

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 契約業務報告書)

2002 年 3 月

鹿島建設株式会社

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

〒319-1184 茨城県那珂群東海村大字村松 4-49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division, Japan Nuclear Cycle Development Institute,
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaragi-ken, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2002

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 契約業務報告書)

2002 年 3 月

鹿島建設株式会社

2002 年 3 月

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 契約業務報告書)

森 孝之* 森川 誠司** 田部井 和人** 岩野 圭太*

要 旨

核燃料サイクル開発機構東濃地科学センターにおける地層科学研究では、地質環境の調査技術・評価手法を開発することを目的として、超深地層研究所計画が進められている。現在までに、研究所建設予定地点である正馬様用地に分布する土岐花崗岩の岩盤力学特性に関する様々な調査が地表から実施されており、今後も、同研究所の設計・施工を考慮した予測・評価及び研究坑道掘削時の検証が必要となってくる。

本業務では、これら調査段階において取得したデータ及び概念モデルに基づき、3次元応力解析及び研究坑道掘削時の掘削影響予測解析を行い、以下の様な知見を得た。

1. 調査段階で取得したデータ・概念モデルに基づき、岩盤力学モデルを構築し、3次元FEM解析を行った結果、実測値に整合する広域的な3次元応力分布の再現をすることができた。
2. 不連続性岩盤の力学挙動を表現可能な2次元MBC解析を立坑・横坑に対し実施した。立坑では、岩盤が堅硬なケースでは岩盤挙動としては微小である。ただし、断層部では岩盤物性が劣るため、大きな変位が発生している。横坑では、展開方向により、亀裂開口量、岩盤変位挙動が異なる結果が得られた。ただし、岩盤挙動としては微小である。
3. その結果、立坑では、岩盤が堅硬であるため、変位量も微小であり、明瞭な支保効果がみられない。ただし、断層区間では鋼製支保工は降伏する個所が発生しており、肌落ち防止やゆるみの進展防止に寄与するものと考えられる。なお、いずれの場合も覆工コンクリートに発生する応力は小さく永久覆工として健全性は確保される。
4. 同様に、横坑支保についても、良好な岩盤であるため、変位抑制効果は見られなかったが、肌落ち防止等の観点からロックボルト程度の支保は必要であると考えられる。

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

契約番号：1306A00484

機構担当部課室及び担当者：東濃地科学センター 地質環境特性研究グループ 武田精悦

* 鹿島建設（株）技術研究所

** 鹿島建設（株）ITソリューション部

The geomechanical evaluation and analysis of surrounding rock
mass behavior in excavating research shafts and adits

Takayuki Mori*, Seiji Morikawa**, Kazuto Tabei**,
Keita Iwano*

Abstract

JNC Tono Geoscience Center advanced the plan for a comprehensive geoscientific research program featuring construction of an underground research laboratory in order to develop the research and evaluation method of geological environment.

In the prospective site of the laboratory, some geomechanical investigations were carried out using 1000m borehole and mechanical data about Toki granite were obtained. And, further evaluation and analysis are scheduled for design of the underground research laboratory.

Therefore, in this report, following analysis was carried out based on these mechanical data.

1. Based on the research data and conceptual model of the prospective site, the rock mechanics model was made for 3-D FEM analysis, and 3D stress distribution that correspond with in-situ data was obtained for the surround wide area.
2. 2-D MBC analysis that can consider the discontinuous rock behavior was conducted for the shaft and the adit case. For the shaft case, rock behavior was small in fine rock zone, but large displacement was found in the fault zone. For the adit case, the behavior of the joint opening and rock displacement was varied with orientation of the adit. But this behavior scale was small.
3. For the shaft case, distinct support effect wasn't found in the fine rock. In the fault zone, the steel support was yielded, but this seemed to contribute to the prevention of rock fall or expansion of loosened zone. The lining concrete was assured for the permanent support because it was estimated to carry small stress.
4. For the adit case, displacement control effect wasn't shown in the fine rock, but for the same reason in the shaft case, rockbolt supposed to be need.

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

JNC Liaison : Geoscience Research Group, Tono Geoscience Center

* : Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation

** : IT Solution Department , Kajima Corporation

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

1. はじめに	1-1
2. 業務概要	2-1
2.1 件名	2-1
2.2 実施期間	2-1
2.3 実施機関	2-1
2.4 納入場所	2-1
2.5 実施内容	2-1
2.6 参考技術資料	2-1
3. 岩盤力学モデルの構築	3-1
3.1 目的および概念	3-1
3.2 解析領域の岩盤構造モデルおよび解析メッシュ	3-2
3.2.1 解析領域の岩盤モデル	3-2
3.2.2 解析メッシュ	3-4
3.3 解析条件ならびに物性値	3-11
3.3.1 初期応力値	3-11
3.3.2 岩盤および断層部物性値	3-16
3.3.3 解析ケース	3-23
3.4 解析結果	3-26
3.5 岩盤力学モデルおよび初期応力解析結果のまとめ	3-43
4. 研究坑道掘削に伴う周辺岩盤への影響に関する予測	4-1
4.1 解析目的	4-1
4.2 MBC 解析の概要	4-1
4.3 解析領域および解析条件	4-6
4.3.1 深地層研究所研究坑道レイアウト	4-6
4.3.2 立坑の解析領域	4-6
4.3.3 横坑の解析領域	4-6
4.4 境界応力条件および物性値	4-9
4.4.1 初期応力値	4-9
4.4.2 岩盤および断層部物性値	4-13
4.4.3 節理に関する物性値	4-13
4.4.4 支保パターンおよび支保物性値	4-23
4.4.5 透水係数	4-26
4.4.6 弾性係数	4-31

4.4.7	解析ケース	4-32
4.5	立坑解析結果	4-36
4.5.1	変形量	4-36
4.5.2	主応力	4-39
4.5.3	亀裂開口量	4-41
4.5.4	安全率	4-46
4.5.5	等価透水係数	4-49
4.5.6	等価弾性係数	4-54
4.5.7	覆工コンクリート応力	4-58
4.5.8	鋼製支保工に働く軸力と応力	4-63
4.6	横坑解析結果	4-68
4.6.1	変形量	4-68
4.6.2	主応力	4-71
4.6.3	亀裂開口量	4-73
4.6.4	安全率	4-78
4.6.5	等価透水係数	4-80
4.6.6	等価弾性係数	4-85
4.6.7	吹付けコンクリート応力	4-90
4.6.8	ロックボルト軸力	4-95
4.7	MBC モデルの予測解析まとめ	4-99
4.7.1	立坑解析結果のまとめ	4-99
4.7.2	横坑解析結果のまとめ	4-100
5.	解析結果の総合的解釈・評価	5-1
5.1	岩盤モデルの構築と3次元解析結果の評価	5-1
5.2	MBC モデルによる予測解析の評価	5-1
5.2.1	立坑解析の結果の評価	5-1
(1)	岩盤挙動の特徴と評価	5-1
(2)	坑道周辺の破壊領域の評価	5-2
(3)	坑道周辺岩盤への物性変化の評価	5-2
(4)	立坑の覆工支保に関する評価	5-3
5.2.2	横坑解析の結果の評価	5-4
(1)	岩盤挙動の特徴と評価	5-4
(2)	坑道周辺の破壊領域の評価	5-4
(3)	坑道周辺岩盤への物性変化の評価	5-4
(4)	横坑の支保の提案（坑道展開方向による力学的影響の違い）	5-5

参考文献

図 一 覧

3 章

- 図 3. 2. 1 3次元解析領域
- 図 3. 2. 2 解析領域(平面図)
- 図 3. 2. 3 解析領域(立体図)
- 図 3. 2. 4 解析メッシュ 1 (東側面図)
- 図 3. 2. 5 解析メッシュ 2 (南側面図)
- 図 3. 2. 6 解析メッシュ 3 平面図(EL+140 レベル)
- 図 3. 3. 1 水圧破碎法測定結果(AN-1)
- 図 3. 3. 2 水圧破碎法測定結果(MIU-2)
- 図 3. 3. 3 水圧破碎法測定結果(MIU-3)
- 図 3. 3. 4 各ボーリング孔ごとの室内試験結果(接線弾性係数・ポアソン比)
- 図 3. 3. 5 各ボーリング孔ごとの室内試験結果 2(見かけ比重)
- 図 3. 3. 6 各ボーリング孔ごとの弾性波速度結果(室内試験・原位置速度試験)
- 図 3. 3. 7 各ボーリング孔ごとの弾性波速度(室内試験・原位置速度試験)と弾性係数
- 図 3. 3. 8 境界条件の設定方法
- 図 3. 4. 1 3次元応力コンター図
- 図 3. 4. 2 3次元応力コンター図(CASE1)
- 図 3. 4. 3 3次元応力コンター図(CASE2)
- 図 3. 4. 4 3次元応力コンター図(CASE3)
- 図 3. 4. 5 3次元応力コンター図(CASE4)
- 図 3. 4. 6 3次元応力解析結果(σ_x :東西方向応力)
- 図 3. 4. 7 3次元応力解析結果(σ_y :南北方向応力)
- 図 3. 4. 8 3次元応力解析結果(σ_z :鉛直方向応力)
- 図 3. 4. 9 3次元応力解析結果(τ_{xy})
- 図 3. 4. 10 3次元応力解析結果($\sigma_{\max}$:水平面内最大主応力)
- 図 3. 4. 11 3次元応力解析結果($\sigma_{\min}$:水平面内最小主応力)
- 図 3. 4. 12 3次元応力解析結果(水平面内主応力方向)
- 図 3. 4. 13 3次元応力解析結果(側圧比 $K_1=\sigma_x/\sigma_z$)
- 図 3. 4. 14 3次元応力解析結果(側圧比 $K_2=\sigma_y/\sigma_z$)
- 図 3. 4. 15 3次元応力解析結果(側圧比 $K_3=\sigma_{\max}/\sigma_z$)

4 章

- 図 4. 2. 1 マイクロメカニクスに基づく連続体モデル
- 図 4. 2. 2 起伏を有するジョイント
- 図 4. 2. 3 問題の重ね合わせ
- 図 4. 2. 4 円形ジョイントを含んだ単純モデル
- 図 4. 2. 5 巨視的接線コンプライアンスの算定手順
- 図 4. 3. 1 立坑および横坑メッシュ図
- 図 4. 4. 1 立坑解析 断面初期応力図
- 図 4. 4. 2 横坑 初期応力図(深度 GL=-500m)
- 図 4. 4. 3 横坑 初期応力図(深度 GL=-945m)
- 図 4. 4. 4 各岩盤ゾーンごとの卓越亀裂群のシュミットネット
- 図 4. 4. 5 各卓越節理群の亀裂間隔ヒストグラム
- 図 4. 4. 6 割れ目トレース長の分布
- 図 4. 4. 7 先行変位率の算出
- 図 4. 4. 8 原位置透水試験結果(岩盤ゾーン別)
- 図 4. 4. 9 原位置透水試験結果(ボーリング孔別)
- 図 4. 4. 10 単一亀裂セットの概念図
- 図 4. 4. 11 複数亀裂セットの概念図
- 図 4. 4. 12 横坑の方向と座標系の設定
- 図 4. 5. 1 立坑解析結果 変形図
- 図 4. 5. 2 立坑解析結果 主応力図
- 図 4. 5. 3 立坑解析結果 亀裂開口量分布図(全亀裂)
- 図 4. 5. 4 立坑解析結果 亀裂開口量分布図(亀裂セット1)
- 図 4. 5. 5 立坑解析結果 亀裂開口量分布図(亀裂セット2)
- 図 4. 5. 6 立坑解析結果 亀裂開口量分布図(亀裂セット3)
- 図 4. 5. 7 立坑解析結果 安全率分布図
- 図 4. 5. 8 安全率の定義
- 図 4. 5. 9 立坑解析結果 透水係数分布図(3成分重ね合せ)
- 図 4. 5. 10 立坑解析結果 透水係数分布図(亀裂セット1)
- 図 4. 5. 11 立坑解析結果 透水係数分布図(亀裂セット2)
- 図 4. 5. 12 立坑解析結果 透水係数分布図(亀裂セット3)
- 図 4. 5. 13 立坑解析結果 等価弾性係数比 $E1$ 分布図
- 図 4. 5. 14 立坑解析結果 等価弾性係数比 E_x 分布図
- 図 4. 5. 15 立坑解析結果 等価弾性係数比 E_y 分布図
- 図 4. 5. 16 立坑解析結果 覆工コンクリート応力図
- 図 4. 5. 17 覆工コンクリート要素番号

- 図 4. 5. 18 立坑解析結果 覆工応力グラフ
- 図 4. 5. 19 立坑 鋼製支保工軸力・せん断力・曲げモーメント図
- 図 4. 5. 20 鋼製支保工要素番号図
- 図 4. 5. 21 立坑解析結果 鋼製支保工の軸力・応力グラフ
- 図 4. 6. 1 横坑解析結果 変形図(主応力方向ごとに坑軸展開)
- 図 4. 6. 2 横坑解析結果 主応力図(主応力方向ごとに坑軸展開)
- 図 4. 6. 3 横坑解析結果 亀裂開口量分布図(全亀裂)
- 図 4. 6. 4 横坑解析結果 亀裂開口量分布図(亀裂セット 1)
- 図 4. 6. 5 横坑解析結果 亀裂開口量分布図(亀裂セット 2)
- 図 4. 6. 6 横坑解析結果 亀裂開口量分布図(亀裂セット 3)
- 図 4. 6. 7 横坑解析結果 安全率分布図
- 図 4. 6. 8 横坑解析結果 全透水係数分布図(主応力方向ごとに坑軸展開)
- 図 4. 6. 9 横坑解析結果 透水係数分布図亀裂セット 1(主応力方向ごとに坑軸展開)
- 図 4. 6. 10 横坑解析結果 透水係数分布図亀裂セット 2(主応力方向ごとに坑軸展開)
- 図 4. 6. 11 横坑解析結果 透水係数分布図亀裂セット 3(主応力方向ごとに坑軸展開)
- 図 4. 6. 12 横坑解析結果 等価弾性係数比 $E1$ 分布図(主応力方向ごとに坑軸展開)
- 図 4. 6. 13 横坑解析結果 等価弾性係数比 E_x 分布図(X 方向の弾性係数比)
- 図 4. 6. 14 横坑解析結果 等価弾性係数比 E_y 分布図(Y 方向の弾性係数比)
- 図 4. 6. 15 横坑解析結果 吹付コンクリート応力図(主応力方向ごとに坑軸展開)
- 図 4. 6. 16 横坑の吹付コンクリート要素番号図
- 図 4. 6. 17 横坑解析結果 吹付コンクリート応力グラフ
- 図 4. 6. 18 横坑解析結果 ロックボルト軸力分布図(主応力方向ごとに坑軸展開)
- 図 4. 6. 19 横坑のロックボルト要素番号図

表 一 覧

3 章

- 表 3. 2. 1 岩盤構造モデルにおけるゾーニング
- 表 3. 2. 2 3次元メッシュの節点数・要素数
- 表 3. 3. 1 初期応力測定結果一覧表
- 表 3. 3. 2 3次元初期応力解析 岩盤・断層部物性値
- 表 3. 3. 3 岩盤等級から予測される物性定数の範囲
- 表 3. 3. 4 解析ケース

4 章

- 表 4. 4. 1 節理に関する物性値一覧
- 表 4. 4. 2 節理に関する物性値一覧(立坑)
- 表 4. 4. 3 節理に関する物性値一覧(横坑軸 最大主応力方向に対して 0°)
- 表 4. 4. 4 節理に関する物性値一覧(横坑軸 最大主応力方向に対して 45°)
- 表 4. 4. 5 節理に関する物性値一覧(横坑軸 最大主応力方向に対して 90°)
- 表 4. 4. 6 節理に関する物性値一覧(横坑軸 最大主応力方向に対して 135°)
- 表 4. 4. 7 支保パターン一覧
- 表 4. 4. 8 岩盤ゾーン別の透水係数の平均値
- 表 4. 4. 9 岩盤ゾーン別の透水係数の代表値
- 表 4. 4. 10 立坑の解析ケースと解析用入力物性値一覧表
- 表 4. 4. 11 横坑の解析ケースと解析用入力物性値一覧表
- 表 4. 5. 1 立坑 掘削壁面変位量
- 表 4. 5. 2 粘着力 C、内部摩擦角 Φ の補正
- 表 4. 5. 3 立坑解析結果 覆工応力一覧表
- 表 4. 5. 4 立坑解析結果 鋼製支保工応力一覧表
- 表 4. 6. 1 横坑 掘削壁面変位量
- 表 4. 6. 2 横坑解析結果 吹付コンクリート応力一覧表
- 表 4. 6. 3 横坑解析結果 ロックボルト軸力一覧表

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構東濃地科学センターは、地質環境の調査技術・評価手法の開発することを目的として、岐阜県瑞浪市において超深地層研究所計画を進めている。

本プロジェクトでは同センターが保有する正馬様用地において地表からの試錐孔掘削並びに各種調査が実施され、それらのデータを用いた地質環境モデルの構築及び研究坑道掘削に伴う地質環境変化の予測が行われる予定である。

本業務では、地表から試錐孔調査において取得した岩盤力学的物性に関するデータに基づき、正馬様用地の岩盤力学モデルを構築し、3次元 FEM 解析により 3次元空間の応力分布を決定した。次に、そのモデルを用いて、MBC (Micro-mechanics Based Continuum Model) により、研究坑道掘削に伴う周辺岩盤への力学的影響に関する予測解析を実施した。そして、これらの解析結果に基づき、坑道周辺岩盤の破壊発生の可能性、等価弾性係数や透水係数の変化、坑道展開方向による力学的影響範囲の違いなどについて考察を行った。

2. 業務概要

2. 1 件名

「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」

2. 2 実施期間

自 平成 13 年 7 月 25 日

至 平成 14 年 3 月 15 日

2. 3 実施機関

鹿島建設技術研究所

〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 (Tel 0424-89-7081)

2. 4 納入場所

岐阜県土岐市泉町定林寺 959 番地 31

核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

2. 5 実施内容

- 1) 岩盤力学モデルの構築及び初期応力解析
- 2) MBC による予測解析
- 3) 解析結果などのとりまとめ及び報告書の作成

2. 6 参考技術資料

本業務を実施するにあたり、核燃料サイクル開発機構殿より貸与を受けた技術資料は以下の通りである。

- ① 技術資料①¹⁾: 「MIU-3 号孔における力学特性調査結果及び正馬様用地における土岐花崗岩体の岩盤力学概念モデル」; JNC TN7420 2001-001
- ② 技術資料②²⁾: 「土岐花崗岩を対象としたジョイントせん断試験」
JNC TJ7430 2001-002 抜粋資料
- ③ 技術資料③³⁾: 「超深地層研究所研究坑道における研究及び施工に関する検討」
JNC TJ7400 2001-005(1)
- ④ 地表データ: 正馬様用地を含む 12 km×12 km の 20m ピッチの座標標高データ
(原点: 北緯 36° 00' 00"、東経 137° 10' 00")
- ⑤ BTV 生データ: MIU-1~MIU-3 号孔のボアホールテレビ観察による不連続面データ
- ⑥ 岩盤データ: MIU-1~MIU-3 号孔における岩石物理試験および力学試験結果

- ⑦ 初期応力データ：AN-1、MIU-2、MIU-3 号孔における初期応力測定結果
- ⑧ 概略柱状図：MIU-1、MIU-2、MIU-3 号孔
- ⑨ 原位置弾性波および速度検層データ：MIU-1、MIU-2、MIU-3 号孔
- ⑩ 不連続面データ：MIU-1、MIU-2、MIU-3 号孔
- ⑪ ジョイントせん断試験データ：MIU-1、MIU-2、MIU-3 号孔
- ⑫ 第三紀層に関する資料⁴⁾：「堆積軟岩での立坑掘削に伴う岩盤物性変化の現場計測による検討」，資源と素材，Vol.116，p821-830，2000
- ⑬ 透水試験データ：AN-1、AN-2、MIU-1、MIU-2、MIU-3 号孔における透水試験結果

3. 岩盤力学モデルの構築

3. 1 目的及び概念

試錐調査で得られたデータはポイントデータであること、用地内に存在する月吉断層の影響により用地内の 3 次元応力分布はかなり複雑になっていること、以上を考慮すると、研究坑道掘削に伴う影響予測解析を行うためには、同用地内の深度 1,000m までの範囲の 3 次元応力状態を定量的に把握しておく必要がある。

このため、正馬様用地に掘削された AN・1、MIU・1, 2, 3 号孔において取得した岩盤力学的特性に関するデータに基づき、同用地を対象とした岩盤力学モデルを構築し、そのモデルを用いた 3 次元初期応力解析を実施する。具体的には、研究坑道掘削解析で用いる初期応力を任意断面でかつ定量的に設定できるように、既存の応力測定結果に最も適合する岩盤モデルを逆解析的に推定する。

3. 2 解析領域の岩盤構造モデルおよび解析メッシュ

3. 2. 1 解析領域の岩盤構造モデル

核燃料サイクル開発機構殿より提示された正馬様用地における岩盤力学概念モデルをベースとして岩盤力学モデルの構築を行った。解析領域は境界条件の影響を受けないようにするため正馬様用地を含み、図 3. 2. 1 で示すように南北 2.3km×東西 1.0km とし、深度方向は 1.5km とした。

3次元解析領域内における表層、月吉断層の位置および各岩盤ゾーンの位置は以下の通りとした。

(1) 第三紀層

正馬様用地を含む解析領域は、基盤としての土岐花崗岩の上層に表層部として新第三紀の堆積岩が分布している（層厚は数m～100m程度）。この表層部を解析に考慮するため、核燃料サイクル開発機構殿より提示されたデータより解析領域の地表面データを抽出した。

平面図、立体図をそれぞれ図 3. 2. 2、図 3. 2. 3 に示す。

(2) 月吉断層

月吉断層は既存の調査結果に基づき、本体部及び両側の割れ目帯より構成されるものとし、以下のようなモデル化を行った。

- ・ 走向・傾斜は貸与資料③⁹⁾における設定条件より *N80E63S* とする。
- ・ MIU-2 試錐孔と EL-670m (GL-900m) で交差し、それを起点としてそこから上記走向傾斜に沿って外挿する。ただし、表層部に関しては、下記月吉断層中心部のみ突き抜ける構造とする。
- ・ 月吉断層中心部の幅は、MIU-2、MIU-3 のボーリング柱状図より、鉛直断面に対し、幅 30mを有するものとする。
- ・ 月吉断層周辺部（上盤側、下盤側）は月吉断層中心部の上下にそれぞれ鉛直断面に対し、85mずつ幅を有するものとし、月吉断層中心部と周辺部を併せて、鉛直断面に対し、計 200mの幅を有するものとする。

(3) 各岩盤ゾーンおよび全体のゾーニング

正馬様用地に地下 1,000mの範囲で分布する土岐花崗岩体は既存の調査結果¹⁾に基づき以下の様な初期モデルを設定した。

- ・ 岩盤ゾーンは、表層部（第三紀層）、月吉断層上盤岩体（ゾーン 1、ゾーン 2、ゾーン 3）、月吉断層下盤岩体（ゾーン 4）、月吉断層周辺部（断層上盤側、断層下盤側）、断層中心部の 8 層に分けて設定した。

- ・各ゾーンの詳細については主に MIU-1～MIU-3 のボーリング柱状図を参考に表 3. 2. 1 のように設定した。なお、各試錐孔の地盤高は GL0m=EL230mとした。

表 3. 2. 1 岩盤構造モデルにおけるゾーニング

岩盤区分	岩盤性状	モデル領域
第三紀層	新第三紀堆積岩 (砂岩・泥岩類)	深度EL+140m以上の領域とし、地表の起伏はサイクル機構殿より提示された地表面データを基とする。
Zone1	花崗岩体 (土岐花崗岩) 割れ目が多いゾーン	月吉断層上盤岩体で深度EL+140m～-170m (GL-90m～-400m) の鉛直方向に計310mの幅の領域とする。
Zone2	花崗岩体 (土岐花崗岩) 割れ目が少ないゾーン	月吉断層上盤岩体で深度EL-170m～-470m (GL-400m～-700m) の鉛直方向に計300mの幅の領域とする。
Zone3	花崗岩体 (土岐花崗岩) 割れ目が多いゾーン	月吉断層上盤岩体で深度EL-470m以深 (GL-700m以深) の領域とする
月吉断層 破碎帯	月吉断層および 周縁割れ目帯 (N80E/63S)	<月吉断層中心部> 月吉断層中心部の幅は、鉛直断面に対し、幅30mをもつ領域とする <月吉断層周辺部> 月吉断層中心部の上下にそれぞれ鉛直断面に対し、85mづつ幅をもつものとし、月吉断層中心部と周辺部を併せて、鉛直断面に対し、計200mの幅をもつ領域とする。
Zone4	月吉断層の 下盤側岩体	月吉断層下盤岩体の領域とする。

3. 2. 2 解析メッシュ

3. 2. 1 で設定した 3 次元解析領域の岩盤構造モデルに基づき、3 次元メッシュを作成した。解析メッシュの側面図および平面図を図 3. 2. 4～図 3. 2. 6 に示す。

座標軸は、南北方向を X 軸、東西方向を Y 軸、鉛直方向を Z 軸とし、それぞれ、北方向、東方向、上方向を正とする。

メッシュは中間ステージ（EL-270m：GL-500m）と最終ステージ（EL-715m：GL-945m）レベル周辺を細かく設定し、また、平面図上で座標の基点となる MIU-1 号孔および立坑に最も近い位置にあたる MIU-2 号孔が節点になるように設定した。また、後述する各解析ケースを考慮し、各岩盤ゾーン間に薄層を設定した。

作成したメッシュの節点数・要素数は以下の通りである。

表 3. 2. 2 3 次元メッシュの節点数・要素数

節点数	約22,000
要素数	約20,000

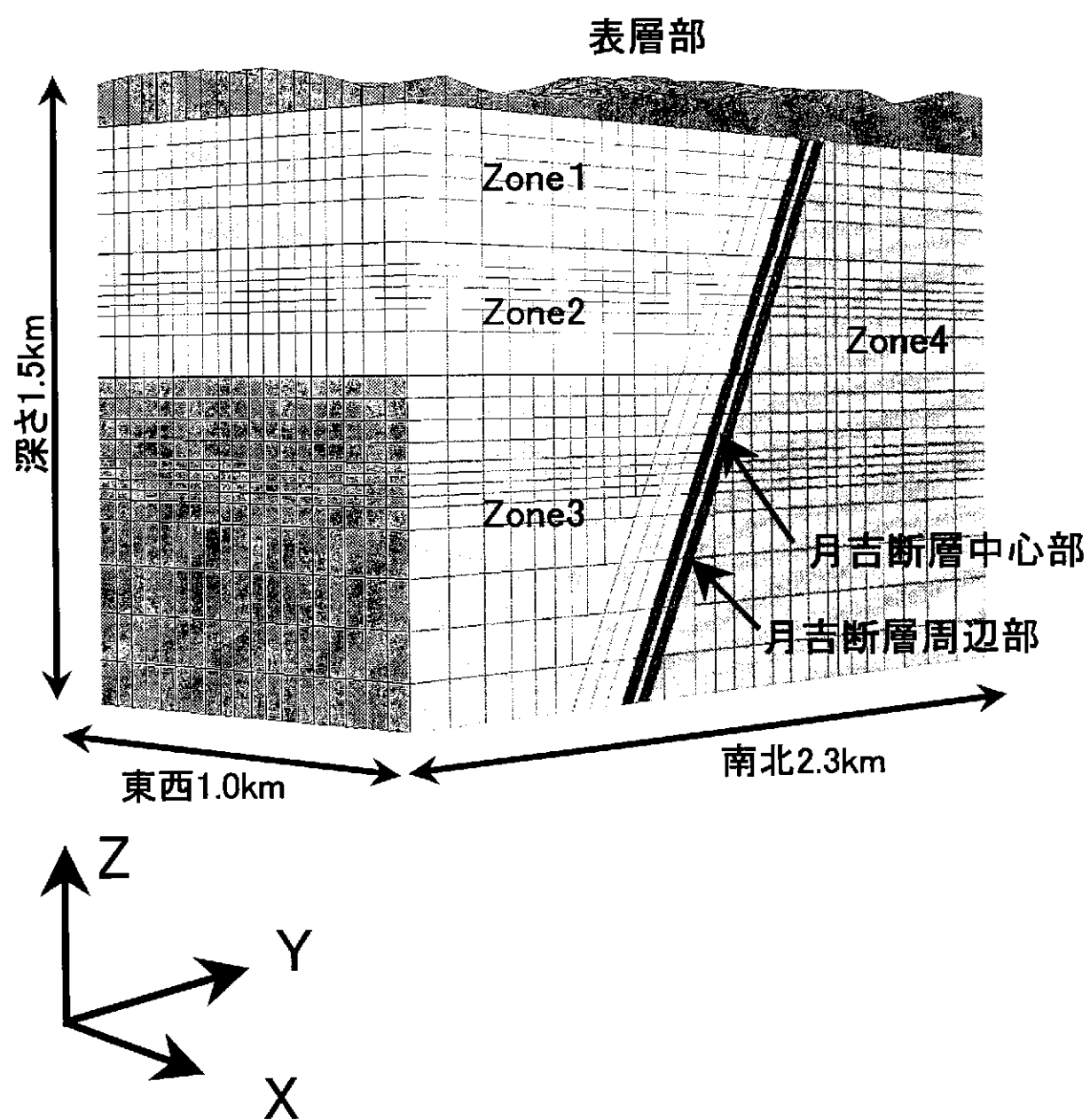


図3. 2. 1 3次元解析領域

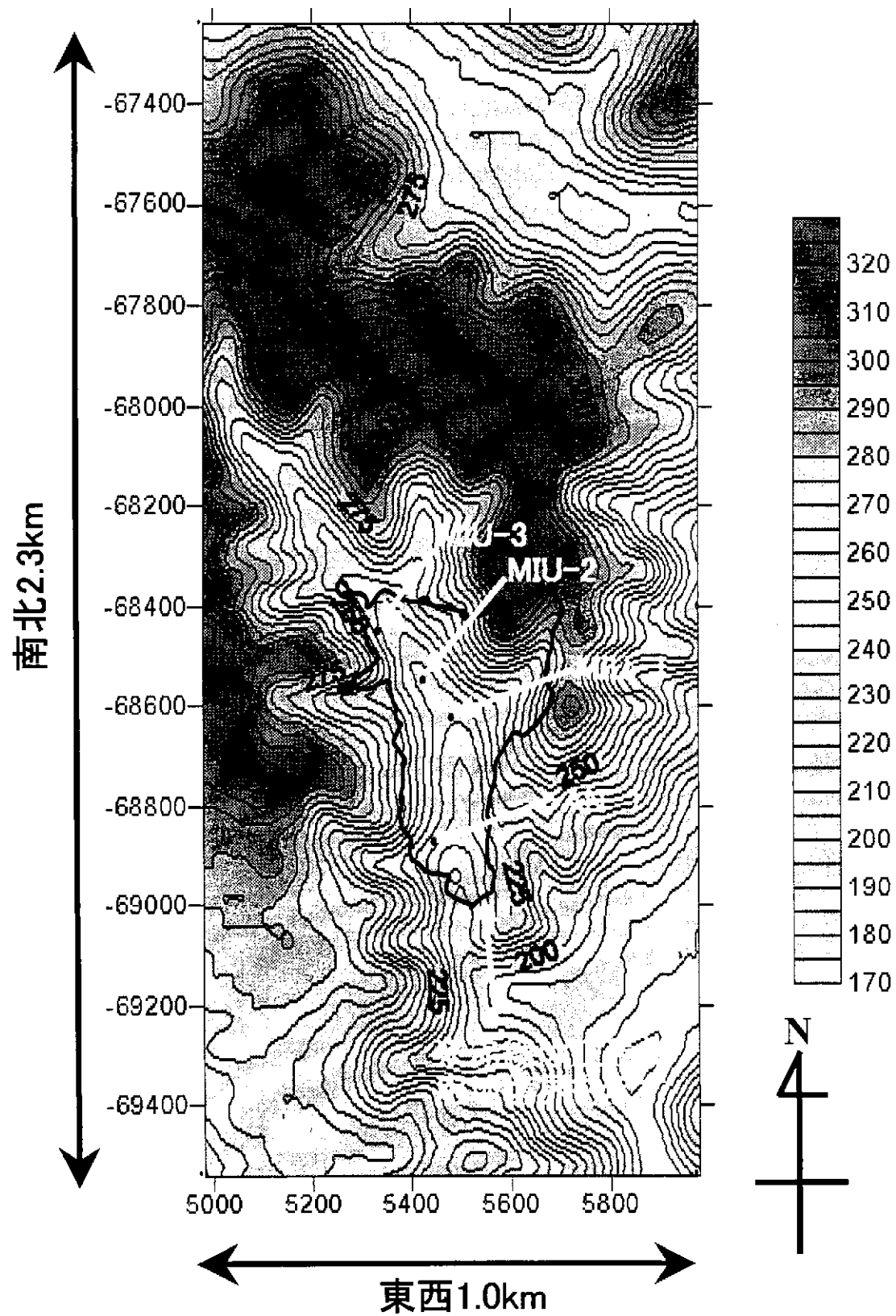


図3. 2. 2 解析領域(平面図)

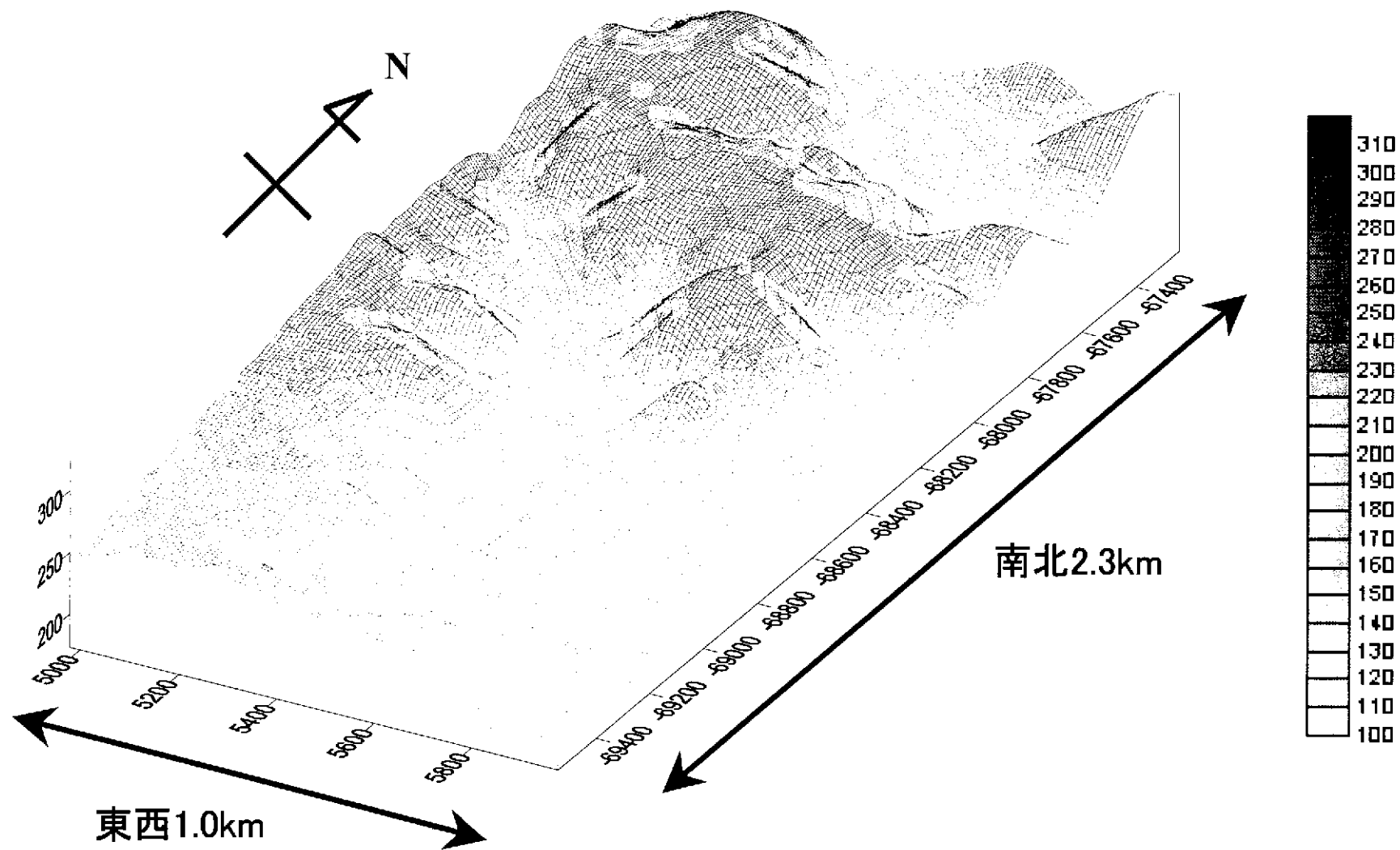


図3. 2. 3 解析領域(立体図)

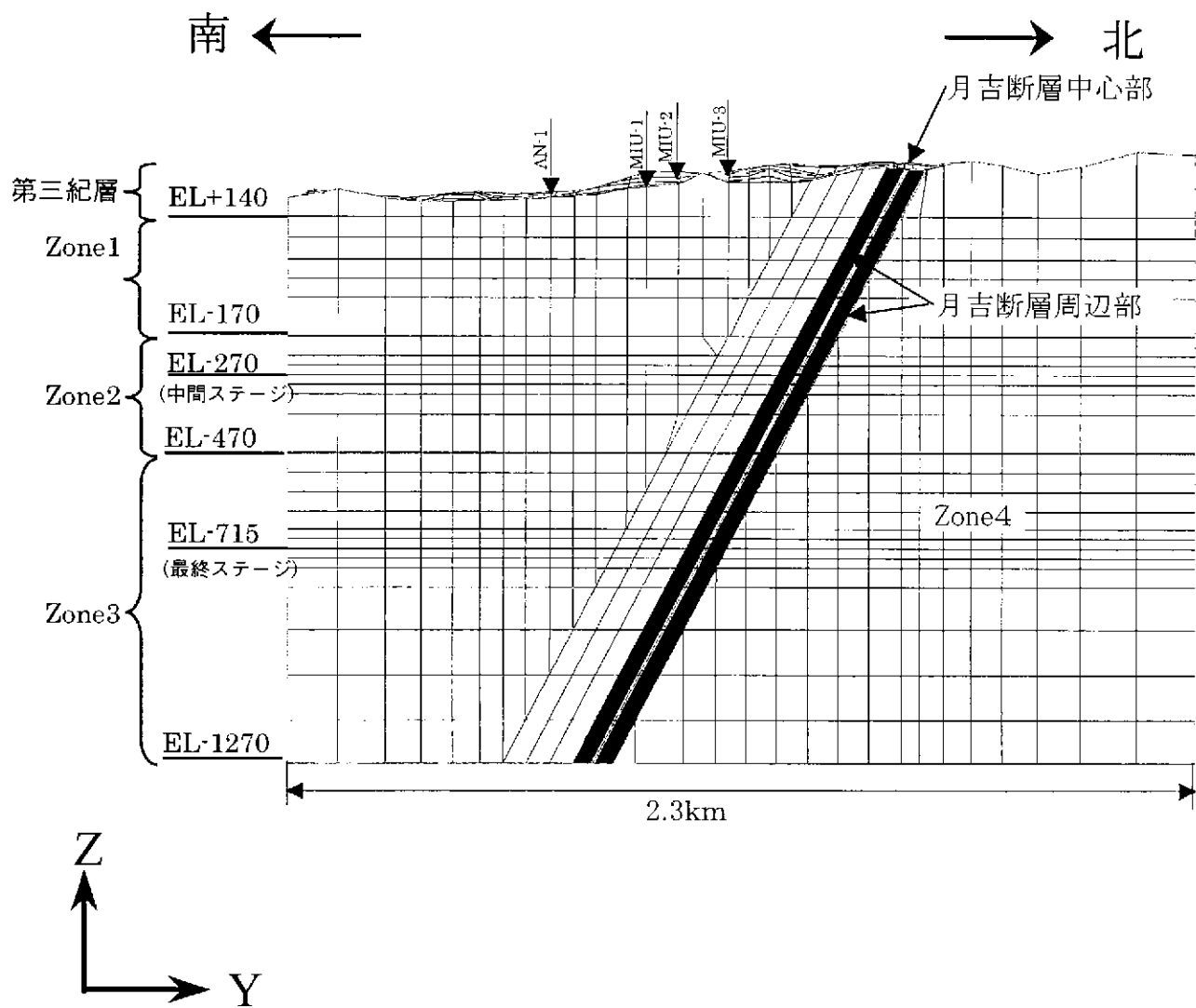


図3. 2. 4 解析メッシュ1(東側面図)

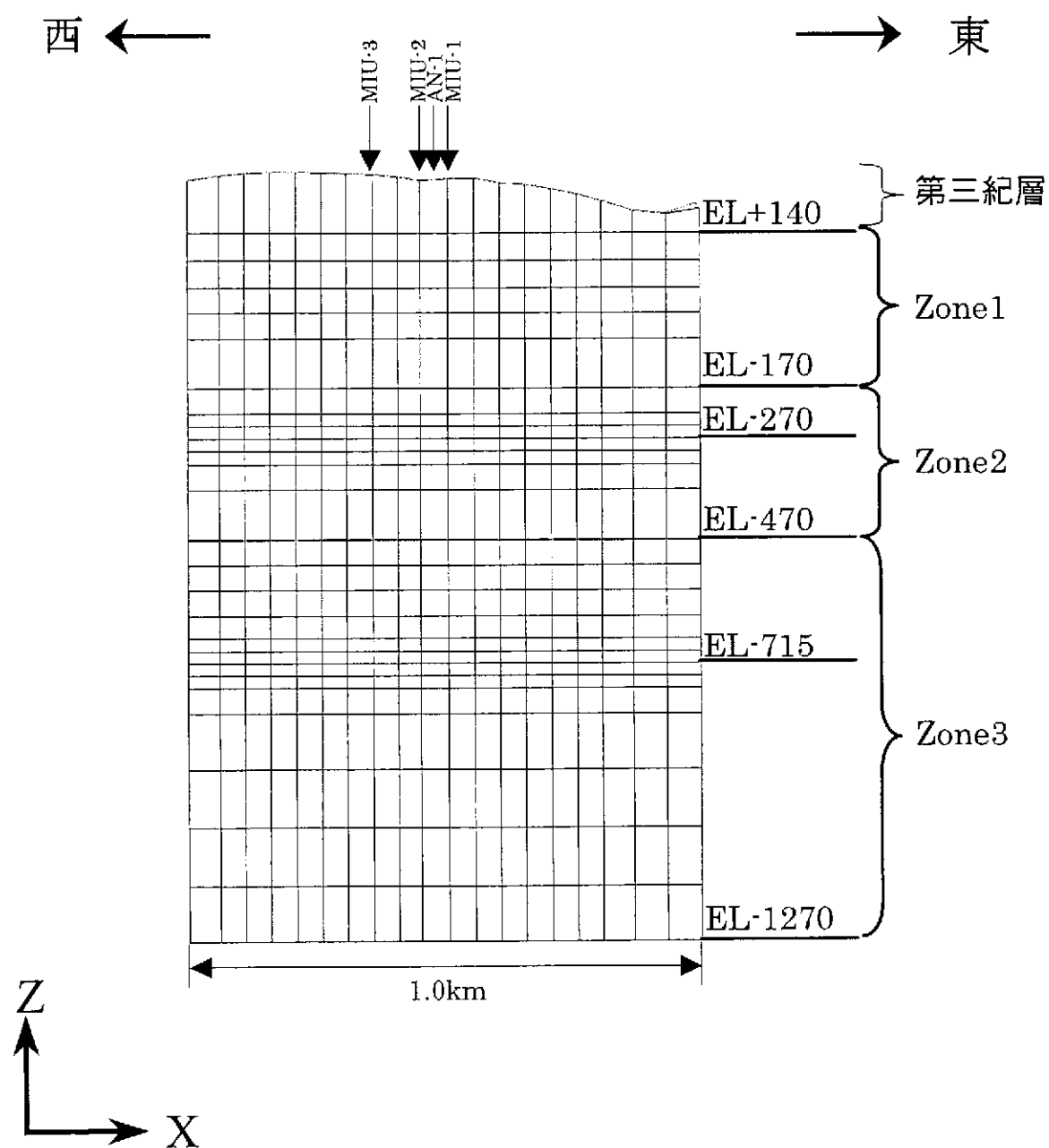


図3. 2. 5 解析メッシュ2(南側面図)

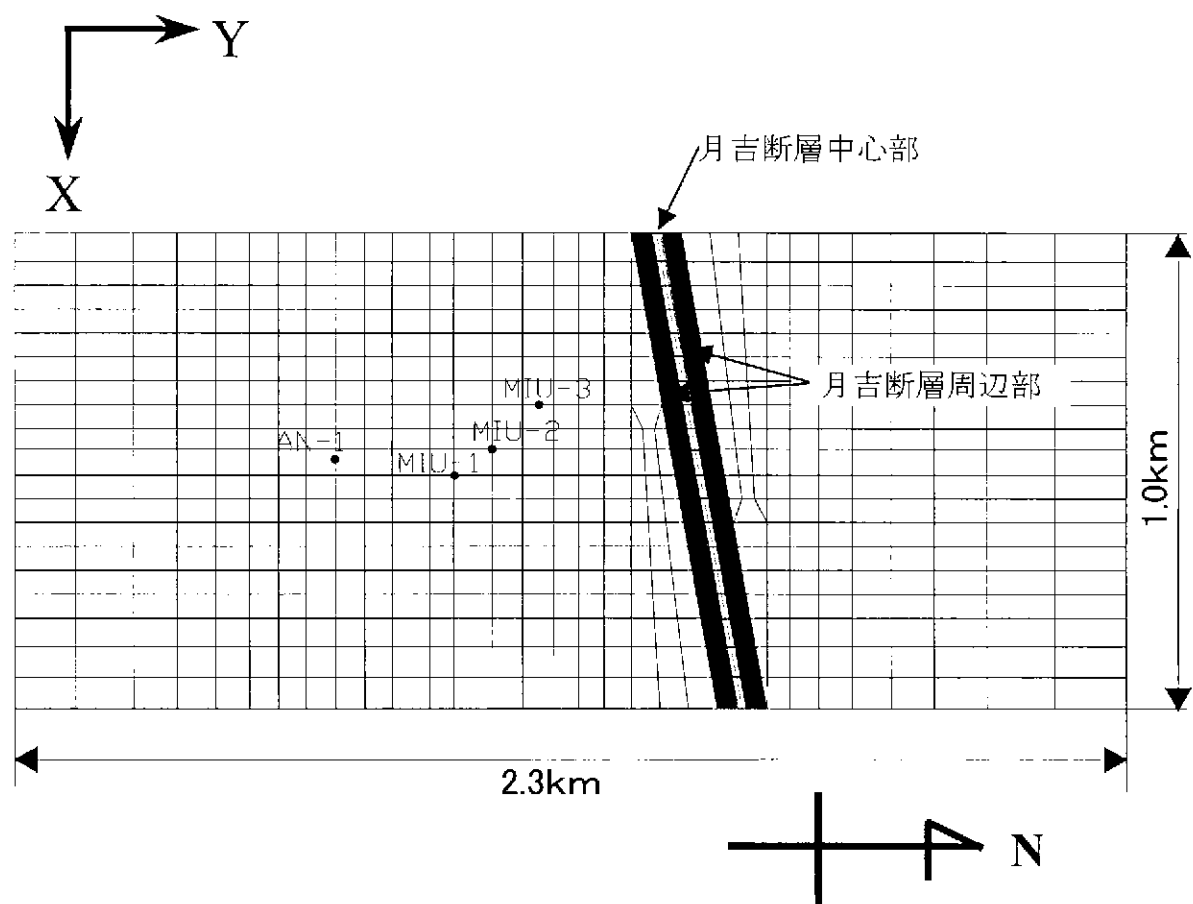


図3. 2. 6 解析メッシュ3平面図(EL+140レベル)

3. 3 解析条件ならびに物性値

3. 3. 1 初期応力値

正馬様用地の岩盤力学モデルの構築に際し、3次元初期応力解析の検証用データとして、AN-1、MIU-2、MIU-3号孔において実施された水圧破碎法による水平面内の主応力値の測定結果を整理した。

具体的には初期応力データより得られた水平面内の主応力よりXY平面の応力(σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy})を算出し、推定土被り圧 σ_z (単位体積重量は後の岩盤物性値より25.6kN/m³とした)との比：側圧係数を算出した。この結果を表3. 3. 1に示す。

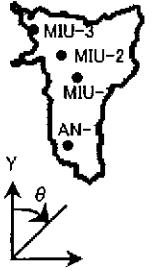
ここで、X軸は東西方向、Y軸は南北方向を示す。

また、図3. 3. 1～図3. 3. 3にそれらの深度変化を各試錐孔ごとに示した。

上記データと既存の技術資料(技術資料①)より推定される初期応力状態を整理すると以下のようなになる。

- ・ 水平面内の最大主応力方向はNNW-SSE～NW-SE方向(N45°W方向)
- ・ 水平面内の応力は、月吉断層上盤側岩体に比べ、下盤側岩体で作用している応力がかかなり小さくなっている。
- ・ 側圧係数 $K_1(=\sigma_x/\sigma_z)$ 、 $K_2(=\sigma_y/\sigma_z)$ はそれぞれ、深度方向に向かうに従い、1に近づいていく。MIU-3号孔では、月吉断層下盤側において、1以下の値となる。

表3.3.1 初期応力測定結果一覧

	ボアホール 深度(m)	水平面内		$\theta(^{\circ})$	$\sigma_x(\text{MPa})$	$\sigma_y(\text{MPa})$	$\tau_{xy}(\text{MPa})$	$\sigma_z(\text{MPa})$	K_1 ($=\sigma_x/\sigma_z$)	K_2 ($=\sigma_y/\sigma_z$)	K_3 ($=\sigma_1/\sigma_z$)	備考
		最小主応力 $\sigma_{\min}(\text{MPa})$	最大主応力 $\sigma_{\max}(\text{MPa})$									
AN-1 水圧破碎試験	49.0	2.9	5.1	0.4	2.90	5.10	0.02	1.25	2.31	4.07	4.07	
	199.0	6.8	14.1	3.8	6.83	14.07	0.48	5.09	1.34	2.76	2.77	
	249.0	9.1	20.3	10.7	9.49	19.91	2.04	6.37	1.49	3.12	3.18	
	309.0	3.8	4.8	-40.2	4.22	4.38	-0.49	7.91	0.53	0.55	0.61	
	351.0	8.8	17.5	-26.8	10.57	15.73	-3.50	8.99	1.18	1.75	1.95	
	404.0	10.4	19.2	-32.5	12.94	16.66	-3.99	10.34	1.25	1.61	1.86	
	498.5	13.6	28	-55.9	23.47	18.13	-6.69	12.76	1.84	1.42	2.19	
	564.0	14.1	29.7	-50.9	23.50	20.30	-7.64	14.44	1.63	1.41	2.06	
	600.0	15.8	25.3	-39.9	19.71	21.39	-4.67	15.36	1.28	1.39	1.65	
	651.0	16.1	29.2	-36.1	20.65	24.65	-6.24	16.67	1.24	1.48	1.75	
	700.0	12.9	20.8	-41.2	16.33	17.37	-3.92	17.92	0.91	0.97	1.16	
	790.0	15.7	22.8	-41.4	18.81	19.69	-3.52	20.22	0.93	0.97	1.13	
	850.0	18.4	28.3	-45.4	23.42	23.28	-4.95	21.76	1.08	1.07	1.30	
	900.0	25.5	48.5	-53.3	40.29	33.71	-11.02	23.04	1.75	1.46	2.11	
MIU-2 水圧破碎試験	941.0	23.4	42.7	-27.5	27.51	38.59	-7.90	24.09	1.14	1.60	1.77	[初期応力の座標系] ・ θ : 最大主応力方位 磁北から時計回り ・X: 東西方向(東を正) ・Y: 南北方向(北を正) ・ σ_z : 単位体積重量を 25.6kN/m ³ として計算
	991.0	18.3	27.8	-71.3	26.82	19.28	-2.89	25.37	1.06	0.76	1.10	
	138.2	7.4	15.6	7.9	7.55	15.45	1.12	3.54	2.14	4.37	4.41	
	158.0	6.5	14.2	-10.0	6.73	13.97	-1.32	4.04	1.66	3.45	3.51	
	187.3	6.9	15.4	-39.6	10.35	11.95	-4.17	4.79	2.16	2.49	3.21	
	254.0	6.6	13.0	-33.0	8.50	11.10	-2.92	6.50	1.31	1.71	2.00	
	294.7	4.2	5.8	-60.5	5.41	4.59	-0.69	7.54	0.72	0.61	0.77	
	301.5	4.0	3.3	-57.5	3.50	3.80	0.32	7.72	0.45	0.49	0.43	
	356.4	9.6	16.9	-57.7	14.82	11.68	-3.30	9.12	1.62	1.28	1.85	
	413.4	13.7	24.3	-4.5	13.77	24.23	-0.83	10.58	1.30	2.29	2.30	
	452.0	12.7	25.2	-19.8	14.13	23.77	-3.98	11.57	1.22	2.05	2.18	
	491.0	15.1	32.3	-54.3	26.44	20.96	-8.15	12.57	2.10	1.67	2.57	
	555.0	11.7	19.8	-39.7	15.00	16.50	-3.98	14.21	1.06	1.16	1.39	
	604.0	9.8	14.6	-44.1	12.12	12.28	-2.40	15.46	0.78	0.79	0.94	
MIU-3 水圧破碎試験	651.0	15.4	25.8	-57.7	22.83	18.37	-4.70	16.67	1.37	1.10	1.55	
	682.0	13.2	23.2	-68.9	21.90	14.50	-3.36	17.46	1.25	0.83	1.33	
	698.5	13.5	23.9	-20.6	14.79	22.61	-3.43	17.88	0.83	1.26	1.34	
	733.7	14.0	24.4	-37.3	17.82	20.58	-5.01	18.78	0.95	1.10	1.30	
	761.3	12.5	20.2	-52.7	17.37	15.33	-3.71	19.49	0.89	0.79	1.04	
	811.3	16.2	26.5	-36.4	19.83	22.87	-4.92	20.77	0.95	1.10	1.28	
	837.7	15.3	27.3	-45.7	21.45	21.15	-6.00	21.45	1.00	0.99	1.27	
	878.1	15.5	27.3	-26.1	17.78	25.02	-4.66	22.48	0.79	1.11	1.21	
	122.0	5.3	11.4	-80.8	11.24	5.46	-0.96	3.12	3.60	1.75	3.65	
	266.0	8.4	17.2	-13.8	8.90	16.70	-2.04	6.81	1.31	2.45	2.53	
	338.0	10.5	20.6	-35.9	13.97	17.13	-4.80	8.65	1.61	1.98	2.38	
	509.0	16.3	35.2	-30.9	21.28	30.22	-8.33	13.03	1.63	2.32	2.70	
	589.0	12.1	21.9	-42.4	16.56	17.44	-4.88	15.08	1.10	1.16	1.45	
	847.0	11.7	16.0	-17.7	12.10	15.60	-1.25	21.68	0.56	0.72	0.74	
	858.0	8.8	9.3	-23.9	8.88	9.22	-0.19	21.96	0.40	0.42	0.42	
	946.0	12.1	14.7	-42.0	13.26	13.54	-1.29	24.22	0.55	0.56	0.61	
	988.0	13.1	16.2	-28.9	13.82	15.48	-1.31	25.29	0.55	0.61	0.64	

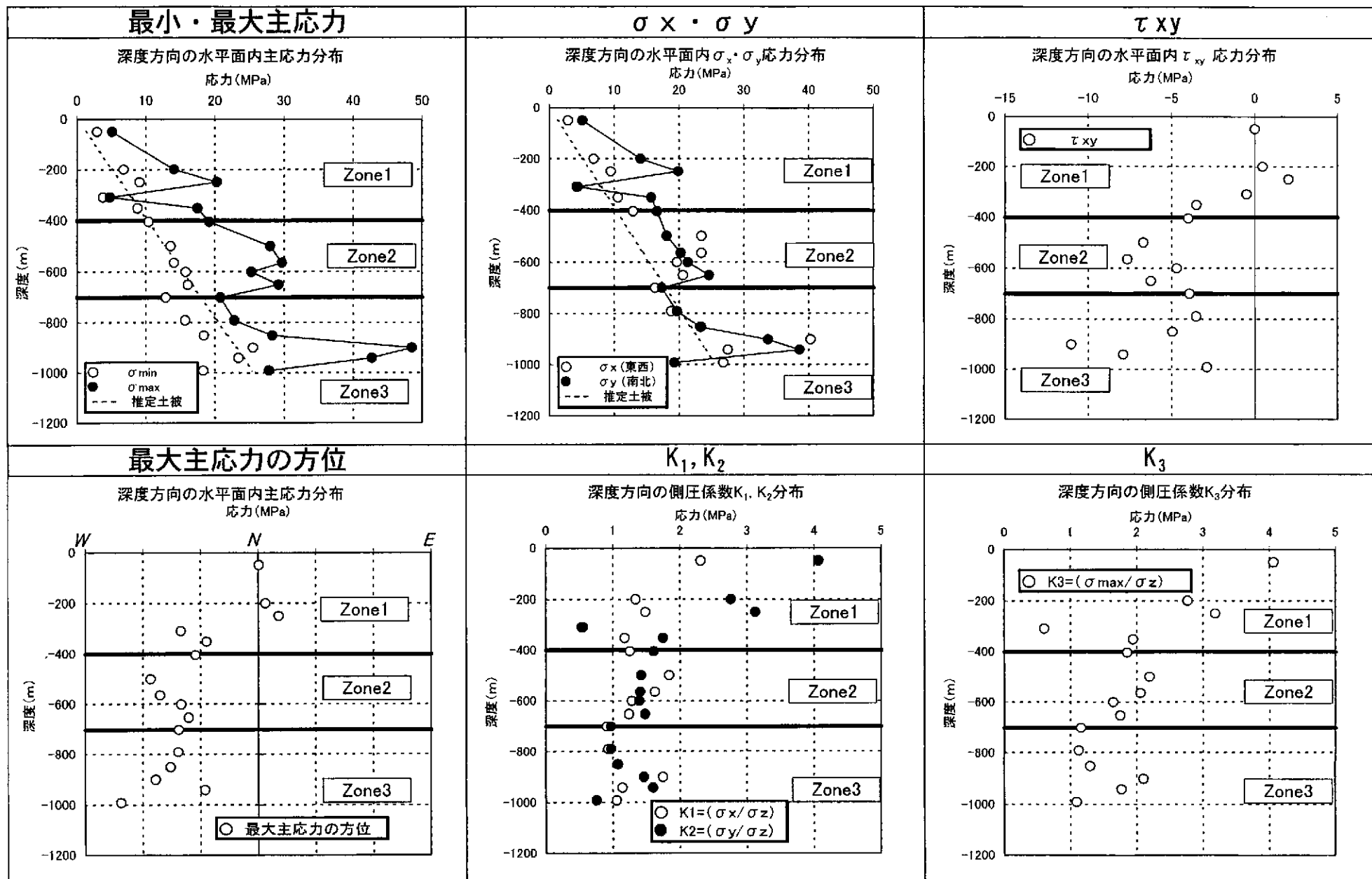


図3. 3. 1 水圧破碎法測定結果 (AN-1)

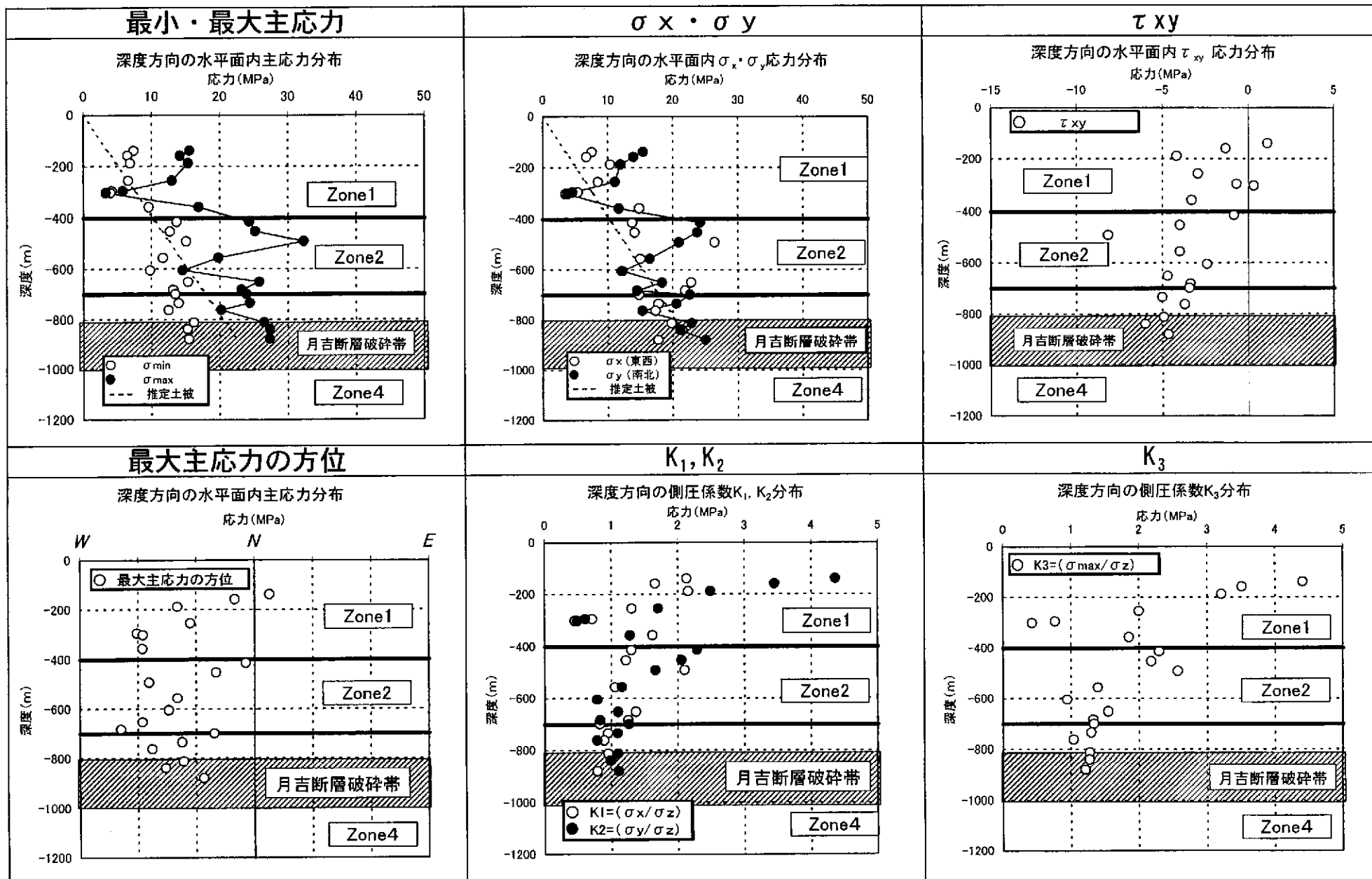


図3. 3. 2 水圧破碎法測定結果 (MIU-2)

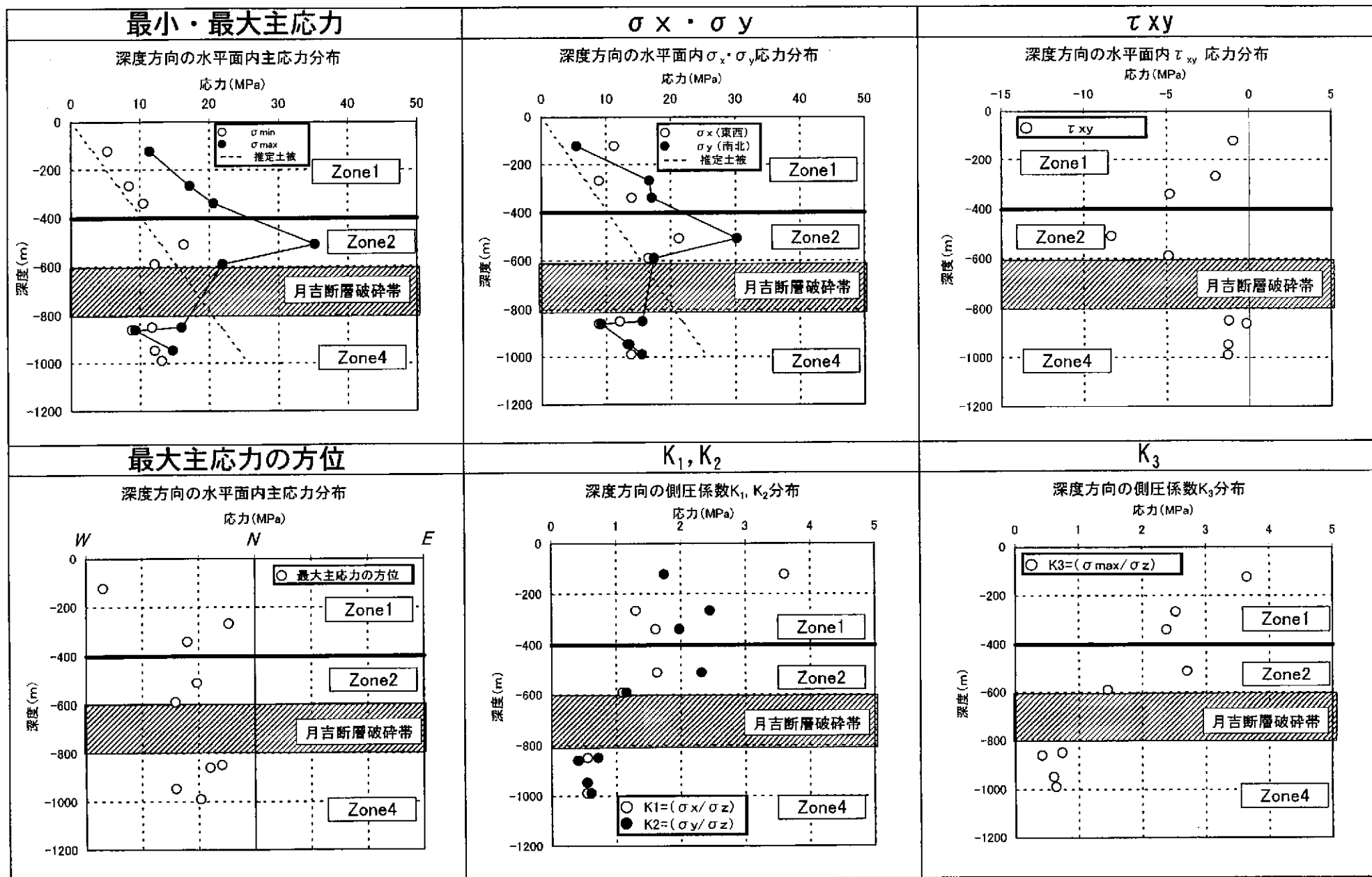


図3. 3. 3 水圧破碎法測定結果 (MIU-3)

3. 3. 2 岩盤および断層物性値

3. 2で設定した3次元岩盤構造モデルに対し、岩盤物性値を設定した。ここでは表層部・Zone1～4と月吉断層周辺部を通常の連続体要素、月吉断層中心部をジョイント要素として取り扱っている。

月吉断層中心部以外に関しては、岩盤ゾーン別に弾性係数(E)、ポアソン比(ν)、単位体積重量(γ)を設定し、月吉断層中心部はジョイント要素であるため、せん断剛性(Ks)、鉛直剛性(Kn)を設定した。表3. 3. 2に3次元初期応力解析用物性値を示すとともに、各物性値の決定方法の詳細を以下に述べる。

(1) 月吉断層中心部以外の領域

(i) 弾性係数

(a) 表層の弾性係数

貸与資料⑫⁴⁾を参考として新第三紀層瑞浪層群の物性値を算出した。

(b) Zone 1～Zone 4の弾性係数

Zone 1～Zone 4の弾性係数は、岩盤データの各ボーリング孔の岩盤物理試験・力学試験結果で得られた接線弾性係数(E_{50})及び岩盤中に内在する割れ目の影響を含むと考えられる速度検層結果を用い、以下の式より計算した後、Zone 毎の平均値を算出した。

$$E = E_{50} \cdot \left(\frac{\nu_p}{V_p} \right)^2 \quad (3. 3. 1)$$

ここで、

E : 原位置における岩盤弾性係数

E_{50} : 室内試験より得られた弾性係数

ν_p : 原位置速度検層で得られた弾性波速度

V_p : 室内超音波試験より得られたP波速度

図3. 3. 4、図3. 3. 5に各試錐孔の岩石物理試験・力学試験結果、図3. 3. 6に室内超音波試験より得られたP波速度(V_p)と原位置速度検層で得られた弾性波速度(ν_p)を、図3. 3. 7に ν_p と V_p を用いて式(3. 3. 1)で計算した弾性係数の深度分布をそれぞれ示した。なお、力学的異方性を評価しうるデータがないことから、ここでは異方性は考慮しないこととする。

(c) 月吉断層周辺部・中心部の弾性係数

月吉断層周辺部及び中心部については、室内試験データ数が少なく、断層付近の物性値を求める際の信頼性に欠けることより、過去の文献より設定するものとした。表 3. 3. 3 より、断層中心部を岩盤等級 C_L~D と判断し、1,500MPa、断層周辺部を C_M と判断し、3,500MPa と設定した。

表 3. 3. 3 岩盤等級から予測される物性定数の範囲⁵⁾

岩盤等級	岩盤の 変形係数 (kg/cm ²)	岩盤の 弾性係数 (kg/cm ²)	岩盤の 粘着力 (kg/cm ²)	岩盤の 内部摩擦角 (°)	岩盤の 弾性波速度 (km/sec)	ロックテスト ハンマー 反発度	孔内裁割試験による		引き抜き 試験による せん断強度 (kg/cm ²)
							変形係数 (kg/cm ²)	接線弾性係数 (kg/cm ²)	
A~B	50,000以上	80,000以上	40以上	55~63	3.7以上	36以上	50,000以上	100,000以上	20以上
C _H	50,000~ 20,000	80,000~ 40,000	40~20	40~55	3.7~3	36~27	60,000~ 15,000	150,000~ 60,000	
C _M	20,000~ 5,000	40,000~ 15,000	20~10	30~45	3~1.5	27~15	20,000~ 3,000	60,000~ 10,000	20~10
C _L	5,000以下	15,000以下	10以下	15~38	1.5以下	15以下	6,000以下	15,000以下	10~5
D									5以下

(ii) ポアソン比

ポアソン比は、各試験孔の岩石力学試験結果を参考に各ゾーン毎に平均値を算出し設定した。月吉断層周辺部は、破碎帯内のコアの力学試験結果を平均して用いた。断層中心部はデータがないため、周辺部と同一の値を設定した。表層（第三紀層）については論文（貸与資料⑫）⁴⁾を参考に設定した。

(図 3. 3. 4 参照)

(iii) 単位体積重量

単位体積重量についても、各試験孔の岩石物理試験結果を参考に各ゾーン毎に平均値を算出し設定した。月吉断層周辺部および中心部は、ポアソン比と同様の考え方で計算している。表層（第三紀層）については論文（貸与資料⑫）⁴⁾を参考に設定した。

(図 3. 3. 5 参照)

(2) ジョイント部

(ii) せん断剛性

月吉断層中心部の中央にジョイント要素を挿入した。このジョイント要素の物性としてせん断剛性 (K_s)、鉛直剛性 (K_n) が必要であるが、月吉断層本体部の力学物性に関するデータは取得されていない。このため技術資料⑫²⁾のジョイントせん断試験結果 (MIU-1~MIU-3 号孔の土岐花崗岩の亀裂性岩盤のジョイント試験データ) より得られた K_s、K_n の平均値をジョイント要素の物性として適用した。

表3. 3. 2 3次元初期応力解析 岩盤・断層部物性値

項目		月吉断層上盤岩体				月吉断層下盤 岩体	月吉断層周辺部			備考
		第三紀層	ゾーン1	ゾーン2	ゾーン3	ゾーン4	断層上盤側	断層中心	断層下盤側	
弾性係数E (GPa)		2.1	49.9	49.4	47.4	48.7	3.5	1.5	3.5	
ポアソン比 ν		0.31	0.36	0.34	0.34	0.39	0.36	0.36	0.36	
単位体積重量 γ (KN/m ³)		19.1	26.0	26.3	26.6	26.2	27.0	27.0	27.0	
ジョイント物性	せん断剛性 ks (Gpa/m)		—	—	—	—	—	0.94	—	
	鉛直剛性 kn (Gpa/m)		—	—	—	—	—	264.0	—	

接線弾性係数（室内試験）

ポアソン比（室内試験）

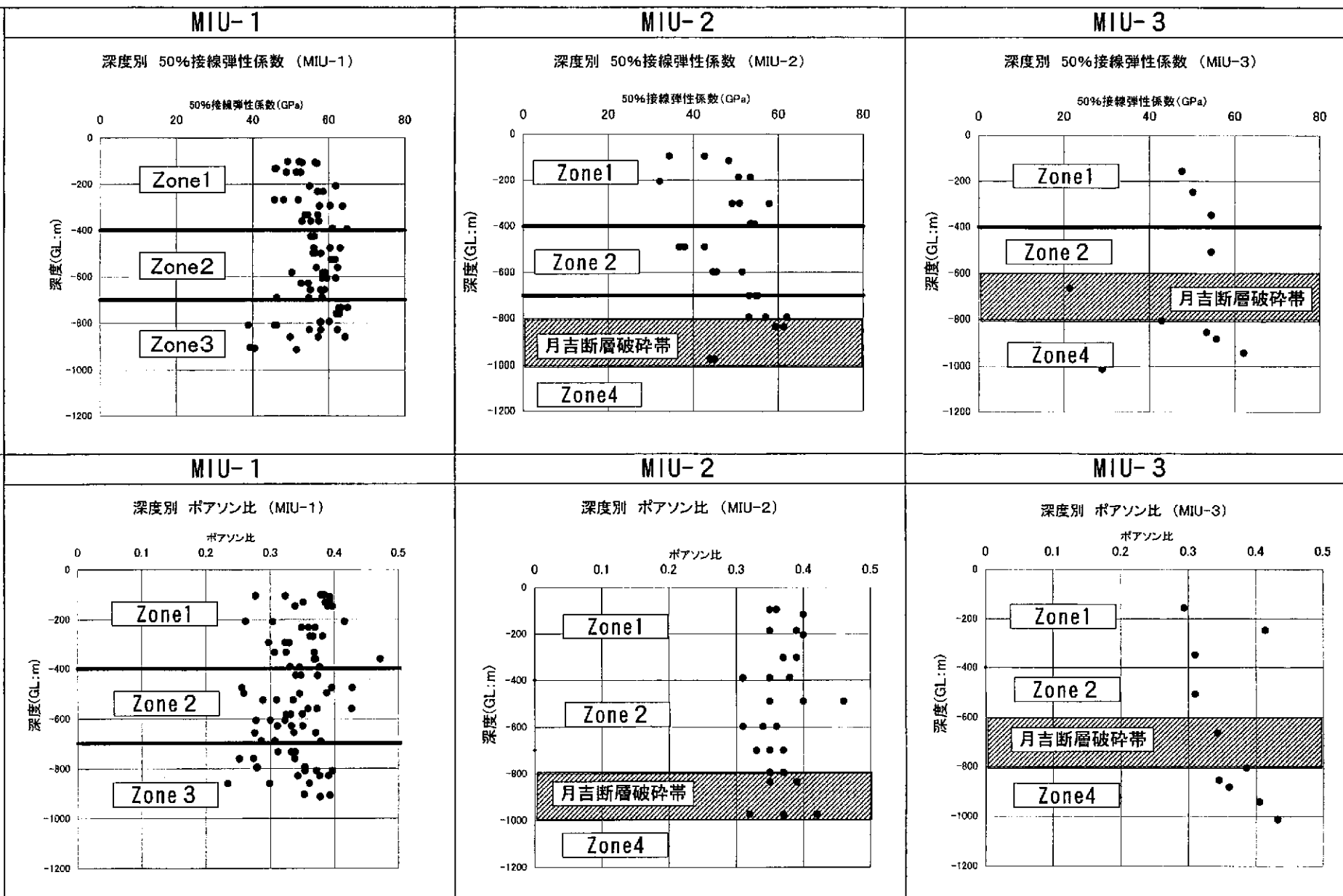


図3. 3. 4 各ボーリング孔ごとの室内試験結果（接線弾性係数・ポアソン比）

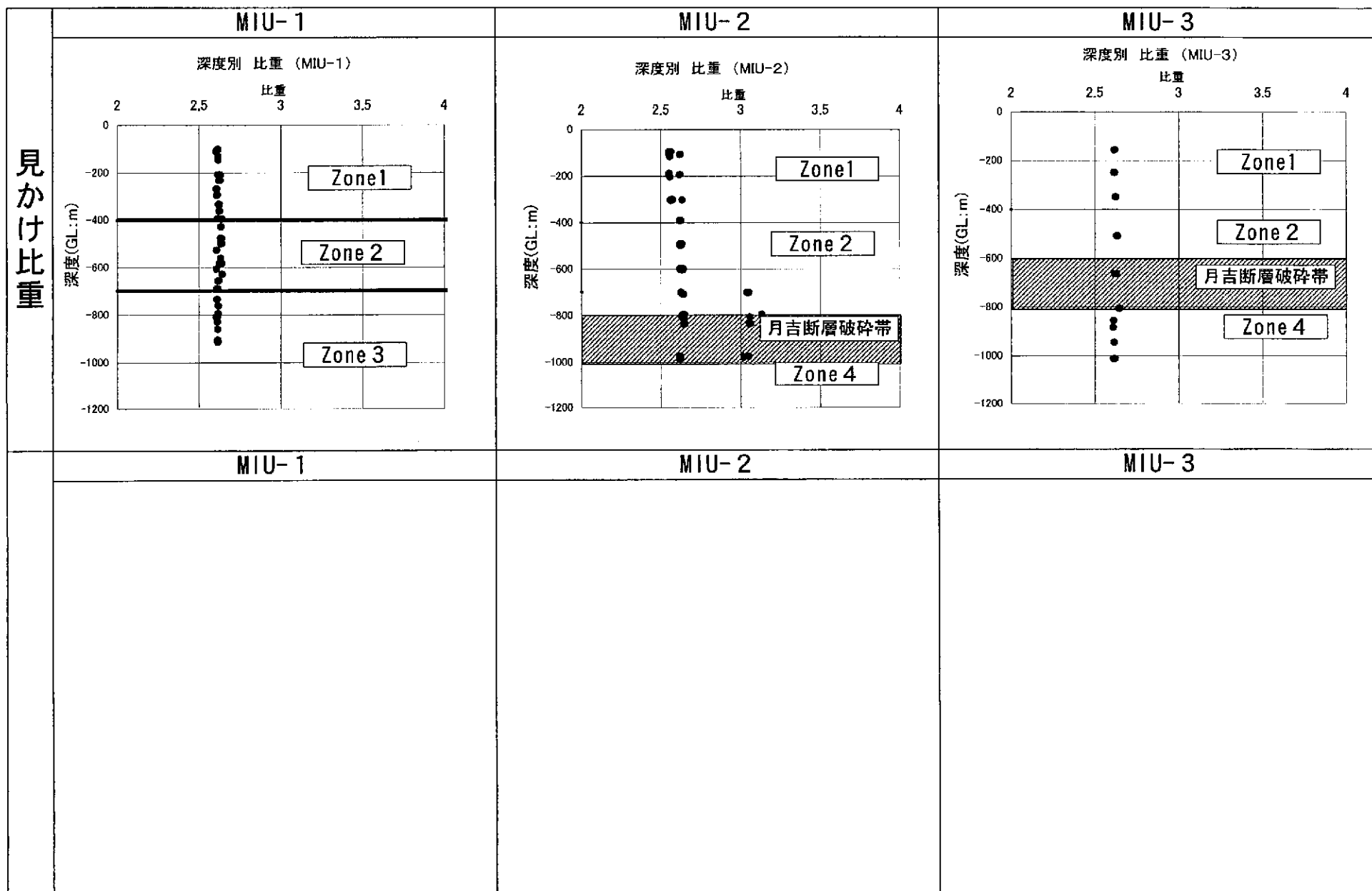


図3. 3. 5 各ボーリング孔ごとの室内試験結果2 (見かけ比重)

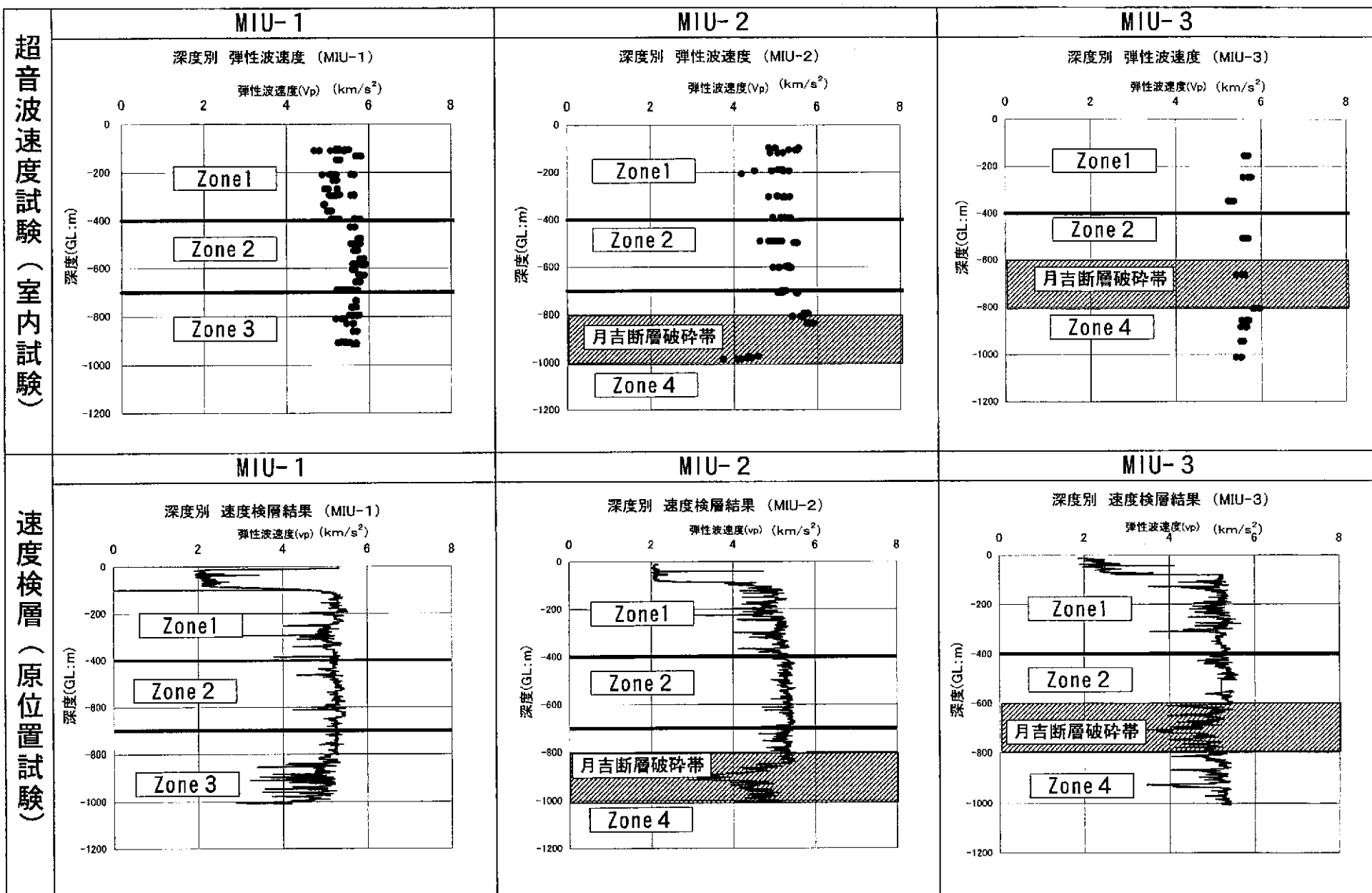


図3. 3. 6 各ボーリング孔ごとの弾性波速度結果（室内試験・原位置速度試験）

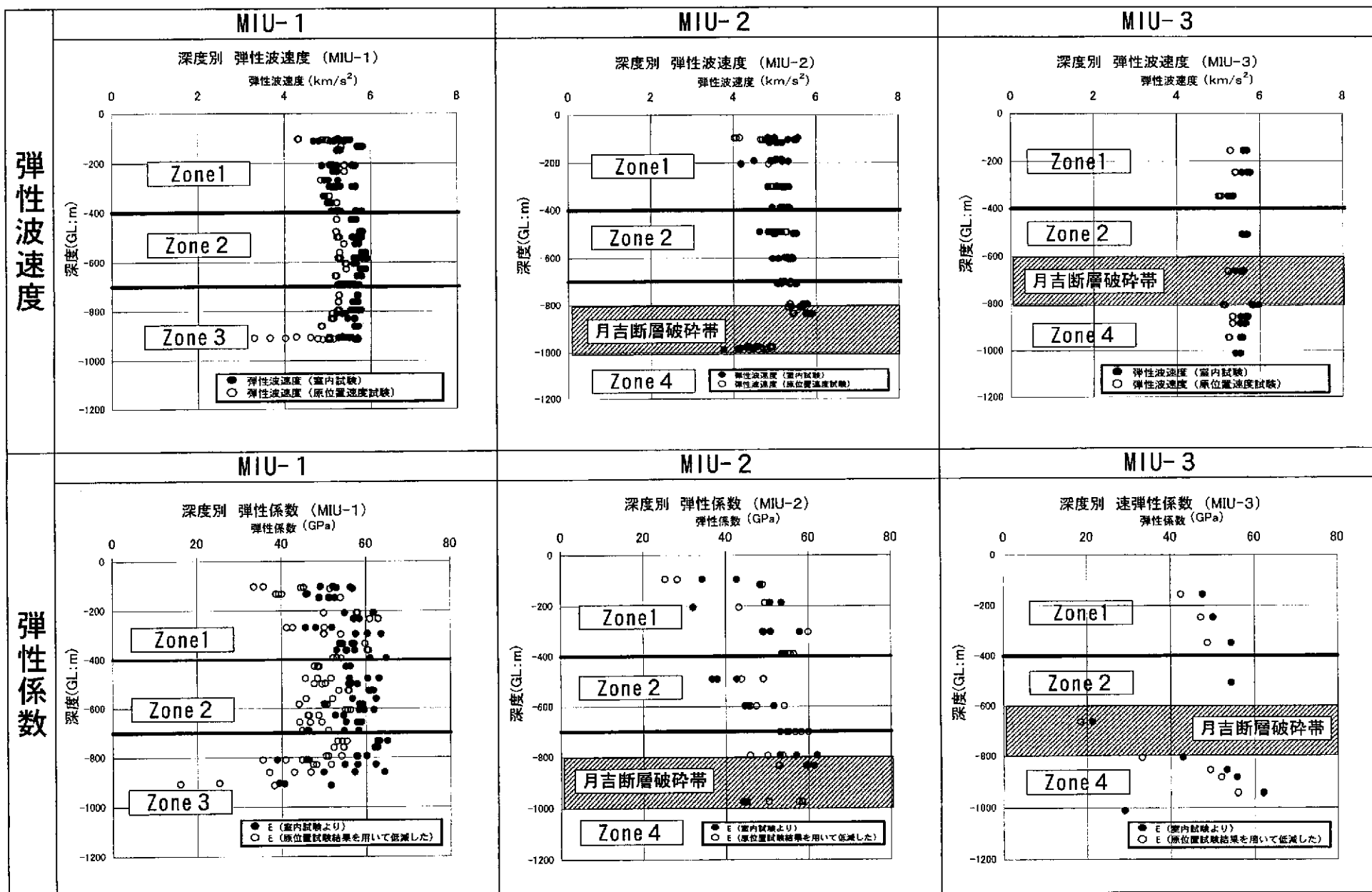


図3. 3. 7 各ボーリング孔ごとの弾性波速度（室内試験・原位置速度試験）と弾性係数

3. 3. 3 解析ケース

3. 3. 1 および 3. 3. 2 において設定した初期応力値、岩盤物性値を基に解析を行う。解析ケースとしては、境界条件を変えた以下の4ケースについて解析を行った。CASE 1 以外は、既存の岩盤力学的概念モデル（貸与資料①）¹⁾を参考に、各岩盤 Zone 間に薄層を設けている。各境界条件については以下の通りであるが、詳細については、表 3. 3. 4 および図 3. 3. 8 に示した

CASE 1・・・自重解析

CASE 2・・・自重解析 + 側面に測定応力相当の荷重
(薄層の弾性係数は岩盤相当)

CASE 3・・・自重解析 + 側面に測定応力相当の荷重
(薄層の弾性係数は岩盤の $1/1,000$)

CASE 4・・・自重解析 + 側面に測定応力相当の荷重
(薄層の弾性係数は岩盤の $1/1,000,000$)

(1) 自重解析

自重解析の境界条件は解析領域底面を完全固定、側面全てローラー固定とし、解析は各岩盤の自重のみで行う。

(2) 側面荷重

側面荷重は北側は、測定値がないためローラーあるいは固定境界とし、南側境界から AN-1 号孔の測定結果と同等となる荷重分布を与えた。具体的には、解析領域底面をローラー固定とし、側面については、側方面直荷重と側方せん断荷重に分けて作用させた。これは、モデルに対し、水平面内主応力が斜め方向から作用している状態を再現するためである。以下に詳細を示す。

(i) 側方面直荷重

側方面直荷重は、解析領域底面と側面の北面と東面をローラーで固定し、西面および南面から面直荷重をかけることとした。

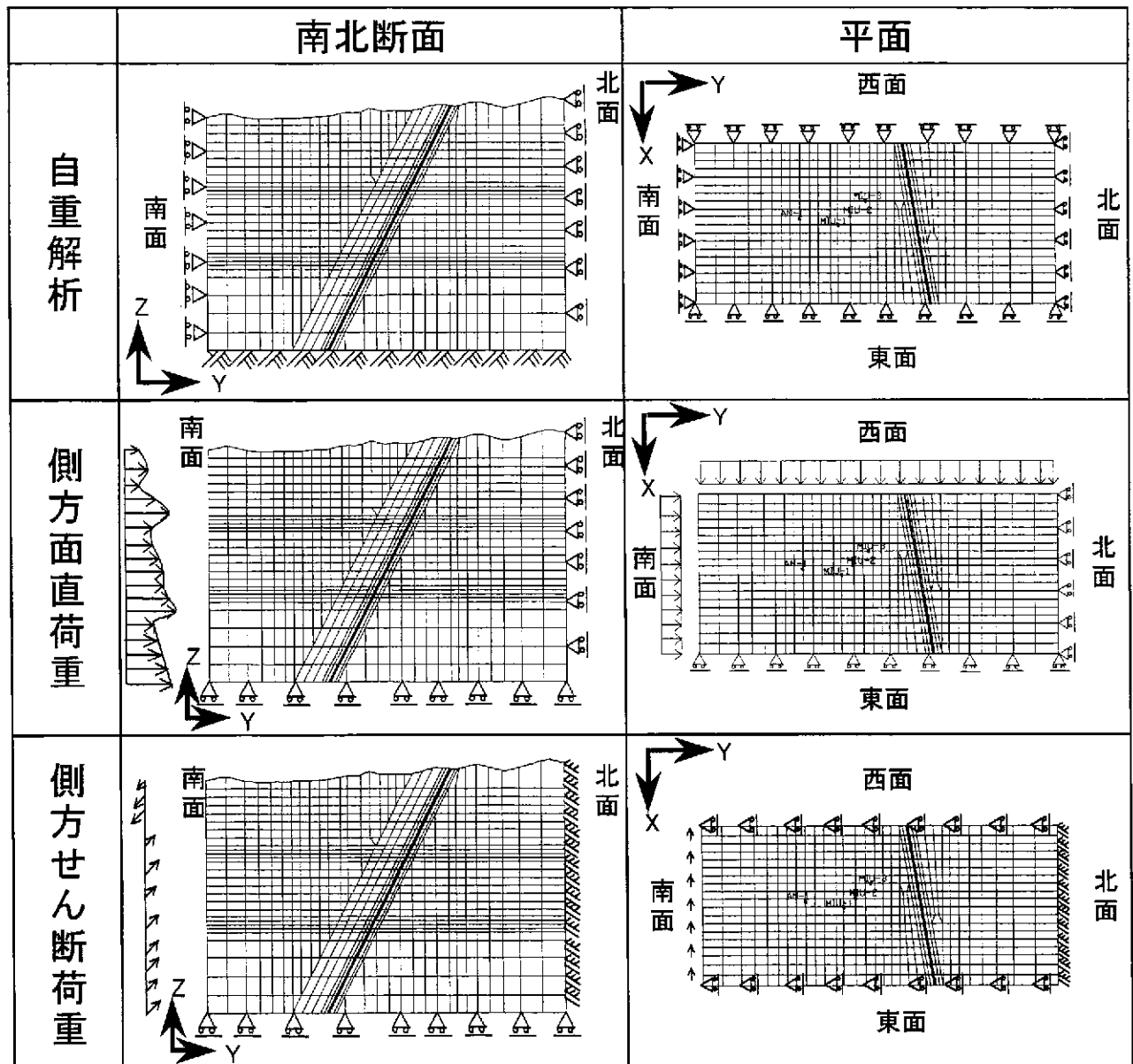
西面から作用させる荷重は、AN-1、MIU-2、MIU-3 で測定された初期応力の平均的な応力、南面から作用させる荷重は荷重点に近い AN-1 の実測値を用いた。ただし、実測値は深度 GL-1,000m 以深の実測値は得られていないので、それ以深は単位体積重量を用いて線形増加させるものとした。

(ii) 側方せん断荷重

側方せん断荷重については、解析領域底面をローラーで固定し、北面を完全固定とした。さらに、解析領域全体に曲げが生じないように東西面を南北方向の変位を固定したローラー固定境界とし、南面に対してせん断荷重として AN-1 の実測値を作用させた。

表3. 3. 4 解析ケース

CASE1	自重解析
CASE2	自重解析 + 側面に測定応力相当の荷重（薄層の弾性係数は岩盤相当）
CASE3	自重解析 + 側面に測定応力相当の荷重（薄層の弾性係数は1/1,000）
CASE4	自重解析 + 側面に測定応力相当の荷重（薄層の弾性係数は1/1,000,000）



※西側側面から作用させる荷重は、AN-1、MIU-2、MIU-3で測定された初期地圧の平均的な応力、南側から作用させる荷重は、荷重点に近いAN-1の実測値を用いた。（ただし、実測値はGL-1,000mまでしか無いので、それ以降は単位体積重量を使って線形増加させた。）

図3. 3. 8 境界条件の設定方法

3. 4 解析結果

図3. 4. 1～図3. 4. 5に3次元初期応力解析結果をケース別に示し、図3. 4. 6～図3. 4. 12にそれぞれボーリング孔ごとに深度別の値を示した。以下、各応力成分の傾向を述べる。

(1) σ_x (東西方向) 応力分布

いずれのケースも、土被りが深くなると σ_x も大きくなる傾向を示している。但し、Case3とCase4では、岩盤ゾーン1と2の間、岩盤ゾーン2と3の間に薄層（弱層）を設けたことにより、この部分の σ_x は小さくなっている。いずれのケースも月吉断層帯に沿う部分の σ_x は周辺岩盤より小さくなっていることが特徴である。これは断層中心部にジョイント要素をモデル化しており、初期応力解析により断層が変位しているためである。

(2) σ_y (南北方向) 応力分布

いずれのケースも土被りが深くなると σ_y も大きくなる傾向を示している。断層部の σ_x は低減しているが、 σ_y については境界南端面から水平荷重を作用させているため、自重解析で低減した σ_y が再度上昇し、周辺岩盤と同様な応力分布となっている。

(3) σ_z (鉛直方向) 応力分布

いずれのケースも月吉断層部の鉛直応力（ σ_z ）は周辺岩盤よりも応力が低減している。これは、断層中心部にジョイント要素をモデル化しており、初期応力解析により断層が変位しているためである。

(4) τ_{xy} 水平面内せん断応力分布

Case1では、月吉断層帯沿の τ_{xy} が小さくなっているが、これは自重解析時の断層の変位によるものである。Case2～Case4では、境界南端面からの水平荷重を作用させているため、断層帯沿の τ_{xy} は周辺岩盤と同様となっている。

(5) σ_{max} 、 σ_{min} 水平面内主応力分布および主応力方向

最大主応力 σ_{max} をみると、Case1では、解析値が実測値より小さく両者は整合しない結果となっている。

最大主応力の作用方向は実測値ではバラツキが大きい、概ねN30°に集まっている。Case2～Case4は概ね実測値に整合しており、中でもCase4がよく整合している。

(6)K 側圧比分布

図3.4.13～図3.4.15に、側圧比を $K_1 = \sigma_x / \sigma_z$, $K_2 = \sigma_y / \sigma_z$, $K_3 = \sigma_{\max} / \sigma_z$ として整理した。この結果、Case1（自重解析）の解析値は実測値の側圧比に比べて小さくなっている。これは自重解析では水平荷重を作用させていないためである。

Case2～Case4の解析値はゾーン1～ゾーン4にわたり実測値と比較的良く整合している。しかし、 $K_2 (= \sigma_y / \sigma_z)$ は、断層部の σ_z が低減されていることに起因して、結果的に断層部の側圧比 K_2 は大きくなっている。

以上をまとめると、Case2～Case4の解析値は、各応力成分について実測値と比較的良く整合していること、水平面内の主応力方向の変化についてはCase4の場合に実測値と良く整合している。これらの結果をもとに4章のMBCモデルによる予測解析には、Case4（自重解析+薄層（岩盤相当/1,000,000））の値を採用することとする。

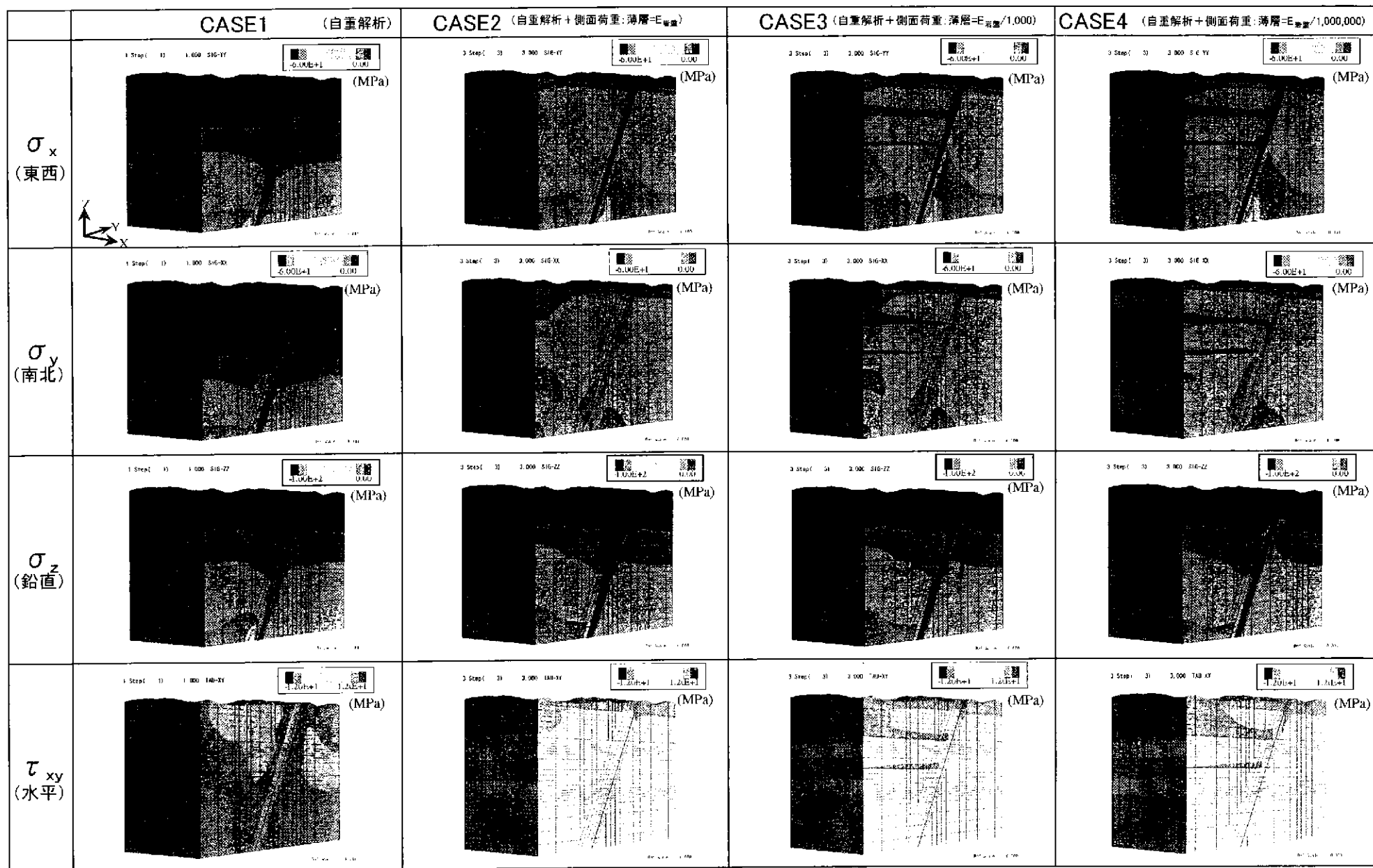
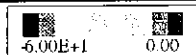


図3. 4. 1 3次元応力コンター図

CASE1

 σ_x

1 Step(1) 1.000 SIG-YY



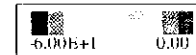
MPa



Def. Scale 0.000

 σ_y

1 Step(1) 1.000 SIG-XX



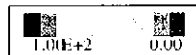
MPa



Def. Scale 0.000

 σ_z

1 Step(1) 1.000 SIG-ZZ



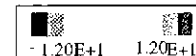
MPa



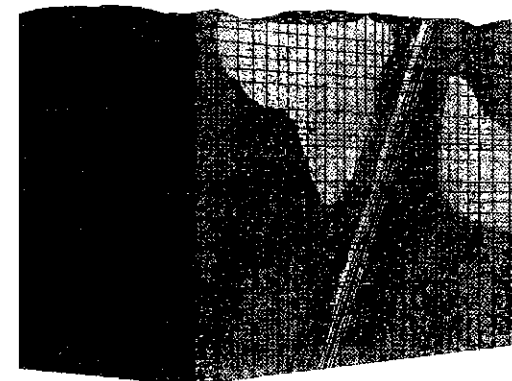
Def. Scale 0.000

 τ_{xy}

1 Step(1) 1.000 TAU-XY



MPa



Def. Scale 0.000

図3.4.2 3次元応力コンター図 (CASE1)

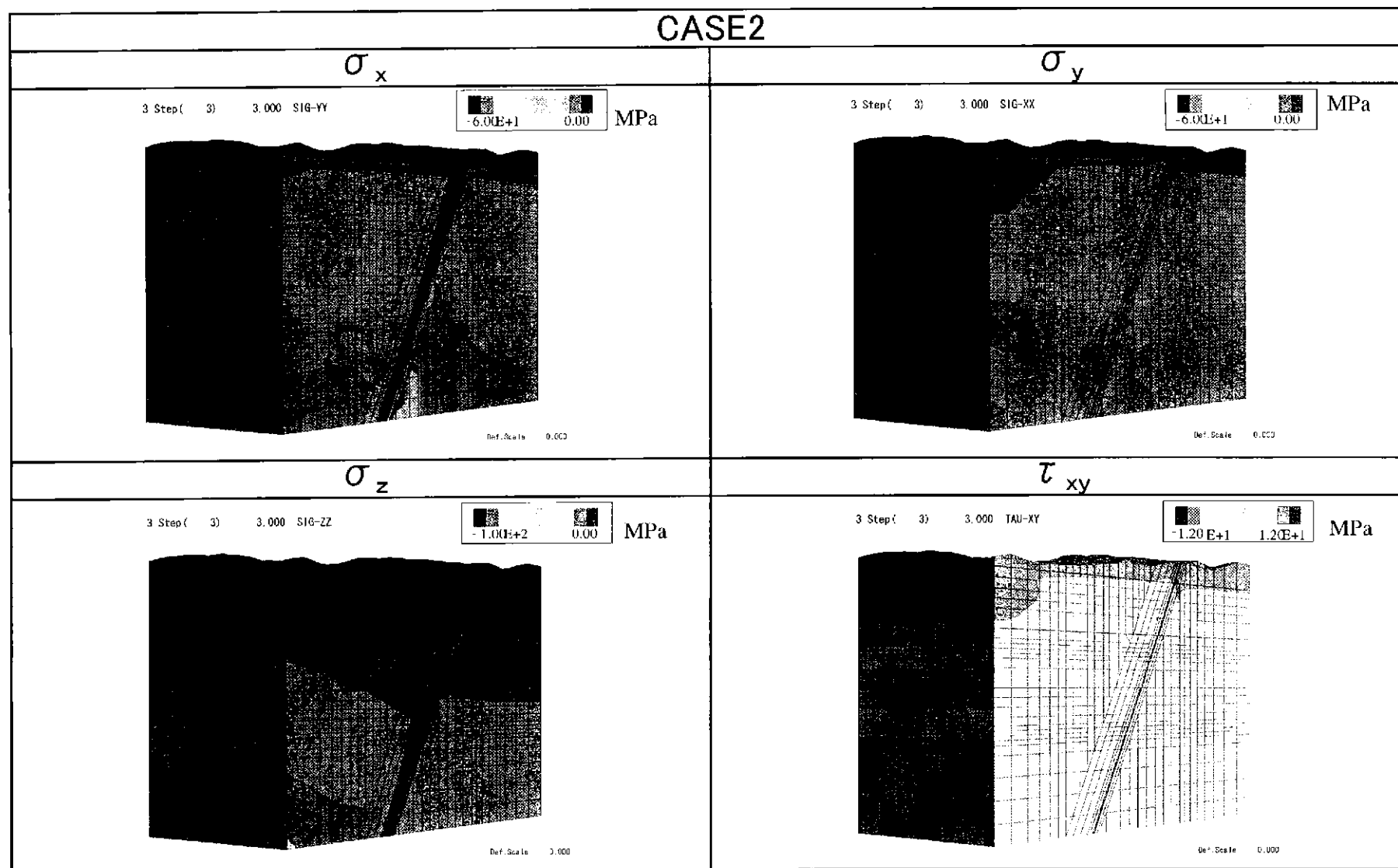


図3.4.3 3次元応力コンター図 (CASE2)

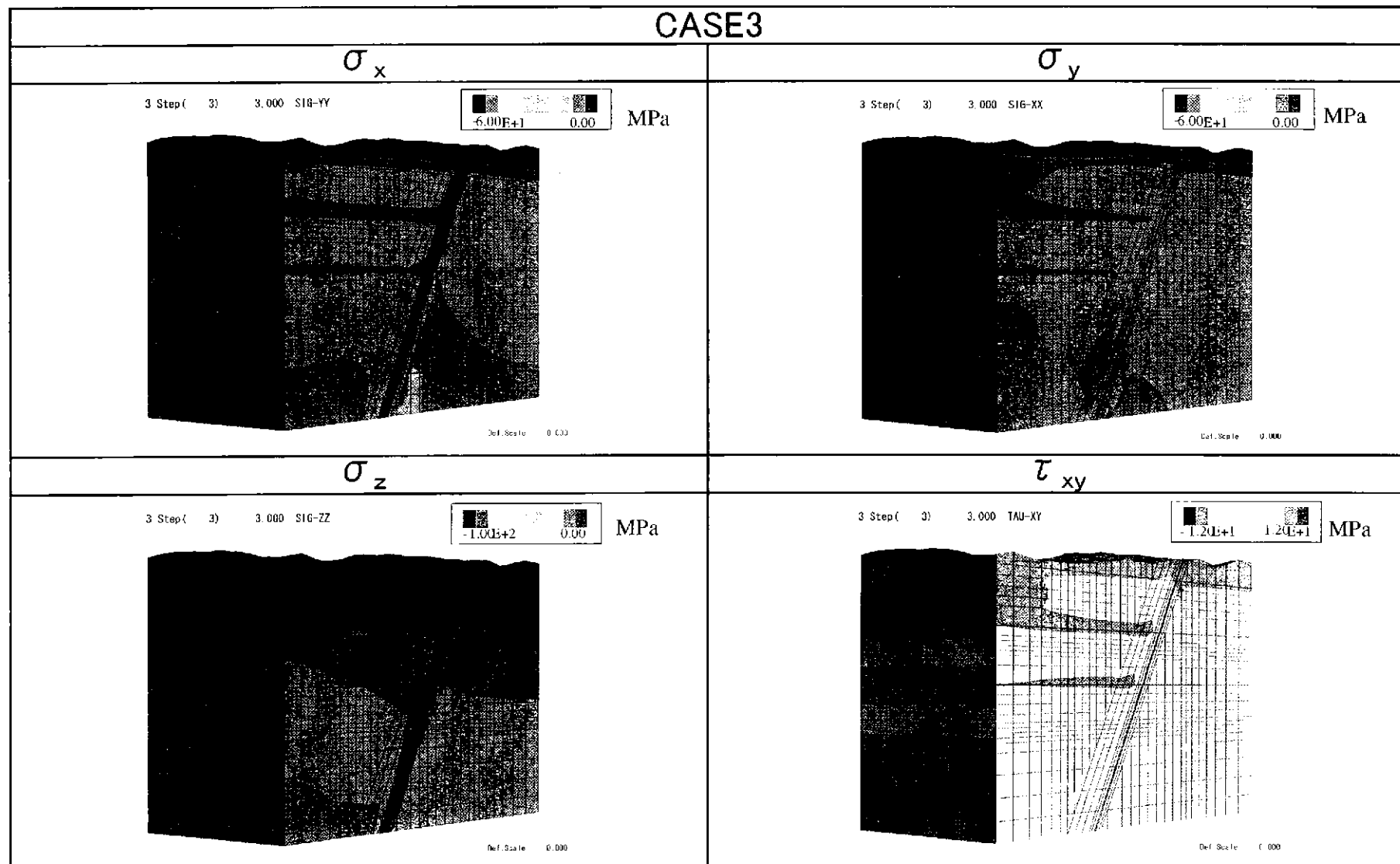


図3.4.4 3次元応力コンター図 (CASE3)

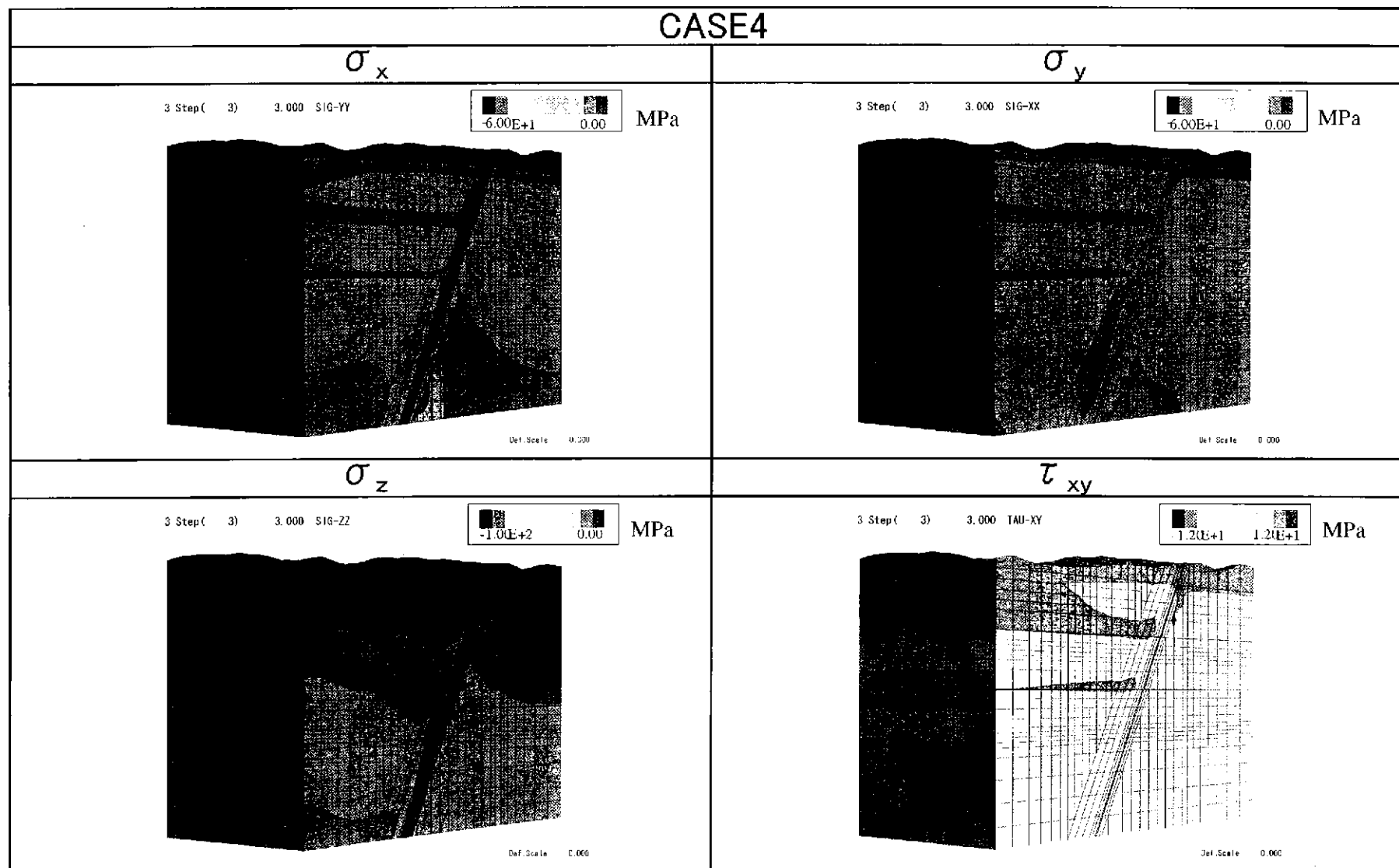


図3.4.5 3次元応力コンター図 (CASE4)

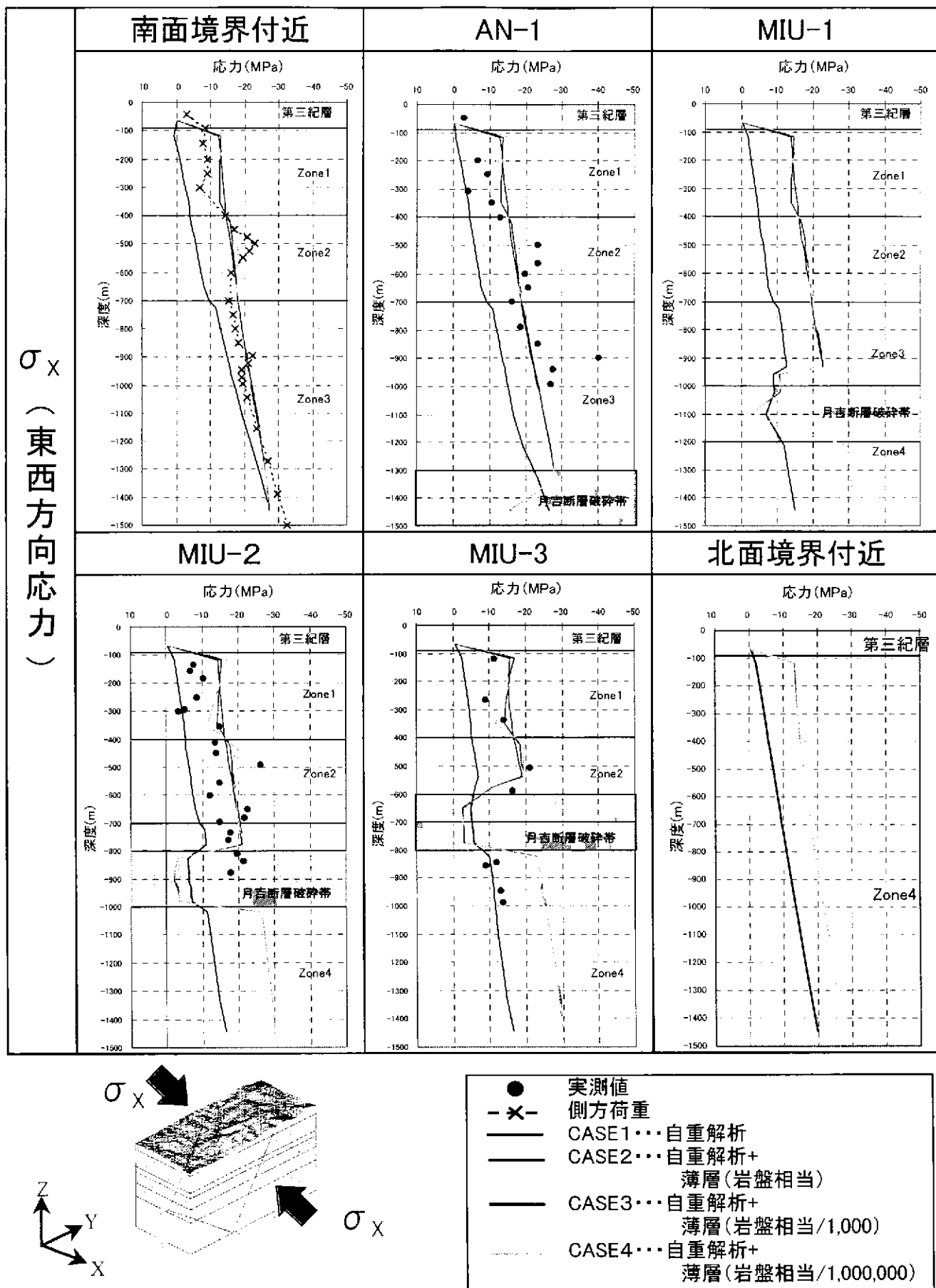


図3. 4. 6 3次元応力解析結果(σ_x :東西方向応力)

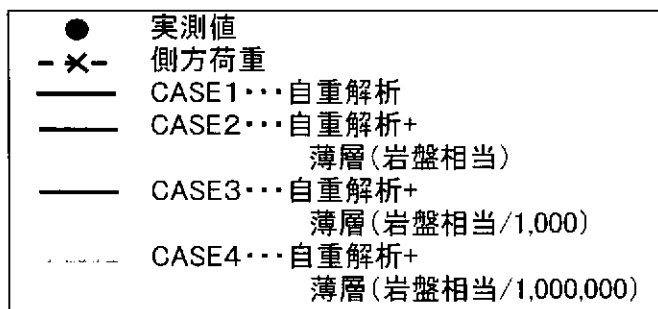
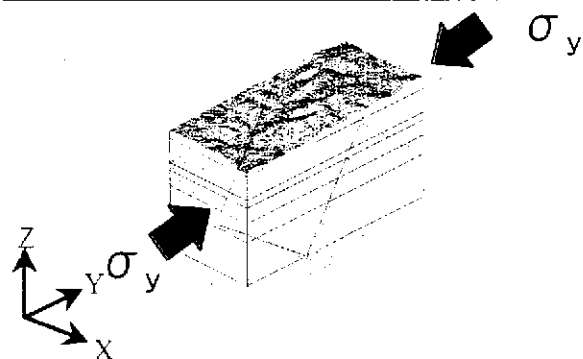
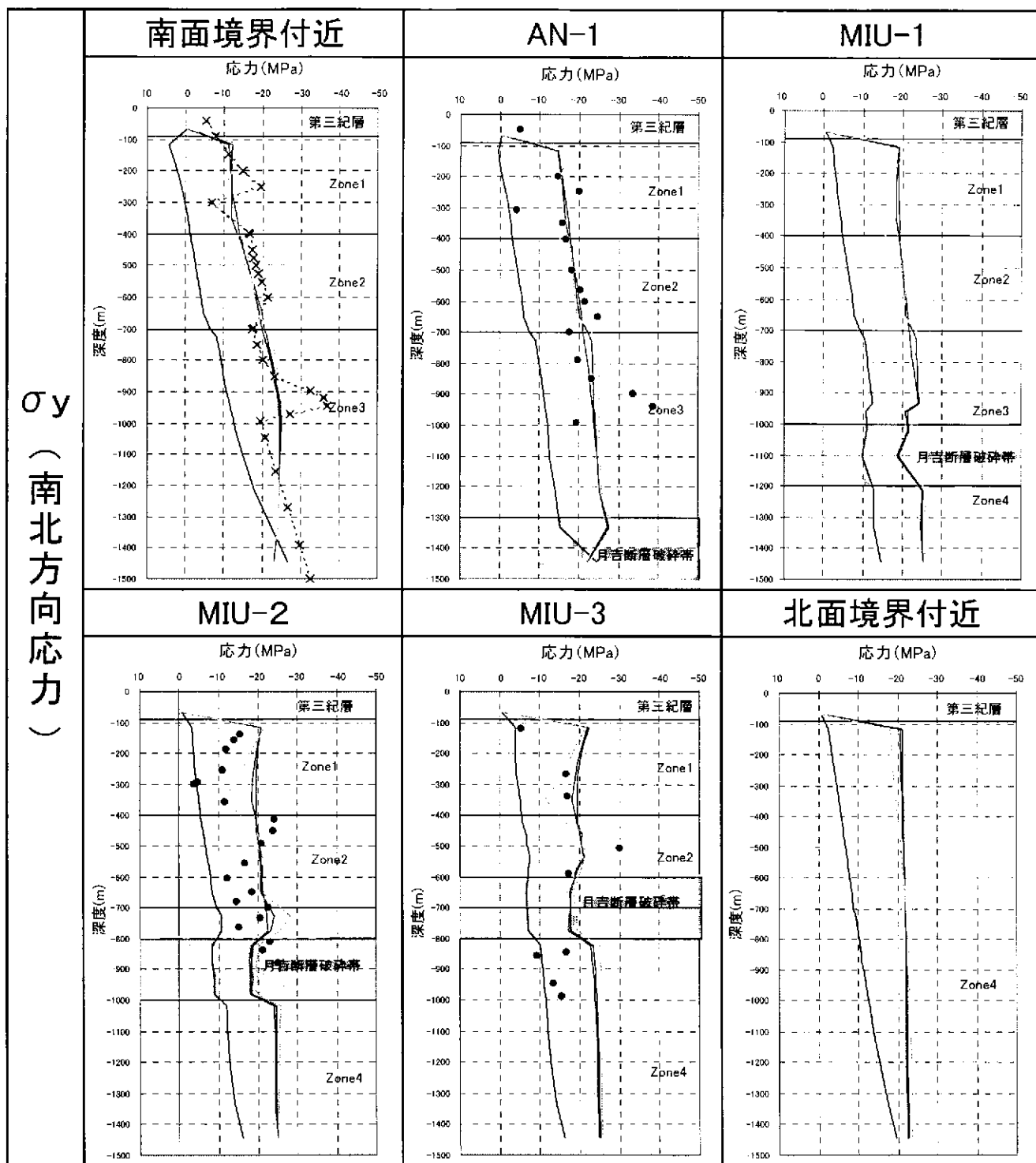


図3. 4. 7 3次元応力解析結果(σ_y:南北方向応力)

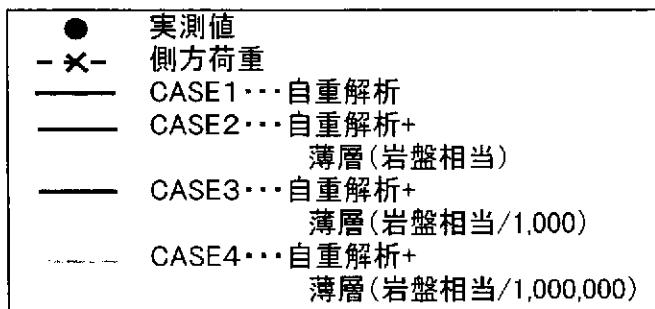
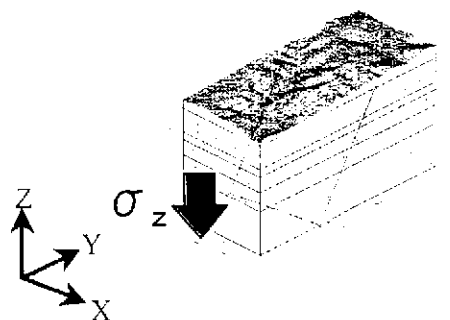
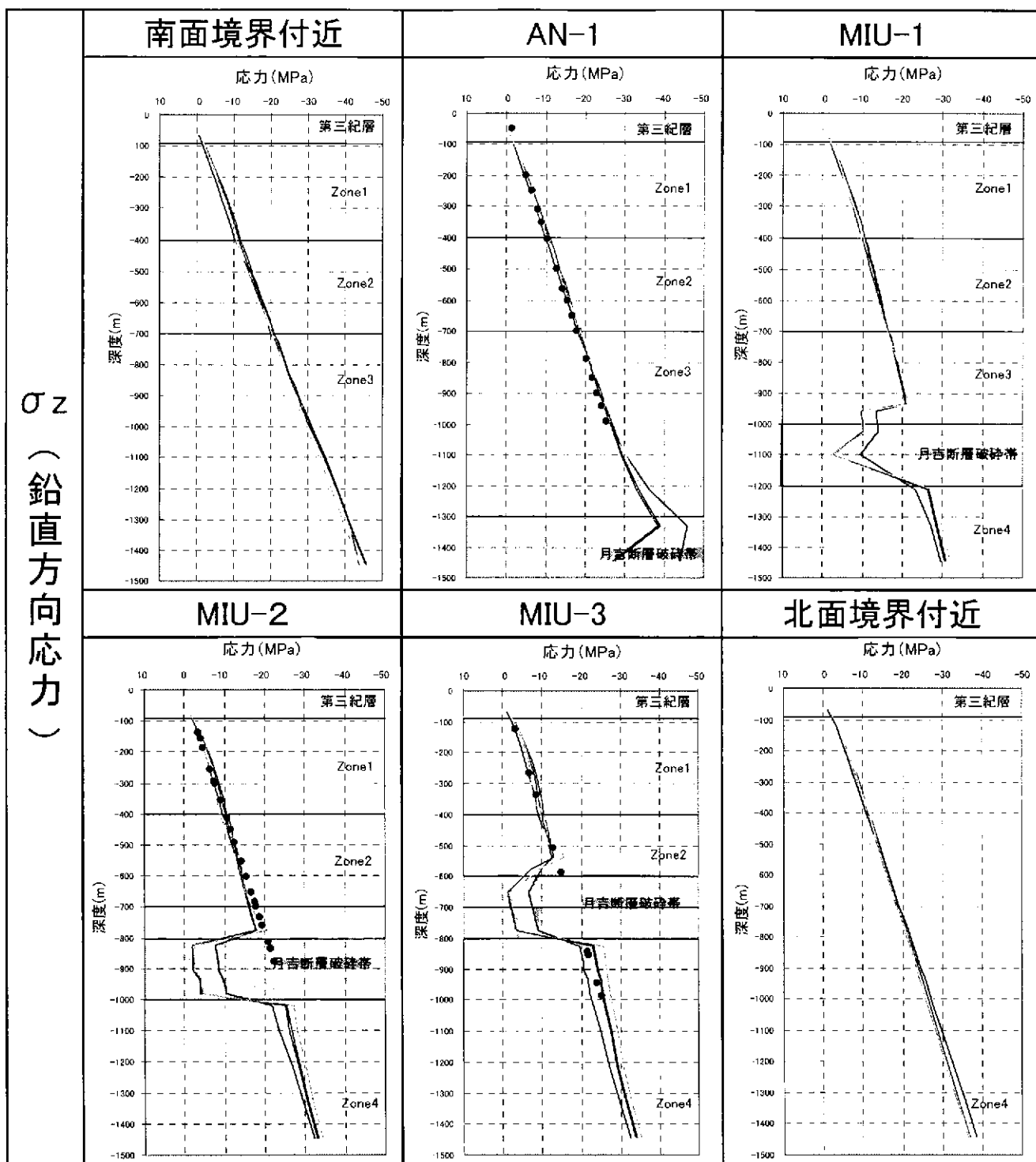


図3. 4. 8 3次元応力解析結果(σ_z:鉛直方向応力)

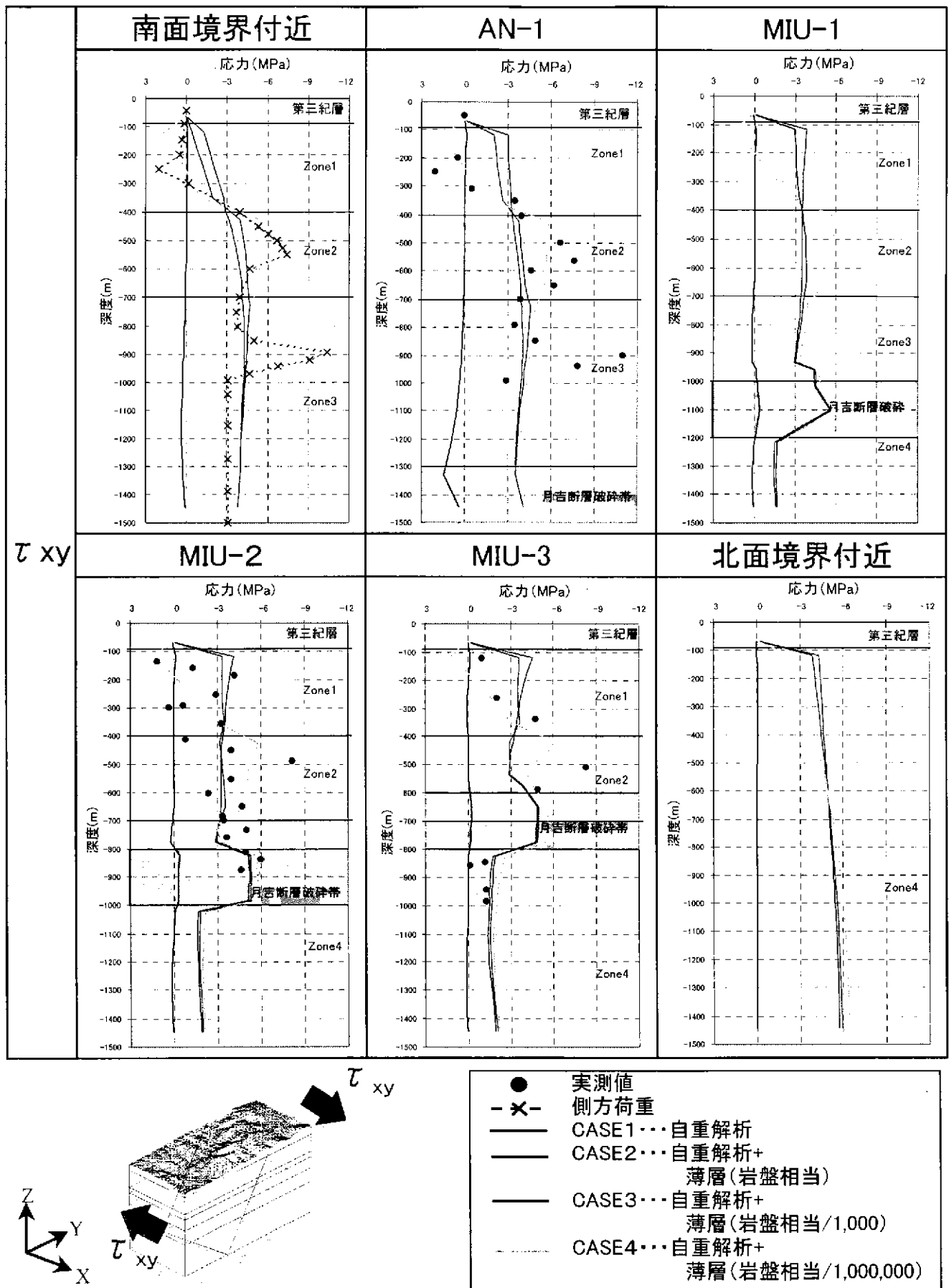


図3. 4. 9 3次元応力解析結果 (τ_{xy})

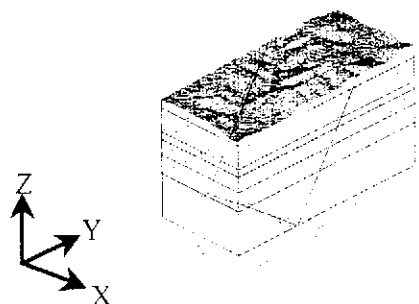
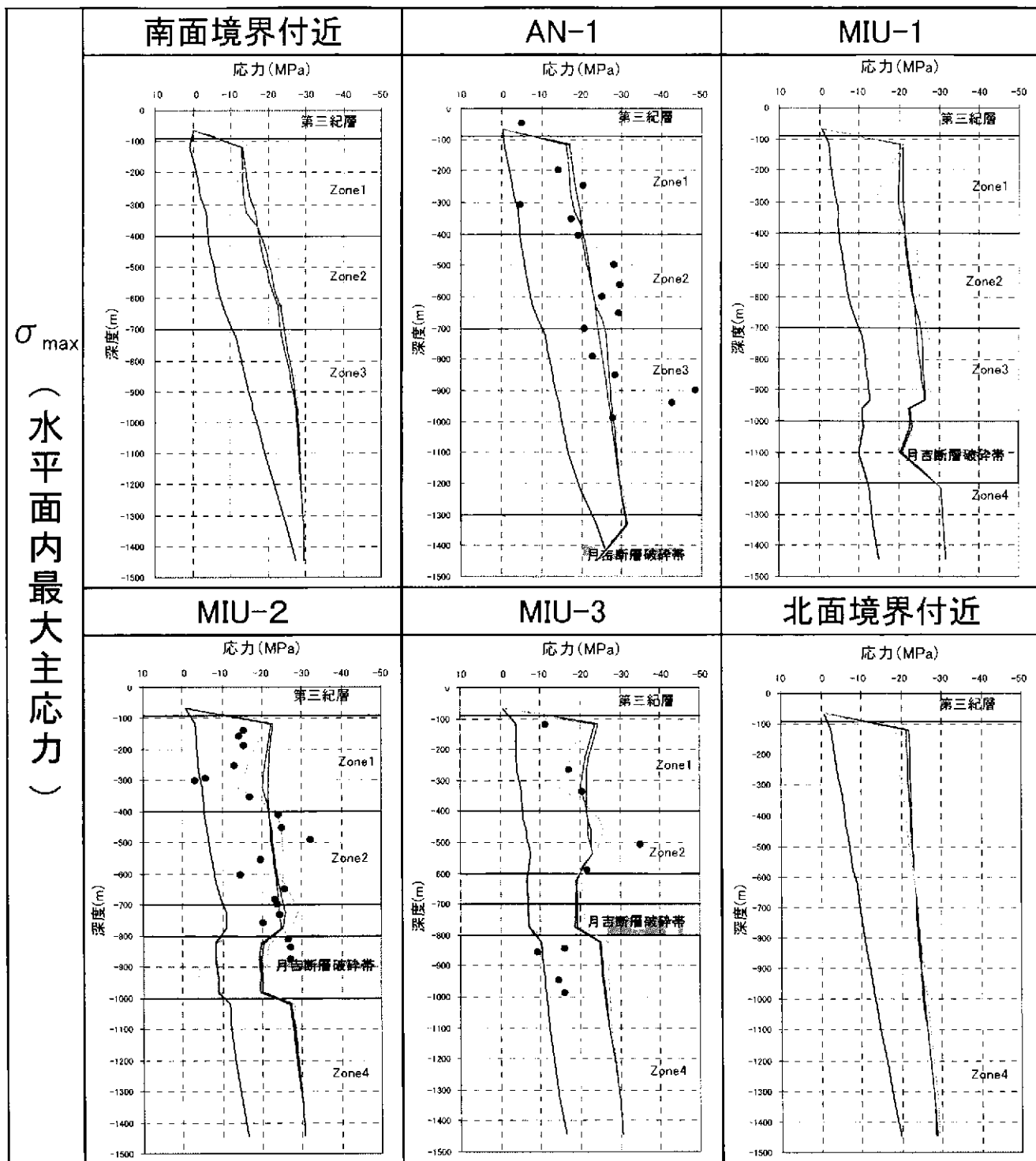
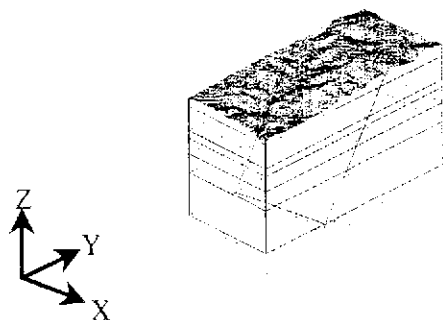
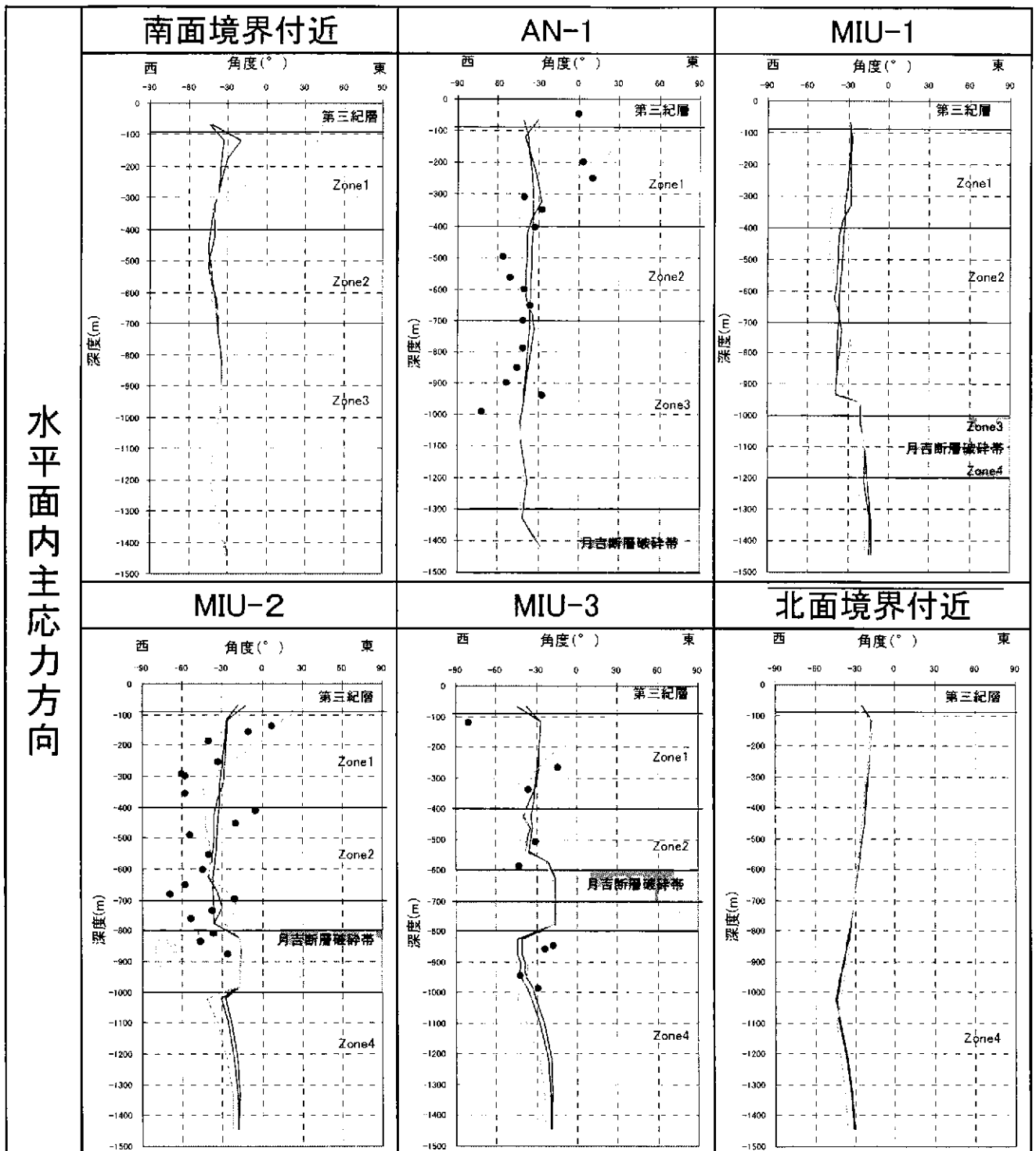


図3. 4. 10 3次元応力解析結果 ($\sigma_{\max}$: 水平面内最大主応力)



- 実測値
- × - 側方荷重
- CASE1...自重解析
- CASE2...自重解析+
薄層(岩盤相当)
- CASE3...自重解析+
薄層(岩盤相当/1,000)
- CASE4...自重解析+
薄層(岩盤相当/1,000,000)

図3. 4. 12 3次元応力解析結果(水平面内主応力方向)

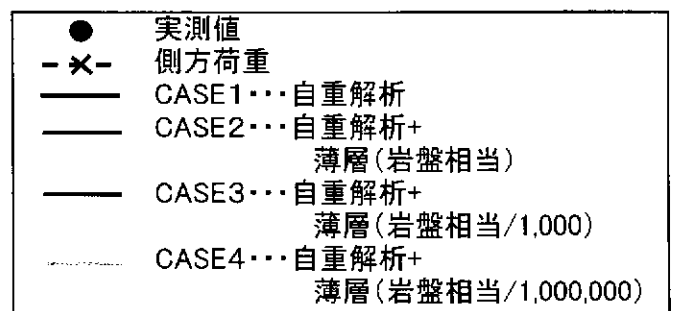
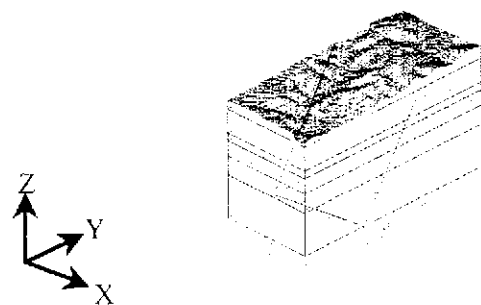
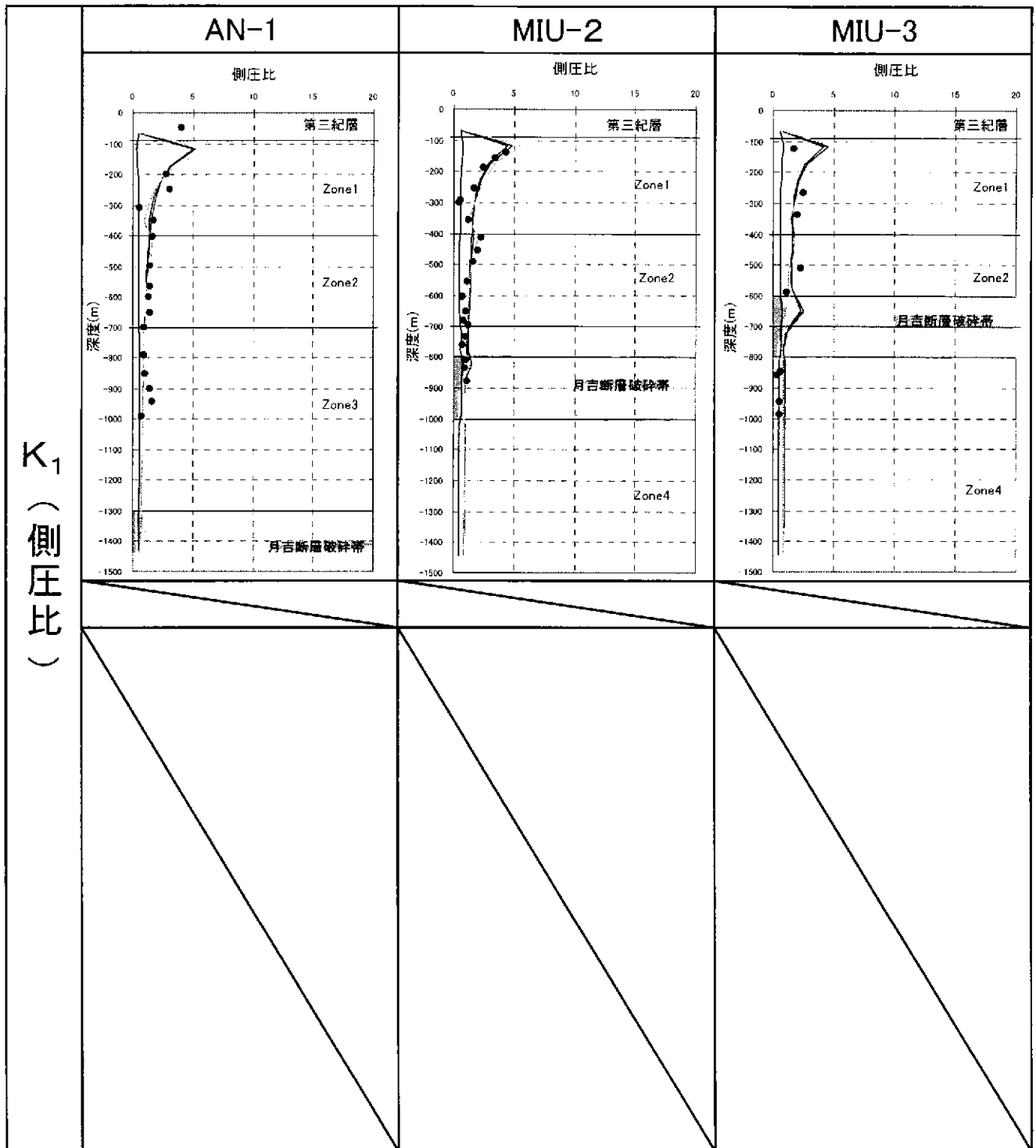


図3. 4. 13 3次元応力解析結果(側圧比 $K_1 = \sigma_x / \sigma_z$)

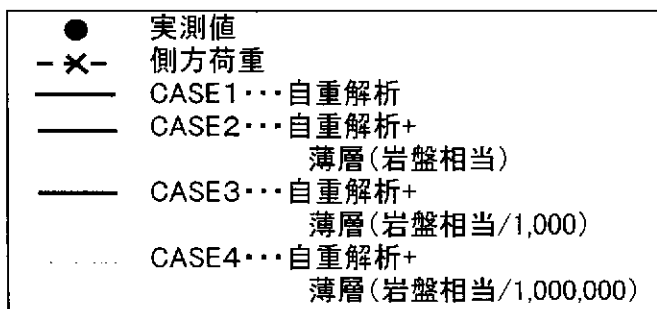
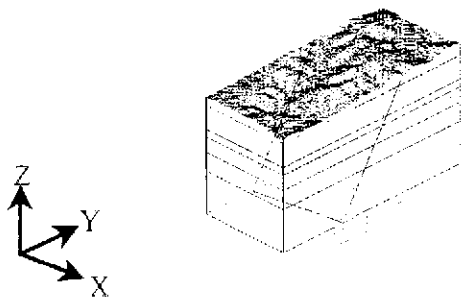
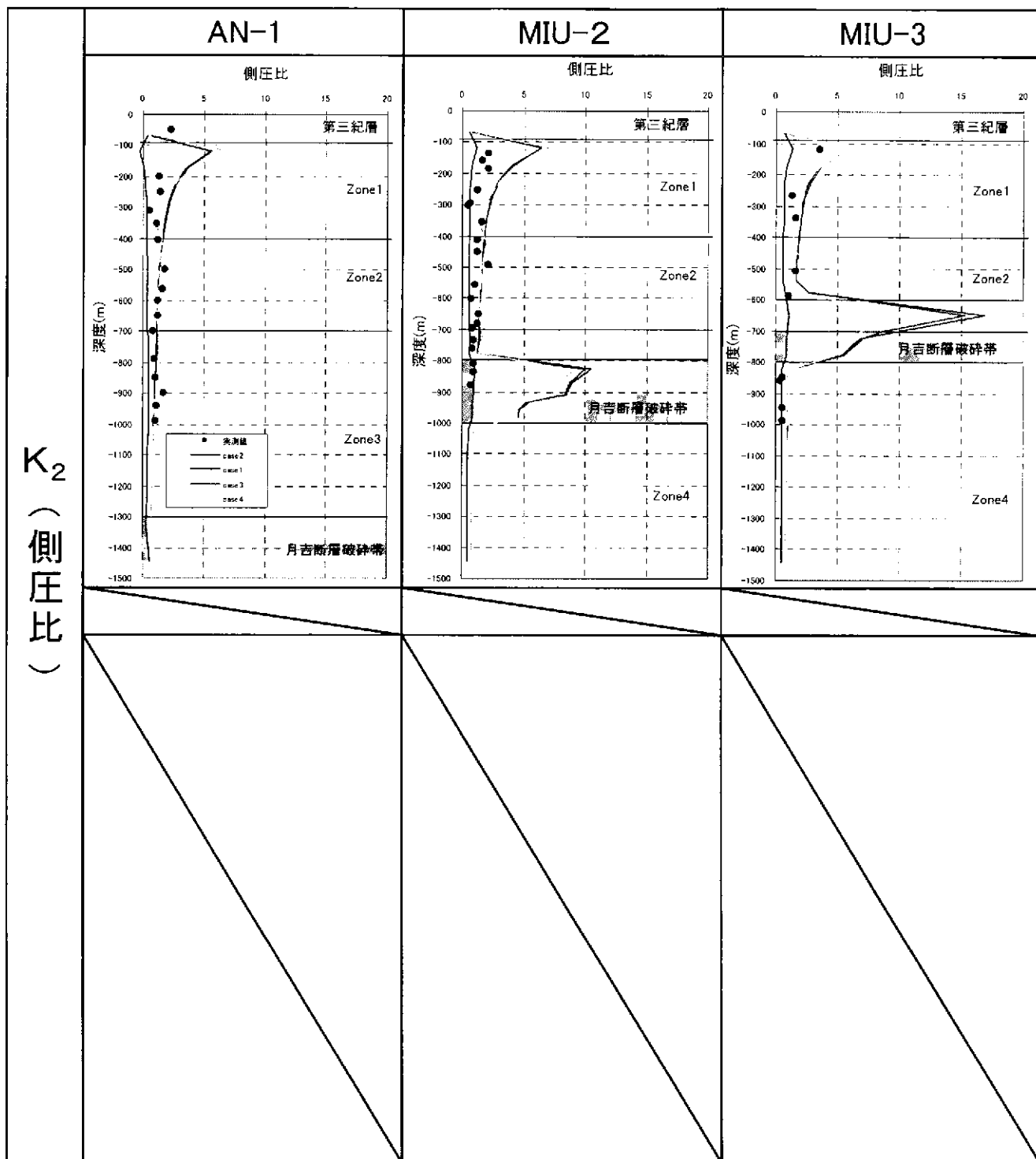
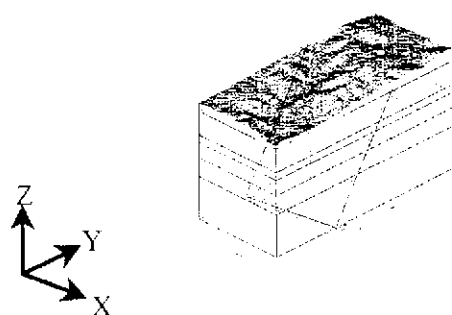
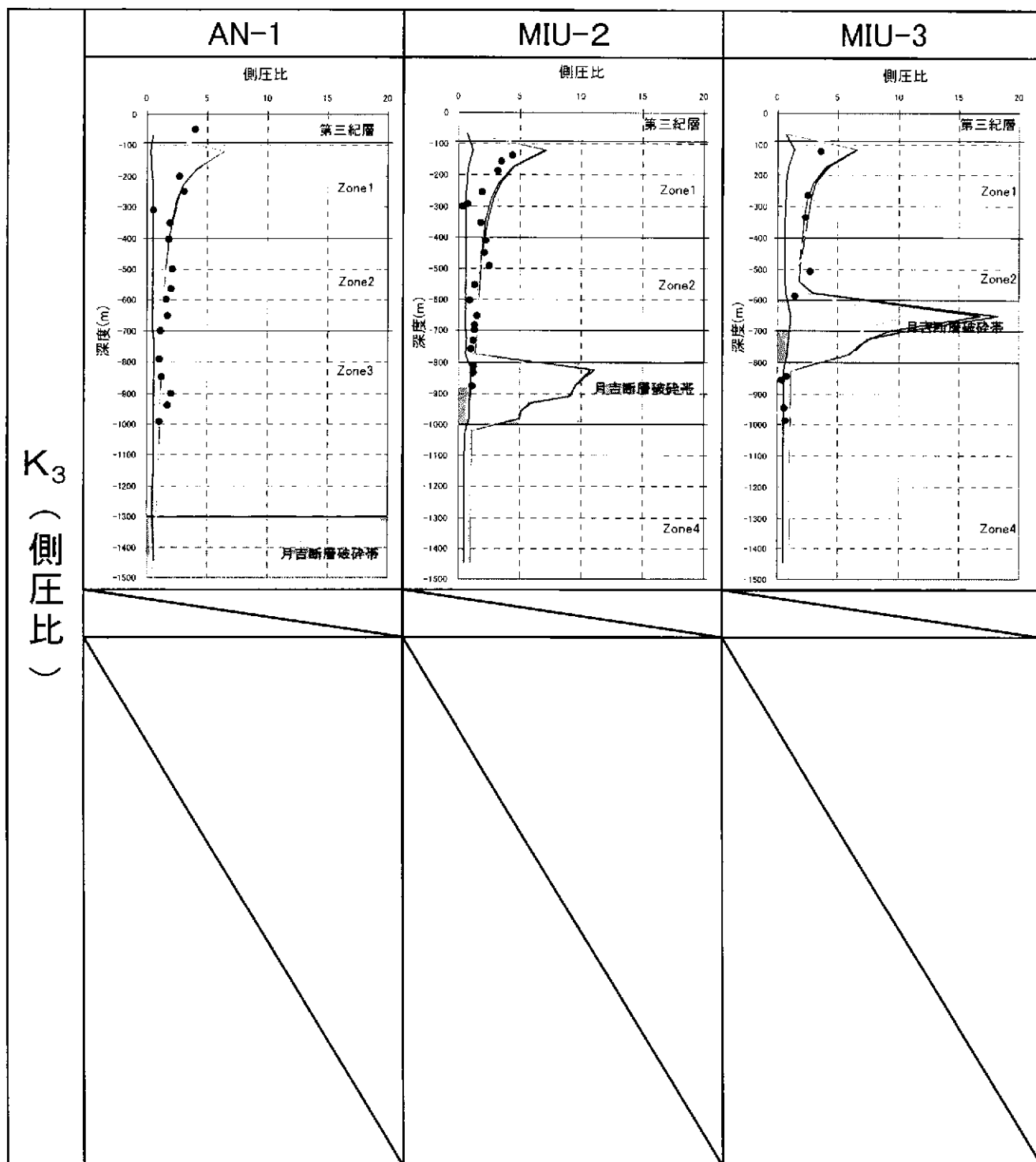


図3. 4. 14 3次元応力解析結果(側圧比 $K_2 = \sigma_y / \sigma_z$)

表 3次元応力解析結果(側圧比 $K_3=\sigma_{\max}/\sigma_z$)



- 実測値
- × - 側方荷重
- CASE1...自重解析
- CASE2...自重解析+
薄層(岩盤相当)
- CASE3...自重解析+
薄層(岩盤相当/1,000)
- CASE4...自重解析+
薄層(岩盤相当/1,000,000)

図3. 4. 15 3次元応力解析結果(側圧比 $K_3=\sigma_{\max}/\sigma_z$)

3. 5 岩盤力学モデル及び初期応力解析結果のまとめ

ここでは、超深地層研究所計画で実施した AN-1、MIU-1～3 号孔における岩盤力学的調査結果に基づき、超深地層研究所建設予定地点を含む正馬様用地の岩盤力学モデルを構築し、そのモデルを用いて正馬様用地内の 3 次元初期応力解析を実施し、3 次元空間の応力分布を決定した。また、解析の結果、得られた応力分布から、研究坑道掘削解析で用いる初期応力の設定を行った。

具体的には、既存の岩盤力学的概念モデルに従い、岩盤構造モデルとして第三紀層、岩盤ゾーン 1～4、月吉断層中心部その周辺部（断層上盤側、断層下盤側）の 8 つのゾーンから構成されるモデルを構築し、月吉断層中心部にジョイント要素、ゾーン 1 と 2 の間、ゾーン 2 と 3 の間に薄層（弱層）を設け、南端側および西端側より初期応力測定結果に見合う水平荷重を作用させ、実測値に整合するような領域全体の広域的な 3 次元岩盤応力分布の再現を試みた。

その結果、最も実測値と整合していると思われる Case 4（自重解析+薄層（岩盤相当/1,000,000））の値を 4 章の MBC モデルによる予測解析に採用することとした。

4. 研究坑道掘削に伴う周辺岩盤への影響に関する予測

4. 1 解析目的

ここでは3章において実施した正馬様用地周辺の3次元初期解析結果を用い、不連続性岩盤の力学挙動およびその物性変化が表現可能なMBC (Micro-mechanics Based Continuum model) により研究坑道掘削に伴う周辺岩盤の力学的影響に関して解析を行う。その結果を基に、坑道周辺岩盤の破壊発生の可能性や透水係数分布等の物性値の変化の程度、坑道展開方向による力学的影響範囲の違い、支保の応力照査と坑道の力学的安定性のために必要な支保の提案等を行う。

4. 2 MBC 解析の概要⁶⁾

MBC モデルは、微視構造要素の存在あるいはその発生・成長に支配された材料に対する連続体理論である。

岩盤にマイクロメカニクスに基づく連続体理論を適用する場合、微視構造要素は個々のジョイントである。不連続面を多数有する岩盤を等価な連続体に置き換える方法としては、まず、図4. 2. 1に示すような不連続面を多数有する岩盤の任意の点に着目し、その点を含む部分領域である代表要素 (R.V.E.: Representative Volume Element) を考える。ここで、代表要素は、微視構造要素に比べて十分に大きく、かつ物体の代表寸法に比べて十分小さい領域とする。その代表要素における平均応力と平均ひずみの関係、すなわち巨視的な構成式を求め、この構成式が等価な連続体の一点における材料の挙動を与えるものとして連続体の解析を行う。

代表要素における平均応力と平均ひずみの関係は、内在する不連続面の寸法、平均間隔、走向分布に依存し、材料は異方的な挙動を強く呈する。不連続面同士の相互干渉を考慮に入れて不連続面の挙動を算定し、その結果を基に代表要素内で平均操作を行うことにより、巨視的な平均応力と平均ひずみの関係が求まる。一般に岩盤の力学挙動は非線形であるため、その関係を増分方程式で表すと、

$$\Delta \bar{\varepsilon}_{ij} = D_{ijkl}^R \Delta \bar{\sigma}_{kl} + \frac{1}{2V} \sum_m \int_{\Omega^m} (\Delta [u_i^{(m)}] n_j^{(m)} + \Delta [u_j^{(m)}] n_i^{(m)}) dS \quad (4. 2. 1)$$

となる。ここで、 V は代表要素の体積、 D_{ijkl}^R は基質岩盤のコンプライアンステンソル、 Ω^m は代表要素 V 中の m 番目のジョイント面、 n_j はジョイント面での単位法線ベクトル、そして $[u_i]$ はジョイント面での変位の相対量である。ここで、ジョイント面における相対変位増分 $\Delta [u_i]$ が平均応力増分 $\Delta \bar{\sigma}_{ij}$ の関数として与えられるならば、式 (4. 2. 1) より岩盤の構成式が、

$$\Delta \bar{\varepsilon}_{ij} = \bar{D}_{ijkl} \Delta \bar{\sigma}_{kl} \quad (4. 2. 2)$$

と得られる。ここで、 $\bar{D}_{ijk}$ はジョイントを含む岩盤の巨視的接線コンプライアンスである。

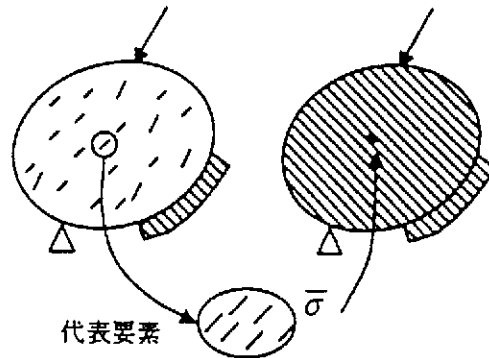


図 4. 2. 1 マイクロメカニクスに基づく連続体モデル

＜岩盤中におけるジョイントの挙動＞

ジョイントを多数含む岩盤において空洞掘削が行われる場合、地山応力解放により生ずるジョイントのせん断すべり・開口が岩盤挙動の支配的メカニズムと考えられる。しかし、空洞掘削時の空洞周辺の応力場は、掘削に伴って応力が解放されるが、依然として圧縮場にあるものと言える。そこで、圧縮下においてジョイントが開口変形を生ずるメカニズムとして、図 4. 2. 2 に示すような起伏を有するジョイントを考える。起伏面でクーロンの摩擦条件が満足された時、その面でせん断すべりが開始し、別の面では開口を生ずる。堀井らは、ジョイント面は次に示すような条件を満たした時、せん断すべりを生ずるものと仮定した。

$$|\bar{\sigma}_s^J| = -\bar{\sigma}_n^J \tan \phi, \quad \bar{\sigma}_n^J < 0 \quad (4. 2. 3)$$

ここで ϕ はジョイント面の摩擦角であり、 $\bar{\sigma}_n^J, \bar{\sigma}_s^J$ は起伏を有するジョイントのせん断面に作用する法線方向および、接線方向の局所的平均応力である。

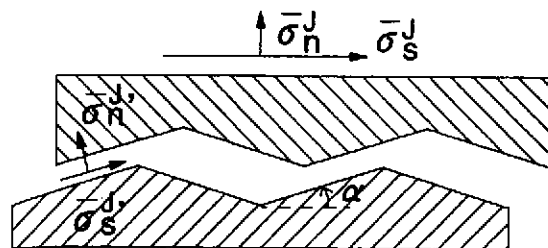


図 4. 2. 2 起伏を有するジョイント

また、ジョイントの一方の面でせん断すべりが生じた場合、他方の面ではジョイント面の開口が起こるため、ストレスフリーになるものと仮定した。従って、ジョイント全

体に作用する巨視的な法線方向・接線方向の平均増分 $\Delta\bar{\sigma}_n^{J'}$ 、 $\Delta\bar{\sigma}_s^{J'}$ はジョイントのせん断面に作用する平均応力増分を用いて次のように表される

$$\Delta\bar{\sigma}_n^{J'} = \frac{1}{2}(\Delta\bar{\sigma}_s^{J'} \tan \alpha + \Delta\bar{\sigma}_n^{J'}) \quad (4. 2. 4)$$

$$\Delta\bar{\sigma}_s^{J'} = \frac{1}{2}(\Delta\bar{\sigma}_s^{J'} - \Delta\bar{\sigma}_n^{J'} \tan \alpha) \quad (4. 2. 5)$$

ここで α は、起伏角度である。

せん断すべりを起こしている間、すべりを生じているジョイント面における応力増分は次の条件を満たすものと仮定する。

$$\Delta\bar{\sigma}_s^{J'} = \begin{cases} -\Delta\bar{\sigma}_n^{J'} \tan \phi & \alpha > 0 \\ \Delta\bar{\sigma}_n^{J'} \tan \phi & \alpha < 0 \end{cases} \quad (4. 2. 6)$$

さらに、ジョイントのすべりを生じている面における変位成分は、せん断方向のすべりのみを生じて、法線方向には変位を生じないものとする。これは局所的なダイレイテーションが巨視的な起伏によるダイレイテーションに比べて小さく、無視できるからである。これにより、ジョイントの相対変位増分の法線・接線方向の成分 $(\Delta[\bar{u}_n^{J'}], \Delta[\bar{u}_s^{J'}])$ とすべり面に対する法線・接線方向成分 $(\Delta[\bar{u}_n^{J'}], \Delta[\bar{u}_s^{J'}])$ の関係は次のように表される。

$$\Delta[\bar{u}_n^{J'}] = \Delta[\bar{u}_s^{J'}] \sin \alpha \quad (4. 2. 7)$$

$$\Delta[\bar{u}_s^{J'}] = \Delta[\bar{u}_s^{J'}] \cos \alpha \quad (4. 2. 8)$$

$$\Delta[\bar{u}_n^{J'}] = 0 \quad (4. 2. 9)$$

この解析手法の特徴としては、地質調査で得られた不連続面の方向や間隔が直接解析の入力データとして解析に反映できること、不連続面のせん断・開口量の空間分布が解析結果として得られること、などが挙げられる。岩盤の挙動は不連続面の方向や岩盤に作用している初期応力の大きさ・方向の組み合わせに依存するが、この解析手法はどのような影響を表すことができる。

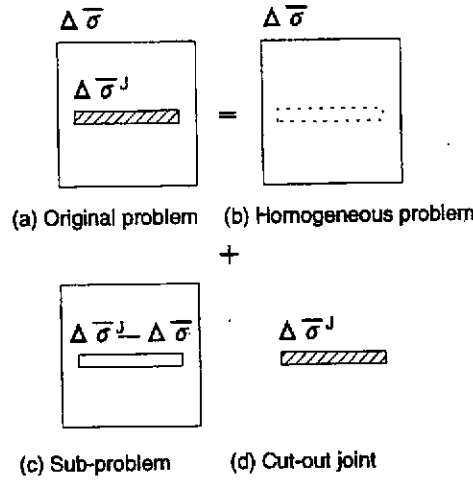


図 4. 2. 3 問題の重ね合わせ

<系の剛性>

系の剛性という概念は以下のように問題の重ね合わせを考えることにより導入される。図 4. 2. 3 に示すようにある 1 つのジョイントだけに着目し、そのジョイントを包含する系を等価な均一材料とみなす。これには無限遠方に平均応力増分 $\Delta\bar{\sigma}$ が、そしてジョイント上には $\Delta\bar{\sigma}^J$ が作用しているものとする。この問題 (a) をジョイントを含まない均一な問題 (b)、ジョイントをくり抜いたスリット問題 (c)、くり抜かれたジョイントの問題 (d) の 3 つに分ける。ここで、問題 (c) におけるスリットの相対変位増分の平均値 $\Delta\bar{u}^S$ とスリットに作用する平均応力増分 $\Delta\bar{\sigma}^J - \Delta\bar{\sigma}$ の関係は系の剛性により以下のように与えられる。

$$\Delta\bar{\sigma}_n - \Delta\bar{\sigma}_n^J = \bar{K}_n \Delta\bar{u}_n^S \quad (4. 2. 10)$$

$$\Delta\bar{\sigma}_s - \Delta\bar{\sigma}_s^J = \bar{K}_s \Delta\bar{u}_s^S \quad (4. 2. 11)$$

ここで $\bar{K}_n$ 、 $\bar{K}_s$ はそれぞれ法線方向、接線方向の系の剛性であり、

$$\bar{K}_n = \frac{\bar{E}}{\lambda_n^0 \lambda_n^c L^J / 2} = \frac{\bar{E}}{\lambda_n^0 \bar{L}_n^J / 2} \quad (4. 2. 12)$$

$$\bar{K}_s = \frac{\bar{G}}{\lambda_s^0 \lambda_s^c L^J / 2} = \frac{\bar{G}}{\lambda_s^0 \bar{L}_s^J / 2} \quad (4. 2. 13)$$

と定義される。ここで、 $\bar{E}$ はジョイント面に対して垂直な等価接線剛性、 $\bar{G}$ は岩盤の等価接線せん断剛性であり、また L^J はジョイントの代表寸法である。また、 λ_n^0 および λ_s^0 はジョイントの形状に関する係数で、 λ_n^c および λ_s^c はジョイントの連結性を表す無次元のパラメータである。

ここで、簡単のため、図 4. 2. 4 のように、水平方向のみに円形のジョイントが

トラクションフリーで存在する場合を考えると、

$$\bar{K}_n = \frac{\bar{E}}{\pi a} \quad (4.2.14)$$

となり、

$$\bar{E} = \frac{E}{1 + \pi a/d} \quad (4.2.15)$$

と示される。ここで a は、円形ジョイントの半径、 d はジョイントの平均間隔である。

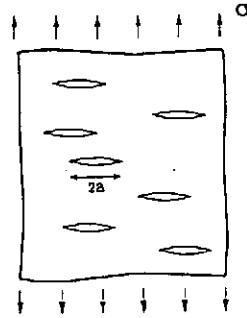


図 4. 2. 4 円形ジョイントを含んだ単純モデル

また、系の剛性マトリックスは以下の手順にて計算される。

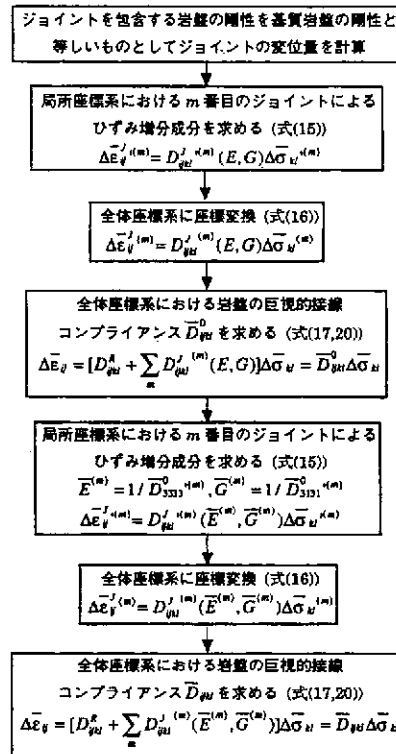


図 4. 2. 5 巨視的接線コンプライアンスの算定手順

4. 3 解析領域および解析条件

図 4. 3. 1 に立坑および横坑の解析領域のメッシュ図を示す。立坑・横坑それぞれの解析領域の設定については以下の通りである。

4. 3. 1 深地層研究所研究坑道レイアウト

超深地層研究所研究坑道のレイアウトは以下の通りとした。

主立坑……主立坑の位置は MIU-2 孔より東方向に 20.2m、北方向に 9.1m の位置とした。

(技術資料③³⁾ : P4.34、4.38、4.39 の試錐孔と主立坑の座標を参考)

中間ステージ……

中間ステージの深度は EL-270m (GL-500m) とした。

(技術資料③³⁾ を参考)

最終ステージ……

最終ステージの深度は EL-715m (GL-945m) とした。

(技術資料③³⁾ : P4.34、4.38、4.39 の最終ステージ深度参考)

4. 3. 2 立坑の解析領域

- ・ 解析領域は、境界条件の影響を受けない十分な広さとして、立坑を中心として 50m×50m の領域とする。
- ・ 立坑は、内径φ6.5m、掘削径φ7.3m、覆工厚 0.4m とする。(貸与資料③)
- ・ 岩盤部はソリッド要素、支保部材は、覆工をソリッド要素、後の追加支保として設定する鋼製支保工ははり要素として導入する。
- ・ 初期応力解析時には、3 章で設定した応力状態を各 2 次元断面に投影した値を用い、境界より作用させる。
- ・ 岩盤物性は、3 章で区分した Zone 区分に従うものとし、各 Zone 内で一様とする。
- ・ 掘削解析時の境界条件は、全周にわたり固定条件とする。
- ・ 掘削解析は全断面掘削とする。
- ・ 解析断面は、深度別に①GL-200m (Zone1)、②GL-500m (Zone2)、③GL-945m (断層部) の 3 断面設定する。

4. 3. 3 横坑の解析領域

- ・ 解析領域は、境界条件の影響を受けない十分な広さとして、横坑を中心として 50m×50m の領域とする。
- ・ 横坑断面は馬蹄型で、3m×3m の無支保とする。(貸与資料③)
- ・ 岩盤部はソリッド要素とする。後に追加する支保は、吹付けコンクリートをソ

- リッド要素、ロックボルトはトラス要素として導入する。
- ・ 初期応力解析時には、3 章で設定した応力状態を各 2 次元断面に投影した値を用い、境界周辺より作用させる。
 - ・ 岩盤物性は、3 章で区分した Zone 区分に従うものとし、各 Zone 内で一様とする。
 - ・ 掘削解析時の境界条件は、全周にわたり固定条件とする。
 - ・ 掘削解析は全断面掘削とする。
 - ・ 解析断面は、深度別に①中間ステージレベル（GL-500m：Zone2）、②最終ステージレベル（GL-945m：Zone3）の 2 断面設定する。しかし、坑道の延長方向については研究上の諸条件から変化することもあり得るため、坑道軸を最大主応力方向に対して、 0° 、 45° 、 90° 、 135° に回転した場合について解析を実施する。（図 4. 4. 10）

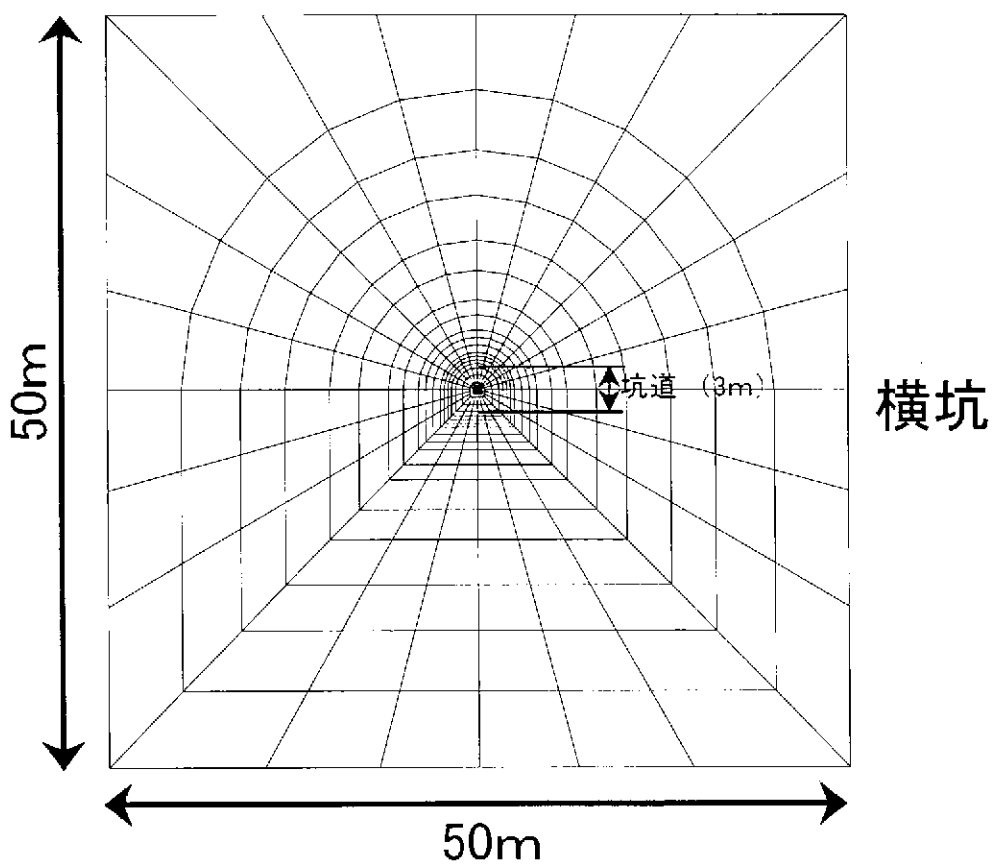
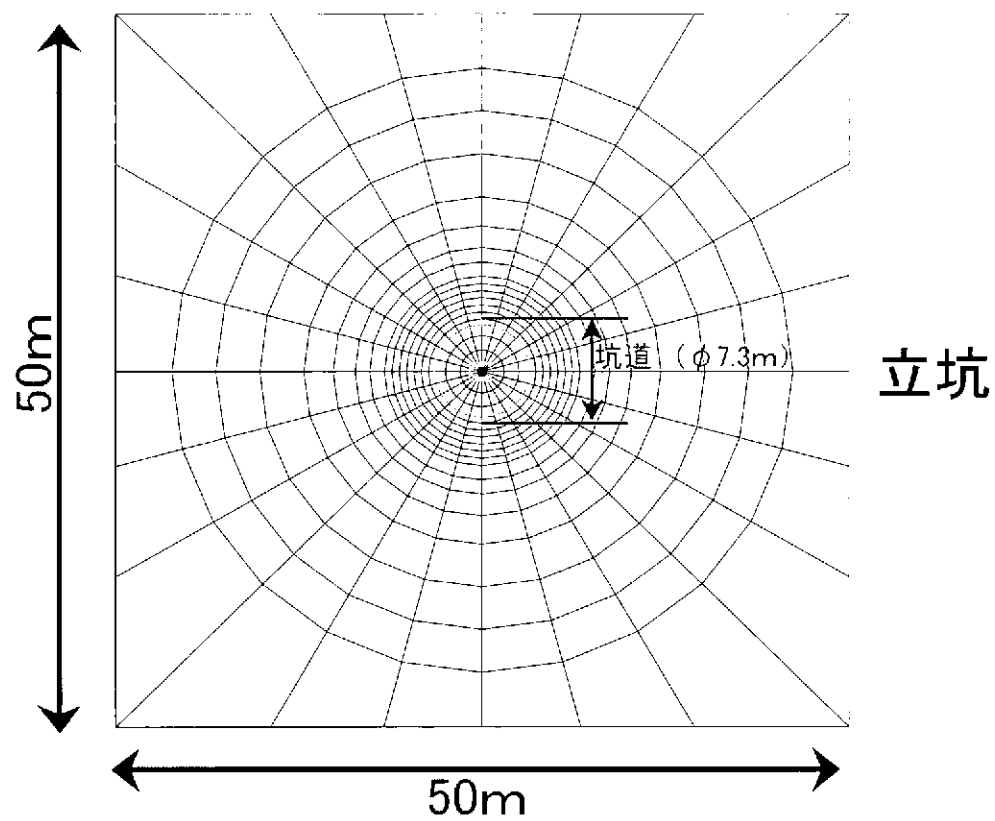


図4. 3. 1 立坑および横坑メッシュ図

4. 4 境界応力条件および物性値

4. 4. 1 初期応力値

3章で設定した応力状態を解析用の各2次元断面に投影した値を用いることで初期応力を設定する。立坑および横坑の各断面における初期応力値は図4.4.1～図4.4.3に示す。その設定の詳細は以下の通りである。

(1) 立坑の初期応力値の設定

立坑解析断面は、深度別に①GL-200m (Zone1)、②GL-500m (Zone2)、③GL-945m (断層部) のケースについて実施するものとする。初期応力値は3章で設定した3次元岩盤力学モデルにおけるMIU-2孔付近の各深度での応力値を2次元断面に投影したものとする。

(2) 横坑の初期応力値の設定

解析断面は、深度別に①中間ステージレベル (GL-500m : Zone2)、②最終ステージレベル (GL-945m : Zone3) のケースについて実施し、それぞれのレベルについてさらに、坑道軸を最大主応力方向に対して、 0° 、 45° 、 90° 、 135° に回転した断面について実施する。

初期応力値は、3章で設定した3次元岩盤力学モデルにおけるMIU-2孔付近の各深度での応力値を2次元断面に投影したものとする。但し、②最終ステージレベルについては、Zone3の値を用いるため、同深度のMIU-1孔の値を用いるものとする。

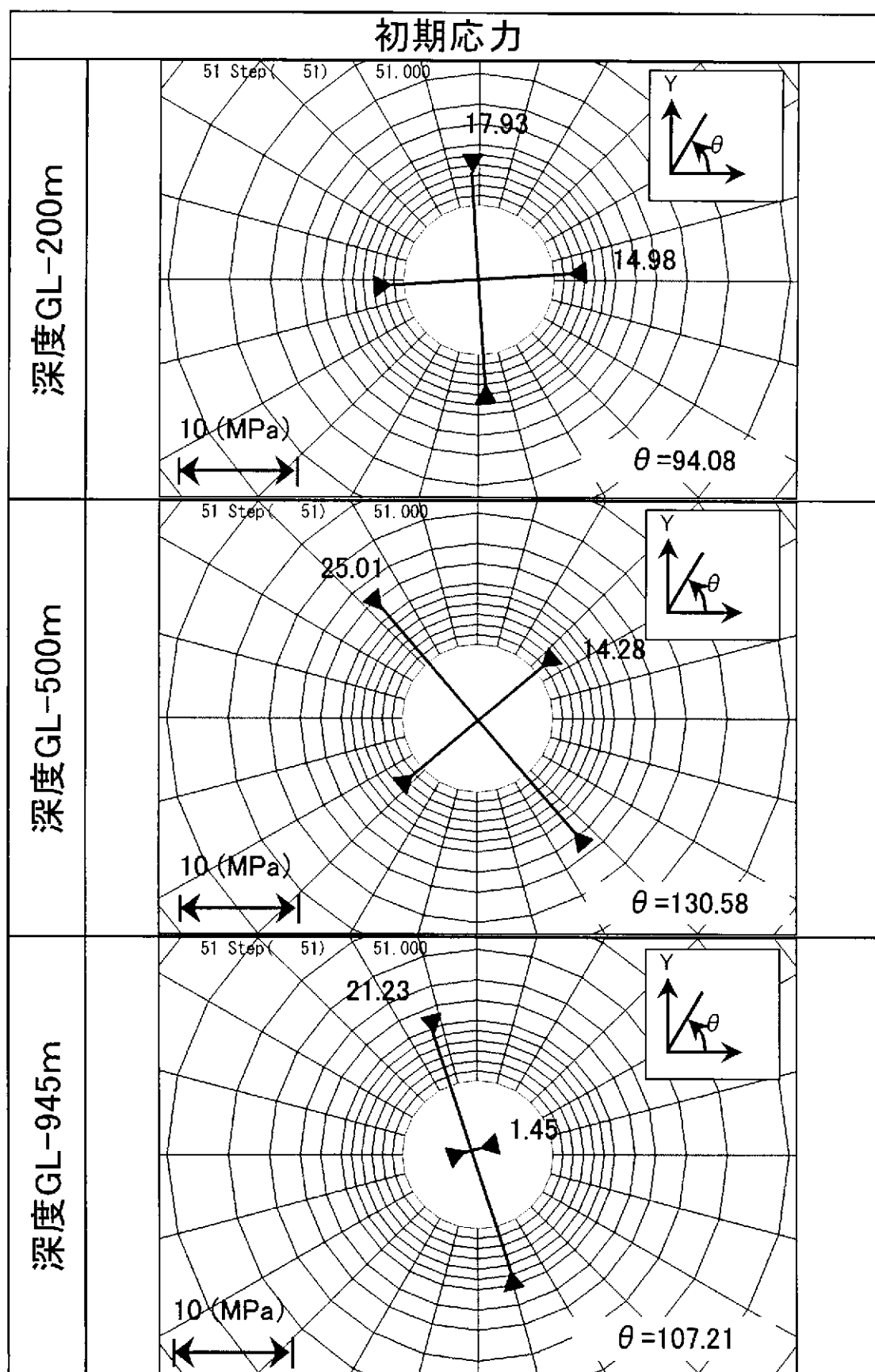


図4. 4. 1 立坑 解析断面 初期応力図

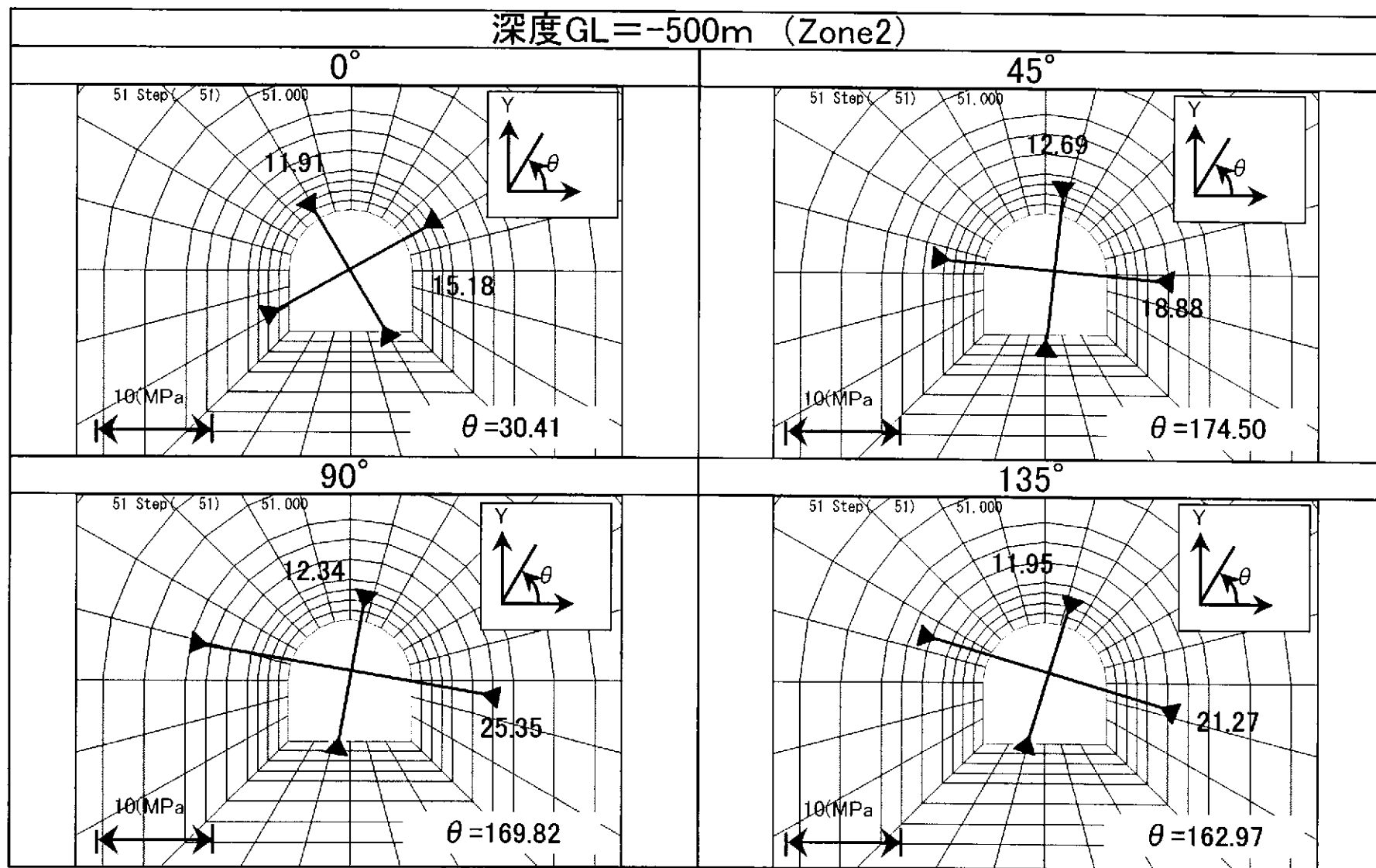


图4. 4. 2 横坑 初期应力图 (深度GL=-500m)

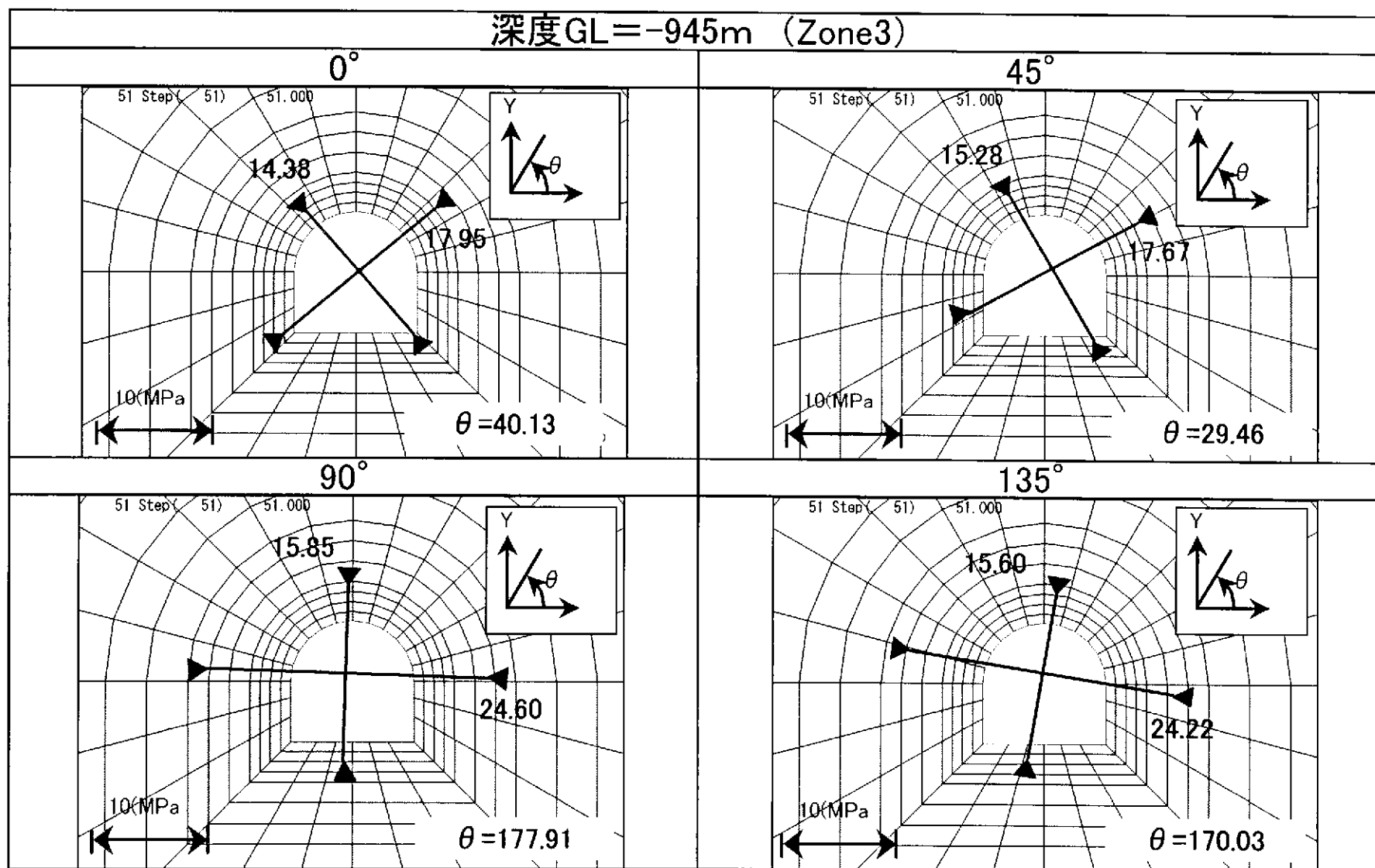


图4. 4. 3 横坑 初期応力図 (深度GL=-945m)

4. 4. 2 岩盤および断層部物性

岩盤および断層部物性は、3 章で設定した各岩盤ゾーンと同じ値を用いることとする。なお、3 章と同様、等方性を仮定する。

4. 4. 3 節理に関する物性値

MBC 解析では、不連続面の効果を考慮するため、その幾何学的・力学的物性に関する情報が必要となる。本解析では、立坑・横坑解析に用いる岩盤の節理に関するパラメータを各岩盤ゾーン毎に設定した。節理は各岩盤ゾーンに対して卓越亀裂群を 1～3 群にまとめ、各亀裂群毎に、走向傾斜、節理間隔、節理有効長、起伏角、摩擦角を設定した。

表 4. 4. 1 に節理に関する物性値一覧を示すとともに、各物性値の決定についての詳細を以下に示す。

(1) 卓越亀裂およびその走向傾斜

MBC では複雑に分布する不連続面の影響を幾つかの同じ幾何学的物性を有する亀裂群の重ね合わせで表現する。このため、BTV 生データより得られた亀裂データを各岩盤 Zone ごとに区分し、各 Zone について 1～3 群の卓越亀裂群にまとめ、その平均走向、傾斜を求めた。図 4. 4. 4 にその卓越亀裂群のシュミットネットを示す。

(2) 亀裂間隔

各 Zone 内の各卓越亀裂群の亀裂間隔ヒストグラムを図 4. 4. 5 に示す。これらの亀裂の平均間隔は以下の式により対数平均で算出した。なお、この間隔は見かけの間隔であり、解析断面に投影された時の値ではない。

$$\log \bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n \log d_i}{n} \quad (4. 4. 1)$$

ここで、 $\bar{d}$: 平均節理間隔
 d : 各節理間隔
 n : 亀裂本数

(3) 節理有効長

節理の長さに関するデータはないので、図4. 4. 6に示す割れ目トレース長と割れ目頻度の関係より以下の式により算出した

$$C(L) = 7644L^{-1.8} \quad (4. 4. 2)$$

ここで、 $C(L)$ ：面積 10000m²あたりの累積割れ目頻度（本）

L ：割れ目トレース長（m）

(4) 起伏角

節理面の不陸に関するデータはないので、過去のMBC解析の実績より、全岩盤ゾーンを10°として設定した。

(5) 摩擦角

技術資料②のジョイントせん断試験におけるティルト試験結果より得られた摩擦角の平均値を全岩盤ゾーンに適用した。

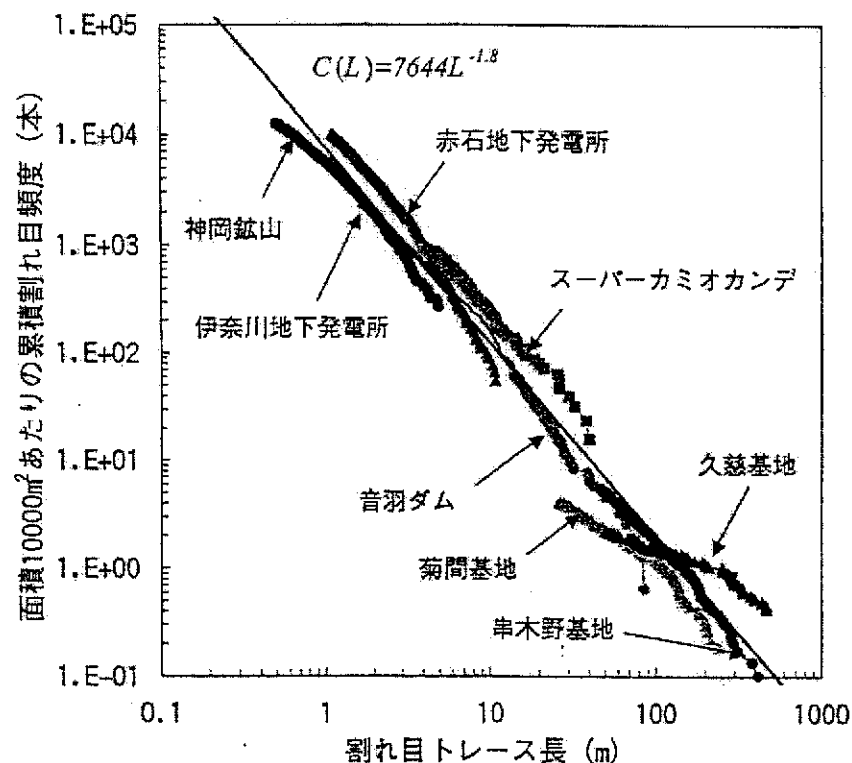


図 4. 4. 6 割れ目トレース長の分布⁷⁾

立坑および横坑（横坑については坑道展開方向ごと）の各解析断毎に得られた亀裂物性値をまとめたものを表4. 4. 2～表4. 4. 6に示した。

表4. 4. 1 節理に関する物性値一覧

卓越亀裂	項目	月吉断層上盤岩体			月吉断層下盤岩体	月吉断層周辺部		備考
		Zone1	Zone2	Zone3	Zone4	断層上盤側	断層下盤側	
卓越①	走向・傾斜	<i>N89E / 4NW</i>	<i>N41E / 75SE</i>	<i>N84E / 62SE</i>	<i>NS / 4E</i>	<i>N88W / 84SW</i>	<i>N10E / 19SE</i>	
	節理間隔(m)	0.10	0.20	0.23	0.98	0.08	0.61	
	節理有効長(m)	0.24	0.35	0.38	0.85	0.21	0.65	
	起伏角(°)	10°	10°	10°	10°	10°	10°	
	摩擦角(°)	25.5°	25.5°	25.5°	25.5°	25.5°	25.5°	
卓越②	走向・傾斜		<i>N87W / 51NE</i>	<i>N85E / 44NW</i>	<i>N47E / 65SE</i>	<i>N59E / 70SE</i>	<i>N65E / 61NW</i>	
	節理間隔(m)		0.30	0.43	0.15	0.25	0.15	
	節理有効長(m)		0.44	0.54	0.30	0.40	0.30	
	起伏角(°)		10°	10°	10°	10°	10°	
	摩擦角(°)		25.5°	25.5°	25.5°	25.5°	25.5°	
卓越③	走向・傾斜		<i>NS / 4E</i>				<i>N88W / 84SW</i>	
	節理間隔(m)		3.45				0.10	
	節理有効長(m)		1.71				0.24	
	起伏角(°)		10°				10°	
	摩擦角(°)		25.5°				25.5°	

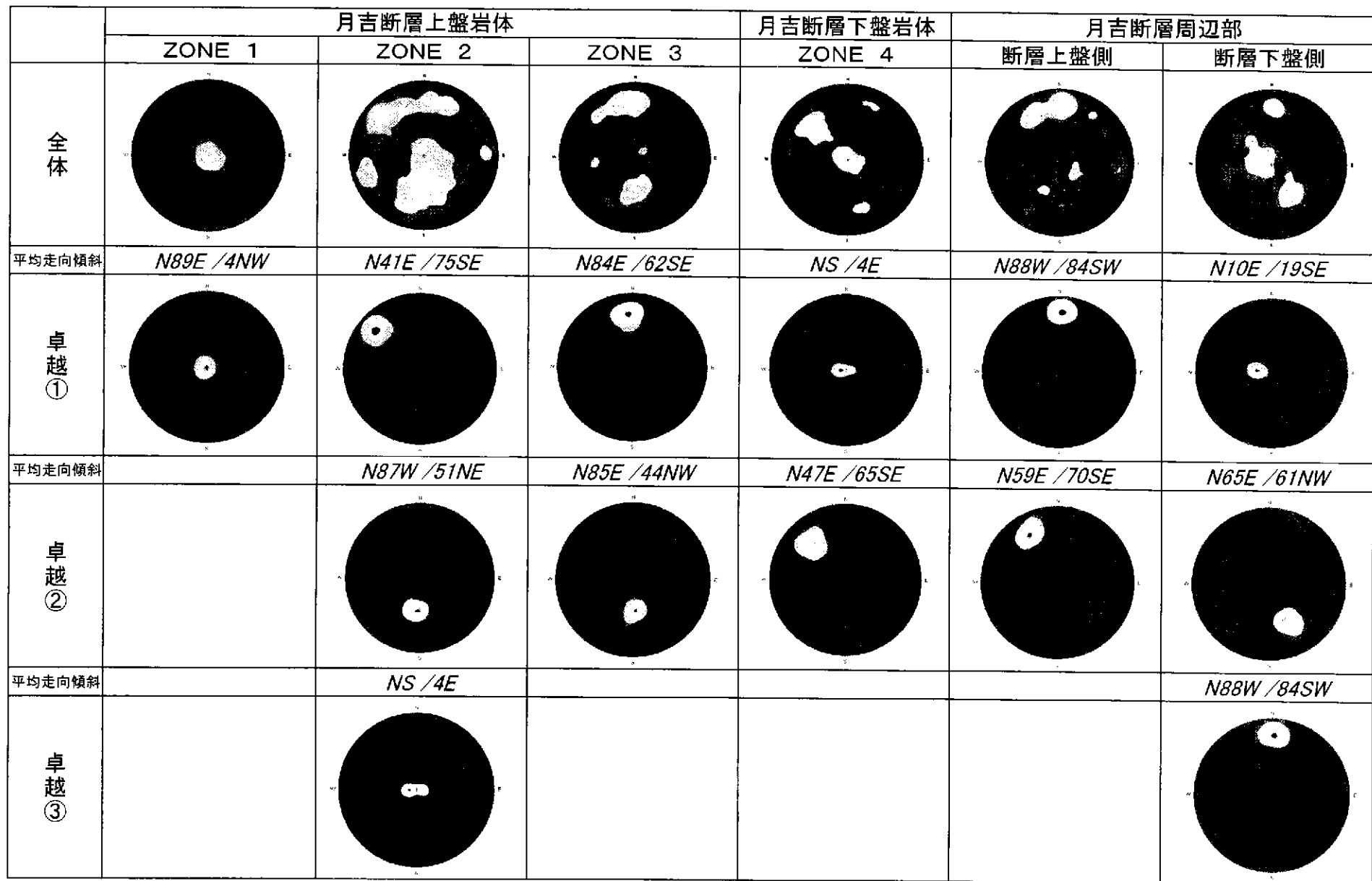


図4. 4. 4 各岩盤ゾーンごとの卓越亀裂群のシュミットネット

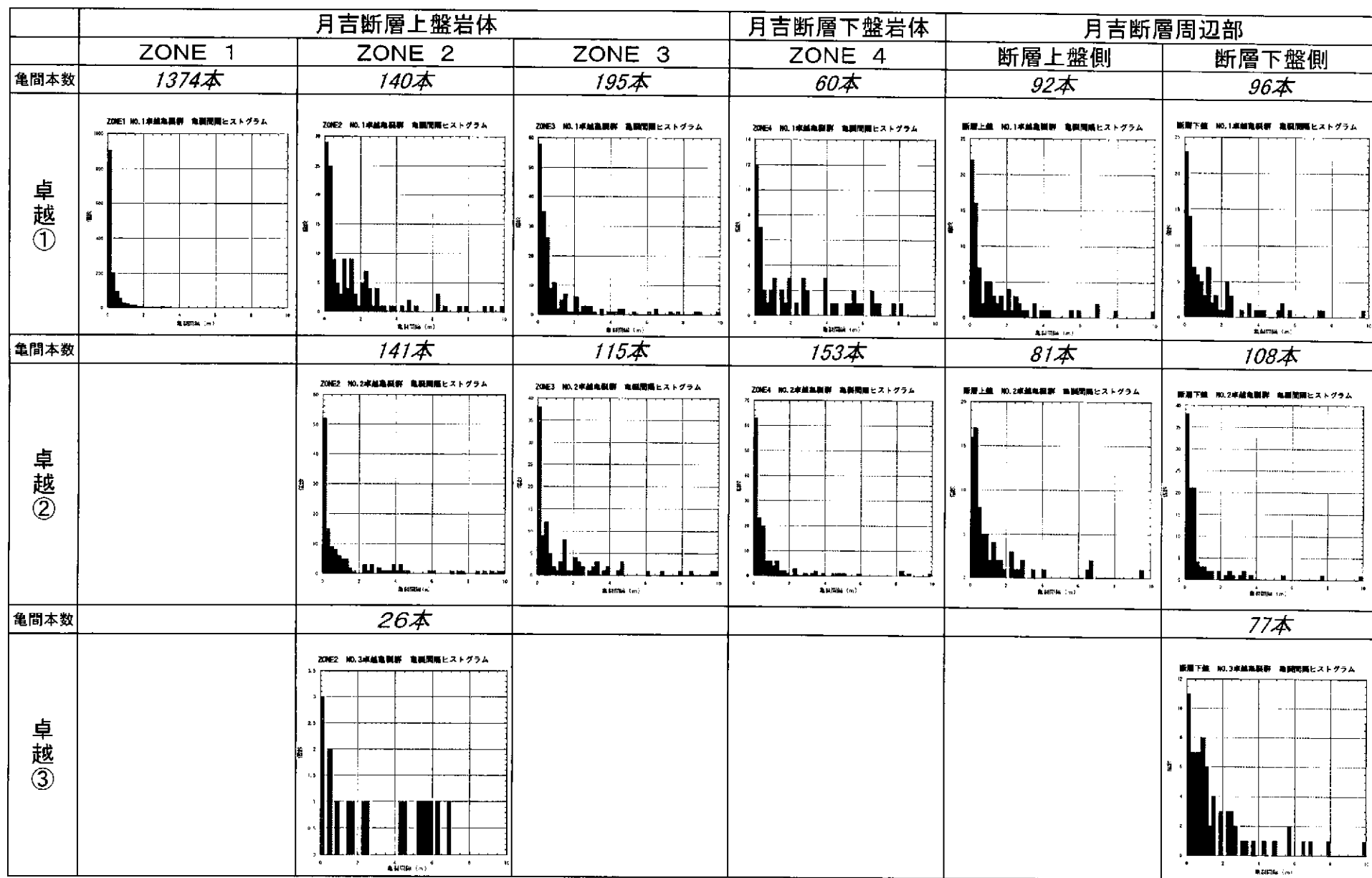
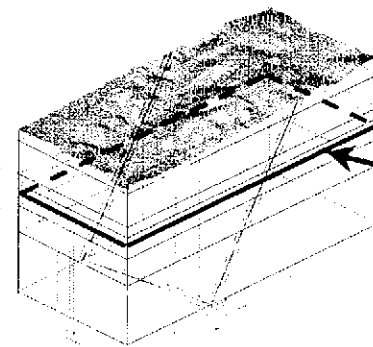
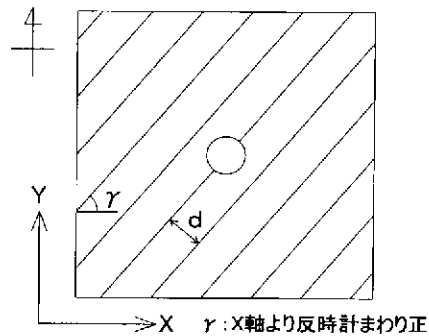


図4. 4. 5 各卓越節理群の亀裂間隔ヒストグラム

表4. 4. 2 節理に関する物性値一覧（立坑）

卓越亀裂	項目		月吉断層上盤岩体			月吉断層下盤岩体	月吉断層周辺部		備考
			Zone1	Zone2	Zone3	Zone4	断層上盤側	断層下盤側	
卓越①	節理がX軸となす角(°)	γ	1	49	6	90	178	80	
	節理間隔(m)	d	1.40	0.20	0.26	14.05	0.08	1.87	
	節理有効長(m)	2a	0.24	0.35	0.38	0.85	0.21	0.65	
	起伏角(°)	α	10°	10°	10°	10°	10°	10°	
	摩擦角(°)	Φ	25.5°	25.5°	25.5°	25.5°	25.5°	25.5°	
卓越②	節理がX軸となす角(°)	γ		177	5	43	31	25	
	節理間隔(m)	d		0.38	0.62	0.16	0.26	0.17	
	節理有効長(m)	2a		0.44	0.54	0.30	0.40	0.30	
	起伏角(°)	α		10°	10°	10°	10°	10°	
	摩擦角(°)	Φ		25.5°	25.5°	25.5°	25.5°	25.5°	
卓越③	節理がX軸となす角(°)	γ		90				178	
	節理間隔(m)	d		49.41				0.10	
	節理有効長(m)	2a		1.71				0.24	
	起伏角(°)	α		10°				10°	
	摩擦角(°)	Φ		25.5°				25.5°	



※節理のなす角、節理間隔は、解析断面に投影した値

表4. 4. 3 節理に関する物性値一覧（横坑軸 最大主応力方向に対して0°）

	項目		月吉断層上盤岩体			月吉断層下盤岩体	備考
			Zone1	Zone2	Zone3	Zone4	
卓越①	節理がX軸となす角(°)	γ	177	165	50	177	
	節理間隔(m)	d	0.10	0.73	0.32	0.98	
	節理有効長(m)	2a	0.24	0.35	0.38	0.85	
	起伏角(°)	α	10°	10°	10°	10°	
	摩擦角(°)	Φ	25.5°	25.5°	25.5°	25.5°	
卓越②	節理がX軸となす角(°)	γ		137	148	4	
	節理間隔(m)	d		0.35	0.51	0.35	
	節理有効長(m)	2a		0.44	0.54	0.30	
	起伏角(°)	α		10°	10°	10°	
	摩擦角(°)	Φ		25.5°	25.5°	25.5°	
卓越③	節理がX軸となす角(°)	γ		177			
	節理間隔(m)	d		3.45			
	節理有効長(m)	2a		1.71			
	起伏角(°)	α		10°			
	摩擦角(°)	Φ		25.5°			

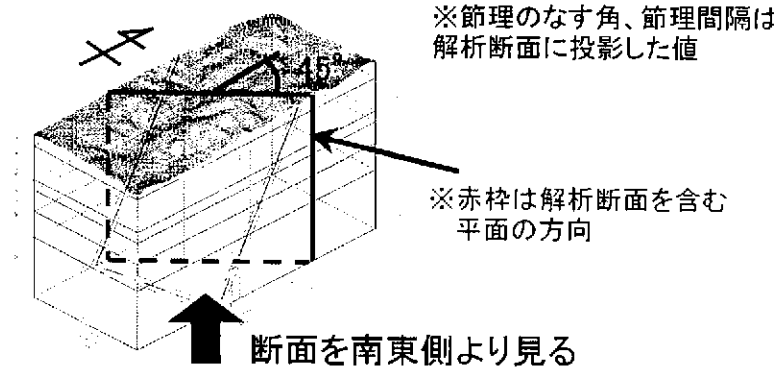
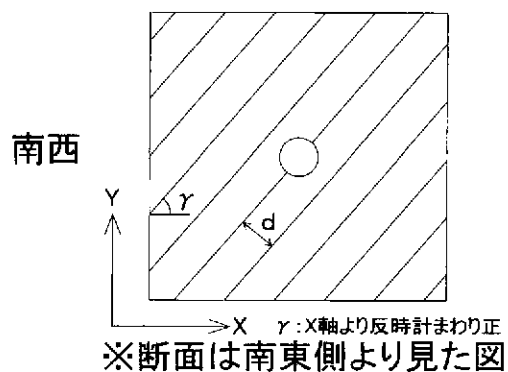
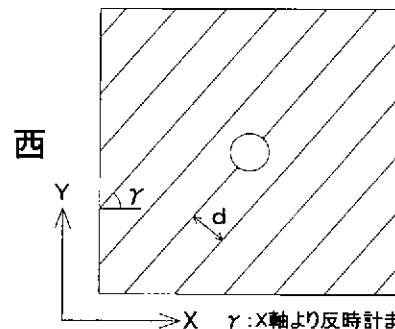
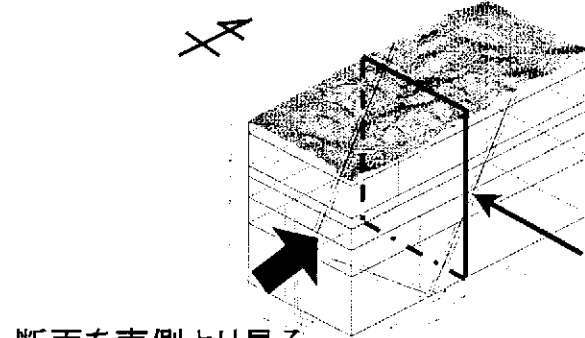


表4. 4. 4 節理に関する物性値一覧（横坑軸 最大主応力に対し45°）

卓越亀裂	項目		月吉断層上盤岩体			月吉断層下盤岩体	備考
			Zone1	Zone2	Zone3	Zone4	
卓越①	節理がX軸となす角(°)	γ	0	110	169	176	
	節理間隔(m)	d	0.10	0.25	0.48	0.98	
	節理有効長(m)	2a	0.24	0.35	0.38	0.85	
	起伏角(°)	α	10°	10°	10°	10°	
	摩擦角(°)	Φ	25.5°	25.5°	25.5°	25.5°	
卓越②	節理がX軸となす角(°)	γ		176	5	124	
	節理間隔(m)	d		0.47	0.60	0.20	
	節理有効長(m)	2a		0.44	0.54	0.30	
	起伏角(°)	α		10°	10°	10°	
	摩擦角(°)	Φ		25.5°	25.5°	25.5°	
卓越③	節理がX軸となす角(°)	γ		176			
	節理間隔(m)	d		3.45			
	節理有効長(m)	2a		1.71			
	起伏角(°)	α		10°			
	摩擦角(°)	Φ		25.5°			



※断面は南側より見た図



断面を南側より見る

※節理のなす角、節理間隔は、解析断面に投影した値

※赤枠は解析断面を含む平面の方向

表4. 4. 5 節理に関する物性値一覧（横坑軸 最大主応力方向と90°）

卓越亀裂	項目		月吉断層上盤岩体			月吉断層下盤岩体	備考
			Zone1	Zone2	Zone3	Zone4	
卓越①	節理がX軸となす角(°)	γ	3	105	124	177	
	節理間隔(m)	d	0.10	0.20	0.28	0.98	
	節理有効長(m)	$2a$	0.24	0.35	0.38	0.85	
	起伏角(°)	α	10°	10°	10°	10°	
	摩擦角(°)	Φ	25.5°	25.5°	25.5°	25.5°	
卓越②	節理がX軸となす角(°)	γ		40	36	115	
	節理間隔(m)	d		0.36	0.48	0.15	
	節理有効長(m)	$2a$		0.44	0.54	0.30	
	起伏角(°)	α		10°	10°	10°	
	摩擦角(°)	Φ		25.5°	25.5°	25.5°	
卓越③	節理がX軸となす角(°)	γ		177			
	節理間隔(m)	d		3.45			
	節理有効長(m)	$2a$		1.71			
	起伏角(°)	α		10°			
	摩擦角(°)	Φ		25.5°			

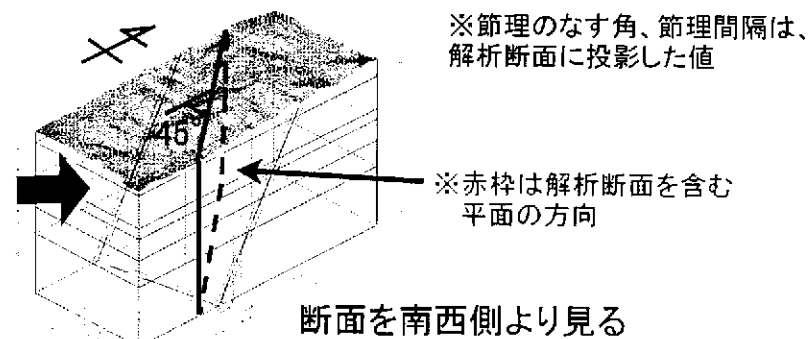
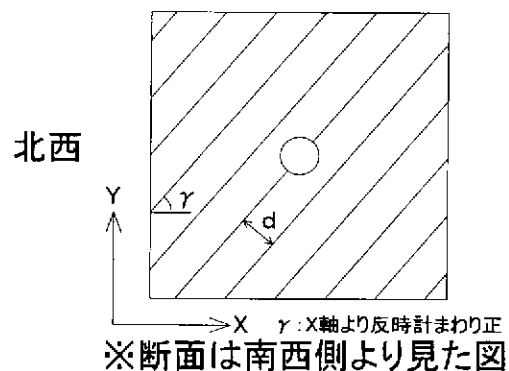
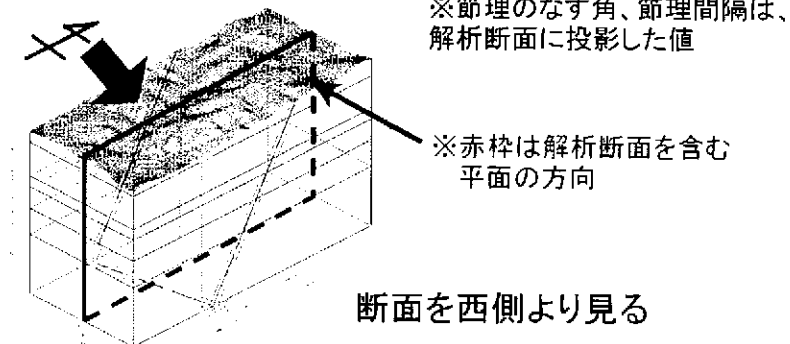
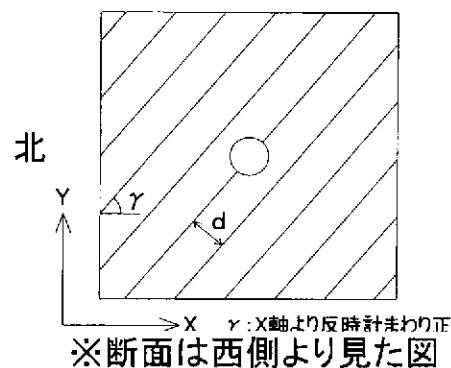


表4. 4. 6 節理に関する物性値一覧（横坑軸 最大主応力に対し135°）

卓越亀裂	項目		月吉断層上盤岩体			月吉断層下盤岩体	備考
			Zone1	Zone2	Zone3	Zone4	
卓越①	節理がX軸となす角(°)	γ	4	112	118	0	
	節理間隔(m)	d	0.10	0.28	0.23	0.98	
	節理有効長(m)	2a	0.24	0.35	0.38	0.85	
	起伏角(°)	α	10°	10°	10°	10°	
	摩擦角(°)	Φ	25.5°	25.5°	25.5°	25.5°	
卓越②	節理がX軸となす角(°)	γ		51	44	123	
	節理間隔(m)	d		0.30	0.43	0.19	
	節理有効長(m)	2a		0.44	0.54	0.30	
	起伏角(°)	α		10°	10°	10°	
	摩擦角(°)	Φ		25.5°	25.5°	25.5°	
卓越③	節理がX軸となす角(°)	γ		0			
	節理間隔(m)	d		3.46			
	節理有効長(m)	2a		1.71			
	起伏角(°)	α		10°			
	摩擦角(°)	Φ		25.5°			



4. 4. 4 支保および支保物性値

立坑・横坑それぞれの断面における支保パターンを表4. 4. 7に示す。ここでは、貸与資料③に従い、掘削サイクルを再現した形で支保を考慮することにした。以下に詳細を示す。

(1) 立坑支保パターン

立坑の支保パターンは以下の3つとする。

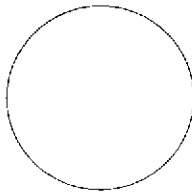
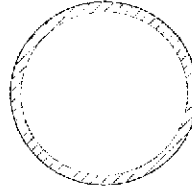
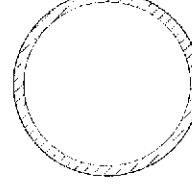
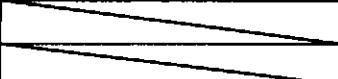
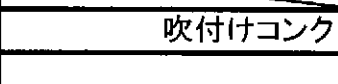
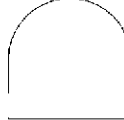
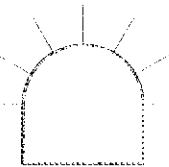
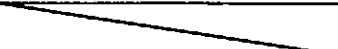
- ・ 無支保 ・ ・ ・ 素掘り
- ・ 支保パターン① ・ ・ ・ 厚さ 40cm の覆工コンクリートを打設。打設時期は、図4. 4. 7の結果から、応力解放率で 90%解放した後とする。
- ・ 支保パターン② ・ ・ ・ 貸与資料③³⁾に従い、鋼製支保工（H125）を打設後、厚さ 40cm の覆工コンクリートを打設する。打設時期は、鋼製支保工が応力解放率で 40%解放後、覆工コンクリートは 90%解放後とする。

(2) 横坑支保パターン

横坑の支保パターンは以下の2つとする。

- ・ 無支保 ・ ・ ・ 素掘り（貸与資料③³⁾ より）
- ・ 支保パターン① ・ ・ ・ 吹付けコンクリートおよびロックボルト（TD21）を打設。打設時期は応力解放率 40%解放後とする。

表4. 4. 7 支保パターン一覧

立坑	支保パターン		覆工		鋼製支保工	
	無支保		なし		なし	
	支保① (原設計)		厚さ(cm)	40	なし	
			ポアソン比	0.2		
			弾性係数(MPa)	2.0×10^4		
支保②		厚さ(cm)	40	呼称寸法	H125×125	
		ポアソン比	0.2	弾性係数(MPa)	2.1×10^5	
		弾性係数(MPa)	2.0×10^4	ポアソン比	0.3	
				断面二次モーメント(m ⁴)	8.39×10^{-6}	
				断面積(m ²)	3.0×10^{-3}	
横坑	支保パターン		吹付けコンクリート		ロックボルト	
	無支保 (原設計)		なし		なし	
	支保①		厚さ(cm)	5	呼称寸法	TD21
			ポアソン比	0.2	直径(mm)	21
			弾性係数(MPa)	3.4×10^3	弾性係数(MPa)	2.1×10^5
			断面積(m ²)	3.46×10^{-4}		

※ 立坑・鋼製支保工の奥行き方向ピッチは1.3m、
横坑・ロックボルトの奥行き方向ピッチは2.5mとする。

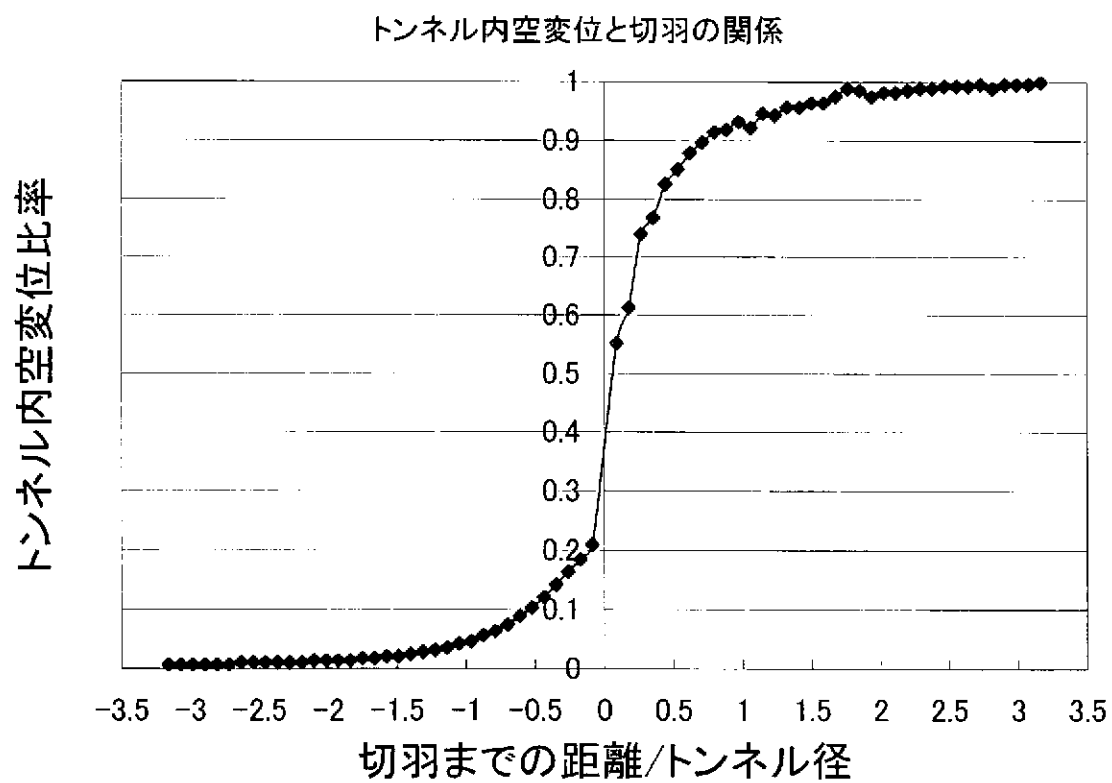
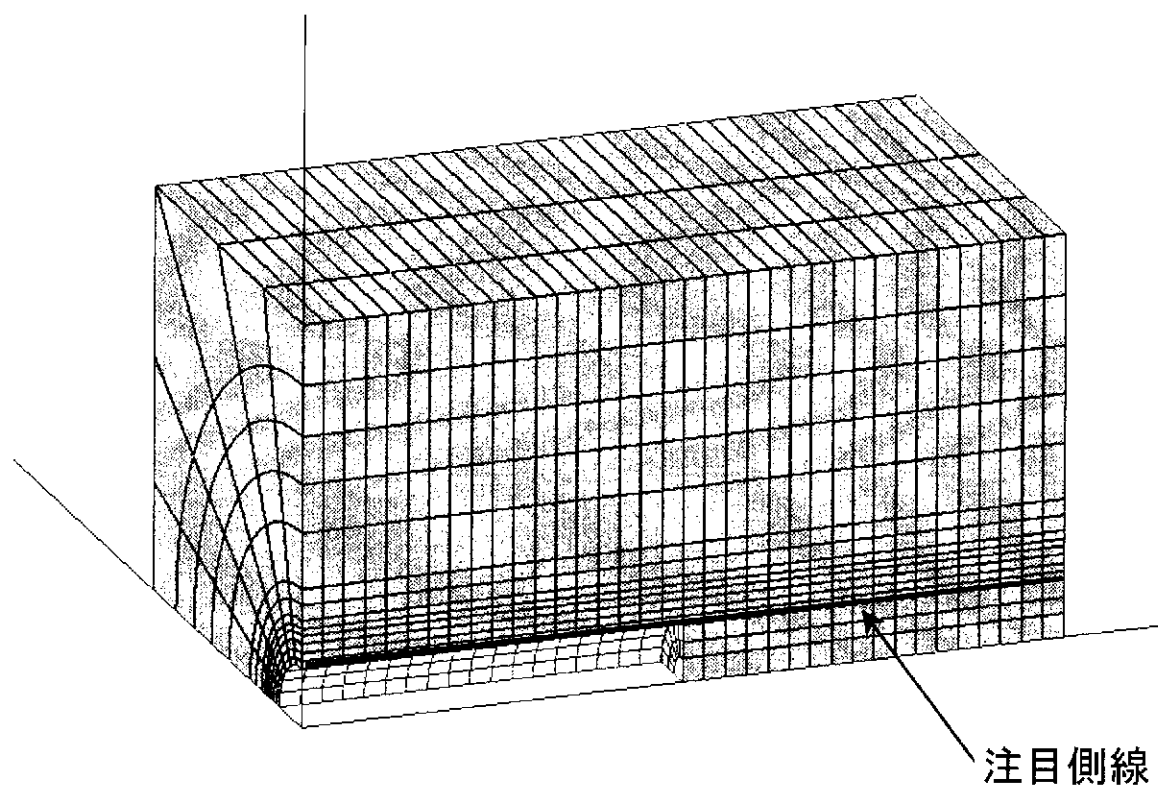


図4. 4. 7 先行変位率の算出

4. 4. 5 透水係数

立坑・横坑それぞれを掘削した際の研究坑道周辺岩盤の透水性変化を評価するため、掘削前の透水係数 (K_{matrix}) を算出する必要がある。このため、岩盤の基質部の透水係数 (K_{matrix}) を算出するためのデータとして、正馬様用地のボーリング孔 (AN-1 孔、AN-3 孔、MIU-1 孔、MIU-2 孔、MIU-3 孔) における原位置透水試験データより、各岩盤ゾーンごと (第三紀層、Zone1～Zone4、月吉断層部) の平均透水係数を算出した。

表 4. 4. 8 に岩盤ゾーン別の透水係数の平均値を示した。また、表 4. 4. 9 には、MBC 解析に用いる透水係数をまとめた。また、図 4. 4. 8 には、原位置透水試験結果として、ボーリング孔別にまとめた。図 4. 4. 9 には、各岩盤ゾーン別にまとめた。

立坑および横坑の掘削による掘削壁面周辺の岩盤透水係数の算出は、亀裂の開口量より非連成にて算出するものとする。具体的には、以下に示すように Elsworth と Mase による不連続性岩盤の中にある複数の節理より容積透水係数を算出する方法を採用する。⁸⁾ これは、原位置調査において、透水異方性を評価しうるだけのデータが取得されていなかったためである。

(1) 単一亀裂セットの場合

矢印方向 (x_2 あるいは x_3 方向) の透水係数は

$$K = \frac{\gamma}{\mu} \frac{b_1^3}{12S_1} + K_{matrix} \left(1 - \frac{b_1}{S_1} \right) \quad (4. 4. 3)$$

と表される。亀裂の開口によって基質岩盤のボリュームが縮小しないと考えるならば、上式は

$$K = \frac{\gamma}{\mu} \frac{b_1^3}{12S_1} + K_{matrix} \quad (4. 4. 4)$$

と表すことができる。

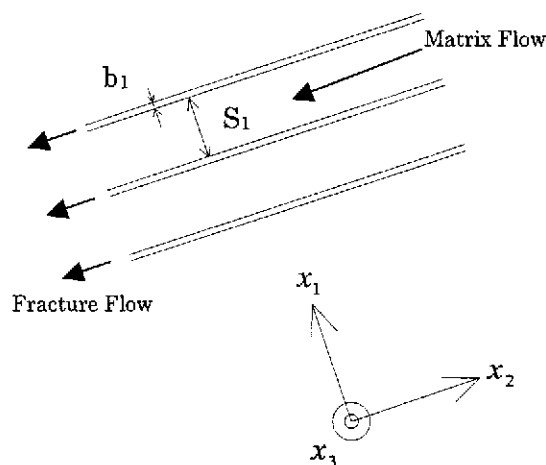


図 4. 4. 10 単一亀裂セットの概念図

(2) x_1x_2 面内直行の亀裂セットの場合

単一亀裂セットの場合の拡張として右図のような亀裂セットを含む岩盤の透水係数は

$$K = \frac{\gamma}{\mu} \frac{1}{12} \left(\frac{b_1^3}{S_1} + \frac{b_2^3}{S_2} \right) + K_{matrix} \left(1 - \frac{b_1}{S_1} \right) \left(1 - \frac{b_2}{S_2} \right) \quad (4. 4. 5)$$

と表されるが、この式が意味するところは x_3 方向の透水係数である。しかるに等方性問題を仮定するのであれば、 x_1x_2 面内の透水係数と等価である、と考えることにする。

また前述のように基質岩盤のポリュームが変化しないのであれば、上式は

$$K = \frac{\gamma}{\mu} \frac{1}{12} \left(\frac{b_1^3}{S_1} + \frac{b_2^3}{S_2} \right) + K_{matrix} \quad (4. 4. 6)$$

とすることができる。このように考えるのであれば、右図のように直行しない亀裂セットに対しても、互いのなす角度を考慮せずに開口幅と亀裂間隔のみでその透水係数を算出できるため、今回の等方性問題における亀裂を考慮した等価透水係数も式(*)を用いて算出を行った。

K_{matrix} : 基質岩盤の透水係数

S_i : 亀裂間隔

b_i : 開口幅

μ : 溶液の粘性係数^{※1}

γ : 単位体積重量

[※1]

粘性係数は温度により大きく異なる性質を示す。

水の場合、地下水温度を 15℃ と仮定すると粘性係数は

$$\mu = 0.01138 [\text{poise}]$$

$$(1 [\text{poise}] = 1.01972 \times 10^{-6} [\text{kgf} \cdot \text{s/cm}^2])$$

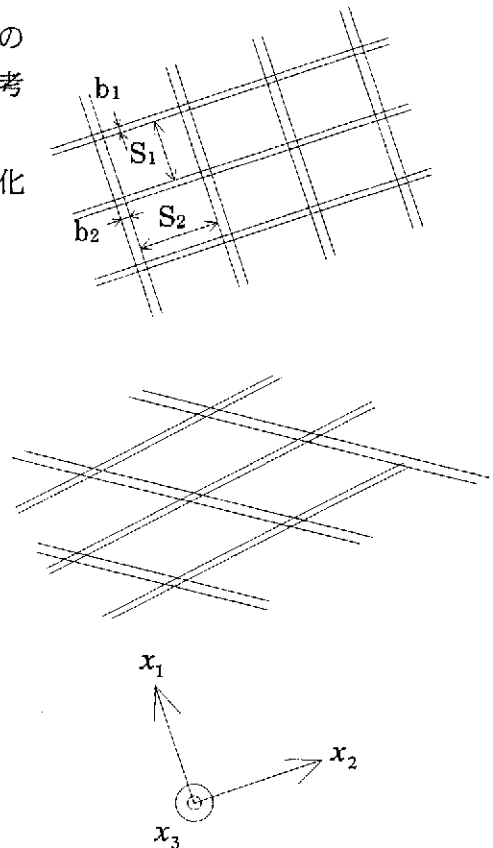


図 4. 4. 1 1 複数亀裂セットの概念図

表4. 4. 8 岩盤ゾーン別の透水係数の平均値

(対数平均処理)

単位(m/s)

岩盤ゾーン	平均値 X	標準偏差 X-σ	標準偏差 X+σ	最小	最大	標本数
第三紀層	3.963E-08	1.576E-09	9.965E-07	1.930E-11	4.000E-06	42
Zone1	1.519E-08	3.697E-10	6.240E-07	3.270E-12	1.109E-05	60
Zone2	6.459E-10	3.368E-11	1.239E-08	3.330E-12	5.870E-08	14
Zone3	1.109E-08	4.604E-10	2.671E-07	1.980E-10	2.190E-06	10
月吉断層	8.282E-08	5.387E-09	1.273E-06	1.600E-09	3.660E-06	10
Zone4	1.119E-08	1.237E-09	1.012E-07	9.960E-10	7.400E-08	3
Zone1234	8.721E-09	2.2772E-10	3.3399E-07	3.27E-12	0.00001109	87

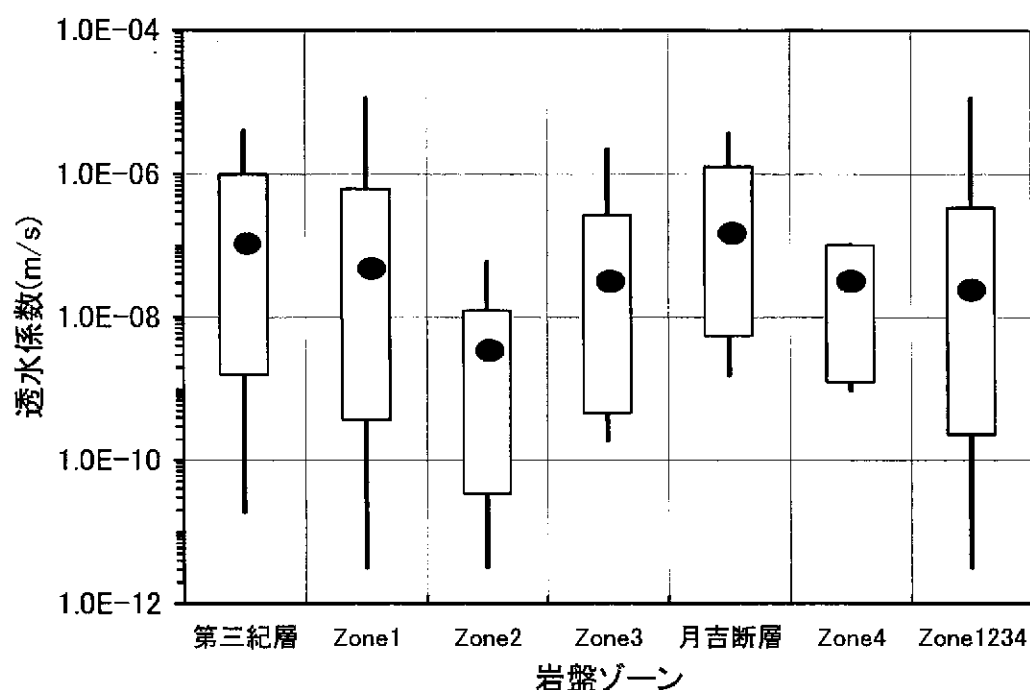


表4. 4. 9 岩盤ゾーン別の透水係数の代表値

岩盤ゾーン	代表透水係数K(m/s)
第三紀層	4.0×10^{-8}
Zone1	1.5×10^{-8}
Zone2	6.5×10^{-10}
Zone3	1.1×10^{-8}
月吉断層	8.3×10^{-8}
Zone4	1.1×10^{-8}
Zone1234	8.7×10^{-9}

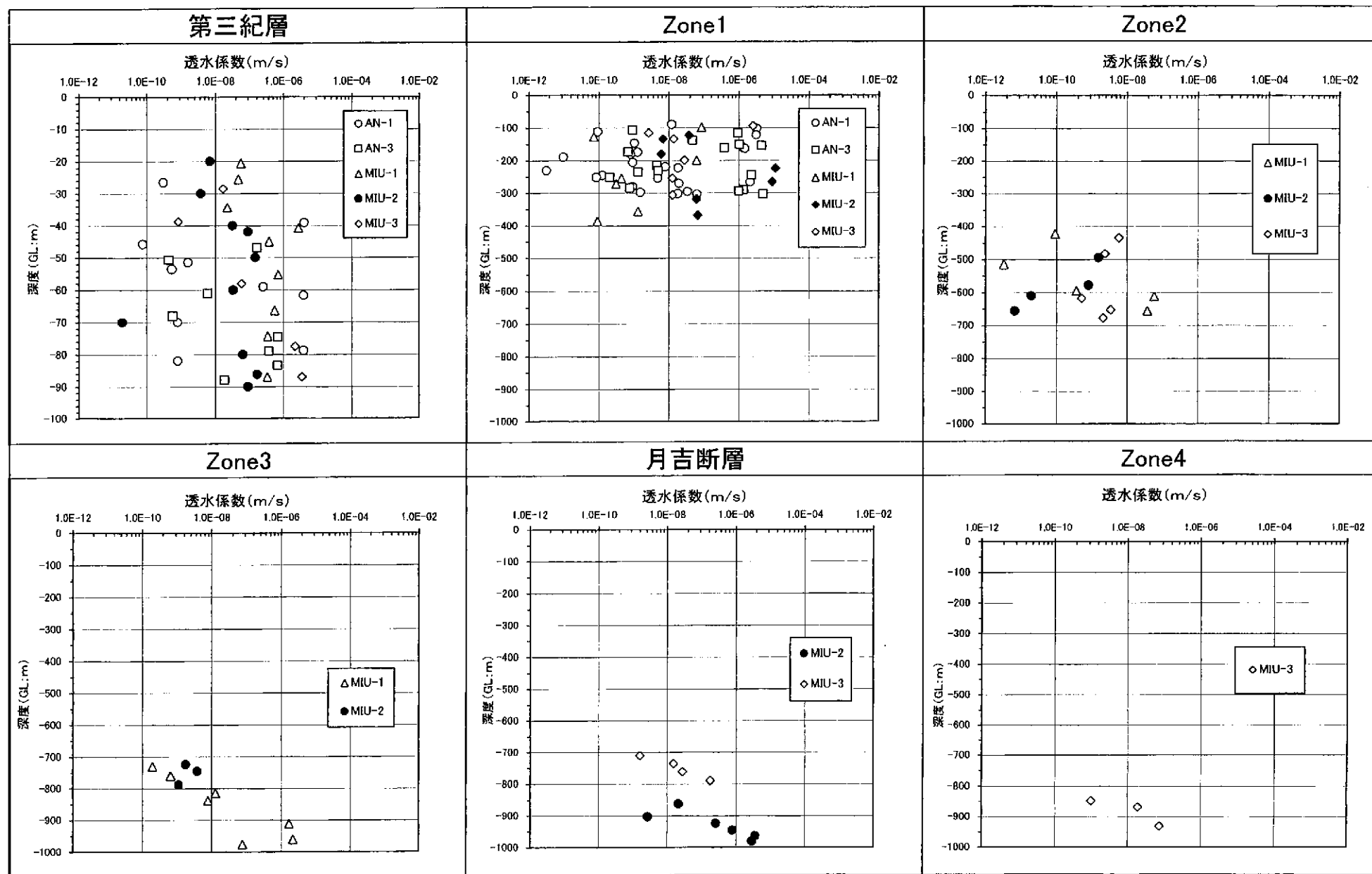


図4. 4. 8 原位置透水試験結果(岩盤ゾーン別)

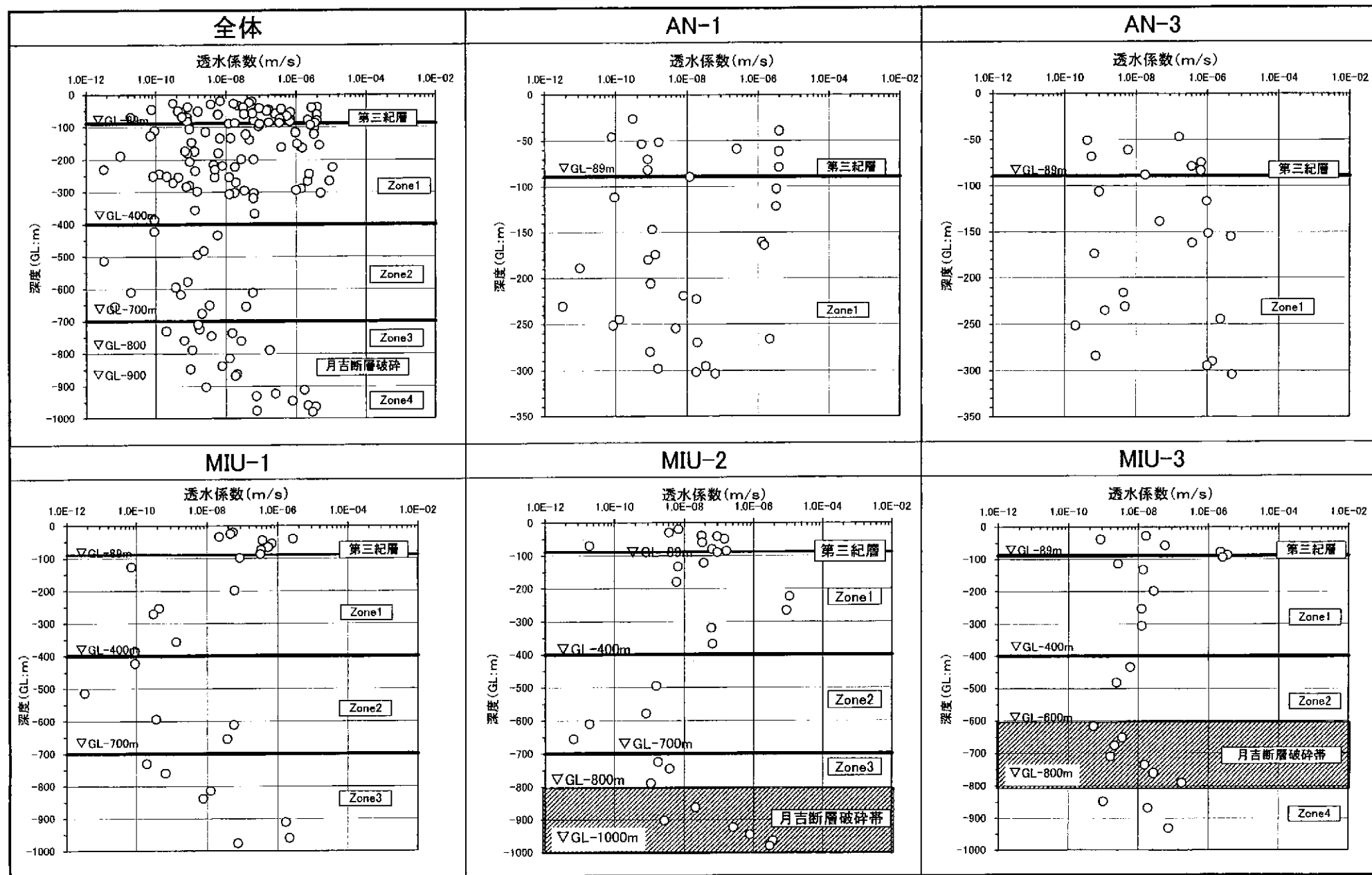


図4. 4. 9 原位置透水試験結果(ボーリング孔別)

4. 4. 6 弾性係数

岩盤の初期弾性係数は、4. 4. 2 で示したとおりである。掘削による開口量変化に伴う弾性係数変化は、計算の過程で得られる剛性マトリックスの値の変化として評価する。なお、初期状態の岩盤物性は等方性であるが、各亀裂セットの開口量に応じ、弾性係数変化は異方的な値となる。

4. 4. 7 解析ケース

(1) 立坑解析ケース

立坑の解析ケースを表 4. 4. 10 に示した。解析断面は深度別に

GL-200m のケース (Case1~Case3)

GL-500m のケース (Case4~Case6)

GL-945m のケース (Case7~Case9)

としている。それぞれの深度で支保パターンごとに

無支保

支保① (覆工コンクリートのみ)

支保② (覆工コンクリート + 鋼製支保工)

の 3 パターンを解析する。総じて 9 ケースとなる。

(2) 横坑解析ケース

横坑の解析ケースを表 4. 4. 11 に示す。解析断面は深度別に

GL-500m のケース (Case10~Case17)

GL-945m のケース (Case18~Case25)

としている。また、横坑の方向と座標系の設定を図 4. 4. 12 に示す。それぞれの深度で坑道展開方向をそれぞれ

最大主応力方向に対し、 0° (N45W 方向)

最大主応力方向に対し、 45° (N 方向)

最大主応力方向に対し、 90° (N45E 方向)

最大主応力方向に対し、 135° (E 方向)

の 4 方向に展開する。また、それぞれのケースに対し支保パターンごとに

無支保

支保① (吹付コンクリート + ロックボルト)

の 2 パターンを解析する。総じて 16 ケースとなる。

表4. 4. 10 立坑の解析ケースと解析用入力物性値一覧

深度(GL)	支保パターン	ケース	岩盤		節理①			節理②			節理③			覆工		鋼製支保		初期応力		
			弾性係数 E(MPa)	ポアソン 比 ν	有効長 a(m)	節理間隔 1/d (/m)	傾斜 (°)	有効長 a(m)	節理間隔 1/d (/m)	傾斜 (°)	有効長 a(m)	節理間隔 1/d (/m)	傾斜 (°)	弾性係数 E(MPa)	ポアソン 比 ν	弾性係数 E(MPa)	断面積 As(m ²)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	τ_{xy} (MPa)
-200m (Zone1)	無支保	Case01	49,900	0.36	0.120	0.714	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14.99	17.92	-0.21
	支保①	Case02	49,900	0.36	0.120	0.714	1	—	—	—	—	—	—	20,000	0.20	—	—	14.99	17.92	-0.21
	支保②	Case03	49,900	0.36	0.120	0.714	1	—	—	—	—	—	—	20,000	0.20	161,538	0.003	14.99	17.92	-0.21
-500m (Zone2)	無支保	Case04	49,400	0.34	0.175	5.000	49	0.220	2.632	177	0.855	0.020	90	—	—	—	—	18.82	20.47	-5.30
	支保①	Case05	49,400	0.34	0.175	5.000	49	0.220	2.632	177	0.855	0.020	90	20,000	0.20	—	—	18.82	20.47	-5.30
	支保②	Case06	49,400	0.34	0.175	5.000	49	0.220	2.632	177	0.855	0.020	90	20,000	0.20	161,538	0.003	18.82	20.47	-5.30
-945m (Zone3) 断層部	無支保	Case07	3,500	0.36	0.325	0.535	80	0.150	5.882	25	0.120	10.000	178	—	—	—	—	3.18	19.50	-5.59
	支保①	Case08	3,500	0.36	0.325	0.535	80	0.150	5.882	25	0.120	10.000	178	20,000	0.20	—	—	3.18	19.50	-5.59
	支保②	Case09	3,500	0.36	0.325	0.535	80	0.150	5.882	25	0.120	10.000	178	20,000	0.20	161,538	0.003	3.18	19.50	-5.59

注1) 節理の傾斜角: 水平軸の正側から反時計回りを正とする。

注2) 鋼製支保工: H-125 断面積As=30.31cm², 弾性係数は打設ピッチ1.3mを考慮(E=210,000/1.3)

注3) 初期応力はY: 南北方向(北を正), X: 東西方向(東を正)

表4. 4. 11 横坑の解析ケースと解析用入力物性値一覧

深度(GL)	坑道方向	支保パターン	ケース	岩盤		節理①			節理②			節理③			吹付コンクリート		ロックボルト		初期応力		
				弾性係数 E(MPa)	ポアソン 比 ν	有効長 a(m)	節理間 隔 1/d (1/m)	傾斜 (°)	有効長 a(m)	節理間隔 1/d (1/m)	傾斜 (°)	有効長 a(m)	節理間隔 1/d (1/m)	傾斜 (°)	弾性係数 E(MPa)	ポアソン 比 ν	弾性係数 E(MPa)	断面積 As(m ²)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	τ_{xy} (MPa)
-500m (Zone2)	0°	無支保	case10	49,400	0.34	0.175	1.370	165	0.220	2.857	137	0.855	0.290	177	—	—	—	—	14.35	12.75	1.43
		支保有り	case11	49,400	0.34	0.175	1.370	165	0.220	2.857	137	0.855	0.290	177	3,400	0.20	84,000	0.000346	14.35	12.75	1.43
	45°	無支保	case12	49,400	0.34	0.175	4.000	110	0.220	2.128	176	0.855	0.290	176	—	—	—	—	18.82	12.75	-0.59
		支保有り	case13	49,400	0.34	0.175	4.000	110	0.220	2.128	176	0.855	0.290	176	3,400	0.20	84,000	0.000346	18.82	12.75	-0.59
	90°	無支保	case14	49,400	0.34	0.175	5.000	105	0.220	2.778	40	0.855	0.290	177	—	—	—	—	24.95	12.75	-2.26
		支保有り	case15	49,400	0.34	0.175	5.000	105	0.220	2.778	40	0.855	0.290	177	3,400	0.20	84,000	0.000346	24.95	12.75	-2.26
	135°	無支保	case16	49,400	0.34	0.175	3.448	112	0.220	3.333	51	0.855	0.289	0	—	—	—	—	20.47	12.75	-2.61
		支保有り	case17	49,400	0.34	0.175	3.448	112	0.220	3.333	51	0.855	0.289	0	3,400	0.20	84,000	0.000346	20.47	12.75	-2.61
-945m (Zone3)	0°	無支保	case18	47,400	0.34	0.190	3.125	50	0.270	1.961	148	—	—	—	—	—	—	—	16.47	15.86	1.76
		支保有り	case19	47,400	0.34	0.190	3.125	50	0.270	1.961	148	—	—	—	3,400	0.20	84,000	0.000346	16.47	15.86	1.76
	45°	無支保	case20	47,400	0.34	0.190	2.083	169	0.270	1.667	5	—	—	—	—	—	—	—	17.09	15.86	1.02
		支保有り	case21	47,400	0.34	0.190	2.083	169	0.270	1.667	5	—	—	—	3,400	0.20	84,000	0.000346	17.09	15.86	1.02
	90°	無支保	case22	47,400	0.34	0.190	3.571	124	0.270	2.083	36	—	—	—	—	—	—	—	24.59	15.86	-0.32
		支保有り	case23	47,400	0.34	0.190	3.571	124	0.270	2.083	36	—	—	—	3,400	0.20	84,000	0.000346	24.59	15.86	-0.32
	135°	無支保	case24	47,400	0.34	0.190	4.348	118	0.270	2.326	44	—	—	—	—	—	—	—	23.96	15.86	-1.47
		支保有り	case25	47,400	0.34	0.190	4.348	118	0.270	2.326	44	—	—	—	3,400	0.20	84,000	0.000346	23.96	15.86	-1.47

注1) 節理の傾斜角: 水平軸の正側から反時計廻りを正とする。

注2) ロックボルトの弾性係数は打設ピッチ2.5mを考慮(E=210,000/2.5)

注3) 初期応力はY: 鉛直方向(上を正), X: 坑道軸に直交する方向(東側を正)

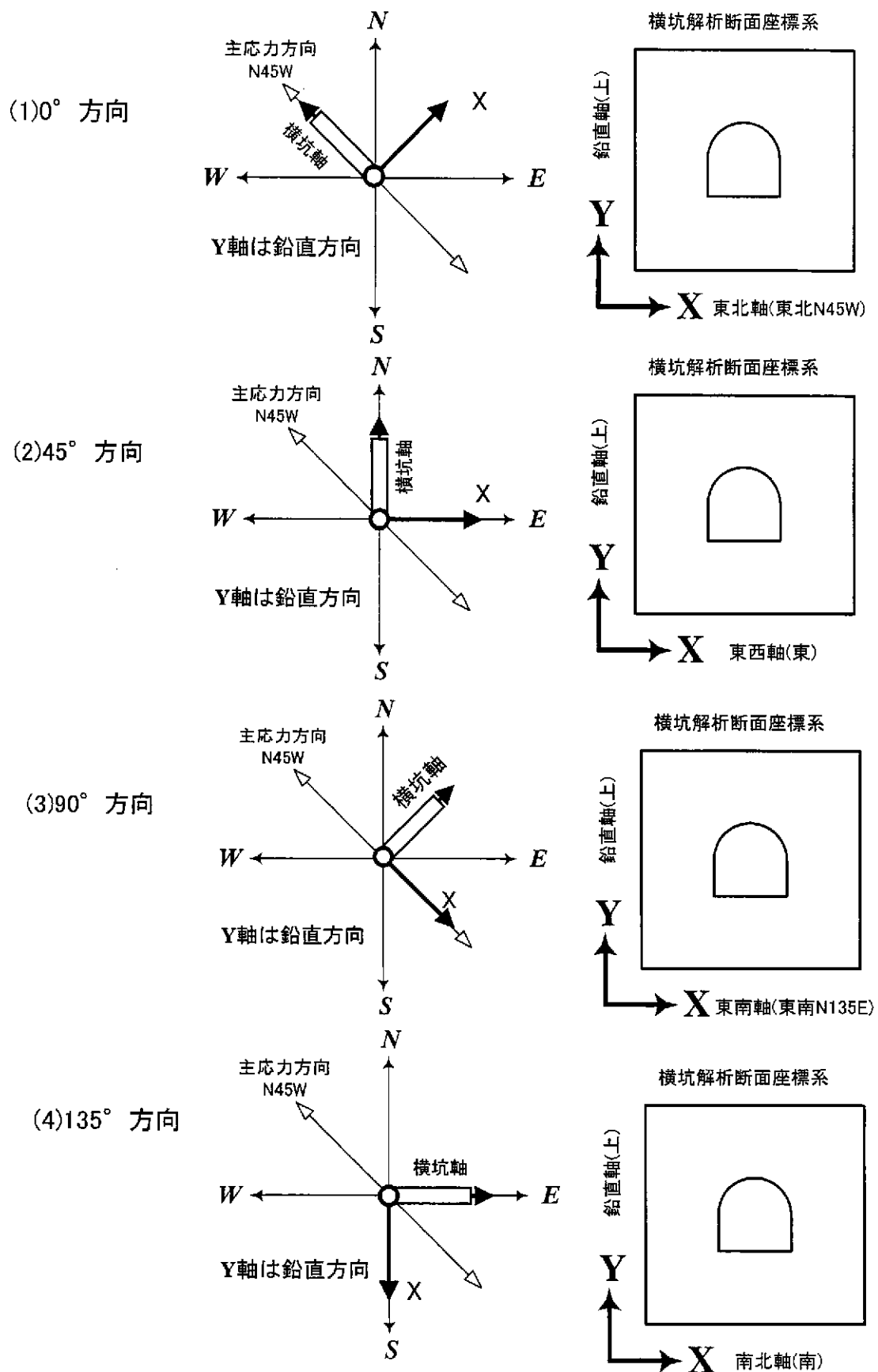


図4. 4. 12 横坑の方向と座標系の設定

4. 5 立坑解析結果

4. 5. 1 変形量

立坑解析結果の内、掘削による変形量を図 4. 5. 1 に示した。また、掘削壁面の変位量を表 4. 5. 1 に示した。この結果、各変形モードおよび変形量は、解析領域内の初期応力状態（初期応力の方向と大きさ）と、岩盤物性に多大な影響を受けていることが分かる。

深度別に見ると深度 GL-200m のケース（Case1～Case3）では、水平面内の最大主応力 σ_1 がほぼ南北に一致しており、最小主応力 σ_2 との大きさの差も 3MPa と比較的小さいことから、立坑の変形モードはほぼ円形のままであり、最大内空変位量も約 1.7mm ほどとなっている。

GL-500m のケース（Case4～Case6）では、水平面内の最大主応力 σ_1 の方向が北西～南東方向であり、最大主応力 σ_2 との大きさの差も約 11MPa あることから、立坑の変形モードは北東～南東方向で押しつぶされた形状であり、最大内空変位量も約 2.8mm となっている。

GL-945m のケース（Case7～Case9）は、岩盤として、断層部の物性値を用いているためその他のケースに比べ岩盤の弾性係数が 1/10 以下であり、水平面内の最大主応力の方向が北北西～南南東の方向にほぼ一軸化しているため、立坑の変形モードが北北西～南南東方向で押しつぶされた形状であり、最大内空変位量も約 34mm 前後となり、非常に大きい。

さらに支保のあり・なしによる変形量の差はあまり見られず、GL-200m のケースで、0.01mm、GL-500m のケースで 0.05mm 程度、GL-945m のケースでは、変位量の絶対量が大きいため、1.7mm 程度となっている。

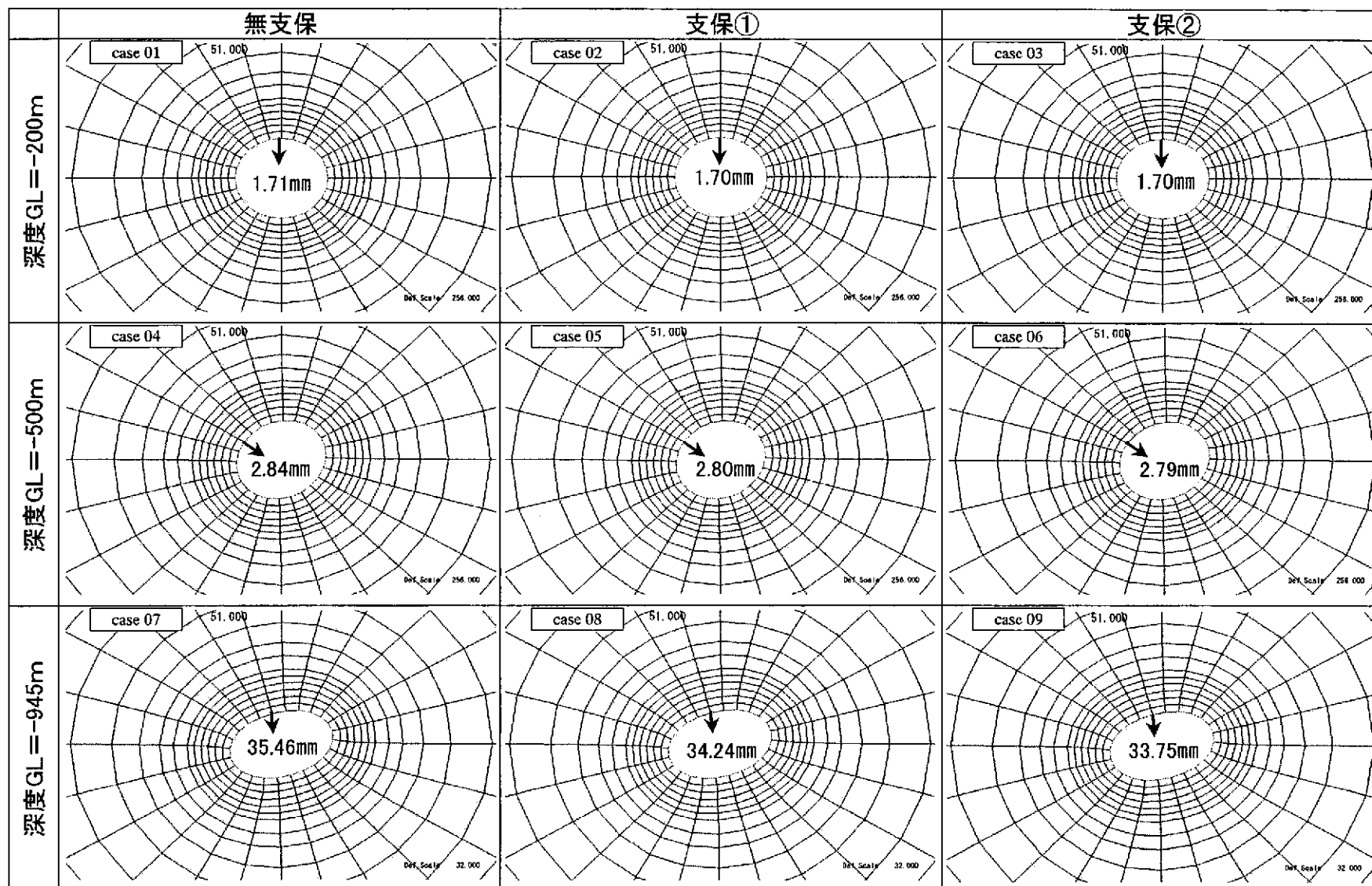


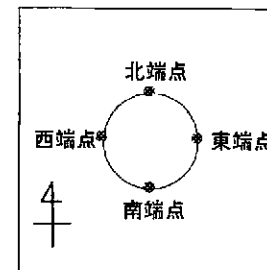
図4. 5. 1 立坑解析結果 変形図

表4. 5. 1 立坑 掘削壁面変位量

単位: mm

立坑	深度 (GL)	物性値	支保	ケース	北端	西端	南端	東端	最大変位量
	-200m	Zone1	無支保	CASE1	1.71	1.31	1.71	1.31	1.71
			支保①	CASE2	1.70	1.30	1.70	1.30	1.70
			支保②	CASE3	1.70	1.30	1.70	1.30	1.70
	-500m	Zone2	無支保	CASE4	2.27	1.90	2.27	1.90	2.84
			支保①	CASE5	2.25	1.88	2.25	1.88	2.80
			支保②	CASE6	2.24	1.88	2.24	1.88	2.79
	-945m	断層部	無支保	CASE7	33.11	11.00	33.11	11.00	35.46
			支保①	CASE8	32.01	10.71	32.01	10.71	34.24
			支保②	CASE9	31.48	10.47	31.48	10.47	33.75

壁面変位量 対象点位置



4. 5. 2 主応力

立坑解析結果の内、主応力分布を図4. 5. 2に示す。主応力分布は各深度での初期応力状態の影響を強く受け、掘削境界付近の岩盤では境界接線方向が最大主応力方向となる分布となっている。しかし、GL-945mのケース（Case7～Case9）では、初期応力が極端な偏圧となっており、掘削境界付近の岩盤の内、北西および南東付近の要素は引張応力が生じている。その値は最大で約 0.15MPa である。逆に北東および南西付近の要素では、初期応力の倍以上の圧縮応力（約 46MPa）となっている。

なお、どのケースにおいても支保のある・なしによる岩盤応力分布の差は特に見られない。

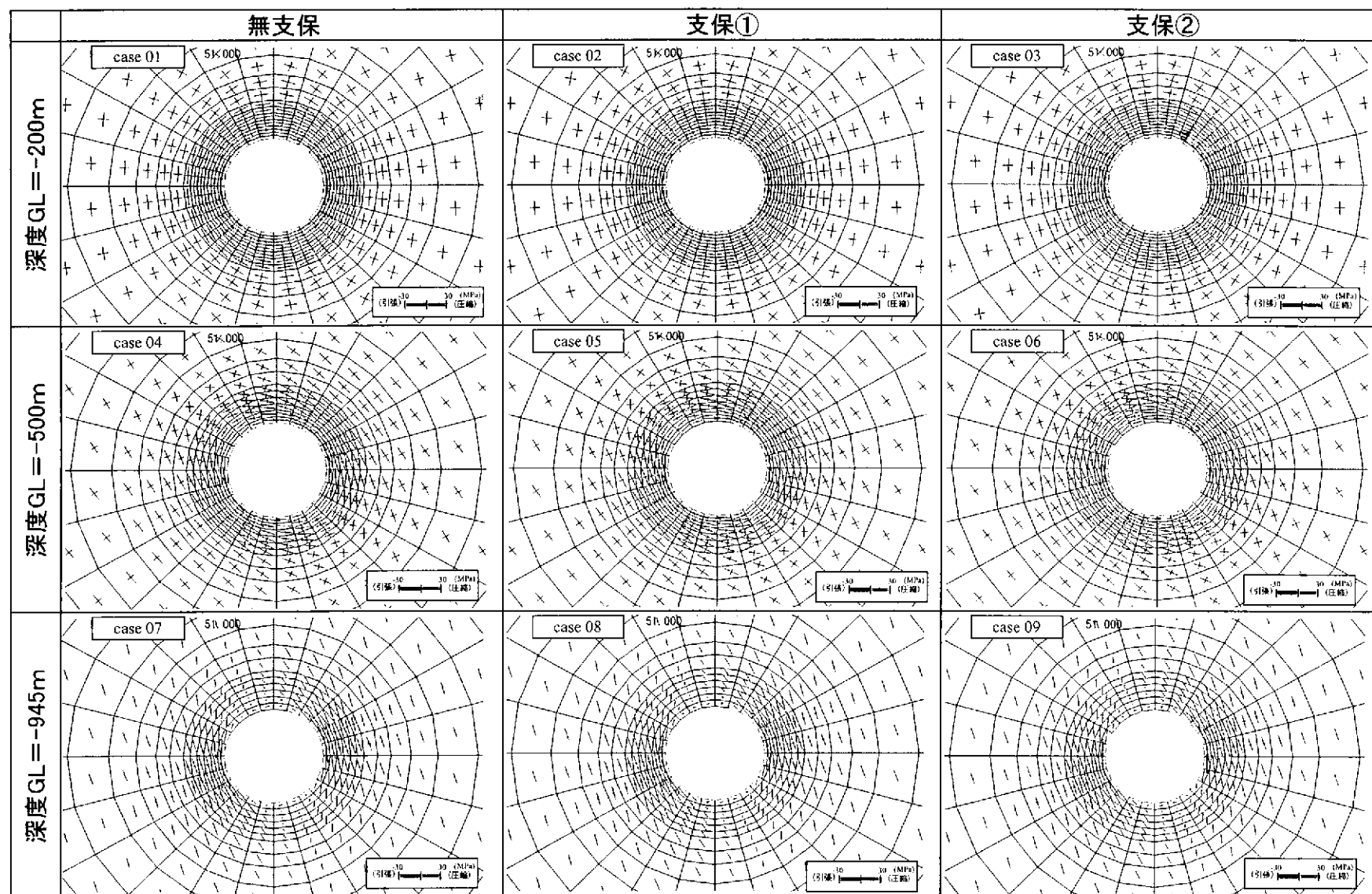


図4. 5. 2 立坑解析結果 主応力図

4. 5. 3 亀裂開口量

掘削による亀裂の全開口量分布を図4. 5. 3に示した。なお、亀裂の全開口量とは、各亀裂セットでの開口量の単純な足し合わせである。亀裂セットとして各ケースで最大3セットを条件として与えたため、各亀裂セット毎の開口量分布を図4. 5. 4～図4. 5. 6に示した。

また、深度 GL-945mのケース（Case7～Case9）では、他のケースに比べ、開口量が極端に大きいため、表示スケールを変更している。

深度別に見ると深度 GL-200mのケース（Case1～Case3）では、亀裂セットとして N89E の亀裂群のみであり、立坑周辺岩盤の南北付近の亀裂が開口している。しかし、開口量としては、1/100mm 以下の極めて小さいものである。

深度 GL-500mのケース（Case4～Case6）では、亀裂セットとして、N41E、N87W、NS の3群を条件として与えており、そのうち N41E、N87W の影響を受けて立坑周辺の亀裂が開口している。しかし、開口量としては最大でも約 0.05mm 程度のものである。

深度 GL-945mのケース（Case7～Case9）では、亀裂セットとして、N10E、N65E、N88W の3群を条件として与えている。これらのケースでは初期地圧が極めて異方的であり、その最大主応力方向は N17W である。このため、既に掘削以前の段階で、主に亀裂セット1（N10E）の影響で解析領域全体で全開口量が大きくなっている。

また、亀裂間隔の最も小さい亀裂セット3（N88W）の影響で、掘削時には立坑周辺のほぼ南北方向の亀裂が開口している。亀裂の開口量は、最大で約 0.25mm 程度である。亀裂が開口する領域は、深度 GL-200mのケースで掘削壁面から約 0.7m、GL-500mのケースで掘削壁面から約 2.3m、GL-945mのケースで掘削壁面から約 3.6mとなっている。

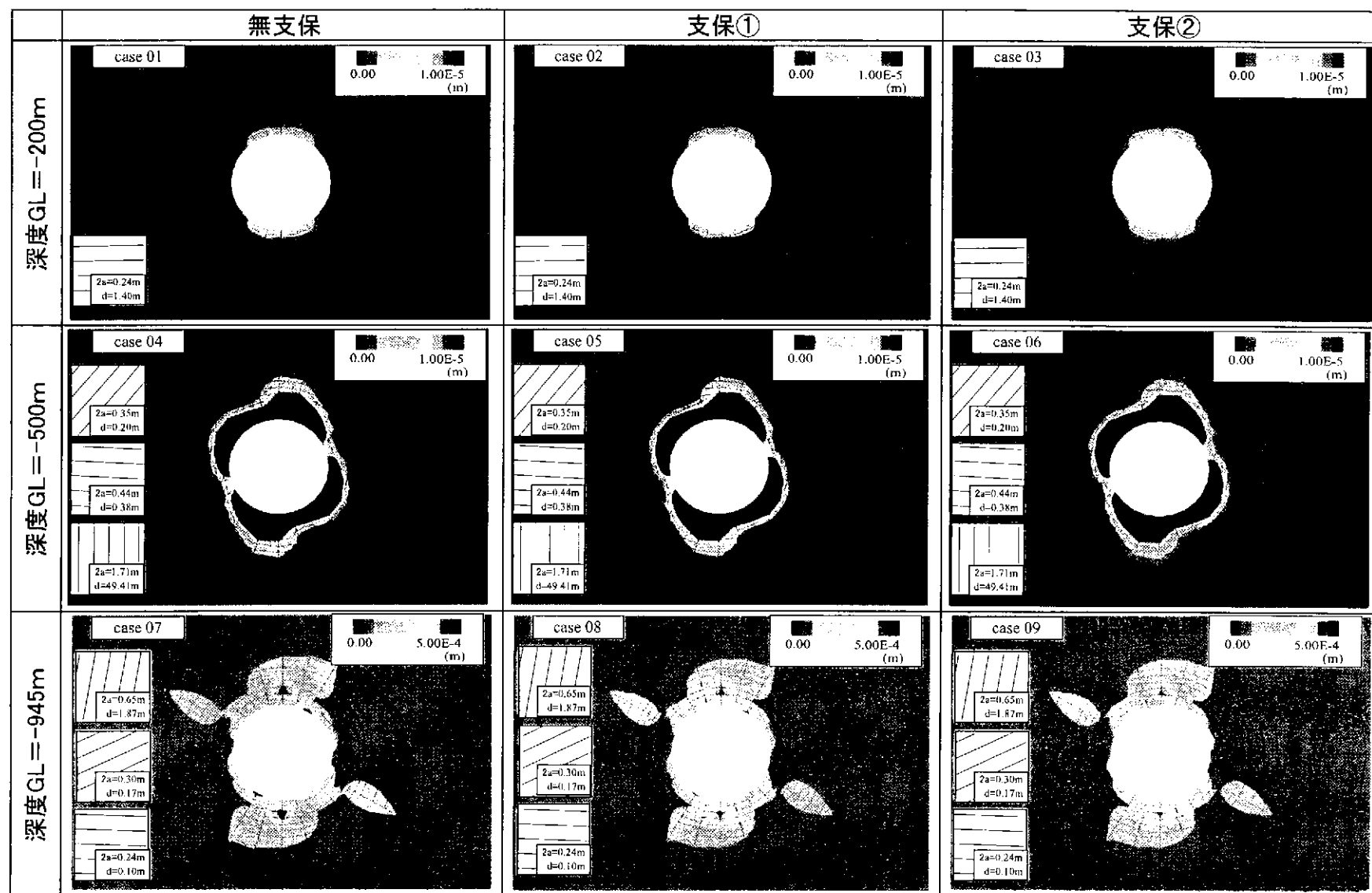


図4.5.3 立坑解析結果 亀裂開口量分布図(全亀裂)

2a=節理有効長(m)
d=節理間隔(m)

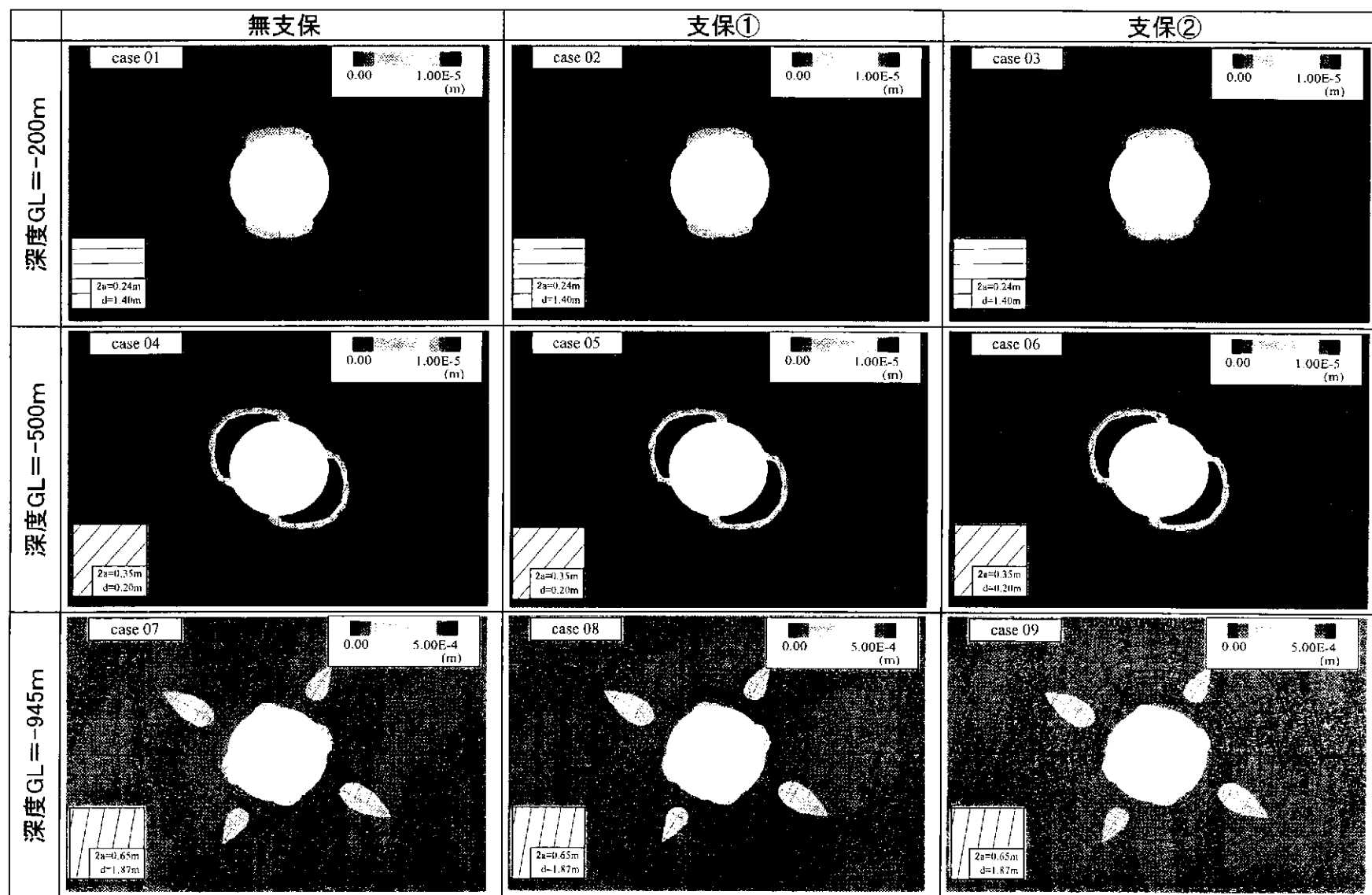


図4. 5. 4 立坑解析結果 亀裂開口量分布図(亀裂セット1)

2a=節理有効長(m)
d=節理間隔(m)

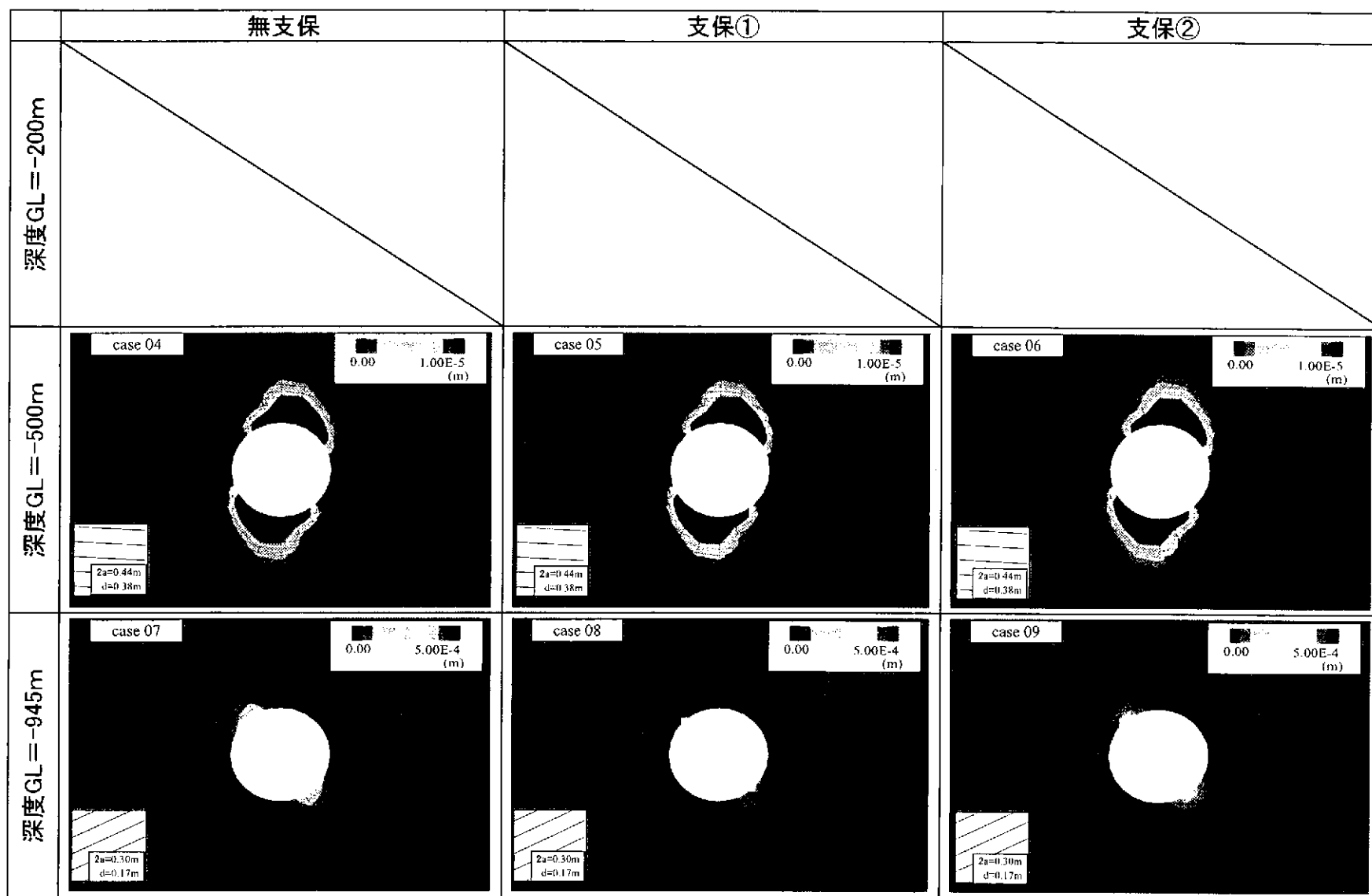


図4. 5. 5 立坑解析結果 亀裂開口量分布図(亀裂セット2)

2a=節理有効長(m)
d=節理間隔(m)

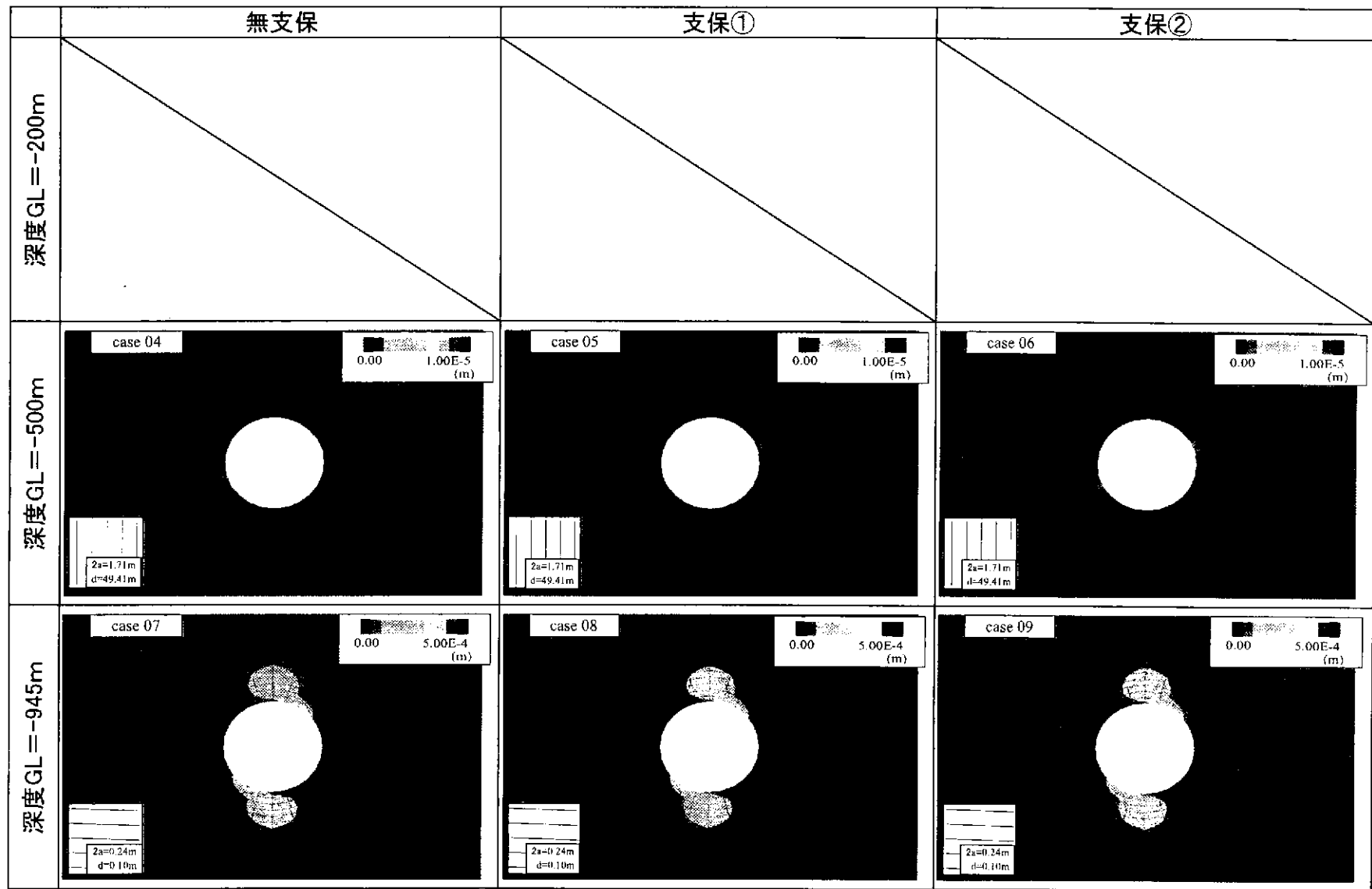


図4. 5. 6 立坑解析結果 亀裂開口量分布図(亀裂セット3)

2a=節理有効長(m)
d=節理間隔(m)

4. 5. 4 安全率

立坑解析結果の内、安全率分布を図4. 5. 7に示す。安全率の評価を行う上で、モール・クーロンの破壊基準を用い、表4. 5. 2で示すように各岩盤ゾーンごとに粘着力 c および内部摩擦角 ϕ を室内試験より決定した。各岩盤ゾーンでそれぞれ値は異なるが、おおよそ粘着力 $c=21\sim35$ (MPa)、内部摩擦角 $\phi=54\sim68^\circ$ の範囲である。

安全率 (FS) の定義は図4. 5. 8に示すように、応力円と破壊基準線との距離をもって評価し、1以下で岩盤が破壊したことを示す。

深度別に見ると深度 GL-200mのケース (Case1~Case3) では、立坑周辺の掘削境界付近の岩盤の最大主応力の値は、約 33 MPa 程度である。岩盤ゾーン1の粘着力、内部摩擦角を考慮した場合、せん断破壊は起こらず、安全率 (FS) ≤ 1 となる領域はない。

深度 GL-500mのケース (Case4~Case6) では、初期応力の方向に依存し、立坑周辺岩盤のうち、北東・南西付近の要素において、最大主応力が大きな値となり、その最大値は約 45 MPa 程度である。しかし、岩盤ゾーン2の粘着力、内部摩擦角を考慮した場合、せん断破壊は起こらず、安全率 (FS) ≤ 1 となる領域はない。

GL-945mのケース (Case7~Case9) は、初期応力が北北西~南南東の方向に極端に一軸化しており、掘削境界付近の岩盤の内、北西および南東付近の要素では引張応力が生じている。そのため、その付近の要素は引張によって破壊している。

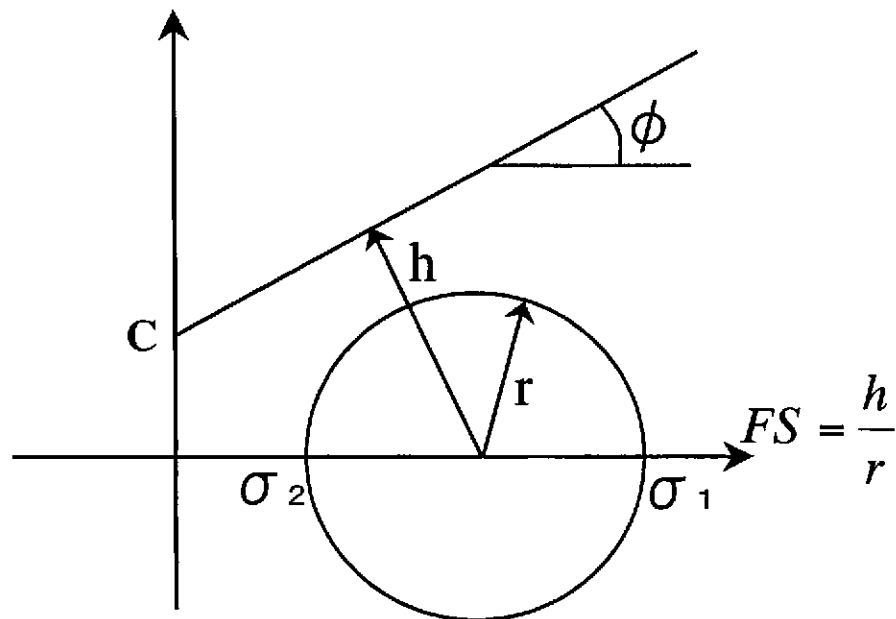


図 4. 5. 8 安全率の定義

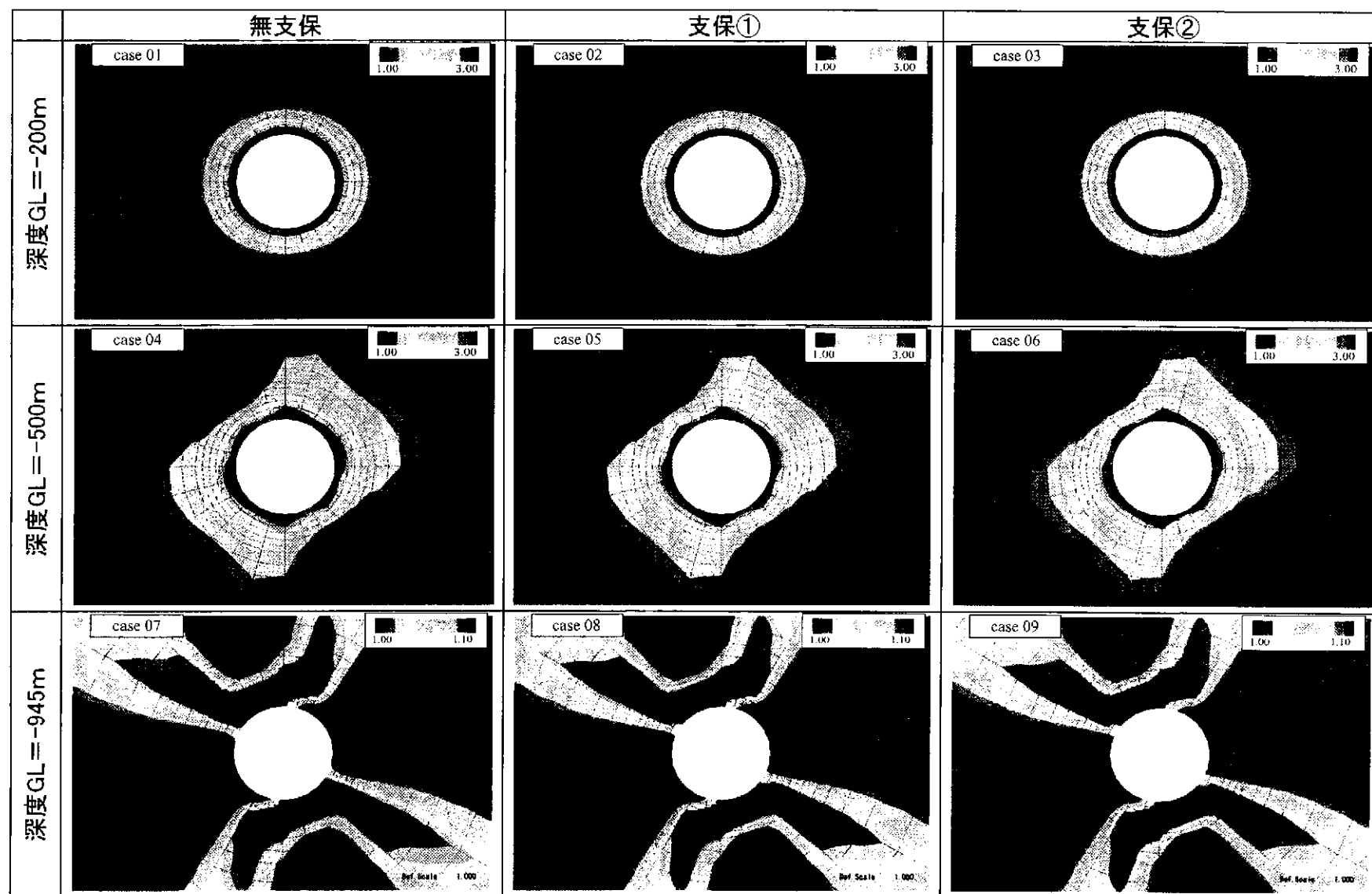


図4. 5. 7 立坑解析結果 安全率分布図

表4. 5. 2 粘着力C、内部摩擦角 ϕ の補正

ZONE1								
	試験代表深度	粘着力 C	内部摩擦角 ϕ	Vp(室内)	Vp(原位置)	粘着力補正值	粘着力 (平均値)	内部摩擦角 (平均値)
	(m)	(MPa)	(°)	(km/s)	(km/s)			
MIU1	105.74	32.86	53.10	5.53	4.89	25.74	35.25 MPa	52.44
	106.89	40.02	51.50	5.29	5.00	35.71		
	110.15	36.00	51.10	5.08	5.18	36.00		
	208.32	37.00	36.30	5.05	5.40	37.00		
	208.85	52.80	51.80	5.09	5.40	52.80		
	209.85	43.40	42.58	5.22	5.40	43.40		
	294.68	46.50	53.60	5.22	5.15	45.27		
	295.39	56.90	49.20	5.05	5.21	56.90		
	296.04	44.93	53.90	5.09	5.19	44.93		
	393.52	42.18	52.30	5.19	5.27	42.18		
	394.24	22.96	58.30	5.09	5.30	22.96		
	394.80	39.63	51.70	5.29	5.26	39.23		
MIU2	95.00	21.40	59.10	4.84	4.16	15.80		
	187.18	20.50	57.90	5.17	5.04	19.47		
	300.60	24.40	59.70	5.04	4.98	23.82		
	390.19	22.50	59.20	5.13	5.34	22.50		
MIU3	156.00	34.50	54.30	5.61	5.28	30.56		
	248.00	44.40	47.60	5.58	5.42	41.84		
	349.00	37.50	53.20	5.36	5.07	33.58		

ZONE2								
	試験代表深度	粘着力 C	内部摩擦角 ϕ	Vp(室内)	Vp(原位置)	粘着力補正值	粘着力 (平均値)	内部摩擦角 (平均値)
	(m)	(MPa)	(°)	(km/s)	(km/s)			
MIU1	498.33	32.08	54.30	5.60	5.26	28.25	28.57 MPa	54.19
	498.86	36.30	52.60	5.75	5.21	29.85		
	499.45	35.61	53.10	5.76	5.26	29.73		
	583.33	31.98	52.80	5.78	5.24	26.27		
	584.16	19.82	56.90	5.77	5.30	16.70		
	584.68	39.04	50.60	5.92	5.28	31.06		
	690.53	44.54	52.60	5.47	5.26	41.24		
	691.16	45.91	53.00	5.43	5.28	43.41		
	692.66	39.53	54.70	5.58	5.25	34.95		
MIU2	490.22	16.60	55.30	4.85	5.29	16.60		
	598.20	12.50	62.40	5.34	5.42	12.50		
MIU3	508.00	36.60	52.00	5.57	5.23	32.27		

ZONE3								
	試験代表深度	粘着力 C	内部摩擦角 ϕ	Vp(室内)	Vp(原位置)	粘着力補正值	粘着力 (平均値)	内部摩擦角 (平均値)
	(m)	(MPa)	(°)	(km/s)	(km/s)			
MIU1	795.33	55.62	50.70	5.68	5.26	47.76	28.67 MPa	56.18
	796.33	39.63	56.90	5.59	5.26	35.02		
	796.91	42.38	56.50	5.73	5.24	35.42		
	906.52	37.38	54.30	5.44	5.03	32.01		
	909.86	22.76	58.90	5.69	4.02	11.33		
	914.16	36.20	56.80	5.70	5.06	28.49		
MIU2	701.35	20.60	58.80	5.14	5.38	20.60		
	795.45	21.60	56.50	5.78	5.37	18.67		

ZONE4								
	試験代表深度	粘着力 C	内部摩擦角 ϕ	Vp(室内)	Vp(原位置)	粘着力補正值	粘着力 (平均値)	内部摩擦角 (平均値)
	(m)	(MPa)	(°)	(km/s)	(km/s)			
MIU3	806.00	35.50	50.90	5.82	5.09	27.12	31.29 MPa	68.20
	856.00	24.60	58.70	5.54	5.30	22.49		
	885.00	34.60	57.70	5.66	5.34	30.78		
	945.00	49.60	51.20	5.54	5.26	44.76		
	1012.00	35.60	54.30	5.41	該当深度なし	該当深度なし		

断層部								
	試験代表深度	粘着力 C	内部摩擦角 ϕ	Vp(室内)	Vp(原位置)	粘着力補正值	粘着力 (平均値)	内部摩擦角 (平均値)
	(m)	(MPa)	(°)	(km/s)	(km/s)			
MIU2	836.00	23.50	56.70	5.78	5.43	20.76	21.48 MPa	55.53
	975.15	22.20	59.10	4.59	4.91	22.20		
MIU3	664.00	17.80	50.80	5.62	該当深度なし	該当深度なし		

4. 5. 5 等価透水係数

亀裂の開口量に基づき、岩盤の全等価透水係数を算出した。透水係数分布を図4. 5. 9に示す。なお、亀裂の全透水係数とは、各亀裂セットでの透水係数の単純な足し合わせである。亀裂セットとして各ケースで最大3セットを条件として与えたため、それぞれの亀裂セットのみによる透水係数分布を図4. 5. 10～図4. 5. 12に示した。

また、それぞれの深度で岩盤自体の透水係数 K_{matrix} がそれぞれ異なるため、図中のスケールは深度ごとに変えている。

深度別に見ると、深度 GL-200mのケース（Case1～Case3）では、亀裂セットとして N89E の亀裂群のみであり、立坑周辺岩盤の南北付近の要素で亀裂が開口している。しかし、開口量は非常に小さいため（1/100mm）、透水係数の変化はない。

深度 GL-500mのケース（Case4～Case6）では、亀裂セットとして、N41E、N87W、NS の3群を条件として与えており、そのうち N41E、N87W の影響を受けて立坑周辺の亀裂が開口し、透水係数が変化している。亀裂の開口により透水係数が変化したのは、掘削壁面から2.5m以内であり、透水係数は1桁増大している。

深度 GL-945mのケース（Case7～Case9）では、亀裂セットとして、N10E、N65E、N88W の3群を条件として与えている。これらのケースでは初期応力が極めて偏圧に作用しており、最大主応力方向は N17W である。そのため、既に立坑掘削以前の段階で、主に亀裂セット1（N10E）の影響で解析領域全体で開口している。また、掘削による亀裂の開口は、亀裂間隔の最も小さい亀裂セット3（N88W）の影響で、立坑周辺のほぼ南北方向の亀裂が開口している。従って、解析領域全体が基質岩盤の透水係数（ K_{matrix} ）に比べ、1桁変化している。なお、立坑の掘削壁面部分では南北方向の要素で、壁面から2.9mの領域まで透水係数 $\geq 1.0 \times 10^{-6}$ となっており、初期岩盤の透水係数 $K_{\text{matrix}} = 8.3 \times 10^{-8}$ （m/s）に比べ、1桁増大している。

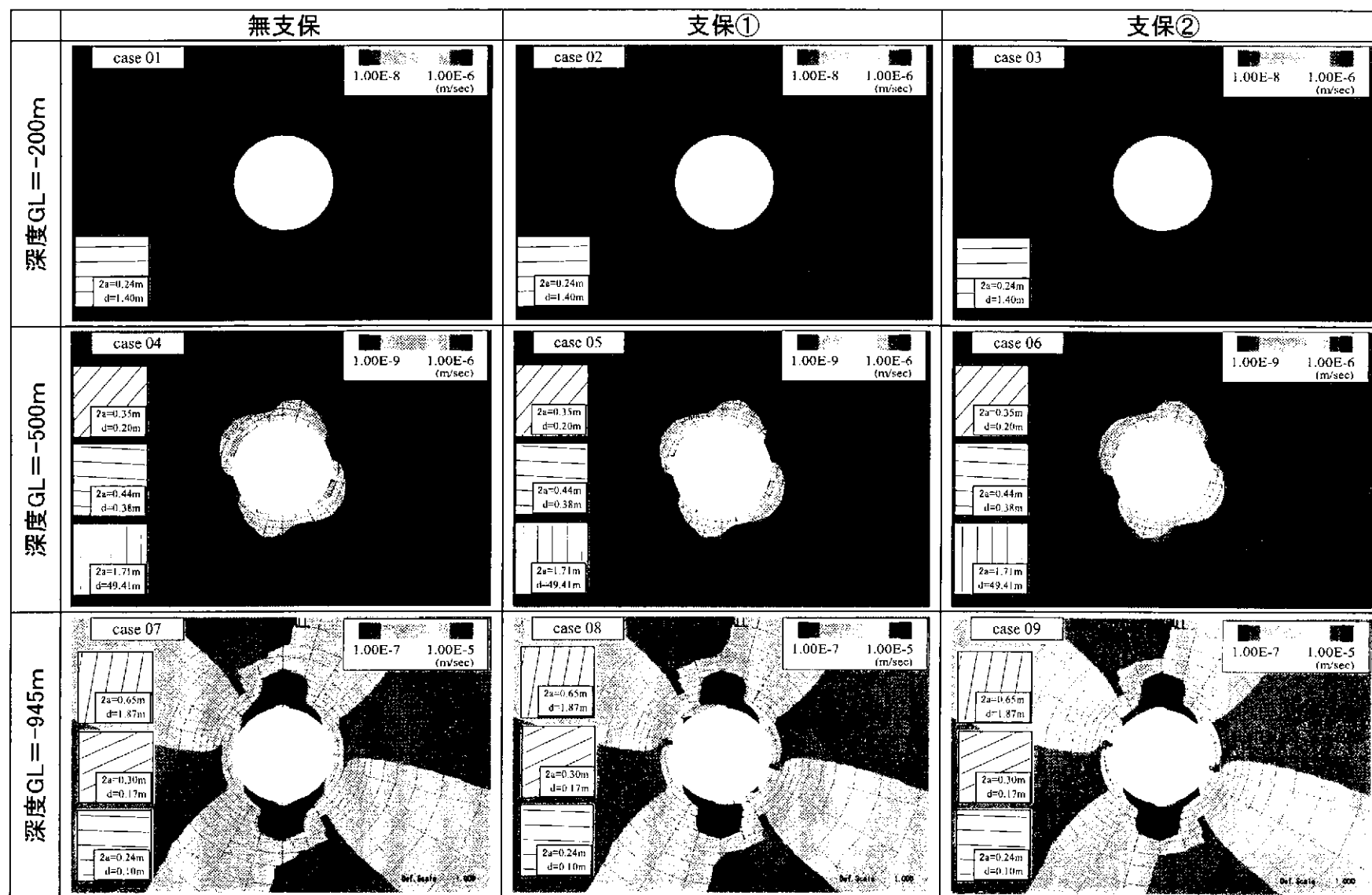


図4.5.9 立坑解析結果 透水係数分布図(3成分重ね合せ)

2a=節理有効長(m)
d=節理間隔(m)

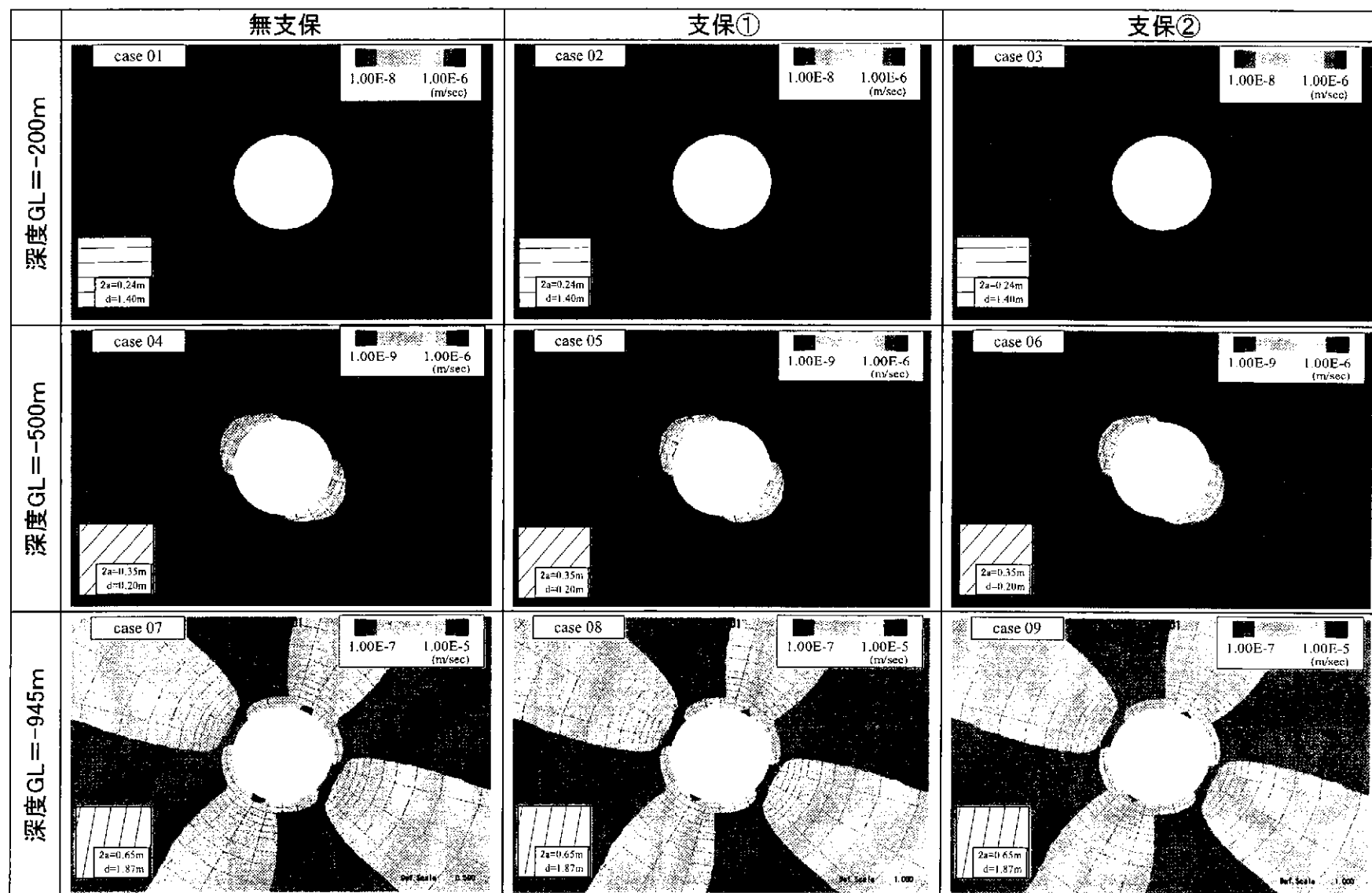


図4. 5. 10 立坑解析結果 透水係数分布図(亀裂セット1)

2a=節理有効長(m)
d=節理間隔(m)

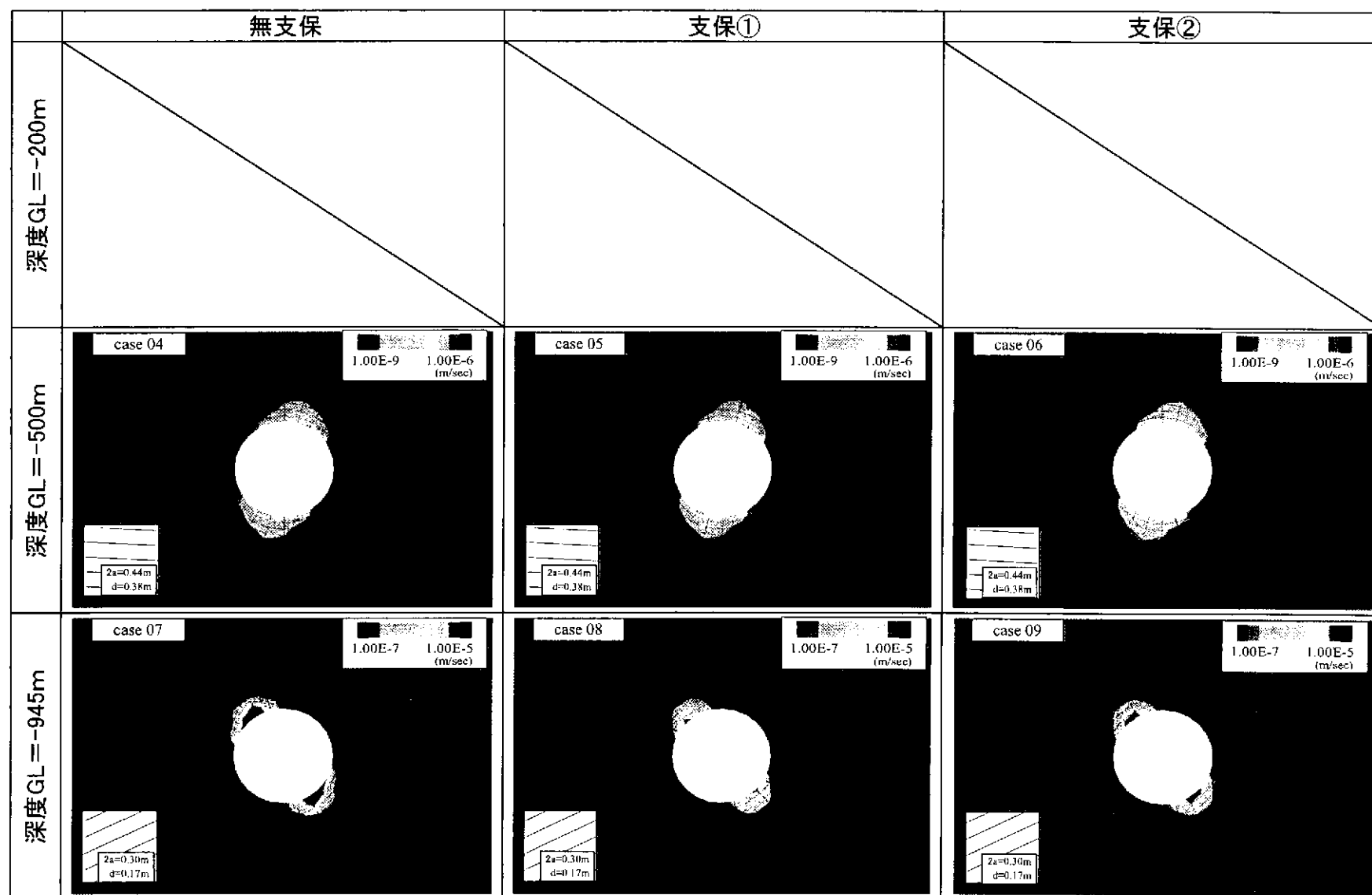


図4. 5. 11 立坑解析結果 透水係数分布図(亀裂セット2)

$2a$ =節理有効長(m)
 d =節理間隔(m)

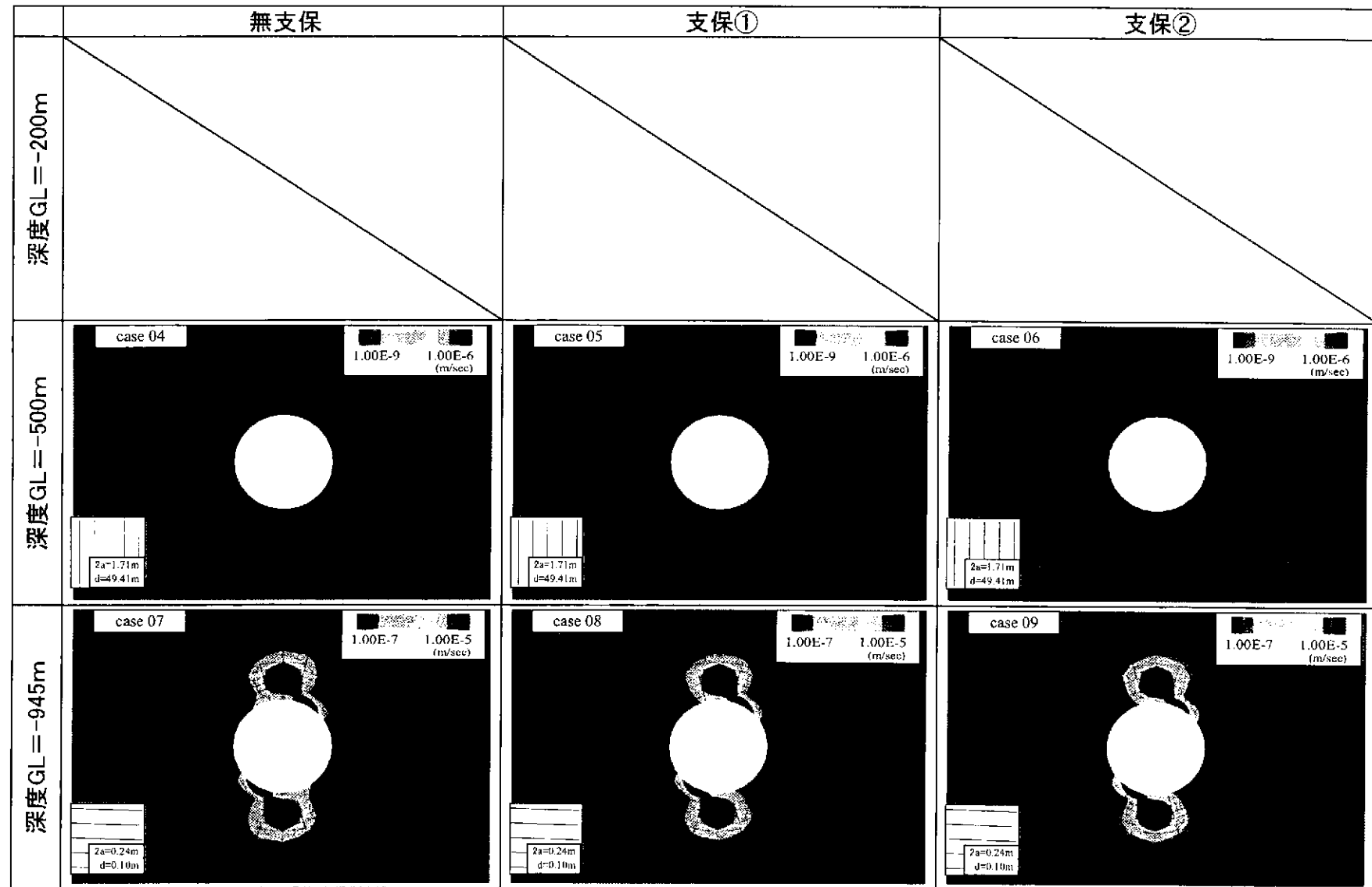


図4. 5. 12 立坑解析結果 透水係数分布図(亀裂セット3)

2a=節理有効長(m)
d=節理間隔(m)

4. 5. 6 等価弾性係数

立坑解析結果の内、等価弾性係数比の分布を図4. 5. 13～図4. 5. 15に示す。等価弾性係数とは、亀裂の開口により低減された弾性係数であるが、ここでは初期の岩盤の弾性係数で割って正規化したものを表示した。

各要素の最大主応力方向の等価弾性係数比 E_1 を図4. 5. 13に示した。これは、MBC 解析の結果、各要素ごと算出された応力から最大主応力方向を求め、その方向の等価弾性係数を初期弾性係数で割ったものである。この結果を見ると、いずれのケースも最も荷重を負担している方向では E_1 の低減は見られない。

次に、東西方向の等価弾性係数比 E_x を図4. 5. 14に示す。深度別に見ると、深度 GL-200mのケース (Case1～Case3) では、もともと、亀裂の開口量自体も小さく、 E_x の低減は見られない。深度 GL-500mのケース (Case4～Case6) では、掘削壁面周辺岩盤の東西付近の要素が半分ほど E_x が低減している。これは、この岩盤ゾーンでの亀裂セット 1(N41E)の開口によるものである。GL-945mのケース (Case7～Case9) は、解析領域全般にわたり、 E_x が低減している。これは、主にこの岩盤ゾーンの亀裂セット 1 (N10E) の開口によるものである。

図4. 5. 15は南北方向の等価弾性係数比 E_y を示したものである。

深度別に見ると、深度 GL-200mのケース (Case1～Case3) では、 E_x と同様、亀裂の開口量自体が小さいため、 E_y の低減は見られない。

深度 GL-500mのケース (Case4～Case6) では、掘削壁面周辺岩盤の南北付近の要素が半分ほど E_y が低減している。これは、この岩盤ゾーンでの亀裂セット 1(N41E)の開口によるものである。

GL-945mのケース (Case7～Case9) は、掘削壁面周辺岩盤の南北付近の要素が80%程度まで E_y が低減している。これは主にこの岩盤ゾーンでの亀裂セット 3 (N88W) の開口によるものである。

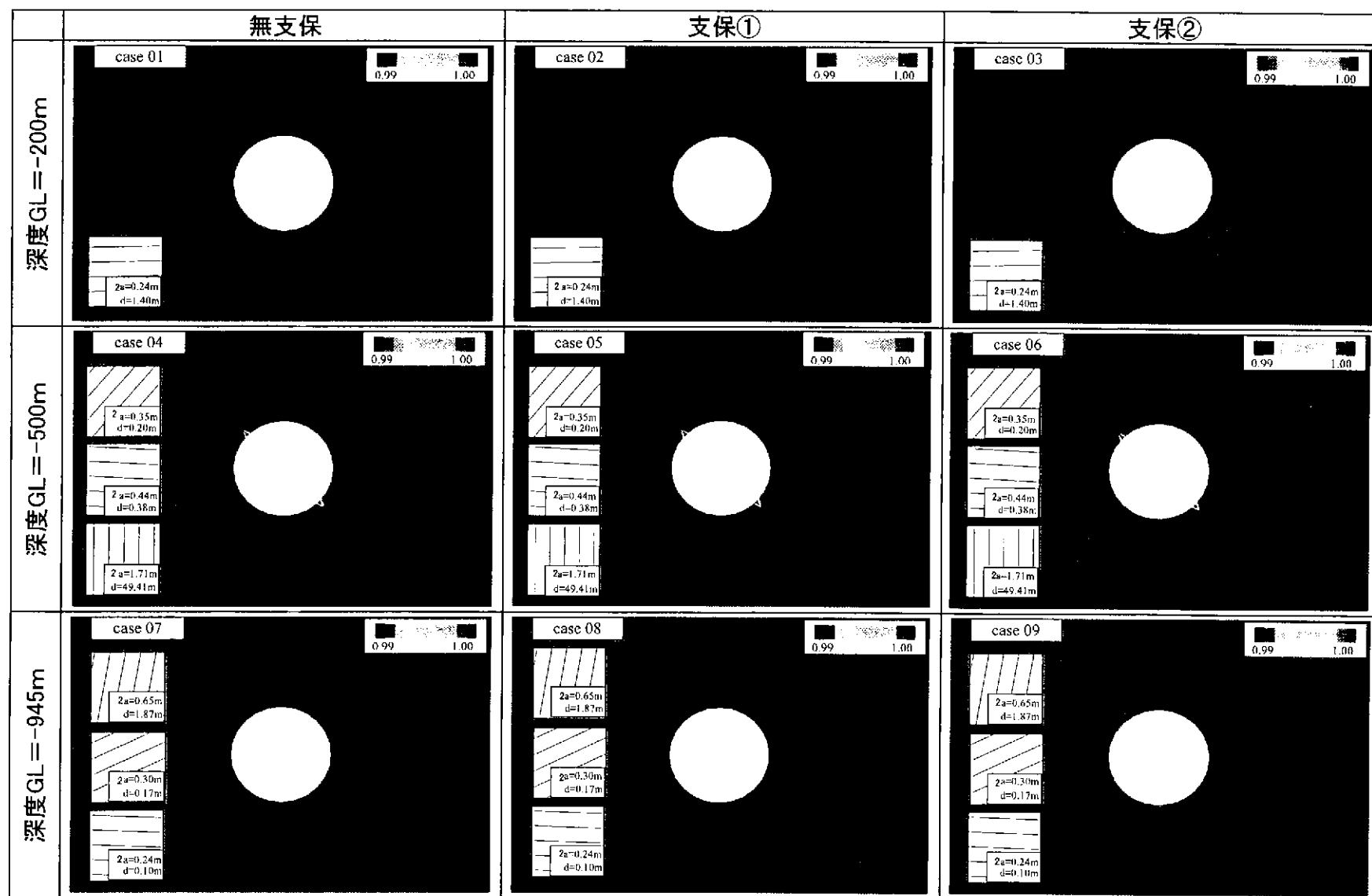


図4. 5. 13 立坑解析結果 等価弾性係数比E1 分布図

2a=節理有効長(m)
d=節理間隔(m)

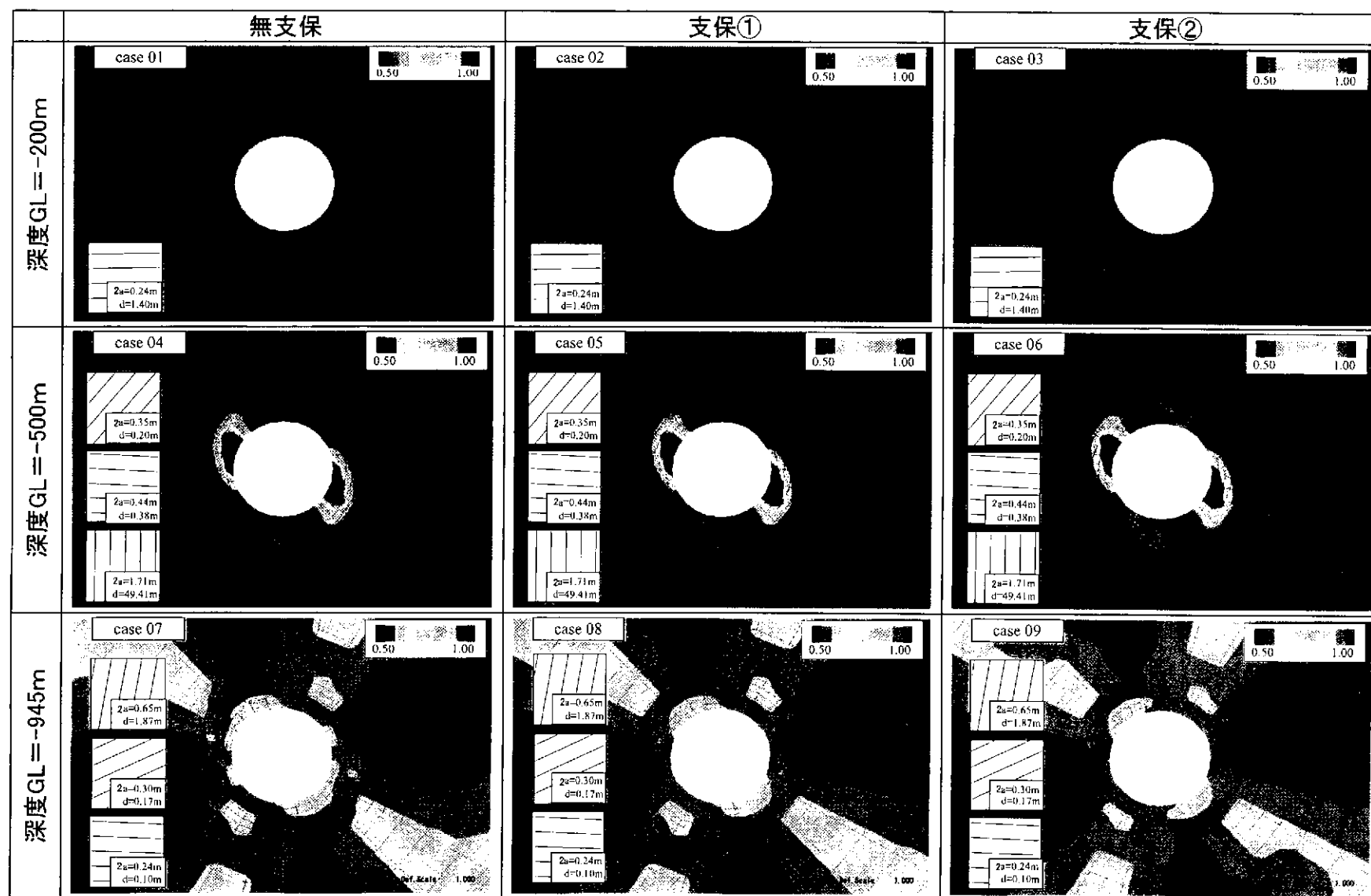


図4. 5. 14 立坑解析結果 等価弾性係数比 E_x 分布図

2a=筋理有効長(m)
d=筋理間隔(m)

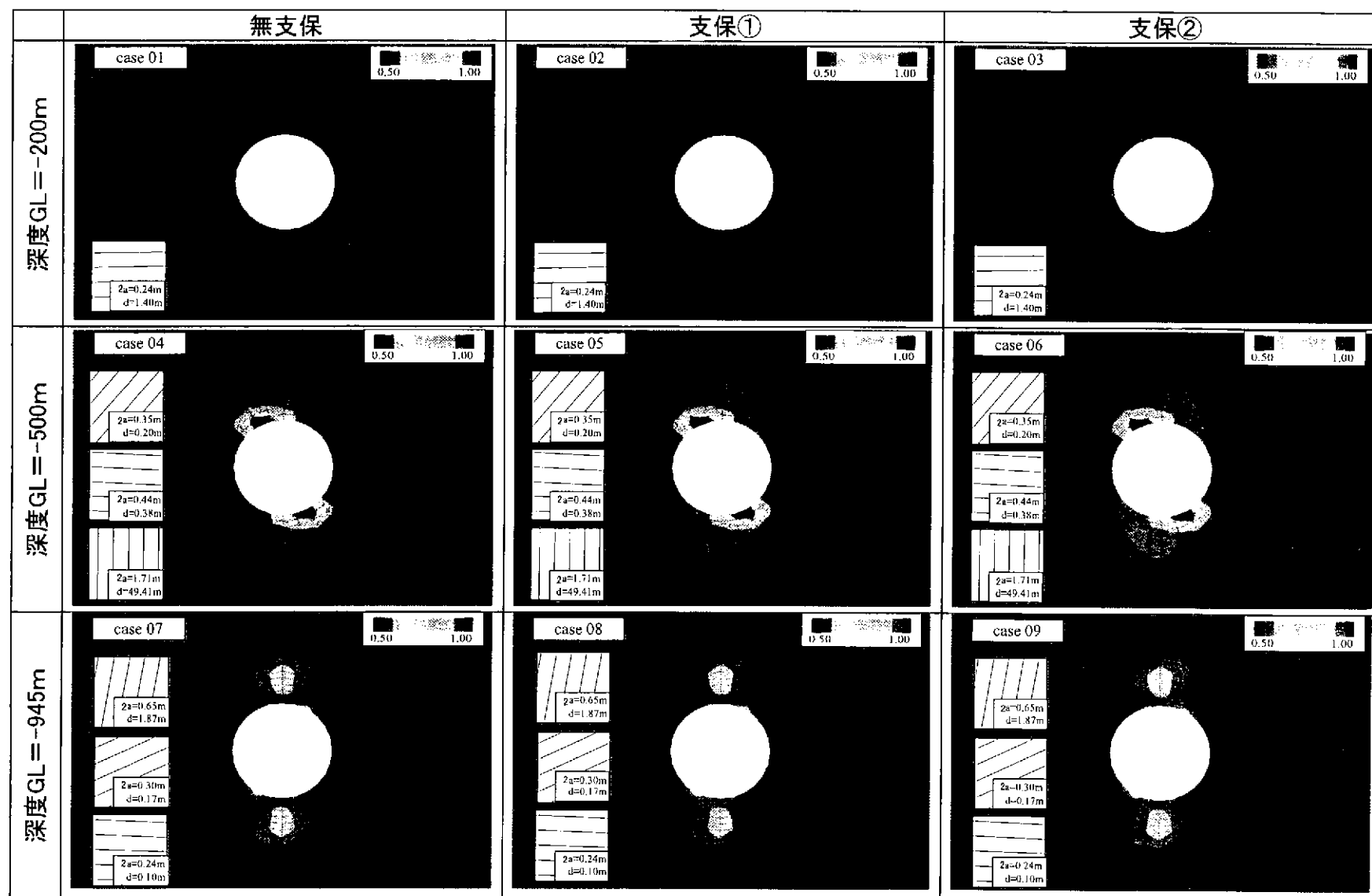


図4. 5. 15 立坑解析結果 等価弾性係数比 E_y 分布図

2a=筋理有効長(m)
d=筋理間隔(m)

4. 5. 7 覆工コンクリート応力

覆工コンクリートの応力分布を図4. 5. 16に示す。また、各要素での応力値を整理し、要素番号を図4. 5. 17に、応力値の一覧を表4. 5. 3に、覆工応力値の分布グラフを図4. 5. 18に示す。

覆工コンクリートの応力は、立坑深度 GL-200m では 0.81～0.98MPa、立坑深度 GL-500m では 1.12～1.72MPa、立坑深度 GL-945m では 1.44～8.53 MPa であり、深度が深くなるほど覆工応力は大きくなる。

なお、深度 GL-945m のケースでは月吉断層破碎帯であるため、覆工応力はひととき大きな値となっている。しかも月吉断層破碎帯では応力状態が偏圧として作用しており、南北方向の応力状態が卓越しているため、立坑内で東側と西側の覆工応力が大きい。

次に、立坑の支保パターンとして「覆工のみ」の場合と「覆工+鋼製支保工」について比較すると、鋼製支保工の有無で覆工コンクリートの応力には明瞭な差異は見られず、深度 GL-945m のケースでも覆工コンクリートのみのケースに比べ支保工を有する覆工構造では覆工応力は約 0.3 MPa 低減する程度である。

なお、応力値については、例えば覆工コンクリートの設計基準強度を $f_c=18.0$ MPa (設計強度 $f_{cd}=13.8$ MPa)としても、最も厳しい深度 GL-945m のケースでも 8.5 MPa であり、設計強度の範囲内にあり、覆工コンクリートの健全性は確保されものと考えられる。

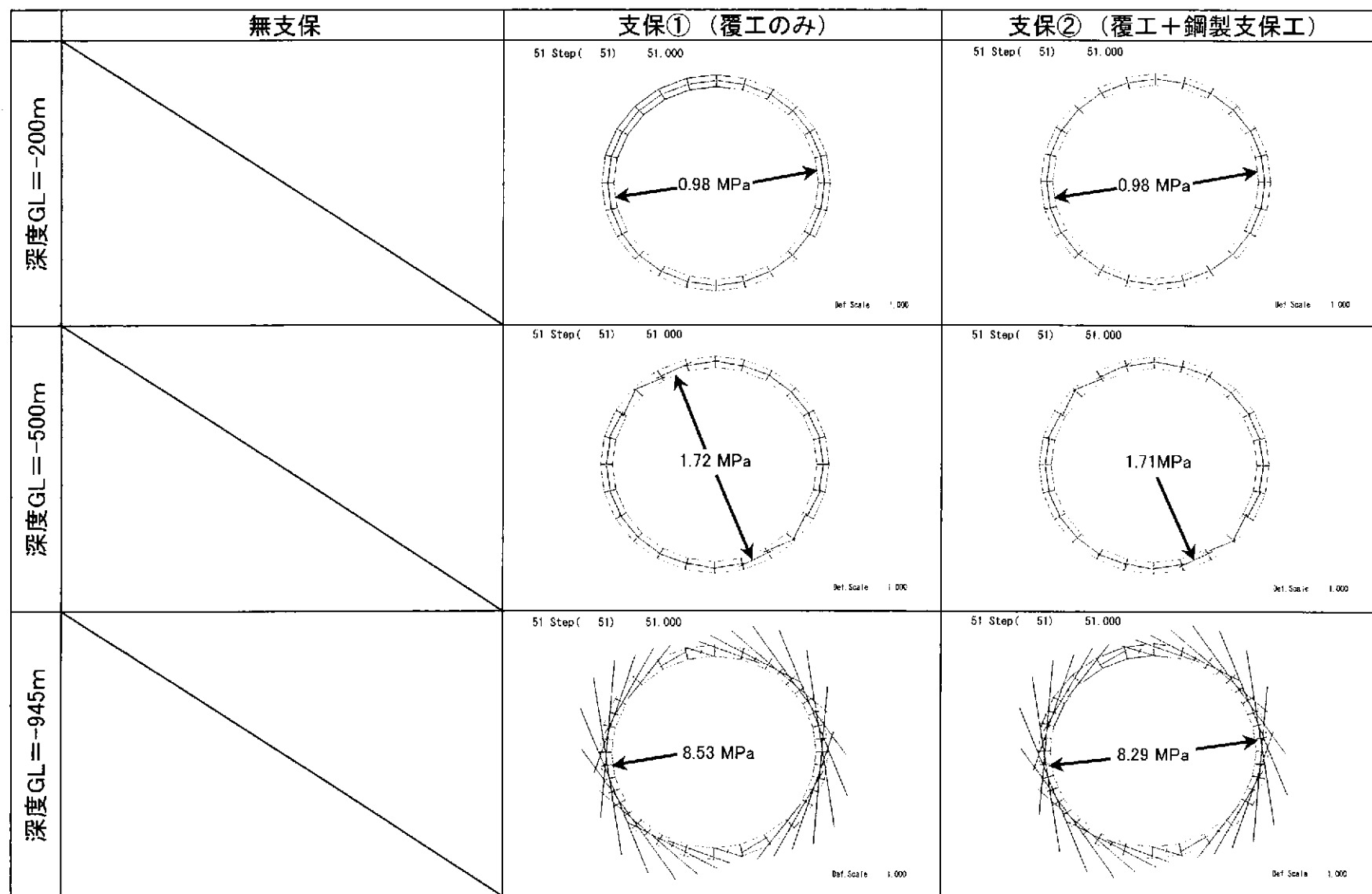


図4. 5. 16 立坑解析結果 覆工コンクリート応力図

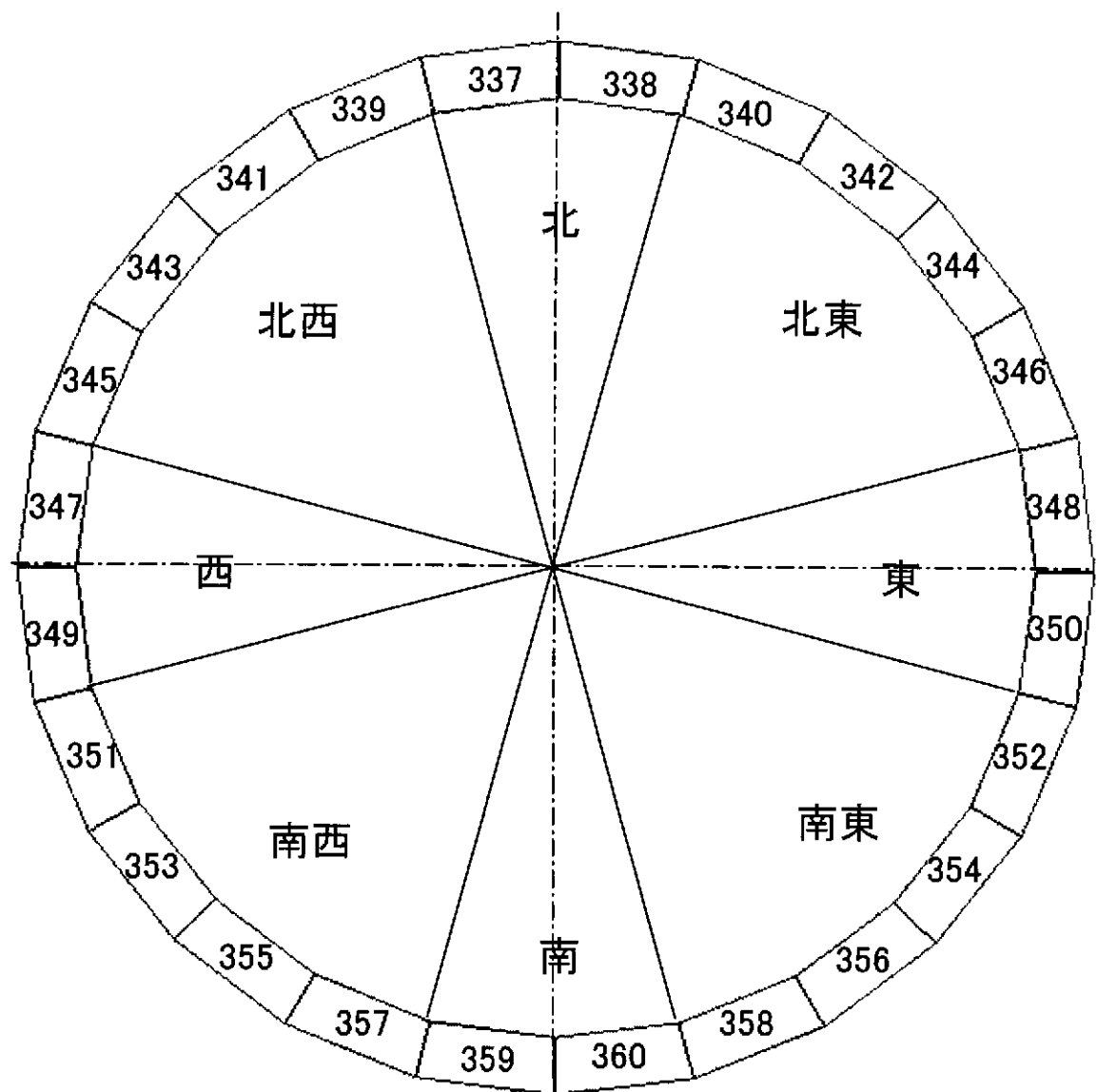


図4. 5. 17 覆エコンクリート要素番号

表4. 5. 3 立坑解析結果 覆工応力一覧表

覆工応力 単位 : MPa

圧縮 : -

位置	要素 番号		深度GL-200m		深度GL-500m		深度GL-945m	
			支保パターン1 (覆工)	支保パターン2 (支保工+覆工)	支保パターン1 (覆工)	支保パターン2 (支保工+覆工)	支保パターン1 (覆工)	支保パターン2 (支保工+覆工)
			CASE02	CASE03	CASE05	CASE06	CASE08	CASE09
北	2	337	-0.81	-0.81	-1.57	-1.56	-1.49	-1.62
	3	338	-0.82	-0.82	-1.37	-1.37	-3.00	-2.99
北東	4	340	-0.85	-0.85	-1.41	-1.40	-4.67	-4.54
	5	342	-0.88	-0.88	-1.45	-1.44	-5.95	-5.81
	6	344	-0.92	-0.92	-1.40	-1.39	-7.46	-7.28
	7	346	-0.96	-0.96	-1.21	-1.20	-8.47	-8.25
東	8	348	-0.98	-0.98	-1.12	-1.12	-8.52	-8.29
	9	350	-0.97	-0.97	-1.19	-1.19	-7.54	-7.33
南東	10	352	-0.94	-0.93	-1.41	-1.40	-5.95	-5.74
	11	354	-0.89	-0.89	-1.42	-1.41	-4.66	-4.47
	12	356	-0.85	-0.85	-1.55	-1.54	-3.25	-3.13
	13	358	-0.83	-0.83	-1.72	-1.71	-1.44	-1.48
南	14	360	-0.81	-0.81	-1.57	-1.55	-1.49	-1.62
	15	359	-0.82	-0.82	-1.37	-1.37	-3.00	-2.99
南西	16	357	-0.85	-0.85	-1.41	-1.40	-4.67	-4.55
	17	355	-0.88	-0.88	-1.45	-1.44	-5.96	-5.82
	18	353	-0.92	-0.92	-1.40	-1.39	-7.47	-7.29
	19	351	-0.96	-0.96	-1.21	-1.20	-8.48	-8.26
西	20	349	-0.98	-0.98	-1.12	-1.12	-8.53	-8.29
	21	347	-0.97	-0.97	-1.19	-1.19	-7.54	-7.33
北西	22	345	-0.94	-0.93	-1.41	-1.40	-5.95	-5.75
	23	343	-0.89	-0.89	-1.42	-1.41	-4.67	-4.47
	24	341	-0.85	-0.85	-1.55	-1.54	-3.25	-3.13
	1	339	-0.83	-0.83	-1.72	-1.70	-1.44	-1.48

: 各解析ケースでの最大値

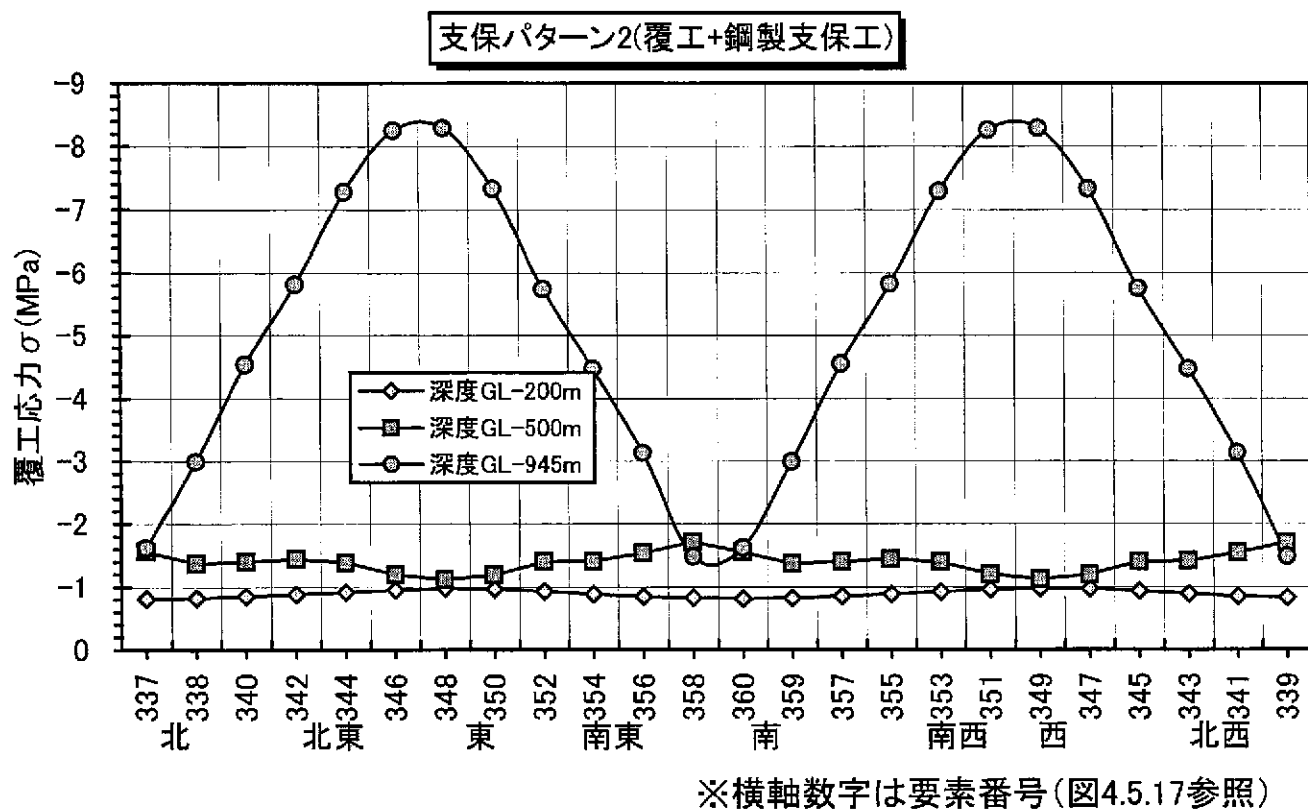
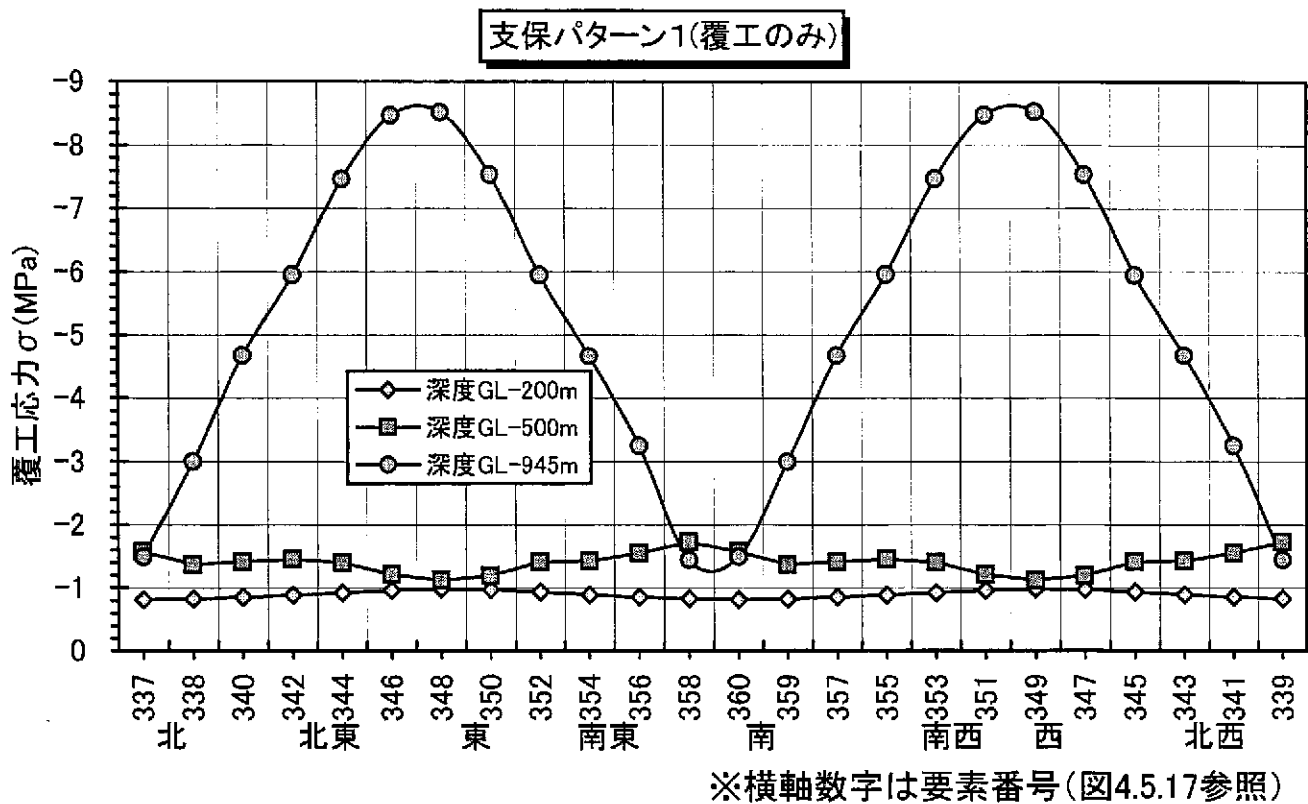


図4. 5. 18 立坑解析結果 覆工応力グラフ

4. 5. 8 鋼製支保工に働く軸力と応力

鋼製支保工応力の断面力の分布を図4. 5. 19に示す。また、図4. 5. 20に示した要素番号について、各要素での断面力を整理し応力値の一覧を表4. 5. 4に、鋼製支保工の応力値の分布グラフを図4. 5. 21に示す。

この結果、鋼製支保工の軸力(N)は、立坑深度 GL-200m では 180kN、立坑深度 GL-500m では 270kN、立坑深度 GL-945m では 2,860kN であり、いずれも圧縮力で立坑の深度が深くなるほど軸力は大きくなる。

なお、深度 GL-945m のケースでは月吉断層破碎帯で変位量が大きいため、支保工の軸力は極めて大きな値となっている。しかも、月吉断層破碎帯では応力が偏圧に作用しており、南北方向の応力状態が卓越しているため、立坑内で東側と西側の軸力が大きい。鋼製支保工のせん断力(S)、曲げモーメント(M)については、いずれのケースも軸力(N)に比べ極めて小さく、軸力が卓越する断面力分布となっている。

次に、鋼製支保工に働く応力の最大値を見ると、立坑深度 GL-200m では 59.2MPa、立坑深度 GL-500m では 92.6MPa、立坑深度 GL-945m では 972.6MPa であり、いずれも圧縮力で深度が深くなるほど応力は大きくなる。

特に、立坑深度 GL-945m では断層破碎帯部で応力状態が偏圧の条件であり、立坑の東側と西側では著しい応力が発生している。このためこの部分では支保工材料の許容値 $\sigma_s=240\text{MPa}$ を超過しており、施工中、支保工は降伏し、塑性変形を起こすものと考えられ変形抑制の効果を期待するのは難しい。ただし、鋼製支保工は、一次支保部材として、肌落ち防止やゆるみの進展抑制効果などの機能を十分発揮するものと思われる。さらに、支保工は降伏するものの、その後打設する覆工コンクリートの応力は許容値以内であるので、立坑の永久覆工の健全性は確保されると判断される。

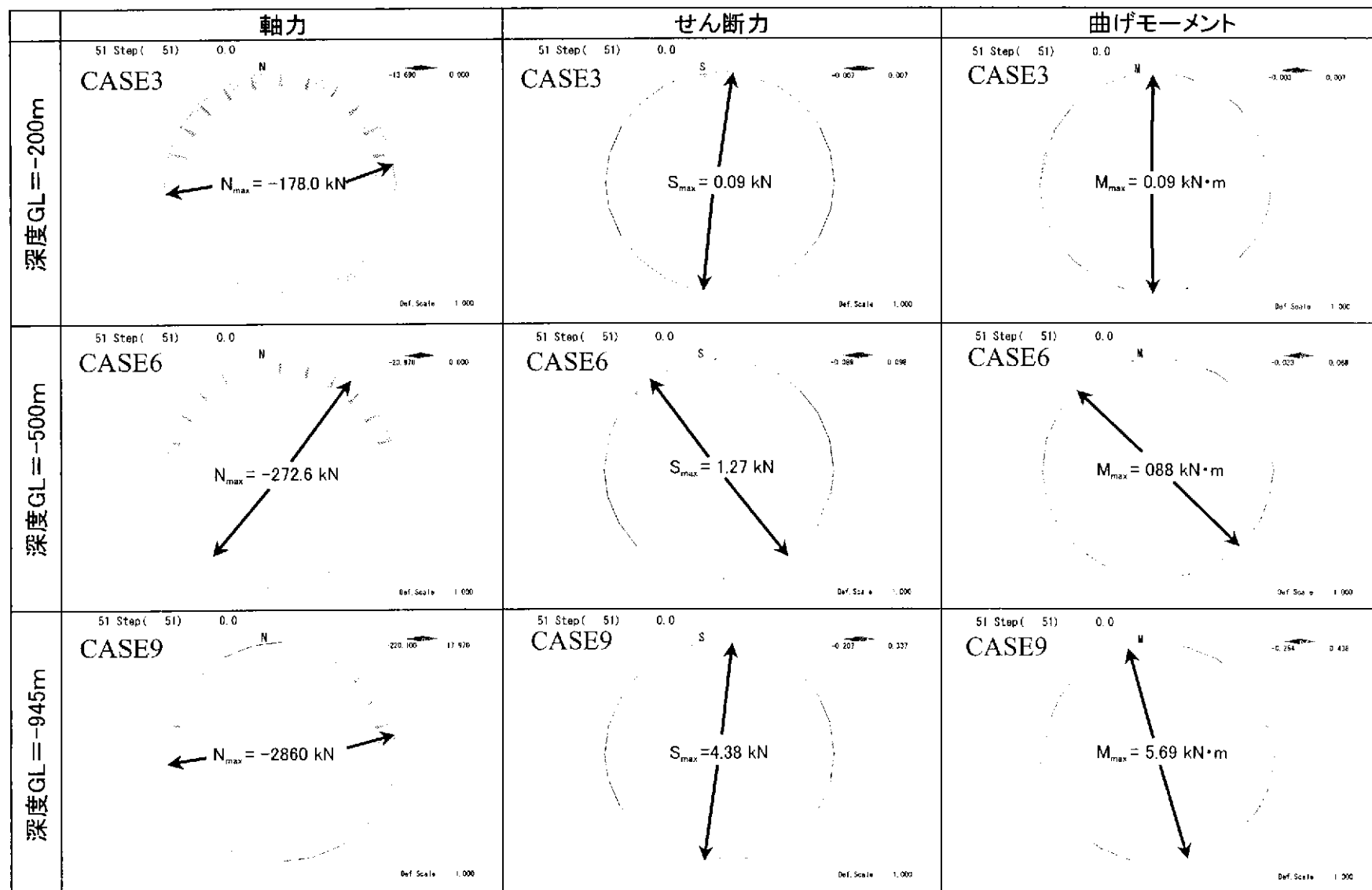


図4. 5. 19 立坑 鋼製支保工軸力・せん断力・曲げモーメント図

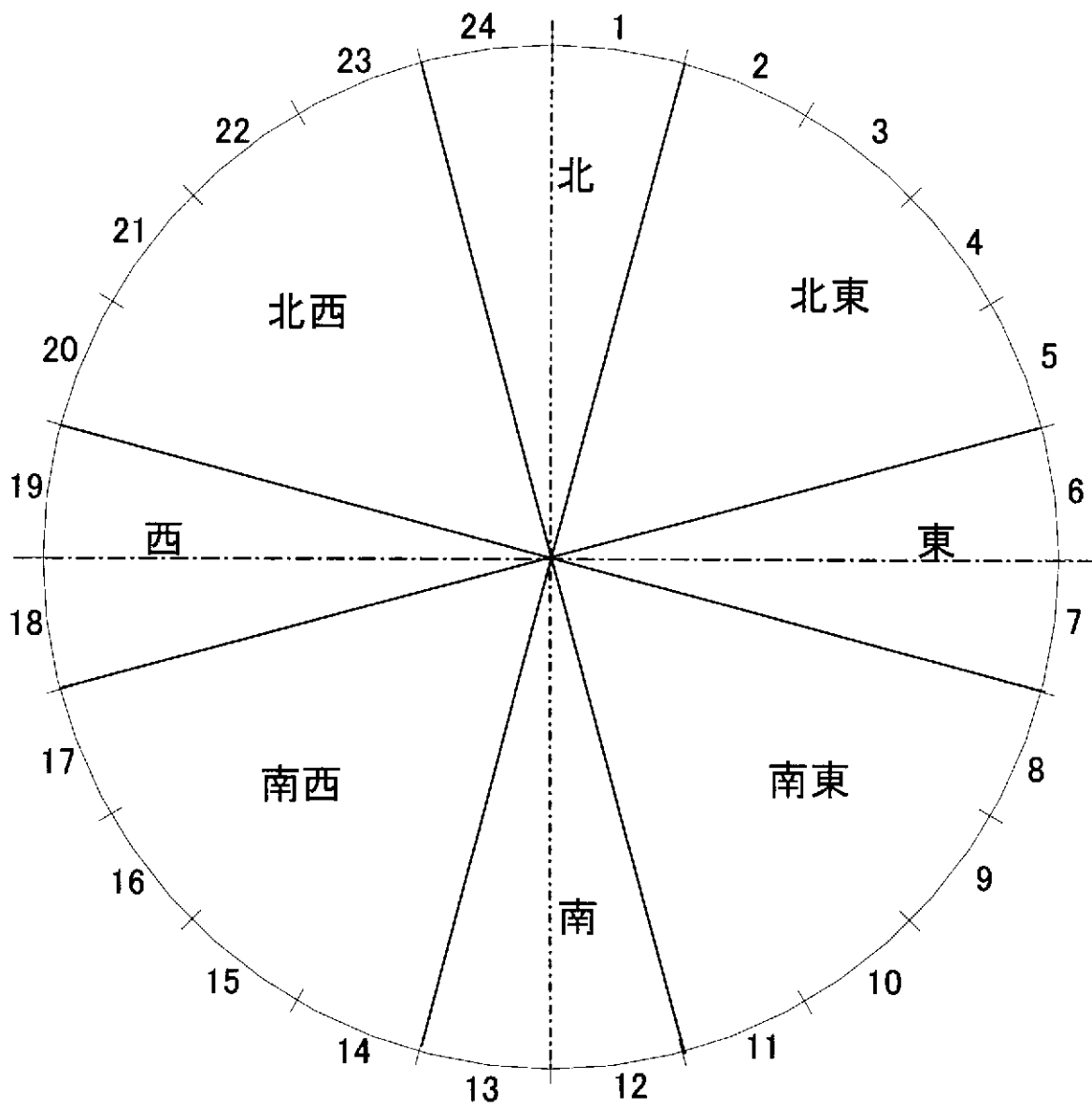


図4. 5. 20 鋼製支保工要素番号図

表4.5.4 立坑解析結果 鋼製支保工応力一覧表

圧縮:-

位置	要素 番号		深度GL-200m(CASE3)					深度GL-500m(CASE6)					深度GL-945m(CASE9)・断層部				
			軸力 N(kN)	せん断力 S(kN)	曲げモー メント M(kN・m)	内空側応力 σ (MPa)	地山側応力 σ (MPa)	軸力 N(kN)	せん断力 S(kN)	曲げモー メント M(kN・m)	内空側応力 σ (MPa)	地山側応力 σ (MPa)	軸力 N(kN)	せん断力 S(kN)	曲げモー メント M(kN・m)	内空側応力 σ (MPa)	地山側応力 σ (MPa)
北	1	24	-145.47	-0.094	0.093	-47.79	-49.19	-217.62	-0.709	0.625	-67.88	-77.20	148.20	2.171	3.640	76.56	22.24
	2	1	-146.90	0.097	0.001	-48.96	-48.98	-249.34	1.115	-0.432	-86.34	-79.89	-499.20	4.381	-0.521	-170.29	-162.51
北東	3	2	-150.67	-0.015	0.016	-50.10	-50.34	-268.58	-0.520	0.069	-89.01	-90.04	-1378.00	-0.672	0.127	-458.39	-460.28
	4	3	-157.30	0.015	0.001	-52.42	-52.44	-272.61	0.312	-0.227	-92.56	-89.18	-1859.00	2.626	-2.366	-637.32	-602.01
	5	4	-164.84	0.037	-0.034	-55.20	-54.69	-250.90	-0.050	-0.180	-84.98	-82.29	-2405.00	0.989	-3.302	-826.31	-777.02
	6	5	-173.55	0.004	-0.038	-58.13	-57.57	-218.27	-0.007	-0.173	-74.05	-71.47	-2834.00	-0.108	-3.198	-968.53	-920.80
東	7	6	-177.97	-0.016	-0.023	-59.49	-59.15	-188.37	-0.046	-0.129	-63.76	-61.82	-2860.00	-0.645	-2.587	-972.64	-934.03
	8	7	-176.41	0.010	-0.033	-59.05	-58.56	-186.94	-0.307	0.161	-61.11	-63.52	-2431.00	-0.378	-2.236	-827.02	-793.65
東南	9	8	-169.52	-0.007	-0.026	-56.70	-56.31	-189.80	0.391	-0.216	-64.88	-61.66	-1729.00	-2.054	-0.252	-578.22	-574.45
	10	9	-159.38	-0.038	0.010	-53.05	-53.20	-186.55	-1.159	0.883	-55.59	-68.77	-1012.70	-2.223	1.859	-323.69	-351.44
	11	10	-151.97	-0.020	0.028	-50.45	-50.87	-184.47	1.275	-0.325	-63.92	-59.06	-429.00	-1.365	3.146	-119.52	-166.48
	12	11	-146.77	0.025	0.004	-48.89	-48.95	-184.47	-0.289	-0.047	-61.84	-61.14	-5.24	-2.639	5.694	40.75	-44.24
南	13	12	-145.47	-0.094	0.093	-47.79	-49.19	-217.62	-0.709	0.625	-67.88	-77.20	148.20	2.171	3.640	76.56	22.24
	14	13	-146.90	0.097	0.001	-48.96	-48.98	-249.34	1.116	-0.432	-86.34	-79.89	-500.50	4.381	-0.520	-170.71	-162.95
南西	15	14	-150.67	-0.015	0.016	-50.10	-50.34	-268.58	-0.520	0.069	-89.01	-90.04	-1378.00	-0.672	0.127	-458.38	-460.28
	16	15	-157.30	0.015	0.001	-52.42	-52.44	-272.61	0.312	-0.227	-92.56	-89.18	-1859.00	2.626	-2.366	-637.32	-602.01
	17	16	-164.84	0.037	-0.034	-55.20	-54.69	-250.90	-0.050	-0.180	-84.98	-82.29	-2405.00	0.989	-3.302	-826.31	-777.02
	18	17	-173.55	0.004	-0.038	-58.13	-57.57	-218.27	-0.007	-0.173	-74.05	-71.47	-2834.00	-0.105	-3.198	-968.53	-920.80
西	19	18	-177.97	-0.016	-0.023	-59.49	-59.15	-188.37	-0.046	-0.129	-63.75	-61.83	-2860.00	-0.649	-2.587	-972.64	-934.03
	20	19	-176.41	0.010	-0.033	-59.05	-58.56	-186.94	-0.307	0.162	-61.11	-63.52	-2431.00	-0.376	-2.236	-827.02	-793.65
北西	21	20	-169.52	-0.007	-0.026	-56.70	-56.31	-189.80	0.391	-0.216	-64.88	-61.66	-1729.00	-2.054	-0.254	-578.23	-574.44
	22	21	-159.38	-0.038	0.010	-53.05	-53.20	-186.55	-1.159	0.883	-55.59	-68.77	-1012.70	-2.223	1.859	-323.69	-351.44
	23	22	-151.97	-0.020	0.028	-50.45	-50.87	-184.34	1.274	-0.325	-63.87	-59.02	-429.00	-1.365	3.146	-119.52	-166.48
	24	23	-146.64	0.025	0.004	-48.85	-48.91	-184.34	-0.289	-0.047	-61.80	-61.10	-5.32	-2.639	5.694	40.72	-44.26

鋼製支保工 H125×125

断面積 $A_s=30.00\text{cm}^2=3.00\times 10^{-3}\text{m}^2$ 断面二次モーメント $I=839\text{cm}^4=8.39\times 10^{-6}\text{m}^4$ 断面係数 $Z=134\text{cm}^3=1.34\times 10^{-4}\text{m}^3$

$$\sigma = \frac{N}{A_s} \pm \frac{M}{Z}$$

:各解析ケースでの最大値

:降伏応力 $\sigma_s=240\text{MPa}$ を超過するもの

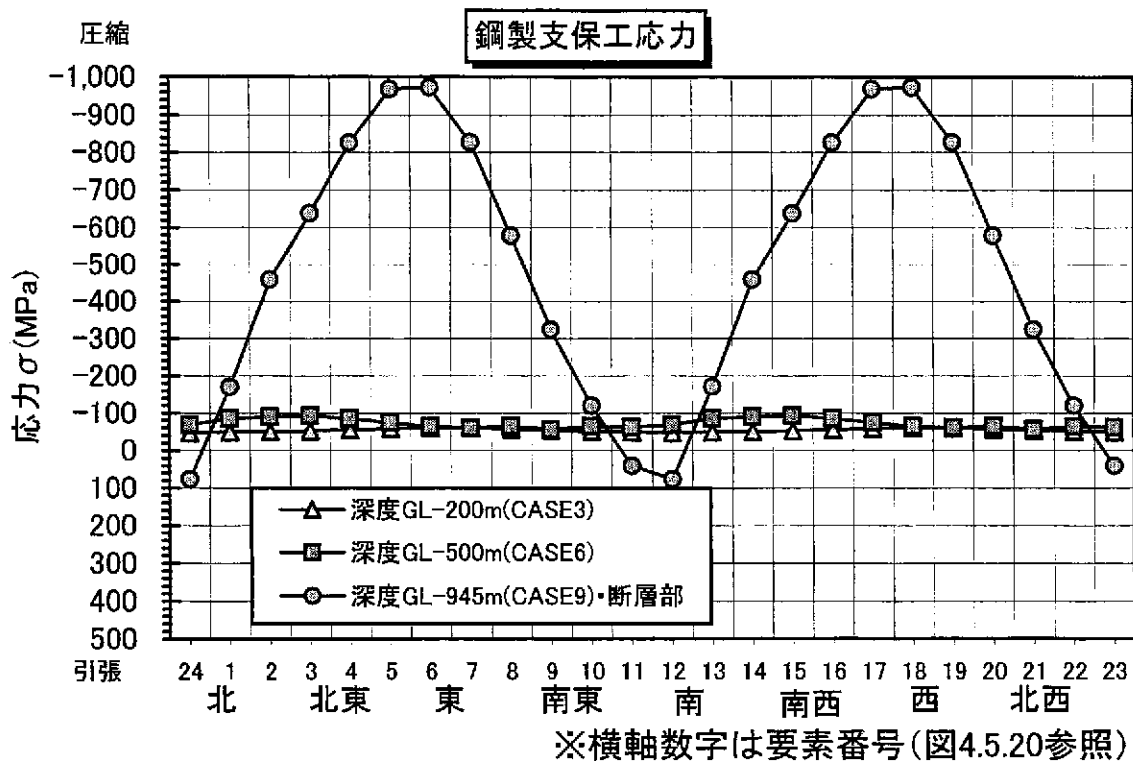
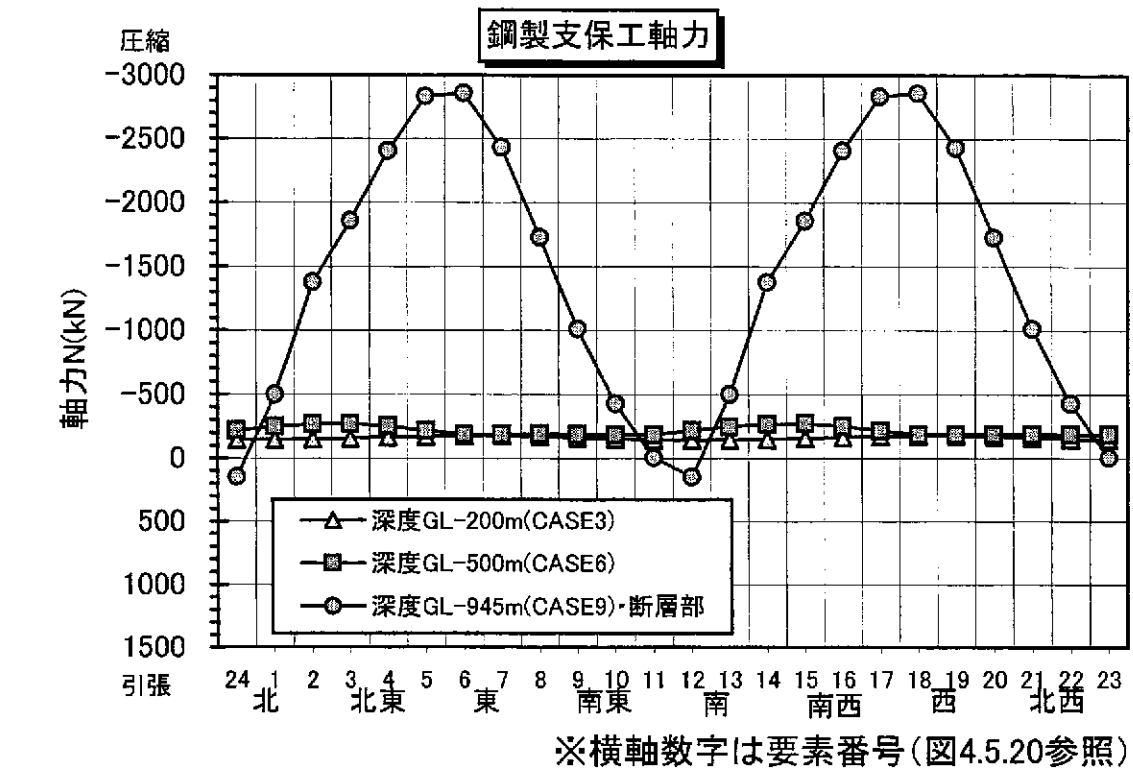


図4. 5. 21 立坑解析結果 鋼製支保工の軸力・応力グラフ

4. 6 横坑解析結果

4. 6. 1 変形量

横坑の深度 GL-500m (Case10～Case17) と深度 GL-945m (Case18～Case25) について横坑の展開配置方向をそれぞれ最大主応力方向に対して 0° 方向 (N45W)、 45° 方向 (N)、 90° 方向 (N45E)、 135° 方向 (E) に配置した場合の掘削による変形量を図 4. 6. 1 に示した。また掘削壁面の変位量を表 4. 6. 1 に示した。

この結果、各ケースでの変形量の最大値を見ると、深度 GL-500m では、 $0.79 \sim 1.45\text{mm}$ 、深度 GL-945m では、 $0.96 \sim 1.42\text{mm}$ の範囲にある。

各深度において、横坑の展開配置方向別に見ると、深度 GL-500m (Case10～Case17) では、最大主応力方向に対して 0° 方向 (N45W) に横坑を掘削した場合が、最も変形量が小さく、 90° 方向 (N45E) に掘削した場合はそのほぼ 2 倍の変形量となっている。最大の変形量を示す位置は、どのケースも坑道側壁部付近であった。

また深度 GL-945m (Case18～Case25) では、最大主応力方向に対して 45° 方向 (N) に横坑を掘削した場合が最も変形量が小さく、 90° 方向 (N45E) に掘削した場合が最大の変形量となる。最大の変形量を示す位置は、最大主応力方向に対して 0° 方向 (N45W)、 45° 方向 (N) は坑道底盤部であり、 90° 方向 (N45E)、 135° 方向 (E) では坑道側壁部であった。

これらの結果、横坑の断面形状は馬蹄形であることから、立坑と比べ、各解析断面内の最大主応力方向と最大の変形量を示す位置が必ずしも一致しないことがわかる。

支保のある・なしによる変形量の差は、ほとんど見られず、どのケースにおいても 0.01mm 程度の差であった。

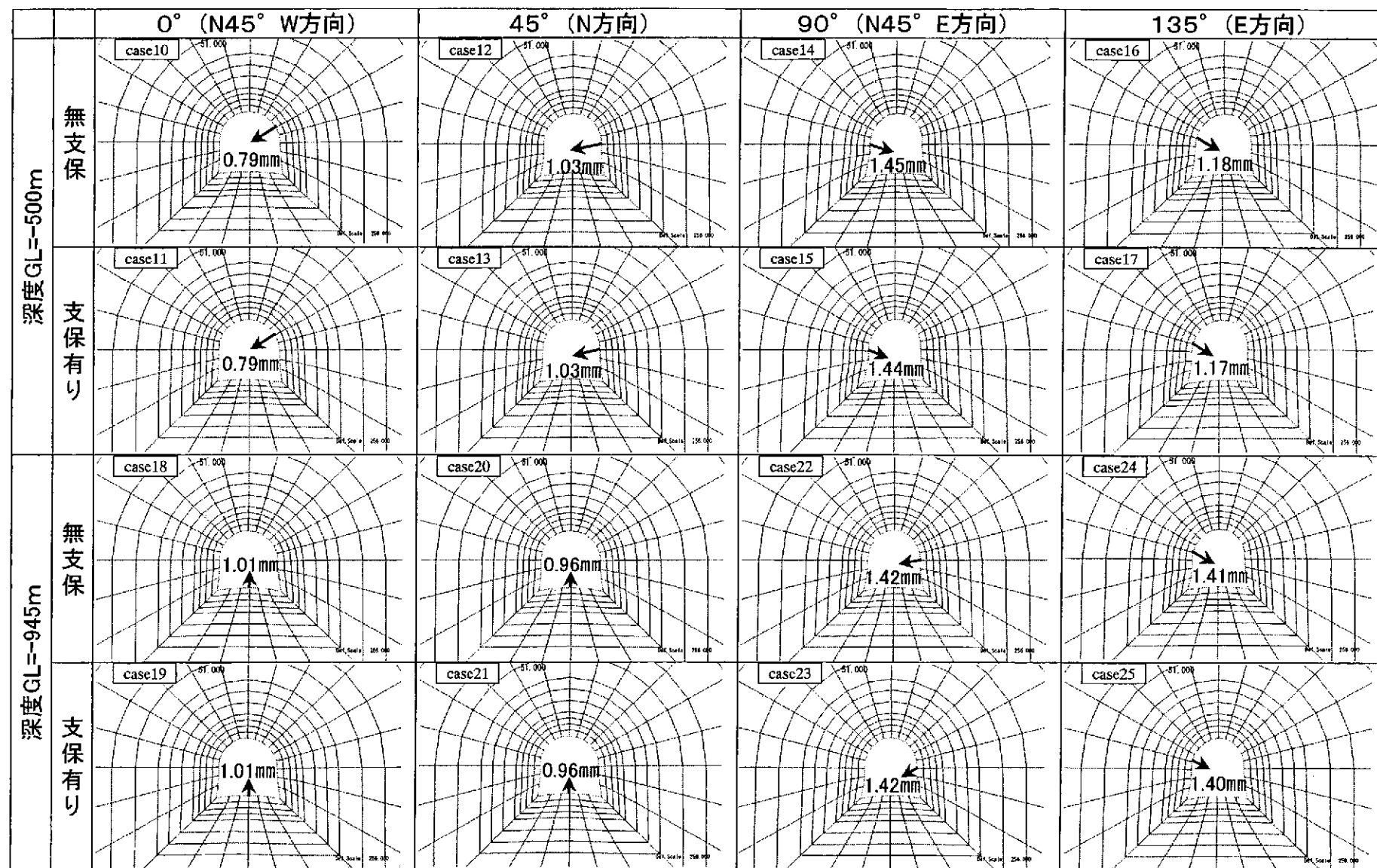


図4. 6. 1 横坑解析結果 変形図(主応力方向ごとに坑軸展開)

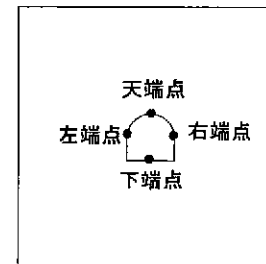
表4. 6. 1

横坑 掘削壁面変位置

単位: mm

横坑	深度 (GL)	物性値	坑道方向	支保	ケース	左端	天端	右端	下端	最大変位置
横坑	-500m	Zone2	0°	無支保	CASE10	0.69	0.56	0.77	0.72	0.79
				支保①	CASE11	0.69	0.56	0.77	0.72	0.79
			45°	無支保	CASE12	1.02	0.62	1.03	0.80	1.03
				支保①	CASE13	1.02	0.62	1.03	0.80	1.03
			90°	無支保	CASE14	1.45	0.49	1.44	0.75	1.45
				支保①	CASE15	1.44	0.49	1.43	0.75	1.44
			135°	無支保	CASE16	1.17	0.54	1.11	0.72	1.18
				支保①	CASE17	1.17	0.54	1.10	0.72	1.17
	-945m	Zone3	0°	無支保	CASE18	0.91	0.75	0.96	1.01	1.01
				支保①	CASE19	0.90	0.75	0.96	1.01	1.01
			45°	無支保	CASE20	0.87	0.78	0.91	0.96	0.96
				支保①	CASE21	0.86	0.78	0.91	0.96	0.96
			90°	無支保	CASE22	1.42	0.68	1.42	0.99	1.42
				支保①	CASE23	1.41	0.68	1.42	0.98	1.42
			135°	無支保	CASE24	1.40	0.65	1.29	0.99	1.41
				支保①	CASE25	1.40	0.65	1.28	0.98	1.40

壁面変位置 対象点位置



4. 6. 2 主応力

横坑の深度 GL-500m (Case10～Case17) と深度 GL-945m (Case18～Case25) について横坑の展開配置方向をそれぞれ最大主応力方向に対して 0° 方向 (N45W)、 45° 方向 (N)、 90° 方向 (N45E)、 135° 方向 (E) に配置した場合の主応力分布を図 4. 6. 2 に示した。主応力分布は各深度での初期応力状態の影響を強く受けながら、掘削境界付近の岩盤では坑壁接線方向に最大主応力方向となる分布となっているが、横坑は断面形状が馬蹄形のため特に両隅角部の応力が乱れている。

各深度ごと、あるいは横坑の展開配置方向による応力分布への差は特に見られない。

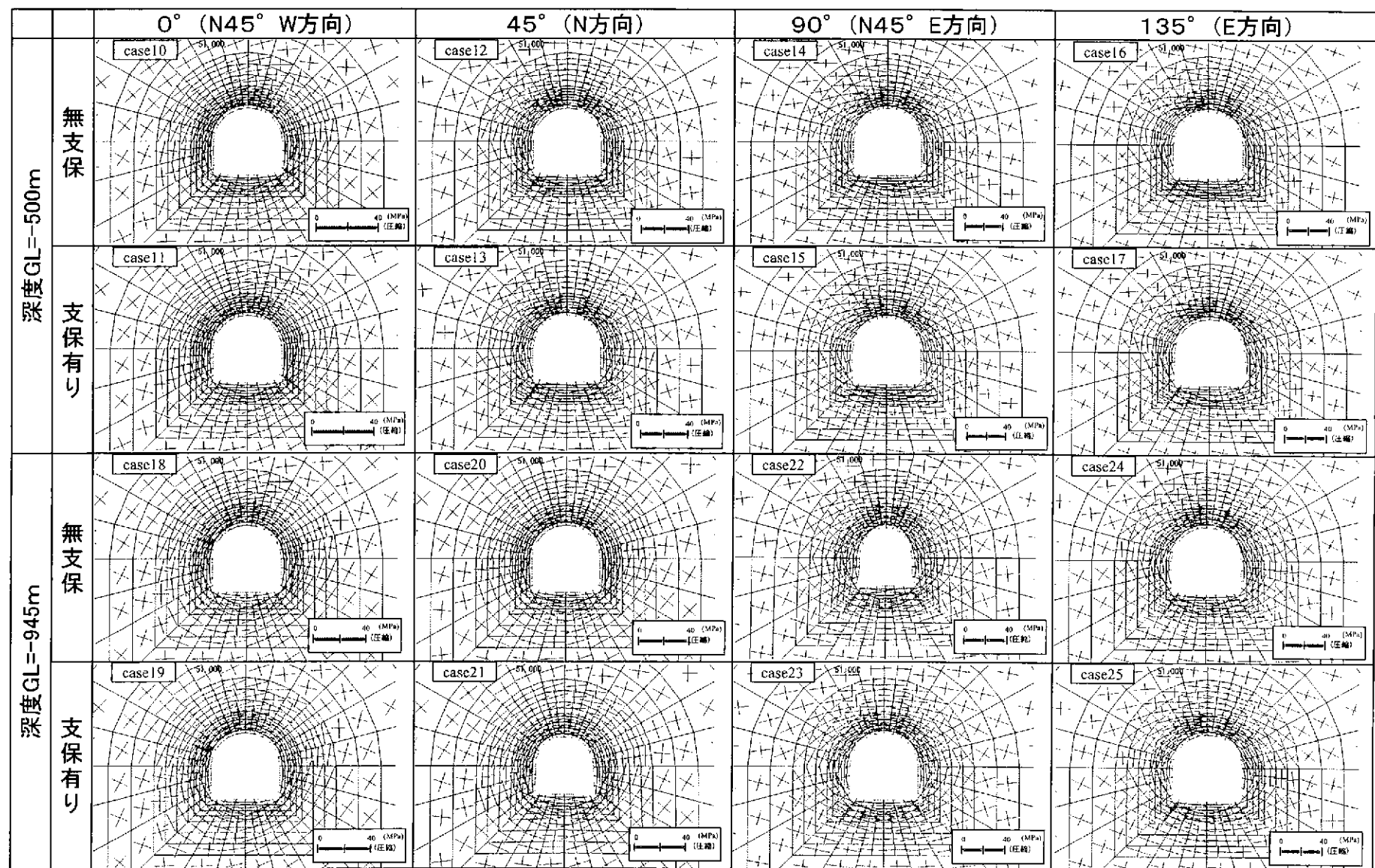


図4. 6. 2 横坑解析結果 主応力図(主応力方向ごとに坑軸展開)

4. 6. 3 亀裂開口量

横坑の深度 GL-500m と深度 GL-945m について横坑の展開配置方向をそれぞれ応力の最大主応力方向に対して 0° 方向(N45W), 45° 方向(N), 90° 方向(N45E), 135° (E)に配置した場合の亀裂の全開口量分布を図 4. 6. 3 に示す。尚、亀裂セットとして各ケースで最大 3 セットを条件として与えたため、それぞれのセットのみによる開口量分布を図 4. 6. 4 ～図 4. 6. 6 に示した。いずれのケースも開口量の絶対量は、0.1mm を超える領域は存在しない。

深度別に見ると、深度 GL-500m のケース (Case10～Case17) では、最大主応力方向に対して 0° 方向 (N45W) に横坑を掘削した場合 (Case10、11) が、最も亀裂の開口している領域が小さく、主に亀裂セット 1 (15° 右落ち) の亀裂の影響で横坑断面の右肩部と左脚部が開口しているのみであり、開口量が 0.01mm 以上の領域 (図 4. 6. 3 で赤い部分) は壁面から 50cm 程度である。逆に、最大主応力方向に対して 90° 方向 (N45E 方向) の場合 (Case14、15) が、他ケースに比べて、初期応力の値も大きいこともあって、横坑周辺全体で亀裂が開口しており、開口量が 0.01mm 以上の領域は、最大で壁面から 1.5m 程度まで及んでいる。特に、亀裂セット 1 (75° 右落ち) と亀裂セット 2 (40° 左落ち) の影響を強く受けている。

深度 GL-945m のケース (Case18～Case25) では、最大主応力方向に対して 45° 方向 (N 方向) に横坑を掘削した場合 (Case20、21) 最も亀裂の開口している領域が小さい。この時の亀裂セットは 11° 右落ちと 5° 左落ちの 2 セットであり、ともにほぼ水平に走る亀裂であることから、横坑断面の天端部と底盤部が開口している。しかし、その開口領域は、開口量が 0.01mm 以上の領域で、壁面から 0.75～1m 程度まで及んでいる。

逆に、最大主応力方向に対して 90° 方向 (N45E 方向) の場合 (Case22、23) と 135° 方向 (E 方向) の場合 (Case24、25) とが、横坑周辺全体で亀裂が開口しており、その領域は、開口量が 0.01mm 以上の領域で、最大で壁面から 1～1.5m 程度まで及んでいる。

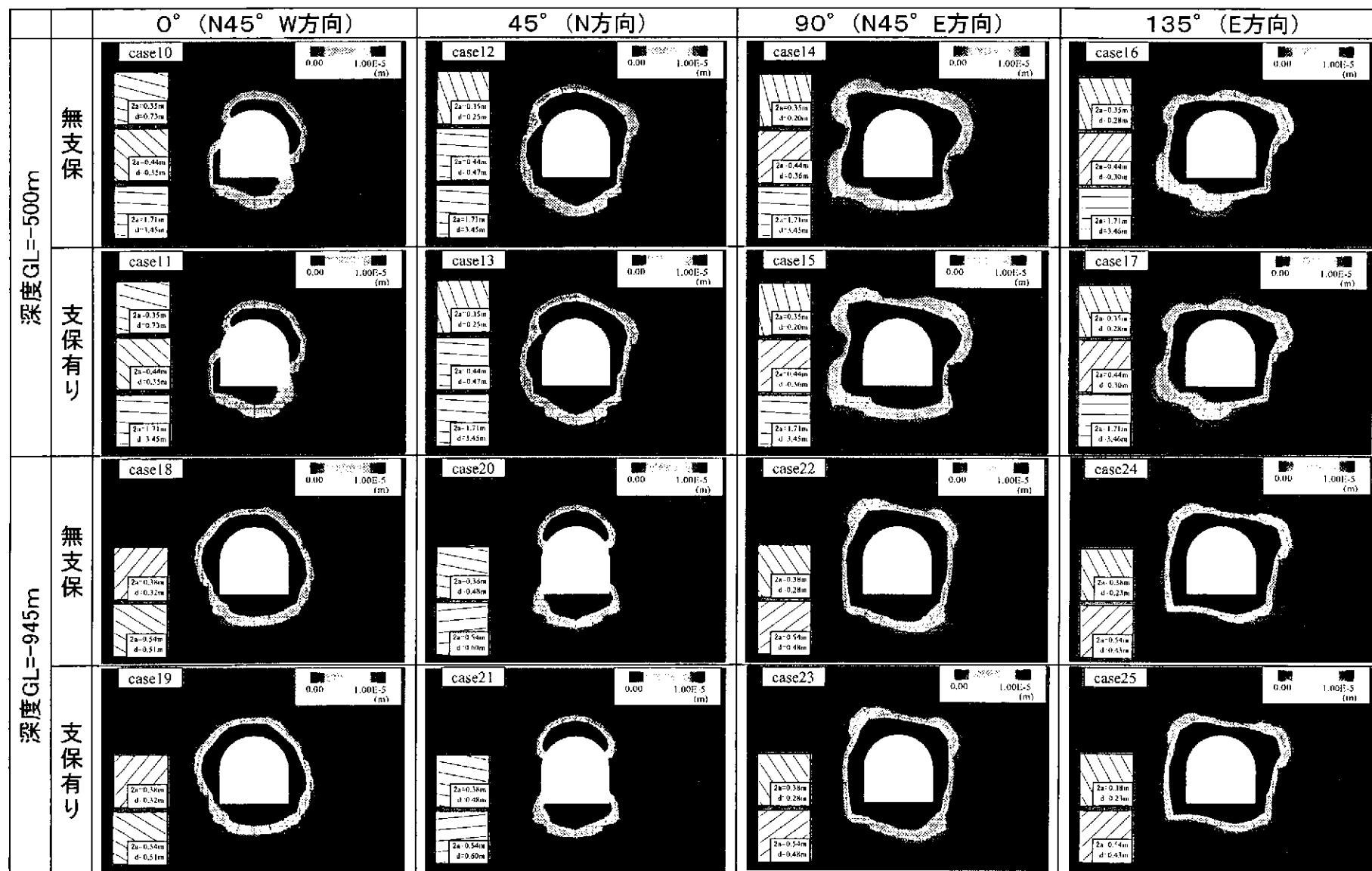


図4. 6. 3 横坑解析結果 亀裂開口量分布図(全亀裂)

2a=節理有効長(m)
d=節理間隔(m)

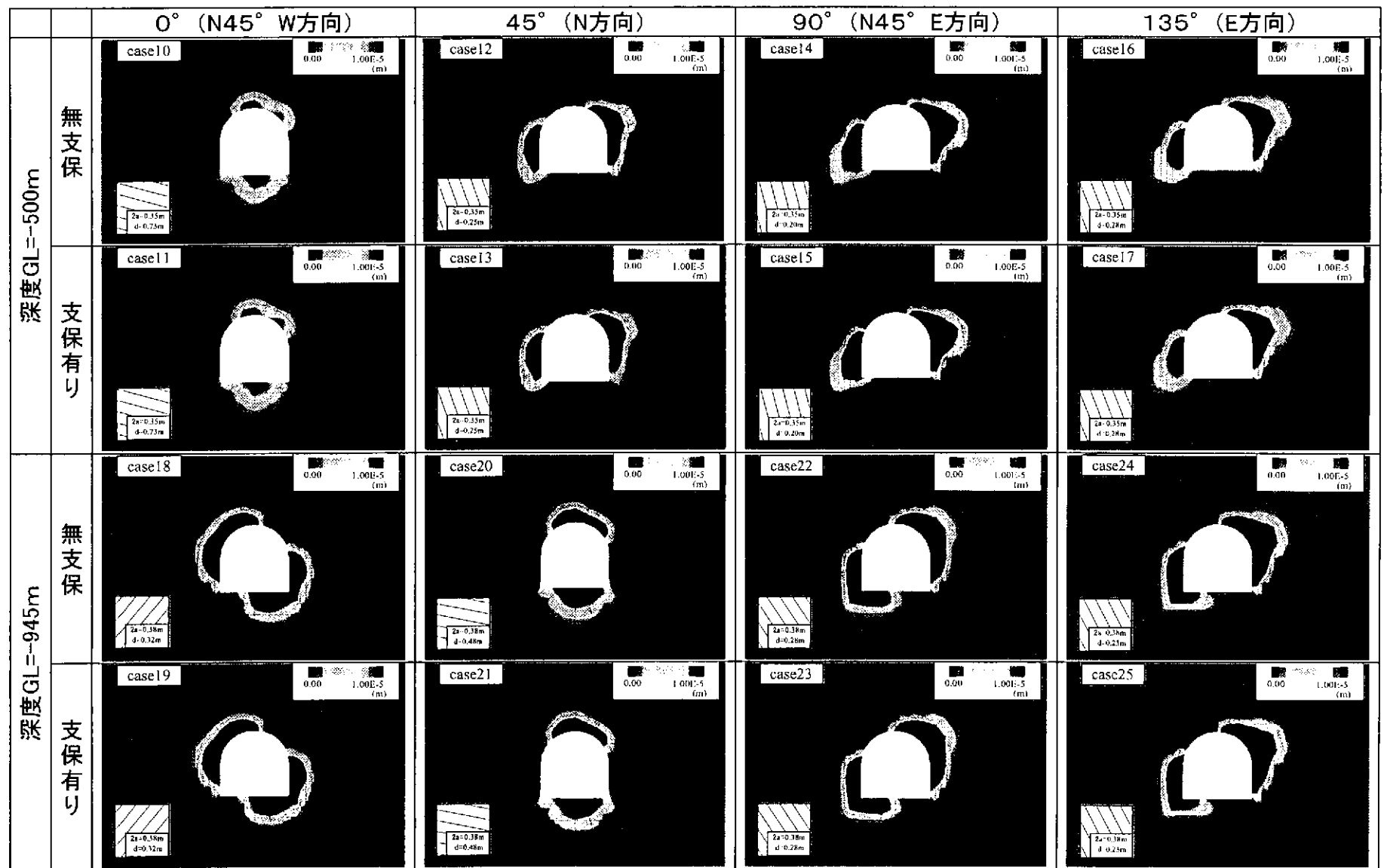


図4. 6. 4 横坑解析結果 亀裂開口量分布図(亀裂セット1)

2a=節理有効長(m)
d=節理間隔(m)



図4. 6. 5 横坑解析結果 亀裂開口量分布図(亀裂セット2)

2a=節理有効長(m)
d=節理間隔(m)

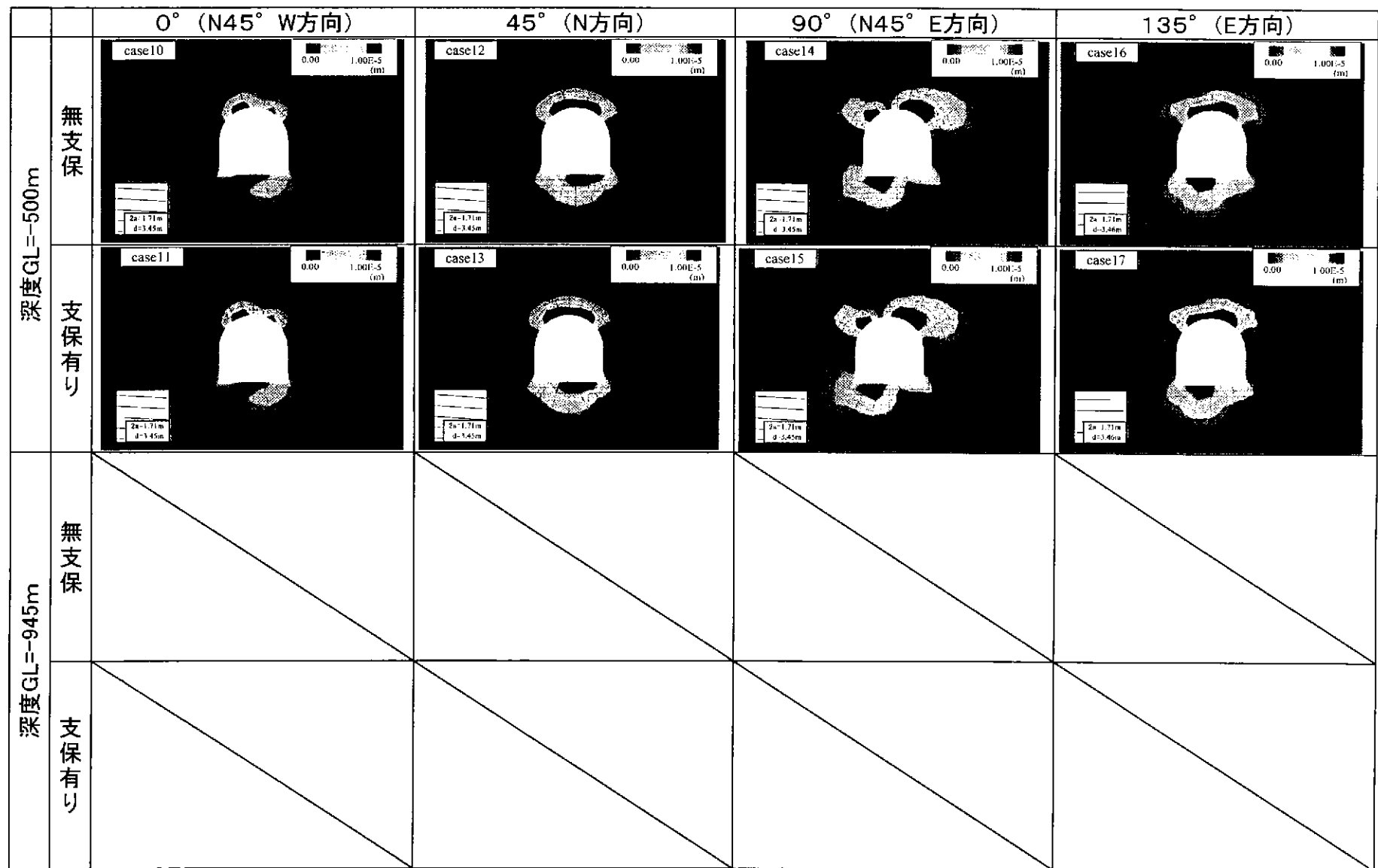


図4. 6. 6 横坑解析結果 亀裂開口量分布図(亀裂セット3)

2a=節理有効長(m)
d=節理間隔(m)

4. 6. 4 安全率

横坑の深度 GL-500m と深度 GL-945m について横坑の展開配置方向をそれぞれ最大主応力方向に対して 0° 方向(N45W), 45° 方向(N), 90° 方向(N45E), 135° (E) に配置した場合の安全率分布を図 4. 6. 7 に示す。安全率 (F S) の評価を行う上での破壊基準は立坑の時と同様である。

深度別に見ると、深度 GL-500m のケース (Case10~Case17) では、最大主応力方向に対して 90° 方向 (N45E 方向) の場合が、掘削壁面から 2 m 離れた要素でも安全率 (F S) = 2~3 の値となっている。これは、他ケースに比べて、最大主応力と最小主応力の差が最も大きいため相対的に応力円が破壊基準線に近いためである。

その他のケースにおいては、天端、両スプリングライン付近、底盤が安全率の低い領域として認められるが、安全率 (F S) ≤ 1 の領域は殆ど存在しない。

深度 GL-945m のケース (Case18~Case25) では、どの展開配置方向のケースにおいても安全率 (F S) ≤ 3 の領域は掘削壁面から 3 m 以内である。天端、両スプリングライン付近、底盤が安全率の低い領域として認められるが、安全率 (F S) ≤ 1 の領域は殆ど存在しない。

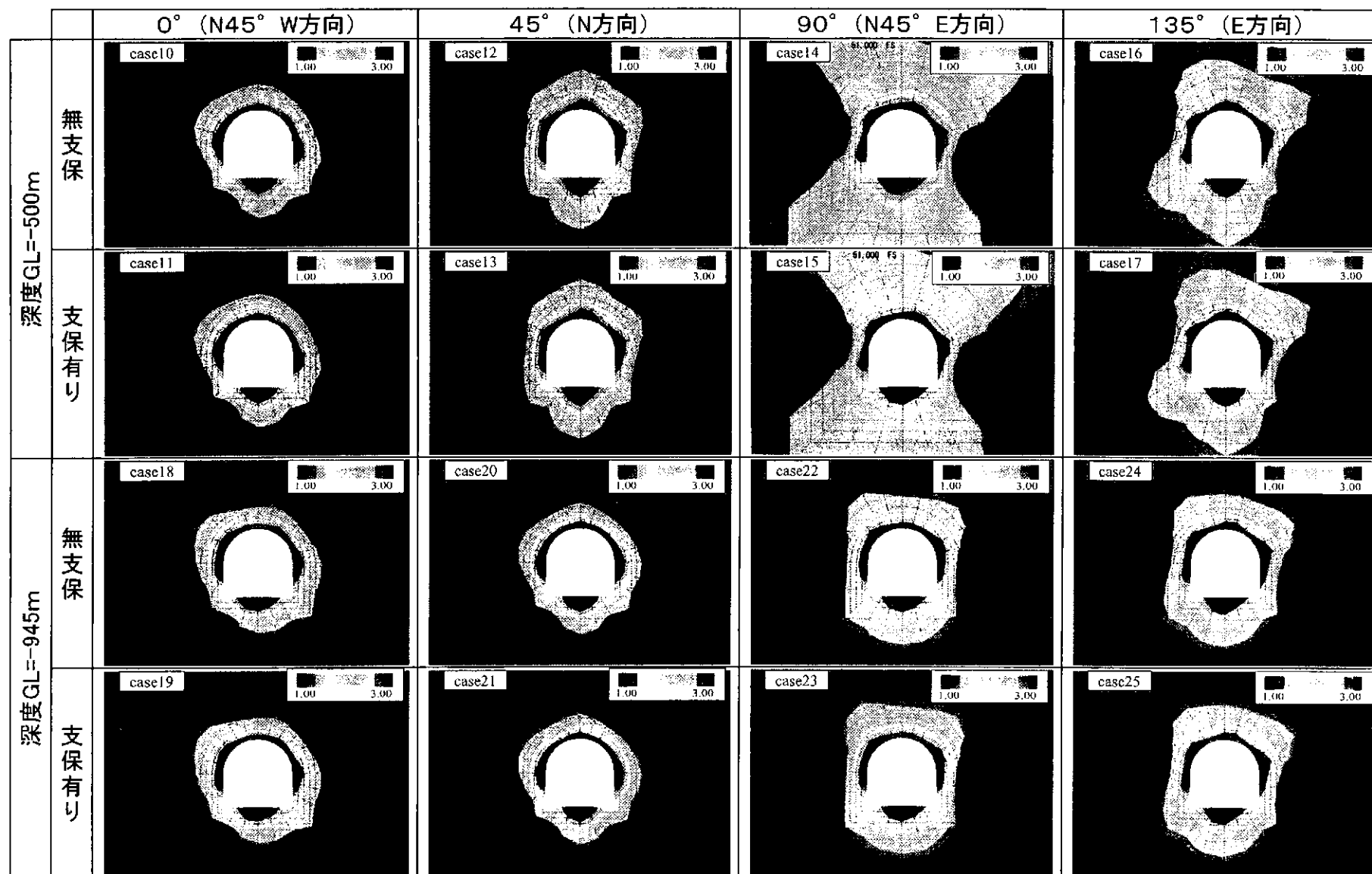


図4. 6. 7 横坑解析結果 安全率分布図

4. 6. 5 等価透水係数

横坑の深度 GL-500m と深度 GL-945m について横坑の展開配置方向をそれぞれ最大主応力方向に対して 0° 方向(N45W), 45° 方向(N), 90° 方向(N45E), 135° (E) に配置した場合の全ての亀裂セットにおける全等価透水係数の分布を図 4. 6. 8 に示す。なお、亀裂セットとして各ケースで最大 3 セットを条件として与えているため、それぞれのセットのみによる等価透水係数分布を図 4. 6. 9～図 4. 6. 11 に示した。

各深度のケースとも、横坑の展開配置方向の変化に伴い、各断面内での亀裂の方向が変化するため、透水係数分布はそれぞれ異なっている。

深度別に見ると、深度 GL-500m のケース (Case10～Case17) では、最大主応力方向に対して 0° 方向 (N45W) に横坑を掘削した場合 (Case10、11) が、最も亀裂の開口している領域が小さいため、透水係数もほとんど変化していない。逆に、最大主応力方向に対して 90° 方向 (N45E 方向) の場合 (Case14、15) が他ケースに比べ亀裂の開口量が大きい。従って、透水係数も、主に亀裂セット 1 (75° 右落ち) と亀裂セット 2 (40° 左落ち) の影響を受け、2 桁以上変化している。

深度 GL-945m のケース (Case18～Case25) では、最大主応力方向に対して 45° 方向 (N 方向) に横坑を掘削した場合 (Case20、21) 最も亀裂の開口している領域が小さい。そのため、透水係数も殆ど変化していない。また、その他のケースも透水係数が 2 桁以上変化している領域は殆どない。

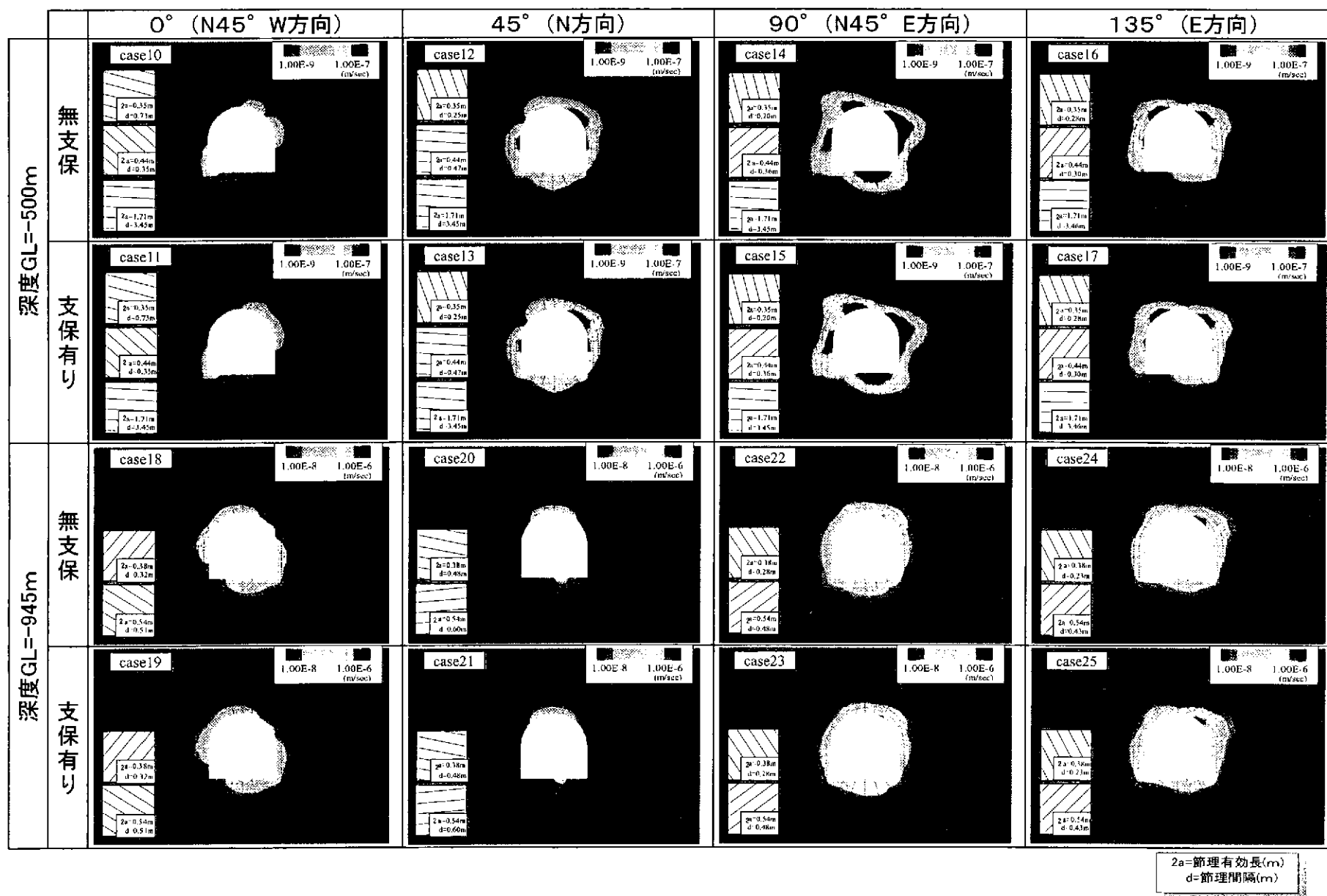


図4.6.8 横坑解析結果 全透水係数分布図(主応力方向ごとに坑軸展開)



図4.6.9 横坑解析結果 透水係数分布図(亀裂セット1)(主応力方向ごとに坑軸展開)



図4. 6. 10 横坑解析結果 透水係数分布図(亀裂セット2)(主応力方向ごとに坑軸展開)

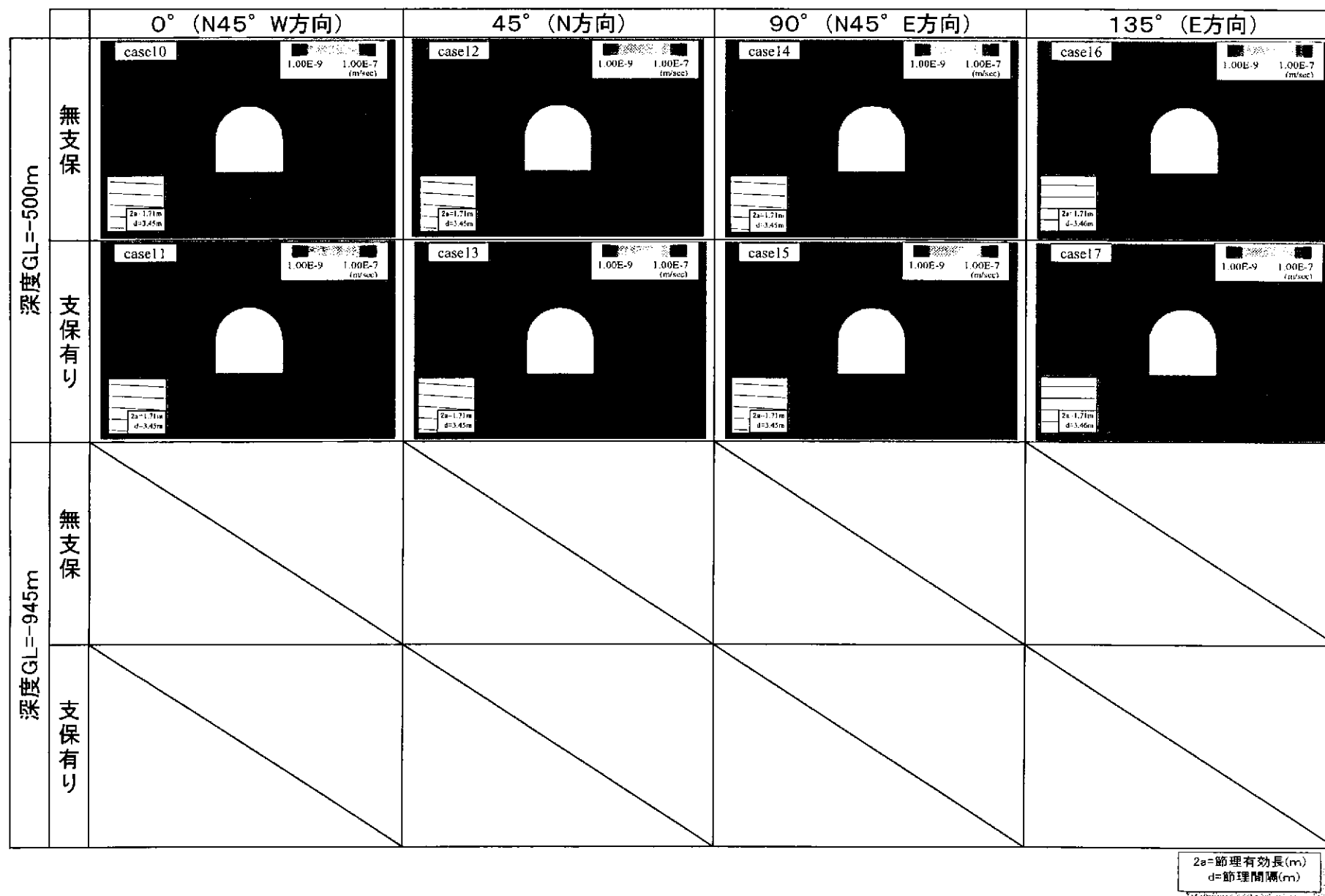


図4. 6. 11 横坑解析結果 透水係数分布図(亀裂セット3)(主応力方向ごとに坑軸展開)

4. 6. 6 等価弾性係数

横坑の深度 GL-500m と深度 GL-945m について横坑の展開配置方向をそれぞれ最大主応力方向に対して 0° 方向(N45W), 45° 方向(N), 90° 方向(N45E), 135° (E) に配置した場合の等価弾性係数比を図 4. 6. 12～図 4. 6. 14 に示す。等価弾性係数とは、亀裂の開口により低減した要素の弾性係数であるが、ここでは初期の岩盤の弾性係数で割って正規化したものを表示した。

最大主応力方向についての等価弾性係数比 E_1 を図 4. 6. 12 に示した。これは、MBC 解析の結果、各要素ごと算出された応力から最大主応力方向を求め、その方向の等価弾性係数を初期岩盤の弾性係数で割ったものである。これより、いずれのケースも最も荷重を負担している方向では、 E_1 の低減は見られない。

水平方向についての等価弾性係数比 E_x を図 4. 6. 13 に示した。 E_x は、急な傾きの亀裂セットが開口することで変化しやすい。

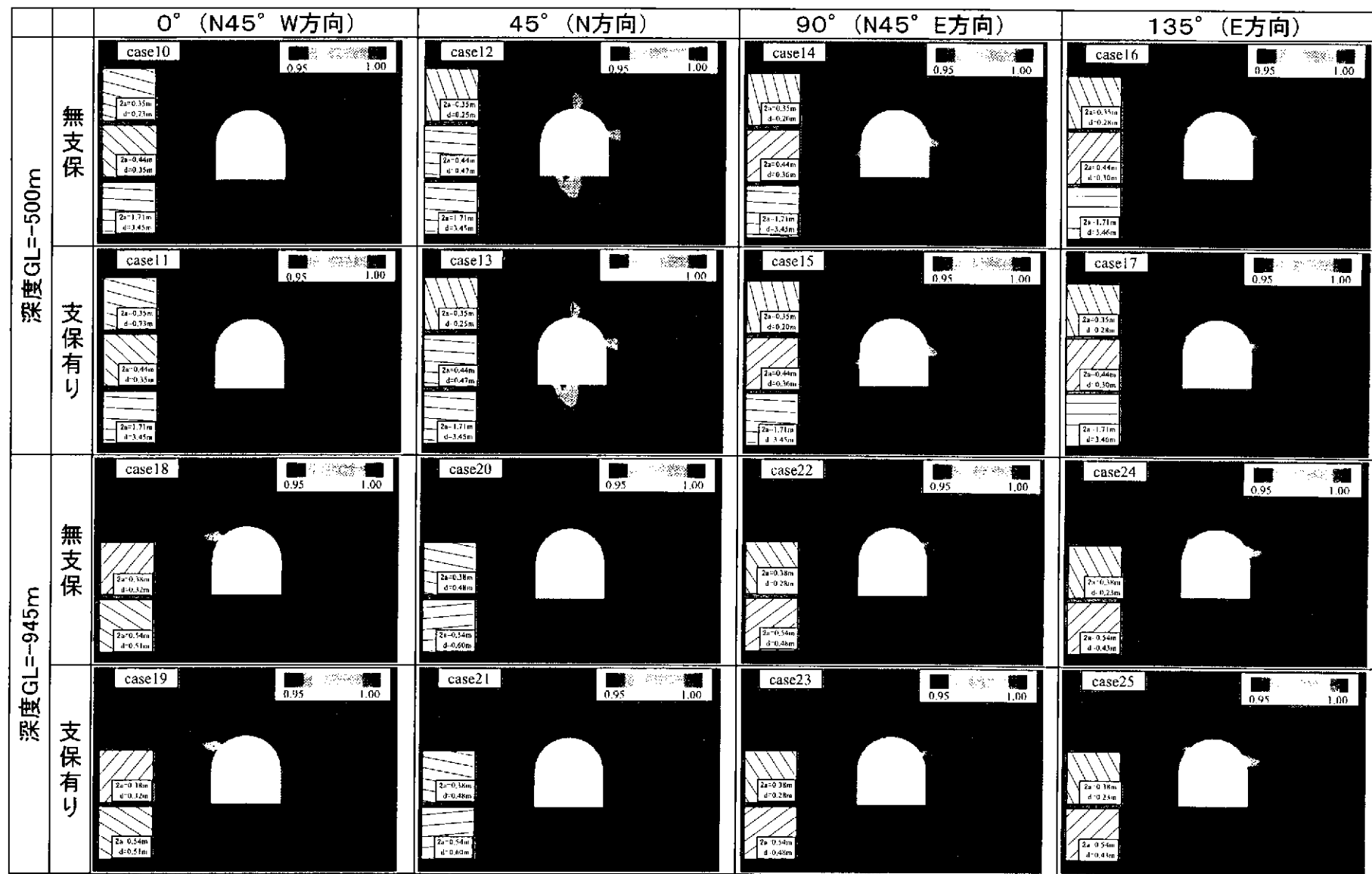
深度別に見ると、深度 GL-500m のケース (Case10～Case17) では、横坑の展開方向が最大主応力方向に対して 0° 方向(N45W)のケース (Case10、Case11) が、亀裂セット 2 (43° 右落ち) の開口によって両スプリングライン付近の E_x の低下が見られる。また、その他のケースでは、いずれも亀裂セット 1 (Case12、Case13 では、 70° 右落ち、Case14、Case15 では、 75° 右落ち、Case16、Case17 では、 68° 右落ち) の開口によって、両スプリングライン付近の E_x の低下が見られる。深度 GL-945m のケース (Case18～Case25) では、横坑の展開方向が最大主応力方向に対して 45° 方向(N 方向)のケース (Case20、Case21) が、水平な亀裂セットのみのため、X 方向の E_x の低減は殆ど見られない。また、その他のケースでは、いずれも亀裂セット 1 (Case18、Case19 では、 50° 左落ち、Case22、Case23 では、 56° 右落ち、Case24、Case25 では、 62° 右落ち) の開口によって、両スプリングライン付近の E_x の低下が見られる。

鉛直方向についての等価弾性係数比 E_y を図 4. 6. 14 に示した。 E_y は、主に水平な亀裂セットが開口により変化しやすい。

深度別に見ると、深度 GL-500m のケース (Case10～Case17) では、横坑の展開方向が最大主応力方向に対して 90° 方向(N45E)のケース (Case14、Case15) が E_y の低下が著しい。これは、亀裂セット 2 (40° 左落ち) および亀裂セット 3 (3° 右落ち) の開口の影響である。その他のケースについても、主に水平な亀裂セットの開口による影響を受け、主に、横坑の天端と底盤に E_y の低下が見られる。深度 GL-945m のケース (Case18～Case25) では、同様に、横坑の展開方向が最大主応力方向に対して 90° 方向(N45E)のケース (Case22、Case23) が E_y の低下が著しい。

これは主に、亀裂セット 2 (36° 左落ち) の開口によるものである。また、展開方向が最大主応力方向に対して 45° 方向(N 方向)のケース (Case20、Case21) は水平方向の亀裂セットのみを有するにもかかわらず、 E_y があまり低減しないのは、亀裂

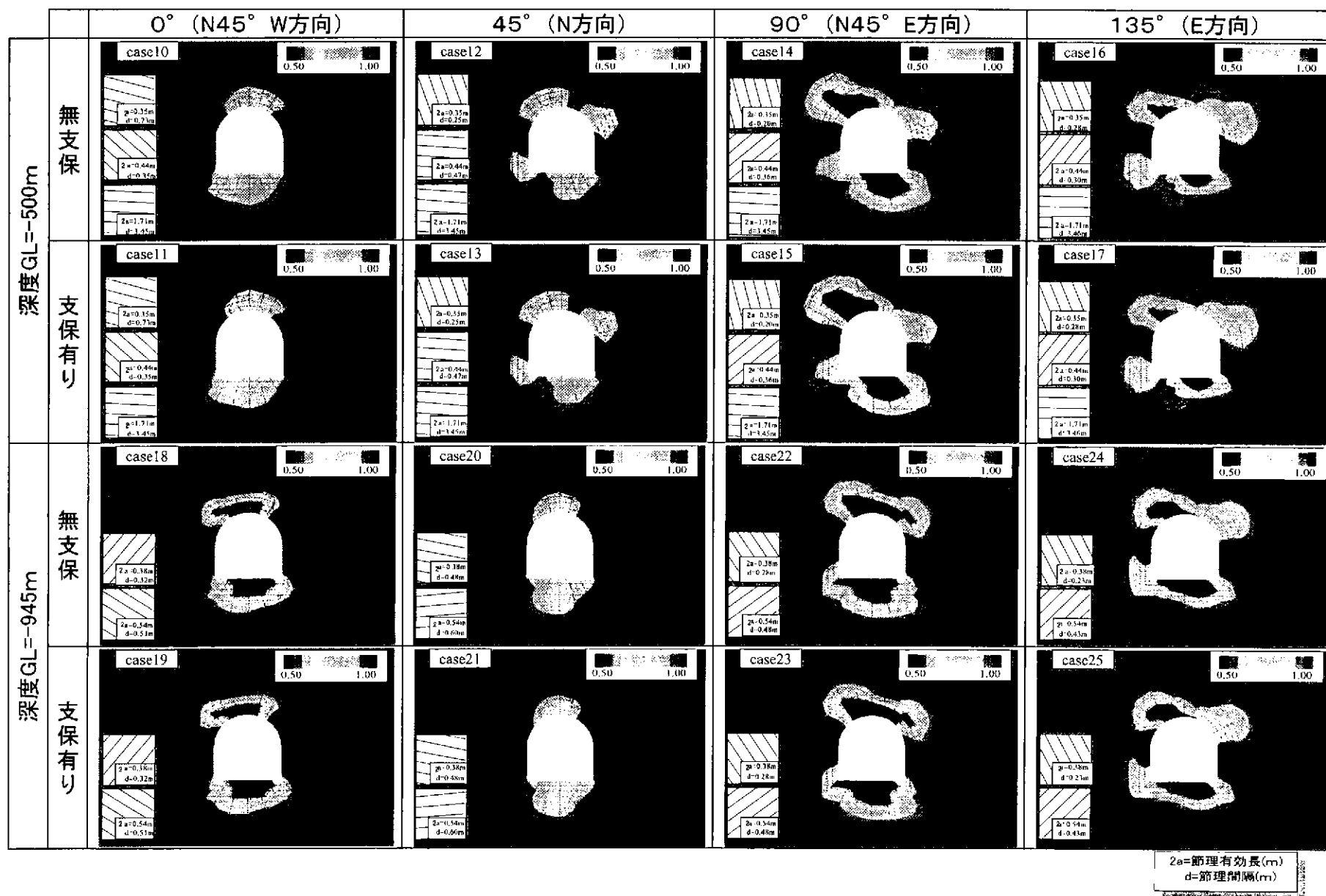
セットの開口量自体が小さいからであると思われる。



2a=節理有効長(m)
d=節理間隔(m)

図4. 6. 12 横坑解析結果 等価弾性係数比E1 分布図(主応力方向弾性係数比)

図4. 6. 13 横坑解析結果 等価弾性係数比 E_x 分布図(X方向の弾性係数比)

図4. 6. 14 横坑解析結果 等価弾性係数比 E_y 分布図(Y方向の弾性係数比)

4. 6. 7 吹付けコンクリート応力

横坑の深度 GL-500m と深度 GL-945m について横坑の展開配置方向をそれぞれ応力の最大主応力方向に対して 0° 方向(N45W), 45° 方向(N), 90° 方向(N45E), 135° (E)に配置した場合の吹付コンクリートの応力分布を図 4. 6. 15 に示す。また、各要素での応力値を整理し、要素番号を図 4. 6. 16 に、応力値の一覧を表 4. 6. 2 に、吹付コンクリート応力値の分布グラフを図 4. 6. 17 に示す。

この結果、各ケースでの最大値を見ると、深度 GL-500m では $1.2\sim 1.8\text{MPa}$ 、深度 GL-945m では $1.6\sim 1.9\text{MPa}$ の範囲にあり、横坑の断面内における応力分布では、いずれのケースも吹付コンクリートの応力は天端で最大となっている。

横坑の深度別には深度 GL-945m のケースの方が深度 GL-500m のケースより吹付コンクリートの応力は大きくなる傾向にある。

横坑の展開方向別には 0° 方向(N45W)、すなわち最大主応力方向に配置したケースでは他のケースに比べ、吹付コンクリートの応力は小さい傾向にある。一方、 90° 方向(N45E)すなわち応力の最大主応力方向に直交する方向に配置したケースでは他のケースに比べ、吹付コンクリートの応力は大きくなる傾向にある。

いずれにしても、吹付コンクリートに発生する応力は、初期応力に支配される岩盤変位や亀裂の開口といった変位挙動に依存した分布傾向が見られる。

なお、吹付コンクリートの応力レベルについては、例えば吹付コンクリートの設計基準強度を $f_c=18.0\text{MPa}$ としても、解析値は高々 2.0MPa 以内にあり、吹付コンクリート部材に働く応力としては問題の無い範囲にある。

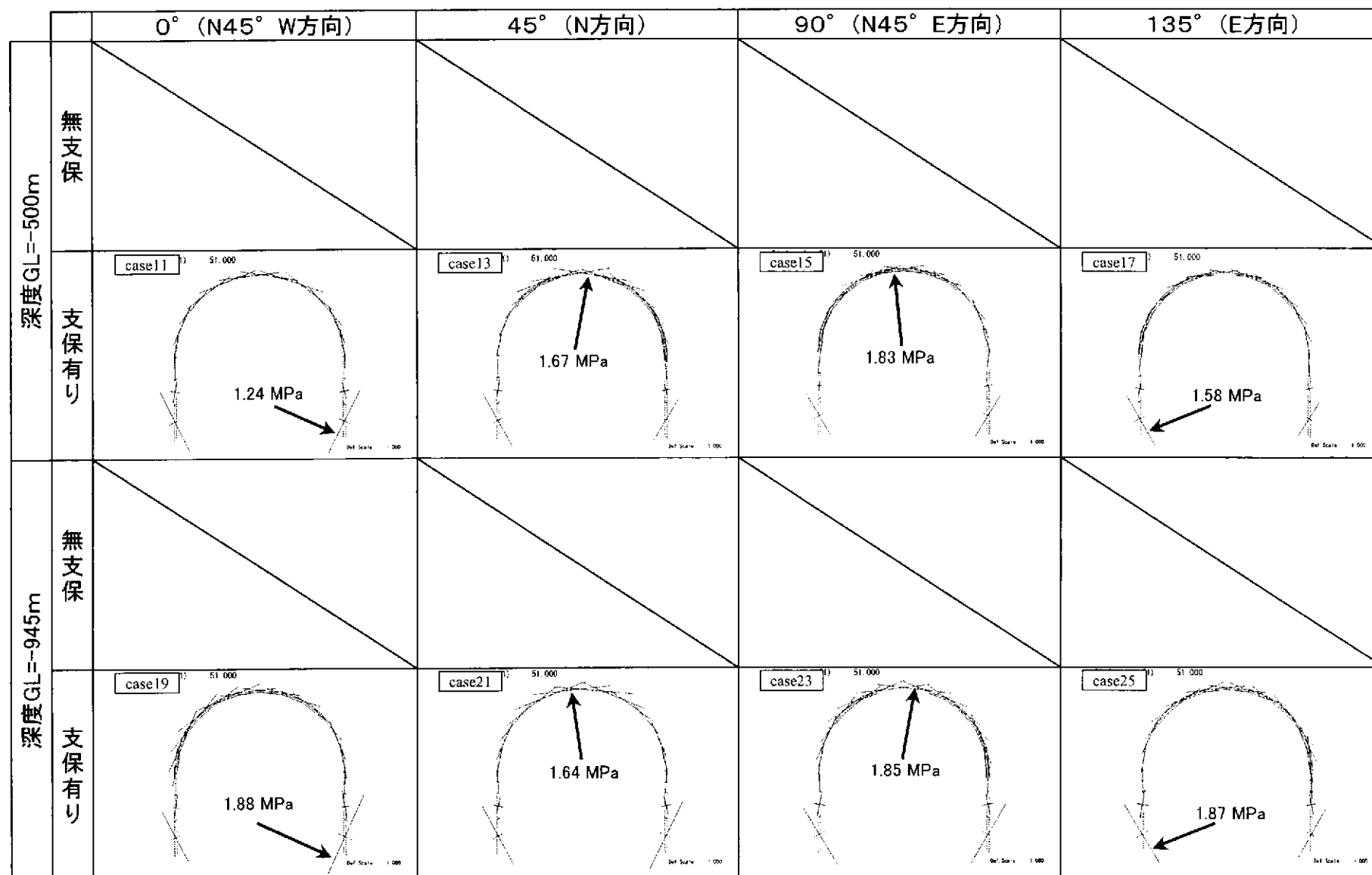


図4. 6. 15 横坑解析結果 吹付コンクリート応力図(主応力方向ごとに坑軸展開)

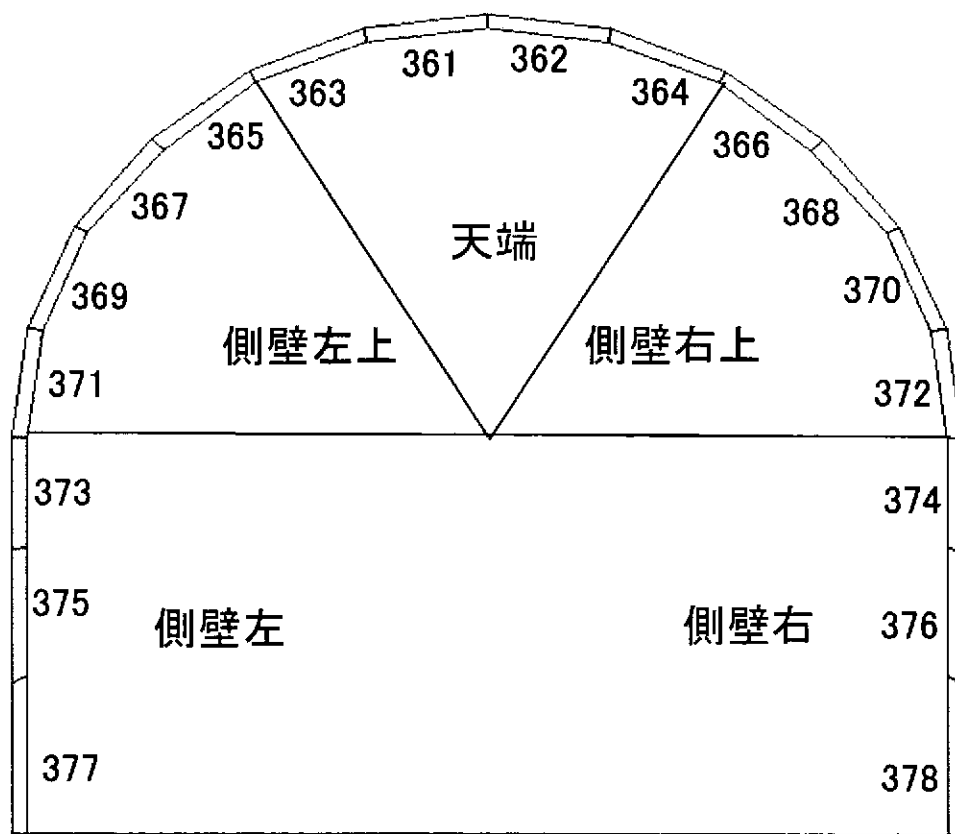


図4. 6. 16 横坑の吹付コンクリート要素番号図

表4. 6. 2 横坑解析結果 吹付コンクリート応力一覧表

吹付コンクリート応力 単位 : MPa

圧縮 : -

位置	要素 番号		深度GL-500m				深度GL-945m			
			0° (N45W方向)	45° (N方向)	90° (N45E方向)	135° (E方向)	0° (N45W方向)	45° (N方向)	90° (N45E方向)	135° (E方向)
			CASE11	CASE13	CASE15	CASE17	CASE19	CASE21	CASE23	CASE25
側壁左	1	377	-1.17	-1.34	-1.48	-1.58	-1.22	-1.40	-1.73	-1.87
	2	375	-0.40	-0.50	-0.36	-0.48	-0.52	-0.37	-0.67	-0.80
	3	373	-0.44	-0.37	-0.59	-0.34	-0.73	-0.48	-0.67	-0.67
側壁左上	4	371	-0.55	-0.47	-0.67	-0.58	-1.05	-0.68	-0.80	-0.75
	5	369	-0.74	-0.61	-0.81	-0.75	-1.36	-0.91	-1.18	-0.98
	6	367	-0.84	-0.72	-1.01	-0.86	-1.54	-1.07	-1.44	-1.28
	7	365	-0.95	-1.07	-1.47	-1.14	-1.60	-1.30	-1.67	-1.59
天端	8	363	-1.06	-1.49	-1.73	-1.31	-1.40	-1.54	-1.83	-1.66
	9	361	-1.04	-1.72	-1.83	-1.37	-1.18	-1.64	-1.84	-1.53
	10	362	-1.05	-1.67	-1.69	-1.35	-1.17	-1.62	-1.85	-1.46
	11	364	-1.23	-1.47	-1.50	-1.45	-1.21	-1.43	-1.79	-1.63
側壁右上	12	366	-1.12	-1.24	-1.48	-1.44	-1.09	-1.08	-1.66	-1.69
	13	368	-0.87	-1.06	-1.40	-1.31	-0.93	-0.87	-1.58	-1.67
	14	370	-0.71	-0.96	-1.15	-1.13	-0.85	-0.75	-1.37	-1.43
	15	372	-0.54	-0.82	-0.76	-0.86	-0.74	-0.58	-1.01	-1.25
側壁右	16	374	-0.41	-0.59	-0.77	-0.61	-0.65	-0.45	-0.71	-0.98
	17	376	-0.31	-0.27	-0.39	-0.28	-0.68	-0.40	-0.57	-0.55
	18	378	-1.24	-1.04	-1.37	-1.08	-1.88	-1.57	-1.78	-1.55

：各解析ケースでの最大値

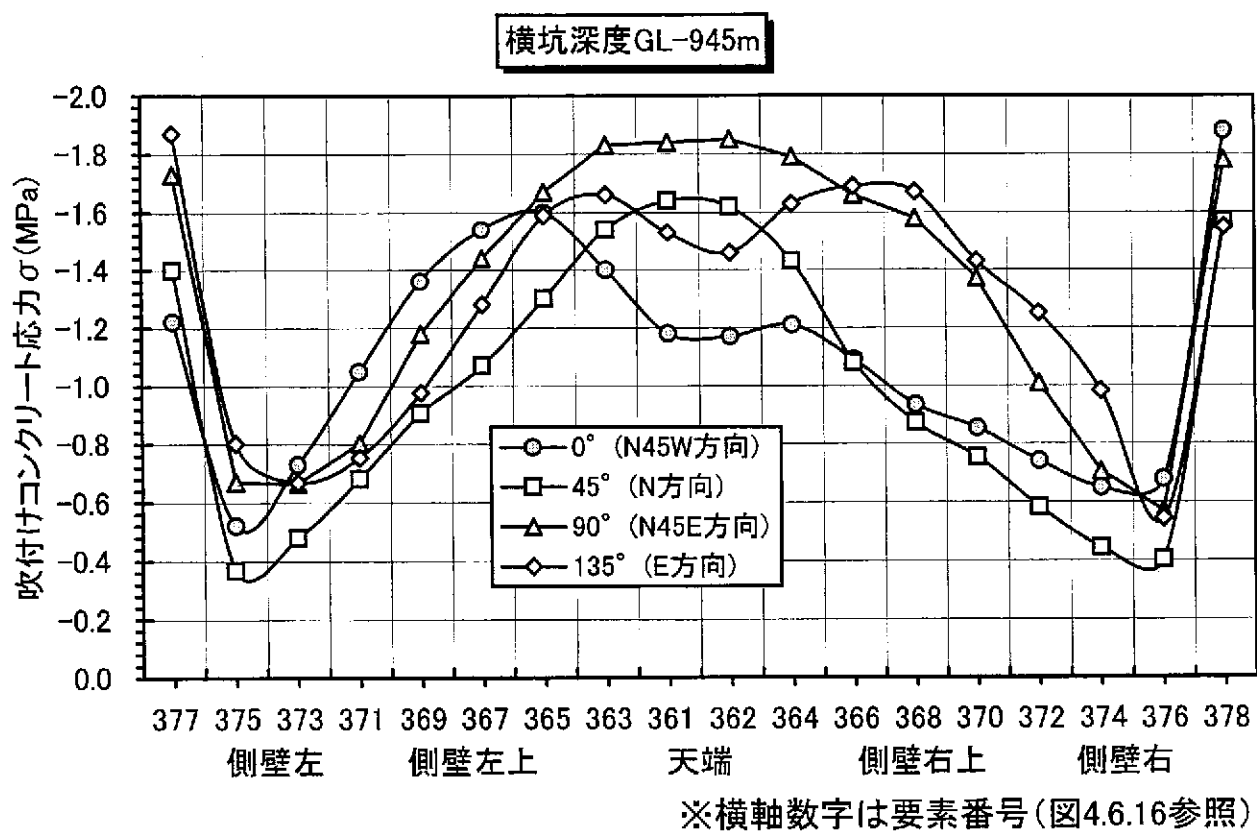
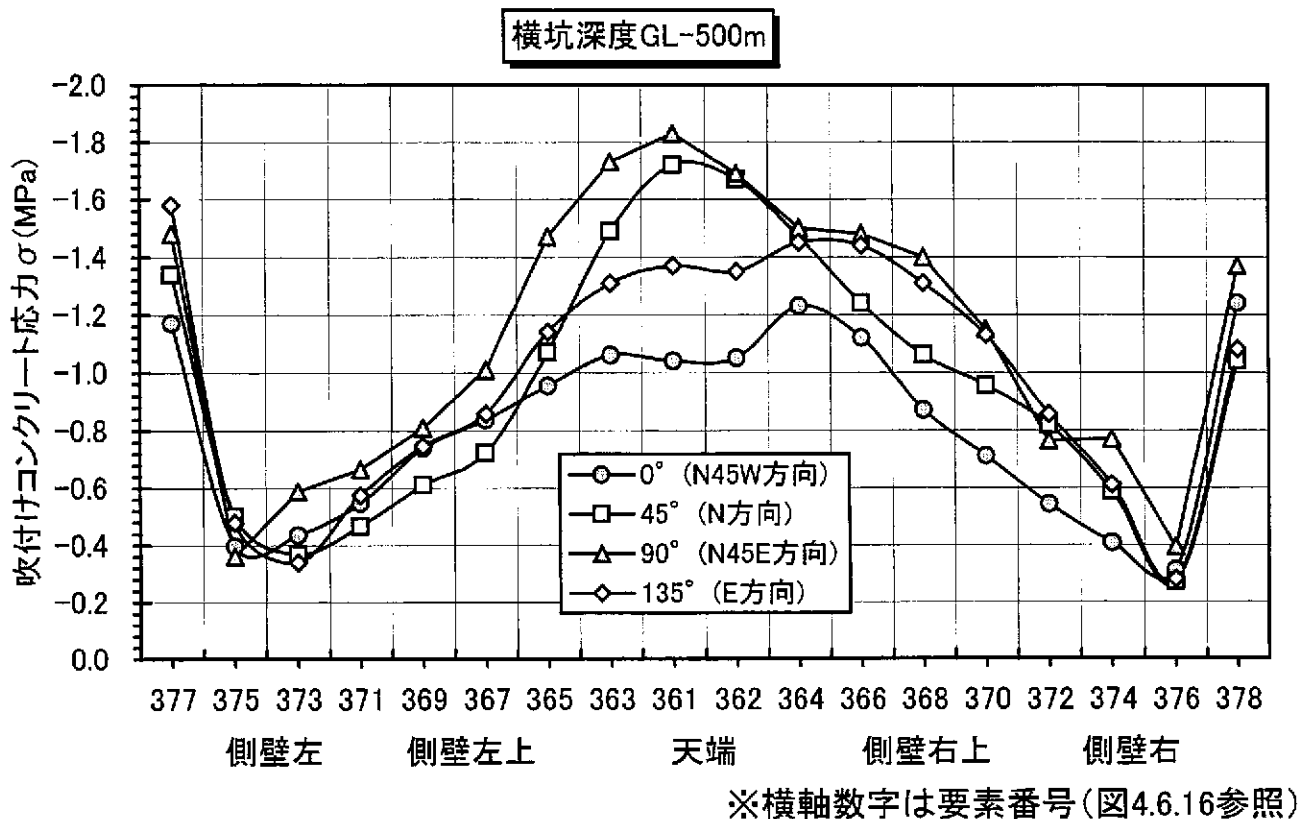


図4. 6. 17 横坑解析結果 吹付コンクリート応力グラフ

4. 6. 8 ロックボルト軸力

ロックボルトの軸力分布を図4. 6. 18に示す。また、図4. 6. 19に示した要素番号について、各要素での軸力を整理した一覧を表4. 6. 3に示す。

この結果、各ケースでの軸力の最大値を見ると、深度 GL-500m では 25～33kN、深度 GL-945m では 28～39kN の範囲にある。

横坑の深度別には深度 GL-945m のケースの方が深度 GL-500m のケースよりロックボルトの軸力は多少大きくなる傾向にあるが、明瞭な差異に至っていない。横坑の断面内における最大軸力の発生位置は様々で、壁面近傍の岩盤変位や亀裂の開口挙動に依存しているものと考えられる。

なお、ロックボルトの軸力レベルについては、想定しているロックボルトは TD21(φ21 ねじり棒鋼)であり、降伏荷重 $P_y=180\text{kN}$ 、破断荷重 $P_u=250\text{kN}$ であるので、解析値は高々 40kN 以内にあり、ロックボルト部材は応力的に問題の無い範囲にある。

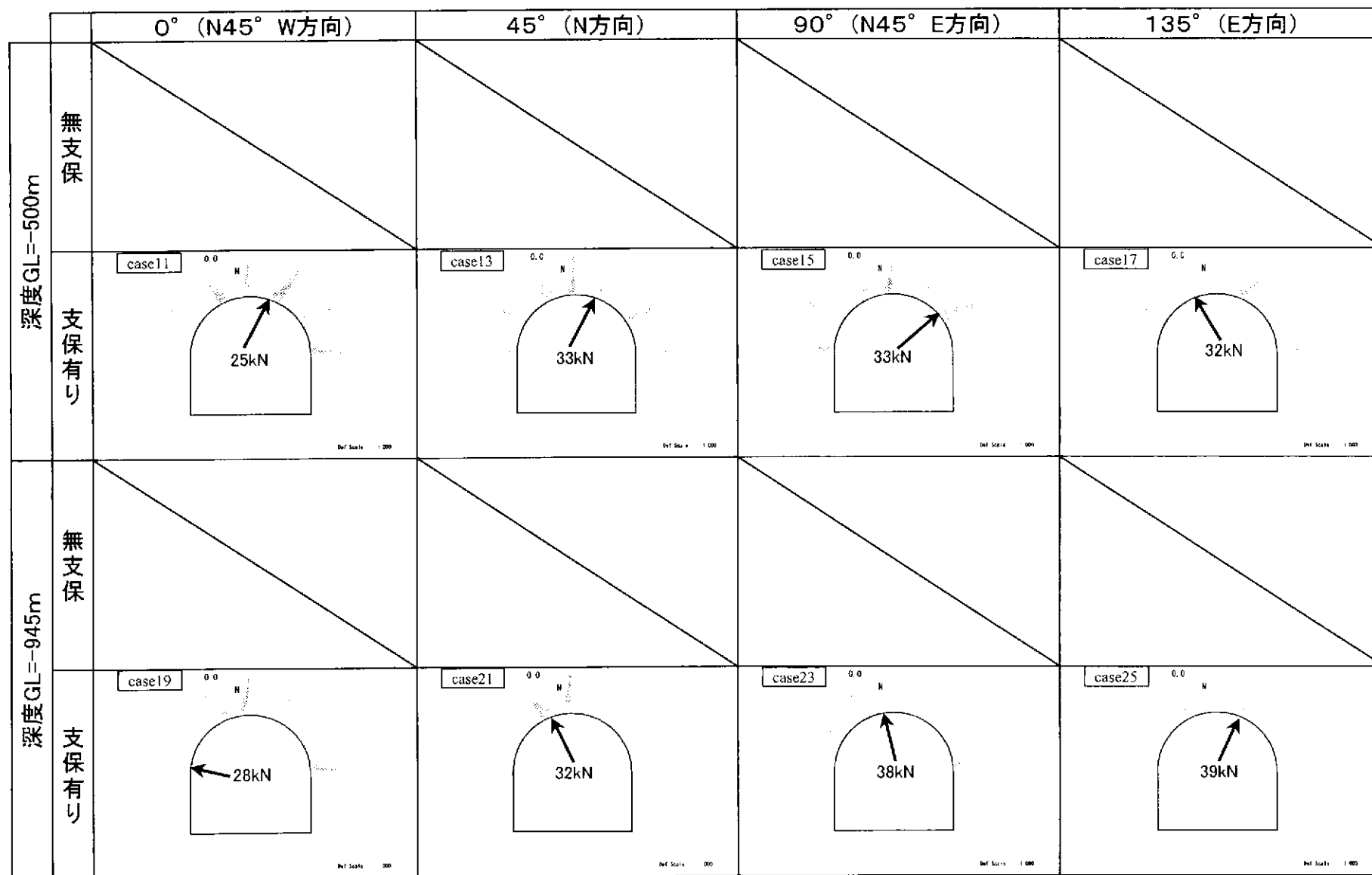


図4. 6. 18 横坑解析結果 ロックボルト軸力分布図(主応力方向ごとに坑軸展開)

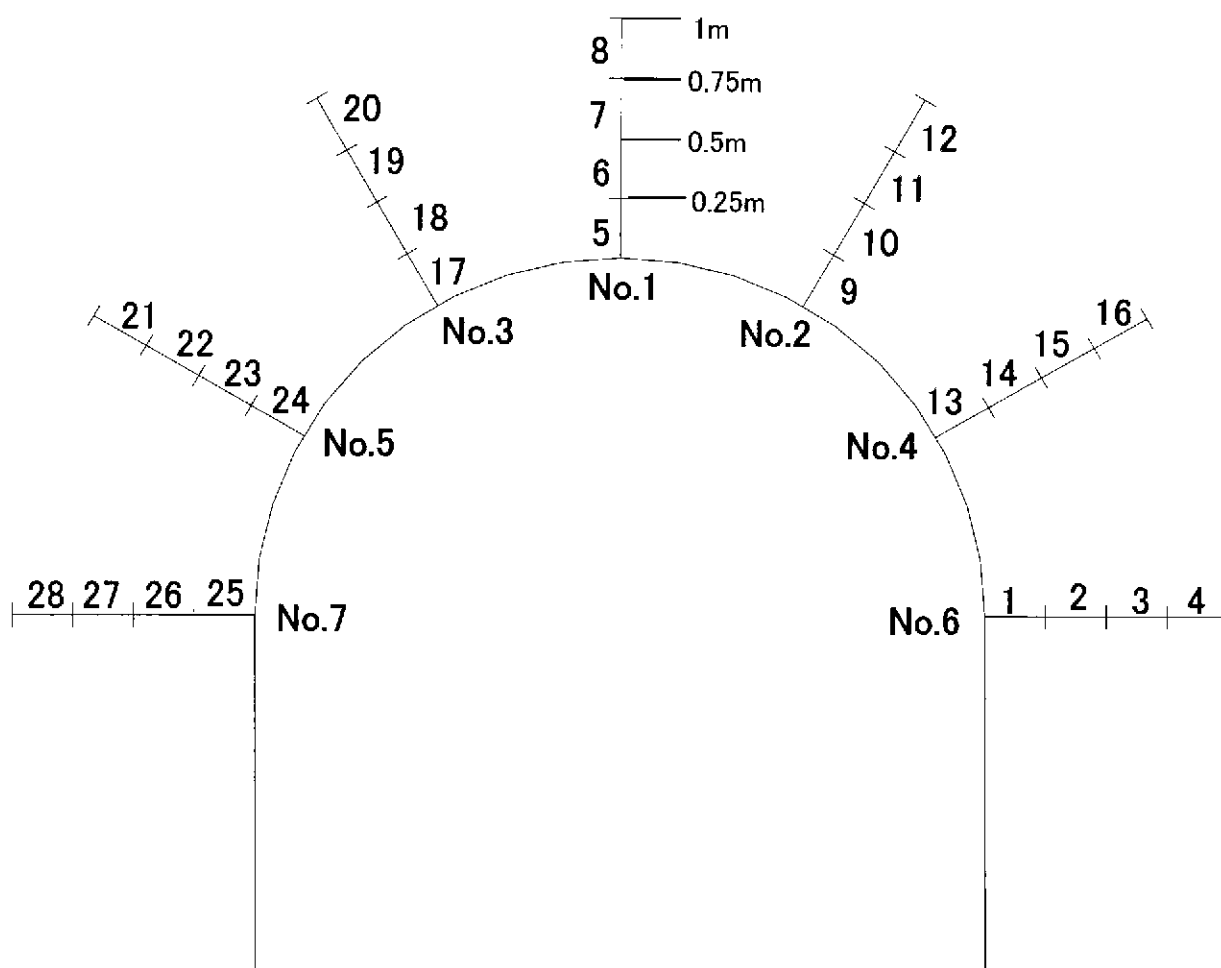


図4. 6. 19 横坑のロックボルト要素番号図

表4. 6. 3 横坑解析結果 ロックボルト軸力一覧表

ロックボルト軸力 単位:kN 引張:+

ボルト番号	深度		要素番号	深度GL-500m				深度GL-945m			
				0° (N45W方向)	45° (N方向)	90° (N45E方向)	135° (E方向)	0° (N45W方向)	45° (N方向)	90° (N45E方向)	135° (E方向)
				CASE11	CASE13	CASE15	CASE17	CASE19	CASE21	CASE23	CASE25
No.1 (天端中央)	①	0m-0.25m	5	16.25	20.68	30.25	18.34	26.40	25.50	37.85	25.60
	②	0.25m-0.5m	6	11.90	14.20	15.61	12.41	18.16	17.05	23.28	16.04
	③	0.5m-0.75m	7	9.66	12.83	8.92	10.23	11.57	13.87	13.65	12.12
	④	0.75m-1m	8	7.35	11.02	6.40	8.13	8.03	10.60	8.33	9.39
No.2 (天端右側)	①	0m-0.25m	9	25.40	33.33	25.93	29.93	20.03	27.53	36.85	39.33
	②	0.25m-0.5m	10	17.03	19.55	16.65	16.04	16.13	18.34	24.20	22.33
	③	0.5m-0.75m	11	11.54	10.49	12.65	8.98	14.25	11.62	14.52	10.94
	④	0.75m-1m	12	7.65	5.93	9.19	5.98	12.12	8.38	9.19	7.19
No.3 (天端左側)	①	0m-0.25m	17	18.83	30.60	30.63	32.35	28.03	32.10	26.03	30.83
	②	0.25m-0.5m	18	12.42	20.57	23.49	21.58	16.67	19.62	17.62	21.14
	③	0.5m-0.75m	19	7.77	12.45	16.64	11.57	11.59	11.13	14.83	16.50
	④	0.75m-1m	20	5.48	7.48	11.28	7.30	7.39	6.89	11.97	11.10
No.4 (側壁右上)	①	0m-0.25m	13	20.54	20.42	32.68	21.08	22.96	17.99	24.99	25.73
	②	0.25m-0.5m	14	14.15	16.87	24.99	16.02	17.33	14.61	19.37	18.72
	③	0.5m-0.75m	15	11.04	16.43	17.83	14.89	12.70	12.03	16.72	16.18
	④	0.75m-1m	16	8.92	12.20	13.19	12.40	9.76	10.25	15.90	15.12
No.5 (側壁左上)	①	0m-0.25m	24	9.13	12.09	17.93	14.18	14.39	12.45	22.43	18.45
	②	0.25m-0.5m	23	9.13	12.09	17.93	14.18	14.39	12.45	22.43	18.45
	③	0.5m-0.75m	22	7.94	13.00	18.43	16.03	11.19	11.02	16.19	16.21
	④	0.75m-1m	21	6.85	11.70	16.00	16.18	10.28	9.40	13.01	15.39
No.6 (側壁左水平)	①	0m-0.25m	1	16.95	21.49	20.96	22.40	22.15	14.60	33.25	37.28
	②	0.25m-0.5m	2	14.18	15.29	19.06	15.53	19.69	13.63	29.78	28.48
	③	0.5m-0.75m	3	11.31	13.99	18.80	14.38	15.85	12.65	19.87	20.91
	④	0.75m-1m	4	9.13	11.97	17.54	12.42	12.47	11.03	13.92	14.00
No.7 (側壁右水平)	①	0m-0.25m	25	12.62	20.57	26.23	23.31	28.10	15.08	29.33	32.25
	②	0.25m-0.5m	26	10.81	19.67	24.80	22.54	24.59	13.66	27.48	29.23
	③	0.5m-0.75m	27	10.16	14.13	17.26	15.29	17.45	12.36	22.17	20.85
	④	0.75m-1m	28	8.63	10.14	13.62	10.79	10.74	10.64	15.63	13.30

各解析ケースでの最大値

4. 7 MBC モデルの予測解析のまとめ

4. 7. 1 立坑解析結果のまとめ

立坑掘削解析結果を深度ごとに以下にまとめる。

①深度 200m

支保工（覆工、鋼製支保工）の有無による解析結果の違いが見られないため、以下では無支保の解析結果についてまとめを示す。

- ・変形は等方的であり、最大変位は壁面で 1.7mm である。
- ・主応力は、坑道掘削により壁面近傍で最大主応力方向が周方向になっている。
- ・亀裂の開口は、坑道の北側及び南側壁面で奥行き方向に約 2m の範囲で生じるが、開口量は最大でも 0.01mm である。
- ・安全率が 3 以下の領域は、坑道を中心として掘削壁面から奥行き方向に 2～3m で広がっている。ただし、安全率 1 を下回る領域は無い。
- ・亀裂の開口によって等価透水係数が増加する領域は、亀裂開口分布と整合する。岩盤の透水増加は 1 桁以下である。
- ・亀裂の開口による東西、南北、最大主応力方向の等価弾性係数の変化は 5% 以下である。
- ・覆工コンクリートに発生する圧縮応力は、最大 0.98MPa、鋼製支保工に発生する圧縮応力は最大 59.2MPa である。ただし、場所による変化は少ない。

②深度 500m

支保工（覆工、鋼製支保工）の有無による解析結果の違いが見られないため、以下では無支保の解析結果についてまとめを示す。

- ・変形は北西～南東方向に扁平した形状であり、最大変位は壁面の北西、南東部で約 2.8mm である。
- ・主応力は、坑道掘削により壁面近傍で最大主応力方向が周方向になっている。
- ・主に開口する亀裂は、亀裂セット 1（N41E 方向）と亀裂セット 2（N87W 方向）である。その開口領域は、各亀裂セットの方向に垂直な方向であり、かつ壁面奥行き方向に 2～3m の範囲である。開口量は最大でも 0.01mm である。
- ・安全率が 3 以下の領域は、掘削壁面から北西～南東に扁平した形状で広がっている。その領域は、壁面奥行き方向に最大 4m である。ただし、安全率 1 を下回る領域は無い。
- ・亀裂の開口によって等価透水係数が増加する領域は、亀裂開口分布と整合する。岩盤の透水係数の増加は最大 1 桁である。
- ・亀裂の開口により、東西方向の等価弾性係数は、坑道の東側及び西側壁面近傍で最大

50%低下している。南北方向の等価弾性係数は、北側及び南側壁面近傍で最大 50% 低下している。しかし、主応力方向の等価弾性係数は、ほとんど変化していない。

- ・覆工コンクリートに発生する圧縮応力は北北西部及び南南東部で最大 1.72MPa、鋼製支保工に発生する圧縮応力は北北東部及び南南西部で最大 92.6MPa である。

③深度 945m

- ・変形は北北西～南南東方向に扁平した形状であり、最大変位は壁面の北西、南東部で発生し、無支保のケースで 35.5mm、覆工のみのケースで 34.2mm、覆工と鋼製支保工の両方のケースで 33.4mm である。
- ・主応力は、坑道掘削により壁面近傍で最大主応力方向が周方向になっている。ただし、初期応力の異方性が極端であるため、掘削壁面から北西および南東部方向に引張応力が生じている。
- ・主に開口する亀裂は、亀裂セット 1 (N10E 方向) と亀裂セット 3 (N88W 方向) である。亀裂セット 1 は解析領域全域にわたり 0.1mm の開口を生じている。亀裂セット 2 は立坑坑道壁面の南部、北部において奥行き方向に約 3m の範囲で生じている。支保工の有無による開口分布の違いはあまり見られなかった。
- ・安全率が 3 以下の領域は、掘削壁面から北西と南東の奥行き方向と北北東と南南西の奥行き方向の 4 方向に 7～8m の範囲で広がっている。北西および南東方向では、引張破壊を生じ、安全率 1 を切っている。支保工の有無による安全率分布の違いはあまり見られなかった。
- ・亀裂の開口によって等価透水係数が増加する領域は、亀裂開口分布と整合する。岩盤の透水係数の増加は最大 2 桁である。支保工の有無による岩盤の透水係数の違いはあまり見られなかった。
- ・亀裂の開口による東西方向の等価弾性係数は、解析領域全域にわたり約 10%低下している。南北方向の等価弾性係数は、北側及び南側壁面近傍で約 10%低下している。主応力方向の等価弾性係数は、ほとんど変化していない。支保工の有無による等価弾性係数変化の違いはあまり見られなかった。
- ・覆工コンクリートに発生する圧縮応力は、東部及び西部で最大 8.53MPa、鋼製支保工に発生する圧縮応力は、東部及び西部で最大 972.6MPa である。
- ・支保工（覆工、鋼製支保工）の有無による解析結果の違いはほとんど見られない。

4. 7. 2 横坑解析結果のまとめ

横坑掘削解析結果を深度ごとに以下にまとめる。

①深度 500m

支保工（吹付けコンクリート、ロックボルト）の有無による解析結果の違いが見られないため、以下では無支保の解析結果についてのまとめを示す。

- ・展開方向によらず、坑道の鉛直壁面の水平方向変位が卓越する変形形状を示す。各展

開方向における最大変位の範囲は 0.79～1.45mm である。また、初期応力の最大主応力方向から 90° の展開方向が最も変位が大きい。

- ・主応力分布は、両隅角部において応力が乱れるが、展開方向ごとの結果には差異は見られない。
- ・亀裂の開口分布は、展開方向により大きく異なる。最大主応力方向に対し、0° 方向に掘削した場合が亀裂の開口領域が最も小さく、90° 方向が最も大きい。ただし、最大開口量は 0.01mm である。
- ・安全率が 3 以下の領域は、展開方向によらず壁面から奥行き 2m である。天端、両スプリングライン近傍、底盤が安全率の低下する領域であるが、安全率 1 を下回ることはない。
- ・亀裂の開口によって等価透水係数が増加する領域は、開口分布と整合する。岩盤の透水係数の増加は最大で 2 桁である。
- ・亀裂の開口により、東西方向の等価弾性係数が坑道の東側及び西側壁面で最大 50% 低下している。南北方向の等価弾性係数も、北側及び南側壁面で最大 50% 低下している。しかし、主応力方向の等価弾性係数は、ほとんど変化していない。
- ・吹付けコンクリートに発生する応力は、最大で 1.8MPa、ロックボルトに発生する軸力は最大 33kN である。

②深度 945m

支保工（吹付けコンクリート、ロックボルト）の有無による解析結果の違いが見られないため、以下では無支保の解析結果についてのまとめを示す。

- ・展開方向によらず、坑道の鉛直壁面の水平方向変位が卓越する変形形状を示す。各展開方向における最大変位の範囲は 0.96～1.42mm である。また、初期応力の最大主応力方向から 90° の展開方向が最も変位が大きい。
- ・主応力分布は、両隅角部において応力が乱れるが、展開方向ごとの結果には差異は見られない。
- ・亀裂の開口分布は、展開方向により大きく異なる。最大主応力方向に対し、45° 方向に掘削した場合が亀裂の開口領域が最も小さく、90° と 135° 方向が最も大きく、横坑周辺全域で開口している。最大開口量は 0.01mm である。
- ・安全率が 3 以下の領域は、展開方向によらず壁面から奥行き 3m である。天端、両スプリングライン近傍、底盤の安全率が低下する領域であるが、安全率 1 を下回ることはない。
- ・亀裂の開口によって等価透水係数が増加する領域は、開口分布と整合する。岩盤の透水係数の増加は最大で 1 桁である。
- ・亀裂の開口により、東西方向の等価弾性係数が坑道の東側及び西側壁面で最大 50% 低下している。南北方向の等価弾性係数も、北側及び南側壁面で最大 50% 低下して

いる。しかし、主応力方向の等価弾性係数は、ほとんど変化していない。

- ・吹付けコンクリートに発生する応力は、最大で 1.9MPa、ロックボルトに発生する軸力は最大で 39kN である。

5. 解析結果の総合的解釈・評価

5. 1 岩盤モデルの構築と 3 次元解析結果の評価

研究サイト周辺の 3 次元初期応力場の推定及び研究坑道掘削解析の初期応力設定を目的とし、正馬様用地の岩盤力学モデルを既存の概念モデルに基づき、下記に示すように構築した。

- ・ MIU-2 を中心とし、東西 1km×南北 2.3km×深度 1.5km の解析モデルを作成した。岩盤部はソリッド要素、月吉断層中心部はジョイント要素としてモデル化し、断層部で応力の不連続が生じるようにした。Zone1 と Zone2 の境界、Zone2 と Zone3 の境界に薄層要素を設け、各 Zone 間の応力が不連続になるようにモデル化した。
- ・ 岩盤物性は室内岩石試験結果を岩盤の弾性波速度を用いて低減した。
- ・ 断層部の物性はジョイントせん断試験結果、既存文献から設定した。
- ・ 初期応力は調査用ボーリング孔（MIU-1～3、AN-1）で計測された初期応力を外力として、解析モデルに与えた。

以上のモデル化の結果、正馬様用地の三次元初期応力状態（広域応力場の方向、調査用ボーリング孔における深度方向の応力状態）を概ね再現することができた。このため、本応力解析結果から MBC モデル解析断面の応力値を設定することとした。

5. 2 MBC モデルによる予測解析の評価

5. 2. 1 立坑解析結果の評価

立坑解析は、深度ごとの挙動を把握するために、深度 200m、500m、945m の 3 つのレベルについての検討を行った。しかし、深度 945m の断層部における解析は、立坑は深度 900m 付近で断層破碎帯を交差するため、他の深度の解析結果と単純に比較はできない。そこで、ここでは深度 200m と 500m の解析結果と深度 945m の解析結果を分けて評価する。

(1) 岩盤挙動の特徴と評価

深度 200m、500m では、坑道周辺の岩盤は花崗岩であり弾性係数が約 50,000MPa と堅硬なため、立坑掘削による変形は小さく、変位量は最大でも深度 200m で 1.7mm（坑道壁面）、深度 500m で 2.8mm（坑道壁面の北西及び南東部）であった。変形挙動は、初期応力を反映した結果となっており、深度 200m では等方的な変形、深度 500m では北西～南東に扁平した形状で変形している。また、亀裂の開口量も、深度 200m では坑道の北側及び南側壁面で最大 0.01mm、深度 500m では、坑道周辺に奥

行き 2～3m の範囲で最大 0.01mm であり、あまり開口していない。

深度 945m では、立坑の周辺岩盤は断層破碎帯であり、弾性係数が約 3,500MPa と設定しているため、深度 200m、500m と比べ変位は大きく、変形量は最大で 3cm であった。亀裂開口に関しては、N10E 方向の亀裂セットが解析領域全体で 0.1mm の開口を生じている。これは、初期応力状態が極端に偏圧（最大主応力方向が N17W の一軸状態）のため、N10E 方向の亀裂セットが開口しやすいからである。また、同様の理由で掘削壁面近傍の北西および南東部では引張応力が生じている。

(2) 坑道周辺の破壊領域の評価

深度 200m では、初期応力が等方的であるため、安全率が 3 以下の領域は坑道を中心として掘削壁面から奥行き方向に 2～3m で広がっている。ただし、破壊強度が大きいため安全率 1 を下回る領域は無い。次に、深度 500m では、最大主応力方向が N45W 方向であり、やや偏圧であるため、安全率が 3 以下の領域は掘削壁面から北東～南西の奥行き方向に 3～4m で広がっている。ただし、安全率 1 を下回る領域は無く、基質岩盤部は十分安全である。

深度 945m では、安全率が 3 以下の領域は、掘削壁面から北西～南東の奥行き方向と北北東～南南西の奥行き方向の 2 方向について 7～8m と広範囲な領域である。また、北西および南東部では、(1) で記述したように引張破壊を生じているため、安全率 1 を下回っており、基質岩盤は初期応力状態から破壊に近い状態と言える。

(3) 坑道周辺岩盤への物性変化の評価

① 等価弾性係数

深度 200m では、亀裂の開口による東西、南北、最大主応力方向の等価弾性係数の低下は 5% 以下である。これは、深度 200m では、亀裂セットが N89E 方向の 1 種類のみであり、開口領域も開口量も小さいためと考えられる。次に、深度 500m では、東西方向の等価弾性係数は坑道の東側及び西側側面近傍で最大 50% 低下している。同様に、南北方向の等価弾性係数は、北側及び南側壁面近傍で最大 50% 低下している。これは、坑道周辺岩盤の等価弾性係数が、亀裂の開口によって亀裂に垂直な方向の等価弾性係数が低下するためであると考えられる。

深度 945m では、東西方向の等価弾性係数は、解析領域全域にわたり約 10% 低下している。これは、N10E 方向の亀裂セット 1 の開口による影響と考えられる。また、南北方向の等価弾性係数は、北側及び南側壁面近傍で約 10% 低下している。これは、N88W 方向の亀裂セット 3 の開口による影響と考えられる。

②等価透水係数

亀裂の開口による等価透水係数の変化は、亀裂の開口量をもとに計算するため、亀裂の開口分布とほぼ整合している。

深度 200m では、亀裂開口による透水係数の変化は、亀裂開口量及び分布が小さいため、1 桁以下の変化であった。500m では透水係数は、壁面から奥行き 2m の範囲で最大 1 桁増加する。これは、主に亀裂セット 1 及び 3 の開口による影響と考えられる。

深度 945m では透水係数は、解析領域全域にわたり 1 桁増加する。これは、亀裂セット 1 の開口による影響と考えられる。また、北側及び南側壁面近傍においては、最大 2 桁増加する。これは、亀裂セット 3 の開口による影響と考えられる。

(4)立坑の覆工支保に関する評価

立坑の解析では支保の仕様を覆工コンクリートは巻厚 $t=400\text{mm}$ 、鋼製支保工は $\text{H}125\times 125$ 、設置ピッチ 1.3m とし、解析ケースとして支保の組合せを「覆工のみ」と「覆工+鋼製支保工」の 2 種類とした。

解析で得られた覆工コンクリートの応力（以下、覆工応力と略す）は、0.81～8.53MPa であり、立坑の深度が深くなるほど覆工応力は大きくなり、特に、深度 GL-945m のケースでは月吉断層破碎帯の影響を受けるため、覆工応力はひときわ大きな値となっている。しかも月吉断層破碎帯では応力が偏圧に作用しており、南北方向の応力が卓越しているため、立坑内で東側と西側の覆工応力が大きい。しかしながら、月吉断層破碎帯部においても覆工応力は設計強度の範囲内にあり、覆工コンクリートの健全性は確保されものと考えられる。

「覆工のみ」のケースと「覆工+鋼製支保工」のケースを比較すると、鋼製支保工の有無で覆工応力には明瞭な差異は見られない。さらに、素掘り(支保無し)のケースと比較しても、岩盤変位に明瞭な差異は認められない。

次に、鋼製支保工の応力については、立坑深度 GL-200m、GL-500m ともに、問題はないが、立坑深度 GL-945m では 972.6MPa が得られ、著しい応力が発生している。

立坑深度 GL-945m では断層破碎帯部で応力が偏圧の条件であることから、円周方向で応力分布は変化し、立坑内で東側と西側では著しい応力が発生しており、この部分では支保工材料の許容値を超過しており、施工中、支保工は降伏し、塑性変形を起こすものと考えられ変形抑制の効果を期待するのは難しい。ただし、鋼製支保工は、一次支保部材として、肌落ち防止やゆるみの進展抑制効果などの機能は十分発揮するものと思われる。さらに、支保工は降伏するものの、その後打設する覆工コンクリートの応力は許容値以内であるので、立坑の永久覆工の健全性は確保されると判断される。

以上の結果、立坑部における覆工コンクリートや鋼製支保工は解析的に明瞭な変位

抑制効果は認められないが、ゆるみの進展防止、肌落ち防止など長期的な立坑の安定に寄与するものであると考えられる。

5. 2. 2 横坑解析結果の評価

(1) 岩盤挙動の特徴と評価

坑道周辺の岩盤は花崗岩であり弾性係数が約 50,000MPa と堅硬なため、深度や展開方向に関わらず、横坑掘削による変形は小さく、変位量は最大でも横坑鉛直壁面で 1.4mm であった。深度 500m と 945m のどちらの場合も、横坑鉛直壁面で最大変位を生じる展開方向は、広域応力場の最大主応力方向 (N45W) に対し 90 度方向に展開したケースであった。これは横坑に対し水平方向に最大主応力が働くためと考えられる。開口分布も広域応力場の最大主応力方向 (N45W) に対し 90 度方向に展開したケースが最も開口する領域が広い。ただし、亀裂の開口は最大で 0.01mm であり、あまり開口していない。

(2) 坑道周辺の破壊領域の評価

深度 500m では、広域応力場の最大主応力方向 (N45W) に対し 90 度方向に横坑を掘削する場合が、安全率が 3 以下の領域が最も広い。これは、90° 方向に展開するケースは、横坑に対し水平方向に最大主応力が働くので軸差応力が最も大きいため、他ケースに比べ安全率が低下する領域が広いと考えられる。

深度 945m では、深度や展開方向に関わらず、安全率が 3 以下の領域は壁面から奥行き 3m 以内の領域である。これは、深度 500m に比べ、初期応力が等方的な応力状態に近いからと考えられる。どちらの深度についても、安全率 1 を下回る領域は無く、基質岩盤部は十分安全である。

(3) 坑道周辺岩盤の物性変化の評価

① 等価弾性係数

亀裂の開口による等価弾性係数の低下する領域は、深度や展開方向に依存しない事が分かった。例えば、東西方向の等価弾性係数は、どのケースにおいても坑道の東側及び西側側面近傍で低下する。ただし、東西方向の亀裂セットが存在しない場合を除く。これは、坑道周辺岩盤の等価弾性係数は、亀裂の開口によって亀裂に垂直な方向の等価弾性係数が低下するからである。

② 等価透水係数

亀裂の開口による透水係数の変化は、亀裂の開口量をもとに計算するため、亀裂の

開口分布とほぼ整合している。透水係数が最も増加する展開方向は、亀裂の開口と同様に、広域応力場の最大主応力方向（N45W）に対し 90 度方向に展開したケースである。また、各深度において亀裂開口量に大きな差がないにも関わらず、深度 500m では透水係数は最大で 1 桁増加するのに対し、深度 945m では最大 2 桁増加するのは、亀裂の開口による透水係数の変化が開口量の 3 乗に比例するためである。

(4) 横坑の支保の提案(坑道展開方向による力学的影響範囲の違い)

横坑の解析では素掘りの無支保のケースに加え、支保を考慮したケースでは、吹付コンクリート、ロックボルトを取上げた。支保の仕様は、吹付コンクリートは吹付厚 $t=50\text{mm}$ 、プレーン、ロックボルトは TD21($\phi 21$)、 $L=1,000\text{mm}$ 、断面内 7 本、奥行き打設ピッチ 2.5m とした。

解析で得られた吹付コンクリートの応力は 1.2~1.9MPa の範囲にあり、各ケースともに最大値は横坑の天端で発生している。

横坑の展開方向別には 0° 方向(N45W)、すなわち応力の最大主応力方向に配置したケースでは他のケースに比べ、吹付コンクリートの応力は小さい傾向にある。一方、90° 方向(N45E)すなわち応力の最大主応力方向に直交する方向に配置したケースでは他のケースに比べ、吹付コンクリートの応力は大きくなる傾向にある。なお、いずれのケースも解析値は高々 2.0MPa 以内にあり、吹付コンクリート部材は応力的に問題の無い範囲にある。

ロックボルト軸力は 25~39kN の範囲にあり、横坑の深度別には深度 GL-945m のケースの方が深度 GL-500m のケースよりロックボルトの軸力は多少大きくなる傾向にあるが、明瞭な差異は認められない。なお、ロックボルト軸力の解析値は高々 40 kN 以内にあり、ロックボルト部材は応力的に問題の無い範囲にある。

別項で示した「支保有」と「支保無」のケースで岩盤変位を比較すると、明瞭な岩盤変位の差異は認められなかった。

従って、今回の解析で扱った支保の仕様では岩盤変位の抑制効果は発揮されていないが、局所的な地質不良部、岩塊のゆるみ、キープロック、肌落ち防止などに対する支保効果は期待できると考えられる。

以上の結果から、横坑に関しては、比較的良好な岩盤であるため岩盤変位は僅かで、岩盤の破壊領域は 0.5m 以内である。このようなことから、基本的には肌落ち防止などを目的とした吹付けコンクリートとロックボルトによる支保で対処できるものと考えられる。

よって、解析的な検討に基づく横坑の支保の提案としては、肌落ち防止などを目的とした吹付けコンクリートとロックボルトであり、その仕様は吹付けコンクリートの吹付け厚 $t=50\text{mm}$ 、ロックボルトは TD21($\phi 21$)、 $L=1,000\text{mm}$ 、断面内 7 本(3 本、

4 本千鳥), 奥行き打設ピッチ 2.5m である。しかも, 坑道展開方向で力学的影響範囲に大きな相違がないので, いずれの展開方向に関しても同様な支保の仕様で良いと考えられる。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構 (2000) : “MIU-3 号孔における力学特性調査結果及び正馬様用地における土岐花崗岩体の岩盤力学概念モデル”, JNC, TN7420 2001-001
- 2) 核燃料サイクル開発機構 (2000) : “土岐花崗岩を対象としたジョイントせん断試験”, JNC, TJ7430 2001-002
- 3) 核燃料サイクル開発機構 (2000) : “超深地層研究所研究坑道における研究及び施工に関する検討”, JNC, TJ7400 2001-005(1)
- 4) 杉原弘造, 他 : “堆積軟岩での立坑掘削に伴う岩盤物性変化の現場計測による検討”, 資源と素材, Vol.116, p.821-830 2000
- 5) 岩盤分類 応用地質特別号, 日本応用地質学会, 1984
- 6) 吉田秀典, 堀井秀之 : “マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルと大規模空洞掘削の解析”, 土木学会論文集, No.535 III-34 p23-41 1996.3
- 7) 核燃料サイクル開発機構 “わが国の岩盤における亀裂特性とそのモデル化に関する研究 亀裂モデルの信頼性評価手法の開発” JNC TY-8400 2000-006
- 8) Elsworth, D. and Mase, C.R. : “Groundwater in Rock Engineering ”, Comprehensive Rock Engineering, Chapter8 Vol.2 p201-226 1992