

JNC TJ7400 2005-004

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

(核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書)

2005年2月

東京大学

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section

Technology Management Division

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

©核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2005

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

大久保 誠介

要 旨

本研究は1994年度～2003年度に実施した研究を基礎とする。1994年度には、空圧式クリープ試験機の改良を行った。1994年度の終わりに、稲田花崗岩を購入し、P波速度の測定やシュミットハンマー試験などを行った。1995年度には、空圧式クリープ試験機を使用して、湿潤状態の田下凝灰岩のクリープ試験を行った。また、完全応力-歪曲線を求めるために、サーボ試験機を用いて一軸圧縮試験と一軸引張試験を行った。さらに、サーボ試験機を用いて稲田花崗岩の短期クリープ試験を行った。1996年度中に開始する予定である稲田花崗岩を用いたクリープ試験に備えて、油圧式クリープ試験機の改造を行った。狙いは、耐久性と安定性の向上である。特に測定装置は、完全に置き換えて新しいものとした。1996年度には、クリープ試験、圧縮試験および引張試験を行った。また、2つの様式（油圧式と空圧式）の周圧維持装置を検討した。1997年度は、従来の結果を踏まえた上で、クリープ試験、圧縮試験および引張試験などを行い、引き続き行ってきた田下凝灰岩の長期クリープ試験、稲田花崗岩の中期クリープ試験の結果について報告した。なお、クリープ試験はともに湿潤状態で行った。1998年度は田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行った。サーボ試験機を使用した中期クリープ試験機も行った。白浜砂岩では、クリープ応力レベル17%でもかなりのクリープ変形が見られた。さらに、3種類の岩石を用いた三軸圧縮試験、一軸引張応力下での除荷・載荷試験を行った。1999年度～2002年度は、田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行った。また、多連式油圧クリープ試験機と可視化周圧ベッセルを開発し、試験データを得ることに成功した。2003年度には、これまでの研究を継続して行うとともに、10年間にわたる研究の経緯と成果を概観した。

2004年度（本年度）も、田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行った。試験期間は7年を越え、従来の報告がほとんどない長期間のデータを採取中と言える。この結果を第2章で述べる。第3章では、中間温度領域（80 程度）におけるクリープ試験に関する検討結果について述べた。第4章では、比較的低い応力下でのクリープ試験結果について述べた。第5章では、時間依存性挙動のメカニズムについて検討したが、その際、試験結果のばらつきを情報の一つと考えた。第6章では、これまでの研究結果の総括と新研究結果について述べた。最後の第7章は結言である。

本報告書は、東京大学が核燃料サイクル開発機構の委託研究契約により実施した研究の成果である。

核燃料サイクル開発機構担当部院課室：

東濃地科学センター 瑞浪超深地層研究所 超深地層研究グループ

：東京大学工学部

Phenomenological Study on Crystalline Rock Aiming
at Evaluation of Long-Term Behaviour of Rock Mass

Seisuke Okubo

Abstract

This study was started on the basis of the outcomes of the research project conducted between 1994 and 2003. In the fiscal year of 1994 when this project was started, a pneumatic creep testing machine was modified. At the end of the fiscal year of 1994, Inada granite was purchased, and the preliminary tests such as P-wave velocity measurement and Schmidt hammer testing were carried out. Through the fiscal year of 1995, a specimen of Tago tuff under water-saturated condition had been loaded in uniaxial condition in the pneumatic creep testing machine. In the fiscal year of 1995, the uniaxial compression and tension tests, and the short-term creep test of Inada granite were also carried out in the servo-controlled testing machines to obtain the complete stress-strain curves. A hydraulic creep testing machine which was planned to use in the next year was modified for long-term creep testing. Finally, a constitutive equation of variable compliance type was examined based on the experimental results. In the fiscal year of 1996, creep, compression and tension tests were carried out. Two types of pressure maintenance equipment (hydraulic and pneumatic types) were developed and examined. In the fiscal year of 1997, creep, compression and tension tests etc. were again carried out on the basis of the results heretofore. The experimental results of long-term creep testing of Tago tuff, middle-term creep testing of Inada granite were described. In both creep tests, samples were submerged in water. In the fiscal year of 1998, creep testing of Tago tuff was conducted. Results of relatively short-term (middle-term) creep conducted on a servo-controlled testing machine were also described. Sample rock was Sirahama sandstone that showed a considerably large creep strain in low stress level such as 17 % of the uniaxial compression strength. Results of triaxial compression test and uniaxial tension test including unloading-reloading tests were described. In the fiscal years of 1999 - 2002, creep testing of Tago tuff was continuously conducted. A multi-cylinder hydraulic creep testing machine and a transparent triaxial cell were also developed and some data were successfully obtained. In the fiscal year of 2003, important tests were continued. The sequences and results of the 10-years investigation were overviewed.

In this year, creep testing of Tago tuff was continuously conducted and the total testing time exceeded 7 years. The data is considered to be very scarce and valuable (chapter 2). Results of creep testing at mid-range temperature were described (chapter 3). Creep testing under relatively low stress was also conducted and the results were described (chapter 4). Mechanism of time-dependent behaviour of rock was discussed considering scatter of data as valuable information (chapter 5). Main results of the 10-years investigation were overviewed and new research project was proposed (chapter 6). Chapter 7 is a conclusion.

This work was performed by The University of Tokyo under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison: Tono Geoscience Center, Mizunami Underground Research Laboratory,
Underground Research Group

: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	空圧式クリープ試験機	2
2 . 1 . 1	試験機の概略	2
2 . 1 . 2	試験開始時の操作	2
2 . 1 . 3	試験機の点検	3
2 . 2	実験条件および実験結果	4
3 .	結晶質岩の中間温度領域におけるマルチステージクリープ試験	20
3 . 1	試験機の改良と実験方法	20
3 . 2	クリープ試験結果	21
4 .	結晶質岩の低応力下でのクリープ試験	37
4 . 1	油圧クリープ試験機	37
4 . 2	4連式油圧クリープ試験機	38
4 . 3	まとめ	40
5 .	時間依存性挙動のメカニズムの解明に向けた研究	60
5 . 1	はじめに	60
5 . 2	理論的な背景	61
5 . 2 . 1	確定論（構成方程式の定数）	61
5 . 2 . 2	確率過程論（2状態1段ポアソン過程）	62
5 . 3	一軸圧縮，一軸引張および圧裂引張試験結果	63
5 . 3 . 1	強度とクリープ寿命	63
5 . 3 . 2	気乾と湿潤状態での強度	63
5 . 4	三軸圧縮試験結果	64
5 . 5	考察	65
5 . 5 . 1	周圧の影響	65
5 . 5 . 2	寸法効果	66
5 . 6	まとめ	68
6 .	これまでの研究のまとめと新研究計画の検討と立案	86
6 . 1	これまで（平成6年度～平成16年度）の研究の概要	86
6 . 2	研究の到達度	90
6 . 3	新研究計画の検討と立案	91
7 .	結言	95
	参考文献	97

表 目 次

表 4 - 1	新載荷装置仕様	41
表 4 - 2	稲田花崗岩の物性値	41
表 5 - 1	確定論と確率過程論の比較	69
表 5 - 2(a)	パラメータ n と応力速度 C による強度の変化 パラメータ n	70
表 5 - 2(b)	パラメータ n と応力速度 C による強度の変化 応力速度 C	70
表 5 - 3	一軸圧縮試験とクリープ試験の結果	71
表 5 - 4	気乾状態と湿潤状態における引張試験結果	72
表 5 - 5	気乾状態における三軸圧縮試験結果	73
表 5 - 6	C_0 , μ and μ' の尺度母数と形状母数	74
表 5 - 7	形状母数に関するリマーク	75
表 6 - 1	長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎研究	94

目 次

図 2 - 1	空圧クリープ試験機の概略図	7
図 2 - 2	空圧クリープ試験機の載荷部	8
図 2 - 3	空圧クリープ試験機の載荷部の拡大	9
図 2 - 4	空圧クリープ試験機の計測・制御ラック	10
図 2 - 5	空圧クリープ試験機の計測・制御ラック背面	11
図 2 - 6	減圧弁の概念図	12
図 2 - 7	クリープ歪および空圧の経時変化	13
図 2 - 8	補正したクリープ歪および空圧の経時変化	14
図 2 - 9	補正したクリープ歪の経時変化	15
図 2 - 10	補正したクリープ歪の年変化	16
図 2 - 11	クリープ歪の経時変化	17
図 2 - 12 (a)	クリープ歪速度の経時変化 今回の結果	18
図 2 - 12 (b)	クリープ歪速度の経時変化 前回の結果	18
図 2 - 13	クリープ歪とクリープ歪速度の関係	19
図 3 - 1	旧載荷装置	23
図 3 - 2	新載荷装置	23
図 3 - 3(a)	変位計 旧変位計 ダブルカンチレバー方式(クリップ型)	23
図 3 - 3(b)	変位計 新変位計 カンチレバー型	23
図 3 - 4(a)	試験容器の表面の温度分布 赤外線カメラの映像	24
図 3 - 4(b)	試験容器の表面の温度分布 容器中心線に沿った温度変化	24
図 3 - 5	試験容器下に断熱材挿入	25
図 3 - 6(a)	断熱材挿入後試験容器の温度分布 赤外線カメラの映像	26
図 3 - 6(b)	断熱材挿入後試験容器の温度分布 容器中心線に沿った温度変化	26
図 3 - 7(a)	応力と歪の経時変化 40	27
図 3 - 7(b)	応力と歪の経時変化 60	28
図 3 - 7(c)	応力と歪の経時変化 80	29
図 3 - 8(a)	歪の経時変化 40	30
図 3 - 8(b)	歪の経時変化 60	31
図 3 - 8(c)	歪の経時変化 80	32
図 3 - 9(a)	クリープ歪の経時変化 40	33
図 3 - 9(b)	クリープ歪の経時変化 60	34
図 3 - 9(c)	クリープ歪の経時変化 80	35
図 3 - 10	クリープ歪の経時変化のまとめ	36
図 4 - 1	旧クリープ試験装置の概略図	42
図 4 - 2	旧油圧源	43
図 4 - 3	旧圧力調整器	43
図 4 - 4	旧アキュムレータ	44

図 4 - 5	旧載荷装置	44
図 4 - 6	旧変位計	44
図 4 - 7	旧変位測定部	44
図 4 - 8	新油圧源 (正面)	45
図 4 - 9	新油圧源 (側面)	45
図 4 - 10	新アキュムレータ	46
図 4 - 11	新アキュムレータ下部	46
図 4 - 12	新載荷装置	46
図 4 - 13	カンチレバー型新変位計 東京測器研究所 CE-2 容量 2 mm	46
図 4 - 14	変位測定部	47
図 4 - 15	変位計接触部	47
図 4 - 16	試験容器	47
図 4 - 17	温度制御システムの概略図	48
図 4 - 18	温度調節計	48
図 4 - 19	載荷部測定荷重 実験開始前に試験片に加えた油圧源応力 約 0.1 MPa	49
図 4 - 20	載荷部測定荷重 実験開始前に試験片に加えた油圧源応力 約 0.5 MPa	50
図 4 - 21	載荷部測定荷重 実験開始前に試験片に加えた油圧源応力 約 1 MPa	51
図 4 - 22	変位計計測結果	52
図 4 - 23(a)	油圧式クリープ試験機の概略図 概略図	53
図 4 - 23(b)	油圧式クリープ試験機の概略図 外観写真	53
図 4 - 24(a)	クリープ歪の経時変化 (気乾状態) 上に凸	54
図 4 - 24(b)	クリープ歪の経時変化 (気乾状態) ほぼ直線	55
図 4 - 24(c)	クリープ歪の経時変化 (気乾状態) 下に凸	56
図 4 - 25(a)	クリープ歪の経時変化 (湿潤状態) 上に凸	57
図 4 - 25(b)	クリープ歪の経時変化 (湿潤状態) ほぼ直線	58
図 4 - 25(c)	クリープ歪の経時変化 (湿潤状態) 下に凸	59
図 5 - 1	一軸圧縮試験とクリープ試験から求めた形状母数 (気乾状態)	76
図 5 - 2	一軸圧縮試験とクリープ試験から求めた形状母数とパラメータ n (気乾状態)	77
図 5 - 3	一軸圧縮試験と引張試験から求めた形状母数 (気乾状態, 湿潤状態)	78
図 5 - 4	一軸圧縮試験と引張試験から求めた形状母数とパラメータ n (気乾状態, 湿潤状態)	79
図 5 - 5	三軸圧縮応力下の強度のワイブル確率線図 (気乾状態) 三城目安山岩を用いた結果 (山口, 1980)	80
図 5 - 6	三軸圧縮試験から求めた形状母数とパラメータ n (気乾状態) 三城目安山岩を用いた結果 (山口, 1980)	81

図 5 - 7(a)	三軸圧縮試験から求めた尺度母数と形状母数（気乾状態） 田下凝灰岩を用いた結果 ・尺度母数	82
図 5 - 7(b)	三軸圧縮試験から求めた尺度母数と形状母数（気乾状態） 田下凝灰岩を用いた結果 形状母数	83
図 5 - 8	三軸圧縮試験から求めた尺度母数と形状母数（気乾状態） 幌延泥岩を用いた結果	84
図 5 - 9	幌延泥岩の薄片	85

1. はじめに

本研究は、巨視的観点からの長期岩盤挙動の評価の確立を目指して平成6年度より平成15年度までの10年間に行われた研究を基礎とする。過去10年間の成果を引き継いで、結晶質岩を主たる対象とした長期岩盤挙動評価のための現象論的研究を行ったので報告する。

平成16年度(本年度)も、田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行いその結果を第2章で述べる。これまでも報告した通り、時間の経過に従い、クリープ歪速度は減少しているが、その速度の減少がどの程度であるかは、長期の安定性を考える上で重要である。著者の見解では、低い応力で、歪速度が顕著に低下していることは、安定化に向かっているとみなせる。

第3章では、中間温度領域におけるクリープ試験結果を述べる。常温および高温での研究結果はこれまでに相当数発表されているが、中温度領域における研究は少ない。推察するに、通常的时间スケールでは、常温と変わらないとして設計しても大きな齟齬をきたさなかったためであろう。しかしながら、1~10万年程度の安定性が岩盤内構造物に要求される場合には是非とも検討すべき課題と考えている。

第4章では、通常的油圧試験機と結晶質岩用4連式油圧クリープ試験機を使用した結晶質岩の低応力下でのクリープ試験結果について述べる。試験機の改良の経緯、現状分析および問題点を指摘した。

第5章では、時間依存性挙動のメカニズムについて検討したが、その際、試験結果のばらつきを情報の一つと考えた。確定論と確率過程論の両者を念頭において検討を進めた。実験結果の整理と理論的な検討結果を総合して、岩石のばらつきと時間依存性挙動の概要をあきらかにするとともに、実用上重要な、ばらつきを考慮した構成方程式中の定数の設定についても一定の方針を示すことを目的とする。

第6章では、平成6年度~平成15年度までの研究結果をまとめた。ついで、いくつか行った研究の到達度を著者なりに推し量ってみた。その上で、今後なすべきことと新研究計画について述べた。

最後の第7章は結言である。

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、7.5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 空圧式クリープ試験機

2.1.1 試験機の概略

空圧式クリープ試験機の概略図を図2-1、載荷部の写真を図2-2および図2-3、計測・制御ラックを図2-4に示す。

(a)のコンプレッサから0.8~1 MPaの圧縮空気を(b)の減圧弁に送り、所定の空圧になるように減圧弁で調整する。一定の空圧は(c)のバルブを介して、(d)の空圧シリンダによりクリープ荷重（応力）を作用させる。

図2-3に示すように、空圧シリンダの変位をダブルカンチレバー式変位計で測定することによって、試験片のクリープ歪を観測した。変位計の出力は、直流アンプを介して、デジタルマルチメータでA/D変換を行い、計算機によりデータを取り込む。

2.1.2 試験開始時の操作

試験開始時の操作手順を以下の1)~10)に示す。

- 1) 減圧弁(b)を開放状態とし、(c)のバルブを開けた状態で、(d)の空圧シリンダが上方にあがっていることを確認する。空圧の回路上、シリンダに残圧が残り、シリンダが上方にいない場合がある。この場合、充分時間をおけば減圧弁から空気が漏れ、残圧がなくなる。また、(c)から(d)へ連結しているチューブの(d)のところをいったんはずしても残圧はすぐに0となる（ただし、チューブが傷むのでなるべく避ける）。
- 2) 減圧弁の零点調整を行い、0となるようにする。
- 3) あらかじめ、完全湿潤状態とした試験片を用意する。試験片をバット（試験片を水に浸す容器）にいれ、試験片が載荷用プラテンの中央にくるようにセッティングする。ペロフラムのシリンダの場合、圧力が作用した状態で限度いっぱい下方にさがると、破損するため、岩石のまわりに保護用の金属片を配置し、岩石が破壊してもシリンダが限度まで下がらないようにする。
- 4) コンプレッサのバルブをわずかに開ける。バルブを完全に開放すると、空圧式の場合、載荷段階でかなりの空気がコンプレッサからシリンダに移動し、目標値に比べ、行きすぎ量（クリープ応力以上の応力が作用してしまう）が生じるため、ある程度それを抑制するために、バルブの開ける量を調整する。これはシリンダの容量、精密弁の特性などの要素が複雑に影響するため、事前に試行錯誤を行い、最適な開けた方を調べておく必要がある。
- 5) 減圧弁を調整してわずかに圧力を加え、シリンダが下方に移動し、プラテンと試験片が接触する。これはプラテンと試験片上端が離れた状態で設定圧力を加えると、両者が接触する際、衝撃力が加わるので、それを避けるためである。しかし、設定圧力に近い程度の力をこの段階で作用させ

てしまうと、岩石のクリープ変形が進行するので、徐々に圧力を加え、シリンダが下方に移動して、試験片と接触する程度とする。

- 6) バットに純水を入れ、岩石が完全に水没するようにする。
- 7) 変位計のアンプの零点調整を行う。この場合、アンプの故障に備えて、キャリブレータで、零点およびゲインのキャリブレーションを行っておく。万が一、アンプが故障した場合には、代替アンプを用意し、このキャリブレータで同じように出力し、零点およびゲインを故障したアンプに合わせることで、連続的に試験を行うことができる。
- 8) (c)のバルブを閉め、(b)の減圧弁を調整して設定圧力にする。
- 9) 測定用プログラムを run させる。
- 10) (c)のバルブを開け、クリープ試験を開始する。

4) で述べたが、ここで重要なことは、設定圧力以上にならないようにしながら、なるべく早く載荷を完了させることである。この調整はコンプレッサのバルブの調整によるところが大きい。

2.1.3 試験機の点検

試験機の点検および故障時の対応を以下に示す。

A. 毎日の点検

以下の項目の点検は、1日1回程度が望ましい。温度などの影響があるため、なるべく同じ時間にすることも望まれる。

- 1) 圧力が設定圧力に保持されているか
- 2) 水が蒸発して、岩石が完全に水没した状態からずれていないか
- 3) 前回に比べて、クリープ変位の変化はあるか

試験開始後1週間以上となると、1日程度ではクリープ変位はほとんど変化していない状態となる。ここでクリープ変位が大きい場合、実際に岩石のクリープ変位が大きくなったか、測定システムが故障したかの判断を行う必要がある。クリープ応力が強度に近い場合には、3次クリープ状態であることが多い。しかし、強度の30%程度のクリープ応力では、測定システムの故障の方が高いと考えられる。

B. 非日常的な点検

- 1) コンプレッサ内部の水を抜く

特に夏場の湿度の高い時期には水がたまりやすくなり、空気をためる有効体積が減少してしまいやすいので、ドレイン抜きを開けることによってそれを回避する。

- 2) 精密弁の水を抜く（図2-5および2-6参照）

精密弁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、精密弁からは、空気が絶えず漏れるようになっている。そのため、水がたまることがあり、バルブをさわっていないのに、設定圧力が変化する。この場合には、(c)のバルブを閉め、精密弁の水を抜く。

- 3) 停電時の対応

停電前にはデータは保存する．停電後は，載荷系統および測定系統の確認．

C. 測定システムの故障判断

・アンブ

操作手順の6)で示したようにキャリブレーションを行うことにより，判断できる

・圧力計

(c)のバルブ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，その間に検定を行う．

・変位計

変位計の点検は，クリープ試験は続行したままで，変位計の接点にブロックゲージを入れ，変位計の検定を行う．検定が終了し，ブロックゲージを取り出すと，接点が微妙にずれてしまうので，クリープ変位が連続するようにデータを補正する．そのため，変位計が故障の原因と判断した場合に限定した方がよい．

・その他

理由がわからず，装置を分解するため，載荷をやめた場合には点検終了後，なるべく早い段階で載荷を開始する．応力を零に戻してしまうと，クリープ変位の一部が徐々に戻る傾向があり，上記のようにデータを連続させることが難しくなるためである．

2.2 実験条件および実験結果

実験条件は，平成9年の試験開始時から一貫して同じで，以下の通りである．

岩石：田下凝灰岩

環境：常温下，湿潤状態

試験片：直径 25 mm × 高さ 50 mm の円柱形

クリープ応力：2.8 MPa [一軸圧縮強度(9.1 MPa)の 30 %]

実験開始日時：平成9年5月23日10時27分

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，平成13年後半から，毎週月曜日と金曜日午前10時時点の値の測定（定常時の計測）

平成6年11月から平成8年8月にかけて上記と同じ条件でクリープ試験を行っており，これを前回の実験と呼ぶことにする．

平成13年後半から開始した，毎週月曜日と金曜日午前10時でのA/D変換した電圧より求めたクリープ歪と，空圧の経時変化を図2-7に示す．データは平成16年11月29日(実験開始後237,247,200 s)までの結果を示した．図で， 1.62×10^8 sまで空圧が徐々に低下している様子が見られたため，精密弁のリリーフ孔およびブリード孔に水滴がたまり，圧力が低下したと判断し，平成14年7月12日に図2-1のバルブ(c)を閉め，精密弁の水を抜く操作を行い，改めて設定圧である 1 kg/cm^2 (0.1 MPa)となるように精密弁を調整した後，バルブを開け実験を再開した．それ以降， 1.8×10^8 sまでは空圧はほぼ設定圧を保持していた．しかしながら，その後，空圧は徐々に低下したため，平成15

年7月15日に再度、同じ操作を行い、圧力を設定圧に調整した。平成15年9月29日、平成16年10月26日にも同様の操作を行った。

クリープ応力が低下すると、弾性的な歪が解放され、みかけ上、クリープ歪が低下するため、図2-7で示すように空圧の低下に従い、クリープ歪が減少する。そこで、この歪を近似的に弾性変形と見なし、低下したクリープ応力をヤング率2.6 GPaで除して、クリープ歪を補正することとした。1 kg/cm²(0.1 MPa)の空圧(クリープ応力にして0.028 MPa)の低下で 1.1×10^{-5} のクリープ歪を補正した。補正したクリープ歪の経時変化を図2-8に示す。図2-8では、図2-7の空圧の変動によるクリープ歪の変動現象は見られておらず、補正はある程度、うまくいったものと考えられる。

図2-8に示した補正したクリープ歪の経時変化の縦軸を拡大したものを図2-9に示す。図には、平成14, 15, 16年の1月1日にあたる時間を示した。図では各年とも年周期の変動がみられる。そこで各月の平均クリープ歪の変化を図2-10に示す。図では各年とも、1月以降、徐々にクリープ歪が低下し、5月から8月に極小値を取った後、クリープ歪が増加し、11月から12月に極大値を取る傾向が見られる。試験機は年間中、同一温度に設定したエアコンによる空調下におかれており、11月後半~3月までは暖房、5月~10月前半までは冷房による運転がなされているため、設定温度と比べ、暖房期では温度、湿度とも低めに、冷房期では高めになりやすい傾向はみられるが、そのことから図2-10を単純に説明することは難しい。このようにクリープ歪に年変化の傾向が見られる理由は判然としないが、室温の変化による計測装置などの温度ドリフトの可能性が高いと考えている。

7.5年経過したクリープ歪の経時変化を図2-11に示す。ただし、図のクリープ歪は温度環境などによる変化が見られたため、 10^8 s以降は年間のクリープ歪の変動をスムージング化した結果である。図で 10^5 sまでは、片対数グラフで直線的に歪が増加しており、対数クリープ則にほぼ従っていることがわかる。しかしながら 10^5 s以降、経過時間の対数に対する歪の増加率が多少大きくなっており、対数クリープ則からずれ始めていることがわかる。 10^5 s以降も最初の傾きで対数クリープ則が成立しているとして直線部を延長して見ると、クリープ歪は 400×10^{-6} 程度であり、対数クリープ則より歪が大きくなっている。図には前回の試験結果も示した。前回はクリープ歪測定用アンブが故障したため、1.5年経過した時点で試験をうち切った。図では今回に比べ、 10^3 sまでクリープ歪は小さいがそれ以降、逆転し大きくなっている。 10^4 s以降の増加傾向は今回の結果を平行移動したような結果である。

大久保・福井(2002)らは、田下凝灰岩の低応力レベルでのクリープ歪は、次式で表現できると報告した。

$$= a \cdot t^{0.1} \quad (2-1)$$

なるべく実験結果に合うように定数aを決め(今回: $160 \times 10^{-6} \text{ s}^{-0.1}$, 前回 $115 \times 10^{-6} \text{ s}^{-0.1}$)、図2-11に図示した。(2-1)式は、今回および前回ともほぼ実験結果を満足していることがわかる。

クリープ歪速度の経時変化を図2-12に示す。図2-12では最初、クリープ歪速度は 10^{-5} /sであったものが、時間の経過に従って、クリープ歪速度は減少している。

(2-1)式を時間で微分すると次式を得る。

$$d / dt = 0.1 a \cdot t^{-0.9} \quad (2-2)$$

図 2 - 12 に(2 - 2)式を図示したが、実験結果とよく一致している。

図 2 - 13 に、クリープ歪とクリープ歪速度の対数の関係を示す。クリープ歪にして 200×10^{-6} (クリープ歪速度にして、 10^{-9} /s) まではほぼ直線的となっており、対数クリープ則に従っているが、それ以降はクリープ歪が増加しても、クリープ歪速度の減少率は小さくなっていることがわかる。

(2 - 1)式および(2 - 2)式より次式を得る。

$$d / dt = 0.1 a^{10} \cdot \quad -9 \quad (2 - 3)$$

図 2 - 13 に(2 - 3)式を図示したが、実験結果とよく一致していることがわかる。

時間の経過に従い、クリープ歪速度は減少しているが、その速度の減少がどの程度であるかは、長期の安定性を考える上で重要である。現在、クリープ試験を開始して 7.5 年経過し、測定結果に年変動が見られるなど、問題点も見られるが、クリープ歪速度の変化に注目し、今後も実験を継続していくつもりである。

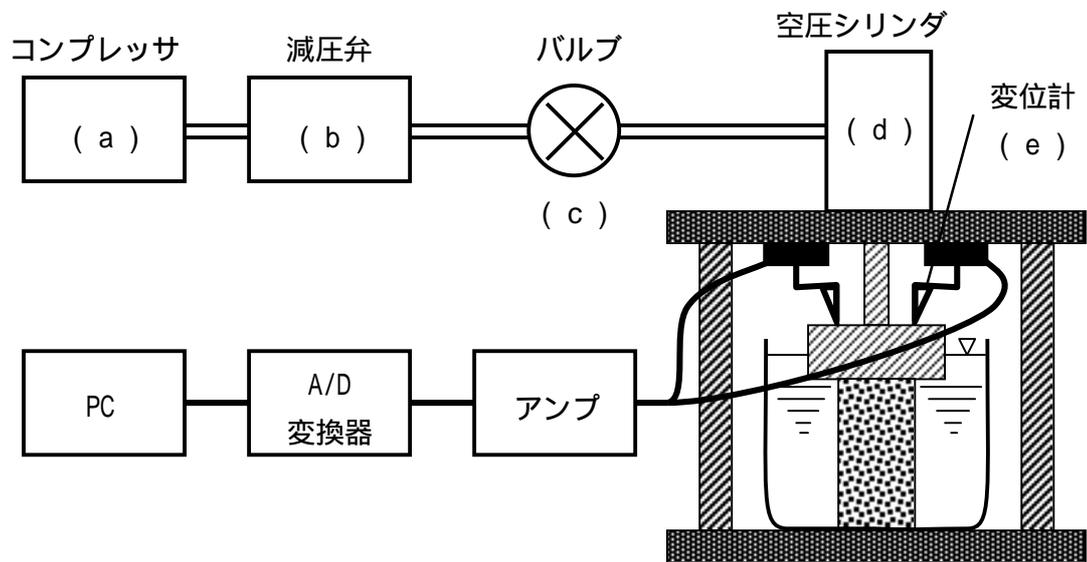


図 2 - 1 空圧クリープ試験機の概略図



図 2 - 2 空圧クリープ試験機の載荷部

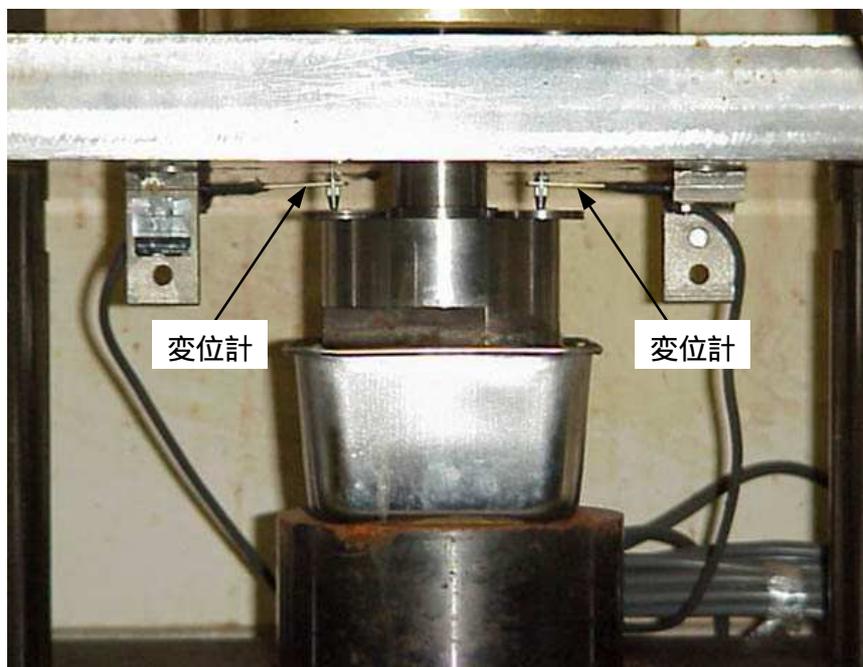


図 2 - 3 空圧クリープ試験機の載荷部の拡大

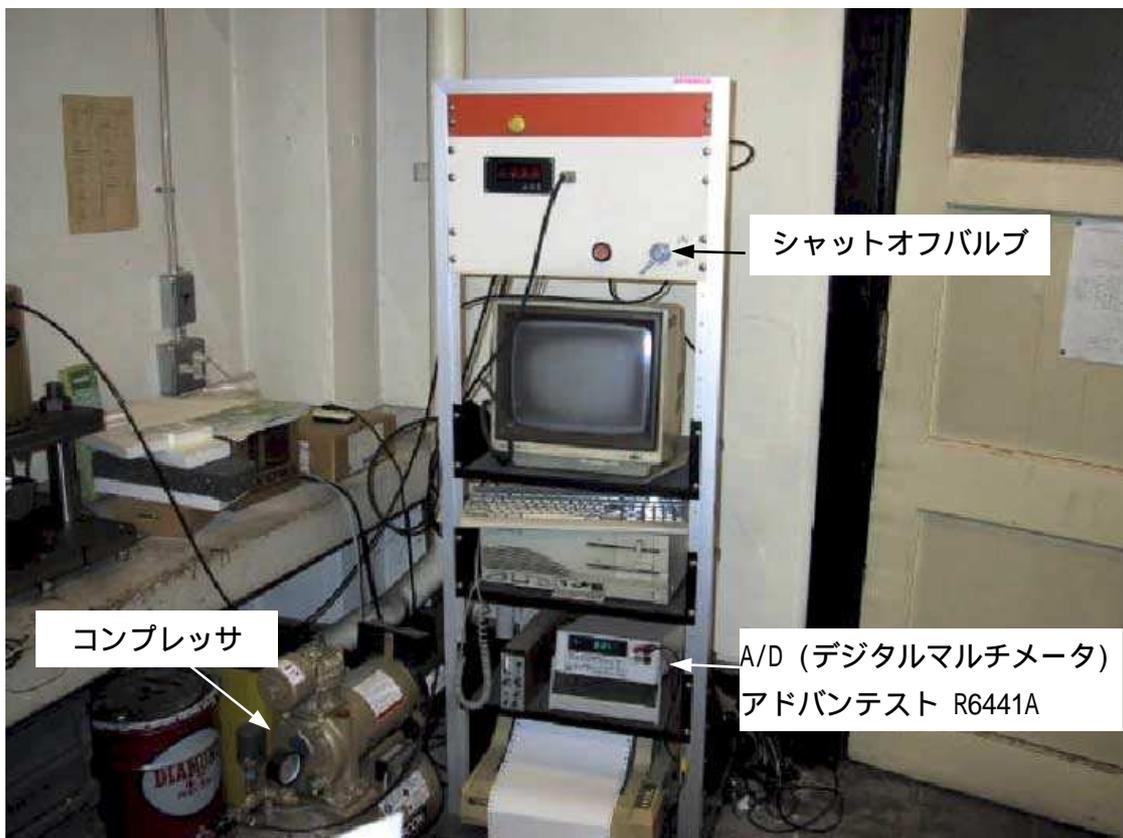


図 2 - 4 空圧クリーブ試験機の計測・制御ラック

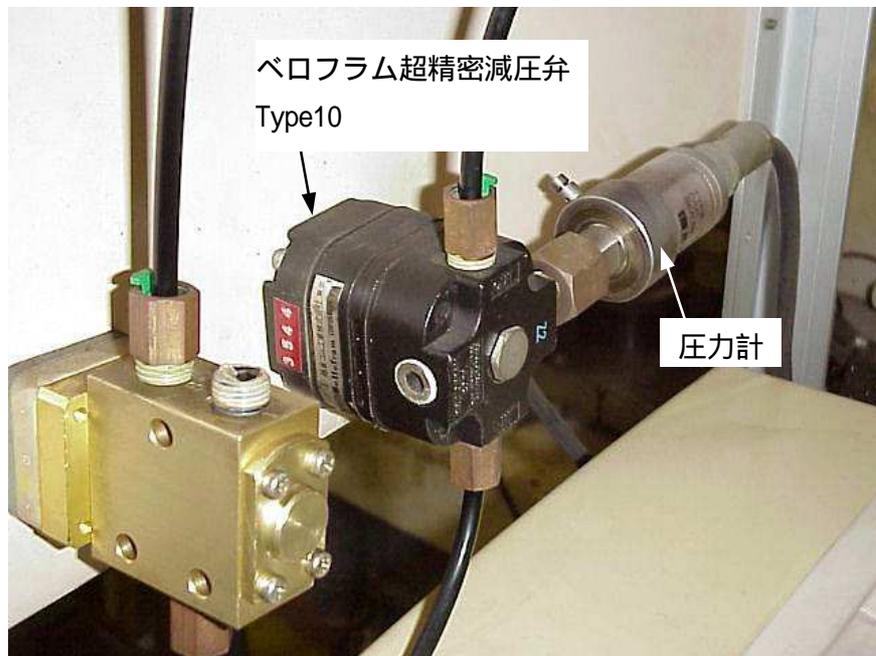


図 2 - 5 空圧クリープ試験機の計測・制御ラック背面

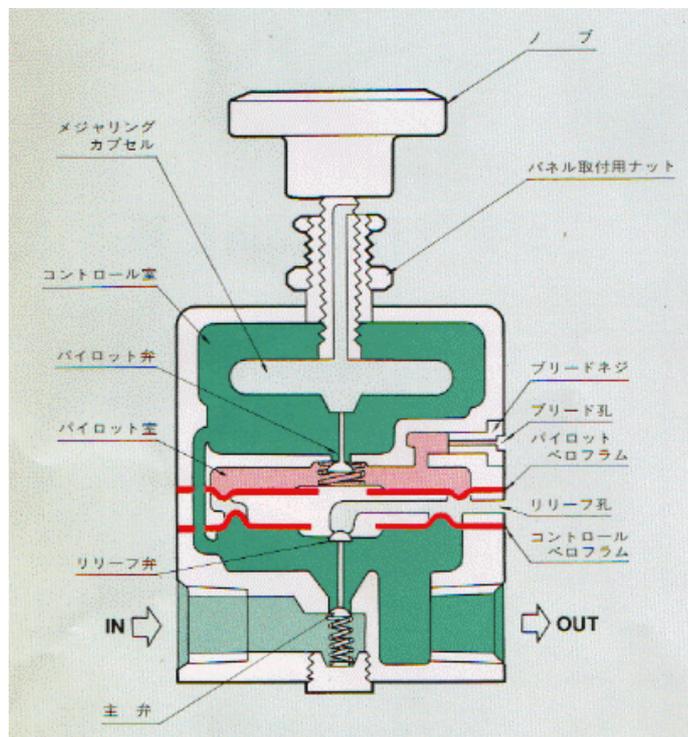


図 2 - 6 減圧弁の概念図

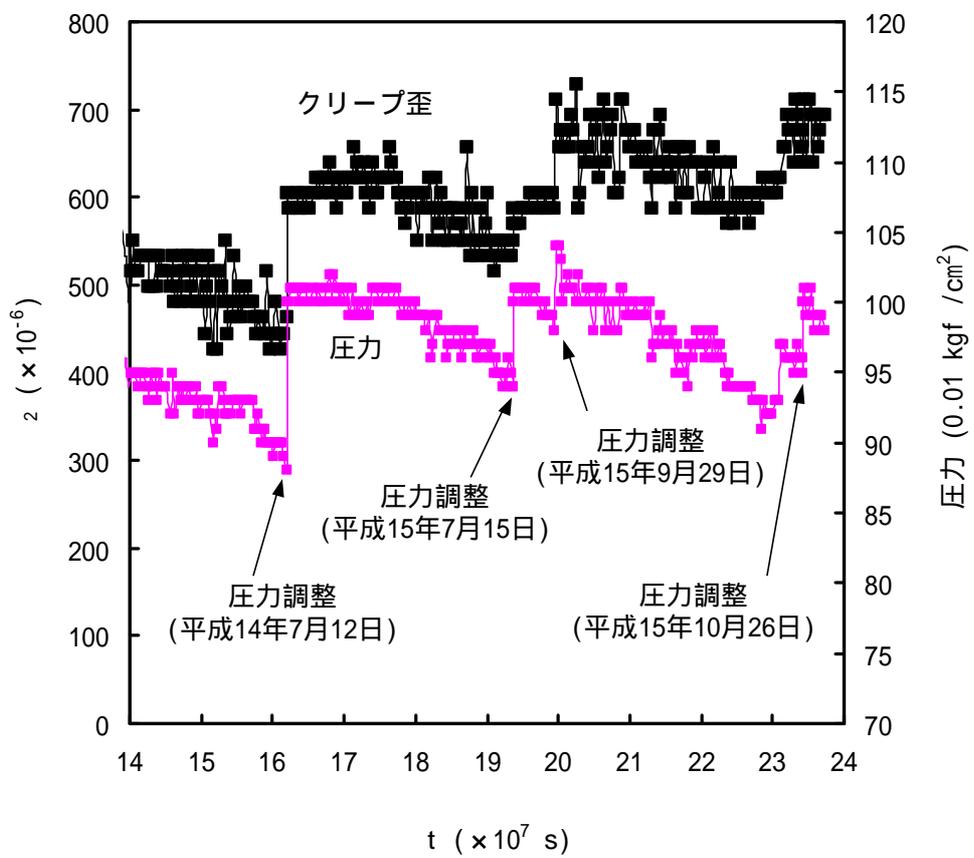


図2-7 クリープ歪および空圧の経時変化

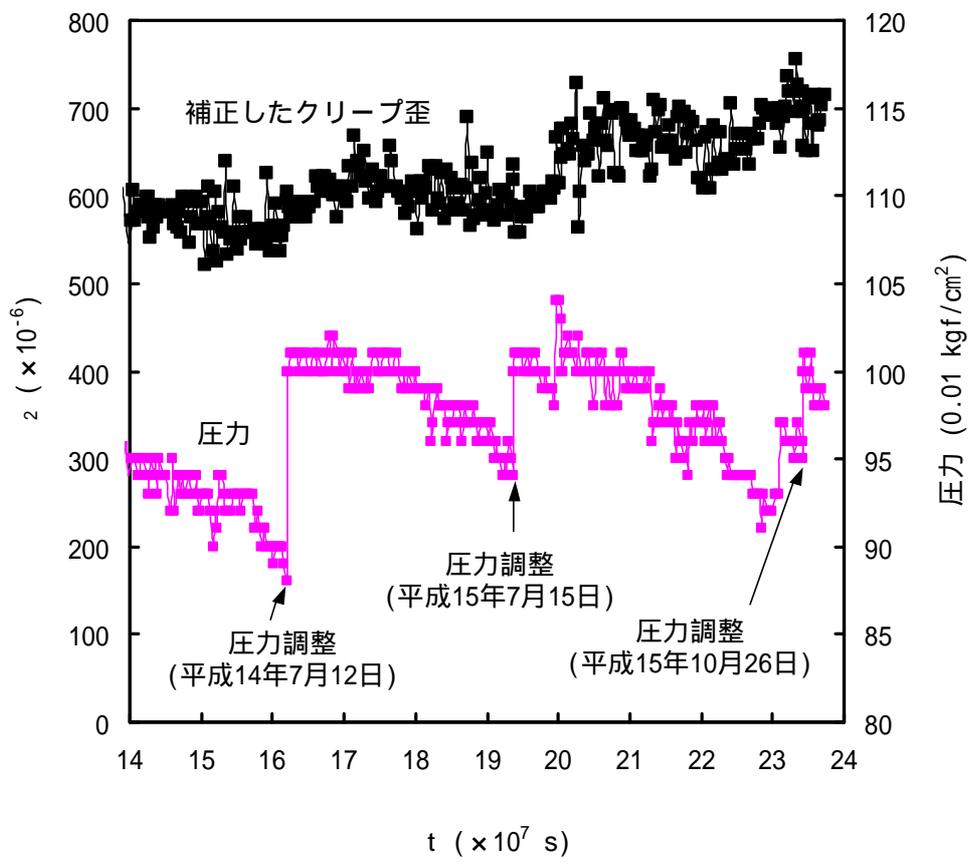


図 2 - 8 補正したクリープ歪および空圧の経時変化

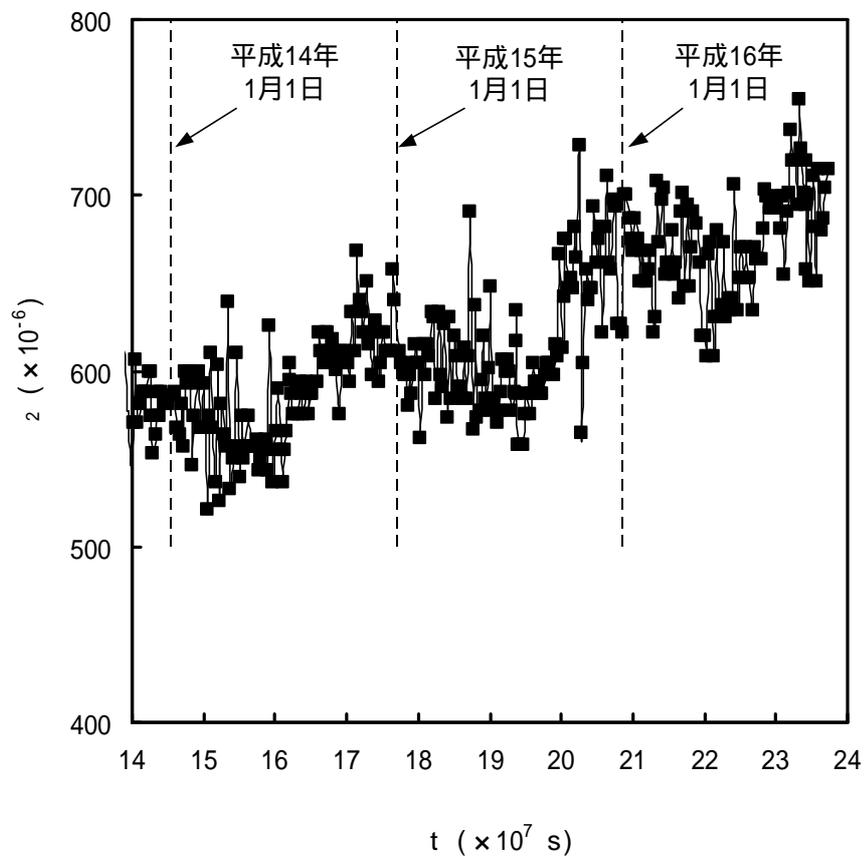


図 2 - 9 補正したクリープ歪の経時変化

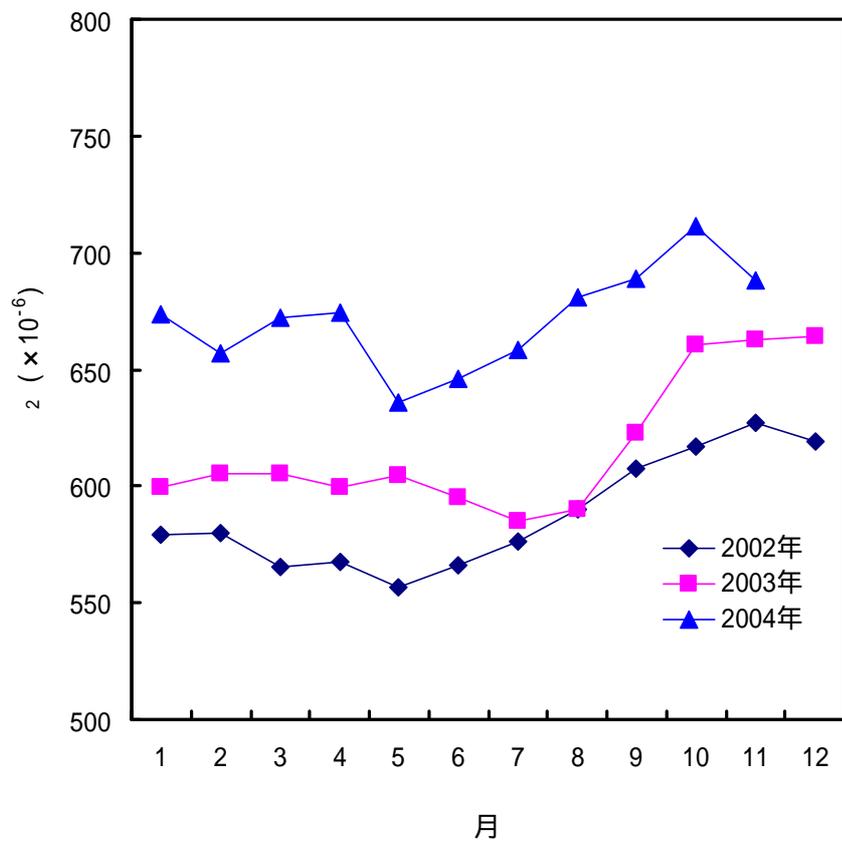


図 2 - 10 補正したクリープ歪の年変化

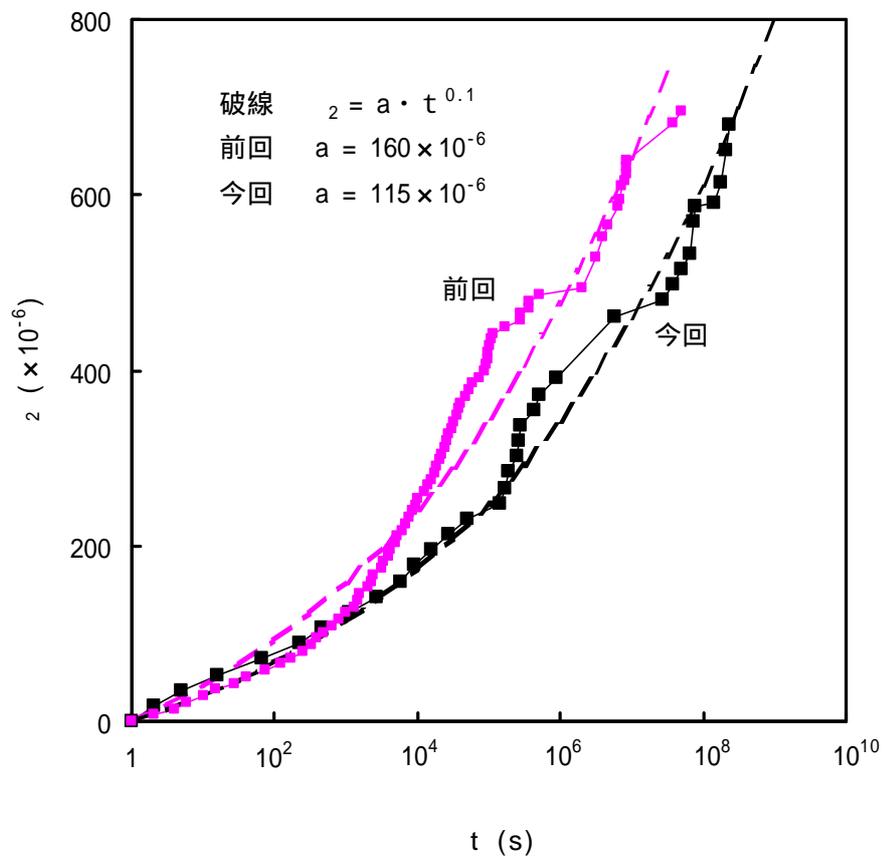
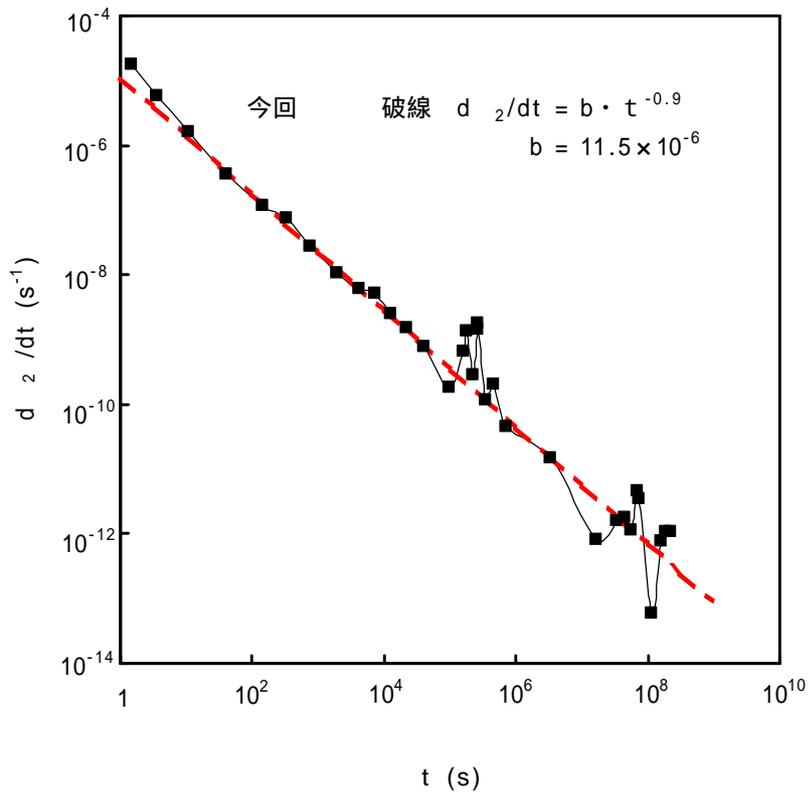
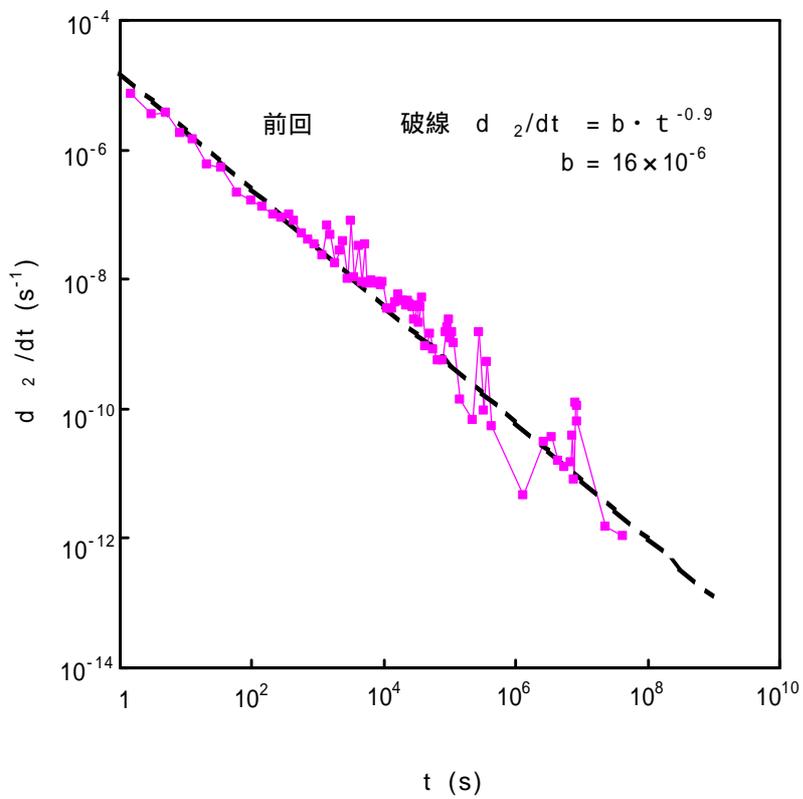


図 2 - 11 クリープ歪の経時変化
 前回：平成 6 年 11 月～平成 8 年 8 月
 今回：平成 9 年 5 月～現在



(a) 今回の結果 (平成9年5月～現在)



(b) 前回の結果 (平成6年11月～平成8年8月)

図2-12 クリープ歪速度の経時変化

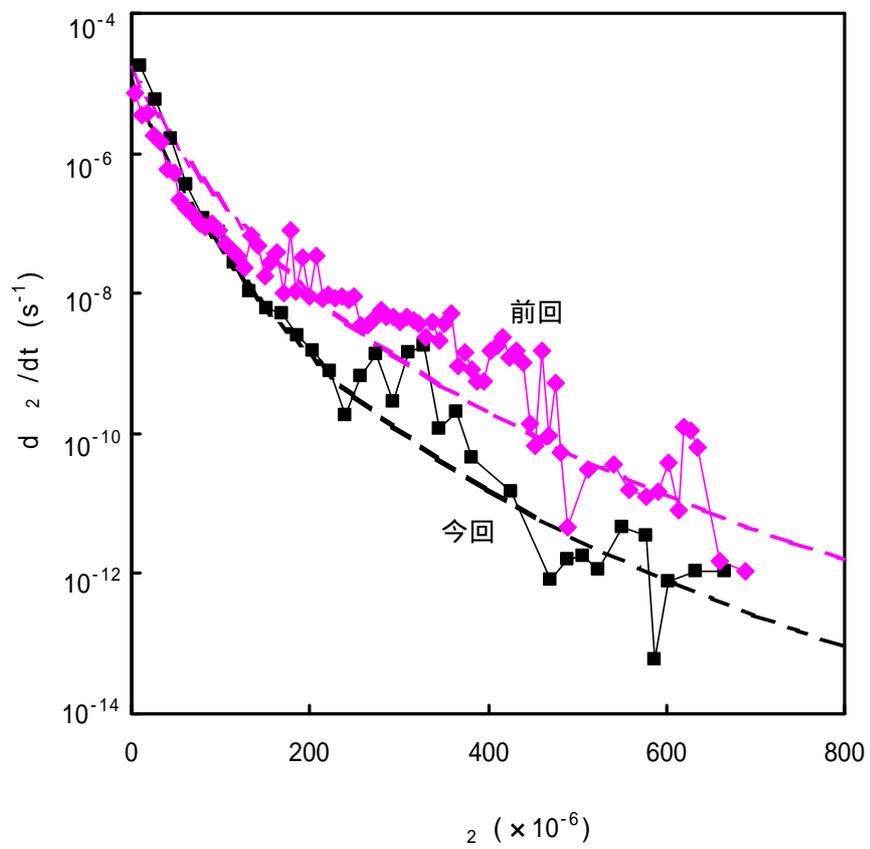


図 2 - 13 クリープ歪とクリープ歪速度の関係

前回：平成 6 年 11 月～平成 8 年 8 月

今回：平成 9 年 5 月～現在

3. 結晶質岩の中間温度領域におけるマルチステージクリープ試験

昨年度の研究では、40 のクリープ試験結果は1週間 (5×10^5 s) 経過してもほぼ対数クリープ則に従った。しかしながら、60 と 80 では対数クリープ則は 10^4 s までしか成立せず、 10^4 s 以降では対数クリープ則より大きなクリープ歪が観測された。中間温度領域(80 程度)で2次クリープのような現象が現れたことは構造物の長期安定性を考えていく上で、重要な事項であると考えられるが、定量的な議論をするにはデータの質、量とも不十分な段階であった。本年度は、質の高い中高温領域でのクリープ結果を収集するために、引き続き試験方法・装置の改良を施しながら、中間温度領域におけるクリープ試験を行った結果について述べる。

3.1 試験機の改良と実験方法

昨年度までは図3-1に示す載荷装置を使用していたが、本年度からは図3-2に示す新載荷装置へ更新した。これに伴い、変位測定装置もダブルカンチレバー方式(クリップ型)変位計からカンチレバー型変位計(東京測器研究所製 CE-2 型)へ変更した(図3-3)。詳細は4章を参照されたい。

この他の試験装置は従来と同様であり、油圧源とアキュムレータに関しては大久保(2002)を、温度の計測および制御装置に関しては大久保(2001, 2003)を参照されたい。基本的な制御システムも従来と同様である。

岩石の強度は個々にばらつくため、単一のクリープ応力でのクリープ試験では、その結果のばらつきが含まれてしまい、クリープ応力の影響を解釈することが難しい。そこで本年度は、マルチステージクリープ試験を行うこととした。マルチステージクリープ試験は、一定のクリープ応力で一定の時間載荷した後、クリープ応力を増加させ、再度クリープ試験を行い、これを繰り返す試験であり、何段階かのクリープ試験結果が得られるため、結果を評価しやすい特徴がある。

実験方法を下記に示す。

- 1) 湿潤状態とした試験片を容器内にセットし、試験機プラテンを下げ容器上部に触れさせる
- 2) 給油側ニードルストップ弁と戻り側ニードルストップ弁を開放する
- 2) 容器温度を設定温度まで上昇させる
- 3) 試験片に若干荷重をかける(油圧源応力で約0.5 MPa)
- 4) 給油側ニードルストップ弁と戻り側ニードルストップ弁を締めた後、油圧源の応力を設定値まで上昇させる(試験片に一軸圧縮強度の30%の荷重がかかる応力に設定)
- 5) 油圧管路内の気泡が油に溶け込むまで約1時間待ち、装置を安定させる
- 6) 給油側ニードルストップ弁を開放して実験を開始する
- 7) 同じ応力で1日以上クリープ試験を行った後、クリープ応力を一軸圧縮強度の10%ずつ上昇させ、60%で終了する

上記の方法で実験を開始したが、80 の実験を行った際に、試験容器内の水が全て蒸発するという現象が見られた。昨年度まで行ってきた同条件での実験では容器内の水はほとんど蒸発することなかったため、新載荷装置に変更したために生じた現象と考えられた。

80 での実験中に赤外線カメラ（AGEMA 社製 Thermovision550）を使用して、試験容器表面の温度を測定した結果を図3-4に示す。図3-4では熱電対を挿入している試験容器下部の温度はほぼ80となっているが、保護カバー直上では135、直下でも125に達していることがわかる。図3-4に示したように、新たに製作した載荷装置下部は厚肉の鋼であるため、熱容量が大きく、試験容器から載荷装置への熱伝導により大きな温度勾配が発生した。そのため、試験容器下部の温度を80に維持しようと制御が働き、バンドヒータが高温になり、試験容器内の温度が設定以上に高温になっていたと考えた。

そこで、図3-5のように試験容器と載荷装置の間に断熱材（宮城県柴田郡村田町産玄武岩）を挿入し、実験を行ったところ、バンドヒータの温度がほぼ80に下がり（図3-6）、試験容器内の水が蒸発する現象は見られなくなり、試験片もほぼ設定温度に保つことができるようになった。

以下では、試験容器と載荷装置の間に断熱材を挿入してからの実験結果を示す。

3.2 クリープ試験結果

実験条件を以下に示す。

岩石：稲田花崗岩

環境：湿潤状態 20 mm×高さ40 mmの円柱形

クリープ応力：一軸圧縮強度(190 MPa)の30% 40% 50% 60%の4段階

クリープ試験時間：各クリープ応力で1日以上

温度：温度は、40、60、80 の3通り

各温度条件で2本以上実験を行った。

図3-7に各温度での実験で得られた、歪の経時変化を示す。(a)は40の結果である。マルチステージクリープ試験を実施したので、クリープ応力を増加させると歪も増加するため、通常の応力-歪曲線のような関係も得られる。クリープ応力を10%増加(19 MPa)させた場合の弾性歪は約 700×10^{-6} であり、これから計算されるヤング率は27 GPaである。湿潤状態の稲田花崗岩のヤング率は39 GPa(大久保, 2004)であるので、小さく現れている。この理由はカンチレバー型変位計を用いて、試験容器の変形を計測しているため、花崗岩以外の変形も合わせて弾性歪として計測していることによる。ただし、クリープ時は荷重の変化がないため、花崗岩以外の歪の変化はなく、花崗岩のクリープ変形だけを計測することができる。(b)には60、(c)には80の結果を示したが、ほぼ同様の結果である。図3-8に歪の経時変化を示す。応力を増加させた時点で階段状に弾性歪が発生しており、弾性歪に比べクリープ歪はわずかであることがわかる。

図3-7、3-8では温度によるクリープ変形の変化がわかりにくいので、弾性歪を除去し、クリープ歪だけの経時変化を求め、示したのが図3-9である。(a)に示した40の結果では応力を増加させた直後はクリープ歪が増加しやすく、その後増加が鈍化していることがわかる。また、30%~60%でのクリープ試験の結果、 4×10^6 s(約4.5日)で 150×10^{-6} 程度のクリープ歪が生じていることがわかる。(b)に示した60の結果でも、40とほぼ同じような傾向が見られるが、 4×10^6 sで 250×10^{-6} 程度のクリープ歪と40の場合に比べ、クリープ歪が大きくなっていることがわかる。(c)に示した80の結果も同様で、 4×10^6 sで 350×10^{-6} 程度のクリープ歪が生じている。

図3-10には、図3-9の結果をまとめて示した。図では、温度の増加によりクリープ歪が増加していることがわかる。応力が大きい程、試験片ごとの差が大きくなる。これは、試験片ごとに強度が異なり、その差異が応力が大きい程増幅されるためと言える。

大久保(2004)では温度を 38℃, 58℃, 79℃ の3通りで、クリープ応力 53 %にてクリープ試験を行った。その結果、 4×10^6 s 経過した時のクリープ歪は、それぞれ 150×10^{-6} , 200×10^{-6} , 250×10^{-6} であった。今回の結果と応力履歴が異なるため、定量的に比較することは難しいが、昨年度の 38℃ と本年度の 40℃ のクリープ歪は比較的近い値である。昨年度の 58℃ と本年度の 60℃ のクリープ歪では、本年度のクリープ歪が 50×10^{-6} だけ大きくなっている。さらに昨年度の 78℃ と本年度の 80℃ のクリープ歪では、本年度のクリープ歪が 100×10^{-6} 大きくなっており、温度が高いほど、本年度のマルチステージクリープでのクリープ歪が大きくなっている。この理由として、応力レベル 60 %で温度が高い時のクリープ歪が大きいことが考えられ、図3-10でもその傾向が現れている。そのため、中間温度領域でもクリープ応力が高くなった場合には、温度によるクリープ変形はかなり大きくなる可能性があり、今後検討する必要がある。



図 3 - 1 旧载荷装置

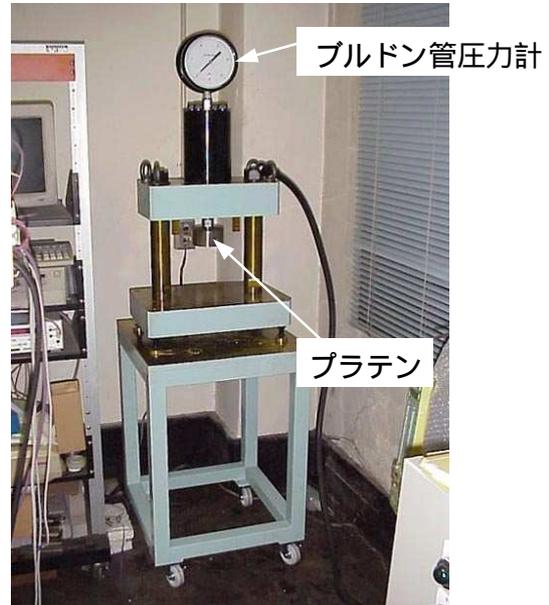


図 3 - 2 新载荷装置

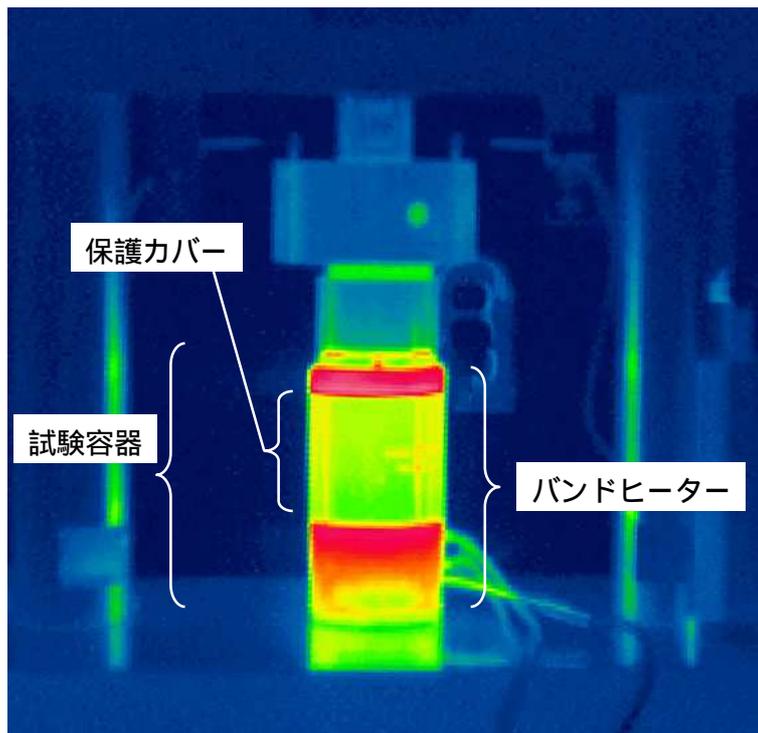


(a) 旧変位計
ダブルカンチレバー方式 (クリップ型)

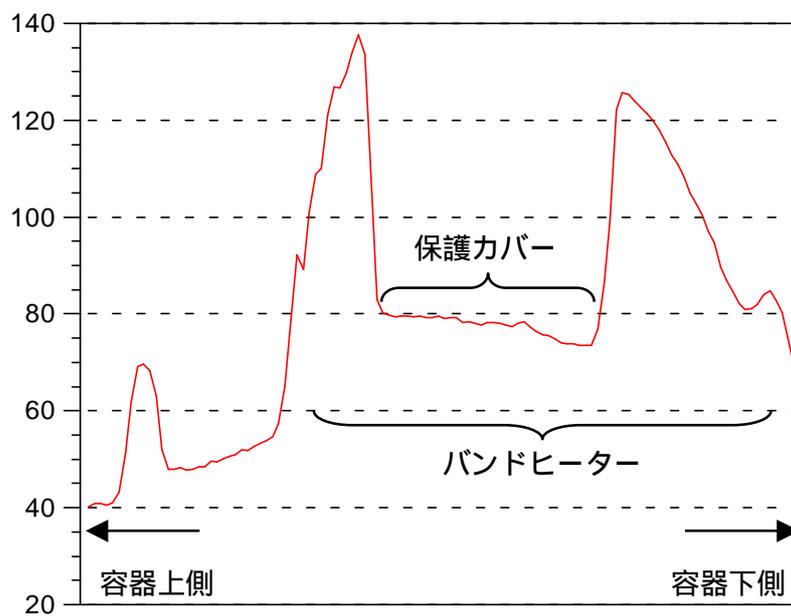


(b) 新変位計
カンチレバー型
東京測器研究所 CE-2 容量 2 mm

図 3 - 3 変位計



(a) 赤外線カメラの映像



(b) 容器中心線に沿った温度変化

図 3 - 4 試験容器の表面の温度分布

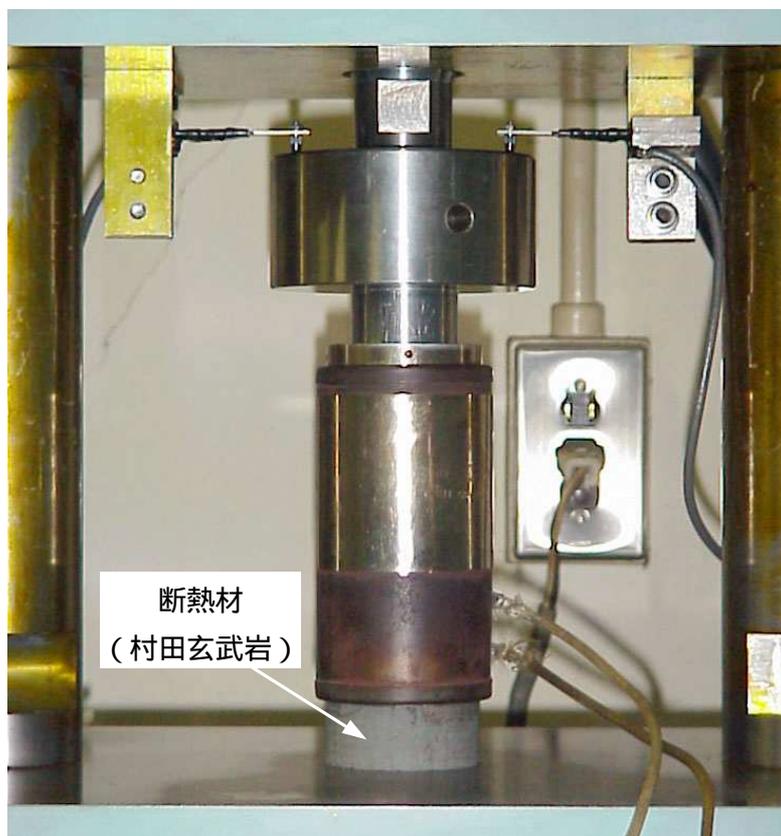
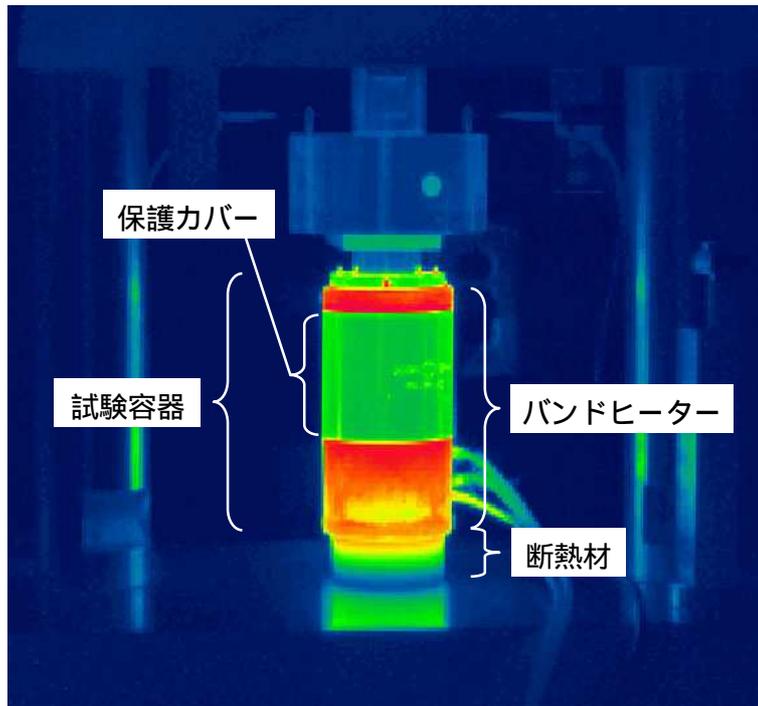
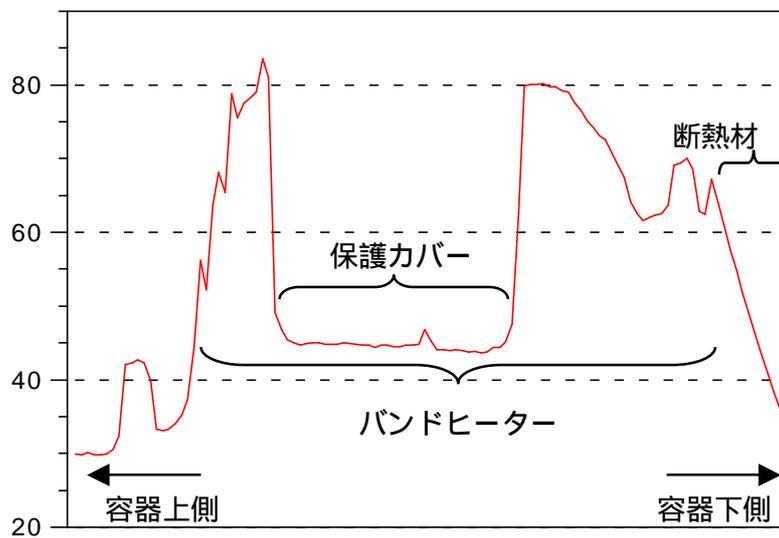


図 3 - 5 試験容器下に断熱材挿入

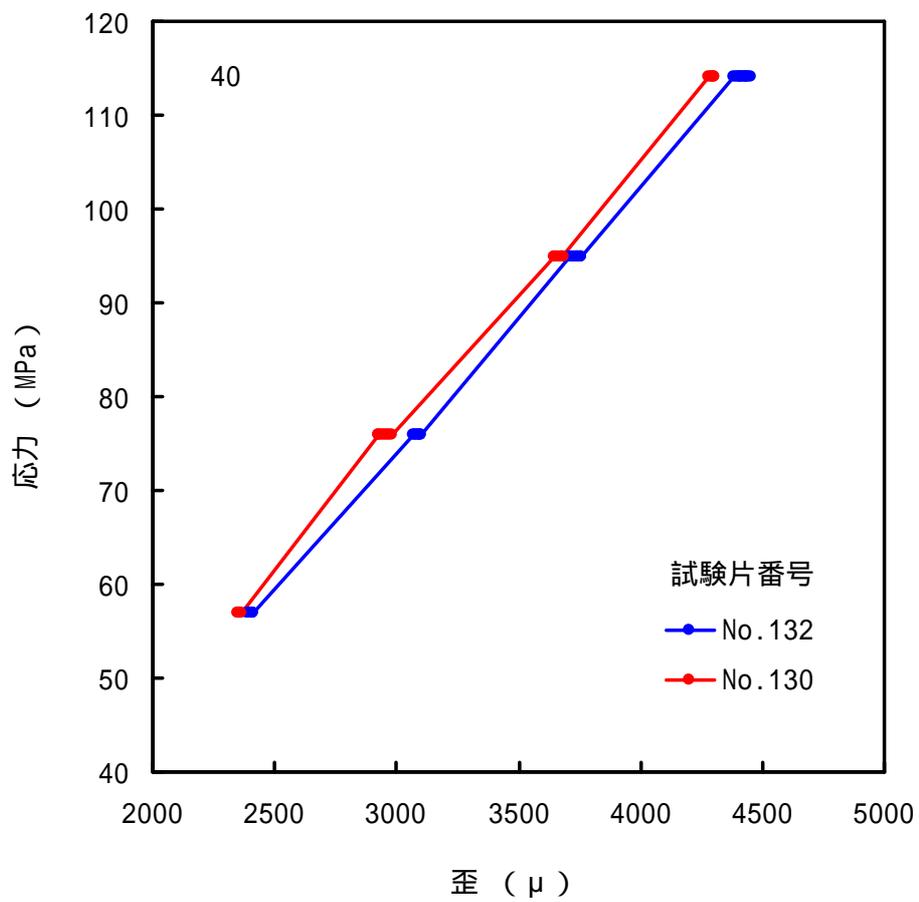


(a) 赤外線カメラの映像



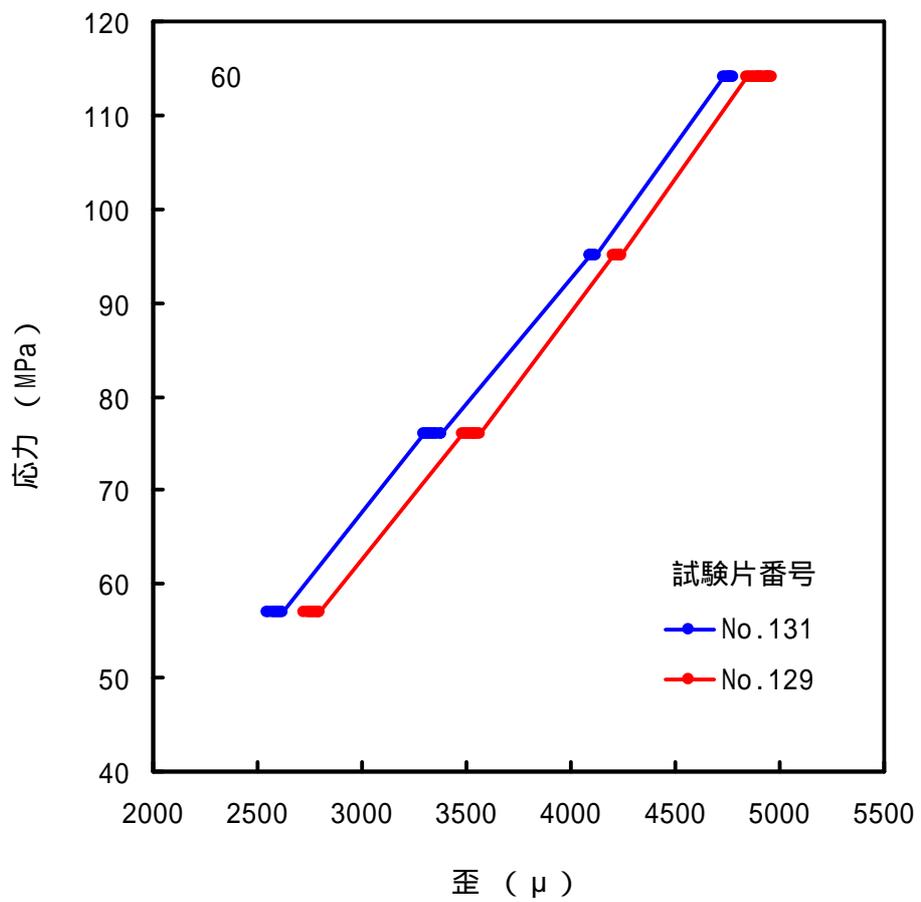
(b) 容器中心線に沿った温度変化

図 3 - 6 断熱材挿入後試験容器の温度分布



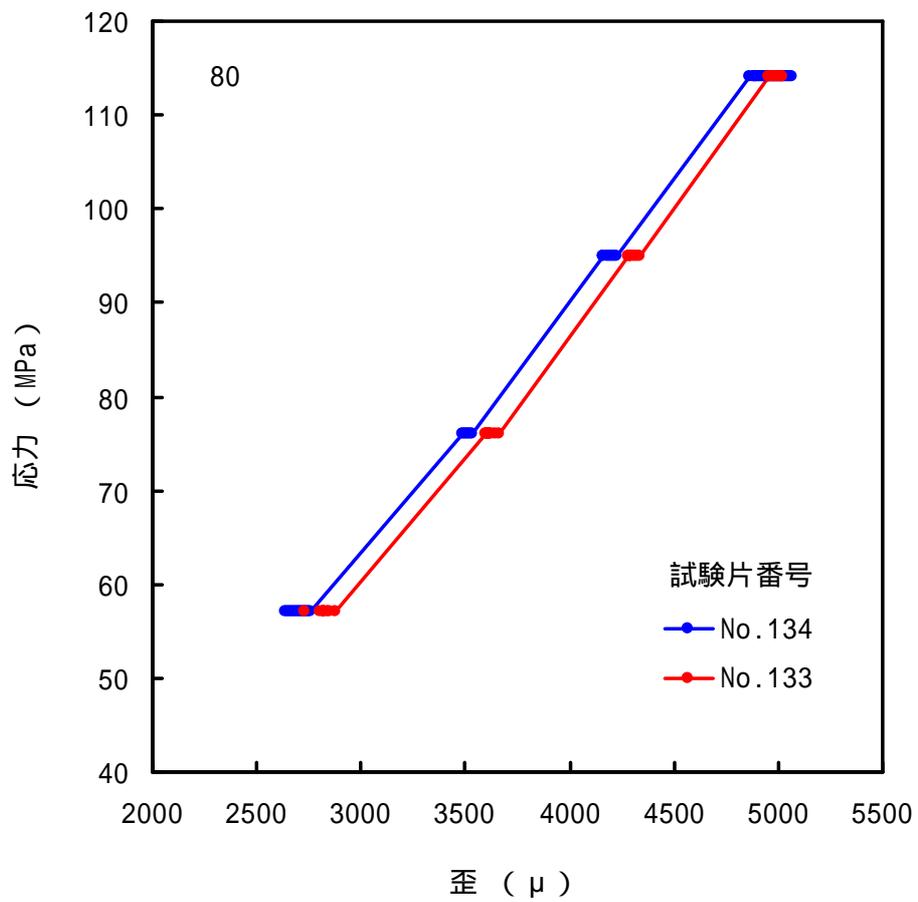
(a) 40

図 3 - 7 応力と歪の経時変化



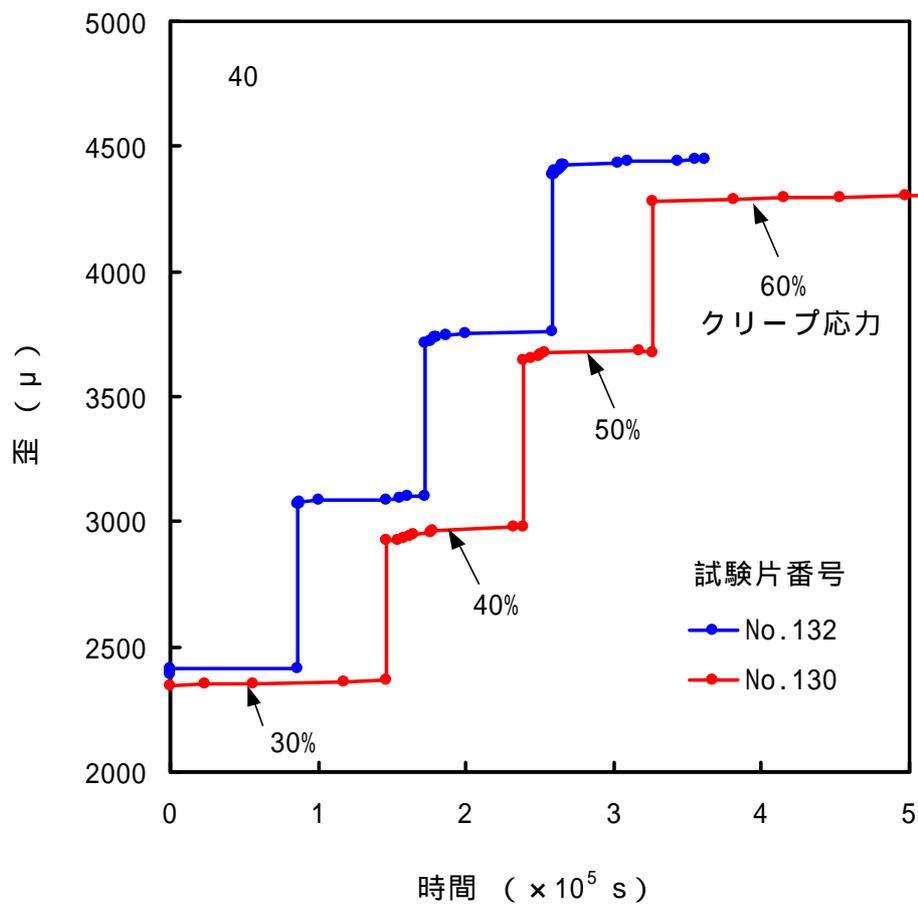
(b) 60

図 3 - 7 応力と歪の経時変化



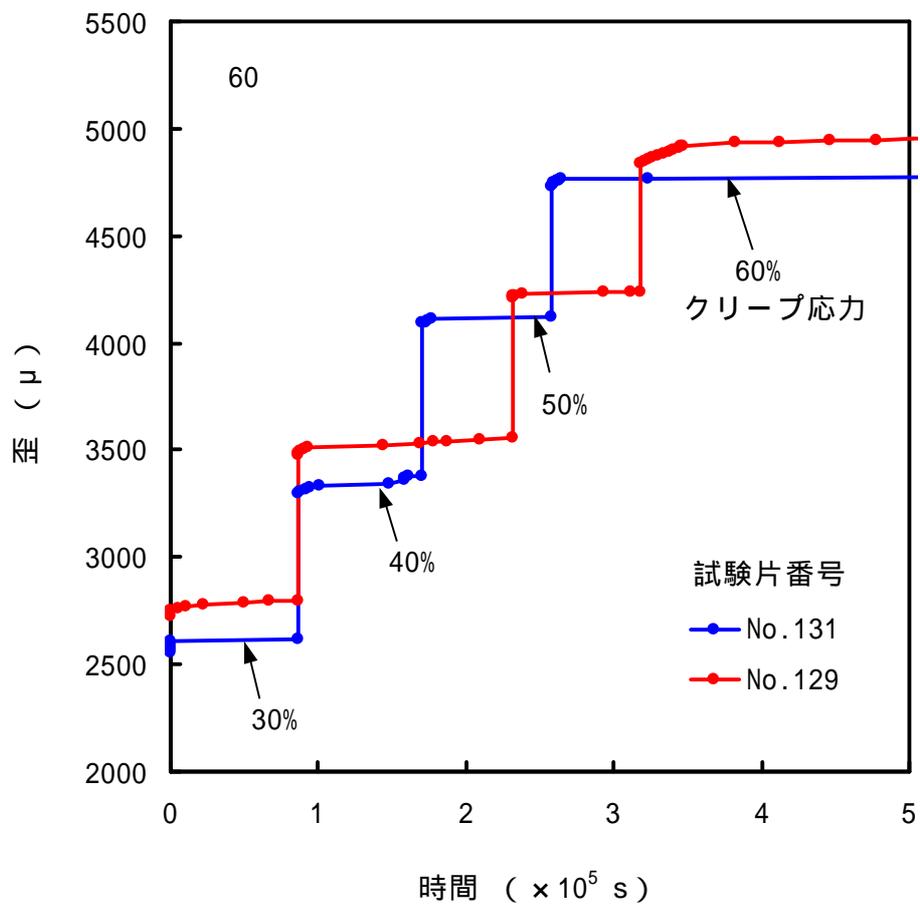
(c) 80

図 3 - 7 応力と歪の経時変化



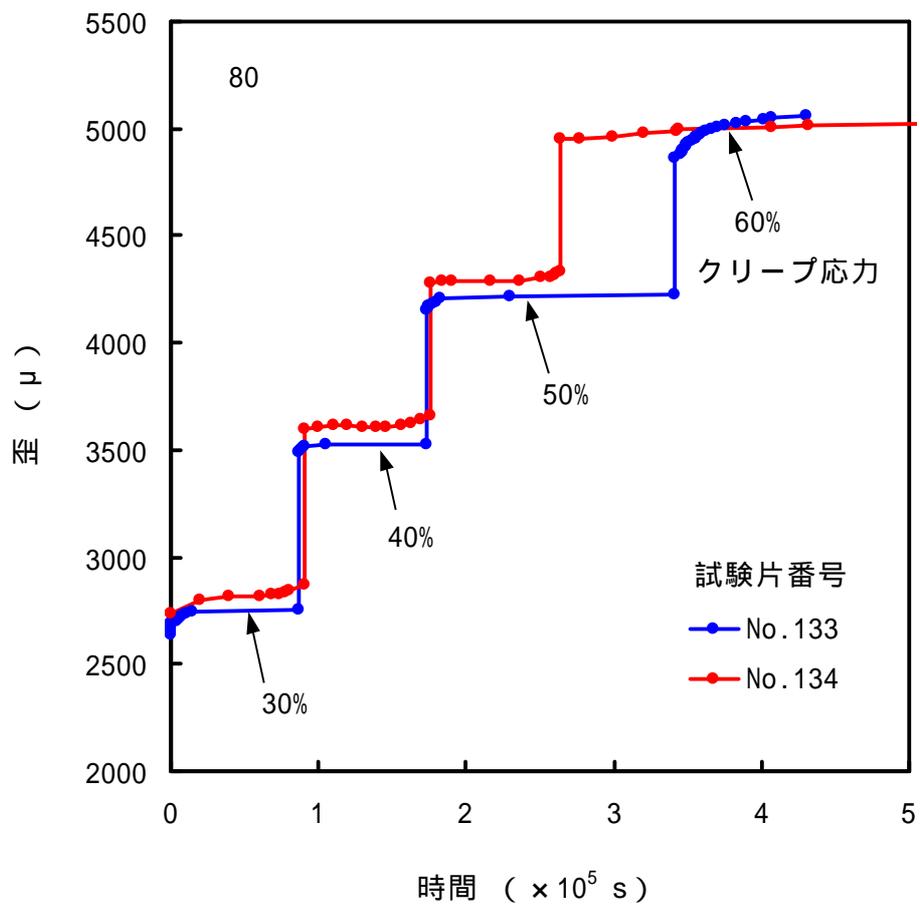
(a) 40

図 3 - 8 歪の経時変化



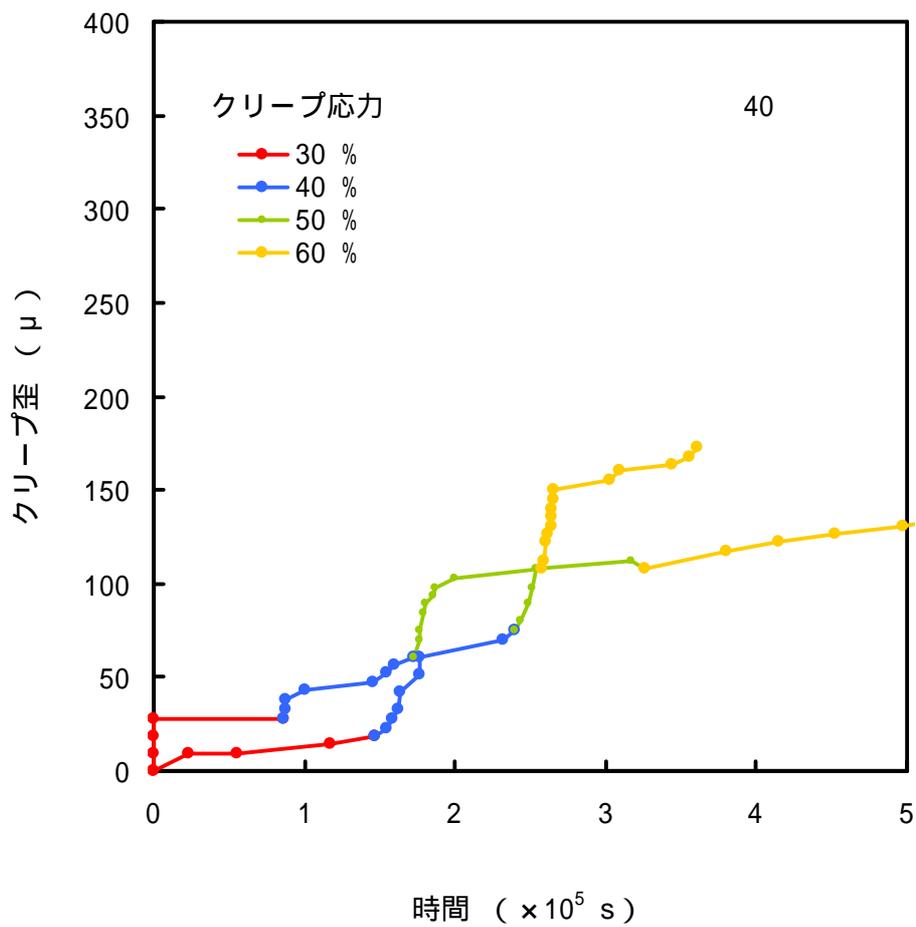
(b) 60

図 3 - 8 歪の経時変化



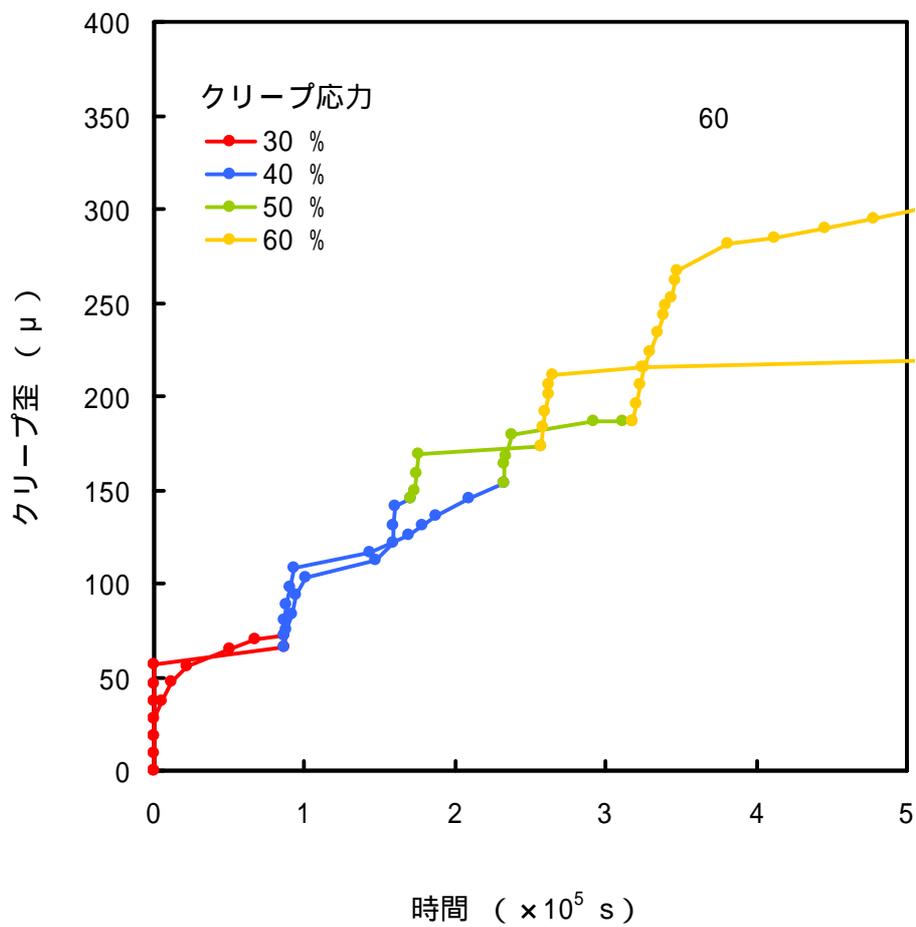
(c) 80

図 3 - 8 歪の経時変化



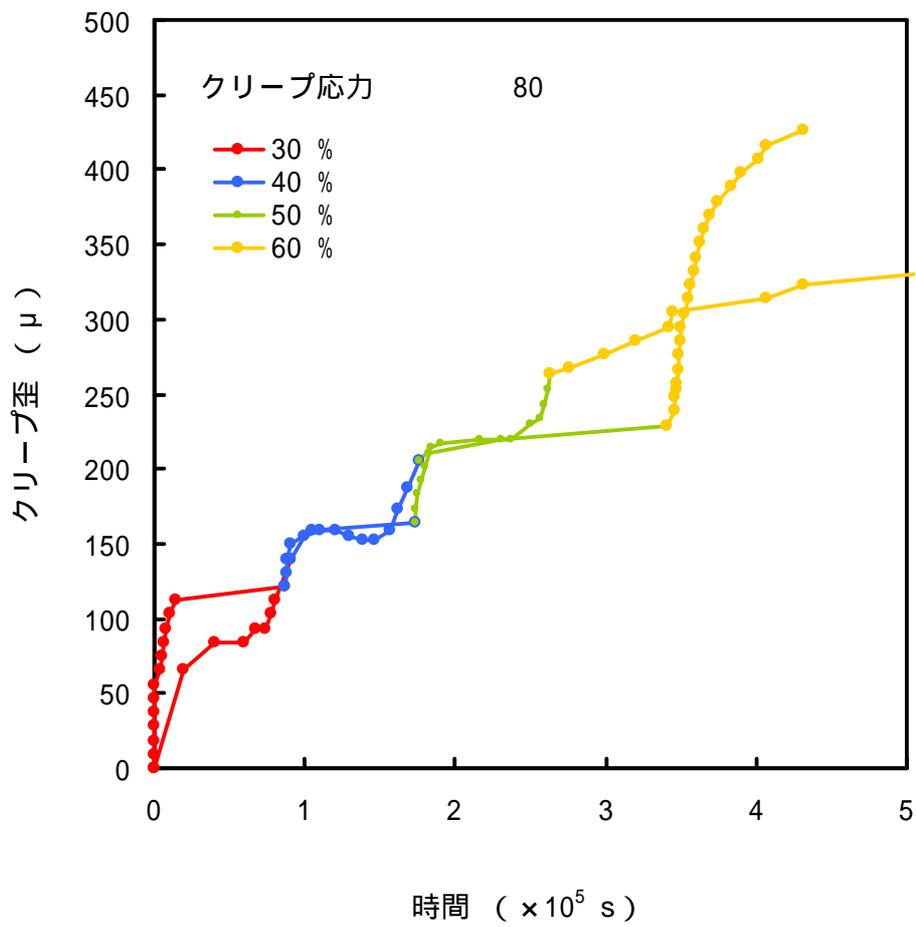
(a) 40

図3-9 クリープ歪の経時変化



(b) 60

図 3 - 9 クリーブ歪の経時変化



(c) 80

図 3 - 9 クリープ歪の経時変化

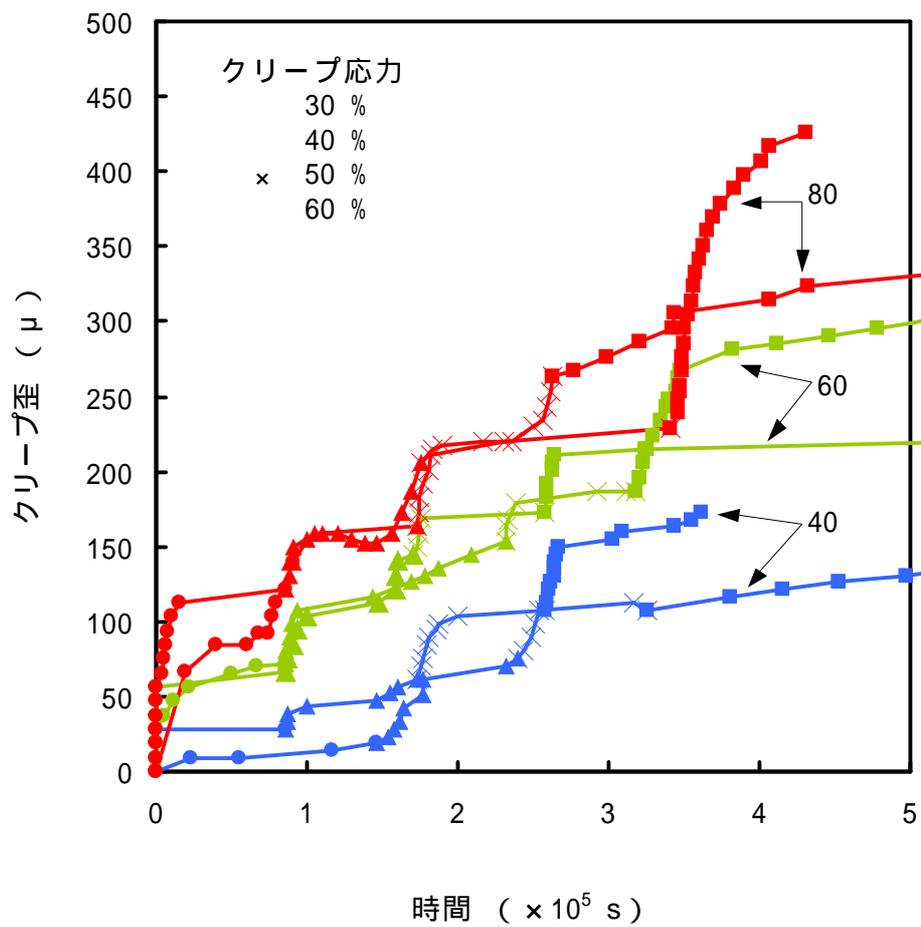


図 3 - 10 クリープ歪の経時変化のまとめ

4. 結晶質岩の低応力下でのクリープ試験

長年にわたってクリープ試験を行ってきたが、その難しさをより痛切に感じるようになってきた。ごく短時間の試験であれば、荷重装置や計測装置の選定は比較的簡単であるが、10年程度の連続試験を前提とすると、どのような試験装置あるいは試験システムが良いかに関して明確な解答は出ていない現状である。本章では、これまでの経験をもとに、第3章で使用した油圧式クリープ試験機（1連式）と4連式油圧クリープ試験機に関して、これまでの経験でわかっていることをまとめてみる。

4.1 油圧クリープ試験機

2001年度まで使用していたクリープ試験装置の概略を図4-1に示す。また、圧力調整弁付き油圧源（東衡テスタック製）および圧力調整器を図4-2、4-3に示す。これらからわかるように、油圧は油圧源からホースを介して載荷装置へと導かれる。油圧源内にチャッキバルブがもうけられているので、一旦圧力源からでた油は逆流することはない。載荷装置における油圧の制御は、油圧源のON/OFFで行った。短時間の試験ならば、サーボ制御式の方が有利であるが、数年にわたる連続試験では事実上サーボ機構は使用できないと考えたからである。クリープ試験がはじまり、試験片の変位速度が極めて小さくなると、油圧源が駆動されるのは1日に2~3度であり、運転時間は合わせて数分と言える。この程度の運転時間ならば長期間にわたって使用し続けることが可能と言える。図4-3に示した圧力調整器で圧力を表示し、圧力の下限で圧力源のモータをON、圧力の上限でOFFするわけであるが、結果的にこのようなシステムは十分な耐久性を持つことがわかった。なお、この圧力調整器は同一の仕様ではもっとも高価なものを購入したと記憶している。旧油圧源およびアキュムレータに関する詳細は大久保（1996）を、新油圧源およびアキュムレータに関する詳細は大久保（2002）を参照されたい。

旧圧力源は20年以上に亘り細かい改良を断続的に行い使用し続けたが、経年変化により油漏れが多くなったため2001年度に新油圧源に更新した（図4-8）。これに伴いアキュムレータも図4-4に示す旧来のものから図4-10に示す新しいものに交換した。旧圧力源はシステムとしては良好であったので、新油圧源もシステムとしては大差ないものとした。また、技術的な進歩をある程度調査してみたところ、基本的な油圧に関する技術はここ20~30年の間、特段の進歩はしていないと思われた。むしろ、油圧機器の仕上げ/組み立ての最終段階で必要な熟練技術者が、最近になって減った印象を受けた。進歩/変化があったのはデジタル指示計であり、他の電子機器と同様に小型化がはかられた。ただし、精度においては格段の進歩があったとは思われなかった。新油圧源において、常識的ではあるが、次のような点に注意した。大きな機械式（ブルドン管式）圧力計を2個もうけた。大型機械式圧力計は高価であり、最近の油圧機器ではあまり採用されないが、信頼性が高いことからあえて設置した。耐久性のある大きめのスイッチを採用した。新油圧源は、現在のところ順調に稼動しており特に問題ないと言える。

2003年度まで使用していた旧載荷装置（図4-5）を、2004年度に新載荷装置に更新した（図4-12）。これにより変位計測はダブルカンチレバー方式（クリップ型）変位計（図4-6）からカンチレバー型変位計（図4-13）に変更した。試験容器（図4-16）および温度制御システムは従来のも

のを使用している．図 4 - 17 に温度制御システムの概略図，図 4 - 18 に温度調節計の写真を示す．

旧載荷装置は当時の職人の腕の良さを示すような良い機械であったと認識している．30 年近く使用した結果，シリンダとピストン間の摩擦抵抗が増大したので，残念ながら更新することにした．摩擦抵抗が増大したのは，経年変化というよりは，複数の試験者が使用してきたので，時として適切な操作がなされなかったためと推測している．また，この装置を製作したメーカーが，往時の技術的レベルを保っていればオーバーホールで済んだ可能性が高い．残念ながら，修理・補正をしながら使用し続けるという技術が，少なくとも関東圏からは失われつつあると感じた．

新載荷装置の載荷部における荷重を測定した結果を示す．荷重は載荷装置プラテンと台の間に設置した荷重計で計測した．

測定は次の手順で行った．

- 1) アキュムレータのニードルストップ弁を開けた状態で，油圧源から油を送る（予圧を加える）．
- 2) 荷重が少し上昇したら，アキュムレータのニードルストップ弁を締める．
- 3) アキュムレータの油圧が所定の値になるまで油圧源を運転する．
- 4) アキュムレータのニードルストップ弁を開放し，載荷装置に油を送り荷重をかける．

予圧を加えるのは，載荷装置プラテンと荷重計との隙間をなくしておくためである．実際の試験では，載荷装置のプラテンと試験片端面の隙間をなくしておくことに相当する．予圧 0.1 MPa での荷重の立ち上がりを図 4 - 19 に示す．これからわかるように，予圧 0.1 MPa ではプラテンと荷重計とのあたりが十分でなく，階段状の荷重変化となってしまう．そこで，予圧 0.5 MPa かけた場合の荷重の立ち上がりを図 4 - 20 に示す．載荷後約 0.5 秒後には荷重が安定し，さらに，階段状の荷重上昇停止区域が無くなっていることが分かる．さらに，予圧を 1.0 MPa とした時の荷重の立ち上がりを図 4 - 21 に示すが，予圧 0.5 MPa の時と比較してさほど改善されているとは思えない．以上のことから，実験開始前に，予圧 0.5 MPa 以上を加えておくことにしたが，荷重の立ち上がりは必ずしもはやいとは言い難く，シリンダとピストン間の摩擦の低減をはかる必要があるかもしれない．この点は検討事項として残った．

カンチレバー型変位計（図 4 - 13）は長年にわたって別の試験で使用してきており，その長期耐久性はほぼ実証されていると言えよう．ただし，長期間にわたる原点のドリフトは個体差があるので事前によりものを選別しておくことが必要である．また，変位と出力の線形性も図 4 - 22 に示すように良好である．なお，図中の上りはカンチレバーを曲げる方向，下りは曲げを戻す方向である．

4.2 4 連式油圧クリープ試験機

4.1 で述べた通常のクリープ試験機では，1 台で試験片 1 個のクリープ試験しか行えない．そこで 4 個の試験片を用いて同時にクリープ試験を行える 4 連式油圧クリープ試験機の開発をここ数年にわたって継続的に行ってきた．

4 連式クリープ試験機の概略図を図 4 - 23 に示す．油圧ポンプは 0.55 kW の交流モータによって駆動される．油はアキュムレータに導かれた後，分岐してピストンに達する．図 4 - 23 のバルブ 1 およびバルブ 2 は試験中は全開にしてあり，バルブ 4 を開放することで試験が開始される．バルブ 3 の閉閉具合により，載荷開始からクリープ荷重に達するまでの時間が変化する．試験開始から 10 秒以内にクリープ荷重に達するようにバルブ 3 を適宜調整した．また，この油圧系は圧力，すなわち

クリープ荷重をほぼ一定に保つように設計されている。すなわち、歪ゲージ式圧力変換器によって測定された圧力は、リレー出力付きのアンプに導かれ、油圧駆動用のモータを ON/OFF する。試験前に油圧の上限値と下限値を設定しておく、回路内の油圧が下限値よりも低下するとモータが動き始め、上限値を越えると止まる機構となっている。ラムからの油の漏れは微小であり、アキュムレータに蓄えられた油にて、かなりの時間、圧力を保持することが可能である。試行錯誤の結果、油圧の上限値と下限値との差を 0.02 MPa、クリープ応力に換算して 0.9 MPa とし、約 30 分で油圧が低下し 40 秒程度でもとに戻るようバルブ 3 を調整することが適切なことがわかった。このように設定した場合には、1 時間に 2 度、合計 80 秒程度モータを動かすことで、クリープ応力の変動を ± 0.45 MPa 以内に抑えることができる。このような機構により、モータを常に動かし続けることによる機器の損耗を防ぐとともに、万が一停電があっても、短時間であれば試験が継続できる。

この試験機ではピストンとシリンダの径の差を数 μm として油の漏れを極めて小さくすることで、シールを使用しない設計とした。その結果、摩擦力は十分小さくでき、荷重変換器とそれに対応するアンプを減らすことができた。比較的長期にわたる試験では計測器を減らすことは、測定精度を高める上で重要であると考えている。

変位の測定には 1 対のカンチレバー式変位計を用いた。変位計先端の端子には摩擦の影響が小さいルビー製のものを用いた。これも試行錯誤の後にたどり着いた結論である。変位計の出力はアンプ、そして、デジタルマルチメータに送られ、測定結果はパソコンに保存される。試験前にキャリブレーションを用いて、計測システムの安定性を調べたところ、1 週間でのドリフトは計測器の分解能、つまり、歪の分解能（約 10×10^{-6} ）以下であった。

常温下、気乾状態および湿潤状態で試験を行った。湿潤状態での試験は、図 4-23 のように試験片を水没させた状態で行った。試験ではまず、バルブ 4 を閉じた状態で油圧ポンプを起動し、回路内を設定圧力にした。試験片をセットし、手動ポンプにより、載荷シリンダに圧力をわずかに与え、変位の 0 点を決定した。手動ポンプの回路を遮断した後、バルブ 4 を開放し、試験を開始した。

試料岩石として茨城県笠間市産の稲田花崗岩を用いた実験例を以下で示すことにする。一軸圧縮強度とヤング率を表 4-2 に示すが、両者とも気乾状態よりも湿潤状態の方が数%小さかった。花崗岩には、互いに直交する割れやすい 3 面（rift 面、grain 面、hardway 面）が存在するが、今回は hardway 面に対して垂直にコアを抜き取った。試験片は直径 20 mm、高さ 40 mm の円柱形とし、端面の平行度は 1/100 mm 以内に仕上げた。整形した試験片は 2 週間以上、温度 20 ± 5 、湿度 $65 \pm 15\%$ に保たれた試験室内に放置し、自然乾燥させた。湿潤状態で用いる試験片については、その後、デシケータに入れ、真空ポンプで 1 日以上デシケータ内部および岩石の空隙中の空気を除去した。ポンプを作動させたまま水を加え、1 日程度保持した後ポンプを止め、1 日以上放置してから試験に供した。なお、水は試験中も一貫して、1 週間程度自然状態で放置し pH が安定したイオン交換水を用いた。

気乾状態でのクリープ歪の経時変化を図 4-24 に示す。図では、クリープ歪が時間の対数に対して、上に凸の曲線を描きながら増加する試験片（図 4-24(a)）、ほぼ直線的に増加する試験片（図 4-24(b)）、下に凸の曲線を描きながら増加する試験片（図 4-24(c)）の 3 種類に分けて示した。グラフが上に凸の試験片（図 4-24(a)）は 3 本あり、いずれの試験片でも試験開始後約 10^3 秒間で $30 \sim 50 \times 10^{-6}$ 程度の歪の増加がみられた。しかし、その後の変化は小さく、クリープ歪は収束しているように見える。グラフがほぼ直線的な試験片（図 4-24(b)）は 2 本あった。2 本の試験片の歪の

増加傾向は定性的には似ており、グラフが若干波うちながら歪が増加している。これらの試験片は、図 4 - 24(c) に示した、グラフが下に凸の試験片と同様に、試験開始後約 10^6 秒が経過しても、クリープ歪の収束はみられない。気乾状態ではいずれの試験片でも、試験開始後約 10^6 秒間で $30 \sim 100 \times 10^{-6}$ のクリープ歪が生じていた。

図 4 - 25 には湿潤状態で行ったクリープ試験結果を示す。湿潤状態でも、横軸を時間の対数としたときのクリープ歪曲線が、上に凸(図 4 - 25(a))、ほぼ直線(図 4 - 25(b))、下に凸(図 4 - 25(c)) の 3 種類に分けられた。グラフが上に凸の試験片は 6 本あり、いずれの試験片でも試験開始後数百秒間での歪の増加量が大い。その後の変化は小さく、6 本中 4 本では歪の増加が収束しているように見える。しかし、残りの 2 本では約 10^6 秒経過後も歪の増加がみられる。グラフが直線的な試験片は 3 本あった。そのうち 2 本は、図 4 - 25(b) で示した試験片と定性的に似た傾向を示しており、グラフが波うちながら歪が増加している。グラフが下に凸の試験片は 4 本あった。約 10^6 秒経過後のクリープ歪は $60 \sim 140 \times 10^{-6}$ であるが、歪の増加が収束に向かう気配はなく、今後変形が進行すると推測される。湿潤状態ではいずれの試験片でも、試験開始後約 10^6 秒間で $40 \sim 160 \times 10^{-6}$ のクリープ歪が生じており、気乾状態よりも若干変形が大きかった。カナダ産の Lac du Bonnet 花崗岩では、気乾状態よりも湿潤状態の方がクリープ変形が生じやすいという研究結果が発表されているが (Lajtai et al., 1987)、今回用いた稲田花崗岩でも同様の傾向があると思われる。

4 連式クリープ試験機は、当初考えていたより、はるかに難しいものであった。アンプ同士の干渉やシリンダ同士の干渉が長期試験の場合にはどうしても生じる可能性が高い。かなりの時間を費やして検討を重ねてきたが、必ずしも満足な結果が得られたとは考えていない。今回の 4 連式クリープ試験機的设计においては、載荷装置をまとめてしまったが、油圧源だけは 1 個として載荷装置は 1 連ずつ別個とする方が賢明かもしれない。この点が検討事項として残った。

4.3 まとめ

これまでに使用しながら改良を少しずつ加えてきた 1 連式クリープ試験機と 4 連式クリープ試験機について総まとめをしてみた。両者ともまずまずの性能を有していると言えるが、必ずしも 100% 満足できる結果が得られたとは考えていない。その原因はいくつかあると思うが、熟練した職人の数がここ 20~30 年で激減したため、試験機細部の仕上げが今ひとつであることが一因として挙げられる。この傾向は、今後ますます進むと思われるので、やや危機感を感じた次第である。

センサー類に関しては進歩もみられないが退歩もしていないように感じた。アンプは小型化が進み安価になったと思うが、安定性などについては特段の進歩は感じなかった。データの収録と整理に関しては、クリープ試験をはじめた 30 年前と比較すると、格段に楽になった。この点だけは、技術の進歩の恩恵を受けたと言えよう。

クリープ試験はみかけより難しい試験であり、今後もわずかず検討を加え、少しでもよいものにしていく考えである。

表 4 - 1 新載荷装置仕様

ブルドン管圧力計 長野計器	
型番	GA21-243
大きさ	150
形状	立型 B枠
接続ネジ	G1/2B
圧力レンジ	0~25 MPa
精度	±0.5 %F.S.
使用温度範囲	-5~+45
指針	ヒネリ指針

変位計 東京測器研究所	
型名	CE-2
容量	2 mm
定格出力	2.5 mV/V (5000 × 10 ⁻⁶ ひずみ)
感度	2500 (× 10 ⁻⁶ ひずみ/mm)
非直線性	1 %R0
測定力	7.1 N (720gf)
応答周波数	110 Hz
許容温度範囲	0~ +40
入出力抵抗	350
推奨印加電圧	2 V以下
許容印加電圧	10 V
入出力ケーブル	0.3 mm ³ , 5 m

表 4 - 2 稲田花崗岩の物性値

	一軸圧縮強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)
気乾状態	204	39.6
湿潤状態	190	38.7

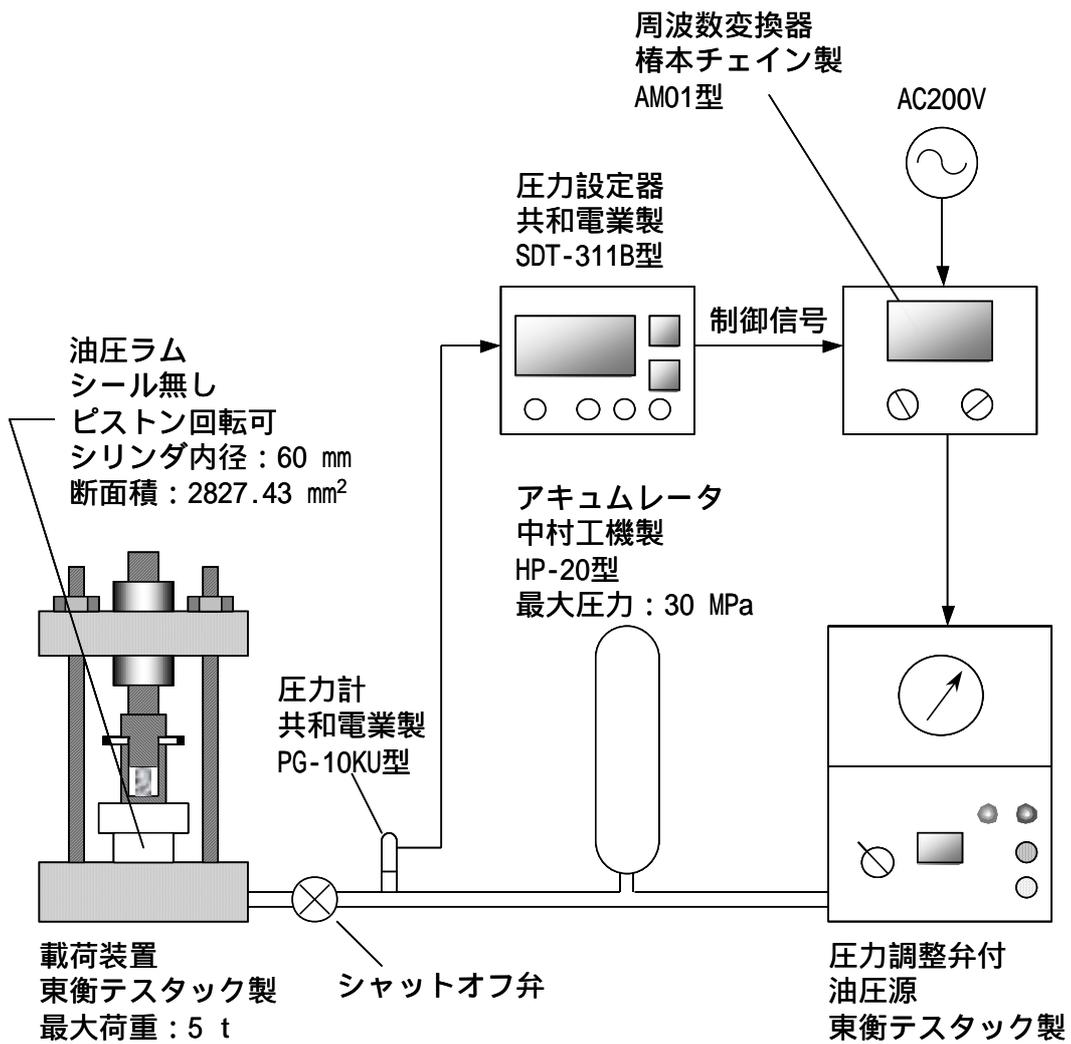


図 4 - 1 旧クリープ試験装置の概略図



图 4 - 2 旧油压源



图 4 - 3 旧压力调整器



図 4 - 4 旧アキュムレータ



図 4 - 5 旧载荷装置



図 4 - 6 旧変位計

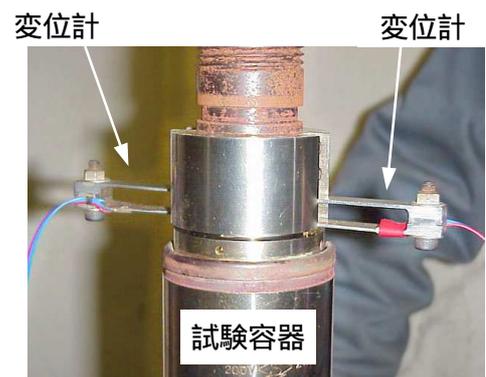


図 4 - 7 旧変位測定部

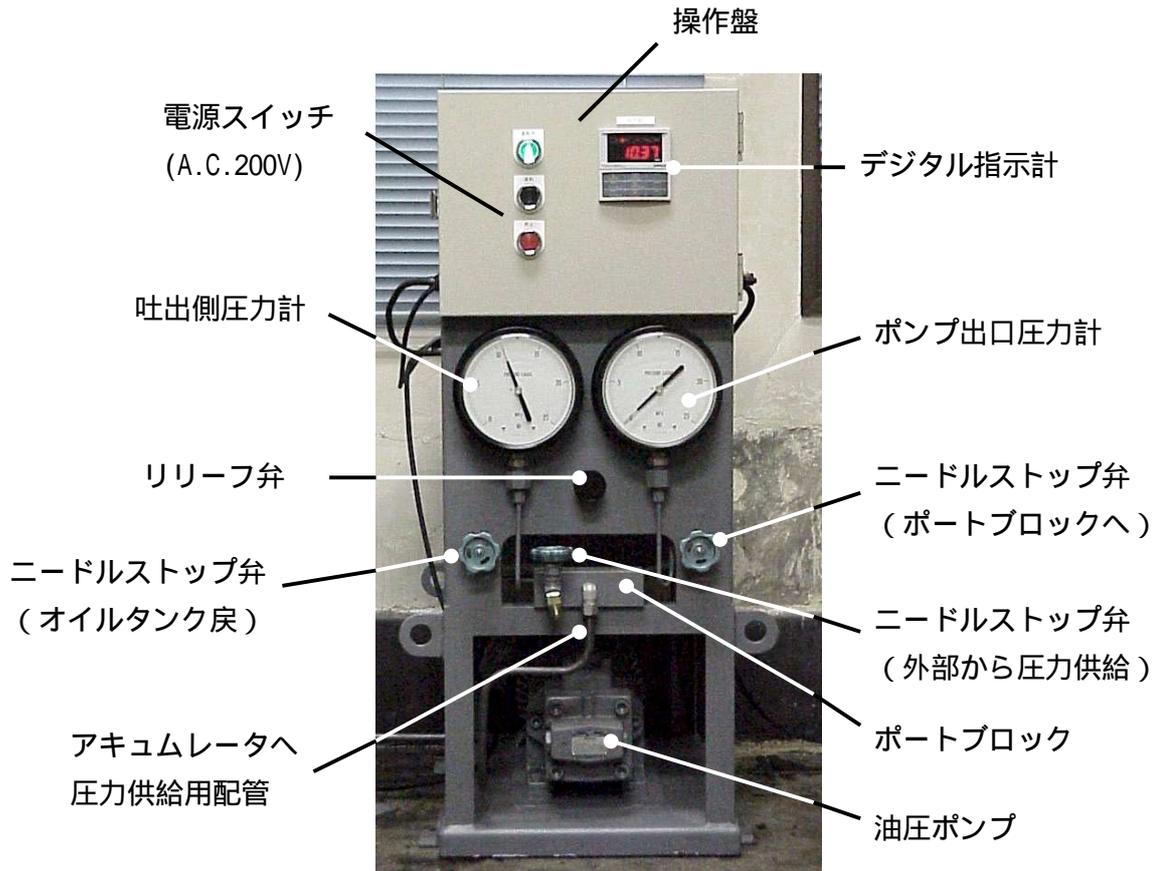


図 4 - 8 新油圧源 (正面)

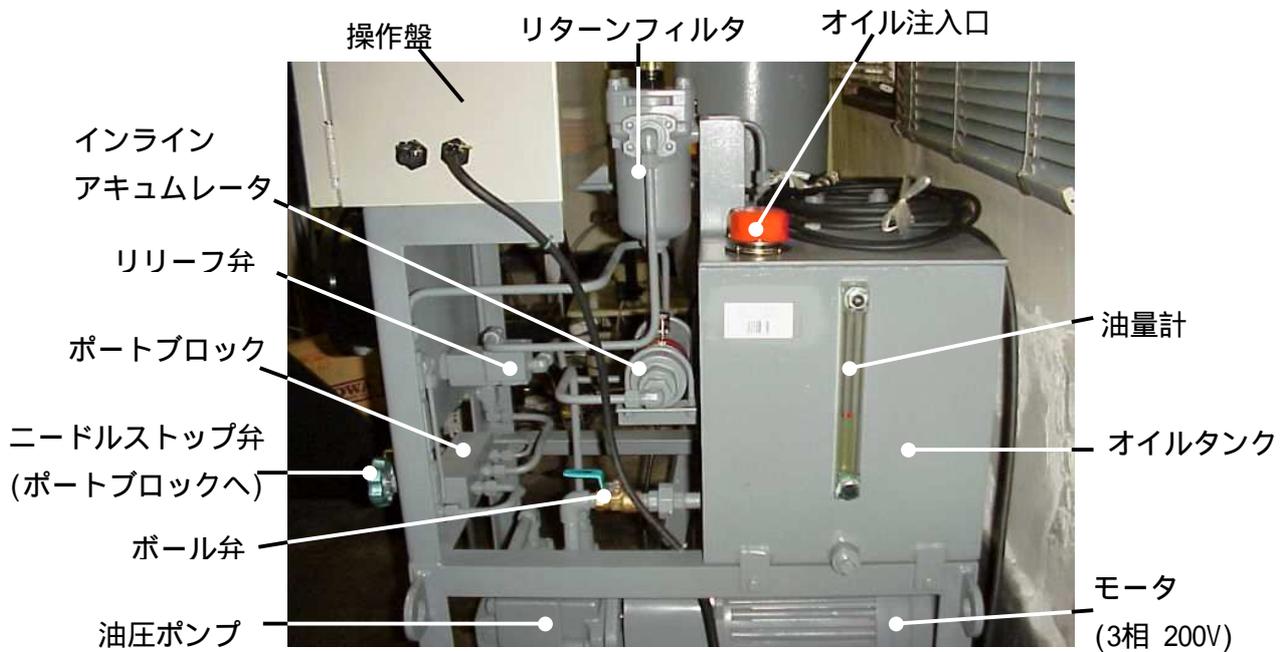
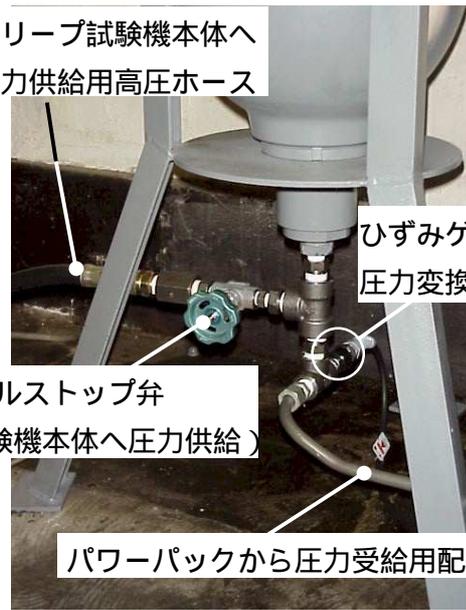


図 4 - 9 新油圧源 (側面)



図 4 - 10 新アキュムレータ

クリープ試験機本体へ
圧力供給用高圧ホース



ひずみゲージ式
圧力変換器

ニードルストップ弁
(クリープ試験機本体へ圧力供給)

パワーパックから圧力受給用配管

図 4 - 11 新アキュムレータ下部



図 4 - 12 新載荷装置



図 4 - 13 カンチレバー型新変位計
東京測器研究所 CE-2 容量 2 mm

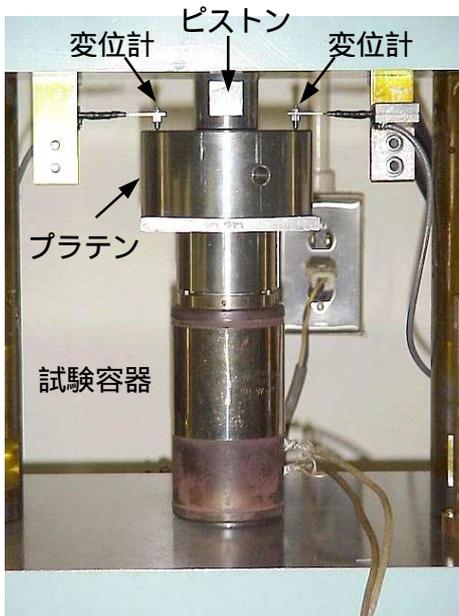


図 4 - 14 変位測定部



図 4 - 15 変位計接触部

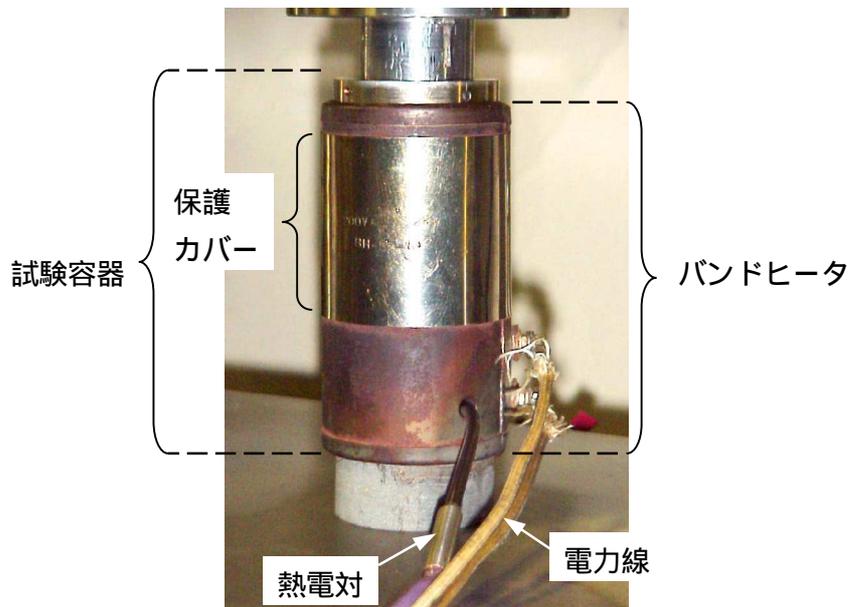


図 4 - 16 試験容器

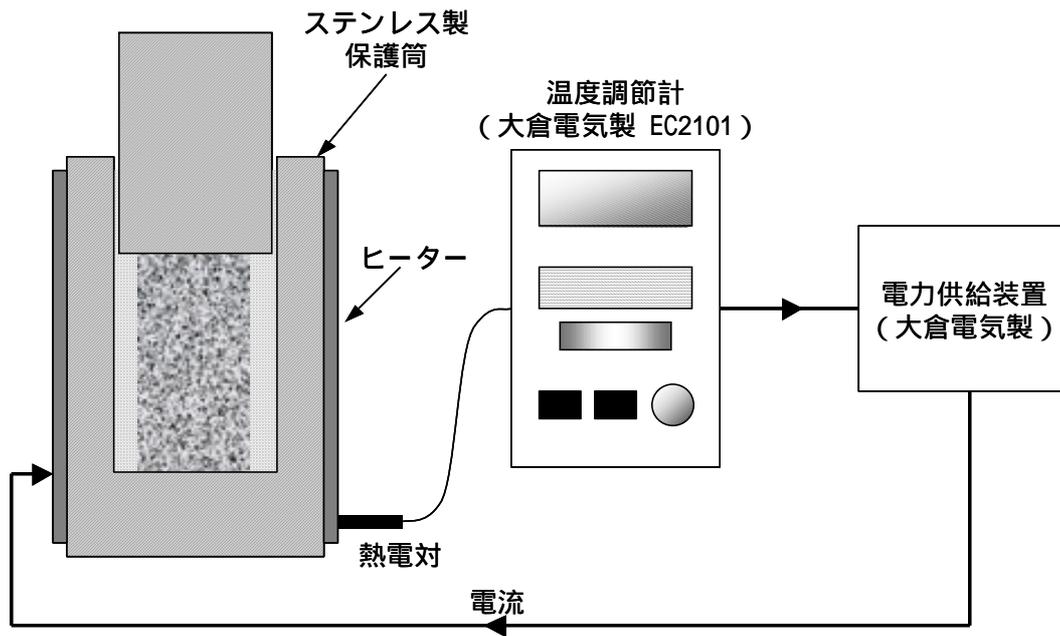


図 4 - 17 温度制御システムの概略図



図 4 - 18 温度調節計

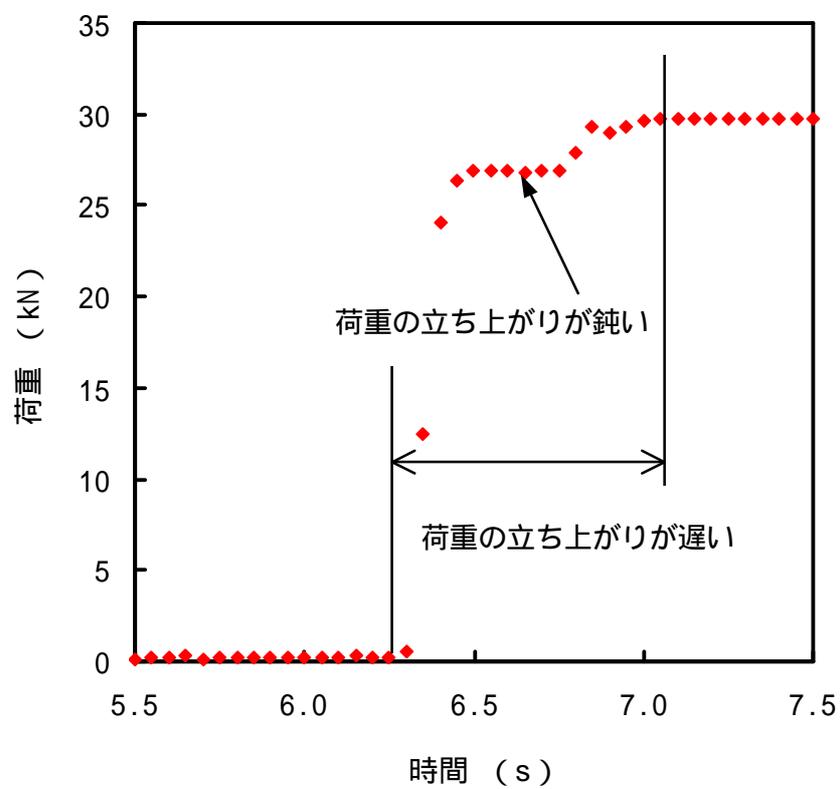


図 4 - 19 载荷部測定荷重
 実験開始前に試験片に加えた油圧源応力 約 0.1 MPa

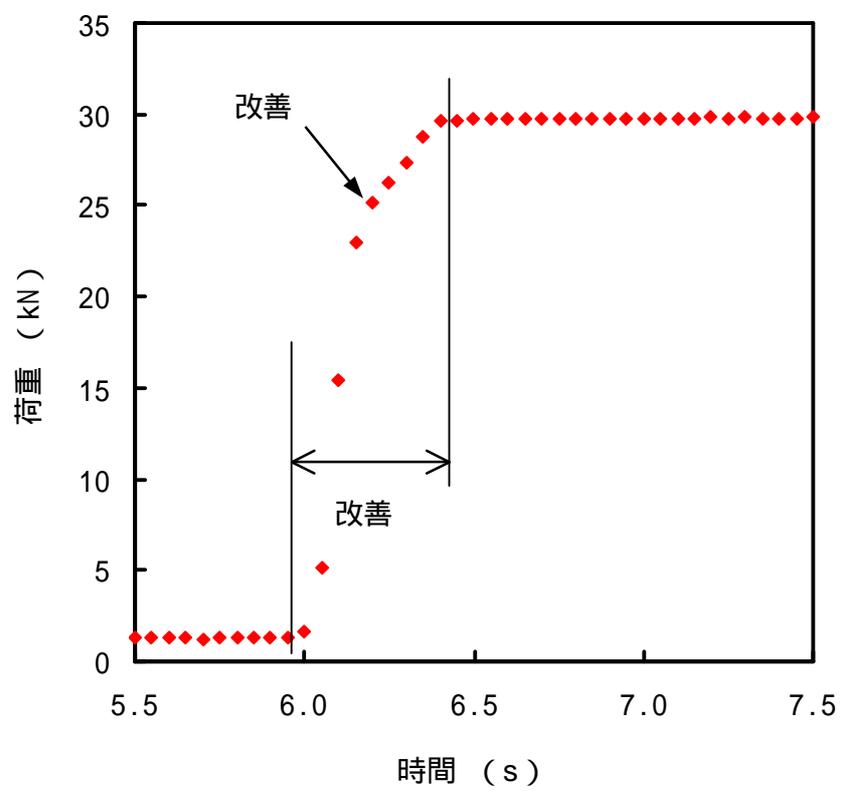


図 4 - 20 载荷部測定荷重
 実験開始前に試験片に加えた油圧源応力 約 0.5 MPa

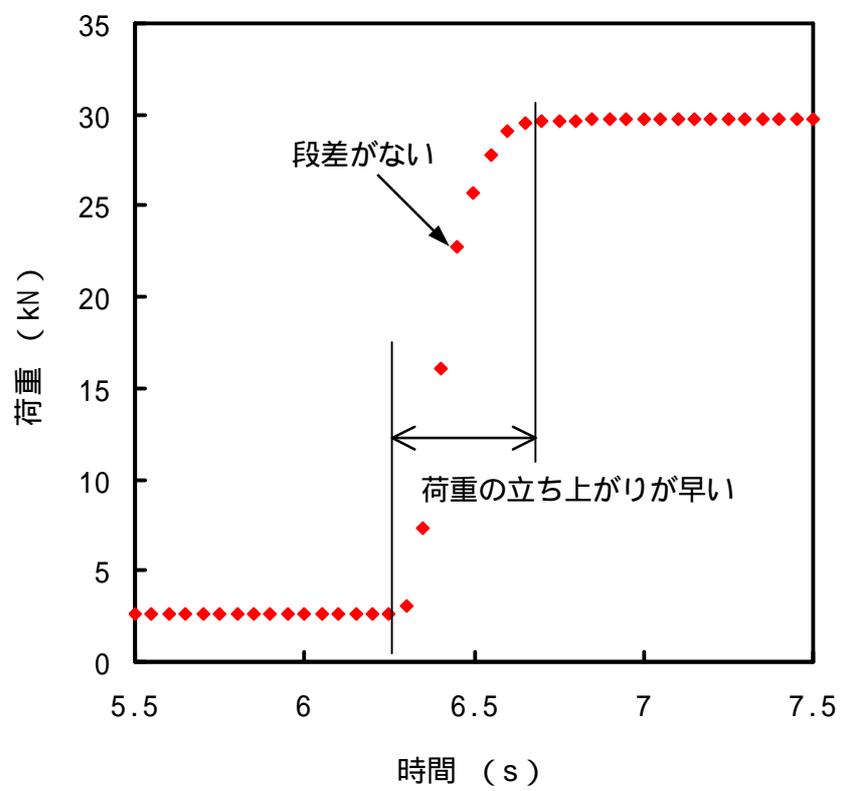


図 4 - 21 载荷部測定荷重
 実験開始前に試験片に加えた油圧源応力 約 1 MPa

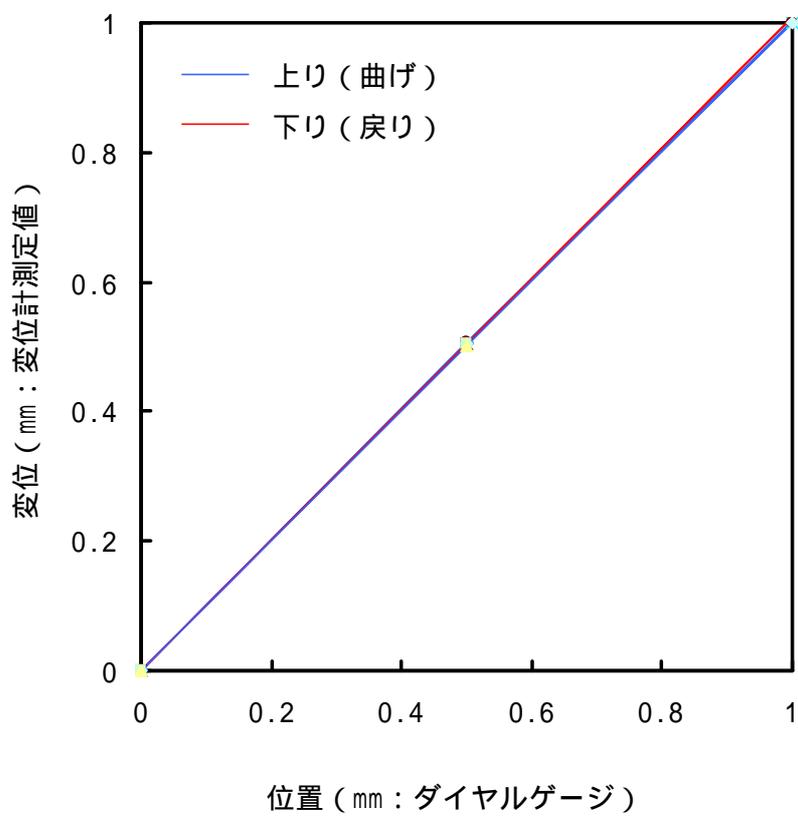
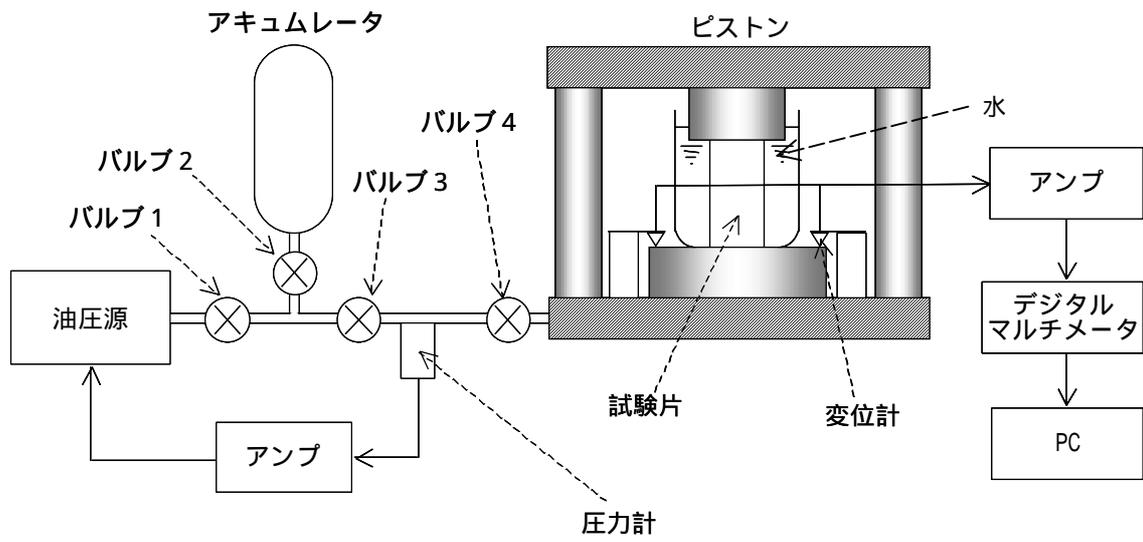
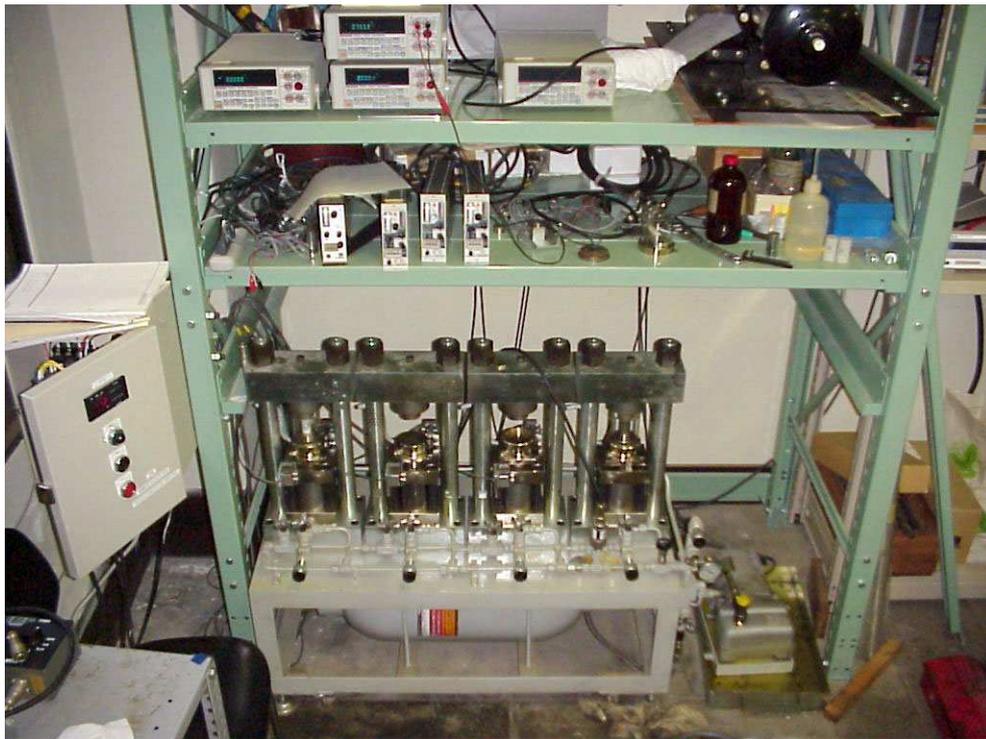


図 4 - 22 変位計計測結果

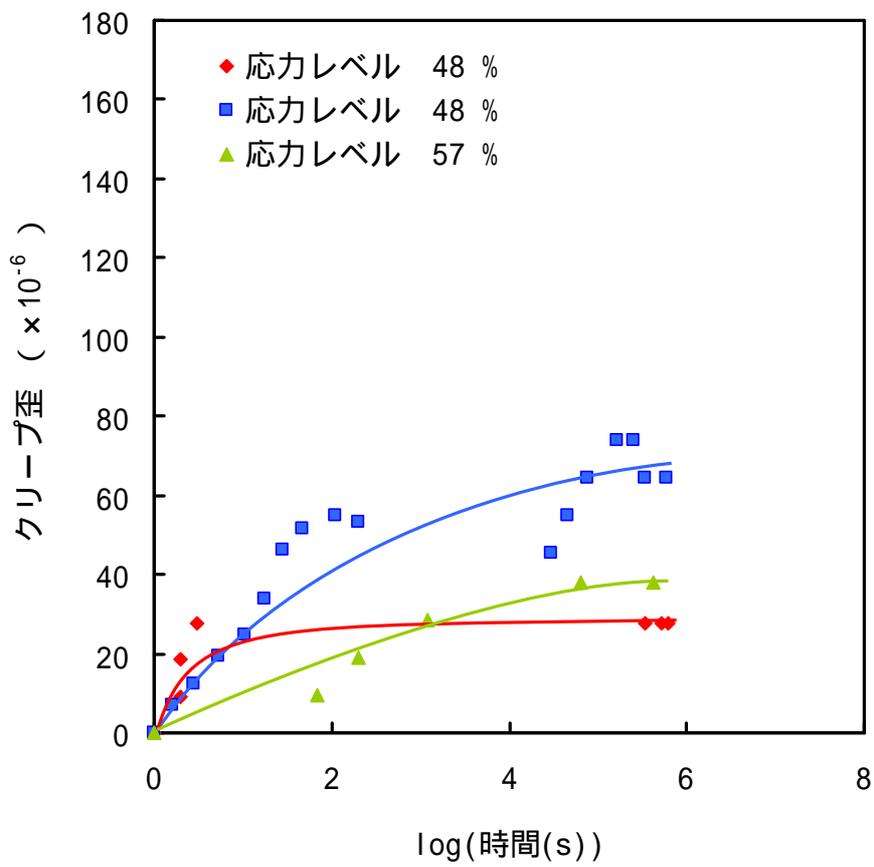


(a) 概略図



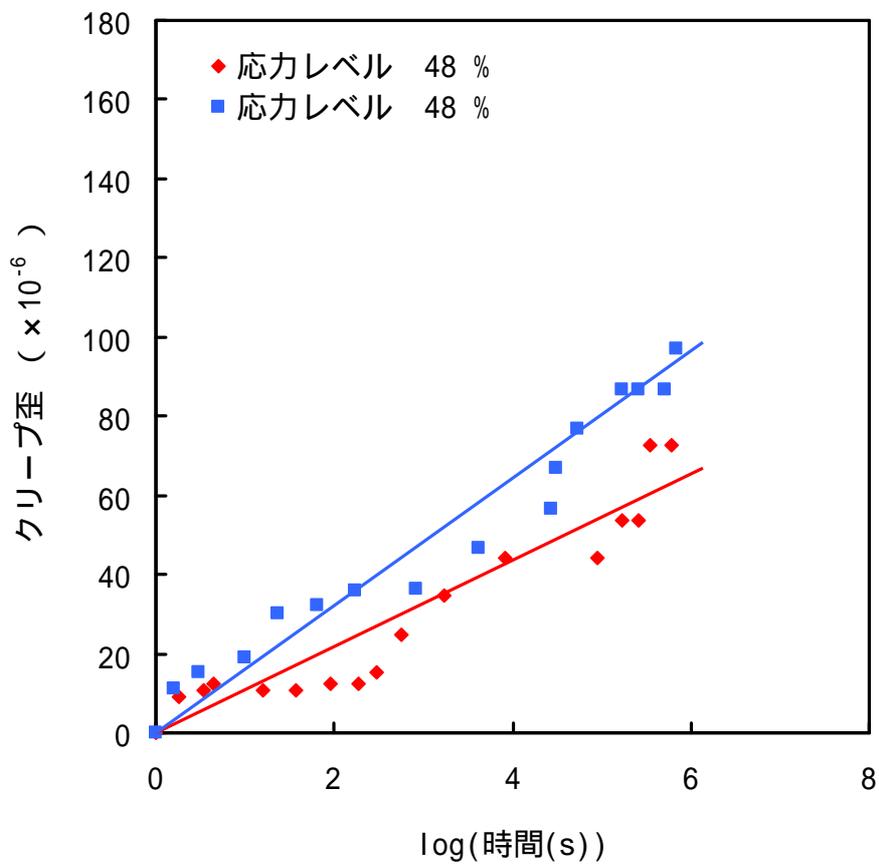
(b) 外観写真

図 4 - 23 油圧式クリープ試験機の概略図



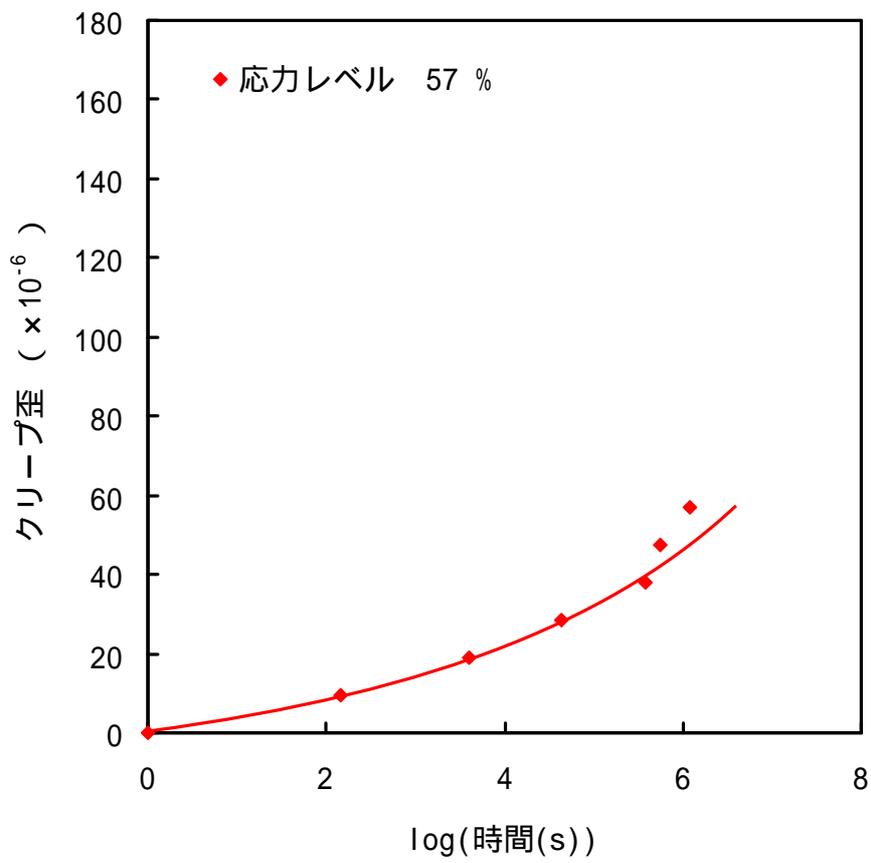
(a) 上に凸

図 4 - 24 クリープ歪の経時変化 (気乾状態)



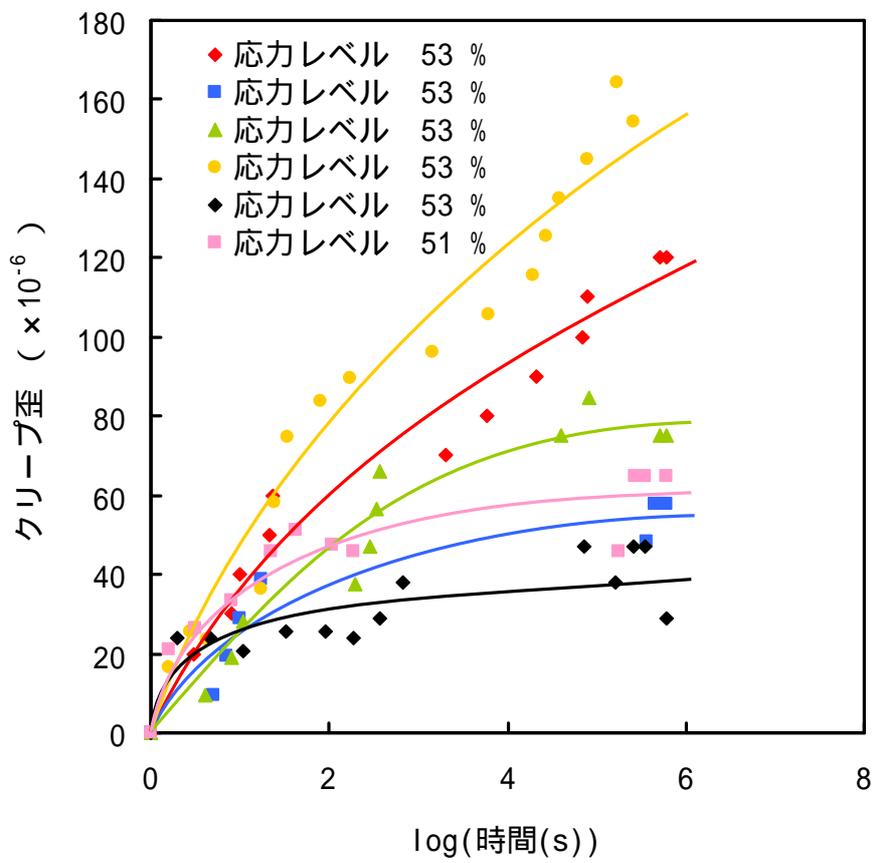
(b) ほぼ直線

図 4 - 24 クリープ歪の経時変化 (気乾状態)



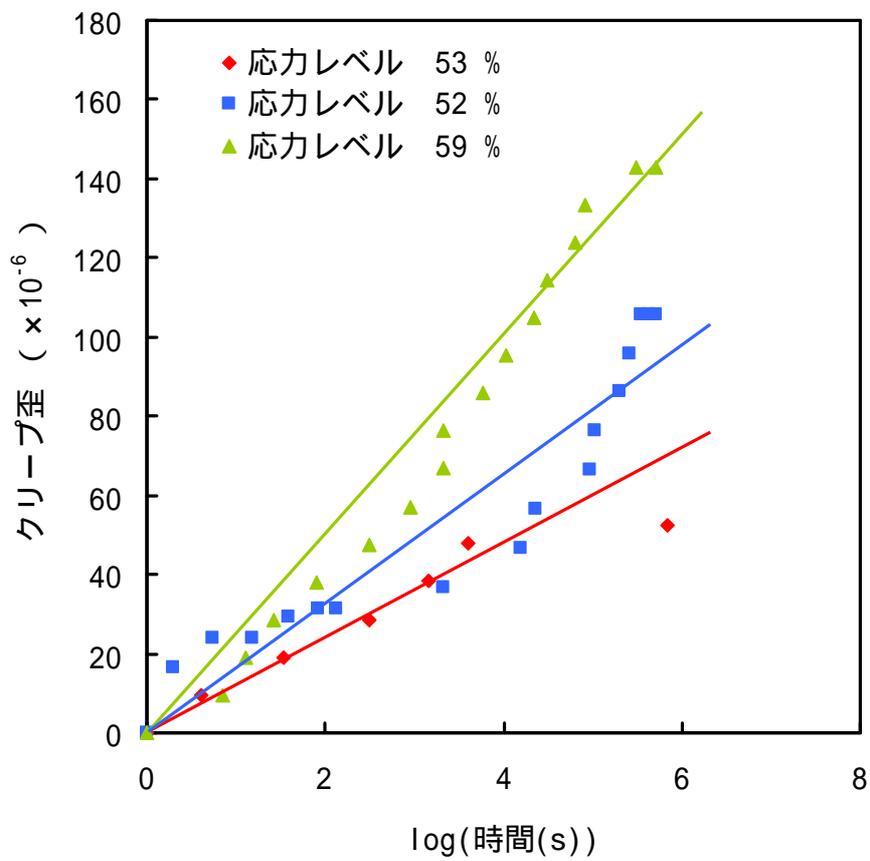
(c) 下に凸

図 4 - 24 クリープ歪の経時変化 (気乾状態)



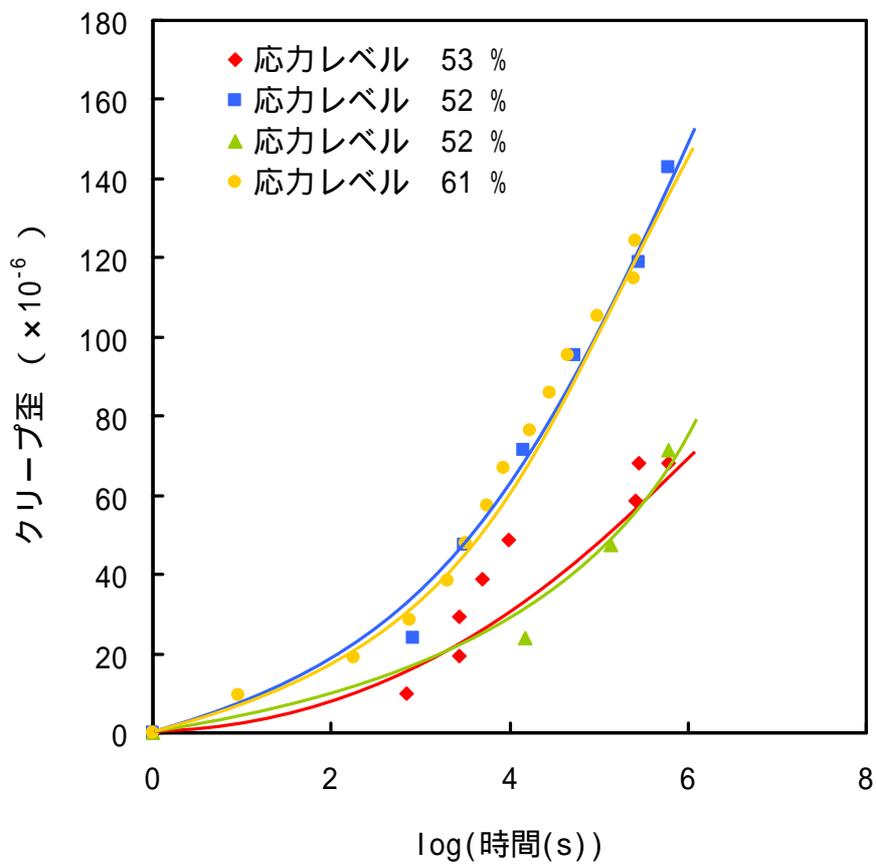
(a) 上に凸

図 4 - 25 クリープ歪の経時変化 (湿潤状態)



(b) ほぼ直線

図 4 - 25 クリープ歪の経時変化 (湿潤状態)



(c) 下に凸

図 4 - 25 クリープ歪の経時変化 (湿潤状態)

5 . 時間依存性挙動のメカニズムの解明に向けた研究

5 . 1 はじめに

強度や寿命のばらつきは、構造物の信頼性を議論する際に重要であり、そのような視点からの研究が主として行われてきた。本研究では、このばらつき方が、試験条件・環境条件により変化することを利用して時間依存性挙動のメカニズムに迫ることを試みた。ばらつきと時間依存性のメカニズムの間には、関係がなさそうに思われるので、ほとんど議論されてこなかったが、本研究では新たな試みとして、両者の関係を検討した。

強度や寿命のばらつきは重要で、古くから多くの研究がなされてきた。例えば、平田・寺尾(1952)は主としてガラスを対象とした先駆的な研究を行い、脆性材料を対象とした後進の研究に大きな影響を与えた。横堀(1978)は、主として金属材料を対象として、広範な実験的、理論的な研究を行った。特に確率過程論にもとづいた強度や寿命の研究は著名であり、鋼の疲労試験における寿命(繰り返し数)などを確率過程論で説明できるとした(横堀, 1974)。西松は岩石の強度や寿命のばらつきについて、極値統計学(山口・西松, 1991)と確率過程論(西松・山口, 1980)の両面から、長年にわたって研究を行い、岩石を対象としたこの方面の研究の基礎を築いた。その後の研究も合わせて考えると、岩石の一軸圧縮応力下での強度のばらつきについてはある程度の知見が蓄積されたと言えるが、強度とクリープ寿命のばらつきの関係、気乾状態と湿潤状態でのばらつきの関係、さらには一軸圧縮応力下と三軸圧縮応力下でのばらつきの関係については不明な点が多く残されている。

本研究では、まず、これまでに行った実験結果を再整理して、一軸圧縮応力下における強度とクリープ寿命のばらつきについて検討する。ついで気乾状態と湿潤状態での強度のばらつきについて調べる。さらにこれまでの知見が少ない、三軸圧縮強度のばらつきについては新たに実験を行い、重点をおいて検討する。

よく知られているように、強度や寿命のばらつきの扱いには、確定論(西松・山口, 1991)と確率過程論(横堀, 1974)によるものがある。確定論でばらつきを論ずる際の基礎データを得るには、多数の試験片が必要であり、今後も大幅に軽減される可能性は小さい。ただし、自動車の部品のように、十分な量のデータが無理なく得られる分野においては、確定論(統計的な処理)が向いているかもしれない。一方、確率過程論で必要なのは遷移確率だけであり、これによって強度の載荷速度依存性、クリープ寿命の応力依存性、強度と寿命のばらつき、さらには寸法効果を論ずることができる(横堀, 1974; 西松・山口, 1980)。この定数をもとめるには精密な実験が必要であるが、今後の実験技術と装置の進歩により、少数の試験片を用いて自動化できる可能性がある。このように考えると、確率過程論が今後より多用される可能性がある。指摘するまでもなく良く知られたことであるが、単位時間内における遷移の確率(遷移確率)を根本に据えているので、確率過程論は本質的に時間経過とともに現象を扱うことになり、さまざまな時間依存性挙動に対して適用できる。

本研究では、確定論と確率過程論の両者を念頭において議論する。実験結果の整理と理論的な検討結果を総合して、岩石のばらつきと時間依存性挙動の概要をあきらかにするとともに、実用上重要な、ばらつきを考慮した構成方程式中の定数の設定についても一定の方針を示すことを目的とする。

5.2 理論的な背景

用語と記号の説明を主たる目的として、確定論と確率過程論について述べる。ただし、両者の全般を網羅するのではなく、本研究で特に重点を置く構成方程式（確定論）と2状態1段ポアソン過程（確率過程論）に絞って述べることにする。

5.2.1 確定論（構成方程式の定数）

確定論では、個々の試験片の強度があらかじめばらついていると考えて、適当な分布（例えばワイブル分布や対数正規分布）を用いて検討することが多い。ここでは、試験片強度のばらつきを構成方程式中の定数にどのように反映させるかを考えてみる。構成方程式としては、大久保(1992)が提案したコンプライアンス可変型構成方程式を取り上げる。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = \alpha(\lambda^*)^m \sigma^n \quad (5-1)$$

λ^* は、その初期値 λ_1 (ヤング率の逆数) で無次元化した無次元化コンプライアンス ($= \lambda / \lambda_1$) である。 m は応力 - 歪曲線の形状を左右する定数で、この値がおおきいほど強度破壊点以降の応力低下が急激になる。 n は、破壊現象の応力依存性を左右する定数で、この値がおおきいほど非線形性が高くなる。定数 m と破壊現象の進む速度は比例するので、クリープ寿命は $1/\lambda$ に比例し、強度 σ_c は $(1/\lambda)^{1/(n+1)}$ に比例する(大久保, 1992)。強度の载荷速度依存性、クリープ寿命の応力依存性を含めて、表 5-1 にまとめて示す(大久保, 1992)。

構成方程式には、 m , n , C の3つの定数が含まれるし、他に試験条件の C も変動する可能性がある。そこでこれら変動したときの強度に及ぼす影響を調べてみた。定応力速度試験では、応力速度を $C = (d\lambda/dt)$ として、強度 σ_c は次式であらわされる。

$$\sigma_c = \left\{ \frac{(n+1)C}{(m-1)\alpha} \right\}^{\frac{1}{n+1}} \quad (5-2)$$

基準値を仮に $n=40$, $m=20$, $C=1$ MPa/s, $\lambda_1 = 1$ (MPa)⁻¹ s とした例を示すが、表 5-2(a) に示すように、 n が 35 から 45 と相当に変動しても強度の変化はわずかである。ほぼ同様なので数値例は示さなかったが、 m が変動しても強度の変化はわずかである。また、表 5-2(b) に示すように、応力速度 C が $\pm 5\%$ 変動したとしても、強度の変化は $\pm 0.12\%$ と小さい。基準値を変えて計算しても、 m , n , C が考えられる範囲で変動したときの強度の変化は高々 0.2% 程度であり、実際の試験における $4\sim 10\%$ 程度におよぶ強度のばらつきを説明できない。なお、定応力速度試験について検討したが、定歪速度試験についても同様の結論が得られる。

そこで、 $1/\lambda$ が形状母数 $b/(n+1)$ のワイブル分布に従ってばらつくことと仮定して議論を進めることにした。このように仮定すると、表 5-1 に示すようにクリープ寿命は形状母数 $b/(n+1)$ 、強度は形状母数 b のワイブル分布に従う。なお、 $1/\lambda$ の分布としては、正規分布や対数正規分布も考えられるが、扱い方や数値計算法に関して大きな違いはないことを断っておく。

5.2.2 確率過程論 (2状態1段ポアソン過程)

強度試験，クリーブ試験などにおいて，荷重の加わった試験片の内部では，微小亀裂の発生や伸展，さらには主亀裂への結合などが段階的に生じており，一般的には $i+1$ 状態 i 段階確率過程として扱うべきであろう．しかしながら，取り扱いが煩雑でかえって本質を見失うおそれがあるので，本研究ではもっとも簡単で解析的に扱える2状態1段階ポアソン過程についてのみ検討することにした．この2状態1段階ポアソン過程で，強度と寿命のばらつき，気乾状態と湿潤状態でのばらつきの比較，異なる岩種間でのばらつきの比較は可能と考える．

2状態1段階ポアソン過程について，次のように記号を定めて議論を進めることにする．

$p(t)$: 時刻 t までに破壊がおこらない確率 (残存確率)

$r(t)$: 遷移確率

$q(t)$: 頻度分布．破壊が t と $t+dt$ の間で発生する確率

$q'()$: 頻度分布．破壊が t と $t+d$ の間で発生する確率

クリーブ実験では $r(t)$ は一定とみなすと，寿命は次式のポアソン分布に従う(西松・山口,1980)．

$$q(t) = r \exp(-rt) \quad (5-3)$$

この場合には，縦軸を $p(t)$ の対数，横軸を t とした $p-t$ 線図は直線となる．また，簡単な計算より寿命の平均値は， $1/r$ であることがわかる(横堀,1974)．

強度試験では，応力の増加にともなって $r(t)$ が変化する．定応力速度試験では，応力速度を C として， $r(t) = Ct$ と書ける．ここで $r(t)$ を次のように置くことにする．

$$r(t) = r_0 \sigma^n = r_0 (Ct)^n \quad (5-4)$$

若干の計算の後に，強度は次式のワイブル分布に従うことがわかる(横堀,1974)．

$$q'(\sigma) = \frac{b \sigma^{b-1}}{a^b} \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma}{a} \right)^b \right\} \quad (5-5)$$

(5-5) 式中の尺度母数 a と形状母数 b は次のようになる．

$$a = \left\{ \frac{C(n+1)}{r_0} \right\}^{\frac{1}{n+1}}$$

$$b = n + 1$$

また，強度の載荷速度依存性，クリーブ寿命の応力依存性に関しては，表5-1に示すようになる(横堀,1974)．なお，確定論で導入したパラメータ n と確率論で導入した n は，両者とも強度の速度依存性やクリーブ寿命の応力依存性を等しく説明する共通のパラメータとなっており，以下で示すように，強度とクリーブ寿命からもとめられる n は多くの場合によく一致する．

5.3 一軸圧縮，一軸引張および圧裂引張試験結果

5.3.1 強度とクリープ寿命

強度のばらつきとクリープ寿命のばらつきについては，個々にはかなり研究されてきたが，強度と寿命の関連についての研究は少ない．西松・山口(1980)は一軸引張強度試験と一軸引張クリープ試験とで，破壊の確率過程に差異がないと仮定して，クリープ寿命のばらつきから一軸引張強度の変動係数を推定して，推定値と実験結果とはほぼ一致するとした．大久保・秋(1994)は，一軸圧縮強度とクリープ寿命のばらつきの間に，比較的簡単な関係のあることを確定論と実験にもとづいて指摘した．

表 5-3 に，山口(1980)，秋(1995)，大久保・秋(1993;1994)が行った一軸圧縮強度試験とクリープ試験を再整理した結果をまとめて示す．試験片はすべて直径 25 mm で高さ 50 mm の円柱形である． b は，ワイブル分布を仮定した時の強度に関する形状母数である．クリープ試験の場合には，クリープ寿命の形状母数 $b' = b/(n+1)$ をもとめ，これに $(n+1)$ を掛けて b を計算した．なお，形状母数のもとめ方には，ワイブル確率線図を描いてその傾きからもとめる方法と，変動係数から計算する方法とがある．前者は，実験を行った当事者が，データの取舍選択を行いながら整理を進める場合には適当と考えられる．本研究では，多くのデータを整理する必要があったので，客観性が高い後者を採用した．また，データ整理にあたっては，データの選別は一切行わず，すべてのデータを用いて計算した．

表 5-3 に示した一軸圧縮強度試験とクリープ試験からもとめた形状母数を，図 5-1 にそれぞれ横軸と縦軸にとって比較したが，多少のばらつきはあるものの大差はないと言える．この結論は，西松・山口(1980)や大久保・秋(1994)の主張を再確認したものである．

図 5-2 に形状母数 b と n を比較して示す．2 状態 1 段ポアソン過程では，表 5-1 からわかるように $b = n + 1$ となるはずであるが 図では実線 $b = n + 1$ を上限としてこれより下部にほとんどの点が存在する．すなわち，2 状態 1 段ポアソン過程で予測されるよりばらつきがおおきい場合がほとんどである．この図を見る限りでは，2 状態 1 段ポアソン過程で予測されるばらつきは，実際のばらつきの下限を与えようと言える．

5.3.2 気乾と湿潤状態での強度

表 5-4 に，秋(1995)と金(1993)が行った気乾状態と湿潤状態における引張試験結果を再整理して示す．なお，秋が使用した圧裂引張試験片は，すべて直径 25 mm で高さ 13 mm の円柱形である．金は A, B, C と 3 つの岩石ブロックから切り出した試験片を使用して圧裂引張試験を行ったが，岩石ブロック A と B から切り出した圧裂引張試験片は，秋と同寸法である．金 C(表 5-4 の Jin C)の圧裂引張試験片のみ直径 50 mm で高さ 25 mm である．また，金の一軸引張試験片は直径 25 mm で高さ 50 mm である．

図 5-3 に，表 5-3 に示した一軸圧縮強度試験と，表 5-4 に示した引張試験からもとめた形状母数を示すが，これからわかるように，圧縮試験結果については，気乾状態と湿潤状態の形状母数はか

なりよく一致する。引張試験結果についても、両者の形状母数はある程度一致していると言えよう。この結果は、従来の指摘(大久保・秋, 1994; 大久保・秋, 1995)を再確認したものと言える。

図 5-4 に気乾状態と湿潤状態の一軸圧縮強度試験(表 5-3)と一軸引張試験(表 5-4)からもとめた形状母数と n を示す。これからわかるように、湿潤状態の一軸圧縮強度試験からもとめた b は、実線 $b = n + 1$ の周辺に位置する。他方、気乾状態の一軸圧縮強度試験からもとめた b は、実線の下方に位置する。引張強度の場合も、湿潤状態の方が実線 $b = n + 1$ の近くに位置する。

確定論の立場にたった説明の一例は次のようになる。気乾状態でも湿潤状態でも強度のばらつきを決める主因は構成方程式中の n の分布である。この分布は気乾状態でも湿潤状態でも同じと仮定すると、湿潤状態の場合には n が小さくなるので図 5-4 のように、気乾状態が右側に、湿潤状態が左側に分布する結果となる。他方、確率過程論の立場にたてば、湿潤状態の試験においては、試験室の温度変化や湿度変化の影響を受け難いので実験誤差が小さくなる。湿潤状態での結果は、実験誤差の減少分だけ、2 状態 1 段階ポアソン過程から予測される直線 $b = n + 1$ に近づくことになる、と説明できる。

5.4 三軸圧縮試験結果

周圧の影響により強度のばらつきがどのように変化するかは、今後の深部開発にあたっては重要であるにもかかわらずほとんど知見がない現状である。

図 5-5 に、山口(1980)が三城目安山岩で行った気乾状態の三軸圧縮強度のワイブル確率線図を示す。試験片は全て直径 25 mm で高さ 50 mm の円柱形である。図 5-5 からわかるように、周圧の増加にともなって強度(尺度母数)は増すが、傾き(形状母数)はあまり変わらない。なお、§ 5.3.1 で述べたように、データ整理にあたっては、データの選別は一切行わず、すべてのデータを採用した。そのために強度が特別に低いデータまで入っている。このようなデータを除くべきかどうかについては異論のあるところと思う。図 5-6 には、横軸に周圧をとり、 b と n の変化を示す。これからわかるように、周圧の増加にともなって n は増加していくが、 b には一定の傾向を見出し難い。

図 5-7 に本研究で行った田下凝灰岩の結果を示す。試験片はすべて直径 25 mm、高さ 50mm の円柱形であり、整形後 2 週間以上、温度・湿度が管理された試験室内に放置し、自然乾燥させてから試験に供した。周圧ベッセルとして透明なアクリル樹脂製の可視化ベッセル(大久保ら, 2002)を用いた。軸方向の载荷には容量 500 kN のサーボ試験機を用い、周圧は最大圧力 35 MPa のサーボ式周圧発生装置で加えた。試験では周圧を設定値まで増加させた後、歪速度 10^{-5} /s で载荷を行った。試験中の周圧の変動は ± 0.02 MPa 以内であり、ほぼ一定とみなせる。ブロック 1 と 2 とで若干の差異が認められるものの、両者の単純平均をみると、尺度母数は周圧にともなって大きくなるが、形状母数はあまり変化しない。

図 5-8 に幌延泥岩の結果を示す。試料は深度 516.3~517.8 m の地点で採取されたものである。試験片はすべて直径 25 mm、高さ 50 mm の円柱形とし、整形後は乾燥を防ぐためラップで包み真空パック内で保存した。試験に供する直前にラップを取り外し、上下に鋼製円柱を密着させた後、全体を熱収縮性チューブで覆った。チューブと鋼製円柱との間に瞬間接着剤を流し込み 1 時間程度放置した後、試験に供した。ただし、一軸応力下では試験片と鋼製円柱をラップで包み、ベッセル内に油を入れずに試験を行った。排水状態で試験を行うため、試験片に密着させる鋼製円柱には、直径 3 mm、

深さ 11 mm の孔を 5 個設け、試験片からしみ出た水が溜まるようにした(羽柴ら,2003)。周圧ベッセルとして可視化ベッセルを用い、軸方向の载荷には容量 500 kN のサーボ試験機を、周圧の制御には最大圧力 35 MPa のサーボ式周圧発生装置を用いた。試験では周圧を設定値まで増加させた後、軸方向に载荷を行ったが、表 5-1 中の n をもとめるため、歪速度は $3 \times 10^{-6} / s$ と $30 \times 10^{-6} / s$ とで交互に変化させた(羽柴ら,2003)。試験中の周圧の変動はいずれの周圧でも ± 0.01 MPa 以内であった。

表 5-5 では強度の形状母数 b を示した。図 5-8 からわかるように、周圧の増加にともなって強度(差応力)と形状母数は大きくなり、この点で前に検討した三城目安山岩と田下凝灰岩とは傾向が異なる。

5.5 考察

5.5.1 周圧の影響

一軸圧縮応力下における強度やクリープ寿命のばらつきに関する研究はかなりなされてきたが、三軸圧縮応力下におけるばらつきの研究は少ない。しかし、地下の応力状態は三軸応力であり、三軸応力下でのばらつきの議論は重要と考えられる。

良く知られているように、Griffith はクラックが進展しはじめる条件について検討を加えた。これを引き継いで McClintock and Walsh(1962)や Walsh & Brace(1964)は、閉鎖したクラックの進展について議論した。その検討結果によれば、周圧 p での強度 C_M は次式となる。

$$C_M = C_0 + \frac{2\mu}{\sqrt{1+\mu^2} - \mu} p \quad (5-6)$$

ただし、 C_0 は一軸応力下での強度、 μ はクラック内面間の摩擦係数である。また、ここでいう強度(minimum value of the fracture stress)とは、亀裂が進展しはじめるときの応力であり、通常の物質では、これより若干高い応力になってはじめて試験片の破壊が生じる。しかしながら、(5-6)式は実験結果をかなり良く説明しているし(McClintock & Walsh,1962;Walsh & Brace,1964)、古くからしばしば使用されている直線包絡線説との整合性もよいので、以下で行うような定性的な検討には十分と考える。

単純に考えれば、三軸圧縮応力下での強度のばらつきは、

$$\begin{aligned} & (\text{右辺第 1 項のばらつき}) + (\text{右辺第 2 項のばらつき}) \\ & = (\text{一軸圧縮強度のばらつき}) + (\mu \text{ に起因するばらつき}) \times p \end{aligned} \quad (5-7)$$

となるはずである。もし、 μ に起因するばらつきが無視できるときには、標準偏差は周圧によらないことになり、変動係数は強度の増加に反比例して低下する。

今回の検討対象とした 4 岩石中の幌延泥岩では、周圧により顕著に変動係数が低下した。幌延泥岩は泥土が圧縮脱水しながら固化したものと類推され、図 5-9 に示す薄片の写真からわかるように、粒径の揃った微小粒子の集合体で、三城目安山岩と田下凝灰岩に比べ均質性が高い。これから考えて試験片内における μ のばらつきは比較的小さく、(5-7)式右辺第 2 項の μ に起因するばらつき

も小さい可能性がある。なお、三城目安山岩と田下凝灰岩の薄片の写真は既報(大久保ら, 2002)を参照されたい。

三城目安山岩と田下凝灰岩では、変動係数や形状母数 b は周圧により大きく変動することはなかった。 μ に起因するばらつきが比較のおおきいことが一因として考えられる。三城目安山岩は、空隙を多量に有する灰白色安山岩で、ガラス質の石基中に、紫蘇輝石、普通輝石、斜長石、磁鉄鉱の斑晶を含む(大久保ら, 2002)。また、田下凝灰岩は、空隙率が 20~30%程度の多孔質であり、溶結構造と思われる流理面が見られる。大谷石の下位の層準に位置する凝灰岩であるが、大谷石に比べて特に方解石が発達して硬くなっている部分がある(大久保ら, 2002)。以上からわかるように、幌延泥岩と比較して両岩石とも不均質といえ、摩擦係数 μ のばらつきもおおきい可能性がある。

参考までに、Weibull 分布を仮定して 3 岩石の実験結果から計算した C_0, μ および $\mu' = 2\mu / \{(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu\}$ の尺度母数と形状母数を表 5-6 に示す。幌延泥岩の μ の尺度母数は、0.8 であり、田下凝灰岩の 0.6 と三城目安山岩の 0.9 の中間となった。いずれの μ も岩石を互いに擦り合わせたときの摩擦係数より相当におおきいが、これは既に指摘されていることである(McClintock & Walsh, 1962)。また、幌延泥岩の μ の形状母数が 49.5 と大きく、ばらつきが小さいことが目立つ。三城目安山岩と田下凝灰岩の μ の形状母数はそれぞれ 17.0 と 16.3 であり、かなり似た値となった。

以上では、亀裂の大きさと同程度の寸法における摩擦係数のばらつきにおいて、幌延泥岩と他の 2 岩石では差があるのではないかとした説明をした。もう一つ考えられる説明は、破壊様式が幌延泥岩と他の 2 岩石とではやや異なることを根拠としたものである。幌延泥岩では、一軸圧縮応力下および三軸圧縮応力下における破面はかなり明瞭で、他の 2 岩石と比較して凹凸の少ないせん断面が形成される。この場合には、亀裂と同程度の局所的な摩擦係数のばらつきではなく、ある程度の大きさを持った面上の平均値がみかけの摩擦係数として破壊に関与してくると考えられる。良く知られているように、平均値のばらつきは個々の局所的なばらつきよりも小さいので、幌延泥岩では、三軸圧縮応力下での強度のばらつきが比較的小さかったと考えられる。

三軸圧縮応力下での強度のばらつきは、いずれにしろ摩擦係数のばらつきと関係が深いと考える。以上では 2 つの可能性を指摘しておいたが、第一は、亀裂長さと同程度の寸法で考えた微視的な摩擦係数のばらつきである。第二は、局所的ではなくかなりの範囲にわたる巨視的な摩擦係数のばらつきである。さらに、両者が、ともに関与し複合している可能性もある。

摩擦係数のばらつきの原因は大別して、岩石組織自体のばらつきと含有物・介在物のばらつきとに分けられると考えている。後者について述べると、例えば試験片内の水分の偏在などが候補としてあげられるので今後検討していくつもりである。

5.5.2 寸法効果

試験片で測定した強度を岩盤内構造物に応用するとき重要なのが、寸法による特性の変化で寸法効果と呼ばれている。寸法効果のうち、特に重要でこれまでに多くの研究がなされてきたのが寸法の増大による強度の低下であり、10 種類の岩石を用いた試験結果をまとめて次式が提案されている(Chuha, 1990)。

$$\text{(一軸圧縮強度)} \propto \left(\frac{1}{V}\right)^{0.06} \quad (5-8)$$

ここで V は試験片の体積である。

極値統計学では、個々の試験片の強度がワイブル分布に従う場合には、(強度の最小値) $1/($ 試験片個数) $)^{1/(b+1)}$ となる。構成方程式と極値統計学の融合に関して定説はないが、もし仮に、構成方程式中の σ が V に比例するとすれば、表 5-1 に示した次式が成り立つ(山口・西松, 1991)。

$$(\text{一軸圧縮強度}) \propto \left(\frac{1}{V}\right)^{\frac{1}{b+1}} \quad (5-9)$$

表 5-3 に示した一軸圧縮応力下での試験結果では、 b の範囲は 10~33 であり、(5-9) 式中のべき数 $1/(b+1)$ は 0.029~0.091 となる。また、 b の単純平均値は 22 であり、これに対応するべき数 $1/(b+1)$ は 0.043 となる。(5-8) 式で示された結果と比べると、若干の差はあるがほぼ妥当な結果が得られたと言える。今後の検討が必須であることは言うまでもないが、構成方程式を有限要素法プログラムに組み込んで数値計算を行う場合には、要素の体積に比例して σ を変えることも考えられる。

確率過程論でも、遷移確率 m が試験片体積 V に比例すると考えることが多い(横堀, 1974)。この考えを採用すれば、定応力速度試験で (5-4) 式が成り立つときには、次の関係が容易に証明できる(横堀, 1974)。

$$(\text{一軸圧縮強度}) \propto \left(\frac{1}{V}\right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (5-10)$$

表 5-3 に示した結果では、 n の範囲は 16~41 であり、(5-10) 式中のべき数 $1/(n+1)$ は 0.024~0.059 となる。また、 b の単純平均値は 30 であり、これに対応するべき数 $1/(n+1)$ は 0.029 となる。よって、確率過程論から予想される寸法効果は、実際の寸法効果よりやや小さいことになる。確率過程論が厳密に成り立つのは均質な岩石ブロックから切り出した試験片を使用した時であり、実際には、強度のばらつきの場合と同様に寸法効果の場合にも、確率過程論から導かれる寸法効果は下限を与える可能性がある。確率過程論の立場より説明すれば、本質的な強度のばらつきにもとづく強度低下は (5-10) 式であらわされるが、実際にはこれに加えて場所ごとの強度のばらつきにもとづく強度低下があり、加算した強度低下が実際にはあらわれることになる。

以上の議論でもっとも大きな仮定は、構成方程式の σ ないし遷移確率が対象とする物質の体積に比例するとしたことである。確率過程論では、1つの亀裂の遷移からマクロな破壊が発生すると考える。亀裂の数は体積に比例するので、遷移確率が体積に比例することになる。構成方程式における σ は、(5-2) 式からわかるように強度を決めるとともに、強度試験中の非弾性歪のおおきさも左右する。したがって、体積により σ を変える事は、非弾性歪の寸法効果を認めることになる。今回文献等を検索した限りでは、これの真偽を検証できる実験結果を見出せなかったため、今後の検討課題としたい。

5.6 まとめ

確定論の立場からは、主として下に再掲する構成方程式の定数の設定について検討した。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = \alpha (\lambda^*)^m \sigma^n \quad (5-1)$$

構成方程式には、 m, n, C の3つの定数が含まれるし、他に試験条件の応力速度 C も変動する可能性があるが、§ 5.2.1で見積もりをした結果では m, n, C が変動しても強度は高々0.2%程度しか変動しないことがわかった。そこで、 $1/$ が、形状母数 $b/(n+1)$ のワイブル分布に従ってばらつくとした。今回の検討対象とした岩石では、表 5-7 に示すように、気乾状態と湿潤状態とで形状母数 b はほとんど変わらなかった。また、強度とクリープに関しても形状母数はだいたい同じ値をとると言えよう。気乾状態の三軸圧縮強度については、岩種によって周圧に対する傾向が異なる結果となり、今後の検討が是非とも必要である。湿潤状態の三軸圧縮強度は排水条件により傾向が左右される可能性があるので慎重な実験が必要であるが、今後の検討課題としたい。さらには、寸法効果についても検討する必要がある。§ 5.5.2で指摘したように、要素の大きさにより σ を変えた試算などが候補としてあげられる。

確率過程論の立場からの検討も行った。クリープ試験結果を整理した $P-t$ 曲線は下に凸となることが多いが、2状態1段のポアソン過程では $P-t$ 曲線は直線となり、多段ポアソン過程では上に凸となる。西松・山口(1980)は、破壊に関する本質的なばらつきと他の要因によるばらつきで説明可能としている。すなわち、実際のばらつきは本質的なばらつきと他の要因によるばらつきとの加算値であり、2状態1段ポアソン過程は、ばらつきの下限を与えると解釈すれば、今回の検討対象とした実験結果と矛盾しない。

確率過程論の欠点は、その理論を直接に証明する手段が今のところ見つかっていないことである。例えば、実験データのばらつきのうち、どのくらいが本質的なばらつきであるかをもとめることは極めて難しい。しかしながら、既に述べたように、载荷速度依存性、強度のばらつき、寸法効果などを遷移確率から導くことができるし、本研究で検討したところでは、確率過程論による推定値は実際の実験結果と桁が違ようなことはないので粗い見積もりには使用できる。この点は重要であり、今後のさらなる検討が必要と考える。

表 5 - 1 確定論と確率過程論の比較

	構成方程式	確率過程論
強度	$(d \sigma / dt)^{1/(n+1)}$	
クリープ寿命	$1/\sigma^n$	
強度の形状母数	b	n + 1
クリープ寿命の形状母数	b / (n + 1)	1
強度の寸法効果	$1/V^{1/(b+1)}$	$1/V^{1/(n+1)}$
クリープ寿命の寸法効果	$1/V^{n/(b+1)}$	$1/V^{n/(n+1)}$
使用するパラメータ	n and b	n

表 5 - 2 パラメータ n と応力速度 C による強度の変化

(a) パラメータ n		(b) 応力速度 C	
n	c の変動係数 %	C MPa/s	c の変動係数 %
35	-0.100	0.95	-0.125
36	-0.074	0.96	-0.099
37	-0.051	0.97	-0.074
38	-0.032	0.98	-0.049
39	-0.014	0.99	-0.024
40	0	1	0
41	0.013	1.01	0.024
42	0.024	1.02	0.048
43	0.033	1.03	0.072
44	0.040	1.04	0.096
45	0.046	1.05	0.119

表 5 - 3 一軸圧縮試験とクリープ試験の結果

試験者	岩石	試験法	気乾/湿潤	試験数	b	n
山口(1980)	Sanjome andesite	一軸圧縮	気乾	30	21	37
		一軸クリープ	気乾	75	24.2	37
秋(1995)	大谷凝灰岩	一軸圧縮	気乾	30	11.8	35
		一軸圧縮	湿潤	34	10.8	16
		一軸クリープ	気乾	46	19.8	35
		一軸クリープ	湿潤	68	9.9	16
	田下凝灰岩	一軸圧縮	気乾	33	18	41
		一軸圧縮	湿潤	30	17.3	23
		一軸クリープ	気乾	46	25	41
		一軸クリープ	湿潤	66	20.9	23
	三城目安山岩	一軸圧縮	気乾	91	33.3	37
		一軸圧縮	湿潤	77	33	27
		一軸クリープ	気乾	113	26.9	37
		一軸クリープ	湿潤	173	29.3	27

表 5 - 4 気乾状態と湿潤状態における引張試験結果

試験者	岩石	試験法	気乾/湿潤	試験数	b	n
秋(1995)	大谷凝灰岩	圧裂引張	気乾	39	6.2	35
			湿潤	42	6.7	16
	三城目安山岩	圧裂引張	気乾	196	19	37
			湿潤	200	19.4	27
	田下凝灰岩	圧裂引張	気乾	37	11	41
			湿潤	38	10	23
Jin A(1993)	三城目安山岩	圧裂引張	気乾	30	17	41
			湿潤	30	16	28
Jin B(1993)	三城目安山岩	圧裂引張	気乾	30	20	41
			湿潤	30	28	28
Jin C(1993)	三城目安山岩	圧裂引張	気乾	30	23	41
			湿潤	30	28	28
Jin(1993)	三城目安山岩	一軸引張	気乾	24	20	38

表 5 - 5 気乾状態における三軸圧縮試験結果

試験者	岩石	周圧 MPa	気乾/湿潤	試験数	強度* MPa	b	n
山口(1980)	三城目安山岩	0	気乾	30	111	21	37
		2.5	気乾	16	124	7.5	44
		4.9	気乾	12	143	33	48
		10.2	気乾	13	168	31	59
		20.4	気乾	12	210	31	74
		39.2	気乾	14	249	12	91
大久保ら	田下凝灰岩	0	気乾	10		19.5	
		2.9	気乾	16		26.5	
		5.9	気乾	12		19.6	
		7.8	気乾	15		20.1	
		9.8	気乾	13		23.2	
大久保ら	幌延泥岩	0	湿潤	8		3.0	37
		5	湿潤	5		6.0	48
		10	湿潤	5		14.3	54

* 試験時の歪速度 10^{-4} /s.

表 5 - 6 C_0 , μ and μ' の尺度母数と形状母数

	三城目安山岩 (山口,1980)	田下凝灰岩 (大久保ら)	幌延泥岩 (大久保ら)
C^0			
a	111.9	18.8	10.3
b	21	19.5	3
μ			
a	0.9	0.6	0.8
b	17	16.3	49.5
μ'			
a	3.8	2.2	3.4
b	5.4	7.1	20.4

表 5 - 7 形状母数に関するリマーク

	Remarks
一軸圧縮強度 (気乾)	基準
一軸圧縮強度 (湿潤)	
一軸圧縮クリープ	
一軸引張クリープ	
三軸圧縮強度 (気乾)	
三軸圧縮強度 (湿潤)	×
強度の寸法効果	×
クリープ寿命の寸法効果	×

- : 気乾状態の一軸圧縮試験の n (標準値) とほぼ同じ
- : ある程度の一致をみる
- : 岩石ごとに合ったり合わなかったりする
- ×: 適切なデータが見当たらない

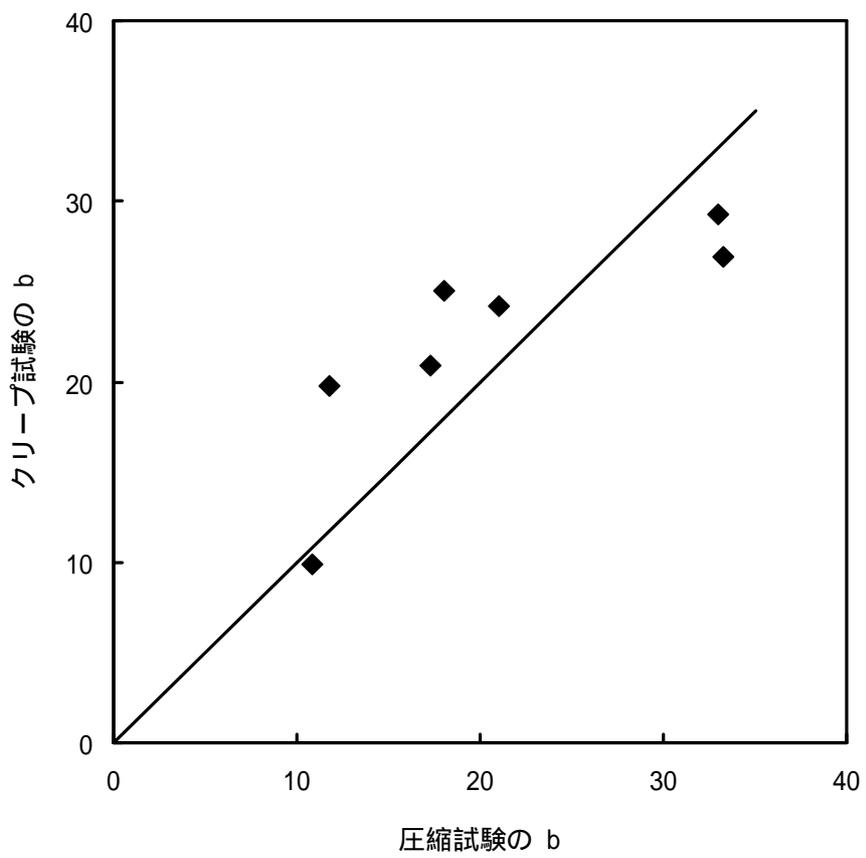


図 5 - 1 一軸圧縮試験とクリープ試験から求めた形状母数（気乾状態）

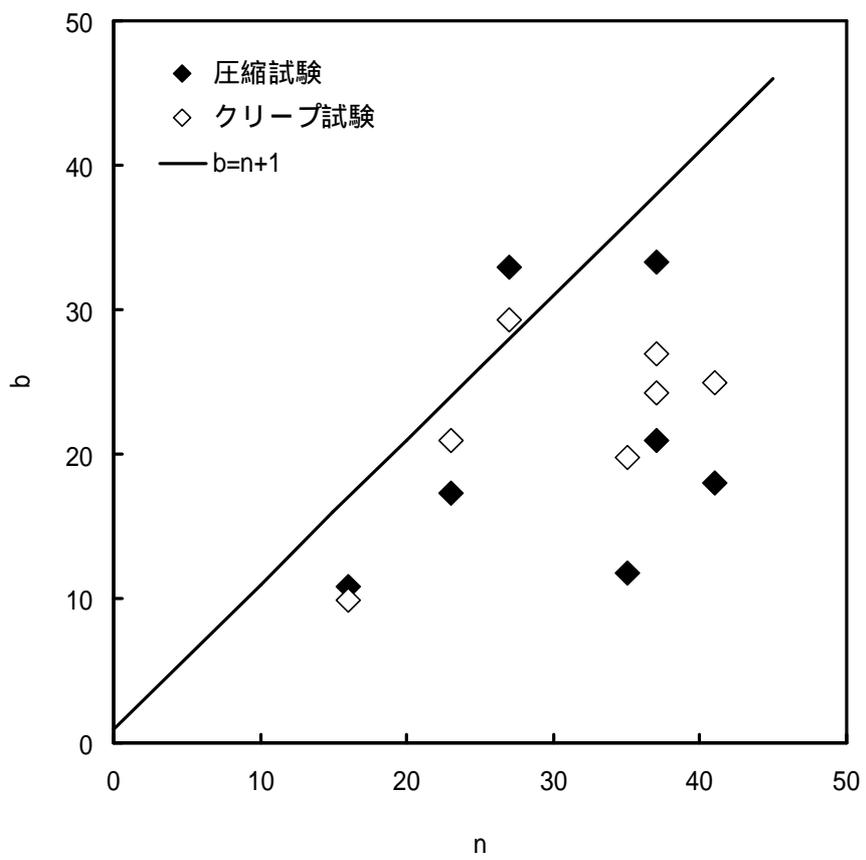


図 5 - 2 一軸圧縮試験とクリープ試験から求めた形状母数とパラメータ n (気乾状態)

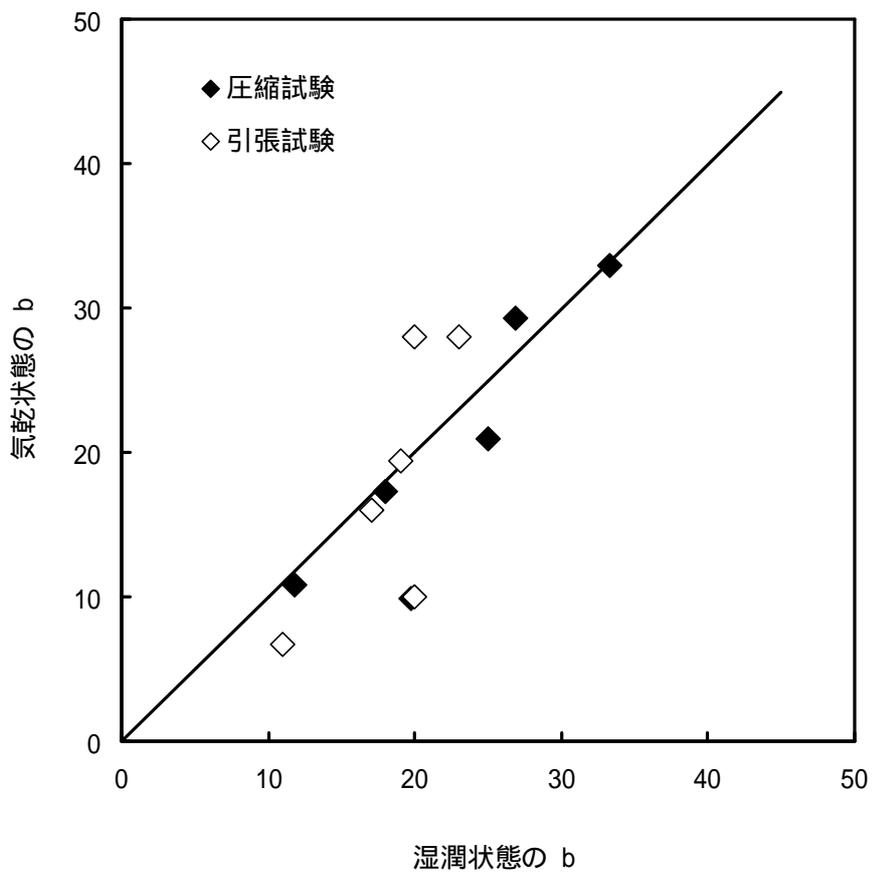


図 5 - 3 一軸圧縮試験と引張試験から求めた形状母数（気乾状態，湿潤状態）

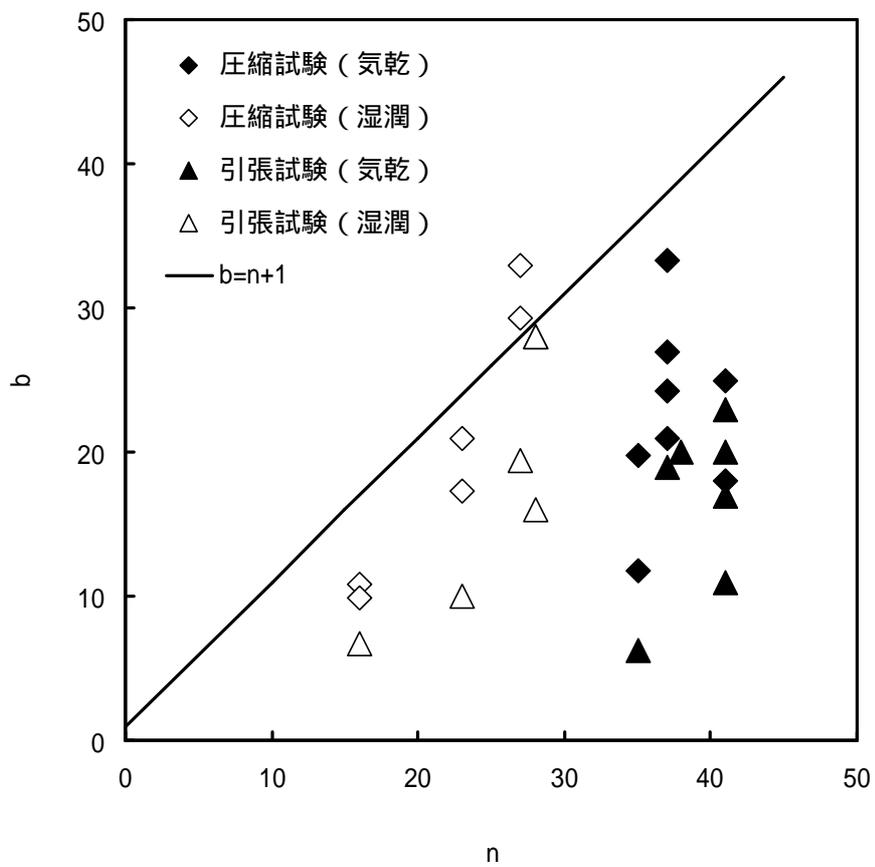


図 5 - 4 一軸圧縮試験と引張試験から求めた形状母数とパラメータ n (気乾状態, 湿潤状態)

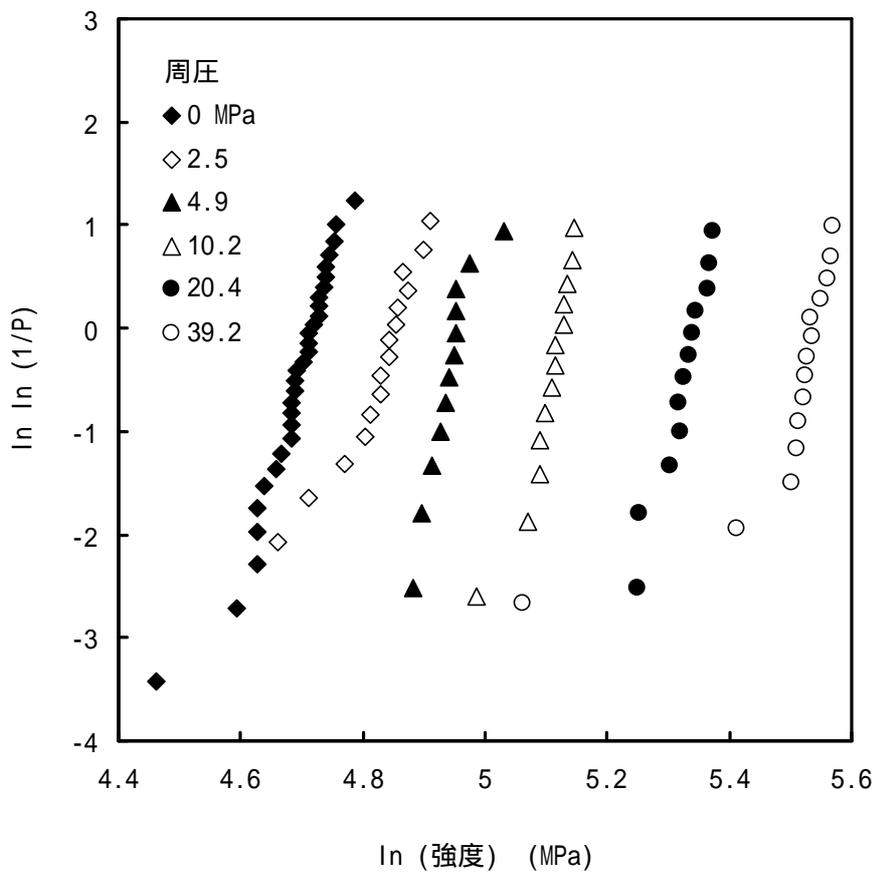


図5-5 三軸圧縮応力下の強度のワイブル確率線図(気乾状態)
三城目安山岩を用いた結果(山口,1980)

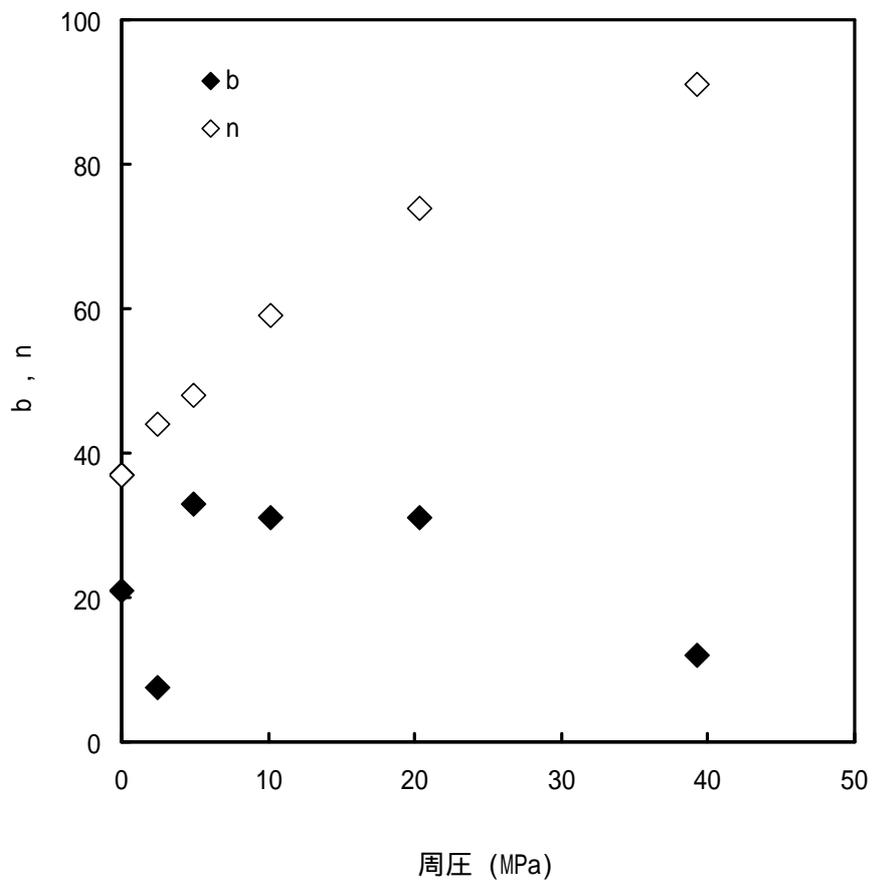
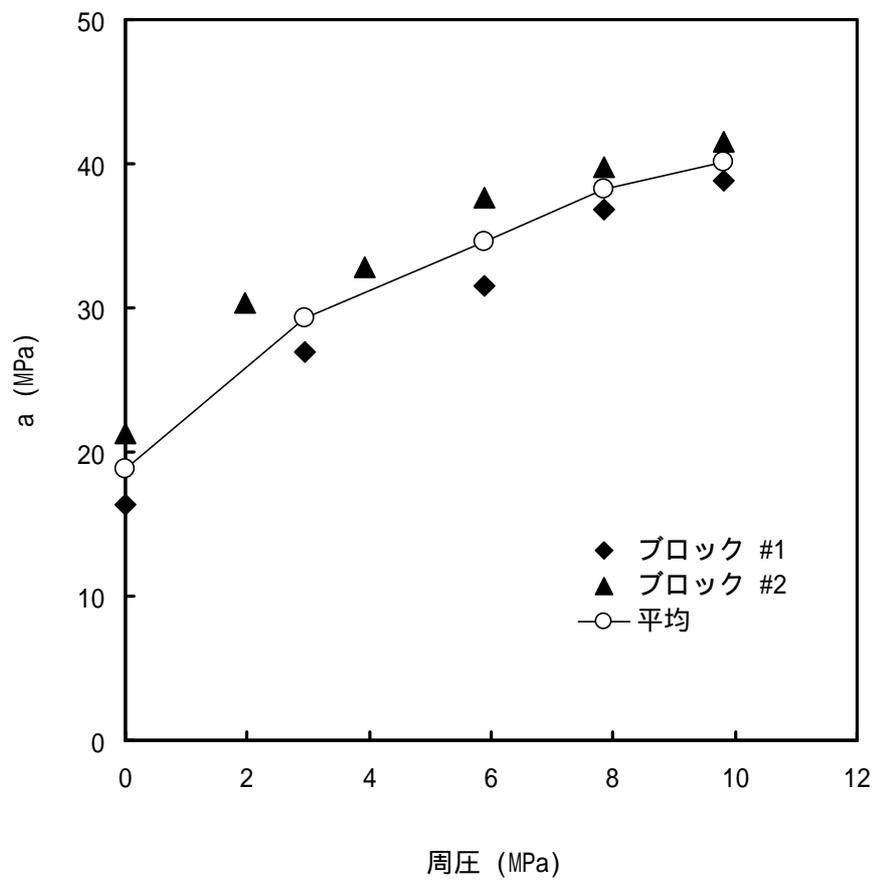
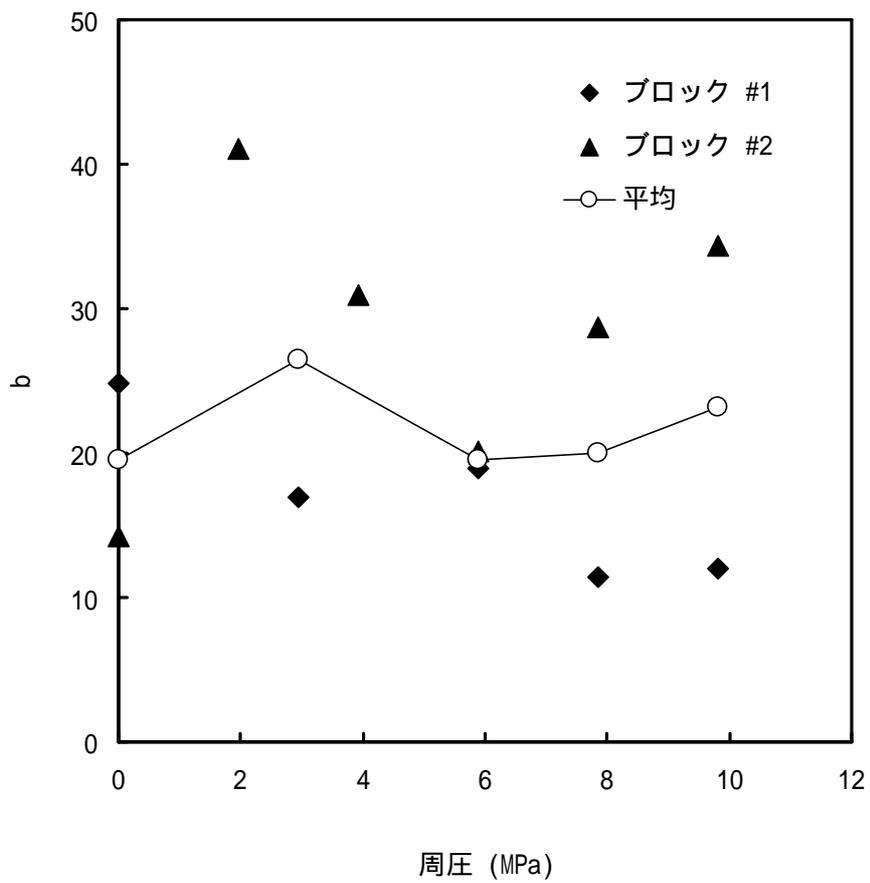


図 5 - 6 三軸圧縮試験から求めた形状母数とパラメータ n (気乾状態)
 三城目安山岩を用いた結果(山口, 1980)



(a) 尺度母数

図5-7 三軸圧縮試験から求めた尺度母数と形状母数（気乾状態）
田下凝灰岩を用いた結果



(b) 形状母数

図5-7 三軸圧縮試験から求めた尺度母数と形状母数(気乾状態)
田下凝灰岩を用いた結果

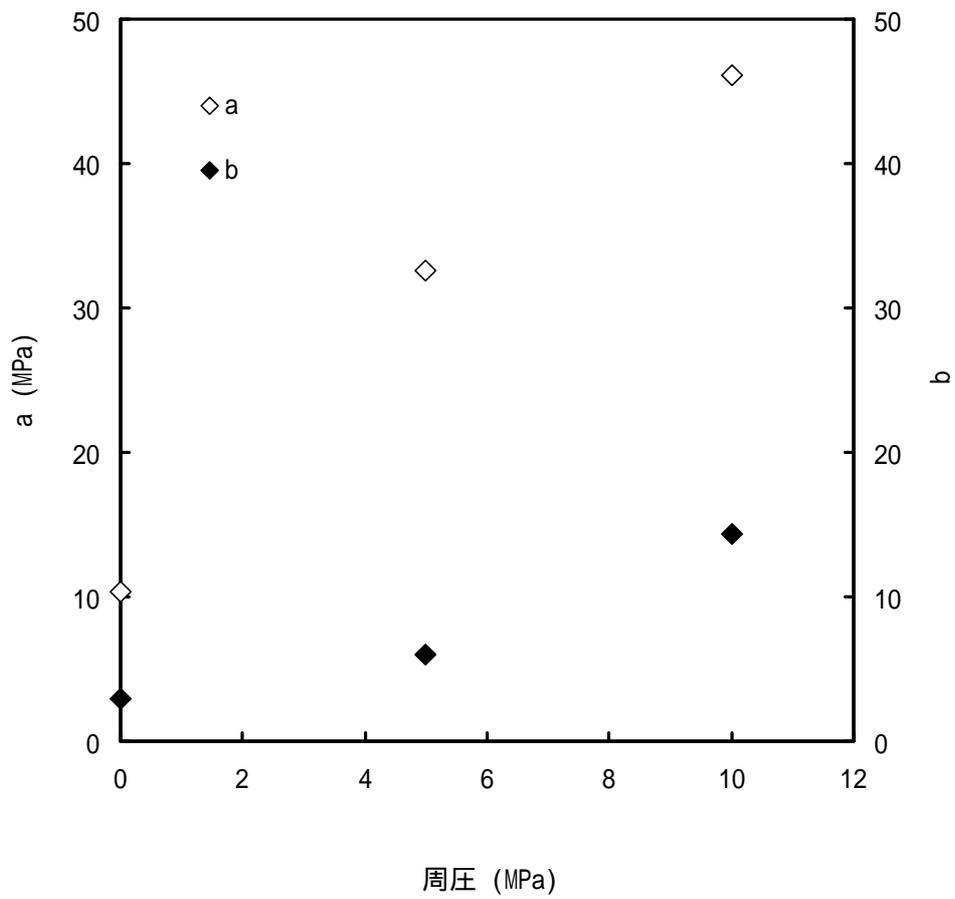


図 5 - 8 三軸圧縮試験から求めた尺度母数と形状母数（気乾状態）
幌延泥岩を用いた結果

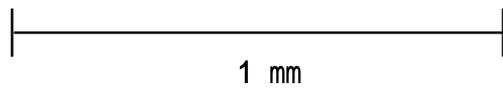
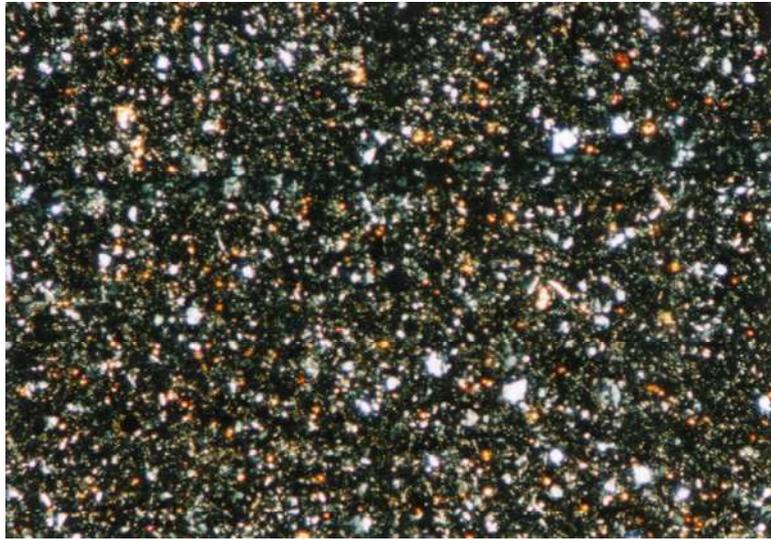


図 5 - 9 幌延泥岩の薄片

6. これまでの研究のまとめと新研究計画の検討と立案

6.1 これまで（平成6年度～平成16年度）の研究の概要

本研究は、巨視的観点からの長期岩盤挙動の評価の確立を目指したものであり、この主旨を実現するために平成6年度よりこの委託研究は始まった。10年間の長きにわたりご援助、ご助言をいただいた核燃料サイクル機構の皆様方には心より御礼を申し上げたい。下記に、この10年間にわたる研究を簡略にまとめるとともに、表6-1（大久保,2004）に表として経緯をまとめた。

平成6年度は、比較的小さな荷重を簡便に加えられる、空圧式クリープ試験機に関する検討を中心に行った。また、今後検討するための岩石試料として稲田花崗岩を選定し、入手するとともに非破壊検査を実施した。このときに開発したクリープ試験機は、現在も健在でありデータを取り続けている。また、このとき入手した花崗岩は良質なものであり、現在もその1部を保存しており、標準資料としての役割を果たしている。

平成7年度の研究範囲は、以下に列挙するように平成6年度に比べてかなり広がった。将来を見据えて、研究範囲を設定した年度と言える。

平成6年度に始めた空圧式クリープ試験機を使用したクリープ試験を引き続き行った。

今後検討を進める予定の稲田花崗岩の基礎物性を把握するため一軸圧縮試験と一軸引張試験を実施した。

本研究では、今後、花崗岩の長期クリープ試験を実施する予定であるが、それに先立って、既存のサーボ試験機を用いた短期間クリープ試験を行った。

大きな荷重を長期間にわたって加え続けることができる油圧式クリープ試験機の改良と試用を行った。

従来の実験結果をまとめ、どのような挙動を再現することが構成方程式に期待されるかを調査し、ついで非線形構成方程式基礎式の紹介とその解析解について述べた。

堆積岩の長期時間依存性挙動も今後検討する予定である、その準備段階として3種類の砂岩について予備的検討を加えた。

平成8年度の研究範囲を大別すると、クリープ試験、強度試験、周圧維持装置の開発、構成方程式の検討の4つになる。

平成6年度に始めた空圧式クリープ試験機を使用したクリープ試験を引き続き行った。さらにサーボ試験機を用いた短期クリープ試験と、油圧式クリープ試験機を使用した中期クリープ試験を行った。

強度試験として、一軸圧縮試験、一軸引張試験および圧裂引張試験を行った。

従来よりしばしば使用されてきた油圧式周圧維持装置についてまず検討した。ついで、より小型で安価に製作できる空圧式周圧維持装置の開発と試用を行った。

平成7年度は1次元の構成方程式評価用プログラムを報告書に添付したが、平成8年度は2次元有限要素法プログラムを添付しその使用方法について解説した。また、構成方程式に含まれるパラメータの求め方と、いくつかの岩石におけるパラメータの値について述べた。

平成9年度は、従来の結果を踏まえた上で、クリープ試験、圧縮試験および引張試験などを行った。

従来より引き続き行っている田下凝灰岩の長期クリープ試験の結果を述べた。ついで、稲田花崗岩の中期クリープ試験を実施した結果を述べた。気乾状態でのクリープ試験結果は比較的多く報告されているが、湿潤状態での結果は比較的少ない。しかしながら、これまでの本研究結果から、湿潤状態ではクリープ変形が進みやすい事がわかっている。そこで、湿潤状態でのクリープに注目して試験を行った。

2つの様式の周圧維持装置を検討した。一つは油圧式でもう一つは空圧式である。油圧式は従来より良く使用されてきた様式であるが、長期にわたって使用されることが予測されたため計測システムの安定性と耐久性には十分留意を払って改造した。油圧維持装置の信頼性、使い勝手を調べるとともに、周圧下における岩石の基礎データを得るために、この油圧式周圧維持装置を用いて三軸圧縮試験を行った結果を述べた。さらに、この時点までに、一軸引張試験における完全応力 歪曲線を求めることに成功していたので、試験途中で除荷 載荷を行い、さらに詳しく一軸引張応力下での岩石の挙動を検討した。ピーク強度以降の領域での除荷 載荷試験は、著者の知る限りではこれまで報告されていなかった。

コンプライアンス可変型構成方程式に関して検討した結果についても報告した。この構成方程式は比較的簡単な形をしているが、従来の多くの構成方程式が適用できない強度破壊点以降の領域まで用いることができる。この構成方程式を組み込んだ2次元および3次元有限要素法プログラムを開発し、比較的簡単なモデルを用いた計算を行った。

平成10年度は、とりたてて新しい試みはしなかったが、順調にデータを収集できた年度と考えている。

田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行い、試験期間は600日程度に達した。

サーボ試験機を使用した中期クリープ試験機も行った。使用した岩石は白浜砂岩である。興味深いことに、白浜砂岩では、クリープ応力レベル17%でもかなりのクリープ変形が見られた。これまでの経験ではこのような岩石はなかった。また、低い応力レベルにおいては、応力レベルによってクリープ歪の進展があまり違わなかった。この点もわれわれがこれまで使用してきた岩石と異なっている。

3種類の岩石を用いた三軸圧縮試験結果を行った。結果は常識的であり、試験装置は順調に稼働していると言える。ただし、岩石試験片のシールが試験の途中で破損することがあった。

一軸引張応力下での除荷・載荷試験を行った。岩盤内構造物の設計において、岩石の引張応力下での挙動は圧縮応力下での挙動と同じ位重要であり、殊に大規模な構造物の場合には重要性が増す。そこで、サーボ試験機を用いて一軸引張応力下での試験を行った。使用した岩石は6種類である。完全応力-歪曲線を求めるとともに、除荷・載荷試験によって非弾性歪の大きさについても検討をした。

平成11年度は、いくつかの新しい試みを行った。この内、開発・試用した可視化ベッセルはその後、大きな成果をあげた。

田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行った。試験期間は900日程度に達しており、従来の報告がほとんどない長期間のデータを採取できた。

結晶質岩用多連式油圧クリープ試験機の開発と試用についても述べた。さらに、可視化周圧ベッセルの開発と試用についても述べた。

時間依存性を考慮した一面せん断試験について述べた。せん断試験結果は、岩盤内構造物の設計

の際に重要であるが、未だに試験方法が確立されていない。そこで、正確な変位と荷重の制御が可能なサーボ試験機を用いて、一面せん断試験を行い、主としてせん断応力下での岩石の粘弾性的（時間依存性）挙動を検討した。

緩み領域の強度回復に関する基礎的検討結果について述べた。これまでの岩盤内構造物の使用期間は、比較的短期であった。この研究で目指すのは、最大 10 万年程度の長期にわたる岩盤内構造物の安定性である。このように長期間にわたる場合には、一旦緩んだ（破壊した）岩石の強度が増す可能性がある。この強度回復がわずかでも期待できると、岩盤内構造物の長期安定性は飛躍的に増す。この点に関する基礎的な検討はこれまで殆どなされていない。この現象を検討するには、長期にわたる試験が必要であり、早期に研究に着手する必要があると考えて、基礎的な考察と簡単な実験室実験を実施した。最後に、地圧データベースに関して述べた。

平成 12 年度は、比較的低い応力レベルにおける時間依存性挙動の研究に着手した。

田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行った。試験期間は約 1300 日に達し、従来の報告がほとんどない長期間のデータを採取できた。

平成 11 年度に開発した結晶質岩用多連式油圧クリープ試験機を使用したクリープ試験を行った。低応力レベルにおける時間依存性とヤング率の載荷速度依存性について検討するため、50 %割線ヤング率の載荷速度依存性に特に注目して定歪速度試験などを行ったが、結果をみると、三城目安山岩などにおいては顕著なヤング率の載荷速度依存性がみられたが、稲田花崗岩などでは検知できなかった。

平成 11 年度に開発した可視化周圧ベッセルを使用した周圧下での予備試験を行った。さらに、地圧データベース構築に向けた基礎資料の収集を行った。

平成 13 年度は、これまでの研究を受け継いで研究を進めた。

田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行った。長期にわたる試験にもかかわらず、目だったトラブルもなく順調に試験結果が得られた。

平成 11 年度に開発した結晶質岩用多連式油圧クリープ試験機を使用したクリープ試験を行った。試験機の再調整に、若干手間取ったが、その後は順調に稼動した。ただし、花崗岩のクリープ歪が小さいので、変位センサーと歪アンプについてはさらなる精度向上が望ましいことがわかった。低応力レベルにおける構成方程式について検討した。少なくとも湿潤状態では、比較的レベルにおいても岩石が粘弾性的性質を示すことは、従来の認識とやや異なると思われる。そこで、これまで行ってきた実験結果を総合的に検討して、低い応力レベルに対して適用できる構成方程式を提案した。

平成 11 年度に開発した可視化周圧ベッセルを使用した周圧下での試験を行った。周圧下で試験片が徐々に横に膨らんでいく様子や、いくつかの亀裂が徐々に進展していく様子の観察に成功し、周圧下での挙動解明の有力な手段となりえることが判明した。最後に、40 から 80 の中間温度領域におけるクリープ試験に関する予備的検討を行った。

平成 14 年度は、構成方程式の適用範囲を広げたことが特筆すべき成果と言えよう。

田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行った。試験期間は 5 年を越え、従来の報告がほとんどない長期間データの採取を継続した。実験結果をみると、特に目立った異常などはなく順当と思われた。

結晶質岩用 4 連式油圧クリープ試験機を使用したクリープ試験を行った。機器の再検定と若干の

改良を行い、気乾状態および湿潤状態での花崗岩のクリープ試験を行った。

理論的な検討の一環として、高応力レベルにおける破壊現象の再現に重点をおいて開発されたコンプライアンス可変型構成方程式と、平成 13 年度の報告書で述べた低応力レベルでのクリープ現象を再現する目的で開発された構成方程式とを組み合わせ、岩石の 1 次クリープから 3 次クリープまでの挙動を再現できるかどうかを、これまで行ってきたクリープ試験結果を参照しながら検討した。

可視化ベッセルを用いて周圧下でのクリープ試験を行った。定歪速度試験では一定時間毎に写真を撮れば良いが、クリープ試験では変化の激しい 3 次クリープにできるだけ多くの写真を撮る必要がある。そこで、3 次クリープ中での変化に着目して、軸歪が一定量増加する毎に自動的に写真撮影を行うシステムを構築し、軸歪および横歪の測定を行った。

中間温度領域におけるクリープ試験を行った。実験方法・装置に細かい改良を加えながら実験を行ったので、その経緯と実験結果について述べた。

平成 15 年度は、構成方程式を引張応力下に適用したことが特筆すべきこととして上げられよう。田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行った。クリープ試験を開始して 6.5 年経過し、測定結果に年変動が見られるなど、問題点も見られるが、クリープ歪速度の低下傾向等に注目し、今後も実験を継続していく価値が大いにあると考える。

結晶質岩用 4 連式油圧クリープ試験機を使用して、従来の研究結果が乏しい低応力下での花崗岩のクリープ試験を行った。その結果、気乾状態、湿潤状態のいずれの条件下でもクリープ歪が生じ、その大きさは約 1 週間で $30 \sim 160 \times 10^{-6}$ であることがわかった。

平成 14 年度提案した構成方程式が、一軸圧縮強度試験および一軸引張強度試験に適用可能かどうかについて検討した。その結果、構成方程式は強度試験とクリープ試験に適用でき、しかも一軸圧縮のみならず一軸引張応力下にも適用できることがわかった。

可視化ベッセルを用いて三軸圧縮クリープ試験を行った。従来は観測し難かった、周圧ベッセル内の試験片の挙動が容易に目視・撮影できるようになったメリットは大きく、この装置を応用した研究はまだまだ続ける価値が大いにあると考える。

中間温度領域におけるクリープ試験を行った。経過時間 10^4 s までは対数クリープ則が成り立ち、温度の影響は大きくないが、経過時間 10^4 s 以降では、温度が高くなると対数クリープ則よりずれが生じ、クリープ歪の温度依存性は高くなることがわかった。

平成 16 年度は、時間依存性挙動のメカニズムの解明に向けた研究を開始した。

堆積岩(田下凝灰岩)の長期クリープ試験の継続。あと 2 年少々で、試験開始から 10 年を迎える。是非とも 10 年にわたるデータを得て、さらに可能な限り測定期間を延ばしたいと考えている。長期間の測定には、技術のほかに運がかかっていると思うこの頃である。

結晶質岩の中間温度領域におけるクリープ試験。測定精度を向上させるために、実験装置や測定装置を大幅に改良した。

結晶質岩の低応力下でのクリープ試験

時間依存性挙動のメカニズムの解明に向けた研究を開始した。まったく新しい試みとして、強度やクリープ寿命のばらつきの中に貴重な情報が隠されていると考えて研究を行った。今後も検討する必要があるが、新しい可能性を指摘できたと考えている。

これまでの研究のまとめと新研究計画の検討と立案

6.2 研究の到達度

これまで行ってきたさまざまな研究の到達度を考えてみることにする．その結果を踏まえて，今後行うべき研究について，後ほど提案する考えである．これまで行ってきた研究は，大別して 試験方法・試験と 構成方程式とになる．

試験方法・試験

- 空気圧式クリーブ試験機
- 油圧クリーブ試験機
- 多連式クリーブ試験機
- 可視化ベッセル
- 緩み領域の強度回復
- 熱クリーブ試験

初期に開発した空気圧クリーブ試験機は，細かい改良を加えたり，連続使用中に故障し交換した機器，部品もある．しかしながら，長年にわたってデータを取り続けることができた．この点から考えてある程度の水準に達した試験機であり，得られたデータも長期間にわたる貴重なものと考えている．もちろん，今以上に長期にわたる実験結果は，さらに貴重なものであり，今後も実験を続けていく必要があるが，現時点でも評価は としてよいと思う．

開発した油圧試験機も所定の成果をあげたと考えている．しかしながら，他の試験機や研究と比較して特筆すべき特徴があるとはいえないので，評価を とした．

多連式クリーブ試験機としてコンパクトな 4 連式クリーブ試験機を開発したが，精密な測定では互いの干渉がおきやすく，なかなか良いデータを得ることができなかった．種々の改良を加えたにもかかわらず，短期ならば使用可能であるが，長期試験に使用するには不安を拭い去れない現状なので評価を とした．

可視化ベッセルは周圧ベッセル内を見えるようにしようとする試みである．周圧下における試験片の変形挙動，亀裂の進展状況がよくわかった．また，強度試験のみならずクリーブ試験に対しても適用可能であり，これまで撮影に成功した例がないとおもわれる周圧下の 3 次クリーブの撮影に成功した．所定の成果をあげたと言えるが，今後も可視化ベッセルを使用して行うことは多量に残っているので，評価は とした．

緩み領域の強度回復は，岩盤内構造物の現場でながく経験を積んだ技術者には，かなり知られたことであるが，研究はほとんど行われてこなかった．本研究を通じて，強度回復が実験室で再現できることを示したつもりである．よって評価は としたが，今後は問題の性質上，原位置での検討をあわせて行う必要があると考えている．

中温度領域におけるクリーブ試験結果が意外と少ないことが判明したので検討を行った．クリーブ歪の測定結果が温度の影響を受け易いので，歪の測定精度が今ひとつであったことを考えて評価を とした．

構成方程式

- 破壊の表現（原型）
 - ・ クリープ試験（3次クリープ）
 - ・ 圧縮強度試験
 - ・ 引張試験
- 項を追加
 - ・ 1次クリープ
 - ・ ピーク強度前
 - ・ 比較的安全率の高い場合

既に何度も報告書中で述べたように、コンプライアンス可変型構成方程式の検討を続け、データが得られるごとに、検証を行ってきた。破壊の表現を目指した原型は、非常に簡単な式であらわされるにもかかわらず、クリープ試験、圧縮強度試験、引張試験に適用できることがわかった。また、かなりの数の岩石に対して、構成方程式中のパラメータを求めることができた。この構成方程式を使用して、比較的高い応力レベルにおかれた岩盤内構造物の長期安定性を評価できると考える。構成方程式の評価は難しいが、所定の目的を達しているとしてとした。

原型は取り扱い易く、式中のパラメータを求めることも比較的簡単であるが、低い応力レベルでの岩石・岩盤の挙動を正確にあらわすことができない。そこで、式に項を追加して欠点の克服を試みた。比較的少数の岩石であるが、計算結果と実験結果とはよい一致をみせた。しかしながら、パラメータの数が増えたので、これらを求めることが困難となった。現在、検討中の点もあるので、評価をとした。

6.3 新研究計画の検討と立案

今後の研究計画について、クリープ試験、構成方程式/数値実験、岩盤のばらつき/不連続面/軟弱部の3つにわけて説明をする。

クリープ試験

- ・ 田下凝灰岩の長期試験（可能な限り継続）
- ・ 温度の影響（2004年～2005年）
- ・ 実際に近い荷重条件下での試験
 - 支保，ベントナイトの影響（ex. 応力低下/歪増加）
 - 試験法開発（2006年～2007年）
 - 試験実施（2008年～）+ 技術移転
 - MIU計画の原位置計測と連携

田下凝灰岩の長期クリープ試験は既に7年以上を経過して、未だに少しずつクリープ歪が増加している。しかしながら、クリープ歪速度は顕著に低下しつつある。よって、長期にわたって少しずつ落ち着きつつあるとみなした方がよいと考えている。貴重なデータであり可能な限り継続させた

い。

温度の影響は、ある程度わかってきたところであり、あとわずかで必要な情報が得られると考えている。

時間依存性を調べるにはクリープ試験や応力緩和試験がしばしば行われる。言うまでもないが、荷重を一定に保った試験がクリープ試験であり、変位を一定に保った試験が応力緩和試験である。他方、実際の岩盤内構造物をみると、支保が施されたり内部にベントナイトが装填されたりする。この場合の岩盤の荷重条件は、クリープと応力緩和の間であり、変形が進むと支保が分担する荷重が増えるので応力が低下する。実際に近い条件での試験を行うための試験法の開発と試験の実施が是非とも必要と考えている。試験法開発（2006年～2007年）、試験実施（2008年開始）の予定で検討を進め、できるだけ早い時期に技術移転をしたい。可能であれば、この方法で採取したデータとMIU計画の原位置計測結果との比較・検討を行いたい。

構成方程式/数値実験

- ・ 基礎データの収集（2004年～）
 - ポアソン比（周圧下）
 - nの扱い（周圧下）
- ・ プログラムの整備
 - 硬岩用（2004年～2005年）
 - 汎用（2006年～2007年）
- ・ 実測データと計算結果の比較・検討（2008年～）
 - MIU計画原位置計測と連携

構成方程式/数値実験の成否は、つまるところ良質なデータがあるかどうかにかかっている。これまでの検討で、データの入手が困難であった周圧下でのポアソン比と、同じく周圧下でのn（構成方程式中の時間依存性の程度をあらわすパラメータ）に重点をおいて研究を進めていく。

プログラムの整備は、比較的簡単な硬岩用から初めて、ついで軟岩を含めた汎用のプログラムの開発を進める予定である。成果品としては、市販のFEMコードに比較的簡単に組み込めるように配慮した副プログラムと考えている。

構成方程式の完成度を高めるには、計算結果と計測結果との比較・検討が是非とも必要である。可能であれば、MIU計画における原位置計測結果と計算結果との比較・検討を実施したい。

岩盤のばらつき/不連続面/軟弱部

- ・ 測定手法の開発（2004年～2005年）
 - TBM、ブームヘッダーの掘削抵抗
 - さく岩機のさく孔速度
- ・ データ収集（2006年～）
 - 適宜MIU計画とリンク
- ・ 数値計算（2008年～）
 - 適宜MIU計画とリンク

どのような物質でも、その特性は個々にばらつくことが知られている。岩盤は、場所ごとに大きく強度などが異なることが知られているが、これまで系統的にばらつきを調査する方法が確立されていなかった。最近になって、掘削機械は実は連続的に強度試験を行っているのだ、との視点から、掘削抵抗より岩盤の特性を調べる研究が盛んになってきた。本研究では、その手法のさらなる進展を目指して検討を行う。しかる後に、データ収集を行い、例えば国内の花崗岩では、どのくらいのばらつきを見込んでおけばよいのかを明らかにする。データ収集は、可能ならば MIU 計画の一環としても行いたい（もちろん他のサイトでのデータ収集も行う予定である）。さらに、各部のばらつきを考慮した計算モデルを用いた計算結果と、MIU 計画における計測結果とを比較・検討したい。

岩盤のばらつきは、大規模岩盤内構造物の設計、長期安定性評価には欠かせないデータと確信している。数値計算においても、ばらつきを考慮した計算モデルが必要である。また、本年度の報告書で述べたように、破壊機構、時間依存性を解くための情報を含んでいる可能性が高い。

最終的な目標

- ・ 必要なデータの採取方法の確立
 - 室内 + 原位置
- ・ 数値実験方法の確立
 - 強度のばらつき等も勘案
 - MIU 計画を通じて検証
- ・ 長期挙動を勘案した岩盤分類

最終的な目標は上記になろうかと考えている。この内、長期挙動を勘案した岩盤分類については少し説明をしておきたい。著者のこれまでの経験では、岩石の時間依存性には一定の傾向があり、岩種、強度、乾湿の情報からある程度推定できる可能性があると考えている。この点からの検討を進め、最低限の情報から、岩石の時間依存性、構成方程式中のパラメータの概略を得る方法を模索する。

今後の研究については、可能な限り MIU 計画のスケジュールに沿った内容で進める所存である。

表6-1 長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎研究

	1994年度	1995年度	1996年度	1997年度	1998年度	1999年度	2000年度	2001年度	2002年度	2003年度	実施内容のまとめ
1) 力学特性試験											1) 力学特性試験 稲田花崗岩, 諫早砂岩, 平島砂岩, 白浜砂岩の各種力学的物性値の把握を行った
a. シュミットハンマー・弾性波速度試験	稲田花崗岩	諫早砂岩 平島砂岩 白浜砂岩	諫早砂岩 平島砂岩 白浜砂岩								
b. 一軸圧縮試験		稲田花崗岩									
c. 一軸引張・圧裂引張試験		稲田花崗岩	同上								
d. 三軸圧縮試験			周圧装置の検討	諫早砂岩, 平島砂岩, 白浜砂岩 周圧 5.5, 11, 16.5 MPa							
2) クリープ試験	装置の紹介 凝灰岩の例										2) クリープ試験
a. 空圧式クリープ試験(長期)		田下凝灰岩 No.1 応力 30%				田下凝灰岩 No.2 応力 30%					a. 長期クリープにむく空圧式試験機を開発し, 6年以上にわたる田下凝灰岩のクリープ試験を実施した
b. 油圧式クリープ試験(中期)		試験装置の改良と試用	稲田花崗岩 気乾と湿潤	稲田花崗岩 低応力	白浜砂岩 低応力						b. 中期クリープ(1週間~1月間程度)用の油圧式試験機を開発し, クリープ試験を実施した
c. サーボ試験機(短期)		稲田花崗岩 1日程度	諫早砂岩, 平島砂岩, 白浜砂岩								c. 短期クリープ(1週間程度まで)用のサーボ試験機によるクリープ試験を実施した
d. 熱クリープ試験							装置の開発と試用	圧力源の改良 稲田花崗岩	階段状に温度を 変化させた試験 稲田花崗岩	稲田花崗岩 温度 40, 60, 80	d. 中温度領域(常温~100)のクリープ試験装置を開発し, 熱クリープ試験を実施した
3) 新規試験方法の開発と結果											3) 新規試験方法の開発と結果
a. 周圧装置			油圧式および空圧式の検討								a. 油圧式および空圧式の周圧装置の検討を行った
b. 間隙水圧の測定装置			予備調査	機器類の性能評価試験	間隙水圧の制御装置の開発						b. 機器の性能評価試験を実施し, 間隙水圧の制御装置の開発を行った
c. 引張下での除荷・載荷試験				稲田花崗岩 三城目安山岩 田下凝灰岩	諫早砂岩 平島砂岩 白浜砂岩						c. 一軸引張下で除荷・載荷試験を行い, 亀裂進展に伴うコンプライアンスと非弾性歪の変化を求めた
d. 可視化ベッセル						ベッセルの開発と試用	堆積軟岩(土丹)	横ひずみの測定方法の開発 田下凝灰岩	クリープ試験と破壊 直前までの連続写真		d. 三軸圧縮試験時に試験片を観察できるベッセルを開発し, 定歪速度試験・クリープ試験などにおける横歪・体積歪を画像から求めた
e. 4連式油圧クリープ試験機						装置の開発と試用	三城目安山岩	載荷方式の改良と予備試験	稲田花崗岩 湿潤, 50%	稲田花崗岩 気乾と湿潤	e. 長期クリープにむく4連式の油圧試験機を開発し, 稲田花崗岩のクリープ試験を実施した
f. 一面せん断試験											f. 一面せん断試験を実施し, 一軸圧縮・引張強度の載荷速度依存性との関係を調べた
g. 緩み領域の強度回復	クリープ寿命と定応力速度試験の載荷速度依存性	コンプライアンス可変型構成方程式の提案	構成方程式の定数の検討および、二次元 FEM プログラムの開発	二次元 FEM による計算と寸法効果。三次元 FEM プログラムの開発の拡張	亀裂進展を考慮した構成方程式の引張応力下への拡張	強度回復の提示と予備試験	低応力レベルの時間依存性とヤング率の載荷依存性	低応力レベルの構成方程式の提案	広範囲の応力レベルに適用可能な構成方程式の提案	広範囲の応力レベルに適用可能な構成方程式の定数の求め方	g. 支保後の緩み領域や時間の経過とともに強度が回復することを提示し, 強度回復実験を実施した
4) 構成方程式											4) 構成方程式 適用範囲の広い構成方程式を開発し, その定数を求めるとともに, FEM の計算も行った
5) 地圧データベース						地圧データベースの試作	地圧データの収集				5) 地圧データベース 地圧に関する文献調査を行い, 地圧のデータベースを構築した

7. 結言

平成 16 年度(本年度)も、田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行いその結果を第 2 章で述べた。これまでも報告した通り、時間の経過に従い、クリープ歪速度は減少しているが、その速度の減少がどの程度であるかは、長期の安定性を考える上で重要である。著者の見解では、低い応力で、歪速度が顕著に低下していることは、安定化に向かっているとみなせる。現在、クリープ試験を開始して 7.5 年経過し、測定結果に年変動が見られるなど、問題点も見られるが、クリープ歪速度の変化に注目し、今後も実験を継続していくつもりである。

第 3 章では、中間温度領域におけるクリープ試験結果を述べた。常温および高温での研究結果はこれまでに相当数発表されているが、中温度領域における研究は少ない。推察するに、通常的时间スケールでは、常温と変わらないとして設計して大きな齟齬をきたさなかったためであろう。しかしながら、1~10 万年程度の安定性が岩盤内構造物に要求される場合には是非とも検討すべき課題と考えている。実験結果をみると、クリープ試験開始後しばらくの間は対数クリープ則が成り立ち、温度の影響は大きくない。しかしながら、時間が経つと、温度が高いほど対数クリープ則よりずれ、クリープ歪の温度依存性は高くなることがわかった。

第 4 章では、これまでに改良を少しずつ加えてきた 1 連式クリープ試験機と 4 連式クリープ試験機について総まとめをしてみた。両者ともまずまずの性能を有していると言えるが、必ずしも 100% 満足できる結果が得られたとは考えていない。その原因はいくつかあると思うが、熟練した職人の数がここ 20~30 年で激減したため、試験機細部の仕上げが今ひとつであることが一因として挙げられる。この傾向は、今後ますます進むと思われる。センサー類に関しては進歩もみられないが退歩もしていない。アンプは小型化が進み安価になったと思うが、安定性などについては特段の進歩は感じなかった。データの収録と整理に関しては、クリープ試験をはじめた 30 年前と比較すると、格段に向上した。クリープ試験はみかけより難しい試験であり、今後もわずかながら検討を加え、少しでもよいものにしていく必要があると考える。

第 5 章では、時間依存性挙動のメカニズムについて検討したが、その際、試験結果のばらつきを情報の一つと考えた。確定論と確率過程論の両者を念頭において検討を進めた。実験結果の整理と理論的な検討結果を総合して、岩石のばらつきと時間依存性挙動の概要をあきらかにするとともに、実用上重要な、ばらつきを考慮した構成方程式中の定数の設定についても一定の方針を示した。岩石や岩盤の場所ごとのばらつきは、これまでもよく知られていたが、積極的なあるいは組織的なデータの収集方法がなく、深い検討はなされてこなかったように思う。最近になって、掘削機械の掘削抵抗を利用してたとえば数 km のトンネル全長に沿った強度特性が連続的に得られるようになった。今後は、積極的に岩石や岩盤の特性のばらつきに関するデータを収集し検討することが必要であるし、またそのような検討ができる下地が準備できた現状と言えよう。本報告書では、不十分ではあるが、ばらつきを情報源とみなし、ばらつきの持つ情報の利用法の一端を示したつもりである。

第 6 章では、平成 6 年度~平成 15 年度までの研究結果をまとめた。ついで、いくつか行った研究の到達度を著者なりに推し量ってみた。その上で、今後なすべきことと新研究計画について述べた。大きな目標は次の 3 つである。

- ・ 必要なデータの採取方法の確立

- ・ 予測手法の確立
- ・ 長期挙動を勘案した岩盤分類

いずれも簡単に実現できるものではないが、できる限りのことは行いたいと考えている。

参考文献

- 羽柴公博, 大久保誠介, 福井勝則 (2003) : 泥岩の周圧下での時間依存性挙動, 資源・素材学会春季大会講演集, Vol. , pp.69-70
- 平田森三, 寺尾宣三 (1952) : ガラスの破壊強度について, 応用物理, Vol.20, No.6/7, pp.234-237
- Jin, F. (1993) : Time-dependent Behaviour of Rock, Thesis for Doctorate, Tongji University, Chapter 3
- Lajtai, E.Z., Schmidtke, R.H. and Bielus, L.P.(1987):The Effect of Water of the Time-Dependent Deformation and Fracture of a Granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.24, No.4, pp.247-255
- McClintock, F.A. and Walsh, J.B. (1962):Friction on Griffith Cracks in Rocks under Pressure, Proc.4th U.S.Nat.Cong.Appl.Meck, Vol.2, pp.1015-1021
- 西松裕一, 山口勉 (1980) : 岩石の引張遅れ破壊寿命の分布特性に関する確率過程論的研究, 材料, Vol.29, No.317, pp.192-197
- 大久保誠介(1992):コンプライアンス可変型構成方程式の解析的検討,資源と素材,Vol.108, No.8, pp.601-606
- 大久保誠介, 秋哲淵 (1993) : 気乾状態と湿潤状態とでの三城目安山岩のクリープ, 資源と素材, Vol.109, No.11, pp.917-922
- 大久保誠介, 秋哲淵 (1994) : 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, 資源と素材, Vol.110, No.7, pp.533-538
- 大久保誠介, 秋哲淵 (1994) : 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, No.490, pp.819-825
- 大久保誠介 (1996) : 長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究, 動力炉・核燃料開発事業団技術資料, PNC PJ1602 96-004
- 大久保誠介 (2001) : 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, 核燃料サイクル開発機構技術資料, JNC TJ7400 2001-003
- 大久保誠介 (2002) : 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, 核燃料サイクル開発機構技術資料, JNC TJ7400 2002-010
- 大久保誠介, 福井勝則(2002): 田下凝灰岩の長期クリープ試験と構成方程式, 資源と素材, Vol.118, No.1, pp.36-42
- 大久保誠介, 福井勝則, 羽柴公博 (2002) : 岩石の三軸圧縮試験用可視化ベッセルの開発と試用, 資源と素材, Vol.118, No.3/4, pp.165-170
- 大久保誠介, 陳文莉, 福井勝則 (2002) : 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, 資源と素材, Vol.118, No.12, pp.729-736
- 大久保誠介 (2004) : 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, 核燃料サイクル開発機構技術資料, JNC TJ7400 2004-002
- 秋哲淵 (1995) : 岩石の湿潤状態における時間依存性, 東京大学博士論文, 4章
- 秋哲淵, 大久保誠介, 福井勝則 (1995) : 気乾状態と湿潤状態での岩石の圧裂・一軸引張強度の分布特性, 資源と素材, Vol.111, No.4, pp.231-237
- 山口梅太郎, 西松裕一 (1991) : 岩石力学入門 第3版, pp.109 - 117

- 山口勉 (1980) : 岩石の変形及び破壊に対する時間の影響の研究, 東京大学博士論文, 4章, 5章
- 横堀武夫 (1974) : 材料強度学 第2版, 8章, 9章
- 横堀武夫 (1978) : 材料強度学, 6章, 8章, 9章
- Walsh, J. B. and Brace, W. F. (1964) : A Fracture Criterion for Brittle Anisotropic Rock, JGR., Vol.69, No.16, pp.3449-3456