中の独立した微視亀裂を個々に考慮することはできない。最後の微視破壊の前に亀裂の早期発生を効果的に考慮するために、与えられた場所で、応力が岩盤強度のk倍に達したときに巨視亀裂が形成されると仮定する。しかし、亀裂表面には健全な岩盤強度が与えられている。応力が引続き増加する間に亀裂表面の強度が超過したしたときにのみ、亀裂は伸展する。FRACODにおいてこの取扱いを用いると、応力=k×強度となったときに亀裂の発生が始まり、応力=1.0×強度となったときに破壊が生じることが予測できる。

FRACODの現行バージョンにおいては、健全な岩盤を評価するためにモールクーロンの破壊基準が用いられる。

亀裂の発生は引張あるいはせん断によって生じる。引張亀裂の発生に関して、FRACODでは引張基準が用いられている。たとえば、健全な岩盤の与えられた点での引張応力が、健全な岩盤の引張強度のk倍を超えると、引張応力に直行する方向に新しい岩盤亀裂が発生する（図-2)。この場合の応力成分は以下のとおりである。

・引張における亀裂発生の限界応力

$$\sigma_{tensile} \geq k\sigma_t \qquad (10)$$

ここで、

$\sigma_{tensile}$ ：与えられた点での主引張応力

σ_t ：健全な岩盤の引張強度

・引張における亀裂発生の方向：

$$\theta_{it} = \theta(\sigma_{tensile}) + \pi/2 \qquad (11)$$

ここで、

θ_{it}：引張における亀裂の発生方向

$\theta(\sigma_{tensile})$：引張応力の方向

新しく発生した亀裂の長さはモデルの境界要素の大きさによって決定する。現在、最小の要素の長さに等しくなるように設定してある。

亀裂の発生を監視するときに、健全な岩盤の中に規則的な間隔の数多くの格子点が定義されている。各格子点での応力が計算され、破壊基準に対して検査される（図-2)。

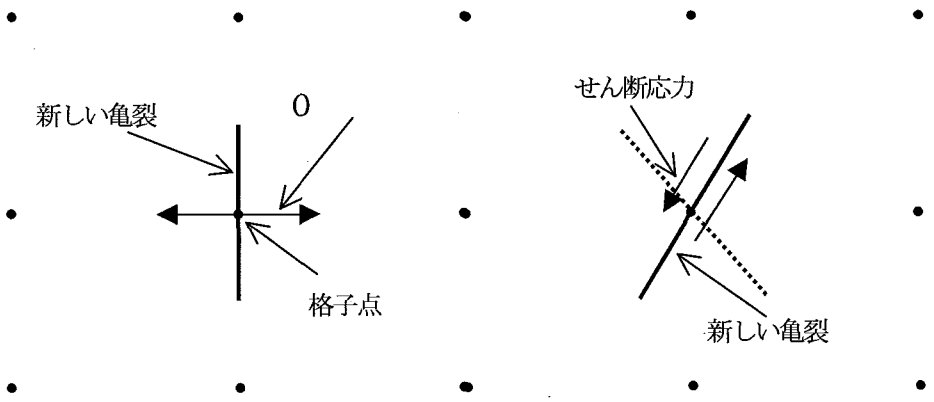


図-2　健全な岩盤中での引張あるいはせん断亀裂の発生

FRACOD では、せん断亀裂の発生に対しても引張亀裂と同様に、モールクーロンの破壊基準が使われている。すなわち、健全な岩盤中の与えられた点において、せん断応力が、健全な岩盤のせん断強度の k 倍を超えたときに、新しい亀裂が発生する（図-2)。この場合の応力成分は以下のとおりである。

・せん断における亀裂発生の限界応力:

$$\sigma_{shear} \geq k(\sigma_n \tan(\phi)+c) \qquad (12)$$

ここで、

σ_{shear}：θ_{is} 方向せん断応力

σ_n：せん断破壊平面での垂直応力

ϕ：健全岩盤の内部摩擦角

c：粘着力

・せん断における亀裂発生の方向:

$$\theta_{is} = \phi/2+\pi/4 \qquad (13)$$

ここで、

θ_{is}：せん断破壊の可能性のある方向（最小主応力の方向から計算）

与えられたどんな点においても 2 つの対称的なせん断破壊平面があるので、せん断破壊が検出されると常に、モデルの中に 2 つの亀裂がはじめ追加される。しかし、実際には、1 つの亀裂だけがせん断破壊の間に現れる。この理由として、2 つの亀裂の方向を最適化し、最大エネルギー開放を起こす亀裂だけを残すからである。FRACOD に適用された最適化手法は効率的であり、亀裂発生の間に多くの新しい亀裂の中から重要な亀裂を取り出すことができる。

せん断亀裂の長さは、引張亀裂の発生で記述した場合と同様に、要素の大きさに依存している。

2.3.2　境界での亀裂の発生

境界での亀裂の発生メカニズムは複雑であるため、境界要素での正確な応力の情報（接線、垂直、せん断）を必要とする。しかし、DDM 手法は、その解放の中で、境界要素の接線応力を計算できない。亀裂発生のための亀裂の接線応力を得るには、隣接要素の変位を用いる必要がある。

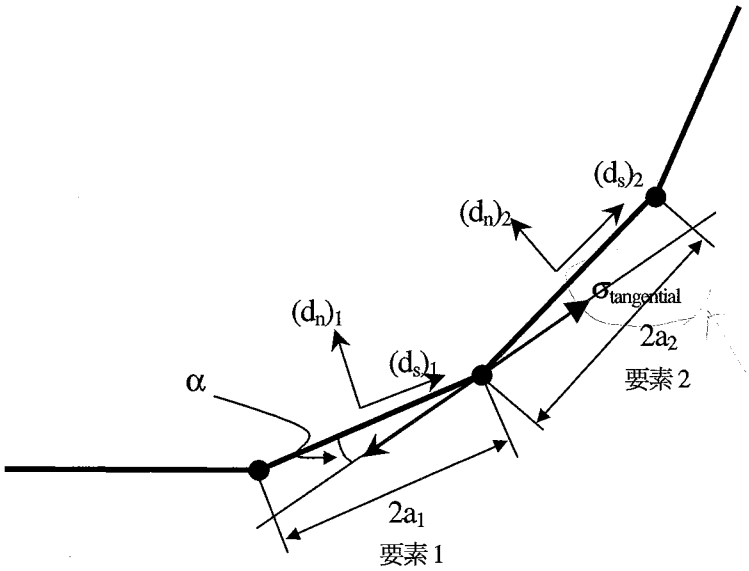


図-3　2 つの隣接要素の結合部分での接線応力

図-3 において、2 つの隣接する要素に対して、結合部分における接線応力σ_{tan}は 2 つの要素の中点での変位を用いて計算できる。

$$\sigma_{\tan} = \frac{E}{1-\nu^2} \frac{[(d_s)_2 \cos\alpha - (d_n)_2 \sin\alpha] - [(d_s)_1 \cos\alpha + (d_n)_1 \sin\alpha]}{(a_1 + a_2)\cos\alpha} \qquad (14)$$

ここで、$(d_s)_1$、$(d_n)_1$、$(d_s)_2$、$(d_n)_2$は 2 つの隣接要素の中点におけるせん断および垂直変位である。a_1とa_2は 2 つの要素の長さの半分である。αは接線と各要素の間の角度、E はヤング率、νはポアソン比である。

結合点での垂直およびせん断応力は 2 つの要素の垂直およびせん断応力の平均である。すなわち、

$$\sigma_s = \frac{(\sigma_s)_1 + (\sigma_s)_2}{2} \qquad (15)$$

$$\sigma_n = \frac{(\sigma_n)_1 + (\sigma_n)_2}{2} \qquad (16)$$

境界要素における垂直とせん断の応力は DDM 解法からわかる。

結合点での接線応力、垂直応力、せん断応力を得た後、亀裂発生の可能性を決定する方向へすすむ。健全な岩盤での亀裂の発生と同様に、境界での亀裂の発生は応力が強度の k 倍を超えたときに予測できる。

境界要素法において、亀裂の発生が予測できると、ほとんどの破壊方向で要素が追加される（図-4 参照）。新しい要素の長さは最短の要素の長さの 4 分の 3 である。新しい亀裂は、健全な岩盤と同じ粘着力、接触角、引張強度をもち、応力が岩盤の強度の 100%に達したときに破壊と伸展がおこる。

境界には、まっすぐな境界、曲がった境界、あるいは鋭い角を持った境界がある。著しい応力集中や応力の特異が境界で生じることもある。最近の Shen と Rinne の研究[6]は、境界での亀裂の発生の複雑さに着目している。まっすぐな境界や曲がった境界だけに上述した亀裂の発生の過程を適用している。応力の特異が発生するところでは（たとえば、鋭角において）、健全な岩盤の破壊基準はもはや適用できない。Shen と Rinne

の研究[6]は健全な岩盤の強度と亀裂先端の強度の両方を使った混合の基準を提案している。混合の基準は研究されたケースのみならず、すべての普遍的なケースにも適用できるだろう。単純ではないが、応力の特異性をもった境界からの亀裂の発生を予測する理論上しっかりした手法である。

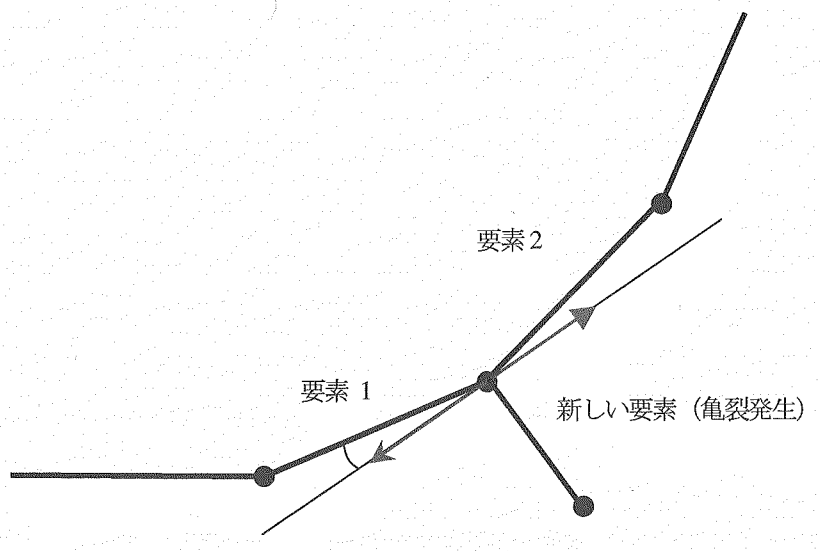


図-4　境界からの亀裂の発生のモデル

FRACOD において、亀裂発生予測に関して鋭角は無視されている。しかし、健全な岩盤での亀裂の発生は角に関連した最終の破壊に導かれる。それゆえ、鋭角での破壊は、健全な岩盤の亀裂発生や亀裂伸展によって間接的にモデル化される。

2.3.3　不均一な亀裂発生

室内試験や AE の解釈[7]に基づくと、損傷すなわち亀裂発生は低い応力レベルで開始し、応力の増大に伴い増加する。岩盤の異方性によっては、破壊強度に達するまで、応力増加に伴い、破壊の可能性がある点が増加する。

この事実を考慮して、亀裂発生を模擬できる確率論的評価機能を FRACOD に追加した。発生しそうな場所において、亀裂発生の確率は応力/強度比（$\sigma/\sigma_{strength}$）に依存すると仮定した。

$$p = (\sigma / \sigma_{strength})^2; \qquad if\ (\sigma / \sigma_{strength} \le 1.0)$$

$$p = 1.0; \qquad if\ (\sigma / \sigma_{strength} > 1.0)$$

ここで、

p：亀裂発生の確率

$\sigma/\sigma_{strength}$：強度に対する応力の比

として、引張と圧縮それぞれの応力と強度を参照した。

亀裂発生の確率を図-5 に示す。応力/強度比が 0.5 以下のときには、亀裂発生の可能性は非常に低い(0.25 未満)。後述する一軸圧縮試験の予備解析においては、実亀裂は強度の 50%に達したときに発生した。

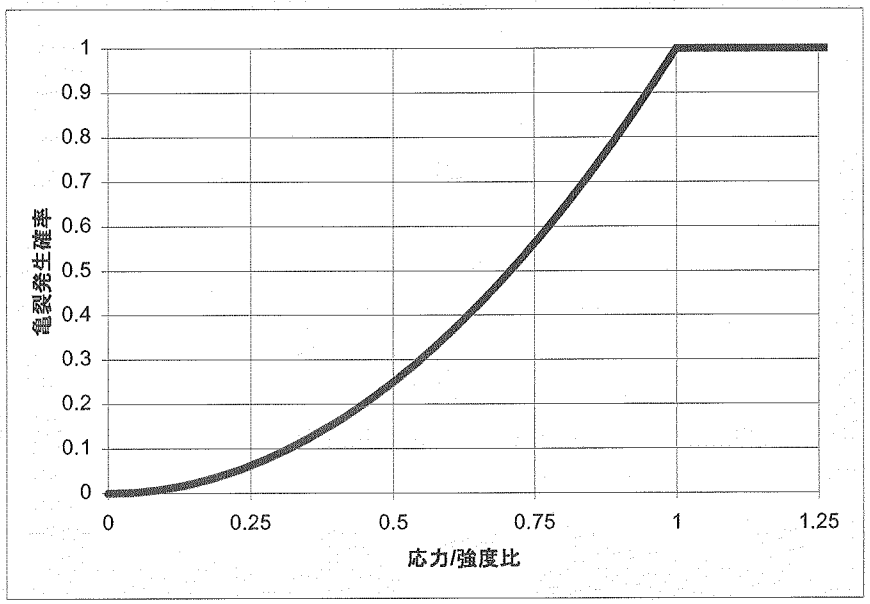


図-5　応力/強度比の関数としての亀裂発生確率

2.4　AE の予測

AE は低いエネルギーの振動イベントである。振動イベントは、与えられた岩盤の体積の中で、検出可能な振動波を放射した非弾性的な変形として考えられる。振動イベントは次のものによって記述される。

- 位置
- 大きさ

2.4.1　AE 位置選定

脆性岩盤において、振動イベントの位置選定は、岩盤破壊、すなわち岩盤亀裂の位置選定とされる。脆性岩盤の振動イベントが発生源とみなせる箇所には、①急な亀裂の運動、②亀裂伸展③亀裂の発生のそれぞれがある。FRACOD は 3 つの発生源をすべて DDM 要素で明瞭に模擬できるので、振動イベントの位置選定の予測ができる。

①急な亀裂の運動

FRACOD のモデル化において、既存亀裂は複数の要素に分けられる。各要素は亀裂表面の移動（弾性、すべり、開口運動）を計算するために、各計算ステップで決定される。もしいずれかのステップで、要素が運動したとわかったら、AE イベントはこの要素の近くで発生することが予測できる。厳密に言えば、この AE イベントの発生位置（震源）選定は要素の中心に位置すべきである。破壊の過程で同じ要素からの多くの AE イベントに対する重複を避けるために、各独立した AE イベントは図-6 に示す、円形の領域に無作為に発生すると仮定する。

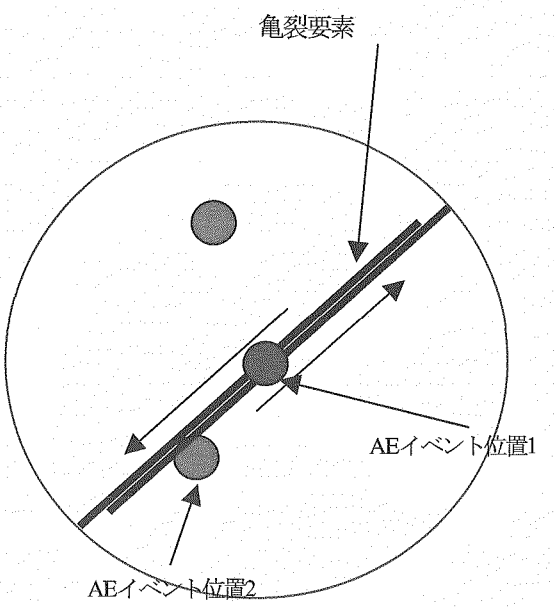


図-6　急な亀裂の運動によって引き起こされるAEイベント

②亀裂伸展

亀裂が伸展するときは、亀裂先端において元来の健全な岩盤が壊れて、既存亀裂が拡張する(図-7)。健全な岩盤が壊れる過程でAEイベントを引き起こす。新しい亀裂はDDM要素で模擬される。それゆえ、1つのAEイベントは新しい要素の近くで発生するように模擬される。再度、図-7に示されるような新しい亀裂要素周辺の円形領域に無作為にAEイベントが発生すると仮定する。

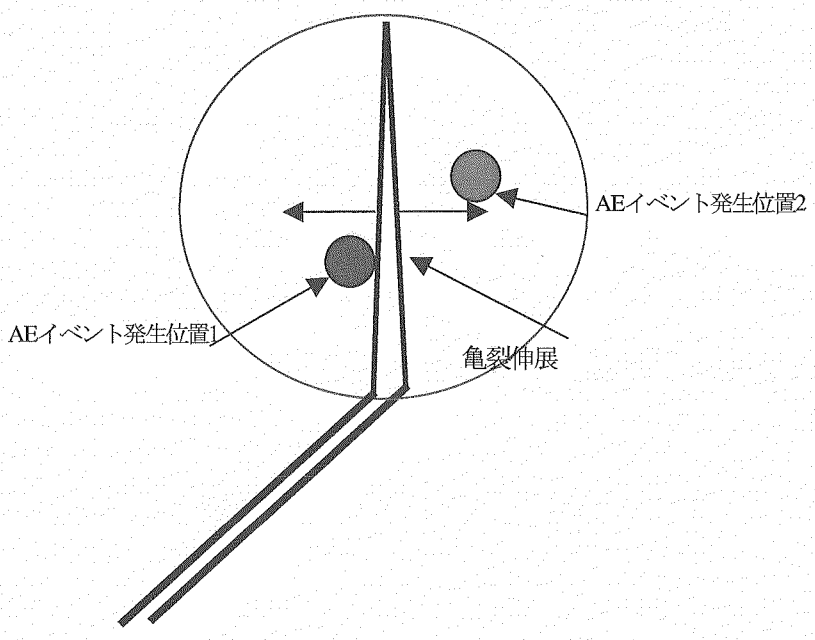


図-7　亀裂伸展によって引き起こされるAEイベント

③亀裂の発生

既存亀裂を含まずに健全な岩盤の中で亀裂ができることを亀裂の発生という。亀裂の発生は図-8 に示すように引張やせん断によって生じる。この過程において、新しい亀裂がつくられ、急に新しい亀裂を形成すると動的なエネルギーを解放し、それにより AE イベントを作り出す。亀裂伸展のモデル化と同様に、FRACOD は新しい DDM 要素を加えることにより、亀裂の発生を模擬する。AE イベントはそれゆえ新しい要素の近くで予測できる。

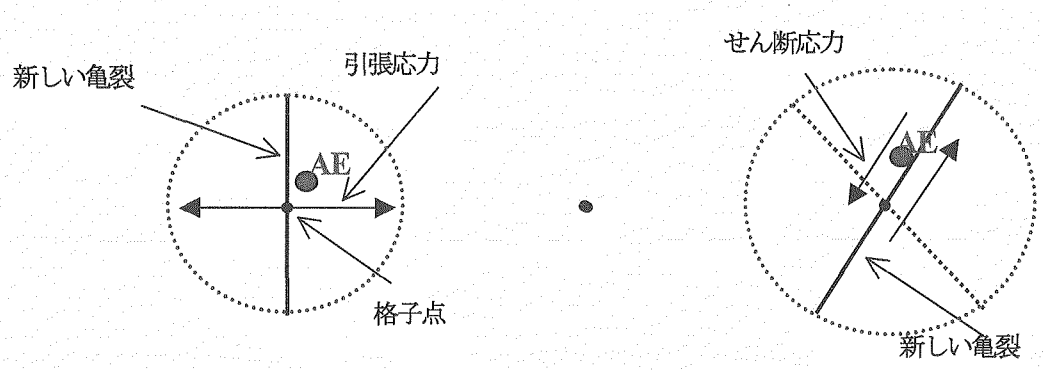


図-8　亀裂の発生によって引き起こされる AE イベント

2.4.2　AE の大きさ

イベントの強度の最も一般的な記述は地震モーメント(Seismic moment)である [8]。単位体積あたりの地震モーメントの変化は次の通りである。

$$\Delta\sigma_{ij} = c_{ijkl}\Delta\varepsilon_{kl} \tag{17}$$

ここで、c_{ijkl}は弾性定数、$\Delta\varepsilon_{kl}$はひずみ変化、$\Delta\sigma_{kl}$地震モーメント密度テンソルあるいは非弾性応力である。

震源体積 V に対して積分した全モーメントは次のように地震モーメントテンソルで表される。

$$M_{ij} = \int_V c_{ijkl}\Delta\varepsilon_{kl}dV = \int_V \Delta\sigma_{ij}dV \tag{18}$$

モーメントテンソルは、イベント中の震源における非弾性変形を評価し、その値はイベントによって生じる永久非弾性ひずみを評価する。

理想化した震源に対して、地震モーメントは通常、次のように定義される。

$$M = G \cdot \Delta D_s \cdot A \qquad (19)$$

ここで、ΔD_s は震源面積 A 全体の変位不連続量、すなわち、すべりの変化である。G はせん断率である。

引張破壊だけが起こる場合においては、地震モーメントは次のように記述される。

$$M = E \cdot \Delta D_n \cdot A \qquad (20)$$

ここで、ΔD_n は震源面積 A 全体の変位不連続量（開口）の変化である。E はヤング率である。

FRACOD において、既存亀裂と新しい亀裂の両方のせん断と垂直の変位不連続量は、亀裂伸展のステップごとに、すべての亀裂要素に対して直接計算される。

モデル化は実際の動的手法で行われていないので、亀裂伸展、すなわち、ひとつの要素サイズの亀裂の成長の各ステップで急な移動が発生すると仮定する。この急な移動によって引き起こされる地震活動は、このステップで発生する亀裂、たとえば既存亀裂の暫時増加変形によって決定される。しかし、新しい亀裂に対して、新しい亀裂の変形の前の初期変形は 0 であることから、亀裂伸展や亀裂発生後の最初のステップにおいて、ますます増加する変形は全亀裂の変形(D_n と D_s) に等しくなる。続くステップにおいては、初期変形は 0 ではなく、増加変形が適用される。

現実の動的過程においてモデル化は行われないので、地震の領域は評価することが難しい。簡単にするために、地震、あるいは AE の領域は、各要素の長さで支配される円形領域とする（図-7 参照)。

地震モーメントは、次の式を使って、局部的な地震の大きさ(m_L)に変換することができる[9]。

$$m_L = \frac{2}{3}\log M - 6 \qquad (21)$$

明らかに、地震の大きさは要素の大きさに敏感である。それゆえ、岩の粒子の寸法に相当する要素の寸法でない限り、予測した AE の大きさと計測した AE の大きさを比較することは実践的でない。

FRACOD において AE の大きさを予測することを役立てるために、FRACOD によって予測された異なる AE イベントを比較する。要素寸法（あるいは仮定した地震領域）は通常、すべての亀裂要素に対して同じであるので、予測した AE の大きさは各亀裂要素の移動に比例している。それゆえ、AE の大きさはすべての異なる AE イベントの相対的な大きさの指標になる。

3 入力パラメータの収集と解析

FRACOD を用いた数値解析には、健全な岩盤や亀裂の変形および強度特性に関する詳細な情報が必要である。以下に示す入力パラメータは、今回の FRACOD を使用した解析用に収集したものである。これらは、サイクル機構から提供されたデータ [10]、サイクル機構から提供された土岐花崗岩のサンプルコアを用いた亀裂力学試験結果に基づいたものである。

3.1 岩盤変形パラメータ

健全な岩盤の岩盤変形パラメータには、ヤング率(E)、ポアソン比(v)などがある。提供データ [10]に基づき、3 種類の深度に対し、それぞれ異なる岩盤変形パラメータを用いる。それらを表-1 にまとめる。

表-1 健全な岩盤の岩盤変形パラメータ

深度	ヤング率(E) GPa	ポアソン比(v)
GL-200m	49.9	0.36
GL-500m	49.4	0.34
GL-945m	3.5	0.36 (月吉断層の中)

3.2 岩盤強度パラメータ

モールクーロン破壊基準を使用する時は、岩盤強度パラメータとしては、内部摩擦角、粘着力、引張強度などがある。

既存の技術資料 [10]には、健全な岩盤サンプルについてポイント・ロード試験や一軸圧縮試験による実験結果が示されている。記載されている全データの平均強度は以下の通りである。

$$\sigma_c = 122\ \mathrm{MPa}.$$

摩擦角および粘着力などのモールクーロン強度パラメータの算出には、それらのいずれか（例えば、健全な岩盤の内部摩擦角）がわらなければならない。既存の技術資料 [11]には、新鮮な岩盤の基本摩擦角のリストが示されている。記載されたデータの平均値は、内部摩擦角を取ったものである。粘着力は、σ_c と摩擦の関係を用いて算出される。すなわち、粘着力は、以下のとおりとなる。

$$\phi = 33^\circ$$

$$c = \frac{\sigma_c (1 - \sin\phi)}{2\cos\phi} = 33\mathrm{MPa}$$

この結果は、GL-276m から GL-678m の岩盤サンプルに基づいたものである。GL-945m からは健全な岩盤サンプルはない。GL-945m の健全な岩盤の強度については、上記に記載されているものと同じとした。

3.3 亀裂の変形と強度パラメータ

亀裂の特性を示すパラメータには、垂直剛性 K_n、せん断剛性 K_s、亀裂摩擦角 ϕ_r、粘着力 c、および内部摩擦角 ϕ_d、などがある。

FRACOD での解析の際には、2 種類の亀裂が対象となる。すなわち、既存亀裂と、亀裂発生と伸展により新たに作られた亀裂である。これら亀裂の特性について、以下に個別に議論する。

3.3.1 既存亀裂の特性

既存の技術資料[11]に、既存亀裂について、25 個の試験片に対する結果が示されている。その平均値を以下に示す。垂直剛性 K_n は、垂直応力が 0～3 MPa で、せん断剛性 K_s は垂直応力が 0.032 MPa～0.079 MPa で取得されたものである。

K_n=245 GPa/m、 K_s=3 GPa/m, ϕ_r=25.5°

K_n および K_s は載荷垂直応力に依存することはよく知られている。

GL-200m、500m、945m では、鉛直応力は、それぞれ 5.1 MPa、12.8 MPa、24.1 MPa と推定される。これらは、K_n の試験での平均的な垂直応力の 4 倍、8 倍、16 倍であり、K_s の試験での平均的な垂直応力の 100 倍、200 倍、400 倍となる。垂直応力に対し K_n と K_s が線形で比例すると考えると、既存亀裂の K_n および K_s は以下のようになる。

表-2 各深度における垂直剛性およびせん断剛性

深度	垂直剛性 K_n GPa/m	せん断剛性 K_s GPa/m
GL-200m	980	300
GL-500m	1960	600
GL-945m	3920	1200(月吉断層の中)

亀裂摩擦角は、全ての深度に対して同じであり、粘着力 c と内部摩擦角 ϕ_d はゼロと考えられる。すなわち、以下のようになる。

ϕ_r=25.5°、 c = 0、 ϕ_d=0

3.3.2 発生した亀裂の特性

新鮮な亀裂の特性、特にせん断によって生じた新鮮な亀裂のデータは非常に限られたものしかない。今回の室内試験では、引張破壊で作られた新鮮な亀裂の垂直剛性の試験を試みた。結果から、亀裂剛性に関し有用な情報が得られた。しかし、岩盤で最も起こりそうな破壊は引張破壊でなくせん断破壊なので、せん断により生じた新鮮な亀裂の特質に関して妥当な評価が必要である。このため、新鮮な亀裂の垂直およびせん断特性を用いて、一軸圧縮試験の予備解析を何回か実施した。この予備解析の詳細については、後述するが、下記の新鮮な亀裂の特性は、室内試験で入手した健全な岩石サンプルの一軸圧縮強度（122 MPa）と、同じ結果となりうるということがわかった。

K_n=13800 GPa/m、K_s = 3099 GPa/m

新たに作られた亀裂の摩擦角と粘着力は、健全な岩石と同じと想定される。一度滑りが起こると、亀裂はその粘着力を失う。

ϕ = 33°、c= 33 MPa (滑り前); 0 (滑り後)

亀裂は、内部摩擦角の高いことが多い。新鮮な亀裂の内部摩擦角の算出に、次の(22)式の方法[12]を用いた。

$$\phi_d = \frac{1}{2} JRC \log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) \qquad (22)$$

新たな亀裂は、今回の室内試験結果から、せん断亀裂のJRC値が5であると想定される。JCSは、健全な岩盤の一軸圧縮強度(122MPa)と同じである。σ_nは、様々な深度での土被り圧である。GL-500mからGL-945mの岩盤で、およそϕ_d=2°となる。以下、全ての深度での新鮮な引張およびせん断亀裂は、同じ特性値とした。

3.4 破壊じん性のパラメータ

3.4.1 試験片と試験片成形

MIU-2 号孔の3深度（GL-200m、500m、945m）の土岐花崗岩について一連の試験を行った。一連の試験として、モードⅠ破壊じん性、亀裂垂直剛性およびモードⅡ破壊じん性を封圧条件下で測定した。

(1) 試験片

GL-200mでの土岐花崗岩は、粒子が小さく均一性が高い。GL-500mでの土岐花崗岩は、粒子の大きさが最大数mmある斑岩状である。GL-945mでの土岐花崗岩は、粒子が粗く、非常に不均一であり、再結晶化がみられて空隙の大きさは最大数mmある。

(2) 試験片成形

試験片成形は、Backers et al.[13] やDonath [14] 及びOuchterlony[15][16]の方法に従って行った。

各深度からの試験片は、モードⅠ破壊じん性試験に適した長さのものを選別した。これらを、できる限り225mm 以上の長さに切断した。端面は、コアの軸に対して直角になるように少なくとも 2°以内の精度で加工し、表面粗さが100ì mになるように研磨した。コアの中程はシェブロン型のノッチをコアの軸に直角に切り、約 1cm の幅でノッチの上に渡しているナイフからコアの中まで接着剤を注入した。これらのナイフは、試験中のクリップゲージ開口変位、亀裂開口変位を測定するためにクリップゲージを保持する。この作業が終わると、試験片は、モードⅠ破壊じん性、K_{IC}および亀裂垂直剛性K_n試験の準備が終わる。

K_{IC}およびK_n試験の後に残った試験片の半分は、モードⅡ破壊じん性K_{IIC}試験片の試験片成形に使用される。試験片は直径50mmに再加工され、直径と長さが同じになるように切断される。端面は表面粗さが100ì m、試験片の軸に直角になるように研磨する。ノッチは端面の真ん中にドリル加工する。

(3) 試験装置

試験は、剛性のあるサーボコントロールMTS(Material Test Systems Corporation, Minneapolis, MI, USA)載荷装置で行った。最大載荷能力は4600kNであり、最大200MPaの拘束圧Pをかけることができる。拘束圧が低い場合（20MPa以下）には、HoekCell (Rocktest Inc.)を使用する。

3.4.2 試験方法

試験は以下に示す手順で行った。最初に、健全な試験片の強度を推定し、次にモードⅠ破壊じん性を求める。亀裂は試験片全体を伝搬した後、亀裂のある試験片の剛性を推定する。同じ試験片を再成形した後、モードⅡ破壊じん性を求める。

(1) モードⅠ破壊じん性試験

破壊じん性試験は、ISRM 指示手法[14]である、シェブロン・ベンド（CB）法、レベルⅡ試験に沿って行った。このシリーズの試験片（以下、CB 試験片と称する）の代表的な寸法を表1に示す。試験片は、3点負荷を受ける（図-9)。負荷は、ノッチの開口速度（亀裂開口変位速度）が一定になるように、増加させ、制御する。試験の間、負荷は少なくとも4サイクルかける。これは塑性の補正ができるようにするためである。

評価を詳細に行うため、Ouchterlony の研究[15][16]と Baker の研究[17]を参考にした。補正していないモードⅠ破壊じん性、K_{IC}は、次式で求められる。

$$K_{IC} = A_{min} \cdot F_{max} / D^{1.5}$$

ここで、

$$A_{min} = \left[1.835 + 7.15 \cdot a_0 / D + 9.85 (a_0 / D)^2\right] \cdot S / D$$

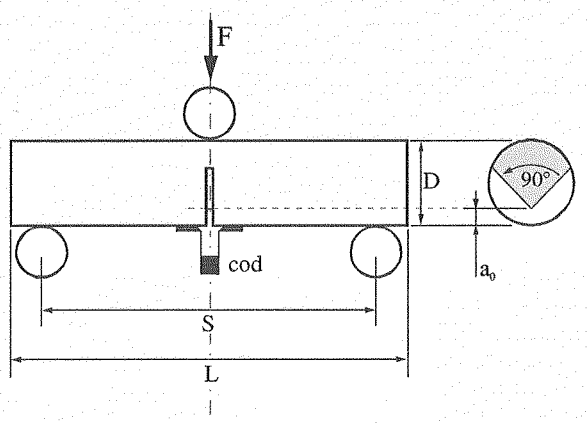


図-9 シェブロン・ベンド試験片（CB 試験片）
(D: 直径、L:供試体、S:支持長、a_0:シェブロンノッチ)

非線形部分の補正は、Baker の研究[17]に従って行い、補正破壊じん性 K^C_{IC} は次式で求めた。

$$K_{IC}^{C} = \sqrt{\frac{1+p}{1-p}} \cdot K_{IC}$$

(2) 亀裂垂直剛性試験

この方法は、CB 試験片に挿入した亀裂を使用する。亀裂はクラック駆動力が 50kN になるまで伝搬する。従って、小さなロックブリッジは残り（～2mm）、それが新しく形成される亀裂面をそのまま保持する。これにより、亀裂面が完全にフィットできるようになる。試験片には、亀裂に垂直な方向に力が加えられる。軸方向変位をコントロールしながら繰り返し負荷をかけられ、亀裂の閉まる量をクリップゲージ（亀裂開口変位）で測定する（図-10）。最大負荷を増やしながらこれを 5 回繰り返す（5、10、20、25kN を 2 回）。変位は、精度 0.5ì m で測定する。十分な精度でかけられる最大負荷は 25kN である。

上記の手順は、原則として亀裂のない試験片の強度の決定にも使用する。K_n は、最後の負荷サイクルの時に決定する。最初の 4 回のサイクルで、亀裂を閉じさせる。最後の回の同じ負荷に対して、亀裂のない試験片と亀裂のある試験片の変位の差を採ることによって亀裂剛性をプロットすることができる。試験手順および評価の詳細については、Donath の研究[14]を参照されたい。

表-3 今回使用した CB 試験片の寸法

幾何学的パラメータ	値	今回
供試体直径	D	64 mm
供試体長 L	>3.5D	224mm
支持間隔 S	3.33±0.02D	211-214mm
シェブロン角	90°	90°
シェブロンチップ位置 a_0	0.15±0.10D	3.2-3.3mm
ノッチチップ幅 t	<0.03D	1.5mm

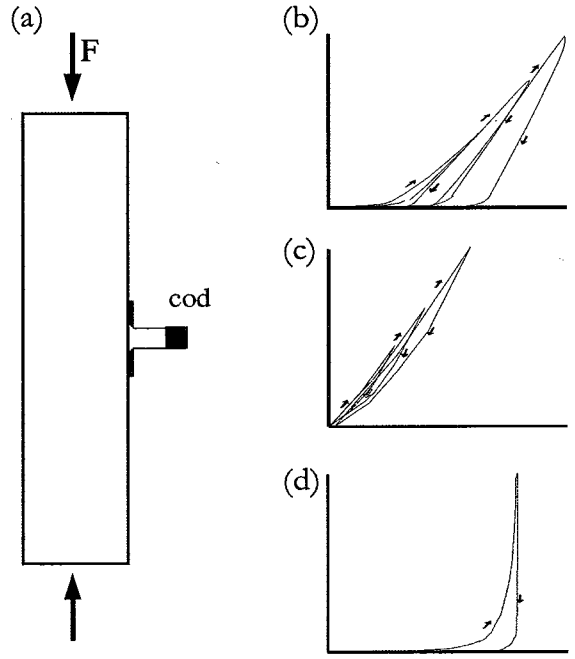


図-10 垂直せん断剛性試験の載荷方法と荷重のプロット

(a) 垂直せん断剛性試験の載荷方法

(b)-(d) 荷重 と cod のプロット（(b)亀裂のある岩石, (c)亀裂のない岩石、(d) (b)と(c)の差）

(3) モードⅡ破壊じん性試験

拘束圧がこの材料物性に及ぼす影響を調べるためにモードⅡ破壊じん性を、パンチ・スルー・シャー (PTS) 試験によって求めた[13)18)]。試験片の形状を図-11 に示し、表-4 に代表的な試験片寸法を示す。封圧条件下で K_{IIC} を測定するために、試験片は、拘束圧媒体が中に入ってこないようにゴムのスリーブでカバーした。試験片の内筒は、0.2mm の一定変位速度で打ち抜きが行われ、上下のノッチに大きなせん断応力を加えていく。

K_{IIC} に採用される原理は、ピーク応力状態でノッチの間のせん断面に生じるせん断変位を利用するものであり、最大変位勾配を生じる応力の逆解析を行うために有限要素法を使用している。K_{IIC} は、最大変位勾配 î、初期亀裂長さ c= t 、ヤング率 E およびポアソン比 í から次式を使って計算できる。

$$K_{IC}^{C} = \varsigma \cdot \frac{E}{2(1+\acute{\imath})}\sqrt{\delta c}$$

表-4 今回使用した PTS 試験片の寸法

幾何学的パラメータ	記号	寸法
供試体高さ	W	50mm
供試体直径	D	50mm
ノッチ直径	ID	25mm
上部ノッチ深さ	A	5mm
下部ノッチ深さ	B	30mm
ノッチチップ幅	T	1.5mm
健全度	IP	15mm

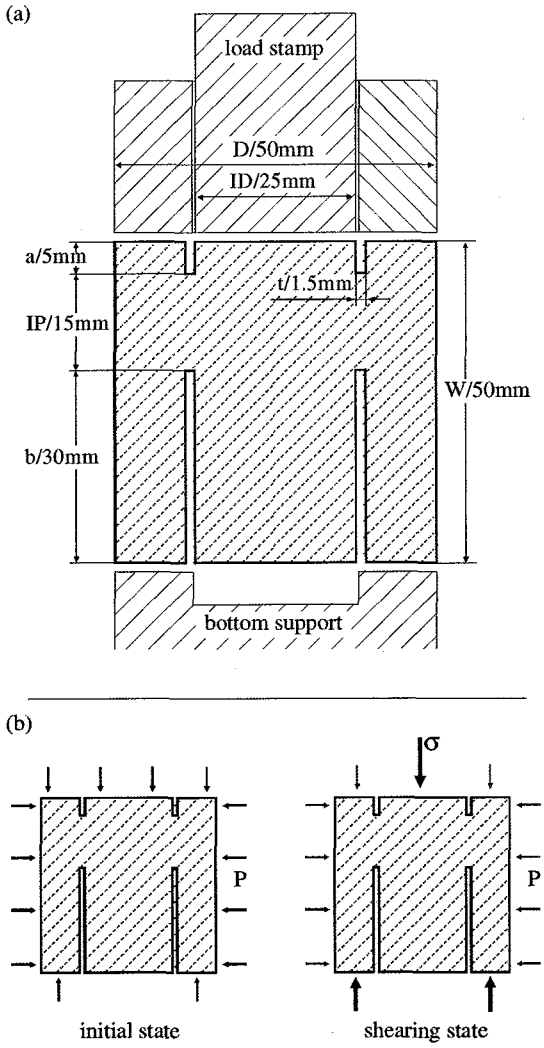


図-11　PTS 試験のための試験片の形状、主な負荷、組み立て及び寸法
(a)試験片の形状と寸法、W:高さ、D:直径、ID:ノッチ内径、a:上部ノッチ深さ、b:下部ノッチ深さ、IP:岩の健全部、t:ノッチの幅、　(b)負荷、σ:軸方向応力、P:拘束力、左：拘束圧による初期応力状態、右:せん断応力がかかっている間の負荷の様式。Backers et al. (2002a)

3.4.3 試験結果

各深度レベルでモードⅠ破壊じん性を求める3回の試験を行った。次に、亀裂垂直剛性試験を2回以上行った。モードⅡ破壊じん性は、少なくとも5つの試験片について、5、15、20、30、50、および70MPaの封圧下で求めた。

(1) モードⅠ破壊じん性 K_{IC}

表-5に各深度レベルに対するK_{IC}とK^{C}_{IC}の平均値を示す。GL-200mおよびGL-500mレベルの花崗岩は、モードⅠの下でほぼ同じ亀裂抵抗を示しており、950mレベルに対するモード 破壊じん性はそれより少なかった。データのばらつきは、岩質や試験方法から予想される範囲であった。

表-5 各深度レベルに対するK_{IC}およびK^{C}_{IC}の平均値

深度	K_{IC} [MPa m $^{1/2}$]	K^{C}_{IC} [MPa m $^{1/2}$]
GL-200 m	1.80±0.18	2.39±0.11
GL-500 m	1.72±0.13	2.37±0.13
GL-950 m*	1.17±0.12	1.73±0.13

*) 950mレベル試験片の長さは、ISRMが推奨する試験方法で定められた長さからは足りなかった。

表-6 上昇ブランチに対するK_{nI}およびK_{nL} (10-25kN)

深度	K_{nI} [kN/mm]	K_{nL} [kN/mm]
GL-200 m	80.8	2071
GL-500 m	67.8±3.4	1808±360
GL-950 m	70.5±26.3	1747±414

表-7 下降ブランチに対するK_{nI}およびK_{nL} (10-25kN)

深度	K_{dnI} [kN/mm]	K_{dnL} [kN/mm]
GL-200 m	26.0±0.2	3635±950
GL-500 m	20.3±0.8	2984±1062
GL-950 m	24.4±1.2	3117±965

(2) 亀裂垂直剛性 K_n

亀裂垂直剛性は、荷重区間0～25kNの範囲で荷重と亀裂開口変位の上昇ブランチと下降ブランチをプロットすることで評価した（図-12および図-13）。表-6および表-7に評価結果を示す。

3つの深度レベルに対するK_{nI}は、ほぼ同等となった。しかしながら、K_{nL}のばらつきは非常に大きい。

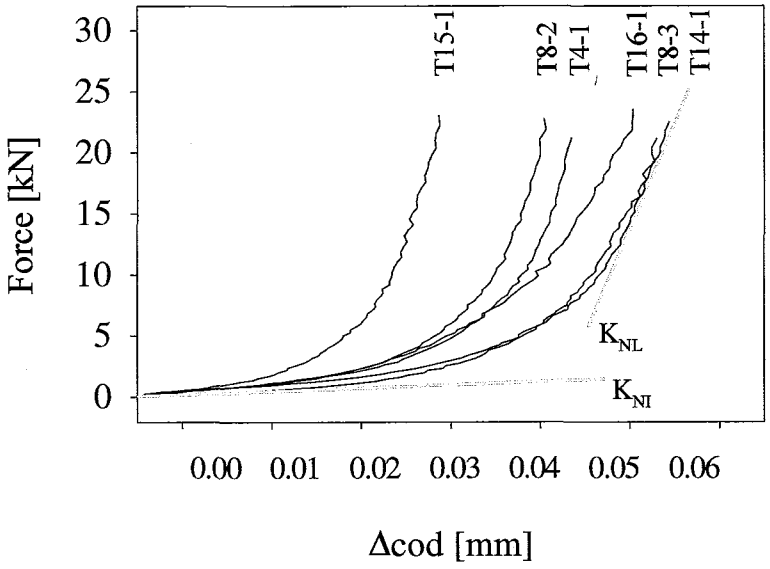


図-12 健全な試験片の岩盤剛性を除去した後の最後の負荷サイクル（K_{nI}とK_{nL}）

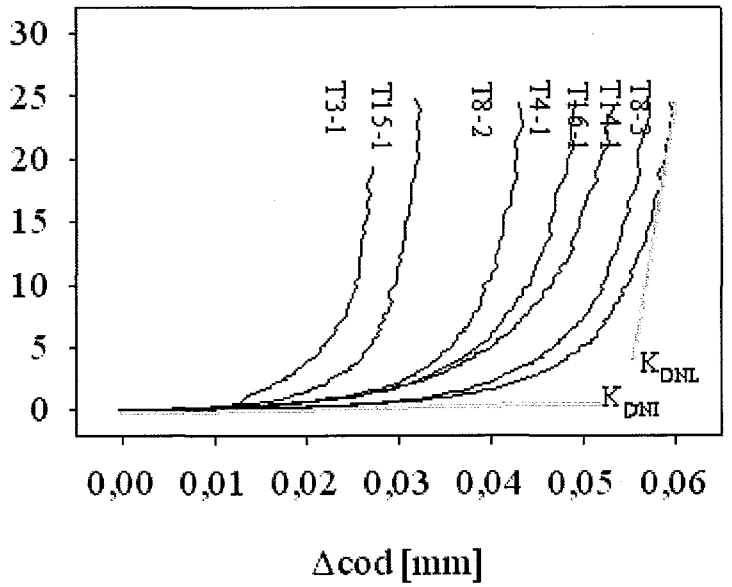


図-13 最終載荷サイクルの 除荷ブランチ（K_{dhI}とK_{dhL}）

(3) モードⅡ破壊じん性 K c

試験結果を評価するために必要な、ヤング率とポアソン比をそれぞれ、E=4,900,000tf/m² 49GPa および ί=0.36 とする。

図-14 に、K cに対する拘束圧の影響を示す。3つの花崗岩全てに対するモードⅡ破壊じん性の値は、拘束圧の増加とともに増加し、上限に近づく傾向となった。表-8 に回帰分析により得られたパラメータを示す。

$$K_{IIC}^{\{P\}} = K_{IIC}^{\{0\}} + K_{IIC}^{\{\infty\}}\left[1 - e^{-xP}\right]$$

GL-200m および500m レベルでは、回帰パラメータはよい一致を見せた。GL-950m レベルでは回帰パラメータは、少し異なり変動も大きかった。これは、粒径が比較的大きくばらつきも大きいことが結果のばらつきの原因になると考えられる。もっと正確な結果を得るには、高い拘束圧でもっと多くの試験をする必要があろう。

拘束圧が 0MPa での K_{IIC} と、拘束圧が 30MPa 以上での K_{IIC} の平均値を表-9 に示す。

3つの花崗岩は、拘束圧の高いところでは K c の平均値は全て同じような値を示している。拘束圧が 30～35MPa 以上では K cは一定の値を想定することができる。

拘束圧の低いところでは、ダイラタンシーのために混合モード効果がはっきりしており、3つの岩石は少し異なるモードⅡ破壊じん性を示している。

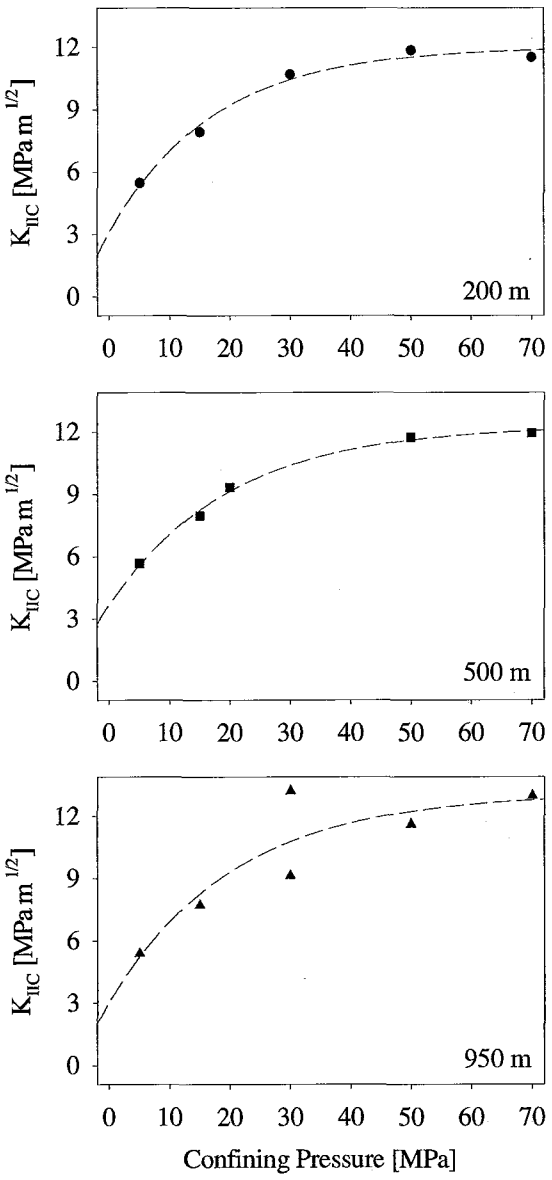


図-14　拘束圧がモードII破壊じん性 K_{IIC} に及ぼす影響

(K_{IIC} は、拘束圧の増加と共に増加し、上限に近づく傾向がある。ここでは、回帰曲線を示す)

表-8　各深度レベルに対するＫｃの拘束圧による回帰分析のためのパラメータ

深度	$K_{IIC}\{0\}$ [MPa m $^{1/2}$]	$K_{IIC}\{\ \}$ [MPa m $^{1/2}$]	x	R2
GL-200 m	3.10	8.91	0.058	0.98
GL-500 m	3.69	8.62	0.050	0.98
GL-950 m	3.07	10.04	0.049	0.81

表-9　拘束圧が0でのＫ$_{II}$Ｃと拘束圧が30MPa以上での破壊じん性

深度	K_{IIC}(P=0) [MPa m $^{1/2}$]	K_{IIC} (P>30MPa) [MPa m $^{1/2}$]
GL-200 m	3.10	11.35
GL-500 m	3.69	11.84
GL-950 m	3.07	11.24

3.4.4　結論

GL-200m と GL-500m レベルからの花崗岩は、モードＩ破壊じん性に関して非常によく似た結果を示し、GL-950m レベルの花崗岩のＫ$_{I}$Ｃは、それより低い。

対象とする土岐花崗岩の室内試験結果に基づくと、3深度での破壊じん性値は表-10のようになる。

表-10　各深度における破壊じん性値

深度	モードＩ破壊じん性値K_{IC} MPa m$^{1/2}$	モード　破壊じん性値K_{IIC} MPa m$^{1/2}$
GL-200m	2.39	3.10
GL-500m	2.37	3.69
GL-945m	1.73	3.07

これらの値を、今回の FRACOD 数値解析では使用する。初期のＫ$_{II}$Ｃ値のみ使用している点に注意いただきたい。Ｋ$_{II}$Ｃの垂直応力への依存性が、FRACOD では摩擦によって考慮されている。

3.5 初期応力

応力パラメータには、垂直応力σ_v、水平最大主応力σ_H、水平最小主応力σ_hがある。応力の方位と大きさは深度により変動する。

サイクル機構提供のデータに基づき[10]、立坑における数値解析用の水平2次元断面の初期岩盤応力のx-y成分を表-11にまとめる。

また、各深度での主応力は表-12のようになる。

異なる方位の横坑について、横坑の軸に垂直な鉛直2次元断面の応力を表-13に示す。

表-11 各深度における初期応力

深度	σ_x MPa	σ_y MPa	σ_{xy} MPa
GL-200m	14.99	17.92	-0.21
GL-500m	18.82	20.47	-5.30
GL-945m	3.18	19.50	-5.59

ここで、xは東西、yは南北を示す。

表-12 各深度の主応力

深度	σ_1 MPa	σ_2 MPa	σ_1 方位
GL-200m	17.93	14.98	N4W
GL-500m	25.01	14.28	N41W
GL-945m	21.23	1.43	N18W

表-13 横坑における数値解析用初期応力

深度	方向	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_{xy} (MPa)
GL-500m	N45W	14.35	12.75	1.43
	N	18.82		-0.59
	N45E	24.95		-2.26
	E	20.47		-2.61
945m	N45W	16.47	15.86	1.76
	N	17.09		1.02
	N45E	24.59		-0.32
	E	23.96		-1.47

x－横坑軸に垂直に横方向

y－縦方向

3.6 掘削形状および方位

立坑と横坑の形状および方位は表-14 に示すとおりである。

表-14 掘削形状および方位

坑道	形状	方位
立坑	円形 ϕ 7.3m	鉛直下向き
横坑	馬蹄形 上半：ϕ 3m の半円 下半：高さ 1.5m、幅 3m	N45W-S45E
		N-S
		E-W
		N45E-S45W

3.7 亀裂ネットワーク

既往情報から読み取った亀裂から、今回の FRACOD 数値解析で考慮する亀裂セットを表-15 に示すとおりとした。

表-15　今回のFRACOD数値解析で考慮する亀裂セット

亀裂セット		ゾーン1 (GL-200m)	ゾーン2 (GL-500m)	ゾーン3 (GL-945m)
I	走向/傾斜	N89E/4NW	N41E/75SE	N84E/62SE
	亀裂間隔(m)	0.10	0.20	0.23
	有効長さ(m)	0.24	0.35	0.38
II	走向/傾斜		N87W/51NE	N85E/44NW
	亀裂間隔(m)		0.38	0.62
	有効長さ(m)		0.44	0.54
III	走向/傾斜		NS/4E	
	亀裂間隔(m)		49.41	
	有効長さ(m)		1.71	

FRACODには、複雑な亀裂ネットワークの数値解析に関し、以下に示す長所および短所がいくつかある。

- 持続性のない亀裂（終端での亀裂）の解析が可能。
- 持続性のない亀裂伝播の解析が可能。
- 限られた数の亀裂しか取扱いできない。
- 互いに交差し、岩盤のブロックを形成する持続性のある亀裂をあまり多く予測解析できない。

上記の事実を踏まえ、立坑および横坑の周囲に簡略化した亀裂ネットワークのみをモデル化した。様々な亀裂ネットワークの詳細については後述する。

3.8　まとめ

上記の議論に基づいて、数値解析で使用した力学特性を表-16にまとめた。

表-16　数値解析で使用した力学特性

材料物性			GL-200m	GL-500m	GL-945m	GL-945m (月吉断層内)
岩盤物性値	ヤング率 E (GPa)		49.9	49.4	47.4	3.5
	ポアソン比　ν		0.34	0.36	0.34	0.36
	一軸圧縮強度 σ_c (MPa)		122	122	122	122
	摩擦角 ϕ (°)		33	33	33	33
	粘着力 C (MPa)		33	33	33	33
	引張強度 σ_t (MPa)		12.4	12.4	12.4	12.4
	モードⅠ破壊じん性値 K_{Ic} (MPa $m^{1/2}$)		2.39	2.37	1.73	1.73
	モードⅡ破壊じん性値 K_{IIc} (MPa $m^{1/2}$)		3.10	3.69	3.07	3.07
ジョイントの物性値	せん断剛性 K_s (GPa/m)		300	600	1200	1200
	垂直剛性 K_n (GPa/m)		980	1960	3920	3920
	摩擦角 ϕ_j (°)		33	33	33	33
	粘着力 c (MPa)		33	33	33	33
	内部摩擦角 ϕ_d (°)		2.0	2.0	2.0	2.0
新鮮亀裂の物性値	せん断剛性 K_s (GPa/m)		3099	3099	3099	3099
	垂直剛性 K_n (GPa/m)		13800	13800	13800	13800
	摩擦角 ϕ_j (°)		33	33	33	33
	粘着力 c (MPa)		33	33	33	33
	内部摩擦角 ϕ_d (°)		2.0	2.0	2.0	2.0
原位置応力	立坑	σ_x (MPa) (EW)	14.99	18.82		3.18
		σ_y (MPa) (NS)	17.92	20.47		19.50
		σ_{xy} (MPa)	-0.21	-5.30		-5.59
	横坑 (N45W)	σ_x (N45E)		14.35	16.47	
		σ_y (垂直)		12.75	15.86	
		σ_{xy}		1.43	1.76	
	横坑 (N45E)	σ_x (N45W)		24.95	24.59	
		σ_y (垂直)		12.75	15.86	
		σ_{xy}		-2.26	-0.32	

4 解析結果の評価方法と同定解析

4.1 解析結果の評価方法

4.1.1 変位

変位に関しては、それぞれのケースにおいて、亀裂伸展あるいは破壊の最終段階のものをプロットした。FRACOD は弾性変形の正確な予測が可能であるが、破壊後、特に岩盤ブロックが剥離した後の状態は効果的に予測できない。

4.1.2 安全率

破壊後の安全率（FS）を計算することは重要ではないので、安全率は破壊前の段階でのみ示す。

安全率は以下の式を用いて計算する。

1）せん断破壊の場合

$$FS = \frac{\sigma_1(\max)}{\sigma_1} = \frac{2c\cos\phi + \sigma_3(1+\sin\phi)}{\sigma_1(1-\sin\phi)}$$

ここで、c は粘着力、φは健全な岩盤の摩擦角、σ_3は最小主応力、σ_1は最大主応力である。

2）引張破壊の場合

$$FS = \frac{\sigma_3(tensile)}{\sigma_t}$$

ここで、σ_3 は最小主応力（引張）、σ_tは岩盤の引張強度である。

4.1.3 岩盤の強度

安全率は岩石コアの強度ではなくて、岩盤の強度を用いて計算した。後述するスケール効果を考慮して、以下のように設定した。

表-17 岩盤の強度

	粘着力 c MPa	摩擦角φ °	圧縮強度σ_c MPa	引張強度σ_t MPa
岩盤	9.5	33	32.5	3.4
健全な岩石コア	33	33	117.5	12.2

4.2 同定解析

立坑および横坑の掘削解析を実施する前に、FRACOD を用いた一軸圧縮試験のシミュレーションを行い、解析手法の確認を行った。解析では、実験室での実際の供試体に近い規模の数値を使用した。解析における供試体モデルには、破壊するまで一軸圧縮荷重を載荷した。一軸圧縮試験のシミュレーション目的は、以下の通りである

- FRACOD における AE 発生予測機能の検証
- 新鮮な亀裂に対する適切な K_n および K_s の決定
- スケール効果の決定

解析は長さ 120mm、幅 60mm の供試体をモデルとして実施した。次に、供試体モデルの大きさを、一軸圧縮強度の供試体の大きさに対する感度、例えばスケール効果を確認するために増加する。また、亀裂剛性の試験結果への影響を確認するために、数種類の破壊じん性値（K_n および K_s）値も使用した。

4.2.1 一軸圧縮試験の予備解析

長さ 120mm 幅 60mm のモデルを用いて一軸圧縮試験の予備解析を行った。FRACOD では 2 次元平面ひずみを想定しているため、数値サンプルは実際には 120mm×60mm の断面の長い梁を表している。実際の一軸圧縮試験では、供試体の上下端面が拘束されているため、これをシミュレーションするために、上部と下部の境界でせん断運動に制約をかけた。垂直応力はモデルの上下部の境界にかけ、モデルが壊れるまで、5MPa のステップで増やしていく。

この予備解析では x 軸および y 軸の両方に対し対称状態とし、実際供試体の 1/4 を対象として計算した。使用した入力パラメータを表-18 に示す。供試体の破壊がおこり始める際に発生する亀裂のサンプルとして、4mm の亀裂開始長さを与えた。この亀裂開始長さは、実際の FRACOD における亀裂開始長さであり、最小の要素サイズである。サンプルの側面境界には要素を 30、上部と下部の境界にはそれぞれ 14 の要素を使用する。

表-18 一軸圧縮試験の予備解析で用いた入力パラメータ

供試体サイズ	長さ (m)	0.120
	幅 (m)	0.060
	亀裂開始長さ (m)	0.004
岩盤の物性値	ヤング率 E (GPa)	49.9
	ポアソン比 ν	0.34
	一軸圧縮強度 σ_c (MPa)	122
	摩擦角 ϕ (度)	33
	粘着力 c (MPa)	33
	引張強度 σ_t (MPa)	12.4
	モードⅠ破壊じん性値 K_{Ic} (MPa $m^{1/2}$)	2.39
	モードⅡ破壊じん性値 K_{IIc} (MPa $m^{1/2}$)	3.10
新鮮亀裂の物性値	せん断剛性 K_s (GPa/m)	3099
	垂直剛性 K_n (GPa/m)	13800
	摩擦角 ϕ_j (°)	33
	粘着力 c (MPa)	33
	内部摩擦角 ϕ_d (°)	2.0

一軸圧縮試験の予備解析で得られた岩石供試体モデルの亀裂進展およびAE発生状況を図-15に示す。

亀裂は一軸圧縮応力が60 MPaになった時点で発生し、さらなる亀裂の伸展は、一軸圧縮応力が120 MPaになった時点で発生した。解析の結果と、開始応力は57.5 MPa、破壊応力は117.5 MPaと予測される。開始応力は強度のおよそ53%である。この強度は、実験室での強度122 MPaに近いものとなる。

予備解析の結果では、AEイベントは亀裂が起こる時に生じ、AEイベントの総数と大きさは、応力が増すにつれ、最終的に破壊するまで増えた。

図-16に、予備解析から得られた応力ひずみ曲線を示している。亀裂開始が生じる時の応力レベル60 MPaでは、応力ひずみ曲線は、非線形となる。この現象は、実際の室内試験から得られる結果と同じである。

この予備解析の結果から、FRACODでは圧縮荷重下での岩石サンプルの亀裂および破壊プロセスを予測できることを示している。また、表-10で使用した入力パラメータも妥当であり、予備解析の結果と室内試験で得られた一軸圧縮強度とがほぼ同じになった。

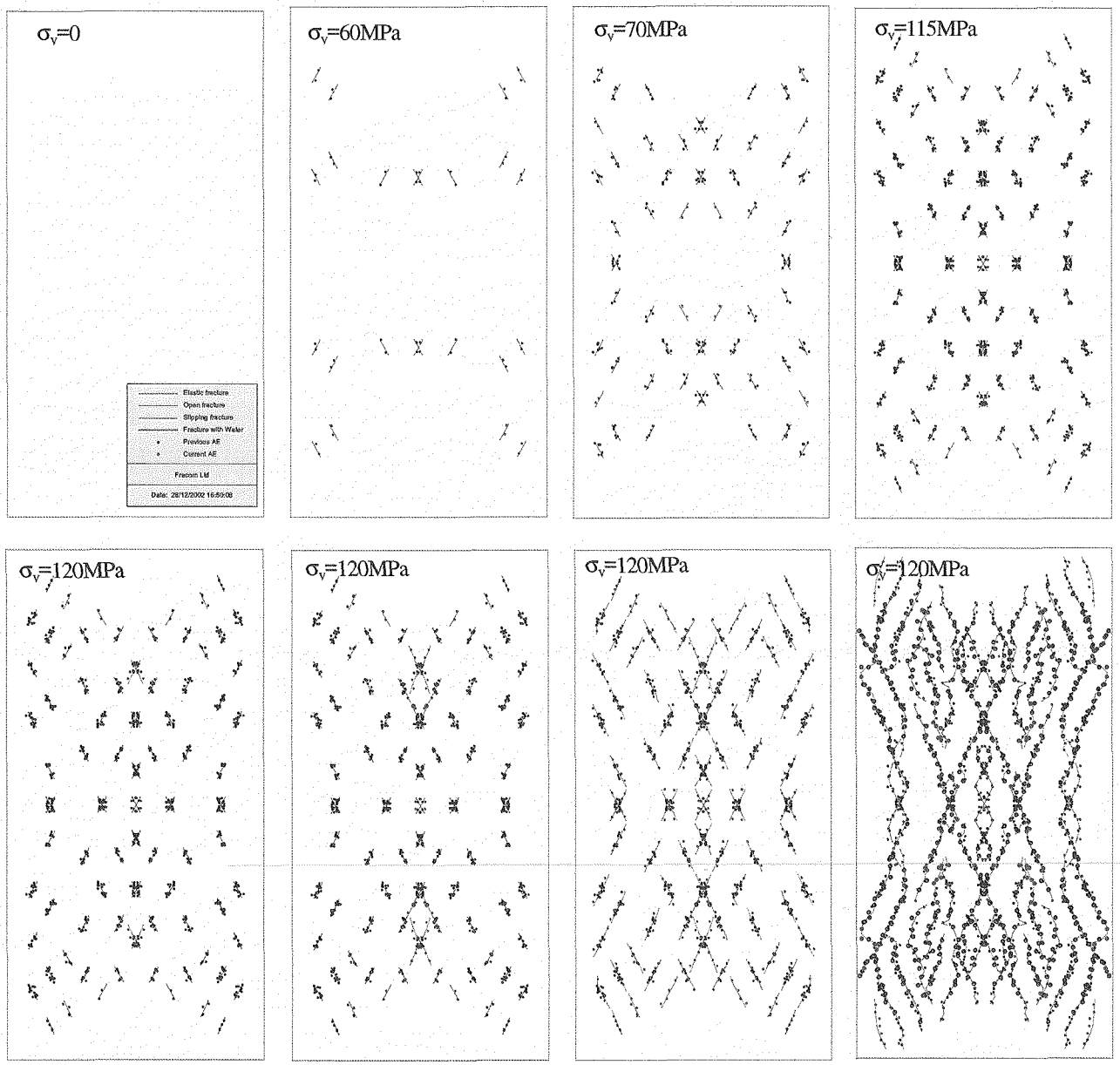


図-15　一軸圧縮応力を受けた岩石サンプルの亀裂開始、伝播および最終的な破壊の予測プロセス
（過程の途中での AE イベントの位置についてもプロット。AE イベントの大きさは、点の大きさに比例。）

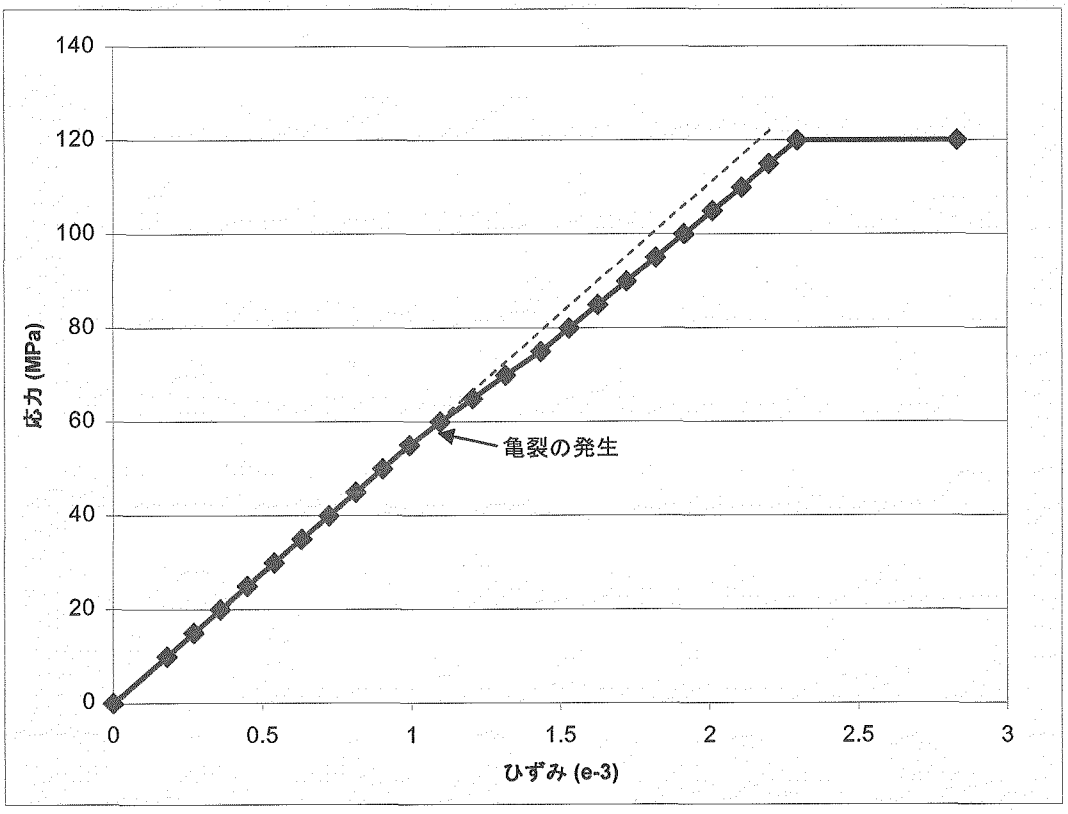


図-16　一軸圧縮試験の予備解析からの数値応力－ひずみ曲線

4.2.2 亀裂剛性の感度解析

表-19 および図-17 に、一軸圧縮試験の予備解析で使用した亀裂の剛性値と、解析で得られた一軸圧縮強度（面積＝120mm ×60mm）を示す。

新鮮な亀裂の垂直剛性とせん断剛性は、室内試験での取得が困難であるため、数値モデルで使われる、新鮮な亀裂剛性の値には不確実性がある。しかし、標準試験で使われる剛性値は、表-19 に示すとおり、花崗岩の物性としては妥当と思われる。また、亀裂剛性の岩盤強度への感度を解析するために、一軸圧縮試験の予備解析では数種類の亀裂剛性値を使用した。

表-19　岩盤強度の新鮮な亀裂剛性への感度

新鮮亀裂の剛性値		一軸圧縮強度 (MPa)
垂直剛性 K_n (GPa/m)	せん断剛性 K_s (GPa/m)	
1333	300	77.5
4444	1000	92.5
13800	3099	117.5
44444	10000	162.5

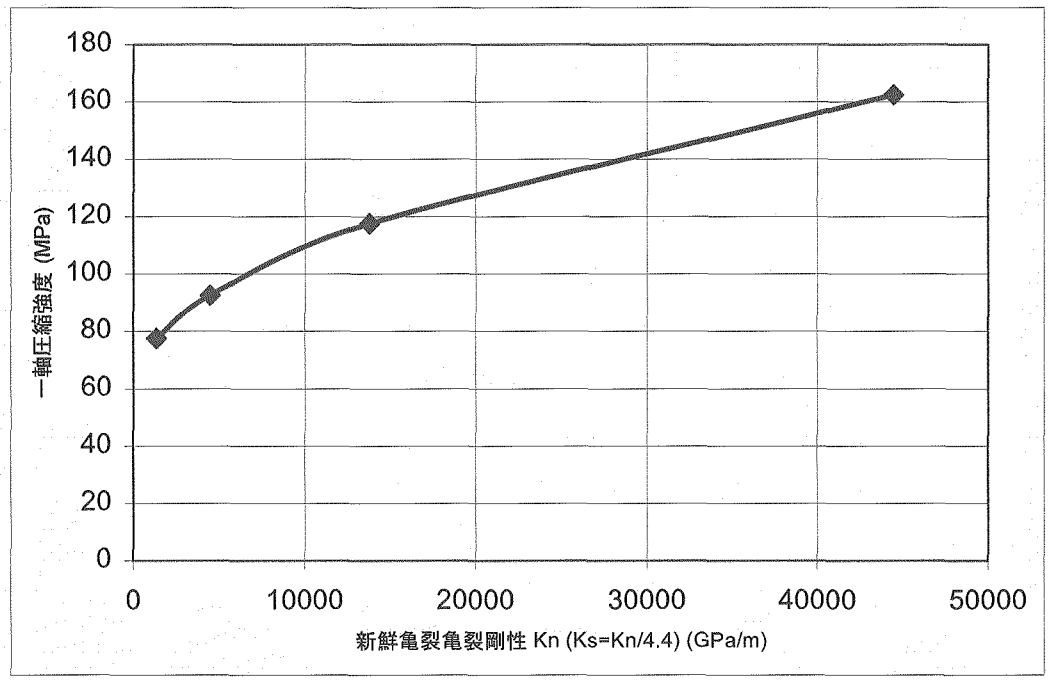


図-17　岩盤強度の新鮮な亀裂剛性への感度

図-17 より、岩石供試体の強度は使用した亀裂剛性に依存して敏感に反応していることがわかる。新鮮な亀裂の強度が低いということは、物理的には、新しく作られた亀裂が空隙のように働き、その結果、岩盤はより大きな損傷を受け、強度が低くなる。すなわち、空隙率の高い岩盤は亀裂剛性が低いと予測される。

4.2.3 スケール効果

岩盤とは基本的に不均質と不連続の媒体である。岩盤の特性の決定には、岩種と亀裂ネットワークのため常に不確実性を余儀なくされる。そのため、室内試験および原位置試験の結果は、試験を行う大きさに強く影響される。サンプルの大きさによる試験結果の変動は、スケール効果(Scale Effect)と呼ばれる[20]。

スケール効果のため、室内試験規模の大きさのサンプルから取得した岩石強度は、そのまま立坑と横坑の数値解析に適用することができない。適用される強度は、対象領域がさらに大きくなることにより、岩盤強度は室内試験結果より低い、という事実を反映していなければならない。

FRACODは、サンプルの大きさを増すと亀裂開始長さが大きくなることを考慮することにより、スケール効果を予測できる。亀裂開始長さが境界要素の長さに左右されるため、サンプルの寸法を大きくすることは、要素の総数に変化がなければ、亀裂開始長さを大きくすることになる。

ここでは、大きさの異なる6種類のサンプルについてFRACODを使って解析した。サンプルの幅は0.06mから1.92mの範囲である。サンプル中の有効な亀裂開始長さは、0.004mから0.128mの範囲である。供試体中の4mmという亀裂開始長さは、岩石粒子の間の実際の空隙もしくはマイクロクラックの大きさを反映させたものである。大きなサンプルの0.128mという亀裂開始長さは、小さな亀裂や岩体のマクロ亀裂の大きさを模擬したものである。

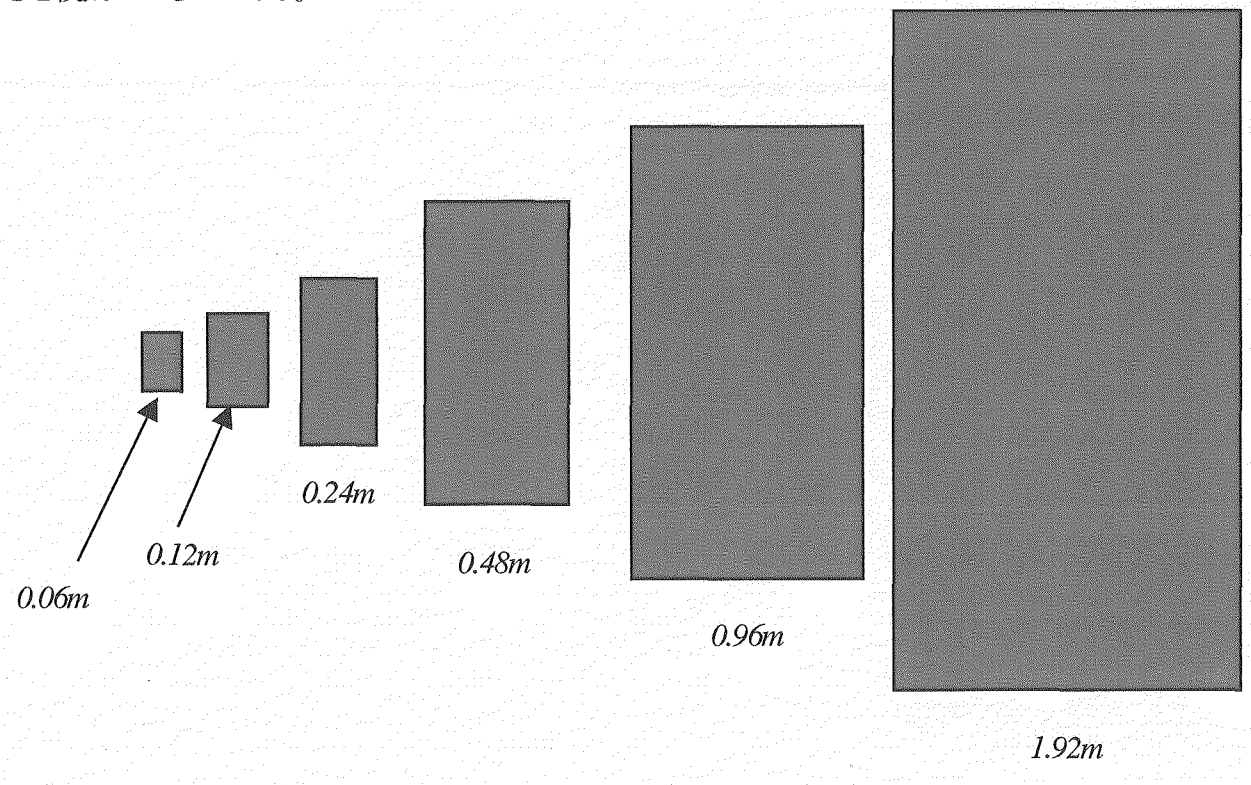


図-18　スケール効果を調べるためにFRACODを使って解析した6サンプルの概念的な比較

寸法の異なる6サンプルを用いて取得した一軸圧縮強度の概略を表-7にまとめ、図-19にプロットした。スケール効果の経験曲線も図-19に示した。経験曲線は、岩盤についてはHoekとBrownの研究[20]から、石炭についてはHergetの研究[21]から得られた2つのスケール関係からのものであり、60mm幅のサンプルで122MPaの一軸圧縮強度で標準化している。岩盤についての曲線は、直径10mmから200mmの健全な岩石サンプルの実験データに対する経験式に基づいたものである。これは、健全なサンプルのスケール効果を表すものである。石炭についての曲線は、大きさが5mmから2000mmの立方体の石炭サンプルについての室内試験および原位置試験を基にしたものである。この曲線のデータにおける全てのスケールで、石炭にはか

なり亀裂が入っているため、この曲線は亀裂性の高い亀裂岩盤のスケール効果を表している。

FRACOD で予測されるスケール効果曲線は、2 本の経験曲線の間になり、対象となる花崗岩の母岩のスケール効果を正しく示すと考えられる。対象とする岩体には、亀裂が多くはいっており、Hoek & Brown 曲線よりスケール依存性が大きくなるはずである。しかし、石炭サンプルより亀裂が少ないため、Herget 曲線よりスケール依存性が少なくなる。

表-20　解析した供試体寸法と対応する一軸圧縮強度

供試体寸法 1	長さ (m)	0.120	一軸圧縮強度 = 117.5MPa
	幅 (m)	0.060	
	亀裂開始長さ (m)	0.004	
供試体寸法 2	長さ (m)	0.240	一軸圧縮強度= 102.5MPa
	幅 (m)	0.120	
	亀裂開始長さ (m)	0.008	
供試体寸法 3	長さ (m)	0.480	一軸圧縮強度= 82.5MPa
	幅 (m)	0.240	
	亀裂開始長さ (m)	0.016	
供試体寸法 4	長さ (m)	0.960	一軸圧縮強度= 57.5MPa
	幅 (m)	0.480	
	亀裂開始長さ (m)	0.032	
供試体寸法 5	長さ (m)	1.920	一軸圧縮強度= 42.5MPa
	幅 (m)	0.960	
	亀裂開始長さ (m)	0.064	
供試体寸法 6	長さ (m)	3.840	一軸圧縮強度= 32.5MPa
	幅 (m)	1.920	
	亀裂開始長さ (m)	0.128	

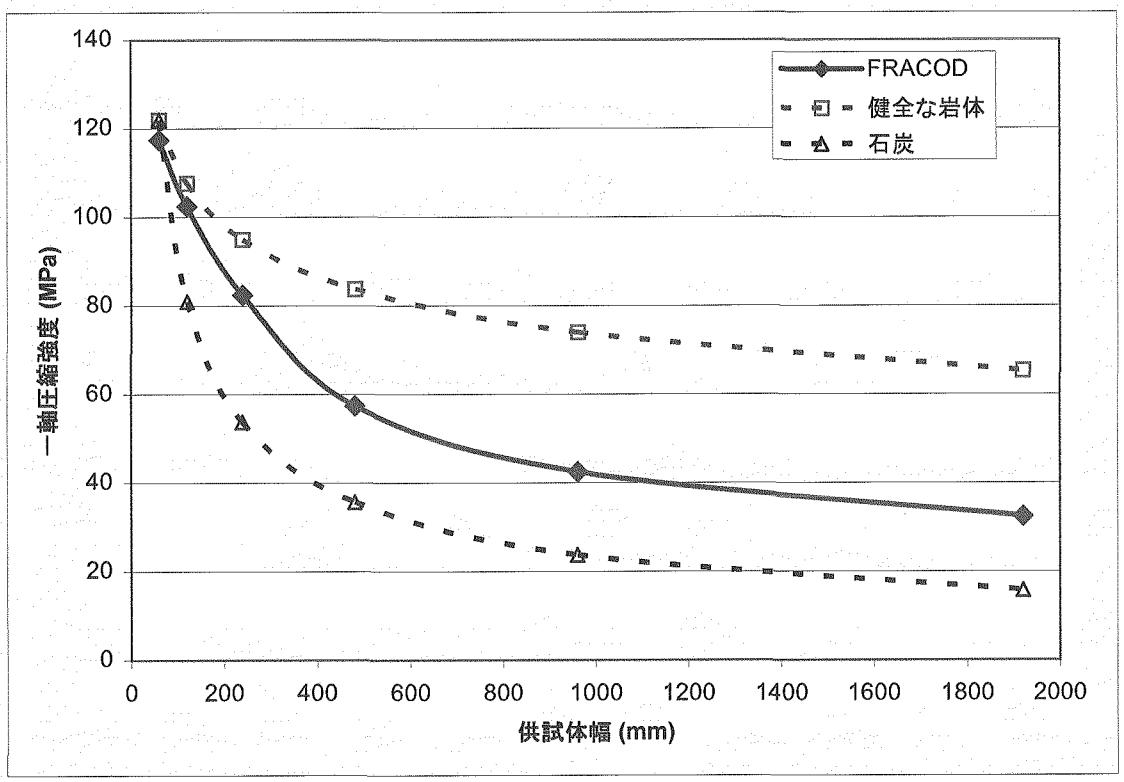


図-19　FRACOD を用いて予測されるスケール依存性と健全な岩体およびと石炭の経験曲線との比較

数値解析の結果、立坑および横坑に相当するスケールの岩体の一軸圧縮強度は、30～45MPa 程度であり、室内試験規模の健全な岩石強度のおよそ 1/3 になると予測できた。

FRACOD は、立坑と横坑のモデルの中で、妥当な亀裂開始長さを用いることによってスケール効果を考慮する。つまり、FRACOD での数値解析では、モデルの大きさによって人為的に健全な岩盤強度を低く設定する必要はないといえる。

5　研究坑道の掘削に伴う亀裂伸展予測

5.1　立坑の予測解析

5.1.1　明瞭な亀裂がない場合の予測解析

ここでは3つの深度（GL-200m、500m、945m）で立坑の予測解析を行う。なお、GL-945mの立坑は、月吉断層中にあり、応力および岩盤特性が他の2つの深度とは大きく異なる。この点を考慮して、ここでは、第3章の表-1に示した入力パラメータを適用した。

(1)　GL-200m

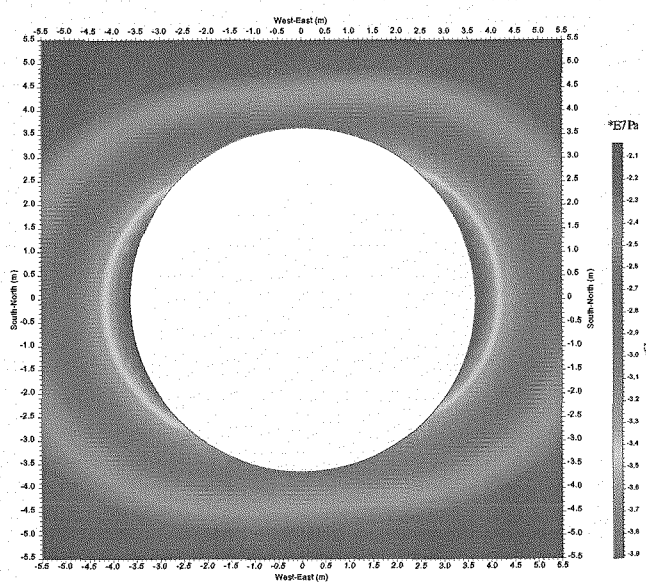
立坑断面の1/4のみを、対称性の条件を用いて数値解析する。掘削は、プレストレスのある岩体において、1ステップでシミュレーションを行う。予測解析結果を図-20に示す。亀裂発生前の主応力分布予測を(a)に、安全率の分布を(b)に、立坑壁面の亀裂パターン予測を(c)に、変位図を(d)に示した。

亀裂は、掘削後、NE、NW、SW、SEの方向に立坑壁面に発生することが予測される。亀裂はせん断または圧縮により始まる。新しい亀裂は伝播し、EWの側壁に向かい一体化する。しかし、明瞭な剥離を形成する直前で停止する。

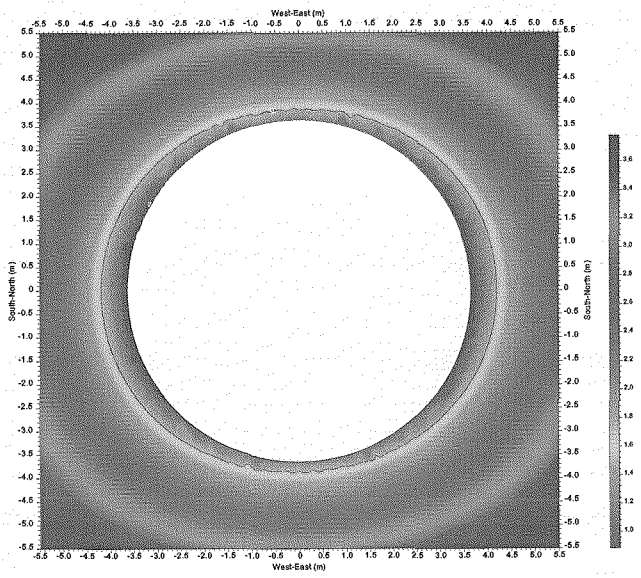
応力集中は、EW方向の立坑壁面で発生する。亀裂発生後の最大応力は、39 MPaと予測され、これは立坑の解析モデルの岩盤の一軸圧縮強度に近い。

しかし、壁面から岩盤中に入るほど拘束圧が上昇するので、亀裂は立坑壁面から0.5m以上拡張することは予見されない。

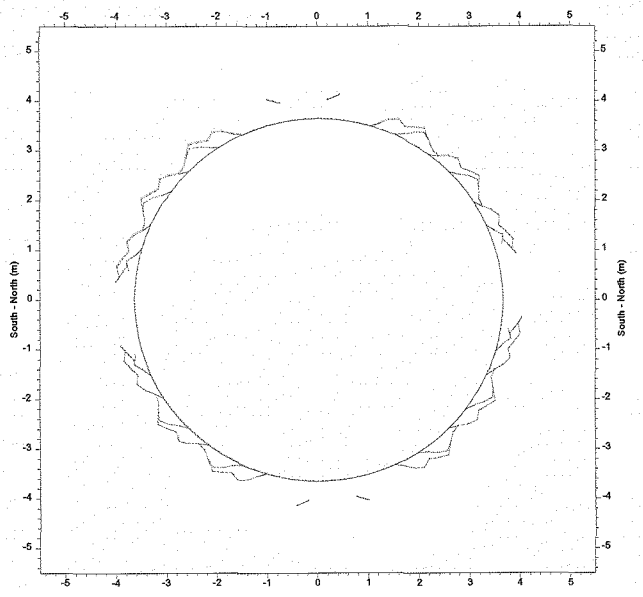
したがって、GL-200mでの立坑は安定であると予測される。亀裂領域は壁からの岩盤中に0.5m拡がる可能性があるが、大規模な剥離は予測されない。しかし、0.5m×0.5m規模の局部的なブロックの落下は、起こり得ると考えられる。



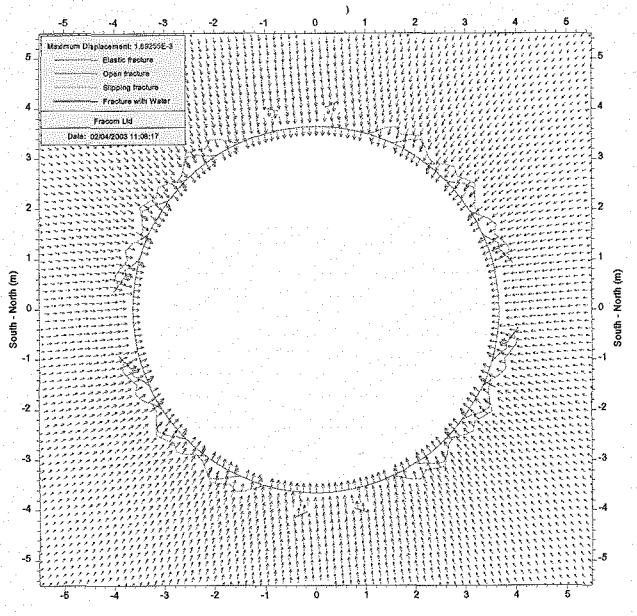
(a)　亀裂発生前の主応力分布



(b)　安全率分布



(c)　立坑壁面の亀裂パターンの最終分布



(d)　変位分布（最大変位 1.9mm）

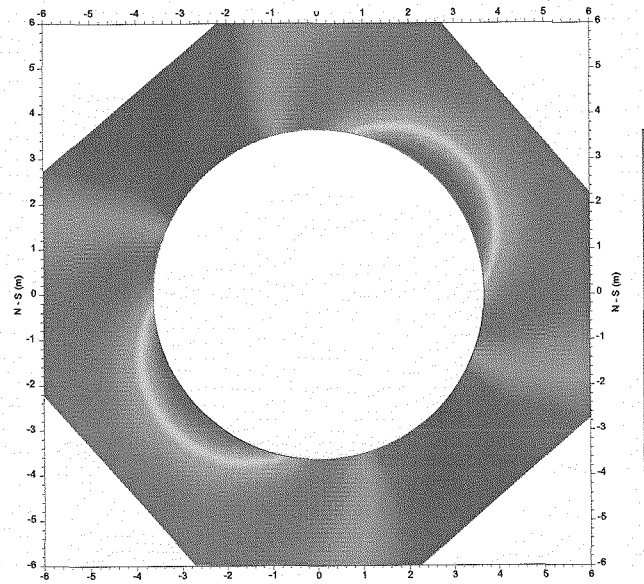
図-20　立坑の予測解析結果（GL-200m）

(2) GL-500m

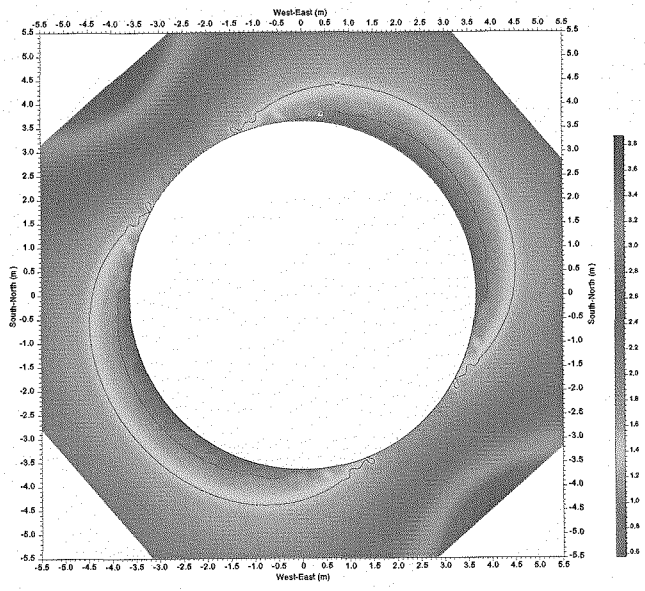
予測解析結果を図-21 に示す。亀裂発生前の主応力分布予測を(a)に、安全率の分布を(b)に、立坑壁面の亀裂パターン予測を(c)に、変位図を(d)に示した。

解析モデルにおける最大主応力の方向は、N41W である。結果として、応力集中は、N49E と S49W の方向の立坑壁面に発生する。これらの位置での主な水平主応力は、約 60MPa である。

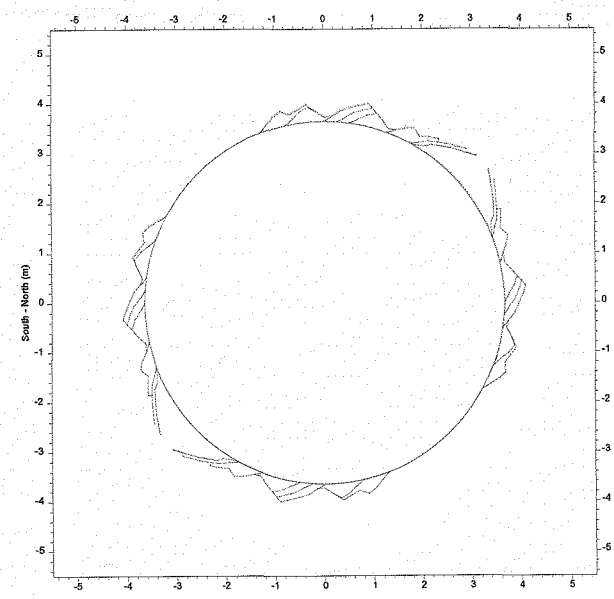
亀裂は立坑壁面で始まり、N49E と S49W の方向に向かってせん断が伝播すると予測される。誘発された亀裂は、NE と SW の方向での立坑壁面に剥離を形成する直前まで伸展する。したがって、GL-500m では剥離が発生することが予測される。剥離の主な方角は NE と SW である。剥離の深さは、立坑壁面から 0.8m 未満である。立坑壁面から 80%は、剥離、もしくは岩盤のブロックの緩みや局部的なブロックの落下を生じる可能性がある。



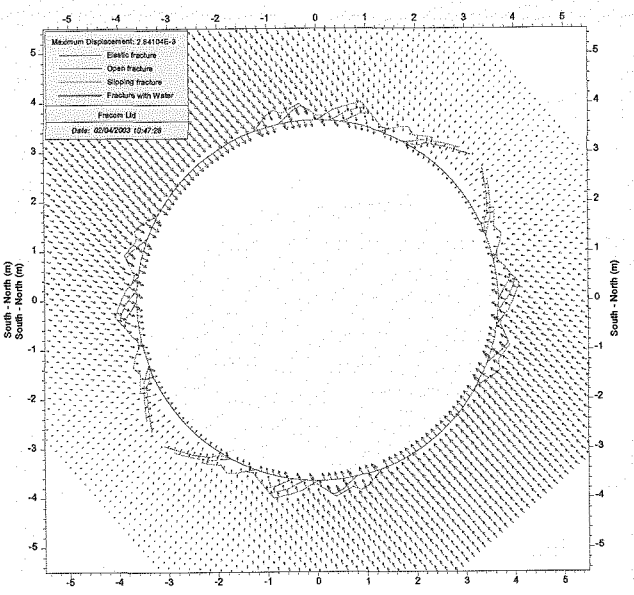
(a)　亀裂発生前の主応力分布



(b)　安全率分布



(c)　立坑壁面の亀裂パターンの最終分布



(d)　変位分布（最大変位 2.8mm）

図-21　立坑の予測解析結果（GL-500m）

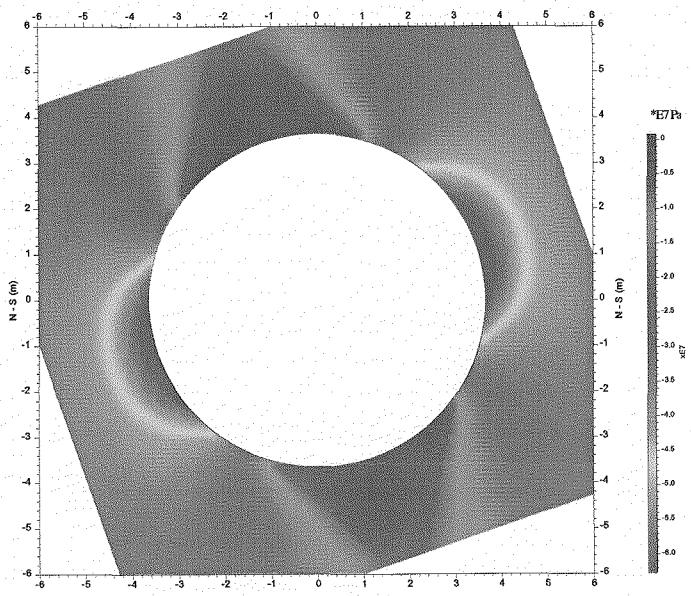
(3) GL-945m

予測解析の結果を図-22 に示す。亀裂発生前の主応力分布予測を(a)に、安全率の分布を(b)に、立坑壁面の亀裂パターン予測を(c)に、変位図を(d)に示した。

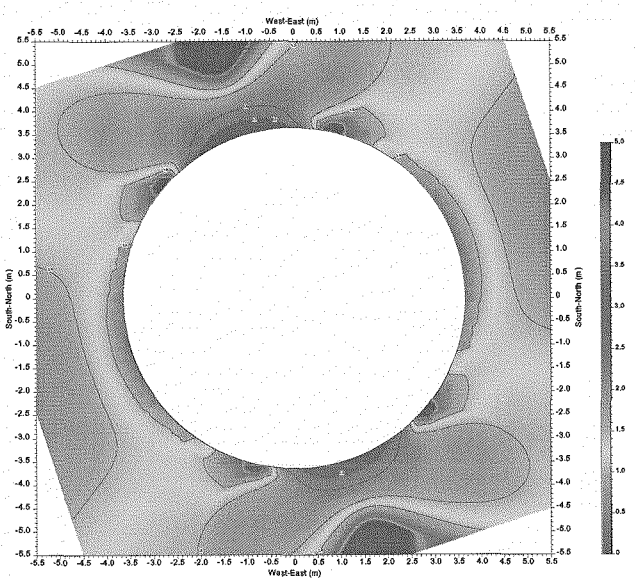
この深度の立坑は、実際は、月吉断層にあるため、岩盤の変形特性（E=3.5GPa）が他の深度よりもかなり低い。解析モデルにおける応力場にもかなり異方性がある。亀裂の予測パターンは、他の深度のものとははっきりと異なっている。

解析モデルにおける主応力の方向はN18W およびS17E である。応力の異方性の強さにより、N72E およびS72W の方角の壁面で高い圧縮の応力集中が発生し（最大主応力は62MPa)、N18W と S18E の方角の壁面で引張応力が発生する。亀裂のある岩体は引張強度が全くないか非常に小さいため、最初の亀裂開始と伝播はN18W と S18E の方向への引張側で発生する。引張亀裂は立坑壁面から奥部に向かって 3～4m 広がる。一方、高い圧縮応力により、N72E と S72W の方角の立坑壁面にせん断亀裂が発生し、伝播する。せん断亀裂は、ブレークアウトや剥離を作り出す。剥離の面積は、0.8m（奥行）×3m（幅）と予測される。

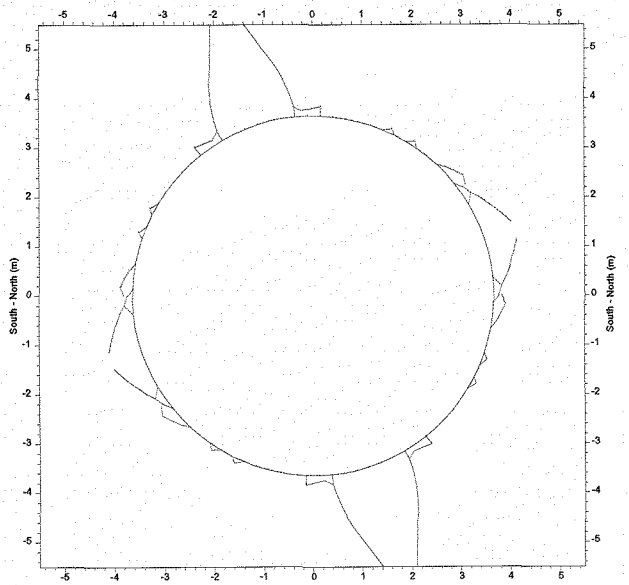
GL-945m での立坑は、支保無しでは不安定になると思われる。N18W と S18E の方角に引張破壊領域が形成され、立坑壁面に 3～4m の深さで広がる。引張亀裂と緩んだ岩のブロックは引張破壊領域に生じると予測される。N72E およびS72W の方角に剥離領域が形成され、側壁から 0.8m の奥行で広がる可能性がある。剥離領域からの大小の岩のブロックの落下が予測される。加えて、断層に沿った亀裂から生じる岩盤特性の異方性が、ブレークアウト領域内で座屈や岩底盤の緩みの原因となることも考えられる。



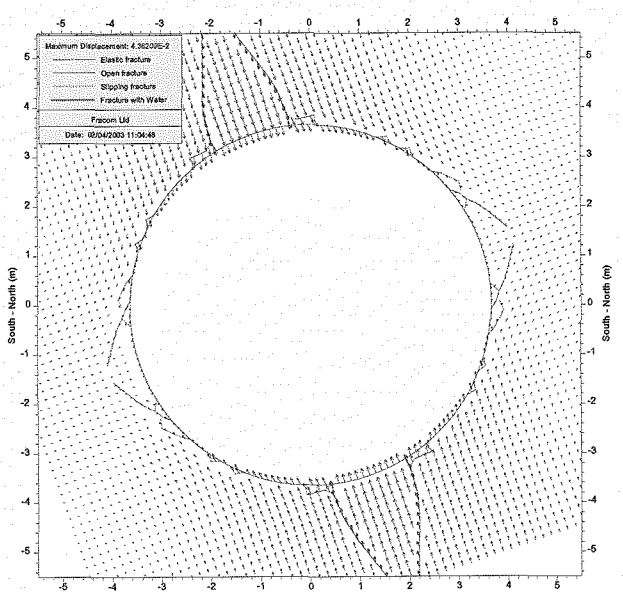
(a)　亀裂発生前の主応力分布



(b)　安全率分布



(c)　立坑壁面の亀裂パターンの最終分布



(d)　変位分布（最大変位 43.8mm）

図-22　立坑の予測解析結果（GL-945m）

(4) まとめ

表-21 に、3 つの深さでの立坑の予測解析結果を比較し、それをまとめた。主な結論は、以下の通りである。

- GL-200m では、立坑は局部的なブロックの落下の可能性はあるものの、安定であると予測される。
- GL-500m では、立坑は大きな壁面の剥離および岩のブロックの緩みを生じる可能性がある。
- 月吉断層の GL-945m では、壁面剥離と引張破壊およびブロックの緩みが発生すると予測される。せん断領域の異方性のある岩盤では、ブレークアウト発生領域での局部的な座屈、および岩底盤の緩みが引き起こされる可能性がある。
- 安全率が 1.0 以下の領域は亀裂が集中する領域と一致し、岩盤ブロックを形成する。
- 安全率が 1.0 以上、1.5 以下の領域では岩盤ブロックが形成されることがなく、亀裂の伸展が限られる。
- GL-200m と GL-500m では、最大変位が 3mm 以下であるのに対して、GL-945m では最大変位が 44mm と予測された。この差は、健全な岩盤のヤング率 (49GPa) に対して、GL-945m では低いヤング率 (3.5GPa) を解析に用いたことによるものと思われる。

表-21 異なる深度での立坑の安定性に関する結果のまとめ

深度	最大応力	最大変位	亀裂帯	亀裂帯の広がり	備考
GL-200m	39MPa	1.9mm	亀裂発生: E/W	深さ 0.5m、幅 7.0m	全体的に安定、局部的なブロックの崩落
GL-500m	60MPa	2.8mm	崩落: N49E/S49W.	深さ 0.8m、幅 7.0m	崩落のため不安定
GL-945m	62MPa	43.8mm	引張: N17W/S17E. 崩落: N72E/S72W.	深さ 3-4m、幅 2.0m 深さ 0.8m、幅 3.0m	損傷と崩落とブレークアウトによる不安定

5.1.2 明瞭な亀裂がある場合の予測解析

対象とする岩盤では、3 つの深度で 3 組の亀裂が観察されている。理論上、亀裂を正確に予測解析するには、3 次元数値解析が必要である。本研究で実施している 2 次元数値解析は、数値モデルの 2 次元平面に投影可能な亀裂しか考慮できない。垂直の立坑を数値解析する場合、2 次元数値モデルは水平断面となる。よって、急勾配の傾斜角の亀裂のみが考慮される。従って、表-22 にあるように、GL-500m と GL-945m では 2 つの亀裂のみがモデル化される。2 次元数値モデルでは、全ての亀裂は垂直つまり、水平モデル平面に垂直と想定する。

GL-200m では、勾配の急な傾斜亀裂は存在しないため、ここでは GL-500m および GL-945m の 2 深度においてのみの解析を行う。

表-22 垂直な立坑の FRACOD 数値解析用の亀裂セット（全ての亀裂は垂直と仮定）

亀裂セット		ゾーン 1 (GL-200m)	ゾーン 2 (GL-500m)	ゾーン 3 (GL-945m)
I	走向		N41E	N84E
	亀裂間隔 (m)		0.20	0.23
	有効長 (m)		0.35	0.38
II	走向		N87W	N85E
	亀裂間隔 (m)		0.38	0.62
	有効長 (m)		0.44	0.54

FRACOD は、限られた数の亀裂しかシミュレーションできないため、立坑近傍の亀裂のみを考慮に入れ、亀裂の間隔も 2～3 倍に増やした。

解析のケースは亀裂セット I の場合と亀裂セット II の場合および不均一に亀裂を発生させた場合の 3 つのケースで実施した。

(1) GL-500m

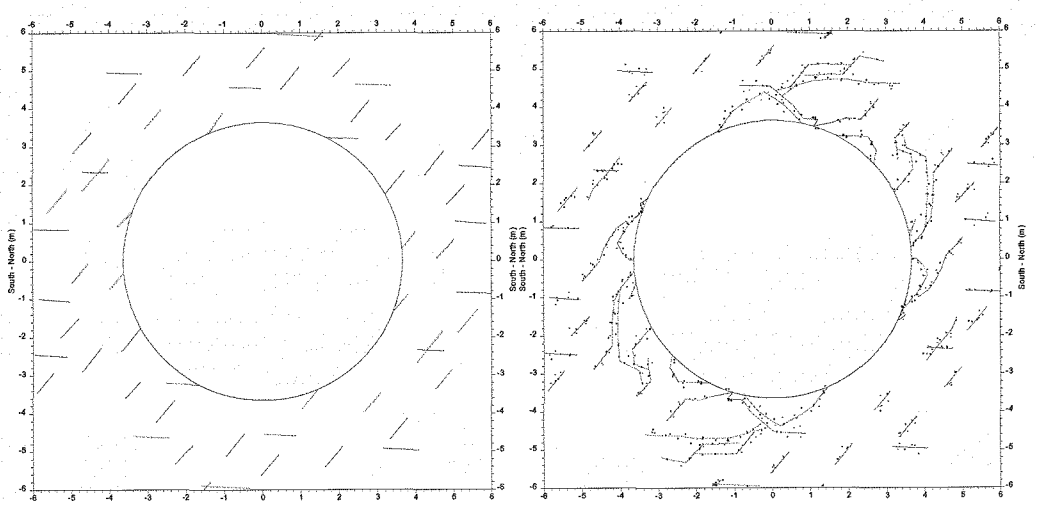
初期の亀裂パターンと最終の亀裂パターンを図-23 に示す。また、それぞれのパターンにおける安全率と変位図を図-24 に示す。なお、亀裂発生前の主応力分布図については、明瞭な亀裂がない場合と同一となるため、ここでの掲載は割愛する。

ケース 1 では、亀裂セットⅠが立坑近傍の亀裂伝播を支配している。亀裂セットⅡは、最終的な破壊にはほとんど関連がない。最終的な亀裂パターンは、N45E と S45W の方角で、立坑壁面に深い「ブレークアウト」を形成する傾向を示している。図-21 にあるように、これらの方角では応力集中が最も大きい。亀裂は立坑壁面から約 2.5m の深さまで広がっている。

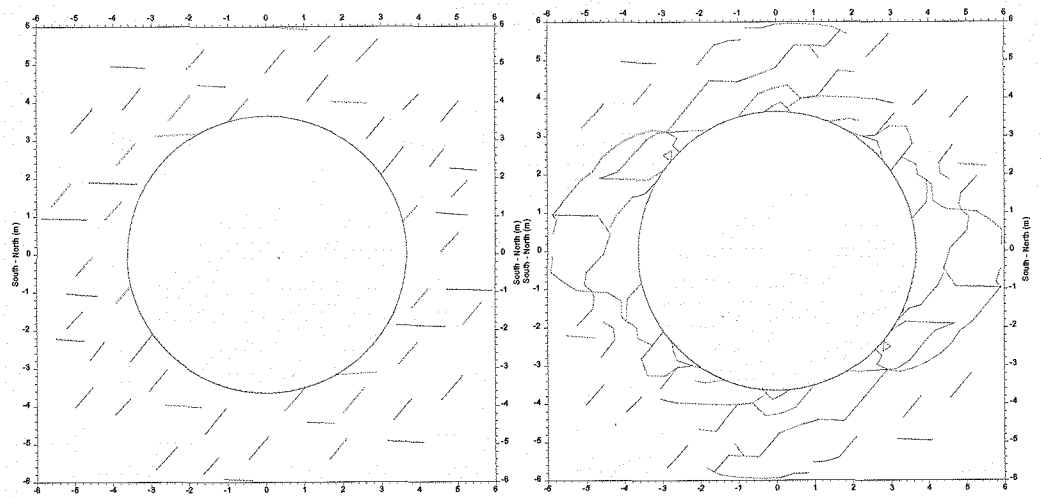
ケース 2 では、亀裂伝播と連続の両方の亀裂が関係している。亀裂伝播は、立坑近傍の全ての方角に、広範囲に広がっている。亀裂の支配的な方角は、N45E/S45W および E/W で、二つの亀裂セットの方向と等しくなる。亀裂領域は立坑壁面に最大 2.5m の深さまで拡張している。

ケース 3 では、最終的な亀裂パターンは N45W と S45E での破壊を除いて、ケース 1 と似ている。亀裂セットⅠとⅡの両方が最終的な亀裂パターンに寄与している。亀裂領域は、ケース 1 および 2 の場合よりも、規模がいくらか小さい。

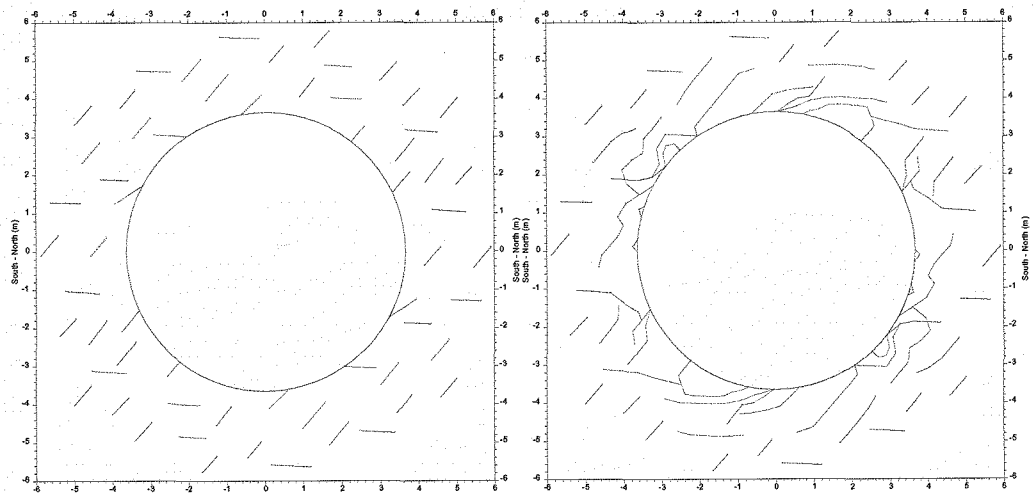
3 つのケースから、亀裂の伝播と一体化は、立坑近傍の周辺で生じることがわかった。亀裂領域は、立坑壁面に 3m の深さまで広がる可能性がある。最初の亀裂分布は、主応力方向とともに亀裂パターンに大きな影響をもつ。しかし、亀裂領域の範囲は、概ね一致した。これらの結果より、GL-500m での立坑は、支保なしでは安定性に欠け、亀裂領域が立坑において崩壊し、立坑に多大な損傷を与える可能性があることが予測される。また、最大変位は 2.9mm から 6.4mm で、亀裂のパターンに依存する。



(a)　初期亀裂分布、ケース１　　(b)　最終亀裂分布、ケース１

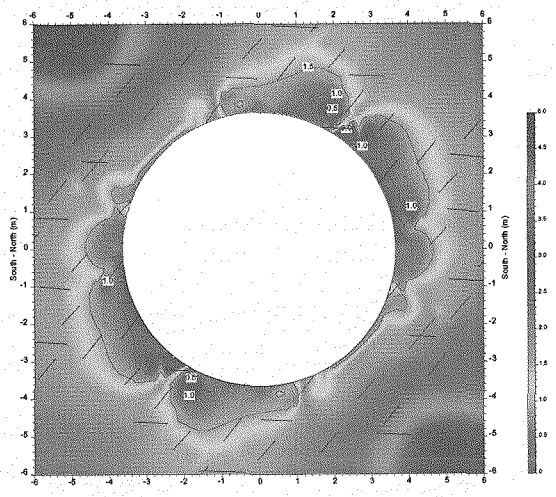


(c)　初期亀裂分布、ケース２　　(d)　最終亀裂分布、ケース２

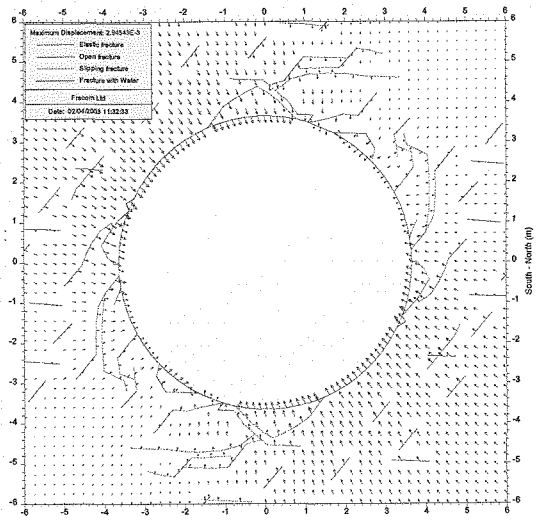


(e)　初期亀裂分布、ケース３　　(f)　最終亀裂分布、ケース３

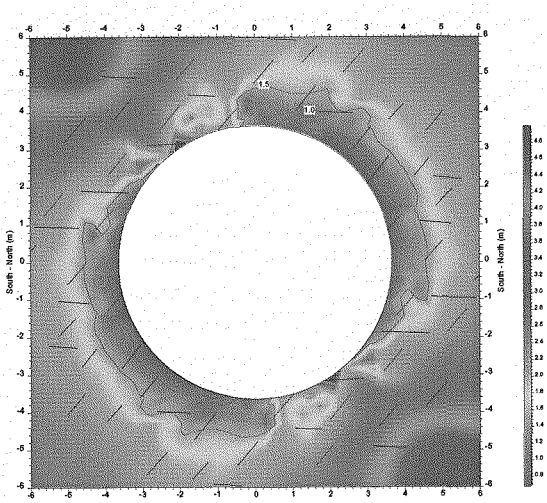
図-23　初期の亀裂パターンと最終亀裂パターン（GL-500m）



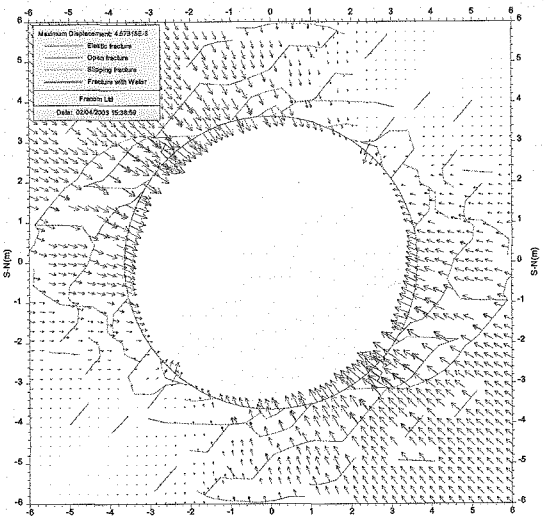
(a)　安全率分布（ケース１）



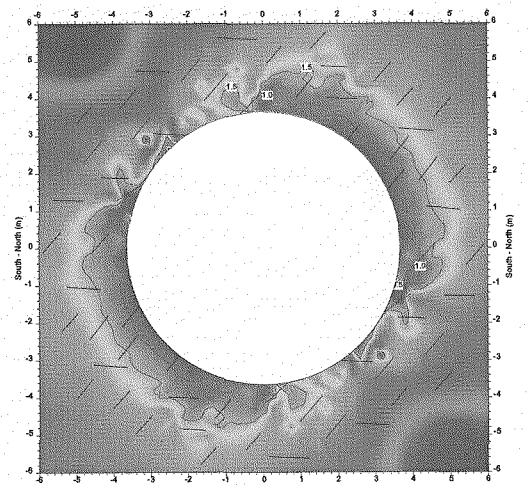
(b)　変位図（ケース１、最大2.9 mm）



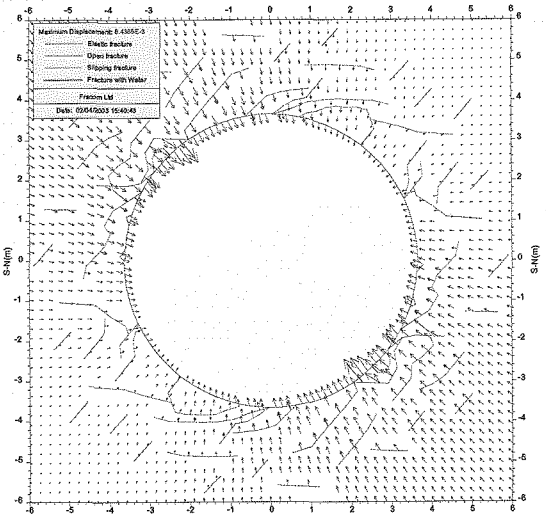
(c)　安全率分布（ケース２）



(d)　変位図（ケース２、最大4.7mm）



(e)　安全率分布（ケース３）



(f)　変位図（ケース３、最大6.4mm）

図-24　亀裂発生前の安全率分布と亀裂発生後の変位図（GL-500m）

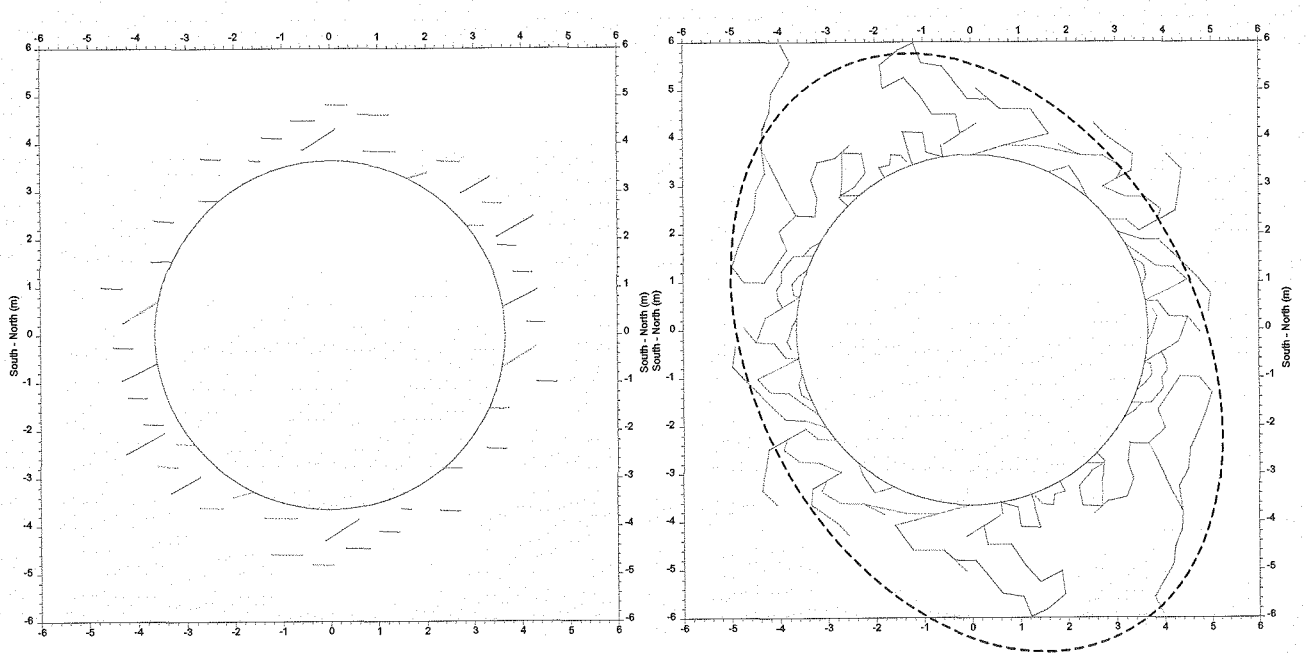
(2) GL-945m

GL-500m と同様に亀裂セットⅠと亀裂セットⅡの２ケースの解析を行った。破壊（亀裂）の開始および最終パターンを、図-25 に示し、安全率と変位図を図-26 に示す。なお、亀裂発生前の主応力分布図は明瞭な亀裂がない場合の GL-945m での結果と同一となるため、掲載を割愛する。

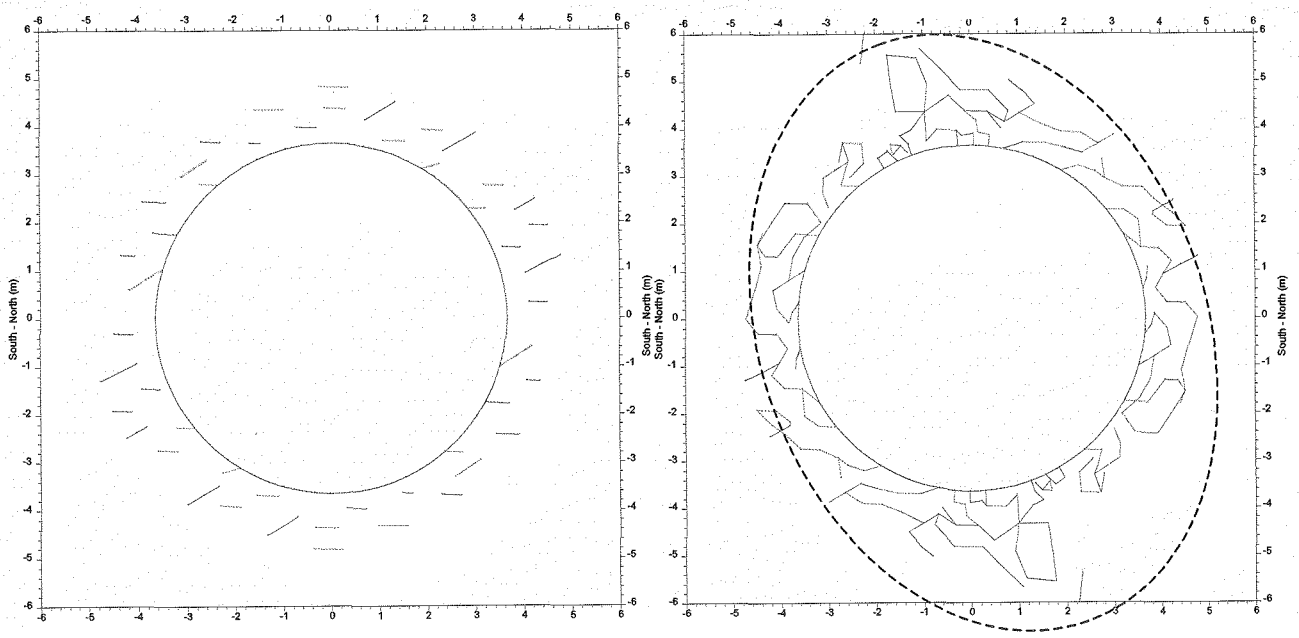
2 つのケースの結果は、おおむね一致している。引張亀裂は、最大主応力方向と平行する、NNW および SSE（赤線はむきだしの亀裂を表す）の方角で発生する。それに対し、せん断亀裂は最大主応力方向に垂直の方角、ENE および WSW（緑線は滑り亀裂を表す）で発生する。引張亀裂領域の範囲は、立坑壁面から約 3～4m の深さで、せん断領域は立坑壁面から約 1m の深さである。

立坑近傍の既存の亀裂は、伝播し、結果として変則的な亀裂パターンを生じる。しかし、引張およびせん断領域は、明確に区別することができる。

以上の亀裂パターンを変えたケース１とケース２に共通する予測の結果、GL-945m の立坑は不安定であり、引張破壊とせん断剥離の両方が、立坑壁面の異なる部分で発生することが予測される。立坑の健全性を維持するため、立坑には強い支保が必要であると考えられる。支保なしとした場合、図-25 にあるように、NNW/SSE に長い楕円形の崩壊領域が形成されることが予測できる。また、立坑壁面の最大変位は 65mm であると予測できる。

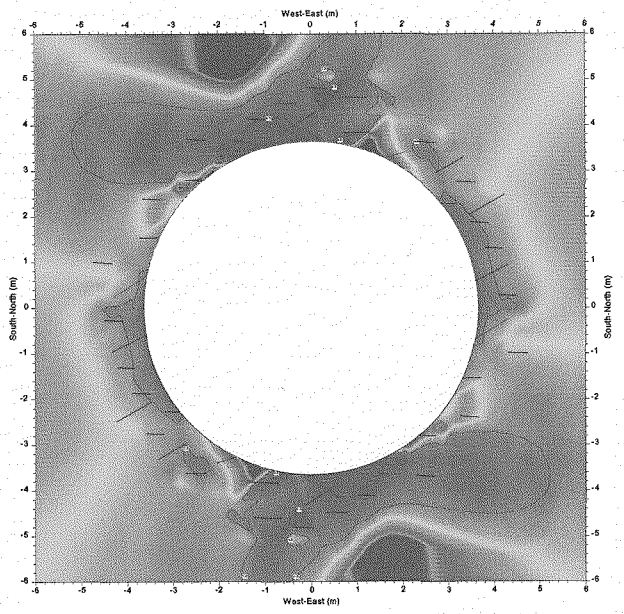


(a)　初期の亀裂パターン（ケース１）　　(b)　最終亀裂パターン（ケース１）

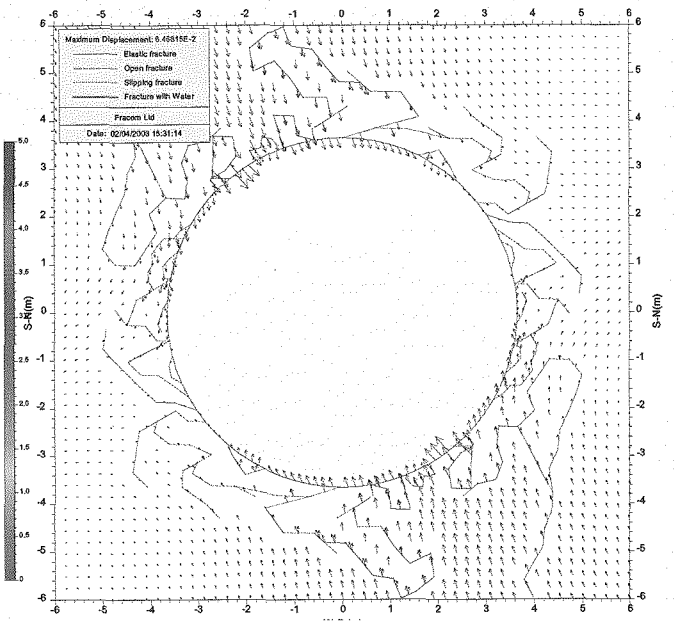


(c)　初期の亀裂パターン（ケース２）　　(d)　最終亀裂パターン（ケース２）

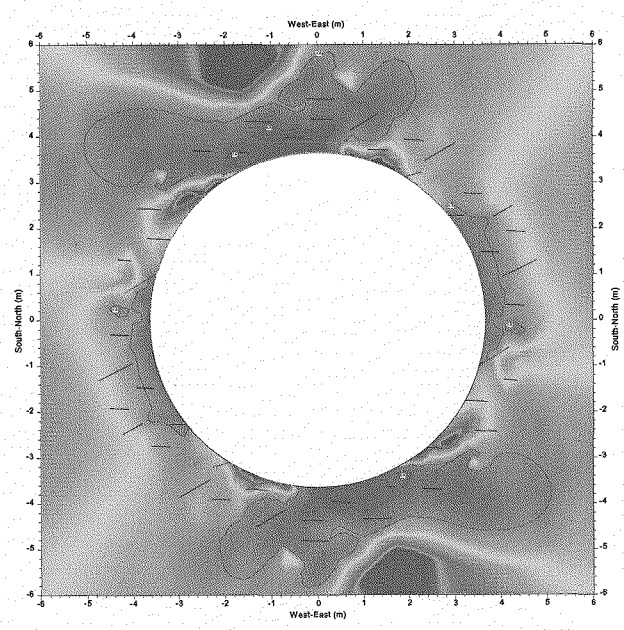
図-25　初期の亀裂パターンと最終亀裂パターン（GL-945m）



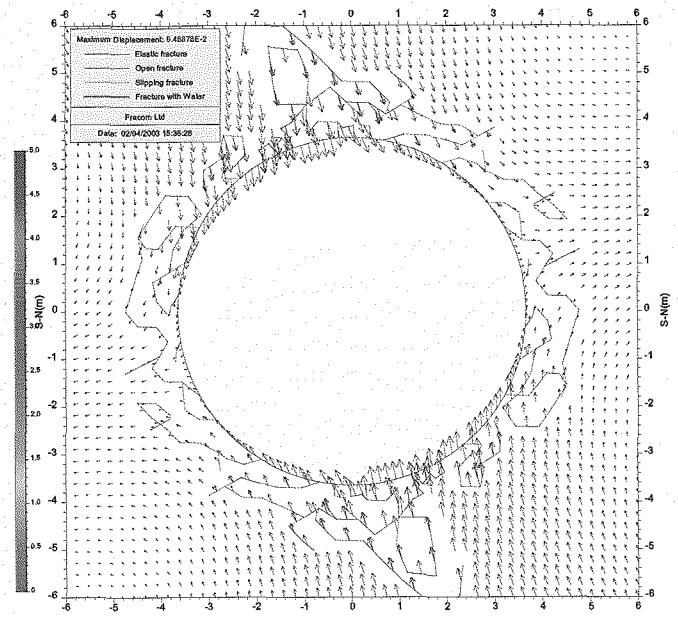
(a)　安全率分布（ケース１）



(b)　亀裂発生後の変位図（ケース１、最大 65mm）



(c)　安全率分布（ケース２）



(d)　亀裂発生後の変位図（ケース２、最大 65mm）

図-26　亀裂発生前の安全率分布と亀裂発生後の変位図（GL-945m）

(3) まとめ

表-23 に、GL-500m および GL-945m での明瞭な亀裂をもつ立坑の予測解析結果をまとめた。主な結論は以下の通りである。

- GL-500m では、亀裂の強い影響により、立坑は NE/SW および E/W の方角に、広範囲にわたる、大がかりな壁の剥落を受ける可能性がある。
- 月吉断層の GL-945m では、支保がないと、引張とせん断破壊に起因する楕円形の崩壊の発生が予測される。
- 明瞭な亀裂がない場合の予測結果と比較すると、亀裂により、立坑近傍で変則的だが深く広範囲にわたる、剥離/亀裂領域が生じることがわかった。
- 安全率が 1.0 以下の領域は亀裂が集中する領域と一致し、岩盤ブロックを形成する。
- 安全率が 1.0 以上、1.5 以下の領域では岩盤ブロックが形成されることがなく、亀裂の伸展が限られる。
- GL-500m では、最大変位が 7mm 以下であるのに対して、GL-945m では最大変位が 65mm と予測された。この差は、亀裂がない場合の予測結果と同様に健全な岩盤のヤング率 (49 GPa) に対して、GL-945m では低いヤング率 (3.5 GPa) を解析に用いていることによるものと思われる。

表-23 異なる深度での立坑の安定性に関する結果のまとめ

深度	最大応力	最大変位	亀裂帯	亀裂帯の程度	備考
GL-500m	56～67MPa	2.9～6.4mm	崩落: N45E/S45W. 崩落: E/W	深さ 1～2.5m、幅 7.0m 深さ 0～2m、幅 7.0m	崩落による不安定
GL-945m	55～70 MPa	43～65mm	引張: NNW/SSE. 崩落: ENE/WSW.	深さ 3-4m、幅 6m 深さ<1m、幅 6m	引張損傷と崩落による不安定

5.2 横坑の予測解析

5.2.1 明瞭な亀裂がない場合の予測解析

横坑は、断面寸法 3m×3m の横坑である。横坑の頂部は、半円形のアーチ形になっている。図-27 に示すとおり、横坑では N45W、N、N45E、E の 4 方向について解析を行った。N45W の方位は、この坑道を展開する領域の岩盤力学モデルにおける水平主応力方向に近く、よって本研究に於ける主要な方向となる。

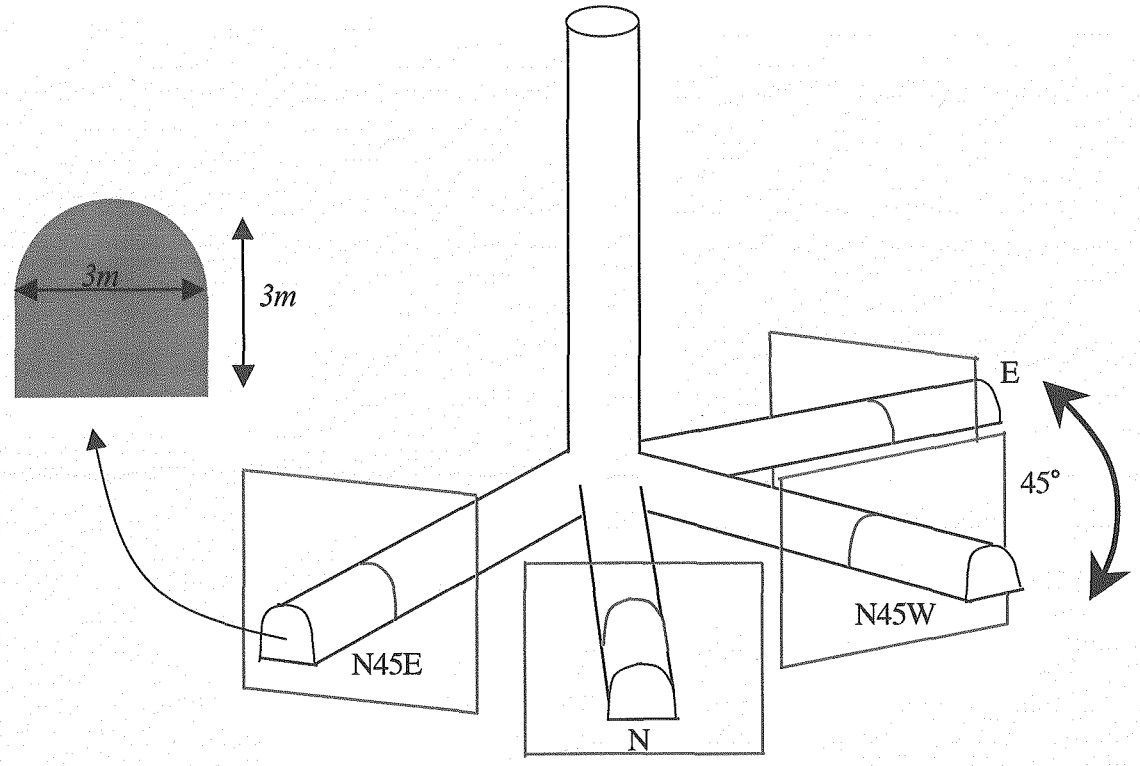


図-27 坑道の幾何学形状と方位

GL-500m と GL-945m の 2 つの深度について横坑の掘削時の挙動の検討を行った。なお、GL-945m では、月吉断層の外の健全な岩盤の坑道のみをシミュレーションしている。GL-945m（ゾーン 3）の岩盤の変形特性は、下記の通りである。

ヤング率　　E=47.4GPa
ポアソン比　　〃=0.34

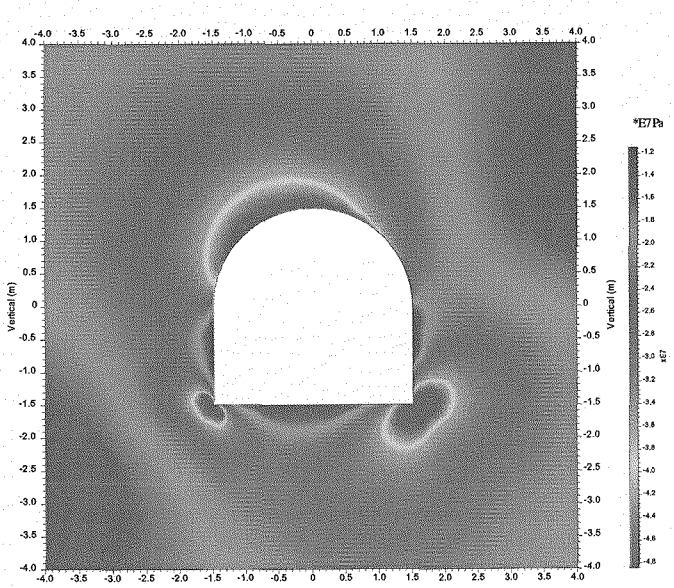
数値解析に用いた健全な岩盤のパラメータは、第 3 章で述べた通りである。

(1) GL-500m

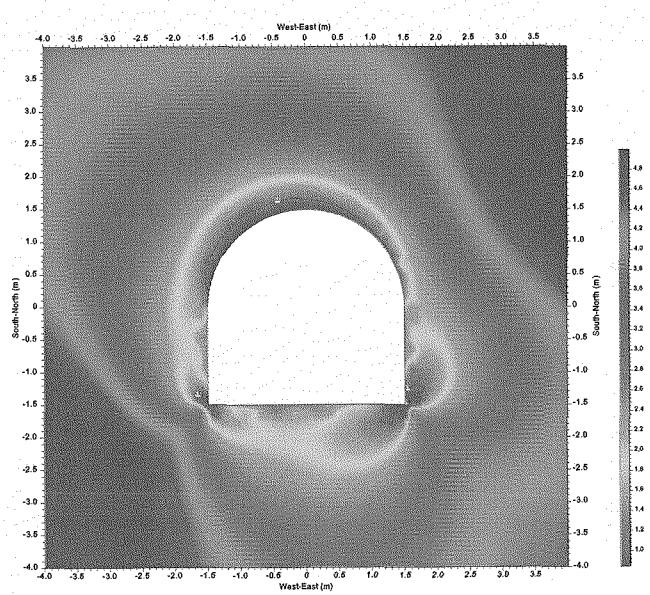
GL-500m での異なる方位の横坑の解析結果を、図-28～図-31 に示した。主な成果を下記にまとめた。

- N45W および N 方向に展開した横坑は、安定していると予測される。横坑のアーチおよび底盤（図-28 および図-29 参照）では、限られた場所でしか亀裂は発生しない。大規模な岩盤崩落は予測されない。N 方向に展開した横坑のアーチでは、表面破壊が発生する可能性がある。
- N45E と E 方向に展開した横坑は、不安定であると考えられる。大規模な亀裂は、アーチの右上部と横坑の底盤に発生すると予測される。亀裂はアーチの剥離を引き起こし、幅 2m 厚さ 0.2～0.3m の岩盤の落下を引き起こす可能性がある（図-30 および図-31 参照）。亀裂領域は、アーチ状の天端と底盤に 0.7m の深さまで広がり、横坑の支保がないと大規模な岩盤崩落につながりかねない。また、底盤の盤ぶくれも考えられる。
- N45W はもっとも安定性が高い横坑の方位であり、一方、N45E はもっとも安定性が低くなる。これは、N45W が、GL-500m での水平主応力（N41W）の方位に近いことから、概ね予測と一致する。主応力方向に沿った横坑は、横坑壁面でもっとも接線方向の応力が小さいので、もっとも、安定性の高いケースとなる。反対に、主応力に垂直な横坑は、接線応力がもっとも高いので、もっとも不安定なケースとなる。

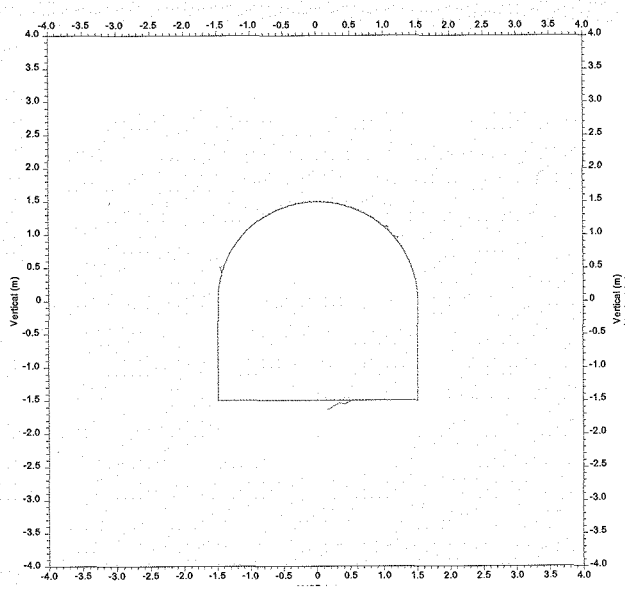
図-32 は、横坑の方位が N45E の時の、破壊の発生と横坑近傍の AE イベントを示している。工程中の AE イベントの位置については、点線でプロットした。AE イベントの大きさは、点の大きさに比例する。



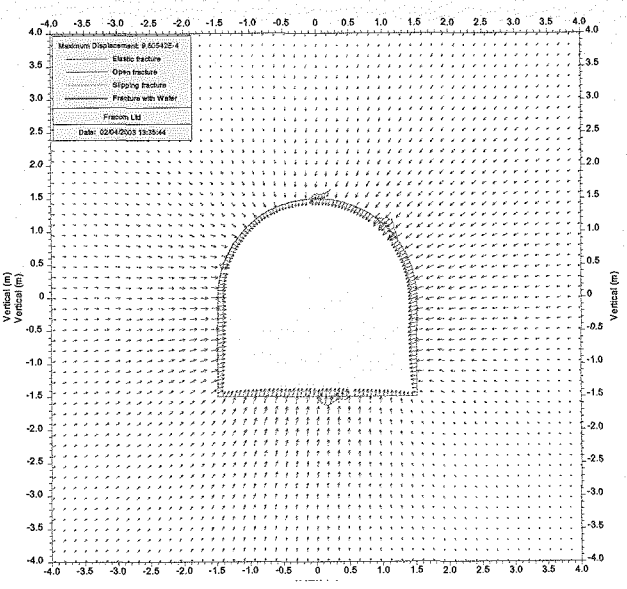
(a)　亀裂発生前の主応力分布



(b)　安全率分布

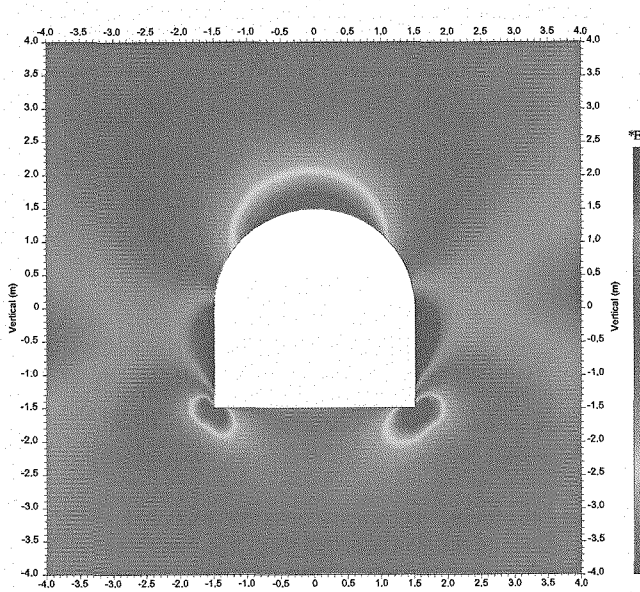


(c)　壁面の亀裂パターンの最終分布

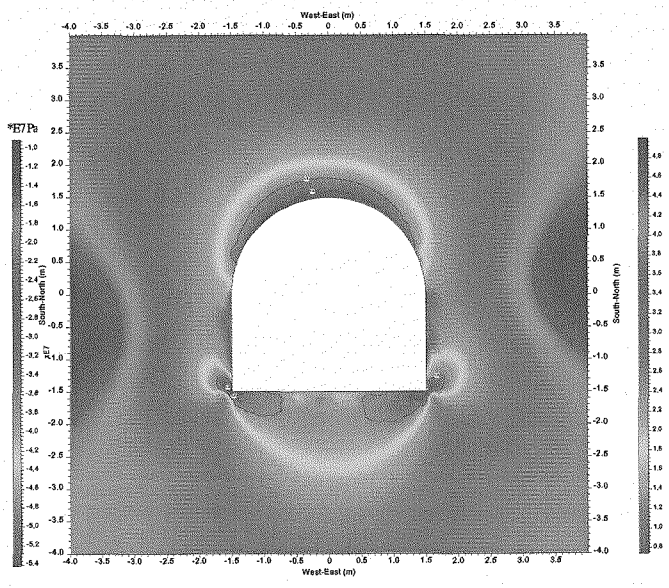


(d)　変位分布（最大変位 0.9mm）

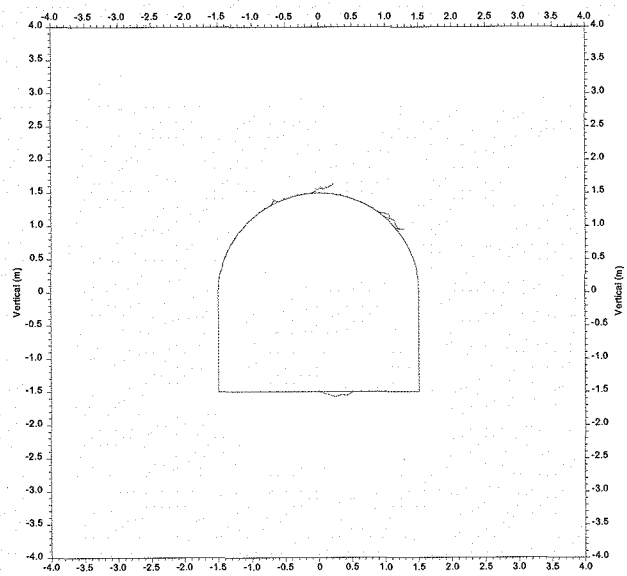
図-28　予測結果（GL-500m、方位=N45W）



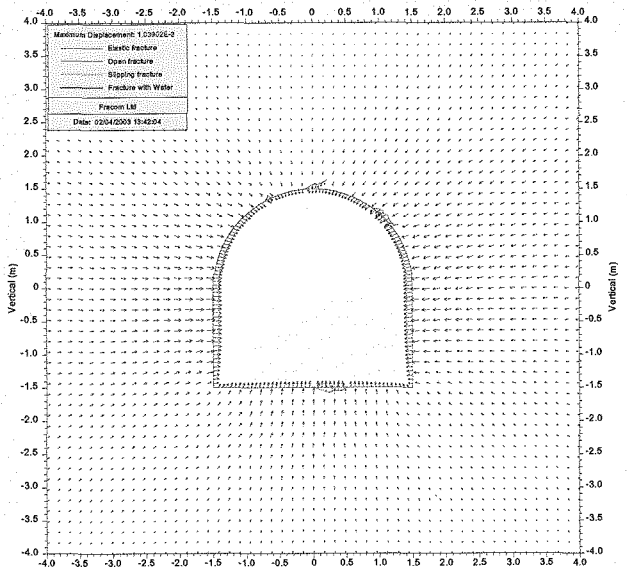
(a)　亀裂発生前の主応力分布



(b)　安全率分布

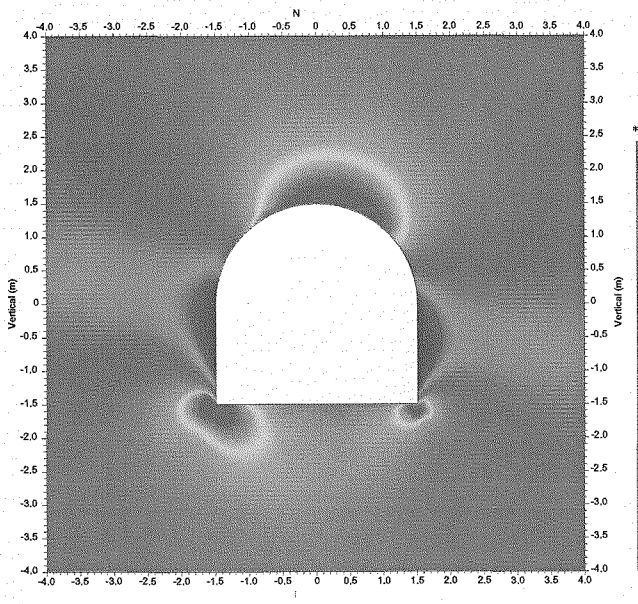


(c)　壁面の亀裂パターンの最終分布

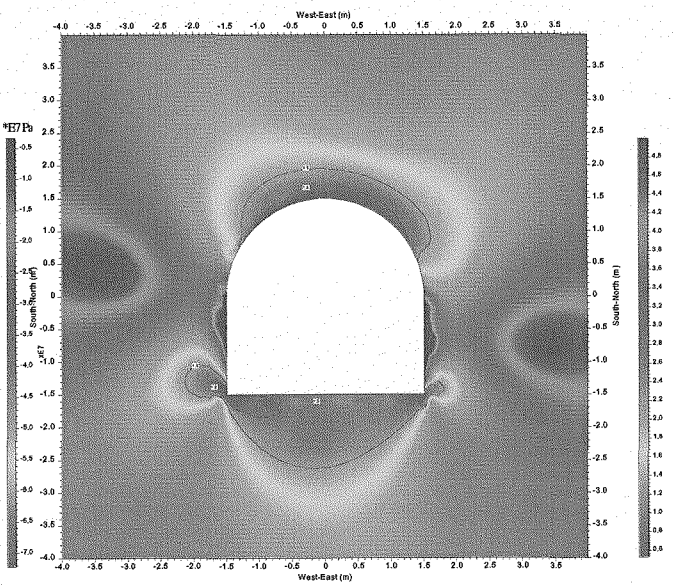


(d)　変位分布（最大変位 1.0 mm）

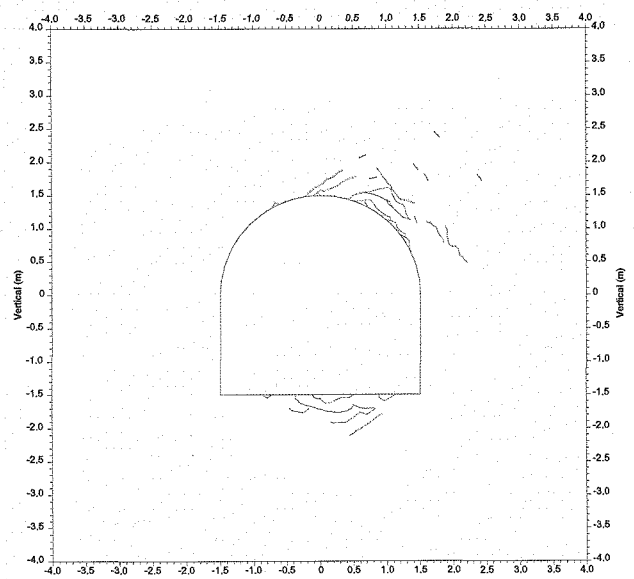
図-29　予測結果（GL-500m、横坑方位=N）



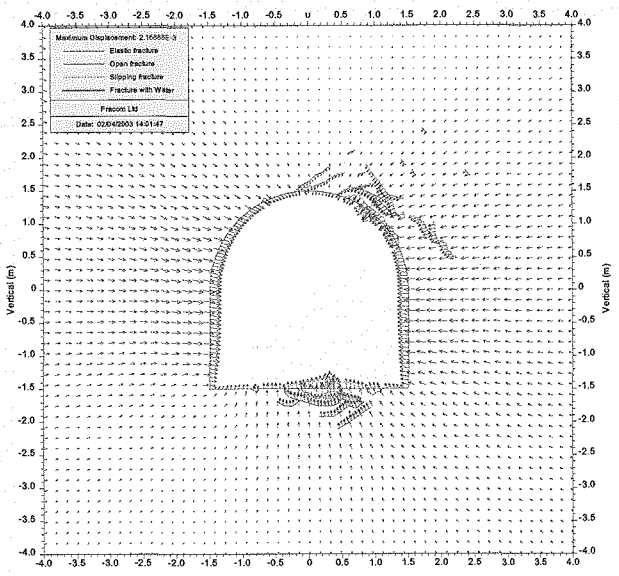
(a)　亀裂発生前の主応力分布



(b)　安全率分布

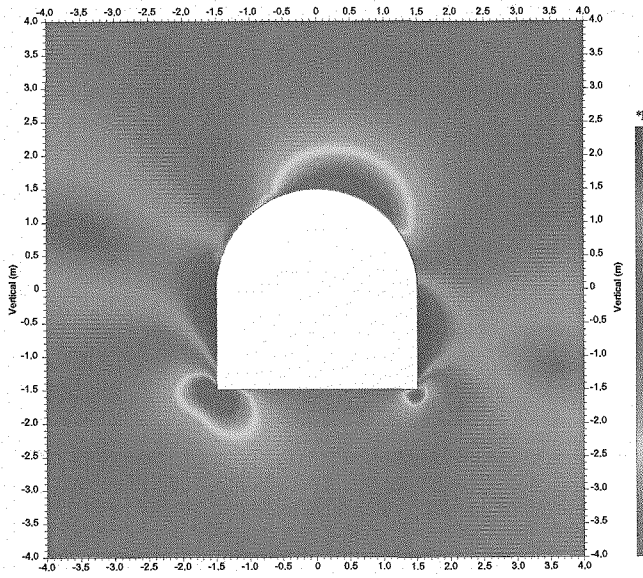


(c)　壁面の亀裂パターンの最終分布

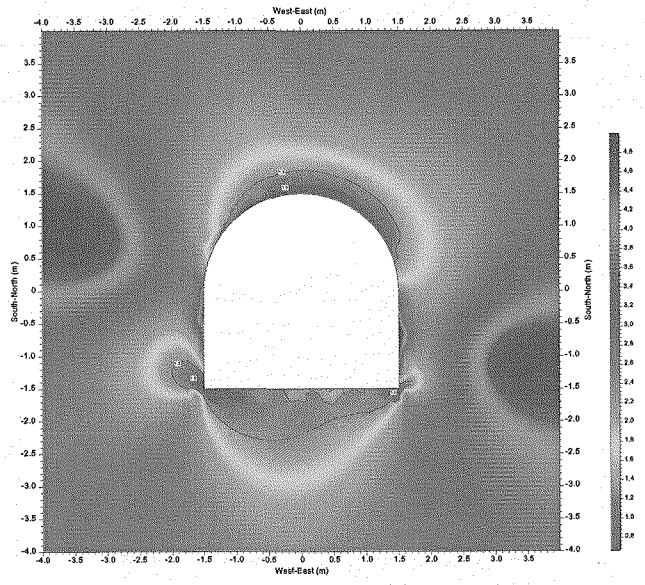


(d)　変位分布（最大変位 2.2 mm）

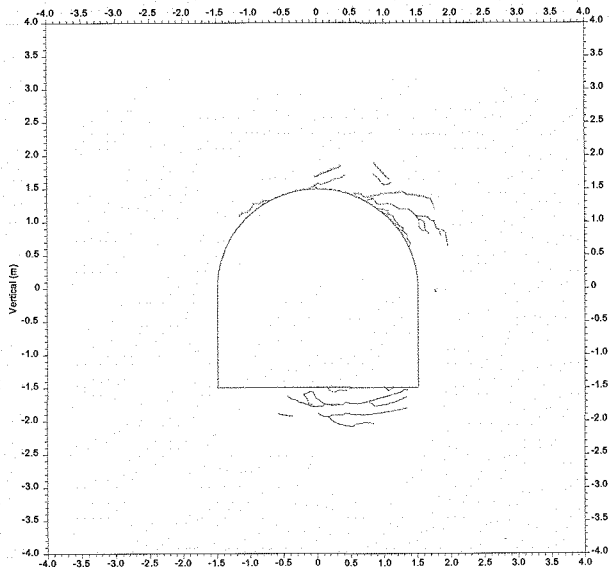
図-30　予測結果（GL-500m、方位=N45E）



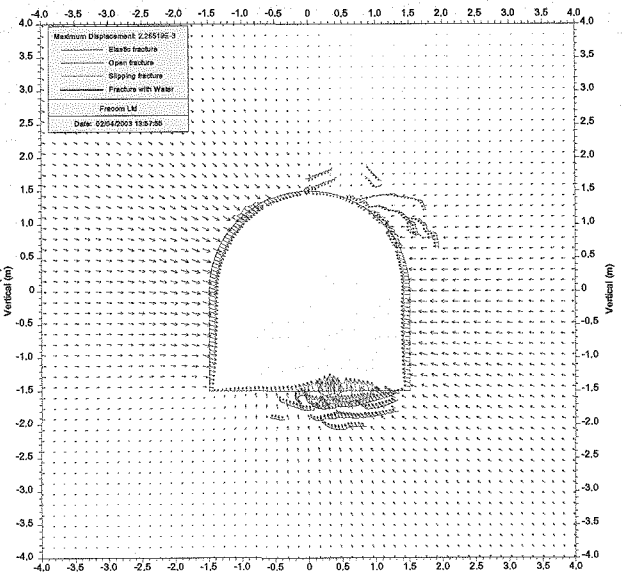
(a)　亀裂発生前の主応力分布



(b)　安全率分布



(c)　壁面の亀裂パターンの最終分布



(d)　変位分布（最大変位 2.3 mm）

図-31　予測結果（GL-500m、方位=E）

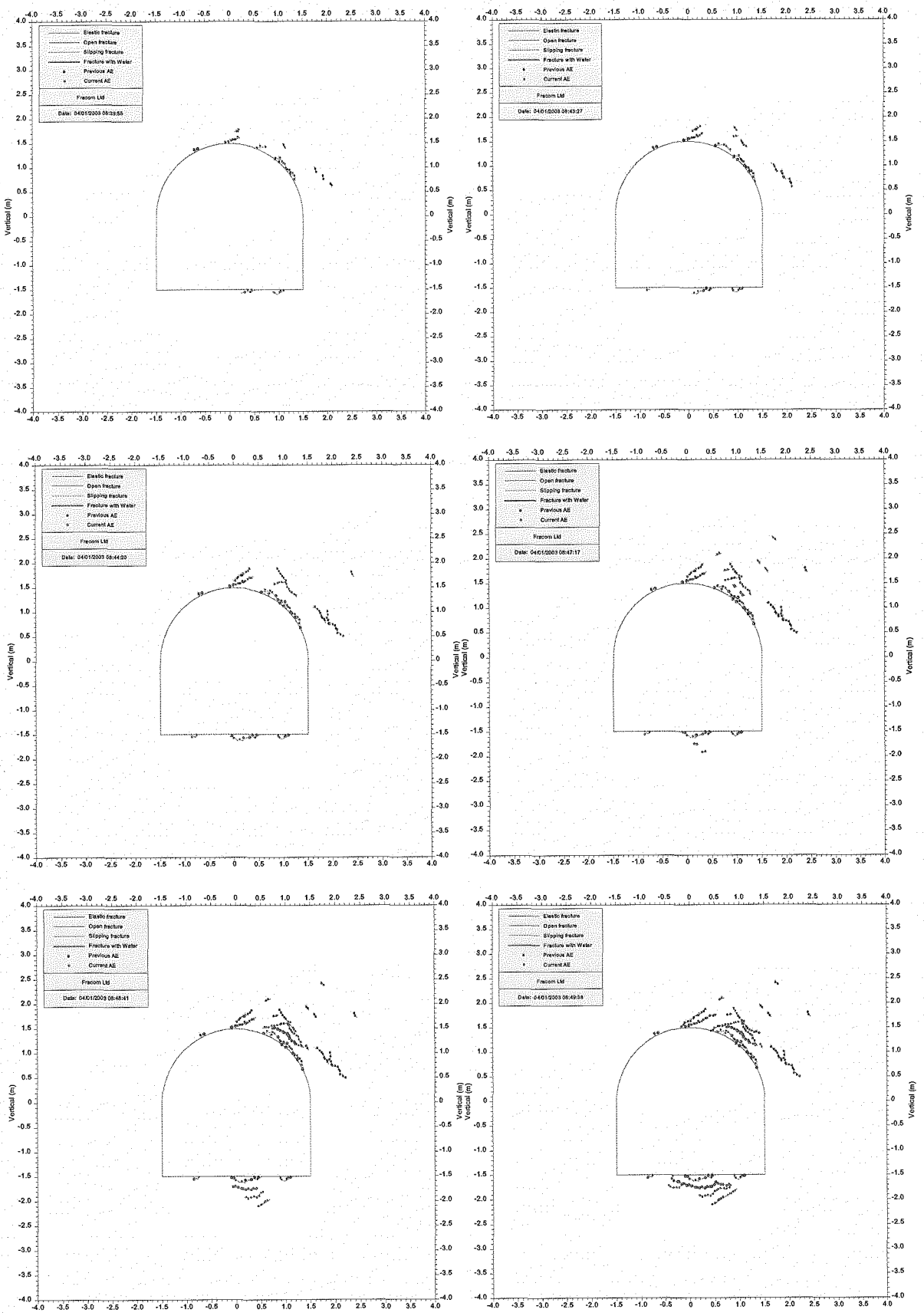
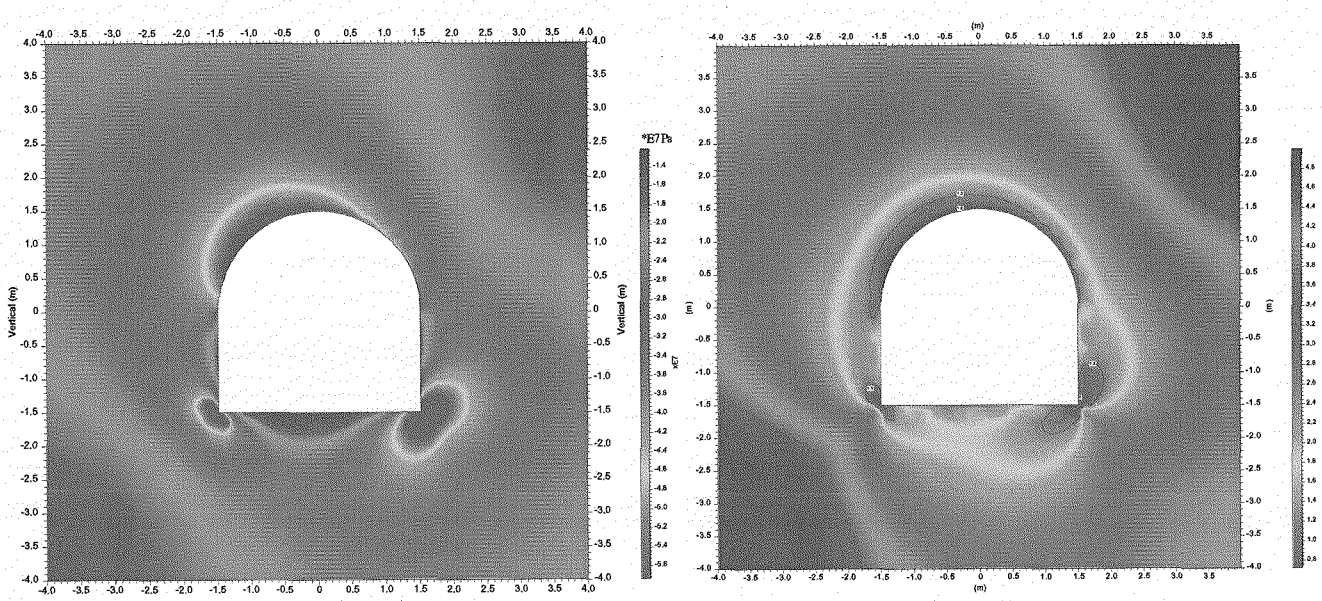


図-32　横坑のアーチおよび壁面の AE イベントの発生予測（方位=N45E）

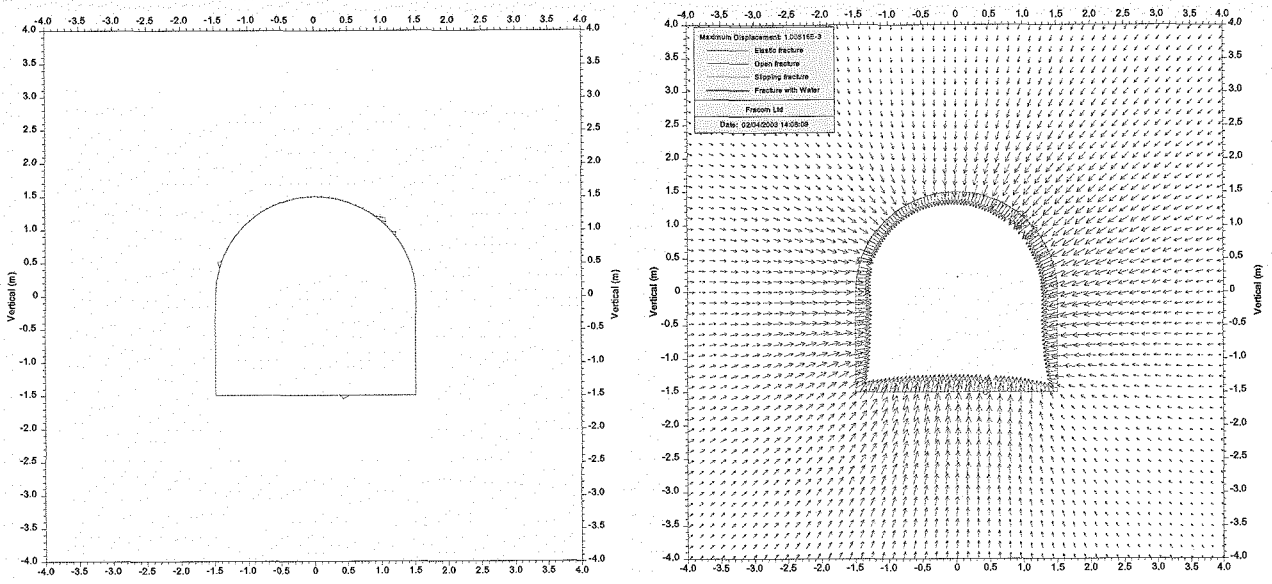
(2) GL-945m

GL-945m での異なる方位での横坑の解析結果を、図-33～図-36 に示した。主な成果は、下記の通りである。

- N45W、N、および N45E 方向に展開した横坑は、概ね安定していると予測される。図-33～図-35 に示すとおり、横坑アーチおよび底盤では、限られた亀裂しか発生せず、大きな岩盤崩落はないと予測される。N および N45E 方向の横坑アーチでは、小さな岩盤のブロックの落下が単発的に発生する可能性もある。
- 方位が E－W の横坑は、不安定であると予測される。図-36 に示すとおり、アーチで亀裂が発達すると、剥離およびブロックの落下が起こる。結果として、岩盤ブロック（幅 0.5m～0.7m、厚さ 0.2～0.4m）が、横坑アーチから落下する可能性がある。底盤に亀裂が発達すると、底盤の盤ぶくれを引き起こす可能性もある。

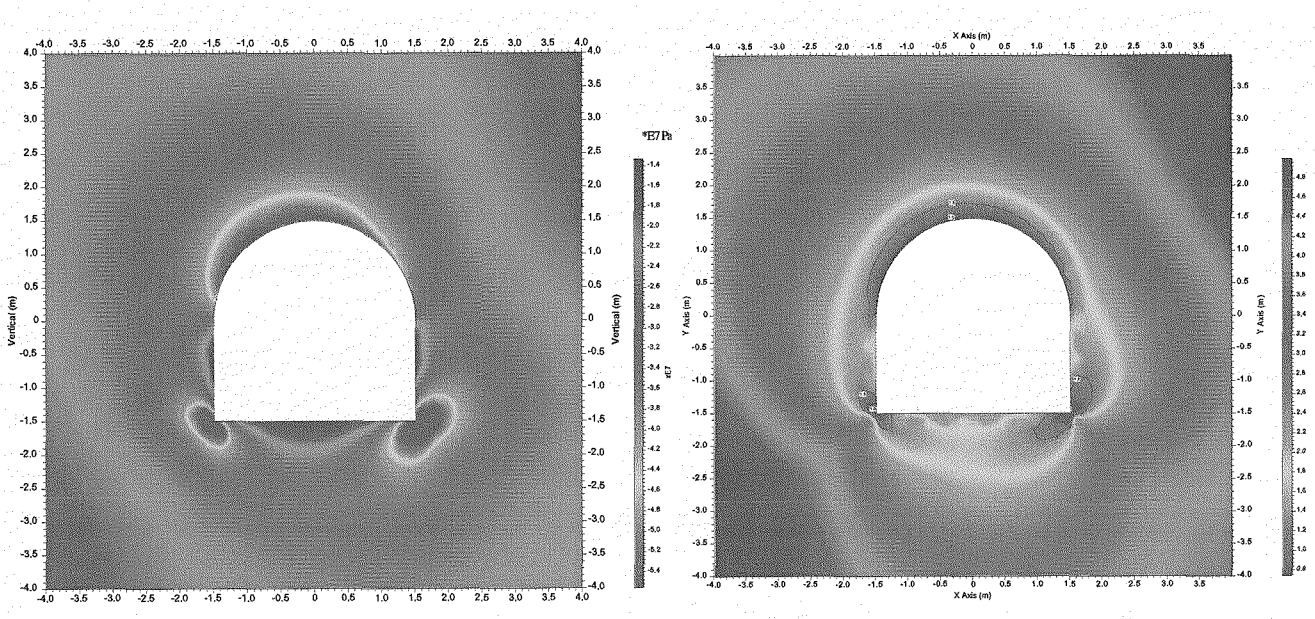


(a)　亀裂発生前の主応力分布　　(b)　安全率分布

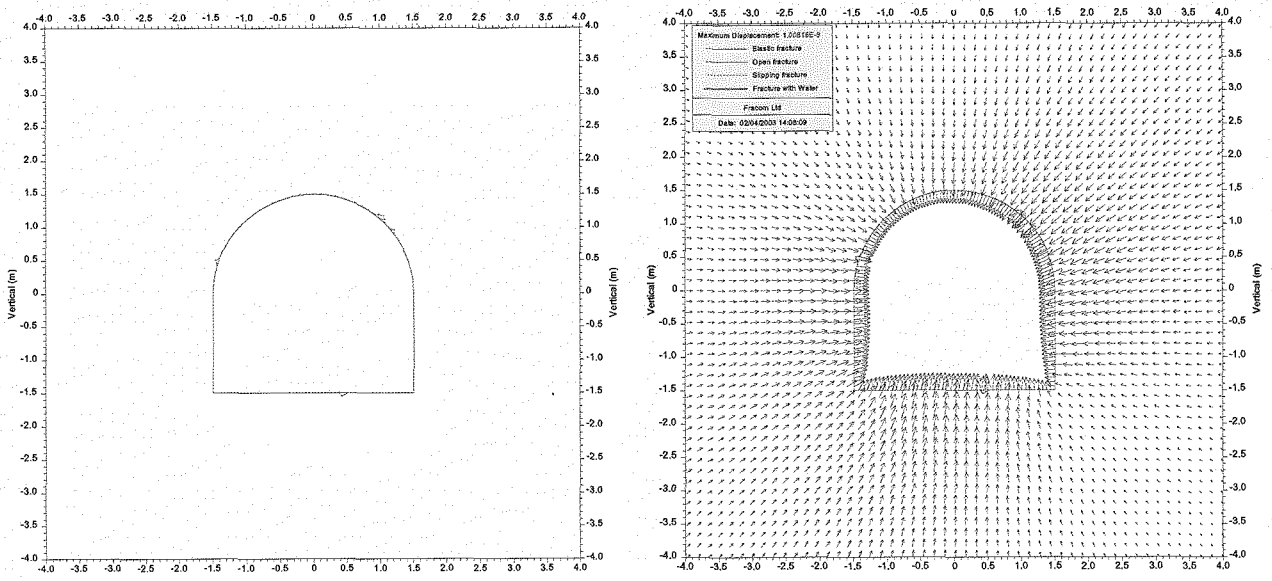


(c)　壁面の亀裂パターンの最終分布　　(d)　変位分布（最大変位 1.0 mm）

図-33　予測結果（GL-945m、方位=N45W）

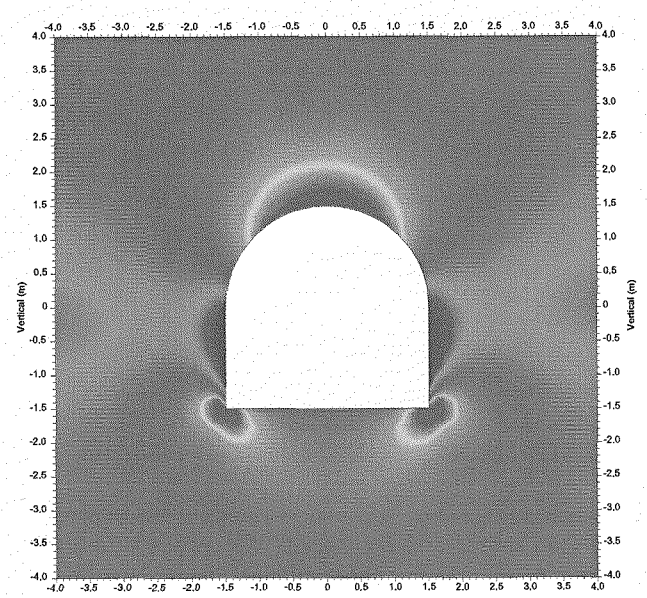


(a)　亀裂発生前の主応力分布　　(b)　安全率分布

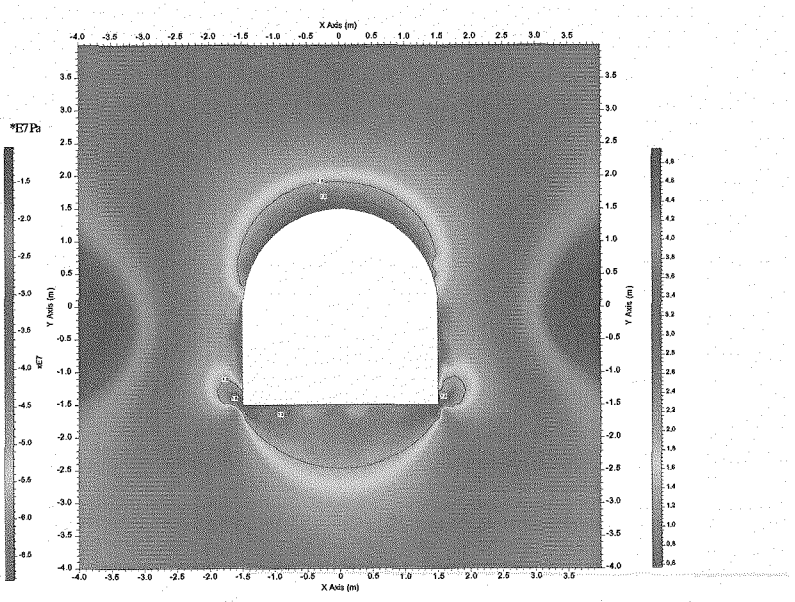


(c)　壁面の亀裂パターンの最終分布　　(d)　変位分布（最大変位 1.0 mm）

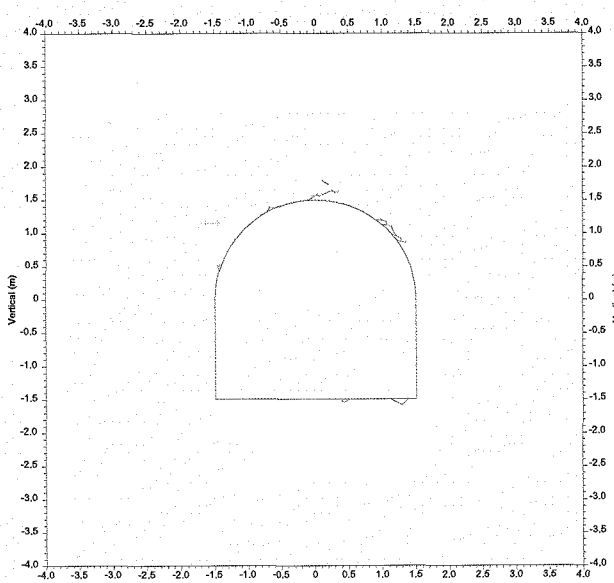
図-34　予測結果（GL-945m、方位=N）



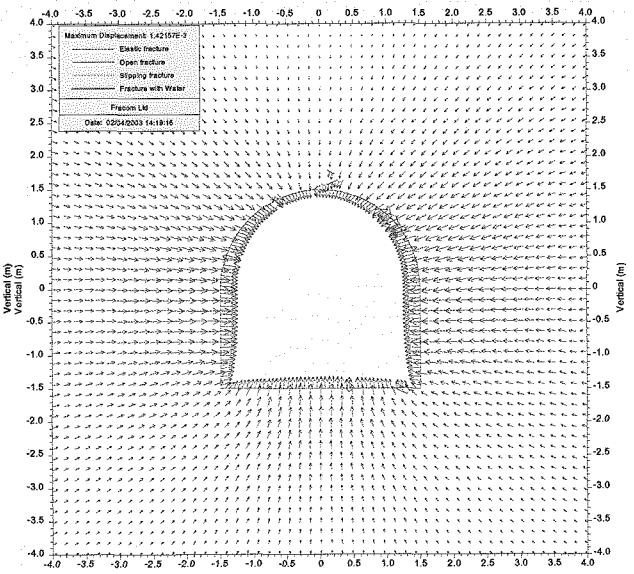
(a)　亀裂発生前の主応力分布



(b)　安全率分布

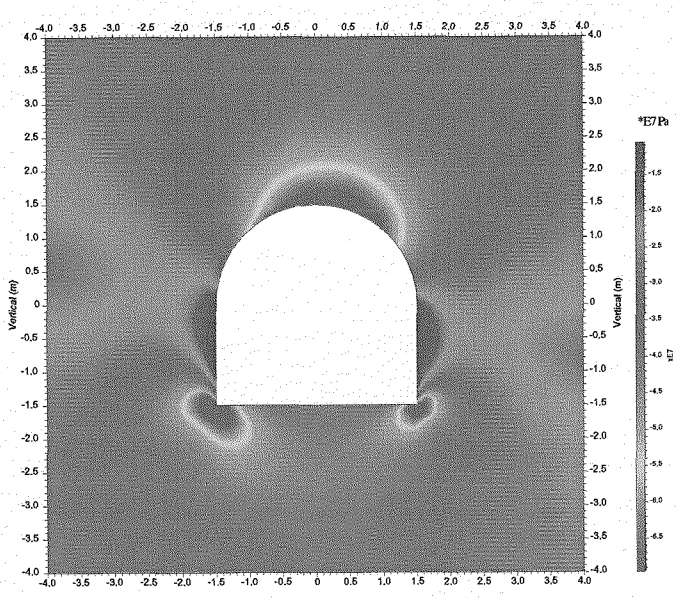


(c)　壁面の亀裂パターンの最終分布

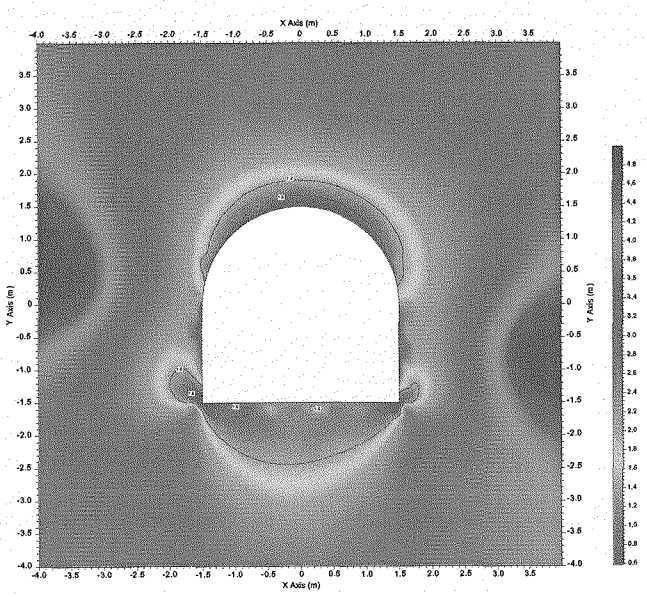


(d)　変位分布（最大変位 1.4 mm）

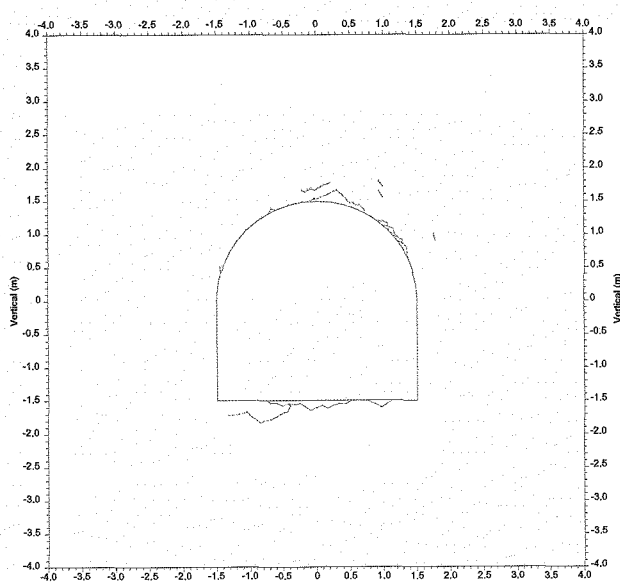
図-35　予測結果（GL-945m、方位=N45E）



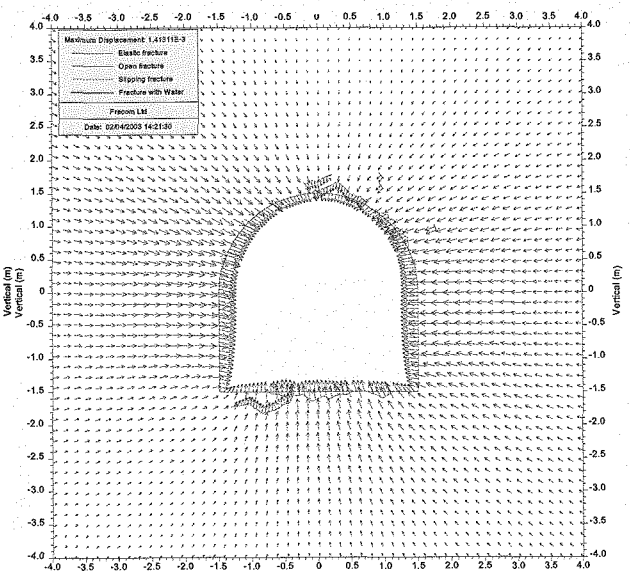
(a)　亀裂発生前の主応力分布



(b)　安全率分布



(c)　壁面の亀裂パターンの最終分布



(d)　変位分布（最大変位 1.4 mm）

図-36　予測結果（GL-945m、方位=E）

(3) まとめ

表-24 に、2 つの深度での横坑の数値解析結果を比較し、それをまとめた。主な結論を以下に示す。

- GL-500m では、N45W および N 方向に展開した横坑は安定すると予測されるものの、N45E および N 方向の横坑は、アーチからの岩盤落下や、底盤の盤ぶくれを生じる可能性がある。
- GL-945m では、E－W 方向の横坑は、アーチからの岩盤の落下や、底盤の盤ぶくれを生じると予測される。N45W、N、N45E の横坑では、概ね安定であると予測される。
- 両方の深度で、坑道展開領域での水平面内主応力方向にほぼ沿った方向に展開した N45W の横坑が、もっとも安定性のあるケースである。この方向には、大規模な剥離や、岩盤の落下はまったく予測されない。
- 一般的に、GL-945m の横坑は、GL-500m よりも安定性が高いと思われる。GL-500m では、水平応力が高く、垂直応力が相対的に低いことが、応力に高い異方性を引き起こしている。応力の異方性は、GL-945m では垂直応力が増大し、水平応力は一定であるため、小さくなる。GL-945m で減少した応力異方性が、横坑の安定性に貢献している。
- 安全率が 1.0 以下の領域は亀裂が集中する領域と一致し、岩盤ブロックを形成する。

表-24 異なる深度での横坑の安定性に関する結果のまとめ

深度	方位	最大応力	最大変位	亀裂ゾーン	亀裂の伸展度合	備考
GL-500m	N45W	50MPa	1.3mm	アーチと底盤に独立した亀裂	微小	小さいブロックの崩落の可能性がある
	N	57MPa	1.0mm	アーチと底盤に独立した亀裂	深さ<0.2m、幅<0.5m	局部的崩落
	N45E	74MPa	2.2mm	天端右アーチ部 底盤	深さ 1m、幅 2m 深さ 0.7m、幅 1.5m	アーチ崩落(1m×0.2m)、底盤盤ぶくれ
	E	74MPa	2.3mm	天端右アーチ部 底盤	深さ 1m、幅 2m 深さ 0.7m、幅 1.5m	アーチ崩落(1m×0.2m)、底盤盤ぶくれ
GL-945m	N45W	58MPa	1.0mm	アーチと底盤に独立した亀裂	微小	小さいブロックの崩落の可能性がある
	N	57MPa	1.0mm	アーチと底盤に独立した亀裂	深さ<0.1m、幅<0.2m 微小	小さいブロックの崩落の可能性がある
	N45E	71MPa	1.4mm	天端右アーチ部 底盤	深さ 0.1～0.2m、幅<0.4m 微小	局部的崩落
	E	74MPa	1.4mm	アーチ部 底盤	深さ 0.1～0.3m、幅 1.5m 深さ<0.4m、幅 2m	岩盤の崩落や底盤の盤ぶくれの可能性

5.2.2 明瞭な亀裂がある場合の予測解析

GL-500m（ゾーン2）およびGL-945m（ゾーン3）における亀裂セットを表-15に示した。予測解析は横坑軸に垂直な2次元平面で実施したため、モデル平面に垂直、あるいは大きな角度の亀裂のみが検討対象となる。亀裂平面ーモデル平面の相対方位は複雑である。亀裂がモデル平面に対して中位の角度（例えば45°）の場合は、モデルに含むかどうかその都度判断する。

表-25には、様々な2次元横坑モデルでの亀裂を示した。モデル平面上の亀裂の投影傾斜角(α)は、図-37にあるように、モデル平面の亀裂の見かけの傾斜を元にしたものである。

表-25　様々な横坑方位での2次元横坑モデルでモデル化した亀裂セット

深度	方位	モデル化した亀裂セット	モデル平面における投影傾斜角（α）
GL-500m	N45W	N87W/51NE	-42.5°
	N	N87W/51NE	-3.7°
	N45E	N41E/75SE N87W/51NE	-75° 39.6°
	E	N87W/51NE	51°
GL-945m	N45W	N85E/44NW	-31.8°
	N	N85E/44NW	4.8°
	N45E	N85E/44NW	36.5°
	E	N84E/62SE N85E/44NW	-61.9° 43.9°

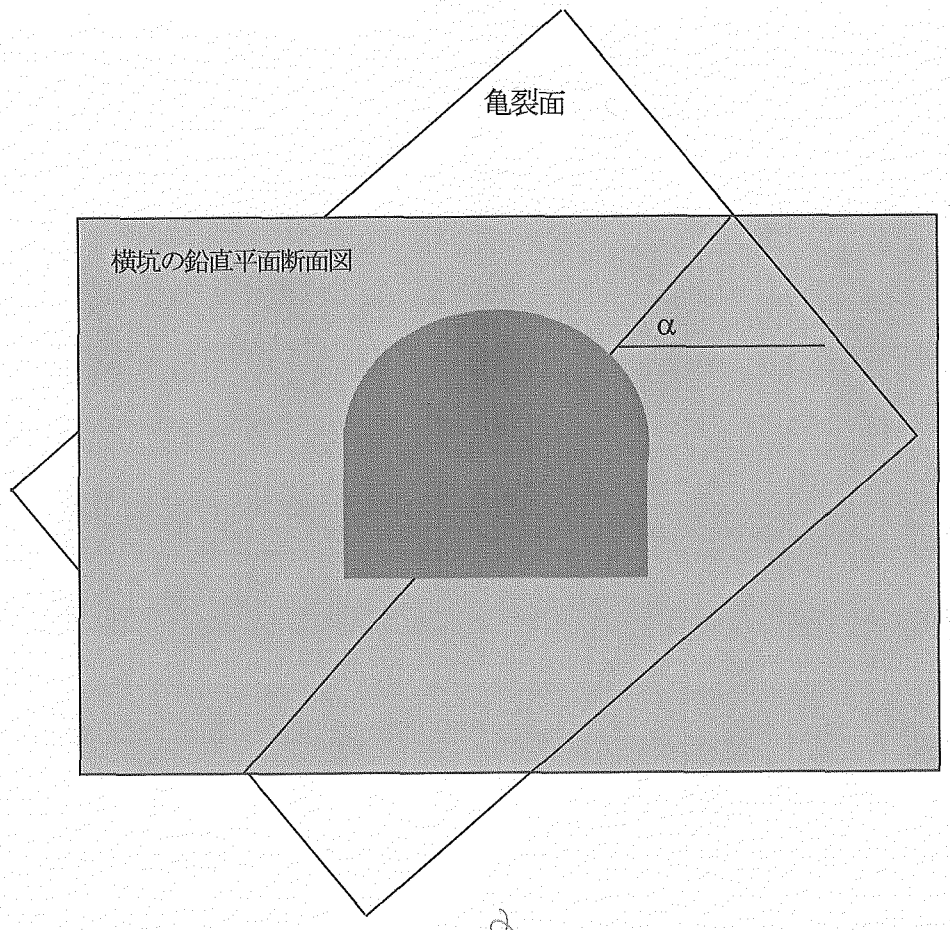
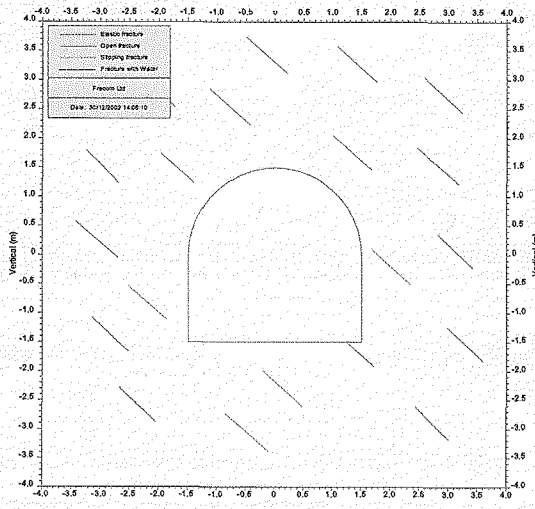


図-37　横坑の2次元平面上の見かけの亀裂方位（αはモデル平面の亀裂面の投影傾斜角を示す）

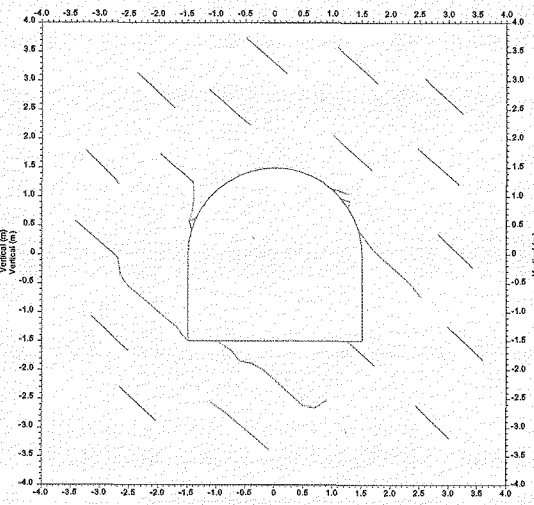
(1) GL-500m

GL-500m の様々な方位の横坑の解析結果を図-38～図-42 に示した。主要方位である N45W の横坑に対して、この方向の安定性が最も高いことから、代表例として、1 つの亀裂ネットワークについて 3 つの亀裂パターンを発生させて（亀裂セットⅠと亀裂セットⅡと不均一に発生させた亀裂の 3 つ）、解析を行った。また、他の 3 つの横坑方位用に対しては、各々ひとつの亀裂ケースについてシミュレーションしている。主な成果を以下にまとめた。

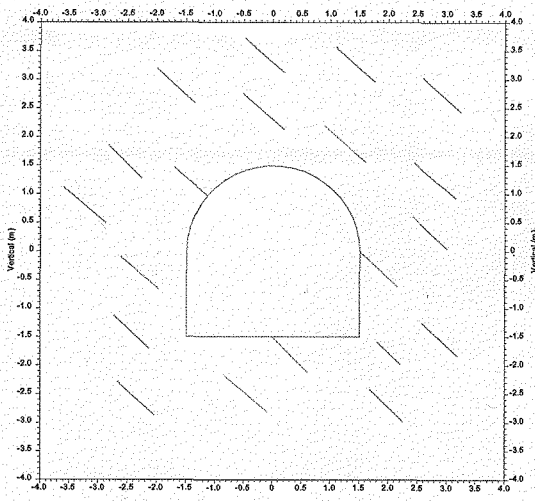
- 図-38 に示すとおり、N45W の横坑は安定性がある。アーチに、亀裂開始が少し起こる可能性がある。横坑直近にある既存の亀裂は、横坑壁面に伝播することがある。亀裂伝播により力学的安定性が損なわれることは考え難い。しかし、地下水の流れと移行に影響を及ぼす可能性はある。
- 図-39 に示すとおり、N－S の横坑は、アーチに小さな剥離や亀裂が発生する可能性がある。底盤にある既存の亀裂は境界まで伝播し、底盤に大きな緩んだブロックを形成するかもしれない。この緩んだブロックは、安定性に関する懸念材料にはならないと思われる。
- 図-40 および図-41 に示すとおり、N45E および E－W 方向の横坑は、不安定であると思われる。大規模な亀裂の開始と伝播が、横坑のアーチ、底盤、側壁に起こる。亀裂の伝播と一体化により横坑近傍に大きな岩盤ブロックを形成される。支保がないと、アーチや側壁からの大規模な岩盤落下が発生すると思われる。また、底盤の盤ぶくれも起こり得る。



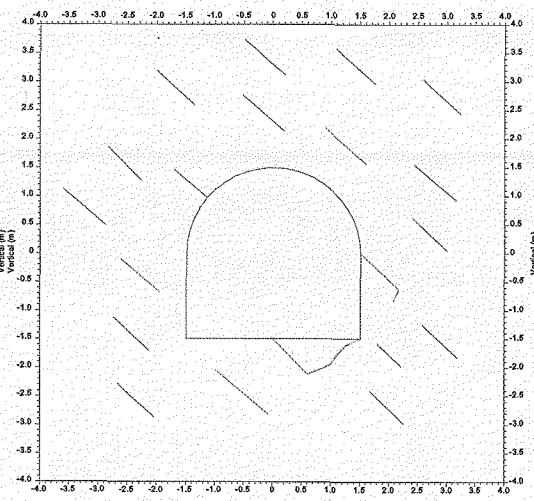
(a)　初期亀裂パターン（ケース１）



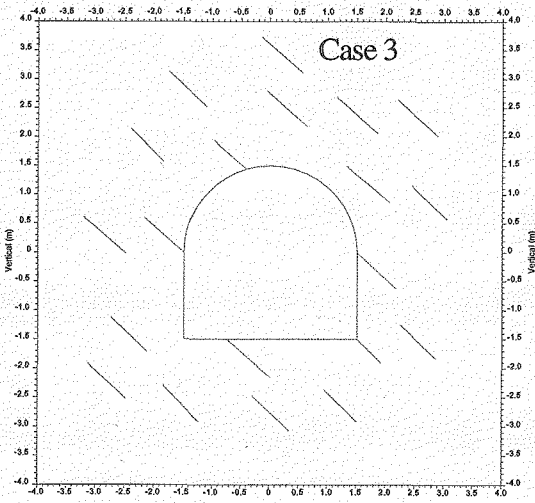
(b)　最終亀裂パターン（ケース１）



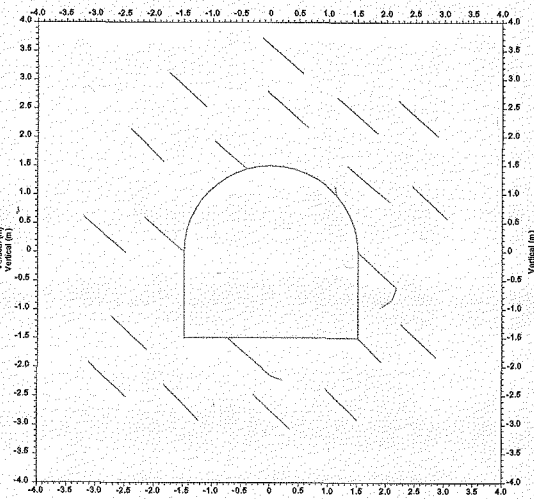
(c)　初期亀裂パターン（ケース２）



(d)　最終亀裂パターン（ケース２）

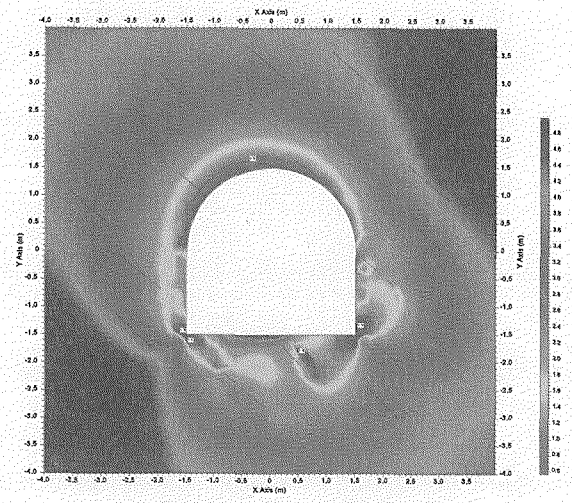


(e)　初期亀裂パターン（ケース３）

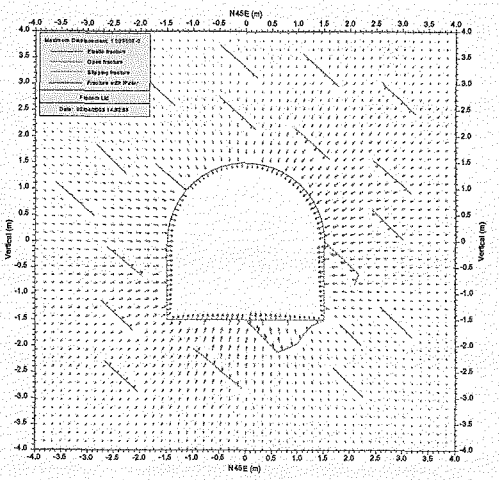


(f)　最終亀裂パターン（ケース３）

図-38　予測結果（GL-500m、横坑方位=N45W）

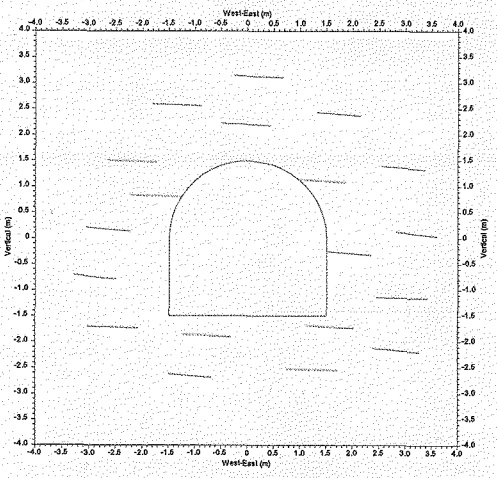


(a)　亀裂発生前の安全率分布

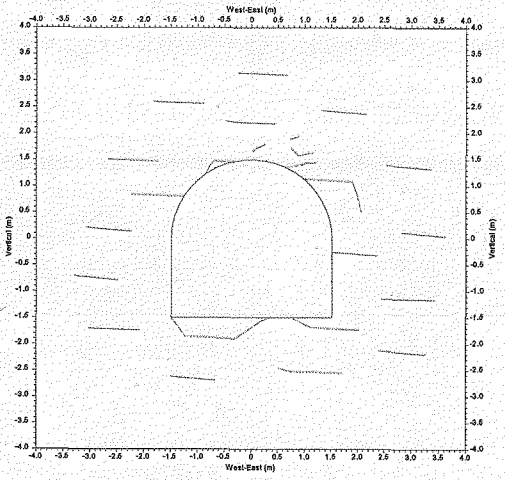


(b)　亀裂発生後の変位図

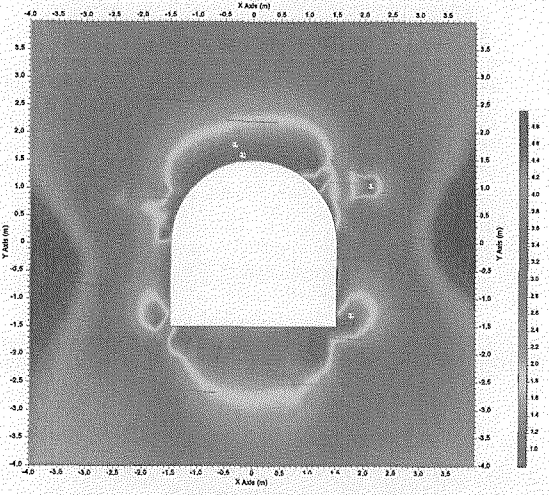
図-39　亀裂発生前の安全率分布と亀裂発生後の変位図（GL-500m、横坑方位=N45w）



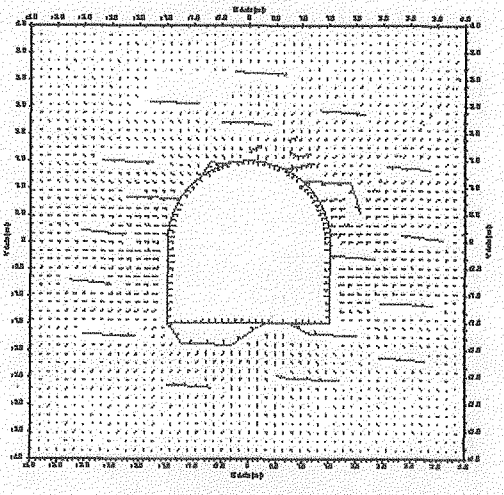
(a)　初期亀裂パターン



(b)　最終亀裂パターン

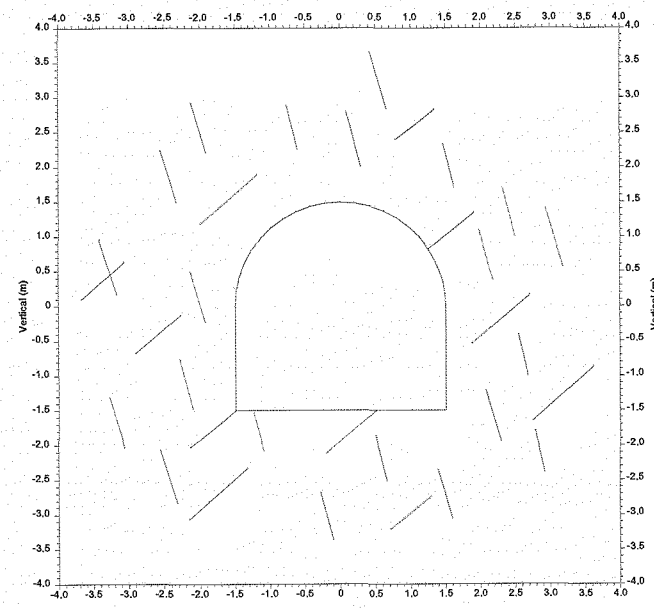


(c)　亀裂発生前の安全率分布

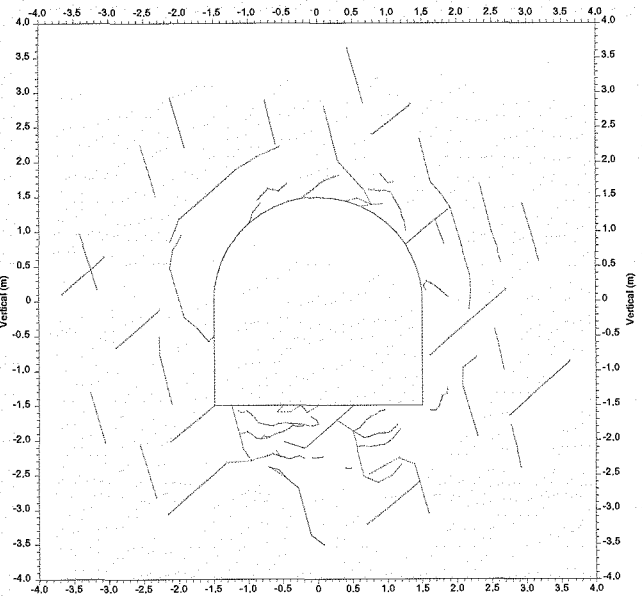


(d)　亀裂発生後の変位図

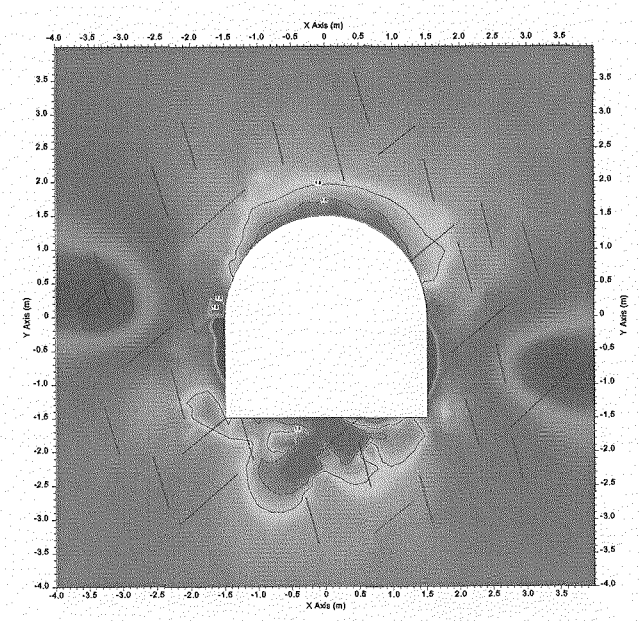
図-40　予測結果（GL-500m、横坑方位=N）



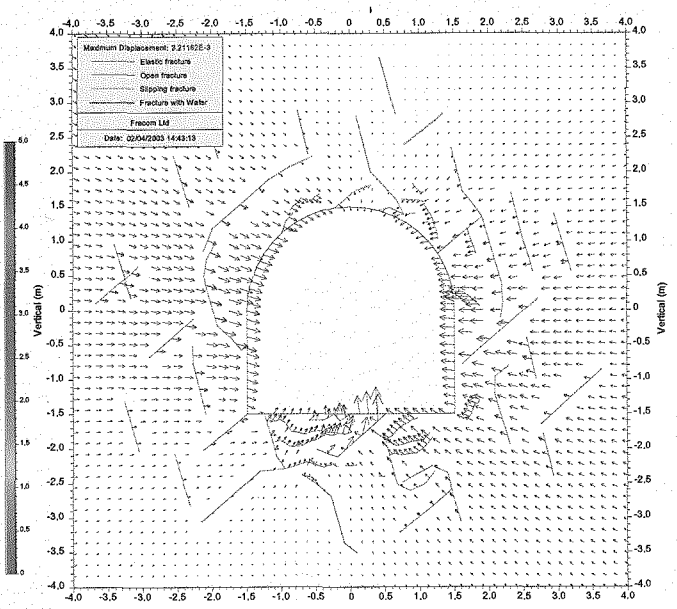
(a)　初期亀裂パターン



(b)　最終亀裂パターン

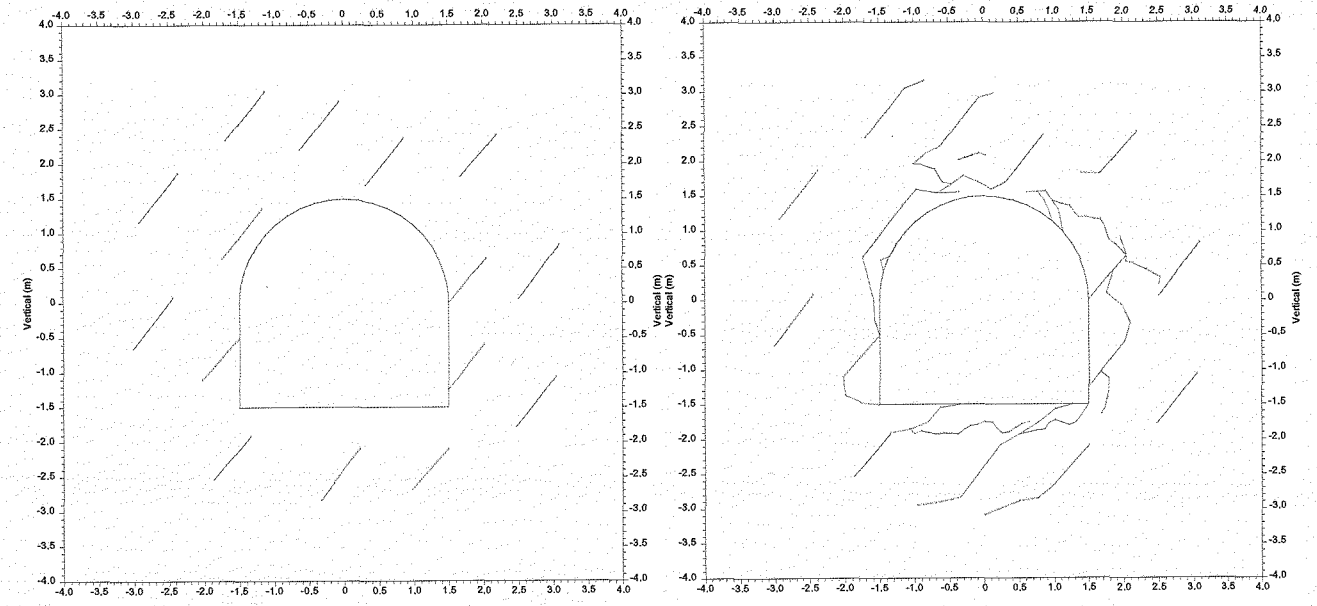


(c)　亀裂発生前の安全率分布



(d)　亀裂発生後の変位図

図-41　予測結果（GL-500m、横坑方位=N45E）



(a)　初期亀裂パターン　　(b)　最終亀裂パターン

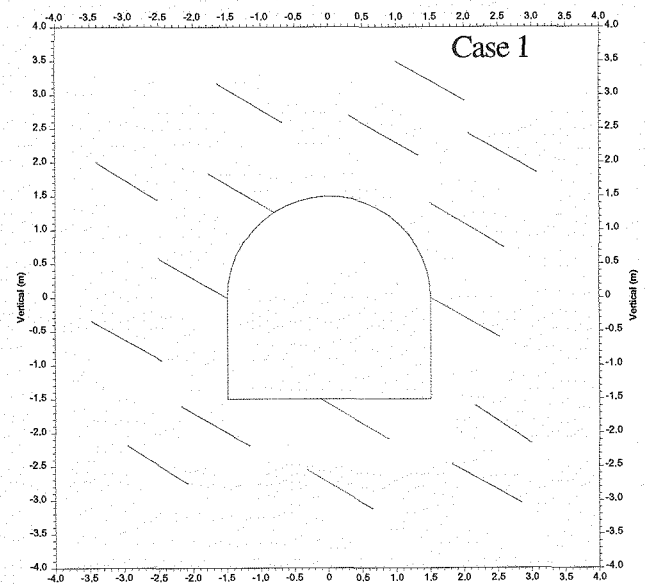
(c)　亀裂発生前の安全率分布　　(d)　亀裂発生後の変位図

図-42　予測結果（GL-500m、横坑方位=E）

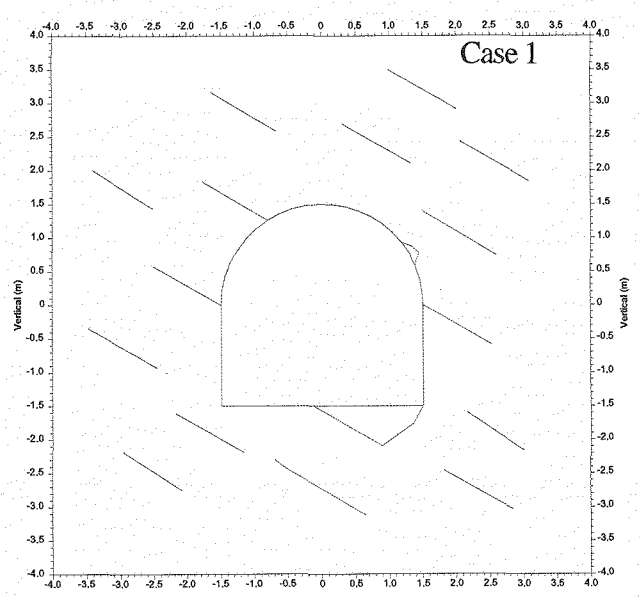
(2) GL-945m

GL-945m の様々な方位の横坑の数値解析結果を図-44～図-46 に示す。方位 N45W の横坑については、この方向の安定性がもっとも高いことから、代表例として、2 つの亀裂セット（I とII）について解析した。ほかの 3 つの方位の横坑に対しては、各々一つの亀裂ネットワークをシミュレーションした。それらの解析結果から以下のようなことがわかった。

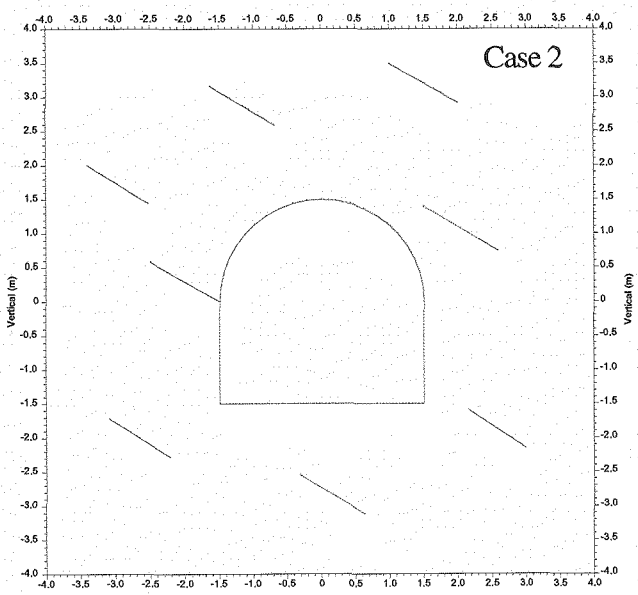
- 図-44 に示すとおり、N45W の横坑は概ね安定している。アーチ部に、亀裂が発生し、横坑に落下するかもしれない小さなブロックが単発的に形成される可能性がある。底盤の既存の亀裂は、底盤への距離が十分近ければ、横坑の底盤に伝播し、大きな岩盤のブロックを形成するかもしれない。
- 図-46 に示すとおり、NS の横坑は、アーチで大規模なブロックの落下が生じる可能性がある。アーチにある既存の亀裂は、横坑の境界まで伝播し、大きなゆるみブロックを形成する可能性がある。側壁と底盤での亀裂の伝播は、まったく予測されていない。
- 図-47 に示すとおり、N45E の横坑は、不安定であると予測でき、アーチ部と底盤には、かなりの亀裂開始と伝播が予測される。アーチからの岩盤ブロックの落下と底盤の盤ぶくれが生じることが考えられる。
- 図-49 に示すとおり、EW 方向の横坑は、不安定であると予測される。横坑のアーチ、底盤、側壁に、亀裂開始と伝播が大規模に発生する。亀裂伝播と一体化により、横坑近傍に大きな岩盤ブロックが形成される。支保がないと、アーチおよび側壁から、大規模な岩盤崩落が起きると思われる。



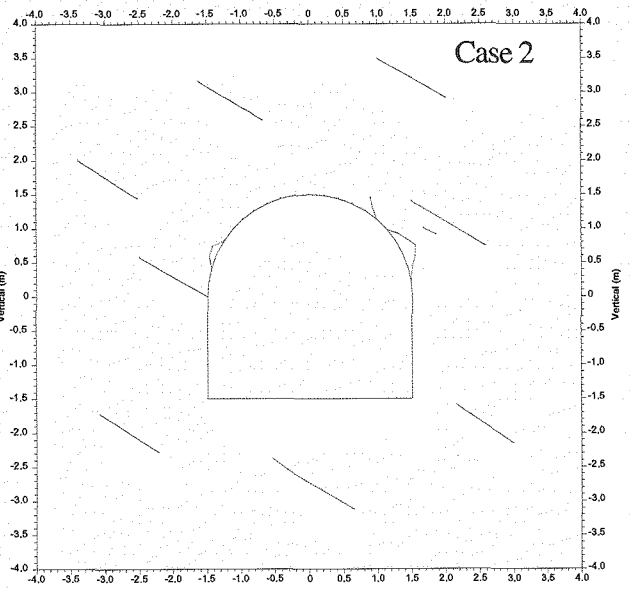
(a) 初期亀裂パターン（ケース 1）



(b) 最終亀裂パターン（ケース 1）

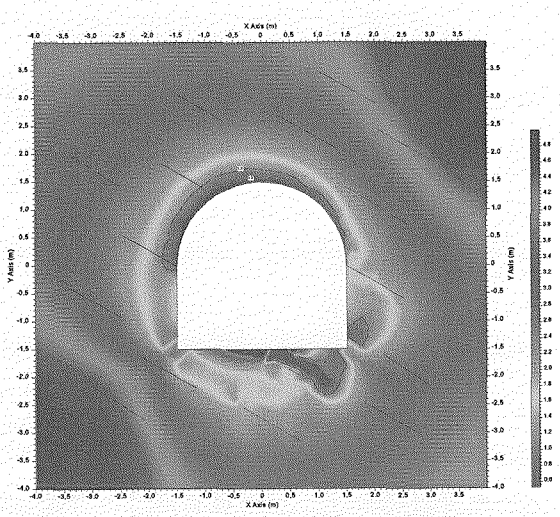


(c) 初期亀裂パターン（ケース 2）

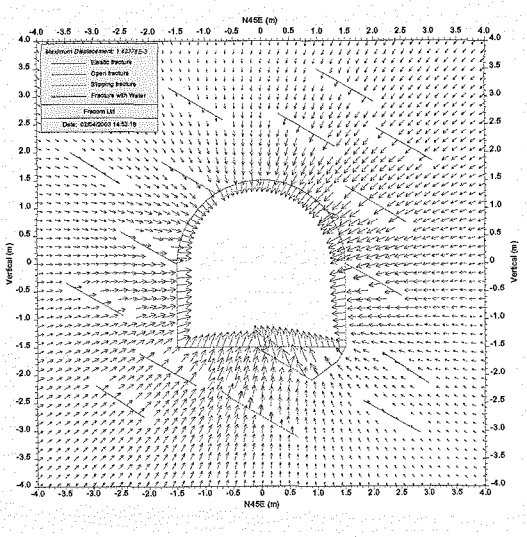


(d) 最終亀裂パターン（ケース 2）

図-43 予測結果（GL-945m、方位=N45W）

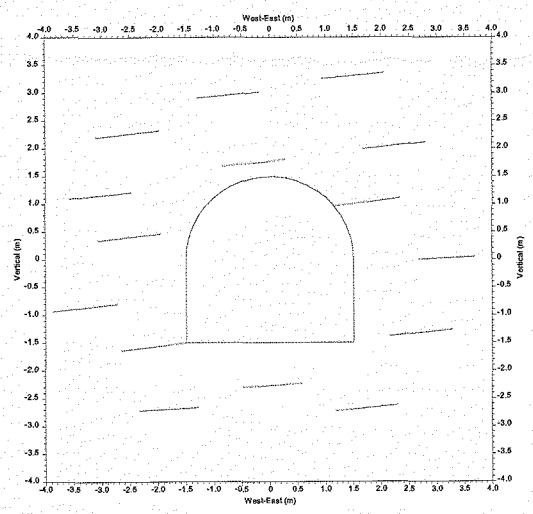


(e)　亀裂発生前の安全率

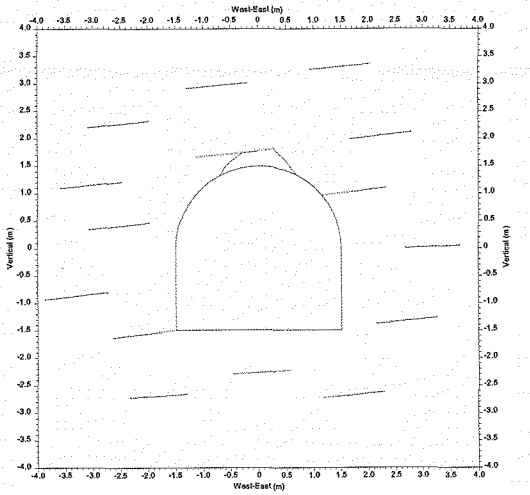


(f)　亀裂発生後の変位図

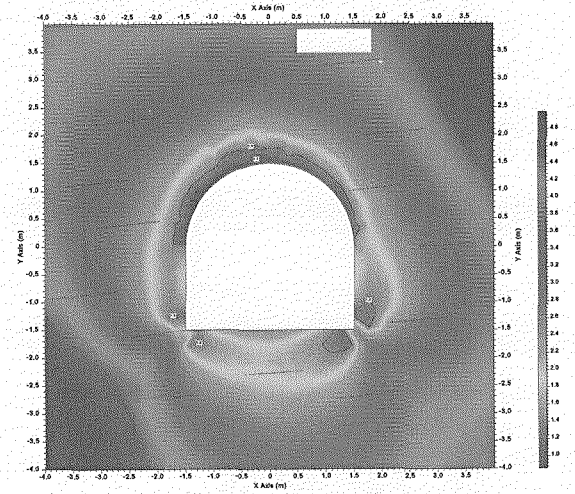
図-43　予測結果（GL-945m、方位=N45W）



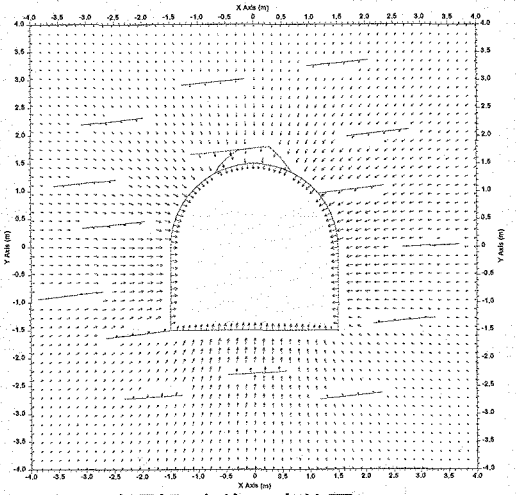
(a)　初期亀裂パターン



(b)　最終亀裂パターン

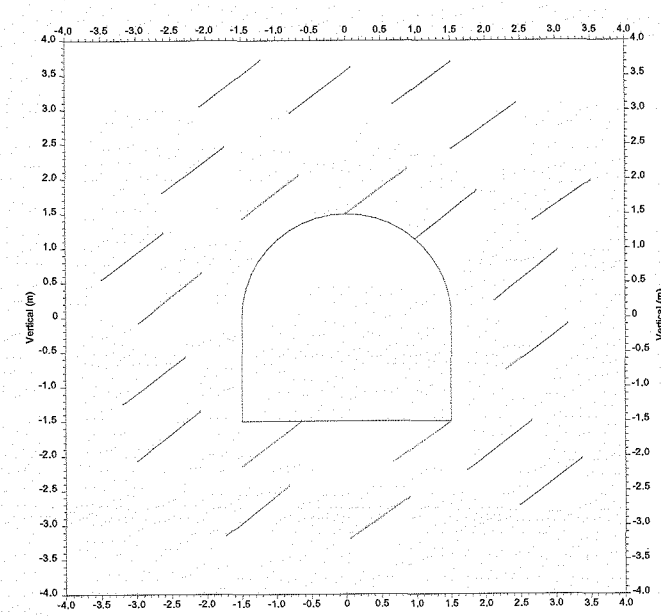


(c)　亀裂発生前の安全率分布

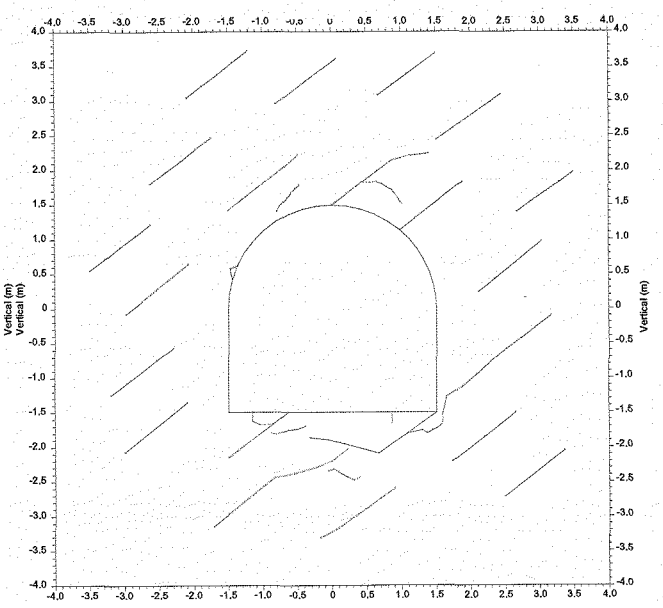


(d)　亀裂発生後の変位図

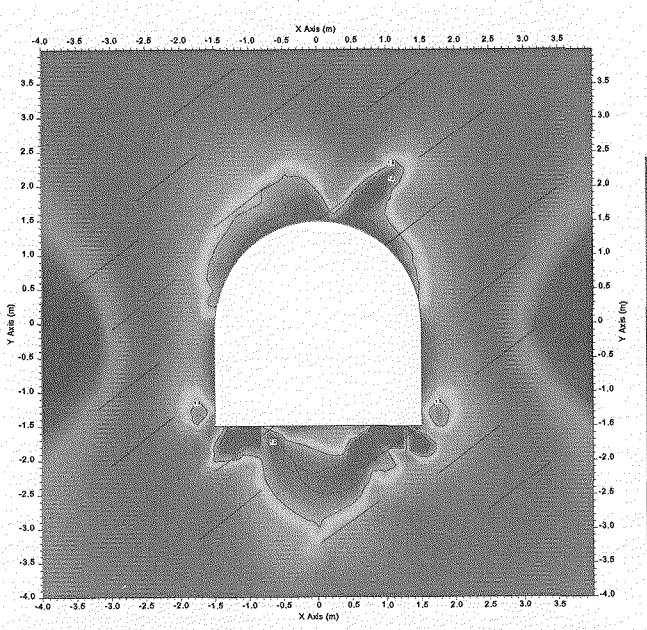
図-44　予測結果（GL-945m、方位=N）



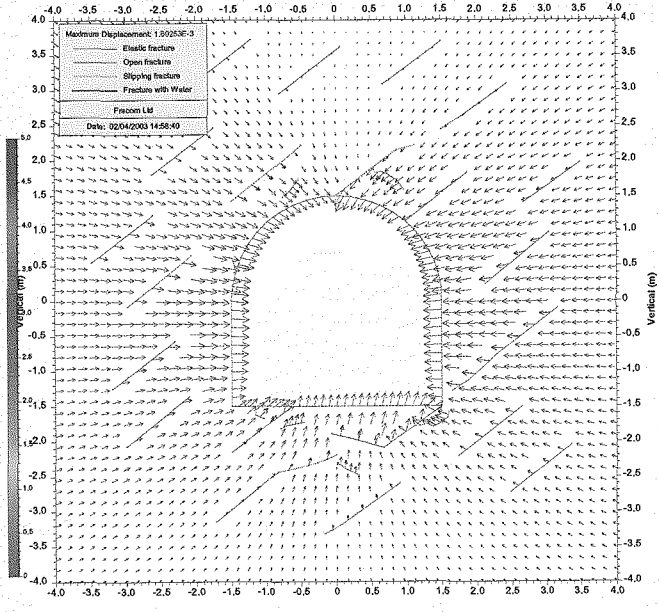
(a)　初期亀裂パターン



(b)　最終亀裂パターン

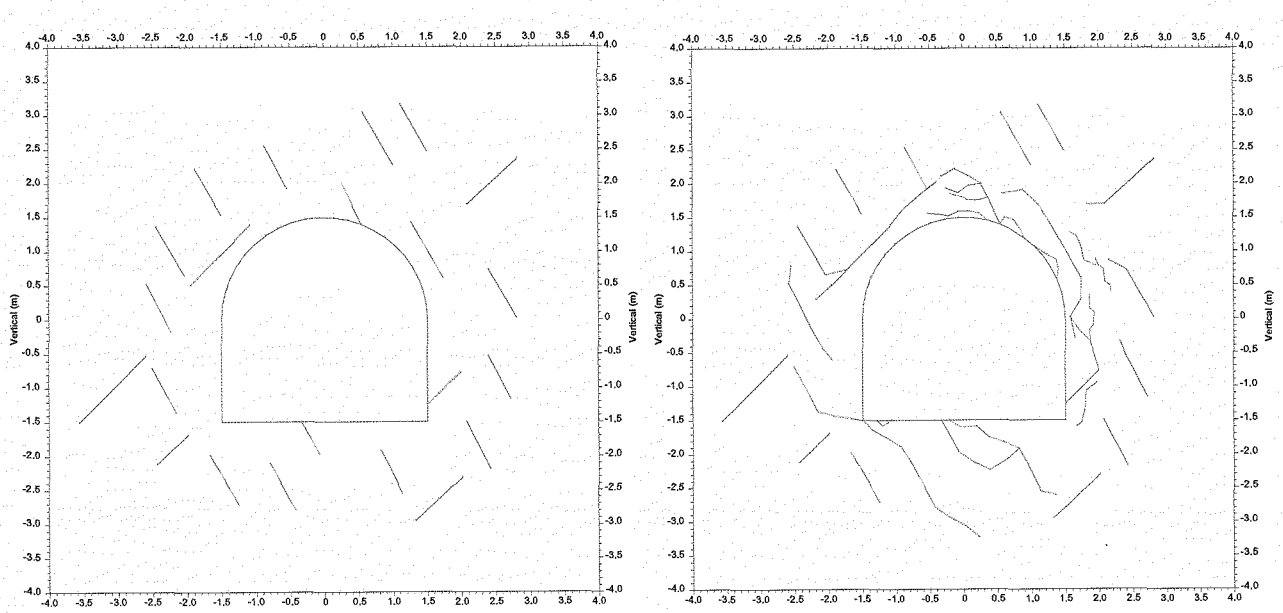


(c)　亀裂発生前の安全率

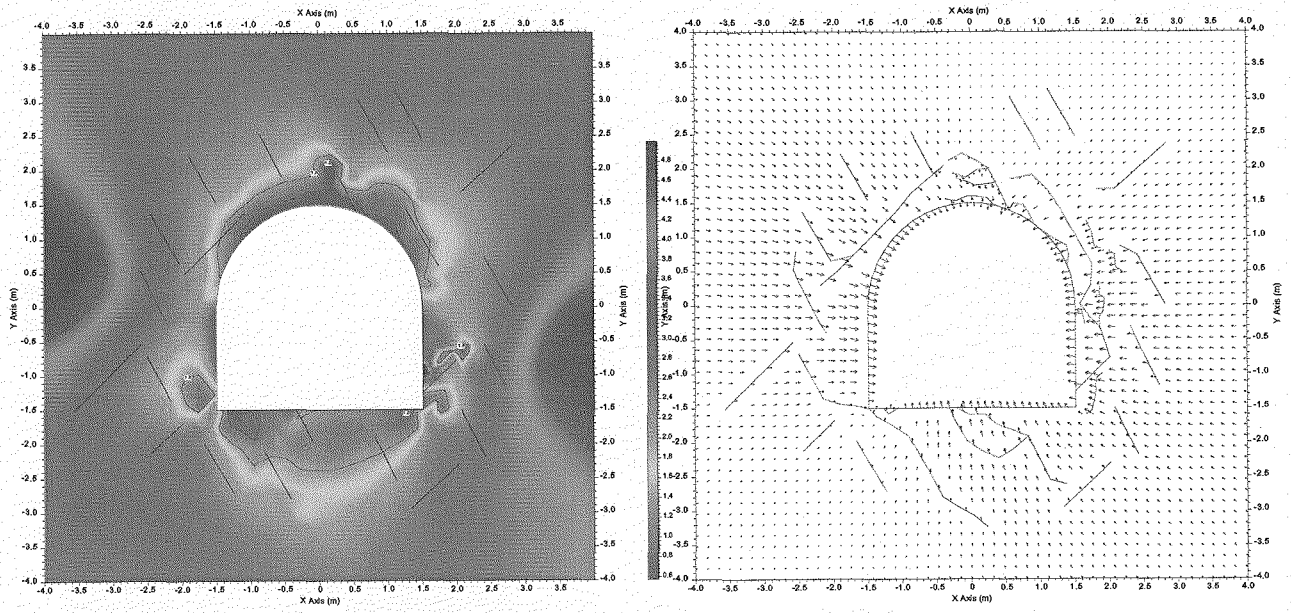


(d)　亀裂発生後の変位図

図-45　予測結果（GL-945m、方位=N45E）



(a)　初期亀裂パターン　　(b)　最終亀裂パターン



(a)　亀裂発生前の安全率　　(b)　亀裂発生後の変位図

図-46　予測結果（GL-945m、方位=E）

(3) まとめ

表-26 に、2 つの深度にある横坑の数値解析結果を比較し、まとめた。以下に主な結論を示す。

- GL-500m の方位が N45W と N の横坑は、安定性があると予測される。方位が N45E および E の横坑は、アーチおよび側壁から岩盤ブロックが崩落すると予測される。底盤の盤ぶくれも考えられる。
- GL-945m では、方位が N45W および N の横坑は、アーチから岩盤ブロックが崩落すると予測される。方位が N45E および N の横坑は、アーチおよび側壁から岩盤ブロックが大規模に崩落すると予測される。
- 両方の深度で、方位が N45W の横坑が最も安定するケースである。この方位では、大規模な剥離や岩盤崩落は予測されない。
- 5.2.1 の明瞭な亀裂が無いケースと比較すると、亀裂は亀裂領域を横坑の周辺にさらに拡大すると考えられる。また、これらは伝播し、大きなブロックを形成する可能性がある。亀裂伝播を考慮すると、キーブロックは亀裂伝播後、持続性のない亀裂により作ることができる。よって、岩盤崩落は必ずしも既存の亀裂の幾何学形状だけに左右されているとはいえない。
- 安全率が 1.0 以下の領域は亀裂が集中する領域と一致し、岩盤ブロックを形成する。
- 安全率が 1.0 以上、1.5 以下の領域では岩盤ブロックが形成されることがなく、亀裂の伸展が限られる。
- ほとんどの解析ケースで、横坑の弾性変位は 1～2mm 程度であった。岩盤ブロックの落下が予測される場合には、変位はさらに大きくなることが予測できるが、FRACOD の現行バージョンでは適切な変位量の予測はできない。

表-26　異なる深度での明瞭な亀裂をもつ横坑の安定性に関する結果のまとめ

深度	方位	最大応力	最大変位	亀裂ゾーン	亀裂ゾーンの伸展程度	備考
GL-500m	N45W	38～49 MPa	0.9～1.0mm	横坑に沿って既存亀裂が伝播	2m、独立した場所	ほぼ安定
	N	43 MPa	1.3mm	アーチと底盤で亀裂伸展	0.5m into rocks	局部的に崩落とブロックの落下
	N45E	68 MPa	2.9mm	横坑周辺の広範囲な亀裂	岩盤中の 1～1.5m	アーチや側壁から大規模な岩体の落下、底盤の盤ぶくれ
	E	60 MPa	1.3mm	横坑周辺の広範囲な亀裂	岩盤中の 1m	アーチや側壁から大規模な岩体の落下
GL-945m	N45W	39～51 MPa	1.0～1.4mm	アーチと底盤に独立した亀裂	微小	小さな岩体が落下する可能性がある
	N	49 MPa	1.0mm	横坑に沿って既存亀裂が伝播	岩盤中の 0.5m	1 つの大きな岩体が起こる可能性がある
	N45E	56 MPa	1.6mm	アーチと底盤で亀裂が伸展	岩盤中の 0.5～1.0m	アーチからの岩盤ブロックの崩落、底盤の損傷
	E	95 MPa	1.6mm	横坑周辺の広範囲な亀裂	岩盤中の 1～1.5m	アーチや側壁から大規模な岩体の落下

6　入力パラメータの感度解析

岩盤特性は、岩盤が不均一かつ不連続という性質を持っているため、大きく変動することが多く、対象とする立坑と横坑の安定性が、岩盤特性のばらつきによる影響を受ける可能性がある。そこで、岩盤特性のばらつきの影響を定量化するため、入力パラメータの感度解析を行った。

岩盤強度は、健全な岩石と亀裂の強度に左右される。3.1 で議論した岩体パラメータは、実験結果の平均値である。感度解析用では、実験結果の低値と高値の 2 つのケースを追加して解析する。感度解析のパラメータを表-27 に示した。

表-27　感度解析のパラメータの範囲

パラメータ	健全な岩石の強度	亀裂特性	破壊じん性
低	σ_c=84MPa (ϕ=33°、c=23MPa) (新鮮亀裂 K_n=464GPa/m、K_s=2070GPa/m)	K_n=264GPa/m、 K_s=29GPa/m、ϕ=21.0°	K_{IC}=1.73MPa $m^{1/2}$; K_{IIC}=3.07MPa $m^{1/2}$
平均*	σ_c=122MPa (ϕ=33°,c=33MPa) (新鮮亀裂 K_n=3099GPa/m、K_s=13800GPa/m)	K_n=1960GPa/m、 K_s=600GPa/m、ϕ=25.5°	K_{IC}=2.37MPa $m^{1/2}$; K_{IIC}=3.69MPa $m^{1/2}$
高	σ_c=148MPa (ϕ=33°,c=41MPa)　(新鮮亀裂 K_n=3099GPa/m、K_s=13800GPa/m)	K_n=5672GPa/m、 K_s=4314GPa/m、ϕ=30.4°	K_{IC}=2.39MPa $m^{1/2}$; K_{IIC}=3.69MPa $m^{1/2}$

*3.3～3.4 で実施した数値解析で使用した特性値

表-27 の「低」および「高」値は、畑らの研究[11]および今回の室内試験の結果の最低、最高値に基づく。

表-27 に示す低、高特性をチェックするため、一軸圧縮試験での数値解析を行った。結果を表-28 に示し、図-47 には結果をプロットし、平均（標準）特性を用いた結果と比較した。

表-28　入力パラメータを変化させた場合の岩盤強度予測値

	健全な岩石の強度 (MPa) (供試体寸法 = 60mm×120mm)	岩盤の強度(MPa) (供試体寸法=1.92m×3.84m)
低	82.5	27.5
平均*	117.5	32.5
高	147.5	37.5

*3.3～3.4 で実施した数値解析で使用した特性値

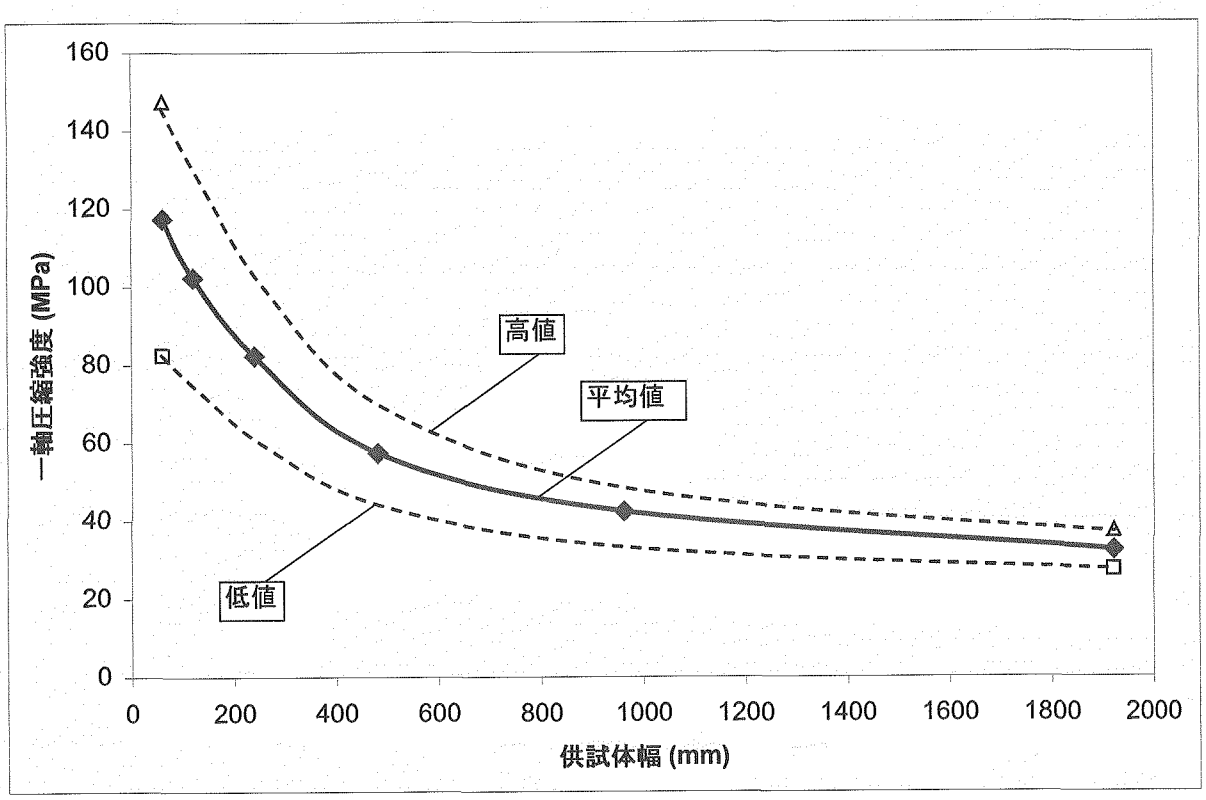


図-47　入力パラメータを変化させた場合の岩盤強度予測値

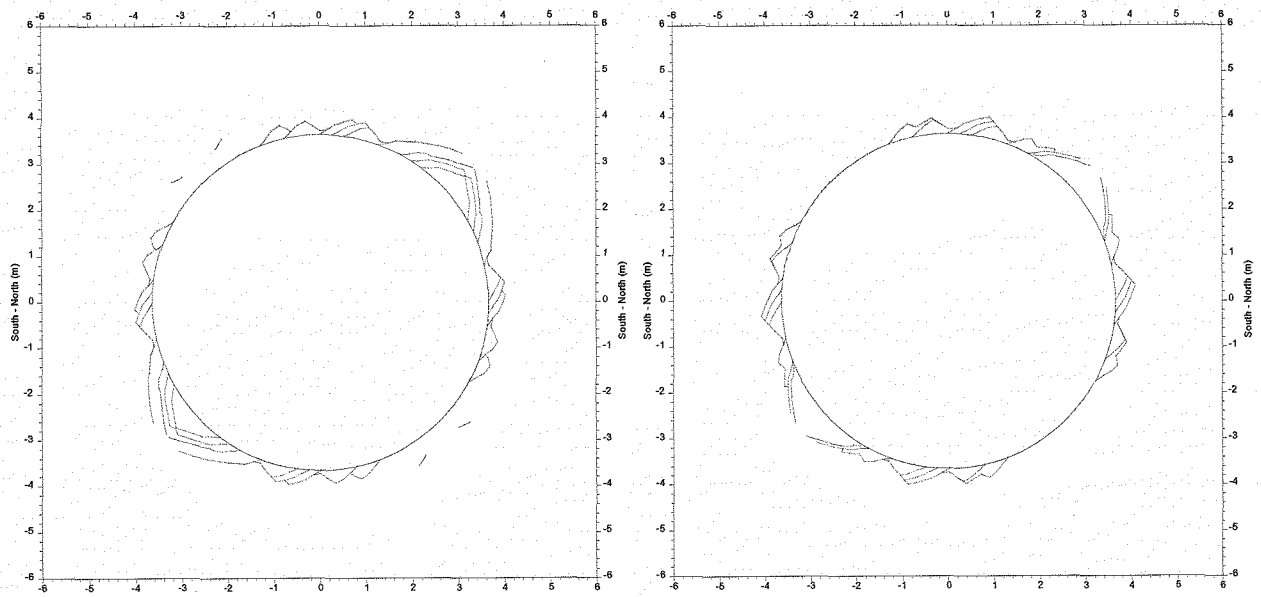
感度解析では、高、低特性を用いて、GL-500m の立坑および横坑の解析を行った。横坑については N45W 方向のみの解析を行った。

6.1 GL-500m の立坑

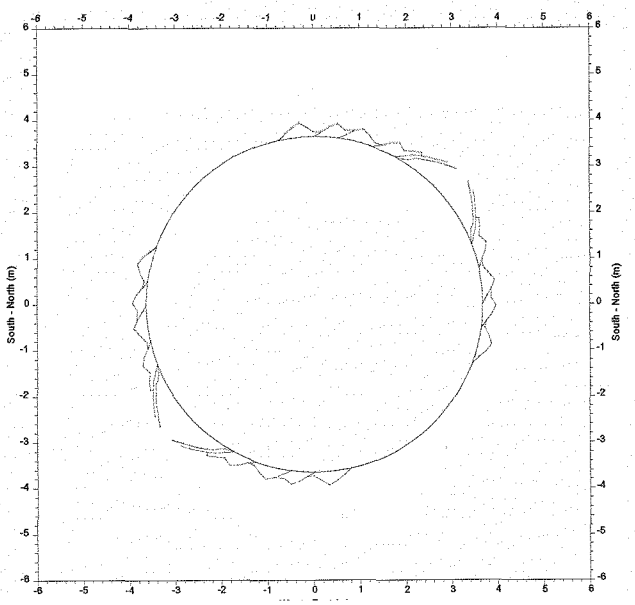
明瞭な亀裂がある場合とない場合の 2 つのケースの立坑のシミュレーションを行った。亀裂のない立坑の結果を図-48 に示し、明瞭な亀裂のある立坑の結果を図-49 に示す。

図-48 に示すように、明瞭な亀裂がない場合、岩盤の特性が低いと立坑近傍で広範囲にわたって亀裂が発生する。結果として、NE/SW の方角に剥離が発生すると予測される。岩盤特性が高いと、亀裂はやや少なくなる。亀裂伝播は完全には剥離を形成せず、平均特性の場合と同様である。

図-49 に示すように、明瞭な亀裂を考慮する場合、特性が低いと立坑近傍で広範囲により多くの亀裂伝播が生じる。NE/SW では大規模な岩盤落下があり、NW－SE では比較的規模の小さい岩盤落下が起こると考えられる。高い岩体特性を使うと、既存亀裂の小規模な伝播が予測される。

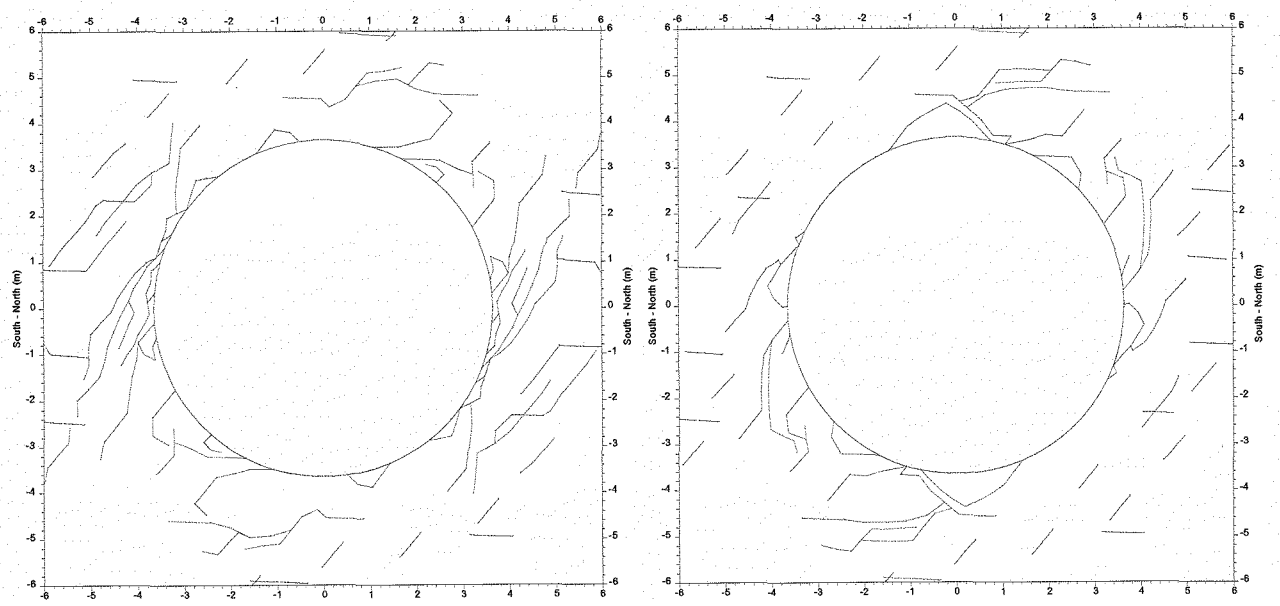


(a) 低値　　(b) 平均値

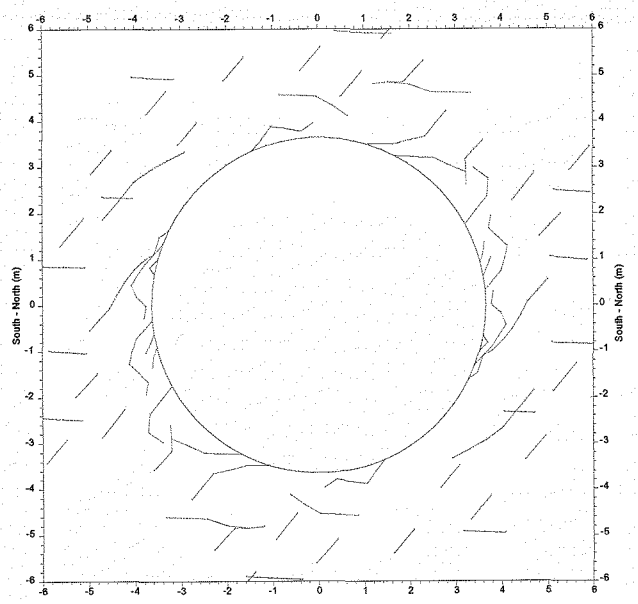


(c) 高値

図-48　-岩盤特性値を変化させた場合の立坑壁面亀裂の比較（GL-500m、明瞭な亀裂は考慮しない場合）



(a) 低値　　(b) 平均値



(c) 高値

図-49　岩盤特性値を変化させた場合の立坑壁面の亀裂予測の比較（GL-500m、明瞭な亀裂を考慮した場合）

6.2 GL-500m の横坑

N45W 方向の横坑について、明瞭な亀裂のある場合とない場合の 2 つの横坑ケースをシミュレーションした。亀裂がない横坑の結果は図-50 に示した。明瞭な亀裂がある横坑の結果は、図-51 に示す。

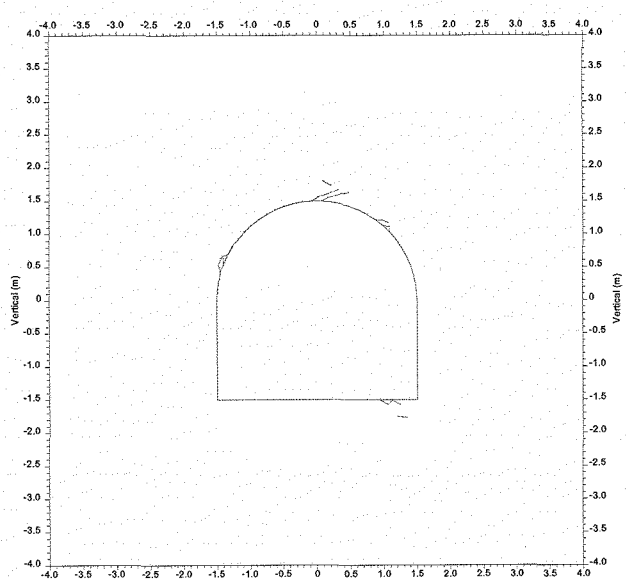
図-50 に示すとおり、明瞭な亀裂を考慮しない場合、岩盤特性が低いと横坑アーチで亀裂開始が少し増える。新しい亀裂は短距離でしか広がらないと予測され、大規模な岩盤ブロックを形成しない。岩盤特性が高いとアーチでは亀裂は 1 回しか生じない。岩盤特性が低い場合と、高い場合のいずれでも、横坑は安定性があると考えられる。

図-51 に示すとおり、明瞭な亀裂を考慮にいれた場合、特性が低いと、アーチと底盤で亀裂開始と伝搬が著しく増える(図-54)。岩盤特性が低いほうが、横坑は安定しないと考えられる。特性が平均および高い場合は、既存亀裂の伝播は限られた範囲しか予測されない。横坑は安定性があると考えられる。

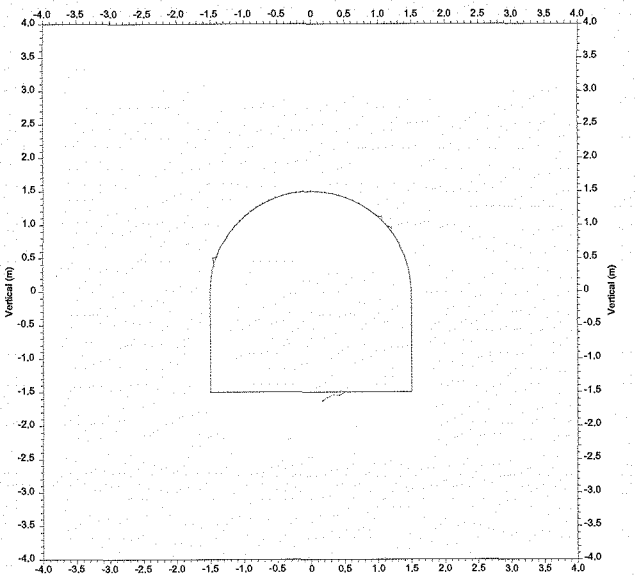
6.3 まとめ

低、高岩体特性を用いた数値解析の結果で以下のことが示された。

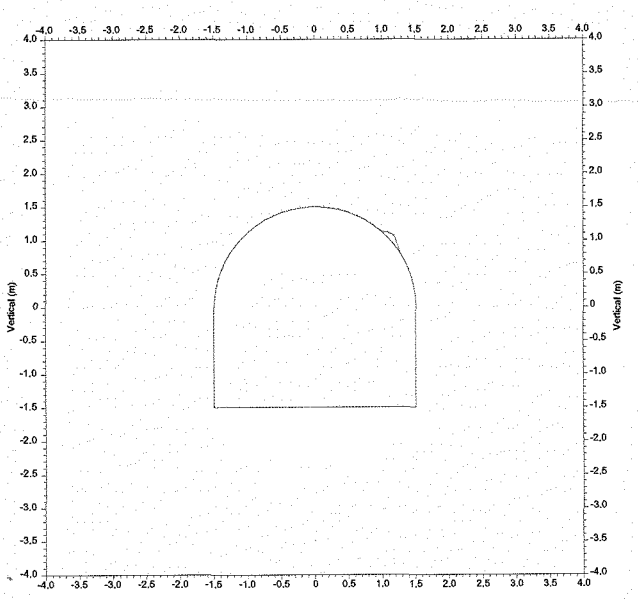
- 立坑：立坑近傍の亀裂領域は、地山条件の局所的な変動により、平均的な特性を使って数値解析した場合より、広くなると考えられる。GL-500m では、ブロックの落下と剥離が予測される。
- 横坑：ほとんどのケースにおいて、GL-500m の横坑は主要な方位である N45W が安定すると予測される。しかし、地山条件が悪く、亀裂がよく発達している局所的な領域では、横坑が不安定である可能性がある。



(a) 低値

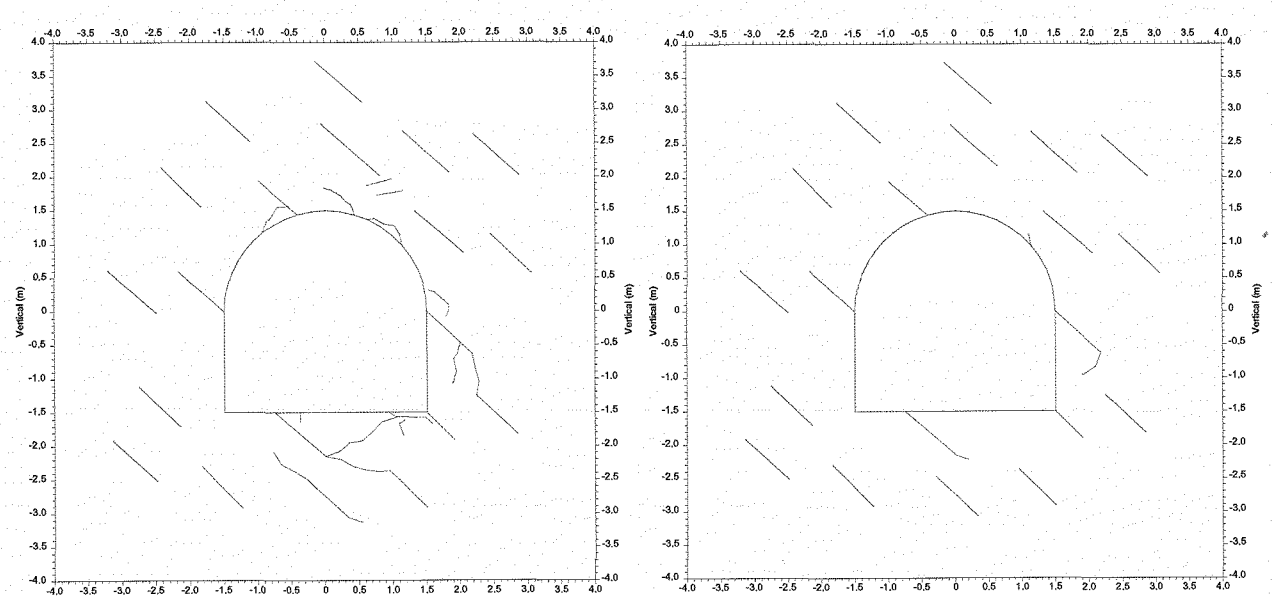


(b) 平均値

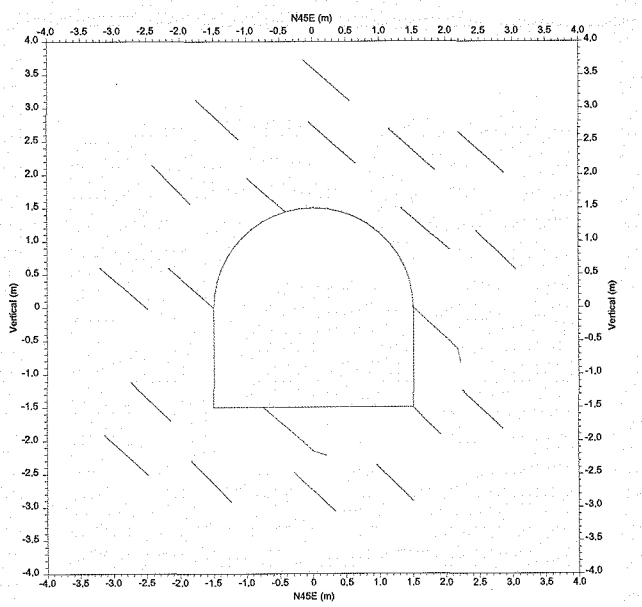


(c) 高値

図-50　岩盤特性値を変化させた場合の横坑周辺の亀裂の比較
（GL-500m、方位＝N45W、明瞭な亀裂は考慮しない場合）



(a) 低値　　(b) 平均値



(c) 高値

図-51　岩盤特性値を変化させた場合の横坑周辺の亀裂の比較
（GL-500m、方位＝N45W、明瞭な亀裂を考慮した場合）

7 支保の評価および提案

7.1 推奨する支保

立坑と横坑は、多くのケースでその不安定性が予測されている。そのため、掘削の安定性を確保するためには支保が必要となる。地下掘削における代表的な岩盤支保の方法として、以下のものがある。

- ロックボルト：ロックボルトの長さは、大体 1.0～2.4m である。個々の岩盤ブロックや層を一緒に結束する効果があり、小～中規模のブロックの落下を防ぐ。
- ケーブルボルト：ケーブルは長さが 8m 以上にもなる。機能は基本的にロックボルトと同じだが、大規模な岩盤落下を防ぐために使われる。ケーブルボルトは、支持能力をさらに増やすため、プレストレスを与えておくことができる。
- 吹付コンクリート：吹付コンクリートは、多くの場合、掘削後間もなく、岩盤応力の再分布と変形が完全に進行する前に施工される。小中規模の岩盤落下を防ぐことができる。また、坑壁に一定の支持応力をかけることにより、岩盤の応力状態を改善することもできる。
- 覆工コンクリート：覆工コンクリートは、坑壁状態の悪い場合の、収縮性で進行する大きな崩壊を防ぐために使われることが多い。吹付コンクリートに原理は似ている。しかし、施工に多大な時間がかかるので、あまり積極的には推奨されない支保というべきであり、支保の応力は岩盤の変形次第で変化する。

前章の立坑と横坑の安定性評価にもとづき、表-29 に示すような、様々な種類の支保を提案する。しかしながら、FRACOD では支保を直接的にシミュレーションできないため、本解析では詳細な支保の設計を提供することはできない。ついては、ここでのコメントは、参考ととらえるものとして議論したい。

安全上の理由から、人、機械、計器が頻繁に存在する横坑の天端は、ゆるいブロックの落下を防ぐため、吹付コンクリートを薄く施工することを推奨する。

表-29　立坑と横坑の不安定性についての予測結果と推奨する支保のまとめ

	深度	方向	亀裂の有無	不安定のタイプ	推奨する支保
立坑	GL-200 m	鉛直		小さい岩盤ブロック	ロックボルト
	GL-500 m	鉛直		崩落	ロックボルト + ケーブルボルト + 吹付コンクリート
		鉛直	亀裂あり	大きい岩盤ブロック	
	GL-945 m	鉛直		陥没	覆工コンクリート
		鉛直	亀裂あり	陥没	
横坑	GL-500 m	N45W		小さい孤立した岩盤ブロック	必要に応じて、ロックボルト(局部的に)あるいは薄い吹付コンクリート
			亀裂あり	小さい孤立した岩盤ブロック	
		N		小さい崩落	ロックボルト
			亀裂あり	小さい崩落/岩盤ブロックの落下	
		N45E		小さい崩落/底盤の盤ぶくれ	ケーブルボルト + 吹付コンクリート
			亀裂あり	アーチと側壁からの大きな岩盤ブロックの落下	
		E		アーチの崩落	ロックボルト + 吹付コンクリート
			亀裂あり	アーチと側壁からの大きな岩盤ブロックの落下	
	GL-945 m	N45W		小さい孤立した岩盤ブロック	局部的なロックボルトあるいは薄い吹付コンクリート
			亀裂あり	小さい孤立した岩盤ブロック	
		N		小さい岩盤ブロック	ロックボルト
			亀裂あり	大きい孤立した岩盤ブロック	
		N45E		小さいアーチ崩落	ロックボルト
			亀裂あり	アーチからの岩盤ブロックの落下、底盤の損傷	
		E		アーチからの岩盤ブロックの落下、 底盤の盤ぶくれ	ロックボルト + 吹付コンクリート
			亀裂あり	アーチと側壁からの大きな岩盤ブロックの落下	

7.2 支保の検討

FRACOD の現行バージョンでは、支保を直接シミュレーションできない。支保の効果について予備的に感度解析するため、支保に代わりうる境界条件として、掘削空洞の内部境界に均一垂直応力をかけて、立坑と横坑の安定性の検討をした。あるケースでは、1MPa から 8MPa の範囲の様々な支保圧力（垂直応力）をかけた。大部分の他のケースでは、5MPa の支保圧力を想定した。

本節での数値解析は、単に理論上であることを強調しておきたい。実際には、このような均一性の高い支保圧力は存在しないと考えられる。

7.2.1 立坑

図-52～図-55 に立坑の支保安定性の検討結果を示す。

図-52 に示すように、GL-200m の立坑では、支保圧力が 5MPa あると壁の亀裂伸展が止まる。

図-53 に示すように、GL-500m の立坑では、支保圧力が 5MPa あると壁の亀裂伸展が軽減され、剥離の機会が少なくなる。亀裂伸展を防ぐには、8MPa の支保圧力が必要である。

図-54 に示すように、GL-945m の立坑では、均一な支保圧力が 5MPa あると NE/SW 方向での壁の剥離が軽減されるが、NW/SE 方向での引張破壊が増加する。

図-55 に示すように、亀裂のある岩体にある GL-500m の立坑では、支保圧力が 5MPa あると立坑壁面の既存の亀裂の伸展が著しく軽減される。立坑は、概ね安定である。

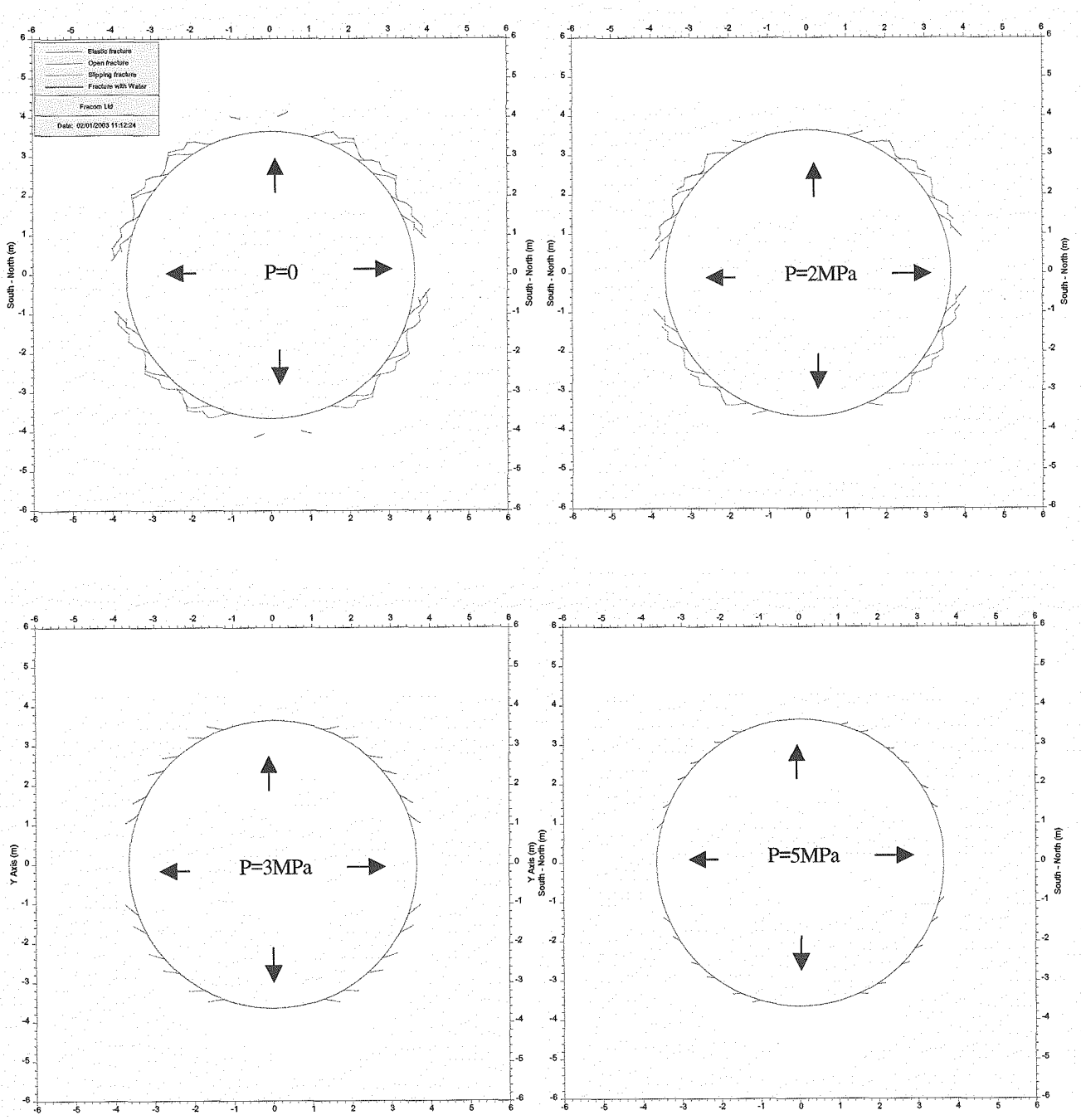


図-52　立坑の安定性に対する支保の効果（GL-200m）

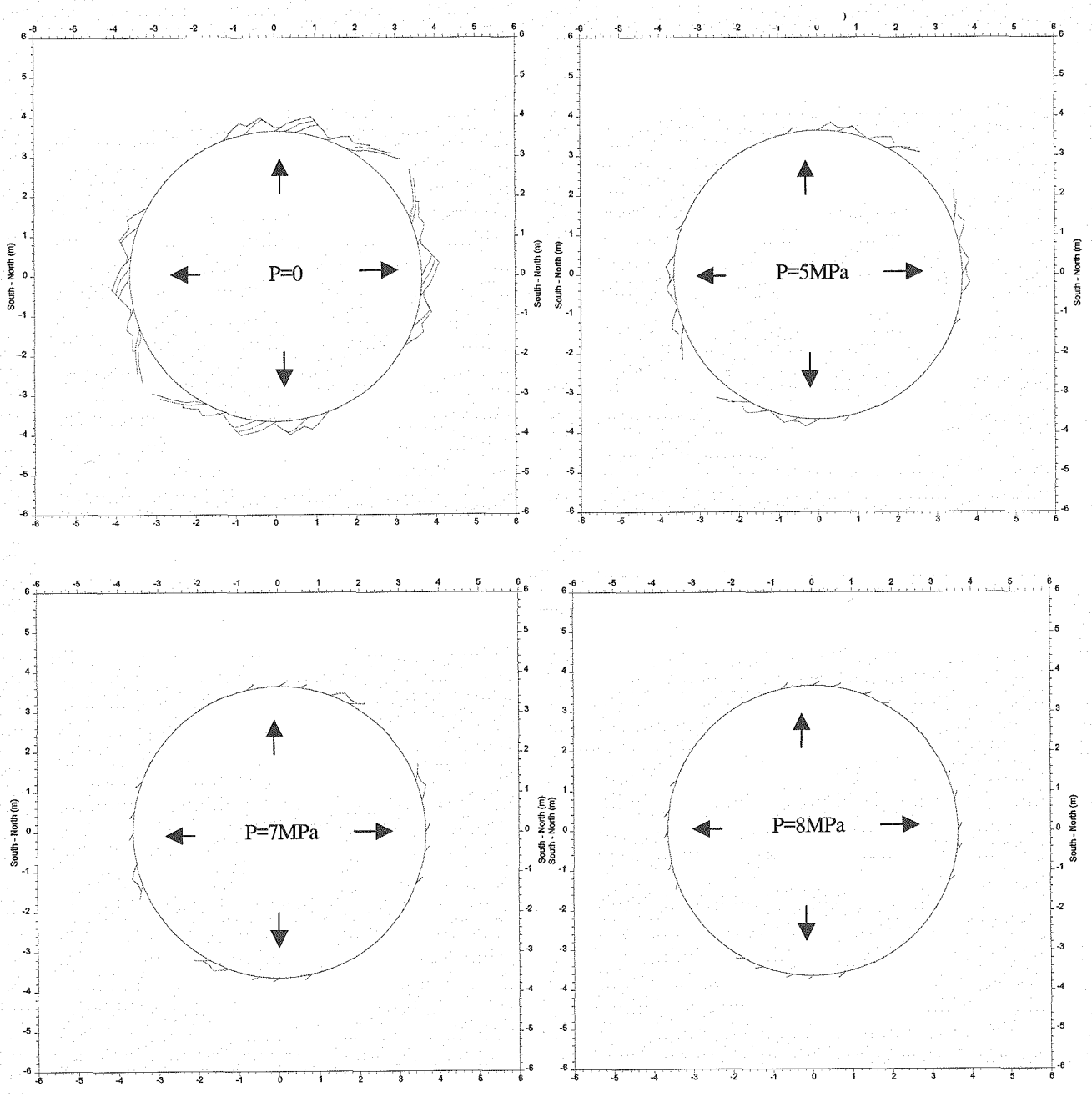


図-53　立坑の安定性に対する支保の効果（GL-500m）

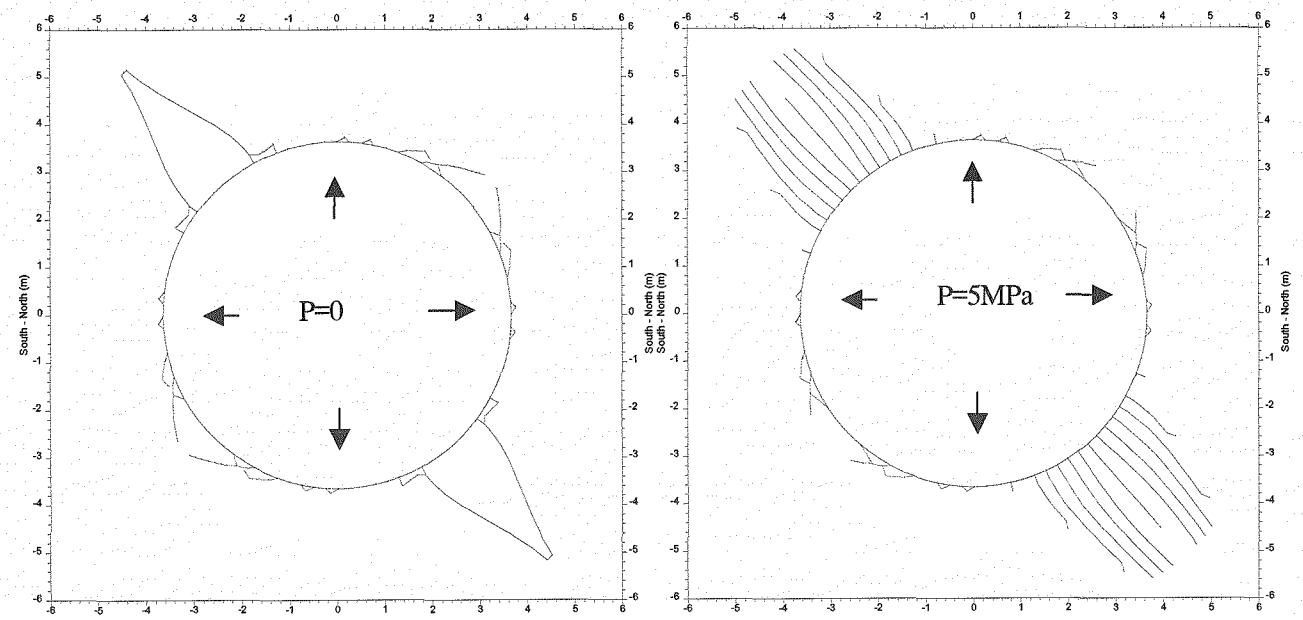


図-54　立坑の安定性に対する支保の効果（GL-945m）

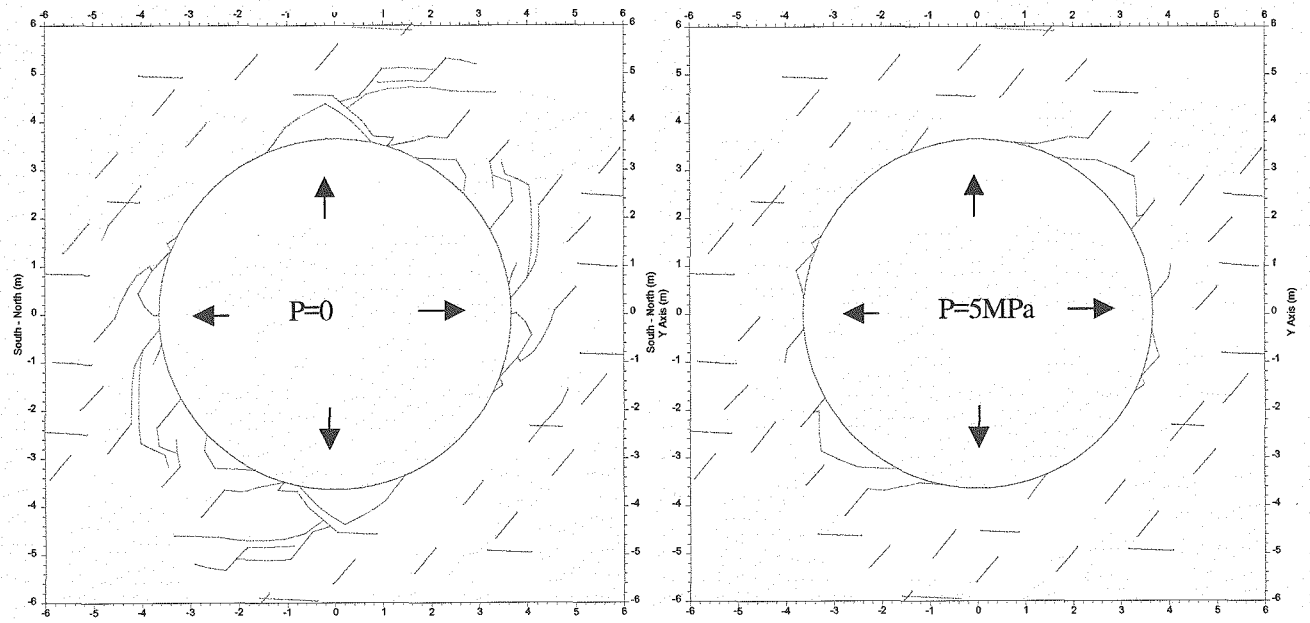


図-55　立坑の安定性に対する支保の効果（GL-500m、明瞭な亀裂を考慮した場合）

7.2.2 横坑

支保の効果を検討する目的で、前述の立坑の場合と同様に異なる横坑方位を N45W および N45E、GL-500m と GL-945m、明瞭な亀裂の有無、といった８つのケースについてシミュレーションした。5MPa の支保圧力をかけた結果を、支保の無い横坑の結果と比較した。結果を図-56～図-63 に示す。

全てのケースにおいて、支保圧力を 5MPa にすると横坑は安定する。横坑の直近には、亀裂発生と伸展は全くみられないか、みられても限られたものしか予測されない。N45W の方位にある横坑では、前章で議論したとおり、大きな不安定性は予測されていないので、支保は必要ないと考えられる。これは GL-500m および GL-945m のいずれにも言える。

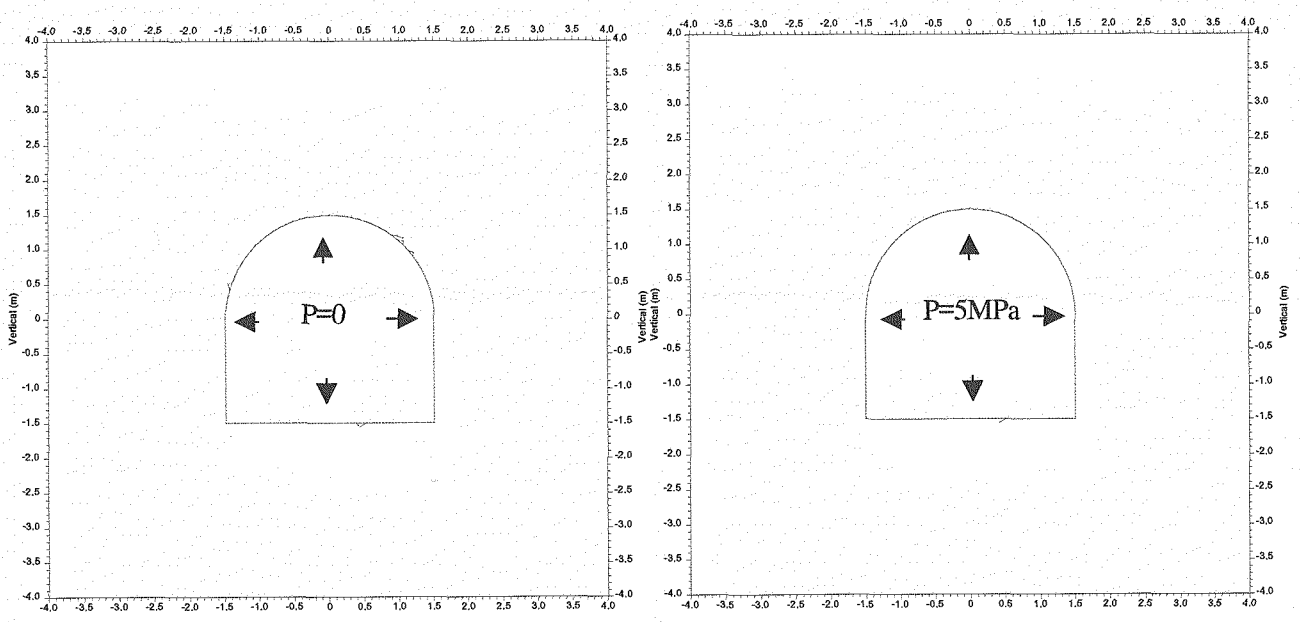


図-56　横坑の安定性に対する支保の効果（GL-500m、方位=N45W）

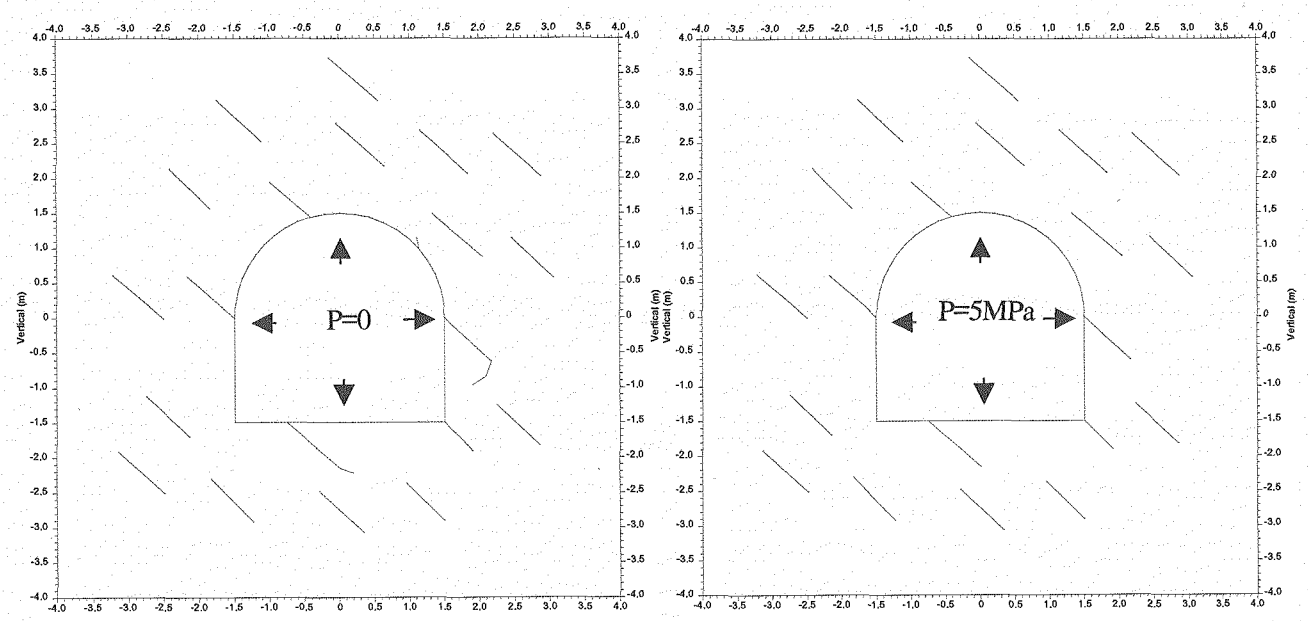


図-57　亀裂をもつ横坑の安定性に対する支保の効果（GL-500m、方位=N45W）

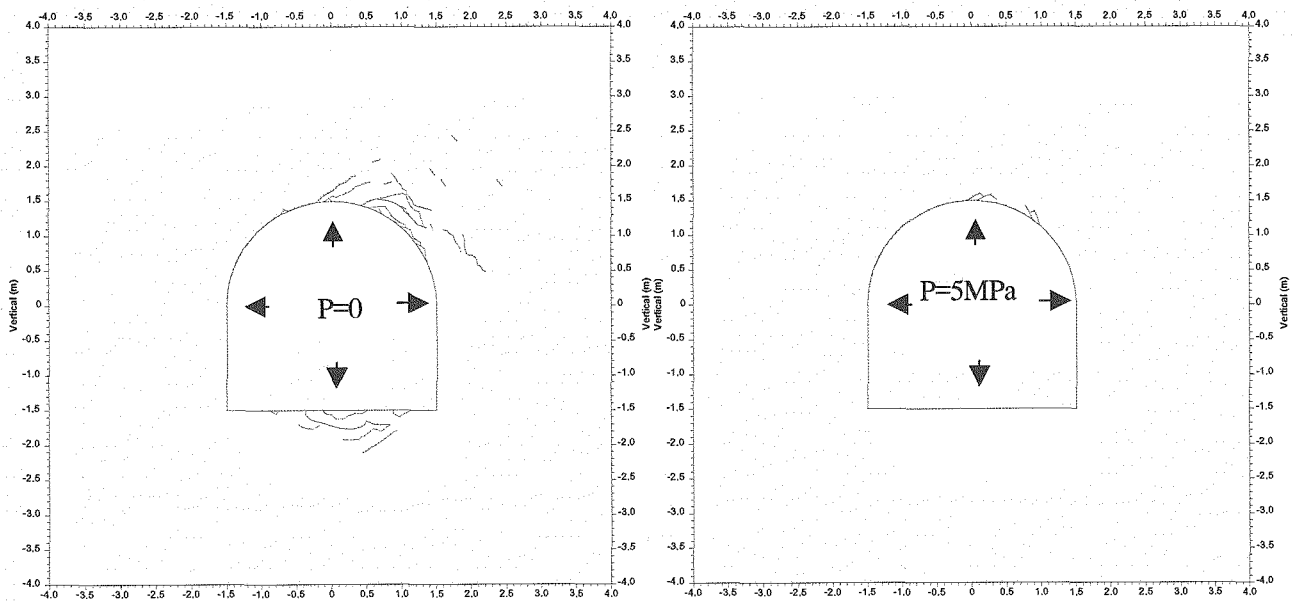


図-58　横坑の安定性に対する支保の効果（GL-500m、方位=N45E）

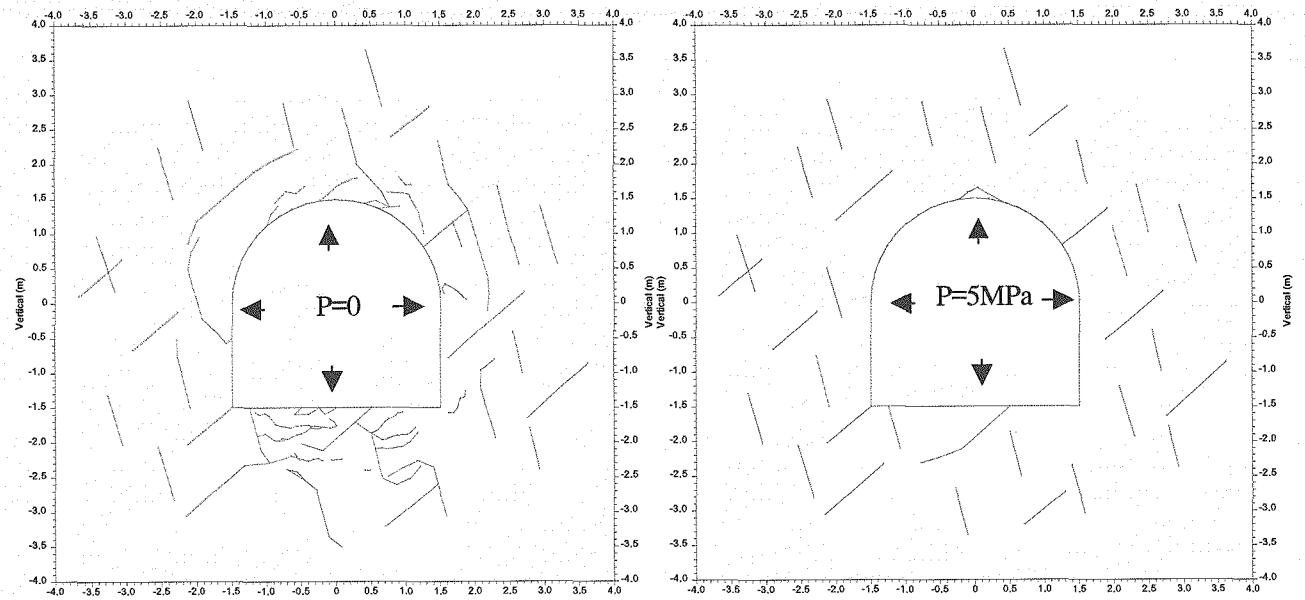


図-59　亀裂をもつ横坑の安定性に対する支保の効果（GL-500m、方位=N45E）

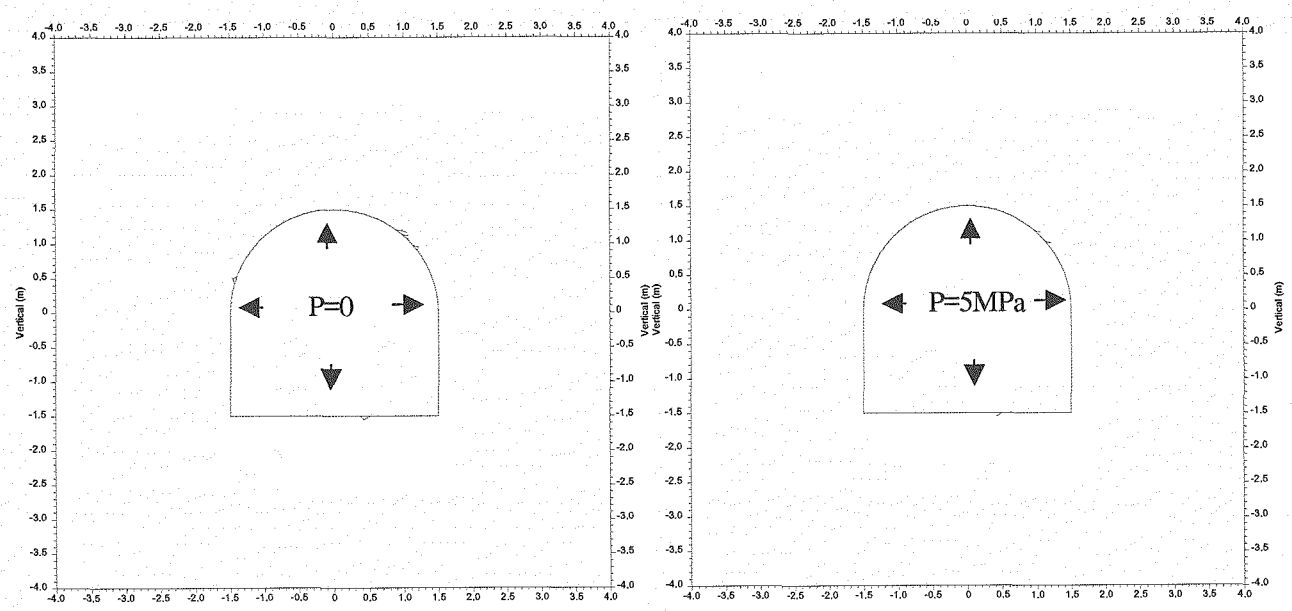


図-60　横坑の安定性に対する支保の効果（GL-945m、方位＝N45W）

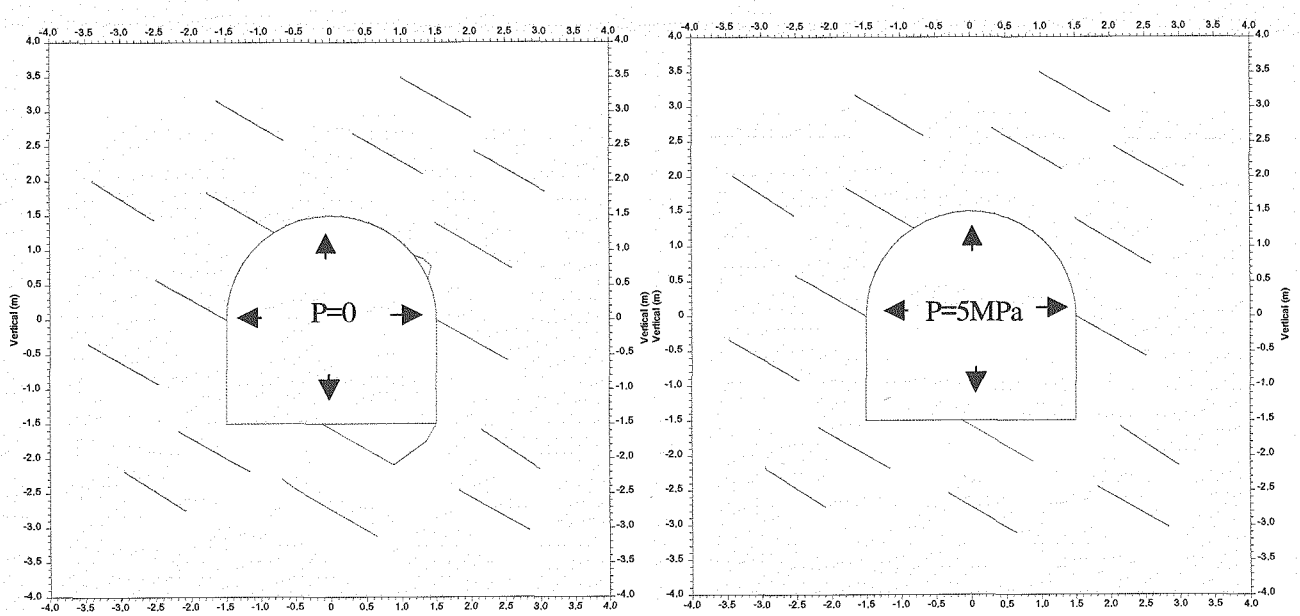


図-61　亀裂をもつ横坑の安定性に対する支保の効果（GL-945m、方位＝N45W）

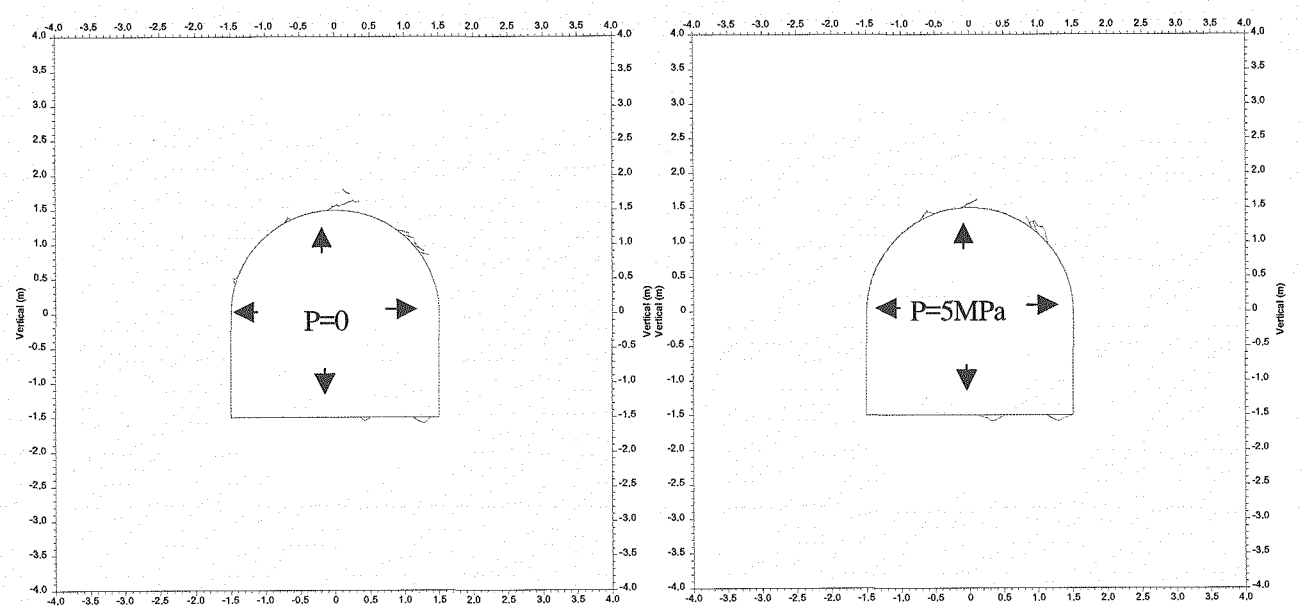


図-62　横坑の安定性に対する支保の効果（GL-945m、方位=N45E）

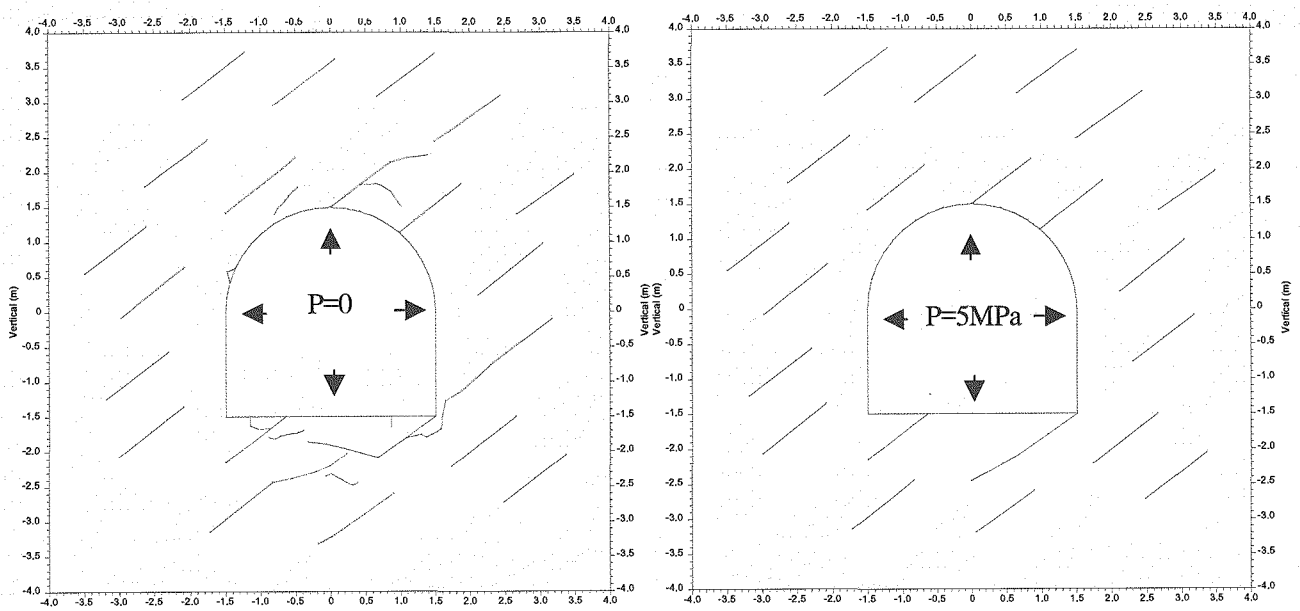


図-63　亀裂をもつ横坑の安定性に対する支保の効果（GL-945m、方位=N45E）

8 まとめ

数値解析の結果と前章での議論にもとづき、超深地層研究所計画における立坑および横坑の安定性に関し、以下のように結論することができる。

- GL-200m の立坑は、大きな不安定性は考えられないが、壁からの局所的な小さな岩盤ブロックの落下が考えられる。剥がれた小さな岩盤ブロックの落下を防ぐには、長さ 2m のロックボルトを使って、スポット的にボルト固定すれば十分である。
- GL-500m の立坑は、NE/SW の壁面で剥離が生じる可能性がある。既存の亀裂の伝播により、大きな岩盤ブロックが形成されることも考えられる。吹付コンクリートとケーブルボルトを使用しての支保が推奨される。
- 月吉断層中の GL-945m の立坑は、著しく不安定になると予測される。NW/SW の方向で引張破壊の発生による緩んだブロックが形成され、NE/SW の壁面で剥離が起こると予測される。支保がないと、楕円形の崩落領域が立坑周囲に形成されると思われる。覆工コンクリートの打設やプレキャストコンクリートの貼付など大規模な支保が推奨される。
- GL-500m および 945m では、方位が N45W の横坑は安定性があると予測される。N45W は、横坑の方位としては、最も安定していることがわかった。支保は必要ないと考えられるが、もし必要となる場合は部分的なロックボルトのような、軽い支保を推奨する。
- 方位が N45E および E の横坑は、不安定であると予測される。アーチの剥離、岩盤落下、底盤の破壊が発生すると思われる。これらの方位における横坑の支保には、支保パターンとしてのロックボルトおよび吹付コンクリートが推奨される。

本研究では、立坑および横坑周辺の掘削影響領域の研究には、亀裂伸展解析コード FRACOD が効果的であることが実証された。亀裂開始と伝播の領域を使って、掘削影響領域を直接的に定量化するのに大きなメリットがある。また、全ての数値解析ケースに対して、AE イベントの発生も、予測可能である。坑道周辺岩盤の AE モニタリングが研究坑道において実施できれば、これらのシミュレーションは有用とあるであろう。

参考文献

1) Shen, B.: FRACOD Version 1.1, User's manual. FRACOM Ltd., (2002)

2) Rinne, M., Shen, B. and Lee, H.: Aspo Pillar Stability Experiment. Modeling of fracture stability by FRACOD. International Progress Report IPR-03-05 (Draft). Swedish Nuclear Fuel Waste Management Company, Stockholm, Sweden, (2003)

3) Shen, B., Stephansson, O. and Rinne, M.: Simulation of borehole breakouts using FRACOD2D, Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, 57 (5), pp.579-590, (2002)

4) Shen, B. and Stephansson, O.: Modification of the G-criterion of crack propagation in compression. Int. J. of Engineering Fracture Mechanics. 47(2), pp.177-189, (1993)

5) Falls, D.S. and Young, R.P.: Acoustic emission and ultrasonic-velocity methods used to characterise the excavation disturbance associated with deep tunnels in hard rock. Tectonophysics. Vol 289 (1998), pp. 1-15, (1998)

6) Shen, B. and Rinne M.: Generalised criteria for fracture initiation at boundaries or crack tips. Report prepared for SKB, (2001)

7) Li, C.: Deformation and Failure of Brittle Rocks under Compression. Doctoral Thesis. Lulea University of Technology, Sweden. 1993:118D, ISSN 0348-8373, (1993)

8) Mendecki, A.J.: Seismic Monitoring in Mines. Chapman & Hall (publisher), (1997)

9) Hazzard, J.F., Collins, D.S., Pettitt, W.S. and Young, R.P.: Simulation of unstable fault slip in Granite using a bonded-particle model. Pure and Applied Geophysics. 159, 221-245, (2002)

10) 森孝之、森川誠司、田部井和人、岩野圭太：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、核燃料サイクル開発機構技術資料（契約業務報告書：鹿島建設株式会社）、JNCTJ7400 2002-007、(2002)

11) 畑浩二、丸山誠、鳥井原誠：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、核燃料サイクル開発機構技術資料（契約業務報告書：株式会社大林組）、JNC TJ7430 2001-002、PP.30、(2001)

12) Barton, N. R.: Deformation Phenomena in Jointed Rock. Geotechnique. Vol. 36, No.2, pp.147-167, (1986)

13) Backers T., Stephansson O. & Rybacki E. : Rock Fracture Toughness Testing in Mode II – Punch-Through Shear Test. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci, 39: pp.755-769.(2002)

14) Backers T., Rybacki E., Alber M. & Stephansson O.: Fractography of rock from the new Punch-Through Shear Test. In: Dyskin, A.V., Hu, X. & Sahouryeh, E. (eds.) Structural Integrity and Fracture – The International Conference on Structural Integrity and Fracture, Perth, Australia.: pp.303-308.(2002)

15) Barker, L.M.: Theory for determining KIC from small, non-LEFM specimens, supported by experiments on aluminium. Int. J. Fract., 15: pp.515-536.(1979)

16) Donath, B.: Stiffness of rock fractures – an experimental investigation. Diploma thesis. Technical University of Berlin. (2002)

17) Ochterlony, F.: Suggested methods for determining the fracture toughness of rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 25: pp.71-96.(1988)

18) Ouchterlony, F.: On the background to the formulae and accuracy of rock fracture toughness measurements using ISRM standard core specimens. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 26: pp.13-23.(1989)

19) Cunha, A. P.: Scale effects in rock mechanics. Proceedings of the 1st International Workshop on Scale Effects in Rock Masses, Loen, Norway, 7-8 June, pp. 3-27, (1990)

20) Hoek, E. and Brown E.T.: Underground excavation in rock. Inst. Mining and Metallurgy, London., (1980)

21) Herget, G.: Stresses in Rock. Rotterdam, Balkema, (1988)