

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 24年 4月 20日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560518

研究課題名（和文） 杭，コーン，SPTサンプラーなどの貫入体による地盤応力変化に関する基礎的研究

研究課題名（英文） A fundamental study on stress change in ground due to penetration projectile pile, cone and SPT sampler

研究代表者

松本 樹典（MATSUMOTO TATSUNORI）

金沢大学・環境デザイン学系・教授

研究者番号：10143877

研究成果の概要（和文）：

N値やCPTデータを用いた経験式による杭支持力予測の精度向上を目的として、杭およびSPTサンプラー（開端杭）の貫入や水平載荷による地盤内応力変化の違いを把握する実験と解析を実施した。実験では、PIVシステムによって、鉛直および水平載荷時の杭周辺地盤の変位、変形、ひずみ分布を詳細に得ることができた。また、管内土の押し上げ実験とそのDEM解析を通じて、SPTサンプラー（開端杭）の挙動に大きな影響を及ぼすパラメータを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Experimental and analytical studies were carried out to clarify the penetration mechanism of pile and SPT sampler (open-ended pipe pile). In the experiments of penetration and cyclic horizontal loading of piles, displacements of the surrounding soils were monitored using a PIV technique. And, strain field of the ground was successfully estimated, from which stress field would be estimated in future study.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

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：基礎，杭，変形，サンプラー

1. 研究開始当初の背景

例えば、ある地盤に同じ径と長さを持つ杭を地盤に施工したとしても、その支持力は施工法（打込み、押込み、埋込み）によって、大きく異なることが知られている。この大きな原因は、杭施工段階における地盤内応力の変化の違いによるものであることは、幅広く認識されている。

しかし、杭の施工による地盤内応力変化お

よび杭に作用する応力変化を具体的に評価することは、難しいのが現状である。FEMによって、杭貫入による地盤応力の変化を推定することも行われているが、地表面からの杭の地盤への貫入は、大変形と破壊を伴うものであり、FEMの適用には、限界がある。施工された杭の支持力特性（荷重-沈下関係）を高い信頼性で評価するには、載荷試験の実施が最も好ましい。しかしながら、載荷試験に

要する費用と時間のため、多くの場合標準貫入試験 (SPT) の N 値やコーン貫入試験 (CPT) データを用いた経験式によって、支持力を算定しているのが、現状である。このような現状を鑑みると、 N 値や CPT データを用いた経験式による杭支持力予測の精度向上のためには、まず杭、SPT サンプラー、コーンの貫入による地盤内応力変化の違いを把握することと、それらを評価できる手法が必要である。

さらに、杭であっても、開端杭 (例えば、鋼管杭) の場合、杭周囲地盤の応力変化に加え、杭の地盤への貫入に伴って杭内部に形成される管内土の応力状態も、杭支持力特性に大きく影響する。鋼管杭の大口径化が進んでいる現状において、管内土形成のメカニズムとその応力状態の評価は、重要な研究課題である。

2. 研究の目的

主な研究目的は、以下の通りである。

- (1) 貫入体を模型砂地盤に押し込んだ場合、および水平載荷を行った時に、貫入体に作用する地盤抵抗の地盤変形 (ひずみ) の測定
- (2) SPT サンプラーや開端杭内部の土の応力状態の測定と解析

3. 研究の方法

研究目的 (1)

模型土槽を図 1 に示す。土槽はステンレス製で、前面にアクリル板が取り付けられており、実験中に模型地盤および貫入体の挙動の観察が可能である。なお、杭周辺地盤に 3 mm 径のターゲットを設置する。

模型杭を図 2 に、その諸元を表 1 に示す。杭体はアルミ製の矩形断面を有し、杭表面特性の異なる 2 種類の杭 (滑らかな杭: アルミのまま、粗い杭: 表面に布やすり #No. 40 を貼付) を用いた。模型地盤への杭体の設置については、所定の根入れ深さ (350 mm) を想定した埋込み杭とした。

模型地盤は気乾状態の珪砂 3 号 (表 2 参照) を使用した。模型作製はタンピングにより層厚 50mm ごとに締固め、均質な密詰め地盤 ($D_r = 90\%$ 程度) を作製した。また、地盤条件は表 3 に示す通りである。

載荷方法を以下に示す。

- (1) 鉛直載荷→除荷 (モータージャッキを利用)
 - (2) 杭頭に重錘を設置 (20N 刻みに 100N まで)
 - (3) 繰返し水平載荷 (ワイヤーによる牽引)
 - (4) 重錘の取外し
 - (5) 再鉛直載荷→除荷 (モータージャッキを利用)
- 計測する物理量を以下に示す。

- (1) 杭頭の鉛直および水平荷重

- (2) 杭頭鉛直および水平変位
- (3) 杭体ひずみ
- (4) 地盤内変形場

本模型実験では、杭および模型地盤をカメラでアクリル板側から撮影し、ターゲットの変位状況を記録した。また高精度運動解析ソフトを利用して、ターゲットを追跡し、経時的な x 座標値、 y 座標値を算出した。さらに有限要素法の 3 角形要素を援用し、空間内のひずみ分布を算出した。杭の種類、水平載荷時の鉛直荷重レベルを変えて、一連の実験を行った。

研究目的 (2)

図 3 に示すような方法で、模型鋼管杭 (表 4) 内部の管内土の押し上げ実験を行った。鋼管杭には、内周面摩擦分布を得るために、軸方向にひずみゲージを貼付けた。実験パラメータは、管内土高さ H 、相対密度 D_r 、管内土種類 (珪砂とアルミナボール) である。

管内土の挙動をより詳細に検討することを目的として、図 4 に示すように、押し上げ実験の DEM 解析を実施した。



図 1 小型模型土槽

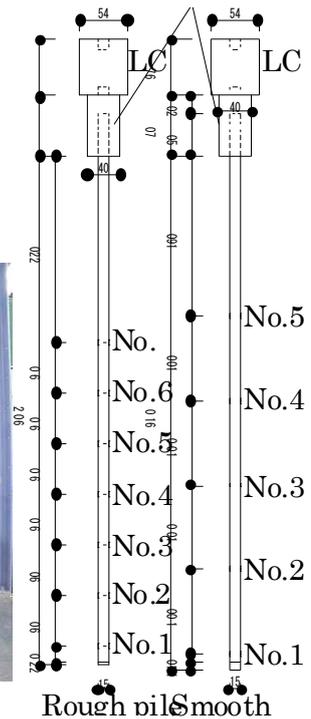


図 2 模型杭 (mm)

表 1 模型杭の諸元

ヤング係数(GPa)	63.78
長辺(mm) D	15
短辺(mm)	10
肉厚(mm)	1.2
断面積(mm ²)	54.24
断面二次モーメント(mm ⁴)	1546

表2 3号珪砂の物理・力学的特性

土粒子密度 ρ_s (t/m ³)	2.645
平均粒径 D_{50} (mm)	1.43
均等係数 U_c	1.60
最大間隙比 e_{max}	0.964
最小間隙比 e_{min}	0.703
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (t/m ³)	1.554
最小乾燥密度 ρ_{dmin} (t/m ³)	1.347
内部摩擦角 ϕ' (deg)($D_r=90\%$)	41.8
内部摩擦角 ϕ' (deg)($D_r=70\%$)	39.6

表3 地盤条件

土槽	高さ(mm)	600
	幅(mm)	600
	奥行き(mm)	300
地盤高さ(mm)		550
杭根入れ長さ(mm)		350
相対密度(%)		90

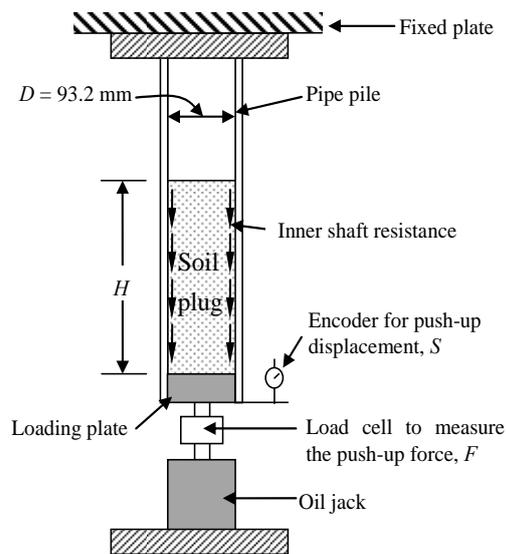


図3 管内土押し上げ実験の概要

表4 模型鋼管杭の諸元

Property	Value
Young's modulus	201 GPa
Length	1.1 m
Inner diameter	93.2 mm
Outer diameter	101.4 mm

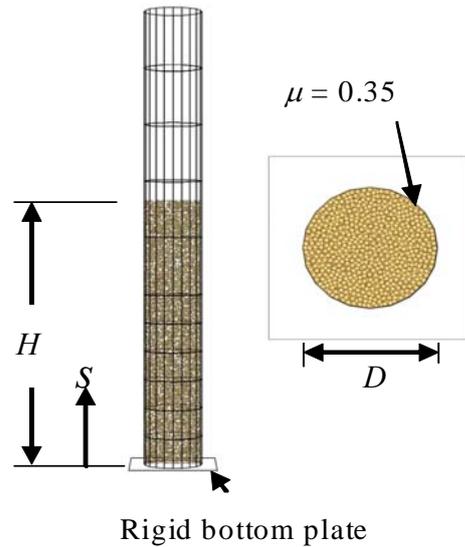


図4 管内土押し上げ実験のDEM解析モデル

4. 研究成果

H21年度

地盤の変形、ひずみを求めるため、杭と地盤対称面にターゲットを設置しその二次元的変位をPIV手法によって測定した。測定したターゲットの変位から、有限要素法によって地盤の変形およびひずみ分布を計算するプログラムを開発した。

次に、同じく乾燥砂模型地盤において、単杭の鉛直荷重および水平荷重試験を行った。鉛直荷重実験では、杭周面付近と杭先端付近の地盤の変形挙動の明確な違いが観察された。水平荷重試験においても、杭周辺地盤の変形挙動を明確に観察することができた。

ここでは、紙面の都合上、主に水平荷重実験結果を述べる。

杭頭部の水平荷重—水平変位を図4に示す。荷重はおよそ15 mmまで変位を与え、その後除荷した。最大水平荷重点(図4中の丸印)でのギャップの生成状況を図5に示す。引張り側の地盤・杭間にギャップが生成している。

さらに図6のように杭周辺部のターゲットを用いて3角形要素を作成し、ひずみ分布を求めた。図7は、相対密度 $D_r = 70\%$ の実験結果より求めた最大水平荷重点におけるひずみ分布(x 方向ひずみ \cdot_{xx} と y 方向ひずみ \cdot_{yy})を、図8は $D_r = 90\%$ の実験での最大水平荷重点におけるひずみ分布を、それぞれ示す。図7, 8中、赤色は圧縮を、青色は引張りを表わし、円の大きさがひずみの大きさを示す。

相対密度 $D_r = 70\%$ の実験では、荷重荷重が小さいにも関わらず、 $D_r = 90\%$ の実験よりも大きなひずみが発生しており、地盤剛性が

低いことが分かる。また、地盤表面付近と杭先端付近の圧縮・引張りの様子から、短杭に見られるような剛体的な挙動を示している。

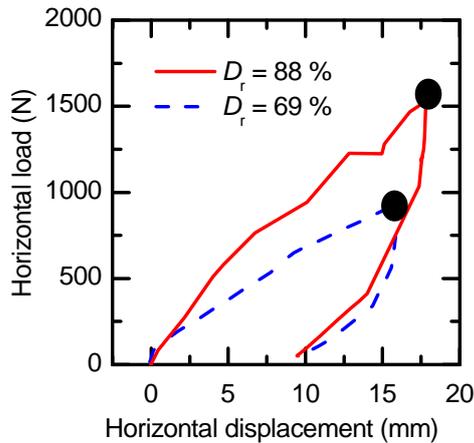


図4 水平荷重－水平変位関係

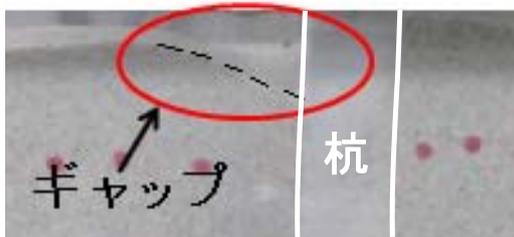


図5 ギャップ生成 (水平変位 15 mm 時)

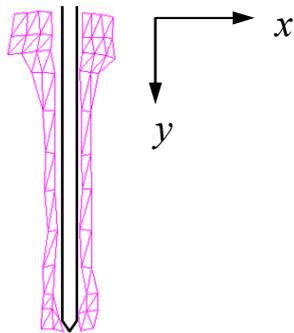


図6 水平荷重初期図

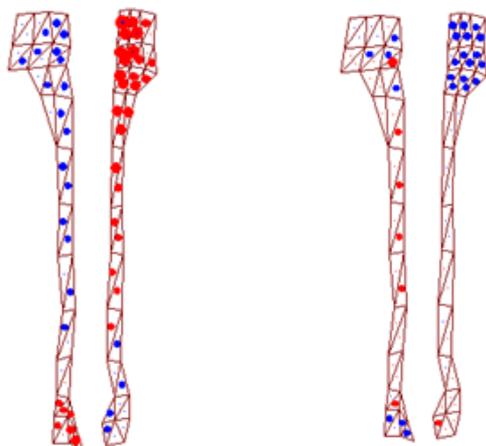


図7(a) ϵ_{xx} 分布図
($D_r = 70\%$)

図7(b) ϵ_{yy} 分布図
($D_r = 70\%$)

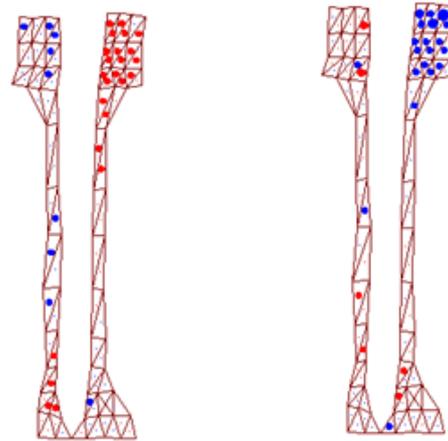


図8(a) ϵ_{xx} 分布図
($D_r = 90\%$)

図8(b) ϵ_{yy} 分布図
($D_r = 90\%$)

すなわち、図7(a)の杭の左側地盤に着目すると、杭上部位置では地盤に引張りひずみが発生しているのに対し、杭先端付近では地盤に圧縮ひずみが発生している。一方、 $D_r = 90\%$ の実験では、杭頭付近の地盤にひずみが集中しており、杭先端付近の地盤のひずみは小さく、杭体は大きな曲げ変形を示して、たわんでいることが分かる。

以上の実験から、従来鉛直荷重杭に利用されていた可視化実験手法が水平荷重杭にも適用できることを示した。

半割の杭と地盤を用いた杭と地盤の変形挙動の観察手法は、これまで他の研究によっても採用されているが、水平荷重を受ける杭に適用したのは、本研究が最初であり、本手法を今後群杭などにも適用できる可能性を示すことができた。

平成 22 年度

単杭を地盤に押し込んだ時、またその後繰返し水平荷重を受けた時の、杭と周辺地盤の変形挙動を観察および計測する手法の開発に主眼を置いて、研究を進めた。そのために、平成 21 年度の研究において作成した、半分割した杭体と地盤モデルを用い、一連の実験を行った。実験パラメータとして、砂地盤の密度(相対密度 70%と 90%)、杭表面の粗度(滑らかな表面と砂を貼りつけた表面)、水平荷重時の杭頭の鉛直荷重レベルを変えて、それらが杭および周辺地盤の挙動に与える影響を調べた。

地盤挙動の観察手法として、地盤の任意の位置に設置したターゲットの変位から、内挿関数を用いて、地盤の格子点における変位を計算し、さらにこれらの変位から格子点における地盤の鉛直、水平、せん断ひずみを計算できる手法(プログラム)を完成した。

杭の荷重実験では、まず模型地盤にあらかじめ設置された模型杭の鉛直荷重実験を行い、鉛直荷重-変位関係を計測し、これから第1極限荷重と第2極限荷重を求めた。通常、現場での水平荷重実験では、鉛直荷重が作用しない条件で実施される。しかし、実際の地震や風荷重などの水平荷重を受ける際には、上部構造物の荷重(死荷重)が杭頭に作用している。鉛直荷重レベルが繰り返し水平荷重を受ける単杭および周辺地盤の挙動に与える影響を調べるために、模型実験においては、第1極限荷重の0、10%、20%、30%、50%、70%の鉛直荷重を載荷した条件で、繰り返し水平荷重を行った。載荷方式は、変位制御方式として、両振りで杭直径の1、2、3、4、5%までの水平変位を杭頭に与えた。杭頭荷重が0の場合、水平荷重時の鉛直変位は、ほとんど生じなかった。杭頭荷重レベルが大きくなるほど、水平荷重時の鉛直変位は増加した。滑らか杭と粗い杭の挙動を比較すると、粗い杭(摩擦杭)の沈下量は、滑らか杭に比べて、小さくなることがわかった。

本年度に開発した PIV システムによって、鉛直および水平荷重時の杭周辺地盤の変位、変形、ひずみ分布を詳細に得ることができた。

一例として、幅 15mm の貫入体(杭)を 15mm だけ、押込んだ時の地盤のせん断ひずみ分布を、図 9 に示す。

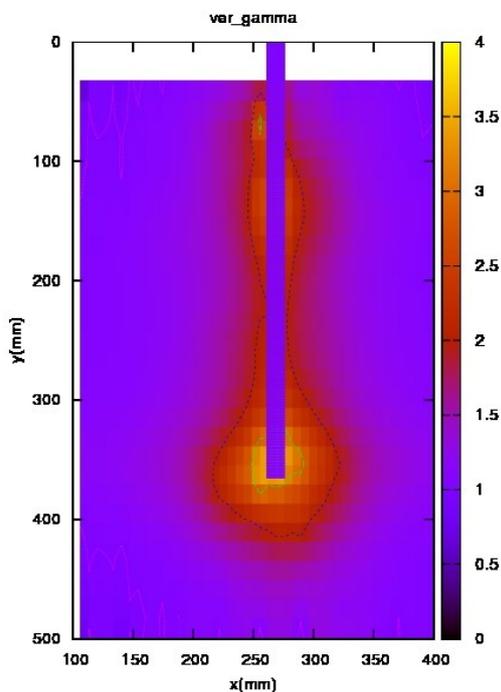


図 9 PIV 手法による地盤のせん断せん断ひずみ (%) 分布

平成23年度

以下の二つのテーマに主眼をおいて、研究

を進めた。

テーマ 1 の研究内容と成果：

複数の貫入体(杭)が鉛直荷重と繰り返し水平荷重が受ける時の、貫入体に発生する力(あるいは応力)と周辺地盤の変位・変形挙動を実験的に調べた。実験では、杭頭を剛なフーチングで固定した、幅 $D=15$ mm、長さ $L=300$ mm の3本の貫入体を、杭中心間隔 $S=45$ mm、60 mm で、あらかじめ模型砂地盤に設置し、その後この基礎構造物を 4 mm 程度押し込んだ。その後、フーチング部に繰り返し水平荷重を与えた。鉛直荷重段階では、両端の杭が、中心杭に比べて、大きな荷重を負担した。また、水平荷重時では、変位する前面に位置する貫入体が非常に大きな抵抗力を受けた。これらの挙動は、これまでに知られている群杭挙動に対応している。地盤の挙動に着目すると、鉛直荷重時には、貫入体に取り囲まれた地盤があたかも一つの大きな貫入体であるかのような挙動が観察された。水平荷重時には、貫入体の前面および後面に、地盤と貫入体の間にギャップが生成された。これらの実験データを今後詳細に解析することで、貫入体周辺地盤内の応力変化をある程度の精度で推定できる段階に達した。

テーマ 2 の研究内容と成果

開端杭や標準貫入試験サンプラーの地盤への貫入を念頭に置き、管内土の挙動に焦点を絞り、アルミナボールを用いた管内土の押上げ実験とこの DEM 解析を行った(図 10 に一例を示す)。このテーマでは、管内土高さ H 、管内径 D 、地盤密度 D_r を変えて、押上げ実験を行った。その結果、サンプラー内部の土の応力状態は、 H/D および D_r に大きく影響されることが示された。また、DEM 解析に基づけば、土粒子間の摩擦係数 \cdot_{intri} 、土の内部摩擦係数 \cdot および土粒子とサンプラー内面間の摩擦係数 \cdot も、サンプラー内部の土の応力状態に影響するパラメータであることが示された。

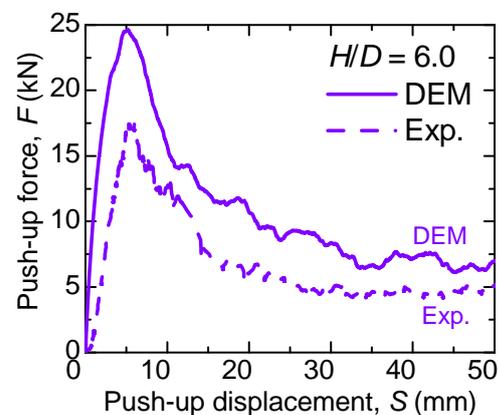


図 10 管内土押し上げ実験結果と DEM 解析

図 11 は、パラメトリックスタディの結果の一例である。

このことは、今後 N 値の有する力学的意味を考察するのに、貴重な研究成果といえる。

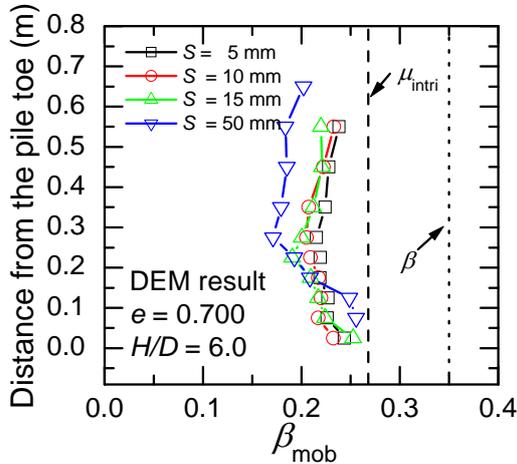


図 11 押し上げ実験の DEM による内周面における動員摩擦係数

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 2 件)

- ① Thongmune, S., Kobayashi, S., Matsumoto, T., Push-up load tests using uncrushable particles and its DEM analyses, Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, Vol. 42, No. 2 (2011), 43-55, 査読有
- ② Thongmune, S., Matsumoto, T., Kobayashi, S., Kitiyodom, P., Kurosawa, K., Experimental and numerical studies on push-up load tests of sand plug in a steel pipe pile, Soil and Foundations, Vol. 51, No. 5 (2011), 959-974, 査読有

[学会発表] (計 7 件)

- ① 白井 聡, 小林俊一, 松本樹典, 水平荷重を受ける単杭および周辺地盤挙動の可視化に関する基礎的実験, 第45回地盤工学研究発表会, 2011年8月18日, 愛媛大学 (愛媛県)
- ② Thongmune, S., Matsumoto, T., Kobayashi, S., DEM simulations of push-up load tests of sand plugs in steel pipe pile, Proceedings of International Symposium on Geomechanics and Geotechnics: From

Micro to Macro, Shanghai, 2010.10.10, Tonji University (China)

- ③ 室田博善, トンムニー スリヤー, 小林俊一, 松本樹典, アルミナボールを用いた管内土の押し上げ実験, 第46回地盤工学研究発表会, 2011年7月6日, 神戸国際会議場 (兵庫県)
- ④ Thongmune, S., Murota, H., Kobayashi, S., Matsumoto, T., DEM simulations of push-up load tests of uncrushable soil plug within a steel pipe pile, 第46回地盤工学研究発表会, 2011年7月6日, 神戸国際会議場 (兵庫県)
- ⑤ 安田達士, 荒木拓真, 松本樹典, 小林俊一, 鉛直および水平荷重を受ける小型模型単杭の可視化実験, 第46回地盤工学研究発表会, 2011年7月6日, 神戸国際会議場 (兵庫県)
- ⑥ 荒木拓真, 安田達士, 小林俊一, 松本樹典, 基礎構造物周辺の地盤変形場を定量的に評価するための画像処理法に関する一考察, 第46回地盤工学研究発表会, 2011年7月6日, 神戸国際会議場 (兵庫県)
- ⑦ Thongmune, S., Kobayashi, S., Matsumoto, T., Effect of soil-pile friction coefficient on soil plug capacity, Proceedings of International Conference on Geotechnics for sustainable development, GEOTEC HANOI 2011, 2011.10.06, Fortuna Hotel (Vietnam)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 樹典 (MATSUMOTO TATSUNORI)
金沢大学・環境デザイン学系・教授
研究者番号: 10143877

(2) 研究分担者

小林 俊一 (KOBAYASHI SHUN-ICHI)
金沢大学・環境デザイン学系・准教授
研究者番号: 10243065

(3) 連携研究者

なし