

模型実験に基づく杭先端近傍の周面摩擦力特性

正会員 ○池田和正*¹
同 土屋 勉*²
同 中沢楓太*¹

正会員 島田正夫*³
会員外 佐藤聡亮*⁴

2.構造 -4.基礎構造

杭, 模型実験, 鉛直荷重, 周面摩擦, 土圧

1. はじめに

当研究室では, 砂を充填した三軸加圧土槽によるアルミニウム模型杭の鉛直載荷実験を行っており, 杭周面の一般部と先端近傍では杭周面抵抗が異なる特性を有することを報告¹⁾²⁾してきた。

引き続き本報告では, 更に実験ケースの蓄積を図って, 杭先端近傍の杭周面摩擦力特性を土中土圧の視点から考察すると共に, 杭頭, 杭先端および杭周面の荷重度-沈下度曲線のモデル化について検討する。

2. 実験装置および実験方法

本実験に用いた土槽は, 模型砂地盤の上面に等分布上載圧 σ_v を, 地盤の側面に等分布側圧 σ_h を各々任意に作用させることのできる加圧円柱土槽である。模型杭は, 直径 20mm, 肉厚 2mm のアルミニウム製で表面に溶射加工 (表面粗さ: $R_{max} \approx 200 \mu m$) を施して周面抵抗力が発揮されるようにしている。また, 内壁面には図-2 に示す深度にひずみゲージを貼付して軸力を測定している。

実験手順としては, 珪砂 6 号 (鹿島砂) を杭先端深度まで空中落下法 (ノズル・ネット型砂投下法³⁾) によって地盤を作製した後, 模型杭を根入れ 400mm で設置して再び砂試料を空中落下させる。この時, 地盤中に土圧計 (共和電業: BE-2KC) を図-3 および表-2 のように埋設する。等方拘束圧を 90 分間作用させた後, 上載圧を 2 倍にして 90 分間作用させ, 静止土圧 ($K_f=0.5$) を有する正規圧密状態の地盤に設置された杭を再現した。杭頭への載荷は, 荷重制御による単調増加方式とした。

実験因子は砂の相対密度と拘束圧であって, 各実験条件を表-1 に示す。

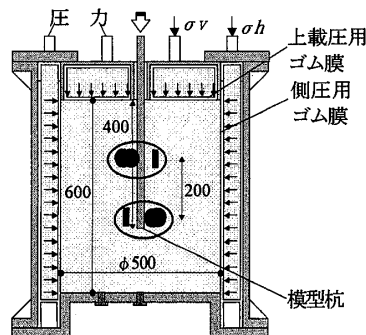


図-1 実験装置

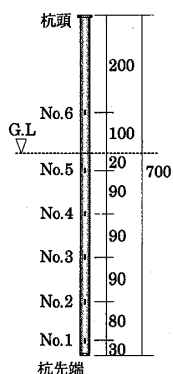


図-2 模型杭

3. 実験結果および考察

(1) 土中土圧の推移

図-4 は, 土圧計で計測した水平方向土圧 p_h および鉛直方向土圧 p_v の推移である。これによると, 側圧および相対密度が高い程, 土中土圧が大きくなっていることがわかる。

図-5 は, 図-4 の土中土圧をそれぞれの最大土圧 p_{max} に対する比で示したグラフである。(a) の杭先端近傍の水平土圧 p_h は, 載荷直後に一端減少して急激に増加してピークに達する。その後, 大きく低下して 1d 沈下時では最大時の 5~30% となる。一方, (c) の杭先端近傍の鉛直土圧 p_v は, 載荷直後にわずかに増加した後に減少して極小値を示し, その後増加して 1d 沈下時でほぼ一定になる。このように, 載荷の進行に伴う水平方向と鉛直方向の土圧変化が逆になることが注目される。それに対して, 一般部では p_h が最大になるまでの挙動は上記の先端近傍の傾向と同様であるが, その後は水平及び鉛直方向共に土圧が減少している。

表-1 実験因子

相対密度	拘束圧(側圧)	試験体記号
高密度83%	20kPa	d-20
	40kPa	d-40
中密度62~66%	20kPa	m-20
	40kPa	m-40

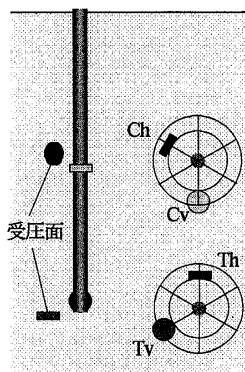


図-3 土圧計配置

表-2 土圧計名称

計測方向	深度位置	名称
水平方向 (杭向き)	中央(C)	Ch
	先端(T)	Th
鉛直方向 (上向き)	中央(C)	Cv
	先端(T)	Tv

Model Tests on Soil Stress and Shaft Friction near Pile Tip subjected to Vertical Load.

IKEDA Kazumasa et al.

このような ph の挙動は、1) 荷重直後では、杭周面から地盤に伝達されるせん断力が正のダイレイタンスーに伴う水平土圧の増加となり、2) 杭周面抵抗力が最大に達した後は、粒子間に大きなすべりが発生して負のダイレイタンスーに伴う水平土圧の減少となると解釈¹⁾²⁾できる。

図-6は、このときの杭先端近傍の様子を pv の挙動も考慮して概念的に示したものである。すなわち、粒子間にすべりが生じて外側に変位した砂粒子が元に戻ろうとするときに、(c)のようにアーチング作用が起こると考えると、水平土圧は減少するが、杭先端近傍は高応力状態になっているために鉛直土圧は増加するものと解釈できる。一般部では、最大周面抵抗を示した後に水平および鉛直土圧で共に緩やかな減少傾向を示したのは、先端部のような高応力状態が形成されないため、アーチングが

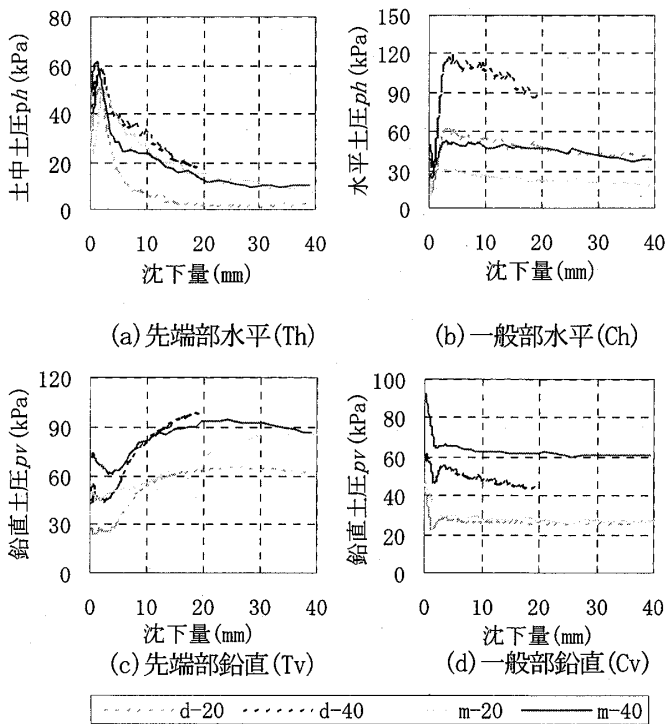


図-4 土圧 p の推移

生じ難い状況であったと考えられる。

(2) 周面抵抗力について

図-7は、沈下の進行に伴う杭周面各区間の周面抵抗力 f_s の推移を示したグラフである。これによると、側圧および相対密度が高い程 f_s が大きく、また、先端部では $f_{s_{max}}$ 後の f_s の減少する割合が大きくなっている事がわかる。

図-8は、図-7の f_s を各区間の $f_{s_{max}}$ で正規化した値で示したグラフである。先端近傍の周面抵抗力は、 $f_{s_{max}}$ に達した後、 $0.5d$ 沈下時まで急激に低下しているが、一般部では $f_{s_{max}}$ に達した後は緩やかに低下している。

図-9は、 $f_{s_{max}}$ 時の沈下量を杭径で正規化したグラフである。相対密度に関わらず、深度が深いほど $f_{s_{max}}$ 時の沈下量は若干小さくなっており、先端部の方が先に周面抵抗力が最大に達することがわかる。

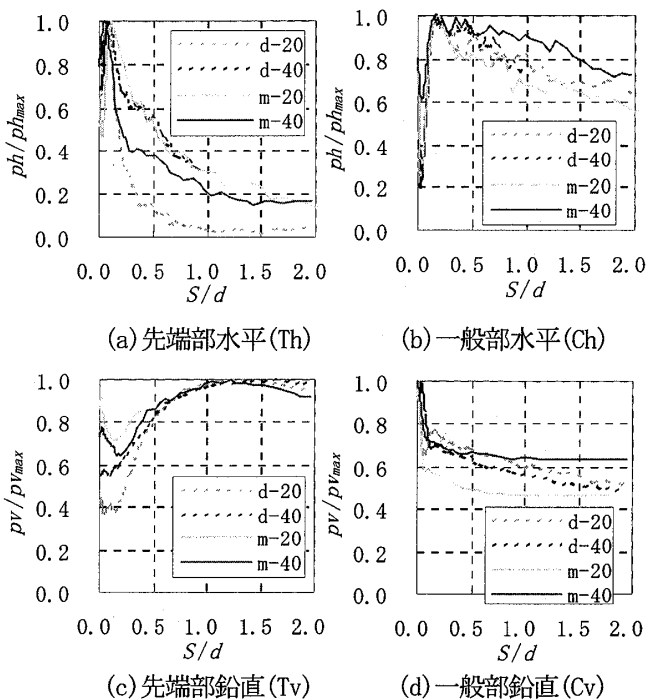


図-5 p/p_{max} の推移

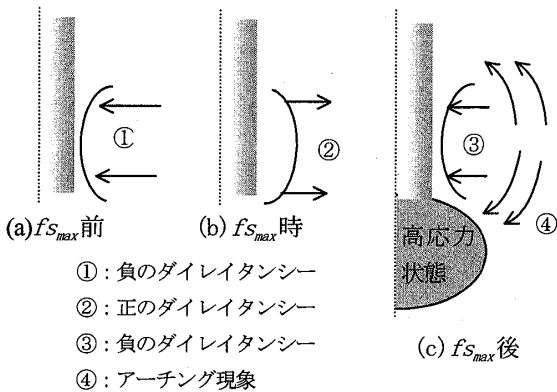


図-6 杭先端部の応力変化

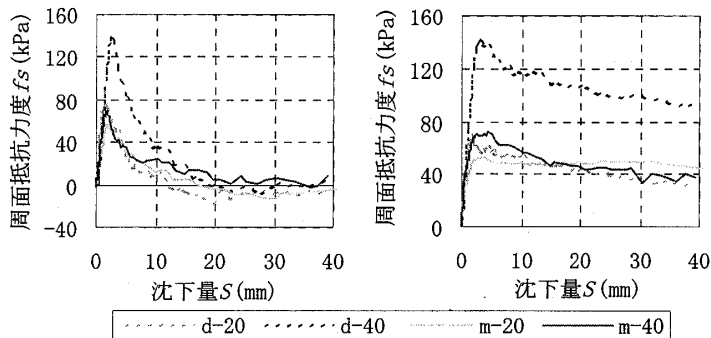


図-7 周面抵抗力 f_s の推移

(3) 周面抵抗力と土圧の関係

図-10は、杭周面抵抗力 f_s と水平方向土圧 ph の関係をプロットしたものである。一般的な傾向として、載荷初期では ph が一定または減少するにもかかわらず、 f_s が増大する現象がみられる。その後は、杭周面抵抗力 f_s と水平方向土圧 ph は比例関係を示した後、 ph が最大になって停滞しても f_s が幾分上昇する区間を経て、 f_s と ph は直線的に減少する。このように、載荷過程と除荷過程でループを描くのが特徴となっており、高密度地盤よりも中密度地盤でその傾向が強い。これらのループはダイレイタンスーが正負入れ替わることによって発生するものと考えられる。逆に言えば、杭頭への押し引きのような繰り返し荷重が作用しない静的な問題を取り扱う場合に対しては、周面抵抗力と水平土圧は概ね比例関係を示す特性を活用することができる。

4. 荷重-沈下曲線のモデル化

荷重-沈下曲線に関する近似式を算出した後、実験因子による影響を定量的に組み入れることによって、荷重-沈下曲線の一般式を誘導した。なお、荷重は杭先端面積で除した荷重度 q_p とし、沈下量は杭径で除した沈下度 $S_d (=S/d)$ として正規化した。

杭頭荷重度および先端支持力度 q_p については、1次双曲線(1式)を用いるが、ピークを有する周面抵抗力 f_s については、杭先端付近の周面(先端部)とその他の周面(一般部)に分割して2次双曲線(2式)で近似を行う。

- ・杭頭および先端支持力度
- $q_p = S_d / (a S_d + b)$ (1)
- ・杭周面抵抗力
- $f_s = S_d / (a S_d^2 + b S_d + c)$ (2)

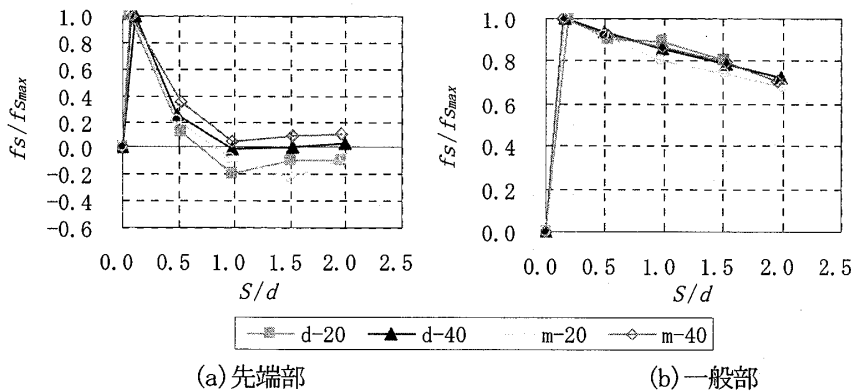


図-8 $f_s/f_{s_{max}}$ の推移

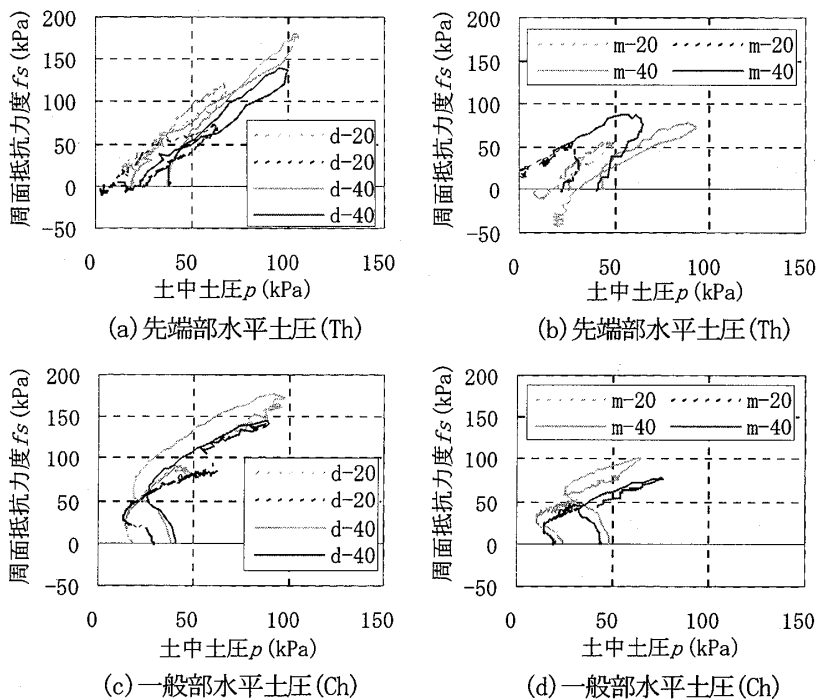


図-10 周面抵抗力 f_s と水平土圧 ph の関係

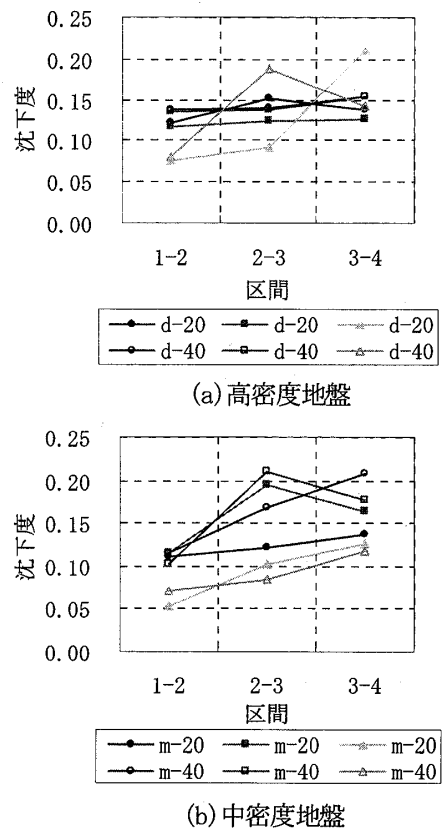


図-9 $f_{s_{max}}$ 時の沈下度と深度の関係

(1) 近似式の係数 a, b および c の算出

(1) 式および (2) 式の両辺を S_d で除し, 分子と分母を入れ換え, その値を座標上にプロットする. そのプロット点を (1) 式に関しては線形近似を行い定数 a および b を求め, (2) 式に関しては 2 次関数による近似を行い定数 a, b および c を求める.

(2) 近似式の係数と実験因子の相関関係

近似式の各係数と実験因子の相関関係を検討するために, 実験条件である相対密度 D_r および側圧 σ_h を説明変数, 近似式の係数を目的変数とする (3) 式で重回帰分析を行った.

$$a \text{ (または } c) = \alpha D_r + \beta \sigma_h + \gamma \dots (3)$$

分析結果を表-3に示すが, α および β は相対密度および側圧の回帰係数, γ は重回帰式の切片である.

(3) 予測式の適合性

一般式で得られた予測値を実験値と比較したのが図-11であって, 実線は予測値, プロット点は実測値である.

杭頭および杭先端の荷重-沈下曲線は, 杭頭および杭先端ともに予測値は, 極限荷重域での荷重の増加割合が実測値より小さくなるものの, 全体を通して高い適合性が見られた.

表-3 重回帰分析の結果
※()内は重相関係数

(a) 杭頭荷重

	係数 a (0.957)	係数 b (0.627)
α	-0.00280	-0.0000890
β	-0.00190	-0.0000643
γ	0.362	0.0151

(b) 杭先端支持力度

	係数 a (0.956)	係数 b (0.585)
α	-0.00372	-0.000535
β	-0.00245	-0.000161
γ	0.464	0.0828

(c) 先端部周面抵抗力度

	係数 a (0.694)	係数 b (0.453)	係数 c (0.669)
α	-0.00612	0.000422	-0.0000594
β	-0.00697	0.000724	-0.0000735
γ	0.794	-0.0680	0.00817

(d) 一般部周面抵抗力度

	係数 a (0.793)	係数 b (0.759)	係数 c (0.209)
α	-0.000558	-0.000349	0.00000562
β	-0.000399	-0.000327	0.00000112
γ	0.0699	0.0448	0.0000529

周面抵抗力度-荷重曲線は, 実験条件によりばらつきがあるが, 杭先端に近い周面部とその他の周面部の特徴を概ね表しており, 2次双曲線により十分表現が可能だといえる.

5. まとめ

本報告をまとめると以下ようになる.

- ①. 荷重の進行に伴う杭先端近傍の土圧変動は, 水平方向と鉛直方向で逆の推移を示すが, 砂のダイレイタンシーとアーチング作用で説明できる.
- ②. 杭先端近傍の周面抵抗力度は, ピーク後に大きく減少する特性があり, 一般部の杭周面とは傾向が異なる. しかし, 荷重初期段階を除けば, 杭先端近傍や一般部の杭周面抵抗力度は水平方向土圧と概ね比例関係が認められる.
- ③. 杭頭と杭先端部の荷重-沈下曲線は, 1次双曲線近似, 周面抵抗力度-沈下曲線は, 2次双曲線で概ね近似できる.

参考文献

- 1) 池田隼人, 土屋 勉, 永井 宏, 他: 砂層に設置された模型杭の周面抵抗と土中応力の関係, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.77, pp.145-148, 2004.7.
- 2) 永井 宏, 土屋 勉, 池田隼人, 他: 鉛直荷重を受ける杭先端近傍の土中土圧と杭周面抵抗に関する模型実験, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.78, pp.93-98, 2005.7.
- 3) 島田正夫, 土屋 勉, 菊地ゆかり: ノズル・ネットを用いた模型砂地盤の作製方法, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.75, pp.21-24, 2002.6.

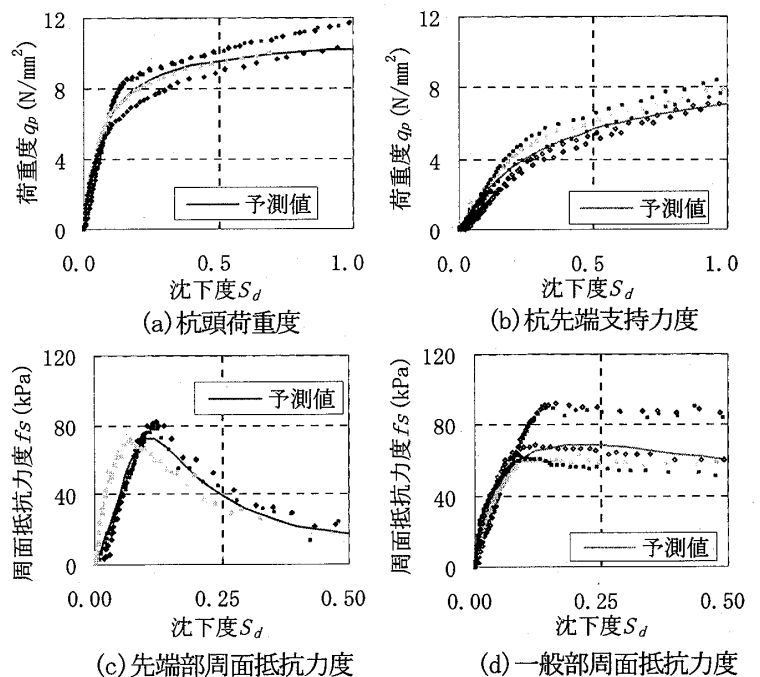


図-11 実測値と予測値の比較

*1 室蘭工業大学 大学院生
*2 室蘭工業大学 教授・工博
*3 室蘭工業大学 技術職員
*4 東日本ハウス (株)

Graduate Student, Muroran Inst. of Tech., Dr. Eng.
Professor, Muroran Inst. of Tech., Dr. Eng.
Technician, Muroran Inst. of Tech
Higashinohouse Co. Ltd.