JAEA-Research
2009-020

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　平野 享　松井 裕哉

Seisuke OKUBO, Toru HIRANO and Hiroya MATSUI

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

August 2009

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

JAEA-Research 2009-020

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*、平野 享※、松井 裕哉

（2009 年 6 月 17 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おいては、建設時および操業時は言うまでもなく、坑道埋め戻し後も数千年から数万年の長期にわたる坑道の安定性が要求される。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。2007 年度までの研究により、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、2008 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。つぎに第 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。まず、10 年間以上にわたり試験を継続した経験に基づき、試験機本体、圧力制御装置、センサーおよびメータに関する知見を総括した。また、試験結果では、クリープ歪はわずかずつであるが連続して増えており、一方、クリープ歪速度は経過時間の－0.9 乗に比例して減少することが示された。これらの挙動は、短期クリープ試験で把握される一次クリープに類似したものであった。つづいて第 3 章では、一般化応力緩和試験をサーボ制御試験機で行うための制御プログラムを拡張し、これまで実施できなかった条件での一般化応力緩和試験を土岐花崗岩に対して行い、既に得られている土岐花崗岩の時間依存性挙動モデルのパラメータが、新たな条件でも妥当な値であることを確認した。最後に第 4 章では、時間依存性挙動モデル（拡張コンプライアンス可変型構成方程式）のパラメータ取得方法を総括した。また、パラメータ取得における問題点とパラメータの信頼性向上の考え方、さらに、工学的な応用に必要と考えられる時間依存性挙動を踏まえた岩盤分類の概念を示した。

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
＊　東京大学
※　技術開発協力員

JAEA-Research 2009-020

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

Seisuke OKUBO*, Toru HIRANO※ and Hiroya MATSUI

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

(Received June 17, 2009)

Rock shows time-dependent behavior such as creep/relaxation. On the radioactive waste disposal, the long-term mechanical stability of shaft and gallery excavated in rock were required, over a period of thousands of years not only during construction and operation but also after back-filling. Therefore, it is very important to understand the time-dependent behavior of rock for evaluating the long-term mechanical stability.

The purpose of this study is finding out the mechanism of time-dependent behavior of rock by the precision test, observation and measurement, to develop the method evaluating of long-term mechanical stability. In the previous work, the testing technique has been established and the basic of evaluating method was developed. Recently, some parameters needed for simulation of time-dependent behavior at Mizunami underground facilities were determined. But we have not enough to check on reliability of the evaluating method, of these parameters.

This report describes the results of the works in the fiscal year 2008. In Chapter 1, we described the overview and background of this study. In Chapter 2, the creep testing system including a testing machine, pressure control equipments, sensors and meters were reviewed on the basis of more than 10 years experience. The long-term creep test of Tage tuff was continuously conducted and the total testing time exceeded 11 years. The strain was increasing at very low speed and the strain rate was decreasing following elapsed time to powers of -0.9. This behavior is likely to previous result of short-term test. In Chapter 3, in order to test along any relaxation pattern, the control program to conduct generalized relaxation testing in a servo-controlled testing machine was extended. Then, generalized relaxation test of Toki granite were carried out successfully. The parameters in the variable-compliance-type constitutive equation for Toki granite were deduced. In Chapter 4, fundamental concept of the constitutive equation was described and parameter-obtaining methods for this constitutive equation were reviewed and criticized. In the final part, an idea of new rock characterization where time-dependent behavior of rock is considered as the very important factor was proposed.

Keywords: Crystalline Rock, Time-dependent Behavior, Creep, Constitutive Equation

---

This work was perfomed by Tokyo University under contract with Japan Atomic Energy Agency.
* The University of Tokyo
※ Collaborating Engineer

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 試験の経緯と試験装置の維持・管理 3
2.3 試験結果 4
2.4 考察 7
2.4.1 長期クリープ試験における応力変動の影響評価 7
2.4.2 長期と短期のクリープ試験結果の比較 8
2.5 まとめ 12
3.　結晶質岩（土岐花崗岩）の一般化応力緩和試験 13
3.1 制御プログラムの拡張 13
3.2 試験方法 15
3.3 試験結果 18
3.4 構成方程式のパラメータの検証 22
3.5 まとめ 24
4.　コンプライアンス可変型構成方程式に基づく結晶質岩の長期挙動の予測手法の開発 26
4.1 構成方程式 26
4.2 一軸圧縮応力下における構成方程式中のパラメータの求め方 26
4.2.1 n の求め方 27
4.2.2 m の求め方 27
4.2.3 a の求め方 29
4.3 三軸圧縮応力下における構成方程式中のパラメータの求め方 29
4.4 パラメータの信頼性向上の考え方 31
4.5 時間依存性を考えた岩盤分類 32
4.6 まとめ 33
5.　おわりに 34
参考文献 35

CONTENTS

1. Introduction 1
2. Long-term creep test of Tage 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
2.4 Discussions 7
2.4.1 An asssesment of the influence of variance in creep loading on result 7
2.4.2 Relationship between long-term creep and short-term creep 8
2.5 Summary 12
3. Generalized relaxation test of Toki granite 13
3.1 Extention of the equipment control program 13
3.2 Testing method 15
3.3 Results 18
3.4 Validation of constitutive eqation parameters about Toki granite 22
3.5 Summary 24
4. Development of the evaluating method on long-term behavior in crystalline rock 26
4.1 A variable-compliance-type constitutive eqation 26
4.2 Parameters setting of constitutive eqation under uniaxial stress state 26
4.2.1 Determination of n 27
4.2.2 Determination of m 27
4.2.3 Determination of a 29
4.3 Parameters setting of constitutive eqation under triaxial stress state 29
4.4 Strategy to get reliable constitutive eqation parameters 31
4.5 A rock classification considering its time-dependent behavior 32
4.6 Summary 33
5. Conclusion 34
Reference 35

図目次

図 2-1　空圧式一軸圧縮クリープ試験装置の概略図 …… 3
図 2-2　クリープ歪と減圧弁の出口圧力の経時変化 …… 4
図 2-3　クリープ歪の経時変化 …… 5
図 2-4　クリープ歪速度の経時変化 …… 5
図 2-5　クリープ歪とクリープ歪速度の関係 …… 6
図 2-6　式(2-4)で計算された τ の経時変化 …… 7
図 2-7　クリープ応力レベルとクリープ寿命の関係 …… 8
図 2-8　短期と長期のクリープ試験で得られたクリープ歪の経時変化 …… 9
図 2-9　短期と長期のクリープ試験で得られたクリープ歪速度の経時変化 …… 9
図 2-10　t^* と $d\varepsilon^*/dt$ の関係 …… 10
図 2-11　クリープ歪速度が最小となった時の応力と歪の関係 …… 11
図 3-1　一般化応力緩和試験の概念図 …… 13
図 3-2　一般化緩和応力試験のための試験機の制御システム …… 14
図 3-3　試料とした MIZ-1 号孔で採取した土岐花崗岩 …… 16
図 3-4　試験に用いた容量 500 kN サーボ試験機の写真 …… 17
図 3-5　試験に用いたサーボ試験機と計測装置の概略図 …… 17
図 3-6　一般化応力緩和試験開始までの応力－歪曲線 …… 18
図 3-7　緩和応力および歪の経時変化（緩和方向係数－2.0） …… 19
図 3-8　緩和応力および歪の経時変化（緩和方向係数 0.25） …… 19
図 3-9　緩和応力および歪の経時変化（緩和方向係数 2.0） …… 20
図 3-10　緩和応力および歪の経時変化（すべての試験結果） …… 20
図 3-11　一般化応力緩和試験開始 10^4 s 後の緩和応力および歪と ϕ の関係 …… 21
図 3-12　一般化応力緩和試験開始 10^4 s 後の応力－歪線図上での位置 …… 22
図 3-13　一般化応力緩和試験終了後に行った一軸圧縮試験結果 …… 22
図 3-14　一般化応力緩和試験開始から 10^4 s 後の正規化した応力－歪線図上での位置 …… 24
図 4-1　構成方程式中のパラメータ m を求めるためにピーク強度以降の応力－歪曲線の傾きを求める方法の説明 …… 28
図 4-2　ピーク強度以降の応力－歪曲線の傾き α から構成方程式のパラメータ m と n の比を求める線図 …… 28
図 4-3　水分（湿度）、温度、周圧の影響 …… 28

表目次

表 2-1　田下凝灰岩の一軸圧縮応力下での力学特性……2
表 3-1　試料岩石（土岐花崗岩）の物性値……16
表 3-2　一般化応力緩和試験に供した試験片の諸元と試験結果 ……17
表 4-1　コンプライアンス可変型構成方程式のパラメータを求めるための三段階の説明 ……30
表 4-2　粘弾性（時間依存性）を考慮した岩盤区分のイメージ ……32
表 4-3　時間依存性と内部摩擦角を考えた岩盤分類の一案 ……32

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分のための坑道においては、建設から操業を経て坑道埋め戻し後の数千年～数万年にわたる、短期から超長期までの力学的安定性が要求される。一方、その坑道が作られる岩石や岩盤は、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、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[1)]。一方、原子力機構の進める超深地層研究所計画[2)]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、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なわれたもので、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、2008 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。はじめに、現在も特に問題なく継続しているその試験について、長期試験の継続を可能とした手法やメンテナンス方法等について経験や知見をまとめた。つぎに、2007 年度までに取得した約 10 年間の長期データに基づいて、破壊強度の 3 割という低応力レベルでの長期クリープ挙動をまとめた。さらに、この挙動を、比較的応力レベルが高い、既往の短期クリープ試験の結果と比較し、非線形粘弾性論を拠りどころとして相互の関係や性質等の検討を行った。続いて、第 3 章では、岩盤が原位置においてはクリープと応力緩和の中間的状態におかれる可能性が高いことを考慮して、土岐花崗岩の一般化応力緩和試験を行った。一般化応力緩和試験は 2007 年度に引続き行ったものであるが、本年度は試験機の制御プログラムを改良し、試験で再現可能な応力と歪の変化方向を拡張した。この新しい手順に沿って、これまで実施できなかった条件下の一般化応力緩和試験を行った。最後に第 4 章では、非線形粘弾性論を拠りどころとして、岩石や岩盤の時間依存性挙動を表現する際に用いる、拡張コンプライアンス可変型構成方程式[3)]を概観し、その式に含まれるパラメータを取得する方法を総括した。また、パラメータ取得における工学的な難易度や問題点を指摘し、パラメータの信頼性向上のための考え方を述べた。さらに、把握された時間依存性挙動の工学的な応用のために、時間依存性（粘弾性的性質）を考慮した岩盤分類の概念を述べた。

2. 堆積岩（田下凝灰岩）の長期クリープ試験

本章では、2007 年度までに達成した、試験期間 10.6 年に及ぶ田下凝灰岩のクリープ試験の経験から、その試験方法や維持管理の要点をとりまとめた。また、そこで取得されたデータを対象として、低応力レベルでの長期クリープ挙動を解明し、さらに、非線形粘弾性論を拠りどころとして、従来の研究で得られている短期クリープ試験結果と今回の長期クリープ試験結果を比較し、統一的な試験結果の検討を試みた。

2.1 試料岩石と試験方法

試料岩石および試験方法は、既報のとおり[4]であるが、以下、重要事項について再掲する。試料岩石としては、使用経験が豊富な、栃木県宇都宮市産の田下凝灰岩を用いた。この岩石は空隙率が 20～30 %程度の多孔質で、0.3～1.5 mm 程度の粒子が多く見られる[5]。表 2-1 には田下凝灰岩の一軸圧縮応力下での力学特性[6]を示した。気乾状態での一軸圧縮強度は 16 MPa とかなり弱い岩石であり、湿潤状態では強度もヤング率も顕著に低下する。表中のパラメータの詳細については後述するが、時間依存性の程度を表す n の値は岩石の標準的な範囲内（20～80 程度）にある[7]。湿潤状態では気乾状態よりも n が小さく、時間依存性の程度が顕著になることを示している。

表 2-1 田下凝灰岩の一軸圧縮応力下での力学特性
（強度とヤング率は歪速度 10^{-5}/s で取得）

	気乾	湿潤
強度（MPa）	16	9.1
ヤング率（GPa）	3.6	2.6
n	41	25
δ	45	30

試験片は直径 25 mm、高さ 50 mm の円柱形とした。作製した試験片は試験室で自然乾燥させた後、真空ポンプで減圧しながら飽和状態となるまで水を強制浸透させた。その後、1 ヶ月以上水中に放置してから試験に用いた。この場合に用いた水は、後述するように pH が安定したイオン交換水である。

載荷装置として、図 2-1 に示した空圧式の一軸圧縮クリープ試験装置を用いた。コンプレッサは上限と下限圧力を設定し、圧力が下限まで下がるとモータが運転を始め、設定した上限に達するとモータは止まる。減圧弁（Bellofram 社製）ではコンプレッサからの一次圧をバルブによって減圧し、二次圧として出力している。この際、減圧弁のブリード孔からは空気が絶えず漏れるようになっているが、その量は微少であり、モータは 2～3 時間に 1 回、1 分程度の運転ですむため長期間の使用に適している。減圧弁の出口圧力は、歪ゲージ式の圧力変換器とブルドン管式圧力計で常にモニタした。空気圧シリンダの有効受圧面積は 141 cm^2 であり、空気の漏れ止め用のシールが使われていないので、圧力×有効受圧面積で荷重が計算できる。試験では、減圧弁の出口圧力を 0.098 MPa（クリープ応力で 2.8 MPa 相当）に設定した。これは、地下空間利用の際に凝灰岩に期待されるであろう深度（100 m 程度以浅）とその際に見込まれる安全率（2 以上）を考慮して決定した。湿潤状態での田下凝灰岩の一軸圧縮強度は 9.1 MPa のため、クリープ応力レベルは 30 %となる。

変位の測定には2個の歪ゲージ式のシングルカンチレバー式変位計（東京測器研究所製）を用いた。変位計の出力は直流式の歪増幅器（共和電業製）を経てディジタルマルチメータ（アドバンテスト製）に表示される。試験開始後の変位の増加が大きいうちは、この出力を GPIB で計算機に取り込み、Okubo et al.[8] と同様にクリープ歪が一定量の変化をする度に記録・保存した。変位の変動が小さくなってからは、毎週月曜日と金曜日の午前 10 時にディジタルマルチメータの値を読み取って記録した。歪増幅器は同一の製品を5～10台程度購入し、個別に評価試験を行い、最も安定性の良いものを用いた。

試験中は常時空調し、温度変化は22±2℃であった。試験は試験片全体を水没させた完全湿潤条件で行い、購入した pH 7 のイオン交換水に大気中の二酸化炭素が溶け込み、pH が安定するまで放置してから試験に用いた。そのときの pH は 5.7 であった。なお、試験中に水面から水が蒸発した際に継ぎ足す水も pH が安定したイオン交換水を用いた。

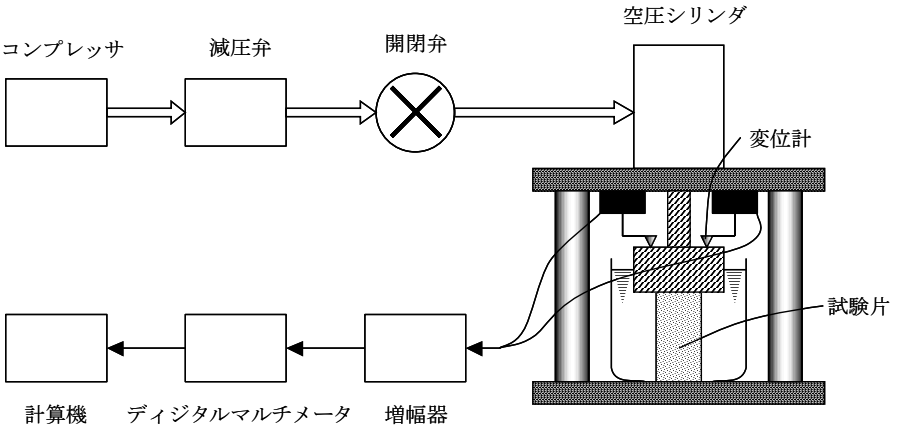


図 2-1　空圧式一軸圧縮クリープ試験装置の概略図

2.2　試験の経緯と試験装置の維持・管理

試験方法や試験装置、試験条件に関する準備を入念に行った後、1994年11月22日にクリープ試験を開始した（試験片#1）。試験は順調に行われたが、1996年8月に変位の測定値が不自然な動きを示すようになったため試験を中止した。試験中止後の調査により、歪増幅器の出力用のオペアンプが故障していたこと（零点の異常）が判明した。歪増幅器の故障としては、零点の異常の他にゲインの異常が生じることも考えられる。また、その他の計測装置が試験中に故障する可能性もある。そこで2本目の試験を行う前に、計測装置に不具合が生じた場合でも試験が継続できるように対応策を検討した。

歪増幅器に不具合が生じた場合の対応策として、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ことにした。圧力計が異常を示した場合は、図 2-1 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ことにした。変位計が異常を示した場合は、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ことにした。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が異常の原因と判断した場合に限定することにした。試験の継続に対して重大な問題とはならなかったが、試験片#1の試験中に計算機の CRT とデータ記録用のフロッピーディスクドライブが故障した。これらの対応策として、計測に用いる計算機などは同機種を複数台ストックすることにした。また、その他の機器についても、故障時に速やかに購入できるものを用いたり、同一機種を複数台購入して使用した。

このような準備を経て、1997 年 5 月 23 日に 2 本目のクリープ試験を開始した（試験片#2）。試験が正常に行われていることを確認するため、毎日、①空気圧が設定値に保持されているか、②試験片が完全に水没した状態になっているか、③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、を確認した。試験開始後 1 週間以上経過すると、クリープ変位の変化はかなり小さくなる。変位の出力値に大きな変化が見られた場合は、実際に試験片のクリープ変位が大きくなったか、計測装置に異常が生じた可能性があるため、試験体や装置を検査し、装置の不具合は修理等で回復可能であれば対処する。また適宜、④コンプレッサ内部の水抜き、⑤減圧弁のブリード孔の掃除、を行った。前述のように、減圧弁のブリード孔からは微量の空気が絶えず漏れるようになっている。ブリード孔から空気が漏れなくなると圧力調整ができなくなるため、定期的に掃除をする必要があった。

試験片#2 の試験中にコンプレッサと試験室の空調機が故障したため新品に交換したが、その他の機器に異常はなく、2007 年 5 月 23 日で試験開始から 10 年が経過した。試験はその後も問題なく継続しており、本年度中に 11.5 年まで経過しているが、本章では一旦 2007 年 10 月 15 日までのデータを整理して、詳細な検討を行った。

2.3　試験結果

図 2-2 上部には、10 年間のクリープ歪の経時変化を示した。試験では載荷開始後 0.3 秒で目標とするクリープ応力に達するが、若干の振動があることなどから、本研究では載荷開始後 1 秒経過したときの歪をクリープ歪の起点とした。試験開始から約 1000 日経過後までは、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データである。それ以降は、毎週月曜日と金曜日の午前 10 時に取得したデータを細線で、各月の平均値の変化を太線で示した。また、図の下部に 2000 年 3 月から記録を開始した減圧弁の出口圧力の変化も示した。

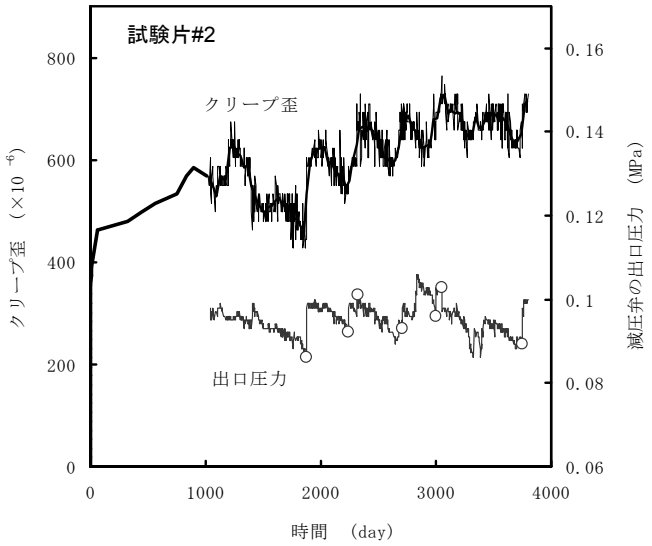


図 2-2　クリープ歪と減圧弁の出口圧力の経時変化

約 1000 日経過後は，クリープ歪の変化を細線で，その月平均を太線で示した．

減圧弁の出口圧力を調整した時点を○で示した．

クリープ歪は試験開始後大きく増加し、10 日後には約 400×10^{-6} になった。その後も徐々に増加していき、500 日後には約 500×10^{-6}、1000 日後には約 600×10^{-6} になった。それ以降、細線で示した毎回の計測結果は、太線で示した毎月の平均値に対して $\pm50\times10^{-6}$ 程度の範囲内で変動しながら推移した。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 10×10^{-6} /℃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ある。ただし、この変動は 10 年間にわたってほぼ一定で続いており、データの解釈には大きな問題は生じないと考える。

減圧弁の出口圧力の設定値は 0.098 MPa であるが、記録を開始した 2000 年 3 月以降、値が徐々に低下した。また、それに伴ってクリープ歪も徐々に減少した。そのため、試験開始から約 1900 日経過後の 2002 年 7 月 12 日にシリンダの手前の開閉弁を閉め、減圧弁のブリード孔を掃除し、圧力を再度調整した後、開閉弁を開けて試験を再開した。その結果、出口圧力はほぼ設定値に戻り、クリープ歪も圧力低下前とほぼ同じ値に戻った。それ以降も、図中に○で示したように、出口圧力が設定値からずれた時点で、適宜、減圧弁のブリード孔の掃除と圧力の再調整を行った。減圧弁の出口圧力の変動はわずかであったが、この影響については次節で考察する。

このように、クリープ歪の測定値には種々の要因による変動が見られたため、長期データの整理にあたり、データ処理の工夫で変動要因の消去ができないか検討が必要である。例えば図 2-2 を見ると、減圧弁のブリード孔を掃除し、圧力を再調整した後の数ヶ月間は、出口圧力は設定値にほぼ保たれていた。そこで、圧力の再調整を行うようになった約 1900 日経過後からは、圧力を再調整した次月に得られたクリープ歪の平均値を計算し、それを記録と見なすようデータ整理の方法を変えた。図 2-3～2-5 はクリープ試験の結果を示すものである。図中、試験片#2 の▲で示された部分は圧力再調整を行なっている期間のデータである。なお、白抜き（◇）は中断した試験片#1 の結果であるが、こちらは圧力再調整を行っていない。試験片#2 は歪が徐々に増加しており、試験開始から 10 年経った現在でもクリープ歪の収束は見出し難い。試験片#1 と試験片#2 を比較すると、試験開始から 10^3 秒後までは両者の結果はよく一致しているが、その後は試験片#1 のクリープ歪の方が大きくなっている。ただし、10^5 秒以降は 2 本の結果はほぼ平行になっており、比較的良好な再現性を示しているといえる。

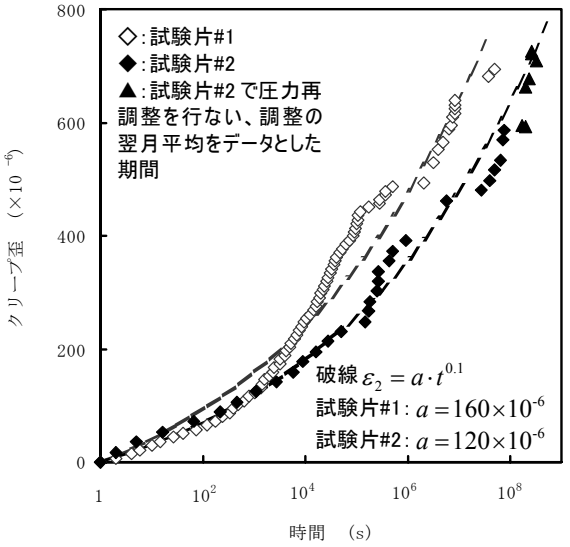


図 2-3　クリープ歪の経時変化

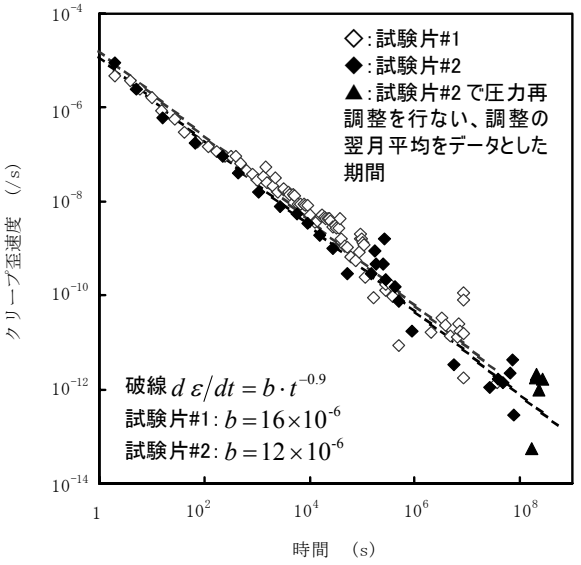


図 2-4　クリープ歪速度の経時変化

図 2-3 中の破線は近似曲線であり、次式で表される。

$$\varepsilon = A\,t^{\frac{1}{\mu+1}} \tag{2-1}$$

ここで、ε は歪、t は経過時間である。A は試験片#1 では 160×10^{-6}、試験片#2 では 120×10^{-6} であり、μ はいずれの試験片とも 9 とした。いずれの試験片の結果とも、(2-1)式で表される曲線で概ね近似できている。

図 2-4 には、クリープ歪速度の経時変化を示した。図中の実線と破線は、(2-1)式を t で微分して得られる次式による計算結果である。

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\mu+1} A\,t^{\frac{1}{\mu+1}-1} \tag{2-2}$$

クリープ歪速度は試験開始からほぼ直線的に減少しており、試験開始から 10 年が経過した現在でも減少は続いているといえる。試験結果にはある程度のばらつきはあるものの、いずれの試験片とも(2-2)式による計算結果とよく一致しており、クリープ歪速度は経過時間の－0.9 乗にほぼ比例していることがわかる。この結果は、一次クリープではクリープ歪速度が経過時間の約－1 乗に比例するとした、比較的短期間のクリープ試験結果とほぼ一致している[8)9)]。

図 2-5 には、クリープ歪とクリープ歪速度の関係を示した。図中の実線と破線は、(2-1)式と(2-2)式から導かれた次式による計算結果である。

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\mu+1} A^{\mu+1}\,\varepsilon^{-\mu} \tag{2-3}$$

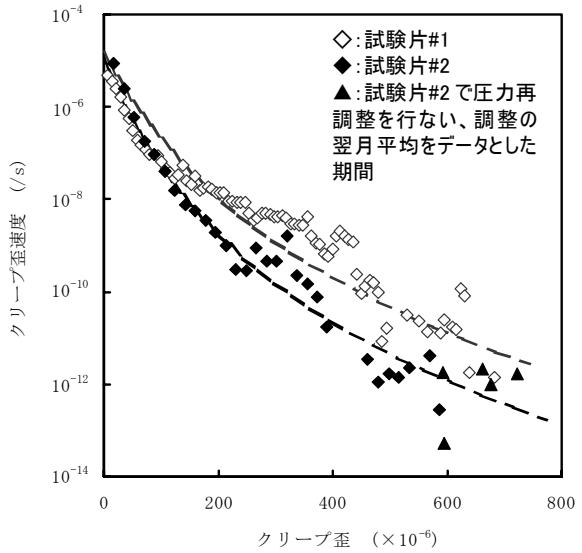


図 2-5　クリープ歪とクリープ歪速度の関係

いずれの試験片でも、クリープ歪とクリープ歪速度の関係は図のように下に凸の曲線で表され、試験結果と計算結果とはよく一致している。

2.4 考察

2.4.1 長期クリープ試験における応力変動の影響評価

図 2-2 に示したように、減圧弁の出口圧力すなわちクリープ応力は、設定値よりもやや小さくなることがあり、最大で設定値の 10 %程度の変動が見られた。この変動がクリープ挙動に及ぼす影響について検討してみる。

横堀[10]の確率過程論に基づく研究結果でも大久保[11]の非線形粘弾性論に基づく研究結果でも、岩石の変形や破壊の進む速度は応力の関数 $g(\sigma^*)$ に比例するとしている。そこで、本研究でも、ある時点での変形や破壊の進み具合（ある時点までの応力履歴の影響）が次式の τ によって決まるとして議論を進めることにする。ただし、σ^* は強度で正規化した応力（応力レベル）である。

$$\tau = \int_0^t g(\sigma^*)dt \qquad (2\text{-}4)$$

$g(\sigma^*)$ の関数形として $(\sigma^*)^n$ を採用し、10 年間の τ の変化を計算した結果を図 2-6(a)に実線で示した。

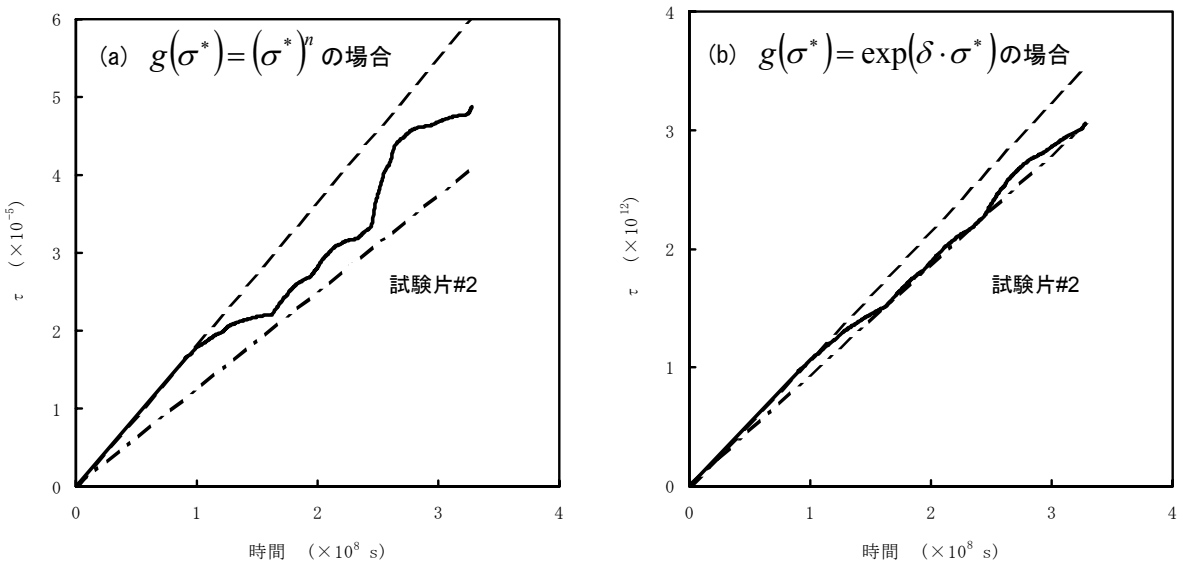


図 2-6 式(2-4)で計算された τ の経時変化
実線：試験結果より計算された τ
破線：クリープ応力が 2.8 MPa で保持された場合の τ
一点鎖線：クリープ応力が 2.8 MPa より 1.5%小さく保持された場合の τ

表 2-1 に示したように時間依存性の程度を決めるパラメータ n は 25 としたが、この値の算出方法については次節で説明する。なお、試験開始からの約 3 年間は減圧弁の出口圧力の値を記録していないため、この間はクリープ応力が設定値に保たれていたと仮定した。図には、10 年間クリープ応力が設定値に保たれた場合の τ を破線で示した。クリープ応力が一定に保たれた場合は、経過時間と τ は比例するため、両者の関係は破線で示したように直線になる。しかし、クリープ応力を厳密に一定に保つことは難しいため、実際の試験では τ は直線からずれることになる。今回の試験ではクリープ応力が設定値よりも小さくなる場合が多かったため、τ は破線よりも下側にきている。そこで、τ の低下がどの程度かを検討するため、クリープ応力が設定値よりも 1.5 %

小さい値で一定に保たれたとした場合のτの変化を一点鎖線で示した。図からわかるように、今回の試験結果は一点鎖線で示した結果よりも上側に位置している。すなわち、今回の試験で試験片が被った応力履歴は、クリープ応力が設定値で一定に保たれた場合よりは小さいものの、それよりもわずか1.5 %小さいクリープ応力を受け続けた場合よりは大きいと予想される。

$g(\sigma^*)$の関数形としては、$(\sigma^*)^n$の他に$\exp(\delta\cdot\sigma^*)$や$\sinh(\delta\cdot\sigma^*)$などが使われることがある[12)13)]。べき級数展開するとわかるように、$\exp(\delta\cdot\sigma^*)$や$\sinh(\delta\cdot\sigma^*)$には$(\sigma^*)^n$以外の項も含まれる。しかし、現状ではこれらの関数形の差を議論できるほどの高精度なデータの蓄積は乏しい。図2-6(b)には、$g(\sigma^*)$の関数形として$\exp(\delta\cdot\sigma^*)$を採用した場合の$\tau$の変化を示した。表2-1に示したように$\delta$は30としたが、この値の算出方法については次節で説明する。図2-6(a)と同様に、試験結果を実線、クリープ応力が設定値に保たれた場合の結果を破線、クリープ応力が設定値よりも1.5%小さい値で一定に保たれた場合の結果を一点鎖線で示した。図よりわかるように、$\exp(\delta\cdot\sigma^*)$を採用した場合も、試験片が被った応力履歴は、クリープ応力が設定値で一定に保たれた場合（破線）と、それよりもわずか1.5%小さいクリープ応力を受け続けた場合（一点鎖線）の間におさまった。なお、$g(\sigma^*)$の関数形として$\sinh(\delta\cdot\sigma^*)$を用いた場合も、$\exp(\delta\cdot\sigma^*)$を用いた場合とほぼ同じ結果であった。

以上の検討結果より、今回の試験では図2-2のようにクリープ応力の変動があったが、その影響はクリープ応力に換算して高々1.5 %程度と考えられる。

2.4.2 長期と短期のクリープ試験結果の比較

大久保・秋[14)]は、本研究と同じブロックから整形した田下凝灰岩の試験片を用いて、比較的高い応力レベルで短期間のクリープ試験を行った。使用した載荷装置は本研究と同じ一軸圧縮クリープ試験装置であり、計測システムもほぼ同じである。試験は湿潤状態で行い、応力レベルは63 %、68 %、73 %、78 %、82 %、87 %、92 %の7通りとした。図2-7には、これらの試験で得られた応力レベルとクリープ寿命の関係を示した。各応力レベルで試験結果はばらついているものの、応力レベルが低いほどクリープ寿命が長くなる様子がわかる。

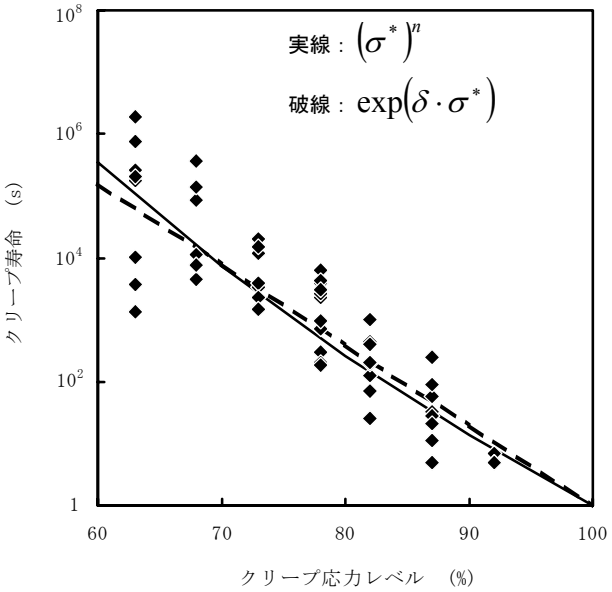


図2-7 クリープ応力レベルとクリープ寿命の関係

◆：大久保・秋[14)]の試験結果

大久保[11]にならって、前節の(2-4)式のτがある値Λに達したときに破壊が生じるとして以下の議論を進めることにする。いま、クリープ試験を応力レベルσ^*一定の条件で行なうものとし、その応力レベルを$\sigma_c{}^*$とおくと、(2-4)式右辺の$g\left(\sigma_c{}^*\right)$は一定値となり、クリープ寿命$t_c$は次式で表される。

$$t_c = \frac{\Lambda}{g\left(\sigma_c{}^*\right)} \tag{2-5}$$

$g\left(\sigma^*\right)$の関数形として$\left(\sigma^*\right)^n$を採用し、(2-5)式でクリープ寿命を計算した結果を図 2-7 に実線で示す。また$g\left(\sigma^*\right)$の関数形として$\exp\left(\delta\cdot\sigma^*\right)$を用いた場合の同結果を破線で示す。なお、$\sinh\left(\delta\cdot\sigma^*\right)$を用いた場合は$\exp\left(\delta\cdot\sigma^*\right)$とほぼ同じ結果になったので省略する。図 2-7 では何れの関数形でも試験結果と計算結果とは同程度に一致しており、ここで関数形の相違を議論できる程の試験精度はないと考えられる。Hashiba et al. と同様に、強度試験から(2-5)式のΛを決め、(2-5)式を試験結果にフィットさせると、関数形が$\left(\sigma^*\right)^n$の場合は$n=25$ となり、$\exp\left(\delta\cdot\sigma^*\right)$では$\delta=30$ となる。$n=25$ の値は過去に強度の載荷速度依存性より得られた値 23 とほぼ一致する。

長期と短期の試験で得られたクリープ歪曲線を図 2-8 に示した。長期試験の結果は本研究で得られた(2-1)式による近似曲線である。

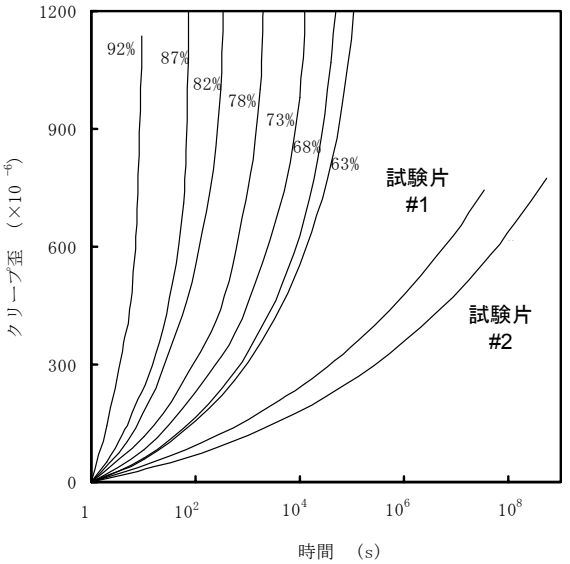


図 2-8 短期[14]と長期のクリープ試験で得られたクリープ歪の経時変化

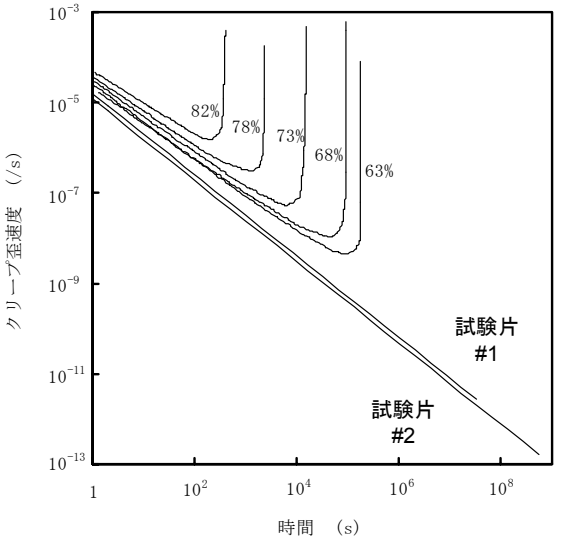


図 2-9 短期[14]と長期のクリープ試験で得られたクリープ歪速度の経時変化

短期間の結果は大久保・秋[14]の結果であり、各応力レベルで 1 例ずつ示した。いずれの応力レベルでも試験開始から若干下に凸の曲線を描きながらクリープ歪が増加しており、長期と短期でクリープ歪曲線の定性的な傾向は一致した。

図 2-9 には、図 2-8 に示した試験片のクリープ歪速度の経時変化を示した。短期間の結果については、クリープ寿命が短かった応力レベル 92 %と 87 %の結果は除いた。また、長期試験の結果は(2-2)式による近似曲線である。いずれの応力レベルでも、試験開始直後は両対数グラフ上で時間とクリープ歪速度の関係は直線的で、それぞれがほぼ平行になっている。すなわち、いずれの応力レベルでも、クリープ歪速度が経過時間の約－0.9 乗に比例して減少することがわかる。短期間の結果では、クリープ歪速度は最小値をとった後増加に転じ、破壊に至っている。一方、今回の試験では、試験開始から 10 年が経過した現在でもクリープ歪速度の減少は続いている。

大久保・秋[14]が実施した全ての短期クリープ試験結果を、横軸にt^*（経過時間tをクリープ寿命t_cで除した商：$t^* = t/t_c$）をとり、縦軸に$d\varepsilon^*/dt$（歪速度$d\varepsilon/dt$とクリープ寿命との積：$d\varepsilon^*/dt = d\varepsilon/dt^* = d\varepsilon/d(t/t_c)$）をとって整理し、図 2-10(a)に実線で示した。

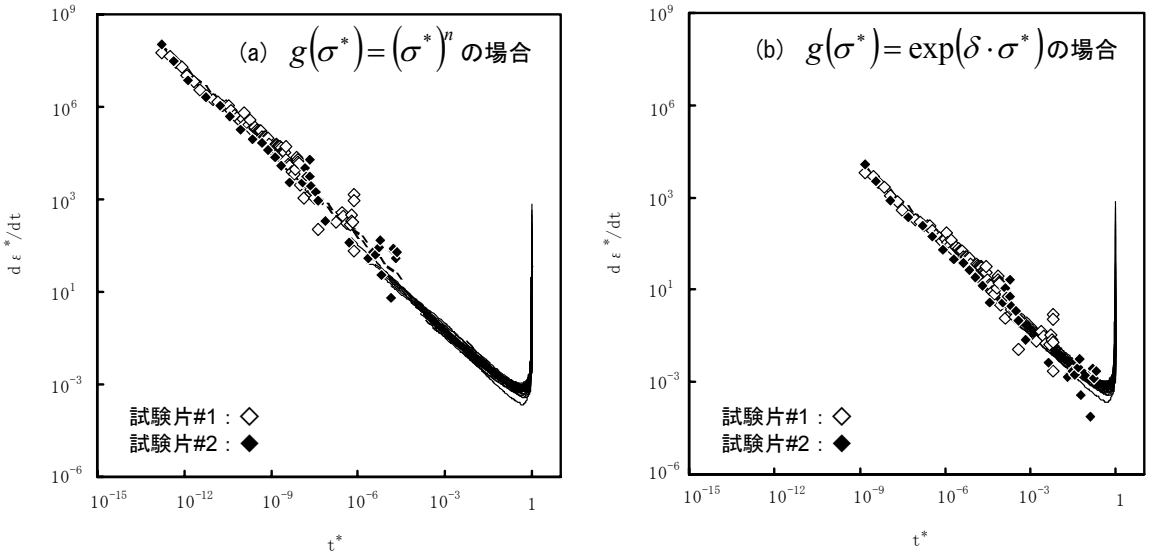


図 2-10　t^*と$d\varepsilon^*/dt$の関係

破線：#1 と#2 の近似直線、実線：短期間の試験結果[14]

大久保・秋[14]の研究でも指摘されているように、このように整理すると、短期間のクリープ試験結果は比較的狭い範囲内におさまり、ほぼ重なった。今回行ったクリープ応力レベル 30 %で破壊が生じるか否かについては不明であるが、仮に、このような低応力レベルでも(2-5)式が成り立つとする。$g(\sigma^*)$の関数形として$(\sigma^*)^n$を採用し、(2-5)式から計算されるクリープ寿命で正規化した長期クリープ試験結果を◇（試験片#1）と◆（試験片#2）で図 2-10(a)に示した。長期クリープ試験の結果はばらついており、短期クリープ試験の結果を示す実線との間に若干の食い違いが見られるものの、概ね実線上に位置しているといえよう。図 2-10(b)には、$g(\sigma^*)$の関数形として$\exp(\delta \cdot \sigma^*)$を採用して同様に整理した結果を示した。この場合も試験結果はばらついているものの、長期クリープ試験の結果は短期クリープ試験の結果もしくはその延長線上に位置しており、両者はよく一致した。なお、$\sinh(\delta \cdot \sigma^*)$を用いた場合も、$\exp(\delta \cdot \sigma^*)$を用いた場合とほとんど同じ結果であった。

$g(\sigma^*)$の関数形として$(\sigma^*)^n$、$\exp(\delta \cdot \sigma^*)$、$\sinh(\delta \cdot \sigma^*)$のいずれを用いた場合でも、試験開始後のクリープ歪速度が減少していく領域では、長期と短期のクリープ試験の結果が 1 本のマスターカーブでほぼ表されることがわかった。なお、関数形の違いによる定性的な差は小さかったが、低応力レベルでのクリープ寿命の推定値は関数形によって異なるため、それに応じて図 2-10 のようにクリープ歪速度の整理結果にも定量的な差が生じた。いずれの関数形がより現実に近いかを調べるには、今後、高精度な試験結果を蓄積していく必要があろう。

前節で、今回の試験における応力変動の影響は、クリープ応力に換算して高々1.5 %程度と述べた。クリープ応力レベル 30 %において応力が 1.5 %低下した場合、$g(\sigma^*)$の関数形として$(\sigma^*)^n$を用いて(2-5)式により計算すると、クリープ寿命は約 1.5 倍になる。また、$\exp(\delta \cdot \sigma^*)$を用いた場合は約 1.1 倍となる。これらの差異が、図 2-7 に示した試験片ごとのばらつきに比べてかなり小さかったことから、試験結果の解釈やここでの議論に及ぼす応力変動の影響はそれ程大きく

ないと考えている。

次に、応力－歪曲線との関係を調べるため、短期間のクリープ試験で歪速度が最小となった時点での応力と歪の関係を図 2-11 に◆で示した。また、表 2-1 に示した強度を決める際に用いた歪速度 10^{-5} /s での応力－歪曲線を実線で示した。ここでは、歪速度の最小値が明瞭に観察された応力レベル 63 %から 82 %の結果を整理した。なお、歪速度が最小となった時点での歪とは、応力－歪曲線から得られた弾性歪に、歪速度が最小となった時点でのクリープ歪を加えた値である。

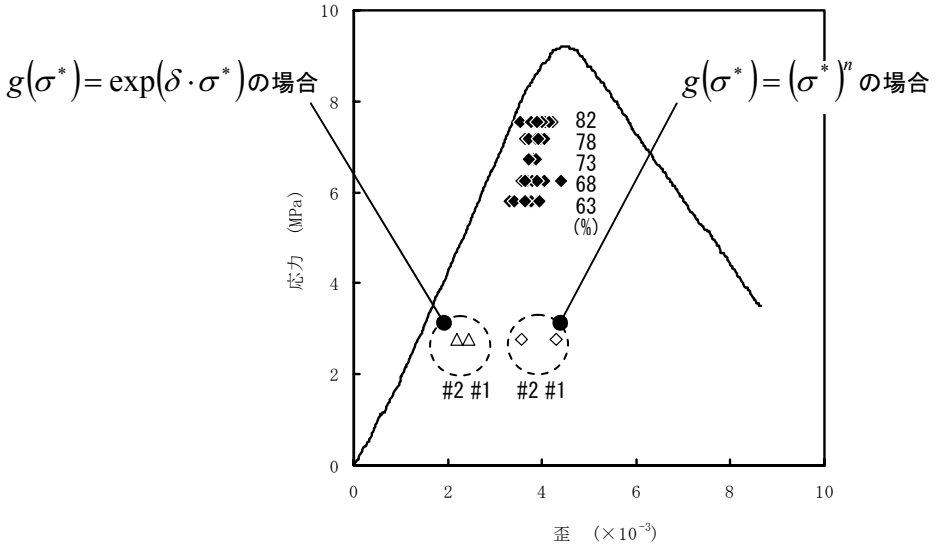


図 2-11 クリープ歪速度が最小となった時の応力と歪の関係

◆：短期間の試験結果 [14]、◇△：今回の長期試験から計算した結果、実線：歪速度 10^{-5} /s での応力－歪曲線

図 2-10 を見ると、短期間のクリープ試験では応力レベルに関係なく、t^* が約 $10^{-0.2}$ で歪速度が最小となっている。そこで、長期クリープ試験でも $t^*=10^{-0.2}$ で歪速度が最小になると仮定し、これに(2-5)式から推定されるクリープ寿命 t_c をかけて、試験開始から歪速度が最小になるまでの時間を計算した。さらに、それを(2-1)式に代入して歪速度が最小となる時点でのクリープ歪を推定することにした。図 2-11 には $g(\sigma^*)$ の関数形として $(\sigma^*)^n$ を用いた場合の結果を◇で、$\exp(\delta\cdot\sigma^*)$ を用いた場合の結果を△で示した。なお、$\sinh(\delta\cdot\sigma^*)$ を用いた場合は、$\exp(\delta\cdot\sigma^*)$ を用いた場合とほとんど同じであった。福井他[15]は、比較的高い応力レベルでは、歪速度が最小になる点が強度破壊点からの除荷曲線上に並ぶという試験結果を報告したが、低い応力レベルにおける応力－歪曲線とクリープの関係についての知見はほとんどない。図を見ると、◇と◆では歪（＝弾性歪＋クリープ歪）の値がほぼ一致した。一方、△と◆に関しては弾性歪を除いたクリープ歪の値が概ね一致し、◆、△がほぼ強度破壊点からの除荷曲線（残留ひずみ分だけ実線が平行移動した様な曲線）上に並んだ。クリープ応力レベル 30 %の試験において、クリープ歪速度が最小値をとるか否か、また最小値をとるとすれば◇と△のいずれに近いかを見極めることは現時点では難しいが、今後の興味深い課題の一つと考えている。

岩盤内構造物は、一定応力の他に繰り返し応力を受ける場合があるので、繰り返し応力の影響を評価するために古くから疲労試験[16]が行われてきた。疲労試験では試験中に応力が変動するが、試験中の最大応力が比較的高い時には、歪の増加傾向と応力－歪曲線とは密接な関係があることが報告されている[17][18][19]。しかしながら、クリープ試験結果と同様に低応力レベルでの疲労試験結果の蓄積は乏しい。岩石の長期的な挙動を把握するためには、両者の比較も重要な検討課題と考えている。

2.5 まとめ

本研究では、クリープ試験を 10 年以上継続することに成功した。試験装置は空圧式としたが、その他の候補としては重錘式や油圧式が考えられた。重錘式は古くから用いられてきたが[20)21)]、振動の影響を受けやすく、大型になるという欠点がある。油圧式の場合は、アキュムレータを使用して空圧式とほぼ同じ原理で試験が行える[8)22)]。今回は空圧式を選択したが、油圧式との優劣の差は小さいと考えている。長期クリープ試験においてどちらを選択するかは、岩種や試験環境などに応じて、加える荷重の大きさや、万一の故障時の配管や部品の購入・交換が速やかに行えるかどうかを勘案すべきであろう。

空気圧の制御には減圧弁を用いたが、クリープ応力には若干の変動が見られた。クリープ挙動に及ぼす影響は小さかったものの、この点は改良の余地があり、候補としては ON-OFF 制御などを考えている。変位計は歪ゲージ式のものを用いたが、10 年間にわたって特に問題は生じなかった。同じ製品でも一つずつ特性が異なるため確たることは言えないが、歪ゲージ式変位計がクリープ試験において 10 年以上継続使用できることを示したことも、本研究の成果の一つと考えている。

田下凝灰岩は湿潤条件下では、強度の 30 %という低い応力レベルでもクリープ変形が進行し、10 年が経過しても測定可能なクリープ歪の増加が続くことが確認された。クリープ歪速度は試験開始から一貫して低下し続けており、経過時間の約－0.9 乗に比例することがわかった。長期クリープ試験で観察されたクリープ歪やクリープ歪速度の挙動は、過去に行われた短期クリープ試験における一次クリープの挙動とほぼ一致した。

岩石の変形や破壊の進む速度が応力の関数に比例すると仮定して、長期と短期のクリープ試験の結果を比較したところ、両者が統一的に説明できる可能性があることがわかった。長期と短期のクリープで同じ理論や方程式が成り立てば、変形や破壊の機構も共通している可能性があり、短期のクリープ試験の結果から長期のクリープ挙動を予測･評価するための重要な知見といえる。この知見をもとに、今後、短期から長期までの時間依存性挙動を表せる構成方程式を構築する必要があろう。また、その検証データを得るうえでも、継続してきた長期クリープ試験は貴重な試験であり、今後もできる限り長期にわたって継続したいと考えている。

3. 結晶質岩（土岐花崗岩）の一般化応力緩和試験

本章では、2007 年度に引続き、実際の複雑な荷重条件下における結晶質岩の時間依存性挙動を解明する手段として、一般化応力緩和試験法を検討する。2007 年度に検討した条件、すなわち、荷重は減少し、歪は増加する状態（クリープ、応力緩和状態を含む）に続いて、本年度は、荷重・歪がともに増加または減少する条件について検討する。はじめに、制御プログラムについて、新しい条件での試験実施ができるよう拡張する。つぎに、そのプログラムを用いて、土岐花崗岩に関する一般化応力緩和試験を試みる。そして、試験で得られた土岐花崗岩に関するデータを用いて、既に取得してある土岐花崗岩の時間依存性挙動を記述する構成方程式のパラメータが妥当であるか検討する。

3.1 制御プログラムの拡張

一般化応力緩和試験の概念図を図 3-1 に示す。試験では、図中の原点から A 点まで歪速度一定で載荷を行い、その後 A 点より一般化応力緩和試験を行う。

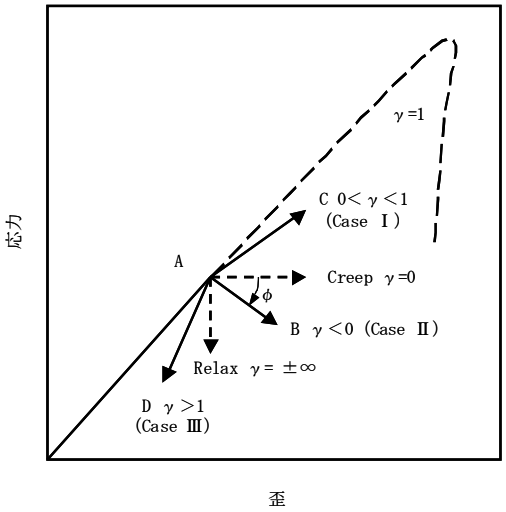


図 3-1 一般化応力緩和試験の概念図

2007 年度の報告書[4)]でも示したように、一般化応力緩和試験の基礎式は次式で表される。

$$Y + \frac{FL\alpha}{A} = LC \qquad (3\text{-}1)$$

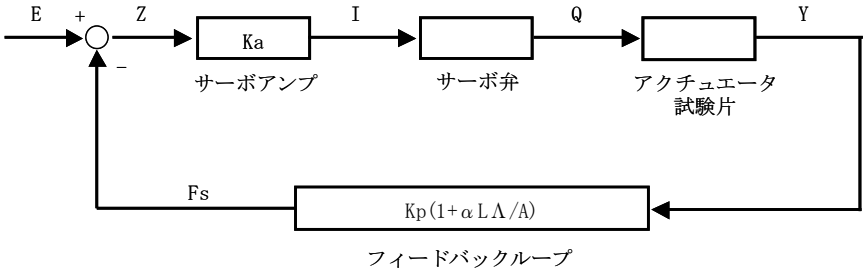
ここで、Y は変位、F は荷重、L は試験片の高さ、A は試験片の断面積、C は無次元の定数である。α の次元は応力の逆数と同じであり、例えば 1/MPa となる。(3-1)式を変形すると次式[23)]となる。

$$\varepsilon + \alpha\sigma = C \qquad (3\text{-}2)$$

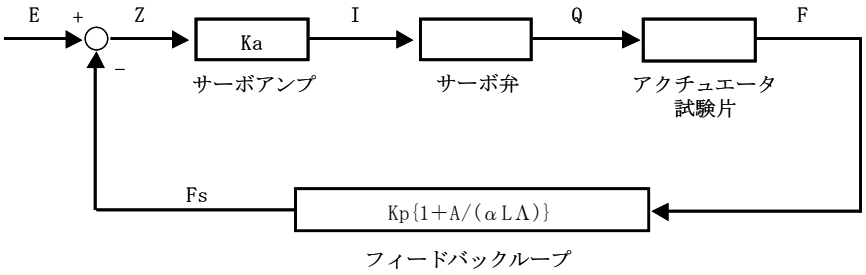
$\gamma = -1/\alpha$ とおいて、これを緩和方向係数と呼ぶことにする。この γ の値によって、応力－歪線図上で、時間経過にともなって A 点よりどのように位置が変化していくかを図 3-1 に示す。歪と応力が両者ともに増大する場合を Case Ⅰ、歪は増大するが応力が低下する場合を Case Ⅱ、歪と応力の両者とも低下する場合を Case Ⅲとすると、$0<\gamma<1$ は Case Ⅰ、$\gamma<0$ は Case Ⅱ、$\gamma>1$

はCaseⅢに対応する。また、$\gamma=1$ の時には試験開始前にA点までの移動に用いた歪速度一定の載荷を継続する試験、$\gamma=0$ は通常のクリープ試験となる。γ が±∞に近付くに従って通常の応力緩和試験に近付いていく。

2007 年度に構築した制御システムのブロック線図を図 3-2(a)に示す。E は制御信号であり、フィードバック信号 F との差 Z が比例制御としてサーボアンプに入力される。Z は、ゲイン定数 K_a のサーボアンプにより、サーボ弁を駆動するための電流出力 I に変換される。さらに、サーボ弁で I は出力流量 Q に変換される。



(a) $|\gamma|$ が比較的大きい範囲に対応した 2007 年度の制御



(b) $|\gamma|$ が比較的小さい範囲に対応した本年度の制御

（凡例）

E：制御信号	Kp：帰還回路のゲイン定数
Fs：フィードバック信号	α：荷重の帰還量を決める定数
Z：E−Fs	Y：変位
Ka：ゲイン定数	F：荷重
I：電流出力	Λ：F/Y
Q：出力流量	A：岩石試験片の断面積
	L：岩石試験片の高さ

図 3-2　一般化緩和応力試験のための試験機の制御システム

(3-1)式を変形すると次式となる。

$$Y\left(1+\frac{\alpha L\Lambda}{A}\right)=LC \tag{3-3}$$

なお、$\Lambda=F/Y$ である。K_p を帰還回路のゲイン定数として、(3-3)式よりアクチュエータの変位 Y は図 3-2(a)のように帰還される。

図 3-2(a)からわかるように、力の帰還量は α、すなわち緩和方向係数 γ の影響を受ける。$|\gamma|$ が小さくなると、$|\alpha|$ は大、すなわち帰還量の絶対値が大きくなって制御が不安定になる。そのた

め、任意のγを対象に試験を行うには、K_aやK_p、もしくは制御方法などを緩和方向係数の値に応じて調整する必要がある。しかし、2007年度は土岐花崗岩を用いた一般化応力緩和試験の第一歩であったため、このような調整は行わないものとした。したがって 2007 年度は、制御プログラムの開発にあたって、任意のγを対象とするのではなく、CaseⅡのうち$-\infty<\gamma<-0.5$ 程度の$|\gamma|$が比較的大きい範囲内の試験に限ることにした。また、$\gamma=0$（クリープ）の場合は荷重制御（荷重一定）で試験を行った。

本年度は$|\gamma|$が小さい場合でも安定して試験が行えるように、制御プログラムを改良した。(3-2)式と(3-3)式を変形すると次式が得られる。

$$\frac{\varepsilon}{\alpha}+\sigma=\frac{C}{\alpha} \tag{3-4}$$

$$F\left(1+\frac{A}{\alpha L\Lambda}\right)=\frac{AC}{\alpha} \tag{3-5}$$

この式にもとづく制御システムのブロック線図は図3-2(b)のようになる。$|\gamma|$が小さい場合($|\alpha|$は大）では、このような制御方法で試験を行うことにした。そこで、2007年度の制御プログラムと合わせると、全体概要は以下のとおりとなる。

$|\gamma|$が大きい場合（$|\alpha|$が小）

① 図3-1の原点からA点まで歪速度一定で載荷する。
② A点でのεとσから(3-2)式によりCを計算し、制御信号の新たな目標値とする。
③ A点以降は(3-2)式に基づいて一般化応力緩和試験を行う。
④ あらかじめ定めた試験時間が経過したら、試験を終了する。

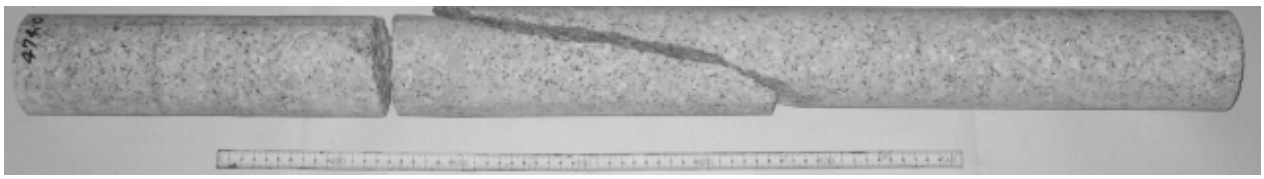
$|\gamma|$が小さい場合（$|\alpha|$が大）

① 図3-1の原点からA点まで歪速度一定で載荷する。
② A点でのεとσから(3-4)式によりCを計算し、制御信号の新たな目標値とする。
③ A点以降は(3-4)式に基づいて一般化応力緩和試験を行う。
④ あらかじめ定めた試験時間が経過したら、試験を終了する。

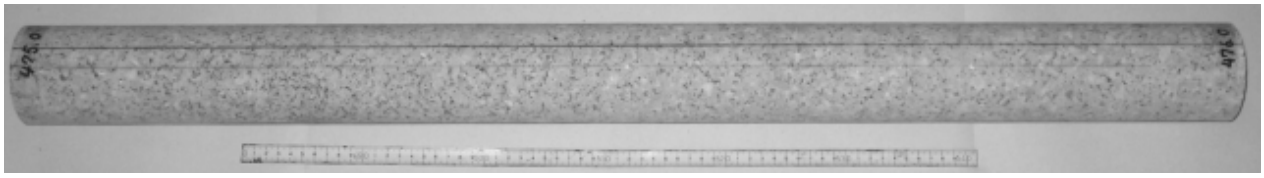
あらかじめ入力する値は、試験片の寸法、ヤング率、A 点までの歪速度、A 点の応力、緩和方向係数、試験時間であり、これらを入力しておけば、あとは自動的に①～④が行えるようなプログラムとした。なお、図 3-2(a)と図 3-2(b)の制御方法が、それぞれどのような緩和方向係数の範囲内で適用可能か、ある緩和方向係数で試験を行う際の制御性はどちらが良いかなどについては、今後検討する必要がある。

3.2 試験方法

試料岩石として2007年度の試験と同じボーリング孔（MIZ-1号孔）の同じ深度（474 m～476 m）から採取された土岐花崗岩を用いた。試料は2007年10月17日に本研究室に到着した直径約80 mmのボーリングコアで、その写真を図3-3に示す。



(a) 474～475 m



(b) 475～476 m

図 3-3　試料とした MIZ-1 号孔で採取した土岐花崗岩

図 3-3(a)からわかるように、深度 474 m～475 m のボーリングコアは、軸方向と垂直な亀裂および軸方向と比較的小さい角度で交わるような亀裂により、3 つに分断されていた。また、図 3-3(b)の、深度 475 m～476 m のボーリングコアは、大きな亀裂は見られずほぼ健全であった。本研究では、深度 475 m～476 m のボーリングコアより、次のような手順で試験片を作製した。

① ボーリングコアを長さ 200 mm ごとに切断した後、木箱に入れ、セメントモルタルで固める
② セメントモルタル中の試料から、直径 25 mm のボーリングを 3 本ずつ行う
③ ダイヤモンドカッタで所定の長さに切断する
④ 平面研削盤で両端面を平行に仕上げる

また、試料岩石の物性値は 2007 年度に取得しており、表 3-1 のとおりである。岩石の物性値は、隣接する採取深度（476 m～478 m）でも 2006 年度に得ており、その値も合わせて比較のために示す。両者の比較から、本年度の岩石試料の一軸圧縮強度、圧裂引張強度、弾性波速度は若干大きく、ポアソン比は若干小さかった。しかし、その差はせいぜい 7 %程度であり、当該深度で深度差が 4m 以内では、物性のばらつきはそれほど大きくないといえる。

表 3-1　試料岩石（土岐花崗岩）の物性値 [4), 23)]

年度	深度	一軸圧縮強度	ヤング率（GPa）（50 %接線）		ポアソン比	圧裂引張強度	弾性波速度	ショア硬度（Cスケール）	比重
	m	MPa	LVDT	歪ゲージ	50 %割線	MPa	m/s		
2007	475～476	171	34	57	0.30	7.0	5123	－	2.62
2006	476～477	161	34	55	0.32	6.6	4813	89	2.62

本年度に用いた試験片の諸元を表 3-2 に示す。試験片の直径は 25 mm、高さは 50 mm とし、比重は 2.6 程度であった。

表 3-2　一般化応力緩和試験に供した試験片の諸元と試験結果

番号	直径 mm	厚さ mm	体積 cm^3	質量 g	比重	緩和方向係数	強度 MPa
7	25.03	50.01	24.61	64.52	2.62	-2.0	179.3
20	25.08	50.00	24.70	65.08	2.63	2.0	179.5
28	25.09	50.02	24.73	64.90	2.62	0.25	172.7
37	25.11	50.02	24.77	64.96	2.62	-2.0	168.4
51	25.09	50.00	24.72	64.68	2.62	2.0	178.4
64	25.13	50.01	24.80	65.06	2.62	0.25	174.0
平均	25.09	50.01	24.72	64.87	2.62	―	175.4

試験には容量 500 kN のディジタル制御式のサーボ試験機を用いた。試験機の写真と概略図をそれぞれ図 3-4 と図 3-5 に示した。

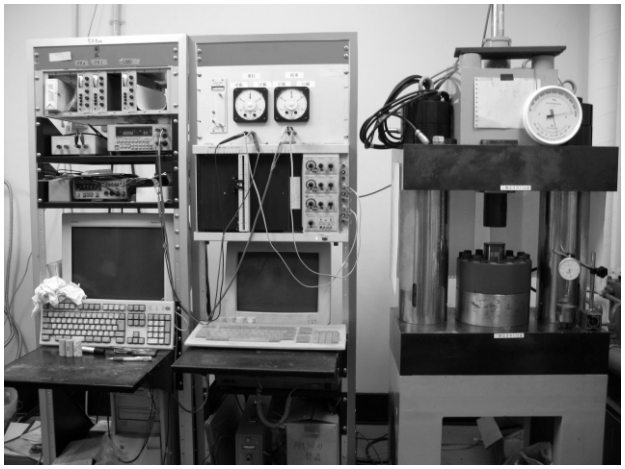


図 3-4　試験に用いた容量 500 kN サーボ試験機の写真

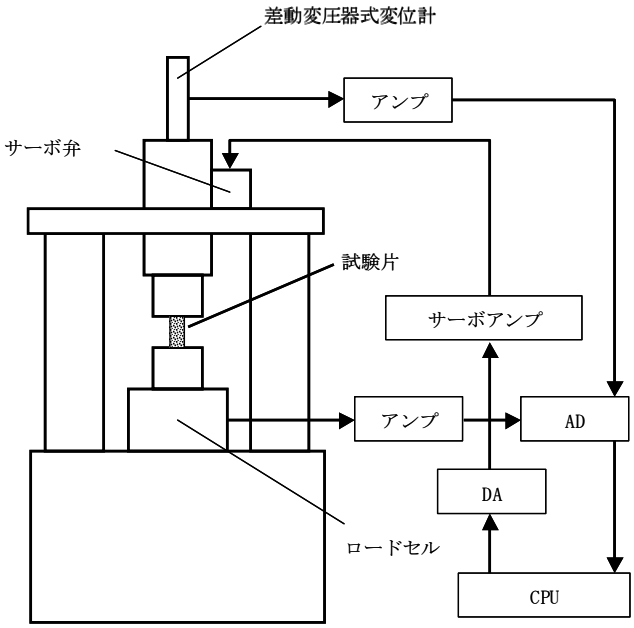


図 3-5　試験に用いたサーボ試験機と計測装置の概略図

まず図 3-1 の原点より A 点まで一定の歪速度（10^{-4} /s）で載荷した。その後 A 点より一般化応力緩和試験を開始し、荷重と変位の経時変化を計測した。データの採取間隔は 1 s とし、試験時間は 3 時間（10800 s）とした。一般化応力緩和試験を開始する応力（A 点の応力）は約 145 MPa（一軸圧縮強度の平均値の約 85 %）とした。緩和方向係数γは－2.0、0.25、2.0 の 3 通りとし、同一条件で 2 本ずつ試験を行った。γ＝－2.0 と 2.0 の試験は、図 3-2(a)の$|\gamma|$が大きい場合の制御方法、γ＝0.25 の試験は、図 3-2(b)の$|\gamma|$が小さい場合の制御方法で行った。このうち、γ＝－2.0 は 2007 年度の試験と同じ緩和方向係数であり、0.25 と 2.0 は初めて試験を実施した緩和方向係数である。

一般化応力緩和試験終了後、試験片のもつ強度などの物性のばらつきを評価できるよう、次式で表される応力帰還制御により一軸圧縮試験を行った。ここで、E はヤング率、t は時間であり、k＝10^{-4} /s、a＝0.3 とした。

$$\varepsilon - a\frac{\sigma}{E} = kt \qquad (3\text{-}6)$$

3.3 試験結果

図 3-6 に、6 本の試験片で得られた一般化応力緩和試験直前までの応力－歪曲線を示す。載荷開始直後は歪の増加による応力の増加は小さく、若干下に凸の傾向が見られるが、これは端面の変形や潜在亀裂の閉鎖によるものと考えられる。その後、応力が増加するに従い応力－歪曲線の傾きは徐々に増加し、応力 40 MPa 以上では応力と歪はほぼ直線的に増加している。試験片ごとのばらつきは小さく、試験結果の再現性は良い。

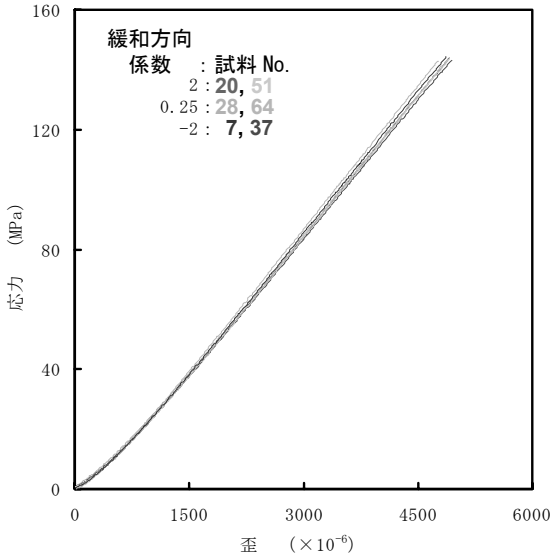


図 3-6 一般化応力緩和試験開始までの応力－歪曲線

一般化応力緩和試験で得られた、緩和応力および歪の経時変化を図 3-7～図 3-9 に示す。図 3-7 は緩和方向係数が－2.0 の結果であり、2007 年度に得た結果[4)]も合わせて示した。本年度実施した試験片 No.7 と No.37 の結果は再現性が良く、2007 年度の結果との差も小さかった。いずれの試験片でも応力はほぼ経過時間の対数に比例して低下し、10^4 s 経過した時点での緩和応力は－4 MPa 程度である。歪は経過時間の対数にほぼ比例して増加し、10^4 s 経過した時点での歪は 100×10^{-6} 程度である。

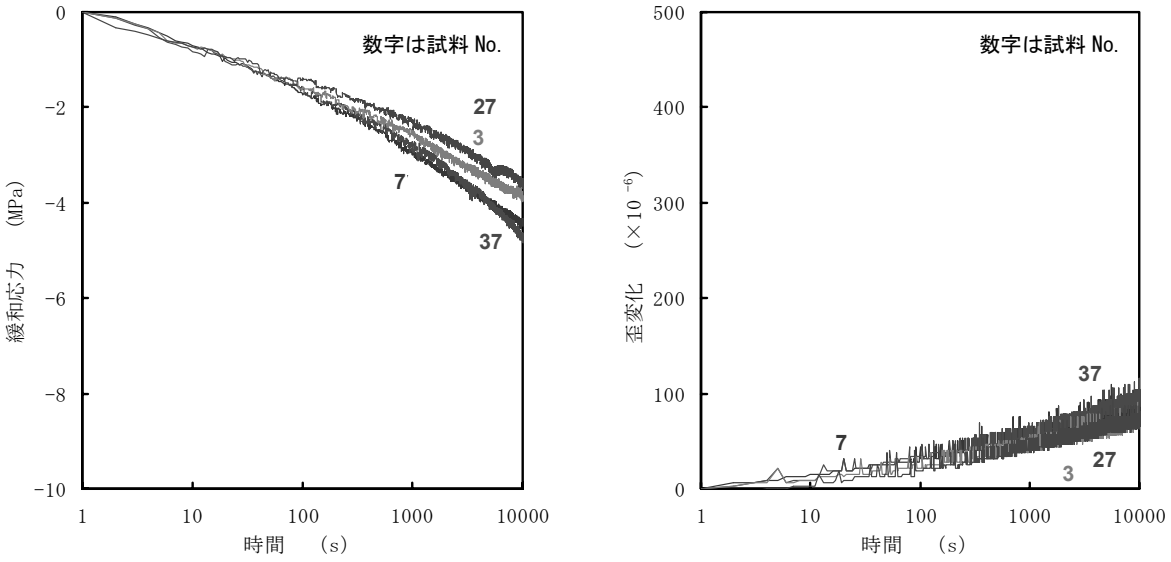


図 3-7　緩和応力および歪の経時変化（緩和方向係数－2.0）

（No.3 と No.27 は 2007 年度の結果）

図 3-8 は緩和方向係数が 0.25 の結果であり、2 本の試験片の再現性は良好である。この試験条件では応力、歪とも徐々に増加するが、他の条件での結果との混乱を避けるため、応力の変化は一貫して緩和応力と称した。いずれの試験片でも、緩和応力は試験開始後 10^2 s 程度まではほぼ直線的に増加しているが、その後は若干下に凸の曲線を描いている。10^4 s 経過した時点での緩和応力は 3 MPa 程度である。歪も応力と同様に、試験開始後 10^2 s 程度まではほぼ直線的に増加しているが、その後は若干下に凸の曲線を描いている。10^4 s 経過した時点での歪は 350×10^{-6} MPa 程度である。歪の変化は、2007 年度の緩和方向係数が 0（クリープ）での試験結果と似た傾向を示している。

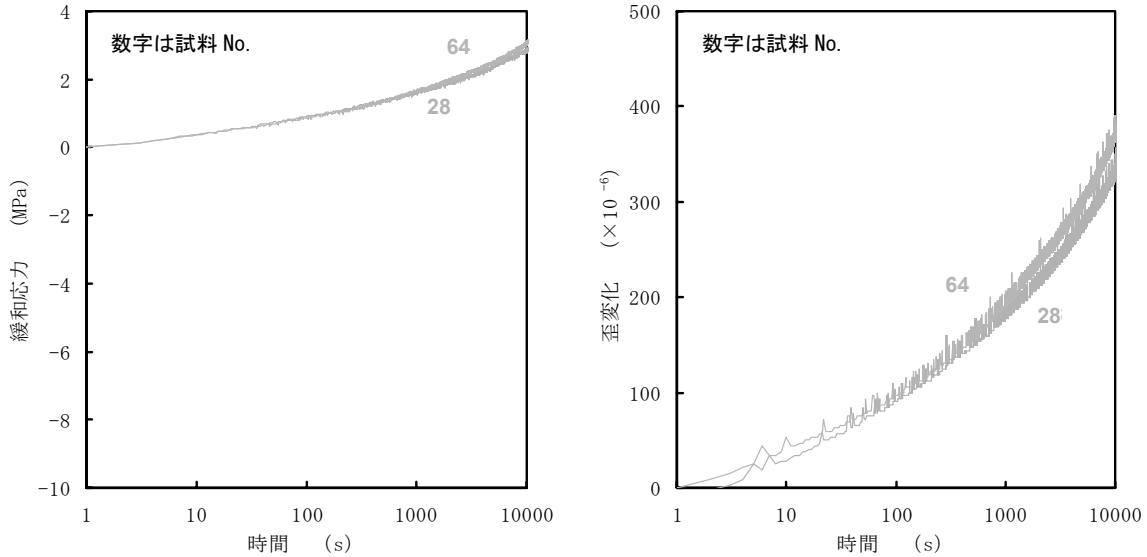


図 3-8　緩和応力および歪の経時変化（緩和方向係数 0.25）

図 3-9 は緩和方向係数が 2.0 の結果であり、2 本の試験片の再現性は良好である。応力は経過時間の対数にほぼ比例して低下し、10^4 s 経過した時点での緩和応力は－10 MPa 程度である。歪

は試験開始後の数秒間は変化が小さかったが、その後は経過時間の対数にほぼ比例して減少している。10^4 s 経過した時点での歪は－120×10^{-6} 程度である。

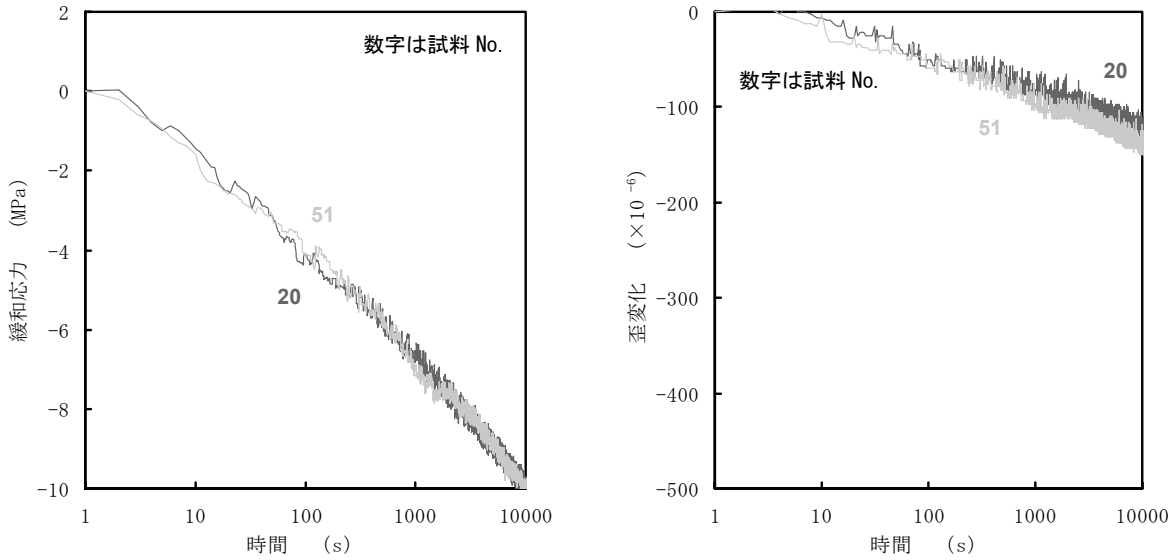


図 3-9　緩和応力および歪の経時変化（緩和方向係数 2.0）

図 3-10 には、これまでに示した全ての緩和方向係数での結果をまとめて示す。図より、応力、歪とも緩和方向係数が 0.25、－2.0、2.0 の順に上から並んでいることがわかる。

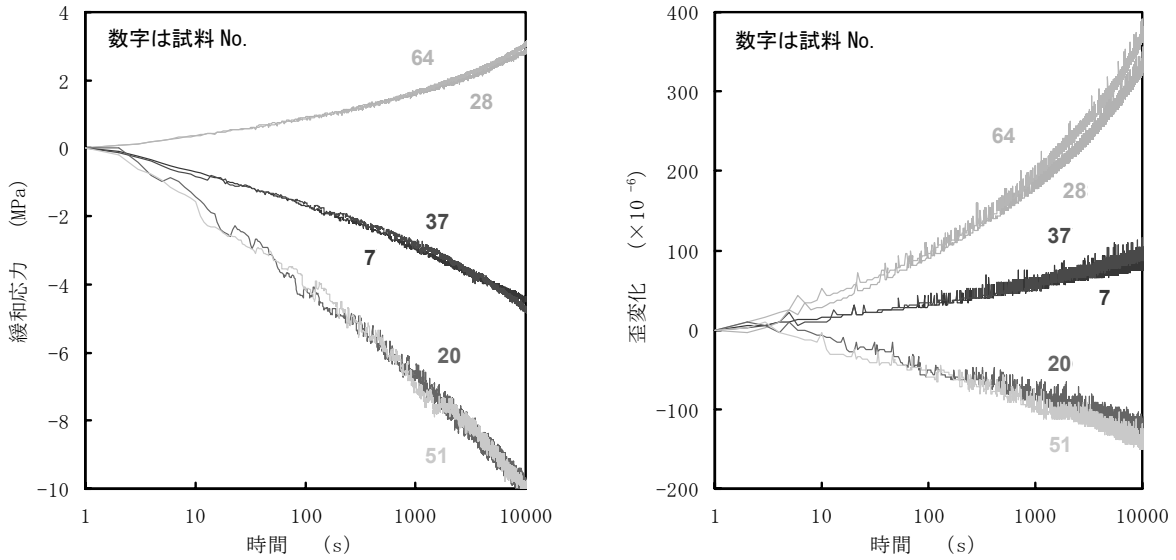


図 3-10　緩和応力および歪の経時変化（すべての試験結果）

いずれの試験条件下でも、試験開始後 100s 程度までは、緩和応力 $\delta\sigma$ と歪変化 $\delta\varepsilon$ が経過時間 t の対数にほぼ比例しており、式で表すと次のようになる。

$$\delta\sigma = -\frac{P}{\alpha}\cdot\log(t) \tag{3-7}$$

$$\delta\varepsilon = P\cdot\log(t) \tag{3-8}$$

ただし、P は定数である。(3-8)式は対数クリープ則として多くの岩石のクリープにおいて成り立つことが知られているが[15]、2007 年度[4]および本年度の試験結果から、土岐花崗岩に対するクリープ試験でも成り立つこと、さらに、クリープ試験だけでなく一般化応力緩和試験でも、緩和方向係数に関わらず、この法則に類似した関係が成り立つことが確認された。

いま、図 3-1 に示すように、一般化応力緩和試験で初期の応力－歪曲線の傾きが 1 になるように応力－歪曲線を描いた場合の、応力と歪が移動する方向と横軸とのなす角度を ϕ（時計回りを正）とする。この ϕ を用いて、図 3-11 に、試験開始後 10^4 s での緩和応力および歪と ϕ との関係を示す。なお、本年度の結果が●、2007 年度の結果が▲である。緩和応力は ϕ が大きくなるほど小さくなり、両者の関係は直線的であった。歪についてもほぼ同様の関係が認められた。

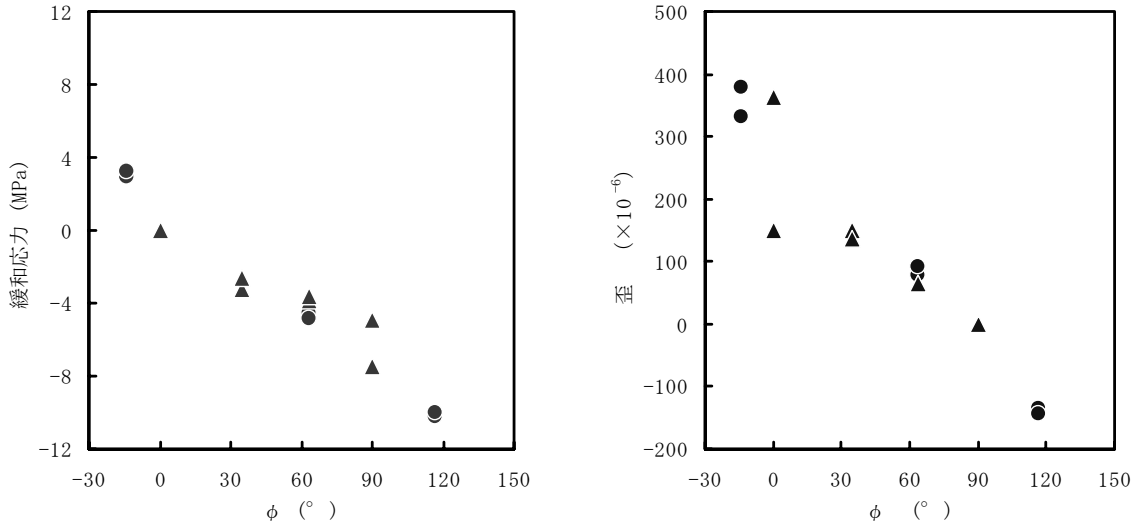


図 3-11　一般化応力緩和試験開始 10^4 s 後の緩和応力および歪と ϕ の関係

試験開始後 10^4 s での応力と歪の位置を、応力－歪線図上に示したものが図 3-12 である。ただし、実線は 10^{-4} /s の歪速度一定の一軸圧縮試験で得られた平均的な応力－歪曲線である。一般化応力緩和試験では、実線上の●を出発点として緩和方向係数に対応する線上を移動する。試験開始後 10^4 s での応力と歪の位置を打点（本年度の試験：■、2007 年度の試験：▲）で示した。なお図中の破線は、応力－歪曲線と平行な直線である。試験結果はややばらついているが、概ね破線の周辺にプロットされている。この結果は、過去に得られている三城目安山岩と河津凝灰岩での結果[24]とほぼ同じである 。

一般化応力緩和試験終了後に行った一軸圧縮試験の結果を表 3-2 に、得られた応力－歪曲線を図 3-13 に示す。一般化応力緩和試験後の強度の平均値は 175.4 MPa であり、表 3-1 に示した 2007 年度実施の一軸圧縮試験結果との差は 2.5 %程度と小さかった。一般化応力緩和試験は応力レベル約 85 %で 3 時間行ったが、2007 年度の結果と同様に、試験終了後の一軸圧縮強度に及ぼす応力履歴の影響は小さいことが確認された。

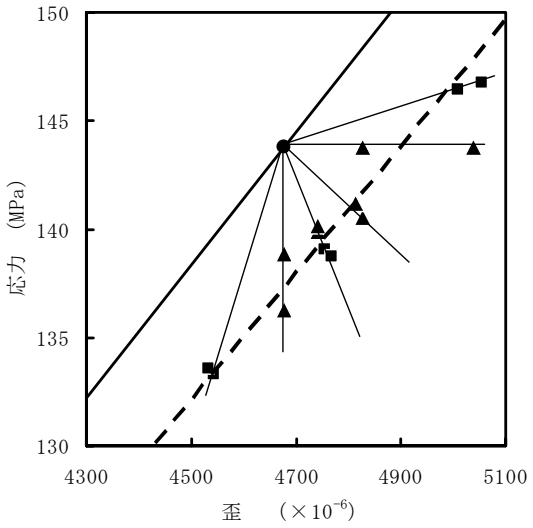


図 3-12 一般化応力緩和試験開始 10^4 s 後の応力－歪線図上での位置

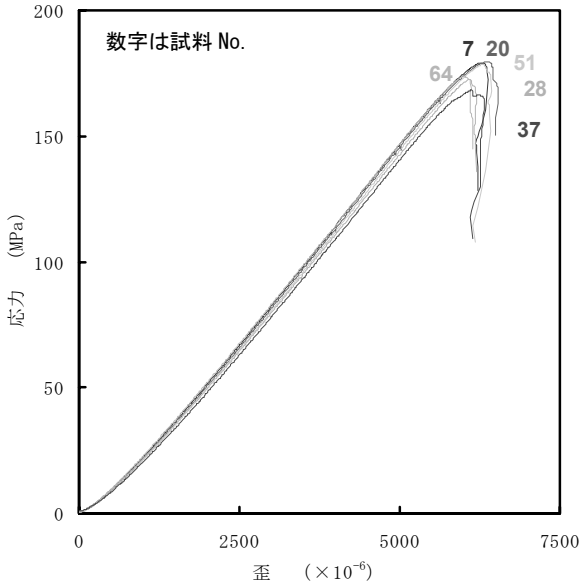


図 3-13 一般化応力緩和試験終了後に行った一軸圧縮試験結果

3.4 構成方程式のパラメータの検証

大久保らが提案[25]したコンプライアンス可変型構成方程式は次式で表される。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a_3 \left(\sigma^*\right)^n \left(\lambda^*\right)^m \qquad (3\text{-}9)$$

(3-9)式は歪εと応力σの比であるコンプライアンス$\lambda = \varepsilon/\sigma$が徐々に増加すると考えたものである。取り扱いやすいように、λを初期値λ_0で正規化した値を$\lambda^*(=\lambda/\lambda_0)$とした。また、$\sigma$を一軸圧縮強度$\sigma_c$で正規化した値を$\sigma^*$とした。$n$は $d\lambda^*/dt$ の応力依存性をあらわすパラメータで、値が大きいほど非線形性が高くなり、例えばクリープではわずかな応力の違いで寿命が大きく変化する。mは破壊が急激に進むかどうかをあらわすパラメータで、定歪速度試験では$m > n+2$の場合、応力－歪曲線がクラスⅡ特性を示すことになる[26)27)]。また、(3-9)式から直ちにわかるように、$d\lambda^*/dt$に比例するクリープ歪速度$d\varepsilon/dt$は時間経過にともない単調増加することになる。すなわち、(3-9)式は 一次から 三次までのクリープの内、三次クリープ相当分を主たる対象としたものといえる。

一次クリープのように、時間の経過（コンプライアンスの増加）にともなってクリープ歪速度が減少していくことを構成方程式に取り入れるために、大久保他[3)]が提案した拡張したコンプライアンス可変型構成方程式は次式で表される。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a_1 \left(\sigma^*\right)^{n_1} \left(\lambda^* - 1\right)^{-m_1} + a_3 \left(\sigma^*\right)^n \left(\lambda^*\right)^m \qquad (3\text{-}10)$$

※n_1、m_1の添字 1 は一次クリープのパラメータであることを表す。同等のルールであれば、右辺第 2 項はn_3、m_3と記すべきところであるが、先に登場した関係で添字の無いn、mとした。

この場合にもn_1は応力依存性をあらわすパラメータであり、a_1とm_1は正値のパラメータである。初期段階のクリープでは(3-10)式の右辺第2項が無視できて、拡張したコンプライアンス可変型構成方程式は右辺第1項で近似できる。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a_1 \left(\sigma^*\right)^{n_1} \left(\lambda^* - 1\right)^{-m_1} \tag{3-11}$$

この式を解いて得られるクリープ歪とクリープ歪速度は次のようになる。

$$\varepsilon_c^* = a_1^{\frac{1}{m_1+1}} \cdot \left(m_1+1\right)^{\frac{1}{m_1+1}} \cdot \left(\sigma^*\right)^{1+\frac{n_1}{m_1+1}} \cdot t^{\frac{1}{m_1+1}} \tag{3-12}$$

$$\frac{d\varepsilon_c^*}{dt} = a_1^{\frac{1}{m_1+1}} \cdot \left(m_1+1\right)^{-\frac{m_1}{m_1+1}} \cdot \left(\sigma^*\right)^{1+\frac{n_1}{m_1+1}} \cdot t^{-\frac{m_1}{m_1+1}} \tag{3-13}$$

ここで、福井他[24]が指摘したように、一般化応力緩和試験において上式が成立し、応力レベルや緩和方向係数によらず、同一時間を経過した後の応力と歪の位置は、一軸圧縮試験で得られる応力 - 歪関係を縦方向に圧縮したものと似た、ある曲線上に乗るものと仮定する。このとき、一般化応力緩和試験で、ある時間経過した後の歪$\delta\varepsilon$は次式で表される。

$$\delta\varepsilon \propto \sigma^{1+\frac{n_1}{m_1+1}} \tag{3-14}$$

(3-10)式のn値は、ピーク強度の載荷速度依存性や応力レベルを変えたクリープ試験結果から、種々の岩石について求められている。一方、n_1については、低応力レベルでの信頼すべきデータが少ないので確たることはわかっていない。最近では、大久保他[3),28)]が、$n_1 = n$として三城目安山岩のクリープ試験結果や強度試験結果をうまく再現できるとしている。そこで、2007年度$n_1 = n$と仮定して構成方程式のパラメータを求めた。まず、一軸圧縮強度の載荷速度依存性よりn＝52を得て、n_1も同じであるとした。次いで、(3-14)式と(3-15)式からm_1＝4～5が得られた。この結果は、緩和方向係数が0(クリープ)の場合の試験結果から別に求めたm_1ともほぼ一致した。強度破壊点以降の応力－歪曲線の形状を表すパラメータmについては、2006 年度に行った試験[23)]により60であることがわかっている。

本年度は、2007年度とは異なる緩和方向係数での一般化応力緩和試験結果を追加した。そこで、本年度と 2007 年度の結果を用いて、n_1とm_1の妥当性について再検討してみる。図 3-12 には、一般化応力緩和試験開始後 10^4 s での応力と歪の位置を示したが、破線で示された 3-14 式をフィットするには試験結果にばらつきが大きい。そこで、このばらつきは、試験片間の力学特性のばらつきによるものと考えて、図 3-13 に示した一般化応力緩和試験終了後の一軸圧縮試験で得られた各試験片の強度と初期コンプライアンスで応力と歪の正規化を行ない、そのばらつきを補正した。正規化して図 3-12 を書き直した結果を図 3-14 に示す。本年度の試験結果が■、2007 年度の結果が▲である。本年度と 2007 年度の結果は、(3-14)式で記述される近似曲線で良好に再現できており、そのパラメータを含めた関数形は次式のとおり計算された。

$$\delta\varepsilon = 0.21\,\sigma^{8.2} \tag{3-15}$$

ここで、(3-14)式と(3-15)式で、応力σにかかるべき数を比較すると、n_1＝52ならばm_1＝6.2

であり、2007 年度までに評価されたm_1＝4～5 とほとんど変わらず、既往のn_1、m_1の値で大きく矛盾しないことから、既往の値は妥当なものと考えられた。

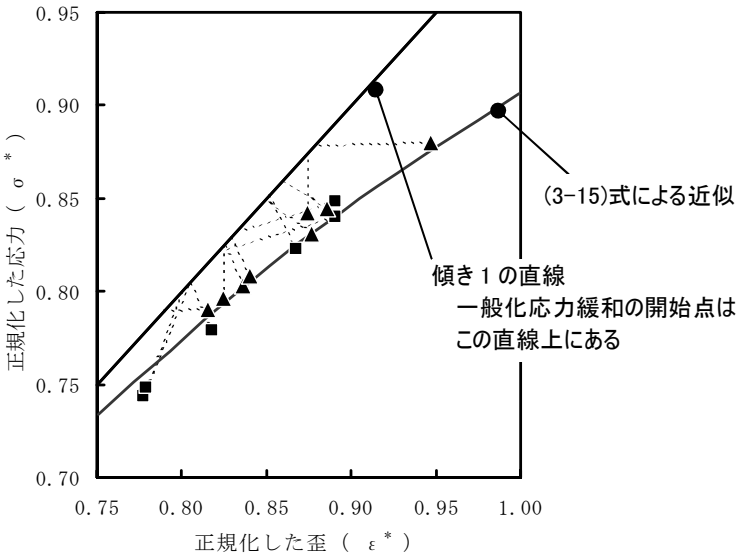


図 3-14　一般化応力緩和試験開始から 10^4 s 後の正規化した応力－歪線図上での位置

3.5　まとめ

2007 年度に引き続き、土岐花崗岩の一般化応力緩和試験を行った。はじめに、2007 年度よりも広い緩和方向係数について試験が行えるように制御プログラムを改良した。これは、2007 年度と同様に、あらかじめ試験条件を入力しておけば、あとは自動的に試験が行えるようなプログラムである。その結果、2007 年度の制御プログラムでは実施できなかった、緩和方向係数$|\gamma|$が小さい場合について問題なく試験が行えるようになった。

つぎに、改良した制御プログラムを用いて、新しく実施可能となった条件を含めて一般化応力緩和試験を行ない、土岐花崗岩に関する試験データを蓄積した。いずれの試験においても、試験開始後 100s 程度までは、応力や歪に現れる変化が、次式で示されるような経過時間の対数にほぼ比例する関係であることがわかった。この結果は、2007 年度の結果や三城目安山岩や河津凝灰岩の結果[24]とほぼ同じであった。

$$\delta\sigma = -\frac{P}{\alpha}\cdot\log(t) \tag{3-7}$$

$$\delta\varepsilon = P\cdot\log(t) \tag{3-8}$$

さらに、一般化応力緩和試験終了後に一軸圧縮試験を行ったところ、得られた強度は緩和方向係数の相違によらず､一般化応力緩和試験を経ていない一軸圧縮強度とほとんど変わらなかった。すなわち、2007 年度と同様に、本年度の結果でも一軸圧縮強度に及ぼす応力履歴の影響は小さいことが確認された。

最後に、2007 年度までに、一軸圧縮強度試験と一般化応力緩和試験から得られていた、拡張したコンプライアンス可変型構成方程式のパラメータについて、本年の試験結果を踏まえてその妥当性を再び検証した。その結果、強度破壊点以前の時間依存性と変形特性を表すパラメータのn_1＝52、m_1＝4～5 は、今回も妥当な値であることが確認された。すなわち、パラメータの値は、

これまでに様々な試験条件下で検証されており、その信頼性は高いと言える。これらパラメータは、従来の知見が少なく、値を求めるには比較的高い精度の試験結果が必要である。特に、花崗岩は強度破壊点以前の時間依存性挙動が小さく、これらのパラメータの値を精度良く求めることは一般に難しい。ゆえに、信頼性あるパラメータが取得されたことは研究における重要な成果であると考えられる。今後は、検証されたこれらパラメータを用いて長期岩盤挙動に関する数値シミュレーションを行い、原位置で計測などから確認される実際の挙動と比較検討することが課題である。

4. コンプライアンス可変型構成方程式に基づく結晶質岩の長期挙動の予測手法の開発

本章では、岩盤の長期挙動（粘弾性挙動）を、コンプライアンス可変型構成方程式に基づいて予測する時の、構成方程式のパラメータ取得方法について総括する。つぎに、粘弾性挙動を考慮した新岩盤分類の検討を含め、長期挙動の予測･評価方法について検討する。

4.1 構成方程式

構成方程式の意味するところは研究者でかなり異なるが、以下の議論では、歪と応力の関係式という広い意味で使用する。この考え方によると、一次元応力下での歪εと応力σをコンプライアンスλで結びつけたフック弾性の式は、最も基本的な構成方程式と言える。

$$\varepsilon = \lambda\sigma \tag{4-1}$$

ここで時間依存性（粘弾性）を考慮するために、(4-1)式を少し書き換えることにする。(4-1)式を時間tで微分すると次式を得る。

$$\frac{d\varepsilon}{d\sigma} = \frac{d\lambda}{dt}\cdot\sigma + \lambda\cdot\frac{d\sigma}{dt} \tag{4-2}$$

(4-2)式は、λの関数形が決まれば容易に解ける。λの関数形はいくつか考えられるが、有力なものの一つに、$d\lambda/dt = f(\lambda)g(\sigma)$がある。この関数形で、考え得る最も簡単なのが次式である[25]。

$$\frac{d\lambda}{dt} = a\lambda^m\sigma^n \tag{4-3}$$

簡単な式であるので、大久保[27]が示したように解析解がある。この構成方程式によって破壊が表現でき、クリープ曲線、応力―歪曲線、応力緩和曲線など、これまでに知られているさまざまな実験結果を少なくとも定性的には再現できる。

この構成方程式は、もともと、数値計算向けに開発したもので、最も簡単で、解析解のある構成方程式を探していてみつけたものである。コンプライアンスλの変化だけを考えているので、FEM（有限要素法：Finite Element Method）をはじめとする構造数値計算プログラムとの相性は良い[29]。例えば、この構成方程式を組み込むFEMプログラムに要求されるのは弾性計算機能だけであるので、ほとんど全てのFEMプログラムが使用可能であり、さらに、一次元（棒要素等）から三次元（4面体、6面体要素等）まで、汎用FEMプログラムに組み込まれたほとんど全ての要素（element）が使用できる。

パラメータa、n、mを決めるには、一軸圧縮試験が最も便利である[30]。特に、強度破壊点の少し手前で歪速度を10倍とした時（あるいは交互に増減した時）、応力がどの位増加するかを調べればnが求まる。また、強度破壊点以降の応力－歪曲線の傾きを調べればmが求まる。もう一つのパラメータaはピーク強度から計算できる。この点については、次の節以降で説明する。

4.2 一軸圧縮応力下における構成方程式中のパラメータの求め方

表4-1はコンプライアンス可変型構成方程式のパラメータを求める試験方法として、実施が容易であり最初に選択すべきものから、実施が難しく必要に応じて行うべきものまで、三段階に分

類して示したものである。

はじめに、表 4-1 の第一段階 1-1 に区分した、一軸圧縮応力下における構成方程式中のパラメータの求め方について述べることにする。これは、実施のための所要試験片数も所要日数も少ないし、実験方法もほぼ確立された段階に達している。

4.2.1 n の求め方

サーボ試験機を用いて、一軸圧縮試験より求めることを勧める。その際、次に示す a)、b)、c) の選択肢がある。

a) 試験片を 20 本程度使用し、精度よく求めたい場合[31)]

1) 10^{-6}、10^{-5}、10^{-4}、10^{-3} s^{-1} の各歪速度で、4 ～ 5 本の一軸圧縮試験を行い、ピーク強度を求める。

2) ピーク強度を縦軸、歪速度を横軸として両対数グラフにプロットし、最小二乗法によりその傾き ϕ を求めると $n=(1/\phi)-1$ となる。

b) 試験片数本で、多少精度は落ちても簡便に求めたい場合[32)]

1) 歪速度 10^{-6} s^{-1} でピーク強度近くまで載荷して、応力－歪曲線の傾きが 50 %接線ヤング率の 30～50 %となる点 σ_1 で、歪速度を 10^{-5} s^{-1} に変更する。

2) その後、応力－歪曲線の傾きは一旦大きくなった後、徐々に低下する。その過程で、点 σ_1 での傾きと同じ傾きとなる点 σ_2 を求める。応力比 $\sigma_2/\sigma_1=10^{1/(n+1)}$ が成り立つので、この式を利用して n を計算する。

c) 上記の b)を改良した手法として提案されたもので、載荷速度を速い速度と遅い速度に交互に切り換えて、そのときの応力の増減幅からパラメータ n の値を求める [7)]。この方法に従えば、必要な試験片の本数は 5 本程度で充分であるし、比較的安定した数値が得られる。

4.2.2 m の求め方

m は、ピーク強度以降における応力－歪曲線の傾きから求めるのが、最も簡単である。まず、大久保・福井 [30)] および Okubo and Fukui[28)] にならって図 4-1 に示す手順で、ピーク強度以降の応力－歪曲線の傾きを示す角度 α を求める。次に図 4-2 を用いて比 m/n を求め、これに既知の n をかけて m を得る。なお、最近では、高性能のパーソナルコンピュータが手軽に使えるので、m を少しずつ変えた数値計算をおこなって、実験結果をよく再現する m を選ぶのがよいかもしれない。

参考までに n と m が環境条件によって変化する様子を述べておくことにする。実験的に全て実証されているわけではないが、水分（湿度）、温度、周圧の影響を図 4-3 に示す [30)]。縦軸は時間依存性で、n が大きいほど時間依存性は弱くなる。横軸は延性・脆性で、角度 α が大きいほど脆性的となる。この図から次のような傾向がうかがえる。

・周圧の増加とともに、時間依存性は減り、延性的になる
・水分があると、時間依存性が増す
・温度が高いと、時間依存性が増し、延性的になる
・弱い岩石ほど、時間依存性が増し、延性的な性質を示す

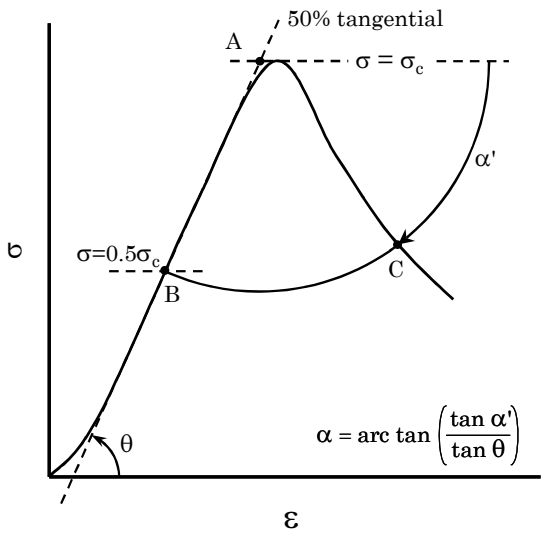


図 4-1　構成方程式中のパラメータ m を求めるためにピーク強度以降の応力－歪曲線の傾きを求める方法の説明

α' は応力－歪線図上での傾き、α は規格化した時の値（θ が 45°）

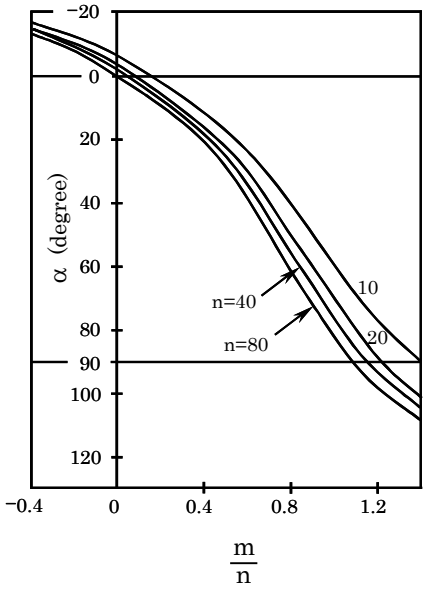


図 4-2　ピーク強度以降の応力－歪曲線の傾き α から構成方程式のパラメータ m と n の比を求める線図

曲線は数値計算で求めている

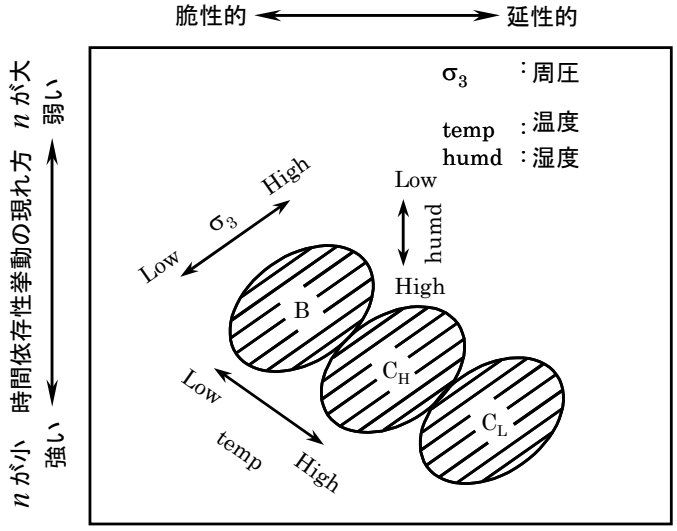


図 4-3　水分（湿度）、温度、周圧の影響

縦軸は時間依存性で，n が大きいほど時間依存性は弱くなる
横軸は延性・脆性で，角度 α が大きいほど脆性的となる
B、C_H、C_L は岩盤分類で区分される範囲のイメージ

4.2.3 a の求め方

a は、定歪速度試験（歪速度 C ）を行って得たピーク強度 σ_c と次式を用いて計算する。

$$a = \left(\frac{m}{n+1}\right)^{\frac{m}{n-m+1}} \lambda_0{}^{-m} \sigma_c{}^{-(n+1)} C \tag{4-4}$$

ただし、λ_0 は初期コンプライアンス（＝1/ヤング率）である。つぎに、この(4-4)式の導出過程について述べる。導出の基礎となるのは(4-3)式であり、これを再掲する。

$$\frac{d\lambda}{dt} = a\,\lambda^m\,\sigma^n \tag{4-3}$$

定歪速度試験の場合、$\varepsilon = \lambda\,\sigma = C\,t$ なので、変形して $\sigma = C(t/\lambda)$ を得る。これを(4-3)式に代入すると、(4-3)式は λ に関する常微分方程式となり、初期条件 $t = 0$ 、$\lambda = \lambda_0$ のもとに次の解が得られる。

$$\sigma = \left(\frac{C}{a}\,\frac{n+1}{n-m+1}\,\frac{\lambda^{n-m+1} - \lambda_0{}^{n-m+1}}{\lambda^{n+1}}\right)^{\frac{1}{n+1}} \tag{4-5}$$

いっぽう、強度試験においてピーク強度 σ_c を取る点（強度破壊点）では、$d\sigma/dt = 0$ なので、定歪速度試験の場合の関係 $\varepsilon = \lambda\,\sigma = C\,t$ を t で微分した、$d\varepsilon/dt = C = \sigma \cdot d\lambda/dt$ という関係が成り立つ。そこで、これを(4-3)式に代入すると、強度破壊点で成り立つ(4-6)式が導かれる。

$$C = a\,\sigma^{n+1}\,\lambda^m \tag{4-6}$$

ここで、(4-6)式と(4-5)式から λ を消去すると、ピーク強度 σ_c を求める式が、(4-7)式のとおり示される。これを変形し、a について解いたものが、最初に示した(4-4)式である。

$$\sigma_c = \left(\frac{C}{a}\right)^{\frac{1}{n+1}} \left(\frac{m}{n+1}\right)^{\frac{m}{(n+1)(n-m+1)}} \lambda_0{}^{-\frac{m}{n+1}} \tag{4-7}$$

4.3 三軸圧縮応力下における構成方程式中のパラメータの求め方

ここでは、表 4-1 の第一段階 1-2 に区分した、三軸圧縮応力下における構成方程式中のパラメータの求め方について述べることにする。表 4-1 に記載したように、所要試験片数も所要日数も一軸圧縮応力下と比較すると多く、実験方法に関しても検討の余地を残している。

一軸圧縮応力下での構成方程式は以下のとおりであった。

$$\frac{d\lambda}{dt} = a\,\lambda^m\,\sigma^n \tag{4-3}$$

ここで、コンプライアンス λ の変化率は応力 σ の n 乗に比例することが示されている。三軸圧縮応力下の場合は、これを、コンプライアンス λ の変化率は破壊限接近度 σ^* の n 乗に比例すると考える。破壊限接近度とは、応力状態をモール円で描き、モール円中心と任意の破壊基準線までの距離 R に対する、モール円の半径 r の割合 r/R である。構成式の大きな変更はこれだけであ

るが、三軸応力による変形を考えることから、ポアソン比が必要になる。また、実際の計算にあたっては、式を無次元化した方が便利である[33]。

表 4-1　コンプライアンス可変型構成方程式のパラメータを求めるための三段階の説明

	目的	試験および原位置調査	構成方程式および計算	検討項目	所要試験片	所要日数	備考
第一段階	1-1 一軸応力下での基礎データ	歪速度を切換えた一軸圧縮強度試験	構成方程式のパラメータ		5	1日	到達度合:80%
(所要期間は試験片整形を含めて1ヶ月)	1-2 三軸応力下での基礎データ	歪速度を切換えた三軸圧縮強度試験	構成方程式のパラメータ，破壊条件		20	1週間	到達度合60%
第二段階	2-1 試計算		コンプライアンス可変型構成方程式による試計算	一軸，三軸応力下での応力－歪曲線，一般化応力緩和挙動		1週間	特に問題点は無い
(所要期間は3ヶ月)	2-2 計算結果と試験結果（中期）を比較・検討	一般化応力緩和試験（中期）		試計算結果の妥当性の確認	20(5条件×3本+予備)	1ヶ月	到達度合:60%
	2-3 構成方程式の精密化と試計算（必要に応じておこなう）		コンプライアンス可変型構成方程式の精密化と試計算	一軸，三軸応力下での応力－歪曲線，一般化応力緩和挙動		1ヶ月	到達度合:80%
第三段階	3-1 計算結果と試験結果（長期）を比較・検討	一般化応力緩和試験（長期）		再確認．必要に応じて構成方程式を補正	20(5条件×3本+予備)	1年	到達度合:40%
(所要期間は数年)	3-2 実際の構造物の検討（計算）		岩盤内構造物を対象とした計算	々		1年	到達度合:60%
	3-3 実際の構造物等の検討（調査）	原位置調査		調査結果と計算結果との比較・検討		数年	到達度合:20%

まとめると、a、n、m は、一軸圧縮応力下の場合とほぼ同じ方法で得られものの、破壊限接近度を評価するための破壊基準を何とするか定める必要があり、また、ポアソン比を求める必要があることが、三軸圧縮応力下の場合に追加される課題である。

破壊基準の選び方として、最も式が簡単な Coulomb の破壊基準は次式で示される。

$$\tau = C + \sigma \cdot \tan\phi \qquad (4\text{-}8)$$

この他にも、放物線であらわされる Mohr の破壊基準、二次式となる Janach の破壊基準などがある。破壊限接近度は、応力状態が破壊基準と一致しているとき１となり、これより応力が低いと小さくなる。やや正確さにかけるが、破壊限接近度とは（局所）安全率の逆数と考えてもよい。なお、この点については西松他[34]か Okubo et al。[35]を参照されたい。どの破壊基準を選んだとしても長所・短所があるため、選択は、検討ケースごとに、使い慣れた基準とするのが最適であると考える。また、圧縮応力のみ加わる場合には、著名な破壊条件ならどれであっても計算結果に大差はないと言える。いっぽう、引張応力の発生する場合には、これに対応していない破壊条件式が多いことに注意が必要である。経験的には、Janach の破壊基準を使用すると、圧縮下では概ね妥当な結果が得られるが、引張応力下での結果はやや疑問視されるものとなる。破壊基準と破壊限接近度は、今後も検討しなければならない重要な課題である。なお、既報[35]にいくつかの破壊基準と破壊限接近度をまとめておいたので必要に応じて参照することが可能である。

以上を踏まえて、構成方程式のパラメータ n と m が得られたとしても、その値は周圧により変わる可能性がある。したがって、必要な周圧毎に n と m を求めることが理想であるが、それには大変な手間を要する。そこで簡便な方法として、周圧下での強度（破壊基準）と n の間の関係式[36]を用いることが考えられる。その関係式を得た実験では、m は周圧の影響を受けておらず、すなわち、破壊基準を決めれば、一軸圧縮応力下で求めた n と m の値を用いて、任意の周圧で設定される三軸圧縮応力下での n と m の値を得ることができる。まとめると以下のとおりである。ただ

し、以下の性質の適用範囲を検討することは今後の課題である。

・n は、周圧下での強度（差応力標示）に比例して増大する
・m は、周圧によらずほぼ一定である

現状で、ポアソン比は、種々の異なる仮定の下で計算した結果を踏まえて、“体積弾性率一定”の仮定から求めるのが妥当と考えられるが[29]、この仮定では、破壊が進行してコンプライアンスが増加するほど、ポアソン比も増加して 0.5 に漸近し、これは必ずしも現実を表したものとは言えない。したがってこの仮定は、暫定であって今後見直す必要があると考えられる。

4.4 パラメータの信頼性向上の考え方

表 4-1 の第一段階までは、必要な手間の大小はあるものの、室内実験から比較的容易に構成方程式のパラメータの値を求めることができる。しかしながら、岩盤内構造物の長期安定性を評価するには、その信頼性をできるだけ高める必要がある。現在のところ、その手段は確立していないが、概念としては、例えば表 4-1 の第二段階および第三段階として示したようなことが考えられる。ここでは、構成方程式のパラメータの信頼性向上に関連する事項を検討する。

構成方程式のパラメータの信頼性向上とは、必ずしもパラメータを精度よく求めることとは限らない。長期挙動の予測対象により例外はあるが、構成方程式のパラメータのわずかな変化が長期挙動に及ぼす影響は比較的緩慢である。例外とは、鉱柱のように自由面が多い場合である。したがって、自由面が多い対象を扱う場合にのみ慎重にパラメータを求めればよいと考えられる。いっぽう、自由面が少ない対象としては、円形トンネルの内空変位がある。この場合、パラメータの少々の変化で、計算結果はさほど変わらないため、n を得る精度としては 10・20・40・60 の 4 段階程度で、m/n のそれは、1/4・1/2・1 の 3 段階程度の区分で十分なことが多い。

構成方程式のパラメータに対し、表 4-1 の第三段階 3-3 に示したように、最終段階（本格的な数値計算に移行する直前）には、未解明な部分への担保として、何らかの原位置試験を行い、最終確認をすべきと言える。しかしながら、トンネルの内空変位など、原位置試験の結果から n を求めることができるのかどうか、まだ結論は得られていない。例えば、n をパラメータに予測ケースをいくつか用意し、これらのうち原位置試験の結果と一致性の良いケースを見出す手法は、原理としてはあり得るが、その具体的な手順の成立性が確認されていない。すなわち、どうすれば構成方程式のパラメータの信頼性が原位置において検証されるのかという課題に対して、知見が少ないと言える。以上の状況を踏まえて、現状で考えられる信頼性検証手順の概念は以下のようなものと考えられる。

・実験室実験で数年までの挙動を把握する
・人工物の調査によって 1000 年程度までの現象を把握する
・それ以上の長期間の現象は、自然物の調査による

また、このような現象論的な挙動の確認は、その挙動が物理法則と矛盾しないものであるか検討が必要であり、分子動力学などの理論的観点による原理・原則の検討をこれとあわせて行うべきと考えられる。

実物の挙動観察、とりわけ自然物の調査による方法は、検討範囲が広範となって作業が大変である。その中で、現時点で考え得るひとつとして、地圧観測による方法を以下のとおり提案する。岩石に認められる時間依存性挙動は、経験上、寸法効果が小さい[37)38)]。すなわち、試験片と実岩盤を同じモデルで扱ったとしても、そのための誤差は少ないと予想される。そこで、岩盤内部の

地圧現象から、その岩盤の時間依存性挙動を把握し、試験片で構築した構成方程式のパラメータで説明可能であるか検討する方法が考えられる[39)]。

4.5 時間依存性を考えた岩盤分類

ここまで、構成方程式とそのパラメータの求め方について総括した。この構成方程式は、提案した後にも長らく検討を続けたもので、パラメータの取得法と合わせて、安定性があるものと考えている。しかしながら、工学的には以下のような課題が残っている。

・正確な把握が必要な脆弱岩盤ほど、多くの試験片を要するが、その試験片が作成し難い
・現状のやり方では、成果を得るまでに長い時間と高いコストが要求される
・構成方程式とそのパラメータの値では施工管理上扱いにくい

これを解決するものとして、岩石の時間依存性挙動、すなわち粘弾性的性質を考慮した岩盤分類を開発する必要がある。岩盤分類において粘弾性的性質を考慮するとは、あいまいな言い方であるが、例えば一つの概念として、粘弾性（時間依存性）を“強い、普通、弱い”の 3 段階程度に区分することは可能と考えられる。イメージを示すと表 4-2 のとおりである。

表 4-2　粘弾性（時間依存性）を考慮した岩盤区分のイメージ

粘弾性 （時間依存性）	対応	適用事例 （Wet:浸潤、Dry:乾燥状態）
強い	短期でも粘弾性を考慮すべき	凝灰岩 Wet 堆積岩 Wet
普通	長期のみ粘弾性を考慮	花崗岩 Wet 強固な結晶質岩 Wet 凝灰岩 Dry 堆積岩 Dry
弱い	考慮しなくてよい	花崗岩 Dry 強固な結晶質岩 Dry

つぎに、内部摩擦角ϕの大小は、施工時や長期安定性に相当の影響を与えると思われる。理論的な解明はまだ十分ではないが、経験的にϕが小さいと岩盤はすべり易く、それを止めるのも困難を極めることが多い。そこで、表 4-3 に示すように、粘弾性（時間依存性）とϕを考えた岩盤分類の一案を示す。ただし、この分類法は、今後十分な検討を要するものである。

表 4-3　時間依存性と内部摩擦角を考えた岩盤分類の一案

	時間依存性			
	小	中	大	
	n > 40	40 > n > 20	n < 20	
A: 施工中，埋め戻し後ともに経時変化（変形）は少ない.	ϕ > 40°			健全な花崗岩
B: 施工中にはある程度の経時変化がみられるが，埋め戻し後の問題は少ない.	40° > ϕ > 20°	ϕ > 40°		比較的強固な安山岩
C: 強度回復を考慮した設計・施工が望ましい	20° > ϕ > 10°	40° > ϕ > 20°	ϕ > 40°	あまり強固でない堆積岩
D: 強度回復を考慮した設計・施工が望ましい．施工には充分な注意を払う必要がある.	10° > ϕ	20° > ϕ > 10°	40° > ϕ > 20°	湿った凝灰岩．未固結堆積岩

＊ nは一軸圧縮応力下での値.

4.6 まとめ

本章では、はじめに、コンプライアンス可変型構成方程式についてその概要を述べ、式に含まれるパラメータの取得法について詳細を述べた。

つぎに、一軸圧縮応力下で、構成方程式のパラメータを求める手法は完成しているが、三軸圧縮応力下でのそれは、手法は明確なものの、そのために要する時間とコストが課題であることを示した。さらに、最大の問題点として、この構成方程式と実験で求めたパラメータを用いて長期安定性を評価する際の、その信頼性を検証する手段において知見が少ないことを述べた。

最期に、時間依存性（粘弾性）を考慮した岩盤分類案を示した。そこでは、経験的に現場施工の難易度に及ぼす影響が大きな、内部摩擦角をパラメータとする区分とした。この岩盤分類の当否については今後の検討課題とした。

5. おわりに

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。この試験は、開始当時、できる限り長期に耐えうる試験装置と、長期にわたって精度良いデータ収録が行える計測装置となるよう検討したが、1994年に開始した試験は計測装置の故障のため2年で中止を余儀なくされた。現在続行している試験は、その翌年再スタートしたもので、先の故障経験をふまえた対策が施されており、その成果として、本年度で 11.5 年経過となるまで大きな問題は発生していない。クリープ試験の結果、田下凝灰岩が、湿潤条件、破壊強度の3割という低応力レベルで、10年以上経過した現在でも測定可能なクリープ歪の増加が続くことが認められた。また、クリープ歪速度は試験開始から一貫して低下し、経過時間の約－0.9乗に比例した。これらクリープ挙動は、比較的高い応力レベルの短期クリープ試験で得られた一次クリープの挙動とほぼ一致することを確認した。ここで、非線形粘弾性論を拠りどころとして、岩石の変形や破壊の進む速度が応力の関数に比例すると仮定すると、長期クリープと短期クリープが統一的に説明できることが示唆された。この統一的説明は、短期の試験結果を用いて長期の挙動を予測・評価する際の根拠となり、今後、短期から長期までの時間依存性挙動を表せる構成方程式を構築した際は、今回の長期クリープ試験の結果が、重要な検証データとなると考えられる。

第3章では、2007年度に引続き、土岐花崗岩の一般化応力緩和試験を行った。本年度は、制御プログラムを改良して、試験可能な荷重と歪の変化条件を拡大し、これまで行えなかった荷重と歪がともに減少または増加する場合を含めた検討を行った。一般化応力緩和試験の結果は、今回新たに試験可能となった条件を含めて、これまで実施した何れの条件下でも、試験開始後 100s 程度まで、応力および歪の変化量は経過時間の対数にほぼ比例することがわかった（次式のとおり対数クリープ則が成り立つ)。同様の性質は、三城目安山岩や河津凝灰岩の結果でも示されている。

$$\delta\sigma = -\frac{P}{\alpha}\cdot\log(t) \tag{3-7}$$

$$\delta\varepsilon = P\cdot\log(t) \tag{3-8}$$

また、試験での荷重と歪の設定、すなわち試験片の応力履歴が異なるにもかかわらず、一般化応力緩和試験終了後の一軸圧縮強度はほとんど変化せず、一軸圧縮強度に及ぼす応力履歴の影響は小さいことが確認された。さらに、土岐花崗岩について得られている一軸圧縮強度試験と一般化応力緩和試験の結果から取得した拡張コンプライアンス可変型構成方程式のパラメータは、本年度の試験結果とも整合することが確認され、パラメータの値の信頼性が向上した。今後、信頼の向上したパラメータを用いて、長期岩盤挙動の数値シミュレーションを行い、原位置の挙動と比較検討することが課題である。

第4章では、コンプライアンス可変型構成方程式（以下、構成式と略記）について概観し、そのパラメータ取得方法を総括した。現状では、一軸圧縮応力状態でのパラメータの取得方法に問題は少なく概ね完成していると言える。しかし、三軸圧縮応力状態でそれを得る方法は、手順は明確化されていても、相当数の岩石試験片と試験のための労力を必要とするので、何らかの簡略化が求められる。また、残されている課題として、一つ目は、取得したパラメータとその構成式の信頼性向上がある。ここで計測不能な長期領域に対しては、ナチュラルアナログ的な検証が必要で、地圧現象に基づく一案を示した。二つ目は、把握した時間依存性挙動を工学的に応用する方法であり、一案として時間依存性（粘弾性）を考慮した岩盤分類の概念を示した。

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) 核燃料サイクル開発機構：“超深地層研究所地層科学研究基本計画”，JNC TN7410 2001-018 (2002)
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，瀬野康弘，平野享，中間茂雄，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 2008-065 (2008)
5) 大久保誠介，陳文莉，福井勝則：“岩石圧砕片の粒度分布と消費エネルギーに関する一考察”，資源・素材学会誌，Vol.118，pp.729-736 (2002)
6) 大久保誠介，秋皙淵：“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，Vol.110，pp.533-538 (1994)
7) K. Hashiba, S. Okubo and K. Fukui: “A new testing method for investigating the loading rate dependency of peak and residual rock strength”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.43, pp.894-904 (2006)
8) S. Okubo, Y. Nishimatsu and K. Fukui: “Complete creep curves under uniaxial compression”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.28, pp.77-82 (1991)
9) D. M. Cruden: “The form of the creep law for rock under uniaxial compression”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.8, pp.105-126 (1971)
10) 横堀武夫：“材料強度学第 2 版”，(岩波書店，東京)，第 8，9 章 (1974)
11) 大久保誠介：“岩石のクリープ”，資源・素材学会誌，Vol.107，pp.245-252 (1991)
12) N. D. Cristescu and U. Hunsche: “Time effects in rock mechanics”, (John Wiley & Sons, Chichester), Chapter 2-4 (1998)
13) W. N. Findley, J. S. Lai and K. Onaran: “Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials”, (North-Holland Publishing Company, Amsterdam), Chapter 2 (1976)
14) 大久保誠介，秋皙淵：“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，Vol.43，pp.819-825 (1994)
15) 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，Vol.105，pp.521-526 (1989)
16) P. B. Attewell and I. W. Farmer: “Fatigue behaviour of rock”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.10, pp.1-9 (1973)
17) B. C. Haimson: “Effect of cyclic loading on rock”, ASTM, STP 654, pp.228-245 (1978)
18) 松木浩二，工藤裕之：“岩石の繰り返し圧縮疲労過程に関する考察”，資源・素材学会誌，Vol.106, pp.781-786 (1990)
19) S. Yamashita, F. Sugimoto, T. Imai, D. Namsrai, M. Yamauchi and N. Kamoshida: “The relationship between the failure process of the creep or fatigue test and of the conventional compression test on rock”, Proceedings of the 9th international congress on rock mechanics, pp.699-702 (1999)
20) N. J. Price: “A study of the time-strain behaviour of coal-measure rock”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.1, pp.277-303 (1964)

21) D. Griggs: “Experimental flow of rocks under conditions favoring recrystallization”, Bull. Geol. Soc. Am, Vol.51, pp.1001-1022 (1940)
22) K. Hashiba, S. Okubo and K. Fukui: “Creep of granite at low stress level”, Proceedings of the ISRM Regional Symposium Eurock2004 & 53rd Geomechanics Colloquy, pp.471-474 (2004)
23) 大久保誠介，瀬野康弘，中間茂雄，佐藤稔紀，平野亨：“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)
24) 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一般化した応力緩和特性”，資源・素材学会誌，Vol.108，pp.543-548 (1992)
25) 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)－”，資源・素材学会誌，Vol.103，pp.177-181 (1987)
26) G. Gioda: “A finite element solution of non-linear creep problems in rocks”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.18, pp.35-46 (1981)
27) 大久保誠介:“コンプライアンス可変型構成方程式の解析的検討”, 資源・素材学会誌, Vol.108, pp.601-606 (1992)
28) S. Okubo and K. Fukui: “An analytical investigation of a variable-compliance-type constitutive equation”, Rock Mech. Rock. Engng., Vol.39, pp.233-253 (2006)
29) 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，Vol.114，pp.79-85 (1998)
30) 大久保誠介，福井勝則：“コンプライアンス可変型構成方程式の定数について”，資源・素材学会誌，Vol.113，pp.561-564 (1997)
31) 秋皙淵：“岩石の湿潤状態における時間依存性”，東京大学博士論文，p.45 (1995)
32) S. Okubo, Y. Nishimatsu and C. He: “Loading rate dependence of class Ⅱ rock behaviour in uniaxial and triaxial compression”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.27，pp.559-562 (1990)
33) 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，Vol.114，pp.79-85 (1998)
34) 西松裕一，大久保誠介，福井勝則：“破壊限接近度と局所安全率に関する考察と拡張”，資源・素材学会誌，Vol.110，pp.343-346 (1994)
35) S. Okubo, K. Fukui and Y. Nishimatsu: “lLocal safety factor applicable to wide range of failure criteria”, Rock Mech. Rock Engng., Vol.30, pp.223-227 (1997)
36) 大久保誠介, 金豊年:“非線形粘弾性モデルによる円形坑道周辺岩盤挙動のシミュレーション”, 資源・素材学会誌, Vol.109, pp.209-214 (1993)
37) 大久保誠介，趙顕：“計算機シミュレーションによる岩石の寸法効果の検討”，資源・素材学会誌，Vol.110, pp.109-114 (1994)
38) 趙顕，大久保誠介，福井勝則：“強度のばらつきを考慮した一軸引張試験の計算機シミュレーション”，資源・素材学会誌，Vol.111，pp.907-912 (1995)
39) 大久保誠介，福井勝則，新孝一：“岩盤の破壊基準と長期強度に関する一考察”，資源・素材学会誌，Vol.115，pp.213-218 (1999)

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

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

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の） 1	1
比透磁率[b]	（数字の） 1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(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[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

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

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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

表５．SI 接頭語

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

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L，l	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3\ kg$

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

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

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}\ J$
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St=1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb=1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal=1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G=1Mx\ cm^{-2}=10^{-4}T$
エルステッド[c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

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

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	1 rem=1 cSv=10^{-2}Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	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）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています