粘性土地盤上のパイルド・ラフト基礎の極限支持力の評価式

PRACTICAL FORMULA FOR ULTIMATE BEARING CAPACITY OF PILED RAFT FOUNDATIONS IN CLAY SOILS

山下 清 — * 1 谷川友浩 — * 2

Kiyoshi YAMASHITA — * 1 Tomohiro TANIKAWA — * 2

キーワード：
パイルド・ラフト基礎, 支持力, 沈下, 数値解析, 弾塑性解析,
3次元有限要素法, 模型実験

Keywords:
Piled raft foundation, Bearing capacity, Settlement, Numerical analysis, Elasto-plastic analysis, 3D-FEM, Model test

Bearing capacity of piled raft foundations in clay soils was studied using elasto-plastic three-dimensional FE analysis. Additional parametric analyses varying pile spacing to the previous study were conducted. Moreover, the bearing capacities of piled rafts obtained from the numerical analyses were compared with the published results from six loading tests of model piled rafts. Based on the previous and present study, it was found that a formula for evaluating ultimate bearing capacity of piled raft foundations, which is approximately equal to 0.8 times the sum of bearing capacities of raft alone and pile group, would be appropriate for practical use.

1. はじめに

パイルド・ラフト基礎（以下、パイルド・ラフト）は、近年高層建物を含む多くの建物に採用されている。また設計の裏付けとなる基礎の沈下や杭とラフトの荷重分担性状について、実建物における長期の観測結果が報告されている^{例え1), 2)}。地震時の挙動についても、2011年東北地方太平洋沖地震時における観測結果^{3), 4)}が報告され、その解析的検討^{5), 6)}も進められている。

現状のパイルド・ラフトの設計は、直接基礎単独では支持力を満足するが、沈下が過大となる場合に杭を付加して沈下を許容値以内に収めるもので、極限支持力については杭の抵抗を無視し、直接基礎と同様に扱われる⁷⁾。その主な理由として、地盤の非線形領域における杭とラフトの相互作用が複雑なため、極限状態までの基礎の荷重～沈下性状が未解明なことがあげられる。この性状が明らかに

なれば、ラフトと杭の両方の支持力を考慮できる可能性があるが、それに関する研究は少ない^{8)~10)}。本研究の目的は、杭とラフトの両方の支持力を考慮するパイルド・ラフトの極限支持力の実用的な評価式を探ることである。前報¹⁰⁾では、鉛直荷重を受ける粘性土地盤上のパイルド・ラフトの極限状態付近までの荷重～沈下性状を3次元有限要素モデルにより解析し、直接基礎および杭基礎との比較を通じて基本的な支持力性状を把握するとともに、解析値を既往の提案式と比較、検討した。本文では、杭間隔や杭先端以深の支持層の影響について追加の解析を行い、さらに解析値を既発表の模型実験結果と比較して妥当性を検証した。これらの検討結果に基づき、パイルド・ラフトの極限支持力に関わる既往の評価式の適用性について考察した。

図1 地盤条件と基礎のモデル

*1 俣竹中工務店技術研究所 専門役・博士（工学）
〒270-1395 千葉県印西市大塚 1-5-1

*2 俣竹中工務店技術研究所 研究主任

*1 Executive Manager, Research & Development Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.

*2 Assoc. Chief Researcher, Research & Development Institute, Takenaka Corporation

図2 三次元有限要素モデル

図3 杭先端の荷重比～杭先端沈下比

表1 解析諸元

地盤	非排水せん断強度 c_u (kPa)	図1参照
	初期せん断剛性 G_0 (kPa)	$400c_u$
	ポアソン比 ν	0.49
杭	ヤング係数 E (GPa)	25
	ポアソン比 ν	0.167
	直径 d (m)	1.0
	杭長 L (m)	10, 20, 30, 40
	杭間隔 s (m)	5.0, 8.6(等価値)
ラフト	剛性	∞
	幅 B (m)	20

2. 数値解析モデル

パイルド・ラフトの荷重～沈下性状を支配する要素として、杭間隔と杭径の比、杭長と基礎幅の比があげられる⁹⁾。図1に地盤条件と基礎のモデルを示す。前報¹⁰⁾と同様の三次元有限要素モデル(図2)を用い、パイルド・ラフトの適用性が高い過圧密地盤における帯基礎状のラフト(基礎幅 $B=20m$)と杭で構成される基礎を対象とした。前報¹⁰⁾では図1(a)のように杭を4列に配置し杭間隔・杭径比 s/d を5.0としたが、本文では図1(b)のように杭を2列に配置した場合を追加した。このとき、杭の支配面積 ($5d \times 15d$) を正方形置換したときの1辺の長さ(支配面積の平方根)を等価的な杭間隔 s とみなし、 $s/d=8.6$ とする。地盤条件は、OC1地盤、OC2地盤の他に、図1(c)

(a) $s/d=5.0$ (OC1 地盤)

(b) $s/d=5.0$ (OC2 地盤)

(c) $s/d=5.0$ (OC2b 地盤)

(d) $s/d=8.6$ (OC1 地盤)

(e) $s/d=8.6$ (OC2 地盤)

図4 パイルド・ラフト、杭基礎、直接基礎の鉛直荷重と沈下比

図5 群杭の荷重分担比と沈下比

に示す OC2 地盤の杭先端に深に堅固な支持層がある場合(以下、OC2b 地盤)を追加し 3 ケースを設定した。支持層は粘性土とし $c_u=750\text{kPa}$ とした。このときの杭先端の荷重比～沈下比関係を図 3 に示す。ここで荷重比とは、沈下比 $\delta/d=0.1$ での先端抵抗強度を 1 として基準化した値である。本解析における杭先端地盤の初期剛性は、図中の砂質土における場所打ちコンクリート杭⁷⁾と比べて高めである。解析に用いた地盤、杭、ラフトの諸元を表 1 に示す。地盤の構成則は、破壊条件として Tresca の基準に加え、破壊基準に到る過程での非線形性を表現するために $G/G_0 - \varepsilon_{eq}$ 関係の双曲線モデルを用いた。 G_0/c_u 値は Randolph (1994)¹¹⁾ が示した 500-1000 の下限値を参考にした。荷重はラフトを剛として所定の荷重度を加えた。解析の詳細については、前報¹⁰⁾を参照されたい。

3. パイルド・ラフトの荷重～沈下性状

前報¹⁰⁾と同じく杭基礎および直接基礎についても解析し、杭基礎ではラフトを設けず杭頭変位を同一として杭のみに載荷した。図 4 に各地盤における、パイルド・ラフト(群杭、ラフト)、杭基礎、直接基礎に作用する鉛直荷重と沈下比の関係を $L/B=0.5, 1.5$ について示す。ここで、群杭およびラフトはパイルド・ラフトの構成要素を指す。なお、本文における極限支持力の解析値は、数値解析上の制約から基礎の沈下量と杭径の比が 0.5 (基礎幅の 2.5%) に対する荷重度とし、各基礎の極限支持力の解析値についても同様とした¹⁰⁾。図 4 には杭基礎と直接基礎の荷重度の単純和を併せて示した。パイルド・ラフトの荷重と単純和の荷重度と比較すると、いずれのケースも単純和より小さい。ただし両者の差は、杭間隔・杭径比 $s/d=5$ では比較的大きいが、 $s/d=8.6$ では小さく OC1 地盤では単純和とほぼ同等である。OC2b 地盤についても両者の差は比較的小さい。この理由として、杭間隔が大きいとラフトと杭の相互作用の影響が小さくなり、杭とラフトの支持力が独立に発揮しやすいこと、支持層がある場合についても杭先端とラフトの支持力が独立に発揮しやすいことが考えられる。

図 5 に、パイルド・ラフト中の群杭の荷重分担比と沈下比の関係を示す。図 5(a), (b) より、群杭の荷重分担比は同じ沈下比に対し、杭間隔が小さい方が大きいことがわかる。

沈下比が小さいとき (δ/d が 2% 程度以下)、群杭の荷重分担比は杭の鉛直ばねに依存し L/B が大きくなると増加するが、杭が短い ($L/B=0.5$) 場合を除くと、荷重分担比は 0.5～0.75 の比較的小さい範

囲にある。この理由として以下のことが考えられる。 $s/d=5.0$ における杭本数は $s/d=8.6$ の場合の 2 倍であり、群杭効果や杭とラフトの相互作用を無視すると前者の荷重分担比は、後者のそれよりかなり大きくなる。ただし、地盤は弾性状態に近いので群杭効果が生じ、群杭効果は杭間隔が小さいほど、杭が長いほど大きくなるので、 $s/d=5.0$ と $s/d=8.6$ における荷重分担比の差は L/B が小さいときは大きい、 L/B が大きくなるとその差は小さくなる。その結果、沈下比が小さいとき、杭が短い場合を除き、群杭の荷重分担比は狭い範囲に分布すると考えられる。また、支持杭を用いたときの荷重分担比(図 5(c))についても杭が短い場合を除き、同じ杭間隔の摩擦杭を用いたときの荷重分担比(図 5(a))と概ね等しい。

沈下比が大きくなると群杭効果や杭とラフトの相互作用の影響が小さくなり、群杭の荷重分担比はその極限支持力の大きさに依存する。したがって、荷重分担比は杭間隔が大きい方がパイルド・ラフトの支持力に占める群杭の支持力の割合が小さいので小さくなる。また支持層がある場合、荷重分担比は相対的に大きくなる。なお、OC1, OC2 地盤における荷重分担比の差は比較的小さい。

以上の数値解析的検討から、パイルド・ラフトおよび直接基礎、杭基礎の荷重～沈下関係を模式的に表すと図 6 のようになり、パイルド・ラフトの鉛直支持力性状には以下の傾向がある。

- ・パイルド・ラフトの極限支持力は、直接基礎、杭基礎単独の鉛直支持力を上回る。
- ・パイルド・ラフトの極限支持力は、直接基礎と杭基礎の極限支持力の和と比べると同等もしくはやや小さい。

図6 パイルド・ラフトの鉛直荷重～沈下関係

・パイルド・ラフト中のラフトおよび群杭の極限支持力は、それぞれ直接基礎および杭基礎の極限支持力と同等もしくはやや小さい。それらの極限支持力の差は杭間隔が増すと小さくなる。

4. パイルド・ラフトの支持力性状

図 7 に、パイルド・ラフトと直接基礎との極限支持力の比 $R_{PR,ult}/R_{R,ult}$ および杭基礎との極限支持力の比 $R_{PR,ult}/R_{P,ult}$ を、杭間隔・杭径比ごとに杭長・基礎幅比 L/B に対して示す。パイルド・ラフトの支持力を直接基礎、杭基礎と比較するとき、両者の支持力比の小さい方に着目すると、 $s/d=8.6$ では L/B にかかわらず $R_{PR,ult}/R_{R,ult} < R_{PR,ult}/R_{P,ult}$ であり直接基礎の支持力に近いことがわかる。一方 $s/d=5.0$ では、杭が相対的に短いときは直接基礎の支持力、長いときは杭基礎の支持力に近いこと、支持層がある場合は杭基礎の支持力に近くなることがわかる。

5. 極限支持力に関する既往の評価式

粘性土地盤におけるパイルド・ラフトの極限支持力については、直接基礎と杭基礎の極限支持力に基づく (1) 式および (2) 式が提案されている⁹⁾。

$$R_{PR,ult} = \alpha_R \cdot R_{R,ult} + \alpha_P \cdot R_{P,ult} \quad (1)$$

$$R_{PR,ult} = \xi_{PR} (R_{R,ult} + R_{P,ult}) \quad (2)$$

$R_{PR,ult}$: パイルド・ラフト基礎の極限支持力

$R_{R,ult}$: 直接基礎の極限支持力

$R_{P,ult}$: 杭基礎の極限支持力

α_R : 直接基礎の極限支持力に関わる係数

α_P : 杭基礎の極限支持力に関わる係数

ξ_{PR} : 極限支持力に関わる係数

(1) 式は、パイルド・ラフトの極限支持力を、直接基礎と杭基礎の極限支持力にそれぞれ係数を乗じて表したものである。個別の基礎の解析結果から、(1) 式における係数 α_R, α_P を求め、図 8 に α_R, α_P と杭長・基礎幅比との関係を示す。 α_R, α_P は杭長・基礎幅比 L/B の影響を受け、 L/B が大きくなると α_R は低下し α_P は増加する傾向を示すこと、特に α_R は杭長、杭間隔のほか地盤条件（支持層の有無を含む）など多くの要因の影響を受けることが指摘される。

一方、(2) 式はパイルド・ラフトの極限支持力を、直接基礎と杭基礎の極限支持力の単純和に係数 ξ_{PR} を乗じて表したものである。図 9 に係数 ξ_{PR} と杭長・基礎幅比との関係を示す。 ξ_{PR} は杭間隔の影響を

図 7 パイルド・ラフトと杭基礎、直接基礎の支持力比

受けることがわかり、 $s/d=8.6$ で相対的に大きく 1 に近い値になる。しかしながら、地盤条件、杭長・基礎幅比の影響をあまり受けないことが強く指摘される。以下では、(2) 式の適用性について検討する。

6. パイルド・ラフトの極限支持力の実用的評価式

6.1 実験結果との比較、検証

比較的規模の大きい模型実験結果を用いて、数値解析結果の妥当性および (2) 式の適用性について調べた。粘性土もしくは粘性土主体の地盤において、正方形基礎スラブ ($B=0.8\text{m} \sim 4.0\text{m}$) の中央に杭を 1 本または 4 本配したパイルド・ラフト、および同じ寸法の直接基礎および単杭について実施した載荷実験の結果が報告されている^{12), 13), 14), 15), 16), 17)}。この 6 例の載荷実験結果から (2) 式における係数 ξ_{PR} を求めたものを図 10 に示す。図 10 には解析値の範囲 (図 9) も示した。実験における L/B は 2 以上で解析と多少異なるが、沈下量が $0.1B$ (1 例のみ $0.1d$) のとき得られた ξ_{PR} 値は $0.89 \sim 1.05$ であり解析値と概ね整合すること、(2) 式について ξ_{PR} の下限値は 0.8 程度であることがわかった。なお、この値は文献 9) における提案値 $\xi_{PR}=0.82$ とほぼ一致するものである。

6.2 直接基礎、杭基礎の支持力との比較

(2) 式を用いるとき、パイルド・ラフトの支持力が直接基礎、杭基礎単独の支持力に対してどの程度増加するかを調べた。パイルド・ラフトと直接基礎の支持力比 $R_{PR,ult}/R_{R,ult}$ およびパイルド・ラフトと杭基礎の支持力比 $R_{PR,ult}/R_{P,ult}$ のうち小さい方の値を $\text{Min}\{R_{PR,ult}/R_{R,ult}, R_{PR,ult}/R_{P,ult}\}$ と表し、パイルド・ラフトとの支持力比とする。パイルド・ラフトとの支持力比は (2) 式より次式のように表わされる。

図 8 直接基礎、杭基礎に関わる係数

図 9 係数 ξ_{PR}

図 10 係数 ξ_{PR} の実験値と解析値

$$R_{P,ult}/R_{R,ult} \leq 1 \text{ のとき} \quad R_{PR,ult}/R_{R,ult} = \xi_{PR} (1 + R_{P,ult}/R_{R,ult}) \quad (3)$$

$$R_{P,ult}/R_{R,ult} > 1 \text{ のとき} \quad R_{PR,ult}/R_{P,ult} = \xi_{PR} (R_{R,ult}/R_{P,ult} + 1) \quad (4)$$

ここで、(3)式は直接基礎とパイルド・ラフトとの支持力比、(4)式は杭基礎とパイルド・ラフトとの支持力比を表す。図 11 に、杭基礎と直接基礎の支持力比 $R_{P,ult}/R_{R,ult}$ とパイルド・ラフトとの支持力比の関係を示す。図 11 には(3)式 (4)式において $\xi_{PR}=1.0, 0.8$ として計算した曲線を併せて示す。パイルド・ラフトとの支持力比は、地盤条件、 L/B によらず概ね二つの曲線の間に分布し $R_{P,ult}/R_{R,ult}=1$ 付近で最大となる。その比は杭間隔・杭径比や支持層の有無により異なる。すなわち OC1、OC2 地盤では、 $s/d=5.0$ で $1.6 \sim 1.7$ であるが、 $s/d=8.6$ では 1.9 以上で両者の単純和に近くなる。また支持層がある場合 ($s/d=5.0$) も単純和に近い。

なお、(3)式において直接基礎の支持力が卓越する ($R_{P,ult}/R_{R,ult} \rightarrow 0$) とパイルド・ラフトの支持力は直接基礎の支持力に近づき、(4)式において杭基礎の支持力が卓越する ($R_{P,ult}/R_{R,ult} \rightarrow \infty$) と杭基礎の支持力に近づくことで、直接基礎、パイルド・ラフト、杭基礎の支持力の連続性が確保される。ここで ξ_{PR} を 0.8 (下限値) とすると、パイルド・ラフトの支持力は $R_{R,ult}/R_{P,ult}=0.25$ で直接基礎の支持力と一致し、 $R_{R,ult}/R_{P,ult}=4.0$ で杭基礎の支持力と一致する。

6.3 設計で想定する荷重に対する沈下量

パイルド・ラフトの極限支持力を、直接基礎の極限支持力を超えて設定する場合には、設計で想定する荷重がパイルド・ラフトに作用するとき、基礎に過大な沈下が生じることへの懸念がある。そこで、(2)式に基づき $\xi_{PR}=0.8$ として評価した極限支持力に基づいて想定した荷重が作用したときのパイルド・ラフトの沈下量を、対応する直接基礎、杭基礎の沈下量と比較した。すなわち、図 12 のようにパイルド・ラフトの使用限界および損傷限界状態を想定した荷重を $1/3 \cdot 0.8R_{PR,ult}$, $2/3 \cdot 0.8R_{PR,ult}$ とし、それぞれの荷重レベルにおけるパイルド・ラフトの沈下量を δ_{PR1} , δ_{PR2} とする。同様に直接基礎の支持力 $R_{R,ult}$ および杭基礎の支持力 $R_{P,ult}$ の $1/3$, $2/3$ の荷重レベルにおける沈下量を δ_{R1} , δ_{R2} および δ_{P1} , δ_{P2} とし、 δ_{PR1} , δ_{PR2} と比較した。図 13 に、二つの荷重レベルにおけるパイルド・ラフトの沈下比 δ_{PR1}/d , δ_{PR2}/d と直接基礎の沈下比 δ_{R1}/d , δ_{R2}/d 、およびパイルド・ラフトの沈下比と杭基礎の沈下比 δ_{P1}/d , δ_{P2}/d をそれぞれ比較したものを示す。これより、いずれの荷重レベルにおいてもパイルド・ラフトの沈下比は、杭基礎の沈下比より大きい直接基礎の沈

図 11 パイルド・ラフトとの支持力比と $R_{P,ult}/R_{R,ult}$ の関係

図 12 各基礎の想定荷重と沈下量

下比より小さいもしくは同等で、両者の沈下比の間になることがわかる。なお、直接基礎と同等の沈下になる (杭の沈下低減効果がみられない) のは OC2 地盤で杭が比較的短い場合であり、OC2 地盤ではラフト下の地盤の塑性域がより深部に及び、杭の支持力がラフトの支持力と独立して発揮されにくいことが考えられる¹⁰⁾。また、杭先端に支持層が有るとパイルド・ラフト沈下比は小さくなり杭基礎の沈下比に近づく。

図 13 パイロッド・ラフトと直接基礎、杭基礎の沈下比

以上の検討結果に基づく、杭間隔・杭径比が 5 以上のパイロッド・ラフトの極限支持力は、(2)式において係数 ξ_{PR} の上限値を 0.8 程度として評価することが妥当と考えられる。

7. おわりに

パイロッド・ラフトの極限支持力について、三次元有限要素モデルによる数値解析的検討、および既往の実験結果との比較、検討を通じて以下の結論を得た。

- パイロッド・ラフトの極限支持力を、直接基礎と杭基礎の極限支持力にそれぞれ係数 α_R , α_P を乗じて表すと、 α_R は地盤条件、杭間隔・杭径比の影響を受け、 α_P は杭長・基礎幅比の影響を受けるなどやや複雑な性状を示す。
- パイロッド・ラフトの極限支持力を、杭基礎と直接基礎の極限支持力の和に基づいた(2)式で表すと、係数 ξ_{PR} は地盤条件、杭長・基礎幅比の影響をあまり受けず、杭間隔の影響のみを受ける。杭間隔・杭径比が 5 以上のとき ξ_{PR} は概ね 0.8 以上となる。
- 粘性土地盤における既往のパイロッド・ラフト（基礎幅 $B=0.8\text{m} \sim 4.0\text{m}$ ）の載荷実験から得られた係数 ξ_{PR} は 0.89～1.05 であり、解析値と概ね整合する。
- パイロッド・ラフトの極限支持力と直接基礎（もしくは杭基礎）の極限支持力の比は、直接基礎と杭基礎の極限支持力が等しいときに最大になる。このとき、支持力比は杭間隔が増すと大きくなり、 $s/d=8.6$ のとき最大 1.9 倍程度で直接基礎と杭基礎の単純和に近くなる。
- パイロッド・ラフトの極限支持力を(2)式に基づき $\xi_{PR}=0.8$ として評価するとき、使用限界および損傷限界状態を想定したパイロッド・ラフトの沈下量は、直接基礎、杭基礎の沈下量の中間の値になり、過大にはならない。
- 杭間隔・杭径比が 5 以上のパイロッド・ラフトの極限支持力は、杭基

礎と直接基礎の極限支持力の和に基づく(2)式によるものとし、係数 ξ_{PR} の上限値を 0.8 程度として評価することが妥当と考えられる。

今後、杭長・基礎幅比が小さい場合の実験との検証や、基礎の大きさ、形状、ラフトの剛性が異なる場合の影響などについて、さらなる検討が望まれる。最後に、本文は日本建築学会「パイロッド・ラフト基礎の支持力検討小委員会（主査：室蘭工業大学土屋勉名誉教授）」における活動成果の一部を含むことを記し、関係各位に深く謝意を表します。

参考文献

- Yamashita, K., Yamada, T. and Hamada, J.: Investigation of settlement and load sharing on piled rafts by monitoring full-scale structures, *Soils & Foundations*, Vol. 51, No. 3, pp. 513-532, 2011.
- Yamashita, K., Hamada, J. and Yamada, T.: Field measurements on piled rafts with grid-form deep mixing walls on soft ground, *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, Vol. 42, No. 2, pp. 1-10, 2011.
- Yamashita, K., Hamada, J., Onimaru, S. and Higashino, M.: Seismic behavior of piled raft with ground improvement supporting a base-isolated building on soft ground in Tokyo, *Soils & Foundations*, Vol. 52, No. 5, pp. 1000-1015, 2012.
- Yamashita, K., Hamada, J. and Tanikawa, T.: Static and seismic performance of a friction piled raft combined with grid-form deep mixing walls in soft ground, *Soils & Foundations*, Vol. 56, No. 3, pp. 559-573, 2016.
- 濱田純次, 重野喜政, 中村尚弘, 鬼丸貞友, 谷川友浩, 山下清: パイロッド・ラフト基礎の地震時シミュレーション解析, 日本建築学会構造系論文報告集 第 79 巻 第 701 号, pp. 941-950, 2014.7.
- Shigeno, Y., Yamashita, K. and Hamada, J.: Numerical study for performance-based design of piled raft with grid-form DMWs under large earthquake load, *PBDIII*, 198, 2017.
- 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 2001.10.
- 岸田英明: 支持杭を用いない基礎工法 一支持杭, 摩擦杭, 地盤改良と併用基礎の設計一, 基礎工, Vol.26, No.5, pp. 2-7, 1998.
- de Sanctis, L. and Mandolini, A.: Bearing capacity of piled rafts on soft clay soils, *J. Geotechnical & Geoenvironmental Eng., ASCE*, Vol. 132, pp. 1600-1610, 2006.
- 山下清, 谷川友浩, 重野喜政, 濱田純次: パイロッド・ラフト基礎の鉛直支持力に関する数値解析的検討, 日本建築学会技術報告集, 第 21 巻 第 47 号, pp. 99-104, 2015.2.
- Randolph, M.F.: Design methods for pile groups and piled rafts, *Proc. 13th ICSMFE*, Vol.5, pp. 61-82, 1994.
- 濱田純次, 本多剛, 谷川友浩, 山田毅, 土屋富男, 山下清: パイロッド・ラフト基礎の鉛直支持力に関する大規模モデル実験(その 1), (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B1, pp. 457-460, 2011.
- 土屋勉, 青木涼, 永井宏: 泥炭層を挟む軟弱地盤におけるパイロッド・ラフト基礎の原位置鉛直載荷試験, 日本建築学会技術報告集, 第 17 巻 第 36 号, pp. 483-486, 2011.6.
- 萩原幸男, 秦雅史, 藤嶋泰輔, 伊藤仁, 佐藤武, 山下俊英, 高稲敏浩: パイロッド・ラフト基礎の原位置鉛直・水平載荷試験(その 1), (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B1, pp. 661-664, 2005.
- 佐野大作, 伊勢本昇昭, 矢島淳二, 高浜勉, 森和久, 土屋勉: パイロッド・ラフト基礎と直接基礎の比較実験(その 1), 第 41 回地盤工学研究発表会, pp. 1407-1408, 2006.
- 渡邊徹, 長尾俊昌, 富田菜都美, 長坂光泰, 梅森浩: 細径鋼管で補強された地盤の原位置載荷実験(その 1), (その 2), 第 50 回地盤工学研究発表会, pp. 1227-1230, 2014.
- 長尾俊昌, 渡邊徹, 富田菜都美: パイロッド・ラフト基礎の原位置鉛直載荷実験(その 1), (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B1, pp. 601-604, 2015.

[2017 年 6 月 5 日原稿受理 2017 年 7 月 25 日採用決定]