

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420509

研究課題名(和文) 引張領域におけるセメント改良土の破壊基準の評価

研究課題名(英文) Evaluating failure criterion for cement-treated soil under a low confining pressure

研究代表者

並河 努 (Namikawa, Tsutomu)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：50455151

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：柱状壁状のセメント改良体には、外力により曲げ変形が生じ、引張破壊が生じる可能性がある。このような引張破壊に対する検討が設計において必要となるが、そのためにはセメント改良土の引張強度の解明が必要である。本研究では、引張及びせん断破壊規準に対する合理的な考え方を確立することを目的とし、セメント改良土の引張からせん断に移行する領域における力学挙動を三軸引張試験より明らかにした。また、研究代表者が構築してきたセメント改良土の弾塑性モデルを試験結果より検証した。さらに、本弾塑性モデルをFEM解析コードDIANAに組み込み、セメント改良土の引張からせん断にわたる破壊挙動を表現しうる解析手法を確立した。

研究成果の概要(英文)：Tensile stress possibly occurs in cement mixing soil column and wall under a low confining stress condition when external forces apply to the column or wall. Thus the evaluation of tensile behavior of cement-treated soils is one of the major issues for designing the ground improvement. The purpose of this study is to clarify the tensile and shear failure criteria of cement-treated soil. Triaxial tension tests are conducted to reveal the tensile and shear failure behaviors of cement-treated soils. Moreover the elasto-plastic model developed by the researcher is verified by comparing between the experimental and numerical results. The developed elasto-plastic model can be implemented in the finite element software DIANA.

研究分野：地盤工学

キーワード：セメント改良土 引張 破壊規準 三軸引張 弾塑性モデル

1. 研究開始当初の背景

深層混合処理工法によるセメント地盤改良工法は、土木建築構造物の基礎、掘削時の土留め壁、液状化対策等に幅広く用いられるようになってきている。近年は柱状や壁状の改良形式が適用されており、コスト縮減に役立っている。しかしながら、柱状や壁状の改良形式の場合、外力により曲げ変形が生じ、曲げ引張破壊が生じる可能性が指摘されている¹⁾²⁾。このような曲げ破壊等の引張破壊に対する検討が設計において必要となるが、セメント改良土の引張破壊挙動において未解明な部分が多いため、現行設計法³⁾⁴⁾において、曲げを含む引張破壊に対する検討方法は未整備である。

曲げを含む引張破壊に対する設計を合理的に行うには、セメント改良土の引張強度の解明が必要である。従来セメント改良土の引張強度は割裂試験により測定されることが多く、曲げ強度は曲げ試験により測定されてきた。しかしながら、これらの試験は要素試験ではなく、割裂試験や曲げ試験より得られる引張強度は直接引張試験より得られる引張強度とは異なることが指摘されている。研究代表者ら⁵⁾は室内試験とFEM解析より、セメント改良砂において直接引張試験より得られる引張強度が真の引張強度に近いことを明らかにした。しかしながら、セメント改良土の直接引張試験が実施された例は少なく、セメント改良土の引張挙動に関するデータは不十分である。

さらに、地盤内において改良体は周辺地盤から拘束圧を受けており、そのような状態における引張破壊挙動を明らかにするためには、拘束圧下での直接引張試験（三軸引張試験）を実施し、引張領域から低拘束圧領域におけるセメント改良土の破壊包絡線を明らかにする必要がある。これまで、セメント改良土のような固結土の破壊規準は、三軸圧縮試験結果等より得られるせん断破壊規準をもとに設定されることが多い。このように設定された破壊規準の場合、引張領域の破壊規準は試験データなしに外挿されており低拘束圧から引張領域における精度が非常に悪いといえる。このように、セメント改良土の引張から圧縮に推移する領域における破壊規準が確立されていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、セメント改良土の引張から圧縮に移行する領域における力学挙動を三軸引張試験等により明らかにし、設計における引張破壊規準に対する合理的な考え方を確立することが目的である。また、研究代表者が構築してきたセメント改良土の弾塑性モデル⁶⁾を試験結果より検証する。さらに、開発した弾塑性モデルをFEM解析コードDIANAに組み込みことにより、低有効拘束圧下におけるセメント改良土の引張からせん断にわたる破壊挙動を表現しうる解析手法

の確立を目的としている。

3. 研究の方法

(1) セメント改良土の三軸試験

セメント改良土の供試体を用いた排水三軸圧縮試験と排水三軸引張試験を実施し、引張領域から低拘束圧領域におけるセメント改良土の変形挙動（応力ひずみ関係）と破壊規準を明らかにする。試験で用いた供試体は室内で配合作製した。試験に用いた供試体の配合を表1に示す。2種類の配合の供試体で試験を実施した。表1に示す材料を10分間攪拌混合し、円筒モールドに振動を与えながら充填した後、湿潤状態で養生を行った。養生期間は7日である。配合Aでの7日養生供試体の一軸圧縮強さは1300kPa程度、配合Bでは500kPa程度である。

三軸圧縮試験では、径50mm高さ100mmの供試体で試験を実施した。三軸引張試験では、引張破壊が供試体端部で発生しないように、供試体中央部を径45mmとした供試体を用いた。引張試験において供試体端部はホルダーと石膏を用いて接着した。

24時間供試体を等方圧密した後、排水条件下で軸方向に変位制御により載荷を実施した。載荷速度は三軸引張試験、三軸圧縮試験とも0.005mm/minである。三軸引張試験の様子を図1に示す。

表1 供試体の配合

Binder	Sand	Cement	Clay	Water
A	69.3%	7.0%	5.0%	18.7%
B	71.2%	4.5%	5.6%	18.7%



図1 三軸引張試験の様子

(2) セメント改良土の弾塑性モデル

研究代表者はセメント改良土の引張およびせん断挙動を表現できる弾塑性モデルを開発してきた⁶⁾。本弾塑性モデルを試験結果を用いて検証する。検証解析では本弾塑性モデルを組み込んだ有限要素法解析ソフト DIANA を用いる。

4. 研究成果

(1) セメント改良土の三軸試験結果

セメント改良土の三軸試験の一覧表を表 2 に示す。

1) 応力ひずみ関係

配合 A における三軸引張試験の代表的な応力ひずみ関係例を図 2 に示す。拘束圧の低い試験(AT-1)ではピーク応力に至るまで応力ひずみ関係はほぼ線形関係となっており、低拘束圧下では線形弾性変形後破壊に至ることがわかる。このような挙動は一軸引張試験でも観察されている⁵⁾。拘束圧の高い試験(AT-5)において、ピーク応力に近い応力で少しひずみ硬化挙動が見られるが、ほぼ線形弾性変形後に破壊に至っている傾向は変わらない。そしてすべてのケースにおいて、破壊時のひずみレベルは非常に小さく -0.01 ~ -0.04% 程度のひずみで破壊に至っていることがわかる。配合 A の三軸引張試験後の供試体を図 3 に示す。引張応力の方向とほぼ垂直に破断面が発生しており、引張破壊が発生していることがわかる。

表 2 三軸試験条件

Case	Binder	p_c' kPa	Loading
AT-1	A	100	Tension
AT-2	A	200	Tension
AT-3	A	300	Tension
AT-4	A	400	Tension
AT-5	A	500	Tension
AC-1	A	50	Compression
AC-2	A	50	Compression
AC-3	A	100	Compression
AC-4	A	100	Compression
AC-5	A	150	Compression
AC-6	A	200	Compression
BT-1	B	30	Tension
BT-2	B	100	Tension
BT-3	B	200	Tension
BT-4	B	300	Tension
BT-5	B	400	Tension
BT-6	B	500	Tension
BC-1	B	50	Compression
BC-2	B	100	Compression
BC-3	B	200	Compression

配合 A の三軸圧縮試験の応力ひずみ関係例を図 4 に示す。引張試験と異なりピーク応力に至る過程においてひずみ硬化挙動が見られる。そして、ピーク応力時のひずみは 0.5% 以上となっている。引張試験結果と比較するとピーク応力時のひずみレベルは 10 倍以上となっている。引張試験と圧縮試験の応力ひずみ関係の差異は、その破壊挙動の違いに起因しているといえる。配合 A の条件では、三軸引張試験では引張破壊が、三軸圧縮試験ではせん断破壊が発生しているといえる。

配合 B の三軸引張試験の応力ひずみ関係例を図 5 に示す。拘束圧の低い試験(BT-1)では配合 A の結果と同様に、ピーク応力に至るまで応力ひずみ関係はほぼ線形関係となっており、ピーク応力時のひずみも非常に小さい。一方、高拘束圧の試験(BT-6)では、ピーク応力に至るまでひずみ硬化挙動を示し、ピーク応力でのひずみも大きくなっていることがわかる。本試験の試験後の供試体を図 6 に示す。BT-6 では引張応力の方向に対し斜めに破断面が発生しており、引張破壊ではなくせん断破壊が発生していることがわかる。

試験結果より、三軸引張試験において強度が大きい配合 A の供試体は引張破壊を示し、強度の小さい配合 B の供試体は低拘束圧下で引張破壊を示し、高拘束圧下でせん断破壊を示すことが明らかとなった。配合 B の条件では引張条件下でも拘束圧により破壊形態が変化しており、引張からせん断に移行する領域でのセメント改良土の破壊挙動が得られたといえる。

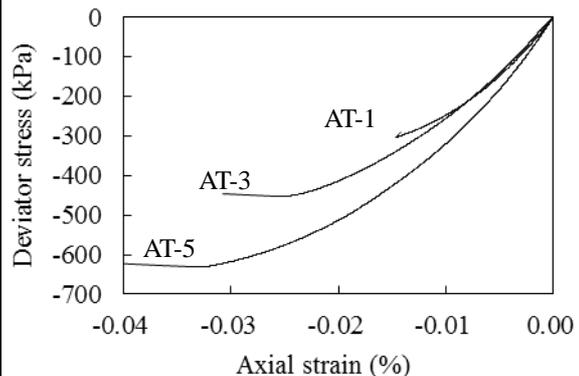


図 2 三軸引張試験応力ひずみ関係 配合 A

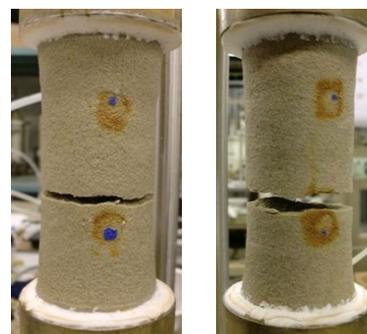


図 3 供試体の破壊状況 配合 A

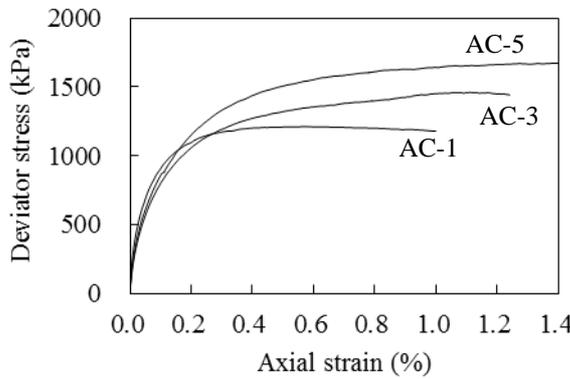


図4 三軸圧縮試験応力ひずみ関係 配合A

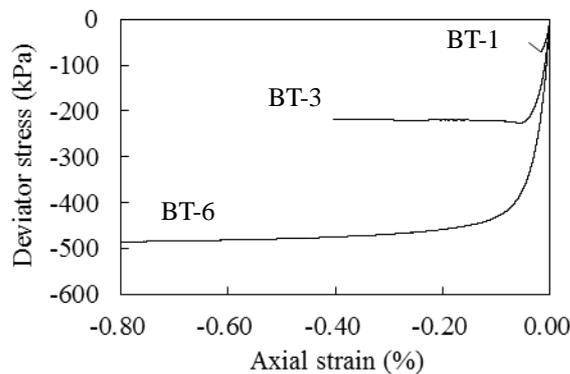
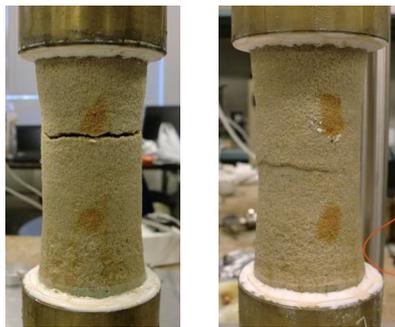


図5 三軸引張試験応力ひずみ関係 配合B



BT-1 BT-6
図6 供試体の破壊状況 配合B

2) 破壊規準

研究代表者らは、セメント改良土の破壊規準として、引張とせん断2つの破壊規準を適用することを提案してきた⁶⁾。本研究での試験結果についてその破壊規準を検証する。本破壊規準は次式で表される。

せん断破壊

$$F_s(\sigma_{ij}) = \sqrt{J_2} - \Gamma(\theta)(c/\tan\phi + p)k_f = 0,$$

$$k_f = \frac{6 \sin\phi}{\sqrt{3}(3 - \sin\phi)}, \quad \Gamma(\theta) = \frac{2\xi}{(1+\xi) - (1-\xi)\sin 3\theta},$$

$$\xi = \frac{3 - \sin\phi}{3 + \sin\phi}, \quad -\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{\pi}{6} \quad (1)$$

引張破壊

$$F_t(\sigma_{ij}) = 2\sqrt{J_2} / \sqrt{3} \sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) - p - T_f = 0$$

(2)

ここで、 σ_{ij} は有効応力、 J_2 は偏差応力の不変量、 θ はロード角、 c は粘着力、 ϕ はせん断抵抗角、 p は平均有効応力、 T_f は引張強度である。せん断破壊はモール・クーロン型の破壊規準を用いており、引張破壊は最少主応力が引張強度に達すると生じると仮定している。

本研究で得られたピーク応力を平均応力-偏差応力面にプロットしたものを図7に示す。図には、(1)式及び(2)式で表現されるせん断破壊面と引張破壊面を併せて示している。各規準に必要な粘着力 c とせん断抵抗角 ϕ および引張強度 T_f を表3に示す。 c と ϕ は三軸圧縮試験結果より設定し、 T_f は一軸引張試験結果より設定した。

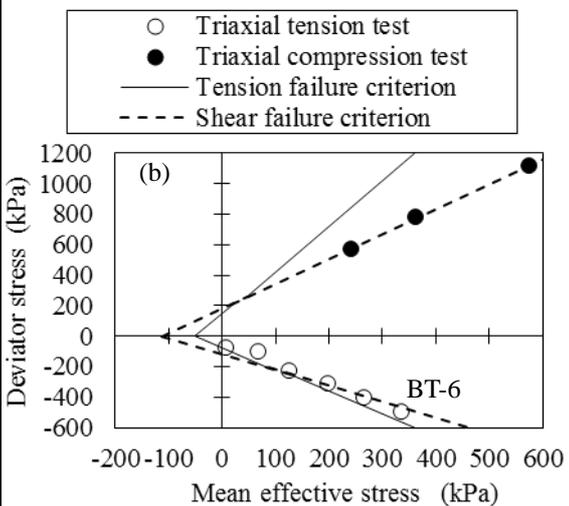
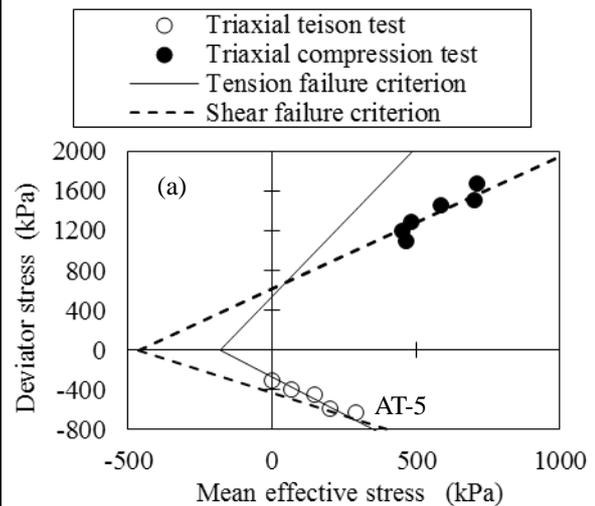


図7 ピーク応力状態と破壊規準 (a) 配合A (b) 配合B

三軸圧縮試験結果は、(1)式で表現されるせん断破壊面に乗っていることがわかる。図7(a)より配合Aの条件において、三軸引張試験結果は(2)式で表される引張破壊面に乗っていることがわかる。一方、図7(b)より配合Bの条件において、低拘束圧の三軸引張試験結果は(2)式で表される引張破壊面に乗っており、高拘束圧の結果はせん断破壊面に乗っていることがわかる。拘束圧の違いによる応力ひずみ関係(図5)の違いが顕著に表れていることから、配合Bの結果は拘束圧の変化にともない引張破壊からせん断破壊に移行しているといえる。これらのことより、(1)式及び(2)式で表現されるせん断と引張の破壊規準の組み合わせがセメント改良土の破壊規準として妥当であることが明らかとなった。

(2) 三軸試験のシミュレーション

研究代表者が開発してきた弾塑性モデルを有限要素法解析プログラム DIANA に組み込み、本研究で実施した三軸試験のシミュレーションを実施した。ここで、試験は要素試験として扱い、1要素モデルで解析を実施した。非線形解析における繰返し計算には初期剛性法を用いた。完全排水条件を仮定し一相系で解析を実施した。引張、せん断ともピーク応力後は、ひずみの局所化が発生し複雑な挙動を示すため、解析はピーク応力までとした。

解析で用いたパラメータを表3に示す。 c と ϕ は三軸圧縮試験結果より設定し、 T_f は一軸引張試験結果より設定した。弾性係数 E は三軸引張試験での初期剛性より設定した。ポアソン比 ν 、ひずみ硬化に関するパラメータ α と e_r は既往研究⁶⁾の値を用いた。

表3 材料定数

Parameter	Binder A	Binder B
E	3000 MPa	1000 MPa
ν	0.167	0.167
ϕ	33 degree	40 degree
c	300 kPa	90 kPa
T_f	180 kPa	50 kPa
α	1.05	1.05
e_r	0.0002	0.0002

配合Aにおける三軸引張試験のシミュレーション結果の例(AT-1、AT-5)を図8に示す。低拘束圧条件であるAT-1の応力ひずみ関係は本弾塑性モデルでうまくシミュレートできていることがわかる。高拘束圧条件であるAT-5において、解析結果がひずみ硬化挙動となり、試験結果と異なる結果となっている。これは解析において破壊挙動がせん断破壊と識別されたことが原因と考えられる。図7より、AT-5の条件は引張破壊とせん断破壊の境界上にあり、この境界部での挙動予測精度の向上は本モデルにおける今後の課題といえる。

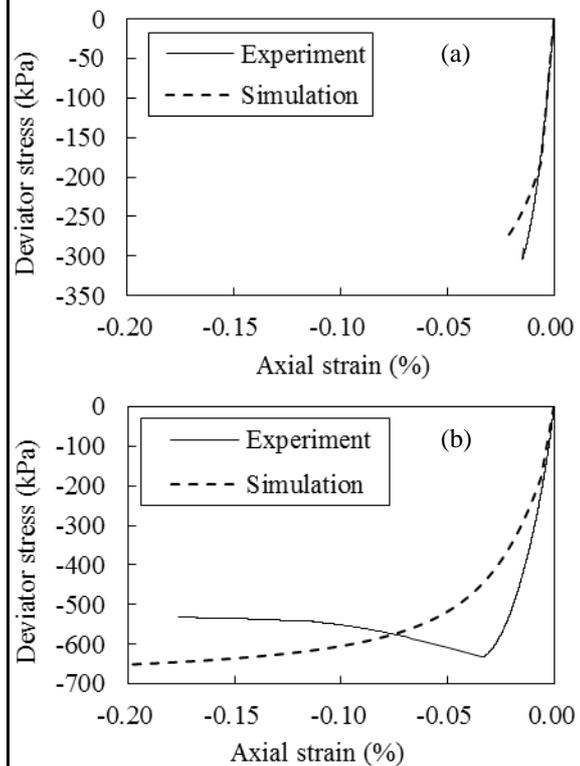


図8 三軸引張試験のシミュレーション 配合A (a) AT-1 (b) AT-5

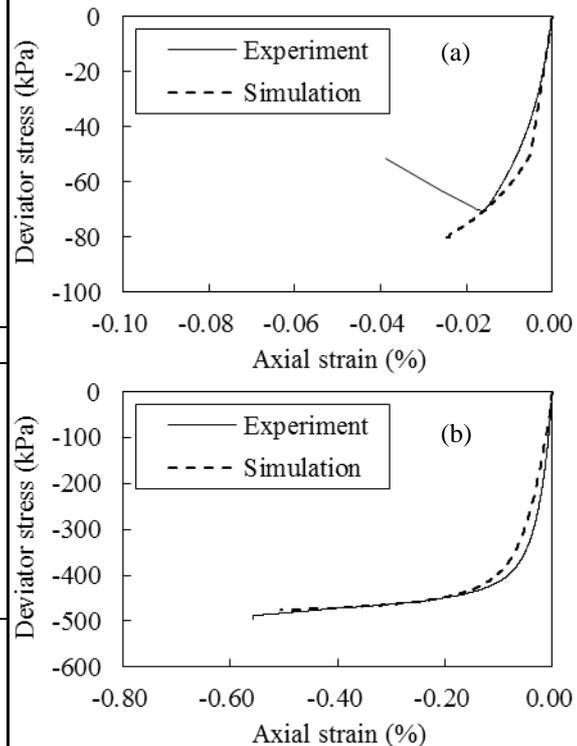


図9 三軸引張試験のシミュレーション 配合B (a) BT-1 (b) BT-6

配合Bにおける三軸引張試験のシミュレーション結果の例(BT-1、BT-6)を図9に示す。低拘束圧条件であるBT-1と高拘束圧条件であるBT-6の試験での応力ひずみ関係におけるひずみレベルは1オーダー異なっているが、本弾塑性モデルは両者の挙動をうまく

シミュレートしていることがわかる。特に、高拘束圧条件である BT-6 におけるひずみ硬化挙動を本弾塑性モデルは適切に表現している。この時、弾塑性モデルは破壊挙動をせん断破壊と識別しているが、試験と解析の一致は引張条件でもせん断破壊が生じていることの裏付けになっている。

参考文献

- 1) Kitazume M., Maruyama K. (2007) : Internal stability of group column type deep mixing improved ground under embankment loading. *Soils and Foundations*, Vol. 47(3), 437-455.
- 2) Namikawa T., Koseki J., Suzuki Y. (2007) : Finite element analysis of lattice-shaped ground improvement by cement-mixing for liquefaction mitigation. *Soils and Foundations*, Vol. 47(3), 559-576.
- 3) 土木研究センター(1999) : 陸上工事における深層混合処理工法 設計・施工マニュアル
- 4) 日本建築センター(1997) : 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針
- 5) Namikawa T., Koseki J. (2007) : Evaluation of tensile strength of cement-treated sand based on several types of laboratory tests. *Soils and Foundations*, Vol. 47(4), 657-674.
- 6) Namikawa T., Mihira S. (2007) : Elasto-plastic model for cement-treated sand. *International Journal for Numerical and Analytical Method for Geomechanics*, Vol. 31(1), 71-107.

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 1 件)

- 1) Namikawa T. : Conditional probabilistic analysis of cement-treated soil column strength. *International Journal of Geomechanics*, Vol. 16, No.1, 2016, pp.04015021-1-10.
DOI:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000481. 査読あり

[学会発表](計 4 件)

- 1) Namikawa T. : Simulation of triaxial tension behavior of cement-treated soil by elasto-plastic model. 6th International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environmental, Bangkok, Thailand, 2016 (in submitted). ISBN:978-4-9905958-6-9 C3051.
- 2) 安藤嘉哉, 並河努 : セメント改良土の一軸引張試験. 第 50 回地盤工学研究発表会, 札幌, 2015. pp.661-662.
- 3) Namikawa T., Hiyama S. : Triaxial tension test of cement-treated soil.

15th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, Vienna, Austria, Vol.1, 2014, pp.329-334. ISBN 978-3-902593-01-6.

- 4) 檜山将太, 並河努 : セメント改良砂の引張強度及び変形特性. 第 49 回地盤工学研究発表会, 北九州, 2014. pp.615-616.

[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

並河努 (Namikawa Tsutomu)
芝浦工業大学 工学部 教授
研究者番号 : 50455151