

010

図書室

3次元応力場の同定手法に関する研究（その3）

（核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書）

2004年2月

社団法人 資源・素材学会

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下さい。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

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

平成 16 年 2 月

3 次元応力場の同定手法に関する研究（その 3）

水田義明¹、金子勝比古²、松木浩二³、菅原勝彦⁴、須藤茂韶⁵

要 旨

本委託研究の目的は、ある領域内の数箇所の試錐孔で得られた初期応力測定結果およびその領域の3次元地質構造に基づいて、3次元領域内の初期応力分布を評価し得る解析手法の確立を目的としている。この目的に到達すべく、平成13年度は研究対象領域および研究の進め方に関する方針など全体研究計画の検討を行い（水田、2002）、平成14年度は核燃料サイクル開発機構から提供される既存データの収集・整理に関する相互理解と各委員のモデルにそれらを取り組むためのすり合わせが行われた。また、平成14年度においては、以下に述べる具体的な研究成果についての報告がなされた（水田ほか、2003）。

まず、不均質モデルの逆解析における問題点が明らかにされた。つぎに、東濃鉱山・正馬様用地およびその周辺を対象領域として、有限要素法および有限差分法を用いて、与えられた地質データを取り込んだ三種類のモデルが構築された。また、境界要素法を用いたモデルの構築に備えて、不均質モデルに対する3次元境界要素法解析コードの開発が行われた。

本委託研究の最終年度である平成15年度は、平成15年度（2003年）9月と11月および平成16年（2004年）1月にそれぞれ1回づつ研究委員会を開催し、第1回委員会においては、花崗岩とその上部堆積層との境界面など、既存データから得られる限りの高精度化と、それを取り込んだ各モデルの構築に関する打ち合わせが行われた。第2回委員会においては、各委員による研究成果の中間報告が行われ、第3回委員会において今年度の研究成果の概要について報告がなされた。また、3次元モデルの今後の高精度化についての検討が行われた。平成14年度におけるモデルとの違いに注目して、各委員による研究内容を以下に要約する。

有限要素法による小領域モデル解析においては、東濃鉱山だけでなく、正馬様および東濃鉱山・正馬様についても3層モデルが構築され、それぞれのモデルに対する広域ひずみが解析された。また、実測データとのよい合致を得るために花崗岩を上部と下部に分けた修正モデルに対しても広域ひずみが求められた。

有限差分法による中領域モデル解析においては、地層境界を水平とせず、核燃料サイクル開発機構から与えられた実際の地層境界に対してモデルが構築され、広域応力が解析された。

境界要素法による中領域モデル解析においては、開発された不均質モデルに対する3次元境界要素法解析コードを用いて、5ケースのモデルが構築され、広域応力場が求められた。

有限要素法による大領域モデル解析においては、断層を含めたモデルが構築され、断層の滑りを考えに入れて、断層を含む不均一岩体の広域ひずみ場評価法を提案した。

また、3次元モデルの高度化、すなわち、3次元応力場の形成に果たす断層の形状・寸法・物性の役割を明らかにするために、最大せん断応力係数（水平面内の最大主応力と最小主応力の差をそれらの和で除した値）の3次元分布を出力することが、提案された。

本報告書は、（社）資源・素材学会が核燃料サイクル開発機構との委託研究契約により実施した研究の成果である。

機構担当課室：東濃地科学センター瑞浪超深地層研究所超深地層研究グループ

- 1 : 崇城大学工学部 環境建設工学科 教授
- 2 : 北海道大学大学院工学研究科 環境資源工学専攻 教授
- 3 : 東北大学大学院工学研究科 地球工学専攻 教授
- 4 : 熊本大学自然科学研究科 教授
- 5 : 社団法人資源・素材学会 嘴託

February 2004

Study on Improved Procedure for Determination of Three Dimensional Distributions of the Initial Rock Stresses (Third Report)

Yoshiaki Mizuta¹, Katsuhiko Kaneko², Koji Matsuki³, Katsuhiko Sugawara⁴ and Shigeki Sudo⁵

Synopsis

In the fiscal year of 2003, our committee achieved the following work items during the contract period, from September 3rd, 2003 to February 13th, 2004.

The more accurate numerical data with respect to the geological / geometrical conditions including the fault were provided from Tono Geoscience Center and the numerical models by Finite Element Method (FEM), Finite Difference Method (FDM) and Boundary Element Method (BEM) were built taking those strata data into account.

For small region modeling by FEM, three layers models, Shoumasama model and Tohnou-Shoumasama model, as well as Thonou Mine model, were constructed, and each strain state at the far field boundary was determined. In order to get better agreement in local stress states with the measured values, a far field strain state was determined to the modified model in which material properties of upper granite and lower granite are different.

In intermediate region modeling by FDM, actual strata data was taken into account, whereas strata boundary was assumed to be horizontal in former modeling, and far field stress field was analyzed.

Intermediate region modeling by BEM was also carried out and far field stress state was determined.

In wide region modeling by FEM, the fault was built in the model and fault slip was taken into account, and evaluation of strain state at the far field boundary was carried out for inhomogeneous rock including fault.

It was proposed to output three-dimensional distribution of the maximum shear stress coefficients in order to advance three-dimensional modeling. It will make clear effect of shape, scale and property of the fault on stress state characteristic.

This report describes minutely the results of the studies mentioned above.

This works was preformed by the Mining and Materials processing Institute of Japan under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

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

1:Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Sojo University

2:Division of Environment & Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University

3:Department of Geoscience and Technology, Graduate School of Engineering, Tohoku University

4:Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University

5:The Mining and Materials Processing Institute of Japan

3次元応力場同定手法に関する研究（その3）

目 次

1. はじめに	1
2. 研究目的	1
3. 研究内容	1
3. 1 3次元モデルの今後の高度化における基本問題に関する考察	3
3. 1. 1 緒言	3
3. 1. 2 断層による応力擾乱とフリクションレス断層モデル	3
3. 1. 3 地殻応力場への浅所断層群の影響	5
3. 1. 4 側圧係数 κ と最大せん断応力係数 ξ	9
3. 1. 5 結言	13
3. 2 層構造地盤における応力場の特徴とその同定法	14
3. 2. 1 はじめに	14
3. 2. 2 広域ひずみおよび3次元応力場の解析方法	14
3. 2. 3 地層形状が応力場に及ぼす影響	17
3. 2. 4 広域ひずみおよび3次元応力場の同定	22
3. 2. 5 まとめ	36
3. 3 中領域モデル解析	37
3. 3. 1 解析手順	37
3. 3. 2 有限差分法による中領域モデル解析	39
3. 3. 3 境界要素法による中領域モデル解析	61

3. 3. 4 まとめ	67
3. 4 断層を含む不均一岩体の広域応力場評価法	83
3. 4. 1 断層のモデル化	84
3. 4. 2 境界条件の設定	88
3. 4. 3 有限要素法による変位型境界条件の決定法	90
3. 4. 4 小規模モデルによる断層の影響評価	95
3. 4. 5 広域応力場の評価のための東濃地区のモデル化	107
4. まとめ	112
5. 今後の課題	113
6. 参考文献	114

図表目次

表 3.2.1	岩盤物性値	26
表 3.2.2	3層モデルによる広域ひずみの解析結果	29
表 3.2.3	修正モデルの岩盤物性値	31
表 3.2.1	修正モデルによる広域ひずみの解析結果	31
表 3.3.1	設定された広域応力場	38
表 3.3.2	FLAC ^{3D} 解析に用いたモデルの概要	39
表 3.3.3	FLAC ^{3D} 解析およびBEM解析に用いた岩盤物性値	39
表 3.3.4	試錐孔の孔口位置および超深地層研究所立坑の坑口位置	40
表 3.3.5	FLAC ^{3D} による推定された地殻応力場	40
表 3.3.6	BEM解析に用いたモデルの概要	61
表 3.3.7	BEMにより推定された地殻応力場（7応力成分）	63
表 3.3.8	超深地層研究所主立坑沿いの11点における3次元応力場	63
表 3.3.9	BEMにより推定された地殻応力場（ $\nu=0.5$ ）	65
表 3.3.10	BEMにより推定された地殻応力場（11応力成分）	65
表 3.3.11	BEMにより推定された地殻応力場 (軟弱地層と基盤との境界面に死荷重)	66
表 3.3.12	BEMにより推定された地殻応力場（月吉断層あり）	66
表 3.4.1	解析に用いた岩体と断層の力学的性質	109
図 3.1.1	応力測定地点の平面図	3
図 3.1.2	測定結果 水面内の主応力分布	4
図 3.1.3	フリクションレス断層モデルによる変位不連続法2次元解析結果	4
図 3.1.4	地殻応力測定結果	5
図 3.1.5	平均水平応力（ σ_{Hav} ）と深度Zの関係 (弾性球殻理論の沈下Uの値によるグループ分け)	6
図 3.1.6	鉛直応力（ σ_v ）のバラツキ（平均値 $\sigma_{v\text{mean}}$ からの偏差）	6
図 3.1.7	フリクションレス浅所断層群モデル	6
図 3.1.8	変位場解析例（フリクションレス浅所断層群による応力擾乱）	7
図 3.1.9	応力場解析例（フリクションレス浅所断層群による応力擾乱）	8
図 3.1.10	鉛直応力のバラツキ（解析結果）	8
図 3.1.11	水平応力のバラツキ（解析結果）	9
図 3.1.12	異方性球殻モデル	10
図 3.1.13	鉛直応力係数 $\sigma_v = -\gamma Z$ と平均応力 σ_m の関係	11
図 3.1.14	最大せん断応力係数 ξ の偏差応力 σ_d 依存性	12
図 3.1.15	異方性球殻モデル解析に用いられたヤング率の代表値Eと 平力応力 σ_m の関係	13
図 3.2.1	単純な地盤構造に対する解析モデル	17
図 3.2.2	均質地盤における鉛直側線上の応力分布	18

図 3.2.3	水平構造地盤における鉛直側線上の応力分布	18
図 3.2.4	基盤が谷構造の場合の応力分布（重力が作用する場合）	20
図 3.2.5	基盤が谷構造の場合の応力分布 (谷垂直方向 : Y 方向の広域ひずみが作用する場合)	20
図 3.2.6	基盤が谷構造の場合の応力分布 (谷平行方向 : X 方向の広域ひずみが作用する場合)	21
図 3.2.7	基盤が谷構造の場合の応力分布 (XY 方向の広域せん断ひずみが作用する場合)	21
図 3.2.8	東濃鉱山の地表面および地層境界面の標高分布	23
図 3.2.9	東濃鉱山の試錐孔位置	23
図 3.2.10	正馬様用地の地表面および地層境界面の標高分布	24
図 3.2.11	正馬様用地の試錐孔位置	24
図 3.2.12	東濃鉱山の正馬様用地を含む 2 km 四方の領域の地表面 および地層境界面の標高分布	25
図 3.2.13	東濃鉱山と正馬様用地の位置関係	25
図 3.2.14	東濃鉱山モデル	27
図 3.2.15	正馬様モデル	27
図 3.2.16	東濃鉱山・正馬様モデル	28
図 3.2.17	東濃鉱山モデルによる解析結果と現場計測結果との比較 (TM-1)	30
図 3.2.18	正馬様モデルによる解析結果と現場計測結果との比較 (AN-1)	30
図 3.2.19	東濃鉱山・正馬様モデルによる解析結果と現場計測結果 との比較	32・33
図 3.2.20	同定された応力分布	34・35
図 3.3.1	FLAC ^{3D} による不均質モデルの要素分割	39
図 3.3.2(a)	試錐孔 00SE-03 (全側点が花崗岩内) で得られた 測定データから抽出された入力データ	42
図 3.3.2(b)	試錐孔 98SE-01 (下部の 2 側点が花崗岩内) で得られた 測定データと測定データから抽出された入力データ	43
図 3.3.2(c)	試錐孔 99SE-02 (下部の 4 側点が花崗岩内) で得られた 測定データと測定データから抽出された入力データ	44
図 3.3.2(d)	試錐孔 AN-1 (上部 1 側点だけが軟弱地層内) で得られた 測定データと測定データから抽出された入力データ	45
図 3.3.2(e)	試錐孔 MIU-1 (全側点が花崗岩内) で得られた測定データと 測定データから抽出された入力データ	46
図 3.3.2(f)	試錐孔 MIU-2 (全側点が花崗岩内) で得られた測定データと 測定データから抽出された入力データ	47
図 3.3.2(g)	試錐孔 MIU-3 (全側点が花崗岩内) で得られた測定データと 測定データから抽出された入力データ	48
図 3.3.2(h)	試錐孔 TM-1 (下部の 1 点が花崗岩内) で得られた	

	測定データと測定データから抽出された入力データ	49
図 3.3.2(i)	試錐孔 TM-2 (下部の 4 点が花崗岩内) で得られた 測定データと測定データから抽出された入力データ	50
図 3.3.3(a)	試錐孔 00SE-03 沿いの 7 点について推定された水平面内 最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および 水平面内最大主応力の方向 θ	51
図 3.3.3(b)	試錐孔 98SE-01 沿いの 12 点について推定された水平面内 最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および 水平面内最大主応力の方向 θ	52
図 3.3.3(c)	試錐孔 99SE-02 沿いの 11 点について推定された水平面内 最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および 水平面内最大主応力の方向 θ	53
図 3.3.3(d)	試錐孔 AN-1 沿いの 14 点について推定された水平面内 最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および 水平面内最大主応力の方向 θ	54
図 3.3.3(e)	試錐孔 MIU-1 沿いの 10 点について推定された水平面内 最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および 水平面内最大主応力の方向 θ	55
図 3.3.3(f)	試錐孔 MIU-2 沿いの 10 点について推定された水平面内 最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および 水平面内最大主応力の方向 θ	56
図 3.3.3(g)	試錐孔 MIU-3 沿いの 9 点について推定された水平面内 最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および 水平面内最大主応力の方向 θ	57
図 3.3.3(h)	試錐孔 TM-1 沿いの 10 点について推定された水平面内 最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および 水平面内最大主応力の方向 θ	58
図 3.3.3(i)	試錐孔 TM-2 沿いの 9 点について推定された水平面内 最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および 水平面内最大主応力の方向 θ	59
図 3.3.4	超深地層研究所主立坑沿いの応力分布： 水平面内最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_2 および鉛直応力成分 σ_z と水平面内最大主応力の方向 θ	60
図 3.3.5	BEM による不均質モデルの要素分割	61
図 3.3.6	BEM による不均質モデルの要素分割 (月吉断層を含む)	62
図 3.3.7(a)	試錐孔 00SE-03 沿いの 10 点について推定された水平面内 最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および 水平面内最大主応力の方向 θ	68
図 3.3.7(b)	試錐孔 98SE-01 沿いの 12 点について推定された水平面内 最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および	

水平面内最大主応力の方向 θ	69
図 3.3.7(c) 試錐孔 99SE-02 沿いの 14 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ	70
図 3.3.7(d) 試錐孔 AN-1 沿いの 14 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ	71
図 3.3.7(e) 試錐孔 MIU-1 沿いの 10 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ	72
図 3.3.7(f) 試錐孔 MIU-2 沿いの 10 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ	73
図 3.3.7(g) 試錐孔 MIU-3 沿いの 9 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ	74
図 3.3.7(h) 試錐孔 TM-1 沿いの 13 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ	75
図 3.3.7(i) 試錐孔 TM-2 沿いの 13 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ	76
図 3.3.8 超深地層研究所主立坑沿いの応力分布： 水平面内最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_2 および鉛直応力成分 σ_z と水平面内最大主応力の方向 θ	77
図 3.3.9(a) 試錐孔 MIU-2 沿いの 10 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ	78
図 3.3.9(b) 試錐孔 MIU-3 沿いの 9 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ	79
図 3.3.10(a) 試錐孔 MIU-2 沿いの 10 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、および鉛直応力成分 σ_z と水平面内最大主応力の方向 θ (with 11 coefficients)	80
図 3.3.10(b) 試錐孔 MIU-3 沿いの 9 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、および鉛直応力成分 σ_z と水平面内最大主応力の方向 θ (with 11 coefficients)	81
図 3.3.11 試錐孔 TM-1 沿いの 13 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_2 、および鉛直応力成分 σ_z と水平面内最大主応力の方向 θ	82

図 3.4.1	貫通する断層を含む領域	83
図 3.4.2	ジョイント要素の垂直剛性 (K_n) とせん断剛性 (K_s)	85
図 3.4.3	(a) ジョイント要素と(b) 正規座標系	85
図 3.4.4	繰り返し計算におけるせん断剛性の修正	87
図 3.4.5	断層滑りを考慮した順解析におけるフロー図	93
図 3.4.6	断層滑りを考慮した逆解析全体のフロー図	94
図 3.4.7	断層滑りを考慮した逆解析における初期設定語のフロー図	96
図 3.4.8	小規模モデルおよび滑りを考慮した逆解析における 地圧データの採取点	97
図 3.4.9	断層滑りを考慮しない場合の順解析結果 (断層上の応力)	99
図 3.4.10	滑らない場合の順解析結果と逆解析結果の比較 (断層上の応力、Data 点 4)	99
図 3.4.11	滑りを考慮した順解析における繰り返し回数と 断層上の応力 ($\mu = 0.35$)	100
図 3.4.12	滑りを考慮した順解析による断層上の応力 ($\mu = 0.35, 0.4, 0.5$)	101
図 3.4.13	断層上の応力の逆解析結果と順解析との比較 ($\mu = 0.35$ 、Data 点 4)	102
図 3.4.14	断層上の応力の逆解析結果と順解析との比較 ($\mu = 0.4$ 、Data 点 4)	102
図 3.4.15	断層上の応力の逆解析結果と順解析との比較 ($\mu = 0.5$ 、Data 点 4)	103
図 3.4.16	逆解析における初期設定 (r_{in}) と断層上の応力の 評価誤差 (er_F) の関係 (Data 点 4)	104
図 3.4.17	逆解析における初期設定 (r_{in}) と注目領域内応力の 評価誤差 (er) の関係 (Data 点 3)	105
図 3.4.18	地圧データ採取法の断層上応力評価誤差 (er_F) に 及ぼす影響 (平均化手法 Av (0.9&1))	106
図 3.4.19	地圧データ採取法の注目領域内応力評価誤差 (er) に 及ぼす影響 (平均化手法 Av (0.9&1))	107
図 3.4.20	東濃地区の三次元構造	108
図 3.4.21	東濃地区のメッシュ分割図	110

1. はじめに

岩盤中に地下空洞を掘削する場合は、その設計及び施工の安全性確保のため岩盤の力学物性（弾性係数、ポアソン比等）とともに初期応力の情報が必要不可欠である。このため、この30年余りの間に幾多の初期応力測定手法が提案・改良され実用化に至っている。

ただし、既往の多数の研究事例において指摘されているように、測定された初期応力データは様々な要因（結晶レベルからプレートのレベルまでのスケールの異なる不連続の存在、岩石および岩盤の不均質性等）に起因して不均一であることが一般に知られている。

ところが、近年地下発電所あるいは地下石油備蓄基地等の大規模三次元地下構造物が建設されるようになっており、設計・施工の最適化あるいは安全性確保の観点から3次元的な初期応力の空間分布を定量的に評価するニーズが高まっている。

本研究は、このような背景を踏まえ、また、核燃料サイクル開発機構の東濃鉱山、正馬様用地の地下岩盤において数多くの応力測定が実施されていることから、その周辺の地下岩盤を有限要素法、有限差分法および境界要素法を用いてモデル化して、3種類のスケールにおける3次元初期応力分布を定量的に評価する手法を構築するものである。

2. 研究目的

本研究は、ある領域内の数箇所の試錐孔で得られた初期応力測定結果およびその領域の3次元地質構造に基づき、3次元領域内の初期応力分布を評価し得る解析手法の確立を目的とする。

3. 研究内容

本研究は、平成13年度から3カ年の研究期間で実施したものである。平成13年度は研究の初年度としてつぎに示す検討を行った。

- ・ 本研究実施に必要となる既存情報の整理・検討
- ・ 全体研究計画
- ・ 本研究の実施に適切と思われる解析手法の選定
- ・ 解析用データセットの作成

平成14年度は研究の第2年度として、下記の検討、解析および開発を実施した。

- ・ 不均質モデルの逆解析における問題点
- ・ 有限要素法による大領域モデル解析
- ・ 有限要素法による小領域モデル解析

- ・ 有限差分法による中領域モデル解析（地層境界が水平なモデル）
- ・ 不均質モデルに対する3次元境界要素法解析コードの開発

平成15年度は研究の最終年度として、断層を含むモデルについて下記の検討・解析・研究を実施した。

- ・ 3次元モデルの今後の高度化における基本的問題に関する考察
- ・ 有限要素法による小領域モデル解析（3層モデルを4層モデルに修正）
東濃鉱山モデル、正馬様モデル、および東濃鉱山・正馬様モデル
- ・ 中領域モデル解析（2層モデルおよび単層モデル）
有限差分法によるモデル、境界要素法によるモデル
- ・ 断層を含む不均一岩体の広域応力場評価法（2層モデル）
断層の滑りを考慮

3. 1 3次元モデルの今後の高度化における基本問題に関する考察

3. 1. 1 緒 言

3次元モデルの構築では、地質の形成史、プレートテクトニクスと地熱の影響、地質的不連続構造とその変形モード、岩盤の剛性構造などに関する深い理解が重要である。これらの重要性を明らかにするとともに、今後の3次元モデルの高度化に資するために、本報告では、深度方向に連続な半無限弾性地盤を仮定して行った、グローバルな地殻応力場の解明に関する研究に基づき、とくに、解析上での断層の取り扱いの問題、弾性球殻モデルによる試算、浅所断層群の影響と岩盤弹性係数の地圧依存性などについて考察するとともに、最大せん断応力係数などが3次元モデルの出力として重要なことを述べる。

3. 1. 2 断層による応力擾乱とフリクションレス断層モデル

断層のように地圧場に大きな影響を及ぼす地質構造因子を考慮して、3次元モデルを構築すべきであるが、それらの構成則の事前評価は極めて困難である。規模の大きな断層については、そのせん断剛性が周囲の岩盤に較べて極めて小さいことに着目すると、断層面に作用するせん断応力は無視できる程度に小さいと仮定できる。この考え方方に立つと、断層を摩擦係数が零である変位不連続面と見なした応力解析が現実的であると考えられる。これはフリクションレス断層モデルと呼ぶことができる。この特別なモデル化が有効であった事例を示す。

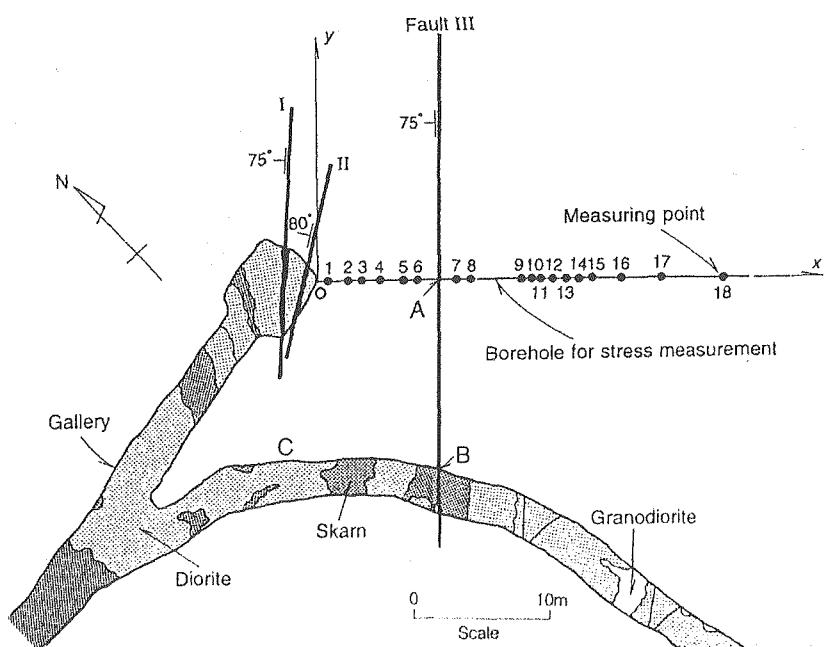


図 3.1.1 応力測定地点の平面図

坑道先端部のボーリング座から図中右向きのボアホールで数字が示す18点の応力解放法による応力測定が行われた。

紹介する事例は坂口ほか（1995）に詳しい。応力測定地点の平面図（図 3.1.1）は、18点の測定を行ったボアホールが断層 III と交差している様子を示している。測定結果の内、水平面内の応力分布（図 3.1.2）とフリクションレス断層モデルによる変位不連続法2次元解析結果（図 3.1.3）を比較して、良好な一致が認められた。水平面内の主応力の方向（主軸）は、断層面に近づくに従い、この地域の広域的主軸から次第に変化している。これは断層 III の影響であり、主軸は断層面に直交する。当然に、フリクションレス断層モデルは断層の不安定度の評価には直接役立たないが、断層端の応力集中度の評価や広域地圧場の傾向を理解する上で有用である。したがって、3次元モデル化において、断層端をモデル内に含ませるか否かで問題は大いに異なってくる。

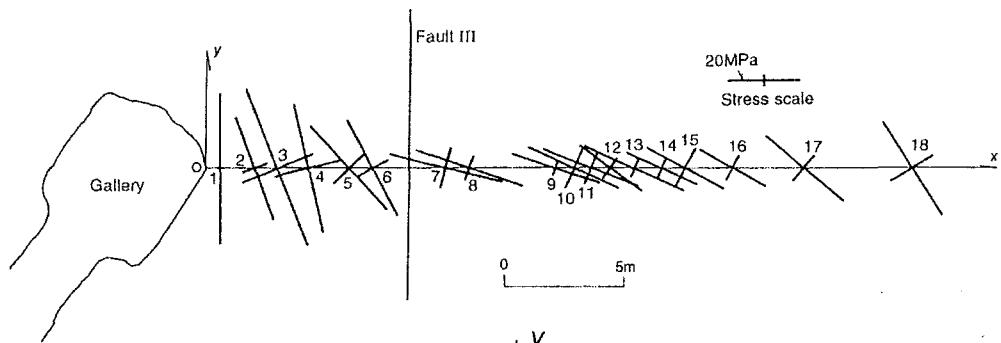


図 3.1.2 測定結果
水平面内の主応力分布

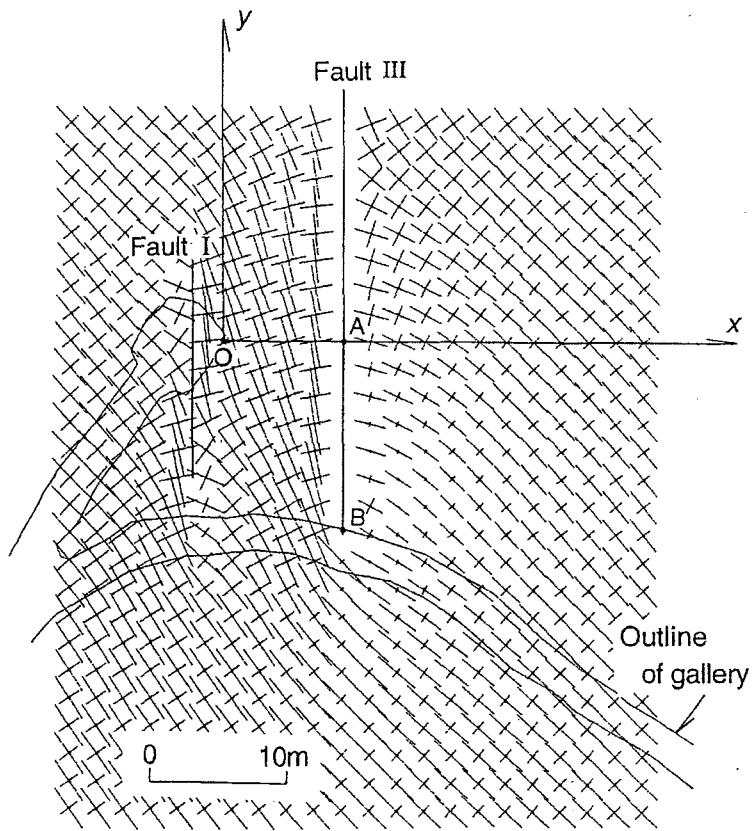


図 3.1.3 フリクションレス断層モデルによる変位不連続法2次元解析結果

3. 1. 3 地殻応力場への浅所断層群の影響

3次元モデルの構築に際しては、従来の地殻応力測定結果を総括し、得られた知見を役立てることが肝要である。地殻応力測定（図3.1.4）によると、限界線I及びIIが示すように、水平応力（ σ_{H1} , σ_{H2} ）の深度構造は単調ではない。たとえば、最大水平応力（ σ_{H1} ）の限界線Iは深度Z=800m～1000mでジャンプする。最大水平応力（ σ_{H2} ）の限界線IIは深度Z=200m～250mで大きくジャンプする。また、鉛直応力（ σ_v ）の分布には大きなバラツキ（平均値 $\sigma_{v,mean}$ からの偏差）が認められる。弾性球殻モデルにおける沈下変位Uの大きさによって、事例を図3.1.5のA～Eの5グループに区分すると、図3.1.6に破線で示すように、鉛直応力のバラツキは深度Z=1000m付近でピーカーを示し、グループBでバラツキが最小になる。これらを浅所断層群の影響として解釈した研究の内容は黄・菅原（1996）に詳しい。

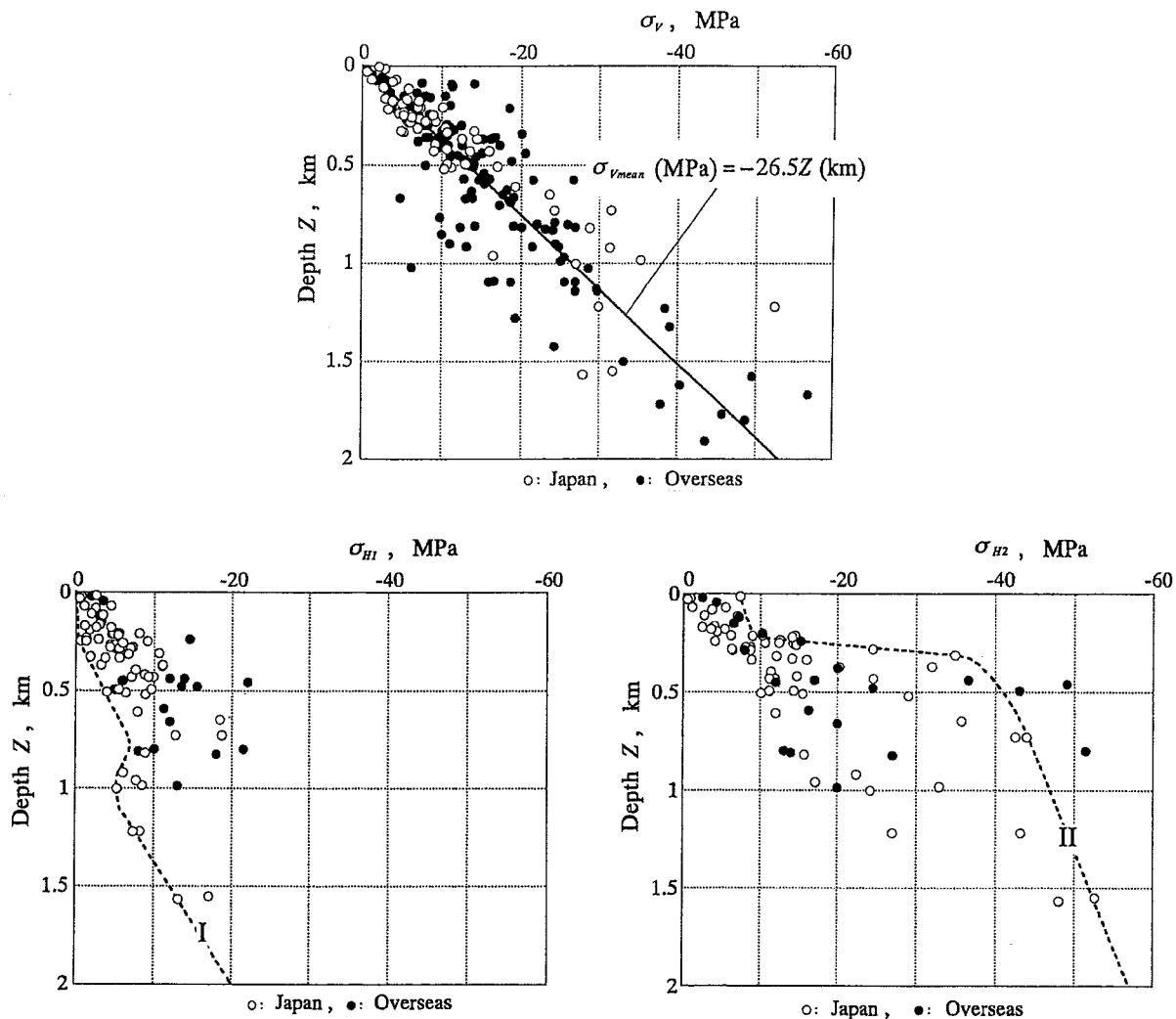


図3.1.4 地殻応力測定結果

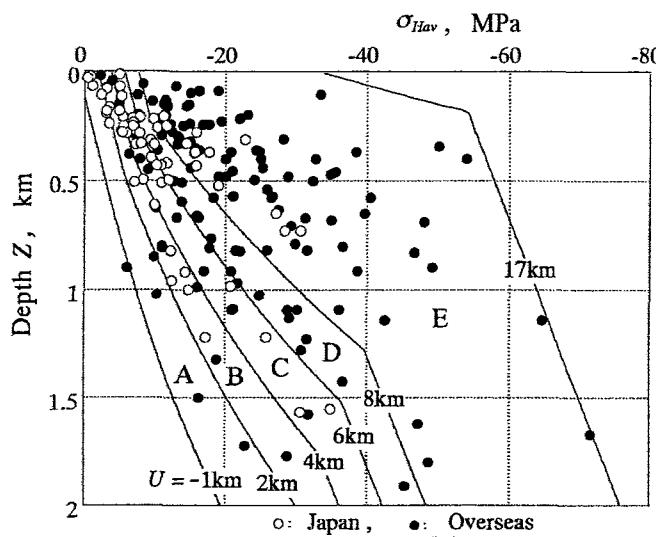


図 3.1.5 平均水平応力 (σ_{Hav}) と深度 Z の関係
(弾性球殻理論の沈下 U の値によるグループ分け)

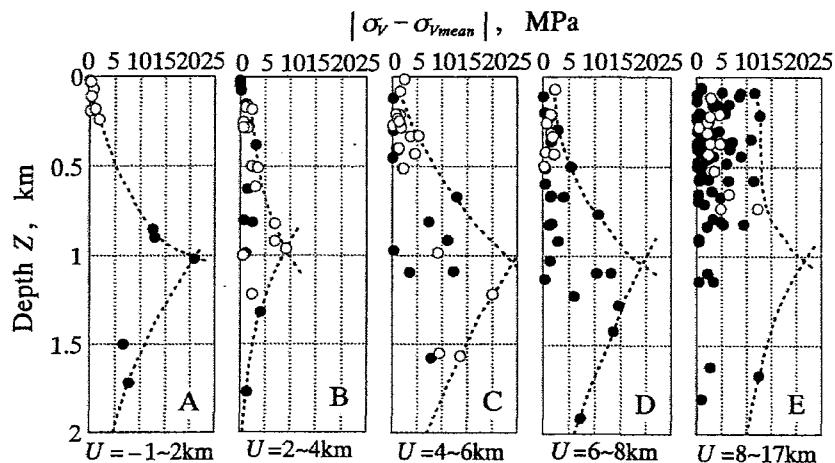


図 3.1.6 鉛直応力 (σ_v) のバラツキ (平均値 $\sigma_{v,mean}$ からの偏差)

次に、フリクションレス仮説による断層群モデル(図 3.1.7)について述べる。
断層は地表と一定間隔で斜めに交差し、深いものと浅いものからなる。

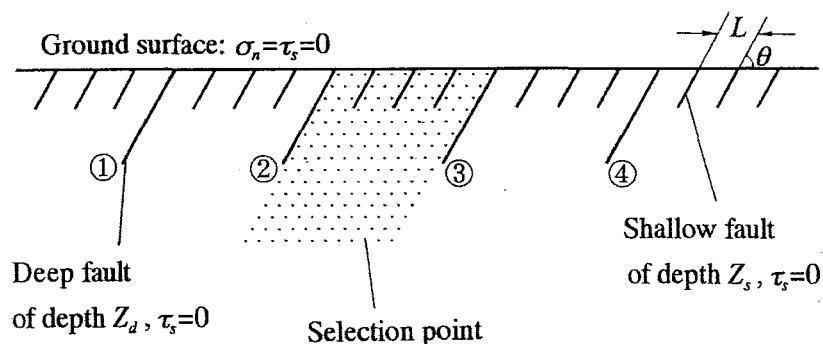


図 3.1.7 フリクションレス浅所断層群モデル

断層群モデルの地盤にはつきの初期応力場が作用し、断層面のせん断応力の解放により周辺弾性岩盤内に相応な応力擾乱が発生する。この変位不連続法による二次元応力解析の初期応力は、深度 Z に比例する初期鉛直応力：

$$\sigma_{V \text{ initial}} = \sigma_{V \text{ mean}} = -\gamma Z \quad (3.1.1)$$

と、地表で σ_0 となる初期水平応力：

$$\sigma_{H \text{ initial}} = \sigma_0 + 0.44\sigma_{V \text{ initial}}, \quad (3.1.2)$$

である。水平地表と交差する 2 種類の斜め平行浅所断層のフリクションレス挙動は σ_0 の値で異なる。すなわち、図 3.1.8(a) のように σ_0 の値が大きいと正断層のようなすべりにより応力場が擾乱される。反対に、図 3.1.8(b) のように σ_0 の値が小さいと逆断層のようなすべりにより応力場が大きく擾乱される。また、これらの中間に平行浅所断層が滑らない場合があり、これがグループ B の特徴を説明している。

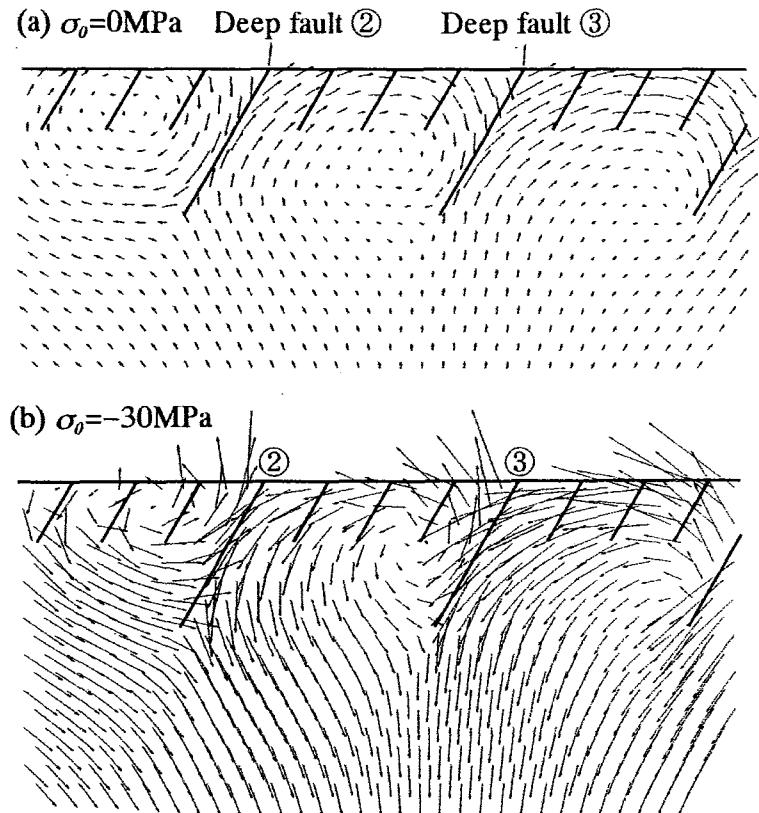


図 3.1.8 変位場解析例（フリクションレス浅所断層群による応力擾乱）
(図中の矢印は変位の方向と大きさを示す)

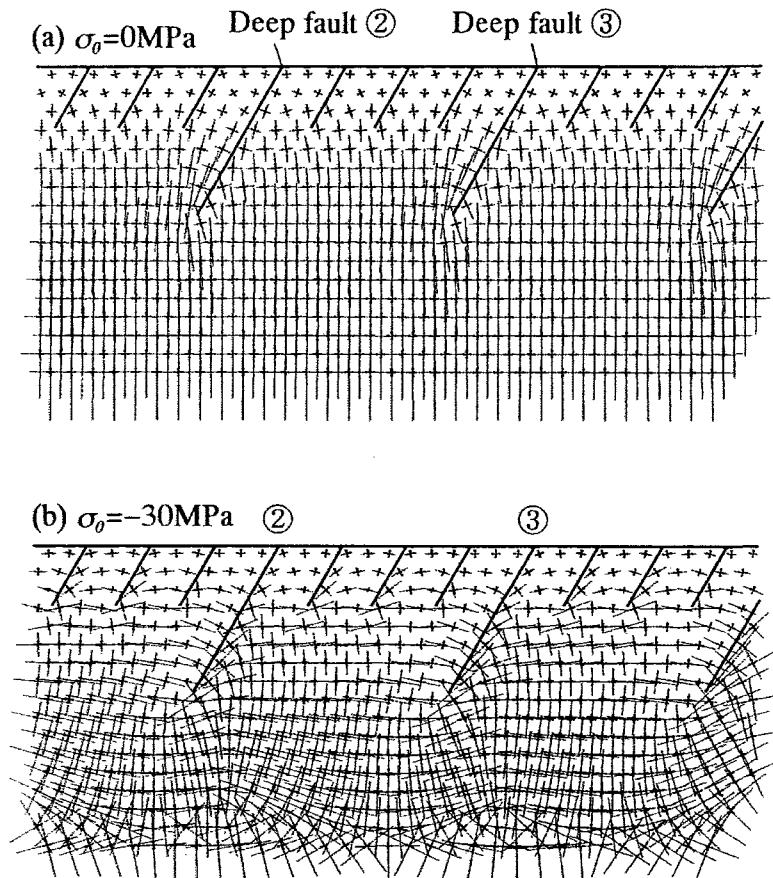


図 3.1.9 応力場解析例（フリクションレス浅所断層群による応力擾乱）
(図中の十字線は応力の方向と大きさを示す)

この研究では、解析領域内に正方等間隔で選点（図 3.1.7 参照）を設け、選点での解析応力値の全体と応力測定データの傾向とが比較された。たとえば、鉛直応力については、図 3.1.10 のように測定結果の傾向と良く似た分布が求められた。すなわち、断層の下端 1039m 付近でバラツキがピークを示した。

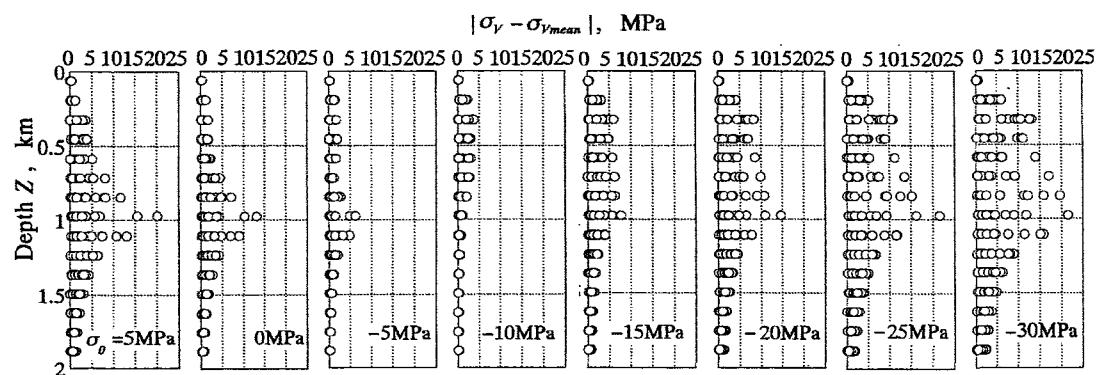


図 3.1.10 鉛直応力のバラツキ（解析結果）

また、水平応力の限界線については、図 3.1.11 のように、 σ_0 の値が大きい場合に限界線 I に良く限界が現れた。反対に、 σ_0 の値が小さい場合に限界線 II のような応力分布が得られた。

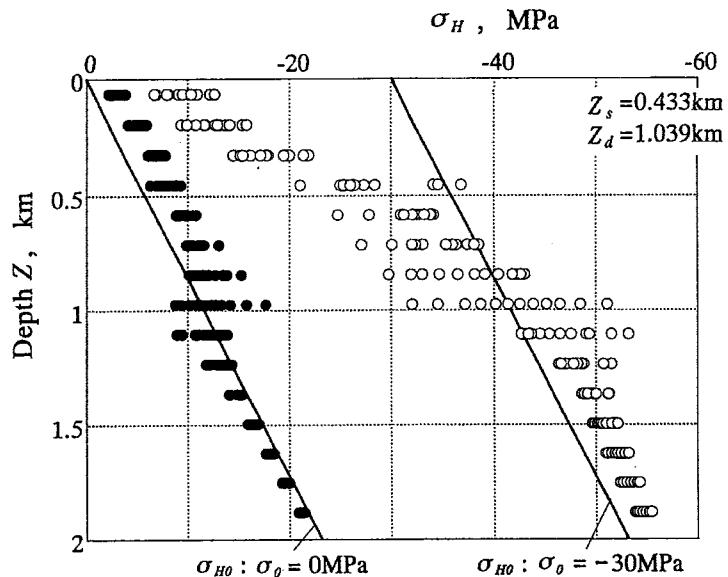


図 3.1.11 水平応力のバラツキ（解析結果）
(図中の 2 つの実線は初期応力を示す)

上述の解析からは、 σ_0 で表現されているプレートテクトニクスの作用に関する浅所断層群の変形モードが擾乱場を規定することができるとともに、従来の測定がこれらの影響下のものであり、かつ信頼に足るデータであると総括出来るよう。さらに、浅所断層群を配置することによって、地盤の巨視的剛性が深度方向に増大すると考えると、測定結果の傾向が定量的に説明できることも同時に明らかにされたと言えよう。したがって、3次元モデルの構築においては、地質構造のモデル化とともに、地質的要因による地盤剛性の地域性の評価が重要であると言えよう。

3. 1. 4 側圧係数 k と最大せん断応力係数 ξ

今回の3次元モデル構築の目標は、高レベル放射性廃棄物の地層処分のように、地下に安定性の高い格納空間を構築するためのサイト選定や空間設計に有用な資料の提供であると考えられる。空洞設計の立場から見ると、側圧係数 (k , k_1 , k_2) と最大せん断応力係数 ξ の定量が重要である。これらはつぎのように定義される。

$$k = \sigma_{Hav} / \sigma_V = 0.5(\sigma_{H1} + \sigma_{H2}) / \sigma_V, \quad k_1 = \sigma_{H1} / \sigma_V, \quad k_2 = \sigma_{H2} / \sigma_V, \quad (3.1.4)$$

$$\xi = (\sigma_{H1} - \sigma_{H2}) / (\sigma_{H1} + \sigma_{H2}). \quad (3.1.5)$$

したがって、最大せん断応力係数 ξ と側圧係数 (k, k_1, k_2) の関係はつきのようである。

$$\xi = 0.5(k_1 - k_2)/k \quad (3.1.6)$$

揚水式地下発電所においては、その本体空洞の長軸を水平面内の最大圧縮応力の方向に設定することにより、空洞の安定を追求した。この場合には、空洞の横断面内の主応力比を1に近づけるほど、岩盤緊結工などの支保コストを軽減できる利点がある。この関係から、空洞横断面内の側圧係数が重要なパラメータとして設計上問題にされた。

しかし、高レベル放射性廃棄物の地層処分のように、直交2方向に坑道群が配置される場合においては、1つの断面内の側圧係数だけでは十分でなく、3つの側圧係数 (k, k_1, k_2) の値、言い換えるとこれらの値を用いて式(3.1.6)で求められる最大せん断応力係数 ξ の評価が必要になる。空洞設計の視点に立てば、最大せん断応力係数 ξ の値が最小値の零で、かつ、側圧係数 k が1の静水圧的地圧地点が最適なサイトであると考えられる。

応力測定結果が示す最大せん断応力係数 ξ 及び側圧係数 (k, k_1, k_2) の一般傾向を述べる前に、最大せん断応力係数 ξ の分析のために開発した直交異方性の弾性球殻モデル（図3.1.12）の概要を示す。

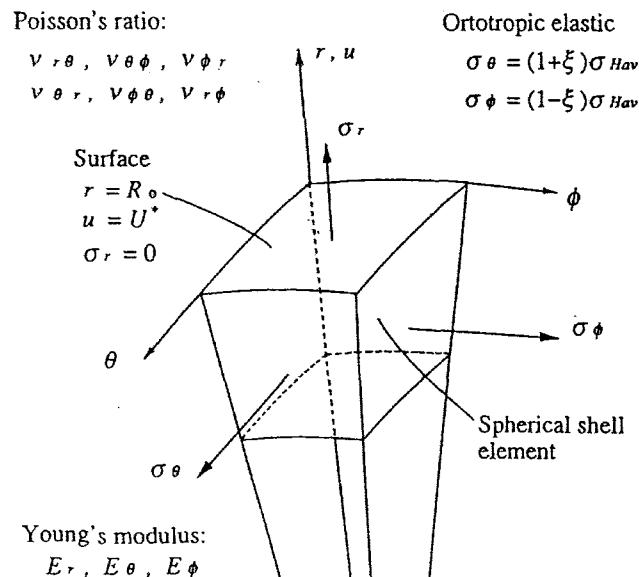


図3.1.12 異方性球殻モデル

図中の R_o は地球の半径6370km、 U^* は沈下量であり、直交3方向のヤング率 (E_r, E_θ, E_ϕ) とポアソン比 $(\nu_{r\theta}, \nu_{\theta\phi}, \nu_{r\phi})$ の関係は、ヤング率の代表値 E とポアソン比の代表値 ν を導入して、つぎのように仮定されている。

$$\nu_{r\theta}/E_\theta = \nu_{\theta r}/E_r = \nu_{r\phi}/E_\phi = \nu_{\phi r}/E_r = \nu_{\phi\theta}/E_\theta = \nu_{\theta\phi}/E_\phi = \nu/E. \quad (3.1.7)$$

また、偏差応力 σ_d と平均応力 σ_m をつぎのように定義し、ヤング率の代表値 E は平均応力 σ_m に依存すると仮定している。

$$\sigma_d = -\gamma Z - \sigma_m, \quad \sigma_m = (-\gamma Z + \sigma_{H1} + \sigma_{H2})/3. \quad (3.1.8)$$

なお、異方性球殻モデルにより最大せん断応力係数 ξ を分析した研究の内容は菅原ら(1995)^{2,3)}に詳しい。

さて、従来の応力測定結果から、鉛直応力 σ_v の計算値 $-\gamma Z$ (鉛直応力の平均値 $\sigma_{V,mean}$)と平均応力 σ_m の関係(図3.1.13)とともに、最大せん断応力係数 ξ と偏差応力 σ_d の間に図3.1.14のような相関性を見出した。図3.1.13では、最大せん断応力係数 ξ の値でマークを変えて測定値をプロットしている。図3.1.14は、測定値が3つのグループに分類できることを示している。図3.1.14の曲線Iと曲線IIは前述した異方性球殻モデルによる理論曲線である。理論曲線と測定値の良好な対応から判断して、異方性球殻モデルは地殻応力場の傾向を説明できていると考える。とくに、最大せん断応力係数 ξ と偏差応力 σ_d の相関性を定量的に説明している。

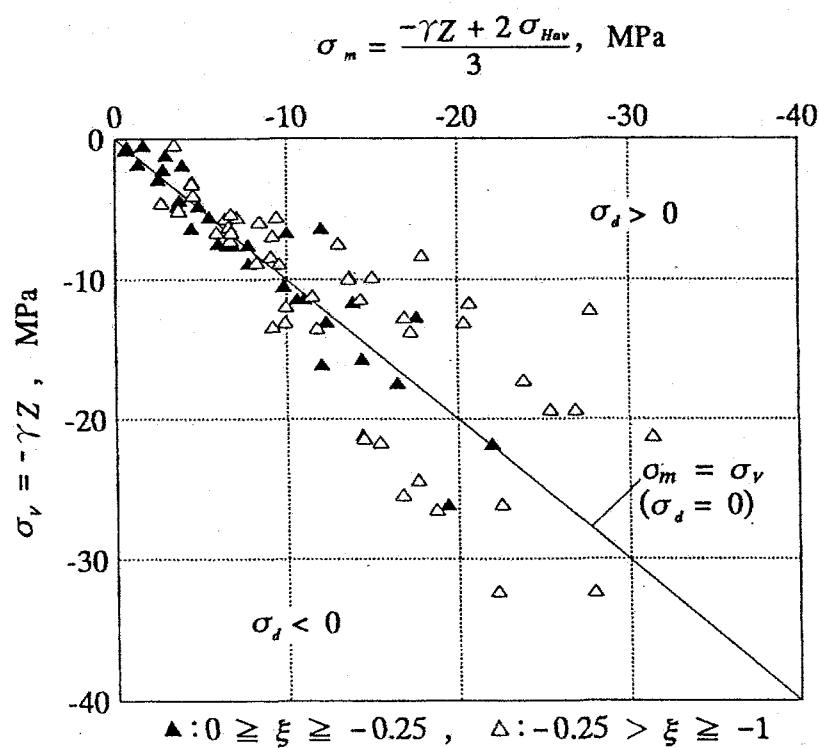


図3.1.13 鉛直応力係数 $\sigma_v = -\gamma Z$ と平均応力 σ_m の関係

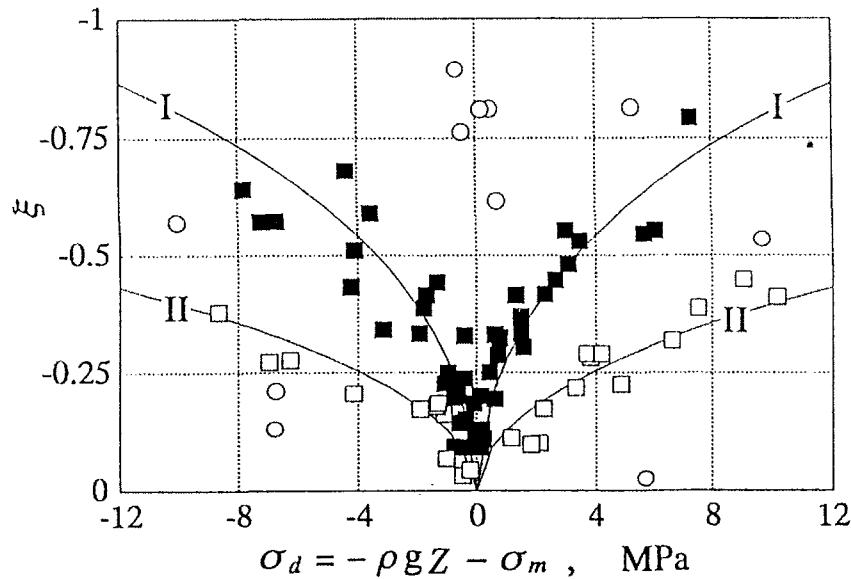


図 3.1.14 最大せん断応力係数 ξ の偏差応力 σ_d 依存性

図 3.1.14 の曲線 I と II が示すように測定結果は大まかに 2 つのグループから構成されている。どちらにおいても、鉛直応力の測定値 σ_v と計算値 $-\rho g Z$ と食い違いが増すとともに、最大せん断応力係数 ξ の値が増加する。言い換えると、鉛直応力の計算値からの偏差が増すと、水平面内主応力の差 ($\sigma_{H1} - \sigma_{H2}$) が増大する。これには構造的原因が必ずあるに違いない。原因は種々あるかも知れないが、今回開発され、今後高度化される 3 次元モデルで計算される応力場についても、このような相関性の成立が期待される。もしも同様の相関が認められないならば、測定と解析のどちらかに誤り、あるいは不備があると考えられる。しかしながら、図 3.1.14 の曲線 I と II には有意な差があり、測定値がこの 2 つのグループに分離されていることは何を意味しているのであろうか？ つぎに述べる理由から、3 次元モデルによる解析がこの問題の解釈に新たな一頁を加えてくれることを期待したい。

異方性球殻モデルによる図 3.1.14 の曲線 I と II の計算に際しては、ヤング率の代表値 E をつぎのように与えている。すなわち、図 3.1.15 に示すように、ヤング率の代表値 E は平均応力 σ_m の指數関数として、

$$E = A \cdot \exp(-\sigma_m/B), \quad (3.1.9)$$

で与えられている。曲線 I の計算では、 $A=3.7\text{GPa}$ 、 $B=26\text{MPa}$ 、曲線 II の計算では、 $A=11.8\text{GPa}$ 、 $B=127\text{MPa}$ が用いられた。すなわち、異方性球殻モデルでは、平均応力 σ_m によるヤング率 E の変化を大きくすると、曲線 I のように最大せん断応力係数 ξ の値が相対的に大きく見積もられる。反対に、ヤング率 E の変化が小さいと、曲線 II のように最大せん断応力係数 ξ の値が小さく見積もられる。

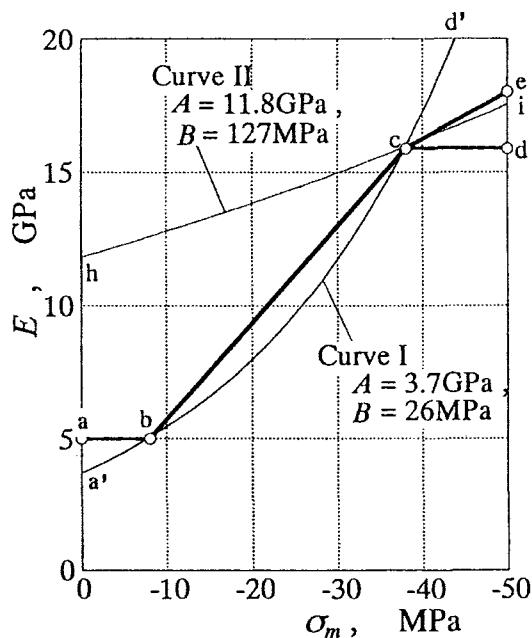


図 3.1.15
異方性球殻モデル解析
に用いられたヤング率
の代表値 E と平均応力 σ_m
の関係

平均応力 σ_m は深度 Z とともに一般に絶対値が増加するから、球殻モデルのヤング率 E の深度勾配が少ない曲線 II は浅所断層群のような地質構造的な擾乱因子が乏しい場合に対応し、反対に、球殻モデルのヤング率 E の深度勾配が大きい曲線 I は地質構造的な擾乱因子が多く、浅い部分の岩盤の剛性が巨視的な意味で低下している場合であると解釈することができる。この考え方方に立つと、曲線 II が通常地点の一般傾向を示し、曲線 I が断層などによる剛性低下が著しい地点に対応すると言えよう。今回の3次元モデルは比較的に単調な地質モデルを採用しているから、曲線 II の傾向が求められると期待されている。

3. 1. 5 結 言

本節では、従来の応力測定値の一般傾向を明らかにし、3次元モデル構築において問題となる断層の取り扱い、浅所断層群などに依存する岩盤の巨視的ヤング率の異方性評価などについて考察した。また、今後の3次元モデルの高度化においては、3次元モデル解析値と上記の応力測定データの一般傾向との調和の確認が重要な課題であり、とくに、最大せん断応力係数などの分析が重要であると論じた。

3. 2 層構造地盤における応力場の特徴とその同定法

3. 2. 1 はじめに

地盤内の応力は、重力やプレート運動などの作用とともに地形や地質による擾乱を受けたものであると考えられる。したがって、もし、地形や地質による擾乱を取り除いた場合に、そこに存在する応力場やひずみ場を仮定することができれば、地盤内の応力はこれら先在的な応力場やひずみ場が地形や地質の影響によって変化した2次応力であると考えることができる。そこで、これら先在的な応力場やひずみ場を広域応力、広域ひずみと呼ぶことにすると、地盤内の任意の座標点における局所応力は、広域応力もしくは広域ひずみの関数として与えられることになる。したがって、これらの関数が確定できれば、広域応力から岩盤内の応力分布が同定できることになる。また、逆に考えれば、局所応力が測定されれば、上式の逆問題を解くことにより広域応力もしくは広域ひずみが同定できることになる。すなわち、岩盤内応力場の同定と広域応力・ひずみ場の同定は正問題と逆問題の関係にあり、基本的には同一の問題として取り扱うことができる。そこで、この考えのもとに、局所応力測定結果から広域ひずみを同定し、これを用いて地盤内の3次元応力場を同定する方法について検討した。

具体的には、まず、対象領域内の局所応力測定結果から広域ひずみ、すなわち、領域外周境界の変位境界条件を逆解析し、これにより領域内の3次元応力場を同定する方法について示す。特に、応力測定が水圧破碎法で実施され水平面内の応力成分のみが測定されていることなどを考慮し、複数の測定点における結果を用いて広域ひずみを逆解析する方法について検討した。次に、広域ひずみに対して領域内の応力場を与える関数の性質、すなわち、地層形状に起因した応力場の擾乱の傾向を把握するために、単純な地層モデルを作成し、基盤形状が地盤内の応力分布に及ぼす影響について分析する。これらの結果に基づいて、東濃地区および正馬様地区を対象として、表面地形と地層形状を考慮した3次元有限要素モデルを作成し、同地域内の応力測定結果から場の境界条件を逆解析し領域内の3次元応力場を同定することを試みた。とくに、地盤の不均質性の影響把握を目的として、地層を考慮した不均質地盤モデルを作成するとともに、領域サイズの影響評価を目的として、解析領域の異なる複数の地盤モデルを作成した。そして、これらのモデルに対する逆解析結果を比較検討し、計測結果に適合する地盤モデルを確定させるとともに、同モデルにより推定された3次元応力場の特徴について考察する。

3. 2. 2 広域ひずみおよび3次元応力場の解析方法

広域ひずみの観点から考えると、領域内の応力場は水平方向無ひずみの条件における応力場と水平方向ひずみにより生じる応力場に分類することができる。前者は、重力に起因する応力であり、十分広い領域に対して、領域周囲境界面

の面直交方向変位を拘束した状態で、岩石の自重のみを作用させた解析を行うことにより評価される。後者は、広域水平ひずみに起因する応力であり、プレート運動などによる地殻の水平方向の動きに起因する応力と解釈される。この広域ひずみの影響は、同様に対象とする領域が十分広ければ、その領域周囲に水平方向変位を作用させることにより表現される。

以上の前提にもとづくと、地盤内の任意の座標点 x における局所応力 $\sigma_{ij}^L(x)$ は、上記の重力と広域ひずみが作用する場合の局所応力の和として、次式で表現できる（金子ほか、2000）。

$$\sigma_{ij}^L(x) = \sigma_{ij}^0(x, \rho g) + \sigma_{ij}^X(x, \varepsilon_{xx}^L) + \sigma_{ij}^Y(x, \varepsilon_{yy}^L) + \sigma_{ij}^{XY}(x, \gamma_{xy}^L) \quad (3.2.1)$$

ただし、 ρg は岩石の単位体積重量であり、 $\sigma_{ij}^0(x, \rho g)$ は岩石の自重により点 x に生ずる局所応力である。また、 $\sigma_{ij}^X(x, \varepsilon_{xx}^L)$ 、 $\sigma_{ij}^Y(x, \varepsilon_{yy}^L)$ および $\sigma_{ij}^{XY}(x, \gamma_{xy}^L)$ は周囲境界に直ひずみ ε_{xx}^L 、 ε_{yy}^L およびせん断ひずみ γ_{xy}^L に相当する変位がそれぞれ与えられた場合の岩盤内の点 x における局所応力であり、広域ひずみの影響項である。したがって、対象領域内の3次元応力場を推定するためには、局所応力の測定値に対して(3.2.1)式を満足させる広域ひずみを求める必要があることがわかる。また、(3.2.1)式は、線形関係から次のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^L(x) &= \sigma_{ij}^0(x, \rho g) \\ &+ c_x \sigma_{ij}^X(x, \varepsilon_{xx0}) + c_y \sigma_{ij}^Y(x, \varepsilon_{yy0}) + c_{xy} \sigma_{ij}^{XY}(x, \gamma_{xy0}) \end{aligned} \quad (3.2.2)$$

ただし、 $c_x = \varepsilon_{xx}^L / \varepsilon_{xx0}$ 、 $c_y = \varepsilon_{yy}^L / \varepsilon_{yy0}$ 、 $c_{xy} = \gamma_{xy}^L / \gamma_{xy0}$ であり、 ε_{xx0} 、 ε_{yy0} 、 γ_{xy0} はそれぞれ定数である。本解析では、 $\varepsilon_{xx0} = \varepsilon_{yy0} = 10^{-4}$ 、 $\gamma_{xy0} = 2 \times 10^{-4}$ と設定し、相当する変位を外周境界に与えた。

ここで、測定点 x_n （ただし、 $n=1 \sim N$ であり、 N は測定点数である）において測定された局所応力を $\sigma_{ij}^M(x_n)$ と表すと、解析値を測定値に一致させる条件は次のようになる。

$$\sigma_{ij}^M(x_n) = \sigma_{ij}^L(x_n) : \quad n=1 \sim N \quad (3.2.3)$$

ただし、水圧破碎法による応力測定結果は水平面内の応力成分 $\sigma_{xx}^M(x_n)$ 、 $\sigma_{yy}^M(x_n)$ 、 $\sigma_{xy}^M(x_n)$ の3つであるから、(3.2.3)式は $3N$ 行の式を与えることになる。また、岩盤の単位体積重量と弾性定数を既知と仮定すると、(3.2.3)式の未知数は c_x 、 c_y 、 c_{xy} の3つとなる。そこで、最小二乗法により係数 c_x 、 c_y 、 c_{xy} を求めることにすると、観測方程式は(3.2.4)式となり、解くべき連立方程式は(3.2.5)式となる。

$$A c = s \quad (3.2.4)$$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} c = \mathbf{A}^T s \quad (3.2.5)$$

ただし、上式中のマトリックスおよびベクトルは次のようである。

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx}^X (x_1, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{xx}^Y (x_1, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{xx}^{XY} (x_1, \gamma_{xy0}) \\ \sigma_{yy}^X (x_1, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{yy}^Y (x_1, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{yy}^{XY} (x_1, \gamma_{xy0}) \\ \sigma_{xy}^X (x_1, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{xy}^Y (x_1, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{xy}^{XY} (x_1, \gamma_{xy0}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{xx}^X (x_N, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{xx}^Y (x_N, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{xx}^{XY} (x_N, \gamma_{xy0}) \\ \sigma_{yy}^X (x_N, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{yy}^Y (x_N, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{yy}^{XY} (x_N, \gamma_{xy0}) \\ \sigma_{xy}^X (x_N, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{xy}^Y (x_N, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{xy}^{XY} (x_N, \gamma_{xy0}) \end{pmatrix} \quad (3.2.6)$$

$$s = \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{xx}^M (x_1) - \sigma_{xx}^0 (x_1) \\ \sigma_{yy}^M (x_1) - \sigma_{yy}^0 (x_1) \\ \sigma_{xy}^M (x_1) - \sigma_{xy}^0 (x_1) \\ \vdots \\ \vdots \\ \sigma_{xx}^M (x_N) - \sigma_{xx}^0 (x_N) \\ \sigma_{yy}^M (x_N) - \sigma_{yy}^0 (x_N) \\ \sigma_{xy}^M (x_N) - \sigma_{xy}^0 (x_N) \end{array} \right\} \quad c = \left\{ \begin{array}{l} c_x \\ c_y \\ c_{xy} \end{array} \right\} \quad (3.2.7) \quad (3.2.8)$$

したがって、測定結果を用いて上記の観測方程式を解くと、定数 c_x, c_y, c_{xy} が求められ、これらから広域ひずみが算定される。さらに、算定された広域ひずみを (3.2.1) 式に適用すると、地盤内の任意点における 3 次元応力が算定される。なお、解析値の計測値に対する誤差 ε_A は次式で与えられる。

$$\varepsilon_A = (1/N) \sum [\{ \sigma_{xx}^M (x_n) - \sigma_{xx}^L (x_n) \}^2 + \{ \sigma_{yy}^M (x_n) - \sigma_{yy}^L (x_n) \}^2 + \{ \sigma_{xy}^M (x_n) - \sigma_{xy}^L (x_n) \}^2]^{1/2} \quad (3.2.9)$$

ただし、 N は応力測定点数、 Σ は $n=1 \sim N$ の総和を示す。なお、(3.2.5) 式の最小二乗法を用いて求められる解は、(3.2.9) 式の誤差最小の解に対応する。ここで、計測および逆解析における誤差の原因を考慮すると、次式の誤差 ε_R を定義することができる。

$$\varepsilon_R = (1/N) \sum [\{ \sigma_{xx}^M (x_n) - \sigma_{xx}^L (x_n) \}^2 + \{ \sigma_{yy}^M (x_n) - \sigma_{yy}^L (x_n) \}^2 + \{ \sigma_{xy}^M (x_n) - \sigma_{xy}^L (x_n) \}^2]^{1/2} / [\{ \sigma_{xx}^L (x_n) + \sigma_{yy}^L (x_n) \} / 2]^{1/2} \quad (3.2.10)$$

すなわち、面内応力の不変量で正規化した誤差である。そこで、 ε_A を絶対誤差、

ε_R を相対誤差と呼ぶことにすると、逆解析としては、絶対誤差最小の解よりも相対誤差最小の解が望ましいと考えることができる。しかし、相対誤差最小解は非線形最小化問題を解く必要があるため計算が極めて繁雑となる。これは今後の課題であると思われる。

3. 2. 3 地層形状が応力場に及ぼす影響

前述の広域ひずみの考えに基づくと、地盤内の応力場は地形や地質による擾乱を受けた2次応力であると考えることができる。したがって、広域ひずみの解析に先立って地形や地質による擾乱を評価し、その特徴を把握することは重要である。特に、地盤は、通常、層構造を示すことから、地層の形状と力学的性質が地盤内の応力分布に及ぼす影響を把握することが重要である。

そこで、地層の形状が、応力分布に及ぼす影響に関する基礎資料を集積することを試みる。特に、問題を単純化するために、地層形状の影響として、基盤形状の影響に対象を限定する。そして、基盤形状が応力分布に及ぼす影響を検討するために、均質地盤、基盤が水平な2層構造地盤、基盤が谷構造となる2層構造地盤の3種の地盤モデルについて地盤内応力分布の特徴について検討した。それぞれの解析モデルは図3.2.1に示すようである。地盤の物性値は2層構造モデルでは表層および基盤層の物性値を以下のように与え、均質モデルでは基盤の物性値を用いた。

表層 ヤング率 E : 2GPa、ポアソン比 ν : 0.25、単位体積重量 ρg : 18 kN/m³

基盤 ヤング率 E : 6GPa、ポアソン比 ν : 0.25、単位体積重量 ρg : 26 kN/m³

以下では、それぞれのモデルについて、特定の鉛直測線（ボーリング孔に相当）上における応力分布を示し、その特徴について考察する。

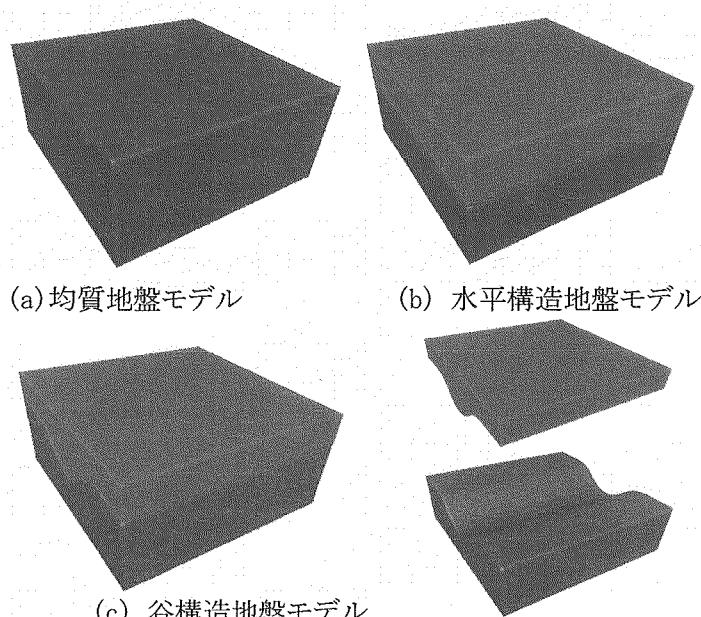


図 3.2.1
単純な地盤構造に対する
解析モデル
(a) 均質地盤、
(b) 水平構造地盤、(c)
谷構造地盤

(1) 地層が均質の場合

地盤が均質の場合の、鉛直測線上の応力分布を図 3.2.2 示す。ただし、(a)は重力のみが作用した場合の応力 $\sigma_{ij}^0(x, \rho g)$ を、(b)は X 方向の広域ひずみ-0.1% のみが作用した場合の応力 $\sigma_{ij}^x(x, \varepsilon_{xx}^0)$ を示している。図(a)より、当然のことながら、鉛直応力は深度と単位体積重量 ρg で決まる一次関数となり、水平応力と鉛直応力の比の値は水平ひずみ拘束における側圧比 ($\nu / (1 - \nu)$ 、ただし、 ν : ポアソン比) に一致することがわかる。また、図(b)より、X 方向の直応力は広域ひずみに $E / (1 - \nu^2)$ を乗じた値となること、Y 方向の直応力は X 方向の直応力にポアソン比を乗じた値となることがわかる。

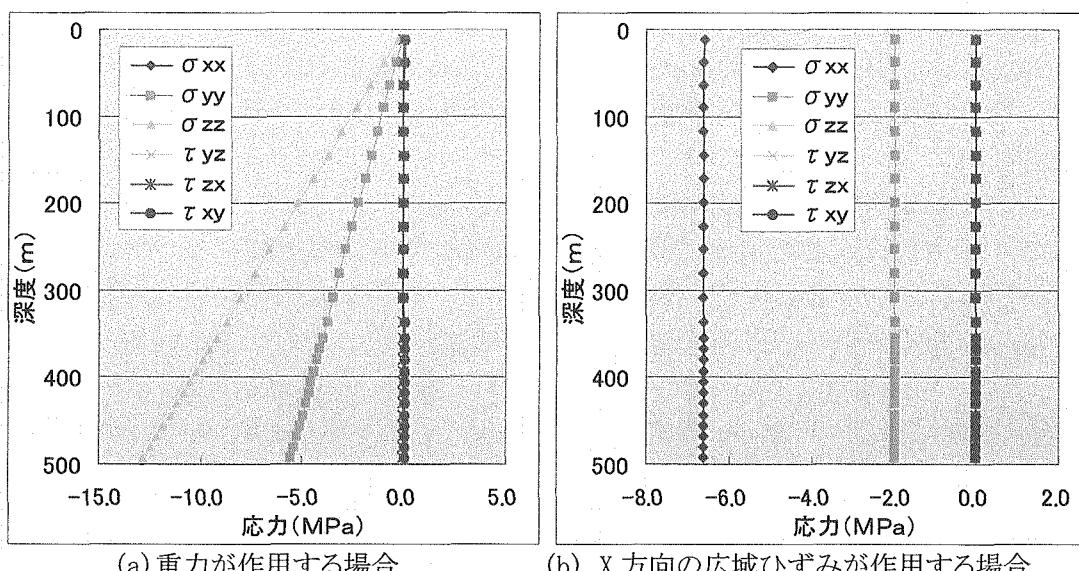


図 3.2.2 均質地盤における鉛直側線上の応力分布

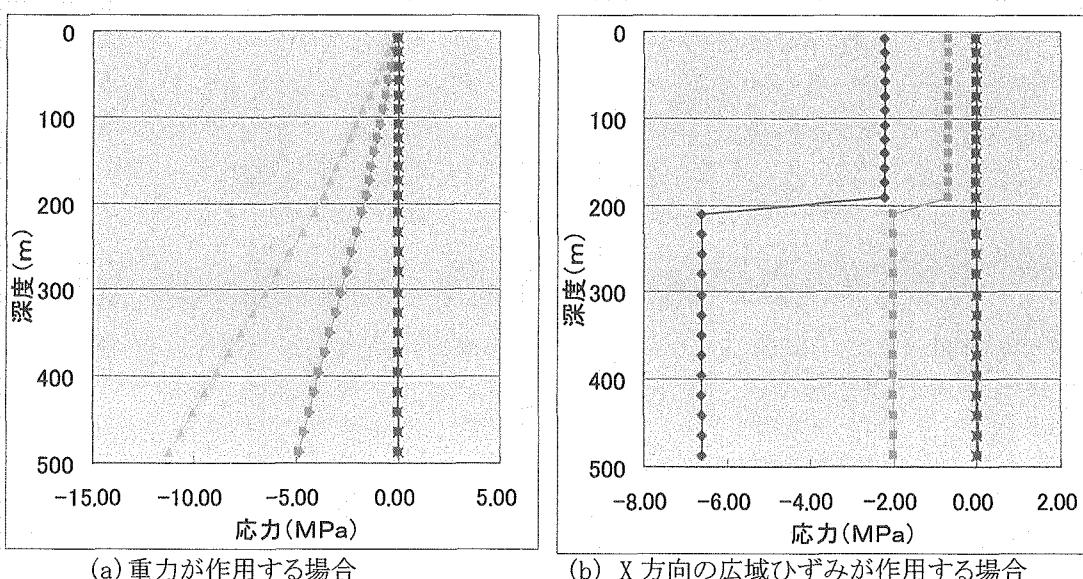


図 3.2.3 水平構造地盤における鉛直側線上の応力分布

(2) 基盤が水平構造の場合

地層が水平構造の場合、鉛直測線上の応力分布は測線位置に関係しない。そこで、モデル中央部の鉛直測線に対して応力分布を図3.2.3示す。ただし、(a)は重力のみが作用した場合の応力 $\sigma_{ij}^0(x, \rho g)$ を、(b)はX方向の広域ひずみ-0.1%のみが作用した場合の応力 $\sigma_{ij}^X(x, \varepsilon_{xx}^X)$ を示している。図3.2.2に示した地盤が均質な場合と比較すると、地盤が層構造をなす場合には、地層の密度の相違により、重力場における鉛直応力および水平応力の深度に対する傾きが地層ごとに異なっていることがわかる。また、図(b)より、地層の弾性率が異なる場合には、広域ひずみに対する応力分布は地層境界において不連続となることがわかる。

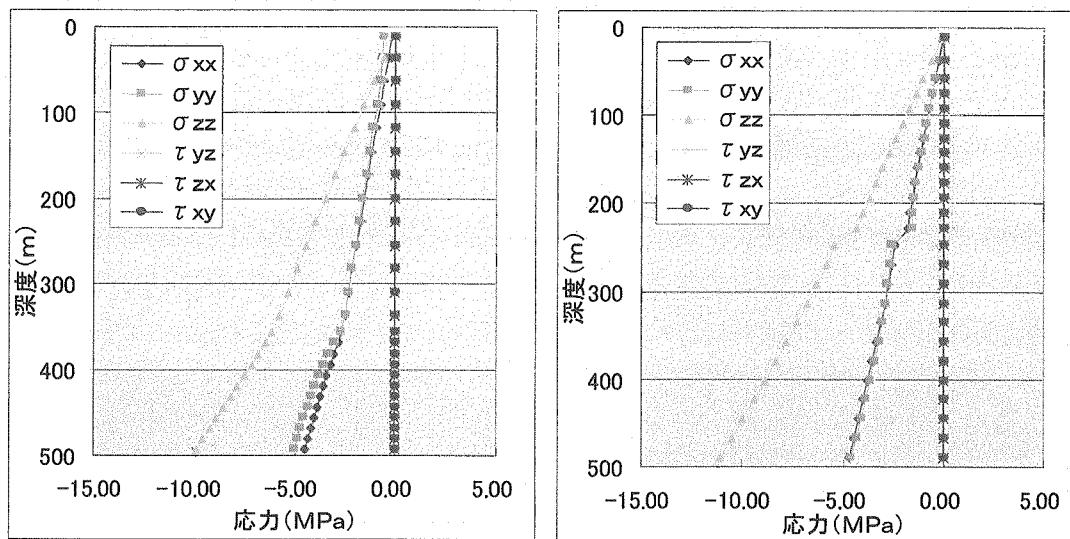
(3) 基盤が谷構造の場合

応力計算測線としては、谷底部を通る鉛直測線および谷肩部を通る鉛直測線を設定した。そして、これらの測線に対して、前述の応力項 $\sigma_{ij}^0(x, \rho g)$, $\sigma_{ij}^Y(x, \varepsilon_{yy}^Y)$, $\sigma_{ij}^X(x, \varepsilon_{xx}^X)$, $\sigma_{ij}^{XY}(x, \gamma_{xy}^X)$ の解析値を示すと図3.2.4～図3.2.7のようである。すなわち、図3.2.4は重力のみが作用する場合、図3.2.5はY方向（谷に垂直方向）の広域ひずみ-0.1%のみが作用する場合、図3.2.6はX方向（谷に平行な方向）の広域ひずみ-0.1%のみが作用する場合、図3.2.7はXY方向の広域せん断ひずみ0.2%のみが作用する場合を示している。また、全て(a)は谷底部を通る鉛直測線、(b)は谷肩部を通る鉛直測線における応力分布を示している。以下にそれぞれの場合の応力分布の特徴をまとめると。

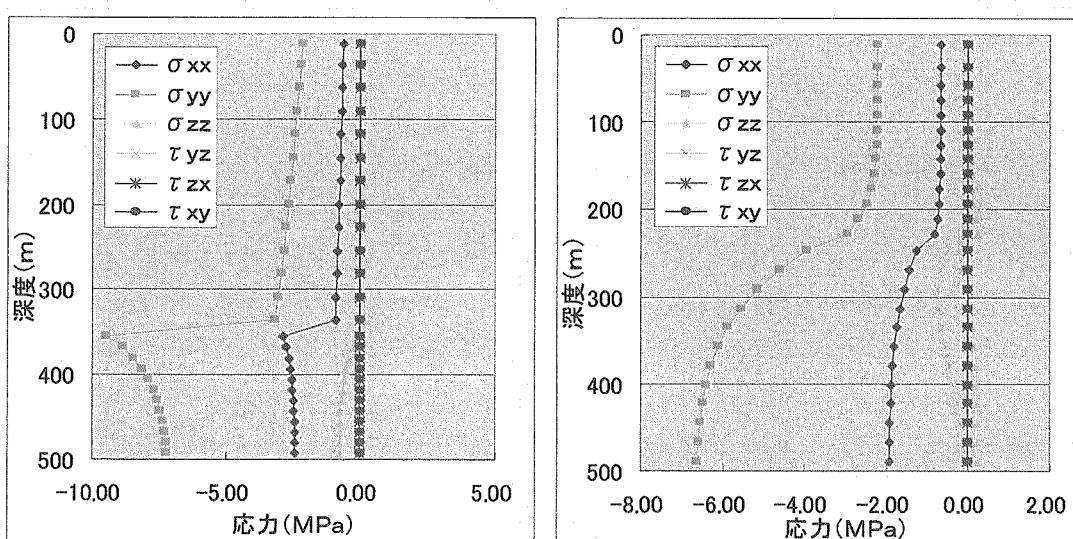
重力が作用する場合（図3.2.4）：谷底部を通る鉛直測線では、表層中ではX方向直応力およびY方向直応力は水平構造の場合と同様にほぼ等しいが、基盤内では両者は一致せず、Y方向直応力がX方向直応力に比較して大きくなる。また、地表面において、Y方向直応力は0とならずに、圧縮となる。これは、次のように説明される。前者の傾向は、谷構造の基盤内では主応力軸が谷傾斜方向に傾き、その結果として谷底部の基盤内で谷に垂直な方向の水平方向応力が大きくなることを示している。また、後者の傾向は、表層の鉛直変形（沈下）量が谷部で大きいため、地表面に曲げ変形が生じることに起因している。

Y方向の広域ひずみが作用する場合（図3.2.5）：谷の底部を通る測線では、X方向直応力が境界面直下で最大となる。また、谷肩部を通る測線では、基盤の境界面において不連続的傾向が認められず、境界面下部で、深度の増大とともに増大し一定値に収束していく。これは、基盤谷構造の形状効果により、谷底部にX方向直応力が集中し、谷肩部で緩和されることを示している。

X方向の広域ひずみが作用する場合（図3.2.6）：X方向直応力の分布は、基盤境界面深度が異なることを除けば、水平構造の場合とほぼ同一の傾向を示す。



(a) 谷底部を通る鉛直測線
(b) 谷肩部を通る鉛直測線
図 3.2.4 基盤が谷構造の場合の応力分布(重力が作用する場合)



(a) 谷底部を通る鉛直測線
(b) 谷肩部を通る鉛直測線
図 3.2.5 基盤が谷構造の場合の応力分布
(谷垂直方向:Y 方向の広域ひずみが作用する場合)

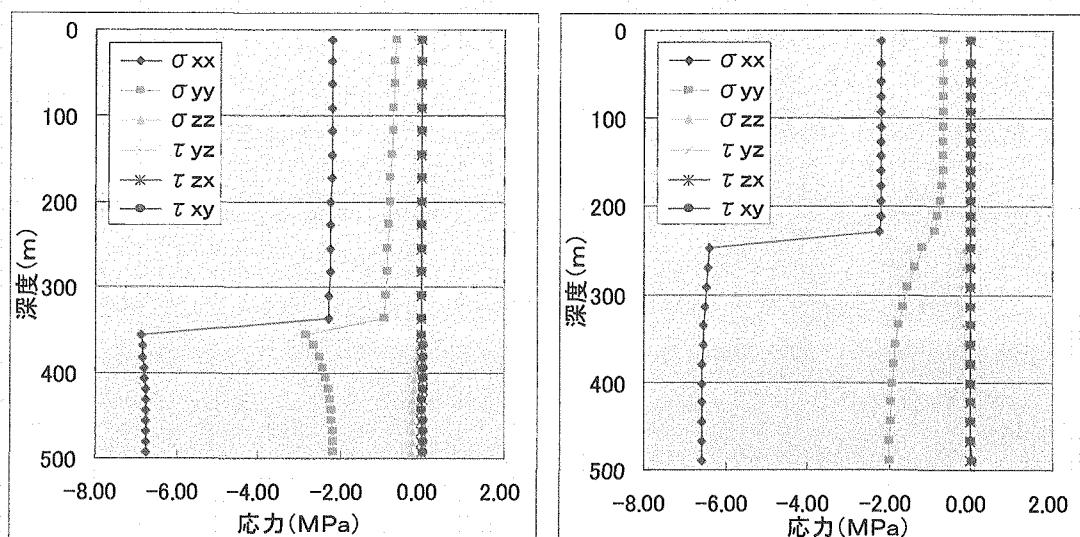


図 3.2.6 基盤が谷構造の場合の応力分布
(谷平行方向:X 方向の広域ひずみが作用する場合)

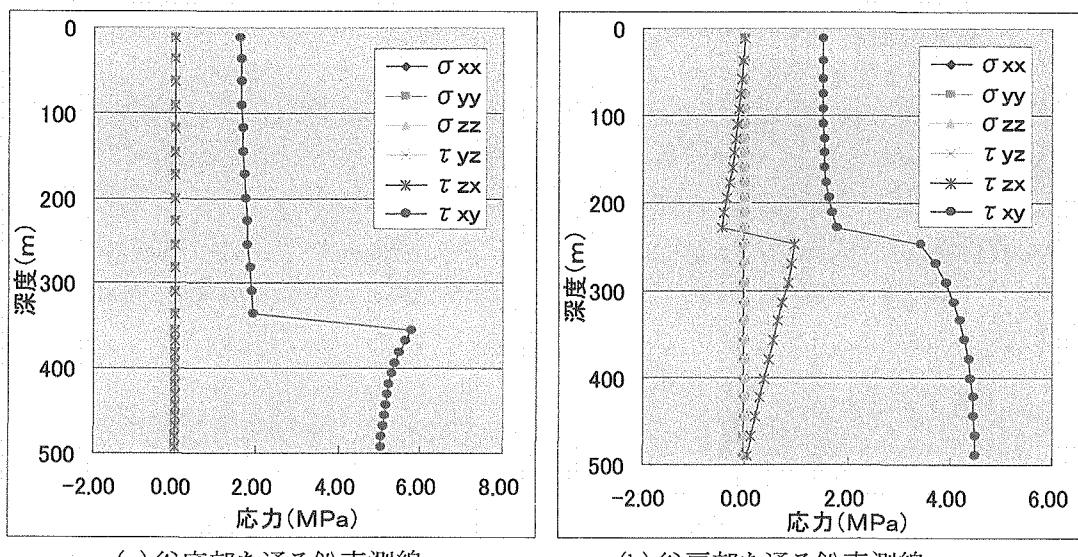


図 3.2.7 基盤が谷構造の場合の応力分布
(XY 方向の広域せん断ひずみが作用する場合)

しかし、谷の底部を通る測線では、Y方向直応力が境界面直下で増大し、谷肩部を通る測線では、基盤の境界面において滑らかに変化している。これは、前例と同様に、ポアソン比効果により生じたY方向応力が、基盤谷構造の形状効果により、谷底部にY方向直応力が集中し、谷肩部で緩和されることを示している。

XY面内の広域せん断ひずみが作用する場合（図3.2.7）：谷の底部を通る測線では、XY成分のせん断応力が境界面直下で最大となる。また、谷肩部を通る測線では、XY成分のせん断応力は、境界面下部で、深度の増大とともに増大し一定値に収束していく。さらに、谷肩部を通る測線では、ZX成分のせん断応力が生じる。

3.2.4 広域ひずみおよび3次元応力場の同定

（1）解析対象地域

東濃鉱山および正馬様用地の地域を解析対象とした。対象地域の地質は、上部から、瀬戸層群、生俵累層、明世累層、土岐夾炭累層、土岐花崗岩体風化部、土岐花崗岩体により構成されているが、地域によっては一部の地層は現れていない。

まず、東濃鉱山を含む1km四方の領域の地表地形および地層境界面の標高分布は図3.2.8のようである。応力測定は、図3.2.9に示す、5つの試錐孔(TM-1、TM-2、98SE-01、99SE-02、00SE-03)において実施されており、測定点数は計47である。応力測定点の深度は、試錐孔TM-1、TM-2、98SE-01、99SE-02では30m～200mであり、試錐孔00SE-03では230～270mであった。したがって、堆積層と花崗岩上部の領域において応力が測定されていると判断できる。

次に、正馬様用地を含む1km四方の領域の地表地形および地層境界面の標高分布は図3.2.10のようである。応力測定は、図3.2.11に示す、3つの試錐孔(AN-1、MIU-2、MIU-3)において実施されており、測定点数は計43である。応力測定点の深度は、いずれの試錐孔でも50～1000mであり、東濃鉱山と比較して、深部の測定点が多く、ほとんどの測定点が基盤花崗岩中に配置されている。

東濃鉱山および正馬様用地を含む2km四方の領域の地表地形および地層境界面の標高分布は図3.2.12のようであり、両地区の位置関係は図3.2.13に示すようである。

（2）解析モデル

東濃鉱山および正馬様用地を対象として3次元有限要素モデルを作成した。特に、東濃鉱山のみを含む1km四方の領域、正馬様用地のみを含む1km四方の領域とこれら両者を含む2km四方の領域のそれぞれについて3次元有限要素モデルを作成した。なお、以下では、これらを東濃鉱山モデル、正馬様モデルおよび東濃鉱山・正馬様モデルと呼ぶことにする。

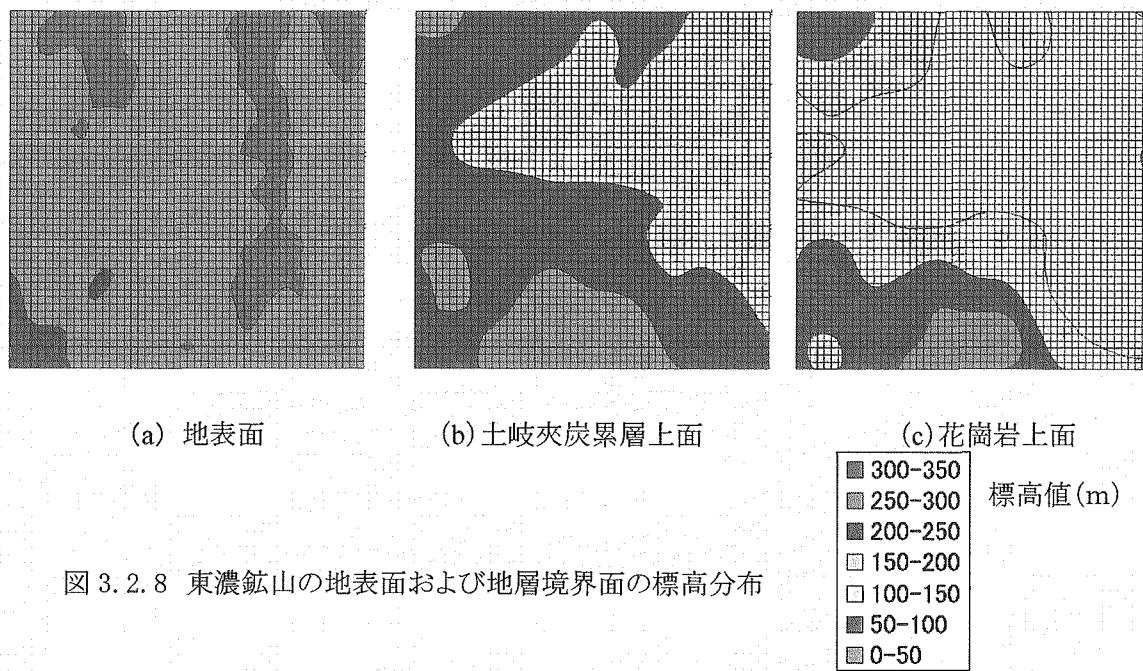


図 3.2.8 東濃鉱山の地表面および地層境界面の標高分布

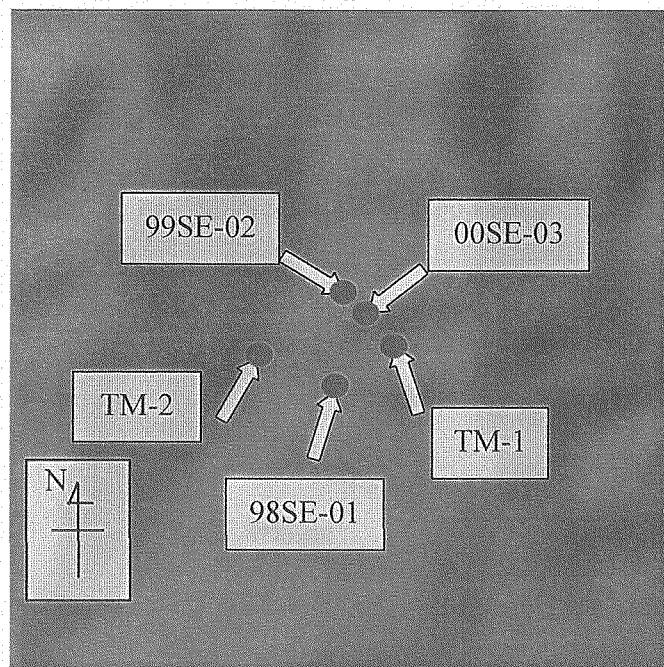
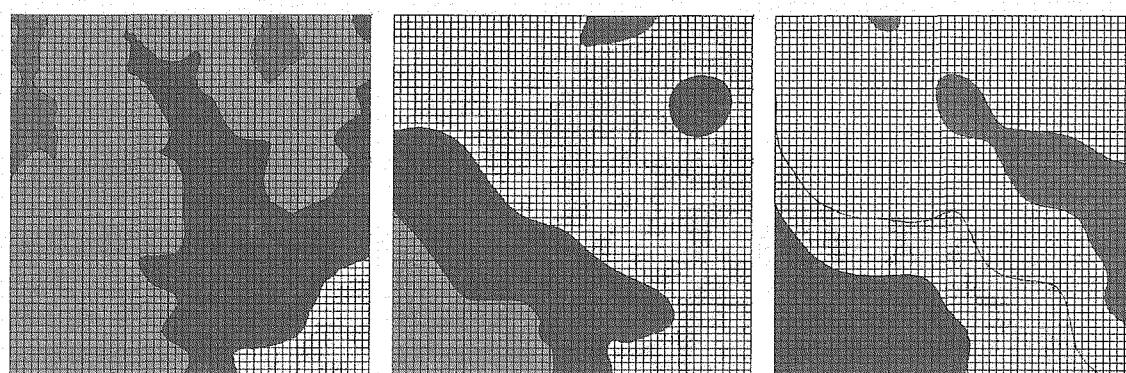


図 3.2.9 東濃鉱山の試錐孔位置



(a) 地表面

(b) 土岐夾炭累層上面

(c) 花崗岩上面

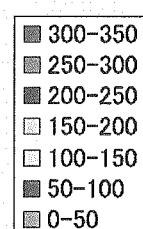


図 3.2.10 正馬様用地の地表面および地層境界面の標高分布

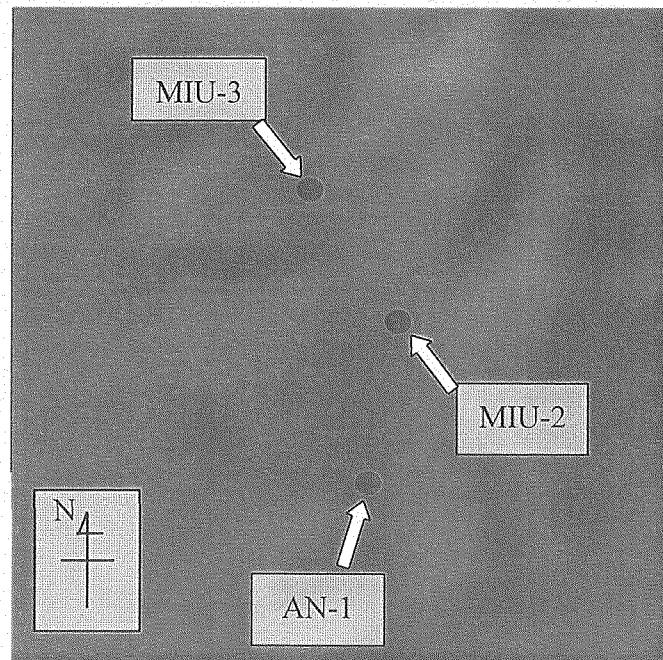
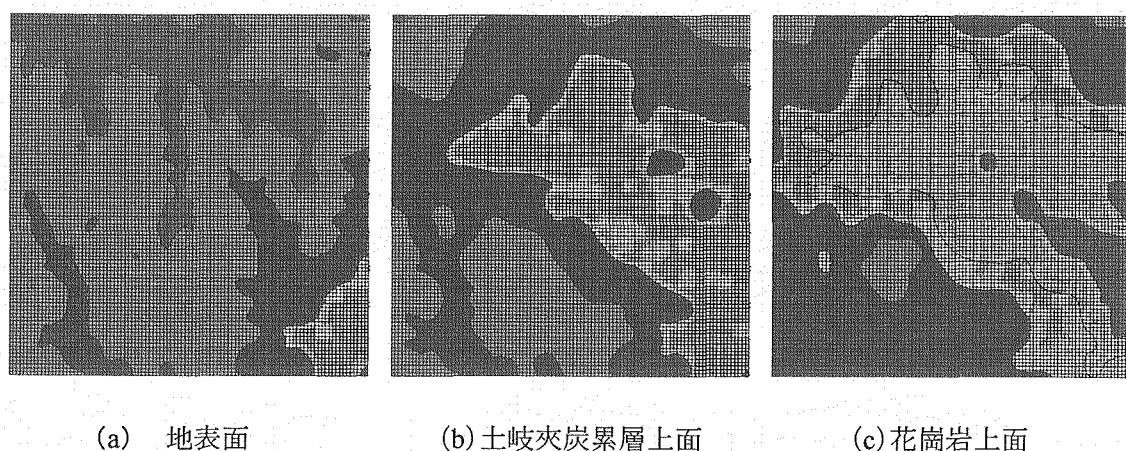


図 3.2.11 正馬様用地の試錐孔位置



(a) 地表面 (b) 土岐夾炭層上面 (c) 花崗岩上面

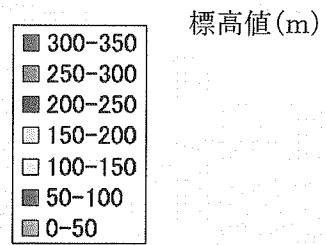


図 3.2.12 東濃鉱山と正馬様用地を含む2km四方の領域
の地表面および地層境界面の標高分布

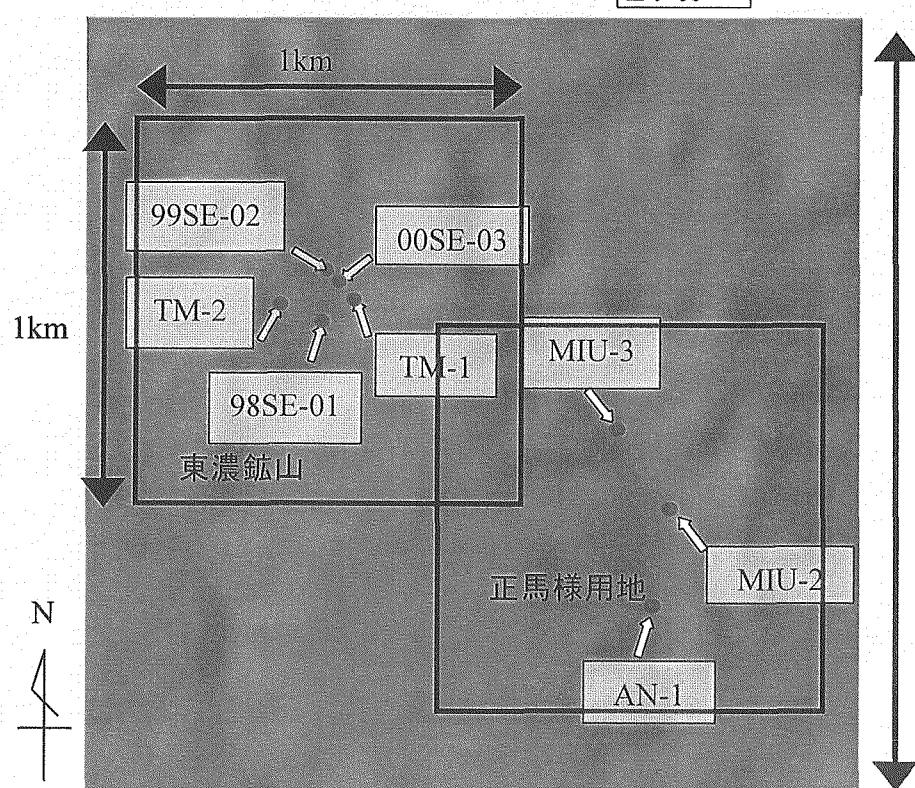


図 3.2.13 東濃鉱山と正馬様用地の位置関係

有限要素としては6面体要素を採用し、まず、対象地域に相当する直方体領域について格子状に節点を配置して6面体（直方体）要素分割を行い、その後に、標高データをもとに節点のZ座標のみを修正することとした。特に、水平面内における要素寸法は20m×20mとし、鉛直方向に25要素を配置した。また、地表地形は20mメッシュの標高データから対応する節点の標高を与える、地層境界形状は、100mメッシュの標高データからスプライン補間ににより20mメッシュの標高データを求め、これにより対応する節点の標高を与えた。また、対象地盤は3層構造とし、第1層：瀬戸層群・生俵累層・明世累層、第2層：土岐夾炭層・土岐花崗岩体風化部、第3層：土岐花崗岩体と仮定した。これら地層ごとの岩盤物性値は表3.2.1のように与えた。なお、3次元要素分割において対応する地層が存在しない領域（地層厚さが0mの領域）では、地層厚さを十分薄く設定している。

東濃鉱山モデルの解析領域は、前出図3.2.9に示す、5つの試錐孔(TM-1、TM-2、98SE-01、99SE-02、00SE-03)を含む、東西1km、南北1km、地表からの深さ約0.5kmの領域である。要素分割の平面図は前出図3.2.8に示すようであり、3次元有限要素モデルは図3.2.14のようである。要素数は62,500、節点数は67,626である。

正馬様モデルの解析領域は、前出図3.2.11に示す、3つの試錐孔(AN-1、MIU-2、MIU-3)を含む、東西1km、南北1km、地表からの深さ約1kmの領域である。要素分割の平面図は前出図3.2.10に示すようであり、3次元有限要素モデルは図3.2.15のようである。要素数および節点数は東濃鉱山モデルと同じである。

東濃鉱山・正馬様モデルの解析領域は、前出図3.2.13に示す、上記9つの試錐孔を含む、東西2km、南北2km、地表からの深さ約1kmの領域である。応力測定点数は、上記8本の試錐孔の総計であり計90点である。要素分割の平面図は前出図3.2.12に示すようであり、3次元有限要素モデルは図3.2.16のようである。要素数は250,000、節点数は265,226である。

表3.2.1 岩盤物性値

層番号	地層名	ヤング率 (GPa)	ポアソン比 (-)	単位体積重量 (kN/m ³)
1	瀬戸層群・生俵累層・明世累層	2.0	0.3	18
2	土岐夾炭層・土岐花崗岩体風化部	2.0	0.3	19
3	土岐花崗岩	6.0	0.3	26

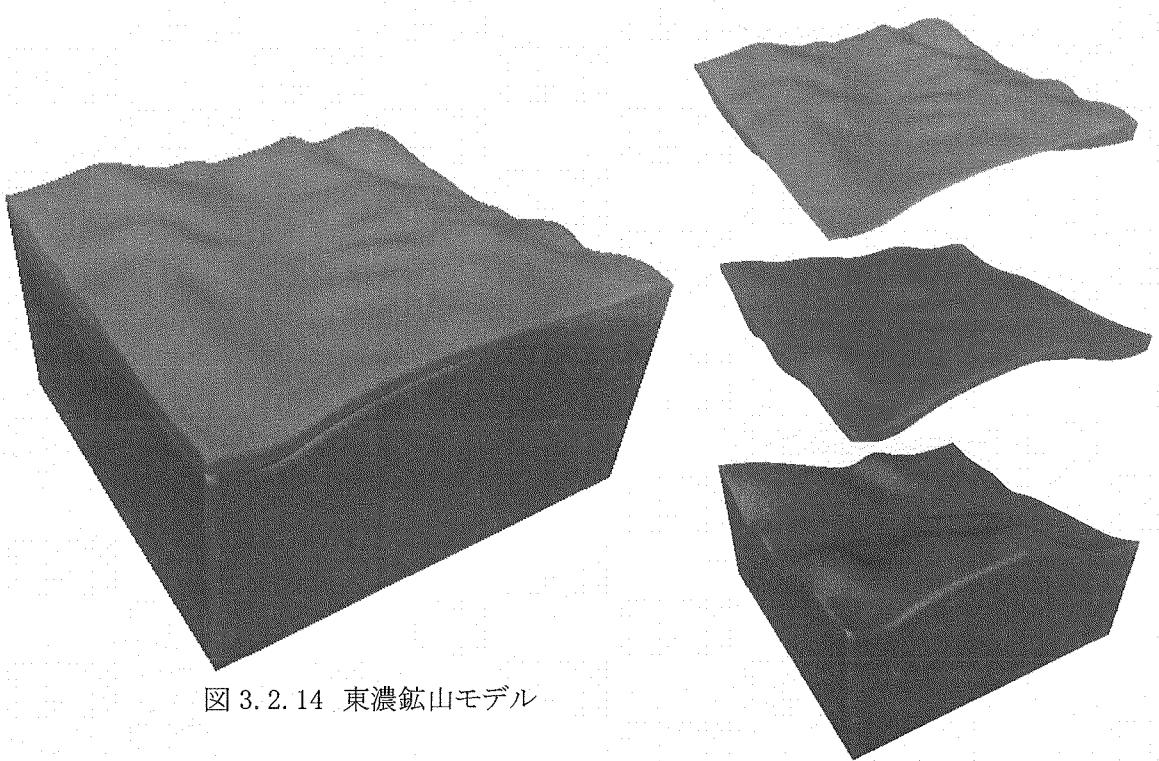


図 3.2.14 東濃鉱山モデル

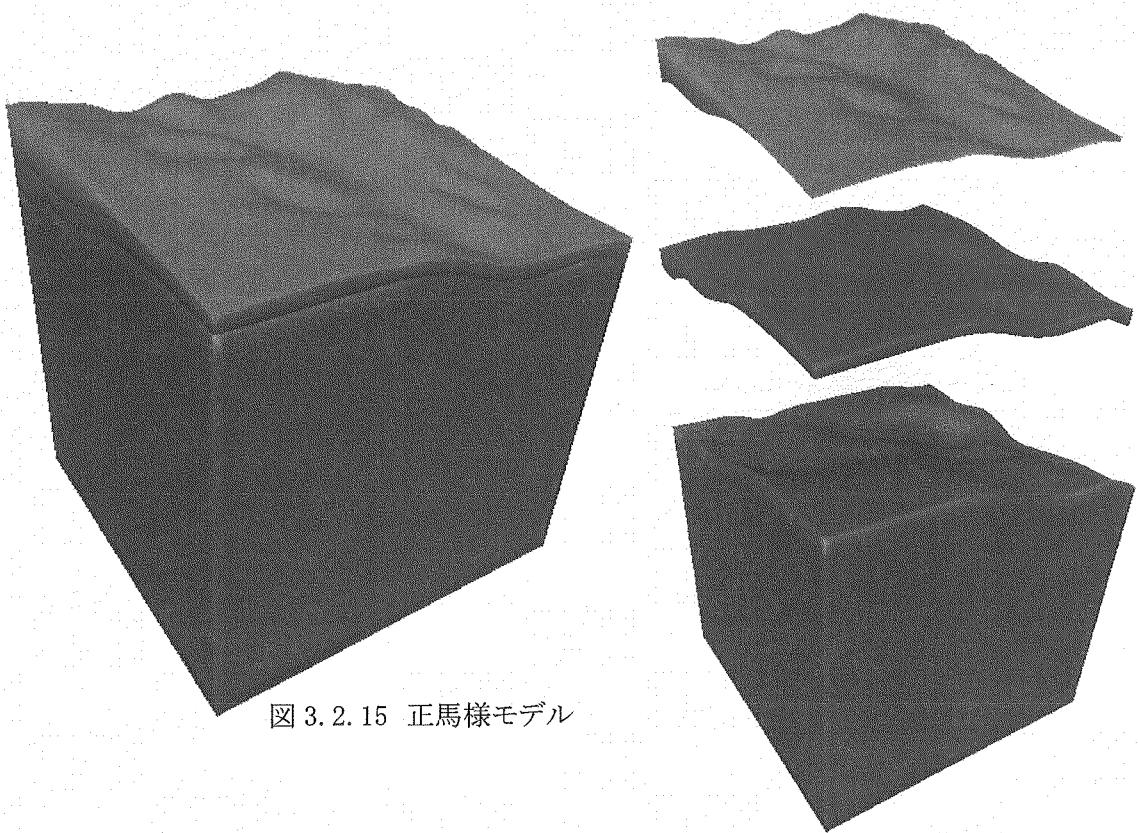


図 3.2.15 正馬様モデル

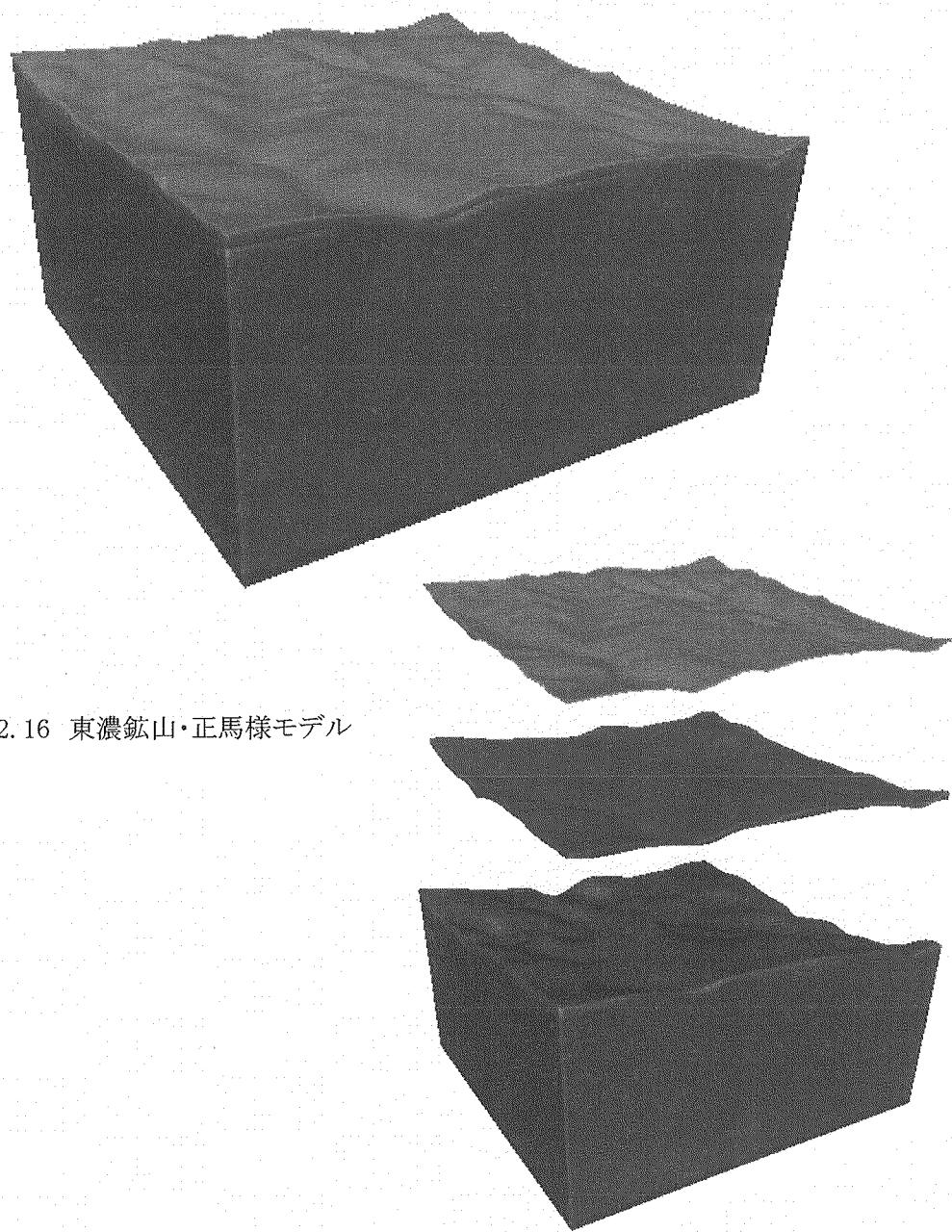


図 3.2.16 東濃鉱山・正馬様モデル

(3) 解析結果および考察

まず、上記の3種のモデルのそれぞれについて、重力および広域ひずみに対する応力の影響関数を求めた。そして、それぞれのモデルについて、領域中の全応力測定点の応力データを用いて観測方程式を解き、広域ひずみを求めた。それぞれのモデルについて求められた広域ひずみの値をまとめると表3.2.2のようである。表より、解析された広域ひずみの値はモデルによって大きく異なることがわかる。特に、東濃鉱山モデルにより求められた広域ひずみは正馬様モデルにより求められたそれらの30~50%程度であることがわかる。ここで、計測結果に相応の信頼性がある、もしくは、計測結果には誤差が含まれているがその誤差には地域による偏りがないと仮定すると、上記のモデルによる結果の相違は逆解析における仮定、すなわち、広域ひずみ一定の仮定および地層モデルの仮定に起因すると考えることができる。

表3.2.2 3層モデルによる広域ひずみの解析結果

モデル	領域寸法 (km)	広域ひずみ(m strain)			誤差 ε_A (MPa)
		ε_{xx}^G	ε_{yy}^G	γ_{xy}^G	
東濃	1x1x0.5	-0.621	-0.633	0.256	2.59
正馬様	1x1x1	-1.004	-1.465	0.820	7.12
東濃・正馬様	2x2x2	-0.876	-1.023	0.603	5.99

そこで、この原因を検討するために、東濃鉱山モデルおよび正馬様モデルのそれぞれについて、計測値と解析値の傾向を比較した。まず、前述のように、東濃鉱山における応力測定点は深度30m~270mに分布し、地層としては堆積層（モデル第1層、第2層）と基盤花崗岩（モデル第3層）上部に位置している。これに対し、正馬様用地における応力測定点は深度50~1000mの範囲に分布するが、当地区は東濃鉱山に比較して堆積層の層厚が薄いため、ほとんどの応力測定点は基盤花崗岩（モデル第3層）中にある。したがって、東濃鉱山モデルでは、堆積層と花崗岩上部における応力測定結果が逆解析の対象となり、正馬様モデルでは花崗岩上部~下部における応力測定結果が逆解析の対象となっている。

上記の前提の基に、表3.2.2の広域ひずみから計算される応力分布を実測値と比較すると図3.2.17および図3.2.18のようである。ただし、図3.2.17は、東濃モデルの試錐孔TM-1に対応する鉛直測線上の応力分布、図3.2.18は、正馬様モデルの試錐孔AN-1に対応する鉛直測線上の応力分布を示している。図より、ともに測定値はばらつきが大きいが、大局的な傾向は解析値と調和的であることがわかる。しかし、図3.2.17の東濃鉱山モデル・TM-2では測定点は全て深度200mまでにあるのに対し、図3.2.18の正馬様モデル・AN-1では、測定点は深度1000mまでの範囲にあり、深度300m以浅では測定値は解析値に比較して小

さいことがわかる。図は省略したが、他の試錐孔についても同様な傾向が認められた。

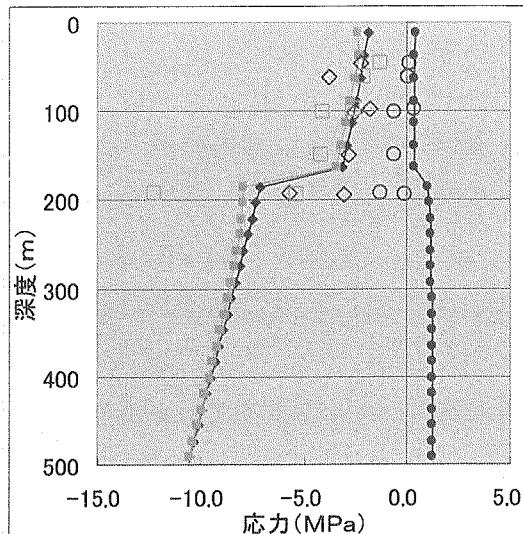


図 3.2.17 東濃鉱山モデルによる
解析結果と現場計測結果
との比較(TM-1)

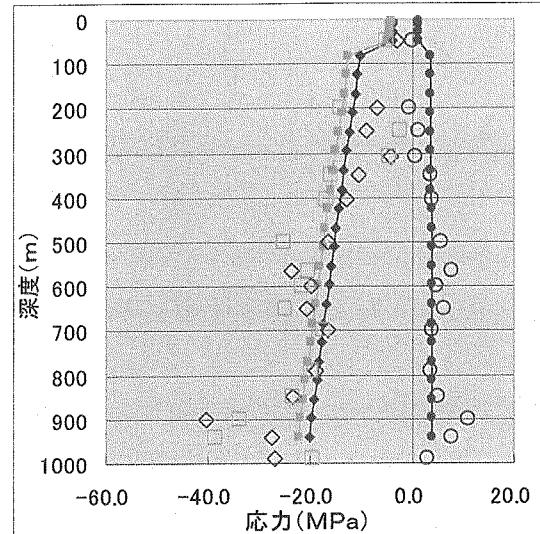


図 3.2.18 正馬様モデルによる
解析結果と現場計測結果
との比較(AN-1)

— σ_{xx}
- σ_{yy}
• τ_{xy}
◊ 計測値 σ_{xx}
□ 計測値 σ_{yy}
○ 計測値 τ_{xy}

したがって、東濃鉱山モデルおよび正馬様モデルによる逆解析結果の相違は、逆解析の対象とした応力測定点の分布に關係することが示唆される。

次に、正馬様用地の試錐孔における亀裂分布の計測結果によると、花崗岩体中の亀裂密度は大きく変動し、花崗岩体上部 250m 程度の範囲と深部（大略 700m 以深）で亀裂頻度が高くなっていることが報告されている。ここで、岩盤の弾性率は構成岩石の弾性率と岩盤内に存在する亀裂の密度と開口・閉合状態と密接に関係する（金子ほか、1988）。特に、開口亀裂は岩盤の弾性率を著しく低下させるが、閉合亀裂が岩盤の弾性率に及ぼす影響は小さいことが知られている。また、深度の増大に伴って応力が増大するため、比較的深部では亀裂の多くは閉合状態にあると予想される。したがって、比較的浅部に亀裂密度が高い領域がある場合には、その領域の岩盤弾性率は亀裂の影響により低下しているが、比較的深部に亀裂密度が高い領域がある場合には、その領域の岩盤弾性率は亀裂の影響をさほど受けていないと考えることができる。この考察に基づくと、花崗岩体上部 250m の範囲の亀裂密度が高い領域では、岩盤弾性率が下部に比較して小さい可能性を指摘できる。言い換えれば、花崗岩の弾性率は一様でなく、深度で異なることを示している。

そこで、土岐花崗岩体で亀裂密度の高い領域が花崗岩境界面から深さ 250m までの範囲にあることから、土岐花崗岩を上部 250m の領域とそれ以深の領域の 2

層に分け、前者を土岐花崗岩上部、後者を土岐花崗岩下部と呼ぶこととする。そして、それぞれの地層の物性値を表 3.2.3 で与えた。特に、第3層：土岐花崗岩上部のヤング率は上面で 6GPa、下面で 20GPa として、深度に伴って弾性率が線形に変化すると仮定した。

前述の東濃鉱山モデル、正馬様モデル、東濃鉱山・正馬様モデルに対して以上の修正を加え、これら修正モデルを用いて逆解析を行った結果をまとめると表 3.2.4 のようである。表より、3 種のモデルに対して求められた広域ひずみの値がほぼ一致することがわかる。したがって、本解析の仮定のもとでは、当地域の地層モデルとしては表 3.2.1 の 3 層構造モデルよりは表 3.2.3 の 4 層構造モデルが適していると判断できる。そこで、東濃鉱山・正馬様モデル（4 層構造モデル）により解析された応力分布と測定値との関係を試錐孔ごとに示すと図 3.2.19 のようである。図より、いずれの試錐孔でも解析された応力分布は計測値の平均的傾向を示していることが分かる。また、同定された応力 6 成分の分布を示すと図 3.2.20 となる。図より、堆積岩と花崗岩など地層ごとの物性値のコントラストが当地域の応力場を複雑にしていることがわかる。

表 3.2.3 修正モデルの岩盤物性値

層番号	地層名	ヤング率 (GPa)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
1	瀬戸層群・生俵累層・明世累層	2.0	0.3	18
2	土岐夾炭層・土岐花崗岩体風化部	2.0	0.3	19
3	土岐花崗岩上部	6.0-20.0	0.3	26
4	土岐花崗岩下部	20.0	0.3	26

表 3.2.4 修正モデルによる広域ひずみの解析結果

モデル	領域寸法 (km)	広域ひずみ (m strain)			誤差 ε_A (MPa)
		ε_{xx}^G	ε_{yy}^G	γ_{xy}^G	
東濃	1x1x0.5	-0.426	-0.396	0.193	2.65
正馬様	1x1x1	-0.333	-0.469	0.274	7.19
東濃・正馬様	2x2x2	-0.334	-0.436	0.267	4.87

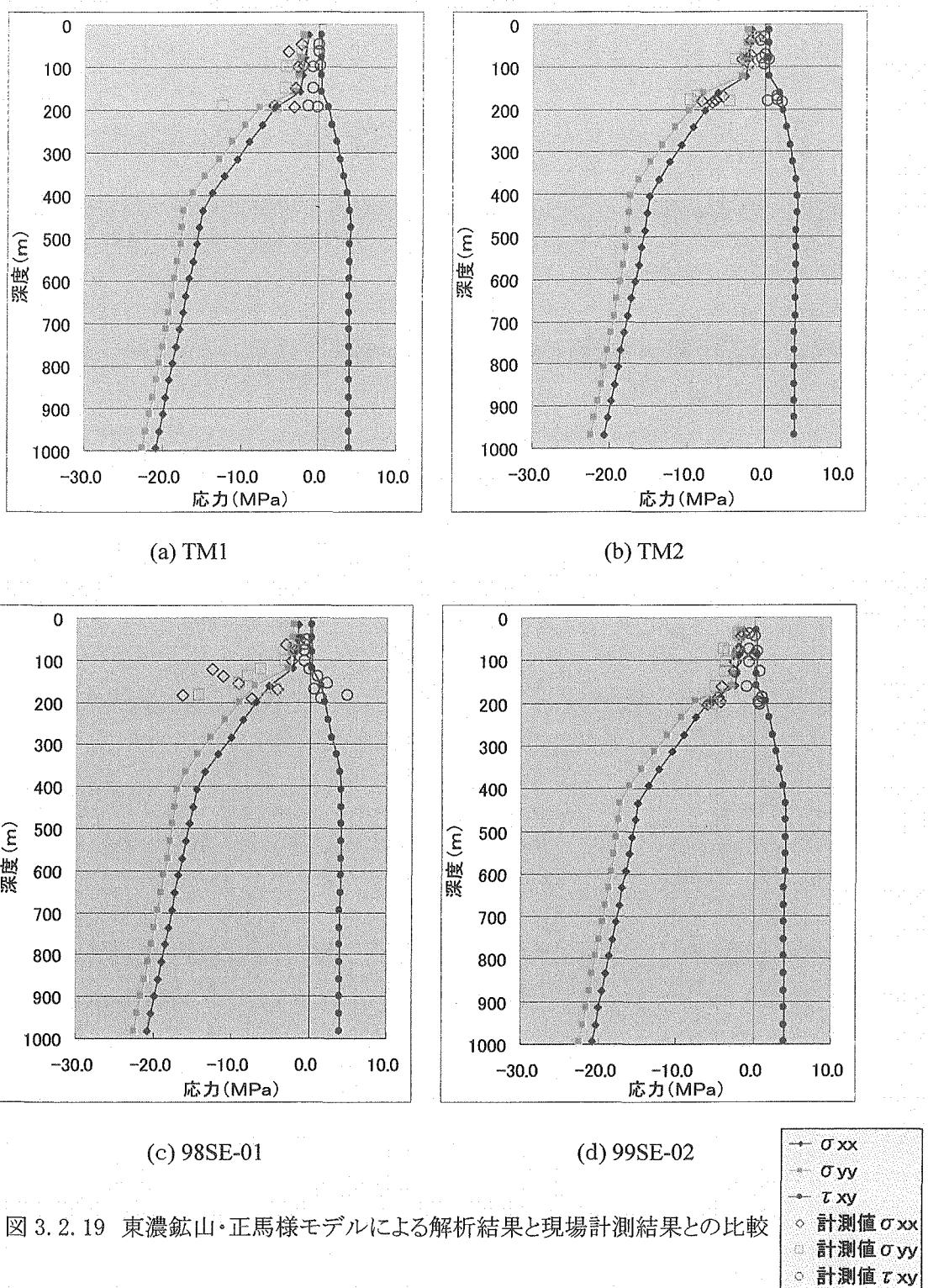


図 3.2.19 東濃鉱山・正馬様モデルによる解析結果と現場計測結果との比較

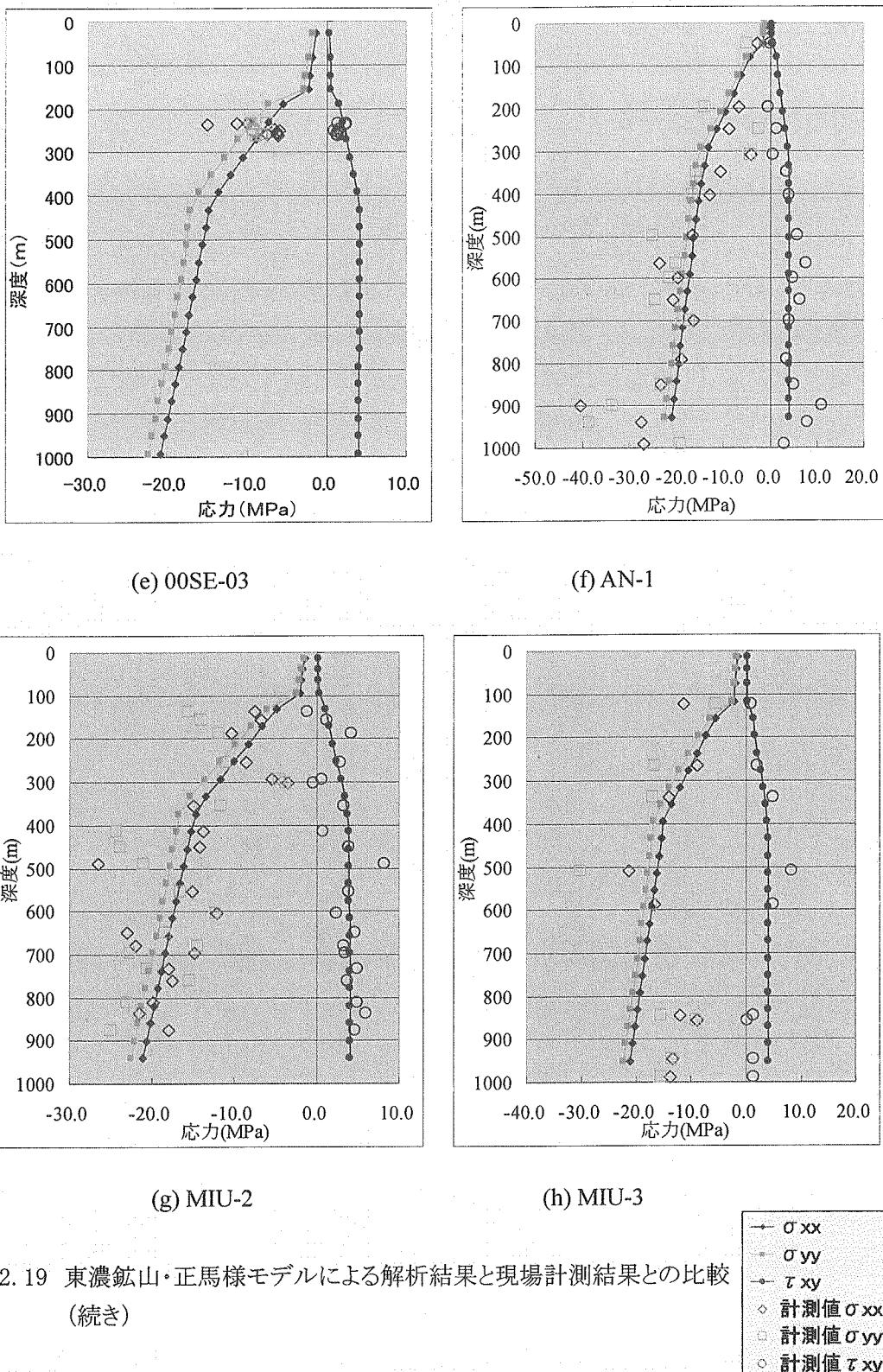


図 3.2.19 東濃鉱山・正馬様モデルによる解析結果と現場計測結果との比較
(続き)

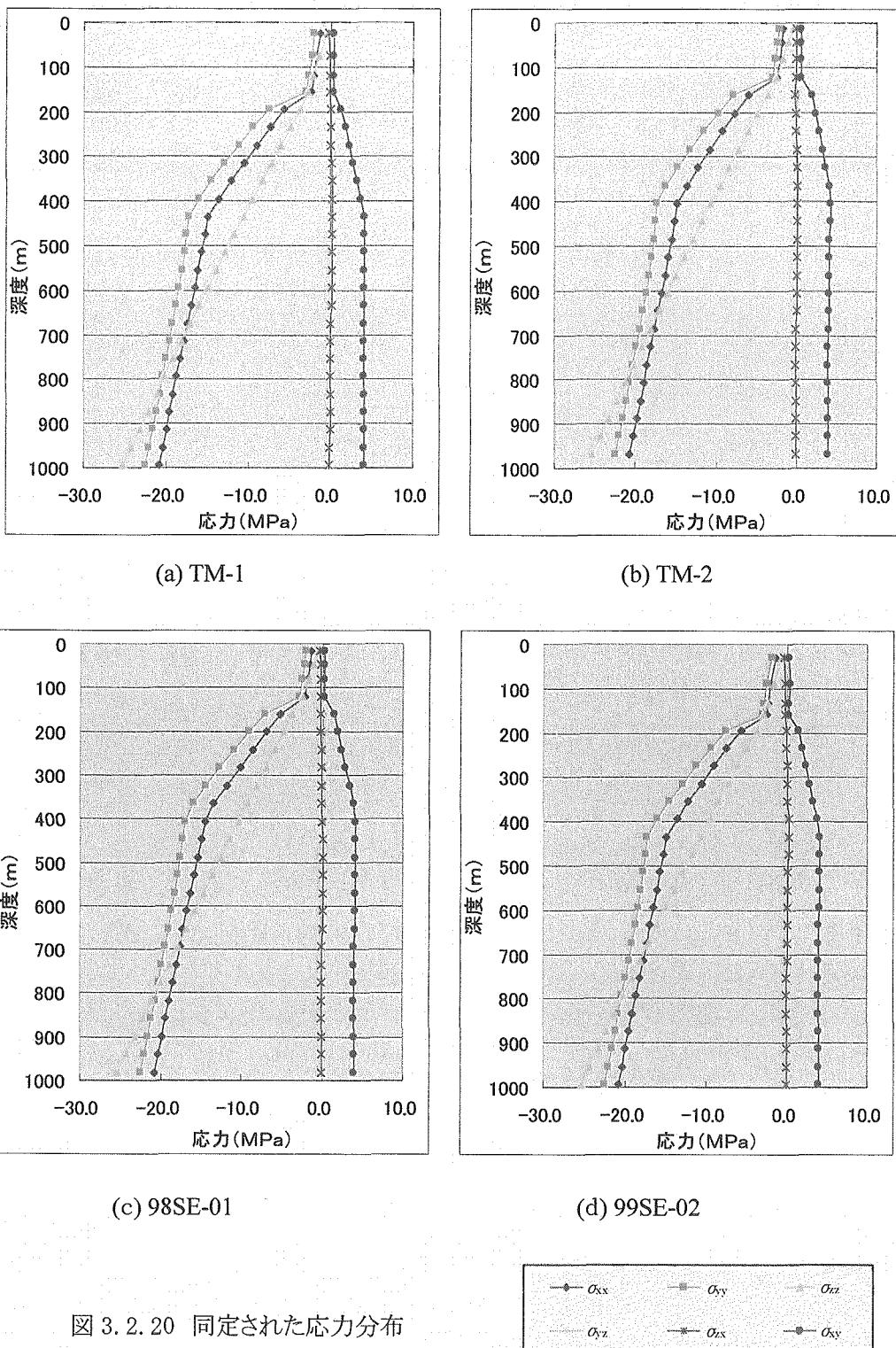


図 3.2.20 同定された応力分布

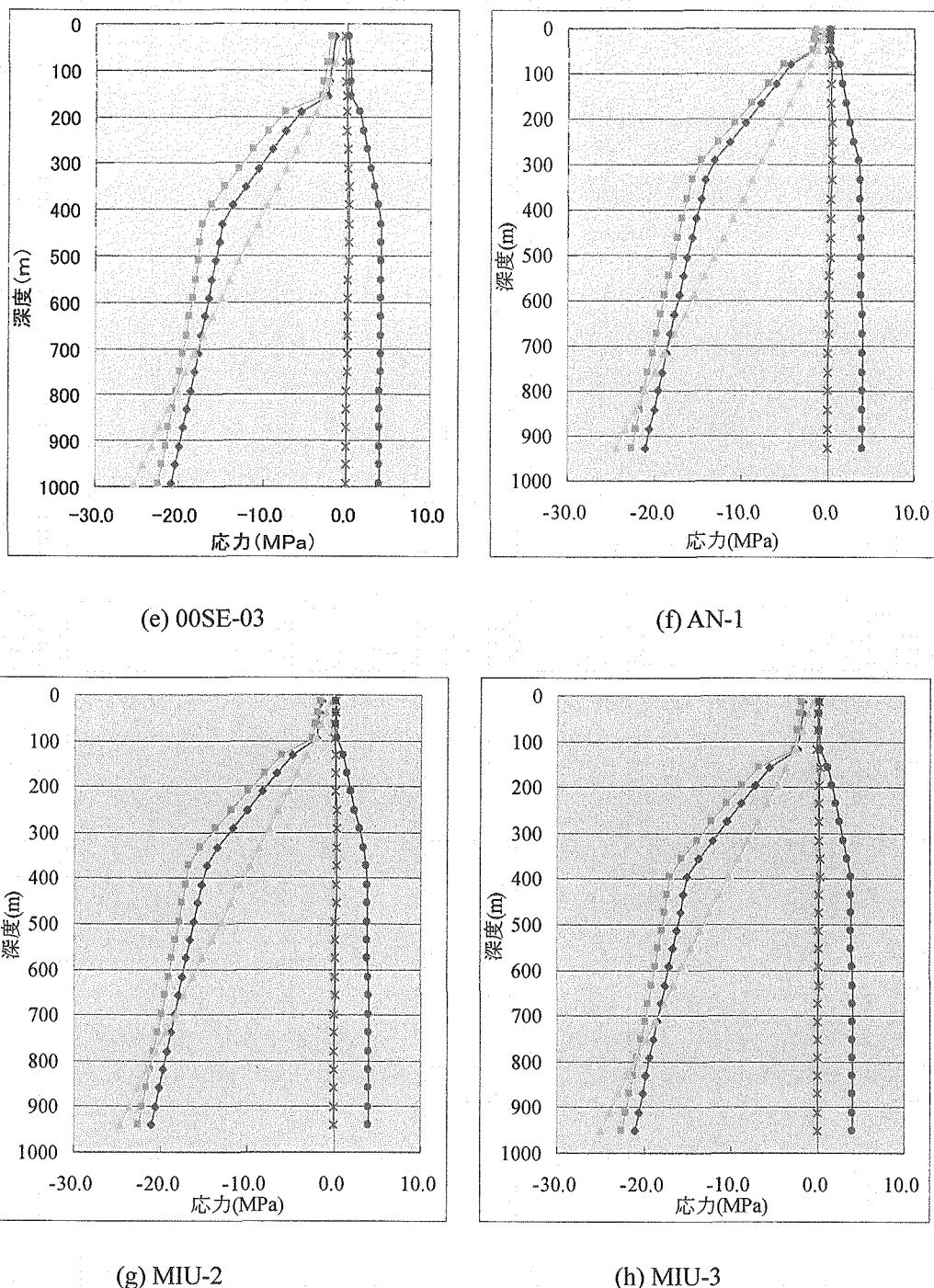
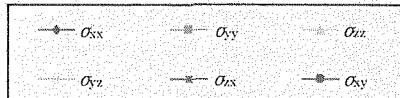


図 3.2.20 同定された応力分布(続き)



(4) 局所応力の変動に関する考察

前述のように、解析された応力分布は計測値の平均的傾向を示すが、個々の計測点で比較すると計測値と解析値は一致しない場合が多い。ここで、計測値と解析値の不一致の原因としては、次の2つを考えることができる。一つは、応力測定システムの誤差であり、計測誤差と解析誤差（計測値から応力を算定する時の誤差であり、主として解析仮定に起因する誤差）などが合成されたものである。もう一つは、岩盤の力学的性質の不均一性に起因する局所応力の変動に関するものである。前者は、計測値の信頼性に対応することから、計測誤差と呼ぶことにする。後者は、逆解析モデルの信頼性、言い換えれば、地盤を層構造として、同一層内の岩盤を均質と仮定した解析法の信頼性を示すことから、モデル化誤差と呼ぶことにする。対象地域における局所応力の変動が計測誤差とモデル化誤差のいずれに起因するかを判定することはできないが、もし、モデル化誤差が主因であるとすると次の推論がなりたつ。すなわち、地盤内の応力分布は地盤の不均質性、すなわち、地層構造とその物性のコントラストに密接に関係することから、計測された応力の変動は、同一地層内でも岩盤の力学的性質が変動すること、言い換えれば、地層が不均質な岩盤から構成されていることを示唆している。したがって、このモデル化誤差の問題を解消するためには、地層内の力学的性質の不均一性を評価した上でそれを表現するモデルを作成する必要がある。しかし、限られた計測量で決定論的モデルを作成することは現実的には困難であることから、このためには確率論的モデルの導入が必要であるかもしれない。少なくとも現時点では、地層内の岩盤物性を均質と仮定したモデルで逆解析した場合に、同定された応力は確率的期待値として取扱う必要があると思われる。

3. 2. 5 まとめ

局所応力測定結果から広域ひずみを同定し、これを用いて地盤内の3次元応力場を同定する方法について検討した。具体的には、まず、対象領域内の局所応力測定結果から広域ひずみ、すなわち、領域外周境界の変位境界条件を逆解析し、これにより領域内の3次元応力場を同定する方法を提案した。次に、地層形状に起因した応力場の擾乱の傾向を把握するために、単純な地層モデルを作成し、基盤形状が地盤内の応力分布に及ぼす影響について分析した。これらの結果に基づいて、東濃鉱山および正馬様用地を対象として、表面地形と地層形状を考慮した3次元有限要素モデルを作成し、同地域内の応力測定結果から広域ひずみを逆解析し領域内の3次元応力場を同定することを試みた。とくに、地盤の不均質性と領域サイズの影響評価を目的として、解析領域の異なる複数の地盤モデルを作成した。そして、これらのモデルに対する逆解析結果を比較検討し、計測結果に適合する地盤モデルを確定させるとともに、同モデルにより推定された3次元応力場の特徴について考察した。

3. 3 中領域モデル解析

3. 3. 1 解析手順

地下空洞やまわりの応力状態などを把握するために、有限差分法、有限要素法および境界要素法を用いた数値解析によって数多くの予測解析が行われている。このような予測解析には初期応力条件を正しく設定することが重要な課題となる。この初期応力条件として、次のように仮定された応力場がよく用いられている。

$$\sigma_{zoz} = \rho gh, \quad \sigma_{xzo} = \sigma_{yzo} = \frac{\nu}{1-\nu} \rho gh \quad (3.3.1)$$

ここに、 ρ は岩盤の密度[kg/m³]、 g は重力の加速度(≈9.81m/s²)、 h は地表からの被りの厚さ[m]、 ν は岩盤のポアソン比である。この初期応力条件は重力に起因する水平方向変位を拘束するという仮定のもとに弾性理論より導かれたもので、一般には、実際の応力場とは大きく異なる。このことから、本研究では、実際に応力を測定するものとする。ただし、地層の不連続性や不均一性などによって、測定された場所によって応力場が大きく異なるのが普通である。そこで多くの測定点で計測された局所応力場から広域の応力場を推定するものとする。ただし、ここでは、広域の応力場は次式で与えられるものとする。

$$\sigma_o(h) = S + k\rho gh \quad (3.3.2)$$

ここに

$$\sigma_o = \begin{bmatrix} \sigma_{xzo} & \tau_{xyo} & \tau_{zxo} \\ \tau_{xyo} & \sigma_{yzo} & \tau_{yzo} \\ \tau_{zxo} & \tau_{yzo} & \sigma_{zoz} \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} S_x & S_{xy} & 0 \\ S_{xy} & S_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad k = \begin{bmatrix} k_x & k_{xy} & 0 \\ k_{xy} & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix}, \quad h = z - H$$

ここに、 z は任意点の標高[m]、 H はモデルの最高点の標高[m]である。この広域応力場は一つの主応力方向が垂直であり、その大きさは被り圧に相当し、かつ、ゼロでない応力成分が深さに対して線形関係にあるという仮定のもとに成り立っている。すなわち一つの主応力方向が鉛直と仮定しているので、 z 軸に関するせん断成分がすべてゼロとなっていて、他の応力成分は深さの一次関数となっている。したがって、モデルの最高点においても初期応力が生じていることとなる。言い換えれば、地表面においても応力が生じていることとなる。

広域応力場を求める手順としては、まず、広域応力場を求める対象となる領域をモデル化し、各広域応力成分をそれぞれ独立にモデルに作用させたときの、各測定点の各応力成分を求める。このとき仮定する7通りの地殻応力場を表3.3.1に示す。

3.3.2 有限差分法による中領域モデル解析

(1) 解析モデルと入力データ

解析に用いたモデルを図 3.3.1 に、その概要を表 3.3.2 に、解析に用いた岩盤物性値を表 3.3.3 に示す。

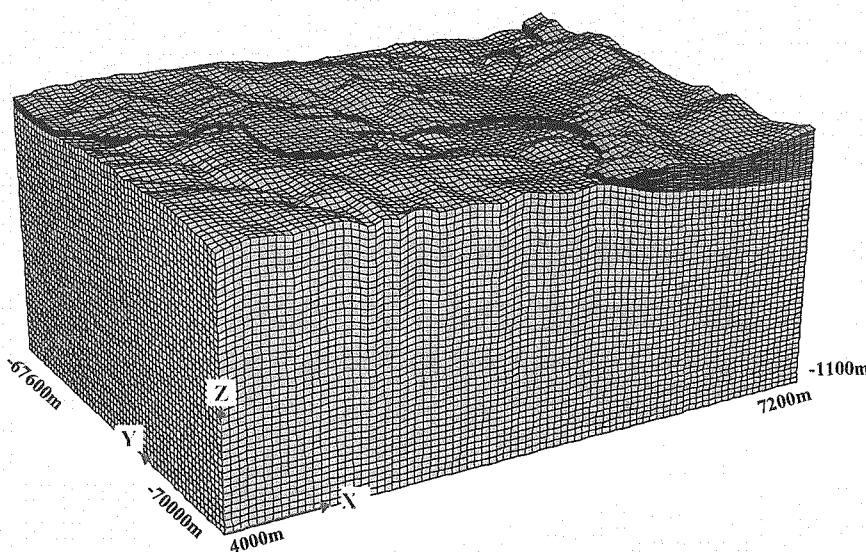


図 3.3.1 FLAC^{3D}による不均質モデルの要素分割

表 3.3.2 FLAC^{3D} 解析に用いたモデルの概要

対象領域[m]			解析モデル	
東西 方向	南北 方向	深さ 方向	要素数	節点数
3200	2400	1400 (-1100-300)	246560	260881

表 3.3.3 FLAC^{3D} 解析およびBEM 解析に用いた岩盤物性値

地層名	密度 (kg/m ³)	ヤング率 E (GPa)	ポアソン比 ν	粘着力 (MPa)	内部摩擦角 (°)	引張強度 (MPa)
軟弱地層	1835	2.21	0.30	1.67	19.7	
花崗岩	2560	50.09	0.35	32.3	54.5	7.46

また、各試錐孔の孔口位置および超深地層研究所立坑の坑口位置を表 3.3.4 に示す。解析に用いた応力測定値は平成 13 年度報告書（水田、2002）に記載されている応力測定結果のすべてである。したがって、水平応力場は水圧破碎応力測定結果であり、鉛直応力場は AE 法（TM-1, TM-2, 98SE-01, 99SE-02）また

は AE 法と DRA 法 (MIU-1, MIU-2, MIU-3) による測定結果である。ただし 1 測点について複数の方法による測定結果（土被り圧も含む）がある場合にはそれらを平均して用いた。さらに、モデルの 1 要素内に複数の測点がある場合についてもそれらを平均して用いたので、入力データの数は測点の数より少ないケースが多い。

表 3.3.4 試錐孔の孔口位置および超深地層研究所立坑の坑口位置

		X	Y	Z
1	00SE-03	4759.6	-68230.3	285
2	98SE-01	4742.5	-68318.5	264
3	99SE-02	4759.6	-68211.9	285
4	AN-1	5454.7	-68877.3	216.376
5	MIU-1	5488.8	-68629.4	220.074
6	MIU-2	5433.3	-68552.4	223.755
7	MIU-3	5340.2	-68455.3	230.475
8	TM-1	4816.2	-68252	288
9	TM-2	4625.4	-68274.4	255
10	瑞浪の主立坑中心	6723.0	-69356.5	200.5

(2) 解析結果

上記の入力データを用い、式(5)を正規化し、正規化された方程式を解いて得られた広域応力場 $\{ S_x, S_y, S_{xy}, k_x, k_y, k_{xy}, k_z \}$ を表 3.3.5 に示す。

表 3.3.5 FLAC^{3D}による推定された地殻応力場

S_x (MPa)	0.852
S_y (MPa)	0.347
S_{xy} (MPa)	-0.446
k_x	0.767
k_y	0.667
k_z	0.906
k_{xy}	-0.454

試錐孔 00SE-03, 98SE-01, 99SE-02, AN-1, MIU-1, MIU-2, MIU-3, TM-1 および TM-2 で得られた測定データをそれぞれ図 3.3.2(a) ~ (i) の左側に示す。また、図 3.3.2(a) ~ (i) の右側には、測定データを最小自乗法により直線近似し、かつモデルの 1 要素内に複数の測点がある場合にはそれらを平均したものが示されている。

それぞれの試錐孔の各 9 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_2 および鉛直応力成分 σ_z の大きさをそれぞれ図 3.3.3(a) ~ (i) の左側に示す。また、水平面内最大主応力の方向をそれぞれ図 3.3.3(a) ~ (i) の右側に示す。また、超深地層研究所主立坑沿いの 9 点について推定された応力の大きさを図 3.3.4 の左側に、水平面内最大主応力の方向を図 3.3.4 の右側に示す。

ただし、これらの図において、最大主応力の方向を示す θ は、上方から見て、N 方向から時計回りの角度である。

なお、これについては、図 3.3.7(a) ~ (i)、図 3.3.8、図 3.3.9(f), (g)、図 3.3.10(f), (g) および図 3.3.11 についても同じである。

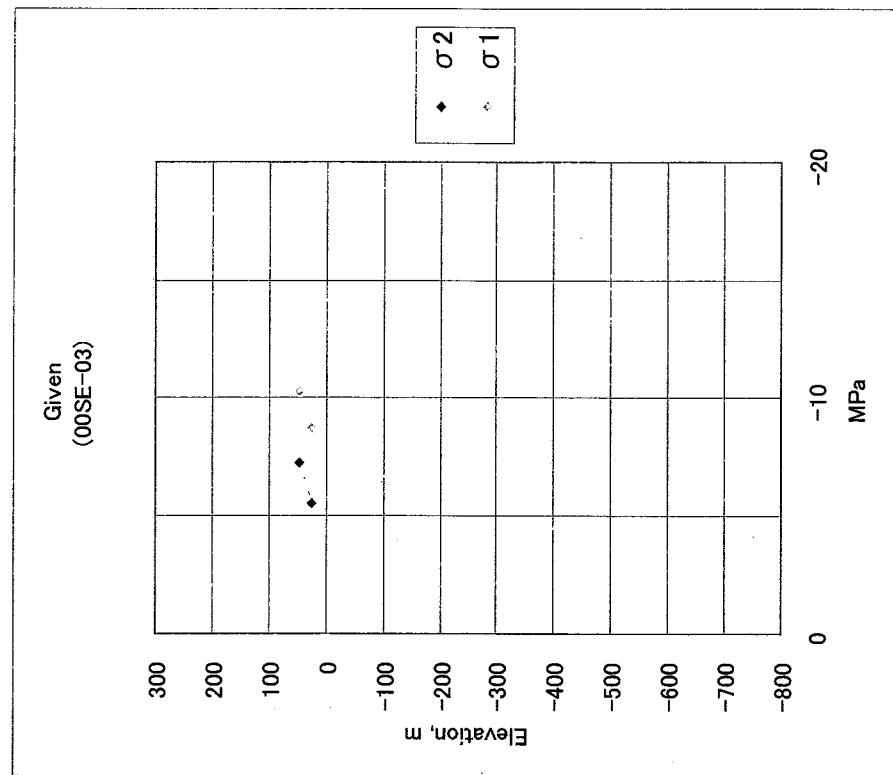
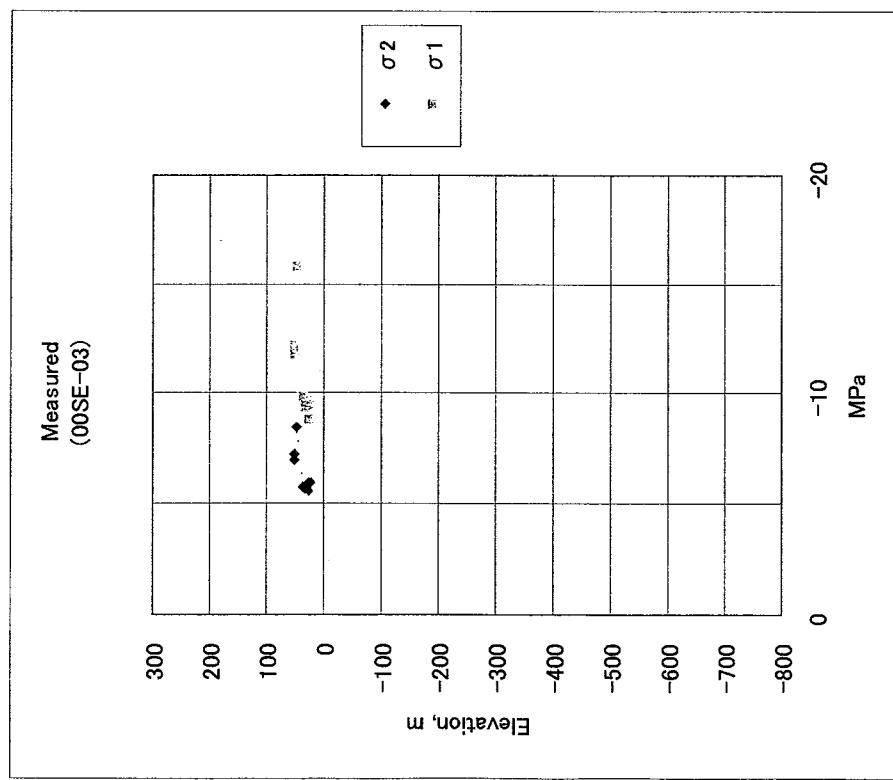


図 3.3.2(a) 試錐孔 00SE-03 (全測点が花崗岩内) で得られた測定データと測定データから抽出された入力データ

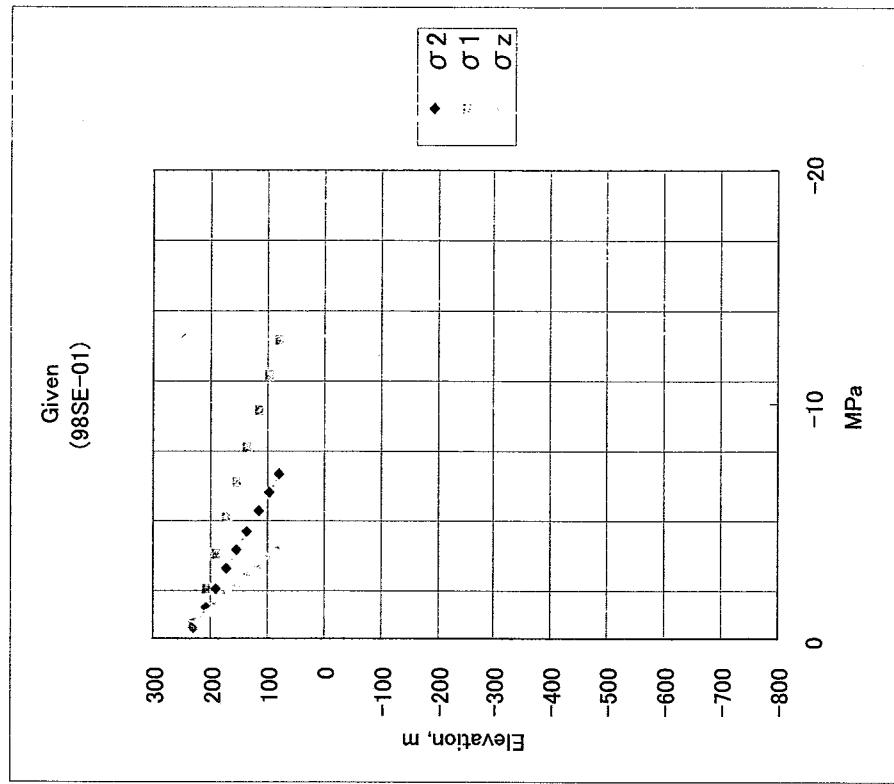
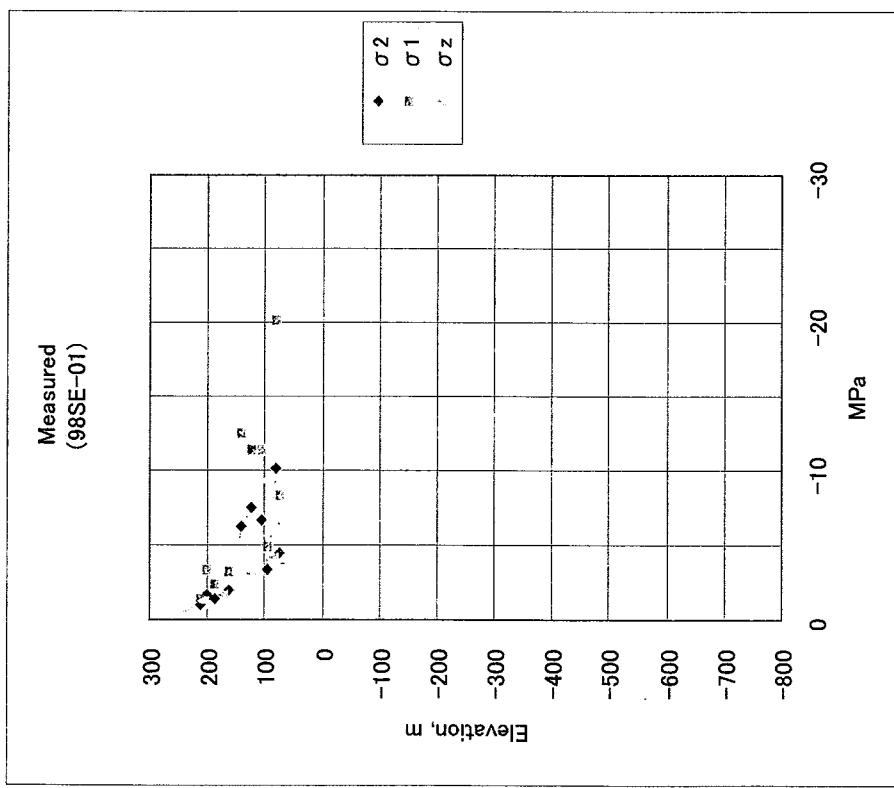


図 3.3.2(6) 試験孔 98SE-01 (下部の 2 測点が花崗岩内) で得られた測定データと測定データから抽出された入力データ

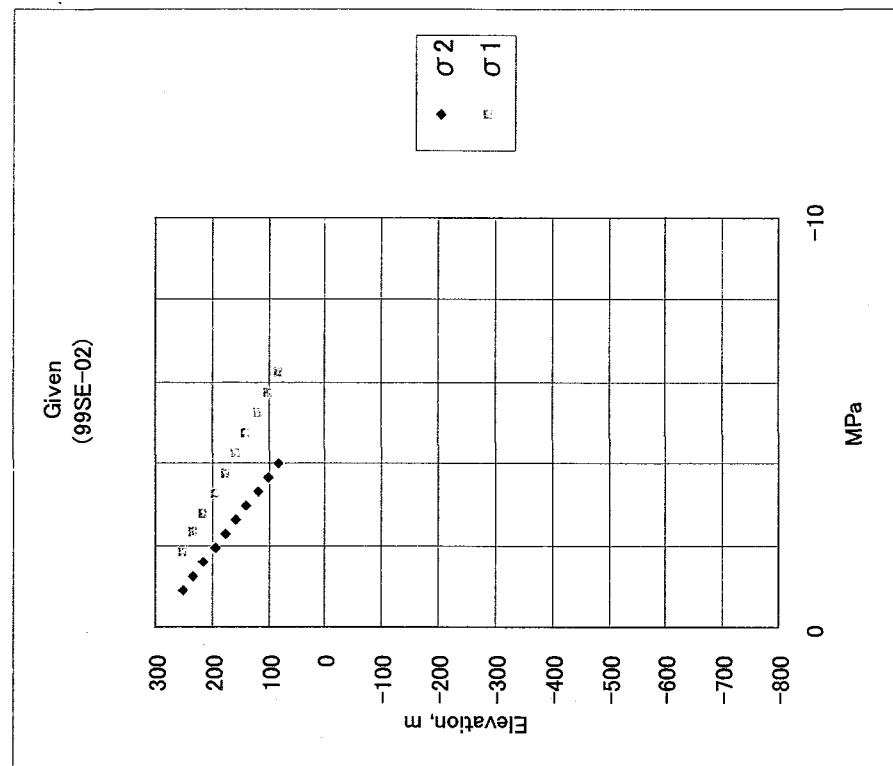
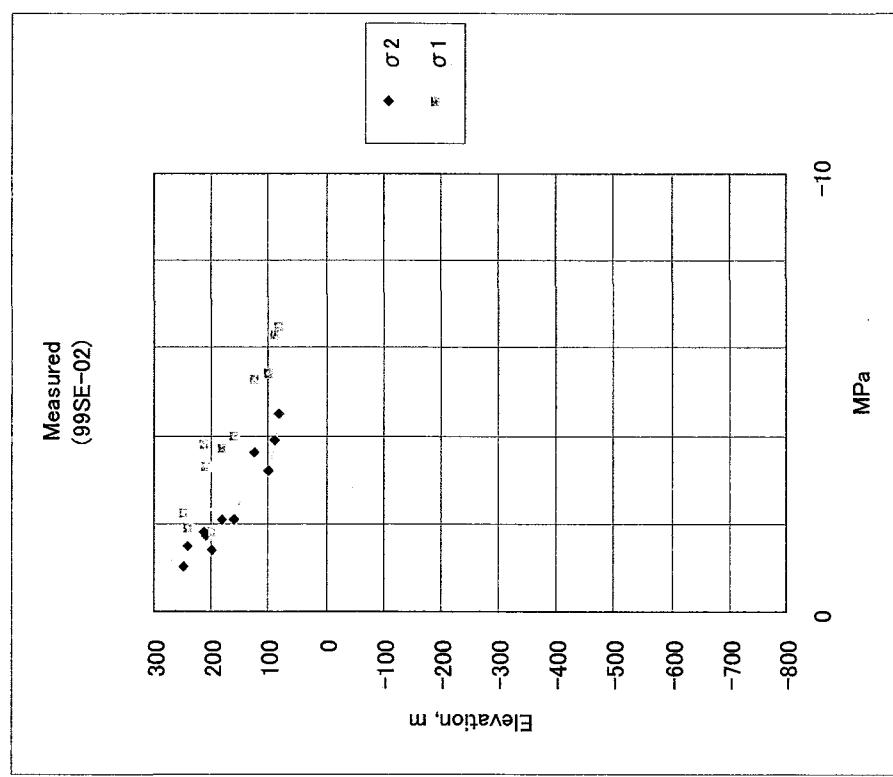


図 3.3.2(c) 試錐孔 99SE-02 (下部の 4 測点が花崗岩内) で得られた測定データと測定データから抽出された入力データ

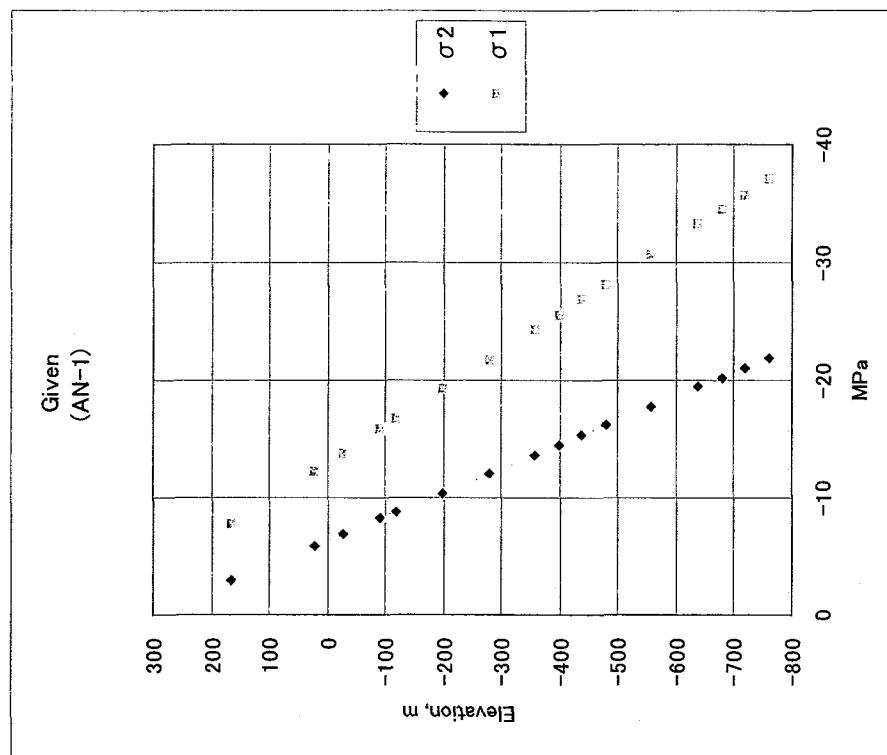
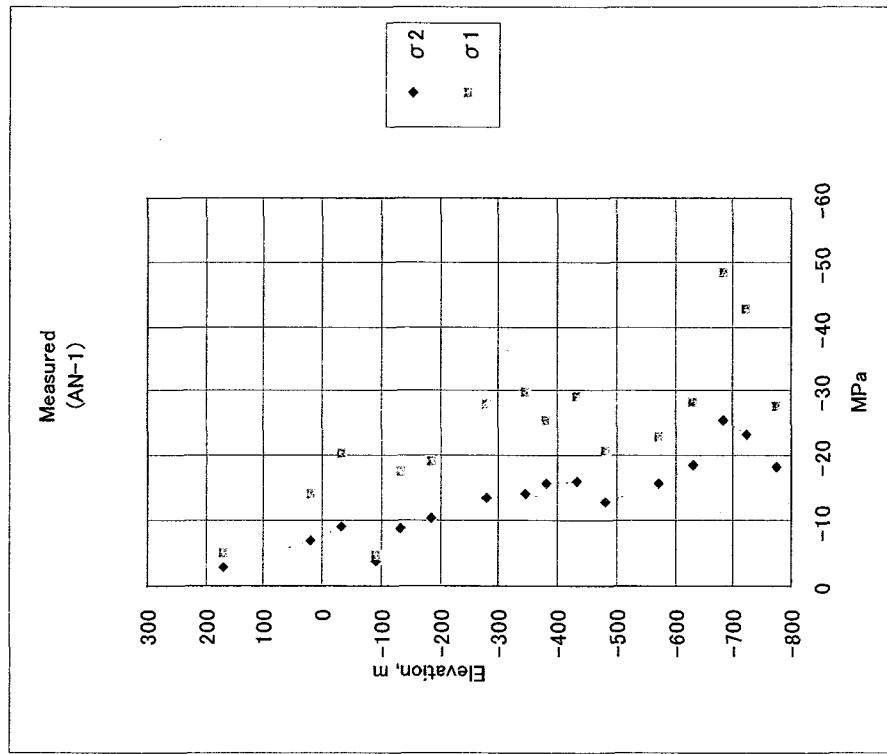
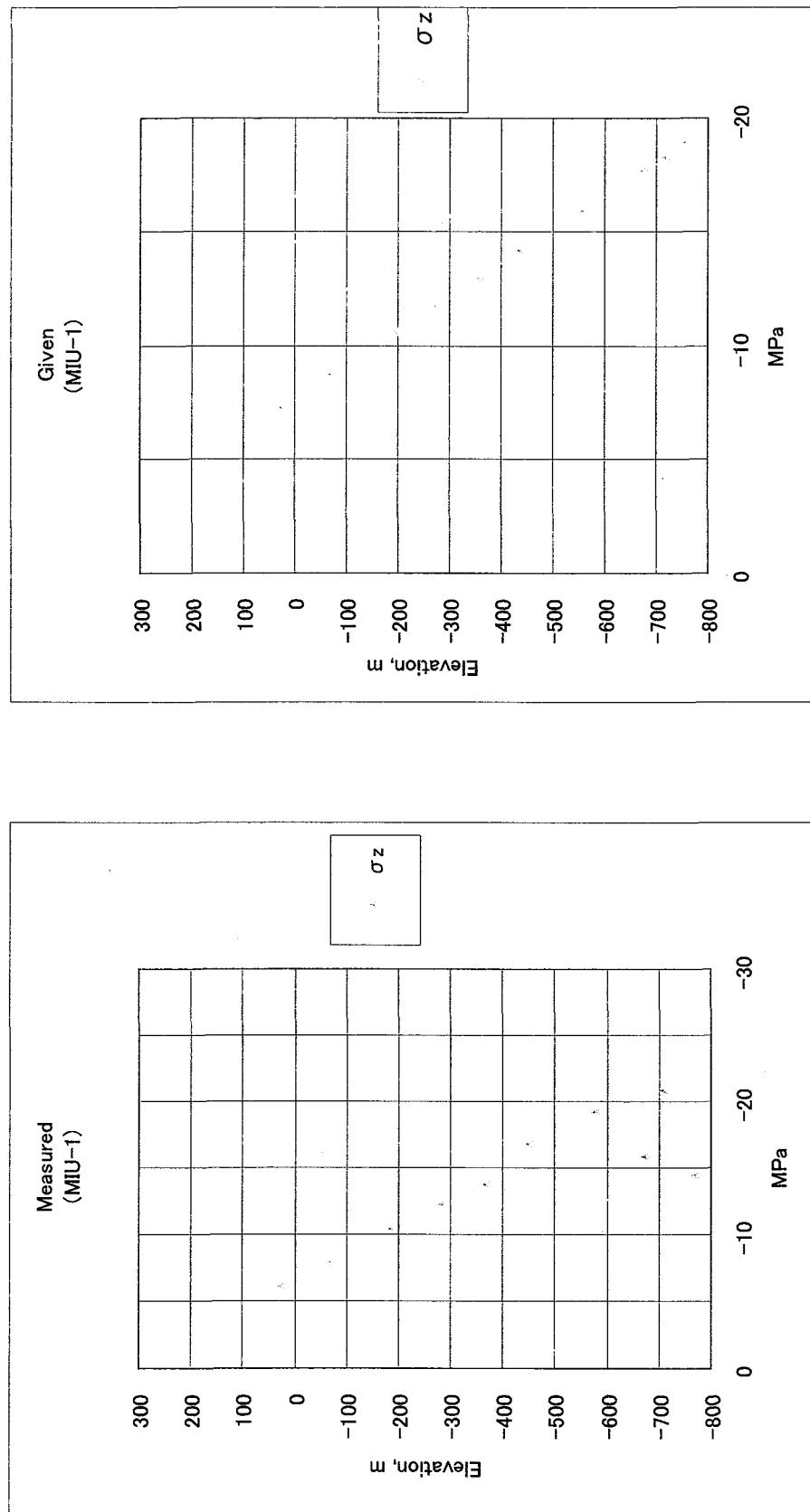


図 3.3.2(d) 試験孔 AN-1（上部 1 測点だけが軟弱地層内）で得られた測定データと測定データから抽出された入力データ

図 3.3.2(e) 試錐孔 MIU-1 (全測点が花崗岩内) で得られた測定データと測定データから抽出された入力データ



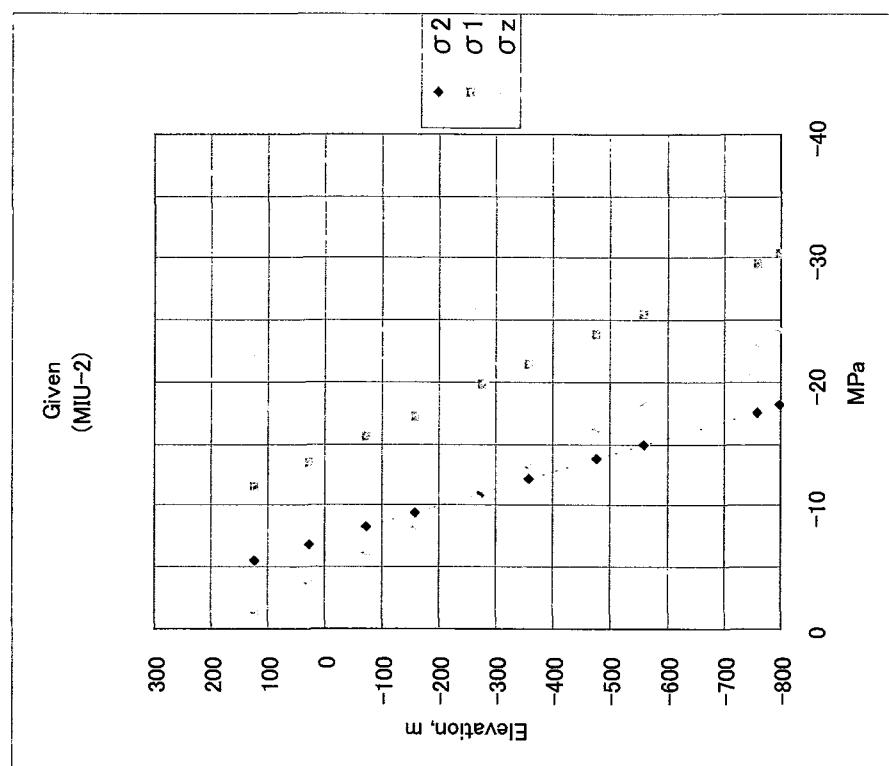
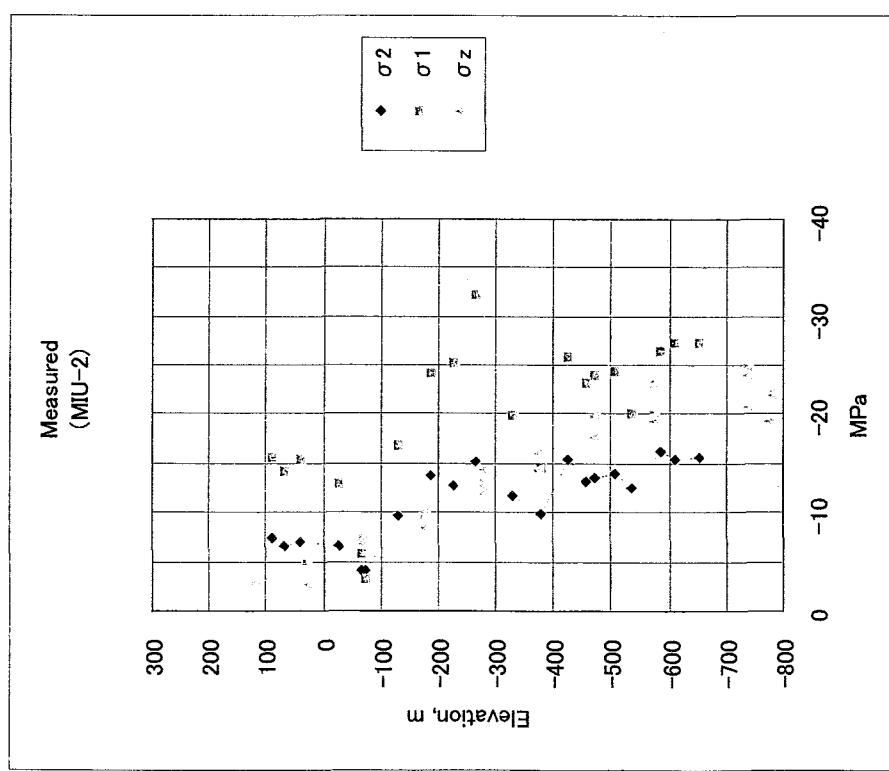


図 3.3.2(f) 試錐孔 MIU-2 (全測点が花崗岩内) で得られた測定データと測定データから抽出された入力データ

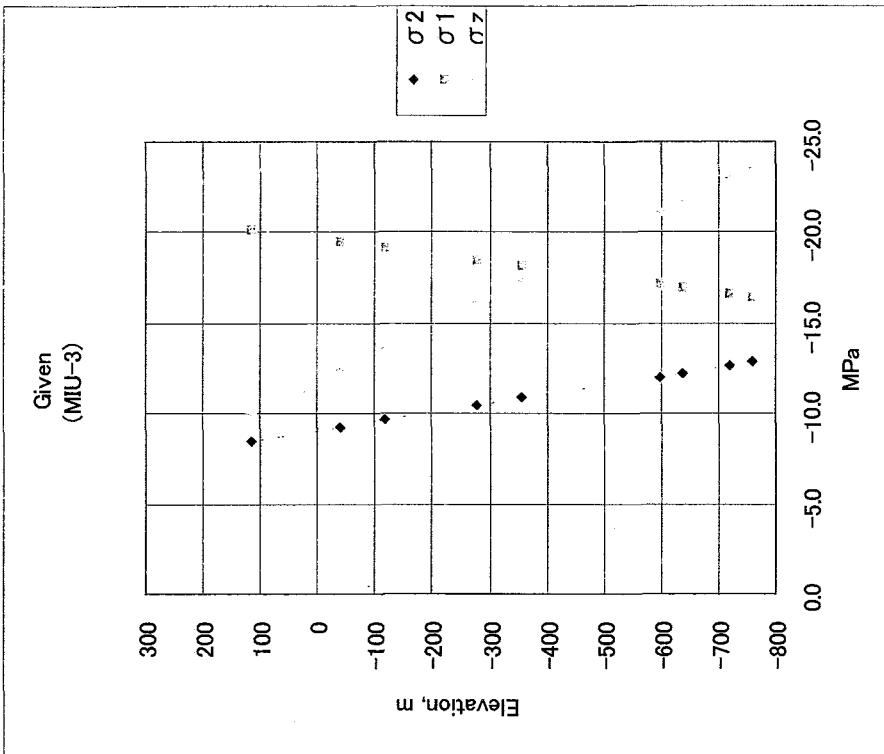
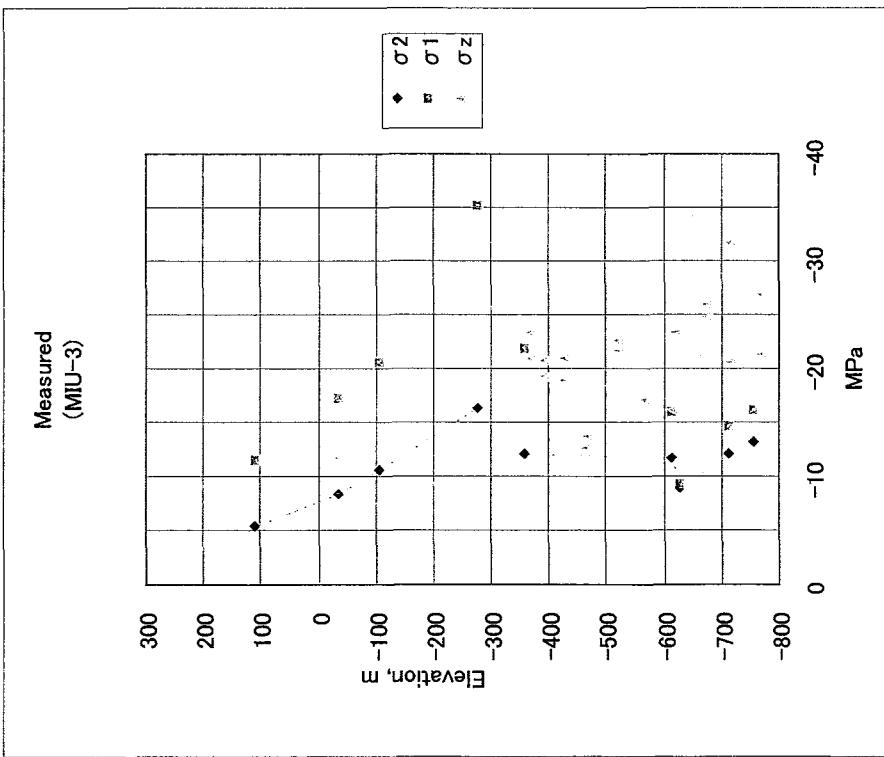


図 3.3.2(g) 試験孔 MIU-3 (全測点が花崗岩内) で得られた測定データと測定データから抽出された入力データ

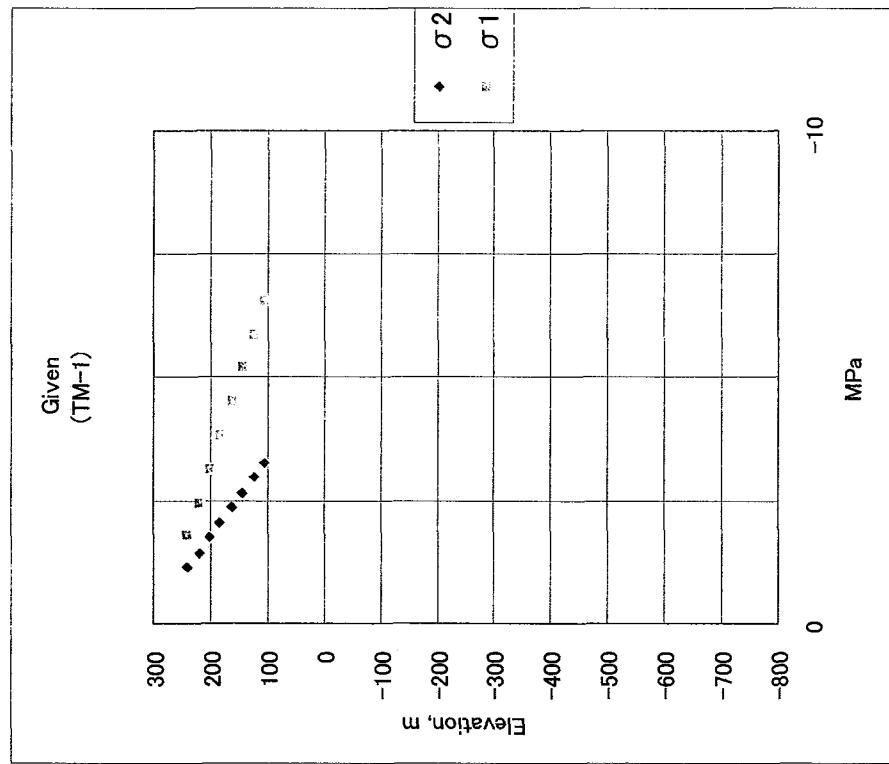
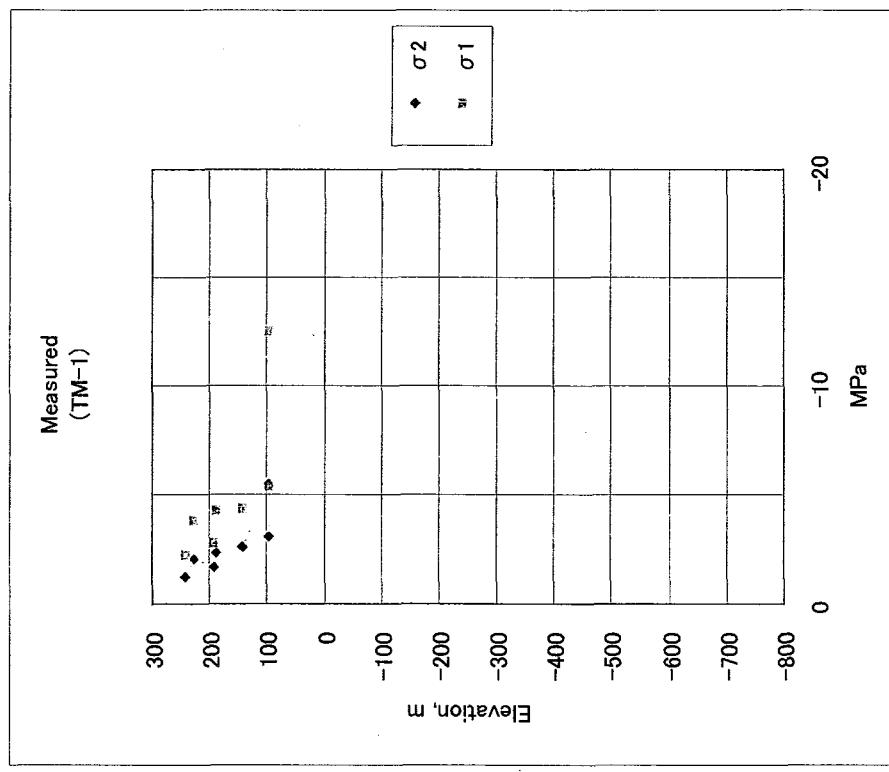


図 3.3.2(h) 試錐孔 TM-1 (下部の 1 点だけが花崗岩内) で得られた測定データと測定データから抽出された入力データ

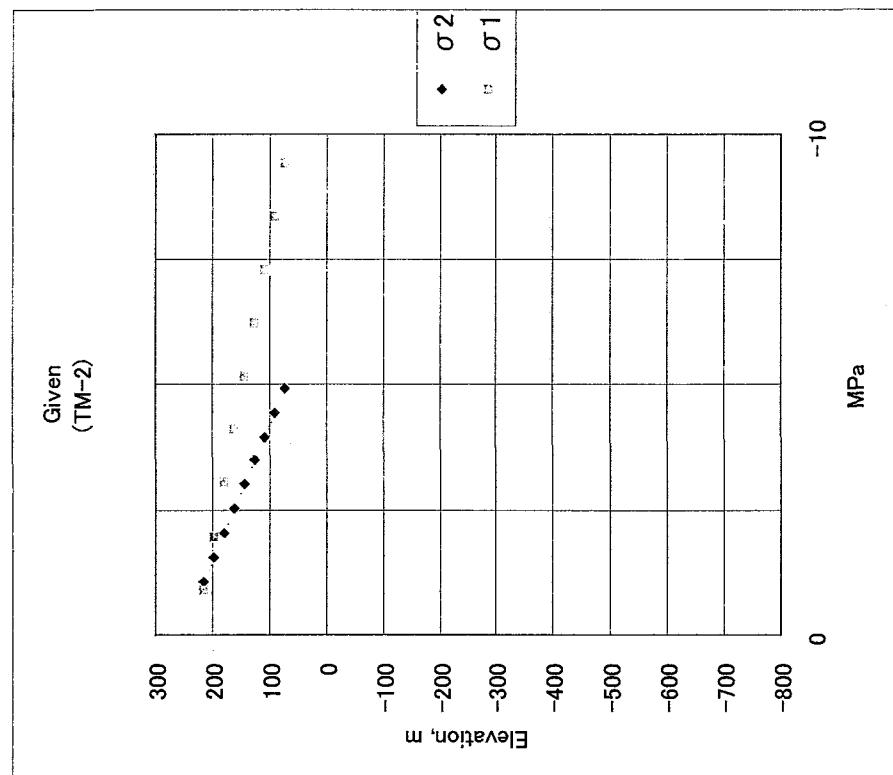
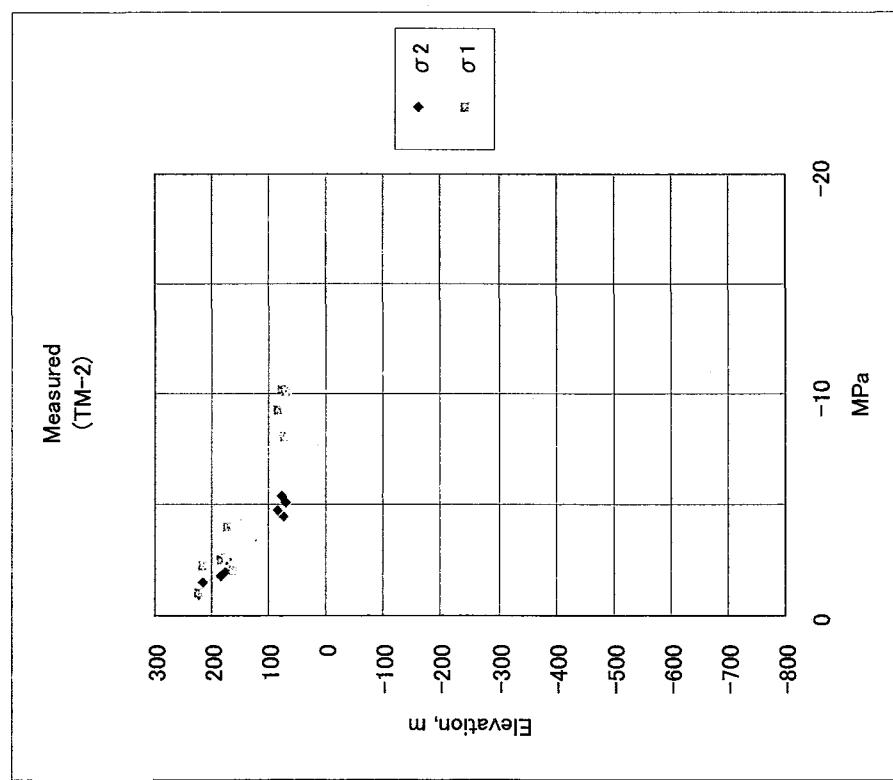


図 3.3.2(i) 試錐孔 TM-2 (下部の 4 点が花崗岩内) で得られた測定データと測定データから抽出された入力データ

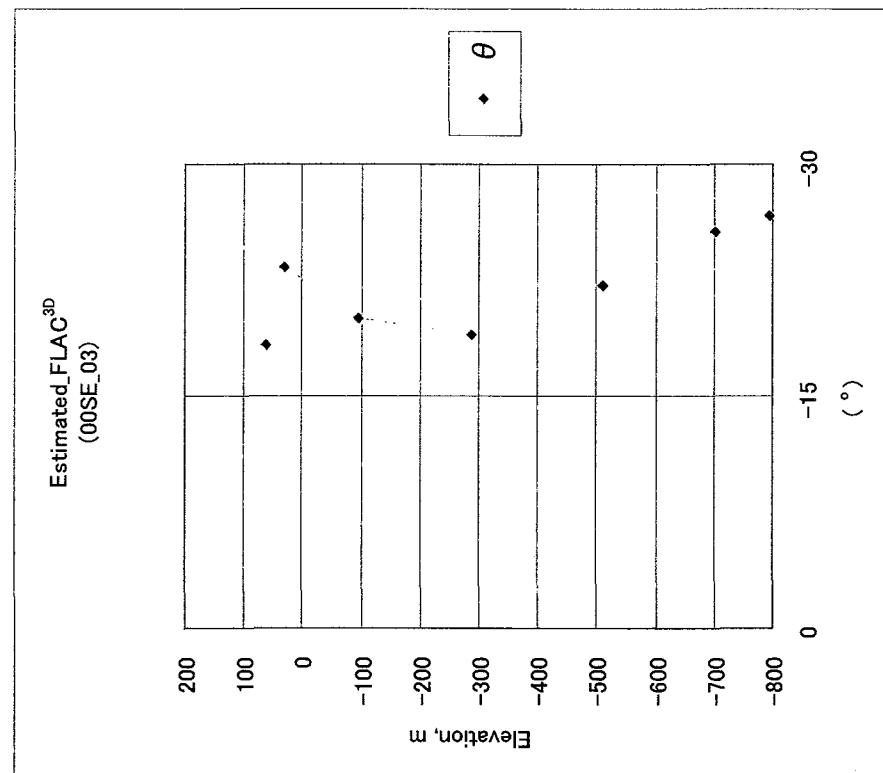
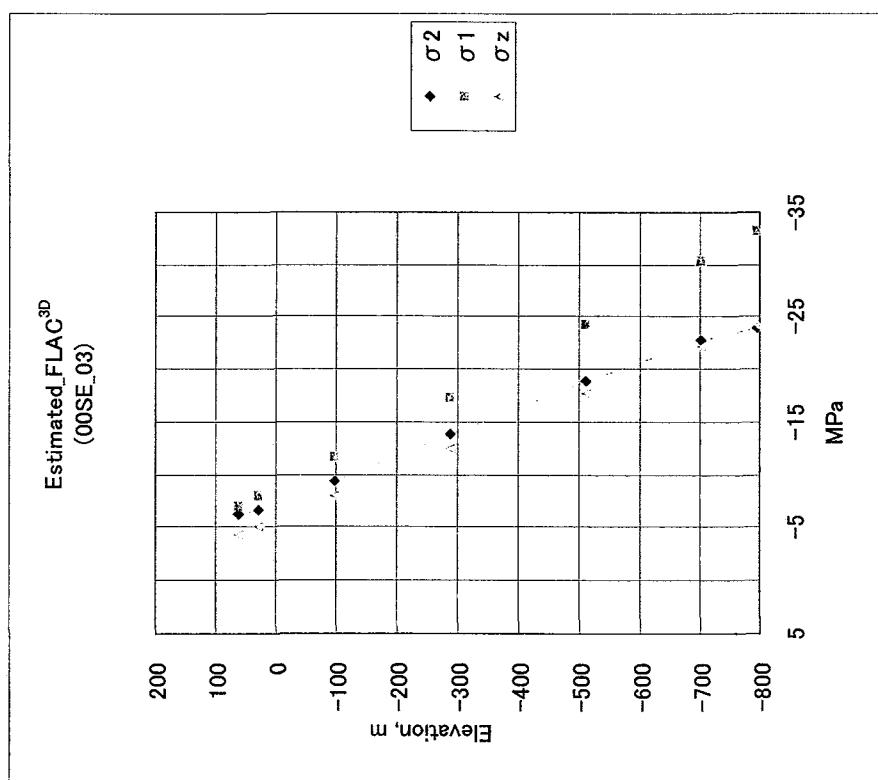
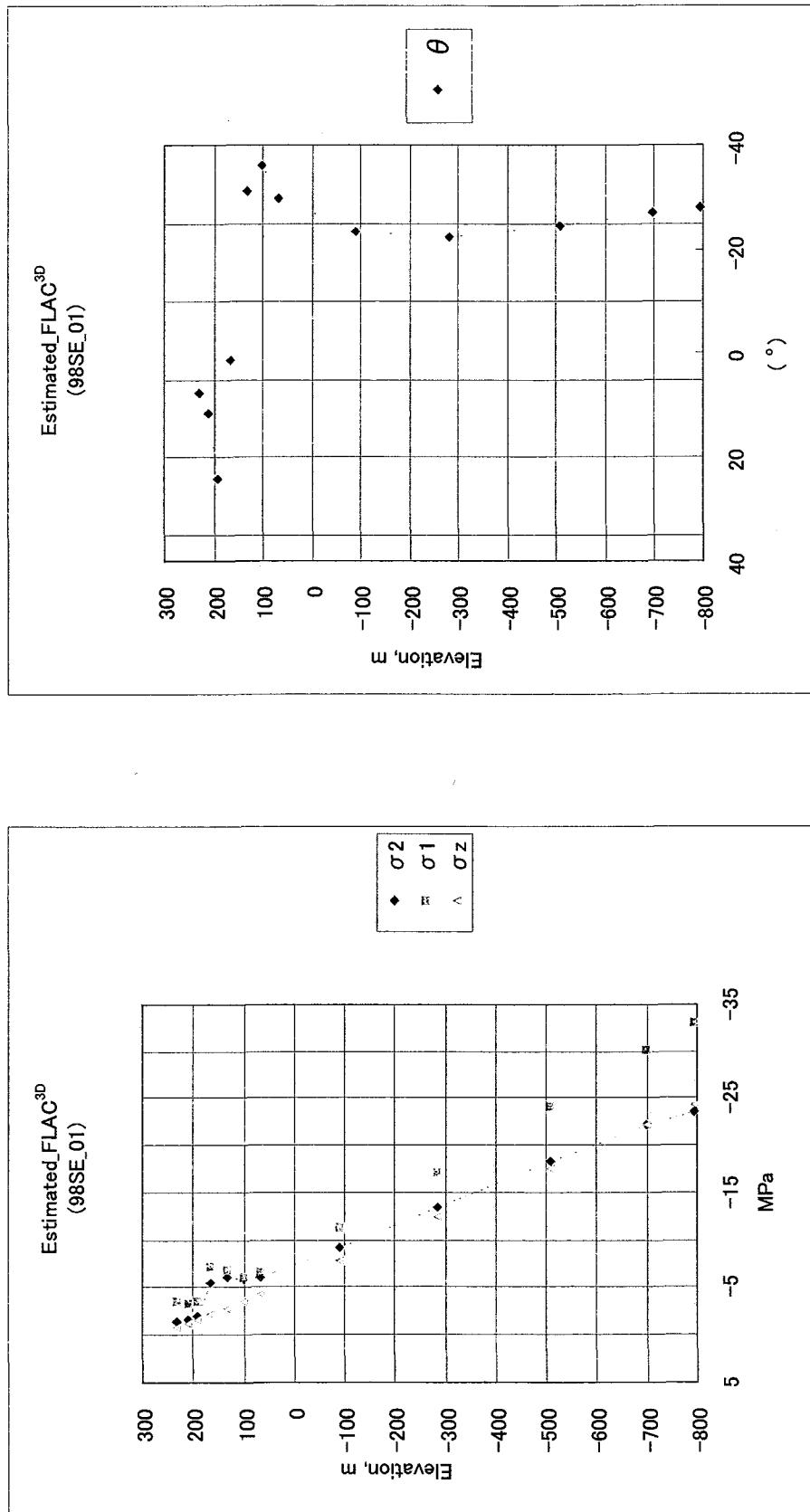


図 3.3.3(a) 試錐孔 00SE-03 沿いの 7 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ

図 3.3.3(b) 試錐孔 98SE-01 沿いの 12 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 , 最小主応力 σ_2 , 鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ



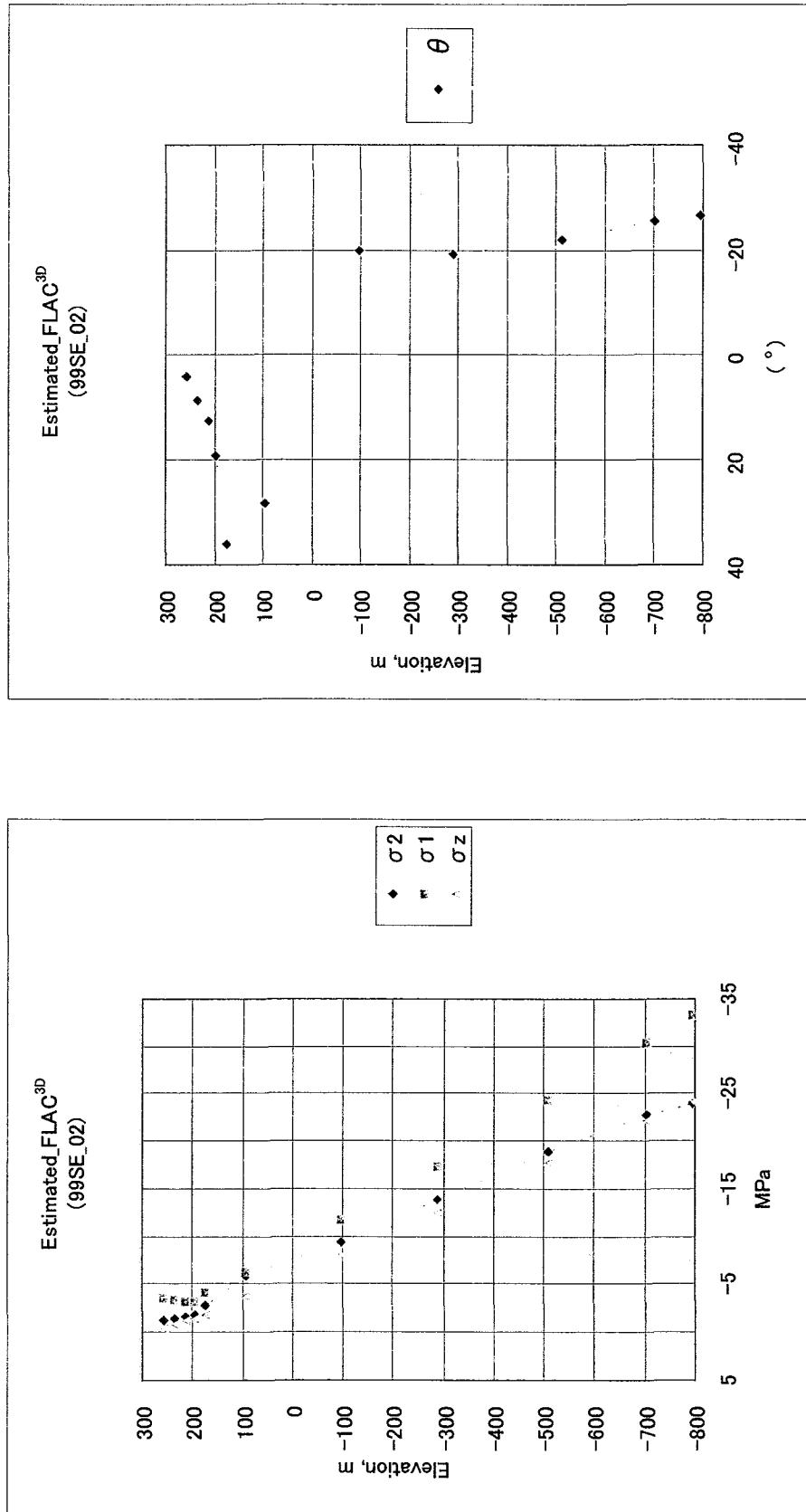


図 3.3.3(c) 試錐孔 99SE-02 沿いの 11 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ

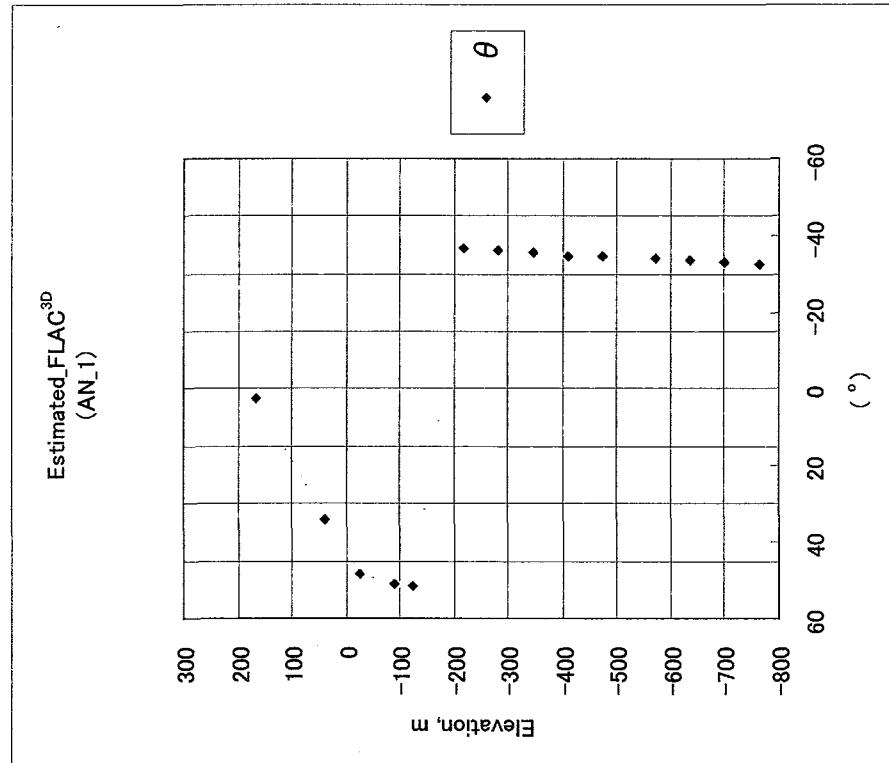
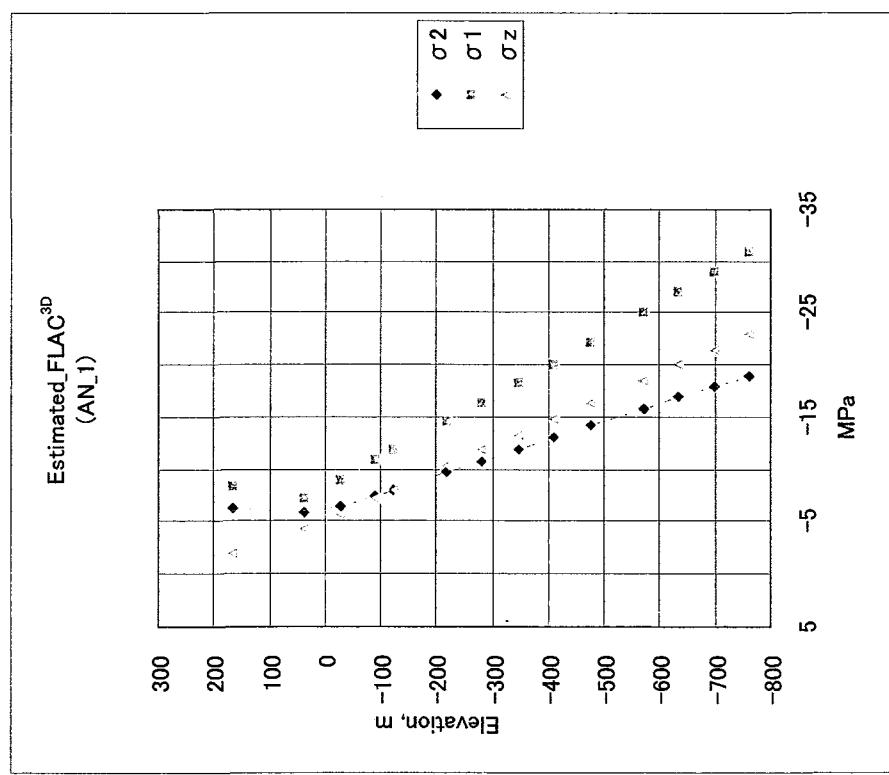


図 3.3(d) 試錐孔 AN-1 沿いの 14 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ

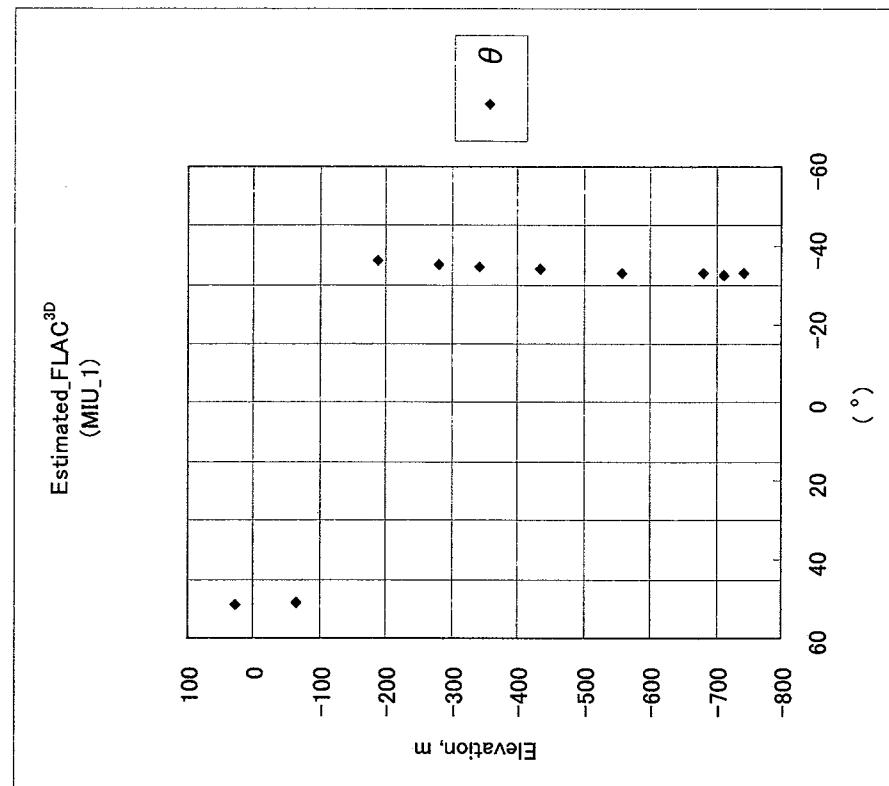
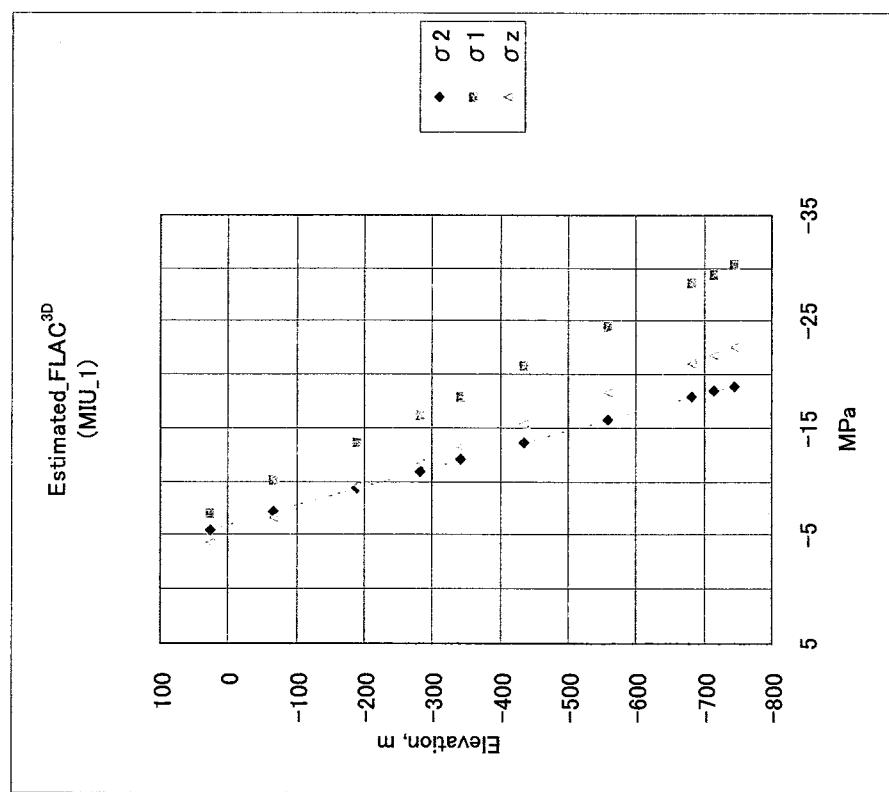


図 3.3.3(e) 試錐孔 MIU-1 沿いの 10 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ

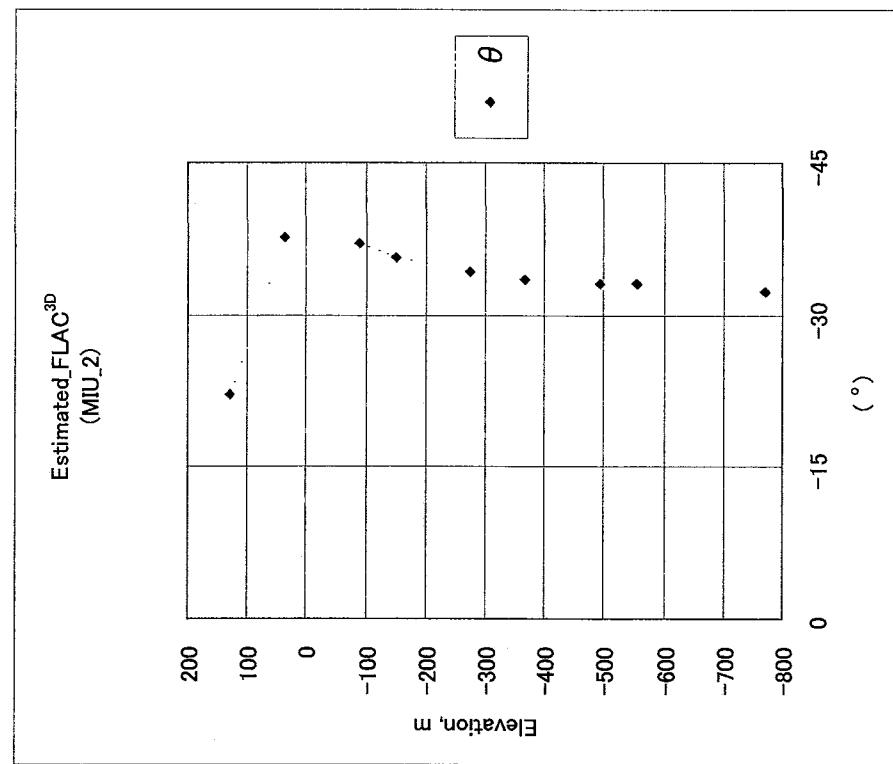
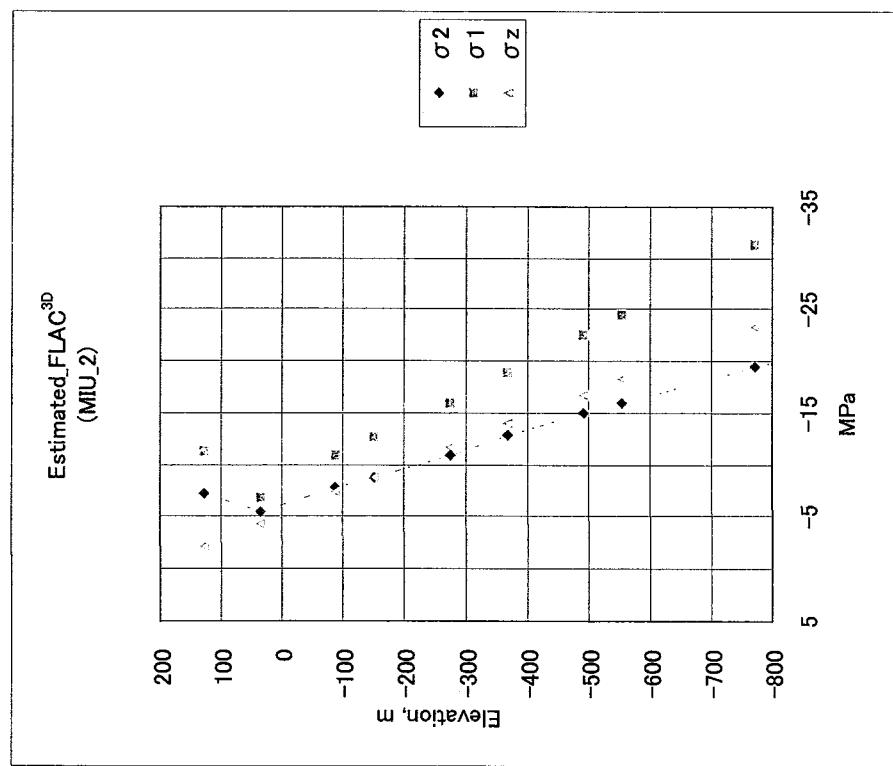


図 3.3.3(f) 試錐孔 MIU-2 沿いの 10 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ

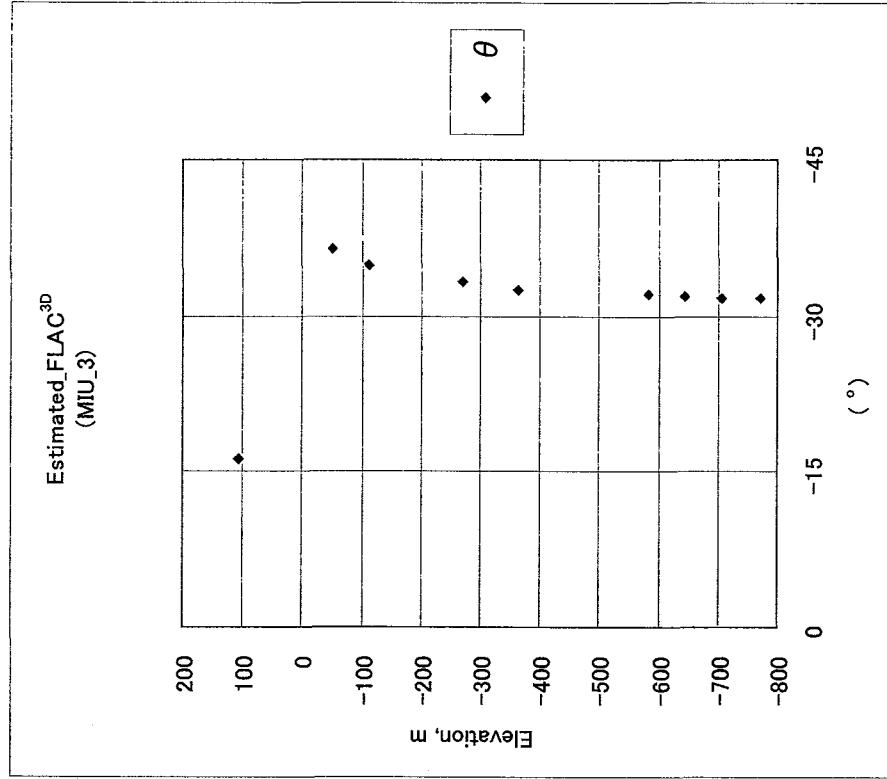
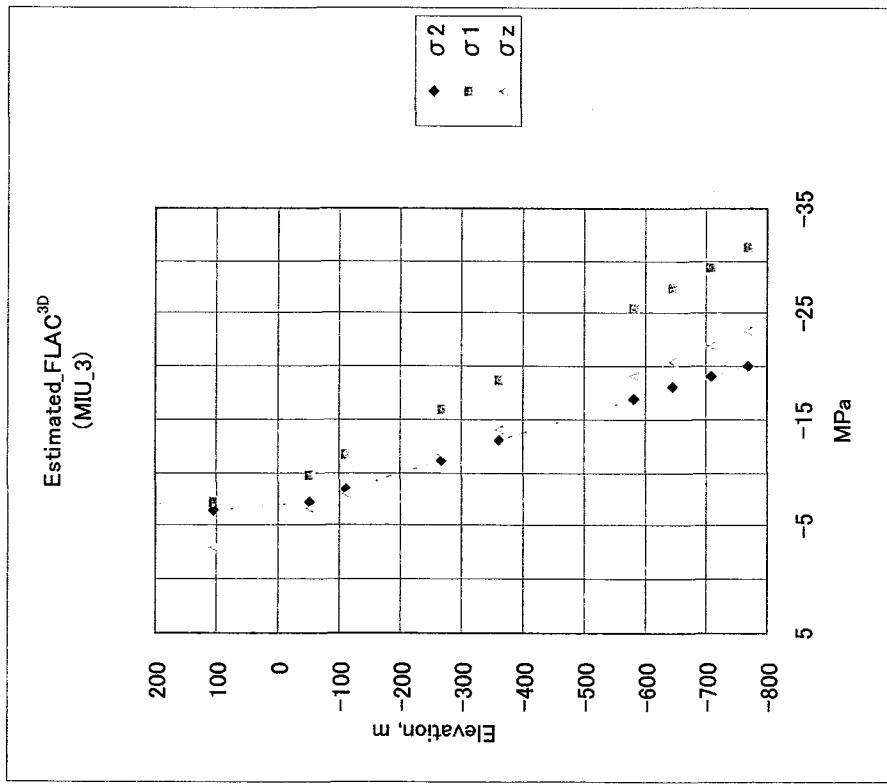
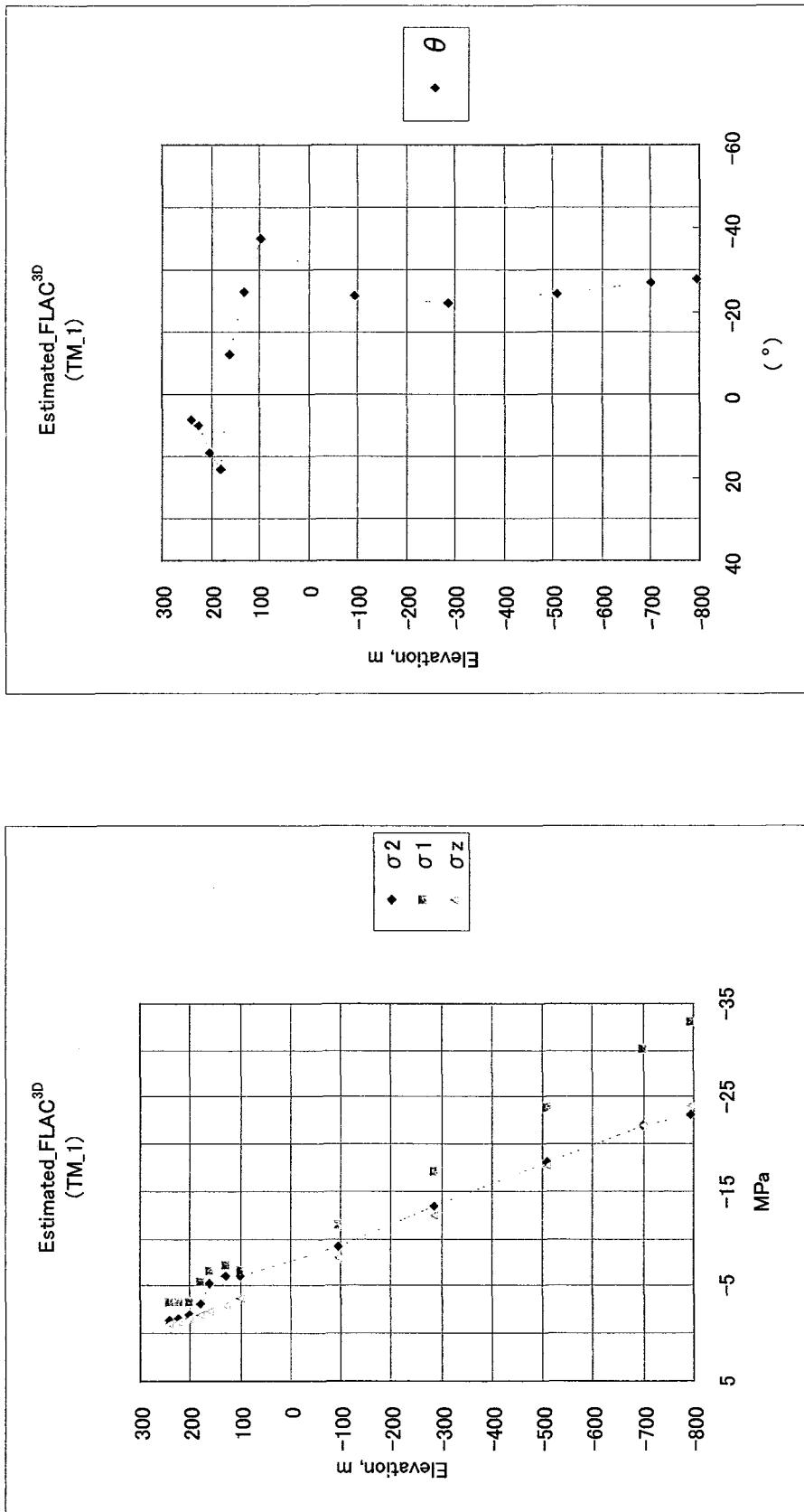


図 3.3.3(g) 試錐孔 MIU-3 沿いの 9 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ

図 3.3.3(h) 試錐孔 TM-1 沿いの 12 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ



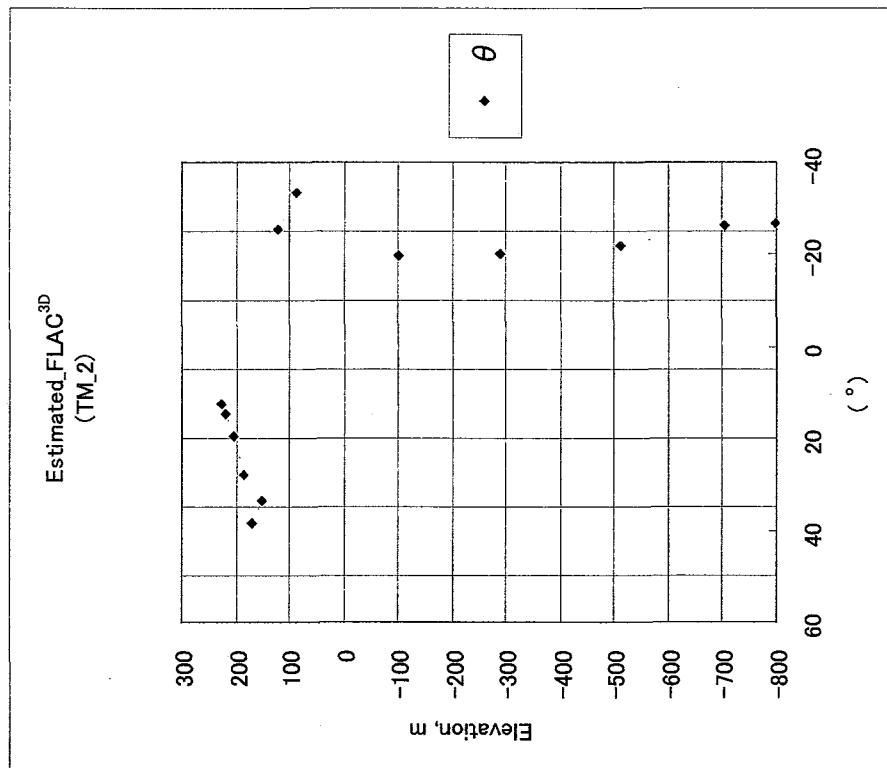
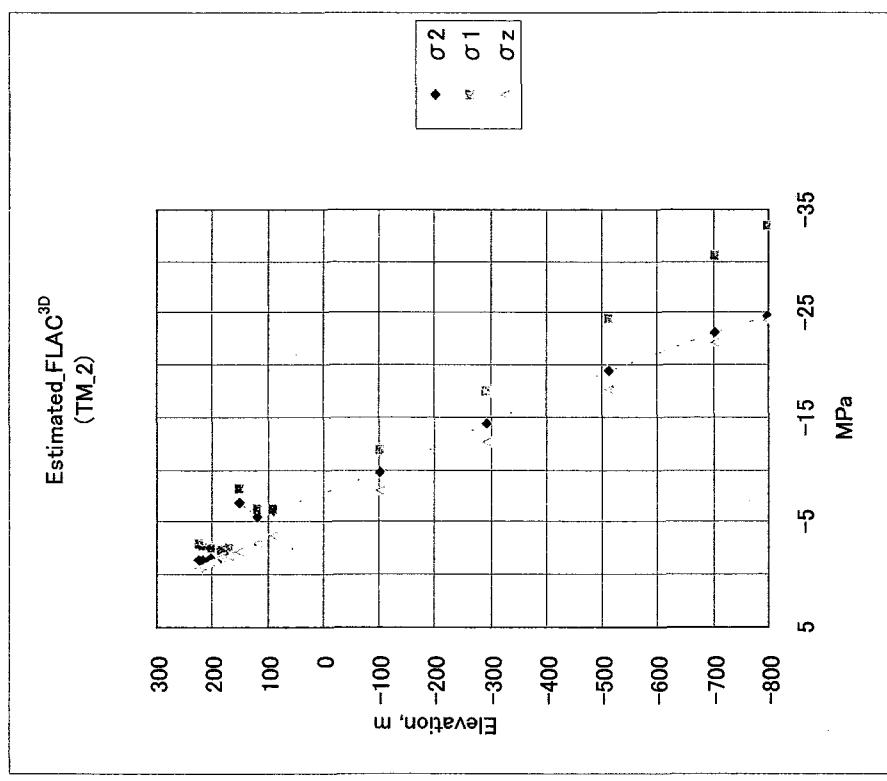


図 3.3.3(i) 試錐孔 TM-2 沿いの 9 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ

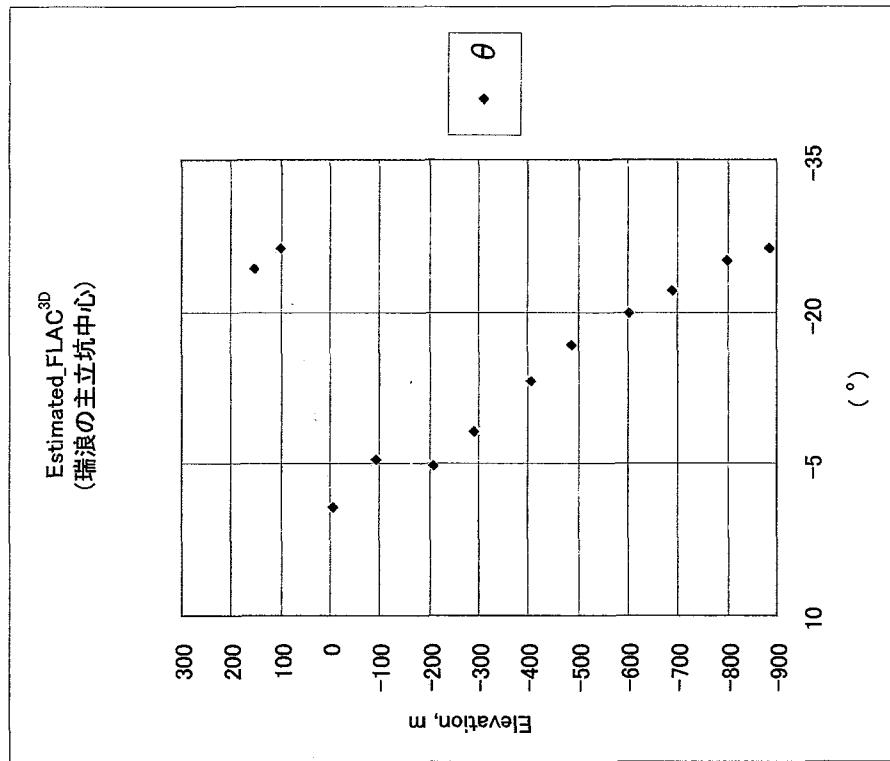
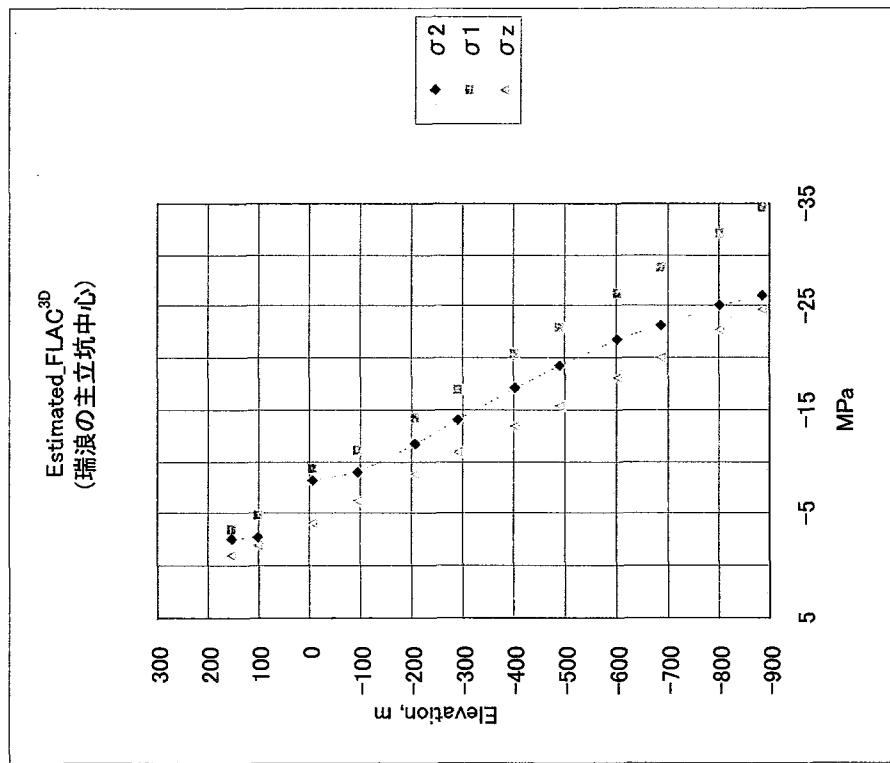


図 3.3.4 超深地層研究所主立坑沿いの応力分布：水平面内最大主应力 σ_1 と最小主应力 σ_2 および鉛直応力成分 σ_z と水平面内最大主应力の方向 θ

3. 3. 3 境界要素法による中領域モデル解析

(1) 解析手順

解析手順は3. 3. 1で述べたものと同じである。

(2) 解析モデルと入力データ

① 基本的な不均質モデル

BEMによる不均質モデルの要素分割を図3.3.5に、モデルの概要を表3.3.6に示す。BEM解析に用いた岩盤物性値は表3.3.3に示すFLAC解析に用いたものと同じである。

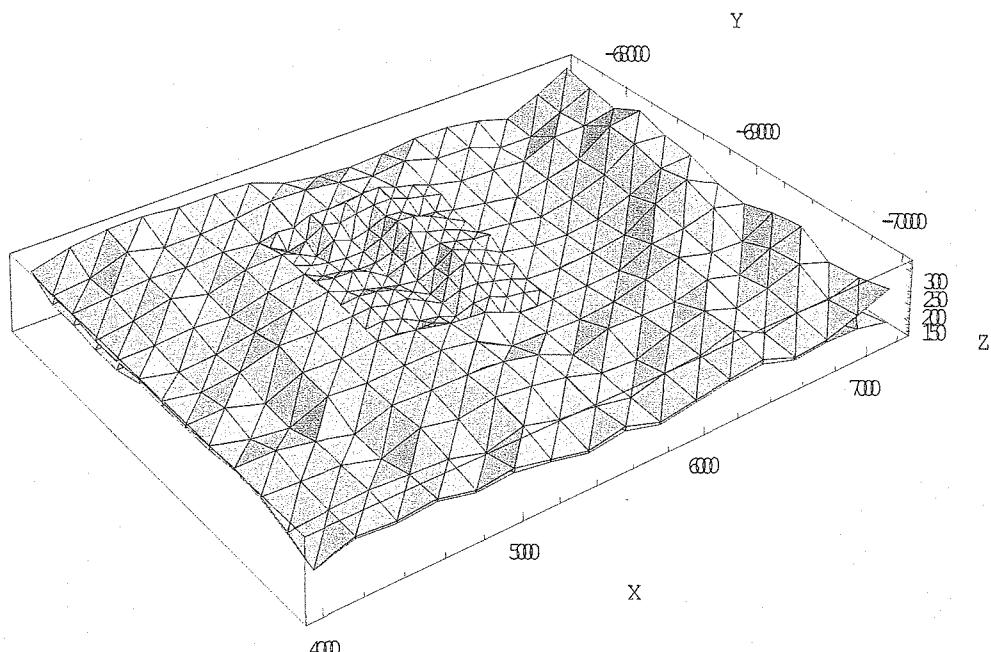


図3.3.5 BEMによる不均質モデルの要素分割

表3.3.6 BEM解析に用いたモデルの概要

対象領域[m]		解析モデル	
東西 方向	南北 方向	要素数	節点数
3200	2400	1602	918

② 軟弱地層のポアソン比を0.5とした場合の不均質モデル

表3.3.3の物性値のうち、軟弱地層のポアソン比だけを $\nu=0.5$ に変えた場合の解析を行った。

③ 地殻応力場に 11 応力成分があるとした不均質モデル

(2) 式中の S および k が次式で表わされた場合の解析を行った。

$$S = \begin{bmatrix} S_x & S_{xy} & S_{zx} \\ S_{xy} & S_y & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{yz} & 0 \end{bmatrix}, \quad k = \begin{bmatrix} k_x & k_{xy} & k_{zx} \\ k_{xy} & k_y & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{yz} & k_z \end{bmatrix}$$

④ 月吉断層を含む不均質モデル

図 3.3.6 に示すように月吉断層を導入したモデルについて解析を行った。

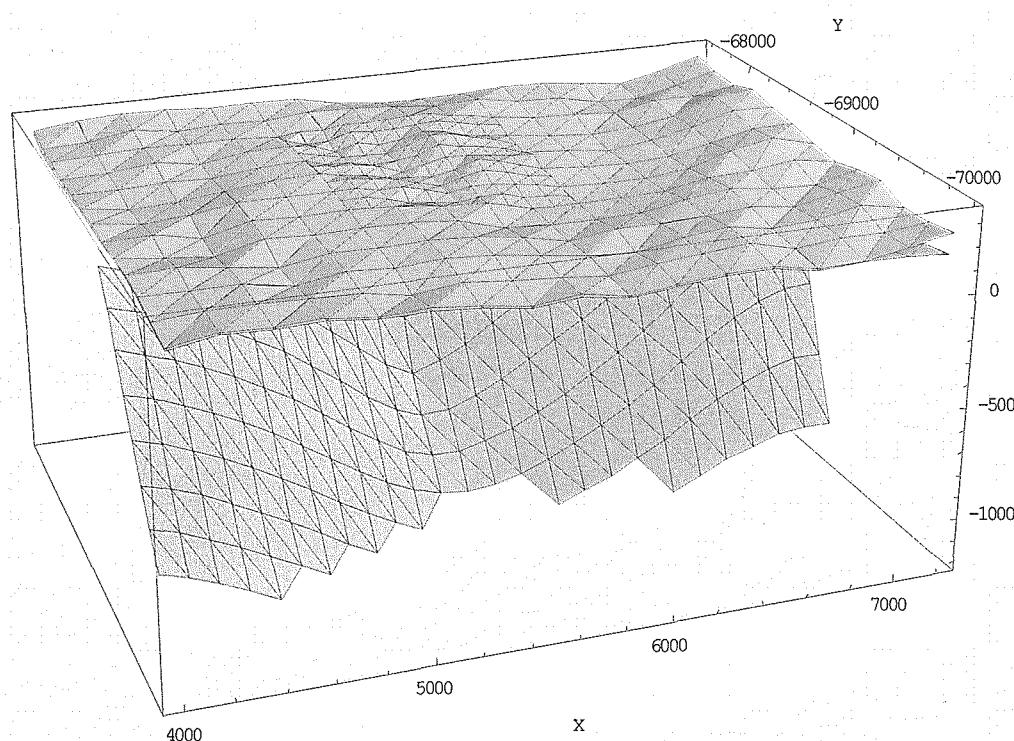


図 3.3.6 BEM による不均質モデルの要素分割（月吉断層を含む）

⑤ 軟弱地層の存在を死荷重に置き換えた均質モデル

花崗岩体だけをモデル化し、その表面に軟弱地層の被り圧に相当する鉛直方向表面力を作用させて解析を行った。

（3） 解析結果

① 基本的な不均質モデル

表 3.3.7 に表 3.3.3 に示された物性値を入力した不均質モデルから推定された広域応力場の 7 成分を示す。また、この広域応力場から算定された各試験孔沿いの応力分布を図 3.3.7(a)~(i) に示す。これらの図を FLAC 解析により推定されたものと比較すると、最大主応力の方向がやや異なり、深さに対して滑らかに変化していることがわかる。また、図 3.3.7(b), (c), (h), (i) に示される測点の多くは

軟弱地層内にあるが、(h), (i)において、深さに対する鉛直応力成分の増大が被り圧から推定されるものより大きいという不合理な結果を呈している。これは地層境界面が閉じた形でない不均質モデルに対して設定されたつぎの境界条件によってもたらされたものと思われる（境界面に垂直な方向を z とする）。

境界条件 I：地表面において $\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$

この境界条件によって点(x, y, z)に誘起される応力・変位はモデル I の全領域（無限領域）が軟弱地層の物性 I を有するものとして求められる（花崗岩の物性を II とする）。

境界条件 II（応力・変位の連続条件）：地層境界において $(\sigma_z)_I = (\sigma_z)_{II}$, $(\tau_{yz})_I = (\tau_{yz})_{II}$, $(\tau_{zx})_I = (\tau_{zx})_{II}$, $(u_z)_I = (u_z)_{II}$, $(u_y)_I = (u_y)_{II}$, $(u_x)_I = (u_x)_{II}$

この境界条件が適用されるモデル II の全領域が物性 II を有するものとして領域 I の諸量と領域 II の諸量の関係が求められる。すなわち軟弱地層が存在する領域はモデル I では物性 I を有し、モデル II では物性 II を有することになる。このモデルから算定された超深地層研究所主立坑沿いの応力分布を図 3.3.8 に示す。表 3.3.8 は超深地層研究所沿いの 11 点における 3 次元応力場を示したものである。

表 3.3.7 BEM により推定された地殻応力場（7 応力成分）

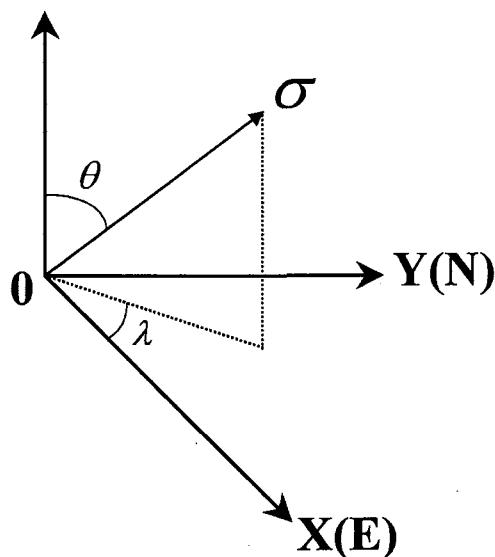
S_x (MPa)	0.763
S_y (MPa)	0.281
S_{xy} (MPa)	-0.0296
k_x	0.833
k_y	0.843
k_z	0.751
k_{xy}	-0.207

表 3.3.8 超深地層研究所主立坑沿いの 11 点における 3 次元応力場

Depth (m)	$\sigma_1(\lambda/\theta)$ (MPa) (Degree)	$\sigma_2(\lambda/\theta)$ (MPa) (Degree)	$\sigma_3(\lambda/\theta)$ (MPa) (Degree)
100.0	-6.01 (46.2/70.5)	-6.37 (130.3/19.58)	-8.14 (43.4/91.13)
0.0	-6.88 (46.1/79.1)	-8.38 (120.0/11.2)	-10.31 (43.4/92.6)
-100.0	-8.12 (47.0/84.1)	-10.20 (119.4/6.1)	-12.74 (42.9/91.4)
-200.0	-9.48 (46.8/85.9)	-11.92 (105.3/4.61)	-15.21 (43.1/92.2)

-300.0	-10.93 (46.4/86.7)	-13.67 (94.4/4.22)	-17.75 (43.4/92.7)
-400.0	-12.44 (46.2/87.2)	-15.42 (91.1/179.1)	-20.32 (43.7/92.8)
-500.0	-13.98 (46.0/87.6)	-17.19 (94.0/176.5)	-22.90 (43.9/92.6)
-600.0	-15.53 (45.8/88.0)	-18.98 (95.5/176.8)	-25.50 (44.1/92.4)
-700.0	-17.10 (45.7/88.3)	-20.78 (96.5/177.2)	-28.12 (44.2/92.1)
-800.0	-18.68 (45.6/88.5)	-22.60 (97.0/177.6)	-30.74 (44.4/91.9)
-900.0	-20.27 (45.5/88.7)	-24.43 (97.4/177.9)	-33.37 (44.5/91.7)

ただし、 λ と θ は下図に示す角度である。



② 軟弱地層のポアソン比を 0.5 とした場合の不均質モデル

軟弱地層の存在を荷重として扱うのとほぼ同等となるように、軟弱地層（モデル I）のポアソン比を 0.5 として解析から推定された応力場の 7 成分を表 3.3.9 に示す。また、この広域応力場から算定された応力成分のうち、試錐孔 MIU-2 沿いの 10 点および試錐孔 MIU-3 沿いの 10 点の応力をそれぞれ図 3.3.9(a), (b) に示す。これを図 3.3.3(f), (g) と比較すると、主応力の方向が、とくに地表近くにおいて大きく異なることがわかる。しかし、これも上記の問題に起因しているものと思われる。

表 3.3.9 BEM により推定された地殻応力場 ($\nu = 0.5$)

S_x (MPa)	0.562
S_y (MPa)	0.298
S_{xy} (MPa)	-0.0147
k_x	0.848
k_y	0.841
k_z	0.753
k_{xy}	-0.208

表 3.3.10 BEM による推定された地殻応力場 (11 応力成分)

S_x (MPa)	0.350
S_y (MPa)	0.640
S_{xy} (MPa)	0.146
S_{yz} (MPa)	1.57
S_{zx} (MPa)	0.745
k_x	0.848
k_y	0.803
k_z	0.741
k_{xy}	0.313
k_{yz}	-1.76
k_{zx}	-0.412

③ 広域応力場に τ_{yz}, τ_{zx} 成分もあるとした不均質モデル

求められた広域応力場の 11 成分を表 3.3.10 に示す。また、この広域応力場から算定された各点の応力分布のうち、試錐孔 MIU-2 沿いの 10 点および試錐孔 MIU-3 沿いの 10 点の応力をそれぞれ図 3.3.10(a), (b) に示す。これらの図をみると、水平面内の主応力差が大きくなっていること、主応力方向が深さ 200m の前後で大きく変化していることがわかる。また MIU-2 において地表近くの σ_z の変化が非常に小さくなっていることがわかる。

④ 軟弱地層の存在を死荷重に置き換えた均質モデル

軟弱地層と花崗岩との境界面を自由面として、そこに死荷重を作らせたモデルから逆算された地殻応力場は表 3.3.11 に示す通りである。ただし、地表面

(不連続面)への載荷の大きさは、本来の地表面を自由面とし、軟弱地層の物性を有する物質媒体モデルから求めた。このモデルにおいては、 S_x と S_y が非常に大きく計算されているが、これは、浅所で計測された応力値に大きく影響を受けているためと思われる。すなわち、浅所応力測定結果を観測方程式に導入しないで地殻応力場を求める方がよいことを示している。また、このモデルに対して、試錐孔 TM-1 沿いの 13 点について推定された応力状態を図 3.3.11 に示す。

表 3.3.11 BEM により推定された地殻応力場
(軟弱地層と基盤との境界面に死荷重)

S_x (MPa)	2.42
S_y (MPa)	3.25
S_{xy} (MPa)	-0.388
k_x	0.773
k_y	0.698
k_z	0.825
k_{xy}	-0.188

⑤ 月吉断層を含む均質モデル

軟弱地層と花崗岩との境界面を自由面として、そこに軟弱地層の重さを作らせ、かつ月吉断層を変位くい違い要素によりモデル化した均質モデルから逆算された地殻応力場は表 3.3.12 に示す通りである。ただし、断層のせん断抵抗をほぼゼロとしている。このモデルにおいては、断層が存在することが地殻応力場に及ぼす影響は大きくないことがわかる。

表 3.3.12 BEM により推定された地殻応力場（月吉断層あり）

S_x (MPa)	2.40
S_y (MPa)	3.25
S_{xy} (MPa)	-0.382
k_x	0.769
k_y	0.696
k_z	0.812
k_{xy}	-0.188

3. 3. 4 まとめ

有限差分法および境界要素法を用いて3次元応力場を同定するための手法を提案し、この手法を用いて広域応力場を決定した。すなわち、まず解析手順、解析モデルおよび入力のためのデータ処理について説明し、つぎに有限差分モデルと境界要素モデルのそれぞれについて、正規化された観測方程式を解いて得られた広域応力場を示した。そして、それぞれのモデルについて得られた広域応力場をもとにして、計算された各試錐孔について推定された応力場を示した。また超深地層研究所主立坑沿いの推定応力場を示した。

図 3.3.7(a) 試錐孔 00SE-03 沿いの 10 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 , 最小主応力, σ_2 , 鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ

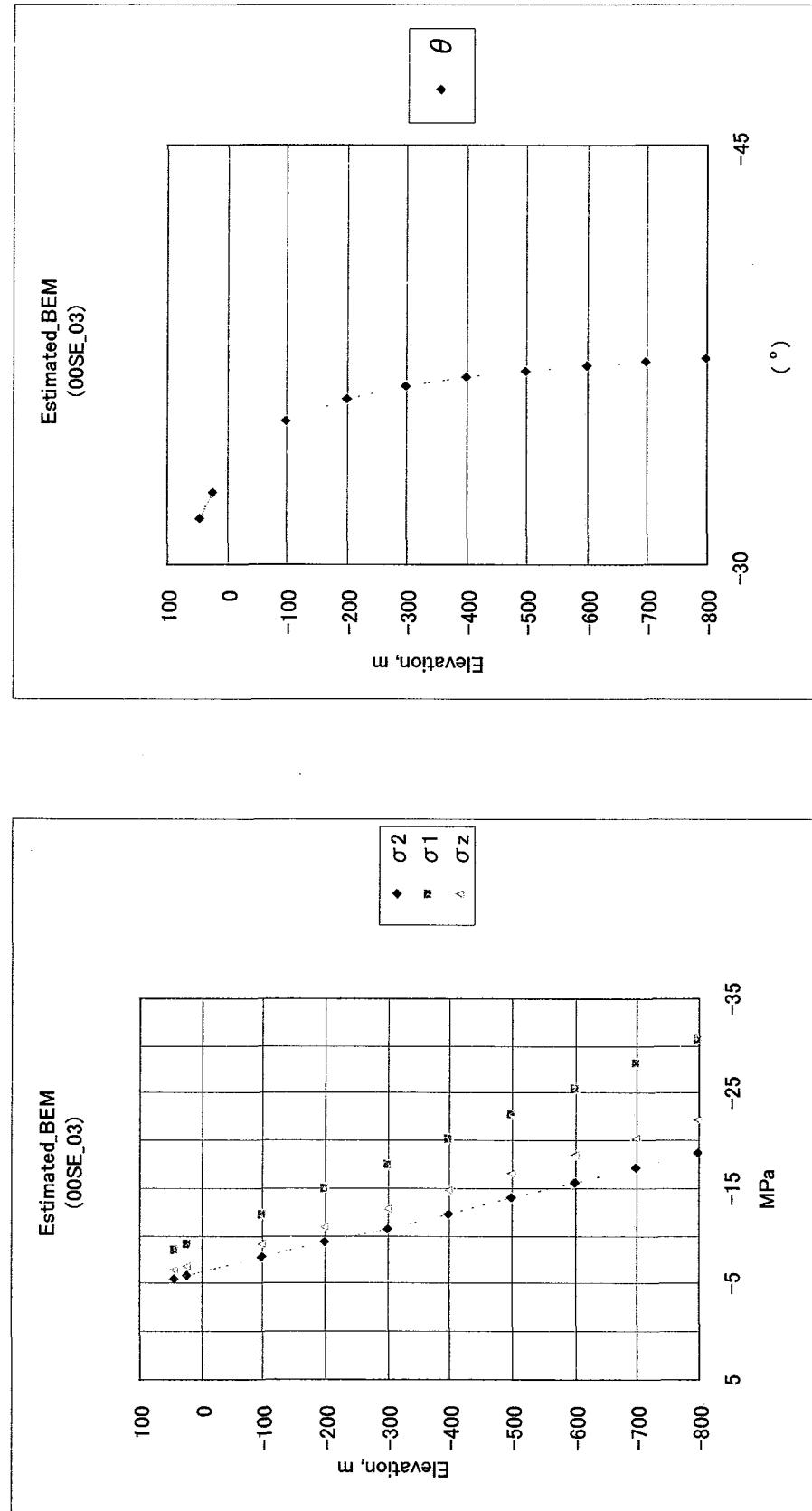


図 3.3.7(b) 試錐孔 98SE-01 沿いの 12 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 , 最小主応力 σ_2 , 鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ

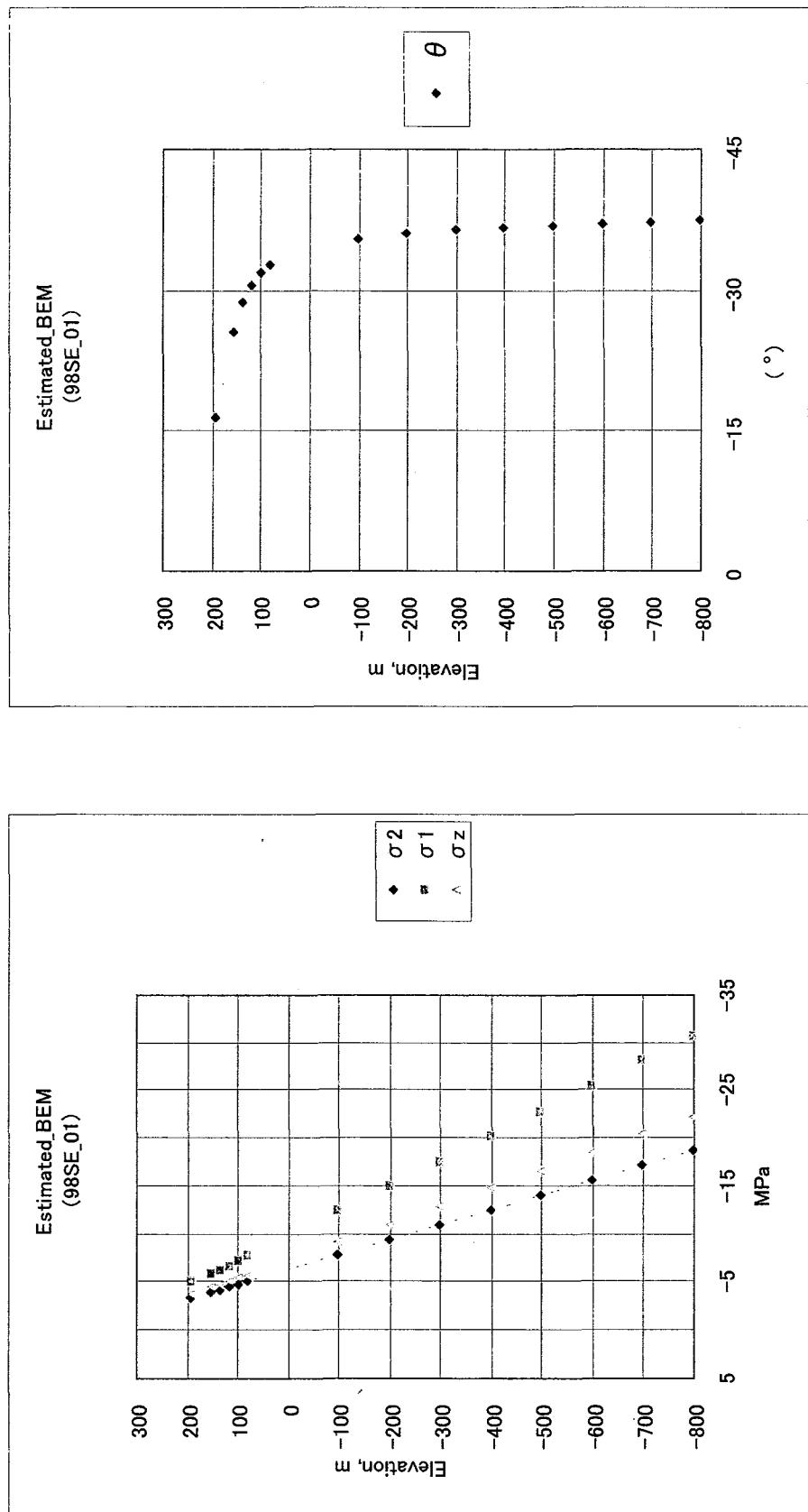
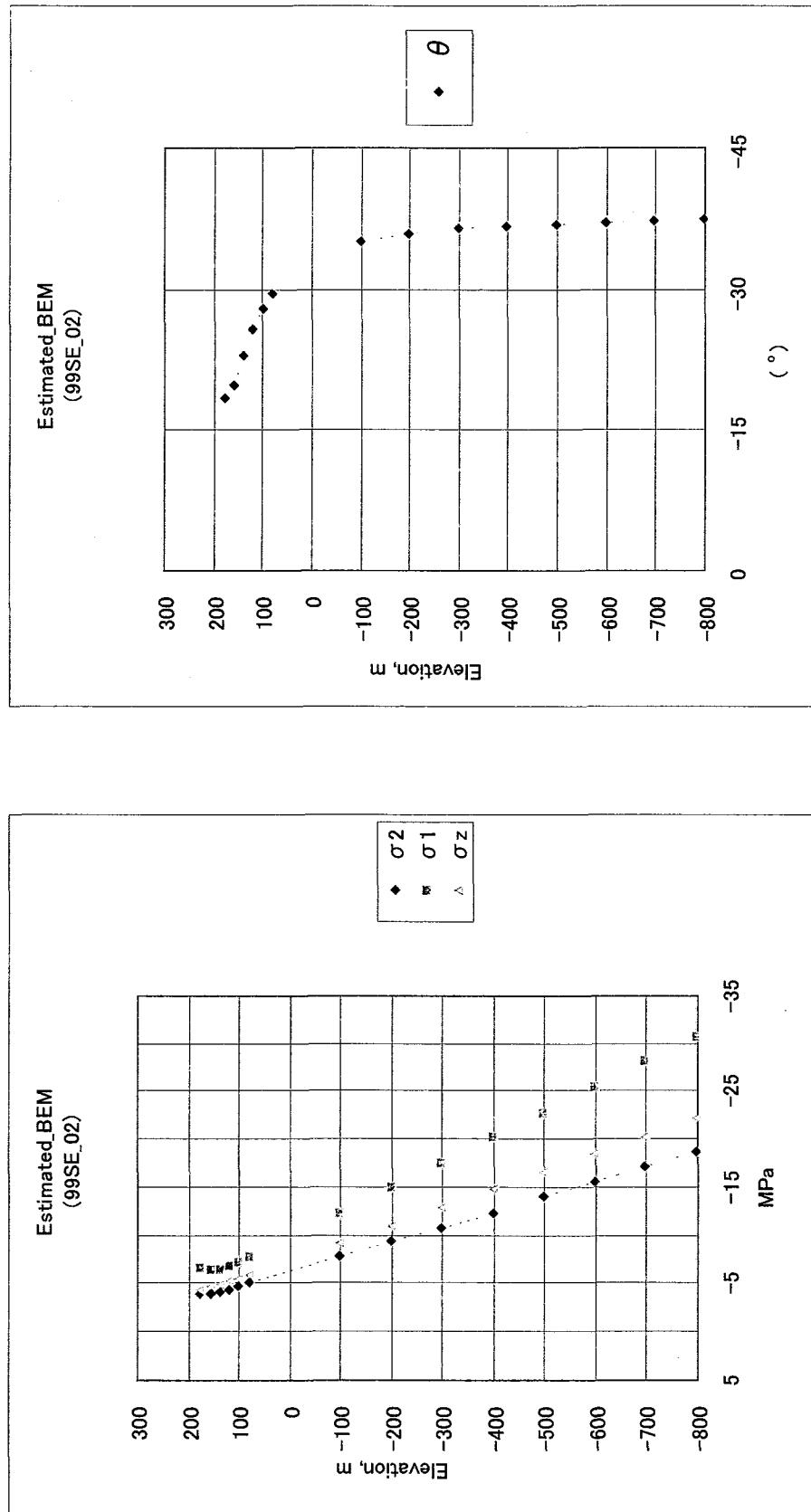


図 3.3.7(c) 試錐孔 99SE-02 沿いの 14 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 , 最小主応力 σ_2 , 鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ



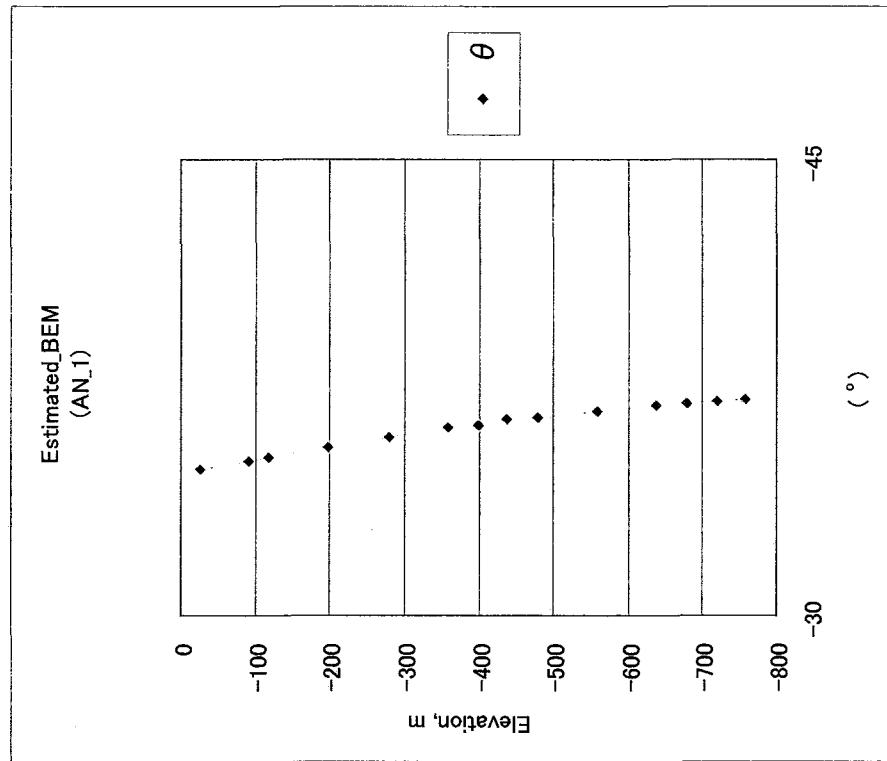
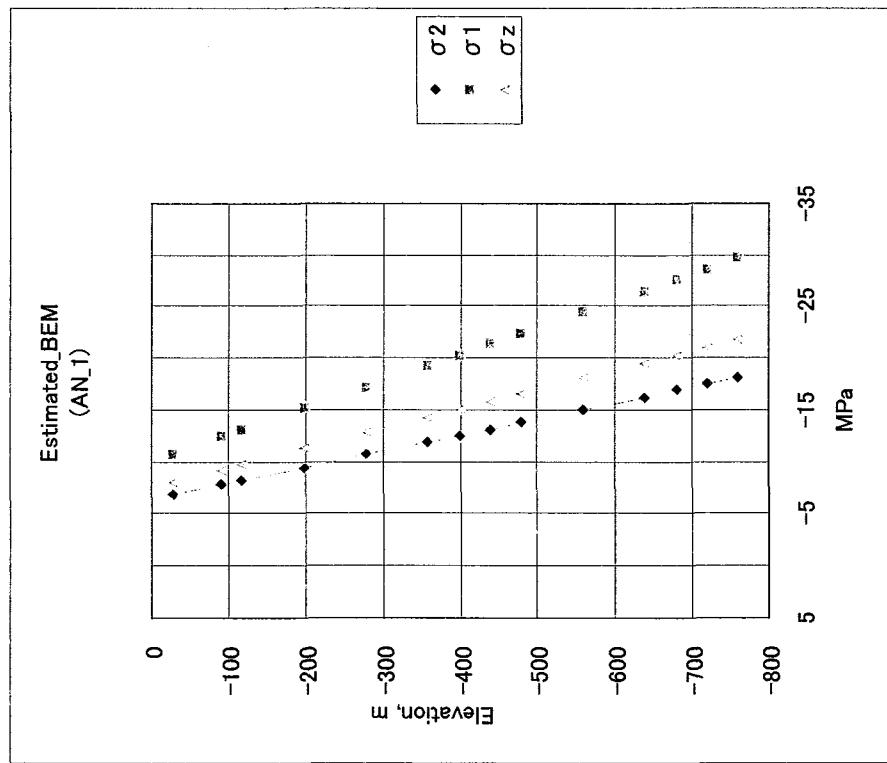


図 3.3.7(d) 試錐孔 AN-1 沿いの 14 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ

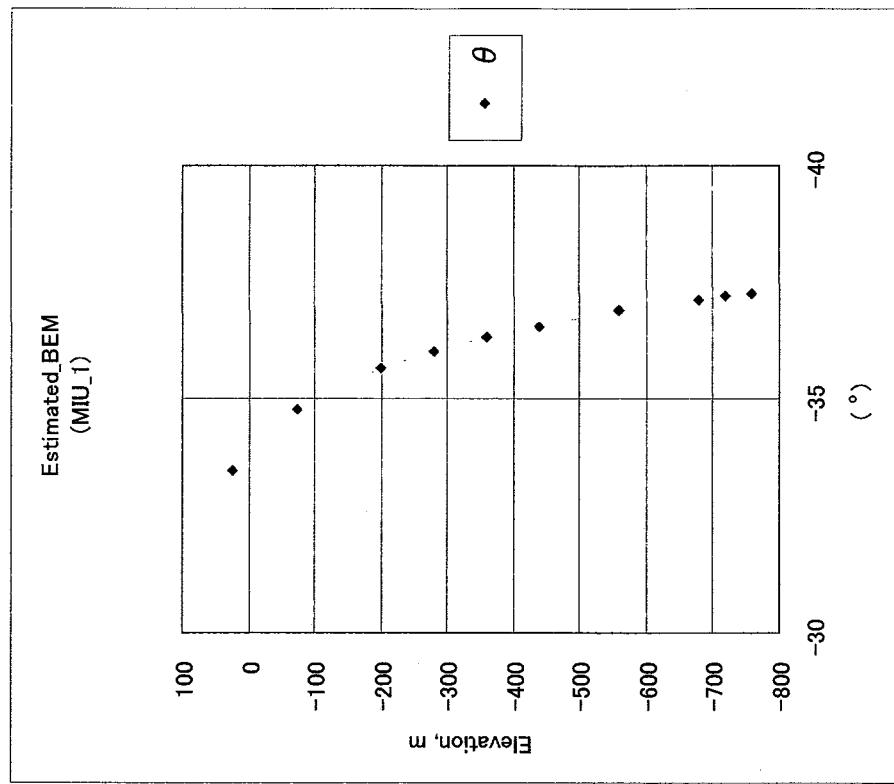
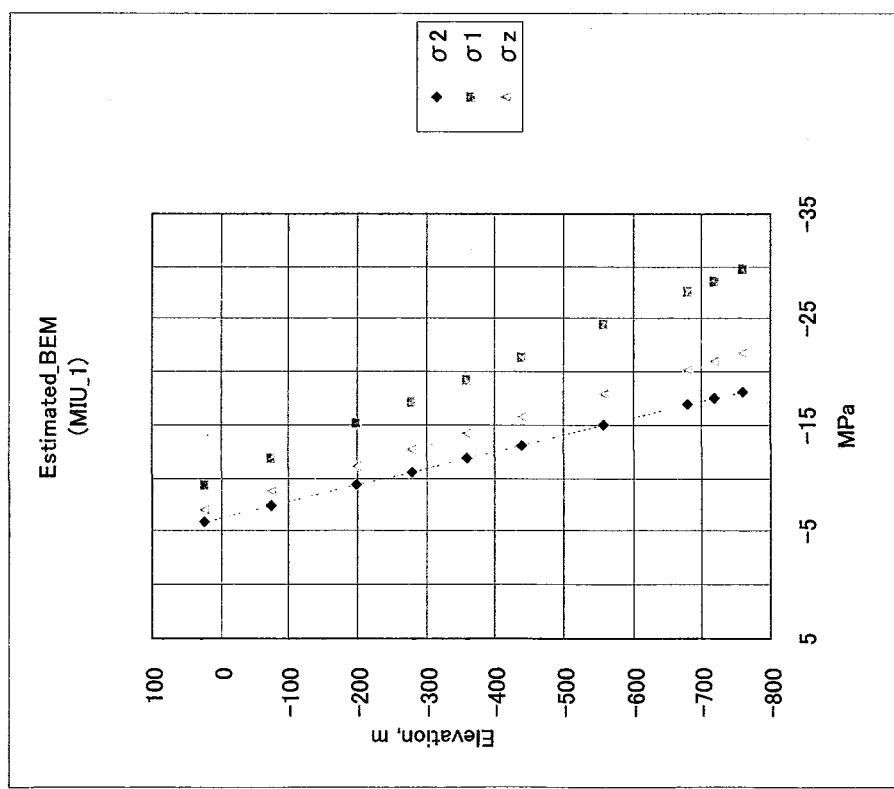


図 3.3.7(e) 試錐孔 MUU-1 沿いの 10 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ

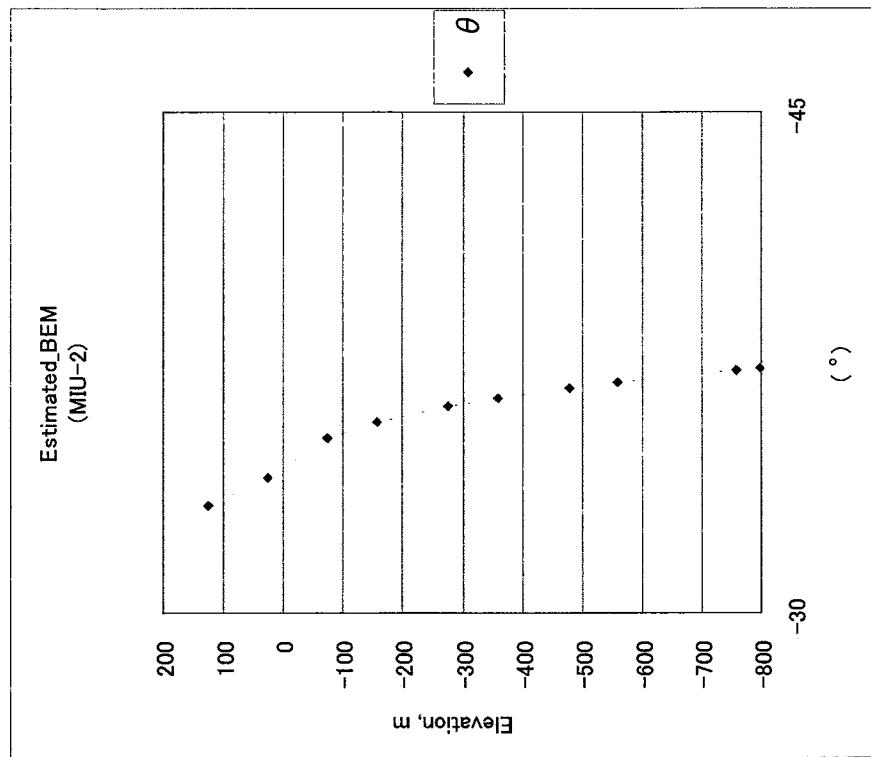
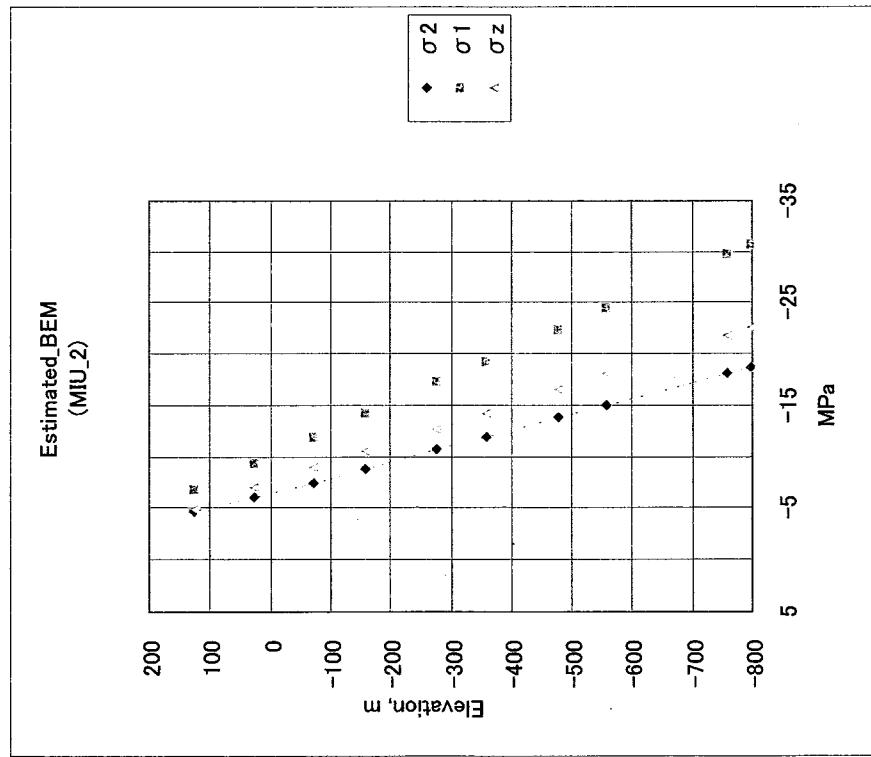


図 3.3.7(f) 試験孔 MIU-2 沿いの 10 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ

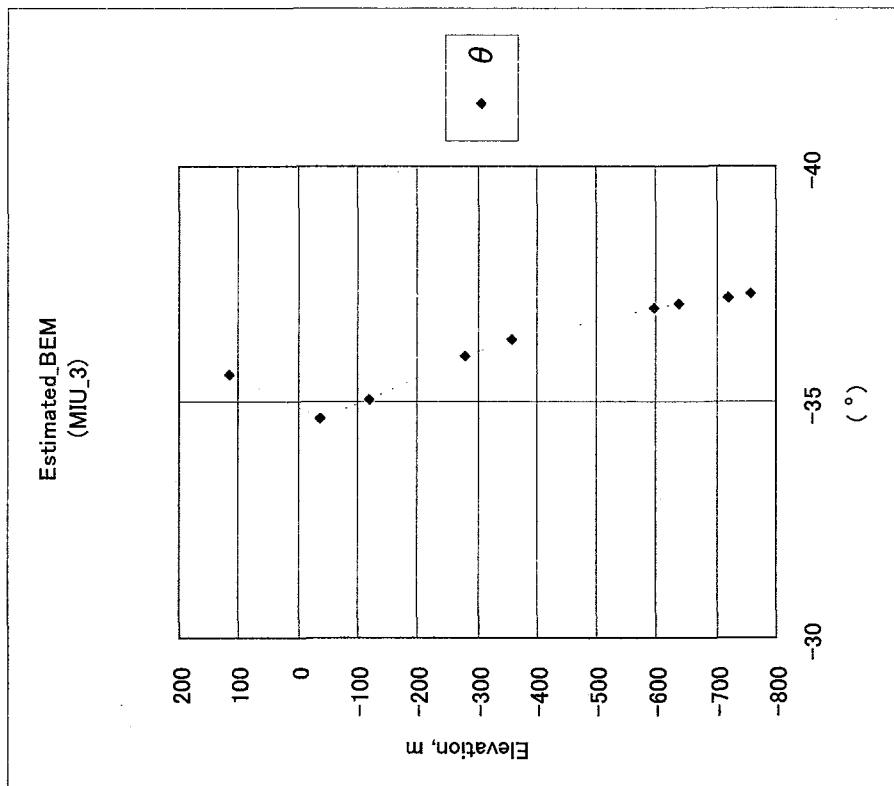
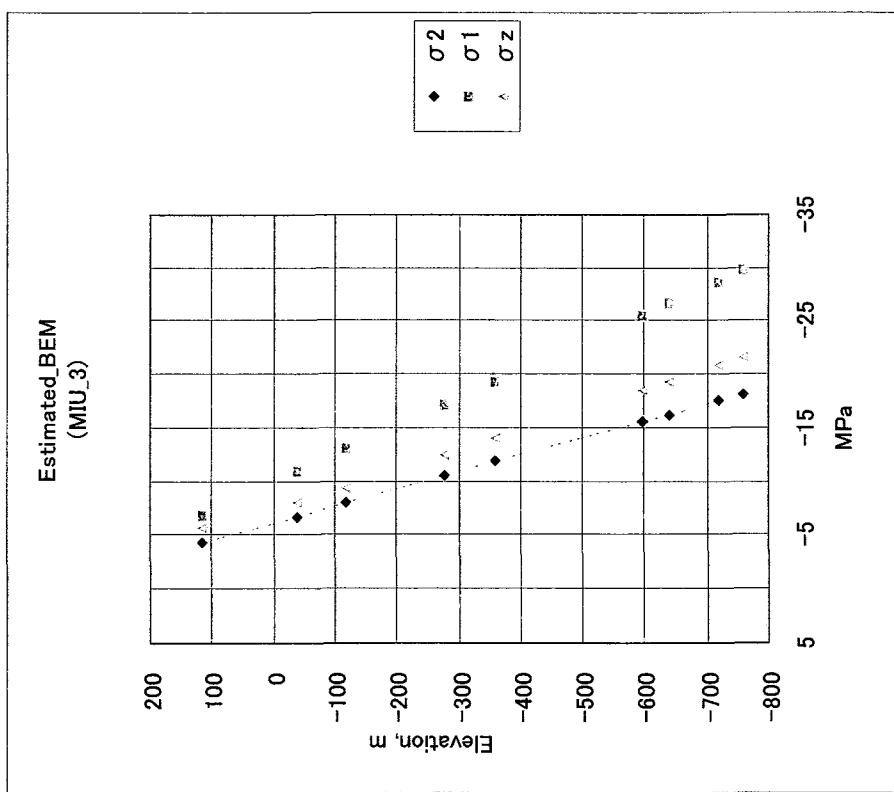


図 3.3.7(g) 試験孔 MIU-3 沿いの 9 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ

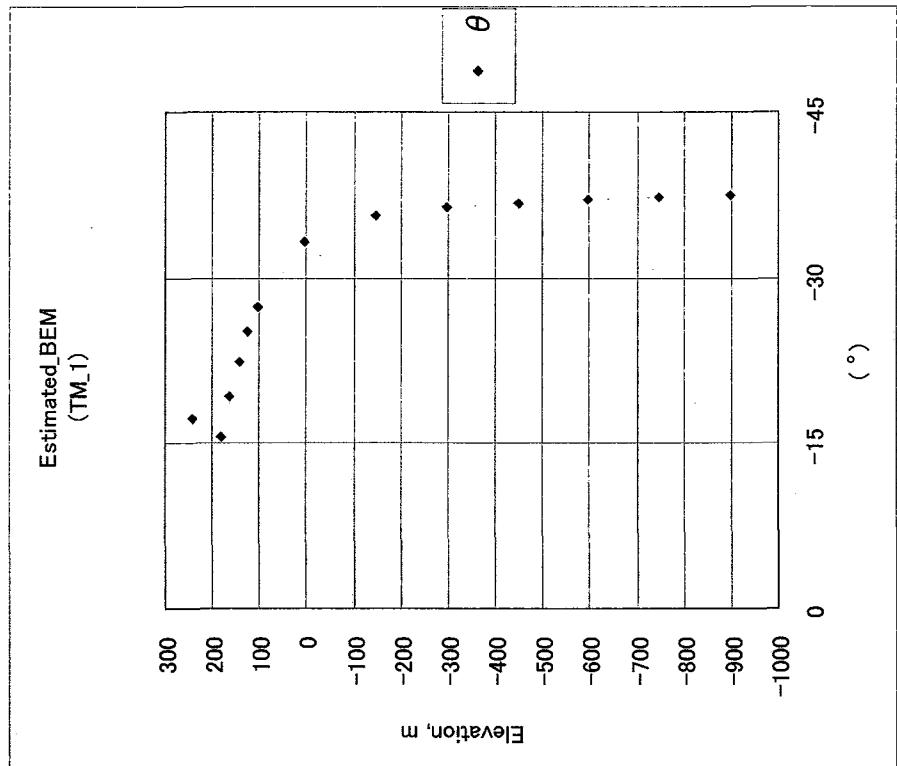
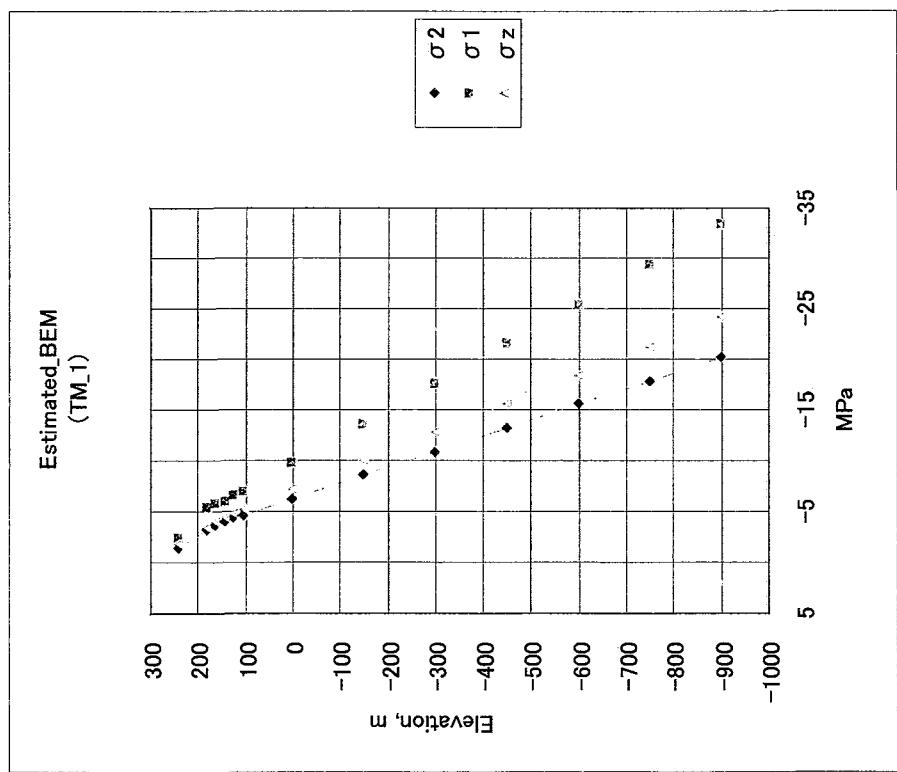


図 3.3.7(h) 試錐孔 TM-1 沿いの 13 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ

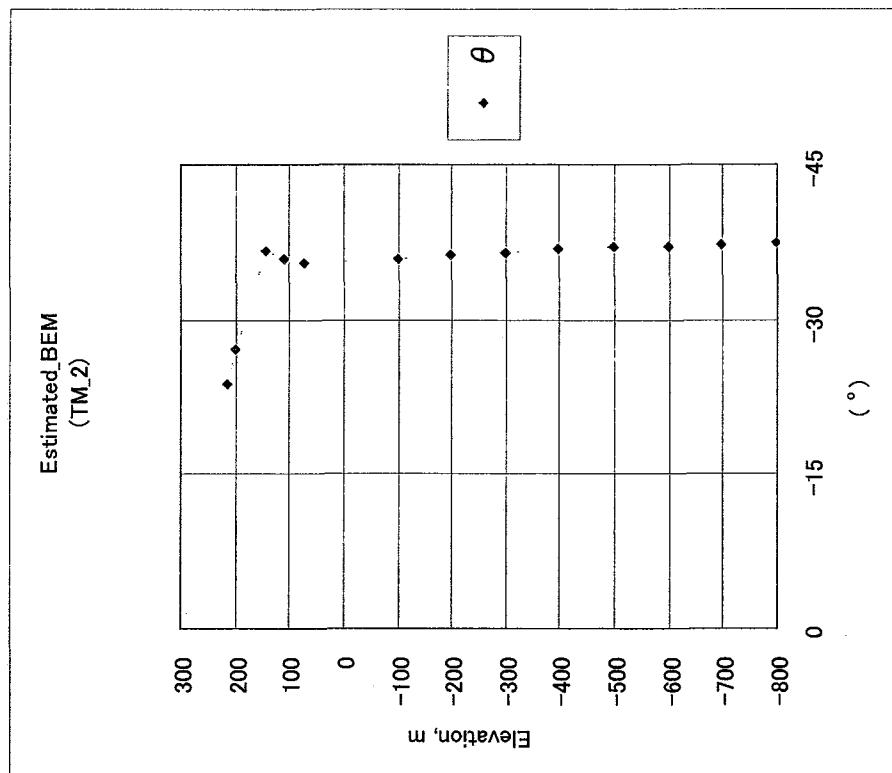
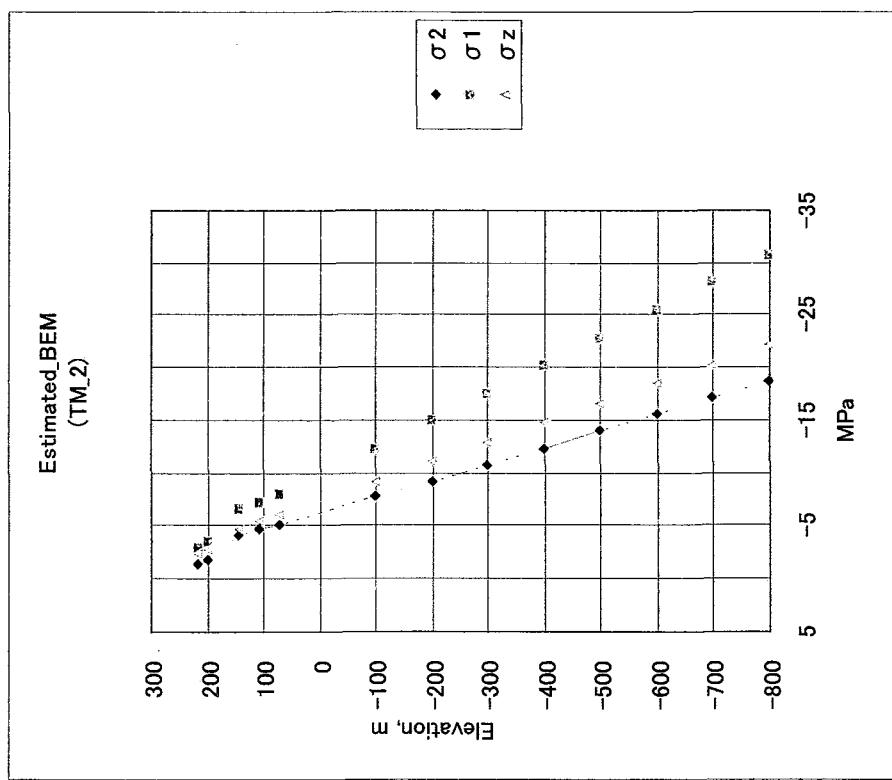
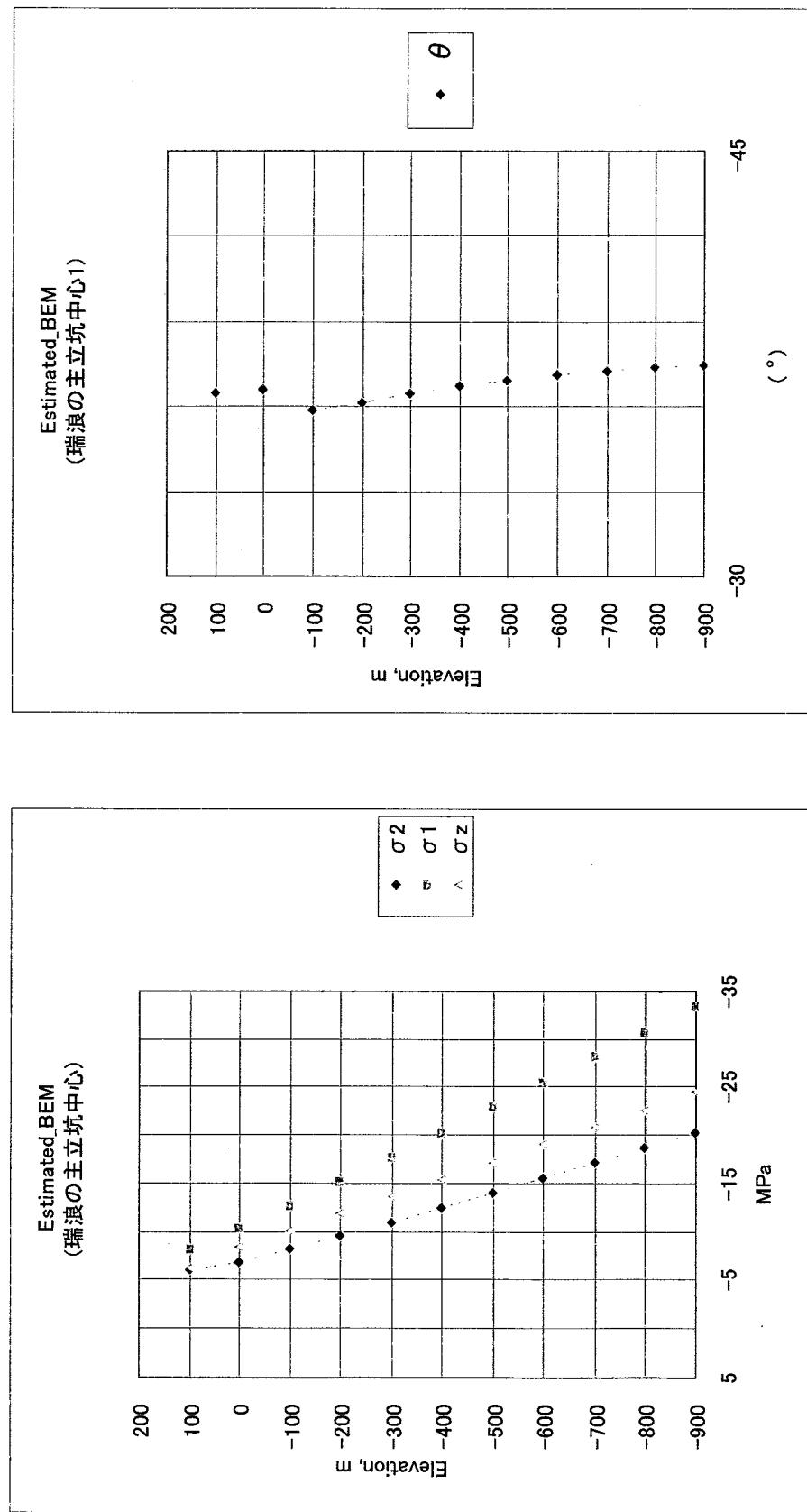


図 3.3.7(i) 試験孔 TM-2 沿いの 13 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ

図 3.3.8 超深地層研究所主立坑沿いの応力分布：水平面内最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_2 および鉛直応力成分 σ_z と水平面内最大主応力の方向 θ



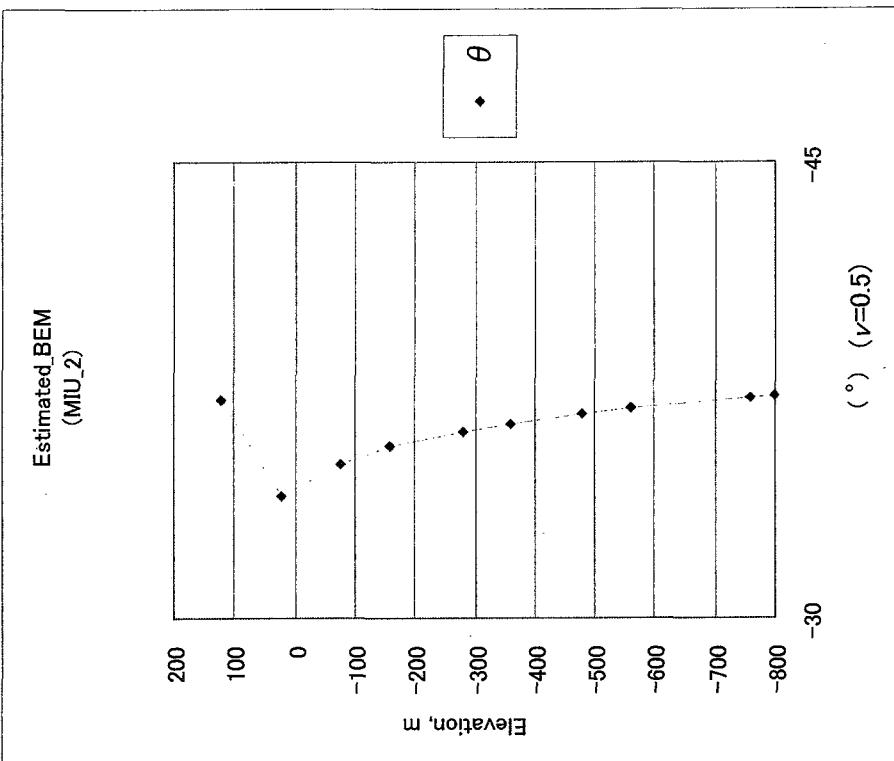
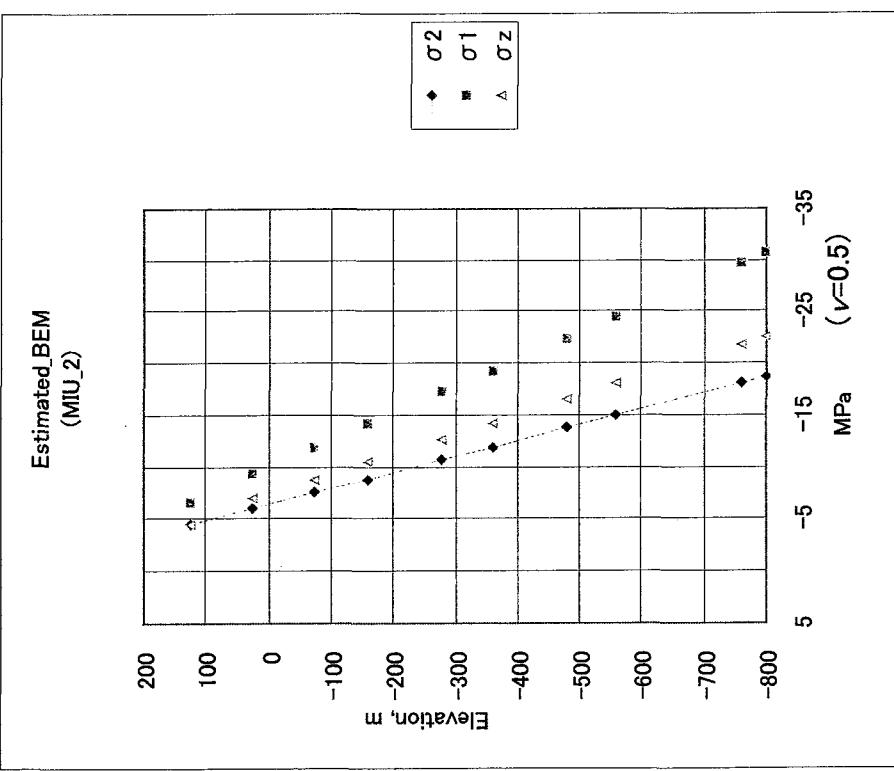


図 3.3.9(a) 試験孔 MIU-2 沿いの 10 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 , 最小主応力 σ_2 , 鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ ($\nu=0.5$)

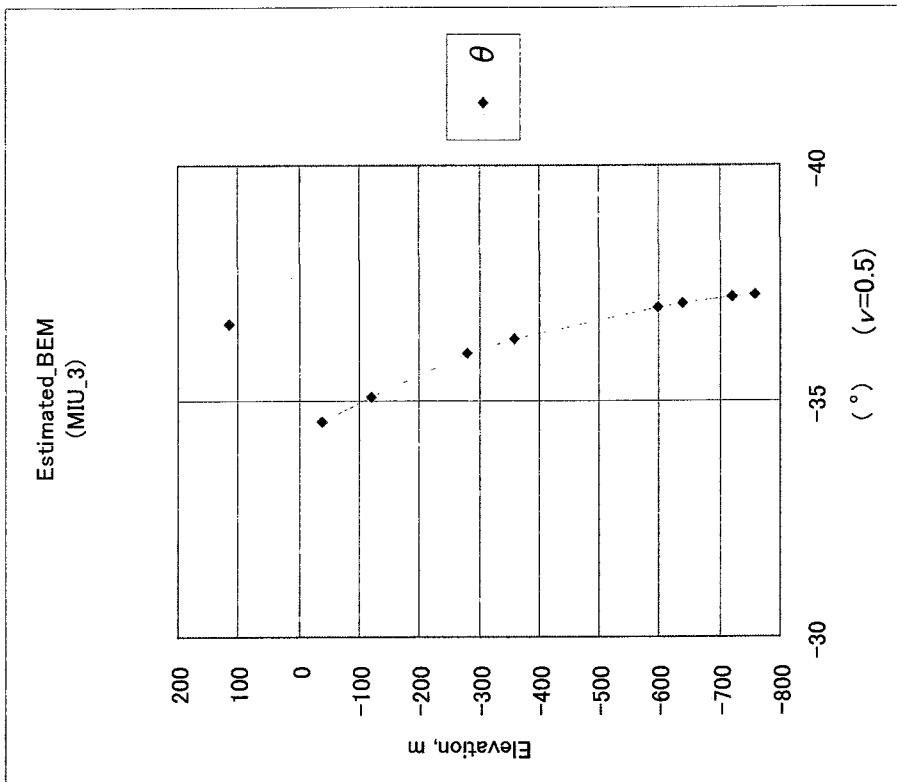
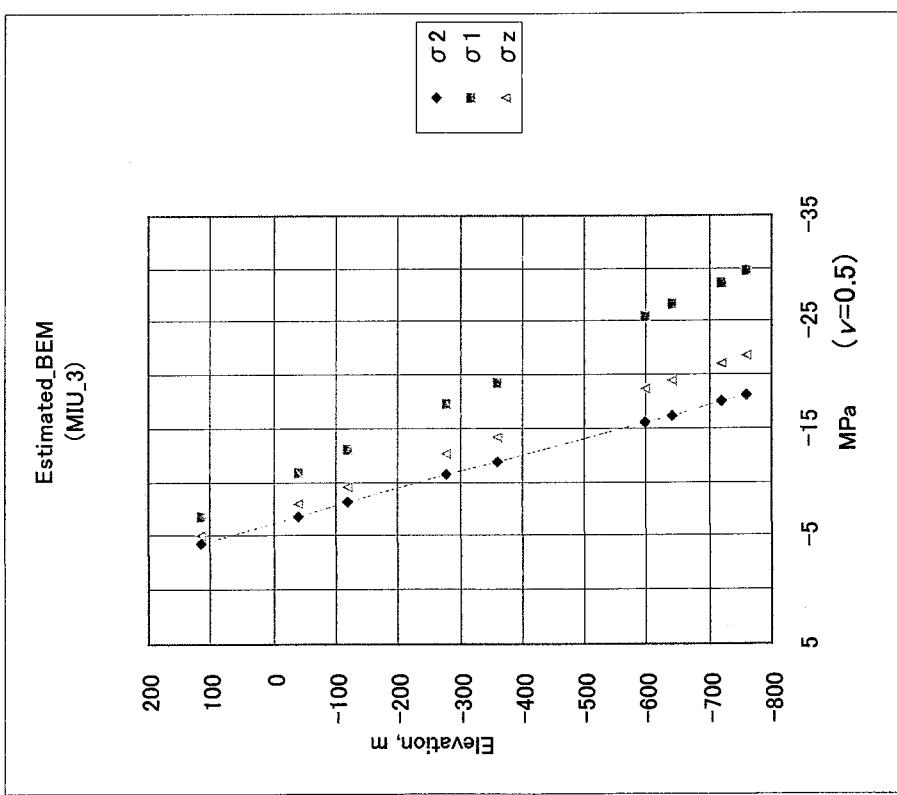


図 3.3.9(b) 試錐孔 MIU-3 沿いの 9 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 , 最小主応力 σ_2 , 鉛直応力成分 σ_z および水平面内最大主応力の方向 θ ($\nu=0.5$)

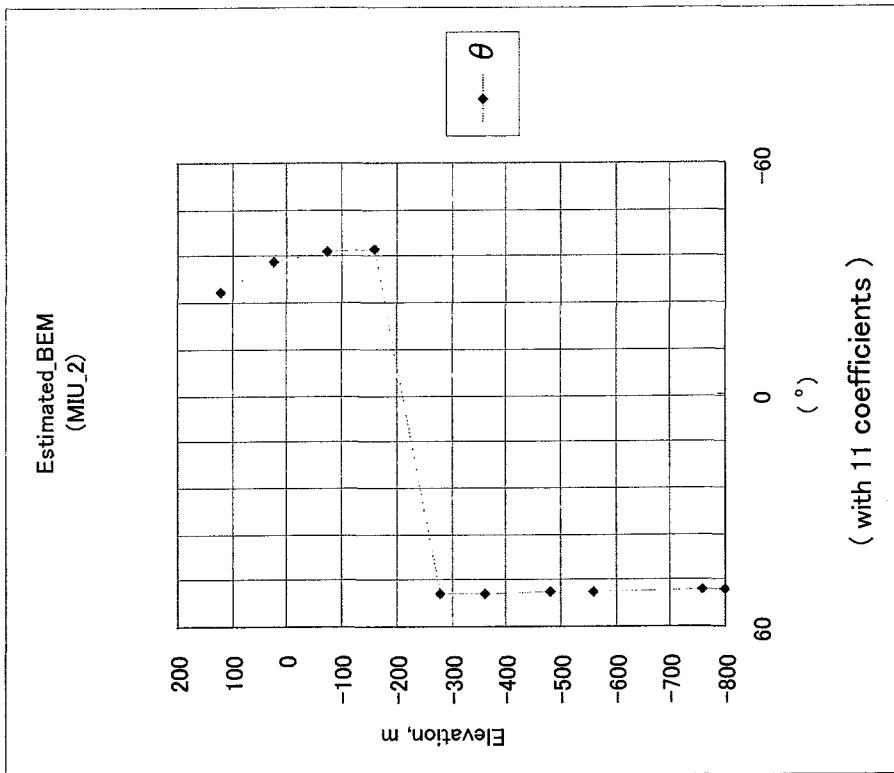
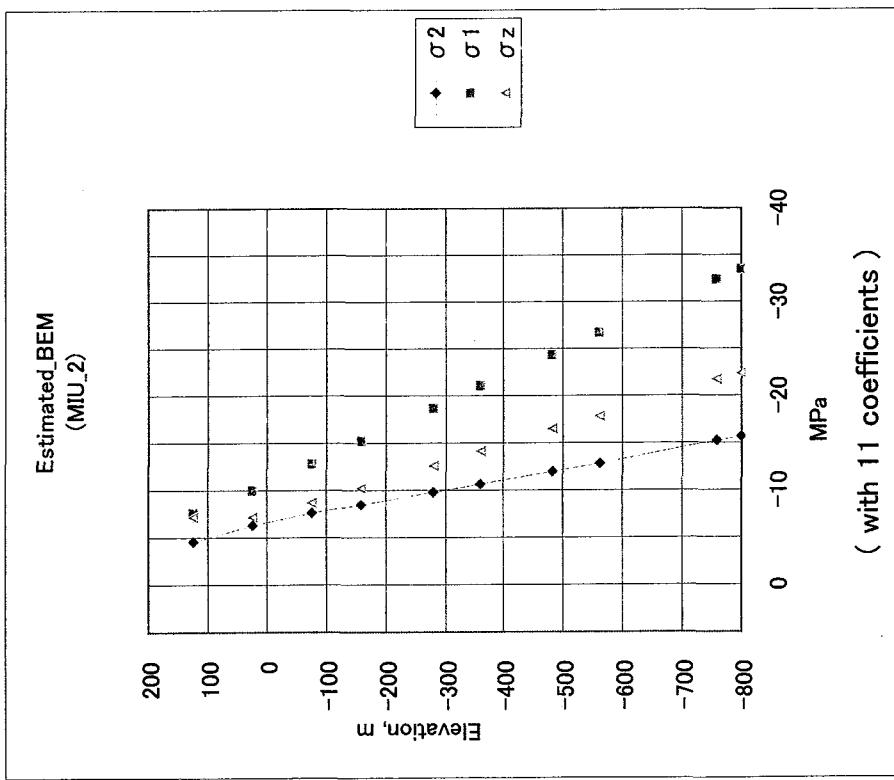


図 3.3.10(a) 試験孔 MIU-2 沿いの 10 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_2 および鉛直応力成分 σ_z と水平面内最大主応力の方向 θ (with 11 coefficients)

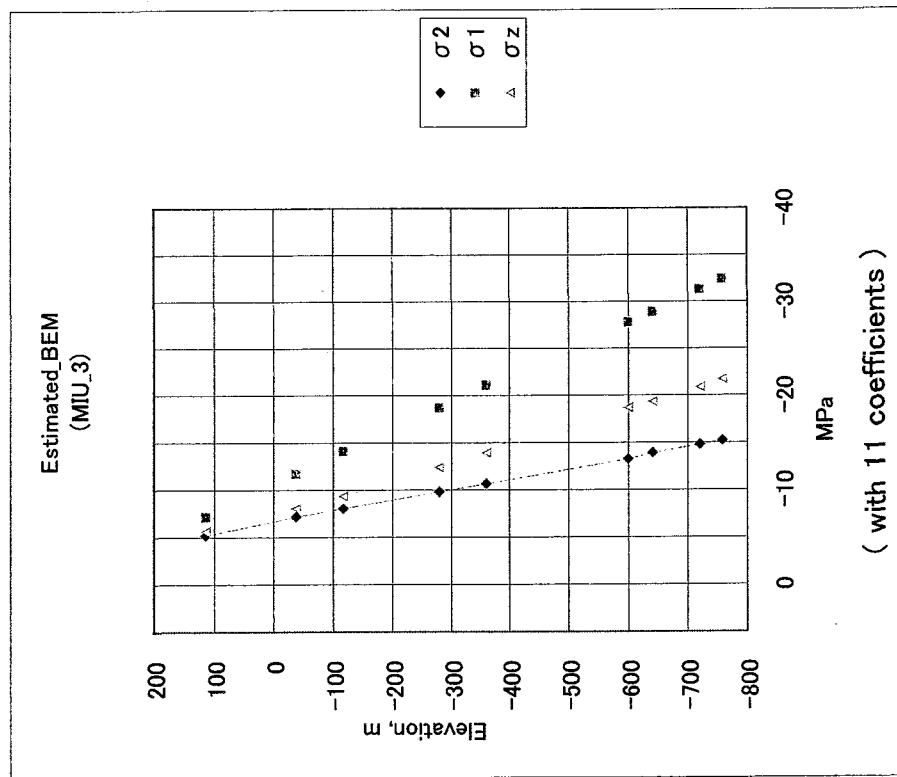
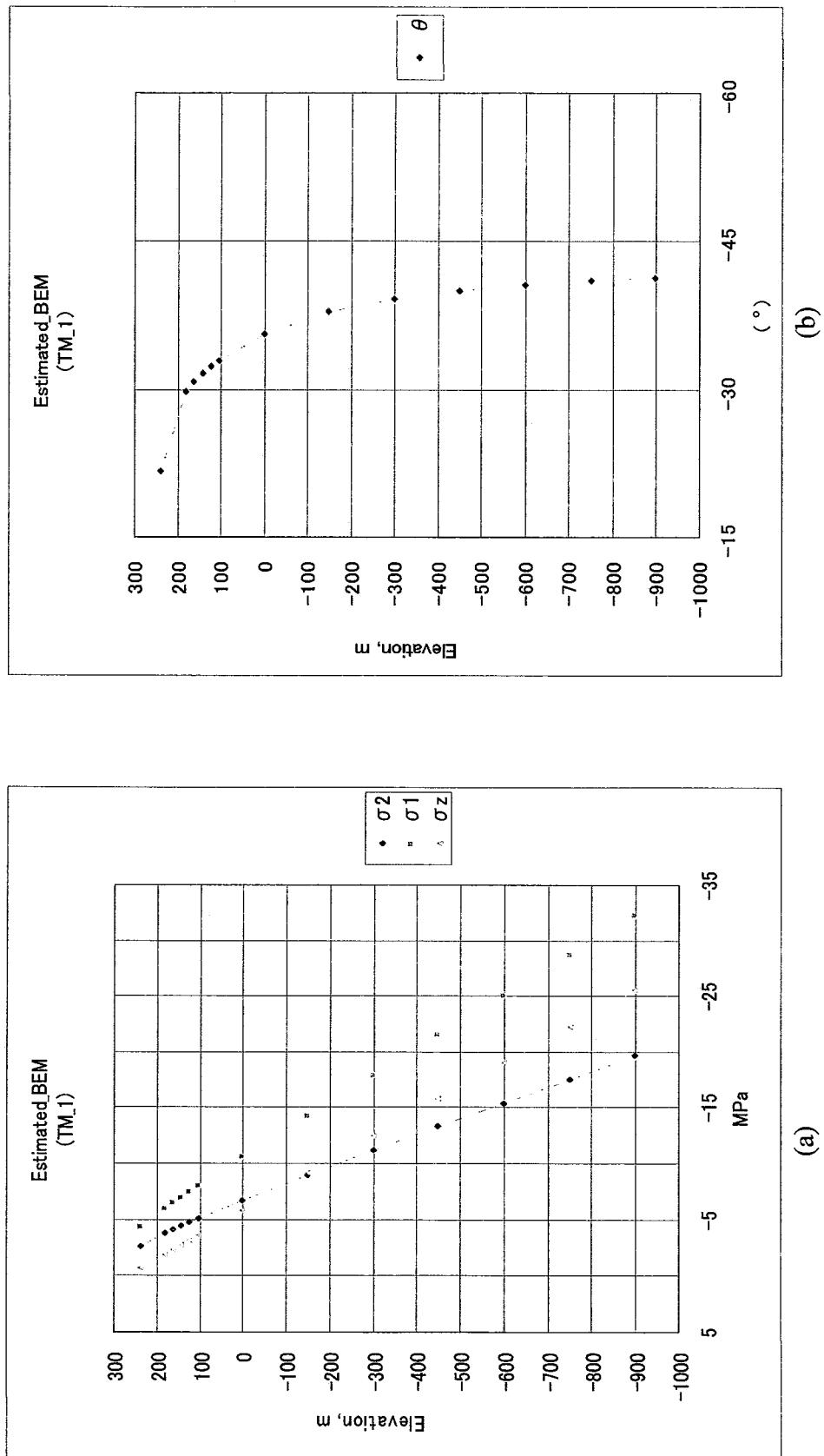


図 3.3.10(b) 試錐孔 MIU-3 沿いの 9 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_2 および鉛直応力成分 σ_z と水平面内最大主応力の方向 θ (with 11 coefficients)

図 3.3.11 試錐孔 TM-1 沿いの 13 点について推定された水平面内最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_2 , および鉛直応力成分 σ_z と水平面内最大主応力の方向 θ



3. 4 断層を含む不均一岩体の広域応力場評価法

本節では、注目領域内に貫通する断層がある場合について、断層の影響を考慮した広域応力場評価法について述べる。昨年度は、断層がない場合の不均一岩体の広域応力場を注目領域から十分離れた境界の平均ひずみ場と考える立場から、広域応力場の評価法を提案した。本節でも、基本的にこの考え方に基づいて広域応力場（平均ひずみ場）を評価する。しかし、注目領域内に貫通する断層がある場合には、断層の走向と直交方向にある鉛直境界を断層から十分離して設定することができない。すなわち、岩体の力学的性質の不均一性の影響に関しては注目領域から十分離れた位置に外部境界を設定できるが、断層に関してはこのことを配慮できない。従って、断層と交差する境界（断層の走向と直交方向にある鉛直境界と底部境界）については、断層の影響を直接考慮した境界条件を設定する必要がある。

図 3.4.1 は、貫通断層を含む領域を模式的に示したものである。注目領域は全領域の中央部にある。同図には、本節で用いる全体座標系（XY面=水平面）と断層上の局所座標系も示してある。断層上の局所座標系としては、走向方向を X' 軸、落としと逆方向（上向き）を Y' 軸、法線方向を Z' 軸にとり、断層上部にある岩体を上部岩体、下部にある岩体を下部岩体と呼ぶ。

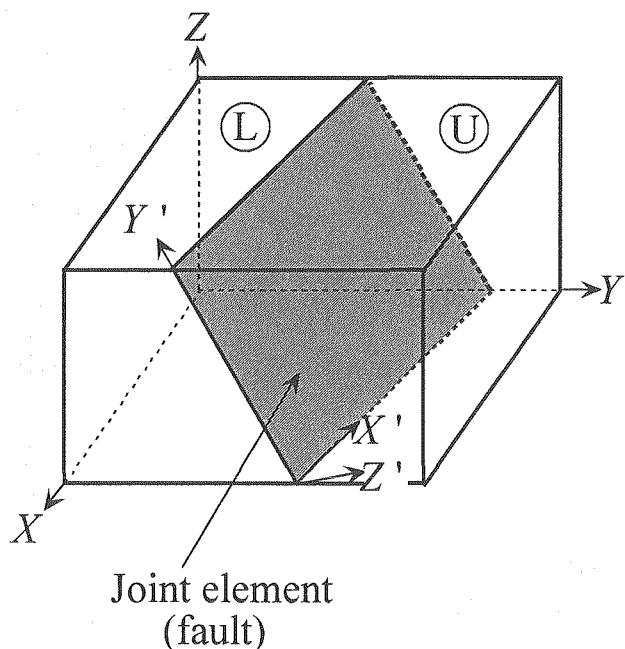


図 3.4.1 貫通する断層を含む領域

3. 4. 1 断層のモデル化

(1) 断層モデル

断層モデルとしては、最も単純な Goodman のジョイント要素を用いた (Goodman, 1976)。ジョイント要素は、図 3.4.2 に示すように、断層の上下面が垂直方向のバネ（垂直剛性 k_n ）とせん断方向のバネ（せん断剛性 k_s ）で連結されている要素である。ただし、せん断方向は等方性を仮定しており、局所座標における応力（せん断応力 τ_x , τ_y 、垂直応力 σ_n ）と断層面の相対変位 ($\Delta u'$, $\Delta v'$, $\Delta w'$) は次の関係にある。

$$\begin{aligned}\tau_x &= k_s \Delta u', \\ \tau_y &= k_s \Delta v', \\ \sigma_n &= k_n \Delta w'.\end{aligned}\quad (3.4.1)$$

なお、断層上の合せん断応力 τ は次式で与えられる。

$$\tau = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2}. \quad (3.4.2)$$

通常、Goodman のジョイント要素は定ひずみ要素として定式化されている。一方、本節では、通常要素として 2 次のアイソパラメトリック要素 (20 節点 6 面体要素、16 節点 5 面体要素、12 節点 4 面体要素) を用いる。そこで、通常要素と適合させるために、ジョイント要素を 2 次のアイソパラメトリック要素に拡張して用いた。すなわち、ジョイント要素を厚みのない二つの平面(上面を U、下面を L で表す) で構成される 16 節点要素 (図 3.4.3(a)) とし、図 3.4.3(b) に示す正規座標系で次のような 2 次の内挿関数を用い、節点以外の座標や表面力、変位などの物理量の内挿を行った。

$$\begin{aligned}\phi_1 (&= \phi_9) &= 0.25(1 - \eta_1)(1 - \eta_2)(-\eta_1 - \eta_2 - 1), \\ \phi_2 (&= \phi_{10}) &= 0.25(1 + \eta_1)(1 - \eta_2)(\eta_1 - \eta_2 - 1), \\ \phi_3 (&= \phi_{11}) &= 0.25(1 + \eta_1)(1 + \eta_2)(\eta_1 + \eta_2 - 1), \\ \phi_4 (&= \phi_{12}) &= 0.25(1 - \eta_1)(1 + \eta_2)(-\eta_1 + \eta_2 - 1), \\ \phi_5 (&= \phi_{13}) &= 0.5(1 - \eta_1^2)(1 - \eta_2), \\ \phi_6 (&= \phi_{14}) &= 0.5(1 - \eta_2^2)(1 + \eta_1), \\ \phi_7 (&= \phi_{15}) &= 0.5(1 - \eta_1^2)(1 + \eta_2), \\ \phi_8 (&= \phi_{16}) &= 0.5(1 - \eta_2^2)(1 - \eta_1).\end{aligned}\quad (3.4.3)$$

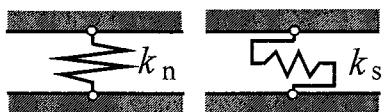


図 3.4.2 ジョイント要素の垂直剛性 (k_n) とせん断剛性 (k_s)

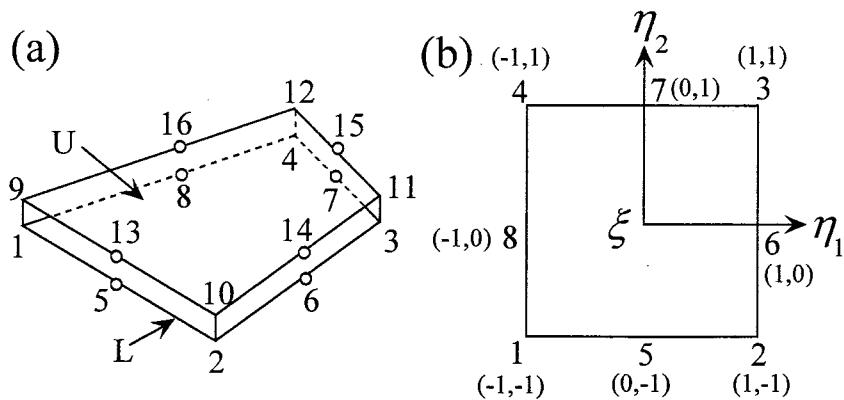


図 3.4.3 (a)ジョイント要素と(b)正規座標系

(2) 断層の剛性マトリクス

ジョイント要素の節点変位を順に並べたものを \mathbf{u}_n 、節点力を順に並べたものを \mathbf{F}_n ($n = 1, 16$) とおくと、

$$\mathbf{u}_n = \begin{Bmatrix} u_1 \\ \mathbf{M} \\ u_8 \\ u_9 \\ \mathbf{M} \\ u_{16} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_n^L \\ \mathbf{u}_n^U \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{F}_n = \begin{Bmatrix} F_1 \\ \mathbf{M} \\ F_8 \\ F_9 \\ \mathbf{M} \\ F_{16} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_n^L \\ \mathbf{F}_n^U \end{Bmatrix}, \quad (3.4.4)$$

である。ただし、L、U は下面と上面を表す。ここで、

$$\mathbf{N}_i = \begin{bmatrix} \phi_i & 0 & 0 \\ 0 & \phi_i & 0 \\ 0 & 0 & \phi_i \end{bmatrix} \quad (i = 1, 8) \quad (3.4.5)$$

とおき、

$$\mathbf{N} = \{\mathbf{N}_1 \quad \mathbf{L} \quad \mathbf{N}_8\} (= \{\mathbf{N}_9 \quad \mathbf{L} \quad \mathbf{N}_{16}\}), \quad (3.4.6)$$

とおくと、上下面の任意の点の変位 \mathbf{u}^U 、 \mathbf{u}^L は次式で与えられる。

$$\mathbf{u}^U = \mathbf{N} \mathbf{u}_n^U, \quad \mathbf{u}^L = \mathbf{N} \mathbf{u}_n^L. \quad (3.4.7)$$

上下面のそれぞれに仮想仕事の原理を適用して上下面に作用する表面力と節点力の関係を求めると次式が得られる。

$$\begin{aligned}\mathbf{F}_n^L &= \int_A \mathbf{N}^T \mathbf{t}_L dA, \\ \mathbf{F}_n^U &= \int_A \mathbf{N}^T \mathbf{t}_U dA,\end{aligned}\quad (3.4.8)$$

ただし、 $\mathbf{t}_U, \mathbf{t}_L$ は全体座標系における上下面の任意の点の表面力である。上式は、外力としての表面力の等価節点力に関する従来の式と同じである。

ここで、ジョイント要素の局所座標の全体座標に関する方向余弦を

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \quad (3.4.9)$$

と表し、局所座標における表面力 \mathbf{t}' と変位 \mathbf{u}' を、それぞれ、

$$\mathbf{t}' = \begin{Bmatrix} t'_1 \\ t'_2 \\ t'_3 \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{u}' = \begin{Bmatrix} u'_1 \\ u'_2 \\ u'_3 \end{Bmatrix}, \quad (3.4.10)$$

と表すと、全体座標系における表面力および変位と局所座標系における表面力および変位のそれぞれの関係は、例えば上面の場合、次式で与えられる。

$$\mathbf{t}_U = \mathbf{L}^T \mathbf{t}'_U, \quad \mathbf{u}_U = \mathbf{L}^T \mathbf{u}'_U. \quad (3.4.11)$$

これは、下面でも同様である。ここで、ジョイント要素のバネ剛性からなるマトリクスを

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 \\ 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & k_n \end{bmatrix}, \quad (3.4.12)$$

とおき、局所座標における相対変位を、

$$\Delta \mathbf{u}' = \begin{Bmatrix} u'_U - u'_L \\ v'_U - v'_L \\ w'_U - w'_L \end{Bmatrix}, \quad (3.4.13)$$

とおくと、

$$\mathbf{t}'_U = \mathbf{K} \Delta \mathbf{u}', \quad \mathbf{t}'_L = -\mathbf{K} \Delta \mathbf{u}', \quad (3.4.14)$$

$$\Delta \mathbf{u}' = \mathbf{L}(-\mathbf{N}, \mathbf{N}) \mathbf{u}_n, \quad (3.4.15)$$

であるから、(3.4.8) 式における表面力は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \mathbf{t}_U &= \mathbf{L}^T \mathbf{KL}(-\mathbf{N}, \mathbf{N}) \mathbf{u}_n, \\ \mathbf{t}_L &= -\mathbf{L}^T \mathbf{KL}(-\mathbf{N}, \mathbf{N}) \mathbf{u}_n. \end{aligned} \quad (3.4.16)$$

従って、ジョイント要素における節点力と節点変位の関係は次式となる。

$$\mathbf{F}_n = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_n^L \\ \mathbf{F}_n^U \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} - \int_A \mathbf{N}^T \mathbf{L}^T \mathbf{KL}(-\mathbf{N}, \mathbf{N}) dA \\ \int_A \mathbf{N}^T \mathbf{L}^T \mathbf{KL}(-\mathbf{N}, \mathbf{N}) dA \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_n^L \\ \mathbf{u}_n^U \end{Bmatrix}. \quad (3.4.17)$$

上式はジョイント要素のいわゆる剛性マトリクスを与える。

(3) 断層の滑り条件

本節では、断層を単なる弾性係数の小さな岩層として扱う場合のみならず、断層が滑る場合も考慮した。滑り条件としては Coulomb 条件を用いた。すなわち、 μ を摩擦係数として、

$$\tau > \mu \sigma_n, \quad (3.4.18)$$

を満足する節点については、繰り返し計算により、次の条件を満足するようにせん断剛性 k_s を滑らない場合の値（弹性値）から修正した。

$$\tau = \mu \sigma_n. \quad (3.4.19)$$

すなわち、繰り返し回数 i での剛性 (k_n, k_s^i) を用いて断層上の τ^i と σ_n^i が求められた場合、(3.4.18) 式を満足する節点については、図 3.4.4 に示すように、その節点におけるせん断変位（相対変位） δ を用いて、

$$k_s^{i+1} = \mu \sigma_n^i / \delta^i, \quad (3.4.20)$$

により新たなせん断剛性 k_s^{i+1} を求めた。ただし、滑り条件を満足した場合でも垂直剛性 k_n は不变である。この方法では、後に述べるように、数回の繰り返しで (3.4.19) 式を満足させることができる。なお、本研究では、断層の粘着力を 0 としているが、滑り条件に粘着力を含めることは容易である。

このように、滑っているジョイント要素の各節点のせん断剛性は同一ではなく

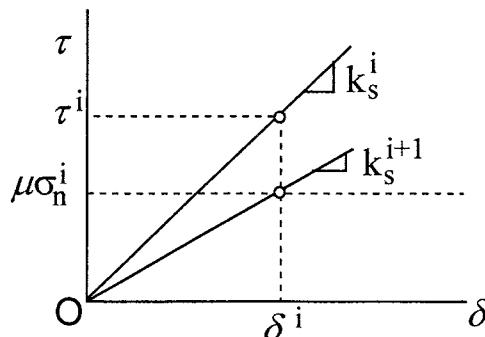


図 3.4.4 繰り返し計算におけるせん断剛性の修正

い。そこで、すべて述べた内挿関数を用いて各節点のせん断剛性 k_{si} から任意点のせん断剛性 k_s を次のように内挿し、せん断剛性を位置の関数として (3.4.17) 式の積分を実行した。

$$k_s = \sum_{i=1}^8 \phi_i k_{si}. \quad (3.4.21)$$

3. 4. 2 境界条件の設定

本節における広域応力場とは、上表面と内部を除く外部境界の変位型境界条件である。昨年度と同様、外部境界における変位の連続性を自動的に満足させるために、外部境界変位を座標の関数として与えた。ただし、断層が領域を貫通しているために、すでに述べたように、断層上で相対変位が生ずることを考慮する必要がある。このため、断層上部と下部の岩体に異なる外部境界変位を与えた。

下部岩体の外部境界変位としては、昨年度と同様に、 ε_z は z の一次関数で、それ以外のひずみが一定である最も単純な境界変位を用いた。

$$\begin{aligned} u_s &= a_1 x + a_2 y + a_3 z, \\ v_s &= b_2 y + b_3 z, \\ w_s &= c_3 z + c_4 z^2. \end{aligned} \quad (3.4.22)$$

従って、下部岩体の境界変位は 7 個の影響係数で表され、そのひずみは次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= a_1, \quad \varepsilon_y = b_2, \quad \varepsilon_z = c_3 + 2c_4 z, \\ \gamma_{xy} &= a_2, \quad \gamma_{yz} = b_3, \quad \gamma_{zx} = a_3. \end{aligned} \quad (3.4.23)$$

他方、上部岩体の境界変位としては、上式に一定変位成分を加え、さらにせん断ひずみに関する二つの変位成分が 0 ではないとして、次式で境界変位を与えた。

$$\begin{aligned} u_s &= a'_0 + a'_1 x + a'_2 y + a'_3 z, \\ v_s &= b'_0 + b'_1 x + b'_2 y + b'_3 z, \\ w_s &= c'_0 + c'_1 x + c'_2 y + c'_3 z + c'_4 z^2. \end{aligned} \quad (3.4.24)$$

この場合のひずみは次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= a'_1, \quad \varepsilon_y = b'_2, \quad \varepsilon_z = c'_3 + 2c'_4 z, \\ \gamma_{xy} &= a'_2 + b'_1, \quad \gamma_{yz} = c'_2 + b'_3, \quad \gamma_{zx} = c'_1 + a'_3. \end{aligned} \quad (3.4.25)$$

上部岩体についても、 ε_z は z の一次関数で、それ以外のひずみは一定であるが、

(3.4.24) 式は (3.4.22) 式と変形様式が異なる。このような外部境界変位を与えると、上部岩体の境界変位は 13 個の影響係数で表され、全ての決めるべき影響係数は 20 個になる。

次に、このような境界変位を与えた場合に断層の境界変位がどのようになるかを考える。全体座標系での断層上面の下面に対する相対変位 Δu は、(3.4.24) 式と (3.4.22) 式の差を取ることによって次式で与えられる。

$$\Delta \mathbf{u} = \begin{Bmatrix} a'_0 \\ b'_0 \\ c'_0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} a'_1 - a_1 & a'_2 - a_2 & a'_3 - a_3 \\ b'_1 & b'_2 - b_2 & b'_3 - b_3 \\ c'_1 & c'_2 & c'_3 - c_3 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ c'_4 - c_4 \end{Bmatrix} z^2. \quad (3.4.26)$$

これを、次のように書く。

$$\Delta \mathbf{u} = \Delta \mathbf{u}_0 + \mathbf{A}x + \mathbf{b}z^2, \quad (3.4.27)$$

ただし、

$$\Delta \mathbf{u}_0 = \begin{Bmatrix} a'_0 \\ b'_0 \\ c'_0 \end{Bmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{Bmatrix} a'_1 - a_1 & a'_2 - a_2 & a'_3 - a_3 \\ b'_1 & b'_2 - b_2 & b'_3 - b_3 \\ c'_1 & c'_2 & c'_3 - c_3 \end{Bmatrix}, \quad (3.4.28)$$

$$\mathbf{b} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ c'_4 - c_4 \end{Bmatrix}.$$

である。

ここで、断層の法線方向を (l_f, m_f, n_f) とおくと、断層上の局所座標（図 3.4.1 参照）の全体座標に対する方向余弦マトリクス L_f は、

$$L_f = \begin{Bmatrix} m_f / \sqrt{l_f^2 + m_f^2} & -l_f / \sqrt{l_f^2 + m_f^2} & 0 \\ l_f n_f / \sqrt{l_f^2 + m_f^2} & m_f n_f / \sqrt{l_f^2 + m_f^2} & -\sqrt{l_f^2 + m_f^2} \\ l_f & m_f & n_f \end{Bmatrix} \quad (3.4.29)$$

で与えられ、断層局所座標 x' と全体座標 x の関係は、断層局所座標の原点を x_0 とおくと、

$$\mathbf{x} = L_f^T \mathbf{x}' + \mathbf{x}_0, \quad (3.4.30)$$

である。ただし、断層は厚みを考慮しないから、 z' は常に 0 であり、

$$\mathbf{x}' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3.4.31)$$

である。従って、断層上の局所座標における相対変位 $\Delta\mathbf{u}'$ は次式で与えられる。

$$\Delta\mathbf{u}' = \mathbf{L}_f(\Delta\mathbf{u}_0 + A\mathbf{x}_0) + \mathbf{L}_f A \mathbf{L}_f^T \mathbf{x}' + \mathbf{L}_f \mathbf{b}(z_0 - \sqrt{l_f^2 + m_f^2} y')^2. \quad (3.4.32)$$

このように、(3.4.24) 式と (3.4.22) 式で上部岩体と下部岩体の境界変位を与えると、外部境界における断層の相対変位は、断層走向と平行な方向の相対変位 ($\Delta u'$) は走向方向 (X') と落とし方向 (Y') の1次関数であるが、落としと平行な方向の変位 ($\Delta v'$) ならびに断層面と垂直な方向の変位 ($\Delta w'$) は走向方向 (X') には1次関数、落とし方向 (Y') には2次関数で変化することになる。このような設定の合理性については今後検討する余地がある。

3. 4. 3 有限要素法による変位型境界条件の決定法

(1) 断層の滑りがない場合

断層の滑りを考慮しない場合、有限要素法による変位型境界条件の決定法は断層を考慮しない不均一岩体の場合と同様である。すなわち、断層は弾性係数の小さな軟弱弾性層として扱われる。解析の結果、断層が滑らない応力状態にあることが確認されれば、得られた広域応力場は実際の広域応力場として評価される。まず、対象とする領域を、境界条件を与える外部境界（側面および底面）とそれ以外の領域（内部および上表面）に分け、後者を便宜上内部領域と呼ぶ。有限要素法では、離散化したモデルの全節点について、次のような節点力と節点変位の関係を与えられた境界条件を満足させるように解く。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{u}_i \\ \mathbf{u}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_{gi} \\ \mathbf{F}_{gs} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \mathbf{F}_s \end{pmatrix}, \quad (3.4.33)$$

ただし、 \mathbf{K}_{ij} は剛性マトリックス、 \mathbf{u} は節点変位、 \mathbf{F}_g は重力による節点力、 \mathbf{F} は外力による節点力であり、添え字の s, i は、それぞれ、外部境界と内部領域を表す。また、断層がある場合には、下部岩体と上部岩体で外部境界変位 \mathbf{u}_s が異なる。変位型境界条件では、外部境界の変位 \mathbf{u}_s を与えて内部領域の変位 \mathbf{u}_i を解く。この場合、 \mathbf{F}_s は外部境界の反力であり、 \mathbf{F}_i は全て 0 である。上式から、 \mathbf{u}_s が与えられた場合の \mathbf{u}_i は次式のように表される。

$$[\mathbf{K}_{11}] (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_{i0}) = -[\mathbf{K}_{12}] (\mathbf{u}_s), \quad (3.4.34)$$

ただし、 u_{i0} は外部境界の全ての変位が 0 の場合の内部領域の重力の影響のみによる変位であり、次式で与えられる。

$$[K_{11}](u_{i0}) = \{F_g\} \quad (3.4.35)$$

(3.4.34) 式は、重力の影響を除いた内部領域の変位が境界変位と比例することを意味する。従って、重力場で境界変位を影響係数に関する幾つかの変形モードの和で与える場合は、それぞれの変形モードで得られた内部領域の変位 u_i から重力の影響のみによる内部領域の変位 u_{i0} を除いて重ね合わせる必要がある。応力が節点変位で決まることから、このことは、境界変位と内部領域の応力の関係についても成立する。すなわち、重力の影響のみによる内部領域の変位 u_{i0} から重力のみの影響による内部領域の応力を予め計算しておけば、各変形モードの境界変位から求めた内部領域の応力から重力のみの影響による応力を除いた応力について重ね合わせが成立する。

このように、次のような手順で地圧の測定データから変位型境界条件を決めることができる。

- 1) 重力の影響のみの変位 u_{i0} を求め、それから測定点 m での重力のみの影響による応力 $\{\sigma_{ij0}^m\}$ を求める。
- 2) 各変形モード k について、単位影響係数 $\alpha_k = 1$ のみの外部境界変位を与え、測定点 m での応力 $\{\sigma_{ij}^m\}_k$ を求める。従って、例えば下部岩体の影響係数の影響を見る場合には、上部岩体の外部境界変位は全て 0 とし、上部岩体の影響係数の影響を見る場合は下部岩体の外部境界変位は全て 0 とする。
- 3) m 点での測定データ $\{\sigma_{ij}^{Mm}\}$ ($m = 1, M$) について、次式の誤差を最小とする影響係数 α_k を求める。

$$\{\sigma_{ij}^{Mm}\} - \{\sigma_{ij0}^m\} = \sum_k \alpha_k [\{\sigma_{ij}^m\}_k - \{\sigma_{ij0}^m\}] \quad (m = 1, M). \quad (3.4.36)$$

従って、測定データ数（応力成分数）が影響係数の数以上あれば、全ての影響係数を決めることができる。ただし、ある程度の精度を確保するためには影響係数の数より多い互いに独立なデータが必要である。

(2) 断層が滑る場合

断層の滑りを考慮しない広域応力場評価の結果、少なくとも断層の一部が滑り条件を満足している場合には、断層の滑りを考慮した広域応力場評価が必要になる。断層が滑る場合について、まず、与えられた境界条件について応力解

析する場合（順解析）のフロー図を図 3.4.5 に示す。滑り条件を満足した節点について既に述べた方法で（3.4.19）式を満足させるが、滑りから弾性、または弾性から滑りへのモード変更がなく、かつ滑り条件を満足した節点について次式で表される誤差 e がある値 e_0 以下になった場合に繰り返し計算を終了する。

$$e = \sqrt{\frac{\sum(|d_i - \mu\sigma_{n,i}|)^2}{N}}, \quad (3.4.37)$$

ただし、 N は滑り条件を満足した節点の総数である。

断層が滑る場合の広域応力場評価法（逆解析法）としては幾つかの方法が考えられる。本節では、断層の位置や幾何学的形状ならびその弾性的性質と摩擦係数のみが与えられている場合に、測定された地圧データからどこまで広域応力場を評価できるかを考える。すなわち、断層が部分的に滑っている場合に、どの部分が滑っているかが予め分からぬ場合を考える。これは、通常、断層のどの部分が滑っているかを知ることが困難であるからである。このように問題を設定すると、測定された地圧データから断層上の滑り領域と広域応力場の両方を決定することになる。しかし、広域応力場と断層上の滑り領域は互いに関係があるため、逆解析で必ずしも両者が一義的に定まるとは限らない。

図 3.4.6 は、断層の滑りを考慮した広域応力場評価法全体のフロー図である。本方法では、基本的に 2 回の広域応力場評価を行った後、3 回目に最終的な広域応力場を評価する。最初は、断層の初期せん断剛性 k_{s0} を弾性値とし、かつ断層上の全節点が滑っていないという設定で解析を始め、後に述べる繰り返し計算により断層の滑りを考慮した広域応力場を評価する。この場合、断層の滑りの影響を受けた地圧データを用いて広域応力場を評価するため、断層の初期せん断剛性として弾性値を用いて解析を始めると、繰り返し計算により断層の滑りを考慮して広域応力場を評価しても、後に述べるように、広域応力場を過小評価する。そこで、2 回目では、断層全体が滑るような条件から解析を始めるために、断層の初期せん断剛性として弾性値をある割合 rin まで減じた値を用い、かつ断層上の全節点がすでに滑っているという設定で解析を始める。この場合には、後に述べるように、広域応力場を过大評価する。そこで、3 回目には、1 回目と 2 回目で得られたせん断剛性の平均値を初期せん断剛性として解析を始める。この際、平均せん断剛性が弾性値と同じであれば滑っていない状態、弾性値より小さければ滑っているというモードの初期設定で解析を始める。従って、3 回目に得られた結果は実際の状態に近いと期待できる。

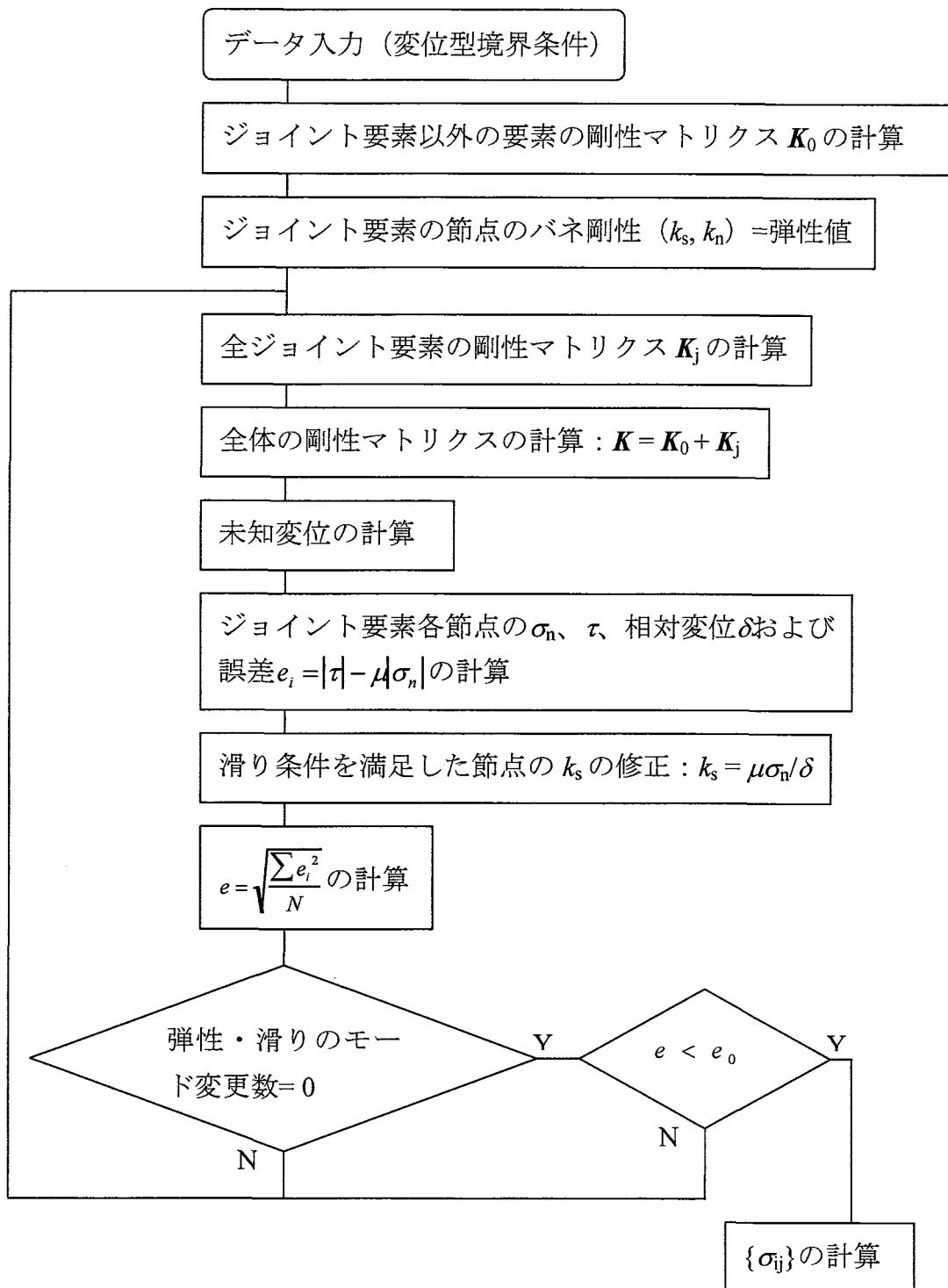


図 3.4.5 断層滑りを考慮した順解析におけるフロー図

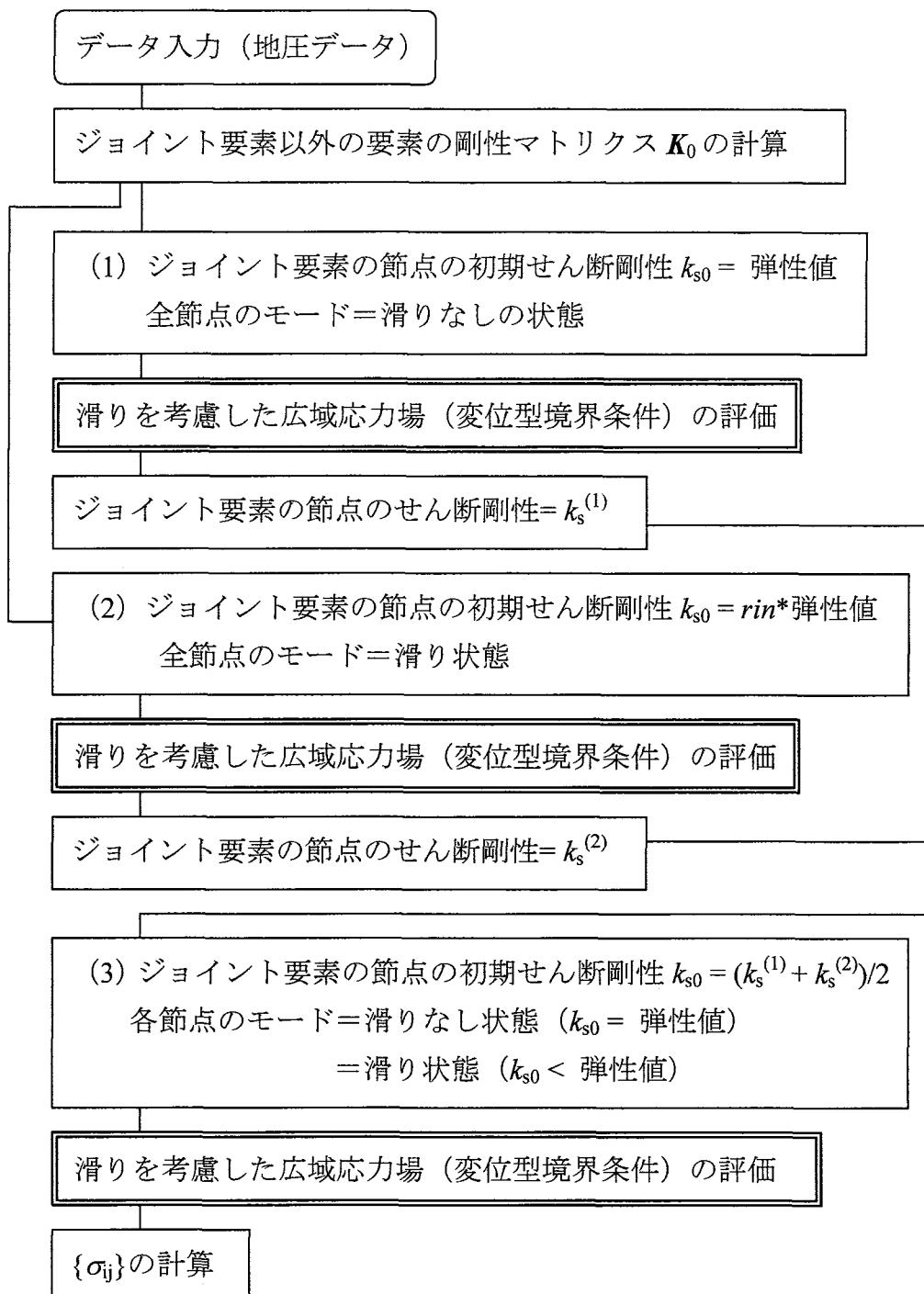


図 3.4.6 断層滑りを考慮した逆解析全体のフロー図

図 3.4.7 は、前記の初期設定の後に用いる広域応力場評価法のフロー図である。断層各節点のせん断剛性と滑りに関するモードの初期値を設定した後、地圧データを用いて既に述べた方法で影響係数を決定し、次に、この影響係数で与えられる変位型境界条件について、順解析の場合と同様に、断層の各節点の滑り状態を評価してせん断剛性を修正し、繰り返し計算により当該影響係数に対する断層の最終的滑り状態を決定する。この過程で断層節点のせん断剛性が変化するので、次に、再度断層の剛性マトリクスを計算し、再び与えられた地圧データから影響係数を評価する。この過程を繰り返し、次式で与えられる総合誤差 ers が最小となる影響係数を最終値として決定する。

$$ers = \sqrt{\frac{\sum \sum [(\sigma_{ij})^m - (\sigma_{ij})^{est}]^2}{M}}, \quad (3.4.38)$$

ただし、 $\{\sigma_{ij}\}^m$ は地圧成分の測定値、 $\{\sigma_{ij}\}^{est}$ は地圧成分の推定値であり、M はデータ数である。

3. 4. 4 小規模モデルによる断層の影響評価

(1) 小規模モデルおよび誤差の評価

前節で述べた方法の有効性や断層が広域応力場評価に及ぼす影響を知るために、貫通断層を含む小規模モデル ($40\text{ m} \times 60\text{ m} \times 40\text{ m}$) を用いて広域応力場の評価を行った。用いたモデルを図 3.4.8 に示す。ただし、同図は、後に述べる広域応力場評価（逆解析）に用いた 5 通りの地圧データの採取点（Data 点 1～Data 点 5 と呼ぶ）を示したものである。要素数 96、節点数 718 で、モデルの Y 軸方向中央に勾配が $1/2$ の断層（要素数 16）があり、この断層は上下方向および走向方向（X 軸方向）に貫通している。本モデルでは、断層のみの影響をみるために、上部岩体と下部岩体の弾性的性質および比重は同一（ヤング率 $E = 10\text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.25$ 、密度 $\rho = 2500\text{ kg/m}^3$ ）とし、断層の弾性的バネ定数としては垂直剛性 $k_n = 100\text{ MPa/m}$ 、せん断剛性 $k_s = 36\text{ MPa/m}$ を用いた。また、モデル境界の影響を除くために、上部境界を除く各境界から 1 要素分を除いた内部領域（24 要素）を注目領域とした。

本節では、小規模モデルの下部および上部岩体に、それぞれ、(3.4.22) 式と (3.4.24) 式の変位型境界条件を与え、滑りを考慮しない場合と滑りを考慮する場合の解析を行った。いずれの場合も、まず順解析でモデル内の応力分布を求め、次に 12 点の応力 6 成分を地圧データとみなして広域応力場評価を行った。

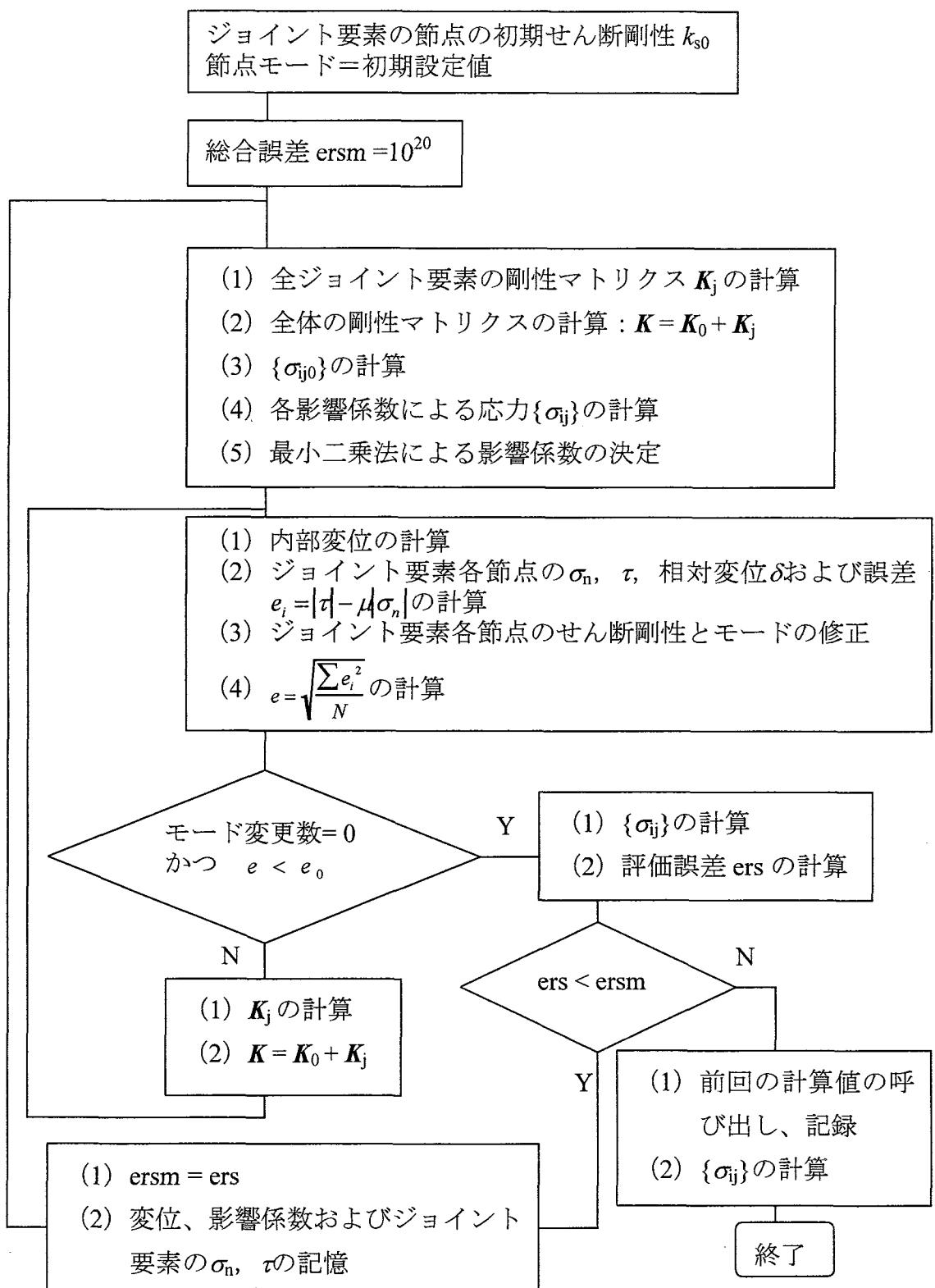


図 3.4.7 断層滑りを考慮した逆解析における初期設定後のフロー図

なお、順解析で用いた変位型境界条件は全ての場合で同一である。地圧データの採取点をすでに図 3.4.8 に示してあるが、Data set 1 は断層から離れた点のみ、Data set 2 は断層に近い点のみ、Data set 3 は断層から離れた点と近い点を混合し

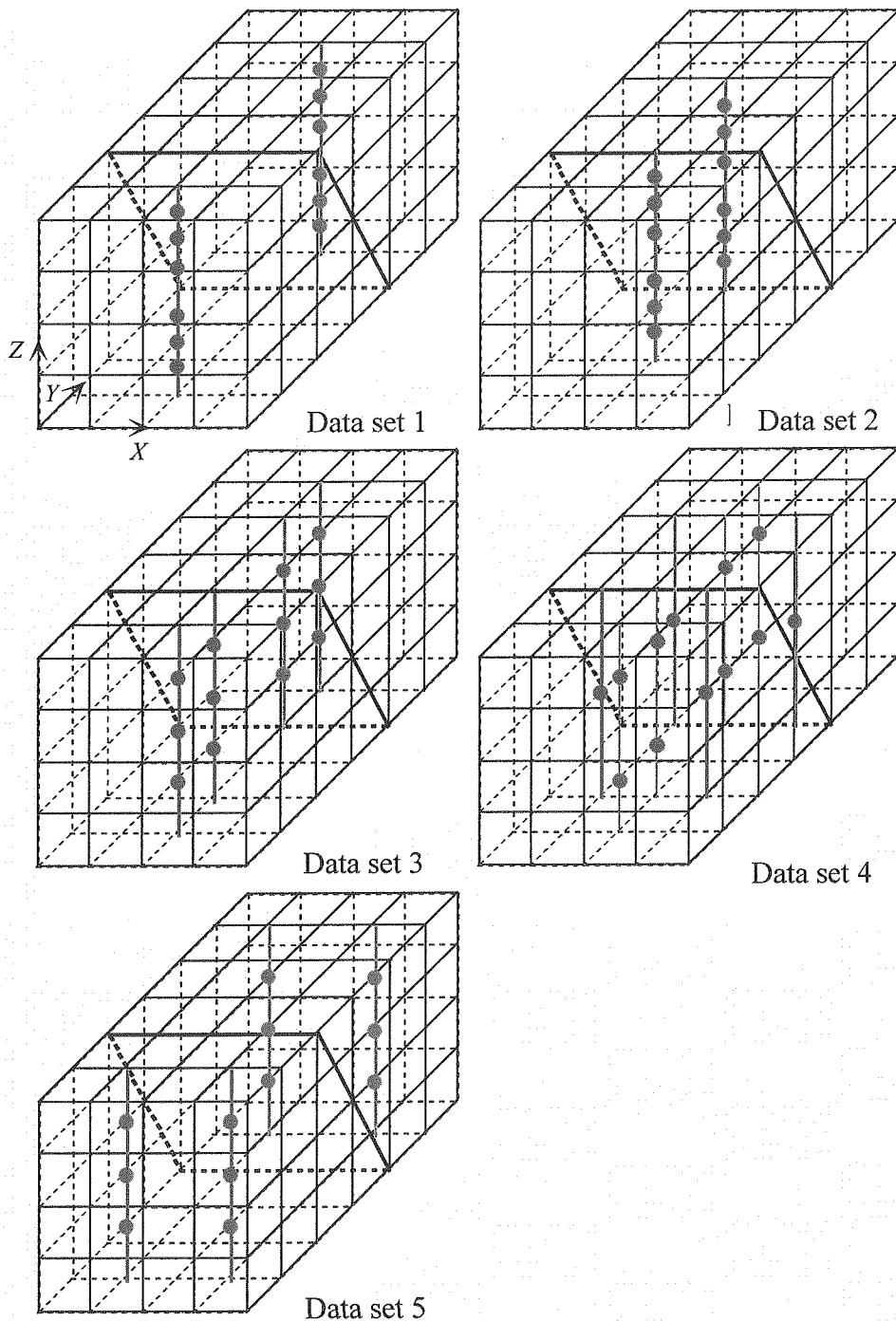


図 3.4.8 小規模モデルおよび滑りを考慮した逆解析における地圧データの採取点

た場合であり、これらは、いずれも X 軸方向の中間点からデータを採取している。一方、Data set 4 は断層から離れた点と近い点ならびに断層の走向に互いに離れた点が混在した場合であり、Data set 5 は断層から離れた点で断層の走向に互いに離れた点の場合である。なお、これらの地圧データ点は断層上にはない。

応力の評価誤差としては二つの値を用いた。一つは、注目領域内の応力評価に関する誤差 er であり、次式のように、注目領域における全応力成分について予測値と実際の値の差の二乗和の平方根平均を用いた。

$$er = \sqrt{\frac{\sum \sum (\sigma_{ij}^{est} - \sigma_{ij}^{ass})^2}{6N_T}}, \quad (3.4.39)$$

ただし、 σ_{ij}^{est} 、 σ_{ij}^{ass} は、それぞれ、予測応力成分と実際の応力成分であり、 N_T は注目領域内の全節点数である。もう一つは、断層上の垂直応力 σ_n とせん断応力 τ に関する誤差 erF で、次式のように、 σ_n と τ の予測値と実際値の差の二乗和の平方根平均である。

$$erF = \sqrt{\frac{\sum \{(\sigma_n^{est} - \sigma_n^{ass})^2 + (\tau^{est} - \tau^{ass})^2\}}{2N_F}}, \quad (3.4.40)$$

ただし、 N_F は断層上の総節点数の半分である。断層上の応力は関与している全ての応力成分がある大きさを有しているのに対し、注目領域内の応力は、特にせん断応力成分が垂直応力成分に比べて小さい場合、(3.4.29) 式で誤差評価を行うと、見かけ上、誤差が小さく見えることに注意を要する。

(2) 断層の滑りを考慮しない場合

図 3.4.9 は、断層が滑らない場合の順解析で得られた断層上の垂直応力 σ_n とせん断応力 τ の関係である。同図には、幾つかの摩擦係数について $\tau = \mu\sigma_n$ の関係を示してある。摩擦係数 μ が 0.3 では全ての断層節点が滑る条件になり、 μ が大きくなるに伴って滑り条件を満足する断層部分が縮小する。そこで、次に述べる滑りを考慮した解析では、 μ を 0.35、0.4、0.5 と変化させ、評価結果に及ぼす滑り領域の大きさの影響について検討した。図 3.4.10 は、断層が滑らない場合に逆解析によって求めた広域応力場（変位型境界条件）から評価した断層上の $\sigma_n - \tau$ 関係を、順解析で求めた実際の $\sigma_n - \tau$ 関係と比較したものである。ただし、地圧データの採取点は Data set 4 である。若干の差が認められるものの、両者はほぼ

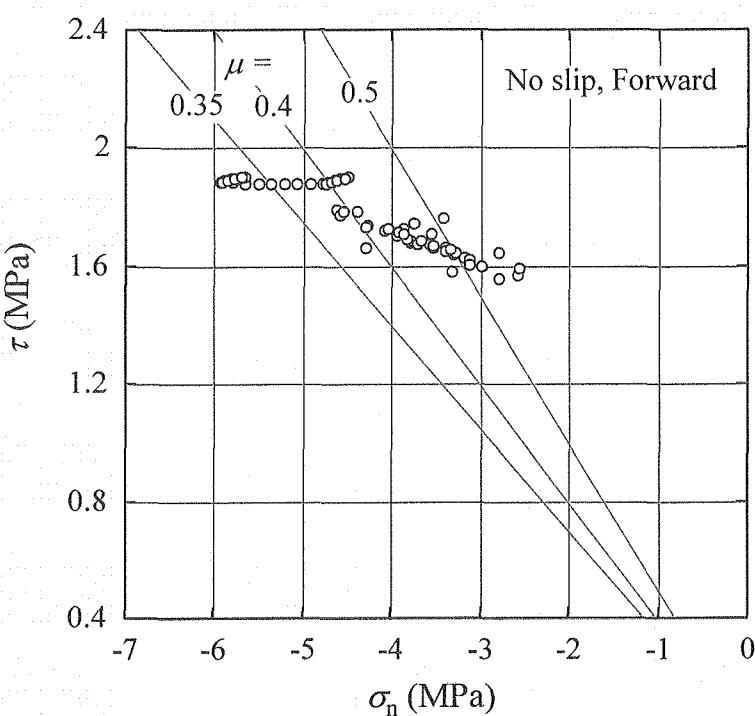


図 3.4.9 断層滑りを考慮しない場合の順解析結果（断層上の応力）

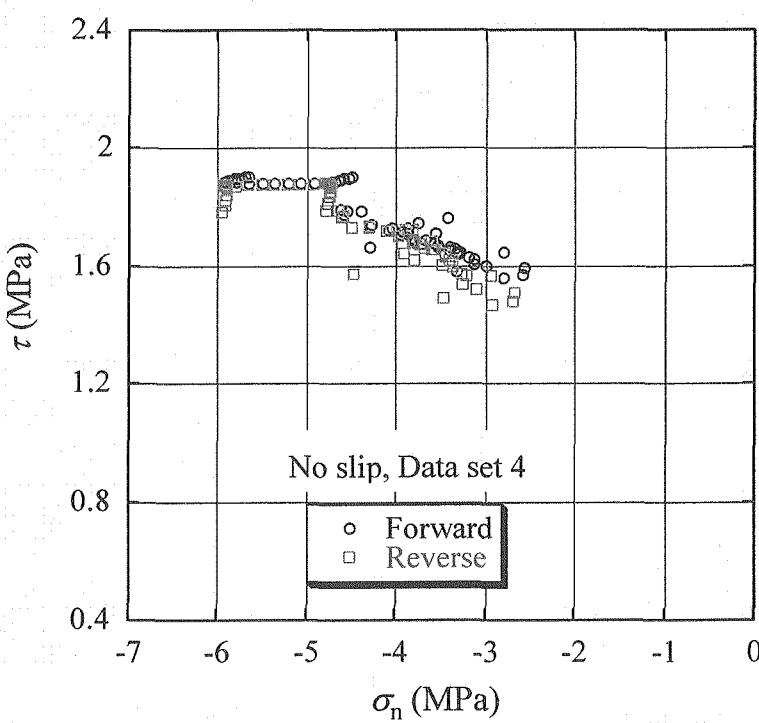


図 3.4.10 滑らない場合の順解析結果と逆解析結果の比較（断層上の応力、Data set 4）

一致している。

(3) 断層が滑る場合

図 3.4.11 は、 $\mu = 0.35$ の場合の順解析における繰り返し数と断層上の応力の関係を示したものである。3 回の繰り返し計算で滑り条件を満足する解が得られている。これは、他の条件でも同じであった。なお、繰り返し計算の終了判定に用いた誤差 e_0 は 0.01 MPa である。図 3.4.12 は、 $\mu = 0.35, 0.4, 0.5$ の場合の順解析結果である。摩擦係数が大きくなると滑り領域が小さくなることが確認できる。これらの順解析によって得られた応力から 12 点の全応力成分を地圧データ (12×6 データ) とみなして広域応力場の評価を行った（図 3.4.8 参照）。その際、次の 3 通りの方法で広域応力場と滑り領域の評価を行った。

- 1) 断層の初期せん断剛性 k_{s0} を弾性値とし、かつ断層上の全節点が滑っていないという設定で解析を始める場合（便宜上、この場合を係数 $rin = 1$ と表す）
- 2) 断層の初期せん断剛性 k_{s0} を弾性値の rin 倍とし、かつ断層上の全節点がすでに滑っているという設定で解析を始める場合 ($rin = 0.9, 0.75, 0.625, 0.5, 0.25$ の 5 通り)

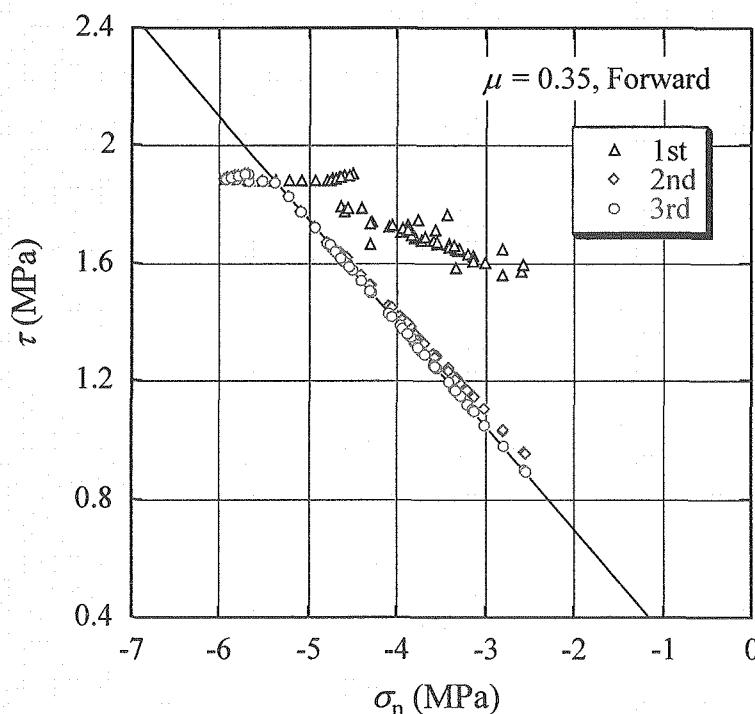


図 3.4.11 滑りを考慮した順解析における繰り返し回数と断層上の応力 ($\mu = 0.35$)

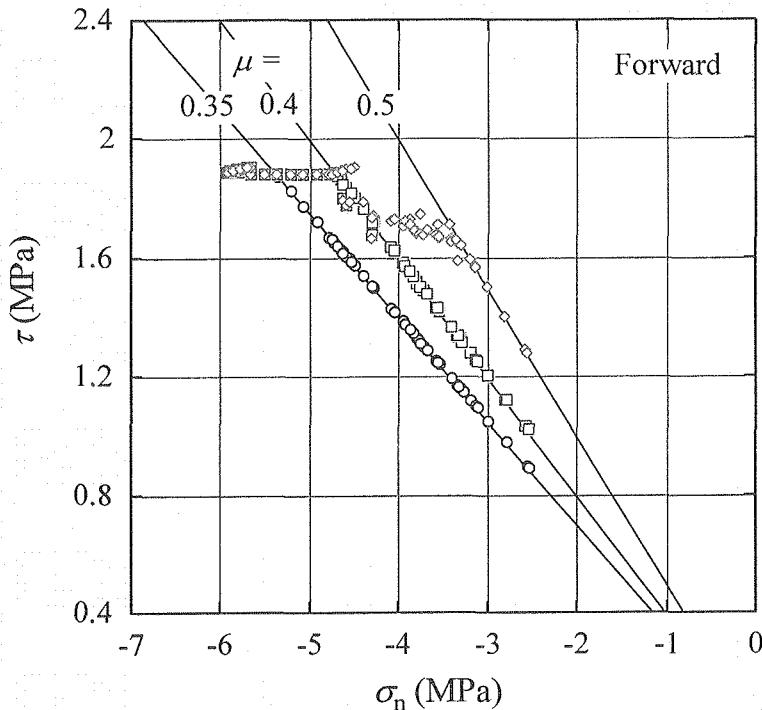


図 3.4.12 滑りを考慮した順解析による断層上の応力 ($\mu = 0.35, 0.4, 0.5$)

- 3) 断層各節点の初期せん断剛性 k_{s0} を $rin = 1$ と $rin = 0.9$ で得られた値の平均値とし、その値が弾性値と等しければ滑っておらず、弾性値よりも小さければ滑っているという設定で解析を始める場合（この場合を Av (0.9 & 1)と表す）

まず、注目領域の応力評価誤差が最も小さかった Date set 4 の場合について初期設定の影響について述べる。 $rin = 1, 0.9, 0.625$ および Av (0.9 & 1)の場合の広域応力場評価で得られた断層上の σ_n と τ の関係の例を、 $\mu = 0.35, 0.4, 0.5$ について、それぞれ、図 3.4.13、図 3.4.14、図 3.4.15 に示す。ただし、比較のためにそれぞれの摩擦係数で得られた順解析結果も示してある。いずれの摩擦係数の場合も、断層の初期せん断剛性 k_{s0} を弾性値としかつ断層上の全節点が滑っていないという設定で解析を始めた場合 ($rin = 1$) には、断層上の応力は実際の $\sigma_n - \tau$ 関係より小さめに評価されている。これは、用いた地圧データが断層滑りの影響を受けているため、断層の初期せん断剛性 k_{s0} を弾性値として解析を始めると、その場合の広域応力場が過小評価され、これが後の繰り返し計算では十分に修正できないためである。特に弾性領域にある断層上の応力の評価誤差が大きい。従って、すべり領域が大きいほど（摩擦係数が小さいほど）、用いた地圧データ

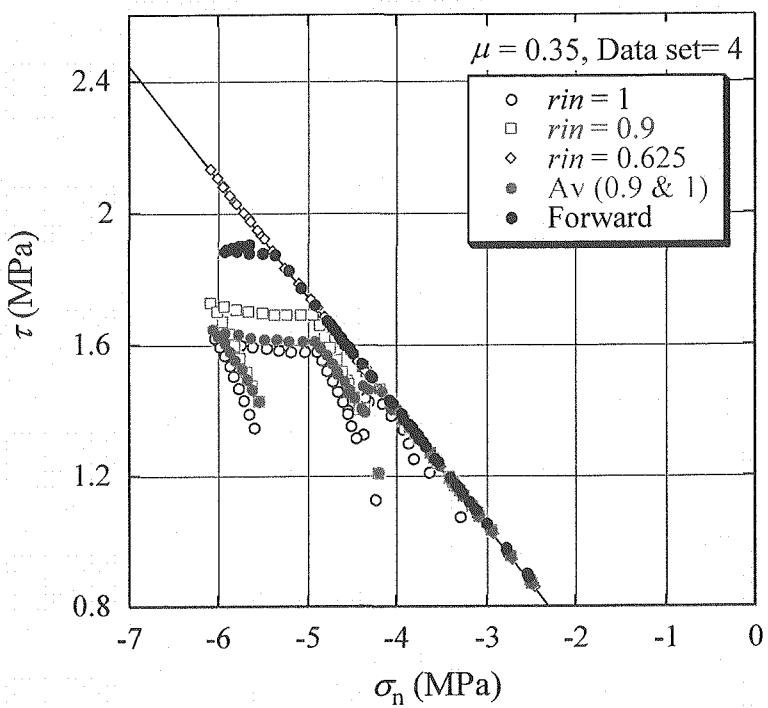


図 3.4.13 断層上の応力の逆解析結果と順解析との比較 ($\mu = 0.35$, Data set 4)

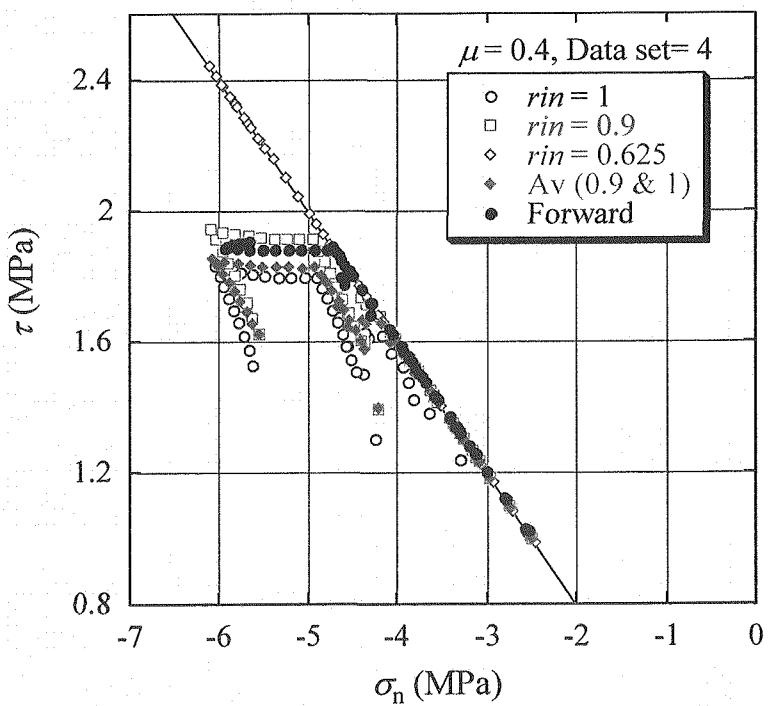


図 3.4.14 断層上の応力の逆解析結果と順解析との比較 ($\mu = 0.4$, Data set 4)

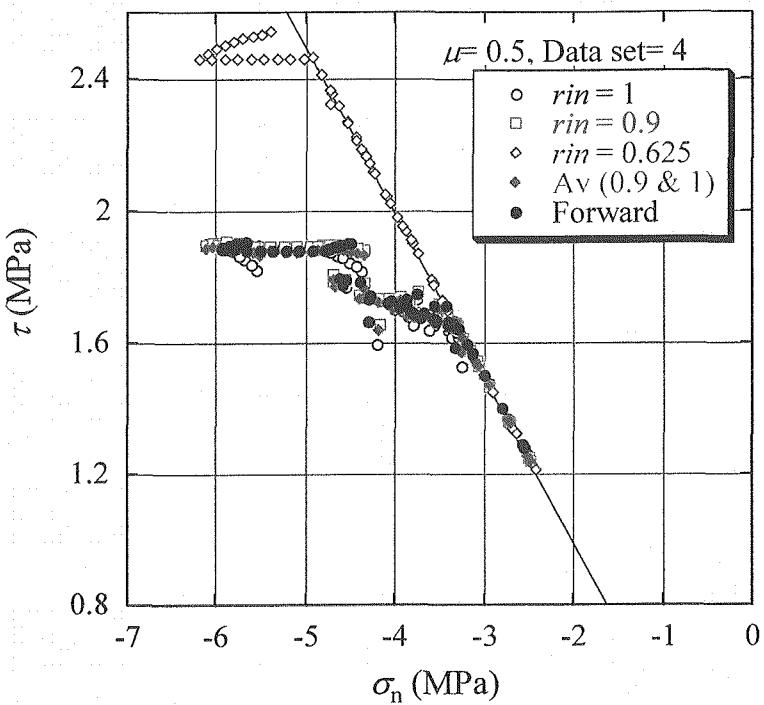


図 3.4.15 断層上の応力の逆解析結果と順解析との比較 ($\mu = 0.5$, Data set 4)

に含まれる断層滑りの影響が大きいため誤差が大きくなっている。

一方、断層の初期せん断剛性として弾性値の 0.625 倍の値 ($rin = 0.625$) を用い、かつ断層上の全節点がすでに滑っているという設定で解析を始めた場合には、いずれの摩擦係数の場合でも、断層上の σ_n - τ 関係は実際よりも大きくなり、滑り領域も過大評価されている。これは、断層の初期せん断剛性 k_{s0} を弾性値よりかなり小さい値であるとして解析を始めると、その場合の広域応力場が過大評価され、これが後の繰り返し計算では十分に修正できないためである。従つて、 $rin = 1$ の場合とは逆に、滑り領域が小さいほど用いた地圧データに含まれる断層滑りの影響が小さいため、滑り領域が小さいほど（摩擦係数が大きいほど）誤差が大きくなっている。他方、 $rin = 0.9$ の場合は中間的な傾向を示し、滑り領域が大きな $\mu = 0.35$ の場合には断層上の応力が過小評価され、滑り領域がより小さな $\mu = 0.5$ の場合は断層上の応力が過大評価される傾向にある。

このように、摩擦係数が小さくて滑り領域が広い場合 ($\mu = 0.35$)、 rin が小さい方が断層上の応力の評価精度が高いのに対し、摩擦係数が大きくて滑り領域が狭い場合 ($\mu = 0.5$)、 rin が大きい方が断層上の応力の評価精度が高く、滑り領域の大きさが中間的な場合 ($\mu = 0.4$) は、それらの中間的な rin の場合に評価精

度が高い。また、初期せん断剛性 k_{s0} を $rin = 1$ と $rin = 0.9$ で得られた値の平均値とし、その値が弾性値と等しければ滑っておらず、弾性値よりも小さければ滑っているという設定で解析を始める場合 ($Av(0.9 \& 1)$) は、断層上の応力は $rin = 1$ と $rin = 0.9$ の中間に位置している。これを、断層上の応力の評価誤差 erF と rin の関係でまとめたものが図 3.4.16 である。ただし、塗りつぶした記号はそれぞれの摩擦係数についての最小値を表し、また、 $Av(0.9 \& 1)$ の場合を、便宜上、 $rin = 0.95$ として示してある。摩擦係数が小さい場合 ($\mu = 0.35$)、評価誤差 erF は rin とともにほぼ増加するのに対し（実際には $rin = 0.75$ で最小値となる）、摩擦係数が大きい場合 ($\mu = 0.5$) は、評価誤差 erF は rin とともに減少する。なお、中間的な摩擦係数 ($\mu = 0.4$) では、中間的な rin の場合 ($rin = 0.9$) で最小誤差となる。このように、断層上の応力を精度良く評価するためには、滑り領域が大きいほど rin を小さくする必要がある。なお、 $rin = 1$ と $rin = 0.9$ の平均値をとる方法（平均化手法）は断層上の応力の評価精度を向上させない。

一方、図 3.4.17 は、注目領域に対する応力の評価誤差 er と rin の関係である。ただし、塗りつぶした記号は最小値を表している。 rin の影響は断層上の応力評

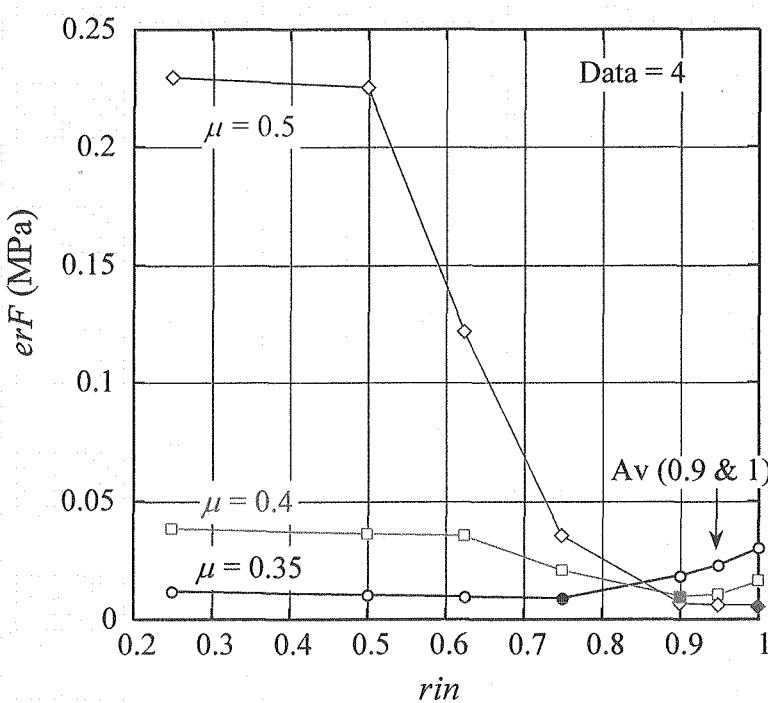


図 3.4.16 逆解析における初期設定 (rin) と断層上の応力の評価誤差 (erF) の関係 (Data set 4)

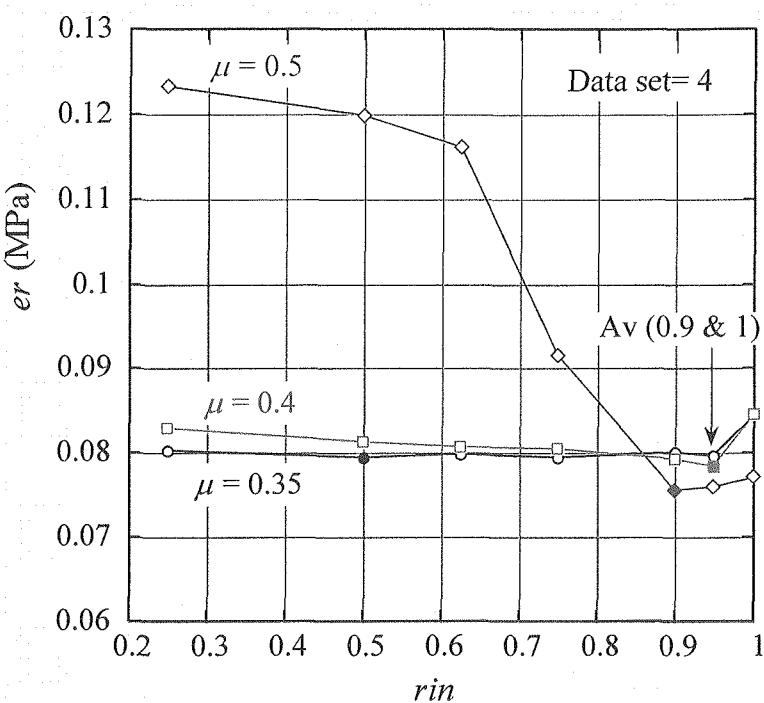


図 3.4.17 逆解析における初期設定 (rin) と注目領域内応力の評価誤差 (er) の関係 (Data set 3)

価の場合とかなり異なる。摩擦係数が小さく ($\mu = 0.35$)、滑り領域が大きい場合は、 $rin = 1$ の場合に誤差が大きいが、 $rin < 1$ であれば rin の影響は小さい。平均化手法 (Av (0.9 & 1)) は $rin < 1$ の場合とほぼ同じ誤差を与える。 $\mu = 0.4$ の場合は、 $rin = 0.9$ までは rin の増加とともに誤差が緩やかに減少し、 $rin = 1$ で誤差が急激に増加して最大誤差になる。平均化手法 (Av (0.9 & 1)) を用いると、誤差は最小となる。滑り領域が小さい $\mu = 0.5$ の場合は、 rin が小さいと大きな誤差を生じ、 rin の増加とともに誤差が急激に減少し、 $rin = 0.9$ の場合に誤差が最小となる。平均化手法 (Av (0.9 & 1)) を用いた場合の誤差は、 $rin = 0.9$ と $rin = 1$ の中間になるが、最小誤差を与える $rin = 0.9$ と大きな差はない。

このような er と erF に及ぼす rin の影響の差異がどのような原因で生じているかは現時点では不明であるが、本研究では、注目領域全体の応力を精度良く評価することが重要である。また、滑り領域が不明のまま地圧データから広域応力場を精度良く評価することを考えると、図 3.4.17 から、 $rin = 0.9$ と $rin = 1$ で得られたせん断剛性の平均値を求め、その値が弾性値と等しければ滑っておらず、弾性値よりも小さければ滑っているという設定で解析を始めれば、滑り

領域の大きさに関わらず注目領域内の応力をある程度精度良く評価できることがわかる。ただし、この方法では、得られた結果が最小誤差を与えるとは限らない。

$r_{in} = 1$ と $r_{in} = 0.9$ のせん断剛性の平均値を用いた場合 (Av (0.9 & 1)) について、地圧データの採取位置が応力評価へ及ぼす影響を、図 3.4.18 (断層上の応力評価誤差 erF) と図 3.4.19 (注目領域内の応力評価誤差 er) に示す。断層上の応力評価誤差 erF については、Data set 3 と Data set 4 の場合がほぼ同じ精度を与えるが、断層上の応力評価誤差 erF と注目領域内の応力評価誤差 er のいずれも、Data set 4 の地圧データを用いた場合に誤差が最小になっている。特に注目領域の応力評価に関しては、Data set 4 の場合に誤差が顕著に小さい。これは、断層から離れた点の地圧データを用いた場合 (Data set 1、Data set 5) は断層が滑っていることの影響が反映されないために広域応力場の正確な評価が行われず、逆に、断層に近い点の地圧データのみを用いた場合 (Data set 2) は、断層上の応力はある程度正確に評価するが断層から離れた岩体の応力を正確に評価できないことによる。従って、断層から離れた点の地圧データと断層に近い点の地圧データの両方を用いてはじめてより正確な広域応力場評価を行うことができる。

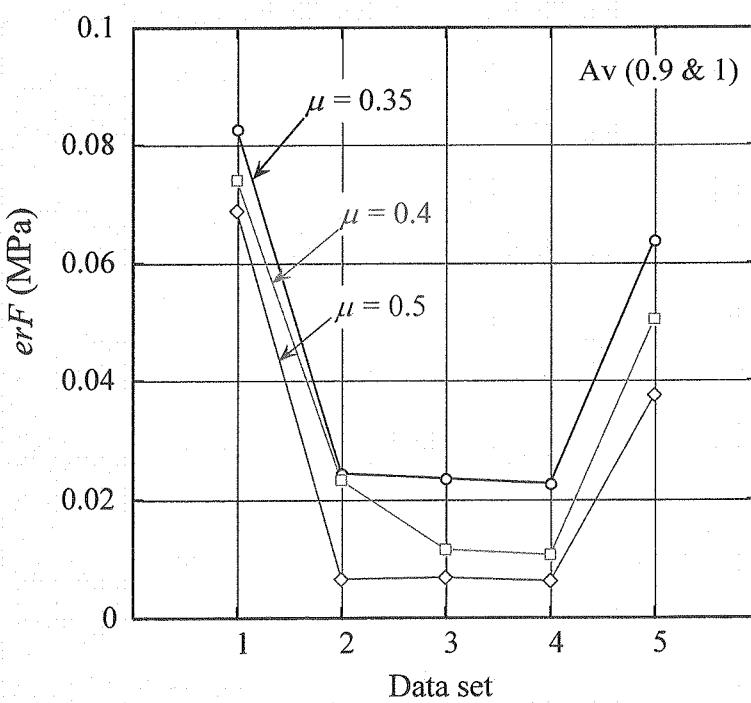


図 3.4.18 地圧データ採取法の断層上応力評価誤差 (erF) に及ぼす影響 (平均化手法 Av (0.9 & 1))

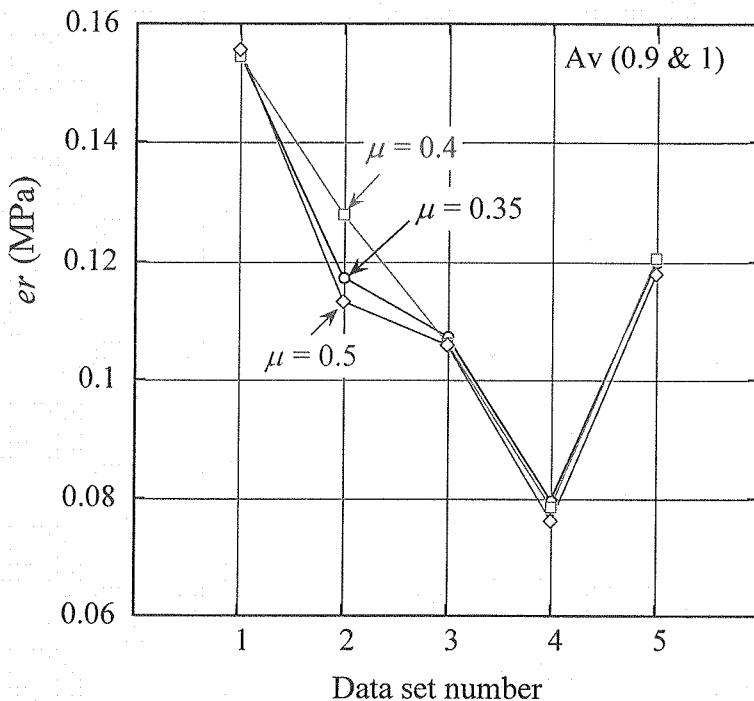


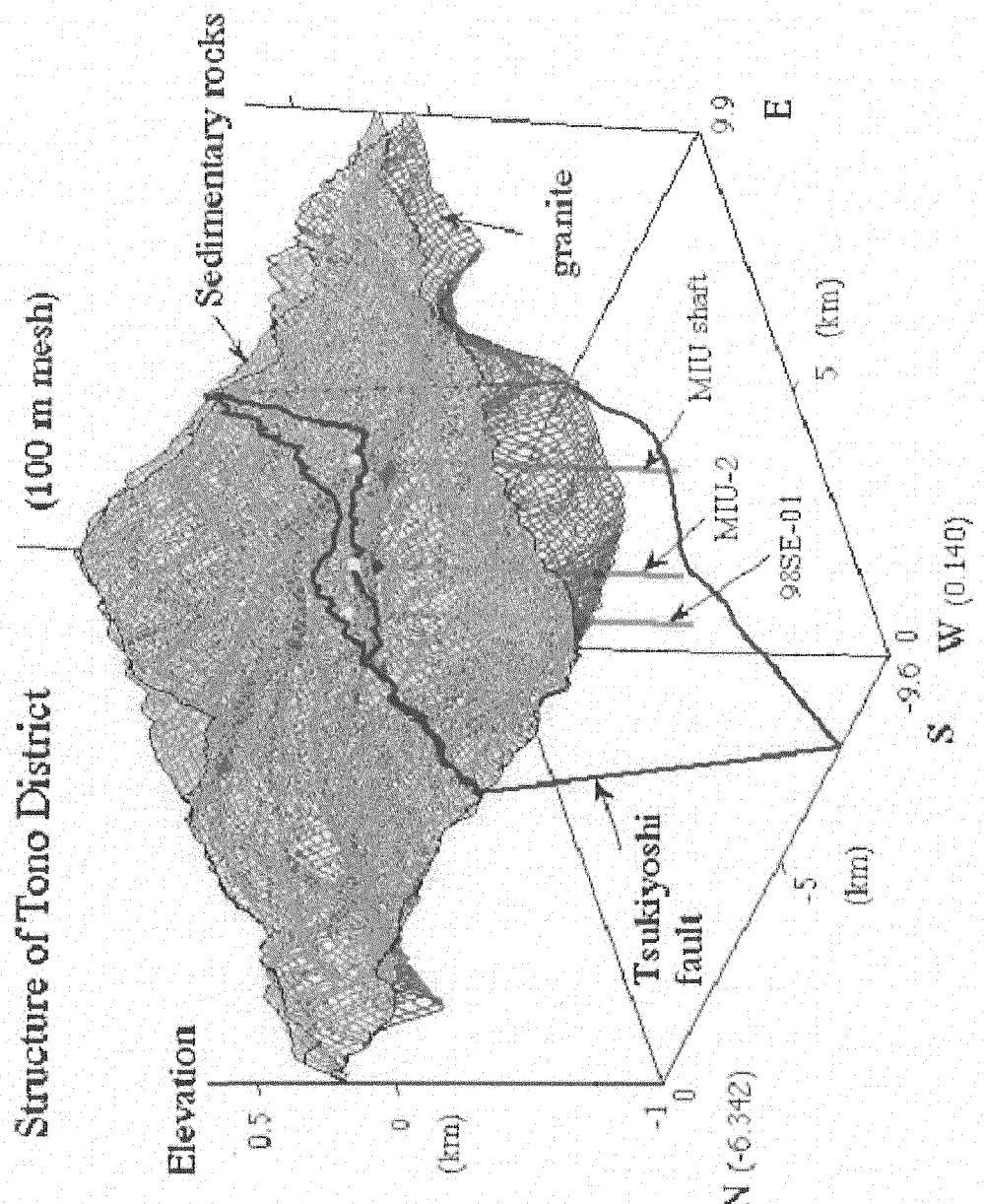
図 3.4.19 地圧データ採取法の注目領域内応力評価誤差 (er) に及ぼす影響 (平均化手法 $Av(0.9 \& 1)$)

ただし、本節で用いた境界変位場は断層の走向方向にも相対変位を生じているため、断層の走向方向の応力変化を含むデータを用いる必要があることから、走向方向に異なる位置から地圧データを採取する必要がある。

このように、断層が部分的に滑っている場合には、断層に近い点と離れた点でかつ走向方向に異なる位置での地圧データを用い、さらに全ての断層面が滑らないとした場合と全ての断層面が少し滑っているとした場合 ($rin = 0.9$) の両方の初期設定で得られるせん断剛性の平均値を用いることにより、ある程度の精度の広域応力場評価を行うことができる。

3. 4. 5 広域応力場の評価のための東濃地区のモデル化

本節では、今後の広域応力場評価のために行った東濃地区のモデル化について述べる。東濃地区の東西 $9.9 \text{ km} \times$ 南北 $9.6 \text{ km} \times$ 深さ約 1.5 km の領域の大略的な三次元構造を図 3.4.20 に示す。ただし、土岐花崗岩と比較して似たような力学的性質を有する堆積岩類（瀬戸層群、生猿累層、明世累層および土岐夾炭累層）を一つの岩体とみなし、地表面、土岐花崗岩体と堆積岩類の境界面および



3.4.20 東濃地区の三次元構造

月吉断層を描いたものである。なお、土岐花崗岩体と堆積岩類の境界面および地表面は 100 m 間隔のデータを用いて描いたものであり、月吉断層上の土岐花崗岩体と堆積岩類の境界面、また、地圧の測定データを用いる予定の東濃鉱山におけるボアホール 98SE-01 と正馬様におけるボアホール MIU-2 および地圧を評価する対象としての瑞浪超深地層研究所の MIU 立坑の位置も示してある。このように、東濃地区はこのような広領域を考えても月吉断層が貫通した領域であり、広域応力場評価において月吉断層の影響を考慮することが重要である。

本領域を、東西 14 × 南北 13 × 深さ 11 の要素に分割して解析を行った。東濃鉱山と正馬様を含む 2 km × 2 km × 1 km の中心部を応力評価のための注目領域とし、その 5 倍の平面寸法を全解析領域にとったわけである。なお、地表面、土岐花崗岩体と堆積岩類の境界面および月吉断層はできるだけ実際に忠実に再現するように配慮した。要素分割図を図 3.4.21 に示す。要素数は通常要素 1848、ジョイント要素 154 であり、節点数は 9342 である。ただし、同図では、6 面体要素のフレームを色分けして示してあり、土岐花崗岩を赤、堆積岩類を空色、月吉断層を紺で描いてある。要素分割は月吉断層近傍ほど、また中心部ほど細分化した。なお、それぞれの岩体の力学的性質と密度は一昨年度の報告書（水田、2002）の値から平均値を取るなどにより求めた（表 3.4.1）。

土岐花崗岩体における月吉断層の垂直剛性とせん断剛性を次のように評価した。すなわち、断層に関するデータベースによると、断層の水平からの傾斜角は 47°～67°で平均 56.3°であり、鉛直方向の厚さは 20 m～25 m、平均 23.8 m であることから、断層と垂直な方向の平均厚さを 13.2 m と見積もり、さらに、断層の原位置弹性波速度がその周辺の健全部の 0.65～0.77 倍、平均 0.717 倍であることから、土岐花崗岩中の断層のヤング率をコアから求めた値の 0.717×0.717 倍 (25800 MPa) であると評価した。そこで、土岐花崗岩中の月吉断層を、厚さ t が 13.2 m で、ヤング率 E_f が 25800 MPa、ポアソン比 ν_x としてコアと同じ値

表 3.4.1 解析に用いた岩体と断層の力学的性質

岩体	密度 (kg/m ³)	ヤング率 (MPa)	ポアソン 比	月吉断層	
				垂直剛性 k_n (MPa/m)	せん断剛性 k_n (MPa/m)
堆積岩類	1870	2270	0.309	88.4	32.8
土岐花崗岩	2560	50100	0.350	1950	724

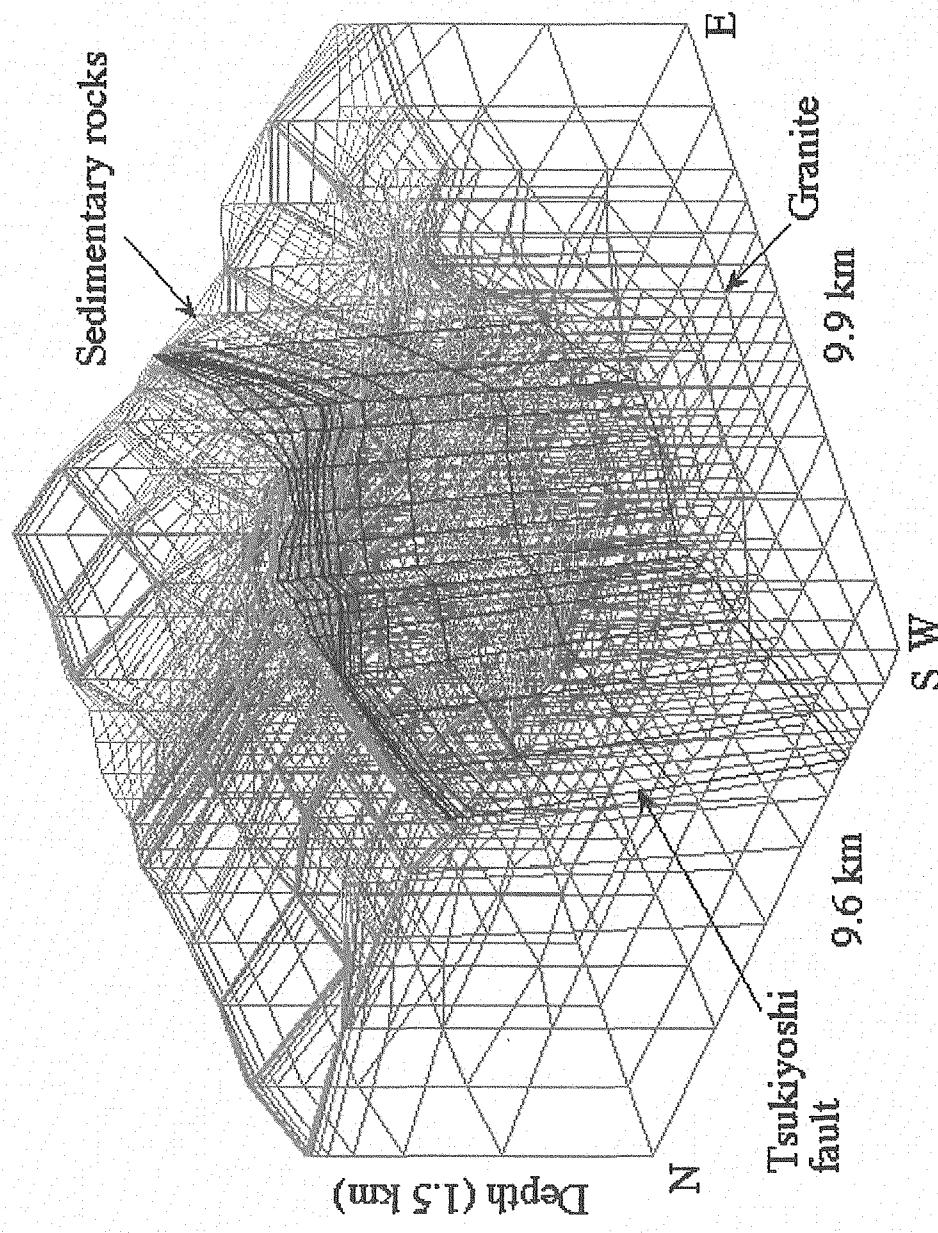


図 3.4.21 東濃地区のメッシュ分割図 (赤：土岐花崗岩、緑：堆積岩類、青：月吉断層)

(0.35) を有する岩層であるとみなし、この岩層の垂直応力に対する変形量およびせん断応力に対するせん断変位から、次式を用いて垂直剛性とせん断剛性を評価した。

$$\begin{aligned} k_n &= E_f / t, \\ k_s &= E_f / \{2(1 + \nu_f)t\}. \end{aligned} \quad (3.4.41)$$

この結果、表 3.4.1 に示すような土岐花崗岩体における月吉断層の垂直剛性とせん断剛性が得られた。なお、これらの値は堆積岩中では異なるが、それを評価するためのデータがないため、本節では、コアから求めた堆積岩類のヤング率の花崗岩のヤング率に対する比を用いて剛性を減じ、堆積岩類における垂直剛性とせん断剛性とした。月吉断層を考慮した東濃地区の広域応力場評価は今後の課題である。

4. まとめ

本研究は、3次元初期応力状態の不均質性を定量的に評価しうる手法の開発を目的として平成13年度から15年度までの3年間に実施したものである。平成13年度は研究の初年度として、既存の情報収集・整理を行い、その結果に基づき全体研究計画を策定するとともに、本研究の実施に当たり適切と考えられる解析手法の選定を行った。また、必要な解析ツールの要件について考察を加えるとともにこれら解析ツールの開発を試みた。

平成14年度は、まず、不均質モデルの逆解析における問題点を述べ、つぎに、13年度にまとめられたデータセット、3次元モデル作成ツールを用い、13年度に策定された全体研究計画にもとづいて、実際にモデルを作成して3次元応力場同定のための有限要素法と有限差分法による解析を行った。すなわち、有限要素法を用いた小規模モデルによる不均一性の影響評価、有限要素法による大領域モデル解析、有限要素法による小領域モデル解析および有限差分法による中領域モデル解析を行った。

その結果、応力評価の精度には、岩体の不均一性のみならず岩体の配置の影響もあることがわかった。また、大領域モデルの解析から、東濃鉱山の応力分布については土岐花崗岩について誤差が大きく、正馬様用地については同一の花崗岩体での比較的大きな応力変化を再現していないことがわかった。このため、地圧測定結果や地質構造の信頼性の吟味とともに、月吉断層の影響を考慮した解析を行わなければならないことがわかった。小規模モデル解析の結果は、解析結果の信頼性を検討する上では、用いたモデルの信頼性の評価が不可欠であり、より実際に近い地質構造を表現したモデルを構築する必要があることがわかった。中領域モデル解析の結果から、瑞浪超深地層研究所の応力場が推定されたが、今後は主応力方向データの事前処理を含めた地圧測定結果の吟味が必要であることがわかった。

また、境界要素法による3次元応力場同定を行うために、3次元境界要素法解析コードの開発を行った。

平成15年度も、引き続き、有限要素法による小領域モデル解析、有限差分法による中領域モデル解析および有限要素法による大領域モデル解析を行い、かつ境界要素法による中領域モデル解析も行った。ただし、平成15年度においては、小領域モデルは東濃鉱山モデルだけでなく正馬様モデルおよび東濃鉱山・正馬様モデルの3ケースについて3層モデルが構築され、それぞれのモデルに対して広域ひずみが解析された。また、実測データとのよい合致を得るために、花崗岩を上部と下部に分けた4層モデルに修正して広域ひずみ場が求められた。

有限差分法による中領域モデル解析においては、地層境界を水平とせず、与えられた実際の地層境界に対してモデルが構築され、広域応力が求められた。また、境界要素法による中領域モデル解析においては、(1)開発された不均質問題用BEM解析コードを用いた基本的な不均質モデル、(2)軟弱地層のポアソン比を0.5とした場合の不均質モデル、(3)広域応力場に τ_{yz} , τ_{zx} 成分もあるとした不均質モデル、(4)月吉断層を含む不均質モデルおよび(5)軟弱地

層の存在を死荷重に置き換えた均質モデル、のそれについて広域応力が求められ、岩盤内応力分布が算定された。

有限要素法による大領域モデル解析においては、断層を含めたモデルが構築され、断層の滑りを考慮に入れて、断層を含む不均一岩体の広域ひずみ評価法を提案した。

5. 今後の課題

3次元モデルの構築においては、厳密には、地質の形成史、プレートテクトニクスと地熱の影響、地質的不連続構造とその変形モード、岩盤の剛性構造などに関する、理解を深めるに、3次元モデルの高度化に取り組まなければならない。また、構築されたモデルから算定される水平主応力2成分の分布をみて断層の影響などについて考察することが必要であり、そのためには、例えば最大せん断応力係数の分布を3次元モデルの出力とすることが重要である。

また、今後行われる「MIU計画」の進捗にあわせて、

- ・MIZ-1孔における水圧破碎応力測定結果
 - ・立坑掘削中の各レベルの坑道における応力測定結果
- との比較・検討を行わなければならない。

6. 参考文献

- 金子勝比古・中村直昭・尾原祐三・伊藤耕助・米田哲朗・加藤昌治（2000）：鳥形山地域の広域的応力状態の推定，資源と素材，116巻，572 - 576
- 金子勝比古・柴拓南・大見美智人（1988）：クラック理論に基づく岩盤のヤング率の評価，日本鉱業会誌，104巻，863 - 870
- 黄 醒春・菅原勝彦（1996）：断層の岩盤初期応力への影響に関する解析と考察，資源と素材，112巻，289 - 294
- 水田義明・金子勝比古・松木浩二・菅原勝彦・須藤茂昭（2003）：3次元応力場の同定手法に関する研究（その2），サイクル機構技術資料（委託研究成果報告書；社団法人資源・素材学会），JNC TJ7400 2003-004
- 水田義明（2002）：3次元応力場の同定手法に関する研究，サイクル機構技術資料（委託研究成果報告書；社団法人資源・素材学会），JNC TJ7400 2001-012
- R. E. Goodman (1976) : Methods in Geological Engineering in Discontinuous Rocks, West Publishing Co., St. Paul, 472
- 坂口清敏・黄 醒春・野口義文・菅原勝彦（1995）：円錐孔底ひずみ法の不連続性岩盤への適用と考察，資源と素材，111巻，283 - 288
- 菅原勝彦・張 鉄國・黄 醒春（1995）：直交異方性球殻モデルによる初期応力解析，資源と素材，111巻，1001 - 1006