

超深地層研究所計画における岩盤力学に関する 調査研究 年度報告書(2006年度)

Annual Report on Rock Mechanics Research at the Mizunami Underground
Laboratory Project (FY2006)

瀬野 康弘* 中間 茂雄 山田 淳夫* 平野 享 佐藤 稔紀*

Yasuhiro SENO*, Shigeo NAKAMA, Atsuo YAMADA*, Toru HIRANO
and Toshinori SATO*

地層処分研究開発部門
結晶質岩地質環境研究グループ

Crystalline Environment Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

November 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

超深地層研究所計画における岩盤力学に関する調査研究
年度報告書 (2006 年度)

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット
瀬野 康弘*1、中間 茂雄+1、山田 淳夫*2、平野 享*1、佐藤 稔紀*3

(2008 年 8 月 27 日受理)

超深地層研究所計画は、深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備および深地層における工学技術の基盤の整備を目標として、日本原子力研究開発機構が、岐阜県瑞浪市において実施している結晶質岩を対象とした深地層の研究施設の建設をともなう研究プロジェクトである。研究は、地上からの調査研究段階 (第 1 段階)、坑道掘削 (地下施設建設) 時の調査研究段階 (第 2 段階)、地下施設での調査研究段階 (第 3 段階) の 3 段階からなり、全体で 20 年程度の計画である。第 1 段階の調査研究は 2002 年度から 2004 年度の三ヵ年で完了し、続いて 2005 年度より第 2 段階の調査研究を開始の後、現在に至る。

第 2 段階の調査研究においては、「第 1 段階での調査・解析・評価技術の評価」が成果目標の一つとして設定されており、繰り返しアプローチを念頭において、調査量と個別目標や課題に対する理解度や不確実性との関連性を評価することとしている。

岩盤力学に関する第 2 段階の調査研究においては、深度 100m ごとに設置される予備ステージからの岩盤力学調査ボーリング (初期応力測定および室内物理・力学試験) を通じて、第 1 段階で構築したサイトスケールにおける岩盤力学モデルを評価することにより、地表からの調査手法を評価するとともに、岩盤力学モデルを更新し、ブロックスケールにおける岩盤力学モデルを構築することを目標としている。また、力学的な掘削影響や長期挙動の評価に関する研究を実施する計画である。

本報告書は、第 2 段階の調査研究のうち、2006 年度に実施した岩盤力学に関する以下の成果を取りまとめたものである。

- ① GL-100m 予備ステージにおける岩盤力学に関する調査研究
- ② 三次元応力場同定手法の高度化に関する研究
- ③ ボーリングコアを用いた岩盤応力評価手法の高度化に関する研究
- ④ 長期岩盤挙動評価に関する研究

東濃地科学センター (駐在) : 〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64

*1 東急建設株式会社 (元 技術開発協力員)

*2 株式会社間組 (元 技術開発協力員)

*3 経済産業省

+1 地層処分基盤研究開発ユニット

※1 技術開発協力員

Annual Report on Rock Mechanics Research at the Mizunami Underground Laboratory
Project (FY2006)

Yasuhiro SENO*¹, Shigeo NAKAMA⁺¹, Atsuo YAMADA*², Toru HIRANO*^{※1}
and Toshinori SATO*³

Tono Geoscientific Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency
Akeyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received August 27, 2008)

In order to establish a scientific and technical basis of geological disposal of high level radioactive waste, Japan Atomic Energy Agency (JAEA) is advancing the geo-scientific research project of Mizunami Underground laboratory (MIU) in crystalline rock environment at Tono Geo science Center (TGC). At MIU, the geo-scientific research is planned to be carried out in three phases over a period of 20 years; Surface-based Investigation Phase (Phase I), Construction Phase (Phase II) and Operation Phase (Phase III). Currently, the project is under the Construction Phase.

This report presents the following results of rock mechanics studies conducted in the 2006 fiscal year,

- 1) Boring investigation for rock mechanics from the sub stage at GL.-100m,
- 2) Advanced study for determination of three dimensional distributions of the initial rock stress,
- 3) Advanced study on core-based stress measurement,
- 4) Basic study on long term behavior of crystalline rock.

*Keywords: Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) Project, Phase II,
Crystalline Rock, Rock Mechanics Research*

*1 Tokyu Construction (Former Collaborating Engineer)
*2 Hazama Corporation (Former Collaborating Engineer)
*3 Ministry of Economy, Trade and Industry
+1 Geological Isolation Research Unit
※1 Collaborating Engineer

目次

1. はじめに	1
2. 2006年度実施研究の目標と概要	3
2.1 GL-100m 予備ステージにおける岩盤力学に関する調査研究	3
2.2 三次元応力場同定手法の高度化に関する研究	3
2.3 ボーリングコアを用いた岩盤応力評価手法の高度化に関する研究	3
2.4 長期岩盤挙動評価に関する研究	4
3. 2006年度調査研究実施内容	5
3.1 GL-100m 予備ステージにおける岩盤力学調査研究	5
3.1.1 ボーリング調査	5
3.1.2 応力解放法による初期応力測定	5
3.1.3 水圧破碎法による初期応力測定	7
3.1.4 AE/DRA 法による初期応力測定	7
3.1.5 室内物理・力学試験	8
3.1.6 まとめ	8
3.2 三次元応力場同定手法の高度化に関する研究	9
3.2.1 不均一地盤の広域ひずみ場と地盤弾性定数の同時評価に基づく広域応力場評価	9
3.2.2 初期応力分布の深度方向非線形性を考慮した広域応力場評価	14
3.2.3 不均一岩体が貫通断層を含む場合の広域応力場評価	16
3.3 ボーリングコアを用いた岩盤応力評価手法の高度化に関する研究	19
3.3.1 AE 法による測定結果	19
3.3.2 DRA 法による測定結果	20
3.4 長期岩盤挙動評価に関する研究	22
3.4.1 長期岩盤挙動評価のための現象論的研究	22
3.4.2 長期岩盤挙動評価のための理論的研究	26
4. おわりに	33
参考文献	34

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Objectives and overview of this study in FY2006	3
2.1 Boring investigation for rock mechanics from the sub stage at GL.-100m	3
2.2 Advanced study for determination of three dimensional distributions of the initial rock stress	3
2.3 Advanced study on core-based stress measurement	3
2.4 Basic study on long term behavior of crystalline rock	4
3. Activities of investigations and studies in FY2006	5
3.1 Boring investigation for rock mechanics from the sub stage at GL.-100m	5
3.1.1 Boring	5
3.1.2 Stress measurement using stress relief method	5
3.1.3 Stress measurement using hydraulic fracturing method	7
3.1.4 Stress measurement using AE/DRA technique as a core-based method	7
3.1.5 Laboratory test of physical or mechanical properties	8
3.1.6 Summary	8
3.2 Advanced study for determination of three dimensional distributions of the initial rock stress	9
3.2.1 Improved procedure for evaluation of elastic constants of formations	9
3.2.2 Fault effect on initial stress distribution which is not linear against depth	14
3.2.3 Evaluation of initial stress distribution in wider area including Tsukiyoshi fault	16
3.3 Advanced study on core-based stress measurement	19
3.3.1 Time-dependent stress changes evaluated with AE method	19
3.3.2 Time-dependent stress changes evaluated with DRA method	20
3.4 Basic study on long term behavior of crystalline rock	22
3.4.1 Study on behavior at creep / uniaxial compression test	22
3.4.2 Study on micro deformation and quartz pressure solution induced by stress	26
4. Summary	33
Reference	34

図目次

図 3.1-1	ボーリング孔レイアウト (GL.-100m 予備ステージ) 平面配置と立体イメージ	5
図 3.1-2	応力解放試験で用いたひずみゲージセル	6
図 3.1-3	06MI-06 号孔深度 7.00m での解放ひずみ観測結果 (円錐孔底ひずみ法)	6
図 3.1-4	06MI-06 号孔深度 7.00m での円錐孔底ひずみ法から求めた初期応力 —主応力方向ステレオ投影図 (等角・下半球投影) —	6
図 3.1-5	水圧破碎試験により生じた横亀裂の解析から求めた初期応力 —主応力方向ステレオ投影図 (等角・下半球投影) —	7
図 3.1-6	06MI-06 号孔深度 9.00~9.55m のコアを用いた AE/DRA 法で求めた初期応力 —主応力方向ステレオ投影図 (等角・下半球投影) —	7
図 3.1-7	室内物理・力学試験結果	8
図 3.1-8	三つの手法による初期応力評価結果	9
図 3.2-1	地層モデルの物性値分布	10
図 3.2-2	解析対象領域、ボーリング孔および立坑の位置	11
図 3.2-3	MIZ-1 号孔における応力分布の解析評価と実測値との比較	12
図 3.2-4	立坑掘削地点で解析評価した応力分布	12
図 3.2-5	水平断面内の最大圧縮応力の大きさと方向の分布	13
図 3.2-6	月吉断層と 666Fault の両方をモデル化した解析モデル	14
図 3.2-7	研究所用地 MIZ-1 号孔における応力分布の解析値と測定値との比較	15
図 3.2-8	大規模モデル	16
図 3.2-9	推定応力の誤差	17
図 3.2-10	98SE-01 号孔と MIU-2 号孔の実測応力を初期条件とする 主立坑位置 (MIZ-1 号孔近傍) での深度と推定応力の関係	17
図 3.2-11	与えた実測応力と推定応力の比較 (MIU-2 号孔位置)	18
図 3.2-12	与えた実測応力と推定応力の比較 (MIZ-1 号孔位置)	19
図 3.3-1	コアの採取からの経過時間と AE カウント・コアの記憶応力の推定値との関係	20
図 3.3-2	コアの採取からの経過時間と DRA 法によるコアの記憶応力の推定値との関係	20
図 3.3-3	187 日後および 368 日後についてしきい値を見直した後のコアの記憶応力の推定値	21
図 3.4-1	空圧式クリープ試験装置の概要	22
図 3.4-2	クリープひずみの経時変化 (2002~2006 年)	22
図 3.4-3	クリープひずみの経時変化	22
図 3.4-4	クリープひずみ速度の経時変化	23
図 3.4-5	クリープひずみとクリープひずみ速度の関係	24
図 3.4-6	2 種類のひずみ速度を交互に切り換えた一軸圧縮試験の概念図	25
図 3.4-7	土岐花崗岩の応力-ひずみ曲線	26
図 3.4-8	供試体作製方法	26
図 3.4-9	供試体セット状況	27
図 3.4-10	緩和応力と時間の関係	27
図 3.4-11	四角形メッシュ群 (供試体 A2)	28
図 3.4-12	平均ひずみの等高線 (供試体 A2)	28
図 3.4-13	水溶液中における石英の溶解挙動	29

図 3.4-14 接触部の概要	30
図 3.4-15 試験方法 1 の概要	30
図 3.4-16 石英円錐台試料	30
図 3.4-17 試験方法 2 の概要	30
図 3.4-18 溶解面の状況の例	31
図 3.4-19 石英溶解量の均質化解析の概念図	32
図 3.4-20 石英溶解量の解析結果の例	32

表目次

表 3.3-1	しきい値の一覧	21
表 3.4-1	MIZ-1 号孔で採取した土岐花崗岩の力学試験結果	24
表 3.4-2	試験条件	30

This is a blank page.

1. はじめに

超深地層研究所計画は、深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備および深地層における工学技術の基盤の整備を目標として、独立行政法人日本原子力研究開発機構が、岐阜県瑞浪市において実施している結晶質岩を対象とした深地層の研究施設の建設をともなう研究プロジェクトである。研究は、地上からの調査研究段階（第1段階）、坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階）、地下施設での調査研究段階（第3段階）の3段階からなり、全体で20年程度の計画である¹⁾。第1段階の調査研究は2002年度から2004年度の三ヵ年で完了し²⁾、続いて2005年度から第2段階の調査研究を開始した。その2005年度中には研究坑道の掘削が被覆層である瑞浪層群を通過して基盤の土岐花崗岩に到達した。

第2段階の調査研究においては、「第1段階での調査・解析・評価技術の評価」が成果目標の一つとして設定されており³⁾、繰り返しアプローチ⁴⁾に基づいて、調査量と個別目標や課題に対する理解度や不確実性との関連性を評価することとしている。

地層処分場など地下岩盤中の空洞に構築される地下施設の設計においては、その施設をとりまく岩盤の力学モデルを構築する必要がある。その力学モデルを構成する主要な要素である岩盤の初期応力および力学的な物性は、地下施設の設計において重要な空洞安定性評価および空洞周辺岩盤の掘削影響を検討するに際して欠くことのできない要素である。初期応力は、一般的に深度依存性が認められるとともに、その地域特有の地質構造（断層などの不連続面や岩盤の不均一性など）の存在や地形の影響の他、地殻変動などによりその状態が変化する⁵⁾。また、狭い領域に対象を限っても、そこに認められる岩盤の不均一性が初期応力に影響を及ぼすと考えられる。したがって、ある対象領域の初期応力状態を評価する場合、地質構造や地形に着目し、複数の地点において初期応力測定を行い、ばらつきを含めて総合的に評価する必要がある。岩盤の力学的な物性についても、地質の変化で物性値が変化することから、対象とする領域内で物性値を取得しなければならない。したがって、このようにして取得された初期応力や力学的な物性が、冒頭に述べた力学モデルに適切に反映されるよう、モデルの構築手順を確立することが課題である。

地下岩盤中に空洞を掘削すると、空洞壁面近傍に割れ目の発生・進展、応力状態の変化、間隙水圧の変化が生じることにより、空洞周辺岩盤の破壊強度や変形特性などの力学的性質、透水係数などの水理学的性質あるいは地下水の酸化還元電位などの地球化学的性質が変化することが想定され、この変化が生じる領域を、「掘削影響領域」と呼んでいる⁶⁾。掘削影響領域は、掘削損傷領域、不飽和領域および応力再配分領域の3つの領域の重ね合わせと考えられる。地層処分場を考える場合、掘削影響領域の性質と広がり把握することは地下施設の合理的な設計や施工にとって必要不可欠であるほか、掘削影響領域そのものが地層処分場閉鎖後の地下水や物質の選択的な移行経路となり得るため、その評価手法を確立することは重要な課題である⁶⁾。

さらに、地層処分場としての地下施設は、その建設時、操業時（数十年から百年程度）はもちろん、閉鎖後（空洞の埋め戻し後）も数千年から数万年にわたり、安定であることが要求される。岩盤にはクリープや応力緩和などの時間依存性挙動が認められるため、超長期にわたるその挙動を把握することは、地下施設の長期安定性を評価する上で重要な課題である。

これらの観点から、岩盤力学分野における重要な調査研究課題として、以下の3項目が挙げられる。

- (1) 初期応力等の測定と岩盤力学モデル構築手法に関する研究（力学調査研究）
- (2) 坑道（空洞）周辺岩盤の掘削影響に関する調査研究（掘削影響研究）
- (3) 岩盤の力学的長期挙動に関する研究（長期挙動研究）

岩盤力学に関する第2段階の調査研究では、(1) 力学に関する情報の取得として、深度100m間隔で設置される予備ステージからの岩盤力学調査ボーリング（初期応力測定、室内物理・力学試験）を実施する。(2) 岩盤力学モデルの構築として、第1段階で構築したサイトスケール（研究所用地を中心に数百m～数km四方、深度2～3kmの領域）における岩盤力学モデルに対し、新たに取得した情報に基づき更新を適宜加えて、ブロックスケール（研究坑道を中心に数十m～数百m四方、深度1km程度の領域）における岩盤力学モデルを構築する。(3) 第1段階で得た成果の評価として、新たに取得した情報に基づきサイトスケールにおける岩盤力学モデルを評価し、地表からの調査・解析・評価手法の有効性を確認する^{4,7)}。また、これら検討は坑道が建設される現在を対象としており、これだけでは地層処分場としての地下施設に必要な将来のモデル化が行えないことから、掘削影響や長期挙動に関する評価手法の確立を目的とした研究を並行して行うものとしている^{4,7)}。

本報告書は、2006年度に実施した岩盤力学に関する以下の成果について概要を報告する。なお、各成果と前述した調査研究課題との対応を括弧内に示すが、2006年度は（掘削影響研究）については実施していない。

- ① GL-100m 予備ステージにおける岩盤力学に関する調査研究（力学調査研究）
- ② 三次元応力場同定手法の高度化に関する研究（力学調査研究）
- ③ ボーリングコアを用いた岩盤応力評価手法の高度化に関する研究（力学調査研究）
- ④ 長期岩盤挙動評価に関する研究（長期挙動研究）

2. 2006 年度実施研究の目標と概要

2.1 GL-100m 予備ステージにおける岩盤力学に関する調査研究

本研究は、GL-100m の堆積岩層を対象として、坑道掘削時の岩盤力学に関する調査研究（第 2 段階の調査研究）を行って、地上からの調査（第 1 段階の調査研究）で実施した調査手法と、そこで得られた情報から構築したサイトスケール岩盤力学モデルの妥当性を確認することが第一の目標である。また、このサイトスケールのモデルに、坑道掘削時に得られた新たな情報を追加して、ブロックスケールの岩盤力学モデルを構築することを第二の目標としている。そこで、坑道周辺岩盤の物理・力学特性および初期応力状態を掘削中の坑道で調査し、把握することが課題となる。

掘削中の坑道での調査は、立坑掘削による力学的影響領域をできるだけ避け、掘削工事の安全に配慮して、深度 100m 間隔で配置される予備ステージ等の水平坑道で行うものとした。そこで本年度は、掘削工事の進捗にあわせて、GL-100m 予備ステージを調査場所に設定した。調査では、GL-100m 予備ステージの力学的掘削影響領域の外に到達する深さ 20m のボーリング孔を掘削し、その方向は岩盤の層理面に概ね平行する水平孔とこれに直交する鉛直孔である。このうち水平孔は、立坑等による力学的な掘削影響領域を避けながら三次元応力状態が把握できるように、立坑からの離隔をある程度とり、互いに独立な方向となる 2 孔を設定したので、全体では 3 孔である。次に、これらのボーリング孔において原位置測定を行って初期応力を評価するとともに、そこで採取したボーリングコアを用いた室内初期応力測定もあわせて行い、相互の評価結果を比較するものとした。また、ボーリングコアは室内物理・力学試験に供して、対象岩盤の物理・力学的特性を把握するものとした。

2.2 三次元応力場同定手法の高度化に関する研究

本研究では、概ね一辺が数 km から 10km までの拵がりを持つ領域（最大でローカルスケールに相当）を対象として、測定位置や測定数の限られた初期応力測定結果を条件とする逆解析によって対象領域のおかれた三次元応力場（広域応力）を同定し、次に順解析によって領域内の任意の地点の初期応力（局所応力）を評価し得る手法の確立を目標としている。

本年度は、以下に示す三つの研究を実施した。(a) 不均一地盤の広域ひずみ場と地盤弾性定数の同時評価に基づく広域応力場評価の研究では、対象領域をとりまく広域ひずみ場を逆解析で得るとともに不均一地盤弾性定数の同時評価を行い、双方の結果を組み合わせることで三次元応力場を同定する手法を検討した。(b) 初期応力分布の深度方向非線形性を考慮した広域応力場評価の研究では、三次元応力場や初期応力の分布が断層に影響されて深度方向で非線形になると考えて、研究用地内の深層ボーリング（MIZ-1 号孔）と交差する断層をモデル化するケースとモデル化しないケースを比較した。(c) 不均一岩体が貫通断層を含む場合の広域応力場評価の研究では、ローカルスケールに相当する解析領域に対して月吉断層のような領域を貫通する大規模断層が存在することの解析に与える影響について検討した。

2.3 ボーリングコアを用いた岩盤応力評価手法の高度化に関する研究

本研究では、ボーリングコアを用いた初期応力測定のうち、現場計測や封圧セルが要らずに比較的測定の負担が小さい AE/DRA（Acoustic Emission [アコースティックエミッション] / Deformation Rate Analysis [変形率変化法]）法の適用性を確認することを目標としている。

ボーリングコアを用いた初期応力測定は、まだ確立した技術とは言えないが、サンプルさえ入手できれば実験室にある機器で測定可能という利点を有し⁸⁾、測定実施の柔軟性の高さとコスト

の低さからその完成が期待される。技術が確立していないとされる主な理由は、①測定原理である応力記憶メカニズムの説明が不十分、②測定精度に及ぼす実施条件の影響（例えばボーリング時の応力集中の影響、採取後試験までの時間経過の影響）が不明などである。AE/DRA法では、上で述べた理由のうち、①に対しては山本⁹⁾が論じている。一方、②では、応力集中の影響は明確な報告がまだない。また、時間経過の影響は、経過時間が長いと初期応力は小さく評価される¹⁰⁾とした報告と、100日程度経過後もほぼ同じ初期応力が評価されたとする報告が混在しており¹⁰⁾、追試験による検証が必要と考えられた。

そこで、本年度は、AE/DRA法を適用した場合の経過時間の影響について詳しく調べることを課題として、研究所用地で掘削された深層ボーリング（MIZ-1号孔）のボーリングコア（深度976～978mabh）を対象に、ボーリングコア採取からの経過時間を変えたAE/DRA法による初期応力測定を実施した。

2.4 長期岩盤挙動評価に関する研究

本研究では、結晶質岩を対象として、力学的な時間依存性挙動であるクリープと応力緩和のメカニズムを解明し、地下施設の長期安定性評価のための手法を開発することを目標としている。

研究の実施手順として、①岩盤や岩石の時間依存性挙動の把握とメカニズム解明、②長期挙動予測手法の構築（モデル化）、③モデルを用いた長期挙動の予測、④研究坑道での計測を用いた予測結果の検証、という順序で進めて、地下施設の長期安定性評価手法を開発する。

また、①の時間依存性挙動の把握とメカニズム解明では、クリープや応力緩和現象といった現象を力学的な試験等で巨視的に把握し、それに基づく構成方程式でモデル化する方法（現象論的方法）と、クリープや応力緩和の原因と考えられるマイクロクラックの進展を微視的な観察で把握し、それに基づく動分子力学や均質化理論を用いたモデルを得る方法（理論的方法）による二方面からのアプローチにて研究を進めている。

本年度は、現象論的研究として、(a)1997年度に開始した田下凝灰岩の低応力レベル・湿潤状態での長期クリープ試験の継続、(b)研究所用地内の深層ボーリング（MIZ-1号孔）から採取した土岐花崗岩を対象とする力学試験およびコンプライアンス可変型構成方程式のパラメータ取得実験をそれぞれ行った。一方、理論的研究として、(c)同じくMIZ-1号孔の土岐花崗岩を対象とするレーザー共焦点顕微鏡下における応力緩和試験、(d)結晶質岩の微視的な破壊機構に深く関わる構成鉱物の圧縮応力下での化学反応による溶解現象を確認するための、石英単結晶供試体およびガラスビーズを用いた圧縮試験、(e)石英の圧力溶解反応現象についての理論構築と均質化理論をベースにした数値解析をそれぞれ実施した。

3. 2006 年度調査研究実施内容

3.1 GL.-100m 予備ステージにおける岩盤力学調査研究

3.1.1 ボーリング調査

瑞浪超深地層研究所の深度 100m における岩盤の物理・力学特性および初期応力状態を把握することを目的として、GL.-100m 予備ステージから、坑道近傍の力学的な掘削影響領域(坑道径 D として 2D 程度)の外に到達する長さ 20m 程度のボーリング孔を 3 本掘削した。ここで、予備ステージの坑道径は D=3m(標準断面)~9m(待避所交差部)である。また、ボーリング径は、採取コアが AE/DRA 法の実施に十分な寸法が得られ、かつ、応力解放法で用いるひずみゲージセルの挿入に必要な HQ サイズ(直径 98mm)とした。3 本あるボーリング孔の配置は、図 3.1-1 に示すように鉛直孔 1 本(06MI-05 号孔)、水平孔 2 本(06MI-04 号孔、06MI-06 号孔)である。

いずれのボーリング孔においても瑞浪層群土岐夾炭累層が分布しており、岩盤は細粒~粗粒の砂岩や凝灰質砂岩から構成されている。また、岩盤のところどころに層理が認められ、炭質物を特徴的に挟在している。

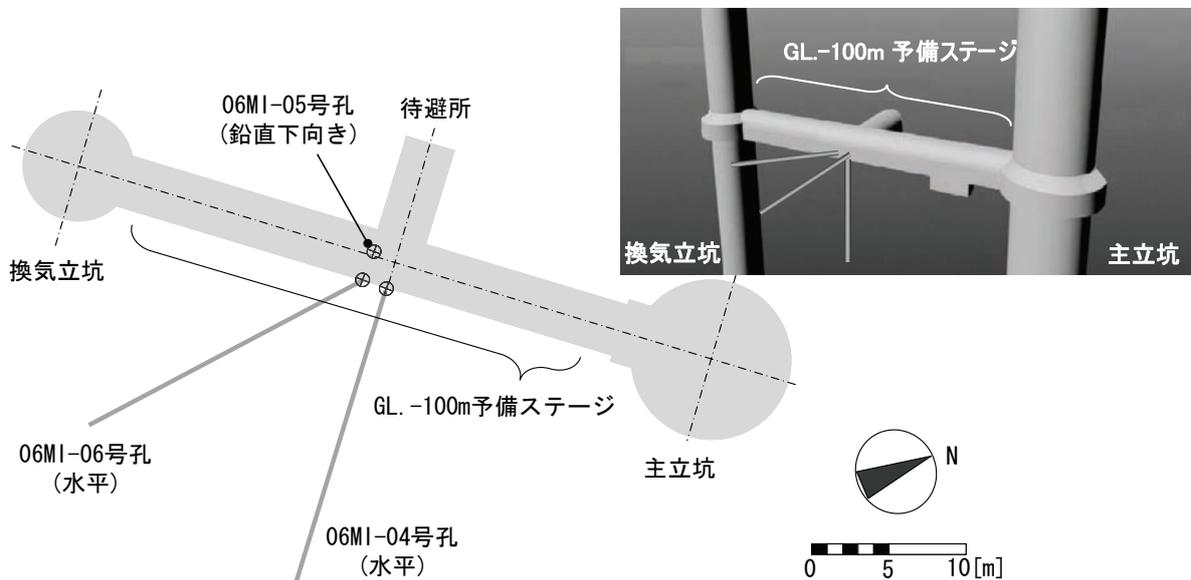
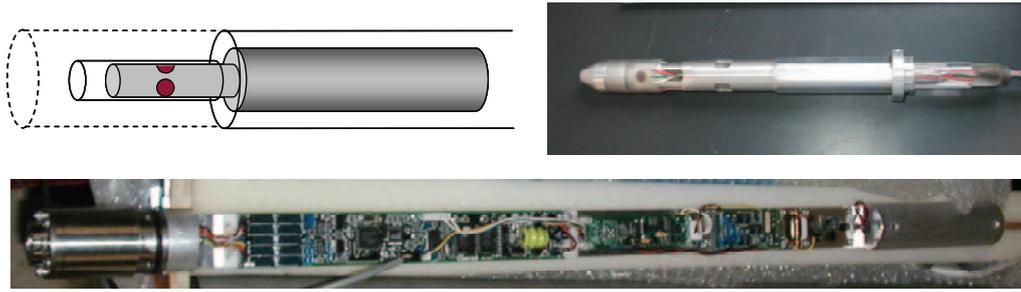


図 3.1-1 ボーリング孔レイアウト (GL.-100m 予備ステージ) 平面配置と立体イメージ

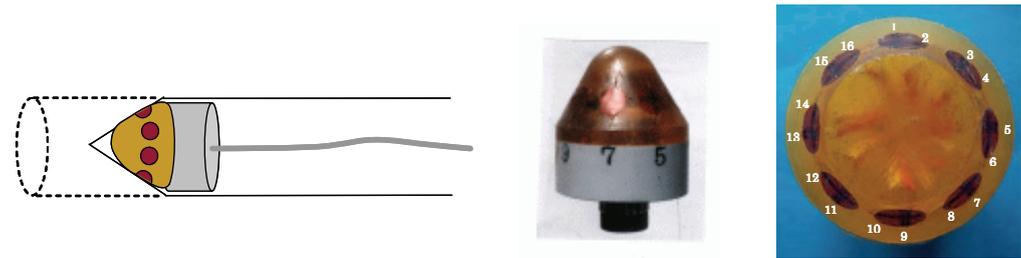
3.1.2 応力解放法による初期応力測定

06MI-04 号孔と 06MI-05 号孔において、応力解放法のひとつである孔壁ひずみ法¹¹⁾(図 3.1-1)による初期応力測定を実施した。測定では初めに、解放ひずみを検出するセンサー(ひずみゲージセル)をパイロット孔内の健岩部に接着するが、今回対象とした瑞浪層群土岐夾炭累層は低強度で著しい強度不均質を有しており健岩部を得ることが難しく、パイロット孔の掘削を数多くやり直した。また、測定に適した健岩部が得られても、孔壁に粘土状のスライムが付着しており、ひずみゲージセルの接着が困難であった。結局、ひずみゲージセルの接着に成功して応力解放ひずみの観測まで行えたのは 06MI-05 号孔における二点だけであり、その結果は応力評価に使える品質ではなかった。

そこで、孔壁ひずみ法の適用性が悪いことから、06MI-06 号孔では別の応力解放法である円錐孔底ひずみ法¹²⁾に変更した(図 3.1-2)。円錐孔底ひずみ法の適用は、水平孔で孔底を排水、清浄にできる場合に限られるが、セルが小さく軽量で、その接着は孔壁ひずみ法より容易なことが多い。この方法で、深度 7.00m で得た最も信頼性の高いと考えられるデータ(図 3.1-3)より決定した初期応力は、最大主応力が N45W 走向でほぼ水平面内にあり、最小主応力はほぼ鉛直方向となった(図 3.1-4)。



(左) 孔壁ひずみ法のセル取付け位置 (右) セル側面外観
(下) セル孔口側に連結する孔中式データロガー



(左) 円錐孔底ひずみ法のセル取付け位置 (中) セル側面外観 (右) セル上面 (数字はゲージ ch)

図 3.1-2 応力解放試験で用いたひずみゲージセル

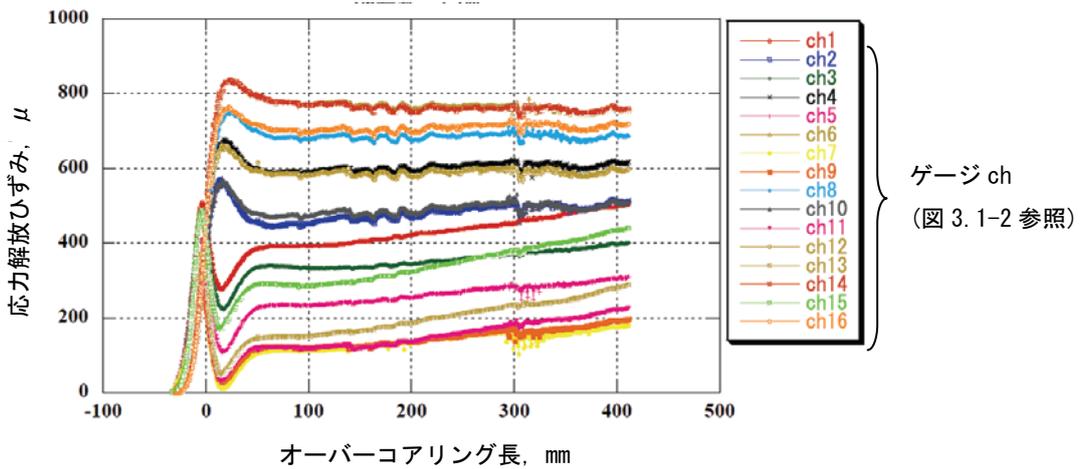


図 3.1-3 06MI-06 号孔深度 7.00m での解放ひずみ観測結果 (円錐孔底ひずみ法)

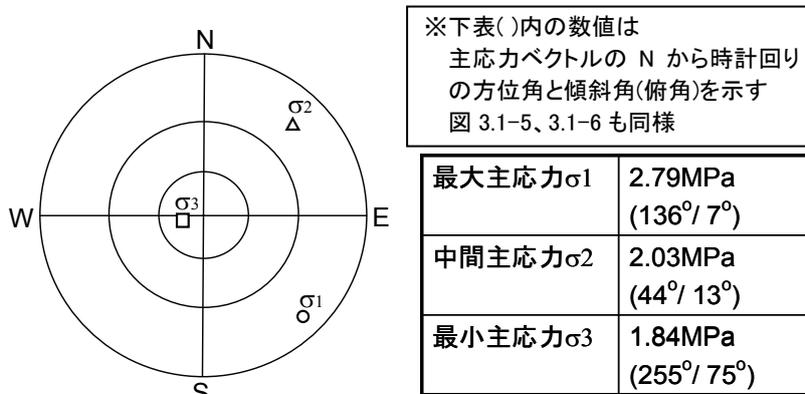


図 3.1-4 06MI-06 号孔深度 7.00m での円錐孔底ひずみ法から求めた初期応力
—主応力方向ステレオ投影図 (等角・下半球投影) —

3.1.3 水圧破碎法による初期応力測定

06MI-04 号孔、06MI-05 号孔および 06MI-06 号孔において水圧破碎法による初期応力測定を実施した。測定位置 6 点のうち 5 点で横亀裂、残り 1 点で雁行状（エシェロンタイプ）の亀裂が生じたため、縦亀裂の発生を前提とする水圧破碎法の通常の解析方法では、ボーリング孔軸と直交する面内の二次元応力状態が得られなかった。しかし、測定点全体で独立な方向を持つ 6 つ以上の横亀裂が観察されたことから、測定位置によらず初期応力状態が一様であると仮定すれば、横亀裂の閉口圧と初期応力の関係から三次元応力状態が得られるものと考えられた。ただし、この仮定は GL.-100m 予備ステージ周辺で鉛直方向に数十 cm オーダーの岩盤不均一性が認められ、応力状態が一様でないと考えられることと矛盾しており、評価結果の精度は低いと言える。この方法で得られた初期応力状態は、最大主応力が N49W 走向で、ほぼ水平面内にあり、中間主応力がほぼ鉛直方向であった（図 3.1-5 参照）。

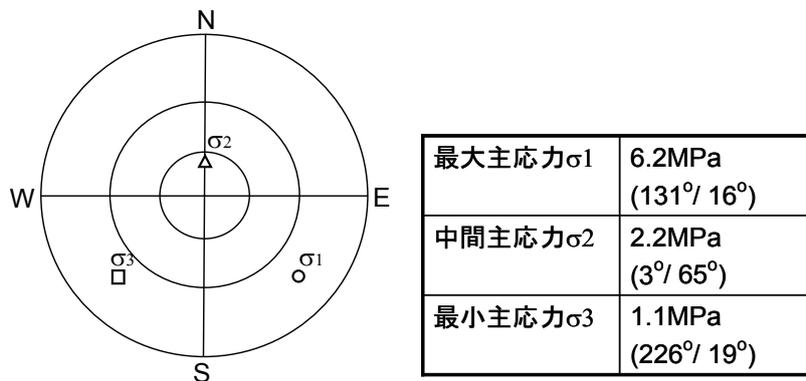


図 3.1-5 水圧破碎試験により生じた横亀裂の解析から求めた初期応力
—主応力方向ステレオ投影図（等角・下半球投影）—

3.1.4 AE/DRA 法による初期応力測定

3 本のボーリングコアから採取した定方位コアを用いて AE/DRA 法による室内試験を行った。AE 法において AE イベント累積数や累積 AE エネルギーの急増点が現れない試料、また、DRA 法においてひずみ差関数に屈曲点応力を見出せない試料が多く、06MI-06 号孔の 1 測定点を除いて初期応力評価に必要な独立 6 方向のデータを揃えることができなかった。唯一データを揃えることのできた測点における最大主応力の方向は、水平面より 28 度傾斜しており、これを水平面に投影した場合、その走向は N48W であった（図 3.1-6 参照）。

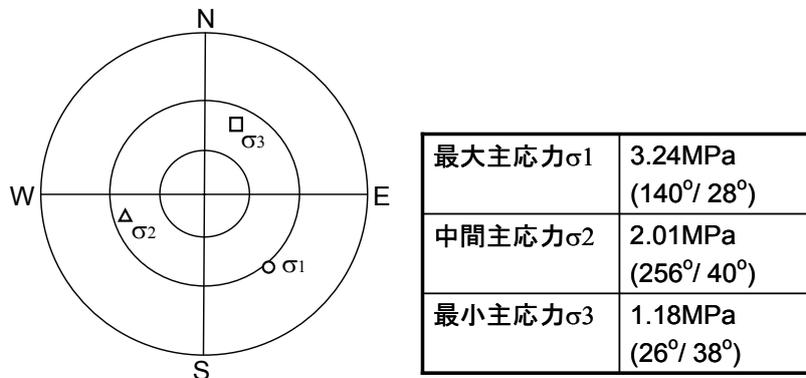


図 3.1-6 06MI-06 号孔深度 9.00~9.55m のコアを用いた AE/DRA 法で求めた初期応力
—主応力方向ステレオ投影図（等角・下半球投影）—

3.1.5 室内物理・力学試験

GL-100m 予備ステージから行ったボーリングのコア（瑞浪層群土岐夾炭累層）の室内物理・力学試験結果を図 3.1-7 に示す。各物性の平均値は次のとおりである。物理物性では、見かけ比重（乾燥状態）：1.54、含水比：28.8%、有効空隙率：43.8%、P 波および S 波速度：2.57km/s と 1.21km/s であった。また、力学物性では、一軸圧縮強度：10.7MPa、50%接線ヤング率：4.97GPa、ポアソン比：0.42、圧裂引張強度：0.782MPa、粘着力：3.99MPa、内部摩擦角：15.4 度であった。これらの値は、研究所用地内 MIZ-1 号孔のボーリングコアから得た瑞浪層群土岐夾炭累層の物性と概ね同様であり、GL-100m 予備ステージと MIZ-1 号孔の両採取地点の離隔（200m 弱）程度では、瑞浪層群土岐夾炭累層の物理・力学特性が大きく変らないものと考えられた。

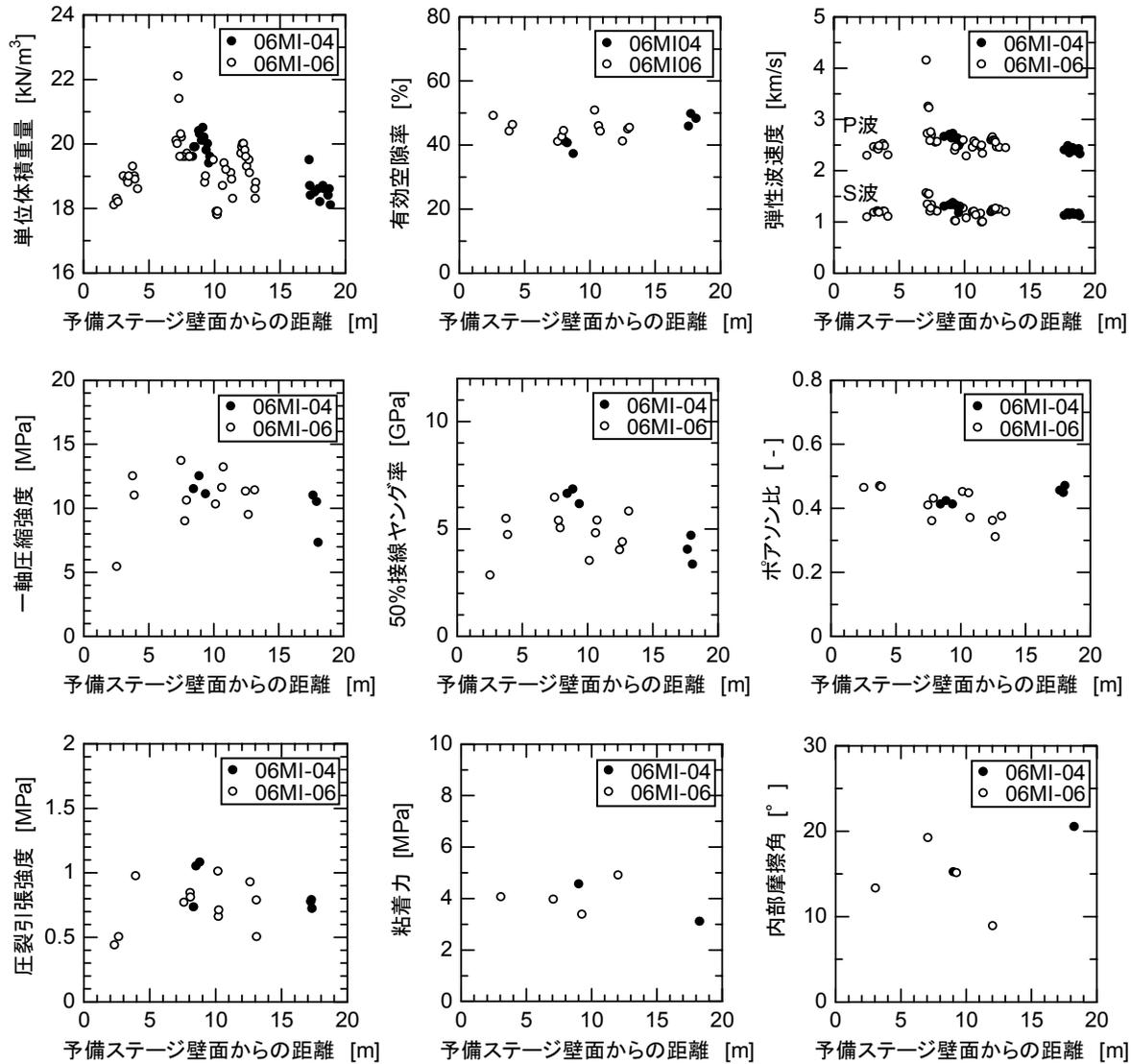


図 3.1-7 室内物理・力学試験結果

3.1.6 まとめ

GL-100m 予備ステージ周辺岩盤の初期応力状態について、実施した三つの手法による初期応力評価結果をまとめたものを図 3.1-8 に示す。最大主応力の方向は、若干の傾斜はあるもののほぼ水平に近く、NW-SE 走向にあると評価できる。これは、東濃地域における三角測量の結果から測地的評価法により推定される研究所用地周辺のひずみ状態^{13),14)}と調和的である。また最大主応力の大きさは、3 本のボーリング孔の結果を総合評価した水圧破砕法による結果が、他と比

較して大きな値となっているが、それ以外では 3MPa 前後の値で、これは岩石の単位体積重量と深度から計算される土かぶり圧の約 1.5 倍程である。中間主応力および最小主応力の走向は、NE-SW に分布しているが、中間主応力と最小主応力の大きさが近いため走向の特定が困難である。また、これらのうち、ほぼ鉛直方向であるものの値は 1.8~2.2MPa となっており、土かぶり圧 1.92MPa とほぼ等しいことが確認された。

GL-100m 予備ステージ周辺の瑞浪層群土岐夾炭累層の物理・力学特性については、研究所用地内 MIZ-1 号孔のボーリングコアから得た同じ層の物性と概ね同様であり、予備ステージと MIZ-1 号孔の両採取地点の離隔 (200m 弱) 程度では、瑞浪層群土岐夾炭累層の物理・力学特性が大きく変わらないことが確認された。一方、研究所用地から数 km 離れた東濃鉦山の瑞浪層群土岐夾炭累層に比べると¹⁵⁾、特に強度、剛性等の力学特性値が大きい傾向にあることから、採取地点が数 km 程度まで離れると、物理・力学特性が変り得ることが確認された。このことは同一の堆積岩層と分類された岩盤の有する、数 km スケールでの力学特性値の不均一性が現れたものと考えられる。

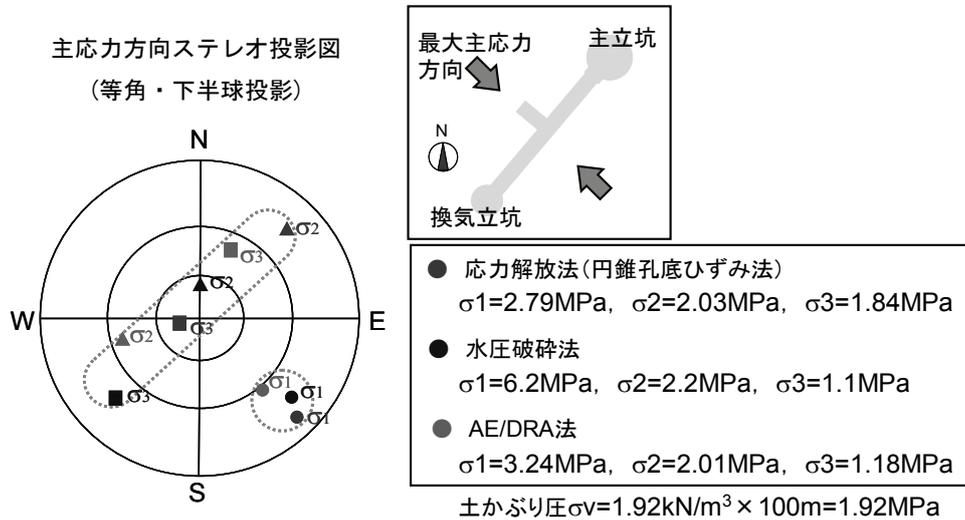


図 3.1-8 三つの手法による初期応力評価結果

3.2 三次元応力場同定手法の高度化に関する研究

3.2.1 不均一地盤の広域ひずみ場と地盤弾性定数の同時評価に基づく広域応力場評価

(1) 概要

初期応力測定結果から、対象とする場の境界条件に相当する広域ひずみを同定し、これにより場の三次元応力状態を同定する方法について検討した。この場合、同定された三次元応力場の信頼性は、初期応力測定結果と逆解析に用いる三次元地盤モデルの信頼性で決まる。特に三次元地盤モデルの信頼性を高めるためには、地形や地層の幾何形状の正確なモデル化とともに地盤の弾性定数をその不均一性も含めて的確に評価する必要がある。しかし、現状では地盤弾性定数を直接測ることは困難であるため、逆解析においてはその値を仮定して計算し、同定された応力場・ひずみ場をその仮定値に対応する一つの解であると解釈している。そのため、三次元応力場を高精度化するには、逆解析に必要な地盤弾性定数の仮定値を選ぶ根拠として、地盤弾性定数を逆解析と同時に評価する方法の開発が必要と考えられる。そこで、本研究では、三次元応力場同定手法の高精度化を目的に、逆解析において広域ひずみ場と地盤弾性定数を同時評価する方法について検討した。

(2) 解析モデル

解析対象領域は、岐阜県東濃地域の東濃鉱山、正馬様用地および研究所用地を含む領域である。対象領域の地質は、上部から新第三紀堆積軟岩、不整合を挟んで土岐花崗岩から構成されており、堆積層はさらに瀬戸層群、瑞浪層群（生俵累層、明世累層、土岐夾炭累層）に、土岐花崗岩は上部割れ目帯、土岐花崗岩下部割れ目低密度帯などに分類されている。

解析では対象領域の地層を力学的観点から以下の4層にモデル化した（図 3.2-1 参照）。

- 第Ⅰ層： 瀬戸層群、瑞浪層群（生俵累層、明世累層）
- 第Ⅱ層： 瑞浪層群（土岐夾炭累層）
- 第Ⅲ層： 土岐花崗岩上部割れ目帯
- 第Ⅳ層： 土岐花崗岩下部割れ目低密度帯

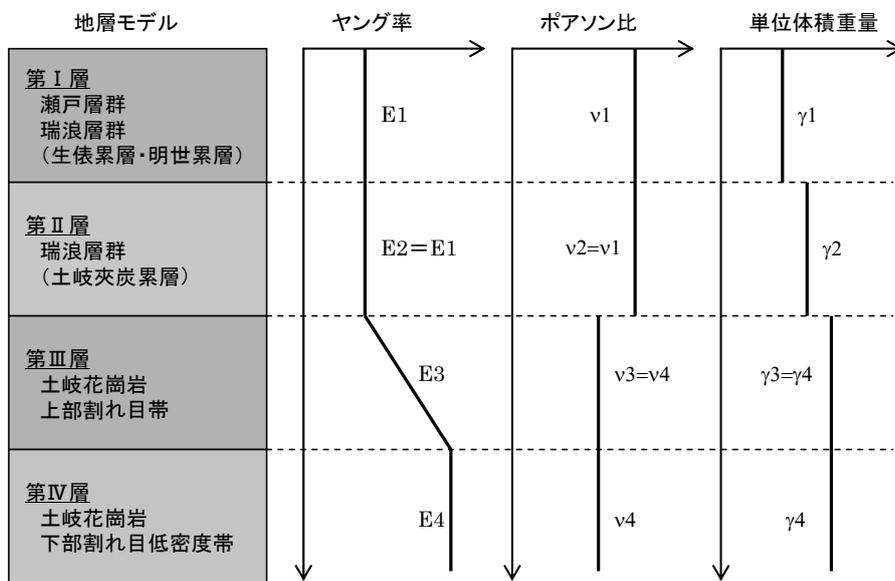


図 3.2-1 地層モデルの物性値分布

解析モデルは、モデルスケールの影響評価も考慮して、領域サイズを 1km×1km、2km×2km のモデルに加え、これをさらに拡張した 3km×3.4km のモデルを設定した（図 3.2-2）。領域サイズが 1km×1km モデルは東濃鉱山もしくは正馬様用地を含む領域をそれぞれモデル化したもの、2km×2km モデルでは東濃鉱山と正馬様用地を含む領域をモデル化したもの、3×3.4km モデルは東濃鉱山、正馬様用地および研究所用地を含むモデルである。解析にあたり、モデルに定義する第Ⅰ～Ⅳ層（図 3.2-1）の地盤弾性定数は特定されておらず、従来このような場合には既往の研究成果などから値を仮定せざるを得なかった。今回は、広域ひずみ場と同時に、未知の地盤弾性定数を評価する方法として、最初の東濃鉱山および正馬様用地における応力測定結果に基づく逆解析の段階ではそれをパラメータとみなして計算し、続いて応力測定結果との誤差が最小となる地盤弾性定数を選び出して広域応力場を同定した。最後にこの応力場のもとで順解析を行って、研究所用地内の MIZ-1 号孔および立坑掘削地点の応力状態を推定した。

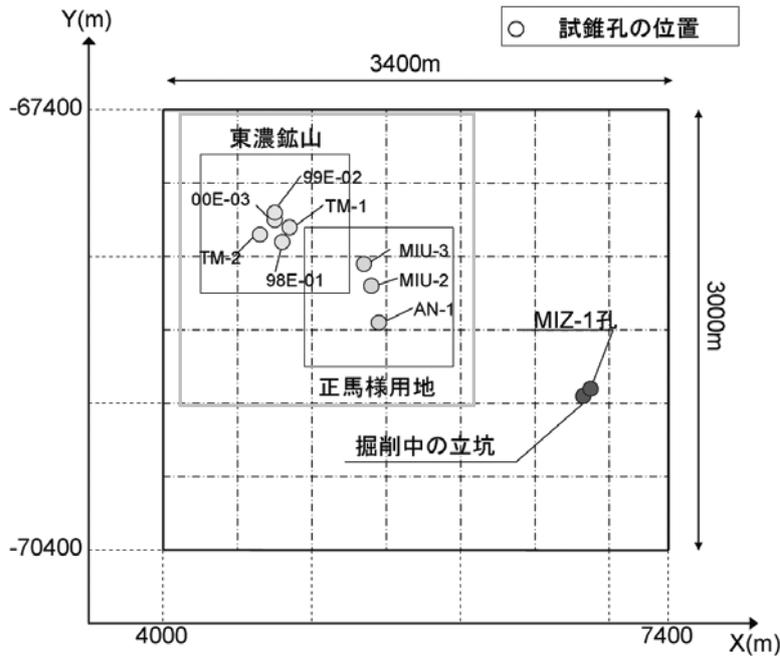


図 3.2-2 解析対象領域、ボーリング孔および立坑の位置

(3) 三次元応力状態の推定

東濃鉱山および正馬様用地における初期応力測定結果を条件として、逆解析で広域応力場を評価し、その結果を用いて研究所用地の MIZ-1 号孔における応力状態を順解析した結果を図 3.2-3 示す。図には比較のため、この解析とは独立した MIZ-1 号孔における初期応力測定結果を示した。MIZ-1 号孔を解析条件として用いていないにもかかわらず、解析結果は初期応力測定結果を良好に再現しており、解析が妥当であったものと考えられる。

ついで、解析で得た立坑掘削地点の応力状態を図 3.2-4 に示す。図は、深度により水平面内主応力の走向が変化することを示している。また、3.1 に示した、この解析とは独立に実施した立坑 GL-100m での初期応力測定結果（最大主応力は概ね水平面内で NW-SE 走向、約 3MPa の圧縮）と比較すると、解析で得られた水平面内における最大圧縮応力（N26W 走向、約 3.3MPa の圧縮、ただし図 3.2-4 では圧縮を負にとるため凡例で最小主応力と表記されている）は初期応力測定結果を良好に再現している。さらに、計画深度の 1,000m における水平面内最大圧縮応力は 28MPa 程度と予測された。

最後に、対象領域内の三次元応力状態の傾向を把握するために、標高別の水平面内最大圧縮応力の分布について図 3.2-5 に示す。この図中の線分は方向が主応力方向、長さが主応力の大きさを現している。(e)より、最も下層にある第IV層（土岐花崗岩下部割れ目低密度帯）では、水平面内の主応力はほぼ一様と予測される。一方(a)～(d)より、浅部では水平断面内の主応力は変動することが示されている。とくに、図を詳細に見ると、第I層～第IV層の地層ごとに応力分布の傾向が異なること、応力の擾乱は、第II層と第III層との境界である花崗岩上面の形状に影響されていることなどがわかる。これらの結果は、不均質岩盤内の応力状態を予測するためには、地層や岩体の形状・空間分布の正確な把握とそのモデル化、さらには計測に基づいたモデル定数の評価が不可欠であることを示唆している。

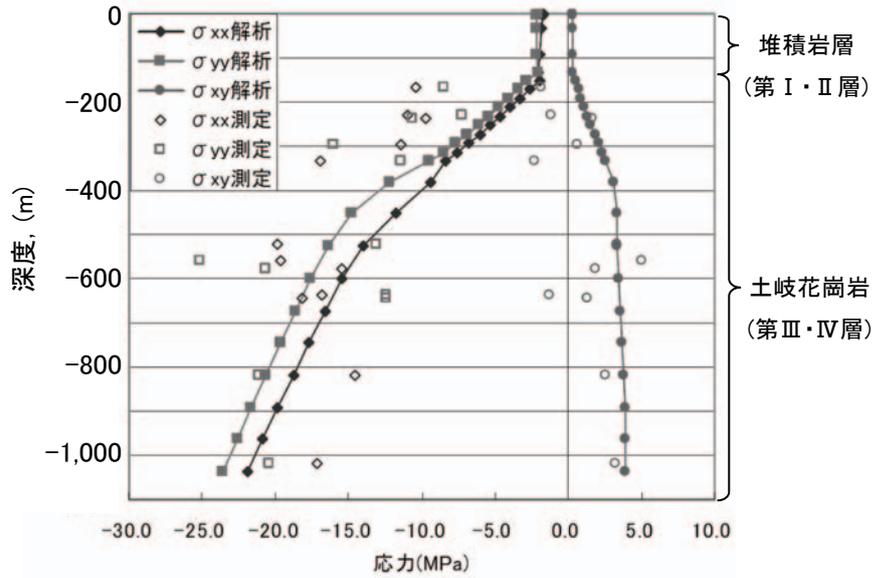
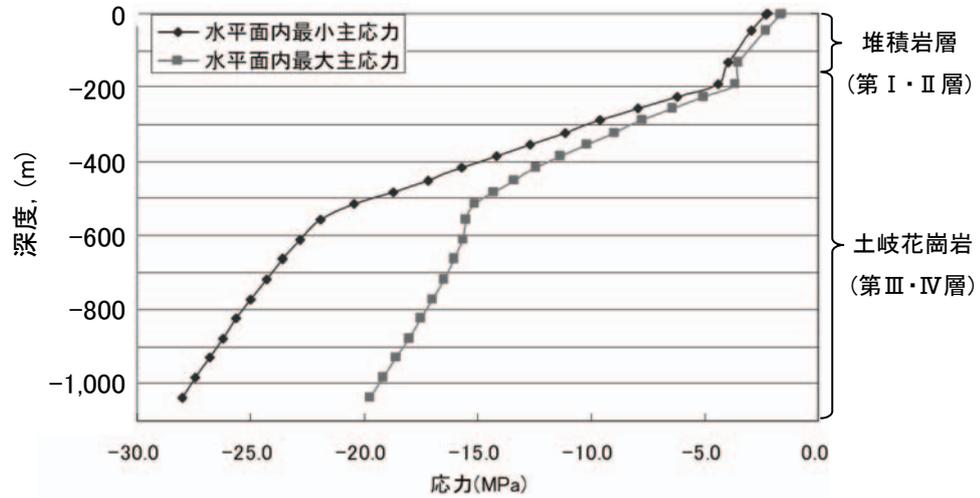
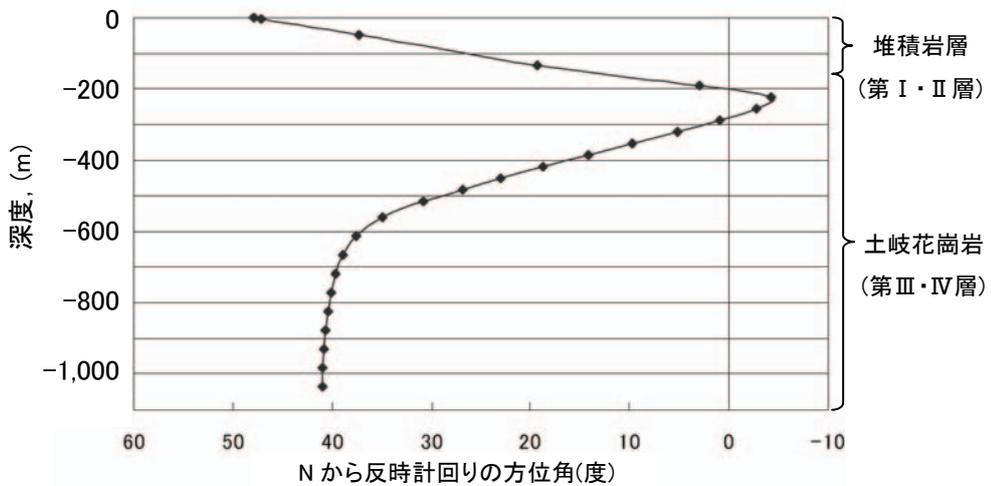


図 3.2-3 MIZ-1 号孔における応力分布の解析評価と実測値との比較 (圧縮：負)



(a) 水平面内主応力値 (圧縮：負)



(b) 最大主応力方向

図 3.2-4 立坑掘削地点で解析評価した応力分布

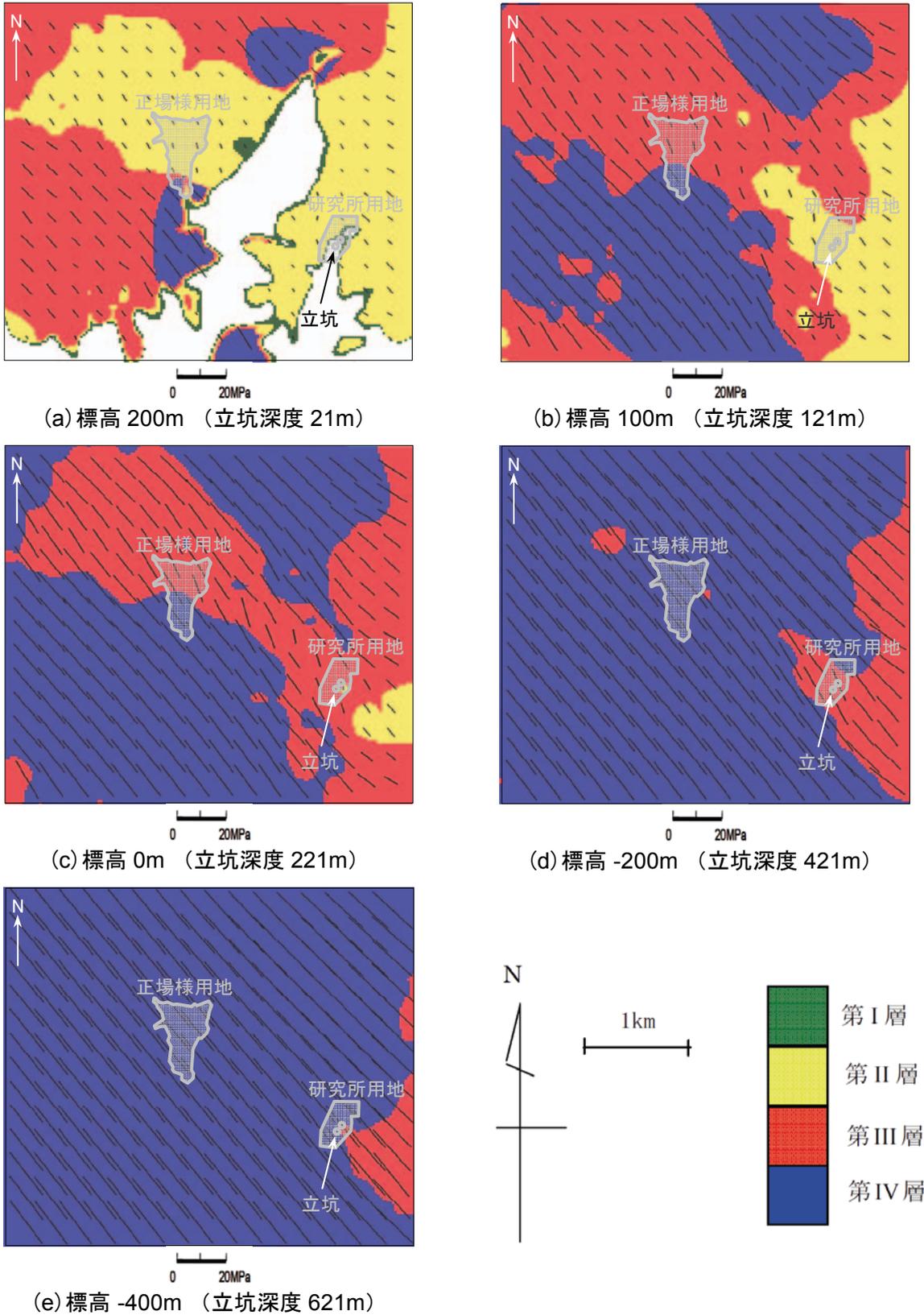


図 3.2-5 水平断面内の最大圧縮応力の大きさと方向の分布

3.2.2 初期応力分布の深度方向非線形性を考慮した広域応力場評価

(1) 概要

三次元境界要素法を用いて、解析領域に月吉断層をモデル化したケースと、これに MIZ-1 号孔で確認された断層の一つ (MIZ-1 号孔と深度 666m 付近で交差する断層、以後 666Fault と呼ぶ) を加えたケースについて広域応力場を逆解析した。逆解析は初期応力分布が深度方向に対して非線形性であることを考慮して行った。その結果得られた、解析領域の境界における広域応力を境界条件として、有限差分法を用いた順解析を行ない、666fault 近傍の MIZ-1 号孔での応力分布を推定した。これと実測との比較によって、666fault をモデル化する/しないの相違が推定応力分布の精度に与える影響について検討した。

(2) 解析モデル

図 3.2-6 に月吉断層と 666Fault を取り入れた解析モデルを示す。解析領域は東濃鉱山、正馬様用地、研究所用地を含む 2.4km×3.2km とした。地質モデルは、今回 666fault の有無が推定応力分布の精度に与える影響を検討したいことから、堆積岩を一括して一層として扱い、モデルの領域が上部堆積層と下部の土岐花崗岩からなるものと単純化した。断層のせん断・垂直剛性は、逆解析で広域応力場を得る段階では精度にあまり関係しないので、計算の効率性を考えて便宜的に 50MPa/m を初期値とした。

なお、この値はボーリング調査から推定される値と比較してかなり小さく、その差異は断層近傍の局所的な領域を検討する場合は無視できない。そのため、次の順解析の段階で、断層近傍にある MIZ-1 号孔の応力分布を得る際は、ボーリング調査から推定されるオーダーの値を用いて計算した。

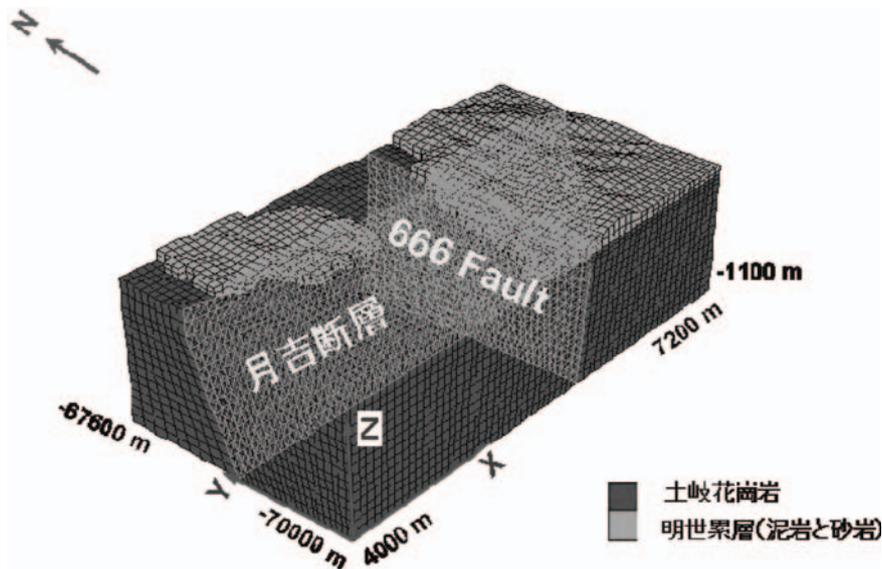
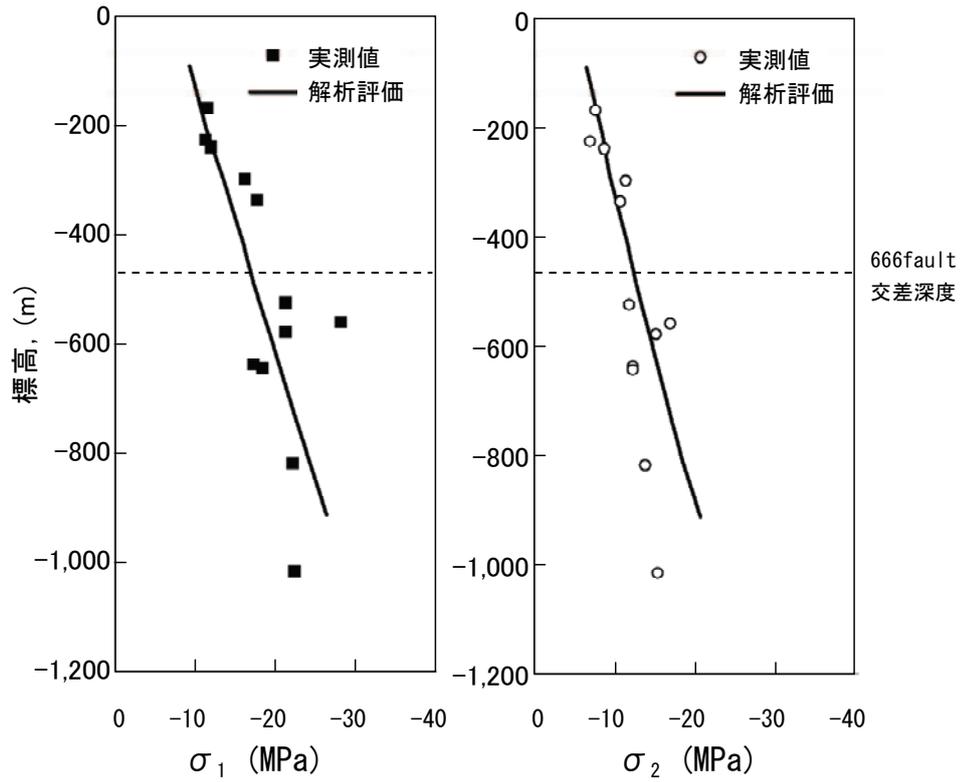


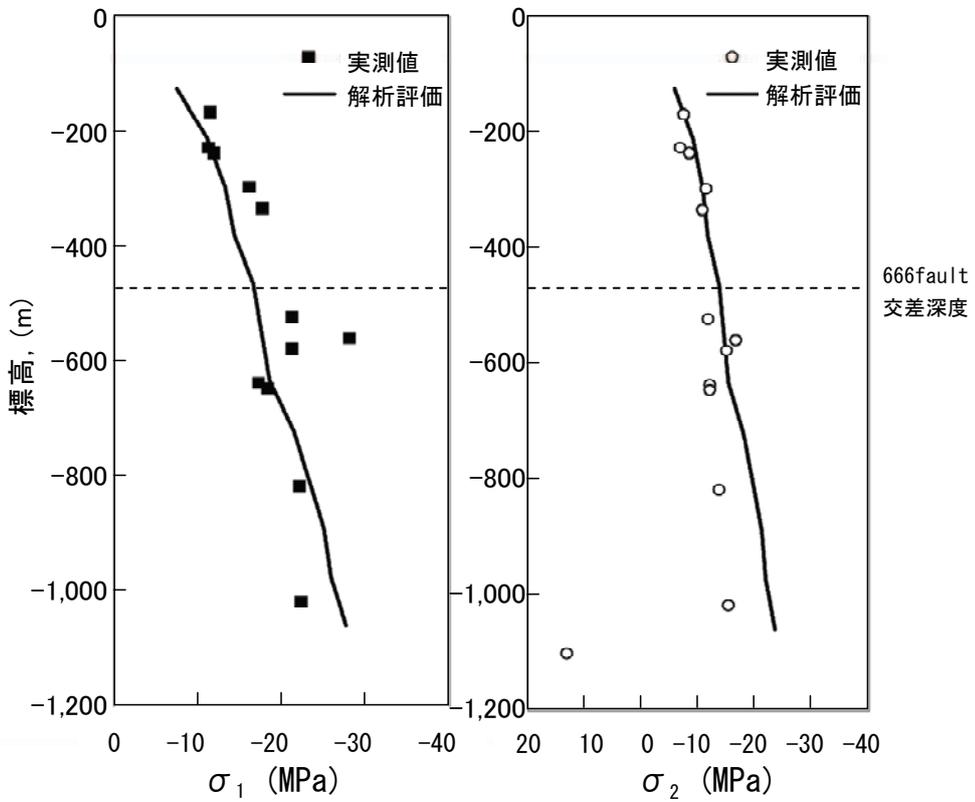
図 3.2-6 月吉断層と 666Fault の両方をモデル化した解析モデル

(3) 三次元応力状態の推定

解析で MIZ-1 号孔における三次元応力状態を推定した結果を図 3.2-7 に示す。この図は水平面内の最大、最小主応力 (σ_1, σ_2) の深度方向での分布について推定結果と水圧破碎法で測定された実測値を比較している。月吉断層だけをモデル化したケース (a) では、再現される応力分布がほぼ直線状であるのに対し、これに 666Fault を加えたケース (b) では、深度に応じた応力変化が示されて、とくに 666Fault 交差深度よりも深い区間で推定値と実測値の一致性が高くなっている。



(a) 月吉断層のみをモデル化したケース



(b) 月吉断層と 666fault の両方をモデル化したケース

図 3.2-7 研究所用地 MIZ-1 号孔における応力分布の解析値と測定値との比較 (圧縮 : 負)

3.2.3 不均一岩体が貫通断層を含む場合の広域応力場評価

(1) 概要

三次元有限要素法を用いて、解析領域を貫通するほど大規模な断層がある場合の、不均一岩体の広域応力場を評価する手法を検討した。具体的には、ローカールスケールの東濃地域（約 10km × 10km × 深さ 1.5km）を解析領域とし、これを貫通する月吉断層をモデルに含めて、広域応力場を評価する。ここで、本解析では現在の地質構造を前提として断層の滑りは想定しないこととし、モデルの月吉断層はその存在による剛性変化だけに寄与するものと仮定した。本作業では、モデルが与える初期応力（以下、推定応力）と、これとは別に測定された初期応力（以下、実測応力）との比較を通じて、広域応力場を評価するとともに、モデルの妥当性について検討する。

(2) 解析モデル

図 3.2-8 にローカールスケールの東濃地区を対象とした大規模モデルを示す。本モデルは東濃鉦山付近を中心とする東西 9.9km、南北 9.6km、深度方向は標高-1,000m までの領域であり、地質モデルとして、被覆層である瑞浪層群や瀬戸層群などの堆積岩を一括して一層であると扱い、上部の堆積層と下部の土岐花崗岩から構成されるものとした。また、モデルの中央部には本領域内を貫通する断層（不連続構造）である月吉断層をジョイント要素としてモデル化した。

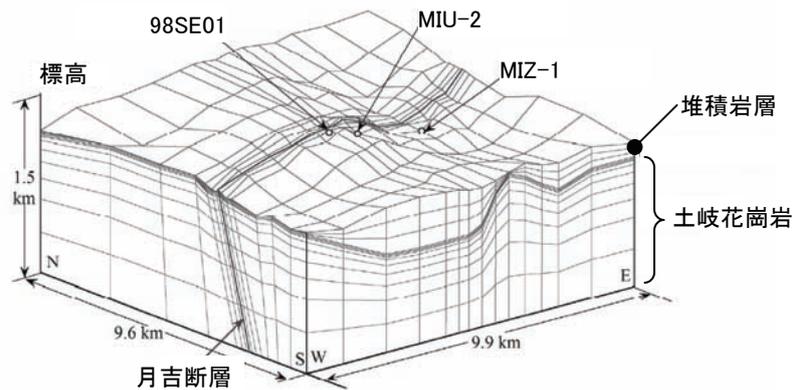


図 3.2-8 大規模モデル

図中には、実測応力を得ている、東濃鉦山 98SE-01 号孔、正馬様用地 MIU-2 号孔、瑞浪超深地層研究用地 MIZ-1 号孔の位置が示されている。

(3) 三次元応力状態の推定

98SE-01 号孔、MIU-2 号孔および MIZ-1 号孔で得られた、計 16 点の実測応力（1 点ごとに水平面内応力三成分 $\sigma_E, \sigma_N, \tau_{EN}$ と被り圧 σ_V の合計四成分、添字 E, N は東と北方向を示す）を初期条件としてモデルに与えて、東濃地域の広域応力場を推定した。次に、この広域応力場に基づく推定応力について、条件を変えてその誤差を比較したものを図 3.2-9 に示す。ここで比較のため、初期条件とする実測応力の数を減らしたケース、月吉断層をモデル化しないケースも含めている。

月吉断層をモデル化しなければ誤差が最も大きく、この領域の三次元応力状態が月吉断層の影響を受けていることがわかる。一方、月吉断層をモデル化した中では、98SE-01 号孔、MIU-2 号孔だけの実測応力（計 11 点）を初期条件とした方が、これに MIZ-1 号孔を加えた全ての実測応力（計 16 点）を初期条件とするよりも誤差が小さい。そこで、誤差の小さい前者の条件で、実測応力を与えた二本のボーリング位置から若干離れた、主立坑位置（MIZ-1 号孔近傍）での深

度に対する推定応力の変化を求めると図 3.2-10 のようになる。この図では主立坑における応力の一部 (σ_E) に大きな引張が現れて、現実にあるとは考え難い結果となった。以上のことより、このモデルでは、初期条件として実測応力を与える地点（ボーリング孔の位置）が、モデル全体の中で部分的にしか得られない場合、その周辺での推定応力は良好に得られるが、そこから離れた位置での推定応力は精度良く得られないものと考えられる。

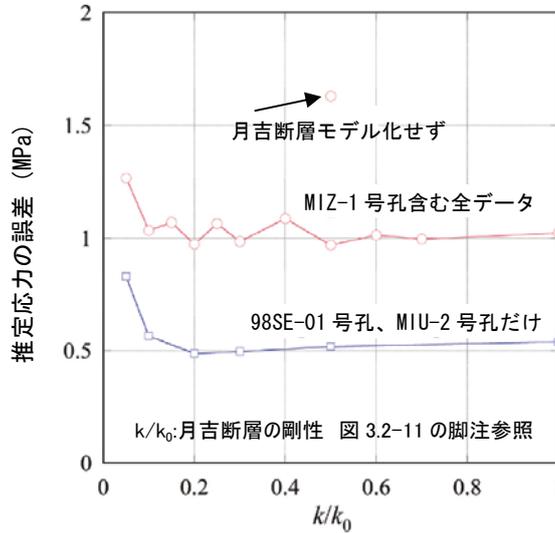


図 3.2-9 推定応力の誤差

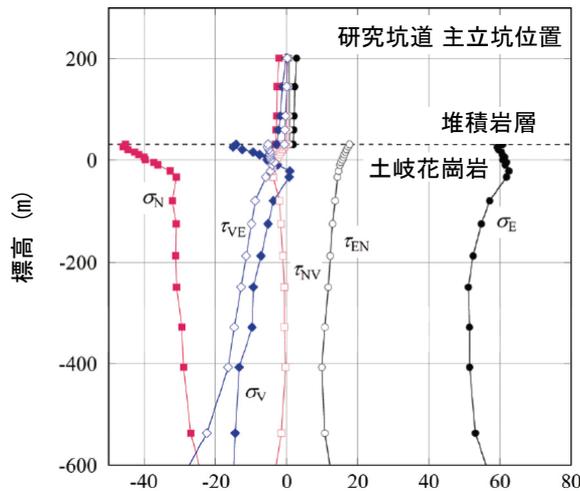


図 3.2-10 98SE-01号孔とMIU-2号孔の実測応力を初期条件とする主立坑位置（MIZ-1号孔近傍）での深度と推定応力の関係

次に、98SE-01号孔、MIU-2号孔、MIZ-1号孔の全てから計16点の実測応力を用いて広域応力場を推定し、これに基づいてMIU-2号孔とMIZ-1号孔における推定応力を計算した。推定応力を図 3.2-11 と 3.2-12 に示す。ここで比較のため両孔における実測応力を“田”印で示す。

図 3.2-11 と 3.2-12 で、月吉断層をモデル化する/しないのケース間を比較すると、評価応力は異なっており、全体的傾向として、図 3.2-9 で見た誤差の傾向と同じく月吉断層をモデル化する場合の方が実測応力と推定応力との一致性は高い。一方、月吉断層をモデル化したケースでは、その断層の剛性により応力値は多少異なるが、実測応力と推定応力との一致性という点で大きな違いは現れなかった。

また、MIZ-1号孔での実測応力と推定応力との一致性が比較的高いのに対し、MIU-2号孔での一致性は全体的に高くない。このことから、このモデルでは互いに1km程度離れた場所のボーリング孔（MIU-2号孔とMIZ-1号孔）の両者を示す解に収束していないものと考えられる。

すなわち解析モデルが妥当であるなら、MIZ-1号孔の初期応力データとMIU-2号孔の初期応力データがこのモデルにおける初期条件として矛盾する関係にあると言える。ここで用いた初期応力データは水圧破碎法で測定されており、鉛直成分は被り圧を仮定している。すなわち真の三次元の測定でないため、その誤差の影響が解の収束に関わっている可能性がある。さらなる検討のためには、用いた初期応力データの妥当性の再検証と、より正確な三次元初期応力測定データの追加が必要である。

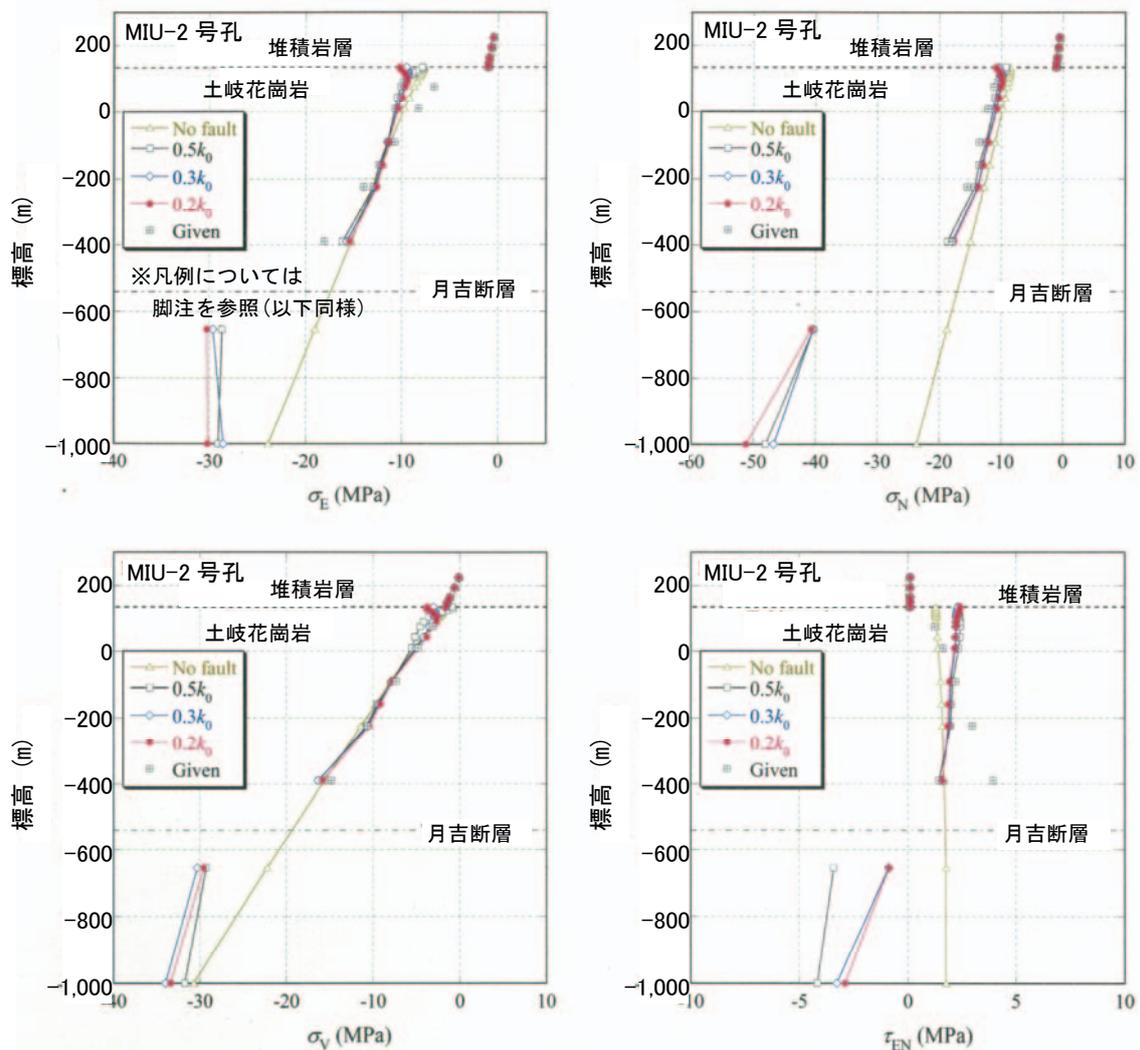


図 3.2-11 与えた実測応力と推定応力の比較 (MIU-2号孔位置)

注) 凡例中 No fault は月吉断層をモデルに入れないケース、その他はそれを入れたケースである。また後者では、ボーリング調査結果から推定した月吉断層のせん断、垂直剛性値の組を k_0 (K_{n0} , K_{s0}) とし、その 0.2~0.5 倍した値 ($0.2k_0 \sim 0.5k_0$) をモデル内の断層に適用している。Given は初期条件として与えた実測応力である。

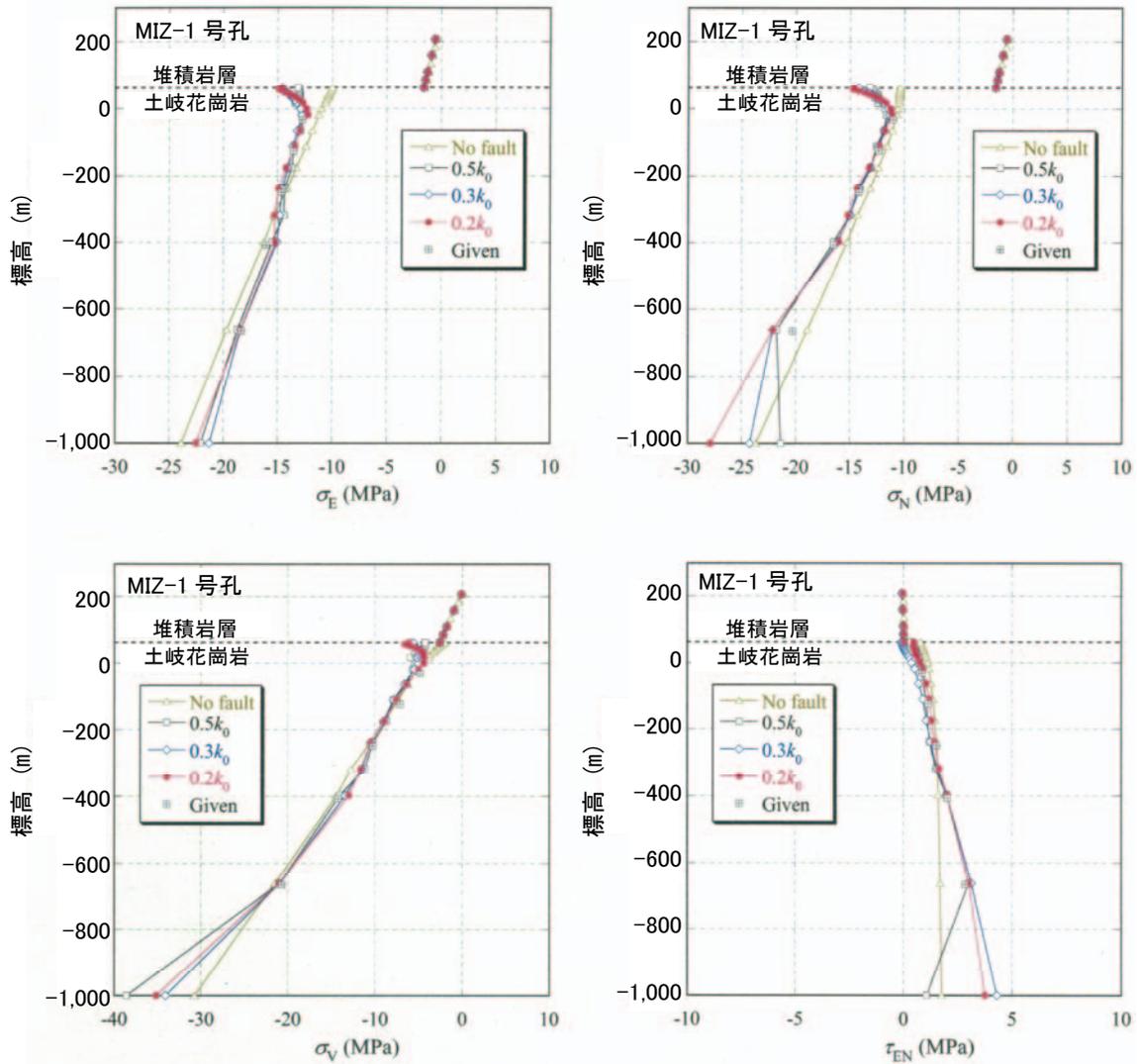


図 3.2-12 与えた実測応力と推定応力の比較 (MIZ-1 号孔位置)

3.3 ボーリングコアを用いた岩盤応力評価手法の高度化に関する研究

2.3 で述べた、本手法に関する残された課題のうち、ボーリングコア採取から AE/DRA 法による試験実施までの経過時間の影響を明らかにすることを目的として、以下の検討を行った。なお、ボーリングコアは初期応力の他、コア採取の過程で過渡的な応力集中を受けている場合もあり、コアの記憶応力が初期応力として妥当であるか別に検討が必要と考えられる。本作業では、初期応力としての妥当性検証は行っていないので、以下、評価されるものはコアの記憶応力とする。

3.3.1 AE 法による測定結果

ボーリングコアの採取時からの経過時間が AE カウント、コアの記憶応力の推定値に及ぼす影響を整理したものを図 3.3-1 に示す。ここで AE カウントとは試験における AE の発生総数としたいが、重なり合った複数の AE の発生イベントを分離して数えることは難しいため、AE 観測波形の振幅が所定レベルを超えた回数を数え上げたもの (リングダウンカウント) とした。ボーリングコアの採取後 3 ヶ月時点までの結果では、時間の経過とともにばらつきが大きくなり、3 ヶ月時点で AE カウント総数が最大ピークとなるが、これらから推定されるコアの記憶応力の平均は 35~40MPa 程度に収まっている。しかし、6 ヶ月以降では推定される応力の平均が 15~

20MPa 程度まで急減し、全 AE カウントも小さくなることが確認された。すなわちこの間にボーリングコアの応力記憶機構になんらかの変化があったことを示しており、AE 法による応力評価の適用限界が 3~6 ヶ月の間にある可能性が考えられる。

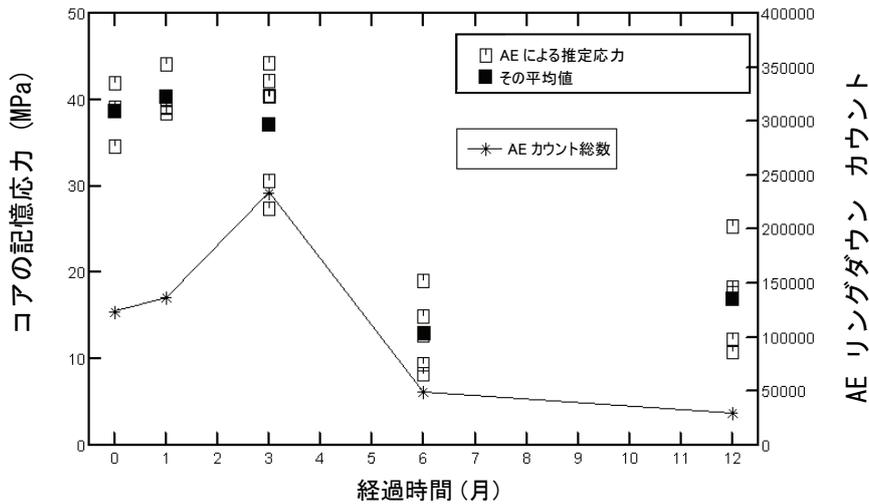


図 3.3-1 コアの採取からの経過時間と AE カウント・コアの記憶応力の推定値との関係

3.3.2 DRA 法による測定結果

DRA 法を用いて推定したコアの記憶応力の経時変化を図 3.3-2 に示す。187 日後および 368 日後の計測では推定値がやや過大になる傾向が見て取れる。一方、368 日後の計測でも推定値のばらつきは 98 日後及び 187 日後の計測よりも小さくなっており、コアの記憶応力の推定値のばらつきは時間の経過というよりは試験片個々の力学的な物性のばらつきによるものと推測される。368 日後の計測では平均で 31.5MPa と 6 日後及び 39 日後の試料の平均値である 28.6MPa と比較して 10%程大きな値が得られた。

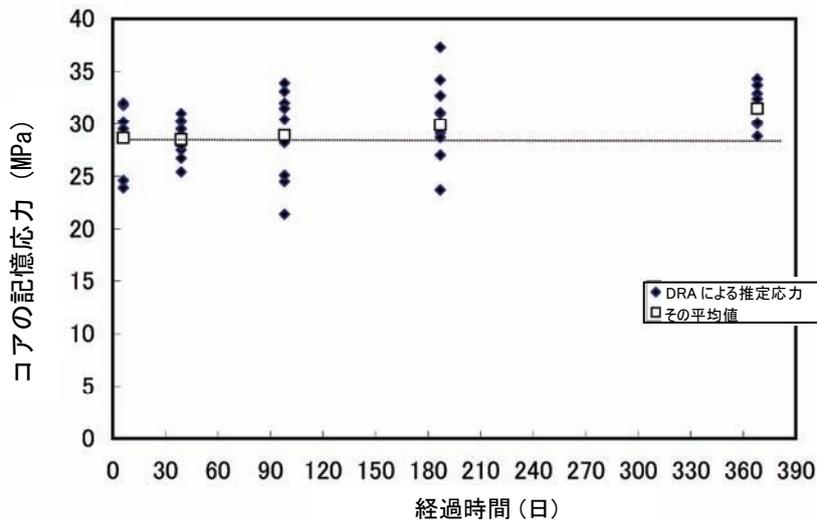


図 3.3-2 コアの採取からの経過時間と DRA 法によるコアの記憶応力の推定値との関係

DRA 法では、記憶応力判定の根拠となる、繰返し载荷で得られたひずみ差-応力関係の屈曲点を客観的に読み取ることが望ましい。その方法として、予備試験を行って既知の記憶応力に対

して認められる屈曲点での移動平均値の変化率を得ておき、これをしきい値としてコアの記憶応力を抽出することが考えられる¹⁰⁾。この方法によると、しきい値の変化はコアの記憶応力の評価値の変化に結びつくため、しきい値の経過時間に伴う変化がどのようなものであるか検討した。

図 3.3-2 では、どの経過時間に対しても、コア採取 6 日後の予備実験で決めたしきい値を用いてコアの記憶応力を評価したものをプロットしている。一方、表 3.3-1 は経過時間毎に予備試験を行って求めたしきい値である。6 日後の計測よりも過大なコアの記憶応力が得られる 187 日後と 368 日後で、しきい値が 6 日後のそれと比較して小さいことが分かる。そこで 187 日後と 368 日後について、その経過時間の予備実験で決めたしきい値を用いてコアの記憶応力を求めると、図 3.3-3 のとおりとなる。図 3.3-2 で見られた過大評価の傾向は見られなくなっている。全体を通して平均値で 28.0~28.9MPa とほぼ一定のコアの記憶応力の評価値が得られた。

このようにしきい値が経過時間に伴い変化することは、しきい値の決定の根拠とした正規化した応力-差ひずみ関係も経過時間に伴い変化していることを示唆する。しかしながら、それを直接確かめるため、正規化した応力-差ひずみ曲線の傾きを比較したところ、試験片ごとのばらつきが大きく、今回は傾向を読み取るには至らなかった。

なお、今回は DRA における計測までの経過時間の影響を検討するための測定であり、通常の DRA 計測では、計測の都度、予備実験でしきい値を決めている。ゆえに、しきい値の経過時間に伴う変化がおよぼす DRA 応力測定への影響は小さいと考えられる。

表 3.3-1 しきい値の一覧

試験体名	経過時間 (日)	予備実験 既知先行応力 (MPa)	しきい値の値 ()は差ひずみ算定に用いた載荷サイクル	
			(1-2)	(2-3)
NESW-03	6	50	0.116	0.105
V-14	98	70	0.130	0.097
V-21	187	50	0.049	0.054
V-22	368	50	0.042	0.044

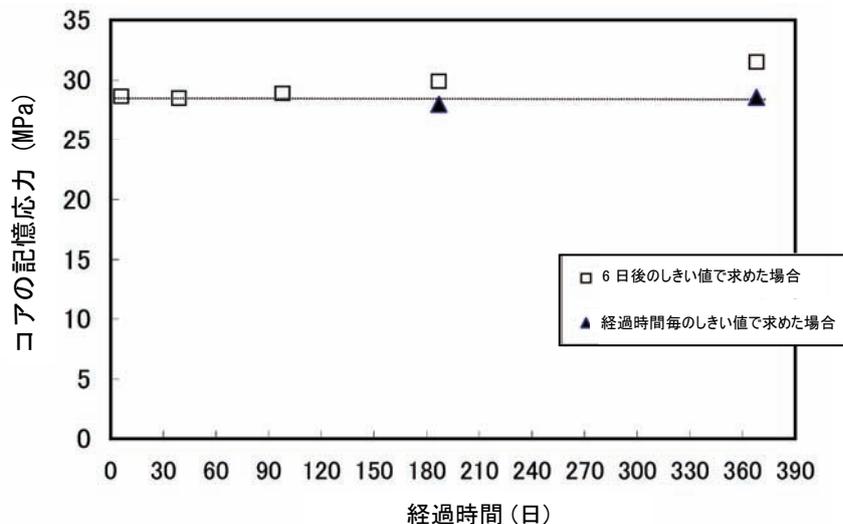


図 3.3-3 187 日後および 368 日後についてしきい値を見直した後のコアの記憶応力の推定値

3.4 長期岩盤挙動評価に関する研究

3.4.1 長期岩盤挙動評価のための現象論的研究

現象論的研究においては、1997年度から実施している田下凝灰岩の低応力レベルでの湿潤状態での長期クリープ試験を継続するとともに、超深地層研究所計画における研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の長期挙動を予測・評価するために、MIZ-1号孔で採取した土岐花崗岩の力学試験およびコンプライアンス可変型構成方程式のパラメータを取得するための実験を実施した。

(1) 堆積岩（田下凝灰岩）の長期クリープ試験

空圧式クリープ試験装置（図 3.4-1 参照）を使用して、1997年度から実施している田下凝灰岩の低応力レベル（一軸圧縮強度 9.1MPa の 30%）、湿潤状態での長期クリープ試験¹⁶⁾を継続するとともに、過去 9 年分のクリープデータをもとに長期クリープ挙動を分析した。

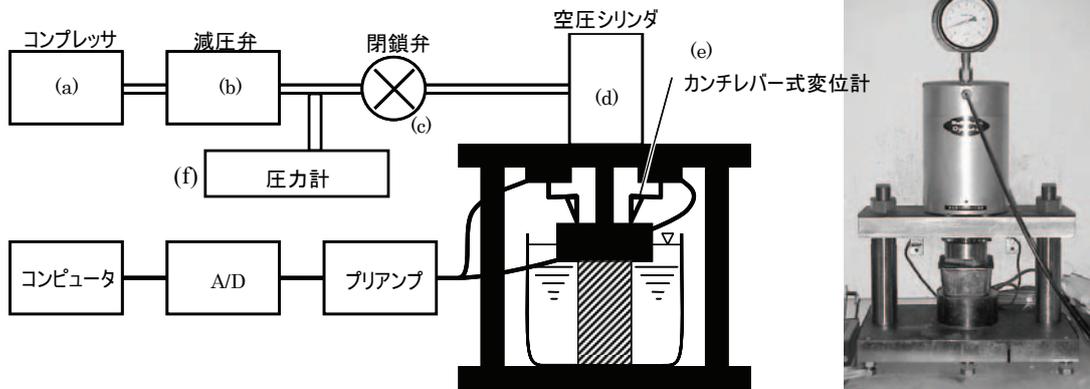


図 3.4-1 空圧式クリープ試験装置の概要

図 3.4-2 に 2002 年から 2006 年までの各月平均としたクリープひずみの変化を、図 3.4-3 にクリープひずみの試験開始時からの経時変化を示す。なお、図 3.4-3 中の前回とは、1994 年 11 月～1996 年 8 月まで実施した試験結果¹⁷⁾であり、今回とは、1997 年 5 月から実施している試験結果で、2006 年 12 月時点までのデータを示している。

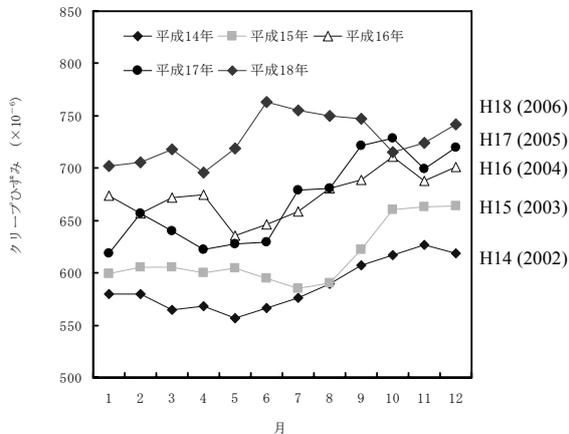


図 3.4-2 クリープひずみの経時変化（2002～2006 年）

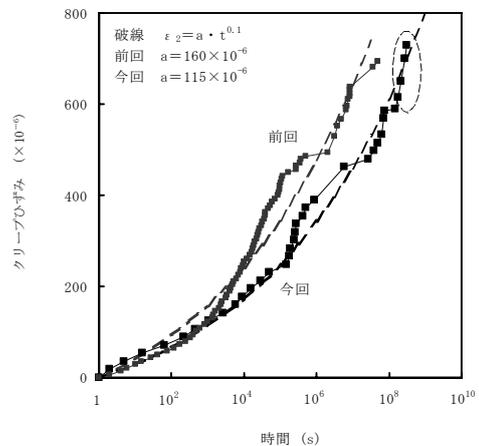


図 3.4-3 クリープひずみの経時変化

図 3.4-2 によれば、試験室の空調を 20°C 一定に設定しているにも関わらず、クリープひずみには季節変動が見られることがわかる。これは、外気変動に連動して、空調機や装置システムそのものが微妙に温度や湿度変化によりドリフトしていることが考えられる。しかし、クリープひずみの長期的な変化において、試験開始後 9 年を経過しても微増していることが、図 3.4-2 と図 3.4-3 の両方から伺える。

図 3.4-4 にクリープひずみ速度の経時変化を示す。図 3.4-3 と図 3.4-4 より、クリープひずみは増加傾向を継続する一方で、クリープひずみ速度は、低下傾向を継続して示していることがわかる。図 3.4-3 では、 10^5sec までは、ほぼ直線的にひずみが増加しており、対数クリープ則にほぼ従っているが、それ以降は、経過時間の対数に対するひずみの増加率が多少大きくなっており、対数クリープ則からずれ始めていることも伺える。この図より田下凝灰岩の低応力レベルでのクリープひずみは、式 (3.4-1) で表現できることが確認できる¹⁸⁾。

$$\varepsilon = a \cdot t^{0.1} \tag{3.4-1}$$

なお、 t は時間、 a は定数である。

図 3.4-4 では、クリープひずみ速度が時間の経過とともに、減少していることがわかる。式 (3.4-1) を時間で微分すると、式 (3.4-2) が得られ、これも実験結果と良く一致していることがわかる。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0.1 a \cdot t^{-0.9} = b \cdot t^{-0.9} \tag{3.4-2}$$

また、式 (3.4-1) および式 (3.4-2) より次式が得られる。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0.1 a^{10} \cdot \varepsilon^{-9} \tag{3.4-3}$$

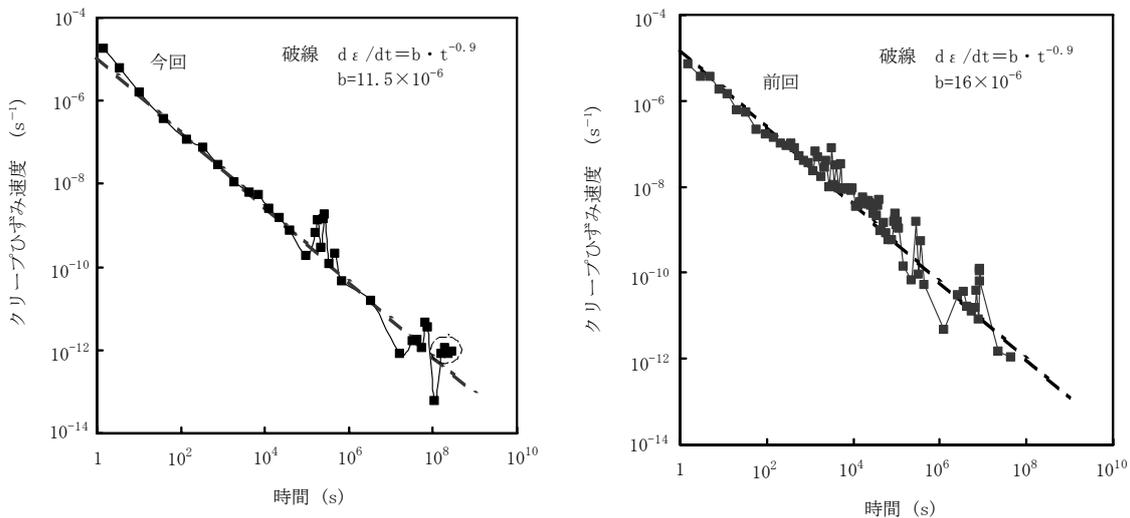


図 3.4-4 クリープひずみ速度の経時変化

図 3.4-5 は、クリープひずみとクリープひずみ速度の関係を示したものである。クリープひずみにして 200×10^{-6} (クリープひずみ速度にして $10^{-9}/\text{s}$) まではほぼ直線的となっており、対数クリープ則に従っているが、それ以降はクリープひずみが増加してもクリープひずみ速度の減少率

は小さくなっていることがわかる。

図 3.4-5 の破線は、式 (3.4-3) を示したものである (今回: $a=115 \times 10^{-6}$ 、前回: $a=160 \times 10^{-6}$) が、実験結果とよく一致していることがわかる。

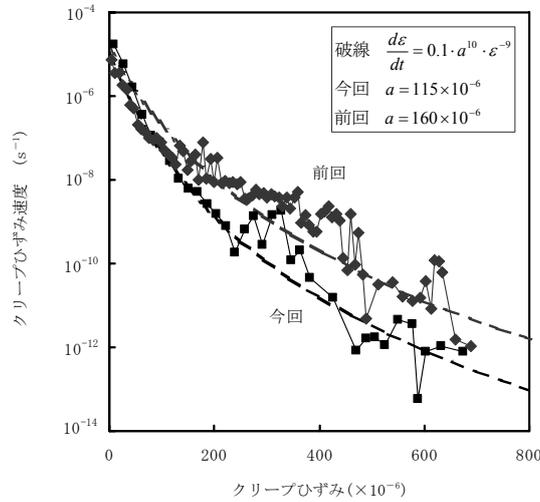


図 3.4-5 クリープひずみとクリープひずみ速度の関係

時間の経過に従い、クリープひずみ速度は減少しているが、その速度の減少がどの程度であるかは、長期の安定性を考える上で重要である。現在、クリープ試験を開始して 9.5 年が経過し、測定結果に年変動が見られるなどの問題点も見られるが、クリープひずみ速度の変化に注目し、今後も実験を継続していく予定である。

(2) 結晶質岩 (土岐花崗岩) の力学試験

今後計画している一般化応力緩和試験など、時間依存性を調べるための実験計画のための参考データをを得るために、MIZ-1 号孔で採取した土岐花崗岩ボーリングコア (深度 476~478mabh、健岩部) を使用して、一軸圧縮強度、ヤング率、ポアソン比 (以上試料寸法 φ 25mm × H50mm)、圧裂引張強度 (試料寸法 φ 25mm × H13mm)、P 波弾性波速度などの基礎的な力学物性を測定した。

試験結果を表 3.4-1 に示す。本結果は、過去に実施した試験結果¹⁹⁾の範囲内にある。

表 3.4-1 MIZ-1 号孔で採取した土岐花崗岩の力学試験結果

比重	2.61~2.63	(平均 2.62)	
一軸圧縮強度	155~166	(平均 161)	MPa
ヤング率 (50%接線)	52.8~60.1	(平均 55.3)	GPa
ポアソン比 (50%割線)	0.24~0.39	(平均 0.32)	
圧裂引張強度	5.6~7.5	(平均 6.6)	MPa
弾性波速度 (P 波)	4.55~5.00	(平均 4.81)	km/s

(3) 結晶質岩 (土岐花崗岩) の時間依存性を考慮した構成方程式のパラメータ取得

MIZ-1 号孔で採取した土岐花崗岩ボーリングコア (深度 476~478mabh、健岩部) を対象として、2 種類のひずみ速度を交互に切り換えた一軸圧縮試験^{20),21)} (図 3.4-6) を行ない、コンプライアンス可変型構成方程式²²⁾ (式 3.4-4) のパラメータ n_3 を取得した。次に、この n_3 を前提として、応力-ひずみ関係に最もフィットするパラメータ m_3 を求めた²³⁾。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a_1(\sigma^*)^{n_1}(\lambda^*-1)^{-m_1} + a_3(\sigma^*)^{n_3}(\lambda^*)^{m_3} \quad (3.4-4)$$

上式はひずみ ε と応力 σ の比であるコンプライアンス $\lambda = \varepsilon / \sigma$ が時間の経過とともに徐々に増加すると考えたものであり、取り扱いやすいように、 λ を初期値 λ_0 で正規化した値を λ^* ($= \lambda / \lambda_0$) とした。また、 σ を一軸圧縮強度 σ_c で正規化した値を σ^* とした。この構成方程式の右辺第1項は一次クリープ（ひずみ硬化現象）を、第2項は三次クリープ（破壊現象）を、それぞれ表している。

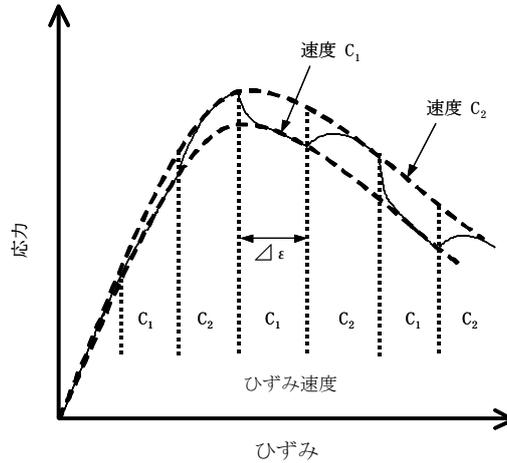


図 3.4-6 2種類のひずみ速度を交互に切り換えた一軸圧縮試験の概念図

三次クリープや強度破壊点以降では、式 (3.4-4) において第1項に比べ第2項の影響が大きくなる。そのため、式 (3.4-4) は次式で近似することができる。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a_3(\sigma^*)^{n_3}(\lambda^*)^{m_3} \quad (3.4-5)$$

ただし、 $a_3 = \{m_3 / (n_3 + 1)\}^{m_3 / (n_3 - m_3 + 1)} / t_0$

であり、 t_0 は強度破壊点に達するまでの荷重時間である。式 (3.4-5) は、ひずみ速度一定試験に関して、応力-ひずみ曲線の解析解が得られ、2通りのひずみ速度で得られる一軸圧縮強度の増加率 σ_i (%) は次式で示される。

$$1 + \sigma_i / 100 = (C_2 / C_1)^{1 / (n_3 + 1)} \quad (3.4-6)$$

この関係を利用し、構成方程式のパラメータ n_3 を実験的に取得することができる。

ひずみ速度を交互に切り換える試験を実施し、一軸圧縮強度の変化から土岐花崗岩の n_3 を求めた結果、 $n_3 = 52$ となった。この値は福井の研究²⁴⁾による稲田花崗岩（一軸圧縮強度 169 MPa）の $n_3 = 51$ とほぼ同様の値であった。過去の研究で求められた結果²⁵⁾と比較すると、土岐花崗岩は比較的、応力-ひずみ関係における時間依存性が小さいものといえる。

式 (3.4-5) を用い、数値実験より m_3 を求めたところ、 $m_3 = 60$ となった。これらの値を用いた数値実験の結果、ほぼ応力-ひずみ曲線を再現できることを確かめた (図 3.4-7)。

次年度以降は、式(3.4-4)右辺第1項のパラメータの取得を実施し、FEMなどに利用できる構成方程式を検討していく予定である。

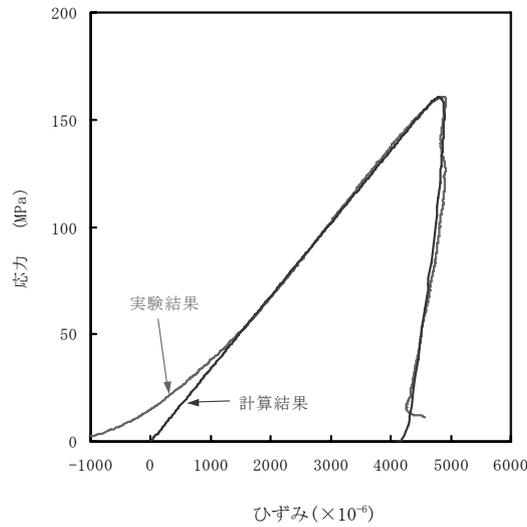


図 3.4-7 土岐花崗岩の応力-ひずみ曲線

3.4.2 長期岩盤挙動評価のための理論的研究

理論的研究においては、MIZ-1号孔で採取した土岐花崗岩を用いて、レーザー共焦点顕微鏡観察下において応力緩和試験を行った。また、多結晶質な岩石の微視レベルの破壊機構に深く関わっている各鉱物の圧縮応力下の化学反応による溶解現象を確認するために、石英単結晶供試体およびガラスビーズを用いた圧縮試験を試みた。さらに、石英の圧力溶解反応現象についての理論構築と均質化法をベースにした数値解析法を試みた。

(1) レーザー共焦点顕微鏡観察下における岩石供試体（土岐花崗岩）の応力緩和試験

試験に用いた供試体は、採取コアを40×10×5mmの直方体に加工し(図3.4-8)、観察面である40×10mmの供試体上部面は鏡面仕上げにし、端面の平行および直角の精度は4/1000程度で製作した。

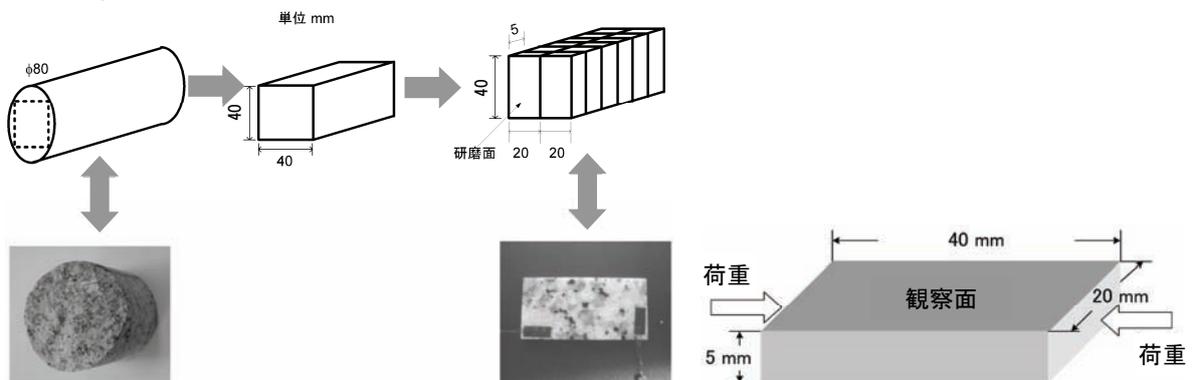


図3.4-8 供試体作製方法

供試体の試験装置への設置状況を図3.4-9に、緩和応力と時間の関係を図3.4-10に示す。なお、図3.4-10において記号A1は、深度155.00～155.12 mabhから、記号A2は、深度663.88～664.00 mabhから採取したコアから作製した供試体を示す。図3.4-10より、同一の初期応力（80 MPa下）ではA2の方がA1よりも緩和応力が若干大きい。これはA2の供試体がA1の供試体よりも深層部分にあってコア採取時の応力解放量が大きく、力学的に微細組織が破壊されている可能性が考えられる。

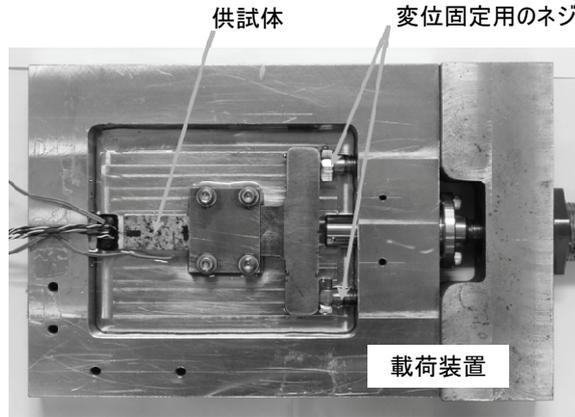


図 3.4-9 供試体セット状況

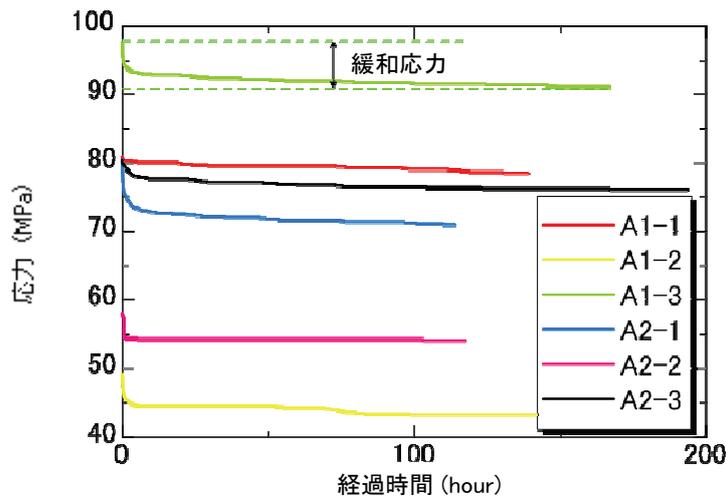


図 3.4-10 緩和応力と時間の関係

なお、応力緩和試験に先立ち、応力緩和試験と同じ装置を用い、供試体が水で飽和した水浸状態で一軸圧縮試験を行った。その結果は、A1（MIZ-1号孔：深度155mabh付近）が163MPa、A2（MIZ-1号孔：深度664mabh付近）が143MPaであった。

図3.4-11のように、レーザー共焦点顕微鏡による観察では、鉱物（石英Q・長石F・黒雲母B）の表面と粒界が明瞭に識別される。载荷直後（約1時間後）の顕微鏡観察画像（初期観察画像）に標点を定めて図に示したような四角形メッシュを構成し、応力緩和試験終了時（変形後）の各点の変位を求めて各四角形のひずみを求めた。ひずみの算定には有限要素近似のB-マトリックス（ひずみ-変位マトリックス）理論を用いた。

各鉱物のひずみは、局所的な幾何形状と各鉱物間の境界の性質に強く依存していると考えられるが、本試験においては、境界での変形が個々の鉱物の表面での変形よりも大きい場合も観察さ

れた。これは、境界部分での材料の特性と応力集中に起因していると考えられる。

二つの隣接した鉱物とその境界の表面変形パターンを調べるために、レーザー共焦点顕微鏡による観察で得た石英 (Q) と黒雲母 (B) およびその境界の変形挙動 (ひずみ変化) を用いて、鉱物と境界での平均ひずみ (圧縮: 負) を有限要素近似により求めたものを図 3.4-12 に示す。ここで、長方形に対して平均ひずみが重心点にかかるとした。図 3.4-12 に示すように、石英内と境界では大半の領域が圧縮ひずみを呈したのに対し、黒雲母内では境界近傍の 1 点で大きな引張ひずみが発生し、それが鉱物全体に影響を与えている。この違いはマッシブな石英とシート状構造の黒雲母との差が表れたものと考えられる。

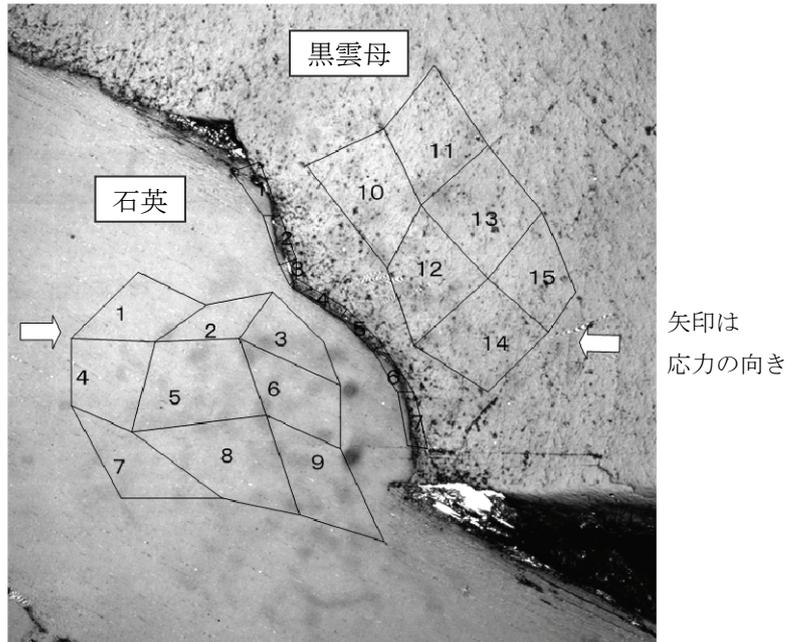


図 3.4-11 四角形メッシュ群 (供試体 A2)

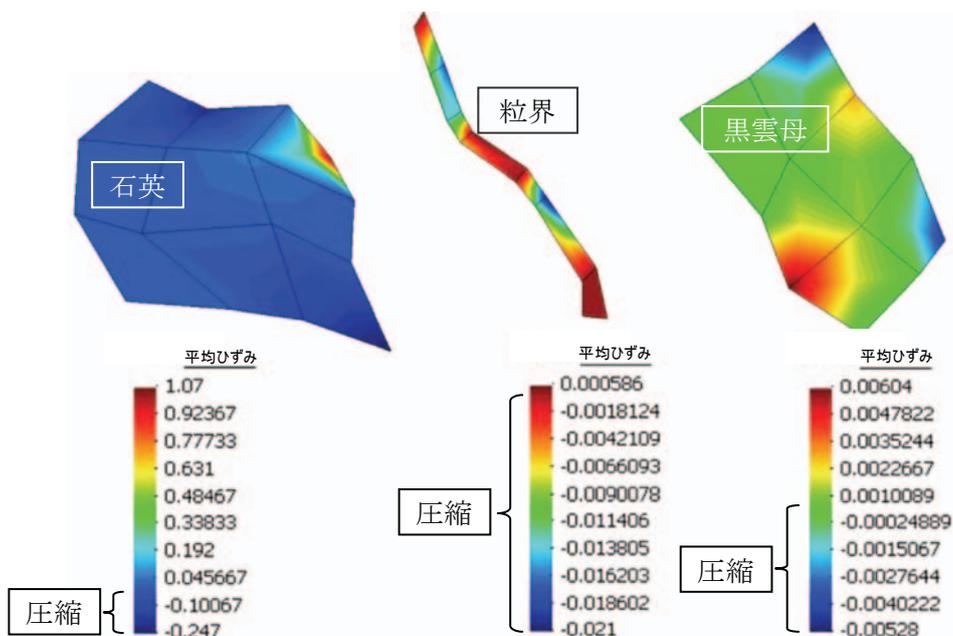


図 3.4-12 平均ひずみの等高線 (供試体 A2)

(2) 水浸载荷下での鉱物の化学変化実験（石英の溶解に関する実験）

花崗岩の造岩鉱物である長石や石英などのケイ酸塩鉱物に一定以上の応力が作用すると溶解する²⁶⁾ことが知られており（図 3.4-13 参照）、亀裂部先端や各鉱物結晶が接触する境界で水が介在した化学反応が起こり、水分子の移送と練成して時間依存変形破壊挙動が生じることが基本的なメカニズムであると考えられる。これらの反応は機械的作用と化学反応場が複合した連成現象（力学化学反応）である。岩石の骨格系を形成する固体部分の応力変形問題の解明に向けて、化学的な変化が鉱物の長期的な挙動に与える影響について、本年度は、ガラスビーズなどを使用したモデル実験的なアプローチにより検討した。

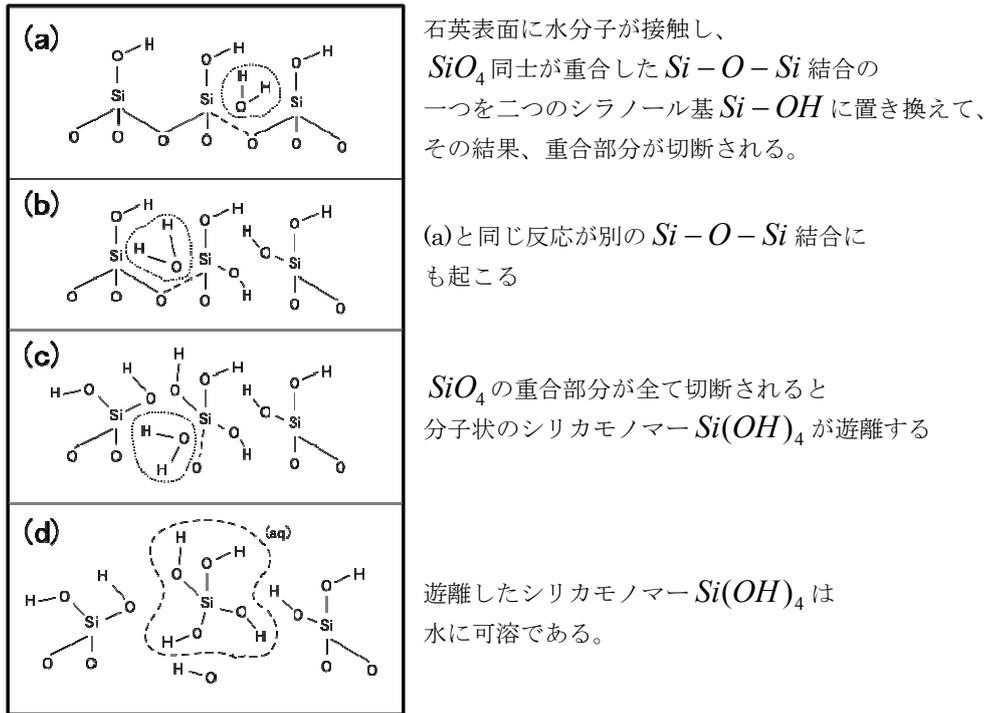


図 3.4-13 水溶液中における石英の溶解挙動²⁶⁾に加筆

本検討では常温で石英の溶解の状況を観察することを第一の目的として、微粒子粉碎の方法^{例え}ば²⁷⁾とは異なる以下の二つの方法で溶解試験を行った。試験は恒温室内で温度 20℃ に保ち実施した。

・試験 1：ガラスビーズ試料

円柱状の石英試料の下面に直径 1 mm の石英ビーズを接触（図 3.4-14）させ、石英試料に圧力を载荷して接触点に圧力を集中させ、常温・高圧下の石英溶解を観察する（図 3.4-15）。

・試験 2：石英円錐台試料

円柱状の石英の先端を円錐台に加工（図 3.4-16）し、その先端と他の円柱状石英試料とを接触させて圧力を载荷し、接触点に圧力を集中させて常温・高圧下の石英溶解を観察する（図 3.4-17）。

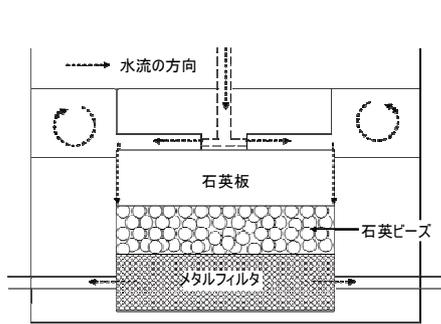


図 3.4-14 接触部の概要

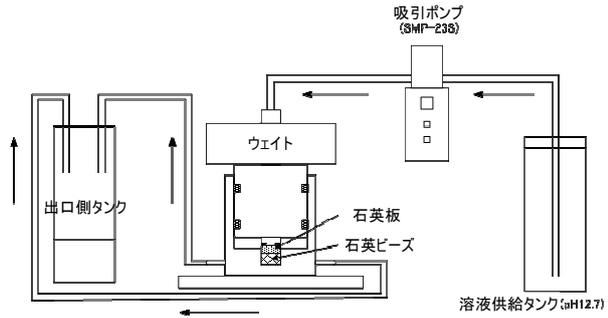


図 3.4-15 試験方法 1 の概要

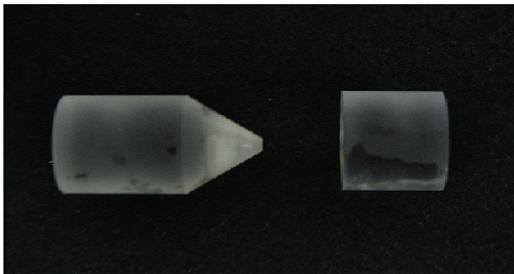


図 3.4-16 石英円錐台試料

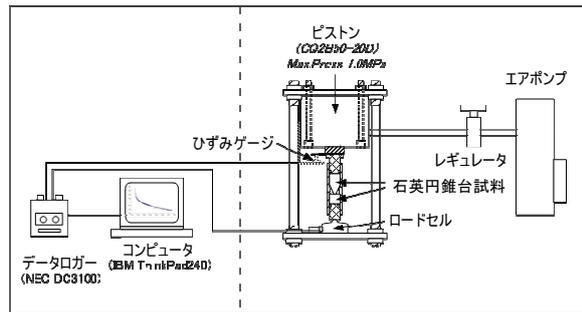


図 3.4-17 試験方法 2 の概要

なお、石英試料は、工業用の単結晶から (001) 面が試験面となるように削り出した。また、石英を浸す媒体として、水酸化ナトリウム NaOH で pH を調整した高 pH (pH=12.7) の水溶液を用いている。これは、地層処分場などの地下空洞掘削における湧水抑制や支保効果を得るためのセメント材料の使用が、隣接した地下水の高 pH 化を引き起こす可能性があること、高 pH で石英の溶解は促進されることから、これらを模擬したものである。二つの試験に共通するのは、接触部に圧力が集中するようにしたことであり、常温で石英の溶解あるいはその後の再沈殿の様子を顕微鏡、特にレーザー共焦点顕微鏡 (CLSM: confocal laser scanning microscope) で観察することが可能となる。試験条件を表 3.4-2 に示す。

表 3.4-2 試験条件

	試験 1	試験 2a	試験 2n
温度 [°C]	25	25	25
pH	12.7	12.7(*)	12.7
接触面における圧力 [MPa]	16	600	600
試験期間 [day]	14	7	7

(* Na₂SiO₃ を 4.914 × 10⁻⁷[mol/l] 含んだ状態での pH)

試験後の、石英同士が接触して生じた溶解部分のレーザー共焦点顕微鏡による観察結果を図 3.4-18 に示す。顕微鏡写真の下に表示されているグラフは、ラインの引かれた断面の標高を表している。図 3.4-18 によれば、ガラスビーズや円錐台石英試料が、接触していた面に溶解したと思われる窪みが観察された。試験 2 では、石英試料同士が接触していた部分には、溶解によると思われる体積減少が認められ、その外側では、再沈殿によると思われる堆積増加が認められる。一方、ガラスビーズを用いた試験 1 の結果では、溶解部と再沈殿部を明瞭ではない。これは、ガラスビーズの成分が石英 100%ではなかったことや、ガラスビーズが厳密な球体形状でなかったこ

と、試験 1 の圧力が複数のガラスビーズに分散されることから溶解度合いにムラができたことが考えられる。

今回実施した試験により、物理的な溶解断面の様子を確かめることはできたが、試験期間が 1～2 週間と短かったことから、溶解部と再沈殿部を明瞭に同定できなかった。化学的な検証や、試験長期継続が今後の課題である。

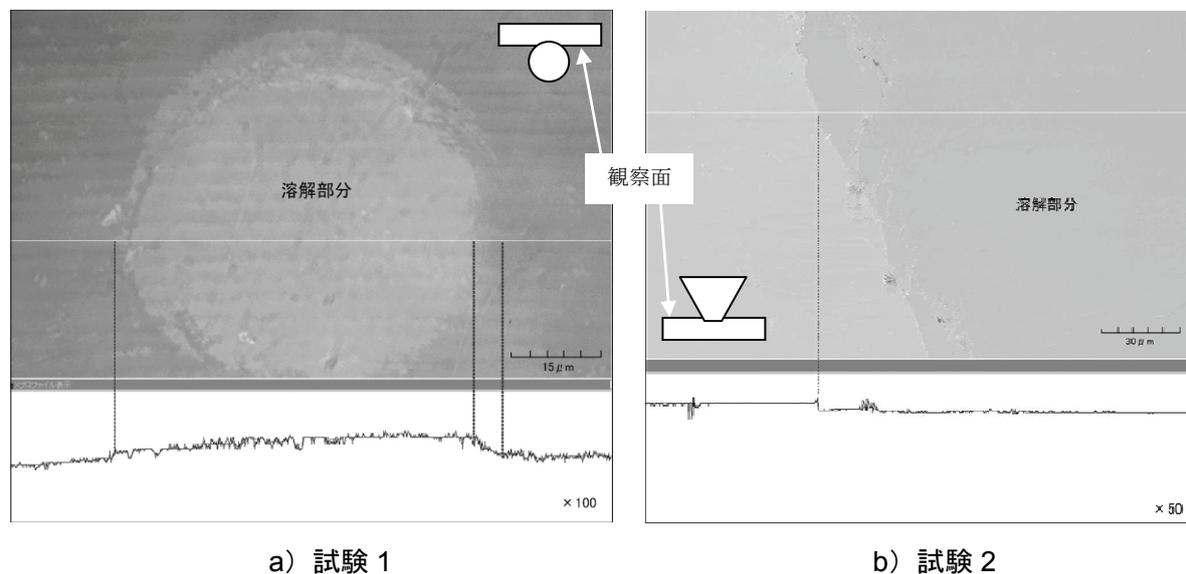


図 3.4-18 溶解面の状況の例

(3) 均質化理論に基づく結晶質岩の長期挙動の予測手法（石英（けい酸質塩鉱物）の溶解反応に関する均質化解析）

岩石の時間依存性を伴う破壊過程を表現するために、これまでの研究で、均質化解析に強不連続解析を導入した亀裂進展解析手法を開発し、岩石供試体の応力緩和現象をシミュレーションでできることを確認した²⁸⁾。

一方、岩石中には多くのケイ酸塩鉱物が含まれている。花崗岩の造岩鉱物は、石英 (SiO_2)・長石 (アルミノケイ酸塩)・黒雲母 (層状ケイ酸塩) であり、花崗岩はケイ酸塩鉱物の集合体であると言える。ケイ酸塩鉱物は強アルカリの条件下でなければ、一般に、水に難溶であるが、一定以上の応力が作用するとシロキサンが加水分解されて水に溶け出す²⁹⁾。石英や長石等の鉱物が応力負荷条件下で溶解することによって岩石の時間依存変形・破壊挙動が生じるのは、1) 微視亀裂先端部における応力集中に起因する場合、2) 石英等が接触した境界において圧力溶解反応を起こす場合、があると考えられる。これらはいずれも機械的作用と化学反応場が複合した連成現象である。

本研究では、セメント系材料の使用で生じる可能性のある高アルカリ環境下における石英の溶解機構に関して、石英内の高アルカリ成分の移動に溶解速度式 (拡散場) を当てはめ、分子動力学法によりマイクロ場の拡散係数を求め、均質化法によりマイクロ場とマクロ場を統一的に記述し、石英溶解の時間的挙動を数値解析によって表現することを試みた (図 3.4-19 参照)。

石英中を移行するアルカリイオンの拡散問題に石英の溶解速度式を組み合わせた一次元供試体モデルを用いて、ベントナイト中における石英の溶解に関する均質化解析を行った結果の一例を図 3.4-20 に示す。図における横軸の L は、高アルカリ環境との境界からの距離を、 ρ は乾燥密度を示している。図より、①石英溶解量 (溶解速度) は温度の影響を受けること、②乾燥密度が大

きい方が、石英の溶解に対する遅延効果が大きいことなどが明らかとなった。

本研究により、ベントナイトのような多孔質体中における拡散問題では、多孔質体が微視的周期構造（ユニットセル）を有すると考えることで均質化法を適用することが可能となり、高アルカリ環境との接触面から浸出したアルカリ成分の拡散による pH の変化と、含有する石英の微視的構造およびマイクロレベルにおける物性を考慮した石英溶解量を定量的に求めることができた。ただし、今回は、ベントナイト中の水酸基拡散に基づく含有石英の溶解問題を取り扱ったものであり、溶解物と他の鉱物の化学反応の影響も大きいと考えられ、他の含有成分の影響を考慮した検討が今後の課題である。

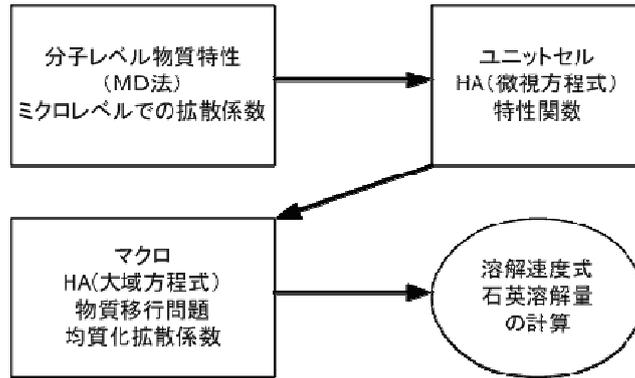


図 3.4-19 石英溶解量の均質化解析の概念図

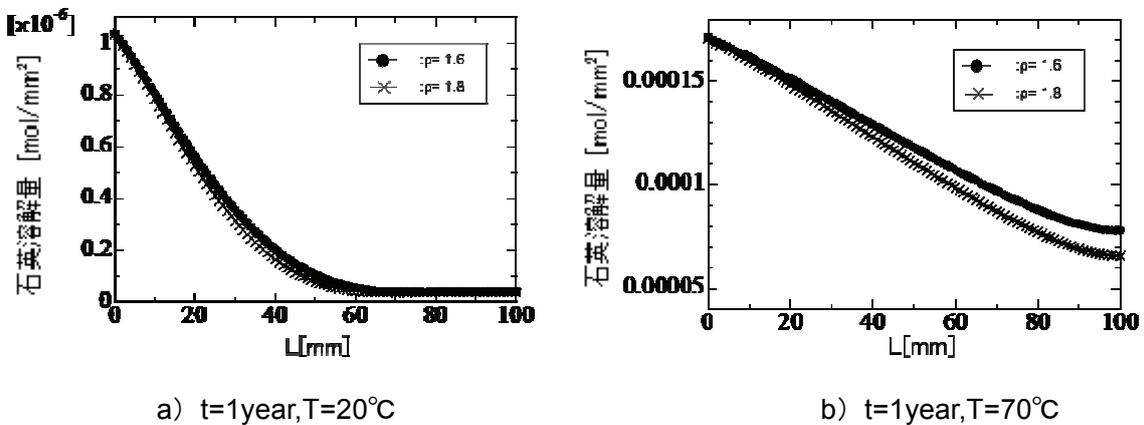


図 3.4-20 石英溶解量の解析結果の例

4. おわりに

超深地層研究所計画における岩盤力学に関する調査研究として、2006年度は、①GL-100m 予備ステージにおける岩盤力学に関する調査研究、②三次元応力場同定手法の高度化に関する研究、③ボーリングコアを用いた岩盤応力評価手法の高度化に関する研究、④長期岩盤挙動評価に関する研究を実施した。

GL-100m 予備ステージにおける岩盤力学調査研究では、3本のボーリングを実施し、三つの手法を用いた初期応力測定と、岩石の物理・力学試験を実施した。初期応力測定により評価された最大主応力は、手法によりその大きさにばらつきはあるものの、その方向はほぼ水平でNW-SE走向であった。また、三つの手法による評価とも、鉛直に近い方向と評価された主応力の値は1.8～2.2MPaであり、これは土かぶり圧の1.92MPaとほぼ等しいことが確認された。岩石の物理・力学特性の分布は、研究所用地内の深層ボーリング（MIZ-1号孔）で得られていた特性とほぼ同様であったことから、研究所用地程度の広さの領域においては、瑞浪層群土岐夾炭累層の物理・力学特性が大きく変らないことが確認された。また、研究所用地から数km離れた東濃鉱山の瑞浪層群土岐夾炭累層と比べると、特に強度、剛性などの力学特性値が大きい傾向が見られたことから、採取地点が数km程度の範囲まで離れると物理・力学特性は変り得ることが確認された。

三次元応力場同定手法の高度化に関する研究では、以下に示す三つの研究成果が得られた。(a)不均一地盤の広域ひずみ場と地盤弾性定数の同時評価に基づく広域応力場評価の研究では、深部の土岐花崗岩下部割れ目低密度帯で初期応力がほぼ一様であるのに対し、浅部では土岐花崗岩層の上面の形状に影響されて初期応力が変動することが示された。(b)初期応力分布の深度方向非線形性を考慮した広域応力場評価の研究では、MIZ-1号孔で確認された666faultをモデル化する/しないのケースの違いで解析結果の比較を行い、モデル化したケースの方が実測値の再現性が高いことを確認した。(c)不均一岩体が貫通断層を含む場合の広域応力場評価の研究では、ローカスケールにおける月吉断層のように解析領域を貫通する大規模断層が存在する場合、数少ない初期応力測定結果を逆解析の初期条件とすると、初期応力測定位置から離れた地点での初期応力推定精度が低下することを確認した。

ボーリングコアを用いた岩盤応力評価手法の高度化に関する研究について、AE法では、採取後3ヶ月時点まで、評価したコアの記憶応力の値について顕著な変化は見られなかったが、6ヶ月以降ではその値が小さくなることが認められた。ゆえに、3～6ヶ月の間にAE法による評価の適用限界がある可能性が考えられた。一方、DRA法では、コアの採取から約6ヶ月以降において、評価したコアの記憶応力の値が若干大きくなることが認められたが、評価で用いるしきい値自身の経過時間に伴う変動を無視したためと判明し、経過時間毎にしきい値を求めてその変動を考慮すれば、約1年までの範囲において、評価した値はほぼ一定となることが確認された。

長期岩盤挙動評価のための現象論的研究では、9年間継続している田下凝灰岩の長期クリープ試験データを整理し、時間の経過に伴うクリープひずみの増加を確認した。しかし、その増加割合（クリープひずみ速度）は減少しており、これが今後どうなるかは、長期の安定性を考える上で重要と考えられるため、この実験は継続していく。また、超深地層研究所の研究坑道を対象とした検討に必要な、土岐花崗岩に関するコンプライアンス可変型構成方程式のパラメータ取得を実施した。その結果、土岐花崗岩の応力-ひずみ関係における力学的な時間依存性が、既往の研究で扱われたその他岩石と比べて小さなことを確認した。さらに、長期岩盤挙動評価のための理論的研究では、レーザー共焦点顕微鏡観察下における土岐花崗岩の応力緩和試験を行い、応力緩和下で鉱物よりも鉱物間の境界でのひずみが拡大する場合があることを確認した。また、水浸載荷実験で石英の溶解と再沈殿が常温下で起こることを確認し、均質化解析に基づいて石英溶解の時間的挙動を推定した。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構: “超深地層研究所 地層科学研究基本計画”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2001-018 (2002)
- 2) 日本原子力研究開発機構: “超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第1段階)研究成果報告書”, JAEA-Research 2007-043 (2007)
- 3) 核燃料サイクル開発機構: “超深地層研究所計画における調査研究の考え方と進め方(平成15~17年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2004-008 (2004)
- 4) 核燃料サイクル開発機構: “高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ— 分冊1 深地層の科学的研究—”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 2005-014 (2005)
- 5) 核燃料サイクル開発機構: “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, JNC TJ7400 2001-012 (2002)
- 6) 核燃料サイクル開発機構: “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ— 分冊1 わが国の地質環境”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 99-021 (1999)
- 7) 中間茂雄, 佐藤稔紀: “超深地層研究所における岩盤力学研究の現状~地表からの調査研究段階から坑道の掘削を伴う研究段階へ~”, 資源・素材 2005(室蘭) 企画発表・一般発表(A)(B) 講演資料, pp.115-119 (2005)
- 8) 佐野修, 平田篤夫: “応力計測にまつわる問題点と今後の可能性”, 測地学会誌, Vol.53, No.4, pp.335-348 (2007)
- 9) 山本清彦: “DRAの標準法” 資源・素材 2000(秋田) 岩盤工学(A2-4) 講演資料, pp.71-76 (2000)
- 10) 瀬戸政宏, 相馬宣和, 前田信行, 松井裕哉, “Ernesto Villaescusa, 勝山邦久: “AE法とDRAによる地下応力測定試験方法とケーススタディ”, 資源と素材, Vol.117, pp.829-835 (2001)
- 11) 中間茂雄, 佐藤稔紀, 加藤春實: “応力解放法による深部岩盤における初期応力測定装置の適用例”, 資源・素材 2004(盛岡) 企画発表・一般発表(A)(B) 講演資料, pp.65-66 (2004)
- 12) 坂口清敏, 吉田宣生, 南将行, 原雅人, 鈴木康正, 松木浩二: “深部地圧計測のための下向き円錐孔底ひずみ法の開発と室内実証試験”, 資源と素材, Vol.122, pp.338-344 (2006)
- 13) 地震予知総合研究振興会: “日本の地殻水平歪 1885-1983年”, 1990, pp.63-64.
- 14) 佐藤稔紀, 前田信行, 松井裕哉: “1,000m 試錐孔における岩盤の初期応力測定—東濃地域における測定例—”, サイクル機構技報, No.5 (1999), pp.95-99.
- 15) 佐藤稔紀, 青木俊朗, 中間茂雄: “瑞浪層群の物理・力学特性に関するデータ集”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7450 2003-002 (2004)
- 16) 動力炉・核燃料開発事業団: “長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究(平成9年度)”, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TJ1602 98-004 (1998)
- 17) 動力炉・核燃料開発事業団: “長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究”, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TJ1602 97-004 (1997)
- 18) 大久保誠介, 福井勝則: “田下凝灰岩の長期クリープ試験と構成方程式”, 資源と素材, Vol.118, No.1, pp.36-42 (2002)
- 19) 中間茂雄, 山田淳夫, 青木俊朗, 佐藤稔紀: “超深地層研究所計画(第1段階)における岩盤力学調査研究”, サイクル機構技報, No.26, pp.77-86 (2005)

- 20) 大久保誠介, 福井勝則, 木村有仁: “土丹の力学的特性と構成方程式”, トンネルと地下, 33, pp.45-50 (2002)
- 21) 羽柴公博, 大久保誠介, 福井勝則: “岩石のピーク強度および残留強度の載荷速度依存性”, 資源と素材, Vol.121, No.1, pp.11-18 (2005)
- 22) 大久保誠介, 福井勝則, 羽柴公博: “コンプライアンス可変型構成方程式の拡張とクリープ試験結果による検討”, 資源と素材, Vol.118, No.12, pp.737-744 (2002)
- 23) 大久保誠介, 福井勝則: “コンプライアンス可変型構成方程式の定数について”, 資源と素材, Vol.113, No.6, pp.561-564 (1997)
- 24) 福井勝則: “複数の荷重条件下における岩石のクリープ及び遅れ破壊”, 東京大学博士論文, 第3章, pp.60-181 (1990)
- 25) 大久保誠介, 瀬野康弘, 中間茂雄, 佐藤稔紀, 平野享: “結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価のための現象論的研究 (委託研究)”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-088 (2007)
- 26) Lasaga, A. C.: “Kinematic Theory in the Earth Sciences”, Princeton Univ. Pr. (1998)
- 27) Brady P. V., Walther J. V.: “Controls on silicate dissolution rates in neutral and basic pH solutions at 25C”, Geochimica et Cosmochimica Acta, 53, pp.2823-2830 (1989)
- 28) 核燃料サイクル開発機構: “長期岩盤挙動評価のための微視的観点による基礎的研究”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7400 2004-014 (2004)
- 29) 奈良禎太, 大野有希, 今井康暁, 金子勝比古: “花崗岩における応力腐食による亀裂進展現象の異方性および粒径依存性”, 資源と素材, 120, pp.25-31 (2004)

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ (物質質量の) 濃度	アンペア毎メートル	A/m
輝度	モル毎立方メートル	mol/m ³
屈折率	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m・kg・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光強度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
照射量 (放射性核種の) 放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	s ⁻¹
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作る際のいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する際には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を併せて用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg・s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg・s ⁻³
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
体積エネルギー	ジュール毎平方メートル	J/m ²	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
電界の強さ	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s・A
体積電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s・A
電気変位	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
誘電率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
透磁率	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎キログラム	J/(mol・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s・A
吸収線量	グレイ 毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ¹ ・m ⁻² ・kg・s ⁻³ =m ⁻¹ ・kg・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg・s ⁻³ =kg・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1海里=1852m
ノット		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バイン	b	1b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≡ 10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≡ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≡ 10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb =1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal =1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	IX unit	1 IX unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	f	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	metric carat	1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ = 1μm=10 ⁻⁶ m

