

# 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)

2001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)  
2001

## 長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究

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、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・載荷試験結果を行った。

昨年度は、田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行った。また、多連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。三城目安山岩を用いたせん断試験結果についても述べた。さらに、緩み領域の強度回復に関する基礎的検討に関して述べた。最後に、地圧関連の文献収集と地圧データベースについて検討を開始した。

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1300日に達しており、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時間依存性を解明するため、ヤング率の載荷依存性について検討した。第5章では、昨年度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、地圧関連の文献収集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：120D0113

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 地質環境特性研究グループ 武田 精悦

※：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 Tago tuff under water-saturated condition had been loaded in uniaxial condition in the pneumatic creep testing machine. In the fiscal year of 1995, the uniaxial compression and tension tests, and the short-term creep test of Inada granite were also carried out in the servo-controlled testing machines to obtain the complete stress-strain curves. A hydraulic creep testing machine which was planned to use in the next year was modified for long-term creep testing. Finally, a constitutive equation of variable compliance type was examined based on the experimental results. In the fiscal year of 1996, creep, compression and tension tests were carried out. Two types of pressure maintenance equipment (hydraulic and pneumatic types) were developed and examined. In the fiscal year of 1997, creep, compression and tension tests etc. were again carried out on the basis of the results heretofore. The experimental results of long-term creep testing of Tago tuff, middle-term creep testing of Inada granite were described. In both creep tests, samples were submerged in water. In the fiscal year of 1998, creep testing of Tago tuff was conducted. Results of relatively short-term (middle-term) creep conducted on a servo-controlled testing machine were also described. Sample rock was Sirahama sandstone that showed a considerably large creep strain in low stress level such as 17 % of the uniaxial compression strength. Results of triaxial compression test and uniaxial tension test including unloading-reloading tests were described.

In the fiscal year of 1999, creep testing of Tago tuff was continuously conducted. Design processes of a multi-cylinder hydraulic creep testing machine and a transparent triaxial cell were described. Direct shear testing of Sanjome andesite was conducted. Strength recovery of loosed area around a tunnel was discussed. Finally, data collection and database concerning rock pressure were described.

In this year, creep testing of Tago tuff reached to testing time of 1300 days 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). Loading rate dependency of Young's modulus 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, data collection concerning rock pressure was described (chapter 6).

---

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

Agreement No. : 120D0113

JNC Liaison: Tono Geoscience Center, Geoscience Research Group, Group Leader,  
Seietsu Takeda

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

# 目次

1. はじめに .....	1
2. クリープ試験 .....	4
2. 1 空圧式クリープ試験機による長期クリープ試験 .....	4
2. 2 空圧式クリープ試験機における計測用プログラム .....	5
2. 3 熱クリープ試験機の開発と試用 .....	6
2. 3. 1 試験機の概要と試験方法 .....	6
2. 3. 2 予備的試験結果 .....	7
3. 結晶質岩用多連油圧式クリープ試験機による試験 .....	25
3. 1 载荷方法の改良と予備試験 .....	25
3. 2 本試験結果 .....	26
4. 低応力レベルにおける時間依存性とヤング率の载荷速度依存性 .....	30
4. 1 はじめに .....	30
4. 2 新しい実験法 .....	31
4. 2. 1 実験方法 .....	31
4. 2. 2 実験結果 .....	32
4. 3 ヤング率の载荷速度依存性 .....	32
4. 3. 1 三城目安山岩 .....	32
4. 3. 2 速度依存性が認められた3岩石(来待砂岩, 田下凝灰岩, 大谷石) .....	34
4. 3. 3 载荷速度依存性が確認できなかった3岩石(秋吉大理石, 稲田花崗岩, 白浜砂岩) .....	35
4. 4 構成方程式による検討 .....	36
4. 5 まとめ .....	39
参考文献 .....	41
5. 可視化周圧ベッセルによる三軸圧縮試験 .....	61
6. 地圧データベース .....	126
本年収集した文献のリスト .....	127
7. まとめ .....	133

## 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（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1300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。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、昨年度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。1998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。1998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、昨年度4連の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、現在は順調に稼動している。

第4章では、低応力レベルにおける時間依存性とヤング率の载荷速度依存性について述べた。ごく最近になって、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、従来より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することにした。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。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、定歪速度試験を行い、50%割線ヤング率の载荷速度依存性に特に注目して実験的研究をおこなった。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载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。

第5章で、昨年度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。

第6章では、地圧データベース構築に向けた基礎資料の収集結果について述べる。



## 2. クリープ試験

### 2. 1 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 3.5 年経過した、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、前回（平成 8 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

本年度も試験は順調に実施されており、クリープ試験を開始して 1 s 後の歪を起点として、歪の経時変化を示したのが図 2-1 である。図では平成 12 年 12 月 31 日の時点までの結果を示しており、試験開始後約 1300 日 ( $1.14 \times 10^8$  s) 経過している。現在のクリープ歪は、 $600 \times 10^{-6}$  である。普通軸で表現した場合、クリープ歪みが  $400 \times 10^{-6}$  までは瞬間的に増加し、それ以降、徐々に増加している傾向が見受けられる。

次に、歪の経時変化を片対数グラフ上に示したのが図 2-2 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おり、対数クリープ則からずれ始めていることがわかる。 $10^5$  s 以降も最初の傾きで対数クリープ則が成立しているとして直線部を延長して見ると、クリープ歪は  $400 \times 10^{-6}$  程度であり、約 1.5 倍のクリープ歪 ( $600 \times 10^{-6}$ ) となっている。

次に図 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 2-1 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ることがわかる。また、クリープ歪にして  $200 \times 10^{-6}$  (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。現在のクリープ歪速度は、約  $10^{-12} \text{ s}^{-1}$  であり、クリープ歪の増加によって、今後どの程度までクリープ歪速度が低下するかが、長期クリープ試験での重要な問題である。すなわち、クリープ歪速度が減少しなくなると（ほぼ一定に近くなると）、二次クリープ状態となり、一定となったクリープ歪と時間の積がクリープ歪となるため、長期でみた場合、かなりのクリープ歪が発生することとなる。なお、歪速度で  $10^{-9} \text{ s}^{-1}$  となった以降では、クリープ歪速度が振動しているように見えるが、これは長期観測における温度変化などの影響によるものであると考えられる。

今後も、クリープ歪速度に注目しながら、このまま実験を行っていく予定である。

## 2. 2 空圧式クリープ試験機における計測用プログラム

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 6 4 4 1 A)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).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.

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 GPIB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に 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f1をお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に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,f1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(f1でデータのセーブ,f2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 GPIBからのデータの呼び出し

200行目 デジボルの値を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。

240行目 GPIB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 デジボルの値を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  $V \geq V_{max}$ 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

## 2.3 熱クリープ試験機の開発と試用

### 2.3.1 試験機の概要と試験方法

今までは、常温でのクリープ試験を行ってきたが、本節では常温より高い温度下でのクリープ試験を行うために、装置の改良と試用した結果について述べる。

試験で扱う温度であるが、大気圧下で100℃以上となると、水の影響が大きく変化するため、ここでは100℃以下を考え、試験機を構成することとした。

熱クリープ試験機としては、油圧式クリープ試験機（試験機の詳細は1996年3月報告書PNC PJ1602 96-004を参照されたい）に、設定した温度で制御できる装置を付加することとした。

油圧式クリープ試験機では、試験片をステンレス製保護筒に入れて試験を行う形をとっているため、この保護筒を設定温度になるように制御することとした。

温度の制御システム概念図を図2-4に示す。ステンレス製保護筒のまわりには、ヒーターがまかれており、電力供給装置からの電力によって温度を上昇させることができる。ステンレス製保護筒内の温度を測定する、熱電対（E型）からの出力は、温度調節計（大倉電気製EC2101）に取り込まれる。温度調節計では、設定の温度に制御するために、PID制御により電力供給装置を制御する。以上のようなシステムで、設定温度に制御するしくみとなっている。

図2-5(a)、(b)にステンレス製保護筒の写真を示す。2枚の写真は角度を変えて撮影したものである。図2-6に温度調節計の写真、表2-2に温度調節計の仕様を示す。図2-6の最上段の数字が熱電対で測定したステンレス製保護筒の温度であり、その下の80.0という数字が、設定温度である。PID制御上の変数であるゲインとして、試行錯誤の結果、比例ゲイン(P)は

20%, 積分時間 (I) は 6 分, 微分時間 (D) は 1 分とした. 電力供給装置の写真を図 2-7, 熱電対の写真を図 2-8 に示す.

試験においての手順を以下に示す.

- 1) 保護筒に試験片を挿入し, その中に水を注入する (湿潤状態での試験を想定). 水の蒸発を防ぐために, そのうえに油を 2, 3 滴垂らす.
- 2) 保護筒を載荷装置内にセットする.
- 3) 温度調節計を ON にして, 設定温度となるまで, 保護筒を加温する. 常温から 80℃ となるまでの時間として, 約 2 時間程度を要した. この程度の温度上昇であれば, 試料岩石にあたえる損傷はほばないものと考えられる. そのあと, 保護筒内の温度が一定となるまで, そのまま放置した. 岩石の場合, 熱伝導率が小さいため, 内部まで温度が一定となるまでしばらく時間が必要である. 今回使用した, 直径 2cm, 高さ 4cm の試験片では寸法が小さいため, 比較的早く内部の温度は上昇するが, 余裕を見て, 4 時間程度は放置することとした.
- 4) クリープ試験を開始する.

図 2-5 に示したステンレス保護筒では, ヒーターによって, 全体的に温度が上昇する. その周辺では, ある程度の温度上昇によって, 放熱と釣り合う形で温度はほば一定となる. ダブルカンチレバー式の変位計も同様に温度上昇が生じるため, 安定となるまで見かけ上, 変位が現れるように見えるが, 安定となった状態ではほば一定の値となる. なお, 従来, 変位計の出力を直流増幅器で電圧信号に変換していたが, 温度を上げた場合, 雑音が大きくなったため, 交流増幅器 (共和電業製 DPM306) に変更した.

### 2. 3. 2 予備的試験結果

改良した試験を用いて, 予備的に実験を行った. 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 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%]
- 試験時間: 126 時間
- 試験数: 1 本

クリープ歪の経時変化を図 2-9 に示す. 図では  $10^4$  s 程度までは, ほば対数表示した時間に対して, 直線的にクリープ歪は増加しており, その後, わずかに傾きが大きくなっている傾向が見られる. これらの傾向は, 従来の常温での結果とほぼ同じである.

クリープ歪速度の経時変化を両対数グラフで示したのが, 図 2-10 である. 図では, ほぼ -1 の傾きでクリープ歪速度が減少している様子がわかる.

図 2-11 は, クリープ歪とクリープ歪速度の関係であるが, クリープ歪と, 対数表示したクリープ歪速度の関係は, 若干, 振動しているようにもみえるが, ほぼ直線的である.

以上のように、80℃での結果は、定性的にはほぼ常温での結果と同様の結果となった。

1998年3月報告書（PNC TJ1602 98-004）では、クリープ応力が同じで、温度が常温での結果を示したが、 $10^5$  s 経過した時のクリープ歪は  $1.0\sim 1.6\times 10^{-4}$  である。80℃である、本結果では  $2.0\times 10^{-4}$  とわずかに増加している傾向が見られる。ただし、今回は試験装置の試用を目的としていたため、1回の試験しか行っていないので、これ以上の議論は今後データを蓄積したうえで行いたいと考える。

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

```

表 2 - 2 温度調整計の仕様

入力	
入力	熱電対 R, K, J, E, B, T, W WRe26
	測温抵抗体 Pt100Ω, 電圧, 電流
入力インピーダンス	500KΩ (熱電対, 電圧入力)
バーンアウト	内蔵 (熱電対, mV)
測定値表示	
表示	3桁または3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> 桁
指示範囲	全目盛り範囲
指示精度	±0.25%FS, ±1digit
	ただし B は 600℃以上 W-WRe26 は 800℃以上
偏差指示	
指示範囲	-1~+1mV (-10~+10%)
設定	
設定方式	3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> 桁, 4桁, 4 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> 桁 デジタル設定
設定精度	±0.25%FS
リモート/ローカル切換え	スイッチ切換えまたは外部接点信号切換え
リモート入力	0~5VDC
リモート入力インピーダンス	500KΩ
測定値出力	
出力信号	0~5VDC (熱電対, 測温抵抗体入力 リニアライズ付)
出力インピーダンス	10Ω以下
調節動作	
制御方式	PID
比例帯 (P)	0.5~50%
積分時間 (I)	0.5~10min (リセットロックアウト付)
微分時間 (D)	0~5min
出力	
出力信号	4~20mADC
負荷抵抗	0~600Ω
出力指示範囲	0~100%



自動→手動切換え スイッチ切換え	手動→自動 バランスレス, バンプレス切換え
手動調節範囲	0~100% (4~20mADC)
警報	
警報出力	リレー接点出力
出力接点容量	250VAC 1A (抵抗負荷)
表示	ランプ
警報設定範囲	上限 0~100% (デジタル指示の場合) 下限 0~100% (デジタル指示の場合)
	上限 0~+10% (偏差指示の場合) 下限 0~-10% (偏差指示の場合)
警報校正信号設定範囲	0~100% (デジタル指示の場合) -10~+10% (偏差指示の場合) 注) 偏差警報は±5mV 直流電圧入力の場合.
電源	100V/200VAC または 115V/220VAC ±10% 50/60Hz
消費電力	約 8.5VA
周囲温度	-10~+50℃
重量	約 3kg

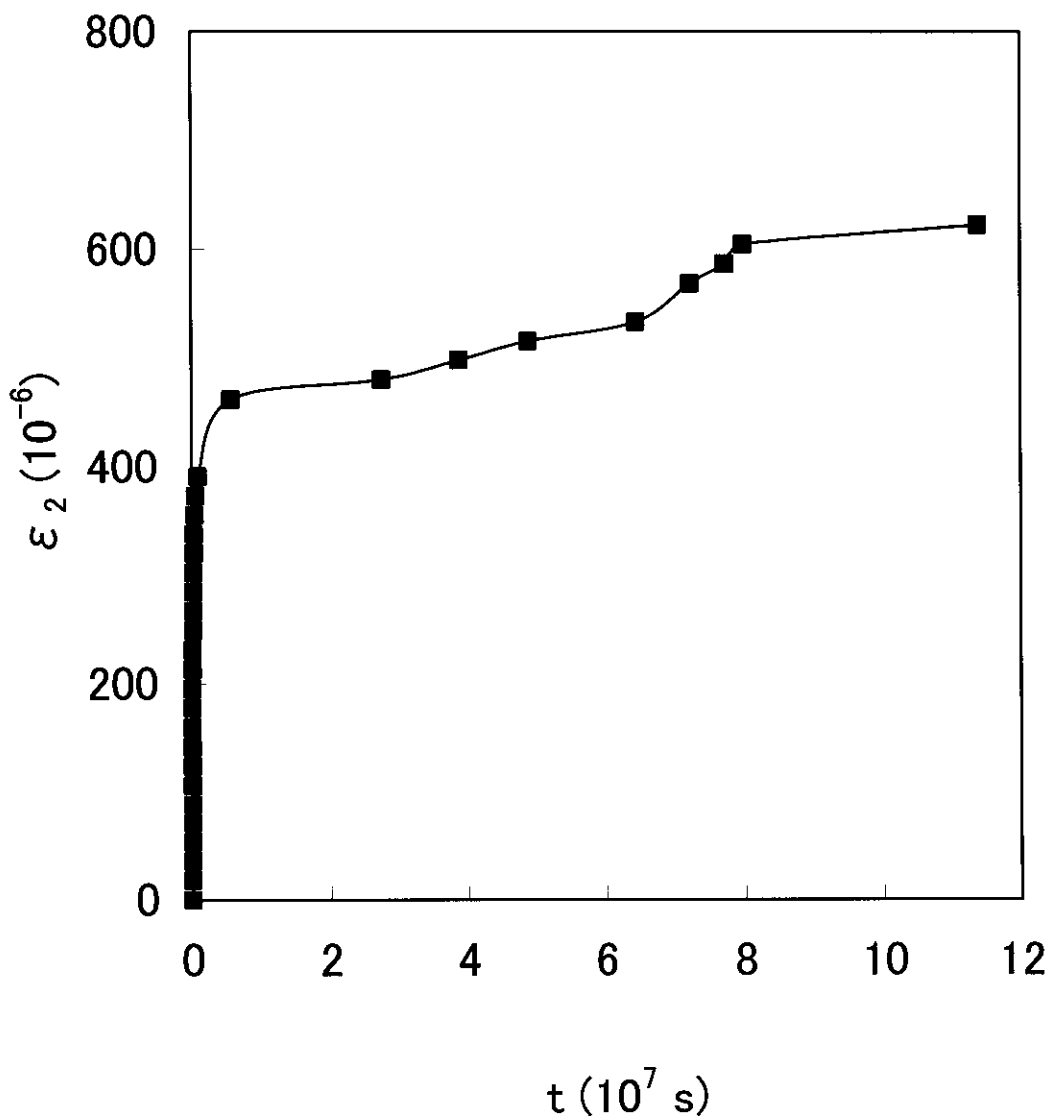


図2-1 クリープ歪の経時変化  
 岩石：田下凝灰岩  
 環境：湿潤状態  
 クリープ応力：一軸圧縮強度(9.1MPa)の30%  
 試験開始：平成9年5月23日

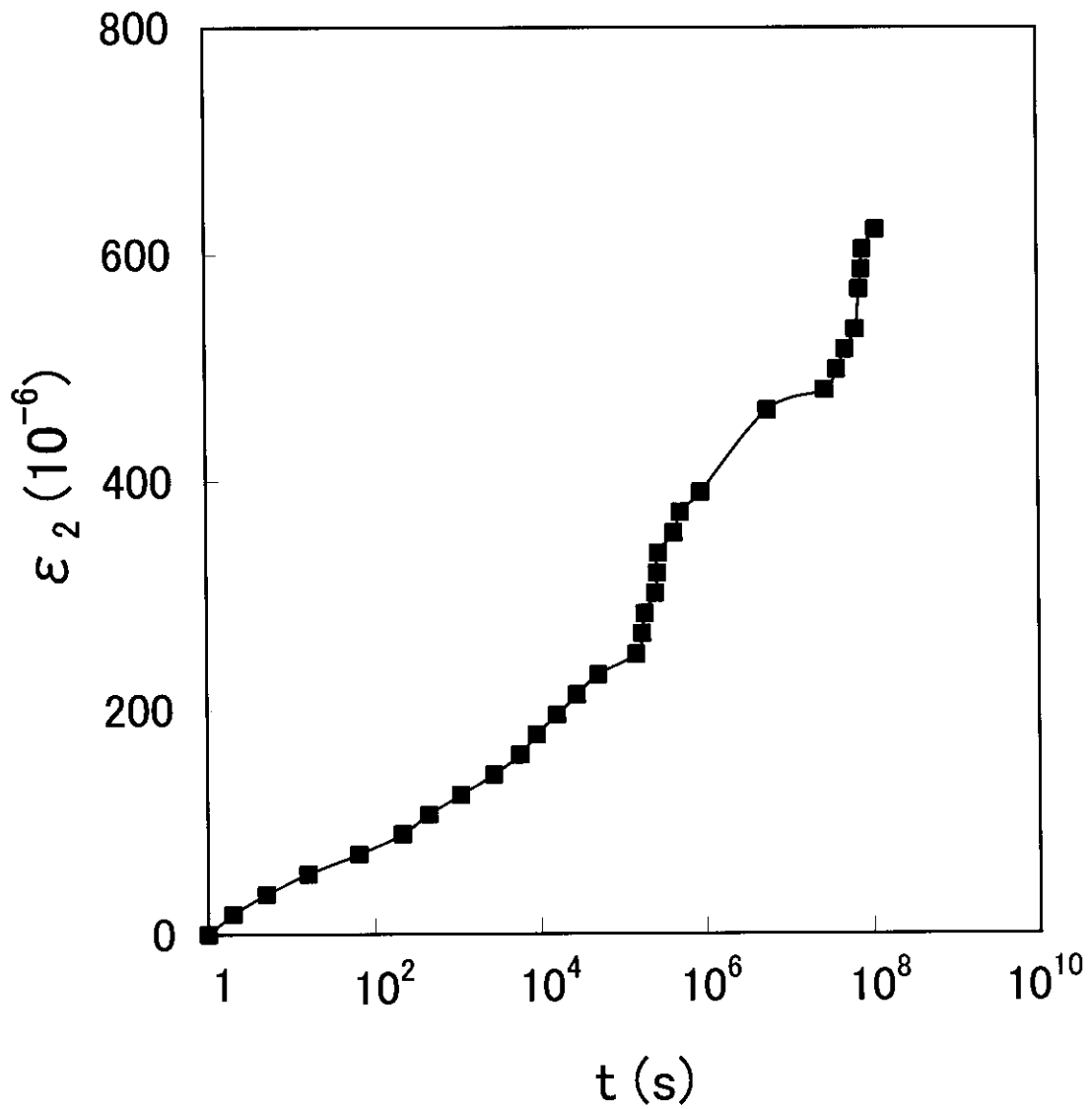


図 2-2 クリープ歪の経時変化  
 岩石：田下凝灰岩  
 環境：湿潤状態  
 クリープ応力：一軸圧縮強度(9.1MPa)の 30%  
 試験開始：平成 9 年 5 月 23 日

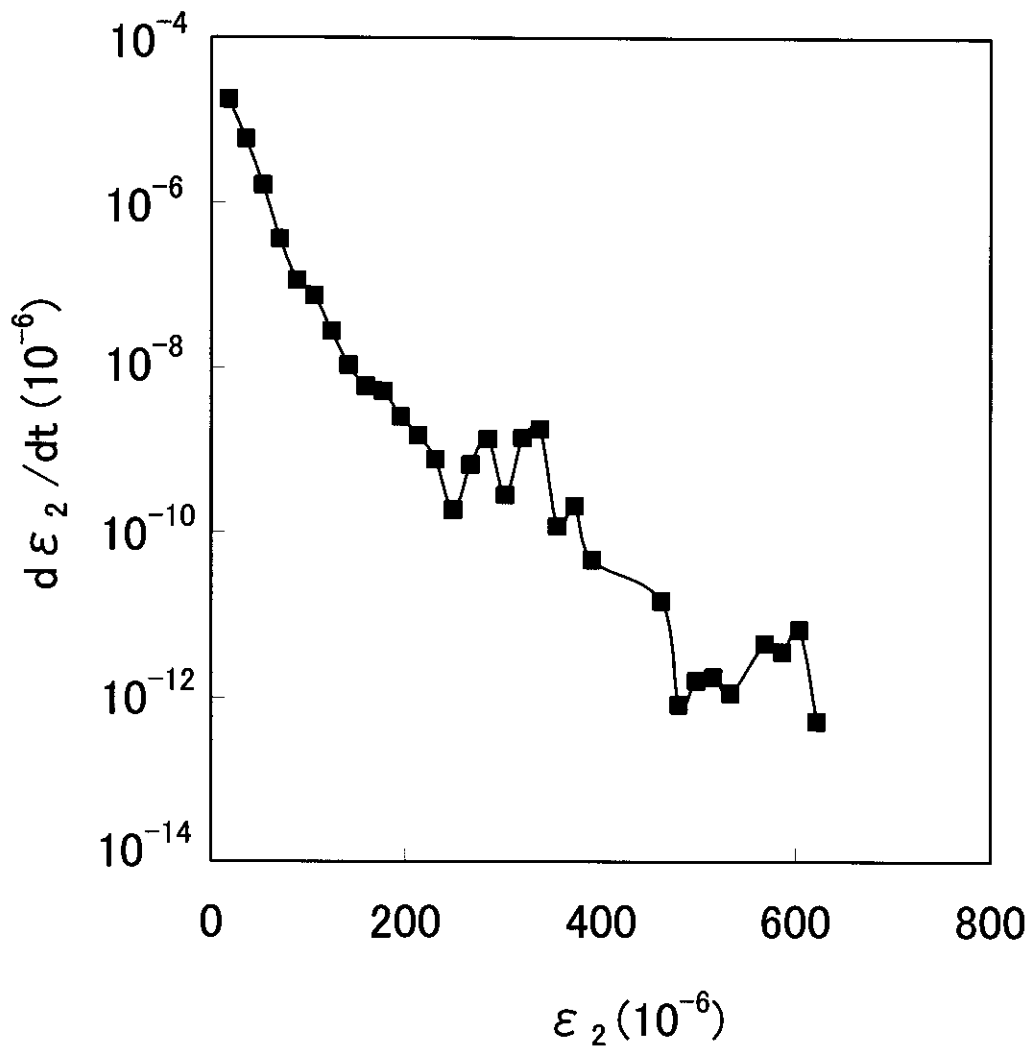


図2-3 クリープ歪とクリープ歪速度の関係  
 岩石：田下凝灰岩  
 環境：湿潤状態  
 クリープ応力：一軸圧縮強度(9.1MPa)の30%  
 試験開始：平成9年5月23日

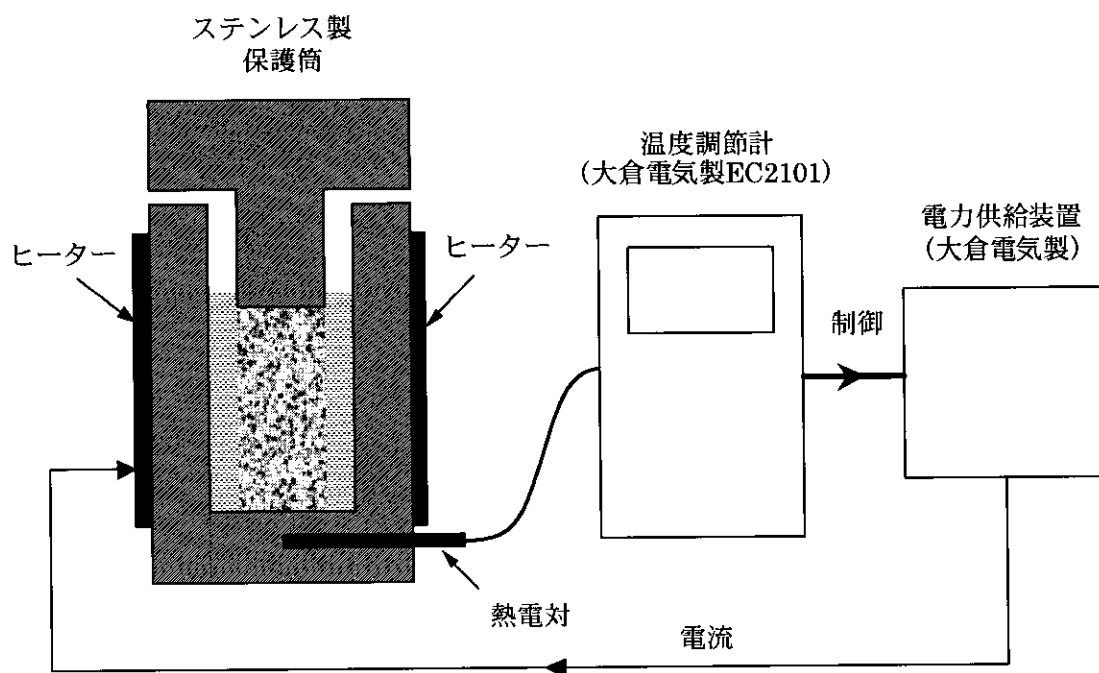


図 2-4 温度の制御システムの概念図

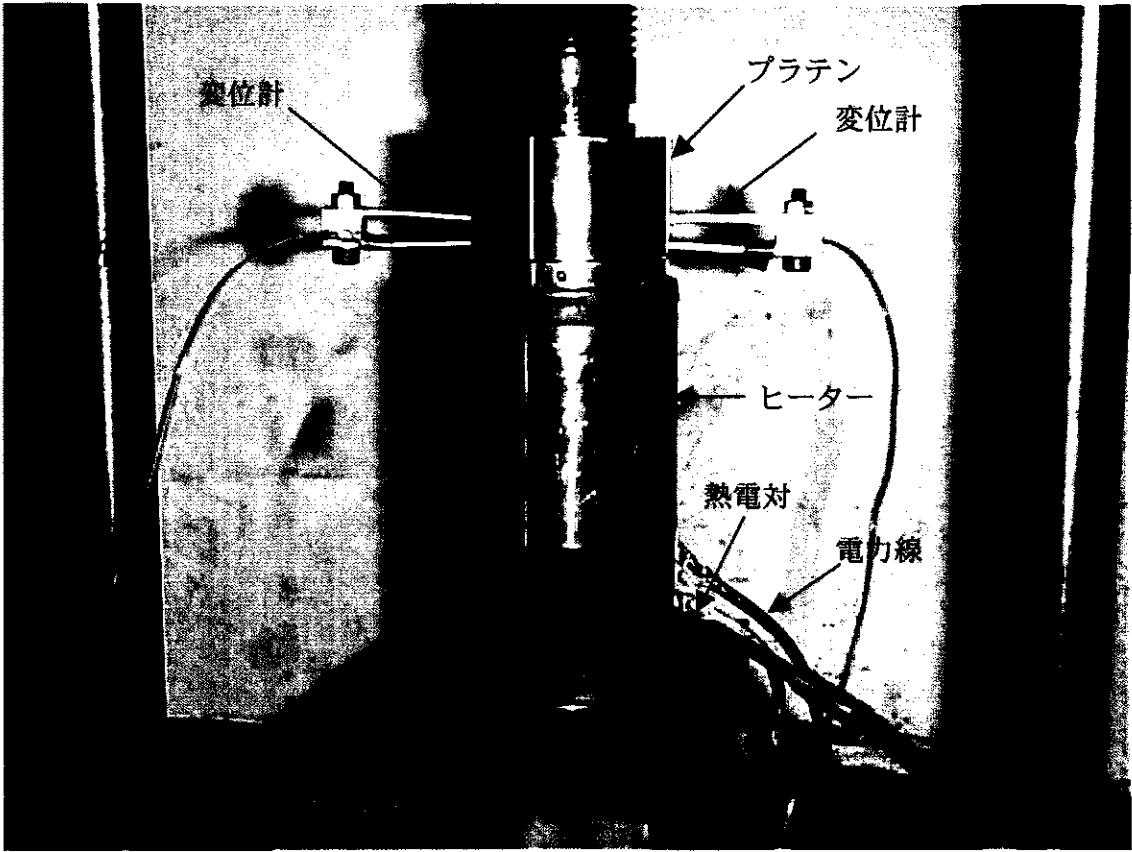


図2-5 (a) ステンレス製保護筒の写真1

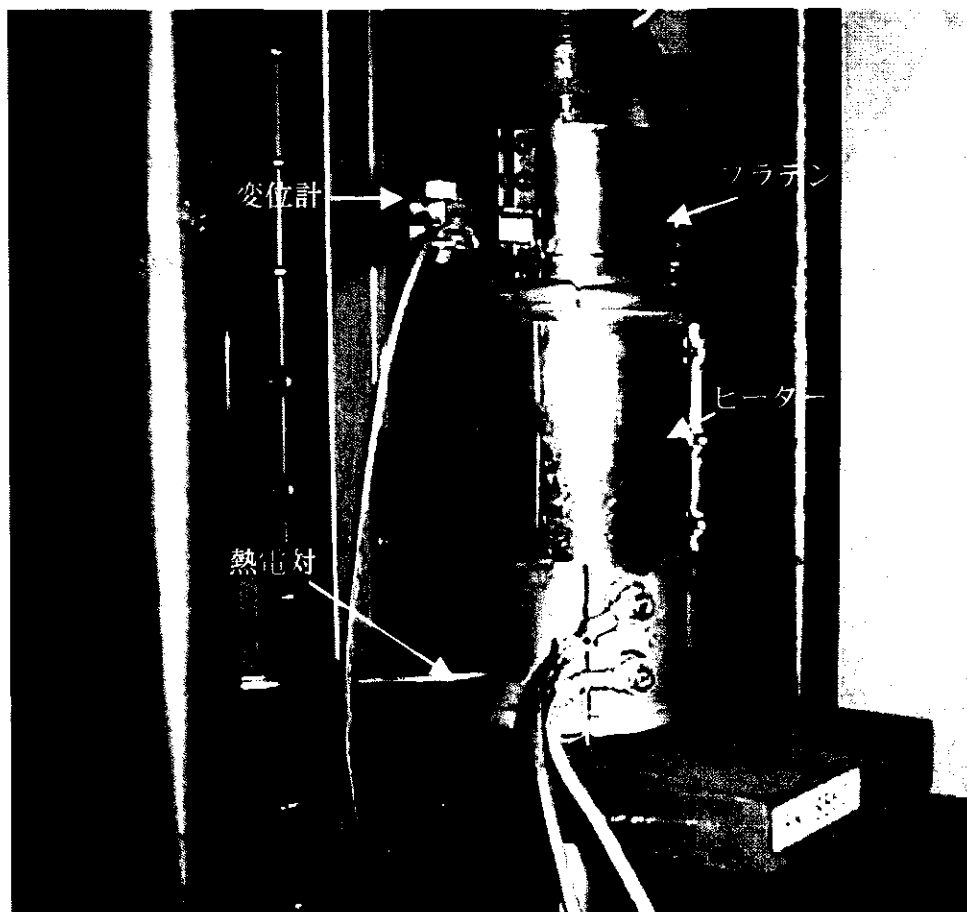


図2-5 (b) ステンレス製保護筒の写真2

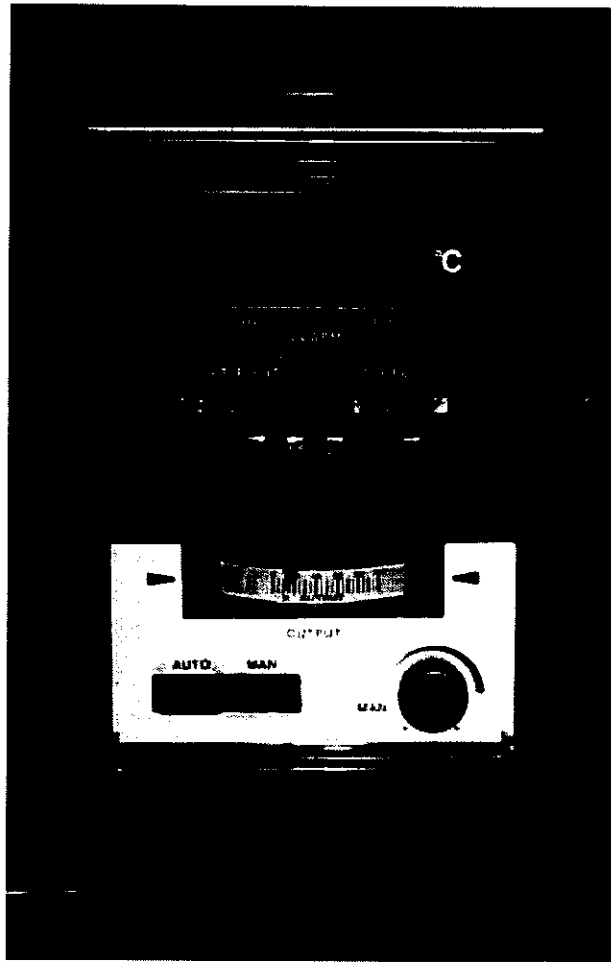


図 2 - 6 温度調整計の写真



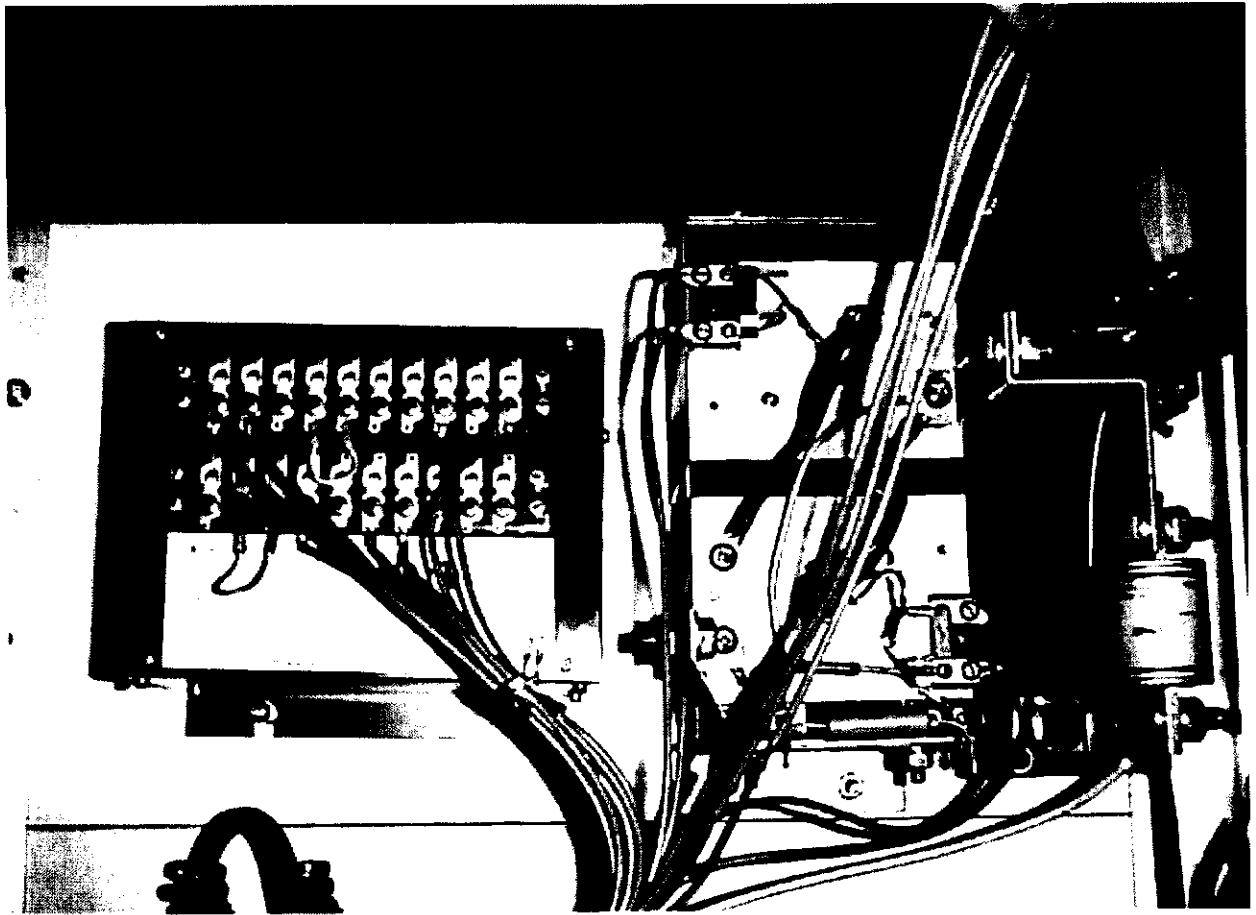


図 2 - 7 電力供給装置



図 2 - 8 E 型熱電対の写真

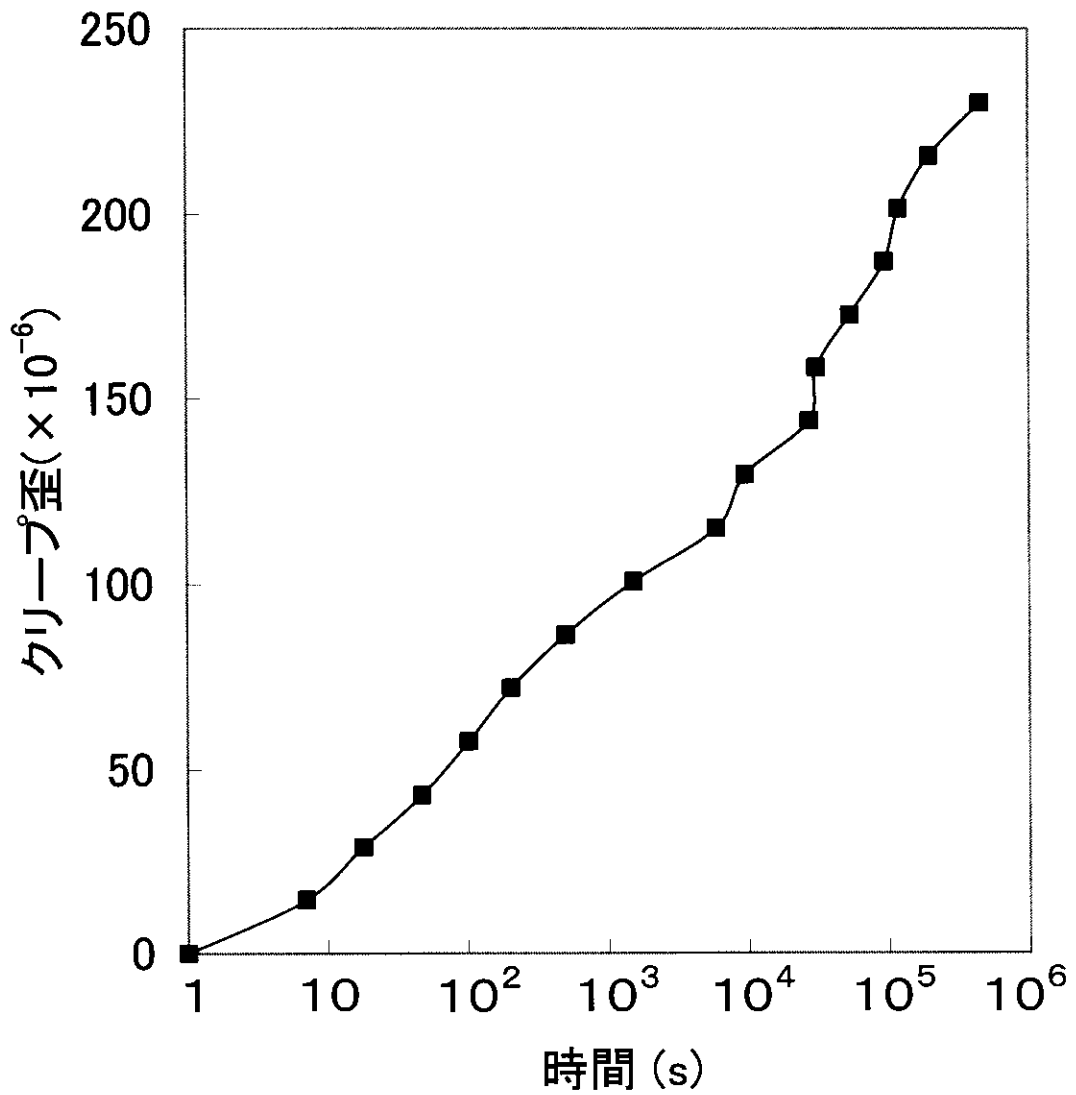


図2-9 クリープ歪の経時変化  
 岩石：稲田花崗岩  
 環境：80℃、湿潤状態  
 クリープ応力：100MPa, 一軸圧縮強度(190MPa)の53%

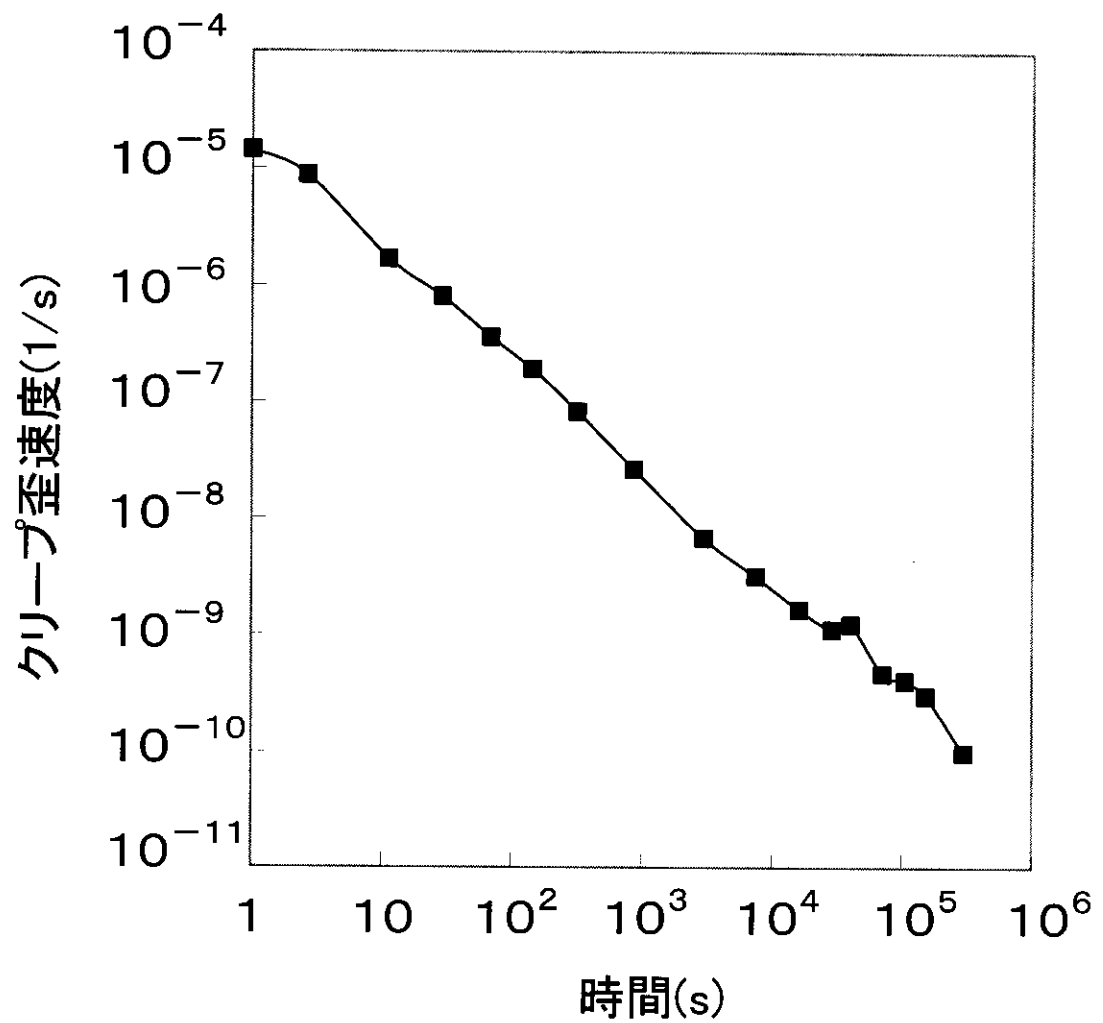


図2-10 クリープ歪速度の経時変化  
 岩石：稲田花崗岩  
 環境：80℃，湿潤状態  
 クリープ応力：100MPa，一軸圧縮強度(190MPa)の53%

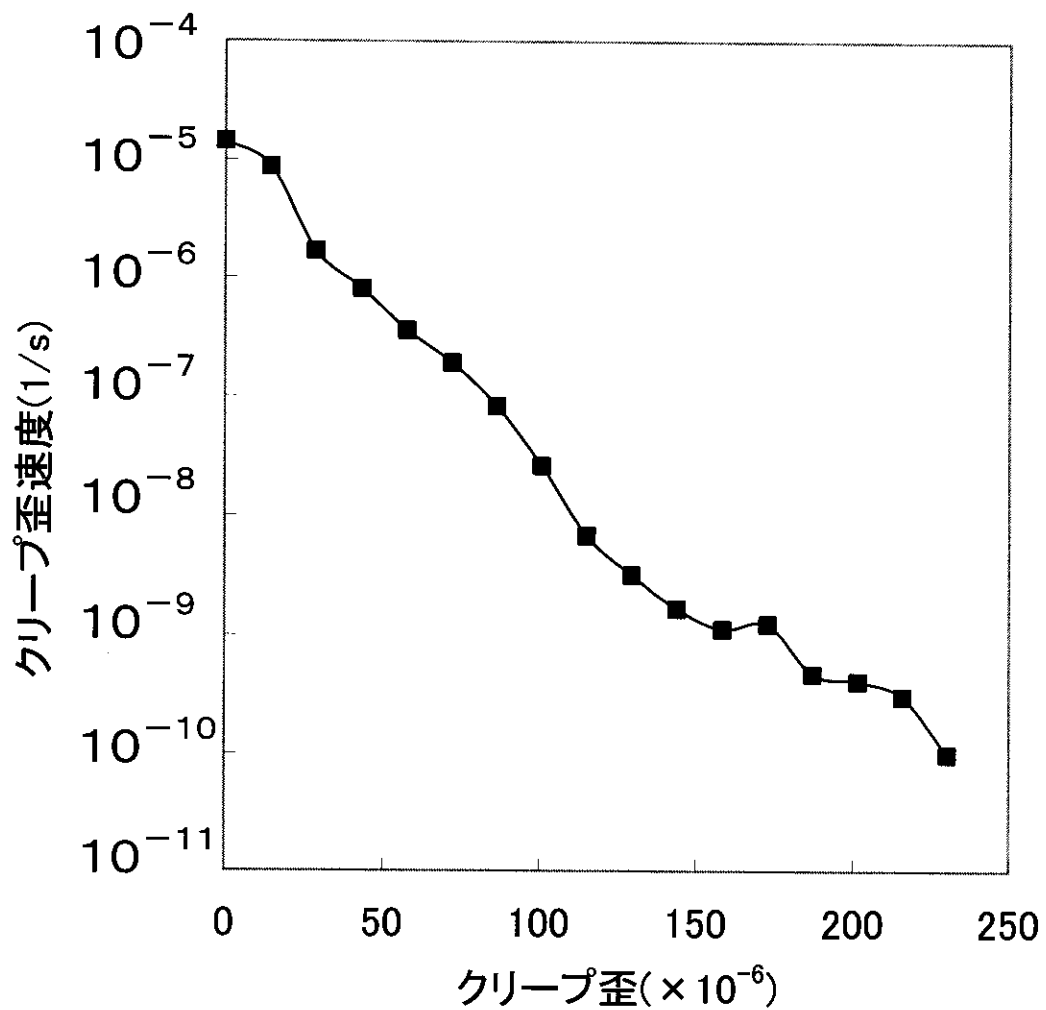


図2-11 クリープ歪とクリープ歪速度の関係  
 岩石：稲田花崗岩  
 環境：80℃，湿潤状態  
 クリープ応力：100MPa，一軸圧縮強度(190MPa)の53%

### 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10年度と11年度、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の考えから、平成12年度には、4連油圧式クリープ試験機を開発し、その予備試験結果を報告した。

この試験機を用いて、10年程度の長期クリープ試験を行う予定であるため、本年度はまず、細部まで検討し、載荷方法に若干の改善を行ってから、実験を開始した。

#### 3. 1 載荷方法の改良と予備試験

昨年度に示した予備試験では、クリープ荷重となるまで数s程度を要したため、載荷方法の改良を行うこととした。

4連油圧式クリープ試験機には、図3-1に示すように合計7つのフローコントロールバルブがある。クリープ荷重までの載荷時間を1s以内に完了することを目的とし、この7つのフローコントロールバルブの開閉を調整することとした。油圧ポンプの作動時間、停止時間もこれらのバルブの開閉ぐあいに大きく影響される。そのため、これらのバルブの調整を行った。

バルブの調整を行う主な目的は、瞬間歪を1秒以内に発生させることと、ポンプが作動し停止した後に設定圧である6.53MPaを超えないようにすることである。また、ポンプが長時間作動し続けると、空冷式のため油温が上昇し油漏れの原因になるので、作動時間はなるべく短く、停止時間はなるべく長くするように調整を行う必要がある。

次に、各バルブの役割と開閉による油圧回路への影響であるが、バルブ1はポンプから出る油の量を調整するバルブであり、閉めすぎるとポンプ作動時の圧力の上がりが遅く、開けすぎると上気りは速いが設定圧力を超えてしまう。バルブ2はポンプ、アキュムレータとシリンダーを結ぶバルブであり、閉めすぎると当初の載荷時間が長くなる。また、シリンダー上部から油が抜け、ポンプへ戻っていくため、ある程度開ける必要がある。バルブ3はアキュムレータと回路を結ぶバルブであり、調整の必要はないため、基本的に全開でよい。バルブ4はシリンダーへ油を送るバルブであり、ON/OFFバルブの役目をするので、このバルブで調整は行いにくい。以上のことから、調整は主にバルブ1と2で行った。

はじめに1をなるべく開けて、2をなるべく閉めた状態で予備実験を行った。ポンプ停止後設定圧を超えることはなかったが、シリンダーへ流れる油が少ないため、当初の載荷時間が1秒以上かかった。また、アキュムレータへ送られる油の量が多くなるためアキュムレータ内の圧力が上昇した。そのため、シリンダーへ流れる油の量をバルブ4-1～4で調整する必要があり、実験は困難であると判断した。

次に1をなるべく閉めて、2をなるべく開けた状態で予備実験を行った。アキュムレータとシリンダーの間の障害がほとんどないため、載荷は1秒以内に完了した。そして、バルブ4-1～4をON/OFFバルブとして使うので実験が容易であった。バルブ2を全開にしてもバルブ1をかなり閉めることによって、ポンプ停止後設定圧を超えることもなく、圧力の上がりも速かった。実験開始時にアキュムレータ内の圧力を設定圧力内しておくことで、載荷は1秒以内に完了し

た.この方法で調整したところ,油圧が6.53MPaから6.49MPaまで下がるのに約20分かかり,ポンプが作動している時間は約10秒であった.ポンプの作動時間が短いため,油温の上昇もなく,長期間の実験に耐えうると判断した.今後はこの設定のまま実験を進めていくこととした.

設定が終了したため,もう一度,予備試験を実施することとした.予備試験の条件としては,岩石試料として稲田花崗岩,環境として常温下で乾燥状態,クリープ応力は一軸圧縮強度の30%,試験片は直径2cm,高さ4cmの円柱形とした.本実験で用いる試験片と同じ剛性を持った試験片で行うことによって,本実験の载荷状態を再現することが可能と考えたからである.また,気乾状態の稲田花崗岩で,この程度の荷重であれば,クリープ歪はほとんど発生しないため,クリープ応力レベルは本実験より小さい30%とした.

約1日間の試験を行った結果を図3-2に示す.図では,ほとんどクリープ歪は発生しておらず,問題なく実験が行われていることがわかる.载荷時の荷重の立ち上がりであるが,1s以内には完了しており,これも問題ないことがわかった.よって,この条件で本試験を行うこととした.

### 3.2 本試験結果

試験条件を以下に示す.

岩石:稲田花崗岩

環境:常温下.湿潤状態

クリープ応力:一軸圧縮強度の50%

試験片:直径2cm,高さ4cmの円柱

試験に先立ち,変位を測定しているアンプが将来的に故障した場合を想定し,平成9年報告書2章に示したように,アンプのゲインおよび零点をストレインメータ用キャリブレーションで測定しておいた.これにより今後,もし仮にアンプが故障した場合でも当初のゲインおよび零点を設定した新規のアンプに置き換えれば,問題なく試験が継続できるようにした.

試験は,平成13年1月から開始した.4連式となっており,1つずつ試験を開始する構造となっているため,1週間ごとに順次,試験を開始した.平成13年2月上旬に4つのクリープ試験が無事に開始された.本報告では,最初に载荷を行った試験片の試験結果について報告することとする.

図3-3にクリープ歪の経時変化を示す.図では,従来通り(平成12年度報告書参照),最初,比較的クリープ歪の増加は大きく,100sをすぎると落ち着いて,対数クリープ則に近づいている傾向が見られる.また, $10^6$ s(約12日)経過した時のクリープ歪は, $1.2 \times 10^4$ となっており,この値も従来の結果とほぼ一致している.

当初,問題であった载荷に要する時間も,バルブ操作によって解決され,今後は長期の装置の安定性に十分注意を払いながら,検討を進めていくつもりである.

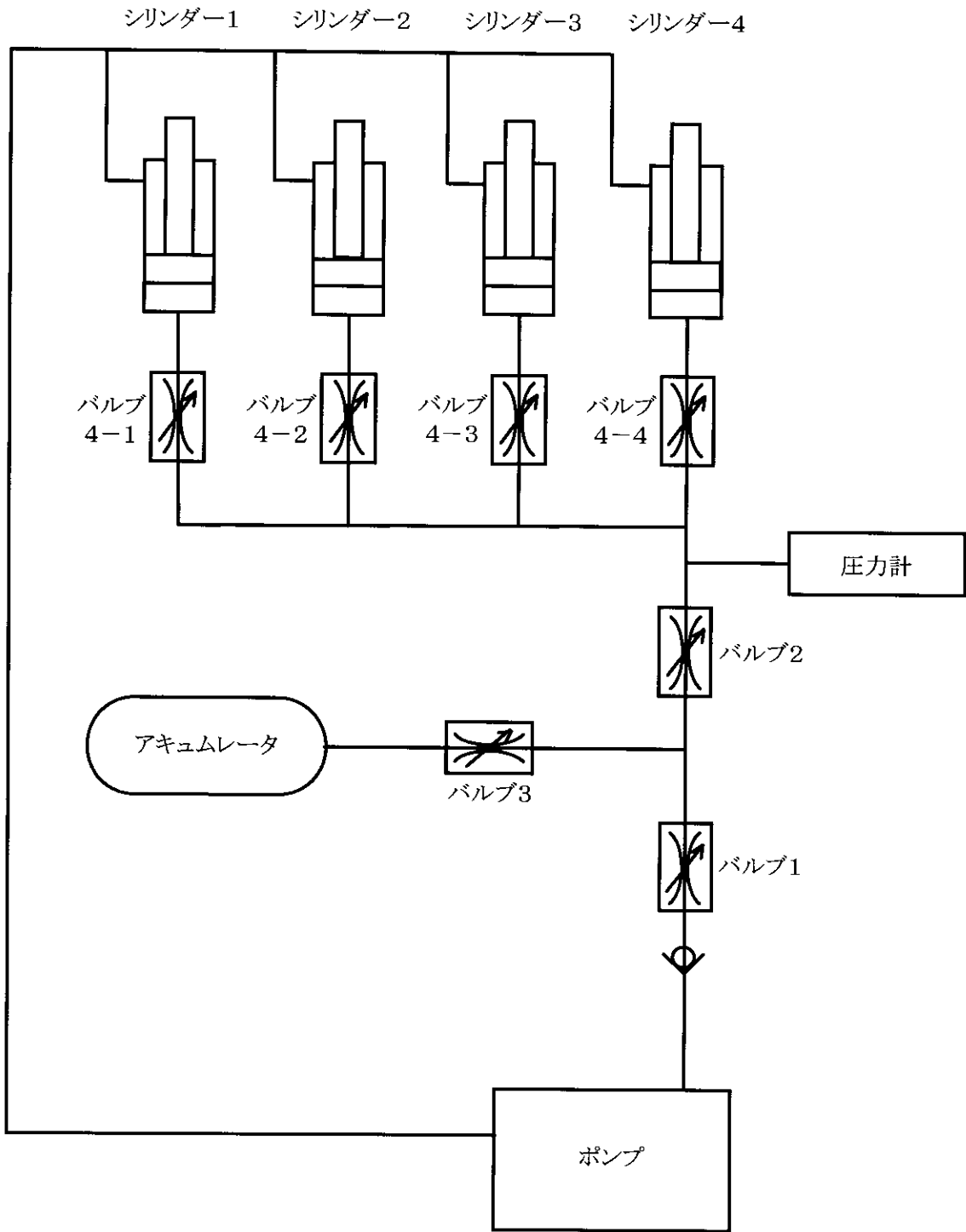


図3-1 クリープ試験機の概略図



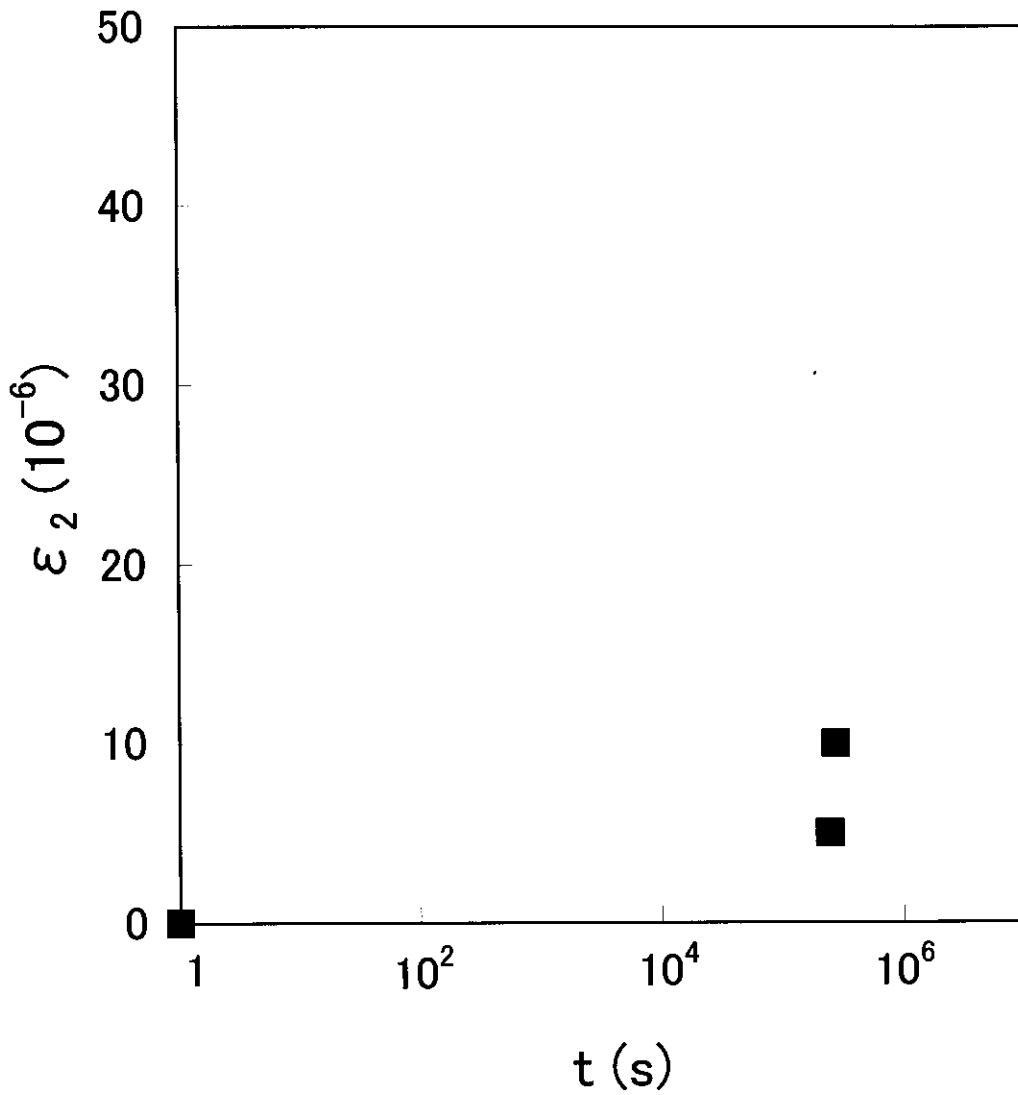


図3-2 予備試験結果

岩石：稲田花崗岩

環境：常温下、気乾状態

クリープ応力：一軸圧縮強度の30%

試験片：直径2cm、高さ4cmの円柱

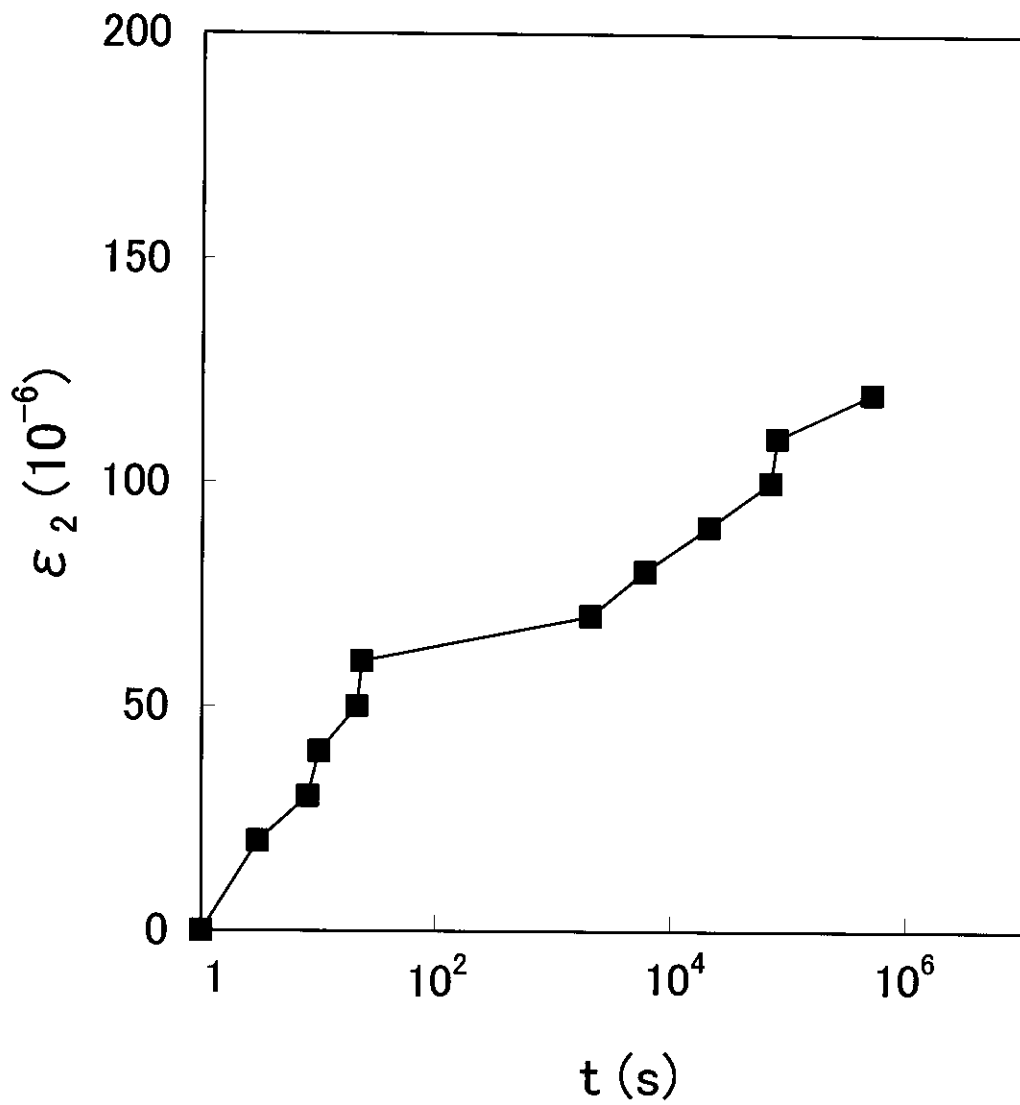


図3-3 クリープ試験結果

岩石：稲田花崗岩

環境：常温下、湿潤状態

クリープ応力：一軸圧縮強度の50%

試験片：直径2cm、高さ4cmの円柱

## 4. 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

### 4. 1 はじめに

これまで、ピーク強度に近い、比較的高い応力レベルにおける岩石の粘弾性的性質(時間依存性挙動)を中心にして研究をおこなってきた。その結果、岩石ごとに少しずつ差はあるが、非線型粘弾性論である程度説明可能な挙動が共通してみられることが判明してきた(大久保, 1991)。そこで、非線型粘弾性論に基づく構成方程式を提案し(山口ら, 1984;大久保ら, 1987;大久保, 1992 a), その計算結果と実験結果を比較・検討したところ、定歪速度試験結果(大久保ら, 1992 b), クリープ試験結果(大久保, 西松, 1986 ;大久保, 秋, 1993)とも構成方程式によってある程度説明できることがわかった。

ごく最近になって、超長期にわた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、より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することにした。その結果(大久保, 2000), 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。

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、定歪速度試験を行い、50%割線ヤング率の載荷速度依存性に特に注目して実験的研究を開始することにした。ヤング率の載荷速度依存性は、もっとも基本的な事項の一つであり、従来多くの研究者が挑んできているが(Perkins et al, 1970; Lama and Vutukuri, 1978), 実のところ信頼できるデータが少なく不明な点が多いとの認識を筆者は持っている。その原因の一つとして、ヤング率を正確に測定することが相当に困難なことが挙げられる。サーボ試験機では、試験機備え付けの差動変圧器でプラテン間の変位が正確に測れるが、この方法では試験片端面の凹凸の影響と試験機のフレーム剛性の影響が測定結果に紛れ込んでしまう。その結果、得られた変位から計算したヤング率は小さくなる。補正はある程度可能であるが、信頼性と精度が下がる。次に、試験片に歪ゲージを貼ることが良く行われるが、歪ゲージの個体差や貼り付け方には、どうしても多少のばらつきが生じる。その他、試験片にナイフエッジを2箇所とりつけ、ナイフエッジ間の変位を測る方法がある。金属試験片ではこの方法で正確に変形が測れるが、岩石では変形の絶対量が小さい上、ナイフエッジの固定が難しい。以上のように、変位ないし歪の測定を正確におこなうことは、荷重の測定に比べてかなり困難といえる。

これまでの研究結果で、載荷速度が大きくなると、多くの場合ヤング率は上昇気味であることは従来の研究結果で明らかになっているが、定量的な結果はまだまだ得られていないと言えないと考えている。このヤング率の載荷速度依存性は、例えば、強度破壊点以前における構成方程式の骨格を決める実験結果の一つであり、その結果によってはこれまでに提案してきた構成方程式に修正を加えなければならないかもしれない。このような事情から、これまで何度も挑戦して明瞭な結論を得るまでに至らなかった、ヤング率の載荷速度依存性に再度取り組むことにした。これ

までの経験では、多数の試験片を用い载荷速度を変えた試験は、試験片ごとの特性の違い等により測定結果がばらつく場合があった。そこで、ばらつきを軽減するために、試験方法を工夫してみたのでその結果を最初に紹介する。ついで、これまでの試験結果を合わせて総合的にヤング率の载荷速度依存性について検討する。最後に、構成方程式との関連について考察する。

## 4. 2 新しい実験法

### 4. 2. 1 実験方法

ヤング率の载荷速度依存性を調べる実験では、かなりの数の試験片を用意しておき、例えば4つの载荷速度  $10^{-6}/s$ 、 $10^{-5}/s$ 、 $10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$  で10回ずつ試験をおこなうことが多かった。この方法で、筆者も何度か検討を試みたが、試験片毎の特性の違いが大きいと明瞭な結論を得ることは難しかった。そこで、これまでの実験方法に若干の工夫を凝らし、図4-1に示す载荷手順で実験をおこなうことにした。

①予備実験でもとめておいたピーク強度(平均値)の10%まで歪速度  $10^{-6}/s$  で载荷する。そして、応力-歪曲線の原点とピーク強度の10%の点を結んだ直線から割線ヤング率  $E_{10}$  をもとめる。なお、ピーク強度の10%という低い応力でも内部構造が変化する可能性はあるが、これより応力を低くすると、正確に割線ヤング率をもとめることが困難なため10%とした。

②除荷する。

③定められた歪速度  $d\varepsilon/dt$  でピーク強度の50%まで载荷して、50%割線ヤング率  $E_{50}$  をもとめる。 $d\varepsilon/dt$  は  $10^{-7}/s$ 、 $10^{-6}/s$ 、 $10^{-5}/s$ 、 $10^{-4}/s$  のいずれかの値とした。

④非弾性歪を測定するため除荷する。

⑤破壊するまで载荷して、一軸圧縮強度をもとめる。

このようにすると、4本の試験片で歪速度を  $10^{-7}/s$  から  $10^{-4}/s$  まで変えた1組の実験が完了することになる。実験より得られた  $E_{50}/E_{10}$  を評価の対象とすることにより、試験片ごとのばらつきを低減するのが、ここで提案する試験方法の主たる狙いである。

これまでの経験によればほとんどの岩石において、採取場所と採取時期が一致していたとしても、作成した試験片の強度等にはかなりのばらつきが存在することがわかっている。そこで前もって、試験片の縦波速度を測っておき、比較的似通った縦波速度を持つ試験片4本を用いて1組の実験をおこなうことにした。例として三城目安山岩を取り上げ、3組の試験片の縦波速度  $V_p$  とヤング率  $E_{10}$  を図4-2に示す。 $E_{10}$  は歪速度  $10^{-6}/s$  で载荷したときの10%割線ヤング率である。これよりわかるように、1組目の縦波速度は3580m/s程度でありヤング率も小さめであった。2組目と3組目の場合、縦波速度は3700m/s程度でありヤング率は大きめであった。弾性波速度がかなり似通っていても、ヤング率はかなりばらつくことがわかるが、縦波速度で分別して1組の実験をおこなう意味はあるといえよう。

## 4. 2. 2 実験結果

試験には、最大容量 100kN の油圧サーボ式試験機を用いた。測定項目は、ロードセルによる荷重、差動変圧器による変位、試験片に貼り付けた歪ゲージによる歪である。ヤング率をもとめる際に使用したのは、歪ゲージによりもとめた歪である。また、試験片は直径 2.5 cm、高さ 5 cm で、試験室において自然乾燥させたものを用いた。

図 4-1 に、三城目安山岩の応力-歪曲線を示したが、最初の立ちあがりの勾配がやや大きいことがわかる。0~40MPa までの曲線は若干上に凸となる。一方、除荷時の曲線は下に凸となり、応力が 0MPa となったとき  $6 \times 10^{-4}$  程度の残留歪が残る。

図 4-3 には、図 4-2 と同じ 3 組の実験例における 50%割線ヤング率の载荷速度依存性を示した。1 組目の実験で使用した試験片のヤング率は、弾性波速度が遅かったことから予め予測したように、他の 2 つと比較して小さかった。図よりわかるように、歪速度が  $10^{-7}/s$  の時のヤング率をもっとも小さく、歪速度が  $10^{-6}/s$ 、 $10^{-5}/s$  となるとヤング率は増大する。しかしながら、歪速度が  $10^{-4}/s$  となると一転してかなり小さくなる。また、2 組目と 3 組目の実験結果をみると、試験片ごとの特性の違いのためと思われるばらつきがかなり大きいことがわかる。

図 4-4 には、今回提案した正規化ヤング率  $E_{50}/E_{10}$  をもって载荷速度依存性を整理した例を示す。実験結果のばらつきは多少あるが、図 4-3 と比較すると大幅な改善がみられた。三城目安山岩の他に、来待砂岩、秋吉大理石、稲田花崗岩、白浜砂岩を用いて実験をおこなったが、図 4-1 に示す方法で  $E_{50}/E_{10}$  をもとめると、試験片毎のばらつきがかなり低減することが認められた。

## 4. 3 ヤング率の载荷速度依存性

ここでは、今回おこなった実験の他、山口(1980)と秋(1995)がおこなった結果もあわせて、ヤング率の载荷速度依存性について検討する。表 4-1 に、検討の対象とした 7 種類の岩石の一軸圧縮強度とヤング率の载荷速度依存性に関する試験の一覧を示す。なお、また、試験片はどの場合も直径 2.5 cm、高さ 5 cm であった。

### 4. 3. 1 三城目安山岩

これまでのデータの蓄積がもっとも多い三城目安山岩についてまず検討する。三城目安山岩には流理面が存在して、これと直角方向(Z方向)の特性と、これに沿う方向(X方向とY方向)の特性とが若干異なる。秋(1995)の検討結果によれば、一軸圧縮強度の差はないが、圧裂引張強度の場合は流理面にそって引張破壊が生ずる時の強度が他に比べて 20%ほど小さい。秋(1995)はヤング率の载荷速度依存性に対しても 3 方向の実験結果を得ている。それを整理して図 4-5 に示した。一つの点は、試験片 6 個以上の平均値をあらわす。これは、従来の実験方法を踏襲したものであり、試験片をいくつか用意しておき载荷速度を変えながら試験をおこなったものである。なお、変位はサーボ試験機に装備されている差動変圧器によって測定し、その測定結果から 50%接線ヤング率をもとめた。この結果より、载荷速度が増加するとヤング率が上昇することがわかる。また、方向性による差異はほとんど認められない。これは、一軸圧縮強度において方向性が認め

られなかったことと整合性のある結果である。さらに、秋(1995)は湿潤状態で同様の試験をおこなった。その結果も同じ図4-5に掲載してある。これからわかるように、湿潤状態でもヤング率の载荷速度依存性が認められる。方向性はないとして全ての試験結果から、気乾状態と湿潤状態における実験式を最小自乗法でもとめてみると次のようになった(表4-1)。

気乾状態:

$$E_{50} = 0.18 \log\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) + 10.4 \quad (4.1)$$

湿潤状態:

$$E_{50} = 0.25 \log\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) + 10.0 \quad (4.2)$$

両式の左辺は差動変圧器で測った50%接線ヤング率  $E_{50}$  で、単位は GPa である。以下においても、差動変圧器で歪をもとめた場合には接線ヤング率を、歪ゲージで歪をもとめた場合には割線ヤング率を示す。差動変圧器で歪をもとめた場合には、試験片端面がプラテンと密着するまでの変位が紛れ込んでしまい、正確な割線ヤング率をもとめ難いため、接線ヤング率を用いた。(4.1)、(4.2)式中の  $d\varepsilon/dt$  の単位は 1/s である。右辺第二項の 10.4 と 10.0 は、 $d\varepsilon/dt$  が 1/s のときの  $E_{50}$  となる。図4-5における近似曲線の傾きは、気乾状態で 0.18 であり、湿潤状態で 0.25 であった。

秋(1995)の実験結果は、5年間ほど同様の試験を続けた結果でありかなりの信頼性があると考えているが、微妙な試験だけに他の試験結果と比べて総合的に判断する必要がある。そこで、今回おこなった実験結果と山口(1980)の結果も表4-1に示す。また、図4-6に規格化した形で示した。規格化したのは、3者の使用した岩石ブロックの特性が少しずつ違うためであり、規格化することによって、絶対値の差の影響を抑えるためである。なお規格化は、 $d\varepsilon/dt$  が  $10^{-4}/s$  の時の50%ヤング率で割っておこなった。ただし、今回おこなった試験については、ある歪速度での  $(E_{50}/E_{10})$  を、 $d\varepsilon/dt$  が  $10^{-4}/s$  の時の  $(E_{50}/E_{10})$  で割って  $E_{50}^*$  を計算した。

表4-1と図4-6を参照しつつ、気乾状態における結果を検討することにする。規格化したヤング率  $E_{50}^*$  の近似式と相関係数  $r$  は次のようになる。

本実験:  $r = 0.98$

$$E_{50}^* = 0.021 \log\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) + 1.08 \quad (4.3)$$

秋:  $r = 0.99$

$$E_{50}^* = 0.019 \log\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) + 1.08 \quad (4.4)$$

山口:  $r = 0.74$

$$E_{50}^* = 0.037 \log\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) + 1.17 \quad (4.5)$$

山口(1980)の結果のみ、相関係数が若干小さく、载荷速度依存性も他より大きめの値となっているが、本実験と秋の実験とは良く一致しているといえよう。(4.3)式あるいは(4.4)式によれば、三城目安山岩のヤング率は、载荷速度が一桁あがる毎に約2%ずつ上昇することになる。三城目安山岩の一軸圧縮強度の载荷速度依存性は秋(1995)によれば、载荷速度一桁あたり6.2%であり、

これと比較するとヤング率のそれは約 1/3 となっている。湿潤状態については、秋(1995)しかおこなっておらず今後の再試験が必要であるが、増加率において気乾状態より若干大きめとの結果は、一軸圧縮強度の載荷速度依存性と似通っていた。

#### 4. 3. 2 速度依存性が認められた 3 岩石(来待砂岩, 田下凝灰岩, 大谷石)

ここでは、ヤング率の載荷速度依存性が認められた、来待砂岩、田下凝灰岩、大谷石(大谷凝灰岩)の 3 岩石について述べる。来待砂岩は今回新たに試験をおこなったものであり、他の 2 岩石は秋(1995)の結果を整理したものである。

これまでの一軸圧縮試験などの経験によれば、来待砂岩は、三城目安山岩と同程度のばらつきを示す岩石である。通常の方法でおこなった場合には、試験片のばらつきの影響が大きく、載荷速度依存性について確たることは言い難い。しかし、今回提案した方法では図 4-7 に示す近似式が得られた。

本研究:  $r = 0.94$

$$E_{50}^* = 0.017 \log\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) + 1.07 \quad (4.6)$$

これからわかるように、三城目安山岩を対象とした(4.3)、(4.4)式と似通った結果が得られ、相関係数は 0.94 と比較的高かった。

次に、図 4-8 に示す田下凝灰岩の結果を、正規化して式であらわすと次のようになる。

気乾:  $r = 0.99$

$$E_{50}^* = 0.047 \log\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) + 1.18 \quad (4.7)$$

湿潤:  $r = 0.89$

$$E_{50}^* = 0.076 \log\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) + 1.25 \quad (4.8)$$

この結果を見る限り、田下凝灰岩のヤング率の載荷速度依存性は、三城目安山岩や来待砂岩に比べてかなり大きく倍程度であった。ちなみに一軸圧縮強度の増加率は、載荷速度が一桁増加すると気乾状態で 5.6%、湿潤状態で 10.1%であった。気乾状態における強度の載荷速度依存性、したがって粘弾性的性質は三城目安山岩よりむしろ小さい。注目すべき点は、田下凝灰岩では、気乾状態と湿潤状態のヤング率の差がかなりあることである。通常考えでは、応力レベル 50%程度であればこれは弾性領域であり、試験片の弾性が測定されることになるはずである。しかし、そう考えると、弾性ばね常数が強度と同様に気乾と湿潤で顕著に異なることが説明し難い。おそらく、観測される歪の中には、非弾性歪も含まれており、この非弾性歪は気乾状態より湿潤状態の方が相対的に大きいと考えられる。この考え方は、低応力レベルでもクリープ歪が観測されることや(大久保ら, 1988; 大久保, 2000)、ピーク強度において除荷するとその除荷曲線の傾きが 50%ヤング率より相当に大きいこと(何ら, 1989)と整合性がある。

図 4-9 に示す大谷石の結果を、正規化して式であらわすと次のようになる。

気乾:  $r = 0.86$

$$E_{50}^* = 0.069 \log\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) + 1.35 \quad (4.9)$$

湿潤:  $r = 0.95$

$$E_{50}^* = 0.046 \log\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) + 1.21 \quad (4.10)$$

上式を他の式と見比べてみると、載荷速度依存性はかなり大きく、三城目安山岩や来待砂岩より、どちらかといえば田下凝灰岩に近いといえる。

#### 4. 3. 3 載荷速度依存性が確認できなかった3岩石(秋吉大理石, 稲田花崗岩, 白浜砂岩)

ここで扱う3岩石の実験結果を式で表すと次のようになった。

秋吉大理石:  $r = 0.02$

$$E_{50}^* = -0.001 \log\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) + 0.98 \quad (4.11)$$

稲田花崗岩:  $r = 0.34$

$$E_{50}^* = -0.005 \log\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) + 0.97 \quad (4.12)$$

白浜砂岩:  $r = 0.36$

$$E_{50}^* = -0.007 \log\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) + 0.95 \quad (4.13)$$

また、各岩石の試験結果を図にしたものを図4-10～12に示す。

これらの3岩石に対しては、ヤング率の載荷速度依存性は認められなかった、あるいは、十分な精度の実験ができなかったといえる。確たることは言えないが、それぞれの岩石に対して現在までの経験を踏まえて少しずつコメントを加えておく。

秋吉大理石の結果はばらつきがかなり大きかった。秋吉大理石のヤング率は、表4-1からわかるように大きく、それと比較して一軸圧縮強度は小さい。したがって、他岩石より高精度の歪の測定が要求されるわけである。歪の測定には注意を払ったつもりであるが、精度が不足していたかもしれないとの懸念は否定できない。

稲田花崗岩の場合も相関係数は小さいが、データをみると、載荷速度を変えたときのヤング率  $E_{50}^*$  の違いは 0.96 から 1.01 の間と比較的小さな範囲に入っている。また、花崗岩においては応力レベルが比較的小さい部分では、粘性的な性質は小さい。これらのことから総合的に考えて、稲田花崗岩のヤング率の載荷速度依存性は比較的小さいのではないかと推測できる。

白浜砂岩は砂岩のうちでかなり特異な応力-歪関係を持つ。すなわち、ピーク強度近傍がかなり丸い特徴を持っている。実験結果をみるとヤング率  $E_{50}^*$  は 0.975～1.025 程度の間であり、データのばらつきは稲田花崗岩と同程度であった。総合的に考えて、稲田花崗岩と同様に、ヤング率の載荷速度依存性は比較的小さいのではないかと考えるが、筆者がこの岩石を扱い始めてから5年程度しか経過しておらず、この岩石の特質を十分に把握していない可能性もある。



#### 4. 4 構成方程式による検討

筆者は、非線形粘弾性論に基づいて構成方程式を提案してきたが、大きく分けて2つのタイプにわかれる。一つは、岩石の破壊にともなって亀裂の数と長さが次第に増加していき、この結果として変形のし易さ(コンプライアンス)が次第に増加していくと考えて提案したものである(大久保ら, 1987)。もう一つは、非弾性歪(irrecoverable strain)が次第に増えていくことを重くみてモデル化したものである(山口ら, 1984)。実際にはコンプライアンス $\lambda$ と非弾性歪 $\varepsilon_2$ の増大とが並行しておこっていることを何ら(1989)は明らかにしたが、両者を分離して扱うには膨大な実験が必要であり実用的でないこと、また、歪ないし変形が単調増加する場合には、どちらか一方のみを考えた構成方程式で現象をよく表せることから、通常は一方のみ考えた構成方程式を実用に供してきた。

前者のコンプライアンス可変型構成方程式を用いて、ヤング率の载荷速度依存性を考えてみることにする。コンプライアンスを $\lambda$ 、時間を $t$ 、応力を $\sigma$ 、さらに $a$ 、 $n$ 、 $m$ を常数として、筆者の提案した構成方程式は次のように書ける。

$$\frac{d\lambda}{dt} = a \lambda^m \sigma^n \quad (4.14)$$

この解は既報(大久保, 1992a)で示したが、その結果によれば、次のことがいえる。①ピーク強度におけるコンプライアンスは载荷速度によらない。②ピーク強度に対して50%など任意の応力レベルにおけるコンプライアンスも载荷速度によらない。③任意の応力レベルにおける接線および割線ヤング率は载荷速度によらない。(4.14)式は比較的高い応力レベルとピーク強度以降に重点をおいている。ピーク強度以前の現象まで扱うには、(4.14)式右辺を変える必要がある。そこで、やや一般化した次の構成方程式を考えてみることにする。

$$\frac{d\lambda}{dt} = f(\lambda) \sigma^n \quad (4.15)$$

ここで $f(\lambda)$ は、 $\lambda$ の任意の関数である。これを定応力速度ないし定歪速度の条件下で解くと次の解が得られる(Appendix 4-I)。

$$\varepsilon^* = \lambda(\sigma^*) \sigma^* \quad (4.16)$$

ここで $\varepsilon^*$ と $\sigma^*$ は、歪と応力を、定応力速度の場合には $(d\sigma/dt)^{1/(n+1)}$ にて、定歪速度の場合には $(d\varepsilon/dt)^{1/(n+1)}$ にて割ったものである。(4.16)式より、载荷速度が変化しても、図4-13(a)に示す基準化した応力-歪曲線( $\sigma^*$ - $\varepsilon^*$ 曲線)は同一曲線となり、しかも対応する点のコンプライアンスは常に等しいことがいえる。したがって、この構成方程式が強度のピーク値を持つ場合には、基準化した強度は载荷速度に依存しない。すなわち、強度は载荷速度の $1/(n+1)$ 乗に比例する。応力レベルは(応力)/(強度)であるため、応力レベルで整理した場合には、前記の①~③が成り立つことがわかる。よって、(4.14)式や(4.15)式の構成方程式では、ヤング率の载荷速度依存性は説明し難い。

非弾性歪を考えた構成方程式は次のように書ける。

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \\ \sigma &= k_1 \varepsilon_1\end{aligned}\quad (4.17)$$

$$\frac{d\varepsilon_2}{dt} = f(\varepsilon_2) \sigma^n$$

図4-14に示すように、 $\varepsilon_1$ は弾性歪、 $\varepsilon_2$ は非弾性歪である。 $k_1$ は弾性ばね常数(初期ヤング率)である。この形の構成方程式を定応力速度の条件下で解くと、 $\sigma^*$ を $\sigma/(d\sigma/dt)^{1/(n+1)}$ として、 $\varepsilon_2$ は $\sigma^*$ によって決まることがわかる(Appendix 4-II)。

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_2(\sigma^*)\quad (4.18)$$

(4.18)式より、载荷速度が変化しても、図4-13(b)に示す $\sigma^*-\varepsilon_2$ 曲線は同一の曲線を描き、対応する点の $\varepsilon_2$ は常に等しいことがいえる。これから、ピーク強度を持つ場合には、応力レベルが同じならば永久歪 $\varepsilon_2$ が同じであることがいえる。

上記の考え方が実験結果と調和的であるかどうかを確かめるため、若干の式の展開をおこなう。まず、コンプライアンスは次のようになる。

$$\lambda = \frac{\varepsilon}{\sigma} = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{\sigma} = \frac{1}{k_1} + \frac{\varepsilon_2}{\sigma}\quad (4.19)$$

载荷速度が変化した時、同じ応力レベルでの比較を考えると、 $\varepsilon_2$ は同じであるので $\delta\lambda/\delta\sigma = -\varepsilon_2/\sigma^2$ となるので次式を得る。

$$\frac{\left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\delta\sigma}{\sigma}\right)} = -\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon}\right)\quad (4.20)$$

近似的に $-\delta\lambda/\lambda$ は、ヤング率の増加率となるので、(4.20)式は次のようにも書ける。

$$\begin{aligned}&(\text{载荷速度が10倍になったときの50\%ヤング率の増加率})/(\text{強度の増加率}) \\ &= (\text{応力レベル50\%における非弾性歪})/(\text{応力レベル50\%における歪})\end{aligned}\quad (4.21)$$

データがもっとも豊富で信頼性のある三城目安山岩では、(4.21)式中の数値は次のようになる。

$$\begin{aligned}(\text{载荷速度が10倍になったときの50\%ヤング率の増加率}) &= 0.020 \\ (\text{载荷速度が10倍になったときの一軸圧縮強度の増加率}) &= 0.062 \\ (\text{応力レベル50\%における非弾性歪}) &= 0.00066 \\ (\text{応力レベル50\%における歪}) &= 0.0025\end{aligned}$$

なお、(応力レベル50%における非弾性歪)は図4-15のようにもとめた。これらの数値を代入すると(4.21)式は次のようになる。

$$\begin{aligned}(\text{左辺}) &= 0.02/0.062 = 0.32 \\ (\text{右辺}) &= 0.00066/0.0025 = 0.27\end{aligned}$$

左辺と右辺は、まずまずの一致を示しており、(4.18)式に関して述べた考え方と実験結果とが調和的であることがわかる。(4.21)式中の各数値の中で誤差がもっとも生じ易いのは、応力レベル50%における非弾性歪であろう。図4-15のようにもとめたのは、最初の10%における非弾性歪は充分小さく、この部分の傾きがモデルの  $k_1$  にほぼ等しいと考えたからである。もし、わずかながらでも非弾性歪があれば  $k_1$  より小さな10%割線ヤング率が求まり、その結果、応力レベル50%における非弾性歪は小さめに見積もられることになる。このように考えれば、(4.21)式の右辺が左辺より小さくなったことを説明できる。

応力レベル50%における非弾性歪のもう一つのもともめ方は、除荷後の永久歪とほぼ等しいと考えることである。応力レベル50%まで載荷し、その後、除荷する。応力が0に至った時の歪を応力レベル50%における非弾性歪とみなすことにする。この扱いは除荷過程で非弾性歪の回復が生じなければ良い方法である。そこでこのようにして非弾性歪をもとめると、

$$\begin{aligned} (\text{応力レベル 50\%における非弾性歪}) &= 0.00032 \\ (\text{右辺}) &= 0.00032/0.0025 = 0.13 \end{aligned}$$

これからわかるように、右辺は左辺の40%位にしかならない。これから類推するに、除荷過程で非弾性歪の回復が生じている可能性が高い。

コンプライアンスの変化を考えた(4.15)式ではヤング率の載荷速度依存性があらわれなかったのに対して、(4.17)式の非弾性歪を考えた構成方程式ではあらわれた。しかしながら、ヤング率の載荷速度依存性があらわれるかどうかは、コンプライアンス可変型と非弾性歪を考えた構成方程式の特徴ではなく、 $\lambda$ ないし  $\varepsilon$  の関数形に依存する。すなわち、(4.17)式を用いた検討結果でヤング率の載荷速度依存性があらわれたのは、 $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$  の右辺第一項と第二項の載荷速度依存性が異なるためである。(4.16)式のコンプライアンス可変型構成方程式でも、右辺に載荷速度依存性が異なる第二項を足せばヤング率の載荷速度依存性があらわれる。

これまで信頼性の高いデータのある三城目安山岩に限って検討してきたが、歪ゲージで測定をおこなった来待砂岩、秋吉大理石、稲田花崗岩、白浜砂岩についても簡単に考察しておく。表4-1に、(4.21)式中の強度の増加率、ヤング率の増加率、応力レベル50%における歪、応力レベル50%における非弾性歪と、同式の左辺および右辺の値を示す。来待砂岩の強度の増加率は不明であるが、ヤング率の増加率は前に見たように比較的大きかった。しかしながら、三城目安山岩と比べると非弾性歪は0.0003程度と小さく、よって右辺の値も0.12とかなり小さくなった。この理由を究明するには、追実験が必要である。

残る3岩石の永久歪は負の値となった。まず、秋吉大理石であるがこの岩石の永久歪は-0.00003程度であり、事実上永久歪なしとみなすことが正しいのであろう。これと呼応して、ヤング率の載荷速度依存性も一桁あたり-0.07%と小さく、これも事実上ないとみなすのがよからう。ただし、前述のように、歪の絶対値が小さいため測定誤差が紛れ込み易いので、今後、確認のための実験が必要と考える。

稲田花崗岩の場合には、良く知られているように、亀裂の閉鎖によって応力-歪曲線は最初下に凸となり、図4-14に示した方法に従ってもとめた永久歪は負値となる。また、稲田花崗岩のヤング率の載荷速度依存性も負値であった。よって、(4.21)式の左辺は-0.46%となり、右辺

は-0.37%と近い値となる。構成方程式  $d\varepsilon_2/dt = f(\varepsilon_2) \sigma^n$  中の  $f(\varepsilon_2)$  は任意の関数であり、ヤング率の載荷速度依存性が負値になる場合にも対応している。花崗岩の場合には、亀裂の閉鎖に時間依存性があり、しかも強度の50%まではこの現象が優勢であるため、このような結果となった可能性がある。Wang ら(2000)は、水圧破碎亀裂の閉鎖に際して時間依存性が認められ、稲田花崗岩の場合にはシミュレーション結果と実験結果とがほぼ一致したと報告している。これは、本研究の検討結果と深く関わる報告と考えている。なお、ここで述べたことが成り立つ岩石や、実験条件については不明であり、今後の検討が必要である。

最後に白浜砂岩であるが、これも、永久歪が負値となっている。これに呼応してヤング率の載荷速度依存性も負値となっている。しかしながら、応力-歪曲線が顕著に下に凸になる理由についてはよくわかっていないので、これ以上の議論をするには追実験が必要である。

#### 4. 5 まとめ

ヤング率の載荷速度依存性は基礎的な現象の一つであるが、これまでの実験結果で明瞭な結論は得られていない。その原因は、正確な歪の測定が困難なことから、載荷速度依存性の程度と比較して、試験片ごとのばらつきが大きいためと思われる。そこで、正規化ヤング率  $E_{50}/E_{10}$  をもってデータを整理することを試みた。まだまだ、検討段階ではあるが、今回提案した方法は有望であるとの感触を得た。

三城目安山岩、来待砂岩、秋吉大理石、稲田花崗岩、白浜砂岩、田下凝灰岩と大谷石の7種類の岩石について検討した。この内、三城目安山岩、来待砂岩、田下凝灰岩と大谷石については、載荷速度が上昇するとヤング率も増加した。

三城目安山岩では、歪速度が10倍になるとヤング率は2%程度上昇した。構成方程式を交えた検討によれば、ヤング率の載荷速度依存性は次のように説明できることがわかった。強度破壊点以前の領域でもかなりの非弾性歪が生ずるが、これは粘性的なもので時間遅れがある。よって、載荷速度が速いほどこの時間遅れは顕著になるので、弾性歪と非弾性歪の和である歪の中で、載荷速度が速い時程、非弾性歪の占める割合が小さくなる。その結果、接線ヤング率と割線ヤング率は、載荷速度にともなって大きくなる。上記の考え方によれば、強度破壊点以前の非弾性歪と、ヤング率の載荷速度依存性との間には密接な関係が成り立つはずである。そこで、三城目安山岩について検討した結果では、構成方程式より予測される関係がほぼ成り立った。

田下凝灰岩と大谷石では、ヤング率の載荷速度依存性がみられた。また、気乾状態より湿潤状態での依存性が大きかった。残念ながら、今回は実験をおこなわなかったものでこれ以上のことはわからない。来待砂岩については、載荷速度依存性がみられ、非弾性歪もかなり大きかった。残念ながら強度の載荷速度依存性が現時点ではわかっていないのでこれ以上のことはわからない。

稲田花崗岩においては、応力-歪曲線の最初の立ち上がり部分が下に凸になる。これは、試験片内部の亀裂が次第に閉鎖していく過程といえる。もし、この亀裂の閉鎖過程が時間依存性をもっており、かつ非弾性歪の増加が比較的小さければ、ヤング率は載荷速度にともなって小さくなるはずである。実験結果でも実際このような結果がでたが、詳細な検討は今後進める考えである。秋吉大理石は、非弾性歪とヤング率の載荷速度依存性がともに小さかった。白浜砂岩は、永久歪が負値となり、これに呼応してヤング率の載荷速度依存性も負値となった。両岩石については、

今後も検討を続ける予定である。

本章で述べた研究で得られた重要な結論は下記のとおりである。

ヤング率の荷重速度依存性は、低応力レベルにおける非弾性歪(時間依存性)を認めれば説明可能である。もしそうであるならば、この現象は、低応力レベルにおける安定性とも結びついているはずであり、今後詳しく検討する価値がある。

荷重速度によりヤング率は増加するケースが多いと報告されてきた。今回の検討でも7岩石中4岩石はそのとおりであった。しかし、稲田花崗岩のようにヤング率が低下する可能性もあることを指摘した。

## 参考文献

- Lama, R. D. and Vutukuri, V. S. (1978): Handbook on Mechanical Properties of Rocks (Volume 2), p. 66-79, Trans Tech Publications (Clausthal, Germany)
- 大久保誠介, 西松裕一(1986):三城目安山岩と河津凝灰岩のクリープ特性と構成方程式, 日本鉱業会誌, 102, p. 395-400
- 大久保誠介, 西松裕一, 緒方義弘(1987):非線形粘弾性モデルによる坑道変形のシミュレーション, 日本鉱業会誌, 103, p. 293-296
- 大久保誠介, 西松裕一, 福井勝則, 上野高明(1988):岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, p. 46-50, 土木学会岩盤力学委員会(東京)
- 大久保誠介(1991):岩石のクリープ, 資源と素材, 107, p. 245-252
- 大久保誠介(1992 a):コンプライアンス可変型構成方程式の解析的検討, 資源と素材, 108, p. 601-606
- 大久保誠介, 西松裕一, 何昌栄, 秋哲淵(1992 b):材料, 41, p. 403-409
- 大久保誠介, 秋哲淵(1993):気乾状態と湿潤状態とでの三城目安山岩のクリープ, 資源と素材, 109, p. 917-922
- 大久保誠介(2000):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, 第2章, 核燃料サイクル開発機構(東海村), 報告書番号 JNC TJ7400 2000-002
- 何昌栄, 大久保誠介, 西松裕一(1989): 資源と素材, 105, p. 591-596
- Perkins, R. D., Green, S. J. and Friedman, M. (1970): Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 7, p. 527-535
- 秋哲淵(1995):岩石の湿潤状態における時間依存性, 付録の p. 3-6, 東京大学博士論文
- 山口勉(1980):岩石の変形及び破壊に関する時間の影響, p. 110-112, 東京大学博士論文
- 山口勉, 大久保誠介, 西松裕一(1984):日本鉱業会誌, 三城目安山岩の非線形レオロジーモデル, 100, p. 631-635
- Wang, E., 松木浩二, 坂口清敏, 奥村清彦(2000): 平成12年度資源素材学会春季大会講演集(I) 資源編, p.165-166

Appendix 4-I (4.16)式の説明

次式を定応力速度の条件下で解くことにする.

$$\frac{d\lambda}{dt} = f(\lambda) \sigma^n \quad (4.15)$$

時刻  $t=0$  におけるコンプライアンスは  $\lambda_0$  で、応力は 0 であったとする.  $\lambda$  に関する項を左辺に、 $t$  に関する項を右辺にまとめた後、時刻  $t=0$  から  $t$  まで積分すると次式を得る.

$$\int_{\lambda_0}^{\lambda} \frac{d\lambda}{f(\lambda)} = \frac{1}{n+1} \frac{\sigma^{n+1}}{d\sigma/dt} = \frac{1}{n+1} \left[ \frac{\sigma}{(d\sigma/dt)^{1/(n+1)}} \right]^{n+1}$$

ここで、 $\sigma = (d\sigma/dt) \cdot t$  である. さらに次のように変形する.

$$(n+1) \int_{\lambda_0}^{\lambda} \frac{d\lambda}{f(\lambda)} = \left[ \frac{\sigma}{(d\sigma/dt)^{1/(n+1)}} \right]^{n+1}$$

ここで  $\sigma^* = \sigma / (d\sigma/dt)^{1/(n+1)}$  とおけば、コンプライアンスは  $\sigma^*$  の関数として  $\lambda(\sigma^*)$  のように記述できることがわかる.

歪  $\varepsilon$  は  $\lambda \sigma$  に等しい. よって、次式が成り立つ.

$$\frac{\varepsilon}{(d\sigma/dt)^{1/(n+1)}} = \frac{\lambda \sigma}{(d\sigma/dt)^{1/(n+1)}}$$

$\varepsilon^* = \varepsilon / (d\sigma/dt)^{1/(n+1)}$  と書くことにすれば、結局(4.16)式となる.

$$\varepsilon^* = \lambda(\sigma^*) \sigma^* \quad (4.16)$$

以上は定応力速度の時であるが、定歪速度のときの証明はほとんど同じであるので省略する.

Appendix 4-II (4.18)式の説明

次式を定応力速度の条件下で解くことにする.

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \\ \sigma &= k_1 \varepsilon_1 \\ \frac{d\varepsilon_2}{dt} &= f(\varepsilon_2) \sigma^n \end{aligned} \quad (4.17)$$

時刻  $t=0$  における  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  および  $\sigma$  は全て 0 であったとする。最下段の式に関して、 $\varepsilon_2$  に関する項を左辺に、 $t$  に関する項を右辺にまとめた後、時刻  $t=0$  から  $t$  まで積分すると次式を得る。

$$\int_0^t \frac{d\varepsilon_2}{f(\varepsilon_2)} = \frac{1}{n+1} \frac{\sigma^{n+1}}{d\sigma/dt} = \frac{1}{n+1} \left[ \frac{\sigma}{(d\sigma/dt)^{1/(n+1)}} \right]^{n+1}$$

ここで、 $\sigma = (d\sigma/dt) \cdot t$  である。さらに次のように変形する。

$$(n+1) \int_0^{\varepsilon_2} \frac{d\varepsilon_2}{f(\varepsilon_2)} = \left[ \frac{\sigma}{(d\sigma/dt)^{1/(n+1)}} \right]^{n+1}$$

ここで  $\sigma^* = \sigma / (d\sigma/dt)^{1/(n+1)}$  とおけば、 $\varepsilon_2$  は  $\sigma^*$  の関数として  $\varepsilon_2(\sigma^*)$  のように記述できることがわかる。

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_2(\sigma^*) \quad (4.18)$$



表4-1 試料岩石と実験結果

文献	歪の測定	割線/ 接線	ヤング率* GPa	強度** MPa	ヤング率 増加率*** %	強度増加率**** %	$\epsilon$ $10^{-6}$	$\epsilon_2$ $10^{-6}$	(21)式 (左辺)	(21)式 (右辺)
秋(1995)	LVDT	接線	10.4	93	1.9	6.2				
秋(1995)	LVDT	接線	10	74	2.5	8				
山口(1980)	LVDT	接線	18.2	101	3.7	6.2				
本研究	歪ゲージ	割線	19.1	82	2.1	6.2	2470	673	0.31	0.27
本研究	歪ゲージ	割線	6.1	28	1.7	-	2400	293	-	0.12
秋(1995)	LVDT	接線	4.2	16	4.7	5.6				
秋(1995)	LVDT	接線	3.3	9.1	7.6	10.1				
秋(1995)	LVDT	接線	3.5	11	6.9	6.6				
秋(1995)	LVDT	接線	1.6	5.0	4.6	15				
本研究	歪ゲージ	割線	67	97	-0.1	3.6	911	-30	-0.019	-0.033
本研究	歪ゲージ	割線	56	198	-0.5	4.5	1840	-688	-0.1	-0.37
本研究	歪ゲージ	割線	6.9	48	-0.7	-	3450	-3450	-	-1

\* ヤング率は載荷速度1/sまで外挿した値

\*\* 強度は載荷速度 $10^{-4}$ /sの時

\*\*\* 増加率は載荷速度が10倍になったときの値

\*\*\*\*  $\epsilon$ と $\epsilon_2$ は、応力レベル50%における歪と非弾性歪

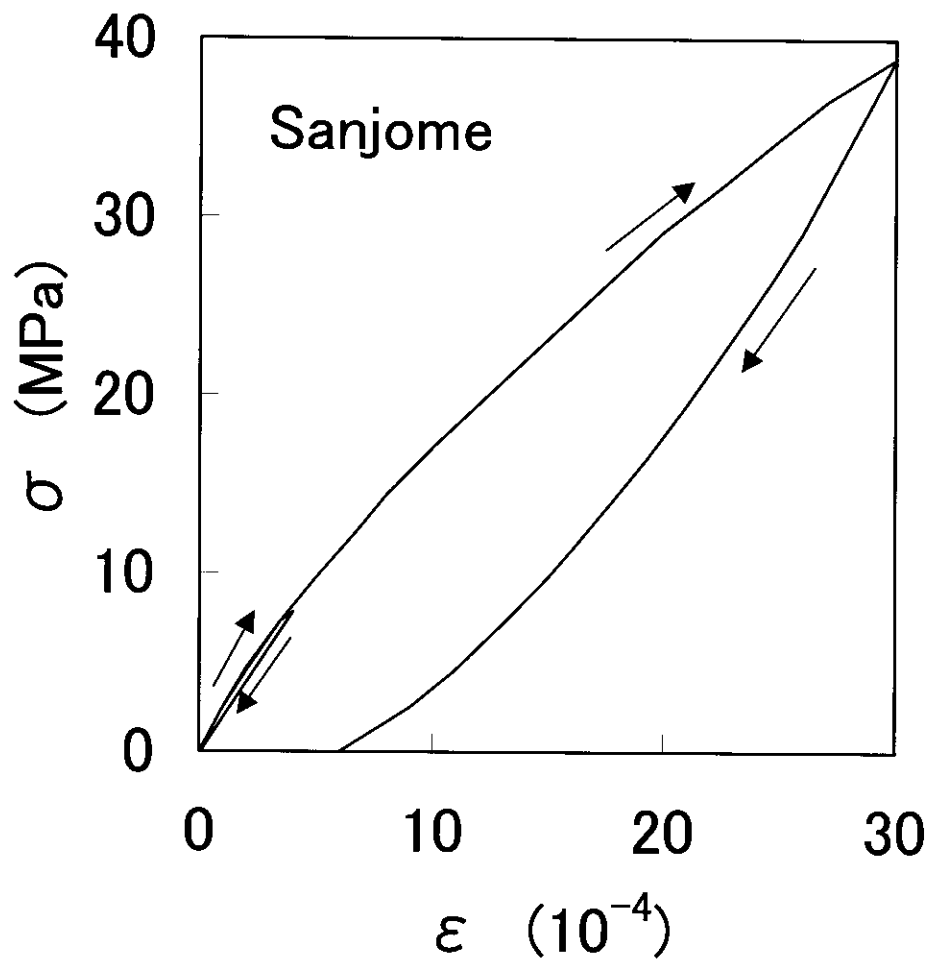


図4-1 実験手順を示す応力-歪曲線の例

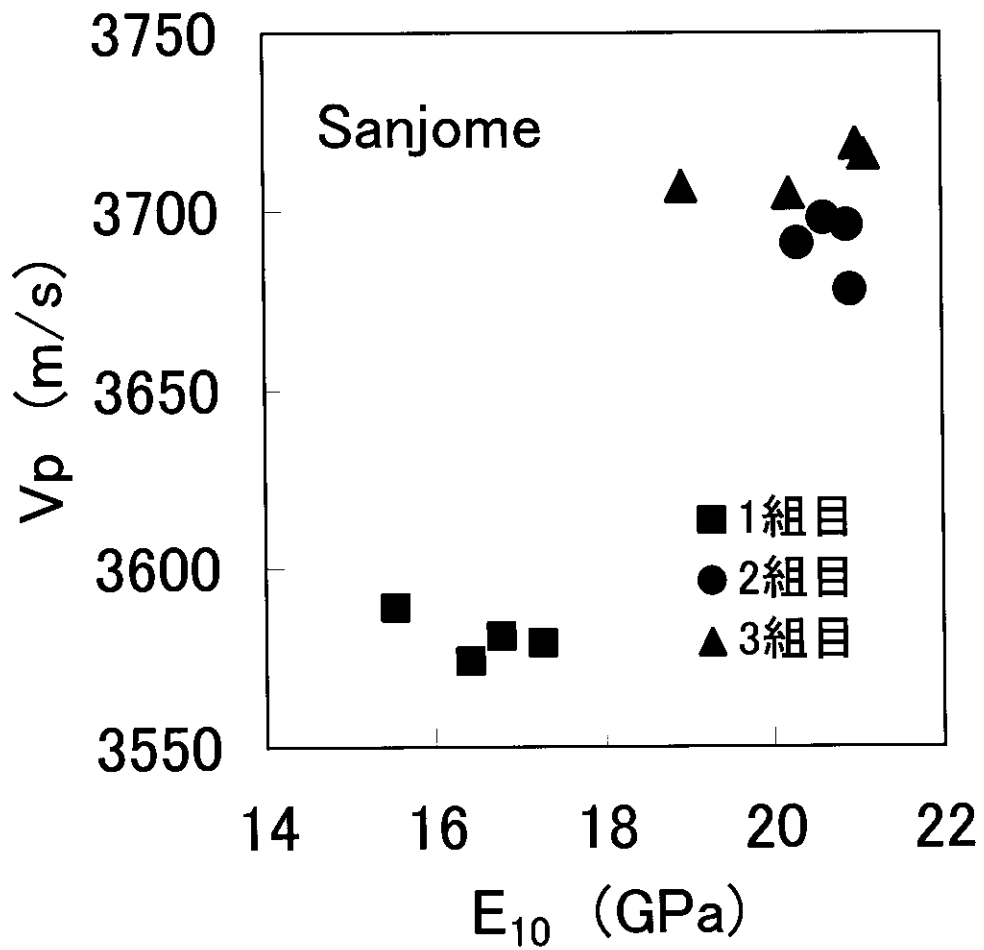


図4-2 三城目安山岩の縦波速度とヤング率  $E_{10}$  の関係

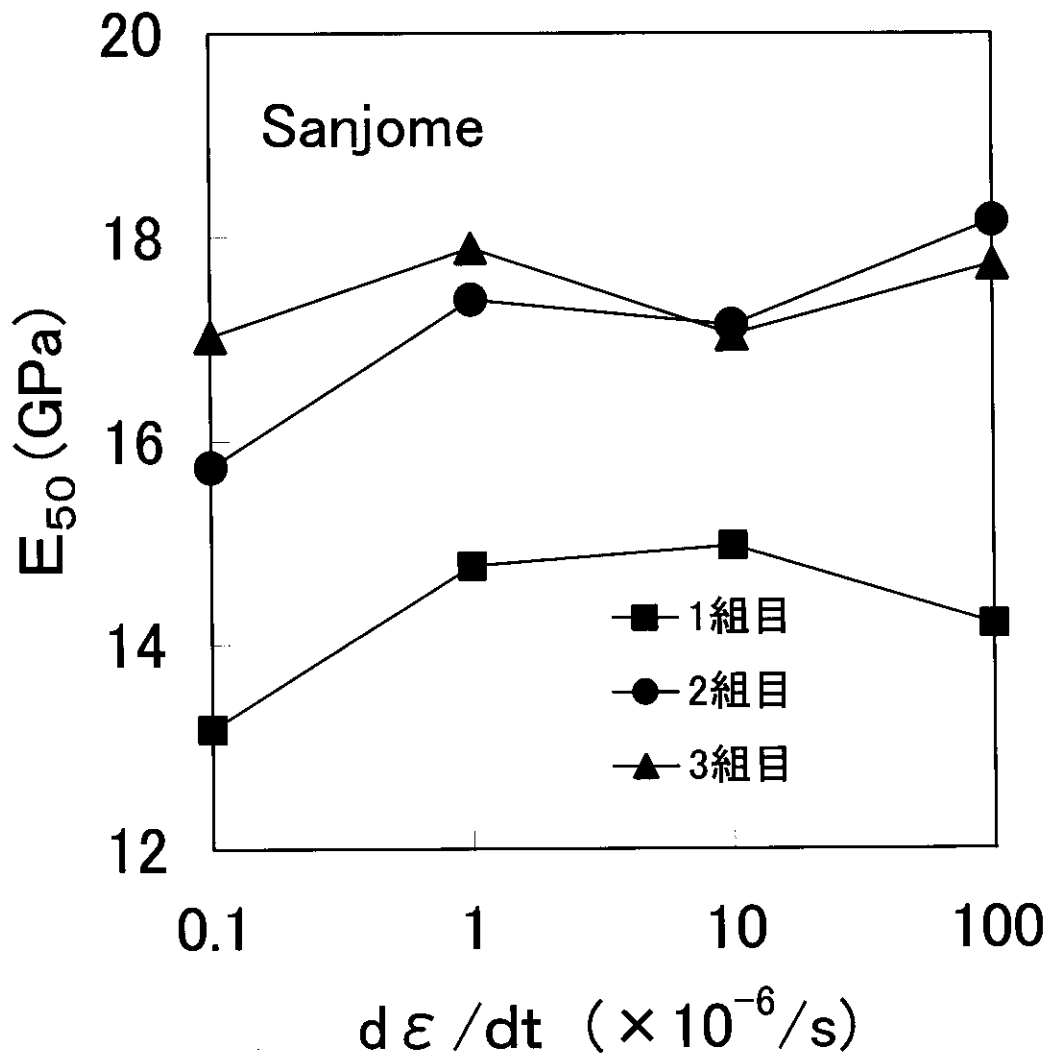


図4-3 三城目安山岩のヤング率  $E_{50}$  の載荷速度依存性

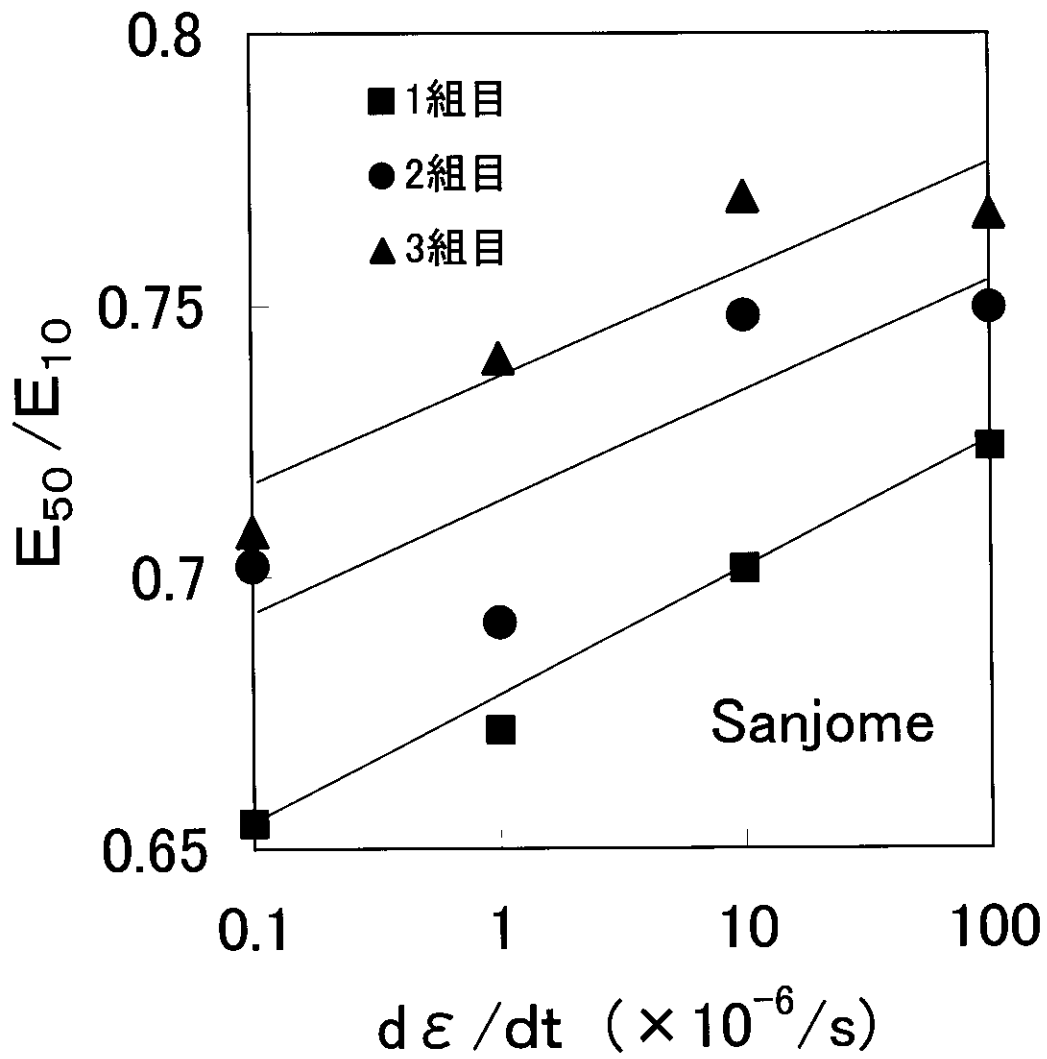


図4-4 三城目安山岩のヤング率  $E_{50}/E_{10}$  の載荷速度依存性

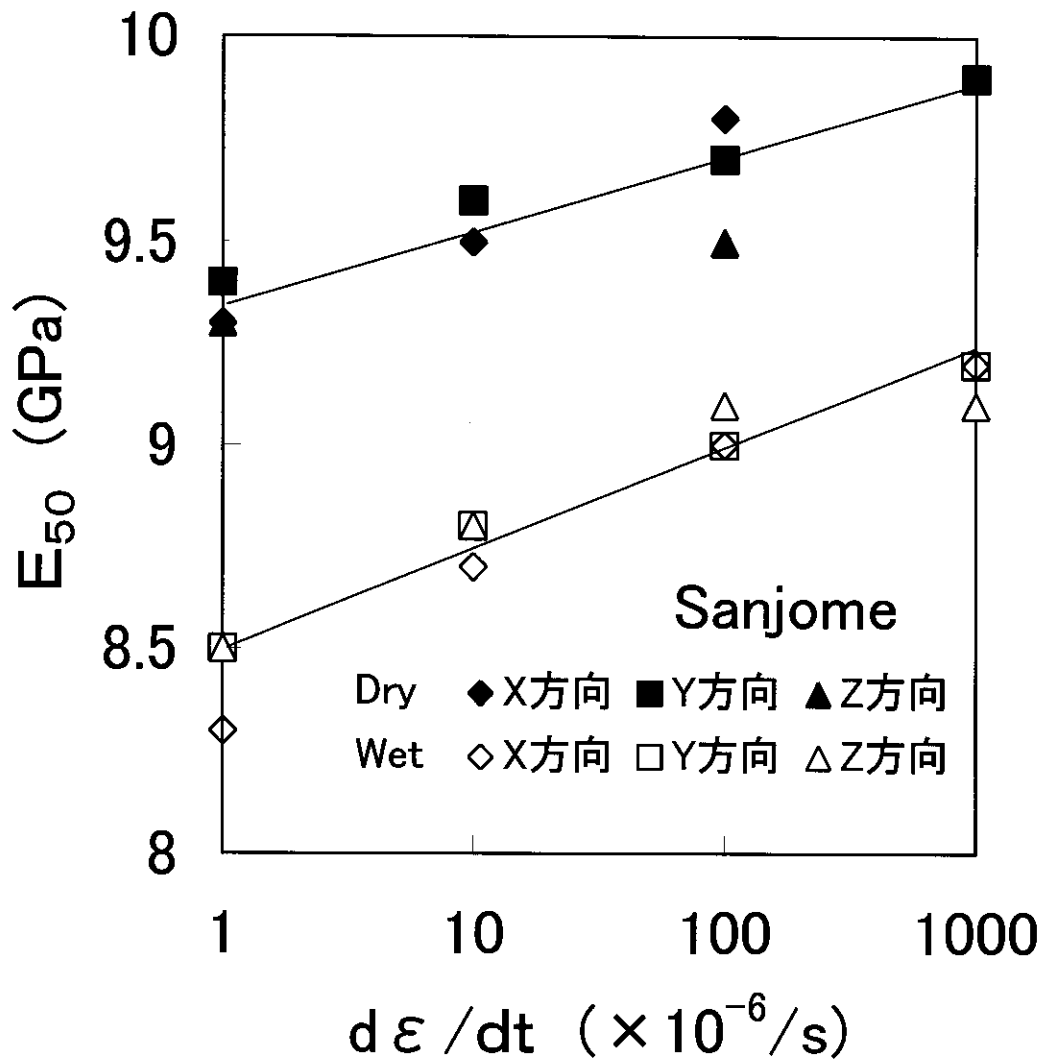


図4-5 方向性を考慮した三城目安山岩のヤング率

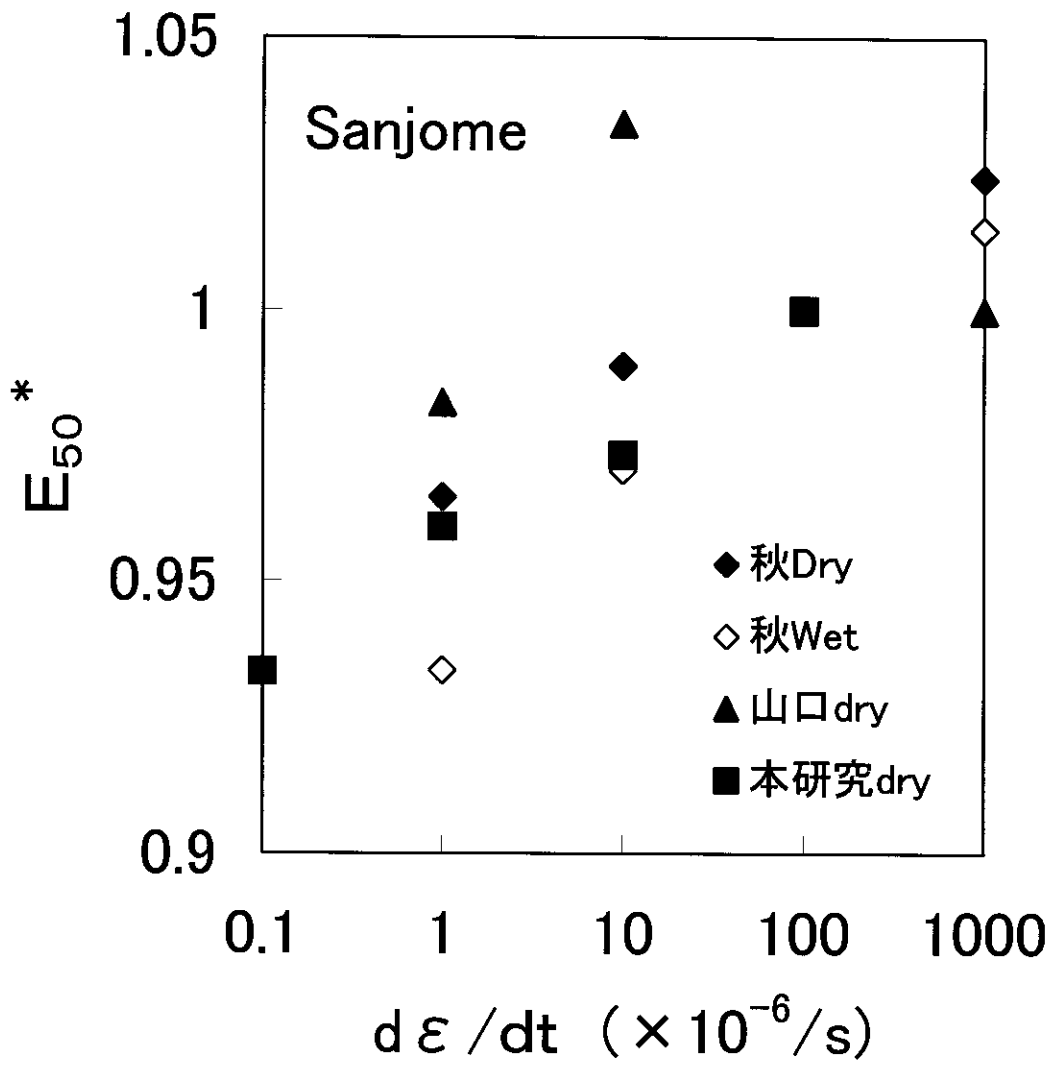


図4-6 三城目安山岩の規格化ヤング率

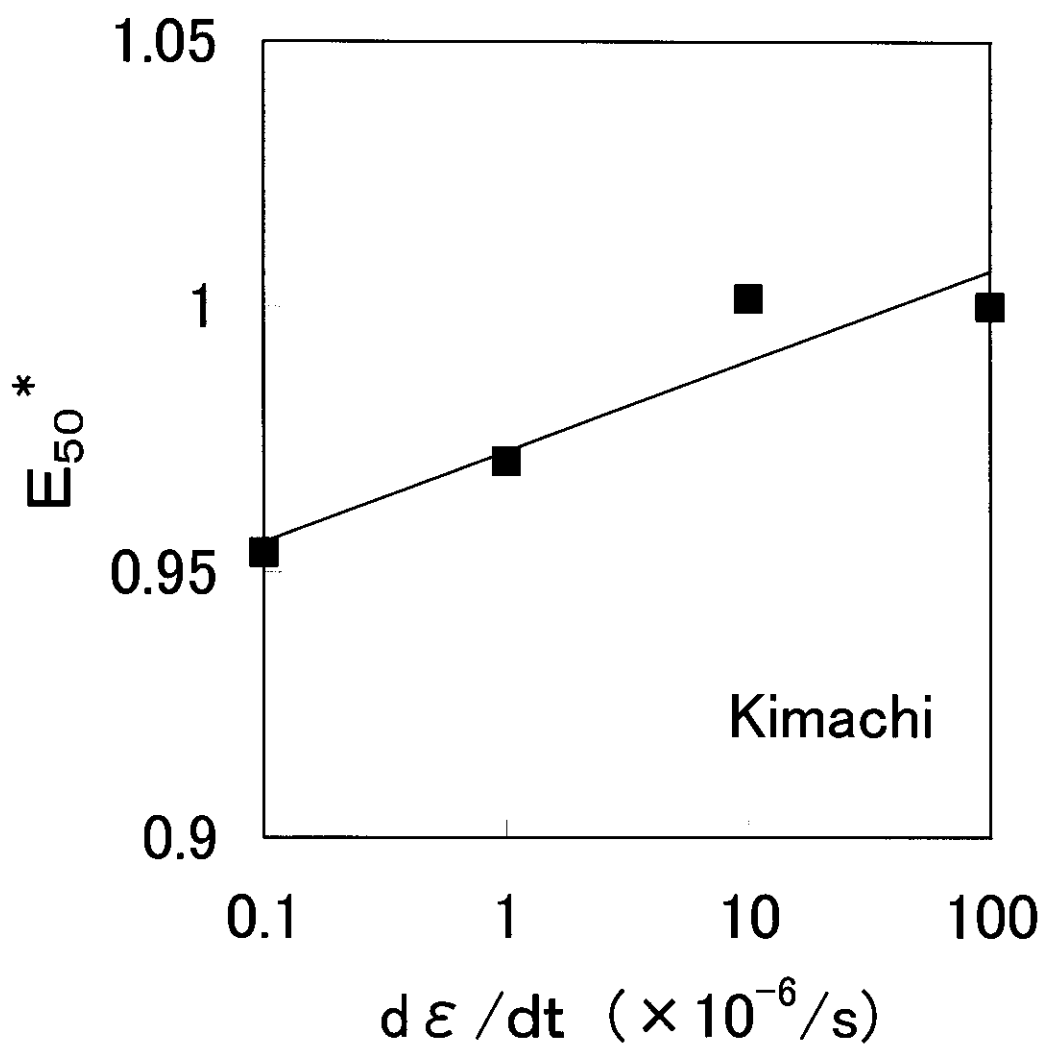


図4-7 来待砂岩の規格化ヤング率



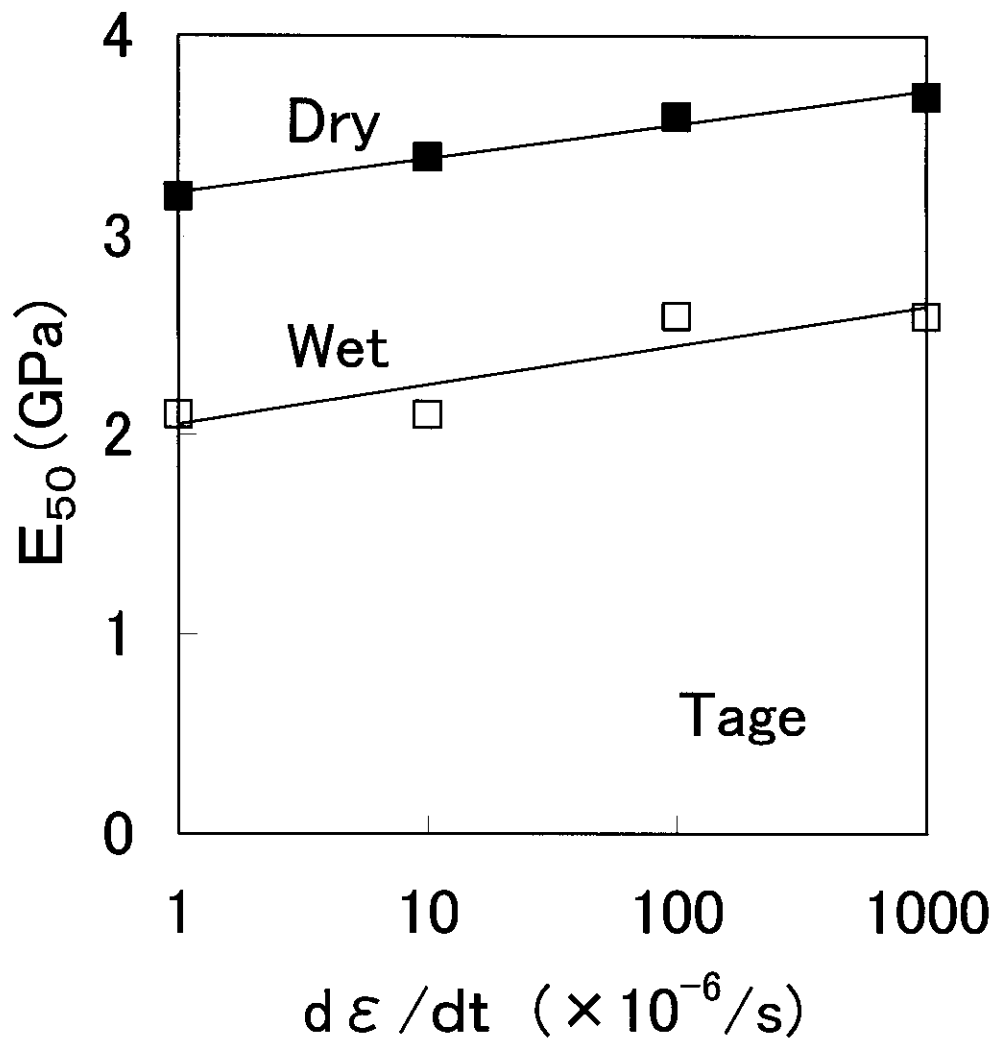


図4-8 気乾状態と湿潤状態の田下凝灰岩のヤング率

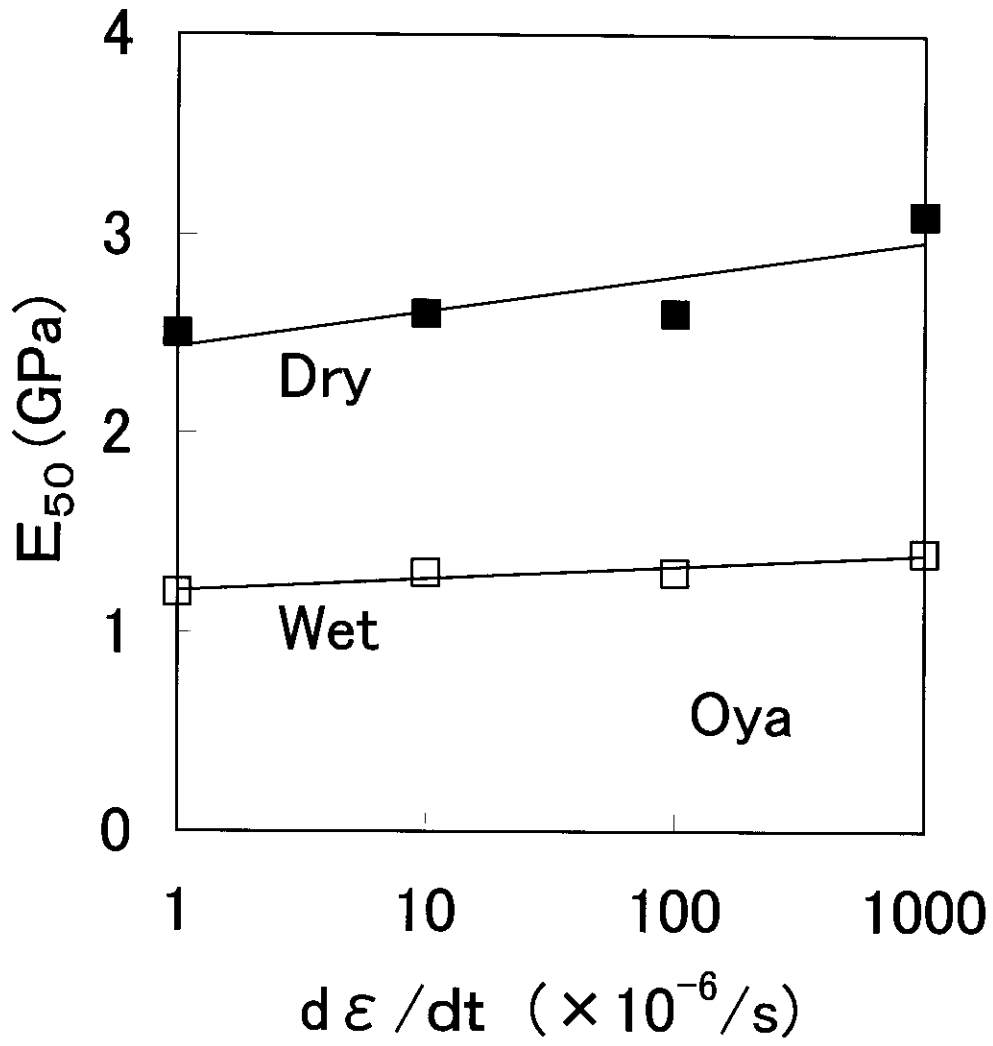


図4-9 気乾状態と湿潤状態の大谷凝灰岩のヤング率

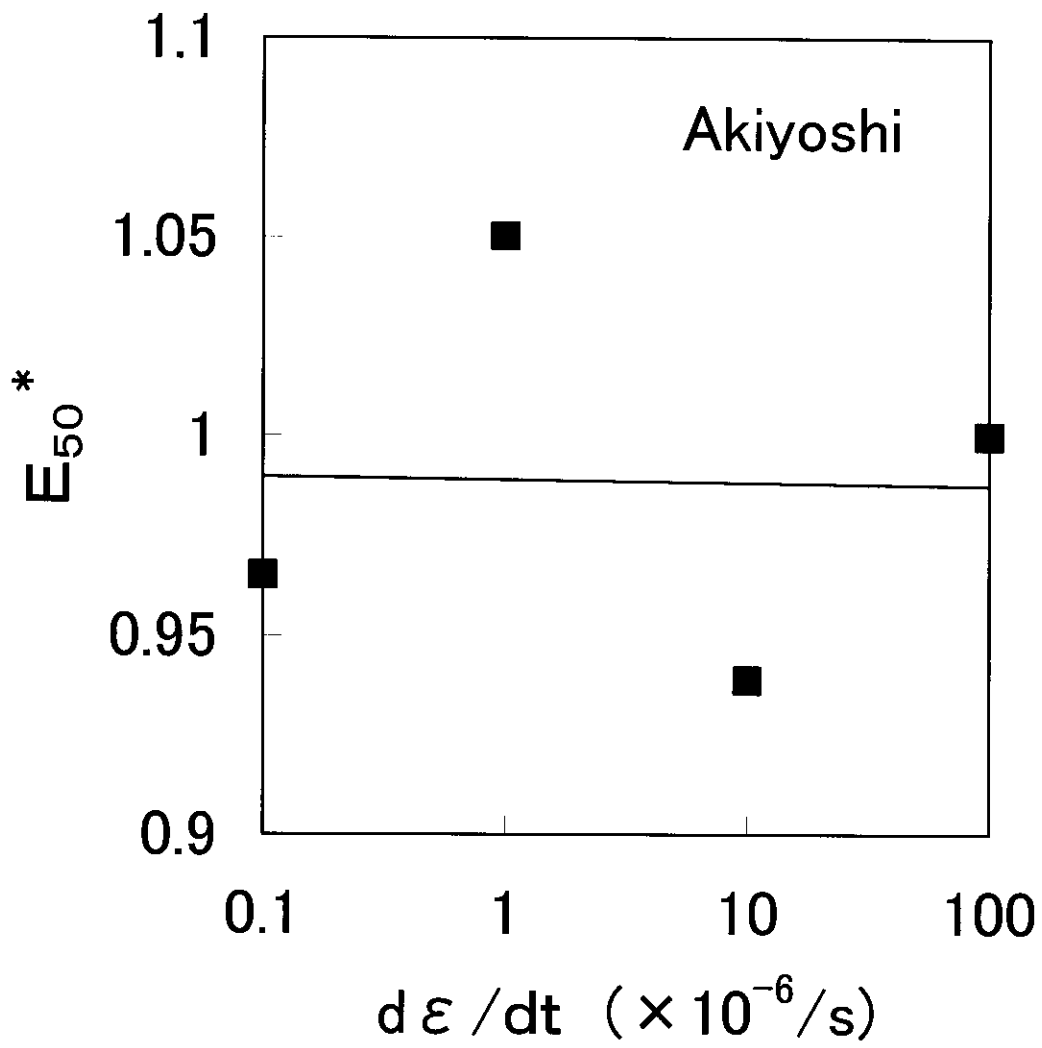


図4-10 秋吉大理石の規格化ヤング率

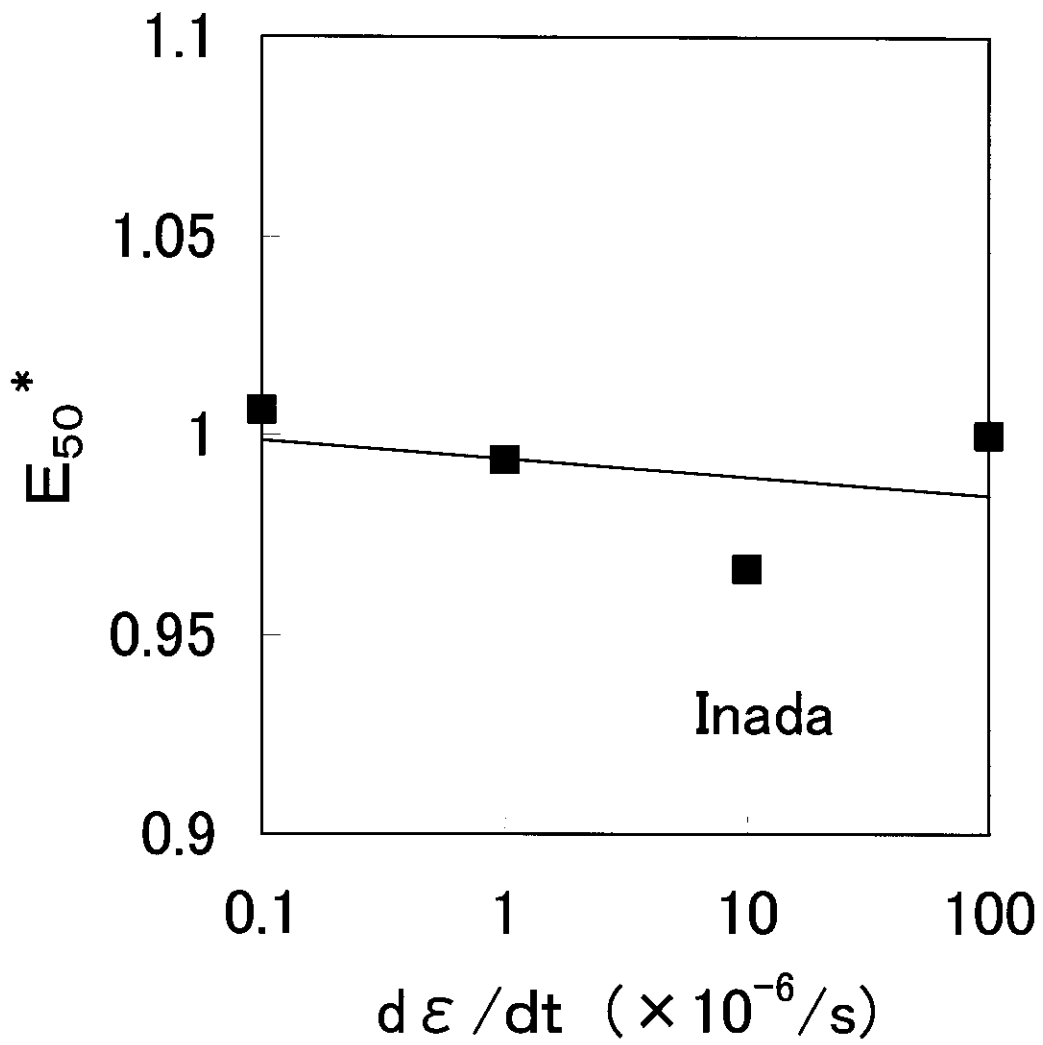


図4-11 稲田花崗岩の規格化ヤング率

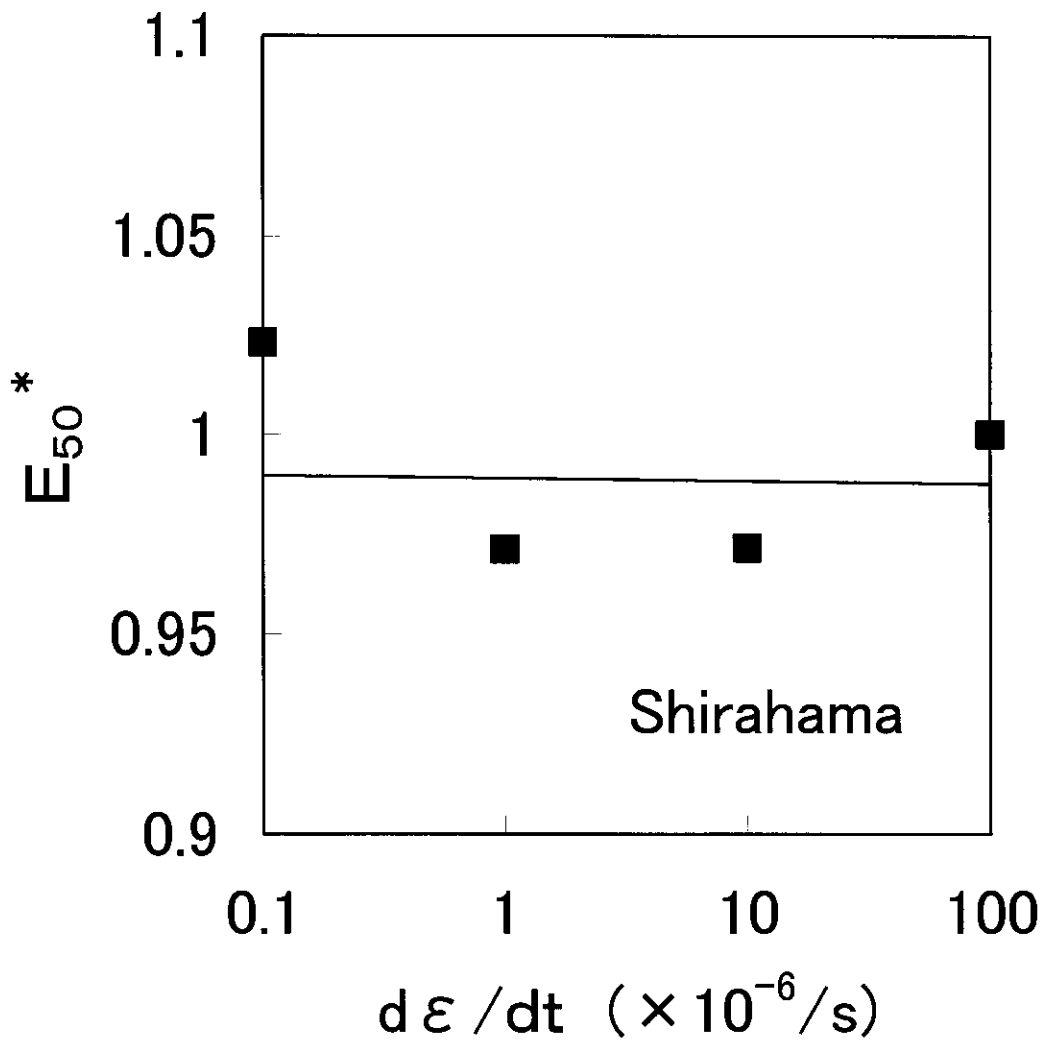
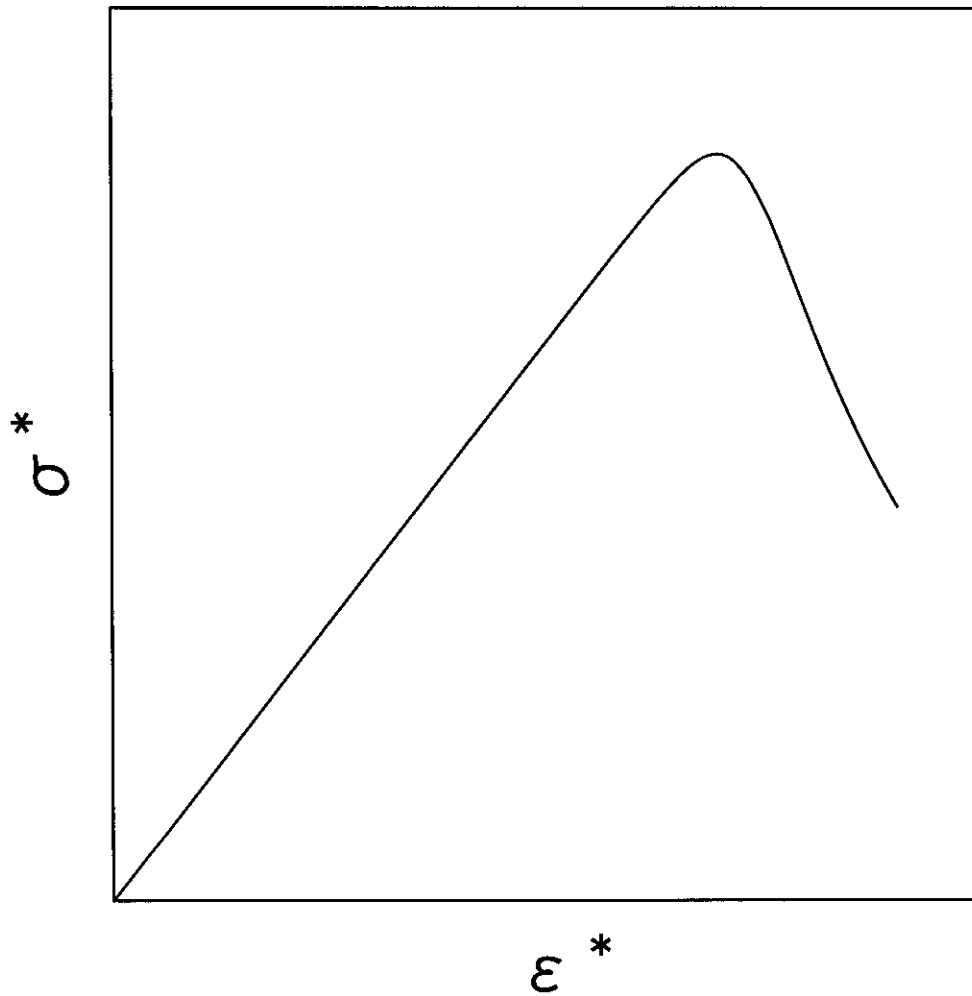
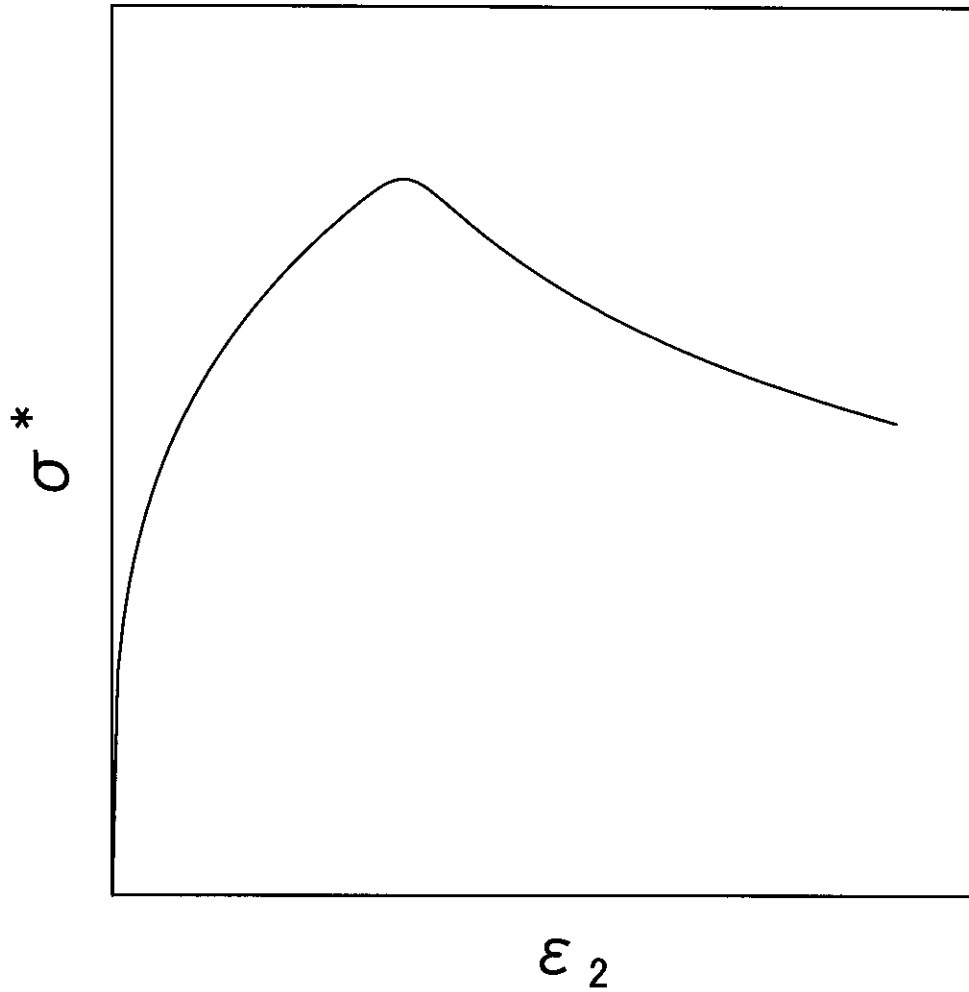


図 4-12 白浜砂岩の規格化ヤング率



(a)コンプライアンス可変型構成方程式の基準化応力-歪曲線  
 図4-13 構成方程式より導かれる応力-歪曲線



(b) 非弾性歪を考えた構成方程式の基準化応力-非弾性歪曲線  
図4-13 構成方程式より導かれる応力-歪曲線

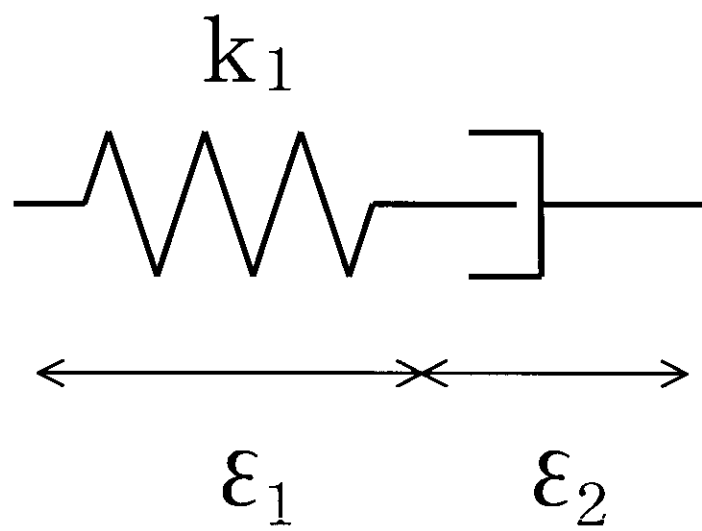


図 4-14 非弾性歪を考えた力学模型



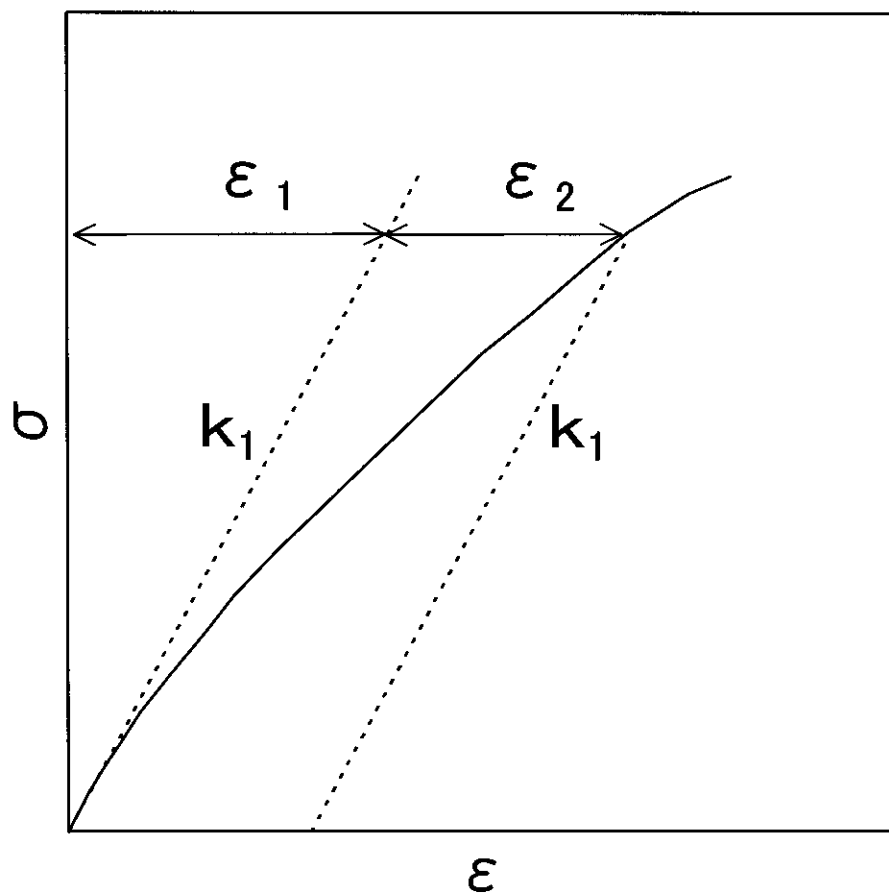


図4-15 非弾性歪のもとめ方.  $k_1$ は10%割線ヤング率

## 5. 可視化周圧ベッセルによる三軸圧縮試験

通常、周圧下の試験では、周圧維持装置とサーボ試験機を使用して圧縮強度試験をおこない、応力-歪曲線などの基礎データを得る。問題は、金属性の周圧ベッセル（圧力容器）中に試験機が納まっており、試験片の変形や破壊状況が逐次観察できないことである。そこで昨年度、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、田下凝灰岩を用いた予備結果について述べた。

本年度は、土丹を用いて実験を行った結果について述べる。実験条件としては、以下のようにした。

○岩石：土丹

○環境：常温下、気乾状態

○歪速度：10  $\mu$ /sec

○試験片：直径2.5 cm、高さ5 cmの円柱形

○周圧：2 MPa、4 MPa、8 MPaの3通り

周圧2 MPaでの試験結果の一例を図5-1 (a)～(r)に示す。図は、差歪が0.01ごとに差応力-差歪曲線における位置と、その時の試験片の写真を示したものである。図5-1に示した試料では、左上から右下にかけてせん断破壊が生じており、強度破壊点以降、ほとんど差応力の低下はなく、かなり延性的な特性を示している。(c)ではほぼ強度破壊点に至っているが、試験片は見た目では変化が観察できない。(d)では左上から試験片中央部にかけて、せん断面がわずかに観察できるようになっている。(e)、(f)と差歪が増加するに従い、そのせん断面は明瞭になってきている様子をうかがうことができる。(g)では、先ほどのせん断面の上部にほぼ同じ角度のせん断面が形成されていることもわかる。

図5-1で示した結果のうち、差歪が0.03ごとの結果を抜き出してまとめたものが、図5-2である。図では、差歪が0.03～0.06の間で、2つのせん断面が試験片表面に現れていることがわかる。その後、徐々にそのせん断面が明瞭になっている様子もわかる。

周圧4 MPaでの試験結果の一例を図5-3 (a)～(q)に示す。図5-3に示した試料では、さきほどの試料と異なり、試験片上部が樽状にふくれるような破壊様式であった。強度破壊点以降、若干差応力の低下しているものの、延性的な特性を示している。(c)ではほぼ強度破壊点に至っており、写真ではわかりにくいですが、その後、試験片上部の側面が徐々にふくらんでいる。光線の加減で、左側は白っぽくなっており観察できないが、右側の光線の関係で黄色く見えているあたりがふくらんでいる様子わかる。(h)では0.07の差歪となった結果であるが、与えた変位により、試験片の中央部に試験片を覆っている熱可縮性チューブがたるんでいる様子わかる。(m)になると、光が反射して見えなかった左側の側面も見えるようになっており、ほぼ左右対称に樽状にふくらんでいる様子わかる。

図5-3で示した結果のうち、差歪が0.03ごとの結果を抜き出してまとめたものが、図5-4である。試験片上部が徐々にふくらんでいく様子わかる。

周圧8 MPaでの試験結果の一例を図5-5 (a)～(q)に示す。図5-5に示した試料では、右上から左下にかけてせん断破壊が生じた。この試料では、降伏後、強度の低下はなく、歪

硬化が生じている。(b)まではほぼ弾性的挙動を示し、(d)からは塑性領域に入り徐々に応力は増加している。(e)あたりから、左側面の中央部および、右側面の上部で試験片がふくらみ始めている様子がわかる。その後、徐々にふくらみが増していき、(h)では右上部からせん断面が現れ始めている。その後、せん断面も明瞭になりつつ、試験片側面のふくらみも増加していることがわかる。

図5-5で示した結果のうち、差歪が0.03ごとの結果を抜き出してまとめたものが、図5-6である。図では、樽状になりながら、せん断面が形成される様子が分かり、図5-1、図5-3の事例の中間的な破壊様式である。

同一条件(周圧)ごとに3本の試験を行ったので、最終的な試験片の様子を図5-7に示す。図5-7(a)は、周圧2MPaの結果である。試験片③は試験片下部が、試験片⑧は試験片上部がそれぞれ樽状にふくれる破壊様式となっている。他方、試験片⑤は左上から右下にかけて2つのせん断面によって破壊されている。

図5-7(b)は周圧4MPaの結果である。3本の試験片ともに試験片下部が樽状にふくらんだ破壊が生じている。ただし、試験片⑨では、試験片左上部から右下部にかけて、せん断面が生じており、複合的な破壊様式となっている。

図5-7(b)は周圧4MPaの結果である。試験片⑩および⑪は樽状破壊で、試験片⑦はせん断破壊である。

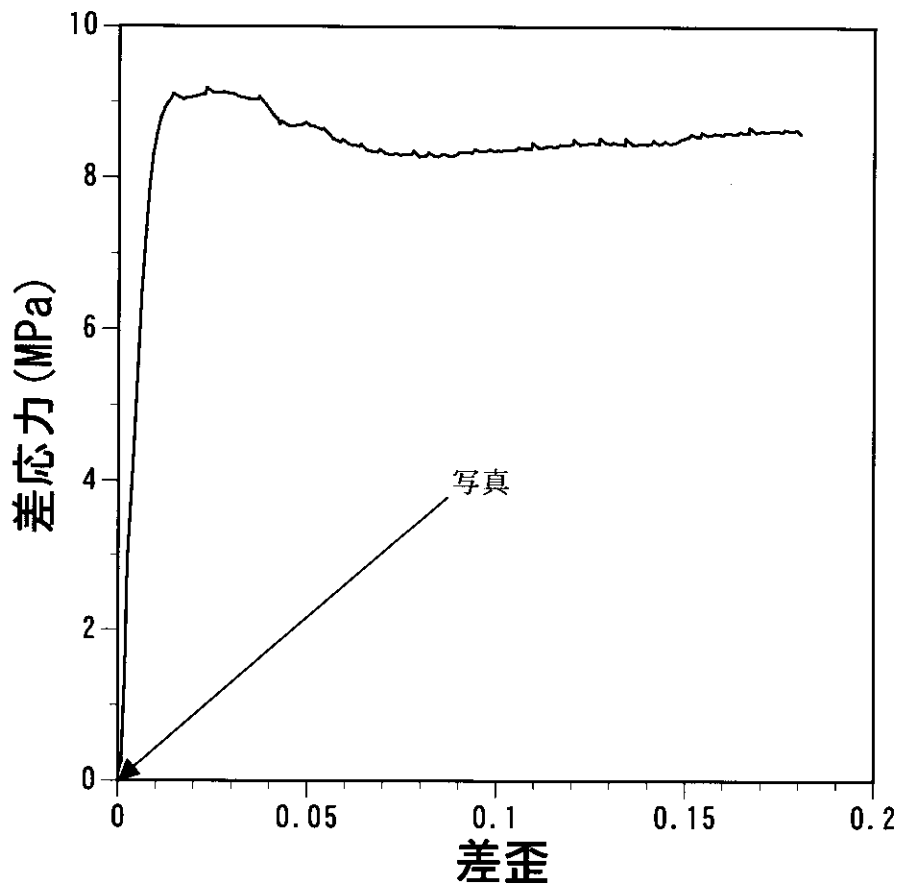
以上のように、本研究で行った限りにおいては、周圧によって破壊様式が変化しているのではなく、試験片ごとに樽状になったり、せん断破壊をしたりしている結果となった。

せん断破壊は破壊様式としてわかりやすいが、樽状破壊では内部がどのような状態になっているのかが不明であったため、X線断層撮影を行うこととした。X線断層撮影は、典型的な樽状破壊をしていた試験片⑨(周圧4MPa)を用いた。

図5-8に試験片の写真と、X線断層(CTスキャン)撮影を行った地点を示す。断層撮影は、①から⑦までの7断面で行った。位置に関しては、図5-8を参照されたい。

図5-9にX線断層撮影結果を示す。X線断層の結果は、CT値と呼ばれるX線の透過率で表されるが、密度との相関から密度に換算した値を図で示した。断面①ではほぼ密度は2となっており、わずかに周辺部の方が高い傾向が見られる。また、側面の変位がほとんど同じである。断面②に比べて若干密度が大きい傾向も見られる。以上から、断面①はプラテンに近いことから、圧縮試験によって圧密されたことによるものと考えられる。断面③も中央部に比べ周辺部の方が密度が高く、断面①および②と同じような傾向である。断面④ではわずかであるが、中央部の密度が高くなっている。断面⑤および⑥ではより顕著に中央部の密度が高い。試験片端部に近い断面⑦では、逆に周辺部の密度が高い傾向が見られる。

密度が減少している領域では、亀裂などが開口していることが考えられるため、変形・破壊が進行した領域と考えられ、逆に密度が増加している領域はさほど変形・破壊が進行しておらず、むしろ圧密されていると考えることができる。よって、今回得られた樽状の破壊に関しては次のように考えることができる。樽状にふくらんでいる領域では、プラテンから円錐状に圧密された健全な領域が内部にあり、その周りの部分で亀裂の開口などの変形・破壊が生じたものであり、樽状となっていない上部ではさほど変形・破壊は進行していないと考えることができる。



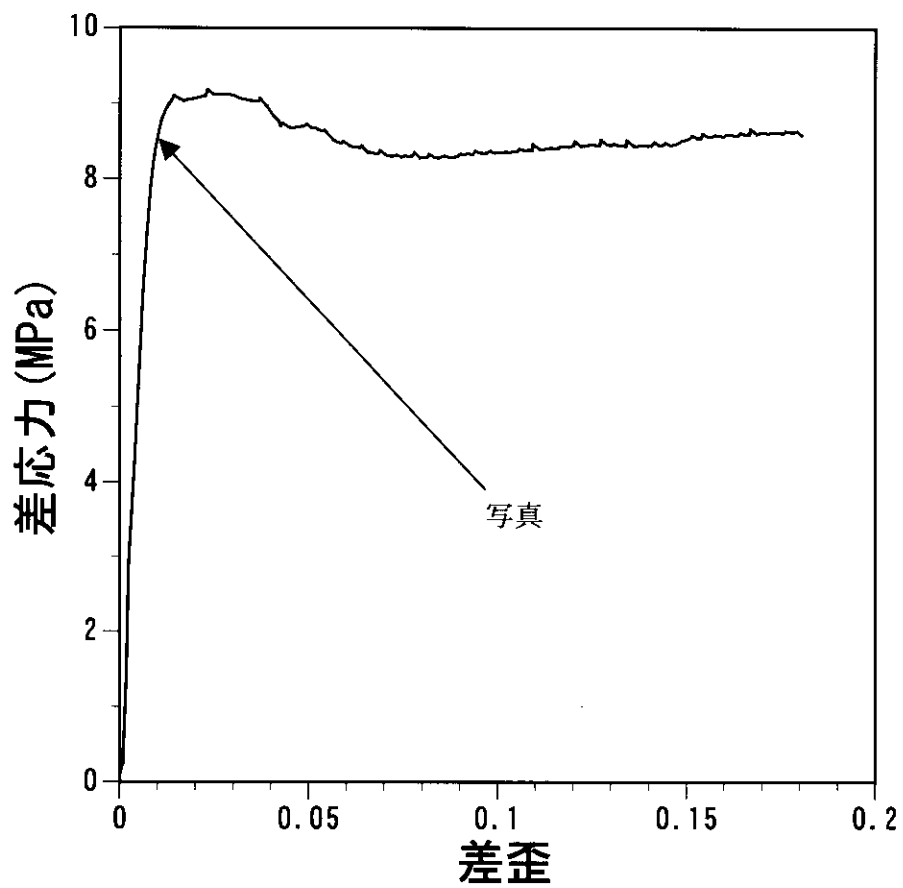
(a) 差歪0の時

図5-1 三軸圧縮試験結果

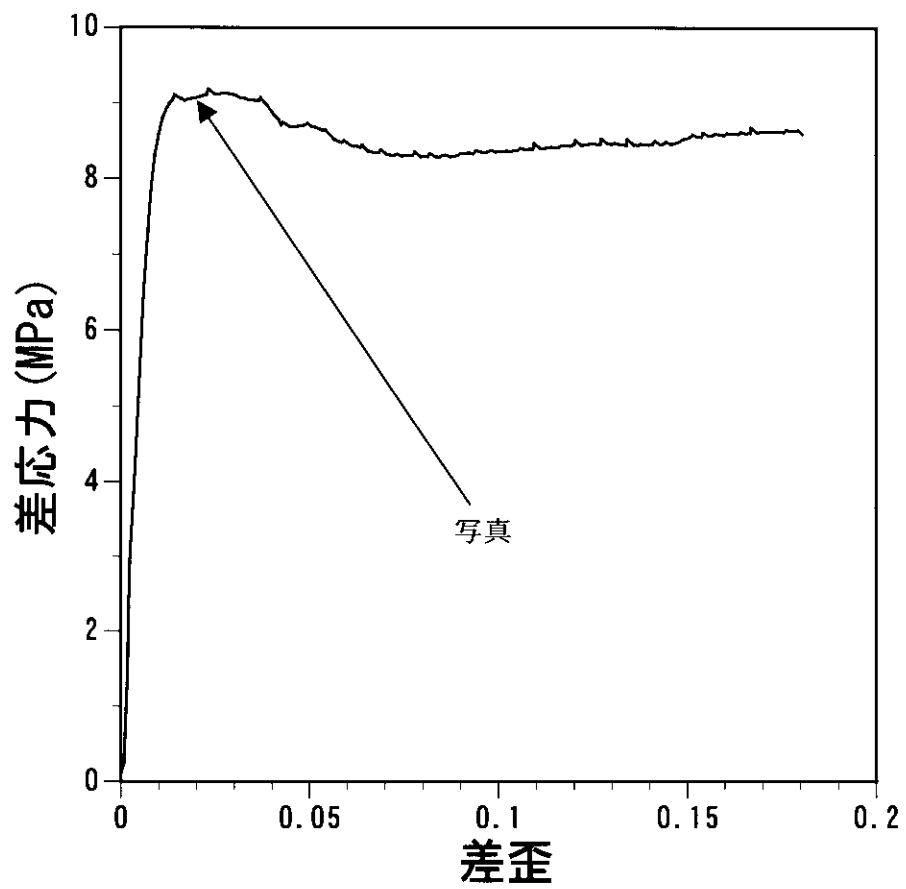
試料：土丹

周圧：2 MP a

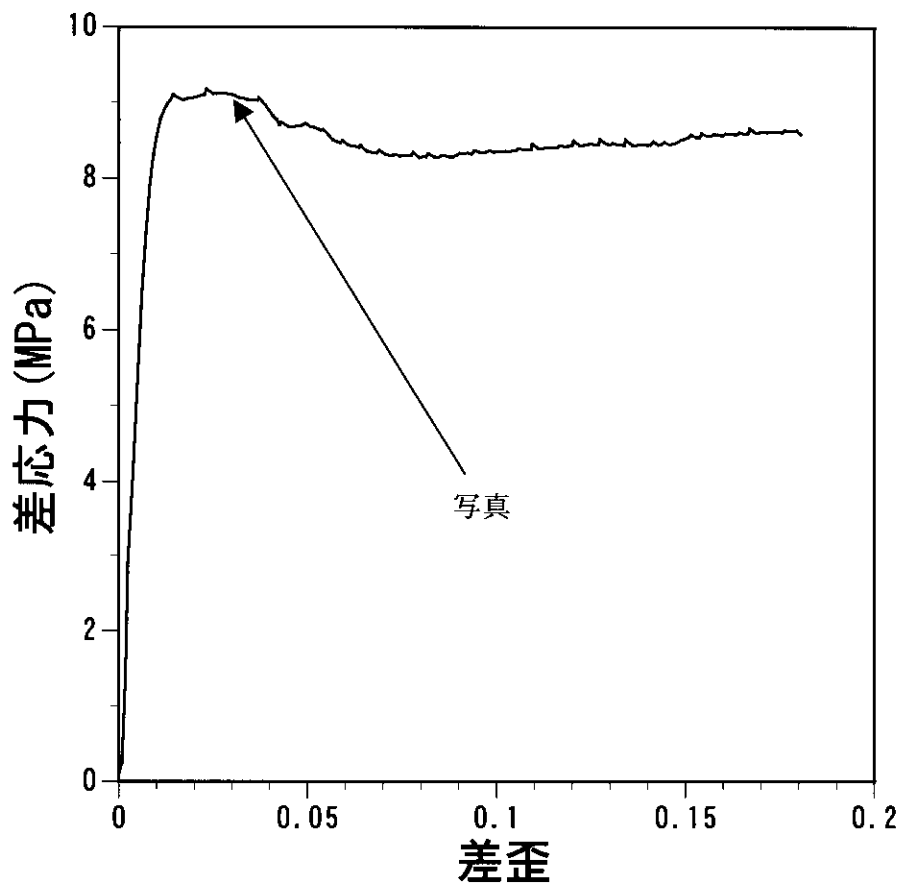
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



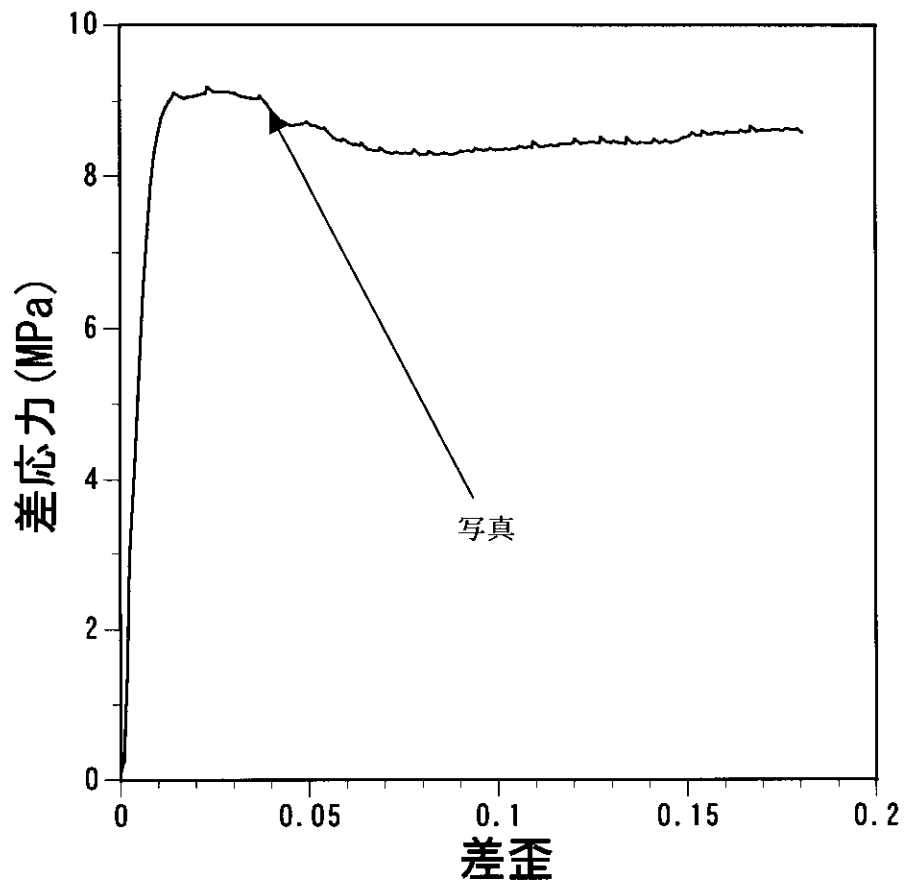
(b) 差歪0.01の時  
図5-1 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：2 MP a  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



(c) 差歪0.02の時  
図5-1 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：2 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

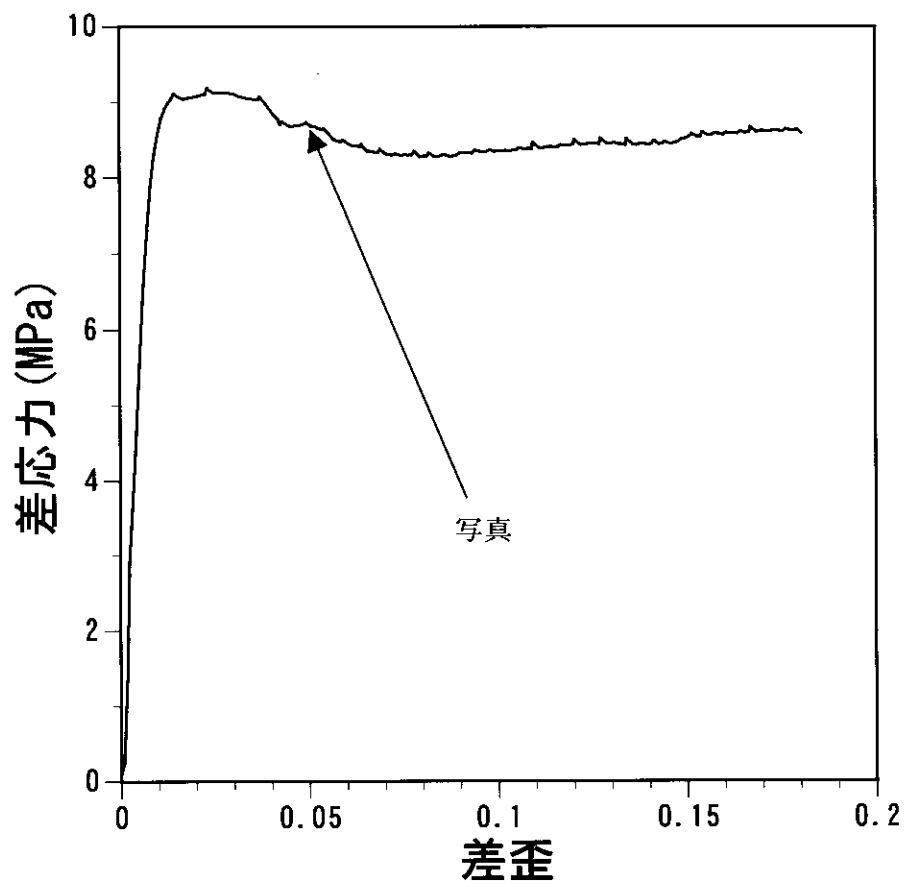


(d) 差歪0.03の時  
図5-1 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：2 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

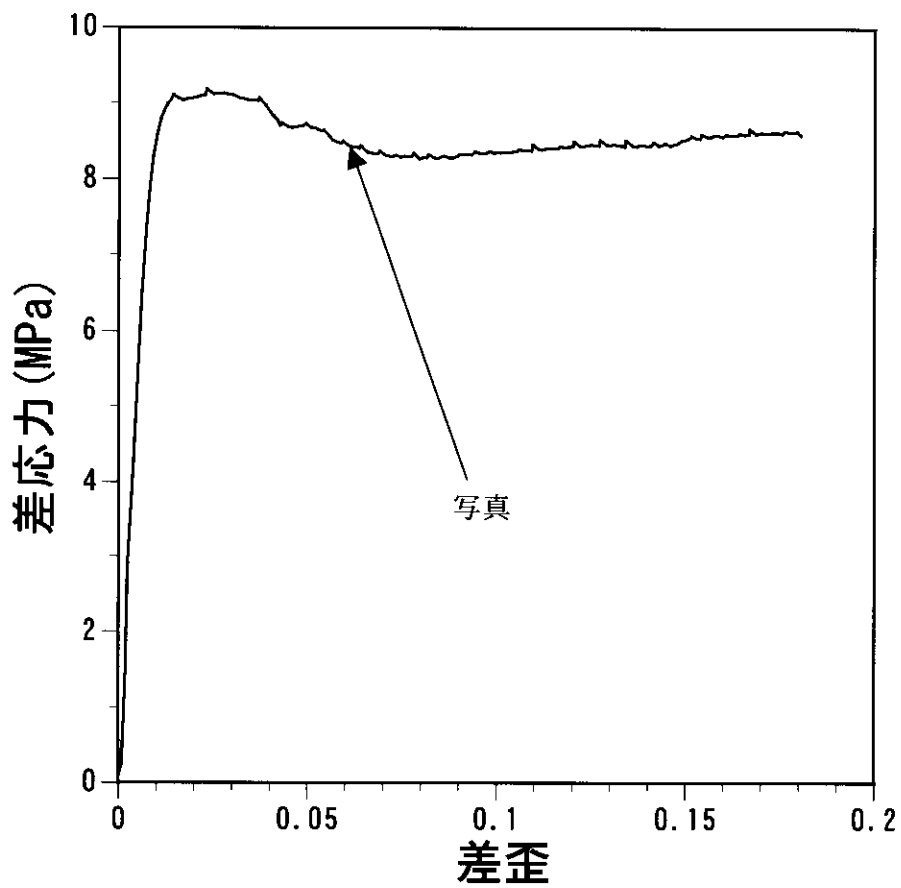


(e) 差歪0.04の時  
図5-1 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：2 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

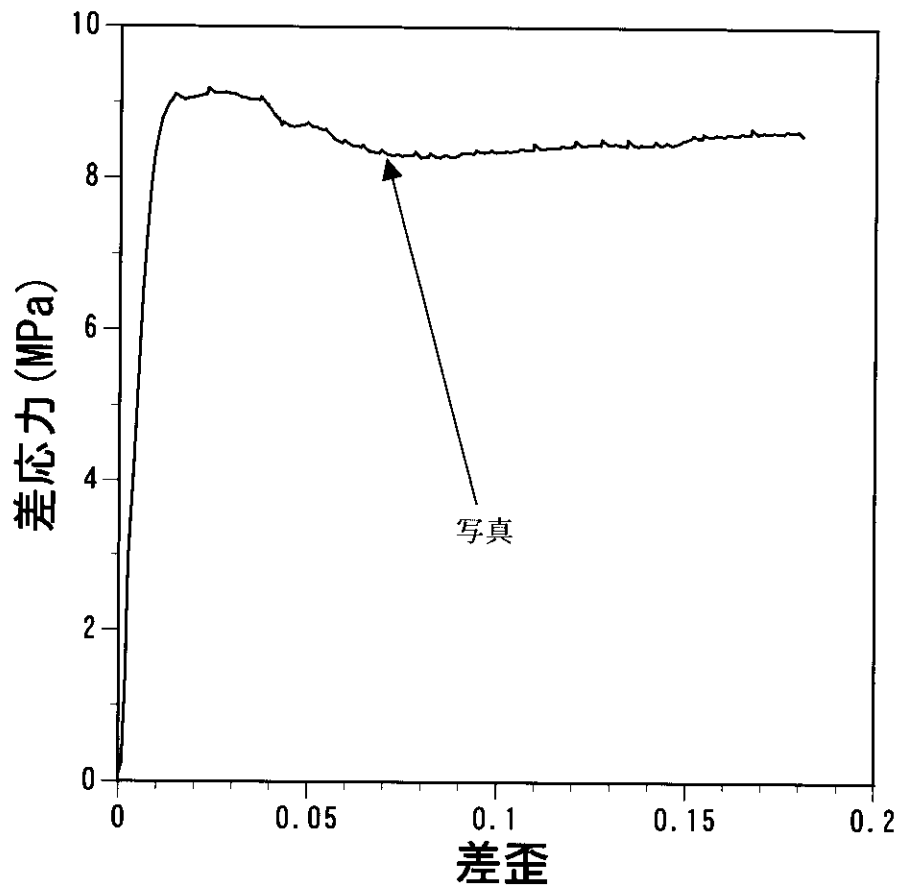




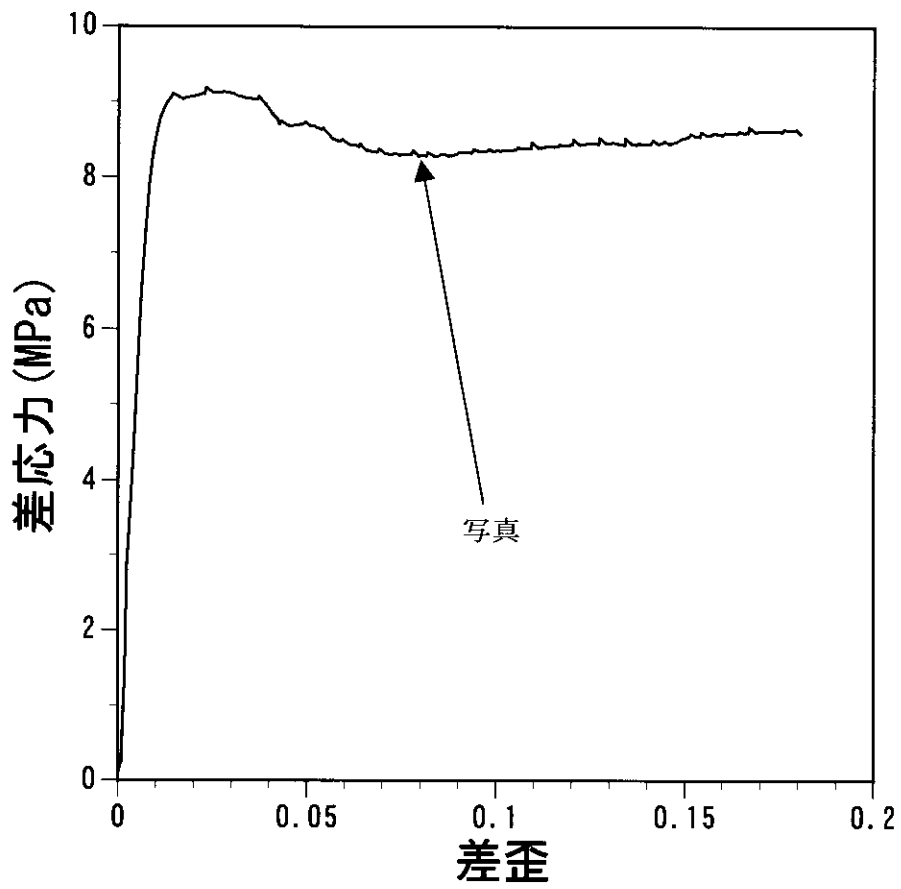
(f) 差歪0.05の時  
図5-1 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：2 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



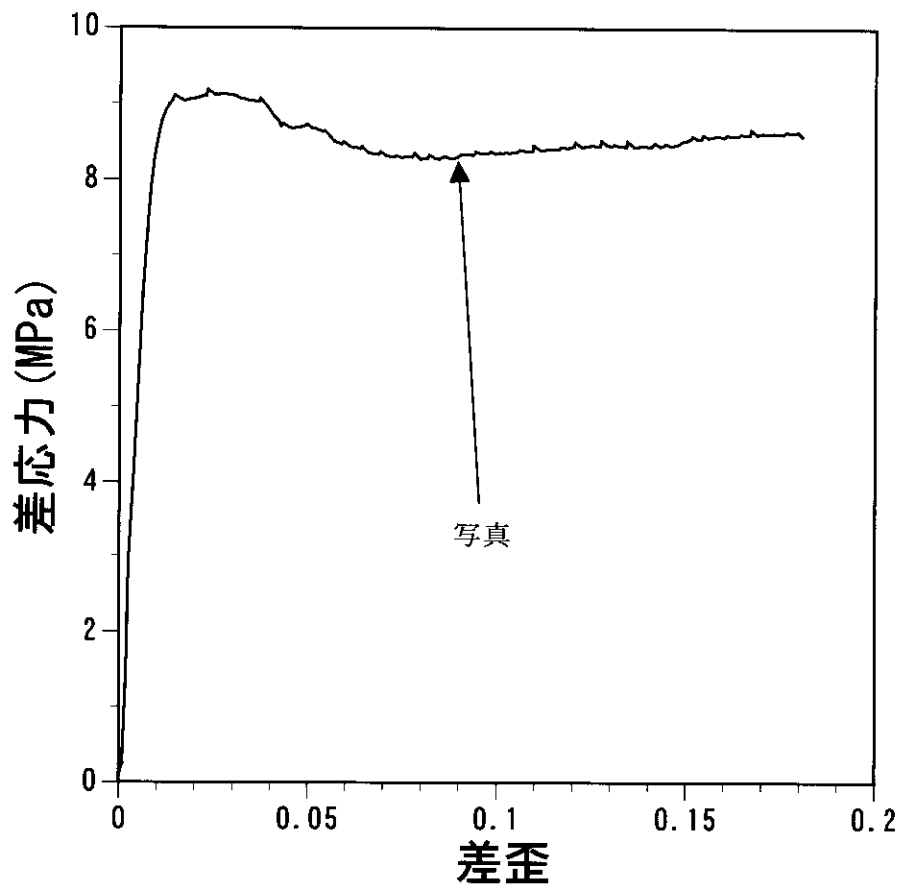
(g) 差歪0.06の時  
図5-1 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：2 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



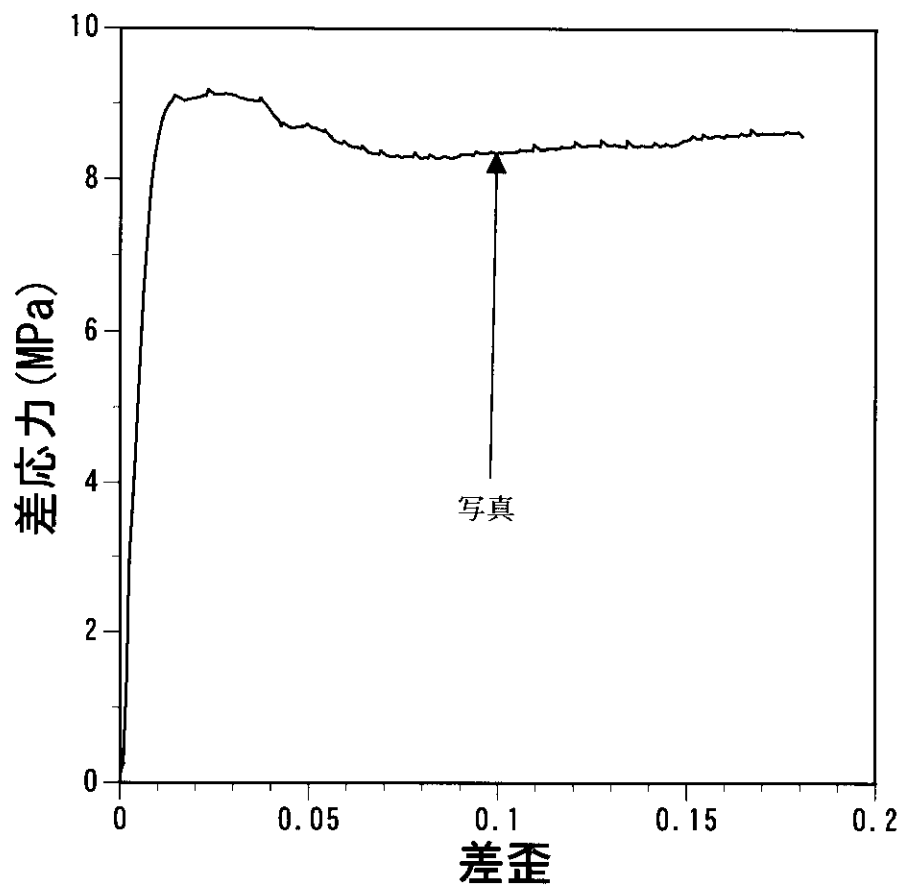
(h) 差歪0.07の時  
図5-1 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：2 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



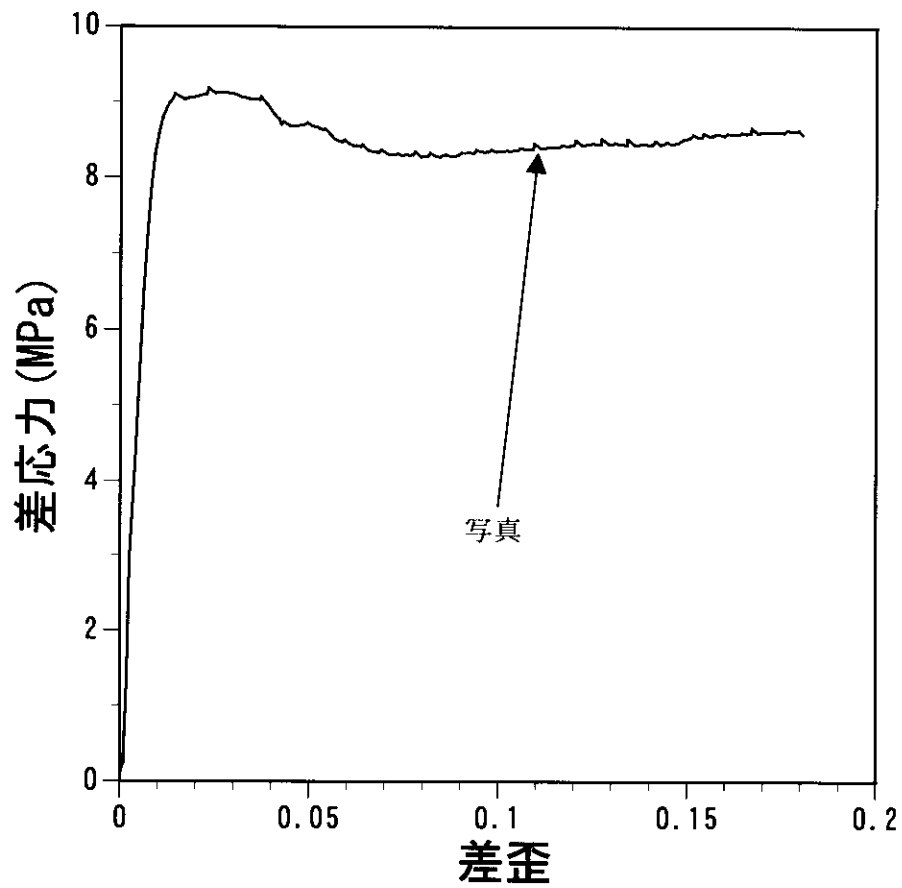
(i) 差歪0.08の時  
図5-1 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：2 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



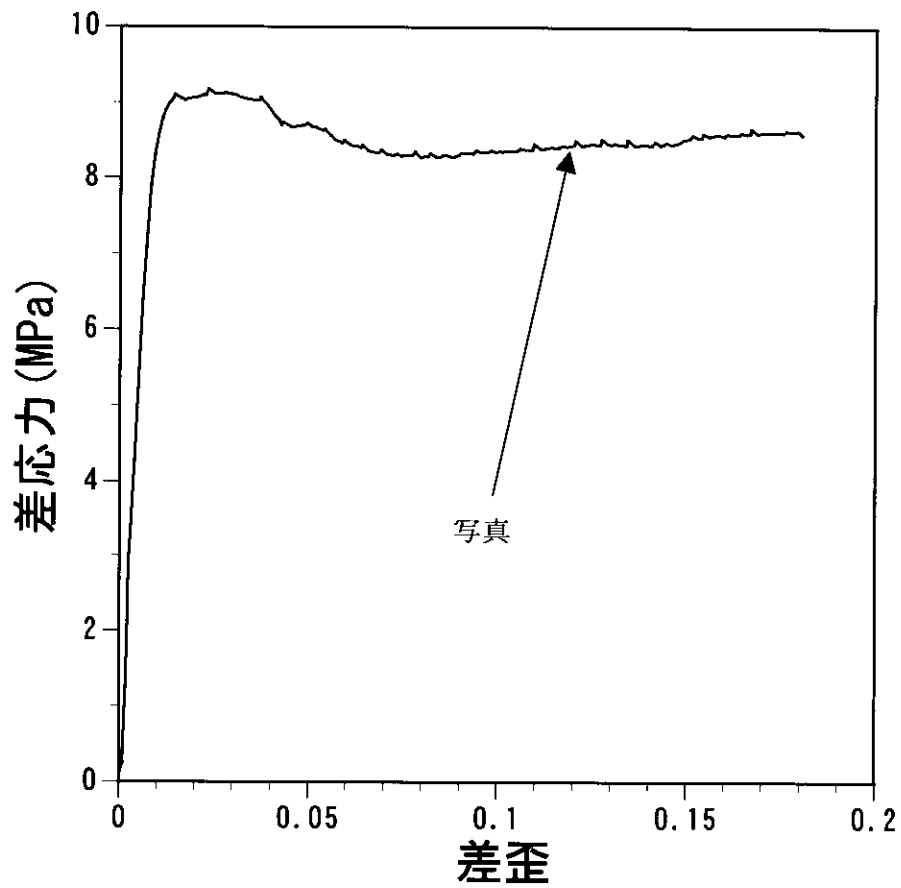
(j) 差歪0.09の時  
図5-1 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：2 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



(k) 差歪0.10の時  
図5-1 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：2 MP a  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

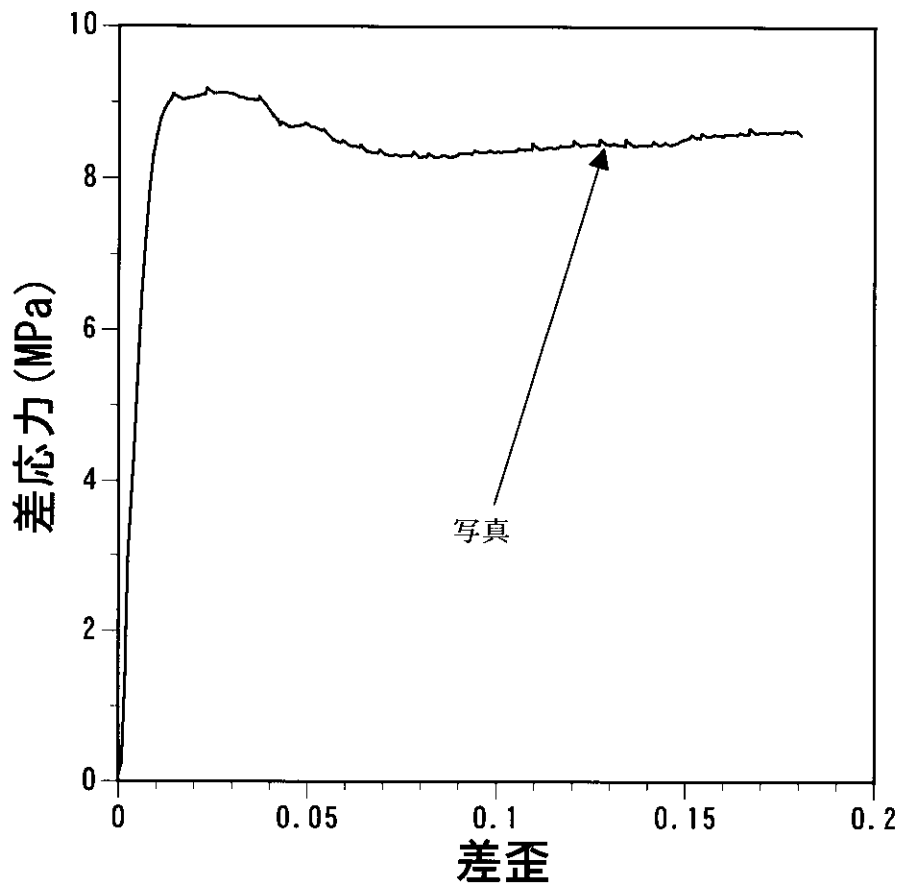


(1) 差歪0.11の時  
図5-1 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：2 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

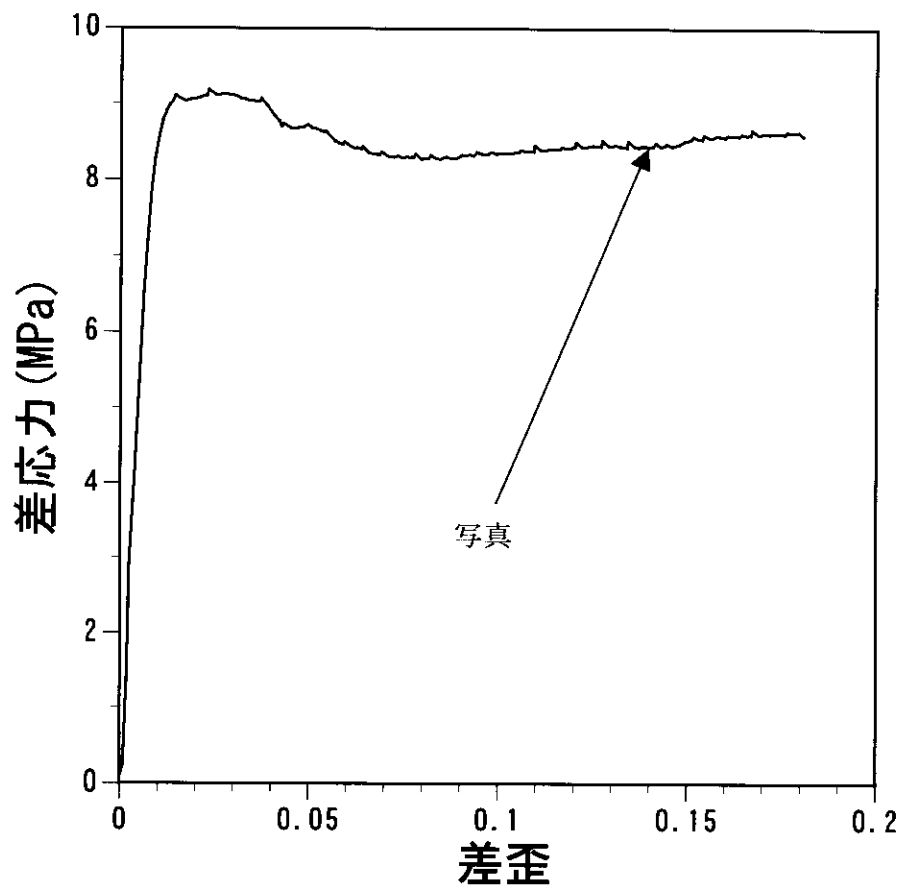


(m) 差歪0.12の時  
図5-1 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：2 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

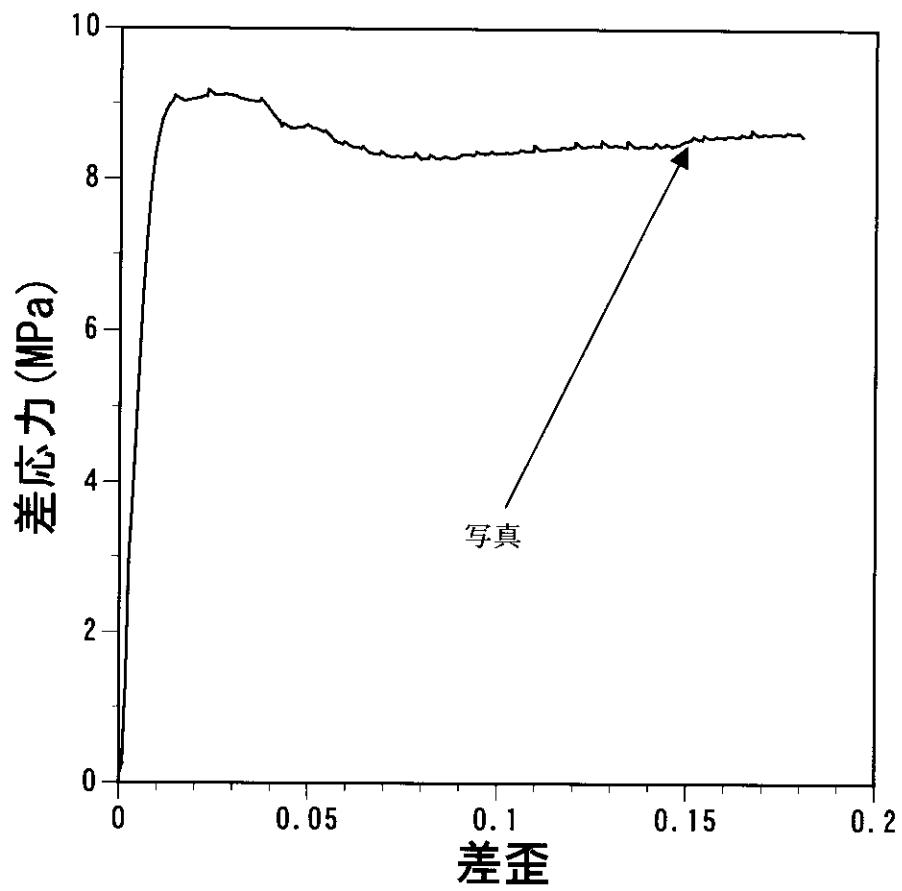




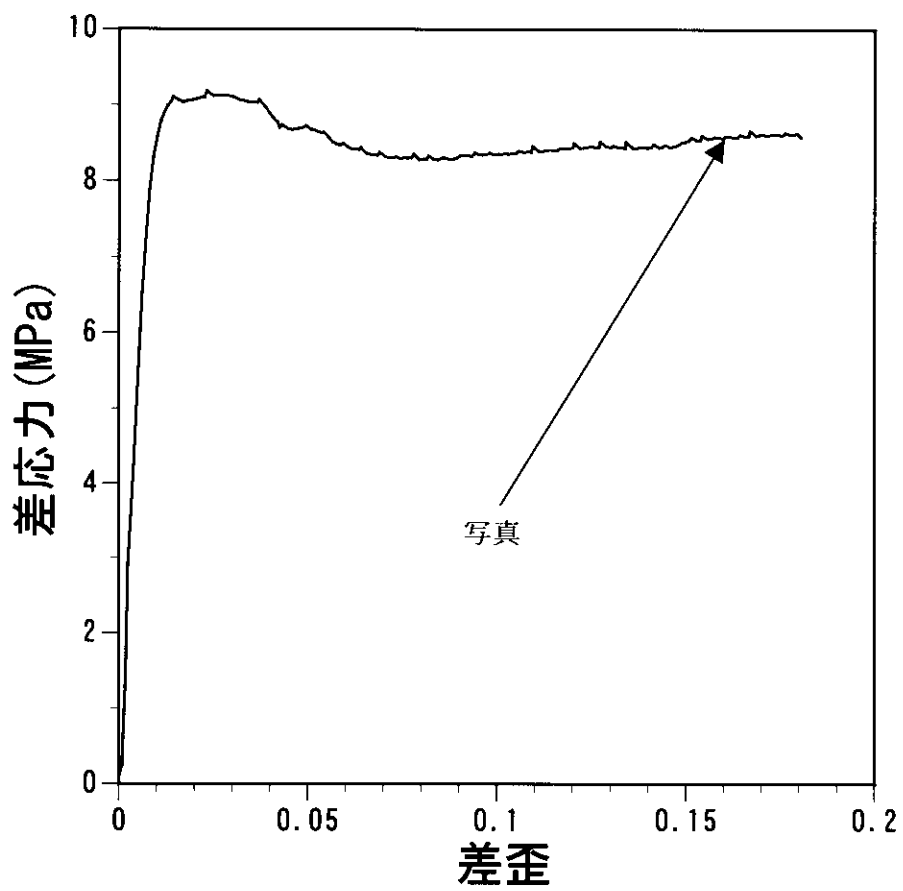
(n) 差歪0.13の時  
図5-1 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：2 MP a  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



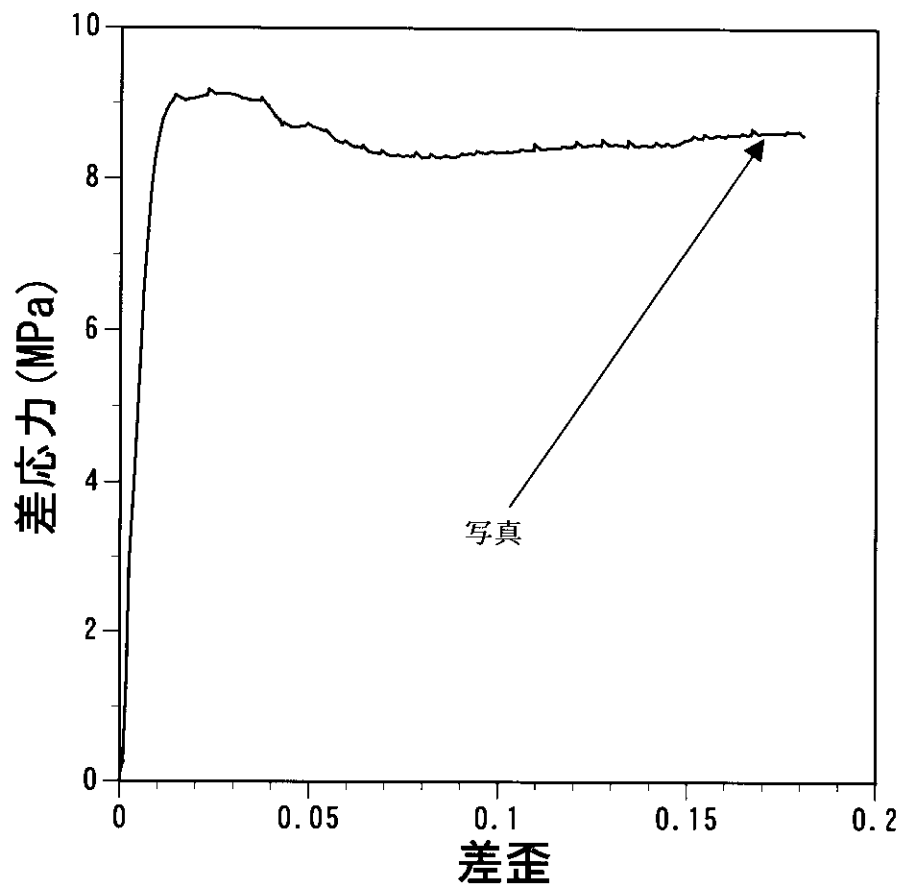
(○) 差歪0.14の時  
図5-1 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：2 MP a  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



(p) 差歪0.15の時  
図5-1 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：2 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



(q) 差歪0.16の時  
図5-1 三軸圧縮試験結果  
試料：上丹  
周圧：2 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



(r) 差歪0.17の時  
図5-1 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：2 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



差歪 0



差歪 0.03



差歪 0.06



差歪 0.09



差歪 0.12



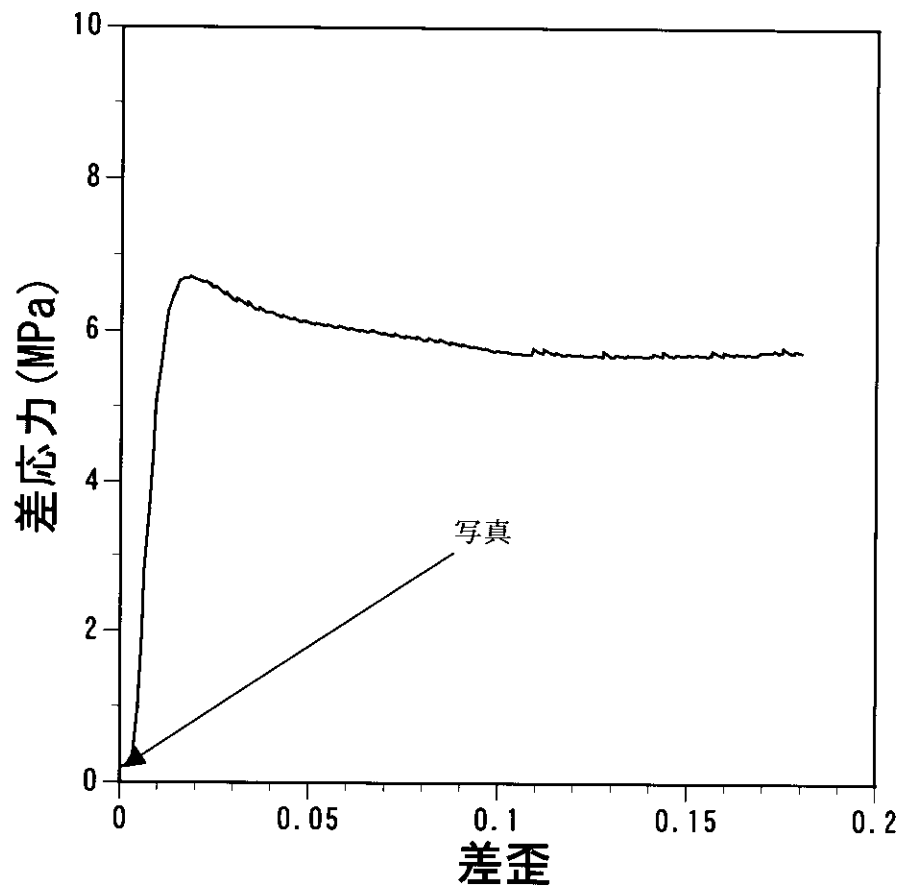
差歪 0.15

図 5 - 2 三軸圧縮試験結果のまとめ

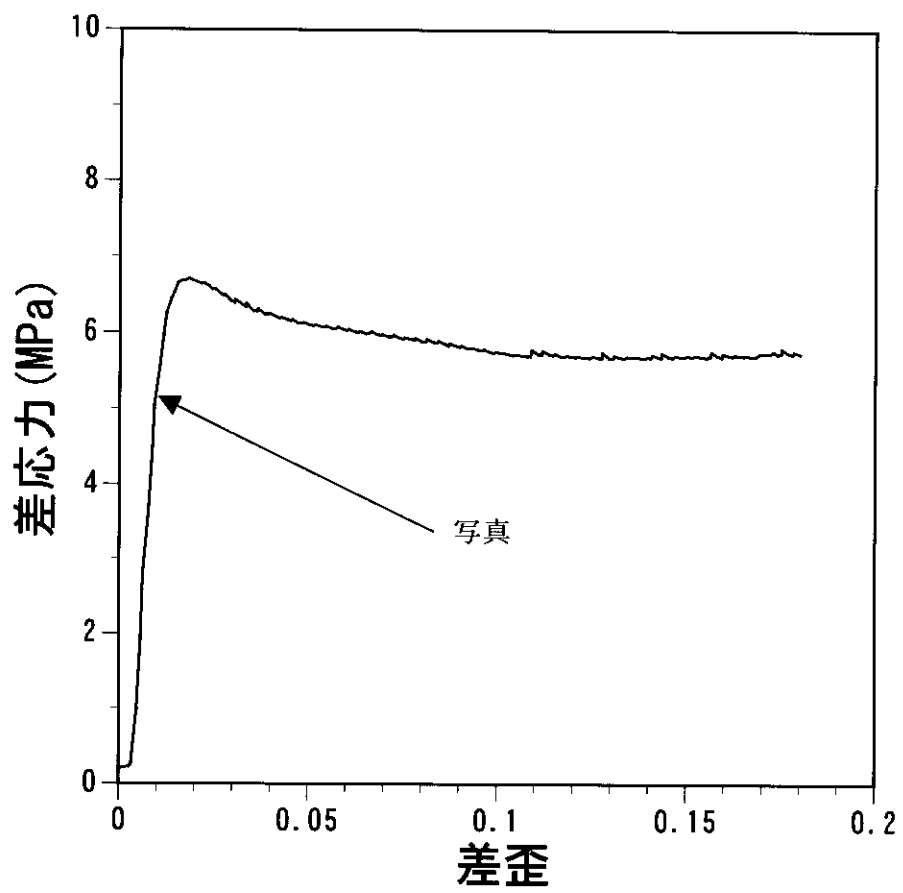
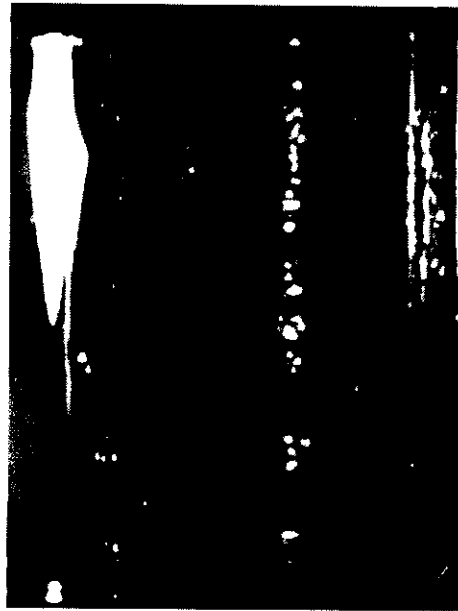
試料：土丹

周圧：2 MP a

歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

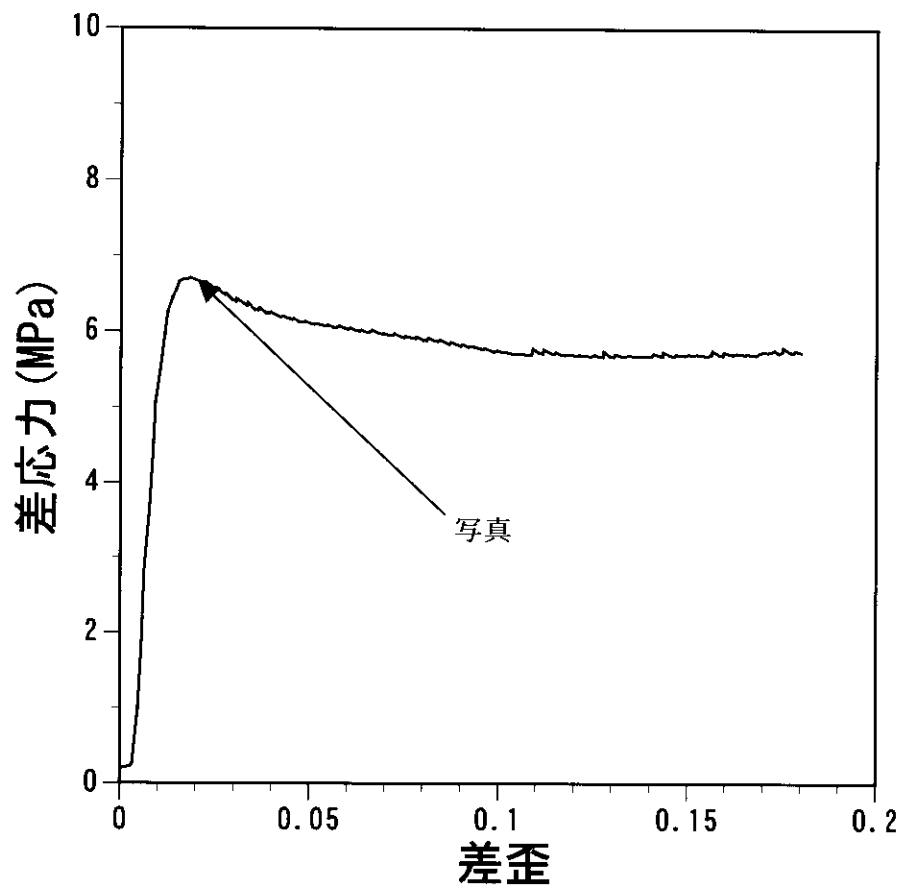


(a) 差歪0の時  
図5-3 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：4 MP a  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

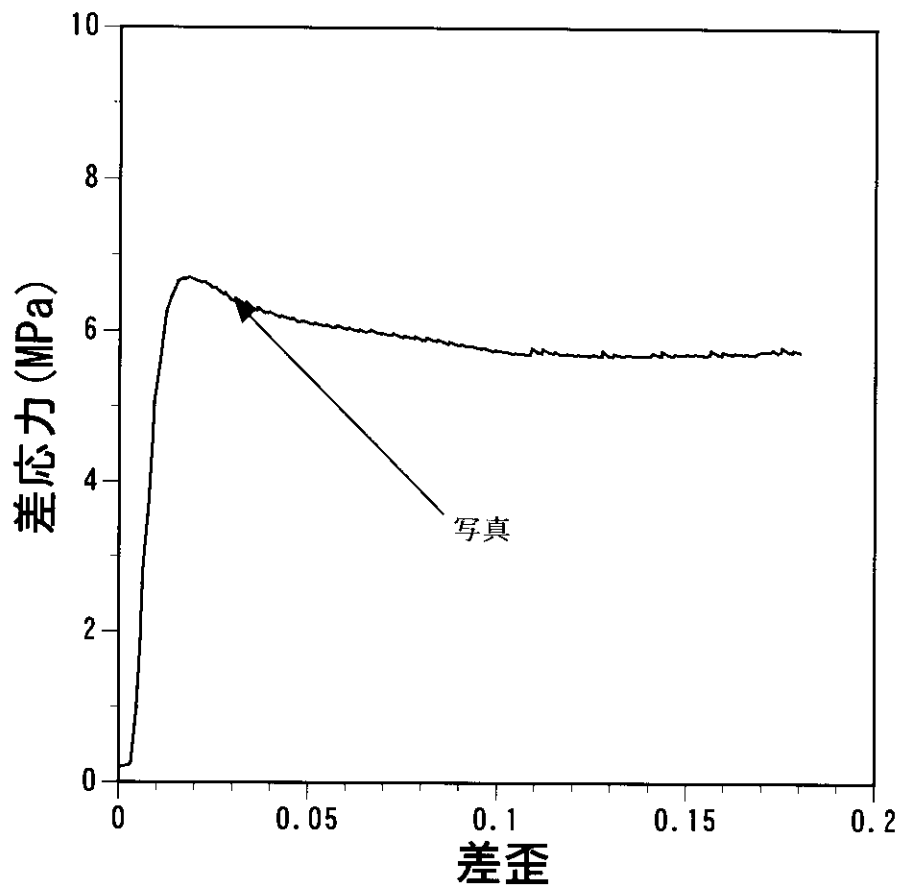


(b) 差歪0.01の時  
図5-3 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：4 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

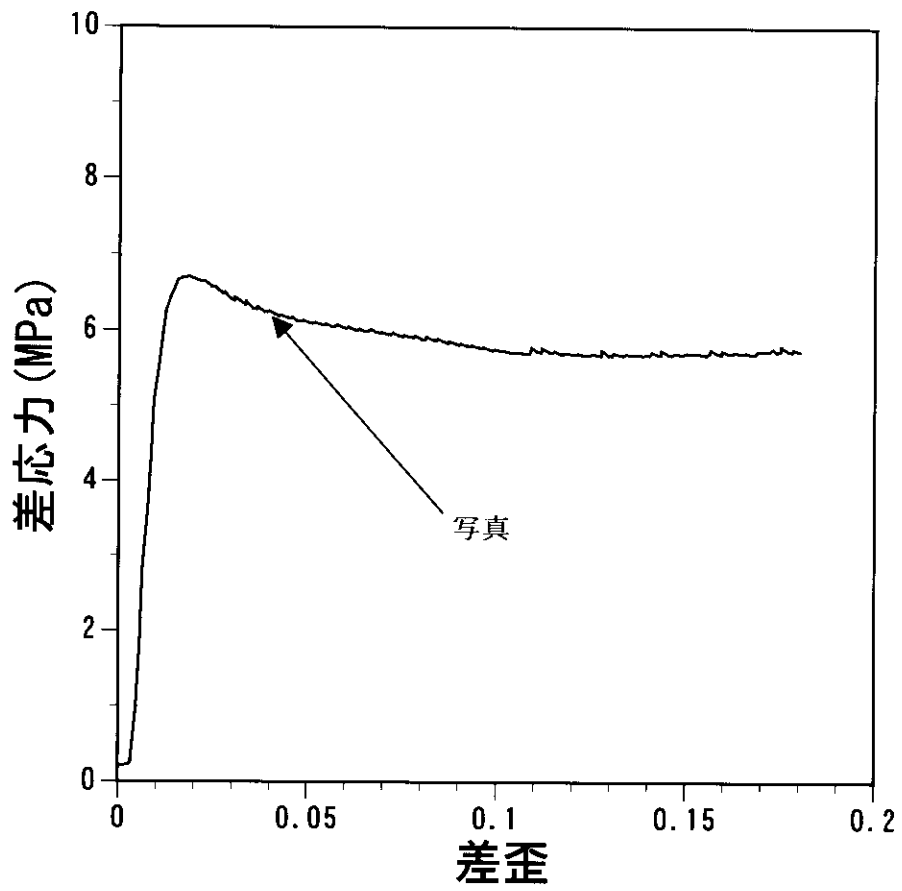
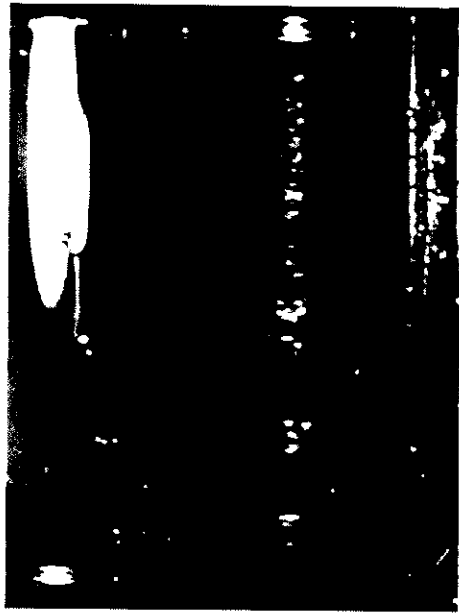




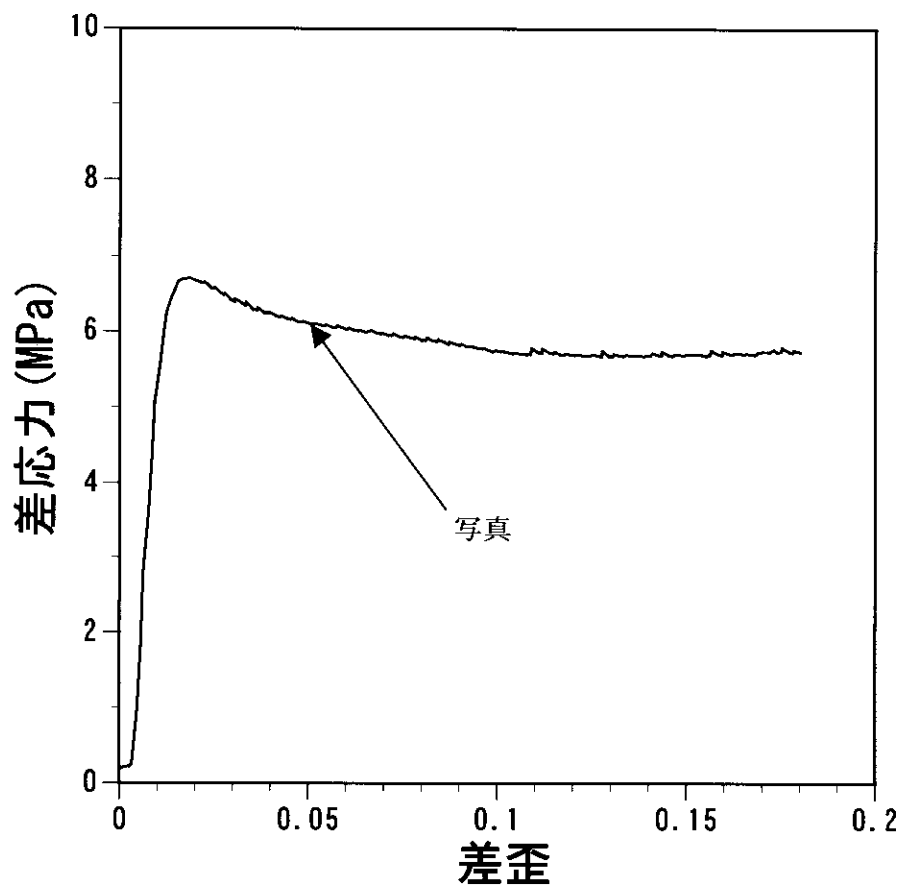
(c) 差歪0.02の時  
図5-3 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：4 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



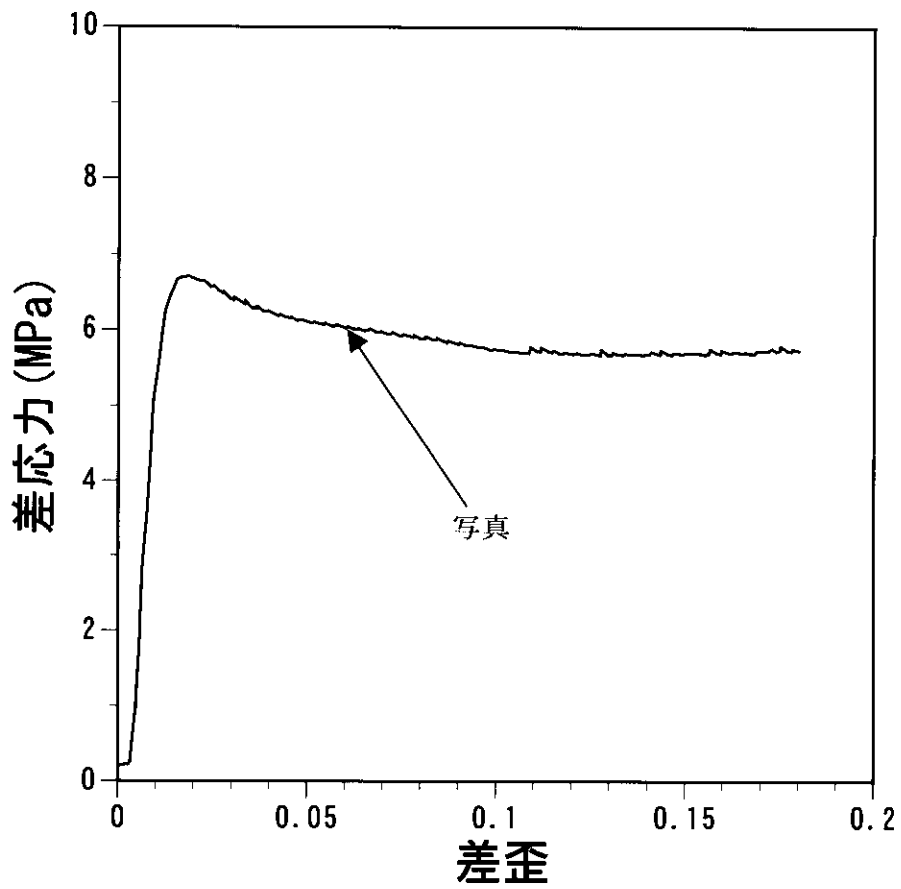
(d) 差歪0.03の時  
図5-3 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：4 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



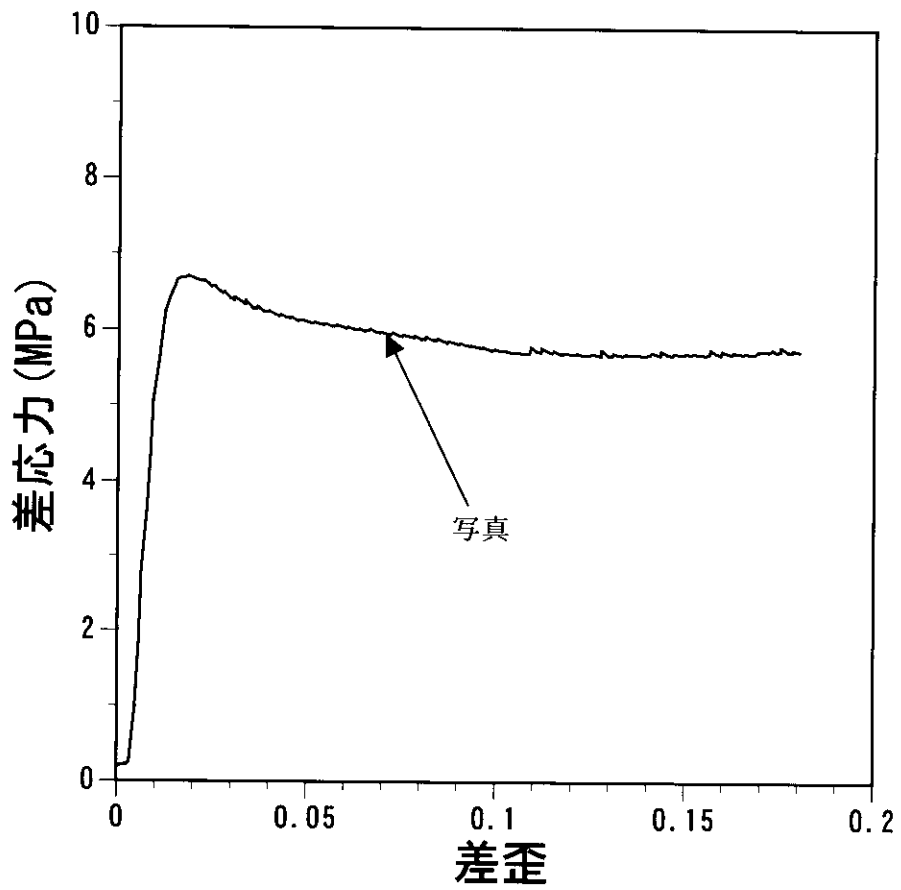
(e) 差歪0.04の時  
 図5-3 三軸圧縮試験結果  
 試料：土丹  
 周圧：4 MPa  
 歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



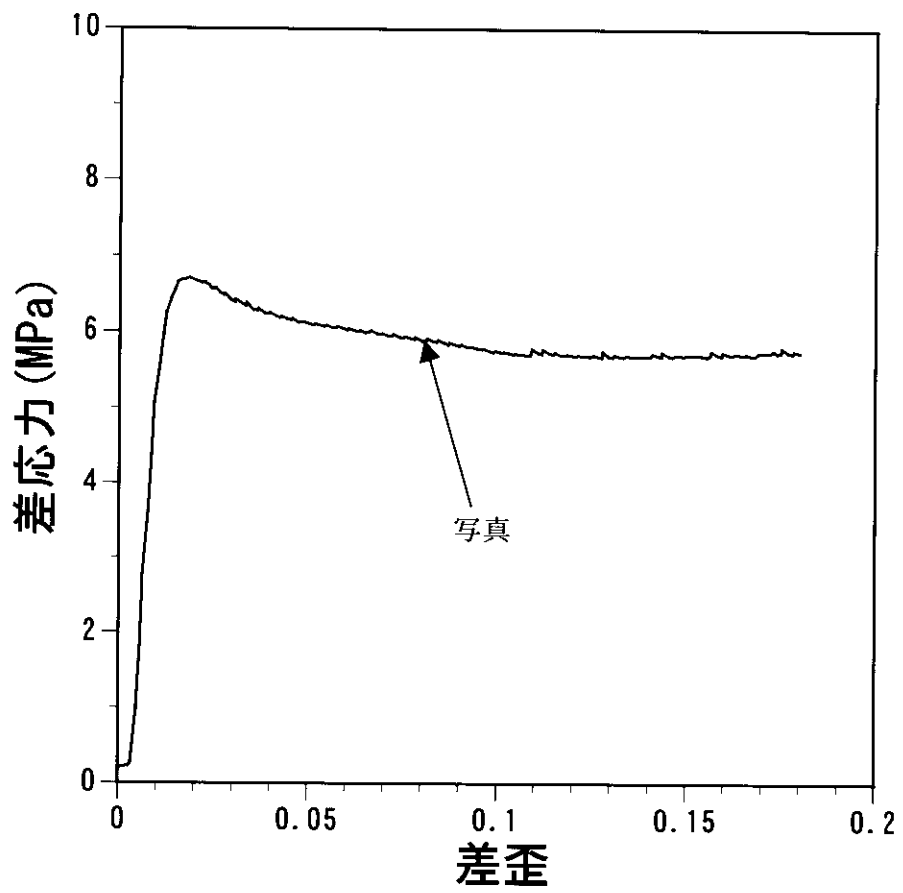
(f) 差歪0.05の時  
図5-3 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：4 MP a  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



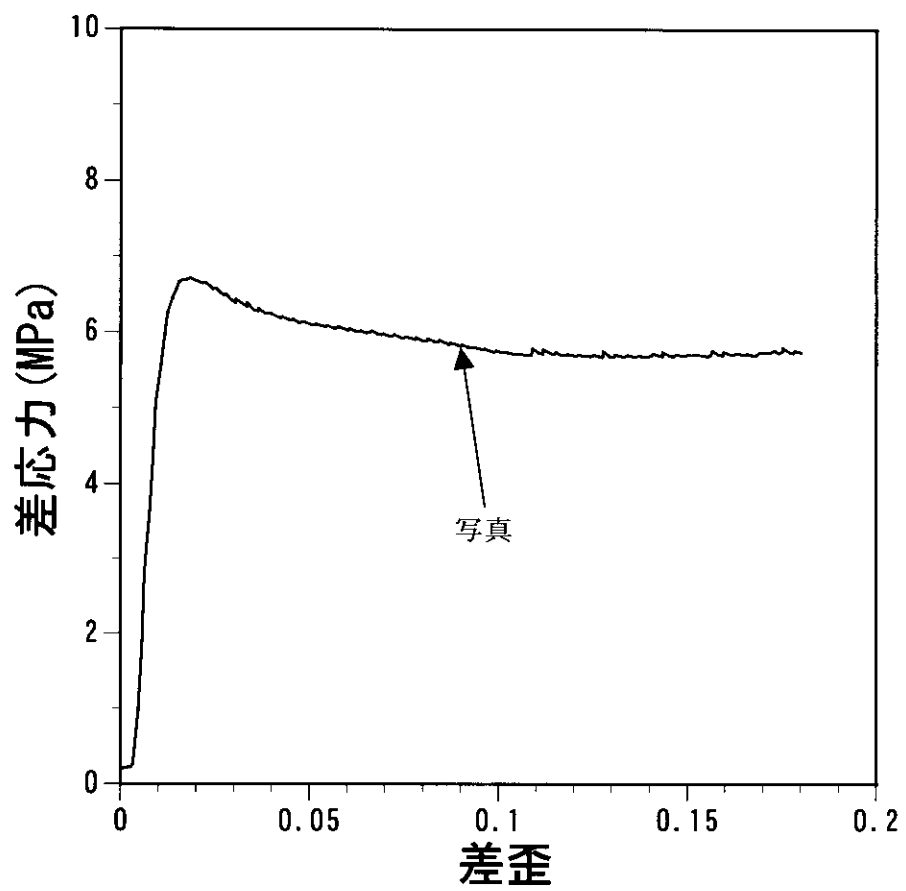
(g) 差歪0.06の時  
図5-3 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：4 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



(h) 差歪0.07の時  
図5-3 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：4 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

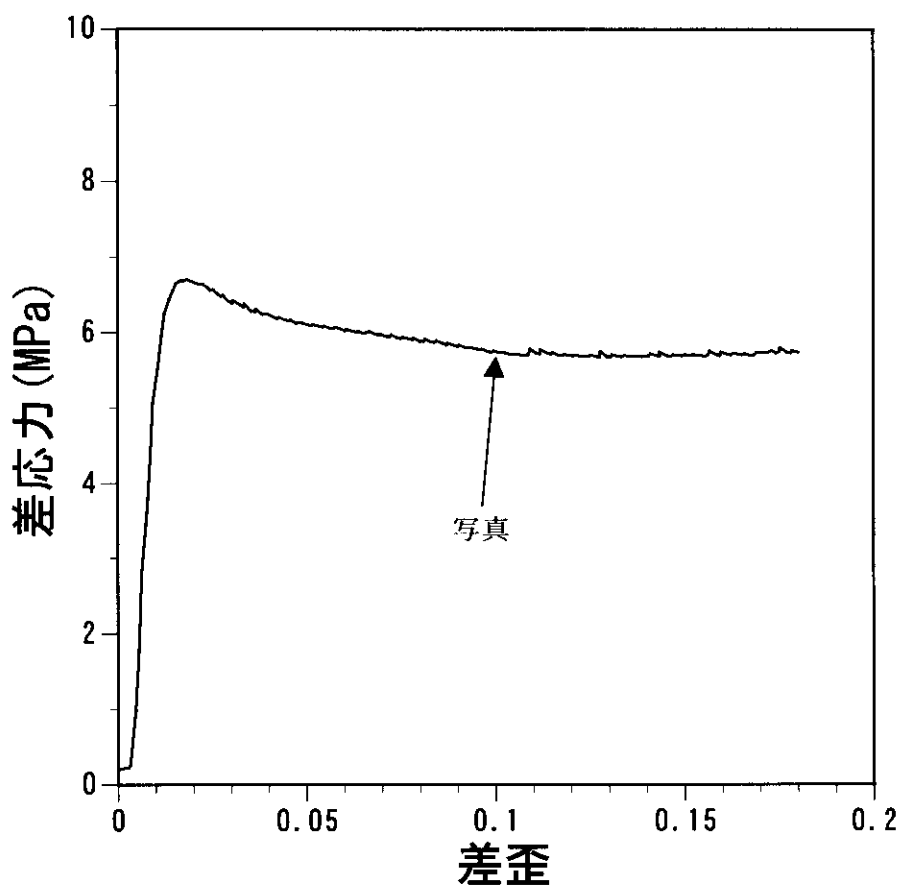


(i) 差歪0.08の時  
図5-3 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：4 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

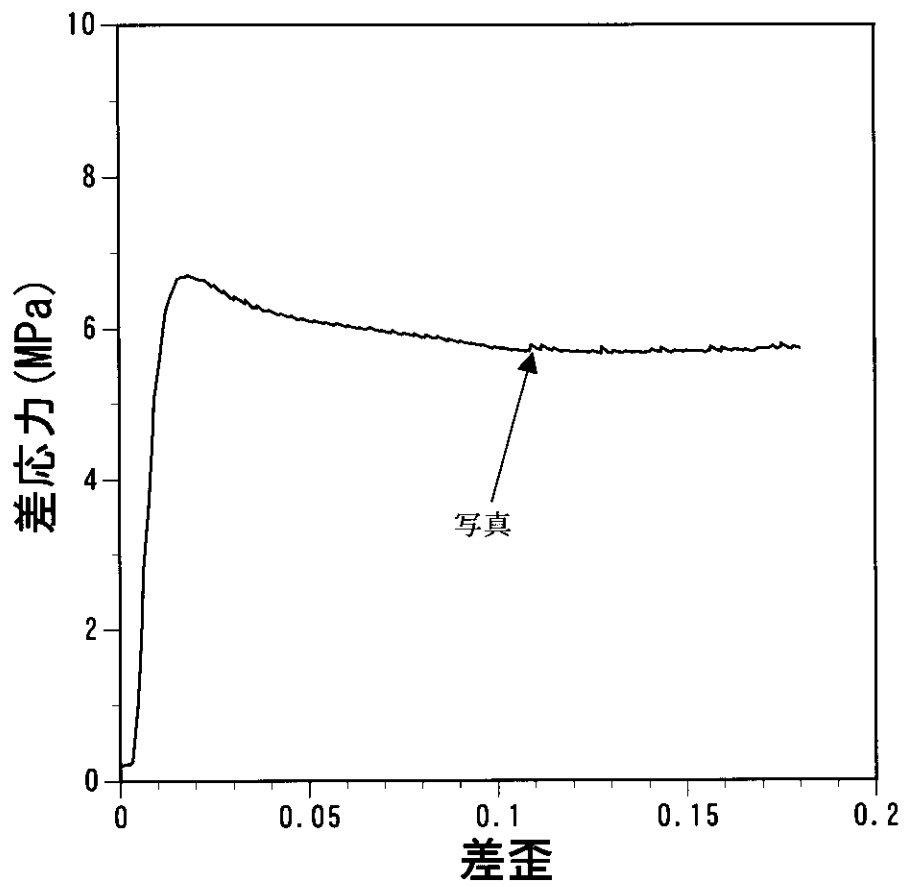
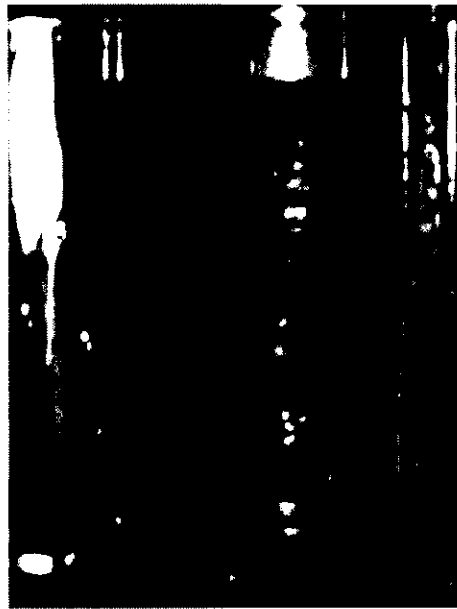


(j) 差歪0.09の時  
図5-3 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：4 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

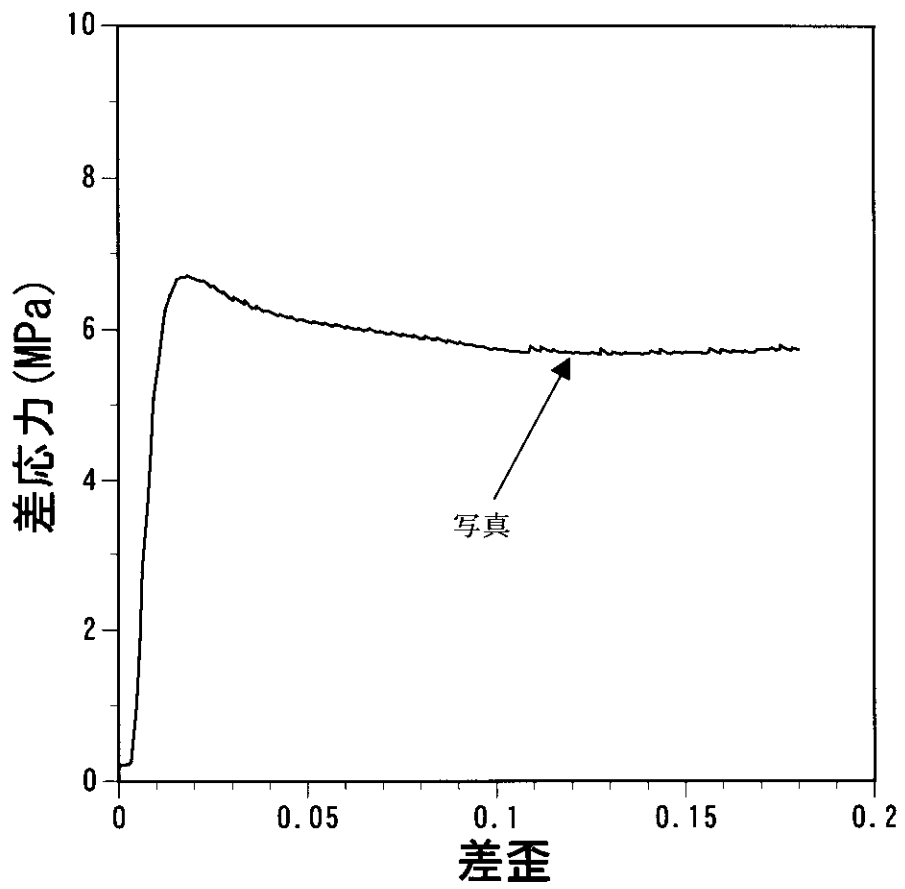
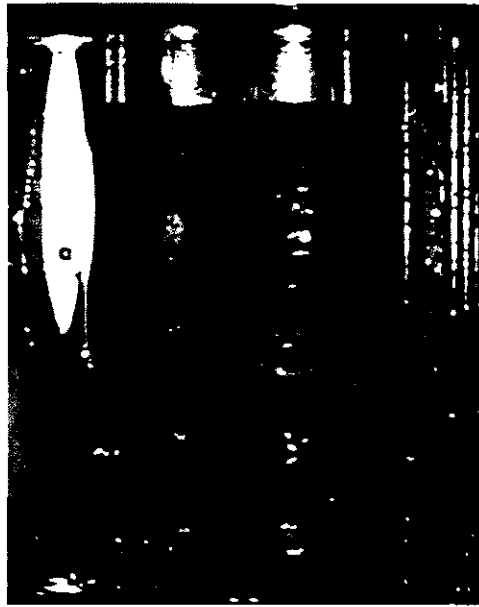




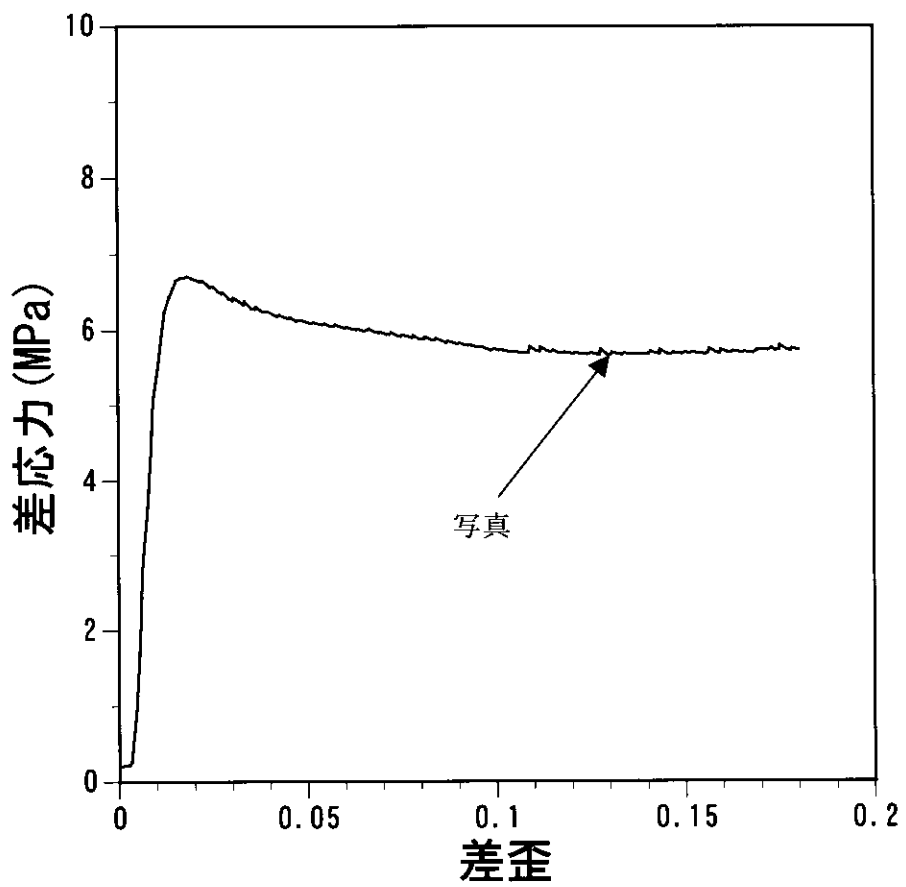
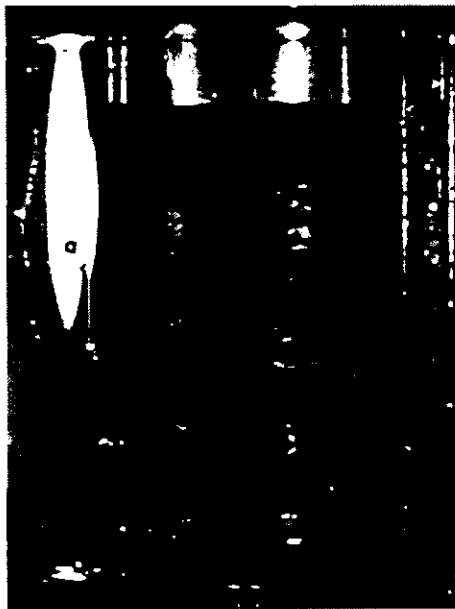
(k) 差歪0.10の時  
図5-3 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：4 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



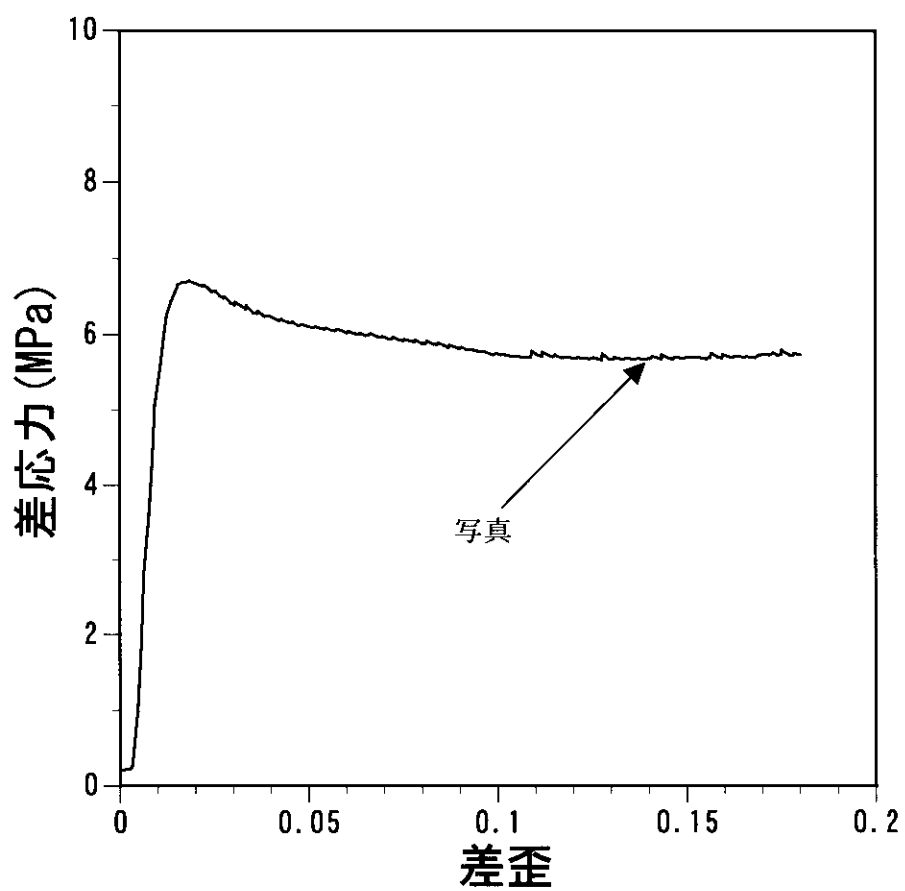
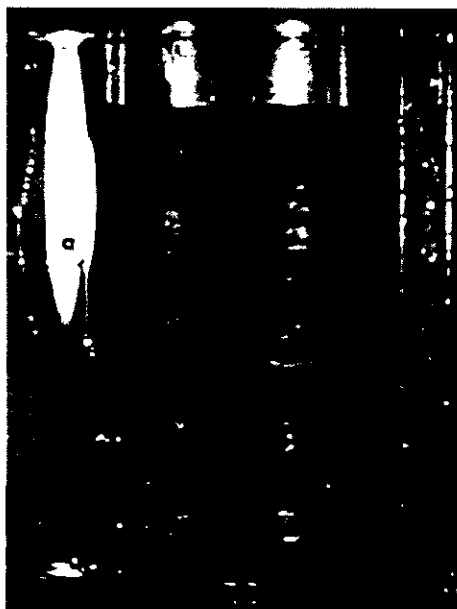
(1) 差歪0.11の時  
図5-3 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：4 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



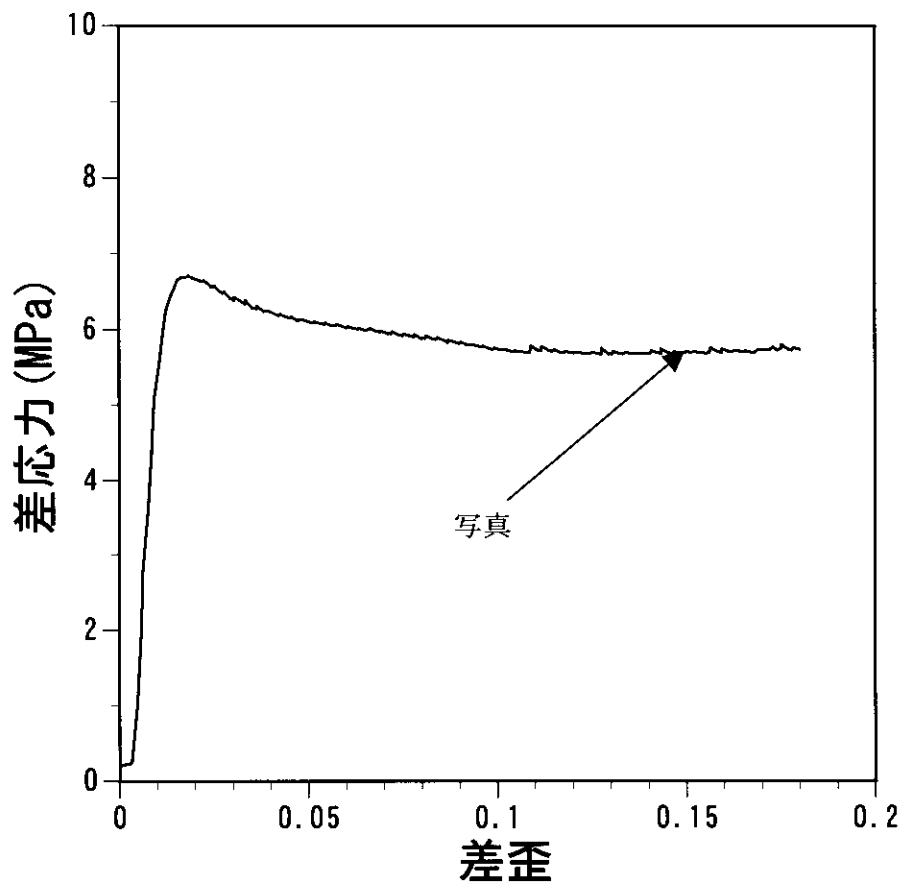
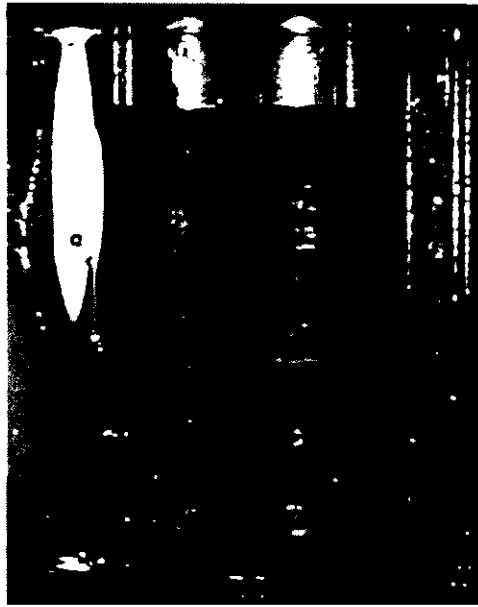
(m) 差歪0.12の時  
 図5-3 三軸圧縮試験結果  
 試料：土丹  
 周圧：4 MPa  
 歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



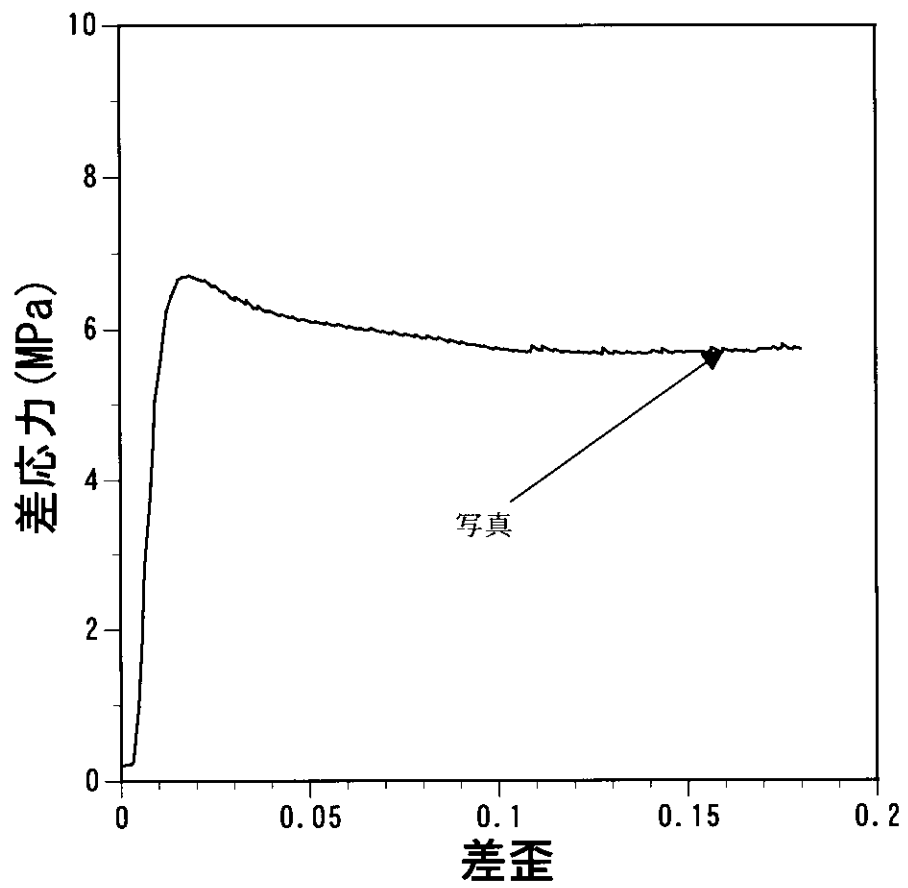
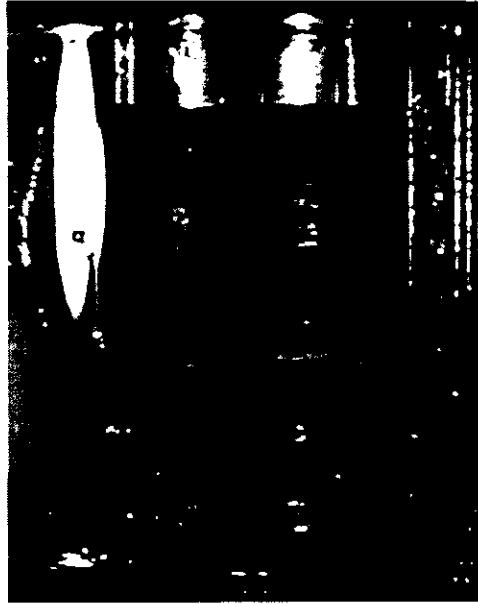
(n) 差歪0.13の時  
 図5-3 三軸圧縮試験結果  
 試料：土丹  
 周圧：4 MPa  
 歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



(o) 差歪0.14の時  
図5-3 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：4 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



(p) 差歪0.15の時  
図5-3 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：4 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



(q) 差歪0.16の時  
図5-3 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：4 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



差歪 0



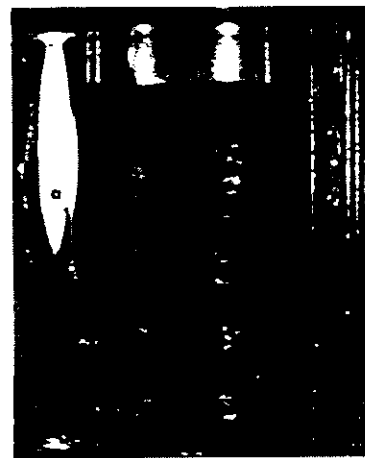
差歪 0.03



差歪 0.06



差歪 0.09



差歪 0.12



差歪 0.15

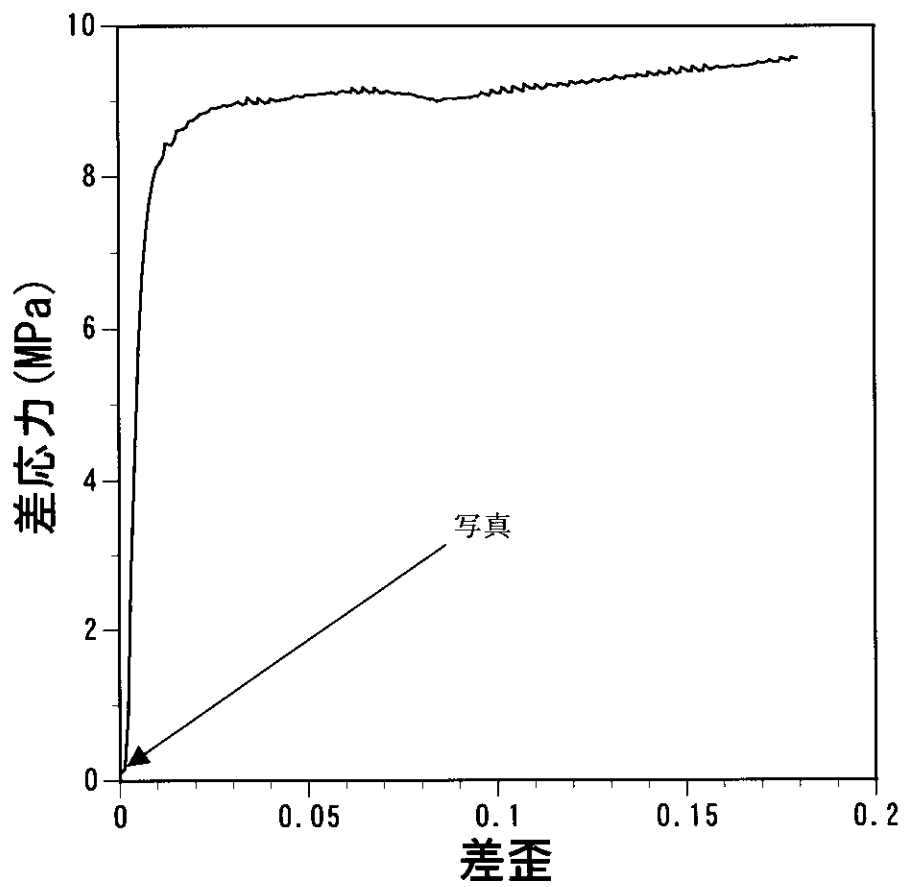
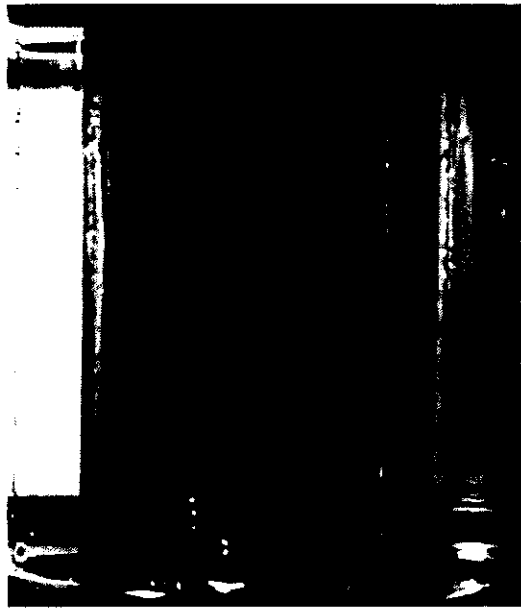
図5-4 三軸圧縮試験結果のまとめ

試料：土丹

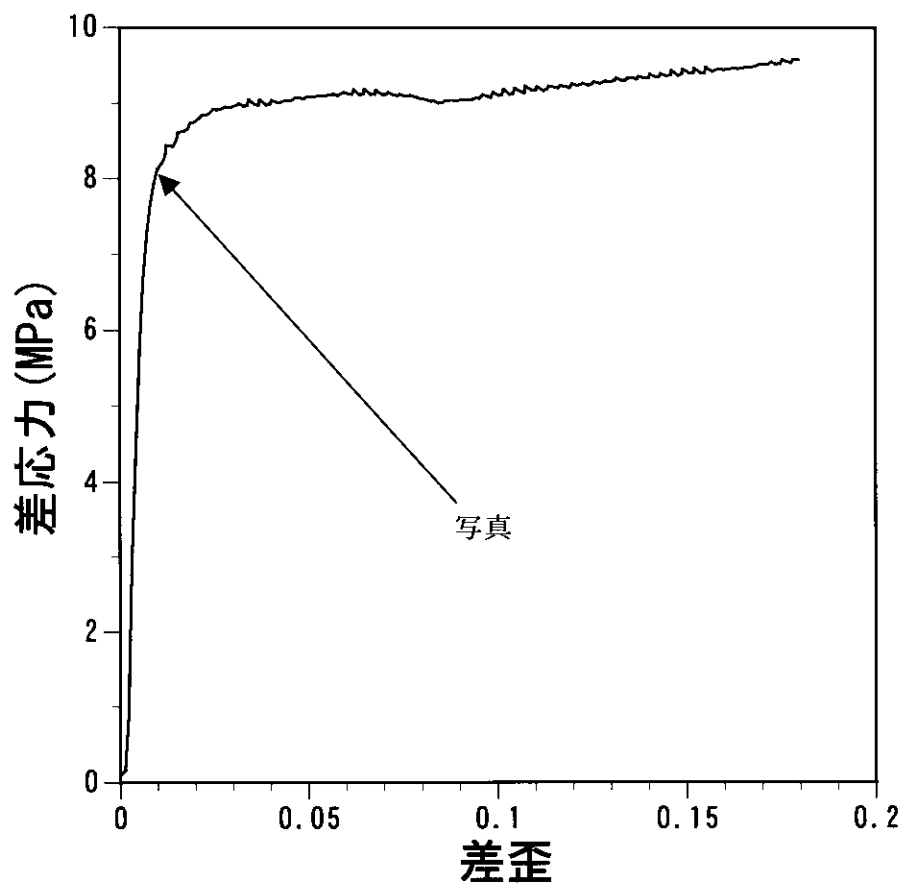
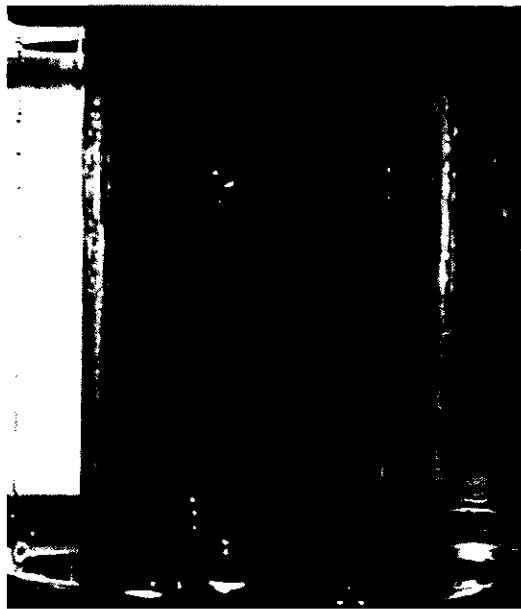
周圧：4 MPa

歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

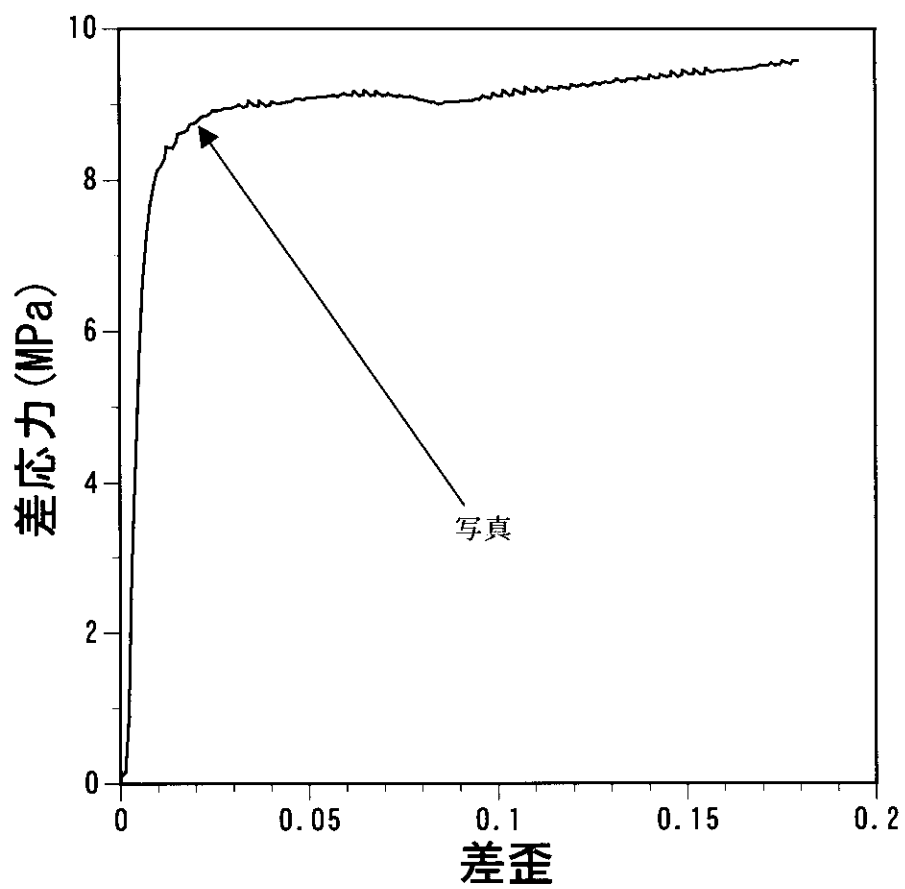
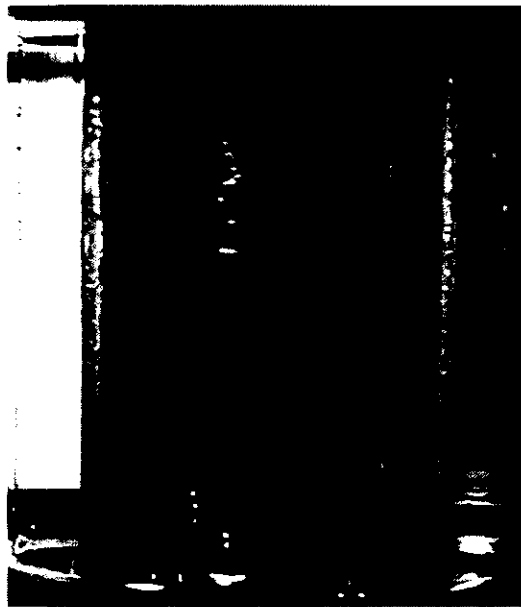




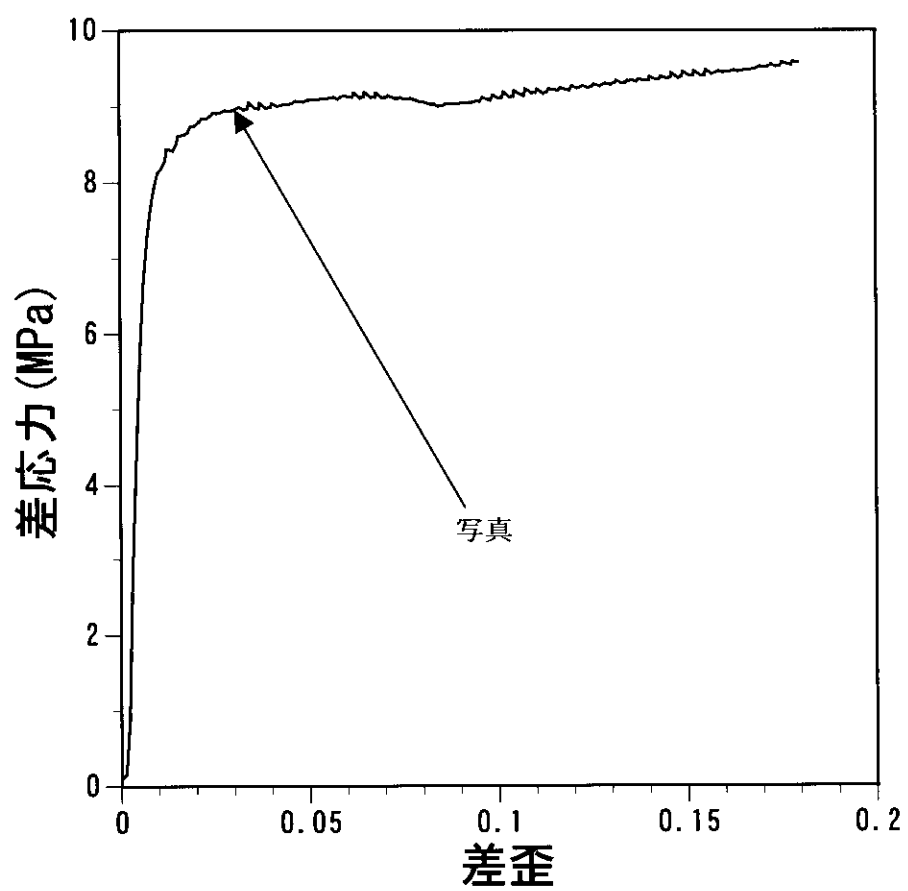
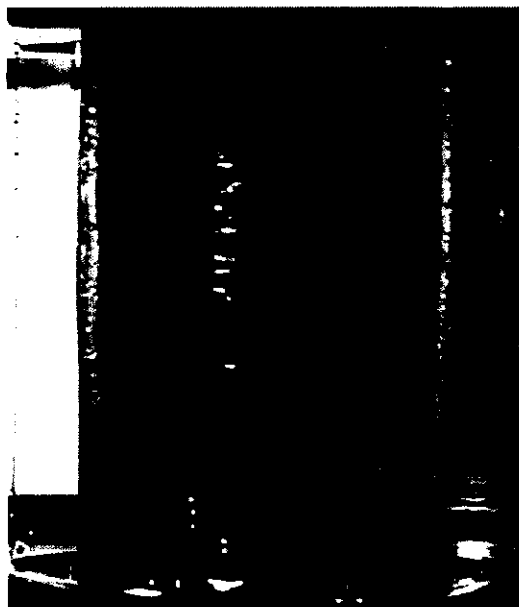
(a) 差歪0の時  
図5-5 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：8 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



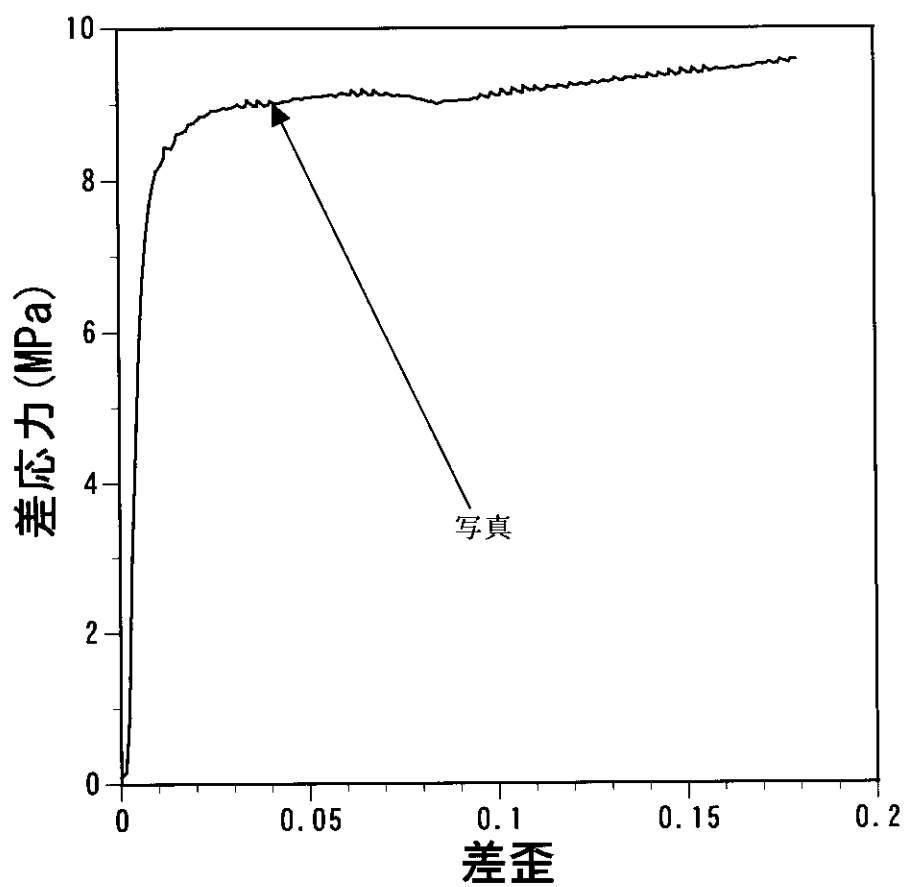
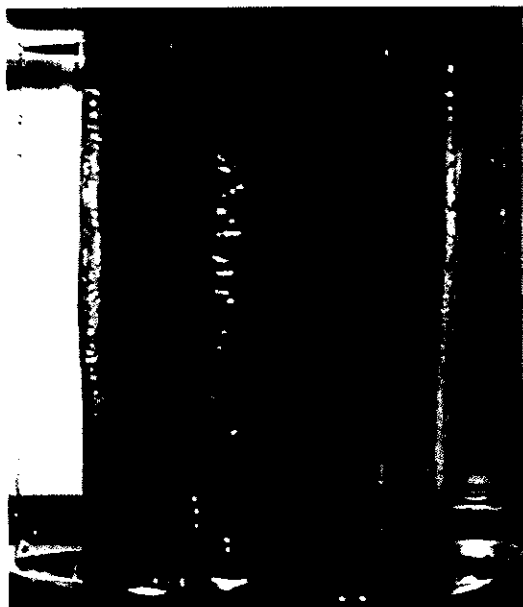
(b) 差歪0.01の時  
図5-5 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：8 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



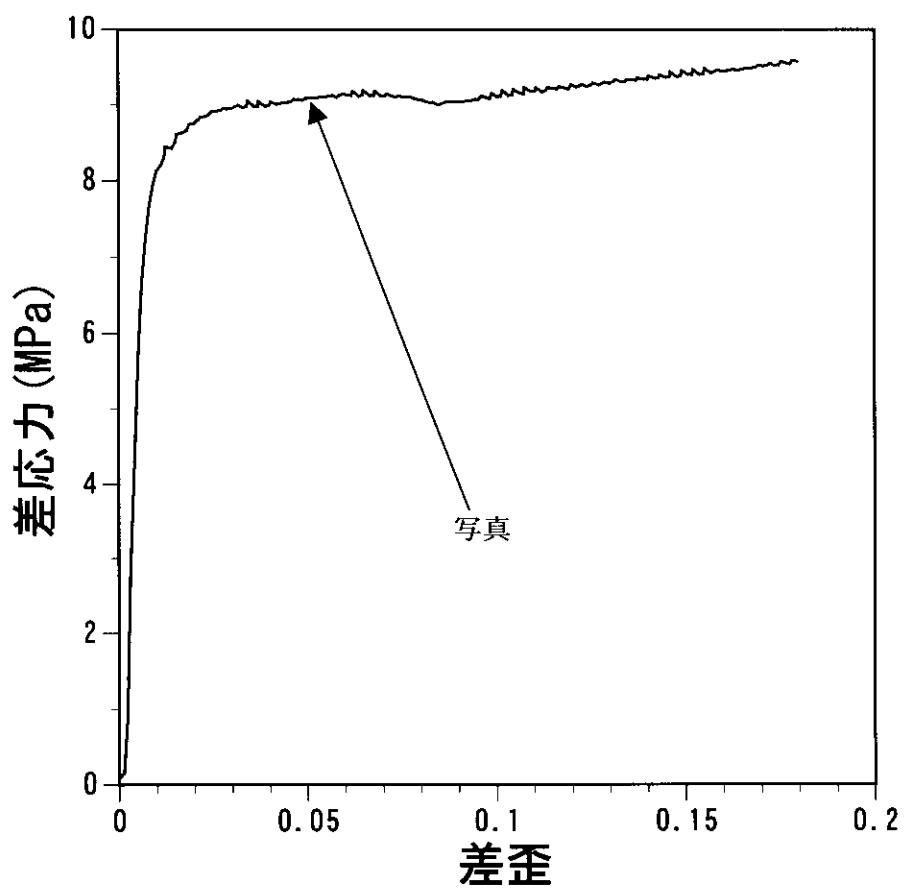
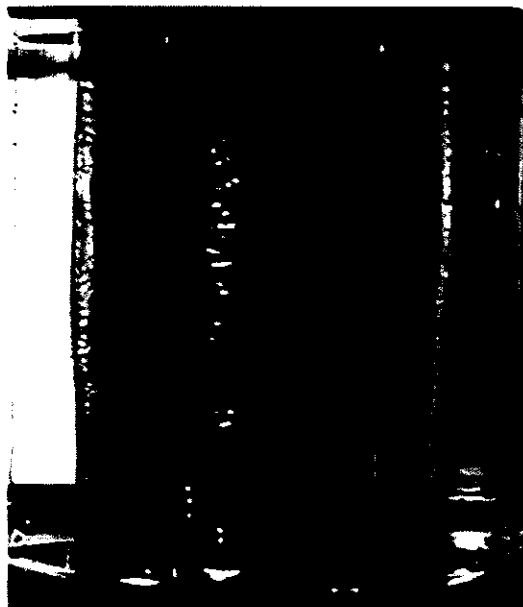
(c) 差歪0.02の時  
図5-5 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：8 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



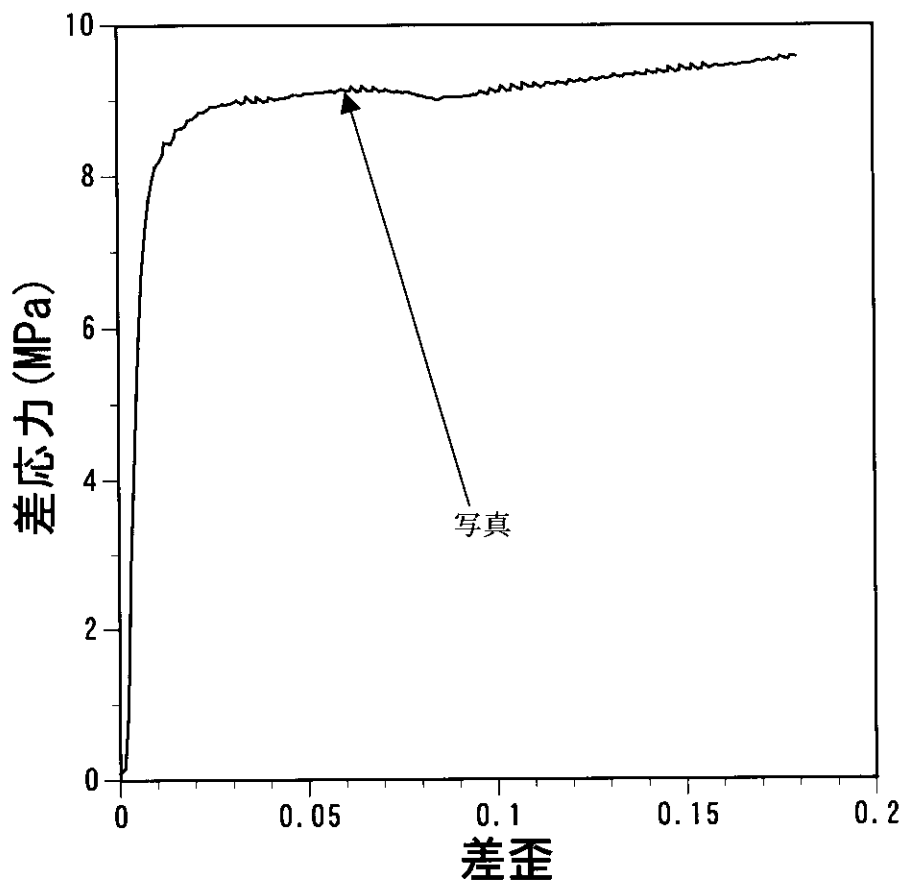
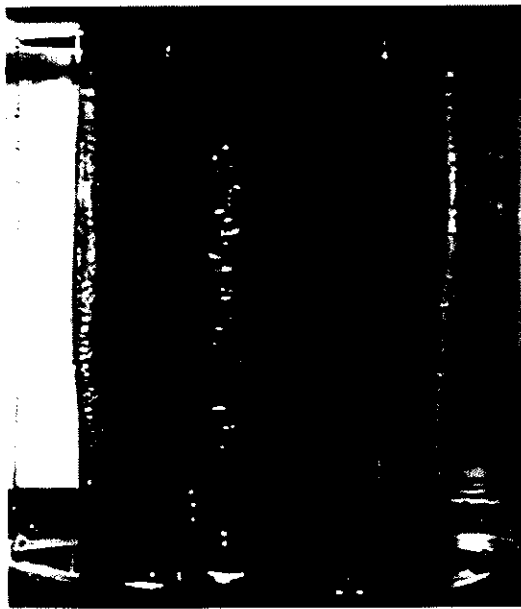
(d) 差歪0.03の時  
図5-5 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：8 MP a  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



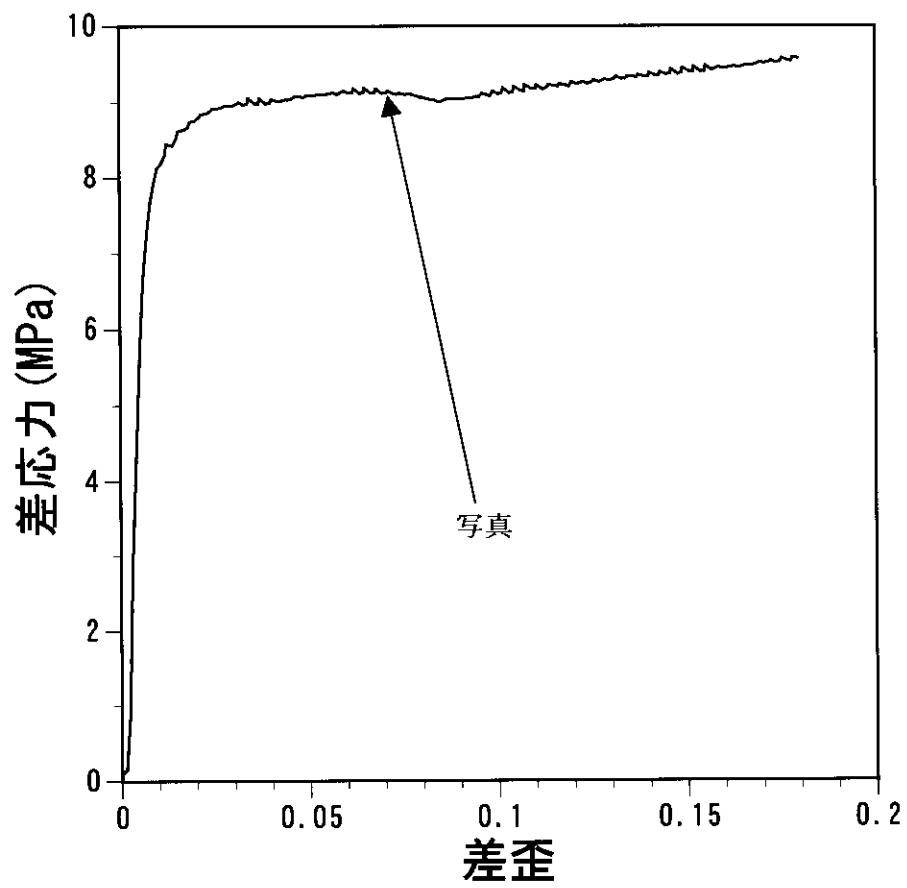
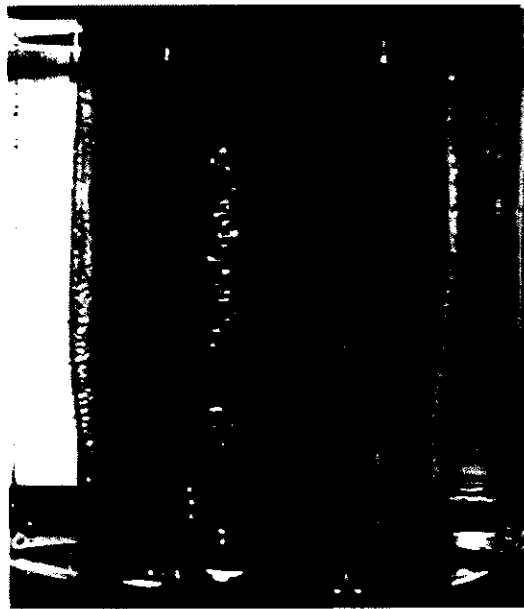
(e) 差歪0.04の時  
図5-5 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：8 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



(f) 差歪0.05の時  
図5-5 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：8 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

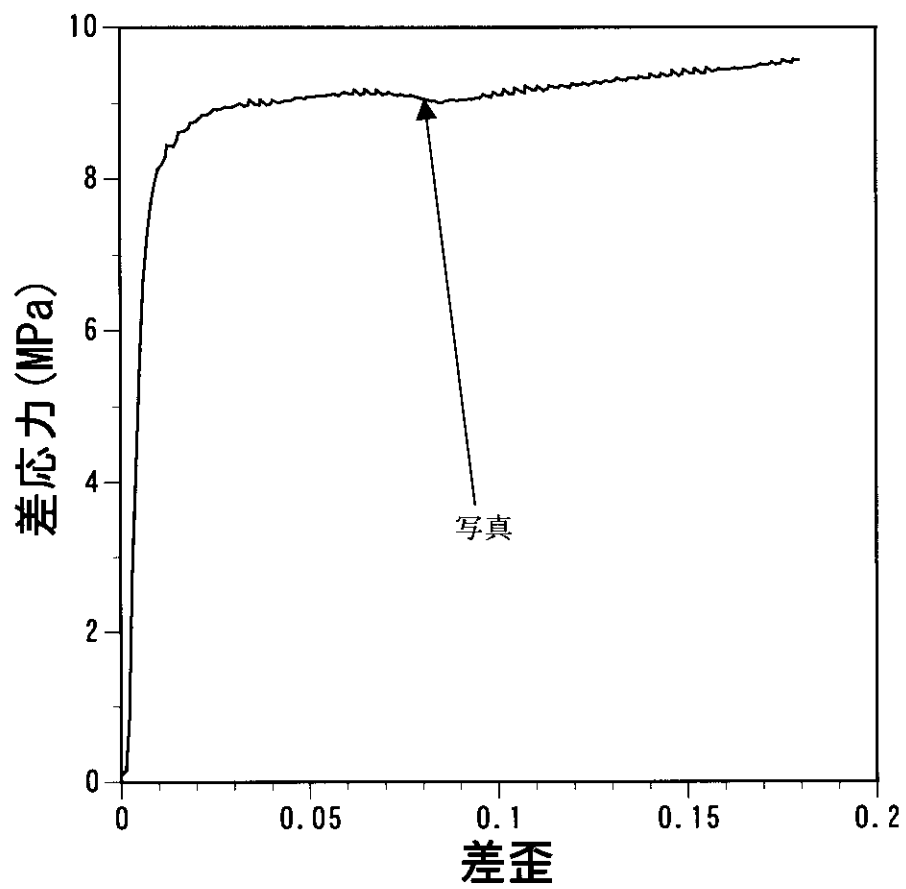
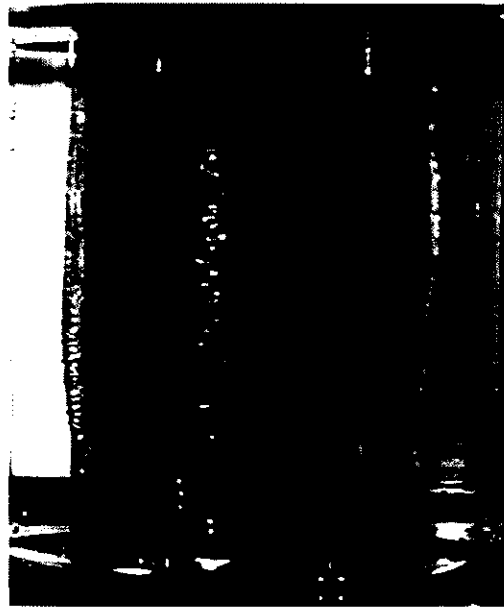


(g) 差歪0.06の時  
図5-5 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：8 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

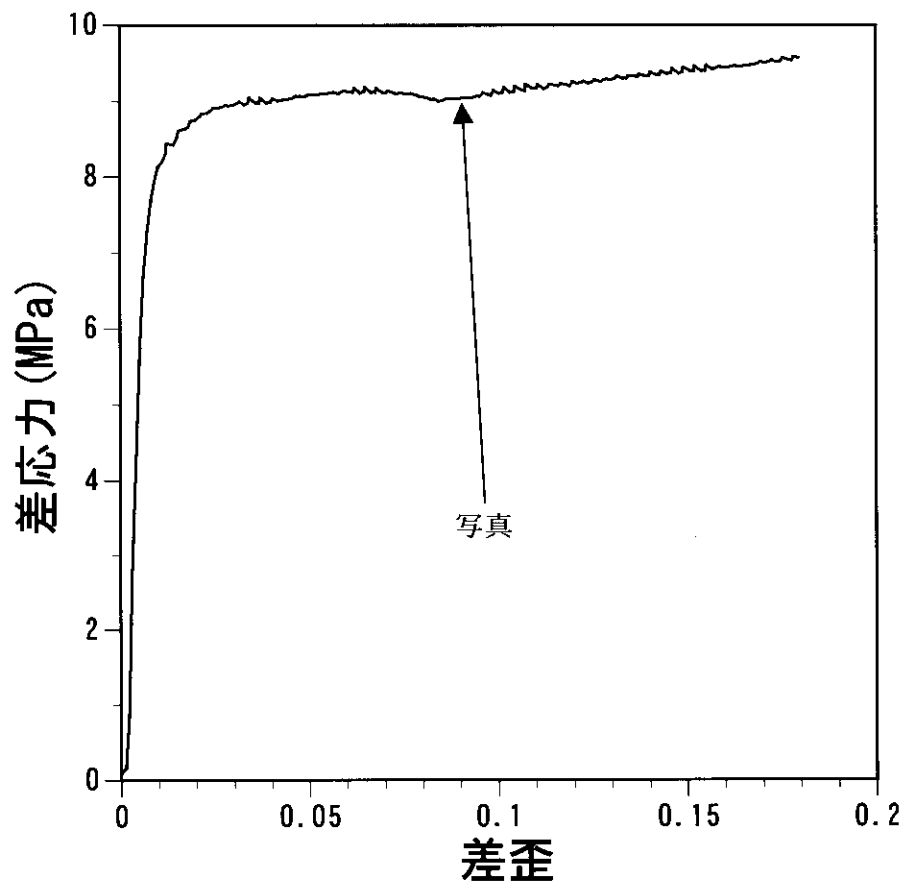
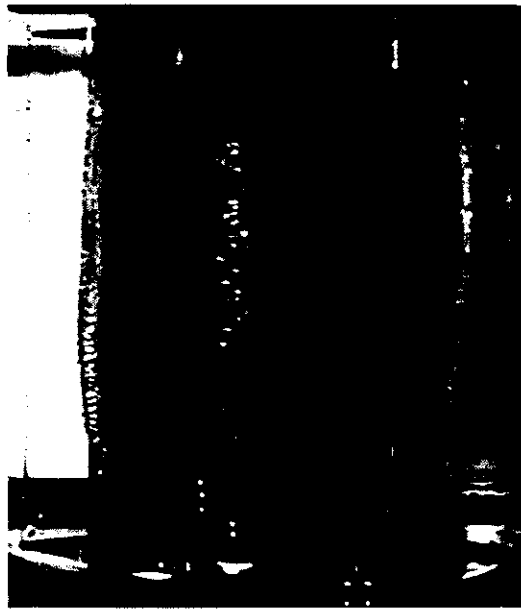


(h) 差歪0.07の時  
図5-5 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：8 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

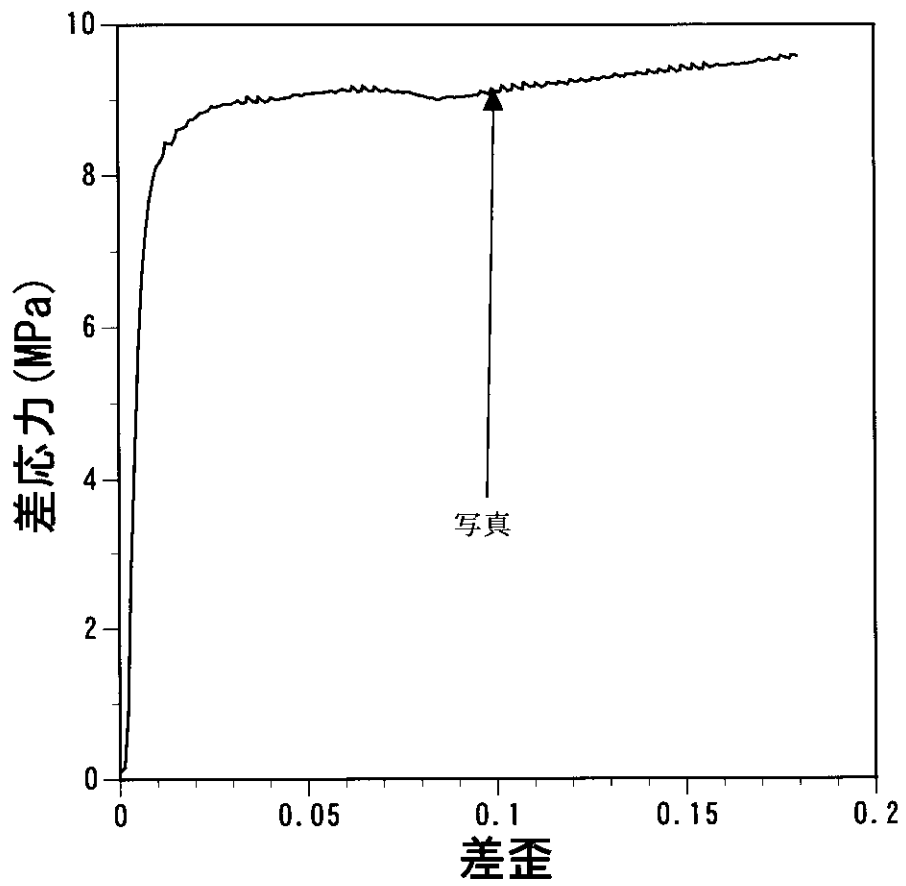
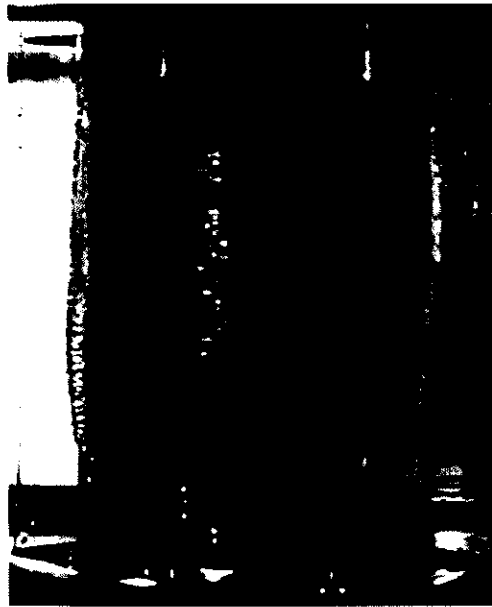




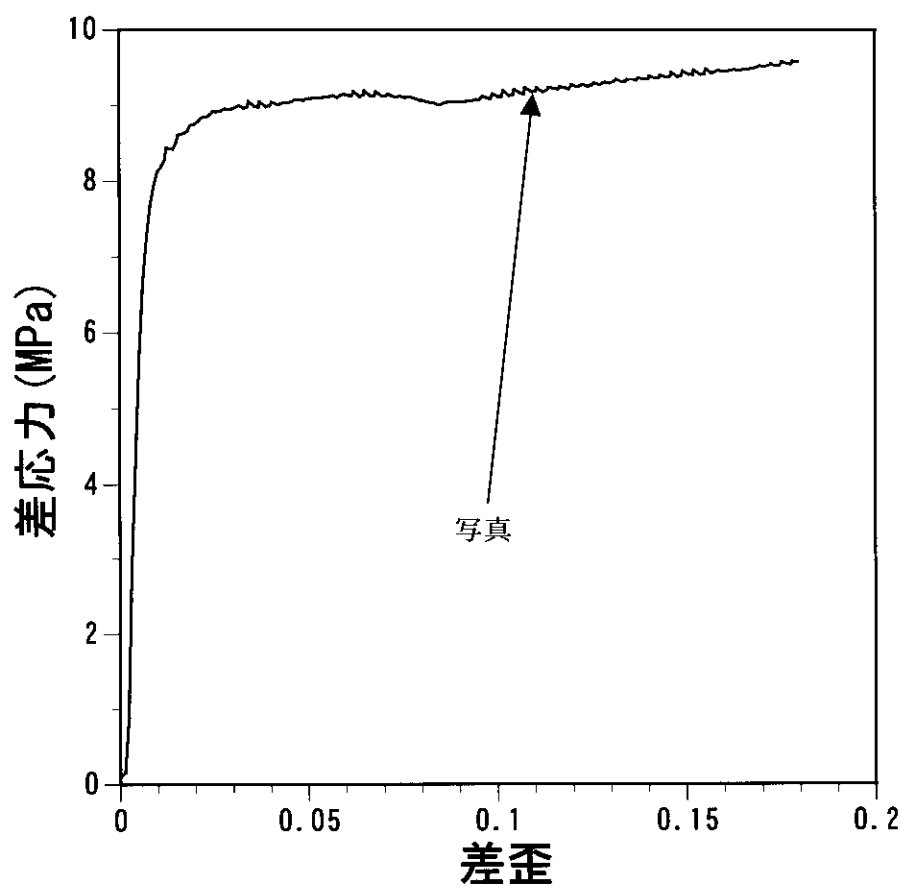
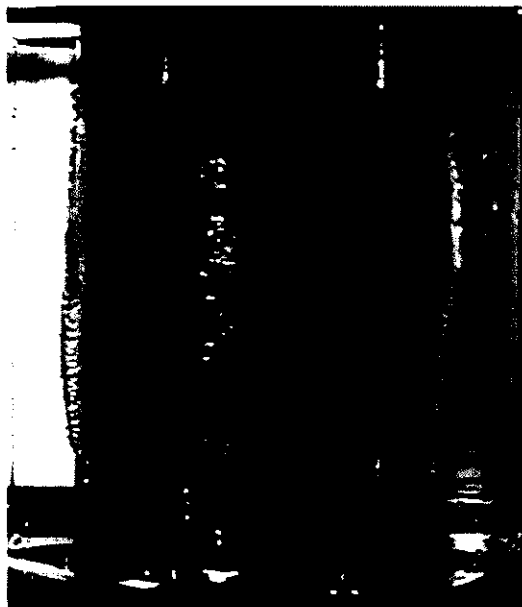
(i) 差歪0.08の時  
図5-5 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：8 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



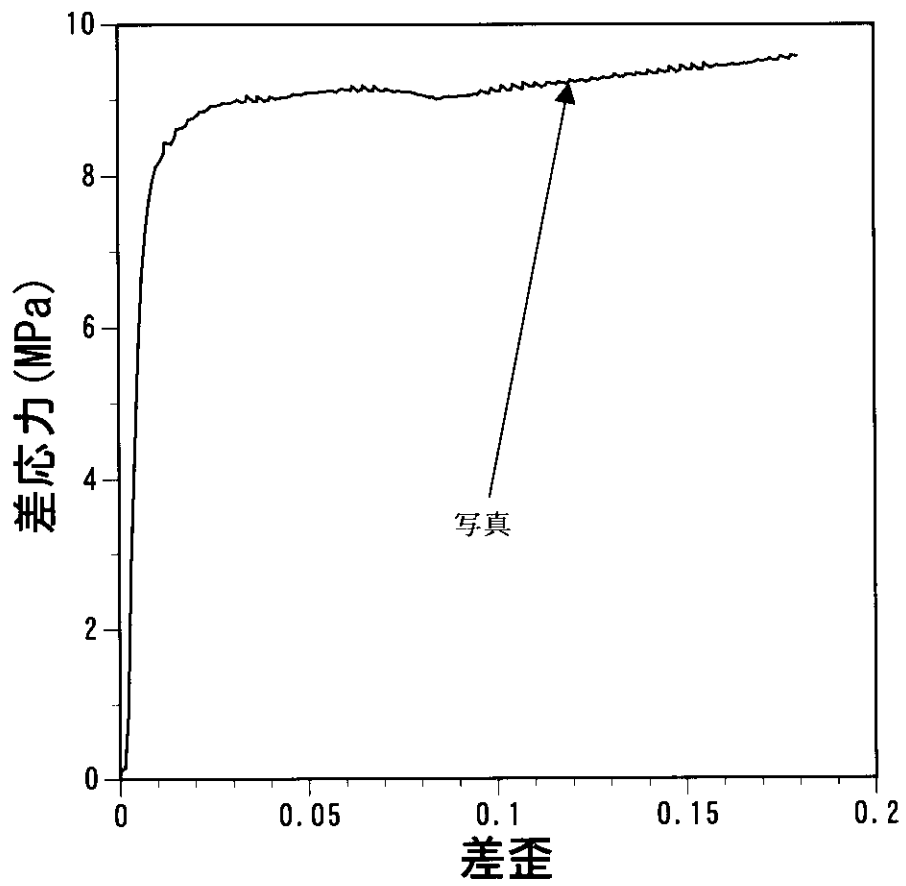
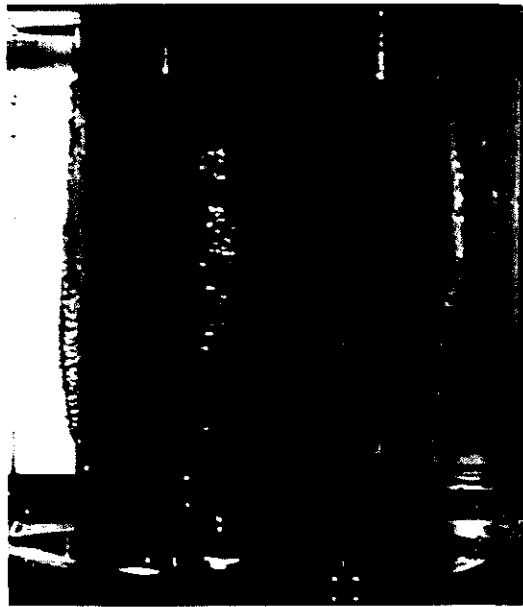
(j) 差歪0.09の時  
図5-5 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：8 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



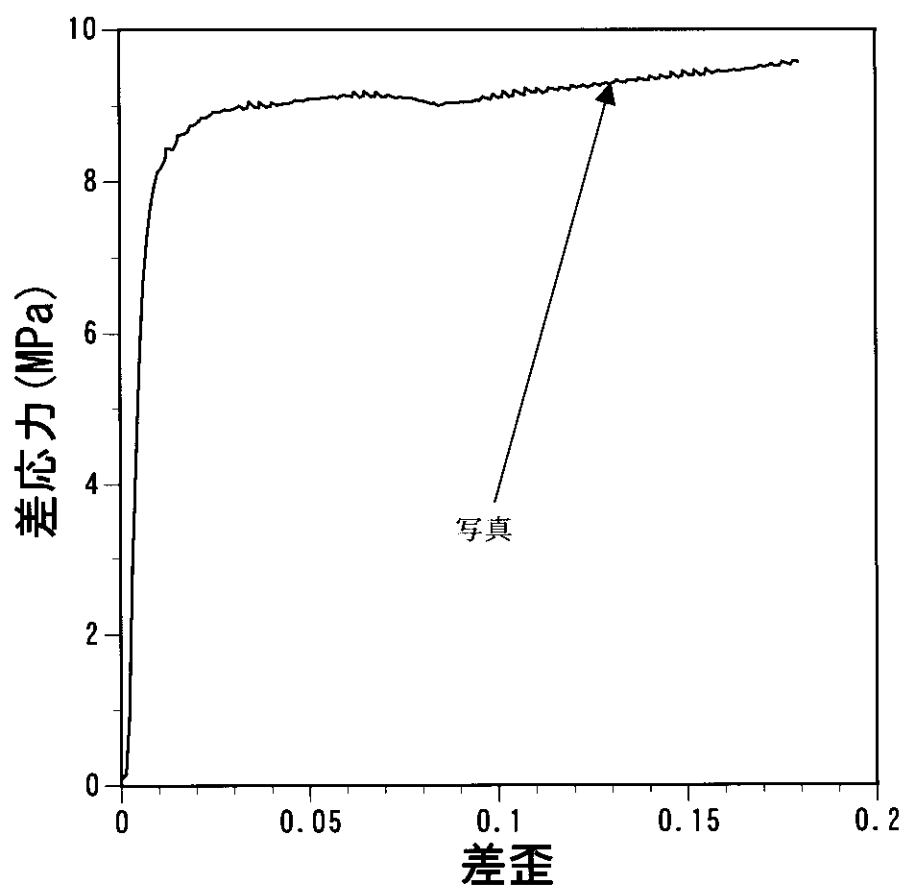
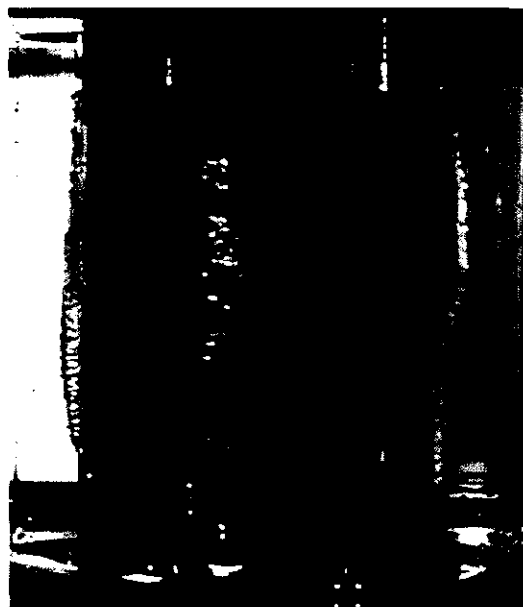
(k) 差歪0.10の時  
 図5-5 三軸圧縮試験結果  
 試料：土丹  
 周圧：8 MPa  
 歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



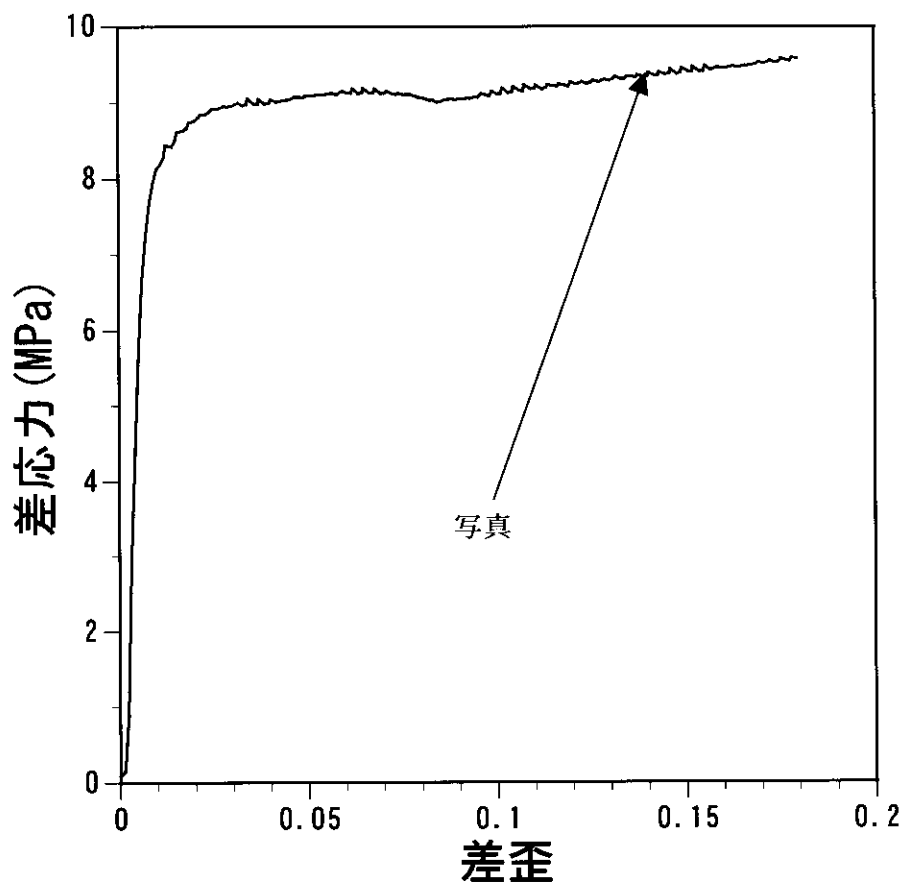
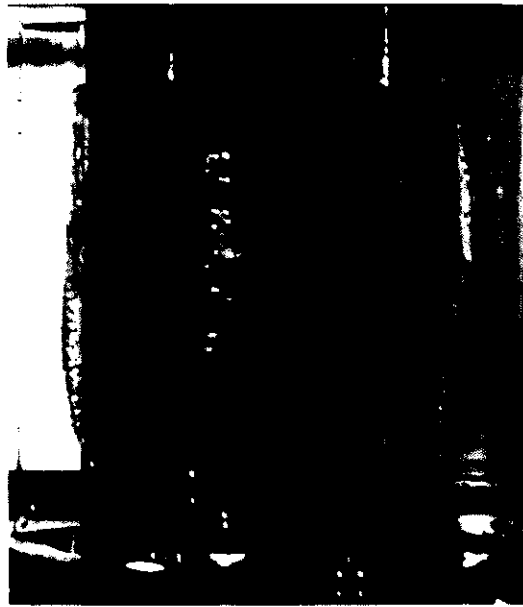
(1) 差歪0.11の時  
図5-5 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：8 MPa  
歪速度： $10^{-6} \text{ s}^{-1}$



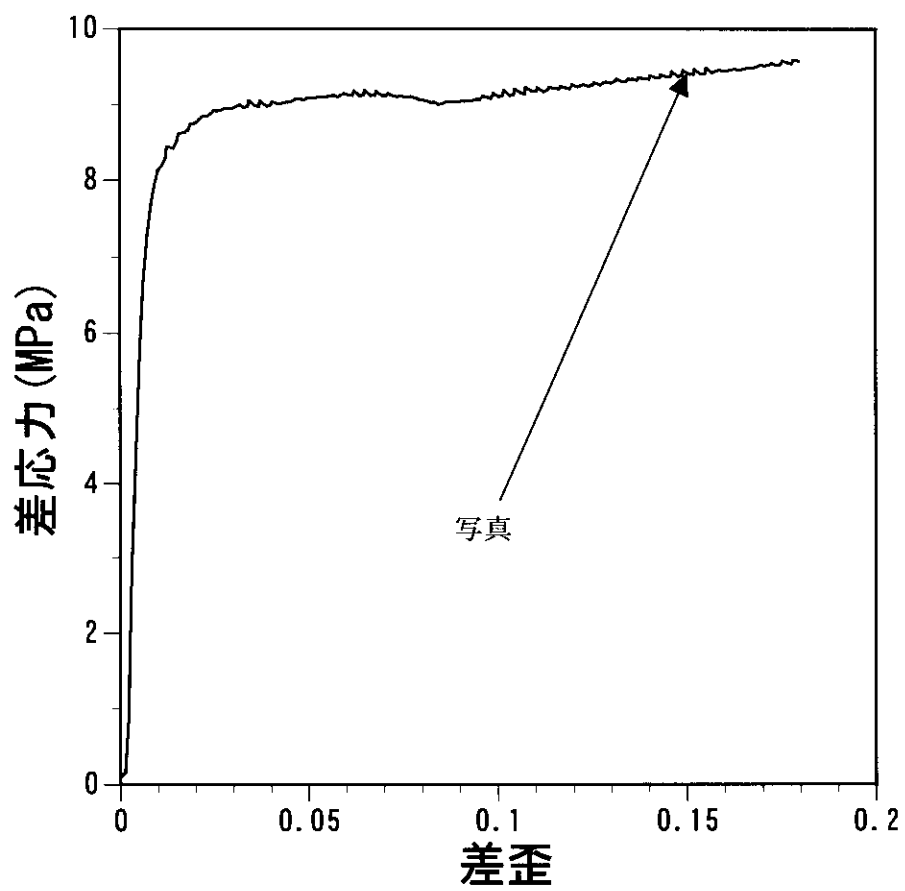
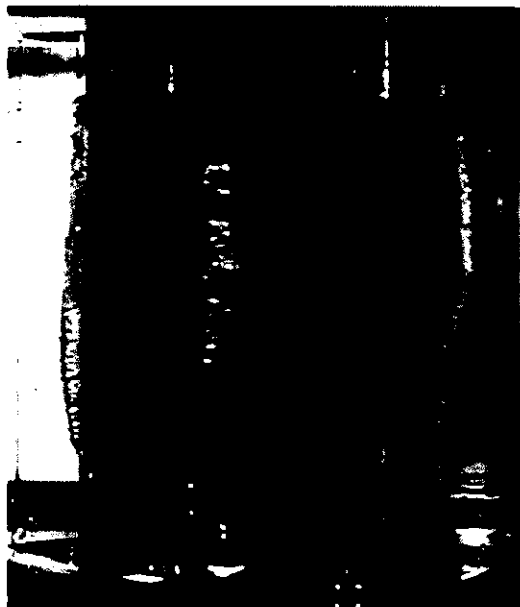
(m) 差歪 0.12 の時  
 図 5-5 三軸圧縮試験結果  
 試料：土丹  
 周圧：8 MPa  
 歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



(n) 差歪0.13の時  
図5-5 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：8 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

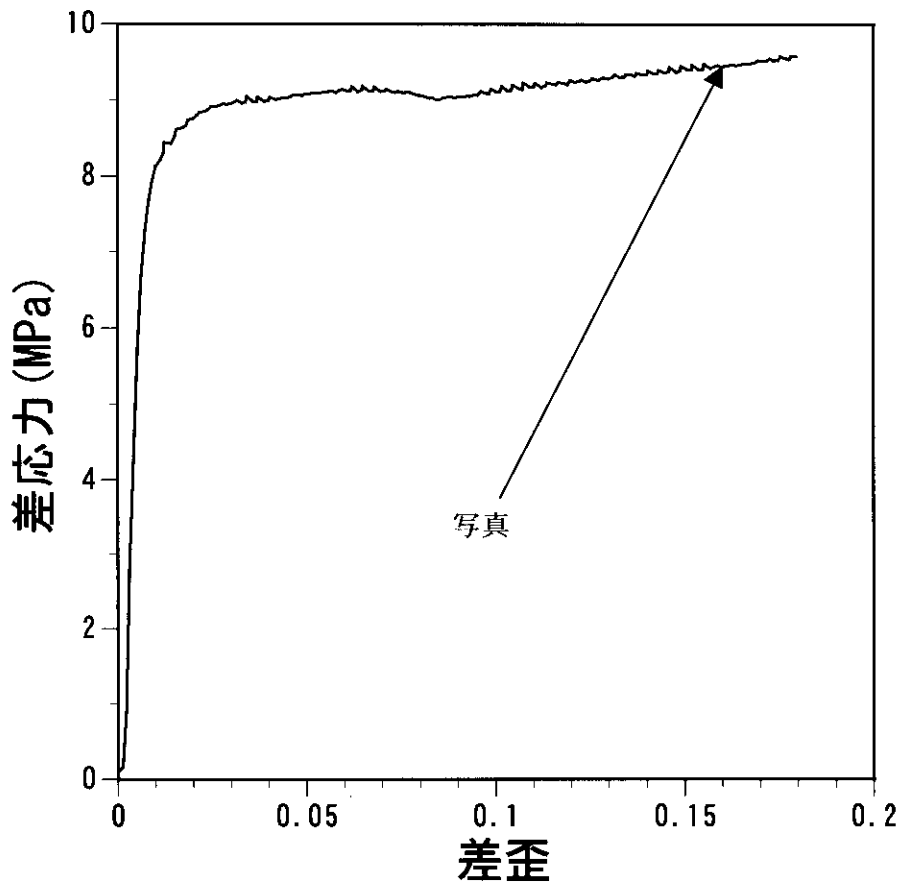
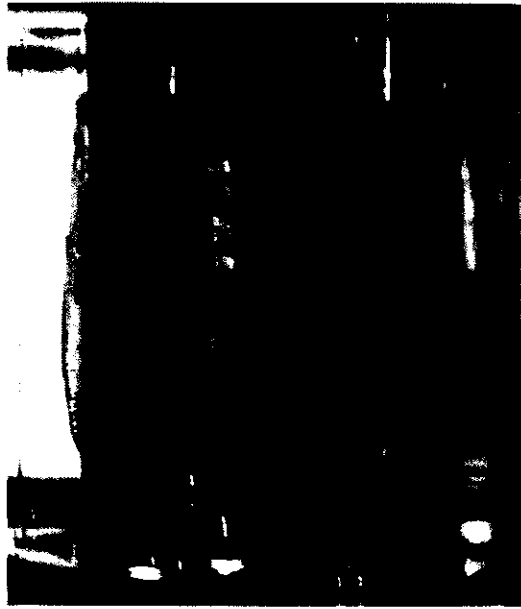


(o) 差歪0.14の時  
図5-5 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：8 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

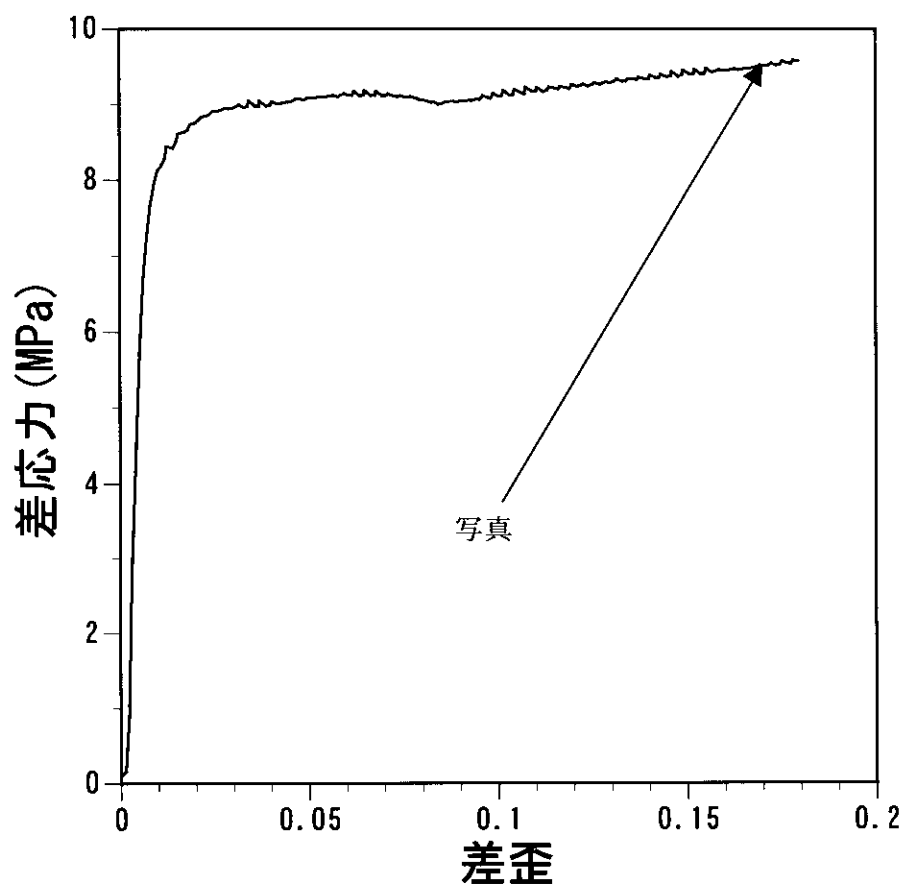
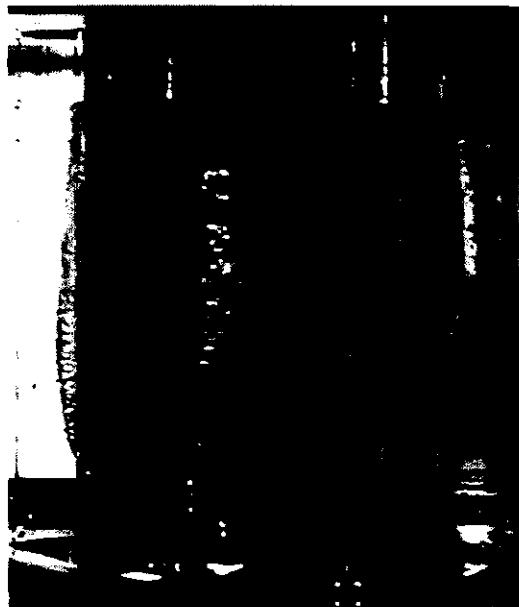


(p) 差歪0.15の時  
図5-5 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：8 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

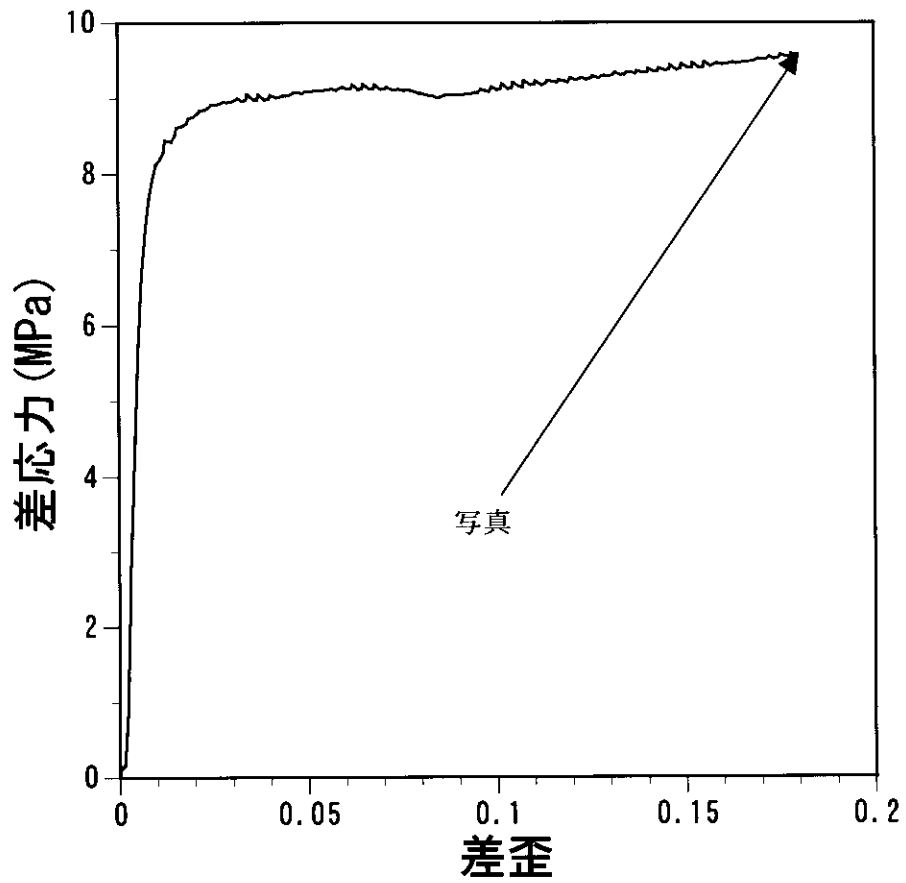
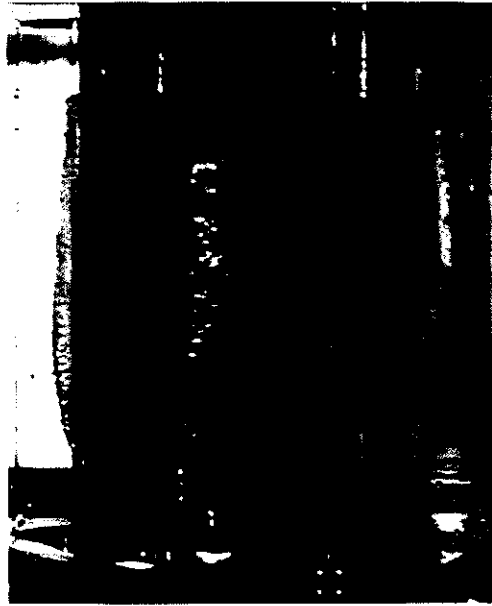




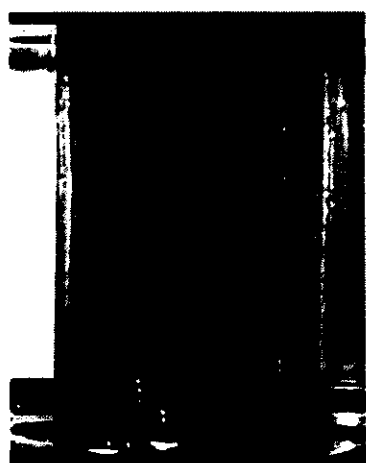
(q) 差歪0.16の時  
図5-5 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：8 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



(r) 差歪0.17の時  
図5-5 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：8 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



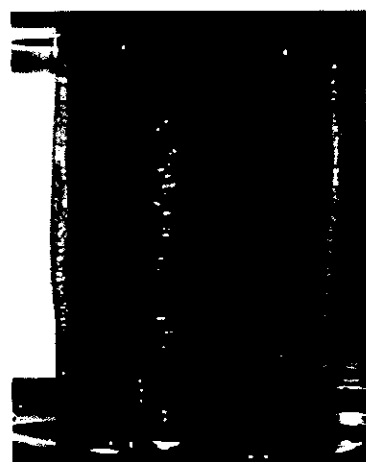
(s) 差歪0.18の時  
図5-5 三軸圧縮試験結果  
試料：土丹  
周圧：8 MPa  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



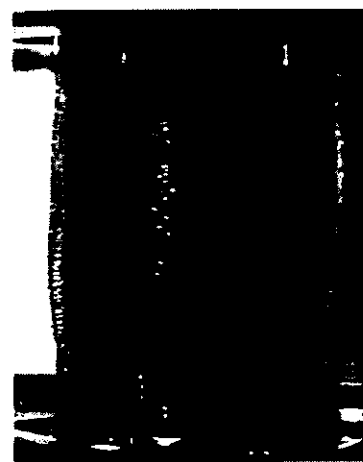
差歪 0



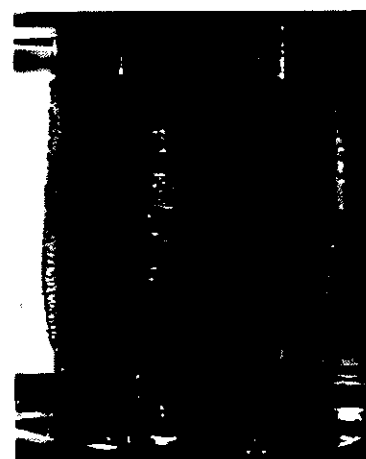
差歪 0.03



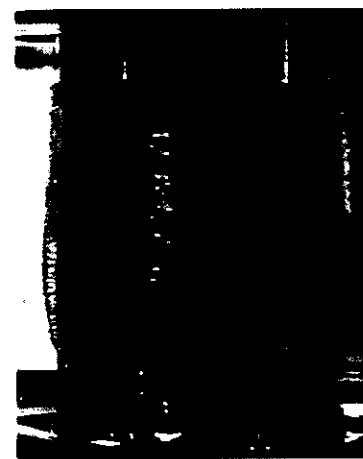
差歪 0.06



差歪 0.09



差歪 0.12



差歪 0.15

図5-6 三軸圧縮試験結果のまとめ

試料：土丹

周圧：8 MPa

歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



試験片③



試験片⑤



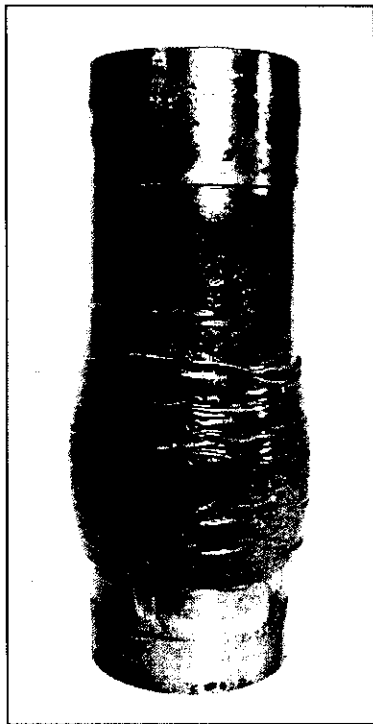
試験片⑧

(a) 周圧 2 MP a

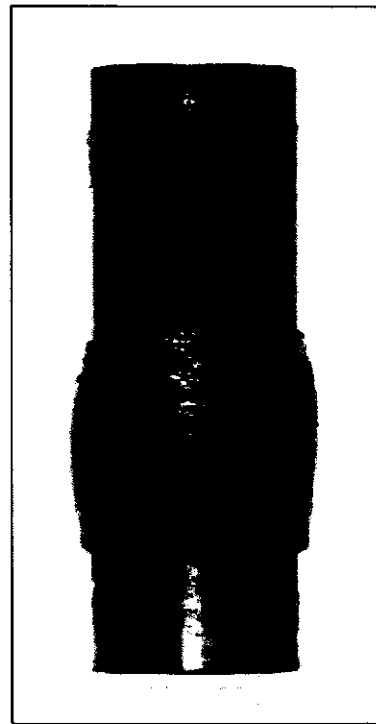
図 5 - 7 三軸圧縮試験後の試験片

試料：土丹

歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



試験片⑥



試験片⑬



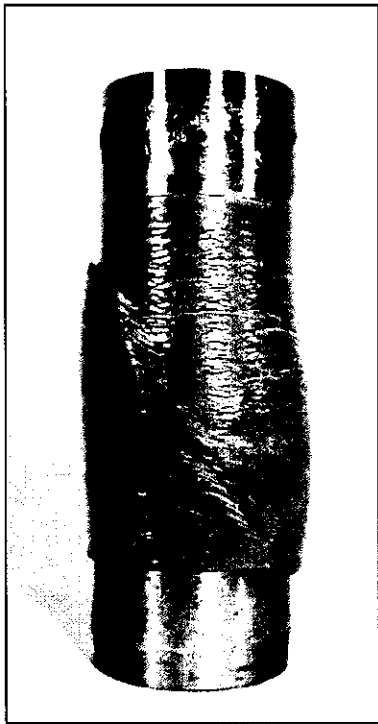
試験片⑨

(b) 周圧4 MP a

図5-7 三軸圧縮試験後の試験片

試料：土丹

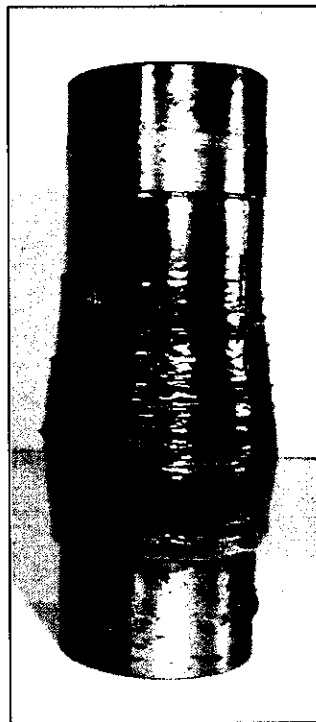
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$



試験片⑦



試験片⑪



試験片⑩

(c) 周圧8MPa

図5-7 三軸圧縮試験後の試験片

試料：土丹

歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

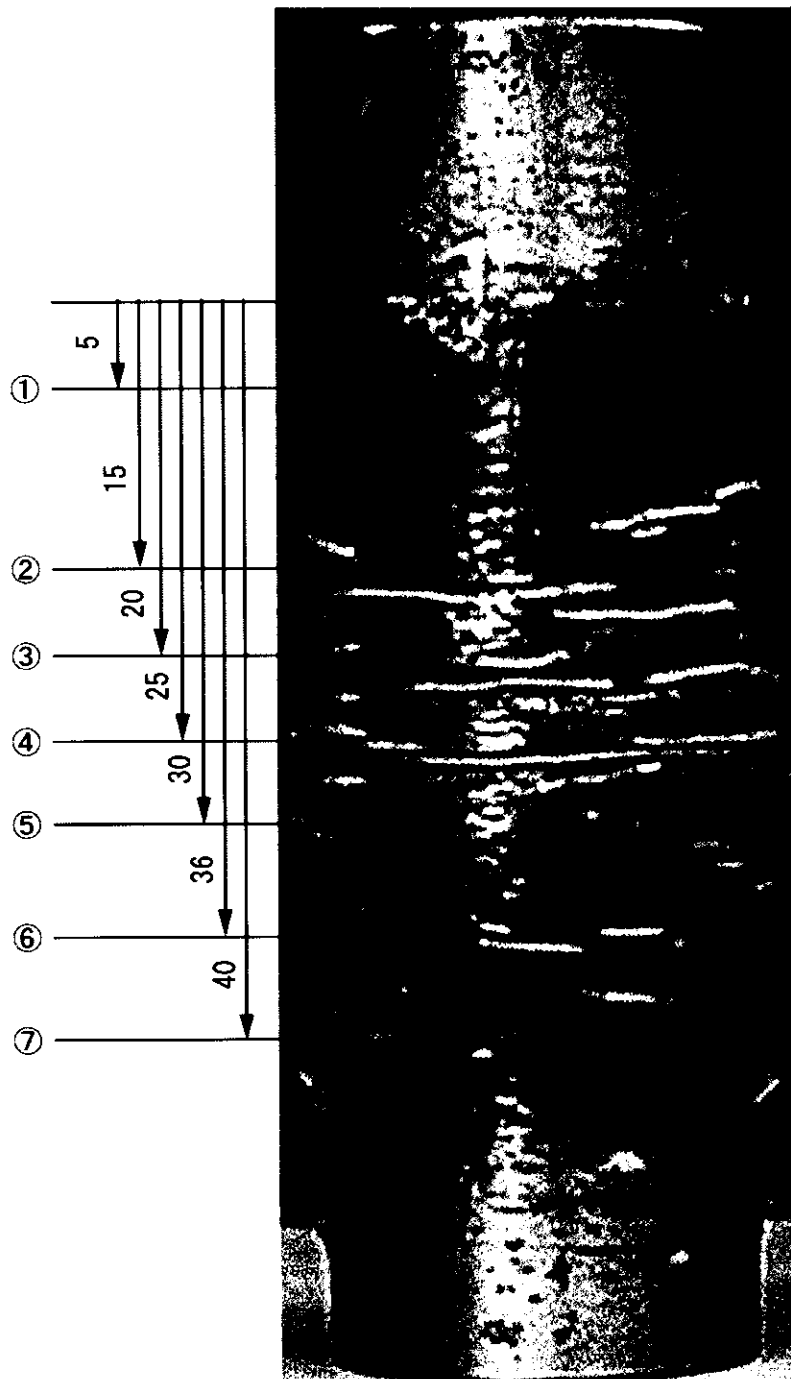
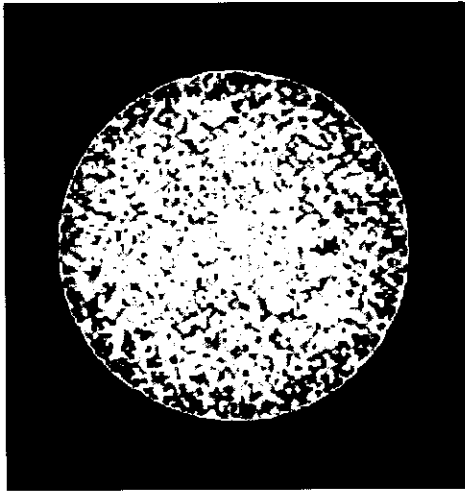
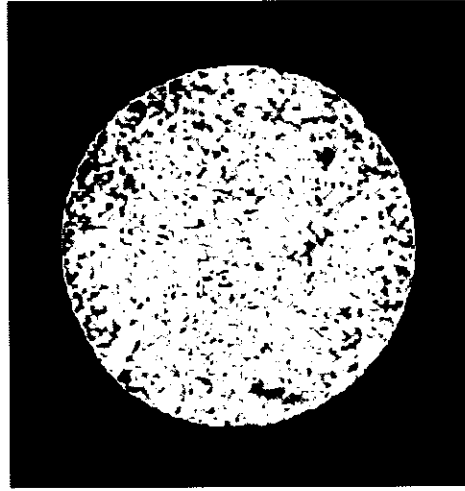


図5-8 X線断層撮影に用いた試験片  
試料：土丹（試験片番号⑨）  
周圧：4 MP a  
歪速度： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$

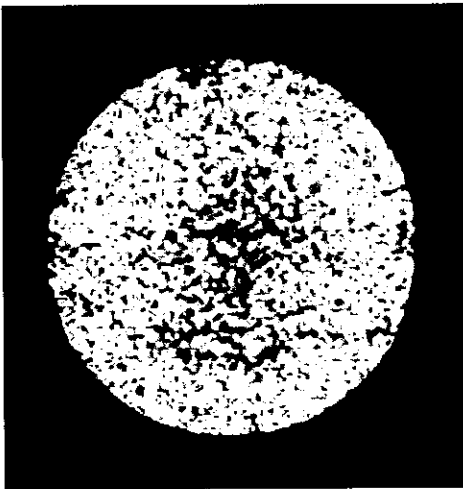




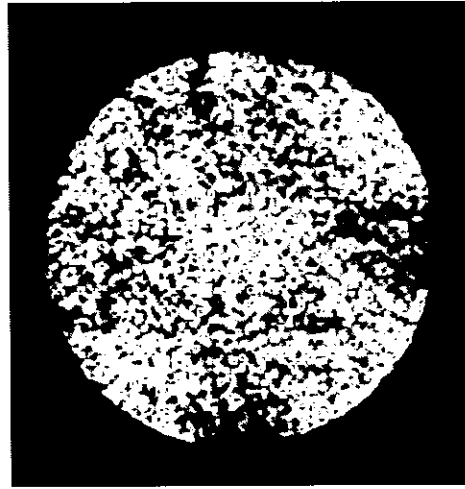
①断面密度分布



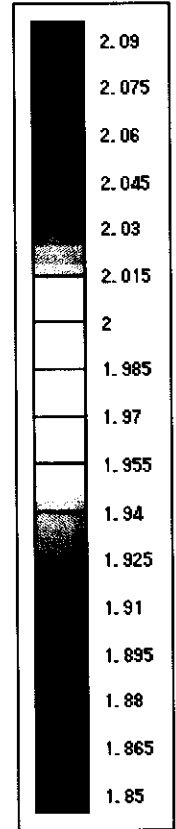
②断面密度分布



③断面密度分布



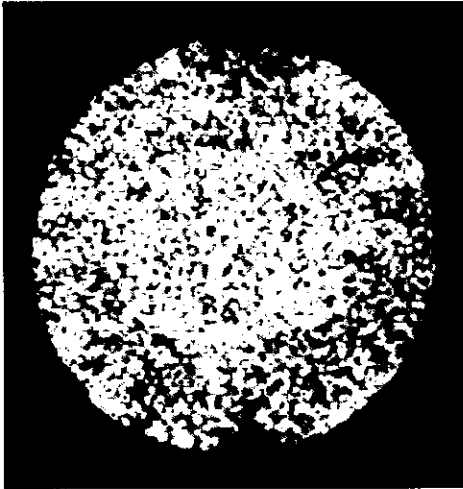
④断面密度分布



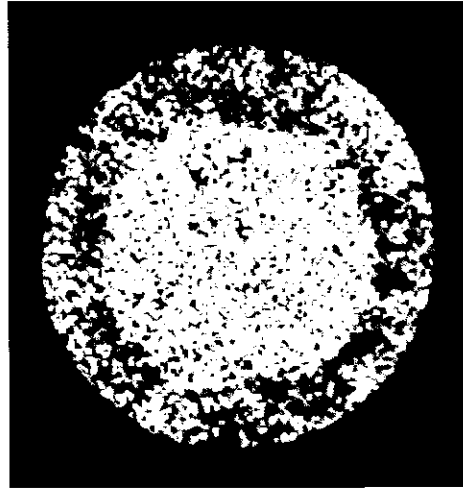
$\rho$  (g/cm<sup>2</sup>)

(a) 断面①~④

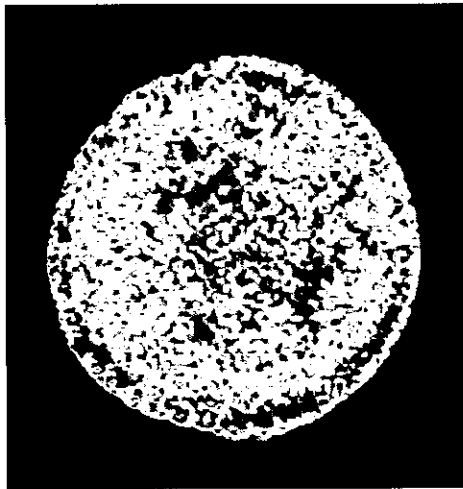
图5-9 X线断层摄影结果



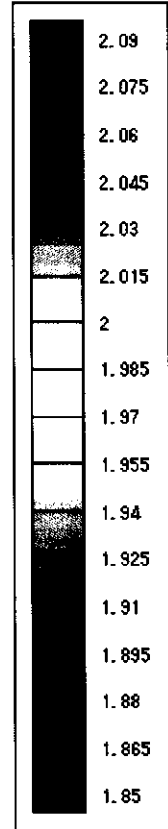
⑤断面密度分布



⑥断面密度分布



⑦断面密度分布



$\rho$  (g/cm<sup>2</sup>)

(b) 断面⑤~⑦

图 5 - 9 X線断層撮影結果

## 6. 地圧データベース

長期にわたる岩盤内構造物の安定性を検討するには、当然ながら地圧に関する調査が必要である。昨年度に引き続いて、関連文献の収集に努めた。集めた文献のリストをこのあとに載せる。なお、文献リストは、その1として整理番号順に、その2として年代順に並べたものを添付した。地圧のデータベース等の試作に役立つものと考えている。

## 本年収集した文献のリスト

### その1                      References    (番号順 ②)

19. Crosson, R. S., : Small Earthquakes, Structures and Tectonics of the Puget Sound Region, B. S. S. A., (vol.62, p.1133-1171)
20. Dunlap, I.R. (1963): Fracture orientation and rock stresses in the Spruiger and Hard Formations, Oklahoma, Jour. Inst. Petrol., (49, p.289-294)
30. Gay, N. C. (1972): Virgin rock stresses at Doornfontein Gold Mine, Carletonville, South Africa, Jour. of Geol., (80, p.61-80)
55. Haimson, B. C. and Voight, B. (1976): Stress measurement in Iceland, EOS Transactions-American Geophysical Union, (Vol.57, p.1007)
60. Hast, N. (1974): The state of stress in the upper part of the Earth's crust as determined by measurements of absolute rock stress, Naturwissenschaften, (61, 11, p.468-475)
84. Hast, N. (1973): Global measurements of absolute stress, Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., (A. 274, p.409-419)
99. Hobbs, N. B. and Clarke, D. A., (1966): Residual stress measurements by the drillhole prestressed meter and the rigid brass plug., Proc. 1<sup>st</sup> Cong. Int. Soc. Rock Mech., (paper 4.1, vol. 2, p.3-7 Lisbon)
125. Herget, G., (1968): The stress field in the Urquhart Shales at Mount Isa ( Queensland Australia), based on structural investigations, Felsmech. und Ingenieurgeol., (6, p.190-200)
127. Hoskins, E. R., (1970): Primary stress Measurements at Mount Isa, in Basic and Applied Rock Mechanics, (475-501)
130. Kluth, D. S., (1964): Rock stress measurements in the jor underground power station of the Cameron highlands hydroelectric scheme, Malaya, Trans. 8<sup>th</sup> Int. Cong. Large Dams, (1, p.103-118)
131. Knill, J. L., (1972): The engineering geology of Cruachan Underground Power Station, Eng. Geol., (6, p.289-312)
133. Franklin, J. A. and Hungr, O., (1978): Rock stresses in Canada; their relevance to engineering projects. Paper presented at the 25<sup>th</sup> Geomechanical Colloquy, Salzburg, Austria,
- 135-2b. Palmer, J. H. L. and Lo, K. L., (1976): In Situ Stress Measurements in Some Near-Surface Rock Formations, Thorold, Ontario, Canadian Geotechnical Journal, (Vol.13, No.1, p.1-7)
- 135-6. Obert, L., (1962): In Situ Determination of Stress in Rock. Mining Engineering, (Vol.14, II, p.51-58)
- 135-10. Skinner, Eugene H., Waddell, G. G., and Conway, J. P., (1974): In Situ Determination of Rock Behavior by Overcore Stress Relief Method, Physical Property Measurements and

Initial Deformation Method. BuMines RI 7962, (p. 87)

140. Zoback, M., Healy, J. and Roller, J., (1977): Preliminary stress measurements in Central California using the hydrofrac technique, in press, Pure and Appl. Geophys., (vol.115, p.135-152)
147. Von Schonfeldt, H. and Fairhurst, C., (1972): Field experiments on hydraulic fracturing, Soc. Petrol. Eng. Jour., (p.69-77)
148. Van Heerden, W.L., (1970): Stress measurements in Coal pillars, Proc. 2<sup>nd</sup> Cong. Int. Soc. Rock. Mech. Paper #4-16, (p.1-5)
149. Van Heerden, W.L., (1976): Practical Application of the CSIR Triaxial strain Cell for Rock Stress Measurements, Proc. ISRM Symp. on Investigation of Stress in Rock-Advances in Stress Measurement, Sydney, Australia, (p.71-82)
155. Van Dam, J., Horner, D.R. and Kehle, R.O., (1964): The determination of tectonic stresses through analysis of hydraulic well fracturing, Jour. Geophys. Res., (69, p.259-273)
156. Van Dam, J. and Horner, D.R., (1957): Interpretation of pressure build-down after sandfrac treatment. Venezuelau 2<sup>nd</sup> Ann. Meeting AIME, Caracas, As reported by Scheidegger, A.E., Stresses in the Earth's Crust from Hydraulic Fracturing Data, Geol. und Bauwesen, (27, 1961, p.45-53)
158. Turchaninov, I.A. and Markov, G.A., (1966): The effect of recent tectonics on the stressed state of rocks in the Khibini Apatite Mines, Izv. Phys. Earth, (8, p.528-530) (in translation)
160. Thomas, H.E., Carpenter H.C. and Sterner, T.E., (1972): Hydraulic fracturing of Wyoming Green River Oil Shale: Field experiments, phase I, USBM RI7596. p.18)
161. Takamatsu, G. et al., (1970): On the measurement of rock stresses at Yokomabu area in Ashio Copper Mine, J. Min. Met. Inst. Japan, (vol.86, p.292-295) (published in Japanese)
164. Suzuki, Ko, (1971): Theory and practice of rockstress measurement by borehole deformation method Paper #4 Symposium on determination of stress in Rock Mechanics, (p.173-182)
166. Stephenson, B.R. and Murray, K.J., (1970): Application of the strain rosette relief method to measure principal stresses throughout a mine, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., (7, p.1-22)
167. Rummel, F. and Jung, R., (1975): Hydraulic Fracturing Stress Measurements, Pure Appl. Geophys., (113, p.321-330)
170. Rocha, M. and Silverio, A., (1971): A new method for the complete determination of the state of stress in rock masses, Proc. Int. Symp. On Determination of stresses in Rock Masses, (p.405-430)
171. Raleigh, C. B., Healy, J. H. and Bredehoeft, J. D., (1972): Faulting and crustal stress at Rangely, Colorado, Am. Geophys. Union Monograph (16, p.275-284)
173. Pollard, D. D. and Muller, O. H., (1976): The effect of gradients in regional stress

- magma pressure on the form of sheet intrusions in cross section, *Geophys. Res.*, (81, p. 975-984)
189. Nichols, T. C. Jr., Savage, W. Z. and Brethauer, G. E., (1977): Deformations and stress changes that result from quarrying the Barre Granite of Vermont in press *Proc. Am. Nuc. Soc. topical meeting "Energy and Mineral Recovery Research,"* Golden, Co,
191. Nichols, T. C. Jr. and Farrow, R. A., (1973): Discussion of the paper by R. V. de la Cruz and C. B. Raleigh "Absolute stress measurements at the Rangely Anticline, Northwestern Colorado," *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci.*, (10, p. 751-755)
193. Nichols, T. C. Jr., (1975): Deformations Associated with Relaxation of Residual stresses in a sample of Barre Granite from Vermont, USGS Prof Paper No. 875, (p.32)
194. Myrvang, A. M., (1976): Practical use of rock stress measurements in Norway, *Proc. Int. Soc. Rock Mech. Symp. On Investigation of stress in Rock-Advances in Stress Measurement*, Sydney, Australia, (p. 92-99)
200. Murphy, H. D., Lawton, R. G., (1977): Tester, J. W., Potter, R. M., Brown, D. W. and Aamodt, R. L., Preliminary Assessment of a geothermal energy reservoir formed by hydraulic fracturing, *Soc. Petrol. Eng. Jour.* (Vol.17, No.4, p.317-326)
201. Muller, O.H. and Pollard, D.D., (1977): The stress state near Spanish Peaks, Colorado, determined from a dike pattern, *Pure Appl. Geophys.*, (vol.115, p.69-86)
202. Morgan, T.A., Fischer, W.G. and Sturgis, W.J., (1965): Distribution of stress in the Westvaco Trona Mine, Westvaco, Wyoming, USBM RI 6675, (p.58)
204. Merrill, R.H., (1964): In situ determination of stress by relief techniques, in W. R. Judd (ed.) *State of stress in the Earth's Crust*, Elsevier, New York, (p.343-369)
205. Melosh, H. J., (1976): Nonlinear Stress Propagation in the Earth's Upper Mantle. *JGR*, (Vol.81, No.32, p.5621-5632)
206. McLennan, J.D. and Roegiers, J. C., (1976): Stress conditions around the Niagara Gorge, *Proc. 3<sup>rd</sup> Symp. Eng. Applications of Solid Mechanics*, Univ. Toronto,
210. Malone, S.D., Rothe, G.H., and Smith, S.W., *Details of Microearthquake Swarms in the Columbia Basin*, Washington, B.S.S.A., (vol.65, p.855-864)
211. Li, B., (1970): Natural stress values obtained in different parts of the Fennoscandian rock mass, Paper #1-28, *Proc. 2<sup>nd</sup> Cong. Int. Soc. Rock Mech.*, Beograd,
217. Li, B. and Moxon, S., (1971): Some Norwegian experience in rock pressure measurements, *Proc. Int. Symp. On Determination of Stress in Rock Masses*, (p.280-291)
219. Le Francois, P., (1970): Int-situ measurement of rock stresses for the Idikki Hydroelectric Project, *Proc. 6<sup>th</sup> Canadian Rock Mech. Symp.*, (p.65-90)
221. Leeman, E.R., (1964): The measurement of stress in rock, part III, *Jour. S. Af. Inst. Min. Metall.*, (65, p.254-284)
228. Lee, F.T., Abel, J.F. and Nichols, Jr. T.C., (1976): The relation of geology and stress changes to excavations in crystalline rocks at Idaho Springs, Colorado: U.S.G.S. Prof. Paper 965 (p.47)

156. Van Dam, J. and Horner, D.R., (1957): Interpretation of pressure build-down after sandfrac treatment. Venezuelau 2<sup>nd</sup> Ann. Meeting AIME, Cracas, As reported by Scheidegger, A.E., Stresses in the Earth's Crust from Hydraulic Fracturing Data, Geol. und Bauwesen, (27, 1961, p.45-53)
- 135-6. Obert, L., (1962): In Situ Determination of Stress in Rock. Mining Engineering, (Vol.14, II, p.51-58)
20. Dunlap, I.R. (1963): Fracture orientation and rock stresses in the Spruiger and Hard Formations, Oklahoma, Jour. Inst. Petrol., (49, p.289-294)
130. Kluth, D. S., (1964): Rock stress measurements in the jor underground power station of the Cameron highlands hydroelectric scheme, Malaya, Trans. 8<sup>th</sup> Int. Cong. Large Dams, (1, p.103-118)
155. Van Dam, J., Horner, D.R. and Kehle, R.O., (1964): The determination of tectonic stresses through analysis of hydraulic well fracturing, Jour. Geophys. Res., (69, p.259-273)
204. Merrill, R.H., (1964): In situ determination of stress by relief techniques, in W. R. Judd (ed.) State of stress in the Earth's Crust, Elsevier, New York, (p.343-369)
221. Leeman, E.R., (1964): The measurement of stress in rock, part III, Jour. S. Af. Inst. Min. Metall., (65, p.254-284)
202. Morgan, T.A., Fischer, W.G. and Sturgis, W.J., (1965): Distribution of stress in the Westvaco Trona Mine, Westvaco, Wyoming, USBM RI 6675, (p.58)
99. Hobbs, N. B. and Clarke, D. A., (1966): Residual stress measurements by the drillhole prestressed meter and the rigid brass plug., Proc. 1<sup>st</sup> Cong. Int. Soc. Rock Mech., (paper 4.1, vol. 2, p.3-7 Lisbon)
158. Turchaninov, I.A. and Markov, G.A., (1966): The effect of recent tectonics on the stressed state of rocks in the Khibini Apatite Mines, Izv. Phys. Earth, (8, p.528-530) (in translation)
125. Herget, G., (1968): The stress field in the Urquhart Shales at Mount Isa ( Queensland Australia), based on structural investigations, Felsmech. und Ingenieurgeol., (6, p.190-200)
127. Hoskins, E. R., (1970): Primary stress Measurements at Mount Isa, in Basic and Applied Rock Mechanics, (475-501)
148. Van Heerden, W.L., (1970): Stress measurements in Coal pillars, Proc. 2<sup>nd</sup> Cong. Int. Soc. Rock. Mech. Paper #4-16, (p.1-5)
161. Takamatsu, G. et al., (1970): On the measurement of rock stresses at Yokomabu area in Ashio Copper Mine, J. Min. Met. Inst. Japan, (vol. 86, p.292-295) (published in Japanese)
166. Stephenson, B.R. and Murray, K. J., (1970): Application of the strain rosette relief

- method to measure principal stresses throughout a mine, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, (7, p.1-22)
211. Li, B., (1970): Natural stress values obtained in different parts of the Fennoscandian rock mass, Paper #1-28, *Proc. 2<sup>nd</sup> Cong. Int. Soc. Rock Mech.*, Beograd,
219. Le Francois, P., (1970): Int-situ measurement of rock stresses for the Idikki Hydroelectric Project, *Proc. 6<sup>th</sup> Canadian Rock Mech. Symp.*, (p.65-90)
164. Suzuki, Ko, (1971): Theory and practice of rockstress measurement by borehole deformation method Paper #4 *Symposium on determination of stress in Rock Mechanics*, (p.173-182)
170. Rocha, M. and Silverio, A., (1971): A new method for the complete determination of the state of stress in rock masses, *Proc. Int. Symp. On Determination of stresses in Rock Masses*, (p.405-430)
217. Li, B. and Moxon, S., (1971): Some Norwegian experience in rock pressure measurements, *Proc. Int. Symp. On Determination of Stress in Rock Masses*, (p.280-291)
19. Crosson, R. S., : Small Earthquakes, Structures and Tectonics of the Puget Sound Region, *B. S. S. A.*, (vol.62, p.1133-1171)
30. Gay, N. C. (1972): Virgin rock stresses at Doornfontein Gold Mine, Carletonville, South Africa, *Jour. of Geol.*, (80, p.61-80)
131. Knill, J. L., (1972): The engineering geology of Cruachan Underground Power Station, *Eng. Geol.*, (6, p.289-312)
147. Von Schonfeldt, H. and Fairhurst, C., (1972): Field experiments on hydraulic fracturing, *Soc. Petrol. Eng. Jour.*, (p.69-77)
160. Thomas, H.E., Carpenter H.C. and Sterner, T.E., (1972): Hydraulic fracturing of Wyoming Green River Oil Shale: Field experiments, phase I, USBM RI7596. p.18)
171. Raleigh, C. B., Healy, J. H. and Bredehoeft, J. D., (1972): Faulting and crustal stress at Rangely, Colorado, *Am. Geophys. Union Monograph* (16, p.275-284)
84. Hast, N. (1973): Global measurements of absolute stress, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, (A. 274, p.409-419)
191. Nichols, T. C. Jr. and Farrow, R. A., (1973): Discussion of the paper by R. V. de la Cruz and C. B. Raleigh "Absolute stress measurements at the Rangely Anticline, Northwestern Colorado," *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci.*, (10, p. 751-755)
60. Hast, N. (1974): The state of stress in the upper part of the Earth's crust as determined by measurements of absolute rock stress, *Naturwissenschaften*, (61, 11, p.468-475)
- 135-10. Skinner, Eugene H., Waddell, G. G., and Conway, J. P., (1974): In Situ Determination of Rock Behavior by Overcore Stress Relief Method, *Physical Property Measurements and Initial Deformation Method. BuMines RI 7962*, (p.87)
167. Rummel, F. and Jung, R., (1975): Hydraulic Fracturing Stress Measurements, *Pure Appl. Geophys.*, (113, p.321-330)
193. Nichols, T. C. Jr., (1975): Deformations Associated with Relaxation of Residual



- stresses in a sample of Barre Granite from Vermont, USGS Prof Paper No. 875, (p.32)
210. Malone, S.D., Rothe, G.H., and Smith, S.W., Details of Microearthquake Swarms in the Columbia Basin, Washington, B.S.S.A., (vol.65, p.855-864)
55. Haimson, B. C. and Voight, B. (1976): Stress measurement in Iceland, EOS Transactions-American Geophysical Union, (Vol.57, p.1007)
- 135-2b. Palmer, J. H. L. and Lo, K. L., (1976): In Situ Stress Measurements in Some Near-Surface Rock Formations, Thorold, Ontario, Canadian Geotechnical Journal, (Vol.13, No.1, p.1-7)
149. Van Heerden, W.L., (1976): Practical Application of the CSIR Triaxial strain Cell for Rock Stress Measurements, Proc. ISRM Symp. on Investigation of Stress in Rock-Advances in Stress Measurement, Sydney, Australia, (p.71-82)
173. Pollard, D. D. and Muller, O. H., (1976): The effect of gradients in regional stress magma pressure on the form of sheet intrusions in cross section, Geophys. Res., (81, p. 975-984)
194. Myrvang, A. M., (1976): Practical use of rock stress measurements in Norway, Proc. Int. Soc. Rock Mech. Symp. On Investigation of stress in Rock-Advances in Stress Measurement, Sydney, Australia, (p. 92-99)
205. Melosh, H. J., (1976): Nonlinear Stress Propagation in the Earth's Upper Mantle. JGR, (Vol.81, No.32, p.5621-5632)
206. McLennan, J.D. and Roegiers, J.C., (1976): Stress conditions around the Niagara Gorge, Proc. 3<sup>rd</sup> Symp. Eng. Applications of Solid Mechanics, Univ. Toronto,
228. Lee, F.T., Abel, J.F. and Nichols, Jr. T.C., (1976): The relation of geology and stress changes to excavations in crystalline rocks at Idaho Springs, Colorado: U.S.G.S. Prof. Paper 965 (p.47)
140. Zoback, M., Healy, J. and Roller, J., (1977): Preliminary stress measurements in Central California using the hydrofrac technique, in press, Pure and Appl. Geophys., (vol.115, p.135-152)
189. Nichols, T. C. Jr., Savage, W. Z. and Brethauer, G. E., (1977): Deformations and stress changes that result from quarrying the Barre Granite of Vermont in press Proc. Am Nuc. Soc. topical meeting "Energy and Mureal Recovery Research," Golden, Co,
200. Murphy, H. D., Lawton, R. G., (1977): Tester, J. W., Potter, R. M., Brown, D. W. and Aamodt, R. L., Preliminary Assessment of a geothermal energy reservoir formed by hydraulic fracturing, Soc. Petrol. Eng. Jour. (Vol.17, No.4, p.317-326)
201. Muller, O.H. and Pollard, D.D., (1977): The stress state near Spanish Peaks, Colorado, determined from a dike pattern, Pure Appl. Geophys., (vol.115, p.69-86)
133. Franklin, J. A. and Hungr, O., (1978): Rock stresses in Canada; their relevance to engineering projects. Paper presented at the 25<sup>th</sup> Geomechanical Colloquy, Salzburg, Austria,

## 7. まとめ

長期岩盤挙動の解明を目指して、平成12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。これまでの試験期間は1300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中といえる。この結果を第2章で述べた。測定結果をみると対数クリープ則から予測される値より若干大きく、間もなく破壊するのではないかとの誤解を与えがちであるが、クリープ歪速度は次第に低下しており安定した計測が続いている。今後の挙動は興味深くまた超長期に使用される岩盤内構造物の設計にとっては欠かせないデータと考えている。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は対象とする場所が決定してからおこなっても遅くないが、長期間にわたる基礎データは、そのデータが必要となるかなり前から行っていく必要がある。さらに言えば、試験室実験でカバーできる範囲は高々10年程度であり、これ以上の長期間にわたる現象の解明には、古い人工物の調査、さらには自然現象の爪あとの調査などが必要と考える。

第3章では、昨年度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。1998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。1998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、昨年度4連の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。4つの系統に分かれた測定系の整合性の調整、4つの载荷装置の相互安定性などはこれまでに経験したことがなく、そのため試験機の調整に手間取ったが、現在は順調に稼動している。ただし、短期間の試験しかしておらず、長期の試験の場合には、新たな問題点の発生が考えられるが、試験機の開発という観点からすれば良い経験になると考えている。

第4章では、低応力レベルにおける時間依存性とヤング率の载荷速度依存性について述べた。ごく最近になって、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、従来より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することにした。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、定歪速度試験を行い、50%割線ヤング率の载荷速度依存性に特に注目して実験的研究をおこなった。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载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。ヤング率の载荷速度依存性については、古くから研究が進められてきたが、明瞭な結論はなかった。今回の研究結果でも全てが明らかになった状態からはほど遠いが、新しい試験法の提案なども含めて、従来より1歩進んだ成果が得られたと考えている。

第5章で、昨年度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。試料岩石は、軟岩に分類される土丹を中心とした。この場合には、変形がおおきく、観察は容易で有効であった。得られたデジタル画像から、変形を正確に求める方法を今後検討するつもりである。

第6章では、地圧データベース構築に向けた基礎資料の収集結果について述べた。