

00012

JNC TJ7400 2002-011

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)

2003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。

〒319-1184 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

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)
2003

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、稻田花崗岩を購入し、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稻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稻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、完全に取り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、稻田花崗岩の中間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・載荷試験結果を行った。

平成11年度～13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、試験データを得ることに成功した。

平成14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5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試験結果を述べた。第4章では、広範囲の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：1406A00453

サイクル機構担当部課室および担当者：東濃地科学センター 地質環境研究グループ グループリーダー
福島 龍朗

*：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, 2000 and 2001, creep testing of Tage 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 this year, creep testing of Tage tuff was continuously conducted and the total testing time exceeded 5 years. 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 and high stress levels (chapter 4). The results of triaxial compression test by the transparent triaxial cell were also described (chapter 5). Finally, results of creep testing at mid-range temperature were described (chapter 6).

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

Agreement No.: 1406A00453

JNC Liaison: Tono Geoscience Center, Geoscience Research Group, Group Leader, Tatsuo Fukushima.

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

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	5
2. 1 空圧式クリープ試験機の操作手順と保守・管理	5
2. 2 クリープ変位の計測	7
2. 3 クリープ試験結果	9
3. 結晶質岩用多連油圧式クリープ試験機による試験	21
3. 1 機器の検定	21
3. 2 気乾状態および湿潤状態での花崗岩のクリープ	22
4. 広範囲の応力レベルに適用可能な構成方程式の開発	29
4. 1 はじめに	29
4. 2 構成方程式の拡張	29
4. 3 大久保・西松（1986）がおこなった一軸圧縮応力下でのクリープ試験結果による検討	30
4. 3. 1 応力レベル77%の歪速度曲線からのパラメータの導出	30
4. 3. 2 応力レベル77%のクリープ試験結果と数値計算結果との比較	32
4. 3. 3 応力レベル87%のクリープ試験結果	33
4. 4 福井ら（1992, 1993）がおこなった一軸圧縮応力下でのクリープ試験結果による検討	33
4. 4. 1 応力レベルを変えたクリープ試験結果	33
4. 4. 2 強度破壊点以降でのクリープ試験結果	34
4. 5 秋ら（1995）がおこなった一軸引張応力下でのクリープ試験結果による検討	34
4. 6 構成方程式中のパラメータについて	35
4. 7 考察	36
4. 7. 1 一軸圧縮試験への拡張の可能性	36
4. 7. 2 周圧下への拡張の可能性	37
4. 7. 3 FEMなどへの組み込みの可能性	37
4. 7. 4 他の構成方程式との関係	38
4. 8 まとめ	38
参考文献	39
5. 可視化ベッセルを用いた周圧下でのクリープ試験と破壊直前までの連続写真	55
5. 1 はじめに	55
5. 2 実験方法	55
5. 3 実験結果	56

5. 3. 1 破壊直前までの連続写真と試験片の横幅の経時変化	56
5. 3. 2 軸歪と横歪	57
5. 4 まとめ	58
参考文献	58
6. 中間温度領域におけるクリープ試験	65
6. 1 実験方法	65
6. 2 温度を変化させたクリープ試験	66
7. まとめ	80

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稻田花崗岩を選定し、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稻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し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、稻田花崗岩の中間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つている。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系統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-歪曲線を求めるため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、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。完全応力一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年度は、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。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、比較的低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。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おこなった。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おこなった。

平成14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5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いえる。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ある。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、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、稻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低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が必要なことがわかった。本年度は機器の再検定と若干の改良をおこなった。その後、気乾状態および湿潤状態での花崗岩のクリープ試験をおこなった。

第4章では、主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ると、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、これまでおこなってきたクリープ試験結果を参照しながら検討した。なお、周圧下での挙動は大切であるが、今回は一軸応力下に限って議論することとした。

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。本年度は、この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結果について述べる。

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検討結果について述べる。この研究は、昨年度に予備的検討をおこなったが、本年度も実験方法・装置に細かい改良を加えながら実験をおこなったので、その経緯と実験結果について述べる。

2. 堆積岩（田下凝灰岩）の長期クリープ試験

本章では、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。実験を開始してすでに約5.5年経過しているため、保守・管理についてある程度のノウハウが蓄積した。また、計測方法の一部を変更したため、保守・管理および計測方法について述べた後、クリープ試験結果について述べる。

実験条件は、前回（1996年度の報告書参照）と同様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

2. 1 空圧式クリープ試験機の操作手順と保守・管理

操作手順

- 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（図2-1参照）。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っていない場合がある。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、圧力が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。ベ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とする。

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、0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、0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かかっている)

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かないか

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)

測定システムの故障判断

・アンプ

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0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。

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、ドレン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

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

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を行う。

2. 2 クリープ変位の計測

クリープ歪の計測システムとしては、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 R 6441A）でのA/D変換した電圧（分解能1 mV）を、GP-IBによりNEC9801に取り込んでいる（詳細は1995年度の報告書を参照されたい）。NEC9801のOSとしては、N88DISKbasicを用いている。長年、使用した実績から安定性が非常によいOSである。

現在、使用している、空圧式クリープ試験機におけるクリープ計測用のプログラムの概要を述べることにする。

計測システムとしては、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 R 6441A）でA/D変換した値をGP-IBによりNEC9801に取り込んでいる（詳細は1995年3月報告書PNC PJ1602 95-004を参照されたい）。

計測用プログラムを表2-1に示す。以下に、プログラムの概要を述べる。

10～40行目 コメント

50行目 GP-IBの初期化

70行目 配列D%の宣言（D%は、時刻を記録する配列）

80行目 D%の初期化

100～120行目 file「data001」からのデータの入力

停電などの対策として、このプログラムは自動に立ち上がるよう autoexec.bat に書き込んでおり、自動的に立ち上がった時に、過去のデータを「data001」から読み込むようになっている。なお、データのセーブは f 1 を押すことによってできるようにしており、これ以外ではデータはセーブされない。これは何か不都合が生じ、メモリ上のデータが破損した場合には、データをセーブしないようにすることができるようしているためである。

よって、通常は、データの確認を行い、正しくデータを計測しているようであれば、数日に1回、f 1 を押してデータをセーブすることが必要である。

140行目 functionキーの設定 (f 1でデータのセーブ、f 2でプリントアウト)

160, 170行目 デジタルマルチメータの初期設定

180行目から220行目

実験の開始を待っている状態。Vが10以上となった時に、240行目にジャンプ。

これは、実験が開始され、弾性変形により変位が変化し始めたことを確認し、データを実際に計測する240行目以降にとばすためのルーチン。

190行目 G P I Bからのデータの呼び出し

200行目 デジポルの値を1mV単位でVに代入する

220行目 VmaxにVを代入 (Vmaxは実際にデータとしている値)

240行目から360行目

実際に計測しているルーチン

クリープ歪は、単調に増加することを利用し、基本的には、データを時系列で採取するのではなく、離散化されたクリープ歪みとなった最終時刻を記録するようにしている。これは計測された値に雑音が小さく、かなり安定していることが条件となる。離散化したクリープ歪みを1mVとしているのは安定性を確認し、この程度であれば問題なしと判断したためである。これは計測環境によって変化するため、なるべく分解能をあげる方向で考える方がよい。しかし後述するが、5.5年に及ぶ本実験においては、温度の日変化、年変化などの環境の影響を受けるため、この方法でデータを採取することは困難である。

240行目 G P - I Bからのデータの呼び出し

250行目 画面に、VmaxとVの表示

260行目 デジポルの値を1mV単位でVに代入する

270行目 VがVmaxに比べ、2以上小さい場合には、vmaxの値を1つさげる

280行目 VがVmaxより小さい場合には、240行目に戻る

290行目 V>=Vmaxの時に290行目に来る。その時、VmaxにVを代入

300行目から350行目 配列D%に時刻を書き込み。

D%は、1mVごとの時刻を記憶する領域である。

D% (vmax, 0) は年、D% (vmax, 1) は月、D% (vmax, 2) は日、

D% (vmax, 3) は時, D% (vmax, 4) は分, D% (vmax, 5) は秒を表す.

380行目～440行目 データをディスクに「data001」という file に落とすルーチン

460行目から530行目 データをプリントアウトするルーチン

以上で述べたようにコンピュータでは、1 mVごとのデータの最終時間を記録するようにしている。しかしながら、クリープ歪の変化が早い時期（試験を行ってから1年程度）であれば問題はないが、試験を開始し、5. 5年程度経過し歪の変化はごくわずかであり、温度環境などの変化によって、クリープ変位が変動したかのようにみえてしまう。そのため、コンピュータによる測定の他、2001年4月から毎週月曜日と金曜日の午前10時にA/D変換した電圧を記録することとした。

2. 3 クリープ試験結果

毎週月曜日と金曜日の午前10時に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2-2に示す。データは平成14年12月31日までのものである。図では、 1.62×10^8 sまで空圧が低下している様子が見られる。2. 2節の非日常的な点検で述べた、精密弁（図2-3参照）に水がたまつたためであると判断した。図2-4に精密弁の概略図を示すが、リリーフ孔およびブリード孔に水がたまり、圧力が低下したと考えられた。図2-1 (c) のバルブを閉め、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 となるように精密弁の設定してから、(c) のバルブを開け、実験を再開した。図2-2に示した「圧力変化」とした時点(1.62×10^8 s)がこれに相当する。それ以降、空圧はほぼ設定圧を保持していることがわかる。

クリープ応力が低下すると当然、弾性的な歪が解放され、みかけ上、クリープ歪が低下したようになり、図2-2でも明らかに空圧の低下に従い、クリープ歪が減少している。そのため、この歪を補正することにするが、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で除して、クリープ歪を補正することとした。田下凝灰岩のヤング率は 2.6 GPa であるため、 0.01 kg/cm^2 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することとなる。この補正したクリープ歪の経時変化を図2-5に示す。図2-5では、図2-2の空圧の低下時に見られたクリープ歪の低下現象は見られない。また、 1.62×10^8 sにおいて、クリープ応力を設定圧に戻したが、補正したクリープ歪はほとんど変化はみられていない。

5. 5年経過した全データを用いたクリープ歪の経時変化を図2-6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、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 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いる。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みると、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2-6のデータの微分勾配から求めたクリープ歪速度の経時変化を図2-7に示す。図2-7では最初、クリープ歪速度は $10^{-5} / \text{s}$ であったものが、時間の経過に従って、クリープ歪速度が減少していることがわかる。図には、傾きが-1の直線を破線で示した。 10^5s 以前ではほぼこの直線上にのっているが、 10^5s 以降、多少この直線より上にいく傾向が見られており、図2-6の傾向と一致している。

図2-8に、クリープ歪とクリープ歪速度の対数の関係を示す。また、クリープ歪にして 200×10^{-6} （クリープ歪速度にして、 $10^{-9} / \text{s}$ ）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。

表2－1 計測用プログラム

```
10 '
20 ' Measuring Program of Creep Test by ADVANTEST
30 ' CREEP.BAS 1997/4/25 by 東京大学開発機械学研究室
40 ' ----- GPIB Initialize
50 ISET IFC:ISET REN:CMD DELIM=0
60 ' ----- Memory clear
70 DIM D%(1000,5)
80 FOR I=0 TO 1000: FOR J=0 TO 5: D%(I,J)=0: NEXT J: NEXT I
90 ' ----- Input from data
100 OPEN "data001" FOR INPUT AS #1:I=0
110 IF EOF(1) THEN CLOSE: GOTO 130
120 INPUT #1,D%(I,0),D%(I,1),D%(I,2),D%(I,3),D%(I,4),D%(I,5):I=I+1: GOTO 110
130 ' ----- Set function key
140 ON KEY GOSUB *DISC,*PRINTER:KEY ON
150 ' ----- Initialize of Advantest
160 PRINT @1;"F1,R5,M0"
170 PRINT @1;"PR3,DL0,S1"
180 ' ----- trigger routine(trigger lever=0)
190 LINE INPUT @1;A$
200 V=INT(VAL(MID$(A$, 4, 10))*1000)
210 PRINT V :IF V<10 GOTO 190
220 VMAX=V
230 ' ----- main
240 LINE INPUT @1;A$
250 PRINT V,VMAX
260 V=INT(VAL(MID$(A$, 4, 10))*1000)
270 IF V<(VMAX-1) THEN VMAX=(VMAX-1)
280 IF (V<VMAX) THEN 240
290 VMAX=V
295 IF (VMAX>999) OR (VMAX<1) THEN 10000
300 D%(VMAX, 0)=VAL(MID$(DATE$, 1, 2))
310 D%(VMAX, 1)=VAL(MID$(DATE$, 4, 2))
320 D%(VMAX, 2)=VAL(MID$(DATE$, 7, 2))
330 D%(VMAX, 3)=VAL(MID$(TIME$, 1, 2))
340 D%(VMAX, 4)=VAL(MID$(TIME$, 4, 2))
350 D%(VMAX, 5)=VAL(MID$(TIME$, 7, 2))
```

```
360 GOTO 240
370 '----- Write Data to Disc
380 *DISC
390 OPEN "data001" FOR OUTPUT AS #1
400 FOR I=0 TO VMAX
410 PRINT #1,D%(I,0),D%(I,1),D%(I,2),D%(I,3),D%(I,4),D%(I,5)
420 NEXT I
430 CLOSE
440 RETURN
450 '----- Output to Printer
460 *PRINTER
470 LPRINT
480 FOR I=1 TO VMAX
500 LPRINT USING"####";I;
510 LPRINT USING"###";D%(I,0);D%(I,1);D%(I,2);D%(I,3);D%(I,4);D%(I,5)
520 NEXT I
530 RETURN
10000 END
```

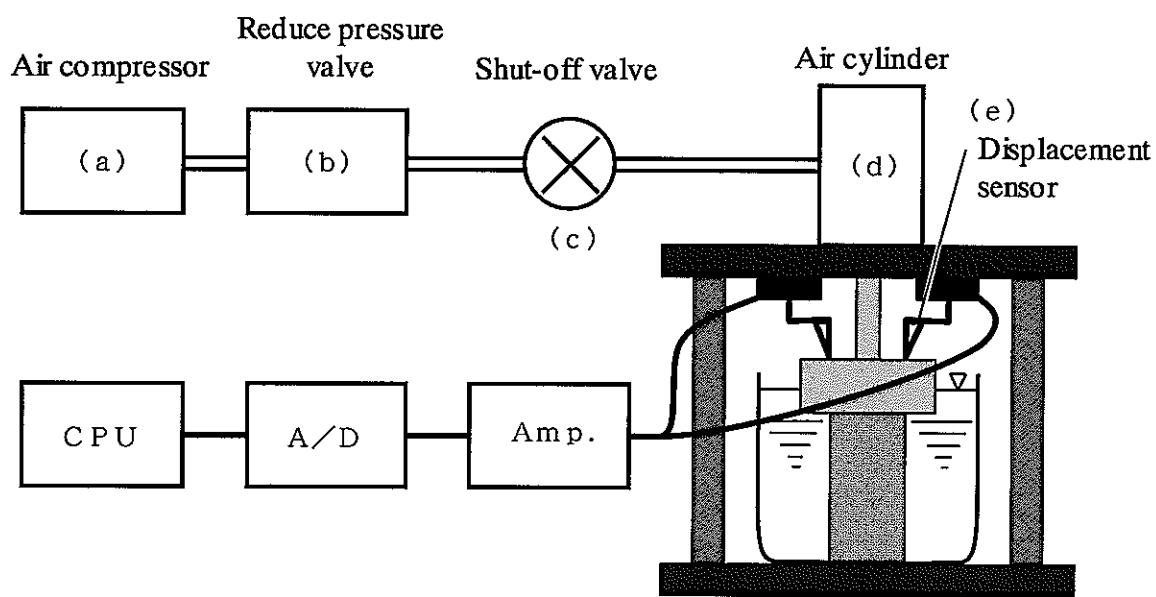


図2-1 空圧クリープ試験機の概略図

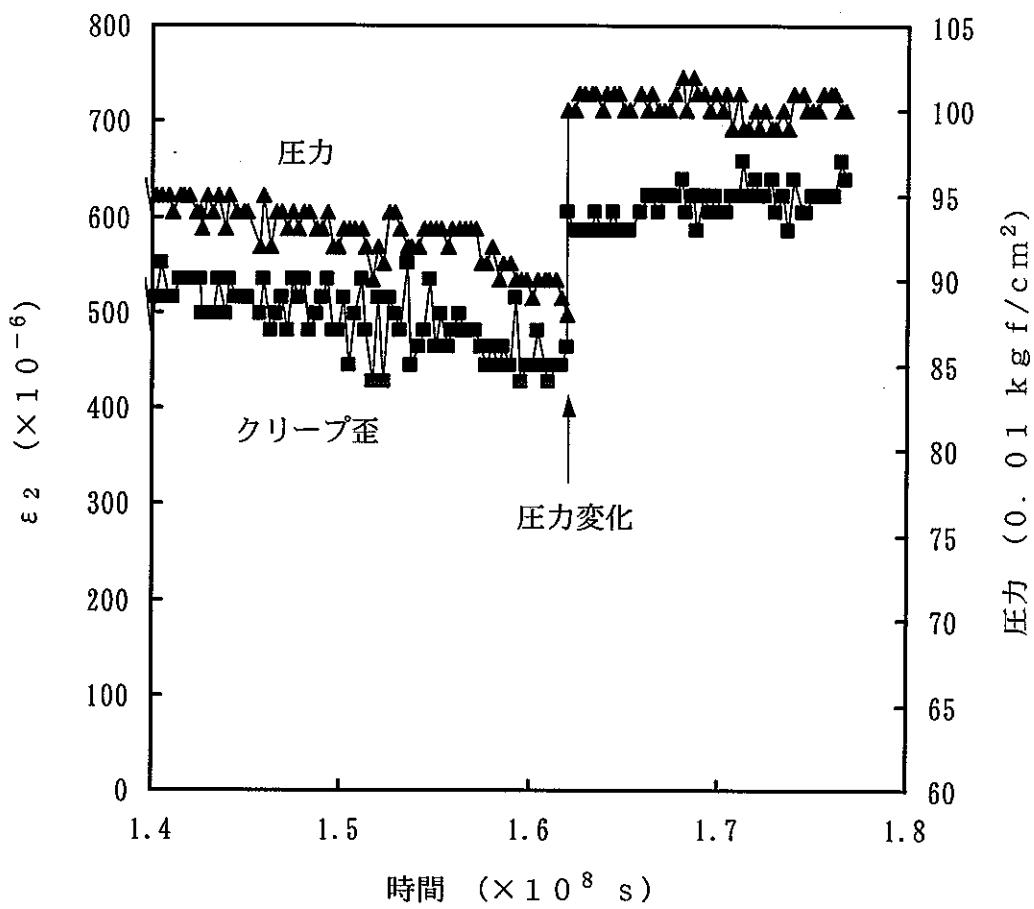


図2-2 クリープ歪および空圧の経時変化

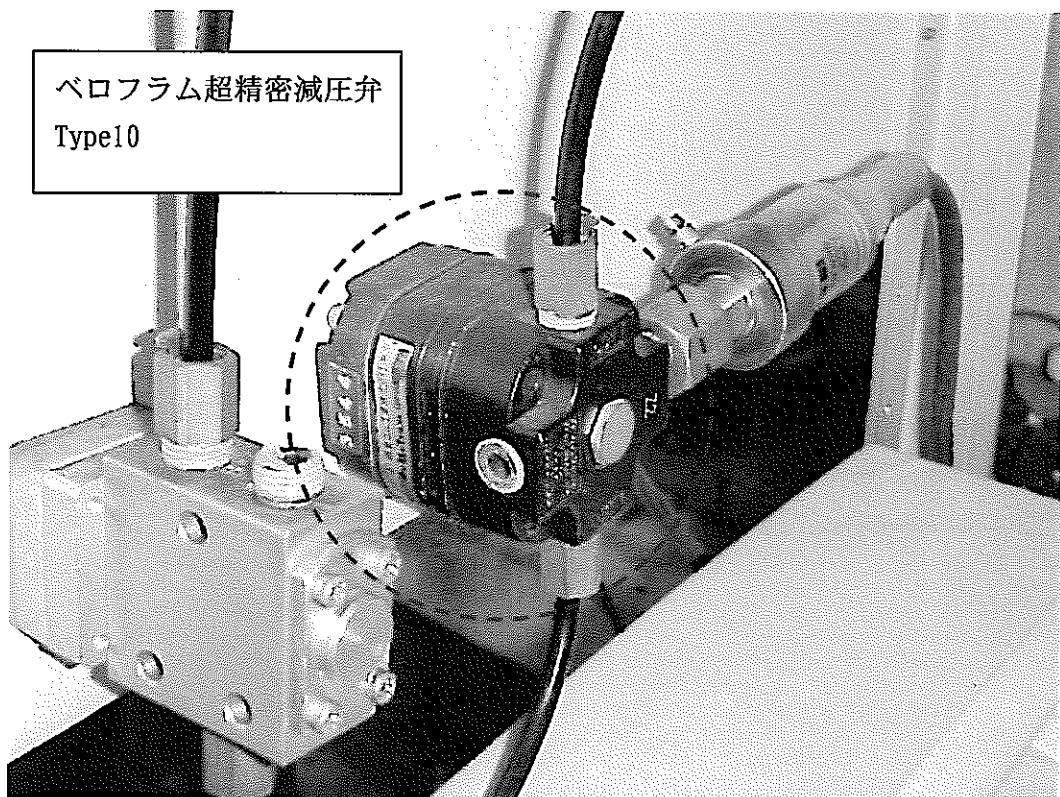


図2-3 精密減圧弁の写真

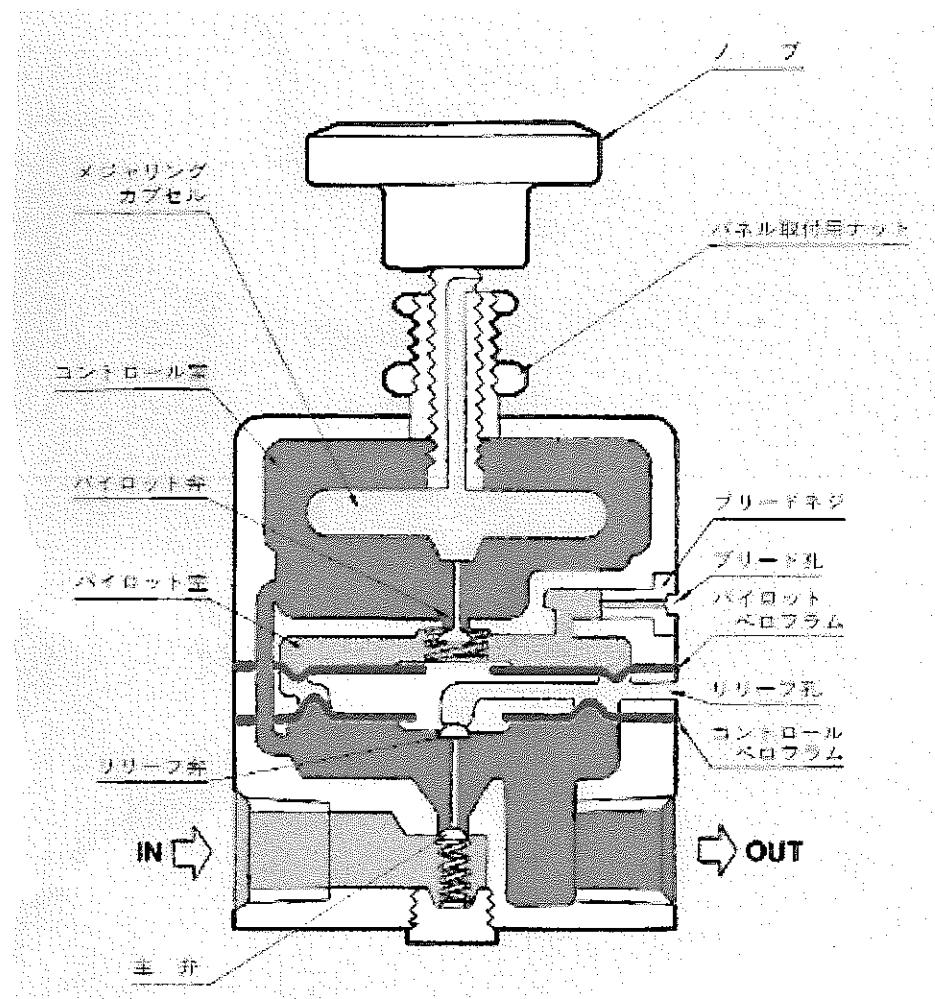


図2-4 精密減圧弁の概略図

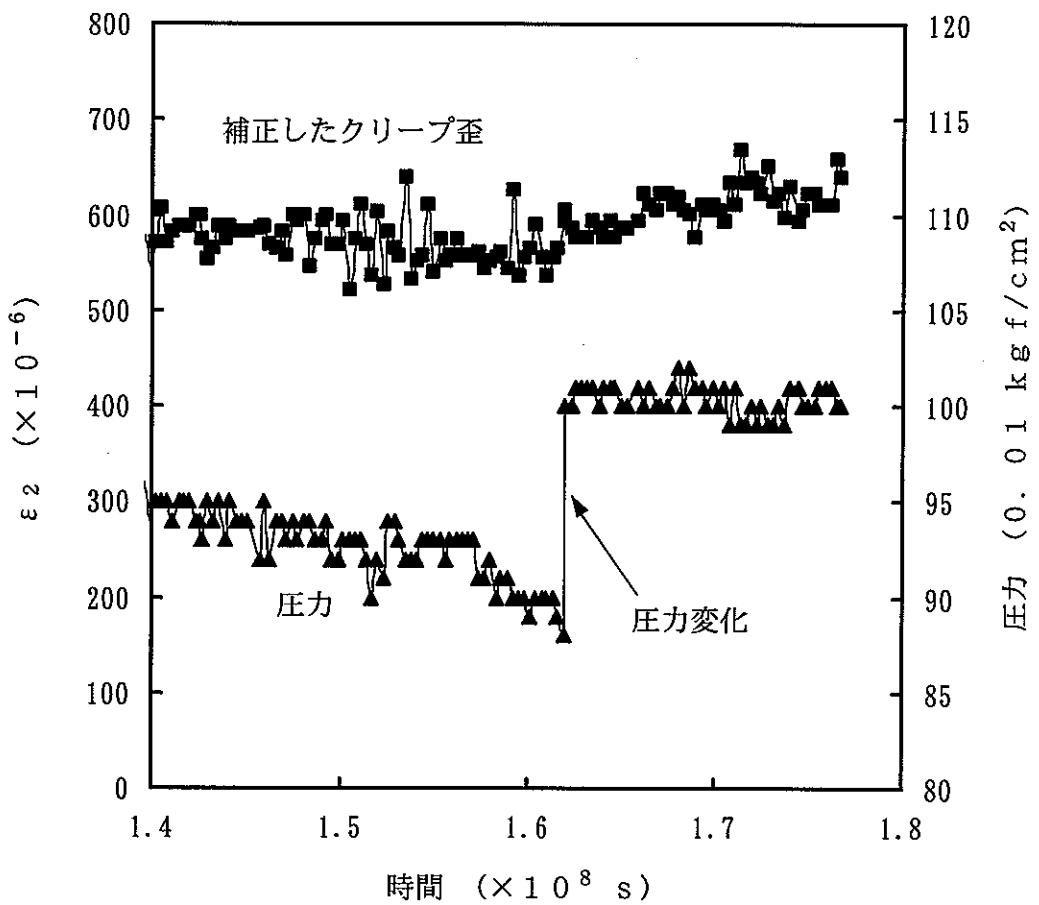


図2-5 補正したクリープ歪および空圧の経時変化

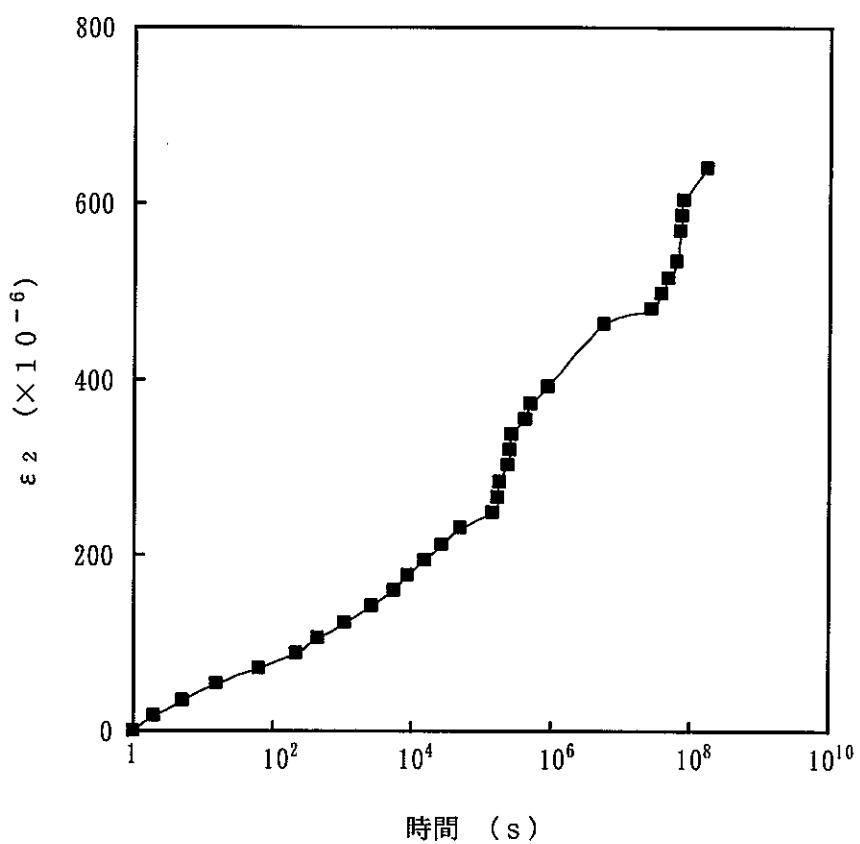


図2-6 クリープ歪の経時変化
岩石：田下凝灰岩
環境：湿潤状態
クリープ応力：一軸圧縮強度(9.1 MPa)の30%
試験開始：平成9年5月23日

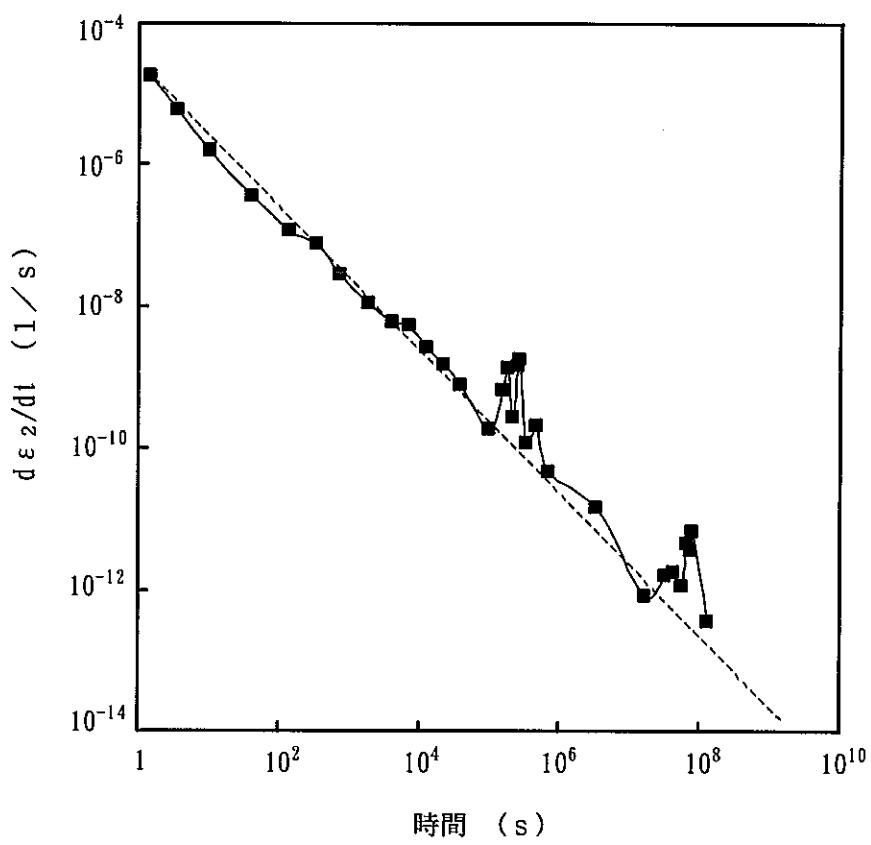


図2-7 クリープ歪速度の経時変化
 岩石：田下凝灰岩
 環境：湿潤状態
 クリープ応力：一軸圧縮強度(9.1 MPa)の30%
 試験開始：平成9年5月23日

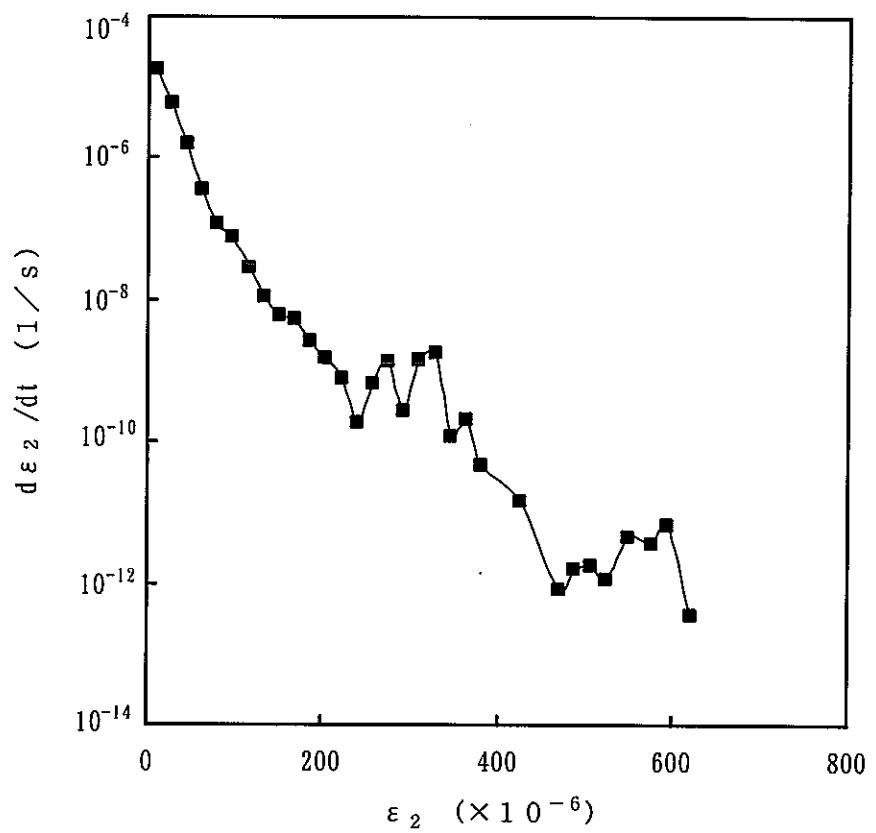


図2-8 クリープ歪速度とクリープ歪の関係
 岩石：田下凝灰岩
 環境：湿潤状態
 クリープ応力：一軸圧縮強度(9.1 MPa)の30%
 試験開始：平成9年5月23日

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13年度に4連油圧式クリープ試験機を用いての、約1年間のクリープ試験について報告した。その結果、試験機の維持や管理は容易であり、問題なく試験が行えることがわかった。しかし、計測システムの安定性や精度が不十分であった。そこで本年度は、機器の選定や検定を慎重に行つた後、試験期間を長くても1ヶ月程度として、再度、クリープ試験を行つた。

3. 1 機器の検定

平成13年度に報告したクリープ試験結果では、試験開始直後の歪の増加傾向について、4本の試験片間でかなり大きなばらつきが見られた（詳細は2002年3月報告書JNC TJ7400 2001-010を参照されたい）。そこで、試験機の動特性について検討した。その際、荷重を測定するのにロードセルを用いた。はじめに手動ポンプで2 kN程度荷重を加え、その後バルブを開け、設定荷重である29 kNまで載荷を行つた。結果を図3-1に示す。図の縦軸は荷重の設定荷重に対する割合であり、横軸はバルブを開放してからの時間である。図(a)の点線で囲んだ部分の拡大図も示した。図より、バルブの開放とともに急激に荷重が増加し、1秒後には設定荷重の99.4%まで達していることがわかる。その後は徐々に荷重が増加し、載荷開始から約2秒経過した時点で設定荷重に達している。従来から、クリープ試験の結果は載荷開始1秒後を基準とすることが多く、平成13年度に報告した結果もそのような整理を行つた。今回の検討結果より、載荷開始後1秒間でほぼ設定荷重にまで達しており、堆積岩のように粘弾性的性質の大きな岩石を用いた場合には試験開始1秒後を基準にしても特に問題は生じないと考えられる。しかし、花崗岩のようにクリープ変形の非常に小さな岩石では、図3-1に見られるような試験開始1秒後から2秒後までの荷重の微小変化が、歪の増加傾向に影響を与える可能性があり、試験結果の解釈には注意が必要である。

このように試験開始直後には慎重な歪の測定が必要であると考え、変位の測定方法を次のように変更した。まず、試験開始から約2分間はサンプリング速度0.2秒で等時間サンプリングを行う。その後約1日間は、歪がある値をとった最終時刻、つまり、デジタルマルチメータがある値をとった最終時刻を記録する。それ以降は1日1回程度デジタルマルチメータの値を読み取る。

変位の測定はラムの手前と奥に設置した片持梁式変位計で行った（詳細は2000年3月報告書JNC TJ7400 2000-002を参照されたい）が、その際に問題となつたのは、変位計の先端とシリンダとの接触状況であった。気乾状態で、クリープ応力を一軸圧縮強度の48%として行った予備試験の結果の一例を図3-2(a)に示す。図より、載荷直後に一度歪が増加した後、ほとんど0まで減少し再び歪が増加し始めるという不安定な現象がみられる。この図は影響が顕著な例であるが、原因の一つとして、変位計とシリンダとの接触面での摩擦の影響が考えられる。そこで、接触面に潤滑剤として二硫化モリブデンを塗り試験を行つたところ、図3-2(b)のような結果が得られ、載荷直後の不安定な現象は見られなくなった。以上より、今後は変位計の先端とシリンダとの接触面に二硫化モリブデンを塗つた上で試験を行うことにした。

3. 2 気乾状態および湿潤状態での花崗岩のクリープ

花崗岩を用いて約1ヶ月間のクリープ試験を行った。条件を以下に示す。

- 岩石：稻田花崗岩
- 環境：常温下、気乾および湿潤状態
- 試験片：直径20 mm×高さ40 mmの円柱形
- 試験本数：気乾、湿潤状態とも4本ずつ
- クリープ荷重：29 kN
- 試験期間：約1ヶ月

試験片は2週間以上、温度・湿度の管理さ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、デシケーターに入れ、真空ポンプで1日以上デシケーター内部及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使用した。なお、水は試験中も一貫して市販のイオン交換水を用いた。気乾状態の試験では4本中3本の試験片に2枚の歪ゲージを貼りその値も記録した。

一軸圧縮強度は気乾状態で204 MPa、湿潤状態では190 MPaである。クリープ応力レベルは試験片の寸法の若干の違いで変わるが、おおむね気乾状態では48.0%，湿潤状態では50.8～53.2%であった。

気乾状態で行った試験の結果を図3-3に示す。図3-1で説明したように載荷開始後何秒の時点を基準にするかが問題となるが、今回は従来通り試験開始1秒後を原点とした。図より、試験開始後100秒間は歪の増加傾向についてのばらつきが非常に大きいことがわかる。②、③、④の試験片については、試験開始10秒後あたりで、歪が急激に増加したり、減少したりしており、潤滑剤を用いたにもかかわらず、変位計の先端とシリンダとの接触面での摩擦の影響が現れたのではないかと思われる。また、④の試験片は初期の段階で他の試験片の倍以上のクリープ歪が生じている。100秒後以降の挙動については①、②、③の試験片ではほぼ直線的に歪が増加しているように見えるが、④の試験片についてはほとんど歪の増加は見られない。いずれの試験片も試験開始後約10⁶秒間で50～150 μ程度のクリープ歪が生じている。

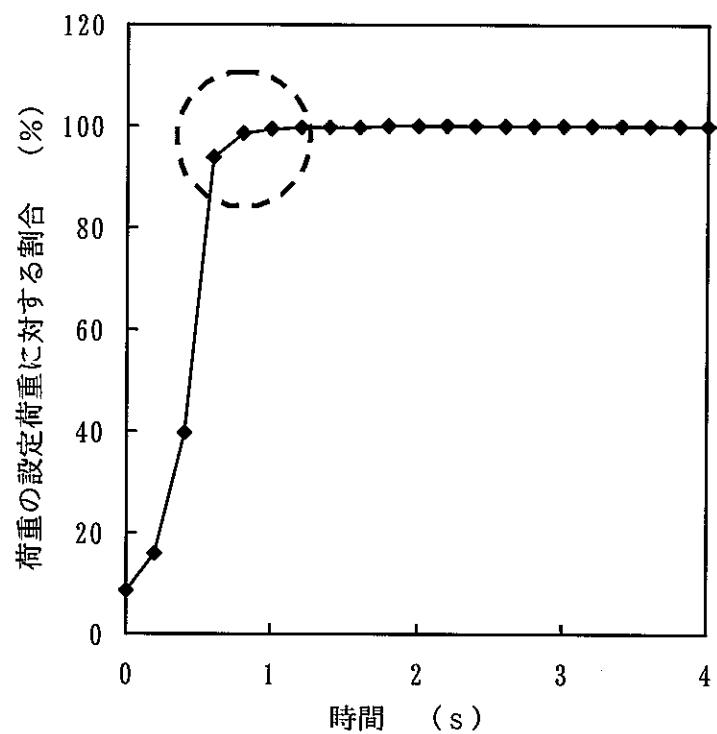
図3-4では図3-3の①、③、④の試験片について、片持梁式変位計と歪ゲージの値との比較を行った。片持梁式変位計で測定した歪は、試験片の端面付近の変形の影響により、歪ゲージの値とは必ずしも一致するとは限らないが、図3-4(a)に示した試験片では両者はほとんど同じ値で推移している。図3-4(b)に示した試験片では、歪ゲージの値が片持梁式変位計の値の倍程度となっているが、その増加傾向は似ている。両者の歪の増加傾向を見ると、片持梁式変位計で測定した歪の、試験開始直後の不安定な現象は、変位計の影響であると考えられる。これは図3-4(c)で示した試験片でも同様のことが言える。歪ゲージで測定した歪の増加傾向を見ると、いずれの試験片でも、試験開始後10～100秒間は若干上に凸の曲線を描き、その後はほぼ直線的に歪が増加している。

図3-5に湿潤状態での試験結果を示す。④の試験片では試験開始約10秒後に歪の急激な減少が見られ、その後ほぼ元の値に戻っている。これは気乾状態での結果と同様に、変位計の先端とシリンダとの接触面での摩擦の影響ではないかと考えられる。①、②、③の試験片に関しては、その

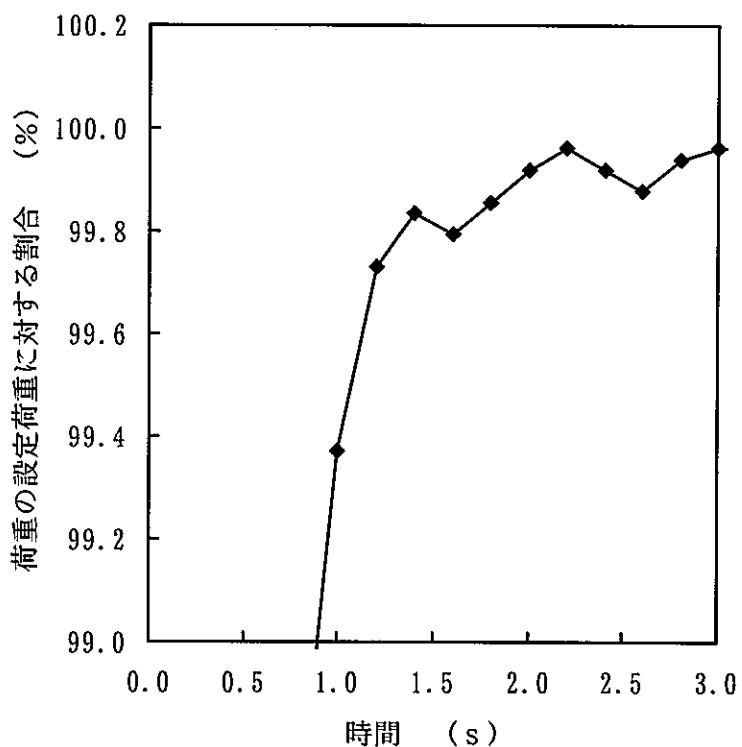
のような不安定な現象は見られず、試験開始後10～100秒間は若干上に凸の曲線を描きながら歪が増加している。その後、①、④の試験片はほぼ直線的に歪が増加しているが、一方②、③の試験片の歪の増加はほとんど見られない。4本の試験片の試験開始後10⁶秒でのクリープ歪は50～150μであった。

気乾状態と湿潤状態での結果を比較してみると、試験開始後100秒間は、湿潤状態の変形がやや大きいように思われるが、その後は両者の差はほとんどないように見える。10⁶秒が経過した時点でのクリープ歪については両者とも50～150μの間であり、差はほとんどない。

本年度は機器の選定・検定を再度行い、安定性を確認した上で約1ヶ月間のクリープ試験を行った。この程度の期間であれば測定機器のドリフトはなく、測定結果の信頼性はかなり高いと考えられる。気乾および湿潤状態で合計8本の試験片で試験を行った結果、約1ヶ月間で50～150μ程度のクリープ歪が生じるということがわかった。ただし、載荷直後の計測システムの信頼性には課題が残った。この理由として、試験機の動特性の影響や変位計とシリンダとの接触状況の影響などが考えられる。この点については今後の検討課題としたい。

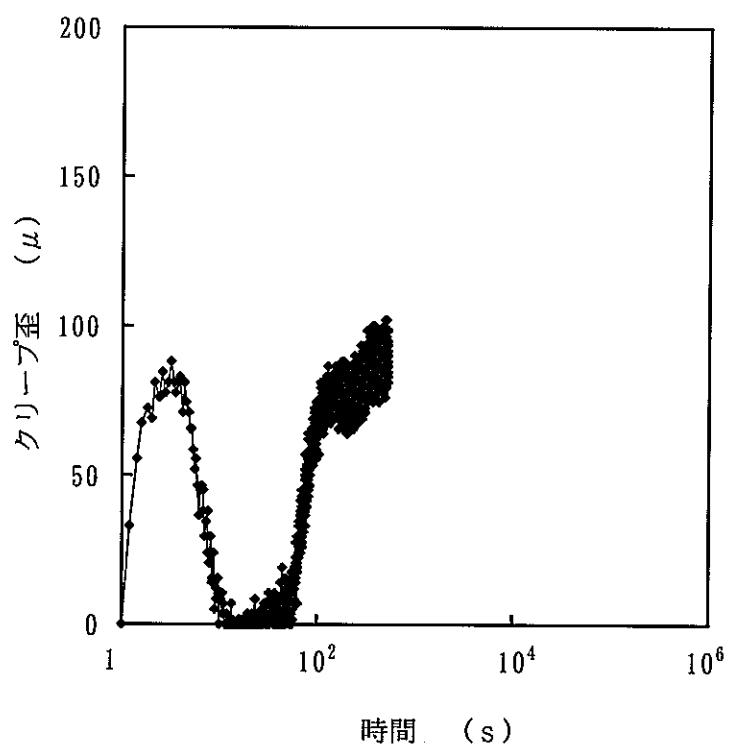


(a) 試験機の動特性

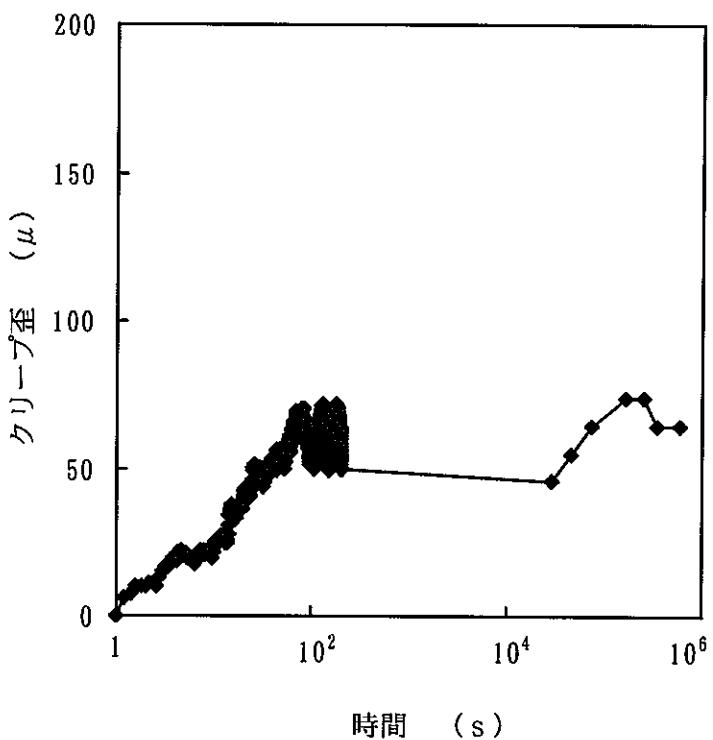


(b) 図 (a) 点線丸囲み部の拡大図

図3-1 4連クリープ試験機の動特性



(a) 二硫化モリブデンを用いず



(b) 二硫化モリブデンを使用

図3-2 クリープ歪の経時変化
気乾状態
クリープ応力レベル4.8%

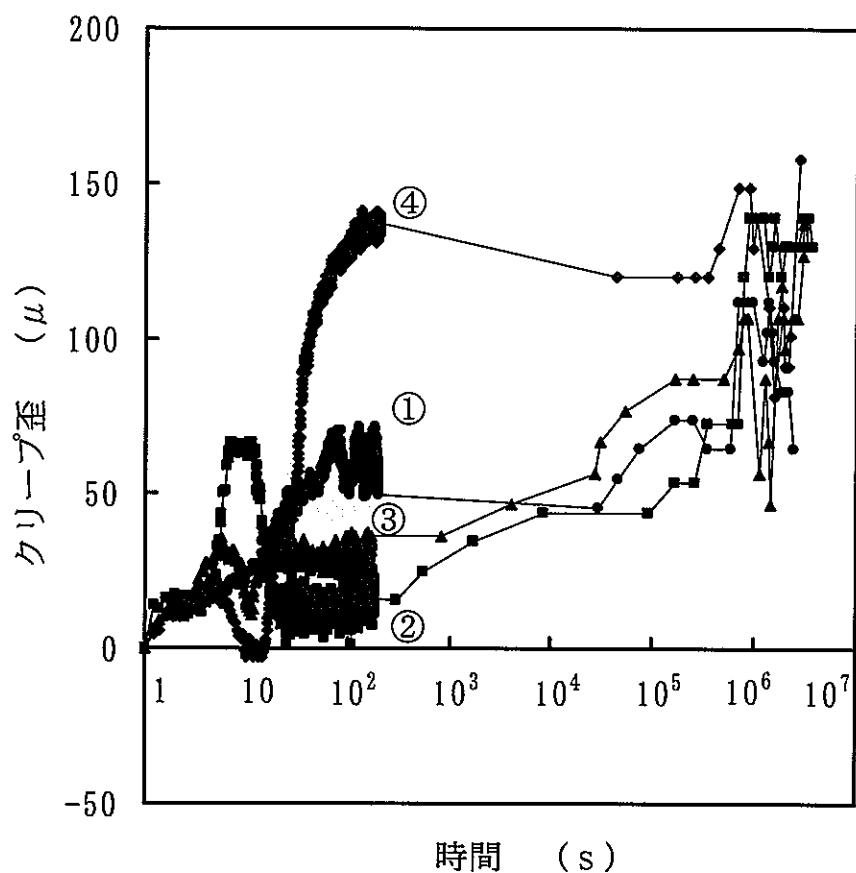
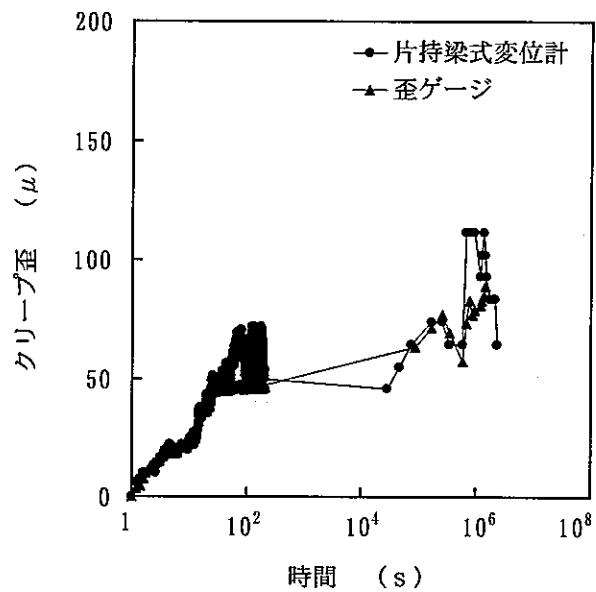


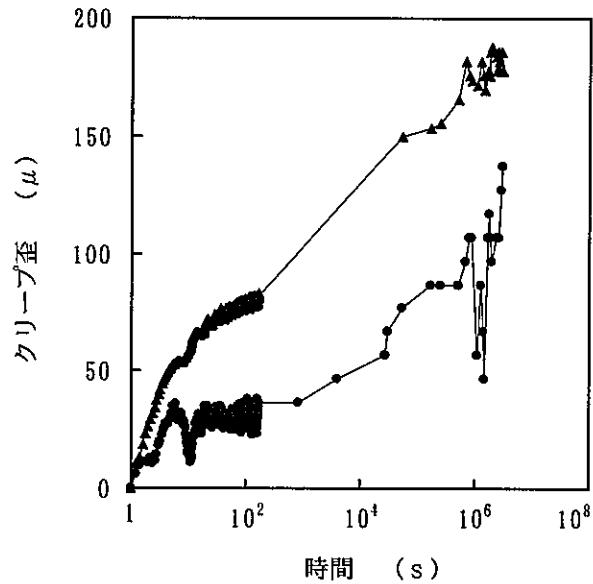
図3-3 クリープ歪の経時変化

気乾状態

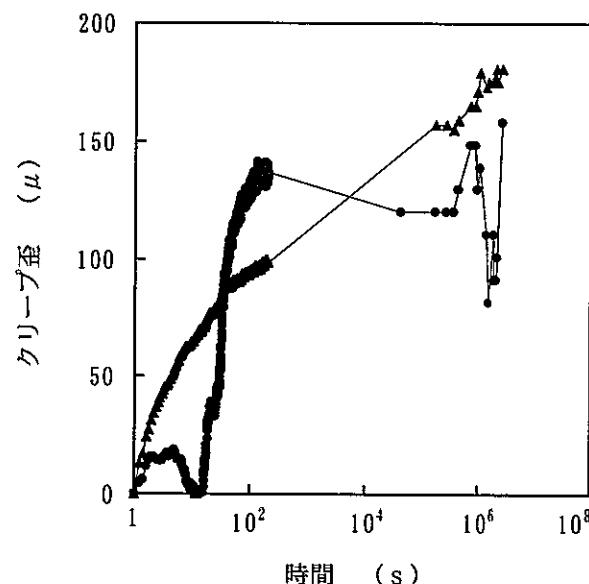
クリープ荷重 29 kN



(a) 図3-3①の試験片



(b) 図3-3③の試験片



(c) 図3-3④の試験片

図3-4 クリープ歪の経時変化

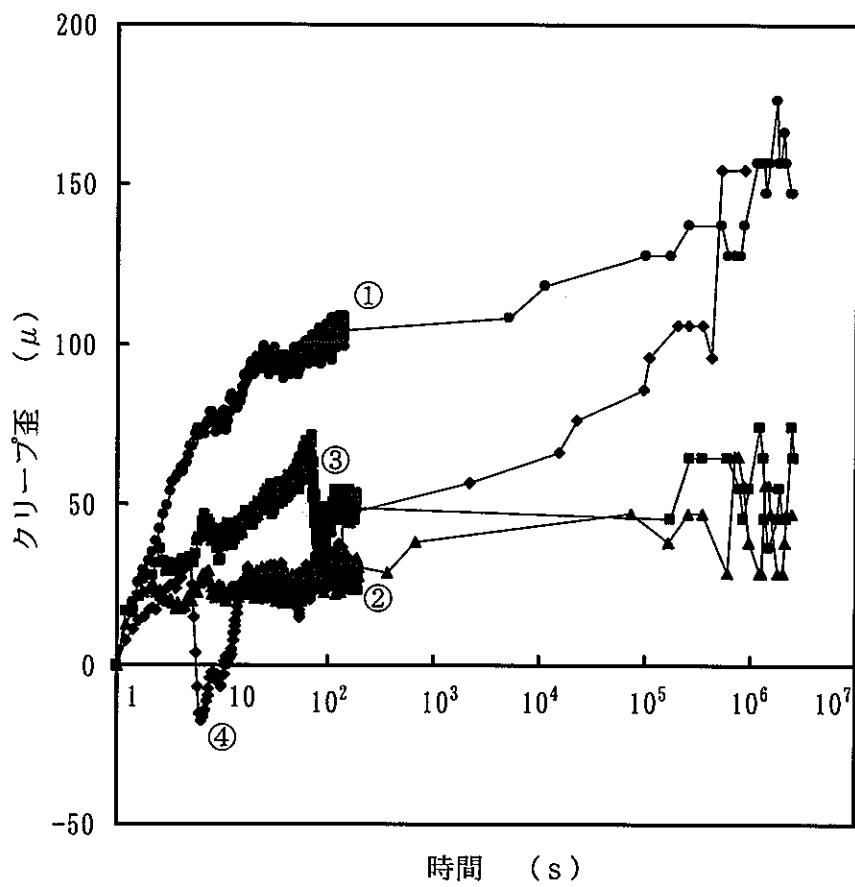


図3-5 クリープ歪の経時変化
潤湿状態
クリープ荷重2.9 kN

4. 広範囲の応力レベルに適用可能な構成方程式の開発

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、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た場合について検討した。

4. 1 はじめに

数多くの岩石の構成方程式が提案されているが、時間依存性を考慮しさらに破壊現象を扱えるものは少ない (Desai & Siriwardane, 1984 ; Fakhimi & Fairhurst, 1994; 大久保, 1991)。このうちのコンプライアンス可変型構成方程式は、比較的簡単な形をしており、一次元応力下では多くの荷重条件下で解析解を持つ (大久保, 1992)。また、時間の経過にともなって変化するのがコンプライアンスのみであるので、有限要素法などのプログラムに組み込むことが比較的容易である (大久保・金, 1993)。しかしながら、簡単さを重んずるあまり、省略した事項も多い。例えば、この構成方程式を一定応力下 (クリープ) で解くと、クリープ歪速度が単調に増加していく。実際のクリープ試験結果をみると (大久保, 1991)，ほとんどの場合、載荷直後は時間の経過にともなってクリープ歪速度が減少していく (1次クリープ) が、現状のコンプライアンス可変型構成方程式ではこの特性を再現できない。

最近になって大久保・福井 (2002) は、田下凝灰岩の長期クリープ試験結果に基づいて、比較的低応力レベルにおけるクリープ現象を表す構成方程式を提案した。ただし、この構成方程式の適用範囲は1次クリープのみであり、3次クリープなどの破壊現象を扱うことはできない。

本章では、主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、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合せると、三城目安山岩の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、これまでおこなってきたクリープ試験結果を参照しながら検討する。なお、周圧下での挙動は大切であるが (Cogan, 1976 ; 趙ら, 1995)，今回は一軸応力下に限って議論することにした。

4. 2 構成方程式の拡張

従来から使用してきた高応力レベル用構成方程式について簡単に説明しておく。この構成方程式は時間経過にともなって歪 ε と応力 σ の比であるコンプライアンス $\lambda = \varepsilon / \sigma$ が徐々に増加すると考えたものであり、取り扱いやすいように無次元化した形では次のようになる。

$$d\lambda^*/dt = a_3 (\sigma^*)^{n_3} (\lambda^*)^{m_3} \quad (4-1)$$

λ を初期値 λ_0 で基準化した値を、 λ^* ($= \lambda / \lambda_0$) とした。また、 σ を一軸圧縮強度 σ_c で基準化した値を、 σ^* とした。 n_3 は $d\lambda^*/dt$ の応力依存性をあらわす定数で、値が大きいほど非線形性が高い。 m_3 は破壊が急激に進むかどうかをあらわす定数で、定歪速度試験では $m_3 > n_3 + 2$ の

場合、応力一歪曲線がクラスⅡ特性を示すことになる（大久保、1992）。

強度を決める定数 a_3 は正値の定数なので、(4-1) 式の右辺は正値となる。したがって応力一定（クリープ）では、時間の経過に伴って λ^* が増大し、それに伴って $d\lambda^*/dt$ も単調増加していく。応力が一定ならば、 λ^* と歪 ε^* ($= \sigma^* \lambda^*$) とは比例するので、この構成方程式では歪速度が次第に減少する 1 次クリープは再現できることになる。

大久保・福井（2002）は、田下凝灰岩の長期クリープデータに基づいて、比較的低応力レベルにおけるクリープ現象を表す次式を提案した。

$$d\lambda^*/dt = a_1 (\sigma^*)^{n_1} (\lambda^* - 1)^{-m_1} \quad (4-2)$$

この場合にも n_1 は応力依存性をあらわす定数で、 a_1 は正値の定数である。 m_1 は正値の定数なので、(4-2) 式の右辺は正値となる。よって(4-1) 式の場合と同様に、応力一定の条件下では、 λ^* は単調増加する。しかしながら、 λ^* の増大にともなって右辺は小さくなっていくので、クリープ歪速度は経過時間にともなって減少していく。

(4-1) 式と(4-2) 式をどのように連結するかには種々の可能性があるが、もっとも簡単な、両者を足し合わせた場合について考えてみることにする。

$$d\lambda^*/dt = a_1 (\sigma^*)^{n_1} (\lambda^* - 1)^{-m_1} + a_3 (\sigma^*)^{n_3} (\lambda^*)^{-m_3} \quad (4-3)$$

以下では、この(4-3) 式から得られる解と、これまでおこなってきた試験結果とを比較・検討しながら、(4-3) 式の妥当性とその適用範囲について、三城目安山岩を例に取り議論を進める。なお、三城目安山岩の(4-3) 式中のパラメータの n_1 と n_3 が不明であるが、 n_3 については、応力レベルを変えたクリープ試験結果からもとめられた値 3.5 を採用する（大久保・西松、1986）。 n_1 については、低応力レベルでの信頼すべきデータが少ないので確たることはわかっていない。大久保・福井（2002）は、1 次クリープに関わる n_1 と高応力レベルのクリープ試験からもとめた n_3 が等しいとおいて、田下凝灰岩の低応力レベルの 1 次クリープをある程度説明できるとしている。この指摘を拠り所にして、今回も n_1 と n_3 が等しいと考えて議論を進めることにする。

4. 3 大久保・西松（1986）がおこなった一軸圧縮応力下でのクリープ試験結果による検討

4. 3. 1 応力レベル 77% の歪速度曲線からのパラメータの導出

初期段階のクリープでは、 λ^* が 1 より少しだけ大きな値をとるので、(4-3) 式右辺第 1 項が第 2 項に比べて大きくなり、(4-3) 式は次式で近似できる。

$$d\lambda^*/dt = a_1 (\sigma^*)^{n_1} (\lambda^* - 1)^{-m_1} \quad (4-4)$$

この式は解析的に解くことができ、弾性歪を差し引いたクリープ歪 $\varepsilon^* = \sigma^* (\lambda^* - 1)$ と歪速度は次のようになる（大久保・福井、2002）。

$$\text{クリープ歪 } \varepsilon^* = a_1 \frac{1}{m_1+1} (m_1 + 1)^{\frac{1}{m_1+1}} (\sigma^*)^{1+\frac{n_1}{m_1+1}} t^{\frac{1}{m_1+1}} \quad (4-5)$$

$$\text{クリープ歪速度 } \frac{d\varepsilon^*}{dt} = a_1 \frac{1}{m_1+1} (m_1 + 1)^{-\frac{m_1}{m_1+1}} (\sigma^*)^{1+\frac{n_1}{m_1+1}} t^{-\frac{m_1}{m_1+1}} \quad (4-6)$$

(4-6) 式からわかるように、縦軸をクリープ歪速度とし、横軸を経過時間とした両対数グラフ上に計算結果を描けば、その傾きは $-m_1 / (m_1 + 1)$ となる。例として三城目安山岩のクリープ試験で、寿命が幾何平均値にもっとも近い結果を図4-1に示すが（大久保・西松、1986），初期段階を図に示した破線で近似することにすれば、図上の傾き $-m_1 / (m_1 + 1)$ が -0.9 となるので、 $m_1 = 9$ を得る。さらに、この m_1 と既知の応力レベル $\sigma^* = 0.77$ を (4-6) 式に代入して、(4-6) 式より得られる計算結果が図の破線とほぼ重なるときの a_1 を求めると $10^{-9} / s$ となる。

次に入 λ^* が十分に大きくなつた3次クリープの場合を考えてみると、(4-3) 式右辺第2項が支配的となり、(4-3) 式は次式で近似できる。

$$d\lambda^*/dt = a_3 (\sigma^*)^{n_3} (\lambda^*)^{m_3} \quad (4-7)$$

この場合にも解析解がある（大久保、1992）。解析解の内、 $m_3 > 1$ のときは次のような。

$$\text{クリープ歪 } \varepsilon^* = \sigma^* \left[\left\{ 1 + a_3 (1 - m_3) (\sigma^*)^{n_3} t \right\}^{-\frac{1}{m_3-1}} - 1 \right] \quad (4-8)$$

$$\text{クリープ歪速度 } \frac{d\varepsilon^*}{dt} = a_3 (\sigma^*)^{n_3+1} \left\{ 1 + a_3 (1 - m_3) (\sigma^*)^{n_3} t \right\}^{-\frac{m_3}{m_3-1}} \quad (4-9)$$

なお、 $m_3 < 1$ では、急激な破壊がおこらないので、今回の議論の対象外とした。さて、(4-9) 式は若干の変形をすると次式となる。

$$\text{クリープ歪速度 } \frac{d\varepsilon^*}{dt} = a_3^{-\frac{1}{m_3-1}} (m_3 - 1)^{-\frac{m_3}{m_3-1}} (\sigma^*)^{-\frac{n_3-m_3+1}{m_3-1}} T^{-\frac{m_3}{m_3-1}} \quad (4-10)$$

ここで T は、破壊するまでに残された時間（残存寿命）であり、縦軸をクリープ歪速度とし横軸を残存寿命として両対数グラフ上に計算結果を描けば、その傾きは $-m_3 / (m_3 - 1)$ となる。図4-1と同じ三城目安山岩の試験結果を図4-2に示すが（大久保・西松、1986），3次クリープを図に示した破線で近似することにすれば、図上の傾き $-m_3 / (m_3 - 1)$ が -1.018 となるので $m_3 = 5.5$ を得る。さらに、この m_3 と既知の応力レベル $\sigma^* = 0.77$ を (10) 式に代入して、得られる計算結果が図の破線とほぼ重なるときの a_3 を求めると $10^{-8} / s$ となる。なお、同一条件でおこなつた他の試験結果によれば、 $-m_3 / (m_3 - 1)$ の傾きの測定には $-1.01 \sim -1.03$ の範囲でばらつきがあり、対応する m_3 は $3.5 \sim 1.00$ の範囲で変化する。傾きの代表値として採用した -1.018 は単純平均値である。

クリープの初期段階のデータから m_1 と a_1 を、破壊に近い3次クリープから m_3 と a_3 を求めた。以上の検討から採用した(3)式中のパラメータをまとめて記すと次のようになる。

$$\begin{array}{ll} a_1 = 10^{-9} \text{ (1/s)} & a_3 = 10^{-8} \text{ (1/s)} \\ n_1 = 35 & n_3 = 35 \\ m_1 = 9 & m_3 = 55 \end{array}$$

4. 3. 2 応力レベル77%のクリープ試験結果と数値計算結果との比較

4. 3. 1でもとめたパラメータを(4-3)式に代入すれば、初期段階から最終段階までのクリープ歪速度曲線がもとまり、さらに若干の計算の後にクリープ歪曲線がもとまるはずである。

大久保・西松(1986)は、応力レベル77%で6回のクリープ試験をおこなっている。使用した三城目安山岩の一軸圧縮強度などを表4-1に示す。図4-3には、クリープ歪速度およびクリープ歪の試験結果と計算結果とを示す。図中の実線は計算結果である。●は前節でパラメータを求める際に使用した試験結果であり、その他の試験結果は●以外の記号で示した。これからわかるように、クリープ歪速度はしばらくの間、時間の経過とともに低下していき、やがて寿命の半分あたりの時間より増加に転じることがわかる。これは、これまでおこなわれた多くの試験結果で確認されている事項である(例えば児玉ら、2001)。実線で示した計算結果も同様の傾向をみせることがわかる。既に述べたように、従来のコンプライアンス型構成方程式では(4-3)式の右辺第2項しか考えていなかったので、1次クリープの挙動はうまく再現できなかつたが、右辺第1項を追加したことにより、実際の試験結果をかなりよく再現できるようになったといえよう。図4-3(b)には、クリープ歪曲線も描いておいたが、クリープ歪曲線の形状についても、試験結果と計算結果とはかなり似ているといえよう。なお、6本の試験結果の寿命(幾何平均値)は 24×10^4 sであったのに対して、計算結果では 49×10^4 sとなった。 n_1 と n_3 が等しい場合、寿命は a_1 と a_3 に反比例するので、これらの値を修正して試験結果と計算結果の寿命を一致させることは簡単にできるが、これまでの経験から、試験片ごとの強度のばらつきによりクリープ寿命は大きく変わることが知られており、2倍程度の差異は重大でないとして話を進めることにする。

3. 3. 1で述べたように、パラメータの中でもっとも求めにくいのが m_3 であった。 m_3 が大きくなるとクリープ歪線図は急に折れ曲がるようになり、逆に小さくなると徐々に1次クリープから3次クリープへと遷移していく。図4-3のクリープ歪曲線をみると計算結果と試験結果とはある程度一致しており、 $m_3 = 55$ とした選択はクリープ歪線図の観点からみてもほぼ妥当な選択であったといえる。

図4-4には、横軸を残存寿命としたときの試験結果と計算結果とを示す。これまでの試験結果によれば、クリープ破壊直前の挙動にもある程度の規則性があり、近似的に破壊までに残された時間(残存寿命)と歪速度は反比例する(大久保・西松、1986)。図4-4に示したように、計算結果でもこのような傾向がうかがえるが、これは(4-3)式右辺の第2項しか考えない従来のコンプライアンス可変型構成方程式でもいえたことである。従来のコンプライアンス可変型構成方程式は主として3次クリープの再現を重く見たものであるが、(4-3)式のように右辺第1項を追加したとしても3次クリープでは、第2項が支配的となり、従来の構成方程式とほとんどかわら

ない計算結果となる。

4. 3. 3 応力レベル87%のクリープ試験結果

大久保・西松（1986）は、応力レベル87%でも11回のクリープ試験をおこなっている。図4-5には、クリープ歪速度およびクリープ歪の試験結果と計算結果とを示す。この場合の寿命の計算値は 0.68×10^4 sであるのに対して、試験結果の寿命（幾何平均値）は 0.21×10^4 sであった。応力レベル77%のときと同様に、この場合にも計算値の方が大きくなりその差異は約3倍であり、応力レベル77%の2倍と比較して差がやや広がった。その原因は試験にあるのか、構成方程式にあるのか不明であるが、現時点ではさほど重視する必要がない程度の差であると考える。クリープ歪速度曲線およびクリープ歪曲線については、応力レベル77%のときと同様に、計算結果と試験結果とはまずまずの一致をみせるといってよかろう。

図4-6には、横軸を残存寿命としたときの試験結果と計算結果とを示す。応力レベル77%の場合と比較して、寿命が短くなっているだけで定性的な傾向はほぼ同じといえよう。この場合にも、計算結果と試験結果の一致はまずまずといえよう。

4. 4 福井ら（1992, 1993）がおこなった一軸圧縮応力下でのクリープ試験結果による検討

4. 4. 1 応力レベルを変えたクリープ試験結果

同じ岩石ブロックをもちいておこなった応力レベル77%と87%のクリープ試験結果について前章では調べた。ここでは、購入時期の異なる別の岩石ブロックから試験片を切り出しておこなった福井ら（1992, 1993）の結果にどのくらい適用できるかを検討してみる。

福井ら（1992）と、福井ら（1993）はそれぞれ別の岩石ブロックから試験片を切り出しており、表4-1に示すようにそれらの強度は、大久保・西松（1986）で使用した三城目安山岩よりかなり弱い。ここで注意すべきことは、福井ら（1992）の場合には歪速度 10^{-4} /sと他より10倍速い歪速度で試験をしていることである。4. 3でもとめたパラメータは、歪速度 10^{-5} /sでもとめた一軸圧縮強度を基準としている。そこで、計算に際しては、次式の関係（大久保・福井、1991）を用いて歪速度 10^{-5} /sでの強度に換算した一軸圧縮強度を基準とした。

$$(\text{一軸圧縮強度}) \propto (\text{歪速度})^{1/(n+1)}$$

この場合 $n = n_1 = n_3 = 3.5$ とした。簡単な比例計算より、歪速度 10^{-4} /sの一軸圧縮強度が77.8 MPaであるのに対して、歪速度 10^{-5} /sの一軸圧縮強度は73.0 MPaであることがわかる。

図4-7には、歪速度 10^{-5} /sの一軸圧縮強度を基準として計算した応力レベルが75%のときのクリープ歪速度およびクリープ歪の試験結果と計算結果とを示す。別のブロックから切り

出した試験片、別の試験者がおこなった試験結果であっても、1次クリープにおけるクリープ歪速度とクリープ歪は、(4-3)式に基づいて計算した結果とかなりよく合うことがわかる。なお、計算にあたって使用した構成方程式中のパラメータは3.1の最後に示した値を用いた。

4.4.2 強度破壊点以降でのクリープ試験結果

福井ら(1993)は、三城目安山岩含む3岩石を用いて定歪速度試験をおこない、強度破壊点を越えた後に一旦わずかに除荷し、その後応力を一定に保つ試験をおこなった。この試験によれば、通常のクリープ試験では時間がかかるため測定が難しい3次クリープ特性の把握が迅速におこなえると著者は主張している。普通のクリープ試験とは応力履歴が異なるので、多少の違いはあるかもしれないが、得られたクリープ歪や歪速度の示す傾向は、定性的には通常のクリープ試験の場合と一致している。以下では、この福井ら(1993)の試験結果と今回提案した構成方程式による計算結果を比較してみる。

図4-8には、横軸を残存寿命としたときのクリープ歪速度の試験結果と計算結果とを示す。図4-8(a)は強度破壊点を越えて応力レベル85%に達するまで定歪速度試験をおこない、その後、定歪速度で除荷し(歪を減少させ)、応力レベル70%に達した後は完全に破壊するまで応力を一定に保った場合である。試験中の応力履歴を示すと下記のようになる。

試験開始 → (定歪速度) → 強度破壊点 → 応力レベル85% → (除荷) → 応力レベル70% → (クリープ) → 破壊

図4-8(b)は、応力レベル95%まで定歪速度試験、応力レベル80%でクリープ試験をおこなった場合の測定結果である。図8(a)と(b)には、(4-3)式より計算した結果も示してあるが、比較検討をおこなった3次クリープでは、測定結果と計算結果とは満足すべき一致をみせるといってよからう。なお、この場合にも、計算にあたって使用した構成方程式中のパラメータは4.3.1の最後に示した値を用いた。

4.5 秋ら(1995)がおこなった一軸引張応力下でのクリープ試験結果による検討

一軸引張応力下でのクリープ試験結果に関する報告は少ない(西松・山口、1980)。秋ら(1995)は、三城目安山岩を使用した一軸引張クリープ試験を実施した。簡単な考察をしてみると、荷重を一定に保った場合、岩石試験片に含まれる亀裂は徐々に数を増すとともにその長さも増大していくので、クリープ歪速度も単調に増大しそうであるが、試験結果をみると、一軸圧縮クリープの場合とほとんど同じで、最初の間はクリープ歪速度が減少していき、寿命の半分ほどの時間が経過した後には歪速度が徐々に増大し破壊に至る。

上記のように一軸引張応力下でのクリープ挙動は定性的には一軸圧縮応力下でのそれと似ていることがわかったので、次の段階として、両者を比較しつつある程度定量的に議論するために、今回提案した構成方程式による計算結果と比較してみる。

表4-1に示すように秋ら(1995)の使用した三城目安山岩の一軸引張強度は3.78 MPaである。この一軸引張強度は、歪速度 $10^{-6}/s$ とした定歪速度試験で求められたものである。さて、(4-3)式の構成方程式は無次元化されており、無次元化する際に用いる強度は同じ無次

元化歪速度 $d\varepsilon^*/dt$ で求められたものでなくてはならない。言葉を変えていえば、強度破壊点に達するまでの試験時間 t_F が圧縮と引張で同じとする必要がある。調べてみると大久保・西松（1986）の一軸圧縮試験の t_F は約 800 s であるのに対し、秋ら（1995）の一軸引張試験でのそれは約 500 s である。そこで、多少の差はあるが両者の無次元化歪速度ないし t_F は同等とみなし、大久保・西松（1986）の試験結果を根拠としてもとめたパラメータをそのまま使用して計算をすることにした。

図4-9には、応力レベル 82%, 88%, 98%におけるクリープ歪速度の試験結果と計算結果とを示す。太い実線は（4-3）式によるものであり、パラメータは 4. 3. 1 の最後に示した値を用いた。試験結果の寿命は計算結果より長いことがわかる。また測定結果の応力レベル 82% と 88% の寿命の差が大き過ぎるようにおもわれる。しかしながら、クリープ試験の初期段階におけるクリープ歪速度の値、図上の曲線の傾きは、測定結果と試験結果とでかなり良くあっていといえよう。また、クリープ歪速度が最初減少し、やや停滞し、最後に加速的に増加する傾向もかなりよく一致しているといえよう。残念ながら一軸引張クリープは難度の高い試験であり、これ以上の議論をするのに十分な試験結果がないが、一軸圧縮クリープで求めたパラメータをそのまま使用して計算した結果が、図4-9に示したように一軸引張クリープにもある程度あてはまることがわかった。

4. 6 構成方程式中のパラメータについて

大久保・福井（2001）で、従来のコンプライアンス可変型構成方程式のパラメータの取得法についてまとめておいた。そこで議論をふまえつつ、今回提案した構成方程式のパラメータの求め方について現在までにわかっていることをまとめておく。

① a_1 は、（4-6）式に示す1次クリープにおけるクリープ歪速度と時間の関係を利用して求まる。また、本章では触れなかったが、強度破壊点以前の応力-歪曲線の形状からも求まる可能性がある。どちらの方法を採用するにしても、試験片全体の変位をはかった場合には試験片端面の変形が紛れ込む可能性があるし、歪ゲージで歪をはかった場合には、応力が高くなると試験片側面の剥離などのため信頼性が損なわれるので注意が必要である。

② m_1 は、（4-6）式に示す1次クリープにおけるクリープ歪速度と時間の関係を利用して求まる。また、強度破壊点以前の応力-歪曲線の形状からも求まる可能性がある。実技的には a_1 と同様に歪の正確な測定に十分な注意を払う必要がある。

③ n_1 は、応力レベルを変えたクリープ試験をおこない、1次クリープでの歪と時間の関係から求まるはずである。これは既報（大久保・福井、2002）で述べたとおりであるが、 n_1 を正しく求めるには、クリープ歪や歪速度を高精度で測定する必要があり、現在までのところ信頼すべきデータが少ない。

一軸圧縮試験においては、 n_1 と n_3 が等しい限り、50%ヤング率の載荷速度依存性はないとの指摘がある（大久保ら、2001）。これまでの試験結果によれば、50%ヤング率の載荷速度依存性は多少あるので、指摘が正しいとすれば n_1 と n_3 の差は存在するようである。しかしながら、これも高精度の試験を要求されるので、信頼すべきデータは少ない。現状では、両者を等しいとおくことが一案であろう。

④ a_3 は、(4-9)式に示す3次クリープにおけるクリープ歪速度と時間の関係を利用して求まる。また、クリープ応力と寿命の関係を利用して求まる。ただし、従来のコンプライアンス可変型の構成方程式では解析解があったので、クリープ応力と寿命よりただちに a_3 を求めることができたが、今回提案した構成方程式では若干の数値計算が必要となる。また、定歪速度試験における強度から求まる可能性がある。

⑤ m_3 は、(4-9)式に示す3次クリープにおけるクリープ歪速度と時間の関係より求まる。3次クリープにおいては、(4-3)式右辺第2項が支配的なので、従来どおりの考え方(大久保・福井、2001)でよいといえる。また、一軸圧縮試験における強度破壊点以降の応力-歪曲線の傾きから、求まる可能性がある。

⑥ n_3 はクリープ寿命の応力依存性から求まる。また、強度の載荷速度依存性より求まる可能性がある。

4. 7 考察

4. 7. 1 一軸圧縮試験への拡張の可能性

従来のコンプライアンス可変型構成方程式の特徴の一つとして、クリープのみならず応力緩和や一軸圧縮試験などにも適用できることがあげられる(大久保、1992)。この特徴は今回提案した構成方程式でも損なわれていない。ただし、定量的な一致については個別に検討する必要がある。詳細な検討は後報にゆずるとして、4. 3で求めたパラメータを用いて、定歪速度による一軸圧縮試験をシミュレートしたら、試験結果と計算結果とはどの程度一致するかどうかを調べてみる。

図4-10には、図4-3や図4-4と同様にパラメータを選んだときの応力-歪曲線の計算結果と試験結果とを示す。計算、試験とも次式であらわされる応力帰還制御(大久保・西松、1984)で載荷速度 $C = 10^{-5} / s$, $\alpha = 0.5$ の場合である。

$$\varepsilon - \alpha (\sigma/E) = C \cdot t \quad (4-11)$$

試験結果の最初の部分はやや下に凸になっているが、この原因の一つは端面の変形でありもう一つは三城目安山岩独自の特性である。試験結果は既報に掲載したもの(大久保・西松、1986の図9)と同じであり、平均強度よりやや強度が小さい。計算結果より試験結果の強度がわずかに小さい原因の一つである。

m_3 が大きいので定歪速度と仮定して計算した場合、強度破壊点直後に応力が急激に低下する。試験結果では、強度破壊点を越えた直後にA点からB点まで応力が10%強低下するが、この部分の応力-歪曲線の傾きは正で、計算結果とよくあっている。しかし、その後、応力-歪曲線図上でB点からC点まで斜め下にわずかに移動し、それから再度正の傾きとなる。このように破壊が何段階かにわたって生じるのは試験片の不均質性によるものと思われるが、計算結果ではそこまでの詳細な現象を表すことに成功していない。強度試験から得られる応力-歪曲線に関する詳しい議論はあらためておこなうこととする。

4. 7. 2 周圧下への拡張の可能性

本章では一軸応力下でのクリープについて検討してきた。従来のコンプライアンス可変型構成方程式と同様に、今回提案した構成方程式も周圧下に適用できるが、構成方程式中のパラメータについては不明な点が多い。

一般に周圧下でのクリープ試験には、周圧を良い精度で長期間保つことが困難であることなど難点が多く、一軸応力下での試験結果と比較して報告されている例が格段に少ない（山口ら、2000；山口・大久保、2000）。幸い本研究で対象とした三城目安山岩については、ある程度の試験結果が公表されており、次のことが指摘されている（趙ら、1995）。

- ①周圧の増加に伴って、 n_3 が増加する。そして n_3 は破壊差応力にほぼ比例する。
- ② m_3 はほぼ同じである。

追加した（4-3）式右辺第1項にかかるパラメータについては、既報（趙、1995）のデータより次のことがいえる。

- ③ n_1 については有力な情報がない。
- ④1次クリープの段階におけるクリープ歪速度と経過時間の関係に大幅な変化はない。したがって m_1 の変化も比較的小さいと考えられる。

これ以上の議論は後報にゆずる。

4. 7. 3 FEM などへの組み込みの可能性

コンプライアンス可変型構成方程式をFEMなどの数値計算プログラムに組み込むことは、徐々に進みつつあるといえよう（大久保・金、1993）。今回の構成方程式の開発にあたっても、従来の構成方程式との連続性を重くみて、基本的な理念を可能な限り変えないよう努力したつもりである。その結果、今回提案した構成方程式のFEMプログラムへの組み込みは従来どおりのプログラミングでよいと思う。また、既に従来のコンプライアンス可変型構成方程式が組み込まれているFEMプログラムの場合、（4-3）式右辺第1項を追加するだけであり、ごく短時間の作業でできることと考えている。

これまで使用してきた（4-1）式の構成方程式では、地圧が大きく坑壁の周囲がかなり損傷するときが、主たる対象であった。この場合にはピーク強度を超えた部分が坑壁から順次奥へと広がるにつれて、コンバージェンスが増えることになる（大久保・金、1993）。今回、1次クリープの項を追加したことで、比較的地圧の小さい場合や掘削直後のコンバージェンスがより良く再現できる可能性がある。

4. 7. 4 他の構成方程式との関係

Dragon & Mroz(1979)や大久保・西松(1986)のように、非弾性歪が増加することを重視して構成方程式を組み立てる方式もある。実際は、コンプライアンス、非弾性歪とともに変化するはずであるが、両者を分別することは難しく構成方程式のパラメータを求めることが極めて困難である。よって、どちらか一方だけが変化するとして構成方程式を組み立てるのが実用的と考える。現在のところ非弾性歪を変化させる場合と、コンプライアンスを変化させる場合とでどちらが総合的に有利かは不明である。一つだけいえるのは、既存の有限要素法プログラムに組み込むには、後者の方が簡単なことが多いことである。

4. 8 まとめ

従来の3次クリープの再現に重点を置いた構成方程式と最近になって提案した1次クリープを対象とした構成方程式を組み合わせた構成方程式について検討した。

大久保・西松(1986)における一軸圧縮クリープ試験結果のうち、応力レベル77%でおこなわれた測定結果の1例から構成方程式のパラメータを求めた。求めたパラメータを構成方程式に代入して得られる計算結果と、応力レベル77%の全データや応力レベル87%における全データとを比較検討した。また、1次クリープについては福井ら(1992)の測定結果と、また、3次クリープについては福井ら(1993)の測定結果と計算結果とを比較検討した。歪速度が時間経過とともに減少する1次クリープでも、歪速度が加速的に増大する3次クリープでも、測定結果と計算結果とはかなり良好な一致を示した。

構成方程式は基準化された形で提案されているので、強度の絶対値がちがっても適用できる可能性があると考えて、秋ら(1995)がおこなった一軸引張応力下でのクリープ試験結果と計算結果とを比較検討した。興味深いことに、一軸圧縮クリープ試験結果を根拠としてもとめたパラメータをそのまま用いて計算した結果と、測定結果とは比較的似通っていることがわかった。引張と圧縮では破壊機構がかなり異なる可能性があり(Hawkes et al., 1973)、構成方程式の適用の可否を即断することは危険であるが、引張クリープと圧縮クリープの共通性について今後検討する必要が大きいにあると考える。その際、今回提案した構成方程式は重要なツールの一つとなりえる可能性が高い。

今回提案した構成方程式を、定歪速度試験など他の試験に応用した場合の検討、周圧下に拡張した場合の検討などが今後の課題として残っている。また、パラメータの数が増加したので、これらを求める手間が増えたことは確かである。今後、他の試験のデータも含めて、より合理的で確実なパラメータの求め方を探求する必要があると考えている。

参考文献

- 趙顕（1995）：岩石の時間依存性挙動と構成方程式に関する研究，東京大学博士論文
- 趙顕・大久保誠介・福井勝則（1995）：資源・素材学会誌，Vol.111，p.543-548
- Cogan, J. (1976) : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.13, p.1-10
- Desai, C. S. and Siriwardane, H. J. (1984) : Constitutive laws with engineering materials with emphasis on geological materials, Chap. 10, 12, Prentice-Hall Inc. (Engle Cliffs, New Jersey)
- Dragon, A. and Mroz, Z. (1979) : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.16, p. 253-259
- Fakhimi, A. A. and Fairhurst, C. (1994) : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 31, p. 117-126
- 福井勝則・大久保誠介・西松裕一（1992）：資源・素材学会誌，Vol.108，p.543-548
- 福井勝則・大久保誠介・西松裕一（1993）：資源・素材学会誌，Vol.109，p.361-366
- Hawkes, I., Mellor, M. and Gariepy, S. (1973) : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.10, p. 493-507
- 児玉淳一・後藤龍彦・藤井義明・吉田豊・板倉賢一（2002）：資源・素材学会誌，Vol.117, p. 718-724
- 西松裕一・山口勉（1980）：材料，29, p.192-197
- 大久保誠介・西松裕一（1984）：日本鉱業会誌，Vol.100, p.1052-1056
- 大久保誠介・西松裕一（1986）：日本鉱業会誌，Vol.102, p.395-400
- 大久保誠介（1991）：資源・素材学会誌，Vol.107, p. 245-252
- 大久保誠介（1992）：資源・素材学会誌，Vol.108, p. 601-606
- 大久保誠介・金豊年（1993）：資源・素材学会誌，Vol.109, p. 209-214
- 大久保誠介・福井勝則（2001）：資源・素材学会誌，Vol.117, p. 13-20
- 大久保誠介・福井勝則，許江（2001）：資源・素材学会誌，Vol.117, p. 29-35
- 大久保誠介・福井勝則（2002）：資源・素材学会誌，Vol.118, p. 36-42
- 秋哲淵・大久保誠介・福井勝則（1995）：資源・素材学会，Vol.111, p. 31-36
- 山口勉・大久保誠介・エンリコ マラニーニ・成田孝（2000）：資源・素材学会誌，Vol.116, p. 91-96
- 山口勉・大久保誠介（2000）：資源・素材学会誌，Vol.116, p. 623-629

表4-1 試験で使用した三城目安山岩の強度

文献名	大久保・西松 (1986)	福井ら (1992)	福井ら (1993)	秋ら (1995)
強度 (MPa)	一軸圧縮 87.3	一軸圧縮 77.8 *1	一軸圧縮 82.2	一軸引張 3.78
ヤング率 (GPa)	1.1	1.1	1.1	7.8
試験方法	定歪速度試験	同左	同左	同左
歪速度 (1/s)	10^{-5}	10^{-4}	10^{-5}	約 10^{-6} *2

(* 1) 歪速度 10^{-5} (1/s) の時の強度は 73.0 (MPa)

(* 2) 試験開始から強度破壊点までの所要時間が 500 s

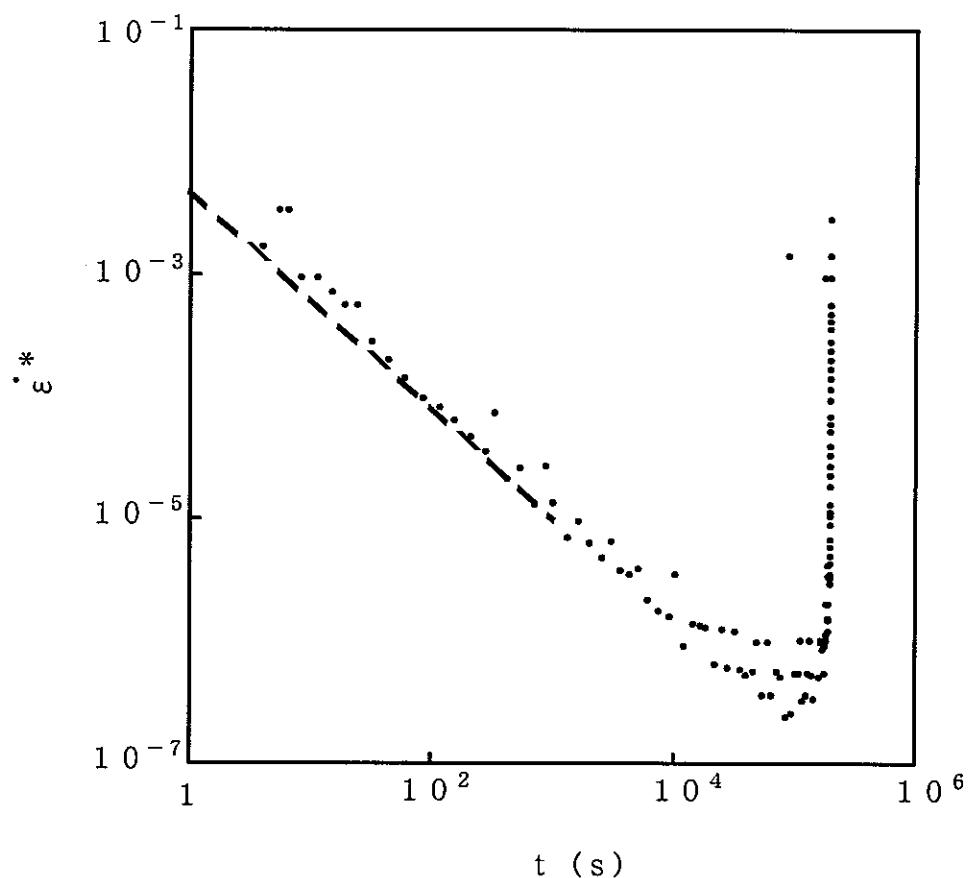


図4-1 応力レベル77%におけるクリープ歪速度の測定例（大久保・西松、1986）.
破線は(4-6)式による計算結果。縦軸は基準化したクリープ歪 $\varepsilon^* = \sigma^* (\lambda^* - 1)$ の増加速度である。

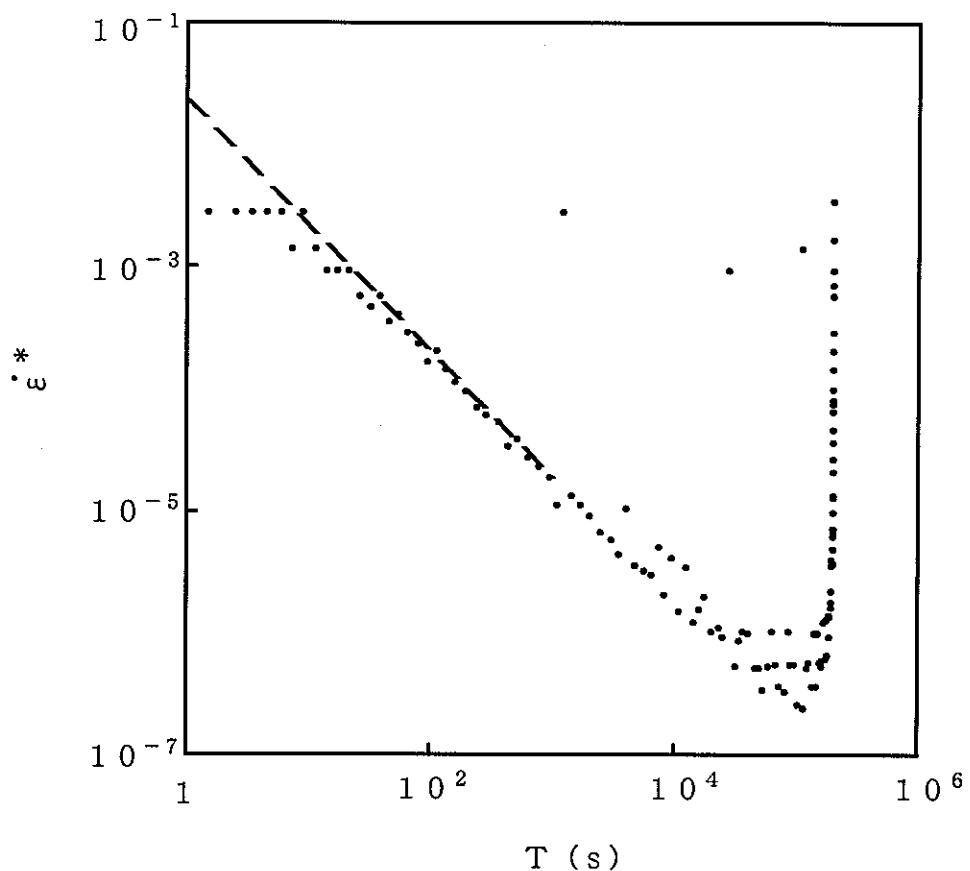


図4-2 応力レベル77%におけるクリープ歪速度と残存寿命の測定例（大久保・西松, 1986）。図4-1と同じ測定例。

破線は(4-10)式による計算結果。横軸のTは破壊するまでに残された時間（残存寿命）である。

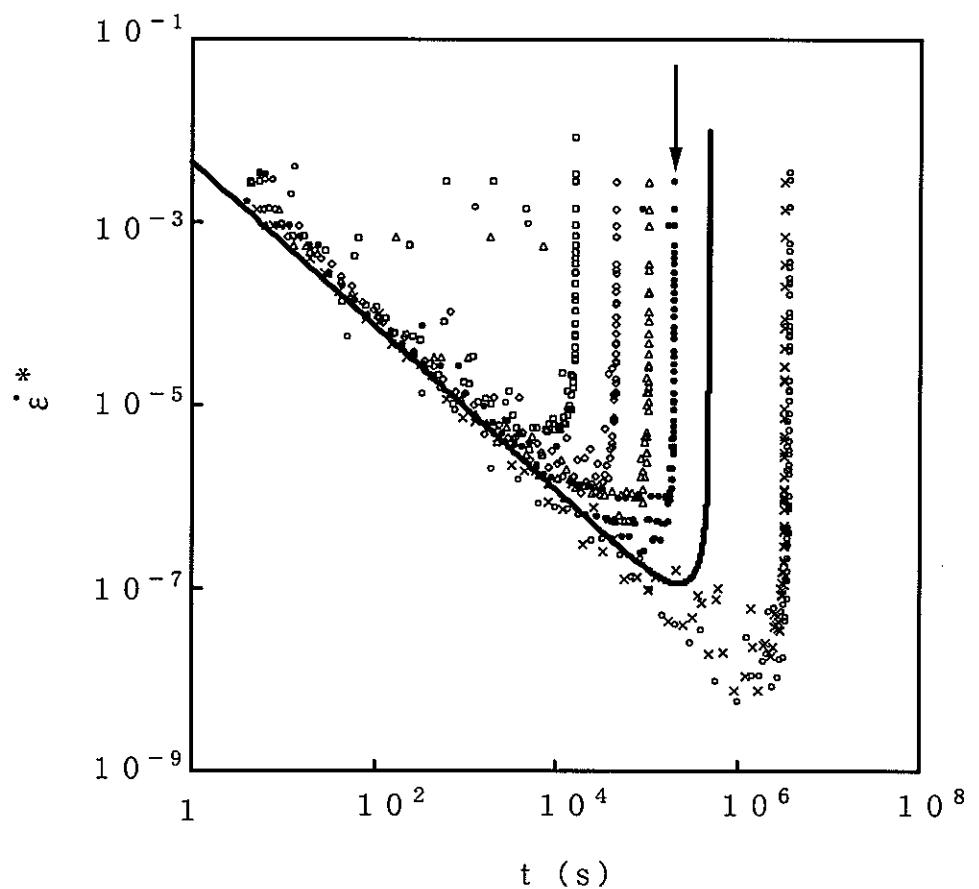


図4-3 (a) クリープ歪速度

応力レベル77%におけるクリープ試験結果の全データ(大久保・西松, 1986).

●は図4-1と同じ測定例で矢印により示した. ●以外はその他の測定例.

実線は(4-3)式による計算結果.

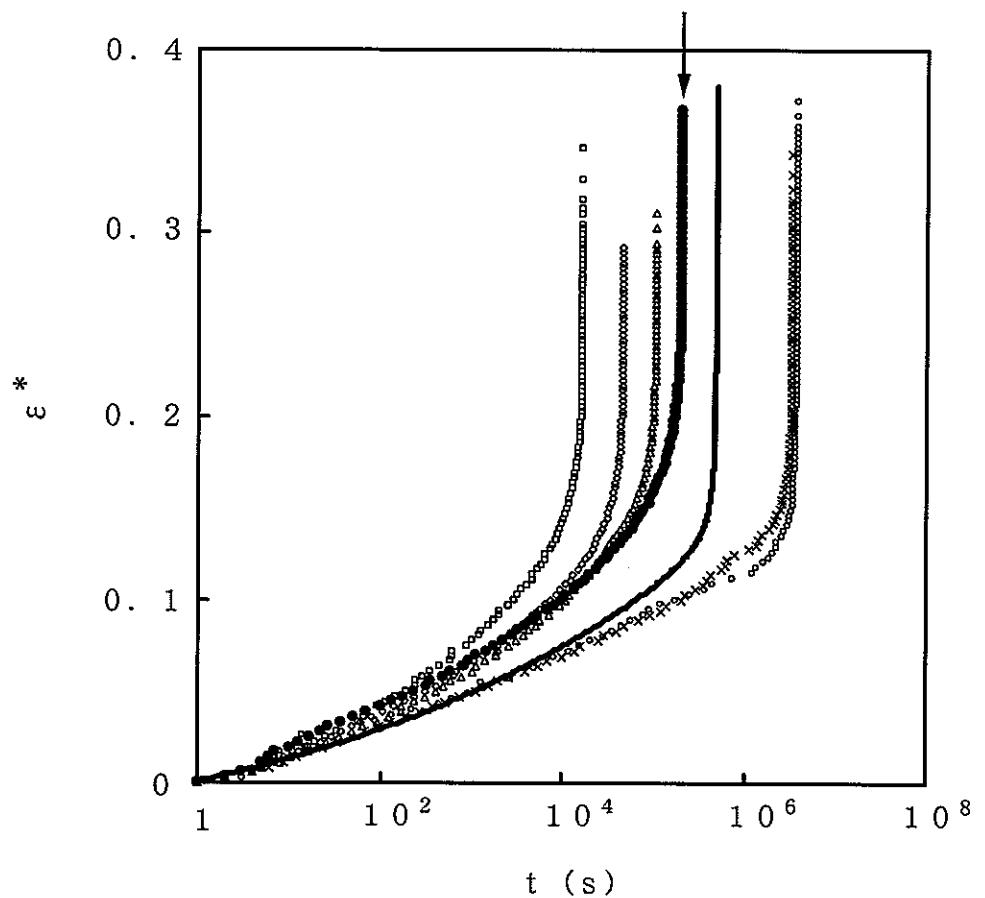


図4-3 (b) クリープ歪

応力レベル77%におけるクリープ試験結果の全データ（大久保・西松, 1986）。

●は図4-1と同じ測定例で矢印により示した。●以外はその他の測定例。

実線は(4-3)式による計算結果。

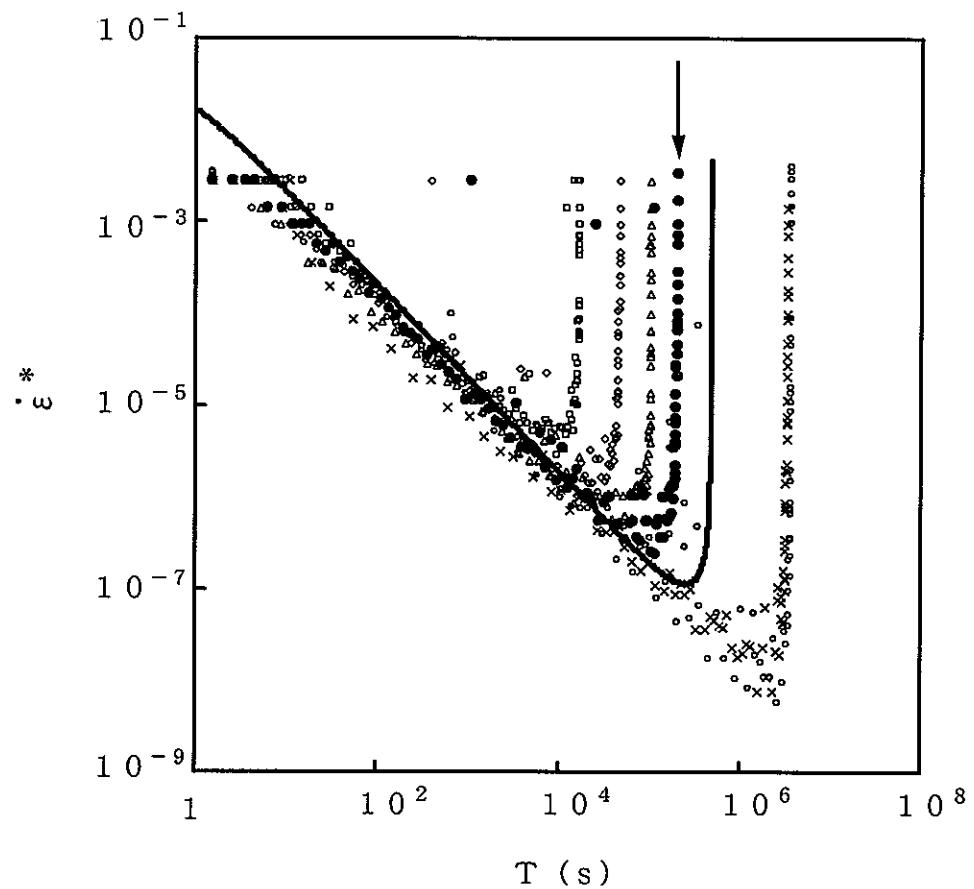


図4-4 応力レベル77%におけるクリープ歪速度と残存寿命の全データ（大久保・西松, 1986）。

●は図4-1と同じ測定例で矢印により示した。●以外はその他の測定例。実線は(4-3)式による計算結果。

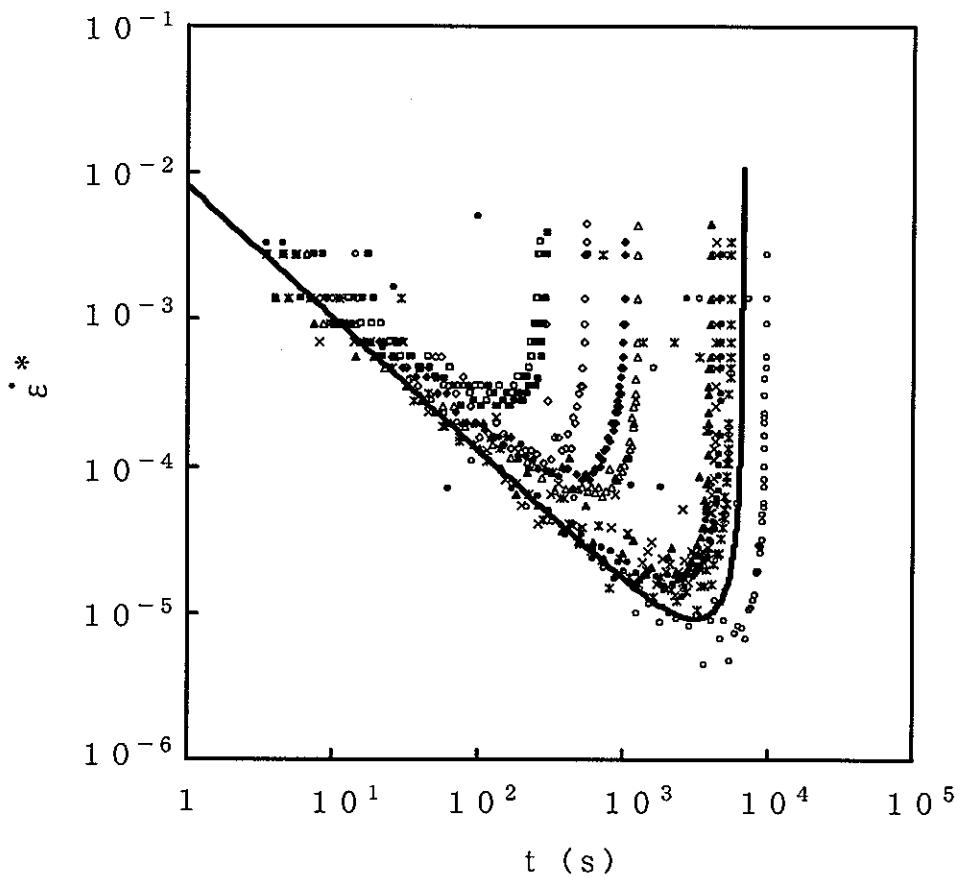


図4-5 (a) クリープ歪速度
応力レベル87%におけるクリープ試験結果の全データ（大久保・西松, 1986）.
実線は(4-3)式による計算結果。

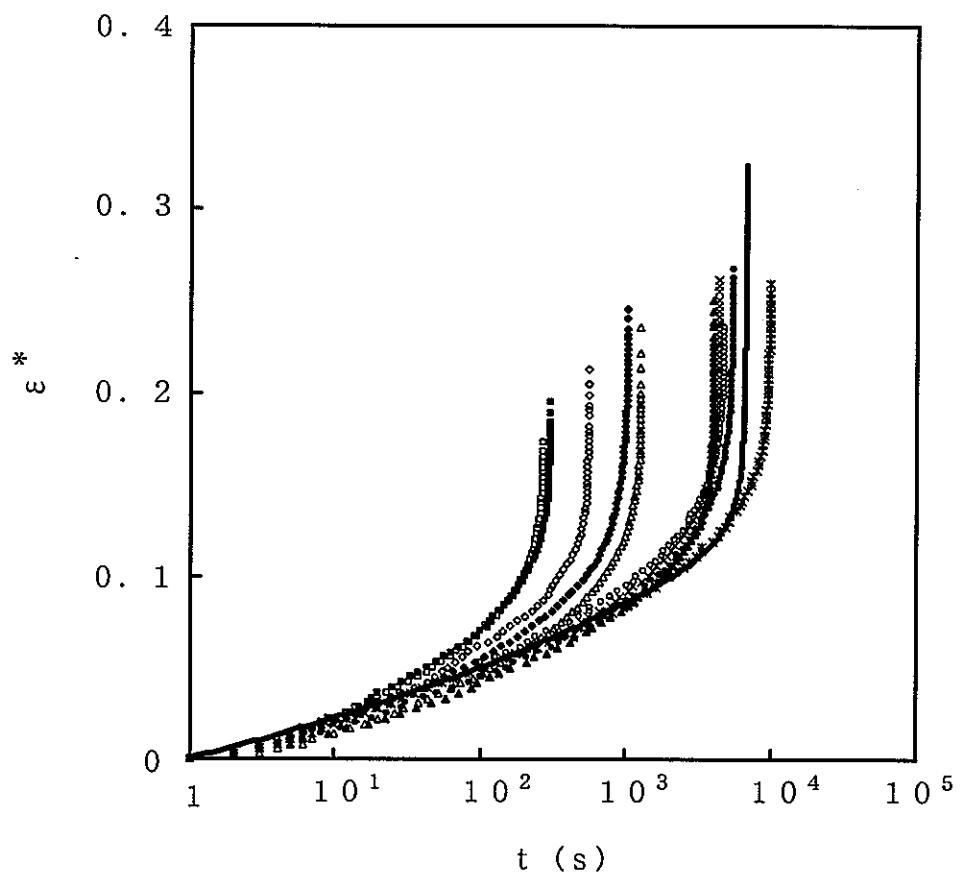


図4-5 (b) クリープ歪
応力レベル87%におけるクリープ試験結果の全データ(大久保・西松, 1986).
実線は(4-3)式による計算結果.

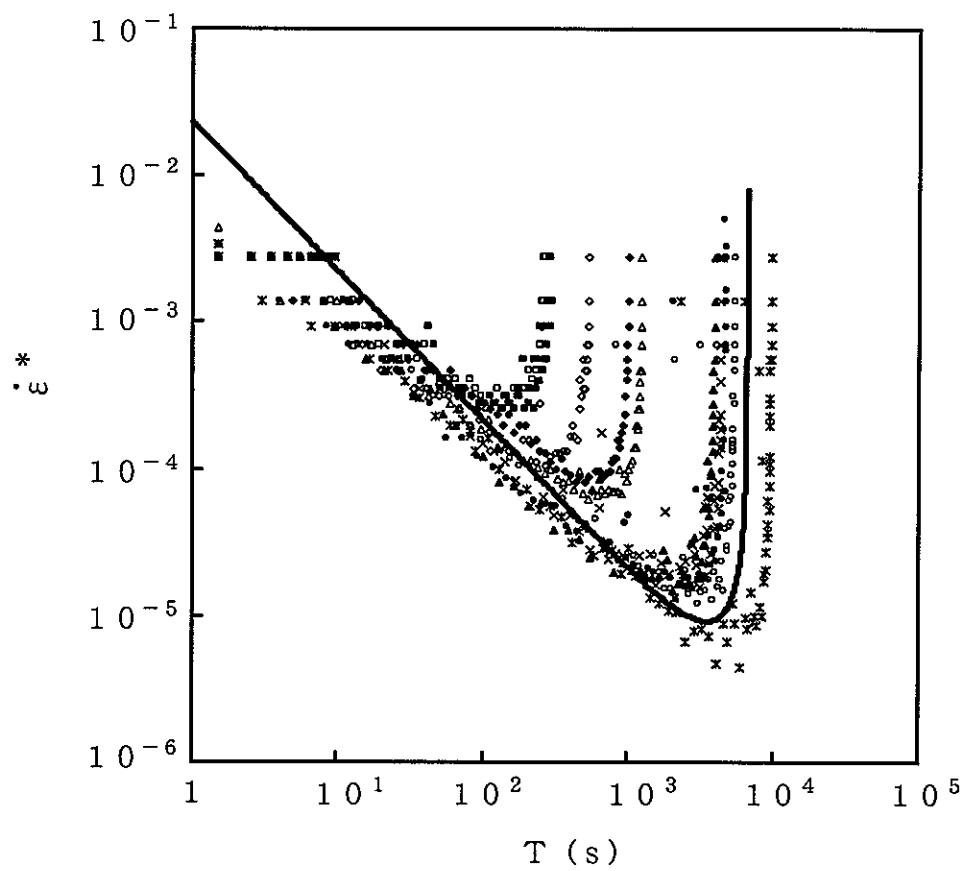


図4-6 応力レベル8.7%におけるクリープ歪速度と残存寿命の全データ（大久保・西松、1986）。

実線は(4-3)式による計算結果。

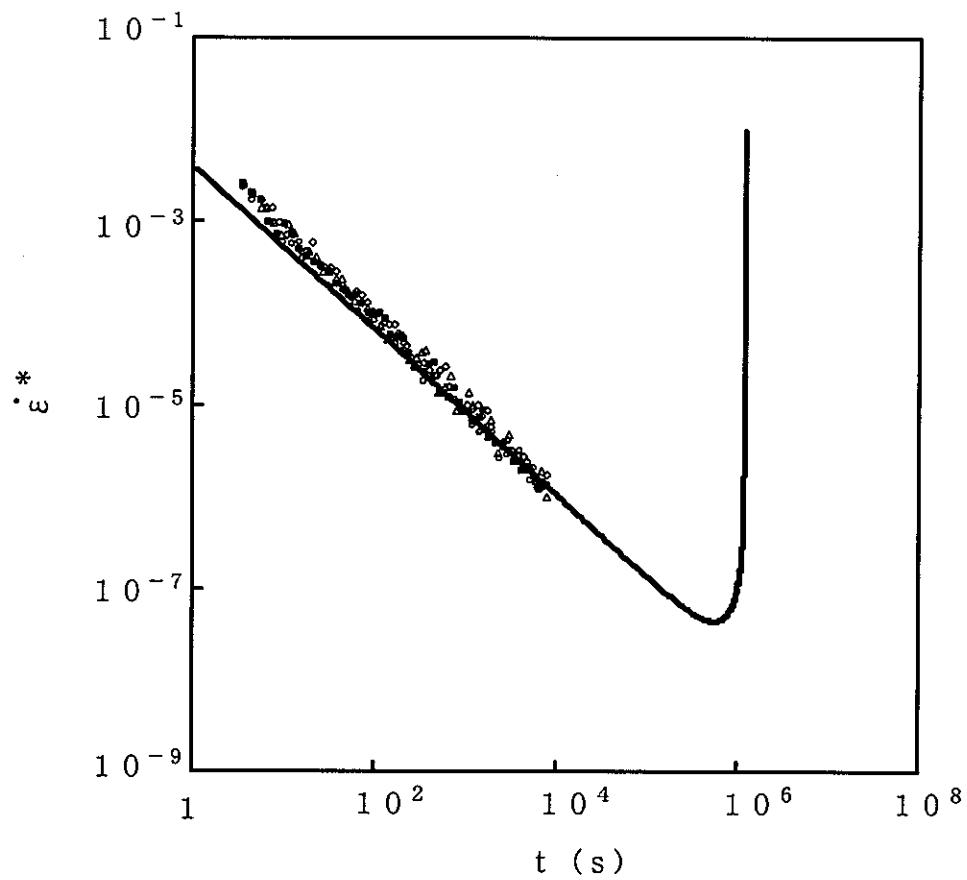


図4-7 (a) クリープ歪速度

応力レベル75%における測定例(福井ら, 1992). 実線は(4-3)式による計算結果.

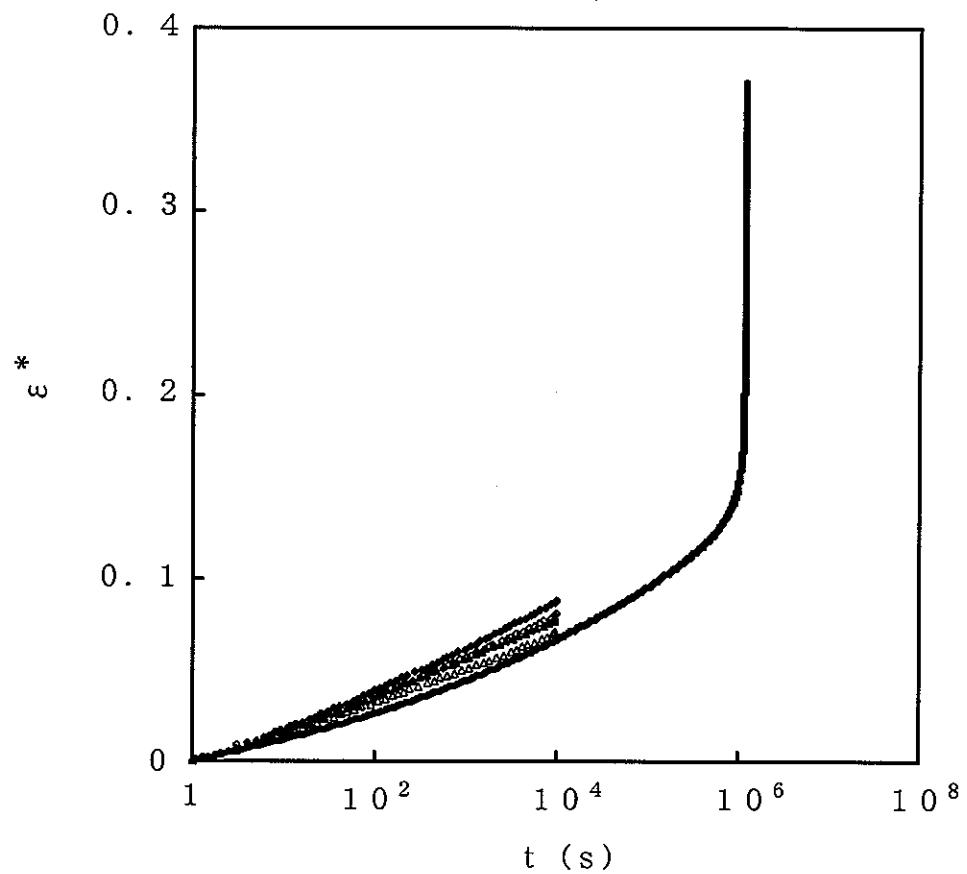


図4-7 (b) クリープ歪

応力レベル75%における測定例(福井ら, 1992). 実線は(4-3)式による計算結果.

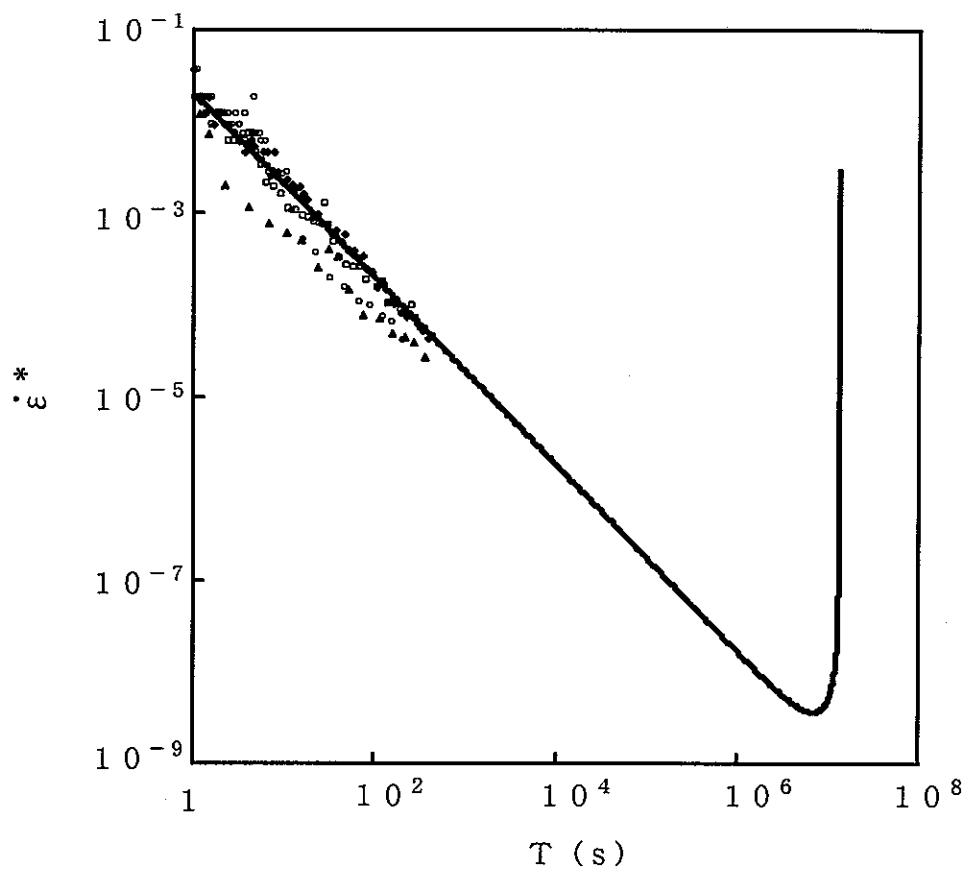


図4-8 (a) 応力レベル70%
強度破壊点以降でのクリープ試験で測定した歪速度（福井ら, 1993）.
横軸は残存寿命. 実線は(4-3)式による計算結果.

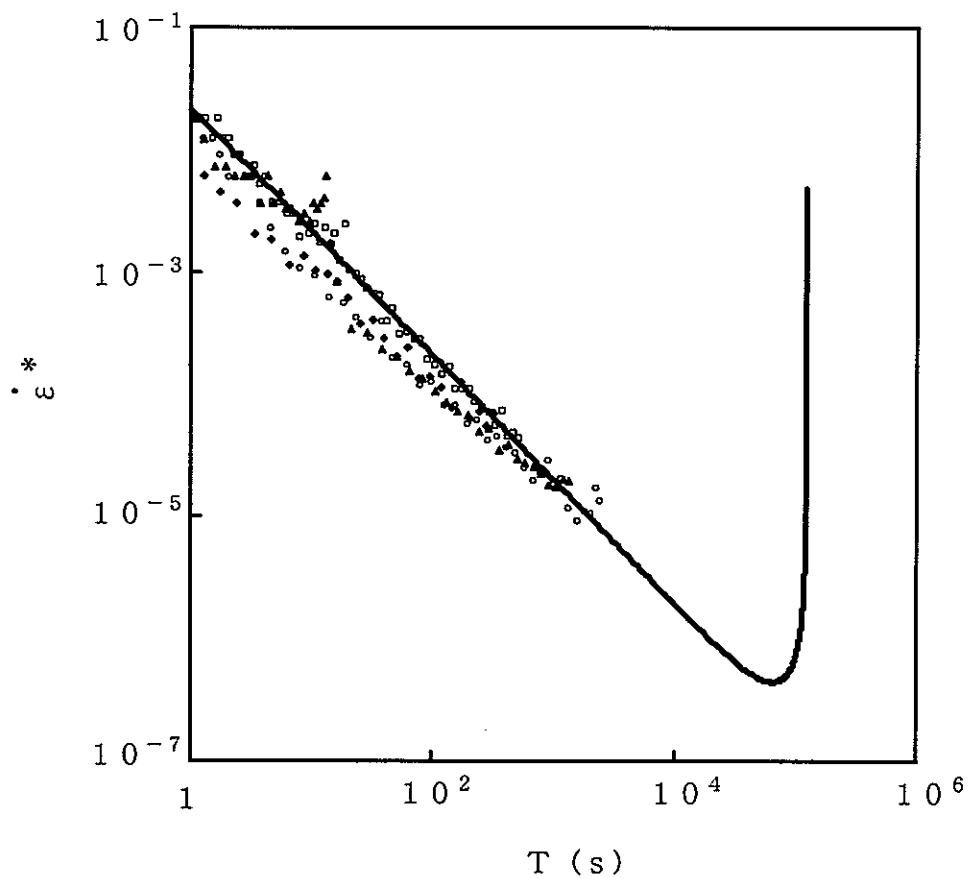


図4-8 (b) 応力レベル80%
強度破壊点以降でのクリープ試験で測定した歪速度（福井ら, 1993）.
横軸は残存寿命. 実線は(4-3)式による計算結果.

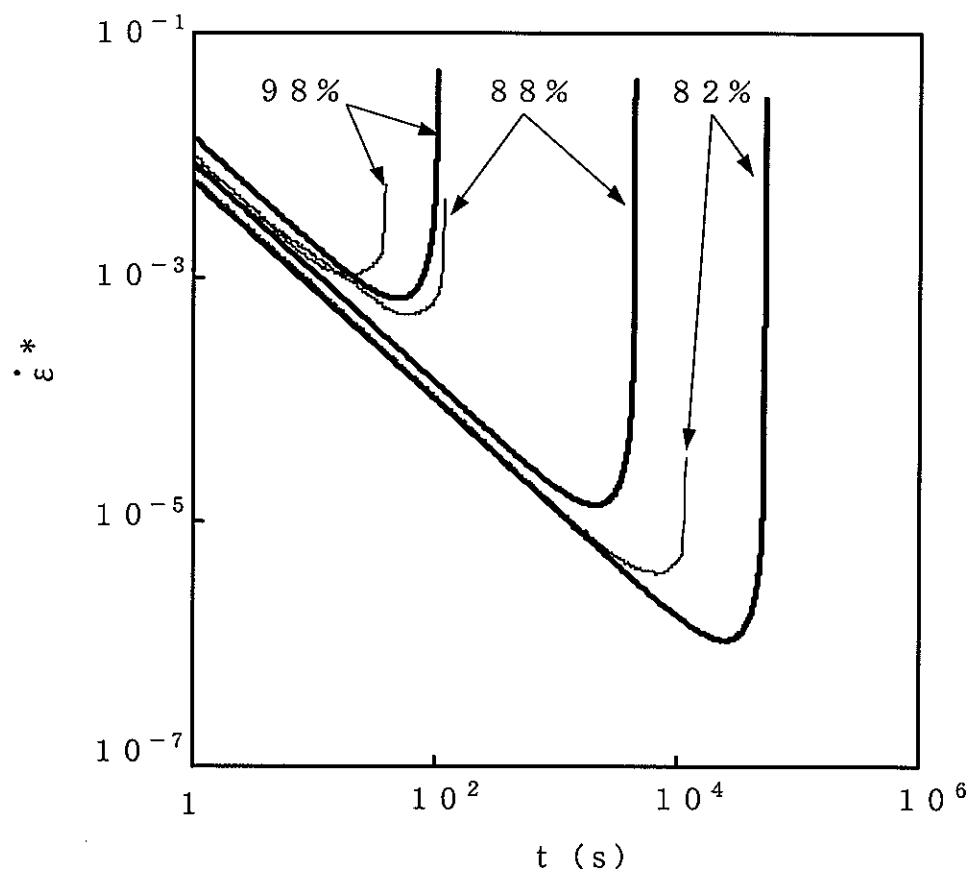


図4-9 一軸引張応力下におけるクリープ歪速度の測定例（秋ら、1995）.
応力レベルは82%，88%および98%。太い実線は(4-3)式による計算結果。

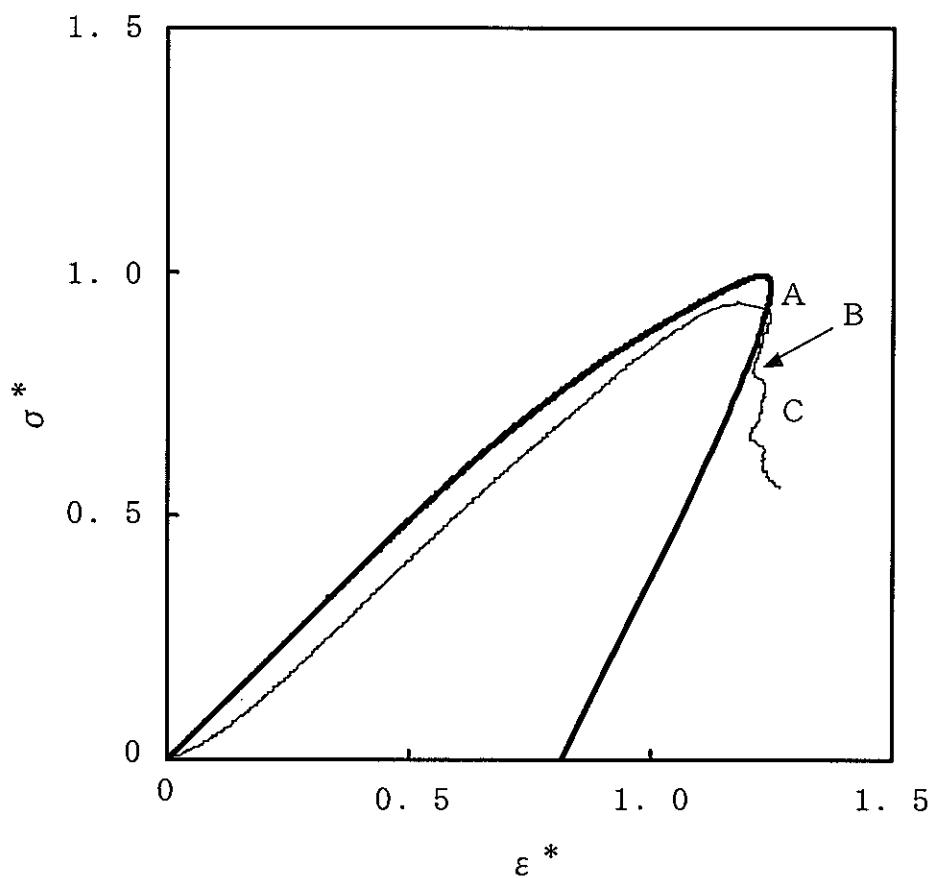


図4-10 応力帰還制御（載荷速度 10^{-5} / s, $\alpha = 0.5$ ）による一軸圧縮試験で得た応力-歪曲線（大久保・西松, 1986）.
太い実線は、図4-3や図4-4と同様にパラメータを選んだときの計算結果。

5. 可視化ベッセルを用いた周圧下でのクリープ試験と破壊直前までの連続写真

5. 1 はじめに

岩盤構造物の長期安定性を論じるには、周圧下でのクリープ特性の把握が極めて重要である。しかし、周圧下でのクリープに関する研究は、一軸応力下でのそれと比べ格段に少ない。この理由の一つとして、試験片が破壊する際に周圧を一定に保つのが困難である点が挙げられる。また従来は、試験片を金属製のベッセル内に入れて実験を行うことが多く、周圧下で破壊過程を観察した例はほとんどない。

大久保ら（2002）は、透明なアクリル樹脂製の可視化ベッセルを開発し、周圧下での実験中に試験片を目視することに成功した。従来の研究では、試験片の横方向変位は各種変位計を用い、局所的な測定を行っていたが、可視化ベッセルによって実験中に撮影した写真から試験片全体の変位を測定することが可能となった。

本研究では、この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結果について述べる。

5. 2 実験方法

試料岩石として田下凝灰岩を用いた。これを直径25 mm、高さ50 mmの円柱形試験片に整形後、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実験に使用した。実験に先立ち、5本の試験片を用いて、歪速度 $10^{-5} / s$ で定歪速度試験を行ったところ、平均一軸圧縮強度は16.0 MPa、ヤング率は3.7 GPaであった。

試験機の概略図を図5-1に示す。載荷には容量500 kNのサーボ試験機を用いた。周圧は最大圧力35 MPaのサーボ制御式の周圧発生装置で制御した。軸方向変位は差動変圧器で、荷重はロードセルで測定した。

周圧ベッセルとして図5-2に示すような透明なアクリル樹脂製の可視化ベッセルを用いた。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、6本のボルトで円筒を締め付ける構造となっている。アクリルの引張強度は75 MPaであり、ベッセルの破壊試験の結果、複数回使用後の円筒はほぼ理論値どおり約55 MPaの周圧で破壊する。今回は周圧を3 MPaと設定したが、安全率は10以上であり、充分安全であると考えられる。

写真撮影には、画素数266万のデジタルカメラ（Nikon製、D1）を用いた。岩石のクリープでは、破壊時刻の予測が難しく、同じ条件下でも破壊寿命が大きくばらつく。また、変化の少ない2次クリープでは比較的長い時間毎に撮影し、変化の激しい3次クリープでは可能な限り多くの撮影枚数を確保する必要がある。そこで、本研究では、図5-1のように既存のシステムに付け加える形で写真撮影システムを組み込んだ。写真撮影システムでは、差動変圧器の出力が増幅器、分解能16 bitのA/D変換器を経て、パソコンに送られる。パソコンでは、変位が一定量増加する毎に写真の撮影ができるように、リレー出力ボードからカメラへ出力信号が送られる。

試験片の横方向変位は写真から次のような手順で測定した。まず、メディアンフィルタによりノイズを除去した。次に横方向に関して、隣接する画素間の輝度値の差を計算した。その差が最大値あるいは最小値となる点を試験片の端とし、両者の間隔を測定することで試験片の幅を測定した。つまり、横方向の輝度値の変化が最も激しいところを試験片の端とした。この際、検出を容易にするため図5-3のように試験片の端の部分にマーカーで色をつけた。

実験は周圧3 MPaのもとで行った。クリープ応力は20.8, 23.4, 24.7 MPaの3種類とした。周圧3 MPaでの圧縮強度は26.0 MPaであり、上述のクリープ応力はそれぞれ強度の80, 90, 95%に相当する。実験は、内部に試験片を設置した可視化ベッセルを試験機に挿入し、周圧を設定値まで上昇させ、安定した後、クリープ応力に達するまで応力速度1 MPa/sで載荷を行った。

5.3 実験結果

5.3.1 破壊直前までの連続写真と試験片の横幅の経時変化

図5-3に実験で得られたクリープ曲線と試験片の連続写真の一部を示す。写真是軸歪が 5×10^{-4} 増加する毎に撮影したが、変化の激しい3次クリープ(図5-3④～⑨)では15～30枚の写真を撮ることに成功した。図ではクリープ曲線上の番号の時点で撮った写真を示した。グラフはクリープ応力に達した時刻を原点とした。

図5-3(a)①より、クリープ開始直後にすでに試験片の左側面上部が膨らんでいる様子と右側面の凹凸が確認できる。これは、試験片の側面を研磨しなかったためであると考えられる。3次クリープ開始直前(写真③)まではほとんど変化が見られないが、その後、写真④から⑨にかけて①で膨らんでいた左側面上部が徐々に張り出していく様子が観察された。右側面も少しづつ膨らんでいくが、左側面ほど顕著ではない。また、右側面については凹凸の形状は①からそれほど変化していない。写真からは上下端面付近の変化はほとんど見られなかつたが、中央部分の破壊が進行していく過程が観察された。実験終了後、試験片をベッセルから取り出して観察したところ、上下端面付近は健全であり中央の破壊した部分にめり込んでいる様子が確認できた。

図5-3(b)は応力レベル95%での結果であり、図5-3(a)と同様に①の時点で試験片の側面の凹凸がはっきりと観察される。その後、写真③から⑨にかけて、①で膨らんでいた左側面の中央付近が張り出していく様子が見られた。右側面に関しては①では中央部分が少しへこんでいるが、⑥でほぼ凹凸がなくなり、その後は逆に中央部分が膨らんでいる。実験終了後に取り出した試験片の上下端面付近はほぼ健全であり、図5-3(a)の試験片と同様に上下の部分が中央部分にめり込んでいる様子も少し見られた。

いずれの試験片でも1次クリープ、2次クリープの段階では見た目の変化はほとんどなかつたが、3次クリープ開始から破壊に至るまでの間で明瞭な変化が観察された。側面に関しては、クリープ試験開始直後の形状をほぼ保ったまま膨らんでいく試験片が多く見られた。

図5-4に試験片の高さ方向の各位置における横幅の経時変化を示す。これは図5-3と同じ試験片であり、図中の番号は図5-3の番号と一致する。図5-3のように試験片の上下端面付近はベッセルの金属板で隠れてしまい、横幅を測定することはできなかつた。試験片の横幅の算出は次

のように行った。まず実験を開始する前に、周圧が安定した状態でベッセル内の試験片を撮影し、上端から下端までの横幅の平均画素数を測定した。次に試験片の直径 25 mm をこの平均画素数で除し、横方向の分解能を算出した。各写真の横方向の画素数にこの分解能を乗じ横幅とした。

図 5-4 (a) ①では試験片の下端から約 12, 19, 26, 36 mm の位置での横幅が小さいが、これは図 5-3 の写真①の試験片の側面の形状とほぼ一致している。3 次クリープ開始直前の③までは試験片は上端から下端までほぼ一様に膨らんでおり、軸歪の変化が小さいのと同様に横方向変位も小さい。その後③から④にかけて、試験片の中央約 1 cm の部分の変位の増加が激しくなっている。この間は、軸歪の増加はそれほど大きくないにもかかわらず、横方向変位は急激に増加している。それ以降も中央部分は膨らみ続け、最終的には約 1.3 mm の変位が生じている。一方、上下端面付近の変化は小さく、特に上端面付近は 0.2 mm 程度しか変位が生じていない。

図 5-4 (b) では⑤までは上端から下端までほぼ一様に膨らんでいるが、⑤を越えると中央部分が大きく膨らみ、最終的には最大で約 2 mm の変位が生じている。一方、上下端面付近は変位が小さく、特に上端部はほとんど膨らんでいない。

5. 3. 2 軸歪と横歪

従来、周圧下でのクリープ試験で横歪を測定する際には、変位計を試験片の中央付近に設置しその部分の歪を測定することが多かった（齋藤ら、1998）。そこで本研究でも、試験片の中央部分の横歪に着目することにした。図 5-5 に各応力レベルでの軸歪および横歪の経時変化を示す。横歪は試験片の中央 1 mm の部分で測定した 25 点の値の平均値である。以後横歪と称するのはこのように測定した横歪を示す。いずれの応力レベルでも、ほとんどの試験片で横歪も軸歪と同様に 1 次、2 次、3 次クリープを経て破壊に至っている。これは従来の研究結果と定性的に同じであった（Kranz & Scholz, 1977）。

図 5-6 には軸歪および横歪と残存寿命の関係を示す。福井ら（1989）によると、サーボ試験機を用いたクリープ試験では、破壊直前に試験機の応答が追い付かず、応力が低下してしまい、破壊時刻が延びる。そのため、クリープでの破壊時刻を正確に決めることが難しいが、今回は、クリープ歪速度が $5 \times 10^{-4} / s$ の時を破壊時刻とした。なお、破壊時刻の取り方により数秒の差が現れるので、この点は今後の検討課題とする。応力レベル 95 % では短時間で破壊に至る試験片があったため、図では応力レベル 80 および 90 % の結果を示した。

図より、破壊に近付くと軸歪、横歪とも残存寿命の対数との間にほぼ直線的な関係が見られる。従来の研究では、一軸圧縮応力下で残存寿命が小さくなった時には、クリープ軸歪と残存寿命の対数との間に直線関係が成り立つという結果が報告されている（大久保、西松、1986）。今回の周圧下でのクリープ試験では、軸歪だけでなく横歪に関してもこれと似た結果が得られた。一方向からのみ写真撮影を行っているため、軸歪と比較して横歪のばらつきは大きいが、破壊時の横歪はその時点での軸歪とほぼ同じような値であった。

5. 4 まとめ

可視化ベッセルを用いてクリープ試験を行い破壊過程の観察に成功した。1次、2次クリープでの変形は非常に小さく、目視で変化を確認することは困難であったが、3次クリープでは試験片が膨らんでいく様子や中央部分が破壊していく様子を観察できた。横方向変位に関しては、従来は試験片の中央断面での測定がほとんどであったが、今回は写真を用いたため、試験片全体の変位を測定することができた。今後は、試験片の幅だけでなく左右両側面の形状の変化を測定する予定である。

従来の研究と同様に試験片の中央部分の横歪について検討したところ、横歪も軸歪と同じように、1次、2次、3次クリープを経て破壊に至ることがわかった。また破壊に近付くと、軸歪だけでなく横歪も残存寿命の対数に対してほぼ直線的に変化することがわかった。

周圧下でのクリープ試験で破壊直前の現象を論じた研究は少なく、今後も一軸応力下での実験結果と比較・検討を進めていく必要があると考えている。

参考文献

- 大久保誠介・福井勝則・羽柴公博（2002）：資源と素材，Vol.118，No.3,4，pp.165-170
斎藤敏明・村田澄彦・今村雅弘・笛尾春夫（1998）：資源と素材，Vol.114，No.12，pp.901-908
R.L.Kranz and C.H.Scholz (1977) : J. Geophys. Res., Vol.82, No.30, pp.4893-4898
福井勝則・大久保誠介・西松裕一（1989）：資源と素材，Vol.105，No.7，pp.527-531
大久保誠介・西松裕一（1986）：日本鉱業会誌，Vol.102，No.1181，pp.395-400

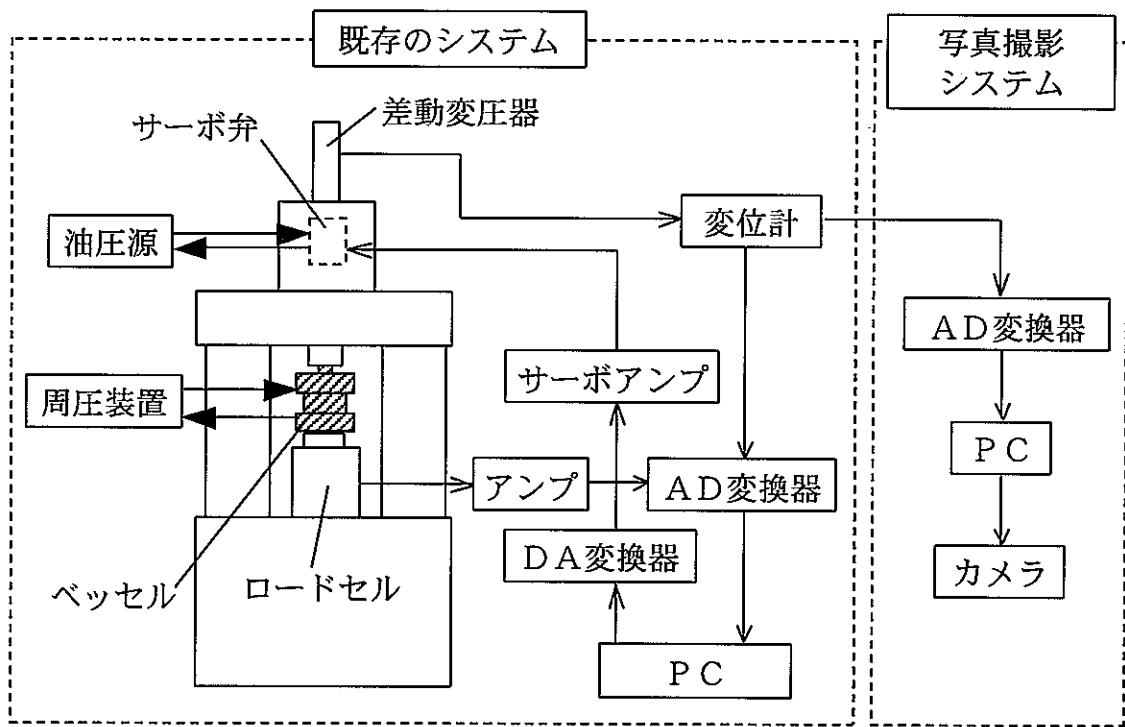


図 5-1 試験機の概略図

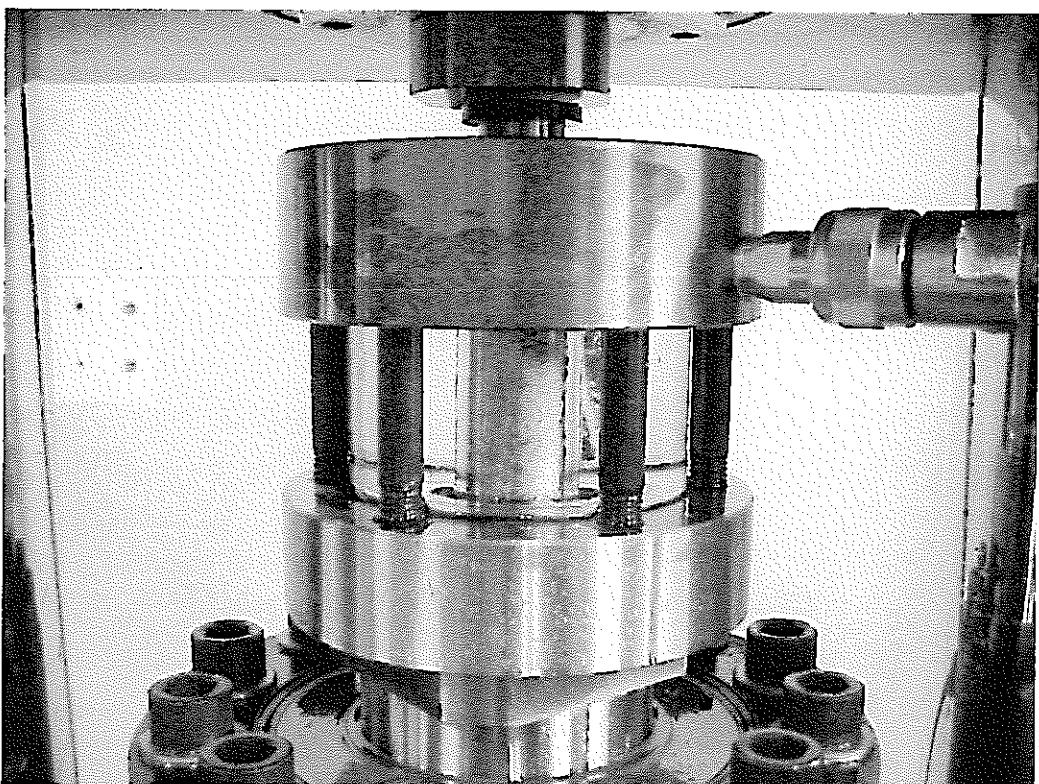
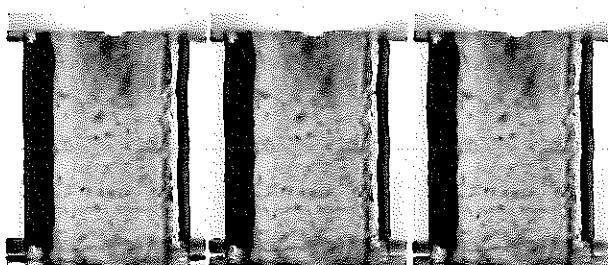
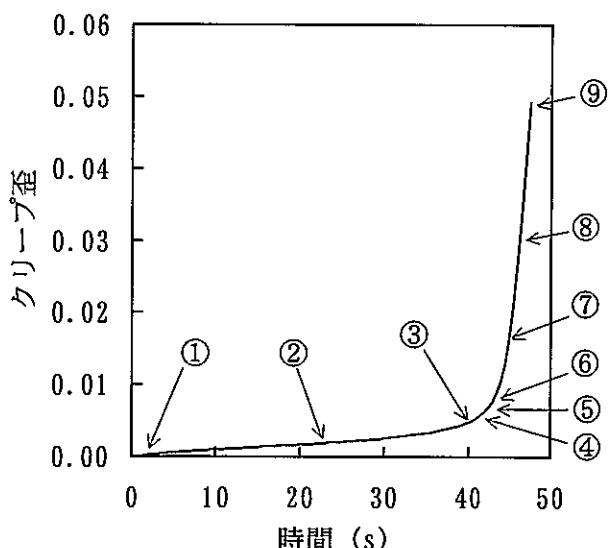
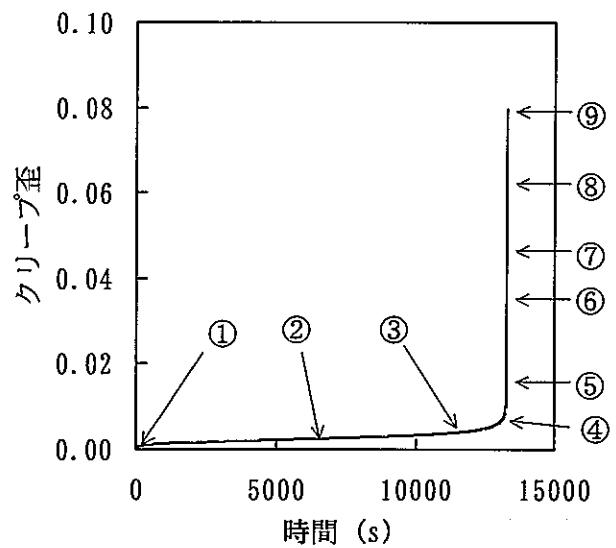


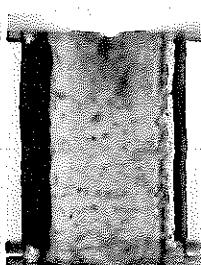
図5-2 ベッセルの写真



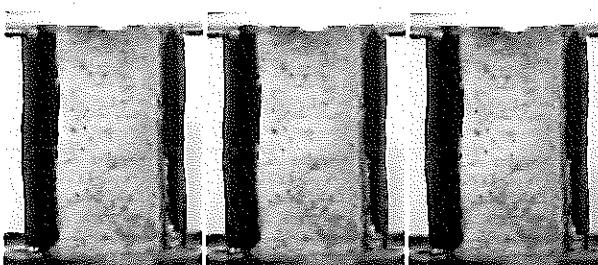
①2秒後



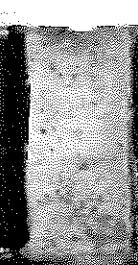
②6902秒後



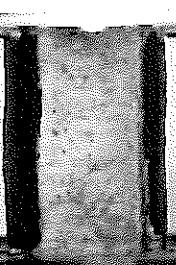
③12342秒後



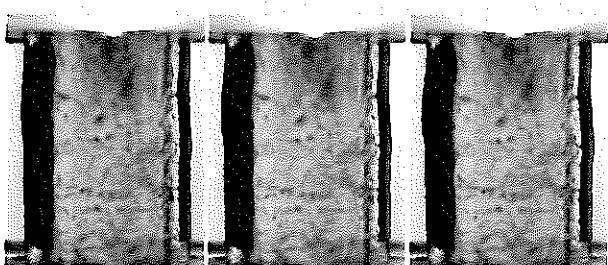
①2秒後



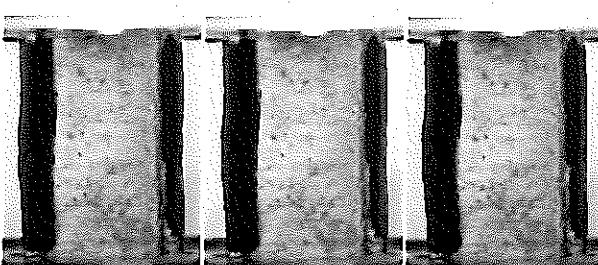
②23秒後



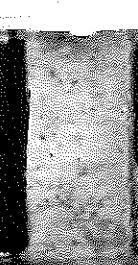
③41秒後



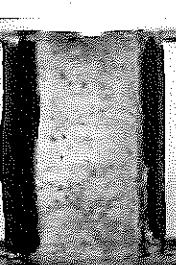
④13244秒後 ⑤13277秒後 ⑥13280秒後



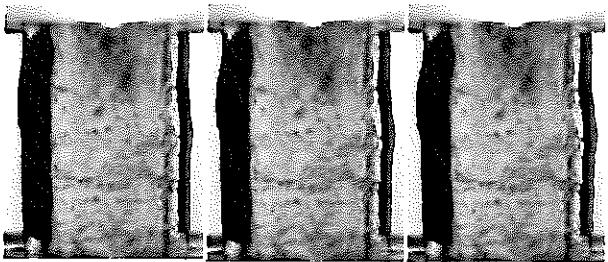
④42秒後



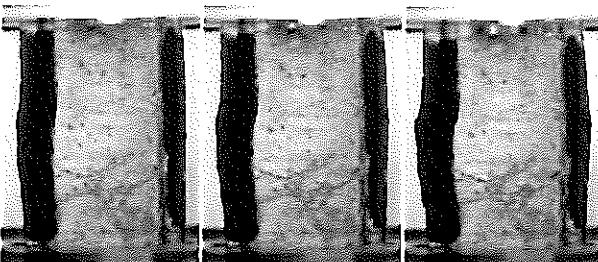
⑤43秒後



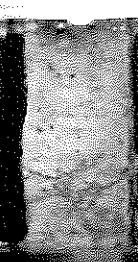
⑥44秒後



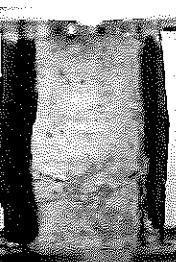
⑦13281秒後 ⑧13282秒後 ⑨13283秒後



⑦45秒後



⑧46秒後



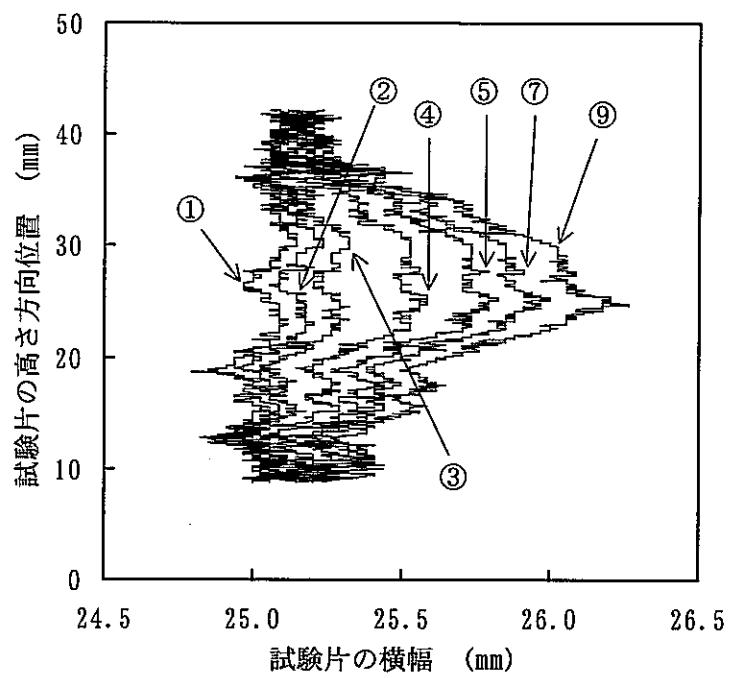
⑨47秒後

(a) 応力レベル 9.0 %

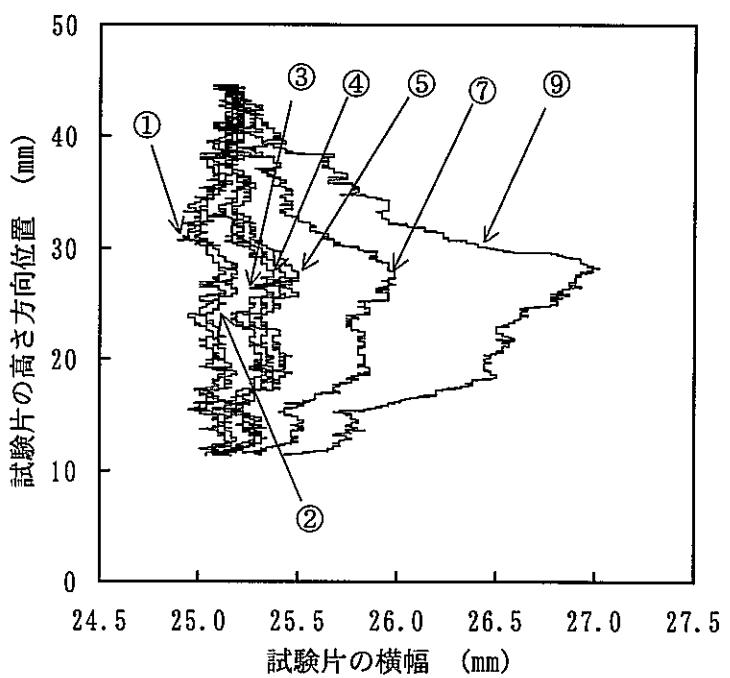
(b) 応力レベル 9.5 %

図5-3 クリープ曲線と連続写真(周圧3 MPa)

写真の秒数はクリープ開始からの経過時間

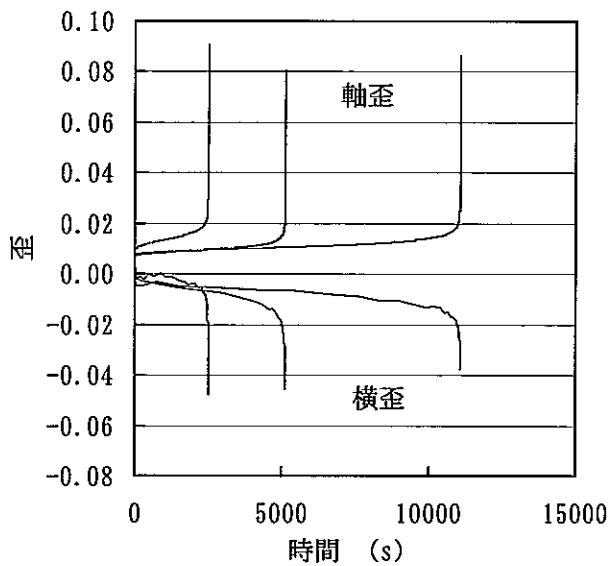


(a) 応力レベル 90 %

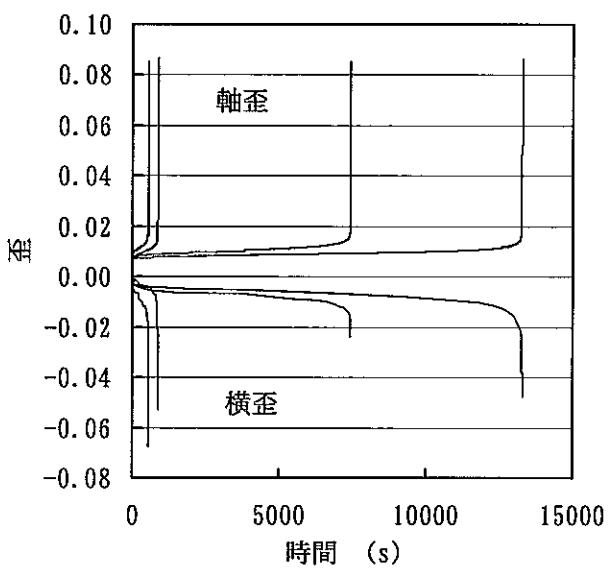


(b) 応力レベル 95 %

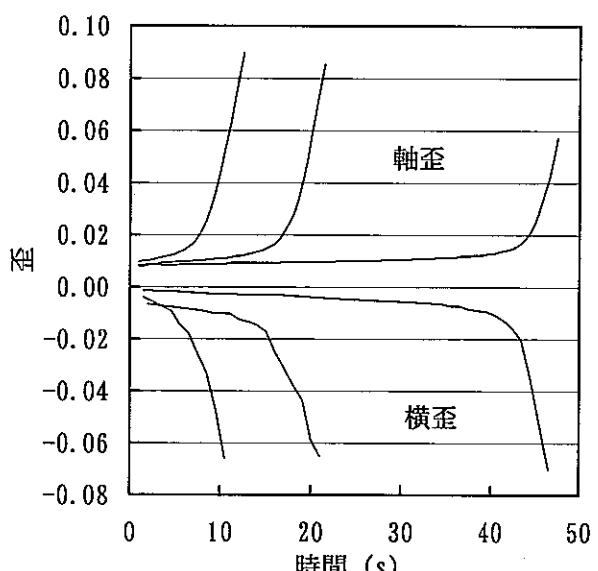
図 5-4 試験片の横幅の変化 (周圧 3 MPa)



(a) 応力レベル 80 %



(b) 応力レベル 90 %



(c) 応力レベル 95 %

図 5-5 軸歪および横歪の経時変化 (周圧 3 MPa)

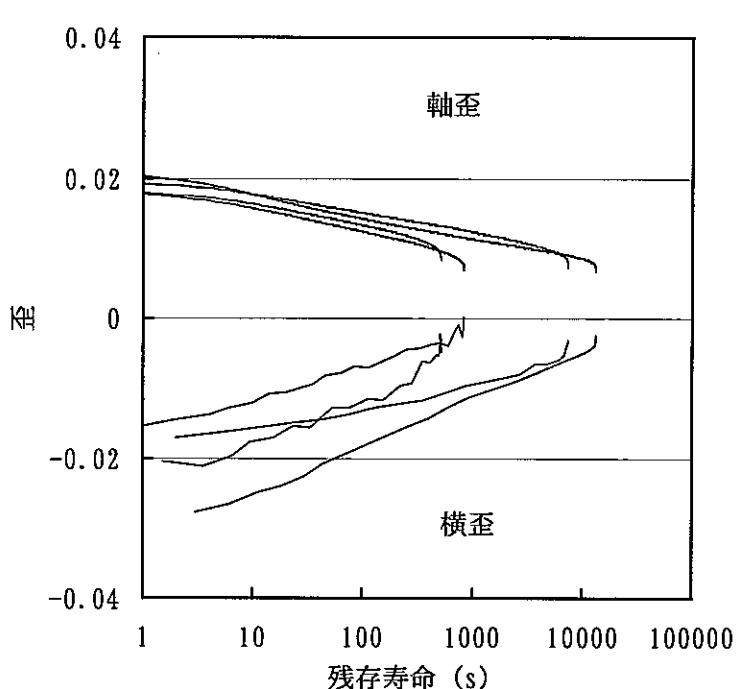
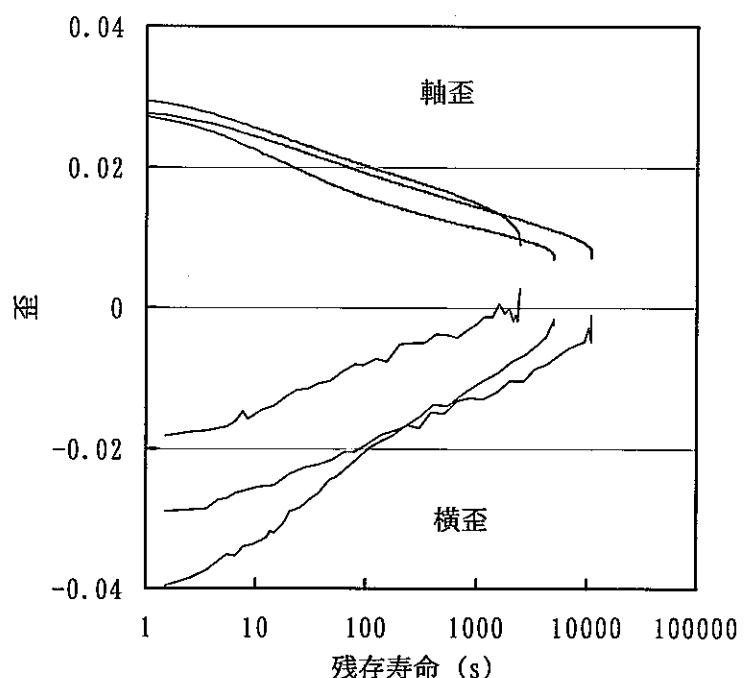


図 5-6 軸歪および横歪と残存寿命の関係 (周圧 3 MPa)

6. 中間温度領域におけるクリープ試験

6. 1 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°C)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、一昨年度の報告書を、油圧源とアクチュエータに関しては昨年度の報告書を参照されたい。

本年度の実験に先立ち、温度の設定を手動から、図6-1に示すように、計算機による目標の温度設定に変更した。計算機より温度調節計に対して目標信号を送り、その信号と熱電対で測定される温度の差に応じて、電力供給装置よりヒータに送る電流を調整することによって温度の制御を行った。

昨年度の報告書において、クリープ応力50%で、温度を2日ごとに40°C, 60°C, 80°Cと変化させた試験を行った時、80°Cの時点で2つの試験片がクリープ破壊した。このような低応力で破壊した原因は判然としないが、1つには次の要因が考えられた。試験片端面において、試験片の線膨張係数に比べて、ステンレス製のエンドピースの線膨張係数が 1.3×10^{-6} (1/°C)程度大きいため、40°Cの温度上昇(40°Cから80°C)では試験片に比べエンドピースで引張歪にして 5.2×10^{-6} の膨張が生じる。これは花崗岩の引張破壊時の歪にはほぼ等しい。試験では、クリープ応力を一定としたまま、温度を2日ごとに20°Cずつ上昇させたため、試験片はエンドピースの横方向に対する熱膨張に引きずられ、過度に引張歪が蓄積し、端面で引張破壊が生じた可能性も考えられた。そのため、材質のヤング率、線膨張係数の差に起因する応力集中を防ぐため、エンドピース、スペーサ、試験片の各接触面に図6-2に示すような潤滑剤(DAW CORNING 製MOLYKOTE G-n paste)を塗布することとした。

上記以外の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り、以下に示す。

・制御システム

- 1) アキュムレータにつなげ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) デジタル指示計は接点出力機能を持っており、最小圧力(1.0, 4.6 MPa)と最大圧力(10, 48 MPa)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6-3)と、給油側ニードルストップ弁2(図6-4)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1.0, 4.7 MPa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、容器温度を40°Cまで上昇させる。
- 5) 温度が40°Cになった後、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、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 温度を変化させたクリープ試験

試験片のばらつきの影響を避けるため、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試験を行った。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。

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20 mm×高さ40 mmの円柱形
- クリープ応力：100 MPa [一軸圧縮強度(205 MPa)の49%]
- 昇温時間：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。
- 試験時間：温度を一定にした後、各温度46時間維持(昇温時間とあわせ、2日とした)
- 温度条件：常温→40℃→60℃→80℃→60℃→40℃→約一ヶ月間繰り返し
- 試験数：4回

1) 試験番号1 (試験期間：4月22日から5月27日)

図6-5に試験番号1での歪および温度の経時変化を示す。温度が上昇すると歪が増加する傾向が見られる。これは昨年度の報告書で示したように、線膨張の相違により生じるみかけの歪の影響であり、20℃の変化で 200×10^{-6} のみかけ歪が生じる。図では、温度が20℃低下すると歪は減少しているが、 100×10^{-6} 程度と半分程度しか回復していない。これは昨年度の結果と異なっており、装置に何らかの異常が生じたものと判断できる。この原因を調べるために、載荷部を分解し調べたがはっきり検証はできなかった。ピストンの押しに比べて戻りの変位が小さくなっているため、温度履歴の影響によってピストンとシリング間に汚れが付着したと考えるのが妥当だと判断し、試験番号1の実験終了後、試験機を分解し、ピストンとシリング間の洗浄を行った。

実験装置が不良であったため、データに関しての信頼性は乏しいと思われるが、一回目の温度上昇過程では、40℃、60℃、80℃と一定の温度とした46時間に、それぞれ、 200×10^{-6} 、 45×10^{-6} 、 75×10^{-6} とクリープ歪が増加している。しかし、その後の温度一定段階においては明瞭なクリープ歪の増加はなく、ほぼ一定もしくは減少している。

昨年度の実験から、温度が20℃変化した際の歪変化を 200×10^{-6} とみなして、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6-6に示す。図6-6を見ると、瞬間にクリープ歪が増加もしくは減少しているように見え、この点からも装置の不良が伺える。

2) 試験番号2 (試験期間：6月11日から7月15日)

図6-7に試験番号2での歪および温度の経時変化を示す。試験番号1と同様に、図では温度を上昇させることによって歪が増加し、下降させることにより歪が減少している。温度を上昇させた際の、歪の変化は約 200×10^{-6} で安定しているが、80℃から60℃へ温度を下げた場合だけ、歪の変化は 150×10^{-6} と少ない。試験番号1に比べ、かなり改善したが、なお問題が残る結果となった。

一回目の温度上昇過程では、40℃、60℃、80℃と一定の温度とした46時間に、それぞれ

70×10^{-6} , 35×10^{-6} , 60×10^{-6} とクリープ歪が増加している。温度下降過程（ $80^{\circ}\text{C} \rightarrow 60^{\circ}\text{C} \rightarrow 40^{\circ}\text{C}$ ）の 60°C 及び、 40°C では、歪が下に凸の減少となる傾向がみられる。

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6-8に示す。ここでも、試験番号1と同様に、瞬間的にクリープ歪が増加もしくは減少しているように見える部分があるが、先ほどよりかは改善した様子がわかる。

3) 試験番号3（試験期間：8月26日から9月13日）

試験番号2の後、温度を変化させながらクリープ荷重を測定し、設定通りになっているかなど、様々な検討を行ったが、上記の原因がつかめなかつた。

本章で使用している油圧式クリープ試験機の載荷部のピストンとシリンダ間は油の漏れを極力防ぐため、かなり高い精度ではめ合わされている。そのため、一度分解すると、わずかな汚れが付着しても、ピストンとシリンダの間に抵抗が生じることが想定されたため、同一条件で何回か繰り返すことによって、汚れが取れ、特性が改善する可能性があると考え、同じ条件で再度実験を行つたのが、試験番号3である。

図6-9に試験番号3での歪および温度の経時変化を示す。この実験では、温度変化における歪の増減は、すべてほぼ 200×10^{-6} となっており、装置の改善が見られた。一回目の温度上昇過程では、 40°C , 60°C , 80°C と一定の温度とした46時間に、それぞれ 160×10^{-6} , 30×10^{-6} , 110×10^{-6} とクリープ歪が増加している。図6-10に温度によるみかけの歪変化を補正して求めたクリープ歪の経時変化を示す。各温度変化における歪変化が、ほぼ 200×10^{-6} となっているので、試験番号1, 2と異なり、クリープ歪はほぼ連続的に変化している。 $40^{\circ}\text{C} \rightarrow 60^{\circ}\text{C} \rightarrow 80^{\circ}\text{C} \rightarrow 60^{\circ}\text{C} \rightarrow 40^{\circ}\text{C}$ の温度変化を1回繰り返した後のクリープ歪は、 300×10^{-6} であり、2回目は、 50×10^{-6} 、と1回目の $1/6$ 程度となっている。

4) 試験番号4（試験期間：11月20日から12月26日）

試験番号3の終了後も、様々な装置の調整作業を行つた後、試験番号4の試験を行つた。

図6-11に試験番号4での歪および温度の経時変化を示す。なお、この試験片には実験の前に試験装置の調整のため、 80°C 前後までの温度履歴を数回与えている。図6-11では、温度変化における歪の増減は、ほぼ 200×10^{-6} となり、ほぼ実験装置は落ち着いたものと考える。一回目の温度上昇過程では、 40°C , 60°C , 80°C と一定の温度とした46時間に、それぞれ 10×10^{-6} , 90×10^{-6} , 30×10^{-6} とクリープ歪が増加している。試験番号1～3に比べ、クリープ歪が小さくなつたのは、 80°C 前後までの温度履歴を数回受けたためであると考えられる。図6-12に温度によるみかけの歪変化を補正して求めたクリープ歪の経時変化を示す。各温度変化における歪変化が、ほぼ 200×10^{-6} となっているので、試験番号3と同様にクリープ歪は連続的に変化している。以上のように、3, 4回目の結果より試験装置および計測システムはほぼ調整は終了したものと見なせる。

温度を変化させる試験を4回行つたが、装置の不良が現れたため、本年度はその調整に費やした。3, 4回目の結果よりほぼ試験機の調整は終わり、今後は信頼性の高いデータを得ることができるものと考える。

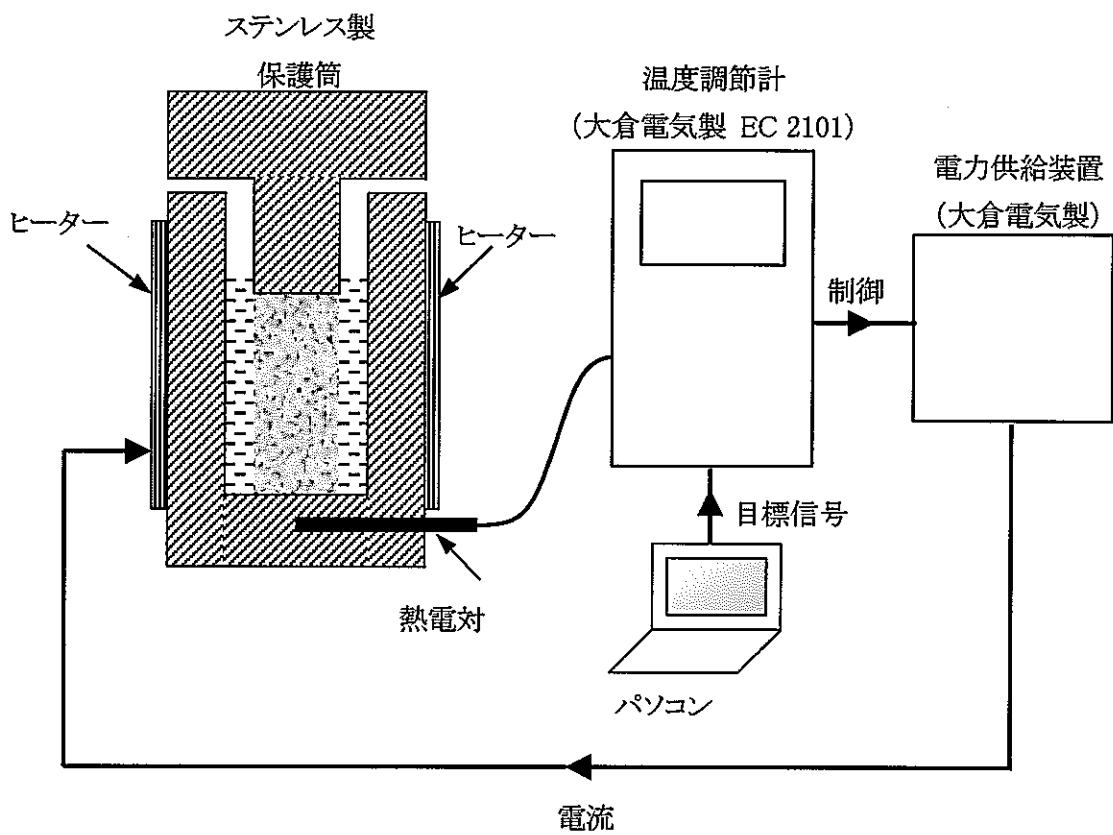


図 6－1　温度制御システムの概念図

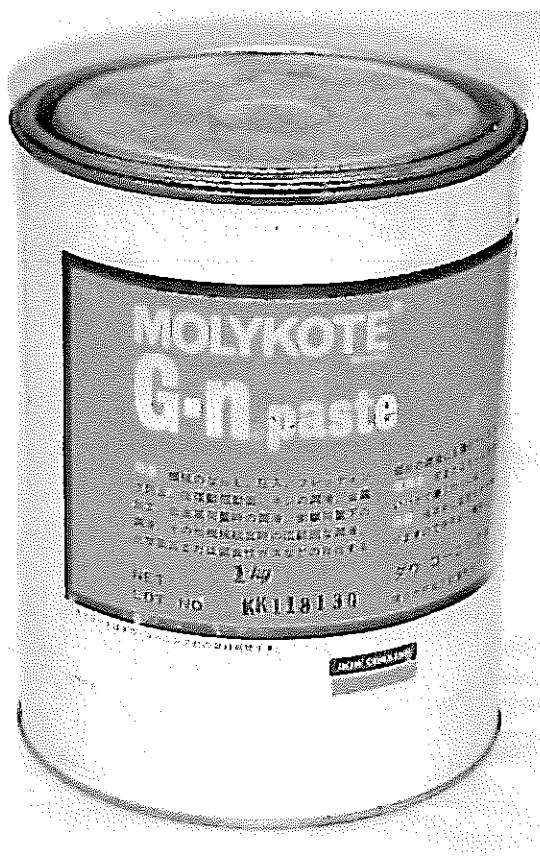


図6-2 潤滑剤 MOLYKOTE G-n paste

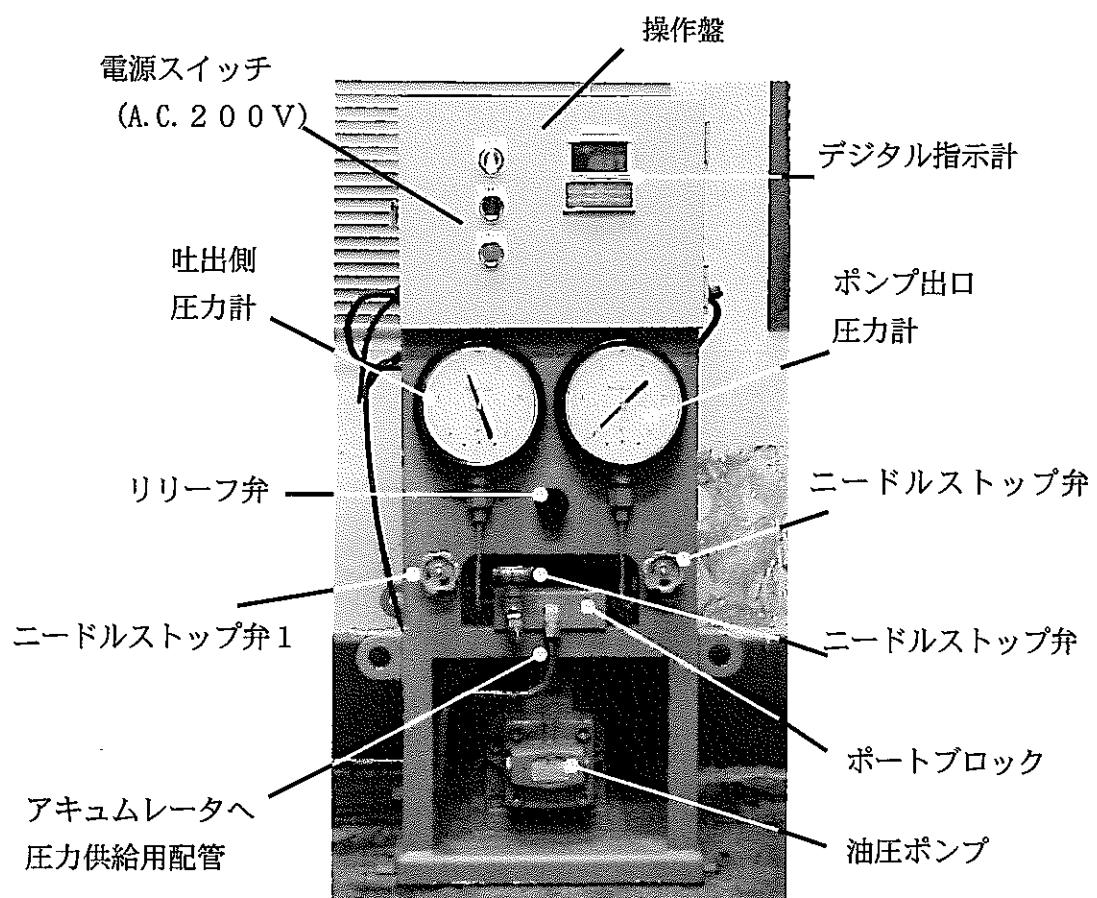


図 6-3 圧力源の写真（正面からの写真）

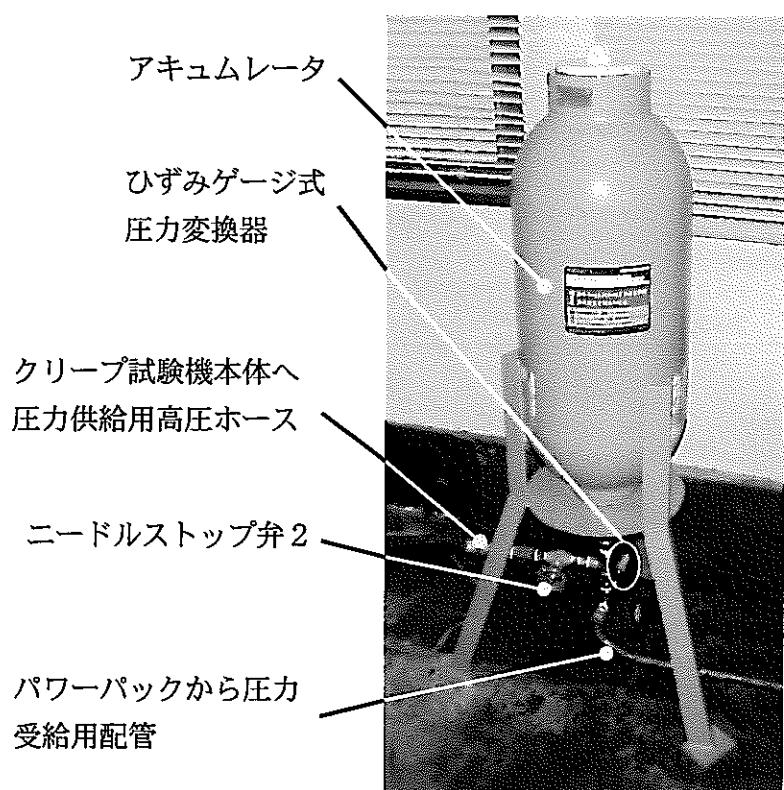


図 6-4 アキュムレータの写真

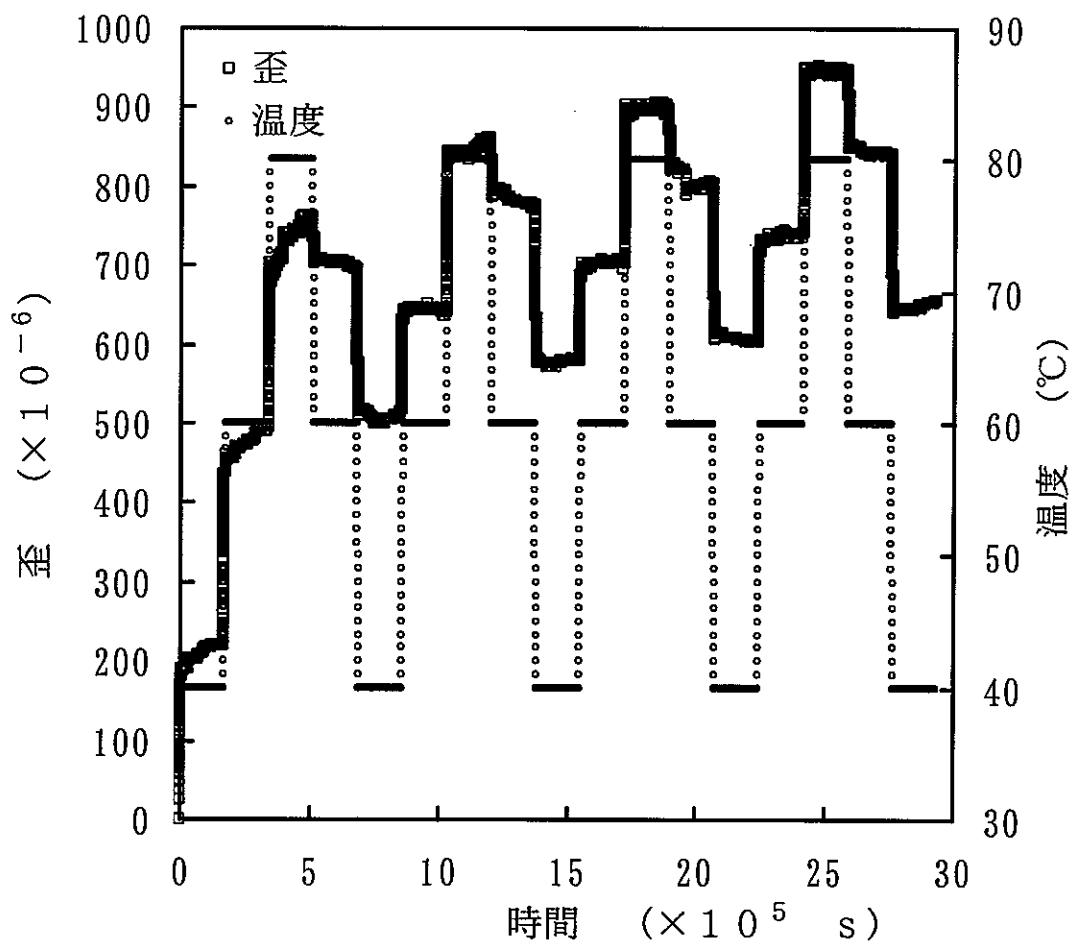


図6-5 クリープ歪と温度の経時変化（試験番号1）

岩石：稻田花崗岩

環境：湿潤状態

クリープ応力：100 MPa [一軸圧縮強度(205 MPa)の49%]

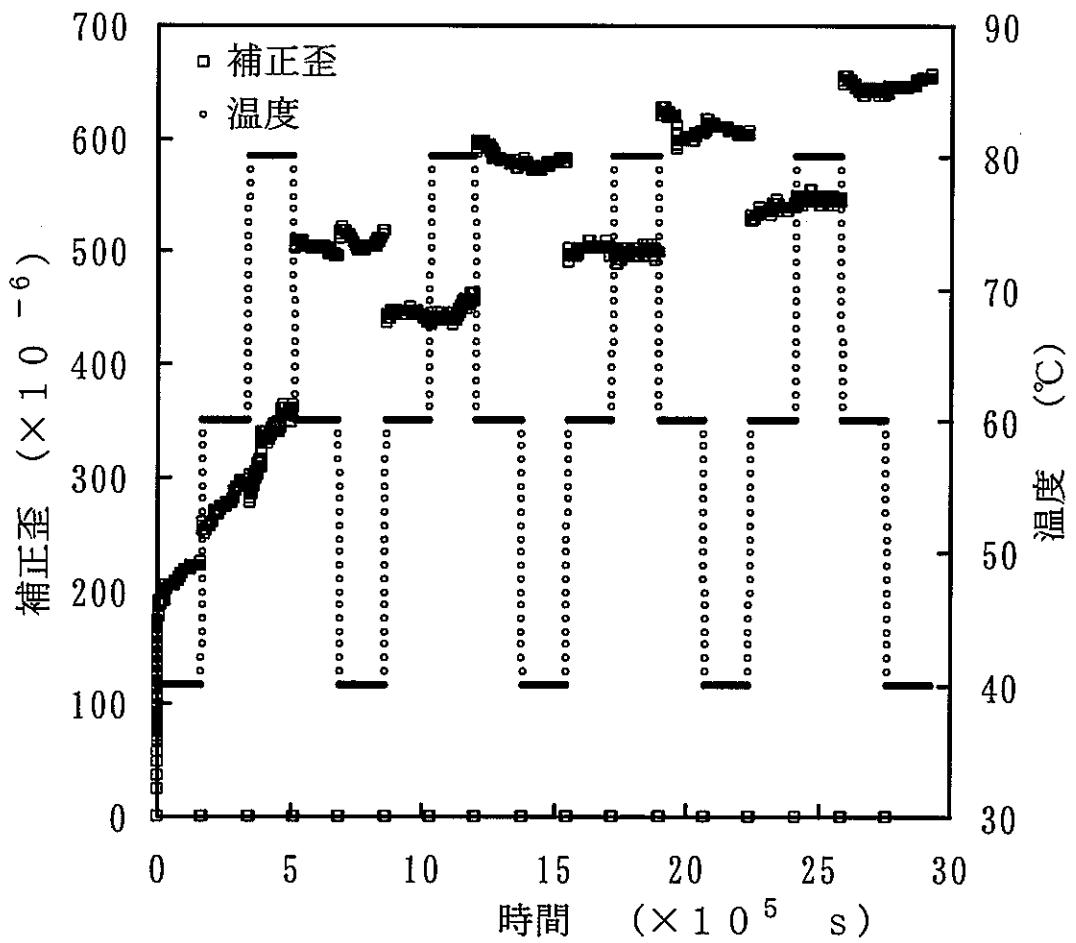


図 6-6 クリープ歪の経時変化（試験番号 1）

岩石：稻田花崗岩

環境：湿潤状態

クリープ応力：100 MPa [一軸圧縮強度 (205 MPa) の 49 %]

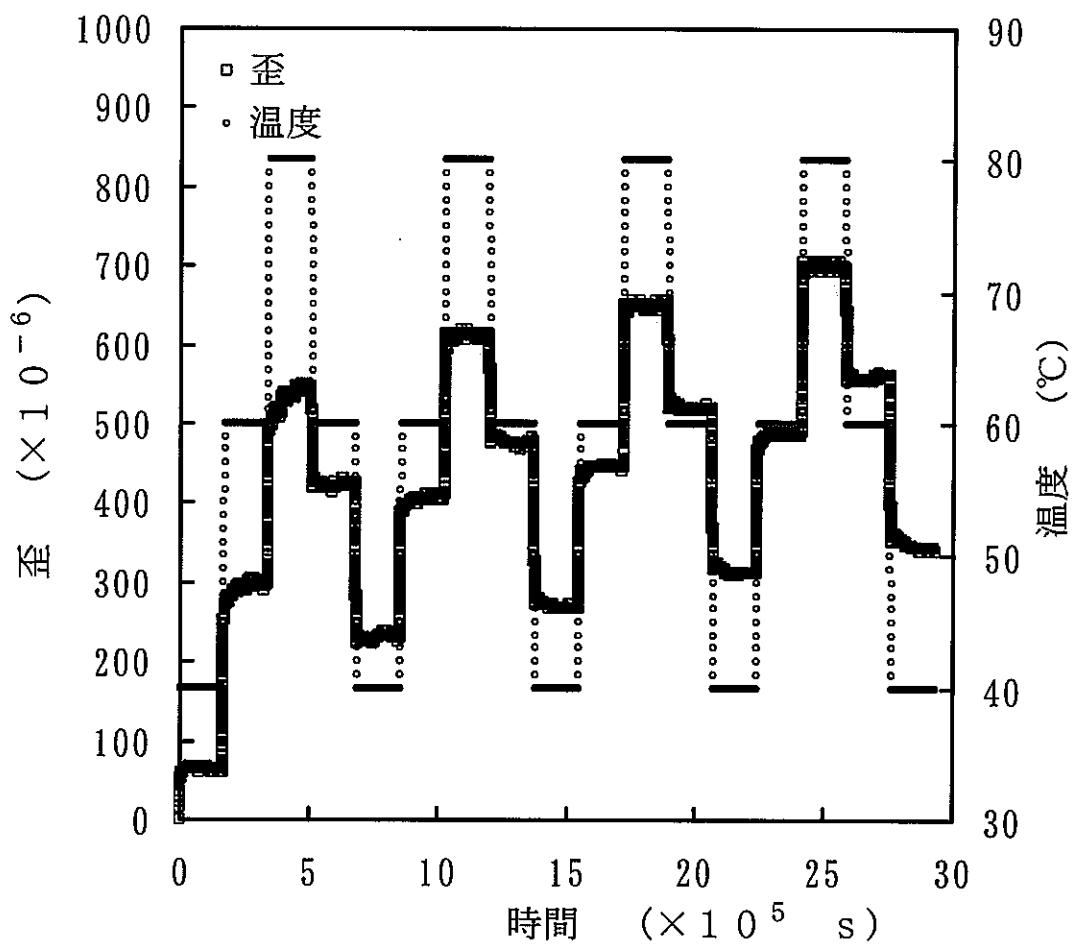


図 6-7 クリープ歪と温度の経時変化（試験番号 2）

岩石：稻田花崗岩

環境：湿潤状態

クリープ応力：100 MPa [一軸圧縮強度 (205 MPa) の 49 %]

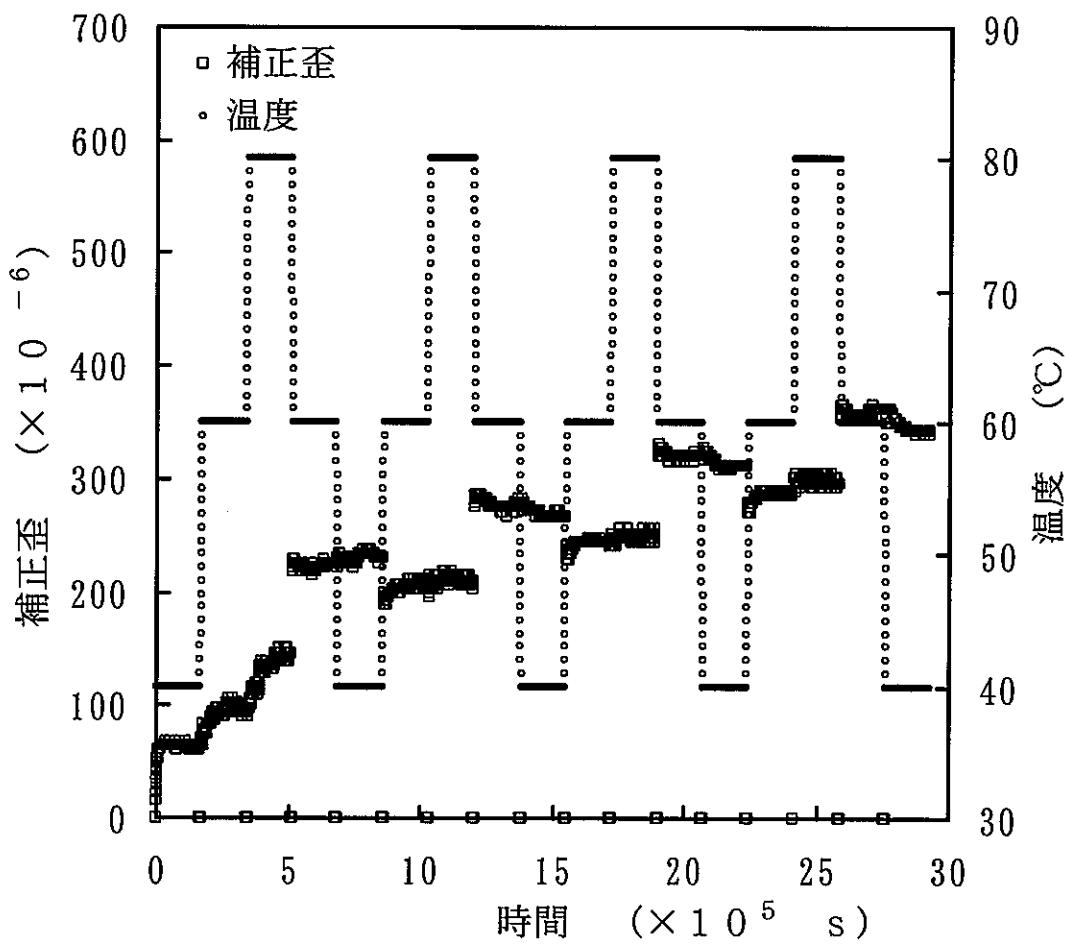


図6-8 クリープ歪の経時変化（試験番号2）

岩石：稻田花崗岩

環境：湿潤状態

クリープ応力：100 MPa [一軸圧縮強度(205 MPa)の49%]

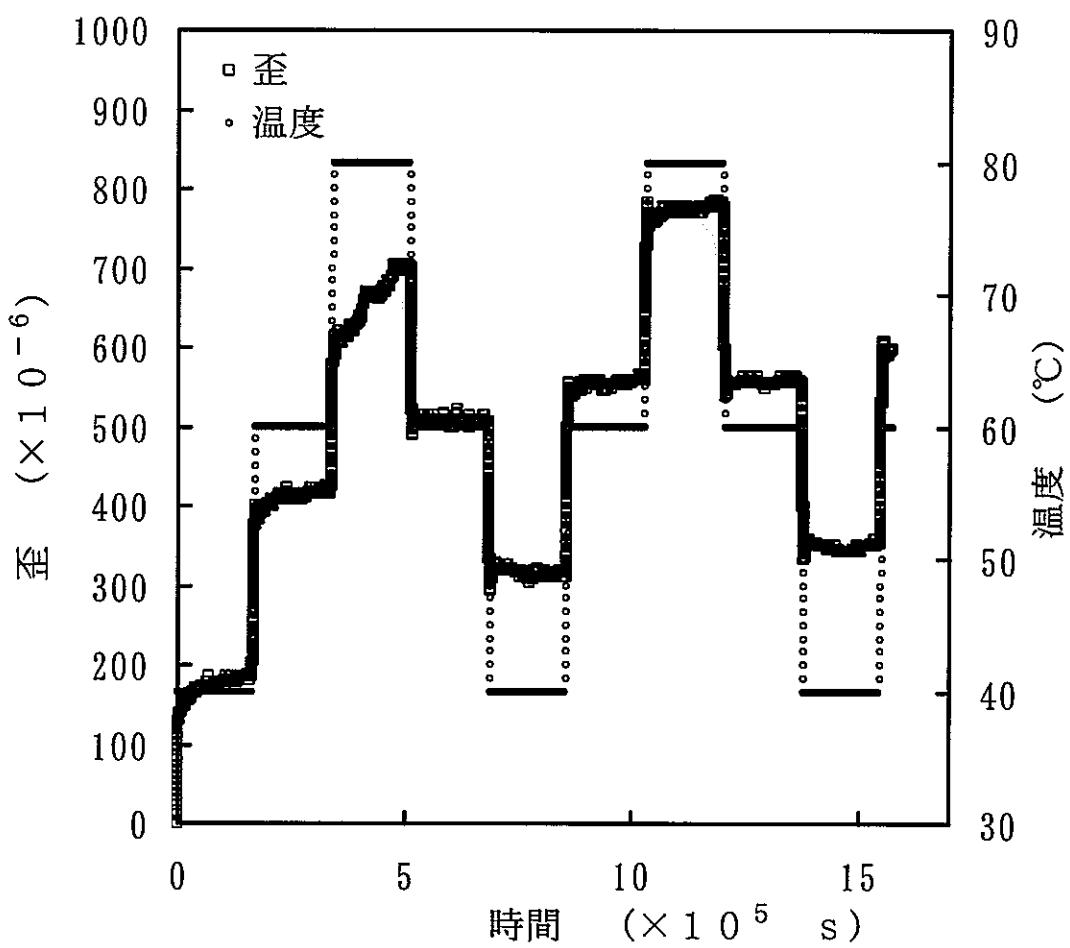


図6-9 クリープ歪と温度の経時変化（試験番号3）

岩石：稲田花崗岩

環境：湿潤状態

クリープ応力：100 MPa [一軸圧縮強度(205 MPa)の49%]

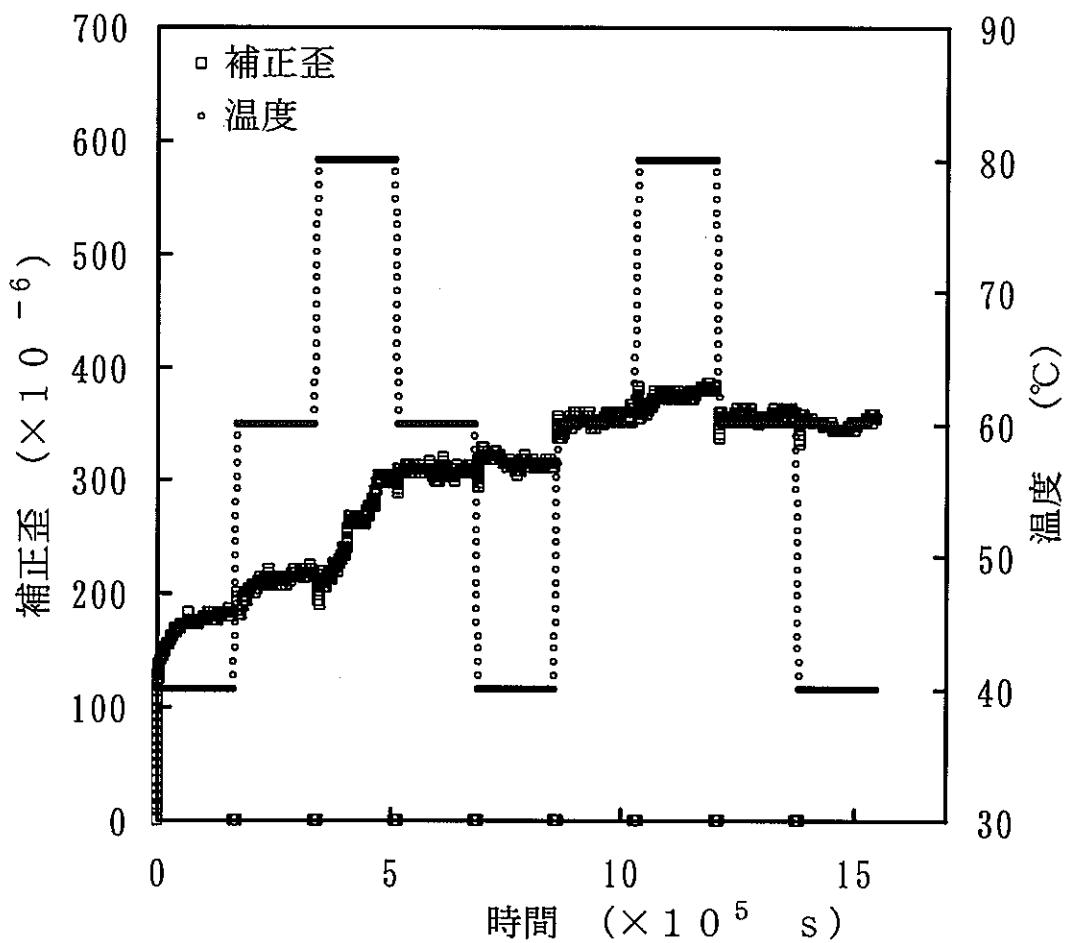


図6-10 クリープ歪の経時変化（試験番号3）

岩石：稲田花崗岩

環境：湿潤状態

クリープ応力：100 MPa [一軸圧縮強度(205 MPa)の49%]

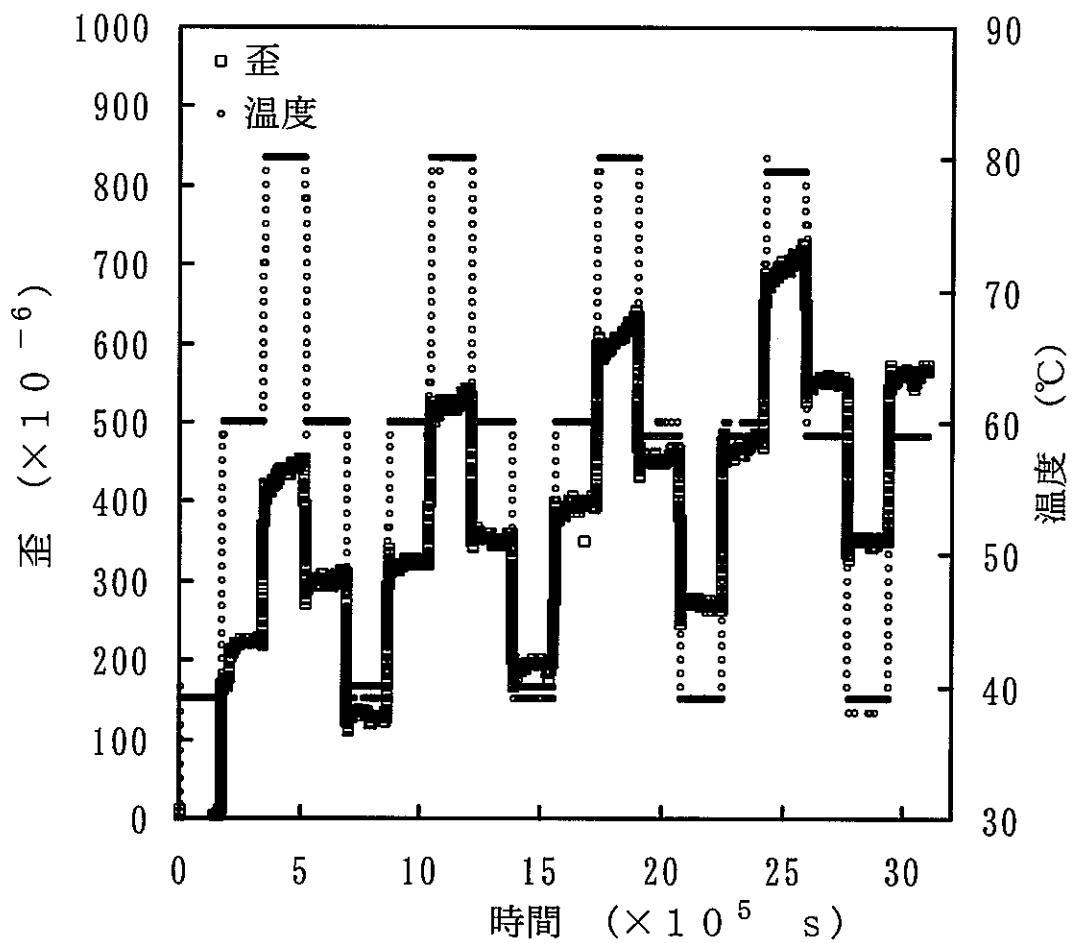


図 6-11 クリープ歪と温度の経時変化（試験番号 4）

岩石：稻田花崗岩

環境：湿潤状態

クリープ応力：100 MPa [一軸圧縮強度 (205 MPa) の 49 %]

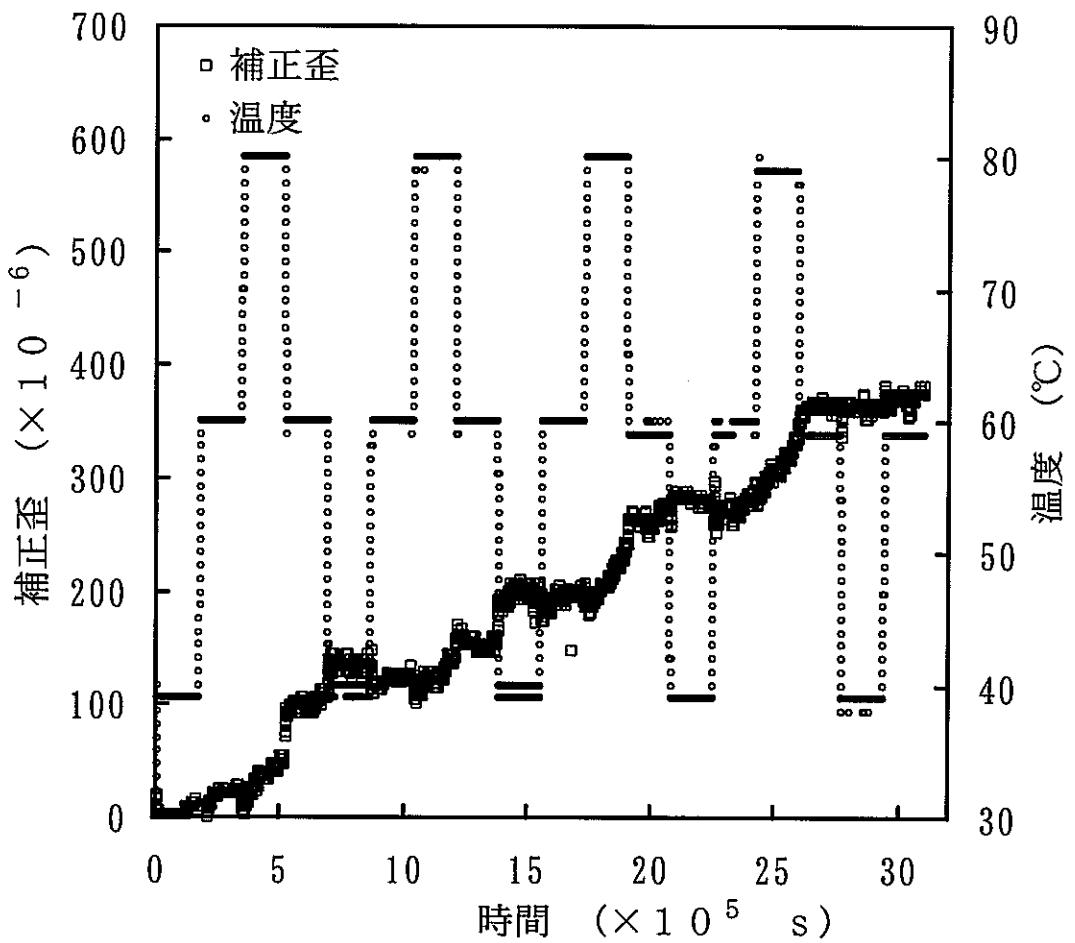


図 6-12 クリープ歪の経時変化（試験番号 4）

岩石：稻田花崗岩

環境：湿潤状態

クリープ応力: 100 MPa [一軸圧縮強度(205 MPa)の49%]

7. まとめ

平成14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5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いえる。実験結果をみると、特に目立った異常はなく順当な試験結果と思われる。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。なお、実験を開始してすでに約5.5年経過しているため、保守・管理についてある程度の経験が蓄積したし、計測方法の一部を変更したので、保守・管理および計測方法についても述べた。

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、稻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低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が必要なことがわかった。本年度は機器の選定・検定を再度行い、安定性を確認した上で約1ヶ月間のクリープ試験を行った。この程度の期間であれば測定機器のドリフトではなく、測定結果の信頼性はかなり高いことがわかった。気乾および湿潤状態で合計8本の試験片で試験を行った結果、約1ヶ月間で $50 \sim 150 \mu$ 程度のクリープ歪が生じることがわかった。ただし、載荷直後の計測システムの信頼性には課題が残った。この理由として、試験機の動特性の影響や変位計とシリンドラとの接触状況の影響などが考えられる。この点については今後の検討課題としたい。

第4章では、主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、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ると、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、これまでおこなってきたクリープ試験結果を参考しながら検討した。なお、周圧下での挙動は大切であるが、今回は一軸応力下に限って議論することにした。まず、以前おこなった一軸圧縮クリープ試験結果のうち、応力レベル77%でおこなわれた測定結果の1例から構成方程式のパラメータを求めた。求めたパラメータを構成方程式に代入して得られる計算結果と、応力レベル77%の全データや応力レベル87%における全データとを比較検討した。その結果、歪速度が時間経過とともに減少する1次クリープでも、歪速度が加速的に増大する3次クリープでも、測定結果と計算結果とはかなり良好な一致を示した。ただし、今回提案した構成方程式を、定歪速度試験など他の試験に応用した場合の検討、周圧下に拡張した場合の検討などが今後の課題として残っている。また、パラメータの数が増加したので、これらを求める手間が増えたことは確かである。今後、他の試験のデータも含めて、より合理的で確実なパラメータの求め方を探求する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。これまでの研究で、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。本年度は、この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。その結果、可視化ベッセルを用いてクリープ試験を行い破壊過程の観察が可能なことがわかった。1次、2次クリープでの変形は非常に小さく、目視で変化を確認することは困難であったが、3次クリープでは試験片が膨らんでいく様子や中央部分が破壊していく様子を観察できた。横方向変位に関しては、従来は試験片の中央断面での測定がほとんどであったが、今回は写真を用いたため、試験片全体の変位を測定することができた。今後は、試験片の幅だけでなく左右両側面の形状の変化を測定する予定である。

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検討結果について述べた。この研究は、昨年度に予備的検討をおこなったが、本年度も実験方法・装置に細かい改良を加えながら実験をおこなった。温度が上がると、わずかながらクリープ歪速度が増加する傾向がみられたが、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る。今後も試験方法と機器の見直しを進める予定である。