

三軸圧縮試験用可視化ベッセルの改良と 岩石試験片の体積測定

The improvement of a transparent tri-axial vessel and the measurement of the volume of rock specimens

羽柴公博*・大久保誠介**・福井勝則***

Kimihiro HASHIBA, Seisuke OKUBO and Katsunori FUKUI

Tri-axial compression tests of rock specimens are essential to understand the deformation behavior of underground structures. Okubo et al. developed a transparent tri-axial vessel made of an acrylic acid resin, and succeeded in observing the failure process of rock specimens in tri-axial compression and creep tests. But the whole of a specimen couldn't be observed because its upper and lower edges were hidden.

In this study the transparent vessel was improved in order to observe the whole of a specimen. And the volume of a specimen was measured from the photographs taken during tri-axial compression tests.

Key Words: tri-axial compression test, visualization, lateral deformation, dilatancy

1. はじめに

岩石供試体を用いた三軸圧縮試験から得られる情報は、地下空洞や岩盤内構造物の変形挙動を把握するのに重要である。三軸圧縮試験は従来からよくおこなわれてきており、有効な知見も数多く得られている¹⁾。しかし、これらの試験の多くは金属製のベッセル内でおこなわれたものであり、一軸試験のように破壊過程を視覚的に捉えることは困難であった。また、試験片の横変形や体積変化はベッセル内部に設置した計測器で測定することが多く、装置の準備や試験の実施に多大な労力を必要とした。

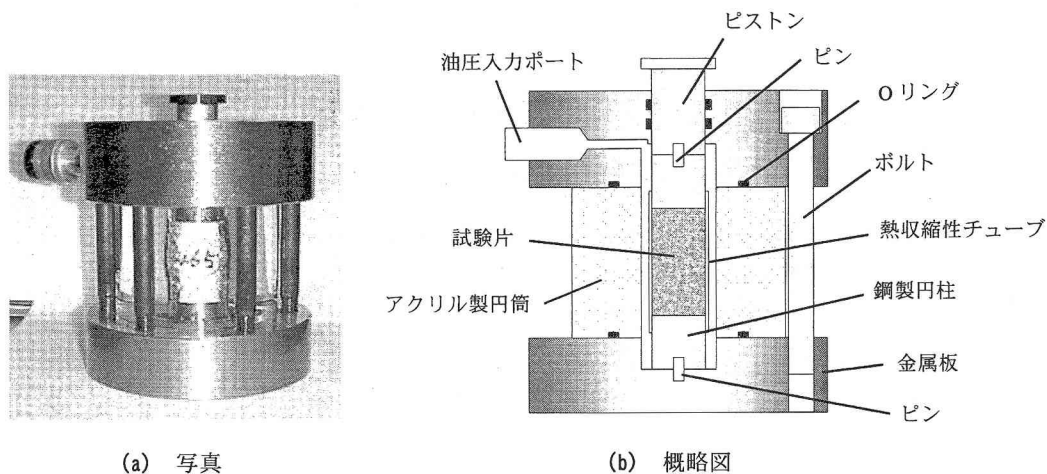
最近になって、大久保ら²⁾は透明なアクリル樹脂製の可視化ベッセルを開発し、三軸圧縮破壊過程の可視化に成功した。また、撮影した写真に画像処理を施し、試験片の中央断面付近の横変位を測定した。その後、試験片の軸方向の変形と連動する写真撮影システムを構築することで、三軸圧縮クリープでの破壊直前の連続写真撮影も可能となった³⁾。このように可視化ベッセルを用いることで、従来は困難であった三軸応力下での破壊過程の目視が可能となり、試験片の写真から比較的容易に横変位の測定ができるようになった。しかし、試験片の上下端面付近がベッセルの金属板に隠れているため、試験片全体の観察や体積の測定はできなかった。

従来から、岩石の圧縮試験ではダイラタンシーが起こることが知られており、体積変化は岩盤挙動のシミュレーションに大きな影響を与えると考えられる。そこで本研究では、試験片全体が見えるように可視化ベッセルを改良し、試験片全体の横変位測定をおこなった。また、試験中の岩石試験片の体積変化についても検討をおこなった。

* 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 改良した可視化ベッセル

２．可視化ベッセルの改良と安全性の検討

改良した可視化ベッセルの写真と概略図を図－１に示す。アクリル製厚肉円筒の高さを従来よりも20 mm 高くし、試験片の上下に密着させる鋼製円柱の高さをそれぞれ10 mm ずつ高くすることで、試験片全体が観察できるようになった。従来は試験片の下部だけに設置していた位置決め用のピンを上部にも設置することで、試験片の位置決めとベッセルの組立てを容易にした。また、油圧入力ポートの位置を従来よりも高くすることで、周圧の制御に影響を与える空気を抜き易くした。これ以外の構造は従来可視化ベッセルとほとんど同じであり、組立て手順やそれにかかる手間は従来可視化ベッセルや通常の金属製ベッセルとさほど変わらない²⁾。測定によると、ピストンと2つのOリングとの間の摩擦力はたかだか60 N 以内であり、今回の試験では軸応力の補正はおこなわなかった。

アクリルの引張強度は75 MPa であり、従来可視化ベッセルは約55 MPa の周圧で破壊した²⁾。そのため安全率を5として周圧10 MPa 以下で使用してきた。改良した可視化ベッセルではアクリル製円筒の高さを20 mm 高くしているので、ベッセルの強度が低下する恐れがあると考えられた。そこで、新品のアクリル製円筒を用いてベッセルの破壊試験をおこなった。試験では、岩石試験片を入れた可視化ベッセルを試験機上に置き、ピストンを固定した上で、油圧入力ポートから手動ポンプで周圧を加えた。2つのアクリル製円筒を用いて破壊試験をおこなった結果、1つは周圧37.7 MPa で、もう1つは周圧41.6 MPa で破壊が起こり、従来ベッセルよりも15 MPa 程度の強度の低下が見られた。破壊の際は油が勢いよく噴出したが、アクリルの破片などの飛散は見られなかった。そこで改良した可視化ベッセルでも安全率を5とし、周圧8 MPa 以下で使用することにした。

３．試験方法

試料岩石として田下凝灰岩を用いた。試験片は直径25 mm、高さ50 mm の円柱形とし、整形後は温度・湿度の管理された試験室内で2週間以上自然乾燥させた。载荷には容量500 kN のサーボ試験機を用い、周圧は最大圧力35 MPa の周圧発生装置で加えた。荷重は歪ゲージ式ロードセルで、試験片の軸方向変位はサーボ試験機の上部に設置した差動変圧器で測定した。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。画像の歪曲は画像中央部と端部で最大でも±0.1%程度であり、変位の計測にはほとんど影響を与えないことがわかっている²⁾。また、ベッセル内の試験片を撮影した場合でも、アクリル製円筒によるゆがみは生じ

ないということもわかっている²⁾。写真撮影システムは試験片の変形と連動しており、差動変圧器の出力が増幅器および A/D 変換器を経てパソコンに送られ、その値が一定量増加する毎に、パソコンに組み込まれたリレー出力ボードからカメラへ出力信号が送られる。今回は軸歪が 2×10^{-3} 増加する毎に写真撮影をおこなった。

試験では、まず、試験片の上下に同径の鋼製円柱を密着させた後に、全体を熱収縮性チューブで覆った。その後、鋼製円柱とチューブとの隙間に瞬間接着剤を流し込み、硬化を待った。組み立てたベッセルを試験機上に置き、空気抜きをおこなった後、零点の調整をおこなった。周圧を設定値まで増加させ安定した後、载荷を開始した。周圧は 2.0 MPa および 7.8 MPa とした。歪速度は $10^{-5}/s$ 、 $10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$ の 3 通りとし、各条件下で 4 本ずつ試験をおこなった。

試験片の横変位は、コンピュータプログラムによる次のような画像処理から求めた。まず、メディアンフィルタにより画像のノイズを除去した後、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。その差の絶対値が最大となる点を試験片の端とした。つまり、横方向に関して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試験片の端の部分に黒色マーカで色をつけた。なお、撮影した写真はカラーであるが、今回は簡単に測定をおこなうために白黒画像に変換をおこなった。

4. 試験結果

今回おこなった試験では試験片の変形がかなり大きくなったが、応力は初期断面積を、軸歪と横歪は初期長さを基準とした微小変形の式を用いた。また、原則として、軸歪は縮む方向を、横歪は伸びる方向を正としたが、図-2 では見やすいように横歪は縮む方向を正としてある。

各周圧下で得られた標準的な軸応力-軸歪曲線を図-2 に示す。いずれの曲線も歪速度 $10^{-4}/s$ での結果であり、応力、歪とも周圧のみを加えた時点での値を 0 とした差応力、差歪である。軸歪は差動変圧器で測定した値である。図には、三軸圧縮試験に先がけておこなった一軸圧縮試験の結果も示した。周圧 7.8 MPa での強度は一軸圧縮強度の約 2.2 倍、周圧 2.0 MPa での強度の約 1.5 倍であった。周圧の増加とともに強度破壊点以降の応力の低下が小さくなっている。

図-3 には図-2 で示した三軸圧縮試験での連続写真の一部と、横変形の経時変化を示す。周圧が同じでも変形の様子は試験片毎に違うが、ここで示したのはその一例である。試験開始から軸歪が 0.07 に達するまでの変化を、軸歪が 0.01 増加する毎に示した。試験片の下部プラテンは固定されており、上部プラテンの下降とともに試験片が縮んでいく。図-3 上側には、初期の試験片の高さ方向における各地点で測定した、試験片の幅の半分値 (半径) の変化を示した。周圧 2.0 MPa では強度破壊点に相当する軸歪 0.01 程度までは横変形は小さいが、その後、試験片の中央付近の膨らみが顕著になる。軸歪 0.04 以降では右側上部と左側下部を結ぶ破断面も観察された。そのため、左右側面の形状はかなり異なっており、横変形の場所による違いが見られた。一方、周圧 7.8 MPa では軸歪 0.02 程度まで横変形は小さく、その後、試験片の下部の膨らみが顕著になる。明瞭な破断面の形成は観察されず、比較的等方的に樽状に膨らむ様子が見られた。ベッセルを改良することで試験片全体の観察と横変位

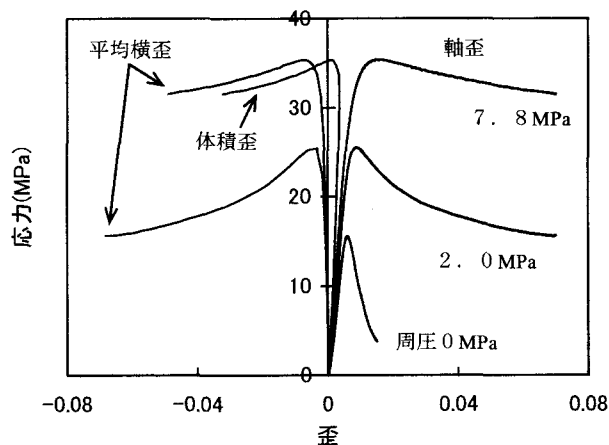
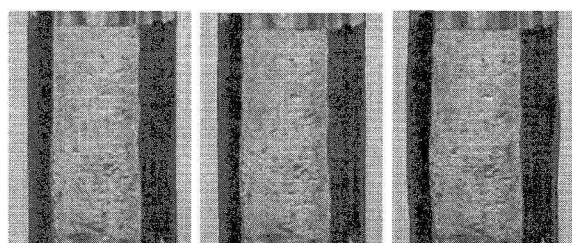
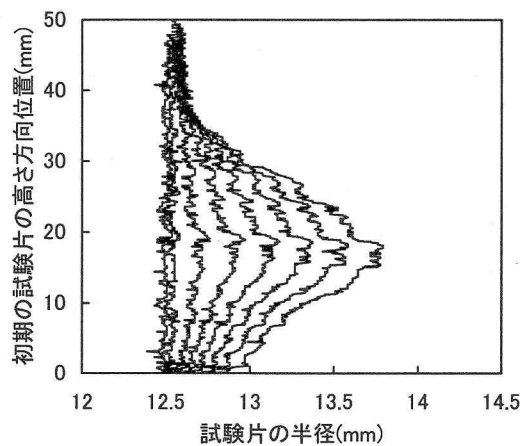
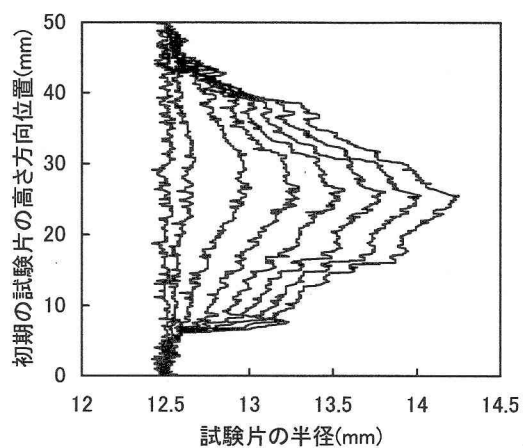
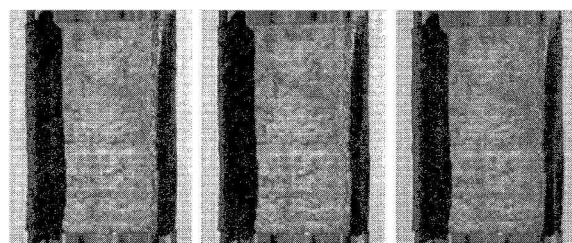


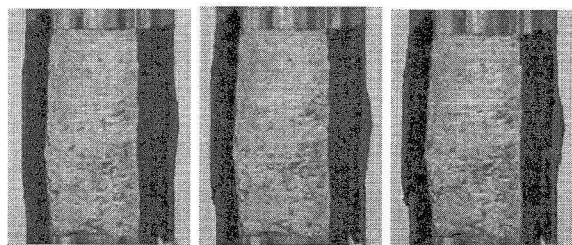
図-2 応力-歪曲線 (歪速度 $10^{-4}/s$)



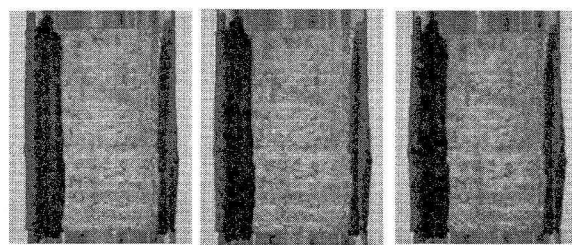
① 軸歪 0 ② 軸歪 0.01 ③ 軸歪 0.02



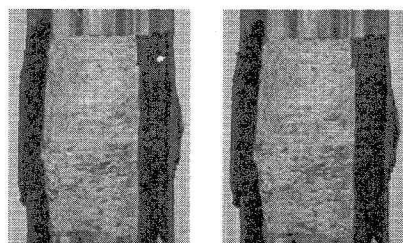
① 軸歪 0 ② 軸歪 0.01 ③ 軸歪 0.02



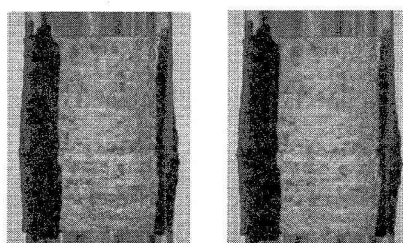
④ 軸歪 0.03 ⑤ 軸歪 0.04 ⑥ 軸歪 0.05



④ 軸歪 0.03 ⑤ 軸歪 0.04 ⑥ 軸歪 0.05



⑦ 軸歪 0.06 ⑧ 軸歪 0.07

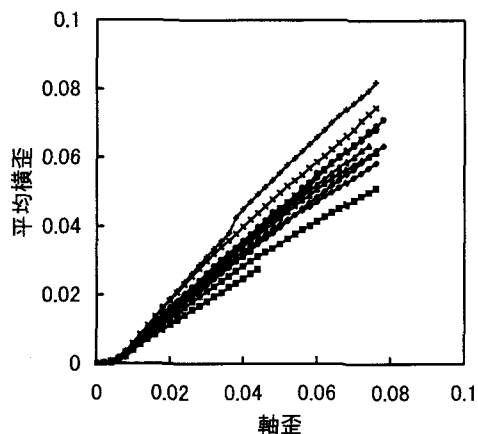


⑦ 軸歪 0.06 ⑧ 軸歪 0.07

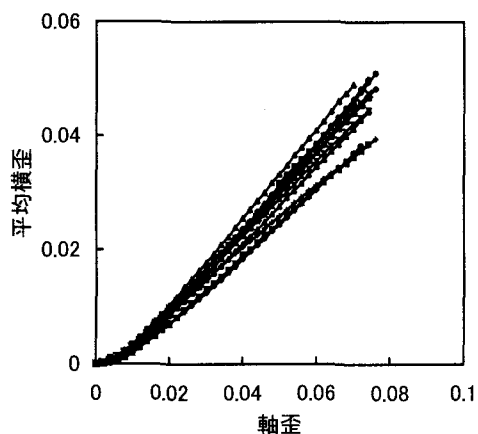
(a) 周圧 2.0 MPa

(b) 周圧 7.8 MPa

図-3 試験片の連続写真と横変形の経時変化

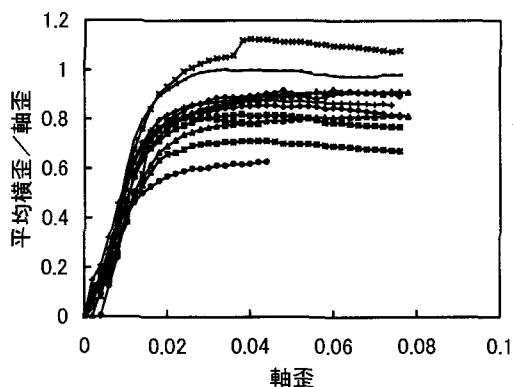


(a) 周圧 2.0 MPa

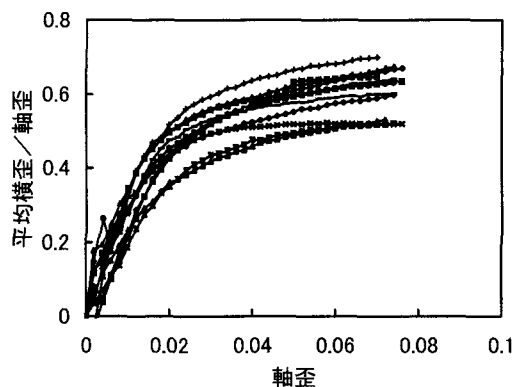


(b) 周圧 7.8 MPa

図-4 軸歪と平均横歪の関係



(a) 周圧 2.0 MPa



(b) 周圧 7.8 MPa

図-5 軸歪と(平均横歪/軸歪)の関係

の測定に成功した。

図-2には上端から下端までの横歪の平均値(平均横歪)を示した。平均横歪は、いずれの周圧でも強度破壊点までは軸歪よりも小さいが、その後は正負の符号の違いはあるものの軸歪と似たような傾向を示している。図-4には軸歪と平均横歪の関係を示した。軸歪は差動変圧器で測定した値である。歪速度の違いによる相違がほとんど見られなかったため、図には各周圧下でおこなったすべての結果を示した。いずれの周圧下でも、強度破壊点に相当する軸歪約0.01まではグラフは若干下に凸の曲線を描き、その後はほぼ直線的である。周圧2.0 MPaの結果ではばらつきが大きい、これは周圧が小さい場合は巨視的な破断面ができやすく、見る方向によって側面の形状が異なる試験片を一方向から撮影しているためと考えられる。図-5には弾性論のポアソン比に相当する(平均横歪/軸歪)と軸歪の関係を示す。軸歪として差動変圧器で測定した値を用いた。周圧2.0 MPaでは軸歪約0.01まではほぼ直線的に増加し、その後、傾きが小さくなっていく。軸歪が0.02をすぎたあたりから(平均横歪/軸歪)はほぼ一定となり、その値は0.6~1.1であった。一方、周圧7.8 MPaでは、軸歪約0.015まではほぼ直線的に増加した後、徐々に傾きが小さくなっていく。軸歪0.05での(平均横歪/軸歪)は0.45~0.65であるが、軸歪0.05を越えても若干増加傾向が見られる。

次に、試験片が図-3上側で示した曲線の縦軸まわりの回転体であると仮定して試験片の体積を求めた。周圧が小さいほど巨視的な破断面ができやすいため、この方

法で求めた体積と実際の値との差が大きくなると考えられる。そこで今回は、横変形が比較的等方的な周圧 7.8 MPa での写真から試験片の体積を求めた。図-2には体積歪の変化を示したが、ここでは見やすいように体積が減少する場合を正とした。強度の約 90% まではほぼ直線的に体積歪が増加していき、その後、直線からずれ始めダイラタンシーが生じる。強度破壊点付近で体積歪は 0 となり、その後も体積歪は減少していく。図-6には軸歪と体積歪の関係を示した。軸歪は差動変圧器で測定した値であり、体積歪は体積が増加する場合が正である。歪速度の違いによる相違が見られなかったため、図には

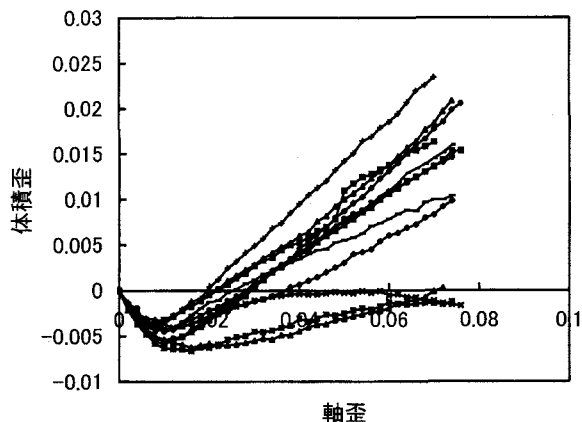


図-6 軸歪と体積歪の関係(周圧 7.8 MPa)

すべての結果を示した。試験開始後、体積歪は減少していき軸歪 0.01~0.015 で最小値をとった後、増加に転じる。それ以降はほぼ直線的に体積歪は増加していくが、傾きは試験片間でばらつきが大きい。軸歪 0.02~0.03 で横軸と交わる試験片が多いものの、軸歪 0.05 でも体積歪が負の値をとる試験片が 3 本あった。

5. まとめ

従来の三軸試験での体積変化に関する研究では、歪ゲージや変位計で軸歪と横歪を測定し、体積歪を(横歪×2-軸歪)として算出する方法⁴⁾や、周圧を加える液体のベッセル内への入出量から体積歪を求める方法⁵⁾などが採用されてきた。しかし、前者は変形が小さい場合にしか用いられないし、後者は試験装置が大掛かりなものになる。そこで今回は、試験片が等方的に膨らむと仮定して写真から体積歪を算出した。この方法は試験片が大変形をした場合も用いることができ、特別な装置も必要としない。しかし、巨視的な破断面ができやすい低い周圧下では、実際の値との差が大きくなると考えられる。今後は、写真から求めた体積と実際の体積との差について調べる予定である。また写真からの厳密な体積測定には、今回のように一方向からだけではなく、直交する二方向からの写真撮影などが有効であると考えられる。横変位の測定精度の向上なども必要であり、これらは今後の検討課題としたい。

なお、本研究の一部は、文部科学省 21 世紀 COE プログラム「機械システム・イノベーション」による補助を受けた。

参考文献

- 1) W. F. Brace, B. W. Paulding, Jr. and C. Scholz : J. Geophys. Res., Vol.71, No.16, pp.3939-3953, 1966
- 2) 大久保誠介・福井勝則・羽柴公博：資源と素材, Vol.118, pp.165-170, 2002
- 3) 羽柴公博・大久保誠介・福井勝則：第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.95-100, 2003
- 4) 山口勉・大久保誠介・エンリコ マラニーニ・成田孝：資源と素材, Vol.116, pp.91-96, 2000
- 5) J. M. Edmond and M. S. Paterson : Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.9, pp.161-182, 1972