## 鉛直振動荷重を受けるパイルドラフト基礎の水土連成変形特性に関する研究

# Research on soil-water coupling deformation behavior of

piled raft foundation subjected to vertical vibration load

千野伸晶1,長崎耕欣2,朱文軒3,岩井裕正4,張鋒5

1 名古屋工業大学・大学院工学研究科社会工学専攻・32415055@stn.nitech.ac.jp

- 2 鹿島建設株式会社(元名古屋工業大学・大学院工学研究科社会工学専攻)
- 3 名古屋工業大学・大学院工学研究科社会工学専攻
- 4 名古屋工業大学・工学部社会工学科
- 5 名古屋工業大学・工学部社会工学科

## 概 要

パイルドラフト基礎はコスト削減や工期短縮が実現できる合理的な基礎構造として我が国における建築 分野において数多くの施工事例があるものの、土木分野での適用事例は少ない。一方、海外ではパイルド ラフト基礎が土木分野でも適用されており、鉄道軌道の基礎にも用いられている。しかし、この列車の鉛 直荷重によりパイルドラフト基礎が沈下する事例が報告されている。本稿では鉛直振動荷重を受けるパイ ルドラフト基礎の力学特性、特に沈下特性に着目し 1G 場模型実験及び 3 次元動的 FEM 解析を実施した。 その結果、1/50 スケールの模型実験より沈下量に及ぼす重要な影響因子として、地盤-構造物一体系の固 有振動数が関与していることが分かった。さらに数値解析で得られた結果と模型実験の結果を比較するこ とで、本研究で提案した解析手法のパイルドラフト基礎の沈下特性への適用性を検証した。

キーワード:パイルドラフト基礎,鉛直振動荷重,沈下,1G場模型実験,FEM動的解析

## 1. はじめに

現在,土木構造物の設計法は仕様規定型から性能規定型 へと移行しつつある<sup>1)</sup>。これは設計の段階で構造物に要求 する性能を明示し,その性能を設計供用期間に構造物が保 持することを客観的に確認する設計法である。即ち,原則 として規定した性能を満足すれば,どのような設計も許容 されるということである。こういった性能規定型の設計へ の移行を受けて,直接基礎に杭を併用した基礎形式である パイルドラフト基礎が近年注目を浴びている。パイルドラ フト基礎では直接基礎と杭が一体となって荷重を分担す ることにより,上部構造物の荷重の一部を,杭体を通じて より深部の地盤に伝達することが可能であり,基礎として の沈下量を低減させることができる<sup>2)</sup>。

実際に我が国の建築分野では,2001年日本建築学会「建築基礎構造設計指針」<sup>3)</sup>の改定がおこなわれ,従来の許容応力度設計法から,建物沈下量など変形評価を主体とする限界状態設計法に移行するとともに,直接基礎に沈下低減用の杭を併用したパイルドラフト基礎が新たな基礎形式として加えられた。その為,これまでに低層建物から超高層建物まで幅広い建物で挙動観測が行われ,設計法の妥当性の検証が実施されており,現在まで数多くの適用実績がある。その際,パイルドラフト基礎を採用することで従来

の杭基礎を適用させた場合の設計と比較してコストが 55%まで低減された事例もある<sup>4</sup>。

一方で、土木分野ではパイルドラフト基礎の採用事例は ほとんどない。現行の設計法において、杭基礎では基礎ス ラブ底面の地盤の抵抗力を無視し、鉛直荷重は杭のみで支 持させるのが原則となっている。設計法がこの様な方針と なっているのは、杭の沈下と地盤の沈下が一致しないこと により、既設構造物でフーチング下部に空隙を生じる事例 が報告されていることによる。しかしながら、構造物の変 位を適切に予測できれば基礎の設計において、上記の様に 構造的及び経済的に大幅な合理化が図れる可能性がある ことも、現行の設計指針で言及されており<sup>5</sup>、パイルドラ フト基礎の採用も期待される。

このような我が国の現状とは異なり,海外ではパイルド ラフト基礎は鉄道軌道の基礎への適用事例があるが,鉄道 供用とともにその鉄道振動によりパイルドラフト基礎が 沈下するという被害も報告されている。。土木構造物は上 記の様な軌道あるいは道路といった振動荷重を受ける場 合が少なくはない。こういった事例を受け,鉄道による振 動荷重と杭・ラフト・地盤の相互関係を適切に把握し予測 することで,その結果を設計に反映することが望まれる。 そこで本研究では、土木構造物として使われるパイルド ラフト基礎の力学特性,特に鉛直振動荷重を受ける場合の 沈下特性に着目し,パイルドラフトと地盤の相互作用に関 する基礎的知見を得ることを目的とする。1/50 スケールの 模型地盤に設置したパイルドラフト基礎模型に小型振動 装置を用いて列車振動荷重を与える 1G 場模型実験を行い, 中密な乾燥地盤及び飽和地盤条件下でのパイルドラフト 基礎の力学挙動に関する基礎データを蓄積する。また,同 条件での数値シミュレーションを実施し,比較及び検討を 行う。

## 2. 1G 場模型実験概要

本実験では,乾燥地盤及び飽和地盤においてパイルドラ フト基礎が上部工から鉛直振動荷重を受ける際の振動数 が力学挙動及び,沈下特性に与える影響を検証した。

## 2.1 試験概要及び試験装置

試験概要図を図1に示す。実験模型は幅1000mm,奥行 715mm,高さ525mmの土槽内の中にパイルドラフト模型 を設置・作製した。模型実験は乾燥地盤及び飽和地盤であ る。乾燥地盤には乾燥豊浦砂を用いて相対密度75~80%の 中密な地盤を目標に,空中落下法(落下高さ70cm)及び 締固め法により作製した。飽和砂地盤は含水比5%の豊浦 砂を相対密度が75~80%となるように湿潤締固め法により 作成し,その後模型土槽底部から水を供給することで飽和 させた。また鉛直振動荷重を与えるために写真1に示す小 型振動機を使用した。

パイルドラフト模型は実構造物の 1/50 スケールを想定 して作製した。図2に示す。モデル杭には直径 D=20mm, 肉厚 t=2mm のアルミパイプを使用し,杭先端をポリアミ ドキャップにより蓋をすることで先端支持力を発揮でき る仕様にした。ラフト部は,幅 260mm,奥行 260mm,厚 さ 20mm の鋼材を使用した。

計測機器については圧電式加速度計,小型ロードセル, ひずみゲージ,レーザ変位計及び間隙水圧計を使用した。 図3に計測機器設置箇所を示す。加速度計,レーザ変位計 は図3の測点A及び測点Bに設置し2点により応答加速 度,沈下量を計測した。また,杭頭部と先端にひずみゲー ジを設置することで杭頭軸力と先端支持力を測定できる ようにした。間隙水圧計は過剰間隙水圧を測定するため, ラフト直下に各深度に設置した。





図2 パイルドラフト模型



図3 計測機器設置個所

#### 2.2 実験ケース

本実験の実験ケースを表1に示す。加振条件は初期荷重 300N,振幅 300N,加振時間を10秒間,加振波を正弦波と した。振動荷重の振動数がパイルドラフト基礎の沈下挙動 に与える影響を検証するため振動数,模型地盤を変え実施 した。

表│ 実験ケース						
Case	振動数(Hz)	地盤	相対密度(%)			
Case1	50		79 <sub>°</sub> 8			
Case2	100	乾燥	79。4			
Case3	200		78 <sub>°</sub> 3			
Case4	400		75 <sub>°</sub> 2			
Case5	50		76 <sub>°</sub> 0			
Case6	100	飽和	77。2			
Case7	200		79 <sub>°</sub> 9			
Case8	400		75 <sub>°</sub> 9			

## 2.3 乾燥地盤 実験結果

各ケースの実験において,加振時間 10 秒間に加振前後 1 秒間を含めた 12 秒間のグラフで表した。Case2 の振動数 100Hz時における荷重時刻歴を図4に示す。左図が全体図, 右図が拡大図である。

各ケースで計測されたラフトの応答加速度の時刻歴を 図5に示す。図5より、与えた振動数が大きくなるにつれ て、応答加速度の値が大きくなっていることが確認できる。



図4 荷重時刻歴











続いて各ケースの沈下時刻歴を比較したグラフを図 6, 加振前後 1 秒間の支持力分担率を表したものを図 7 に示 す。矢印左が加振前,矢印右が加振後の分担率を表してい る。図6より,振動数200Hzのケースでは,最終沈下量が 約0.27mmであり,比較的大きな沈下がみられることから, 沈下特性は振動数に依存することが確認できた。200Hzの 場合に沈下量が最も大きかった原因として,与えた振動数 が地盤・パイルドラフトー体系の固有振動数に近いことが 考えられる。さらに図7より,200Hzの実験ケースでは, 模型が最も沈下したのにも関わらず,地盤反力が得られて いないことが確認できる。これはラフトの沈下量よりも模 型地盤沈下量の方が大きくなってしまい,ラフトが模型地 盤に接地していなかったことが原因と考えられる。また全 ての実験ケースにおいて加振前から加振後にかけて,先端 支持力の分担率が上昇し,周面摩擦力の分担率が減少して いることが確認できる。

#### 2.1 飽和地盤 実験結果

各ケースで計測されたラフトの応答加速度の時刻歴を 図8に示す。図8より飽和地盤のほとんどの実験ケースに おいて,応答加速度の大きさが乾燥地盤に比べ小さいこと が確認できる。また乾燥地盤と同様に,与えた振動数が大 きくなるにつれて,応答加速度の値も大きくなっているこ とが分かる。



図8 応答加速度時刻歴(飽和地盤)

続いて各ケースの沈下時刻歴を比較したグラフを図 9, 加振前後 1 秒間の支持力分担率を表したものを図 10 に示 す。図 9 より,乾燥地盤で最も沈下が大きかった振動数 200Hz 載荷時は,飽和地盤では全く沈下が発生しなかった。 また,振動数 100Hz 載荷時では乾燥地盤及び飽和地盤とも に沈下量は概ね一致していることが確認できる。これらの 結果から,模型地盤の固有振動数の変化が沈下量に影響を 及ぼしていると考えられる。また図 10 より乾燥地盤と同 様,加振前から加振後にかけて先端支持力の分担率が上昇 し,周面摩擦力の分担率が減少していることが分かるが, 加振後も載荷荷重の大部分を周面摩擦力で支持している ことが確認できる。



図9 沈下時刻歴(飽和地盤)





#### 3. 模型加振実験の数値解析

室内模型実験と同条件で3次元動的 FEM 解析を実施した。実験結果と本解析の結果を比較し, FEM プログラムの 模型実験への適用性及び解析面から模型パイルドラフト 基礎の力学特性を検証した。

#### 3.1 構成式

土の構成モデルである回転硬化型弾塑性構成式 Cyclic mobility model(Zhang et al.,2007)<sup>7</sup>は,砂/粘土のさまざまな 挙動を説明するために広く使用されている。しかし,本実 験のように砂が低拘束圧条件下にある場合,e-Inp 関係を 使用した Cyclic mobility model は適切でないため修正を行った。主な変更点として等方圧密下の砂の体積ひずみと平均主応力の関係をべき乗則によって図 11 に示すように表現した。そのため新しい材料パラメータ n を導入し,低拘 束圧を含めた等方圧密実験結果に基づいて,豊浦砂の特性 パラメータ n の値を 0.5 に決めた。また過圧密の発展則に 用いられる従来の材料パラメータである m<sub>R</sub>を塑性せん断 ひずみと塑性体積ひずみの影響を別々に考慮できるよう に,二つのパラメータ m<sub>R1</sub> と m<sub>R2</sub>に変更した。地盤材料パラメータを表 2 に示す。

#### 3.2 解析概要

模型加振実験の数値解析を3次元動的 FEM プログラム 「DBLEAVES」<sup>8)</sup>を用いて実施した。基礎模型は AFDmodel<sup>9)</sup>及びビーム要素とコラム要素で構成されるハイブ リッド要素でモデル化し、ラフト、杭、地盤の境界面に要 素の剥離と閉合を考慮できるクーロン規準をベースにし た弾塑性ジョイント要素を設けた。数値解析に用いた解析 メッシュを図12に示す。解析メッシュは模型実験に使用 した土槽の幅方向及び奥行方向を判断面とした4分の1断 面である。荷重載荷点は図12に示す位置に設定し,実験 で計測された荷重を載荷した。また本数値シミュレーショ ンでは,初期剛性に比例するレーリー減衰を使用した。各 要素の減衰定数を表3に示す。境界面における拘束条件は, 領域側面及び領域底面で境界法線方向のみを拘束とし,地 表面は自由境界とした。



図11 間隙比と平均主応力のべき乗関係



表2	地盤材料パラメーク	タ
114		

Parameter of modified Cyclic mobility model		
Principal stress ratio at failure		3.3
Poisson ratio		0.3
Void ratio		0.91
Compression index		0.04
Swelling index		0.006
Exponential index of compression/extension		0.5
Degradation parameter of over consolidation state		0.0001
(Shear component)		
Degradation parameter of over consolidation state		0.01
(Volumetric component)		
Degradation parameter of structure		0.5
Evolution parameter of anisotropy		1.0
Over consolidation ratio		7000
Initial structure ratio		0.21
Initial anisotropic		0.0

表3 初期剛性比例型レーリー減衰の減衰定数					
減衰定数		値			
ラフト	$h_1$	0.01			
杭	$h_1$	0.02			
模型地盤	$h_1$	0.05			
ジョイント要素	hı	0.05			

#### 3.3 解析結果

各ケースにおけるラフトの応答加速度の解析結果を図 13,図14に示す。また実験結果も同グラフに載せること で解析結果と実験結果を比較した。応答加速度の解析結果 より振動数100Hzのケースでは実験結果を再現できた。ま た400Hzのケースでは応答加速度の大きさに差が生じて しまったが,他の振動数では実験結果を概ね再現すること ができた。







図14 応答加速度の比較(飽和地盤)

続いて Case2 における沈下量の比較を図 15 に示す。構成式の修正前と修正後の解析では沈下量が約 10 分の 1 に低減され,他のケースにおいても同様な傾向が見られた。

これより修正 Cyclic mobility model は既存の Cyclic mobility model に比べ,かなりの精度で低拘束圧下での沈下量を再 現できていると言える。また各ケースにおけるラフトの沈 下時刻歴の解析結果及び実験結果のグラフを図 16,図 17 に示す。図 16 より乾燥地盤で生じる沈下量の最大値が実 験結果の値と同程度であることが確認できた。よって本解 析により乾燥地盤で発生する最大の沈下量は再現できた と言える。しかし,ほとんどのケースでは沈下量を過大に 評価しており,振動数による沈下量の違いはあるものの、 実験値ほどではなかった。今後さらなる検討が必要と考え られる。











また構成式修正後の乾燥地盤と飽和地盤の鉛直変位コ ンター図を図18,図19に示す。コンター図より乾燥地盤 が飽和地盤に比べ100Hz,200Hz,400Hzのケースにおい て、ラフトより周辺地盤とラフト直下の沈下量が大きくな った。これは飽和地盤では乾燥地盤に比べ地盤剛性が高い ためだと考えられる。



図18 鉛直変位コンター図(乾燥地盤)



図19 鉛直変位コンター図(飽和地盤)

## 4. 結論

本研究では鉛直振動荷重を受ける際の,中密な乾燥地盤 及び飽和地盤に設置されたパイルドラフト基礎の力学特 性,特に沈下特性に着目し,1G場模型実験及び3次元動 的 FEM 解析を実施した。本研究によって得られた知見を 以下に示す。

- ラフトに発生する沈下量は、乾燥地盤では振動数 200Hzの場合に0.27mmと最も大きいが、飽和地盤の 場合は振動数200Hzで沈下は発生しなかった。また飽 和地盤で最も沈下が大きくなったのは振動数100Hzで 0.12mm沈下する結果となった。これより、沈下量に及 ぼす重要な影響因子として地盤-構造物一体系の固有 振動数が挙げられる。
- 2) 支持力分担率より乾燥地盤及び飽和地盤で実施した ほぼ全ての実験ケースにおいて、加振前から加振後に かけて先端支持力の分担率が上昇し、周面摩擦力の分 担率が減少していることが分かった。さらに飽和地盤 では加振前、加振後ともに載荷荷重の大部分を周面摩 擦力で支持していることが確認できた。
- 3) ラフトに発生する応答加速度は Cyclic mobility model の修正にさほど変化が見られず,400Hz 以外のケース では応答加速度の大きさ及び位相において,実験結果 を概ね再現することができた。
- 4) ラフトに発生する沈下量は修正 Cyclic mobility model を導入することにより、従来の Cyclic mobility model に 基づいた解析に比べ約 10 分の 1 まで低減され、乾燥地 盤の模型実験で発生しうる最大の沈下量と同程度にな ることが確認できた。しかし振動数による沈下量の違 いはあるものの、実験値ほどではなかった。したがっ て異なる振動数がパイルドラフト基礎の沈下量に与え る影響をより正確的に再現できる、地盤-構造物一体 解析手法の開発を今後の課題とする。

#### 参考文献

- 福田佳典:パイルドラフト基礎の長期沈下挙動に関する研究, 京都大学大学院学位論文,2013.
- 2) 日本建築学会:建築基礎構造設計指針,2001.
- (財)建設コスト管理システム研究所:「パイルドラフト基礎」の調査報告,新技術調査検討会,2007.
- 日本道路協会:道路橋示方書・同解説IV 下部構造編, pp.243-265, 2002.
- Gu. L. L, Ye. G. L, Bao. X. H and Zhang. F: Mechanical behavior of piled-raft subjected to high-speed train loading, Soils and Foundation, Vol.56, No.6, pp.1035-1054, 2016.
- Zhang. F, Ye. B, Noda. T, Nakano. M and Nakai. K: Explanation of cyclic mobility of soils: Approach by stress-induced anisotropy, Soils and Foundation, Vol.47, No.4, pp.635-648, 2007.
- Ye. B, Ye. G. L, Zhang. F and Yamashita. A: Experiment and numerical simulation of repeated liquefaction-consolidation of sand, Soils and Foundation, Vol.47, No.3, pp.547-558, 2007.
- Zhang. F and Kimura. M: Numerical prediction of the dynamic behaviors of an RC group-pile foundation, Soils and Foundation, Vol.42, No.3, pp.72-92, 2002.