泥炭層を挟む軟弱地盤における パイルド・ラフト基礎の原位置 鉛直載荷試験

土屋 勉 ——— *1 青木 涼 ——— *2
永井 宏 ——— *3

キーワード：
パイルド・ラフト, 原位置載荷試験, 鉛直荷重, 泥炭地盤,
H型 PC パイル

Keywords:
Piled raft, In-situ loading test, Vertical load, Peaty ground, H-shaped
PC pile

1. はじめに

パイルド・ラフト基礎は, 建築学会の基礎指針¹⁾に紹介されたことを契機として次第に建築技術者の関心が高まっている. 中・高層建築物への採用例²⁾も増加しており, 特別な基礎工法ではなくなりつつある. 今後は, 軟弱地盤における戸建て住宅や比較的小規模な構造物に対しても, 同工法の展開が図られるものと思われる.

しかし, パイルド・ラフト基礎は地盤を介して杭部分とラフト部分の挙動が相互に影響³⁾し合うことにより, 基礎全体の変形増大や支持力低下を引き起こすのが一般的である. また, 隣接する杭同士の間でも, 地盤を介して相互の影響が表れて, 杭の変形や支持力が変化することが考えられる. これらの現象は, 戸建て住宅や比較的小規模な構造物の場合でも同様に生じるであろう. 更に, 小規模構造物は剛性が一般に小さいので, 劣悪な地盤条件の敷地では不同沈下が発生し易いと考えられる. パイルド・ラフト基礎を採用する場合には, より慎重な検討が必要である.

鉛直荷重を受けるパイルド・ラフトの挙動を解明するために, 解析的研究や実大建物の長期計測がなされてきた. しかし, 解析ではあくまでも理想化されたモデルによる結果であり, 実大建物の長期計測では荷重分布や建物形状が複雑なため, その挙動の解釈に苦慮する人が多い. パイルド・ラフト基礎の挙動を明確にするためには, 地盤条件が比較的単純な原位置における鉛直載荷試験の蓄積を図ることが極めて重要と考えられる.

これらを背景として, 本報告ではパイルド・ラフト基礎の特性を明らかにすることを目的にして, 泥炭層を挟む軟弱地盤に施工された実構造物に近い形状の基礎に対する鉛直載荷試験を実施した. パイルド・ラフト試験体の他に, 直接基礎と単杭の試験も行っており, これらを相互に比較しながら, 主として沈下と杭体応力について考察する.

2. 地盤概要

試験現場は北海道勇払郡厚真町浜厚真であり, 海岸沿いの湿地帯

IN-SITU VERTICAL LOADING TESTS OF PILED RAFT FOUNDATION ON HIGHLY ORGANIC SOFT GROUND

Tsutomu TSUCHIYA — *1 Ryo AOKI ——— *2
Hiroshi NAGAI ——— *3

Vertical loading tests are performed at highly organic soft ground to evaluate the piled raft foundations, in which the raft is not directly connected to pile heads. The rafts are made of reinforced concrete with 3.64m square and 0.15m thickness with 21kN/m² loadings, and four H-shaped 5m long PC piles arranged at the corner of raft. The settlement and the axial stress of piled raft foundations are compared to those of a mat foundation and a single pile tested at the same site.

となっている. 図1に試験地盤の土質柱状図とスウェーデン貫入試験および標準貫入試験結果, 表1に土質試験結果(物理試験, 圧密試験, 一軸圧縮試験)を示す. 表層は火山灰で覆われ, その下(GL-0.7m~2.6m)に含水比の高い泥炭層が堆積している. それ以深も軟らかいシルトや緩い砂が分布する地層構成となっている.

図1 試験地盤の土質柱状図および貫入試験結果

表1 土質試験結果

試料番号	①	②	③	④	⑤	⑥
深さ (m)	0.35~ 0.50	1.30~ 2.15	2.80~ 3.64	4.20~ 4.67	6.50~ 7.37	11.00~ 11.88
土質	火山灰	泥炭	シルト-1	シルト質 細砂	シルト・ 砂互層	シルト-2
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.594	1.019	1.557	1.805	1.852	1.708
自然含水比 w_n (%)	23.9	549.4	71.0	29.9	35.6	52.0
間隙比 e_0	-	8.707	1.885	-	0.971	1.399
圧縮指数 C_c	-	5.457	0.541	-	0.485	0.690
圧密降伏応力 P_c (kN/m ²)	-	50.9	88.2	-	248.6	115.1
一軸圧縮強さ q_u (kN/m ²)	-	52.9	40.7	-	43.4	62.7

本稿は2010年度日本建築学会北海道支部研究報告集No.83に発表した内容を加筆・修正したものである。

¹⁾ 室蘭工業大学大学院工学研究科 教授・工博
(〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

²⁾ 会澤高圧コンクリート(株)

³⁾ 室蘭工業大学大学院工学研究科 助教・博士(工学)

¹⁾ Prof., Graduate School of Engineering, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

²⁾ Aizawa Concrete Corp.

³⁾ Assit. Prof., Graduate School of Engineering, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

表 2 H 型 PC パイルの性能

杭長※	L	(m)	3.0～6.5	7.0～10.0
杭断面積	A	($\times 102 \text{ mm}^2$)	308	308
PC鋼より線	種類		2.9mm3本より 2.9mm3本より	
	本数		4	6
	断面積	A_p (mm^2)	79.2	118.9
断面二次モーメント	X方向	I_x ($\times 104 \text{ mm}^4$)	7494	7494
	Y方向	I_y ($\times 104 \text{ mm}^4$)	12471	12471
ひび割れ曲げモーメント	X方向	$M_{cr, x}$ (kN・m)	5.6	6.6
	Y方向	$M_{cr, y}$ (kN・m)	9.3	11.0
有効プレストレス	σ_e	(N/mm ²)	2.77	4.16

※杭長は 0.5m ピッチとする

3. 試験方法

実施した一連の原位置載荷試験の配置図を図 2 に示す。パイロード・ラフト基礎や直接基礎の挙動を長期的に計測する載荷試験（長期間載荷試験）を基本として、それと比較するために、単杭、直接基礎およびラフト付き単杭による通常の載荷試験（短期間載荷試験）も実施した。

本試験で使用した杭は端板の無い H 型形状の PC パイルであり、その構造と性能を図 3 と表 2 に示す。

3. 1 短期間載荷試験

図4 短期間載荷試験 試験体

図4に示すように、a)単杭（杭先端：GL-5.2m）、b)直接基礎（1.82m×1.82m）、c)ラフト付き単杭（直接基礎の中心部に杭を配置）の3ケースである。直接基礎およびラフト付き単杭では、表層をすきとって、切り込み砕石（厚さ50mm）の上に均しコンクリート（厚さ50mm）を施工した後、ラフトのコンクリート（厚さ150mm）を打設した。ラフト付き単杭の杭頭は、均しコンクリートの下端に接している。載荷試験は、反力杭方式の鉛直載荷試験（写真1）である。試験方法

は、杭の押し込み試験方法（JGS1811-2002）および地盤の平板載荷試験方法（JIS1521-2003）に準じて行った。杭とラフトの基本的な挙動を把握することの他に、これらの試験から地盤定数を逆算することを目的としている。

写真 1 短期間載荷試験

3. 2 長期間載荷試験

長期間載荷試験は図 5 に示すように、パイルド・ラフト 2 体と直接基礎である。パイルド・ラフトでは 4 本の杭を配置したが、杭 1 本の支配面積を $1.82\text{m} \times 1.82\text{m}$ と仮定してラフト面積を $3.64\text{m} \times 3.64\text{m}$ とした。この場合の杭間隔 s/d は、杭を等価な円形断面に換算すると約 8.9 となる。杭頭部とラフトの接合部を図 6 に示す。ラフトのコンクリート（厚さ 150mm）と杭頭の縁を切ったのは、地震時水平力を杭頭に作用させないことを意図したことによる。ラフトから杭頭への鉛直荷重伝達を検討するために、下記の 2 種類の試験体を設定した。パイルド・ラフト-1 は、切り込み砕石（厚さ 50mm）の上に均しコンクリート（厚さ 50mm）を施工した後、ラフトのコンクリートを打設しており、杭頭が均しコンクリートの下端に接している。一方、パイルド・ラフト-2 は、杭頭部の上に切り込み砕石（厚さ 100mm）が施され、杭とラフトが完全に縁切りされている。

図5 長期間載荷試験 試験体

図6 接合部の詳細

載荷はラフトの上に砕石を2段階に分けて積み上げる実載荷方式(写真2)によって行った。ラフトのコンクリートを打設して、12日後に1回目の砕石投入(10.5kN/m²)、23日後に2回目の砕石投入(10.5kN/m²)を行った。

主な測定項目は、ラフト平面の沈下分布(4隅と中央部)、杭体の深度方向の軸ひずみ分布(深さ方向に4深度)である。

写真2 長期間載荷試験

4. 試験結果および考察

4. 1 短期間載荷試験

各試験体における荷重と沈下量の関係を図7に示した。ここで、各試験体の荷重を相互に比較するために、単杭については杭頭荷重を直接基礎やラフト付き単杭の平面積(1.82m×1.82m)で除したものである。

a)の単杭では10mm程度の沈下時点で極限状態に達しているが、b)の直接基礎ではそれ以上の沈下進行に伴い荷重が増加している。杭径の10%である20mm沈下時点の荷重に着目すると、a)単杭：36kN/m²、b)直接基礎：82kN/m²、c)ラフト付き単杭：103kN/m²となった。図中の破線d)は単杭と直接基礎を単純に合計したものであるが、20mm沈下時点では118kN/m²となった。c)はd)の87%となったが、ラフトと杭の地中応力が干渉して、同一荷重での沈下増大をもたらした結果と考えられる。ただし、沈下量50mmあたりではc)とd)の荷重が同程度となっていることから、大沈下時ではラフト

図7 短期間載荷試験 荷重-沈下量関係

図8 杭体軸力分布

部と杭部が独立に挙動することを示唆している。

図8は杭体の軸力分布である。単杭では載荷の進行に伴う軸力分布形状がほぼ近似している。一方、ラフト付き単杭では123kN/m²載荷時点で杭頭部の最大軸力32kN/m²を示した後、それ以上の載荷時点では杭頭部軸力が減少している。

上記の挙動を考察するために、単杭とラフト付き単杭の杭周面摩擦力を土層区分ごとにプロットしたのが図9である。それによると、単杭とラフト付き単杭共に、シルト質細砂である③-④区間で最も大きな摩擦抵抗を示すものの、両基礎形式で以下に示すような特徴的な摩擦抵抗を示している。

a) 単杭：杭体深度にかかわらず、沈下増大に伴って杭周面摩擦力が上昇し、最大になった後ほぼ一定の値を維持している。最大に達する時点の沈下量は、深部の③-④区間では7mm程度であるが、浅部の①-②区間や②-③区間ではそれよりも大きく10mm程度である。泥炭である①-②区間は15kN/m²程度の杭周面摩擦力を有している。

b) ラフト付き単杭：②-③区間や③-④区間の杭周面摩擦力は、10mm程度の沈下量で最大に達してそれ以降はほぼ一定になる。それに対して、①-②区間の杭周面摩擦力は、25mm沈下時にピークを迎えた後に大きく減少して、100mmを越える大沈下時ではほとんど0になっている。

図9 短期間荷重試験 杭周面抵抗力度-沈下量関係

以上のように、GL-2.5m 以浅の①-②区間の杭周面摩擦力が単杭とラフト付き単杭で大きく異なることが明らかになった。ラフト付き単杭では、ラフトから地盤を介して杭へ伝達する力が顕著であることを反映したものと考えられる。このような現象は、既往の解析⁴⁾や実験⁵⁾でも報告されており、パイルド・ラフトの杭周面摩擦力を評価する場合に考慮する必要がある。

4. 2 長期間荷重試験

図10は直接基礎とパイルド・ラフトの荷重度～沈下量関係である。同一荷重度においては、パイルド・ラフトが直接基礎よりも明らかに沈下量が小さく、杭による沈下抑制効果が表れている。パイルド・ラフト-1とパイルド・ラフト-2を比較すると、載荷重が小さい段階では両者にあまり差が見られない。しかし、載荷重が大きくなるにつれてパイルド・ラフト-2の沈下量がパイルド・ラフト-1よりも大きくなっている。杭頭に介在した碎石の影響と推察されるが、この部分の碎石の挙動に関して今後詳しい検討が必要である。

図11は杭頭部と杭先端部の軸力の推移を、杭1本の支配面積で除してプロットしたものである。基礎底盤打設においては、コンクリート硬化に伴って杭頭部軸力が増加する。一方、碎石投入による載

図10 長期荷重試験 荷重度-沈下量関係

図11 載荷重-杭体軸力関係

荷段階になると、時間経過に伴って杭頭荷重が逆に減少した。しかし、杭先端部の軸力は増加していることから、ラフトから直接地盤に伝達した荷重が、地盤を介して再び杭体へ伝達されたことを反映したものと考えられる。パイルド・ラフトではラフトから杭へ及ぼす相互作用のために、通常の荷重試験である単杭の軸力分布とは異なることが実証できた。

5. まとめ

本報告では、泥炭層を挟む軟弱地盤に施工された実構造物に近い形状の基礎に対する鉛直荷重試験を実施した。パイルド・ラフト基礎の普及を図るには、このような原位置荷重試験の蓄積が必要である。本報告で得られた主な知見を以下に示す。

- ①. ラフト付き単杭の基準支持力（杭径の10%沈下時点）は、単杭と直接基礎の合計よりも小さく、ラフトと杭の間で相互作用の影響がある。
- ②. ラフト付き単杭では、大沈下時では表層に近い深度での杭周面摩擦力がほとんど発揮されず、単杭の荷重試験結果とは大きく異なる。
- ③. パイルド・ラフトに載荷されると、時間経過にともなって杭負担が減少してラフトから地盤に直接伝達される割合が増加する。ただし、杭先端部軸力が逆に増大することから、ラフトから地盤そして再び杭へと伝達する荷重を確認した。
- ④. 碎石を介在させて杭頭とラフトの縁を切った場合、載荷重が大きくなるにつれて杭頭軸力負担率の減少と沈下量の増大をもたらした。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001.10.
- 2) 加倉井正昭：建築分野における併用基礎の利用，基礎工，Vol.37，No.10，pp.2-9，2009.10.
- 3) 土屋 勉：併用基礎（パイルド・ラフト）における相互作用，基礎工，Vol.37，No.10，pp.21-25，2009.10.
- 4) 土屋 勉・後藤延明：PILED-RAFTの支持力と沈下特性に関する解析的研究，構造工学論文集，Vol.40B，pp.61-67，1994.3.
- 5) 松尾雅夫・小椋仁志・他：パイルド・ラフト基礎に節杭を適用した建物の挙動（その1～3），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.685-690，2005.9.

[2010年10月18日原稿受理 2011年1月7日採用決定]