

研究種目：若手（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19760327

研究課題名（和文） 有限変形土／水連成解析による断層形成メカニズムの定量的考察

研究課題名（英文） Study on the mechanism of fault formation  
using by the finite strain soil/ water coupling analysis

研究代表者

橘 伸也（TACHIBANA SHINYA）

埼玉大学・地圏科学研究センター・助教

研究者番号：90432567

研究成果の概要：

地球表層部において、土や岩などから構成される地盤に地殻変動のような大規模かつ長期にわたる力学的負荷が作用した場合、地盤中の間隙流体の移動と地盤の変形挙動との連成複合現象が生起する。こうした地質学的スケールの現象の中で形成される地質構造の形成メカニズムの解明は、どのようなプロセスを経て現在ある地質構造に至ったのかを知るのみならず、われわれが生活する地球表層部が、将来、どのように変遷していくのかを予知する上でも、重要な役割を担う課題である。本研究は、地質構造、その中でも主に断層にスポットを当て、その形成過程を地盤が経験する破壊現象と捉え、初期値・境界値問題として扱い、数値解析を通してその形成メカニズムを定量的、かつ具体的に評価することを目的としている。ここで研究対象とする断層の場合、断層帯あるいは破碎帯と呼ばれる局所変形が卓越した領域での材料の特性変化の考慮が重要となる。本研究ではまず、限界状態理論に基づき Aversa et al. (1998) が実験的に示した破碎性堆積岩のダイレイタンシー特性のモデル化を行っている。すなわち、破碎履歴に伴う降伏曲面の形状変化を考慮し、大野ら (2006) による地盤材料の弾塑性構成モデルを拡張した。これにより、種々の拘束圧下での破碎性堆積岩のダイレイタンシー挙動、あるいは破碎履歴による降伏特性を、より忠実に再現できるようになった。次いで、Hashiguchi and Tsutsumi (2001) による接線応力速度効果を構成関係に導入し、非排水条件および、平均有効応力一定・平面応力条件下でのせん断帯生成条件について、解析的検討をおこなった。また、上記の構成モデルを有限要素プログラムに組み込み、非排水条件および、平面応力条件下での横ずれ断層のシミュレーションを実施した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	0	2,100,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	330,000	3,530,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地球変動予測・テクトニクス・固体地球物理・応用力学・地盤力学

## 1. 研究開始当初の背景

地盤を構成する土や岩などの地盤材料に、たとえば地殻変動のような大規模かつ長期にわたる力学的負荷が作用した場合、地盤中の間隙流体の挙動と地盤材料そのものの挙動との連成複合現象が生起する。断層などの地質構造の理解は、主に地球科学、構造地質学の分野において、幾何学的・運動学的な解釈がなされてきた。たとえば、逆断層に分類される断層は圧縮テクトニクスを、正断層に分類される断層は伸張テクトニクスを受けて生成するという理解である。このような理解は、地盤工学における受働・主働問題と同義であり、これらと回転作用の組み合わせにより、運動学的に断層は大別できる。本研究課題では、このような問題を境界値問題として扱うことにより、断層の生成過程・生成条件などそのメカニズムを定量的・具体的に明らかにしようとするものである。

## 2. 研究の目的

本研究は、地質構造、その中でも主に「断層」にスポットを当て、その形成過程を地盤が経験する分岐現象と捉え初期値・境界値問題として扱い、数値解析を通してその形成メカニズムを定量的・具体的に評価することを目的としている。

## 3. 研究の方法

### (1) せん断帯生成解析の実施

地盤材料の弾塑性構成式がもつ特性を明らかにするため、平面ひずみ非排水条件、あるいは平面応力条件といった簡単な条件の下で、材料非線形性に起因する分岐条件を調べる。最初に大野らが提案する EC モデルを有限変形理論へと拡張し、そのせん断帯生成条件について吟味する。次いで、Hashiguchi and Tsutsumi が提案する接線応力速度効果をモデルに導入し、主応力方向が変化するような応力載荷条件下でのせん断帯生成条件を調べる。

### (2) 岩石材料の破碎を考慮したモデルの提案

岩石材料に対して行われているせん断試験の結果を元に、既存の地盤材料に対する弾塑性構成モデルの改良を行う。具体的には、Averesa et al. が実験的に示している破碎に伴って降伏曲面の形状が変化するという効果を LC モデルに新たに導入し、そのパフォ

ーマンスを検討する。

### (3) 有限要素プログラムへのチューンナップ

これまでに示した弾塑性構成モデルを有限要素プログラムに組み込み、入力パラメータの同定・境界条件の設定など、断層形成シミュレーションのための目的にかなったシステムを構築する。

### (4) 断層形成シミュレーションの実施

ここまでに構築した数値実験システムを用い、断層形成シミュレーションを実施する。初期条件と境界条件に着目しこれらをパラメトリックに変化させ、ケーススタディの蓄積を行う。

## 4. 研究成果

(1) ダイレイタンシー特性の表現の異なる弾塑性構成モデルに対するせん断帯生成解析

地盤材料の変形の局所化は、それらを連続体と看做した場合、主に幾何学的非線形性と材料非線形性に起因する。ここでは、大野らが提案するダイレイタンシー特性表現の異なる弾塑性構成モデル (EC モデル) をストレッチングの加算型弾塑性分解を用いて有限変形場へ拡張し、構成モデルがせん断帯の生成に及ぼす影響を検討する。EC モデルは、フィッティングパラメータの選択により様々なダイレイタンシー挙動を表現することができ、オリジナル Cam-clay モデルを包含する。解析では Hill and Hutchinson と同様の方法を取り、主に、ダイレイタンシー特性とせん断帯の生成条件に関係に着目し検討を行っている。

### 有限変形 EC モデル

等方圧密状態を初期状態にとったときの EC モデルの降伏関数は、それぞれ次のように与えられる。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} + \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \frac{1}{n_E} \left( \frac{\eta}{M} \right)^{n_E} + \int_{t_0}^t J \tau d^p dt = 0$$

ここで、 $p'$  は平均有効応力、 $\eta (= q/p')$  は応力比、 $M$  は限界応力比、 $\lambda$ 、 $\kappa$  はそれぞれ  $e - \ln p'$  関係における圧縮、膨潤曲線の勾配、 $e_0$ 、 $p'_0$  はそれぞれ先行時 ( $t = t_0$ ) の間隙比と平均有効応力、 $n_E$  は EC モデルのダイレイタンシー特性に関するパラメータ、 $J$  は体積変化率、 $d^p$  は塑性ストレッチングである。降伏関数の第 3 項目は、ひずみ型硬化パラメータ

であり、微小ひずみ理論における塑性体積ひずみ  $\varepsilon_v^p$  に相当する。降伏関数に連続条件を課し、有効 Cauchy 応力テンソル  $\sigma'$  の共回転 Jaumann 速度と弾性ストレッチング  $d^e$  の関係で表される速度形弾性構成関係と関連流れ則を適用すると、EC モデルの速度形弾塑性構成関係が次のように得られる。

$$\dot{\sigma}' = \left[ c^e - \frac{\left( 3G\xi \frac{s}{q} - K\beta I \right) \otimes \left( 3G\xi \frac{s}{q} - K\beta I \right)}{3\xi^2 G + K\beta^2 + J \frac{D'}{D} \beta} \right] : d$$

ここで、 $d$  はストレッチング、 $c^e$  は4階の弾性係数テンソル、 $D = (\lambda - \kappa) / M(1 + e_0)$  である。表-1 に、弾性係数  $K$ 、 $G$ 、および応力比  $\eta$  に関するパラメータ  $\beta$ 、 $\xi$  の定義をまとめる。前述のように、EC モデルは  $n_E = 1.0$  のときオリジナル Cam-clay モデルに帰着する。

### 瞬間弾塑性係数

以下では、平面ひずみ非排水条件に限定し議論を進める。等方応力状態を初期条件とし、主応力方向の回転が起こる瞬間までは座標軸と主応力方向が一致すると考えたときの  $45^\circ$  せん断、単純せん断に関する瞬間弾塑性係数  $\mu^*$ 、 $\mu$  はそれぞれ次のように導かれる。

$$\dot{\sigma}'_{11} - \dot{\sigma}'_{22} = 2\mu^* (d_{11} - d_{22}) \quad ; \quad \mu^* = \frac{G \left( K\beta^2 + \frac{D'}{D} \beta \right)}{3\xi^2 G + K\beta^2 + \frac{D'}{D} \beta}$$

$$\dot{\sigma}'_{12} = 2\mu d_{12} \quad ; \quad \mu = G$$

図-2、図-3 にせん断履歴  $\alpha$  に対する EC モデルの  $\mu^*$ 、 $\mu$  の変化をそれぞれ示す。図ではそれぞれの係数を等方応力状態での  $\mu$  の値で無次元化している。いずれの係数も単調に減少するものの、パラメータ  $n_E$  が 1 に近い、すなわちオリジナル Cam-clay モデルと同様の降伏関数を持つ場合は下に凸、また、パラメータ  $n_E$  が大きくなるにつれ上に凸の曲線を描くことがわかる。

### せん断帯の生成条件

公称応力速度で記述される現配置での速度形つり合い式に速度形構成式を代入すると、次の変位速度場で記述したつり合い式が得られる。

$$(\mu + \tau)v_{2,111} - (2\mu^* - \mu)(v_{1,112} - v_{2,221}) - (\mu - \tau)v_{1,222} = 0$$

ただし、 $v_1$ 、 $v_2$  はそれぞれ  $x_1$ 、 $x_2$  方向の速度ベクトルの成分、 $\tau = (\sigma'_{11} - \sigma'_{22}) / 2$  である。ここで、均一・一様場に生成するせん断帯の存在を仮定し、その法線ベクトルを  $\mathbf{n} = (n_1, n_2)$  とする。また、Hill and Hutchinson に倣い、せん断帯の法線ベクトルの成分で記述される流れ関数:  $\Psi = \Psi(n_1 x_1 + n_2 x_2)$  を導入すると、式(6)は次のように書き改められる。

$$(\mu + \tau) + 2(2\mu^* - \mu) \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 + (\mu - \tau) \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^4 = 0$$

上式の特徴が楕円型から放物型に遷移し  $(n_2/n_1)^2$  が実数解をもつとき、すなわちせん断帯が生じる条件をはじめて満たすときの応力履歴  $\alpha$  を EC モデルのパラメータ  $n_E$  について求めたものを図-4 に示す。図から、EC モデルともにパラメータ  $n_E$  のとり方によらず、せん断帯の生成条件を満たすのは応力履歴  $\alpha$  がほとんど 1、すなわち限界状態のごく近傍であることがわかる。また、このときの  $(n_2/n_1)^2$  の解から最大(圧縮)主応力面からのせん断帯の生成角度を求めると、EC モデルともにパラメータ  $n_E$  のとり方によらず、ほぼ  $45^\circ$  であった。

様々なダイレイタンシー挙動を表現可能な EC モデルのせん断帯の生成条件について検討を行った。結果として、せん断帯の生成にダイレイタンシー特性の違いはほとんど寄与しないことが明らかとなった。話題を材料非線形性に限定するならば、構成モデルへの接線応力速度効果の導入などが必要である。

表-1 各パラメータの定義

Elastic properties	
$c^e = KI \otimes I + 2GA$	$K = \frac{1+e}{\kappa} p'$ ; $G = \frac{3(1-2\nu')}{2(1+\nu')} K$
Parameters of stress ratio $\eta$	
EC model:	$\beta = M(1 - \alpha^{n_E})$ ; $\xi = \alpha^{(n_E-1)}$
LC model:	$\beta = M \left( 1 - \frac{2\alpha^{n_E}}{1 + \alpha^{n_E}} \right)$ ; $\xi = \frac{2\alpha^{(n_E-1)}}{1 + \alpha^{n_E}}$

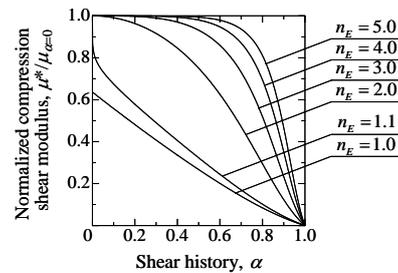


図-2 せん断履歴  $\alpha$  に対する  $\mu^*$  の変化

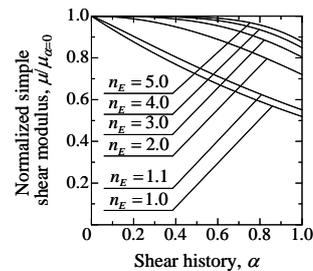


図-3 せん断履歴  $\alpha$  に対する  $\mu$  の変化

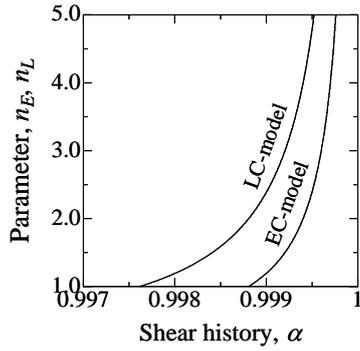


図-4 セン断帯生成条件を満たす応力履歴

(2) 破碎によるダイレイタンスー特性変化を考慮した岩石材料の弾塑性構成モデル

Aversa et al. compared the yield surfaces between intact and destructured pyroclastic rock (volcanic tuff) samples through a series of triaxial drained shear tests. For intact samples, they were first isotropically consolidated to an effective mean stress which was below isotropic initial yield stress ( $p'_c \approx 20\text{MPa}$ ), and standard triaxial drained tests were then carried out. On the other hand, for destructured samples, they were first isotropically consolidated to an effective mean stress ( $p'_c \approx 40\text{MPa}$ ) which was approximately twice as isotropic initial yield stress and subsequently unloaded to a lower value. And then, standard triaxial drained tests were carried out. Fig. 1 shows both yield points which are normalized by each pre-consolidation pressure  $p'_c$ . Yield stresses  $q/p'_c$  of destructured samples tend to be smaller values than those of intact samples at same effective mean stress  $p'/p'_c$ . These interesting experimental data suggest that the size and shape of yield surface change during plastic loading due to destructuration effects, in case of porous rock materials, while yield surface of a lot of elasto-plastic models is assumed to be expanding or shrinking to keep its similarity.

Also included in the figure are the fitted yield surfaces derived by LC model to each set of yield points. While more details about LC model will be explained in next section, this model describes various yield surfaces by determining its parameter  $n_L$  and reduces to modified Cam-clay model in case that  $n_L = 2.0$ . From

the figure, it is found that lower value of parameter  $n_L$  can follow the yield points of destructured samples more. Although the parameter  $n_L$  is originally a material constant, in LC model, which determines inelastic dilatancy or contractancy behaviors until the critical state, in next section, we shall develop the constitutive model regarding the parameter  $n_L$  as a function of hardening parameter in order to describe the destructuration effects.

The yield function of LC model in which the parameter  $n_L$  is regarded as a function can be written as

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} + \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \frac{2}{n_L} \ln \left( \frac{M^{n_L} + \eta^{n_L}}{M^{n_L}} \right) - \varepsilon_v^p = 0$$

where,  $\lambda, \kappa$  are respectively the compression and swelling indexes in  $e - \ln p'$  relation,  $e$  is a void ratio,  $\varepsilon_v^p$  is a plastic volumetric strain,  $p'$  is an effective mean stress,  $q$  is a stress deviator, and  $\eta (= q/p')$  is a stress ratio. The subscript 0 indicates the reference state which means the yield state of isotropic consolidation for intact sample in case of a porous rock. In order to derive the incremental stress-strain relationship, we apply the consistency condition as

$$\dot{f} = \frac{\partial f}{\partial \sigma'} : \dot{\sigma}' + \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} \dot{\varepsilon}_v^p + \frac{\partial f}{\partial n_L} \dot{n}_L = 0$$

To expand this equation, the progressing low of the parameter  $n_L$  is needed in addition to the assumptions of the elastic incremental stress-strain relation and the associated flow rule. In this research, we determined this low under two simple assumptions that (1) the parameter  $n_L$  monotonously decreases with changing the stress-like hardening parameter  $p'_c$ , and (2) the lowest value of  $n_L$  is set to be 1.0 because the convexity of yield surface loses in case that  $n_L < 1.0$ . Then, the parameter  $n_L$  may be written by a function of the stress-like hardening parameter  $p'_c$  as a fitting curve

$$n_L(p'_c) = (n_0 - 1) \exp \left[ -a \left( \ln \frac{p'_c}{p'_0} \right)^2 \right] + 1$$

where,  $a$  is a fitting parameter which controls the speed of change of  $n_L$ , and  $n_0$  is an initial value of  $n_L$  which determines the initial shape of yield

surface for intact sample. Fig. 2 shows the relations between  $n_L$  and  $p'_c$ . When  $a=0$ ,  $n_L$  keeps constant and the shape of yield surface keeps its similarity. By taking the time derivation and applying the isotropic hardening law as

$$\frac{\partial p'_c}{\partial \varepsilon_v^p} = \frac{p'_c}{(\lambda - \kappa)/(1 + e_0)}$$

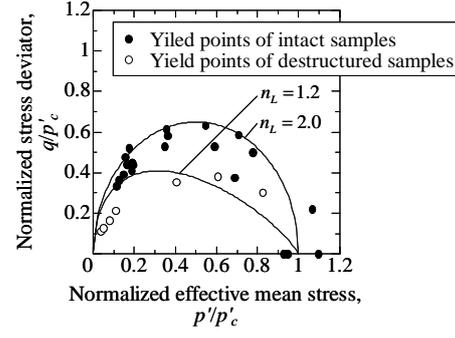
we can obtain the equation such that

$$\dot{n}_L = -2a \frac{n_0 - 1}{(\lambda - \kappa)/(1 + e_0)} \ln \frac{p'_c}{p'_0} \exp \left[ -a \left( \ln \frac{p'_c}{p'_0} \right)^2 \right] \dot{\varepsilon}_v^p \equiv h_n \dot{\varepsilon}_v^p$$

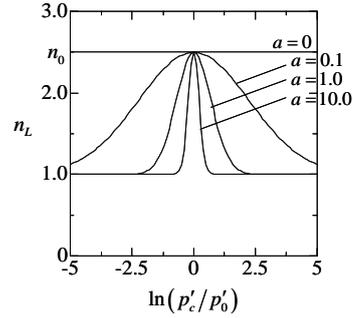
By substituting this equation together with the elastic incremental stress-strain relation and the associated flow rule, one can derive the incremental stress-strain relation as

$$\dot{\sigma}' = \mathbf{c}^{ep} : \dot{\varepsilon} ; \quad \mathbf{c}^{ep} = \mathbf{c}^e - \frac{1}{\chi} \mathbf{c}^e : \frac{\partial f}{\partial \sigma'} \otimes \frac{\partial f}{\partial \sigma'} : \mathbf{c}^e$$

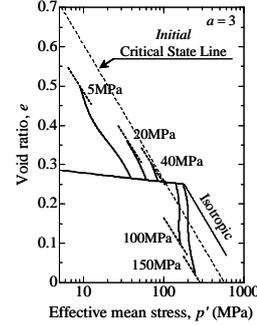
Incorporating the incremental stress-strain relation to the finite element code, we simulate the triaxial drained shear of the porous rock under various confining pressures. Parameters in the model are set as  $\lambda = 0.15$ ,  $\kappa = 0.01$ ,  $M = 1.3$ ,  $\nu' = 0.4$ ,  $e_0 = 0.25$  and  $p'_0 = 180 \text{ MPa}$ . In the simulations, we compare the responses in cases with and without the destructuration effects. Figs. 3 and 4 show the  $e - \ln p'$  relations in cases with and without the destructuration effects, respectively. The value with the path indicates each confining pressure. In case with the destructuration effect ( $a = 3$ , Fig. 3), it is found that the dilatancy at lower confining pressures decreases and the contractancy at higher confining pressures increases until the critical state compare with Fig. 3, because the critical state line shifts downward in  $e - \ln p'$  space due to the change of shape of yield surface. Fig 4 shows the stress-strain relations with and without the destructuration effects, respectively. In Fig. 4, at higher confining pressure (150 MPa), the stress-strain curve shows the strain-hardening and a downward convexity, which can be often seen in experimental data for porous rock samples (e. g. Wong et al.), after initial yielding.



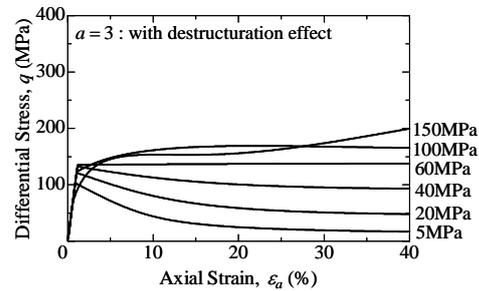
**Figure 1:** Yield points by Aversa et al. and yield surfaces of LC model



**Figure 2:** Relations between  $n_L$  and  $p'_c$



**Figure 3:**  $e - \ln p'$  relations



**Figure 4:** Stress-strain relations

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5件)

- 1) 金澤伸一, 橘伸也, 河井克之, 大野進太郎, 飯塚敦, 不飽和土/水連成有限要素解析における空間離散化手法の検討, *応用力学論文集*, 土木学会, Vol. 11, pp. 331-338, 2008. (査読有り)
- 2) 河井克之, 山田竜太郎, 飯塚敦, 橘伸也, 大野進太郎, 植生の吸水作用が地盤の安定性に及ぼす影響, *応用力学論文集*, 土木学会, Vol. 11, pp. 443-450, 2008. (査読有り)
- 3) 河井克之, 飯塚敦, 霜永勝之, 橘伸也, 植生の吸水作用が地盤に及ぼす影響, *応用力学論文集*, 土木学会, Vol. 10, pp. 375-382, 2007. (査読有り)
- 4) 大野進太郎, 河井克之, 橘伸也, 有効飽和度を剛性を表す状態量とした不飽和土の弾塑性構成モデル, *土木学会論文集*, Vol. 63, No. 4, pp. 1132-1141, 2007. (査読有り)
- 5) Tachibana, S., Iizuka, A., Kawai, K., Kobayashi, I., Pipatpongsa, T. and Ohta, H., Numerical Investigation on the Failure Criterion for Normally Consolidated Clays, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 31, pp. 809-833, 2007. (査読有り)

[学会発表] (計7件)

- 1) Tachibana, S., Saeki, T., Iizuka, A. and Kuwano, J., The critical state theory applied to porous rock considering the destructuration effects, *Proc. of the 6th Regional Symposium on Infrastructure Development*, RSID6-GE025, 2008. (発表年月日: 2009年1月12日)
- 2) 佐伯拓也, 橘伸也, 飯塚敦, 破碎によるダイレイタンシー特性変化を考慮した岩石材料の弾塑性構成モデル, *第63回年次学術講演集*, 土木学会, III-4, 2008. (発表年月日: 2008年9月11日)
- 3) 金澤伸一, Thirapong Pipatpongsa, 竹山智英, 橘伸也, 飯塚敦, 陰解応力積分法を導入した地盤構成式の検討, *第5回地盤工学会関東支部発表会 Geo-Kanto2008*, 地盤工学会, GK-113, 2008. (発表年月日: 2008年11月1日)
- 4) Tachibana, S., Iizuka, A., Kawai, K., Kobayashi, I., Pipatpongsa, T. and Ohta, H., Inhomogeneous Deformation

Developing in a Clay Specimen, *Proc. of the Sixteenth Southeast Asian Geotechnical Conference*, pp. 289-295, 2007. (発表年月日: 2007年5月10日)

- 5) Kawai, K., Iizuka, A. and Tachibana, S., The Influence of Evapo-Transpiration on the Ground, *Proc. of the 3<sup>rd</sup> Asian Conference on Unsaturated Soils*, pp. 359-364, 2007. (発表年月日: 2007年4月7日)
- 6) 橘伸也, 大野進太郎, 飯塚敦, 太田秀樹, ダイレイタンシー特性の表現の異なる弾塑性構成モデルに対するせん断帯生成解析, *第42回地盤工学研究発表会講演集*, pp. 227-228, 2007. (発表年月日: 2007年7月4日)
- 7) 三好絵里子, 橘伸也, 飯塚敦, 河井克之, 境界端面の潤滑性に注目した粘土供試体のせん断シミュレーション, *平成19年度土木学会関西支部年次学術講演会*, III-37, 2007. (発表年月日: 2007年5月26日)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橘伸也 (TACHIBANA SHINYA)

埼玉大学・地圏科学研究センター・助教

研究者番号: 90432567