

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560601

研究課題名(和文) 組合せ荷重を受ける群杭およびパイルド・ラフト基礎の実用的な三次元変形解析法の開発

研究課題名(英文) Three-dimensional analysis of pile group and piled raft subjected to combination loads

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) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、組合せ荷重を受ける群杭(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。また、PG及びPRについては、振動台実験も実施した。これらの実験より、いずれの荷重条件においても、PRはPG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。
三軸試験から求まる地盤の力学的定数を用いた三次元FEM解析によって、静的実験結果をある程度再現することができた。

研究成果の概要(英文)：Static and dynamic (shaking) load tests on a pile group and a piled raft were carried in a model dry sand ground, in order to investigate behaviours of a model pile group (PG) and a model piled raft (PR). In the static load tests, vertical load tests on a single pile, a raft alone, PG and PR, and cyclic horizontal load tests on PG and PR with a constant vertical load were carried out. Shaking table tests were carried out on PG and PR. It was demonstrated that deformation of PR is suppressed compared to PG in any loading conditions, and that PR has ductile (tenacious) response showing the advantage of PR over PG.

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。これらの基礎構造物の設計においては、杭寸法、杭本数、杭配置などを変えた、数多くの試設計が必要となる。

2. 研究の目的

本研究の第1の目的は、組合せ荷重を受ける群杭基礎(以後 PG と略記)およびパイルド・ラフト基礎(以後 PR と略記)の変形・抵抗メカニズムを模型実験を通して、より詳細に調べることである。そして、パイルド・ラフト基礎の群杭基礎に対する優位性と適用限界を検討・考察するである。

さらに、これらの基礎形式の合理的な設計を行うことを念頭に置き、実験結果を再現できる解析手法を検討・考察することも重要な目的である。

3. 研究の方法

3.1 模型実験方法

限られた実験条件範囲ではあるが、乾燥砂地盤を用いて、組合せ荷重を受ける模型基礎およびその構成要素の载荷実験を行った。静的試験として、ラフトのみ、単杭、PG 及び PR の鉛直载荷試験、鉛直荷重を载荷した条件での、PG 及び PR の繰返し水平载荷実験を行った。また、PG 及び PR については、振動台実験も実施した。

図1は、一例として3本杭 PR の水平载荷試験の状況を示したものである。地盤には、表1に示す物理的性質を有する乾燥珪砂6号を用いた。実験地盤の相対密度を70%とした。

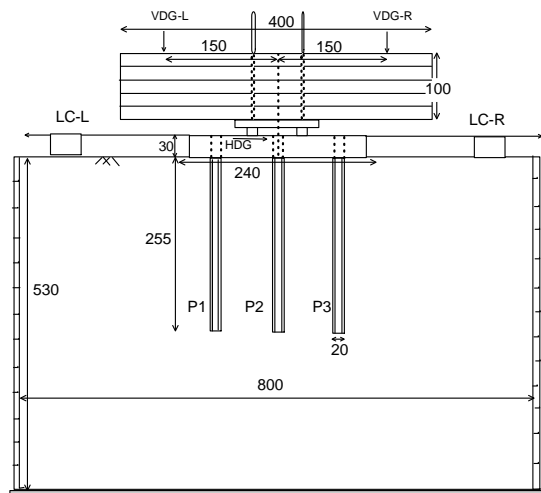


Fig. 1 Test setup for horizontal loading of piled raft.

Table 1 Properties of model ground.

Item	Value
Density of soil particles, ρ_s (t/m ³)	2.66
Maximum dry density, ρ_{dmax} (t/m ³)	1.542
Minimum dry density, ρ_{dmin} (t/m ³)	1.280
Maximum void ratio, e_{max}	1.079
Minimum void ratio, e_{min}	0.725
Median grain size, D_{50}	0.423
Coefficient of uniformity, U_c	1.880

Table 2 Properties of the model pile.

Item	Value
Outer diameter, D (mm)	20.00
Wall thickness, t (mm)	1.1
Length, L (mm)	255
Cross sectional area, A (mm ²)	65.31
2nd moment of inertia, I (mm ⁴)	2926.2
Young's modulus, E (N/mm ²)	64000
Poisson's ratio, ν	0.31

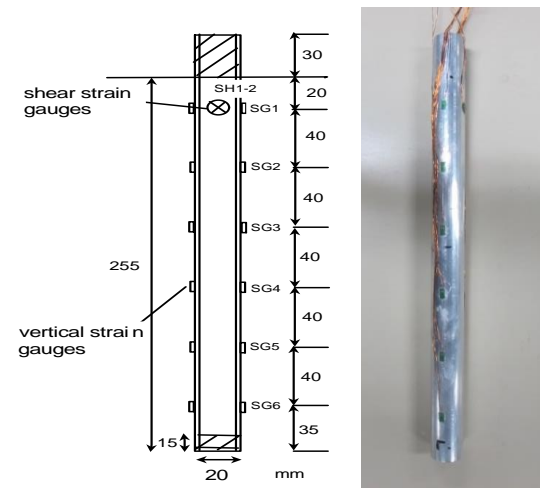


Fig. 2. Single pile model.

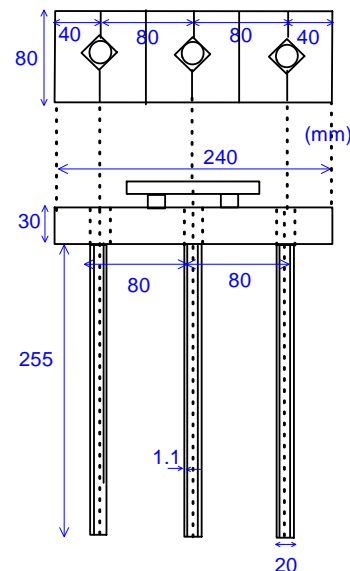


Fig. 3 Piled raft (or Pile group) model.

模型杭には、表 2 に示す寸法と力学的定数を有するアルミ管を用いた。ただし、先端を閉塞条件とした。載荷実験時に軸力、曲げモーメント、せん断力を算定するため、それぞれの杭には、図 2 に示すように、6 レベルにひずみゲージを貼付けた。

PR あるいは PG 基礎模型(Fig. 3)は、剛とみなせるジュラミン製ラフト (長さ 240mm、奥行 80mm、厚さ 30mm) に 3 本の杭を剛結したものである。PR と PG の違いは、PR ではラフト地表面に接地させ、PG ではラフト底面と地表面の間に 15mm のギャップを設けて地盤に設置したことである。

3. 2 地盤試料の三軸実験と解析

模型載荷実験の実施に加えて、模型載荷実験の FEM 解析を行うことで、各基礎形式の変形、抵抗メカニズムをより詳細に検討・考察した。そのため、模型地盤に使用した砂試料の三軸圧縮試験を実施し、地盤パラメータを求めるとともに、その挙動を再現できる地盤モデルについて検討した。

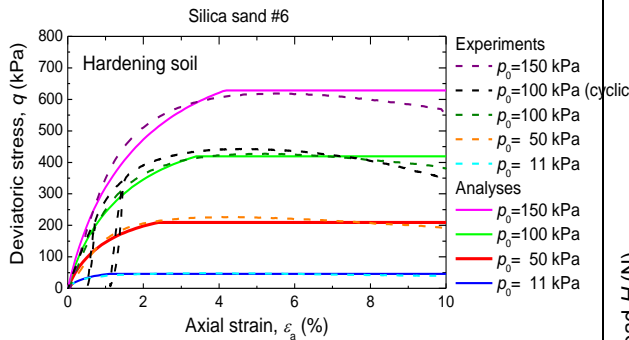


Fig. 4 Deviatoric stress q versus axial strain ε_a .

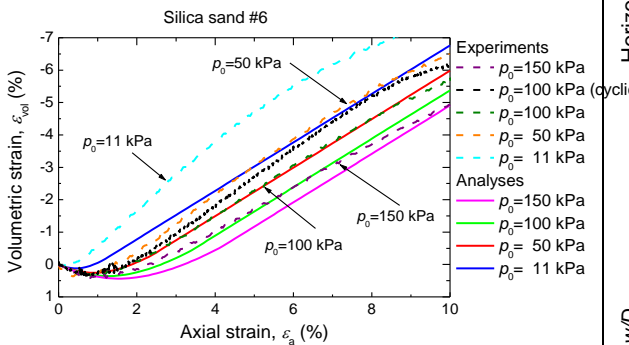


Fig. 5 Volumetric strain ε_{vol} versus axial strain ε_a .

Table 3 Material properties of the sand.

Secant stiffness, E_{50} (kPa)*	29.6×10^3
One-dimensional stiffness, E_{oed} (kPa)*	23.7×10^3
Unloading/reloading stiffness, E_{ur} (kPa)*	99.6×10^3
Stress dependency parameter, m	0.5
Non-linear factor, R_f	0.75
Poisson's ratio, ν	0.19
Internal friction angle, ϕ' (deg.)	43.2
Dilatancy angle, ψ (deg.)	15.8

* values for a reference stress, $p_0^{ref} = 100$ kPa

図 4 と図 5 は、初期圧密圧力 p_0 を 11 から 150kPa を変化させた場合の主応力差 q と軸ひずみ ε_a の関係、及び体積ひずみ ε_{vol} と ε_a の関係である。図 4 と図 5 には、Hardening Soil model (HS model) (Shanz et al, 1999) によるシミュレーション結果も示している。表 3 に示すパラメータによって、HS model は三軸実験結果をよく再現できている。そのため、模型実験の解析においては、HS model を利用した。

4. 研究成果

紙面の制限上、静的載荷実験結果の一部とその FEM 解析結果に焦点を絞って、研究成果を述べる。

PR と PG では水平載荷に先立ち、鉛板 5 枚をラフト上面に順次設置して、最終的に 497 N の鉛直荷重を与えた。水平載荷段階では、変位制御方式で $u/D = \pm 0.2, \pm 0.4, \pm 0.6$ までの、交番繰返し載荷を行った。

図 6 は、PR と PG について、水平荷重 H と杭直径 D (= 20 mm) で無次元化した水平変位 u/D の関係である。同じ水平変位でみたとき PR は PG より大きな水平抵抗力を發揮している。PG では、 $u/D \approx 0.3$ においてほぼ極限抵抗状態 ($H = 300$ N) になっているが、PR では水平変位の増加とともに水平抵抗力がさらに増加する傾向にある。

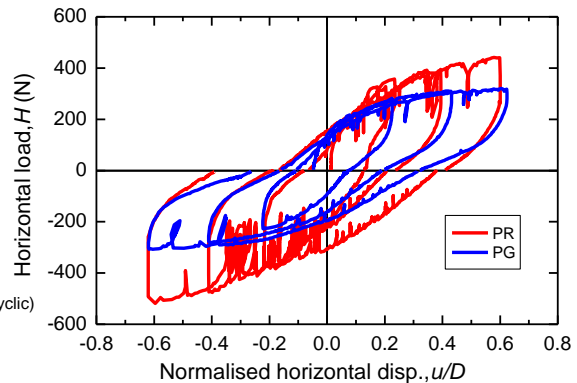


Fig. 6 Horizontal load H versus normalised horizontal displacement u/D .

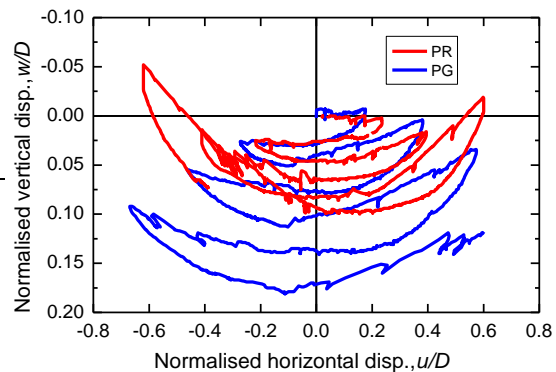


Fig. 7 Normalised horizontal displacement u/D versus normalised vertical displacement w/D .

図 7 は、杭直径 D で無次元化した鉛直変位 w/D と u/D の関係である。 $u/D = 0$ の時の沈下

に着目すると、同じ繰返し数であっても PR の沈下量は PG の約半分となった。

図には示さないが、PR では同じ水平荷重の時、杭に発生する曲げモーメントとせん断力は、PG に比べてかなり抑制された。すなわち、組合せ荷重下においても、PR は PG に比べて優れた抵抗特性を示した。そこで、以下では PR を中心に研究成果を示す。

図 8 は、一例として、PR の水平載荷試験の FEM 解析モデルである。対称性を考慮し、杭と地盤の半分のみをモデル化した。杭周面には、インターフェース要素を配置した。杭周面と地盤間の摩擦角は、実験結果に基づいて、 31° とした。水平載荷に先立ち、497 N の鉛板をラフト上に設置したが、これもモデル化している。解析では、まず地盤のみの K_0 圧密解析を行い、次に模型杭を設置しての自重解析、その後鉛直載荷及びそれに引続く水平載荷の解析を行った。

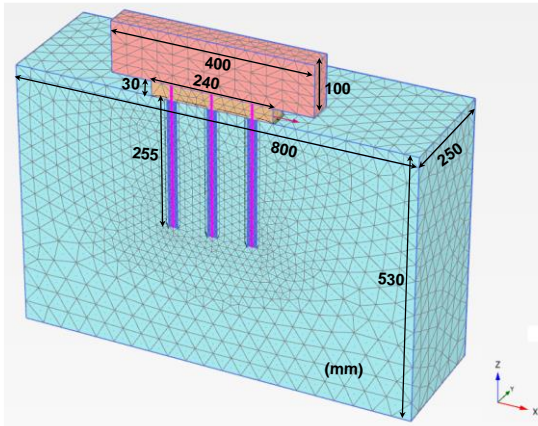


Fig. 8 Finite element mesh of the piled raft model for static horizontal loading test.

PR の鉛直載荷実験と解析

図 9 は、鉛直荷重 V と鉛直変位 (沈下) w の関係の実測結果と解析 (予測) 結果である。同図には、ラフトおよび 3 本の杭が受持つ鉛直荷重も示している。全荷重については、解析結果は荷重が 3300 N までは実測結果の沈下を過大評価し、それ以降の荷重においては沈下を過小評価している。ラフトおよび 3 本の杭の荷重-沈下関係についても、同様の解析結果である。

図 10 は、3 本の杭およびラフトの鉛直荷重分担率と無次元鉛直変位 w/D の関係である。実測では、初期の杭の荷重分担率は 70% であり、沈下の増加とともに減少し、最終的に 48% の分担率に達した。解析では、杭の荷重分担率の値は、実測値より小さいが、沈下にもなう変化は実測結果と定性的に一致した。

PR の水平載荷実験と解析

図 11 は、水平荷重 H と杭直径 D で無次元化した水平変位 u/D の関係である。同図には、

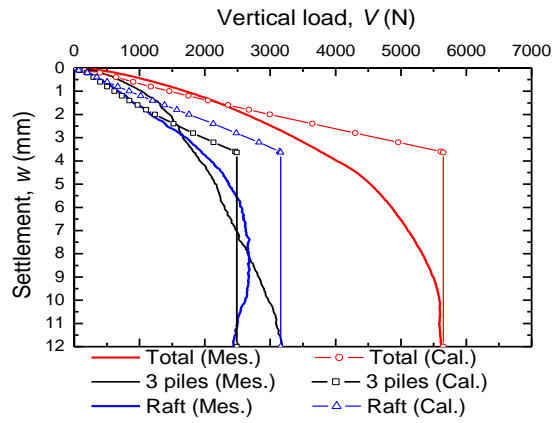


Fig. 9 Vertical load-settlement relationships of the piled raft.

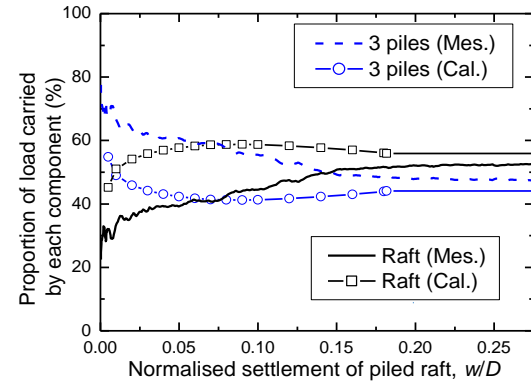


Fig. 10 Load sharing of 3 piles and the raft under vertical loading.

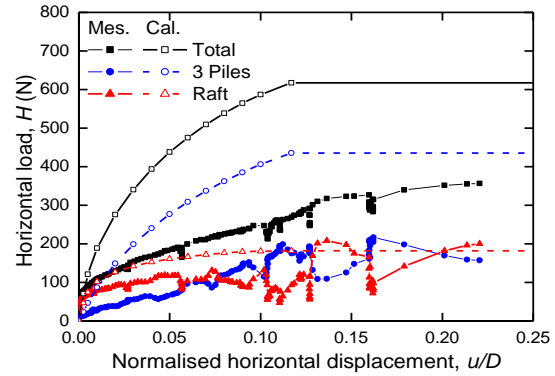


Fig. 11. Horizontal load-normalised horizontal displacement relationships of the piled raft.

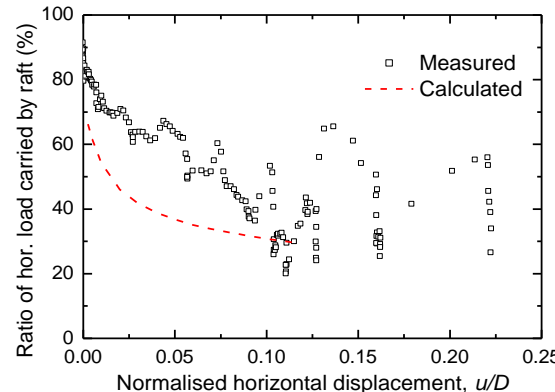


Fig. 12. Percentage of horizontal load carried by the raft.

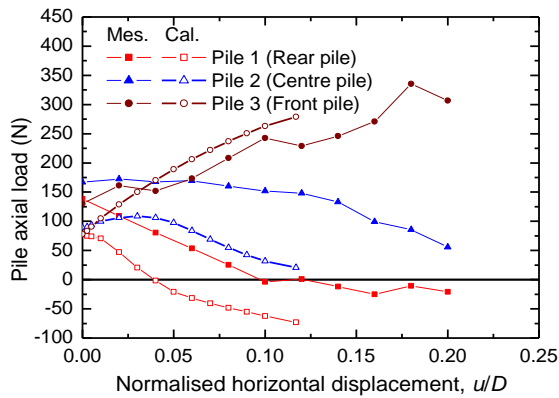


Fig. 13 Axial load-displacement relationships.

3本の杭及びラフト底面摩擦による荷重分担も示している。図12は、ラフトの水平荷重分担割合と u/D の関係である。

実験結果によれば、水平荷重の初期では、ラフトの荷重分担が大きく、水平剛性も非常に大きい。すなわち、ラフトは水平変位の抑制に大きく寄与している。 $u/D=0.1$ でラフトの荷重分担割合は一定値30%になった。解析結果は、杭の荷重分担を過大評価しているが、実験結果を定性的に再現している。

図13は、3本の杭の鉛直荷重と u/D の関係である。実験結果では、鉛直荷重497Nの載荷終了時では、端杭であるP1とP3の鉛直荷重はほぼ等しく、中心杭P2の荷重よりも小さい。水平荷重段階では、 $u/D=0.1$ までは前方杭P3の鉛直荷重は増加し、一方後方杭P1の荷重は減少する。中心杭P2の鉛直荷重は、ほぼ変化しない。解析結果は、定性的またある程度定量的に実験結果を再現できている。

図14は、 $u/D = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10$ における各杭の曲げモーメント M の分布である。杭のせん断力 Q は、 $Q = dM/dz$ (M のこう配) で求められる。実験結果によれば、 $u/D = 0.04$ までは、各杭の M の分布には、大きな差は生じていない。しかし、 $u/D = 0.06$ を超えると、前方杭P3、中心杭P2、後方杭P1の順で大きな M が発生している。すなわち、P3, P2, P1の順で大きなせん断力 Q (水平抵抗) が発生している。これは、地盤が線形弾性挙動を示す場合とは、大きく異なる。地盤が線形弾性挙動を示す場合は、P1とP3の M は同じであり、その大きさはP2に比べて大きい。解析結果は、これらの実験結果を定性的に再現している。

図15は、FEM解析による $u/D = 0.1$ における地盤の平均応力 p の分布である。これによれば、水平変位の増加(図の右方向)に伴いP3側のラフト底面接地圧が増加する。このことと、杭の水平抵抗力の増加によって、P3前方にある地盤の p が増加する。P2とP1でも、その値はより小さくなるが、同様である。図4に示したように、地盤砂は p が増加すると

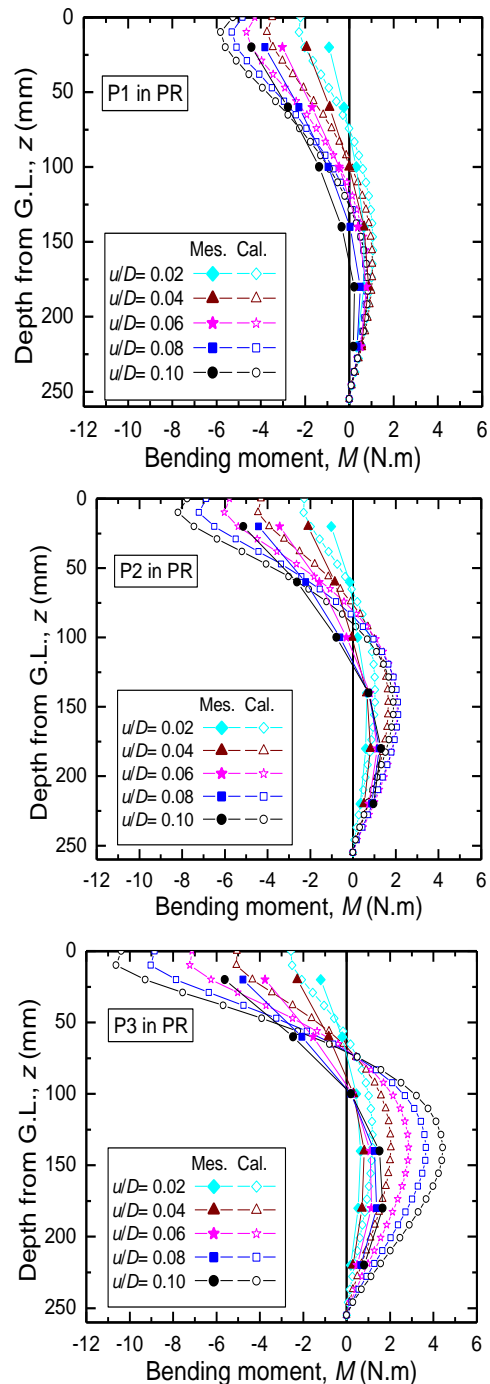


Fig. 14 Bending moment distribution along each pile shaft (P1, P2 and P3).

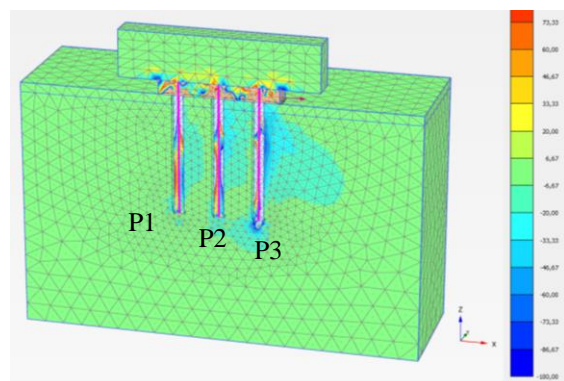


Fig. 15 Mean stress contours for piled raft horizontal loading analysis.

その剛性が増加する。そのため、前方杭 P3、中心杭 P2、後方杭 P1 の順に大きな水平抵抗が発揮され、大きな M が生じている。

以上、PR は PG に比べて、沈下抑制、水平変位抑制の両面で優位な特性を有することが確認できた。解析（設計）手法として、適切な地盤モデルと地盤パラメータを利用した三次元 FEM の優位性が示された。ただし、これまでの研究では、HS model を用いた解析は、実験結果を定性的にシミュレーションできたが、定量的な結果には改善の余地が残されている。

参考文献

Schanz T, Vermeer PA, Bonnier PG (1999): The hardening soil model: Formulation and verification. In R.B.J. Brinkgreve., Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Rotterdam: Balkema; 281-290.

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 Unsever Y.S., Matsumoto T. and Özkan M.Y. (2015): Numerical analyses of load tests on model foundations in dry sand, Computers and Geotechnics, Vol. 63, pp. 255-266, 有, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.10.005>.
- ② Unsever Y.S., Matsumoto T. and Shimono S. (2014): Static cyclic load tests on model foundations in dry sand, Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, Vol. 45, No.2, pp.40-51, 有, <http://dx.doi.org/10.1016/j.sandf.2014.12.016>.
〔学会発表〕（計 14 件）
- ① Unsever Y.S., Matsumoto T. and 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 (accepted for publication), 2015.11.2-3.
- ② 江指健一, Unsever Y.S., 松本樹典, 小林俊二, 下野慎也(2014): 砂地盤におけるパイルド・ラフトおよび群杭模型基礎の振動実験, 第 50 回地盤工学研究発表会, 札幌(掲載決定), 2015.9.2-4.
- ③ Unsever Y.S., Özkan M. Y., Matsumoto T., Shimono S. and Esashi K. (2014): Physical and numerical modelling of pile foundations subjected to vertical and horizontal loading in dry sand, Proc. of the 14th Int. Conf. of the Int. Assoc. for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Kyoto, pp.963-968, 2014.9.22-25.
- ④ 松本樹典, 江指健一, Unsever Y.S., 小林俊二, 下野慎也(2014): 乾燥砂地盤における模型杭基礎の鉛直・水平載荷実験（その

1 : 実験概要), 第 49 回地盤工学研究発表会, 北九州, pp.1131-1132, 2014.7.15-17.

- ⑤ 河淵勇太, 武田和輝, 小橋邦彦, 松本樹典, 小林俊一, 下野慎也 (2014): 乾燥砂地盤における模型杭基礎の鉛直・水平載荷実験(その 2 : 砂試料の三軸試験とモデル化), 第 49 回地盤工学研究発表会, 北九州, pp.1133-1134, 2014.7.15-17.
 - ⑥ 小橋邦彦, 江指健一, Unsever Y.S., 河淵勇太, 武田和輝, 松本樹典, 小林俊一, 下野慎也(2014): 乾燥砂地盤における模型杭基礎の鉛直・水平載荷実験(その 3 : 鉛直載荷実験結果と FEM 解析結果), 第 49 回地盤工学研究発表会, 北九州, pp.1135-1136, 2014.7.15-17.
 - ⑦ 江指健一, Unsever Y.S., 松本樹典, 小林俊二, 下野慎也(2014): 乾燥砂地盤における模型杭基礎の鉛直・水平載荷実験(その 4 : 水平載荷実験結果), 第 49 回地盤工学研究発表会, 北九州, pp.1137-1138, 2014.7.15-17.
 - ⑧ Matsumoto, T. (2013): Implications for design of piled raft foundations subjected lateral loading (Keynote paper), Proc. Int. Symp. on Advances in Foundation Engineering, Singapore, pp.113-136, 2013.12.5-6.
 - ⑨ Unsever, Y. S., Kawamori, M., Matsumoto, T. and Shimono, S. (2013): Cyclic horizontal load tests of single pile, pile group and piled raft in model dry sand, Proc. 18th Southeast Asian Geotechnical Conf. & Inaugural AGSSEA Conf., 18SEAGC/1AGSSEA, Singapore, pp.891-896, 2013.5.29-31.
 - ⑩ 川森真弓, Unsever Y.S., 松本樹典, 小林俊二, 下野慎也(2013): 砂地盤における模型杭基礎の繰返し水平載荷実験(その 1 : 実験概要), 第 48 回地盤工学研究発表会, 富山, pp.1315-1316, 2013.7.23-25.
 - ⑪ Unsever S.Y., Kawamori M., Matsumoto T., Kobayashi S. and Shimono S. (2013): Cyclic horizontal load experiments on model pile foundations in dry sand (Part 2: Experimental results), 第 48 回地盤工学研究発表会, 富山, pp.1317-1318, 2013.7.23-25.
- #### 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 : 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・環境デザイン学系・准教授
研究者番号 : 1 0 2 4 3 0 6 5
 - (3)研究協力者
金沢大学・環境デザイン学系・技術職員
下野 慎也 (SHIMONO, Shinya)