

3次元応力場の同定手法に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書)

2002年3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。

〒319-1194 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

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,
Japan

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

3次元応力場の同定手法に関する研究

水 田 義 明*

要 旨

平成 13 年（2001 年）12 月 19 日から発足した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している。また、この目的のために（1）全体研究計画の策定、（2）本研究実施に必要な既存情報の整理、（3）本研究実施に適切と思われる解析手法の選定などを行うものとし、下記のメンバーからなる研究委員会を設立した。

山口大学工学部社会建設工学科 教授 水田義明（委員長）
北海道大学大学院工学研究科環境資源工学専攻 教授 金子勝比古
東北大学大学院工学研究科地球工学専攻 教授 松木浩二
熊本大学自然科学研究科 教授 菅原勝彦
社団法人 資源・素材学会 事務局長 須藤茂韶（事務担当）

平成 14 年（2002 年）1 月と 2 月にそれぞれ 1 回ずつ研究委員会を開催して、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った。その結果、まず、既存データの収集・整理が可能であり、かつ検証データの取得までが現実的に実施可能と考えられる東濃鉾山、正馬様用地のほか、少なくとも既存データの収集・整理が可能である釜石鉾山を研究対象領域とすることとなり、現在、これらの対象領域に関する既存データの収集・整理、およびそれらのデータセットを用いた数値解析用モデル作成ツールの開発を実際に行っている。また、有限要素法による地形モデル作成のための専用ツールについては、そのフレームがすでに出来上がりつつある。この専用ツールによれば

数値地図を入力することにより解析に供されるモデルを作成することができる。また、この専用ツールの作成手法は有限差分法によるモデル作成にも適用でき、また境界要素法によるモデル作成にも応用することができる。さらに、本研究で作成された地質構造に関する数値地図を読み込めば、地下の地質情報もモデルに取り込むことができる。ただし、本年度の研究としては、日本全国にわたる地形に関する数値地図をもとにして、モデル作成ツール開発のためのフレームを確立する。

つぎに、収集・整理された既存データをデータセットとしてコンピューター内に収納し、これらを画像表示するシステムを用いて3次元的な応力分布を定量的に把握・評価し得る手法を構築する過程での数値解析の方法としては、有限要素法だけではなく有限差分法・境界要素法も用いることとする。

本委託研究における本年度の研究委託期間が平成13年12月19日から平成14年3月1日と短期間であることから、本年度の研究成果としては、既存データの収集・整理、それらをデータセットとしてコンピューター内に収納し、自在にアウトプットできるシステムを作成するためのフレームワーク、および3次元応力場同定のための逆解析に用いられる数値解析に関連したこれまでの研究の収集・整理と本研究に取り込むためのまとめである。本年3月1日以降に行われる研究成果報告会（第3回委員会）に先立って、上記の成果をまとめる。

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

契約番号：1306A01148

開発機構担当部課室および担当者：東濃地科学センター

地質環境長期予測研究グループ：福島龍朗

* (社)資源・素材学会 会長

Study on Improved Procedure for Determination of Three Dimensional Distributions of the Initial Rock Stresses

Yoshiaki Mizuta *

Synopsis

In the fiscal year of 2001, our committee achieved the following work items during the contract period, from December 19th, 2001 to March 1st, 2002.

Set up the master program to go ahead with and settle the domains as the objects of this study in the first committee meeting held in January, 2002.

Following to the master program, in the process of development of the evaluation procedure of three dimensional stress distribution in the domain specified, Finite Difference Method, Boundary Element Method as well as Finite Element Method are to be used as the numerical method in the evaluation system.

Collection and arrangement of the data which already exist are carried out development of the framework for numerical modeling using those data is carried out.

Arrangement of the studies in relation to the numerical back analysis for determination of three dimensional stress distribution is carried out.

A report as the results of the studies mentioned above is being arranged and it shall be completed in advance of the briefing session, which is going to be held after March 1st, 2002 as the third committee meeting at the same time.

This report is the result of the works performed by the Mining and Materials processing Institute of Japan under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

Contract Number: 1306A01148

PNC Liaison: Neotectonics Research Group

Tono Geoscience Center: Tatsuo Fukushima

* President of the Mining and Materials processing Institute of Japan

3次元応力場同定手法に関する研究

目次

1. はじめに	1
2. 研究目的	2
3. 研究内容	2
3.1 本研究実施に必要となる既存情報の整理・検討	2
3.1.1 解析手法に関する調査・研究事例	3
3.1.2 サイクル機構が実施した調査研究事例	9
3.1.3 検討結果	12
3.2 全体研究計画	13
3.2.1 計画策定の考え方	13
3.2.2 研究内容	13
3.2.3 研究実施体制	20
3.2.4 スケジュール	20
3.3 本研究の実施に適切と思われる解析手法の選定	21
3.3.1 はじめに	21
3.3.2 広域応力の評価法	21
3.3.3 解析ツールの要件	26
3.4 解析用データセットの構築	36
3.4.1 東濃鉾山	36
3.4.2 正馬様用地	37
3.4.3 釜石鉾山	38
4. まとめ	40
5. 次年度の予定	40
6. 参考文献	41

付録 データセット内容

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に岩盤の力学物性（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。表1.1は菅原が種々の初期応力測定手法とその手法が対象とする岩盤の体積（特性体積）との関係を整理したものである。

表 1.1 主な初期応力測定法（菅原(1998)を一部修正）

分類	主な測定法	特性体積 (m ³)
水圧法	水圧破砕法	0.5~50
	Sleeve fracturing 法	0.5~2
	HTPF 法	1~10
	SHTPF 法	0.5~2
応力解放法	孔径変化法	0.1~1
	孔径ひずみ法	0.1~1
	Doorstopper 法	0.01~1
	Doorstopper RPR 法	0.01~1
	球面孔底ひずみ法	0.1~1
	円錐孔底ひずみ法	0.01~1
コア法	ASR 法	0.001~0.01
	DSCA 法	0.001~0.01
	DRA 法	0.001~0.01
	Ultrasonic 法	0.001~0.01
	AE 法	0.001~0.01
	条痕解析法	10 ⁸
	Core Discing 法	0.1~1
その他	逆解析法	10 ⁵ ~10 ⁴
	Borehole breakout 法	0.1~100
	応力補償法	0.5~2
	地震学的評価法	10 ⁹
	測地学的評価法	10 ¹⁰ ~10 ¹²

ここに示される手法の大部分は、特性体積との関係が示す通り対象となる地下空洞のスケール（10³m³オーダー）と比べると点のデータとして評価すべきものである。さらに、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、岩石及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。

しかし、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、あるスケールにおける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、次章に述べる通り平成13年度から3カ年程度の研究期間で実施するものである。今年度は研究の初年度として以下の検討を実施した。

- ・ 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

以下に今年度の研究成果について述べる。

3.1 本研究実施に必要となる既存情報の整理・検討

サイクル機構においては、これまで岐阜県土岐市に位置する東濃鉦山、正馬様用地及び岩手県釜石市に位置する釜石鉦山において様々な初期応力測定手法を用いた応力測定を実施されているが、本研究において目標とするような評価手法の研究はこれまで実施されていない。このため、既存情報の整理・検討に当たっては初期応力測定データに関する情報収集をサイクル機構の資料から実施し、評価手法すなわち解析手法に関する情報収集をサイクル機構外の資料か

ら実施した。以下にその整理・検討結果を示す。

3.1.1 解析手法に関する調査・研究事例

岩盤を対象とした既存の数値解析法については、宇野ら(宇野ら(2001))が網羅的に整理し、それらの解析手法の理論的背景も含めとりまとめている。それによれば、岩盤の解析手法は、等価連続体解析、不連続体解析、不均質体解析に大別され、それぞれのモデル化手法について多数の数値解析法が提案されている。図 3.1 に岩盤の解析手法と岩盤モデルの変遷を示すとともに、現在実績のある数値解析法とその概要を表 3.1~3.3 に示す。

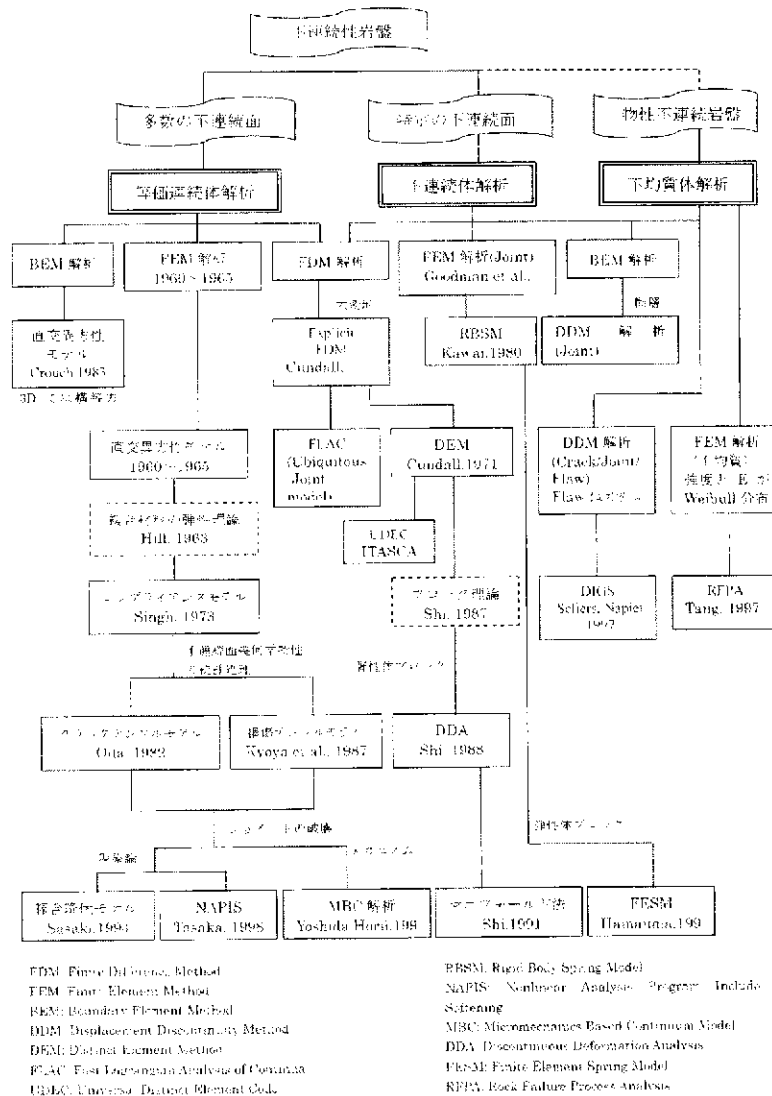


図 3.1 不連続性岩盤の解析手法及び岩盤モデルの変遷 (宇野ら(2002))

表 3.1 代表的な等価連続体手法の比較 (宇野ら(2002))

項目	連続体要素法 (CSM)	有限要素法 (FEM)	有限要素法 (FEM)	有限要素法 (FEM)	NAPIS	MBC (有限要素法)	有限要素法 (FEM)	有限要素法 (FEM)	有限要素法 (FEM)
提案者	Singh (1973)	Sho (1982)	Sho (1982)	Sho (1982)	白坂ら (1986)	山田と高井 (1988)	Chakrabarti (1987)		Sho (1982)
基礎理論	等価連特性理論	有限要素法	有限要素法	有限要素法	有限要素法	有限要素法	弾性論	弾性論	弾性論
上連続体の系の数	複数	複数	複数	複数	1 (固定)	複数	1 (固定)	1 (固定)	1 (固定)
下連続体の節数	-	-	-	高数	高数	高数	高数	高数	高数
下連続体の自由度	-	-	-	-	-	高数	-	-	-
品質性の板厚	-	-	-	高数	高数	-	-	高数	-
不連続面の境界条件	固定、自由、滑り	固定、自由、滑り	固定、自由、滑り	固定、自由、滑り	固定、自由、滑り	固定、自由、滑り	固定、自由、滑り	固定、自由、滑り	固定、自由、滑り
EMの連続性	連続	連続	連続	連続	連続	連続	連続	連続	連続
応用	連続体要素法	有限要素法	有限要素法	有限要素法	有限要素法	有限要素法	有限要素法	有限要素法	有限要素法
特徴	連続体要素法	有限要素法	有限要素法	有限要素法	有限要素法	有限要素法	有限要素法	有限要素法	有限要素法

表 3.2 代表的な不連続体解析手法の比較 (宇野ら(2002))

手法	連続体要素法 (CSM)	有限要素法 (FEM)	有限要素法 (FEM)	有限要素法 (FEM)	有限要素法 (FEM)	有限要素法 (FEM)	有限要素法 (FEM)	有限要素法 (FEM)
提案者	Goodman (1968)	Goodman (1970)	Kowal (1980)	加藤 (1980)	Wardell (1971)	Sho and Goodman (1988)	Sho (1984)	Goodman and Shi (1987)
変形	微小変形	-	微小変形	微小変形	微小変形	微小変形	微小変形	-
プロット関数	弾性体	弾性体	弾性体	弾性体	弾性体	弾性体	弾性体	弾性体
不連続面の特性	弾性	弾性	弾性	弾性	弾性	弾性	弾性	弾性
支配方程式	弾性・動的	弾性	弾性・動的	弾性・動的	弾性・動的	弾性・動的	弾性・動的	弾性・動的
基礎理論	弾性・動的要素法	弾性・動的要素法	弾性・動的要素法	弾性・動的要素法	弾性・動的要素法	弾性・動的要素法	弾性・動的要素法	弾性・動的要素法
変位数	弾性・動的	弾性・動的	弾性・動的	弾性・動的	弾性・動的	弾性・動的	弾性・動的	弾性・動的
長所	FEMの自由なメッシュ	弾性・動的要素法	弾性・動的要素法	弾性・動的要素法	弾性・動的要素法	弾性・動的要素法	弾性・動的要素法	弾性・動的要素法
短所	多数の不連続面を考慮できない	多数の不連続面を考慮できない	多数の不連続面を考慮できない	多数の不連続面を考慮できない	多数の不連続面を考慮できない	多数の不連続面を考慮できない	多数の不連続面を考慮できない	多数の不連続面を考慮できない
適用事例	弾性・動的要素法	弾性・動的要素法	弾性・動的要素法	弾性・動的要素法	弾性・動的要素法	弾性・動的要素法	弾性・動的要素法	弾性・動的要素法

表 3.3 不均質体解析手法の比較 (宇野ら(2002))

項目 \ 手法	RFA (FEM)	DIGS (DDM)
提案者	Tang (1997)	Sellers・Napier (1997)
変形	大変形	—
ブロックの剛性	—	弾性体
不連続面の特性	—	クラッシュボット スライダー
支配方程式	びずみ軟化	脆性・延性
基礎理論	物性が Weibull 分布 線型 FEM	粒子内亀裂+ 粒子境界要素+欠陥要素 (ランダム分布)
未知量	節点変位	要素の変位くい違い
長所	FEM での利用が容易	DDM 要素のエネルギー 解放量を評価
短所	解の唯一性が保証され ない、実岩盤での適用 実績がない	解の唯一性が保証され ない
適用事例	微小破壊の集積から巨 視的なせん断破壊	深部鉱山における山鳴 り (AE) の解析

ここでは、上記に示される解析手法を用い、比較的広範囲を対象とした応力解析を実施した研究事例に関するの情報収集を行った。ここでの検討に当たって参照した文献等のリストを表 3.4 に示す。

表 3.4 収集した文献リスト

番号	文献名	著者	発行年	出典（発行元）
①	Stress measurement schemes for Jointed and fractured rock	Brady, BGH., Lemos, JV., Cundall, PA	1986	Proc. International Symposium on Rock Stress and Rock Stress Measurement, pp.167-176
②	Stress determination from hydraulic Test Data and Focal Mechanisms of Induced Seismicity	F.H. CORNET, PH. JULIEN	1989	Int. J. Rock Mech. Sci.&Geomech. Abstr. Vol.26 No.3/4 , pp. 235-248
③	Interpretation of stress measurements In a Provence mine using a block modelling	F. Homand, M.Souley	1997	Proceeding of International Symposium on Rock stress, pp. 205-210
④	A Geostatistical approach to evaluate differences In results between hydraulic fracturing and overcoring	J. Andersson, C. Ijunggern	1997	Proceeding of International Symposium on Rock stress, pp. 205-210
⑤	On determination of large scale stresses and module	A.N. Galybin, A.V.Dyskin & R.J.Jewell	1997	Proceeding of International Symposium on Rock stress, pp. 205-210
⑥	Estimation of far-field stresses from borehole strainmeter observation	Hiroshi Ishii, Guangqi Chen&Yuzo Ohnishi	1997	Proceeding of International Symposium on Rock stress, pp. 205-210
⑦	The relation between geological features and the stress state of the earth's crust In Central Japan	Takafumi Seiki, Omer Aydan& Toshikazu Kawamoto	1997	Proceeding of International Symposium on Rock stress, pp. 205-210
⑧	局所岩盤応力測定結果からの広域応力場の決定	水田義明 Budi Sulistian, 城戸利夫, 加藤幸雄, 加藤春寛, 新宮和喜, 堀之口賢二, 藤井伸一郎, 木村信彦	1997	資源素材学会秋季大会講演予稿集 AIV-10, pp.142-145
⑨	不連続面が地圧応力場に与える影響	菅原勝彦	1997	資源素材学会秋季大会講演予稿集 A 1-1, pp.1-4
⑩	鳥形山地域の広域的応力状態の推定	金子勝比古, 中村直昭, 尾原祐三, 伊藤耕介, 米田哲朗, 加藤昌治	2000	資源と素材 Vol.116, pp.572-576
⑪	大規模地下空洞の情報化施工	土木学会		pp.53-pp.65

文献①は、ジョイントを含む媒体内の応力分布の不均一性を理解する目的で実施された研究である。ここでは、粗粒の結晶質ドロマイト及び層状の再結晶化した頁岩中にレイズボーラによって掘削された 1.81m の掘削孔を利用して実施した応力解放法による応力測定結果の解釈のための数値解析を実施している。具体的には、円形領域で定義されるジョイントを含む岩盤ブロックを個別要素法を用いてモデル化した。円周の境界ブロックは無限弾性体内の円孔をモデル

化した境界要素の剛性マトリックスとカップリングしている。解析結果から、すべりを起こしたジョイントと他のジョイントの交差部では応力集中が起こり、交差するジョイントに向かってすべりが増大すると圧縮応力が増大するがその逆の場合は減少すること、複数のジョイントセットを含む岩盤の応力場は応力履歴の経路によって局所的に変化すること、等が述べられている。

文献②は、Le Mayet Montagne 花崗岩体の深度 850m までの初期応力状態を、HITF 法と圧入流体によって誘起される微小地震の発震機構解析に基づく方法によって求め、両者の比較を行っているものである。発震機構のデータをすべて用いた逆解析では解が収束せず、この方法の仮定の前提にある応力場の均一性が満足されていないことが想定された。また、一部の発震機構のデータを用い逆解析した結果と HITF 法の比較では、最大主応力方向が鉛直であるという点では両者は一致するものの、水平面内の最大主応力方向は大きくずれている結果であった。これは、流体の圧入によって応力場が攪乱されたことに原因があると説明されている。

文献③は、フランス Provence mine にて実施されたフラットジャッキ及び水圧破砕法による応力測定地点を含む 22×27×1.1km の領域をモデル化・解析し、領域内の応力分布を求め計測結果と比較した事例である。本解析では特に断層に着目している関係から、数値解析手法は不連続体解析手法の一つである UDEC を用い、領域内をブロックに分割するとともに、各ジョイントセット・ブロック毎に解析用物性値を設定している。解析結果は、大局的には測定結果と一致しているとされている。

文献④は、スウェーデン Aspo 島等で実施された水圧破砕法による応力測定結果について、統計的な解析によりその変動幅を求めることを主眼として実施された研究である。しかし、使用した統計的手法に関する具体的記述はない。

文献⑤、⑥は特定の応力測定手法（⑤は Cylindrical jack method による応力測定方法、⑥は Strainmeter を用いた応力測定手法）に基づく解析手法を提案したものである。⑤は異方性を考慮した弾性理論解を、⑥は Strainmeter の設置状況（機器本体、接着のためのグラウト層、岩盤）を模擬した 3 層構造モデルを作

成し、BEMにより解析する方法を提案したものである。特に⑥は接着層と本体及び岩盤との相互作用を考慮している。

文献⑦は、日本列島中部地方を対象に地質的特徴、広域ひずみ及びサイズミックイベントを利用し地殻の応力状態を推定しようとした試みである。具体的には、鉛直応力は土被りに等しく中間主応力は最大・最小主応力の加算の半分と仮定し、断層タイプ毎に水平応力・鉛直応力と側圧比、地殻の一軸圧縮強度との関係を求める。次にサイズミックイベントより断層タイプを決定し、応力値を計算する。非常に広範囲の地殻応力状態を決定できるのがこの手法の特徴である。

文献⑧は、通常解析に用いられる応力場の仮定 ($\sigma_v = \rho g Z$, $\sigma_x = \sigma_y = \nu / (1 - \nu) \times \rho g Z$) が正しくないことを実測例との比較により指摘し、新たな広域応力場の定義 ($\sigma_{ij} = k_{ij} \rho g Z$) を導入し、局所的な応力測定結果から広域応力場を推定する手法を提案している。この中で、岩盤が均質等方弾性体であり対象領域内で大きな応力不連続が存在しない限り、本手法で広域応力場を求めることは可能であること、この手法では原位置応力測定が必要不可欠であることが述べられている。

文献⑨は、不連続面が地圧応力場に与える影響をスケール効果を考慮しつつ断層をモデル化した DDM による解析及び原位置応力計測の分析から論じたものである。これらの検討から、不連続面の力学特性に関する寸法効果の影響の重要性を指摘するとともに、巨視的応力場については断層の影響が重要であること、局所応力場については Active な不連続面（亀裂面に作用するせん断応力 τ と垂直応力 σ の比が大きい亀裂）の影響が大きいこと等が述べられている。

文献⑩は、高知県に位置する日鉄鉱業(株)鳥形山鉱業所を事例として、3次元応力解析によって局所岩盤応力の測定結果から広域応力を推定する方法について検討を加えたものである。ここでは、岩盤を均質弾性体と仮定し、広域応力をプレート運動等による地殻の水平方向の動きに起因する応力と重力による応力の和と定義し、3次元有限要素法解析による応力解析結果と局所応力測定結果を比較することにより広域応力を推定する手法を提案し、鳥形山で実施され

た円錐孔底ひずみ法による応力測定結果との比較を通じその適用性を検討している。その結果、岩盤のポアソン比が重要であり、その推定に当たっては深度の異なる複数の応力測定が必要であることを指摘している。

文献⑩は、国内の土木構造物の設計において必要不可欠な初期応力がどのように取り扱われているかの記述がなされている。大規模地下空洞の建設に当たっては、初期応力の評価は、極端な偏圧がかかっていないこと、地質学的な変動をうけていないこと、を確認することを主眼としており、以下のような方法が通常とられているとされている。

- (1) FEMによる地形を考慮した自重解析を実施し、現地で計測された初期応力測定結果と比較して両者がほぼ一致すれば、FEM解析結果を建設予定地周辺の初期応力分布として採用する。
- (2) (1)にて両者が一致しない場合は、実測値に合うようFEM解析モデルの補正を行う。補正方法については定型化された方法はない。

この方法は、必ずしも対象とする場の初期応力分布を定量的に評価することを意図したものではない。

本節に示した通り、応力測定に関連する数値解析では、主に連続体・不連続体解析手法が選択されている。しかし、その多くは取得された初期応力測定結果の解釈を行うために実施され、また岩盤を等方均質体と仮定する場合が多い。このため、実岩盤中の3次元応力場の不均一性を定量的に評価するという視点での研究事例はほとんどない。また、地下構造物の設計においても不均一性を考慮したような応力場の設定は行われていないのが現状である。

3.1.2 サイクル機構が実施した調査研究事例

岩盤応力の測定手法は表 1.1 に示したように様々な種類があるが、菅原(1998)によって各手法に関連する既存研究成果のレビューが行われている。本論文では、原位置応力測定手法である水圧破碎法、応力解放法及び岩石コアを用い室内試験にて応力を測定するコア法それぞれについて手法の問題点や今後の課題などが抽出されている。特にコア法については、それぞれの測定手法の標準化が試みられている(松木(2000), 及川ら(2000), 山本(2000), 瀬戸ら(2000)が、ASR, DSCA 法以外の手法(AE,DRA,Ultrasonic 法)では応力記憶のメカニズムに関

する検証が大きな課題として取り上げられている（菅原(1988)）。また、種々の方法を組み合わせる岩盤応力測定システムのシステム化が重要であること、各測定点において幾つかの応力成分が確実に測定できる“完結型”測定法が不可欠であると締めくくられている。

サイクル機構においては、初期応力が岩盤中に空洞を掘削した場合の掘削影響評価に不可欠な情報と捉えられており、主に結晶質岩と堆積岩を対象とした場合の既存応力測定手法の信頼性に関する検討が原位置計測を通じ実施されてきた。関連する個別報告は多数あるため、ここでは代表的なものに絞った。

表 3.5 に収集・参照した文献等を示す。

表 3.5 収集した文献リスト

番号	文献名	著者	発行年	出典
①	深地層を対象とした力学的調査の現状-複数の手法を用いた初期応力測定について	佐藤他 (サイクル機構)	1998	原子力バックエンド研究 Vol.4 No.2, pp.83-89
②	Estimation of applicability of stress measurement methods and three dimensional stress state in soft sedimentary rock	Maeda et.al(JNC)	1999	Proceeding of '99 Japan-Korea Joint Symposium on Rock Stress, pp. 277-284
③	Comparison of the results of stress measurements determined by various methods at the Kamaishi mine	Matsui et.al(JNC)	1997	Proceeding of International symposium on Rock stress, pp. 95-100
④	繰り返しアプローチを用いた中領域の地質環境の評価手法について-応力分布と物性値分布-	松井他 (サイクル機構)	2000	JNC TN 7410 2000-003, pp. 35-44

文献①は、岐阜県土岐市に位置する東濃鉱山における新第三紀堆積岩及び岩手県釜石市に位置する釜石鉱山の結晶質岩を対象として実施した各種初期応力測定結果の比較がなされている。東濃鉱山については、東濃鉱山第2立坑第1計測坑道において実施した水圧破砕法、応力解放法、ダブルフラクチャリング法、AE法の結果を比較し、堆積軟岩に対するこれらの測定手法の適用性を論じている。釜石鉱山については海拔550mレベル坑道における円錐孔底ひずみ法、水圧破砕法、AE/DRA法、DSCA法による応力測定が行われており、それらの比較を通じこれらの手法の適用性を検討している。

文献②は、東濃鉦山において新第三紀堆積軟岩を対象として実施した水圧破碎法による測定結果などを既存の様々な情報とリンクして、各測定結果の信頼性に言及したものである。具体的には、地表から掘削した 200m 級の試錐孔 4 本において水圧破碎法により計測した結果と地質構造との関連を考察するとともに、坑道内で実施した初期応力測定結果と比較しそれらの信頼性を検討している。その結果、東濃鉦山周辺の応力状態については、堆積岩部と結晶質岩部において応力値の大きさ及び水平面内最大主応力方向が異なること等が述べられている。

文献③は、岩手県釜石鉦山において結晶質岩を対象として実施した各種応力測定結果をとりまとめるとともに、地震のメカニズム解より推定される水平面内主応力の方向あるいは坑道掘削時に観察された破壊現象の発生領域の観察等から推定される主応力方向と計測結果を比較することにより、適用手法の結果の信頼性について言及している。その結果、主応力方向は円錐孔底ひずみ法の結果が、主応力値については水圧破碎法の結果の信頼性が高いとしている。

文献④は、正馬様用地において実施された 1000m 級試錐孔 3 本の初期応力測定結果及び岩盤物性の深度分布をとりまとめたものであり、同領域内に分布する土岐花崗岩体は応力・岩盤物性の深度変化の観点からおおよそ 3 つのゾーンに分けられること等が知見として述べられている。特に、水平面内の応力状態は深度方向に複雑に変化していることが示されている。

ここに示したように、サイクル機構が実施している応力測定は、測定対象領域のスケールが数 100m 以内で非常に多くの初期応力測定データ及び岩盤物性データが取得されている。しかしながら、これらの測定の目的は既存手法の適用性の検討に重点が置かれ、理論的な検討・考察は行われていない。このため、3 次元的な応力場に関しては定性的な検討（地殻ひずみ、地震メカニズム解等との比較）が行われているのみである。

3.1.3 検討結果

3.1.1、3.1.2 に示した検討結果をまとめると以下のようなになる。

- ・解析手法に関しては、一般に認知されたものとして定量的に 3次元応力分布の不均一性を表現しうる手法は現存しない。
- ・数値解析は、主として現象の解釈のために行われており、地下構造物の設計・施工といった観点での応力場の不均一性を考慮したモデル化はほとんど行われていない。また、実際に設計のための計算を行う場合にも、解析に利用した初期応力の妥当性を検証した事例はほとんどない。
- ・既往の文献の実測データはポイントデータあるいは数 10km を越えるようなスケールの広域的なデータであり、その間のスケール（数 km 以下）で詳細な応力測定を実施している事例は少ない。

これらの調査結果を踏まえ、3カ年を日途とした本研究の全体計画を策定した結果を次節にて述べる。

3.2 全体研究計画

3.2.1 計画策定の考え方

3.1 にて実施した既存情報の収集・整理の結果を踏まえ、かつ効率的に研究を進める観点から以下のような考え方で本研究の全体計画を策定する。

1) 研究対象領域の選定

既存データが豊富に存在しかつ追加での検証データが取得できる可能性がある所を対象とする。具体的にはサイクル機構 東濃地科学センターが所有する東濃鉾山周辺、正馬様用地及び昭和 63 年度から平成 9 年度まで原位置試験を実施してきた釜石鉾山が候補としてあげられる。

2) 研究の進め方

モデル化・解析手法に焦点を絞った研究であるが、幾多の解析手法が既に現存している。このため、効率的に研究を進める観点から、解析手法は新たに開発することはせず、かつ一つに絞らず様々な手法を同一研究対象領域に適用しその適用性を評価するという方法を採用する。

これらの考え方に基づき、設定した研究内容、研究実施体制及びスケジュールを以下に示す。

3.2.2 研究内容

1) 研究対象領域

研究対象領域としては、現段階であるスケールを対象とした応力測定が繰り返し実施されており、かつ検証データの取得までが現実的に実施可能と考えられる東濃（東濃鉾山、正馬様用地）や過去に多数の応力測定を実施した釜石鉾山周辺地域を研究対象とする。研究対象領域の特徴を以下に示す。

（東濃鉾山）

東濃鉾山およびその周辺は、新第三紀堆積軟岩で構成されており、月吉断層と呼ばれるほぼ東西方向の走向を持ち 60～70° 南落ちの逆断層が存在する。同

鉾山敷地内には、東濃鉾山の坑道が3次元的に展開されており、坑道内の試錐孔において各種の応力測定が実施されている。また、本研究のために、敷地内に深度200m~500m程度の試錐孔を計5本掘削し、水圧破碎法による初期応力測定を実施している。

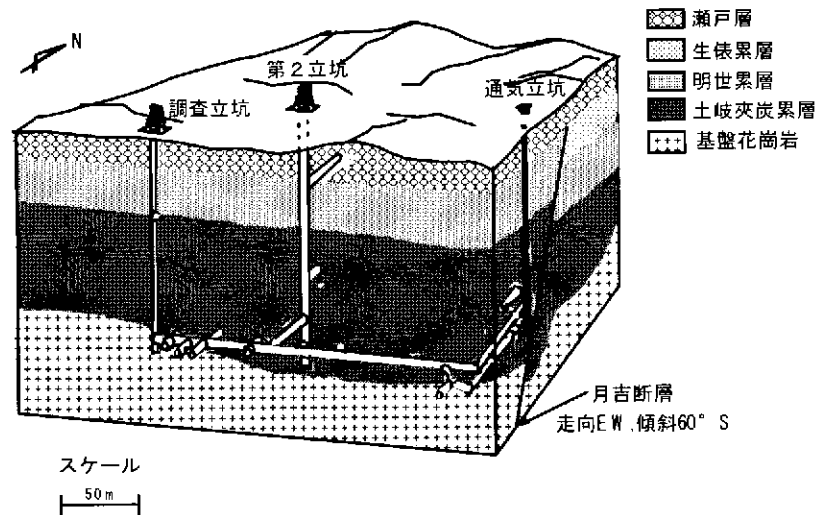


図 3.2 東濃鉾山の地質概要

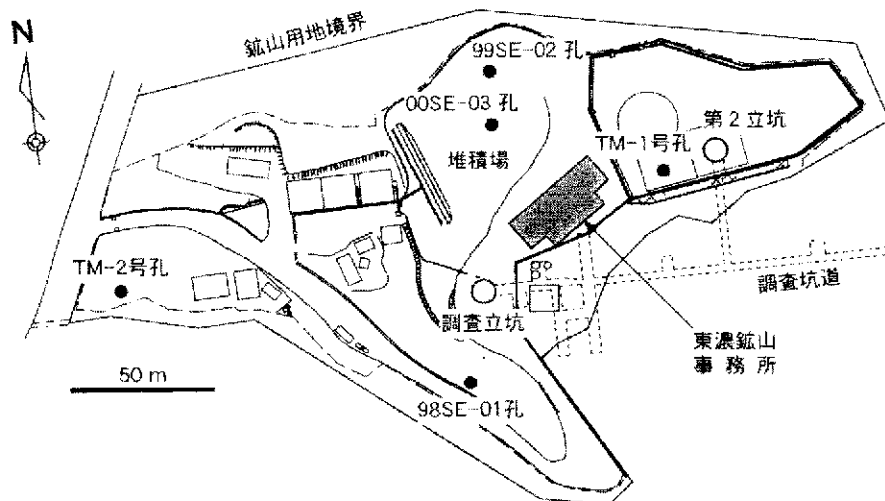


図 3.3 地表試錐孔位置図

(正馬様用地)

正馬様用地は、数 10～数 100m の厚さで東濃鉦山と同じ堆積軟岩が分布しているが、それ以深は土岐カコウ岩と呼ばれる花崗岩で構成されている。月吉断層は花崗岩中でもその存在が確認されている。本用地が元々超深地層研究所建設予定地点であったことから、領域内には 4 本の 1000m 試錐孔が存在し、それぞれ水圧破碎法・AE 法などによる応力測定が実施されている。

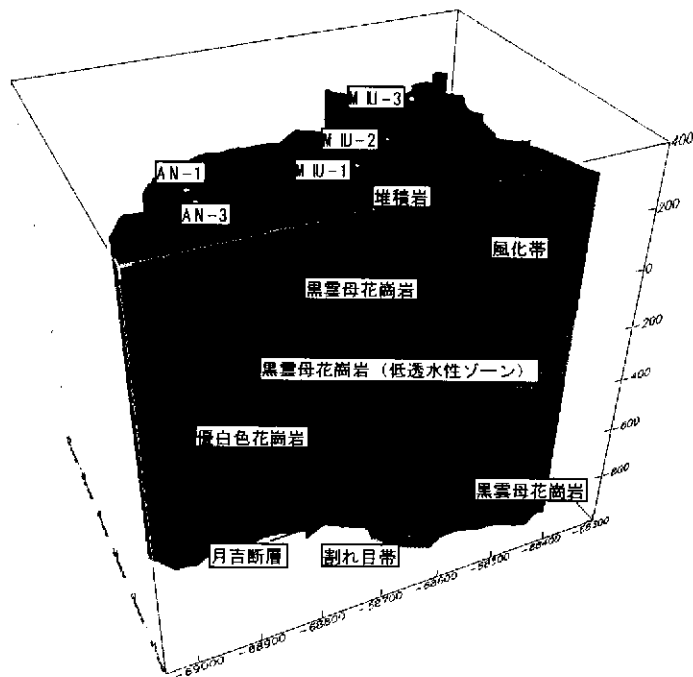


図 3.4 正馬様用地における地質構造の概念図

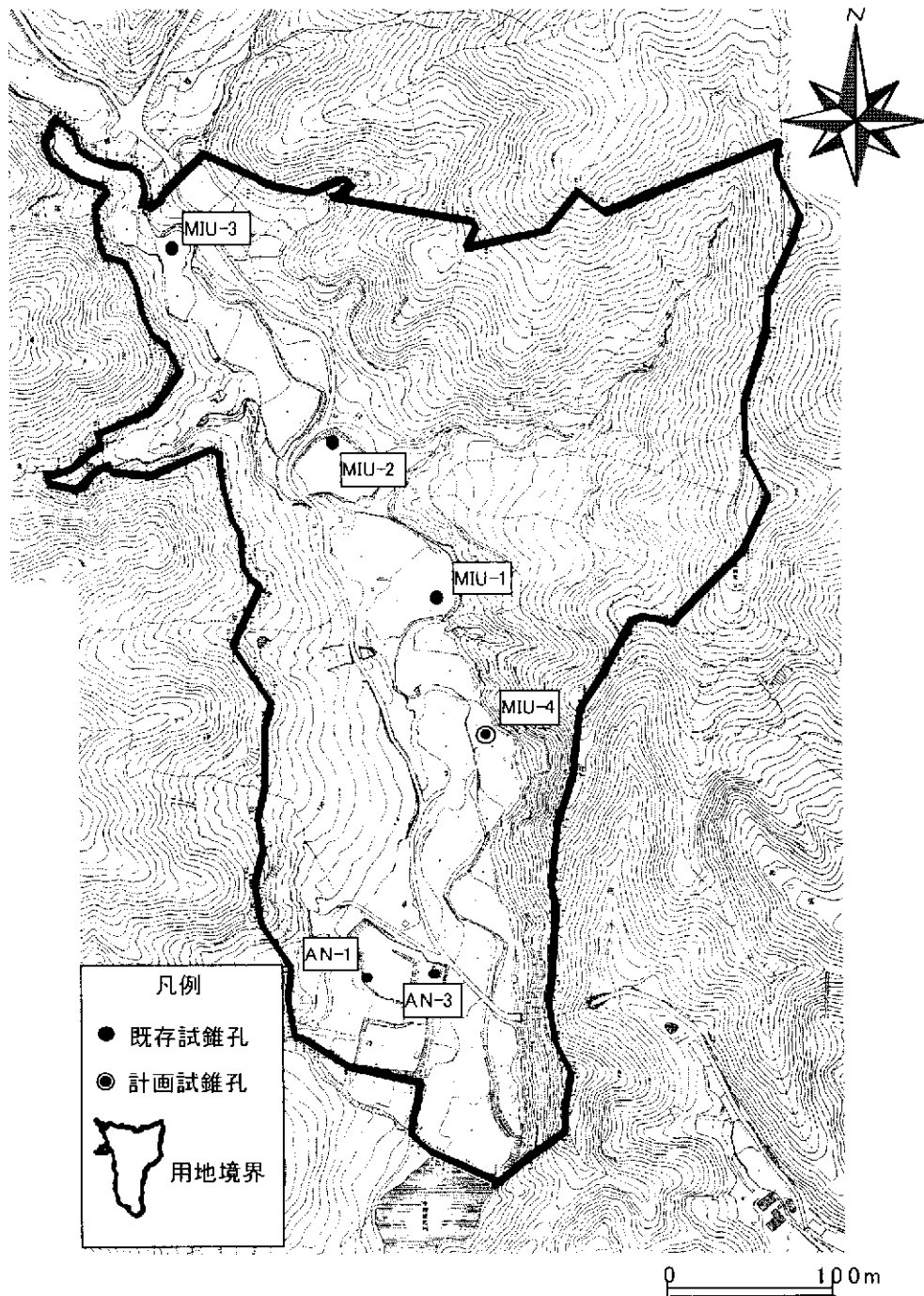


図 3.5 正馬様用地における試錐孔位置図

(釜石鉱山)

釜石鉱山は、サイクル機構が昭和 63 年度から平成 9 年度までの 10 年間にわたり結晶質岩を対象とした原位置試験研究を実施してきたサイトである。原位置試験は全長約 140km に及び坑道のうち、海拔 550m レベル及び 250m レベルに位置する坑道の最北端部で実施された。土被り厚は、それぞれ約 230m, 730m である。この領域は栗橋花崗閃緑岩と呼ばれる花崗閃緑岩で構成されている。この原位置試験場において 550m, 250m レベルから掘削した試錐孔を用い、水圧破砕法、応力解放法（円錐孔底ひずみ法、孔径変化法）、コア法（AE, DRA, DSCA 法）といった主要な応力測定手法を用いた初期応力測定が実施されている。

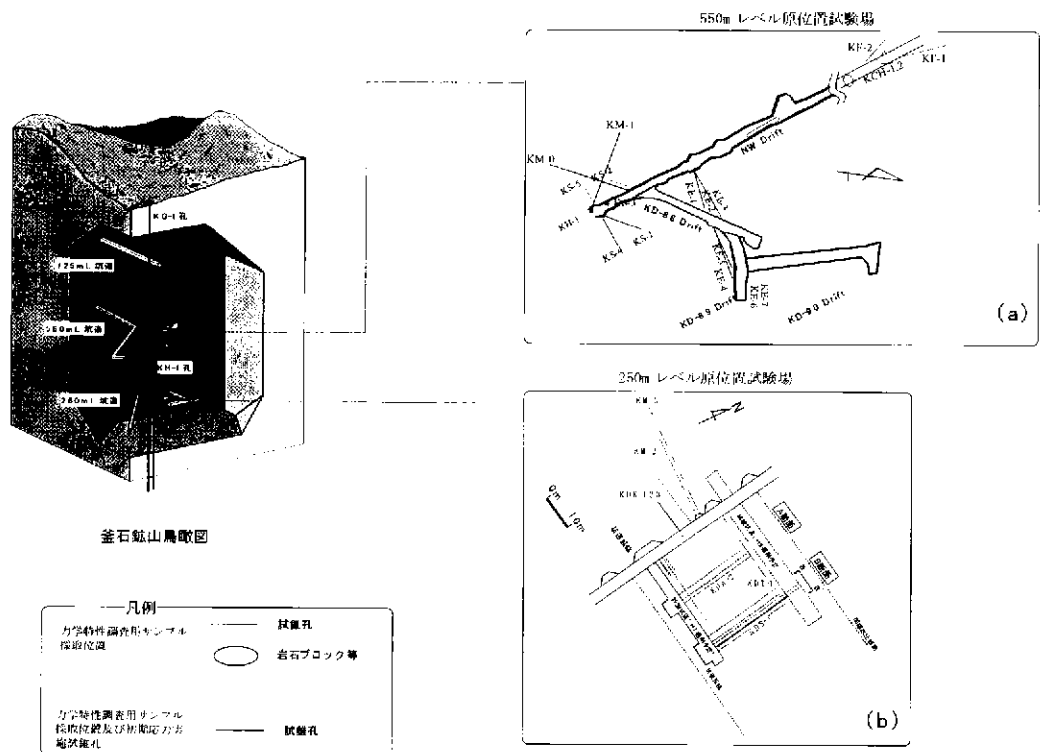


図 3.6 釜石鉱山における調査用試錐孔配置図

2) 研究概要

本研究では、3カ年程度の研究期間の間に、これまでサイクル機構により取得されてきた岩盤物性や応力測定結果を利用し、解析モデルの構築・解析・解析結果の検証などを行うことにより、適用した手法の有効性の把握・改良点の抽出・改良といったプロセスを経て3次元的な応力分布を定量的に把握・評価しうる手法の構築を図る。以下に、各年度の概略的な研究内容を示す。

①初年度

研究の初年度として、3カ年間の全体計画の策定を行うとともに、解析に必要な既存データの収集・整理とデータセットの作成及びモデル化・応力解析に必要な数値解析手法の選定を行う。また、適用する解析手法に追加で取得すべきパラメータがあれば、その抽出を行う。

②次年度

初年度に構築したデータセットをベースとして解析用のモデルを作成するとともに、初年度選定した手法を用いた数値解析を実施する。解析結果を検証データと比較・検討し、解析モデル・解析手法の妥当性を評価するとともに、改善点があれば抽出・整理する。

③最終年度

前年度に抽出した改善点を改良した上で再解析を実施し、解析結果と検証データを比較・検討することにより、最終的な解析手法の有効性等の評価を実施し、研究結果のとりまとめを行う。

図 3.7 に研究の流れを示す。

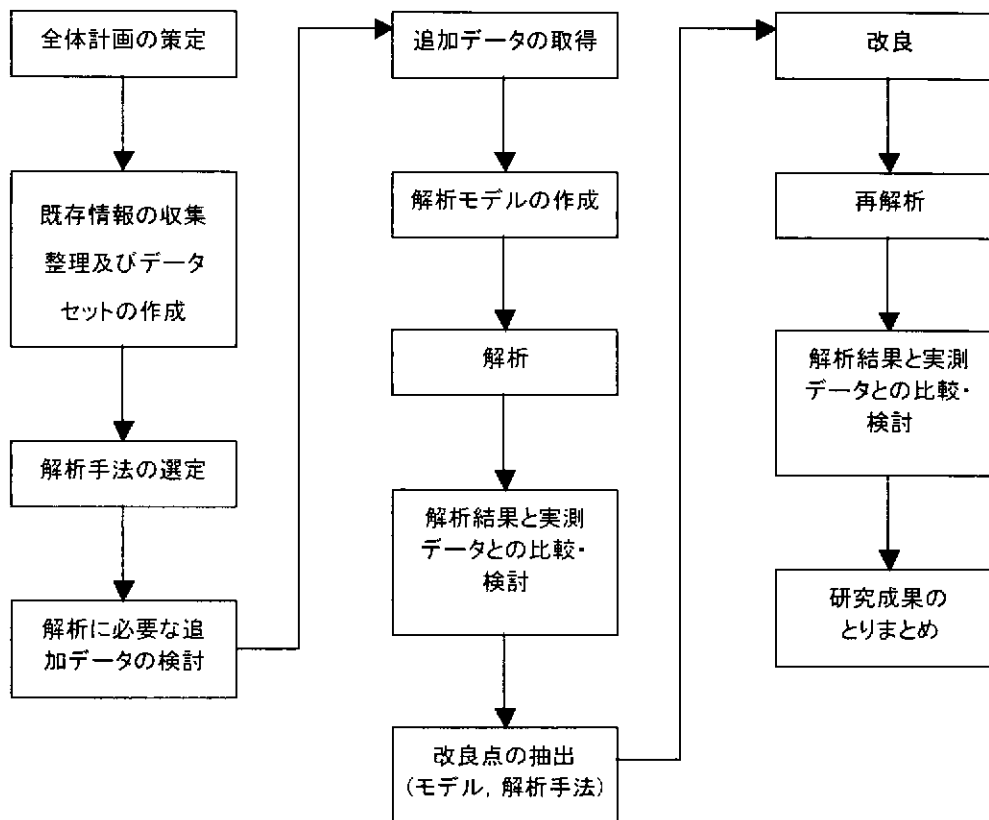


図 3.7 本研究の流れ

3.2.3 研究実施体制

本研究は、資源素材学会の下で専門家から構成される委員会を組織し、研究を進めることとする。委員会のメンバーは、水田義明山口大学教授，菅原勝彦熊本大学教授，金子勝比占北海道大学教授，松木浩二東北大学教授の4名とする。

3.2.4 スケジュール

上記に基づき策定した本研究のマスタースケジュールを表 3.6 に示す。なお、このスケジュールは研究の進展に合わせ適宜見直すものとする。

表 3.6 本研究のマスタースケジュール

実施項目\月		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
初年度	全体計画の策定							■	■	■			
	既存情報の収集整理およびデータセットの作成								■	■	■	■	■
	解析手法の選定											■	■
	解析に必要な追加データの検討											■	■
	委員会											▲	▲
次年度	追加データの取得			■	■	■	■	■					
	解析モデルの作成			■	■	■	■	■					
	解析							■	■	■	■		
	解析結果と実測データとの比較・検討									■	■	■	
	改良点の抽出（モデル、解析手法）											■	■
	委員会											▲	▲
最終年度	改良			■	■	■	■	■					
	再解析							■	■	■			
	解析結果と実測データとの比較・検討								■	■	■	■	
	研究成果のとりまとめ										■	■	■
	委員会											▲	▲

3.3 本研究の実施に適切と思われる解析手法の選定

研究の初年度として、適切と考えられる解析手法の選定作業を実施した。以下にその結果を述べる。なお、地盤内の地質的不均一性に起因した応力の擾乱や地質的成因・変遷過程に起因した内部応力の存在なども考慮する必要があるが、これらの取り扱いは今後の課題である。

3.3.1 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 \mathbf{x} における局所応力 $\sigma_{ij}^l(\mathbf{x})$ は、広域応力 σ_{ij}^G もしくは広域ひずみ ε_{ij}^G の関数として次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\sigma_{ij}^l(\mathbf{x}) &= F(\mathbf{x}, \sigma_{ij}^G) \\ \sigma_{ij}^l(\mathbf{x}) &= G(\mathbf{x}, \varepsilon_{ij}^G)\end{aligned}$$

ただし、上式の F および G は地形や地質の影響による応力の擾乱を表す関数である。したがって、上式の関数 F もしくは G 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、広域応力の同定手法について考察を加える。

3.3.2 広域応力の評価法

1) 広域応力の表現方法

広域応力の表現方法としては幾つかの方法が考えられる。水田等（水田他（1997）；Sulistianto et al. (1998)）は、初期状態で地表面が水平な場合を考え、広域応力 σ_{ij}^G を初期被り重力圧に係数を乗じたものとして次式で表現している。

$$\sigma_{ij}^G = k_{ij} \rho g z \quad (1)$$

ただし、 ρ は岩石の密度、 g は重力加速度、 z は初期地表面からの深度である。また、 k_{ij} は広域応力係数と呼ばれる対称テンソルであり、その独立成分数は応力と同じ6である。また、水田等（水田他(1999)）は(1)式を(2)式に拡張した方法も提案している。

$$\sigma_{ij}^G = S_{ij} + k'_{ij} \rho g z \quad (2)$$

ただし、これは先に Cornet 等（Cornet 他(1984)）が提案したものと同一であり、 S_{ij} および k'_{ij} は、 $S_{xz} = S_{yz} = S_{zz} = 0$ 、 $k'_{zz} = 1$ 、 $k'_{xz} = k'_{yz} = 0$ となる対称テンソルであるとしている。すなわち、これらの独立成分数は6である。したがって、いずれの場合も、独立な6種の広域応力条件において測定地域の幾何形状を考慮した3次元応力解析を行い、その結果を用いて局所岩盤応力の測定結果を逆解析すれば、広域応力を表すテンソルを決定することができる。

また、(2)式右辺第2項は重力に起因した応力を表現することから、テンソル k'_{ij} は側圧係数としての意味をもつ。したがって、これら重力に起因した応力について、水平方向無ひずみの仮定をおくと、 $k'_{xy} = k'_{yx} = 0$ となり、さらに、 k'_{xx} および k'_{yy} はポアソン比 ν のみの関数として与えることができる。この場合、(2)式は(3)式に書き換えられる。

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^G &= S_{xx} + \rho g z \nu / (1 - \nu) \\ \sigma_{yy}^G &= S_{yy} + \rho g z \nu / (1 - \nu) \\ \sigma_{zz}^G &= \rho g z \\ \sigma_{xy}^G &= S_{xy} \\ \sigma_{yz}^G &= \sigma_{zx}^G = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

(3)式の未知数は S_{xx} 、 S_{yy} および S_{xy} とポアソン比 ν （もしくは係数 $\nu/(1-\nu)$ ）の4つである。これら未知数の同定法は後述する。

次に、広域応力は水平方向成分についてひずみ場との関連で議論されることが多いことから、広域ひずみの観点のもとに広域応力の表現法を考える（金子他(2000)）。特に、水平方向の広域ひずみから考えると、水平方向応力は水平

方向無ひずみの条件における応力と水平方向ひずみにより生じる応力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。

そこで、以上の前提のもとに、広域応力を地表面が水平な地盤において地盤中に作用する応力と定義する。この場合、広域ひずみに起因する応力は、地表面が水平な地盤において周囲境界に広域ひずみ $\varepsilon_{xx}^G, \varepsilon_{yy}^G, \gamma_{xy}^G$ ($=\varepsilon_{xy}^G+\varepsilon_{yx}^G$) に相当する変位が与えられた場合の応力となり、これらを $\sigma_{xx}^T, \sigma_{yy}^T, \sigma_{xy}^T$ と表わすと、次式となる。

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}^T &= E/(1+\nu)(1-2\nu) \cdot [(1-\nu)\varepsilon_{xx}^G + \nu\varepsilon_{yy}^G] \\ \sigma_{yy}^T &= E/(1+\nu)(1-2\nu) \cdot [(1-\nu)\varepsilon_{yy}^G + \nu\varepsilon_{xx}^G] \\ \sigma_{xy}^T &= E/2(1+\nu) \cdot \gamma_{xy}^G\end{aligned}\quad (4)$$

ただし、 E および ν は岩盤のヤング率およびポアソン比であり、ここでは簡略化のために岩盤は均質弾性体であると仮定している。さらに、密度を一定と仮定すると、広域応力 σ_{ij}^G は(4)式の応力と重力による応力の和として次式となる。

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}^G &= \sigma_{xx}^T + \rho g z \nu / (1-\nu) \\ \sigma_{yy}^G &= \sigma_{yy}^T + \rho g z \nu / (1-\nu) \\ \sigma_{zz}^G &= \rho g z \\ \sigma_{xy}^G &= \sigma_{xy}^T \\ \sigma_{yz}^G &= \sigma_{zx}^G = 0\end{aligned}\quad (5)$$

(5)式は広域ひずみを仮定した場合の広域応力の定義式であるが、前出(3)式と同形であることがわかる。また、(3)式および(5)式は弾性球殻理論（菅原他(1995)）による地殻応力の表現式で地温勾配をゼロとした場合と形式的に一致する。ただし、(3)式および(5)式の解析上の相違点は、(3)式の場合は広域応力が場の初期条件として取り扱われるのに対し、(5)式の場合は広域ひずみが対象

領域の境界条件として取り扱われることである。したがって、この解析上の相違点のみ留意すれば、(3)式および(5)式のどちらの定義式に対しても同様な議論を行うことが可能である。そこで、以下では、特に断らない限り、(5)式を前提として議論を進めるが、広域ひずみ ($\epsilon_{xx}^G, \epsilon_{yy}^G, \gamma_{xy}^G$) を広域応力 (S_{xx}, S_{yy}, S_{xy}) に置き換えれば以下の関係式は(3)式に対する式となる。

以上の前提のもとに、次に、地盤内の応力分布について考察する。実際の地盤内の応力は地形の影響を受け、複雑なものとなるが、上記の重力と広域ひずみが作用する場合の、地盤内の任意の座標点 \mathbf{x} における局所応力 $\sigma_{ij}^l(\mathbf{x})$ は次式で表現できる。

$$\sigma_{ij}^l(\mathbf{x}) = \sigma_{ij}^p(\mathbf{x}, \rho g) + \sigma_{ij}^x(\mathbf{x}, \epsilon_{xx}^G) + \sigma_{ij}^y(\mathbf{x}, \epsilon_{yy}^G) + \sigma_{ij}^{xy}(\mathbf{x}, \gamma_{xy}^G) \quad (6)$$

ただし、 $\sigma_{ij}^p(\mathbf{x}, \rho g)$ は岩石の自重により点 \mathbf{x} に生ずる局所応力である。また、 $\sigma_{ij}^x(\mathbf{x}, \epsilon_{xx}^G)$ 、 $\sigma_{ij}^y(\mathbf{x}, \epsilon_{yy}^G)$ および $\sigma_{ij}^{xy}(\mathbf{x}, \gamma_{xy}^G)$ は周囲境界に直ひずみ ϵ_{xx}^G 、 ϵ_{yy}^G およびせん断ひずみ γ_{xy}^G 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 \mathbf{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、(5)式を前提にすると、広域応力を推定するためには、局所応力の測定値に対して(6)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。

2) 観測方程式

広域応力が(5)式で表される場合を対象として、局所応力の測定結果から広域ひずみと広域応力を推定する方法を以下に示す。なお、前述のように、広域ひずみ ($\epsilon_{xx}^G, \epsilon_{yy}^G, \gamma_{xy}^G$) を広域応力 (S_{xx}, S_{yy}, S_{xy}) に置き換えれば以下の関係式は広域応力を(3)式で表した場合の式となる。

まず、岩盤内の任意の点 \mathbf{x} における局所応力は(6)式で表現されるが、線形関係から次のように書き換えられる。

$$\sigma_{ij}^l(\mathbf{x}) = \sigma_{ij}^0(\mathbf{x}, \rho g) + c_x \sigma_{ij}^x(\mathbf{x}, \epsilon_{xx0}) + c_y \sigma_{ij}^y(\mathbf{x}, \epsilon_{yy0}) + c_{xy} \sigma_{ij}^{xy}(\mathbf{x}, \gamma_{xy0}) \quad (7)$$

ただし、 $c_x = \epsilon_{xx}^G / \epsilon_{xx0}$ 、 $c_y = \epsilon_{yy}^G / \epsilon_{yy0}$ 、 $c_{xy} = \gamma_{xy}^G / \gamma_{xy0}$ であり、 ϵ_{xx0} 、 ϵ_{yy0} 、 γ_{xy0} はそれぞれ定数である。ここで、測定点 \mathbf{x}_0 において測定された局所応力を

$\sigma_{ij}^M(\mathbf{x}_0)$ と表すと、解析値が測定値に一致する条件は次のようになる。

$$\sigma_{ij}^M(\mathbf{x}_0) = \sigma_{ij}^0(\mathbf{x}_0) \quad (8)$$

すなわち、解析においては境界条件となる広域ひずみのある一定の値に仮定して測定点における局所応力を評価しておけば、(8)式から測定値に対応する広域ひずみの値が算定されることになる。ただし、 σ_{ij}^0 は岩盤の単位体積重量とポアソン比の関数であるが、岩盤の単位体積重量に関しては岩石のそれと等しいと扱うことができることから、 ρg の値は評価可能である。したがって、(7)式右辺の項はすべてポアソン比の関数となることから、(8)式の連立方程式は応力6成分に対して未知数は c_x 、 c_y 、 c_{xy} とポアソン比の4つとなる。そこで、ポアソン比の値ごとに、最小二乗法により係数 c_x 、 c_y 、 c_{xy} を求めると、観測方程式は(9)式となり、解くべき連立方程式は(10)式となる。

$$\mathbf{A} \mathbf{c} = \mathbf{s} \quad (9)$$

$$\mathbf{A}' \mathbf{A} \mathbf{c} = \mathbf{A}' \mathbf{s} \quad (10)$$

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。

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx}^X(\mathbf{x}_0, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{xx}^Y(\mathbf{x}_0, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{xx}^{XY}(\mathbf{x}_0, \gamma_{xy0}) \\ \sigma_{yy}^X(\mathbf{x}_0, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{yy}^Y(\mathbf{x}_0, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{yy}^{XY}(\mathbf{x}_0, \gamma_{xy0}) \\ \sigma_{zz}^X(\mathbf{x}_0, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{zz}^Y(\mathbf{x}_0, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{zz}^{XY}(\mathbf{x}_0, \gamma_{xy0}) \\ \sigma_{yz}^X(\mathbf{x}_0, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{yz}^Y(\mathbf{x}_0, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{yz}^{XY}(\mathbf{x}_0, \gamma_{xy0}) \\ \sigma_{zx}^X(\mathbf{x}_0, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{zx}^Y(\mathbf{x}_0, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{zx}^{XY}(\mathbf{x}_0, \gamma_{xy0}) \\ \sigma_{xy}^X(\mathbf{x}_0, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{xy}^Y(\mathbf{x}_0, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{xy}^{XY}(\mathbf{x}_0, \gamma_{xy0}) \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx}^M(\mathbf{x}_0) - \sigma_{xx}^0(\mathbf{x}_0) \\ \sigma_{yy}^M(\mathbf{x}_0) - \sigma_{yy}^0(\mathbf{x}_0) \\ \sigma_{zz}^M(\mathbf{x}_0) - \sigma_{zz}^0(\mathbf{x}_0) \\ \sigma_{yz}^M(\mathbf{x}_0) - \sigma_{yz}^0(\mathbf{x}_0) \\ \sigma_{zx}^M(\mathbf{x}_0) - \sigma_{zx}^0(\mathbf{x}_0) \\ \sigma_{xy}^M(\mathbf{x}_0) - \sigma_{xy}^0(\mathbf{x}_0) \end{pmatrix} \quad \mathbf{c} = \begin{pmatrix} c_x \\ c_y \\ c_{xy} \end{pmatrix}$$

また、推定誤差 e は(11)式で定義することができる。

$$e = [(1/6) \sum \sum (\sigma_{ij}^M(\mathbf{x}_0) - \sigma_{ij}^L(\mathbf{x}_0))^2]^{1/2} \quad (11)$$

推定誤差はポアソン比ごとに求められるため、それが最小となるポアソン比における解が最確値となる。

3.3.3 解析ツールの要件

前章の考察に基づくと、関数 F もしくは G を定めるためには、対象地域の地形を考慮した3次元モデルを作成し、このモデルに対して3次元応力解析を実施する必要があることがわかる。そこで、このために開発すべき解析ツールの要件について考察する。

1) 3次元応力解析法

広域応力場・広域ひずみ場を解析対象とする場合、解析モデルは相応に広い範囲をカバーするとともに、その表面形状は自然地形を適格に表現するものでなくてはならない。これは、同様に岩盤を対象とする構造物であっても、トンネルや地下発電所空洞などのような限られた領域における規格化された構造物とは大きく異なることを示している。したがって、自然地形の三次元モデル化においては、広大な領域における複雑な形状のモデル化が要求され、このためには極めて膨大な情報が必要となる。これは、数値モデル化における情報量（入力データ）とともに解析に必要なコンピュータ容量や計算時間が、通常の空洞解析等に比較して極めて増大することを示している。したがって、コンピュータ性能や計算コストなどを考慮して、現実的に可能な範囲内で解析を行うためには、計算容量や計算時間が節約可能な解析法と計算アルゴリズムを採用する必要がある。

弾性連続体の応力解析手法としては有限要素法、境界要素法および有限差分法などが一般的である。このうち、有限要素法と境界要素法では、系全体の力学的平衡条件を連立方程式により表現することから、連立方程式の計算が不可欠であり、このための計算容量を確保する必要がある。これに対し、有限差分法は、陽解法を採用すると連立方程式を解く必要がなくなるため大幅に計算容量を削減することができる。したがって、陽解法の有限差分法は3次元大規模

計算への適応性を有していると判断できる。そこで、以下では、有限要素法と境界要素法について3次元大規模計算への適応性について検討する。

一般に、有限要素法と境界要素法を比較すると、3次元解析ではモデル作成作業および計算容量などから境界要素法が有利であると言われてきている。すなわち、有限要素法は領域型解法であるため、3次元モデルは立体的に離散化する必要があるが、境界要素法は境界型解法であるため、3次元モデルはその境界面のみを離散化すればよい。しかし、詳細な離散化に伴って連立方程式の元数も増大するため、数値計算においては連立方程式の性質も考慮した検討が必要である。そこで、対象地域を含む立方体領域を解析モデルとして取り扱う場合を例に取り、離散化に伴う節点数と連立方程式のマトリックス容量を試算してみる。

まず、外周に変位境界条件を与える場合を考えると、この場合には、境界要素法では外周6面上に節点が配置されるが、有限要素法では直方体領域内部にも節点が配置される。例えば、地表面および外周面にそれぞれ $N \times N$ の節点を配置した場合、境界要素法の節点数 N_b は $N_b = 6N^2 - 12N + 8 \doteq 6N^2$ と与えられるが、有限要素法で同等な精度の解析を行うための節点数 N_f は $N_f = N^3$ と与えられる。

次に、広域応力を場の初期条件として与え、さらに関数 F が地形のみの影響を表す場合を考えると、境界要素法では地表面のみをモデル化すればよいので、必要な節点数 N_b は $N_b = N^2$ となる。なお、当然のことながら、この場合の有限要素モデルは上述と同じであるため、節点数も上述のそれと同一となる。

以上の節点数を比較すると、分割数 N が大きな3次元解析には有限要素法よりも境界要素法が有利であるとの考えも理解できる。しかし、境界要素法の計算に用いられるマトリックスは密なマトリックスであるため、節点数 N_b の離散化を行った場合に必要なマトリックス容量は $(3N_b)^2$ となる。これに対し、有限要素法の計算に用いられるマトリックスは疎なマトリックスであるため、非零成分のみを記憶することにすれば、節点数 N_f の離散化を行った場合に必要なマトリックス容量は $C(3N_f)$ となる。ただし、 C はマトリックス各行における非零成分の最大値であり、通常3次元要素分割では最大81程度である。したがって、上記の離散モデル化において必要な記憶容量は、有限要素法では $3CN^3$ となるが、境界要素法で6面要素分割の場合は $324N^4$ 、境界要素法で1面要素分割（地表面のみモデル化）の場合は $9N^4$ となる。ちなみに、有限要素法でフルマトリックスを使用する場合は $9N^6$ となる。そこで、これらの計算に必要な

マトリックス容量と分割数との関係を示すと図 3.8 のようである。ただし、図 3.8 には、境界要素法については 6 面を要素分割する場合（最大サイズ）と 1 面（地表面）のみを要素分割する場合（最小サイズ）を、有限要素法についてはフルマトリックスを用いる場合（最大サイズ）と非零成分のみを記憶する場合（最小サイズ）のそれぞれの場合を示している。図 3.8 より、記憶容量は、境界要素法で 1 面要素分割の場合と有限要素法で非零成分のみを記憶する場合が最も少ないことがわかる。とくに、6 面要素分割の境界要素法の記憶容量はこれらの数十倍となることがわかる。したがって、広域応力を場の初期条件として取り扱う場合には、1 面要素分割の境界要素法もしくは非零成分のみを記憶する有限要素法が有利であると考えられることができる。また、広域ひずみを場の境界条件（外周の変位境界条件）として与える場合には、非零成分のみを記憶する有限要素法が現実的に可能な方法であると考えられることができる。また、前述のように、両者の場合ともに、陽解法の有限差分法は適応性を有している。すなわち、以上の考察は、問題に応じて解析法とアルゴリズムを選択する必要があることを示している。とくに、計算のアルゴリズムに関しては、境界要素法および有限差分法では一般的なアルゴリズムが採用可能であるが、有限要素法の場合は、剛性マトリックスはその非零成分のみを一次元配列に格納し、連立方程式の解法として ICCG 法等の反復解法を採用する必要がある。

以上、計算上の制約条件から解析法の適応性を考察したが、次に、不均一性の観点から解析法の適応性を考えてみる。有限要素法や有限差分法では、要素ごとに物性値や構成式を与えることが可能であることから、地層のような領域ごとの物性の相違を表現することは比較的容易である。しかし、断層のような不連続面の場合は、その傾斜や形状によっては特殊なモデル化が要求される。これに対し、境界要素法では、変位不連続要素を採用すれば、断層は傾斜・形状によらずそのモデル化が容易である。しかし、地層のような領域ごとの物性の相違を表現する場合には、多領域型への拡張が必要となり、これに伴って計算容量が大幅に増大する。したがって、不均一性のモデル化は今後の検討課題であるが、現時点では、問題に応じて解析法が選択できるように、複数の方法についてそれらの適応性を検討することが肝要であると思われる。

2)モデル作成ツール

数値解析としては 3 次元解析が不可欠であるが、周知のように、3 次元解析

ではモデル作成作業が極めて繁雑である。そこで、3次元解析のための汎用的なモデル作成ツールが種々開発されてきているが、問題が限定されている場合には汎用ツールより専用ツールが便利である（金子他，1998）。そこで、このための専用ツールとして、上記の自然地形の幾何形状を考慮した簡単なモデル作成ツールの開発を試みている。とくに、本解析では地形を表現する必要があるが、地図上から標高値を読み取りこれらを入力するためには、極めて膨大な作業が必要となる。しかし、近年は比較的精度の高い数値地図が容易に入手できることから、これら数値地図を利用したモデル作成ツールを開発することとした。以下では、図 3.9 に示す地域を例にとり、開発中のモデル作成ツールの概要を示す。なお、境界要素法の場合は、地表面形状のみのモデル化であるため、後述するデータ補間後の標高データをそのまま解析モデルとして用いることができる。そこで、以下では、地形を考慮した有限要素モデルおよび有限差分モデルの作成法について説明する。

①数値標高データ

数値標高データとしては、日本全国をカバーし、かつ、最も小縮尺なものである国土地理院発行の 50m メッシュの数値標高データを用いる。なお、国土地理院の数値標高データは CD で人手でき、CD には領域ごとに分割した数値標高データのファイルが複数記録されている。例えば、図 3.9 に示す地域について、数値標高データを 3次元表現すると図 3.10 のようになる。なお、解析作業の簡便性から、対象地域の座標（緯度・経度）から必要な領域のデータファイルを検索する機能も必要となると思われる。

②標高データの補間

上記の数値標高データは 50m 間隔で与えられているが、解析ではより詳細な要素分割が必要となる場合が想定される。そこで、50m メッシュの数値標高データをスプライン補間し、任意寸法メッシュの数値標高データを作成することとした。特に、スプライン補間関数としては B スプラインを採用した。また、2次元スプラインと 1次元スプラインが考えられるが、両者の結果は大差ないことから、計算の容易な 1次元スプラインを採用することとした。すなわち、まず、緯度もしくは経度方向について 1次元スプライン補間を行い、その後、残る方向について再び 1次元スプライン補間を行う。図 3.11 中のある測線に

ついて1次元スプライン補間を行うと図 3.12 のようである。

③ 3次元有限要素モデルの作成

補間された標高データから3次元離散モデルを作成する。とくに、有限要素モデルでは、6面体要素を採用し、節点が格子状に配置されるようにした。この場合には、有限要素モデルと有限差分モデルは互いに互換性を有することになる。そこで、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。一例として、25mメッシュの標高データから作成した3次元有限要素モデルを図 3.12 に示す。なお、地質的不均一性のモデル化は今後の課題であるが、地質が層構造をなす場合には、それぞれの地層境界面に節点が配置されるように節点座標を移動する方法や、地層境界面を上記の地表面と同等に取り扱い、地層ごとに段階的(階層的)にモデルを作成する方法などが考えられる。

④ 3次元境界要素モデル

地表面を仮想応力(Fictitious Stress)要素で、不連続面(実際には石灰岩と輝緑凝灰岩とその地層境界)を変位くい違い(Displacement Discontinuity Method)要素で表現した3次元境界要素モデルの一例(Mizuta et al. 1999)を図 3.13 に示す。

⑤ 3次元有限差分モデル

現在、3次元有限差分法解析コードとしてはITASCA社製の3D FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)が広く使われている。この解析コードの特徴としては、ひずみ成分だけでなく回転成分が考慮されていること、大変形を取り扱うことができること、陽解法による計算を行うので大容量のモデル化に対応できることなどである。3D FLACモデルの一例(Manual: FLAC^{3D} Version 2.0 Volume III: Verification Problems and Example Applications)を図 3.14 に示す。

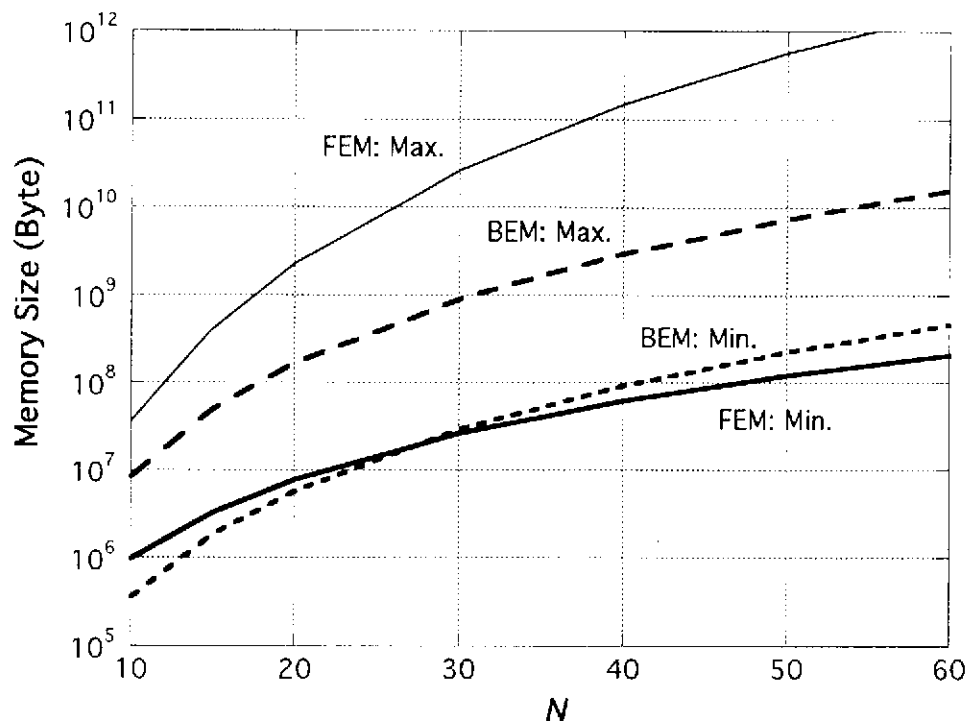


図 3.8 分割数 N と記憶容量との関係 (有限要素法と境界要素法との比較)

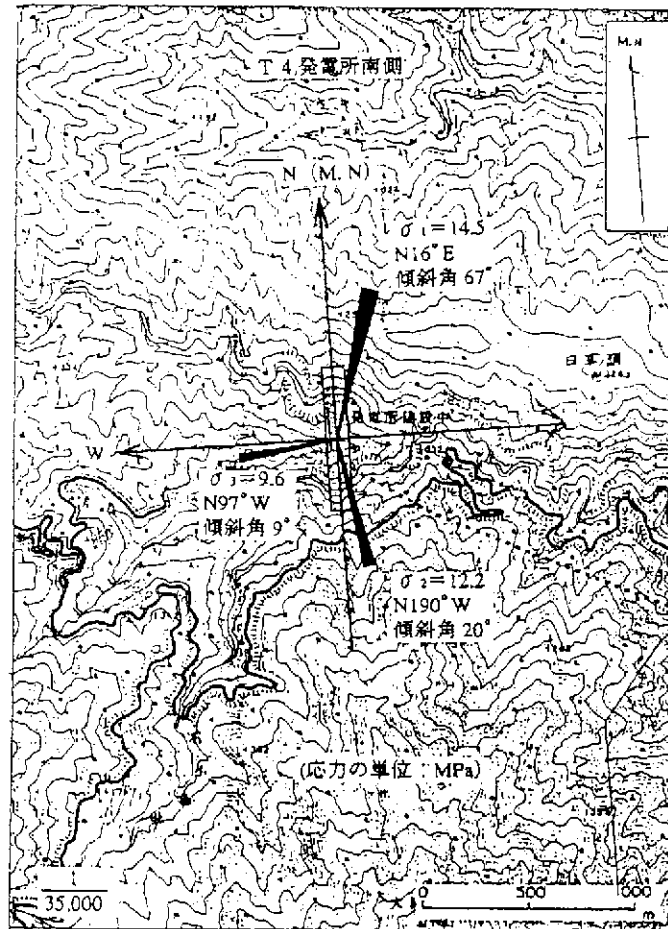


図 3.9 モデル作成対象地域の平面図

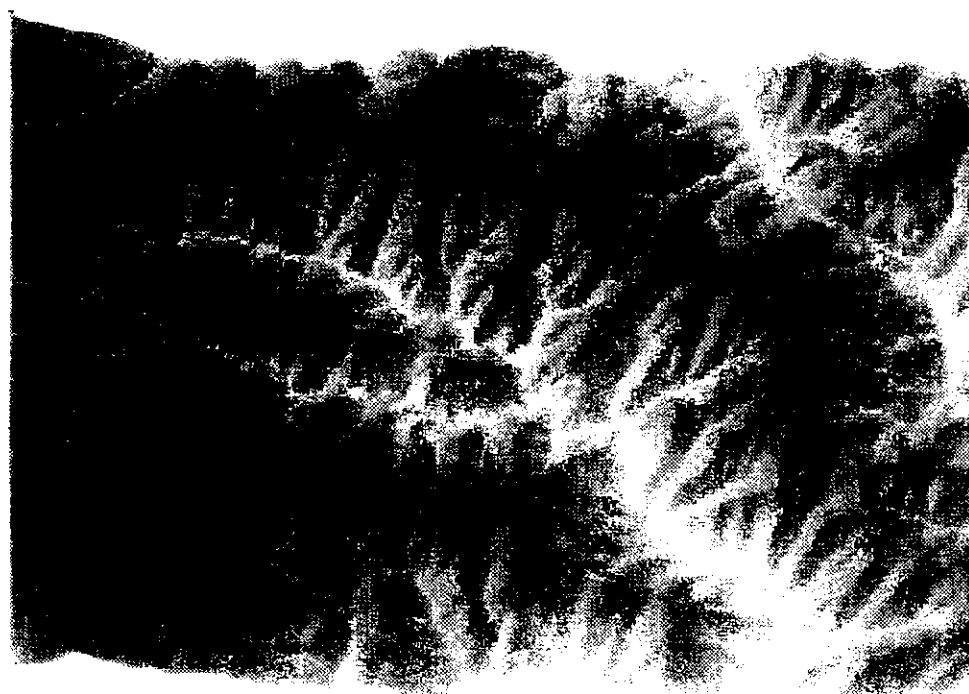
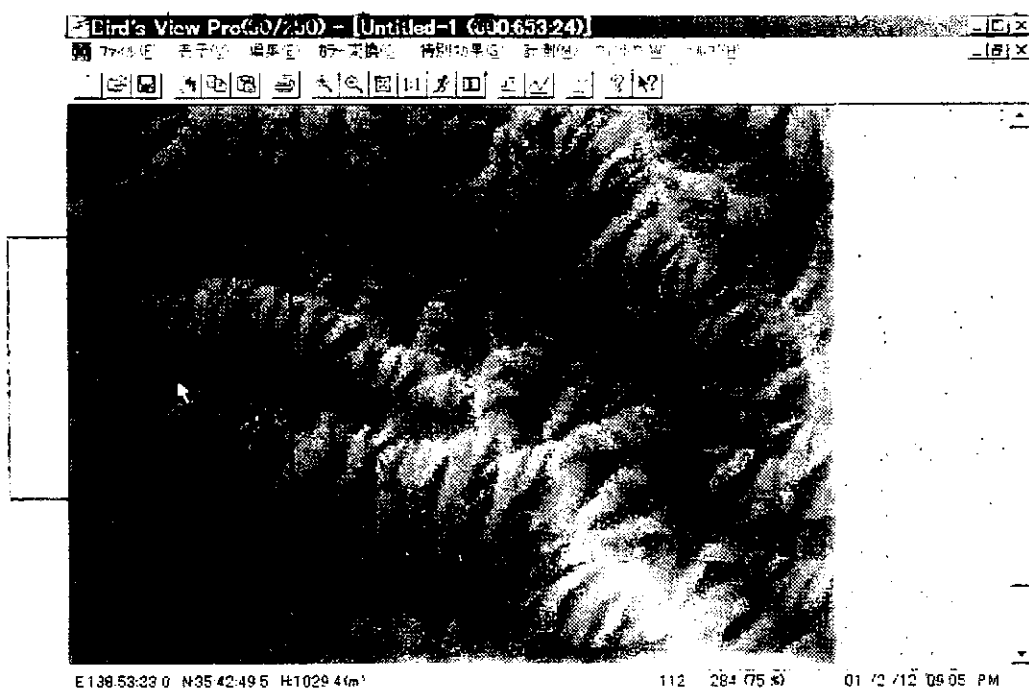


図 3.10 数値地形データの 3次元表現

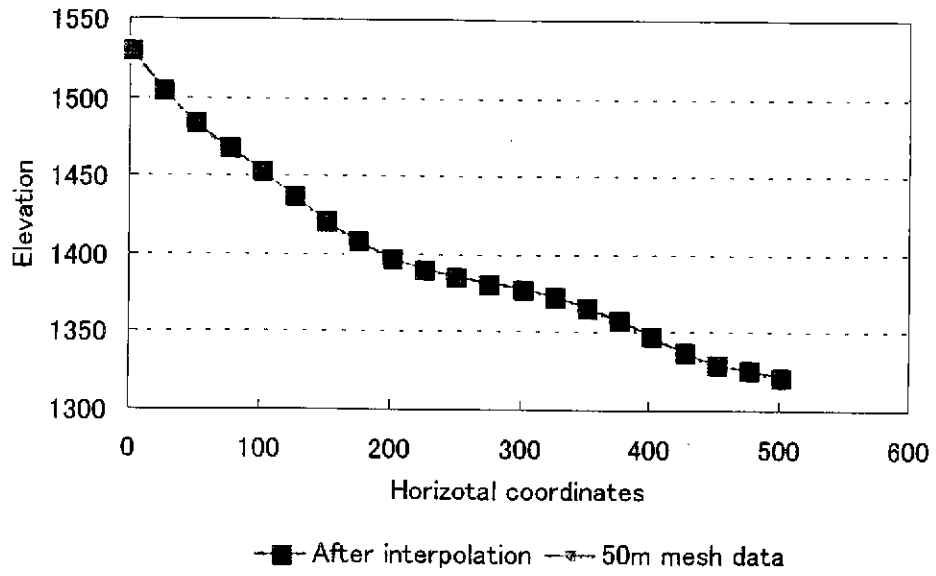


図 3.11 標高のスプライン補間

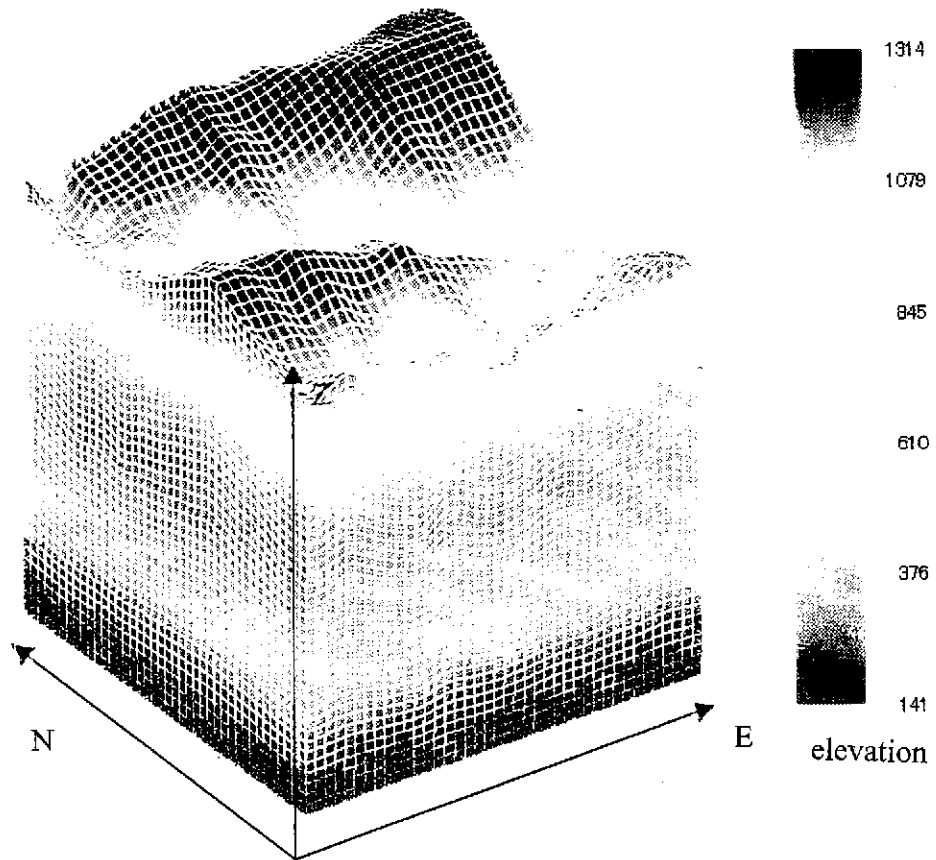


図 3.12 自動作成された有限要素モデル

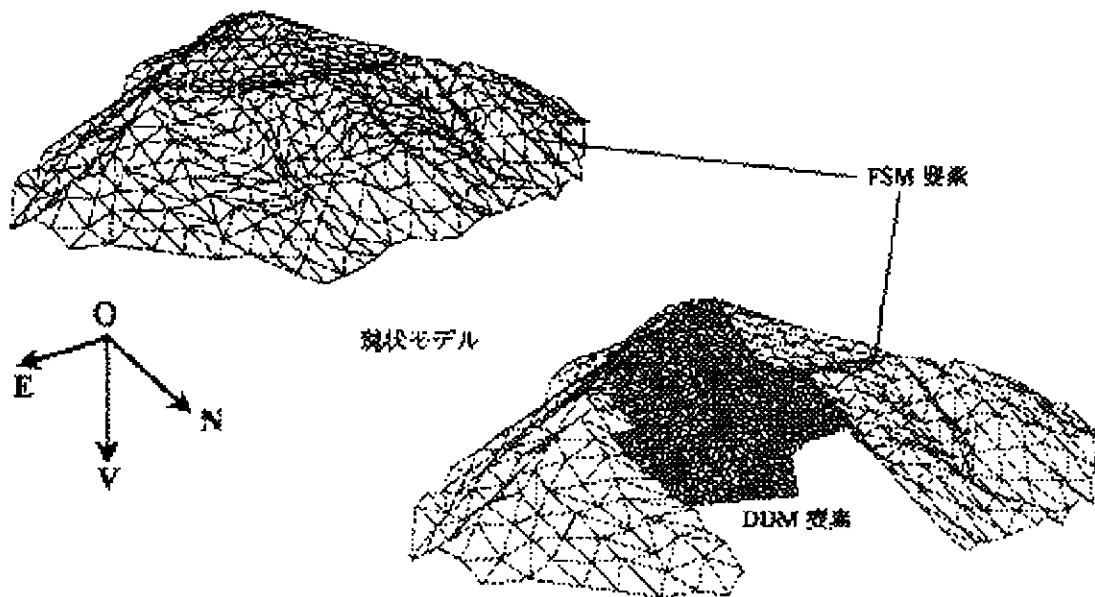
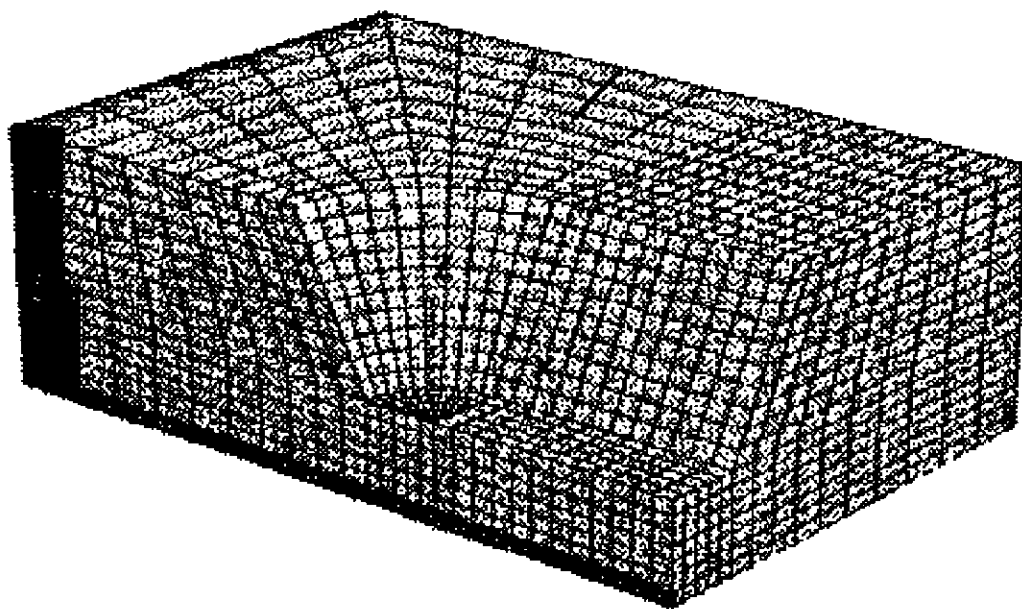


図 3.13 表面と不連続面（地層境界）を境界面とする境界要素モデル



"Bathtub" model to evaluate slope curvature

図 3.14 3D FLACモデルの一例

3.4 解析用データセットの構築

初期応力解析を実施するにあたり、研究対象となる領域のモデル化に必要な解析用データセットを構築した。データセットについては、各研究対象領域（東濃鉱山、正馬様用地、釜石鉱山）ごとに以下の内容で構成されている。

- ・ 地表面データ・地質情報データ
- ・ 岩石物性データ
- ・ 応力測定位置データ
- ・ 応力測定結果

3.4.1 東濃鉱山

1) 概要

核燃料サイクル開発機構東濃地科学センターの所有する東濃鉱山（岐阜県土岐市）は標高約 300m 付近の丘陵地に位置する。東濃鉱山周辺の地質は土岐花崗岩を基盤として、その上に瑞浪層群（明世累層、土岐夾炭累層）と呼ばれる砂質泥岩・砂岩、瀬戸層群と呼ばれる未固結堆積層が約 150m 程度堆積した構造となっている。また、同領域内には、走向がほぼ E-W、傾斜が約 60°S の月吉断層（逆断層）が存在している。

2) 地表面データ・地質情報データ

地表面データに関しては、東濃地科学センターで実施している広域地下水流動研究で作成した 3次元地質構造モデルの中に、国土地理院の発行する国土数値情報にもとづいた、20m 間隔の標高データがあるため、これをそのまま本研究用のデータセットとした。

地質情報データに関しても、上記の 3次元地質構造モデルの中にある、地層境界、断層のデータを本研究用のデータセットとした。また、東濃鉱山に関しては現在東濃地科学センターにて 3次元地質データを作成中であり、今後これを地質情報データとして利用可能である。

3) 岩石物性データ

第 2 立坑の掘削、北延 NATM 坑道の掘削時に調査された岩石物性をデータセ

ットとして収録した。

4) 応力測定位置データ

東濃鉱山においては、地表から掘削した 5 本の試錐孔にて応力を測定した。この応力測定位置をデータセットとして収録した。

5) 応力測定結果

上記位置で測定された応力測定結果をデータセットとして収録した。

3.4.2 正馬様用地

1) 概要

核燃料サイクル開発機構東濃地科学センターの所有する正馬様用地（岐阜県瑞浪市）は標高約 200m 付近の谷部に位置する。正馬様用地は東濃鉱山の南東約 1.5km に位置しており、その周辺の地質は東濃鉱山周辺と同様に土岐花崗岩を基盤として、その上に瑞浪層群（明世累層、土岐夾炭累層）と呼ばれる砂質泥岩・砂岩層が 50～150m 程度堆積した構造となっている。また、用地内地下には丹吉断層が存在している。

2) 地表面データ・地質情報データ

地表面データに関しては、東濃地科学センターで実施している広域地下水流動研究で作成した 3 次元地質構造モデルの中に、国土地理院の発行する国土数値情報にもとづいた、20m 間隔の標高データがあるため、これをそのまま本研究用のデータセットとした。

地質情報データに関しても、上記の 3 次元地質構造モデルの中にある、地層境界、断層のデータを本研究用のデータセットとした。また、東濃地科学センターにて製作した正馬様用地における土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデルについてもデータセットとした。

3) 岩石物性データ

各試錐孔の掘削時に調査された岩石物性および、正馬様用地における土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデルにもとづいた物性をデータセットとして収録し

た。

4) 応力測定位置データ

正馬様用地においては、地表から掘削した3本の試錐孔にて応力を測定した。この応力測定位置をデータセットとして収録した。

5) 応力測定結果

上記位置で測定された応力測定結果をデータセットとして収録した。

3.4.3 釜石鉱山

1) 概要

動力炉・核燃料開発事業団が1988年から1997年まで実施した釜石原位置試験研究場は、釜石鉱山（岩手県釜石市）の550mレベル坑道（標高550m）および250mレベル坑道（標高250m）に位置する。鉱山周辺の地質は、栗橋花崗閃緑岩と呼ばれる北上山地に分布する花崗岩帯の一部で構成されている。

2) 地表面データ・地質情報データ

釜石鉱山においては、東濃鉱山や正馬様用地で作成しているような、地質情報データはないため、既存の地質図などを参考にして新たに作成する必要がある。

地表面データについても、新たに国土地理院の発行する国土数値情報を入手する必要がある。

3) 岩石物性データ

550mレベル、250mレベル坑道において調査した岩石物性データをデータセットとして収録した。

4) 応力測定位置データ

550mレベル、250mレベル坑道から掘削した試錐孔にて応力測定を実施した。この応力測定位置（試錐孔孔口座標）をデータセットとして収録した。

5) 応力測定結果

上記位置で測定された応力測定結果をデータセットとして収録した。

以上の東濃鉾山，正馬様用地，釜石鉾山のデータは，その一覧を巻末に示す。

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する手法の開発を目的として今年度から開始したものである。今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。解析手法の選定に当たっては、3次元応力場同定のための基礎理論について検討した。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。解析ツールは3次元応力解析ツールと3次元モデル作成ツールから構成されており、ともに試作段階であるが、平成14年度前半には完成する予定である。

5. 次年度の予定

研究の2年目として主に具体的な岩盤のモデル化及び解析作業を行う。また、研究の進捗に応じ全体研究計画を適宜見直すこととする。具体的には、平成14年度は、東濃地区および正馬様地区を対象として、広域応力を逆解析し、当地域の3次元応力場を推定する予定である。さらに、当地域の3次元応力場に及ぼす地質構造の影響を分析するとともに、地質構造を考慮した広域応力・3次元応力場の同定手法について検討する予定である。

6. 参考文献

- 菅原勝彦(1998)：岩盤応力測定に関する研究の動向，資源と素材 Vol.114, pp.834-844
- 宇野晴彦，石田毅，水田義明(2001)：岩盤モデル及び解析手法の歴史的な変遷と特徴，資源と素材（投稿中）
- 松木浩二(2000)：ASR 法の標準法，資源素材学会秋季大会講演予稿集 A2-2, pp.63~66
- 及川寧巳，山口勉(2000)：DSCA の標準法，資源素材学会秋季大会講演予稿集 A2-3, pp.67~70
- 山本清彦(2000)：DRA の標準法，資源素材学会秋季大会講演予稿集 A2-4, pp.71~76
- 瀬戸政宏，E.Villaescusa，歌川学，相馬宣和(2000)：AE 法の標準法 - AE 法での試験手順とケーススタディー - ，資源素材学会秋季大会講演予稿集 A2-5, pp.77~80
- 水田義明，城戸利夫，加藤幸夫，加藤春實，新宮和喜，掘之口賢二，藤井伸一郎，木村信彦(1997)：局所岩盤応力測定結果からの広域応力場の決定，資源・素材 97, AIV-10, pp.142-145
- Sulistianto, B., Kido, T. and Mizuta, Y.(1998) : Determination of far Field Stress from the Point Stress measurement, Shigen to Sozai, 114, 7, pp.461-466
- 水田義明，大西康智，土井隆史(1999)：地殻応力と地層境界を考慮に入れた境界要素法による残壁安定性解析，資源・素材 99, A2-11, pp.60-63
- Cornet, F.H., and Valette, B.(1984):In Situ Stress Determination From Hydraulic Injection Test Data, Journal of Geophysical Research, Vol.89, No.B13, pp.11527-11537
- 金子 勝比古,中村直昭,尾原祐三,伊藤耕助,米田哲朗(2000)：鳥形山地域の広域的応力状態の推定，資源と素材, 116 巻, 7 号, pp.572-576
- 菅原勝彦，張鉉國，黃醒春(1995)：等方性球殻理論による初期応力測定値の分析と考察，資源と素材, 111, pp.913-918
- 菅原勝彦，張鉉國，黃醒春(1995)：直交異方性球殻理論による初期応力解析，資源と素材, 111, pp.1001-1006 .

金子勝比占, 加藤昌治, 中村直昭(1998) : 露天採掘斜面の三次元応力解析法, 石灰石, 292号, pp.15-21

Mizuta, Y., Sulistianto, B., and Ohnishi, Y.(1999):Stability evaluation taking strata boundary and tectonic stress into consideration, Proc. of 9th Int. Congress on Rock Mech.(Paris), Vol.2, pp.1163-1166

データセット内容

I. 東濃鉦山

(1) 地表面データ (一例)

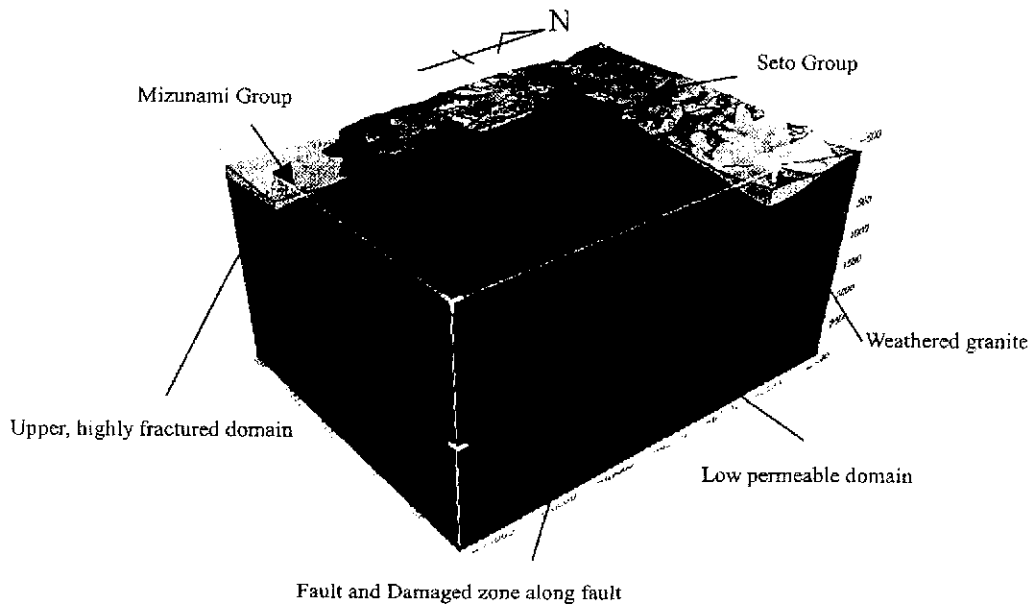
地表面データは、国土地理院の発行する国土数値情報にもとづいた、20m 間隔の標高データにより構成されている。データの一部を表 I-1 に示す。平面座標については、北緯 36°00'00"、東経 137°10'00"を原点とする国家Ⅶ系座標で表示されている。

表 I-1 データの一部

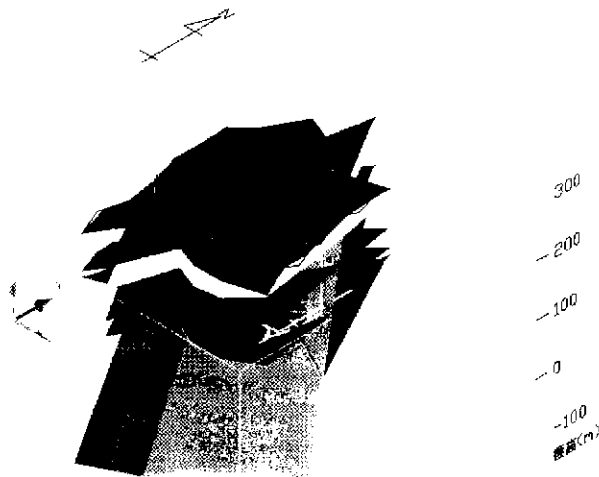
X (E-W)	Y (N-S)	Z (Elevation)
0	-62860.839	200
20	-62860.839	202
40	-62860.839	206
60	-62860.839	209
80	-62860.839	212
100	-62860.839	214
120	-62860.839	217
140	-62860.839	220
160	-62860.839	223
180	-62860.839	227
200	-62860.839	231
220	-62860.839	234
240	-62860.839	237
260	-62860.839	239
280	-62860.839	239
300	-62860.839	239
320	-62860.839	239
340	-62860.839	241
360	-62860.839	246
380	-62860.839	252
400	-62860.839	254
420	-62860.839	253
440	-62860.839	250
460	-62860.839	247
480	-62860.839	245
500	-62860.839	244
520	-62860.839	242
540	-62860.839	240
560	-62860.839	239
580	-62860.839	239
600	-62860.839	239
.	.	.
.	.	.
.	.	.

(2) 地質情報データ (一例)

参考となる3次元地質構造モデルの一例および現在東濃地科学センターにて製作中の東濃鉦山3次元モデルの一例を図I-1に示す。



(a)



(b)

図I-1 地質情報データの一例

(a) 広域地下水流動研究で作成した3次元地質構造モデルの一例

(b) 東濃鉦山3次元地質構造モデルの一例

(3) 岩石物性データ

東濃鉱山第2立坑の掘削時に調査された岩盤物性データを表I-2に示す。なお深度150m以深の花崗岩の岩盤物性データは取得されていないため、これについては正馬様用地の花崗岩データを参照することとする。

表 I - 2 東濃鉱山岩盤物性データ

地層名	岩石名	試験深度 (m)	単位体積 重量 (kN/m ³)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	一軸圧縮 強度 (MPa)	圧裂 引張強度 (MPa)	粘着力 (MPa)	内部 摩擦角 (°)
明世累層 (第2立坑)	砂岩	22~25	20.0	3.07	0.31	7.52	-	2.05	16.6
	泥岩	41~44	16.8	2.16	0.29	5.56	-	2.25	16.7
土岐 夾炭累層 (第2立坑)	凝灰質砂岩	68~73	18.3	0.54	0.37	3.03	-	0.75	31.5
	含礫砂岩	90~96	18.4	2.07	0.27	6.43	-	1.94	24.0
	砂岩	108~111	19.2	3.53	0.33	8.42	-	0.68	39.4
	砂岩	132~137	19.9	1.50	0.30	7.42	-	4.08	12.9

(4) 応力測定位置データ

応力測定位置データを表I-3に示す。なお、平面座標は国家Ⅶ系表示となっている。また応力測定位置（試錐孔）の概略位置図を図I-2に示す。

表 I - 3 応力測定位置（試錐孔）データ

試錐孔	平面直角座標系Ⅶ系		
	X	Y	Z (Elevation)
TM-1	-68252.0	4816.2	288
TM-2	-68274.4	4625.4	255
98SE-01	-68318.5	4742.5	264
99SE-02	-68211.9	4759.6	285
00SE-03	-68230.3	4759.6	285

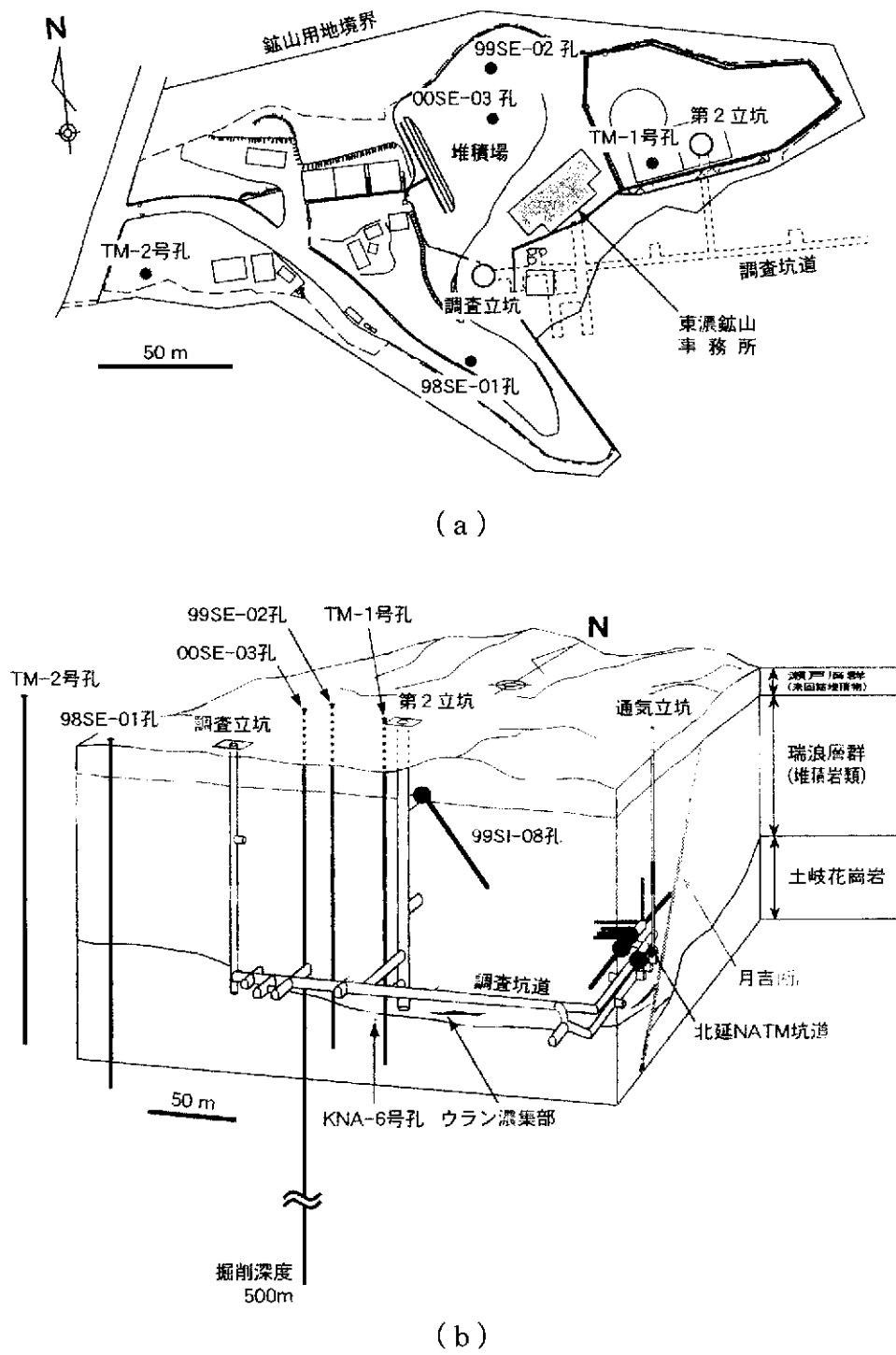


図 I - 2 応力測定位置 (試錐孔) 概略位置図
 (a) 平面図 (b) 鳥瞰図

(5) 応力測定結果

応力測定結果を表 I - 4、I - 5 に示す。

表 I - 4 応力測定結果 (水圧破碎試験)

試錐孔	試錐孔地表からの深度 (m)	水平面内最小主応力 Sh (MPa)	水平面内最大主応力 (MPa)		水平面内最大主応力方位 (°)	備考	
			SHmin (MPa) 間隙水圧考慮	SHmax (MPa)			
TM-1	47.0	1.22	2.24	2.24	-82.20		
	62.5	2.06	3.82	3.94	-87.10		
	98.0	1.67	2.74	3.21	-19.80		
	100.7	2.34	4.26	4.76	19.70		
	146.5	-	-	-	-		
	149.4	2.62	4.38	5.35	21.30		
	192.2	5.48	12.47	13.86	10.90	花崗岩	
	194.3	3.06	5.36	6.77	2.20	花崗岩	
TM-2	32.0	0.90	1.00	1.10	-38.60	細粒砂岩	
	40.0	1.50	2.20	2.40	42.10	細粒砂岩	
	73.0	1.80	2.50	3.00	-19.10	中粒砂岩	
	80.0	1.90	2.60	3.20	34.50	中粒砂岩	
	84.5	2.50	4.00	4.70	-27.60	礫岩	
	95.4	2.00	2.00	2.80	-16.30	風化花崗岩	
	171.0	4.70	9.30	10.80	-22.90	花崗岩	
	179.1	5.40	10.20	11.80	-24.30	花崗岩	
	182.0	4.40	8.10	9.70	-81.80	花崗岩	
185.0	5.10	10.10	11.70	-34.30	花崗岩		
98SE-01	52.3	1.00	1.40	1.40	45.20	粗粒砂岩	
	64.5	1.70	3.30	3.30	65.20	中粒砂岩	
	77.0	1.40	2.40	2.50	35.40	亜炭	
	102.0	1.90	3.20	3.60	26.60	礫岩	
	122.0	6.20	12.50	13.10	-89.60	花崗岩	
	141.0	7.50	11.40	12.10	-72.80	花崗岩	
	157.8	6.60	11.40	12.30	-46.00	花崗岩	
	170.3	3.40	4.80	5.80	-42.60	花崗岩	
	184.2	10.10	20.20	21.40	-51.30	花崗岩	
192.5	4.50	8.30	9.60	-61.00	花崗岩		
99SE-02	39.0	1.00	2.20	2.20	32.30	凝灰質砂岩	明世累層
	44.0	1.50	1.90	1.90	-36.70	細粒砂岩	明世累層
	75.0	1.80	3.80	4.10	-13.80	中粒砂岩	明世累層
	79.0	1.70	3.30	3.60	-20.40	中粒砂岩	明世累層
	87.0	1.40	1.80	2.20	-38.80	中粒砂岩	土岐夾炭類層
	105.0	2.10	3.70	4.20	22.30	中粒砂岩	土岐夾炭類層
	127.0	2.10	4.00	4.80	-28.10	粗粒砂岩	土岐夾炭類層
	162.0	3.60	5.30	6.40	32.50	花崗岩	
	188.5	3.20	5.40	6.80	-50.50	花崗岩	
	199.0	3.90	6.30	7.80	-18.90	花崗岩	
205.0	4.50	6.50	8.00	-58.50	花崗岩		
00SE-03	233.6	7.26	12.16	14.00	-46.69	花崗岩	
	235.5	6.97	11.85	13.70	-71.46	花崗岩	
	238.5	8.45	15.78	17.66	-70.02	花崗岩	
	241.7	8.71	-	-	-	花崗岩	
	249.9	5.80	9.89	11.88	-25.78	花崗岩	
	251.8	5.71	9.47	11.49	-14.32	花崗岩	
	253.0	5.70	9.42	11.44	-23.27	花崗岩	
	258.9	5.97	9.66	11.74	-39.95	花崗岩	
	260.9	5.55	8.85	10.95	-27.12	花崗岩	
263.9	5.95	9.45	11.58	-23.14	花崗岩		

表 I - 5 応力測定結果 (A E 法)

試錐孔	試錐孔地表からの深度 (m)	鉛直応力 (MPa)	水平方向 最大主応力 (MPa)	水平方向 最小主応力 (MPa)	水平方向 最大主応力 方位(°) 磁北から時計回り: +	備考
TM-1	154	2.81				凝灰質砂岩
TM-2	70	1.18				凝灰質砂岩
	170	3.79				花崗岩
98SE-01	30	0.61				凝灰質砂岩
	60	1.23				凝灰質砂岩
	90	—*				凝灰質砂岩
	90	1.73				花崗岩レキ
	140	3.05				花崗岩
	160	—*				花崗岩
	180	4.17				花崗岩
200	3.75				花崗岩	
99SE-02	40	0.52	0.66	0.39	-5.20	凝灰質砂岩
	78	1.14	1.66	1.23	-37.50	凝灰質砂岩
	189	—*	3.97	2.92	-23.20	花崗岩
	200	4.90	4.75	3.14	-39.30	花崗岩
	207	5.62	5.07	3.13	-42.60	花崗岩

II. 正馬様用地

(1) 地表面データ (一例)

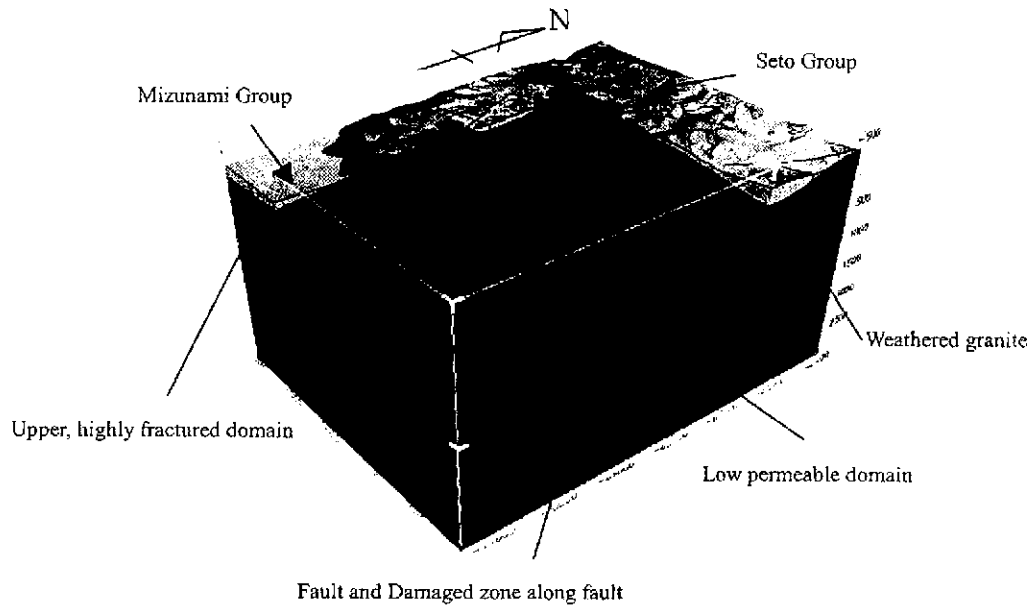
地表面データは、国土地理院の発行する国土数値情報にもとづいた、20m 間隔の標高データにより構成されている。データの一例を表 I - 1 に示す。平面座標については、北緯 36°00'00"、東経 137°10'00"を原点とする国家Ⅶ系座標で表示されている。

表 II - 1 データの一例

X (E-W)	Y (N-S)	Z (Elevation)
0	-62860.839	200
20	-62860.839	202
40	-62860.839	206
60	-62860.839	209
80	-62860.839	212
100	-62860.839	214
120	-62860.839	217
140	-62860.839	220
160	-62860.839	223
180	-62860.839	227
200	-62860.839	231
220	-62860.839	234
240	-62860.839	237
260	-62860.839	239
280	-62860.839	239
300	-62860.839	239
320	-62860.839	239
340	-62860.839	241
360	-62860.839	246
380	-62860.839	252
400	-62860.839	254
420	-62860.839	253
440	-62860.839	250
460	-62860.839	247
480	-62860.839	245
500	-62860.839	244
520	-62860.839	242
540	-62860.839	240
560	-62860.839	239
580	-62860.839	239
600	-62860.839	239
.	.	.
.	.	.
.	.	.

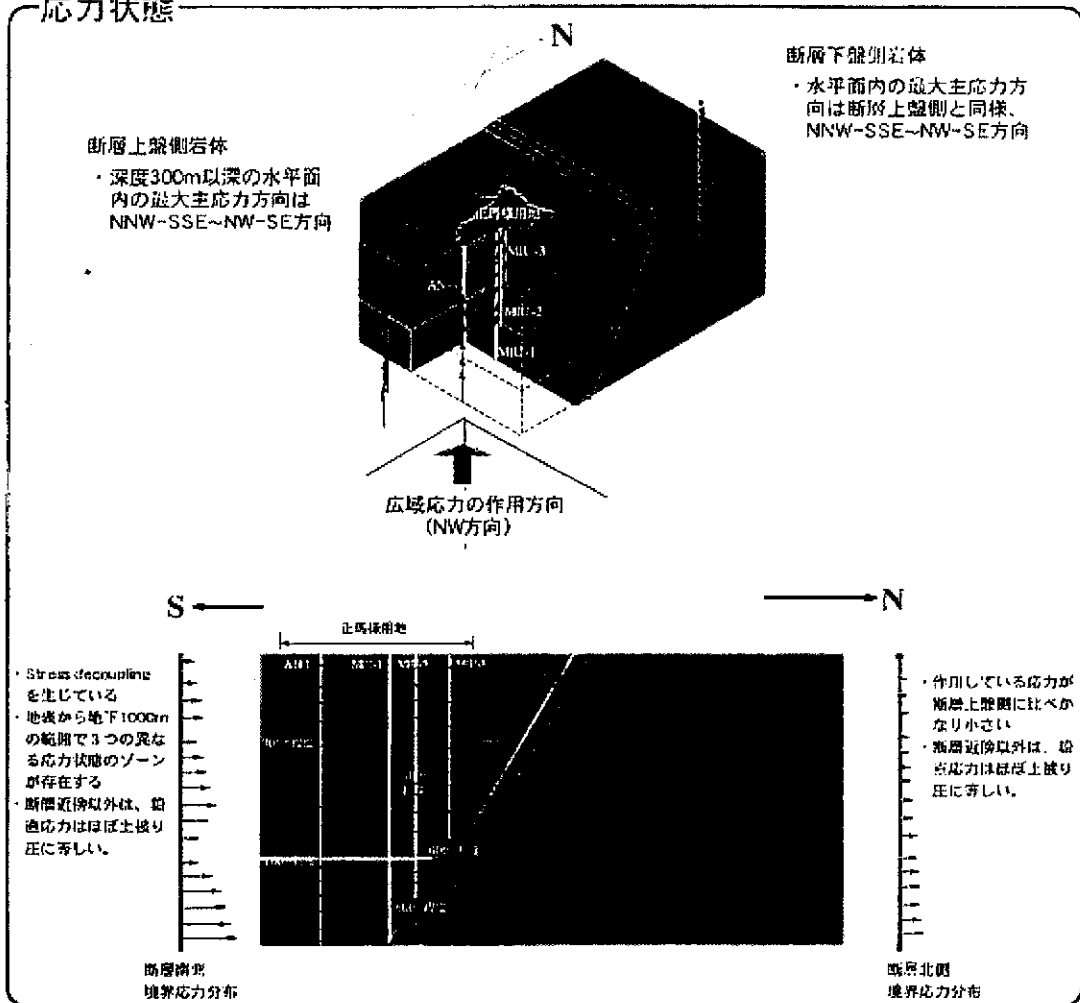
(2) 地質情報データ (一例)

参考となる3次元地質構造モデルの一例を図Ⅱ-1に、また、正馬様用地における土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデルを図Ⅱ-2に示す。



図Ⅱ-1 地質情報データの一例
広域地下水流動研究で作成した3次元地質構造モデルの一例

応力状態



岩盤物性

	月吉断層上盤側岩体			月吉断層下盤側岩体	月吉断層周辺部
	ゾーン1	ゾーン2	ゾーン3	ゾーン4	断層上盤側割れ目帯 断層下盤側割れ目帯
岩石マトリックス部の力学特性	・剛性 小 ・力学的異方性 不明	・剛性 大 ・力学的異方性 大	・剛性 小 ・力学的異方性 小	・剛性 小 ・力学的異方性 水平面内の異方性は非常に小さい	・剛性 最小 ・力学的異方性 大
割れ目の分布特性	・割れ目が多い ・低角~水平傾斜の割れ目が相対的に卓越	・割れ目が少ないゾーン	・割れ目が多いゾーン ・高傾斜の割れ目が卓越	・上盤側の岩体に比べ、極端に割れ目が少ない	・割れ目数は相対的に多い ・上盤側に比べ、断層下盤側の割れ目帯の方が相対的に割れ目が多い
断層帯岩盤の力学特性	・剛性 ゾーン2に比べ小さい ・局所的な変化が大きい	・剛性 最も大きい ・局所的な変化は小さい	・剛性 ゾーン2に比べ小さい ・局所的な変化は大きい	・剛性 上盤側岩体とほぼ同等 ・割れ目密度帯や断層帯帯域以外の領域では、局所的な変化は最小	・剛性 最小値で他の領域の60%程度

図II-2 地質情報データの一例

正馬様用地における土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデル

(3) 岩石物性データ

各試錐孔の掘削時に調査された岩石物性および、正馬様用地における土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデルにもとづいた物性をデータセットとして収録した。

表Ⅱ－２ 正馬様用地岩盤物性データ（試錐孔ごと）

地層名	試錐孔	試験深度 (m)	単位体積 重量 (kN/m ³)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	一軸圧縮 強度 (MPa)	圧裂 引張強度 (MPa)	粘着力 (MPa)	内部 摩擦角 (°)
土岐 花崗岩	AN-1	100~1000	25.5	47.28	0.34	197.16	8.48	-	-
	MIU-1	100~1000	25.7	55.95	0.32	180.11	7.18	39.04	52.6
	MIU-2	100~1000	25.6	49.97	0.37	165.92	7.92	22.79	57.7
	MIU-3	100~1000	25.7	47.15	0.36	131.21	6.25	35.07	53.1
		平均値		25.6	50.09	0.35	168.60	7.46	32.30

表Ⅱ－３ 正馬様用地岩盤物性データ（岩盤力学的概念モデル等に基づく）

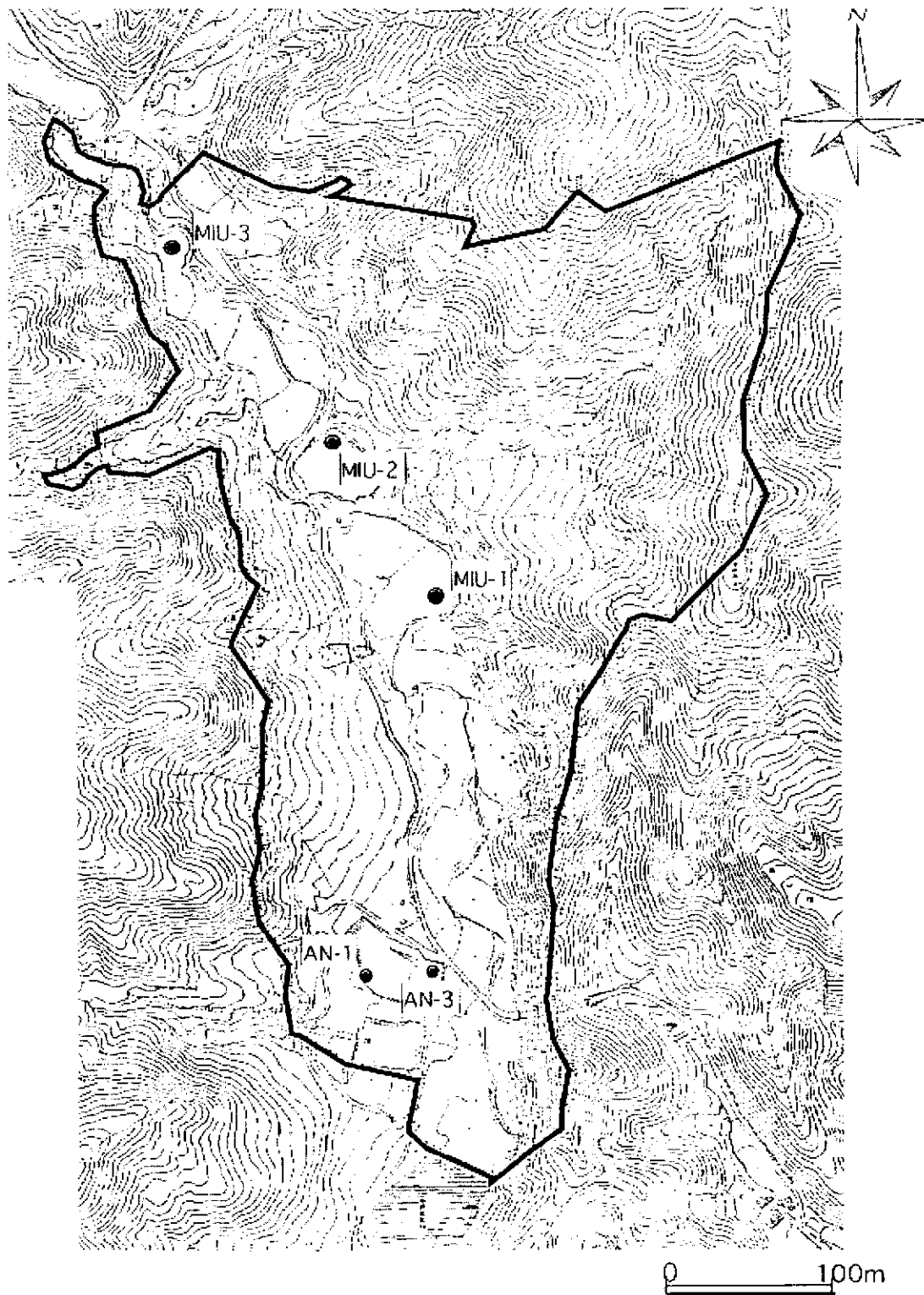
地層名	ゾーン	単位体積 重量 (kN/m ³)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
土岐 花崗岩	ゾーン1	2.6	49.9	0.36
	ゾーン2	2.63	49.4	0.34
	ゾーン3	2.66	47.4	0.34
	ゾーン4	2.62	48.7	0.39
	断層上盤割れ目帯	2.7	3.5	0.36
	断層下盤割れ目帯	2.7	3.5	0.36
	断層中心	2.7	1.5	0.36

(4) 応力測定位置データ

応力測定位置データを表Ⅱ－４に示す。なお、平面座標は国家Ⅶ系表示となっている。また応力測定位置（試錐孔）の概略位置図を図Ⅱ－３に示す。

表Ⅱ－４ 応力測定位置（試錐孔）データ

試錐孔	平面直角座標系Ⅶ系		
	X	Y	Z (Elevation)
AN-1	5454.7	-68877.3	216.376
MIU-1	5488.8	-68629.4	220.074
MIU-2	5433.3	-68552.4	223.755
MIU-3	5340.2	-68455.3	230.475



図II-3 応力測定位置（試錐孔）概略平面図

(5) 応力測定結果

応力測定結果を表Ⅱ-5、Ⅱ-6に示す。

表Ⅱ-5 応力測定結果（水圧破碎試験）

試錐孔	試錐孔地表からの深度 (m)	水平面内 最小主応力 Sh (MPa)	水平面内最大主応力		水平面内 最大主応力 方位(°)	備考
			SHmin (MPa) 間隙水圧考慮	SHmax (MPa)		
AN-1	49.0	2.90	5.10	5.40	0.40	
	199.0	6.80	14.10	15.90	3.80	
	249.0	9.10	20.30	22.50	10.70	
	309.0	3.80	4.80	7.60	-40.20	
	351.0	8.80	17.50	20.70	-26.80	
	404.0	10.40	19.20	23.00	-32.50	
	498.5	13.60	28.00	32.70	-55.90	
	564.0	14.10	29.70	35.00	-50.90	
	600.0	15.80	25.30	31.00	-39.90	
	651.0	16.10	29.20	35.40	-36.10	
	700.0	12.90	20.80	27.50	-41.20	
	790.0	15.70	22.80	30.40	-41.40	
	850.0	18.40	28.30	36.40	-45.40	
900.0	25.50	48.50	57.10	-53.30		
941.0	23.40	42.70	51.70	-27.50		
991.0	18.30	27.80	37.30	-71.30		
MIU-2	138.2	7.40	15.60	16.80	7.90	
	158.0	6.50	14.20	15.60	-10.00	
	187.3	6.90	15.40	17.10	-39.60	
	254.0	6.60	13.00	15.40	-33.00	
	294.7	4.20	5.80	8.60	-60.50	
	301.5	4.00	3.30	6.10	-57.50	
	356.4	9.60	16.90	20.30	-57.70	
	413.4	13.70	24.30	28.20	-4.50	
	452.0	12.70	25.20	29.50	-19.80	
	491.0	15.10	32.30	37.00	-54.30	
	555.0	11.70	19.80	25.10	-39.70	
	604.0	9.80	14.60	20.40	-44.10	
	651.0	15.40	25.80	32.10	-57.70	
	682.0	13.20	23.20	29.80	-68.90	
	698.5	13.50	23.90	30.60	-20.60	
733.7	14.00	24.40	31.50	-37.30		
761.3	12.50	20.20	27.50	-52.70		
811.3	16.20	26.50	34.30	-36.40		
837.7	15.30	27.30	35.40	-45.70		
878.1	15.50	27.30	35.80	-26.10		
MIU-3	122.0	5.30	11.40	12.60	-80.80	
	266.0	8.40	17.20	19.80	-13.80	
	338.0	10.50	20.60	23.90	-35.90	
	509.0	16.30	35.20	40.20	-30.90	
	589.0	12.10	21.90	27.70	-42.40	
	847.0	11.70	16.00	24.30	-17.70	
	858.0	8.80	9.30	17.70	-23.90	
	946.0	12.10	14.70	24.00	-42.00	
988.0	13.10	16.20	25.90	-28.90		

表Ⅱ-5 (a) 応力測定結果 (AE法、DRA法)

ボアホール 試験方法	ボアホール 深度 (m)	AE法による 鉛直応力 (MPa)	DRA法による 鉛直応力 (MPa)	(参考) 土かぶり圧 (MPa)	備考
MIU-1	196.0	5.09	8.06	5.02	・土かぶり圧 単位堆積重量25.6kN/m ³ として計算 ・DRA法による鉛直応力は 繰り返し載荷による平均値
	297.0	6.65	9.34	7.60	
	409.0	9.83	11.10	10.47	
	504.0	13.73	10.17	12.90	
	590.0	9.98	16.09	15.10	
	AE法 674.0	17.24	15.83	17.25	
	DRA法 799.0	23.04	13.99	20.45	
	896.0	13.55	11.01	22.94	
	932.0	26.28	12.27	23.86	
990.0	4.87	13.24	25.34		
MIU-2	106.88	3.49	2.79	2.74	・土かぶり圧 単位堆積重量25.6kN/m ³ として計算 ・DRA法による鉛直応力は 繰り返し載荷による平均値
	107.64	2.99	2.76	2.76	
	107.76	4.20	2.84	2.76	
	107.88	4.31	2.94	2.76	
	196.49	5.34	4.73	5.03	
	196.61	4.71	5.22	5.03	
	199.45	2.91	2.75	5.11	
	296.30		7.68	7.59	
	296.42		6.71	7.59	
	296.54	5.28	7.48	7.59	
	296.66	9.20	7.08	7.59	
	402.00		9.42	10.29	
	402.12	7.70	10.14	10.29	
	402.24		8.38	10.30	
	MIU-2 402.36	8.94	9.71	10.30	
	505.52	10.11	11.87	12.94	
	AE法 505.64		12.78	12.94	
	DRA法 505.76	7.75	14.41	12.95	
	505.88		13.30	12.95	
	603.00		14.46	15.44	
	603.12		15.94	15.44	
	603.23		14.11	15.44	
	698.34		17.67	17.88	
	698.46		19.73	17.88	
	698.58	19.77	19.91	17.88	
	800.59	24.60	20.26	20.50	
800.71	17.88	23.48	20.50		
801.27	34.69	19.30	20.51		
801.39		22.75	20.52		
963.29	24.89	24.07	24.66		
964.20	19.49	20.80	24.68		
964.77	24.89	24.75	24.70		
1002.20	24.31	19.19	25.66		
1005.75	22.70	22.02	25.75		
1011.37	35.57	22.26	25.89		

表Ⅱ-5 (b) 応力測定結果 (AE法、DRA法)

ポアホール 試験方法	ポアホール 深度 (m)	AE法による 鉛直応力 (MPa)	DRA法による 鉛直応力 (MPa)	(参考) 土かぶり圧 (MPa)	備考
MIU-3 AE法 DRA法	602.15	18.50	23.37	15.48	・土かぶり圧 単位堆積重量25.7kN/m ³ として計算 ・DRA法による鉛直応力は 繰り返し载荷による平均値
	602.29	19.10	20.97	15.48	
	626.00	24.70	19.20	16.09	
	626.12	22.30	20.67	16.09	
	661.62	21.00	20.97	17.00	
	661.88	23.30	18.93	17.01	
	697.54	12.50	12.50	17.93	
	698.45	13.70	13.70	17.95	
	754.45	26.90	22.50	19.39	
	754.67	32.60	21.75	19.40	
	799.00			20.53	
	799.12	22.70	17.07	20.54	
	850.70	20.50	16.20	21.86	
	850.82	23.10	23.33	21.87	
	905.43	27.70	25.93	23.27	
	905.55	23.00	24.90	23.27	
	949.00	24.30	31.70	24.39	
	949.12	21.00	20.60	24.39	
	1002.60	21.50	21.33	25.77	
1002.72	23.10	26.90	25.77		

Ⅲ. 釜石鉱山

(1) 岩石物性データ

550m レベル坑道、250m レベル坑道で調査された岩石物性をデータセットとして収録した。

表Ⅲ-1 釜石鉱山岩石物性データ

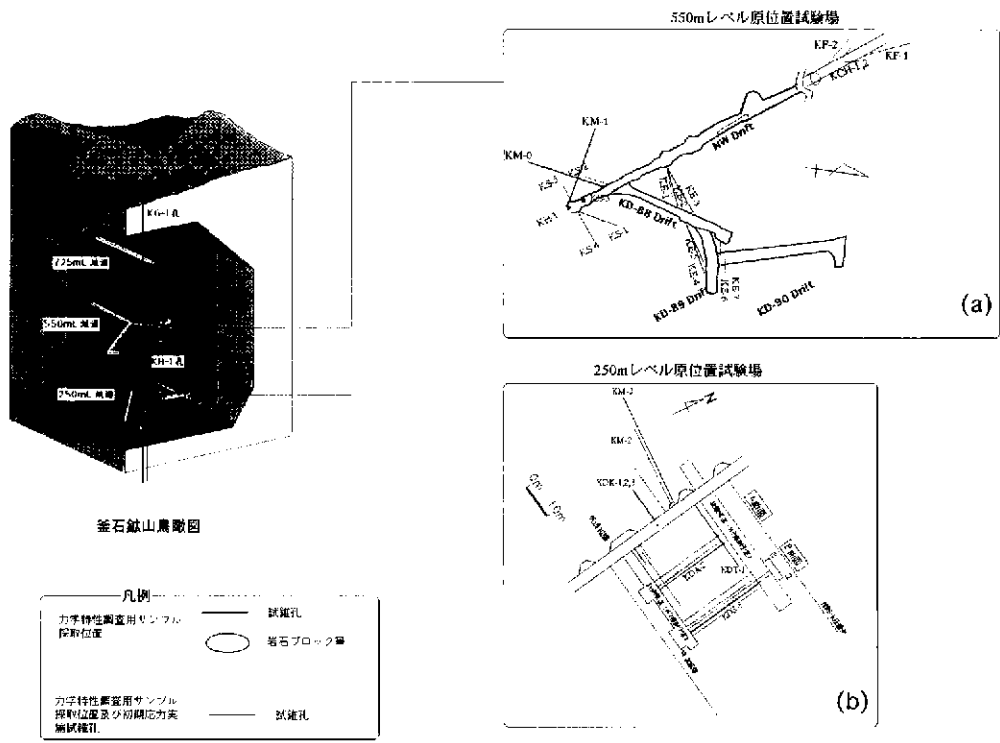
地層名	測定位置	単位体積重量 (kN/m ³)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	一軸圧縮強度 (MPa)	圧裂引張強度 (MPa)	粘着力 (MPa)	内部摩擦角 (°)
栗橋花崗閃緑岩	550mレベル坑道	26.8	57~71	0.25	151~189			
	250mレベル坑道	27.3	61~76	0.25	145~160			
	平均値	27.0	57.5	0.25	146.8	9.2	34.0	47.6

(2) 応力測定位置データ

応力測定位置データを表Ⅲ-2に示す。なお、平面座標は国家Ⅶ系表示となっている。また応力測定位置（試錐孔）の概略位置図を図Ⅲ-1に示す。

表Ⅲ-2 応力測定位置（試錐孔）データ

位置	試錐孔	平面直角座標系 X 系			掘削長 (m)	方向	傾斜角 (°)
		X	Y	Z (Elevation)			
550mレベル坑道	KM-0	72691.93	-75008.16	577.53	19.93	N93W	1.3
550mレベル坑道	KM-1	72684.51	-75001.51	577.13	21	N177E	1.3
250mレベル坑道	KM-2	72352	-75693.72	259.198	20	N87W	1



図III-1 応力測定位置（試錐孔）概略図

(3) 応力測定結果

応力測定結果を表Ⅲ-3、表3-4に示す。

表Ⅲ-3 応力測定結果 (550m レベル坑道)

試験方法	試錐孔	試錐孔孔口からの深度 (m)	最大主応力 σ_1 (MPa) 方位(°) 傾斜(°)	中間主応力 σ_2 (MPa) 方位(°) 傾斜(°)	最小主応力 σ_3 (MPa) 方位(°) 傾斜(°)	土かぶり(m) 土かぶり圧(MPa)
AE法	KM-2	10.95~12.53	16.61 152 66	8.85 55 2	4.51 2 24	14.58
	KM-2	15.35~16.46	18.39 287 57	12.87 56 22	12.56 156 23	17.15
	KM-2	20.48~21.71	26.34 102.0 44	19.79 349 22	11.15 240 38	19.67
	代表値*1	20.48~21.71	26.34 102.0 44	19.79 349 22	11.15 240 38	730 19.67
DRA/AE法	KM-2	13.72~14.45	23.8 56.1 39.8	18 190.6 39.8	2.8 39.8 24.8	17.67
	KM-2	16.98~17.49	21.4 131.9 66.9	16.7 230.3 3.2	7 321.1 23	19.28
	KM-2	18.91~19.36	20.3 75.2 57.1	13.9 201.3 21.1	6.9 301.1 24.2	17.18
	代表値*1 (平均値)	—	21.2 78.7 56.1	16.6 207.1 23	5.8 307.9 23.6	730 18.04
DSCA法	KM-2	14.82~14.90	1 129.9 50.4	0.59 17.1 18.1	0.15 274.7 34.1	
	KM-2	17.58~17.64 19.72~19.82	1.00 100.8 31.3	0.86 219.3 38.3	0.73 344.2 36.2	
	代表値*1 (平均値)	—	1 124.4 48.6	0.69 21.6 11	0.45 282.6 39.1	730
円錐孔底 ひずみ法	KM-2	10.9	34.52 179 6.5	20.9 79.1 56.3	5 273.2 32.9	16.44
	KM-2	13.7	54.77 187.2 44.4	29.25 354.9 44.9	21.05 91.1 6.2	41.65
	KM-2	15.2	51.72 183.3 39.6	33.08 15.2 50	24.72 278.2 5.9	40.57
	KM-2	18.6	43.2 175.4 4.9	28.14 271.7 52	9.23 9.23 37.5	21.24
	代表値*1 (平均値)	—	43.82 181.2 25.5	26.84 347.5 63.8	17.75 88.6 5.4	730 29.92
水圧破砕法	KM-2 代表値*1 (総合評価値)	—	25.96 359.0 52	15.08 237 23	11.36 133 29	730 20.95

・各測定値はサイクル機構所有のデータシートより引用

*1 各手法ごとの代表値は「釜石原位置試験総括報告書」p. I - 36に掲載された値。算出方法のわかるものは括弧書きで記した。

表Ⅲ-4 応力測定結果 (250m レベル坑道)

試験方法	試錐孔	試錐孔孔口からの深度 (m)	最大主応力 σ_1 (MPa) 方位(°) 傾斜(°)	中間主応力 σ_2 (MPa) 方位(°) 傾斜(°)	最小主応力 σ_3 (MPa) 方位(°) 傾斜(°)	土かぶり(m) 土かぶり圧(MPa)
AE法	KM-1	14.01~15.54	20 348.6 30	4.6 90.6 19.8	3.4 208.9 52.9	7.7
	KM-1	17.8~19.3	14.3 350.1 41.5	7.5 116.7 34	1.9 229.5 29.9	9.1
	KM-1	19.6~21.0	17.2 352.8 19.8	8.1 259 10.3	5.7 143 67.5	7.1
	KM-0	10.10~15.54	24.2 199.4 20.4	7.5 96.6 30.8	3.9 317.6 51.7	7.3
	KM-1	14.40~16.20	15.9 339.1 27.6	9.3 246.3 5.4	0.2 146.1 61.8	3.7
	代表値*1*2	—	15.6 355.8 19.6	7.5 257.2 22.6	5.6 122.6 59.3	260 7
DRA法	KM-1	14.01~15.54	21.9 331.9 23.6	5.1 97.4 53	1.6 229.2 26.7	7
	KM-1	17.8~19.3	15.5 349.8 30.2	8 124 50.2	5.1 245.2 23.4	9.4
	KM-1	19.6~21.0	13.9 353.4 22.5	8.3 252.6 24.4	6 120.8 55.7	7.6
	KM-0	10.10~15.54	17.7 186.2 3.6	9.8 279.8 44.8	6 92.7 44.9	7.9
	KM-1	14.40~16.20	16.6 165.1 26.6	6.8 33.9 52.8	4.9 268 24	8.4
	代表値*1*2	—	15.5 345.3 13.7	7.7 191.4 74.8	6.3 76.9 6.4	260 8.1
DSCA法	KM-1	13.7	1 207.9 23.5	0.78 115.7 5.1	0.55 14.2 65.9	
	KM-1	13.8	1 114.1 27.4	0.8 326.4 58.5	0.05 211.7 14.4	
	KM-1	13.8	1 233 21.6	0.54 2.9 58.3	0.37 133.8 22	
	KM-1	20.3	1 166 33.6	0.63 270.5 20.7	0.04 26.3 49	
	KM-1	20.4	1 235.8 13.8	0.58 137.3 31.2	0.28 346.5 55.3	
	KM-1	20.5	1 191.7 15.5	0.63 313.4 62.3	0.59 95.2 22.5	
	KM-0	16.0	1 156.6 39.9	0.92 299.3 43.6	0.48 49.2 19.7	
	代表値*1 (平均値)	—	1 203.8 32.9	0.77 294.1 0.5	0.52 24.9 57.1	

・各測定値はサイクル機構所有のデータシートより引用

*1 各手法ごとの代表値は「釜石原位置試験総括報告書」p. I-36に掲載された値。算出方法のわかるものは括弧書きで記した。

*2 代表値の算出方法が不明なもの

試験方法	試錐孔	試錐孔孔口からの深度 (m)	最大主応力 $\sigma 1$ (MPa) 方位(°) 傾斜(°)	中間主応力 $\sigma 2$ (MPa) 方位(°) 傾斜(°)	最小主応力 $\sigma 3$ (MPa) 方位(°) 傾斜(°)	土かぶり(m) 土かぶり圧(MPa)
円錐孔底 ひずみ法	KM-0	10.1	26.58 344 16	5.03 184 73	1.19 76 5	6.63
	KM-0	14.4	27.07 349 7	8.55 79 2	0.4 189 83	0.77
	KM-0	16.5	47.36 8 2	17.47 278 6	5.78 120 84	5.96
	KM-0	17.4	36.41 322 16	14.37 229 11	1.21 106 70	4.46
	KM-0	19.0	25.93 316 17	19.22 221 15	5.29 91 67	7.98
	KM-1	14.1	30.85 349 3	5.1 258 30	1.03 85 60	2.12
	KM-1	16.7	43.86 340 9	13.37 246 22	6.38 90 66	8.22
	KM-1	17.8	30.76 350 0	12.11 259 58	9.66 80 32	11.14
	KM-1	19.6	32.36 0 10	10.63 267 21	4.74 114 67	6.3
		代表値*1 (総合評価値)		29.3 342.0 13	7.6 248 17	2.9 107 68
水圧破砕法	KM-0,KM-1 代表値*1 (総合評価値)	—	17.37 331.5 3.7	8.66 237.2 49.4	4.5 64.6 4.4	730 6.95

・ 各測定値はサイクル機構所有のデータシートより引用

*1: 各手法ごとの代表値は「釜石原位置試験総括報告書」p. I-36に掲載された値。算出方法のわかるものは括弧書きで記した。