

小型試験片による岩石の物性値の取得

ESTIMATING THE PHYSICAL PROPERTIES OF ROCK FROM SMALL SPECIMENS

羽柴公博*・大久保誠介**・福井勝則***

Kimihiro HASHIBA, Seisuke OKUBO and Katsunori FUKUI

In this study various testing methods under confining pressure were examined with small rock specimens. At first multi-stage triaxial compression tests were conducted to research the relationship between the peak strength and the confining pressure. Triaxial compression tests with the strain rate alternately switching at every predetermined strain interval were conducted to investigate the loading rate dependency of the peak strength. Then the new testing method, multi-stage triaxial compression test with the strain rate alternately switching, was developed. It was found that this method made it easy to estimate the physical properties of rock accurately and efficiently.

Key Words: Rock, Tuff, Multi-stage triaxial compression test, Loading rate dependency

1. はじめに

岩盤内構造物を建設するには、周辺岩盤の力学的特性を知る必要がある。その際、原位置試験が有効であるが、機器の設置やコストなどを考えると実施が困難な場合が多い。一方、岩石試験片を用いた室内試験では、比較的容易に強度や変形特性を調べることができる。しかし、岩石ブロックの運搬には時間やコストがかかるため、十分な量の試験片が確保できない場合も多い。

そこで本研究では、容易に持ち運びが可能な質量 1 kg 程度以下のブロックから採取できる小型試験片を用いて、岩石の物性値を取得する方法について検討した。まず、少数の試験片から強度と周圧の関係を調べるため、試験途中で周圧を段階的に変化させる多段階三軸圧縮試験を行った。また、強度の載荷速度依存性を調べるため、試験途中で歪速度を交互に切り換える三軸圧縮試験を実施した。さらに、物性値取得の効率化のため、歪速度を交互に切り換える多段階三軸圧縮試験を行い、1 本の試験片から強度の周圧依存性と載荷速度依存性を同時に調べる方法についても検討した。

2. 試験方法

原位置で採取した試験片は、同じ岩種でもサイトごと、ブロックごとに物性値がばらつくことが多い。そこで本研究では、物性値のばらつきが比較的大きい田下凝灰岩を試料岩石として用いた。小型試験片は直径 10 mm、高さ 20 mm の円柱形とした。また比較のため、直径 25 mm、高さ 50 mm の円柱形試験片（以下、中型試験片と称する）も同じブロックから作成した。試験片は作成後、2 週間以上、温度・湿度の管理された試験室内で自然

* 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

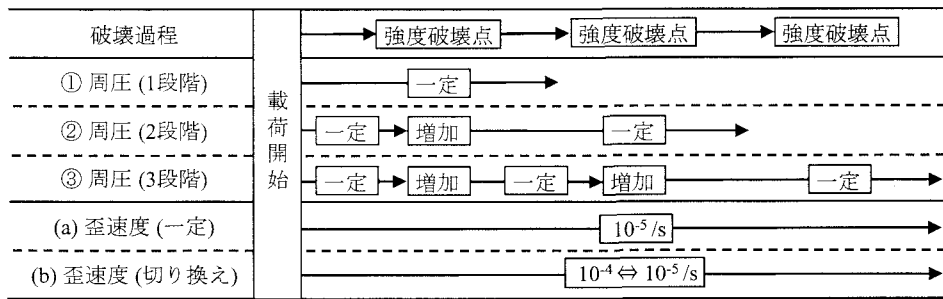
*** 正会員 工博 東京大学助教授 工学系研究科地球システム工学専攻

表－1 本研究で実施した試験

試験方法	試験片	手順（図1）
多段階三軸圧縮試験	小型	② or ③ + (a)
歪速度を切り換える三軸圧縮試験	小型/中型	① + (b)
歪速度を切り換える多段階三軸圧縮試験	小型	② + (b)

の周圧発生装置で加えた。三軸ベッセルとして可視化ベッセル¹⁾を用いたが、小型試験片では改良した可視化ベッセル²⁾を使用した。

小型試験片の三軸圧縮試験では、まず、試験片の上下に同径の鋼製円柱を密着させ、全体を厚さ 0.2 mm の市販のビニルテープで覆い、鋼製円柱とテープの隙間に接着剤を流し込んだ。組み立てたベッセルを試験機上に置き、空気抜きを行った後、変位の零点を調整した。周圧を設定値まで増加させ安定した後、載荷を開始した。なお、一軸圧縮試験はベッセルを用いずに実施した。中型試験片の三軸圧縮試験もほぼ同じ手順で実施したが、試験片のシールには熱収縮性チューブを用いた。本研究で実施した試験を表－1 に、試験手順の模式図を図－1 に示した。



図－1 本研究で実施した試験手順の模式図

3. 多段階三軸圧縮試験

少数の試験片から強度と周圧の関係を調べる方法として多段階三軸圧縮試験が行われてきている³⁾。従来の研究結果によると、周圧を 4 ～ 5 段階以下で変化させることで、強度の周圧依存性を適切に評価できるとされている⁴⁾。そこで本研究では、小型試験片を用いて、周圧を 2 段階、もしくは、3 段階で変化させる試験を行った。試験での周圧の変化は図－1 の②もしくは③、歪速度は同図の (a) とした。

図－2 には、試験で得られた応力－歪曲線のうち、周圧を 2 段階と 3 段階で変化させた場合の結果をそれぞれ一例ずつ示した。また、図には試験中の周圧の変化も示した。今回の試験では試験片の変形がかなり大きくなる場合もあったが、応力、歪ともそれぞれ初期断面積、初期長さを基準とした微小変形の式を用いた。なお、歪は周圧のみを加えた時点での値を 0 とした差歪である。#1 の試験片では、まず周圧を 2.0 MPa に保ったまま定歪速度 10⁻⁵ /s で載荷を行い、強度破壊点（黒丸 a）を少しすぎた地点で周圧を約 0.05 MPa/s の速度で 9.2 MPa まで増加させた。さらに、周圧を一定に保ったまま強度破壊点（黒丸 b）をすぎるまで載荷を続けた。#2 では周圧を 3 段階で変化させたため、3 種類の周圧に対応する強度破壊点が観察された（白丸 a, b, c）。

強度破壊点での最大主応力と最小主応力（周圧）の関係を示すパラメータとして、C（粘着力）と φ（内部摩擦

乾燥させてから試験に供した。

小型・中型試験片のいずれの試験でも、載荷装置として容量 500 kN のサーボ試験機を用いた。荷重は歪ゲージ式ロードセルで、変位は試験機に設置された差動変圧器式変位計で測定した。周圧は最大圧力 35 MPa

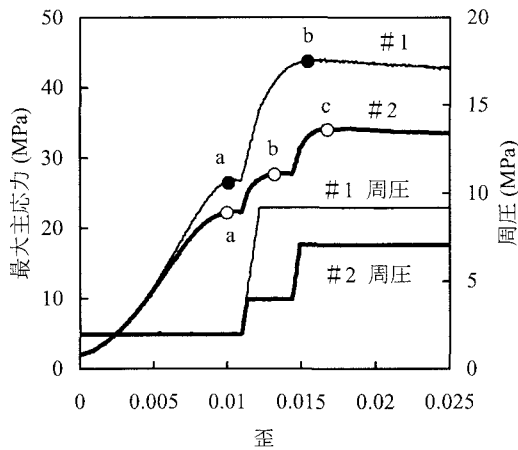


図-2 多段階三軸圧縮試験で得られた応力-歪曲線と周圧の変化

(試験片番号は表-2と一致)

●, ○: 強度破壊点

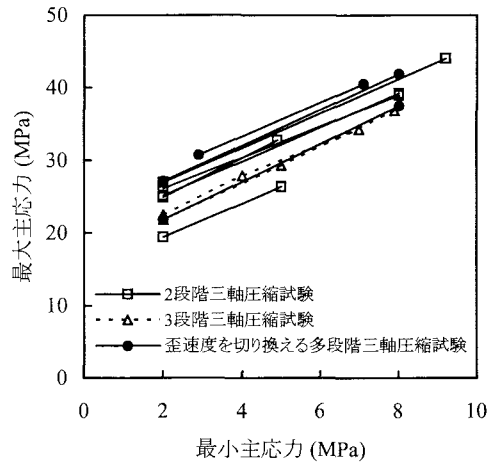


図-3 強度破壊点での最大主応力と最小主応力 (周圧) の関係 (歪速度 10^{-5} /s)

角) があり, Mohr-Coulomb の直線包絡線説で示される破壊基準は, これらを用いて次式で表される⁵⁾.

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{4}\right) + 2C \tan\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \quad (1)$$

ただし, σ_1 , σ_3 はそれぞれ強度破壊点での最大, 最小主応力である. 図-3 には, 多段階三軸圧縮試験で得られた, 強度破壊点での最大主応力と最小主応力 (周圧) の関係を示した. 図では 1 本の試験片から得られた, 2 種類, もしくは, 3 種類の周圧に対応するプロットを直線で結んだ. また表-2 には, 試験結果から得られた C と ϕ の値をまとめて示した. なお C と ϕ は, 2 段階三軸圧縮試験結果については図-3 の 2 点間を結んだ直線を, 3 段階三軸圧縮試験結果については 3 点の最小二乗法近似から得られた直線を (1) 式にあてはめて算出した.

表-2 には同じブロックから採取した小型・中型試験片を用いた

表-2 多段階三軸圧縮試験, および, 歪速度を切り換える多段階三軸圧縮試験から得られた, 歪速度 10^{-5} /s での粘着力 C と内部摩擦角 ϕ の値

試験片番号	周圧	歪速度	C (MPa)	ϕ (°)
小型試験片 #1	2段階	一定	7.2	24.0
小型試験片 #2	3段階	一定	5.9	23.5
小型試験片 #3	2段階	一定	7.5	21.3
小型試験片 #4	2段階	一定	6.7	23.6
小型試験片 #5	2段階	一定	6.0	27.2
小型試験片 #6	2段階	一定	4.9	23.4
小型試験片 #7	3段階	一定	5.2	25.8
小型試験片 #8	2段階	切り換え	7.1	24.9
小型試験片 #9	2段階	切り換え	5.1	26.4
小型試験片 #10	2段階	切り換え	7.9	23.5
小型試験片 (17本) ³⁾	1段階 (一定)	一定	5.3	28.5
中型試験片 (15本) ³⁾	1段階 (一定)	一定	6.5	25.6

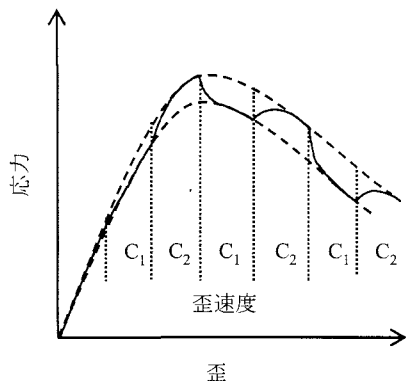


図-4 歪速度を切り換える試験の模式図
(ただし、 $C_1 < C_2$)

方法として、歪速度を交互に切り換える試験（図-1の① + (b)）を提案した。さらに羽柴他¹⁰⁾は、図-4に模式的に示すように、得られた応力-歪曲線のうち歪速度が遅い部分と速い部分をそれぞれスプライン補間で結ぶことで、1本の試験片から2種類の歪速度に対応する応力-歪曲線を取得することに成功した。本研究では、この試験法を小型試験片に適用し、中型試験片での結果と比較・検討を行った。

図-5には小型試験片を用いた試験で得られた応力-歪曲線を太線で示した。なお、応力、歪とも周圧のみを加えた時点での値を0とした。周圧は一定とし、歪速度は歪が 8×10^{-4} 増加するごとに 10^{-4} と 10^{-5} /s で交互に切り換えた。いずれの周圧下でも強度破壊点直前から、歪速度の増減にともない応力が増加・減少しているのがわかる。図中の細線は3次スプライン補間の結果であり、入力値として歪速度を切り換える直前の点の座標と試験開始・終了時の傾きを用いた。補間結果は、試験で得られた応力-歪曲線の遅い歪速度と速い歪速度に対応する部分をそれぞれ滑らかにつないでいる。すなわち、1本の試験片から、2種類の歪速度に対応する応力-歪曲線が得られることがわかる。これらの補間結果と次式を用いて算出した n の値を図-6に示した。

$$1 + \frac{\sigma_i}{100} = \left(\frac{C_2}{C_1} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (2)$$

ただし、 σ_i (%) は遅い歪速度 C_1 (/s) と速い歪速度 C_2 (/s) に対応するピーク強度の増加率である。図-6より、一軸応力下と周圧 2.0 MPa では、小型と中型試験片での結果がよく一致しているのがわかる。過去の研究で得られている田下凝灰岩の一軸応力下での n は 41 ~ 46 であり¹⁰⁾、今

周圧一定での三軸圧縮試験（1段階三軸圧縮試験）の結果も示したが、 C 、 ϕ ともに多段階三軸圧縮試験結果と似た値であった。すなわち、小型試験片を用いた多段階三軸圧縮試験により、 C と ϕ を精度良く求めることに成功したといえる。

4. 歪速度を交互に切り換える三軸圧縮試験

従来の研究結果により、多くの岩石で強度が载荷速度の $1/(n+1)$ 乗に比例することがわかっている⁶⁾。また、クリープ寿命の応力依存性⁷⁾や応力腐食によるき裂進展速度と応力拡大係数との関係⁸⁾も、上記の n を用いて表せることが報告されている。すなわち n は岩石の変形・破壊の時間依存性を表す重要なパラメータであると考えられる。大久保他⁹⁾は少数の試験片から強度の载荷速度依存性を調べる

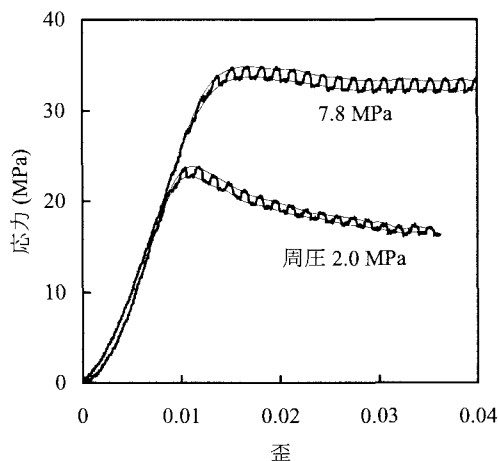


図-5 歪速度を切り換える三軸圧縮試験で得られた応力-歪曲線とスプライン補間結果（小型試験片）
太線：応力-歪曲線
細線：スプライン補間結果

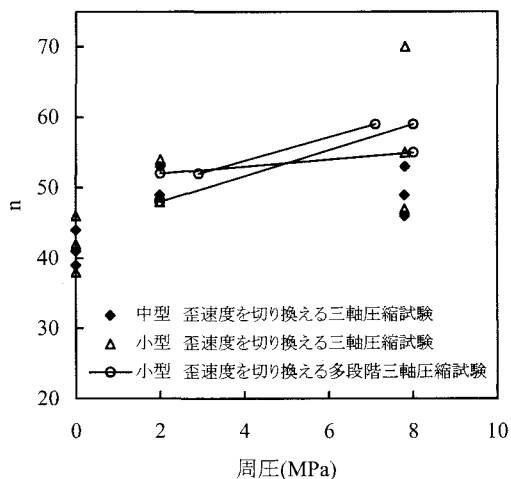


図-6 (2) 式中の n と周圧の関係

図-7には試験で得られた応力-歪曲線を太線で、スプライン補間で得られた近似曲線を細線で示した。また、試験中の周圧の変化も示した。まず、周圧 2.0 MPa での強度破壊点付近で歪速度の増減とともに応力が増加・減少を繰り返す様子が観察された。補間を行いやすくするため、強度破壊点を越えてからも周圧一定のままで載荷を続け、強度破壊点以降で応力の増減による山が一つできたところで、周圧を増加させた。周圧増加中も歪速度を切り換えたため、周圧の増加速度が一定になっていないが、この点は今後の課題と考えている。周圧が 8.0 MPa に達したところで再び周圧を一定にし、歪速度を切り換える試験を続けた。2 回目の強度破壊点以降も試験を続けた結果、残留強度の載荷速度依存性も確認できた。

スプライン補間は周圧を増加させる前と、増加させた後で別々に実施した。その結果、それぞれの部分で 2 種類の歪速度に対応する応力-歪曲線がうまく近似できた。図-3には歪速度 $10^{-5}/s$ に対応する強度破壊点での最大主応力と最小主応力の関係を、表-2には歪速度を切り換える三軸圧縮試験から得られた C と ϕ の値を示した。また、図-6には(2)式を用いて計算した n と周圧の関係を示した。まず図-3と表-2により、歪速度を切り換える多段階三軸圧縮試験から得られた C と ϕ が、過去に行われた 1 段階三軸圧縮試験や 3 章で行った多段階三軸圧縮試験の結果と、良く一致していることがわかる。また、 n についても 4 章で行った歪速度を切り換える三軸圧縮試験結果とほぼ等しい値が得られている。さらに、歪速度を切り換える多段階三軸圧縮試験で得られた n

回の一軸応力下での結果はこれらの結果ともほぼ一致している。一方、破壊が延性的な周圧 7.8 MPa では、小型試験片の結果は若干ばらつきが大きくなっている。原因の一つとして、小型と中型試験片とで異なるシール材を用いた影響が考えられる。しかし全体的には、少数の試験片から精度良く n が求められており、歪速度を切り換える試験が小型試験片にも適用可能であることがわかった。

5. 歪速度を交互に切り換える多段階三軸圧縮試験

3 章では C と ϕ を、4 章では n を小型試験片から取得することに成功した。そこで次に、1 本の試験片から、 C 、 ϕ 、 n を同時に取得する方法、すなわち、歪速度を切り換える多段階三軸圧縮試験（図-1の② + (b)）について検討した。

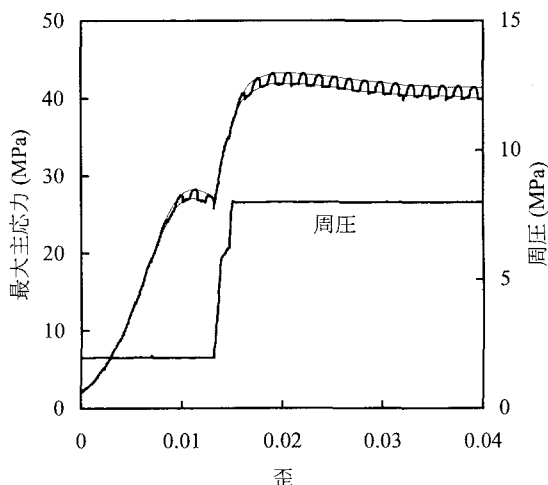


図-7 歪速度を切り換える多段階三軸圧縮試験で得られた応力-歪曲線とスプライン補間結果、および、周圧の変化
太線：応力-歪曲線
細線：スプライン補間結果

は周圧の増加とともに若干増加しており，田下凝灰岩の過去の研究結果¹⁰⁾や他の岩石での結果¹¹⁾と定性的にも合っている．すなわち，小型試験片の歪速度を切り換える多段階三軸圧縮試験により，強度と周圧の関係を表すパラメータ C と ϕ ，および，強度の載荷速度依存性を表すパラメータ n を 1 本の試験片から取得することに成功したといえる．

6. まとめ

岩石の物性値はサイトごと，ブロックごとに大きくばらつくため，その特性を定量的に調べるには，多大な労力とコストが必要になる．そこで本研究では，少数の小型試験片を用いて，岩石の物性値を精度良く効率的に取得する方法について検討した．3 章では強度と周圧の関係を表すパラメータを，4 章では強度の載荷速度依存性を表すパラメータを取得する方法について検討し，さらに 5 章では，これらのパラメータを 1 本の試験片から取得する方法を提案した．得られた結果は良好であり，従来，数十本の試験片が必要であった作業を効率化できる可能性がある．この方法により，岩石ブロックの運搬が困難な海外のサイトなどから，握りこぶしぐらいの大きさのブロックを持ち帰り，物性値を取得することが可能になると考えている．さらに，小さなボーリングコアから，物性値の異方性などを調べることに役立つと考えられる．

今回は田下凝灰岩を用いたが，今後，より多くの岩種で試験を行う予定である．歪速度を切り換える多段階三軸圧縮試験は試験手順が複雑であるため，歪速度を切り換える間隔や，周圧を増加させるタイミングの設定についても検討する必要がある．

謝辞

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．ここに記して，感謝の意を表する．

参考文献

- 1) 羽柴公博，大久保誠介，福井勝則（2004）：第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，247-252
- 2) 羽柴公博，大久保誠介，福井勝則（2004）：資源・素材 2004（盛岡）企画発表・一般発表（A）（B）講演資料，71-72
- 3) Kovari K. and Tisa A. (1975) : Rock Mechanics, 7, 17-33
- 4) 木村誠，谷和夫，岡田哲実（2002）：土木学会論文集，722，III-61，275-287
- 5) 大西有三，谷本親伯（1984）：わかりやすい岩盤力学（鹿島出版会，東京），53-56
- 6) Brace W. F. and Jones A. H. (1971) : J. Geophys. Res., 76, 4913-4921
- 7) Winkins B. J. S. (1987) : Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 24, 379-380
- 8) Lajtai E. Z. and Bielus L. P. (1986) : Rock Mechanics and Rock Engineering, 19, 71-87
- 9) 大久保誠介，福井勝則，木村有仁（2002）：トンネルと地下，33，45-50
- 10) 羽柴公博，大久保誠介，福井勝則：資源と素材，投稿中
- 11) 大久保誠介，福井勝則（1997）：資源と素材，113，561-564