

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 8月26日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560481

研究課題名（和文） 地下深部における岩盤内の流体挙動に関する研究

研究課題名（英文） Study on flow behavior in rock mass of deep underground

研究代表者

吉田 秀典 (YOSHIDA HIDENORI)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：80265470

研究成果の概要（和文）：本研究では、既存あるいは新規発生不連続面の変形と透水特性の評価を目的とした装置を用いて、不連続性岩盤の巨視的な変形および透水挙動を把握すると同時に、デジタルカメラを用いて、任意の段階における供試体の画像の取得し、巨視及び局所的な変形の比較・検証を通して、変形および透水挙動のメカニズムの把握を試みた。その結果、不連続面を包含する供試体において除荷時に透水量増大が確認すると同時に、そのメカニズムを把握した。

研究成果の概要（英文）：

It is known that the deformation and flow properties of a rock mass are governed by the discontinuities involved in the rock mass. When a tunnel is excavated, the stress around the tunnel changes complicatedly. However, the changes of the deformation and flow properties under the complicated stress remain poorly understood. Thus, in this study, the flow-deformation coupling experiments are conducted, and the effects of the existence or non-existence of discontinuity, the opening of discontinuity and the stress change on the deformation and flow properties are examined. In consequence, it is clarified that the flow property of the discontinuous rock mass changes rapidly in loading or unloading to a specimen with a discontinuity.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：炭酸ガス，地中固定，岩盤，不連続面，透水-変形挙動，

1. 研究開始当初の背景

近年、我が国では CO₂ の深部帯水層貯留や高レベル放射性廃棄物の地層処分、メタンハイドレートの海底採掘と言った事業が注目されている。こうした事業では、地表あるいは海底面より地中深くに、立坑あるいはトン

ネルを掘削する必要がある。その際、掘削にともなって発生する周辺岩盤の応力変化が生じることが知られている。一般に、トンネルなどの掘削を行う場合、その放射方向の応力が解放され、逆に、周方向の応力が卓越するという偏差的な状態になる。こうした偏

差的な応力状態によって、不連続面の変形は増大し、同時に周辺岩盤の透水性が増大する可能性もあり、その場合、CO₂の地中固定や放射性廃棄物の処分、そして、メタンハイドレート採掘計画に影響を及ぼす可能性も否定できない。

前述の通り、CO₂の地中固定を行う際に、立抗の掘削およびCO₂の圧入における周辺岩盤の応力変化が考えられ、それにともなうCO₂の漏洩が危惧される。立抗の掘削が行われる際に、1箇所とは限らず、複数の立抗が同時に掘削される可能性が考えられ、この場合、1箇所の掘削よりも、岩盤には、より複雑な応力変化が生じる可能性がある。また、CO₂の圧入において、複数の圧入井から同時に圧入した場合、より複雑な応力変化が生じる可能性がある。したがって、単一の荷重パターンではなく、複数の荷重パターンにおいて変形特性および透水特性を把握する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、実際の掘削を意識し、荷重パターンを変化させて透水-変形連成実験を実施し、応力変化にともない変形特性、さらには透水特性にどのような影響を及ぼすかを把握すると同時に、荷重時および除荷時において着色した水を用いることで、透水状況の変化のメカニズムを把握することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 試験機の概要

本研究で実施する試験では、不連続面の変形にともなう透水性能の変化を把握するために、平面ひずみ圧縮試験と透水試験を同時に実施できる試験機を用いた。透水試験では供試体の流入側と流出側にペDESTALを設け、それぞれ流入側の水圧タンク及び流出側のビュレットに連結されており、流入側の水タンクに $P_1 \cdot P$ の圧力を、流出側のビュレットに P の圧力を加え、圧力差 $\cdot P$ によって透水を行う。また、流出側に設置した2本のビュレットの一方だけに排水を行い、2本の水位差を求めることによって透水量の測定を行う。

(2) 供試体の概要

本研究では、亀裂性岩盤における変形および透水特性を把握することを目的としているため、不連続面を含む供試体を作製する必要がある。本来、試験には、天然岩盤/岩石を供試体として用いることが好ましいが、天然岩盤/岩石は不均質性が強く、複雑な形状の亀裂を有している可能性が高い。こうしたことは試験結果の解釈を困難にする可能性があることから、本研究では人工材料で作製

した供試体を用いた。

使用した材料はセメント（普通ポルトランドセメント）、砂（豊浦標準砂）、水（水道水）、混和剤（マイクロウェア 202）である。また、本研究で使用する平面ひずみ圧縮試験機の容量が約100kNという要求項目によりモルタル供試体の配合比を決定した。

4. 研究の成果

ここでは、静的破壊試験で得られたピーク応力を基に決定したクリープ応力を用いて行った多段階荷重・除荷試験の結果を示す。

多段階荷重・除荷試験とは、荷重及び除荷を行うことで、クリープ応力を変化させて行うクリープ試験である。試験は、クリープ応力に達するまで一定のひずみ速度(0.002%/s)で単純荷重を行う。この試験は、トンネルなどの掘削前後で、周辺岩盤の応力が複雑に変化することに対応するもので、試験中における応力変化が、変形特性及び透水特性に及ぼす影響を把握することを目的としている。

パターン1は、ピーク応力に対して、50%、60%、70%、60%、パターン2は、70%、60%、50%、50%、パターン3は50%、60%、70%、70%という応力を、それぞれ6時間ずつ、合計24時間荷重している。

透水試験は、パターン1においては、蛍光塗料ウラニン（フルオレセインナトリウム）で着色した水（黄色）、赤色の蛍光顔料（FA-43、シンロイヒ株式会社）で着色した水および青色の蛍光顔料（FA-48、シンロイヒ株式会社）で着色した水を、また、パターン2及びパターン3においては、蛍光塗料ウラニンで着色した水（黄色）、赤色の蛍光顔料で着色した水を、それぞれ列記した順番で用いた。これら色のついた水を、荷重及び除荷の前後30分間、合計1時間、透水試験に用い、それ以外は、水道水を用いて透水試験を行った。

各パターンの試験で得られたクリープひずみと透水係数の経時変化の一例を図1～図6に示す。また、不連続面有りの供試体については、試験後にブラックライトで照射し、撮影したものを写真1～写真3に示す。前節と同様に、写真は左から注入面、流出面、側面の順番で掲載している。

(1) 不連続面無し

まず、変形挙動について考察を行う。パターン1（図1）においては、試験開始～6時間、12時間～18時間の一定荷重時において漸増傾向を示し、それ以外の一定荷重時は、ひずみの変化はほとんど確認できなかった。また、試験開始6～12時間と18～24時間の荷重応力レベルは同等であるが、間隙が潰れた分、除荷してもひずみが永久ひずみとして残っているため、18時間以降のひずみレベルが僅かに高くなっているものと思われる。

パターン 2 (図 2) においては、試験開始～6 時間の一定載荷時において漸増傾向を示し、それ以外の一定載荷時は、ひずみの変化はほとんど確認できなかった。試験開始～6 時間は、載荷応力レベルが最も高いため、比較的時間の圧縮量が大きいと考えられる。そのため、除荷後は大きな間隙の圧縮が発生せず、一定載荷時のひずみレベルが一定だったと考えられる。

パターン 3 (図 3) においては、試験開始～6 時間で漸増傾向、試験開始 6～12 時間、試験開始 12～16 時間でひずみレベルが一定の値を示している。また、不連続面無しにおけるクリープ試験や多段階載荷・除荷試験のパターン 1 など、70% 応力を最も高い載荷応力レベルに設定している試験の最大ひずみは概ね 0.5～0.6% 程度となっていることや、図 14 の変形挙動から、パターン 3 における試験開始 16～24 時間のひずみは 0.5～0.6% 程度だと推測される。

次に、透水挙動について考察を行う。図 1～図 3 に示すように、どのパターンにおいても、透水係数が終始 $1.0 \times 10^{-9} \text{ m/s} \sim 1.0 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ の値をとり、ばらつきが生じている。

パターン 1 およびパターン 2 においては、試験開始後、透水係数がわずかに低下し、 $1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s} \sim 1.0 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ の値でばらついている。なお、応力変化にともなう透水係数の変化は見られなかった。前述した通り、不連続面無しの供試体における主な水みちは、供試体内部の間隙や微小亀裂である。不連続面無しのクリープ試験において透水係数が上昇する原因として、間隙同士の連結や、微小亀裂の発生による透水性の上昇が考えられた。応力変化のパターンが異なるにもかかわらず、透水挙動がほぼ同じとなった理由として、載荷時および除荷時において、ひずみの変化にともなって起こる供試体内部の間隙状況の変化や、微小亀裂の発生および開口が、発生しなかった、または、発生したが水みちとして機能しなかったことが考えられる。

パターン 3 においては、 $1.0 \times 10^{-9} \text{ m/s} \sim 1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ の値を示し、ばらつきが生じている。なお、試験開始後 12 時間で、わずかに透水係数が上昇し、また元に戻っている。試験開始 12 時間に、60% 応力から 70% 応力に切り替えることによって、クリープひずみが増大し、間隙同士の連結や、微小亀裂が発生したことによって透水係数が増大したと考えられる。元に戻った原因として、発生した水みちが閉口したためと考えられる。

② 不連続面有り

まず、変形挙動について考察を行う。図 4 に示すように、パターン 1 においては、試験開始～6 時間の一定載荷時においてクリープ変形が漸増傾向を示し、それ以外の一定載荷

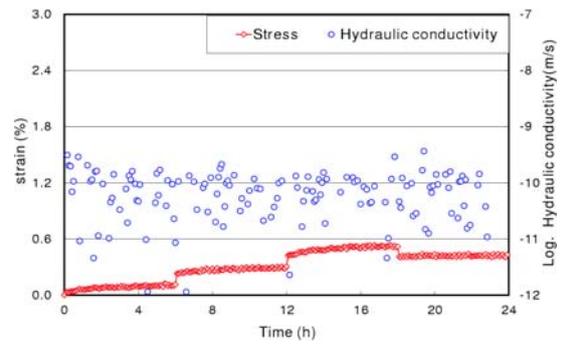


図 1 時間一クリープひずみ／透水関係 (不連続面無し, パターン 1)

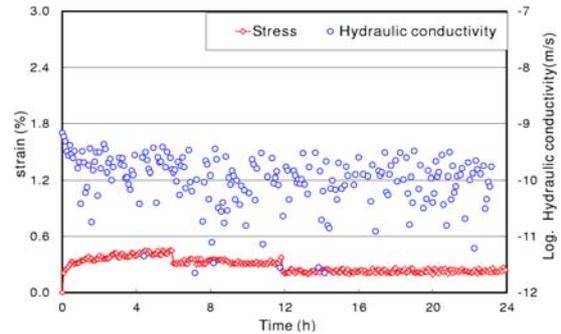


図 2 時間一クリープひずみ／透水関係 (不連続面無し, パターン 2)

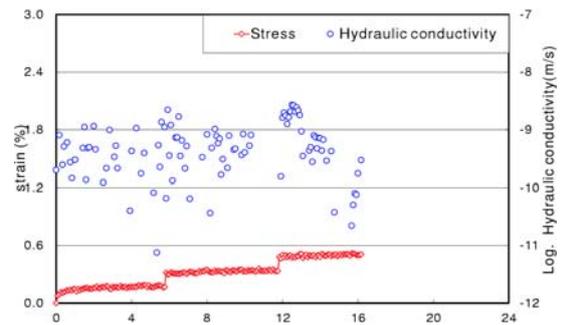


図 3 時間一クリープひずみ／透水関係 (不連続面無し, パターン 3)

時は、ひずみの変化はほとんど確認できなかった。また、不連続面無しの結果と比較すると、変形挙動および最大クリープひずみにあまり違いは見られなかった。本試験においては、最大クリープ応力を 70% に設定しているため、供試体そのものが破壊に至るような変形挙動を示すケースはあまり見られない。そのため、不連続面の強度が高く、噛み合わせがよい場合、その変形挙動は、不連続面無しの供試体の変形挙動に近くなると考えられる。これより、用いた供試体の不連続面の強度が高く、噛み合わせがよい供試体だったと考えられる。

図 5 に示すように、パターン 2 においては複雑な変形挙動を示した。試験開始～5 時間の一定載荷時においてクリープ変形が漸増傾向を示しており、その後、ひずみがおよそ 0.6% 急激に増加している。原因としては、載荷

応力によって、不連続面の噛み合っていた部分が、破壊されることでひずみが増大したと考えられる。また、試験開始6時間で除荷にともない、ひずみがおよそ0.4%急激に増加している。载荷応力を除荷することで、不連続面に対する垂直応力が低下し、不連続面の密着性が低下すると考えられる。不連続面の密着性が低下することにもない、内部摩擦角が低下し、結果的に不連続面のせん断抵抗力が低下すると推測される。本試験は高拘束圧下での試験であり、なおかつ、除荷しているため、すべり変形が生じるとは考えにくい。不連続面の凹凸や噛み合わせによってはすべり変形が生じうると考えられる。不連続面の滑動後は、再び不連続面が噛み合い、応力が発生し、ひずみの増加が見られなかった。なお、試験開始6～12時間と12～24時間の一定载荷時は、ひずみの変化はほとんど見られなかった。

図6に示すように、パターン3においては、試験開始～6時間の一定载荷時においてクリープ変形が漸増傾向を示し、それ以外の一定载荷時は、ひずみの変化はほとんど確認できなかった。このように不連続面無しの供試体とほぼ同様の挙動を示す場合は、不連続面の強度が高く、密着性が高いことで、不連続面無しの供試体に近い状態になっていると考えられる。

次に、透水挙動について考察する。パターン1では、初期の透水係数が $1.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ より僅かに大きい値を示した。そこから、終始、減少傾向にあり、最終的に透水係数は、 $1.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ よりわずかに小さい値を示した。写真1に示すように、不連続面の中央で黄色の発光が認められ、他の色は確認できなかった。また、流入面では、黄色の発光や赤色の発光が確認できるのに対し、流出面は供試体の中央で黄色の発光が見られた。このことから、試験序盤では不連続面の中央が水みちとして機能し、試験中盤には、不連続面の中央が水みちとしての機能が低下し、その結果、透水係数が減少していったと考えられる。

パターン2では、試験開始後1.5時間で透水係数が上昇している。そこから、0.5時間ほどで、 $1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 程に低下している。また、それ以降の透水係数は減少傾向にあり、試験終了直前で、 $1.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ まで減少している。一方で、写真2より、不連続面にはっきりとした着色は確認されなかった。原因として、色が混ざり合った、もしくは水道水によって色が薄まったことが考えられる。また、パターン2のように载荷応力が減少していく場合には主たる水みちが载荷応力に影響されにくいことが推測される。

パターン3では、終始 $1.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ の透水係数を示しており、ばらつきが見られた。また、応力変化による透水係数の変化が

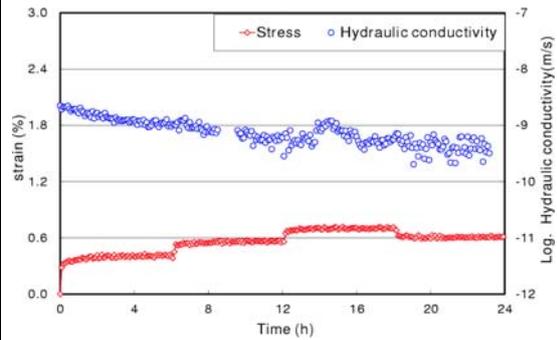


図4 時間-クリープひずみ/透水関係 (不連続面有り, パターン1)

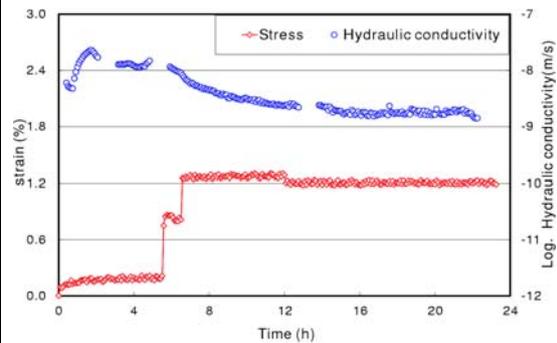


図5 時間-クリープひずみ/透水関係 (不連続面有り, パターン2)

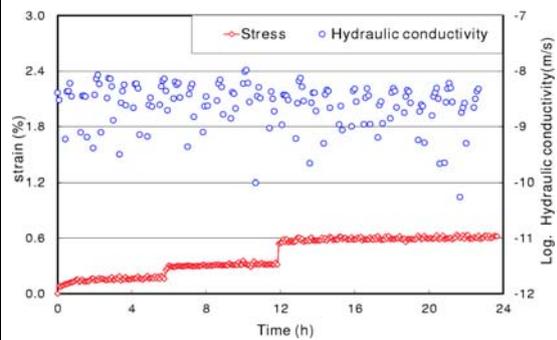


図6 時間-クリープひずみ/透水関係 (不連続面有り, パターン3)

見られなかった理由として、確固たる水みちが存在せず、様々な水の経路が存在したと推測される。応力変化によって、存在するすべての水みちが閉口することは無く、いくつかの水みちが残ることで、透水係数の変化が見られなかったと推測される。また、写真3で示すように、不連続面の中央で黄色の発光が確認でき、他の色は確認できなかった。このことから、試験序盤においては不連続面の中央が水みちとして機能していたが、ひずみの増大にともない、不連続面の中央における流路としての機能が低下したと考えられる。

(4) まとめ

本研究では、不連続性岩盤における透水一

変形連成挙動のメカニズムを把握するため、平面ひずみ圧縮試験と透水試験を同時に実施できる試験機を用いて試験を行った。変形試験と透水試験を同時に行うことのできる独自の試験機を用いて、実際の岩盤に代わる材料として人工供試体を作製し、不連続面を含むおよび含まない供試体に対して静的破壊試験、クリープ試験、多段階載荷・除荷試験を実施した。また、本研究では、複数の着色した水を用いて透水試験を行い、応力変化にともなう透水状況の変化のメカニズムの解明を試みた。

これらの試験から、以下の知見を得た。

- ・不連続面が有る供試体に関しては、不連続面が無い供試体とほぼ同様の変形挙動を示す場合と、応力変化にともなって、不連続面が比較的大きくクリープ変形する場合が見られた。また、その違いは不連続面の密着性が関係していると推測される。
- ・パターン1の序中盤やパターン3のように、載荷応力が増加していく傾向にある場合は、水みちとして機能していた領域が載荷応力によって閉口する様子が確認された。
- ・パターン2のように、載荷応力が減少していく傾向にある場合は、載荷応力によって水みちとして機能があまり損なわれなると推測される。

今後の課題としては、透水試験に用いる着色した水における色の選定がある。本研究で用いた青色の蛍光顔料で着色した水は、発光が弱く、黄色や赤色と比較して確認しにくかった。したがって、確認しやすく、かつ、混ぜても打ち消しあわないような色の組み合わせを考えていく必要があると考えられる。また、ほぼ同様の変形挙動をとった場合において透水係数に違いが見られることや、同じ載荷パターンにおいて、供試体ごとで変形挙動が違ふ場合があるため、今後も試験を行っていく必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計10件)

- ① 吉田秀典, 岡村隆一郎, 坂本達哉: 応力レベルの変化が不連続性岩盤の透水・変形連成挙動におよぼす影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集 C, Vol.69, No.2, pp.186-200, 2013.4
- ② 吉田秀典, 村宮諒哉, 荒木志帆, 瀬田剛: 格子ボルツマン法に基づく岩盤の亀裂内浸透解析, 岩の力学国内シンポジウム講演論文集, Vol.13, pp.485-490, 2013.1
- ③ Shiho ARAKI, Hidenori YOSHIDA, Hiroyuki NAKAGAWA and Kazuaki NAGAO: Study on the Influence of Material Inhomogeneity on Characteristics of Ultrasonic Wave Propagation, *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol.61,

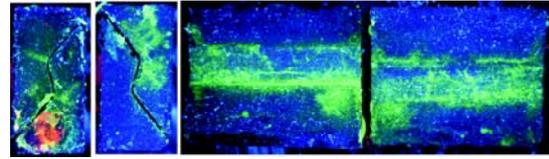


写真1 透水状況 (パターン1)

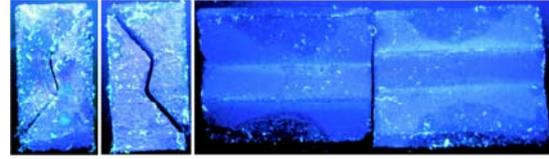


写真2 透水状況 (パターン2)

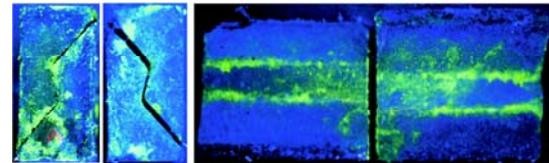


写真3 透水状況 (パターン3)

pp.145-150, 2013.2

- ④ 吉田秀典, 柳原久美, 森本はるか, 三馬寛之: 鉄筋による拘束を受けるコンクリートの乾燥収縮挙動に関する簡易解析手法の提案, 計算数理工学論文集, Vol.12, pp.55-60, 2012.12
- ⑤ 鎌村友美, 吉田秀典, 中川裕之, 長尾和明: 構造物の劣化評価における表面法の適用に関する数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.92-103, 2012.
- ⑥ 吉田秀典, 則包智彦: 画像解析手法による不連続面のクリープ挙動の把握, 計算数理工学論文集, Vol.12, pp.25-30, 2011.12
- ⑦ 村宮諒哉, 吉田秀典, 巽隆有: エコーチップ硬度試験による岩質材料の力学的特性の簡易評価に関する研究, 土木学会論文集 A2, Vol.67, No.2, pp.I_405-I_416, 2011.8
- ⑧ 西村拓馬, 吉田秀典: 不飽和浸透特性が岩盤斜面の安定性に及ぼす影響に関する数値解析的研究, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.125-135, 2011.3
- ⑨ 山野はるか, 吉田秀典, 檜垣勝久, 三馬寛之: 誘発目地の周辺に発生するひび割れに関する数値解析的検討, 計算数理工学論文集, Vol.10, pp.51-56, 2010.12
- ⑩ 吉田秀典, 則包智彦: 画像解析手法を用いた不連続面の変形・破壊挙動の把握, 応用力学論文集, Vol.13, pp.301-312, 2010.8

〔学会発表〕(計15件)

- ① 吉田秀典: 格子ボルツマン法に基づく岩盤の亀裂内浸透解析, 第13回岩の力学国内シンポジウム, 宜野湾, 2013.1

- ② 荒木志帆：超音波反射法による非破壊検査の可能性に関する数値解析的検討，第26回信頼性シンポジウム，高松，2012.12
- ③ 荒木志帆：劣化評価に対する反射法の適用に関する研究，第67回土木学会年次学術講演会，名古屋，2012.9
- ④ 荒木志帆：劣化が超音波伝播特性に与える影響に関する研究，平成24年度土木学会四国支部技術研究発表会，香美，2012.5
- ⑤ 坂本達哉：透水－変形連成試験における透水挙動と変形挙動のばらつきに関する研究，地盤材料試験・地盤調査の精度とばらつきに関するシンポジウム，大阪，2012.5
- ⑥ 香川友成：変形－透水連成挙動の把握を目的とした画像解析手法の有用性に関する研究，地盤材料試験・地盤調査の精度とばらつきに関するシンポジウム，大阪，2012.5
- ⑦ 荒木志帆：材料不均一性が超音波伝播特性に与える影響に関する研究，第61回理論応用力学講演会，東京，2012.3
- ⑧ 村宮諒哉：格子ボルツマン法に基づく岩盤の亀裂内浸透流に関する数値解析的研究，第61回理論応用力学講演会，東京，2012.3
- ⑨ 吉田秀典：画像解析手法による不連続面のクリープ挙動の把握，第12回計算数理工学シンポジウム，高松，2011.12
- ⑩ 村宮諒哉：エコーチップ硬度試験による岩質材料の力学的特性の簡易評価に関する研究，第14回応用力学シンポジウム，松山，2011.9
- ⑪ 西村拓馬：不飽和浸透特性が岩盤斜面の安定性に及ぼす影響に関する数値解析的研究，第57回構造工学シンポジウム，京都，2011.4
- ⑫ 山野はるか：誘発目地の周辺に発生するひび割れに関する数値解析的検討，第10回計算数理工学シンポジウム，新潟，2010.12
- ⑬ 西村拓馬：不飽和浸透特性が岩盤斜面の安定性に及ぼす影響に関する数値解析的研究，土木学会第65回年次学術講演会，札幌，2010.9
- ⑭ 堀家拓也：SEM-EDXを用いたベントナイトの変質メカニズムの解明に関する研究，土木学会第65回年次学術講演会，札幌，2010.9
- ⑮ 吉田秀典：画像解析手法を用いた不連続面の変形・破壊挙動の把握，第13回応用力学シンポジウム，札幌，2010.9

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ssce.eng.kagawa-u.ac.jp/~yoshida/>

6. 研究組織

研究代表者

吉田 秀典 (YOSHIDA HIDENORI)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：80265470

連携研究者

長谷川 修一 (HASEGAWA SHUUICHI)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：00325317