

平成 30 年 4 月 25 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06208

研究課題名(和文) 組合せ荷重を受ける斜杭パイルド・ラフトおよび群杭基礎の変形挙動に関する研究

研究課題名(英文) Study on deformation behaviours of piled raft and pile group with batter piles subjected to load combination

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：組合せ荷重を受ける斜杭を有する群杭(PG)及びパイルド・ラフト(PR)の挙動を調べるため、乾燥砂地盤において模型基礎の載荷実験を行った。静的試験として、ラフトのみ、単杭、PG及びPRの鉛直載荷試験、鉛直荷重を載荷した条件での、PG及びPRの繰返し水平載荷実験を行った。これらの実験は、直杭のみを有する模型基礎および斜杭を有する模型基礎に対して実施した。これらの実験より、いずれの荷重条件においても、斜杭を有すパイルド・ラフトと群杭は、直杭のみを有する基礎に比べて変形が抑制され、変形が大きくなっても抵抗が持続するような、粘り強い基礎構造形式であることが示された。

研究成果の概要(英文)：Static load tests on pile group model (PG) and piled raft model (PR) were carried in model dry sand ground, in order to investigate their behaviours under combination loading. In the static load tests, vertical load tests on single pile, raft alone, PG and PR, and cyclic horizontal load tests on PG and PR with a constant vertical load were carried out. The tests were conducted for PG and PR models with vertical piles alone or with batter piles. It was demonstrated that deformations of PR and PG with batter piles are suppressed compared to those without batter pile in any loading conditions, and that foundation models with batter piles has ductile (tenacious) response.

The static load test results were fairly simulated by three-dimensional FEM analyses in which the mechanical parameter of the sand were estimated from the triaxial tests of the sand.

研究分野：基礎工学

キーワード：パイルド・ラフト 群杭 模型載荷実験 組合せ荷重 砂地盤 変形 荷重分担 FEM解析

### 1. 研究開始当初の背景

現在、杭基礎構造物の設計の主流である許容応力度設計法を、限界状態設計や性能規定型設計に移行していくには、対象となる基礎構造物の荷重-変形関係を設計に考慮することが不可欠である。我国の場合、鉛直荷重に加えて、風荷重、地震荷重（静的等価水平力）、転倒モーメントを外力として考慮しなければならない。また、多くの杭基礎構造物は、現在の設計でしばしば仮定されているような群杭基礎ではなく、パイルド・ラフト構造である。例えば、道路橋示方書下部構造編では、「外力はすべて杭のみで抵抗する」ように設計することが規定されている。しかし、実際にはフーチング（ラフト）が接地している、あるいは根入れされているため、鉛直荷重および水平荷重のかなりの割合がフーチングによっても受け持たれていることは想像に難くない。また、道路橋示方書下部構造編では、杭中心間隔比  $s/D$  ( $s$  は杭中心間隔、 $D$  は杭直径) が 2.5 以上になると杭同士の相互作用（変形に関する群杭効果）は、無視できるとされている。しかしながら、申請者らの研究を含むこれまでの研究によって、この仮定は妥当ではないことが指摘されている。すなわち、道路橋示方書下部構造編に基づく設計では、杭基礎の基礎構造物の荷重-変形関係を精度高く計算しているとは言えず、同時に杭に発生する軸力、曲げモーメント、せん断力を正しく計算しているとは言えない。

### 2. 研究の目的

1. で述べたような現在の橋梁杭基礎の設計方法をブレークスルーするには、新しい技術を導入することが一つのきっかけになると、申請者らは考えている。このような技術の一つとして、本研究では斜杭の利用を目指す。パイルド・ラフト基礎を橋梁に適用した例は、ドイツにおいて一例のみが報告されている。斜杭を有するパイルド・ラフトの橋梁基礎の適用は、国内外においてこれまでに報告されていない。

そこで、本研究の目的を以下のように設定した。

- 1) 組合せ荷重（鉛直、水平、転倒モーメント）を受ける、斜杭を有するパイルド・ラフトおよび群杭基礎の変形挙動を模型実験によって詳細に調べる。
- 2) 実験のシミュレーション解析および実験のみでは網羅できない杭基礎条件を考慮したパラメトリック解析を実施する。
- 3) 上記の研究結果に基づいて、斜杭を有するパイルド・ラフトおよび群杭基礎の橋梁杭基礎への適用について提案を行う。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 模型実験方法

##### 模型基礎

図 1 は、実験で用いた杭基礎模型である。基礎模型は、ほぼ剛とみなせるジュラルミン製のラフトと 3 本あるいは 6 本の杭から構成される。端杭は直杭あるいは斜杭(batter pile)となっている。

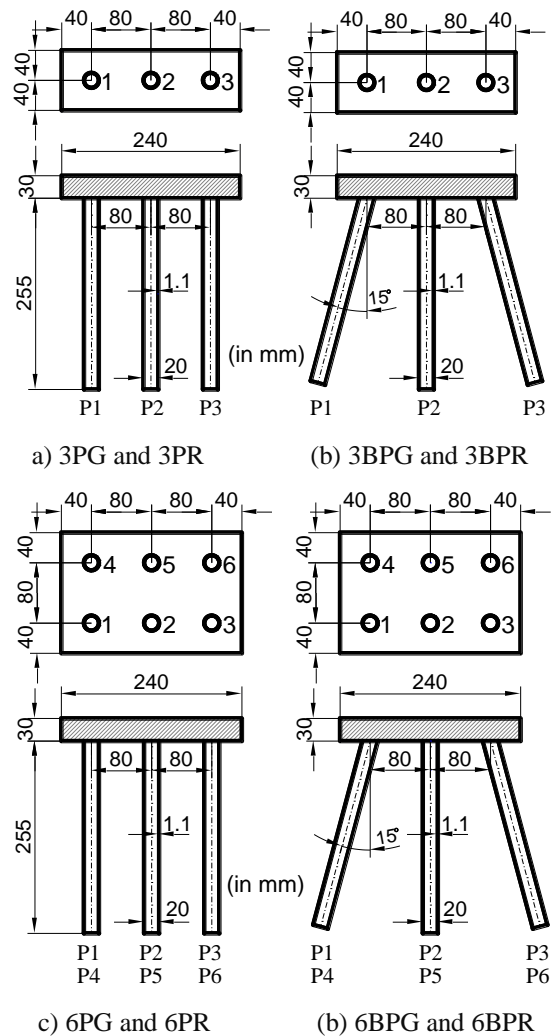


図 1 模型杭基礎

模型杭には、アルミニウム管を用いた。ただし、先端は閉塞条件とした。模型杭の諸元を表 1 に示す。

杭の軸力、曲げモーメント、せん断力を測定するため、模型杭には、図 2 に示すように、ひずみゲージを貼付けた。そして、周面摩擦を増加するため、杭表面に砂粒子を固着した。

表 1 模型杭の諸元

Property	Value
Outer diameter, $D$ (mm)	20
Wall thickness, $t$ (mm)	1.1
Effective length from raft base, $L$ (mm)	255
Young's modulus, $E_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	70267
Poisson's ratio, $\nu$	0.31

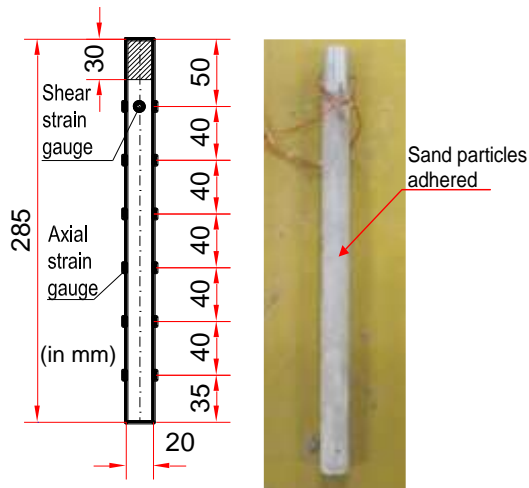


図2 模型杭

### 模型地盤

模型地盤には、乾燥した珪砂6号を用いた。その物理的定数を表2に示す。

表2 珪砂6号の物理的定数

Property	Value
Density of soil particle, $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	2668
Maximum dry density, $\rho_{dmax}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1604
Minimum dry density, $\rho_{dmin}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1269
Maximum void ratio, $e_{max}$	1.103
Minimum void ratio, $e_{min}$	0.663
Maximum grain size, $d_{max}$ (mm)	0.5

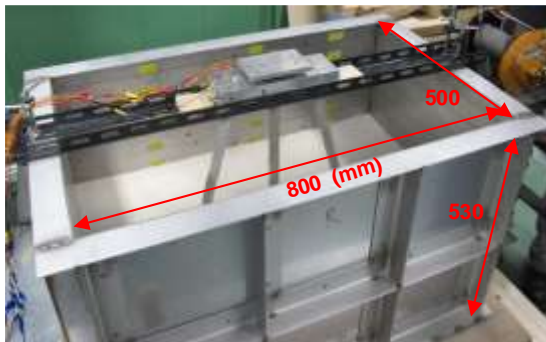


図3 模型地盤土槽

模型地盤は、図3に示す鋼製土槽（幅800 mm、高さ530 mm、奥行き500 mm）内に作成した。砂を一層約50mm程度になるように土槽に入れ、その後相対密度  $D_r$  が80%になるようにタンピングによって地盤密度を調整した。計11層分この作業を繰り返し、模型地盤を作成した。模型基礎の設置、地盤が高さが所定の値に達した時点で、模型基礎を図3に示すように設置し、その後上記の地盤作成を

続けた。群杭基礎（PG: Pile Group）の実験では、ラフト底面と最終地盤表面の間に20 mmのギャップができるようにした（3PG, 3BPG, 6PG, 6BPG）。パイルド・ラフト（PR: Piled Raft）の実験では、ラフト底面が最終地盤表面と一致するようにした（3PR, 3BPR, 6PR, 6BPR）。

### 載荷実験方法

図1に示した4つの模型基礎について、それぞれ鉛直載荷実験と水平載荷実験を行った。鉛直載荷実験では、スクリージャッキを用いて、変位制御方式でラフトに鉛直変位を与えた。鉛直荷重をロードセルで、鉛直変位をダイヤルゲージで測定した。

水平載荷試験では、まずラフトに鉛板を置くことで鉛直荷重を与えた（図4）。その後、ウィンチとワイヤーを用いて、変位制御方式で、繰り返し水平載荷を行った。水平荷重はロードセルで、ラフトの水平変位と鉛直変位はダイヤルゲージで測定した。ラフトの2か所で測定した鉛直変位から、ラフトの傾斜も算定した。

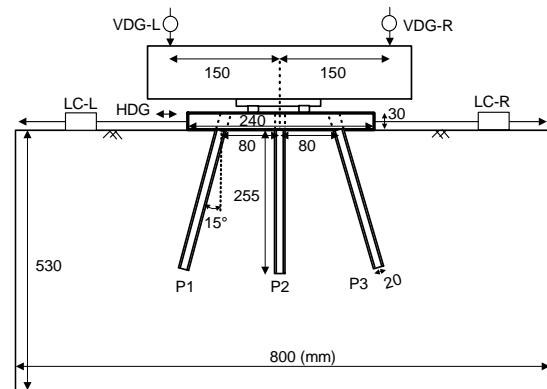


図4 繰り返し水平載荷実験の状況

### 3.2 地盤試料の三軸実験

模型地盤の力学的挙動を把握するために、砂試料の三軸CD試験を実施した。初期圧密圧力  $p_0 = 7, 17, 27, 50$  kPa とした4回の試験を実施した。

## 4. 研究成果

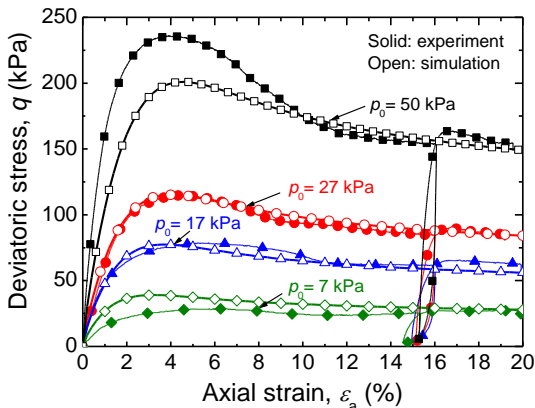
### 4. 1 三軸試験のシミュレーション解析

載荷実験の FEM 解析に用いる適切な地盤モデルとそのパラメータを選択するために、まず、三軸 CD 試験のシミュレーション解析を実施した。

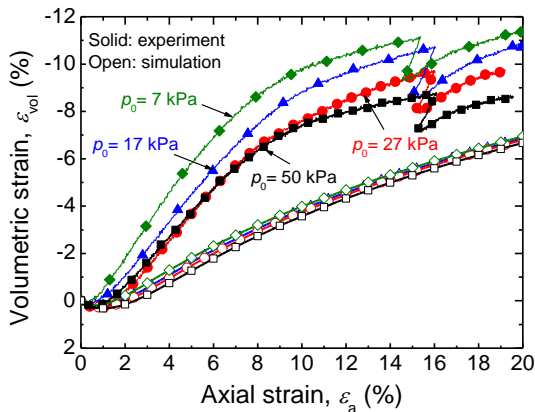
土の構成モデルとして、剛性の応力依存性、ひずみ軟化挙動、ダイラタンシーの非線形性、繰返し塑性を考慮できる hypoplastic model (Wolffersdorff, 1996)を用いた。

図 5 は、三軸 CD 試験の実験結果とシミュレーション解析結果の比較である。シミュレーション解析では、表 3 に示す地盤パラメータ値を用いた。シミュレーション解析結果は、実測のダイラタンシーを過小評価しているが (図 5b)、ダイラタンシーの非線形性を定積的に表現している。軸ひずみと主応力差の関係については、シミュレーション解析結果は、定量的および定性的に試験結果をよく再現している。

そこで、次に説明する載荷実験の FEM 解析では、表 3 に示した地盤パラメータを一貫して用いた。



(a) 主応力差  $q$  と軸ひずみ  $\varepsilon_a$  の関係



(b) 体積ひずみ  $\varepsilon_{vol}$  と軸ひずみ  $\varepsilon_a$  の関係

図 5 砂試料の三軸 CD 試験結果とシミュレーション結果の比較

表 3 三軸試験のシミュレーション解析で用いた hypoplastic model のパラメータ

Item	Value	Item	Value
$\varphi_c$ (deg.)	31	$m_R$	5
$h_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	2000	$m_T$	2
$n$	0.28	$R_{max}$	$5 \times 10^{-5}$
$e_{d0}$	0.663	$\square_r$	0.5
$e_{c0}$	1.1	$\square$	1
$e_{i0}$	1.2	$p_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$3 \times 10^{-3}$
$\alpha$	0.12	$e$	0.739
$\beta$	1.2		

### 4. 2 載荷実験結果とそのシミュレーション解析

#### 基礎と地盤の FEM モデル、及び解析手順

図 6 は、水平載荷実験の基礎と地盤の FEM モデル化の一例である。実験の対称性を考慮して、基礎と地盤の半分のみをモデル化している。杭の周面およびパイルド・ラフト (PR) の場合にはラフト底面にモール・クーロン型の境界要素を配置した。

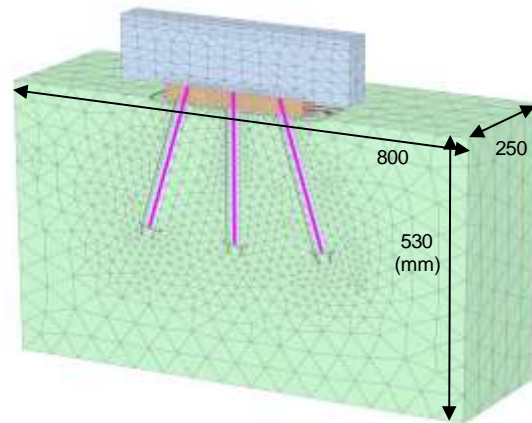


図 6 水平載荷実験の基礎と地盤の FEM モデルの例

水平鉛直載荷実験の解析手順は、以下の通りである。

- 1) 地盤のみをモデル化して、自重解析を行う。
- 2) 基礎をモデル化して、再度自重解析を行う。
- 3) ラフト上面の重り (鉛板) をモデル化し、実験と同様な条件で、鉛直載荷段階の解析を行う。
- 4) ラフトに水平変位を与えることによって、水平載荷段階の解析を行う。

#### 水平載荷の実験結果と FEM 解析結果

図 7 は、6 本杭基礎の水平荷重と無次元化水平変位  $u/D$  の関係の実験結果である。1 回目の水平載荷に注目すると、水平剛性および最大水平抵抗力の大きさは、6BPR, 6PR, 6BPG, 6PG の順となっている。すなわち、PR 基礎が PG 基礎に比べて優位であり、斜杭によってさらに水平抵抗性能が向上されている。

図 8 は、FEM 解析結果である。解析では、 $u/D \leq \pm 0.25$  の範囲で繰返し水平変位を与えたが、この範囲内で、解析結果は実測結果をよく再現している。

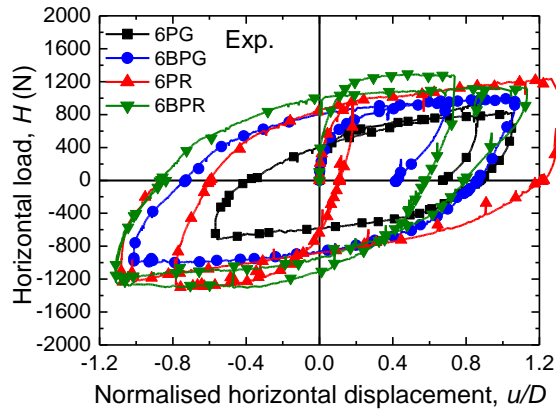


図 7 6 本杭基礎の水平荷重と無次元化水平変位  $u/D$  の関係 (実験結果)

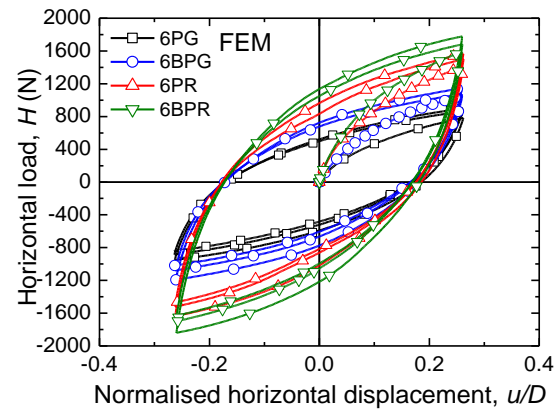


図 8 6 本杭基礎の水平荷重と無次元化水平変位  $u/D$  の関係 (解析結果)

図 9 は、6 本杭基礎の水平荷重と傾斜の関係の実験結果である。6BPR、6PR、6BPG、6PG の順に、基礎の傾斜抑制効果が高いことがわかる。解析結果 (図 10) は、実測の傾向をよく再現している。

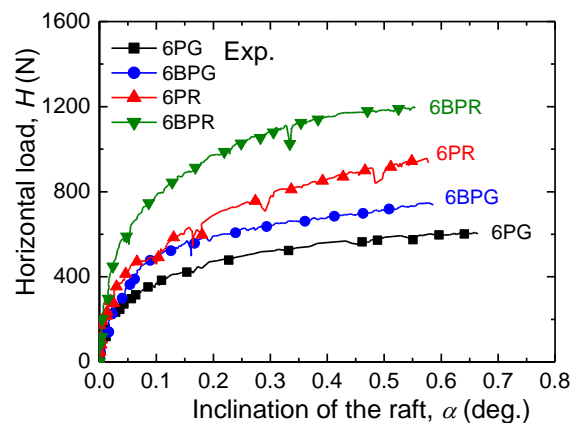


図 9 6 本杭基礎の水平荷重と傾斜の関係 (実験結果)

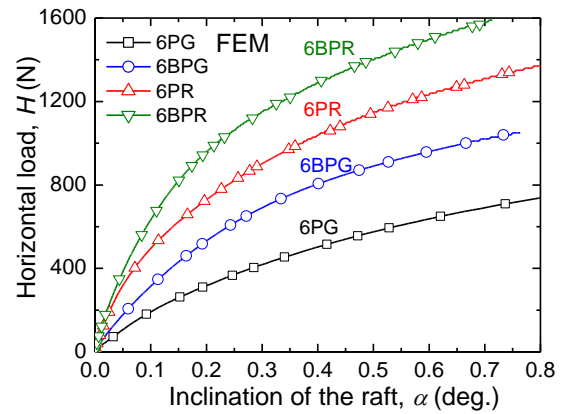


図 10 6 本杭基礎の水平荷重と傾斜の関係 (解析結果)

## 5. まとめ

乾燥砂地盤においてパイルド・ラフトおよび群杭基礎の鉛直および水平載荷実験を行った。実験では、斜杭導入の効果も詳しく調べた。さらに、砂試料の三軸 CD 試験結果をよく再現できる地盤構成則とパラメータを用いて、実験の FEM 解析を実施した。

実験では、斜杭を有するパイルド・ラフトは、沈下、水平変位、傾斜の抑制に非常に効率的な基礎形式であることが、明確に示された。

解析結果は、実測結果をよく再現できた。したがって、本研究で示した解析手法によって、実大の杭基礎構造物の設計を信頼性が高く行えることが示された。

## 参考文献

Wolffersdorff PA (1996) A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface. *Mechanics of cohesive-frictional materials* 1: 251-271.

## 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 6 件)

- ① Vu Anh-Tuan, Matsumoto T., Kobayashi S., Nguyen Tuong-Lai (2018): Model load tests on battered pile foundations and finite-element analysis, *Int. Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 18(1): 33-54.
- ② Vu Anh-Tuan, Matsumoto T., Yoshitani R., Tuong-Lai Nguyen (2017): Behaviours of Pile Group and Piled Raft Foundation Models Having Batter Piles, *Journal of Earth Engineering*, 2(1): .27-40.
- ③ Vu Anh-Tuan, Matsumoto T., Kobayashi S., Shimono, S. (2017): Experimental study on pile foundations having batter piles subjected to combination of vertical and horizontal loading, *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 48(3): 13-24.

- ④ Tikanta T., Matsumoto T., Vu A.T., Kobayashi S., Shimono S., Bamrungwong C. (2017): Fundamental experiments on a reinforcement method using sheet pile wall for bridge pile foundations subjected to pile embedment reduction and numerical validation, *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 48(3): 26-39.
- ⑤ Vu Anh-Tuan, Matsumoto T. (2016): A study on the interaction behaviour of pile foundations through model load tests, *The Transport Journal*, 1: 304-308.
- ⑥ Unsever Y.S., Matsumoto T. and Özkan M.Y. (2015): Numerical analyses of load tests on model foundations in dry sand, *Computers and Geotechnics*, 63: 255-266.  
[学会発表] (計 1 3 件)
- ① Matsumoto T., Hamada J., Kawamori M., Morikage A. (2017): Practices of pile foundation design in Japan, and demonstrative analyses of piled rafts compared with pile groups, *Design and Analysis of Piled Raft Foundations*, Taipei: 15-32.
- ② Chang D.W., Matsumoto T. (2017): Performance based seismic design of piled raft foundations – Alternate approaches using approximate computer based analyses, *Design and Analysis of Piled Raft Foundations*, Taipei: 147-166.
- ③ Vu A.T., Matsumoto T. (2017): Experimental and numerical study on performance of piled raft models, *Design and Analysis of Piled Raft Foundations*, Taipei: 185-199.
- ④ Kitiyodom P., Watcharasawe K., Jongpradist P., Matsumoto T., Petchgate, K., Prachgosdin, J. (2017): Monitoring of load distribution of the piles and the raft of a building foundations in Bangkok clay, *Design and Analysis of Piled Raft Foundations*, Taipei: 235-243.
- ⑤ Tikanta T., Matsumoto T., Vu Anh-Tuan, Bamrungwong C. (2017): Experimental study on reinforcement of existing bridge pile foundations using sheet pile wall, *Proc. of 19th ICSMGE*, Seoul: 975-979.
- ⑥ Unsever Y.S., Matsumoto T., Esashi K. (2017): Shaking table test of model foundations in saturated sand, *Proc. of 19th ICSMGE*, Seoul: 989-992.
- ⑦ Matsumoto T., Vu A.N., Unsever Y.S. (2017): Advantages of piled rafts over pile groups observed in model load tests in dry and saturated sand grounds, *Proc. of Int. Conf. on Advancement of Pile Technology and Pile Case Histories “PILE 2017”*, Bali, Vol. 1: A5-1 - A5-25.
- ⑧ Vu A.N., Matsumoto T. (2017): Three-dimensional numerical study on the interaction behaviours of vertically-loaded pile group and piled raft foundations, *Proc. of Int. Conf. on Advancement of Pile Technology and Pile Case Histories “PILE 2017”*, Bali, Vol. 2: F2-1 - F2-10.
- ⑨ Tikanta T., Matsumoto T., Shimono S., Bamrungwong, C. (2016): Fundamental Experiments on Reinforcement of Bridge Pile Foundations in Thailand Using Sheet Pile Wall, *Proc. of 19SEAGC*, Kuala Lumpur: 605-611.
- ⑩ Vu Anh Tuan, Yoshitani R., Matsumoto T., Shimono S., Nguyen Tuong Lai (2016): Effects of Batter Piles on The Performance of Pile Group and Piled Raft Foundations in Dry Sand Model Ground, *Proc. of 19SEAGC*, Kuala Lumpur: 597-604.
- ⑪ Unsever S.Y., Matsumoto T. (2016): The behavior of piled raft model foundation under low frequency sinusoidal waves in dry sand, *Proc. 4th Int. Conf. on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Nicosia, North Cyprus: 511-518.
- ⑫ Vu Anh-Tuan, Matsumoto T. (2016): Experimental and numerical study on small-size piled raft foundation models subjected to cyclic horizontal loading, *Proc of GEOTEC HANOI 2016: The 3rd Int. Conf. on Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development*, Hanoi: 53-59.
- ⑬ Unsever Y.S., Matsumoto T., Shimono S. (2015): Shaking table tests of piled raft and pile group foundations in dry sand, *Proc. 6th Int. Conf. on Earthquake Geotech. Engineering (6ICEGE)*, Christchurch, New Zealand, Paper No.328, 9p.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松本 樹典 (MATSUMOTO, Tatsunori)  
金沢大学・理工研究域・教授  
研究者番号：1 0 1 4 3 8 7 7

### (2) 研究分担者

小林 俊一 (KOBAYASHI, Shun-ichi)  
金沢大学・理工研究域・准教授  
研究者番号：1 0 2 4 3 0 6 5

### (3) 研究協力者

下野 慎也 (SHIMONO, Shinya)