

中間層支持杭の鉛直支持力特性に関する研究

支持層の厚さと相対密度の影響に着目した遠心模型実験とシミュレーション解析

堀井 良浩^{*1}・渡邊 徹^{*1}・長尾 俊昌^{*1}

Keywords : pile, bearing capacity, settlement, thin bearing layer, vertical loading test, centrifuge model test, simulation analysis

杭, 支持力, 沈下, 中間層, 鉛直載荷試験, 遠心模型実験, シミュレーション解析

1. はじめに

近年, 環境負荷の軽減と社会資本整備の効率化の志向により, 建築基礎構造において性能の確保とともに材料, 排出土量, 工期, コストの縮減が一層求められている。これらを実現するため, 軟弱地盤上に建築物を建設する場合には, 杭の先端を N 値が大きくかつやや薄い砂層等(中間層¹⁾)に支持させることがある(図-1)。このためには, 杭の支持力の確保とあわせ, 基礎構造の沈下が許容値以下となるように設計することが大切である。これまでには, 支持層が薄い場合の杭の先端の鉛直支持力特性の評価に課題があり, その適用上の制約があった。

本研究は, 中間層に支持される杭(以下, 中間層支持杭と呼称)の鉛直支持力特性を明らかにし, その沈下挙動の評価を支持層の厚さによらず可能にすること

を目的としている。既報²⁾において, 支持層の厚さの影響に着目した模型杭の鉛直載荷実験とそのシミュレーション解析を報告した。本報では, 支持層の相対密度を従来の 85%から 60%に低下させた実験と, 杭の先端の鉛直支持力特性の評価を見直したシミュレーション解析の結果を加え, 改めて全体の内容を報告する。

2. 遠心模型実験

模型杭(縮尺 1/50)の鉛直載荷実験は, 地盤の剛性と強度に関係する応力を実物相当とするため, 50G(G は重力加速度)の遠心加速度場において行った。

2.1 試験体

実験に用いた試験体の概略を図-2に示す。模型地盤は主として上から緩い砂層(表層), 密な砂層(支持層), 過圧密粘土層の 3 層で構成される飽和地盤である。地表面から 360mm(実物換算 18m)の深さを上面とする支持層に, 模型杭を 1D(D は直径)根入れさせ 2 本(一部 3 本)設置することにより, 1 つの試験体で 2 回の鉛直載荷実験を可能にしている。模型杭は図-3

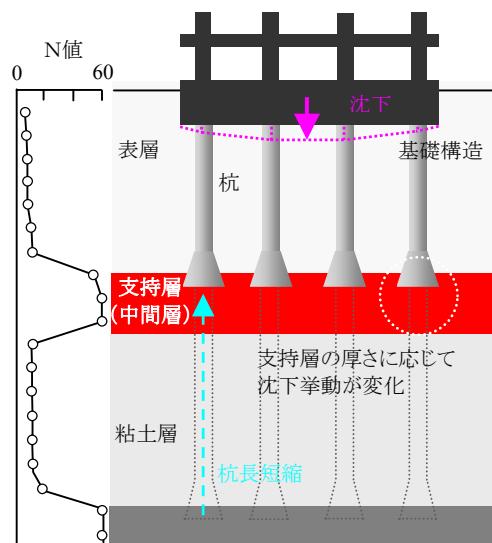


図-1 杭の中間層支持の概念

Fig.1 Image of pile on thin bearing layer

*1 技術センター建築技術研究所建築構工法研究室

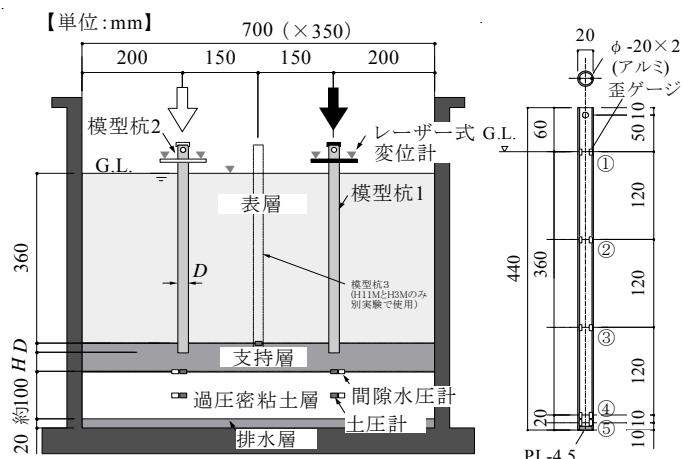


図-2 試験体の概略

Fig.2 Outline of centrifuge modeling

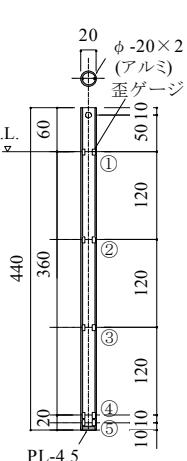


図-3 模型杭

Fig.3 Pile model

に示すような先端を閉塞させ表面が滑らかな直径20mm（実物換算1m）のアルミ管製であり、軸力測定のため同図に示す位置の内面（1断面あたり2箇所）に歪ゲージを貼付している。また土槽の内壁には摩擦低減のためテフロンシートを貼り付けている。

模型地盤の作製は表-1に示す地盤材料を用い以下の手順により1G場で行った。まず厚さ20mmの排水層（珪砂5号）の上に真空脱気したスラリー状のカオリン粘土（含水比100%）を投入し、最大0.5MPaの上載圧で圧密させ過圧密粘土層（過圧密度比 ≥ 2.5 、実験後含水比50%前後）を作製した。次に支持層（豊浦砂）を所定の相対密度 D_r となるよう空中落下法により杭下端深さまで作製した段階で模型杭を固定した。そして残りの支持層と表層（珪砂8号、 $D_r=55\%$ ）を同様に作製した後、地表面まで水で飽和させた。

2.2 実験ケース

実験ケースを表-2に示す。試験体は支持層が密（ $D_r=85\%$ ）で支持層の杭下端以深の厚さHの杭径Dに対する比H/Dを0～11とする5体と、支持層が緩く（ $D_r=60\%$ ）H/Dを3,11とする2体の計7体を作製した。H2,H3,H3M,H4が中間層支持杭に対応するケースで、H11,H11Mが支持層の支持力を、またH0が過圧密粘土層の支持力を確認するケースである。

2.3 実験方法

実験は、遠心力を50Gまで増加させ、地表面の沈下と粘土層内の過剰間隙水圧の消散が概ね終了した時点で、杭頭荷重を変位制御（目標載荷速度 $\leq 0.3\text{mm}/\text{min}$ ）で与える方式により、各試験体で2回づつ

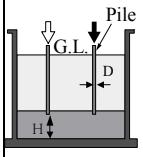
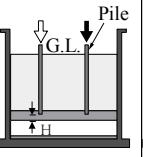
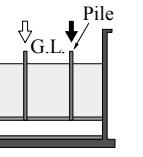
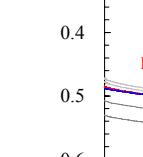
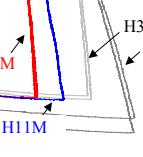
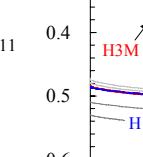
表-1 実験に用いた地盤材料の物理的性質

Table1 Properties of soil materials

材料名	土粒子比重	密度(g/cm ³)	D_{50} 最大	D_{50} 最小	均等係数	曲率係数	液性限界	塑性限界
豊浦砂	2.644	1.627	1.344	0.201	1.75	0.937	—	—
珪砂8号	2.634	1.560	1.173	0.078	—	—	—	—
カオリン粘土	2.616	—	—	<0.005	—	—	68.6%	30.9%

表-2 実験ケース

Table2 List of model tests

実験の種類	杭の鉛直載荷実験						
	50G(G:重力加速度)						
実験の方法	H11	H11M	H4	H3	H3M	H2	
							
H/D	11	4	3	2	0		
地盤	表層	珪砂8号($D_r=55\%$)					
	支持層	D _r =85%	60%	85%	60%	85%	
	過圧密粘土層	---		カオリン粘土(圧密荷重0.5MPa)			

行った。杭頭変位は5mm(0.25D)を超えた時点での杭頭荷重が零となるまで戻した後、再び10mm(0.5D)以上となるまで与えた。実験中、前述の杭ひずみに加え、杭頭荷重を小型ロードセルにより、杭頭変位と地表面変位をレーザー式変位計により、地盤の土水圧を小型の土圧計および間隙水圧計により計測した。

2.4 実験結果

実験結果は加力直前を初期値とし、荷重は杭を中心とした断面積で除した荷重度 q により、また沈下量 S は杭径で除した沈下比 S/D で整理した。先端荷重度 q_p は、先端より10mm上方のひずみ換算値を基本とするが、H11MとH3Mについては先端より20mm上方のそれとした（前述の図-3）。なお加力直前において、杭先端には杭の自重、加力治具、浮力、負の摩擦力に起因する荷重（平均0.5MPa前後）が作用していた。

2.4.1 荷重度～沈下比関係

実験で得られた杭頭の $q_t \sim S_t/D$ 関係と先端の $q_p \sim S_p/D$ 関係を支持層の D_r 別に図-4に示す。支持層が密

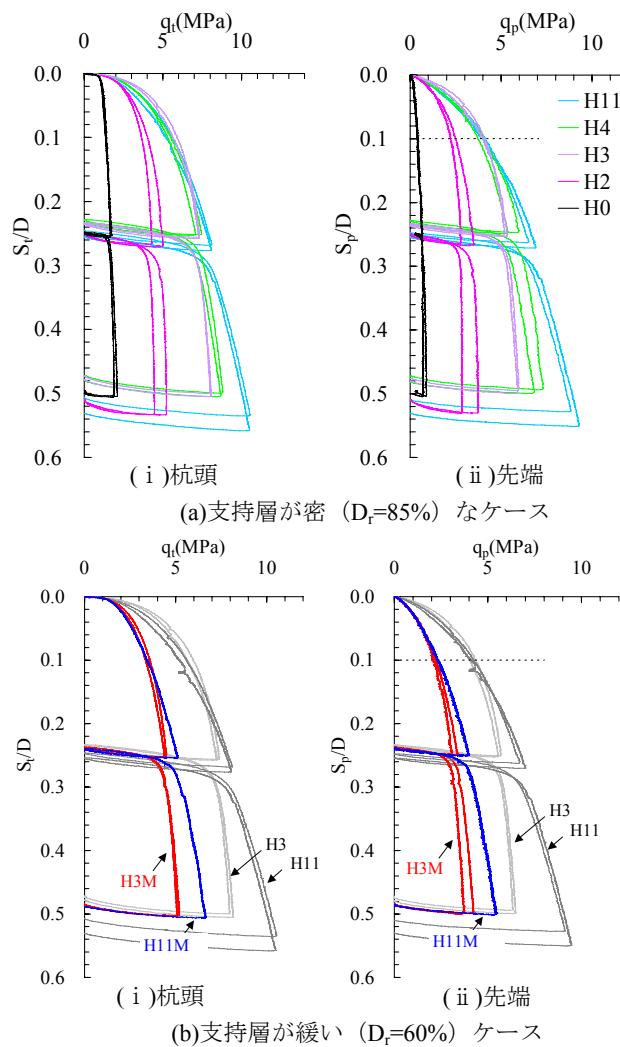


図-4 荷重度～沈下比関係の実験結果

Fig.4 Load-settlement relationships

($D_f=85\%$) なケースの $q_p \sim S_p/D$ 関係 (同図-a-ii) より, H/D が小さく (支持層が薄く) なるにつれ q_p が減少する傾向を確認できる。この傾向は、支持層の破壊機構の変化を示唆すると考えられるが、 S_p/D が 0.1 以下の範囲では明瞭でない。これは支持層が緩い ($D_f=60\%$) ケースにおいても確認できる (同図-b-ii)。図中、支持層が密で H/D が対応する実験結果を併記するが、支持層の D_f の低下によっても q_p が減少している。これは支持層の剛性と強度の低下に起因すると考えられる。

2.4.2 先端支持力

設計上の極限先端支持力は S_p/D が 0.1 の時 (第2限界抵抗力) の先端荷重 q_{pu} 相当とすることが多い。実験で得られた q_{pu} と H/D の関係を図-5 に示す。図より、前述したように q_{pu} は支持層の D_f の低下により減少すること、また支持層の D_f が同じ場合、 H/D が 11 から 3 に小さくなても殆ど変わらないが、それより小さくなると減少することを確認できる。同図に、 q_{pu} の粘土層の支持力等から決まる(1)式 (いわゆる 2 層地盤の支持力式) の計算結果を、荷重分散角 θ を変えて併記している。

$$q_{pu} = q_c \{1 + 2 \cdot H/D \cdot \tan \theta\}^2 \quad (1)$$

ここで q_c は粘土層に支持される杭の q_{pu} であり、本報では $H0$ の実験結果とする。図より、(1)式による計算結果は、 θ を $\tan^{-1}0.35$ とする場合に実験結果と良く対応することが分かる。一方、 θ を直接基礎の支持力評価に用いられる $\tan^{-1}0.5^{(3)}$ とする場合は実験結果より大きめとなり、また杭の支持力評価に用いられる $\tan^{-1}0.3^{(4)}$ とする場合はやや小さめとなる。ここで $H4$ と $H3M$ の計算結果が実験結果より大きいのは、 q_{pu} が支持層の支持力により決まるためと考えられる。

2.4.3 基準化した先端荷重～先端沈下量関係

q_{pu} と $S_p/D=0.1$ で基準化した $q_p \sim S_p/D$ 関係を図-6 に示す。図中、下式で表される砂質地盤に支持される場所打ち杭を対象とする設計推奨式⁽⁵⁾を併記している。

$$S_p/(0.1D) = 0.3 q_p / q_{pu} + 0.7 (q_p / q_{pu})^2 \quad (2)$$

図より、(2)式は実験結果と概ね対応することが分かる。ただし、 $H2$ と $H3$ においてやや大きめの沈下量を与えており (同図-a)，支持層の破壊機構の変化に起因するものと推察される。

2.4.4 先端荷重～先端沈下量関係の推定

S_p/D が 0.1 となるまでの $q_p \sim S_p/D$ 関係は、 q_{pu} を θ を $\tan^{-1}0.35$ とした(1)式の計算結果と支持層が厚い場合の実験結果の小さい方とし、かつその曲線形状を(2)式で

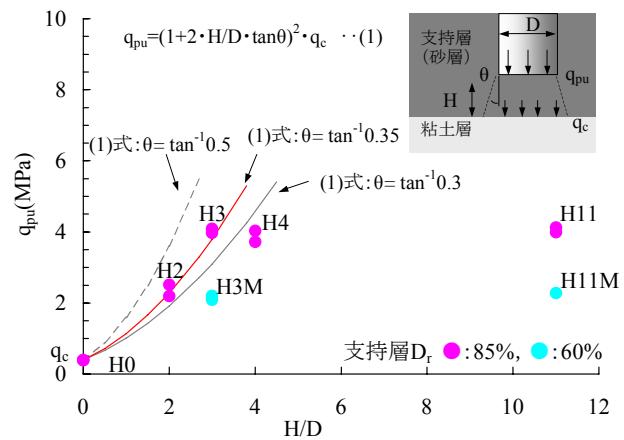
図-5 q_{pu} と H/D の関係

Fig.5 Bearing capacity of pile toe - H/D relationships

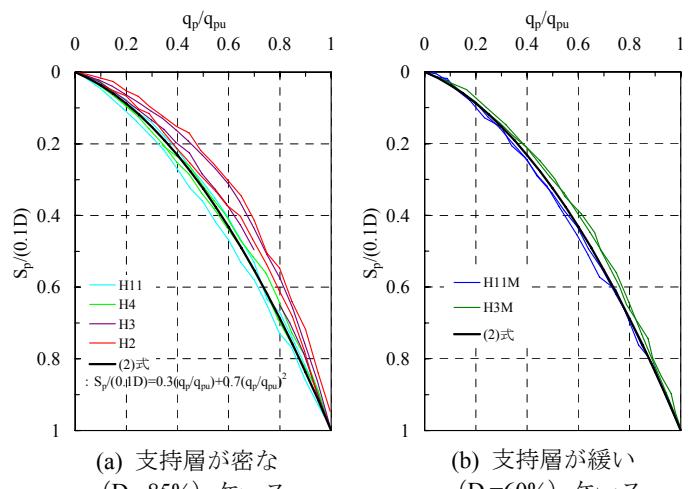
(a) 支持層が密な
($D_f=85\%$) ケース(b) 支持層が緩い
($D_f=60\%$) ケース

図-6 基準化した先端荷重～先端沈下量関係

Fig.6 Normalized load-settlement relationships at pile toe

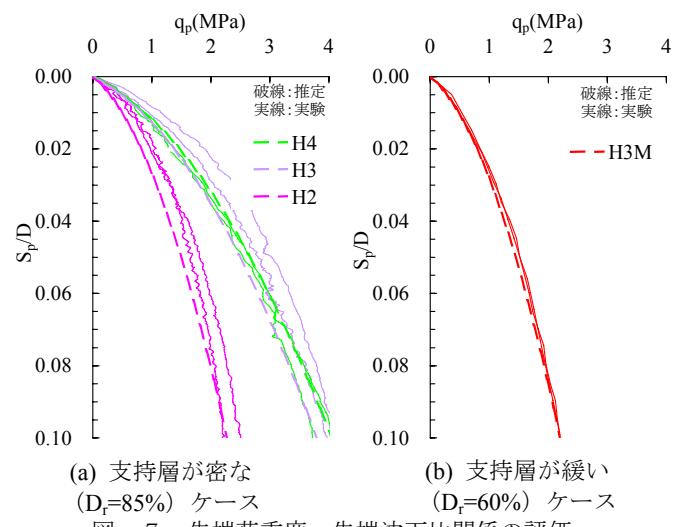
(a) 支持層が密な
($D_f=85\%$) ケース(b) 支持層が緩い
($D_f=60\%$) ケース

図-7 先端荷重～先端沈下比関係の評価

Fig.7 Estimations of load-settlement relationships at pile toe

与えることにより推定可能である。この推定結果と実験結果との比較を図-7 に示すが、全体として両者は概ね良い対応を示している。ただし、粘土層の支持力

等で q_{pu} が決まるケースの場合、 S_p/D が小さい範囲においてその推定結果がやや大きめとなるのは、前述の通りである。

3. 遠心模型実験のシミュレーション解析

3.1 解析手法

本章では有限要素法によるシミュレーション解析を行う。解析モデルの概念を図-8に示す。杭と地盤を弾性体の直方体要素とし、これらを鉛直ばねで連結することにより、単杭の沈下挙動に関する杭の弾性変形、先端抵抗と周面摩擦抵抗の非線形性および各ねじ間の相互作用を考慮している。本手法は建築物の沈下予測のような群杭問題への応用が可能で、そのとき杭下方の地層構成を反映した地中応力分布が考慮される点を特徴とする。

3.2 解析モデル

解析モデルの平面と断面を図-9に、また解析で与える地盤と杭の特性を表-3に示す。解析モデルは、試験体の1/4の範囲を表現しており、地表面を除くモデル外面の面外変位を拘束している。解析ケースは支持層が密で中間層支持に対応するH2,H3,H4である（前述の表-2）。地盤のヤング係数は換算密度と V_s とポアソン比から算出し、表層と支持層の V_s は測定値を、また粘土層の V_s は三軸圧縮試験結果からの推定値を用いる。先端ばねは2.4.4で示した手法により推定した $q_p \sim S_p/D$ 関係（前述の図-7）相当から杭先端以深の地盤の弾性変形を除いたものとする。周面摩擦ばねは、後述する実験結果との対応を考慮し、最大耐力が(3)式の極限摩擦力度 τ_u 相当で、降伏変位が $D/100(0.02\text{mm})$ となるバイリニア型の特性⁶⁾とする。

$$\tau_u = \sigma_v' (1 - \sin \phi) \tan \delta \quad (3)$$

ここで σ_v' ：地盤の鉛直有効応力、 ϕ ：地盤の内部摩擦角、 δ ：杭と地盤の摩擦角

式中の ϕ は表層の三軸圧縮試験結果（35.4°）を用い、また δ は ϕ と同じとする。解析で考慮する τ_u 分布と S_p/D が0.1の時の周面摩擦力度分布の実験結果との比較を図-10に、また同じく周面摩擦ばねと、周面摩擦力度と当該深さの杭沈下量の関係の実験結果の比較を、深さ120～240mm間にについて図-11に例示する。これらの図より、実験結果は多少ばらつくものの、解析に用いる周面摩擦ばねは実験結果と対応するとみなすことができる。

表-3 解析で与える地盤と杭の特性

Table 3 Properties of soil and pile

	V_s (m/s)	γ_s (kN/m³)	ν	E (MN/m²)
表層	145 ¹⁾	18.0	0.30	100
支持層	270 ¹⁾	19.4	0.30	375
過圧密粘土層	145 ²⁾	16.6	0.30	93
杭	---	---	0.17	244

1) 遠心加速度場における測定値

2) $V_s = 134(q_u/100)^{0.334}$ と $q_u = 130\text{kPa}$ からの推定値

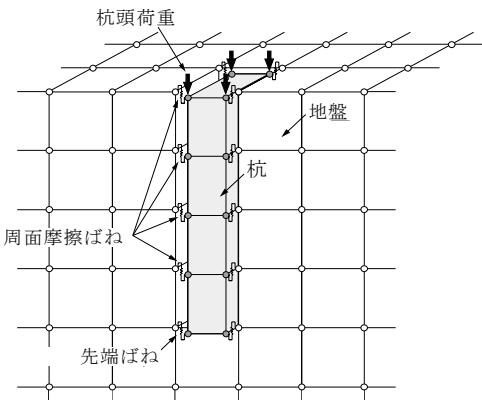


図-8 解析モデルの概念

Fig.8 Image of analysis model

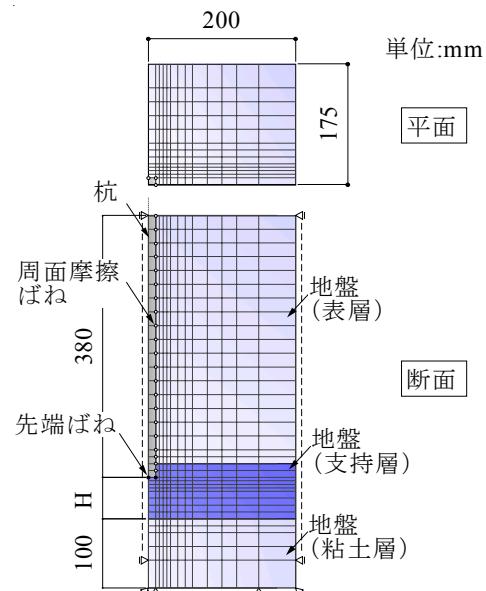


図-9 解析モデルの平面と断面

Fig.9 Plan and section of analysis model

3.3 解析結果と実験結果の比較

S_p/D が0.1以下の $q_t \sim S_t/D$ 関係の解析結果と実験結果の比較を図-12に示す。図より、解析結果は H/D に応じた沈下挙動の変化に対応しており、全体として実験結果を良く再現していると判断できる。ただし、 q_t が小さい範囲で解析結果は S_t/D をやや大きめに評価する傾向があることについては、今後の課題としたい。

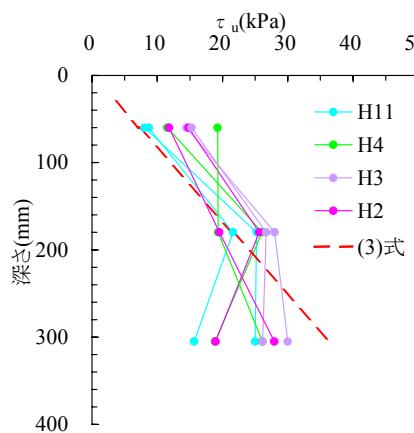


図-10 第2限界抵抗力時の周面摩擦力度分布

Fig.10 Distributions of skin friction on pile

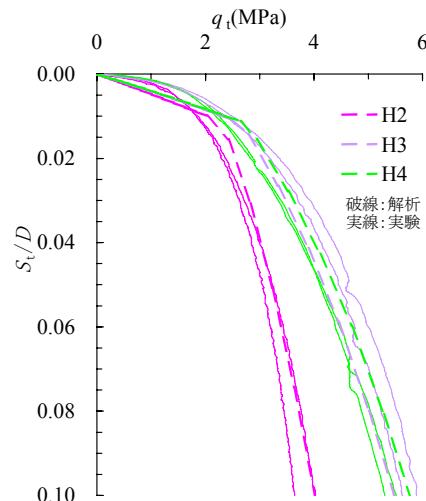


図-12 シミュレーション解析結果

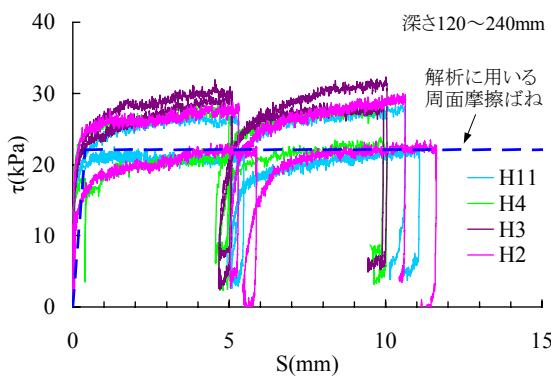
Fig.12 Results of analyses on load-settlement relationships
at pile top

図-11 周面摩擦力度～沈下量関係

Fig.11 Skin friction-settlement relationships

4. まとめ

中間層に支持される杭の鉛直支持力特性を明らかにし、その沈下挙動の評価を可能にするため、杭下端以深の支持層の厚さの杭径に対する比 H/D と支持層の相対密度 D_r の影響に着目した模型杭の鉛直載荷実験と、そのシミュレーション解析を行った。本研究により得た知見をまとめれば、以下に示す通りである。

- (1) 設計上の極限支持力に相当する、先端沈下量が杭径の 10% の時の先端荷重度 q_{pu} は、杭下端以深の支持層の厚さとその相対密度に影響される。

- (2) 杭先端の荷重～沈下量関係は、建築基礎構造設計指針に示される場所打ち杭の設計推奨式と、2 層地盤の支持力式による q_{pu} の計算結果等とから推定される関係に概ね対応する。
- (3) 本手法により推定した杭先端の荷重～沈下量関係を組み込んだ FEM 解析により、中間層支持杭の沈下挙動の評価が可能である。

今後は、建築物の挙動観測などを通じて、本研究の信頼性の向上を図る予定である。

参考文献

- 1) 東京都建築士事務所協会：建築構造設計指針, pp.513- 520, 2001.
- 2) 堀井良浩, 長尾俊昌, 渡邊徹：中間層支持杭の鉛直支持力特性に関する研究（遠心模型実験とシミュレーション解析）, 大成建設技術センター報, 第 41 号, 26-1-4, 2008.11
- 3) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, pp.116-117, 2001.10
- 4) 鉄道総合技術研究所：SI 単位版鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物, pp.234-235, 2001.6
- 5) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, pp.226-227, 2001.10
- 6) Franke, E. : EUROCODE safety approach as applied to single piles, 4th International DFI Conference, pp.13-18, 1991