

平成21年 4月 1日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560478

研究課題名（和文）

材料の透水－変形連成挙動のメカニズム解明と数値解析モデルの構築

研究課題名（英文）

Clarification of mechanism for coupling behavior of water flow and deformation of material and development of its numerical method

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：

亀裂を含まない供試体および含む供試体に対して、拘束圧、供試体の配合、亀裂の形状などを変化させ、研究代表者および連携研究者にて独自に開発した試験機を用いて静的平面ひずみ同時透水試験および平面ひずみクリープ同時透水試験を実施した。また、試験時に CCD カメラを用いて亀裂の観察を行った。2 年またがる試験より、当該供試体に対する透水－変形のメカニズムを抽出し、それに基づいて数値解析モデルを構築した。さらに、構築モデルを用いて数値解析を実施した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：応用力学，計算力学，岩盤力学

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：

透水－変形連成挙動，新しい試験装置，廃棄物の地層処分，亀裂の発生，地盤材料

## 1. 研究開始当初の背景

2002 年に原子力発電環境整備機構が高レベル放射性廃棄物の処分場建設に向け、候補地選定のための概要調査地区の公募を開始し、また、2005 年には、九州電力が玄海原発で実施を目指すプルサーマル発電計画が国から許可され、地元自治体からも了解が得られるに至っている。こうしたエネルギー施設の稼動にともなって、低レベルから高レベル

に至るまで様々な放射性廃棄物が排出されることとなる。わが国では含有放射性廃棄物の濃度などの特性に応じて、地層処分、余裕深度処分、トレンチ処分、ピット処分を検討し、トレンチ処分やピット処分の一部については操業に至っている。地層処分については、対象となる廃棄物の放射能レベルが高くその処分の期間は長期に亘るため、岩盤の長期健全性の確保が課題となる。特に、核種が地

下水により生物圏に運搬される時間とその量によって安全性が評価されるため、力学性能だけでなく透水性能についても詳細に検討しておく必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、上記で示したような課題を解決するために研究代表者および連携研究者で開発した試験機を用いて、こうした材料における水一応力の連成現象に関する知見を集積し、放射性廃棄物の処分において問題となる「変形にともなう透水挙動」を解明することを目的とする。

## 3. 研究の方法

わが国では、高レベル放射性廃棄物を地層処分することで検討を行っているが、処分期間は千年を超えるため、超長期に亘る地層、とりわけ対象となる岩盤の健全性に関する議論が必要となる。しかしながら、室内実験あるいは原位置試験のみでその健全性を議論するには、期間が極めて長いことから限界もある。そこで、岩盤の長期的挙動について議論可能な数値解析手法の確立が急務となっている。

岩盤、とりわけ亀裂性岩盤の変形および透水特性は包含される亀裂に支配される。したがって、亀裂性岩盤に対する数値解析手法の構築には、亀裂の変形や透水に関するメカニズムを抽出する必要がある。そこで本研究では、亀裂性岩盤の水一応力連成実験を行うために開発された専用装置（特許公開番号：特開 2008-46086，発明の名称：透水試験機および透水試験方法）を用いて、現象の核となるメカニズムの把握を行うこととした。

具体的には、

- ・ 亀裂を含まない供試体に対する静的平面ひずみ同時透水試験
- ・ 亀裂を含む供試体に対する静的平面ひずみ同時透水試験
- ・ 亀裂を含まない供試体に対する平面ひずみクリープ同時透水試験
- ・ 亀裂を含む供試体に対する平面ひずみクリープ同時透水試験

という4つのケースについて、拘束圧などを変化させて試験を実施した。

本研究では、亀裂性岩盤における変形と透水性能の変化を把握するということが目的であるため、通常とは異なり、供試体に不連続面（以降、単に亀裂と称する）が存在する供試体を用意する必要がある。また、全ての試験を通じて天然亀裂を有する岩盤／岩石を実験供試体として用いるのが好ましいのかもしれないが、通常、天然亀裂は複雑な形状をしており、その表面における凹凸や摩擦の状態も一様ではない。こうした要因は、試験結果の解釈を困難とする可能性があるこ

とから、本研究では、天然の岩盤／岩石ではなく、石膏と砂を主体とした人工材料を用いた。また、亀裂の形状については、昨年度、正弦波の形状を有する単一亀裂を供試体に導入した結果、亀裂の山が圧壊や削り取られる現象が散見されたため、今年度は、こうした応力集中にともなう亀裂の圧壊や削り取られを避けるために、亀裂形状を三角波とした。三角波の場合についても、昨年度の正弦波と同様、亀裂の波長や振幅の大きさが供試体の変形や透水性能の変化にどのような影響を及ぼすかについて考察した(表1参照)。なお、透水試験については、試験中に蛍光染料を含む液体を流し、試験後にブラックライトを照射して流路の推定を実施した。

平成20年度は、試験供試体の亀裂部分の変形と巨視的な材料の変形の関連を探るために、試験機流入側に相当するアクリルの窓部に CCD カメラを接眼し、亀裂の局所変形の追跡を行うということを実施した。具体的には、亀裂を含む供試体については、グリッドをつけたメンブレンを供試体亀裂面に設置し、グリッドの動く様子を試験機背面にある観測窓から CCD カメラを用いて観測することで、亀裂部の移動距離の計測も行った。CCD カメラの画素数は 1800 万画素であり、グリッド全体の挙動を観測できるよう倍率を 75 倍とし、撮影範囲は 4.07mm×3.04mm（この部分で約 211 万画素）とした。

表1 正弦波亀裂の形状タイプ

供試体タイプ	波長 (波数)	振幅
Case1	17.00 mm (6 個)	1.00 mm
Case2	17.00 mm (6 個)	2.00 mm
Case3	12.75 mm (8 個)	1.00 mm
Case4	12.75 mm (8 個)	2.00 mm

## 4. 研究成果

### (1) 試験結果

試験については

- ・ 境界条件を変化させる（拘束圧 (0.5MPa / 1.0MPa)
- ・ 物性を変化させる（水石膏比を 50%, 60%, 70%の3種類）
- ・ 亀裂形状を変化させる（振幅および波長 2通りずつ）

というように、各種条件を変化させて実施した。その結果、

- ・ 材料は拘束圧依存性を示す
- ・ 材料基質部の強度あるいは変形特性は、材料の巨視的な変形挙動のみならず、透水挙動にも影響を及ぼす
- ・ 亀裂の形状によって亀裂の変形あるいは破壊の形態が異なるが、マクロ的にみれば、それほど形状による差はない
- ・ CCD カメラを用いて亀裂の局所変形を捉え、静的試験では大きな亀裂の変形を(写

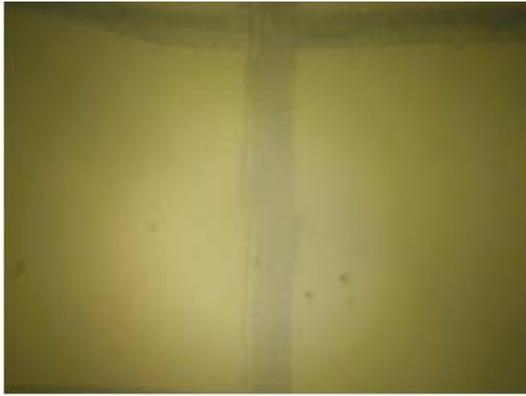


写真1 CCDカメラ画像 (静的試験, case1, 0.5MPa, 水石膏比 70%, ひずみ 0.0%)



写真2 CCDカメラ画像 (静的試験, case1, 0.5MPa, 水石膏比 70%, ひずみ 5.0%)

写真1および写真2), また, クリープ試験では亀裂がほとんど変形していないことを確認した (写真3~写真4) という知見を得た.

## (2) 数値解析

### ① 解析手法

次に, 上述した各種試験を受け, 数値解析モデルの構築を行った. Carter & Hansen は岩塩の一軸クリープについて検討したクリープモデルを提案している. このモデルでは, クリープ温度依存性を考慮することができ, 定温下においては, このモデルは Norton-Bairry のクリープモデル ( $\dot{\epsilon}^c = qA\sigma^n t^{q-1}$ ,  $\dot{\epsilon}^c$  は相当クリープひずみ,  $\sigma$  は軸応力,  $t$  は時間,  $A$ ,  $n$  および  $q$  はクリープに関する係数) と合致する. 岩盤のクリープに関しては多くの研究がなされているが, 亀裂性岩盤の各種特性を考慮に入れた研究は数が少ないのが現状である.

本研究では, 岩盤がその中に亀裂を含み, その亀裂が摩擦すべりを生じるという問題を扱うことから, こうした摩擦すべり現象を表現できるモデルが必要となる. そこで本研究では, 亀裂部分にはクーロン摩擦則に基づくモデルを採用し, 亀裂を除く岩盤基質部 (連続体) には Drucker-Prager の弾塑性構



写真3 CCDカメラ画像 (クリープ試験, case1, 0.5MPa, 水石膏比 70%, 0.0 時間後)

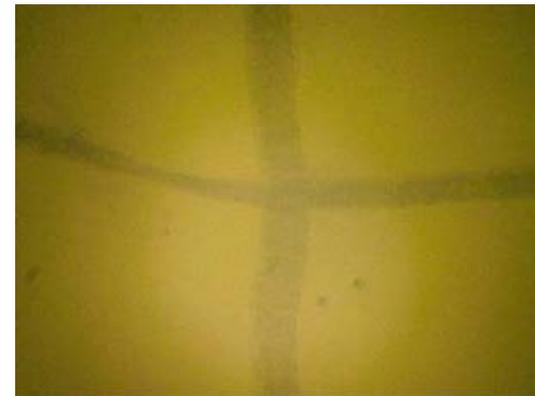


写真4 CCDカメラ画像 (クリープ試験, case1, 0.5MPa, 水石膏比 70%, 24 時間後)

成モデルと上述した Norton-Bairry のクリープモデルを適用し, こられにはソリッド要素を使用した.

不連続面の変形については, 単に滑動するだけでなく, 本研究では, 亀裂面が削れることによって, クーロン摩擦則で言う所の摩擦係数が変化するものと仮定した. 具体的には以下に示すように, 亀裂の削れにともなって摩擦係数  $\mu$  が変化するモデルを考えた.

$$\mu = \begin{cases} \mu_i & \dots \dots \dots (\sigma'_n < \sigma'_y) \\ (\mu_i - \mu_r) \times \exp\{-D(\sigma'_n - \sigma'_y)\} + \mu_r & \dots \dots \dots (\sigma'_n \geq \sigma'_y) \end{cases}$$

ここで,  $\mu_i$  は初期の摩擦係数,  $\sigma'_n$  は亀裂面の接触点に作用する法線方向応力,  $\sigma'_y$  は亀裂面における岩盤の降伏応力,  $D$  は低減率を表す. このモデルでは, 亀裂面における法線応力が亀裂面における岩盤の初期降伏応力  $\sigma'_y$  に達すると亀裂面では減耗が開始され, 亀裂面の摩擦係数は亀裂面における法線応力  $\sigma'_y$  の増加にともなって減少し, 残留値まで低下して一定値  $\mu_r$  になるものと仮定した.

### ② 解析結果

本研究では, 前項で説明したモデルを総て組み合わせ, 有限要素解析コードに組み込んで総ての試験結果の再現を試みた. 紙面の関係上, その総てを掲載することは不可能なので, 亀裂を含む供試体に対するクリープ解析

表2 弾性係数とクリープ応力

拘束圧	亀裂ケース	弾性係数	クリープ応力
0.5MPa	case1	191MPa	1.87MPa
	case2	221MPa	2.27MPa
	case3	226MPa	1.43MPa
	case4	536MPa	2.29MPa
1.0MPa	case1	144MPa	3.08MPa
	case2	138MPa	3.39MPa
	case3	263MPa	2.95MPa
	case4	384MPa	3.44MPa

表3 クリープに関するパラメータ

拘束圧	$A$	$q$	$n$
0.5MPa	$1.5 \times 10^{-2}$	0.9	1.5
1.0MPa	$8.5 \times 10^{-3}$	0.9	2.0

表4 亀裂に関するパラメータ

亀裂ケース	$\sigma'_y$ (MPa)	$\mu_r$	$D$
case1	2.00	0.30	0.10
case2	2.00	0.20	1.00
case3	2.00	0.15	0.50
case4	2.00	0.10	5.00

についてのみ結果を記す。

弾性係数については、各供試体で状態が異なるため、試験ごとに評価して値を定め、解析を実施した。境界条件については、亀裂を含まない供試体に対する静的試験と同様であることから、解析においても同様に設定した。各拘束圧および各亀裂形状のケースごとの弾性係数を表2に示す。

岩盤基質部の強度特性についてであるが、亀裂を含まない供試体の場合、試験結果（ポアソン比：0.25，粘着力：1.9MPa，内部摩擦角：10度）を Drucker-Prager の型の等方弾塑性モデルに適用することでピーク時までの挙動については再現性を得ている。材料基質部の材料定数および挙動モデルとしては、上述したものでピーク時までの挙動については概ね表現は可能であるが、亀裂を含む供試体では、亀裂面においてブリーディングなどの材料分離により、巨視的な強度が亀裂を含まないものよりも小さくなるものと思われる。本研究では、材料分離にともなう強度低下に関する研究を対象としていないことから、簡易的ではあるが、亀裂を含む供試体では亀裂面におけるブリーディングなどによって亀裂の強度が低下しているものと考え、その巨視的な強度を低下させることとした。具体的には、粘着力を1.0MPa，内部摩擦角を7度，また、亀裂面の摩擦係数を0.5として解析を行った。

前述の通り、岩盤基質部のクリープについては Norton-Bairry のクリープモデルを適用しているが、亀裂を含まない供試体に対する

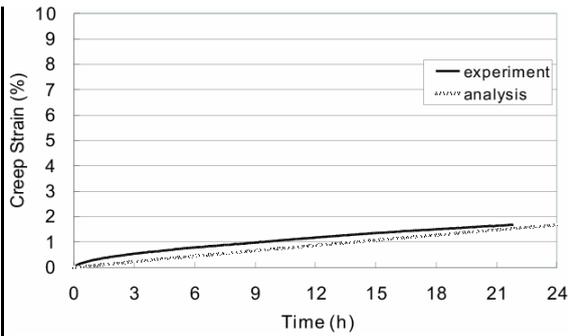


図1 時間とクリープひずみ (case1, 0.5 MPa)

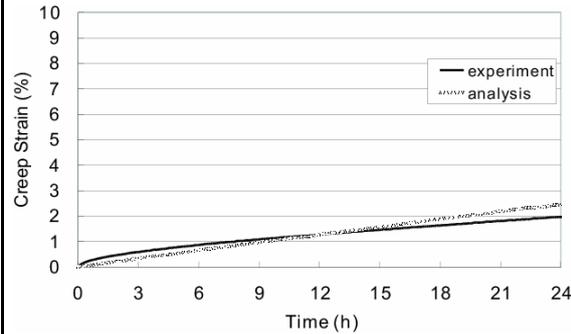


図2 時間とクリープひずみ (case2, 0.5 MPa)

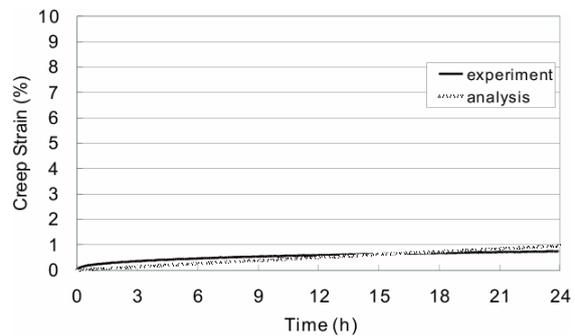


図3 時間とクリープひずみ (case3, 0.5 MPa)

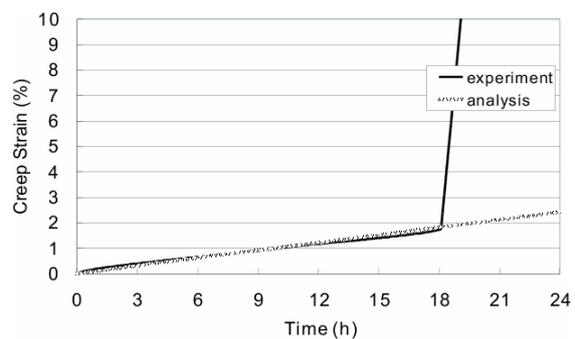


図4 時間とクリープひずみ (case4, 0.5 MPa)

クリープ試験の再現解析より、表3に示す解析パラメータを決定した。また、亀裂を含む供試体に対する静的試験の再現解析より、表4に示す摩擦に関する解析パラメータを決定した。

各ケースで解析を行った結果を図1から図

8に示す。図中の analysis は、表4で示したパラメータを用いて解析した結果を表す。

拘束圧 0.5MPa 場合、試験結果と解析結果の比較より、総てのケースにおいて両結果は類似した挙動を示していることがわかる。これより再現性の高い結果が得られたものと考えられる。拘束圧 1.0MPa の場合、case1, case3 はともに類似した挙動を示している。case2, case4 は解析結果のほうがやや高いクリープひずみを示しているが、その誤差は1%未満であるため 24 時間レベルにおいては概ね良好な再現性を得ているものと考えられる。これより、本研究にて使用しているクリープモデルにおけるパラメータに関しては、材料試験などで得られる変形あるいは強度特性より設定することが可能で、こうした設定されたパラメータを用いて解析をすることで、試験の再現が可能であると考えられる。本研究の主眼である亀裂に焦点をあてると、解析の結果、拘束圧 0.5 MPa, 1.0 MPa, case1 から case4 までのすべての場合においてクリープひずみ量に差はあるが、滑動は確認されなかった。クリープ解析の結果、亀裂は滑動することなく、材料基質部のクリープ変形が主であるという結果になった。顕微鏡を用いた試験中の観察によれば、例えば case1 の拘束圧 0.5MPa では、24 時間後、亀裂は水平方向に 0.19mm (写真4) のみしか変動していない。すべてのクリープ解析において、これと類似した結果となっている。一方、静的試験では水平方向に 1.0mm (軸ひずみ：約 5.0%時、写真2) 以上移動しているが、クリープ試験ではほとんど亀裂が変形していないものと考えられる。顕微鏡を用いて観察している箇所は、亀裂における極微小な領域であるが、亀裂全体にわたっても、その挙動については大きな差はないものと考えられる。したがって、解析におけるクリープ挙動は試験のそれを概ね良好に再現できていると考えられ、提案したクリープモデルに根本的な誤りはないものと考えられる。

### (3)まとめ

数多くの試験より、実際の処分坑道の建設および廃棄体の埋設に当たっては、通説の範囲を出ない結果かもしれないが、母岩の強度および変形特性を把握しておくことと、亀裂の密度などを把握しておく必要があると思われる。ここで、亀裂の密度などに関して不確定要素が多い中で、亀裂の形状に関して、これを正確に把握する必要性は薄いと判断する。また、処分坑道近傍を除いて、つまり、坑道より深部に位置する岩盤に包含される亀裂については、周囲から高い圧縮応力を受けているので、クリープ変形することは考え難い。また、提案した解析手法は妥当なものとして判断している。

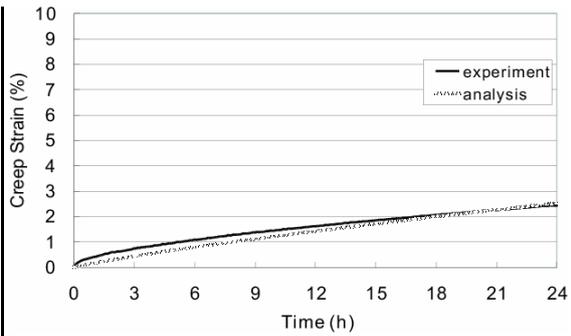


図5 時間とクリープひずみ (case1, 1.0 MPa)

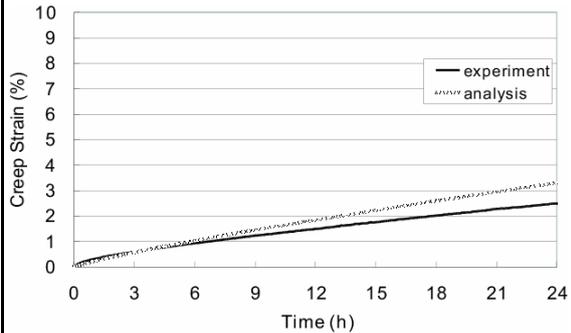


図6 時間とクリープひずみ (case2, 1.0 MPa)

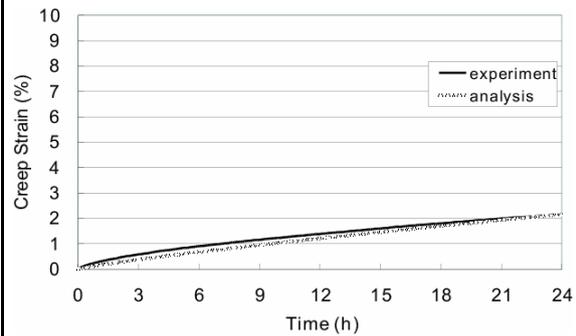


図7 時間とクリープひずみ (case3, 1.0 MPa)

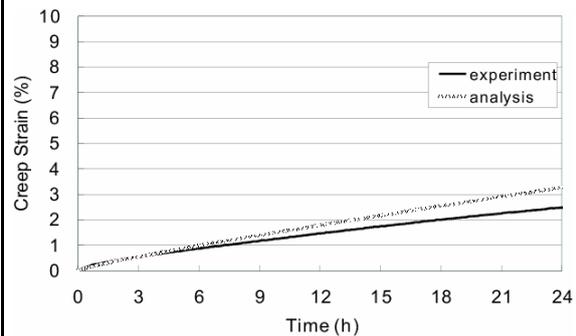


図8 時間とクリープひずみ (case4, 1.0 MPa)

課題としては、さらに多くのシミュレーションを実施し、手法の妥当性について検証することと、解析から得られた亀裂の変形分布より力学的開口幅が求まり、その結果、亀裂部分の透水係数が算出されることから、実際の試験における水理特性と比較する必要がある。

る。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

- ① T. Tatsumi and H. Yoshida: Numerical Study on Shear Behavior of Discontinuity of Rock Mass, Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol. 57, pp. 67-72, 2009, 査読有
- ② 澤田昌孝, 新孝一, 山下裕司, 江藤芳武, 蔣宇静, 吉田秀典, 堀井秀之: 不連続面の挙動を考慮可能な解析手法を用いた情報化施工の提案, 土木学会論文集 FVol. 65, No. 1, pp. 17-31, 2009, 査読有
- ③ 吉田秀典, 山崎卓哉, 井上純哉: 岩盤の透水-応力連成挙動の把握を目的とした試験装置の開発と連成挙動の解明に関する研究, 土木学会論文集C, Vol. 64, No. 4, pp. 843-855, 2008, 査読有
- ④ 吉田秀典, 巽隆有: 不連続面の特性が材料の巨視的挙動に及ぼす影響に関する研究, 計算数理工学論文集, Vol. 8, pp. 31-36, 2008, 査読有
- ⑤ 森川誠司, 田部井和人, 森孝之, 岩野圭太, 吉田秀典, 堀井秀之: MBCモデルによる不連続性岩盤の三次元変形及び浸透流解析, 岩の力学国内シンポジウム講演論文集, Vol. 12, pp. 807-812, 2008, 査読有
- ⑥ 巽隆有, 吉田秀典: 不連続面を有する材料の変形挙動に関する実験的および数値解析的研究, 応用力学論文集, Vol. 11, pp. 339-350, 2008, 査読有
- ⑦ 荒木裕行, 三谷浩二, 保田圭二, 高下正剛, 吉田秀典, 長谷川修一: 現場計測および有限要素解析に基づく補助工法の変位抑制効果の検討, 土木学会論文集C, Vol. 64, No. 3, pp. 473-484, 2008, 査読有
- ⑧ 吉田秀典, 木下尚樹, 大野雅之: 鉾山残壁の崩壊事例の調査と安定性の検討, 土木学会論文集C, Vol. 64, No. 1, pp. 57-66, 2008, 査読有
- ⑨ 吉田秀典, 乗金悠里, 森本亮司, 井上純

哉: 亀裂性岩盤における透水-変形連成挙動に関する研究, 応用力学論文集, Vol. 10, pp. 311-322, 2007, 査読有

- ⑩ 吉田秀典, 井上純哉, 森本亮司: 不連続面の変形を考慮に入れた不連続性材料のクリープモデル, 計算数理工学論文集, Vol. 7, No. 1, pp. 19-24, 2007, 査読有

〔学会発表〕(計 5 件)

- ① 吉田秀典, 巽隆有, 不連続面の特性が材料の巨視的挙動に及ぼす影響に関する研究, 第 8 回計算数理工学シンポジウム, 2008 年 11 月 28 日, 福井大学
- ② 森川誠司, 田部井和人, 森孝之, 岩野圭太, 吉田秀典, 堀井秀之: MBCモデルによる不連続性岩盤の三次元変形及び浸透流解析, 第 12 回岩の力学国内シンポジウム, 2008 年 9 月 3 日, 山口大学
- ③ 巽隆有, 吉田秀典, 不連続面を有する材料の変形挙動に関する実験的および数値解析的研究, 第 11 回応用力学シンポジウム, 2008 年 9 月 9 日, 東北大学
- ④ 巽隆有, 吉田秀典, 不連続面のせん断挙動に関する数値解析的研究, 第 57 回理論応用力学講演会, 2008 年 6 月 11 日, 日本学術会議
- ⑤ 吉田秀典, 乗金悠里, 森本亮司, 井上純哉, 亀裂性岩盤における透水-変形連成挙動に関する研究, 第 10 回応用力学シンポジウム, 2007 年 9 月 11 日, 広島国際会議場

## 6. 研究組織

### (1) 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

### (2) 連携研究者

井上 純哉 (INOUE JUNYA)  
東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
研究者番号: 70312973