

可視化ベッセルを用いた周圧下でのクリープ試験と 破壊直前までの連続写真

The Tri-axial Creep Tests in a Transparent Vessel and Sequence Photographs until just before the Final Failure

羽柴公博*・大久保誠介**・福井勝則***

Kimihiro HASHIBA, Seisuke OKUBO and Katsunori FUKUI

Creep tests of Tase tuff were conducted under confining pressure. A transparent tri-axial vessel developed by the authors was used to observe the behavior of a rock specimen during the test. Photographs were successfully taken from a primary creep until just before the final failure.

Axial and lateral strains of a specimen were obtained through image processing of the photographs. It was found that both strains at the center of the specimen passed through the primary, secondary and tertiary creep until the failure. In tertiary creep, both strain rates increased in inversely proportional to residual time up to the final failure. The results described above are similar to that of the conventional studies heretofore.

Key Words: Creep, Confining Pressure, Visualization, Lateral Strain

1. はじめに

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

大久保ら¹⁾は、透明なアクリル樹脂製の可視化ベッセルを開発し、周圧下での実験中に試験片を目視することに成功した。従来の研究では、試験片の横方向変位は各種変位計を用い、局所的な測定を行っていたが、可視化ベッセルによって実験中に撮影した写真から試験片全体の変位を測定することが可能となった。

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

2. 実験方法

* 東京大学大学院博士課程 工学系研究科地球システム工学専攻

** 正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科地球システム工学専攻

*** 正会員 工博 東京大学助教授 工学系研究科地球システム工学専攻

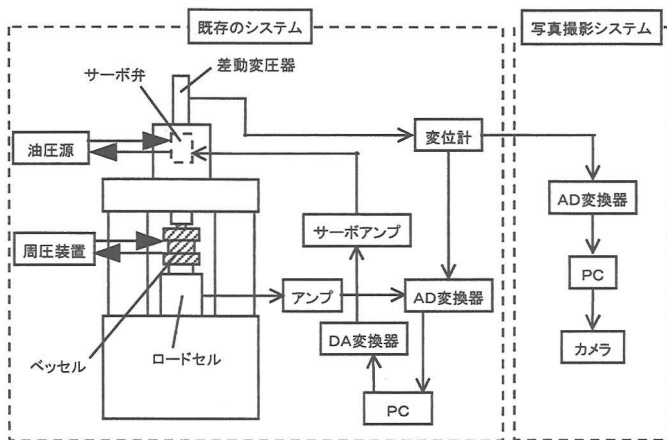


図1 試験機の概略図

試料岩石として田下凝灰岩を用いた。これを直径25mm、高さ50mmの円柱形試験片に整形後、2週間以上、温度・湿度が管理された実験室内に放置し、自然乾燥させてから実験に使用した。実験に先だち、5本の試験片を用いて、歪速度 $10^{-5}/s$ で定歪速度試験を行ったところ、平均一軸圧縮強度は16.0MPa、ヤング率は3.7GPaであった。

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

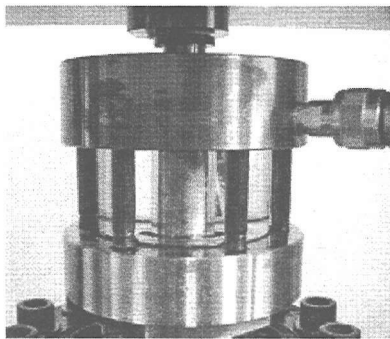


図2 ベッセルの写真

周圧ベッセルとして図2に示すような透明なアクリル樹脂製の可視化ベッセルを用いた。このベッセルは、上下の金属板と透明なアクリル製円筒からなり、6本のボルトで円筒を締め付ける構造となっている。アクリルの引張強度は75MPaであり、ベッセルの破壊試験の結果、複数回使用後の円筒はほぼ理論値どおり約55MPaの周圧で破壊する¹⁾。今回は周圧を3MPaと設定したが、安全率は10以上であり、充分安全であると考えられる。

写真撮影には、画素数266万のデジタルカメラ（Nikon製、D1）を用いた。岩石のクリープでは、破壊時刻の予測が難しく、同じ条件下でも破壊寿命が大きくばらつく。また、変化の少ない2次クリープ

では比較的長い時間毎に撮影し、変化の激しい3次クリープでは可能な限り多くの撮影枚数を確保する必要がある。そこで、本研究では、図1のように既存のシステムに付け加える形で写真撮影システムを組み込んだ。写真撮影システムでは、差動変圧器の出力が増幅器、分解能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。

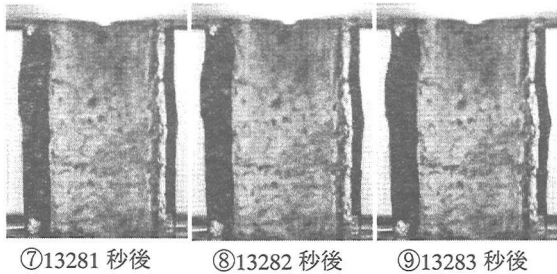
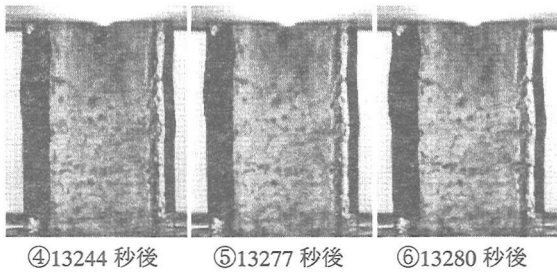
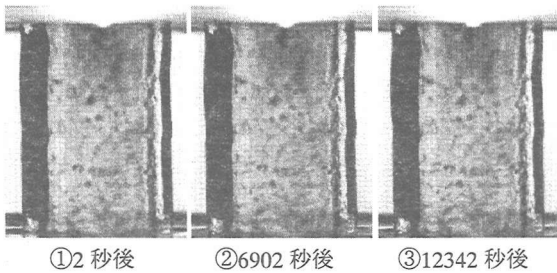
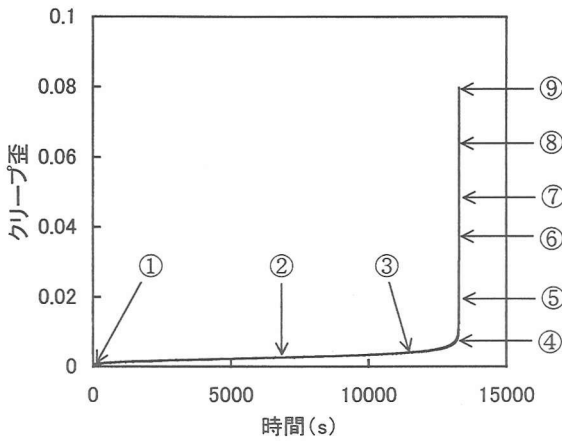
試験片の横方向変位は写真から次のような手順で測定した。まず、メディアンフィルタによりノイズを除去した。次に横方向に関して、隣接する画素間の輝度値の差を計算した。その差が最大値あるいは最小値となる点を試験片の端とし、両者の間隔を測定することで試験片の幅を測定した。つまり、横方向の輝度値の変化が最も激しいところを試験片の端とした。この際、検出を容易にするため図3のように試験片の端の部分にマーカーで色をつけた。

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

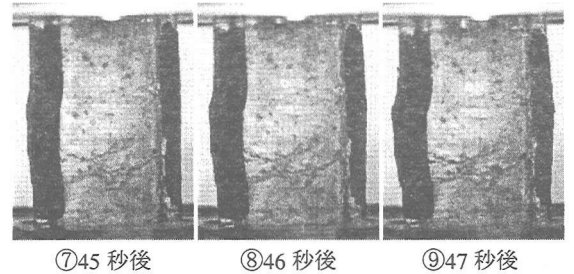
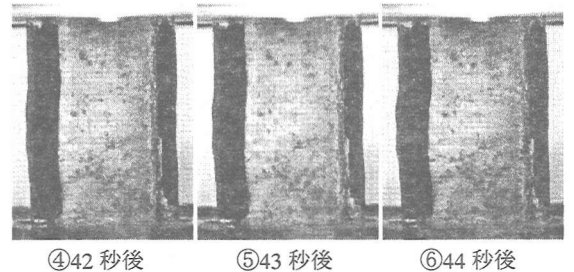
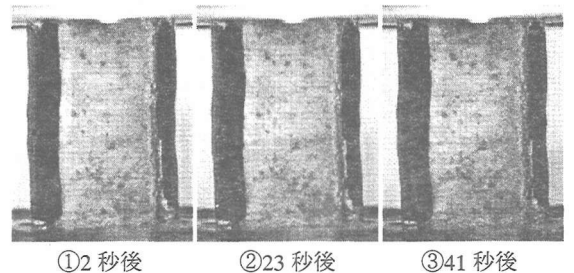
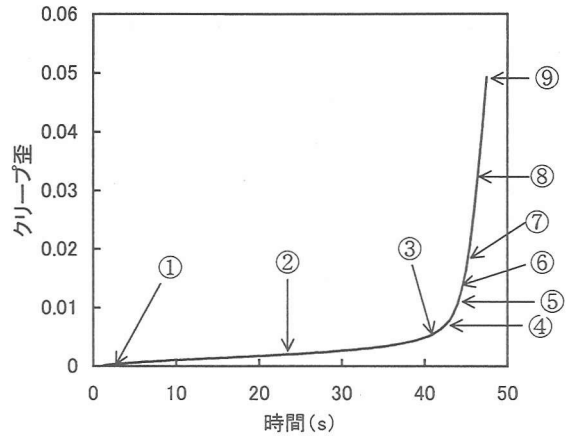
3. 実験結果

(1) 破壊直前までの連続写真と試験片の横幅の経時変化

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



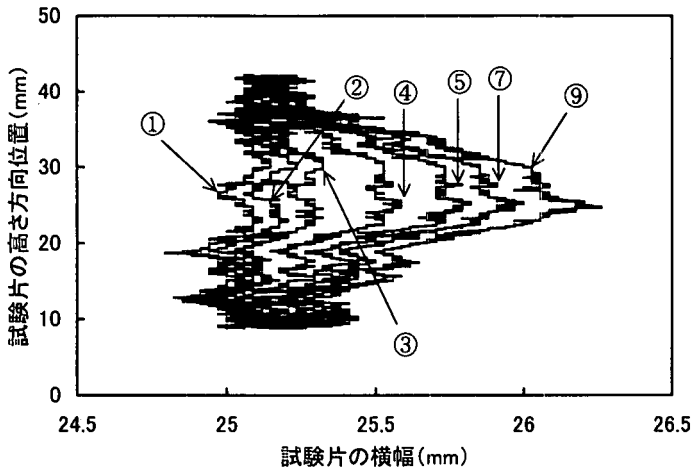
(a) 応力レベル90%



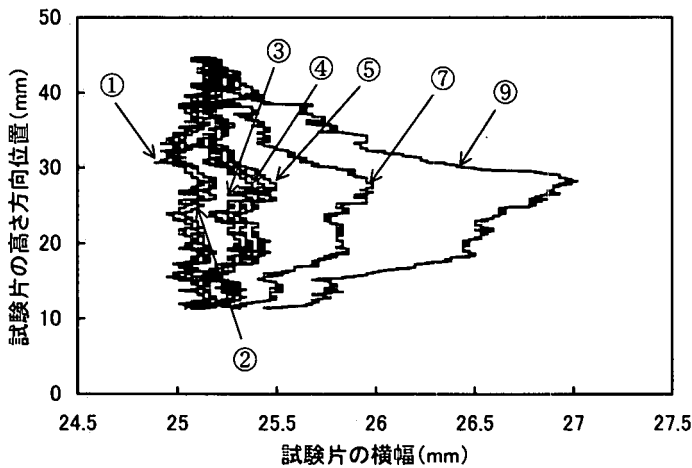
(b) 応力レベル95%

図3 クリープ曲線と連続写真（周圧3MPa）

写真の秒数はクリープ開始からの経過時間



(a) 応力レベル90%



(b) 応力レベル95%

図4 試験片の横幅の変化(周圧3MPa)

こんであるが、⑥では凹凸がなくなり、その後は逆に中央部分が膨らんでいる。実験終了後に取り出した試験片の上下端面付近はほぼ健全であり、図3(a)の試験片と同様に上下の部分が中央部分にめり込んでいる様子も少し見られた。

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

図4に試験片の高さ方向の各位置における横幅の経時変化を示す。これは図3と同じ試験片であり、図中の番号は図3の番号と一致する。図3のように試験片の上下端面付近はベッセルの金属板で隠れてしまい、横幅を測定することはできなかった。試験片の横幅の算出は次のように行った。まず実験を開始する前に、周圧が安定した状態でベッセル内の試験片を撮影し、上端から下端までの横幅の平均画素数を測定した。次に試験片の直径25mmをこの平均画素数で除し、横方向の分解能を算出した。各写真の横方向の画素数にこの分解能を乗じ横幅とした。

図4(a)①では試験片の下端から約12、19、26、36mmの位置での横幅が小さいが、これは図3の写

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

図3(b)は応力レベル95%での結果であり、図3(a)と同様に①の時点で試験片の側面の凹凸がはっきりと観察される。その後、写真③から⑨にかけて、①で膨らんでいた左側面の中央付近が張り出していく様子が見られた。右側面に関しては①では中央部分が少しへ

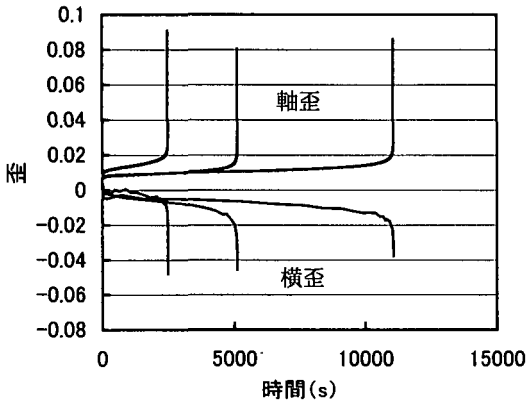
真①の試験片の側面の形状とほぼ一致している。3次クリープ開始直前の③までは試験片は上端から下端までほぼ一様に膨らんでおり、軸歪の変化が小さいと同様に横方向変位も小さい。その後③から④にかけて、試験片の中央約1cmの部分の変位の増加が激しくなっている。この間は、軸歪の増加はそれほど大きくないにもかかわらず、横方向変位は急激に増加している。それ以降も中央部分は膨らみ続け、最終的には約1.3mmの変位が生じている。一方、上下端面付近の変化は小さく、特に上端面付近は0.2mm程度しか変位が生じていない。

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

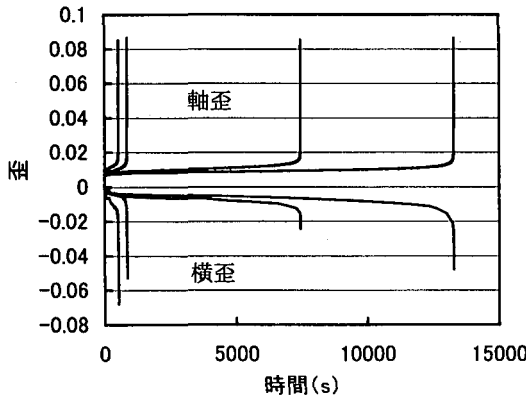
(2) 軸歪と横歪

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

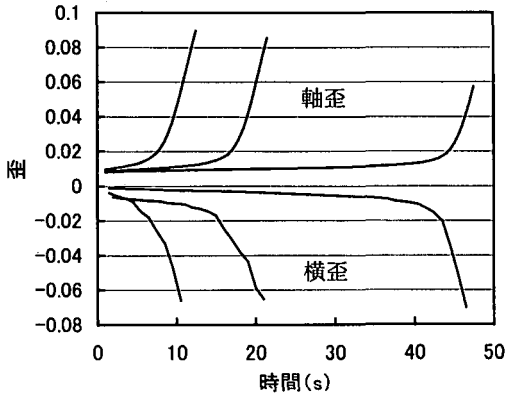
図6には軸歪および横歪と残存寿命の関係を示す。福井ら⁴⁾によると、サーボ試験機を用いたクリープ試験では、破壊直前に試験機の応答が追いつかず、応力が低下してしまい、破壊時刻が延びる。そのため、クリープでの破壊時刻を正確に決めることが難しいが、今回は、クリープ歪速度が $5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ の時を破壊時刻とした。なお、破壊時刻の取り方により数秒の差が現れるので、この点は今後の検討課題とする。応力レベル95%では短時間で破壊に到る試験片があったため、図では応力レベル80および90%の結果を示した。



(a) 応力レベル80%



(b) 応力レベル90%



(c) 応力レベル95%

図5 軸歪および横歪の経時変化 (周圧3MPa)

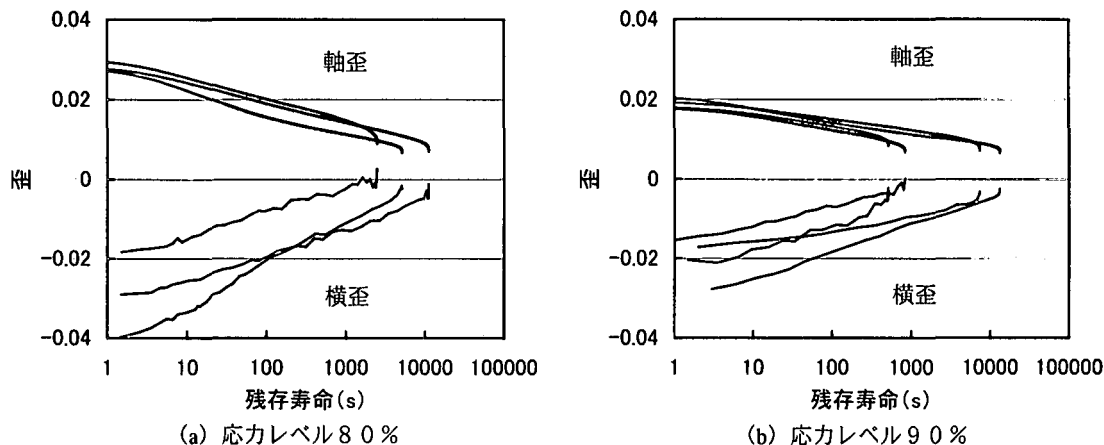


図6 軸歪および横歪と残存寿命の関係（周圧 3 MPa）

図より、破壊に近付くと軸歪、横歪とも残存寿命の対数との間にほぼ直線的な関係が見られる。従来の研究では、一軸圧縮応力下で残存寿命が小さくなった時には、クリープ軸歪と残存寿命の対数との間に直線関係が成り立つという結果が報告されている⁵⁾。今回の周圧下でのクリープ試験では、軸歪だけでなく横歪に関してもこれと似た結果が得られた。一方向からの写真撮影を行っているため、軸歪と比較して横歪のばらつきは大きいが、破壊時の横歪はその時点での軸歪とほぼ同じような値であった。

4. まとめ

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

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

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

参考文献

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