

# 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 委託研究成果報告書)

2002年3月

東京大学

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

〒319-1194 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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section  
Technology Management Division.  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,  
Japan

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
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

大久保 誠介\*

## 要 旨

本研究は1994年度にはじめられた。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おこなった。狙いは、耐久性と安定性の向上である。特に測定装置は、完全に置き替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おこなった。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3軸圧縮試験、一軸引張応力下での除荷・载荷試験結果を行った。

1999年度と2000年度は、田下凝灰岩のクリープ試験を引き続きおこなった。また、多連油圧式クリープ試験機と可視化周圧ベッセルを開発し試用した。

2001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。試験期間はまもなく5年に達する予定で、従来報告がほとんどない長期間のデータを採取中といえる。この結果を第2章で述べる。第3章では、多連油圧式クリープ試験機を用いたクリープ結果を述べた。第4章では、低応力レベルにおける構成方程式について検討した。第5章では、開発した可視化ベッセルを用いた周圧下での実験結果について述べた。第6章では、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結果について述べた。

---

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

契約番号：1306A00338

サイクル機構担当グループおよび担当者：東濃地科学センター 地質環境長期予測研究グループ 清水 和彦

※：東京大学工学部 教授

Fundamental Study on long-term Stability of Rock  
from the Macroscopic Point of View.

Seisuke Okubo\*

Abstract

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 Tage 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 Tage 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 Tage 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 and 2000, creep testing of Tage tuff was conducted. Preliminary uses of a multi-cylinder hydraulic creep testing machine and a transparent triaxial cell were also conducted.

In this year, creep testing of Tage tuff was continuously conducted reaching to testing time of 5 years, and the data is considered to be very scarce and valuable (chapter 2). Short-term creep testing was also conducted in the multi-cylinder hydraulic creep-testing machine and the results were described (chapter 3). A non-linear constitutive equation was discussed to clarify the time dependent behavior at low stress level (chapter 4). The results of triaxial compression test by the transparent triaxial cell were also described (chapter 5). Finally, results of preliminary creep testing at mid-range temperature was described (chapter 6).

---

Work performed by The University of Tokyo under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

Agreement No.: 1306A00338

JNC Liaison: Tono Geoscience Center, Neotectonics Research Group, Group Leader,  
Kazuhiko Shimizu

※:The University of Tokyo, Faculty of Engineering; Professor

## 目次

1. はじめに.....	1
2. 空圧式クリープ試験機による長期クリープ試験.....	4
3. 結晶質岩用多連油圧式クリープ試験機による試験.....	8
3. 1 計測システムの安定性.....	8
3. 2 クリープ歪の経時変化.....	9
3. 3 クリープ歪速度の経時変化.....	10
4. 低応力レベルにおける構成方程式の構築.....	24
4. 1 はじめに.....	24
4. 2 実験装置の開発経緯.....	25
4. 3 試料岩石と実験装置.....	26
4. 4 試験片#1と試験片#2の結果.....	27
4. 5 構成方程式による検討.....	29
4. 5. 1 1次クリープをあらわす構成方程式.....	29
4. 5. 2 応力依存性をあらわすパラメータ $\nu$ と $n$ .....	31
4. 5. 3 歪増分を考えた構成方程式との比較.....	31
4. 5. 4 応力依存性をあらわす関数に関して.....	32
4. 6 まとめ.....	32
参考文献.....	35
5. 可視化ベッセルの開発と試用.....	45
5. 1 はじめに.....	45
5. 2 可視化ベッセルの概要.....	45
5. 3 安全性と破壊試験.....	46
5. 4 測定方法.....	47
5. 5 予備試験.....	48
5. 6 田下凝灰岩での結果.....	48
5. 7 土丹での結果.....	50
5. 8 まとめ.....	51
参考文献.....	52
6. 中間温度領域におけるクリープ試験.....	75
6. 1 圧力源の製作と実験方法.....	75
6. 2 80℃でのクリープ試験.....	75
6. 3 温度を変化させたクリープ試験の予備的検討.....	76
参考文献.....	77
7. まとめ.....	97

## 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。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。

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。①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。②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。③本研究では、将来、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。④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。⑤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。⑥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。①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。②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。③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。④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。まず、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。また、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求めるために、この油圧式周圧維持装置を用いて3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。また、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、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おこなった。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3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動していると言える。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おこなった。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、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。また、結晶質岩用多連油圧式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、一面せん断試験をおこない、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、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油圧式クリープ試験機を使用したクリープ試験をおこなった。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おこなったが、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おこなった。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おこなった。

平成13年度（本年度）は、田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行った。試験期間はまもなく5年に達する予定であり、従来の報告がほとんどない長期間のデータを採取中といえる。この結果を第2章で述べるが、今後も可能な限り本実験を続ける予定でいる。短期間で結果が得られる試験とは違い、データが必要となるかなり以前から行っておいてこそ価値のある試験と考えて

いる。

第3章では、平成11年度に開発した結晶質岩用多連油圧式クリープ試験機を使用したクリープ試験結果について述べる。平成10年度に、稲田花崗岩の中期一軸圧縮クリープ試験をおこなった。その結果、湿潤状態では比較的応力レベルでもクリープが進行することが判明した。この点は従来ほとんど指摘されていない事項であるので、引き続き慎重に検討する必要があると考えた。平成10年度の試験は、サーボ式試験機を使用しておこなってきたが、停電に弱く、長期にわたる試験は困難である。また、空気圧式クリープ試験機では、大きな荷重を加えることができない。そこで、平成11年度に4連式油圧式クリープ試験機を開発して、比較的容易に、多数のクリープ試験結果を得ることを目指した。試験機の調整に手間取ったが、その後は順調に稼動している。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を目指した検討をおこなう予定でいる。

第4章では、低応力レベルにおける構成方程式について述べた。最近になって、超長期に亘る岩盤内構造物の安定性を検討することの重要性が高まったので、従来と比較して低い応力レベルでの長期間にわたる粘弾性的性質を検討してきた。その結果、例えば湿潤状態の田下凝灰岩にピーク強度の30%の応力を加え続けると、3年以上経過してもクリープ歪の増加はとまらないことがわかった。また、湿潤状態の花崗岩にピーク強度の50%の応力を加えた場合にも、クリープ歪が徐々に増大していくことがわかった。このように、少なくとも湿潤状態では、比較的応力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。今後も比較的小さい応力でのクリープ試験を続け、低い応力レベルでの粘弾性を調べていく予定であるが、非線型粘弾性現象は可能な限り多面的に検討していく必要がある。そこで、これまでおこな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。

第5章で、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結果について述べる。良く知られているように、従来の周圧ベッセル（圧力容器）では、金属ベッセル中に試験片が納まっており、試験片の変形や破壊状況が逐次観察できない。そこで最近になって発展の著しい透明なエンジニアリング・プラスチック製の周圧ベッセルを開発し、これを使用した周圧下での実験を行った。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。

第6章では、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結果について述べる。

## 2. 空圧式クリープ試験機による長期クリープ試験

本章では、約4年半経過した、空圧式クリープ試験機による長期クリープ試験について述べる。実験条件は、1996年度の報告書に記した通りである。

- 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：平成9年5月23日10時27分

クリープ歪の計測の概略は次の通りである。変位計の出力を直流アンプにより増幅した後、デジタルマルチメータ（アドバンテスト社製 R6441A）でA/D変換する。その際、電圧の読み取り単位は1mVとした。デジタル化した電圧を、GP-IBによりパーソナルコンピュータNEC9801に取り込む（詳細は1995年度の報告書を参照されたい）。

コンピュータでは、電圧がある値をとる最終時間のみを記録するようになってきた。

慎重を期するため、2001年4月からは、毎週月曜日と金曜日の午前10時にA/D変換した電圧も記録することとした。このようにして記録した12月末までの9ヶ月間（ $2.2 \times 10^8$  s）のクリープ歪を図2-1に示す。4月および10月に、数日～3週間の周期で、クリープ歪にして $40 \times 10^6$  s程度の変動が現れていることがわかる。この季節は日ごとの気温変化が大きい時期であり、その影響が現れている可能性がある。

クリープ歪の経時変化を片対数グラフ上に示したのが図2-2で、平成13年12月31日までの試験開始後1650日間（ $1.44 \times 10^8$  s）の結果である。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、従来の知見どおり対数クリープ則に従っているとみなして差し支えない。しかしそれ以降も通して見ると、クリープ曲線は下に凸で時間の0.1乗に比例して増加している。

図2-3に、クリープ歪とクリープ歪速度の対数の関係を示す。なお、クリープ歪速度は、図2-2に示したクリープ歪の経時変化の勾配より求めた。図2-3では最初、クリープ歪速度は $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ であったものが、クリープ歪の増大に従って、クリープ歪速度が減少していく。クリープ歪 $200 \times 10^6$ （クリープ歪速度にして、 $10^{-9} \text{ s}^{-1}$ ）まではほぼ直線であるが、それ以降のクリープ歪速度の減少率は若干小さくなる。

本年度の試験はおおむね順調であった。今後も、可能な限りこのまま実験を行っていく予定である。

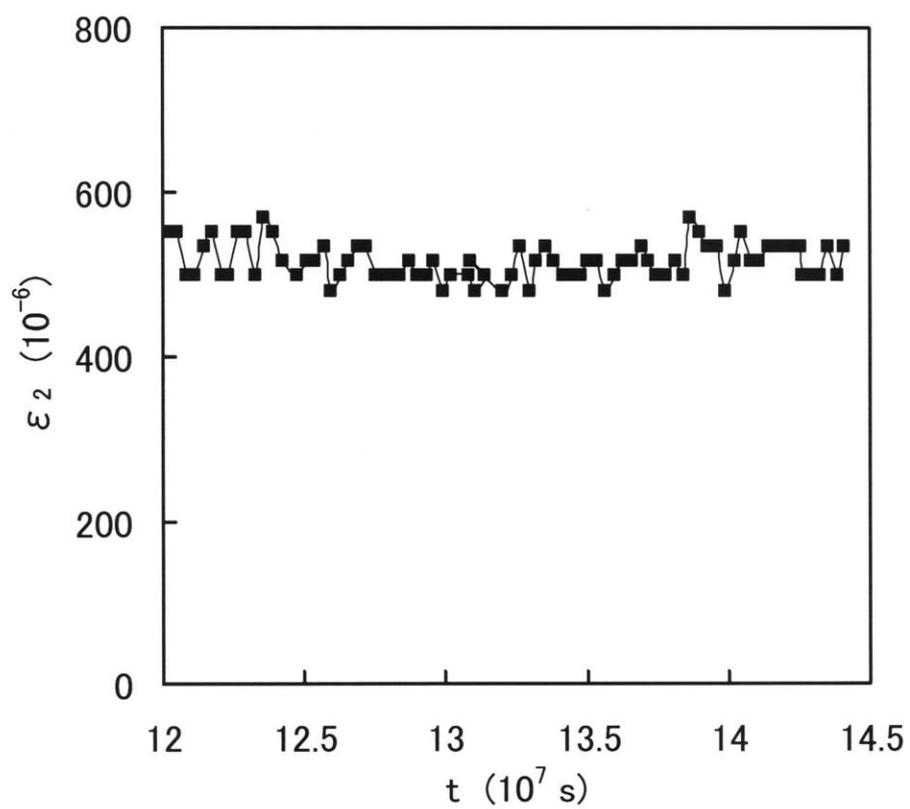


図2-1 クリープ歪の経時変化

岩石：田下凝灰岩

環境：湿潤状態

クリープ応力：一軸圧縮強度(9.1 MPa)の30%

試験期間：平成9年5月23日～平成13年12月31日

(なお表示は平成13年4月1日～平成13年12月31日)

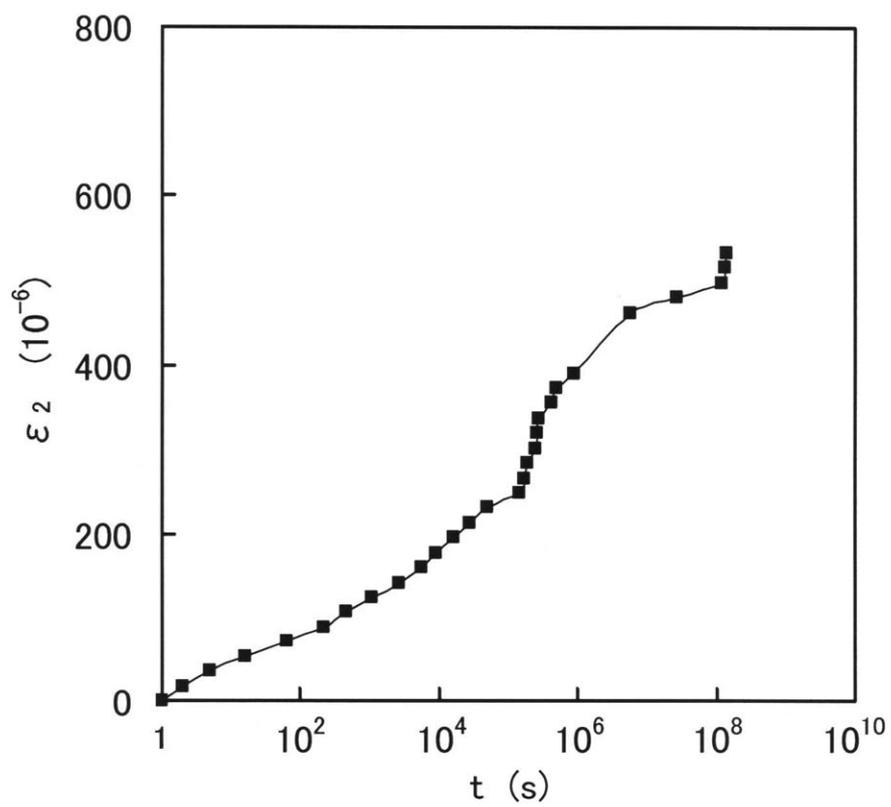


図2-2 クリープ歪の経時変化

岩石：田下凝灰岩

環境：湿潤状態

クリープ応力：一軸圧縮強度(9.1 MPa)の30%

試験期間：平成9年5月23日～平成13年12月31日

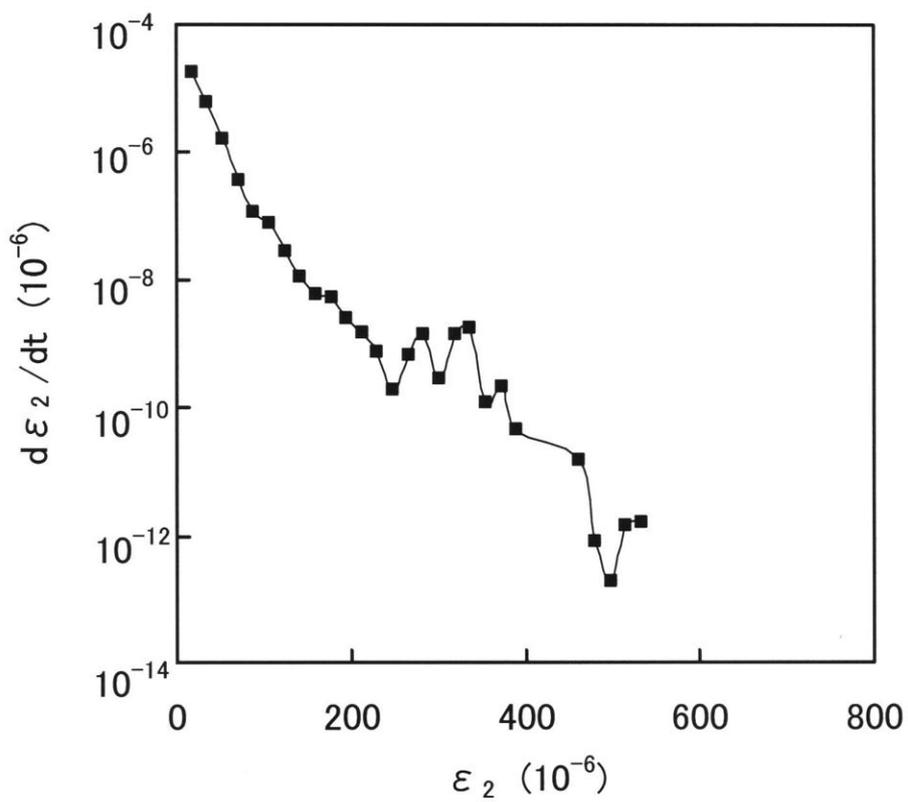


図2-3 クリープ歪とクリープ歪速度の関係

岩石：田下凝灰岩

環境：湿潤状態

クリープ応力：一軸圧縮強度(9.1 MPa)の30%

試験期間：平成9年5月23日～平成13年12月31日

### 3. 結晶質岩用多連油圧式クリープ試験機による試験

平成12年度に4連油圧式クリープ試験機による長期クリープ試験を開始した。

実験条件は以下の通りである。試験は4本の試験片で1週間おきに開始した（試験手順は2000年3月報告書 JNC TJ7400 2000-002 を参照されたい）。

○岩石：稲田花崗岩

○環境：常温下，湿潤状態

○試験片：直径20mm×高さ40mmの円柱形

○クリープ応力：91MPa〔一軸圧縮強度（190MPa）の約50%〕

○実験開始日時：1本目 平成13年1月15日

2本目 平成13年1月22日

3本目 平成13年1月29日

4本目 平成13年2月5日

試験開始から約1年が経過した。本章では，この間の計測システムの安定性及び実験結果について述べる。

#### 3. 1 計測システムの安定性

長期にわたる試験では，計測システムの安定性を保つことが重要であり，計測機器の故障の可能性も否定できない。そこで，実験前にキャリブレータ（ユニパルス製）を用いて，アンプのキャリブレーションを行った（詳細は1997年報告書 PNC TJ1602 97-004 を参照されたい）。アンプの零点を調節した後，キャリブレータからアンプへ等価歪を入力し，その際のアンプの出力値を記録した。結果を表3-1に示す。アンプの交換が容易なように，ゲインは出力値がなるべくきりの良い値になるように調節した。

クリープ試験中は約3ヶ月おきに，キャリブレータを用いてアンプの零点及びゲインの変動を調べた。結果を表3-2に示す。アンプの出力値を試験片の歪に換算すると，1mVあたり約10 $\mu$ である。表3-2(a)は約3ヶ月経過した時点での値であるが，実験前と比較して，①，②のアンプはいずれも零点の値が2mV減少している。逆に③に関しては1mV増加している。また，①，② ③のいずれのアンプとも，ゲインの変化はほとんど見られない。一方④のアンプに関しては，零点，ゲインとも変動はほとんど見られない。

表3-2(b)は約6ヶ月経過した時点での値である。①，②に関しては，ゲインはこの3ヶ月間で変動は見られないが，零点はいずれのアンプとも1mV減少している。③に関しては，この3ヶ月間で零点が1mV増加し，ゲインが1mV程度増加している。一方④のアンプは，零点，ゲインとも6ヶ月間での変動はほとんどない。

表3-2(c)は約9ヶ月経過した時点での値である。①のアンプはこの3ヶ月間で，零点が2mV減少しているがゲインの変動はほとんどない。その結果，9ヶ月間でゲインの変動は非常に小さいものの，零点は5mV変化している。この変化を歪に換算すると約50 $\mu$ でありクリープ歪と比較すると無視できない量である。②のアンプはこの3ヶ月で零点が1mV減少しており，9ヶ月間で，零点が4mV程度減少している。①と同様ゲインの変化はほとんどない。③はこの

3ヶ月で以前とは異なり、零点が1 mV増加している。ゲインの変動は小さかった。9ヶ月間通してみると、零点は1 mV増加しているが、①、②のアンプに比べ変動は小さかった。④のアンプはこの3ヶ月間で零点、ゲインともほとんど変動しておらず、9ヶ月通してみても、変化はほとんどない。

このように、ゲイン量の変動はいずれのアンプとも非常に小さかった。一方、零点の変動は④のアンプでは見られなかったが、①～③のアンプでは見られた。その中でも①のアンプの零点の変化は、歪に換算して約50  $\mu$ と大きかった。

ゲインの変動はないため、零点が変化しても実験データを補正することはできる。しかし、数年にわたる長期の試験で定期的にアンプの値の変動を調べることは、非常に手間がかかる。原因として、直流増幅器を用いている点、試験期間中に短時間の停電があった点などが考えられる。これらに加え、変位計の経時変化についても今後検討が必要であると考えている。

### 3. 2 クリープ歪の経時変化

約1年間のクリープ試験の結果を図3-1に示す。図では縦軸にクリープ歪をとった。クリープ歪は載荷開始後1秒経過したときの歪を起点とした。横軸には時間の対数をとった。これも載荷開始1秒後を起点としている。また、3.1のように①、②、③のアンプに零点の変動が見られたので、試験片①、②、③については、9ヶ月の間で零点が初期値から直線的に変化するとして補正を行った。

図3-1(a)より、試験片①のクリープ歪は、試験開始後約10 s間で約60  $\mu$ までほぼ直線的に増加している。その後約 $10^3$  sまでは変化が小さいが、それ以降は約 $10^6$  sまで再びほぼ直線的に増加している。横軸が対数目盛りのため、 $10^6$  s以降は歪の増減が激しくなっており、約 $10^7$  sで約200  $\mu$ から約100  $\mu$ まで減少した後、再び200  $\mu$ まで増加している。

図3-1(b)では、試験開始後約 $10^3$  s間はクリープ歪の増加は非常に小さい。その後約 $10^4$  sまではほぼ直線的に増加し、クリープ歪は約50  $\mu$ に達している。歪は約 $10^6$  sまでは徐々に増加し、その後変動が激しくなっている。試験片①と同様に $10^7$  sあたりで、歪が約100  $\mu$ 減少した後、ほぼもとの値に戻っている。

試験片③のクリープ歪は、初期の10 s間で約50  $\mu$ まで若干上に凸に曲線を描きながら増加している。その後、 $10^6$  s程度まではほぼ直線的に緩やかに歪が増加していき、その後変動が激しくなっている。 $10^7$  s付近で若干歪が減少しているように見えるが、その量は①、②の試験片ほど大きくなく、約50  $\mu$ である。

図3-1(d)より、試験片④のクリープ歪は約 $10^4$  sまでほぼ直線的に増加していき、約50  $\mu$ に達している。その後約 $10^6$  sまではほとんど変化がない。約 $10^7$  sで負の値をとった後、50  $\mu$ まで回復している。

いずれの試験片も載荷後約 $10^7$  sが経過したあたりで歪が一度減少し、その後、ほぼもとの値まで回復している。これは温度の変化に関係していると考えられる。実験室は温度が管理されているが、夏季と冬季では設定温度が若干異なる。実験室内の温度を測定した結果、夏季は23～26  $^{\circ}$ C、冬季は19～22  $^{\circ}$ Cであった。花崗岩の線膨張率は4～10  $\mu$ /Kであり、夏季と冬季で約5  $^{\circ}$ Cの温度差があれば、20～50  $\mu$ の歪の変化が生じることになる。実験開始後、約1

$0^7$  s 経過したあたりで、冬季から夏季への温度の変化を迎えており、その影響で歪が減少したと考えられる。その後、歪がもとの値に戻っているのは夏季から冬季への温度の変化によるものと思われる。

いずれの試験片でも試験開始後約  $10^4$  s 間で、 $50 \sim 80 \mu$  のクリープ歪が生じている。この間の歪の増加傾向は試験片によって異なっており、試験片①と③については若干上に凸であるのに対し、試験片②は下に凸の曲線を描いている。また、試験片④についてはほぼ直線的である。このように、4本の試験片でかなりばらつきがあるが、この原因の一つとして間隙水の影響が考えられる（小島ら，1995）。

$10^4$  s 以降はいずれの試験片もほぼ対数クリープ則に従っている。しかし、試験片①、②については、若干下に凸の曲線を描いているようにも見える。もしそうであると仮定すると、長期にわたるクリープでは、従来の対数クリープ則に基づく歪の予測値よりも歪が大きくなることになる。この点については、今後も実験及び検討が必要であると考えている。

### 3. 3 クリープ歪速度の経時変化

得られたデータからクリープ歪速度を求めた。結果を図3-2に示す。試験片①、②、④については、クリープ歪速度は実験開始後ほぼ直線的に減少していき、 $10^6$  s 以降で  $10^{-11}/s$  とほぼ一定の値をとっている。この3本の試験片については載荷直後のクリープ歪速度は得られなかった。試験片③については、載荷直後のクリープ歪速度は約  $10^{-3}/s$  であり、その後約10秒間で約  $10^{-6}/s$  まで急激に減少している。それ以降は他の試験片とほぼ同じように直線的に減少していき、 $10^6$  s 以降では  $10^{-11}/s$  に落ち着いている。すべての試験片について、載荷直後からクリープ歪速度が直線的に減少していくとして、試験開始後10sでの歪速度を見積もると約  $10^{-5}/s$  であり、他の岩石との差は小さい。しかし、3.2で述べたように間隙水の排水の影響があると、図3-2(c)のように初期の歪速度が急に折れ曲がる可能性がある。

従来の短期のクリープ試験では、クリープ歪速度はほぼ直線的に減少していき、最小値をとった後は歪速度が増加し、破壊に到っている。つまり、短期のクリープ試験ではクリープ歪速度は経過時間とともに常に変化しており、2次クリープ領域は存在しないと言える。しかし、今回の実験結果では歪速度は最小値をとった後、一定の値で推移している。つまり、2次クリープの領域が存在していることになる。この点は非常に興味深い結果であり、今後も実験及び検討が必要であると考えている。

開発した4連油圧式クリープ試験機で、約1年間試験を行った。計測システムについては課題が残った。アンプの零点の変動が大きく、数年という長期にわたる試験を行う際にはデータの信頼性が低下するおそれがある。この点については、印加電圧に搬送波を用いる歪測定器の導入を検討している。また、今回の結果でも明らかであるが、一つ一つの機器の間にも精度の差があり、十分な検定が必要であると考えられる。

稲田花崗岩では、歪の増加傾向にばらつきが生じることがわかった。また、その後は、試験片

4本中2本は、対数クリープ則に基づく歪の予測値よりも歪が大きくなるという結果が得られた。クリープ歪速度については、4本の試験片とも、最小値をとった後、ほぼ一定の値で推移しており、従来の短期クリープ試験とは異なる結果が得られた。これらの点は今後も実験及び検討を続けていく予定である。

#### 参考文献

小島隆・村井正・松木浩二（1995）：日本地熱学会誌，17，4，p.285－295

表3-1 アンプのキャリブレーションの値 (実験前)

キャリブレータからの 入力値 (mV/V)	アンプの出力値 (mV)			
	①	②	③	④
0	1	1	1	1
0.25	499	499	499	499
0.5	1000	1000	999	999
0.75	1500	1500	1500	1500
1	2001	2000	2000	2000
1.5	3001	3001	3001	3001
2	4003	4002	4002	4002
2.5	5004	5003	5004	5004
3	6005	6004	6005	6005

(アンプの出力値とは、キャリブレータから左端の等価歪を入力したときのアンプの出力電圧)

表3-2(a) アンプのキャリブレーションの値 (実験開始後88日)

キャリブレータからの 入力値 (mV/V)	アンプの出力値 (mV)			
	①	②	③	④
0	-1	-1	2	1
0.25	498	497	500	499
0.5	998	997	1000	1000
0.75	1499	1498	1500	1500
1	1999	1998	2001	2000
1.5	3000	2998	3001	3001
2	4001	3999	4002	4002
2.5	5003	5000	5003	5004
3	6004	6000	6003	6005

表3-2(b) アンプのキャリブレーションの値（実験開始後191日）

キャリブレータからの 入力値 (mV/V)	アンプの出力値 (mV)			
	①	②	③	④
0	-2	-2	3	1
0.25	497	496	502	500
0.5	997	997	1002	1000
0.75	1498	1497	1502	1500
1	1998	1997	2002	2001
1.5	2998	2997	3002	3001
2	4000	3998	4003	4002
2.5	5001	5000	5004	5004
3	6002	6000	6005	6005

表3-2(c) アンプのキャリブレーションの値 (実験開始後261日)

キャリブレータからの 入力値 (mV/V)	アンプの出力値 (mV)			
	①	②	③	④
0	-4	-3	2	1
0.25	495	495	501	499
0.5	995	995	1001	1000
0.75	1496	1496	1501	1500
1	1996	1996	2002	2000
1.5	2997	2996	3002	3001
2	3998	3997	4003	4002
2.5	5000	4998	5004	5004
3	6001	5999	6005	6005

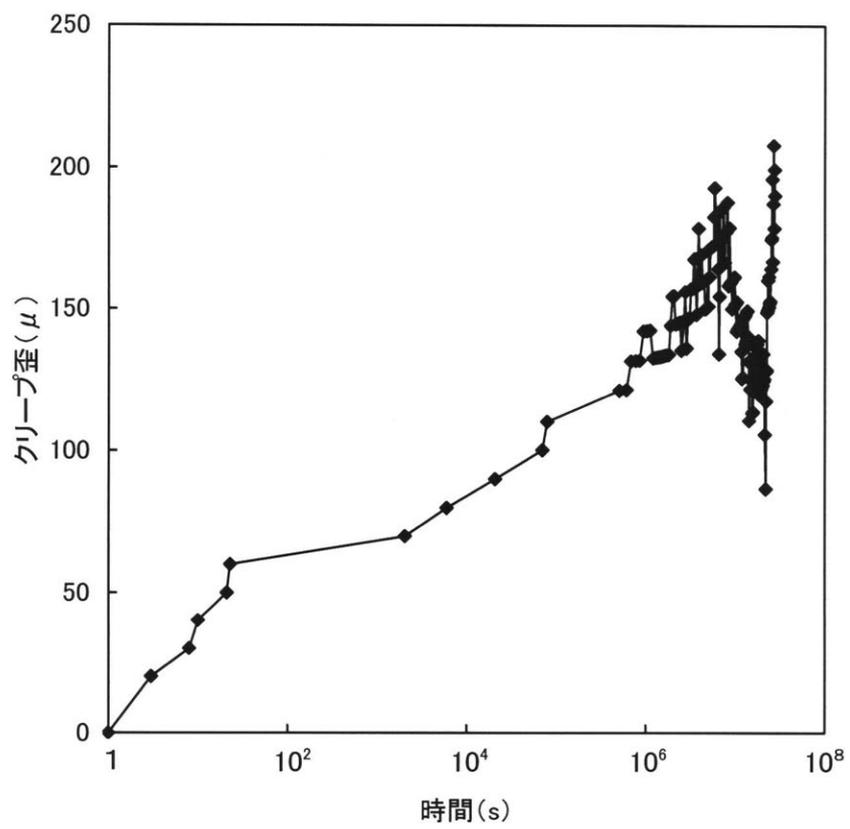


図 3 - 1 (a) クリープ歪の経時変化 (試験片①)

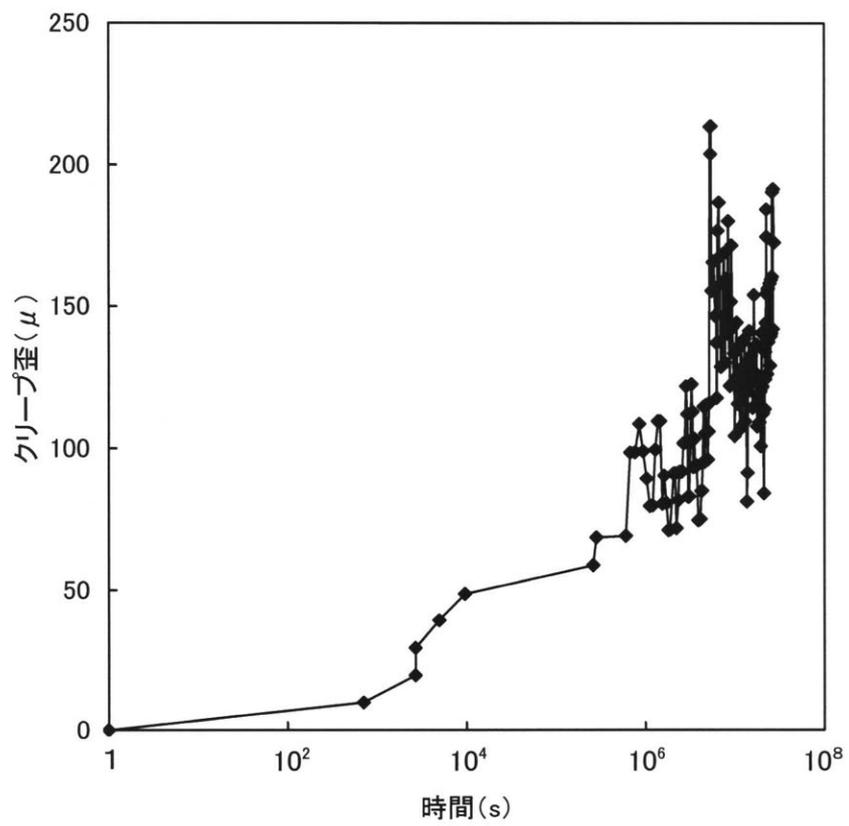


図 3 - 1 (b) クリープ歪の経時変化 (試験片②)



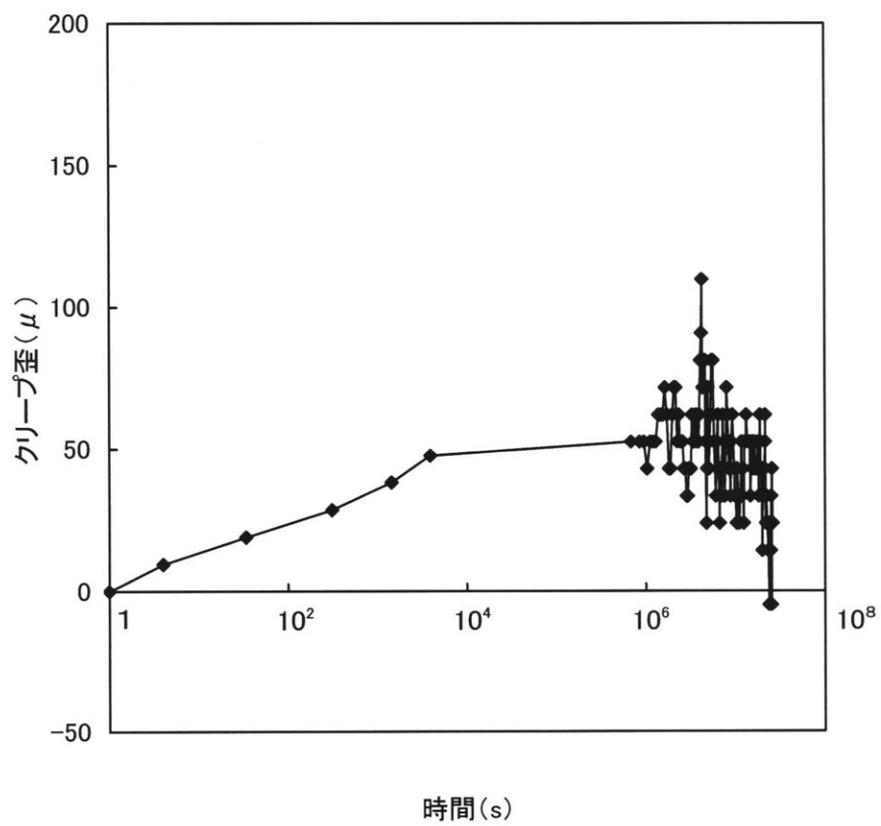


図 3 - 1 (d) クリープ歪の経時変化 (試験片④)

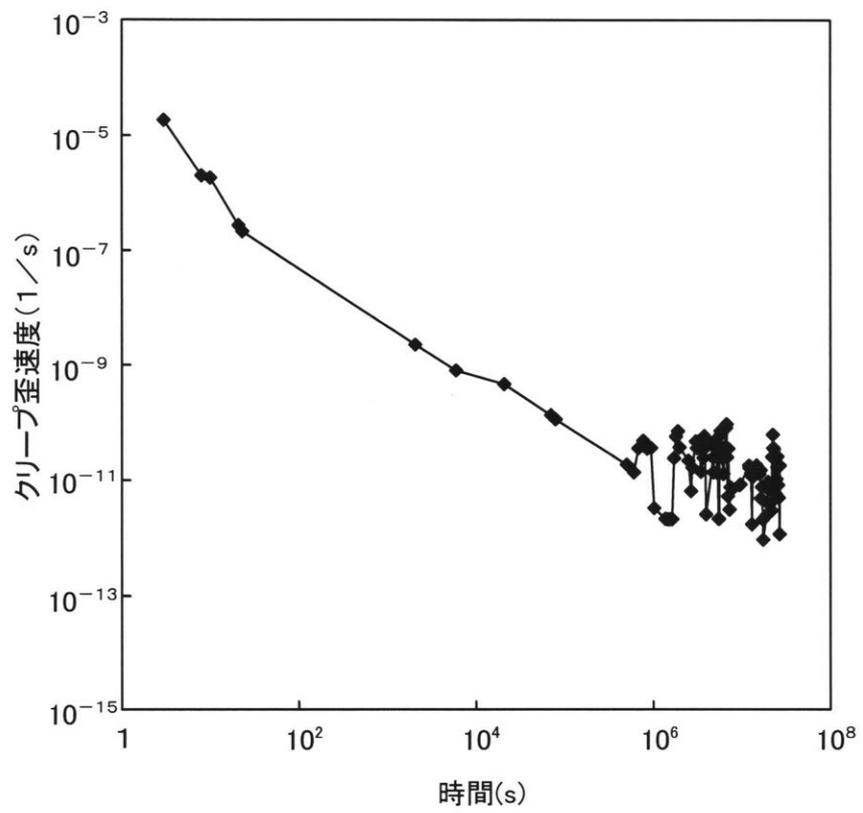


図3-2(a) クリープ歪速度の経時変化 (試験片①)

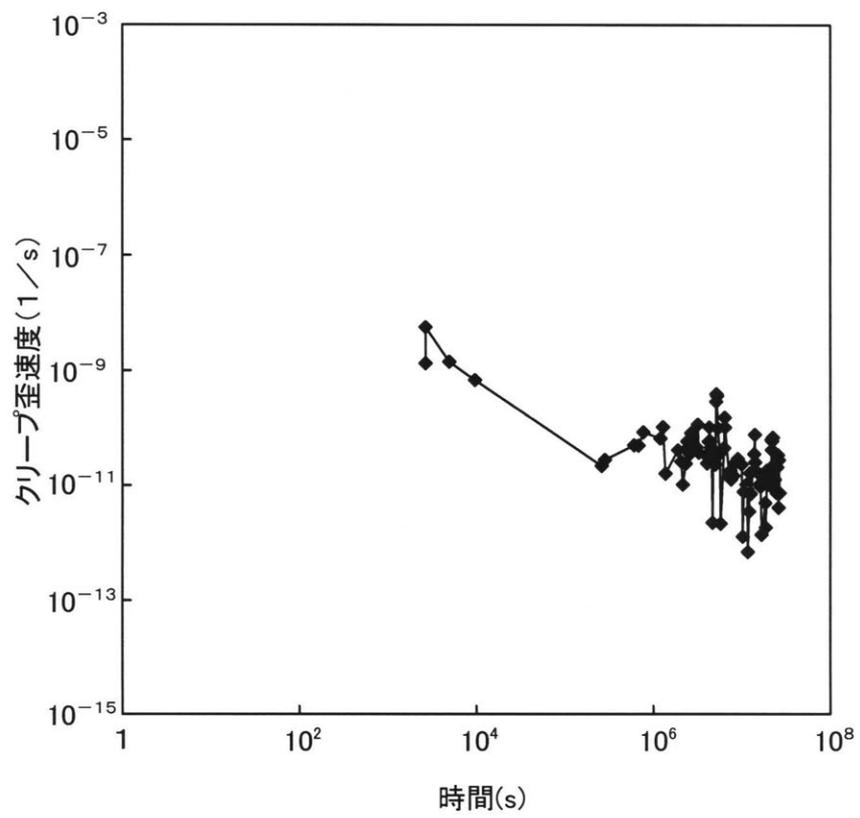


図 3 - 2 (b) クリープ歪速度の経時変化 (試験片②)

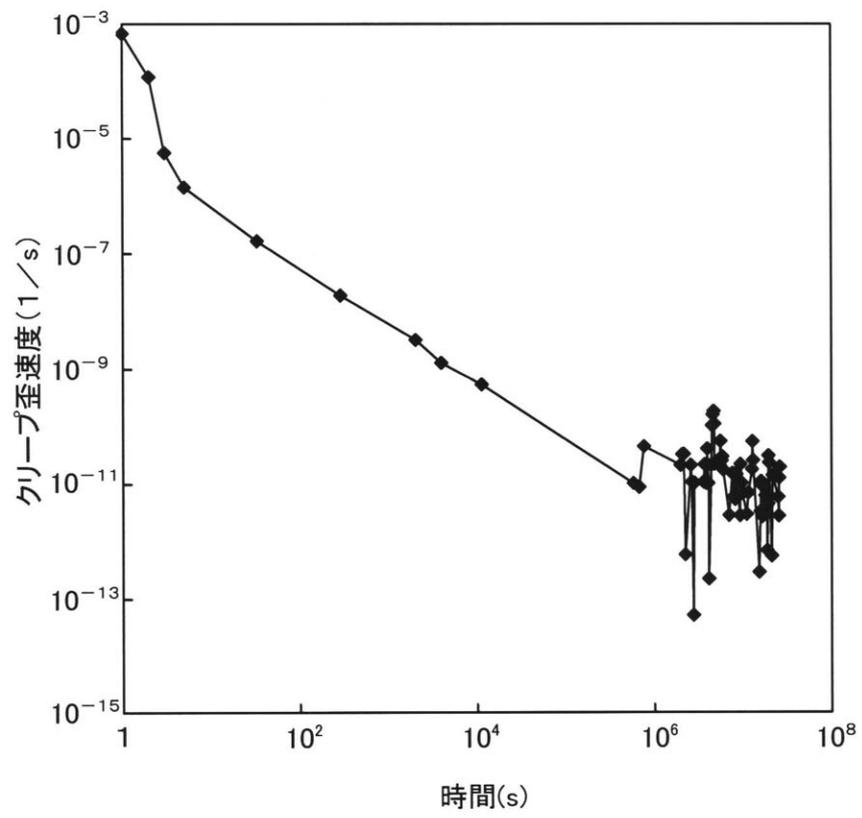


図 3-2(c) クリープ歪速度の経時変化 (試験片③)

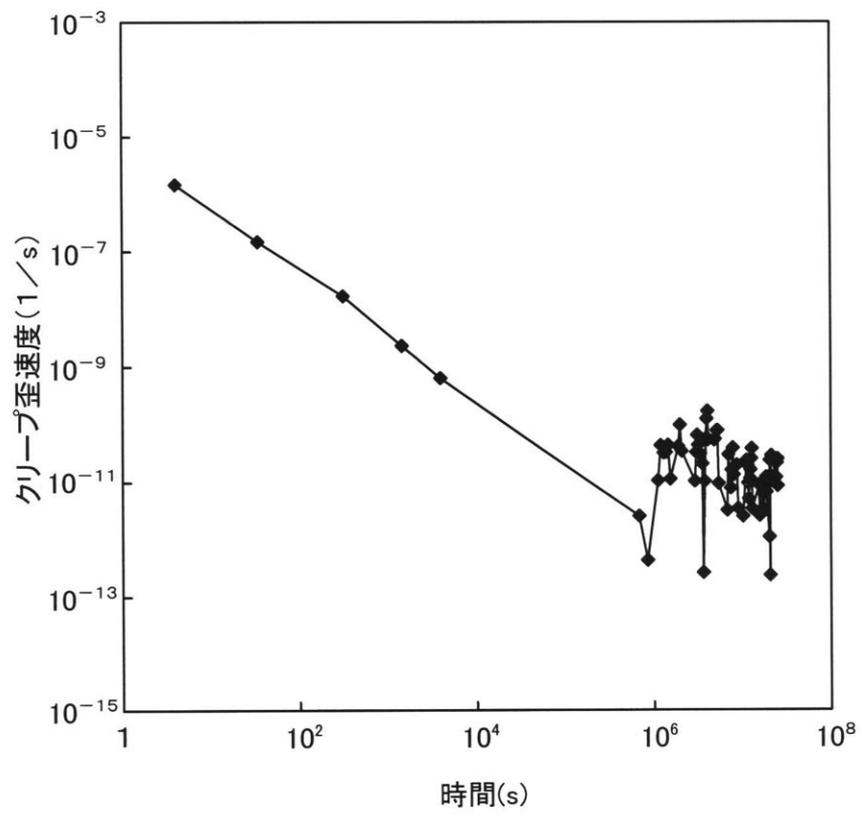


図 3 - 2 (d) クリープ歪速度の経時変化 (試験片④)

## 4. 低応力レベルにおける構成方程式の構築

これまでおこなってきた田下凝灰岩の長期クリープ試験結果をもとにして、低応力レベルにおける非線形粘弾性構成方程式を検討した。

### 4. 1 はじめに

地上における建設物や構造物には、やむをえず環境にかなりの負荷をかけてしまう恐れが常に付きまとう。これを克服する一つ的手段として地下空間の利用が考えられる。地下空間にトンネルやドームなどの構造物、あるいは廃棄物の処分場などを設けることは、現在の技術レベルで可能であるし、さらにこれからの技術的な発展を考えると費用の面でも競争力がでてくると予想している。ただし注意しなければならないことは、一旦地下構造物を作ったら長年にわたる保守のことも考えねばならないし、寿命がきたからといってそのまま放置することもおそらく許されないことである（大深度地下利用技術調査小委員会，2000）。したがって、地下利用にあたっては、地下構造物を充分慎重に計画し、できる限り長期間にわたって使用することを前提にするのが賢明とおもわれる。ばくぜんと長期間といったが、トンネルなどでは最低数100年、廃棄物の処分場などでは数1000年から数万年の使用が前提となるであろう（核燃料サイクル開発機構，1999）。これまでの実績では、土木工学や鉱山学に限らず、設計に際して前提とされる使用期間はせいぜい100年位ではないかと思う。したがって、比較的短期間の使用に関わる物性はかなりよく調べられてきたが、長期間にわたるデータの蓄積はどの分野でも比較的少ない現状といえる。

本章の主たるテーマである岩石のクリープについて考えてみると、地質学的見地からの超長期にわたる現象解明の要求もあり、長期間にわたるデータの重要性に対する認識は、他の分野よりも深いと思われる。例えば、Ito & Sasajima (1987) は花崗岩と斑れい岩のはりのたわみを長年にわたって観測した。その結果をみると温度の変動などにより、たわみはかなり変化するものの、時間経過に伴うたわみの増加は否定できないように思われる。筆者がかかわった研究でも、西松・山口 (1980) が引張クリープを、山口ら (1983)、大久保・西松 (1986)、福井ら (1989)、大久保・秋 (1993, 1994a, 1994b)、趙ら (1995) が圧縮応力下でのクリープや応力緩和を比較的長期にわたっておこなってきたが、さまざまな制約のためその期間は3ヶ月を超えなかった。たった一つの例外は、原位置のコンバージェンスなどを1年以上にわたって計測したことであった（大久保ら，1984a, 1984b）。

このような状況下で、長期間のクリープ試験をおこなうことにして、準備を1994年の春に始め（大久保ら，1996）、現在までに、湿潤状態での田下凝灰岩を対象とした約3年間にわたるデータを2つ得たのでまとめて報告することにした。以下では、試験経過と得られたデータの解釈を、構成方程式を交えて議論する。

## 4. 2 実験装置の開発経緯

試料岩石の候補としては使用経験が深い三城目安山岩と田下凝灰岩があげられたが、比較的小さなクリープ応力で済む田下凝灰岩に決めた。試験装置としては、重錘式、油圧式、空気圧式の3者を候補として検討した。重錘式は十分な防振を施した基礎が必要であるため、費用の点で無理と考えてまず候補から外した。油圧式と空気圧式は、両者とも長期試験が可能であると考えたが、最終的には空気圧式にした。その最大の理由は、万一の故障時の配管や部品の購入がより速やかだと考えたからである。しかし、これは著者のおかれた当時の状況下における判断であり、現在では油圧式でもほとんど変わらないと考えている。

次なる検討課題は試験機室の問題であった。温度のみならず湿度も厳密に制御された部屋が望ましいが、これは初期投資額の点でも、また試験中にかかる空調機の電力代の点でも無理なことがわかった。せいぜい可能なのは業務用空調機の導入であったが、これまでの経験からしてこの程度の空調では、歪速度  $10^{-10}$  / s 程度が精一杯であり、世界的に最高水準であるとともに著者が実現したいと考えた歪速度  $10^{-12}$  / s の測定は難しいと判断した。そこで試験片全体を水の中につけた完全湿潤状態でのクリープ試験を、かなりの試行錯誤と予備試験の末に選択した。特にわが国の場合、地下水位が高く、地下構造物は、どちらかという、湿潤状態に近いことが多いとの考えももちろん判断材料に加味しての結果であった。

次に検討したのは、変位（歪）の測定方法であった。いくつかの選択肢を予備試験などで検討したのち最後に可能性のあるものとして残ったのが、差動変圧器と歪ゲージ式変位計であった。両者とも十分に注意して使用すれば、 $1\ \mu\text{m}$ 以下の分解能が可能であることがわかり性能としては優劣つけがたしとの検討結果であった。最終的には歪ゲージ式の変位計を使用することにしたが、その理由は①著者の使用経験がより長く細部にわたって動作原理等を承知していた、②安価であること。②について少し申し添えておきたい。変位計にしろ対応したアンプにしろ、一式だけならなんとか購入できるが、実は同じ製品でも一つずつ特性が異なるので、著者は、同一の製品を5～10台程度購入し、個別に評価試験をして適当な使用方法を決めている。最も良いものを長期試験用にして、安定性の悪いものは短期の試験用にすることが多い。このような使用方法のため、安価であることは相当に重要であった。

変位計を歪ゲージ式とした後の課題は、歪ゲージ式アンプの印加電圧を直流にするか、交流にするかの選択であった。これも事前に評価試験をおこなったところ、ゲインの変化は直流が少なく、零点の変化は交流が少ないのごく常識的な結果を得た。総合的に考えて両者の差は少ないと思われたが、①交流式のアンプを使用すると、外部キャリブレーションによるゲインの検定に際して、R（抵抗）のみではなくC（浮遊電荷容量）まで考慮せねばならないため相当の注意が必要なこと、②直流の場合、信号伝送線の接続部がわずかでも劣化すると熱起電力が大きくなる懸念があるが、十分に注意を払えば克服できることから、最終的に直流式のアンプを使用することにした。

最後にどのような水を使用するかを検討をおこなった。これに関しては、著者の経験は浅く、従来の文献をまず調査することにした（例えば Vutukuri et al, 1974）。その結果では、pHなどがどのように影響するかについての一般的な定説はどれもなさそうだとの感触を得た。これも実状にあわせての配慮からであったが、pHの常時制御は費用の面で事実上不可能であった

ので、妥協案として、購入したpH7のイオン交換水に大気中の二酸化炭素が溶解込み、pHが安定するまでしばらく試験室内に放置してから、クリープ試験で使用することにした。その時のpHは5.7であった。なお、試験中、水面から水が蒸発していくので継ぎ足す必要があるが、その際にもこうしてpHが安定した水を継ぎ足すことにした。なお、田下凝灰岩の場合には、試験片を浸した水のpHは殆ど変化しないし、色の変化もなかった。

まとめとして、最終的な試験条件を記しておく。試験室は常時空調し、温度変化は $22 \pm 2^\circ\text{C}$ であった。また、クリープ歪は、大久保・西松(1986)が提案した方法により記録・保存した。すなわち、クリープ歪は温度変化などの影響を受けて多少変動しながら増加していくので、クリープ歪がある値を取った最後の時間を秒単位で磁気メディアに記憶した。

こうした準備期間を経た後、1994年後半より第1回の試験を開始した。試験は順調であり特に問題となることもなかったが、計算機と連結したCRTだけは焼きつきがはなはだしかったので途中交換した。約2.5年経過後に、変位の測定値が不自然な動きを示すようになったのでやむを得ず試験を中止した。中止後に調査した結果では、歪アンプの出力用のオペアンプが故障していた。これに関してメーカーに問い合わせたところでは、例のあまりない故障とのことであった。あとで述べるような若干の改良の後、第2回の試験を行い現在までにほぼ3年が経過した。2本ではあるが、これまでに例の少ない3年という期間にわたるデータが得られたのでここに発表することにした。

#### 4.3 試料岩石と実験装置

表4-1に田下凝灰岩の気乾と湿潤状態の特性を示す。表中のnについて後ほど(4-4)式のところで説明するが、この値が大きいほど非線形性が強く、わずかなクリープ応力の変化でクリープ寿命が大きく変わる。この表からわかるように、田下凝灰岩は気乾状態での一軸圧縮強度が16MPaとかなり弱い岩石である。ことに、湿潤状態下では、強度も剛性も顕著に低下することがわかる。この田下凝灰岩について著者は、比較的高い応力レベルではあるが、多くのクリープ試験をおこなってきている。また、秋(1995)は湿潤状態で、短期間ではあるが詳細なクリープ試験のデータを採取した。

本研究では、クリープ実験に際してクリープ応力レベルを30%( $9.1 \times 0.3\text{MPa}$ )に選んだがその理由は次のとおりである。①長期に使用することを前提とした構造物の安全率は2以上に取られるであろう。この観点からすれば、クリープ応力を4.5MPa以下にすることが適当であろう。②現在の地下空間利用の要請から考えて、凝灰岩に期待される深度はさほど深いとは思われず大体100mくらいまでであろう。その時の地圧は2~2.5MPaである。以上2点を勘案して切りのよい数字を選択すると、応力レベル30%(2.73MPa)が第一候補としてあがった。

図4-1には田下凝灰岩の完全応力-歪曲線を示すが、これからわかるように、田下凝灰岩はクラスIの特性を持ち、一軸圧縮試験ではせん断面にそってマクロな破壊をすることが多い。3次クリープ開始時の歪についてはいくつかの意見がある。たとえば、Wawersik(1971)らは、強度破壊点以前の応力-歪曲線上からクリープ試験は出発し、強度破壊点以降の応力-歪曲線と交差するまでにクリープ歪が大きくなると、3次クリープがはじまるとしている。この意見

に従えば、田下凝灰岩の応力レベル30%におけるクリープ試験では、クリープ歪 $6\sim 8\times 10^{-3}$ で3次クリープがはじまる。福井ら(1989)は、強度破壊点を起点とする除荷曲線と交差するまでにクリープ歪が大きくなると、3次クリープがはじまるとしている。後者の考え方は、 $1.5\sim 2\times 10^{-3}$ だけクリープ歪が増加すると3次クリープがはじまることになる。

試験開始時点でこれ以上の情報はなく、クリープ応力は見切り発車で30%として試験を開始した。

図4-2に空圧式クリープ実験装置を示す。基本的には既報(大久保・西松, 1986)で述べたものと同じであるが、一つ一つの機器や部品の選定には十分に気を配ったつもりである。コンプレッサーは、市販のタンク容量 $30\text{ dm}^3$ で最大常用圧力 $1\text{ MPa}$ のものを使用した。これは、2回目の試験の最中に破損した。破損はモータに繋がった動力線が焼き切れるというものであった。おそらくモータ軸受けの油が切れて焼きついたものと思われる。なお、コンプレッサーは、上限と下限圧力を設定し、圧力が下限まで下がるとモータが回転をはじめ、上限に達するとモータの回転が止まる。概略の連続モータ回転時間は1分程度で、次の運転までの時間は2~3時間である。減圧弁は、米国 Bellofram 社製のもので、出口圧力を $0.014\sim 0.84\text{ MPa}$ の範囲で設定でき、設定圧の長期変動は $0.001\text{ MPa}$ 程度であった。空気圧シリンダーは、Bellofram 社製の有効受圧面積 $141\text{ cm}^2$ のものであり、ベロフラムと呼ばれる一種の風船がシリンダー内にあり、空気の漏れ止め用のシールが使われていないので、圧力 $\times$ 有効受圧面積でもって荷重が計算できる。

変位計は、(株)東京測器研究所製の測定範囲 $\pm 2\text{ mm}$ シングルカンチレバー式のものを使用した。歪増幅器は、(株)共和電業製の印加電圧が直流式のものを使用した。これは、前述のように途中で1回の交換を要した。このアンプの出力を、(株)アドバンテスト製のデジタルボルトメータに導き、さらにGPIBにて計算機に取り込んだ。

圧力は、減圧弁で制御されるが、モニター用として歪ゲージ式の圧力計とブルドン管式圧力計(0.5級)で常にモニターした。

#### 4.4 試験片#1と試験片#2の結果

図4-3にクリープ歪曲線を示す。縦軸のクリープ歪は、載荷開始後1s経過したときの歪を起点とした。載荷動作(バルブを開く)後、0.3sで目標とする荷重にほぼ達するが、若干の振動があることなどから、これらの影響がなくなった1s後を起点とした。横軸は時間の対数である。#1は1994年11月22日に実験を開始した。約1000sまで片対数グラフ上で滑らかに上昇していくが、その後傾きをやや増し、約10万秒後からは逆に傾きが緩やかになる。その後、300万s(35日)後からまた傾きを増す。一方、#2は1997年5月23日に開始した。1000s後までは#1とほぼ同じ傾向で時間経過にともなってクリープ歪は上昇していく。さらにその後も歪は上昇していくが、#2より若干小さいことがわかる。

クリープ歪曲線の近似法は各種有るが(Kidybinski, 1966; Parsons & Hedley, 1966), その内もっとも簡単な時間 $t$ のべき乗による近似を採用する。また、応力依存性を表す関数には任意性があるが、仮にべき乗として議論を進めることにする。

$$\varepsilon = \alpha \sigma^\nu t^{\frac{1}{\mu+1}} \quad (4-1)$$

$\varepsilon$  は歪,  $\sigma$  は応力,  $t$  は経過時間で  $\alpha$ ,  $\nu$ ,  $\mu$  は定数である.  $\mu$  をどのように決めるかには任意性があるが,  $\mu = 9$  よって  $1/(\mu + 1) = 0.1$  として計算した結果を図 4-3 に示す. なお, #1 と #2 の  $\alpha \sigma^\nu$  は, それぞれ  $160 \times 10^{-6}$  と  $120 \times 10^{-6}$  ( $s^{-\frac{1}{\mu+1}}$ ) とした. #1 では近似曲線を測定結果が波打ちながら往復するが, #2 ではデータ点と近似曲線との乖離は比較的少ないことがわかる.

さて (4-1) 式を  $t$  で微分すると次式が得られる.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\mu+1} \alpha \sigma^\nu t^{\frac{1}{\mu+1}-1} \quad (4-2)$$

上で求めた  $\alpha \sigma^\nu$  と  $\mu$  を代入して計算した結果を図 4-4 に示すが, このように両対数グラフ上では直線的にクリープ歪速度が減少していき, 約 3 年後 ( $10^8$  s 後) の歪速度は毎秒  $10^{-12}$  程度であった. また, 同じ図 4-4 に歪速度の測定値も ■ で示した. 測定値はクリープ歪の増分を時間増分で割ったもので, ある程度のばらつきは見られるものの, 実線で示した計算結果と測定値の傾向は当然ながらよく一致している.

本実験をおこなう前に, 比較的高い応力レベルにて田下凝灰岩のクリープ試験をおこなった (大久保, 秋, 1994a & 1994b). 使用した実験装置は, 本論文と同じ空気圧式クリープ試験機であり, 測定装置もほぼ同じである. 湿潤状態では, 63%, 68%, 73%, 78%, 82%, 87%, 92% の 7 段階の応力レベルで試験がおこなわれ, 各段階での試験片の数は 8 ~ 11 個であった. これらのデータを, 今回の結果と比較してみる.

クリープ寿命の幾何平均値と応力レベルの関係を図 4-5 に示す. また, クリープ寿命が応力レベル  $\sigma^*$  のべき乗に反比例するとした近似曲線を, 実線で描いておいた.

$$t_c = (\sigma^*)^{-n}$$

なお, 右辺の係数はまるめて 1 とした. また, 従来の研究に基づいて,  $n = 2.3$  とした (大久保, 秋, 1994a; 秋, 1995).

クリープ寿命はばらつくが, 各応力レベルから一つずつ選択して描いたクリープ歪曲線を図 4-6 に示す (大久保・秋, 1994b). これからわかるように, 経過時間が小さいうちはいずれもやや下に凸のクリープ曲線に従って徐々にクリープ歪が増加していく. その後, 経過時間が増すと次第に傾きが増し, やがて 3 次クリープを経て破壊に至る. 図 4-6 には, 図 4-3 に示した応力レベル 30% のときの近似曲線も実線で描いておいた.

図 4-6 のままでは各応力レベルでの結果が比較し難いので, 次のような操作をしたクリープ歪速度曲線を両対数グラフ上に描いてみることにした. まず横軸の経過時間を寿命  $t_c$  でわった  $t^*$  とする. こうすることにより  $t^* = 1$  で全て破壊することになるが, 応力レベルごとにクリープ歪速度が異なる. そこで, 試行錯誤の後, クリープ歪速度に  $t_c$  をかけた  $\varepsilon^*$  を縦軸とする

と、高い応力レベルでの結果は、図4-7に示す2本の実線間の比較的狭い区間に入る(大久保・秋, 1994b)。

図4-4に示した応力レベル30%でのクリープ歪速度の経時変化を、クリープ寿命  $t_c = (\sigma^*)^{-n}$  で基準化した2本の実線も図4-7に示す。横軸の実験範囲は  $t^* = 10^{-4}$  までであるが、この付近の傾きは従来の結果も今回も約-0.9である。ただし、今回の実験と従来の結果とのあいだには、若干の食い違いがある。この食い違いを定量的に論ずるには、2回の実験では無理で、今後の追実験が必要と考える。

#### 4.5 構成方程式による検討

##### 4.5.1 1次クリープをあらわす構成方程式

以下の議論では、簡単のため、荷重条件を一軸圧縮応力下に限ることとする。

既報にてコンプライアンス可変型構成方程式を提案した(大久保ら, 1987)。この構成方程式は、見かけ上コンプライアンス  $\lambda = \varepsilon/\sigma$  が時間とともに変化するとしたもので、取り扱い易い変数分離形の場合には次のように書ける。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = g(\sigma^*)f(\lambda^*) \quad (4-3)$$

なお、簡単のため(4-3)式の  $\lambda^*$  は  $\lambda$  を初期値  $\lambda_0$  で基準化した値 ( $\lambda^* = \lambda/\lambda_0$ ) とする。また、 $\sigma^*$  は応力  $\sigma$  を一軸圧縮強度  $\sigma_c$  で基準化した値 ( $\sigma^* = \sigma/\sigma_c$ ) とする。(4-3)式において右辺が、 $g(\sigma^*) = a(\sigma^*)^n$ 、 $f(\lambda^*) = (\lambda^*)^m$  のように近似できる場合について、解析(大久保, 1992)と数値計算(大久保ら, 1998)で調べた。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a(\sigma^*)^n (\lambda^*)^m \quad (4-4)$$

その結果、例えば、岩石の一軸圧縮強度の荷重速度依存性がかなりよく再現できること、また、応力-歪曲線についても強度破壊点以降まである程度近似できることが判明した。しかしながら、これをそのままクリープに適用しようとすれば、(4-4)式から直ちにわかるように、 $d\lambda^*/dt$  に比例するクリープ歪速度  $d\varepsilon/dt$  は、時間経過にともない単調増加することになる。すなわち、(4-4)式は1次から3次までのクリープの内、3次クリープ相当分を主たる対象としたものといえる。

これまでの実験結果で判明しているのは、極端に高い応力レベルでない限り、荷重後しばらくの間、次第に歪速度が減少する1次クリープないし過渡クリープと呼ばれる区間があることである(たとえば Cruden, 1971)。

1次クリープでは、時間の経過(コンプライアンスの増加)にともなってクリープ歪速度が減少していくことを、構成方程式に取り入れるために、(4-3)式に立ち返って  $f(\lambda^*)$  の関数形を再考することにした。この場合、 $f(\lambda^*)$  の満たすべき要件の一つは、 $\lambda$  の増加にともなって次第に減少していくことである。(4-4)式の場合にはべき乗  $f(\lambda^*) = (\lambda^*)^m$  で近似したの

で、若干の試行錯誤の後、今回は  $(\lambda^* - 1)$  のべき乗で次のように近似してみることにした。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a(\sigma^*)^n (\lambda^* - 1)^{-m} \quad (4-5)$$

まず、応力が一定のクリープの場合について調べる。  $x^* = \lambda^* - 1$  とおけば、(4-5) 式は次式となる。

$$\frac{dx^*}{dt} = a(\sigma^*)^n (x^*)^{-m} \quad (4-6)$$

$$\int (x^*)^m dx^* = \int a(\sigma^*)^n dt \quad (4-7)$$

積分範囲を  $x = 0 \sim x$ ,  $t = 0 \sim t$  として、結果を整理すると次のようになる。

$$(x^*)^{m+1} = a(m+1)(\sigma^*)^n t$$

よって、コンプライアンスとその変化速度は次式となる。

$$x^* = \lambda^* - 1 = a^{\frac{1}{m+1}} (m+1)^{\frac{1}{m+1}} (\sigma^*)^{\frac{n}{m+1}} t^{\frac{1}{m+1}} \quad (4-8)$$

$$\frac{dx^*}{dt} = \frac{d\lambda^*}{dt} = a^{\frac{1}{m+1}} (m+1)^{-\frac{m}{m+1}} (\sigma^*)^{\frac{n}{m+1}} t^{-\frac{m}{m+1}} \quad (4-9)$$

初期弾性歪を差し引いたクリープ歪  $\varepsilon_c^*$  ( $= \varepsilon_c / \sigma_c \lambda_0 = \sigma (\lambda - \lambda_0) / \sigma_c \lambda_0$ ) と歪速度は次のようになる。

$$\varepsilon_c^* = \sigma^* x^* = a^{\frac{1}{m+1}} (m+1)^{\frac{1}{m+1}} (\sigma^*)^{1+\frac{n}{m+1}} t^{\frac{1}{m+1}} \quad (4-10)$$

$$\frac{d\varepsilon_c^*}{dt} = a^{\frac{1}{m+1}} (m+1)^{-\frac{m}{m+1}} (\sigma^*)^{1+\frac{n}{m+1}} t^{-\frac{m}{m+1}} \quad (4-11)$$

前に述べたように  $\sigma^*$  は応力  $\sigma$  を  $\sigma_c$  でわって基準化した値である。これと呼応して、上式の歪  $\varepsilon^*$  も  $(\lambda_0 \sigma_c)$  でわって基準化した値 ( $\varepsilon^* = \varepsilon / (\lambda_0 \sigma_c)$ ) である。結果的に (4-1) 式と (4-10) 式、(4-2) 式と (4-11) 式は同じ形の式となり、対応する定数の関係は次のようになる。

$$\begin{aligned} \alpha &\rightarrow a^{\frac{1}{m+1}} (m+1)^{\frac{1}{m+1}} \lambda_0 \sigma_c^{-(v+1)} \\ \nu &\rightarrow 1 + \frac{n}{m+1} \\ \mu &\rightarrow m \end{aligned}$$

前にも述べたように、(4-1) 式と (4-2) 式は従来からよく使用されてきた実験式である。本節の検討では、構成方程式の形を適当に仮定することにより、このごく一般的な実験式と一致する解にたどり着いたわけである。

#### 4. 5. 2 応力依存性をあらわすパラメータ $\nu$ と $n$

前にも述べたように、(4-1)式と(4-2)式とはよく使用される実験式であり、前に例を示したように $\alpha\sigma^\nu$ と $\mu$ を実験結果から求めることが可能である。さらに、応力レベルを変えたときの $\alpha\sigma^\nu$ の変化から $\nu$ を求めることができる。応力依存性を決めるべき乗数がどのような値になるかは粘弾性論では極めて重要あり、その値がどの位であるかによって粘弾性の生ずる機構がある程度絞られる(上田, 1974)。

そこで問題となるのは、応力依存性を決めるべき関数をどのように考え、どのように求めるかである。一つの考え方は、(4-1)式ないし(4-2)式の $\nu$ を重視する考え方であり、 $\nu$ を求めることが比較的容易であることもあって、比較的広くいきわたっている。たとえば、Ranalli(1987)は既往の研究をまとめて表にしているが、それをみると岩塩の $\nu$ は5.3、花崗岩(気乾)は3.2などで、2~5の間に入っていることが多い。著者の経験でも、比較的低い応力レベルでのデータを同様に整理すると、ほぼこのくらいの値になる。問題は、 $\alpha\sigma^\nu$ の $\nu$ が、本質的な値なのか、あるいは他の現象の影響が紛れ込んだ値なのかをみわけることである。

今回構成方程式より導いた(4-8)~(4-11)式では、応力依存性は $\sigma^{1+\frac{n}{m+1}}$ のようであらわさるので、 $n$ と $m$ とを当然ながら区別するべき値である。ちなみに、3.2節で述べたクリープ寿命から得られた $n=23$ を $n$ に、前に得られた $\mu$ を $m$ に、それぞれ代入して $\nu=1+\frac{n}{m+1}$ を計算すると $\nu=3.3$ となるが、これは従来知見の範囲内(2~5)である。

もし、これまでに述べた議論が正しければ、応力レベル30%から高応力レベルまで、同じ応力依存性の関数 $\sigma^n$ で近似でき、この範囲の応力でクリープの生ずる機構がさほど変化していないと考えて研究を進めることができるし、今後さらに研究が進めば、比較的高い応力レベルでの試験結果を、応力レベル30%程度まで外挿できる可能性もあるといえる。

#### 4. 5. 3 歪増分を考えた構成方程式との比較

クリープ歪をコンプライアンスの変化とみなす方式のほかに、非弾性歪 $\varepsilon_2$ (irreversible strain)の増加と考える方式もある。後者では(4-5)式に対応する構成方程式は次のようにかける(大久保・西松, 1986)。

$$\frac{d\varepsilon_2}{dt} = a(\varepsilon_2)^{-m} \sigma^n \quad (4-12)$$

これを解いて得られるクリープ歪とその速度は次のようになる。

$$\varepsilon_c = a^{\frac{1}{m+1}} (m+1)^{\frac{1}{m+1}} \sigma^{\frac{n}{m+1}} t^{\frac{1}{m+1}} \quad (4-13)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = a^{\frac{1}{m+1}} (m+1)^{-\frac{m}{m+1}} \sigma^{\frac{n}{m+1}} t^{-\frac{m}{m+1}} \quad (4-14)$$

これからわかるように、 $\sigma$ にかかるべき数が、 $1+n/(m+1)$ から $n/(m+1)$ へと1だけ減少していることがわかる。具体的な数を仮に $n=23$ 、 $m=9$ として計算すると、3.3と2.3となる。

これは現在の実験精度で判別できる程度の差なので、比較的短期間でどちらがより真実に近いかわかる可能性がある。

#### 4. 5. 4 応力依存性をあらかず関数に関して

応力をあらかず関数形として、べき乗則のほかに、 $\exp(\delta\sigma)$  とか  $\sinh(\delta\sigma)$  が使われることがあり（たとえば Cristescu & Hunsche, 1998）、どれがよいかについては定説がない。今回提案した構成方程式においても、3者のいずれが正しいかについては、今後さらに広範囲の実験結果を積み重ねて検証していく必要があると言える。

$\exp(\delta\sigma)$  を採用すれば構成方程式は次のようになる。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a \exp(\delta\sigma^*) (\lambda^* - 1)^{-m} \quad (4-15)$$

解は次のようになる。

$$\varepsilon_c^* = a^{\frac{1}{m+1}} (m+1)^{\frac{1}{m+1}} \sigma^* (\exp(\delta\sigma^*))^{\frac{1}{m+1}} t^{\frac{1}{m+1}} \quad (4-16)$$

$$\frac{d\varepsilon^*}{dt} = a^{\frac{1}{m+1}} (m+1)^{-\frac{m}{m+1}} \sigma^* (\exp(\delta\sigma^*))^{\frac{1}{m+1}} t^{-\frac{m}{m+1}} \quad (4-17)$$

これからわかるように、 $\sigma^n$  がそれぞれ  $\exp(\delta\sigma)$  に置き換わるだけである。 $\sinh(\delta\sigma)$  を採用したとき、さらに非弾性歪  $\varepsilon_2$  を考えた構成方程式でも事情はほとんど変わらない。

#### 4. 6 まとめ

既報（大久保, 1991）にて、およそ1960年代から1980年代のクリープに関する研究の動向をまとめた。1990年代の研究内容は、ここ数10年にわたって議論されてきたことの繰り返しがかなり多い。以下で考察する事項にも、過去に何度か議論されたことが含まれることを予め断っておく。

クリープを生ずる応力に下限があるかどうかについて長期間にわたる議論が続いている（Schmidtke & Lajtai, 1985）。これは難しい問い掛けであり、本研究の目的の一つもこの問題に対して少しでも新しい知見を加えようとするところにある。

クリープを生ずる応力に下限はないが、クリープ歪に限度があるとの意見もある（Cristescu & Hunsche, 1998）。すなわち、応力-歪曲線があり、これとほぼ相似でひとまわり小さい曲線（stabilization limit）に達するとクリープ歪は収束するとの考え方である。すなわち、いくつかのクリープ応力でクリープ試験をおこない、縦軸にクリープ歪速度、横軸に時間をとり、クリープ歪が充分小さくなった時の歪と応力を応力-歪線図上にプロットし、これらの点を滑らかに繋いでクリープ限度としている。しかしながら、このような方法で、クリープ歪が限度に達したかどうかを見分けることは、ほとんど不可能だと考えている。今回の実験結果でも、両軸を普通軸

としてクリープ歪-経過時間曲線を描いてみると、数日程度で、歪速度は初期の1万分の1以下になり、十分に注意しないとクリープ歪が収束したように見えてしまう。

上記と同様に、変化速度が充分小さくなったら収束とみなすことが、地下構造物のコンバージェンスや岩盤内変位の整理でずっと使われてきた。これは比較的短時間の使用を考えた時には許されようが、より長時間の耐久性を要する構造物の場合には再検討する必要がある。

クリープ機構について触れておこう。先にも述べたが、この10年間であまり大きな進展はなかったと著者はみている。かなりの部分が既報(大久保, 1991)の繰り返しになるが、本研究と特に密接な関係のある部分について考察をしてみる。

クリープの機構としてまず拡散クリープがどのような物質に対しても上げられている。これは、他の現象とからみあうことが多いが、純粋な拡散クリープであれば、その歪速度は応力勾配に、従って $\sigma$ の1乗に比例すると考えてよい(大久保, 1991)。これに関して多くの議論がなされてきたが、おそらく純粋な拡散クリープは今回の実験よりさらに低い応力において支配的になるはずであり、これまで岩石で確認されたことはないと思う。

次が、古くからあるOrowanの考え方にもとづく、転移の運動(例えば山本・堀, 1976)によりもたらされるクリープである。金属では、応力の2乗に転移の密度は比例し、さらにこの転移の密度勾配は応力の1乗に比例するので、掛け合わせて応力の3乗に比例するといわれている(大久保, 1991)。岩石のクリープにおいても、応力を変えた実験をおこない、同じ経過時間におけるクリープ歪を比べるとべき乗数は3前後となることがある。このため転移クリープ説を採用する研究者がいる。問題は2つあると著者は考える。一つは実験であり、上記のことが成り立つのは、定常クリープでの話であると著者は考えるが、このことが認識されていないか、認識されていても、なお、かなり早い時期にクリープ実験を打ち切り中途半端なデータしか取れていない疑いがある。もう一つは、実験事実に基づいた理論は金属で発展したものであり、岩石における明瞭な機構は、この理論がしばしば使われている岩塩ですら今一つあきらかでないことである。

もう一つの有力なクリープの機構は応力腐食であろう(Sano et al, 1981; 大久保, 1991)。また、応力腐食とはやや異なる圧力溶解作用(*pressure solution, solution transfer creep*)が、クリープ歪の増大に関与しているとの意見もある(パターソン, 1986)。気乾状態と湿潤状態での強度が大幅に異なる田下凝灰岩では、応力腐食ないしそれに準じた変形機構が支配的である可能性が高い。

著者の意見では、試験片で観察されるクリープ機構はかなり低応力(例えば30%程度)までほとんど変わらず、また、応力依存性をあらわすべき乗数もあまり変わらない可能性があると考えている。これは、試験片全体が均等に変形するのではなく、微視的に見たとき、何箇所かの応力の高い部分での変形が支配的であり、低応力の部分の寄与分が少ないためと考えている。クリープ試験で観察されるマクロな試験片の挙動は、この応力の高い部分での粘弾性であり、高い応力での特性を結果的に反映していると思う。当然ながら、クリープ応力の高低によってクリープ歪やクリープ歪速度に差があるが、高いクリープ応力では、試験片内で相当な応力レベルに達して変形する部分が多いのに対して、低いクリープ応力ではそういう部分が少ないためといえよう。

今回水中に試験片を浸して実験をおこない、長期間にわたるクリープ歪を測定した。一方、予備実験としておこなった気乾状態のクリープ試験では、応力レベル30%でのクリープ歪は検知

できないほど小さかった。湿潤状態では強度が下がることが一般に認められているが、低応力のクリープについては不明な点が多い。一つの考え方では、体積膨張の生ずるような比較的高い応力でのみ水の影響があるとしており(Cristescu & Hunsche, 1998), その原因は、体積膨張は岩石内部のクラックの生成、進展により生じ、その結果、水の移動が容易になってクリープ変形に水が影響を及ぼすためと説明されている。本研究で使用した田下凝灰岩はかなりの空隙をもち、たとえ体積膨張が生じなくとも水の移動が可能なことから、ここにあげた意見はあてはまらないと考える。

第4章では、湿潤状態の田下凝灰岩を用いた、応力レベル30%での長期クリープ試験の結果を報告した。実施したのは2回だけであるが、比較的良好な再現性を示し、2回とも経過時間の約0.1乗( $t^{0.1}$ )に比例してクリープ歪が増大した。クリープ歪速度は、試験開始時より一貫して低下し続けており、経過時間の約-0.9乗( $t^{-0.9}$ )にほぼ比例する。以上のクリープ歪と歪速度の示す傾向は、著者が従来おこなった比較的高い応力レベルでの1次クリープにおける挙動とほぼ一致している。

比較的高い応力レベルにおけるクリープ寿命は、クリープ応力の2.3乗に反比例することが、従来の研究でわかっている。やや一般的に言えば、クリープ実験において、現象の進行速度は応力の2.3乗に比例すると考えてよい。著者が提案したコンプライアンス可変型構成方程式を応用して、1次クリープにおけるクリープ歪を説明できる構成方程式を導き、この構成方程式を用いて検討したところ、田下凝灰岩では、低い応力レベルでも現象の進む速度は応力の2.3乗( $n=2.3$ )に比例する可能性があることがわかった。

長期間にわたるクリープ実験には種々の困難がともなうため、よりどころとなるデータが少ない現状である。今回の研究でもデータの数が不足しているため確たることはいえなかった。今後も可能な限り長期にわたってクリープ試験をおこなうとともに、地質現象から微細構造の変化までの多様な視点から、岩盤の長期挙動を検討する予定である。

## 参考文献

- 趙 顕・大久保誠介・福井勝則 (1995) : 資源・素材学会誌, Vol. 111, No. 8, pp. 543-548
- Cristescu, N. D. and Hunsche, U. (1998) : Time Effects in Rock Mechanics, pp.43-55, pp. 76-80, pp.88-94, John Wiley & Sons(Chichester, England)
- Cruden, D. M. (1971) : Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 8, pp. 105-126
- 大深度地下利用技術調査小委員会 (2000) : 大深度地下利用技術調査小委員会報告書, pp.355-356, (社)日本トンネル技術協会 (東京)
- 福井勝則・大久保誠介・西松裕一 (1989) : 資源・素材学会誌, Vol. 105, No. 7, pp. 521-526
- Ito, H. and Sasajima, S. (1987): Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 24, No. 2, pp. 113-121
- 核燃料サイクル開発機構 (1999) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性(JNC TN1400 99-020), 第1章, 核燃料サイクル開発機構 (東海村)
- Kidybinski, A.(1966): Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 3, pp. 279-306
- 西松裕一・山口勉 (1980) : 材料, Vol. 29, No. 317, pp.192-197
- 大久保誠介・天野勲三・小泉昇三・西松裕一 (1984a) : 日本鉱業会誌, Vol. 100, No.1151, pp.11-16
- 大久保誠介・天野勲三・小泉昇三・西松裕一 (1984b) : 日本鉱業会誌, Vol. 100, No.1153, pp.219-224
- 大久保誠介・西松裕一 (1986) : 日本鉱業会誌, Vol. 102, No. 1181, pp.395-400
- 大久保誠介・西松裕一・緒方義弘 (1987) : 日本鉱業会誌, Vol. 103, No. 1191, pp. 293-296
- 大久保誠介 (1991) : 資源・素材学会誌, Vol. 107, No. 5, pp. 245-252
- 大久保誠介 (1992) : 資源・素材学会誌, Vol. 108, No. 8, pp. 601-606
- 大久保誠介・秋哲淵 (1993) : 資源・素材学会誌, Vol. 109, No.11, pp. 917-922
- 大久保誠介・秋哲淵 (1994a) : 資源・素材学会誌, Vol. 110, No.7, pp. 533-538
- 大久保誠介・秋哲淵 (1994b) : 材料, Vol. 43, No. 490, pp.819-825
- 大久保誠介・福井勝則・Tubagus Nouval (1996) : 資源・素材学会春季大会一般発表講演要旨集, p.55, 資源・素材学会 (東京)
- 大久保誠介, 福井勝則, 張建東 (1998) : 資源・素材学会誌, Vol. 114, No. 2, pp. 79-85
- Parsons, R. C. and Hedley, D. G.(1966):Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 3, pp. 325-335
- パターソン, M.S. (1986) : 実験岩石力学 (荻野正二・水田義明, 佐野修 共訳), pp.160-165, 古今書院 (東京)
- Ranalli, G. (1987) : Rheology of the Earth, § 10.4, Allen & Unwin Inc.(Winchester, USA)
- Sano, O., Ito, I. & Terada, M. (1981) : J. Geophys. Res., Vol. 86, pp.9299-9311
- Schmidtke & Lajtai(1985): Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, Vol. 22, No. 6, pp.461-465
- 秋哲淵 (1995) : 岩石の湿潤状態における時間依存性, p.118, 付録 pp. 11-12, 東京大学博士論文

- 山口勉・大久保誠介・西松裕一・小泉昇三（1983）：日本鉱業会誌, Vol. 99, No. 1150, pp. 1029-1034
- 山本善之・堀幸夫（1976）：固体力学, 第Ⅱ編第2章, 岩波書店（東京）
- 上田誠也編（1974）：固体の流動, pp.3-28, 東海大学出版会（東京）
- Vutukuri, V. S., Lama, R. D. and Saluja, S. S.（1974）：Handbook on Mechanical Properties of Rocks, Vol. 1, § 2.8, Trans Tech Publications(Clausthal, Germany)
- Wawersik, W. R.（1971）：Proc. 14th U.S. Symp. Rock Mech., pp.85-106

表1 田下凝灰岩の物性. nは(4-4)式を参照.

試験	項目	気乾状態	湿潤状態
	みかけ比重	1.81	2.05
	空隙率(%)	25	-
一軸圧縮	強度(MPa)	16	9.1
	ヤング率(GPa)	3.6	2.6
	n	41	23
圧裂引張	強度(MPa)	1.9	0.9
	n	45	NA

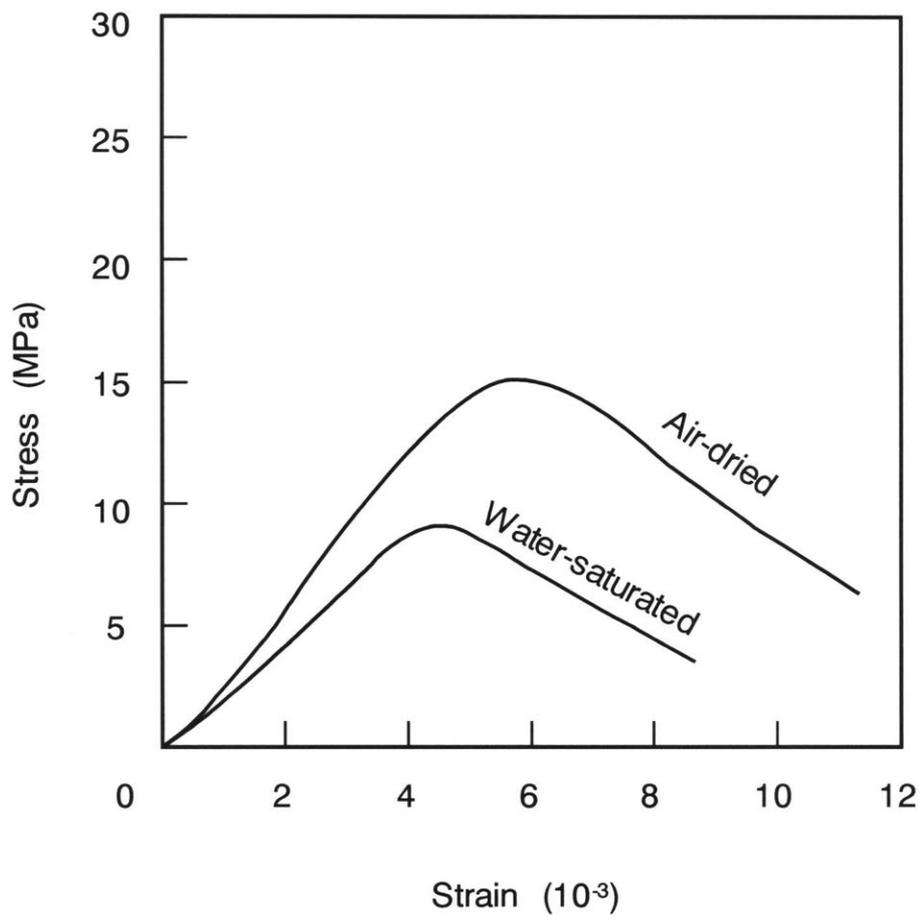


図4-1 田下凝灰岩の完全応力-歪曲線. 気乾状態, 湿潤状態とも, 定歪速度  $10^{-5}/s$  での結果.

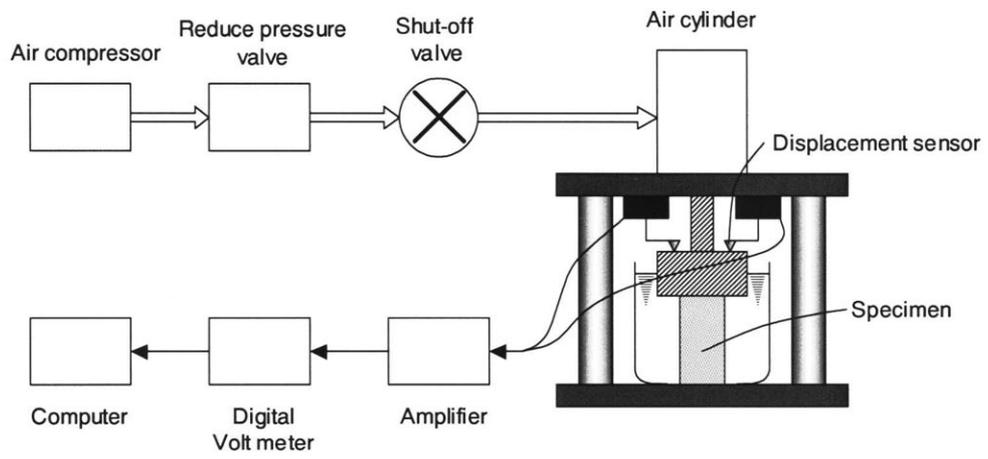


図 4 - 2 空圧式クリープ実験装置

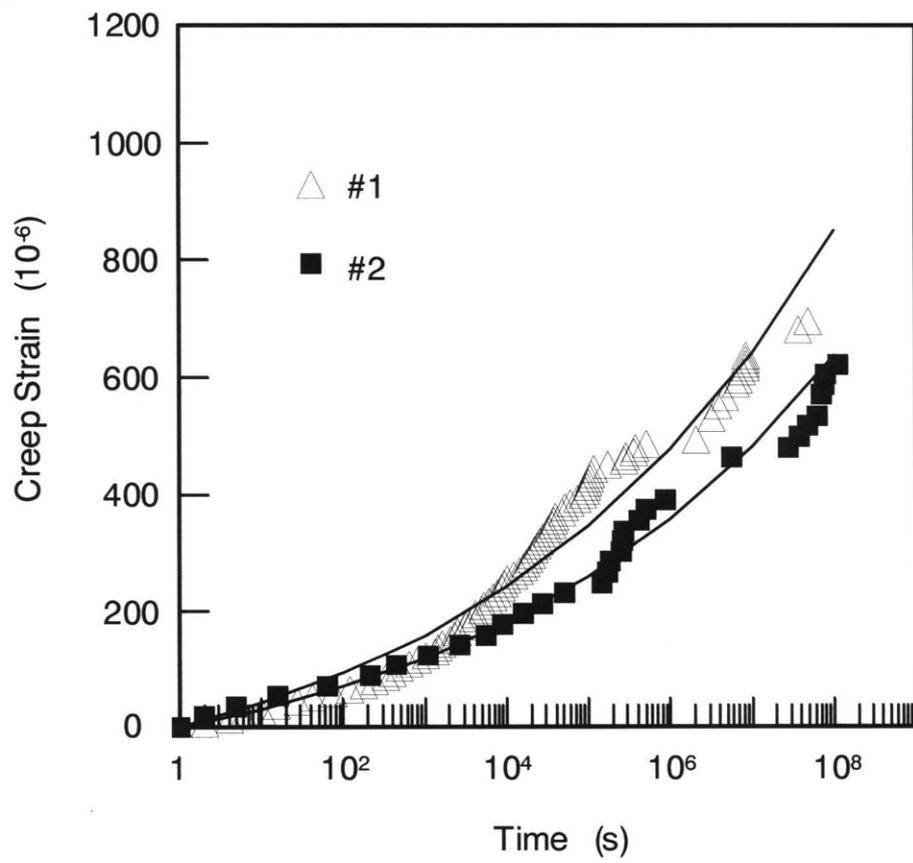


図4-3 田下凝灰岩のクリープ歪曲線. 実線は近似曲線

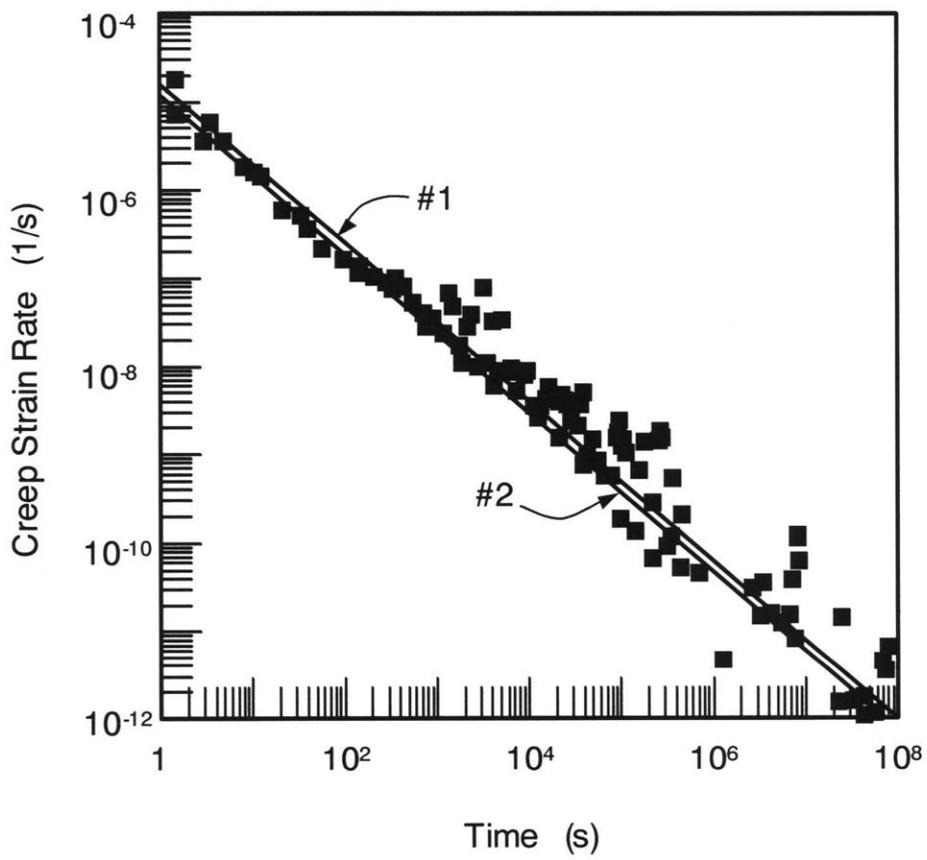


図4-4 田下凝灰岩のクリープ歪速度曲線。  
 実線は(4-2)式による計算結果で、■は測定値。  
 (a)試験片#1, (b)試験片#2

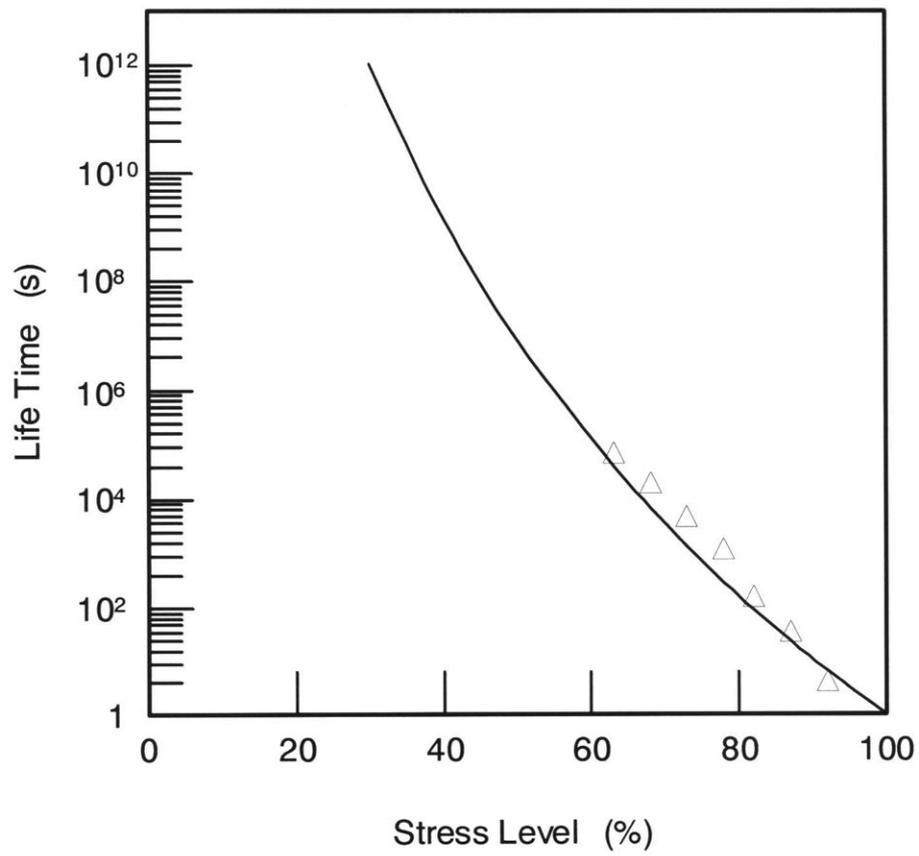


図4-5 高い応力レベルでのクリープ寿命.  
△は寿命の幾何平均値で、実線は近似曲線

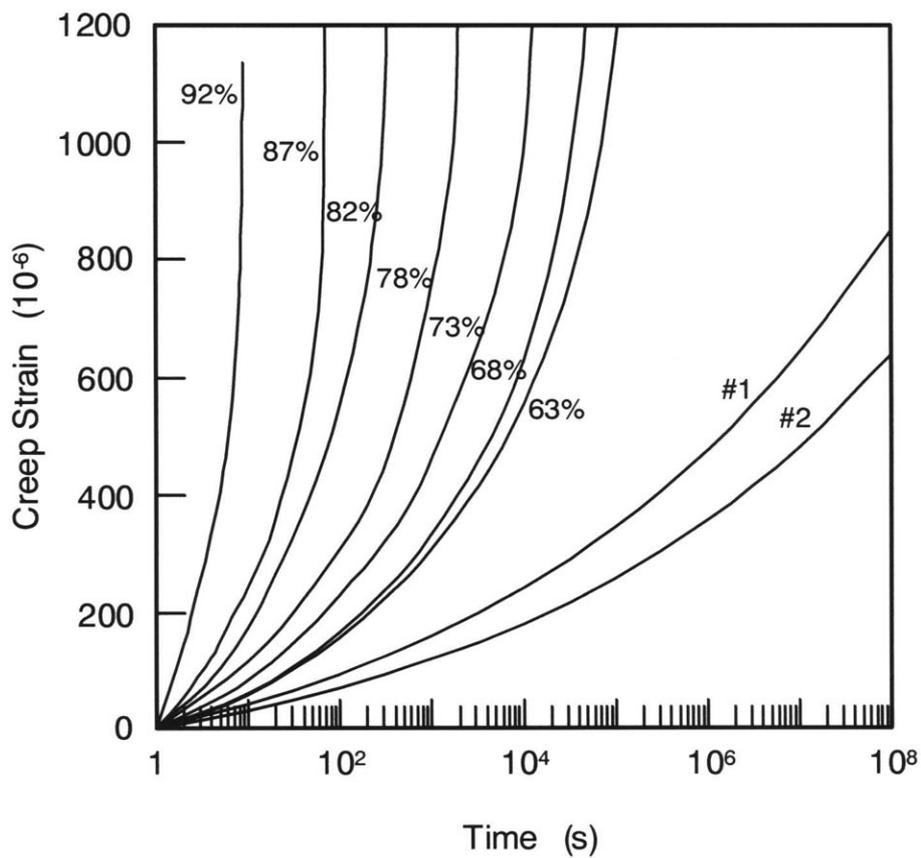


図4-6 高い応力レベルでのクリープ歪曲線。  
 以前おこなった実験結果で、7段階の応力レベルから  
 1例ずつ示した。参考までに、今回得た結果#1、#2も示した

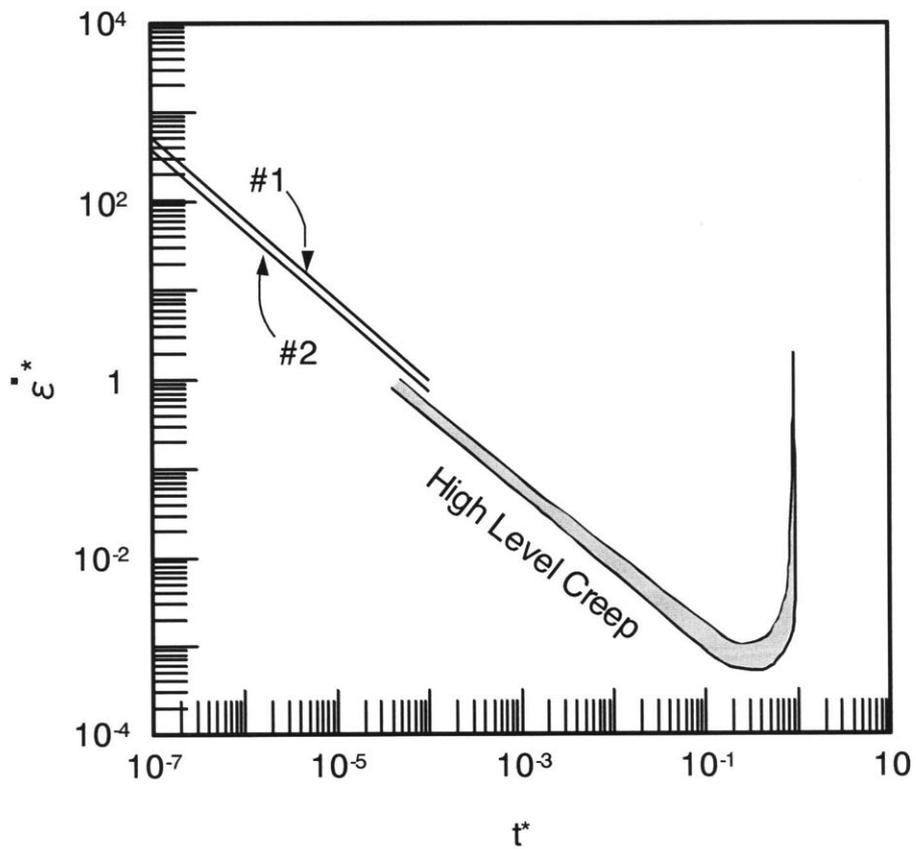


図4-7 高い応力レベルでのクリープ歪速度曲線。縦軸は（クリープ歪速度）×（寿命）で、横軸は（経過時間）/（寿命）。以前おこなった実験結果を再整理したもの。7段階の応力レベルの結果が、2本の実線間の比較的狭い区間に入る。参考までに、今回得た結果#1、#2も示した

## 5. 可視化ベッセルの開発と試用

昨年度開発した可視化ベッセル（透明な周圧ベッセル）を用いて性能試験を兼ねた予備実験を行った。

### 5. 1 はじめに

現象の可視化は重要であり、試験中に試験片がどのように変化していくかを観察することは破壊機構の解明には欠かせない。土の三軸試験には種々の方法や装置があり（例えば松尾稔，1974），一概に述べることは困難だが，多くの場合1 MPa以下の周圧でおこなわれる。そのため，三軸ベッセルの外筒は透明なプラスチックであることが多く，この場合には当然試験中に試験片が目視できる。岩石でも一軸圧縮試験では，試験片の観察は容易にできるが，比較的高い周圧下の三軸圧縮試験は金属製のベッセル中でおこなわれるので，試験片を直接目視することは困難である。

本章では，昨年度に引き続いて，最近信頼性の増したエンジニアリング・プラスチックを使用して，10 MPa程度までの周圧で使用できる三軸試験用可視化ベッセルについて検討した結果について述べる。可視化ベッセルの概要，安全性の検討，測定方法をこの順に述べた後，2種類の岩石を用いて試用した結果について述べる。

### 5. 2 可視化ベッセルの概要

図5-1に可視化ベッセルの概略図（a）と写真（b）を示す。このベッセルは，上下の金属板と，透明なアクリル製円筒からなり，M2（JIS）の6本のボルトでアクリル製円筒を締め付ける構造となっている。上の金属板には油圧ポートが設けられており，油圧源からの圧力を導き入れる。油圧源としては，手押しポンプないしサーボ式周圧装置を使用した。また，上の金属板中央に設けられた円孔に直径25 mmの押し棒が入る。押し棒と円孔の間の漏れ止めは，2個のオーリングでおこなった。この押し棒で直径25 mm，高さ50 mmの岩石試験片に荷重を加える。なお，試験片の上下に同径の鋼製円柱を密着させ，試験片と円柱を同時に熱可縮性チューブで覆った。試験片の位置決めは，下板から突き出たピンでおこなった。

中央部の円筒は，ガラス，ポリカーボネートなどの透明な材料と比較・検討の末，入手のし易さ，整形のし易さおよび表面の研磨のし易さからアクリル（アクリライト）製とした。アクリル製円筒の外径は100 mm，内径は35 mm，高さは50 mmである。上下端面は研磨仕上げになっており，設計周圧10 MPaでは，周圧が金属板を押し広げようとする力よりボルトの締め付け力が十分に大きいので，上下金属板とアクリル製円筒とのあたり面（接合面）は密着して油の漏れを防いでいる。ただし，用心のため，図に示すように金属板とアクリル製円筒との間にオーリングを組み込んでおいた。

可視化ベッセルの組み立て手順は次のとおりである。

- ①下の金属板を試験機ないし適当な組み立て台にのせる
- ②試験片と鋼製円柱を下金属板にのせ，ピンで位置決めをする

③アクリル製円筒を下の金属板にのせた後、油を注ぎ込む

④押し棒を付けた金属板をアクリル製円筒にのせた後、6本のボルトを締める

これからわかるように、組み立て手順や、それにかかる手間は通常の金属製ベッセルとさほど変わらない。

### 5. 3 安全性と破壊試験

よく知られていることだが、鋼をはじめとする金属は一旦降伏しても、一気に耐荷能力を失うわけではなく、完全に破壊するまでに多くのエネルギーを吸収する。これに対して、ガラスやプラスチックは、強度はかなり高いものの、一気に破壊しがちである。このため圧力容器の材料として使用するときには、10～20程度の大きな安全率をとることが多い。今回の可視化ベッセルの設計に際しても、最初は周圧10MPaで安全率10を目標にしたが、種々検討した後に無理なことがわかったので、圧力容器以外の一般的な機械類でよく用いられる安全率4以上で全般的な設計をおこなった。試験室のよく管理された状況下での使用を前提にすれば、この程度の安全率で十分と考えたからである。しかしながら、万一破壊した場合、重大な事故がおきてはいけないので、ベッセル自体の破壊試験をおこない、ベッセル自体が破壊しても周囲に及ぼす影響が少ないことを確認することにした。

破壊試験に先立って吟味したところでは、予想される破壊（損傷）モードとして、①アクリル製円筒の破壊、②アクリル製円筒と上下金属板との間からの油の漏れ、③上の金属板と押し棒との間からの油の漏れ、の3つが考えられる。この内、最も危険であると考えられるのは、①のモードであり、アクリルの破片が飛び散る可能性がある。一方②、③のモードでの破壊はそれほど危険ではないと考えられる。

破壊試験では、ベッセル内にダミー試験片を置き、試験機で押し棒の変位を固定した上で、手動ポンプで周圧を増加させていった。試験に供したアクリル製円筒は4本であり、そのうち2本は新品で、残りの2本は使用済のものである。ボルトの締め付けトルクは、トルクレンチで管理して30N・mとした。ただし、破壊モードにはボルトの締め付けトルクが影響する可能性があるため、1試験だけ10N・mとした。

アクリル製円筒によく知られた圧肉円筒の式を適用すれば、内側円孔側面で発生する最大引張応力 $\sigma$ と周圧 $p$ との関係は次式となる。

$$\sigma = \frac{r_i^2 p}{r_0^2 - r_i^2} \left( \frac{r_0^2}{r_i^2} + 1 \right) \quad (5.1)$$

ここで、 $r_0$ 、 $r_i$ は円筒の外径、内径である。(5.1)式の $\sigma$ がアクリルの引張強度75MPa（三菱レイヨン、2001）となる時の周圧は59MPaとなる。そこで、新しい2本の円筒を用いて、周圧を計算値59MPaの約10%増しの65MPaまで増加させたが、2本とも破壊に至らなかったし、②や③の油漏れも見受けられなかった。ただし、ベッセルを解体後観察したところ、金属板と円筒間のオーリングは塑性変形していた。したがって、65MPaのような高い圧力ではある程度時間が経過すると、オーリングからの油漏れが生ずる可能性が高いと判断した。

使用済みのアクリル製円筒は、1本の締め付けトルクを30 N・m、もう1本を10 N・mとして試験をおこなったところ、それぞれ計算値に近い58.7 MPaと55.1 MPaとで破損した。破損の状況は、2本とも同じであり、図5-2に示すように内側から外側に向かって平面状の亀裂が入った。この亀裂が入るとともに、油が噴出したが、人体に損傷を与えるような破片の飛散などはなかった。

破壊試験をおこなった結果、使用済みの円筒でも、設計目標であった10 MPaの4倍以上の圧力に耐えることがわかった。また、万一破壊したとしても、油の噴出が生じるのみであることがわかった。

#### 5.4 測定方法

試験片の撮影には、有効画素数266万のデジタルカメラ(Nikon-D1型)を用いた。レンズは望遠系単焦点レンズ(105 mm F2.8 D)を用いた。試験に先立って、画像の歪曲(distortion)の程度を調べるため、試験の際とほぼ同じ約500 mmの撮影距離から方眼紙を撮影した。その結果によると、例えば90 mmの線分が、画像中央部で1598ピクセル、端部で最大1601ピクセルとなり、両者の差は±0.1%程度であることがわかった。

可視化ベッセルのアクリルや、試験片を被覆した熱可縮性チューブは、光を反射しやすいので、照明には注意を払った。試行錯誤の末、光を直接可視化ベッセルにあてるのではなく、試験機の周辺を全体的に明るくした上(間接照明)で撮影を行うことにした。

図5-3に示すように、試験片を被覆する熱可縮性チューブに何本かの測線を描いて、縦方向変位を測定することにした。横方向の変位は、試験片画像の直径より測定することにした。試験中に撮影した画像からメディアンフィルタを用いてノイズを取り除き、次に画像を鮮鋭化するためのフィルタ処理をした後に(赤松ら, 1999)、縦方向と横方向変位を測定した。

縦方向と横方向変位の誤差要因として、①試験片側面と熱可縮性チューブ間の滑りと、②アクリル製円筒と油による光の屈折とが考えられる。要因①については、試験片側面に印を付け、熱可縮チューブで被覆した後、その上にも同位置に印を付けて実験を試みた。その結果、試験片側面と熱可縮チューブとは同様に变形しており、両者間の滑りは認められなかった。

光の屈折が、測定精度に与える影響については、実験的および理論的に検討した。縦方向については1.02倍、アクリル製円筒の曲率の影響を受ける横変位については1.47倍だけ画像が拡大されるが、縦横ともに初期長さがわかっているため補正できるし、画像の歪曲も少ないことがわかった。

すべての誤差を含めて、長さの測定精度は約±0.06 mm、分解能(再現性)は約±0.03 mmとの結果を得た。

## 5. 5 予備試験

試作した可視化ベッセルを用いて試験を行った。可視化ベッセルの許容周圧は10 MPaと比較的小さいので、数MPaの周圧でも、影響が顕著に観察できると予測された田下凝灰岩と土丹を試料岩石として選定した。

試験片は直径25 mm、高さ50 mmの円柱形とした。田下凝灰岩は、試験片整形後2週間以上、温度・湿度が管理された実験室内に放置し、自然乾燥させてから試験した。土丹は、原位置で採取したブロックを密封して保管し、水分の変化がないように心がけた。試験片整形後、可能な限り短時間の内に試験を行った（大久保ら、2002）。

試験は容量500 kNのサーボ試験機を用いて、田下凝灰岩では定歪速度10  $\mu$ /s、土丹では定歪速度100  $\mu$ /sでおこなった。周圧は、最大圧力35 MPaのサーボ式周圧装置で加えた。田下凝灰岩では5.9、7.8、9.8 MPaの3段階、土丹でも2.0、3.9、7.8 MPaの3段階に周圧を変えて試験した。

試験片端面間の変位は、サーボ試験機に取り付けてある差動変圧器で測定した。また、試験片に加わる荷重は、容量200 kNの歪ゲージ式ロードセルで測定した。

## 5. 6 田下凝灰岩での結果

実験で得られた応力-軸歪曲線の例を図5-4（右側）に示す。縦軸は周圧を差し引いた差応力である。横軸の軸歪は、周圧相当の静水圧を加えた時の歪を差し引いた差歪であり、差動変圧器の測定値よりもとめた。以下で単に軸歪と称するのは、このように差動変圧器よりもとめた値である。なお、今回の実験では、試験片の変形がかなり大きくなったが、応力、歪ともそれぞれ初期断面積、初期長さを基準とした微小変形の場合の式を使用した。

気乾状態での一軸圧縮強度は約15 MPaであるが（秋、1995）、周圧5.9 MPaの強度はその倍程度になる。さらに周圧が増加すると強度が増し、強度破壊点での軸歪も若干増加する。また、周圧が高くなると、強度破壊点以降の応力低下がやや緩慢となる。図5-4（左側）には、撮影した写真から求めた、試験片の最も膨らんだ部分の横歪を示した。強度破壊点までは軸歪よりも小さいが、強度破壊点付近から急激に増加しはじめ、その後は軸歪と近い値になる。以上で述べた点は、金属製ベッセルを用いた従来の研究結果と定性的に同じである（趙ら、1995；齋藤ら、1998）。

周圧5.9 MPaにおける試験片の連続写真を図5-5に示す。なお、この試験片の応力-歪曲線は図5-4に示してある。軸歪0.02で左側面が膨らみはじめ、軸歪0.04ではその膨らみが顕著になる。右側面も膨らむが、左側面に比べると小さい。また、試験片左上部から右下へと複数のせん断面が成長しはじめる。軸歪が0.06、0.08と大きくなるにつれ、これらのせん断面における滑りが増し、せん断面の終端付近にあたる左側面の膨らみがより顕著になっていく。写真では見難いので、その様子を図5-6②(a)に示すが、左上から右下方向へのせん断面のほか、これと共役な複数のせん断面も軸歪が大きくなると観察できた。このように、周圧下で試験片がどのように変化していくかを観測できることが可視化ベッセルの第一の利点である。

図5-5と同じ試験片の下端から9mmの高さより、4.6mmごとに46mmまでの高さにおける横歪の変化を図5-7(a)に示す。この図では軸歪が0.01増加するごとの変化を示している。図5-5からわかるように、試験片の上下端はベッセルの金属板に隠れて見えないため測定することができなかった。左から2番目の結果は軸歪が0.01の時のものであり、強度破壊点付近に対応する。このときの横歪は、比較的小さく、高さ方向の変化は複雑で一定の傾向は見出せない。軸歪が0.02となると高さ32mmの横歪が大きくなる。これは左側面上部でせん断面が入りはじめたためと考えられる。軸歪がさらに大きくなると、ほぼ中央の横歪が大きくなるが、端に近い部分の変化は小さく、殊に上部の横歪はほとんど変化しなかった。

表5-1に示すように、周圧5.9MPaでは図5-6①のせん断面による破壊モードが7回の試験中3回みられた。この他に、図5-6②に示すように、試験片の中央部付近に交差したせん断面ができて横方向に膨らむ破壊モードが4回みられた。この破壊モードでは、せん断面ができて弱くなった部分に、上下の部分がめり込むことが観察された。なお、田下凝灰岩では破壊モード①と②の区別は必ずしも明瞭でなく、①と②の間ともいえる破壊モードも現れたが、何度も写真や試験片を見比べた後、便宜上どちらかに分類しておいた。

図5-7(b)と(c)には、それぞれ周圧7.8MPaと9.8MPaにおける横歪の変化を示した。なお、これらの試験片の応力-歪曲線は図5-4に示してあり、破壊モードはともに②であった。周圧が5.9MPaの場合と同様に、強度破壊点付近に対応する軸歪0.01の時の横歪は小さい。この時の軸方向の変化は複雑で一定の傾向がみられないが、その後は、中央付近が徐々に膨らんでいく。

表1に示すように、周圧7.8MPaでおこなった10回の試験の内、図5-6の破壊モード①が3回で、破壊モード②が7回であった。一方、周圧が9.8MPaでは、8回の試験中で、破壊モード①が2回、破壊モード②が6回であった。これらの結果より、周圧が増加するにつれて、破壊モードが①から②へとわずかながら移行すると考えられる。また、同じ破壊モード②でも、周圧が増加するにつれて破壊の及ぶ範囲が広がっていき、図5-6の②(a)から(b)へと移行する傾向が見られた。破壊モードが①や②(a)の場合には、強度破壊点以降は破壊が端面付近まで及びにくく、端面付近の横歪の変化は小さくなる。一方、周圧が9.8MPaで破壊モードが②(b)の場合には、強度破壊点以降もしばらくの間端面付近で破壊が進む傾向がみられた。

以上の議論で軸歪と称してきたのは、サーボ試験機に取り付けられた差動変圧器から求めた変位を試験片初期長さで割った値である。可視化ベッセルを用いた実験では、部分的な軸歪を求めることが可能と考えて、試験片を覆う熱可縮性チューブに測線を描きその長さの変化を測定し軸歪を求めた。

図5-8に得られた結果の例を示すが、横軸はこれまでと同じ軸歪で、縦軸は試験片中央2cmの区間の軸歪（以下中央軸歪と呼ぶ）である。中央軸歪は、図5-8(a)のカット図に示すように、等間隔な5測線の変化を平均し、これを初期長さ（約2cm）で割ってもとめた。

図5-8(a)は周圧5.9MPaでおこなった試験の内、5回の整理結果を示したものであり、目安として全体軸歪と中央軸歪が等しくなる場合の直線も示した。周圧5.9MPaでは、中央軸歪は全体軸歪とほぼ等しく、直線的に増加しており、ばらつきも小さいことがわかる。図5-8(b)に示す周圧7.8MPaでは、中央軸歪の方が全体軸歪より大きくなる試験片の方が多く、ばらつきが大きい。図5-8(c)に示す、周圧9.8MPaでは、中央軸歪の方が全体軸歪より

小さくなる場合が3回、逆の場合が2回であった。試験片ごとのばらつきは、周圧5.9 MPaと周圧7.8 MPaの間といえる。

図5-8に示した結果のうち、#3①のように表示されている、せん断破壊した試験片については、破壊した試験片が軸対象でないので撮影方向によって中央軸歪が変わってしまい、得られた結果はばらつきが大きく周圧による変化を検討することができなかった。

#1②のように一部が横に膨らむモードの場合には、周圧5.9 MPaより7.8 MPaの中央軸歪が大きかった。その原因の一つとして、周圧5.9 MPaの方が、中央の膨らんだ部分に、両端の健全な部分がめりこみ易いことが考えられる。周圧が7.8 MPaから9.8 MPaに増すと、今度は中央軸歪が小さくなる。これは周圧の増加にともなって、破壊モードが図5-6の②(a)から(b)へと移行し、中央部のみが大きく膨らむことがなくなるためである。

中央軸歪と同様に、試験片中央2 cm区間の横歪の平均値(中央横歪)も整理してみた。図5-9に、周圧5.9 MPaの時の|中央横歪/軸歪|と軸歪の関係を示した。軸歪が0.02程度までは急激に増加するが、その後、次第に傾きが小さくなり、軸歪0.04以上ではほぼ一定となる。この一定となったときの値は0.6~1.1であり、弾性領域でのポアソン比の数倍となる。周圧が7.8 MPaと9.8 MPaのときも定性的な傾向はほとんど同じであった。ただし、一定になったときの値は、周圧の増加にともなってわずかながら減少する傾向をみせ、周圧9.8 MPaでは6回の結果が0.5~0.8の範囲に入った。

## 5.7 土丹での結果

図5-10(a)~(c)に、実験で得られた応力-歪曲線と破壊した試験片の模式図を、周圧ごとにわけて示す。図5-10(a)は、周圧2.0 MPaでおこなった3本の試験結果である。この場合にも破壊モードはせん断破壊①と部分的な横への膨らみ②とに大別できた。ただし、せん断破壊の場合、田下凝灰岩の場合には共役なせん断面のできることが多かったが、土丹では試験片の両端面を結ぶ1つのせん断面ができ、破壊モードの区別がはっきりできた。

図中の試験片#2は破壊モード①で破壊し、その強度は他に比べて高かった。一方、強度のやや低い#1と#3の試験片は、破壊モード②で破壊した。いずれの場合にも延性的な特性を示し、歪が大きくなっても応力低下はごくわずかであった。図5-10(b)は、周圧3.9 MPaでの結果であるが、この場合には3本すべてが破壊モード②で破壊した。この場合にも、歪が大きくなっても応力はほとんど低下しなかった。図5-10(c)は周圧7.8 MPaでの結果であるが、この場合には#1の試験片が破壊モード①で破壊した。周圧2.0 MPaの場合と同様に、この破壊モード①で破壊した試験片の強度がもっとも高かった。試験片の個数が少ないので確たることはいえないが、弱い部分を含む試験片は、その部分に多くのせん断面ができて膨らみ破壊モード②の破壊をし、比較的均質な試験片では、せん断面が形成されて破壊モード①となった可能性がある。

試験片(図5-10(c) #1)の連続写真を図5-11に示す。参考までに、最終的な破断面の位置を、図5-11(a)の白線で示した。軸歪0.06になると、試験片の右側面の上部に、左下方向へと進展するせん断面が見えはじめる。軸歪が増加するに従い、せん断面が顕著になっていき、それに伴い横方向への膨らみも増す。なお、周圧が高くなると、熱可縮性チューブと試

験片の密着性が増して、歪が大きくなっても熱可縮性チューブのしわが目立たなくなることがわかった。

各周圧から1例ずつ選んで(図5-10(a) #3, (b) #3, (c) #2), 横歪の高さ方向分布を図5-12に示す。横歪の測定は、試験片を7等分した各高さに描いた側線の長さの変化を、撮影した写真から読み取っておこなった。軸歪が0.01増加する毎の変化を示したが、いずれの周圧でも、最終的には端面から10~15mm離れた部分の横歪が最も大きくなる。田下凝灰岩では試験片中央付近の横歪が大きかったのと、かなり異なった傾向を示したといえる。軸歪が0.13における横歪の最大値を比較してみると、いずれも0.16程度であり大差ないといえる。一方、軸歪が0.13における横歪の最小値には若干の差があった。すなわち、周圧のもっとも小さい(a)の場合には、高さ5mmで横歪は最小値となり、その値は約0.03であった。しかしながら、(b)と(c)では、試験片上部で横歪は最小となり、値はいずれも約0.005と小さかった。ここで示した結果に関する限り、周圧が大きい場合の方が、破壊の進行が局所化するように思われたが、試験片の個数が少なく今後検討の余地がある。

## 5.8 まとめ

可視化ベッセルの心臓部ともいえる透明円筒の材料として、今回はアクリル樹脂を使用した。ほぼ同じ位の強度をもつ材料としてポリカーボネートがあるが、透明度が落ちるので採用を見送った。ただし、破壊するまでの吸収エネルギーは、アクリルよりポリカーボネートの方がはるかに大きいので今後検討する予定である(日本機械学会, 1994)。また、最近になって使用されはじめたPPS(ポリフェニルサルファイド)樹脂の強度は、アクリルの約2倍であるが、著者が検討した限りでは、透明でかつ表面を研磨したとき鏡面状に仕上がるものがみつからなかったため今回は採用しなかった。PPSの持つ高い強度は魅力的であり、利用するにはかなりの工夫が要りそうだが、今後継続して検討していくつもりである。今回主として検討した材料は、エンジニアリング・プラスチックであるが、高強度ガラスについても検討の余地はあると考えている。

2年ほどの使用経験と破壊試験を通じて、初期の設計通り周圧10MPaまでの使用には十分耐えるとの結論を得た。オーリングの種類、取り付け方法、加工精度など細部を改良すれば周圧20MPaまでは使用できる可能性が高いと考えており、近日中にこの周圧での試用を開始する予定である。

透明円筒を通してデジタルカメラで撮影した写真により測定を試みたところ、変位の測定精度は、 $\pm 0.06$ mm以下であった。透明円筒を通して撮影したことによる不利はほとんどなく、撮影機材と撮影技術を高めれば、変位の測定精度はかなり上がると考えている。

田下凝灰岩と土丹を用いた三軸圧縮試験をおこなったが、周圧下で試験片がどのように変形していくかを実時間で目視できることが、当然ながら開発した可視化ベッセルの最大の利点であると考えられる。今後ビデオ撮影をおこない、その映像を画像処理することも考えている。

試験時に撮影した写真から、横歪や部分的な軸歪の測定を試みた。今回使用した岩石に関する限り、試験片を覆う熱可縮性チューブに何本か線を引き、それらの長さや間隔を測定することにより、歪の測定が可能であることがわかった。

## 参考文献

- 赤松孝雄・稲村實・桂井浩(1999):わかる画像工学, p.159-180, 日新出版
- 趙顕・大久保誠介・福井勝則(1995):資源と素材, 111, pp.543-548
- 松尾稔(1974):土質実験, 9章, 森北出版(東京)
- 三菱レイヨン株式会社(2001):一般物性表(JIS K7113で指定された試験による,  
アクリライトの引張強度)
- 日本機械学会(1994):機械工学便覧, 応用編, B4
- 大久保誠介, 福井勝則, 木村有仁(2002):トンネルと地下, 33, p.45-50
- 斎藤敏明, 村田澄彦, 今村雅弘, 笹尾春夫(1998):資源と素材, 114, pp.901-  
908
- 秋哲淵(1995):東京大学博士論文, p.13-47

表5-1 田下凝灰岩の各周圧における破壊モード.  
破壊モードは図6に示した

周圧(MPa)	破壊モード		合計(本)
	①	②	
5.9	3	4	7
7.8	3	7	10
9.8	2	6	8

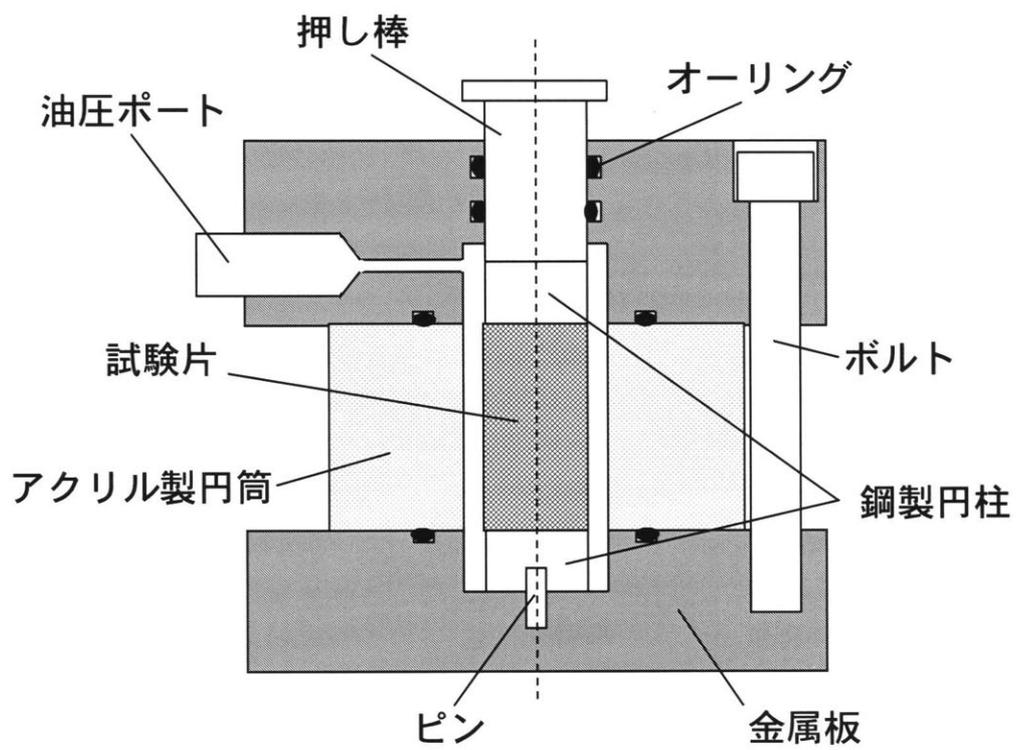


図5-1(a) 可視化ベッセル  
概略図

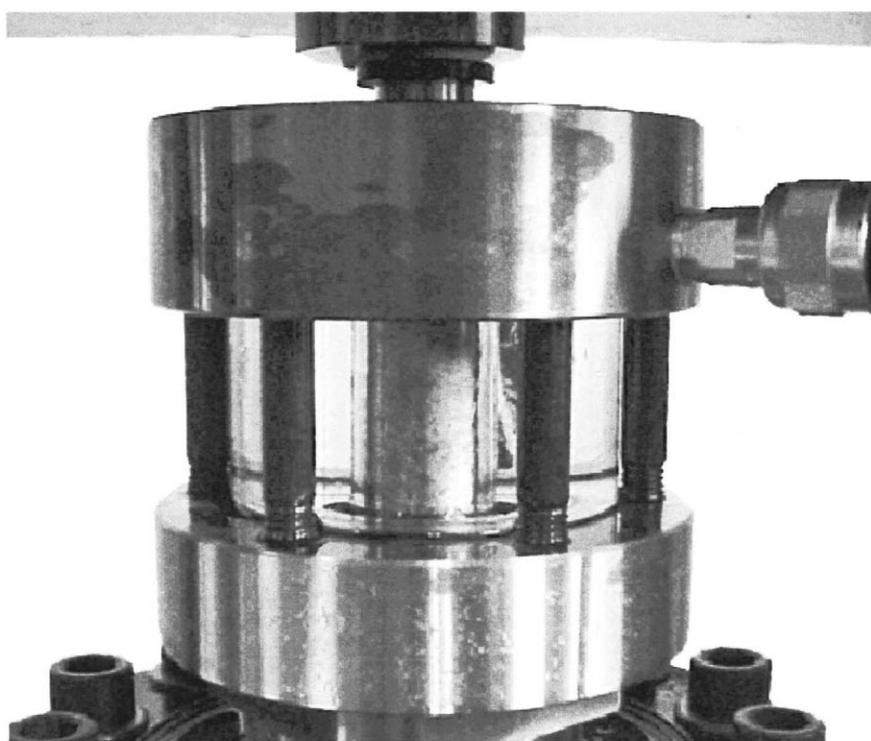


図5-1(b) 可視化ベッセル  
写真



図5-2 アクリル製円筒の破損状況.  
円筒を上から撮影した写真で、右側にほぼ直線の亀裂が入っている

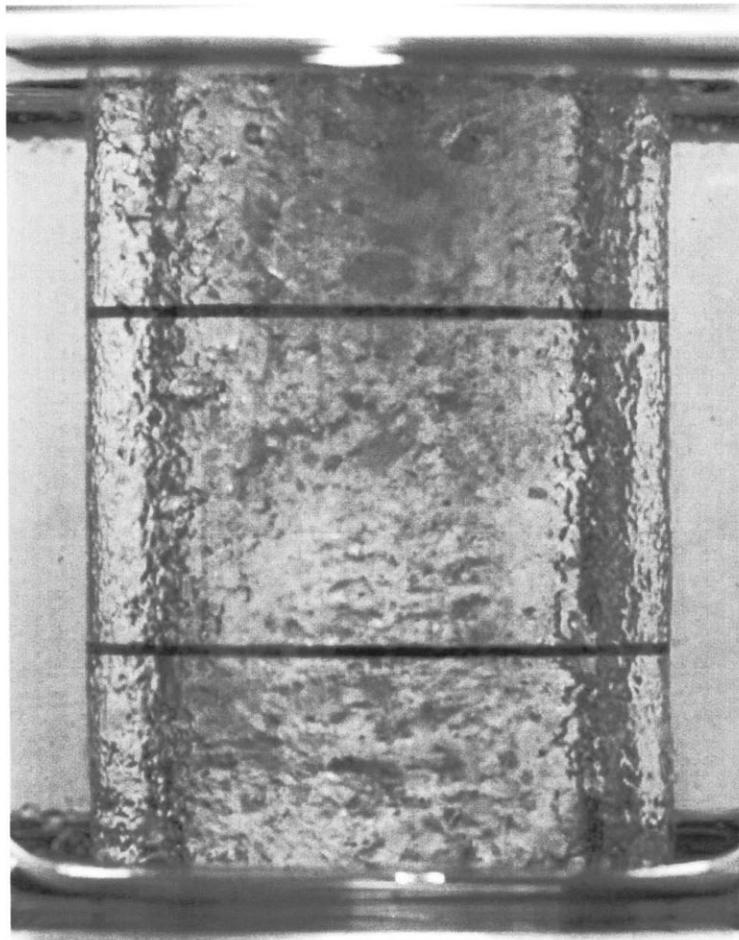


図5-3 熱可縮性チューブで覆った試験片と中央軸歪測定用の2本の線

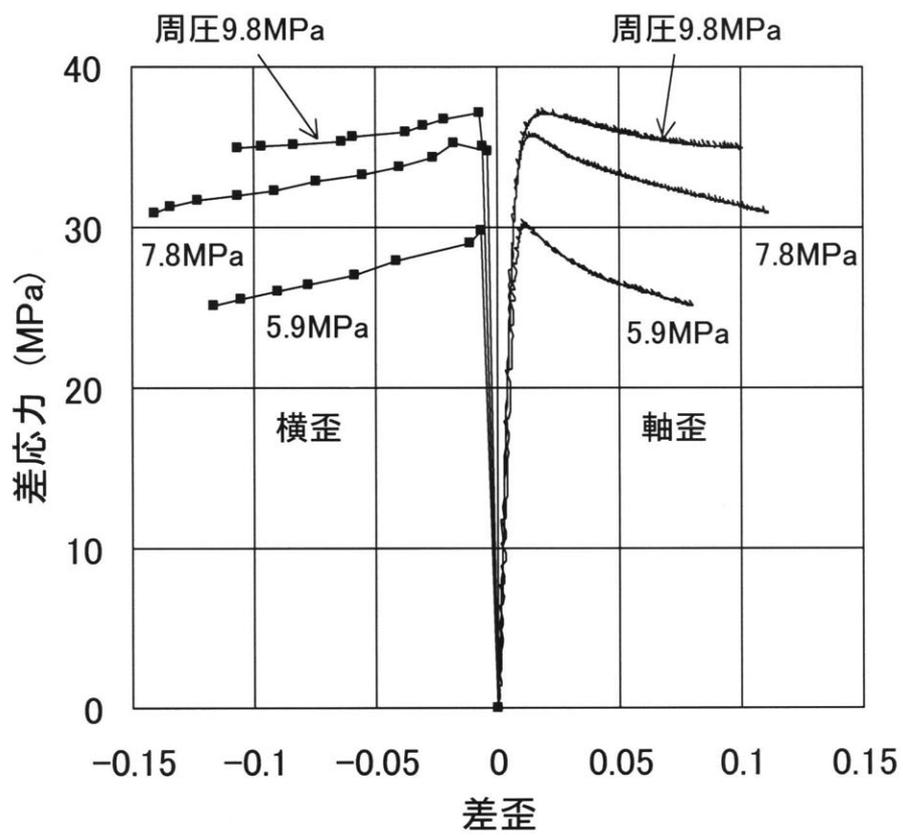


図5-4 田下凝灰岩の応力-歪曲線. 左側はもっとも膨らんだ部分の横歪, 右側は差動変圧器でもとめた軸歪. 以下の図で単に軸歪と称するのは, 差動変圧器でもとめた値

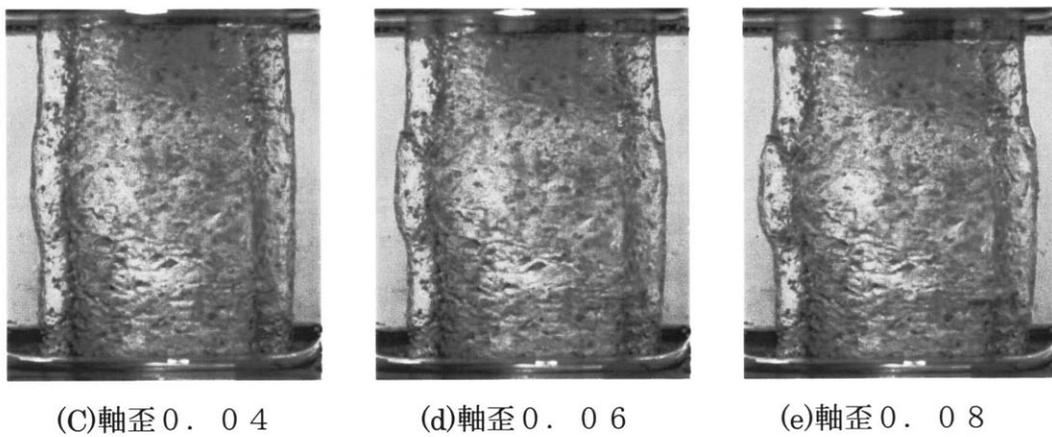
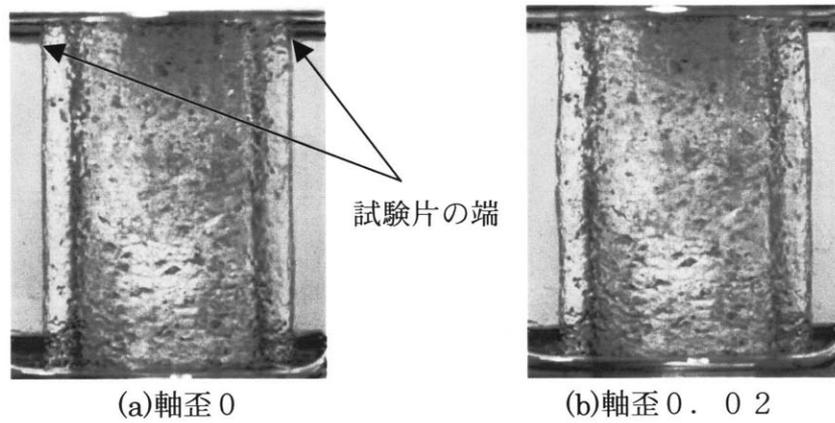
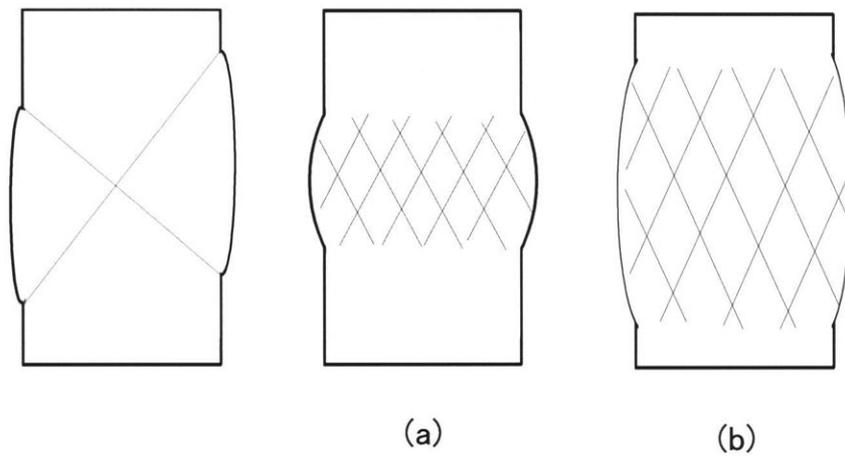


図5-5 田下凝灰岩の周圧5.9MPaにおける試験片の連続写真.  
 図5-4に示した応力-歪曲線と同じ試験片.



① 共役なせん断面

② 多数のせん断面

図 5 - 6 田下凝灰岩の試験片の破壊モード.

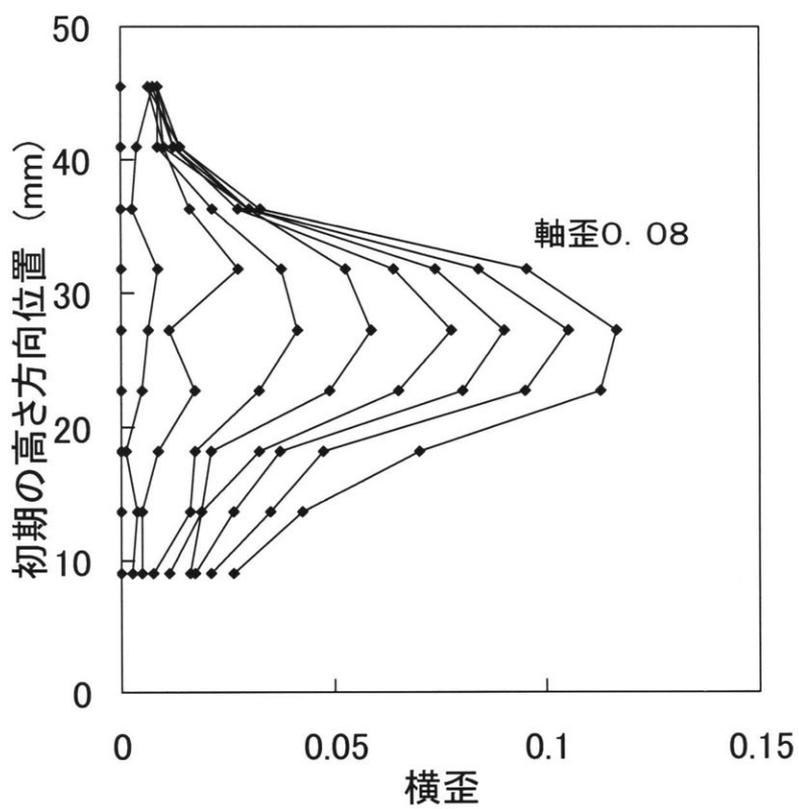


図5-7(a) 横歪の試験片高さ方向の分布 (田下凝灰岩) .

図5-4に示した応力-歪曲線と同じ試験片. 軸歪が0.01増すごとに表示  
周圧5.9MPa

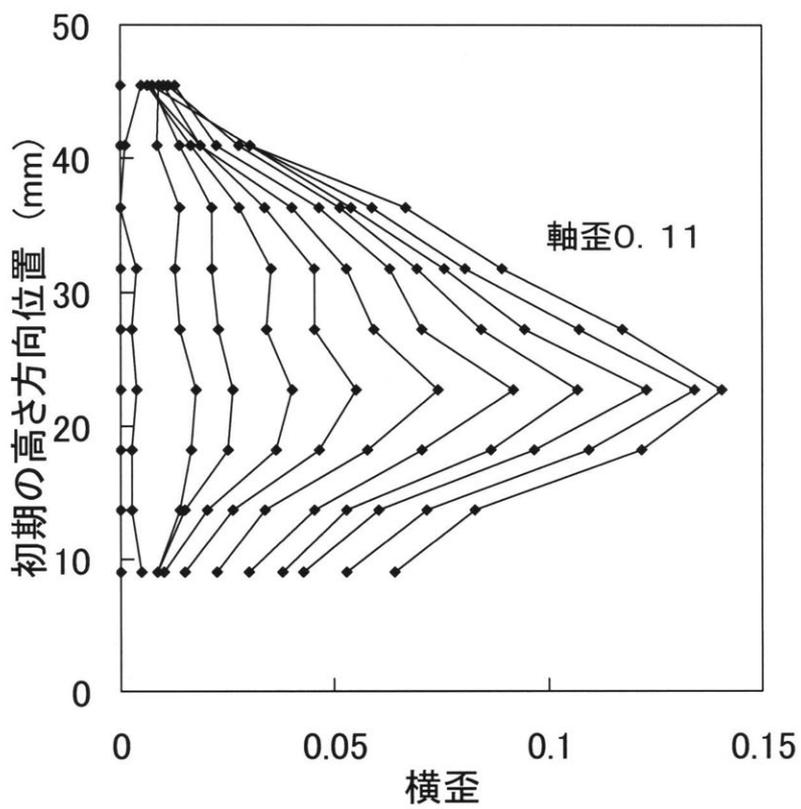


図5-7(b) 横歪の試験片高さ方向の分布 (田下凝灰岩) .

図5-4に示した応力-歪曲線と同じ試験片. 軸歪が0.01増すごとに表示  
周圧7.8MPa

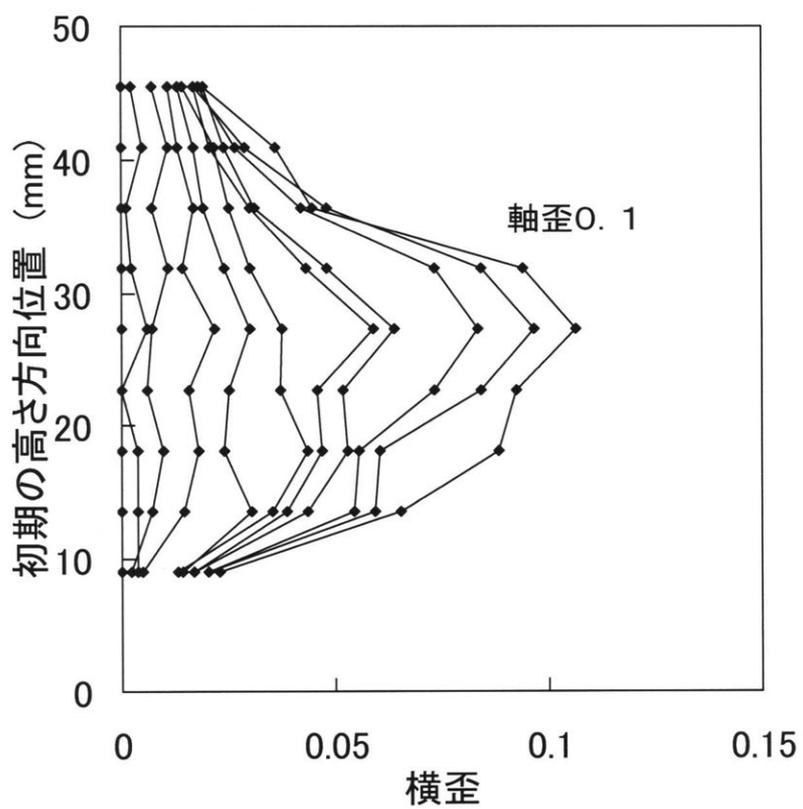


図5-7(c) 横歪の試験片高さ方向の分布 (田下凝灰岩) .

図5-4に示した応力-歪曲線と同じ試験片. 軸歪が0.01増すごとに表示  
周圧9.8MPa

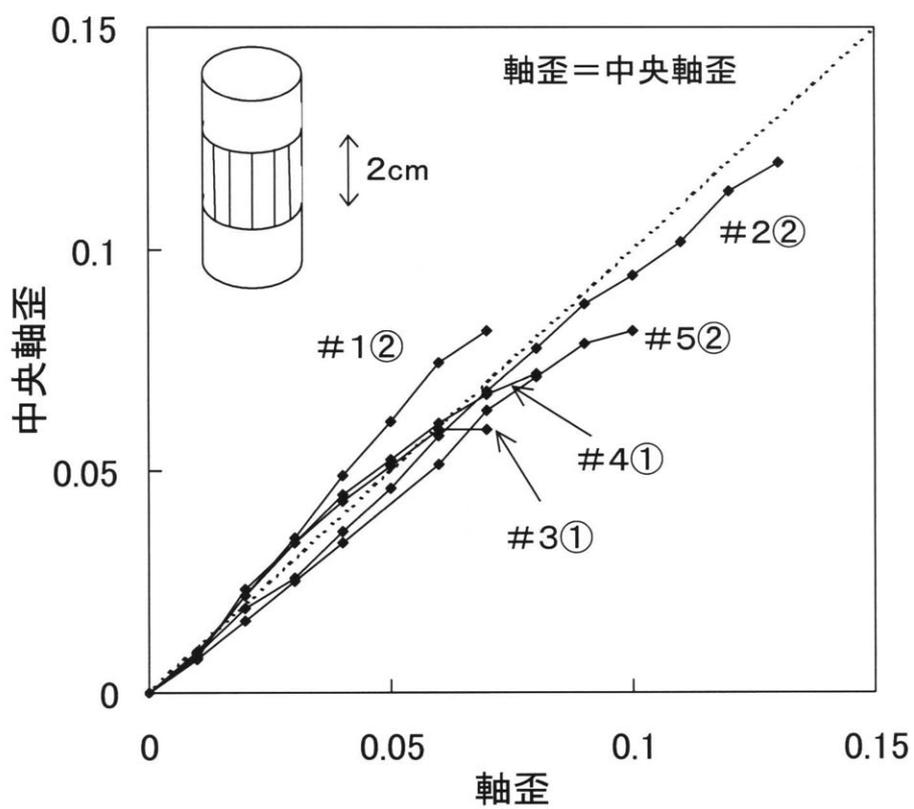


図5-8(a) 中央軸歪と差動変圧器でもとめた軸歪の関係(田下凝灰岩)。  
 例えば#1②は、試験片番号1で、破壊モード②であることを示す。  
 周圧5.9MPa

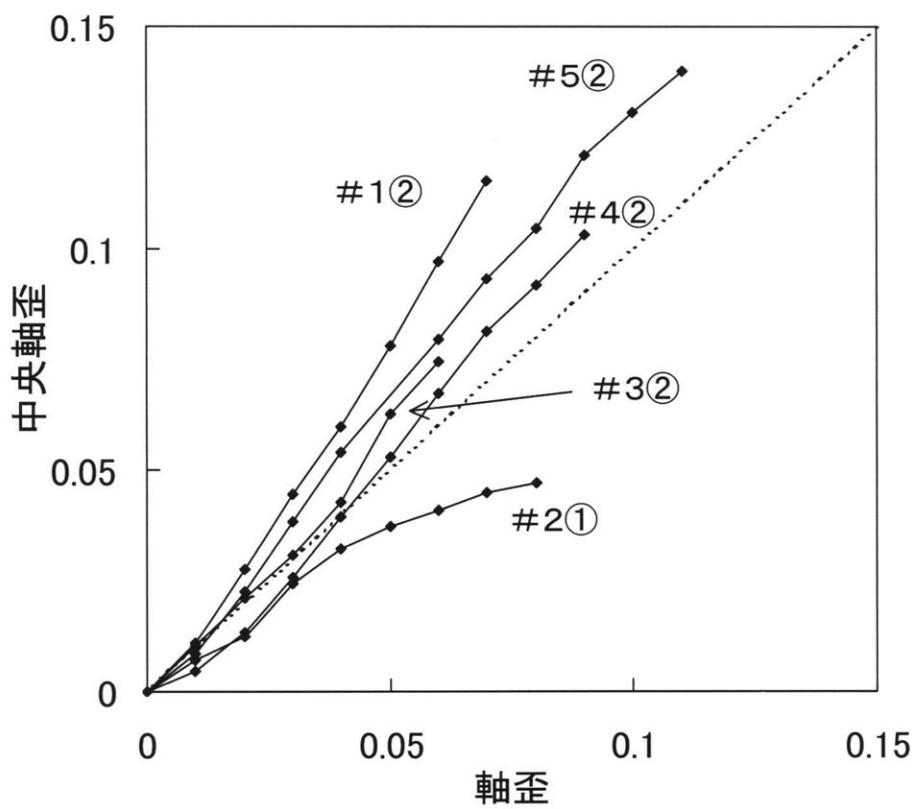


図5-8(b) 中央軸歪と差動変圧器でもとめた軸歪の関係 (田下凝灰岩) .  
 例えば#1②は, 試験片番号1で, 破壊モード②であることを示す.  
 周圧7.8MPa

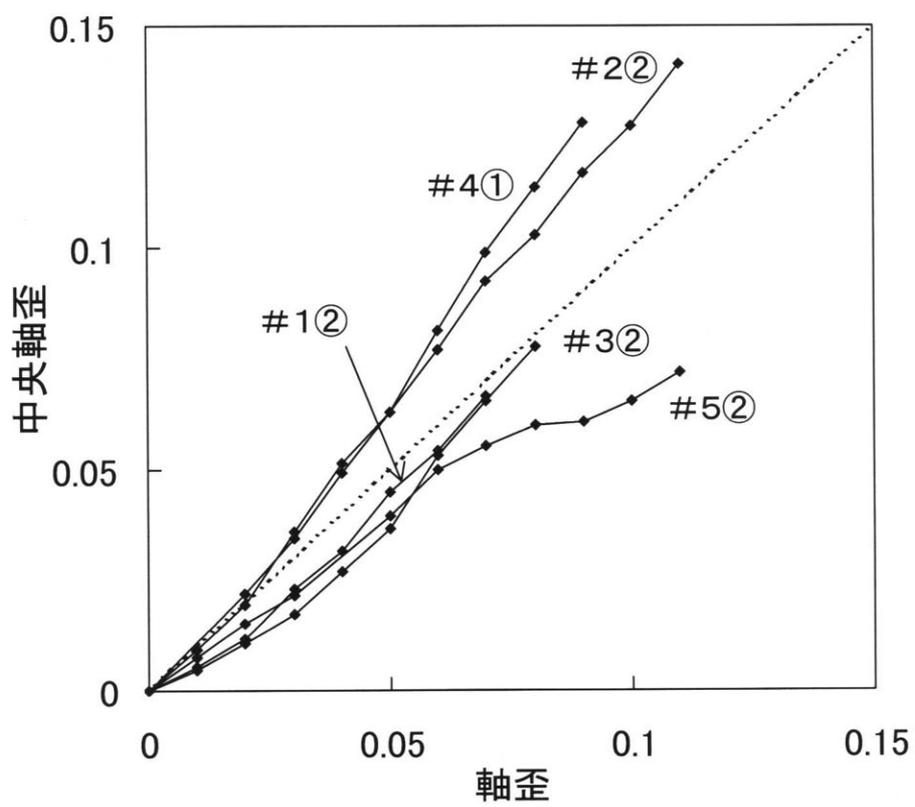


図5-8(c) 中央軸歪と差動変圧器でもとめた軸歪の関係(田下凝灰岩)。  
 例えば#1②は、試験片番号1で、破壊モード②であることを示す。  
 周圧9.8MPa

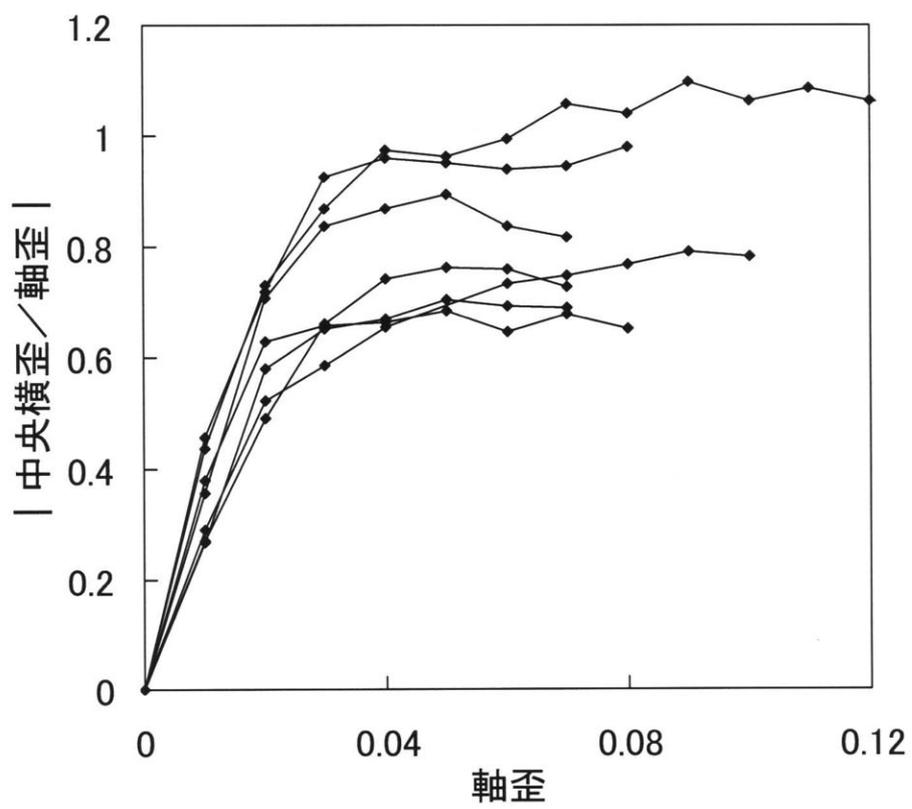


図5-9 周圧5.9MPaの時の|中央横歪/軸歪|と軸歪の関係(田下凝灰岩)

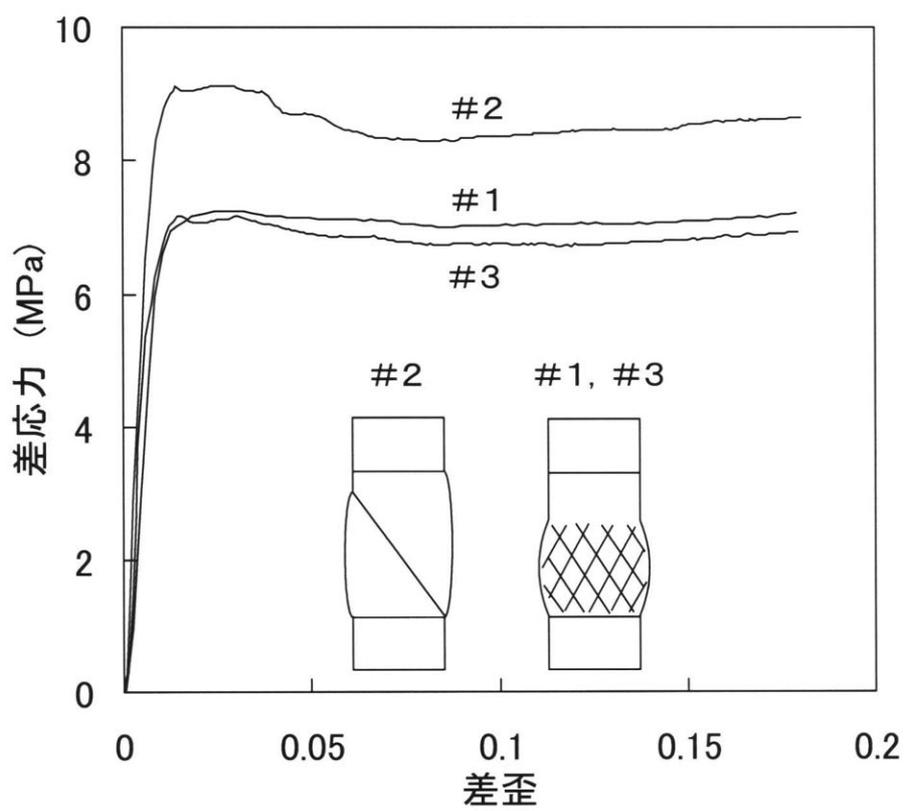


図5-10(a) 土丹の応力-歪曲線と破壊した試験片の模式図  
周圧 2 MPa

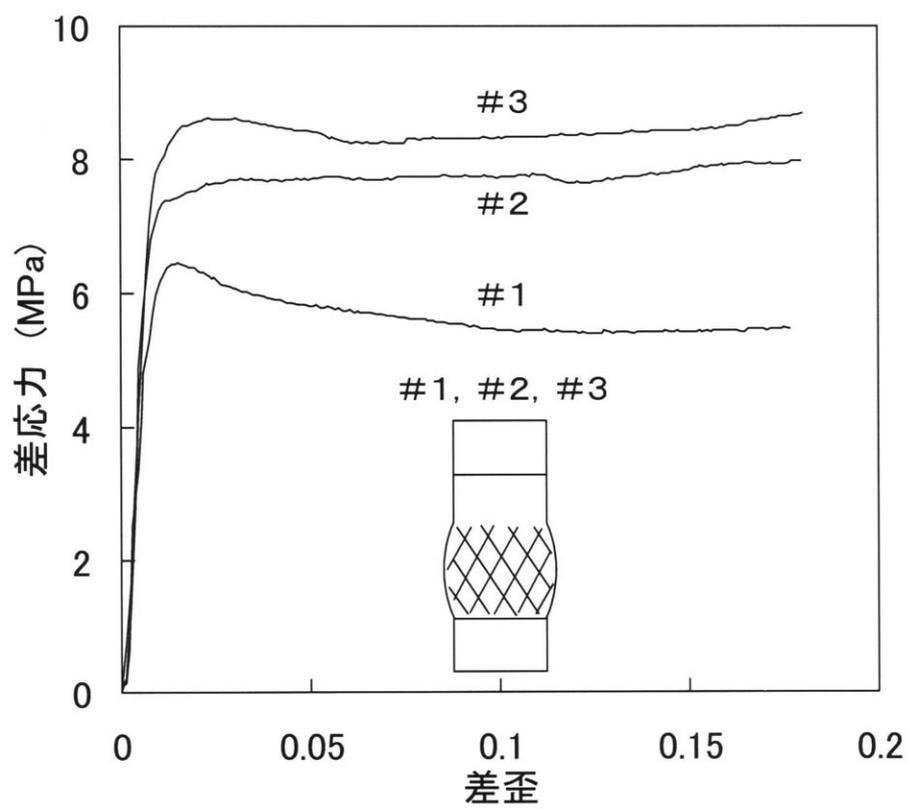


図5-10(b) 土丹の応力-歪曲線と破壊した試験片の模式図  
周圧 3.9 MPa

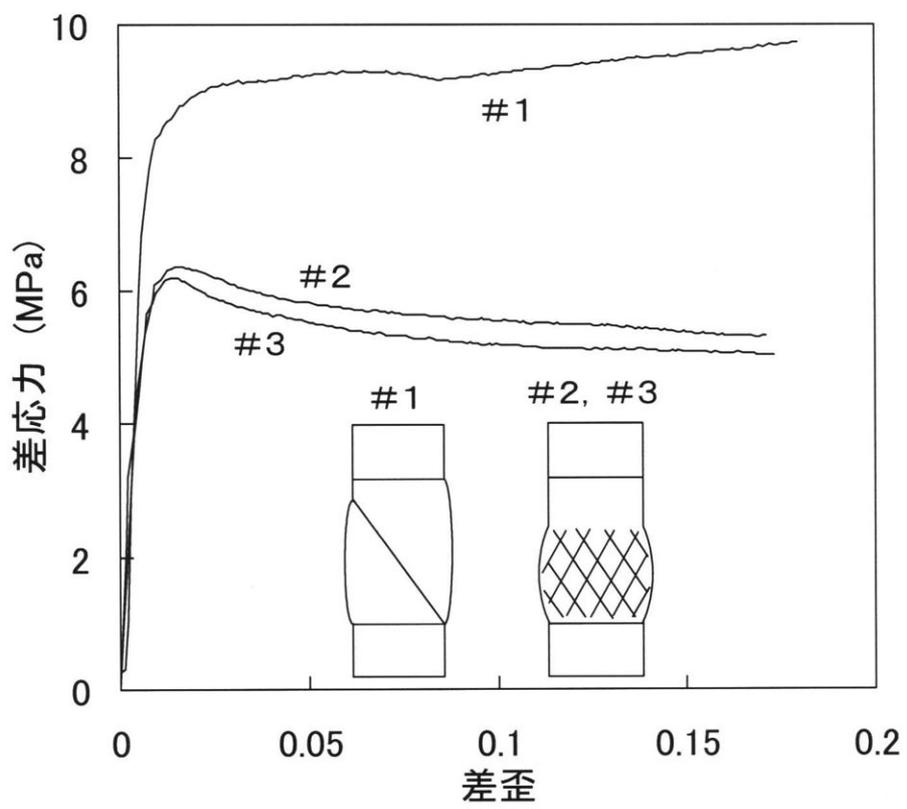
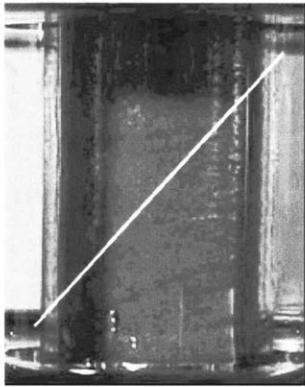
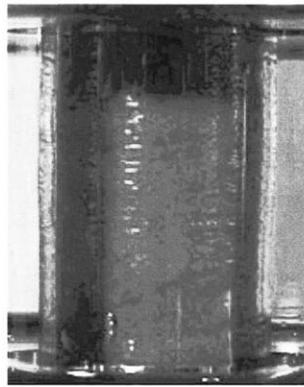


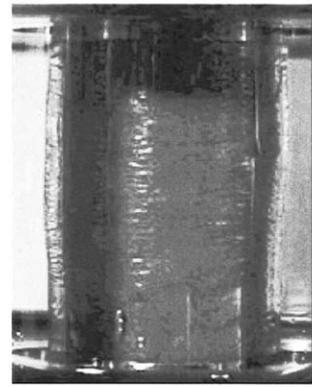
図5-10(c) 土丹の応力-歪曲線と破壊した試験片の模式図  
周圧7.8MPa



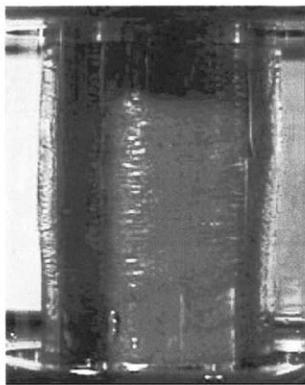
(a)軸歪0



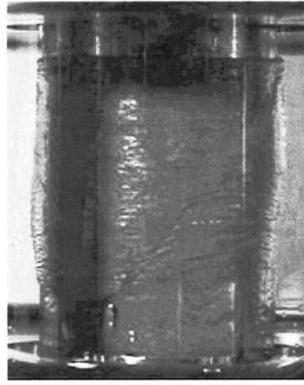
(b)軸歪0.03



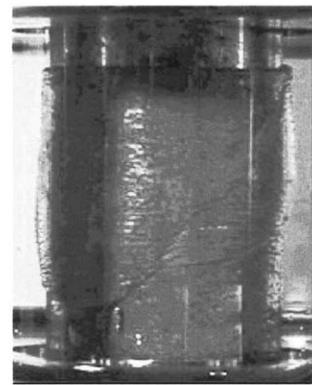
(c)軸歪0.06



(d)軸歪0.09



(e)軸歪0.12



(f)軸歪0.15

図5-11 土丹の試験片(図5-10(c) #1)の連続写真

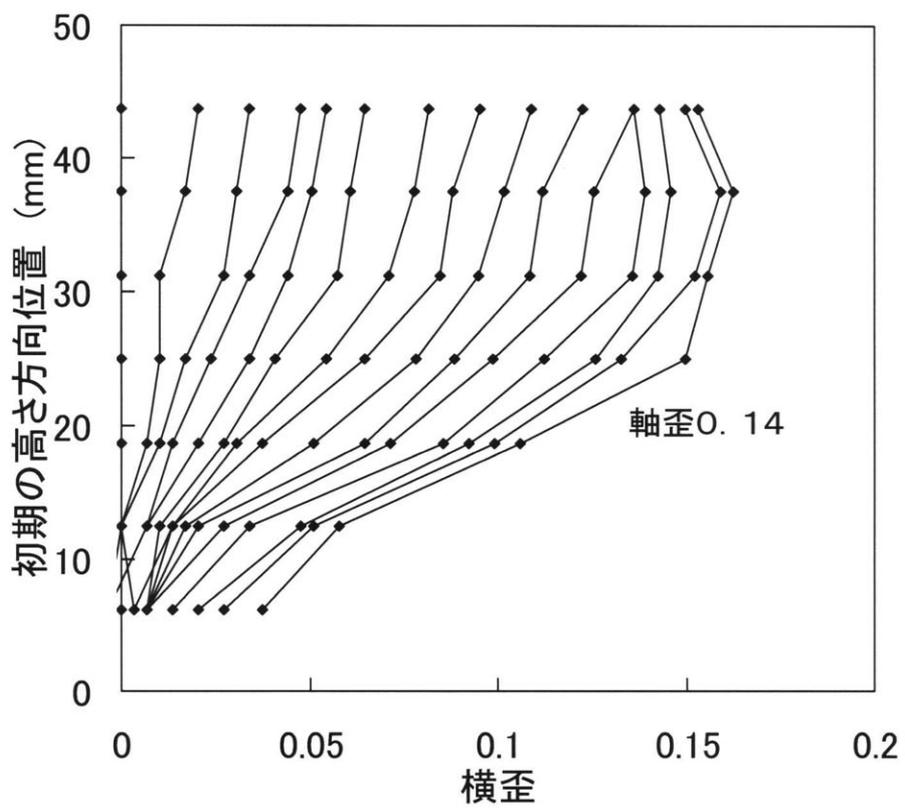


図5-12(a) 横歪の試験片高さ方向の分布(土丹)．軸歪が0.01増すごとに表示  
周圧2.0MPa

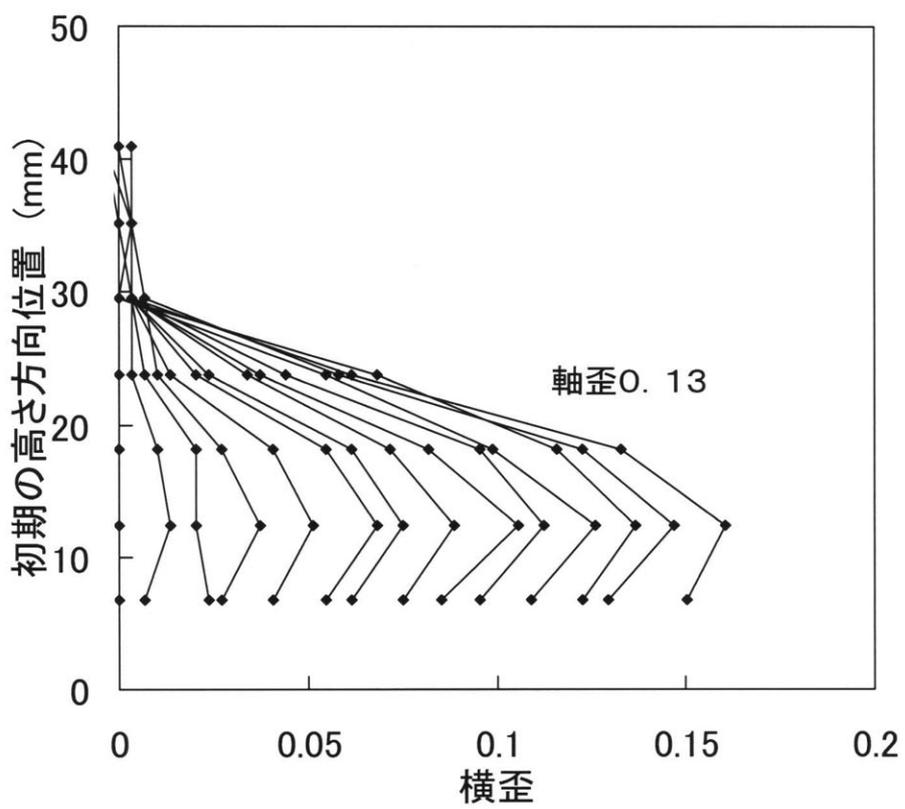


図5-12(b) 横歪の試験片高さ方向の分布(土丹)．軸歪が0.01増すごとに表示  
周圧3.9MPa

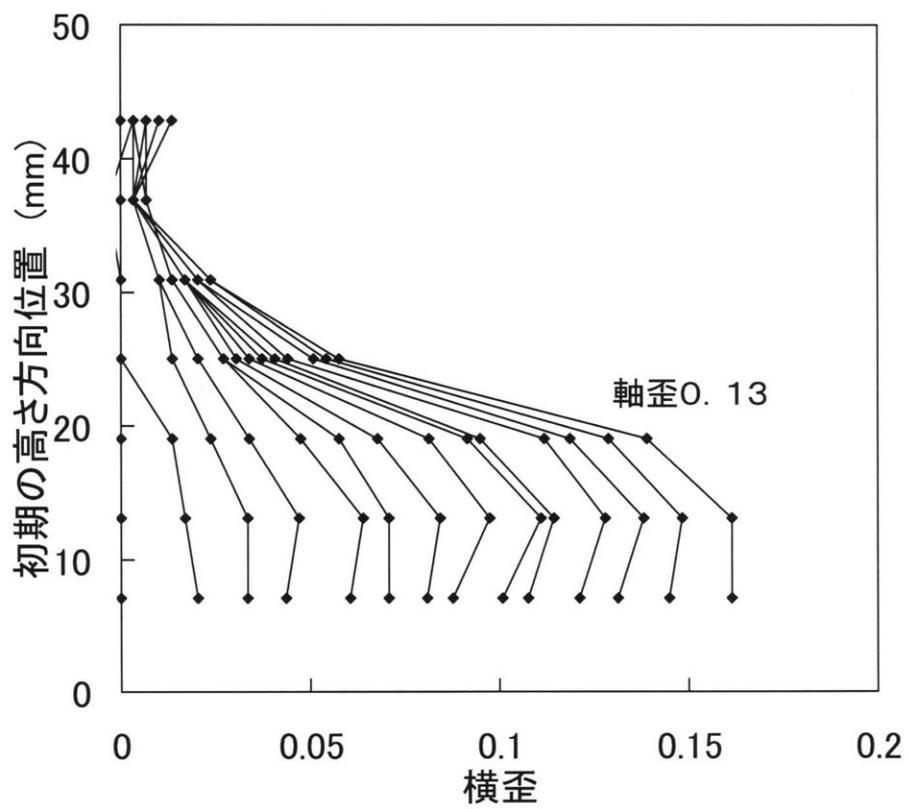


図5-12(c) 横歪の試験片高さ方向の分布(土丹)．軸歪が0.01増すごとに表示  
周圧7.8MPa

## 6. 中間温度領域におけるクリープ試験

### 6. 1 圧力源の製作と実験方法

油圧式クリープ試験装置により、中間温度領域（40～80℃）におけるクリープ試験を行った。温度の計測と制御装置に関しては、昨年度の報告書を参照されたい。

昨年度までは、1995年度の報告書に示したように、圧力調整弁付き油圧源（東衡テスタック製）およびアキュムレータ（中村工業製）を用いてきた。稲田花崗岩のクリープ試験では、10MPa程度の油圧が必要となるが、この程度の圧力でも老朽化した油圧源における油漏れがかなり多くなったので油圧源を更新した。

新規に製作した油圧源の仕様を表6-1に、写真を図6-1, 2に示す。また、アキュムレータも図6-3に示すものに取り替えた。

基本的な制御システムおよび実験方法は従来と同様である。

#### ・制御システム

1) アキュムレータにつけたひずみゲージ式圧力変換器をセンサーとして、デジタル指示計により油圧を測定する。

2) デジタル指示計（表6-2および表6-3参照）は接点出力機能を持っており、最小圧力（10.38MPa）と最大圧力（10.40MPa）の間で、油圧ポンプをON-OFF制御する。

#### ・実験方法

1) 戻り側ニードルストップ弁1（図6-1）と、給油側ニードルストップ弁2（図6-3）を締める。

2) 圧力源の電源をいれると約5分程度で油圧は10.39MPaまで増加する。

3) 油圧管路内の気泡が油に溶け込むまで約1時間待つと装置は安定する。

4) 試験片をセットし、手動で載荷枠上部のねじを回して試験片に若干荷重をかける。

5) 給油側ニードルストップ弁2をわずかに開放して実験を開始する。

### 6. 2 80℃でのクリープ試験

昨年度は、予備的に1本の試験を行った。試験条件を以下に示す。

○岩石：稲田花崗岩

○環境：80℃，湿潤状態

○試験片：直径20mm×高さ40mmの円柱形

○クリープ応力：100MPa [一軸圧縮強度（190MPa）の53%]

○試験時間：126時間

本年度は同一条件で2本の試験を追加した。昨年度実施した結果を1回目、本年度実施した結果を2, 3回目とする。

図6-4にクリープ歪の経時変化を示す。3回の試験とも、クリープ歪は時間の対数にほぼ比例する。ただし、細かくみるとクリープ曲線は下に凸である。

図6-5は、クリープ歪速度の経時変化を両対数グラフで示したものであり、クリープ歪速度は時間の $-0.9 \sim -1$ 乗に比例して減少することがわかる。

クリープ歪とクリープ速度の関係を図6-6に示すが、クリープ歪と対数表示したクリープ歪速度との関係はほぼ線形といえる。

80℃の平均的な結果(1回目)と、1997年度の報告書に示したクリープ応力50%、常温下でのクリープ試験結果をあわせて図6-7に示す。図では10sまでは同じような歪であるが、その後徐々に80℃のクリープ歪が大きくなる傾向がみられ、常温に比べ、下に凸の傾向がやや顕著である。ただし、クリープ応力が80℃と常温とでわずかであるが異なっていたので確たることはいえない。

### 6.3 温度を変化させたクリープ試験の予備的検討

前説で述べたような試験片ごとに温度を変化させる実験では、試験片のばらつきの影響を受け易い。そこで、1本の試験片によってクリープ特性の温度依存性を調べる手法を検討した。具体的には、1本の試験片を使用し、2日間隔で温度を40℃、60℃、80℃と段階的に増加させ、その後、逆に60℃、40℃と温度を低下させ、クリープ特性を調べるものである。

試験条件を以下に示す。

- 岩石：稲田花崗岩
- 環境：湿潤状態
- 試験片：直径20mm×高さ40mmの円柱形
- クリープ応力：100MPa [一軸圧縮強度(190MPa)の53%]
- 試験時間：温度を一定にした後、各48時間
- 温度条件：常温→40℃→60℃→80℃→60℃→40℃

熱応力の発生を最小限にとどめるため、2時間で20℃の温度変化とした。

図6-8に60℃から80℃に温度を上昇させた時の結果を示す。15時から温度制御装置の目標温度を6分ごとに1℃増加させていった。最初は1℃程度目標値に比べ、実測値は遅れているが、65℃を過ぎた時点で目標値と実測値はほぼ一致しており、制御の遅れはなくなっている。オーバーシュートを防ぐため、16時50分の時点で15分間程度、目標値を79℃に固定し、その後ゆっくり目標値をあげて80℃とした。

試験は都合3回行った。そのうち、1回は80℃にした直後にクリープ破壊が生じた。まず破壊の生じなかった2例についてまず述べる。

図6-9に試験番号1での温度および歪の経時変化を示すが、温度が上昇すると歪が増加し、逆に温度が低下すると歪みが減少している。また温度が20℃変化した際の歪の変化はすべて $200 \times 10^{-6}$ と一定である。そのため、温度変化によって生じる膨張であると考えられる。そこで、花崗岩の試験片のかわりにステンレスを用いて同一条件で試験を行った。その結果、20℃の温度の上昇により歪は $60 \times 10^{-6}$ 減少した。両者の結果から試料岩石の線膨張係数が、ステンレス(試験片を被うベッセルの素材)より $13 \times 10^{-6}/\text{℃}$ ほど小さいことがわかる。

線膨張係数の相違により生ずるみかけの歪を補正して求めたクリープ歪の経時変化を図6-

10に示す。図でクリープ歪を0とした区間は温度が変化している間を表す。試験番号1では、載荷してから約3分後に常温から温度を上昇させたため、図6-10では瞬間的にクリープ歪が増加しているように見えるが、図6-11に示す対数表示した時間で表現すると、その間はほぼ対数クリープ則に近い状態でクリープ歪が増加していることがわかる。図6-10では40℃、60℃、80℃と一定の温度とした2日間に、それぞれ $2.0 \times 10^{-6}$ 、 $4.5 \times 10^{-6}$ 、 $8.0 \times 10^{-6}$ とクリープ歪は増加している。他方、80℃から60℃、40℃と変化させても、歪の変化はほとんどみられていない。図6-10で $7 \times 10^5$  s、 $8.7 \times 10^5$  s付近において、クリープ歪が極小となる傾向がみられ、クリープ歪は約 $3.0 \times 10^{-6}$ 程度減少している。この間は、約2日であり、1日ごと（日変化）にクリープ歪が低下しているような傾向が現れている。それ以前でもわずかではあるが、その兆候は見られており、日変化に起因した影響が現れている可能性が高いと考える。その原因はいまのところ不明であるが、試験室の気温の変化と空調関係などの試験室環境の影響であると思われる。

図6-12に試験番号2での温度および歪の経時変化を示す。試験番号1と同様に、図では、温度を変化させることによって、計測された歪が増加している。次に、みかけの歪を補正して求めたクリープ歪の経時変化を図6-13に示す。図6-14に示した対数表示した時間で表現すると、温度を変化させていない最初の10sの間はほぼ対数クリープ則に近い。図6-13では40℃、60℃、80℃と一定の温度とした2日間にそれぞれクリープ歪は、 $1.0 \times 10^{-6}$ 、 $5.0 \times 10^{-6}$ 、 $1.10 \times 10^{-6}$ と増加していることがわかる。他方、80℃から60℃、40℃と変化させても、歪の変化はほとんどみられていないことがわかる。また試験番号1と同様に日変化によるクリープ歪の変動が見られる。

試験片が破壊した場合について報告する。図6-15に、温度および歪の経時変化を示すが、経過時間520,000sにおいて破壊が生じた。先ほどと同じように、クリープ歪の経時変化を図6-16に示す。40℃、60℃となった直後のクリープ歪が、前に述べた例の倍程度であった。80℃に達した後、クリープ歪みが $1.60 \times 10^{-6}$ から $3.00 \times 10^{-6}$ まで増加する。次に $3.0 \times 10^{-6}$ ほど急激に歪が増大し、その後クリープ歪速度は一旦減少するが、420,000sと495,000s付近でクリープ歪速度が再度増大する。福井ら(1989)で述べたように、花崗岩のクリープ破壊では、最終的な破壊の直前に、数回の側面の破壊とそれに伴うクリープ歪の増大がある。図6-16でもこのような現象が見られた。

昨年度の予備試験において、同じ試験片を用いて、温度関係の調整をおこなっていた際、クリープ応力50%で試験片が1回破壊した事例があった。ただし、同じ試験片で何回もクリープ試験を行い、さらに数回の温度履歴を経験したためとおもわれる。以上で述べた2例から見て、低応力レベルでも、熱履歴を経験すると数日でクリープ破壊する可能性があることがわかった。しかしながら、まだ予備的な検討段階での結果であり、今後詳細に検討していくつもりである。

## 参考文献

福井勝則・大久保誠介・西松裕一(1989): 資源と素材, 105, pp. 521 ~ 526

表6-1 圧力源の仕様

ブルドン管圧力計 長野計器	
型番	GA21-243
圧力レンジ	0~25MPa
精度	0.5±%F. S.

インラインアキュムレータ 日本アキュムレータ	
型式	S210-02
品番	HN-S21MP-L02-CAC
最高使用圧力	21MPa
ガス容積	0.2L

油圧ポンプ 油研	
VANE PUMP	
MODEL	PV11R10-2-L-RAA-20
MAX. PRESSURE	31.5MPa
MAX. DISPLACEMENT	2.2cm <sup>3</sup> /rev

モータ 三菱電機				
1.5kW 6P THREE PHASE INDUCTION MOTOR				
周波数	50Hz	60Hz	型式	SF-JR
電圧	200V	200V	わく番号	100L
電流	7.4A	7.0A	連続定格	CONT
回転数	930rpm	1110rpm	周囲温度	40℃
			絶縁クラス	E 種絶縁

表6-2 デジタル指示計 1

デジタル指示計 ユニパルス				
型式	F340A			
仕様	アナログ部	センサ印加電圧	DC 10V±10%	
			DC 2.5V±10%	
			出力電流 30mA以内	
			パネルキーにより設定可	
		信号入力範囲	-3.0~3.0mV/V	
		等価入力較正範囲	0.5~3.0mV/V	
		等価入力較正誤差	0.1%F. S. 以内(0.5mV/V入力時)	
		実負荷較正範囲	0.5~3.0mV/V	
		ゼロ調整範囲	0~±2.0mV/V	
		最小入力感度	1μV/count	
			1mV/V以上の入力で1/10000が保証できる	
			精度	非線形成
		ゼロドリフト		0.5μV/°C 以内
		ゲインドリフト		25ppm/°C 以内
	A/D変換器	速度	100回/秒	
		分解能	16bit(バイナリ)	
	アナログフィルタ	4Hz, 10Hz, 100Hz(初期値), 3kHz		
		パネルキーにより設定可		
	ピークホールド機能 (高速アナログホールド方式)	動作応答速度	約1kHz	
			(Sin波:3mV/V入力, アナログフィルタ3kHz時)	
確度		0.1%F. S. 以下		
リセット時間		50μs以下		
表示部	表示器	文字高	16mm 7セグメント赤色LEDによる数字表示(5桁)	
		数値	5桁±8.8.8.8.8. (表示器最上桁は1または表示なし)	
		指示値	-19999~19999	
		小数点	表示位置は選択可	
	表示項目	状態表示	HI, OK, LOW, PEAK, HOLD	
		表示回数	赤色LED5個	
			3, 6, 13, 25回/秒より選択	

表6-3 デジタル指示計2

デジタル指示計 ユニパルス						
仕様	設定部	設定項目	較正:ゼロ較正/スパン較正(実負荷較正, 等価入力較正), 上限値, 下限値, 上下限比較モード, ヒステリシス, ゼロ付近, デジタルフィルタ, アナログフィルタ, モーションディテクト, ゼロトラッキング, ホールドモード, 自動印字, ホールド値印字, LOCK, 最小目盛, 表示回数, 印加電圧, BCDデータ更新レート, RS-232C, D/Aコンバータゼロ設定, D/Aコンバータフルスケール設定			
	外部信号	SI/F出力, 上限リレー出力, 下限リレー出力, アナログ電圧出力, ホールド信号入力, デジタルゼロ 信号入力				
	オプション	BCDパラレルデータ出力	OP1 (BCO)			
		RS-232Cインターフェイス	OP2 (232)			
		D/Aコンバータ	OP3 (DAC)			
	一般性能	電源電圧	AC100V~220V 50Hz/60Hz	+10% -15%	フリー電源	
		消費電力	約10VA			
		使用条件	温度	使用温度範囲	-10°C~+40°C	
				保存温度範囲	-40°C~+80°C	
			湿度	85%RH以下 (結露不可)		
外形寸法		96W×96H×135D(mm) (突起部含まず)				
パネルカット寸法	92×92	+1 -0	(mm)			
重量	約0.9kg					

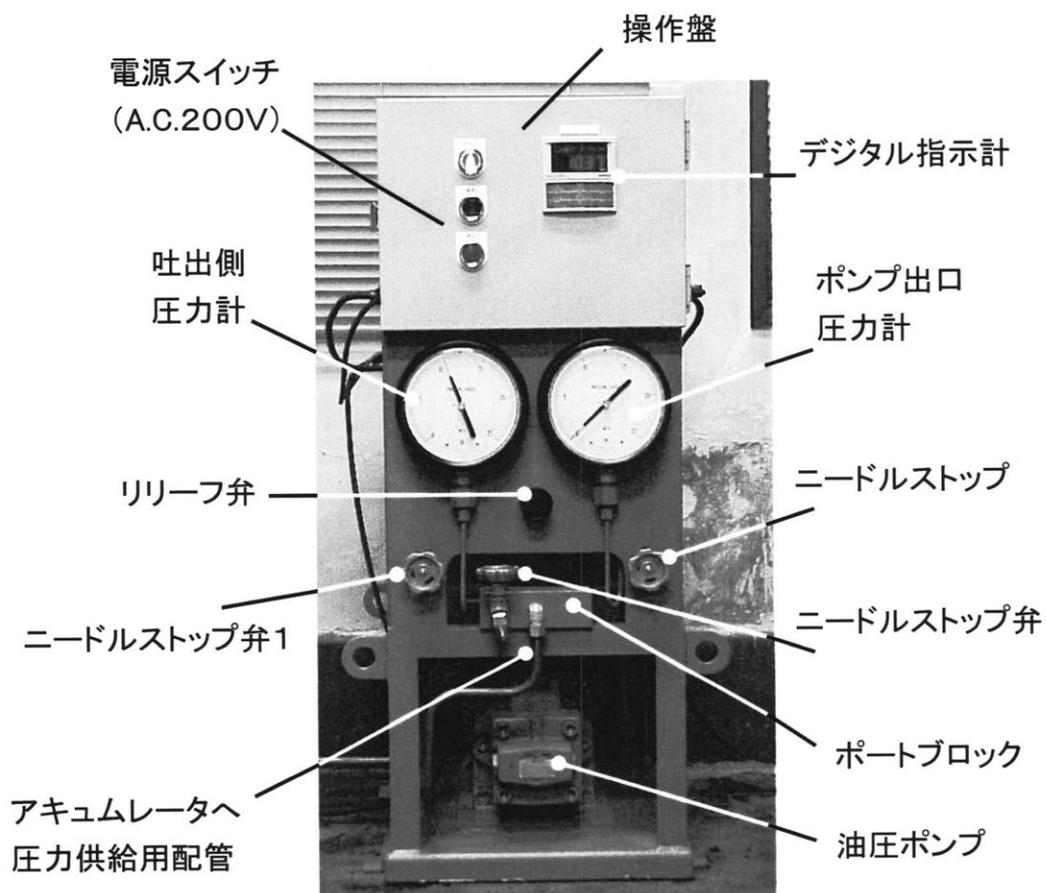


図6-1 圧力源の写真1 (正面からの写真)

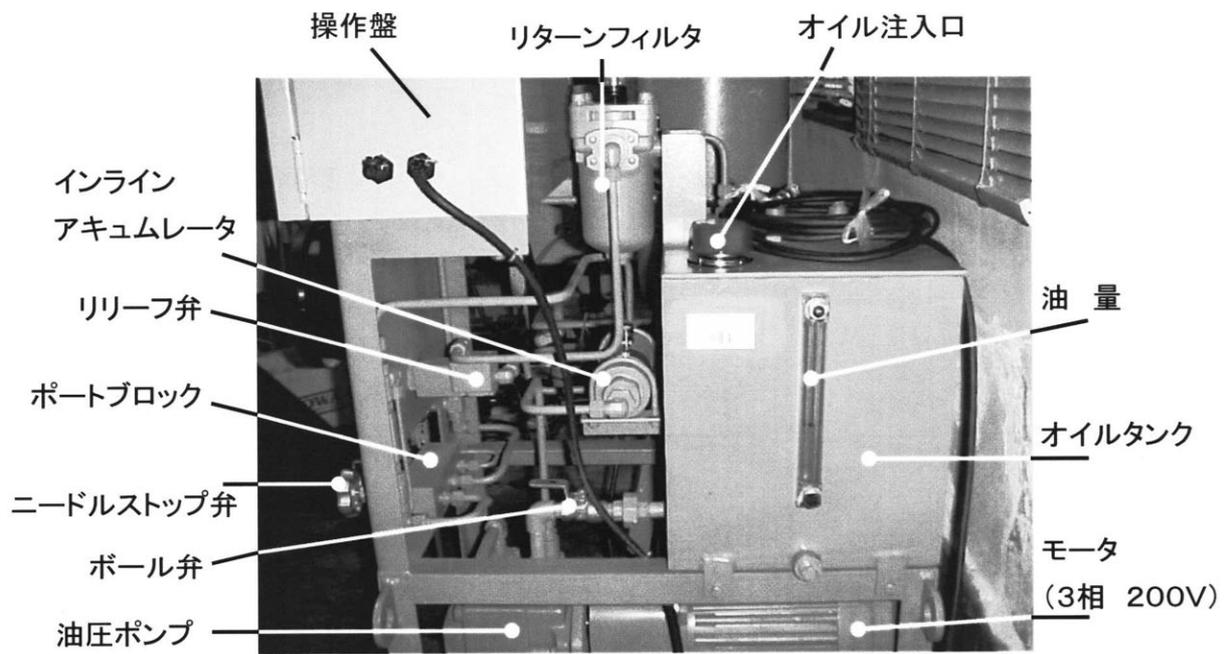


図6-2 圧力源の写真2 (横からの写真)

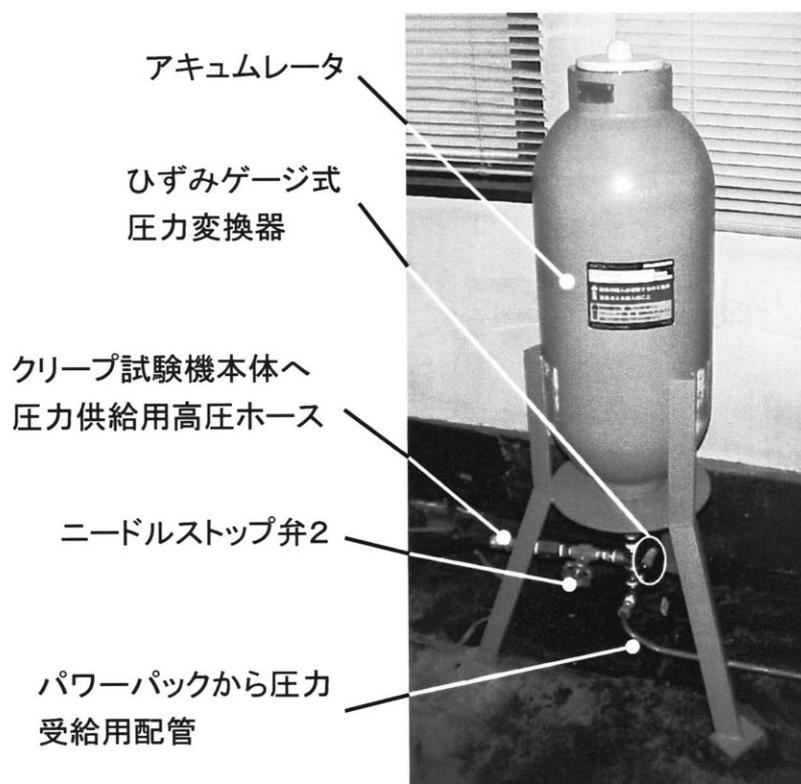


図6-3 アキュムレータの写真

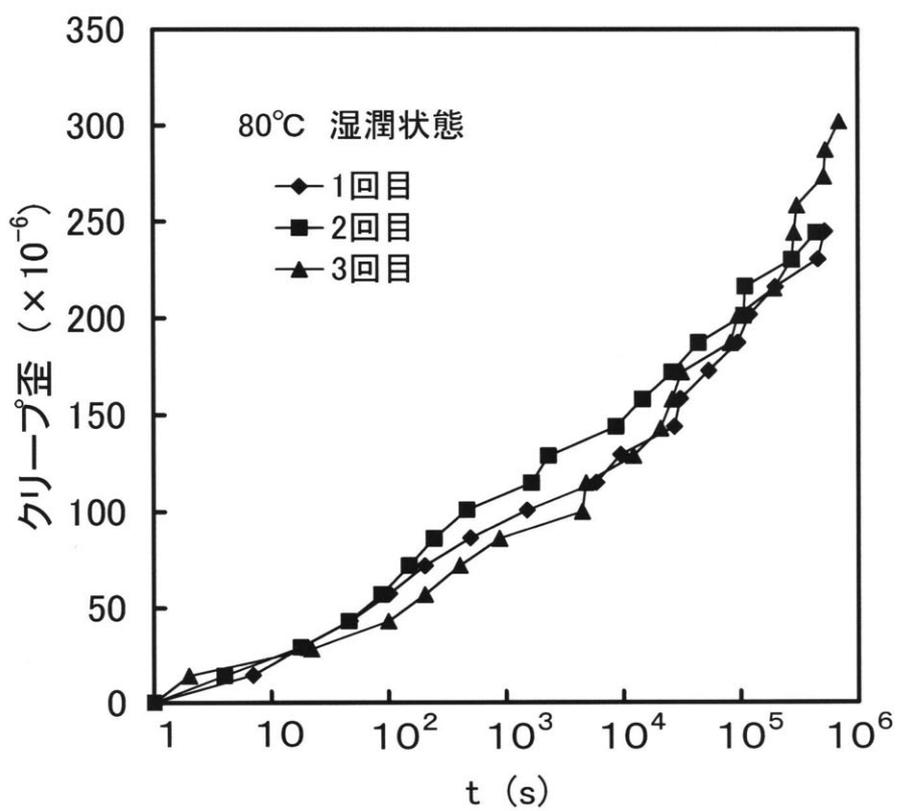


図6-4 クリープ歪の経時変化  
 岩石：稲田花崗岩  
 環境：80℃，湿潤状態  
 クリープ応力：100MPa [一軸圧縮強度(190MPa)の53%]

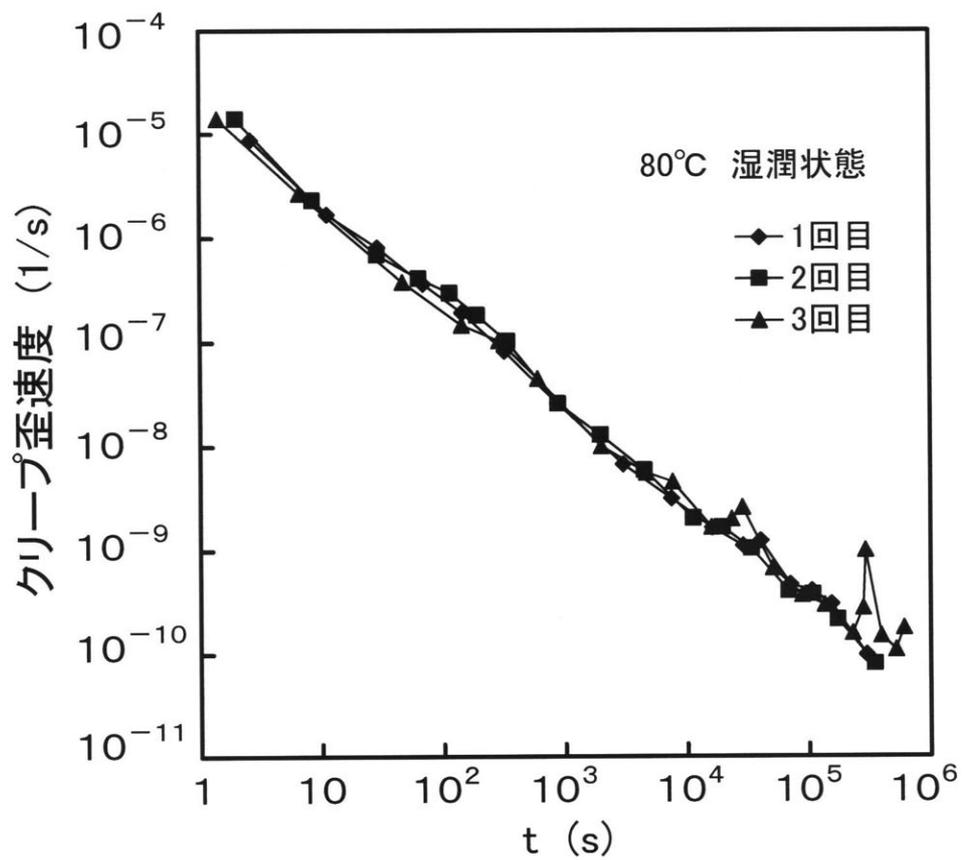


図6-5 クリープ歪速度の経時変化

岩石：稲田花崗岩

環境：80°C，湿潤状態

クリープ応力：100MPa [一軸圧縮強度(190MPa)の53%]

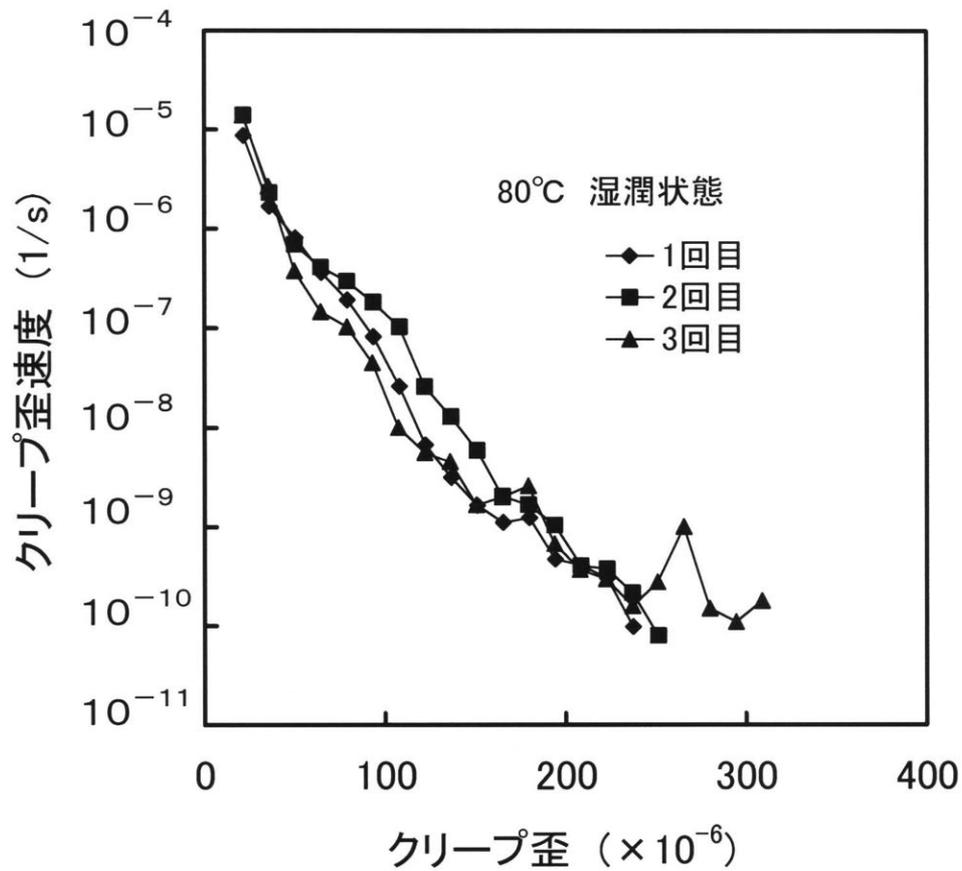


図6-6 クリープ歪とクリープ歪速度の関係

岩石：稲田花崗岩

環境：80℃，湿潤状態

クリープ応力：100MPa [一軸圧縮強度(190MPa)の53%]

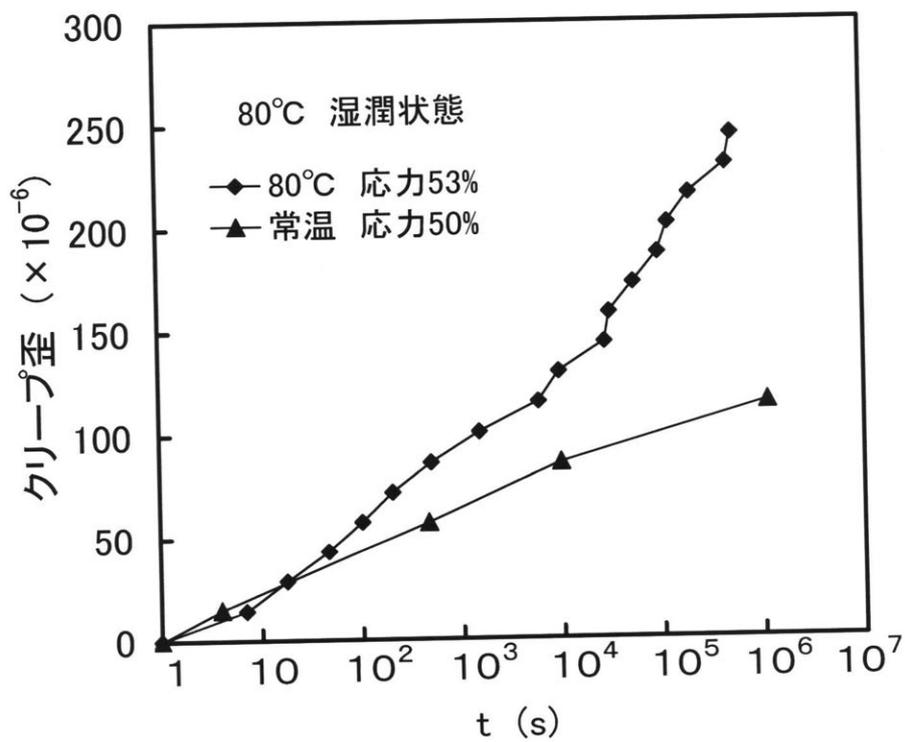


図6-7 クリープ歪の経時変化

岩石：稲田花崗岩

環境：湿潤状態

80°C：クリープ応力100MPa

[一軸圧縮強度(190MPa)の53%]

常温：クリープ応力95MPa

[一軸圧縮強度(190MPa)の50%]

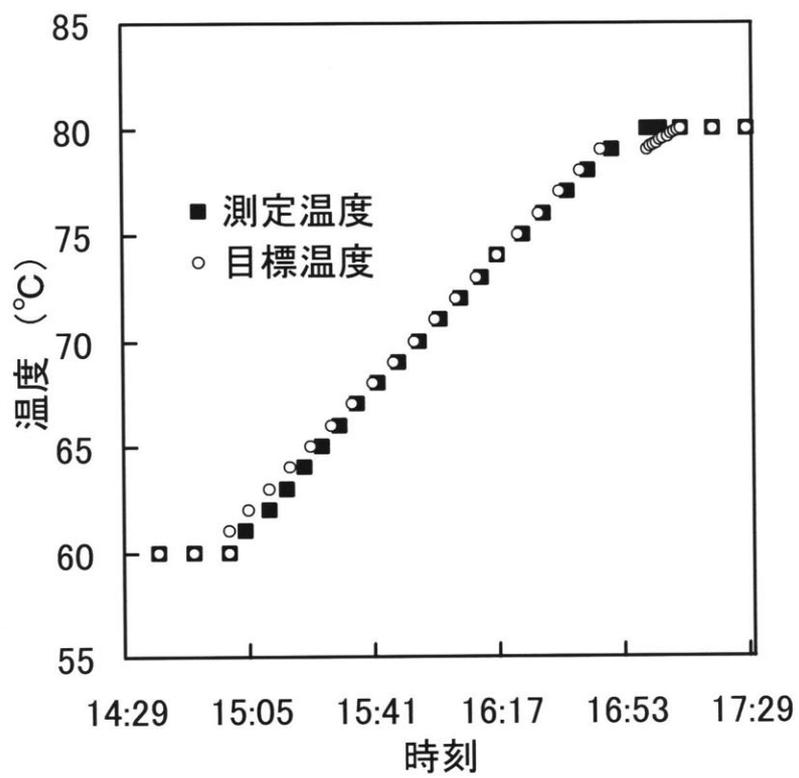


図6-8 温度の上昇過程の事例  
(温度60℃から80℃へ上昇)

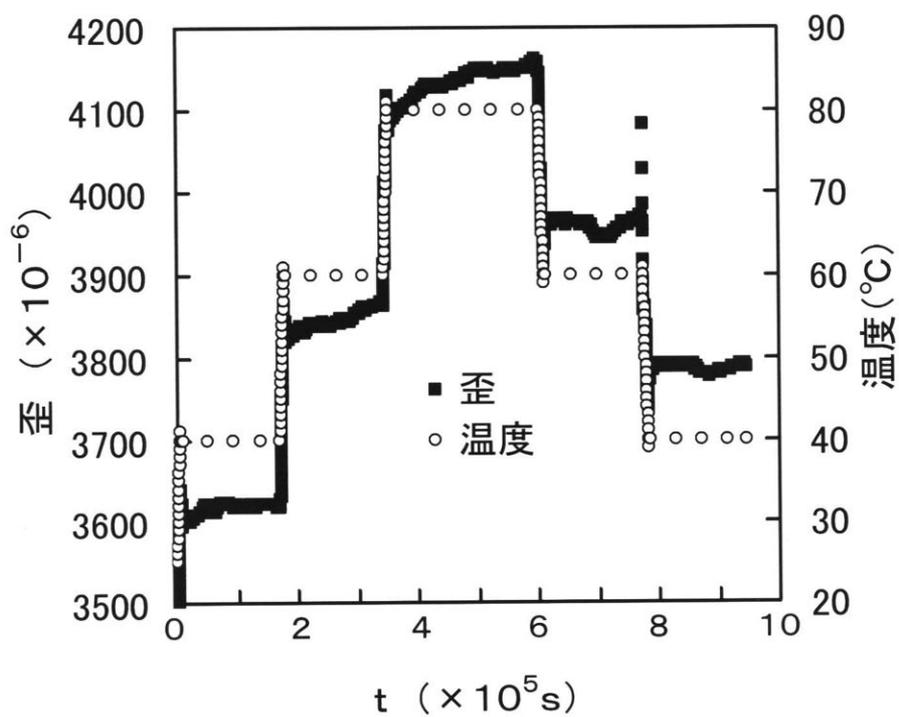


図6-9 温度および歪の経時変化 (試験番号1)

環境：湿潤状態

試験片：直径20 mm×高さ40 mmの円柱形

クリープ応力：100MPa [一軸圧縮強度(190MPa)の53%]

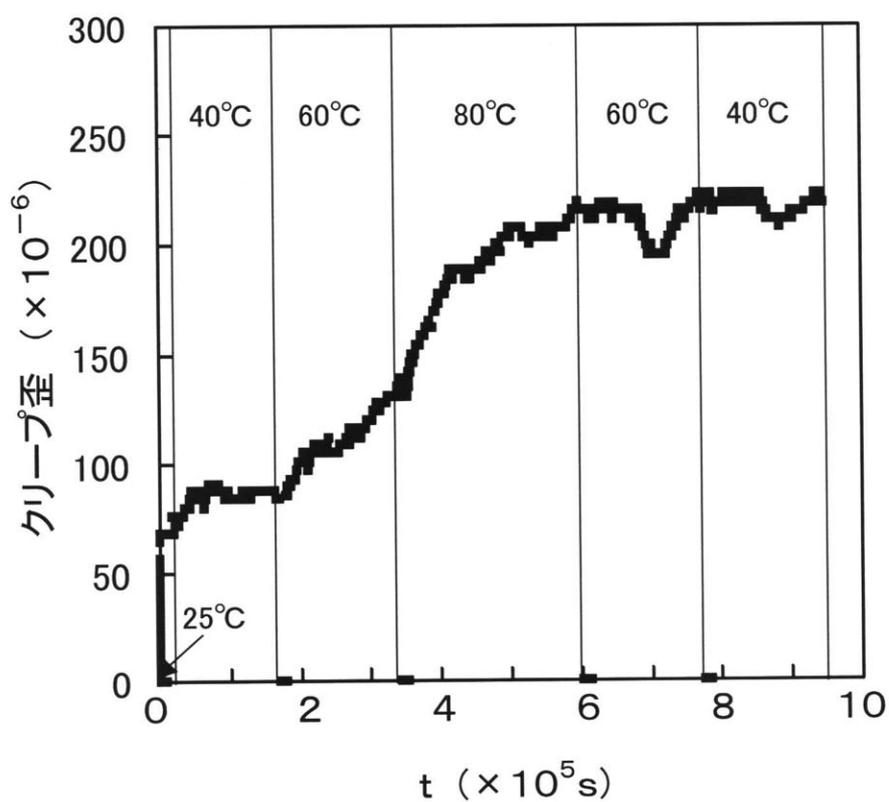


図6-10 クリープ歪の経時変化 (試験番号1)

環境：湿潤状態

試験片：直径20 mm×高さ40 mmの円柱形

クリープ応力：100MPa [一軸圧縮強度(190MPa)の53%]

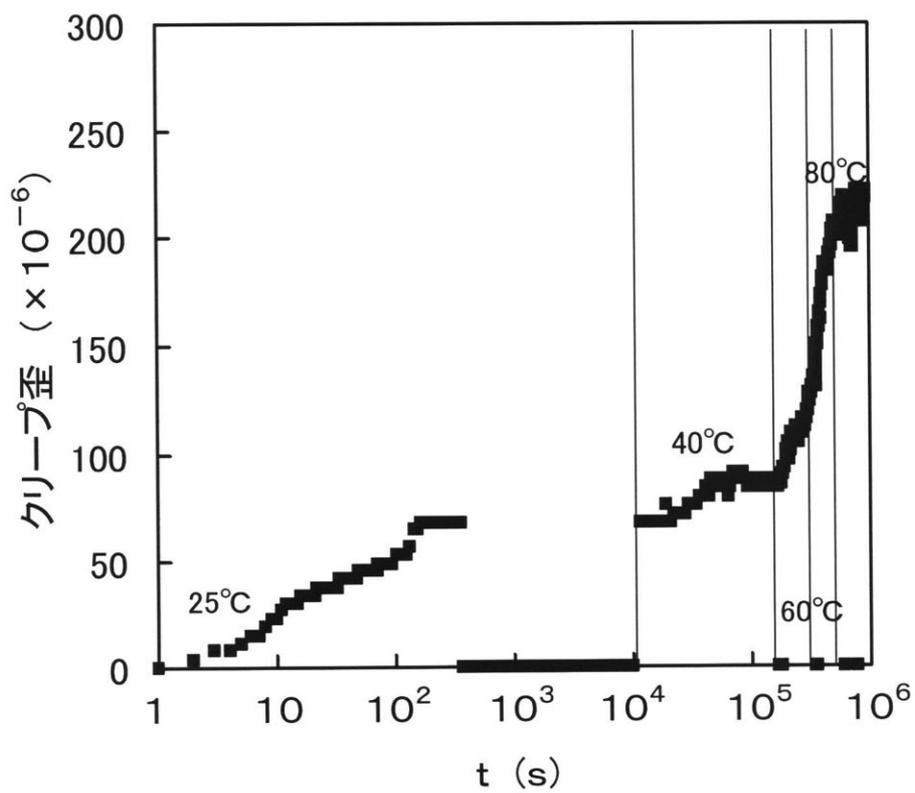


図6-11 クリープ歪の経時変化（試験番号1）

時間を対数表示

環境：湿潤状態

試験片：直径20 mm×高さ40 mmの円柱形

クリープ応力：100 MPa [一軸圧縮強度（190 MPa）の53%]

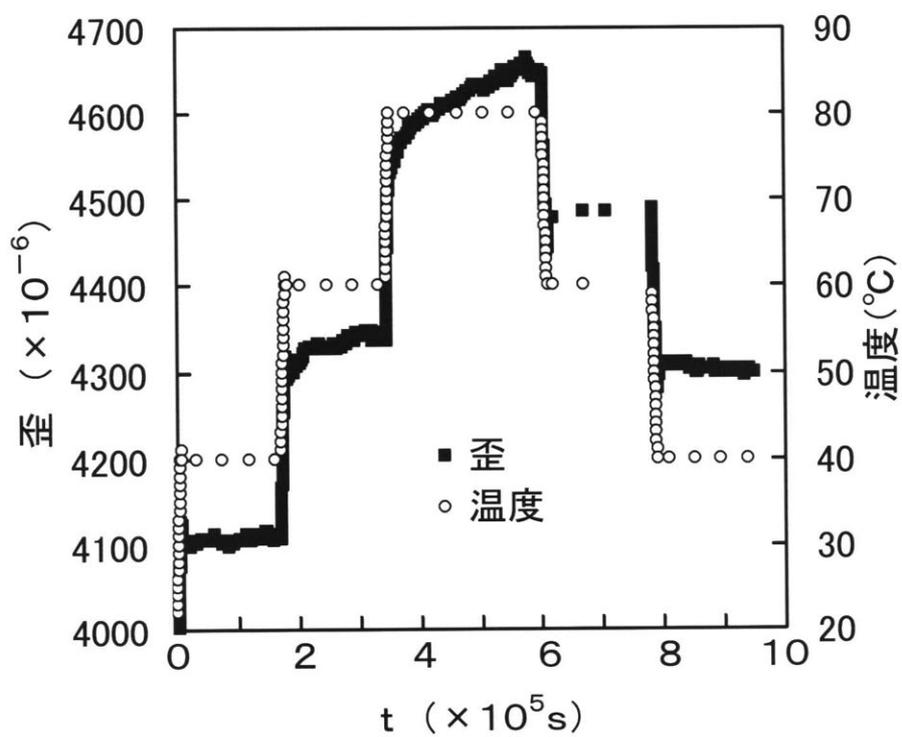


図6-12 温度および歪の経時変化 (試験番号2)

環境：湿潤状態

試験片：直径20 mm×高さ40 mmの円柱形

クリープ応力：100MPa [一軸圧縮強度(190MPa)の53%]

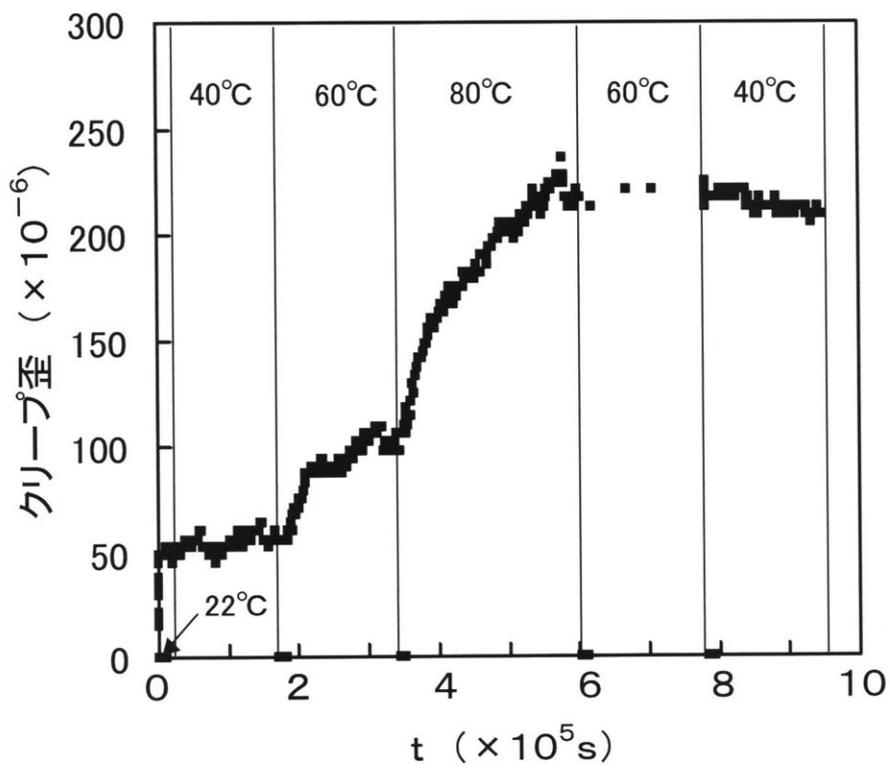


図6-13 クリープ歪の経時変化 (試験番号2)

環境：湿潤状態

試験片：直径20 mm×高さ40 mmの円柱形

クリープ応力：100 MPa [一軸圧縮強度(190 MPa)の53 %]

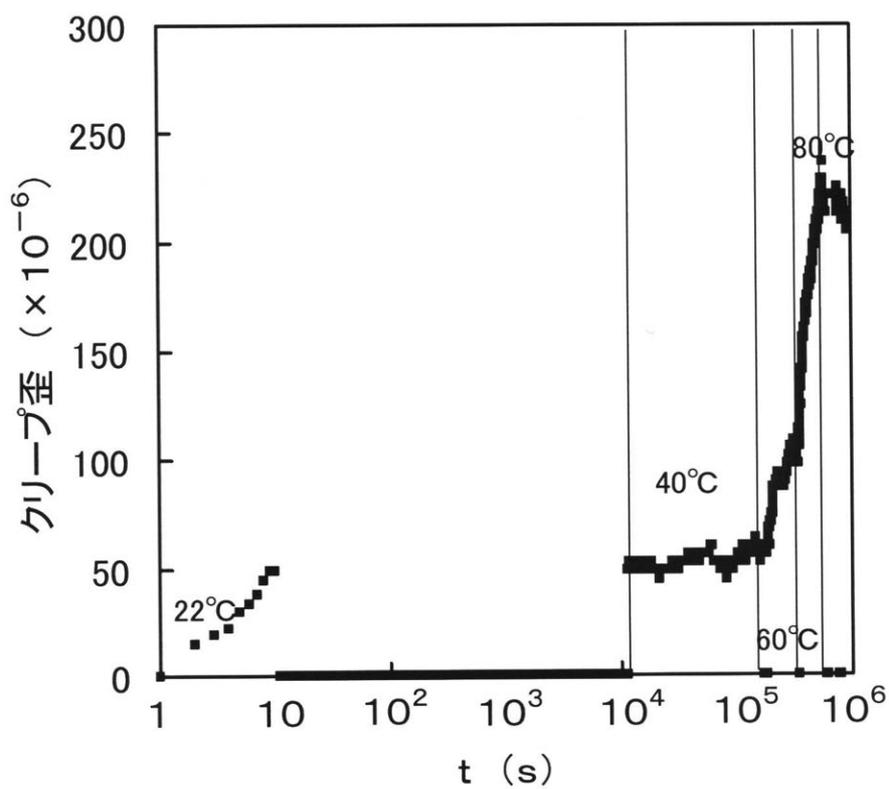


図6-14 クリープ歪の経時変化 (試験番号2)

時間を対数表示

環境：湿潤状態

試験片：直径20 mm×高さ40 mmの円柱形

クリープ応力：100 MPa [一軸圧縮強度(190 MPa)の53 %]

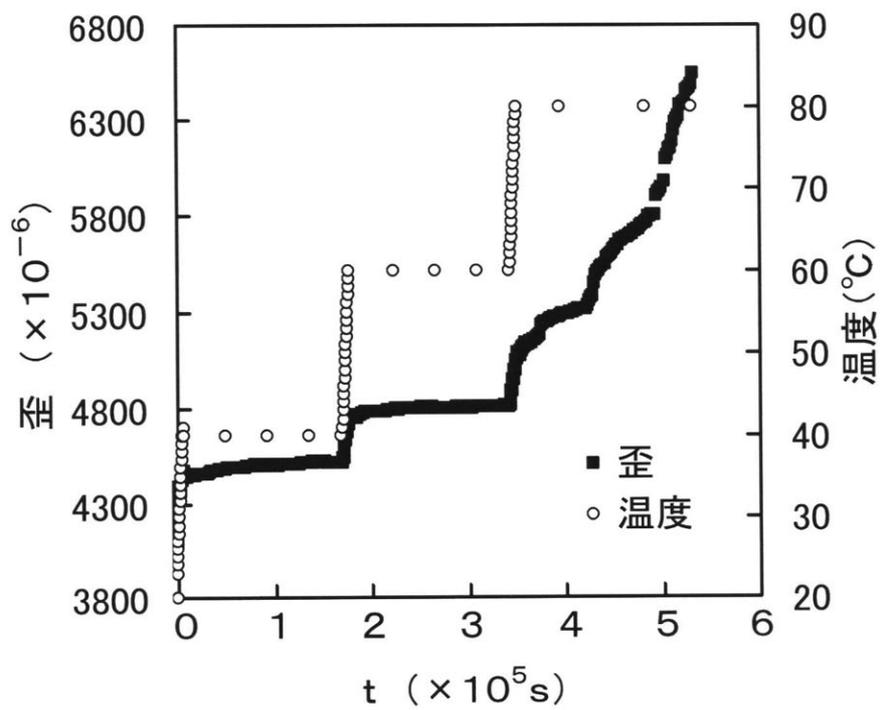


図6-15 温度および歪の経時変化（破壊した事例）

環境：湿潤状態

試験片：直径20 mm×高さ40 mmの円柱形

クリープ応力：100MPa [一軸圧縮強度（190 MPa）の53%]

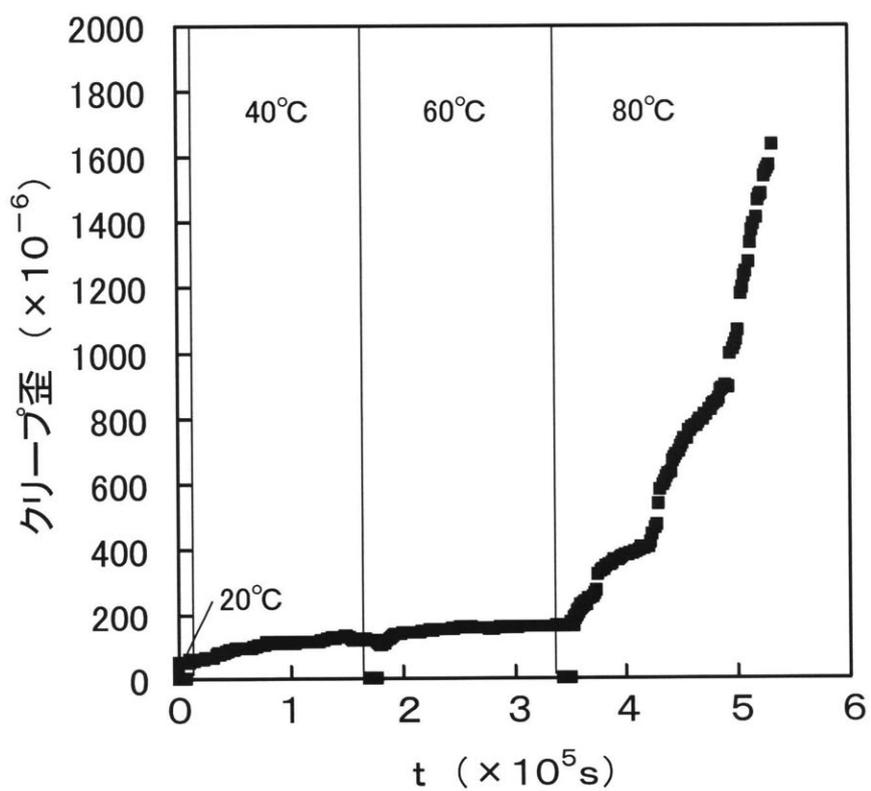


図6-16 クリープ歪の経時変化（破壊した事例）

環境：湿潤状態

試験片：直径20 mm×高さ40 mmの円柱形

クリープ応力：100 MPa [一軸圧縮強度（190 MPa）の53%]

## 7. まとめ

平成13年度(本年度)は、田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行った。試験期間はまもなく5年に達する予定であり、従来の報告がほとんどない長期間のデータを採取中といえる。この結果を第2章で述べたが、これまでのデータを整理して得られたクリープ曲線は比較的簡単な実験式でまとめられそうであり、今後も可能な限り本実験を続けて確認をする予定でいる。短期間で結果が得られる試験とは違い、データが必要となるかなり以前から行っておいてこそ価値のある試験と考えている。

第3章では、平成11年度に開発した結晶質岩用多連油圧式クリープ試験機を使用したクリープ試験結果について述べた。平成10年度に、稲田花崗岩の中期一軸圧縮クリープ試験をおこなった。その結果、湿潤状態では比較的応力レベルでもクリープが進行することが判明した。この点は従来ほとんど指摘されていない事項であるので、引き続き慎重に検討する必要があると考えた。平成10年度の試験は、サーボ式試験機を使用しておこなってきたが、停電に弱く、長期にわたる試験は困難である。また、空気圧式クリープ試験機では、大きな荷重を加えることができない。そこで、平成11年度に4連式油圧式クリープ試験機を開発して、比較的容易に、多数のクリープ試験結果を得ることを目指した。最初の間、試験機の調整に手間取ったが、その後は順調に稼動している。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を目指した検討をおこなう必要があると考えており、本年度の後半には、主として歪アンプの精度の吟味をはじめた。

第4章では、低応力レベルにおける構成方程式について述べた。最近になって、超長期に亘る岩盤内構造物の安定性を検討することの重要性が高まったので、従来と比較して低い応力レベルでの長期間にわたる粘弾性的性質を検討してきた。その結果、例えば湿潤状態の田下凝灰岩にピーク強度の30%の応力を加え続けると、3年以上経過してもクリープ歪の増加はとまらないことがわかった。また、湿潤状態の花崗岩にピーク強度の50%の応力を加えた場合にも、クリープ歪が徐々に増大していくことがわかった。このように、少なくとも湿潤状態では、比較的応力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。今後も比較的小さい応力でのクリープ試験を続け、低い応力レベルでの粘弾性を調べていく予定であるが、非線型粘弾性現象は可能な限り多面的に検討していく必要がある。そこで、これまでおこな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。提案した構成方程式は可能な限り簡単なものとしたが、そのパラメータを短時間の試験でもとめる方法については今後検討を重ねていく必要があると考えている。

第5章で、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結果について述べた。良く知られているように、従来の周圧ベッセル(圧力容器)では、金属ベッセル中に試験片が納まっており、試験片の変形や破壊状況が逐次観察できない。そこで最近になって発展の著しい透明なエンジニアリング・プラスチック製の周圧ベッセルを開発し、これを使用した周圧下での実験を行った。周圧下で土丹や田下凝灰岩の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。現在のところ使用可能な最大周圧は10MPaであるがこれを2倍程度にできる可能性が高い。また、写真から変形などを読み取るときの分解能についても、相当に

高めることが可能と考えている。

第6章では、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結果について述べる。一本の試験片を使用して温度を40℃から80℃の間で段階的に上げ下げした。使用した岩石は湿润状態の花崗岩であり、熱膨張の影響を取り除くのにかなりの経験が必要とおもわれるが、現在の測定装置で検知可能な大きさのクリープ歪が観察された。暫定的な結果であるが、温度が上昇すると、わずかながらクリープ歪速度が上昇することがわかった。また、応力レベル50%において、1週間程度で破壊した試験片があったことは特筆すべきことであり、この現象の再現性については今後検討する価値が大いにあると考えている。