

機関番号：12601

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360404

研究課題名 (和文) 三軸応力下における岩石試験片からの水の出入りの観察と透水係数の推定

研究課題名 (英文) Observation of in and out flow from rock specimens and estimation of the permeability under the triaxial compression

研究代表者

大久保 誠介 (OKUBO SEISUKE)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：90092155

研究成果の概要 (和文)：強度回復に伴う透水係数の変化を実験的に調べた。岩盤内空洞の長期挙動の評価に際しては、強度の回復とともに透水係数の回復 (減少) も重要である。試験片を厚肉円筒に入れて破壊させる。強度破壊点を過ぎると応力は次第に下がっていくが、厚肉円筒中の内壁に破壊した試験片が接触しだすと応力は上昇を開始する。この開始しだした直後における透水係数を測定したが、予測したとおりで、透水係数は非常に大きな値を示した。また、次第に強度回復していく過程における透水係数を測定したが、興味深いことに、透水係数は急激に低下していくことがわかった。

研究成果の概要 (英文)：Variation of the coefficient of permeability with the strength recovery phenomenon was researched experimentally. When investigating the long-term behavior of the underground structures, strength recovery and decrease of the coefficient of permeability are very important. The coefficients of permeability for the original rock specimen, fractured specimen in the progress of strength recovery, and the compacted specimen after the compaction test were investigated experimentally. The coefficient of permeability became small moderately with the increase of the axial load applied in the compaction test. Experimental results from this study showed that the decrease of the coefficient of permeability progressed with strength recovery, which is the preferable trend for the repositories in rock mass.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2009年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
総計	9,600,000	2,880,000	12,480,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：岩石, 可視化, 時間依存性, 三軸圧縮試験, 透水係数, 構成方程式, シミュレーション, 強度回復

1. 研究開始当初の背景

土を対象とした比較的低い周圧下での三軸圧縮試験は、透明な外筒を持った三軸ベッセル (周圧容器) でおこなわれてきた。しかしながら、強度が高い岩石では、周圧も高くする必要があるので、金属製の三軸ベッセルを使用して三軸圧縮試験がおこなわれてきた。金属製の三軸ベッセルの場合には、内部

の試験片を直接に観察することができないので、部分的な横歪を測定するだけでも困難であった。例えば歪ゲージを試験片に貼り付けて横歪を測定する方法があるが、歪ゲージの信号線を三軸ベッセルの外部まで引き出すことが困難な上に、歪が大きくなると歪ゲージがはがれたり破損する。三軸応力下での試験片の状況を直接観察することは、この分

野の研究者にとって長年の夢であったといえる。このような背景のもとに、申請者等は最近になって信頼性を増したエンジニアリング・プラスチックやガラスを使用して三軸ベッセルの外筒を作成することを考えた。種々検討した末に、アクリル製の外筒を作成して三軸圧縮試験を試みた。外筒の材質をアクリルに決めたときの一番の決め手は、三軸ベッセル内の油の屈折率と、アクリルのそれとがほぼ一致していたことである。実際に試用してみた結果でも、アクリル製の外筒を通して見える岩石試験片の形状のゆがみはほとんどなかった。また、三軸圧縮試験中の試験片に横歪はもちろん明瞭に観察できたし、亀裂の発展や高い周圧ではリューダースバンド（せん断帯）も観察できた。

2. 研究の目的

(1) 可視化ベッセルを用いた試験片からの水の出入りの観察

透明な外筒を持つ三軸ベッセルを試用してみたところではほぼ予期した通りの結果が得られたといえる。さらに、試験片上下端に透明な円筒形のエンドピースを配置して、予備試験を実施した。このエンドピースには、1個当たり3個ずつの小さな孔が空けられており、試験片から絞りだされる水量が直接観察できる。この予備実際で試したところでは、まず等方圧を加えた段階で各孔にはかなりの水が貯まるのがわかった。等方圧から軸方向に载荷をしていくと、水は試験片からさらに絞りだされていくが、ピーク強度付近に至ると試験片内部で亀裂が進展しはじめるので、かえって水が試験片内部に染み込んでいくことがわかった。またこの方法によれば、ピーク強度付近をはるかに越えた残留強度領域までなんの問題もなく水の出入りが観察できた。

これまでの経験を通して、この方法の利点は下記にあると予想している。

- ①水の出入りが明瞭に観察できるので、得られた結果の確度が高い（大幅な間違いが無い）。
- ②三軸ベッセルから長い管を通して圧力や流量を測定するのと比較して応答性がよい。
- ③色、混入物、気泡などが直接観察できるので応用範囲が広い。
- ④二層流や三層流の観察に好適である可能性がある。
- ⑤複数の孔が空けられるので、亀裂進展等ともなって生じる透水係数の異方性、不均一性の解明ができる。
- ⑥岩石の透水係数を測定できる。

(2) 本研究でおこなうこと

- ①から⑥のいずれも、まさに本研究を通じ

て検証し確立すべき事項といえるが、特に重点を置く"⑥岩石の透水係数を測定できる"について説明をしておく。申請者等は最近になって試験途中に歪速度を交互に遅速2段階に変速して実験をおこなうことを提案した。こうすることにより、歪速度を早くすると応力が上昇し、歪速度を遅くすると応力が減少することがわかった。この歪速度による応力の増減の程度は、試験片の粘弾性的な性質と深く結びついており、粘弾性的な性質が強い岩石ほど応力の増減の程度が大きいことが判明している。この方法を間隙水を含む岩石で実施して、試験中の試験片からの水の出入りの観測結果から岩石の透水係数を推し測ることを提案する。

以上はあくまでも推論であるが、計算機シミュレーションと実験室実験をまじえた検討によりその可能性を追求する価値は十分にあると考えている。もし成功したならば、三軸圧縮試験をおこないながら周圧下での透水係数を測定できることになり、しかもその透水係数は、初期段階（荷重が小さい間）から試験片にかなりの亀裂が入ったピーク強度付近、さらには残留強度領域に至る間の透水係数の変化を連続的に把握できる。

(3) 提案した方法の独創的な点と確立された後の応用分野

本研究では、可視化ベッセルを使用し、さらに歪速度交互切り替えを試験中におこなう。両者ともに申請者等によって最近になって提案・開発されたものである。本研究では、両者を組み合わせた実験をおこない、岩石試験片の透水係数を測定する方法を確立する所存である。なお、この方法によれば、初期状態から残留強度領域までの透水係数が連続的に得られる。さらに、透水係数に加えて、縦歪、荷重のデータが得られるとともに、横歪、亀裂の進展に関するデータも同時に得られることを強調しておきたい。

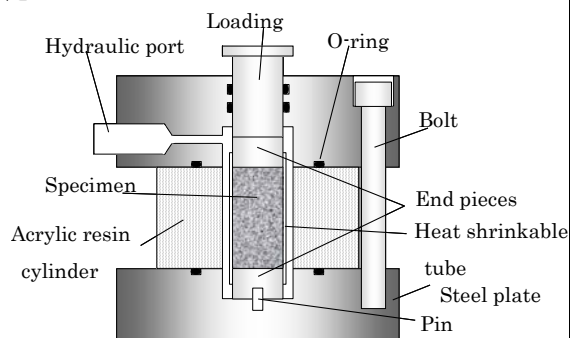
このような発想に基づく研究が過去になされた例を申請者等は知らず、独自性の高い提案と信じている。現在のところ考えている応用範囲は次のようなものである。

- ①岩石力学の基礎（破壊機構の解明、体積膨張・収縮(dilatancy)の解明、亀裂進展の状況とその結果生じる透水係数の異方性、構成方程式の開発、岩盤挙動の数値シミュレーション)
- ②資源開発（オイルサンド、オイルシェール、石炭等からの物質の出入り)
- ③環境保全（汚染した岩石、岩盤、地層からの汚染物質の出入り、汚染土壌の浄化方法の開発)
- ④その他（多孔質含油軸受け、無給油軸受けの特性解明、二酸化炭素炭層固定化技術の検証)

3. 研究の方法

(1) 現在の可視化ベッセルの状況把握と改良

参考までに現在使用している可視化ベッセルの概略図と写真を図1に示す。アクリル製外筒は、6本のボルト（外径 12 mm）で上と下の金属板を締め付けて固定した。設計周圧 10 MPa では、周圧が上下の金属板を押し広げようとする力よりも、ボルトの締め付け力が十分に大きいので、上下の金属板とアクリル製外筒とのあたり面は密着して油の漏れを防ぐことができる。さらに、安全性を高めるために、図に示すように、金属板とアクリル製外筒の間にオーリングを組み込んだ。上の金属板には油圧ポートがあって、この油圧ポートに周圧発生装置（油圧源）を接続した。また、上の金属板中央に設けた円孔に、直径 25 mm の押し棒を入れた。この押し棒で直径 25 mm、高さ 50 mm の岩石試験片に荷重を加えた。試験片への油の浸入を防ぐため、上下に同径の鋼製エンドピースを密着させた後、試験片とエンドピースを同時に熱可縮性チューブで覆った。さらに、鋼製エンドピースとチューブとの間に瞬間接着剤を流し込み、油の浸入を防いだ。試験中にせん断面の様子を観察するため、熱収縮性チューブも透明なものを採用した。試験片の位置決めは、下の金属板から突き出たピンでおこなった。



(a) 概略図



(b) 写真

図1 現在の可視化ベッセル

図2に田下凝灰岩の三軸圧縮試験中に撮影した写真を示す。アクリル製外筒の曲率の影響によって、横方向の寸法は実際の約 1.5 倍に拡大されるが、初期長さがわかっているので補正は容易である。変位を測定する際には、試験片の輪郭の検出を容易にするために、図に示したように、あらかじめ熱収縮性チューブの左右の側面に黒色マーカで色をつけた試験片を用いた。写真が小さいのでわかりにくいですが、試験片の表面に亀裂が徐々に入っていき、それに対応して試験片の側面が変形していくことが明瞭に観察できた。

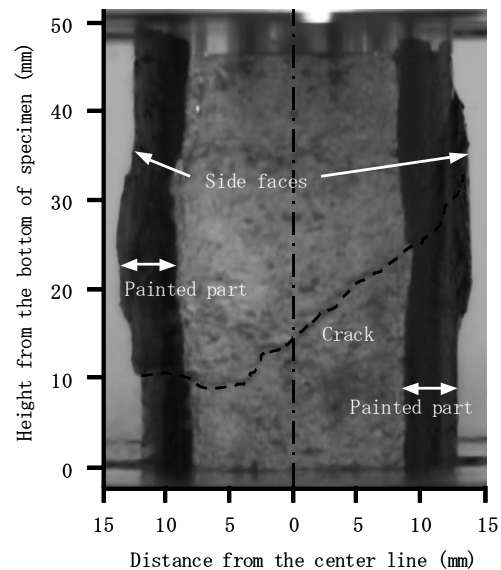


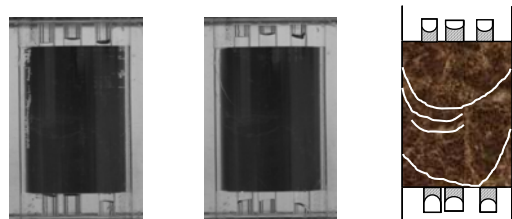
図2 田下凝灰岩の三軸圧縮試験中に撮影した写真

一つの試みとして試験片の上下端の透明なエンドピースに小さな穴を3個ずつあけて実験をした。その時に撮影した写真を図3に示すが、三軸圧縮試験に先立って所定の周圧を加えて静水圧状態としたときの写真を図3(a)に示す。この段階で既にかかなりの水が試験片から絞りだされている。図3(b)はちょうど強度破壊点に達した時の写真であるが、この強度破壊点までは試験片内部から水が染み出し、この点を越えると水が逆戻りして試験片内部に染みこんでいくことが多かった。また、興味深いことに(c)に模式的に示すように発生した亀裂と、各孔での染み出した水量との間にはなんらかの関係があるように思われた。

以上でこれまでにおこなった予備試験で把握した結果を述べたが、本格的な研究を開始するにあたって、次のような点を改良する予定である。

各部に加わる応力と部材の再検討をおこない使用出来る周圧を上げるとともに安全性を確保する。これまでも種々の計算や可視

化ベッセルの耐久試験を通じて最高使用周圧を10 MPaとして使用してきた。今回の試験にあたっては使用する材料の再吟味をまずおこなう予定である。特に透明な円筒の部材として、現在使用しているアクリルのほかに、ポリカーボネートやガラスも候補として検討する予定である。材料力学に基づいて吟味をした後に、出来上がった可視化ベッセルの耐压試験をおこない最高使用周圧を決める予定であるが、現在のところ数値目標をかつての倍の20 MPaとして各種検討を実施する予定である。



(a) 静水圧 (b) 強度破壊 (c) クラック状態での写真 点での写真と染み出した水量との関係
図3 幌延頁岩から染み出した水

次に検討すべき点は、上下のエンドピースに空ける孔の数、位置、径、深さである。これらは選択の余地が大きく最良値を選ぶのは困難と思われるが少なくとも次の点は十分に考慮して決める予定である。

- ①現在1つのエンドピースあたり3個の孔しかあけていないがこれではやや情報量がたりないので数を増やす予定である。ただし孔の径が小さくなり過ぎると毛細管圧が効いて来るのでこの点も配慮する。
- ②これまででは写真の撮影方向は1箇所（一方向）であったが、これでは孔の数を大きくした時に全部の孔が撮影できない。同期して複数の方向から撮影できるように改良する予定である。

(2) 数値シミュレーションをまじえた実験条件の設定

本研究の特色は、最近になって申請者等によって開発された硬岩用可視化ベッセルと歪速度交互可変試験とを組み合わせる新たな知見を得ようとするところにある。後者の歪速度交互切り換え試験の概念図を、図4に示す。1本の試験片から強度と応力-歪曲線の荷重速度依存性を調べるため、図4の下部に示すように、試験開始から歪が切り換え間隔 $\Delta \epsilon$ だけ増加するごとに、歪速度を遅い速度 C_1 と速い速度 C_2 の間で交互に切り換えた。図4上部には、予備的に行った試験の結果を太線で模式的に示した。黒丸で歪速度を増加させると応力が増加し、白丸で歪速度を減少させると応力も減少する。試験では、歪が一

定量増加するごとに歪速度を交互に切り換えるだけなので、コンピュータプログラムにより容易に試験がおこなえる。

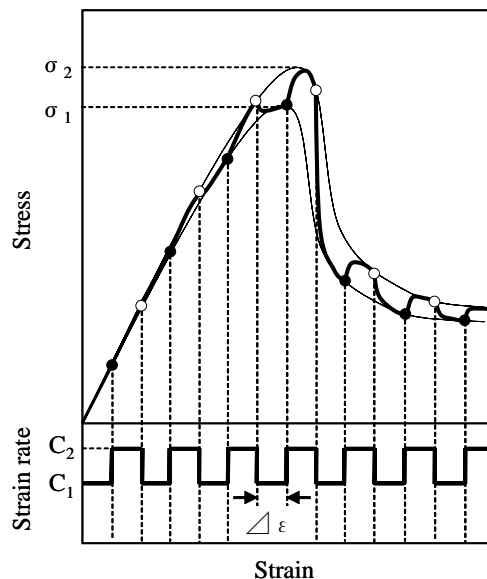


図4 歪速度交互切り換え試験の概念図

図5には、歪速度を切り換えた試験で得られた、田下凝灰岩の標準的な応力-歪曲線を示す。一軸圧縮試験（周圧0 MPa）では、試験開始から応力が強度の約50%に達するまで、歪速度の切り換えによる影響はほとんど見られなかった。その後は、歪速度の遅速にともない応力も増加・減少を繰り返した。応力の増減の程度は強度破壊点付近で最も大きく、強度破壊点以降では徐々に小さくなっている。応力が5 MPa以下まで低下しても歪速度依存性が確認できた。周圧2.0 MPaでも試験開始から応力が強度の約60%に達するまでは、歪速度の影響はほとんど見られなかった。その後は一軸圧縮試験と同様に、歪速度の遅速による応力の増減が見られるが、一軸圧縮試験に比べ、破壊が延性的であった。周圧7.8 MPaでも試験開始直後は、歪速度の切り換えによる影響はほとんど出なかった。この場合には、強度破壊点が明瞭ではなく、歪が 1.5×10^{-2} を越えると、応力-歪曲線は横軸とほぼ平行となった。

試験結果を見ると、歪速度の増加・減少によって明瞭に応力が変化しており、これは岩石のもつ荷重速度依存性を示すものと考えた。図4に模式的に示すように、2本の細線はそれぞれ歪速度 C_1 と C_2 で落ち着いたときの曲線をつないだものであり、これらを C_1 と C_2 で得られた応力-歪曲線の近似とみなしてデータの整理を試みた。この歪速度交互切り換え試験によれば、従来複数個（多くは10本以上）の試験片を用意して、1本ごとに歪速度を変えてやっと得られた応力-歪速度曲線の歪速度依存性が、たった1本の試験片

で、しかもより正確に求めることができる。

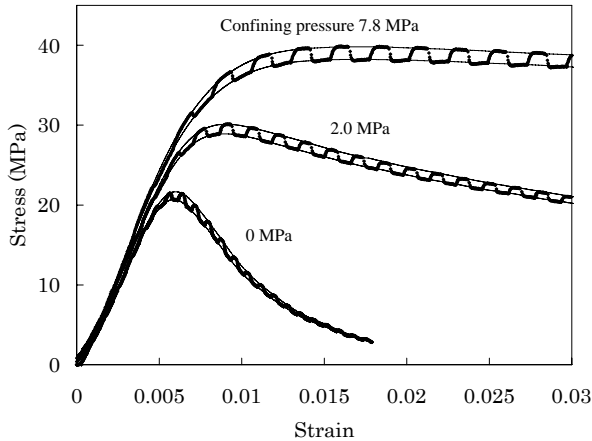


図5 歪速度交互切り換え試験結果の例

これまでの試験は乾燥した試験片を用いておこなってきたが、今回は湿った試験片を用いて歪速度切り換え試験を実施して、その時の試験片端面からの水の出入りから種々の情報を得ることを主目的の一つとして研究を進めることにする。ここで問題なのは、広い意味での試験条件の設定である。岩石の種類、エンドピースの孔の空け方、歪速度の遅速の比、歪速度の絶対値、歪速度を切り換えるタイミング、周圧などあまりにも多くの選択可能な条件がある上に、歪速度切り替え試験自体、ごく最近になって開発されたばかりであり不明な点も多い。やみくもに実験条件を少しずつ変えながら研究をおこなったのでは時間がかかり申請する研究期間内に得られる成果はわずかとなる可能性が高い。そこで、非線形粘弾性論に基づく構成方程式にある程度の改良を加えて計算機シミュレーションをおこない、その結果を参考にして条件を設定しつつ研究を進めていく予定である。そのおおまかな手順は次のように予定している。

- ①湿った試験片の挙動を正確に扱える構成方程式の開発
- ②計算機プログラムの開発と計算機シミュレーションの実施
- ③実験室実験の実施

(3) 透水係数の測定法

従来の方法で得られた透水係数とを比較・検討する予定である。その要項は下記の通りである。

- ①5種類程度の岩石について比較試験をおこない、新旧の方法から得られた結果を比較検討する。
- ②その結果をみて、本方法の適用範囲、精度を示す。
- ③精度を高め適用範囲を広げるための提案をする。期間内にできることはおこなうが、

時間に限りがあるので、将来に向けた提案をおこなう予定である。

(4) 様々な応用範囲の検討

今回提案した試験方式は、三軸圧縮応力下における試験中に①試験片の変形が直接観察できる、②試験片からの物質の出入りが直接観察できる、③試験片の時間依存性挙動が把握できる、等の特徴を有しており様々な用途に応用できる可能性がある。

4. 研究成果

大久保ら(2001)は、押し込み試験後の一軸圧縮強度を縦軸にとり、横軸を押し込み試験終了時の縦歪にとって試験結果を整理した。そして、”これを見るとだいたいの岩石も一つの下に凸の曲線上にのっている。これから即断するのは難しいが、軸歪を測定することで一軸圧縮強度を知ることができる可能性があるといえよう。”と述べている。

大久保らにならって、横軸を押し込み試験終了時の縦歪にとって透水試験結果を整理したのが図6である。押し込み試験終了時の縦歪の増加に従い、透水係数が大幅に減少していることがわかる。データの数が少なく確たることは言えないが、岩石ごとの違いをみると、同じ縦歪に対して、河津凝灰岩、本小松安山岩、田下凝灰岩、来待砂岩、三城目安山岩の順に透水係数が小さくなる傾向がみられる。

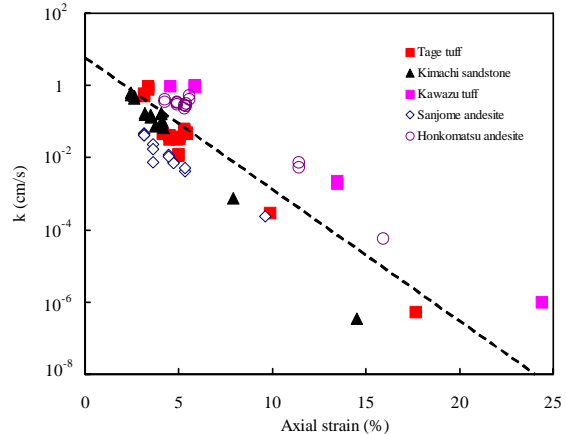


図6 押し込み最大荷重での軸歪と押し込み試験終了後の透水係数

岩盤内空洞の長期挙動の評価に際しては、強度の回復とともに透水係数の回復(減少)も重要である。試験片を厚肉円筒に入れて破壊させると、前述したように強度破壊点を過ぎると応力は次第に下がっていくが、厚肉円筒中の内壁に破壊した試験片が接触しはじめると応力が上昇する。この接触しはじめた直後における透水係数を測定した。予測したとおりで、透水係数は非常に大きな値を示した。その後、次第に強度回復していく過程

における透水係数を測定したが、興味深いことに、透水係数は急激に低下していくことがわかった。このように、強度回復過程での各段階の透水係数の求め方は、おそらく初めて実施されたものと考えられ、試行錯誤を重ねた後に、ある程度の精度をもったデータを収集することができたと考える。今後の追試験が必要ではあるが、今回の試験結果に関する限りでは、一旦破壊した（緩んだ）岩石は、条件が整いさえすれば強度、透水係数ともに徐々に回復するといえる。この結果は、長期間にわたる密閉性、隔離性、安定性、信頼性の確保が極めて重要な、核廃棄物の貯蔵施設の安定性評価に役立つものとする。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計20件）

- ① S. Okubo, K. Fukui, Applicability of the variable-compliance-type constitutive equation to rock breakage by excavation machinery., Tunnelling and Underground Space Technology, 査読有, Vol. 26, No. 1, 2011, pp. 29-37
- ② S. Okubo, K. Fukui, K. Hashiba, Long-term creep of water-saturated tuff under uniaxial compression., International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 査読有, Vol. 47, No. 5, 2010, pp. 839-844
- ③ 羽柴公博, 大久保誠介, 福井勝則, 岩石のピーク強度以前の時間依存性挙動を表す構成方程式とパラメータの取得方法, 資源・素材, 査読有, Vol. 126, No. 10, 11, 2010, pp. 560-568
- ④ 羽柴公博, 雷鳴, 大久保誠介, 福井勝則, 破碎した岩石の強度回復特性と载荷速度依存性, 資源・素材, 査読有, Vol. 125, No. 9, 2009, pp. 481-488
- ⑤ 大久保誠介, 福井勝則, 掘削機械による岩石破碎へのコンプライアンス可変型構成方程式の適用性に関する検討, 資源・素材, 査読有, Vol. 125, No. 8, 2009, p. 420-428
- ⑥ S. Okubo, K. Fukui, K. Hashiba, Development of a Transparent Triaxial Cell and Observation of Rock Deformation in Compression and Creep Tests, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 査読有, Vol. 45, 2008, pp. 351-361
- ⑦ S. Okubo, K. Fukui, X. Gao, Rheological Behaviour and Model for Porous Rocks Under Air-dried and Water-saturated Conditions, The Open Civil Engineering Journal, 査読有, Vol. 2, 2008, pp. 88-98
- ⑧ S. Okubo, K. Fukui, Q. Yang, T. Ochi, Uniaxial Tensile and Compressive Testing of Sprayed Steel Fiber-reinforced Concrete, JP Journal of Solids and Structures, 査読有, Vol. 2, No. 2, 2008, pp. 111-137

〔学会発表〕（計20件）

- ① 羽柴公博, 福井勝則, 大久保誠介, 含水飽和した岩石の一軸引張試験, 第40回岩盤力学に関するシンポジウム, 2011年1月13日, 土木会館（東京都）
- ② 羽柴公博, 大久保誠介, 福井勝則, 破碎した岩石の強度および透水性の回復, 平成22年度資源・素材学会秋季大会, 2010年9月13日, 九州大学（福岡県）
- ③ M. Lei, K. Hashiba, S. Okubo, K. Fukui, An Optical Testing Apparatus for Rock in Triaxial Compression and its Application, NDRM 09 Int. conference Sanya China, 2009年3月24日, Sanya, China.
- ④ 羽柴公博, 雷鳴, 大久保誠介, 福井勝則, 三軸圧縮試験中に岩石試験片を出入りする間隙水の可視化, 第12回岩の力学国内シンポジウム, 2008年9月2日, 山口大学（山口県）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大久保 誠介 (OOKUBO SEISUKE)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号：90092155

(2) 研究分担者

福井 勝則 (FUKUI KATSUNORI)
東京大学・工学系研究科・准教授
研究者番号：70251361

羽柴 公博 (HASHIBA KIMIHIRO)
東京大学・工学系研究科・助教
研究者番号：60456142

(3) 連携研究者