JAEA-Research 2014-020



結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価手法 に関する研究(2013年度) (委託研究)

Study on Crystalline Rock Aiming at Evaluation Method of Long-term Behavior of Rock Mass (FY2013) (Contract Research)

> 福井 勝則 羽柴 公博 佐藤 稔紀 真田 祐幸 桑原 和道

Katsunori FUKUI, Kimihiro HASHIBA, Toshinori SATO, Hiroyuki SANADA and Kazumichi KUWABARA

バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター

Tono Geoscience Center Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

November 2014

日本原子力研究開発機構

Japan Atomic Energy Agency

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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) 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連携成果展開部研究成果管理課 〒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 Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration 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

 $\underline{\mathbb{O} \text{ Japan Atomic Energy Agency, } 2014}$

結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価手法に関する研究(2013年度) (委託研究)

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 福井 勝則*、羽柴 公博*、 佐藤 稔紀、真田 祐幸、桑原 和道^{*}

(2014年8月20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、2013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16年間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、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結 果、その利用方法について報告した。本年度は、国内外の他の研究者のデータを追加し、岩石の 時間依存性に影響をおよぼす要因について検討した。さらに、データの利用方法の一つの例とし て、時間依存性を考慮した岩盤分類について考察した。第4章では原位置試験計画の策定のため、 原位置岩盤の数値解析手法の向上に関する検討を行った。岩石を対象とした構成方程式の妥当性 や適用性は圧縮応力下で検討されることがほとんどであり、試験結果の少ない引張応力下での検 討例はほとんどなかった。そこで、花崗岩の一軸引張試験結果を用いて構成方程式の適用性に関 する検討を行った。さらに、一軸引張応力下と一軸圧縮応力下に適用できる構成方程式を比較し、 両応力下での力学挙動の相違について考察した。

本報告書は東京大学が日本原子力研究開発機構との委託研究により実施した研究成果に関するものである。

東濃地科学センター:〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64

※ 技術開発協力員

* 東京大学

JAEA-Research 2014-020

Study on Crystalline Rock Aiming at Evaluation Method of Long-term Behavior of Rock Mass (FY2013) (Contract Research)

Katsunori FUKUI*, Kimihiro HASHIBA*, Toshinori SATO, Hiroyuki SANADA and Kazumichi KUWABARA *

Tono Geoscience Center Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management Japan Atomic Energy Agency Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received August 20, 2014)

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 mass for evaluating long-term mechanical stability. The purpose of this study is determining the mechanisms of time-dependent behavior of rock mass 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. Further research is needed to examine the reliability of the provided model and parameter.

This report describes the results of the activities in fiscal year 2013. 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 Tage tuff are described and the total testing time exceeded 16 years started in fiscal year 1997. In Chapter 3, the result of organization and analysis for time dependent behavior of crystalline rock was described. In addition, rock mass classification systems considering time-dependency of rock mass were examined. In Chapter 4, for the drafting of in-situ test plan, examination of the numerical analysis technique of rock mass was carried out. Furthermore, the constitutive equation applied to a uniaxial compression stress state was compared with uniaxial tensile stress state, and it was considered difference in dynamics behavior in these two stress state.

Keywords: Crystalline Rock, Time Dependency, Creep, Constitutive Equation

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

X Collaborating Engineer

^{*} 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	4
2.3 試験結果	5
3. 岩石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 岩石の時間依存性を表す指標	9
3.2 一軸圧縮応力下および引張応力下での試験結果	11
3.3 岩石の時間依存性に影響を与える要因	. 13
3.4 時間依存性を考慮した岩盤分類に関する考察	. 15
3.5 まとめ	. 19
4. 原位置岩盤の時間依存性挙動の数値解析手法に関する検討	. 20
4.1 構成方程式	. 20
4.2 一軸引張応力下での試験結果と計算結果	. 31
4.3 一軸引張応力下と一軸圧縮応力下での構成方程式の比較	. 40
4.4 まとめ	. 45
5. おわりに	. 46
参考文献	. 48

Contents

1. Introduction	
2. Long-term creep test of Tage tuff	
2.1 Sample and testing method	2
2.2 Historical review of the test and maintenance of equipment	
2.3 Results	
3. Organization and analysis for time dependent behavior of rock	
3.1 An index of time dependent behavior of rock	
3.2 Results of uniaxial compression and tension tests	11
3.3 Factor to affect time-dependence of rock	
3.4 A rock mass classification considering its time-dependent behavior	
3.5 Summary	
4. Examination about the numerical analysis technique of time-dependent	behavior of
in-situ rock mass	
4.1 A variable-compliance-type constitutive equation	
4.2 Results of uniaxial compression tests and numerical analysis	
4.3 Comparison of constitutive equation under uniaxial tensile and compression	on
stress state	40
4.4 Summary	
5. Conclutions	
References	

図リスト

义	2-1	空圧式クリープ試験機の概略図	2
义	2-2	空圧式クリープ試験機の写真	3
义	2-3	クリープ歪およびシリンダ内の圧力の変化	6
义	2-4	クリープ歪および室温と水温の変化	6
义	2-5	クリープ歪および湿度の変化	7
义	2-6	室温と水温の差および湿度の変化	7
义	2-7	クリープ歪およびシリンダ内の圧力の変化	8
义	2-8	クリープ歪および室温と水温の差の変化	8
义	3-1	nの値を求めるための4通りの試験方法と試験結果	. 10
义	3-2	周圧下と湿潤状態での強度と n の関係	15
义	3-3	式(3-12)における TFL/TF と RMR-RMRt の関係 (a ₁ は 18)	. 17
义	3-4	式(3-14)における TFL/TF と Qt/Q の関係 (a ₁ は 18、a ₂ は 7.5)	. 18
义	3-5	式(3-17)における TFL/TF と RMit/RMi の関係	. 19
义	4-1	試験機の概略図	. 25
义	4-2	稲田花崗岩のm ₁ の値を求めるための一軸引張試験結果と近似直線	. 26
図	4-3	構成方程式Aで定数の値を変化させたときの一軸引張試験の計算結果	. 27
义	4-4	構成方程式 B で定数の値を変化させたときの一軸引張試験の計算結果	. 28
义	4-5	構成方程式 C で定数の値を変化させたときの一軸引張試験の計算結果	. 29
図	4-6	稲田花崗岩の一軸引張試験結果 43) と計算結果	. 31
図	4 - 7	一軸引張応力下での応力-歪曲線に関する計算結果	. 33
义	4-8	強度の載荷速度依存性に関する計算結果	. 34
図	4-9	ー軸引張応力下でのクリープに関する構成方程式Aの計算結果	. 35
図	4-10	ー軸引張応力下でのクリープに関する構成方程式 B の計算結果	. 36
义	4-11	ー軸引張応力下でのクリープに関する構成方程式 C の計算結果	. 38
図	4-12	クリープ寿命の計算結果	. 39
図	4-13	一軸圧縮応力下での応力-歪曲線に関する計算結果	. 41
义	4-14	ー軸圧縮応力下でのクリープに関する構成方程式Aの計算結果	. 42
义	4-15	一軸圧縮応力下でのクリープに関する構成方程式Bの計算結果	. 43

表リスト

表 3-1	一軸圧縮、一軸引張、圧裂引張試験での岩石の強度とnの値	12
表 4-1	構成方程式 A, B, C, D とピーク強度以前での解析解	21
表 4-2	2 土岐花崗岩の一軸圧縮試験結果	23
表 4-3	3 土岐花崗岩の圧裂引張試験結果	24
表 4-4	■ 構成方程式を稲田花崗岩に適用した場合の定数の値	30

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、処分坑道の力学的安定性は、建設・操業時はもと より閉鎖後も千年程度にわたって要求される。一方、処分坑道をとりまく岩石や岩盤は、クリー プや応力緩和などの力学的な時間依存性挙動を示すことが知られており、その挙動を把握するこ とは処分坑道の安定性評価における課題となっている。この課題を受け、2009 年度までに実施し てきた「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」では、結晶質岩を対象 とした地上からの調査段階における長期岩盤挙動の評価手法の構築を目指した研究開発をすすめ、 2009 年度にその成果のとりまとめを実施した。2010 年度は、その成果をふまえ、地上からの調 査段階における長期岩盤挙動評価手法の妥当性確認を主目的とした研究開発を実施した。2011 年 度は、2010 年度の研究に基づいて、次年度以降の研究の進め方を日本原子力研究開発機構内部で 検討した。2012 年度は、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)における 妥当性検証のための原位置試験手法について検討した。本年度は、これまでに例を見ない長期間 のクリープ試験を継続するとともに、研究坑道を利用した原位置試験手法に関する検討を引き続 きおこなった。

第2章では、継続しておこなってきた長期クリープ試験結果について報告した。本研究では、 岩盤構造物の長期挙動予測評価手法に対して新しい知見を加えるため、長期間のクリープ試験に 耐えうる試験装置と、長期間にわたって精度の良い計測が行える計測システムを開発して、1994 年から試験を開始した。本年度も、これまで続けてきた田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行 い試験期間は16年を越えた。このような長期にわたる試験は過去にもほとんど例がなく、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つつあるといえる。本研究の第2 章では、これまでに得られた試験結果を示した。

第3章では、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結果、その利用方法 として、時間依存性を考慮した岩盤分類について報告した。2010年度は、これまでに本研究室で 取得してきた岩石の強度と岩石の時間依存性を表す指標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。2012年度は、2010年度に示した岩石の強度とnの値に、試験方法の記載 やデータを追加して再整理した。本年度は、国内外の他の研究者のデータを追加し、岩石の時間 依存性に影響をおよぼす要因について検討した。さらに、データの利用方法の一つの例として、 時間依存性を考慮した岩盤分類について考察した。

第4章では、原位置試験計画の策定に資する情報を得るため、原位置岩盤の数値解析手法の向 上に関する検討を行った。岩石を対象とした構成方程式の妥当性や適用性は圧縮応力下で検討さ れることがほとんどであり、試験結果の少ない引張応力下での検討例はほとんどなかったので、 花崗岩の一軸引張試験結果を用いて構成方程式の適用性に関する検討を行った。さらに、一軸引 張応力下と一軸圧縮応力下に適用できる構成方程式を比較し、両応力下での力学挙動の相違につ いて考察した。

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16.5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

試験条件は、前回の試験(1994年11月から1996年8月まで実施)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、図 2-2)
- 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 521, 596, 800sec (2013 年 12 月 2 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(主に載荷初期と 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)

試験開始後に追加した計測項目:

- ・シリンダ内の圧力: 2000年2月から記録を開始
- ・水温、室温、湿度:2010年1月から測定を開始。図2-2に示すように、水温は、試験を 行っている横で、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 を入れた状態で測定している。湿度の測定にはアスマン式通風乾湿計を用いている。



図 2-1 空圧式クリープ試験機の概略図



図 2-2 空圧式クリープ試験機の写真 温度計1:室温測定用 温度計2:水温測定用

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):
 - ・シリンダ内の圧力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

2013年における、クリープ歪とクリープ荷重を作用させるシリンダ内の圧力の経時変化を図 2-3に示す。この間、シリンダ内の圧力は概ね一定であったが、10月に若干低下したので元の値 に戻した。クリープ歪は日々の細かい変動が見られたものの9月まではほぼ一定であったが、10 月に若干減少し、その後はほぼ一定値を保っている。図2-3と同じ期間の水温と室温の変化を図 2-4に示す。水温と室温には似たような変化が見られたが、水温の変化のほうが若干大きく、夏 場に高く冬場に低くなる傾向が見られた。図2-5には湿度の変化を示したが、実験室は湿度の制 御をしていないので、夏場は湿度が高く 60~80%となり、冬場は低く 40%以下となった。冬場に データ点が消えているのは、アスマン式通風乾湿計で測定できる湿度の下限を下回ったためであ る。図2-6には室温と水温の差および湿度の変化を示す。水の蒸発熱の影響により、湿度が低い ほど室温と水温の差が大きく、湿度が高いほど室温と水温の差が小さいという傾向が見られた。

図 2-7 には、試験開始(1997 年 5 月 23 日)から 2013 年 12 月 2 日までのクリープ歪とシリン ダ内の圧力の経時変化を示した。試験開始から約 3 年間は、歪のデータを計算機で取り込んだ。 その際、記憶容量の節約のため、ある歪をとった最終時刻を記憶したのでデータ点が少なくなっ ている。その後は、毎週月曜日と金曜日午前10時頃に歪と圧力の値を記録した。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内の圧力が設定値よりも徐々に減少していった ので、適宜、圧力を設定値に戻すという作業を行ってきた。クリープ歪は概ね圧力と似たように 変動しながらも徐々に増加した。しかし、2010年度の報告書で指摘したように、2008年から2009 年にかけては、圧力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。この原因として、何らかの影響でシリンダが動きにくく なっている可能性が考えられたので、2010年10月29日に減圧弁(b)により圧力を設定値の0.098 MPa (1 kgf/cm²) から 0.049 MPa (0.5 kgf/cm²) まで下げてから、圧力を 0.049 MPa (0.5 kgf/cm²) と 0.039 MPa (0.4 kgf/cm²) の間で 10 回上下させた。その後、圧力を設定値である 0.098 MPa (1 kgf/cm²) に戻した。この時点を図 2-7 に矢印で示した。この作業の後は、クリープ歪は 2007 年と同程度まで増加し、それ以降はシリンダ内の圧力と似たような変化をした。今年に入ってか らもクリープ歪には大きな変化は見られなかったが、10月以降は若干の減少傾向が見られた。圧 力にはあまり変化は見られないので、2008 年~2009 年と同様に何らかの影響でシリンダが動き にくくなっている可能性も考えられる。この点に関しては、今後も注意深く見守っていく予定で ある。図 2-8 には、クリープ歪と温度差(=室温-水温)の経時変化を示した。温度差には夏場 や冬場を極値とした年周期が見られたが、クリープ歪にはそのような傾向は見られなかった。

過去の長期クリープ試験結果の例として、熊谷ら¹⁾の27年間の試験結果が報告されているが、 これは四角柱形試験片の自重による曲げクリープ試験の結果である。そのため、多くの短期クリ ープ試験結果が蓄積されている一軸圧縮応力下での挙動との比較は難しい。本研究での試験は開 始から16年をすぎ、過去に例が少ない一軸圧縮応力下での長期間のデータを取得しているとこ ろである。今後もできるだけ長期にわたって試験を継続する予定である。



図 2-3 クリープ歪およびシリンダ内の圧力の変化 (2013 年)



図 2-4 クリープ歪および室温と水温の変化 (2013 年)



図 2-6 室温と水温の差および湿度の変化 (2013 年)



図 2-7 クリープ歪およびシリンダ内の圧力の変化 (1997 年~2013 年)

2010年10月29日にシリンダを低圧力下で上下運動させる作業を行った。





図 2-8 クリープ歪および室温と水温の差の変化 (1997 年~2013 年) 2010 年 10 月 29 日にシリンダを低圧力下で上下運動させる作業を行った。

3. 岩石の時間依存性挙動把握のためのデータの整理と分析

地下構造物の長期的な安定性を評価するためには、周辺岩盤の時間依存性挙動を把握すること が重要である。これまで室内試験により岩石の時間依存性挙動に関する研究を行ってきた。室内 試験で得られた結果を原位置岩盤の評価にどのように利用すれば良いかについては、検討の余地 が大いに残されているのが現状である。本章では、これまで収集した岩石の強度と岩石の時間依 存性を表す指標であるnの値に国内外のデータを追加して、岩石ごとの比較や時間依存性に影響 を与える要因について検討を行った。さらに、設計や施工に利用するための一つの方法として、 時間依存性を考慮した岩盤分類に関する検討を行ったので、その考察を述べる。

3.1 岩石の時間依存性を表す指標

載荷速度 C が増加すると岩石の強度 σ_fは増加し、次式より n の値が求まる。

$$\sigma_f \propto C^{\frac{1}{n+1}} \tag{3-1}$$

載荷速度には歪速度 d ϵ /dt や応力速度 d σ /dt が含まれ、一般的には歪速度と応力速度の線形 和 d ϵ /dt – α d σ /dt²⁾ として表される。ピーク強度以前で応力 – 歪曲線が直線からずれ始めると、 定歪速度と定応力速度の結果はわずかに違ってくるが、n におよぼす両者の差を論じられるほど の高精度な試験は現状では難しい。クリープ応力 $\sigma_{\rm er}$ とクリープ寿命 $t_{\rm er}$ の関係は次式で表され、 多くの岩石で式(3-1) と式(3-2) の n の値がほぼ等しいことが確認されている³。

$$t_{cr} \propto \sigma_{cr}^{-n} \tag{3-2}$$

式(3-1)と式(3-2)は実験式であるが、次のような簡単な仮定から導くこともできる。まず、速度過程論や確率過程論にならって、破壊が進行する速度dλ/dtが応力のn乗に比例するとする⁴⁾。

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

破壊の進行は亀裂の進展、剛性の低下、非弾性歪の増加などとして現れるので、dλ/dt はそれ らの速度と考えることができる。次に、dλ/dt の積分値がある値Λに達すると破壊すると仮定す る。

$$\Lambda = \int_0^t \frac{d\lambda}{dt} dt \tag{3-4}$$

定応力速度の場合は、 σ =Ct を式(3-3)と式(3-4)に代入すると式(3-1)の関係が導かれる。応力 一定の場合は、 $\sigma = \sigma_{cr}$ =const.を式(3-3)と式(3-4)に代入すると式(3-2)の関係が導かれる。この ように、n は岩石の時間依存性の程度を表す指標と考えることができる。なお、n の値が小さい ほど時間依存性が大きくなり、載荷速度を変化させたときの強度の変化が大きくなり、クリープ 応力を変化させたときのクリープ寿命の変化が大きくなる。

2012年度はnの値を求めるための4つの方法を紹介した。ここではよりわかりやすくするため、 得られる試験結果とnの求め方を追加して図 3-1 に示した。



図 3-1 nの値を求めるための4通りの試験方法と試験結果

(a)異なる載荷速度での定載荷速度試験、(b)載荷速度をピーク強度直前で切り換える試験、

(c) 載荷速度を交互に切り換える試験、(d) 異なるクリープ応力でのクリープ試験

(a)では試験片ごとに定まった載荷速度で強度試験を行い、そのときの強度を求める。(a)中央 図は各載荷速度での平均的な結果であり、実際には(a)右図のように、同じ載荷速度でも試験片 ごとに強度はばらつく。そのため、均質な岩石ブロックが入手できるときには確実な良い方法で あるが、多数の試験片が必要となる。(b)では応力-歪曲線を見ながら定載荷速度試験を行って、 応力-歪曲線の傾きが小さくなりピーク強度を迎える直前に載荷速度を 10 倍程度に増加させ、 そのときの応力の増加より n の値を求める⁵⁾。この方法は、1 本の試験片で n の値が求まるが、 載荷速度を増加させる時点を適切に選定するには高い技術と経験が要求される。(c)では 2 種類 の載荷速度を交互に切り換えながら強度試験を行う³⁾。(c)中央図のように、得られた応力-歪曲 線の内側と外側を滑らかにつないで、2種類の載荷速度に対応する強度を求めnの値を計算する。 この方法では1本の試験片でnの値が求まり、載荷速度を交互に切り換えるだけなので試験に高 い技術が要求されることはない。応力-歪曲線を滑らかにつなぐ際に誤差が生じる場合があるが、 これまでの研究では、(a)とほぼ同様のnの値が得られている³³。(d)では複数のクリープ応力の もとでクリープ試験を行ってnの値を求める。ただし、クリープ応力が同じでもクリープ寿命は 試験片ごとにばらつくし、試験片が破壊するまでクリープ試験を行うには長時間を要するので、 一般的な方法とはいえない。

3.2 一軸圧縮応力下および引張応力下での試験結果

2012年度は土岐花崗岩と9種類の日本産岩石、1種類の硬質粘土層(土丹)、1種類の中国産石炭のnの値をまとめた。この土岐花崗岩と日本産岩石の結果に、29種類の国内外の岩石の結果⁶⁻²⁸⁾を追加したものを表 3-1(1)、(2)に示した。なお、高速での載荷では低速とは異なる試験装置が用いられていたり、載荷速度が設定値からずれていたりする場合があり、また、低速と高速とでは試験片内部の応力状態が異なっている可能性があるとの指摘もあるため^{8,29,30)}、ここでは載荷速度 10⁻¹/s 以下での結果を採用した。岩石名に産地名が書いていないのは、文献に明記されていなかったものである。試験の欄に*1を付けたのは、3.1で示したような異なる試験方法、もしくは層に対して異なる方向から載荷した場合のものであり、結果の欄には得られた値の範囲を示した。文献中にそれ以前のデータがまとめられていた場合は、元のデータの出典を*2~*9で示した。2012年度にも指摘したように、同じ岩石では一軸圧縮、一軸引張、圧裂引張でのnの値はほぼ同じであった。

岩種ごとに気乾状態の結果から見ていく。安山岩、花崗岩、大理石、砂岩、凝灰岩は4ヶ所以上の産地の結果が得られているが、強度、nの値ともに産地ごとの違いが大きかった。その中でもっとも産地ごとの差が小さかったのは花崗岩であるが、10ヶ所で取得された nの値は 32~58であった。砂岩の nの値は 28~94 と、気乾状態での全データ 26~94 とほぼ同程度のばらつきが見られた。

岩種と産地が同じで研究者が異なる場合の結果を見てみる。稲田花崗岩、Westerly 花崗岩、秋 吉大理石、和泉砂岩、来待砂岩、多胡砂岩では、複数の研究者により n の値が求められている。 研究者ごとの差異は産地ごとの差異に比べれば小さく、特に Westerly 花崗岩では、2 つの文献の 発表年は約 20 年違っているが n の値はほぼ同じであった。稲田花崗岩でも、実験技術が進歩し た最近になって発表された n の値 42~51 に対して、約 40 年前に発表された 37 や約 20 年前に発 表された 55 は近い値であると言って良いであろう。一方、和泉砂岩や来待砂岩では研究者の違 いで n の値が 2 倍程度異なっており、産地が同じでも採取場所や岩石ブロックによってばらつき が生じた可能性が考えられる。

気乾状態に比べると含水飽和状態での結果はかなり少ない。13データのうち2データを除いて、 含水飽和状態でのnの値は気乾状態よりも小さくなっており、水分によって時間依存性の程度が 大きくなる岩石が多いことがわかる。

表 3-1	一軸圧縮、	一軸引張、	圧裂引張試験での岩石の強度とnの値	(1/2)
-------	-------	-------	-------------------	-------

			気乾状態		湿潤状態			
1 7	昔石 しんしょう しんしょ しんしょ	試験	強度 (MPa)	п	強度 (MPa)	п	文献	
江持	安山岩	UC	94	26			小林 ⁶⁾	
石越	安山岩	UC	274	61			小林 ⁶⁾	
		UC*1	62-103	35-42	66-73	28-31		
三条目	安山岩	UT^{*1}	4.1-7.1	36-40			福井ら ⁷⁾	
		BT	5.6	41	4.1	28		
湯河原	安山岩	UC	223	45			Masuda ⁸⁾	
Beebe	斜長石	UC-Creep		56		41	Lajtai et al. ⁹⁾ *2	
	玄武岩	UC		55			Brace and Jones ¹⁰⁾ * ³	
	粗粒玄武岩	UC		32			Sano et al. ¹¹⁾ *4	
Barre	花崗岩	UT^{*1}	7.0-8.9	44-58			Goldsmith et al. ¹²⁾	
Charcoal	花崗岩	UC		36			Sano et al. ¹¹⁾ * ⁵	
		UC	183	37			小林 ⁶⁾	
稻田	花崗岩	UC	191	55			梶川ら ¹³⁾	
		UC^{*1}	180-190	42-51	184	42	福井ら ⁷⁾	
Indian	花崗岩	UC	274	45	251	33	Masuda et al. ^{14, 15)}	
Lac du Bonnet	花崗岩	UC-Creep		58		17	Lajtai et al. ^{9) *6}	
大島	花崗岩	UC	192	32			Sano et al. ¹¹⁾	
土岐	花崗岩	UC	161	52			福井ら ⁷⁾	
Wootory	龙岗岩	UC		43			Brace and Jones ¹⁰⁾	
westery	16回石	UC	205	44			梶川ら ¹³⁾	
-	花崗岩	UC	190	37			Mogi ¹⁶⁾	
-	花崗岩	UC		52			Brace and Jones ¹⁰⁾ * ³	
も生	十田工	UC	116	59			小林 ⁶⁾	
	入理口	UC^{*1}	97-120	64-73			福井ら ⁷⁾	
Carrara	大理石	UC		43			Sano et al. ¹¹⁾ *4	
まれ	十四二	UC	82	52			小林 ¹⁷⁾	
	入理口	UC	78	48			小林 ⁶⁾	
-	大理石	UC	77	80			Mogi ¹⁸⁾	
Solenhofen	石灰岩	UC		41			Brace and Jones ¹⁰⁾	
Two do 11	工匠巴	UC		42		64	Lajtai et al. ⁹⁾	
TYHUATT	1八石	UC-Creep		50		32	Lajtai et al. ⁹⁾	
-	紫蘇輝石斑糲岩	UC		33			Sano et al. ¹¹⁾ *4	
_	珪岩	UC		32			Sano et al. ¹¹⁾ *4	

UC: 一軸圧縮試験. UT: 一軸引張試験. BT: 圧裂引張試験. 一軸圧縮強度: 歪速度 10⁻⁵/s もしくは応力速度 0.1MPa/s. 一軸引張強度: 歪速度 10⁻⁶/s 圧裂引張強度: 破壊までの時間が 500 s.

- *1: 異なる試験方法や異なる載荷方向から得られた結果.
- *2: 元のデータは Lajtai and Schmidtke (1986)¹⁹⁾.
- *3: 元のデータはKumar (1968)²⁰⁾.
- *4: 元のデータは John (1972)²¹⁾.

			気乾:	状態	湿潤	伏態	
岸石	青石	試験	強度	-	強度		文献
			(MPa)	п	(MPa)	п	
Berea	砂岩	UC		57			Sano et al. ¹¹⁾ * ⁵
般比	动坦	UC	38	31			小林 ¹⁷⁾
<i>名</i>	47 /12	UC	11	28			小林 ⁶⁾
和自	动坦	UC	200	34			小林 ⁶⁾
1171	砂石	UC^{*1}	200	56 - 61			福井ら ⁷⁾
本 / 4	心里	UC	34	91			小林 ⁶⁾
木付	砂石	UC	40	42			福井ら ⁷⁾
Louropooltink	おい出	UC		63			Sangha and Dhir ¹⁹⁾
	119 石	UC		60			Sano et al. ¹¹⁾ *7
白派	动毕	UC		33		37	藤田ら ²⁰⁾
	49 /	BT		31		11	藤田ら ²⁰⁾
夕田	动坦	UC	17	94			小林 ⁶⁾
多叻	119 石	UC	33	72			福井ら ⁷⁾
-	砂岩	UC		62			Sano et al. ¹¹⁾ *4
-	トーナル岩	UC		49			Brace and Jones ¹⁰⁾ *8
河津	凝灰岩	UC^{*1}	32-39	53-66	23	42	福井ら ⁷⁾
荻野	凝灰岩	UC	57	29			小林 ⁶⁾
大谷	凝灰岩	UC^{*1}	11-13	36-43	5.0	16	福井ら ⁷⁾
		UC^{*1}	15-22	41-53	8.0	22	
田下	凝灰岩	UT	1.2	46			福井ら ⁷⁾
		BT	1.3	45			
-	凝灰岩	UC		41			Brace and Jones ¹⁰⁾ *9

表	3-1	一軸圧縮、	一軸引張、	圧裂引張試験での岩石の強度とnの値	(2/2)
---	-----	-------	-------	-------------------	-------

UC: 一軸圧縮試験. UT: 一軸引張試験. BT: 圧裂引張試験.

一軸圧縮強度: 歪速度 10^{-5} /s もしくは応力速度 0.1MPa/s. 一軸引張強度: 歪速度 10^{-6} /s

- 圧裂引張強度: 破壊までの時間が 500 s.
- *5: 元のデータは Peng (1973)²⁴⁾.
- *6: 元のデータは Schmidtke and Lajtai (1985)²⁵⁾.
- *7: 元のデータは Sangha and Dhir (1972)²⁶⁾.
- *8: 元のデータは Perkins et al. (1970)²⁷⁾.
- *9: 元のデータは Green and Perkins (1969)²⁸⁾.

3.3 岩石の時間依存性に影響を与える要因

3.2 で示したように、水分は岩石の時間依存性に影響をおよぼす。また、2012 年度にも指摘し たように、周圧の大きさによってもnの値は変化する。その他にも、温度、湿度、含水率、塩分 など水分中に含まれる物質、なども影響をおよぼす可能性がある³¹⁾。しかしながら、これまでに 強度試験やクリープ試験で得られているnの値は、気乾状態と含水飽和状態および周圧下での結 果がほとんどなので、ここでは水分と周圧の影響について検討する。

2012年度は、三条目安山岩、稲田花崗岩、河津凝灰岩、田下凝灰岩の周圧下での結果について、 同じ岩石では一軸圧縮応力下での値で正規化した強度(差応力)とnの値がほぼ等しくなったと 報告した。ここでは、他の研究者^{13,14)}の周圧下の結果を2つ追加するとともに、含水飽和状態で の結果も合わせて検討してみることにする。

図 3-2 には、一軸圧縮応力下での値で正規化した周圧下での強度とnの値を示した。多くの結

果が傾き1の直線の近傍に位置しているが、新たに追加した Indian 花崗岩の結果が直線から離 れた位置にある。Indian 花崗岩の試験は他の岩石に比べて周圧が大きく、ピーク強度以降で応 カー歪曲線の傾きが緩やかになるにつれて、正規化した強度とnの関係が傾き1の直線からずれ ていく可能性が考えられた。直線からのずれが小さくわかりにくいが、破線で囲んだ河津凝灰岩 や田下凝灰岩の結果は、他の岩石の結果に比べて直線のやや右側に位置している。これら凝灰岩 の結果は、ピーク強度以降で応カー歪曲線が水平に近くなるような場合の結果であり、この結果 からも、ピーク強度以降で応カー歪曲線の傾きが緩やかになるにつれて図中の直線からずれてい くことが考えられる。図には、表 3-1 に示した6種類の岩石について、気乾状態での値で正規化 した含水飽和状態での強度とnの値も示した。含水飽和状態では強度、nの値ともに減少し、正 規化した結果は傾き1の直線の近傍に位置した。

このように、正規化した強度と n の値が傾き 1 の直線の近傍に位置する。すなわち、両者がほぼ等しくなることの意味について検討してみる。気乾状態での一軸圧縮強度 σ_f と n の値が、水分や周圧の影響で σ_f と n'に変化したとする。載荷速度が C_1 から C_2 に増加したときの強度の増加量 $\Delta \sigma_f$, $\Delta \sigma_f$, α_5

$$\Delta \sigma_{f} = \left\{ \left(\frac{C_{2}}{C_{1}} \right)^{\frac{1}{n+1}} - 1 \right\} \sigma_{f} \approx \frac{\sigma_{f}}{n+1} \ln \frac{C_{2}}{C_{1}}$$

$$\Delta \sigma_{f}' = \left\{ \left(\frac{C_{2}}{C_{1}} \right)^{\frac{1}{n'+1}} - 1 \right\} \sigma_{f}' \approx \frac{\sigma_{f}'}{n'+1} \ln \frac{C_{2}}{C_{1}}$$

$$(3-5)$$

ここでは、冪級数展開による近似を用いた。式(3-5)と式(3-6)より次式が得られる。

$$\frac{\Delta \sigma'_f}{\Delta \sigma_f} = \frac{n+1}{n'+1} \frac{\sigma'_f}{\sigma_f} \approx \frac{n}{n'} \frac{\sigma'_f}{\sigma_f}$$
(3-7)

ただし、n, n' >>1 とした。すなわち、正規化した強度 (σ_{f} ' / σ_{f}) と正規化した n の値 (n' /n) が等しいということは、載荷速度を増加させたときの強度の増加量 ($\Delta \sigma_{f} \ge \Delta \sigma_{f}$ ') が等しい ということになる。

図 3-2 を見直すと、周圧や水分の影響によって強度が変化しても、ピーク強度以降で応力-歪曲線の傾きが急なうちは、 $\Delta \sigma_f$ はほぼ一定であると考えられる。一方、Indian 花崗岩、河津凝 灰岩、田下凝灰岩の結果より、周圧が増加してピーク強度以降での応力-歪曲線の傾きが緩やかになると、強度が増加してもnすなわち $\Delta \sigma_f / \sigma_f$ がほぼ一定になっているように見える。



図 3-2 周圧下と湿潤状態での強度とnの関係 強度とnは一軸圧縮応力下、気乾状態での値で正規化した.湿潤状態の結果は三条目安山岩, 稲田花崗岩, Indian 花崗岩,河津凝灰岩,大谷凝灰岩,田下凝灰岩の結果

3.4 時間依存性を考慮した岩盤分類に関する考察

ここまでで、n が岩石の時間依存性を表す指標になることを述べてきた。この結果を原位置岩 盤に応用するためには、n の値の寸法効果を知る必要があるが、これまでに得られている知見は 少ない。羽柴ら³²⁾は、直径 10 mm、高さ 20 mmの試験片と直径 25 mm、高さ 50 mmの試験片を用 いて田下凝灰岩の n の値を求めたが、両者に違いは見られなかったとしている。趙ら³³⁾は、計 算モデルの寸法を変えて有限要素法による数値シミュレーションを行い、寸法が増大すると強度 は低下するが載荷速度依存性はほとんど変化しないとの結果を得た。大久保ら³⁴⁾の鉱山の坑道 を対象とした数値シミュレーションでは、原位置の試料を用いて室内試験で得られた n の値が 10 ~40 に対して、計算で n=20 とすると原位置計測結果と計算結果とが一致したとしている。これ らの結果より、岩石と岩盤とで n の値はそれほど大きくは違わない可能性が考えられる。

岩盤の調査や地下構造物の設計の際に、岩盤分類により対象とする岩盤の区分が行われる。これまでに種々の岩盤分類法が提案されてきたが、構造物の使用期間や寿命すなわち時間の影響を考慮したものは少ない。その理由の一つとして、岩盤の時間依存性の程度を表す適切な指標がなかったことが考えられる。例えば、Kalamaras and Bieniawski³⁵⁾は時間の経過とともに RMR が低下するとして、次式を提案している。

$$RMR_{tm} = RMR - 0.14T_m \tag{3-8}$$

RMR_{tm}は T_m年後の RMR であり時間の影響が考慮されているものの、右辺第 2 項の根拠は明らかではない。そこで、前節までで検討してきた n を、良く知られている既存の岩盤分類法 ³⁶⁾に組み込む方法について検討してみる。その際に、時間 T_Fおよび T_{FL}後に岩盤が破壊する応力を σ_F および σ_{FL} として、これらの間にクリープ試験での応力-寿命関係と同様の次式が成り立つと考える。

$$\frac{\sigma_{FL}}{\sigma_F} = \left(\frac{T_{FL}}{T_F}\right)^{-\frac{1}{n}}$$
(3-9)

 $\sigma_{\rm F}$ は一般的に使用されている岩盤強度、 $T_{\rm FL}$ は構造物の使用期間と考えることができる。岩盤 が応力を受けていると、その応力が $\sigma_{\rm F}$ より小さい $\sigma_{\rm FL}$ でも $T_{\rm FL}$ 後には破壊が生じると考える。す なわち、 $T_{\rm FL}$ が長くなるほど長期的にみた場合の強度 $\sigma_{\rm FL}$ が低下するので、岩盤分類における評点 を下げる必要がある。 $T_{\rm F}$ は強度と同じ応力を加えたときのクリープ寿命であり、岩石の室内試験 では 1~数 s という結果が得られているが³⁾、原位置岩盤ではその値は明らかではない。

RMR と岩盤強度の関係に関しては、数多くの経験式が提案されてきた。その中でもよく使用されている、次式のような関係式を用いて検討してみる。

$$\frac{\sigma_F}{\sigma_f} = \exp\frac{RMR - 100}{a_1} \tag{3-10}$$

 $\sigma_{\rm f}$ は岩石強度である。 a_1 は定数であり、研究者によって 10~30 の値が提案されている ³⁷⁾。強度 $\sigma_{\rm FL}$ に対応する RMR を RMR_tとする。RMR_tは構造物の使用期間によって変化する評点である。

$$\frac{\sigma_{FL}}{\sigma_f} = \exp\frac{RMR_t - 100}{a_1} \tag{3-11}$$

式(3-9)、(3-10)、(3-11)より次式が導かれる。

$$RMR_{t} = RMR - \frac{a_{1}}{n} \ln \frac{T_{FL}}{T_{F}}$$
(3-12)

式(3-12)は式(3-8)と同じ形をしているが、式(3-12)には構造物の使用期間 T_{FL}だけでなく、岩 盤の時間依存性の程度を表す n も入っている。図 3-3 には、 $a_1 & b_1 & b_1$

RMRとQとの間に次式のような関係が見出されている。

$$RMR = a_2 \ln Q + b_2 \tag{3-13}$$



図 3-3 式(3-12)における TFL/TF と RMR-RMRtの関係 (a₁は18)

研究者によって、定数 a_2 は 5~10、 b_2 は 40~60 程度の値が提案されている³⁸⁾。RMR_tに対応する Q を Q_t とし、式(3-12)に式(3-13)を代入すると次式が得られる。

$$Q_t = Q \left(\frac{T_{FL}}{T_F}\right)^{-\frac{\alpha_1}{\alpha_2 n}} \tag{3-14}$$

GSI>25 では、GSIと岩盤強度の間に次式のような関係があるとの報告がある³⁹⁾。

$$\frac{\sigma_F}{\sigma_f} = \exp\frac{GSI - 100}{18} \tag{3-15}$$

式(3-15)は式(3-10)と同じ形をしているので、強度 σ_{FL} に対応する GSI を GSI_tとすると次式が得られる。

$$GSI_t = GSI - \frac{18}{n} \ln \frac{T_{FL}}{T_F}$$
(3-16)



図 3-4 式(3-14)における TFL/TF と Qt/Qの関係 (a1は 18、a2は 7.5)

 T_{FL}/T_F と GSI-GSI_tの関係は図 3-3 と同じになる。RMR_tと同様に T_{FL}/T_F が長くなるほど、また n が小さいほど、すなわち岩盤の時間依存性が大きいほど、GSI_tは小さくなる。

RMi は岩盤強度そのものを表す指標 40 なので、強度 σ_{EL} に対応する RMi を RMi t とすると次式となる。

$$RMi_t = RMi \left(\frac{T_{FL}}{T_F}\right)^{-\frac{1}{n}}$$
(3-17)

図 3-5 には、 T_{FL}/T_F と RMi_t/RMi の関係を示した。図より、 T_{FL}/T_F が長くなるほど RMi_tは小さくなることがわかる。また、n が小さいほど、すなわち岩盤の時間依存性が大きいほど、RMi_tが小さくなることもわかる。

式の形は異なるものの、4 種類のいずれの岩盤分類法においても、構造物の使用期間と岩盤の時間依存性の程度に応じて評点が低下することが表現できた。今後はこれらの式の妥当性、岩盤のnの値の取得とその寸法効果、T_Fの設定方法などを検討する必要がある。



図 3-5 式 (3-17) における TFL/TF と RMit/RMiの関係

3.5 まとめ

国内外の 39 種類の岩石の n の値を整理したところ、同じ岩種でも産地ごとに値は大きく異な ることがわかった。岩種によっては、産地が同じであれば n の値がほぼ一定の場合もあったが、 砂岩では産地が同じでも n の値は大きくばらついた。従来は n の値を求めるために多くの試験片 が必要であったが、最近になって 1 本の試験片から n の値が求められるようになったので、今後、 同じ岩石の n の値の分布特性や岩種ごとの分布特性の違いなどを検討していきたい。

周圧や水分によって強度が変化すると、それにほぼ比例してnの値も変化したが、周圧が増加 してピーク強度以降での応力-歪曲線の傾きが緩やかになると、比例関係からずれる傾向が見ら れた。その機構は亀裂の進展やすべりと関係があると考えられるが、現状では知見は少なく、今 後データを蓄積して検討していく必要がある。本章では時間依存性におよぼす周圧と水分の影響 について述べたが、温度や湿度の影響なども今後調べていく必要がある。

岩石の時間依存性に関する試験結果を設計や施工に利用する方法の一つとして、時間依存性を 考慮した岩盤分類に関する検討を行った。RMR は岩石強度、RQD、不連続面、地下水などに関する 6 つの評点を足し合わせて求める。式(3-12)では、そこから構造物の使用期間と岩盤の時間依存 性の程度に応じた評点を差し引くことになる。Q の値は RQD、不連続面、地下水、応力状態など に関する6つの評点を掛け合わせて求める。式(3-14)では、さらに構造物の使用期間と岩盤の時 間依存性の程度に応じた評点を掛け合わせることになる。GSI は RMR と、RMi は Q と似た形の式 になった。今後は、原位置調査などを通して提案した式の妥当性を検討していきたい。

4. 原位置岩盤の時間依存性挙動の数値解析手法に関する検討

地下構造物の長期的な安定性を評価するためには、原位置において周辺岩盤の時間依存性挙動 を把握することが重要である。超深地層研究所計画においても、今後、研究坑道を利用した原位 置試験の実施が予定されている。原位置試験の実施には多くの時間、労力、経費がかかるため、 多くの条件下で試験を実施することは難しく、室内試験と異なり試験条件を任意に変化させるこ とも困難である。そこで、事前に綿密な計画を立てるために数値解析を行うことは有効な手法の 一つとなる。これまでに、超深地層研究所周辺に広く分布する土岐花崗岩の変形・破壊挙動およ び時間依存性挙動をモデル化し、坑道周辺岩盤の時間依存性挙動の数値解析を行ってきた。

地下空洞の長期的な安定性を評価するには、圧縮応力下だけではなく引張応力下での岩石の変 形・破壊特性を把握し、適切な構成方程式による数値解析を行うことが重要である。

岩石の一軸引張試験結果は一軸圧縮試験結果に比べれば格段に少ないものの、徐々に蓄積され ている。0kubo and Fukui⁴¹⁾は、一軸圧縮試験と一軸引張試験での岩石の応力-歪曲線が似た形状 であることを指摘した。秋ら⁴²⁾は、一軸圧縮応力下と一軸引張応力下のクリープ歪の変化が似た 傾向を示すことを報告した。一方、福井ら⁴³⁾は、一軸圧縮試験とは違って一軸引張試験では、載 荷開始から除荷曲線の傾きが徐々に減少していくことを指摘している。羽柴ら⁴⁴⁾は、一軸圧縮試 験では気乾状態と湿潤状態とで応力-歪曲線の形状はあまり変わらないが、一軸引張試験では湿 潤状態の方がピーク強度以前の非線形性が大きくなるなど変化が見られたとしている。大久保⁴⁵⁾ らは、一軸圧縮試験と一軸引張試験では、ピーク強度以前における石炭の応力-歪曲線の形状が 定性的にも異なっていることを指摘している。このように、精度が高まってきた最近の試験によ り、一軸圧縮応力下と一軸引張応力下とで異なる変形特性を示すことがわかってきた。

本章では、花崗岩の一軸引張試験結果を用いて構成方程式の適用性に関する検討を行った。さ らに、一軸引張応力下と一軸圧縮応力下に適用できる構成方程式を比較し、両応力下での力学挙 動の相違について考察した。

4.1 構成方程式

検討に用いた構成方程式を表 4-1(a)にまとめて示した。式 A は大久保ら³⁴⁾が提案したコンプラ イアンス可変型構成方程式 $(d \lambda^*/dt = a_3(\lambda^*)^{m_3}(\sigma^*)^n)$ に、ピーク強度以前の挙動を表す項を追加

した式⁴⁶⁾である。式Aは1つのバネを表しており、バネ定数の逆数に相当するコンプライアンス λ (= 盃/応力)が徐々に増加し、バネ定数は減少していく。大久保ら⁴⁵⁾が提案した式Bは、直 列に並んだ2つのバネのバネ定数がそれぞれ独立に減少していくことを表している。式Cはコン プライアンス可変型構成方程式に、ピーク強度以前で非弾性歪が増加する項を付け加えた式⁴⁷⁾ である。式Dは、大久保・西松⁴⁸⁾が提案した非弾性歪が徐々に増加する式から、ピーク強度以前 と以降を表す2項を取り出したものである。いずれの式でも、ピーク強度以前で式中の第1項が 支配的な場合は、応力速度一定と応力一定(クリープ)のもとで解析解を求めることができる。 解析解を表 4-1(b)に示したが、式の形が類似しているので解析解も似た形となり、式Aと式B、 式Cと式Dの解は統一的に表現できる。

大久保ら⁴⁹は、三城目安山岩について一軸圧縮応力下と一軸引張応力下で式Aの定数を求めた が、両応力下で異なる値が得られたとしている。その後、羽柴ら⁵⁰は一軸圧縮応力下において式 Aと式Cの適用性について検討した。その結果、三城目安山岩は式C、稲田花崗岩は式Aと式C で、応力-歪曲線、載荷速度依存性、クリープなどをうまく再現できることがわかった。大久保 ら⁴⁷⁾は多孔質岩石の一軸圧縮強度試験結果を用いて検討し、気乾状態と湿潤状態でのヤング率の 違いが式 C で再現できることを示した。大久保ら⁴⁵⁾は石炭の試験結果を用いて検討し、一軸引張 応力下での応力-歪曲線が式 A、式 B、式 C のいずれの式でも再現できることを示した。一方、 一軸圧縮応力下での応力-歪曲線は、コンプライアンス可変型構成方程式、すなわち、式 A、式 B、式 C で a₁=0 とした式で再現できた。

表 4-1(a)に示した 4 つの構成方程式のうち、式 D ではピーク強度以降で応力が急激に減少する ような場合をうまく再現できなかったので、式 A、式 B、式 C の 3 つの式を用いて、一軸引張応 力下における花崗岩への適用性に関する検討を行った。表 4-2 と表 4-3 に示すように、これまで に土岐花崗岩を用いて一軸圧縮試験や圧裂引張試験を行ってきた。しかし、今回検討する一軸引 張試験は行っていない。これまでの一軸圧縮試験や圧裂引張試験の結果をみると、土岐花崗岩の 力学特性は稲田花崗岩と類似している。そこで、過去に得られた稲田花崗岩の一軸引張試験結果 を用いて検討することにする。

表 4-1 構成方程式 A, B, C, D とピーク強度以前での解析解(1/2) (a)構成方程式

	応力-歪関係	ピーク強度以前	ピーク強度以降	初期値
A	$arepsilon^*=\lambda^*\sigma^*$	$\frac{d\lambda^*}{dt} = a_1 \left(\lambda^* - 1\right)^{-m_1} \left(a_1 + b_2 \right)^{-m_1} \left(a_2 + b_2 \right)^{-m_1} \left(a_2$	$\lambda^* = 1$	
В	$\varepsilon^* = \lambda^* \sigma^*$ $\lambda^* = \lambda_1^* + \lambda_3^* - 1$	$\frac{d\lambda_{1}^{*}}{dt} = a_{1} \left(\lambda_{1}^{*} - 1\right)^{-m_{1}} \left(\sigma^{*}\right)^{n}$	$\frac{d\lambda_3^*}{dt} = a_3 \left(\lambda_3^*\right)^{m_3} \left(\sigma^*\right)^n$	$\lambda_1^* = \lambda_3^* = 1$
С	$\varepsilon^* = \varepsilon_v^* + \lambda^* \sigma^*$ $\varepsilon_v^* = \varepsilon_{v1}^*$ $\lambda^* = \lambda_3^*$	$\frac{d\varepsilon_{v_1}^{*}}{dt} = a_1 \left(\varepsilon_{v_1}^{*}\right)^{-m_1} \left(\sigma^{*}\right)^n$	<i>ul</i> (コンプライアンス可変型構成 方程式)	$\varepsilon_{v1}^{*} = 0$ $\lambda_3^{*} = \lambda_0^{*}$
D	$\varepsilon^* = \varepsilon_v^* + \sigma^*$	$\frac{d\varepsilon_{v}^{*}}{dt} = a_{1}\left(\varepsilon_{v}^{*}\right)^{-m_{1}}\left(\sigma\right)$	$(*)^n + a_3 \left(\varepsilon_v^* \right)^{m_3} \left(\sigma^* \right)^n$	$\varepsilon_v^* = 0$

 $\sigma^{*=}\sigma/\sigma_{f}$, $\varepsilon^{*=}\varepsilon E/\sigma_{f}$, $\varepsilon_{v}^{*=}\varepsilon_{v}E/\sigma_{f}$, $\varepsilon_{v1}^{*=}\varepsilon_{v1}E/\sigma_{f}$, $\lambda^{*=}\lambda E$, $\lambda_{0}^{*=}\lambda_{0}E$, $\lambda_{1}^{*=}\lambda_{1}E$, $\lambda_{3}^{*=}\lambda_{3}E$, $C_{s}^{*=}C_{s}^{'}/\sigma_{f}$, $\sigma_{cr}^{*=}\sigma_{cr}^{'}/\sigma_{f}$ t:時間, σ :応力, ε :歪, E: ヤング率, λ : コンプライアンス, σ_{f} : 強度, C_{s} : 応力速度, σ_{cr} : クリープ応力

	定応力速度($\sigma^* = C_s^* t$)	クリープ ($\sigma^* = \sigma_{cr}^*$)
A	$\lambda^* - 1 \text{ or } \lambda_1^* - 1$ $= \left(a_1 \frac{m_1 + 1}{n_1 + 1}\right)^{\frac{1}{m_1 + 1}} \left\{\frac{\sigma^*}{\sigma}\right\}^{\frac{n+1}{m_1 + 1}}$	$\lambda^* - 1 \text{ or } \lambda_1^* - 1$ = $a_1 \frac{1}{m_1 + 1} (m_1 + 1) \frac{1}{m_1 + 1} (\sigma_{cr}^*) \frac{n}{m_1 + 1} t^{\frac{1}{m_1 + 1}}$
В	$= \left(\frac{a_1}{C_s^*} \frac{m_1 + 1}{n + 1}\right)^{\frac{1}{m_1 + 1}} (\sigma^*)^{\frac{n+1}{m_1 + 1}}$	$\frac{d\lambda}{dt} or \frac{d\lambda_1}{dt}$ $= a_1 \frac{1}{m_1 + 1} (m_1 + 1)^{-\frac{m_1}{m_1 + 1}} (\sigma_{cr}^{*})^{\frac{n}{m_1 + 1}} t^{-\frac{m_1}{m_1 + 1}}$
С	$ = \left(a_1 \frac{m_1 + 1}{m_1 + 1}\right)^{\frac{1}{m_1 + 1}} \left\{\frac{\sigma^*}{\sigma}\right\}^{\frac{n+1}{m_1 + 1}} $	$\mathcal{E}_{v}^{*} \text{ or } \mathcal{E}_{v1}^{*}$ $= a_{1} \frac{1}{m_{1}+1} (m_{1}+1) \frac{1}{m_{1}+1} (\sigma_{cr}^{*}) \frac{n}{m_{1}+1} t^{\frac{1}{m_{1}+1}}$
D	$= \left(\frac{a_1}{C_s^*} \frac{m_1 + 1}{n + 1}\right)^{\frac{1}{m_1 + 1}} (\sigma^*)^{\frac{n+1}{m_1 + 1}}$	$\begin{vmatrix} \frac{d\varepsilon_{v_1}}{dt} & or & \frac{d\varepsilon_{v_1}}{dt} \\ = a_1 \frac{1}{m_1 + 1} (m_1 + 1)^{-\frac{m_1}{m_1 + 1}} (\sigma_{cr}^{*})^{\frac{n}{m_1 + 1}} t^{-\frac{m_1}{m_1 + 1}}$

表 4-1 構成方程式 A, B, C, D とピーク強度以前での解析解(2/2) (b) ピーク強度以前での解析解

 $\sigma^{*} = \sigma / \sigma_{f}, \quad \varepsilon^{*} = \varepsilon E / \sigma_{f}, \quad \varepsilon_{v}^{*} = \varepsilon_{v} E / \sigma_{f}, \quad \varepsilon_{v1}^{*} = \varepsilon_{v1} E / \sigma_{f}, \quad \lambda^{*} = \lambda E, \quad \lambda_{0}^{*} = \lambda_{0} E, \quad \lambda_{1}^{*} = \lambda_{1} E, \quad \lambda_{3}^{*} = \lambda_{3} E, \quad C_{s}^{*} = C_{s} / \sigma_{f}, \quad \sigma_{cr}^{*} = \sigma_{cr} / \sigma_{f}$

t:時間, σ :応力, ϵ :歪,E:ヤング率, λ :コンプライアンス, σ_{f} :強度, C_{s} :応力速度, σ_{cr} :クリープ応力

午座 社会十分		試験片	採取深度	強度	ヤング率	(GPa)	-#-7-11-14	構成方程式Aの定数				
中度 武鞅万伝	試験力法	番号	(m)	(MPa)	LVDT	歪ゲージ	ホナソン比	n	a ₁	m ₁	a ₃	m ₃
		2		157	35	60	0.29					
		3		155	34	53	0.31					
		13		156	34	51	0.29					
	空卦古法由	24		166	35	55	0.39					
	足戰彻还没	25		162	34	55	0.30					
		26		162	35	57	0.35					
		43		165	35	54	0.35					
2006		44	$476 \sim 477$	161	35	58	0.24					
		5		162	34			53				
		14		154	33			44				
		15		158	33			48				
	載荷速度切換	16		157	34			62				
		27		156	34			63				
		28		165	36			47				
		45		148	34			47				
20	06年度 平均			159	34	55	0.32	52				
		1		176	35	57	0.28					
		15		172	34	56	0.21					
	定載荷速度	26	26 35 49	167	33	56	0.36					
		35		169	34	59	0.30					
		49		171	35	57	0.33					
		2		165								
2007		3	$475 \sim 476$	175								
	定載荷速度	17		164				52	7×10^{-8}	4	3×10^{-4}	60
	入L 報 问 述/文	19		169								
	一般化応力緩和 試驗終了後	27		173								
	1-100×1-1 12	36		174								
		50		167								
		63		182				52	3×10^{-7}	4	1×10^{-4}	60
2	007年度平均			171	34	57	0.30					
		7		179								
	定載荷速度	20		180								
2008		28	$475 \sim 476$	173								
2000	一般化応力緩和	37	110 - 410	168								
	□ □ 1 □ 1 □ 1 □ 1 □ 1 □ 1 □ 1 □ 1 □ 1 □											

表 4-2 土岐花崗岩の一軸圧縮試験結果

51

64

2008年度平均

平均

178

174

175

168

34

56

0.31

52

年度	試験片 番号	深度 (m)	強度 (MPa)
	10		5.6
	11		6.3
2006	12	476~477	6.6
2000	21	410 -411	7.5
	22		6.8
	23		6.6
200	6年度平均		6.6
	11		7.7
	12		6.2
	25		7.5
	45		7.3
2007	46	$475 \sim 476$	5.5
2001	60	415 - 410	6.9
	61		6.8
	71		7.1
	72		7.6
	73		7.3
200	7年度平均		7.0
	平均		6.8

表 4-3 土岐花崗岩の圧裂引張試験結果

福井ら⁴³⁾は、直径 25 mm、高さ 50 mm の稲田花崗岩の円柱形試験片を、エポキシ樹脂系の接着 剤により試験機の載荷盤に接着してから、次式で表される応力帰還制御²⁾により一軸引張試験を 行った。

$$\varepsilon - \alpha \frac{\sigma}{E} = Ct$$

(4-1)

αを0.45、載荷速度Cを10⁻⁶/sとし、応力が0.5 MPa程度変化するごとに0.5 MPa程度の除荷を行った。図4-1に示すように、試験は容量500 kNのサーボ試験機を用いて気乾状態で実施した。変位は差動変圧器式変位計、荷重は歪ゲージ式ロードセルで測定した。試験で得られた稲田花崗岩の一軸引張強度は8.6 MPa、初期ヤング率は32 GPaであった。



図 4-1 試験機の概略図

構成方程式の定数の求め方について説明する。まず、表 4-1の欄外に示したように、応力は強度 σ_f 、歪は σ_f /初期ヤング率 E、コンプライアンスは初期値 1/E で正規化した。なお、強度と初期ヤング率は歪速度 10⁻⁶ /s での値を用いた。結果は次節で述べるが、数値計算によると、いずれの構成方程式でも強度は歪速度の 1/(n+1)乗に比例した。n は岩石の時間依存性の程度を表す重要な定数であり、前章で種々の岩石の n をまとめたので、その値を参考にして決定した。

 m_1 を求めるには表 4-1(b)に示した定応力速度での解析解が有用であるが、試験は応力帰還制御のもとで行われた。強度試験において、応力-歪曲線が直線であれば定応力速度と定歪速度、応力帰還制御の結果は一致するが、直線からずれ始めると制御方法による差が出てくる。しかしながら、数値計算によると、ピーク強度以前に限れば制御方法による差は小さかった。そこで、定応力速度での解析解を用いて、応力帰還制御のもとでの試験結果から m_1 を求めることにした。ピーク強度以前での応力-歪曲線の直線からのずれがコンプライアンスの増加によると考えて、 σ^* と λ^*-1 の関係を示したのが図 4-2(a)である。また、直線からのずれが非弾性歪の増加によると考えて、 σ^* と ϵ_v^* の関係を示したのが図 4-2(b)である。なお、横軸の log $\sigma^*=-0.2$ は $\sigma^*=0.6$ に相当する。いずれの図でも、破線で囲んだ部分は除荷時の結果である。表 4-1(b)に示したように、式Aと式Bでは、図 4-2(a)において破線で囲んだ部分を除く載荷時の傾きが(n+1)/(m_1+1)に相当し、式Cでは図 4-2(b)での載荷時の傾きが(n+1)/(m_1+1)に相当するので、図中に太線で示した近似直線の傾きから m_1 の値を求めた。

図 4-3 から図 4-5 には、式 A、B、C で a₁/a₃ と m₃ を変化させたときの計算結果を示した。なお a₁と a₃の値は、繰り返し計算により強度が 1 になるように決めた。式 A と式 C で a₁/a₃ を変化さ せると、ピーク強度以前の応力-歪曲線の傾きが変化したが、ピーク強度以降の傾きの変化は小 さかった。式 B で a₁/a₃を変化させると、ピーク強度以前と以降の傾きが変化した。一方 m₃を変 化させた場合は、いずれの式でもピーク強度以前の応力-歪曲線には変化は見られず、ピーク強 度以降の傾きだけ変化した。そこで、ピーク強度以前の応力-歪曲線の形状が試験結果に合うよ うに a₁/a₃を決めた後に、ピーク強度以降の応力-歪曲線の形状が合うように決めることにした。 このようにして求めた各構成方程式の定数の値を表 4-4 に示した。



図 4-2 稲田花崗岩の m₁の値を求めるための一軸引張試験結果と近似直線



図 4-3 構成方程式 A で定数の値を変化させたときの一軸引張試験の計算結果



図 4-4 構成方程式 B で定数の値を変化させたときの一軸引張試験の計算結果 値を示していない定数に関しては表 4-4 の値を用いた。



図 4-5 構成方程式 C で定数の値を変化させたときの一軸引張試験の計算結果 値を示していない定数に関しては表 4-4 の値を用いた。

構成方程式	定数	一軸引張	一軸圧縮
	a1 [1/s]	$5.4 \mathrm{x10^{-11}}$	$1.4 x 10^{-10}$
	$a_{3} [1/s]$	$5.4 \mathrm{x10^{-12}}$	$1.0 \mathrm{x} 10^{-4}$
A	m_1	26	4.5
	m_3	47	70
	n	47	50
	a1 [1/s]	$9.9 \mathrm{x} 10^{-12}$	
	$a_3 [1/s]$	$9.9 \mathrm{x} 10^{-4}$	
В	m_1	26	
	m_3	37	
	n	47	
	a1 [1/s]	9.1x10 ⁻⁹	$1.0 \mathrm{x} 10^{-38}$
	$a_{3} [1/s]$	$9.1 \mathrm{x} 10^{-4}$	$6.0 \mathrm{x} 10^{-1}$
C	m_1	17	36
	m_3	45	70
	n	47	50
	λ 0*	1	1/1.1
A or B	$n/(m_1+1)+1$	2.7	10
C	$n/(m_1+1)$	2.6	1.4

表 4-4 構成方程式を稲田花崗岩に適用した場合の定数の値

4.2 一軸引張応力下での試験結果と計算結果

福井ら43の稲田花崗岩の一軸引張試験結果と3つの構成方程式での計算結果を図4-6に示した。 前節で述べたように試験では載荷と除荷を繰り返したが、計算では除荷はせず、式(4-1)で Cを 一定とした場合の応力-歪曲線を求めた。図4-6(a)は応力-歪曲線であるが、試験結果における 除荷時の曲線(左下方向への線)を除いて計算結果と比較してみる。ピーク強度以前に関しては 3式による計算結果はほぼ重なり、試験で得られた応力-歪曲線の形状をうまく再現できている。 ピーク強度以降で σ が 2 MPa 程度に低下するまでは、3 式の計算結果の差は小さく試験結果とほ ぼ一致した。それ以降、試験では応力-歪曲線の傾きが緩やかになったが、式 B の計算結果は試 験結果と良く似た傾向を示している。一方、式Aと式Cでは応力-歪曲線の傾きがやや急であっ た。

図 4-6(b)には、強度 σ と除荷曲線の傾き $1/\lambda$ の関係を示した。計算では除荷はしなかったが 1/λは求まるので、3つの構成方程式での結果を示した。試験では1/λは試験開始から徐々に減 少していき、ピーク強度で初期値の70%程度となった。その後は、若干上に凸の曲線を描きなが ら $1/\lambda$ は減少し0に近づいた。実際の試験ではコンプライアンスの増加($1/\lambda$ の減少)とともに 非弾性歪の増加も生じる。式Aと式Bによる計算結果はほぼ重なり、両者ともコンプライアンス の増加だけを考慮しているので、ピーク強度以前から以降まで1/2は試験結果よりも小さくなっ た。式Cは、ピーク強度以前では非弾性歪の増加が支配的なので、1/λの変化はほとんどなく試 験結果から乖離している。ピーク強度以降では1/λとσの関係は直線的であった。



(a) 応力-歪曲線

1/λ*は初期ヤング率で正規化した除荷曲線 の傾き



花崗岩の一軸引張応力下での試験結果は少なく、妥当性の検証は今後の試験結果の蓄積にゆだ ねるが、時間依存性挙動の傾向を知るために以下では数値計算結果を示すことにする。図 4-7 に は、載荷速度を基準値の 0.1 倍、1 倍、10 倍、100 倍にした際の一軸引張試験の計算結果を示し た。なお、各構成方程式の定数や α の値は変えていない。いずれの式でも、載荷速度が大きい場 合の応力-歪曲線が、載荷速度が小さい場合の曲線を内包し、載荷速度の増加とともに強度も増 加した。ピーク強度以前からピーク強度直後までは 3 式の計算結果の差は小さかったが、ピーク 強度以降で応力が小さくなると、式 A、式 C、式 B の順に曲線の傾きが緩やかになった。図 4-8 には正規化した強度と載荷速度の関係を示した。3 式による結果はほぼ重なり、両対数グラフ上 で傾きが 1/(n+1)=0.021 の直線となった。

図 4-9 から図 4-11 には、一軸引張クリープ試験で応力レベルσ*を 0.6、0.7、0.8、0.9 とした ときの計算結果を示した。図 4-9 は構成方程式 A による結果であるが、いずれの応力レベルでも、 クリープ歪は片対数グラフ上で時間に対してほぼ直線的に増加していき、若干下に凸の曲線にな ってから歪が急激に増加し破壊にいたった (図 4-9(a))。クリープ歪速度は両対数グラフ上で時 間に対してほぼ直線的に減少していき、最小値をとった後に増加に転じた (図 4-9(b))。またク リープ歪に対しては、クリープ歪速度は、はじめはほぼ直線的に減少していき、最小値をとった 後に増加に転じ、その後はほぼ直線的に増加した (図 4-9(c))。図 4-10の構成方程式 B による結 果を見ると、経過時間-クリープ歪、経過時間-クリープ歪速度、クリープ歪クリープ歪速度の いずれも、定量的にも構成方程式 A と似た結果であった。図 4-11 は構成方程式 C による結果で あり、定性的には構成方程式 A や B の結果と似ているが、定量的に見ると、経過時間-クリープ 歪の曲線の初期の傾きが大きかったり、クリープ歪クリープ歪速度の曲線の形状が少し違ってい たりするなど、若干の差異が見られた。図 4-12 には、計算で得られたクリープ応力レベルとク リープ寿命の関係を示した。3 式による結果はほぼ重なり、両対数グラフ上で傾きが-n=-47 の 直線となった。

表 4-1 に示したように、一次クリープでの歪速度の応力依存性を表す冪指数(d ε /dt $\propto \sigma$ p の p) は式 A と式 B は n/(m₁+1)+1 となり、式 C では n/(m₁+1)となる。この冪指数の値を計算して表 4-4 に示したが、式 A と式 B では 2.7、式 C では 2.6 とその差はわずかであった。冪指数がどの ような値になるかは粘弾性の機構を知るうえできわめて重要であり、例えば、拡散クリープでは 1、転位クリープでは 3 となる ⁵¹。Kirby⁵²がまとめた岩石の結果は概ね 2~5 の間に入っている が、これは高温高拘束圧下での結果であり、本研究のような常温大気圧下や引張応力下での結果 ではない。異なる構成方程式間で冪指数の値が不変であれば、定数の値の取得が容易になるが、 今後は実験的に検証していく必要がある。



強度が小さいものから基準の載荷速度の 0.1 倍、1 倍、10 倍、100 倍の載荷速度での結果



(b) 式 B で計算された応カー歪曲線 強度が小さいものから基準の載荷速度の 0.1 倍、1 倍、10 倍、100 倍の載荷速度での結果

図 4-7 一軸引張応力下での応力-歪曲線に関する計算結果 (1/2)



(c) 式Cで計算された応力-歪曲線

強度が小さいものから基準の載荷速度の 0.1 倍、1 倍、10 倍、100 倍の載荷速度での結果

図 4-7 一軸引張応力下での応力-歪曲線に関する計算結果(2/2)



図 4-8 強度の載荷速度依存性に関する計算結果



(b) クリープ歪速度の経時変化

図 4-9 一軸引張応力下でのクリープに関する構成方程式 A の計算結果(1/2)



(c) クリープ歪とクリープ歪速度の関係





図 4-10 一軸引張応カ下でのクリープに関する構成方程式 B の計算結果(1/2)



(c) クリープ歪とクリープ歪速度の関係









(c) クリープ歪とクリープ歪速度の関係





図 4-12 クリープ寿命の計算結果

4.3 一軸引張応力下と一軸圧縮応力下での構成方程式の比較

羽柴ら⁵⁰⁾では、稲田花崗岩の一軸圧縮試験結果から構成方程式AとCの定数の値を求め、その 定数を用いて一軸圧縮クリープ試験結果も再現できることを示した。一軸圧縮試験は福井ら⁴³⁾ の一軸引張試験と同じ容量 500 kN のサーボ試験機で行われ、一軸圧縮強度は 216 MPa、50%接線 ヤング率は 34 GPa であった。得られた構成方程式の定数の値を表 4-4 に示した。一軸圧縮応力 下と一軸引張応力下の定数の値を比較してみると、まず、式 C の λ_0^* が異なっていることがわか る。一軸圧縮応力下では λ_0^* が 1/1.1 になっているが、これはピーク強度以前で除荷曲線の傾き が 50%接線ヤング率よりわずかに大きくなることを表している。すなわち、50%接線ヤング率は 34 GPa であり、これに 1/ λ_0^* =1.1 を掛けると除荷曲線の傾きは 37 GPa になる。福井ら⁴³⁾の一 軸引張応力下での初期ヤング率は 32 GPa であった。ブロックや試験時期の違いなどを考慮する と、一軸圧縮応力下での 50%接線ヤング率と除荷曲線の傾き、一軸引張応力下での初期ヤング率 の違いは、それほど大きな差ではないと言える。一軸圧縮応力下のピーク強度以前で繰り返し応 力を加えると、稲田花崗岩では載荷時と除荷時の曲線はほぼ重なり弾性的な挙動を示すので、一 軸圧縮応力下での 50%ヤング率と除荷曲線の傾き、さらには一軸引張応力下での初期ヤング率の 差が小さいのであろう。

ー軸圧縮応力下でも、一次クリープでの歪速度の応力依存性を表す冪指数を求めて、表 4-4 に 示した。一軸引張応力下では構成方程式間で冪指数の値に差はほとんど見られなかったが、一軸 圧縮応力下での値は一軸引張応力下での値と異なるだけでなく、構成方程式間でも大きな差が見 られた。この差は大きいので、今後の試験結果の蓄積により検証が可能になると考える。

一軸引張応力下との比較のため、一軸圧縮応力下での式Aと式Cによる数値計算結果を示すことにする。図4-13には載荷速度を変化させた際の応力-歪曲線の変化を示した。式Aと式Cの計算結果の違いは小さく、いずれの式でも、載荷速度が大きい場合の応力-歪曲線が、載荷速度が小さい場合の曲線を内包し、載荷速度の増加とともに強度も増加した。一軸引張応力下での応力-歪曲線に比べて、ピーク強度以前ではより直線的であった。ピーク強度以降では、一軸引張応力下では負の傾き(クラスI)であったが、一軸圧縮応力下では正の傾き(クラスII)であった。図4-8には正規化した強度と載荷速度の関係を示した。2式による結果はほぼ重なり、両対数グラフ上で傾きが1/(n+1)=0.020の直線となった。基準の載荷速度を一軸引張応力下では10⁻⁶/s、一軸圧縮応力下では10⁻⁵/sとしたので、直線はずれているがその傾きはほぼ一致した。

図 4-14 と図 4-15 には、一軸引張クリープ試験で応力レベルσ*を 0.6、0.7、0.8、0.9 とした ときの計算結果を示した。図 4-14 は構成方程式 A による結果であるが、いずれの応力レベルで も、クリープ歪は片対数グラフ上で時間に対してほぼ直線的に増加していき、若干下に凸の曲線 になってから歪が急激に増加し破壊にいたった(図 4-14(a))。クリープ歪速度は両対数グラフ上 で時間に対してほぼ直線的に減少していき、最小値をとった後に増加に転じた(図 4-14(b))。ま たクリープ歪に対しては、クリープ歪速度は、はじめは、ほぼ直線的に減少していき、最小値を とった後に増加に転じ、その後はほぼ直線的に増加した(図 4-14(c))。図 4-15 の構成方程式 B による結果を見ると、いずれのグラフも定性的には式 A の結果と似ているが、表 4-4 に示した歪 速度の応力依存性を表す冪指数の違いからもわかるように、クリープ応力レベルを変化させたと きの一次クリープでの歪速度の変化が大きかった。図 4-12 には、計算で得られたクリープ応力 レベルとクリープ寿命の関係を示した。2 式による結果はほぼ重なり、両対数グラフ上で傾きが -n=-50 の直線となった。一軸引張応力下と一軸圧縮応力下の違いはわずかであった。



(a) 式Aで計算された応力-歪曲線

強度が小さいものから基準の載荷速度の 0.1 倍、1 倍、10 倍、100 倍の載荷速度での結果



(b) 式 C で計算された応カー歪曲線 強度が小さいものから基準の載荷速度の 0.1 倍、1 倍、10 倍、100 倍の載荷速度での結果

図 4-13 一軸圧縮応カ下での応カー歪曲線に関する計算結果





log(t [s])





図 4-14 一軸圧縮応カ下でのクリープに関する構成方程式 A の計算結果(1/2)



(c) クリープ歪とクリープ歪速度の関係





(a) クリープ歪の経時変化

図 4-15 一軸圧縮応カ下でのクリープに関する構成方程式 B の計算結果(1/2)



(c) クリープ歪とクリープ歪速度の関係

図 4-15 一軸圧縮応カ下でのクリープに関する構成方程式 B の計算結果(2/2)

4.4 まとめ

本章では、花崗岩の一軸引張試験結果を用いて構成方程式の適用性に関する検討を行った。さ らに、一軸引張応力下と一軸圧縮応力下に適用できる構成方程式を比較した。土岐花崗岩と特性 が似ている稲田花崗岩の試験結果を用いて検討したところ、A、B、Cのいずれの構成方程式でも 一軸引張応力下での応力-歪曲線をほぼ再現できることがわかった。応力-歪曲線の再現性に比 べると、載荷と除荷を繰り返したときの除荷曲線の傾きの変化に関しては、計算結果と試験結果 の違いが大きかった。繰返し応力が加わるようなより複雑な載荷条件下においては、構成方程式 の精密化が必要であろう。一軸引張応力下での初期ヤング率と一軸圧縮応力下での 50%接線ヤン グ率がほぼ等しいこともわかった。

ー軸圧縮応力下で構成方程式AとCの計算結果を比較したところ、応力-歪曲線の形状、強度 の載荷速度依存性、クリープ歪やクリープ歪速度の経時変化に関してはあまり違いが見られなか ったが、歪速度の応力依存性に差が見られた。この点に関しては、今後、実験的に検証していく 必要がある。

岩石の一軸圧縮応力下での試験結果が蓄積されてきたが、載荷と除荷時の応力-歪曲線、載荷 速度依存性、クリープ、一般化応力緩和、水分の影響などのデータが揃っているのは三城目安山 岩などごく少数である。三軸圧縮応力下や一軸引張応力下では、さらにデータが限られる。一軸 引張応力下での花崗岩の特性に関しては、応力-歪曲線が得られている程度で、クリープ試験結 果や応力緩和試験結果の蓄積は乏しい。試験結果を蓄積し、圧縮応力下と引張応力下での変形・ 破壊機構の相違を検討したり、構成方程式の妥当性を検証したりすることが今後の課題である。

5. 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。

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述べた。本年度で、試験開始 から 16 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。1997 年の試験開始から 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内の圧力が設定値よりも徐々に 減少していったので、適宜、圧力を設定値に戻すという作業を行ってきた。クリープ歪は概ね圧 カと似たように変動しながらも徐々に増加した。2008年から2009年にかけて、圧力はほぼ一定 に保たれていたにもかかわらず、クリープ歪は若干の減少傾向を示した。この原因として、何ら かの影響でシリンダが動きにくくなっている可能性が考えられたので、2010年10月29日に圧力 を設定値の 0.098MPa(1 kgf/cm²) から 0.049MPa (0.5 kgf/cm²) まで下げてから、圧力を 0.049MPa (0.5 kgf/cm²) と 0.039MPa (0.4 kgf/cm²)の間で 10 回上下させた。その後、圧力を設定値であ る 0.098MPa(1 kgf/cm²) に戻した。この作業の後は、クリープ歪は 2007 年と同程度まで増加し、 それ以降はシリンダ内の圧力と似たような変化をした。2013年に入ってから、最初はクリープ歪 に大きな変化は見られなかったが、10月以降は若干の減少傾向が見られた。圧力にはあまり変化 は見られなかったので、2008 年~2009 年と同様に何らかの影響でシリンダが動きにくくなって いる可能性も考えられた。この点に関しては、今後も注意深く見守っていく予定である。試験は 開始から 16 年をすぎ、過去に例が少ない長期間のデータを取得しているところである。今後も できるだけ長期にわたって試験を継続する予定である。

第3章では、2012年度に示した岩石の強度と岩石の時間依存性を表す指標であるnの値に、国 内外の他の研究者のデータを追加して再整理した。それらの結果をもとにして、岩石ごとの比較 や時間依存性に影響を与える要因について検討を行った。その結果、同じ岩種でも産地ごとに n の値は大きく異なることがわかった。岩種によっては、産地が同じであれば nの値がほぼ一定の 場合もあったが、砂岩では産地が同じでも nの値は大きくばらついた。周圧や水分によって強度 が変化すると、それにほぼ比例して nの値も変化したが、周圧が増加してピーク強度以降での応 カー歪曲線の傾きが緩やかになると、比例関係からずれる傾向が見られた。岩石の時間依存性に 関する試験結果を設計や施工に利用する方法の一つとして、時間依存性を考慮した岩盤分類に関 する検討を行った。RMR は岩石強度、RQD、不連続面、地下水などに関する6つの評点を足し合わ せて求める。時間依存性を考慮する場合は、そこから構造物の使用期間と岩盤の時間依存性の程 度に応じた評点を差し引くことになる。Q の値は RQD、不連続面、地下水、応力状態などに関す る6つの評点を掛け合わせて求める。時間依存性を考慮する場合は、さらに構造物の使用期間と 岩盤の時間依存性の程度に応じた評点を掛け合わせることになる。GSI は RMR と、RMi は Q と似 た形の式になった。今後は、原位置調査などを通して提案した式の妥当性を検討していきたい。

第4章では、原位置試験計画の策定に資する情報を得るため、原位置岩盤の数値解析手法の向 上に関する検討を行った。岩石を対象とした構成方程式の妥当性や適用性は圧縮応力下で検討さ れることがほとんどであり、試験結果の少ない引張応力下での検討例はほとんどなかったので、 花崗岩の一軸引張試験結果を用いて構成方程式の適用性に関する検討を行った。これまでに提案 された3つの構成方程式について検討したところ、いずれの構成方程式でも一軸引張応力下での 応力-歪曲線をほぼ再現できることがわかった。応力-歪曲線の再現性に比べると、載荷と除荷 を繰り返したときの除荷曲線の傾きの変化に関しては、計算結果と試験結果の違いが大きかった。 一軸引張応力下での初期ヤング率と一軸圧縮応力下での50%接線ヤング率がほぼ等しいこともわ かった。一軸圧縮応力下で構成方程式AとCの計算結果を比較したところ、応力-歪曲線の形状、 強度の載荷速度依存性、クリープ歪やクリープ歪速度の経時変化に関してはあまり違いが見られ なかったが、歪速度の応力依存性に差が見られた。一軸引張応力下での検討例は少ないので、試 験結果を蓄積し、圧縮応力下と引張応力下での変形・破壊機構の相違を検討したり、構成方程式 の妥当性を検証したりすることが今後の課題である。

参考文献

- 1) 熊谷直一,伊藤英文,笹嶋貞雄: "岩石の長年クリープ実験(巨大試片 27 年間・小試片 10 年間の結果)",材料,35,1986,pp.484-489.
- S. Okubo and Y. Nishimatsu: "Uniaxial compression testing using a linear combination of stress and strain as the control variable", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 22, 1985, pp. 323-330.
- 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., 43, 2006, pp. 894-904.
- 4) 横堀武夫:"材料強度学第2版", 岩波書店, 第8章, 第9章 (1974).
- 5) S. Okubo, Y. Nishimatsu and C. He: "Loading rate dependence of class II rock behavior in uniaxial and triaxial compression tests - An application of a proposed new control method", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 27, 1990, pp. 559-562.
- 6) 小林良二: "高速荷重下における岩石の力学的性質(第1報)",日本鉱業会誌,85,1969, pp.911-916.
- 7) 福井勝則,羽柴公博,丹野剛男,引間亮一,真田祐幸,佐藤稔紀:"結晶質岩を対象とした長 期岩盤挙動評価手法に関する研究(2012年度)(委託研究)" JAEA-Research 2013-031, 2013, 52p.
- K. Masuda: "Effects of water on rock strength in a brittle regime", Journal of Structural Geology, 23, 2001, pp. 1653-1657.
- 9) E. Z. Lajtai, E. J. Scott Duncan and B. J. Carter: "The effect of strain rate on rock strength", Rock Mech. Rock Eng., 24, 1991, pp.99-109.
- W. F. Brace and A. H. Jones: "Comparison of uniaxial deformation in shock and static loading of three rocks", J. Geophys. Res, 76, 1971, pp. 4913-4921.
- 11) O. Sano, I. Ito and M. Terada: "Influence of strain rate on dilatancy and strength of oshima granite under uniaxial compression", J.Geophys.Res, 86, 1981, pp. 9299-9311.
- W. Goldsmith, J. L. Sackman and C. Ewert: "Static and dynamic fracture strength of Barre granite", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 13, 1976, pp. 303-309.
- 13) 梶川昌三, 増田幸治, 山田功夫, 出原理: "粒径の異なる花崗岩に発生する微小クラックの 特徴", 地震第2輯, 43, 1990, pp. 179-188.
- 14) K. Masuda, H. Mizutani and I. Yamada: "Experimental study of strain-rate dependence and pressure dependence of failure properties of granite", J. Phys. Earth., 35, 1987, pp. 37-66.
- 15) K. Masuda, H. Mizutani, I. Yamada, and Y. Imanishi: "Effects of water on time-dependent behavior of granite", J. Phys. Earth., 36, 1988, pp. 291-313.
- 16) K. Mogi: "Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relations to earthquake phenomena", Bulletin of the Earthquake Research Institute, 40, 1962, pp. 125-173.
- 17) 小林良二: "高速静荷重下における岩石の力学的性質(第1報)",日本鉱業会誌,80,1964, pp.429-434.
- 18) K. Mogi: "Experimental study of deformation and fracture of marble. (1st paper) On the fluctuation of compression strength of marble and the relation to the rate of stress application", Bulletin of the Earthquake Research Institute, 37, 1959, pp. 155-170.

- Lajtai, E. Z., Schmidtke, R. H.: "Delayed failure in rock loaded in uniaxial compression", Rock Mech. Rock Eng., 19, 1986, pp.11-25.
- 20) Kumar, A., : "The effect of stress rate and temperature on the strength of basalt and granite", Geophysics, 33(3), 1968, pp.501-510.
- 21) John, M., : "The influence of loading rate on mechanical properties and fracture processes of rock", CSIR Rep. ME. 1115, 1972.
- 22) C. M. Sangha and R. K. Dhir: "Strength and deformation of rock subject to multiaxial compressive stresses", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 12, 1975, pp. 277-282.
- 23) 藤田泰之,藤井義明,石島洋二:"白浜砂岩の変形・破壊挙動に及ぼす水と載荷速度の影響", 資源と素材,116,2000, pp.565-571.
- 24) Peng, S.S., : "Time-dependent aspects of rock behavior as measured by a servo-controlled hydraulic testing machine", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 10, 1973, pp.235-246.
- 25) Schmidtke, R. H., Lajtai, E. Z. : "The long-term strength of Lac du Bonnet granite", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 22 (6), 1985, pp. 461-465.
- 26) Sangha, C. M., and R. K. Dhir, : "Influence of time on the strength, deformation and fracture properties of a lower devonian sandstone", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 9, 1972, pp. 343-354.
- 27) Perkins, R. D., S. J. Green, and M. Friedman,: "Uniaxial stress behavior of porphyritic tonalite at strain rates to 10³/second", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 7, 1970, pp. 527-535.
- 28) Green, S. J., and R. D. Perkins, : "Uniaxial compression test at strain rates from 10^{-4} /sec to 10^{4} /sec on three geologic materials", DASA-2199, Final Rep., January 1969, 44p.
- 29) W. A. Olsson: "The compressive strength of tuff as a function of strain rate from 10⁻⁶ to 10³ /sec", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 28, 1991, pp.115-118.
- 30) S. H. Cho, Y. Ogata and K. Kaneko: "Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 40, 2003, pp.763-777.
- 31) B. K. Atkinson: "Subcritical crack growth in geological materials", J. Geophys. Res, 89, 1984, pp. 4077-4114.
- 32) 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, 2007, pp.790-795.
- 33) 趙顕,福井勝則,大久保誠介: "岩石の寸法効果と時間依存性挙動の計算機シミュレーションによる検討",資源と素材,111,1995, pp.595-600.
- 34) 大久保誠介, 西松裕一, 緒方義弘: "非線形粘弾性モデルによる坑道変形のシミュレーション", 日本鉱業会誌, 103, 1987, pp.293-296.
- 35) G. S. Kalamaras and Z. T. Bieniawski: "A rock mass strength concept for coal seams incorporating the effect of time", Proceedings eighth international congress on rock mechanics, 1, 1995, pp. 295-302.
- 36) B. Singh and R. K. Goel: "Engineering rock mass classification", Butterworth-Heinemann, 2011.
- 37) L. Zhang: "Estimating the strength of jointed rock masses", Rock Mech. Rock Eng.,43, 2010, pp. 391-402.
- 38) P. K. Kaiser, C. MacKay and A. D. Gale: "Evaluation of rock classifications at B. C. Rail Tumbler Ridge tunnels", Rock Mech. Rock Eng., 19, 1986, pp. 205-234.

- 39) E. Hoek and E. T. Brown: "Practical estimates of rock mass strength", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 34, 1997, pp.1165-1186.
- 40) A. Palmstrøm: "Characterizing rock masses by the RMi for use in practical rock engineering Part 1: The development of the Rock Mass index (RMi)", Tunnelling and Underground Space Technology, 11, 1996, pp.175-188.
- 41) S. Okubo, K. Fukui: "Complete stress-strain curves for various rock types in uniaxial tension", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 33, 1996, pp. 549-556.
- 42) 秋皙淵,福井勝則,大久保誠介:"一軸引張応力下での三城目安山岩のクリープ",資源と素材,111,1995,pp.31-36.
- 43) 福井勝則,大久保誠介,清水剛:"一軸引張応力下での岩石の破壊過程に関する研究",資源 と素材,114,1998,pp.925-930.
- 44) 羽柴公博,大久保誠介,福井勝則: "気乾状態と湿潤状態での岩石の一軸引張強度と非弾性 歪", Journal of MMIJ, 127, 2011, pp. 675-681.
- 45) 大久保誠介,羽柴公博,福井勝則,斉慶新: "石炭の一軸引張試験と構成方程式", Journal of MMIJ, 129, 2013, pp. 569-576.
- 46) 大久保誠介,福井勝則,羽柴公博: "コンプライアンス可変型構成方程式の拡張とクリープ 試験結果による検討",資源と素材,118,2002, pp.737-744.
- 47) 大久保誠介,高秀君,福井勝則: "気乾と湿潤状態における多孔質岩石の変形特性と力学模型",資源と素材,121,2005, pp.583-589.
- 48) 大久保誠介, 西松裕一: "三城目安山岩と河津凝灰岩のクリープ特性と構成方程式", 日本鉱 業会誌, 102, 1986, pp.395-400.
- 49) 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三城目安山岩の一軸圧縮・引張強度試験による検討",資源と素材,119,2003, pp.541-546.
- 50) 羽柴公博,大久保誠介,福井勝則: "岩石のピーク強度以前の時間依存性挙動を表す構成方 程式とパラメータの取得方法", Journal of MMIJ, 126, 2010, pp. 560-568.
- 51) 大久保誠介: "岩石のクリープ", 資源と素材, 107, 1991, pp. 245-252.
- 52) S. H. Kirby: "Rheology of the lithosphere, Reviews of geophysics and space physics", 21, 1983, pp.1458-1487.

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本ì	SI 基本単位			
盔半里	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	Α			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	モル	mol			
光 度	カンデラ	cd			

表 2. 基本単位を	2用いて表されるSI組立単位	立の例			
如去量	SI 基本単位				
和立里	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 ⁸			
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 conce	entration)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

	SI 旭立単位					
組立量	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 負	自 ラジアン ^(b)	rad	1 (в)	m/m		
立 体 自	コステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 (b)	$m^{2/}m^2$		
周 波 数	なヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹		
力 力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²		
压力,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,	ミワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³		
電荷、電気量	と クーロン	С		s A		
電位差(電圧),起電力	ゴボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$		
静電容量	コアラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$		
電気抵抗	1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 身	E ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$		
磁東密厚	E テスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$		
インダクタンス	ペーンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$		
セルシウス温厚	モ セルシウス度 ^(e)	°C		K		
光 剪	ミ ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd		
照月	E 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	も カタール	kat		s ⁻¹ mol		

酸素活性(カタール) kat [s¹ 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。
 (a)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。
 (a)へルツは周頻現象についてのみ、ペラ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。
 (a)やレ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。やレシウス度とケルビンの
 (b)からさは同一である。したがって、温度差や理慮問摘を決す数値はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)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

	S	I 組立単位	
組立量	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
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	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	ペンリー毎メートル	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
酸素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ e ⁻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	с		
10^{18}	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m		
10^{15}	ペタ	Р	10 ⁻⁶	マイクロ	μ		
10^{12}	テラ	Т	10 ⁻⁹	ナノ	n		
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピ コ	р		
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f		
10^3	+ 1	k	10 ⁻¹⁸	アト	а		
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z		
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v		

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	٥	1°=(п/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad			
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³			
トン	t	$1t=10^{3}$ kg			

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

衣される奴値が実験的に待られるもの					
名称 記号				記号	SI 単位で表される数値
電	子 オ	ベル	ŀ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダ	ル	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統-	一原子	質量単	单位	u	1u=1 Da
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{\cdot 12} \text{ cm})2=10^{\cdot 28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉信的な間径け
ベル	В	対数量の定義に依存。
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	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s			
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$			
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd } \text{ cm}^{\cdot 2} = 10^4 \text{ cd } \text{m}^{\cdot 2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx			
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$			
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$			
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4π)A m ⁻¹			
(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」					

は対応関係を示すものである。

	表10. SIに属さないその他の単位の例						
	名	称		記号	SI 単位で表される数値		
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq		
$\scriptstyle u$	ン	トゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$		
ラ			ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy		
$\scriptstyle u$			L	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv		
ガ		\sim	7	γ	1 γ =1 nT=10-9T		
フ	T.	ル	"		1フェルミ=1 fm=10-15m		
メー	ートル	系カラ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg		
ŀ			N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa		
標	準	大 気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa		
力		IJ	ļ	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)		
3	カ	17	~		$1 = 1 = 10^{-6}$ m		