



**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)**

Phenomenological Study on Crystalline Rock for Evaluating of Long-term Behavior  
(Contract Research)

大久保 誠介 福井 勝則 羽柴 公博 引間 亮一  
丹野 剛男 真田 祐幸 松井 裕哉 佐藤 稔紀

Seisuke OKUBO, Katsunori FUKUI, Kimihiro HASHIBA, 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

February 2012

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](mailto: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](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

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 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット

大久保 誠介\*1、福井 勝則\*1、羽柴 公博\*1、  
引間 亮一\*、丹野 剛男\*、真田 祐幸、松井 裕哉、佐藤 稔紀

(2011 年 11 月 21 日受理)

岩石や岩盤は、クリープや応力緩和のような時間依存性挙動を示すことが知られている。高レベル放射性廃棄物の地層処分時には、建設時および操業時は言うまでもなく、坑道埋め戻し後も千年程度の長期にわたる坑道の安定性の評価が要求される。このため、長期にわたる岩石や岩盤の時間依存性挙動を把握することは、そのような坑道の長期安定性を評価する上で重要な課題である。そこで、岩石や岩盤の時間依存性挙動を、精密な試験や観察・計測から直接的に検討する手法（現象論的方法）で解明し、岩盤構造物の長期挙動予測評価手法を開発する研究を行ってきた。これまでの研究により、現象を把握するための試験法、非線形粘弾性論を拠りどころとした現象の評価方法をほぼ確立し、また、土岐花崗岩のモデルを作成するためのパラメータを取得した。残された課題は、得られたモデルとパラメータの信頼性の検討である。

本報告書は、2010 年度に実施した研究をまとめたものである。第 1 章では、研究内容とその背景を概括した。第 2 章では、1997 年度から継続している田下凝灰岩のクリープ試験結果について報告した。第 3 章では、岩石の時間依存性の程度を表す  $n$  の値の意味をより明確に示すため、強度の載荷速度依存性とクリープ寿命の応力依存性との関係および時間依存性、強度とクリープ寿命の分布特性、寸法効果の相互関係について論じた。さらに、既往の研究事例をレビューして、土岐花崗岩の力学特性や時間依存性について、今後実施すべき試験について検討した。第 4 章では岩盤の破壊基準の設定に関する検討として、十分長い時間をかけて岩石を壊したときの強度（長期強度）および、いつまで経っても破壊に至らない応力条件について検討した。第 5 章では、周圧下での  $n$  の値の変化および岩盤強度のばらつきを考慮した二次元有限要素解析により、土岐花崗岩の長期挙動に関する予想的検討を行った。最後に、数値解析結果にもとづいて原位置試験計画に関する所見を述べた。

---

本報告書は、日本原子力研究開発機構との委託研究契約に基づき、東京大学が実施した研究の成果に関するものである。

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

※ 技術開発協力員

\*1 東京大学

Phenomenological Study on Crystalline Rock for Evaluating of Long-term Behavior  
(Contract Research)

Seisuke OKUBO<sup>\*1</sup>, Katsunori FUKUI<sup>\*1</sup>, Kimihiro HASHIBA<sup>\*1</sup>,  
Ryoichi HIKIMA<sup>※</sup>, Takeo TANNO<sup>※</sup>, Hiroyuki SANADA,  
Hiroya MATSUI and Toshinori SATO

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

(Received November 21, 2011)

Rock, under *in situ* conditions, shows time-dependent behavior such as creep/relaxation. With respect to high-level radioactive waste disposal, knowledge of the long-term mechanical stability of shafts and galleries excavated in rock is required, not only during construction and operation but also over a period of thousands of years after closure. Therefore, it is very important to understand the time-dependent behavior of rock for evaluating long-term mechanical stability. The purpose of this study is determining the mechanisms of time-dependent behavior of rock by precise testing, observation and measurement in order to develop methods for evaluating long-term mechanical stability of a rock mass. In the previous work, testing techniques have been established and basic evaluation methods were developed. Recently, some parameters needed for simulation of time-dependent behavior were determined at the Mizunami underground research facilities. However, sufficient data to check the reliability of the evaluation method for these parameters were not available.

This report describes the results of the activities in fiscal year 2010. In Chapter 1, we provide an overview and the background to this study. In Chapter 2, the results of a long-term creep test on Tase tuff, started in fiscal year 1997 are described. In Chapter 3, the relation of loading-rate dependency of strength and stress dependency of creep life, the relation of time dependency, probability distribution and size effects are discussed to indicate more clearly the meaning of the value of “*n*” to express the degree of time dependency of the rock. Furthermore, past studies concerning the value of “*n*” are reviewed and the tests that could be carried out in future studies of mechanical properties and time dependency of Toki granite are considered in this Chapter. In Chapter 4, failure criterions of a rock mass considering time dependency are discussed. In Chapter 5, the FEM analysis implemented with a generalized variable-compliance-type constitutive equation considering the change of “*n*” in confining pressure and strength distribution of rock mass carried out to clarify the long-term behavior of Toki granite is described. Finally, based on the numerical analysis, an *in situ* testing method is proposed.

*Keywords: Crystalline Rock, Time Dependency, Creep, Failure Criterion, Constitutive Equation*

---

This work was performed by the University of Tokyo under contract with Japan Atomic Energy Agency.

※ Collaborating Engineer

\*1 The University of Tokyo

## 目 次

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 1. はじめに .....                        | 1  |
| 2. 堆積岩（田下凝灰岩）の長期クリープ試験.....          | 2  |
| 2.1 試料岩石と試験方法 .....                  | 2  |
| 2.2 試験装置の維持管理 .....                  | 3  |
| 2.3 試験結果 .....                       | 4  |
| 3. 結晶質岩の時間依存性挙動把握のためのデータの整理と分析 ..... | 9  |
| 3.1 強度の載荷速度依存性とクリープ寿命の応力依存性との関係..... | 9  |
| 3.2 時間依存性、分布特性、寸法効果の関係 .....         | 11 |
| 3.3 土岐花崗岩と種々の岩石の $n$ .....           | 13 |
| 3.4 まとめ .....                        | 22 |
| 4. 岩盤の破壊基準の検討 .....                  | 23 |
| 4.1 岩石強度の載荷速度依存性に関する過去の研究 .....      | 23 |
| 4.2 時間依存性を考慮した破壊基準.....              | 24 |
| 4.3 まとめと今後の課題 .....                  | 32 |
| 5. 原位置試験計画策定のための予察的検討 .....          | 33 |
| 5.1 構成方程式.....                       | 33 |
| 5.2 岩盤強度のばらつき .....                  | 34 |
| 5.3 計算方法と計算条件 .....                  | 37 |
| 5.4 数値解析結果 .....                     | 41 |
| 5.5 原位置試験を実施する際の留意事項 .....           | 50 |
| 6. おわりに .....                        | 52 |
| 参考文献 .....                           | 53 |

## CONTENTS

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introduction.....                                                                        | 1  |
| 2. Long-term creep test of Tase tuff.....                                                   | 2  |
| 2.1 Sample and testing method.....                                                          | 2  |
| 2.2 Historical review of the test and maintenance of equipment.....                         | 3  |
| 2.3 Results .....                                                                           | 4  |
| 3. Organization and analysis for time dependent behavior of crystalline rock.....           | 9  |
| 3.1 Relation of loading-rate dependency of strength and stress dependency of creep life.... | 9  |
| 3.2 Relation of time dependency , probability distributions and size effects.....           | 11 |
| 3.3 Comparision of the value of “ <i>n</i> ” for Toki granite and other rocks.....          | 13 |
| 3.4 Summary .....                                                                           | 22 |
| 4. Examination on failure criterion of rock mass .....                                      | 23 |
| 4.1 Review of past studies about loading-rate dependency of rock strength.....              | 23 |
| 4.2 Failure criterions considering time dependency .....                                    | 24 |
| 4.3 Summary and subjects of future studies .....                                            | 32 |
| 5. Numerical analysis of long-term behavior for <i>in situ</i> testing methods.....         | 33 |
| 5.1 A generalized variable-compliance-type constitutive equation .....                      | 33 |
| 5.2 Strength distribution of rock mass .....                                                | 34 |
| 5.3 Analytical model and analysis conditions.....                                           | 37 |
| 5.4 Results of numerical analysis.....                                                      | 41 |
| 5.5 Considerations for <i>in situ</i> testing methods.....                                  | 50 |
| 6. Conclusions.....                                                                         | 52 |
| Reference .....                                                                             | 53 |

## 図目次

|        |                                                        |    |
|--------|--------------------------------------------------------|----|
| 図 2-1  | 空圧式クリープ試験機の概略図                                         | 2  |
| 図 2-2  | クリープ歪および圧力の変化 (1997 年～2010 年)                          | 4  |
| 図 2-3  | クリープ歪および圧力の変化 (2010 年)                                 | 5  |
| 図 2-4  | 補正したクリープ歪 (2002～2010 年)                                | 6  |
| 図 2-5  | 温度計の設置状況                                               | 7  |
| 図 2-6  | 室温および水温の変化 (2010 年)                                    | 7  |
| 図 2-7  | 湿度の変化 (2010 年)                                         | 8  |
| 図 2-8  | 室温と水温の差および湿度の変化 (2010 年)                               | 8  |
| 図 3-1  | 気乾状態での一軸圧縮強度と $n$ の関係                                  | 20 |
| 図 3-2  | 気乾状態と湿潤状態での一軸圧縮強度と $n$ の関係                             | 21 |
| 図 3-3  | 周圧下での強度と $n$ の関係                                       | 21 |
| 図 4-1  | (4-5) 式から計算される $t_f$ と $\sigma_f/\sigma_0$ の関係         | 26 |
| 図 4-2  | (4-6) 式から計算される $\sigma_{cr}/\sigma_0$ と $t_{cr}$ の関係   | 26 |
| 図 4-3  | 各破壊基準における最大主応力と最小主応力の関係                                | 28 |
| 図 4-4  | 時間の経過にともなう Coulomb の破壊基準の変化                            | 29 |
| 図 4-5  | 時間の経過にともなう Mohr の破壊基準の変化                               | 30 |
| 図 4-6  | 時間の経過にともなう Hoek and Brown の破壊基準の変化                     | 31 |
| 図 5-1  | ワイブル確率紙にプロットした土岐花崗岩の一軸圧縮強度                             | 36 |
| 図 5-2  | 円形坑道の二次元計算モデル                                          | 38 |
| 図 5-3  | 計算モデルの要素分割                                             | 38 |
| 図 5-4  | 2007 年度の一軸圧縮試験 (試験片 No.17) で得られた応力-歪曲線と基本条件で計算した応力-歪曲線 | 41 |
| 図 5-5  | 基本条件で計算した内空変位と内空変位速度の経時変化                              | 42 |
| 図 5-6  | 基本条件、計算条件 1-1、計算条件 1-2 で計算した内空変位と内空変位速度の経時変化           | 42 |
| 図 5-7  | ワイブル確率紙にプロットした計算条件 2 で割り振った一軸圧縮強度                      | 43 |
| 図 5-8  | 基本条件(太線)と計算条件 2-1(細線)で計算した内空変位と内空変位速度の経時変化             | 45 |
| 図 5-9  | 基本条件(太線)と計算条件 2-2(細線)で計算した内空変位と内空変位速度の経時変化             | 45 |
| 図 5-10 | 基本条件(太線)と計算条件 2-3(細線)で計算した内空変位と内空変位速度の経時変化             | 46 |
| 図 5-11 | 基本条件(太線)と計算条件 2-4(細線)で計算した内空変位と内空変位速度の経時変化             | 46 |
| 図 5-12 | 基本条件(太線)と計算条件 2-5(細線)で計算した内空変位と内空変位速度の経時変化             | 47 |
| 図 5-13 | 基本条件(太線)と計算条件 2-6(細線)で計算した内空変位と内空変位速度の経時変化             | 47 |
| 図 5-14 | 計算条件 2 での計算結果                                          | 48 |

## 表目次

|          |                                            |    |
|----------|--------------------------------------------|----|
| 表 3-1    | 土岐花崗岩の強度と $n$ .....                        | 13 |
| 表 3-2    | 稲田花崗岩の強度と $n$ .....                        | 13 |
| 表 3-3    | 三城目安山岩の強度と $n$ .....                       | 14 |
| 表 3-4    | 河津凝灰岩の強度と $n$ .....                        | 15 |
| 表 3-5    | 田下凝灰岩の強度と $n$ .....                        | 15 |
| 表 3-6    | 大谷凝灰岩の強度と $n$ .....                        | 15 |
| 表 3-7    | 和泉砂岩の強度と $n$ .....                         | 16 |
| 表 3-8    | 来待砂岩の強度と $n$ .....                         | 16 |
| 表 3-9    | 多胡砂岩の強度と $n$ .....                         | 16 |
| 表 3-10   | 秋吉大理石の強度と $n$ .....                        | 17 |
| 表 3-11   | 土丹の強度と $n$ .....                           | 17 |
| 表 3-12   | 石炭の強度と $n$ .....                           | 17 |
| 表 3-13   | 気乾状態における周圧下での強度と $n$ .....                 | 18 |
| 表 3-14   | 今後取得すべき情報の優先順位 .....                       | 22 |
| 表 4-1    | 過去に提案された岩石・岩盤を対象とした破壊基準 .....              | 27 |
| 表 5-1    | 岩石の一軸圧縮強度のばらつきの程度を表すワイブル分布の形状母数と変動係数 ..... | 35 |
| 表 5-2(a) | 数値解析での計算条件（基本条件） .....                     | 39 |
| 表 5-2(b) | 数値解析での計算条件（計算条件 1） .....                   | 40 |
| 表 5-2(c) | 数値解析での計算条件（計算条件 2） .....                   | 40 |
| 表 5-3    | 計算結果 .....                                 | 49 |



## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分のための地下施設においては、建設から操業を経て坑道埋め戻し後の千年程度にわたる、短期から長期までの力学的安定性が要求される。その坑道が作られる岩盤は、クリープや応力緩和などの時間依存性挙動を示すことが一般に知られており、その性質を把握することは上記の安定性を評価するための重要課題である。

独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構と略記）では、1994年度から2003年度までの10年間の研究によって、岩盤の時間依存性挙動を予測評価するための基礎（試験法とモデル）を構築した<sup>1)</sup>。原子力機構の進める超深地層研究所計画<sup>2)</sup>は、結晶質岩（花崗岩）を主な調査・研究対象とし、深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備等を図るもので、2004年度に「研究坑道の掘削を伴う研究段階（第2段階）」を開始した。これに合わせて、時間依存性挙動の研究は、主現象であるクリープと応力緩和現象の現象論的な解明をテーマとし、原位置における時間依存性挙動の予測評価手法の開発と、その手法の研究坑道を用いた原位置試験による検証を目標とする新たな方針に移行した。

本研究は、この方針に沿って行われたもので、結晶質岩を主たる対象とし、クリープや応力緩和の性質を、現象論的手法、すなわち精密な試験や観察・計測から直接的に検討する手法を用いて解明し、坑道周辺岩盤の長期挙動予測評価手法を開発するとともに、その検証が超深地層研究所計画の「研究坑道を利用した研究段階（第3段階）」において実施できるよう、必要な基礎情報を得ることを目的として行うものである。

本報告書は、2010年度に実施した研究成果をまとめたものである。第2章では、1997年度から継続している田下凝灰岩の長期クリープ試験結果について報告した。試験を開始して13.5年が経過し、長期時間依存性挙動を評価するための貴重なデータが得られている。第3章では、岩石の時間依存性の程度を表す $n$ の値の意味をより明確に示すため、強度の載荷速度依存性とクリープ寿命の応力依存性との関係および時間依存性、強度とクリープ寿命の分布特性、寸法効果の相互関係について論じた。さらに、既往の研究事例をレビューして、土岐花崗岩の力学特性や時間依存性について、今後実施すべき試験について検討した。第4章では岩盤の破壊基準の設定に関する検討として、十分長い時間をかけて岩石を壊したときの強度（長期強度）および、いつまで経っても破壊に至らない応力条件について検討した。第5章では、周圧下での $n$ の値の変化および岩盤強度のばらつきを考慮して拡張したコンプライアンス可変型構成方程式<sup>3)</sup>を用いた有限要素法により、土岐花崗岩の長期挙動に関する予察的検討を行った。最後に、数値解析結果にもとづいて原位置試験計画に関する所見を述べた。

## 2. 堆積岩（田下凝灰岩）の長期クリープ試験

本章では、試験を開始してから 13.5 年経過した、空圧式クリープ試験機による田下凝灰岩の長期クリープ試験について述べる。

### 2.1 試料岩石と試験方法

試料岩石および試験方法は、既報<sup>4)</sup>と同様で以下の通りである。

岩 石：田下凝灰岩

試 験 機：空圧式クリープ試験機（図 2-1）

環 境：常温下、湿潤状態

試 験 片：直径 25mm×高さ 50mm の円柱形

クリープ応力：2.8MPa [一軸圧縮強度（9.1MPa）の 30%]

実験開始日時：1997 年 5 月 23 日 10 時 27 分

経 過 時 間：実験開始後 428,457,600sec（2010 年 12 月 20 日現在）

計 測 方 法：試験開始後から現在にいたるまでの計算機による取り込み（主に载荷初期と破壊に備えての計測）と、2000 年から毎週月曜日と金曜日午前 10 時時点の測定（定常時の計測）

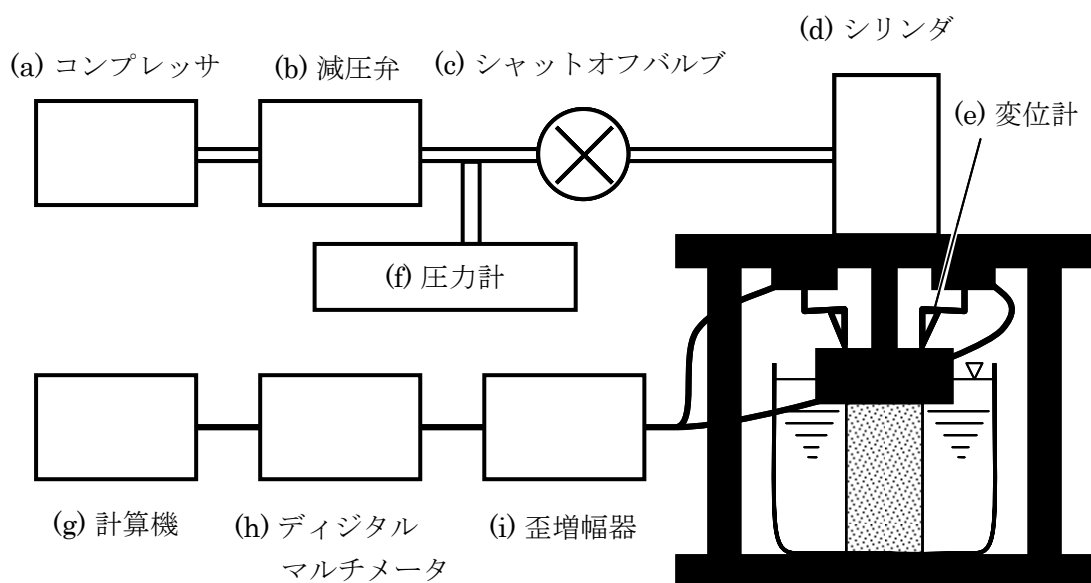


図 2-1 空圧式クリープ試験機の概略図

## 2.2 試験装置の維持管理

試験の維持・管理方法は以下の通りである。

### 1) 維持・管理（日常）：

- ・ 空気圧が設定値に保持されていることの確認
- ・ 試験片が完全に水没した状態になっていることの確認
- ・ 前回の点検時に比べて、変位の出力値の大きな変化はないかの確認

### 2) 維持・管理（適宜）：

- ・ コンプレッサ内部の水抜き
- ・ 減圧弁のブリード孔の掃除

### 3) 計測装置が異常を示した場合の対応策：

- ・ 歪増幅器：任意の歪量を出力できるキャリブレータを用意し、試験前と適宜試験中に歪増幅器のキャリブレーションを行う。
- ・ 圧力計：シリンダの手前の開閉弁を閉めることによって数時間はクリープ試験が継続できるのでその間に点検を行う。
- ・ 変位計：クリープ試験は継続したままで、変位計の接点にブロックゲージを入れることで点検を行う。ただし、ブロックゲージを取り出すと接点が若干ずれてしまうので変位計の点検は変位計の値が異常と認められる場合に限定する。
- ・ 計算機やその他の機器（CRT やフロッピーディスクドライブなど）  
：同機種を複数台ストックする。

## 2.3 試験結果

試験開始(1997年5月23日)から2010年12月20日までのクリープ歪とクリープ荷重を作用させるシリンダの空圧の経時変化を図2-2に示す。試験開始から約3年間は、クリープ歪が一定量の変化をする度に計算機で記録した。その後は、毎週月曜日と金曜日の午前10時に歪と空圧の値を記録した。2007年までは、時間とともにクリープ荷重を作用させるシリンダの空圧が設定値よりも徐々に減少したため、適宜、空圧を設定値に戻すという作業を行った。クリープ歪は概ね空圧と似たように変動しながらも徐々に増加した。しかし、既報<sup>4)</sup>で指摘したように、2008年から2009年にかけては、空圧がほぼ一定に保たれていたにもかかわらず、クリープ歪は従来と同じように変動しながら若干の減少傾向を示した。2010年度は、試験を継続しながらこの原因についての検討を行った。

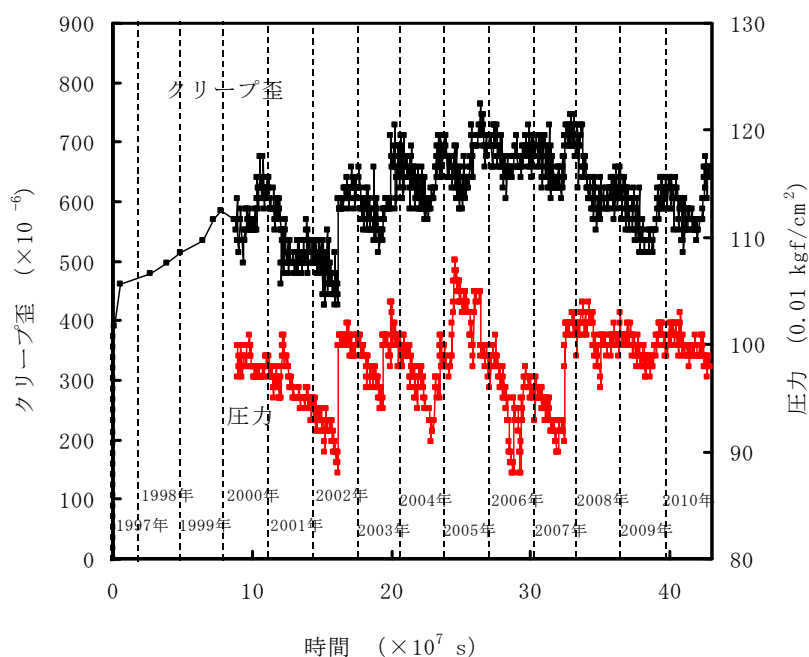


図2-2 クリープ歪および圧力の変化（1997年～2010年）

2010年におけるクリープ歪とシリンダの空圧の経時変化を図2-3に示す。2008年から2009年にかけて、空圧はほぼ一定であったが、クリープ歪に変動が見られた。このように空圧とクリープ歪がやや異なる変化傾向を示した原因として、測定した空圧とシリンダの空圧の値が一致していない可能性が考えられた。似たような現象は2005年にも生じており<sup>5)</sup>、この際には、設定圧力以下で圧力を上下させ、図2-1の(c)シャットオフバルブから(d)シリンダにかけて空気とシリンダの移動を数回行った。ただし、2005年の現象と2008年から2009年の現象はやや異なっている。すなわち、2005年は空圧が変動したにもかかわらずクリープ歪は変動しなかったが、2008年から2009年にかけては空圧の変動は小さかったがクリープ歪は変動した。そこで今回は、まず2010年3月29日に、“維持・管理（適宜）”に示した減圧弁のブリード孔の掃除と、配管の一部の掃除を行った。配管の掃除では、図2-1の(c)シャットオフバルブを閉めた状態で、(a)コンプレッサと(b)減圧弁の間の配管および(b)減圧弁と(c)シャットオフバルブの間の配管をはずして掃除を行った。図2-3にその時点を示した。しかしその後も、それ以前と同様に、空圧は

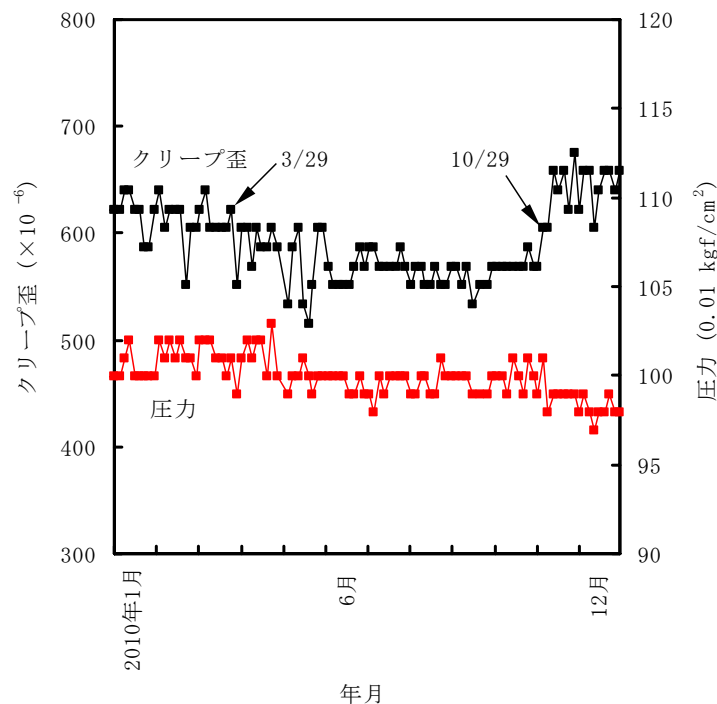


図 2-3 クリープ歪および圧力の変化（2010 年）

ほぼ一定であったが、クリープ歪には若干の変動しか見られず、特に改善は見られなかった。そこで次に、2005 年と同様の作業を 2010 年 10 月 29 日に実施した。(b)減圧弁により空圧を設定値の  $1\text{kgf/cm}^2$  から  $0.5\text{kgf/cm}^2$  まで下げてから、空圧を  $0.5\text{kgf/cm}^2$  と  $0.4\text{kgf/cm}^2$  の間で 10 回上下させた。その後、空圧を設定値である  $1\text{kgf/cm}^2$  に戻した。この時点を図 2-3 に矢印で示した。この作業の後は、クリープ歪は若干増加し、空圧には若干の減少傾向が見られた。

これまでの計測では、時間とともに空圧が設定値よりも徐々に減少したため、適宜、空圧を設定値に戻すという作業を行っている。図 2-2 で空圧が急激に大きく増加しているのが、この作業を行った時点である。今年度もこれまでと同様に、このような空圧の低下による歪の変化を近似的に弾性変形と見なし、低下したクリープ応力をヤング率  $2.6\text{GPa}$  で除して、クリープ歪を補正することとした。すなわち、クリープ応力  $0.028\text{MPa}$  に対応する空圧  $0.01\text{kgf/cm}^2$  ( $1\text{kPa}$ ) の低下で、クリープ歪が  $1.1 \times 10^{-5}$  だけ低下すると仮定して補正した。図 2-2 のクリープ歪を補正した結果を図 2-4 に示す。図より、試験開始から 2004 年までは、細かい変動は見られるもののクリープ歪が徐々に増加していることがわかる。2005 年にクリープ歪が減少しているのは、上記で述べたように、測定した空圧とシリンダの空圧の値が一致していない可能性が考えられた期間である。2006 年から 2007 年の前半にかけてもクリープ歪は若干増加している。その後の 2007 年後半から 2009 年にかけてはクリープ歪が減少したが、これも上記のように、測定した空圧とシリンダの空圧の値が一致していない可能性が考えられた。2010 年 10 月 29 日に配管とシリンダ内の空気の移動を生じさせた結果、2010 年 12 月にはクリープ歪は 2007 年後半の値にほぼ戻っているように見える。ただし、現状では問題が解決されたかどうか不明であるため、今後の経過を慎重に観察していく必要がある。

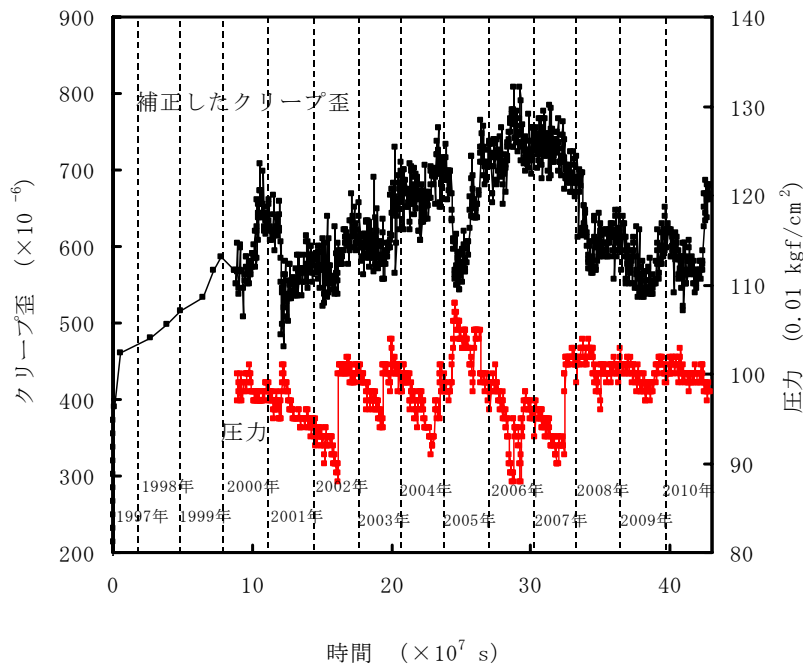


図 2-4 補正したクリープ歪 (2002～2010 年)

図 2-4 に示したクリープ歪の毎回の計測結果には、 $\pm 50 \times 10^{-6}$  程度の小さな変動が見られる。この原因の一つとして、日々の温度変化による岩石試験片と試験装置枠の膨張収縮が考えられる。いずれも線膨張率は  $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  程度であり、計測結果の変動と同程度のオーダーである。また、温度変化や湿度変化が、変位計や歪増幅器に影響を及ぼしている可能性も考えられた。そこで、2010 年 1 月 8 日より室温、水温、湿度の測定を行った。図 2-5 に温度計の設置状況を示す。温度計 1 は室温の測定用である。温度計 2 は水温の測定用であるが、試験中の試験片や容器などとの接触を避けるため、試験を行っている横で試験と同じ状況、すなわち、試験に用いているものと同じ容器に田下凝灰岩の試験片とイオン交換水を入れた状態で水温を測定した。湿度はアスマン式通風乾湿計により測定した。ファンにより約 2 分間通風した状態で乾球と湿球の値を読み取り、換算表により湿度を測定した。

2009 年の室温と水温の変化を図 2-6 に示す。図より、室温と水温は類似した変化傾向を示すことが認められる。1 月から 6 月頃までは徐々に増加して、その後、8 月頃まではほぼ一定である。9 月と 10 月はやや温度が高くなったが、11 月以降はまたほぼ一定になった。4 月に温度が低下した日があるが、これは試験室のドアを修理するためドアが取り外されていたためである。11 月にも温度が低下した日がある。この原因は判然としないが、季節の変わり目で空調を冷房から暖房に切り換えた影響の可能性がある。図 2-7 に湿度の変化を示すが、夏場は比較的高く、冬場は比較的低くなっている。図 2-8 に室温と水温の差および湿度の変化を示す。1 年を通して室温と水温の差の変化は小さいものの、湿度が低いと室温と水温の差が大きく、湿度が高いと室温と水温の差が小さいという傾向が見られた。

2010 年度は、空圧とクリープ歪の変動がこれまでとやや異なる傾向を示した原因を解明するための作業を行った。さらに、1 年間にわたり室温、水温、湿度のデータを取得したが、クリープ歪に及ぼす温度変化の影響を確認するには至らなかった。今後はクリープ歪の経過を慎重に観察するとともに、温度測定を継続して行い、試験結果および試験装置に及ぼす影響について検討する予定である。

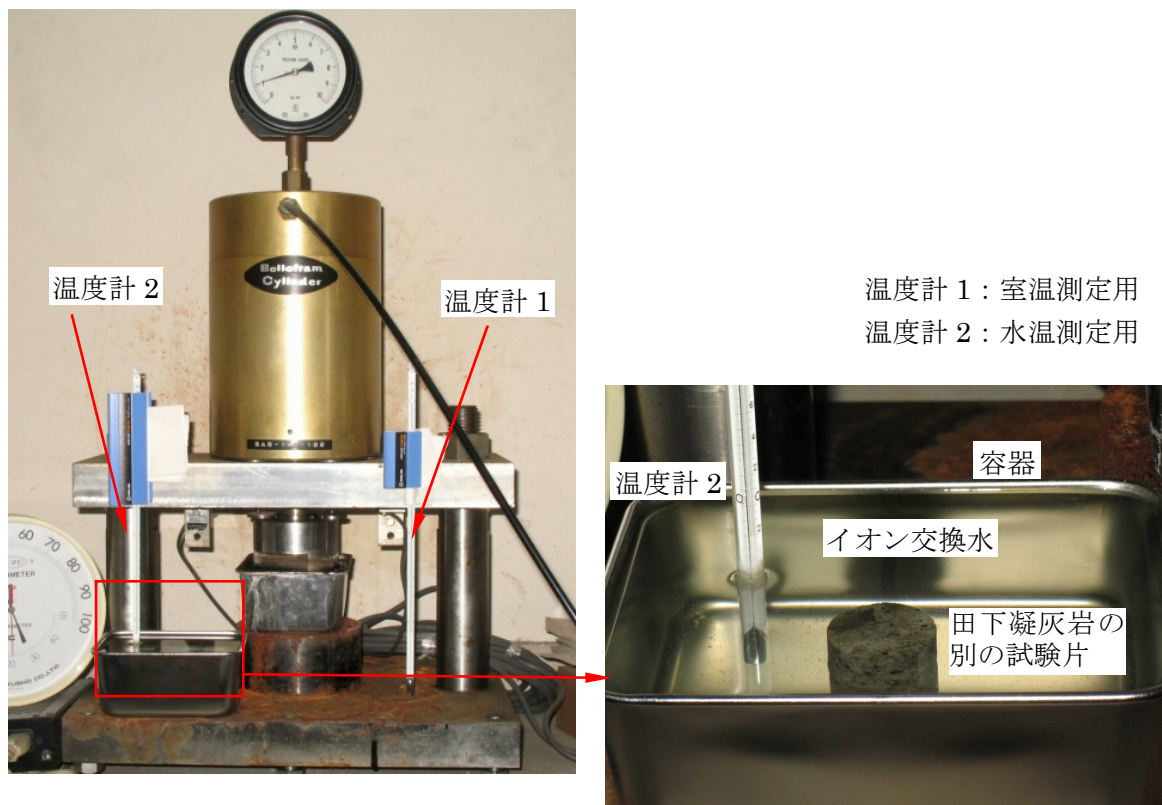


図 2-5 温度計の設置状況

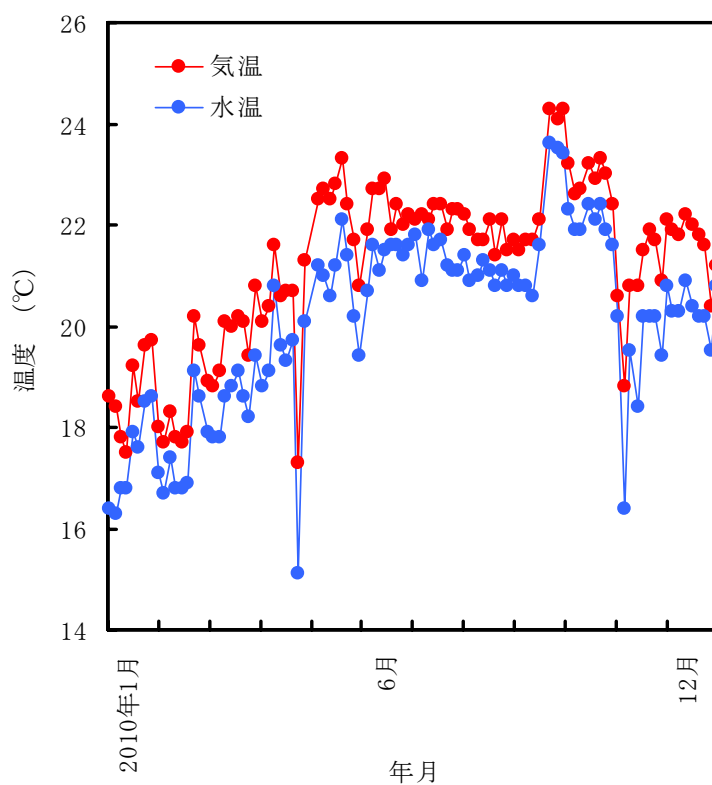


図 2-6 室温および水温の変化（2010 年）

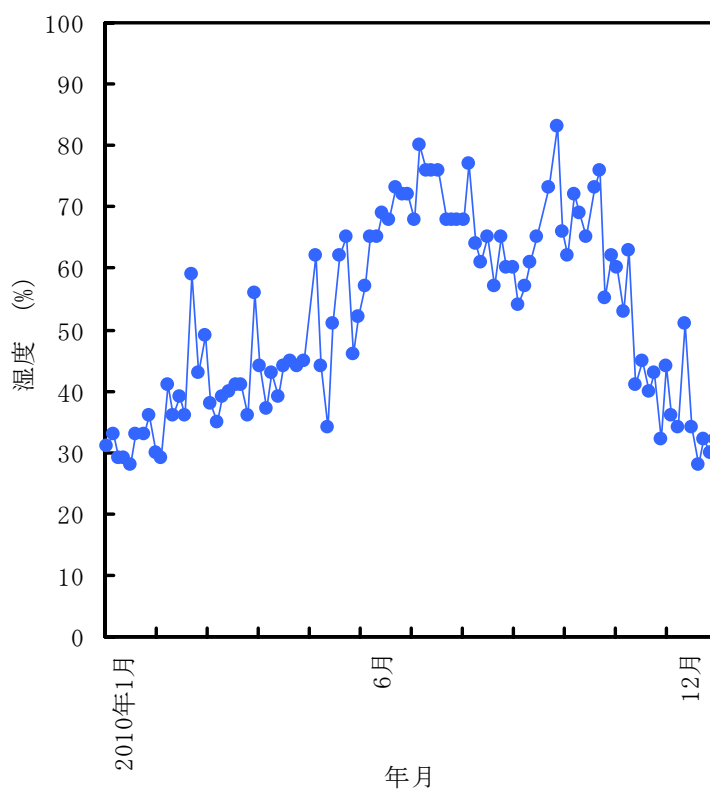


図 2-7 湿度の変化（2010 年）

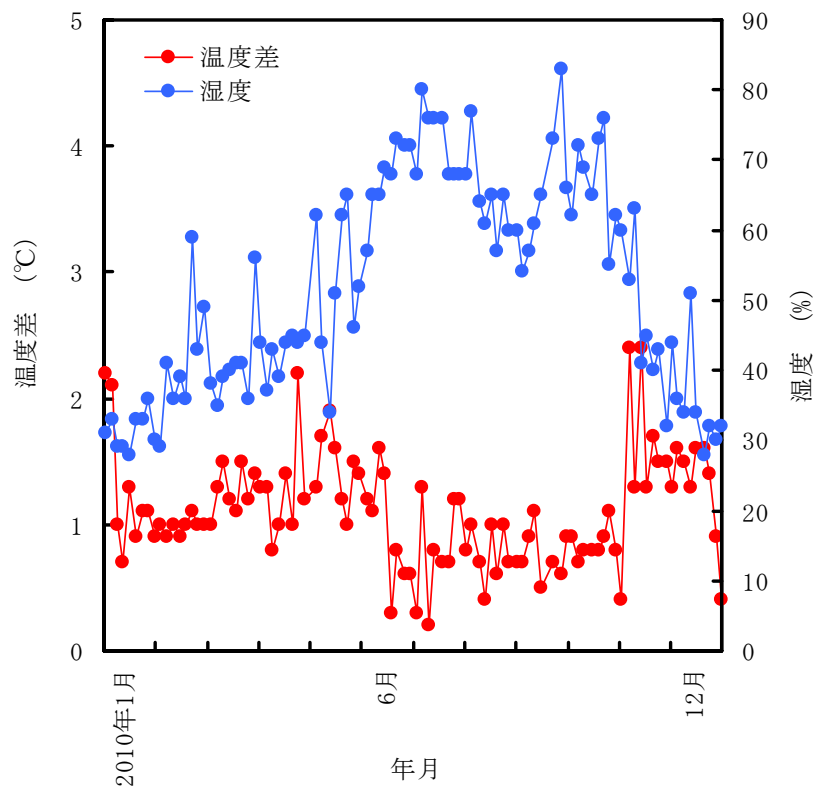


図 2-8 室温と水温の差および湿度の変化（2010 年）



### 3. 結晶質岩の時間依存性挙動把握のためのデータの整理と分析

本章では、まず、強度の载荷速度依存性とクリープ寿命の応力依存性との関係および時間依存性、強度とクリープ寿命の分布特性、寸法効果の相互関係について、決定論モデルや確率過程論モデルを用いて説明する。次いで、これまでに取得された岩石の強度と時間依存性の程度を表す  $n$  の値を整理して、土岐花崗岩の強度や  $n$  の値と比較検討する。さらに、これまでに得られている岩石の強度や時間依存性に及ぼす水分や周圧の影響を調べる。最後に、今後、研究坑道で原位試験を行うにあたり、土岐花崗岩の力学特性や時間依存性に関する情報のうちで把握すべき情報について検討する。

#### 3.1 強度の载荷速度依存性とクリープ寿命の応力依存性との関係

破壊の進行する速度が応力  $\sigma$  の関数  $g(\sigma)$  に比例するものとして、強度の载荷速度依存性とクリープ寿命の関係を考える。 $g(\sigma)$  としては解析的な検討が容易な次の関数形を採用する。

$$g(\sigma) = \sigma^n \quad (3-1)$$

他の関数形として、定数  $\delta$  を用いた  $\exp(\delta\sigma)$  や  $\sinh(\delta\sigma)$  などが考えられるが、以下での取り扱いに大きな違いはない。 $g(\sigma)$  の積分値  $\tau$  が一定値  $T$  に達すると破壊が生じるとすると、応力速度  $C$  の強度試験では次式が成り立つ。

$$T = \int_0^{t_f} (Ct)^n dt = \frac{1}{n+1} \left( \frac{\sigma_f}{C^{\frac{1}{n+1}}} \right)^{n+1} \quad (3-2)$$

ここで、 $t$  は载荷開始からの経過時間、 $\sigma_f (= Ct_f)$  は強度である。(3-2) 式を整理すると次式となる。

$$\sigma_f = \{T(n+1)C\}^{\frac{1}{n+1}} \quad (3-3)$$

これより、強度が応力速度（载荷速度）の  $1/(n+1)$  乗に比例することがわかる。一方、クリープ試験では  $\sigma = \sigma_{cr}$ （一定）のため次式となる。

$$T = \int_0^{t_{cr}} \sigma_{cr}^n dt = \sigma_{cr}^n t_{cr} \quad (3-4)$$

ここで、 $t_{cr}$  はクリープ寿命である。(3-4) 式を整理すると次式となる。

$$t_{cr} = \frac{T}{\sigma_{cr}^n} \quad (3-5)$$

これより、クリープ寿命がクリープ応力の  $n$  乗に反比例することがわかる。

応力速度  $C_1$  と  $C_2$  での強度をそれぞれ  $\sigma_{f1}$  と  $\sigma_{f2}$  とすると、その比  $k$  は (3-3) 式を用いて次式のように計算できる。

$$k = \frac{\sigma_{f1}}{\sigma_{f2}} = \left( \frac{C_1}{C_2} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (3-6)$$

また、比が  $k$  のクリープ応力  $\sigma_{cr1}$  と  $\sigma_{cr2}$  でのクリープ寿命を  $t_{cr1}$  と  $t_{cr2}$  とすると、(3-4) 式を用いて次式が導かれる。

$$k = \frac{\sigma_{cr1}}{\sigma_{cr2}} = \left( \frac{t_{cr2}}{t_{cr1}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3-7)$$

データは 3.3 節に示すが、岩石の  $n$  は 1 よりも十分大きいので近似的に次式が成り立つ。

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{t_{cr2}}{t_{cr1}} \quad (3-8)$$

これは、例えば、載荷速度が 10 倍になったときの強度の増加率が  $x\%$  の場合、クリープ応力を  $x\%$  低下させるとクリープ寿命が 10 倍になることを意味する。

クリープ応力を段階的に増加させる多段階クリープ試験では、 $\tau$  は次式となり、 $\tau$  が  $T$  に達すると破壊が生じる。

$$\tau = \sum_i \left( \sigma_{cri}^n t_{cri} \right) \quad (3-9)$$

ここで、 $i$  番目のクリープ応力を  $\sigma_{cri}$ 、その応力での継続時間を  $t_{cri}$  とした。山口他<sup>6)</sup>は、周圧下での稲田花崗岩の強度試験結果と多段階クリープ試験結果を比較検討し、この考え方の妥当性を示している。

以上は巨視的な観点からの説明であるが、応力の関数  $g(\sigma)$  が破壊の進行の程度を表すとする考え方は、速度過程論<sup>7)</sup>や応力腐食によるき裂進展の考え方<sup>8)</sup>とも矛盾しない。岩石の複雑な時間依存性挙動が、(3-1) 式のような簡単な関数形で説明できることは興味深い。これに関して、実際は  $g(\sigma)$  には  $n$  の小さい低次の項も存在するが、高い応力レベルでは無視でき、結果的に  $\sigma^n$  の影響が反映されるという指摘がある<sup>9)</sup>。

### 3.2 時間依存性、分布特性、寸法効果の関係

多くの材料と同様に、岩石でも物性値のばらつきや寸法効果が観察される。これらと時間依存性とは一見異なる性質のように思われるが、この三つの性質が密接に結びついていることが種々の理論と実験結果により明らかにされてきた。

時間依存性と強度やクリープ寿命の分布特性との関係は、決定論モデルを用いて次のように説明される<sup>10)</sup>。まず、前節で定義した  $T$  がワイブル分布に従うと仮定する。

$$P(T)=1-F(T)=\exp\left\{-\left(\frac{T}{a}\right)^{\frac{b}{n+1}}\right\} \quad (3-10)$$

ここで、 $F(T)$  は  $T$  の累積分布関数、 $a$  は尺度母数、 $b/(n+1)$  は形状母数である。(3-2) 式を (3-10) 式に代入すると次式となる。

$$P(\sigma_f)=1-F(\sigma_f)=\exp\left[-\left\{\frac{\sigma_f}{\{a(n+1)C\}^{\frac{1}{n+1}}}\right\}^b\right] \quad (3-11)$$

これより、強度  $\sigma_f$  も形状母数  $b$  のワイブル分布に従うことがわかる。また、(3-4) 式を (3-10) 式に代入すると次式となる。

$$P(t_c)=1-F(t_c)=\exp\left\{-\left(\frac{t_{cr}}{a\sigma_{cr}^{-n}}\right)^{\frac{b}{n+1}}\right\} \quad (3-12)$$

これより、クリープ寿命  $t_{cr}$  も形状母数  $b/(n+1)$  のワイブル分布に従うことになる。これらの結果から、クリープ寿命の形状母数は強度の形状母数よりも小さくなり、クリープ寿命の変動係数(=標準偏差/平均値)は大きくなることがわかる。一軸圧縮応力下では多くの岩石で、強度の分布特性から求めた  $b$  とクリープ寿命の  $b$  がほぼ一致することが確認され、この考え方の妥当性が示されている<sup>11)</sup>。周圧下での強度やクリープ寿命の分布特性に関する研究は少ないが<sup>12)</sup>、報告されている実験結果とこの考え方とは矛盾していない。

確率過程論の観点からも、時間依存性と強度やクリープ寿命の分布特性との関係が論じられてきた。2 状態 1 段ポアソン確率過程では、強度試験で遷移確率が  $\sigma^n$  に比例すると仮定すると、強度は形状母数  $n+1$  のワイブル分布に従うことになる<sup>7)</sup>。クリープ試験では遷移確率を一定とみなすと、クリープ寿命は形状母数 1 のワイブル分布に従うことになる<sup>7)</sup>。確率過程論では試験片の強度やクリープ寿命はあらかじめ決まっているわけではないことに注意する必要がある。多くの場合、実験結果のばらつきは確率過程論から導かれるばらつきよりも大きく、確率過程論はばらつきの下限を与える可能性が指摘されている<sup>10)</sup>。データは 3.3 節に示すが、周圧の増加とともに岩石の  $n$  も増加することから、確率過程論に従えば周圧の増加とともに強度の形状母数は増加し、変動係数が減少することになる。しかし、これを検証するためのデータの蓄積は不十分である。また、2 状態 1 段ポアソン確率過程はかなり単純化したモデルであり、回復などは考慮されていない。より複雑な確率モデルによる検討は今後の課題である。

強度の寸法効果については、様々な考え方があるが定性的には次のように考えるのが主流といえる。全体の強度が一定体積毎に区分けした小部分の強度により決まると考える<sup>13)</sup>。岩石の小部分の強度が形状母数  $b$ （確率過程論では  $n+1$ ）のワイブル分布に従うとき、全体の強度は小部分の数、すなわち体積の  $1/b$  乗（確率過程論では  $1/(n+1)$  乗）に反比例する。この場合、小部分のばらつきの説明が決定論と確率過程論のいずれでなされていても以上の考え方は成立する。なお、寸法効果についても、確率過程論はその下限を与える可能性が指摘されている<sup>10)</sup>。ただし、ここでの強度は微視的な部分が破壊し始める応力であり、これがただちに全体の強度には結びつかないとの指摘がある。

時間依存性と物性値の分布特性や寸法効果の関係については、多くの研究が行われてきたが一軸圧縮応力下を対象としたものがほとんどである。時間依存性や物性値の分布特性に関する実験には多くの時間と手間がかかるが、今後周圧下でのデータの蓄積が望まれる。寸法効果に関しては、広範囲のデータを実験的に取得することは難しく、原位置での現象などを利用して議論していく必要がある<sup>14)</sup>。

### 3.3 土岐花崗岩と種々の岩石の $n$

前節までで、強度の載荷速度依存性やクリープ寿命の応力依存性などから求められる  $n$  が、岩石の時間依存性の程度を表す重要な指標となる可能性があることを示した。そこで、これまでに取得してきた岩石の  $n$  の値を整理して、土岐花崗岩の  $n$  の値と比較検討する。

表 3-1 に、2006 年度、2007 年度、2008 年度に求められた土岐花崗岩の強度と  $n$  の値を示す。なお以下の議論において、 $n$  は (3-3) 式にもとづいて強度が載荷速度（荷重速度、変位速度、応力速度、歪速度および、それらの組合せ）の  $1/(n+1)$  乗に比例するとして求められた値、強度は基準となる載荷速度での値とする。基準となる載荷速度は、一軸圧縮試験では  $10^{-5}/s$ 、一軸引張試験では  $10^{-6}/s$  とした。基準となる載荷速度での強度が求められていない場合は、(3-3) 式を用いて換算した。強度試験から  $n$  を求める方法としては、①4 種類程度の載荷速度のもとで定載荷速度試験を行う、②定載荷速度で試験を開始し強度破壊点直前で載荷速度を増加させる<sup>15)</sup>、③試験開始から 2 種類の載荷速度を交互に切り換えながら試験を行う<sup>16)</sup>、の 3 通りがあるが、 $n$  の値に大きな差が見られなかったため、以下では試験方法による区別を行わずに示した。ただし、試験者によって採取場所やブロックには違いがある場合がある。既報<sup>4)</sup>で示した土岐花崗岩の強度は、載荷速度の違いによる影響を考慮していないが、今回は (3-3) 式を用いて基準となる載荷速度  $10^{-5}/s$  での強度に換算した値を示した。例えば、土岐花崗岩の  $n$  は 52 なので、載荷速度が  $10^{-4}/s$  での強度は  $10^{-5}/s$  での強度よりも約 4.4% 大きくなる。表 3-1 によると、深度 476～477m よりも深度 475～476m での強度が若干大きかったが、その差は 4% 以下と小さかった。

表 3-2 には稲田花崗岩の強度と  $n$  の値を示す<sup>15,17,18)</sup>。土岐花崗岩の強度は稲田花崗岩よりも 10～20% 小さいが、土岐花崗岩の  $n$  の値は、これまでに得られている稲田花崗岩の  $n$  の値の範囲に入っている。また稲田花崗岩では、強度、 $n$  の値とも気乾状態と湿潤状態とで大きな違いは見られなかった。

表 3-1 土岐花崗岩の強度と  $n$

（一軸圧縮強度は載荷速度  $10^{-5}/s$  での値）

| 試験環境 | 試験方法   | 採取深度 (m) | 強度 (MPa) | $n$ |
|------|--------|----------|----------|-----|
| 気乾状態 | 一軸圧縮試験 | 475～476  | 167      | —   |
|      |        | 476～477  | 161      | 52  |

表 3-2 稲田花崗岩の強度と  $n$

（一軸圧縮強度は載荷速度  $10^{-5}/s$  での値）

| 試験環境 | 試験方法   | 文献                  | 強度 (MPa) | $n$ |
|------|--------|---------------------|----------|-----|
| 気乾状態 | 一軸圧縮試験 | 大久保他 <sup>15)</sup> | 180      | 51  |
|      |        | 大久保他 <sup>15)</sup> | 180      | 49  |
|      |        | 何他 <sup>17)</sup>   | 183      | 42  |
|      |        | 大久保他 <sup>18)</sup> | 190      | 44  |
| 湿潤状態 | 一軸圧縮試験 | 大久保他 <sup>18)</sup> | 184      | 42  |

表 3-3 には、これまで数多くの試験者により種々の载荷条件下で試験が行われてきた三城目安山岩の強度と  $n$  の値を示す<sup>15-25)</sup>。気乾状態の一軸圧縮応力下では、強度は 62~103MPa とばらつきが大きかったが、 $n$  の値は 35~39 と比較的揃っていることがわかる。また、一軸圧縮試験、一軸引張試験、圧裂引張試験、三点曲げ試験、一面せん断試験と载荷条件が異なっても、気乾状態の  $n$  はほとんど変化せず、34~41 という狭い範囲に入っている。気乾状態に比べると、湿潤状態では強度、 $n$  の値とも小さくなったが、供試体を採取するブロックの違いや载荷条件によらず湿潤状態での  $n$  の値は 28~31 という狭い範囲に入っている。

表 3-3 三城目安山岩の強度と  $n$

(一軸圧縮強度は载荷速度  $10^{-5}$ /s での値、一軸引張強度は载荷速度  $10^{-6}$ /s での値)

| 試験環境 | 試験方法    | 文献                  | 強度 (MPa) | n  |
|------|---------|---------------------|----------|----|
| 気乾状態 | 一軸圧縮試験  | 山口他 <sup>19)</sup>  | 103      | 36 |
|      |         | 大久保他 <sup>15)</sup> | 94       | 35 |
|      |         | 大久保他 <sup>15)</sup> | 94       | 38 |
|      |         | 何他 <sup>17)</sup>   | 93       | 38 |
|      |         | 大久保他 <sup>18)</sup> | 94       | 38 |
|      |         | 大久保他 <sup>18)</sup> | 88       | 37 |
|      |         | 大久保他 <sup>20)</sup> | 79       | 36 |
|      |         | 大久保他 <sup>20)</sup> | 81       | 36 |
|      |         | 趙他 <sup>21)</sup>   | 80       | 36 |
|      |         | 羽柴他 <sup>16)</sup>  | 62       | 39 |
|      | 一軸引張試験  | 大久保他 <sup>22)</sup> | 4.3      | 38 |
|      |         | 福井他 <sup>23)</sup>  | 6.2      | 39 |
|      |         | 福井他 <sup>23)</sup>  | 7.1      | 40 |
|      | 圧裂引張試験  | 大久保他 <sup>22)</sup> | —        | 41 |
|      | 三点曲げ試験  | 大久保他 <sup>24)</sup> | —        | 37 |
|      |         | 大久保他 <sup>24)</sup> | —        | 34 |
|      | 一面せん断試験 | 福井他 <sup>25)</sup>  | —        | 38 |
| 湿潤状態 | 一軸圧縮試験  | 大久保他 <sup>18)</sup> | 73       | 29 |
|      |         | 大久保他 <sup>18)</sup> | 68       | 28 |
|      |         | 大久保他 <sup>20)</sup> | 66       | 29 |
|      |         | 大久保他 <sup>20)</sup> | 69       | 31 |
|      | 圧裂引張試験  | 大久保他 <sup>22)</sup> | —        | 28 |

表 3-4～表 3-6 には、3 種類の凝灰岩の強度と  $n$  の値をまとめた<sup>15-18,23,26-29)</sup>。表 3-4 に示す河津凝灰岩では、強度、 $n$  の値とも気乾状態よりも湿潤状態の方が小さかった。気乾状態での結果を見ると、強度は土岐花崗岩の 1/5 以下であったが、 $n$  の値は土岐花崗岩よりも大きかった。表 3-5 に示す田下凝灰岩は、三城目安山岩の次に多くの条件下でデータが得られている岩石である。三城目安山岩と同様に一軸圧縮強度のばらつきは大きい、 $n$  の値は比較的良く揃っている。また、一軸圧縮試験、一軸引張試験、圧裂引張試験と載荷条件が異なっても、気乾状態の  $n$  はほとんど変化しない点も三城目安山岩の結果と類似している。湿潤状態での  $n$  の値は気乾状態での値の 1/2 程度であった。表 3-6 に示す大谷凝灰岩は、気乾状態と湿潤状態での  $n$  の値の違いが最も大きく、湿潤状態の  $n$  の値は気乾状態の 1/2 以下であった。

表 3-4 河津凝灰岩の強度と  $n$ (一軸圧縮強度は載荷速度  $10^{-5}$ /s での値)

| 試験環境 | 試験方法   | 文献                  | 強度 (MPa) | $n$ |
|------|--------|---------------------|----------|-----|
| 気乾状態 | 一軸圧縮試験 | 大久保他 <sup>15)</sup> | 32       | 58  |
|      |        | 大久保他 <sup>15)</sup> | 32       | 59  |
|      |        | 何他 <sup>17)</sup>   | 32       | 66  |
|      |        | 大久保他 <sup>18)</sup> | 33       | 66  |
|      |        | 羽柴他 <sup>26)</sup>  | –        | 53  |
| 湿潤状態 | 一軸圧縮試験 | 大久保他 <sup>18)</sup> | 23       | 42  |

表 3-5 田下凝灰岩の強度と  $n$ (一軸圧縮強度は載荷速度  $10^{-5}$ /s での値、一軸引張強度は載荷速度  $10^{-6}$ /s での値)

| 試験環境 | 試験方法   | 文献                   | 強度 (MPa) | $n$ |
|------|--------|----------------------|----------|-----|
| 気乾状態 | 一軸圧縮試験 | 大久保他 <sup>18)</sup>  | 15       | 41  |
|      |        | 大久保・秋 <sup>27)</sup> | 18       | 53  |
|      |        | 羽柴他 <sup>16)</sup>   | 22       | 51  |
|      |        | 羽柴他 <sup>28)</sup>   | 19       | 41  |
|      | 一軸引張試験 | 福井他 <sup>23)</sup>   | 1.2      | 46  |
|      | 圧裂引張試験 | 秋他 <sup>29)</sup>    | –        | 45  |
| 湿潤状態 | 一軸圧縮試験 | 大久保他 <sup>18)</sup>  | 8        | 22  |

表 3-6 大谷凝灰岩の強度と  $n$ (一軸圧縮強度は載荷速度  $10^{-5}$ /s での値)

| 試験環境 | 試験方法   | 文献                   | 強度 (MPa) | $n$ |
|------|--------|----------------------|----------|-----|
| 気乾状態 | 一軸圧縮試験 | 大久保他 <sup>18)</sup>  | 11       | 36  |
|      |        | 大久保・秋 <sup>27)</sup> | 13       | 43  |
| 湿潤状態 | 一軸圧縮試験 | 大久保他 <sup>18)</sup>  | 5        | 16  |

表 3-7～表 3-9 には、3 種類の砂岩の強度と  $n$  の値をまとめた<sup>15,16,30)</sup>。表 3-7 に示す和泉砂岩は、強度、 $n$  の値とも土岐花崗岩よりも大きかった。来待砂岩と多胡砂岩を比較すると、一軸圧縮強度は来待砂岩の方が少し大きい、 $n$  の値は多胡砂岩の方がかなり大きかった。

表 3-7 和泉砂岩の強度と  $n$   
(一軸圧縮強度は載荷速度  $10^{-5}$ /s での値)

| 試験環境 | 試験方法   | 文献                  | 強度 (MPa) | $n$ |
|------|--------|---------------------|----------|-----|
| 気乾状態 | 一軸圧縮試験 | 大久保他 <sup>15)</sup> | 200      | 61  |
|      |        | 大久保他 <sup>15)</sup> | 200      | 56  |

表 3-8 来待砂岩の強度と  $n$   
(一軸圧縮強度は載荷速度  $10^{-5}$ /s での値)

| 試験環境 | 試験方法   | 文献                 | 強度 (MPa) | $n$ |
|------|--------|--------------------|----------|-----|
| 気乾状態 | 一軸圧縮試験 | 羽柴他 <sup>16)</sup> | 40       | 42  |

表 3-9 多胡砂岩の強度と  $n$   
(一軸圧縮強度は載荷速度  $10^{-5}$ /s での値)

| 試験環境 | 試験方法   | 文献                 | 強度 (MPa) | $n$ |
|------|--------|--------------------|----------|-----|
| 気乾状態 | 一軸圧縮試験 | 福井他 <sup>30)</sup> | 33       | 72  |



表 3-10 に秋吉大理石の強度と  $n$  の値を示す<sup>15,16)</sup>。 $n$  の値は大きく多胡砂岩と同程度であった。表 3-11 には、横浜市内の土被り約 50m の地点から採取した土丹の強度と  $n$  の値を示す<sup>31)</sup>。湿潤状態の強度は大谷凝灰岩と同程度であったが、 $n$  の値は大谷凝灰岩の約 2 倍であった。表 3-12 には、中国北京市西方約 26km の九龍山麓に位置する門頭溝炭鉱の、土被り約 350m の地点から採取した石炭の強度と  $n$  の値を示す<sup>32)</sup>。採取した石炭には、成層面のほかに、成層面とほぼ直交する主炭理と斜めに傾斜した従炭理が観察された。そこで、直交する 3 方向からボーリングを行い採取した試験片を用いて実施した試験の結果を示した。一軸圧縮試験、一軸引張試験ともに、載荷方向により強度に大きな違いが見られたが、 $n$  の値にはそれほど大きな違いは見られなかった。また、一軸圧縮応力下と一軸引張応力下での  $n$  の値も似た値であった。石炭の  $n$  の値は、これまでに得られている  $n$  の中で最も大きく、土岐花崗岩の 2~3 倍であった。

表 3-10 秋吉大理石の強度と  $n$ (一軸圧縮強度は載荷速度  $10^{-5}$ /s での値)

| 試験環境 | 試験方法   | 文献                  | 強度 (MPa) | $n$ |
|------|--------|---------------------|----------|-----|
| 気乾状態 | 一軸圧縮試験 | 大久保他 <sup>15)</sup> | 120      | 64  |
|      |        | 大久保他 <sup>15)</sup> | 120      | 73  |
|      |        | 羽柴他 <sup>16)</sup>  | 97       | 67  |

表 3-11 土丹の強度と  $n$ (一軸圧縮強度は載荷速度  $10^{-5}$ /s での値)

| 試験環境 | 試験方法   | 文献                  | 強度 (MPa) | $n$ |
|------|--------|---------------------|----------|-----|
| 湿潤状態 | 一軸圧縮試験 | 大久保他 <sup>31)</sup> | 4.2      | 30  |

表 3-12 石炭の強度と  $n$ (一軸圧縮強度は載荷速度  $10^{-5}$ /s での値)

| 試験環境 | 試験方法   | 文献                  | 強度 (MPa) | $n$ | 備考       |
|------|--------|---------------------|----------|-----|----------|
| 気乾状態 | 一軸圧縮試験 | 大久保他 <sup>32)</sup> | 50       | 140 | 載荷方向が異なる |
|      |        |                     | 25       | 150 |          |
|      |        |                     | 22       | 120 |          |
|      | 一軸引張試験 | 大久保他 <sup>32)</sup> | 0.4      | 100 | 載荷方向が異なる |
|      |        |                     | 1.0      | 140 |          |
|      |        |                     | 0.6      | 100 |          |

表 3-13 には、これまでに得られた気乾状態における周圧下での強度（最大差応力）と  $n$  の値をまとめた<sup>16,17,19,21,28)</sup>。なお、強度は載荷速度  $10^{-5}/s$  での値であるが、その載荷速度での強度が求められていない場合は（3-3）式を用いて換算した。周圧下での試験は時間と手間がかかるため、一軸圧縮応力下に比べると得られている結果が少ないが、いずれの岩石でも周圧の増加とともに、強度と  $n$  の値も増加していることがわかる。

表 3-13 気乾状態における周圧下での強度と  $n$   
（強度は載荷速度  $10^{-5}/s$  での値で差応力）

| 岩石     | 文献                 | 周圧 (MPa) | 強度 (MPa) | $n$ |
|--------|--------------------|----------|----------|-----|
| 稲田花崗岩  | 何他 <sup>17)</sup>  | 0        | 183      | 42  |
|        |                    | 5        | 265      | 65  |
|        |                    | 10       | 319      | 74  |
|        |                    | 20       | 408      | 98  |
|        |                    | 40       | 539      | 104 |
| 三城目安山岩 | 山口他 <sup>19)</sup> | 0        | 103      | 36  |
|        |                    | 10       | 160      | 52  |
|        |                    | 20       | 200      | 70  |
|        |                    | 39       | 246      | 71  |
|        | 何他 <sup>17)</sup>  | 0        | 93       | 38  |
|        |                    | 5        | 131      | 50  |
|        |                    | 10       | 155      | 66  |
|        |                    | 20       | 198      | 73  |
|        |                    | 40       | 248      | 84  |
|        | 趙他 <sup>21)</sup>  | 0        | 80       | 36  |
|        |                    | 5        | 109      | 52  |
|        |                    | 10       | 125      | 63  |
|        |                    | 20       | 154      | 73  |
|        |                    | 40       | 191      | 85  |
| 田下凝灰岩  | 羽柴他 <sup>16)</sup> | 0        | 22       | 51  |
|        |                    | 2        | 29       | 56  |
|        |                    | 8        | 38       | 57  |
|        | 羽柴他 <sup>28)</sup> | 0        | 19       | 41  |
|        |                    | 2        | 26       | 52  |
|        |                    | 8        | 32       | 49  |

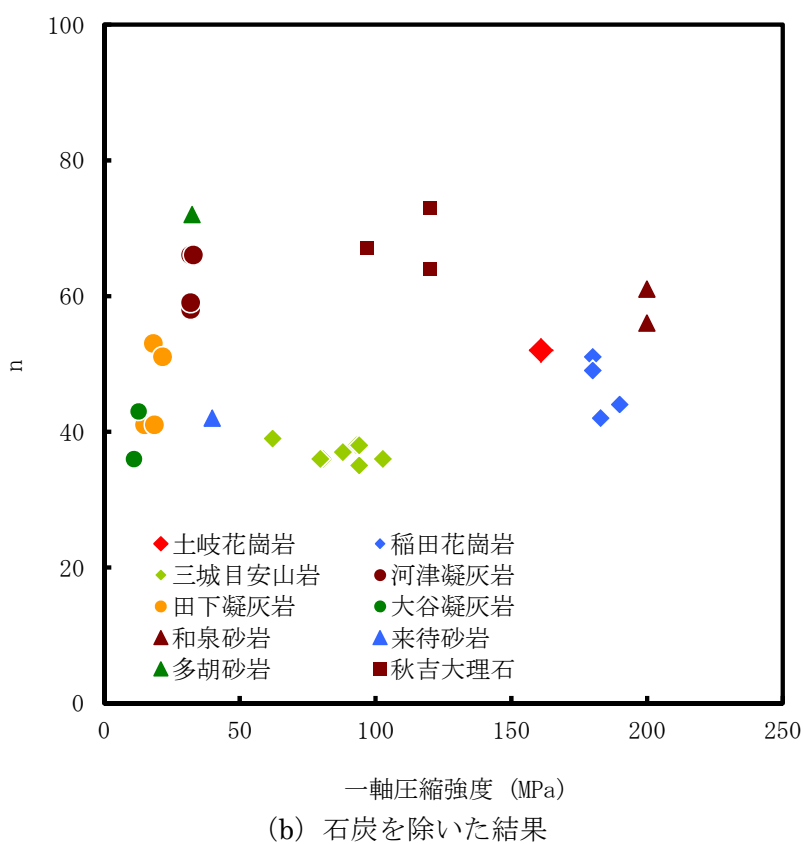
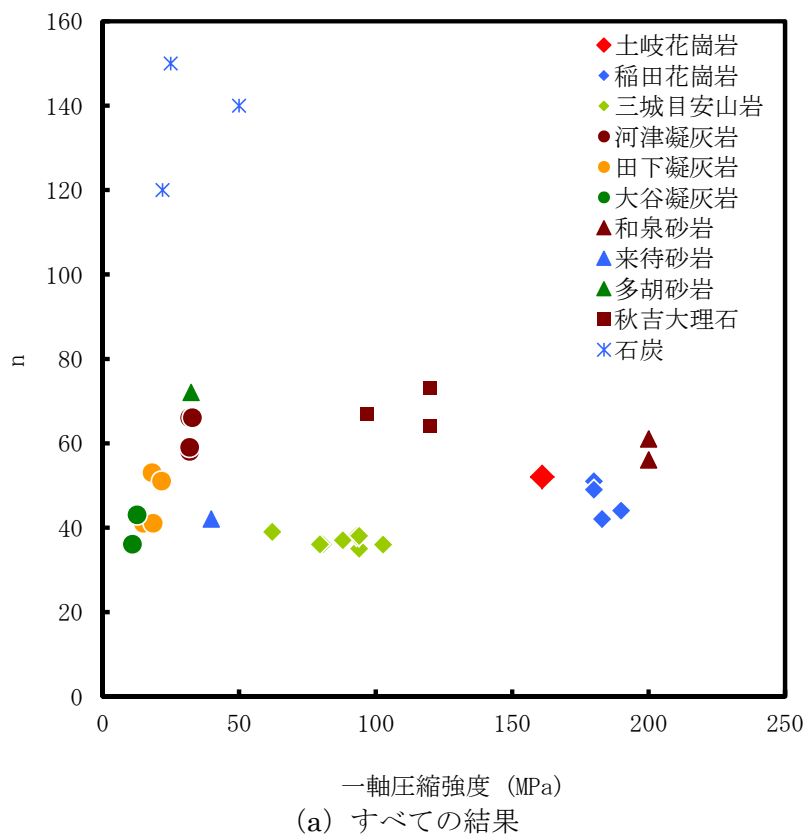
次に、岩種や試験条件による  $n$  の違いを比較するため、図を用いて検討を行う。図 3-1 に気乾状態での一軸圧縮強度と  $n$  の関係を示す。図 3-1(a)によると、岩種によって一軸圧縮強度は 10～200MPa、 $n$  の値は 30～150 の範囲内に大きくばらついている。他の岩石と比べて石炭の  $n$  の値が大きいため、図 3-1(b)に石炭を除いた結果を示す。図より、 $n$  の値は 30～80 の範囲内におさまっているが、一軸圧縮強度との相関は見られない。土岐花崗岩は気乾状態での一軸圧縮強度は大きい方に分類されるが、 $n$  の値は中間的な値である。同じ岩種で比較すると、土岐花崗岩と稲田花崗岩は一軸圧縮強度、 $n$  の値ともそれほど大きな違いは見られない。3 種類の凝灰岩（河津凝灰岩、田下凝灰岩、大谷凝灰岩）に関しては、一軸圧縮強度はそれほど大きな差はないが、 $n$  の値には大きな違いが見られる。3 種類の砂岩（和泉砂岩、来待砂岩、多胡砂岩）に関しては、一軸圧縮強度、 $n$  の値ともかなり異なっている。これらの結果より、 $n$  の値を一軸圧縮強度から推定することは難しいものの、岩種によっては、同一岩種（ここでは、土岐花崗岩と稲田花崗岩）で  $n$  が似た値を取る場合もあることがわかった。

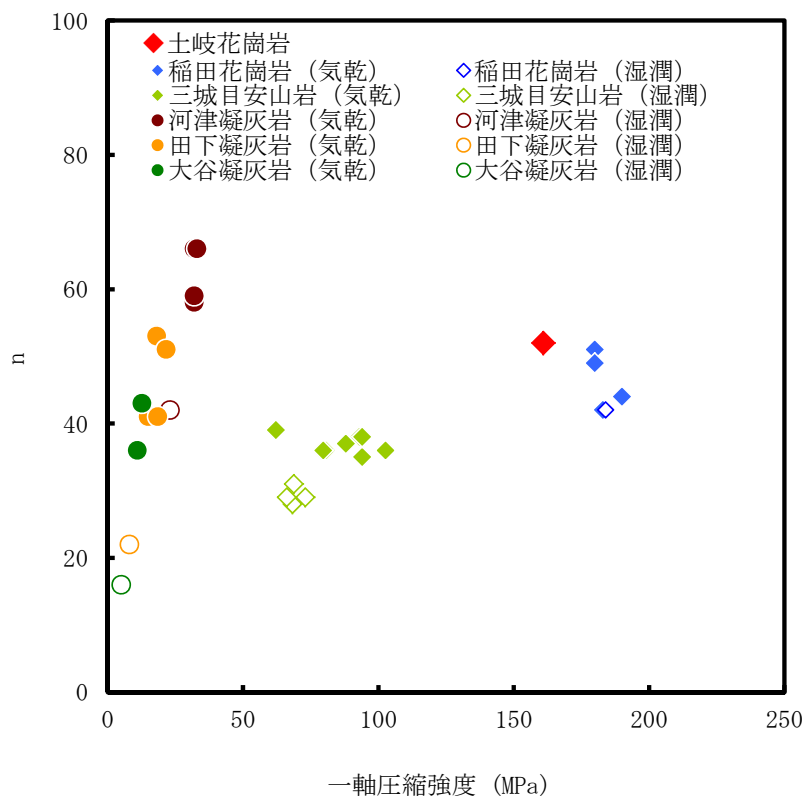
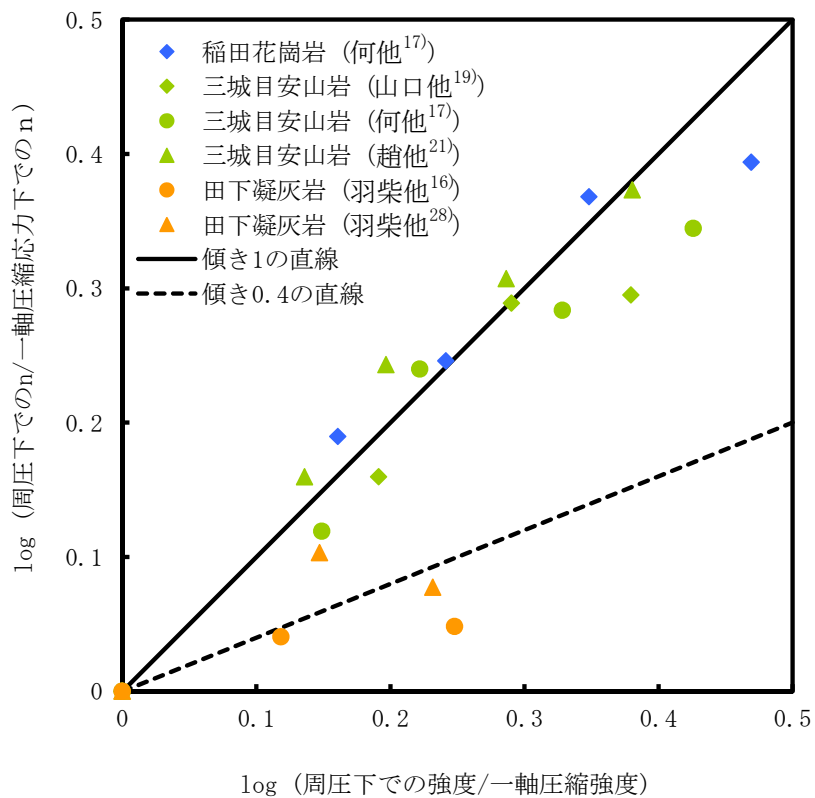
図 3-2 に気乾状態と湿潤状態での一軸圧縮強度と  $n$  の関係を示す。湿潤状態での結果も含めると、土岐花崗岩の  $n$  の値は大きい方（時間依存性の程度が小さい方）に分類されることがわかる。同じ形で色を塗った記号（気乾状態）と色を塗っていない記号（湿潤状態）とを比較すると、三城目安山岩、河津凝灰岩、田下凝灰岩、大谷凝灰岩では、湿潤状態での結果が気乾状態の結果の概ね左下に位置していることがわかる。すなわち、湿潤状態では一軸圧縮強度、 $n$  の値とも気乾状態よりも小さくなっている。特に、田下凝灰岩と大谷凝灰岩では  $n$  の減少が大きかった。一方、稲田花崗岩では気乾状態と湿潤状態とで一軸圧縮強度も  $n$  の値も大きな差は見られなかった。土岐花崗岩についても、気乾状態と湿潤状態とで一軸圧縮強度や  $n$  の値が大きくは変化しない可能性があるが、湿潤状態での物性値はある程度取得しておく必要があると考える。

次に周圧下での結果について述べる。図 3-3 には横軸を（周圧下での強度／一軸圧縮強度）の対数、縦軸を（周圧下での  $n$ ／一軸圧縮応力下での  $n$ ）の対数として両者の関係を示す。図には傾き 1 と 0.4 の直線を、それぞれ実線と破線で示した。多少のばらつきはあるものの、稲田花崗岩と三城目安山岩の結果は似た傾向を示しており、傾き 1 の直線でほぼ近似できることがわかる。一方、田下凝灰岩の結果はばらつきが大きいものの、傾き 0.4 の直線の周辺に概ね位置していることがわかる。すなわち、周圧下での強度  $\sigma_f$  と  $n$  の関係は次式で近似できる。

$$\frac{n}{n_0} = \left( \frac{\sigma_f}{\sigma_c} \right)^\alpha \quad (3-13)$$

ここで、 $\sigma_c$  と  $n_0$  はそれぞれ一軸圧縮応力下での強度と  $n$  である。 $\alpha$  は図 3-3 に示した直線の傾きを表し、近似的に稲田花崗岩と三城目安山岩では  $\alpha=1$ 、田下凝灰岩では  $\alpha=0.4$  となる。数値解析により地下構造物の周辺岩盤の時間依存性挙動を計算する際には、 $\alpha$  が小さいほど周圧下での  $n$  の値が小さくなるので、変形が生じやすくなる可能性がある。

図 3-1 気乾状態での一軸圧縮強度と  $n$  の関係

図 3-2 気乾状態と湿潤状態での一軸圧縮強度と  $n$  の関係図 3-3 周圧下での強度と  $n$  の関係

### 3.4 まとめ

本章では、まず、岩石の時間依存性の程度を表す  $n$  の値の意味を示すため、強度の載荷速度依存性とクリープ寿命の応力依存性との関係および時間依存性、強度とクリープ寿命の分布特性、寸法効果の相互関係について論じた。次いで、これまでに取得された  $n$  の値を整理して、土岐花崗岩の強度や  $n$  の値と比較検討した。その結果、土岐花崗岩の一軸圧縮強度は稲田花崗岩よりも若干小さいものの、 $n$  の値はこれまでに得られている稲田花崗岩の  $n$  の値の範囲内に入っていることがわかった。また、気乾状態に限れば、土岐花崗岩の  $n$  は岩石の中間的な値であること、湿潤状態も含めれば、土岐花崗岩の  $n$  の値は大きい方（時間依存性の程度が小さい方）に分類されることも確認された。周圧が  $n$  に及ぼす影響は岩種によって異なるが、土岐花崗岩と特性が比較的似ている稲田花崗岩では、周圧下では  $n$  が強度にほぼ比例することがわかった。

土岐花崗岩の力学特性や時間依存性に関してこれまで検討してきたのは、気乾状態における一軸圧縮応力下での挙動であり、水分や周圧の影響に関しては検討の余地が残されている。また、引張応力下やせん断応力下での力学特性や時間依存性に関しても知られていることは少ない。今後、研究坑道で原位置試験を行うにあたり、必要に応じてこれらの情報を取得する必要があるものの、力学特性や時間依存性に関する試験は時間や手間がかかる場合が多いのが現状である。そこで、土岐花崗岩の力学特性や時間依存性について、今後取得すべき情報の優先順位について検討した結果を以下に示す。

表 3-14 今後取得すべき情報の優先順位

|        | 気乾 | 湿潤 |
|--------|----|----|
| 一軸圧縮試験 | —  | 1  |
| 三軸圧縮試験 | 1  | 3  |
| 一軸引張試験 | 2  | 2  |
| せん断試験  | 3  | 3  |

表 3-14 の数字は、今後取得すべき情報の優先順位である。前節で述べたように、岩石によっては、湿潤状態での一軸圧縮強度や  $n$  の値が気乾状態よりも小さくなる場合がある。そこで、まず、湿潤状態における一軸圧縮応力下での力学特性と時間依存性を把握する必要があると考える。数値解析により地下構造物の周辺岩盤の時間依存性挙動を計算する際には、周圧下での強度や  $n$  の値を知る必要があり、気乾状態・周圧下での力学特性と時間依存性の把握も優先順位 1 とした。前節では、多くの岩石で一軸圧縮試験と一軸引張試験もしくは圧裂引張試験での  $n$  がほぼ一致することを示した。土岐花崗岩でも同様のことがいえるかどうかを確認することを優先順位 2 とした。ただし、湿潤状態での一軸引張試験はこれまでにほとんど行われていないので、試験装置や試験方法についても検討する必要がある。湿潤状態における周圧下での特性や、気乾および湿潤状態におけるせん断応力下での特性は、他の岩石でもほとんど知られていないが、これらの結果は先に述べた優先順位 1 と 2 の結果から類推できる。そこで、土岐花崗岩についても必要に応じて検討するという事で優先順位 3 とした。

#### 4. 岩盤の破壊基準の検討

地下深部における長期間の空洞安定性評価においては、長期にわたる岩盤の評価に適用できる破壊基準が必要である。多くの岩石は粘弾性（時間依存性）を示すため、強度は載荷速度によって変化する。したがって、厳密な意味での破壊基準は時間依存性を考慮したものとなる。しかしながら、これまでに岩石・岩盤を対象とした数多くの破壊基準が提案されてきたが、時間の影響を考慮したものは少ないのが現状である。このため本章では、岩盤の破壊基準の設定に関する検討として、岩石強度の載荷速度依存性に関する室内試験結果を利用して、十分長い時間をかけて岩石を壊したときの強度（長期強度）、あるいは、いつまで経っても破壊に至らない応力条件について検討する。

##### 4.1 岩石強度の載荷速度依存性に関する過去の研究

これまで行われてきた岩石の載荷速度依存性に関する研究結果のうち、数多くの載荷条件下で試験が行われている三城目安山岩の結果を紹介する。

西松他<sup>33)</sup>は、MTS社のサーボ試験機を用いて、大谷凝灰岩、三城目安山岩、秋吉大理石の一軸圧縮試験を行った。制御方式は、軸歪速度一定と周歪速度一定の2方式である。その結果、三城目安山岩においては載荷速度による強度の増加を確認した。大谷凝灰岩と秋吉大理石では、試験結果がばらついて明瞭な結論を得ることができなかった。

この研究結果より、三城目安山岩は比較的扱いやすい岩石であるとの知見が得られたため、山口他<sup>19)</sup>は三城目安山岩について詳細な検討を行った。直径2.5cmで高さ5cmの円柱試験片を用い、歪速度を $10^{-7}$ ~ $10^{-3}$ /sまで変えて実験を行ったところ、歪速度が10倍となると強度が6.4%ずつ上昇することがわかった。なお、西松他<sup>35)</sup>の結果では強度が大きくばらついたため、試験片中の湿分と試験室の湿度管理を厳密に行ったところ、強度のばらつきが減少した。さらに、周庄下（最大周圧40MPa）で圧縮試験を行った結果、周庄下でも載荷速度が増大すると強度が上昇することがわかった。周圧5、10、20、40MPaで、載荷速度が10倍となったときの強度の増加率は、それぞれ6.4%、4.4%、3.3%、3.3%であった。周圧が増大すると、強度の増加率は減少するが、載荷速度が10倍となったときの強度の増加（値そのもの）はほとんど変わらないとの結果であった。ただし、周庄下での結果は大きくばらついた。

何他<sup>17)</sup>は、山口他<sup>19)</sup>を引き継いで周庄下での載荷速度依存性を調べた。用いた岩石は、三城目安山岩、稲田花南岩、河津凝灰岩である。その結果、周圧が増大すると、載荷速度が10倍となったときの強度の増加率は減少するが、強度の増加はほとんど変わらないとの結論を得た。さらに、大久保他<sup>18)</sup>は、湿潤状態での載荷速度依存性についても検討し、ほぼ同様の結果を得た。

引張強度の載荷速度依存性についての知見は少ない。そこで、大久保他<sup>24)</sup>は、三城目安山岩を用いた3点曲げ試験を行った。試験片は、22.5cm×5cm×5cmの四角柱で、載荷点の変位速度の範囲は $10^{-5}$ ~ $10^{-1}$ cm/sであった。その結果、曲げ強度は載荷速度が10倍となるごとに6.8%ずつ上昇することがわかった。また、あらかじめ長さ1cmの亀裂を入れた試験片を用いて実験を行い、応力拡大係数の最大値Kmaxの載荷速度依存性を検討した。その結果、載荷点の変位速度 $10^{-5}$ ~ $10^{-1}$ cm/sの範囲で、載荷速度が10倍となるごとにKmaxが6.2%ずつ上昇することがわかった。さらに、大久保他<sup>22)</sup>は、三城目安山岩を使用して、一軸引張試験と圧裂引張試験を行った。その結果、載荷速度が10倍になったときの強度の増加率は、一軸引張強度、圧裂引張強度、曲げ強度、応力拡大係数Kmaxとも6.5%前後で差異が認められないことがわかった。

これまでに、一軸圧縮強度の載荷速度依存性については、多くの研究結果が発表されているが、

周圧下での圧縮強度や引張強度については、知見が乏しい。これまでの研究においてすべての結果が揃っているのは三城目安山岩のみである。そこで、三城目安山岩についてまとめると次のようになる。

- 1) 一軸圧縮強度および一軸引張強度は、載荷速度が 10 倍となると 6.5%増加する。
- 2) 一軸圧縮状態も含めて、周圧下では載荷速度が 10 倍となると 6MPa ずつ強度が増加する。

#### 4.2 時間依存性を考慮した破壊基準

第 3 章と同様に、破壊の進行する速度が応力 $\sigma$ の関数 $g(\sigma)$ に比例するとし、 $g(\sigma)$ としては解析的な検討が容易な次の関数形を採用する。

$$g(\sigma) = \sigma^n \quad (4-1)$$

$g(\sigma)$ の積分値 $\tau$ が一定値 $T$ に達すると破壊が生じるとすると、応力速度 $C$ の強度試験では次式が成り立つ。

$$\sigma_f = \{T(n+1)C\}^{\frac{1}{n+1}} \quad (4-2)$$

ここで、 $\sigma_f$ は一軸応力下での強度もしくは三軸応力下での強度（差応力）である。ピーク強度に到るまでの時間を $t_f (= \sigma_f/C)$ とすると次式のようになる。

$$\sigma_f = \left\{ \frac{T(n+1)}{t_f} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (4-3)$$

クリープ試験（ $\sigma = \sigma_{cr}$ ）でのクリープ寿命 $t_{cr}$ は次式となる。

$$t_{cr} = \frac{T}{\sigma_{cr}^n} \quad (4-4)$$

以下では、実験開始からピーク強度までの所要時間 $t_f$ が 100s のときを基準とする。そのときの強度を $\sigma_0$ とすると、(4-3) 式と (4-4) 式はそれぞれ次のように書き換えられる。

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_0} = \left( \frac{100}{t_f} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4-5)$$

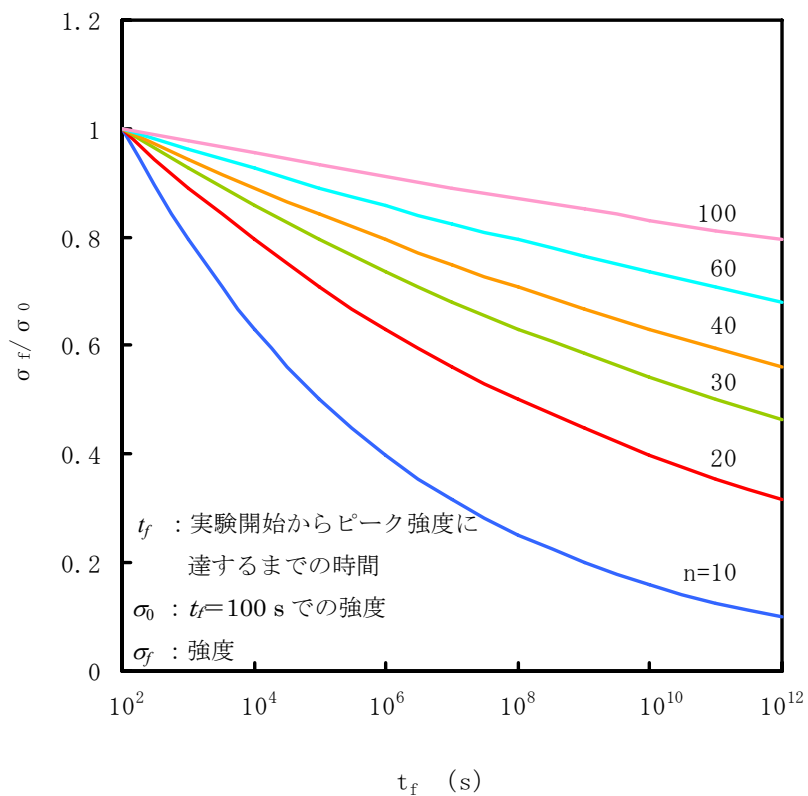
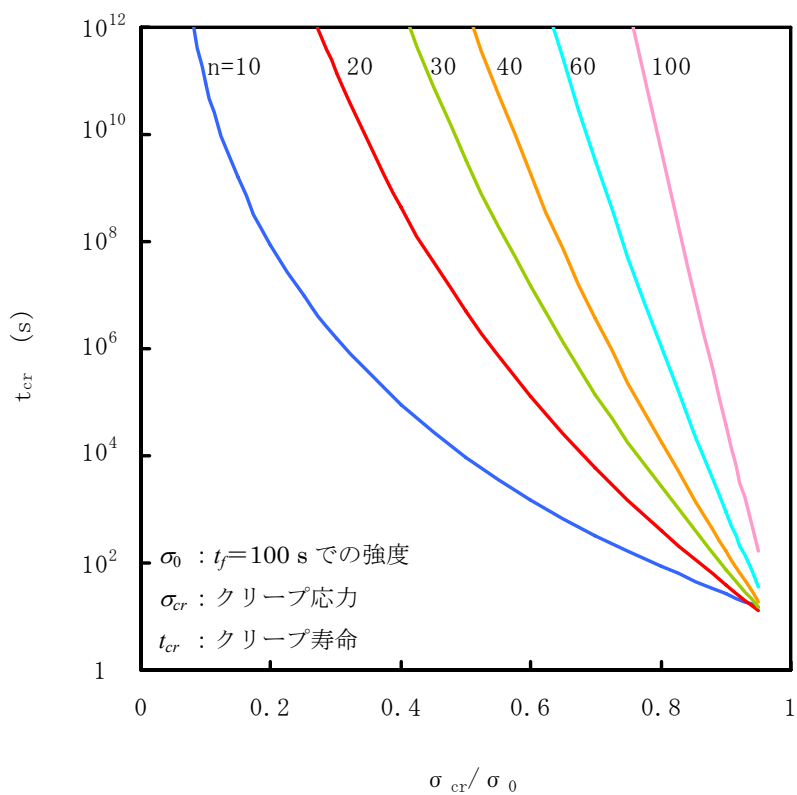
$$t_{cr} = \frac{100}{n+1} \left( \frac{\sigma_0}{\sigma_{cr}} \right)^n \quad (4-6)$$



第3章では、土岐花崗岩および、その他の岩石の試験結果を次式に代入して、強度の載荷速度依存性の程度を表す  $n$  の値を求めた。

$$\sigma_f \propto C^{\frac{1}{n+1}} \quad (4-7)$$

その結果、一軸圧縮応力下ではほとんどの岩石の  $n$  が 10 から 100 の間に入ることがわかった。そこで、 $n$  を 10 から 100 まで変化させた際の、(4-5) 式で計算される  $t_f$  と  $\sigma_f/\sigma_0$  の関係を図 4-1 に示す。実験開始からピーク強度までの所要時間が 100s のときの強度を  $\sigma_0$  にしているので、 $t_f=100\text{s}$  では  $n$  によらず  $\sigma_f/\sigma_0$  は 1 となる。 $t_f$  が増加するほど強度が低下していき、 $n=10$  の場合、 $t_f=10^{12}\text{s}$  (約 3 万年) での強度  $\sigma_f$  は  $\sigma_0$  の 1/10 程度になった。 $n$  が大きいほど  $t_f$  の増加にともなう強度の低下は緩やかになり、例えば  $t_f=10^{12}\text{s}$  での  $\sigma_f/\sigma_0$  は、 $n=40$  で 0.56、 $n=100$  で 0.79 であった。次に、(4-6) 式で計算される  $\sigma_{cr}/\sigma_0$  と  $t_{cr}$  の関係を図 4-2 に示す。図より、同じ  $\sigma_{cr}/\sigma_0$  で比較した場合、 $n$  が大きいほどクリープ寿命が長くなることがわかる。例えば  $\sigma_{cr}/\sigma_0$  が 0.8 の場合、 $n=10$  では  $t_{cr}=85\text{s}$ 、 $n=40$  では  $t_{cr}=18349\text{s}$  (約 5 分)、 $n=100$  では  $t_{cr}=5 \times 10^9\text{s}$  (約 160 年) となった。

図 4-1 (4-5) 式から計算される  $t_f$  と  $\sigma_f / \sigma_0$  の関係図 4-2 (4-6) 式から計算される  $\sigma_{cr} / \sigma_0$  と  $t_{cr}$  の関係

過去に岩石・岩盤を対象として提案された破壊基準を表 4-1 に示す<sup>34)</sup>。これらの破壊基準を比較するため、それぞれの破壊基準で一軸圧縮強度 $\sigma_c$ と一軸引張強度 $\sigma_t$ との比である脆性度  $Br$  ( $=\sigma_c/\sigma_t$ ) が 10 となるように定数を決めて、 $\sigma_{\max}/\sigma_c$  と  $\sigma_{\min}/\sigma_c$  の関係を図 4-3 に示した。 $\sigma_{\max}$  と  $\sigma_{\min}$  はそれぞれ最大主応力と最小主応力であり、圧縮を正とした。Bieniawski の破壊基準は脆性度だけからでは定数の値が決まらないため、過去の研究例<sup>35)</sup>を参考にして  $B=4$ 、 $\beta=0.75$  とした。Coulomb の破壊基準は直線、その他の破壊基準は上に凸の曲線であり、同じ  $\sigma_{\min}/\sigma_c$  での  $\sigma_{\max}/\sigma_c$  は、小さい方から Mohr、Janach、Hoek and Brown、Bieniawski、Coulomb の順になっていることがわかる。

表 4-1 過去に提案された岩石・岩盤を対象とした破壊基準

| 破壊基準                                              | 最大主応力と最小主応力の関係                                                                               | 備考                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Coulomb<br>$\tau = c + \mu\sigma_n$               | $\sigma_{\max} = \sigma_c + \sigma_{\min} \tan^2\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{4}\right)$ | $\sigma_c = 2c\left(\sqrt{1+\mu^2} + \mu\right)$<br>$\sigma_t = 2c\left(\sqrt{1+\mu^2} - \mu\right)$<br>$\mu = \tan\phi$ |
| Mohr<br>$\tau^2 = m\sigma_t(\sigma_n + \sigma_t)$ | $\sigma_{\max} = (m\sigma_t + \sigma_{\min}) + 2\sqrt{m\sigma_t^2 + m\sigma_t\sigma_{\min}}$ | $m = Br + 2 - 2\sqrt{Br + 1}$                                                                                            |
| Hoek and Brown                                    | $\sigma_{\max} = \sigma_{\min} + \sqrt{\sigma_c^2 + l\sigma_c\sigma_{\min}}$                 | $\sigma_t = \frac{\sqrt{l^2 + 4} - l}{2}\sigma_c$                                                                        |
| Bieniawski                                        | $\sigma_{\max} = \sigma_c + B\sigma_c^{1-\beta}\sigma_{\min}^\beta$                          | $B, \beta$ : constants                                                                                                   |
| Janach                                            | $\sigma_{\max} = \sigma_c \sqrt{1 + \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_t}}$                         |                                                                                                                          |

$\sigma_{\max}$  : 最大主応力     $\sigma_{\min}$  : 最小主応力     $\sigma_c$  : 一軸圧縮強度     $\sigma_t$  : 一軸引張強度  
 $\tau$  : せん断応力     $\sigma_n$  : 垂直応力     $Br = \sigma_c/\sigma_t$

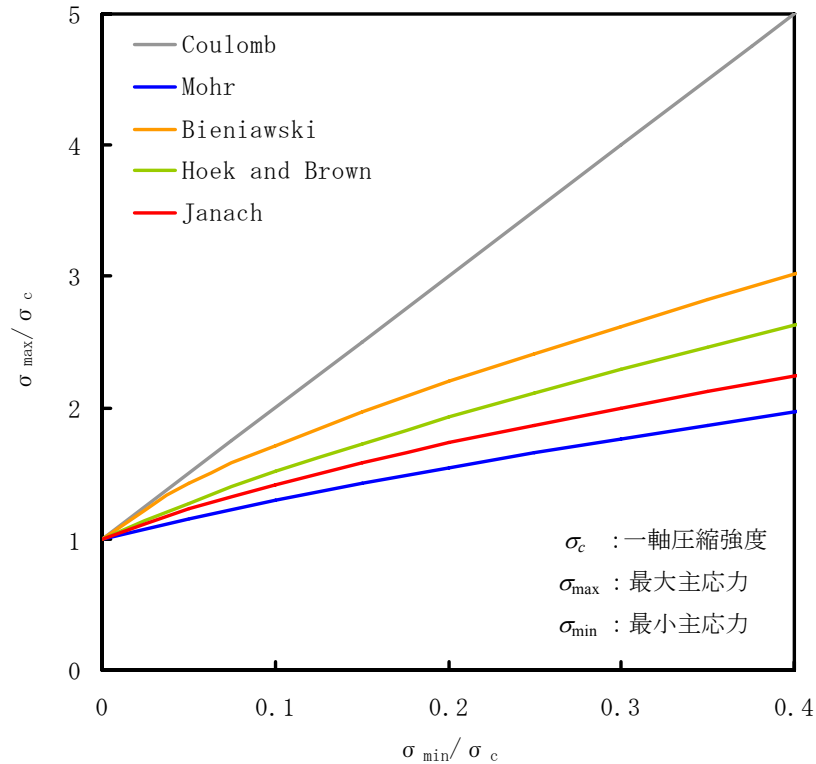


図 4-3 各破壊基準における最大主応力と最小主応力の関係

時間の経過にともなう破壊基準の変化を計算する際に、一軸圧縮強度 $\sigma_c$ が(4-5)式を書き換えた次式に従うと仮定した。

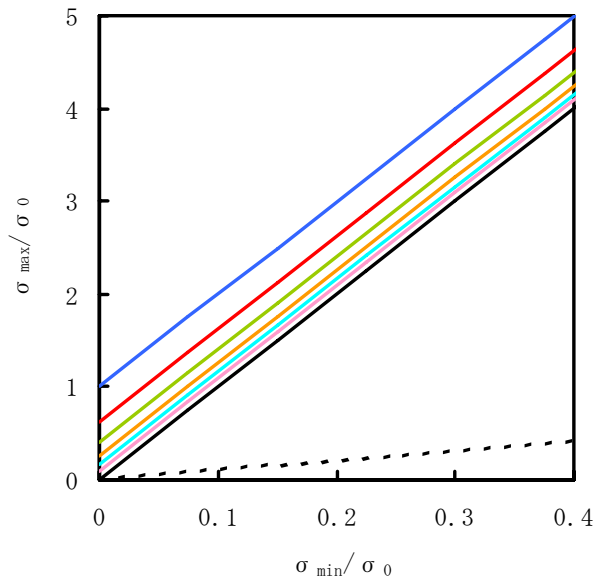
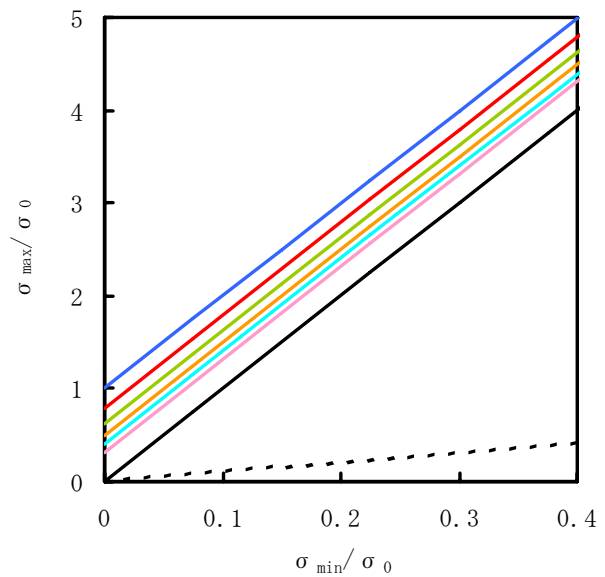
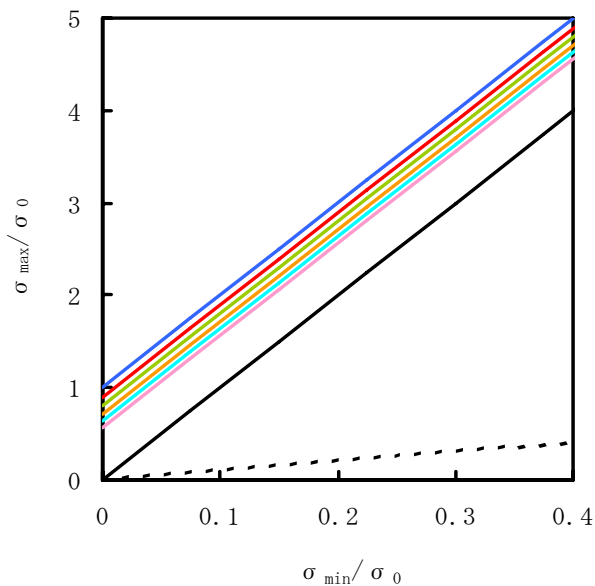
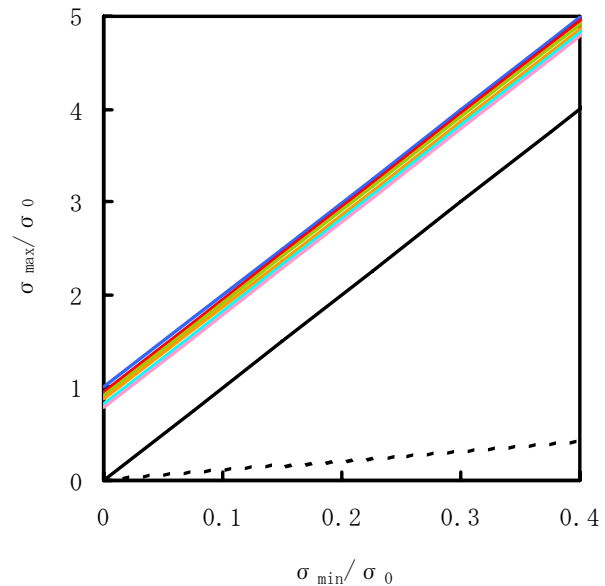
$$\frac{\sigma_c}{\sigma_0} = \left( \frac{100}{t_f} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4-8)$$

このように仮定すると、 $t_f$ の増加にともなって $\sigma_c$ は0に近付くことになる。すなわち、 $\beta < 1$ とした場合の Bieniawski の破壊基準や Janach の破壊基準では、 $t_f$ の増加にともなって $\sigma_{\max}$ も0に近付くことになる。そこで以下では、Coulomb、Mohr、Hoek and Brown の3種類の破壊基準について、時間の経過にともなう変化を計算することにした。その際、各破壊基準の定数は脆性度が10となるように設定した。図4-4から図4-6には、(4-8)式で $n=10, 20, 40, 100$ とした場合の、時間の経過にともなう破壊基準の変化を示す。なお図には、 $t_f=\infty$ とした場合の結果（長期強度）を黒の実線で、静水圧状態を破線で示した。

図4-4に示した Coulomb の破壊基準では、 $t_f$ が大きくなるとグラフは下方向に平行移動した。この結果は、4.1節の最後に述べた“2) 一軸圧縮状態も含めて、周圧下では载荷速度が10倍となると、6MPa ずつ強度が増加する”という試験結果と調和的である。また、 $n$ が大きいほど時間による変化が小さくなることがわかる。式からもわかるように、 $t_f=\infty$ 、すなわち $\sigma_c=0$ となった場合の破壊基準である長期強度は原点を通る直線となる。この太線と静水圧状態を表す破線に挟まれた領域では、いつまで経っても破壊に至らないことになる。

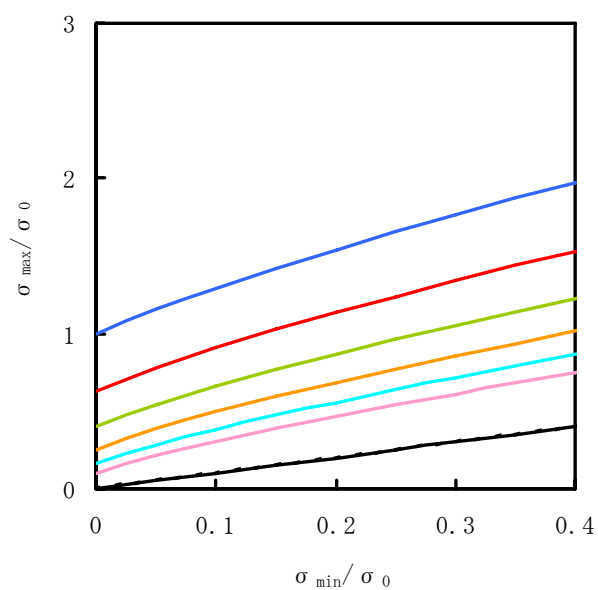
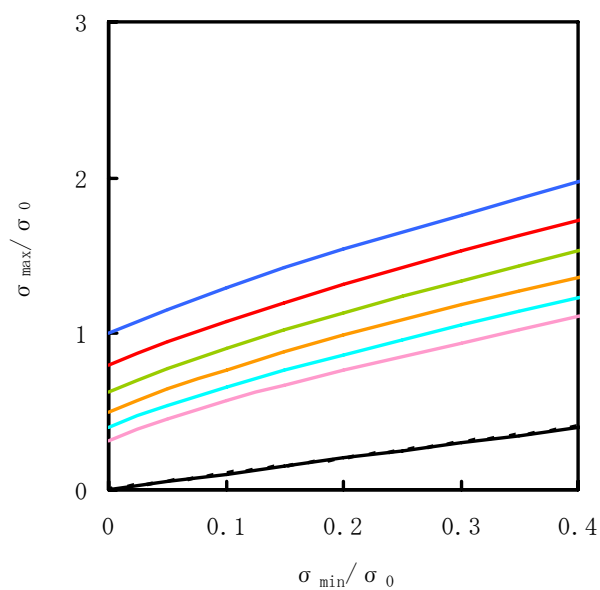
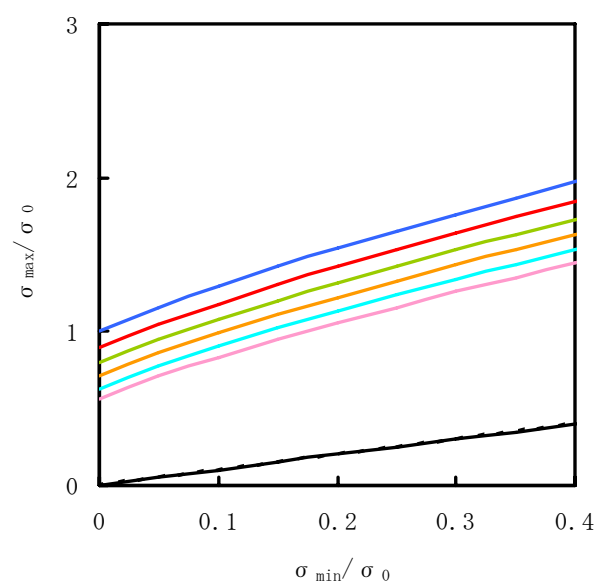
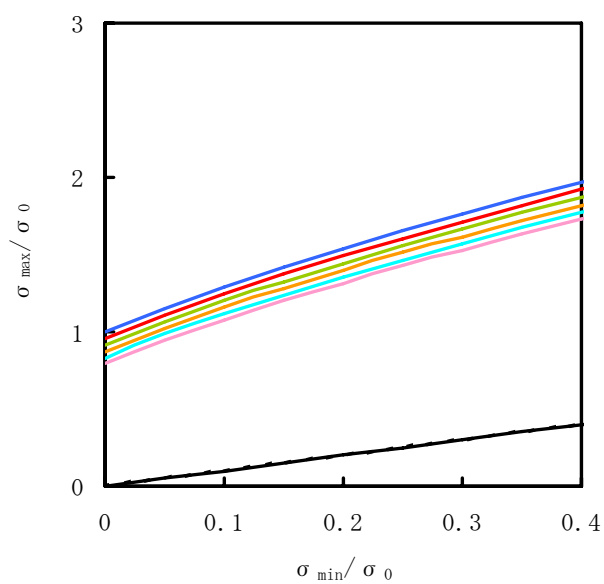
図4-5に示した Mohr の破壊基準や図4-6に示した Hoek and Brown の破壊基準でも、 $t_f$ が大きくなるとグラフは下方向に移動した。 $t_f$ が大きくなるほどグラフの傾きは緩やかになっていくが、傾きの変化は小さくそれぞれのグラフはほぼ平行になっている。Coulomb の破壊基準と同様

に、“2) 一軸圧縮状態も含めて、周圧下では荷重速度が 10 倍となると、6MPa ずつ強度が増加する”という試験結果と調和的である。 $n$  が大きいほど時間による変化が小さくなっていることも Coulomb の破壊基準と同様である。いずれの破壊基準でも、式からもわかるように、長期強度を示す太線は静水圧状態を表す破線と重なる。すなわち、Mohr の破壊基準や Hoek and Brown の破壊基準では、いつまで経っても破壊に至らない領域は存在しないことになる。

(a)  $n=10$ (b)  $n=20$ (c)  $n=40$ (d)  $n=100$ 

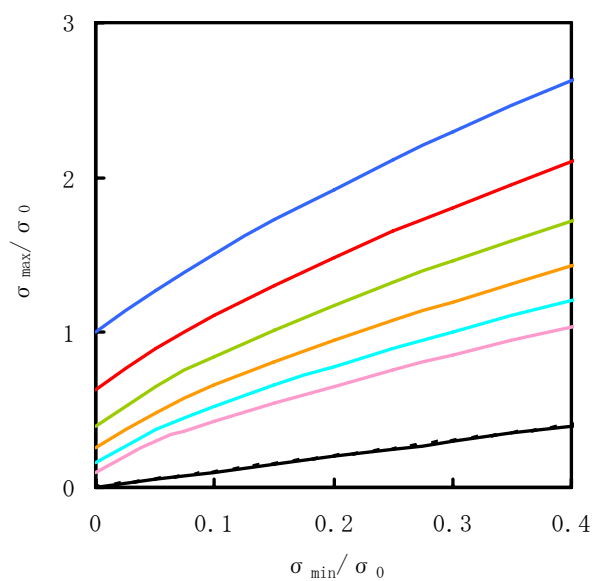
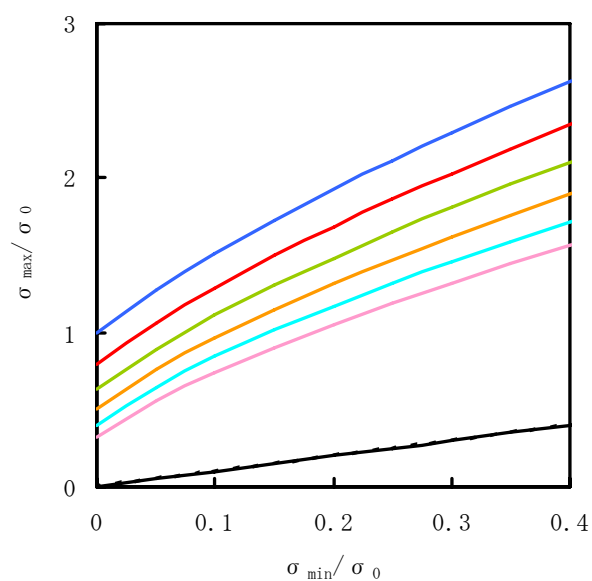
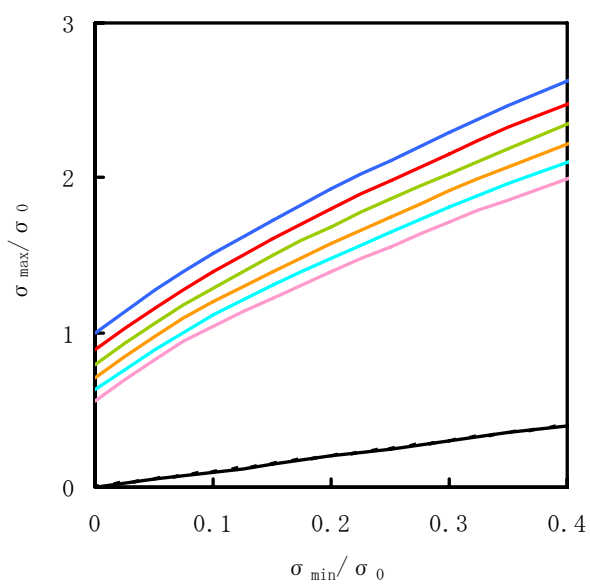
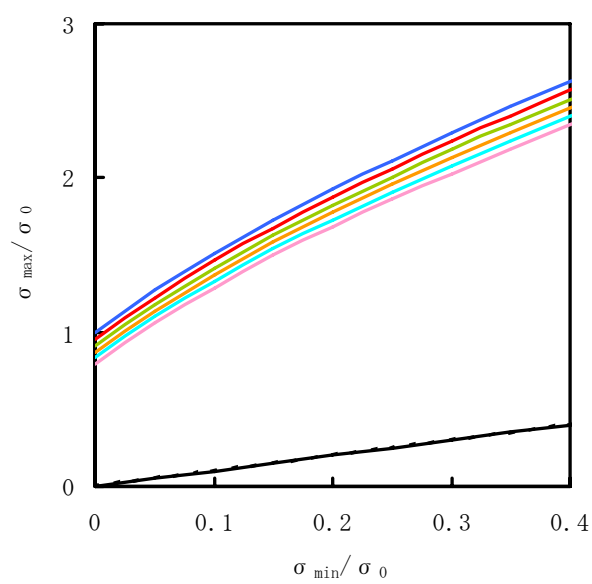
実線：上から  $t_f=10^2$ 、 $10^4$ 、 $10^6$ 、 $10^8$ 、 $10^{10}$ 、 $10^{12}$ s および  $t_f=\infty$ （黒）での計算結果  
破線：静水圧状態

図 4-4 時間の経過に伴う Coulomb の破壊基準の変化

(a)  $n=10$ (b)  $n=20$ (c)  $n=40$ (d)  $n=100$ 

実線：上から  $t_f=10^2$ 、 $10^4$ 、 $10^6$ 、 $10^8$ 、 $10^{10}$ 、 $10^{12}$ s および  $t_f=\infty$ （黒）での計算結果  
 破線：静水圧状態

図 4-5 時間の経過にともなう Mohr の破壊基準の変化

(a)  $n=10$ (b)  $n=20$ (c)  $n=40$ (d)  $n=100$ 

実線：上から  $t_f=10^2$ 、 $10^4$ 、 $10^6$ 、 $10^8$ 、 $10^{10}$ 、 $10^{12}$ s および  $t_f=\infty$ （黒）での計算結果  
 破線：静水圧状態

図 4-6 時間の経過にともなう Hoek and Brown の破壊基準の変化

### 4.3 まとめと今後の課題

本章では、岩盤の破壊基準の設定に関する検討として、岩石強度の載荷速度依存性に関する室内試験結果を利用して、十分長い時間をかけて岩石を壊したときの強度（長期強度）、あるいは、いつまで経っても破壊に至らない応力条件について検討した。すなわち、一軸圧縮強度が載荷速度の  $1/(n+1)$  乗に比例すると仮定したうえで、時間の経過にともなう Coulomb、Mohr、Hoek and Brown の 3 種類の破壊基準の変化を計算した。その結果、いずれの破壊基準においても、二次元主応力線図上でグラフは時間の経過とともに下方方向にほぼ平行移動することがわかった。Coulomb の破壊基準では、長期強度と静水圧状態に挟まれたいつまで経っても破壊には至らない領域が存在すること、Mohr の破壊基準と Hoek and Brown の破壊基準では、そのような領域が存在しないことも確認された。

今後検討すべき課題は以下のとおりである。

1) 強度の載荷速度依存性に関する仮定

(4-1) 式の応力関数を  $\exp(\delta\sigma)$  や  $\sinh(\delta\sigma)$  などに変えて検討する必要がある。

2) 破壊基準の追加

Bieniawski の破壊基準や Janach の破壊基準については、条件（時間、応力状態など）を限定したうえで検討する必要がある。von Mises の破壊基準や Drucker-Prager の破壊基準など、中間主応力の影響を考慮した破壊基準による検討も重要である。

3) 原位置データによる検証

長期強度の存在を実験的に求めることは難しいが、種々の地質現象や地圧測定結果などを用いて、ある程度検証する必要があると考える。

4) 設計・施工への応用

長期間にわたって高い安全性が確保される必要がある地層処分施設や大規模地下空間の設計・施工へ、時間依存性を考慮した破壊基準を適用する方法についての検討が必要である。



## 5. 原位置試験計画策定のための予察的検討

本章では、拡張したコンプライアンス可変型構成方程式を用いた有限要素法により、土岐花崗岩の長期挙動に関する予察的検討を行う。2009 年度に引続いて円形坑道の二次元モデルで計算するが、周圧下での  $n$  の値の変化および岩盤強度のばらつきを考慮した数値計算を行う。最後に、数値解析結果にもとづいて原位置試験計画に関する所見を述べる。

### 5.1 構成方程式

計算には、次式で表される拡張したコンプライアンス可変型構成方程式を用いた。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a_1 \left( \sigma^* \right)^{n_1} \left( \lambda^* - 1 \right)^{-m_1} + a_3 \left( \sigma^* \right)^n \left( \lambda^* \right)^m \quad (5-1)$$

$t$  は時間、 $\lambda^*$  は初期値  $\lambda_0$  ( $=1/\text{ヤング率 } E$ ) で正規化したコンプライアンス ( $=\lambda/\lambda_0$ )、 $\sigma^*$  は破壊限接近度である。 $n_1$  と  $n$  は、それぞれ強度破壊点以前と以降での応力依存性を表す定数であるが、2009 年度の計算<sup>4)</sup>と同様に  $n_1=n$  とする。すなわち、(5-1)式は変数分離形である次式のように表せる。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = \left( \sigma^* \right)^n \left\{ a_1 \left( \lambda^* - 1 \right)^{-m_1} + a_3 \left( \lambda^* \right)^m \right\} \quad (5-2)$$

(5-2) 式を変形すると次式のようにになる。

$$\frac{d\lambda^*}{a_1 \left( \lambda^* - 1 \right)^{-m_1} + a_3 \left( \lambda^* \right)^m} = \left( \sigma^* \right)^n dt \quad (5-3)$$

(5-3) 式の積分値を  $\tau$  とすれば 3.1 節および 3.2 節と同じ議論ができる。すなわち、拡張したコンプライアンス可変型構成方程式では、破壊の進行する速度が  $(\sigma^*)^n$  に比例し、 $\lambda^*$  は破壊の進行の程度を表す。また、強度は載荷速度の  $1/(n+1)$  乗に比例し、クリープ寿命はクリープ応力の  $n$  乗に反比例する。

周圧下での  $n$  は、再掲する (3-13) 式に従って変化すると仮定する。

$$n = \left( \frac{\sigma_f}{\sigma_c} \right)^\alpha n_0 \quad (5-4)$$

ここで、 $\sigma_f$  は周圧下での強度（差応力）、 $\sigma_c$  は一軸圧縮強度、 $n_0$  は一軸応力下での  $n$  の値である。2009 年度の計算では  $\alpha=1$  としたが、2010 年度は  $\alpha$  の値を変化させて計算を行った。

ポアソン比  $\nu$  は次式に従って変化すると仮定した。

$$\nu = 0.5 - \frac{0.5 - \nu_0}{\lambda^*} \quad (5-5)$$

ここで、 $\nu_0$ はポアソン比の初期値である。この仮定は体積弾性率を一定にしたことと同じである。  
破壊条件として、2009年度の計算と同様に Janach<sup>36)</sup>の提案した次式を採用した。

$$\sigma_{\max} = \sigma_c \sqrt{1 + \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_t}} - \sigma_{\min} \quad (5-6)$$

圧縮応力を正として、 $\sigma_{\max}$ と $\sigma_{\min}$ は最大と最小主応力、 $\sigma_t$ は一軸引張強度である。この式での破壊限接近度 $\sigma^*$ は次式となる<sup>37)</sup>。なお、 $\max(x, y)$ とは $x$ と $y$ の大きい方の値である。

$$1 + \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_t} \leq 0 \text{ では、 } \sigma^* = -\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_t} \quad (5-7)$$

$$1 + \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_t} > 0 \text{ では、 } \sigma^* = \max \left( \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_c \sqrt{1 + \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_t}} - \sigma_{\min}}, -\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_t} \right) \quad (5-8)$$

## 5.2 岩盤強度のばらつき

材料強度のばらつきを表す確率分布としてワイブル分布が広く用いられている<sup>38)</sup>。ワイブル分布の累積分布関数 $F(x)$ は次式で表される。

$$F(x) = 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{x}{A} \right)^B \right\} \quad (5-9)$$

$A$ は尺度母数、 $B$ は形状母数である。平均値、標準偏差、変動係数はそれぞれ次式で計算される。

$$\text{平均値} : A \Gamma \left( 1 + \frac{1}{B} \right) \quad (5-10)$$

$$\text{標準偏差} : A \sqrt{\Gamma \left( 1 + \frac{2}{B} \right) - \Gamma^2 \left( 1 + \frac{1}{B} \right)} \quad (5-11)$$

$$\text{変動係数} : \frac{\sqrt{\Gamma \left( 1 + \frac{2}{B} \right) - \Gamma^2 \left( 1 + \frac{1}{B} \right)}}{\Gamma \left( 1 + \frac{1}{B} \right)} \quad (5-12)$$

ここで、 $\Gamma$ はガンマ関数である。上式からわかるように、変動係数は形状母数 $B$ だけによって決まり、 $B$ が大きいほど変動係数が小さく（ばらつきが小さく）なる。(5-9)式を変形すると次式

のようになる。

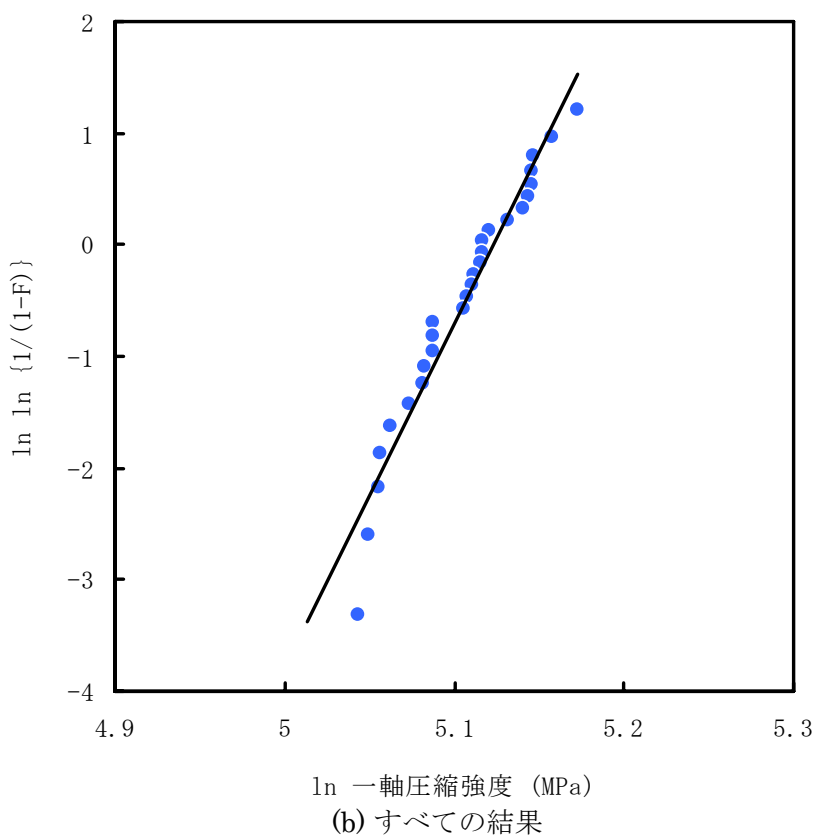
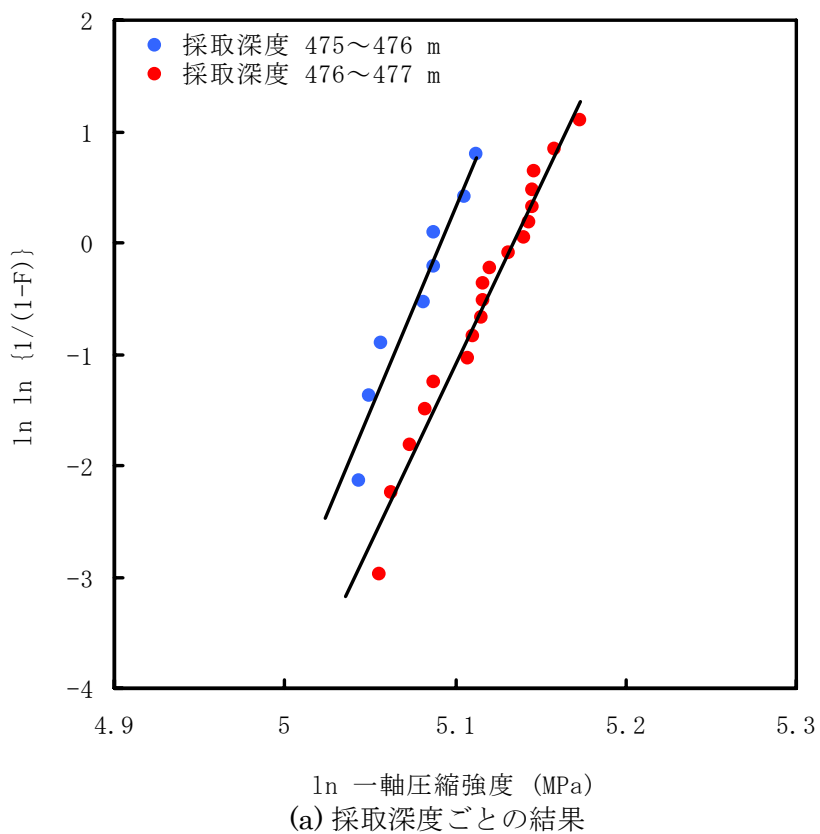
$$\ln \ln \frac{1}{1-F(x)} = B(\ln x - \ln A) \quad (5-13)$$

これより、試験結果  $x$  がワイブル分布に従うかを調べるには、横軸を  $\ln x$ 、縦軸を  $\ln \ln 1 / \{1-F(x)\}$  とした図（ワイブル確率紙）で、試験結果が直線になるかどうかを調べればよいことがわかる。

図 5-1 には、2006 年度、2007 年度、2008 年度に求められた土岐花崗岩の一軸圧縮強度をワイブル確率紙にプロットした結果を示す。なお一軸圧縮強度は、第 3 章と同様に載荷速度  $10^5/s$  の強度に換算した値である。図 5-1(a)では深度ごとに分けてプロットし、図 5-1(b)ではすべての結果をプロットした。深度 475～476m と深度 476～477m の結果とも直線で近似できることから、土岐花崗岩の一軸圧縮強度はワイブル分布にほぼ従っていることがわかる。また、図 5-1(b)のようにすべての結果をプロットした場合でも、試験結果は概ね直線で近似できた。図中に示した直線の傾きより求めた形状母数と変動係数は、それぞれ、深度 475～476m の結果で 37 と 0.026、深度 476～477m の結果で 32 と 0.033、すべての結果で 31 と 0.036 であった。表 5-1 には、これまでに得られている岩石の一軸圧縮強度の形状母数を示した。なお、形状母数から計算される変動係数もあわせて示した。他の岩石の結果に比べると、土岐花崗岩の結果はばらつきが比較的小さいことがわかる。

表 5-1 岩石の一軸圧縮強度のばらつきの程度を表すワイブル分布の形状母数と変動係数  
(土岐花崗岩以外は大久保他<sup>10)</sup>から引用)

|         | 形状母数 | 変動係数  |
|---------|------|-------|
| 土岐花崗岩   | 31   | 0.036 |
| 三城目安山岩1 | 21   | 0.059 |
| 三城目安山岩2 | 33   | 0.038 |
| 田下凝灰岩   | 18   | 0.069 |
| 大谷凝灰岩   | 12   | 0.101 |



(Fは累積確率、直線は最小二乗法による近似結果)

図 5-1 ワイブル確率紙にプロットした土岐花崗岩の一軸圧縮強度

2010年度の有限要素解析では、要素の一軸圧縮強度をワイブル分布に従ってばらつかせた場合の計算を行った。有限要素解析のプログラム作成に用いたC言語では、擬似乱数を発生させる関数としてrand()が用意されている。rand()を定義しているファイルrand.cより、今回用いたOS (FreeBSD 7.1) およびコンパイラ (gcc 4.2.1) では、rand()は次式で表される乗算型線形合同法により擬似乱数列 $X_i$  ( $i=0, 1, 2, \dots$ ) を発生させることを確認した。

$$X_{i+1} = 16807 X_i \bmod 2^{31} - 1 \quad (5-14)$$

ここで、mod は剰余を表す。 $2^{31}-1$  は素数であり、 $0 < X_i < 2^{31}-1$  となる。線形合同法は、古くから使われており研究成果が多く、高速で記憶領域が少ないという利点があるものの、周期が短い、多次元で均等分布しないといった欠点も指摘されている<sup>39)</sup>。今回の有限要素モデルは要素数が360と少なく、ばらつかせたのは一軸圧縮強度のみであったため、計算は関数rand()により発生させた擬似乱数を用いた。(5-14)式で求めた一様分布する擬似乱数 $X_i$ を、次式で表されるワイブルの分布関数の逆関数 $F^{-1}$ に代入して(逆関数法)、ワイブル分布に従ってばらつく一軸圧縮強度 $\sigma_{ci}$ を各要素に割り振った。

$$\sigma_{ci} = F^{-1}(X_i) = A \left\{ -\ln \left( 1 - \frac{X_i}{2^{31}-1} \right) \right\}^{\frac{1}{B}} \quad (5-15)$$

ここで、 $X_i/(2^{31}-1)$ は0と1の間で一様分布する擬似乱数である ( $0 < X_i/(2^{31}-1) < 1$ )。

### 5.3 計算方法と計算条件

有限要素解析に用いた坑道モデルは2009年度に用いたもの<sup>4)</sup>と同じであり図5-2に示す。モデルは二次元平面歪状態にあると仮定した。坑道の断面は直径 $D=4\text{m}$ の円形とし、その4分の1をモデル化した。外部の境界条件が試験結果に影響を及ぼさないように、モデルの縦と横の長さはいずれも300mと十分大きくした。モデルの下端のy方向変位と左端のx方向変位を固定した。計算モデルの要素分割の様子を図5-3に示す。節点数は208、要素数は360とした。

あらかじめ円形坑道を設けた計算モデルの外部境界に、時刻 $t=0$ において、図5-2のように瞬時に水平方向地圧 $\sigma_h$ と鉛直方向地圧 $\sigma_v$ が加わったとし、その後の経時変化を次のような単純な陽解法を用いて計算した。

- 1) 各要素の歪と応力を計算する。
- 2) (5-7)式もしくは(5-8)式により、各要素の破壊限接近度 $\sigma^*$ を計算する。
- 3) (5-2)式により、時間刻み $\Delta t$ 間に生じる各要素のコンプライアンス $\lambda^*$ の変化を求め、新しい $\lambda^*$ を各要素に与える。
- 4) (5-4)式により各要素の $n$ を計算し、新しい $n$ を各要素に与える。
- 5) (5-5)式により各要素のポアソン比 $\nu$ を計算し、新しい $\nu$ を各要素に与える。

1) から 5) の手順を必要な回数だけ繰り返した。なお、1回あたりの時間刻み $\Delta t$ は1sよりはじめ、以降10%ずつ増加させた。すなわち、最初の時間刻みを $\Delta t_0$ とすると、 $k$ 回目の時間刻み $\Delta t_k$ は次式となる。

$$\Delta t_k = 1.1^k \Delta t_0 \quad (5-16)$$

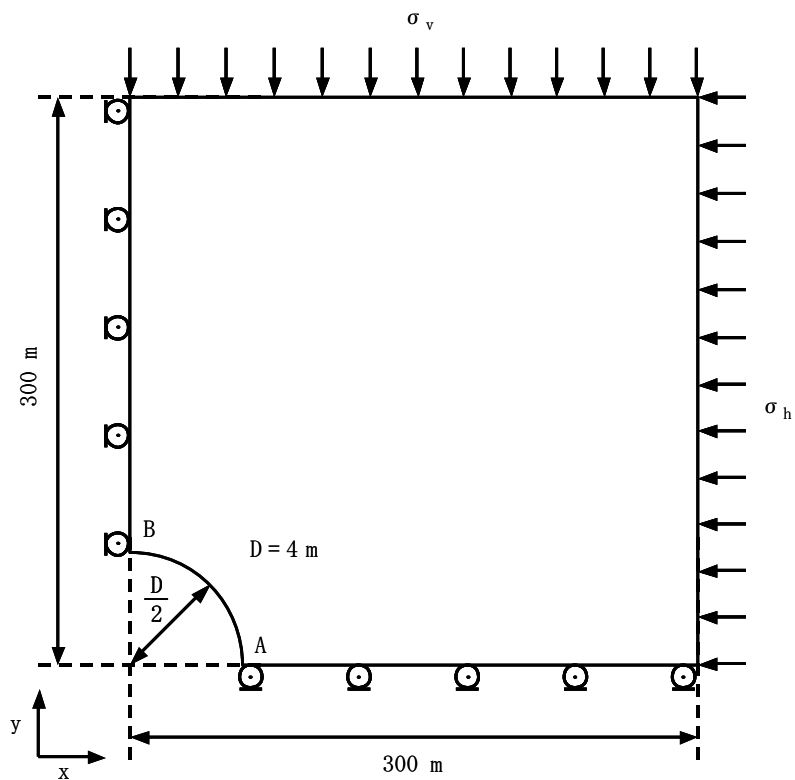
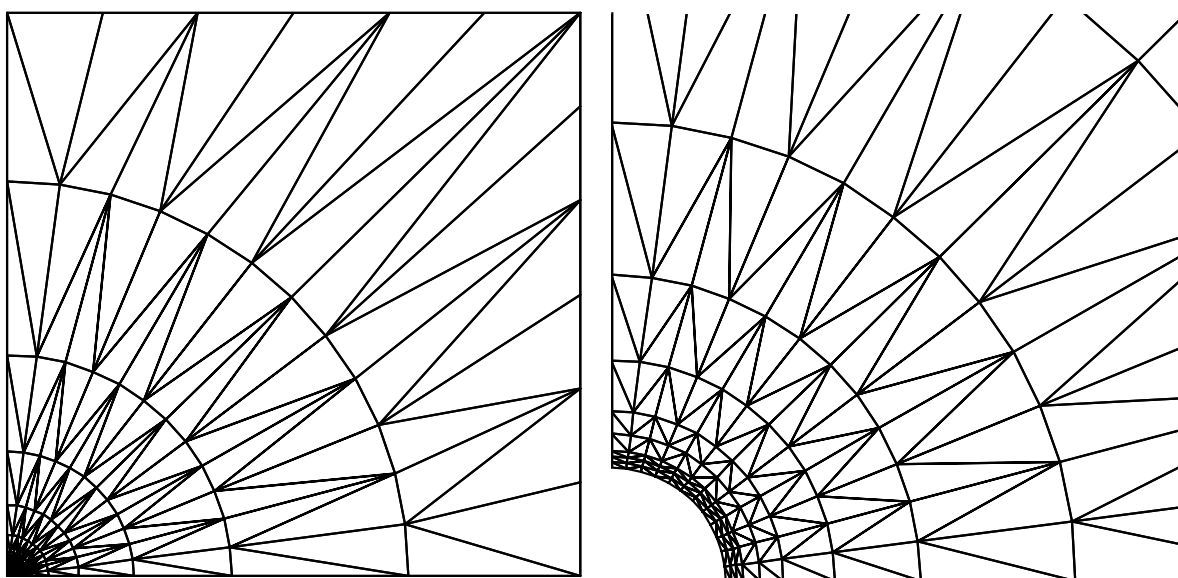


図 5-2 円形坑道の二次元計算モデル



(a) モデル全体

(b) 坑道周辺の拡大図

図 5-3 計算モデルの要素分割

数値解析では、土岐花崗岩の試験結果を参考にして、2009年度と同様に表 5-2(a)に示す基本条件を設定した。一軸圧縮強度は試験結果に近い値の 150MPa とした。脆性を 20 としたので、一軸引張強度は 7.5MPa となる。ヤング率と初期ポアソン比も試験結果に近い値として、それぞれ 50GPa と 0.3 とした。構成方程式のパラメータは、得られている 2 本の値がほぼ同じであったので、2009 年度と同様に試験片 No.17 の値を用いることにした。基本条件では、水平地圧、鉛直地圧ともに 25MPa とした。これは、岩盤の単位体積重量を 25kN/m<sup>3</sup> とした場合の、深度 1000m での土被り圧に相当する。2010 年度は新たに (5-4) 式中の  $\alpha$  の値を変化させた計算も実施した。基本条件では  $\alpha=1$  とした。また、基本条件では要素の強度は一定とした。

2010 年度は、この基本条件の各値のうち、 $n$  の周圧依存性を決める (5-4) 式中の  $\alpha$  と一軸圧縮強度のばらつきの程度を決める (5-15) 式中の  $B$  を変化させて感度解析を行った。感度解析での計算条件を表 5-2(b) と (c) に示す。表中の一は基本条件と同じ値を用いたことを表す。計算条件 1-1 と 1-2 では  $\alpha$  のみを変化させた。計算条件 1-1 は  $n$  の周圧依存性が小さい場合、計算条件 1-2 は周圧によらず  $n$  が一定である場合である。計算条件 2-1 から 2-6 では一軸圧縮強度の形状母数  $B$  を変化させた。計算条件 2-1 は土岐花崗岩の一軸圧縮強度よりもばらつきがやや小さい条件、計算条件 2-2 は土岐花崗岩の一軸圧縮強度よりもばらつきがやや大きい条件である。計算条件 2-3 から 2-6 へとばらつきが徐々に大きくなる。なお、いずれの条件でも一軸圧縮強度の平均値は基本条件と同じ 150MPa となるように  $A$  を決めた。また、各要素の脆性は一定値 20 としたので、一軸引張強度も形状母数  $B$  のワイブル分布に従ってばらつくが、平均値は基本条件と同じ 7.5MPa となる。

表 5-2(a) 数値解析での計算条件（基本条件）

| 計算条件                             | 基本                   |
|----------------------------------|----------------------|
| 一軸圧縮強度の平均値 $\sigma_c$ (MPa)      | 150                  |
| 一軸引張強度の平均値 $\sigma_t$ (MPa)      | 7.5                  |
| (各要素の脆性度 $\sigma_c / \sigma_t$ ) | (20)                 |
| ヤング率 $E$ (GPa)                   | 50                   |
| 初期ポアソン比 $\nu_0$                  | 0.3                  |
| $n$                              | 52                   |
| $a_1$                            | $7.0 \times 10^{-8}$ |
| $m_1$                            | 4                    |
| $a_3$                            | $3.0 \times 10^{-4}$ |
| $m$                              | 60                   |
| 水平地圧 $\sigma_h$ (MPa)            | 25                   |
| 鉛直地圧 $\sigma_v$ (MPa)            | 25                   |
| $n$ の周圧依存性を決める定数 $\alpha$        | 1                    |
| 強度の形状母数 $B$                      | 設定なし                 |

表 5-2(b) 数値解析での計算条件 (計算条件 1)

(n の周圧依存性を決める定数  $\alpha$  を変化)

| 計算条件                             | 1-1  | 1-2  |
|----------------------------------|------|------|
| 一軸圧縮強度の平均値 $\sigma_c$ (MPa)      | —    | —    |
| 一軸引張強度の平均値 $\sigma_t$ (MPa)      | —    | —    |
| (各要素の脆性度 $\sigma_c / \sigma_t$ ) | —    | —    |
| ヤング率 E (GPa)                     | —    | —    |
| 初期ポアソン比 $\nu_0$                  | —    | —    |
| n                                | —    | —    |
| $a_1$                            | —    | —    |
| $m_1$                            | —    | —    |
| $a_3$                            | —    | —    |
| m                                | —    | —    |
| 水平地圧 $\sigma_h$ (MPa)            | —    | —    |
| 鉛直地圧 $\sigma_v$ (MPa)            | —    | —    |
| n の周圧依存性を決める定数 $\alpha$          | 0.5  | 0    |
| 強度の形状母数 B                        | 設定なし | 設定なし |

(表中の"—"は基本条件と同じ値)

表 5-2(c) 数値解析での計算条件 (計算条件 2)

(強度の形状母数 B を変化)

| 計算条件                             | 2-1 | 2-2 | 2-3 | 2-4 | 2-5 | 2-6 |
|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 一軸圧縮強度の平均値 $\sigma_c$ (MPa)      | —   | —   | —   | —   | —   | —   |
| 一軸引張強度の平均値 $\sigma_t$ (MPa)      | —   | —   | —   | —   | —   | —   |
| (各要素の脆性度 $\sigma_c / \sigma_t$ ) | —   | —   | —   | —   | —   | —   |
| ヤング率 E (GPa)                     | —   | —   | —   | —   | —   | —   |
| 初期ポアソン比 $\nu_0$                  | —   | —   | —   | —   | —   | —   |
| n                                | —   | —   | —   | —   | —   | —   |
| $a_1$                            | —   | —   | —   | —   | —   | —   |
| $m_1$                            | —   | —   | —   | —   | —   | —   |
| $a_3$                            | —   | —   | —   | —   | —   | —   |
| m                                | —   | —   | —   | —   | —   | —   |
| 水平地圧 $\sigma_h$ (MPa)            | —   | —   | —   | —   | —   | —   |
| 鉛直地圧 $\sigma_v$ (MPa)            | —   | —   | —   | —   | —   | —   |
| n の周圧依存性を決める定数 $\alpha$          | —   | —   | —   | —   | —   | —   |
| 強度の形状母数 B                        | 40  | 30  | 20  | 15  | 10  | 5   |

(表中の"—"は基本条件と同じ値)



## 5.4 数値解析結果

2007 年度の一軸圧縮試験で得られた試験片 No.17 の応力-歪曲線を、図 5-4 に青で示す。なお、応力は一軸圧縮強度 $\sigma_c$ で、歪は一軸圧縮強度/ヤング率 ( $=\sigma_c/E$ ) で正規化した。試験は次式で表される応力帰還制御により実施した。

$$\varepsilon - K \frac{\sigma}{E} = C t \quad (5-17)$$

ここで、 $K$ は応力帰還量をあらわす定数、 $E$ はヤング率、 $C$ は載荷速度である。2007 年度の試験では、 $K$ は 0.3、 $C$ は  $10^{-4}/s$  とした。図には、表 5-2(a)に示した基本条件での計算結果を赤で示した。図よりわかるように、強度破壊点以降で試験結果と計算結果との間に差異が見られるものの、全体的には基本条件での計算により試験結果がうまく再現されている。

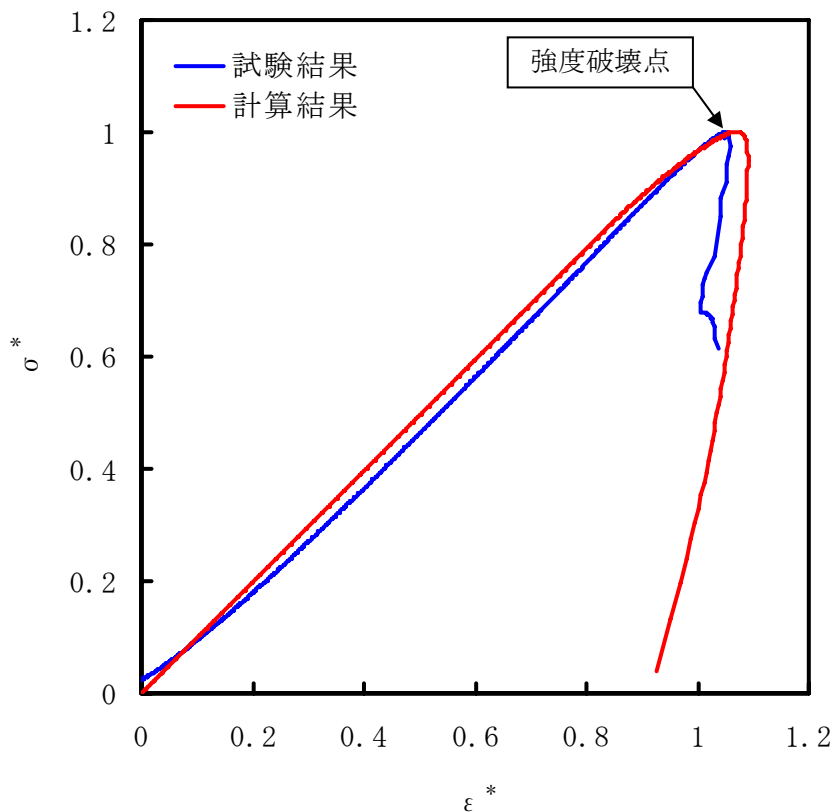
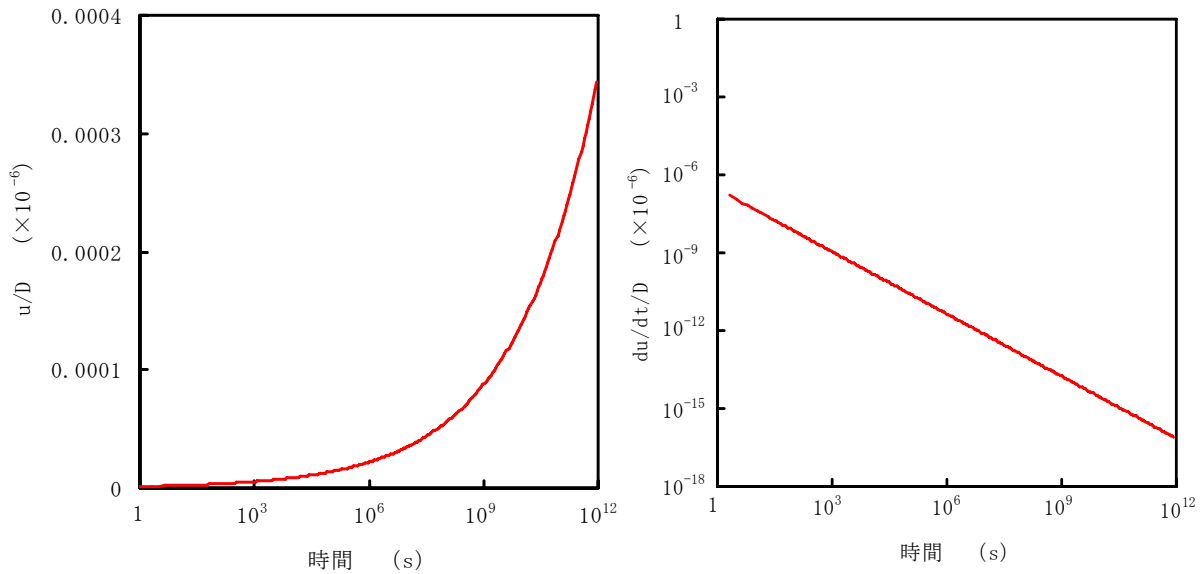


図 5-4 2007 年度の一軸圧縮試験（試験片 No.17）で得られた応力-歪曲線と基本条件で計算した応力-歪曲線

表 5-2(a)の基本条件のもとで計算した坑道の内空変位の経時変化を図 5-5(a)に示す。図には、実際に生じた内空変位から弾性変形分を差し引いた値  $u$  を坑道径  $D$  で正規化して示した。図よりわかるように、 $u/D$  は時間の対数に対して下に凸の曲線を描くように増加した。図 5-5(b)には、坑道径  $D$  で正規化した内空変位速度  $du/dt/D$  を示すが、 $du/dt/D$  は両対数グラフ上で時間に対して直線的に減少した。



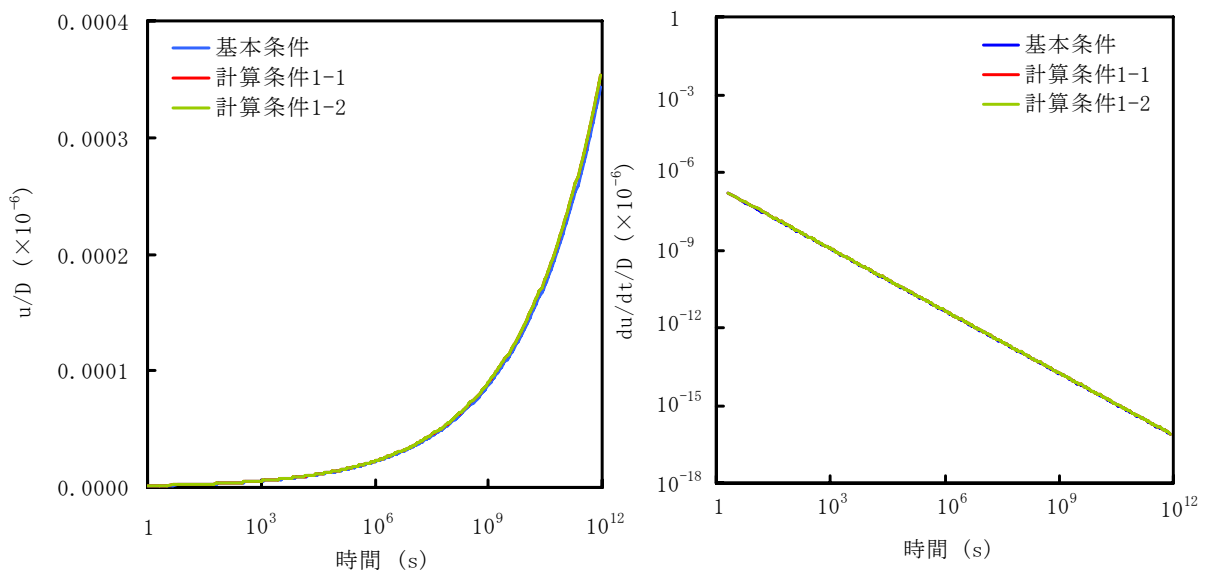
(a) 内空変位

(b) 内空変位速度

(u : 弾性変形分を差し引いた内空変位、D : 坑道径)

図 5-5 基本条件で計算した内空変位と内空変位速度の経時変化

計算条件 1 では  $n$  の周圧依存性を決める  $\alpha$  の値のみを変化させた。この場合、一軸圧縮応力下において正規化した応力-歪曲線は図 5-4 の赤で示した結果と同じになり、周圧下での  $n$  の値が異なることになる。基本条件および計算条件 1-1 と 1-2 での計算結果を図 5-6 に示す。図よりわかるように、いずれの計算条件でも、 $u/D$  は時間の対数に対して下に凸の曲線を描きながら増加し、 $du/dt/D$  は両対数グラフ上で時間に対して直線的に減少した。基本条件、計算条件 1-1、計算条件 1-2 の差異はほとんど見られず、 $n$  の周圧依存性を決める  $\alpha$  の値が計算結果に及ぼす影響は小さいことがわかった。



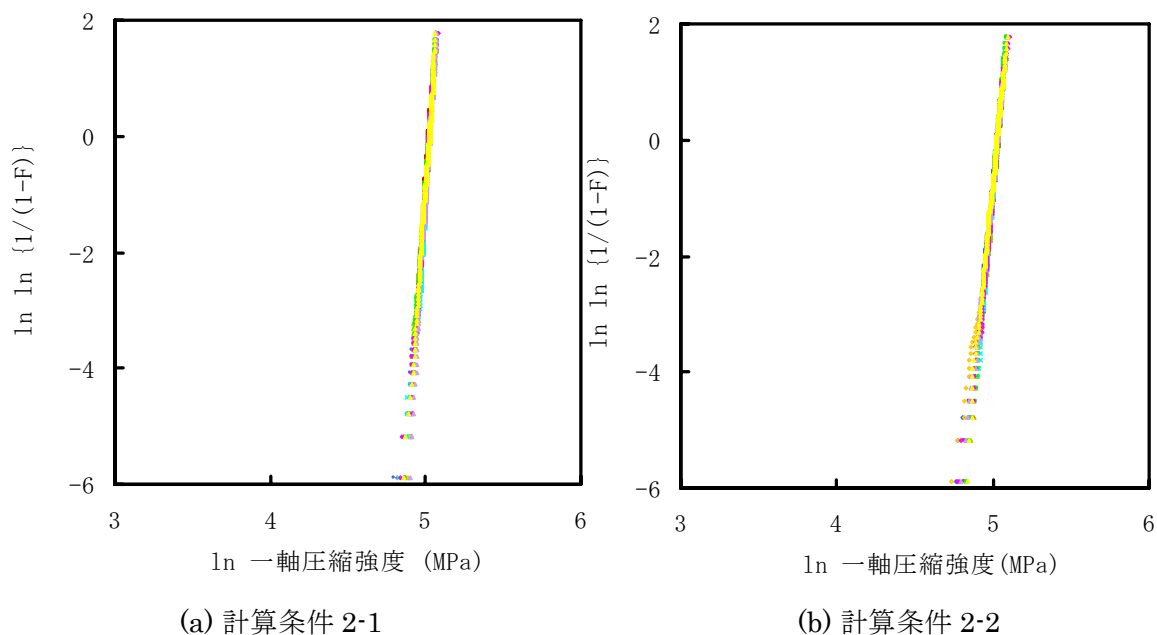
(a) 内空変位

(b) 内空変位速度

(u : 弾性変形分を差し引いた内空変位、D : 坑道径)

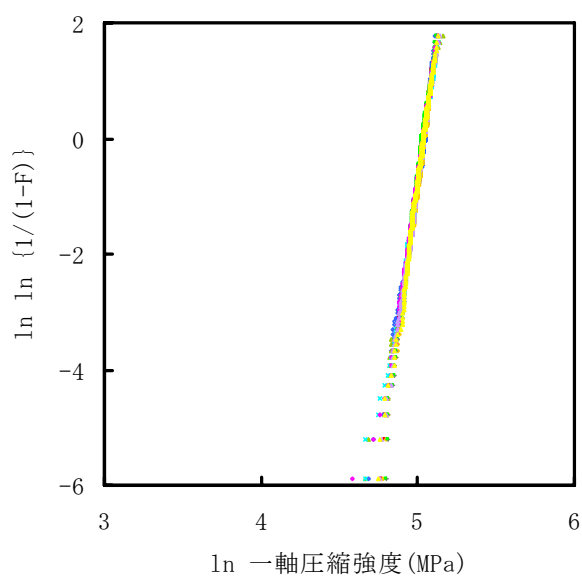
図 5-6 基本条件、計算条件 1-1、計算条件 1-2 で計算した内空変位と内空変位速度の経時変化

計算条件 2 では強度の形状母数  $B$  を変化させて計算を行った。なお、1 条件につき 10 個の異なる擬似乱数列を用いて計算を行った。計算条件 2-1 から 2-6 で用いた要素の一軸圧縮強度をワイブル確率紙にプロットしたものが図 5-7 である。いずれの条件でもグラフは直線的であり、要素に割り振った一軸圧縮強度は概ねワイブル分布に従っていることがわかる。ただし条件によっては、かなり小さい一軸圧縮強度の値が割り振られた要素が生じている場合もあった。これらの一軸圧縮強度を用いて計算した結果を図 5-8～図 5-13 に示す。なお、図には基本条件での結果を太線で示した。いずれの計算条件でも、 $u/D$  は時間の対数に対して下に凸の曲線を描きながら増加し、要素に割り振った一軸圧縮強度のばらつきが大きくなるほど（形状母数  $B$  の値が小さくなるほど）、10 回の計算結果のばらつきも大きくなっていることがわかる。基本条件での結果と比較すると、計算条件 2-1 と 2-2 の結果は基本条件の結果の上方にも下方にも存在している。一方、計算条件 2-3 から 2-6 の計算結果のほとんどが基本条件の結果の上方にしか存在していない。すなわち、要素に割り振った一軸圧縮強度のばらつきが大きくなるほど（形状母数  $B$  の値が小さくなるほど）、計算結果のばらつきが大きくなるとともに、生じる内空変位も大きくなっていることがわかる。計算条件 2-6 では、計算開始直後から大きな変形が生じた場合があった（図中に赤で示した結果）が、これは、坑壁近傍の要素にかなり小さい一軸圧縮強度の値が割り振られたためであった。この結果を除いて、 $du/dt/D$  は両対数グラフ上で時間に対して直線的に減少した。

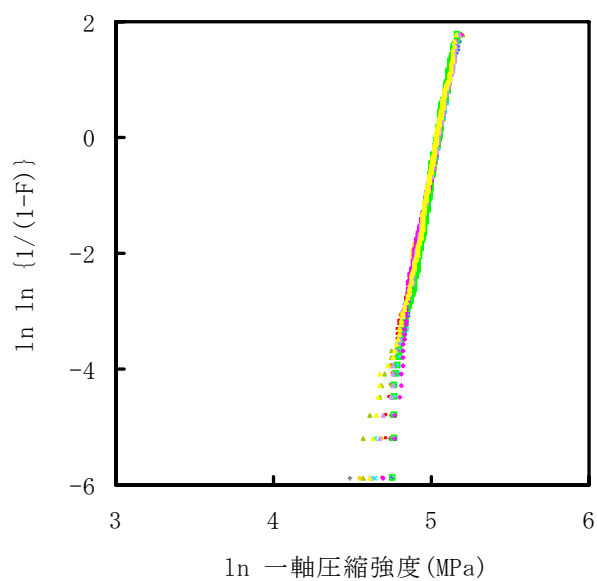


( $F$  は累積確率、プロットの色は一軸圧縮強度の計算に用いた擬似乱数列の違いを示す)

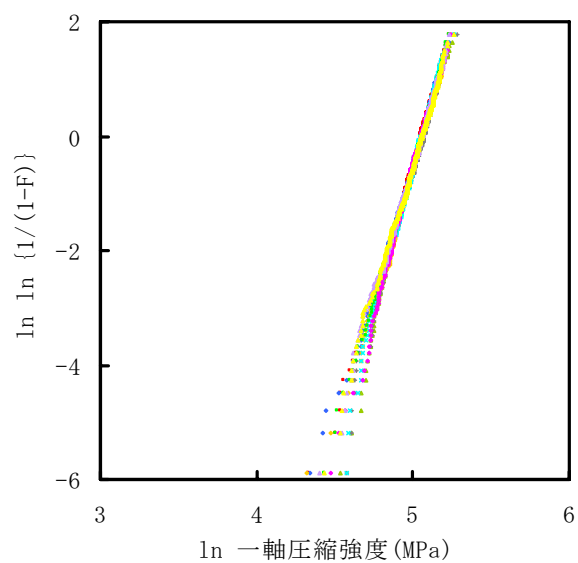
図 5-7 ワイブル確率紙にプロットした計算条件 2 で割り振った一軸圧縮強度



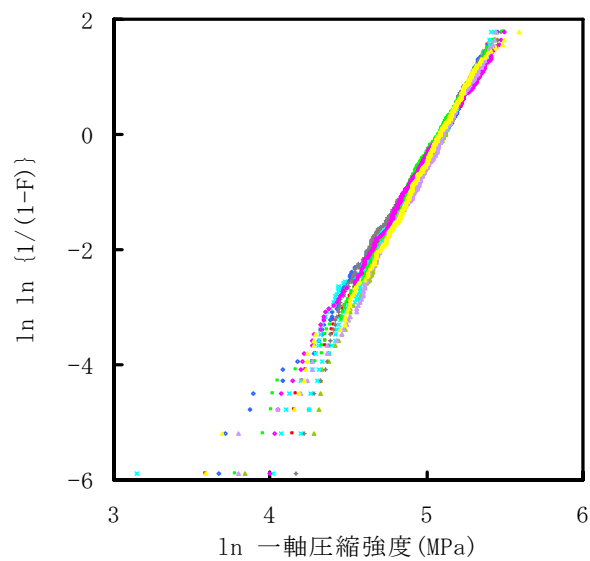
(c) 計算条件 2-3



(d) 計算条件 2-4



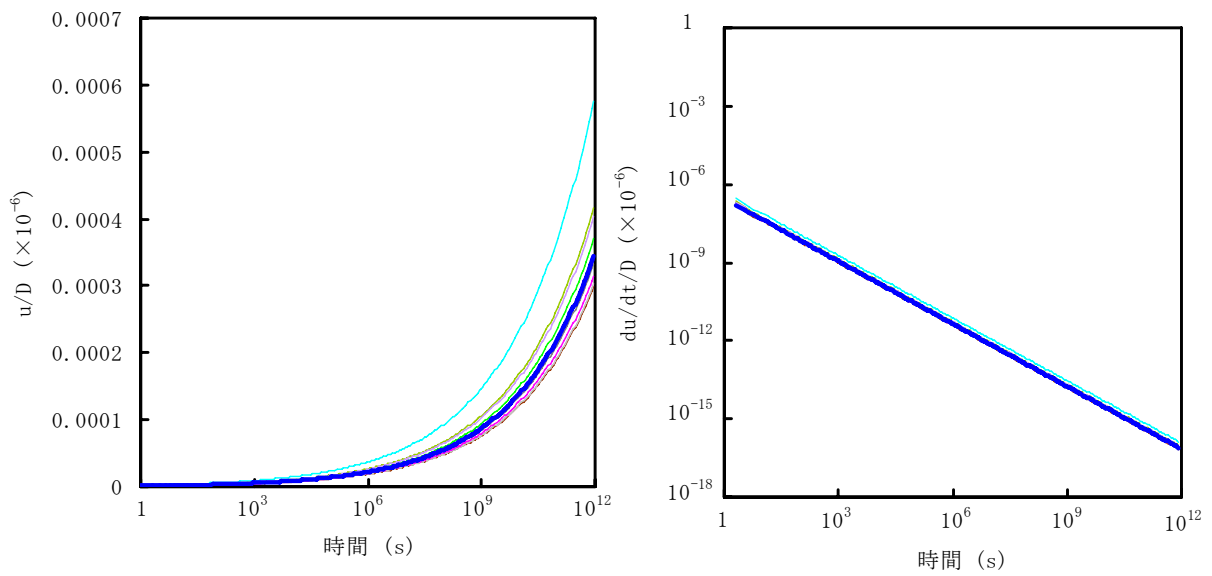
(e) 計算条件 2-5



(f) 計算条件 2-6

(F は累積確率、プロットの色は一軸圧縮強度の計算に用いた擬似乱数列の違いを示す)

図 5-7 ワイブル確率紙にプロットした計算条件 2 で割り振った一軸圧縮強度

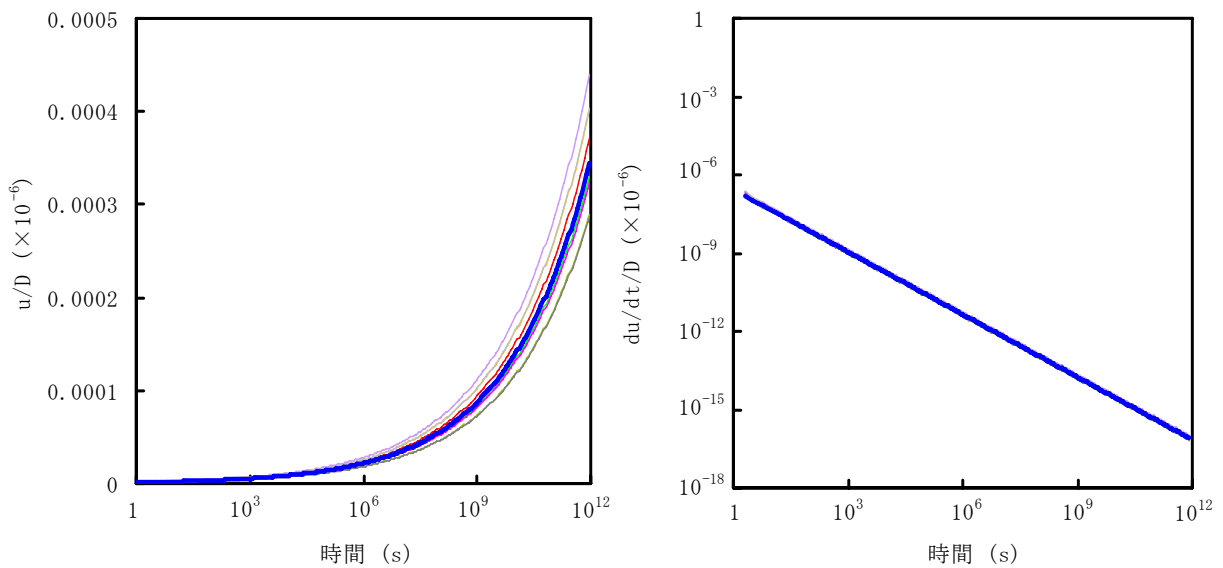


(a) 内空変位

(b) 内空変位速度

( $u$  : 弾性変形分を差し引いた内空変位、 $D$  : 坑道径)  
(細線プロットの色は一軸圧縮強度の計算に用いた擬似乱数列の違いを示す)

図 5-8 基本条件(太線)と計算条件 2-1(細線)で計算した内空変位と内空変位速度の経時変化

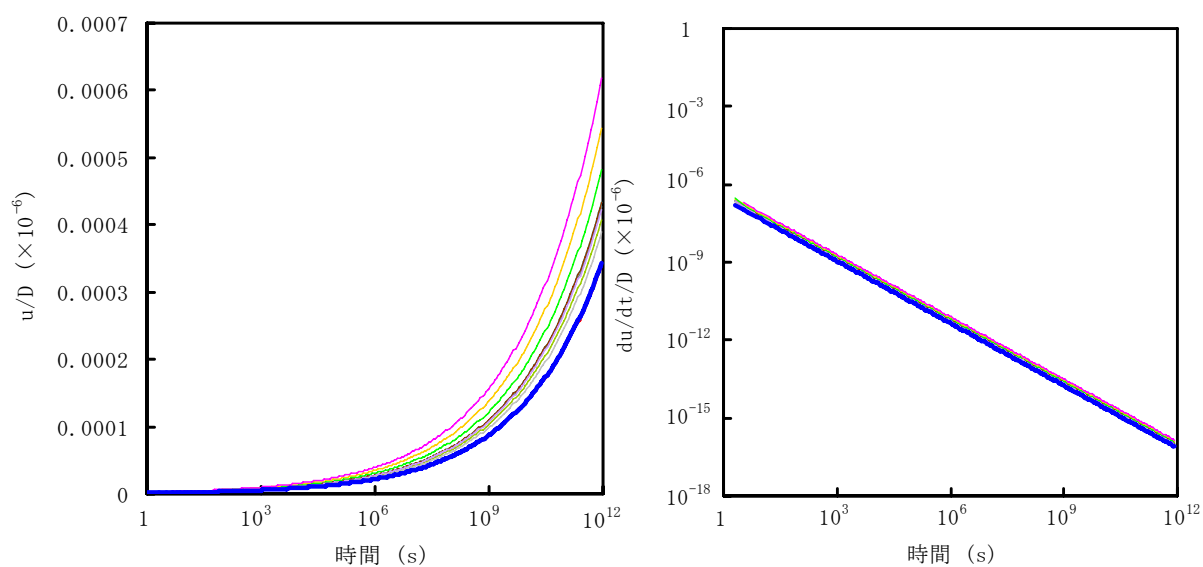


(a) 内空変位

(b) 内空変位速度

( $u$  : 弾性変形分を差し引いた内空変位、 $D$  : 坑道径)  
(細線プロットの色は一軸圧縮強度の計算に用いた擬似乱数列の違いを示す)

図 5-9 基本条件(太線)と計算条件 2-2(細線)で計算した内空変位と内空変位速度の経時変化

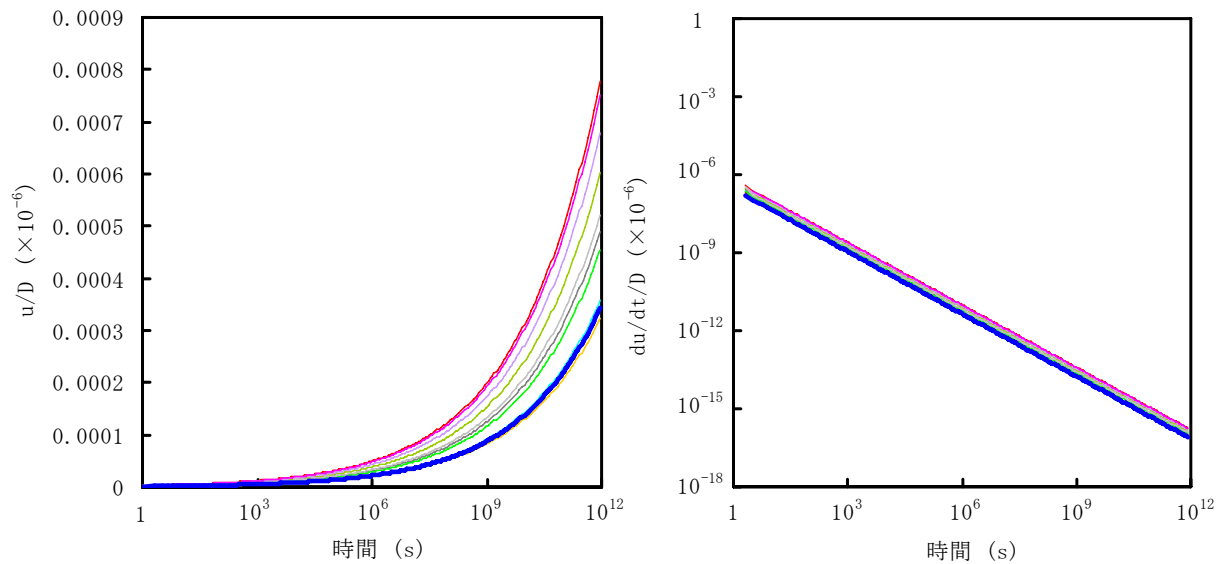


(a) 内空変位

(b) 内空変位速度

( $u$  : 弾性変形分を差し引いた内空変位、 $D$  : 坑道径)  
(細線プロットの色は一軸圧縮強度の計算に用いた擬似乱数列の違いを示す)

図 5-10 基本条件(太線)と計算条件 2-3(細線)で計算した内空変位と内空変位速度の経時変化

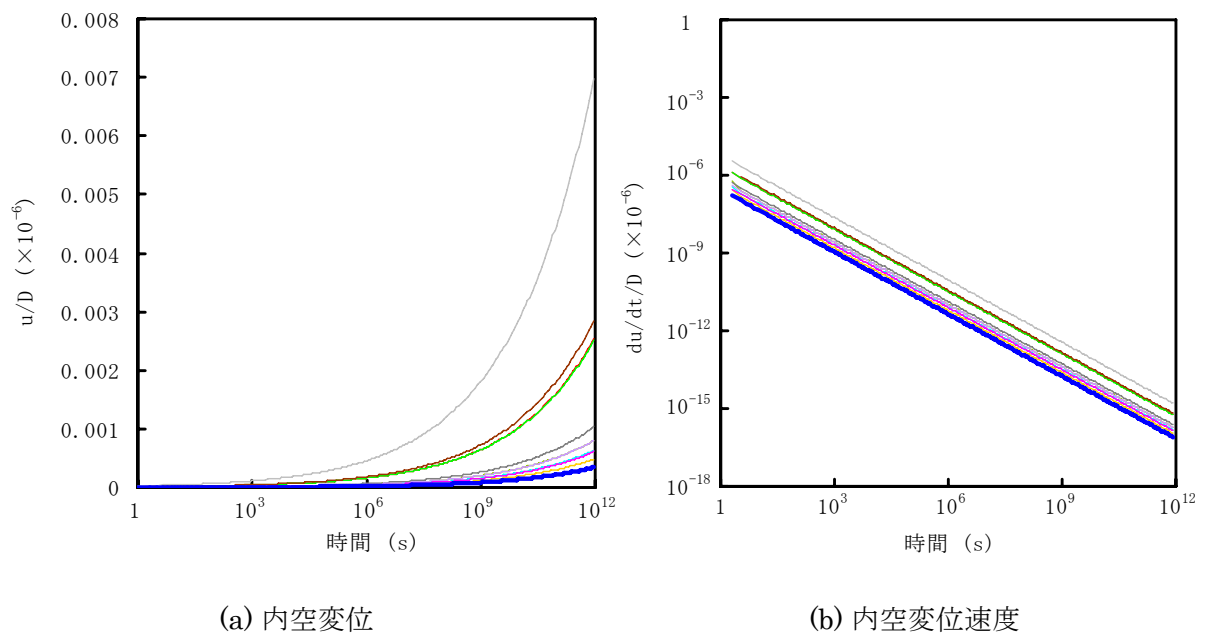


(a) 内空変位

(b) 内空変位速度

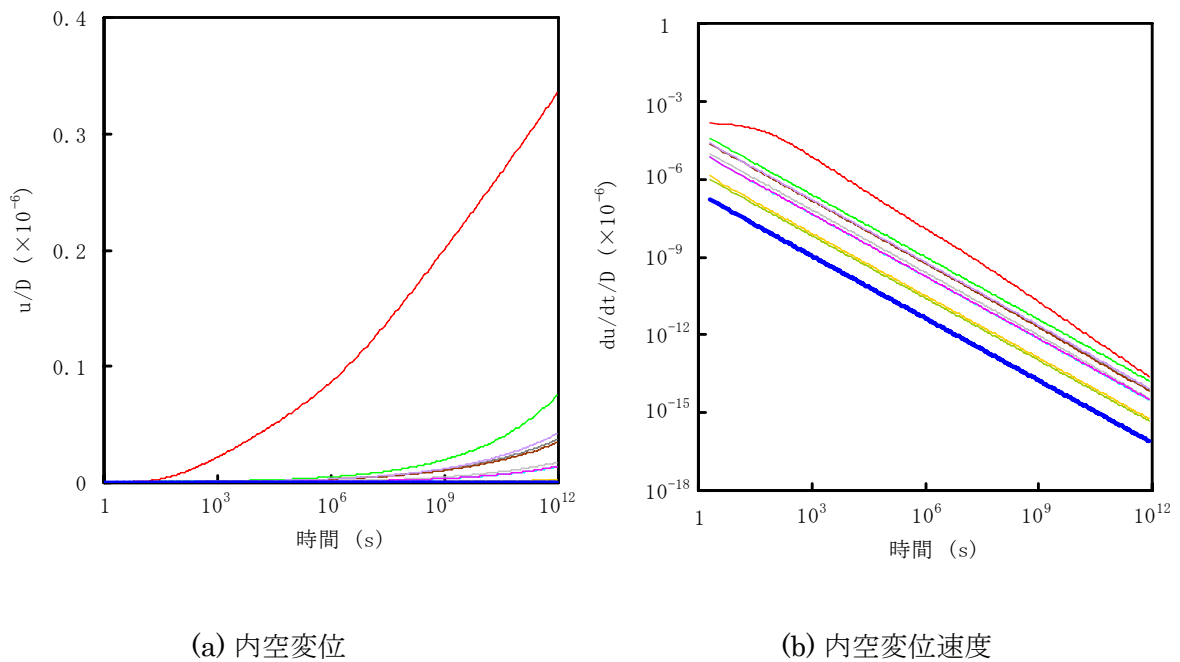
( $u$  : 弾性変形分を差し引いた内空変位、 $D$  : 坑道径)  
(細線プロットの色は一軸圧縮強度の計算に用いた擬似乱数列の違いを示す)

図 5-11 基本条件(太線)と計算条件 2-4(細線)で計算した内空変位と内空変位速度の経時変化



( $u$  : 弾性変形分を差し引いた内空変位、 $D$  : 坑道径)  
 (細線プロットの色は一軸圧縮強度の計算に用いた擬似乱数列の違いを示す)

図 5-12 基本条件(太線)と計算条件 2-5(細線)で計算した内空変位と内空変位速度の経時変化



( $u$  : 弾性変形分を差し引いた内空変位、 $D$  : 坑道径)  
 (細線プロットの色は一軸圧縮強度の計算に用いた擬似乱数列の違いを示す)

図 5-13 基本条件(太線)と計算条件 2-6(細線)で計算した内空変位と内空変位速度の経時変化

これらの結果をよりわかりやすくするため、図 5-14 に計算開始から  $10^{12}$ s 経過した時点での内空変位と形状母数  $B$  の関係を示した。この図からも、要素に割り振った一軸圧縮強度のばらつきが大きくなるほど（形状母数  $B$  の値が小さくなるほど）、計算結果のばらつきが大きくなるとともに、生じる内空変位も大きくなっていることが確認できる。また、形状母数  $B$  が 10 よりも小さくなると、基本条件に比べて大きな内空変位が生じる場合もあることがわかる。

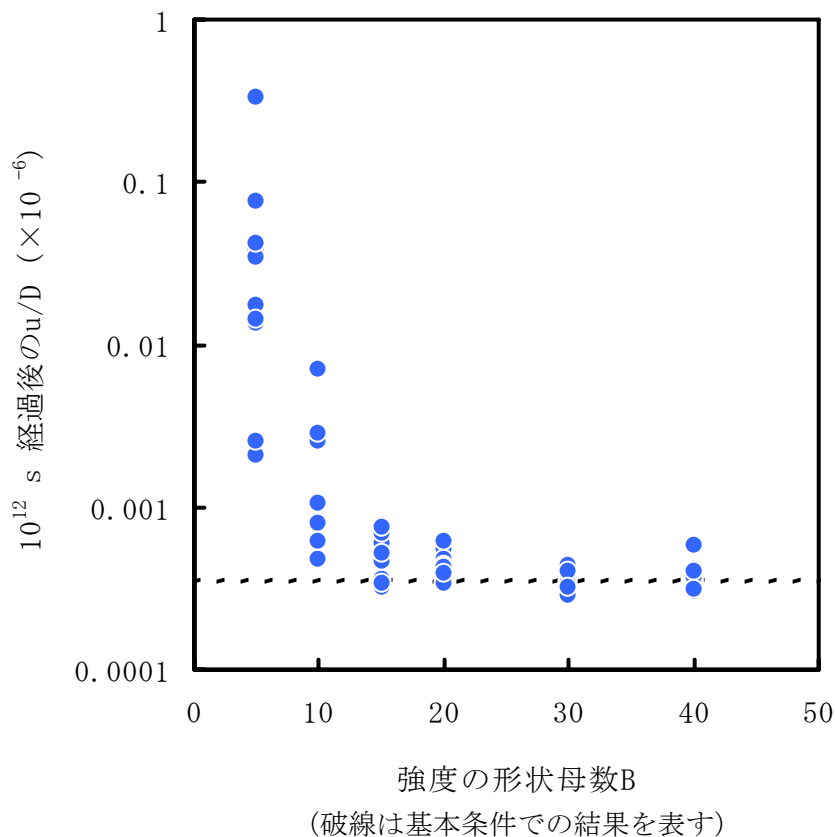


図 5-14 計算条件 2 での計算結果

表 5-3 には計算結果を 2009 年度の計算結果と比較して示す。 $u/D$  の単位は  $10^{-10}$  であるが、これは  $D=10$  (m) とした場合の内空変位  $u$  ( $10^{-6}$ mm) に相当する。なお、2010 年度の計算条件 2 に関しては 10 回の計算の幾何平均値と最大値を示した。2010 年度の計算条件 1 の結果は基本条件とほとんど変わらず、時間依存的な変形はかなり小さいことがわかる。計算条件 2-1(形状母数  $B=40$ )～計算条件 2-5 (形状母数  $B=10$ ) では時間依存的な変形は小さかったが、計算条件 2-6(形状母数  $B=5$ )では比較的大きな変形が生じる場合があった。例えば、計算条件 2-6 で生じた変形の最大値は、応力レベル (=地圧／一軸圧縮強度) を基本条件の 2 倍にした 2009 年度の計算条件 1-2 や計算条件 4-2 の 1/4 程度であった。しかしながら、2009 年度と同様に、いずれの条件下でも弾性変形に比べると時間依存的な変形量はかなり小さいことが確認された。



表 5-3 計算結果

(u : 弾性変形分を差し引いた内空変位、D : 坑道径)

| 年度     | 計算条件     | 変化させた値                     | 10 <sup>12</sup> sまでに生じた変形  |                                  |
|--------|----------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
|        |          |                            | u/D<br>(10 <sup>-10</sup> ) | D=10でのu<br>(10 <sup>-6</sup> mm) |
|        | 基本       |                            | 3.4                         |                                  |
| 2009年度 | 1-1      | 一軸圧縮強度もしくは<br>一軸引張強度       | 113                         |                                  |
|        | 1-2      |                            | 13392                       |                                  |
|        | 1-3      |                            | 4.7                         |                                  |
|        | 1-4      |                            | 5.6                         |                                  |
|        | 2-1      | ヤング率もしくは<br>初期ポアソン比        | 4.6                         |                                  |
|        | 2-2      |                            | 6.9                         |                                  |
|        | 2-3      |                            | 4.1                         |                                  |
|        | 2-4      |                            | 4.5                         |                                  |
|        | 3-1      | 構成方程式の定数                   | 3.5                         |                                  |
|        | 3-2      |                            | 16                          |                                  |
|        | 3-3      |                            | 118                         |                                  |
|        | 4-1      | 水平地圧と鉛直地圧                  | 465                         |                                  |
|        | 4-2      |                            | 13047                       |                                  |
|        | 4-3 (鉛直) |                            | 8.1                         |                                  |
|        | 4-3 (水平) |                            | 17                          |                                  |
|        | 4-4 (鉛直) |                            | 571                         |                                  |
|        | 4-4 (水平) |                            | 1047                        |                                  |
|        | 4-5 (鉛直) |                            | *                           |                                  |
|        | 4-5 (水平) |                            | *                           |                                  |
| 2010年度 | 1-1      | nの周圧依存性を決める<br>定数 $\alpha$ | 3.5                         |                                  |
|        | 1-2      |                            | 3.5                         |                                  |
|        |          | 強度の形状母数B                   | 幾何平均値                       | 最大値                              |
|        | 2-1      |                            | 3.6                         | 5.8                              |
|        | 2-2      |                            | 3.5                         | 4.4                              |
|        | 2-3      |                            | 4.4                         | 6.2                              |
|        | 2-4      |                            | 5.1                         | 7.8                              |
|        | 2-5      |                            | 13                          | 70                               |
|        | 2-6      |                            | 218                         | 3354                             |

\* 破壊

## 5.5 原位置試験を実施する際の留意事項

原位置試験を実施する際の留意事項として、2009 年度は以下の点を指摘した。

### 1) 望ましい地山強度比

地山強度比が、1.5～2.5

この条件は思ったよりも厳しい条件であるが、やはりもっとも大切な条件であると考ええる。これよりも地山強度比が大きいと変形が進まず、成果を得るのに長い時間がかかってしまう。

### 2) 支保

これまでの経験から、剛性の高い支保がある場合には、岩盤の本来の挙動が把握し難くなる。安全性の観点からは、慎重に検討しなければならないが、可能であれば無支保が望ましい。無支保が無理な場合にも可能な限り軽い支保であることが望ましい。

### 3) 空洞の形状と外乱（雑音）

空洞の形状は、単純な円形とか四角形が良いであろう。形状に関する要望はあまりきつくないが、複雑な形状は避けるのが懸命であろう。なお、これまでの経験で、様々な外乱（雑音）が計測途中で入りがちなので、これを避けるのが懸命であろう。外乱（雑音）としては、新たな掘削、通気の変化、車両の通過などが比較的大きな影響を及ぼすと考えられる。

### 4) 空洞の寸法

岩石/岩盤には寸法効果が認められることが多い。ことに石炭では、寸法によって強度が 1 桁程度変化してしまうことが知られている。しかしながら、結晶質岩ではこの寸法効果は比較的軽度である。よって、実物大での原位置試験が望ましいことは確かであるが、予算等の関係で数分の 1 のスケールで原位置試験を行わざるを得なくても、データの解釈の段階で十分な注意を払うことによって、意味のある成果が得られると考える。

### 5) 計測

計測項目は、コンバージェンス、岩盤内変位などのごく一般的なもので良いと考えている。近頃の計測器では、精度や耐久性が格段に向上しているので、この点についても格別の注意を払う必要はないと思う。今回の計測で特段の注意を払う必要があるのは、掘削直後の地山の動きをできるだけ早い段階から計測することであろう。これまでに行った計算結果によれば、一本の試験片の変形にしろ、地下構造物の変形にしろ、変形はほぼ対数則で近似できる。これは、変形速度は、経過時間に反比例して遅くなっていくことを意味している。すなわち、変形の計測において、経過時間が短い部分の情報量が多いといえる。この要求の実現は決して易しいことではないが、最大限の努力をはらって計画を進めるのがよいと考える。

### 6) 計測期間

できるだけ長い方がよいことは議論の余地がないが、まず 3 年間で提案しておく。この位の期間ならば、計測器等の使用機器の耐久性に問題はなく、市販の機器をそのまま使えるので、安価に実施できるのではないかと考えている。第 2 章で述べたように、実験室で 10 年を超え長期クリープ試験を実施しているが、このような長期間を前提とした計測・実験では可能な限り高品質な機器を求めることになり費用がかさむ。逆に、3 年間にわたって精密な計測を実施した例は比較的少なく、データとしての意義は充分にあると考える。

2010 年度は岩盤強度のばらつきを考慮して数値計算を行った。その結果、ばらつきが大きくなると内空変位も大きくなる場合があることを指摘した。原位置での岩盤強度のばらつきについては測定手法が確立されておらず不明な点が多いが、例えば福井・大久保<sup>40)</sup>は、TBM（全断面トンネル掘進機）の掘削抵抗から推定した岩盤強度の形状母数が 2～5 程度であることを指摘している。そこで、原位置試験を実施する際の留意事項として以下を追加する。

#### 7) 岩盤強度のばらつきの把握と試験場所の選定

室内試験で得られる岩石試験片の強度に比べて、原位置の岩盤強度はかなりばらつくことが知られている。TBM やさく岩機などの掘削機械の掘削抵抗や、シュミットハンマーによる原位置計測などから、岩盤強度のばらつきの程度をある程度把握しておくことが必要と考える。岩盤強度のばらつきができるだけ小さい場所で原位置試験を行った方が、数値解析結果との比較などは行いやすいであろう。

原位置試験で検討することが望ましい事項として、2009 年度は以下の項目を挙げた。ただし、これらの事項は、予算や期間等を総合的に考えて判断すべきであるといえる。

##### ① 掘削影響領域

掘削にともなって周辺岩盤にどの位の影響が及ぶかを見極めることは重要である。ことに、在来工法（発破工法）と機械掘削との比較は早期に結論を得たいところである。

##### ② 不連続面の影響

地表近くの岩盤では不連続面が決定的な影響を及ぼすことがある。幸いにして、本研究で対象としているのは相当に深度の深いところなので、不連続面の影響は、地表近くと比較すれば軽度であると予測できる。しかしながら、不明な点が多いので原位置試験を通じて理解を深めることが望ましい。

##### ③ 岩盤分類

2008 年度の報告書<sup>41)</sup>で、時間依存性を考慮した岩盤分類を提案した。長期間にわたって多くの人がたずさわるプロジェクトでは、理解の容易さと使い勝手を考えてこのような岩盤分類の確立が是非とも必要と考えている。実際のプロジェクトの施工開始までに、原位置試験の成果を取り入れてこのような岩盤分類を信頼性のあるものへと作り上げたいものである。

##### ④ 原位置試験の整理とパラメータの値の決定

試験結果を整理して、それをよく表す構成方程式とパラメータを決定する手法は、線形モデルでは確立されているといえよう。しかしながら、ここで対象としている構成方程式は非線形性が高く容易にそのパラメータを求めることができない。これまでは、パラメータを少しずつ変えながら計算結果と計測結果を見比べて、よさそうなパラメータを求めてきた。このような試行錯誤による手法には限界があり、迅速かつ合理的な定数の決定方法を今後検討する必要がある。

岩盤強度のばらつきを考慮した 2010 年度の結果は、“② 不連続面の影響”を検討する際にも役立つと考える。ただし 2010 年度の計算では、強度のみが要素の位置に無関係に分布すると仮定した。実際の岩盤では強度だけではなく、ヤング率やポアソン比、構成方程式の定数などもばらつくことが予想される。また、それらは位置に無関係に分布するわけではなく、周辺部分とある程度の相関を持ちながら分布することが予想されるし、断層など物性値が急激に変化する部分の存在も予想される。これらを考慮した数値解析手法の開発は今後の重要な検討課題である。

## 6. おわりに

本研究の主たる目的は、未だに知られるところの少ない長期岩盤挙動に対して少しでも新しい知見を加えることである。そのために、本研究では試験と数値解析により検討を行った。

第2章では、堆積岩（田下凝灰岩）の長期クリープ試験について報告した。2010年度で、試験開始から13年以上が経過した。このような長期にわたる試験は過去にも例が少なく、岩石の長期時間依存性挙動を評価するための貴重なデータを取得しているといえる。2009年度の結果<sup>4)</sup>から、歪ゲージ式圧力計で測定した圧力が、クリープ荷重を正しく測定していない可能性があることがわかった。2010年度は、その原因を解明するための作業を行った。さらに、1年間にわたり室温、水温、湿度のデータを取得したが、クリープ歪に及ぼす温度変化の影響を確認するには至らなかった。今後も温度測定を継続して行い、試験結果および試験装置に及ぼす影響について検討する予定である。

第3章では、まず、岩石の時間依存性の程度を表す $n$ の値の意味を示すため、強度の載荷速度依存性とクリープ寿命の応力依存性との関係および時間依存性、強度とクリープ寿命の分布特性、寸法効果の相互関係について論じた。次いで、これまでに得られた岩石の強度と $n$ の値を整理して、土岐花崗岩の強度や $n$ の値と比較検討した。その結果、土岐花崗岩の一軸圧縮強度は稲田花崗岩よりも若干小さいものの、 $n$ の値はこれまでに得られている稲田花崗岩の $n$ の値の範囲内に入っていることがわかった。また、気乾状態に限れば、土岐花崗岩の $n$ は岩石の中間的な値であること、湿潤状態も含めれば、土岐花崗岩の $n$ の値は大きい方（時間依存性の程度が小さい方）に分類されることも確認された。周圧が $n$ に及ぼす影響は岩種によって異なるが、土岐花崗岩と特性が比較的似ている稲田花崗岩では、周圧下では $n$ が強度にほぼ比例することがわかった。また、今後、瑞浪超深地層研究所の研究坑道で原位置試験を行うにあたり、土岐花崗岩の力学特性や時間依存性に関する情報のうちで把握すべき情報について検討した。

第4章では、岩盤の破壊基準の設定に関する検討として、岩石強度の載荷速度依存性に関する室内試験結果を利用して、十分長い時間をかけて岩石を壊したときの強度（長期強度）、あるいは、いつまで経っても破壊に至らない応力条件が存在するかどうかについて検討した。検討にあたっては、一軸圧縮強度が載荷速度の $1/(n+1)$ 乗に比例すると仮定したうえで、時間の経過とともになうCoulomb、Mohr、Hoek and Brownの破壊基準の変化を計算した。その結果、いずれの破壊基準においても、二次元主応力線図上でグラフは時間の経過とともに下方向にほぼ平行移動することがわかった。Coulombの破壊基準では、長期強度と静水圧状態に挟まれたいつまで経っても破壊には至らない領域が存在すること、Mohrの破壊基準とHoek and Brownの破壊基準では、そのような領域が存在しないことも確認された。

第5章では、拡張したコンプライアンス可変型構成方程式を用いた有限要素解析により、土岐花崗岩の長期挙動に関する予察的検討を行った。2009年度に引き続いて円形坑道の二次元モデルで計算したが、2010年度は周圧下での $n$ の値の変化および岩盤強度のばらつきを考慮して数値計算を行った。その結果、 $n$ の周圧依存性を決める $\alpha$ の値が計算結果に及ぼす影響は小さいこと、要素に割り振った一軸圧縮強度のばらつきが大きくなるほど（形状母数 $B$ の値が小さくなるほど）、計算結果のばらつきが大きくなるとともに、生じる内空変位も大きくなることがわかった。しかし、いずれの条件下でも弾性変形に比べると時間依存的な変形量はかなり小さいことが確認された。最後に今回実施した解析結果を踏まえて、原位置試験を実施する際の留意事項に”7) 岩盤強度のばらつきの把握と試験場所の選定”を追加し、所見を述べた。

## 参考文献

- 1) 大久保誠介：“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”，JNC TJ7400 2004-002 (2004)
- 2) 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)
- 3) 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・素材学会誌，Vol.118，pp.737-744 (2002)
- 4) 大久保誠介，引間亮一，平野享，松井裕哉：“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)”，JAEA-Research 2010-031 (2010)
- 5) 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)”，JAEA-Research 2007-088 (2008)
- 6) 山口勉，大久保誠介，エンリコ マラニーニ，成田孝：“稲田花崗岩の周圧下の多段階クリープ試験と長期寿命予測”，資源・素材学会誌，116，pp.91-96 (2000)
- 7) 横堀武夫 (1974)：“材料強度学”，岩波書店 (東京)，第 8 章，第 9 章
- 8) Atkinson, B. K.: “Subcritical crack growth in geological materials”, J. Geophys. Res., 89, B6, pp.4077-4114 (1984)
- 9) 大久保誠介：“岩石のクリープ”，資源・素材学会誌，107，pp.245-252 (1991)
- 10) 大久保誠介，福井勝則，羽柴公博，新孝一：“岩石の強度とクリープ寿命の分布特性に関する一考察”，資源・素材学会誌，119，pp.734-740 (2003)
- 11) 大久保誠介，秋哲淵：“気乾状態と湿潤状態での一軸圧縮強度とクリープ寿命の分布特性”，資源・素材学会誌，110，pp.533-538 (1994)
- 12) 山口勉，大久保誠介：“稲田花崗岩の周圧下の強度とクリープ寿命の分布に関する検討”，資源・素材学会誌，116，pp.623-629 (2000)
- 13) 山口梅太郎，西松裕一：“岩石力学入門第 3 版”，東京大学出版会 (東京)，第 3 章 (1991)
- 14) 福井勝則，大久保誠介：“掘削体積比エネルギーを用いた岩石強度の寸法効果の推定”，資源・素材学会誌，120，pp.555-559 (2004)
- 15) 大久保誠介，何昌栄，西松裕一：“一軸圧縮応力下における時間依存性挙動－岩石の Post-failure Region での挙動 (第 1 報)－”，日本鉱業会誌，103，pp.177-181 (1987)
- 16) 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・素材学会誌，121，pp.11-18 (2005)
- 17) 何昌栄，大久保誠介，西松裕一：“クラス II 岩石の周圧下の挙動の載荷速度依存性”，材料，38，pp.216-220 (1989)
- 18) 大久保誠介，西松裕一，何昌栄，秋哲淵：“湿潤状態での岩石の一軸圧縮強度の載荷速度依存性”，材料，41，pp.403-409 (1992)
- 19) 山口勉，大久保誠介，西松裕一，小泉昇三 (1983)：“三城目安山岩の三軸圧縮強度に及ぼすひずみ速度の影響－岩石の破壊および変形における時間依存性の研究 (第 1 報)－”，日本鉱業会誌，99，pp.87-92
- 20) 大久保誠介，秋哲淵 (1993)：“気乾状態と湿潤状態とでの三城目安山岩のクリープ”，資源・素材学会誌，109，pp.917-922
- 21) 趙頌，大久保誠介，福井勝則：“周圧下での三城目安山岩のクリープ”，資源・素材学会誌，111，pp.543-548 (1995)

- 22) 大久保誠介, 金豊年, 秋山政雄: “一軸引張強度と圧裂引張強度の載荷速度依存性”, 資源・素材学会誌, 109, pp.865-869 (1993)
- 23) 福井勝則, 大久保誠介, 岩野圭太: “一軸引張応力下での三城目安山岩と田下凝灰岩の載荷速度依存性”, 土木学会論文集, 729, pp.59-71 (2003)
- 24) 大久保誠介, 新孝一, 西松裕一: “時間効果を考慮したき裂進展のモデルー三城目安山岩の場合ー”, 材料, 33, pp.882-887 (1984)
- 25) 福井勝則, 大久保誠介, 小川亮: “三城目安山岩のせん断強度の載荷速度依存性”, 土木学会論文集, 743, pp.125-134 (2003)
- 26) 羽柴公博, 雷鳴, 大久保誠介, 福井勝則: “破碎した岩石の強度回復特性と載荷速度依存性, 資源・素材学会誌, 125, pp.481-488 (2009)
- 27) 大久保誠介, 秋哲淵: “気乾状態と湿潤状態での田下凝灰岩ならびに大谷凝灰岩の一軸圧縮クリープ”, 材料, 43, pp.819-825 (1994)
- 28) 羽柴公博, 高秀君, 大久保誠介, 福井勝則: “小型岩石試験片用の三軸圧縮試験法の開発”, 材料, 56, pp.790-795 (2007)
- 29) 秋哲淵, 大久保誠介, 福井勝則: “気乾状態と湿潤状態での岩石の圧裂・一軸引張強度の分布特性”, 資源・素材学会誌, 111, pp.231-237 (1995)
- 30) 福井勝則, 大久保誠介, 西松裕一: “一軸圧縮荷重下での岩石のクリープ特性, 資源・素材学会誌, 105, pp.521-526 (1989)
- 31) 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)
- 32) 大久保誠介, 福井勝則, 斉慶新: “石炭強度の載荷速度依存性に関する研究”, 資源・素材学会誌, 118, pp.23-28 (2002)
- 33) 西松裕一, 大久保誠介, 山口勉, 小泉昇三: “岩石の圧縮破壊過程におよぼすひずみ速度の影響”, 日本鉱業会誌, 97, pp.1163-1168 (1981)
- 34) Okubo S., Fukui K. and Nishimatsu Y.: “Local safety factor applicable to wide range of failure criteria”, Rock Mech. Rock Engng., 30, pp.223-227 (1997)
- 35) Bieniawski, Z. T.: “Estimating the strength of rock materials”, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 74, pp.312-320 (1974)
- 36) Janach, W.: “Failure of granite under compression”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 14, pp.209-215 (1977)
- 37) 大久保誠介, 福井勝則, 張建東: “岩石の時間依存性を考慮した三次元 FEM 解析”, 資源・素材学会誌, 114, pp.79-85 (1998)
- 38) 日科技連: “信頼性データの解析”, 日科技連(1967)
- 39) 伏見正則: “乱数”, 東京大学出版会(東京), 第1章(1989)
- 40) 福井勝則, 大久保誠介: “掘削抵抗から得られた岩盤強度の分布特性”, 資源・素材 2005 (室蘭)講演資料, pp.87-90 (2005)
- 41) 大久保誠介, 平野享, 松井裕哉: “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)”, JAEA-Research 2009-020 (2009)

# 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량   | 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 <sup>2</sup>     |
| 体積                     | 立法メートル       | m <sup>3</sup>     |
| 速度                     | メートル毎秒       | m/s                |
| 加速度                    | メートル毎秒毎秒     | m/s <sup>2</sup>   |
| 波数                     | 毎メートル        | m <sup>-1</sup>    |
| 密度，質量密度                | キログラム毎立方メートル | kg/m <sup>3</sup>  |
| 面積密度                   | キログラム毎平方メートル | kg/m <sup>2</sup>  |
| 比体積                    | 立方メートル毎キログラム | m <sup>3</sup> /kg |
| 電流密度                   | アンペア毎平方メートル  | A/m <sup>2</sup>   |
| 磁界の強さ                  | アンペア毎メートル    | A/m                |
| 量濃度 <sup>(a)</sup> ，濃度 | モル毎立方メートル    | mol/m <sup>3</sup> |
| 質量濃度                   | キログラム毎立法メートル | kg/m <sup>3</sup>  |
| 輝度                     | カンデラ毎平方メートル  | cd/m <sup>2</sup>  |
| 屈折率 <sup>(b)</sup>     | (数字の) 1      | 1                  |
| 比透磁率 <sup>(b)</sup>    | (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) ともよばれる。  
(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 <sup>(b)</sup>   | rad               | 1 <sup>(b)</sup>     | m/m                                                            |
| 立体角                        | ステラジアン <sup>(b)</sup> | sr <sup>(c)</sup> | 1 <sup>(b)</sup>     | m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>                                 |
| 周波数                        | ヘルツ <sup>(d)</sup>    | Hz                |                      | s <sup>-1</sup>                                                |
| 力                          | ニュートン                 | N                 |                      | m kg s <sup>-2</sup>                                           |
| 圧力，応力                      | パスカル                  | Pa                | N/m <sup>2</sup>     | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>                             |
| エネルギー，仕事，熱量                | ジュール                  | J                 | N m                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>                              |
| 仕事率，工率，放射束                 | ワット                   | W                 | J/s                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>                              |
| 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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>              |
| 静電容量                       | ファラド                  | F                 | C/V                  | m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup> |
| 電気抵抗                       | オーム                   | Ω                 | V/A                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>              |
| コンダクタンス                    | ジーメンズ                 | S                 | A/V                  | m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup> |
| 磁束                         | ウェーバ                  | Wb                | Vs                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>              |
| 磁束密度                       | テスラ                   | T                 | Wb/m <sup>2</sup>    | kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>                             |
| インダクタンス                    | ヘンリー                  | H                 | Wb/A                 | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>              |
| セルシウス度 <sup>(e)</sup>      | セルシウス度 <sup>(e)</sup> | ℃                 |                      | K                                                              |
| 光束度                        | ルーメン                  | lm                | cd sr <sup>(c)</sup> | cd                                                             |
| 照射度                        | ルクス                   | lx                | lm/m <sup>2</sup>    | m <sup>-2</sup> cd                                             |
| 放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>   | ベクレル <sup>(d)</sup>   | Bq                |                      | s <sup>-1</sup>                                                |
| 吸収線量，比エネルギー分与，カーマ          | グレイ                   | Gy                | J/kg                 | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                 |
| 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 <sup>(g)</sup>  | Sv                | J/kg                 | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                 |
| 酸素活性化                      | カタール                  | kat               |                      | s <sup>-1</sup> 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のみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(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 radionuchide）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                                                                        |
| 粘着力のモーメント      | パスカル秒<br>ニュートンメートル | Pa s<br>N m           | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup><br>m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>              |
| 表面張力           | ニュートン毎メートル         | N/m                   | kg s <sup>-2</sup>                                                                   |
| 角速度            | ラジアン毎秒             | rad/s                 | m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>                                   |
| 角加速度           | ラジアン毎秒毎秒           | rad/s <sup>2</sup>    | m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>                                   |
| 熱流密度，放射照度      | ワット毎平方メートル         | W/m <sup>2</sup>      | kg s <sup>-3</sup>                                                                   |
| 熱容量，エントロピー     | ジュール毎ケルビン          | J/K                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>                                    |
| 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 <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>                                       |
| 比エネルギー         | ジュール毎キログラム         | J/kg                  | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                                       |
| 熱伝導率           | ワット毎メートル毎ケルビン      | W/(m K)               | m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>                                                 |
| 体積エネルギー        | ジュール毎立方メートル        | J/m <sup>3</sup>      | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>                                                   |
| 電界の強さ          | ボルト毎メートル           | V/m                   | m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>                                                 |
| 電荷密度           | クーロン毎立方メートル        | C/m <sup>3</sup>      | m <sup>-3</sup> s A                                                                  |
| 表面電荷           | クーロン毎平方メートル        | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>-2</sup> s A                                                                  |
| 電束密度，電気変位      | クーロン毎平方メートル        | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>-2</sup> s A                                                                  |
| 誘電率            | ファラド毎メートル          | F/m                   | m <sup>-3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>                       |
| 透磁率            | ヘンリー毎メートル          | H/m                   | m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>                                                 |
| モルエネルギー        | ジュール毎モル            | J/mol                 | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>                                  |
| 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 <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>                  |
| 照射線量（X線及びγ線）   | クーロン毎キログラム         | C/kg                  | kg <sup>-1</sup> s A                                                                 |
| 吸収線量率          | グレイ毎秒              | Gy/s                  | m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>                                                       |
| 放射強度           | ワット毎ステラジアン         | W/sr                  | m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> |
| 放射輝度           | ワット毎平方メートル毎ステラジアン  | W/(m <sup>2</sup> sr) | m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>                |
| 酵素活性濃度         | カタール毎立方メートル        | kat/m <sup>3</sup>    | m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol                                                  |

表 5. SI 接頭語

| 乗数               | 接頭語 | 記号 | 乗数                | 接頭語  | 記号 |
|------------------|-----|----|-------------------|------|----|
| 10 <sup>24</sup> | ヨ   | Y  | 10 <sup>-1</sup>  | デシ   | d  |
| 10 <sup>21</sup> | ゼ   | Z  | 10 <sup>-2</sup>  | センチ  | c  |
| 10 <sup>18</sup> | エクサ | E  | 10 <sup>-3</sup>  | ミリ   | m  |
| 10 <sup>15</sup> | ペ   | P  | 10 <sup>-6</sup>  | マイクロ | μ  |
| 10 <sup>12</sup> | テ   | T  | 10 <sup>-9</sup>  | ナノ   | n  |
| 10 <sup>9</sup>  | ギ   | G  | 10 <sup>-12</sup> | ピコ   | p  |
| 10 <sup>6</sup>  | メガ  | M  | 10 <sup>-15</sup> | フェムト | f  |
| 10 <sup>3</sup>  | キロ  | k  | 10 <sup>-18</sup> | アト   | a  |
| 10 <sup>2</sup>  | ヘクト | h  | 10 <sup>-21</sup> | ゼプト  | z  |
| 10 <sup>1</sup>  | デカ  | da | 10 <sup>-24</sup> | 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                                                                                |
|-------|------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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 <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>                                     |
| リットル  | L, l | 1L=1l=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> |
| トン    | t    | 1t=10 <sup>3</sup> 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 <sup>-19</sup> J   |
| ダルトン     | Da | 1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> 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 <sup>11</sup> m |

表 8. SIに属さないが<sup>3</sup>、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 <sup>5</sup> 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 <sup>-10</sup> m                                              |
| 海里        | M    | 1 M=1852m                                                                        |
| バイン       | b    | 1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm)2=10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup> |
| 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、<br>対数量の定義に依存。                                                     |
| ベレル       | B    |                                                                                  |
| デジベール     | 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                    | erg | 1 erg=10 <sup>-7</sup> J                                                               |
| ダイン                   | dyn | 1 dyn=10 <sup>-5</sup> N                                                               |
| ポアズ                   | P   | 1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s                                                  |
| ストークス                 | St  | 1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> |
| スチルブ                  | sb  | 1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>                          |
| フオット                  | ph  | 1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx                                        |
| ガッラル                  | Gal | 1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>                           |
| マクスウェル                | Mx  | 1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb                                          |
| ガウス                   | G   | 1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T                                           |
| エルステッド <sup>(c)</sup> | Oe  | 1 Oe≐ (10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>                                           |

(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 <sup>10</sup> Bq                                 |
| レントゲン     | R    | 1 R = 2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg                             |
| ラド        | rad  | 1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy                               |
| レム        | rem  | 1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv                              |
| ガンマ       | γ    | 1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T                                  |
| フェルミ      |      | 1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m                               |
| メートル系カラット |      | 1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 <sup>-4</sup> 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℃」カロリー）， 4.1868J（「IT」カロリー） 4.184J（「熱化学」カロリー） |
| マイクロン     | μ    | 1 μ =1μm=10 <sup>-6</sup> m                                  |

