

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 6 日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560686

研究課題名(和文) 層状地盤における杭基礎先端の荷重と沈下量関係の評価方法の開発

研究課題名(英文) Development of method for reputing relations of end load displacement on layered stratum

研究代表者

山崎 雅弘 (YAMAZAKI, Masahiro)

岡山理科大学・工学部・教授

研究者番号：60240826

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,400,000円

研究成果の概要(和文)：近年、杭の支持力のうち杭先端支持力の割合が大きくなってきているため、先端支持力を精度よく評価する必要がある。杭先端は支持層に設置され、その支持層が十分な強度と層厚を持っている場合は、大きな支持力を得られるが、支持層の厚さが薄い場合や、支持層に弱い土層がある場合には、支持力は低下するが、その評価方法の信頼性は検証されていない。本研究では、模型杭の載荷試験結果に基づき、評価方法について検証を行った。

研究成果の概要(英文)：The pile bearing capacity consists of pile end bearing capacity and pile skin friction. These days, the rate of pile end one to the total one. So it is necessary to evaluate the pile end one accurately. The pile end is settled on the supporting layer. When the strength of the soil and the thickness of the layer are enough, we can expect the adequate pile end bearing capacity. But if the thickness is small or the supporting layer includes a clay layer, the pile end capacity decreases. There is some evaluation method of the decrease, but the accuracy of them has not been investigated. This research is for investigating the accuracy of the methods based on the result of the model pile tests.

研究分野：建築基礎構造

キーワード：先端支持力 薄層支持層 評価方法 模型実験

1. 研究開始当初の背景

杭の支持力は、杭の先端抵抗と杭軸部の周面摩擦抵抗の和によって決定される。近年は、杭先端径を大きくした工法が開発され、杭支持力における先端抵抗の割合が大きく、杭先端抵抗（杭先端支持力）を精度よく評価することが重要となってきている。また、実務では杭の極限支持力のみに着目して設計行為がなされているが、沈下量の評価も重要視されつつあり、杭に作用する荷重に対する沈下量の評価が必要である。

杭の極限先端支持力の評価式は、実杭の載荷試験結果から決定されているが、載荷試験が実施される支持層の地盤は、その厚さが十分にあり、また、弱い地盤が見られないところが選ばれる傾向がある。しかし、実際の地盤は常にそのような良好な地盤ではなく、弱い層が見られる層状の地盤、または、支持層の層厚が十分にない場合も多々見られるが、このような支持層における杭先端支持力の評価方法が確立されていない。

2. 研究の目的

(1) 杭先端の極限支持力の評価方法としては、層状地盤の代表的なものとして、支持層が砂質土、支持層下が粘性土の2層地盤を対象とし、既往の評価方法の検証と開発を目的とする。建築学会の建築基礎構造設計指針1)に2層地盤モデルによる方法とFEM解析による方法が推奨されている。模型杭の載荷試験を行い、2層地盤モデルを検証する。FEM解析については詳細な説明がなく、その評価精度については、知見が示されていない。従って、代表研究者の保有するFEM解析プログラムを用いてその精度と問題点の把握と改善を行う。

(2) 杭先端の荷重～沈下量関係の評価方法については、FEM解析を用いることが有効な方法の一つである。模型載荷試験結果との比較により、その精度と問題点の把握と改善を行う。

3. 研究の方法

本研究で用いた模型杭載荷試験装置を写真1に、その概要を示す模式図を図1に示す。土槽は円筒土槽を、円筒軸を通る面で切断した形をしており、その切断面は鋼製フレームとアクリル板によって構成されている。地盤の変形を観察するために、三軸圧縮試験用のゴムスリーブを切り開いた薄ゴム膜に25mmメッシュの線を引き、グリズでアクリル板に貼り付けた。ゴム膜とアクリル板との間の摩擦力は小さく、



写真1 模型杭載荷試験装置

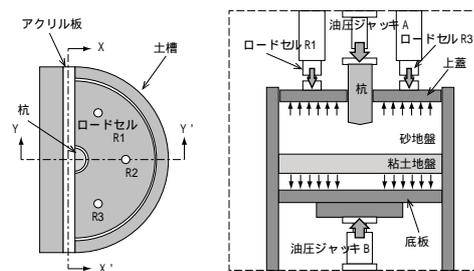
ゴム膜のメッシュの変形から地盤の変位を観察する。また、土槽内側面にはグリズを間に塗布した2重のテフロン膜を貼り、地盤との摩擦を低減している。杭の直径 d は100mm、土槽の直径は800mmである。杭は100mm根入れして、先端は土槽底面から250mmとした。杭の先端支持力は杭先端から土槽底面までの距離 Z_0 の影響を受ける。岸田らの研究2)を参考にすると弾性地盤で Z_0 が $3d$ 、 $7d$ で沈下量が約10%、5%小さくなる。この実験では Z_0 が $2.5d$ と小さいため、支持層が十分厚い場合の極限支持力を正確に確認できない。また、地盤の粘土層は実際の粘土に近い材料を使用すべきであるが、粘土層作成の困難さのため、ここでは油粘土を用いた。この2点は、本論の2層地盤モデルの適用性の検討には、大きな問題にならないと考えている。

砂地盤は空中落下法によって作成した。降らせる砂のタンクの下に40mm間隔のグリッド状に穴を開け、その穴の大きさで砂の量を調整した。穴から落した砂は1mmメッシュの3層のふるいを通し均等に降らせる。目標の相対密度は90%と70%、穴径と相対密度の関係を調べる予備実験によって穴の直径3mm、7mmとし、締まった砂地盤、緩い砂地盤を作成した。

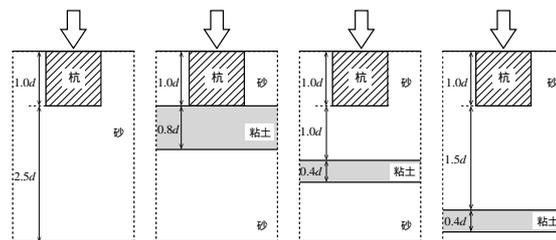
実験方法を以下に示す(図1参照)。

ジャッキBによって土槽底板を押し上げる。土槽上蓋は3つのロードセルR1~R3によって移動が拘束されているため地盤に鉛直応力 v が導入される。鉛直応力はこのロードセルで評価する。鉛直応力導入中は、ジャッキAによって杭の鉛直変位が生じないように調整する。

地盤の鉛直応力が所定の値になったときのジャッキAの荷重を初期値とし、杭を押し込み、増分荷重と沈下量を計測する。このとき鉛直応力が一定となるようにジャッキBに



(a) 上から見た図 (b) XX'断面
図1 模型杭載荷装置模式図



(a) D3(L3) (b) C3 (c) D3-1.0 (d) D3-1.5
図2 実験地盤の概要

よって調整する。

表 1 に実験ケースを示す。締まった砂、緩い砂の 2 種類、それぞれ均一な砂地盤、支持層厚が 1.0d, 1.5d の 3 ケース、これに加え、粘土層の支持力を求めるために杭先端直下に層厚 0.8d の粘土層を配置した 1 ケースの計 7 ケースである。この実験地盤の概要を図 2 に示す。

4. 研究成果

(1) 実験結果

図 3 の (a) に締まった砂、(b) に緩い砂の場合の荷重沈下量関係を示す。杭径 d の 10%、10mm に沈下量が達したときの荷重 P0 を極限支持力とした。荷重 P0 は杭周面の摩擦力 RF と極限先端支持力 RP と和である。実験ではこれらを分離して計測していないため、RF を次のように推定し、RP と極限先端支持力度 qp を求め、表 2 に示した。

杭周面の表面粗さは、基準長さを 0.25 mm として計測すると、6 箇所最大高さ Ry の平均値は 5.1 μm であった。矢島らの研究 3) の

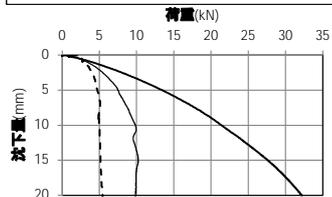
表 1 実験ケース

実験ケース	支持層材料	目標相対密度	支持層厚
D3	豊浦砂	90%	-
D3-1.5	豊浦砂	90%	1.5d
D3-1.0	豊浦砂	90%	1.0d
L3	豊浦砂	70%	-
L3-1.5	豊浦砂	70%	1.5d
L3-1.0	豊浦砂	70%	1.0d
C3	油粘土	-	-

表 2 杭の先端支持力度

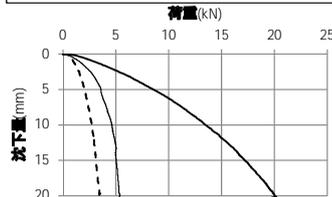
実験ケース	P ₀ (kN)	R _p (kN)	q _p (kN/m ²)
D3	21.4	20.7	5271
D3-1.5	9.9	9.2	2330
D3-1.0	5.0	4.3	1095
L3	13.5	12.8	3247
L3-1.5	4.6	3.9	993
L3-1.0	2.7	2.0	509
C3	1.4	0.7	178

— 実験D3 — 実験D3-1.5 - - - 実験D3-1.0



(a) 締まった砂 (Dr=90%)

— 実験L3 — 実験L3-1.5 - - - 実験L3-1.0



(b) 緩い砂 (Dr=70%)

図 3 荷重沈下量関係

鋼材の Ry と豊浦砂の鋼材の摩擦係数のデータを参考に摩擦係数 μ を 0.3 とした。実験では鉛直応力 v=300kPa, 静止土圧係数 K0=0.5 として、周面摩擦力度は 45N/m², 杭周面の面積を乗じて RF を 0.7kN とした。

指針 1) の場所打ち杭の先端支持力度 100N を参考にすると、表 2 の qp の値から締まった砂は N 値 53 相当、緩い砂は N 値 32 相当である。粘土層は先端支持力度を 6cu とすると、cu=30 kN/m², qu=60kN/m² となり、堀井ら⁴⁾ の研究に掲載されている実杭、模型杭試験の粘土より一軸圧縮強度が 1/10 のオーダーとなっている。

(2) 2 層地盤の検証

図 4 に 2 層地盤モデルを示している。このモデルによると、杭先端直下の第 1 層の砂地盤における極限先端支持力度を qps, 第 2 層の粘土地盤の極限先端支持力度を qpc とすると、杭の極限先端支持力 Rp は式(1)で評価する。

$$R_p = \min \left(q_{ps} \frac{\pi d^2}{4}, q_{pc} \frac{\pi D^2}{4} \right) \quad (1)$$

杭直径 d が 0.1m, 実験結果より qps は 5271kN/m², qpc は 178kN/m² から求めた分散角 θ を表 3 に示す。支持層厚が 1.5d と 1.0d の場合、締まった砂でそれぞれ 41° と 36°, 緩い砂で、24° と 19° となった。この結果は、2 層地盤モデルの分散角 θ は、支持層の強度や剛性、または支持層の層厚に応じて変更する必要があることを示している。

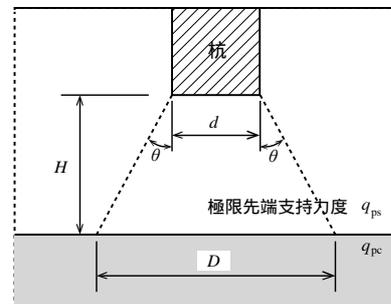


図 4 2 層地盤モデル

表 3 分散角

実験ケース	D(m)	H(m)	θ(°)
D3-1.5	0.36	0.15	41
D3-1.0	0.25	0.10	36
L3-1.5	0.24	0.15	24
L3-1.0	0.17	0.10	19

(3) FEM 解析の検証

FEM 解析モデルは軸対称アイソパラメトリック要素を用いた。図5のように杭軸から右半分をモデル化し、杭モデルの上端の鉛直変位は同一として荷重を作用させている。杭要素は鋼材を想定して、ヤング係数 $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比が 0.2 の弾性体である。地盤の構成方程式は Duncan⁶⁾ らが提案したものを採用する。砂の剛性に関するパラメータ K と内部摩擦角 θ については、は土質試

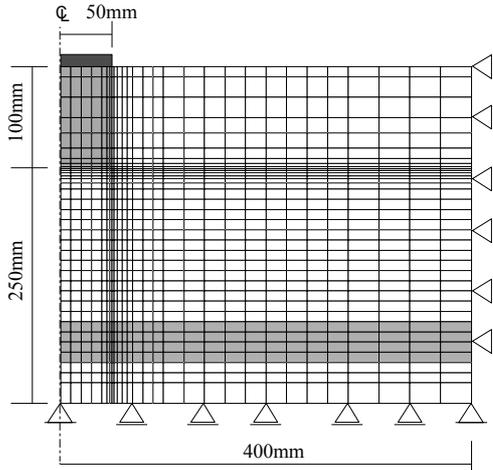


図5 FEM 解析モデル

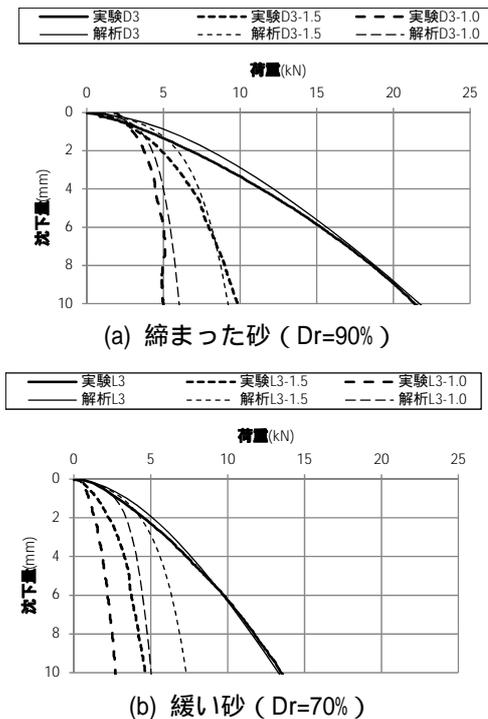


図6 荷重沈下量関係

表4 荷重分散角 (解析)

解析ケース	P_0 (kN)	R_p (kN)	q_u (kN/m ²)	θ (°)
D3	21.7	21.0	5348	-
D3-1.5	9.2	8.5	2168	41.5
D3-1.0	6.0	5.3	1360	32.2
L3	13.3	12.6	3207	-
L3-1.5	7.3	6.6	1680	36.4
L3-1.0	5.0	4.3	1101	28.1
C3	1.3	0.6	163	-

験結果の値を参照し、相対密度 90% と 70% のそれぞれにおいて 40.6° と 37.6° とした。 K は実験 D3, L3 の荷重沈下量関係が合うように 1800 と 1000 とした。その他のパラメータについては文献 7) と等しい。粘性土のパラメータは実験 C3 の荷重沈下量関係が合うように設定した。地盤の初期状態の鉛直応力は 300kPa, 水平応力は砂については $K_0=0.5$, 粘土については $K_0=1.0$ として設定した。杭の根入れ部分の摩擦力は、摩擦係数 $\mu=0.3$ となるように杭周面に隣接する地盤要素の内部摩擦角を設定した。解析は荷重増分法で行い、増分荷重は杭の沈下量が 0.1d に達する荷重を 180~200 に分割した値とした。

図6に荷重沈下量関係を示している。D3とL3は、解析が実験と合うようにパラメータを設定した結果である。支持層が 1.5d と 1.0d の結果については、締まった砂の場合はよく合っているが、緩い砂の場合は差が大きい。

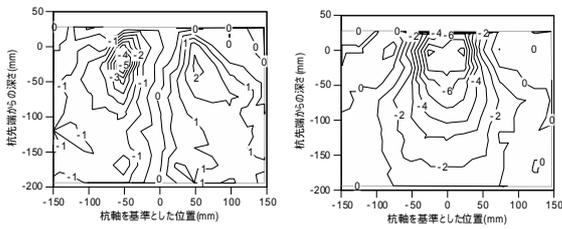
表4にはFEM解析によって求められた極限支持力から求めた荷重分散角を示している。解析結果も支持層の強度や剛性、または支持層の層厚に応じて変更する必要があることを示している。

図7~10に地盤変位の様子を示す。図7,8は一様地盤(D3)の実験結果と解析結果、図9,10に支持層厚 1.5d の実験結果と解析結果を示す。一様地盤については、実験結果と秋席結果と類似しているが、支持層厚が薄い場合については、実験結果をFEM解析結果が表しているとは言いがたい。地盤変位の鉛直成分分布形状の精度が高いほど、荷重沈下量関係の精度も高いと考えられるため、地盤変位の精度が低い原因を特定し、改善が必要である。

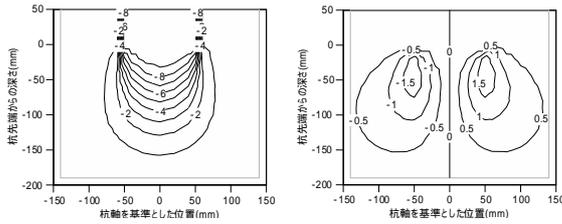
(4) まとめ

層状地盤の代表的なモデル、2層地盤について、模型杭の載荷試験結果を基にして、極限支持力評価方法の2層地盤モデルについて検証を行った。その結果、2層地盤モデルの分散角は、支持層厚さや地盤の力学的特性によって適切な角度とすべきであり、常に固定値を使用すべきでないことが分かった。しかし、厚さや特性に応じて分散角を設定する方法まで提案は今後の課題として残った。しかし、支持層厚が杭径に対して十分でない地域は多く、その地域における基礎構造の設計では、十分な設計上の配慮と、今後の知見を反映すべきであること示した。

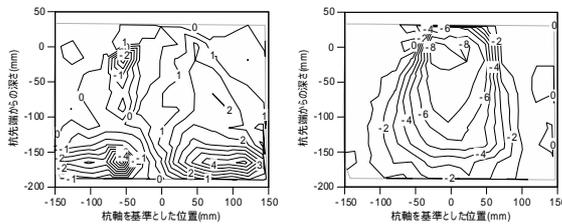
杭先端の荷重沈下量関係の評価においてFEM解析を用いることは、まだまだ信頼性が高いとはいえないことがわかった。信頼性を向上させる方法については今後の課題として残った。



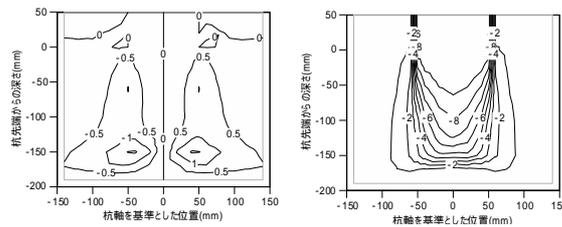
(a) 水平方向成分 (b) 鉛直方向成分
図7 地盤変位 (実験 D3)



(a) 水平方向成分 (b) 鉛直方向成分
図8 地盤変位 (解析 D3)



(a) 水平方向成分 (b) 鉛直方向成分
図9 地盤変位 (実験 D3-1.5)



(a) 水平方向成分 (b) 鉛直方向成分
図10 地盤変位 (解析 D3-1.5)

Duncan. J. M, Byrne. P, Wong. K. S & Mabry. P: Strength, Stress-strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analyses for Stresses and Movements in Soil Masses, Report No. UCB/GT/80-01, Univ. of California, Berkeley, 1980

5. 主な発表論文等
〔学会発表〕(計2件)

山崎雅弘: 模型杭載荷試験に基づく薄層支持層における杭先端支持力の評価法に関する検討, 日本建築学会全国大会, 2015年9月4日, 東海大学湘南キャンパス

山崎雅弘: 模型杭載荷試験による薄層に支持させた杭の先端支持力に関する検討, 日本建築学会中国支部研究発表会, 2015年3月6日, 米子高専

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 雅弘 (YAMAZAKI, Masahiro)

岡山理科大学・工学部・教授

研究者番号: 60240826

< 引用文献 >

日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, p.210, 1988

岸田英明, 高野昭信: 砂地盤中の埋込み杭先端部の接地圧分布 (その1. 加圧砂地盤タンクの製作および接地圧文系の実験結果), 日本建築学会論文報告集第260号, pp.21-33, 昭和52年10月

矢島淳二, 小西達也, 上杉守道, 岸田英明: 標準砂-鋼材間の摩擦に及ぼす鋼材の表面粗さの影響, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.5-8, 1984.7

堀井良浩他: 層状地盤に支持される杭先端の鉛直支持性能 その1: 既往実験結果に基づく検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.415-416, 2012.9

山崎雅弘, 堀井良浩: 層状地盤に支持される杭先端の鉛直支持性能 その2: FEM解析に基づく検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.417-418, 2012.9