



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 (2011 年度)

Mizunami Underground Research Laboratory Project -Rock
Mechanical Investigations Annual Report for Fiscal Year 2011

引間 亮一 丹野 剛男 真田 祐幸 松井 裕哉 佐藤 稔紀

Ryoichi HIKIMA, Takeo TANNO, Hiroyuki SANADA
Hiroya MATSUI and Toshinori SATO

地層処分研究開発部門
東濃地科学研究ユニット

Tono Geoscientific Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate

July 2013

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, 2013

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 (2011 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
引間 亮一※、丹野 剛男※、真田 祐幸、松井 裕哉⁺¹、佐藤 稔紀

(2013 年 4 月 2 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で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伴う研究プロジェクトである。本研究プロジェクトは、研究坑道の建設工程やこれに伴う調査研究の課題、対象、空間スケールの違いを考慮して、地表からの調査予測研究段階（第 1 段階）、研究坑道の掘削を伴う研究段階（第 2 段階）、研究坑道を利用した研究段階（第 3 段階）の 3 段階に区分して調査研究を進め、全体で 20 年程度をかけて実施する。現在は第 2 段階および第 3 段階の調査研究を進めている。

岩盤力学に関する調査研究では、「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」に関して、安全評価の観点から、「掘削影響領域の地質環境特性の把握」を個別目標に設定しており、設定された目標に対して、(i)掘削影響領域の範囲の把握、(ii)掘削影響領域の物理・力学特性分布の把握、(iii)掘削影響領域の応力状態の把握を課題に掲げている。また、地下空洞の設計・施工の観点から、「地下空洞の力学安定性の把握」を個別目標に設定しており、設定された目標に対して、(iv)応力場の把握、(v)岩盤の物理・力学特性の把握、(vi)不連続構造などの有無の把握を課題に掲げている。

本報告は、2011 年度に実施した岩盤力学に関する調査研究項目の成果の概要をまとめたものである。

本報告書に取りまとめた調査研究項目は以下の通りである。

- ① 深度 400m 地点におけるボーリングコアを用いた初期応力測定
- ② ボーリングコア・掘削ずりを用いた室内試験による岩盤物性評価
- ③ 第 3 段階における施工対策影響評価試験の計画検討
- ④ 掘削体積比エネルギーを用いた原位置岩盤物性評価に関する研究（共同研究）
- ⑤ 種々の計測結果に基づく深部岩盤中の応力場評価に関する基礎的研究（共同研究）

Mizunami Underground Research Laboratory Project -Rock Mechanical Investigations
Annual Report for Fiscal Year 2011

Ryoichi HIKIMA*, Takeo TANNO*, Hiroyuki SANADA, Hiroya MATSUI⁺¹ and
Toshinori SATO

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

(Received April 2, 2013)

In order to establish a scientific and technological basis for geological disposal of technology, Japan Atomic Energy Agency (JAEA) is pursuing the geoscientific research project namely the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) in the crystalline rock environment at Tono Geoscience Center (TGC). In the MIU Project, geoscientific research is being carried out in three overlapping phases spanning a period of 20 years; Surface-based Investigation Phase (Phase I: FY1996 - 2004), Construction Phase (Phase II: FY2004- in progress) and Operation Phase (Phase III: FY2010- in progress).

In the rock mechanical investigations, the research aims at “Characterization of geological environment in the Excavation Disturbed Zone (EDZ)” from the viewpoint of safety assessment. For the research, the specific data of the EDZ: (i)size and structures, (ii)petrophysical/geomechanical properties, and (iii)stress state are required. The research also aims at “Characterization of geomechanical stability around tunnel ” from the viewpoint of design and construction of underground facilities. For the research, the specific data: (iv) local stress regime, (v)spatial variability of petrophysical/geomechanical properties of rocks, and (vi)distribution of discontinuities intersecting underground tunnels are required.

This report presents the results of following rock mechanical investigations conducted in FY2011.

- 1) In-situ stress measurements using core-based methods at the - 400 m stage,
- 2) Laboratory tests using core and block samples,
- 3) Planning of in-situ experiments to evaluate influence of construction materials on geological environment in Phase III,
- 4) Application of specific energy for evaluation of in-situ rock mass properties,
- 5) Study on estimation of in-situ rock stress based on the results of various measurements.

Keywords: MIU, Crystalline Rock, Phase II , Rock Mechanics Investigations , In Situ Stress

+ 1 Research and Development Integration Unit

* Collaborating Engineer

目 次

1. はじめに	1
2. 岩盤力学に関する調査研究	4
2.1 2011年度の調査研究	7
3. 深度400m地点におけるボーリングコアを用いた初期応力測定	8
3.1 目的および実施内容	8
3.2 調査位置	8
3.3 DSCA法	9
3.3.1 DSCA法の概要	9
3.3.2 供試体	10
3.3.3 試験の概要	12
3.3.4 試験結果	13
3.3.5 初期応力の算出結果	14
3.3.6 考察	16
3.4 多面体供試体による三次元弾性波速度測定	18
3.4.1 三次元弾性波速度測定の概要	18
3.4.2 供試体	18
3.4.3 試験の概要	19
3.4.4 測定結果および考察	19
4. ボーリングコア・掘削ずりを用いた室内試験による岩盤物性評価	22
4.1 目的および実施内容	22
4.2 室内物理・力学試験	22
4.2.1 調査位置	22
4.2.2 試験の概要	23
4.2.3 供試体	24
4.2.4 試験結果および考察	25
5. 第3段階における施工対策影響評価試験の計画検討	30
5.1 目的	30
5.2 施工対策影響評価試験計画検討のための既存研究調査	31
5.3 施工対策影響評価試験の計画検討	32
5.4 まとめ	35
6. 掘削体積比エネルギーを用いた原位置岩盤物性評価に関する研究	36
6.1 目的	36
6.2 研究内容	36
6.2.1 ハンドドリルを用いた基礎実験の概要	36
6.2.2 装置の概要	36
6.2.3 試験内容	37
6.2.4 試験結果	38
6.3 まとめ	39
7. 種々の計測結果に基づく深部岩盤中の応力場評価に関する基礎的研究	40
7.1 目的	40
7.2 断層および断層の条線に基づく初期応力の解析方法	40
7.3 断層および断層の条線データに基づく初期応力評価	41
7.4 地震発震機構の解析に基づく初期応力評価	41
7.5 まとめ	42
8. まとめ	43
参考文献	44
付録（室内物理・力学試験における個々の試験体での結果）	47

CONTENTS

1.	Introduction	1
2.	Rock Mechanical Investigations	4
2.1	Objectives and overview of this study in FY2011	7
3.	In-situ stress measurements using core-based methods at the ~ 400 m stage.....	8
3.1	Purpose.....	8
3.2	Location.....	8
3.3	Measurement of DSCA method	9
3.3.1	Overview of DSCA method	9
3.3.2	Specimen.....	10
3.3.3	Procedure	12
3.3.4	Results	13
3.3.5	Estimation of in-situ stress	14
3.3.6	Discussion.....	16
3.4	Measurement of elastic wave velocity using polyhedral specimens.....	18
3.4.1	Overview of elastic wave velocity using polyhedral specimens.....	18
3.4.2	Specimen.....	18
3.4.3	Procedure	19
3.4.4	Results and discussion.....	19
4.	Laboratory tests using core and block samples.....	22
4.1	Purpose.....	22
4.2	Laboratory tests of physical and mechanical properties	22
4.2.1	Location.....	22
4.2.2	Overview of laboratory tests	23
4.2.3	Specimen.....	24
4.2.4	Results and discussion.....	25
5.	Planning of in-situ experiments to evaluate influence of construction materials on geological environment in Phase III... 30	
5.1	Purpose.....	30
5.2	Reserch to evaluate influence of construction materials on geological environment	31
5.3	Planning of in-situ experiments in Phase III.....	32
5.4	Conclusion.....	35
6.	Application of specific energy for evaluation of in-situ rock mass properties.....	36
6.1	Purpose.....	36
6.2	Research content	36
6.2.1	Overview of fundamental experiment using a hand drill	36
6.2.2	Device.....	36
6.2.3	Procedure	37
6.2.4	Results	38
6.3	Conclusion.....	39
7.	Study on estimation of in-situ rock stress based on the results of various measurements....	40
7.1	Purpose.....	40
7.2	Inference method of in-situ rock stress	40
7.3	Estimation of in-situ rock stress from fault striations	41
7.4	Estimation of in-situ rock stress from earthquake faulting mechanism	41
7.5	Conclusion.....	42
8.	Conclusion	43
	References.....	44
	Appendix (The rock physical and mechanical properties of each specimen).....	47

図目次

図 1.1 研究所周辺の地質分布.....	2
図 1.2 空間スケール概念.....	2
図 1.3 研究所用地の概要.....	3
図 1.4 研究坑道のレイアウト.....	3
図 2.1 掘削影響領域概念図.....	4
図 2.2 第1段階での岩盤力学概念モデル.....	6
図 3.2.1 ボーリングコアを用いた初期応力測定を実施したボーリング孔.....	8
図 3.3.1 岩石の圧力-差ひずみ曲線の模式図.....	9
図 3.3.2 座標軸の設定.....	10
図 3.3.3 供試体写真.....	11
図 3.3.4 ひずみゲージの貼付位置および方向.....	11
図 3.3.5 シリコンで被覆した供試体.....	11
図 3.3.6 試験装置の模式図.....	12
図 3.3.7 (1) 試験中の静水圧载荷による差ひずみの挙動.....	13
図 3.3.7 (2) 試験中の静水圧载荷による差ひずみの挙動.....	14
図 3.3.8 初期応力算出結果.....	16
図 3.3.9 DSCA 法と水圧破砕法の比較.....	17
図 3.4.1 供試体写真.....	18
図 3.4.2 三次元弾性波速度測定装置の模式図.....	19
図 3.4.3 三次元 P 波速度分布.....	20
図 3.4.4 三次元弾性波速度測定と DSCA 法による主値の比較.....	20
図 3.4.5 水平面内の最大主応力の方向.....	21
図 4.2.1 物理・力学試験調査位置.....	22
図 4.2.2 室内物理・力学試験結果.....	27
図 4.2.3 第2次取りまとめと瑞浪超深地層研究所での物理・力学特性の度数分布図.....	29
図 5.1.1 坑道周辺岩盤概念モデル.....	30
図 5.3.1 施工対策影響評価試験実施場所案.....	32
図 5.3.2 施工対策影響評価試験レイアウト案.....	34
図 6.2.1 ハンドドリル計測システム.....	36
図 6.2.2 深度方向の物性値の分布状況.....	37
図 6.2.3 全試料の試験結果.....	38
図 6.2.4 削孔速度と一軸圧縮強さ.....	39
図 6.2.5 回転による掘削体積比エネルギーと一軸圧縮強さ.....	39
図 7.2.1 初期応力の推定方法.....	40
図 7.3.1 断層データより推定した応力状態.....	41
図 7.4.1 地震動データより推定した応力状態.....	41

表目次

表 3.3.1 供試体の採取深度および地質概要	10
表 3.3.2 測定機器の一覧.....	12
表 3.3.3 初期応力算出結果.....	15
表 3.4.1 供試体の採取深度および地質概要	18
表 3.4.2 算出された P 波速度成分	19
表 4.2.1 物理・力学試験概要	23
表 4.2.2 物理・力学試験の実施数量	23
表 4.2.3 ボーリング孔および試料の概要	24
表 4.2.4 掘削ずり試料概要	24
表 4.2.5 第 1 段階と第 2 段階（2011 年度実施分）で得られた室内物理・力学試験結果一覧	26
表 5.2.1 世界的に知見が少なく今後の研究課題とされる事項	31
表 5.3.1 施工対策影響評価試験の実施内容案.....	33
表 6.2.1 試験に用いたコアの概要	37

1. はじめに

超深地層研究所計画（以下、MIU 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（以下、原子力機構）が岐阜県瑞浪市に建設中の瑞浪超深地層研究所（以下、研究所）で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伴う研究プロジェクトである。本研究プロジェクトは、研究坑道の建設工程やこれに伴う調査研究の課題、対象、空間スケールの違いを考慮して、地表からの調査予測研究段階（第 1 段階）、研究坑道の掘削を伴う研究段階（第 2 段階）、研究坑道を利用した研究段階（第 3 段階）の 3 段階に区分して調査研究を進め、全体で 20 年程度を予定している¹⁾。MIU 計画は、1996 年度より岐阜県瑞浪市明世町の正馬様洞にある原子力機構用地（図 1.1 の正馬様用地）において開始され、瑞浪市明世町の市有地（図 1.1 の研究所用地）における第 1 段階の調査研究は、2002 年 1 月から 2005 年 3 月までの約 3 年間で実施された²⁾。2003 年度 7 月には立坑の基礎部の掘削工事に着手、2004 年度には本格的な掘削を開始し、本格的な第 2 段階の調査研究を開始した。さらに、2010 年度からは、深度 300m の水平坑道において第 3 段階の研究が開始された。研究所周辺の地質分布は、基盤をなす後期白亜紀の花崗岩（土岐花崗岩）を新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）が不整合に覆い、さらにそれを固結度の低い新第三紀鮮新世～第四紀更新世の砂礫層（瀬戸層群）が不整合に覆っている（図 1.1）。立坑の位置においては、深度 170m 付近で花崗岩と堆積岩の不整合面が出現した。

現在実施されている第 2 段階の調査研究においては、「研究坑道の掘削を伴う調査研究による地質環境モデルの構築および研究坑道の掘削による深部地質環境の変化の把握」が段階目標の一つとして設定されており、第 1 段階のサイトスケール（研究所用地を中心に数百 m～数 km 四方、深度 2～3km の領域）（図 1.2 参照）^{3),4)}の地質環境モデルの妥当性評価と更新、ブロックスケールモデル（研究坑道を中心に数十 m～数百 m 四方、深度 1km 程度の領域）（図 1.2 参照）^{3),4)}の構築と更新を行い、調査の種類・量、解析・評価の手法および結果の精度との関係を把握するものとされている。また、「研究坑道を利用した研究段階の調査研究計画の策定」についても段階目標として設定されており、研究坑道を利用した調査研究の課題を見直すとともに、第 3 段階における調査研究計画の具体化を図るものとされている¹⁾。

本報告書は、MIU 計画における岩盤力学分野に関する調査研究のうち 2011 年度に実施した成果の概要をまとめたものである。本報告で記載されている主立坑、換気立坑、MIZ-1 号孔の位置を図 1.3 に、研究坑道のレイアウトを図 1.4 に示す。

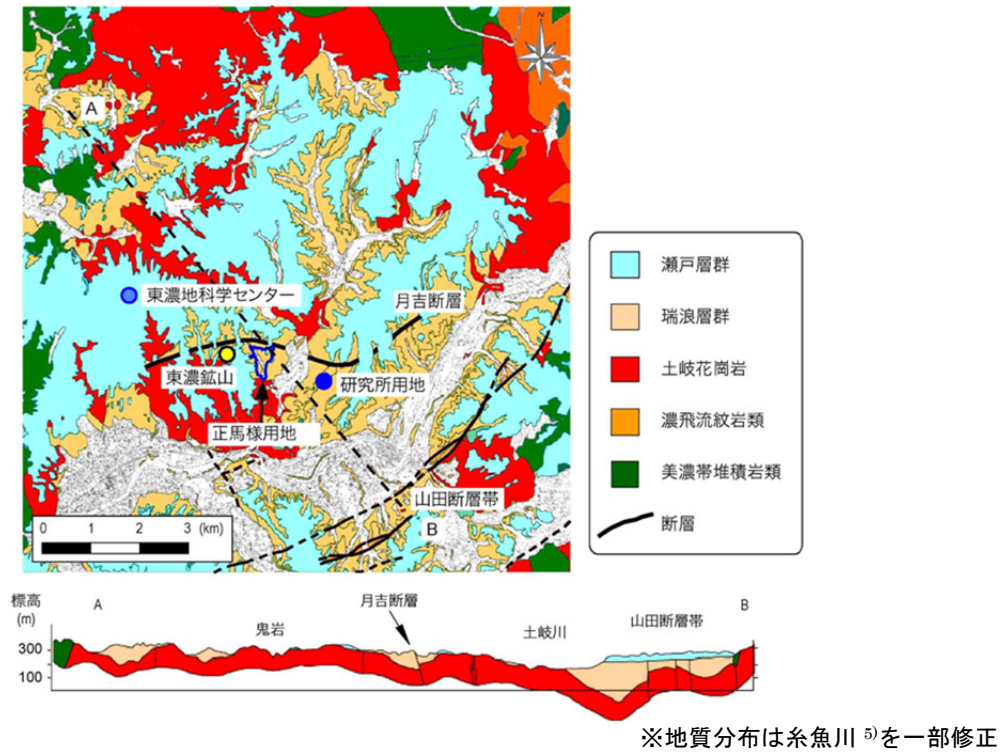


図 1.1 研究所周辺の地質分布

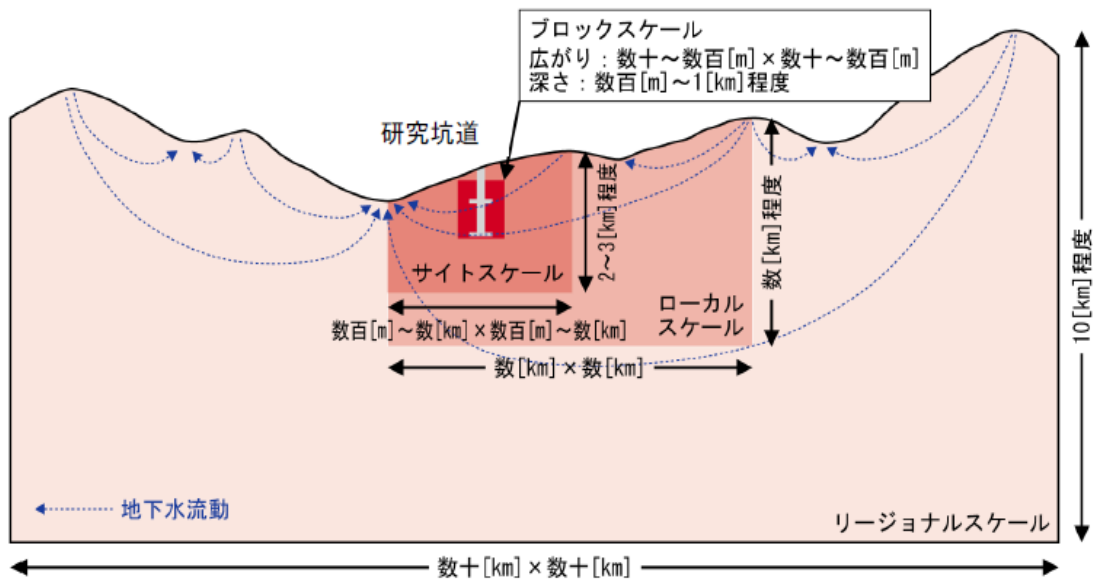


図 1.2 空間スケール概念^{3),4)}

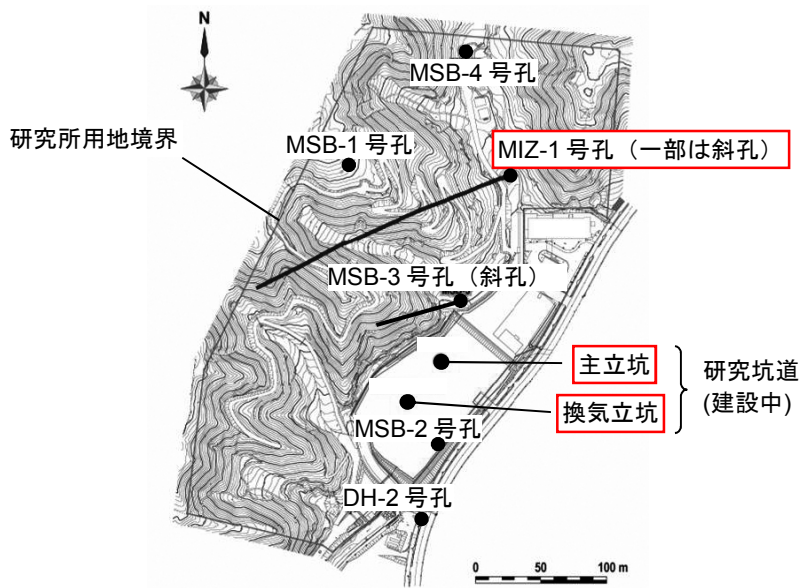


図 1.3 研究用地の概要

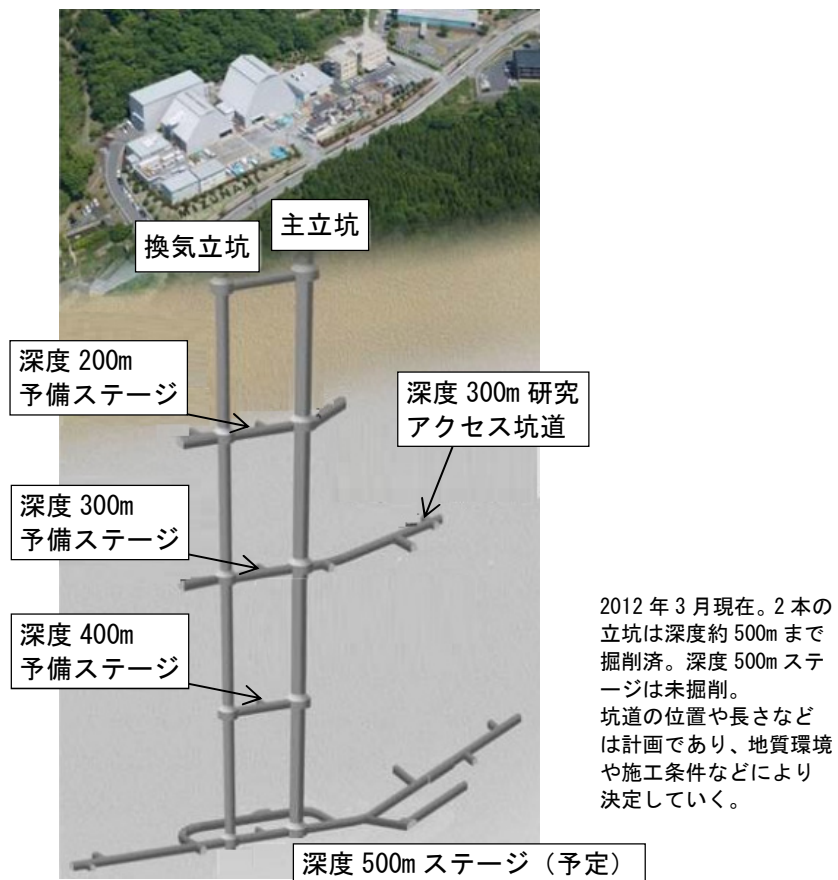


図 1.4 研究坑道のレイアウト

2. 岩盤力学に関する調査研究

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⁾。掘削影響領域は図 2.1 に示すように、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ている⁶⁾。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、地層処分場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⁾。

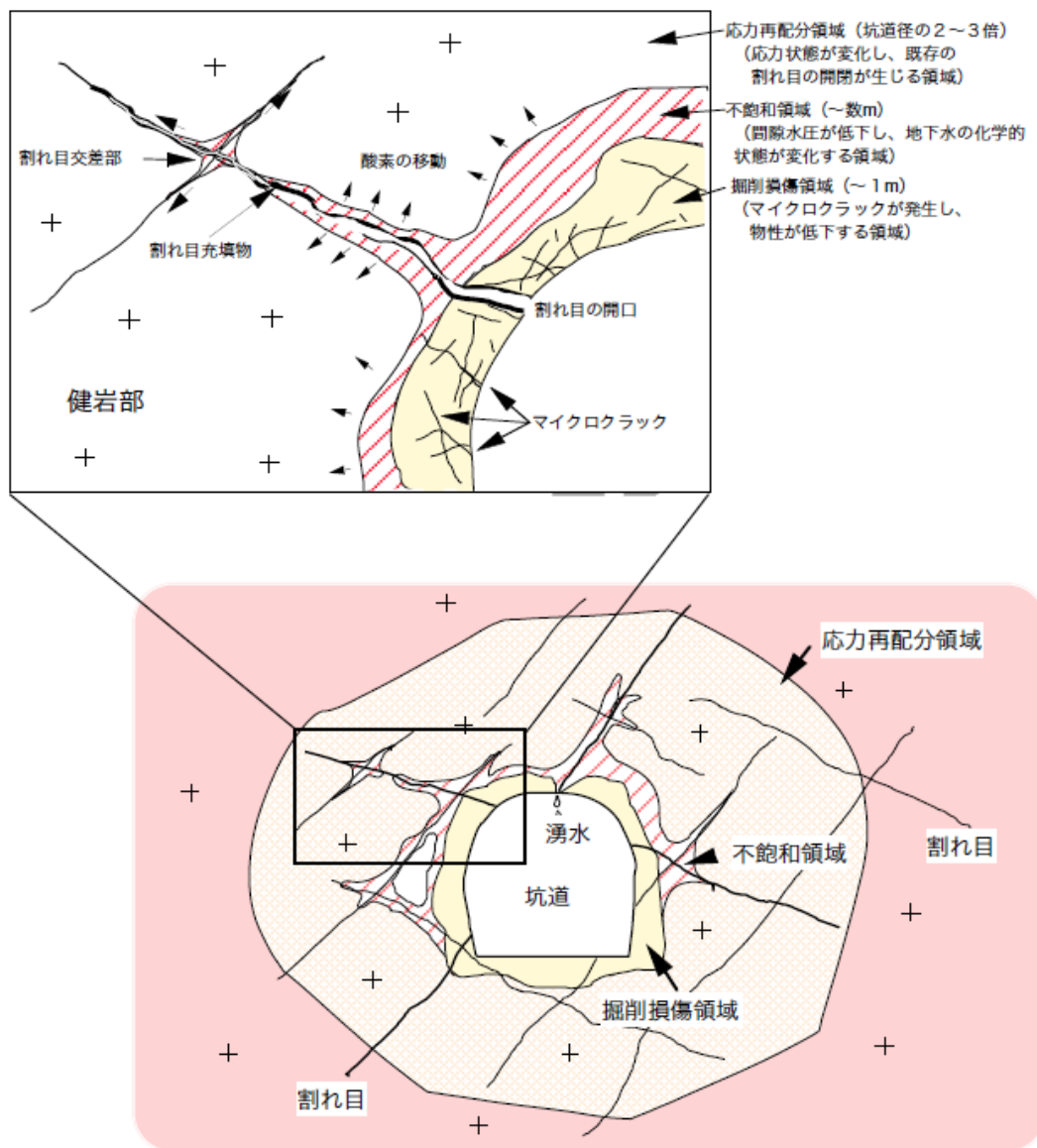


図 2.1 掘削影響領域の概念図⁶⁾

地下岩盤中に構築される地下施設の設計・施工においては、地下空洞の力学安定性の把握のために、施設周辺の岩盤力学概念モデルを構築する必要がある。岩盤力学概念モデルにおける主要なパラメータである岩盤の初期応力および力学的な物性は、空洞の力学安定性を評価する際に欠くことのできないパラメータである。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、特に断層などの不連続面や岩盤の不均質性などの存在や地形の影響によりその状態が変化する⁷⁾。また、狭い領域に対象を限っても、そこに認められる割れ目や地質的な不均質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、地層の違いや地質的な不均質性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、岩盤力学概念モデルに適切に反映されるよう、モデルの構築方法を確立することが課題である。

このような背景から、岩盤力学に関する調査研究では、MIU計画の全体目標のひとつである「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」に関して、安全評価の観点から、「掘削影響領域の地質環境特性の把握」を個別目標に設定しており、設定された目標に対して、(i)掘削影響領域の範囲の把握、(ii)掘削影響領域の物理・力学特性分布の把握、(iii)掘削影響領域の応力状態の把握を課題に掲げている。また、地下空洞の設計・施工の観点から、「地下空洞の力学安定性の把握」を個別目標に設定しており、設定された目標に対して、(iv)応力場の把握、(v)岩盤の物理・力学特性の把握、(vi)不連続構造などの有無の把握を課題に掲げている⁸⁾。

「掘削影響領域の地質環境特性の把握」に関しては、調査段階や空間スケールを整理して、ブロックスケールでの岩盤力学概念モデルに基づく数値解析による予測を第1段階と第2段階で行うこと、掘削影響領域の地質環境特性に関わる原位置試験は第3段階で実施し、ブロックスケールでの地質環境モデルを構築することとされている。また、「地下空洞の力学安定性の把握」に関しては、調査段階や空間スケールを整理して、応力場や岩盤の物理・力学特性を表現する岩盤力学概念モデルは、ローカルスケールおよびサイトスケールを対象として構築し、このサイトスケールの岩盤力学概念モデルの構築・確認・更新は、第1段階から第2段階を通じて繰り返し実施すること、ブロックスケールの岩盤力学概念モデルの構築・確認・更新は、第2段階において実施することとされている。さらに、第2段階において、坑道で観測された断層などの不連続構造が坑道の力学安定性に与える影響を評価することとされている⁸⁾。

岩盤力学に関する第2段階の調査研究計画の具体的な実施内容は、第1段階での岩盤力学概念モデル(図2.2)の妥当性確認のため、異なる深度での原位置および岩芯を用いた応力測定、岩芯および掘削ずりを用いた室内物理・力学試験を実施する。第2段階のブロックスケールの岩盤力学概念モデル構築に資するため、割れ目等の不連続面の影響を考慮できる等価連続体モデル等を用いた力学的なモデル化・解析を試行する。これらのモデル化・解析結果を研究坑道掘削中に取得す情報と比較してその妥当性を確認するとともに調査からモデル化に至る体系的な方法論を構築する。また、第1段階で実施した掘削影響予測手法の妥当性を確認するための研究坑道周辺岩盤を対象とした掘削影響調査を実施するとともに、過去10年あまりにわたって研究開発を進めてきた岩盤の長期挙動に関する評価手法の確立を目的とした研究を行う。研究坑道がより深部へ到達して研究坑道周辺の初期応力の絶対値が大きくなり、高抜け、山はねなどの応力集中による岩盤破壊が生じる恐れが高くなるため、ブロックスケールよりもさらに局所的な現象であるこれら岩盤破壊を調査評価できる技術開発を進める⁸⁾。

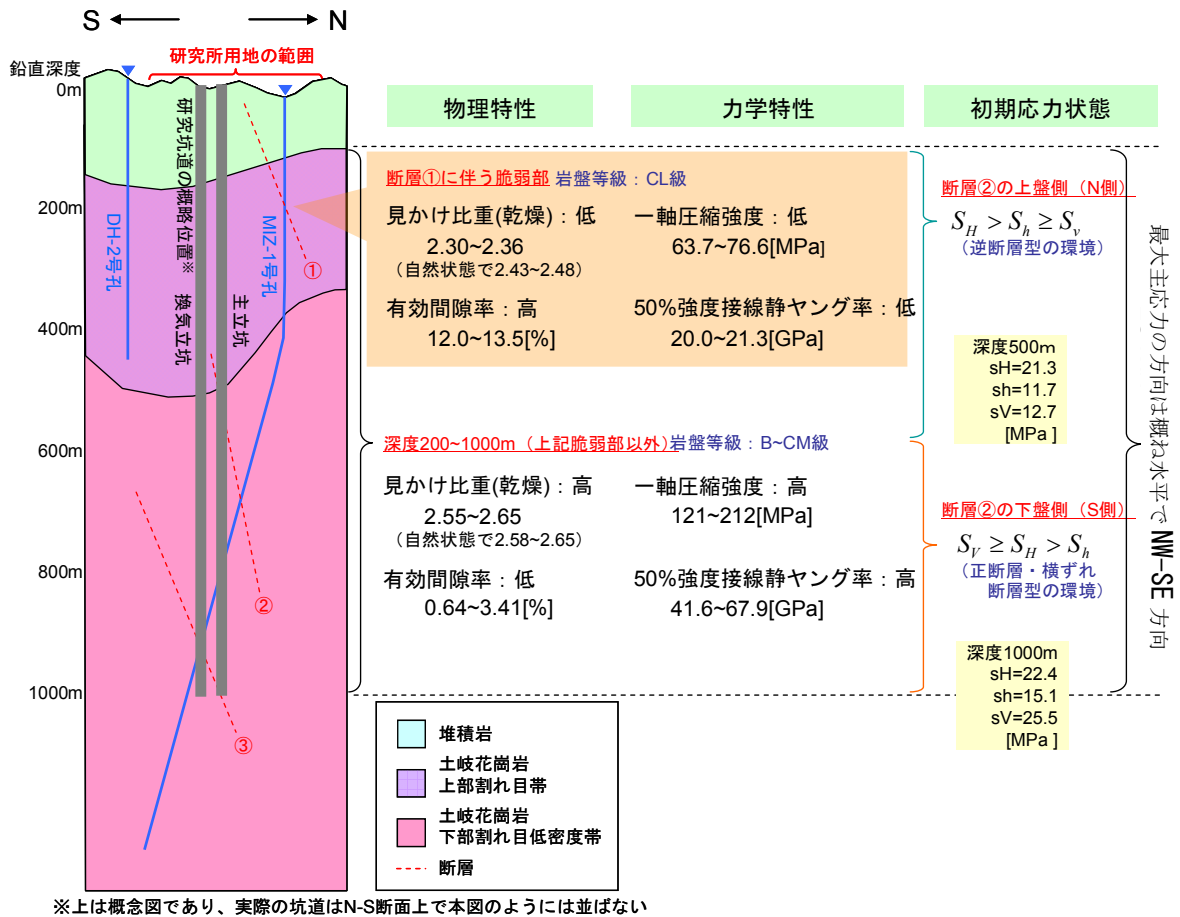


図 2.2 第1段階での岩盤力学概念モデル⁹⁾

2.1 2011 年度の調査研究

2011 年度の岩盤力学に関する調査研究として計画されていた深度 300m ボーリング横坑（換気立坑）における応力解放法による初期応力測定、等価連続体の数値解析によるブロックスケールのモデル構築のための方法論の検討、岩盤の長期挙動評価手法の確立を目的とした研究は、2011 年 3 月 11 日に発生した「東北地方太平洋沖地震」に伴う原子力機構の茨城県にある研究施設の修復および東京電力株式会社福島第 1 原子力発電所における事故の対応に予算と人員を振り分けたことから、延期または中止とされた。よって、2011 年度に実施できた岩盤力学に関する調査研究の研究項目は以下に示す 5 項目である。

- ① 深度 400m 地点におけるボーリングコアを用いた初期応力測定（第 3 章）
- ② ボーリングコア・掘削ずりを用いた室内試験による岩盤物性評価（第 4 章）
- ③ 第 3 段階における施工対策影響評価試験の計画検討（第 5 章）
- ④ 掘削体積比エネルギーを用いた原位置岩盤物性評価に関する研究（第 6 章）
- ⑤ 種々の計測結果に基づく深部岩盤中の応力場評価に関する基礎的研究（第 7 章）

①については、「(iv)応力場の把握」という課題に対して実施し、深度 400m におけるボーリングコアを用いた初期応力測定および比較のために三次元弾性波速度測定を行い、第 1 段階で実施した初期応力測定結果の妥当性確認および初期応力評価手法の適用性・有効性を検討した。

②については、「(v)岩盤の物理・力学特性の把握」という課題に対して実施し、深度 300m、400m におけるボーリングコアおよび換気立坑・主立坑の掘削ずりを用いた岩盤物性評価を実施し、第 1 段階で実施した調査結果の妥当性確認を行うとともに第 2 次取りまとめ¹⁰において検討された岩盤物性の統計量と MIU 計画で得られた土岐花崗岩の物性値との対比を実施した。

③については、「(i)掘削影響領域の範囲の把握」、「(ii)掘削影響領域の物理・力学特性分布の把握」、「(iii)掘削影響領域の応力状態の把握」という課題に対して、第 3 段階で実施する調査試験計画である施工対策影響評価試験の計画検討のために既存情報の収集や一部の計画検討を実施した。

④については、「(iv)岩盤の物理・力学特性の把握」という課題に対して実施している共同研究であり、原位置で簡便に岩盤の力学特性を把握する手法としてハンドドリルを用いた掘削体積比エネルギーに基づく岩盤評価を実施するため、研究所用地で取得されたボーリングコアを利用した基礎実験を行った。

⑤については、「(iv)応力場の把握」という課題に対して実施している共同研究であり、研究所で取得された断層および断層の条線データに基づいて初期応力を評価した。さらに、岐阜県瑞浪市を震源とする地震の発震機構解析結果から初期応力を評価した。

3. 深度 400m 地点におけるボーリングコアを用いた初期応力測定

3.1 目的および実施内容

本調査試験では、地下数百 m における岩盤の初期応力測定について、コアを用いた初期応力測定法（コア法）の一手法である DSCA（Differential Strain Curve Analysis）法^{11), 12)}の適用性の検討を目的として、研究所の深度 400m 予備ステージの 10MI26 号孔のコアを対象に DSCA 法による初期応力測定を行った。また、DSCA 法による結果の比較のために多面体供試体を用いた三次元弾性波速度測定^{13), 14), 15)}を行った。

3.2 調査位置

深度 400 m 予備ステージの 10MI26 号孔で採取したコアを用いて DSCA 法による初期応力測定を 3 深度（9 供試体）、多面体供試体を用いた三次元弾性波速度測定を 2 深度（2 供試体）で実施した。図 3.2.1 に供試体を採取した 10MI26 号孔の位置を示す¹⁶⁾。また、これまでの調査研究において、土岐花崗岩部で実施した DSCA 法による初期応力測定で用いた深度 200m におけるボーリング孔（08MI14、15、16 号孔）および深度 300m におけるボーリング孔（08MI13、09MI20、21 号孔）を示す。なお、08MI13、09MI20 号孔では多面体供試体を用いた三次元弾性波速度測定を 2010 年度に行っている。

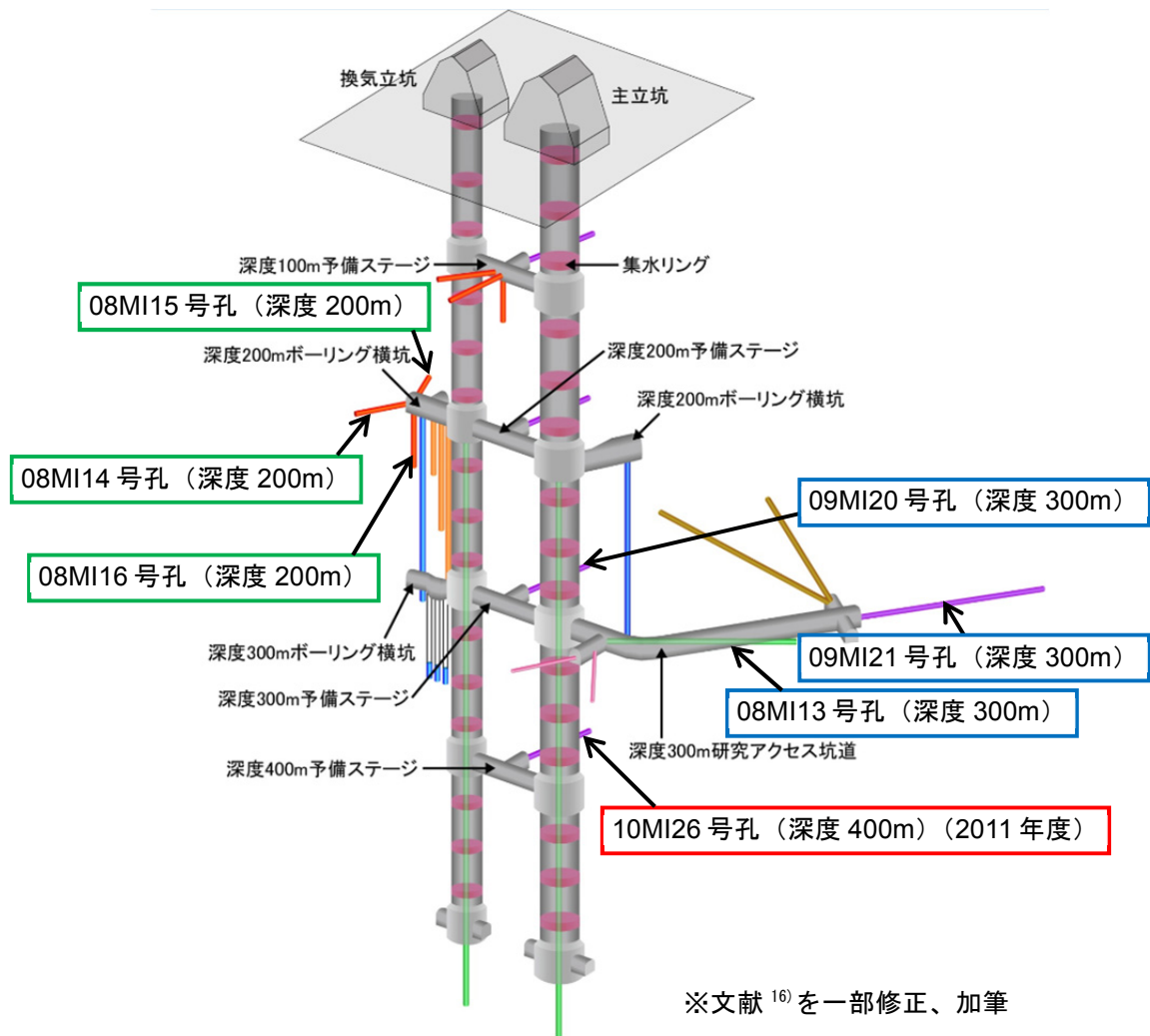


図 3.2.1 ボーリングコアを用いた初期応力測定を実施したボーリング孔

3.3 DSCA 法

3.3.1 DSCA 法の概要

DSCA 法は、Strickland and Ren¹¹⁾などによって開発されてきた初期応力測定に関する手法の一つである。DSCA 法は、ボーリング掘削により採取した岩石コアの微小亀裂分布を計測し、その微小亀裂分布と初期応力とを幾つかの仮定の基で関連付けて応力を推定する。その仮定を以下に示す^{11),12)}。

- ①ボーリングなどによって地圧が解放されると岩石が膨張し、それに伴って初期主応力方向に垂直に微小クラックが発生する。
- ②発生する微小クラックの量は初期主応力の大きさに比例する。
- ③応力解放以前に存在していた微小亀裂は無視できる。

以上のような仮定を基に、岩石供試体に静水圧载荷を行い、その際の载荷圧力に対するひずみの挙動を測定する。なお DSCA 法では、供試体のひずみ挙動において温度の影響をキャンセルするために供試体と同様の条件下で熔融石英のひずみ挙動を測定し、供試体のひずみと熔融石英のひずみの差である差ひずみを用いて解析を行う。図 3.3.1 に岩石を静水圧载荷させた際の岩石の圧力—差ひずみ曲線の模式図を示す。図 3.3.1 に示すように、岩石を静水圧载荷すると岩石に含まれる微小亀裂が徐々に閉鎖することにより、圧力—差ひずみ線図の接線勾配の低下が見られる。その後、岩石内部の微小亀裂が完全に閉鎖することにより、接線勾配が一定になる。DSCA 法では、この図に示した圧力—差ひずみ線図の微小亀裂が閉鎖する前の初期の接線勾配 β^0_{ij} 、微小亀裂が完全に閉鎖し、ひずみ変化率が一定になった際の接線勾配 β^l_{ij} から有効線圧縮率 $\Delta\beta_{ij}$ ($=\beta^0_{ij} - \beta^l_{ij}$) を算出し、①～③の仮定を基に初期応力の算定を行う。なお、下付き添え字 ij はテンソル成分であることを示す。 $\Delta\beta_{ij}$ ($=\beta^0_{ij} - \beta^l_{ij}$) は岩石内部の応力解放により生じた亀裂の情報を抽出したものであり、クラックパラメータと呼ばれる。さらに松木ら¹²⁾は岩石が持つ異方性の影響を小さくするために有効線圧縮率 $\Delta\beta_{ij}$ ($=\beta^0_{ij} - \beta^l_{ij}$) を固有線圧縮率 β^l_{ij} で除した値 $(\Delta\beta / \beta^l)_{ij}$ を用い、これをクラックパラメータとしている。なお $(\Delta\beta / \beta^l)_{ij}$ は、クラック密度に関する無次元量である。ここで①～③の仮定に基づくとパラメータ $(\Delta\beta / \beta^l)_{ij}$ の主値 $(\Delta\beta / \beta^l)_1$ は初期主応力の比と方向を表すと言える。したがって DSCA 法は、ボーリングによる応力解放によりボーリングコア内部に生じる微小亀裂の密度の配向性から初期応力を推定する方法であると言える¹⁷⁾。

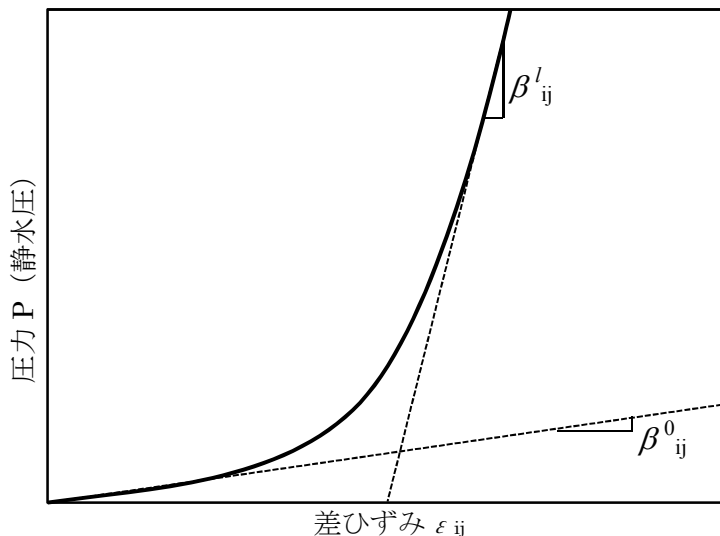


図 3.3.1 岩石の圧力—差ひずみ曲線の模式図

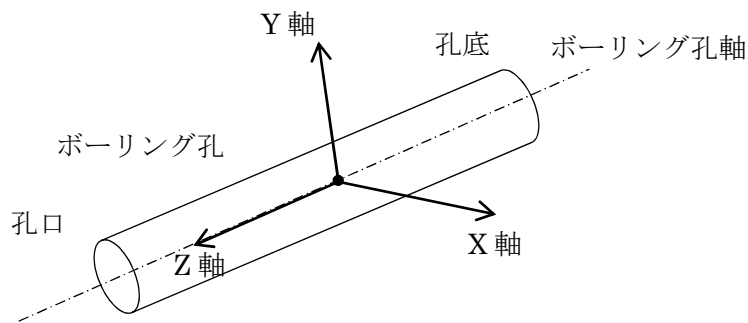
3.3.2 供試体

表 3.3.1 に供試体の採取深度および地質概要、図 3.3.2 に座標軸の設定、図 3.3.3 に供試体写真を示す。X 軸と Y 軸はボーリング孔軸と直交する平面内にあり、X 軸は孔口から孔底を見て 3 時の方向（水平）を向き、Z 軸はボーリング孔軸（孔底から孔口方向）と一致する（図 3.3.2 参照）。測定で使用した岩石試料は 9 試料で、土岐花崗岩部より肉眼観察で風化変質の認められないものを選定した。供試体は設定した座標軸に従い、図 3.3.3 のように立方体に成形する。

さらに成形した供試体について、図 3.3.4 に示すように互いに直交する 3 面に計 12 方向（1 面当たり 3 軸ロゼットゲージ 1 枚と単軸ゲージ 1 枚）のひずみゲージを貼付する。また、圧力媒体が供試体の内部に浸透するのを防ぐために図 3.3.5 に示すように、供試体の全面をシリコン樹脂で被覆する。

表 3.3.1 供試体の採取深度および地質概要

ボーリング孔名 (方位/傾斜)	供試体名	採取深度(m)	岩種	岩盤等級
10MI26 号孔 (N60°W/-3°)	DA1	26.25	土岐花崗岩	CH
	DA2	26.30	土岐花崗岩	
	DA3	26.35	土岐花崗岩	
	DB1	52.75	土岐花崗岩	B
	DB2	52.80	土岐花崗岩	
	DB3	52.85	土岐花崗岩	
	DC1	68.25	土岐花崗岩	B
	DC2	68.30	土岐花崗岩	
	DC3	68.35	土岐花崗岩	



X 軸：孔口から孔底を見て 3 時の方向（水平）
 Y 軸：孔口から孔底を見て 12 時の方向
 Z 軸：ボーリング孔軸（孔底から孔口方向）

図 3.3.2 座標軸の設定

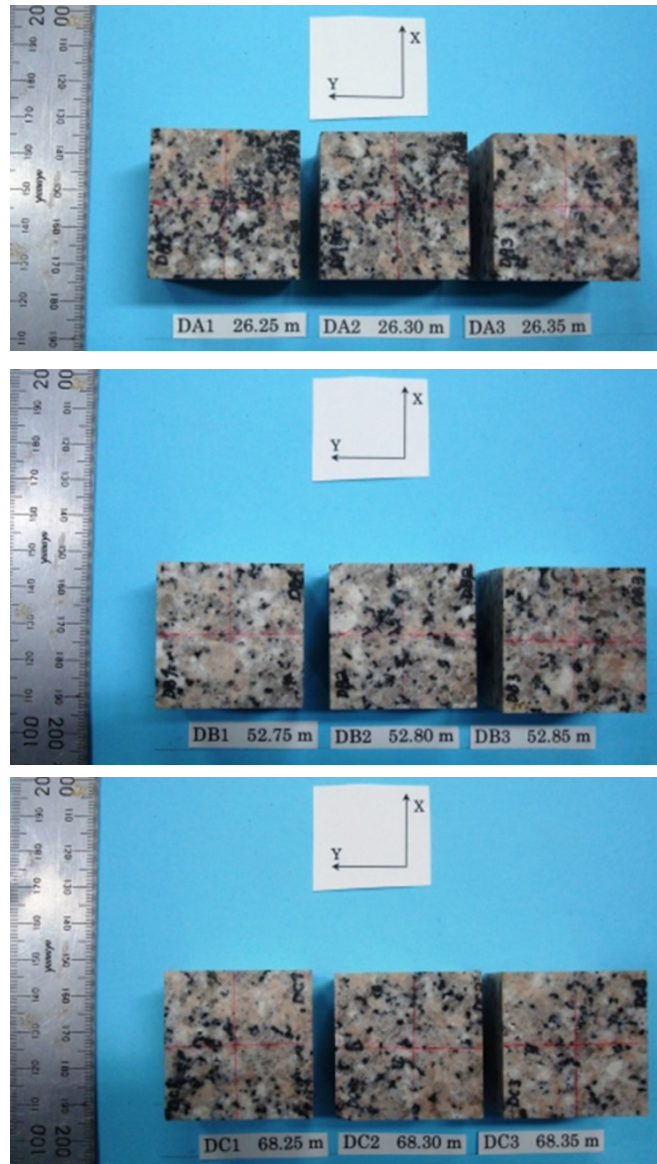


図 3.3.3 供試体写真

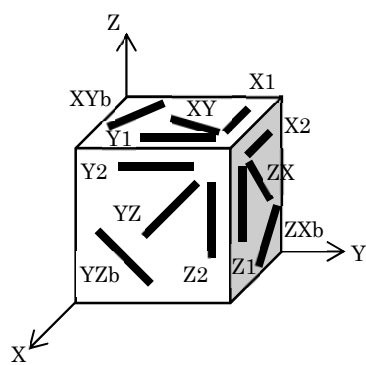


図 3.3.4 ひずみゲージの貼付位置および方向

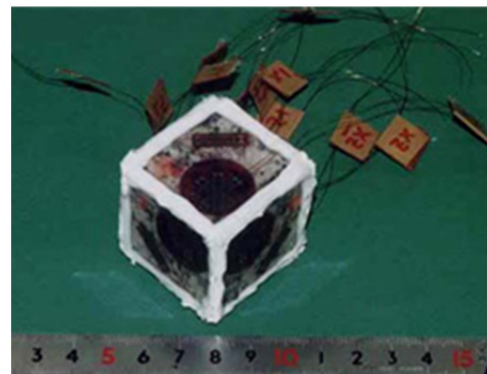


図 3.3.5 シリコンで被覆した供試体

3.3.3 試験の概要

DSCA 法の試験装置の模式図を図 3.3.6 に示す。作成した供試体を圧力容器にセットし静水圧载荷を行い、静水圧载荷に伴うひずみの挙動を測定する。試験装置は圧力容器(図中 a)、静水圧を加えるための高圧ポンプと圧力変換器(図中 b)、データ取得および記録のためのデータアキュイジションコントローラ(図中 c)およびパーソナルコンピュータ(図中 d)の4部分により構成されている。表 3.3.2 は、使用した測定機器の一覧である。ダミーゲージは 2 ゲージ法による測定においてリード線の温度補償のために使用した。熔融石英は差ひずみを求めるために供試体と同様に静水圧载荷に伴うひずみの挙動を測定した。熔融石英は内部に亀裂がほとんどないため力学物性において等方的な性質を示し、かつひずみは载荷圧力に対して直線的な挙動を示す。

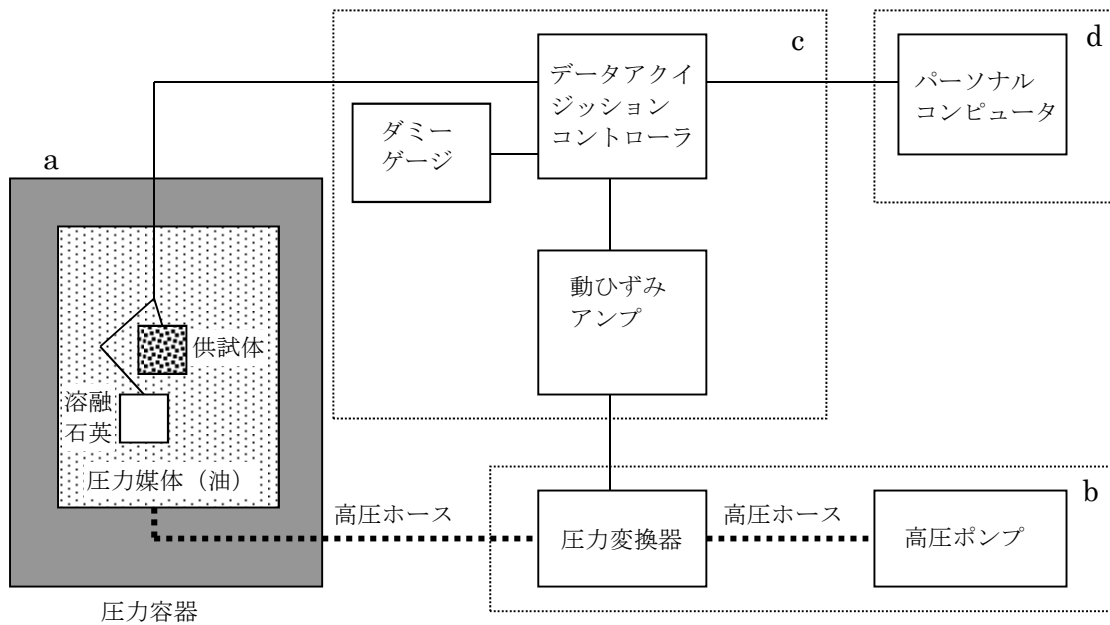


図 3.3.6 試験装置の模式図

表 3.3.2 測定機器の一覧

測定機器	メーカー
データアキュイジションコントローラ 7V14	San-ei
動ひずみアンプ、DPM-712B	共和電業(株)
圧力変換器、PG-2TH	共和電業(株)
高圧ポンプ、RIKEN POWER MODEL No.UP-22	RIKEN SEIKI Co., LTD
パーソナルコンピュータ、EPSON PC-386LLR	エプソン
ひずみゲージ(3軸ロゼットゲージ)、KFG-10-120-D17-11	共和電業(株)
ひずみゲージ(単軸ゲージ)、KFG-10-120-C1-11	共和電業(株)

3.3.4 試験結果

図 3.3.7 (1)および(2)に試験中の静水圧载荷による圧力-差ひずみ線図の実測データを示す。図のひずみ挙動は、前述のとおり差ひずみを算出し試験中の供試体に関する温度の影響をキャンセルするため、各供試体のひずみから熔融石英のひずみを引いている。

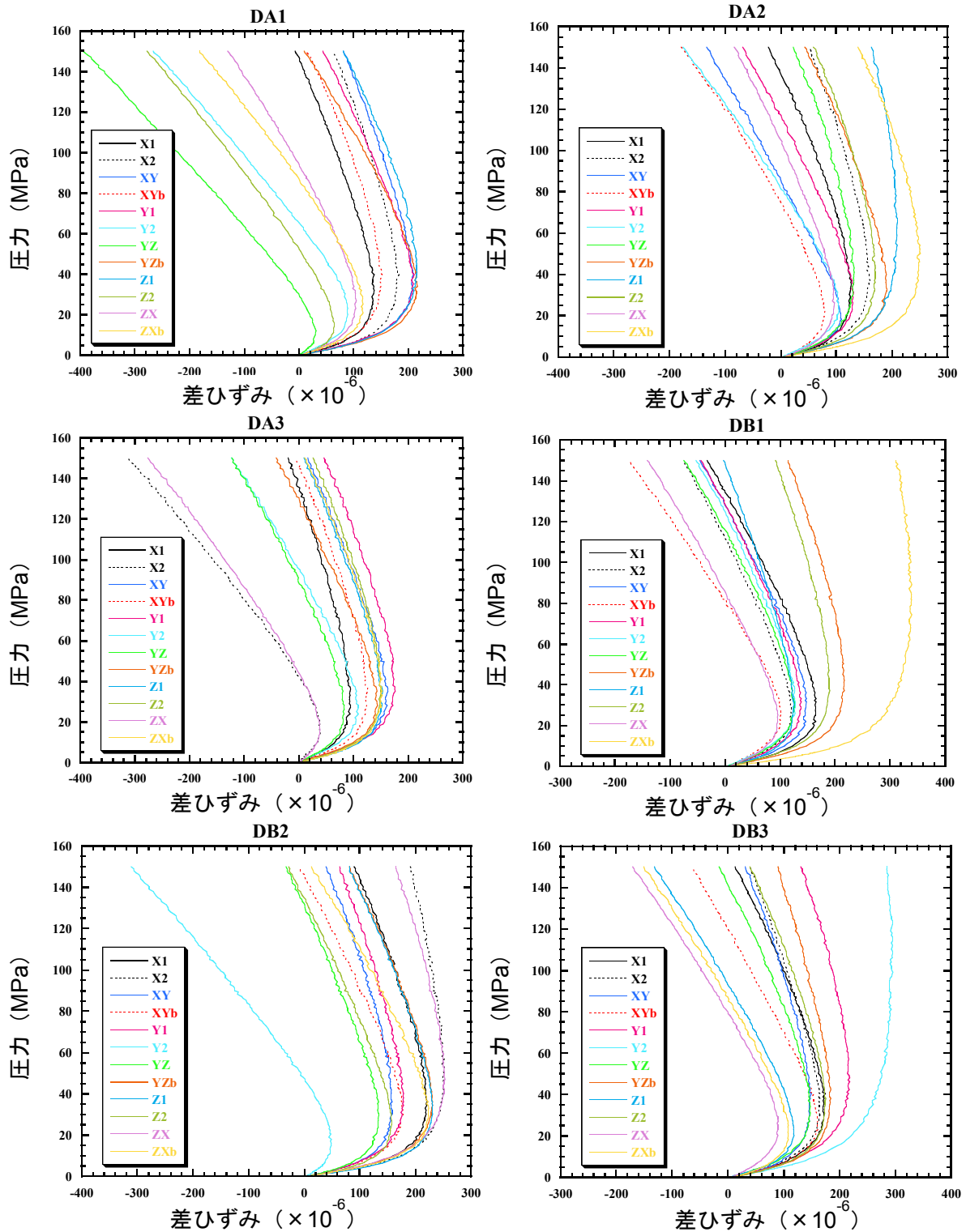


図 3.3.7 (1) 試験中の静水圧载荷による差ひずみの挙動

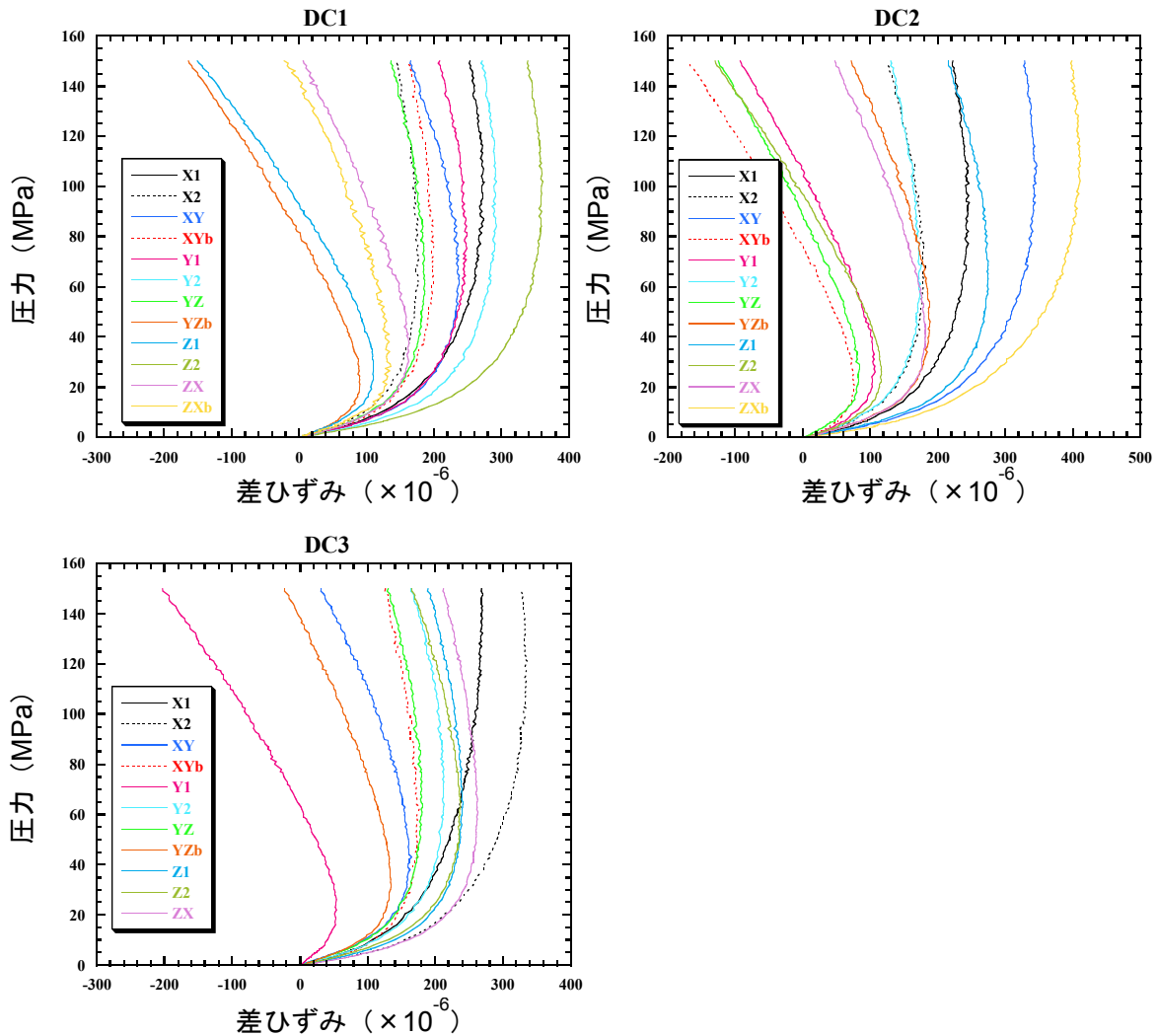


図 3.3.7 (2) 試験中の静水圧载荷による差ひずみの挙動

3.3.5 初期応力の算出結果

静水圧载荷試験による圧力-差ひずみ曲線より得られた 12 個のクラックパラメータから 6 個の未知数 $\{(\Delta\beta/\beta)_E, (\Delta\beta/\beta)_N, (\Delta\beta/\beta)_V, (\Delta\beta/\beta)_{EN}, (\Delta\beta/\beta)_{NV}, (\Delta\beta/\beta)_{VX}\}$ を最小二乗法により算出し、主成分分析により主値 $(\Delta\beta/\beta)_I (I=1\sim 3)$ を算出した。3.3.1 項の仮定を基にすると、主値の比が主応力 $\sigma_I (I=1\sim 3)$ の比、主値の方向が主応力の方向となる。算出結果を表 3.3.3 および図 3.3.8 に示す。

表 3.3.3 より、DSCA 法による初期応力測定では、個別の測定結果にはバラツキが見られるが、深度 400m における主応力比 σ_1/σ_3 は、1.3 から 2.3 の範囲にあり、全体の平均値は 1.9 であり、水平面における最大主応力 σ_H の方向は概ね NW-SE であることが分かった。また図 3.3.8 より、最大主応力の方角は概ね NW-SE であることが分かった。このような測定結果のバラツキは、広域的な応力場が不連続構造や岩体の不均質性等の測点に特有の地質状況によって擾乱された結果であり、換言すれば、個別の測定結果を平均することで周辺の広域的な応力場が把握できると考えられる¹⁸⁾。このような考えに基づいて深度 400m における DSCA 法による初期応力測定結果を平均し、図中の塗りつぶしの記号で示した。これにより深度 400m における最大主応力(●)の方角はおよそ NNW-SSE であることが分かった。

表 3.3.3 初期応力算出結果

試料名	DA1	DA2	DA3	DB1	DB2	DB3	DC1	DC2	DC3	
ボーリング孔名 (方位/傾斜)	10MI26号孔 (N60°W/-3°)									
採取深度(m)	26.25	26.3	26.35	52.75	52.8	52.85	68.25	68.3	68.35	
($\Delta\beta/\beta'$) _E	1.84	1.44	1.28	1.41	2.66	1.69	1.95	1.72	2.23	
($\Delta\beta/\beta'$) _N	2.19	2.44	1.8	2.62	3.17	2.04	1.66	2.16	1.47	
($\Delta\beta/\beta'$) _V	1.93	1.63	1.58	1.59	1.72	1.89	1.92	1.38	1.35	
($\Delta\beta/\beta'$) _{EN}	-0.22	-0.41	-0.52	-0.36	-0.43	-0.16	-0.12	-0.35	0.17	
($\Delta\beta/\beta'$) _{NV}	0.54	0.33	0.24	0.38	0.09	-0.09	0.12	0.44	0.02	
($\Delta\beta/\beta'$) _{VE}	-0.48	-0.23	-0.15	-0.13	-0.37	-0.11	0.09	-0.07	-0.04	
(Δβ/β') _I	I=1	2.85	2.72	2.25	2.84	3.45	2.11	2.03	2.52	2.27
	I=2	1.79	1.53	1.46	1.46	2.48	1.93	1.95	1.58	1.45
	I=3	1.33	1.25	0.96	1.31	1.58	1.57	1.55	1.16	1.33
推定される 主応力比+	σ_1/σ_3	2.1	2.2	2.3	2.2	2.2	1.3	1.3	2.2	1.7
	σ_2/σ_3	1.3	1.2	1.5	1.1	1.6	1.2	1.3	1.4	1.1
	σ_3/σ_3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
推定される 水平面主応力比*と σ_H の方向*	σ_H/σ_h	1.3	2	2.2	2.1	1.4	1.3	1.2	1.5	1.6
	σ_h/σ_h	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	θ^*	-64	-70.4	-58.4	-74.5	-61.3	-68.4	-20.2	-61.1	11.8

+: 3.3.1 項の仮定を基にした推定

※: 水平面内における最大主応力 σ_H 、最小主応力 σ_h

*: σ_H からN方向に向かって測った σ_H までの角度(°)

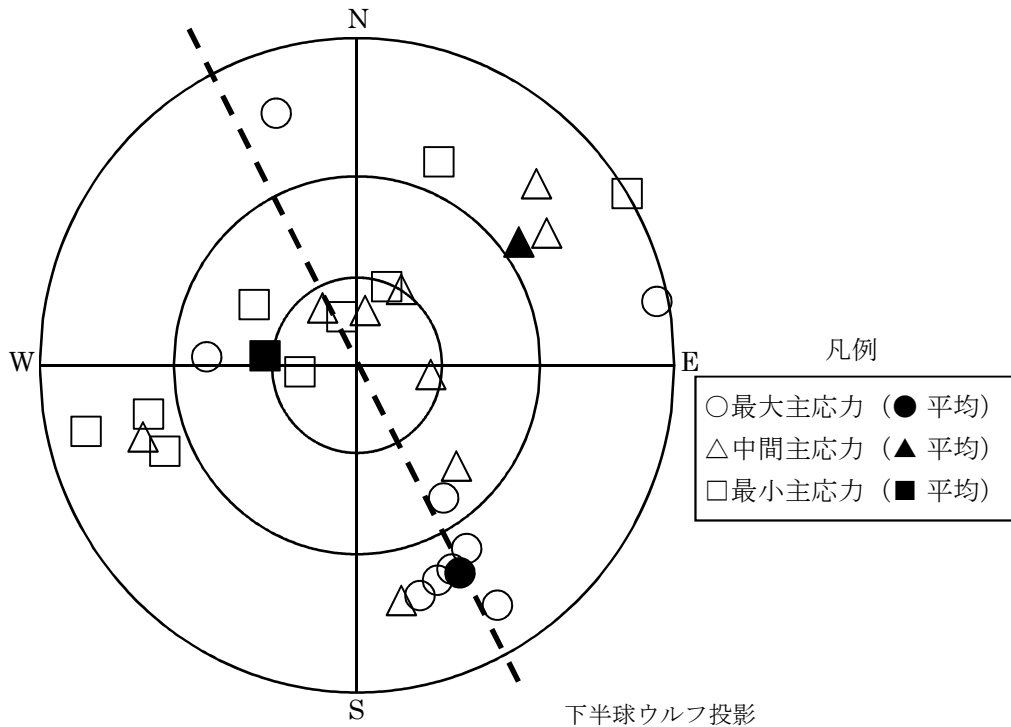


図 3.3.8 初期応力算出結果

3.3.6 考察

DSCA 法による初期応力測定法の深部岩盤における適用性を検討するために、第 1 段階の地表からの調査研究段階で実施した MIZ-1 号孔における水圧破碎法による初期応力算出結果⁹⁾と深度 200m、300m、400m で実施した DSCA 法による初期応力算出結果^{19), 20)}を比較した。地殻部分の応力の状態はプレートテクトニクスの影響により最大主応力の方向が水平に近い場合が多い。特に日本のように複数のプレートが接するプレートの沈み込み帯ではその傾向が顕著であり、水平面内の応力状態を把握することは重要であることから²¹⁾、両手法による水平面内の最大主応力を比較した。

水圧破碎法は ISRM(International Society for Rock Mechanics)²²⁾で報告されているように理論的背景がほぼ確立しているが、原位置における測定であり、大がかりな装置が必要である。なお、水圧破碎法は手法の性質上、水平面内の主応力が算出される。一方、DSCA 法の理論はいくつかの仮定に基づいて構築されているが、ボーリングコアさえ入手できれば室内で比較的簡便に実施できるという利点がある。DSCA 法では主応力の比と方向が算出される。図 3.3.9 に、両手法による初期応力の算出結果の比較を示す。なお DSCA 法の値は、前述した考えに基づいて深度ごとに測定値を平均した結果を示している。水圧破碎法による水平面の最大主応力の方向は、深度 168m での結果は低角度割れ目帯の近傍であり、深度 632m の結果は深度 600m～750m 付近で確認されている断層の近傍であるため、これらの影響を受けているものと評価されている⁹⁾が、概ね N-W の範囲にある。また、DSCA 法の結果も概ね N-W の範囲にあり、両者の結果は調和的である。以上より、DSCA 法による初期応力測定法が深部岩盤の初期応力測定における適用可能性を示すことができた。水圧破碎法はその手法の性質上、測定に数 m 程度の無亀裂区間が必要であるが、DSCA 法では数十 cm 程度の無亀裂区間があれば、供試体を採取し試験が可能である。よって、岩盤の初期応力測定において水圧破碎法が実施できないような区間では、DSCA 法で代替できると考えられる。

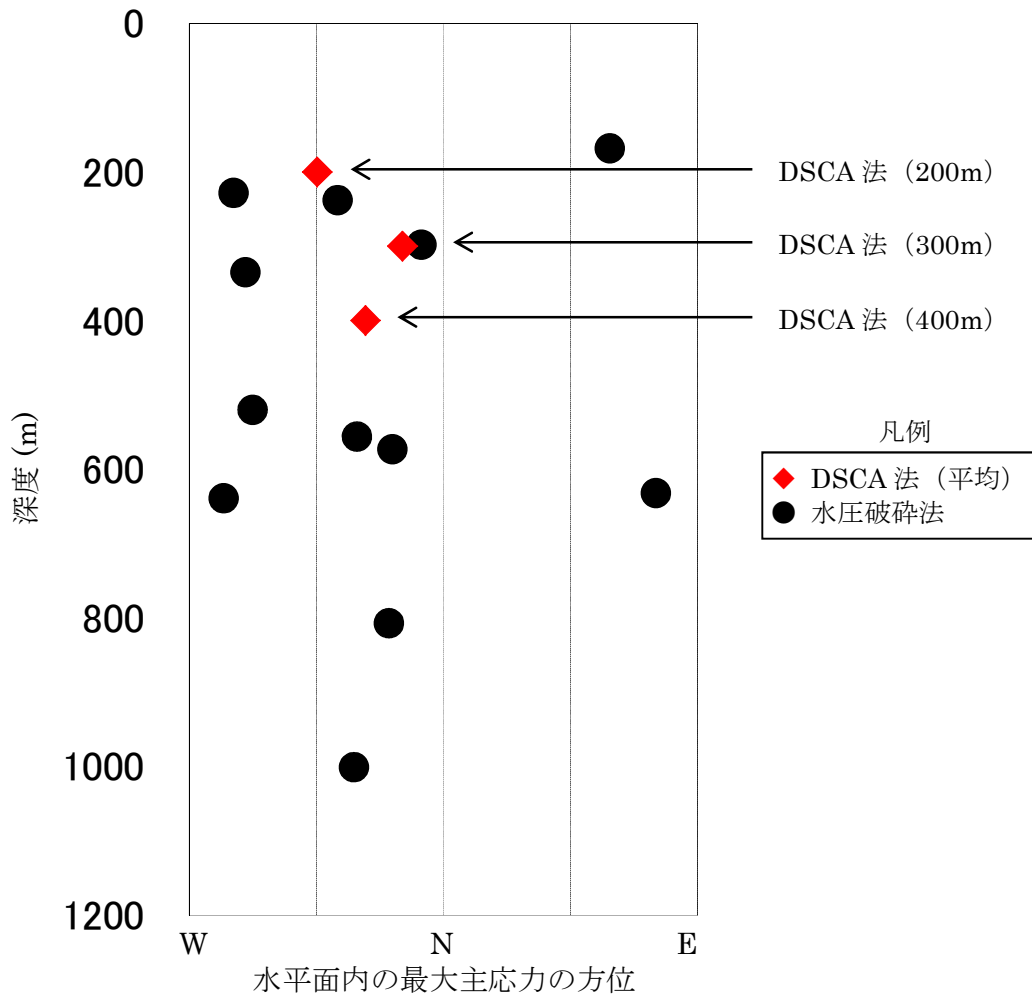


図 3.3.9 DSCA 法と水圧破碎法の比較

3.4 多面体供試体による三次元弾性波速度測定

3.4.1 三次元弾性波速度測定の概要

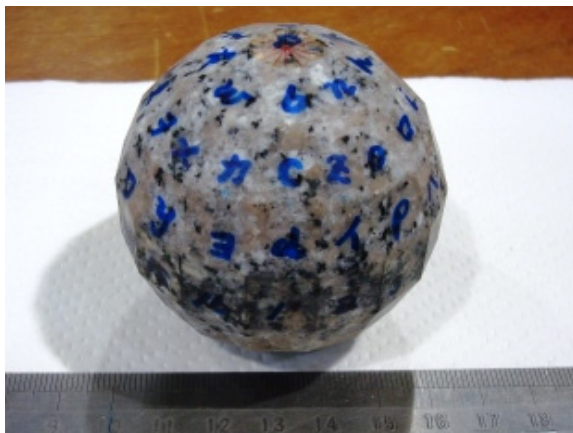
岩石の P 波速度は、岩石内部の亀裂に影響される。P 波速度は亀裂密度に反比例することから、P 波速度の三次元的な分布から亀裂の配向性を求めることができる^{13), 14)}。亀裂の配向性について、DSCA 法では周圧载荷によるひずみの挙動により明らかにし、多面体供試体による三次元弾性波速度測定では P 波速度分布により明らかにしようとするものである。つまり岩石内部の亀裂の配向性を別々の現象（ひずみの挙動と P 波速度）から捉えようとするものであり、両者を比較することによって互いの測定結果のクロスチェックが可能と考えられる。

3.4.2 供試体

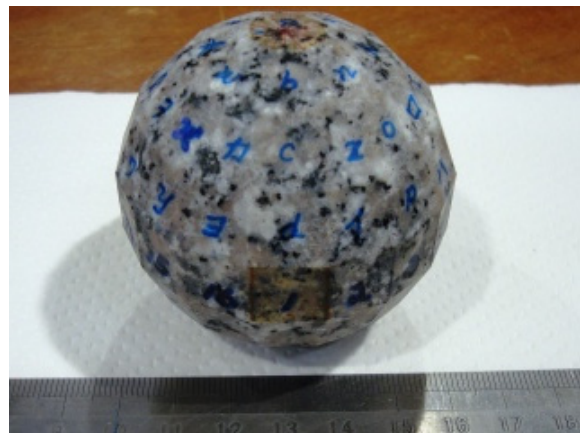
表 3.4.1 に供試体の採取深度および地質概要、図 3.4.1 に供試体写真を示す。測定で使用した岩石試料は 2 試料で、肉眼観察で風化変質の認められないものを選定し、図 3.4.1 のように 98 面体に成形した。なお、設定した座標軸は DSCA 法と同様である（図 3.3.2 参照）。

表 3.4.1 供試体の採取深度および地質概要

ボーリング孔名 (孔軸方向)	供試体名	採取深度(m)	岩 種	岩盤 等級
10MI26 号孔 (N60°W/-3°)	A	26.19	土岐花崗岩	CH
	B	68.14	土岐花崗岩	B



供試体 A



供試体 B

(供試体 A, B の形状 : 98 面体)

図 3.4.1 供試体写真

3.4.3 試験の概要

三次元弾性波速度測定装置(応用地質(株)製)の模式図を図 3.4.2 に示す。供試体を振動子(発信、受信)で挟み供試体を透過する P 波速度を測定した。P 波速度は行き帰りを測定し、その平均を求めた。以上を 49 方向について繰り返し、P 波速度分布を明らかにした。

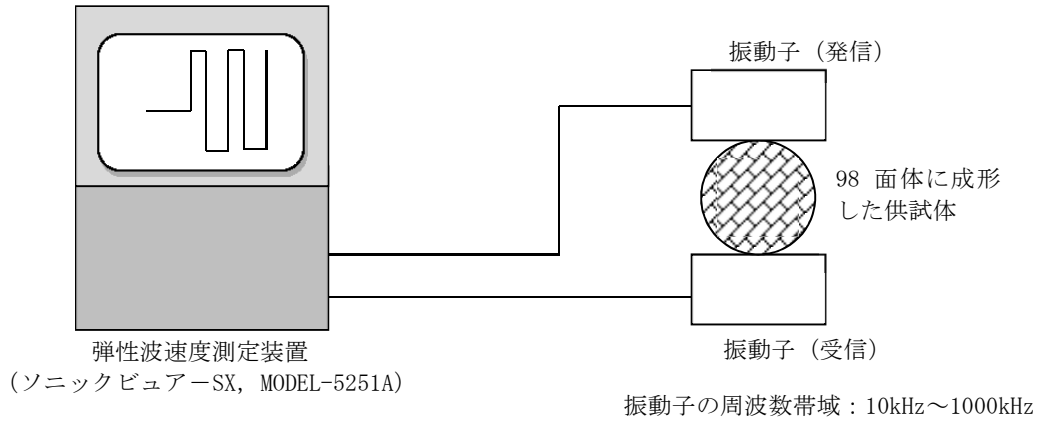


図 3.4.2 三次元弾性波速度測定装置の模式図

3.4.4 測定結果および考察

49 方向の P 波速度測定結果から 6 個の未知数{ $V_E, V_N, V_V, V_{EN}, V_{NV}, V_{VE}$ }を最小二乗法により算出し、主成分分析により算出した主値の結果を表 3.4.2 に示す。また、三次元 P 波速度分布を図 3.4.3 に示す。

表 3.4.2 算出された P 波速度成分

供試体名	A	B	
ボーリング孔名(方位/傾斜)	10MI26 号孔(N60°W/-3°)		
採取深度(m)	26.19	68.14	
速度成分* (m/s)	V_E	4902	4962
	V_N	4794	4686
	V_V	4790	4931
	V_{EN}	277	136
	V_{NV}	-111	-172
	V_{VE}	17	-45
平面主値	V_H	5130	5017
	V_h	4566	4630
	θ^*	39.5	22.3
主値	V_1	5140	5104
	V_2	4817	4904
	V_3	4529	4570

※：速度成分のマイナスは設定方向と逆向であることを示す。

*：E から N 方向に向かって測った V_H までの角度(°)

供試体中の微小亀裂は岩盤中で受けていた応力の解放により発生すると仮定すると、亀裂密度は応力の解放量が多い程、つまり岩盤中で受けていた応力が多い程大きくなる。よってP波速度が最小の方向が、岩盤中の最大主応力方向に相当すると考えられる。図 3.4.3 より P 波速度の最小主値の方位は NW 方向であった。図 3.4.4 に三次元弾性波速度測定における主値と同一深度の DSCA 法における主値の平均値を示す。同図より、最大主応力の方向は調和した結果となった。亀裂の配向性について、DSCA 法では周圧荷によるひずみの挙動から推定し、三次元弾性波速度測定では、P 波速度から推定する。つまり亀裂の配向性について、それぞれ異なる現象からアプローチしており、異なる手法で調和した結果が得られたということは、測定結果について信頼性が高いと言える。

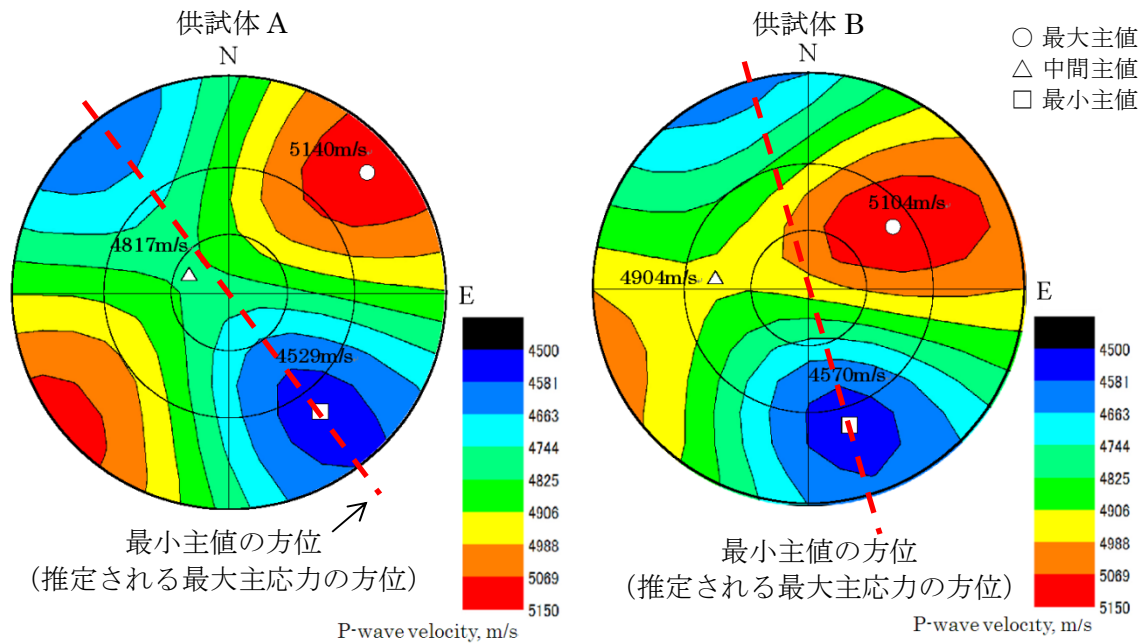


図 3.4.3 三次元 P 波速度分布

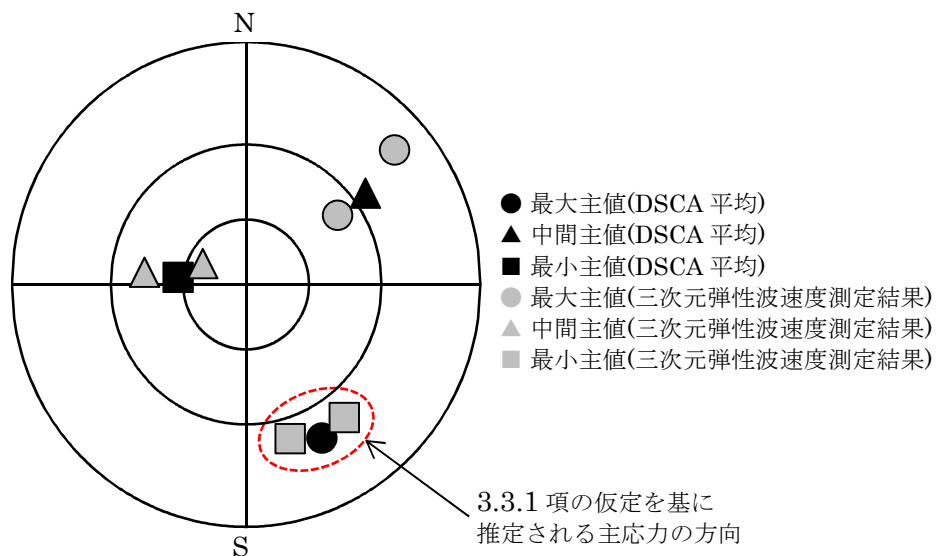


図 3.4.4 三次元弾性波速度測定と DSCA 法による主値の比較

次に、地表からの調査で実施した MIZ-1 号孔の水圧破碎法の結果⁹⁾と研究坑道内でのボーリングのコアを用いた DSCA 法および三次元弾性波速度測定の結果^{19),20)}を比較した。比較した結果を図 3.4.5 に示す。図には 2011 年度に実施した深度 400m における DSCA 法の平均値および三次元弾性波速度測定結果のほかに、過去に実施した深度 200m、300m における DSCA 法の平均値と、深度 300m における三次元弾性波速度測定の結果も示している。水圧破碎法の結果において割れ目帯や断層の影響を受けているものと評価された⁹⁾ものや、三次元弾性波速度測定の結果において、岩盤の不均質や不連続構造といった局所的な影響を受けたと推定される結果も含まれるが、大局的には 3 手法による水平面内の最大主応力の方位は N-W の範囲に収まっている。

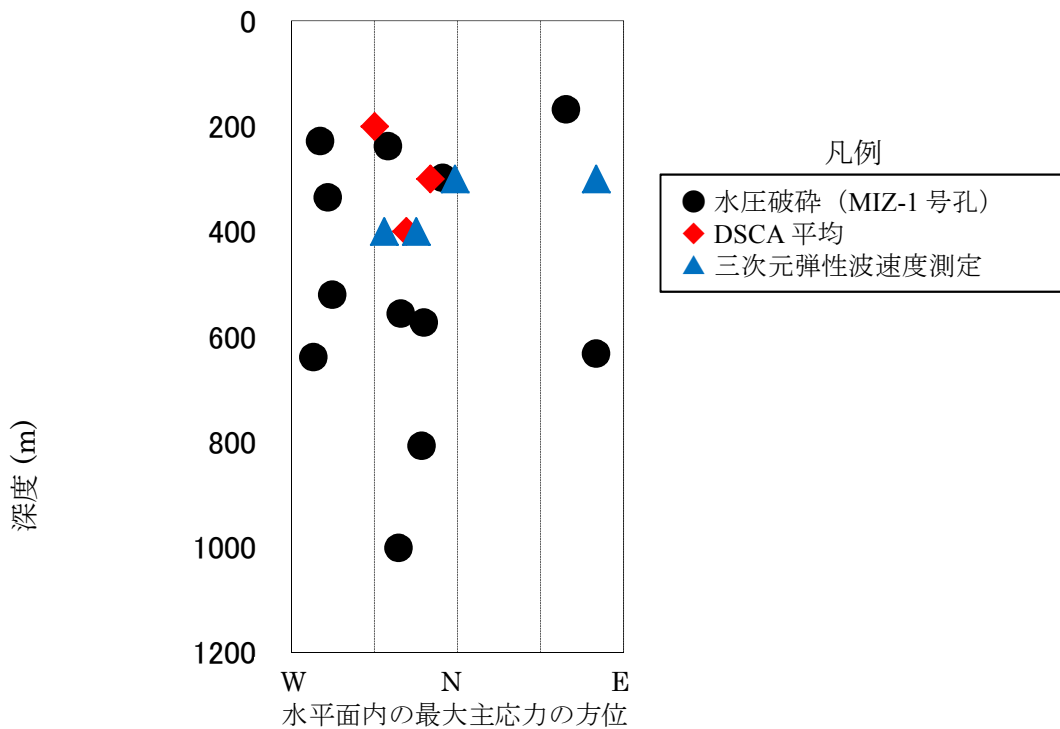


図 3.4.5 水平面内の最大主応力の方向

4. ボーリングコア・掘削ずりを用いた室内試験による岩盤物性評価

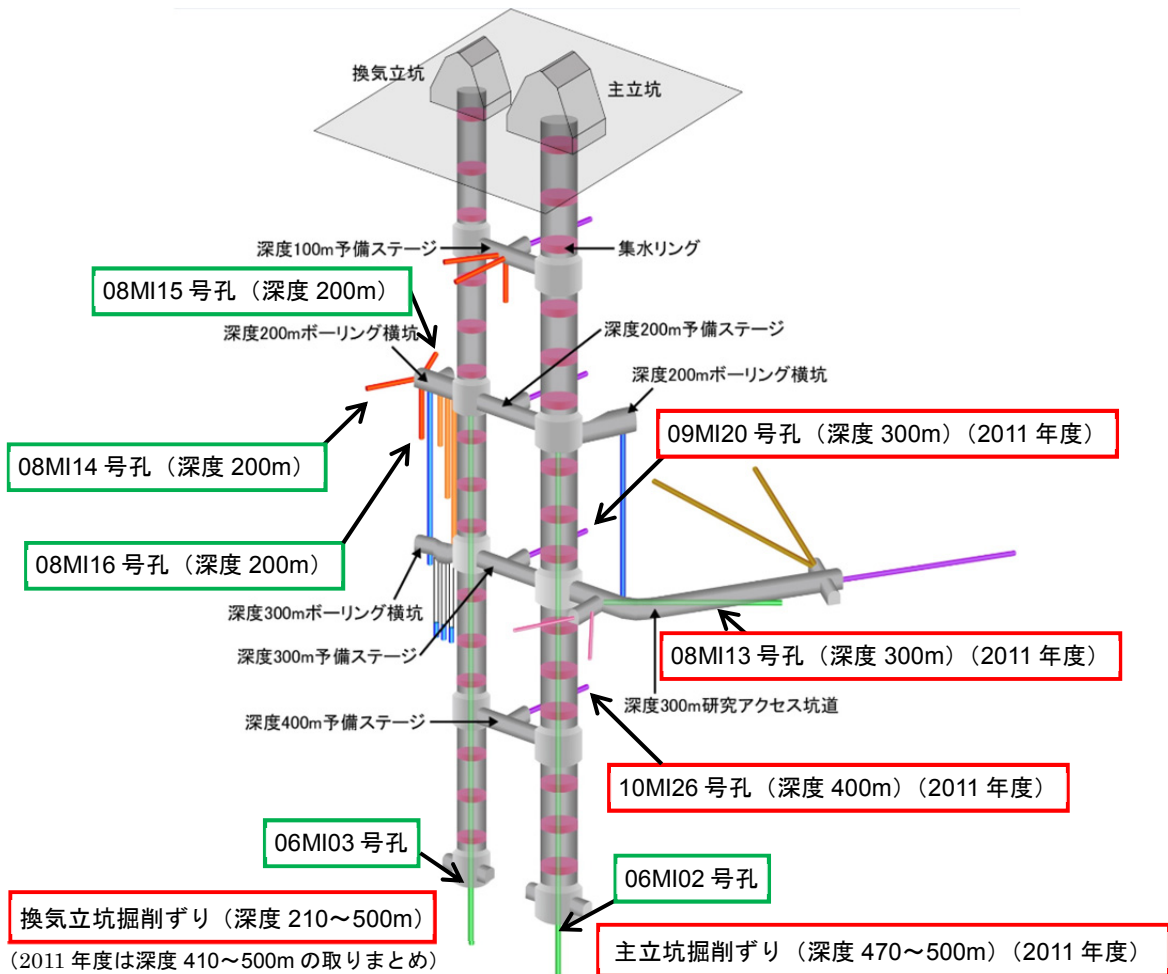
4.1 目的および実施内容

本調査試験では、研究所における岩盤の物理・力学特性を把握することを目的として、深度 300m および深度 400m で採取されたボーリングコアを用いて室内物理・力学試験を実施した。また、立坑掘削に伴い継続して実施している換気立坑の掘削ずりを用いた室内物理・力学試験の結果を深度 410~500m までの範囲で取りまとめた。さらに、主立坑の中で新たに実施した掘削ずりを用いた室内物理・力学試験を深度 470~500m までの範囲で取りまとめた。これらの結果に基づいて第 1 段階で実施した調査結果の妥当性確認を行うとともに第 2 次取りまとめ¹⁰⁾における既存文献の収集で得た岩盤物性の統計量と MIU 計画で得られた土岐花崗岩の物性値との対比を実施した。

4.2 室内物理・力学試験

4.2.1 調査位置

本調査試験では、深度 300m で掘削された 08MI13 号孔、09MI20 号孔および深度 400m で掘削された 10MI26 号孔のボーリングコアおよび換気立坑・主立坑の掘削で排出される掘削ずりを用いて試験を行った。図 4.2.1 に物理・力学試験の調査位置を示す。図には、これまでの調査研究において、土岐花崗岩部で室内物理・力学試験を実施した深度 200m でのボーリング孔(08MI14、15、16 号孔) および立坑掘削のパイロットボーリングとして実施したボーリング孔 (06MI02、03 号孔) も示している。



※文献¹⁶⁾を一部修正、加筆

図 4.2.1 物理・力学試験調査位置

4.2.2 試験の概要

室内物理試験の項目は、密度試験、含水比試験、有効間隙率試験および弾性波速度試験である。また、室内力学試験の項目は、一軸圧縮試験、圧裂引張試験および三軸圧縮試験である。それぞれ地盤工学会が示した基準「岩の試験・調査方法の基準・解説書（平成14年度版）」²³⁾に準拠して実施した。試験の概要および試験実施数量を表4.2.1、表4.2.2に示す。

表 4.2.1 物理・力学試験概要

	試験基準	供試体寸法
08MI13 号孔 09MI20 号孔 10MI26 号孔	地盤工学会基準 (JGS)	物理試験 φ36×h78(一部非整形試料あり) 弾性波速度試験は一軸・三軸圧縮、 圧裂引張試験供試体を使用 力学試験 一軸・三軸圧縮試験 φ36×h78 圧裂引張試験 φ60×h60
換気立坑掘削ずり	地盤工学会基準 (JGS)	物理試験 非整形 弾性波速度試験は一軸圧縮試験 供試体を使用 力学試験 一軸圧縮試験 φ50×h100 圧裂引張試験 φ50×h50
主立坑掘削ずり	地盤工学会基準 (JGS)	物理試験 非整形 弾性波速度試験は一軸・三軸圧縮、 試験供試体を使用 力学試験 一軸・三軸圧縮試験 φ50×h100 圧裂引張試験 φ50×h50

表 4.2.2 物理・力学試験の実施数量

試験名	試験数量(個)					備考	
	08MI13 号孔	09MI20 号孔	10MI26 号孔	換気立坑 掘削ずり	主立坑 掘削ずり		
物理試験	密度試験	6	9	9	30	12	3 供試体/地点
	含水比試験	6	9	9	30	12	〃
	有効間隙率試験	6	9	9	30	12	〃
	弾性波速度試験 (P波・S波)	18 ^{*1}	27 ^{*1}	27 ^{*1}	30 ^{*2}	12 ^{*2}	※1 一軸圧縮、圧裂引張、三軸圧縮試験の各供試体を測定 (9 供試体/地点) ※2 一軸圧縮試験の供試体を測定 (3 供試体/地点)
力学試験	一軸圧縮試験	6	9	9	30	12	3 供試体/地点
	圧裂引張試験	6	9	9	30	12	〃
	三軸圧縮試験	6 ^{*3}	9 ^{*3}	9 ^{*3}	—	8 ^{*4}	※3 側圧 10,20,29MPa の供試体 3 個と一軸圧縮試験の計 4 個を 1 地点とし、その結果から c, φ を評価 (3 供試体/地点) ※4 側圧 2,4,8,19MPa の供試体計 4 個を 1 地点とし、その結果から c, φ を評価 (4 供試体/地点)

4.2.3 供試体

室内物理・力学試験で用いたボーリングコアは、他の調査を目的として掘削されたボーリング孔で採取されたものである。ボーリングコアから試料を採取した位置は、広範囲の岩盤物性値が得られること、かつ供試体の作成に必要な長さが得られることを基準に選定した。各ボーリング孔の概要および試料の採取深度、コア観察による岩盤等級を表 4.2.3 に示す。岩盤等級はボーリングコアの観察結果に基づく電研式岩盤分類²⁴⁾の結果である。供試体は表中に示されている試料採取地点の範囲の中から物理試験、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、圧裂引張試験用供試体をそれぞれ 3 個ずつ作成した。

表 4.2.3 ボーリング孔および試料の概要

ボーリング孔名	ボーリング実施目的	ボーリング実施深度 (GL-,m)	掘削方向	掘削長 (mabh ⁺)	試料採取地点 (mabh)	岩盤等級
08MI13 号孔	研究アクセス坑道掘削のためのパイロットボーリング	300	水平	62.5	27.3~29.0	B
					57.0~59.7	B
09MI20 号孔	地下水モニタリング	300	水平	102.0	26.2~28.0	CH
					51.0~51.9	CM
					54.8~56.4	CH
10MI26 号孔	地下水モニタリング	400	水平	70.6	74.0~76.0	CH
					25.0~26.7	CH
					58.1~59.8	CM
					62.0~64.0	CM
					67.0~68.8	B

* mabh: meters along borehole

掘削ずりによる室内物理・力学試験は、ボーリングコアによる調査を補完して深度方向の調査密度を上げるために実施されたものである。換気立坑の掘削ずりによる室内物理・力学試験は深度 210m から 10m 毎に継続して実施されたもの¹⁹⁾であり、本報告では 410~500m の範囲で結果を取りまとめた。試料は、発破掘削により地上に排出された掘削ずりの中から、20~50cm 角程度の岩塊をその深度を代表するサンプルとして採取した。主立坑の掘削ずりによる室内物理・力学試験は深度 470~500m の範囲で 2011 年度に新たに実施されたものである。試料は、壁面観察作業中に壁面より 10cm 角以上の大きさになるようにサンプリングした。掘削ずり試料の概要を表 4.2.4 に示す。掘削ずりの岩盤等級（電研式岩盤分類）は壁面観察によるものである。表中に示されている試料採取深度において一軸圧縮試験、圧裂引張試験用供試体はそれぞれ 3 個、三軸圧縮試験用は 4 個作成した。物理試験用供試体には上記の供試体を作成した残余岩片を用いて実施した。

表 4.2.4 掘削ずり試料概要

試料採取場所	試料採取深度 (GL-,m)	岩盤等級	備考
換気立坑	410,420,430,440,450,460,470,480,490,500	B~CH	
主立坑	470,475,480 [*] , 490,495,500 [*]	CM,CH~CM,CL [*] , CH,CH,CM [*]	※三軸圧縮試験を実施

4.2.4 試験結果および考察

2011年度に取得・取りまとめを行った物理・力学結果の平均値と分布範囲を第1段階で実施したMIZ-1号孔の結果⁹⁾とともに表4.2.5に示す。また、深度方向の各物性値の分布傾向を図4.2.2に示す。図には、第1段階、第2段階でこれまでに実施した土岐花崗岩の室内物理・力学試験の結果(MIZ-1号孔、深度200m岩盤力学調査¹⁹⁾、深度210~400mまでの換気立坑掘削ズリによる試験¹⁹⁾、および立坑掘削パイロットボーリングによる試験²⁵⁾も示してある。なお、2011年度に実施した各試験の個別結果は巻末の付録に示した。

表4.2.5より深度300mで掘削された08MI13号孔(岩盤等級B~CH級)と09MI20号孔(岩盤等級B~CM級)の結果はMIZ-1号孔健岩部(岩盤等級A~CM級)の平均値と概ね一致する結果が得られた。深度400~500mの範囲にある10MI26号孔(岩盤等級B~CM級)や換気立坑掘削ズリ(岩盤等級B~CH級)の結果は、P波速度や一軸圧縮強さがMIZ-1号孔健岩部の平均に比べて若干小さい。図4.2.2によると深度400m前後からMIZ-1号孔での調査結果(図4.2.2中の●)と換気立坑掘削ズリの調査結果(図4.2.2中の■)も一軸圧縮強さが小さくなっており、深度方向の各物性値の分布傾向はMIZ-1号孔の深度200m付近(岩盤等級CL級)と主立坑掘削ズリ(岩盤等級CH~CL級)、主立坑パイロットボーリング(岩盤等級CH~D級)の結果を除くと概ね一致した。さらに詳細に検討すると、換気立坑掘削ズリのP波速度は、MIZ-1号孔や換気立坑パイロットボーリングのそれより若干小さい傾向がある。これは掘削による発破衝撃により損傷を受け、弾性波速度が低下した可能性が考えられる。また、換気立坑掘削ズリは、深度470m以深でP波速度に加え一軸圧縮強さも小さくなっている。この深度は上部割れ目帯(以下、UHFDと略す)から下部割れ目低密度帯(以下、LSFDと略す)の換気立坑中心での境界深度²⁶⁾とほぼ対応しており、UHFDとLSFDの物理・力学的特性の違いを捉えている可能性も否定できない。この検証は今後の課題である。なお、主立坑掘削ズリ、主立坑パイロットボーリングの試験結果は、主立坑が断層に沿って掘削されているため、岩盤等級も悪く深度方向にばらつきがある結果となっている。

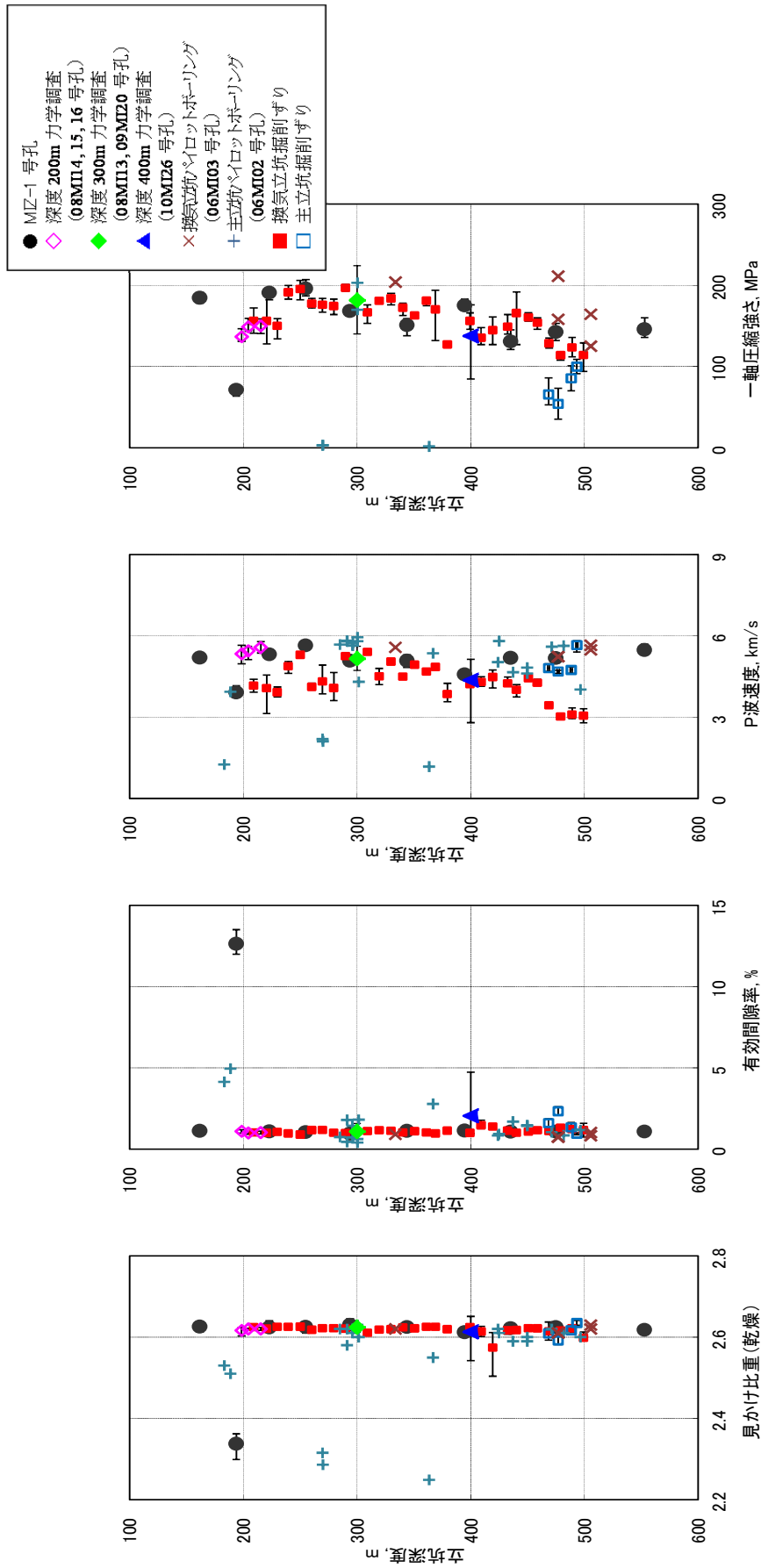
以上から、深度500mまでの健岩部においては、各物性値とも試料の採取地点による大きな相違は認められず、岩石の物性は深度方向に概ね一様であり、立坑に分布する土岐花崗岩体が力学的には概ね一様であることを示している。また、換気立坑掘削ズリを用いた室内試験は、P波速度が若干異なることにより掘削時の損傷が試験結果に含まれる可能性はあるが、試験体の採取が容易で深度方向に対して密に採取することができるため、調査位置の深度方向の物性分布を詳細に調査するのに適しているという利点を確認することができた。

表 4.2.5 第 1 段階と第 2 段階 (2011 年度実施分) で得られた室内物理・力学試験結果一覧

調査段階	第 1 段階調査				第 2 段階調査 (2011 年度実施分)			
	地表からの調査予測研究段階				研究坑道の掘削を伴う研究段階			
調査地点	MIZ-1 号孔 上段: 平均値±1σ 下段: 最小値~最大値	08M113 号孔 上段: 平均値±1σ 下段: 最小値~最大値	09M120 号孔 上段: 平均値±1σ 下段: 最小値~最大値	10M126 号孔 上段: 平均値±1σ 下段: 最小値~最大値	換気立坑 掘削すり試験 上段: 平均値±1σ 下段: 最小値~最大値	主立坑 掘削すり試験 上段: 平均値±1σ 下段: 最小値~最大値		
調査深度 (GL-)	167~1004m	300m	300m	400m	410~500m	470~500m		
地質	土岐花崗岩	土岐花崗岩	土岐花崗岩	土岐花崗岩	土岐花崗岩	土岐花崗岩		
岩盤等級	A~CM級	B~CH級	B~CM級	B~CM級	B~CH級	CH~CL級		
見かけ比重 (乾燥)	2.62±0.01 2.55~2.65	2.63±0.00 2.62~2.63	2.62±0.01 2.61~2.63	2.61±0.04 2.54~2.65	2.61±0.02 2.50~2.63	2.61±0.02 2.58~2.64		
含水比 (%)	0.41±0.15 0.24~1.22	0.23±0.04 0.19~0.27	0.24±0.03 0.21~0.30	0.35±0.22 0.19~0.67	0.26±0.09 0.13~0.51	0.29±0.05 0.22~0.36		
有効間隙率 (%)	1.12±0.40 0.64~3.41	12.65±0.44 12.0~13.5	1.16±0.19 0.99~1.58	2.05±1.57 0.96~4.73	1.21±0.20 0.75~1.78	1.56±0.57 0.89~2.60		
P波弾性波速度 (km/s)	5.45±0.41 4.53~6.16	5.17±0.31 4.77~5.62	5.15±0.15 4.72~5.41	4.37±0.49 2.80~5.14	3.84±0.61 2.79~4.74	4.97±0.44 4.61~5.81		
S波弾性波速度 (km/s)	2.91±0.32 2.34~3.38	2.98±0.21 2.65~3.34	2.99±0.23 2.41~3.29	2.60±0.32 1.63~3.03	2.38±0.34 1.79~2.84	2.41±0.21 2.10~2.70		
一軸圧縮強さ (MPa)	172.5±24.6 121.0~212.0	71.8±7.1 63.7~76.6	194.1±20.5 166.9~224.1	137.8±29.5 84.7~175.9	139.1±22.1 94.1~192.0	76.3±22.9 35.1~109.0		
50%接線ヤング率 (GPa)	53.9±5.8 41.6~67.9	57.3±3.8 53.2~63.3	65.8±2.5 62.5~69.8	51.4±8.6 35.1~62.1	48.4±6.7 31.3~60.1	33.8±11.5 14.9~59.3		
静ポアソン比	0.265±0.04 0.17~0.35	0.243±0.02 0.22~0.26	0.303±0.03 0.26~0.35	0.310±0.05 0.23~0.38	0.271±0.03 0.20~0.34	0.282±0.03 0.22~0.35		
圧裂引張強さ (MPa)	6.48±1.86 3.53~12.50	2.55±0.38 2.12~2.80	8.55±0.59 7.87~9.43	5.27±2.07 1.66~8.50	5.80±1.45 3.09~8.29	4.62±1.70 2.84~7.75		
粘着力 c (MPa)	39.1±2.2 34.4~42.6	25.2 ^{注2} 側圧0-30MPa時 側圧0-30MPa時	22.9±3.6 18.8~25.0	15.0±1.7 13.3~16.7	-	10.7±6.4 6.2~15.2		
内部摩擦角 φ (°)	52.2±1.3 49.3~53.8	30.1 ^{注2} 側圧0-30MPa時 側圧0-30MPa時	62.7±0.6 62.0~63.0	61.7±1.5 60.0~63.0	-	47.7±21.3 32.6~62.7		

注 1: 風化・変質が激しい供試体

注 2: 測定値がひとつのためσの計算なし



※図は土岐花崗岩のみプロットしている。
 ※MIZ-1 号孔力学調査, 深度 200~400m 力学調査, 換気立坑・主立坑掘削ずりは深度毎の平均値を示す。
 プロットに表示しているバーは測定値の上限と下限を示す。
 ※換気立坑パイロットボアリング, 主立坑パイロットボアリングは全データを表示している。

図 4.2.2 室内物理・力学試験結果

次に、第2次取りまとめ¹⁰⁾において検討された岩盤物性の統計量と第1段階調査と第2段階調査で得られた土岐花崗岩の岩盤物性の統計量との対比を実施した。物理・力学特性を比較した結果を図4.2.3に示す。第1段階調査と第2段階調査で得られた有効間隙率のピーク値は2%以下であり第2次取りまとめ¹⁰⁾における結晶質岩（酸性岩）の文献データのピークと概ね一致する。分布特性は狭く、第2次取りまとめ¹⁰⁾の釜石鉾山や東濃鉾山の結果により類似している。なお、第1段階調査で取得された有効間隙率が10%を超える箇所は脆弱部と評価された箇所である。強度や変形特性のピークは第2次取りまとめ¹⁰⁾における結晶質岩（酸性岩）の文献データと比較して若干大きく、第2次取りまとめの釜石鉾山や東濃鉾山の結果と類似している。また、第1段階調査と第2段階調査を比べるとピークや分布がほぼ等しいことが分った。

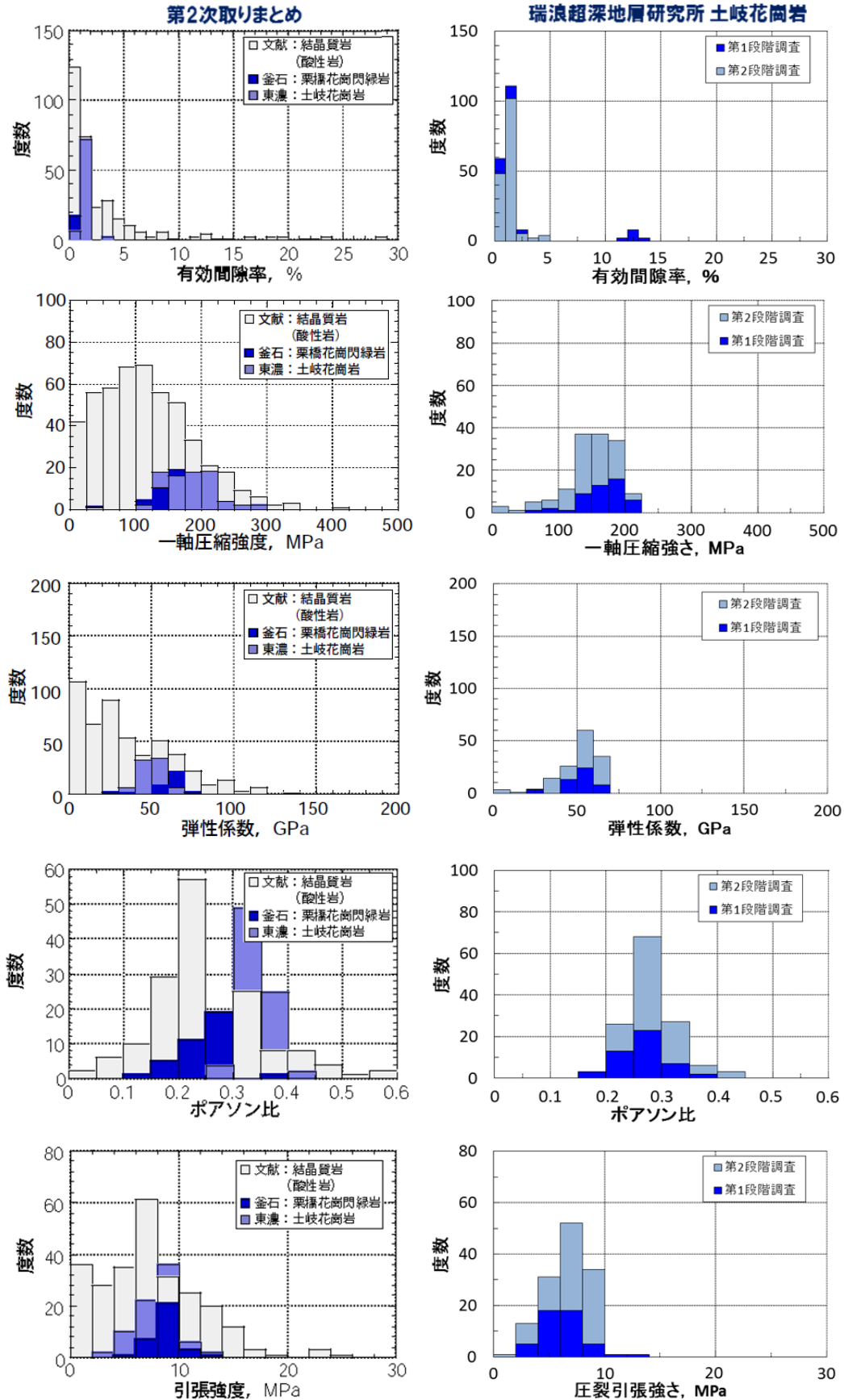
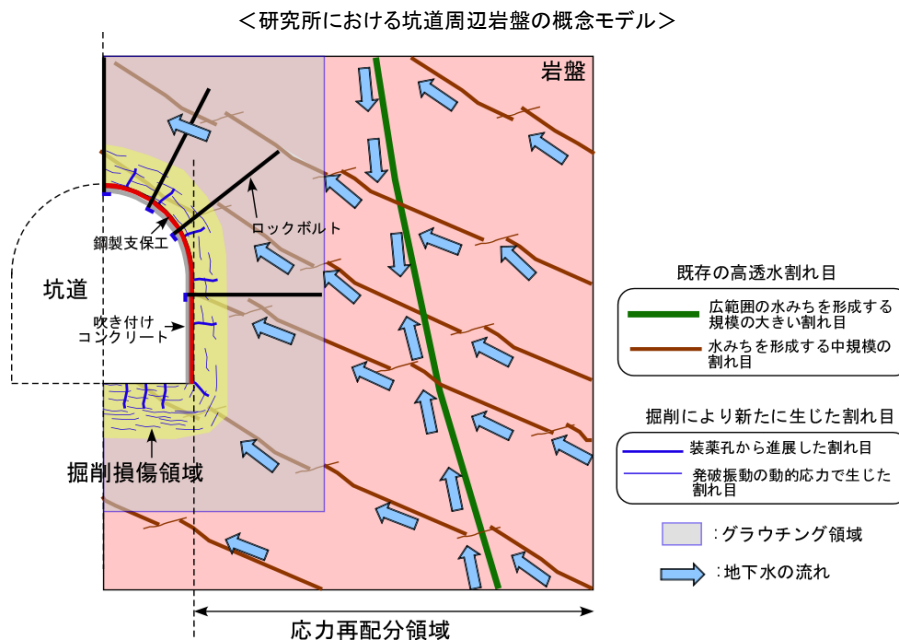


図 4.2.3 第 2 次取りまとめと瑞浪超深地層研究所での物理・力学特性の度数分布図

5. 第3段階における施工対策影響評価試験の計画検討

5.1 目的

研究坑道を利用した研究段階の調査研究計画の策定を目的として、昨年度までは、掘削影響領域に関する原位置試験の事例収集を実施してきた。わが国の地質環境は、諸外国と比べ、亀裂が多く地下水が豊富であり、処分場建設時には、多量のセメント（コンクリート支保、グラウト、インバート）、鋼材（ロックボルト、鋼製支保）などの人工材料が使用されると考えられる。したがって、坑道周辺の地質環境は、グラウトやコンクリート支保など人工材料とのインターフェイスであり、操業に伴う微生物活動をも伴う酸化還元反応といった物理的・化学的変化を伴う環境（場）となる⁸⁾（図 5.1.1）。このため、人工材料の使用により、岩盤の長期的な劣化や地下水への化学的な影響を与えることが危惧される。このような背景から、MIU 計画の第3段階における掘削影響研究においては、地下施設の施工対策に使用された人工材料が、坑道周辺の地質環境に及ぼす影響を把握・評価することが重要となる。そのため、第3段階の調査研究において施工対策影響評価試験の計画を予定している。今年度は、施工対策影響評価試験の計画検討のために既存情報の収集や一部の計画検討を実施した。



5.2 施工対策影響評価試験計画検討のための既存研究調査

Chin-Fu ら²⁷⁾は諸外国における掘削影響研究での知見の集約と知識の共有を目的に実施された掘削影響ワークショップ (CNS²⁸⁾、NEA²⁹⁾、EC³⁰⁾ を総括し、処分事業の段階 (建設、操業、閉鎖 (短期・長期)) や岩種 (結晶質岩、岩塩、硬質粘土、塑性粘土) ごとに課題を整理して研究課題を抽出している。この中で世界的に知見が少なく今後の研究課題とされる事項 (表 5.2.1) の 1 つとして、施工対策技術 (支保部材、グラウト) との相互作用が挙げられており、ロックボルト、セメント支保、鋼製支保、グラウト自体の劣化と地質環境への接触に伴う変質を把握することが重要であると述べられている。このような課題に対して、スウェーデンでは、地下施設において、低 pH セメントを使用したロックボルトや吹付コンクリートの適用を実施している。ロックボルトの施工が周辺の地質環境に与える影響を確認するために、2011 年度からオーバーコアリングを複数回実施し、各種分析を実施している。また、ロックボルトの坑道内での暴露試験なども実施し、鋼材の腐食に関する検討も実施している。加えて、吹付コンクリートのオーバーコアリングを実施し、オーバーコアリング試料を用いた力学試験結果を通じ、支保機能の健全性などを確認している³¹⁾。また、湧水抑制対策として使用する溶液型グラウトや低 pH セメントグラウトをそれぞれ深度 220 m、450 m において坑道全体を対象にメガパッカーと呼ばれるパッカーを用い、ポストグラウチングに関する試験研究を実施している³²⁾。フィンランドでは、処分場周囲の水理地質構造モデルに基づき、湧水亀裂を対象にグラウチングを実施している。グラウト材としては、超微粒子セメント、スラリー状のシリカフューム、ナフタレン系の混和剤が使用され、混和剤やセメントの長期性能への影響評価などを実施している。また、グラウトに使用されたセメント影響の把握のために地下水モニタリングを実施している³³⁾。

表 5.2.1 世界的に知見が少なく今後の研究課題とされる事項

今後の研究課題	内 容
掘削影響領域の長期挙動の理解とプロセスの抽出	<ul style="list-style-type: none"> ・建設、操業、閉鎖後に想定される水理 (水圧・飽和度)、力学 (変位)、化学 (水質・酸化還元・微生物) 特性についての長期挙動の理解とプロセスの抽出 ・長期挙動を把握するためのツール (長期耐久性、高精度 etc.) ・方法論の開発
掘削影響領域での物質移行特性の理解	<ul style="list-style-type: none"> ・掘削影響領域での分散特性、拡散特性、吸着特性 etc. の把握
施工対策技術 (支保部材、グラウト) との相互作用	<ul style="list-style-type: none"> ・セメント支保、ロックボルト、鋼製支保、グラウト自体の劣化と地質環境への接触に伴う変質の把握
複合プロセスの評価 (熱・水・応力・化学)	<ul style="list-style-type: none"> ・温度変化に伴う亀裂の開口、進展 ・水圧低下、換気等に伴う不飽和化 (二相流現象) ・化学、微生物反応による目詰まり等
掘削影響領域の低減・修復とその方法論	<ul style="list-style-type: none"> ・グラウト効果の評価やポストグラウトの実施可能性の検討 ・埋め戻しによる周辺地質環境への影響評価

5.3 施工対策影響評価試験の計画検討

建設時に使用される人工材料（コンクリート支保、グラウト、インバート、ロックボルト、鋼製支保等）が坑道周辺の地質環境に及ぼす影響を把握・評価するための技術開発および深度 500 m で実施する原位置試験の予備試験とすることを目的として、深度 300m 研究アクセス坑道における施工対策影響評価試験の検討を行った。

まず、試験の実施場所は、深度 300m 研究アクセス坑道掘削時のプレグラウトの影響が少なくなるように、深度 300m 研究アクセス坑道で実施した先行ボーリング調査（08MI13 号孔）で湧水量や割れ目が少ないことが確認され、さらに深度 300m 研究アクセス坑道掘削時の地質観察の結果からプレグラウトによるグラウト材の充填が確認された割れ目が試験区間を横切ることが少なくなる領域を選定した（図 5.3.1 参照）。

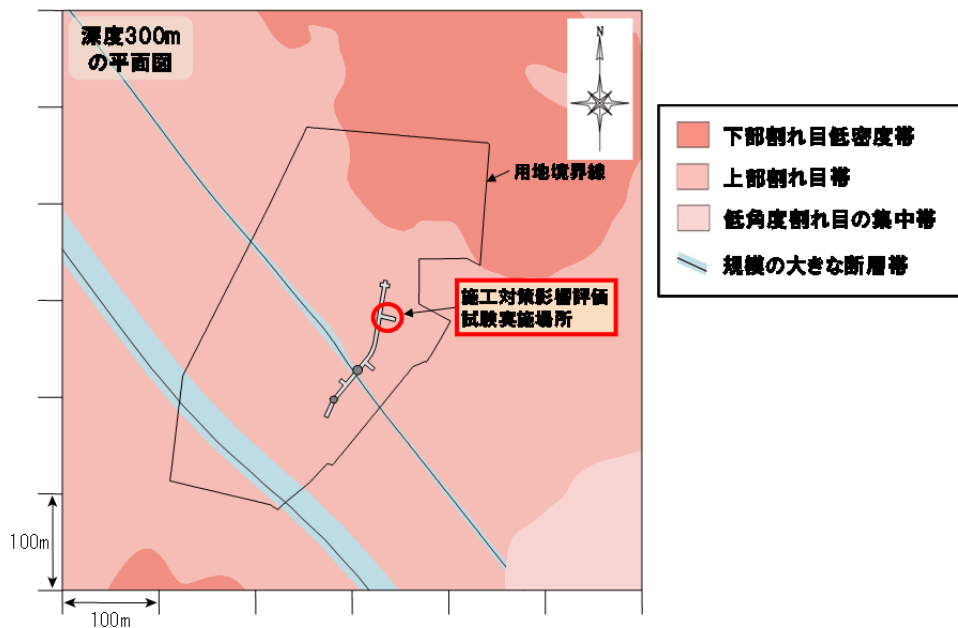


図 5.3.1 施工対策影響評価試験実施場所案

次に、施工対策影響評価試験の実施内容および試験レイアウトを検討した。施工対策影響評価試験の実施内容を表 5.3.1 に示す。1 年目に事前解析を実施してその解析結果に基づいて施工対策影響評価試験の仕様を最適化する。2 年目に先行ボーリング孔を掘削して試験坑道の施工仕様の最適化と施工前の初期条件を把握する。その後、グラウトの施工を行い、試験坑道掘削前の事前調査を実施する。3 年目に試験坑道を掘削して事前調査と同様の調査試験を実施し、掘削前後での短期的な地質環境の変化を把握する。4 年目以降にグラウトによって岩盤に注入したセメント材料や設置した支保工などの人工材料による地質環境への影響および人工材料そのものや人工材料に接した岩盤の長期的な劣化状況を長期モニタリングやサンプリング・分析により把握する。さらに事後解析を実施し、人工材料が地質環境に与える短期・長期的な影響を把握・評価する技術を体系的に示す。検討した試験レイアウトの一例を図 5.3.2 に示す。試験坑道は、事前解析や先行ボーリングの結果により最適化されるが、深度 300m 研究アクセス坑道の掘削影響領域を外れた範囲で各種試験を行える延長と断面形状を設定した。

表 5.3.1 施工対策影響評価試験の実施内容案

実施時期	実施内容	
1年目	・事前解析	・坑道掘削解析（力学・水理・地球化学）：◎
	・施工対策影響評価試験の仕様設定	・解析結果に基づく施工対策影響評価試験の仕様の最適化：◎
2年目	・先行ボーリング	・試験坑道の施工仕様の最適化と施工前の初期条件の把握（速度検層、水理試験等）：◎
	・グラウトの施工（低アルカリセメント）	・グラウト用ボーリング孔の掘削（8m×8孔、15m×8孔程度）：◎ ・グラウト用ボーリング孔のコア観察等に基づく試験場の理解：◎ ・グラウトの注入：◎
	・試験坑道掘削前の事前調査	・トモグラフィ（比抵抗：◎、電磁波：○、弾性波：△） ・水圧、水質モニタリング、採水：◎ ・室内試験：◎
3年目	・試験坑道の掘削（吹付け：低アルカリセメント）	・断面径 3m 程度の坑道を 12m 程度掘削：◎
	・試験坑道掘削後の調査	・トモグラフィ（比抵抗：◎、電磁波：○、弾性波：△） ・水圧、水質モニタリング、採水：◎ ・室内試験：◎ ・屈折法弾性波探査：△ ・B計測：△ ・モニタリング断面の試験（速度検層：△、水理試験：○、水圧、水質モニタリング、採水：◎） ・湧水量モニタリング：△
4年目以降	・人工材料、岩盤のコアリングと分析	・ロックボルト、インパート、グラウト、吹き付け、鋼製支保（同質の金属材料でも可）のオーバーコアリング：◎ ・EPMA, SEM 等の分析：◎
	・モニタリングの継続	・トモグラフィ、水圧、水質モニタリング、採水の継続：◎
	・モデル化、解析	・事後解析：○

※人工材料が地質環境に及ぼす影響評価に関連する調査を最優先として、優先度を記載

(◎：高、○：中、△：低)

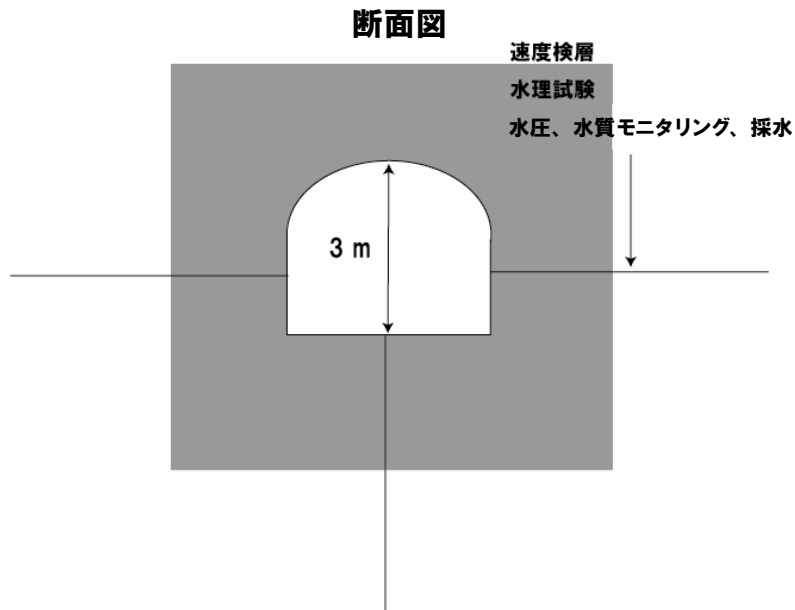
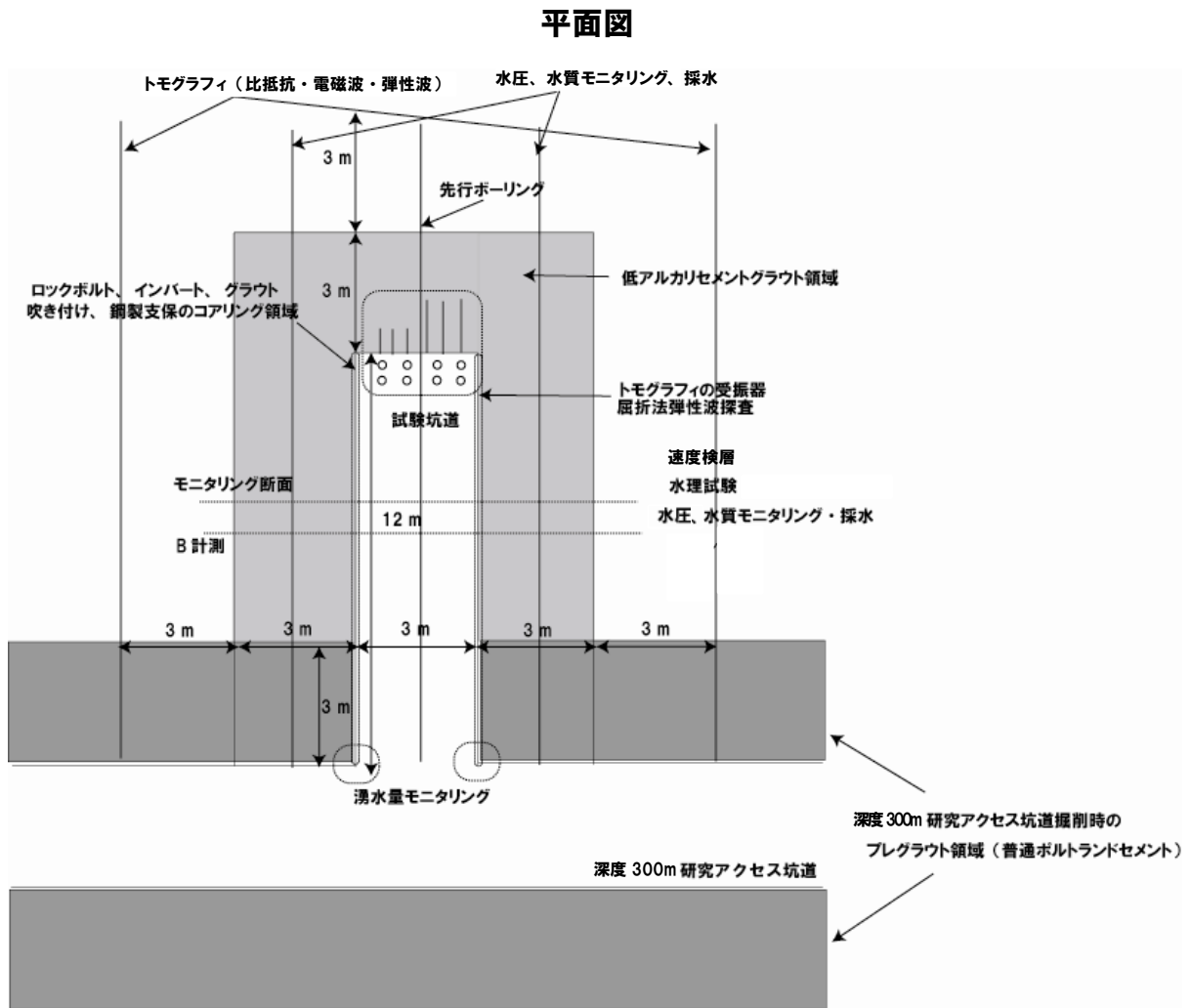


図 5.3.2 施工対策影響評価試験レイアウト案

5.4 まとめ

北欧においては、地下施設における普通ポルトランドセメントや低アルカリセメント、溶液型グラウトの施工試験や地質環境への影響評価試験は先行事例がある^{31),32),33)}。しかし、我が国と北欧での事例とを比較すると、北欧での地下施設および処分場は基本的には無支保であるが、我が国の場合、亀裂や湧水が豊富であり、多量に支保やボルト・鋼材を使用せざるを得ないという特徴のため、原位置での調査研究における重要度は海外と比べ高いと考えられる。したがって、建設時に使用される人工材料が坑道周辺の地質環境に及ぼす影響を把握・評価することを目的として、深度 300m 研究アクセス坑道における施工対策影響評価試験の検討を行った。今回の施工対策影響評価試験の検討結果を深度 300m 研究アクセス坑道や深度 500 m ステージでの原位置試験に反映し、坑道周辺岩盤を調査・解析・評価するための一連の手法を構築することが重要である。

6. 掘削体積比エネルギーを用いた原位置岩盤物性評価に関する研究

6.1 目的

坑道の力学的安定性評価を行う際には岩盤の力学特性を把握することが重要である。しかし、坑道掘削前のボーリングコアなど限られた情報からでは、割れ目を含む原位置岩盤の力学特性を正確に評価することは困難である。したがって、原位置での岩盤調査が望まれるが、広範囲にわたる地下空洞ですべての位置を網羅した調査を実施することは現実的でない。このため、原位置岩盤をその不均一性や割れ目の影響を含めてより広範に評価することを目的として、掘削のために供給したエネルギーや掘削速度などの掘削機械から得られる情報から計算される掘削体積比エネルギー^{34,35)}を用いて、原位置岩盤の物性を評価する手法を検討する。なお、本研究は原子力機構と西松建設株式会社とで、平成22年度～平成24年度の3年間で実施している共同研究である。

6.2 研究内容

2011年度は、建設工事の施工機械である削岩機を用いた掘削体積比エネルギーの測定方法および測定データの解析評価方法を検討した。具体的には、2012年度に実施が予定されている先行ボーリング実施区間で削岩機の削孔データを取得して、先行ボーリングのデータなどと比較して評価する計画を立案した。また、原位置で簡便に岩盤の力学特性を把握する手法としてハンドドリルを用いた掘削体積比エネルギーに基づく岩盤評価を実施するため、研究所用地で取得されたボーリングコアを利用した基礎実験を行った。ハンドドリルを用いた基礎実験の概要を以下に示す。

6.2.1 ハンドドリルを用いた基礎実験の概要

原位置で簡便に岩盤の力学特性を把握する手法として回転打撃式のハンドドリルを応用した掘削体積比エネルギーに基づく評価法の研究・開発が行われている^{36,37,38)}。これらの研究では、ハンドドリルを用いた岩盤評価のための基礎的実験や原位置での調査を想定した測定ツールとしての計測システムの開発が行われている。

本実験では、平野ら³⁸⁾が開発したハンドドリル計測システムを用いて、研究所で採取された予め物性値が取得されているボーリングコアを削孔し、原位置での岩盤物性を評価するための基礎実験を行った。

6.2.2 装置の概要

ハンドドリル計測システムは、原位置で簡便に利用できることを目的として開発されたものである³⁸⁾。使用した装置を図6.2.1に示す。装置は市販のバッテリー式ハンドドリルを改造し、ハンドドリル本体にセンサ類（推力測定用ロードセル、削孔深さ測定用変位計、回転センサ）を配置し、測定器部にリチウムイオンバッテリー、電流計、電圧計、デジタル式記録計を配置したものである。

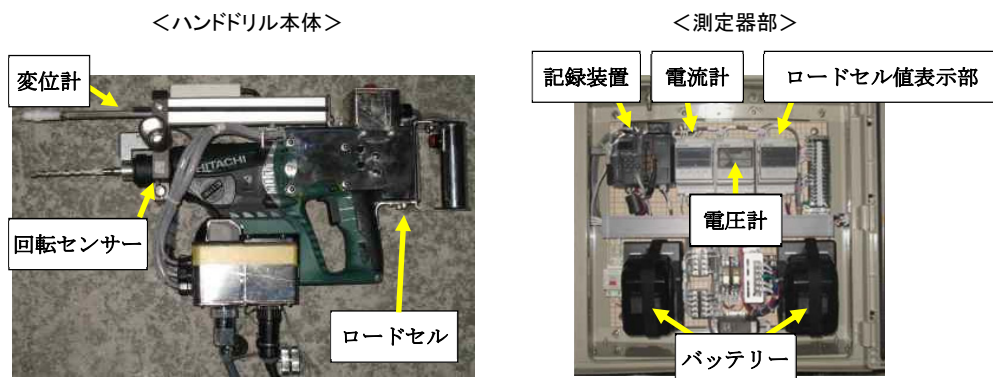


図 6.2.1 ハンドドリル計測システム

6.2.3 試験内容

試験用の岩石試料は、研究所において採取された土岐花崗岩のボーリングコアである。試験に用いたコアは、地上からの調査ボーリング孔（MIZ-1号孔）⁹⁾、研究坑道での力学調査ボーリング孔（08MI15、08MI16号孔）¹⁹⁾のコアを用いて強度のコントラストが明確に現れるよう選定した。試験に用いたコアの概要を表 6.2.1 に、これらを含めて研究所において得られた物性値の深度方向の分布状況を図 6.2.2 に示す。

表 6.2.1 試験に用いたコアの概要

試料名	試料採取元 ボーリング孔名	岩盤等級	試料数	見かけ比重 (乾燥)	一軸圧縮強さ (MPa)	圧裂引張強さ (MPa)	備考
A	MIZ-1	CL	4	2.34	72	2.6	コアは変質している、1つの試料は削孔により破損・データ未取得
B	MIZ-1	B	4	2.62	131	5.1	
C	MIZ-1	CH	4	2.63	202	9.4	
200-1	08MI15	CH	5	2.62	136	5.9	
200-2	08MI16	CH	4	2.62	150	6.7	

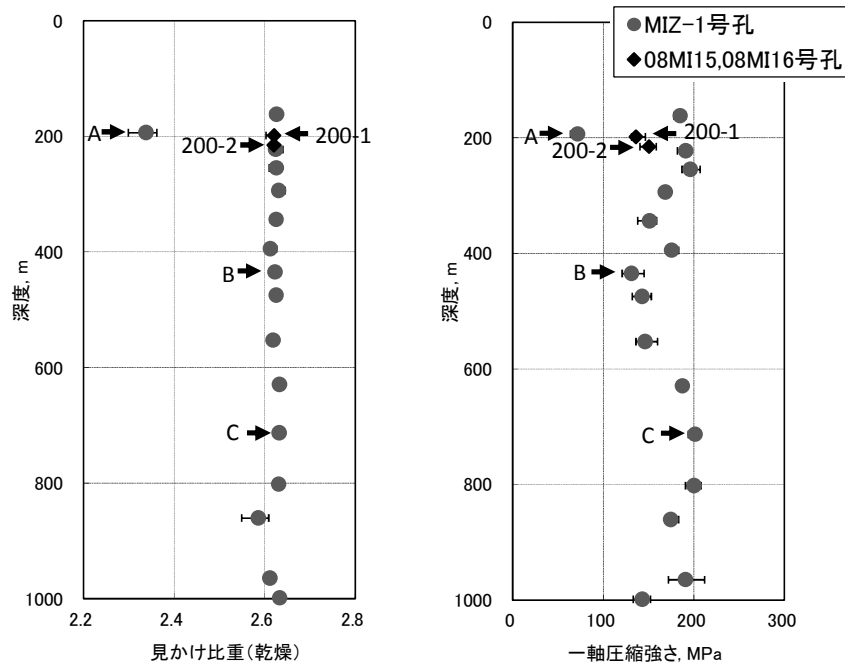


図 6.2.2 深度方向の物性値の分布状況

試料はボーリングコアを切断したものを、削孔時に動いたり回転したりしないようモルタル中に固定した。この試料を直径 8 mm のドリルビットを装着したハンドドリルで、自重のみ加わるよう本体を軽く支えた状態（推力 78N）で鉛直に削孔した。この削孔を同一条件で 21 個の試料に対し行ったが、このうち 1 試料については削孔時に破損してデータが取得できなかった。削孔データは 0.1 秒間隔に取得し、推力、削孔深さ、ドリル回転数、電流、電圧をデジタル式記録計に記録した。削孔は回転打撃モードで 10 秒間行い、測定開始時と終了時の 1 秒ずつを除くデータを平均して検討に用いた。

岩盤の評価に用いる回転による掘削体積比エネルギー E_d は (6.1) 式で示され、ハンドドリルの純粋な削孔による消費電力 W に削孔時間 t をかけた電力量を削孔体積 V で除したものである。ハンドドリルの純粋な削孔により消費される消費電力 W は、ハンドドリル削孔中の消費電力 W_d から無負荷状態の回転と打撃による消費電力 W_0 を引いたものとして (6.2) 式で示される。

$$E_d = W \times t / V \tag{6.1}$$

$$W = (W_d - W_0) \tag{6.2}$$

6.2.4 試験結果

試験により得られた結果を図 6.2.3 に示す。図によると削孔により消費される消費電力は概ね一定であった。削孔速度は試料 C で小さく、試料 A で大きくなっている。回転による掘削体積比エネルギーは、試料 C で大きく、試料 A で小さくなっている。表 6.2.1 に示した一軸圧縮強さと比較すると強度が大きいほど削孔速度が小さく、回転による掘削体積比エネルギーが大きくなる傾向が認められる。

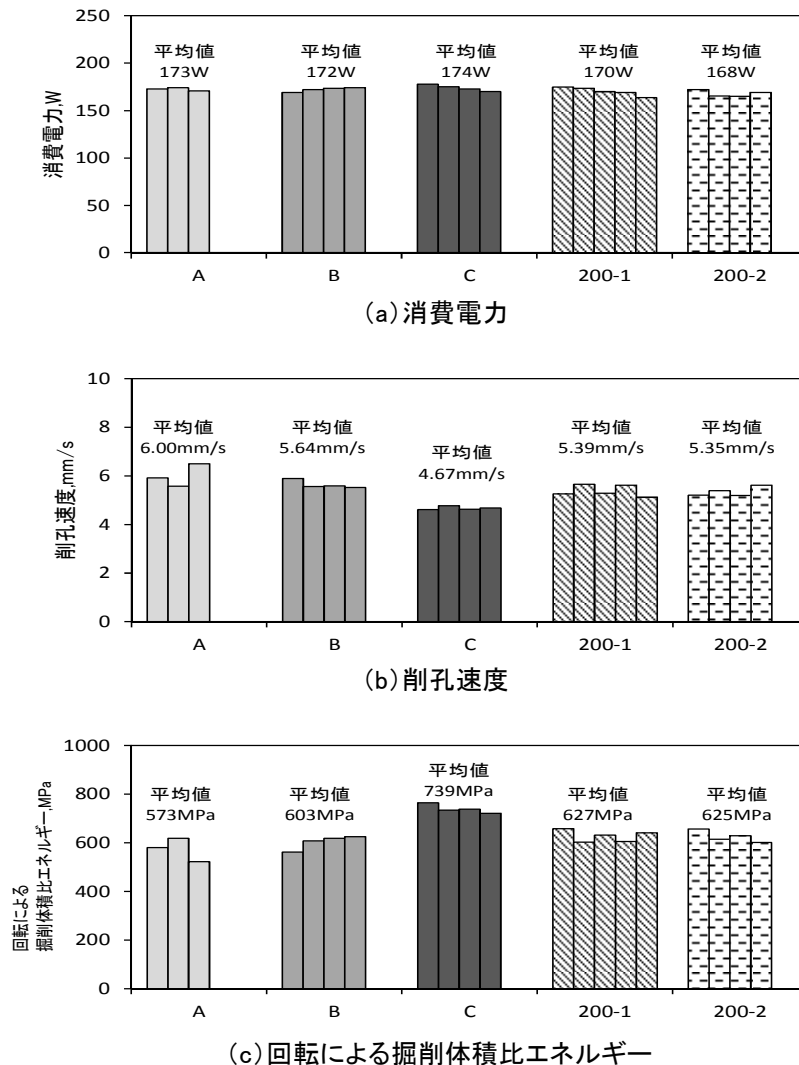


図 6.2.3 全試料の試験結果

次に、一軸圧縮強さと削孔速度の平均値の関係を図 6.2.4 に、一軸圧縮強さと回転による掘削体積比エネルギーの平均値の関係を図 6.2.5 に示す。一軸圧縮強さが増加するに従い削孔速度は直線的に減少し、回転による掘削体積比エネルギーは直線的に増加している。これは、一軸圧縮強さが大きいものほど削孔に時間を要し、削孔に要するエネルギーが多く必要となることを示している。この結果を利用して、原位置の岩盤を同一条件でハンドドリルにより削孔することで、削孔速度または回転による掘削体積比エネルギーを取得すれば、原位置での岩盤強度を推定できる可能性が高いと考えられる。

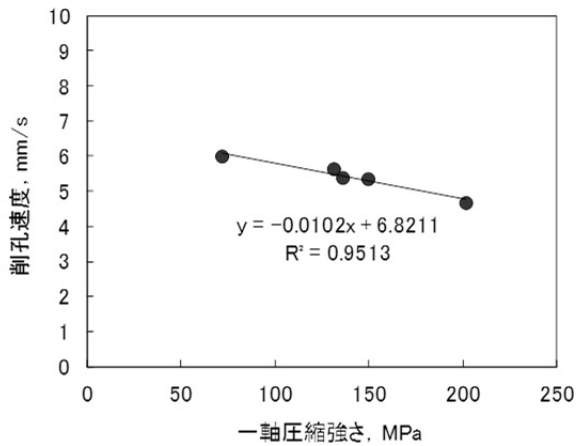


図 6.2.4 削孔速度と一軸圧縮強さ

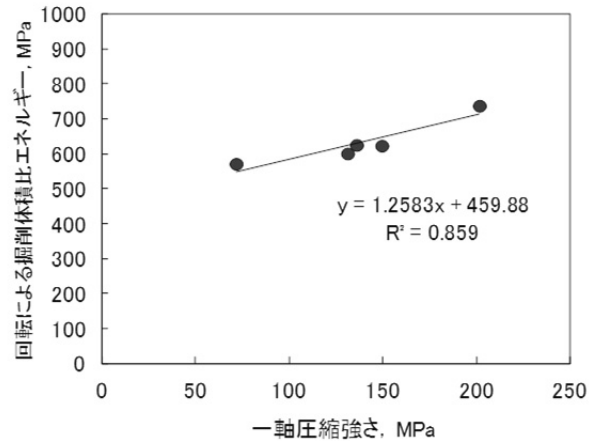


図 6.2.5 回転による掘削体積比エネルギーと一軸圧縮強さ

6.3 まとめ

本年度は、建設工事の施工機械である削岩機を用いた掘削体積比エネルギーの測定方法および測定データの解析評価方法を検討した。また、原位置で簡便に岩盤の力学特性を把握する手法としてハンドドリルを用いた掘削体積比エネルギーに基づく岩盤評価を実施するため、研究所用地で取得されたボーリングコアを利用した基礎実験を行った。その結果、原位置の岩盤を同一条件でハンドドリルにより削孔することで原位置の岩盤強度を評価することができる可能性を示した。2012年度は、これらの調査研究結果を踏まえて、削岩機を用いた掘削体積比エネルギー取得およびハンドドリルを用いた原位置削孔実験を実施し、その実用性を検討していく予定である。

7. 種々の計測結果に基づく深部岩盤中の応力場評価に関する基礎的研究

7.1 目的

初期応力は原位置あるいはボーリング掘削によって得られるコアにより測定する手法が研究されてきており、地下空洞の設計施工および掘削影響領域の評価等に適用されている。しかし、これらの手法は、相対的に高コストであるために測定数量が限られ、測定スケールは数 cm～数 m 程度である。初期応力の分布や広域応力場は、岩盤中に内在する割れ目や断層等の大小様々な不連続構造により影響を受けることが知られている²¹⁾。数十 m～数 km オーダーのスケールを対象とした場合、測定数量や測定スケールの問題、および内在する不連続面構造の影響により原位置やボーリングコアによる初期応力測定法では初期応力の分布や広域応力場を評価するのは困難である。

このような背景をふまえ、本研究では、原位置やボーリングコアによる初期応力測定結果を東海大学が提案する以下の種々の方法で補完しつつ、安価にかつ多点にわたって取得可能な初期応力評価手法の検討を行う。なお、本研究は原子力機構と学校法人東海大学とで、平成 22 年度～平成 25 年度の 4 年間で実施している共同研究である。

2011 年度は、断層および断層の条線データに基づく初期応力評価方法³⁹⁾に基づき、研究所で取得された断層および断層の条線データを用いて初期応力を評価した。また、岐阜県瑞浪市を震源とする地震の発震機構の解析結果から地震発震機構の解析に基づく初期応力評価⁴⁰⁾を実施した。なお、地震の発震機構の解析結果は、独立行政法人 防災科学技術研究所 F-net Project による広帯域地震波形を用いたメカニズム解析結果 (HP: <http://www.fnet.bosai.go.jp/>) を利用した。

7.2 断層および断層の条線に基づく初期応力の解析方法

Aydan³⁹⁾は断層面の走向・傾斜および断層面上の条線と最大、中間、最小主応力の関係を図 7.2.1 のように設定し、断層面の走向・傾斜および断層面上の条線から初期応力を推定する方法を提案している。本研究では研究所で確認された主立坑断層のデータおよび岐阜県瑞浪市を震源とする地震の発震機構解析結果から初期応力を推定した。なお、地震の発震機構解析結果からは、地震断層の傾斜、方位角および条線角が得られるため、断層データを用いて推定する方法と同様に解析を行うことができる。

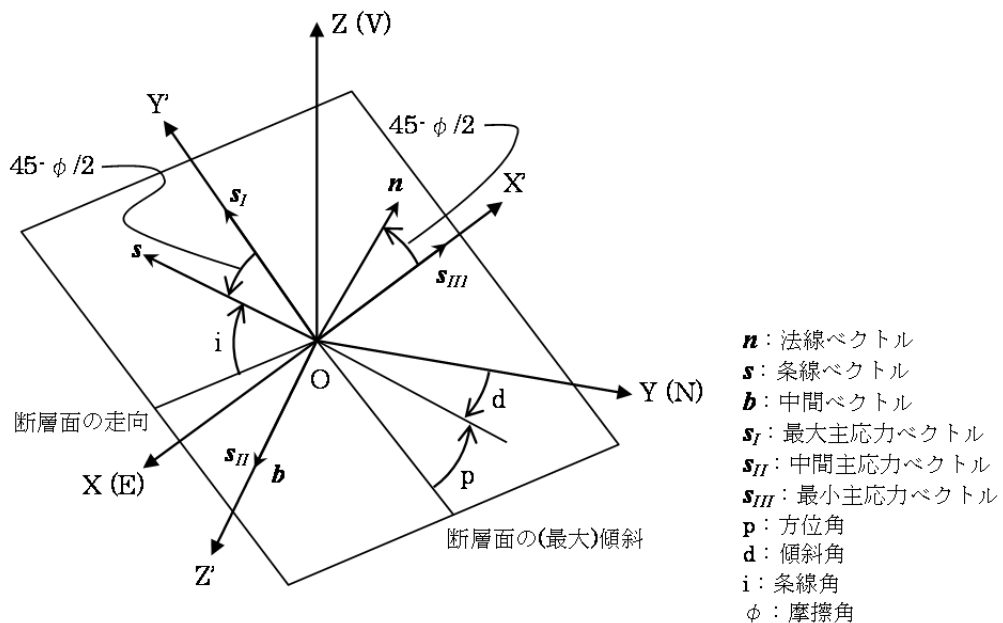


図 7.2.1 初期応力の推定方法

7.3 断層および断層の条線データに基づく初期応力評価

鶴田ら⁴⁾の研究を参考に、研究所の主立坑沿いに出現する主立坑断層のスリップデータをまとめた fdt ファイル（断層面の傾斜の方位、断層面の傾斜、条線の方位、条線の傾斜、ずれのセンス（正断層、逆断層、右ずれ断層、左ずれ断層）をまとめたファイル）⁴⁾を用いて解析を行った。解析結果を図 7.3.1 に示す。図より、水平面内の最大主応力の方向は、水圧破砕法で評価された N-W 方向⁹⁾と矛盾しない結果となった。

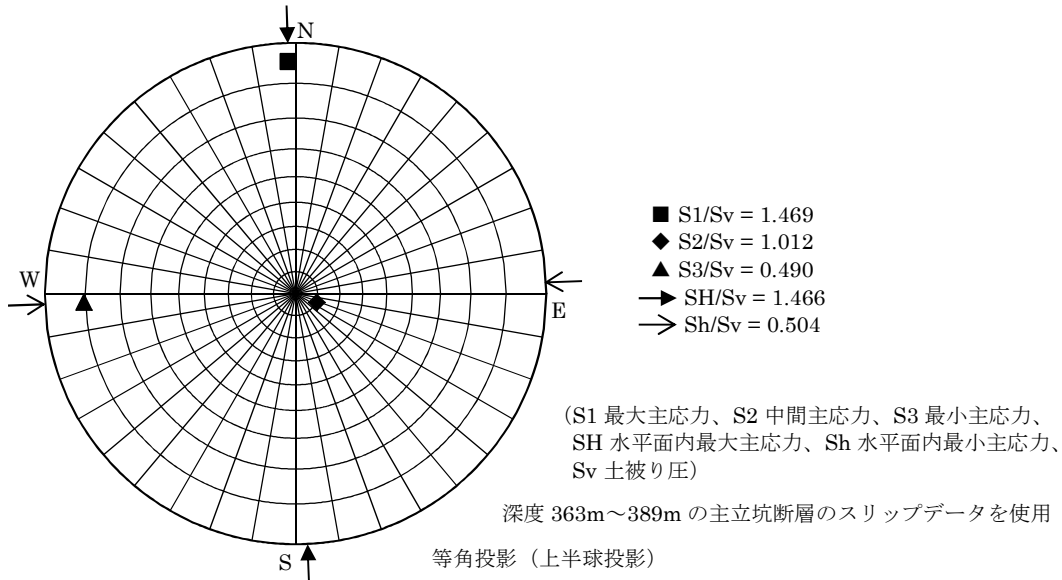


図 7.3.1 断層データより推定した応力状態

7.4 地震発震機構の解析に基づく初期応力評価

前述の F-net Project で公開されている、2011 年 12 月 14 日の岐阜県瑞浪市を震源とする地震の発震機構解析結果を利用して初期応力を評価した結果を図 7.4.1 に示す。断層および断層の条線データに基づく初期応力評価結果と同様に、水平面内の最大主応力の方向は水圧破砕法で評価された N-W 方向⁹⁾と矛盾しない結果となった。

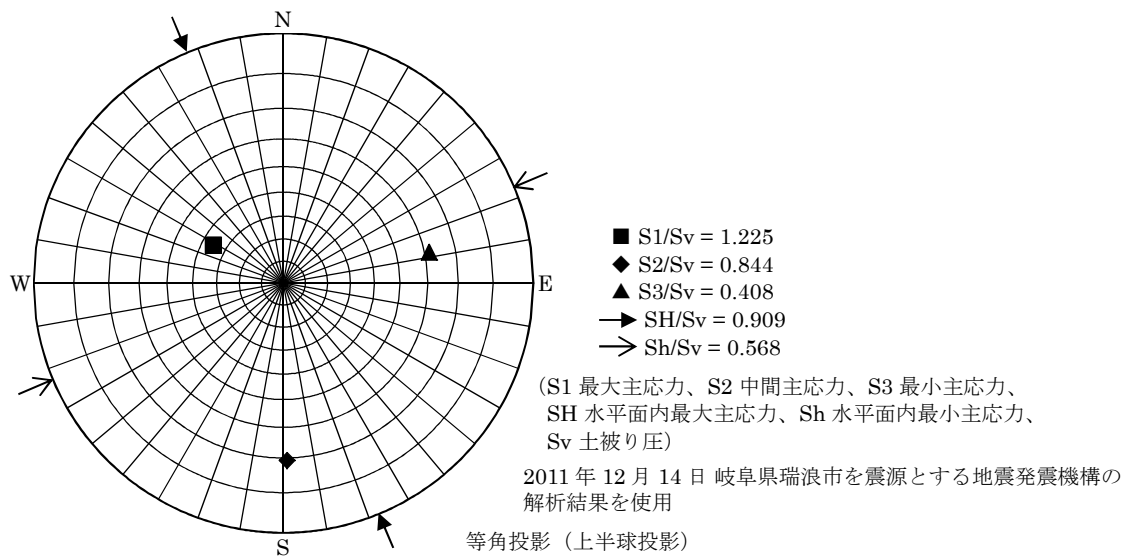


図 7.4.1 地震動データより推定した応力状態

7.5 まとめ

2011年度は、断層および断層の条線データに基づく初期応力評価方法³⁹⁾および地震発震機構の解析に基づく初期応力評価方法⁴⁰⁾に基づき、主立坑断層のスリップデータおよび2011年12月14日の岐阜県瑞浪市を震源とする地震の発震機構解析結果から初期応力の評価を行った。その結果、どちらの方法でも水平面内の最大主応力の方向は、水圧破碎法で評価されたN-W方向⁹⁾と矛盾しない結果となった。今後はさらに他のデータや他の手法を用いて初期応力の評価を実施し、水圧破碎法の結果と比較し、断層および断層の条線データに基づく初期応力評価手法および地震発震機構の解析に基づく初期応力評価手法の有効性を評価する予定である。

8. まとめ

2011年度においては、以下に示す項目の調査研究を実施した。

- ① 深度 400m 地点におけるボーリングコアを用いた初期応力測定
- ② ボーリングコア・掘削ずりを用いた室内試験による岩盤物性評価
- ③ 第 3 段階における施工対策影響評価試験の計画検討
- ④ 掘削体積比エネルギーを用いた原位置岩盤物性評価に関する研究
- ⑤ 種々の計測結果に基づく深部岩盤中の応力場評価に関する基礎的研究

①については、深度 400m におけるボーリングコアを用いた DSCA 法による初期応力測定および比較のための三次元弾性波速度測定を実施した。その結果、亀裂の配向性に基づく異なる手法で同様な結果が得られた。さらに、深度 200～400m の範囲において第 1 段階で実施した MIZ-1 号孔での水圧破碎測定結果と概ね調和的であることが確認され、DSCA 法による初期応力評価手法の適用性・有効性が確認できた。

②については、深度 300m、400m におけるボーリングコアおよび換気立坑・主立坑の掘削ずりを用いた岩盤物性評価を実施した。その結果、深度方向の各物性値の分布傾向は深度 500m までの範囲で第 1 段階での調査結果と概ね一致した。また、第 2 次取りまとめにおいて検討された岩盤物性の統計量と MIU 計画で得られた土岐花崗岩の物性値を対比した結果、第 2 次取りまとめの釜石鉦山や東濃鉦山の結果と類似していることが分った。さらに、第 1 段階調査と第 2 段階調査の統計量を比べるとピークや分布がほぼ等しいことが分った。

③については、海外における人工材料による影響評価試験に関する先行事例を調査した。さらに深度 300m における施工対策影響評価試験の計画を検討した。得られた知見は、今後実施される深度 300m ステージや深度 500m ステージでの原位置試験の計画策定に反映する。

④については、ハンドドリルを用いた掘削体積比エネルギーに基づく岩盤評価を実施するため、研究所用地で取得されたボーリングコアを利用した基礎実験を行った。その結果、原位置の岩盤を同一条件でハンドドリルにより削孔することで原位置の岩盤強度を評価することができる可能性を示した。

⑤については、研究所で取得された断層および断層の条線データに基づいて初期応力を評価した。さらに、岐阜県瑞浪市を震源とする地震の発震機構解析結果から初期応力を評価した。その結果、どちらの方法でも水平面内の最大主応力の方向は、水圧破碎法で評価された N-W 方向と矛盾しない結果となった。

参考文献

- 1) 日本原子力研究開発機構：“超深地層研究所 地層科学研究基本計画”，JAEA-Review 2010-016 (2010)
- 2) 三枝博光，瀬野康弘，中間茂雄ほか：“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”，日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2007-043 (2007)
- 3) 核燃料サイクル開発機構：“東濃地域における地質環境特性に関する調査研究—地表からの調査研究の考え方と進め方— (技術報告)”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN7410 2002-008 (2002)
- 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研究開発—平成14年度報告—”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 2003-004 (2003)
- 5) 糸魚川淳二：“瑞浪地域の地質”，瑞浪市化石博物館専報，No.1, pp.1-50 (1980)
- 6) 核燃料サイクル開発機構：“釜石原位置試験総括報告書”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN7410 99-001 (1999)
- 7) 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)
- 8) 三枝博光，松井裕哉，濱克宏ほか：“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—深度500mまでの調査研究計画—”，日本原子力研究開発機構，JAEA-Review 2011-022 (2011)
- 9) 平野享，中間茂雄，山田淳夫，瀬野康弘，佐藤稔紀：“超深地層研究所計画 (岩盤力学に関する調査研究) MIZ-1号孔における岩盤力学調査”，日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2009-031 (2009)
- 10) 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)
- 11) Strickland, F. G. and Ren, N. K.: "Use of differential strain curve analysis in predicting in-situ stress state in deep wells", Proc. 21st. U. S. Sympo. on Rock Mech., pp.523-532 (1980)
- 12) 松木浩二，志水俊仁，奥村清彦：“DSCAによる岩石内部微小き裂の評価”，資源と素材，Vol.111, pp.607-615 (1995)
- 13) 奈良禎太，加藤春實，金子勝比古：“微視き裂分布評価を目的とした多面体試験片を利用した花崗岩の主軸方向決定法”，Journal of MMIJ, Vol.124, pp.725-732 (2008)
- 14) 加藤春實，奈良禎太，金子勝比古，松木浩二ほか：“多面体試験片を用いた3次元弾性波速度測定による初期地圧評価”，資源・素材2009 (札幌) 企画発表・一般発表 (A) (S) 講演資料地球・資源，pp.283-286 (2009)
- 15) Nara, Y., Kato, H., Yoneda, T. And Kaneko, K.: "Determination of three-dimensional microcrack distribution and principal axes for granite using a polyhedral specimen", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 48, pp.316-335 (2010)
- 16) 國丸貴紀，見掛信一郎，西尾和久ほか：“超深地層研究所計画年度報告書 (2010年度)”，日本原子力研究開発機構，JAEA-Review 2012-020 (2012)
- 17) 坂口清敏，松木浩二，奥村清彦，徳本毅：“円錐孔底ひずみ法との比較に基づくコアを用いた地圧測定法の石灰岩への適用性評価”，資源と素材，Vol.115, pp.517-524 (1999)
- 18) 菅原勝彦，張鉉國，黄醒春：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，Vol.111, No.13, pp.913-918 (1995)
- 19) 平野享，瀬野康弘，松井裕哉：“超深地層研究所計画 (岩盤力学に関する調査研究) 深度200mにおける岩盤力学ボーリング調査”，JAEA-Research 2010-013 (2010)

- 20)真田 祐幸, 松井 裕哉, 佐藤 稔紀ほか : “超深地層研究所計画 (岩盤力学に関する調査研究) 深度 300m ステージでのコア法による初期応力測定”, JAEA-Research 2011-038 (2012)
- 21)ベルナルド・アマデイ, オープ・ステファンソン, (監修) 石田 毅、(翻訳代表) 船戸明雄 : “岩盤応力とその測定”, 京都大学学術出版会 (2012)
- 22)Haimson, B.C., Cornet, F.H.: ”ISRM Suggested Methods for rock stress estimation—Part 3:hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 40, pp.1011-1020 (2003)
- 23)社団法人地盤工学会 : “岩の試験・調査方法の基準・解説書 平成 14 年度版”, 社団法人地盤工学会 (2003)
- 24)田中治雄 : “土木技術者のための地質学入門”, 山海堂 (1964)
- 25)丹野剛男, 真田祐幸, 佐藤稔紀ほか : “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 (2010 年度)”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Review 2012-017 (2012)
- 26)石橋正祐紀, 栗原新, 松岡稔幸ほか : “超深地層研究所計画におけるサイトスケール地質構造モデルの構築; 第 2 段階における Shaft180 から Stage300 地質構造モデルへの更新”, 日本原子力研究開発機構, JAEA- Research 2012-018 (2012)
- 27)Chin-Fu Tsang, F. Bernier, C. Davies. : ” Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays—in the context of radioactive waste disposal”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 42, pp. 109-125 (2005)
- 28)CNS : ”Designing the Excavation Disturbed Zone for a nuclear repository in hard rock”, Proceedings of the EDZ Workshop, International Conference on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste (1996)
- 29)NEA : “Characterization and representation of the Excavation Disturbed or Damaged Zone (EDZ) “, Lessons learnt from a SEDE Topical Session (2002)
- 30)EC : “Impact of the Excavation Disturbed or Damaged Zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories”, European Commission (2004)
- 31)SKB: “Äspö Hard Rock Laboratory Annual report 2010”, SKB TR-11-10 (2011)
- 32)EC: “R&D work on low-pH cementitious materials for a geological repository”, 3rd workshop (2007)
- 33)Ahokas H., Hellä P., Ahokas T., Hansen J., Koskinen K., Lehtinen A., Koskinen L., Löfman J., Mészáros F., Partamies S., Pitkänen P., Sievänen U., Marcos N., Snellman M., Vieno T.: ”Control of Water Inflow and Use of Cement in ONKALO after Penetration of R19”, Working Report 2006-45 (2006)
- 34)Teale, R: “The concept of specific energy in rock drilling”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci.,Vol.2, pp.57-73 (1965)
- 35)西松裕一 : “掘削方法とその評価方法について”, 日本鉱業会秋季大会分科会資料[L], pp1-4 (1972)
- 36)吉田智章, 福井勝則, 大久保誠介 : “回転打撃さく孔における岩石のさく孔特性”, 資源・素材学会春季大会講演要旨集(A), pp. 89-90 (2010)
- 37)福井勝則, 大久保誠介, 羽柴公博, 平野享 : “回転打撃さく孔での岩石のさく孔特性”, 資源・素材学会秋季大会講演要旨集(A), pp. 171-174 (2011)
- 38)平野享, 山下雅之, 石山宏二, 福井勝則 : “ハンドドリルを応用した掘削体積比エネルギーに基づく坑内岩盤強度測定器の開発”, 第 66 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 3-108, pp.215-216 (2011)
- 39)Omer AYDAN, : “A stress Inference Method from Fault Striations for The Stress State of Earth’s Crust”, 第 21 回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, pp.105-112 (2000)

- 40) Omer AYDAN, Halil KUMSAR, Resat ULUSAY: “How to Infer the Possible Mechanism and Characteristics of Earthquakes from the Striations and Ground Surface Traces of Existing Fault”, *Seismic Fault-induced Failures*, pp.161-170 (2001)
- 41) 鶴田忠彦, 松岡稔幸, 程塚保行ほか: “超深地層研究所計画; 地質・地質構造に関する調査研究 (2008年度)報告書” JAEA-Research 2010-039 (2011)

付録（室内物理・力学試験における個々の試験体での結果）

1. 全試験体の物理試験結果（比重等測定）

No.	試験工種	採取位置		岩相	分類	みかけ比重	みかけ比重	みかけ比重	含水比	有効間隙率	
		採取深度 GL.-m	孔号名 mabh			自然	湿潤	乾燥	We %	ne %	
1	物理	300	08M13	28.34	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.63	2.64	2.63	0.3	1.04
2	物理	300	08M13	28.44	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.63	2.63	2.62	0.3	0.97
3	物理	300	08M13	28.54	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.64	2.64	2.63	0.3	0.97
4	物理	300	08M13	57.07	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.63	2.63	2.62	0.2	0.90
5	物理	300	08M13	57.17	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.63	2.64	2.63	0.2	0.91
6	物理	300	08M13	57.37	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.63	2.63	2.62	0.2	0.86
7	物理	300	09M20	26.25	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.64	2.64	2.63	0.2	1.09
8	物理	300	09M20	26.35	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.63	2.64	2.63	0.2	1.06
9	物理	300	09M20	26.45	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.64	2.64	2.63	0.2	1.07
10	物理	300	09M20	55.09	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.62	2.63	2.62	0.3	1.14
11	物理	300	09M20	55.91	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.62	2.63	2.62	0.3	1.33
12	物理	300	09M20	56.15	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.62	2.63	2.61	0.3	1.58
13	物理	300	09M20	74.75	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.63	2.64	2.63	0.2	0.99
14	物理	300	09M20	74.85	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.64	2.64	2.63	0.2	1.02
15	物理	300	09M20	75.90	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.62	2.63	2.62	0.2	1.21
16	物理	400	10M26	25.00	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.64	2.65	2.64	0.2	1.02
17	物理	400	10M26	25.10	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.64	2.64	2.64	0.2	0.96
18	物理	400	10M26	25.20	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.65	2.65	2.64	0.2	1.00
19	物理	400	10M26	58.13	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.56	2.59	2.54	0.7	4.73
20	物理	400	10M26	58.25	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.56	2.59	2.55	0.6	4.21
21	物理	400	10M26	59.37	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.60	2.61	2.58	0.6	3.32
22	物理	400	10M26	67.00	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.64	2.65	2.64	0.2	1.05
23	物理	400	10M26	67.10	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.65	2.66	2.65	0.2	1.10
24	物理	400	10M26	67.20	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.66	2.66	2.65	0.2	1.03
No.	試験工種	採取深度 GL.-m	採取位置	岩相	分類	みかけ比重	みかけ比重	みかけ比重	含水比	有効間隙率	
						自然	湿潤	乾燥	We %	ne %	
㊦01	B410-1	409.10	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.64	2.64	2.63	0.4	1.27	
㊦02	B410-2	409.10	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.63	2.63	2.62	0.4	1.37	
㊦03	B410-3	409.10	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.62	2.62	2.60	0.5	1.78	
㊦04	B420-1	419.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.51	2.52	2.50	0.3	1.22	
㊦05	B420-2	419.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.62	2.62	2.61	0.4	1.49	
㊦06	B420-3	419.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.62	2.63	2.61	0.4	1.47	
㊦07	B430-1	432.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.61	2.62	2.61	0.1	1.26	
㊦08	B430-2	432.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.62	2.63	2.62	0.1	1.07	
㊦09	B430-3	432.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.63	2.63	2.62	0.2	1.09	
㊦10	B440-1	440.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.63	2.63	2.62	0.2	1.00	
㊦11	B440-2	440.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.62	2.63	2.62	0.2	0.99	
㊦12	B440-3	440.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.62	2.62	2.61	0.2	1.07	
㊦13	B450-1	450.70	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.63	2.63	2.62	0.3	1.05	
㊦14	B450-2	450.70	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.63	2.63	2.62	0.3	1.05	
㊦15	B450-3	450.70	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.64	2.64	2.63	0.3	1.15	
㊦16	B460-1	458.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.63	2.64	2.62	0.3	1.24	
㊦17	B460-2	458.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.63	2.64	2.62	0.3	1.10	
㊦18	B460-3	458.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.63	2.63	2.62	0.3	1.17	
㊦19	B470-1	468.85	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.62	2.63	2.61	0.2	1.20	
㊦20	B470-2	468.85	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.62	2.62	2.61	0.2	1.10	
㊦21	B470-3	468.85	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.62	2.63	2.62	0.2	1.06	
㊦22	B480-1	478.95	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.62	2.63	2.61	0.3	1.37	
㊦23	B480-2	478.95	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.62	2.63	2.62	0.3	1.21	
㊦24	B480-3	478.95	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.63	2.63	2.62	0.3	1.39	
㊦25	B490-1	489.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.62	2.63	2.61	0.2	1.33	
㊦26	B490-2	489.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.63	2.63	2.62	0.2	1.16	
㊦27	B490-3	489.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.63	2.64	2.63	0.2	1.23	
㊦28	B500-1	499.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.60	2.61	2.59	0.2	1.58	
㊦29	B500-2	499.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.60	2.60	2.59	0.2	1.22	
㊦30	B500-3	499.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.62	2.62	2.61	0.2	0.75	
㊦31	A470-1	468.40	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.64	2.65	2.64	0.2	1.16	
㊦32	A470-2	468.40	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.60	2.61	2.59	0.3	1.77	
㊦33	A470-3	468.40	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.61	2.62	2.60	0.4	1.87	
㊦34	A475-1	476.85	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.60	2.61	2.59	0.3	2.31	
㊦35	A475-2	476.85	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.61	2.62	2.60	0.3	2.09	
㊦36	A475-3	476.85	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.59	2.61	2.58	0.4	2.60	
㊦37	A490-1	488.35	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.63	2.63	2.62	0.3	1.26	
㊦38	A490-2	488.35	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.62	2.63	2.61	0.4	1.63	
㊦39	A490-3	488.35	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.63	2.63	2.62	0.3	1.13	
㊦40	A495-1	493.30	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.64	2.64	2.63	0.3	0.89	
㊦41	A495-2	493.30	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.65	2.65	2.64	0.3	0.96	
㊦42	A495-3	493.30	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.64	2.64	2.63	0.3	1.01	

2. 全試験体の物理試験結果（弾性波速度等測定）

No.	試験工程	採取深度		採取位置		岩相	分類	P波速度		S波速度	動弾性係数	動せん断弾性係数	動ポアソン比
		GL-m	孔号名	mabh	Vp			Vs	Ed	Gd	vd		
												km/sec	km/sec
1	一軸	300	08M13	28.75	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.62	3.21	68.5	27.3	0.256		
2	一軸	300	08M13	28.85	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.54	3.05	62.8	24.5	0.282		
3	一軸	300	08M13	27.34	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.58	3.34	71.8	29.4	0.221		
4	三軸	300	08M13	27.44	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.54	3.10	64.2	25.2	0.273		
5	三軸	300	08M13	27.54	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.53	2.88	57.3	21.8	0.314		
6	三軸	300	08M13	27.64	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.07	2.92	56.3	22.5	0.250		
7	圧裂	300	08M13	27.74	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.42	3.19	66.1	26.7	0.236		
8	圧裂	300	08M13	27.81	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.41	3.32	69.7	29.1	0.197		
9	圧裂	300	08M13	27.88	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.33	3.25	67.0	27.8	0.204		
10	一軸	300	08M13	57.47	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.97	2.91	54.9	22.2	0.239		
11	一軸	300	08M13	59.10	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.86	2.93	54.5	22.4	0.216		
12	一軸	300	08M13	59.20	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.77	2.97	54.6	23.1	0.182		
13	三軸	300	08M13	59.30	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.80	2.83	51.6	20.9	0.234		
14	三軸	300	08M13	59.40	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.89	2.79	51.3	20.4	0.258		
15	三軸	300	08M13	59.50	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.87	2.79	51.3	20.4	0.255		
16	圧裂	300	08M13	57.27	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.97	2.65	47.8	18.4	0.302		
17	圧裂	300	08M13	58.35	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.94	2.94	55.4	22.6	0.226		
18	圧裂	300	08M13	58.42	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.92	2.66	48.0	18.6	0.293		
19	一軸	300	09M20	26.55	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.13	3.12	62.0	25.7	0.205		
20	一軸	300	09M20	26.65	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.09	3.16	62.4	26.3	0.185		
21	一軸	300	09M20	26.75	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.24	3.21	65.2	27.1	0.200		
22	三軸	300	09M20	26.85	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.25	3.10	62.3	25.3	0.233		
23	三軸	300	09M20	27.17	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.04	2.87	54.6	21.7	0.259		
24	三軸	300	09M20	27.27	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.99	3.02	58.2	24.0	0.210		
25	圧裂	300	09M20	27.37	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.17	2.94	57.2	22.7	0.261		
26	圧裂	300	09M20	27.65	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.02	2.70	49.6	19.1	0.297		
27	圧裂	300	09M20	27.78	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.72	2.73	48.9	19.6	0.250		
28	一軸	300	09M20	51.00	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.34	3.27	67.8	28.2	0.200		
29	一軸	300	09M20	51.41	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.19	3.17	63.3	26.3	0.203		
30	一軸	300	09M20	51.58	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.41	3.29	68.8	28.5	0.208		
31	三軸	300	09M20	54.89	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.15	3.27	65.2	28.1	0.162		
32	三軸	300	09M20	55.29	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.16	3.24	64.8	27.6	0.175		
33	三軸	300	09M20	56.29	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.87	2.99	56.1	23.5	0.196		
34	圧裂	300	09M20	51.81	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.12	2.59	46.6	17.5	0.328		
35	圧裂	300	09M20	55.19	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.35	3.16	64.3	26.1	0.232		
36	圧裂	300	09M20	56.00	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.04	3.06	59.4	24.6	0.208		
37	一軸	300	09M20	74.00	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.20	2.98	58.6	23.3	0.256		
38	一軸	300	09M20	74.10	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.15	2.99	58.6	23.5	0.247		
39	一軸	300	09M20	74.20	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.15	3.05	60.3	24.5	0.229		
40	三軸	300	09M20	74.30	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.16	2.93	56.9	22.5	0.263		
41	三軸	300	09M20	74.55	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.21	2.97	58.4	23.2	0.259		
42	三軸	300	09M20	74.65	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.26	2.95	58.1	22.9	0.271		
43	圧裂	300	09M20	74.40	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.11	2.95	57.2	22.9	0.250		
44	圧裂	300	09M20	75.76	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.41	2.41	41.8	15.2	0.377		
45	圧裂	300	09M20	75.83	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.13	2.60	46.9	17.7	0.327		
46	一軸	400	10M26	25.30	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.73	2.83	51.6	21.2	0.220		
47	一軸	400	10M26	25.65	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.28	2.55	41.8	17.1	0.225		
48	一軸	400	10M26	25.75	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.36	2.61	43.9	18.0	0.220		
49	三軸	400	10M26	25.85	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.33	2.59	43.2	17.7	0.220		
50	三軸	400	10M26	26.38	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.80	2.79	51.1	20.5	0.246		
51	三軸	400	10M26	26.48	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.14	3.03	59.2	24.0	0.234		
52	圧裂	400	10M26	25.40	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.68	2.71	48.2	19.3	0.247		
53	圧裂	400	10M26	25.55	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.22	2.58	42.1	17.5	0.201		
54	圧裂	400	10M26	26.58	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.67	2.73	48.6	19.6	0.241		
55	一軸	400	10M26	62.52	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.72	2.83	51.4	21.1	0.220		
56	一軸	400	10M26	62.73	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.35	2.79	47.1	20.5	0.152		
57	一軸	400	10M26	63.39	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	3.10	1.84	21.8	8.9	0.228		
58	三軸	400	10M26	62.83	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.71	2.88	52.4	21.8	0.201		
59	三軸	400	10M26	63.80	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.38	2.86	48.7	21.5	0.130		
60	三軸	400	10M26	63.90	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.10	2.66	42.3	18.6	0.137		
61	圧裂	400	10M26	59.31	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	2.80	1.86	19.8	8.9	0.108		
62	圧裂	400	10M26	62.00	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.33	2.74	46.0	19.7	0.165		
63	圧裂	400	10M26	62.66	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	3.63	1.63	18.8	6.8	0.375		
64	一軸	400	10M26	67.30	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.47	2.75	47.5	19.9	0.196		
65	一軸	400	10M26	67.40	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.50	2.53	42.6	16.8	0.270		
66	一軸	400	10M26	67.50	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.36	2.68	45.1	18.9	0.196		
67	三軸	400	10M26	68.40	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.58	2.63	45.7	18.2	0.253		
68	三軸	400	10M26	68.50	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.62	2.78	49.4	20.3	0.216		
69	三軸	400	10M26	68.60	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.64	2.62	45.7	18.1	0.265		
70	圧裂	400	10M26	67.60	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.45	2.50	41.7	16.4	0.269		
71	圧裂	400	10M26	67.94	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.38	2.58	43.2	17.5	0.234		
72	圧裂	400	10M26	68.70	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.55	2.58	44.0	17.4	0.263		

JAEA-Review 2013-017

No.	試験工種	採取深度 GL.-m	採取位置	岩相	分類	P波速度		S波速度	動弾性係数	動せん断弾性係数	動ポアソン比
						Vp	Vs	Ed	Gd	vd	
						km/sec	km/sec	GPa	GPa	-	
㊦91	B410-1	409.10	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.28	2.75	45.4	19.8	0.148	
㊦92	B410-2	409.10	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.49	2.84	49.1	21.1	0.165	
㊦93	B410-3	409.10	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.14	2.68	42.6	18.7	0.140	
㊦94	B420-1	419.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.74	2.82	50.8	20.7	0.225	
㊦95	B420-2	419.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.08	2.55	39.9	16.9	0.181	
㊦96	B420-3	419.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.64	2.82	50.0	20.7	0.209	
㊦97	B430-1	432.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.14	2.51	39.8	16.4	0.211	
㊦98	B430-2	432.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.14	2.49	39.6	16.3	0.216	
㊦99	B430-3	432.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.48	2.61	44.5	17.9	0.242	
㊦100	B440-1	440.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.20	2.39	37.7	15.0	0.261	
㊦101	B440-2	440.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	3.74	2.05	28.3	11.0	0.284	
㊦102	B440-3	440.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.10	2.44	38.1	15.5	0.226	
㊦103	B450-1	450.70	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.50	2.76	48.0	20.0	0.200	
㊦104	B450-2	450.70	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.36	2.58	43.1	17.5	0.229	
㊦105	B450-3	450.70	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.48	2.82	49.0	20.9	0.172	
㊦106	B460-1	458.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.17	2.62	42.6	18.1	0.174	
㊦107	B460-2	458.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.40	2.71	46.5	19.5	0.194	
㊦108	B460-3	458.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.26	2.66	44.2	18.7	0.181	
㊦109	B470-1	468.85	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	3.43	2.18	28.8	12.4	0.161	
㊦120	B470-2	468.85	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	3.42	2.16	28.5	12.2	0.168	
㊦121	B470-3	468.85	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	3.49	2.18	29.3	12.4	0.180	
㊦122	B480-1	478.95	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.92	1.90	21.5	9.5	0.133	
㊦123	B480-2	478.95	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	3.11	2.00	24.3	10.6	0.147	
㊦124	B480-3	478.95	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	3.05	1.99	23.5	10.4	0.129	
㊦125	B490-1	489.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	3.02	1.96	23.2	10.2	0.136	
㊦126	B490-2	489.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	3.34	2.14	28.1	12.2	0.152	
㊦127	B490-3	489.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.95	1.95	22.5	10.1	0.112	
㊦128	B500-1	499.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	3.08	2.00	23.8	10.5	0.135	
㊦129	B500-2	499.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.79	1.79	19.3	8.4	0.150	
㊦130	B500-3	499.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	3.31	2.15	27.7	12.2	0.135	
㊦131	A470-1	468.40	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.97	2.70	49.4	19.2	0.290	
㊦132	A470-2	468.40	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.76	2.61	46.1	17.9	0.286	
㊦133	A470-3	468.40	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.69	2.44	40.7	15.5	0.314	
㊦134	A475-1	476.85	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.71	2.18	33.4	12.3	0.364	
㊦135	A475-2	476.85	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.73	2.25	33.9	12.5	0.355	
㊦136	A475-3	476.85	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.61	2.10	30.8	11.2	0.369	
㊦137	A490-1	488.35	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.75	2.24	35.8	13.2	0.356	
㊦138	A490-2	488.35	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.86	2.43	41.3	15.5	0.334	
㊦139	A490-3	488.35	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.61	2.23	35.2	13.1	0.347	
㊦140	A495-1	493.30	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	5.40	2.47	44.2	16.2	0.367	
㊦141	A495-2	493.30	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	5.76	2.66	51.0	18.7	0.364	
㊦142	A495-3	493.30	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	5.81	2.64	50.3	18.4	0.369	

3. 全試験体の力学試験結果（一軸圧縮試験）

No.	試験工種	採取深度 GL.-m	採取位置		岩相	分類	一軸圧縮強さ	接線静弾性係数	静ポアソン比		
			孔号名	mabh			q_u MPa	$E_{1.50}$ GPa	ν_u -		
1	一軸	300	08M13	28.75	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	140	59.5	0.340		
2	一軸	300	08M13	28.85	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	147	53.2	0.320		
3	一軸	300	08M13	27.34	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	160	56.8	0.370		
4	一軸	300	08M13	57.47	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	188	53.6	0.220		
5	一軸	300	08M13	59.10	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	153	63.3	0.280		
6	一軸	300	08M13	59.20	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	186	57.3	0.310		
7	一軸	300	09M20	26.55	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	184	62.9	0.330		
8	一軸	300	09M20	26.65	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	175	62.5	0.280		
9	一軸	300	09M20	26.75	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	173	66.0	0.350		
10	一軸	300	09M20	51.00	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	167	65.7	0.290		
11	一軸	300	09M20	51.41	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	197	67.1	0.260		
12	一軸	300	09M20	51.58	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	200	63.6	0.280		
13	一軸	300	09M20	74.00	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	217	69.8	0.310		
14	一軸	300	09M20	74.10	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	224	68.5	0.320		
15	一軸	300	09M20	74.20	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	211	66.2	0.310		
16	一軸	400	10M26	25.30	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	169	57.4	0.340		
17	一軸	400	10M26	25.65	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	161	52.1	0.330		
18	一軸	400	10M26	25.75	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	155	49.8	0.300		
19	一軸	400	10M26	62.52	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	128	61.3	0.230		
20	一軸	400	10M26	62.73	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	102	53.9	0.360		
21	一軸	400	10M26	63.39	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	81	35.1	0.280		
22	一軸	400	10M26	67.30	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	123	45.9	0.380		
23	一軸	400	10M26	67.40	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	141	62.1	0.300		
24	一軸	400	10M26	67.50	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	131	44.9	0.270		

No.	試験工種	採取深度 GL.-m	採取位置	岩相	分類	一軸圧縮強さ	接線静弾性係数	静ポアソン比		
						q_u MPa	$E_{1.50}$ GPa	ν_u -		
㊦01	B410-1	409.10	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	148	51.1	0.256		
㊦02	B410-2	409.10	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	132	48.4	0.229		
㊦03	B410-3	409.10	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	127	42.8	0.218		
㊦04	B420-1	419.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	147	54.8	0.266		
㊦05	B420-2	419.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	127	40.8	0.219		
㊦06	B420-3	419.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	161	51.7	0.267		
㊦07	B430-1	432.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	144	45.7	0.250		
㊦08	B430-2	432.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	140	50.2	0.202		
㊦09	B430-3	432.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	164	55.5	0.288		
㊦10	B440-1	440.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	192	60.1	0.315		
㊦11	B440-2	440.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	127	44.0	0.339		
㊦12	B440-3	440.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	179	58.7	0.321		
㊦13	B450-1	450.70	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	156	53.8	0.251		
㊦14	B450-2	450.70	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	160	55.0	0.275		
㊦15	B450-3	450.70	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	166	56.4	0.280		
㊦16	B460-1	458.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	146	54.7	0.275		
㊦17	B460-2	458.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	160	55.5	0.296		
㊦18	B460-3	458.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	156	53.4	0.283		
㊦19	B470-1	468.85	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	135	48.9	0.294		
㊦20	B470-2	468.85	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	128	46.3	0.308		
㊦21	B470-3	468.85	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	123	41.8	0.283		
㊦22	B480-1	478.95	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	118	42.4	0.276		
㊦23	B480-2	478.95	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	116	40.5	0.243		
㊦24	B480-3	478.95	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	108	40.2	0.273		
㊦25	B490-1	489.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	123	45.7	0.294		
㊦26	B490-2	489.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	136	44.4	0.276		
㊦27	B490-3	489.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	112	44.7	0.289		
㊦28	B500-1	499.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	120	50.5	0.226		
㊦29	B500-2	499.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	94	31.3	0.239		
㊦30	B500-3	499.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	129	43.3	0.284		

No.	試験工種	採取深度 GL.-m	採取位置	岩相	分類	一軸圧縮強さ	接線静弾性係数	静ポアソン比		
						q_u MPa	$E_{1.50}$ GPa	ν_u -		
㊦31	A470-1	468.40	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	86	27.1	0.296		
㊦32	A470-2	468.40	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	58	34.7	0.319		
㊦33	A470-3	468.40	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	53	14.9	0.278		
㊦34	A475-1	476.85	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	73	41.0	0.261		
㊦35	A475-2	476.85	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	54	39.4	0.277		
㊦36	A475-3	476.85	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	35	32.4	0.349		
㊦37	A490-1	488.35	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	101	38.2	0.224		
㊦38	A490-2	488.35	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	85	40.3	0.280		
㊦39	A490-3	488.35	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	70	59.3	0.278		
㊦40	A495-1	493.30	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	109	22.1	0.260		
㊦41	A495-2	493.30	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	91	33.0	0.265		
㊦42	A495-3	493.30	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	100	22.7	0.297		

4. 全試験体の力学試験結果（圧裂引張試験）

No.	試験工種	採取深度 GL-m	採取位置		岩相	分類	圧裂引張強さ				
			孔号名	mabh			σ_t MPa				
1	圧裂	300	08M13	27.74	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	9.43				
2	圧裂	300	08M13	27.81	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	7.97				
3	圧裂	300	08M13	27.88	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	8.99				
4	圧裂	300	08M13	57.27	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	7.87				
5	圧裂	300	08M13	58.35	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	8.50				
6	圧裂	300	08M13	58.42	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	8.55				

7	圧裂	300	09M20	27.37	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	8.88				
8	圧裂	300	09M20	27.65	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	9.49				
9	圧裂	300	09M20	27.78	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	8.91				
10	圧裂	300	09M20	51.81	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	6.56				
11	圧裂	300	09M20	55.19	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	9.95				
12	圧裂	300	09M20	56.00	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	7.06				
13	圧裂	300	09M20	74.40	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	9.42				
14	圧裂	300	09M20	75.76	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	8.34				
15	圧裂	300	09M20	75.83	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	10.01				
16	圧裂	400	10M26	25.40	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	8.50				
17	圧裂	400	10M26	25.55	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	6.04				
18	圧裂	400	10M26	26.58	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	7.40				
19	圧裂	400	10M26	59.31	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	3.52				
20	圧裂	400	10M26	62.00	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.30				
21	圧裂	400	10M26	62.66	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	1.66				
22	圧裂	400	10M26	67.60	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	4.55				
23	圧裂	400	10M26	67.94	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	6.33				
24	圧裂	400	10M26	68.70	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	5.09				

No.	試験工種	採取深度 GL-m	採取位置	岩相	分類	圧裂引張強さ				
						σ_t MPa				
㊦01	B410-1	409.10	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	6.01				
㊦02	B410-2	409.10	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	5.46				
㊦03	B410-3	409.10	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	5.00				
㊦04	B420-1	419.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	6.53				
㊦05	B420-2	419.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	8.21				
㊦06	B420-3	419.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	6.60				
㊦07	B430-1	432.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	7.21				
㊦08	B430-2	432.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	7.71				
㊦09	B430-3	432.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	5.98				
㊦10	B440-1	440.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	6.86				
㊦11	B440-2	440.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	8.29				
㊦12	B440-3	440.30	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	6.34				
㊦13	B450-1	450.70	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.74				
㊦14	B450-2	450.70	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	5.92				
㊦15	B450-3	450.70	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	6.01				
㊦16	B460-1	458.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	7.28				
㊦17	B460-2	458.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	6.70				
㊦18	B460-3	458.50	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	7.98				
㊦19	B470-1	468.85	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.64				
㊦20	B470-2	468.85	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	6.38				
㊦21	B470-3	468.85	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	6.22				
㊦22	B480-1	478.95	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	5.68				
㊦23	B480-2	478.95	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	5.16				
㊦24	B480-3	478.95	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	3.90				
㊦25	B490-1	489.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	3.75				
㊦26	B490-2	489.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	3.36				
㊦27	B490-3	489.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	3.72				
㊦28	B500-1	499.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.16				
㊦29	B500-2	499.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	3.09				
㊦30	B500-3	499.15	換気立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.98				

㊦31	A470-1	468.40	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	3.24				
㊦32	A470-2	468.40	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.91				
㊦33	A470-3	468.40	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.90				
㊦34	A475-1	476.85	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	5.42				
㊦35	A475-2	476.85	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	6.44				
㊦36	A475-3	476.85	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4.53				
㊦37	A490-1	488.35	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	7.75				
㊦38	A490-2	488.35	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2.84				
㊦39	A490-3	488.35	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	6.89				
㊦40	A495-1	493.30	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	3.48				
㊦41	A495-2	493.30	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	3.93				
㊦42	A495-3	493.30	主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	5.11				

5. 全試験体の力学試験結果（三軸圧縮試験）

No.	試験工種	採取深度		採取位置		岩相	分類	側方向応力		UU圧縮強さ		粘着力 Cu	内部摩擦角 φu
		GL.-m	孔号名	mabh				MPa	MPa	(σa-σr)max	MPa		
1	一軸	300	08M13	28.75	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	140.2	18.3	64			
2	一軸	300	08M13	28.85	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	147.3					
3	一軸	300	08M13	27.34	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	160.2					
4	三軸	300	08M13	27.44	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	10	308.6					
5	三軸	300	08M13	27.54	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	20	387.9					
6	三軸	300	08M13	27.64	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	29	400.9					
10	一軸	300	08M13	57.47	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	188.0	18.8	61			
11	一軸	300	08M13	59.10	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	153.3					
12	一軸	300	08M13	59.20	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	186.3					
13	三軸	300	08M13	59.30	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	10	336.8					
14	三軸	300	08M13	59.40	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	20	431.9					
15	三軸	300	08M13	59.50	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	29	501.9					

16	一軸	300	09M20	26.55	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	183.6	18.8	62
17	一軸	300	09M20	26.65	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	174.6		
18	一軸	300	09M20	26.75	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	173.4		
19	三軸	300	09M20	26.85	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	10	342.1		
20	三軸	300	09M20	27.17	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	20	432.2		
21	三軸	300	09M20	27.27	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	29	479.1		
22	一軸	300	09M20	51.00	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	166.9	25.0	63
23	一軸	300	09M20	51.41	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	197.2		
24	一軸	300	09M20	51.58	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	199.6		
25	三軸	300	09M20	54.89	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	10	370.5		
26	三軸	300	09M20	55.29	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	20	430.0		
27	三軸	300	09M20	56.29	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	29	366.5		
28	一軸	300	09M20	74.00	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	216.5	25.0	63
29	一軸	300	09M20	74.10	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	224.1		
30	一軸	300	09M20	74.20	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	210.7		
31	三軸	300	09M20	74.30	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	10	375.6		
32	三軸	300	09M20	74.55	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	20	445.8		
33	三軸	300	09M20	74.65	中粒黒雲母花崗岩	花崗岩	29	525.1		

34	一軸	400	10M26	25.30	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	169.1	16.7	62
35	一軸	400	10M26	25.65	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	161.0		
36	一軸	400	10M26	25.75	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	155.4		
37	三軸	400	10M26	25.85	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	10	274.5		
38	三軸	400	10M26	26.38	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	20	358.2		
39	三軸	400	10M26	26.48	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	29	436.6		
40	一軸	400	10M26	62.52	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	127.5	13.3	60
41	一軸	400	10M26	62.73	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	102.0		
42	一軸	400	10M26	63.39	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	81.0		
43	三軸	400	10M26	62.83	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	10	219.5		
44	三軸	400	10M26	63.80	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	20	270.2		
45	三軸	400	10M26	63.90	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	29	324.2		
46	一軸	400	10M26	67.30	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	123.3	15.0	63
47	一軸	400	10M26	67.40	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	141.0		
48	一軸	400	10M26	67.50	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	0	131.4		
49	三軸	400	10M26	68.40	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	10	251.7		
50	三軸	400	10M26	68.50	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	20	350.5		
51	三軸	400	10M26	68.60	中～粗粒黒雲母花崗岩	花崗岩	29	417.2		

No.	試験工種	採取深度		採取位置	岩相	分類	側方向応力		UU圧縮強さ		粘着力 Cu	内部摩擦角 φu
		GL.-m					MPa	MPa	(σa-σr)max	MPa		
㊦1	A480-1	480.85		主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2	56.0	15.2	33		
㊦2	A480-2	480.85		主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4	66.1				
㊦3	A480-3	480.85		主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	8	84.6				
㊦4	A480-4	480.85		主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	16	84.8				
㊦5	A450-1	496.95		主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	2	67.8	6.2	63		
㊦6	A450-2	496.95		主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	4	144.7				
㊦7	A450-3	496.95		主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	8	169.3				
㊦8	A450-4	496.95		主立坑	中～粗粒花崗岩	花崗岩	16	302.0				

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
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
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	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) とよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表される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 ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	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
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電流量	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 s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m ² kg 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 s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m ²	m ² cd
放射線種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号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である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についての、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で“radioactivity”と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含む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
粘り	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg 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
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =m ² 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
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

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6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値	
		名称	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=86 400 s	
度	°	1°=(π/180) rad	
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad	
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad	
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²	
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³	
トン	t	1t=10 ³ kg	

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、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単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
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 ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
ファ	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガラ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π)A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
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
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 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	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

