

JNC TJ8400 2002-062

軟岩の長期挙動に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2003年3月

東京大学

軟岩の長期挙動に関する研究
(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

大久保誠介*

要 旨

幌延地域で採取されたボーリングコアを用いて、三軸圧縮応力状態におけるデータを取得し、拘束圧が岩石の長期力学的変形挙動に与える影響について検討を実施した。

本研究では、まず三軸圧縮試験をおこなった。試験中に載荷速度を速めたり遅くしたりして、そのときの応力の増減の程度から、供試体の粘弾性的性質を把握することを試みた。さらに、三軸圧縮応力下で多段階クリープ試験をおこなった。試験結果よりコンプライアンス可変型構成方程式のパラメータを求めた。なお、試験に際して、著者が独自に開発した可視化ベッセルを用いて三軸試験をおこなった。この可視化ベッセルの外筒は透明なアクリル製であり、試験中に供試体が次第に変形していくことが観察できた。

本報告書は、東京大学が核燃料サイクル開発機構との委託研究契約により実施した研究成果に関するものである。

環境保全・研究開発センター 処分研究部 システム解析グループ

*：東京大学

Study on Long-Term Behavior of Weak Rock
(Document Prepared by Other Institute, Based on the Trust Contract)

Seisuke Okubo*

Abstract

Using the boring core obtained in the Horonobe region, the data in triaxial compression stress state was acquired, and the examination was carried out on the effect of the confining pressure on long-term deformation or stability of the sample rock.

At first, triaxial compression tests were carried out. In the test, loading rate (strain rate) was changed several times to obtain viscoelastic properties of the sample rock. Multi-stage creep tests were also performed in triaxial compression stress. The parameter set of a constitutive equation of variable compliance type was obtained based on the testing results.

In this study, a transparent triaxial cell recently developed by this author was used. The external cylinder of this vessel was made of the transparent acrylic resin. Therefore, gradual deformation of the sample under testing was easily and clearly observed.

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

JNC Liaison: Repository System Analysis Group, Waste Isolation Research Division,
Waste Management and Fuel Cycle Research Center

* : The University of Tokyo

目 次

1 . はじめに	1
2 . コンプライアンス可変型構成方程式と破壊条件式の概要	2
2 . 1 コンプライアンス可変型構成方程式.....	2
2 . 2 破壊条件式と破壊限接近度.....	5
3 . 供試体と実験装置.....	9
3 . 1 供試体	9
3 . 2 試験機と測定装置	9
3 . 3 可視化ベッセル.....	10
4 . 三軸圧縮試験	18
4 . 1 試験方法	18
4 . 2 試験結果	18
4 . 3 構成方程式のパラメータ	20
5 . 多段階クリープ試験	41
5 . 1 試験方法	41
5 . 2 試験結果	41
6 . おわりに	52
参考文献	53

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分システムを考えるにあたり、ニアフィールド岩盤の長期力学的変形挙動を適切に評価することが重要である。多くの研究が発表されているが、一軸圧縮応力状態における岩石の長期力学的変形挙動について述べたものが主である。しかしながら、実際の処分環境においてニアフィールド岩盤は、三軸圧縮応力下にあると推測されるので、今後、三軸圧縮応力状態における長期力学的変形挙動について検討する必要がある。

本研究では、フランスの放射性廃棄物管理機関 A N D R A (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) との共同研究参画に資するため、幌延地域で採取されたボーリングコア（堆積軟岩）を用いて、三軸圧縮応力状態におけるデータを取得し、拘束圧が岩石の長期力学的変形挙動に与える影響について検討を実施した。

本研究では、まず三軸圧縮試験をおこなった。試験中に载荷速度を速めたり遅くしたりして、そのときの応力の増減の程度から、供試体の粘弾性的性質を把握することを試みた。さらに、三軸圧縮応力下で多段階クリープ試験をおこなった。試験結果よりコンプライアンス可変型構成方程式のパラメータを求めた。なお、試験に際して、著者が独自に開発した可視化ベッセルを用いて三軸試験をおこなった。この可視化ベッセルの外筒は透明なアクリル製であり、試験中に供試体が次第に変形していくことが観察できた。

2. コンプライアンス可変型構成方程式と破壊条件式の概要

本研究では、コンプライアンス可変型構成方程式のパラメータを求めることを主たる目的の一つとしている。一次元応力下での構成方程式は比較的簡単であるが、三次元応力下での構成方程式については注意すべき点がいくつかある。そこで、三次元応力下でのコンプライアンス可変型構成方程式の概要について、前もってまとめておくことにした。

三次元応力下での供試体の挙動を考えると、拘束圧による強度増加をあらゆる破壊条件式の検討もかかせない。この破壊条件式は、三次元応力下での構成方程式とかかわりをもつし、また、本研究のもう一つの目的である三次元応力下での長期挙動の解明とも結びついている。そこで、破壊条件式についても簡単に紹介しておく。

2.1 コンプライアンス可変型構成方程式

今回採用したのはコンプライアンス可変型構成方程式(大久保ら, 1987a)である。なお、この構成方程式を使用した二次元有限要素法による計算結果(大久保ら, 1987b; 大久保ら, 1993)や、解析的な検討(大久保, 1992)について、すでに論文として発表しているので適宜参照されたい。以下では記号の説明を兼ねて必要最小限のことのみ箇条書きにして述べることにする。

(仮定1) 等方性: 等方性は常に保たれる。

(仮定2) コンプライアンスの増大: 応力を受け続けるとコンプライアンスが次式に従って徐々に増大する。

$$\frac{d\lambda^*}{dt^*} = (\lambda^*)^m \cdot (\sigma^*)^n \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

ここで、 m は延性の程度を決めるパラメータ、 n は時間依存性の程度を決めるパラメータである。 $\lambda^* = \lambda/\lambda_0$ は初期コンプライアンス λ_0 で正規化したコンプライアンスである。 σ^* は破壊限接近度である。 t^* は正規化した時間で次式にて表される。

$$t^* = \frac{\left\{ m / (n+1) \right\}^{m/(n-m+1)}}{t_0} t \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

t_0 は定歪速度試験を行ったとき歪が図2-1の ε_A に達するまでの所要時間で、載荷速度 $C = 1/t_0$ に反比例する。

(仮定3) ポアソン比の増大: コンプライアンスの増大につれて、ポアソン比も次式に従って増大する。

$$\nu = 0.5 - \frac{0.5 - \nu_0}{\lambda^*} \dots\dots\dots (2 - 3)$$

ν_0 はポアソン比の初期値(弾性領域での値)である。この仮定は体積弾性率を一定としたことと同じである。

(仮定4) n は、周圧の増加に伴って強度が増すと、次式に従って増加する。

$$n = \frac{\Delta\sigma_c}{\sigma_c} n_0 \dots\dots\dots (2 - 4)$$

n_0 は n の一軸応力下での値である。 σ_c は一軸圧縮強度、 $\Delta\sigma_c$ は周圧下でのピーク強度(差圧分)である。

大久保(1992)は、コンプライアンス可変型構成方程式の一軸応力下での解析的検討はすでに報告しているので、本研究と関連の深い三軸応力下での歪増分に関する解析的検討を紹介する。当然ながら歪増分には、仮定1と仮定3が深く関与する。

まず、応力は一定に保たれているとし、微小時間内にコンプライアンスが $\delta\lambda$ だけ変化し、それに伴って歪が変化したときを考える。3次元での Hooke の法則は次式となる。

$$\varepsilon_1 = \{ \sigma_1 - \nu (\sigma_2 + \sigma_3) \} \lambda \dots\dots\dots (2 - 5)$$

$\delta\lambda$ に伴う ε_1 の変化は次のように書ける。

$$\delta\varepsilon_1 = \{ \sigma_1 - \nu (\sigma_2 + \sigma_3) \} \delta\lambda - (\sigma_2 + \sigma_3) \lambda \cdot \delta\nu \dots\dots\dots (2 - 6)$$

また、(2 - 3) 式を利用して次式を得る。

$$\lambda \cdot \delta\nu = (0.5 - \nu) \delta\lambda \dots\dots\dots (2 - 7)$$

(2 - 7) 式を (2 - 6) 式に代入すると次式を得る。

$$\delta\varepsilon_1 = \{ (\sigma_1 - \sigma_2) + (\sigma_1 - \sigma_3) \} \frac{\delta\lambda}{2} \dots\dots\dots (2 - 8)$$

あるいは一般に次式が成り立つ。

$$\delta\varepsilon_i = \{ (\sigma_i - \sigma_j) + (\sigma_i - \sigma_k) \} \frac{\delta\lambda}{2} = \frac{3}{2} \sigma'_i \cdot \delta\lambda \dots\dots\dots (2 - 9)$$

σ'_i は偏差応力 $\{ \sigma_i - (\sigma_i + \sigma_j + \sigma_k) / 3 \}$ である。

(2 - 9) 式は、 $d\lambda$ を比例序数(a scalar factor of proportionality)とした塑性論の Levy-Mises の式 $d\varepsilon_{ij} = \sigma'_{ij} d\lambda$ (Hill, 1950; Johnson ら, 1965), および μ を粘性係数としたニュートン流体の支配方程式 $d\varepsilon_{ij} / dt = \sigma'_{ij} / \mu$ と類似した形をしている。粘弾性論の立場から導かれた式と塑性論の立場から導かれた式の類似性について、Hill(1950)は、“見かけ上

のもので注意しなければならない(should guard against a facial analogy) ”として否定的な立場をとり，一方，Lodge(1975)は，“ 塑性論は広く研究されているが，(中略)応力の大きいときには粘性流体の挙動を示すとするものである ”として，粘弾性論は塑性論を包含するものであるとしている。(2-9)式は簡単な形をしており数学的な意味は明瞭であるが，ミクロな構造に立ち入った解釈は，Levy-Mises の式やニュートン流体の支配方程式と同様に難しく，今後の課題とする。

(2-9)式より体積変化 $\delta v = \delta \varepsilon_1 + \delta \varepsilon_2 + \delta \varepsilon_3 = 0$ が導かれる。また，外部より単位体積に加えられるエネルギー δE_{out} は次式となる。

$$\begin{aligned} \delta E_{out} &= \sigma_1 \delta \varepsilon_1 + \sigma_2 \delta \varepsilon_2 + \sigma_3 \delta \varepsilon_3 \\ &= \left\{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right\} \frac{\delta \lambda}{2} \quad (2-10) \end{aligned}$$

また，弾性歪エネルギーの増分 δE_{in} と熱に変わるエネルギー損失 δE_{loss} は次のようになる。

$$\delta E_{in} = \delta E_{loss} = \frac{\delta E_{out}}{2} \dots\dots\dots (2-11)$$

このように δE_{in} と δE_{loss} とが常に同じ値になるのは，構成方程式のパラメータの数をできる限り少なくしたためである。両者の比 $\delta E_{in} / \delta E_{loss}$ を他の値としたいときは，結果的に設定すべきパラメータの数が増えるが，並列にばね要素や粘性要素を配置したモデルとすればよい。したがって，(2-11)式で表される性質は，この方程式の特徴であって長所でも短所でもない。

次に応力が変化する場合を考える。計算手順は省くがこの場合には(2-9)式右辺に応力の変化による項を加えた次式が成り立つ(Hill, 1950; Johnson ら, 1965)。

$$\delta \varepsilon_i = \frac{3}{2} \sigma_i' \cdot \delta \lambda + \left\{ \delta \sigma_i - \nu (\delta \sigma_j + \delta \sigma_k) \right\} \lambda \quad (2-12)$$

(12)式は， ε_i や σ_i を主歪，主応力と解釈しても成り立つし， ε_x や σ_x 等と解釈しても成り立つ。なお，せん断歪については若干の計算の後，剛性率を G として次式を得る。

$$\delta \gamma_{xy} = 3 \tau_{xy} \cdot \delta \lambda + \frac{\delta \tau_{xy}}{G} \dots\dots\dots (2-13)$$

式中の $\delta \lambda$ を，塑性論の比例序数 $d\lambda$ に置き換えれば，(2-12)式と(2-13)式はPrantl-Reuss の式と一致する(Hill, 1950; Johnson ら, 1965)。

2.2 破壊条件式と破壊限接近度

岩石を対象としていくつかの破壊条件式が提案されているが、本研究ではその内 Janach, Coulomb, Mohr の3つの破壊条件式を取り上げて紹介する。

従来よりコンプライアンス可変型構成方程式と組み合わせて使用してきた Janach の破壊条件式(Janach, 1977)は次式となる。

$$\sigma_1^2 = \sigma_c^2 \left(1 + \frac{\sigma_3}{\sigma_t} \right) \dots\dots\dots (2-14)$$

圧縮応力を正として、 σ_1 と σ_3 は最大と最小主応力である。 σ_c と σ_t は、定歪速度試験で歪 ε_A (図2-1参照)までの所用時間が t_0 のときの一軸圧縮強度と一軸引張強度である。また、この破壊条件式での破壊限接近度は次式となる。なお、 $\max(x, y)$ とは、 x と y の大きい方の値である。

$1 + \frac{\sigma_3}{\sigma_t} \leq 0$ では、

$$\sigma^* = -\left(\frac{\sigma_3}{\sigma_t} \right) \dots\dots\dots (2-15)$$

$1 + \frac{\sigma_3}{\sigma_t} > 0$ では、

$$\sigma^* = \max \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c \sqrt{1 + \frac{\sigma_3}{\sigma_t}} - \sigma_3}, -\frac{\sigma_3}{\sigma_t} \right) \dots\dots\dots (2-16)$$

Coulomb の破壊規準は、せん断応力を τ 、せん断面に垂直な応力を σ として次式となる。

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi \dots\dots\dots (2-17)$$

ただし、 c は粘着力、 φ は内部摩擦角である。この規準における西松ら(1994)の提案した方法に従って求めた破壊限接近度は次式となる。

$$\sigma^* = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} - \frac{\sigma_3}{\sigma_t} \dots\dots\dots (2-18)$$

Mohr の破壊規準は、 $\mu = \sigma_c / \sigma_t + 2 - 2\sqrt{1 + \sigma_c / \sigma_t}$ として2つの場合にわけられる。

$(\mu - 1)\sigma_3 + \sigma_1 \leq 0$ では、

$$\sigma_3 = -\sigma_t \dots\dots\dots (2 - 19)$$

この場合の破壊限接近度は，西松ら(1994)の方法に従って求めると次式となる．

$$\sigma^* = -\left(\frac{\sigma_3}{\sigma_t}\right) \dots\dots\dots (2 - 20)$$

$(\mu - 1)\sigma_3 + \sigma_1 > 0$ では

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 2\mu\sigma_t(\sigma_1 + \sigma_3) + \mu\sigma_t^2(\mu - 4) \quad (2 - 21)$$

この場合の破壊限接近度は，次式となる．

$$\sigma^* = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3) - 2\sqrt{\sigma_1\sigma_3 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \frac{1}{\mu}}}{\sigma_t(\mu - 4)} \quad (2 - 22)$$

一軸応力下では3つの破壊規準に基づく破壊限接近度は一致するが，周圧下では一致しない．図2-2に破壊限接近度 $\sigma^* = 1$ の曲線を示す． σ_3/σ_t が負(引張)のとき， σ_1/σ_c はMohr, Janach, Coulombの順であるのに対して， σ_3/σ_t が正(圧縮)では順番が逆になっている．ここで注目すべきはJanachが常に3者の内中央にあることであり，それゆえ2次元の有限要素法計算(大久保ら, 1987b)ではJanachの破壊規準を採用した．

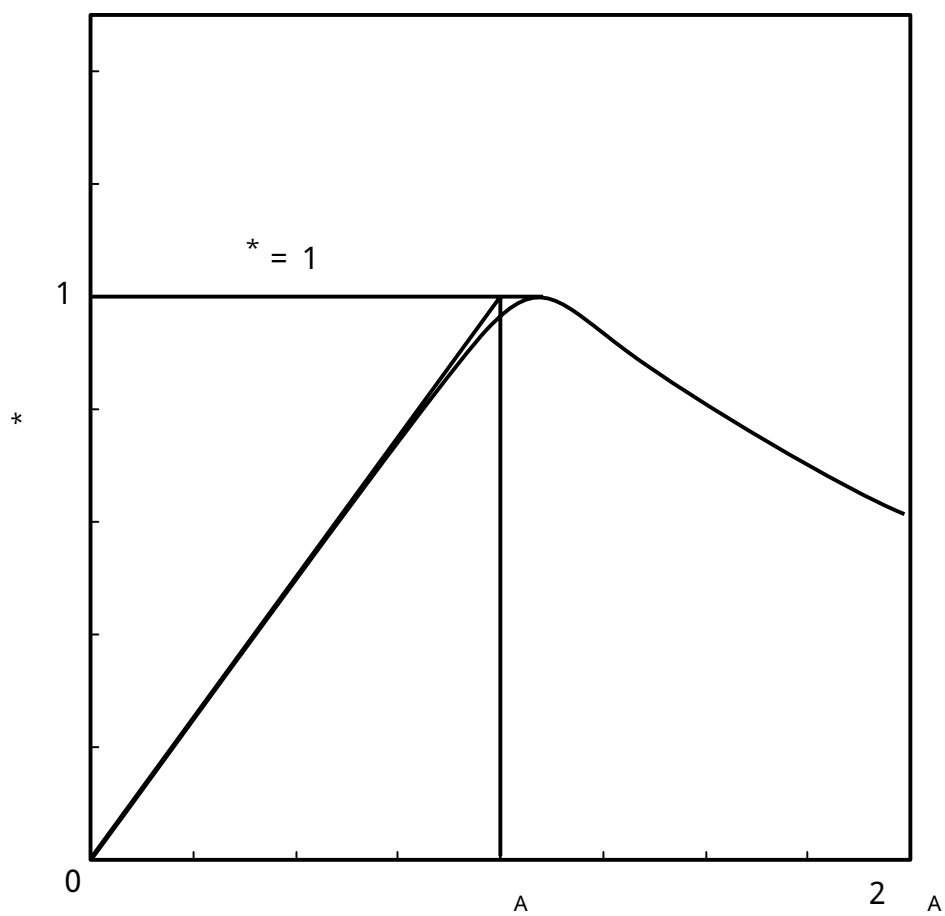


図 2 - 1 正規化に際して用いた記号の説明

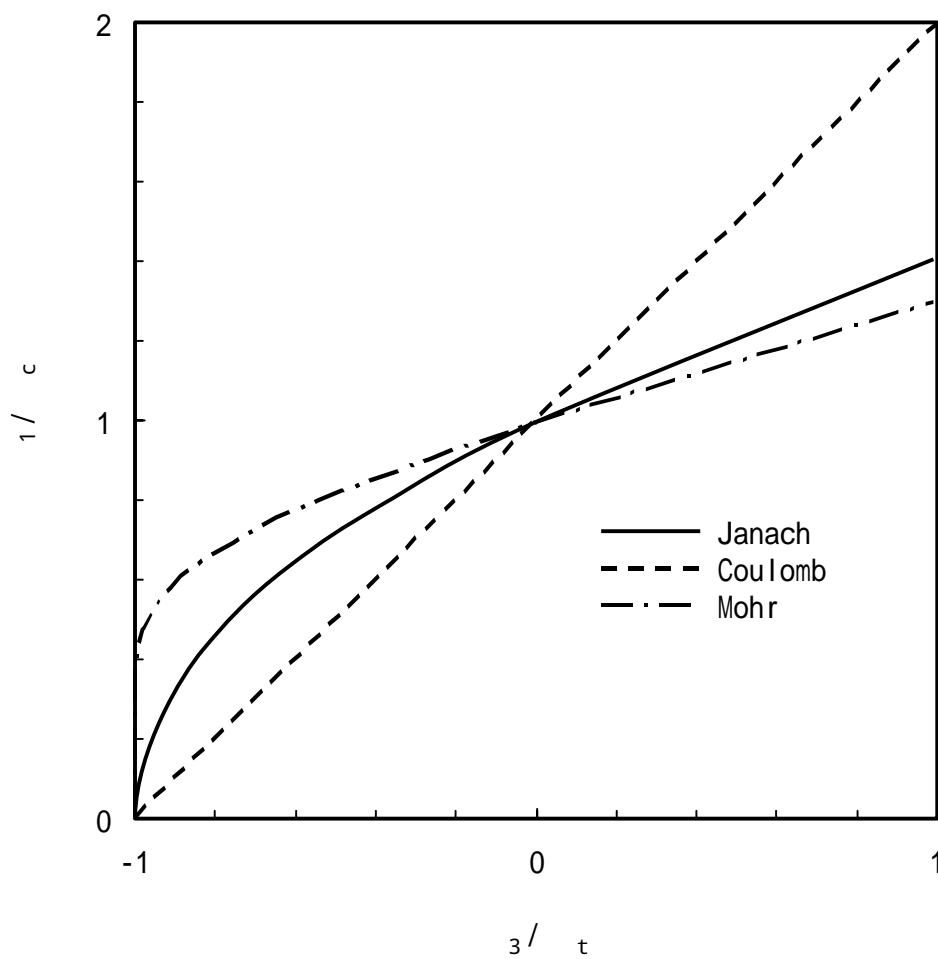


図2 - 2 主応力線図上に描いた破壊限接近度1の曲線.

σ_c と σ_t は, 一軸圧縮強度と一軸引張強度.

3. 供試体と実験装置

3.1 供試体

供試体として北海道天塩郡幌延町産の硬質頁岩を用いた。2002年10月23日に本研究室に到着したコアの写真を図3-1に示す。このコアの直径は80 mmであり、深度516.3～517.8 mの地点で採取されたものである。全体が湿っており、肉眼で多数のクラックが確認できた。

試験片の作成は次のような手順で行った。

コアを長さ約200 mmにカットした後、木箱に入れ、セメントモルタルで固める
ボーリングおよびカッターでの切断を行う

平面研削盤にて研磨を行う

乾燥を防ぐためラップで包んだ後、真空パック内で保存する。

試験片の寸法は直径25 mm、高さ50 mmであり、端面の平行度は1/100 mm以内に仕上げた。

3.2 試験機と測定装置

载荷には容量500 kNのサーボ試験機を用いた。写真を図3-2に概略図を図3-3に示す。荷重の測定には、容量200 kNのロードセル(NTS社製, LRX 20T)を用いた。その出力は直流増幅器(ユニパルス社製, AM30)を経て、A/D変換器(ディテル製, DPC 113 16A)に送られる。変位の測定は、シリンダ上部に設置された差動変圧器変位計で行った。その出力も増幅器を経て、A/D変換器に送られる。A/D変換器は16bitの分解能で、1チャンネルあたりの変換時間は48 μsである。フィードバック信号はD/A変換器(CONTEC製, DA16-2D(98))を経て、サーボ弁に送られる。D/A変換器も16bitの分解能で、変換時間は6 μsである。A/D変換器、D/A変換器はパソコン(NEC製, PC 9801VX)に組み込んである。直流増幅器にはXYレコーダ(横河電機製)およびデジタルマルチメータ(Takeda Riken製)が接続されている。

周圧は、図3-4に示す最大圧力35 MPaの周圧装置より加えた。周圧の測定には圧力変換器を用い、その出力は直流増幅器を経て、A/D変換器に送られる。フィードバック信号はD/A変換器を経て、電磁比例圧力制御弁に送られる。周圧の値は、直流増幅器に接続されたデジタルマルチメータで知ることができる。

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。写真撮影システムは図3-3のように既存のシステムに付け加える形で組み込んだ。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16bit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。

3.3 可視化ベッセル

図3-5に可視化ベッセルの概略図(a)と写真(b)を示す。このベッセルは、上下の金属板と、透明なアクリル製円筒からなり、M12(JIS)の6本のボルトでアクリル製円筒を締め付ける構造となっている。上の金属板には油圧ポートが設けられており、油圧源からの圧力を導き入れる。油圧源としては、手押しポンプないしサーボ式周圧装置を使用した。また、上の金属板中央に設けられた円孔に直径25mmの押し棒が入る。押し棒と円孔の間の漏れ止めは、2個のオーリングでおこなった。この押し棒で直径25mm、高さ50mmの岩石試験片に荷重を加える。なお、試験片の上下に同径の鋼製円柱を密着させ、試験片と円柱を同時に透明な熱可縮性チューブで覆った。排水状態で試験を行うため、鋼製円柱には図3-6のように直径3mm、深さ11mmの穴を5個設けてある。ただし、試験片の下側の円柱には試験片の位置決め用のピンをさすための穴があるため、中央の穴の深さは3mmである。試験片の位置決めは、下板から突き出たピンでおこなった。

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

可視化ベッセルの組み立て手順は次のとおりである。

下の金属板を試験機ないし適当な組み立て台にのせる

試験片と鋼製円柱を下の金属板にのせ、ピンで位置決めをする

アクリル製円筒を下の金属板にのせた後、油を注ぎ込む

押し棒を付けた金属板をアクリル製円筒にのせた後、6本のボルトを締める

ベッセル内の空気抜きのため、一旦0.5MPa程度まで加圧後、油を抜く。この操作

で、気泡は油とともに逆流してベッセルから排出される。
これからわかるように、組み立て手順や、それに掛かる手間は通常の金属製ベッセルとさ
ほど変わらない。



(a) HDB - 1孔 : 516.3 ~ 517.0 m



(b) HDB - 1孔 : 517.1 ~ 517.8 m

図3 - 1 幌延産硬質頁岩のコア

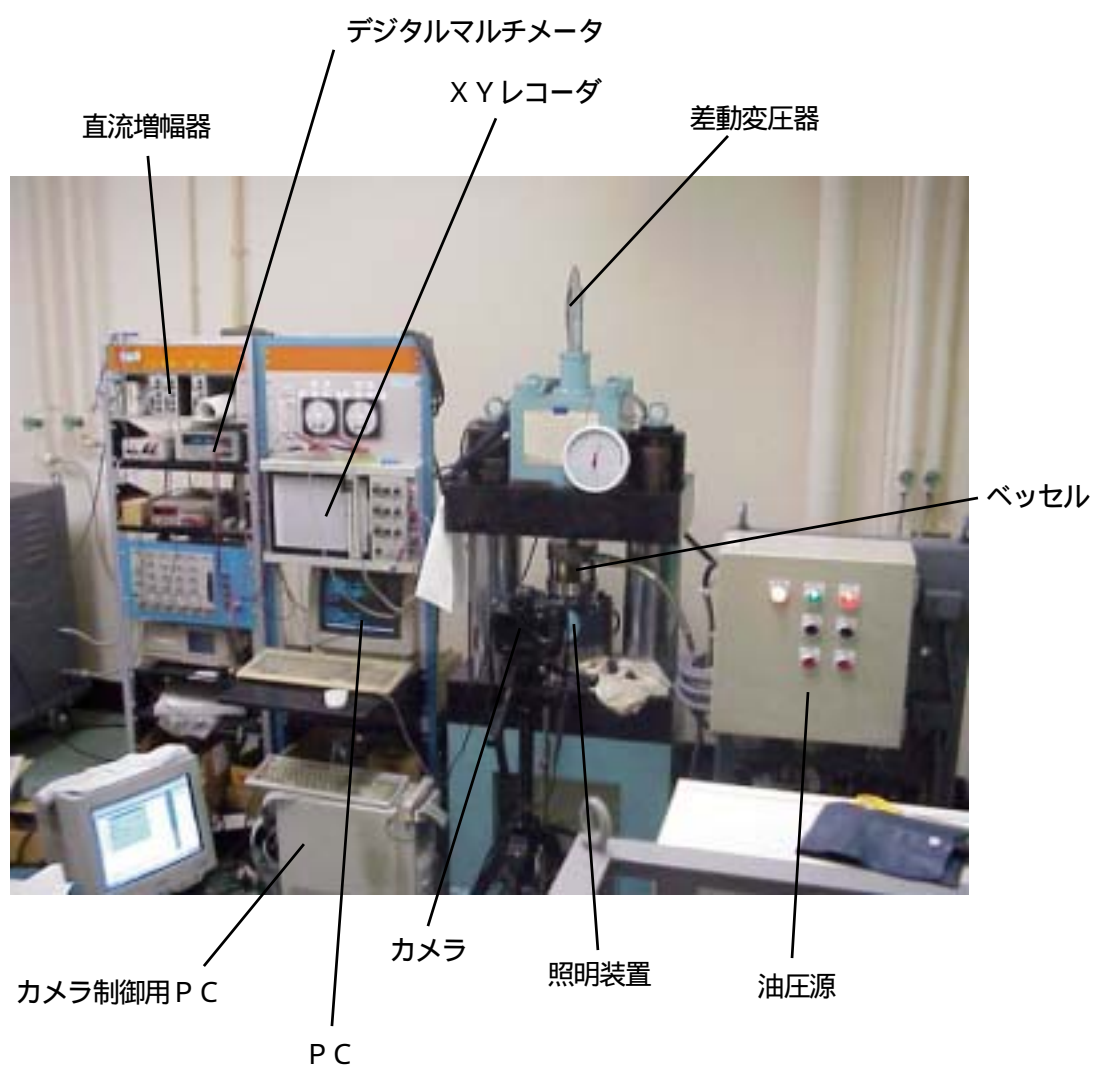


図3 - 2 サーボ試験機および周辺装置

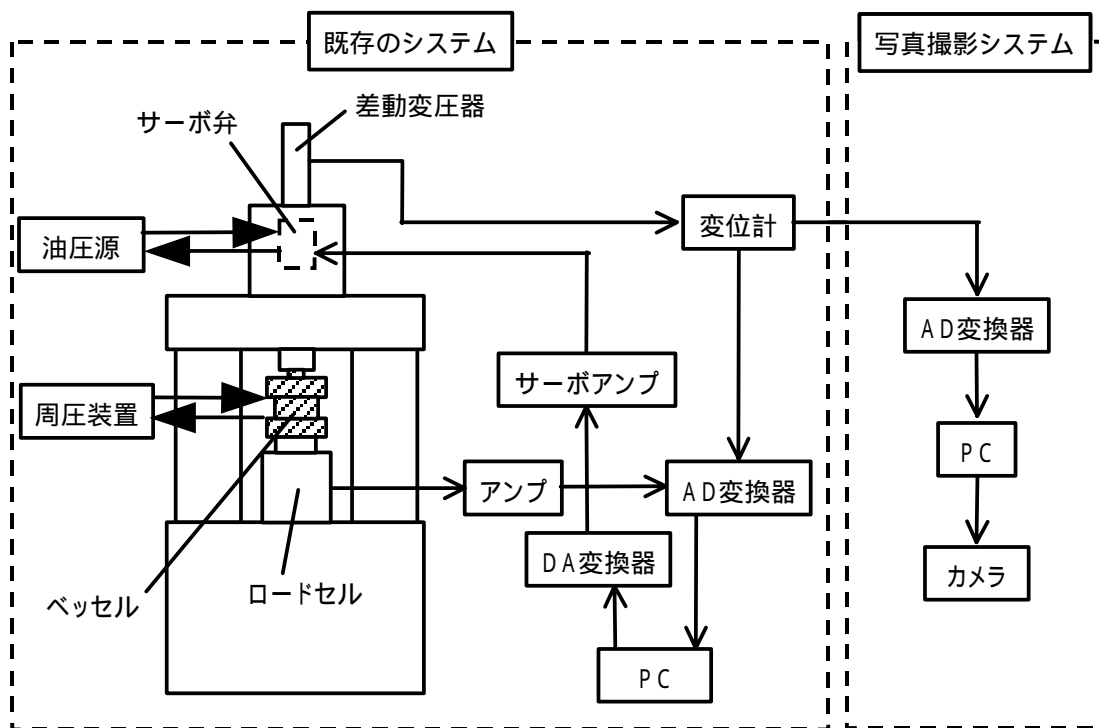


図3 - 3 試験システムの概略図

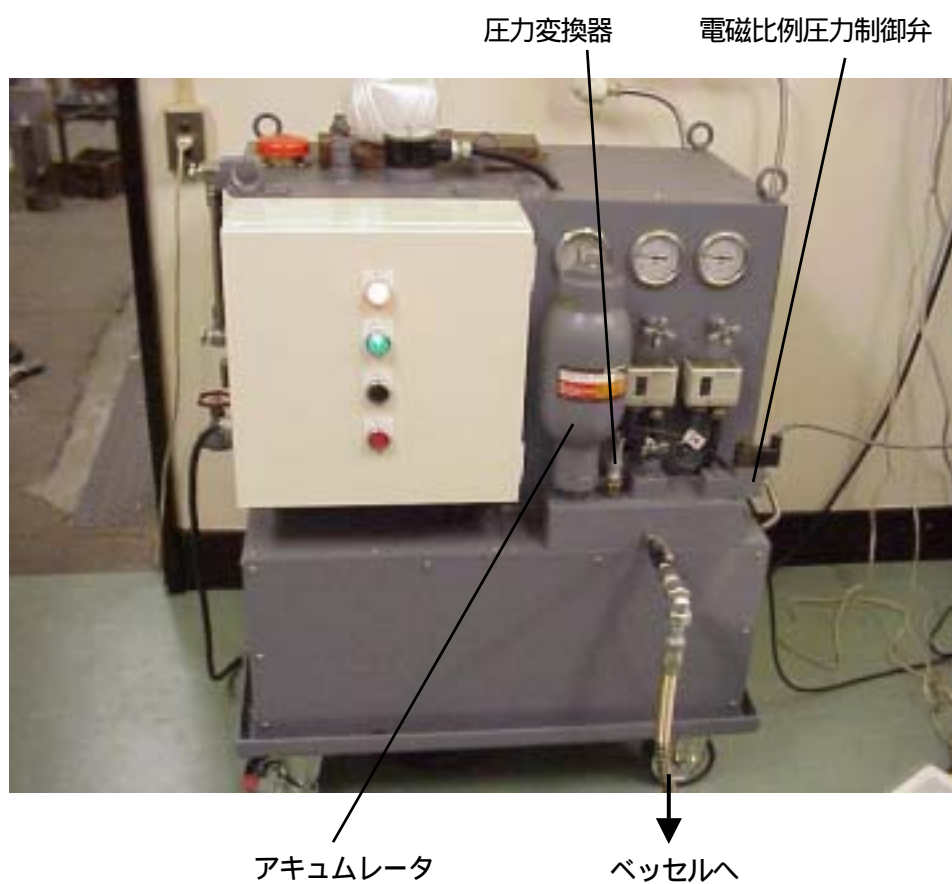
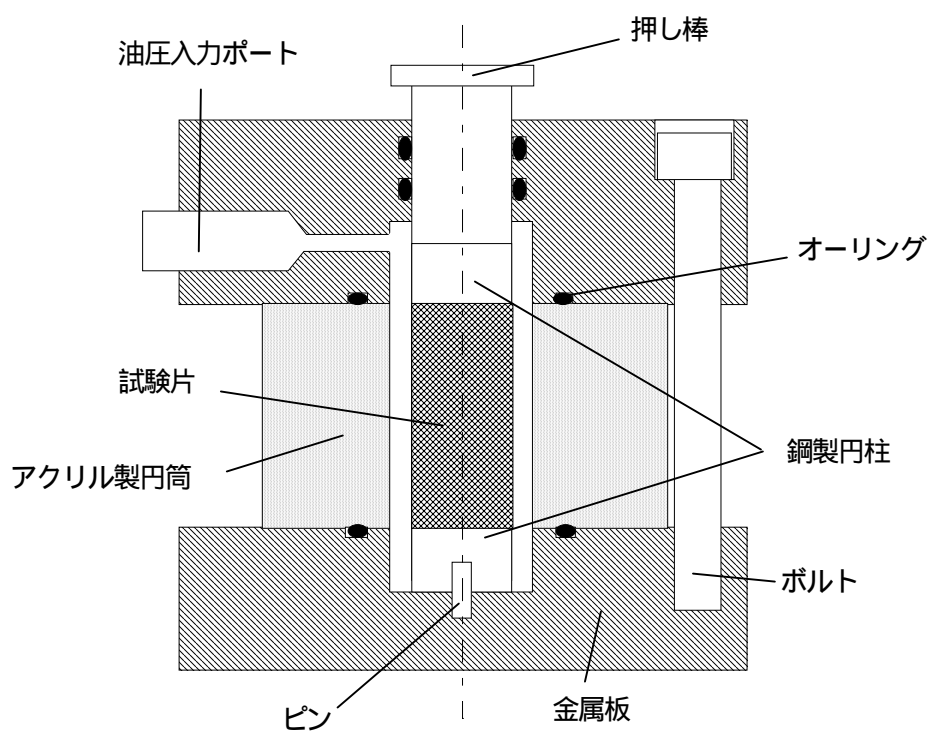


図 3 - 4 周圧装置



(a) 概略図



(b) 写真

図3 - 5 可視化ベッセル



図3 - 6 鋼製円柱と水を溜めるための穴

4. 三軸圧縮試験

4.1 試験方法

試験条件を以下に示す。

環境：常温下，排水状態

周圧：0，5，10 MPa

載荷速度： 3×10^{-6} と 30×10^{-6} / sで切換

切換間隔 周圧 0 MPa： 400×10^{-6}

周圧 5 MPa： 600×10^{-6}

周圧 10 MPa： 800×10^{-6}

(各周圧で上記の歪間隔毎に載荷速度を切り替えた)

試験では，組み立てた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，軸方向に載荷を行った。周圧0 MPaでも可視化ベッセルを用いたが，熱可縮性チューブで覆うと横方向への変形が拘束されるので，試験片をラップで包みベッセル内に油を入れずに試験を行った。

4.2 試験結果

試験で得られた応力 - 歪線図を図4 - 1 ~ 3に示す。

周圧0 MPaでは，3本の試験片とも歪が0.006程度まではグラフはほぼ直線的であった。の試験片については歪約0.006で応力が最大値をとった後，1 MPa程度の応力の低下が見られる。その後再び応力は増加していき，歪約0.008で急激な低下が生じている。それ以降，応力はほぼ一定値で推移している。の試験片もと同じような傾向を示しており，歪約0.007で1 MPa程度の応力低下があった後，再び応力は増加している。とは異なり，応力が最大値をとるのはその後であり，その値は初期の小さな応力低下が生じる直前よりも1 MPa程度大きい。急激な応力低下が生じた後に残留強度が存在するのはと同じであった。では，で見られたような小さな応力低下はなく，歪約0.006で急激な応力低下が生じている。応力は3 MPa程度まで低下した後，若干増加し，歪約0.001では約4 MPaとなっている。残留強度が徐々に増加していく点は興味深い現象である。3本の試験片での強度の平均値は8.3 MPaであった。試験終了後，試験片と鋼製円柱を取り出して観察したところ，円柱の穴に水がたまっている様子は見られず，試験片も乾燥していた。周圧0 MPaでは試験片にラップを巻い

ただけであったので、試験中に表面から水が蒸発したと考えられる。

周圧 5 MPa での 2 本の結果は強度に関しては大きな差があったものの、応力 - 歪曲線の形状はよく似たものであった。いずれの試験片も強度の 50% 付近まではグラフはほぼ直線的であり、その後直線からずれていき応力が最大値をとっている。それ以降は小さな応力の低下がいくつか見られるが、ともに周圧 0 MPa のような急激な低下はなく、比較的滑らかに応力が減少している。の試験片については、歪約 0.03 以降で応力がほぼ一定になっていた。2 本の試験片での強度の平均値は 30.5 MPa であった。試験終了後、試験片と鋼製円柱を観察したところ、図 4 - 4 のように、試験片の下側の円柱の 1 つないし 2 つの穴に水がたまっており、試験片の表面も少し湿っていた。

周圧 10 MPa では 2 本の試験片で試験を行ったが、その結果は強度、応力 - 歪曲線の形状とも非常によく似たものであった。グラフは強度の 3 分の 1 程度まではほぼ直線的であり、その後直線からずれている。強度破壊点以降 10 MPa 程度の応力の低下が見られ、その後、約 30 MPa の残留強度が存在している。2 本の試験片での強度の平均値は 43.0 MPa であった。図 4 - 4 のように周圧 5 MPa と同様に、下側の鋼製円柱の穴に水がたまっており、試験片の表面も濡れていた。周圧 10 MPa でも、1 つないし 2 つの穴にはあふれるほど水がたまっているにもかかわらず、他の穴にはあまりたまっている様子は見られなかった。このような試験片からしみでる水の不均一性は興味深いテーマであり、今後の検討課題としたい。

図 4 - 5 ~ 12 には図 4 - 2 の試験片の連続写真の一部を示す。図には歪が 5000 μ 増加する毎の写真と、その写真を撮った応力 - 歪線図上の位置を矢印で示した。試験開始から強度破壊点以前の軸歪 0.02 までは変化は見られないが、軸歪 0.025 になると、上端面から伸びるき裂 1 つと、下端面から伸びるき裂 2 つの合計 3 つのき裂が観察できる。また、試験片の色がそれ以前より白く明るくなっている。図 4 - 2 を見ると、強度破壊点以降で小さな応力の低下が 3 回起こっており、この現象とき裂の生成との間に関連がある可能性が考えられる。その後、上下端面から伸びてきた 2 つのき裂が連結し、試験片全体にわたるせん断面となっている。図 4 - 2 に見られる残留強度はこのせん断面での摩擦の影響であると考えられる。

図 4 - 13, 14 にモールの応力円を示す。各周圧での実験データを用いて描いた円を細線で、平均値を用いて描いた円を太線で示した。図 4 - 13 には (2 - 17) 式で $c = 2$, $\tan \theta = 0.7$ としたときの直線も示した。太線の円に着目してみると、周圧 5 MPa での円が直線の上方に出ており、この破壊基準の適用は難しいと考えられる。

一方、Mohr の破壊基準は放物線包絡線として、

$$\tau^2 = \mu\sigma_t(\sigma_t + \sigma) \quad (4-1)$$

で表される．ここで， $\mu = 1.10$ ， $\sigma_t = 0.1$ としたときの曲線を図4-14に示す．直線包絡線の場合と同様に太線の円に着目してみると，各周圧の円はこの曲線にほぼ接しており，今回用いた岩石ではMohrの破壊基準が適用できる可能性がある．

図4-15には強度破壊点での最小主応力と最大主応力の2乗との関係を示した．図には(2-14)式で示される近似直線も示した．各周圧での平均値はほぼこの直線上にのっており，(2-14)式中の σ_c と σ_t はそれぞれ，6.1および0.14となる．この σ_t の値はMohrの破壊基準で用いた σ_t の値と非常に近い値であった．

今回の結果からはMohrの破壊基準，Janachの破壊基準ともに適用できる可能性があることがわかった．しかし，試験片の本数が少ないため，どちらの破壊基準がより適しているかの判断には今後の実験データの蓄積が必要である．

4.3 構成方程式のパラメータ

図4-16に模式的に描くように，試験途中で歪があらかじめ定めた値だけ増加するとに，歪速度を交互に変化させ，それぞれの歪速度で描く応力-歪曲線をなめらかに繋いだ．こうしてもとめた2本の曲線を，近似的にそれぞれの歪速度で得られた応力-歪曲線とみなしてデータ整理をおこなった(大久保他，2002)．なお，この試験方法は，Okubo et al.(1990)が10年ほど前に提案した方法を改良したものである．Okubo et al.(1990)が提案した方法では，強度破壊点の直前に歪速度を増加し，その時の応力の増加から荷重速度依存性を推定するが，この方法の実施にあたっては，歪速度を増加するタイミングの選定に工夫を要するなど，実験者がかなり試験方法に習熟している必要があった．一方，本研究で採用した試験方法では，歪速度の増減を機械的に行うだけでよく，実験技術の難易度は大幅に低下する．

表4-1に，今回おこなった実験結果よりもとめた値をまとめて掲載した．試験片の数が十分とはいえないので，これらの値については将来見直す必要があるかもしれないが，これまでの経験からして，致命的といえる大幅な変更はないものと考えている．

まず，強度であるが，周圧が0 MPaから5 MPaまで増加すると大幅に増加している．その後，周圧が10 MPaになるときの増加はやや小さくなる．

構成方程式中のパラメータ n は，岩石の粘弾性の程度をあらわすもので，その値が小さいほど粘弾性的な性質が顕著である．通常の岩石では，一軸圧縮応力下では4～12%程度となることが多い．図4-17に，荷重速度が10倍になったときの強度増加率から n

への換算図を示したが、この図から、4～12%に対応するnの範囲は、大体60～20であることがわかる。

表4-1に、今回行った実験よりもとめた強度増加率を示した。これも試験片の数が少ないためある程度の誤差を含んでいるものと考えている。これまでの経験では、岩石の種類によらず、周圧が増加すると強度増加率が低下したが、今回の実験結果でも同様であり、周圧が0, 5, 10 MPaとなると強度増加率は8, 4, 3%と小さくなった。この点からすれば、定性的には従来の実験結果と矛盾しないといえる。この強度の増加率から、図4-17を用いてnに換算すると、30, 60, 80となる。

次に、構成方程式中のパラメータmについて検討した。ピーク強度を越えた後の応力-歪曲線の形は、m/nにより決まる（nの値が多少影響するが、その程度は小さい）。図4-18には、m=30として、nを変えたときの応力-歪曲線を示した。m/nが1前後の場合には、ピーク強度を過ぎた後に応力は極めて急激に低下する。m/nが小さくなるにしたがって、ピークを過ぎた後の応力の低下は緩慢になっていく。

実験結果と図4-18を見比べると、m=30である。なお、このようにmを決めた背景には、これまでの経験から得た「mの値は周圧によって大幅には変化しない」という経験則がある。

繰り返しになるが、表4-1に示した構成方程式のパラメータは、試験片個数が少ないためある程度の誤差を含む可能性があるものの、これまでの経験と照らし合わせてみるとごく自然な値ではないかと考える。

表4 - 1 圧縮試験結果のまとめ

周圧 MPa	強度(注1) MPa	強度増加率(注2) %	n	m	m/n	ヤング率 GPa
0	8.3	8	30	30	1	1.3
5	30	4	60	30	0.5	1.7
10	43	3	80	30	0.375	2.0

注1) 差応力であらわした

注2) 載荷速度が10倍になったときの強度増加率

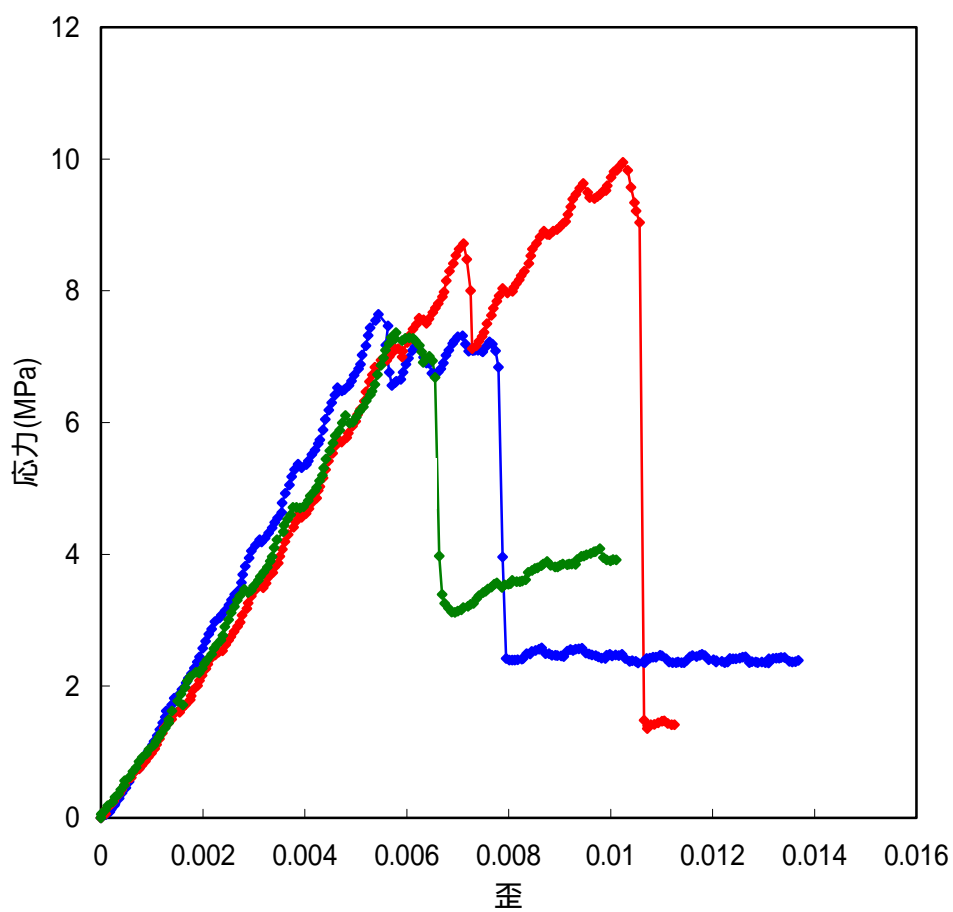


図4 - 1 応力 - 歪線図

周圧 0 MPa

歪速度 3 30 $\mu\text{s t} / \text{s}$ (400 $\mu\text{s t}$ 毎に切換)

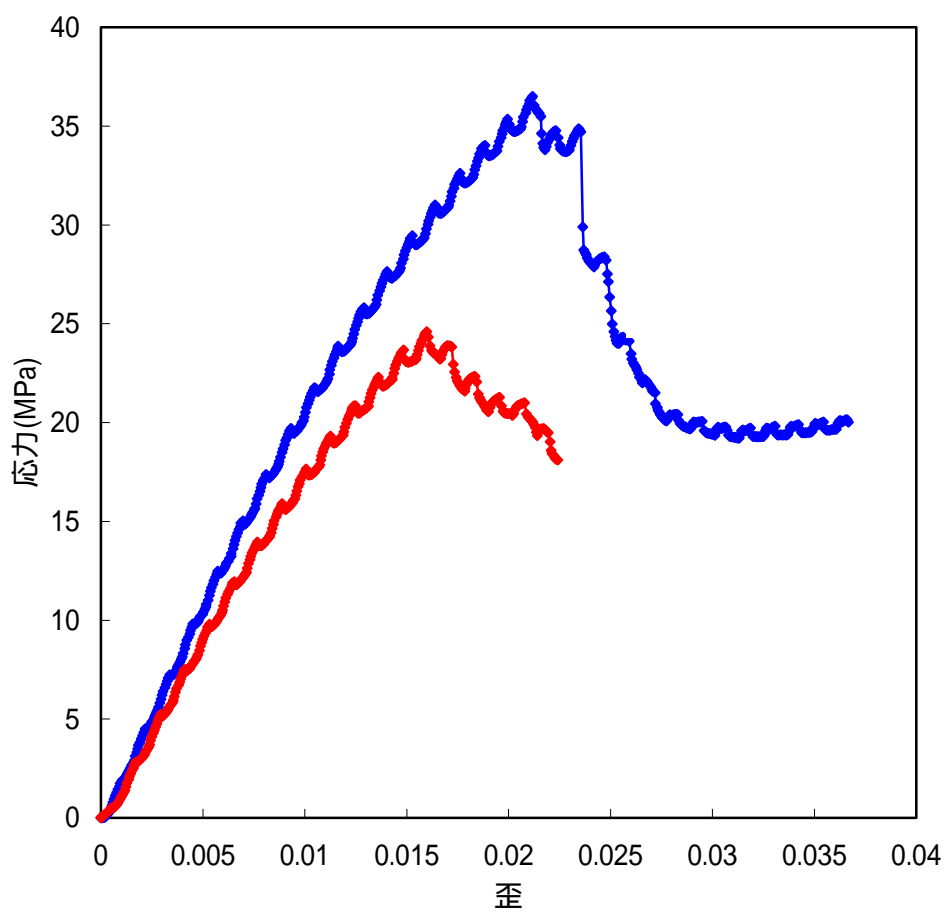


図4 - 2 応力 - 歪線図

周圧 5 MPa

歪速度 3 30 $\mu\text{s t} / \text{s}$ (600 $\mu\text{s t}$ 毎に切換)

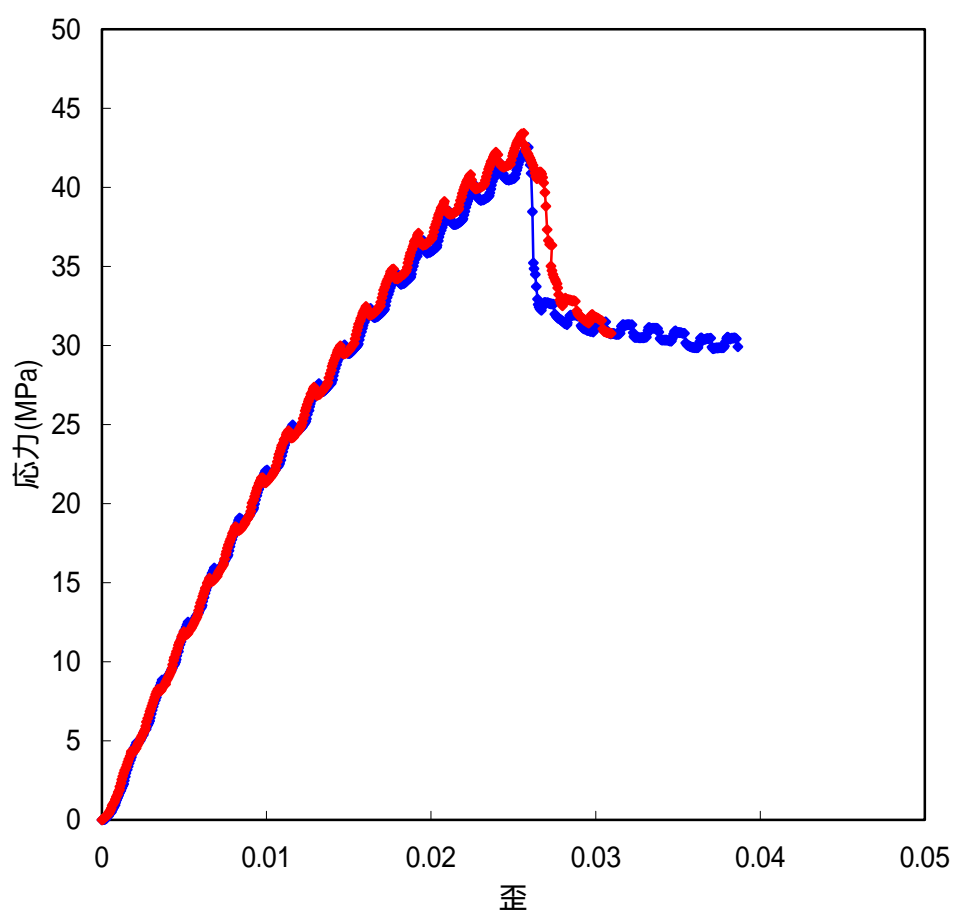


図4 - 3 応力 - 歪線図

周圧 10 MPa

歪速度 3 30 $\mu\text{st/s}$ (800 μst 毎に切換)

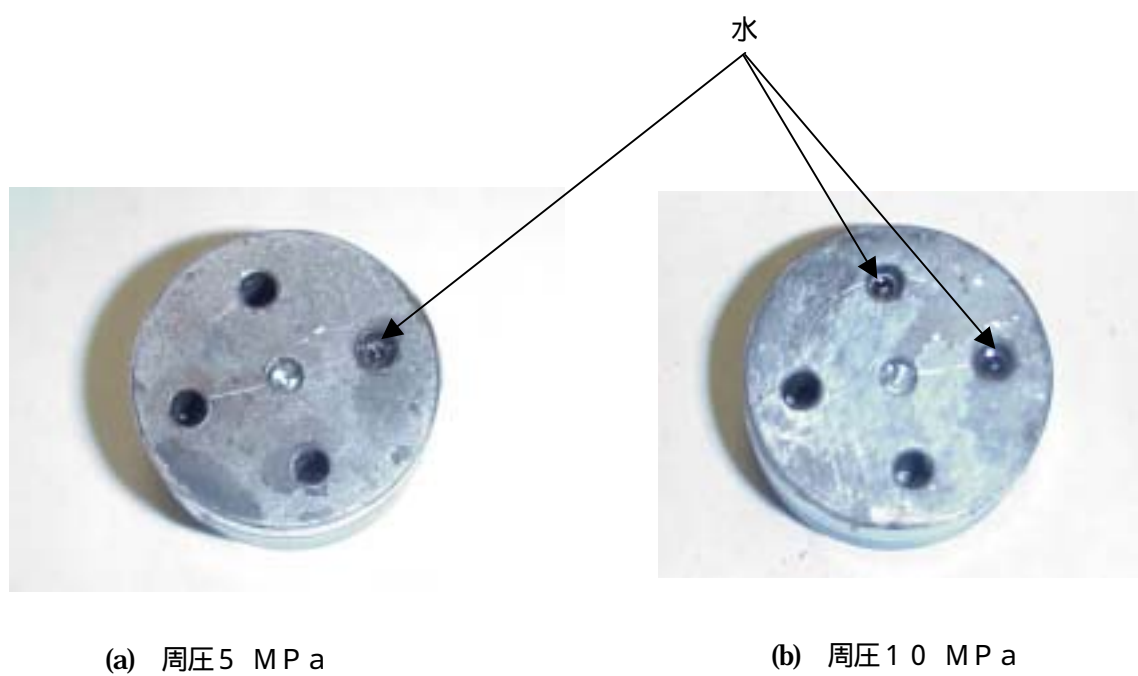


図4 - 4 鋼製円柱の穴に溜まった水

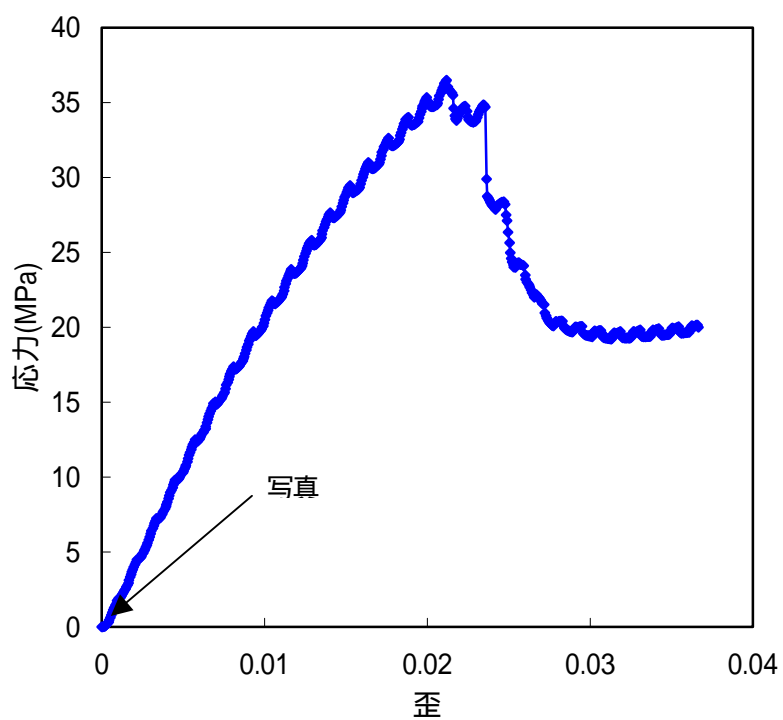
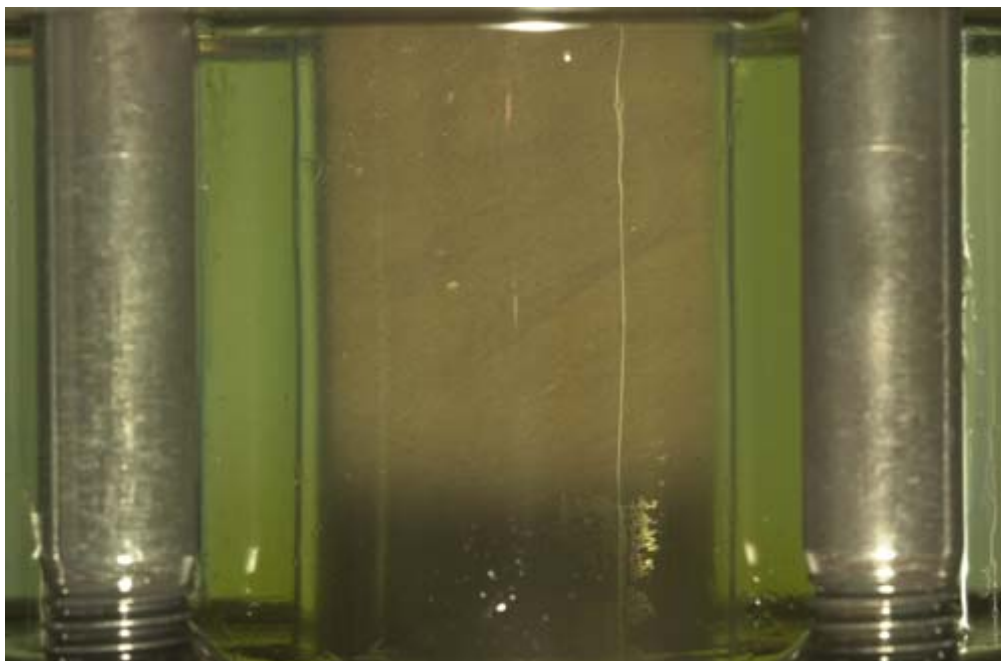


図4 - 5 試験片の写真と応力歪線図

周圧 5 MPa

歪速度 3 30 $\mu\text{st}/\text{s}$ (600 μst 毎に切換)

軸差歪 0 μst

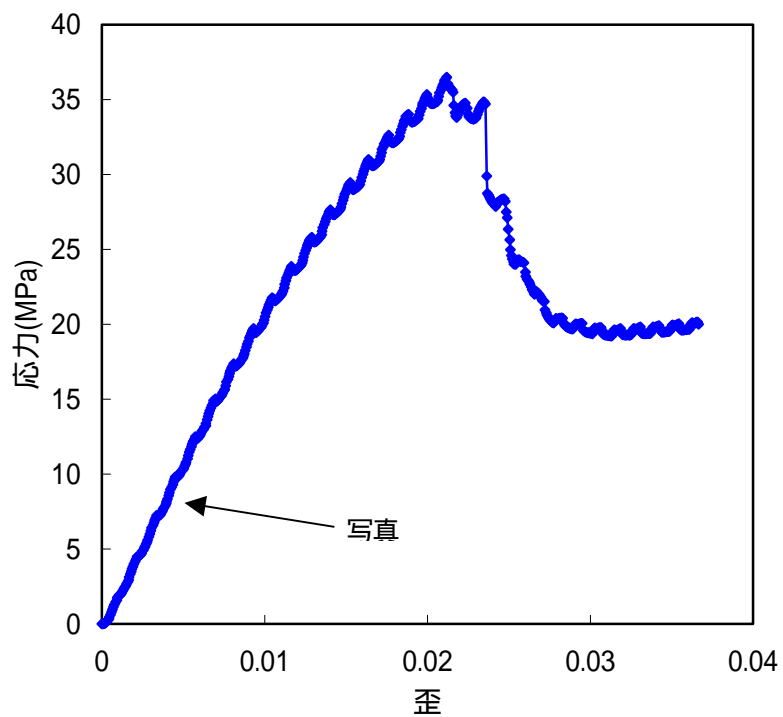
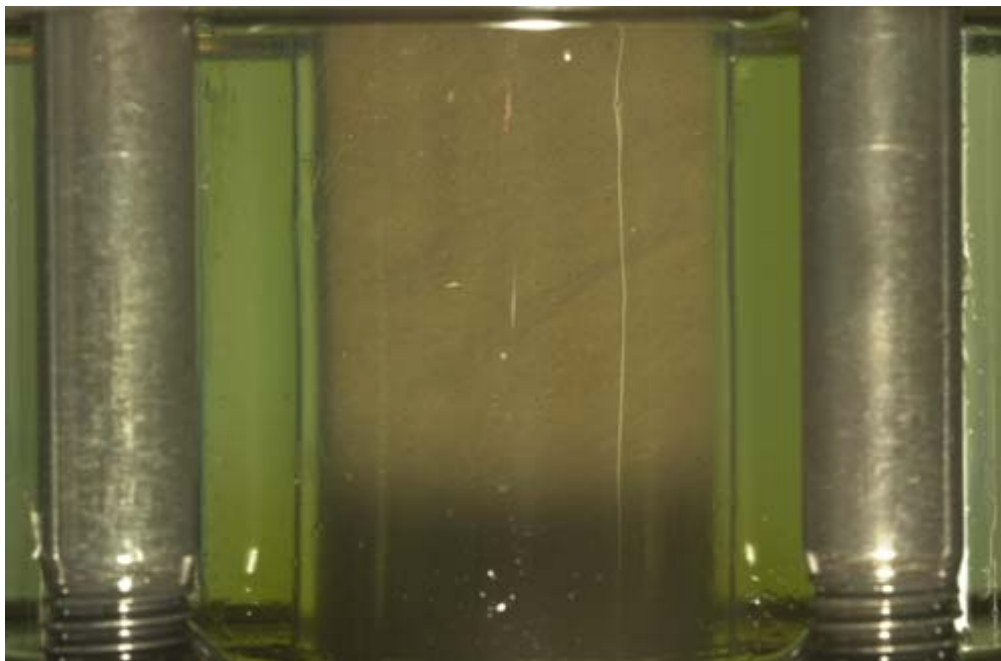


図4 - 6 試験片の写真と応力歪線図

周圧 5 MPa

歪速度 3 30 $\mu\text{st}/\text{s}$ (600 μst 毎に切換)

軸差歪 5000 μst

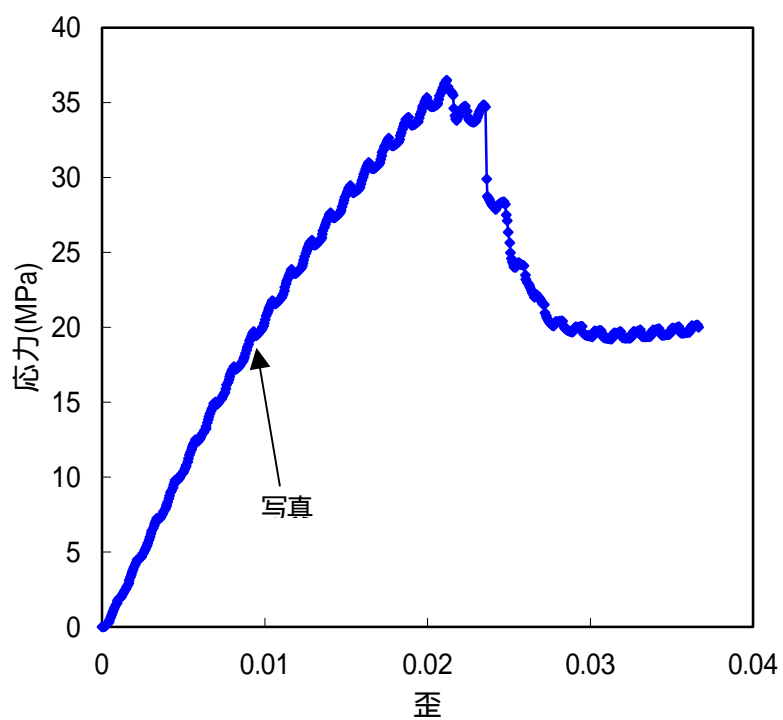
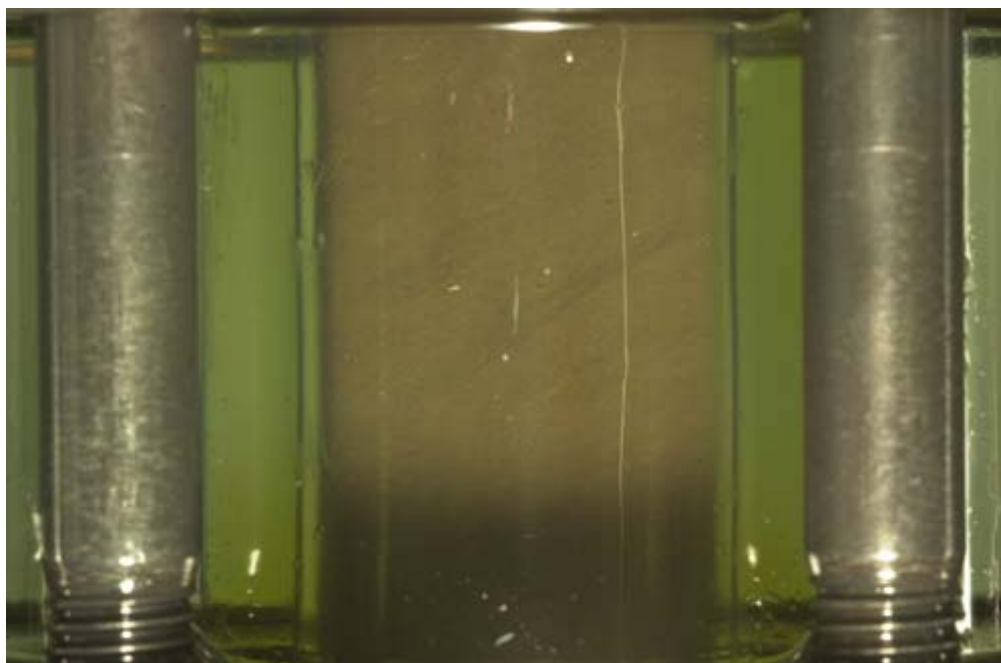


図4 - 7 試験片の写真と応力歪線図

周圧 5 MPa

歪速度 3 30 $\mu\text{st}/\text{s}$ (600 μst 毎に切換)

軸差歪 10000 μst

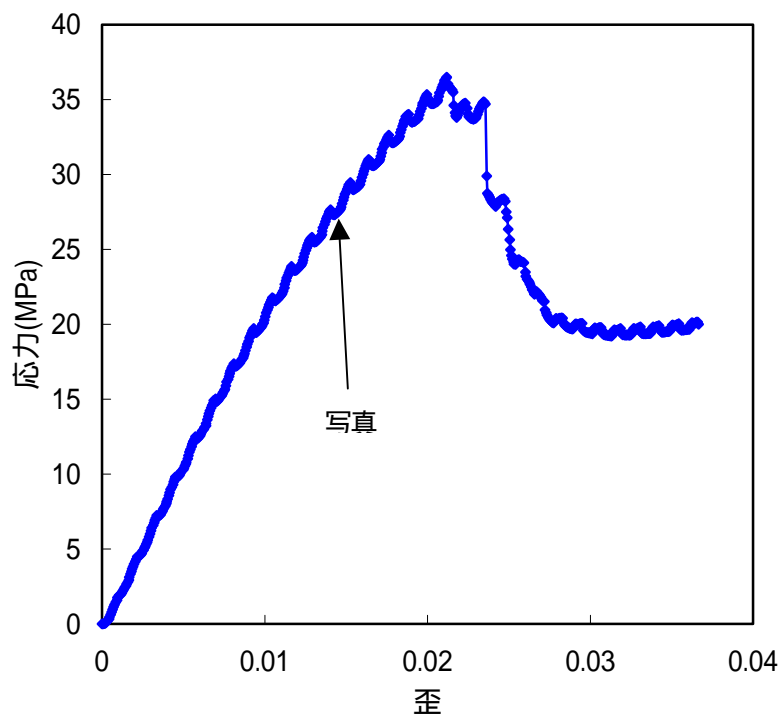
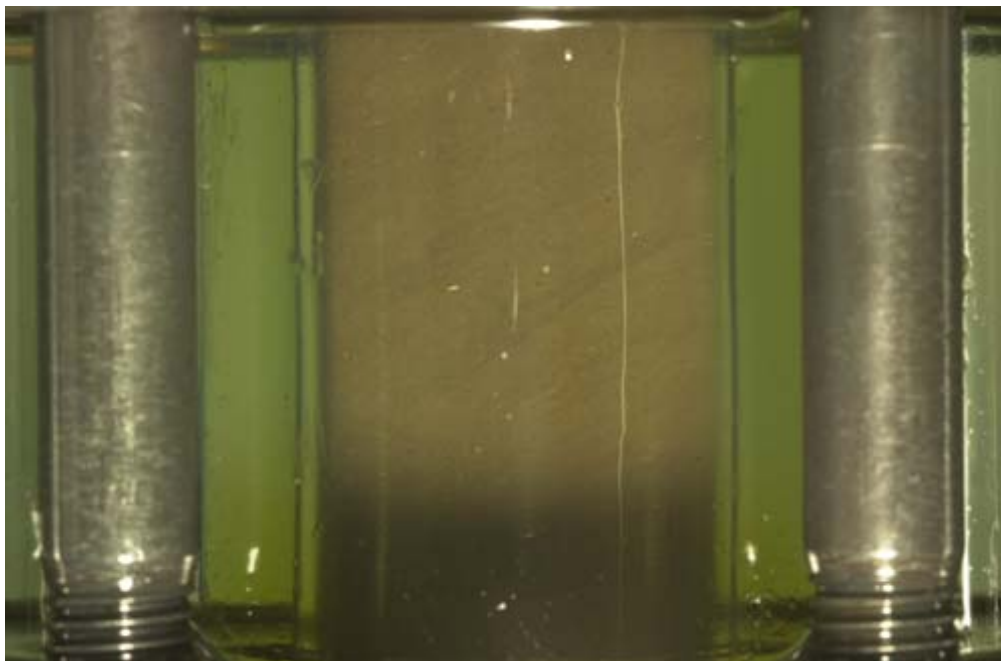


図4 - 8 試験片の写真と応力歪線図

周圧 5 MPa

歪速度 3 30 $\mu\text{st}/\text{s}$ (600 μst 毎に切換)

軸差歪 15000 μst

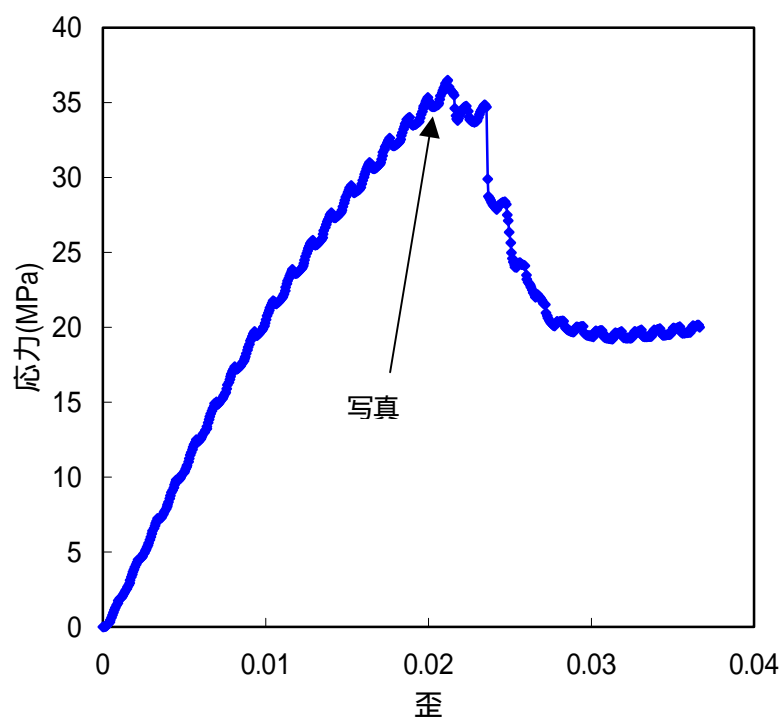
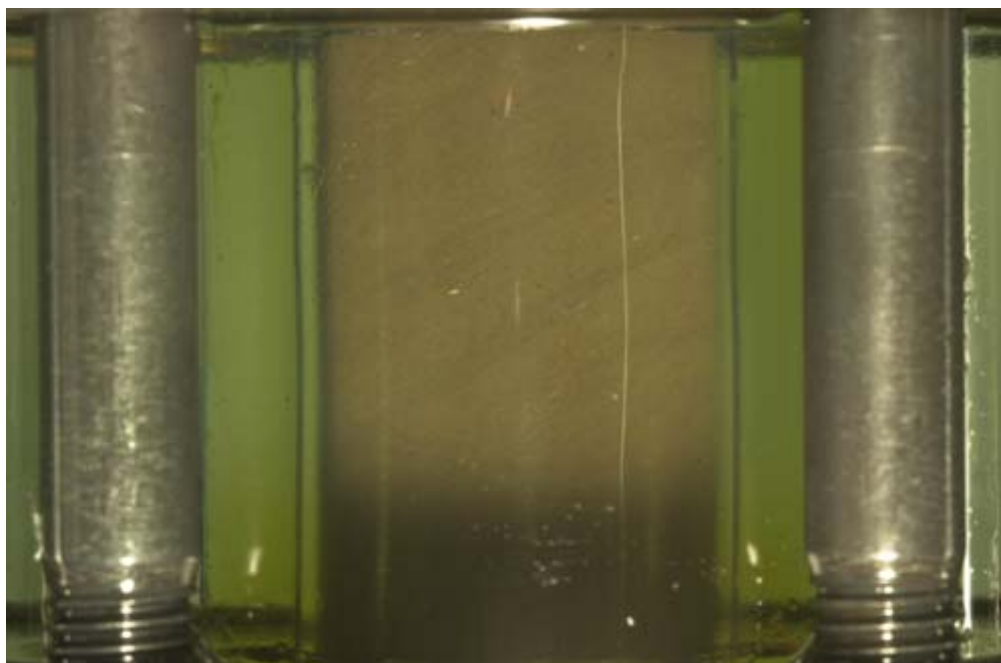


図4 - 9 試験片の写真と応力歪線図

周圧 5 MPa

歪速度 3 30 $\mu\text{st}/\text{s}$ (600 μst 毎に切換)

軸差歪 20000 μst

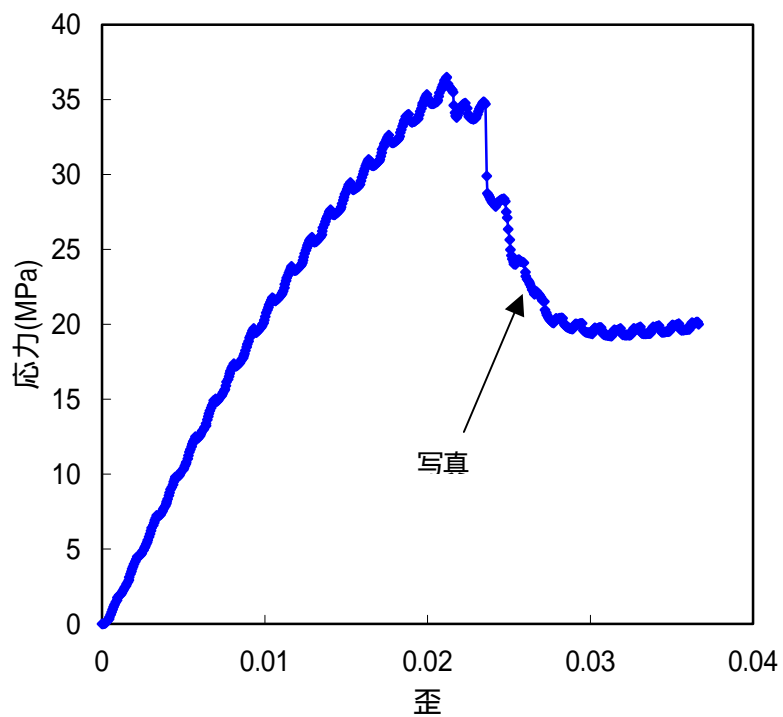
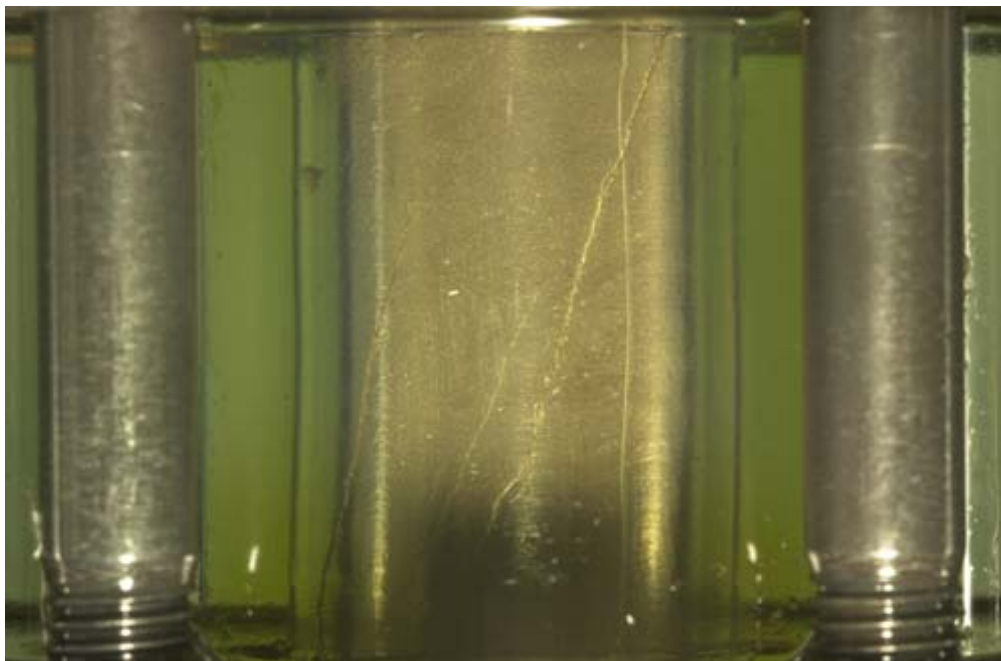


図4 - 10 試験片の写真と応力歪線図

周圧 5 MPa

歪速度 3 30 $\mu\text{st}/\text{s}$ (600 μst 毎に切換)

軸差歪 25000 μst

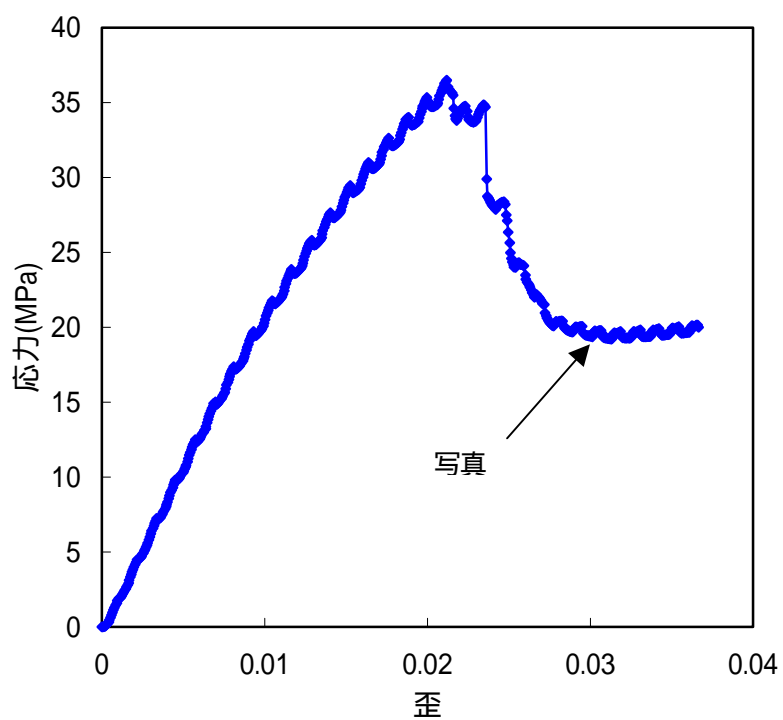
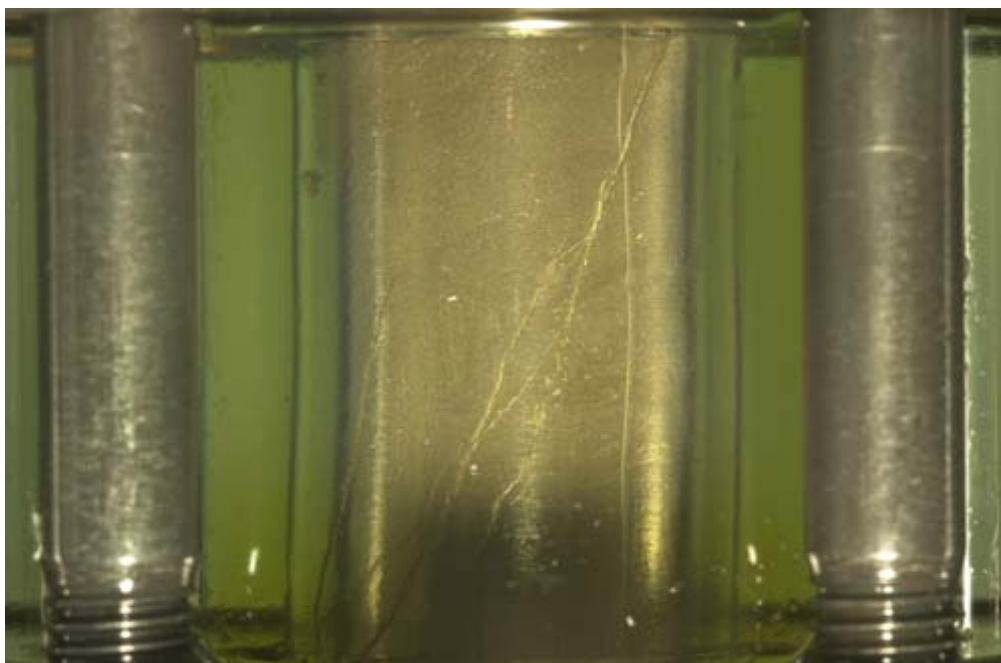


図4 - 11 試験片の写真と応力歪線図

周圧 5 MPa

歪速度 3 30 $\mu\text{st}/\text{s}$ (600 μst 毎に切換)

軸差歪 30000 μst

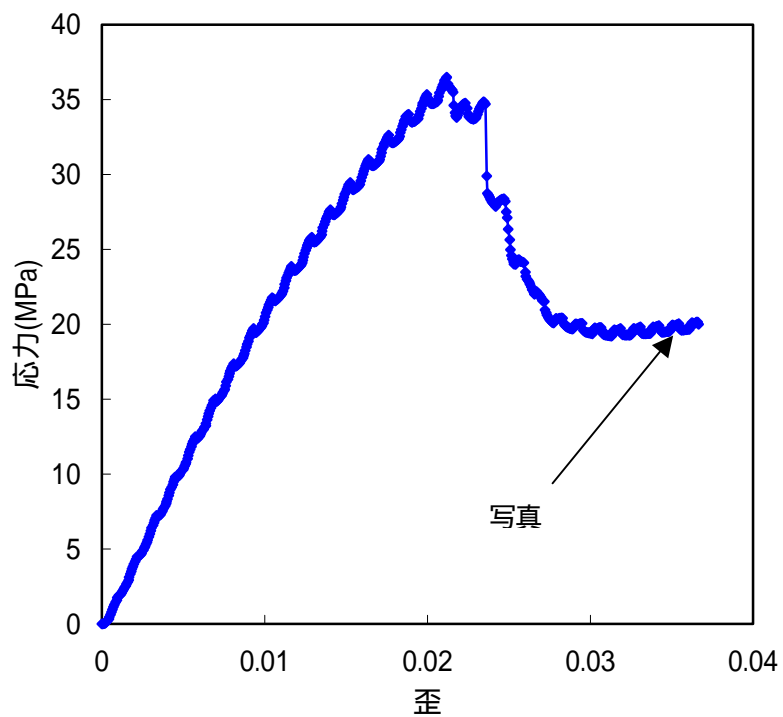
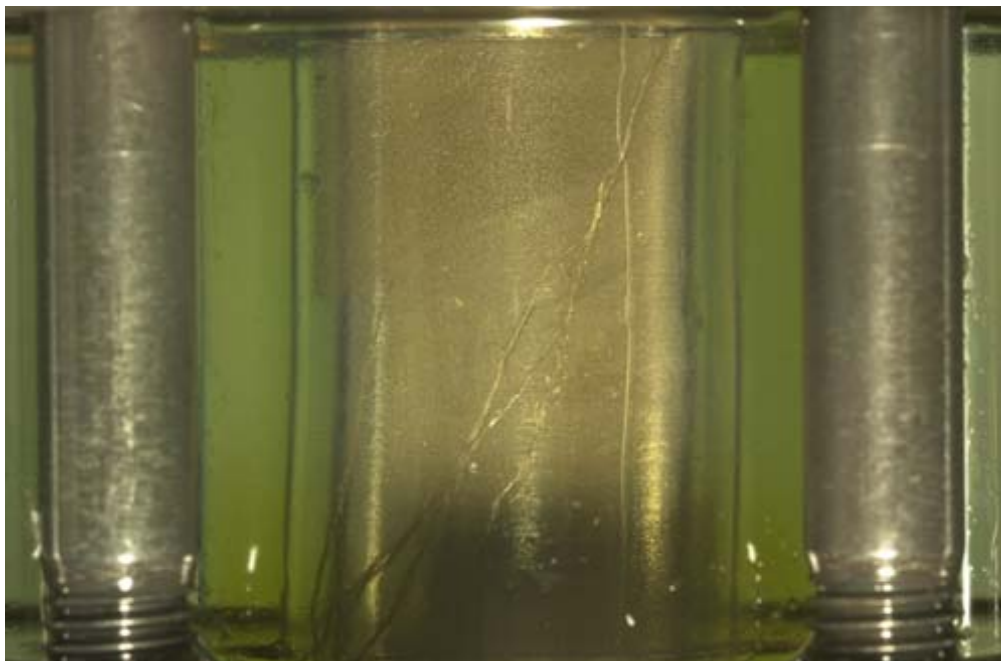


図4 - 12 試験片の写真と応力歪線図

周圧 5 MPa

歪速度 3 30 $\mu\text{st}/\text{s}$ (600 μst 毎に切換)

軸差歪 35000 μst

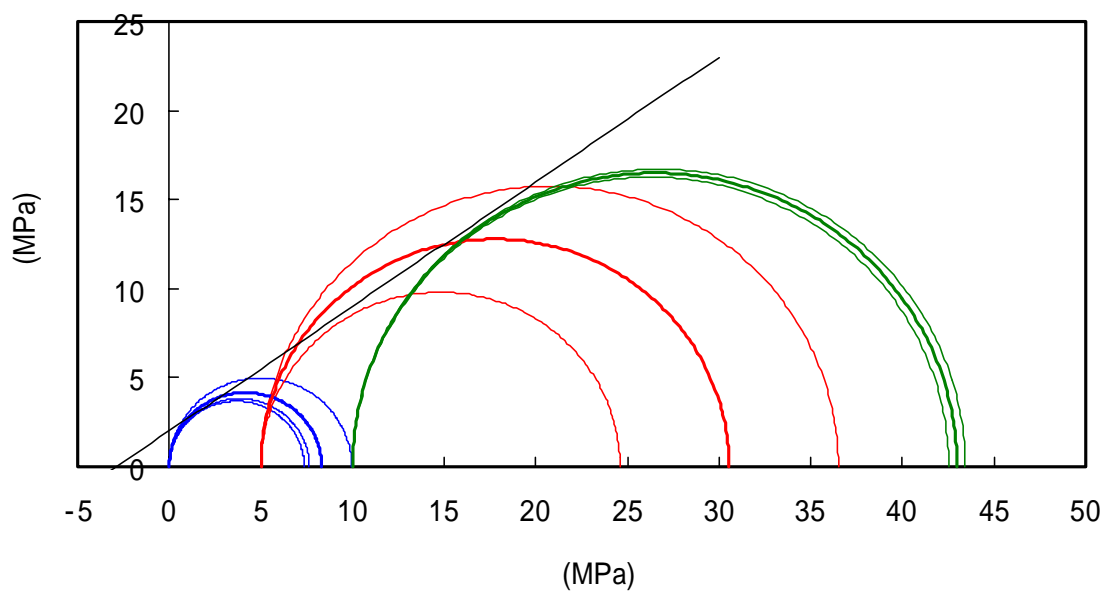


図4 - 13 Mohrの応力円とCoulombの破壊基準
細線は各周圧での試験データにより描いた円
太線は各周圧での平均値により描いた円

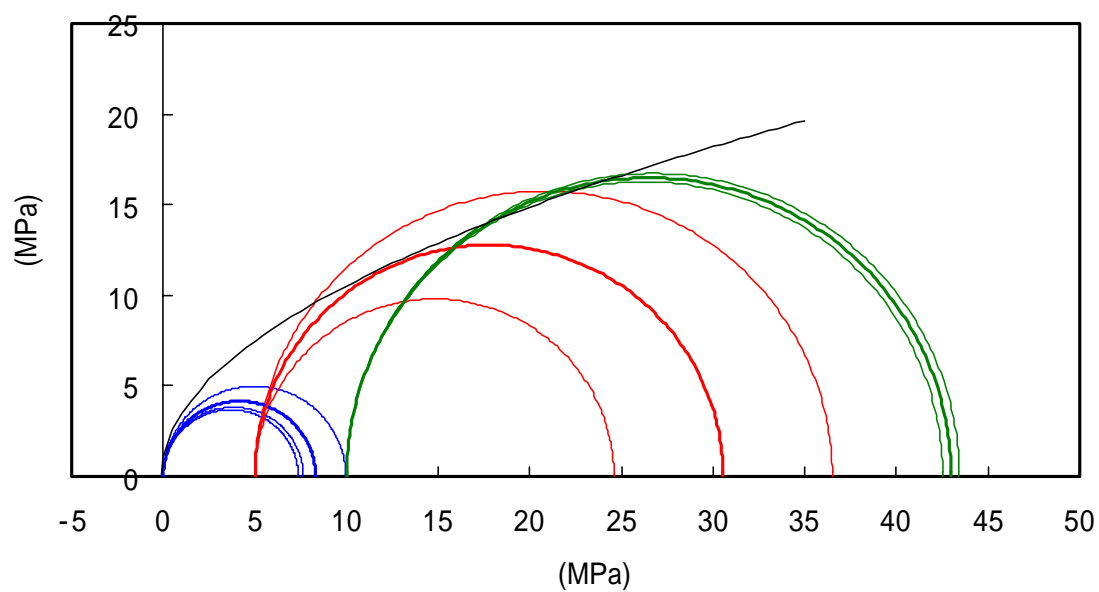


図4 - 14 Mohrの応力円とMohrの破壊基準
細線は各周圧での試験データにより描いた円
太線は各周圧での平均値により描いた円

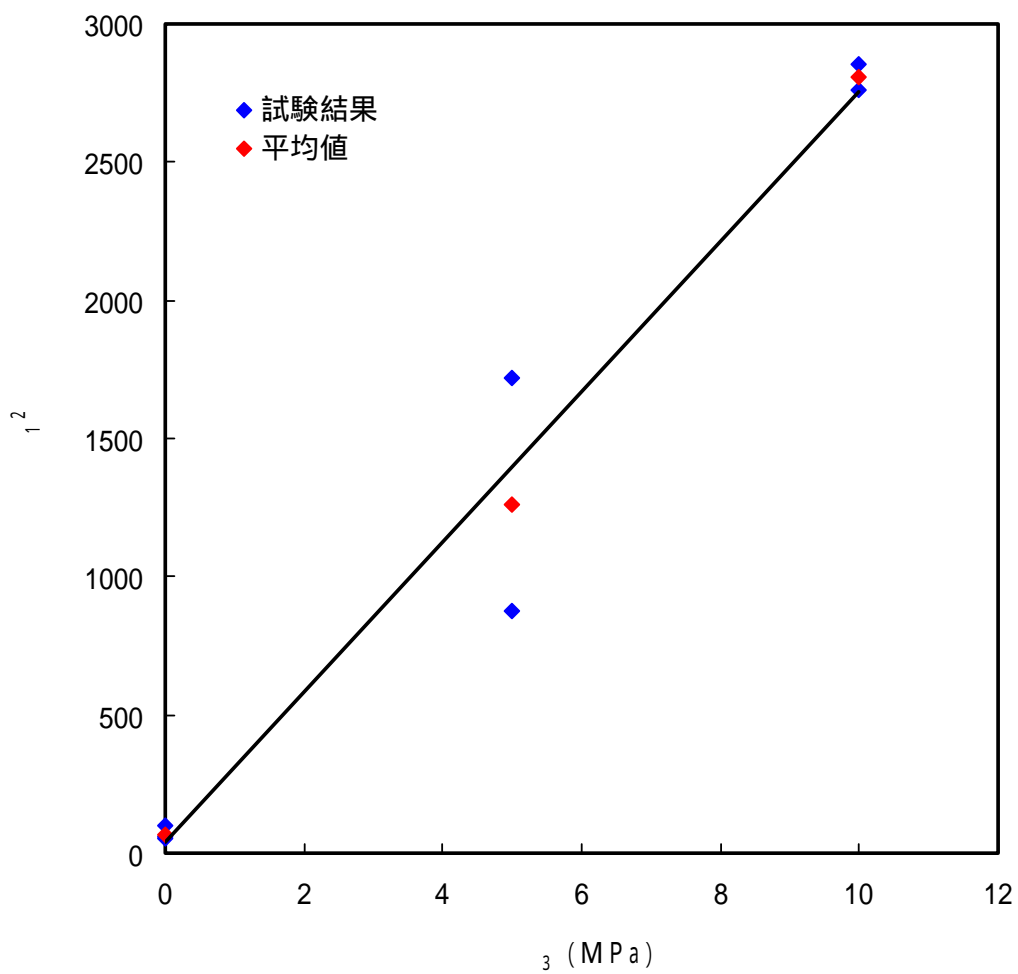


図4 - 15 最小主応力と最大主応力の2乗との関係と
Janachの破壊基準

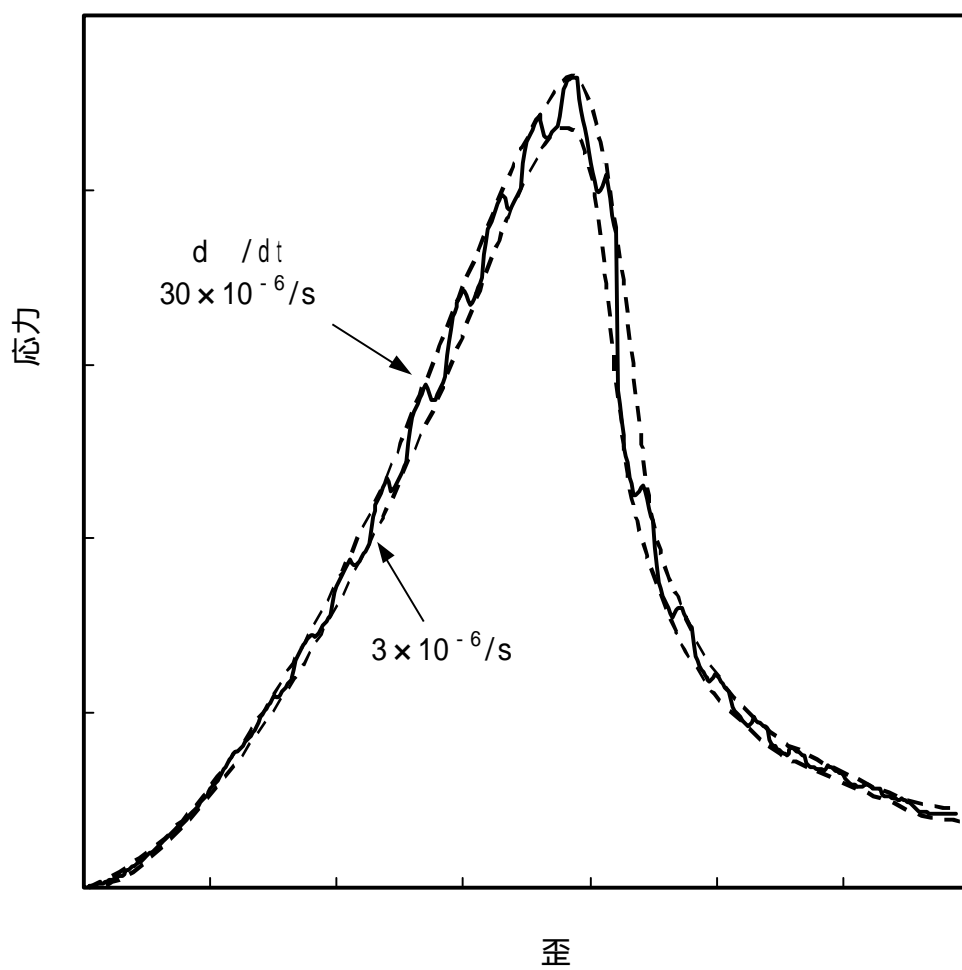


図4 - 16 荷速度依存性を調べるための強度試験の概念図

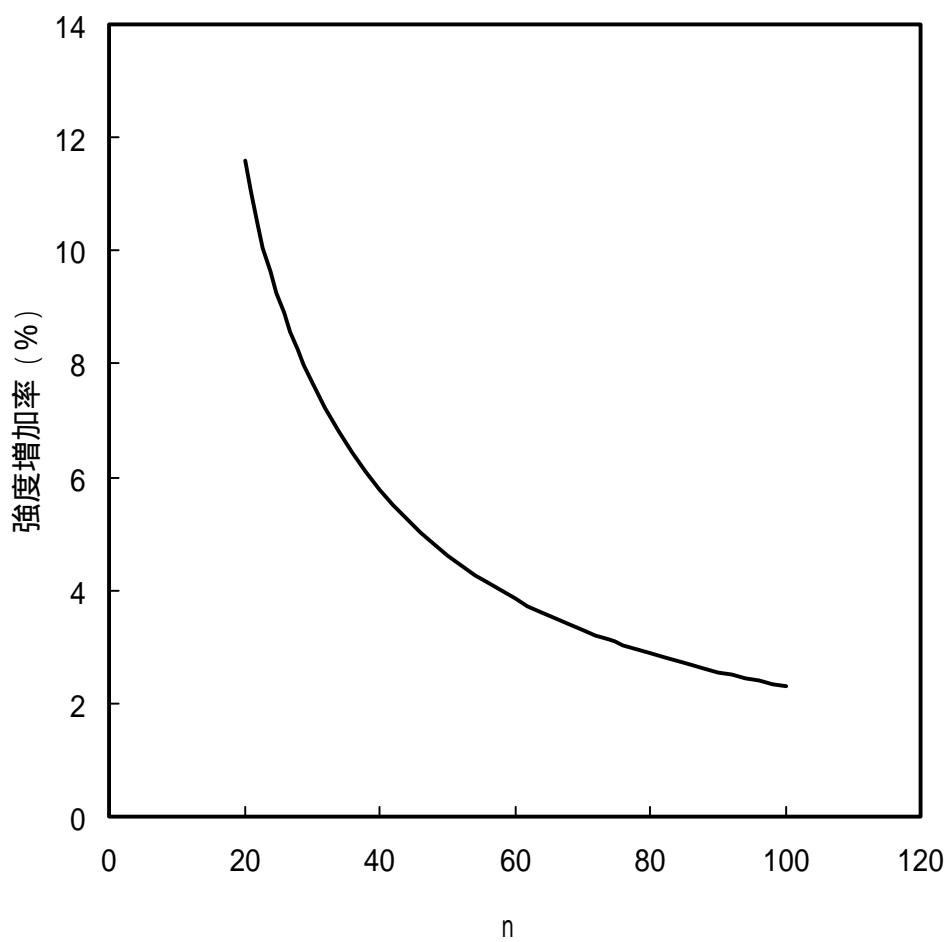


図4 - 17 載荷速度が10倍になったときの強度の増加

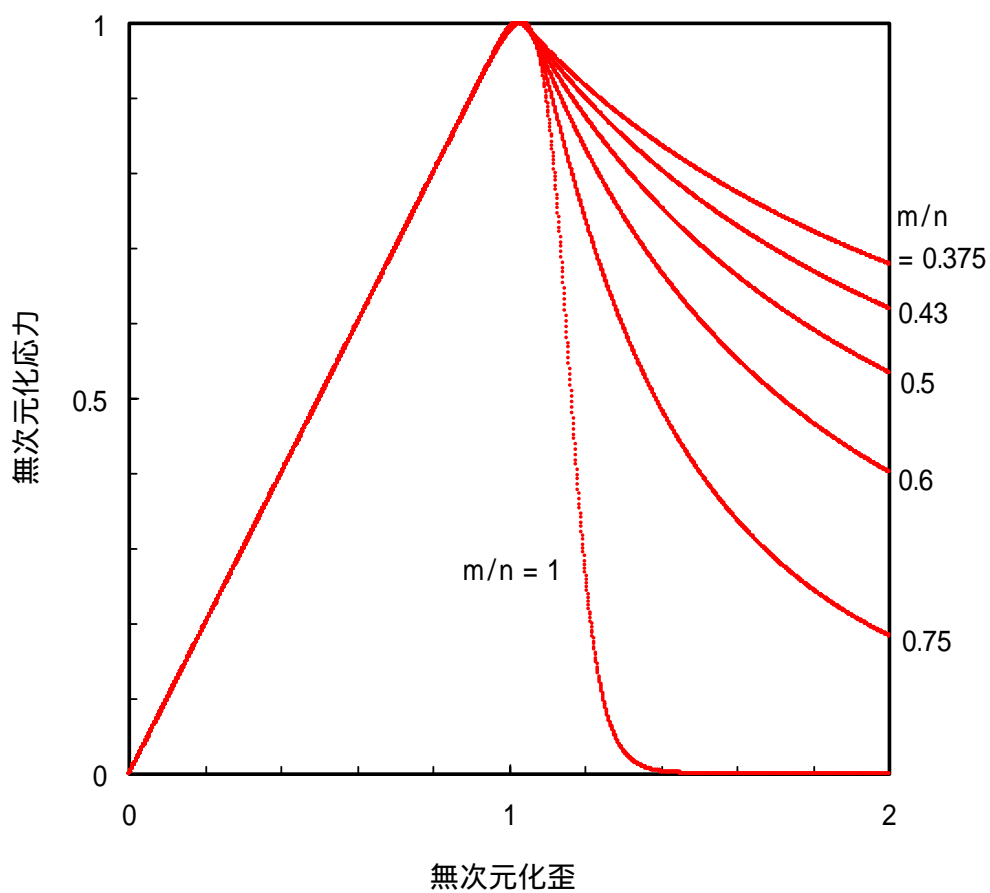


図4 - 18 m/n による応力 - 歪曲線の変化 (計算値).
 $m = 30$ とした. n は30, 40, 50, 60, 70, 80と変えた.

5. 多段階クリーブ試験

5.1 試験方法

試験条件を以下に示す。

環境：常温下，排水状態

周圧：0，5，10 MPa

クリーブ応力：強度の約20，40，60，80，100%で1時間ずつ

(強度は表4-1に示した各試験での平均値を用いた)

試験では，組み立てた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，第一段階のクリーブ応力に達するまで一定応力速度0.05 MPa/sで載荷を行った。各段階のクリーブ試験が終了し，次の段階に移る際も，一定応力速度0.05 MPa/sで載荷を行った。なお，応力を上昇させてクリーブ試験に制御を切り換える際，手動で切り換えたため，クリーブ応力は設定値に比べ試験ごとに若干異なる。強度試験と同様に，周圧5，10 MPaでは試験片を熱可縮性チューブで覆い，周圧0 MPaではラップで包んだ。

5.2 試験結果

図5-1～3に試験で得られた応力-歪曲線を示す。周圧0 MPaでは5段階目のクリーブ中に破壊したが，周圧5および10 MPaでは5段階目から6段階目に荷重を増やす途中で破壊が起こった。破壊が起こったときの応力は，周圧5 MPaでは35.7 MPa，周圧10 MPaでは48.2 MPaと強度試験の結果よりも5 MPa程度大きかった。試験終了後，試験片と鋼製円柱を観察したところ，いずれの周圧でも水はたまっておらず，試験片も乾燥していた。強度試験は短時間で終わるため，試験片と鋼製円柱を熱可縮性チューブで覆う作業は試験をする日に行っていた。一方，多段階クリーブ試験は時間がかかるため，この作業を前日に行っていた。そのためこの1日の間に何らかの理由で水が蒸発したのではないかと考えられる。実際，チューブで覆った直後と試験開始直前に試験片の質量を量ったところ，1日の間に約30 mg質量が減少していた。理由の一つとして，チューブが水分子を通す可能性が考えられる。このように，試験片からしみでる水に関する試験を行う際には，試験片内の水分の管理に慎重を期す必要があると思われる。

図5-4～6に各段階でのクリーブ歪と時間の対数との関係を示す。図では各段階に到った1秒後を原点とした。

周圧0 MPaでは応力レベル23, 44, 65, 86%ともクリープ歪は時間の対数に対してほぼ直線的に増加しており, 105%でも破壊するまでは同様の傾向を示している。各段階で1時間経過した後のクリープ歪は23%で最も小さく, 44%と65%がほぼ等しく, 86%が最も大きい, 各段階とも250~500 μ の範囲内に入っている。

周圧5 MPaでは各段階とも, クリープ開始後約100秒間はグラフが若干下に凸の曲線を描いており, その後はほぼ直線的に歪が増加している。各段階で1時間が経過した後のクリープ歪は応力レベルが高くなるほど大きくなっている。また, 各段階間の差も応力レベルが高くなるにつれて大きくなっている。

周圧10 MPaでは応力レベル18, 39, 59, 79%ではクリープ開始後約100秒間は若干下に凸の曲線を描き, その後は逆に若干上に凸の曲線を描いている。一方, 99%では全体的に下に凸の曲線を描きながら歪が増加している。周圧5 MPaと同様に応力レベルが高くなるほどクリープ歪は大きい。各段階で1時間が経過した後のクリープ歪を見ると, 第2, 3段階間の差が第1, 2段階間および第3, 4段階間の差よりも大きくなっている。

図5-7~9に各段階でのクリープ歪速度と時間の対数との関係を示す。各周圧, 各段階とも傾き約1の直線上にほぼのっており, 周圧0 MPaの応力レベル105%ではその直線からずれるように歪速度が増加し破壊に到っている。図5-8, 9では, 応力レベルが高くなるにつれ右上へとシフトしているようにも見えるが, ばらつきも大きく, 確たることは言えない。

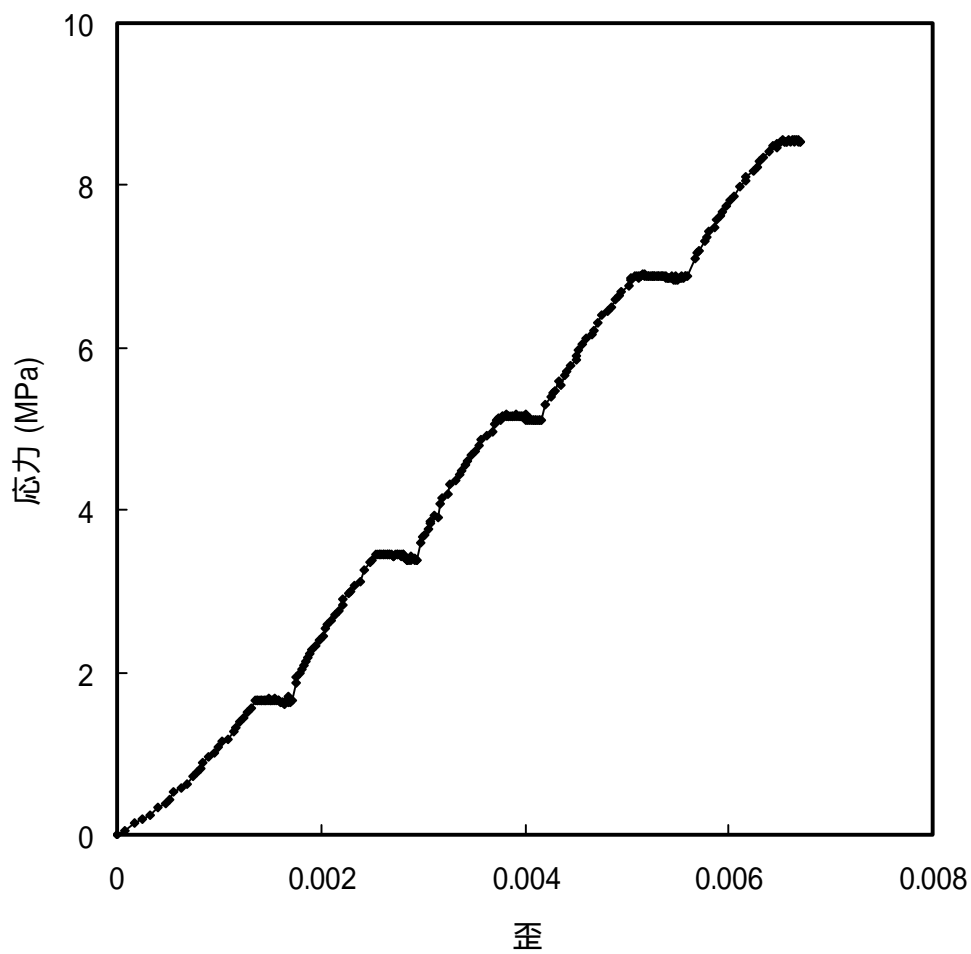


図5 - 1 多段階クリープ試験での応力 - 歪線図
周圧 0 MPa

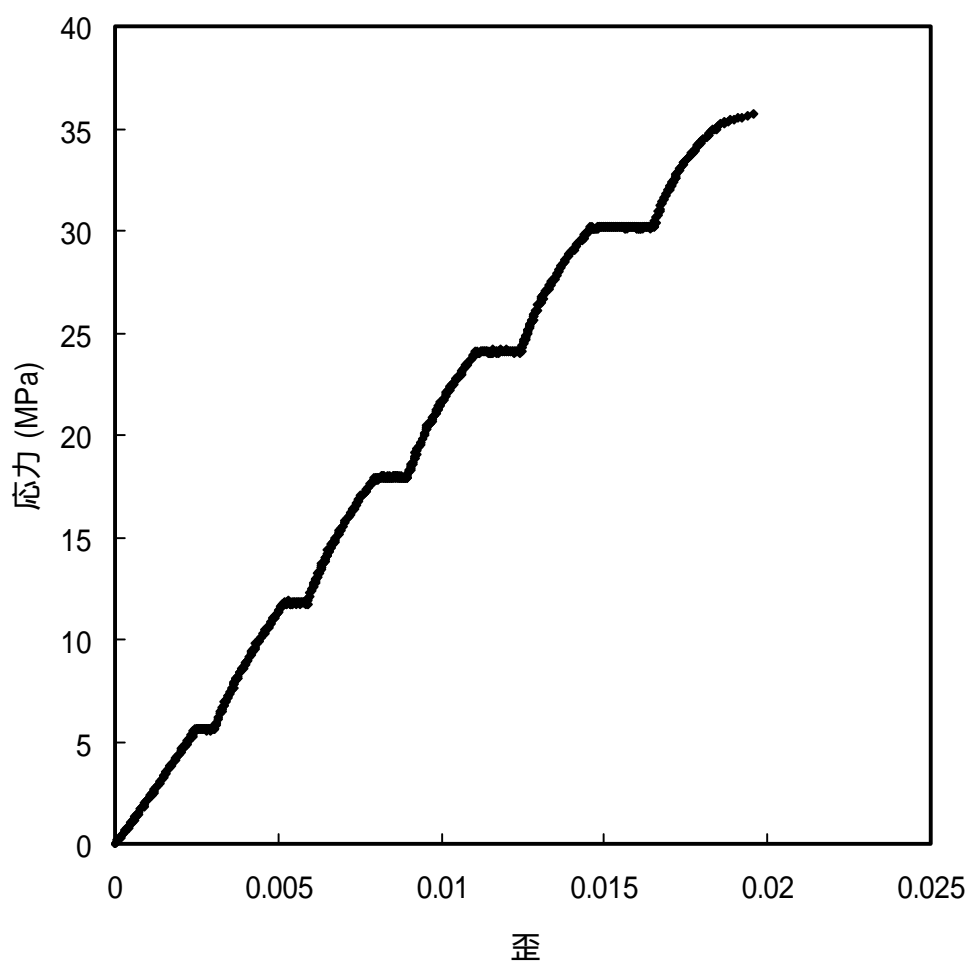


図5 - 2 多段階クリープ試験での応力 - 歪線図
周圧 5 MPa

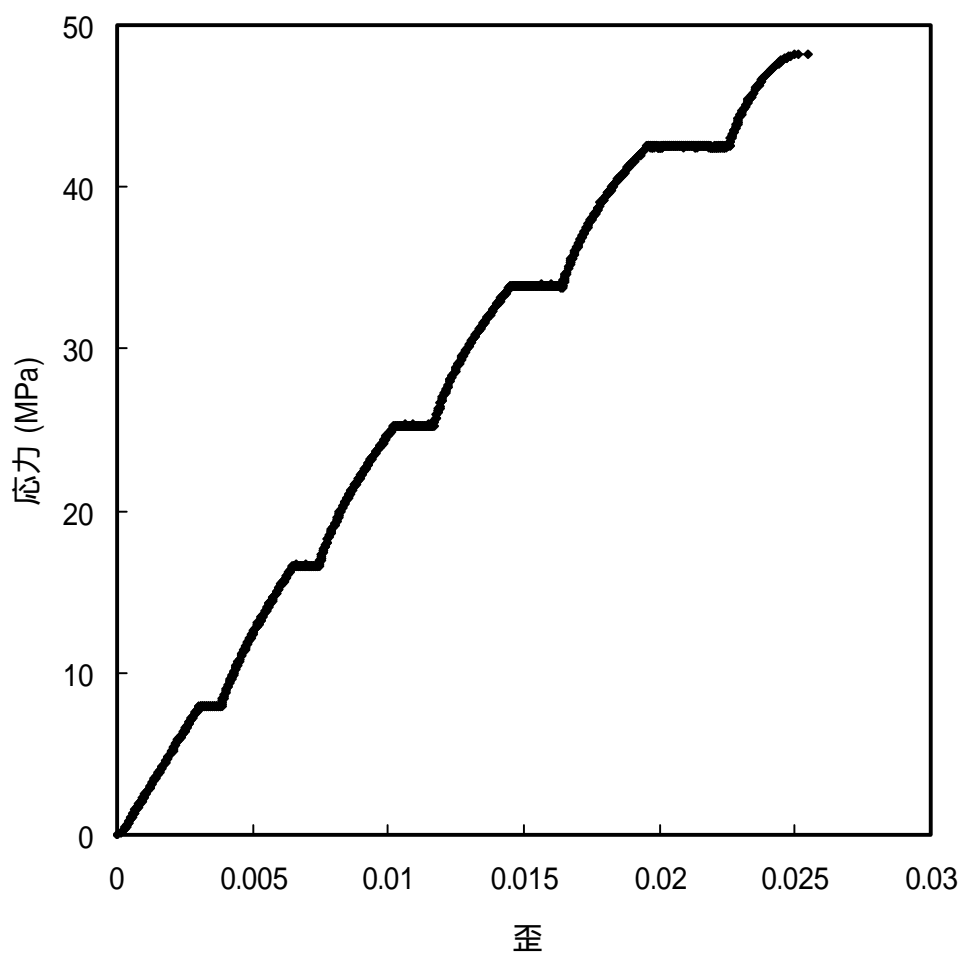


図5 - 3 多段階クリープ試験での応力 - 歪線図
周圧 10 MPa

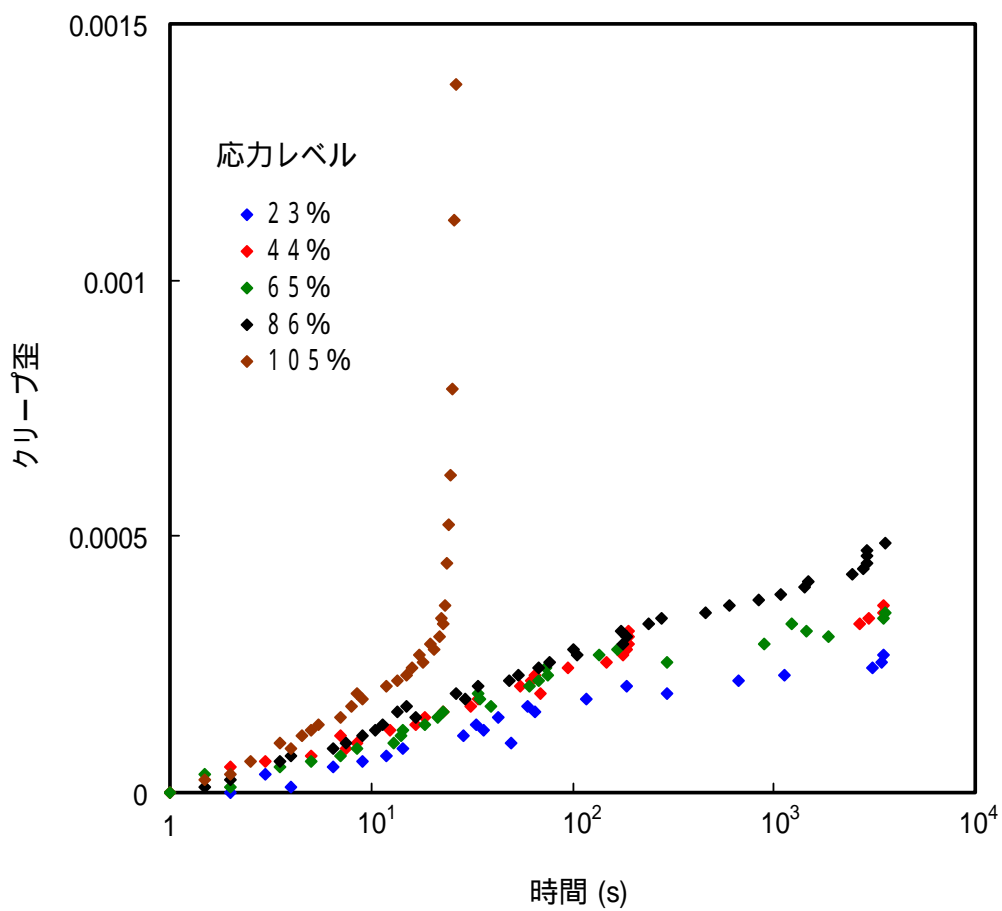


図5 - 4 各段階でのクリープ歪の経時変化
周圧 0 MPa

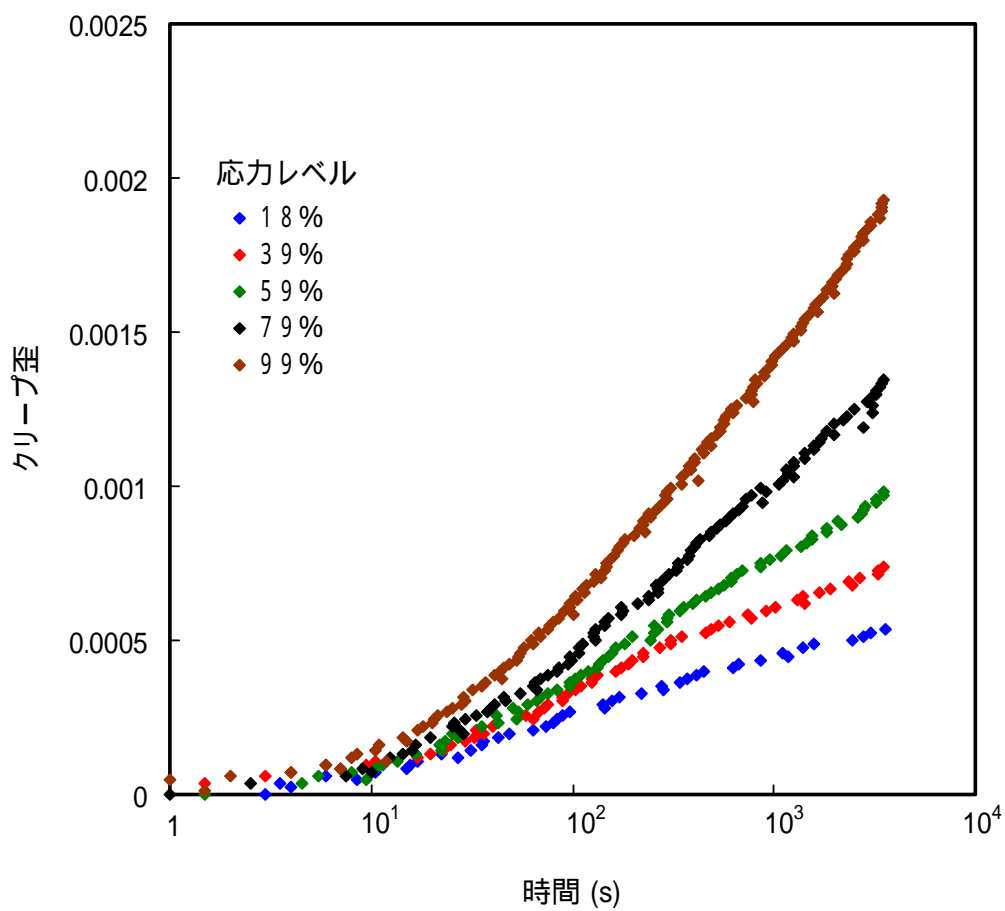


図 5 - 5 各段階でのクリープ歪の経時変化
周圧 5 MPa

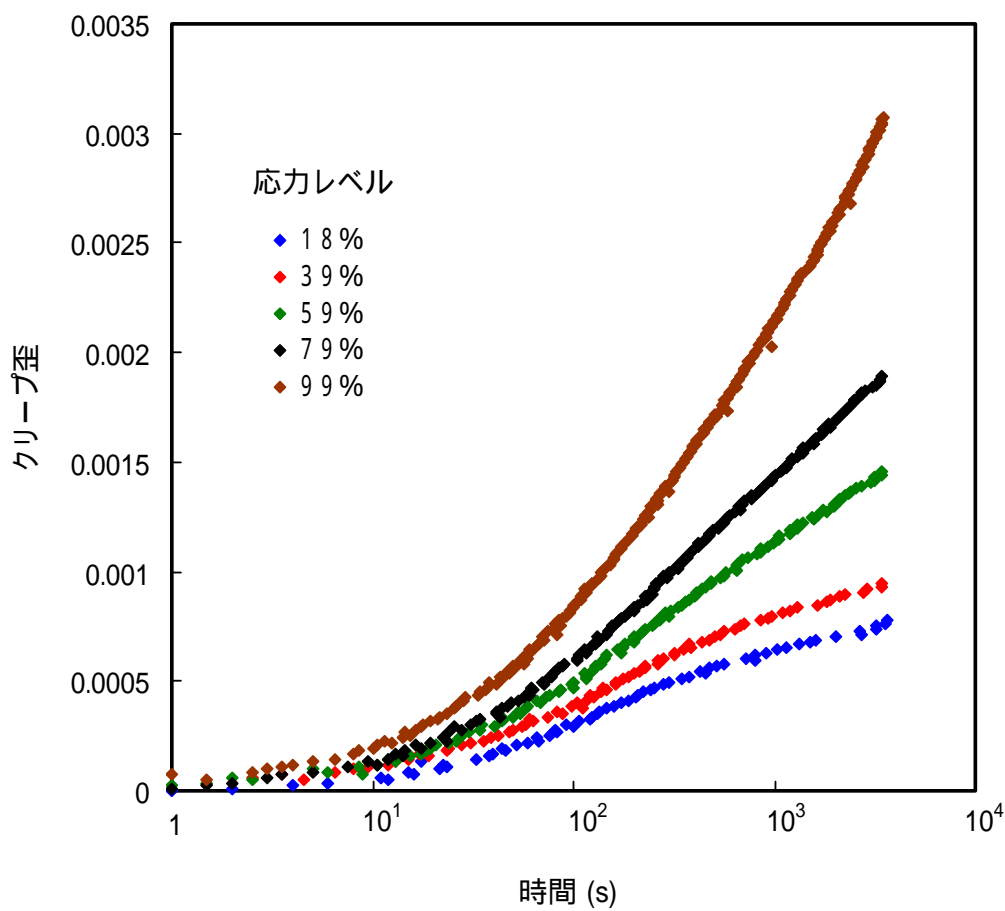


図 5 - 6 各段階でのクリープ歪の経時変化
周圧 10 MPa

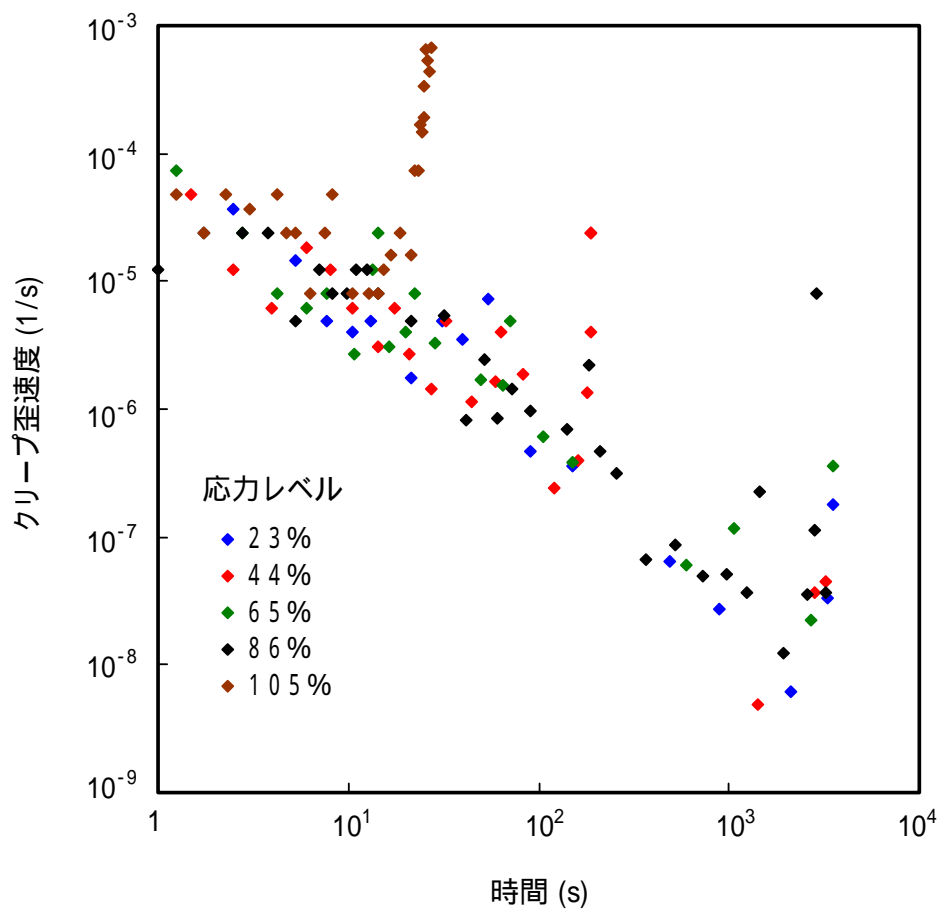


図5 - 7 各段階でのクリープ歪速度の経時変化
周圧 0 MPa

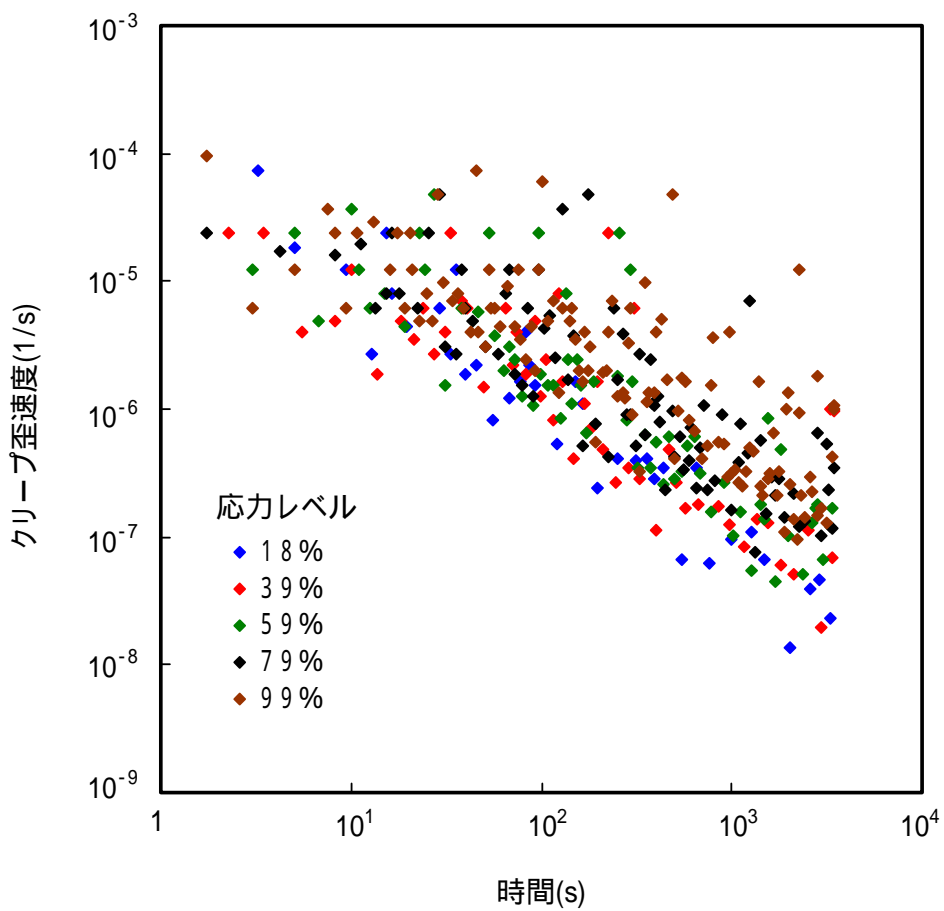


図5 - 8 各段階でのクリープ歪速度の経時変化
周圧 5 MPa

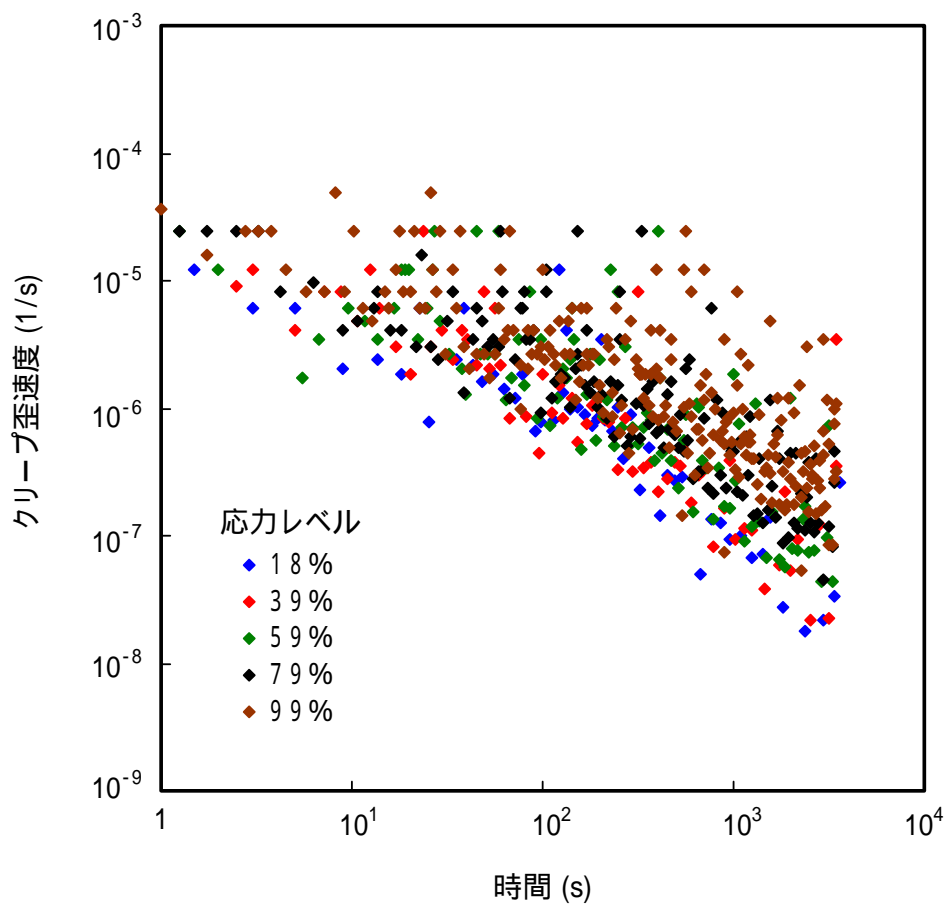


図5 - 9 各段階でのクリープ歪速度の経時変化
周圧 10 MPa

6. おわりに

本研究では、まず三軸圧縮試験をおこなった。試験中に載荷速度を速めたり遅くしたりして、そのときの応力の増減の程度から、供試体の粘弾性的性質を把握することを試みた。さらに、三軸圧縮応力下で多段階クリープ試験をおこなった。試験結果よりコンプライアンス可変型構成方程式のパラメータを求めた。なお、試験に際して、著者が独自に開発した可視化ベッセルを用いて三軸試験をおこなった。この可視化ベッセルの外筒は透明なアクリル製であり、試験中に供試体が次第に変形していくことが観察できた。主だった結果を箇条書きにして示す。

周圧に伴う強度の増加は、他の岩石と比較して、やや大きめと思われる。

構成方程式のパラメータ中の n （粘弾性の程度を決める）は、一軸圧縮応力下で30であった。この値はやや軟質の堆積岩としては平均的なものであろう。

周圧の増加にともなって n は増加した。これは、従来の結果と定性的に一致する。

構成方程式のパラメータ中の m （応力-歪曲線の形を決める）は、周圧によらず30であった。

三軸圧縮試験、多段階クリープ試験をあわせて考えると、今回の試験対象岩石は、軟質堆積岩としてごく平均的な粘弾性的性質をもっていると判断した。

参考文献

- Hill, R.: The mathematical theory of plasticity, p.38-41, Clarendon press (Oxford), (1950)
- Janach, W. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 14, p.209-215, (1977)
- Johnson, W. & Mellor, P. B. (共訳: 清田堅吉, 山田嘉昭, 葉山益次郎): 塑性加工学 1(基礎の理論), p.57-59, 培風館(東京), (1965)
- Lodge, A. S. (共訳: 倉田道夫, 尾崎邦宏): 弾性液体, p.209, 吉岡書店(京都), (1975)
- Smith, I. M. & Griffiths, D. V.: Programming the finite element method (2nd ed.), John Wiley & Sons (New York), (1988)
- Vutukuri, V. S., Lama, R. D. & Saluja, S. S.: Handbook on mechanical properties of rocks, p.29-32, Transtech Publications (Clausthal), (1974)
- 大久保誠介・何昌栄・西松裕一: 日本鉱業会誌, 103, p.177-181, (1987a)
- 大久保誠介・西松裕一・緒方義弘: 日本鉱業会誌, 103, p.293-296, (1987b)
- Okubo, S., Nishimatsu, Y. and He, C. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 27, p.559-562, (1990)
- 大久保誠介: 資源・素材学会誌, 108, p.601-606, (1992)
- 大久保誠介・金豊年: 資源・素材学会誌, 109, p.209-214, (1993)
- 大久保誠介・趙顕: 資源・素材学会誌, 110, p.109-114, (1994)
- 大久保誠介・福井勝則・木村有仁: トンネルと地下, 32, No.1, p.45-50, (2002)
- 田中忠治・鶴飼恵三・河邑真・坂上最一・大津宏康: 地盤の三次元弾塑性有限要素法解析, 丸善(東京), (1996)
- 趙顕・福井勝則・大久保誠介: 資源・素材学会誌, 111, p.595-600, (1995)
- 西松裕一・大久保誠介・福井勝則: 資源・素材学会誌, 110, p.343-346, (1994)
- 矢川元基・曾根田直樹: パラレルコンピューティング, 3章, 培風館(東京), (1991)