

荻野凝灰岩の強度特性に及ぼす封圧の影響

Effect of Confining Pressure on Strength Characteristic of Ogino Tuff

高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI

黒川 幸彦 YUKIHIKO KUROKAWA

本研究では、荻野凝灰岩を試料として用い、封圧を種々変えた三軸圧縮試験を実施して荻野凝灰岩の強度特性に及ぼす封圧の影響を検討した。三軸圧縮試験における制御にはカスケード制御を採用し、破壊後の挙動も精度良く評価した。実験から得られた軸差応力-軸ひずみ関係から、荻野凝灰岩の強度は、封圧の増大に伴い大きくなることを示した。また、その破壊挙動が封圧の増大とともに脆性的挙動から延性的挙動へと遷移することを明らかにした。

キーワード：凝灰岩、三軸圧縮試験、封圧、強度特性

The study conducted a series of the triaxial compression tests on the Ogino tuff specimen under the various confining pressures to investigate the confining pressure effect on the strength characteristic of the Ogino tuff. The triaxial compression tests were controlled by the cascade method and the post-failure behavior could be evaluated with high accuracy. The deviator stress-axial strain relationships obtained from the tests showed that the strength of the Ogino tuff increased according to the increment of the confining pressure. The test results also indicated that the failure mode changed from the brittle failure to the ductile failure as the confining pressure increased.

Key Words: Tuff, Triaxial Compression test, Confining Pressure, Strength Characteristic

1. はじめに

近年、産業廃棄物処分、LPG および LNG 等の地下貯蔵、高レベル廃棄物の地層処分、ならびに輸送空間等としての地下空間利用の必要性が高まっている。このような地下岩盤の長期的な利用については、その設計や健全性の評価が非常に重要であり、そのための岩石のクリープ特性や強度特性の評価のための検討が実施されている。しかしながら、それらの多くは硬岩に関するものであり、堆積型の軟岩の長期安定性や強度特性に関する研究の実施例は少ない。

堆積型の軟岩の力学特性に関する既往の研究として、例えば、松木ら¹⁾は、間隙水圧が堆積岩の強度特性に与える影響を検討し、そのメカニズムを明らかにすることを目的として、荻野凝灰岩と来待砂岩を用いて三軸圧縮試験および圧裂引張試験を実施した。その結果、これらの堆積岩は、封圧の増大に伴い最大軸差応力が大きくなることを示した。また、片岡ら²⁾は、荻野凝灰岩を供試体に用い、封圧を種々変えた三軸圧縮試験を実施し、その力学的挙動について考察している。その結果、破壊挙動が封圧の増大に伴い脆性的な挙動から延性的な挙動に

遷移することを明らかにした。

これらは軟岩の力学特性に関する研究例であるが、岩石の力学特性に関する研究事例全般においては、その多くが硬岩に関するものであり、堆積型の軟岩の長期安定性や強度特性に関する研究の実施例は少ない。したがって、軟岩についてもさらなる基礎データの蓄積が重要であると考えられる。

本研究では、荻野凝灰岩を用いて封圧を種々変えた三軸圧縮試験を実施し、堆積岩の強度特性に与える封圧の影響について検討した。

2. 実験概要

(1) 岩石試料

実験に用いた岩石試料は、福島県耶麻郡高郷村産の荻野凝灰岩である。荻野凝灰岩はそのほとんどが火山ガラス片から構成され、その他の構成要素は石英、長石類、黒雲母等である。火山ガラスは続成作用および変成作用によって沸石化している。沸石はモルデン沸石（モルデナイト）が主で、多少の斜プチロル沸石（クリノプチロライト）を伴っている。変質した火山ガラスの周縁部に



(a) 円柱供試体



(b) 周面状況

写真-1 供試体の状況

表-1 荻野凝灰岩の物理特性

乾燥密度 (g/cm ³)	湿潤密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)
1.61	1.91	30.4

表-2 荻野凝灰岩の動的特性

P波速度 (km/sec)	S波速度 (km/sec)	動的 ポアソン比	動的 ヤング率 (MPa)
2.65	1.74	0.12	11,160

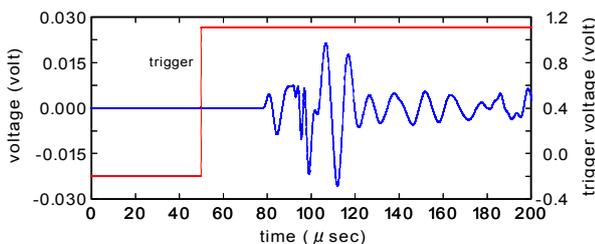


図-1 パルスと応答波形の時刻歴変化



写真-2 三軸圧縮試験装置 (MTS815)

は、微量のモンモリロナイトが生じており、火山ガラス間は沸石およびモンモリロナイトによって膠結されている¹⁾。一般的に、荻野凝灰岩は、石塀や灯籠などに使われている。

表-1 に、本実験に用いた荻野凝灰岩の物理的特性、表-2 に P 波速度、S 波速度、動的ポアソン比および動的ヤング率を示す。なお、表中の値は3試料で計測した値の平均値である。写真-1 に荻野凝灰岩の円柱供試体、およびコアスキャン装置を用いて撮影した周面状況を示す。

ここで、弾性波速度試験は JIS A 1127 に準じて以下のように実施した。すなわち、振動子には共振周波数が 1MHz、平面寸法が 20mm×20mm のセラミック製のものを用いた。これを供試体端面にエレクトロニックワックスを用いて貼り付けた。パルス波形に関して、出力電圧は 100Vp-p、繰返し時間は 100msec とした。受信波形に関して、アベレージングは 1,000 回実施し、サンプリング時間は 10nsec とした。データサンプリング数は、1 波形につき 5,000 データとした。なお、プリアンプ等は使用していない。一例として、パルスと応答波形の時刻歴変化を図-1 に示す。

表-1 より、荻野凝灰岩は、乾燥密度が 1.61g/cm³ と小さく、空隙率が約 30% と大きいことが特徴的である。

なお、P 波速度および S 波速度の供試体間のばらつきは 5% 以下と小さかった。

(2) 三軸圧縮試験の概要

a) 三軸圧縮試験装置

三軸圧縮試験装置には、写真-2 に示す MTS 社製の MTS815 を用いた。本試験装置は、図-2 に示すように載荷フレーム、軸アクチュエータ、圧力容器、封圧発生装置、間隙圧発生装置、制御装置および制御コンピュー

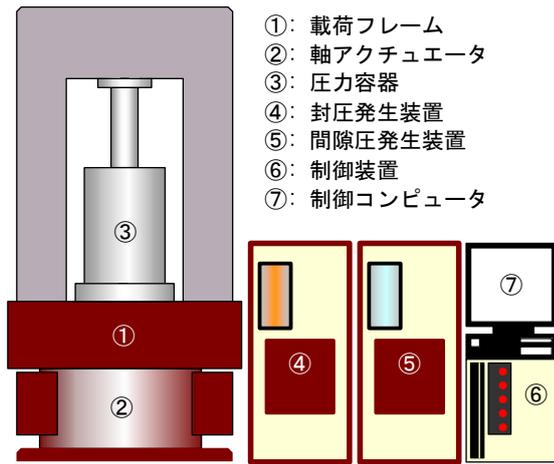


図-2 三軸圧縮試験装置 (MTS815) の構成

表-3 三軸圧縮試験装置 (MTS815) の諸元 (最大値)

軸荷重 (kN)	封圧 (MPa)	間隙圧 (MPa)	供試体寸法 (mm)
4,600	100	100	φ 100×200

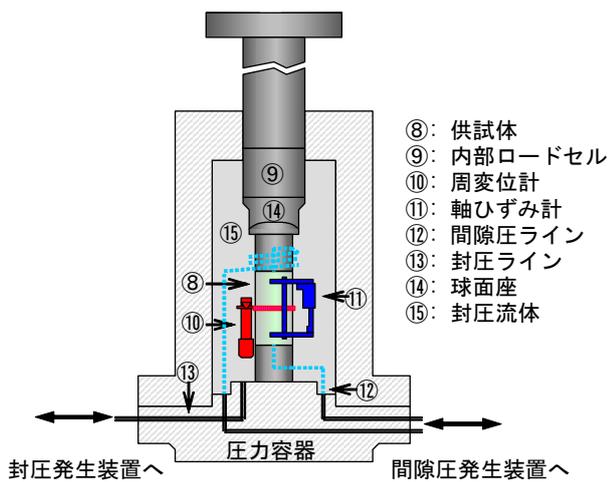


図-3 圧力セル内のセットアップ

タで構成される。制御系はデジタルサーボシステムで構成されているため、精度の高い制御が可能である。表-3に、本試験装置の諸元を示す。

図-3は、圧力セル内に供試体をセットした状況を模式的に示したものである。また、写真-3に、軸ひずみ計および周変位計を供試体に取り付け、これを圧力セル内に設置した状況を示す。

b) 制御方法

ISRMの指針³⁾などによると、岩石の一軸圧縮試験および三軸圧縮試験は、原則として応力速度が一定になるように制御する。この場合、破壊後領域（ピーク強度以降）において、試験機は供試体を一気に载荷してしまうため、この領域の完全な応力-ひずみ特性を把握するこ



写真-3 軸ひずみ計と周変位計の設置状況

とはできない。岩石試験で得られた変形特性や強度特性をもとに、地下岩盤構造物の設計が行われているが、解析手法の進展に伴って、岩石試験における破壊後特性などが重要となってきた。試験機の剛性が低い場合や、クラスIIの岩石を試験する場合は、破壊後領域で完全な応力-ひずみ特性が得られないため、周ひずみ速度制御⁴⁾、応力帰還法⁵⁾、AE制御⁶⁾などの試験法が開発された。これにより試験は可能となったが、応力速度が一定とはならないため、ISRMなどの指針に基づく従来の試験結果に強度などが一致しないという問題点がある。

そこで、木山ら⁷⁾は、従来の試験法を満足し、さらに破壊後変形挙動まで計測することを目的として、ダブルループ制御（以下、カスケード制御とよぶ）による三軸圧縮試験法の開発を行った。本実験は、このカスケード制御により実施した。以下に、その制御方法について述べる。

図-4(a)および(b)に、サーボループ制御とカスケード制御の制御系ブロック図を示す。

通常、破壊後の変形挙動を計測する場合は、供試体に巻き付けたチェーン式の周変位計の出力をフィードバックして、周ひずみ速度が一定となるように制御している。周ひずみ速度制御では、周変位計の出力がセンサーフィードバックとして入力され、ランプ波形がプログラムコマンドとして入力される。また、応力速度制御の場合には、ロードセルの出力がセンサーフィードバックとして入力され、プログラムコマンドとしては同様にランプ波形が入力される。

これに対して、カスケード制御は図-4(b)に示すようにループが二重になっており、例えば今回の実験では、

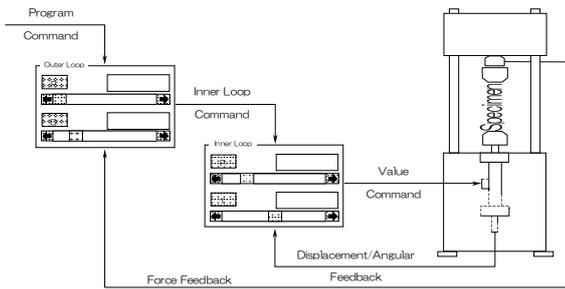
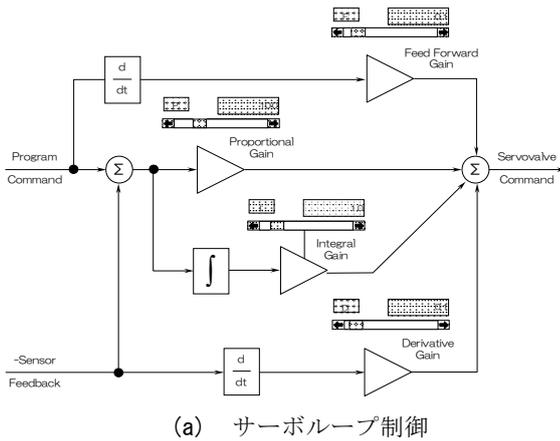


図-4 制御系のブロック図

インナーループに周変位計、アウターループに内部ロードセルの信号がフィードバックされる。この場合、基本的に、軸アクチュエータの制御はインナーループの周変位計によって制御されることになる。通常の周ひずみ速度制御のサーボコントロールにおいて、プログラムコマンドとして与える周ひずみ速度を速くすれば結果として応力速度も速く、周ひずみ速度を遅くすれば応力速度も遅くなる。すなわち、コマンドとして与える周ひずみ速度を試験中に変化させると、これに対応して応力速度も変化することになる。そこで、アウターループからインナーループにコマンドとして与える周ひずみ速度を、応力速度が一定になるように変化させれば、あくまで軸アクチュエータは周変位計で制御されながら、応力速度が一定となる試験が可能となる。

このカスケード制御により、ピーク強度までは応力速度が一定に制御される。そして、ピーク強度を超えると応力速度を一定に制御できなくなり、アウターループはインナーループに対して、最大の周ひずみ速度を要求して試験が進行する。したがって、きわめて短い時間で破壊後の制御は進行するが、あくまで周変位計の信号により制御されるため、破壊後の変形挙動が観測することが可能となる。

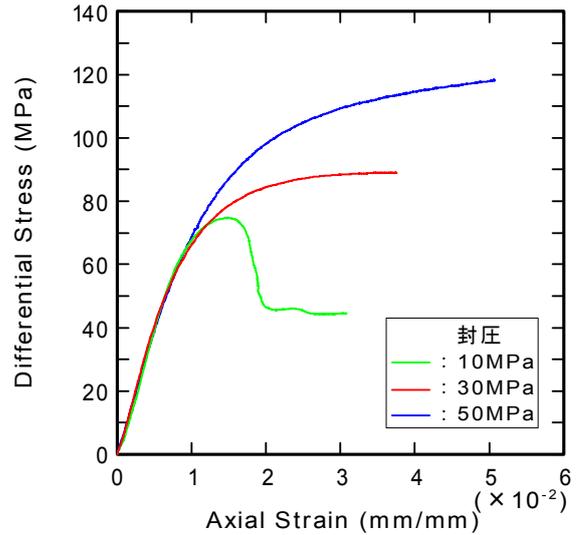


図-5 軸差応力-軸ひずみ関係

c) 供試体概要と試験手順

供試体には、温度 50℃の乾燥炉の中で十分に乾燥させた試料を用いた。供試体は円柱形状で、その寸法は各供試体で若干異なるものの、ほぼ直径 30mm、高さ 75mm である。

試験手順は、以下のとおりである。まず、供試体に上下エンドキャップをセットし、テフロン製の熱収縮チューブで全体を被覆した。次に、これを圧力容器内にセットし、軸荷重 0.3~0.5kN を載荷した状態で圧力容器の蓋を閉じ、封圧流体を注入した。その後、封圧を 0.1MPa/sec の昇圧速度で所定の値まで昇圧し、約 1 時間保持した。なお、昇圧時に断熱圧縮により温度が上昇するが、ここで 1 時間保持することにより供試体温度を室温 (約 25℃) まで戻し、載荷試験中に温度変化が生じないように留意した。

その後、載荷速度 100MPa/hr で前述したカスケード制御による載荷試験を実施した。なお、設定した封圧は、10MPa、30MPa および 50MPa である。

3. 実験結果

(1) 軸差応力-軸ひずみ関係

図-5 に、軸差応力-軸ひずみ関係を示す。図より、封圧 10MPa の結果は、軸ひずみが 1.5% で軸差応力が最大値 74.7MPa を示し、その後軸ひずみの増大に伴い軸差応力が急激に低下するという脆性的な挙動を示している。軸差応力低下直後である軸ひずみ 2% における強度は 46MPa 程度であり、さらに載荷を進めても軸ひずみの増大に伴う軸差応力の明確な低下は認められず、軸ひずみ 3% における残留強度は 45MPa であった。供試体の破

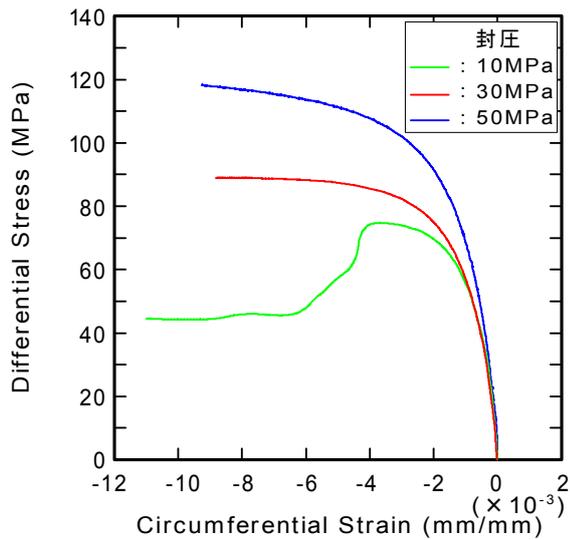


図-6 軸差応力-周ひずみ関係

壊状況は、明確なせん断破壊面が生じるものであった。これに対して、封圧 50MPa の結果は、軸ひずみの増大に伴い軸差応力も増大するという延性的な挙動を示すことが明らかである。供試体の破壊状況も封圧 10MPa の場合とは異なり、供試体上下部位置に破碎帯が生じ、ここに集中的に割れ目が多数形成されるものであった。一方、供試体中央部には明確な変化は認められなかった。封圧 30MPa の結果は、封圧 50MPa の結果と同様に延性的な挙動となるが、軸ひずみの増大に伴う軸差応力増加の割合が、封圧 50MPa の場合と比較して小さいことが認められた。

前述した片岡ら²⁾は、荻野凝灰岩を供試体に用い、封圧を 0.1MPa, 5MPa, 10MPa, 20MPa, 40MPa, 60MPa および 80MPa と段階的に変えた三軸圧縮試験を実施し、その力学的挙動について考察した。その結果、軸差応力-軸ひずみ関係から、封圧 20MPa まではひずみ軟化型の脆性的な破壊挙動となり、封圧 40MPa 以上ではひずみ硬化型の延性的破壊挙動となることを示している。このことは、本実験結果と整合するものである。また、軸差応力-軸ひずみ関係が、封圧 40MPa までは封圧の増加に伴い同一の軸ひずみに対して軸差応力が大きくなる、すなわち、軸差応力-軸ひずみ曲線の位置が高くなる履歴形状となるのに対し、封圧 60MPa ではこの関係が逆転することを示している。本実験結果における軸差応力-軸ひずみ関係は、封圧の増大に伴い軸差応力が大きくなる履歴曲線となっており、このような逆転現象は認められない。

この差異の要因の一つとして供試体の含水状況の違いが考えられるが、文献においては供試体の含水状況は不明である。

ここで、供試体の含水状態が強度特性に与える影響について、瀬良田ら⁸⁾は、珪藻土（空隙率=71.7%）、大谷石（空隙率=42.5%）およびペレア砂岩（空隙率=18.3%）等の堆積軟岩を対象として封圧を種々変えた三軸圧縮試験を実施し、湿潤試料と乾燥試料での強度特性の差異を調べた。その結果、堆積軟岩のような特に空隙率の大きな岩石では、湿潤試料と乾燥試料を比較した場合、強度は約 10%~50%程後者の値が大きいことを示している。また、松木ら¹⁾は、荻野凝灰岩の湿潤試料と乾燥試料を用いた一軸圧縮試験および三軸圧縮試験を実施し、大気圧下における湿潤試料の最大軸差応力が、乾燥試料のその 60%まで低下することを示している。これらのことから、供試体の含水状態によって強度特性が大きく異なることがわかる。

本研究では、乾燥状態の供試体を対象としていることから、今後湿潤状態の試料を用いた実験も行い、含水状態が強度特性に与える影響についても明らかにする必要があると考える。

以上のことから、荻野凝灰岩の破壊挙動は、封圧の増大とともに脆性的挙動から延性的挙動へと遷移することが明らかとなった。片岡ら²⁾は、前述した実験結果から、荻野凝灰岩の封圧の増大に伴う強度の増加が通常の岩石と比較してあまり大きくなく、その原因がこの破壊挙動によるものと考察している。本実験結果も、これに整合するものである。

(2) 軸差応力-周ひずみ関係

軸差応力-周ひずみ関係を図-6 に示す。脆性的な破壊挙動を示す封圧 10MPa の結果は、周ひずみが 0.38%で最大軸差応力に到達し、その後軸差応力の急激な減少とともに周ひずみが増大している。一方、延性的な破壊挙動を示す封圧 30MPa および 50MPa の結果は、封圧 10MPa のそれと比較して、周ひずみ発生量が小さい。これは、封圧 10MPa では明確なせん断破壊面でのすべりが生じたのに対し、他の封圧における破壊挙動がそのようなすべり面が生じていないことに起因するものと考えられる。

(3) 軸差応力-体積ひずみ関係

図-7 は、軸差応力-体積ひずみ関係を示したものである。封圧 10MPa の結果をみると、体積ひずみは軸差応力の増大に伴い直線的に収縮側に増加する。そして、最大軸差応力到達後は、体積ひずみがそれほど変化しない状態で軸差応力が急激に減少するという挙動となっている。一方、封圧 30MPa および 50MPa の結果は、いずれも軸差応力の増大に伴い収縮側の体積ひずみが漸増する

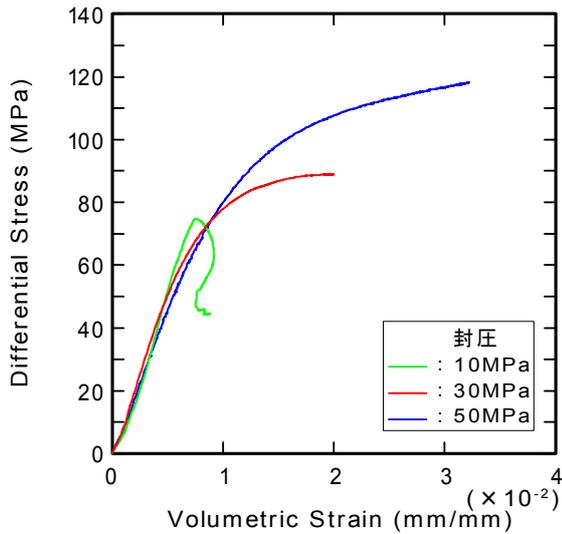


図-7 軸差応力-体積ひずみ関係

という挙動を示している。

4. おわりに

当社では、1992年にMTS815を導入以来、さまざまな岩石試験を行ってきた。

今回、堆積岩の強度特性に与える封圧の影響を明らかにすることを目的とし、荻野凝灰岩を用いて封圧を種々変えた三軸圧縮試験を実施した。

以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- ① 荻野凝灰岩の強度は、封圧の増大に伴い大きくなる。
- ② 荻野凝灰岩の破壊挙動は、封圧の増大とともに脆性的挙動から延性的挙動へと遷移する。
- ③ 脆性的な破壊挙動を示した封圧 10MPa の周ひずみの発生量は、延性的な破壊挙動を示す封圧 30MPa および 50MPa のそれよりも大きい。
- ④ 封圧 10MPa の場合、体積ひずみは軸差応力の増大に伴い直線的に収縮側に増加する。そして、最大軸差応力到達後は、体積ひずみがそれほど変化しない状態で軸差応力が急激に減少する。
- ⑤ 封圧 30MPa および 50MPa における体積ひずみは、いずれも軸差応力の増加に伴い収縮側に増大する。

謝辞：本研究は、独立行政法人産業技術総合研究所からの受託試験の一環として実施したものです。ご指導いただいた独立行政法人産業技術総合研究所 楠瀬勤一郎博士、奥山康子博士に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 松木浩二, 坂口清敏, 奥村清彦: 堆積岩の強度に及ぼす間隙水圧の影響, 資源と素材, Vol.114,

pp.895-900, 1998.

- 2) 片岡浩志, 佐野修, 荻野正二: 三軸応力下の荻野凝灰岩の挙動, 日本鉱業会研究業績発表講演会講演要旨集, Vol.1986, pp.5-6, 1986.
- 3) International Society for Rock Mechanics. Committee on Laboratory Tests. Suggested method for determining the uniaxial compressive strength of rock material. Document No.1, first revision, 1977.
- 4) Hironori Kawakata, Akiyo Cho, Tamotsu Kiyama, Takashi Yanagitani, Kinichiro Kusunose, and Mitsuhiko Shimada: Three-dimensional Observations of Faulting Process in Westerly Granite under Uniaxial and Triaxial Conditions by X-ray CT Scan. Tectonophysics, 313, pp.293-305, 1999.
- 5) 大久保誠介, 何昌栄, 西松裕一: 日本鉱業会誌, Vol.103, pp177-181, 1987.
- 6) Lockner, D. A., Byerlee, J. D., Kuksenko, V., Ponomarev, A. & Sidorin, A.: Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite. Nature, Vol. 350, pp39-42, 1991.
- 7) 木山保, 楠瀬勤一郎, 長秋雄, 今福伸博: 破壊後の応力-ひずみ特性まで計測できる新しい定応力速度三軸圧縮試験法, 土木学会年次学術講演会講演概要集第3部(A) Vol.53, pp.740-742, 1998.
- 8) 瀬良田礼志, 竹原孝, 及川寧己, 島田英樹, 松井紀久男: 封圧下における堆積軟岩の強度特性に関する実験的研究, 資源・素材学会春季大会講演集, No.1, pp.157-158, 2006.