

鉛直荷重を受ける杭先端近傍の土中土圧と杭周面抵抗力に関する模型実験

正会員 ○永井 宏^{*1} 正会員 島田正夫^{*4}
同 土屋 勉^{*2} 会員外 高久 穂^{*5}
同 池田隼人^{*3} 同 塚本健志^{*6}

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

軟弱地盤における基礎工法として, 直接基礎と摩擦杭を併用したパイルド・ラフト工法が試みられるケースが増えつつある. 筆者らは, パイルド・ラフトの挙動を予測する実用計算法の開発を進めているが, 弾塑性挙動をする杭周面抵抗力特性の入力常数をどのように設定するかが重要な課題となっている.

本論文では, 特に杭先端近傍の周面抵抗力特性に着目し, 砂地盤中における模型杭の押し込み載荷実験を行った. 杭体軸力と杭周面近傍の土中土圧を測定することにより, 杭貫入に伴う杭近傍地盤の土圧の変化が杭周面抵抗力に及ぼす影響について検討する.

2. 実験装置および実験方法

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 を任意に作用させることのできる三軸加圧土槽(図1)である. 模型杭(図2)は, アルミニウム管の表面に溶射加工(表面粗さ: $R_{max} \approx 200 \mu m$)を施したものであり, 内壁面にはひずみゲージを各断面に一对貼付して軸力を測定している. なお, 杭先端は閉塞としている.

試験体の製作は, 図1に示すように硅砂6号を杭先端深度までノズル・ネット砂投下法²⁾によってしきつめた後, 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, 杭周面近傍の地盤の応力状態を

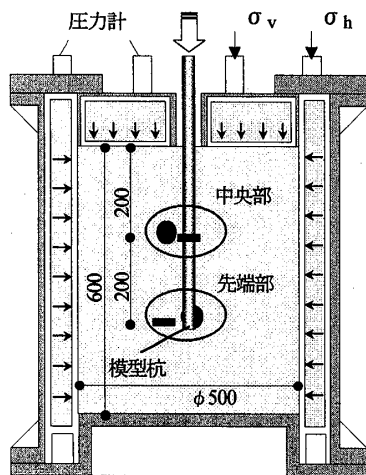


図1 円柱土槽

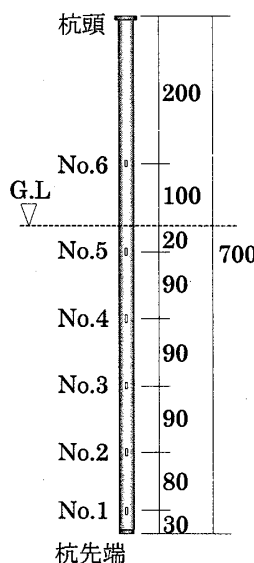


図2 模型杭

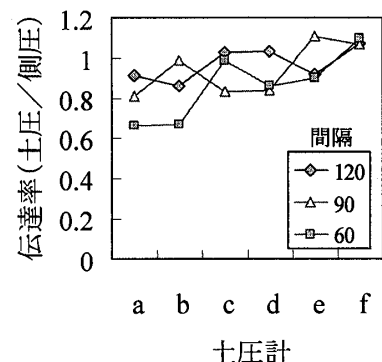


図6 側圧の伝達率

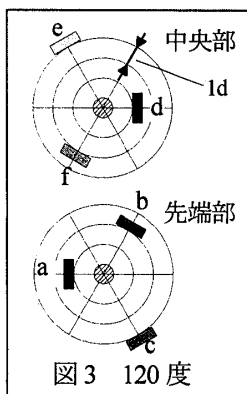


図3 120度

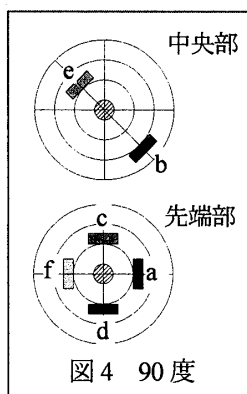


図4 90度

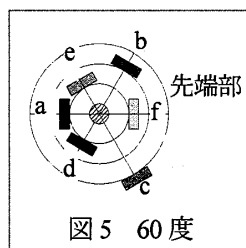


図5 60度

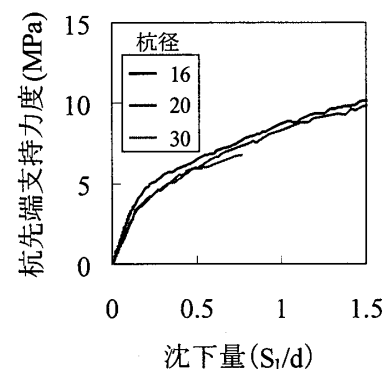


図7 杭先端支持力度

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

NAGAI Hiroshi et al.

把握するため、杭先端部および中央部に杭周面から水平方向に1d (d: 杭径) 離して土圧計 (共和電業製: BE-2KC) を埋設し、鉛直および水平方向の土中土圧を計測する。なお、受圧面は水平方向では杭側、鉛直方向は地表面に向けた。その後、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 ($K_0=0.5$) 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。杭頭荷重は荷重制御による単調増加方式とした。

3. 予備実験

3.1 土圧計の適正配置

土圧計の配置方法が地盤の水平方向応力分布に及ぼす影響について検討するために、図3~図5のように120~60度間隔で土圧計を埋設した。この時の砂地盤の相対密度は83%で、側圧は20kPa、上載圧は40kPaである。

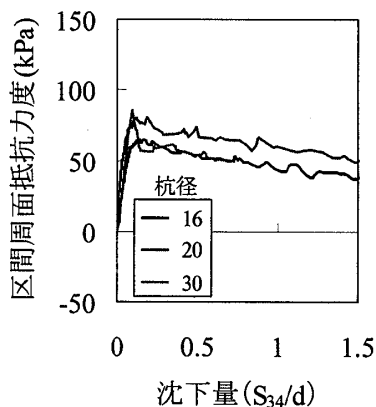
図6は、側圧の伝達率である。120度と90度の実験では作用させた側圧と同程度の圧力が計測されているが、60度ではa, bでの計測値が小さい。このことから、土圧計を配置する際は、密集して配置せず間隔を90度以上

空ける必要があると言える。

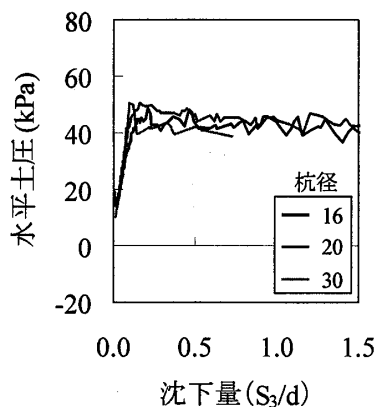
3.2 杭径の違いによる寸法効果

相対密度83%で側圧20kPa (上載圧40kPa) を作用させた砂地盤において、杭径 $d=16\text{mm}$, 20mm および 30mm の押し込み実験を行い、寸法効果について検討する。

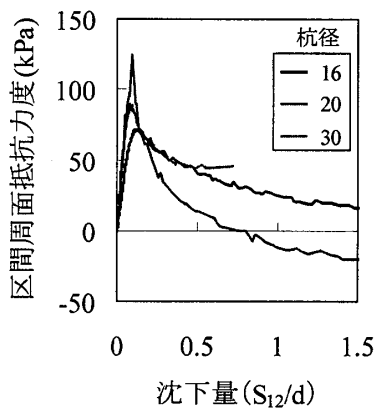
図7に杭先端支持力度、図8に杭周面抵抗力度、図9に土中土圧の実験結果を示した。なお、沈下量 S は杭径で除して正規化しており、添え字は図2のゲージ測定位置を表している。杭先端支持力度は、いずれの杭径においてもほぼ等しい値となっている。周面抵抗力度を見ると、杭径にかかわらず中央部に比べて先端部ではピーク後の低下が大きくなる傾向が表れている。1-2区間の値に若干ばらつきが見られるのは、ゲージ計測区間長が全杭径で等しいため、中央部と先端部の挙動が混在することが原因の一つと考えられる。土圧に関してもほぼ同様な傾向が得られており、杭の寸法効果の影響は小さいと言える。したがって、以降の載荷実験では載荷装置の加力能力や作業難度を考慮して直径20mmの模型杭を用いることとした。



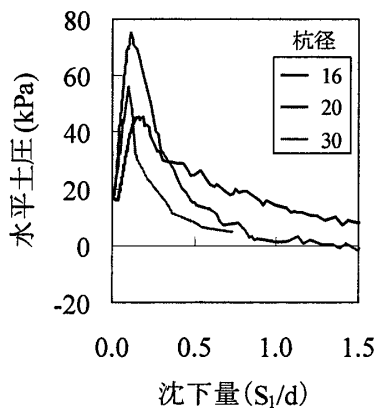
(a) 3-4 区間



(a) 中央部



(b) 1-2 区間



(b) 先端部

図8 周面抵抗力度

図9 土中土圧

表1 実験因子

実験因子	実験記号	実験条件	
相対密度 (%)	m	66	
	d	83	
拘束圧 (kPa)		側圧	上載圧
	20	20	40
	40	40	80

表2 土圧計の名称

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

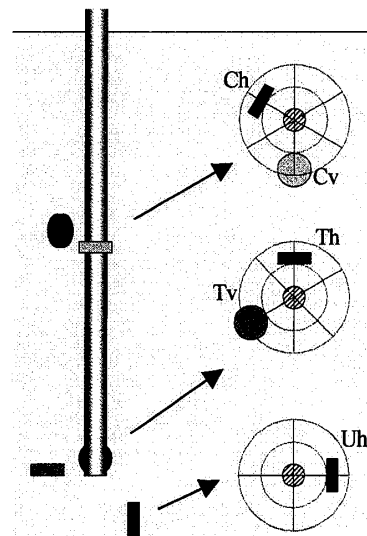


図10 土圧計の配置図

4. 本実験

土圧計を図 10 のように杭根入れ中央部, 先端部および杭先端から 2d 下方の位置に埋設し, 砂地盤の相対密度および地盤に作用させる拘束圧を表 1 のように変化させた実験を各 2 回行った。以降, 試験体名は表 1 の実験記号を組み合わせて, 土圧計は表 2 の名称で表記する。

4. 1 実験結果

(1) 周面抵抗力度

図 11 は, 中央部および先端部における杭周面抵抗力度の推移である。それによると, 周面抵抗力度は, 相対密度が高いほど最大値が大きく, 拘束圧が大きいほど降伏後の低下が著しい。

図 12 は, 周面抵抗力度と区間平均沈下量との関係であり, それぞれ最大周面抵抗力度 $f_{s_{max}}$ および杭径 d で除して正規化している。 $f_{s_{max}}$ 時, 0.5d, 1d および 1.5d 沈下時の値をプロットしたものである。(a) の中央部では, 周面抵抗力度がピークを示した後, 緩やかに低下して $f_{s_{max}}$ 時の 60~80% が残留する。このとき, 緩い地盤の方が大きく減少する。これに対して, (b) の杭先端部では, ピーク後大きく低下し, 大変形時には負の抵抗力度を示す傾向がある。

(2) 杭近傍地盤の土中土圧

図 13 は, 中央部および先端部それぞれについて, 鉛直方向と水平方向の土圧の推移を示したものである。中央

部および先端部の水平土圧は, それぞれ 3-4 区間および 1-2 区間の周面抵抗力度と同様の推移を示しているのが分かる。また, 鉛直土圧は相対密度による影響はなく, 拘束圧についても初期値が異なるだけで, ほぼ同様な傾向を示している。一方, 杭下の水平土圧では, 降伏せずに増大し続ける傾向が見られた。なお, 減少傾向を示した m-20 の試験体では, 地盤が大きく変形したことで土圧計自体が傾いたことが原因と考えられる。

図 14 は, 土中土圧と沈下量との関係であり, それぞれ各土圧の最大値 σ_{max} および杭径 d で除して正規化した。水平土圧を見ると, 荷重直後は負のダイレイタンスの影響により土圧が減少するが, その後急増して最大値を示す。ピーク後に着目すると, (a) の中央部では緩やかに減少し, σ_{max} 時の 50~90% が残留する。このとき, 緩い地盤の方が低下する傾向がある。一方, (b) の先端部では周面抵抗力度と同様に大きく減少する傾向を示し, 荷重直前よりも土圧が低下している。鉛直土圧を見ると,

(c) の中央部では荷重直後に杭周面から地盤に荷重が伝わるため僅かに上昇するが, $f_{s_{max}}$ 時まで急激に低下し, その後はピーク値の 60% 程度で一定となる。一方, (d) の杭先端部では, 荷重直後に一旦上昇した後, $f_{s_{max}}$ 時まで減少傾向を示す。 $f_{s_{max}}$ 後は, 杭先端支持力の増大に合わせるように土圧も上昇し, 約 1d 沈下時点で最大値を示し, その後はほぼ一定となる。

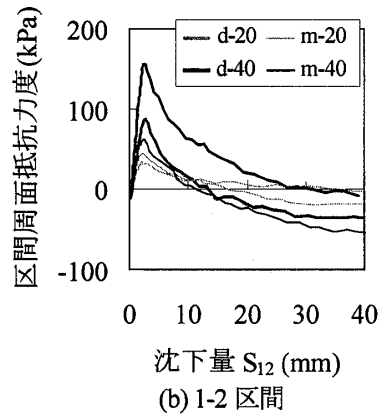
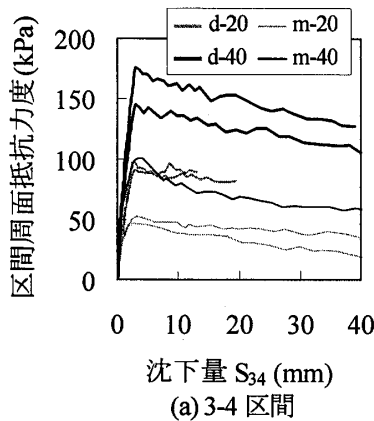


図 11 周面抵抗力度と沈下量の関係

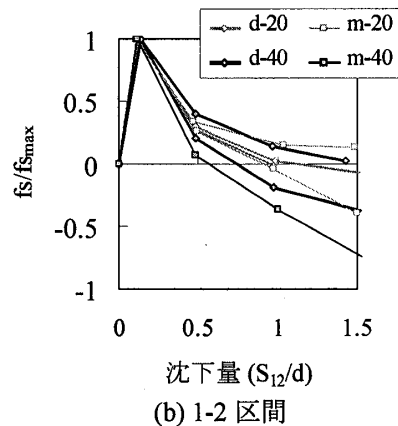
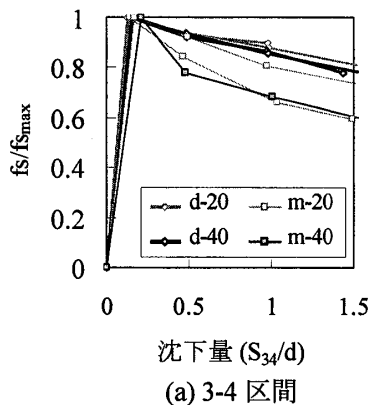


図 12 周面抵抗力度と沈下量の関係 (正規化)

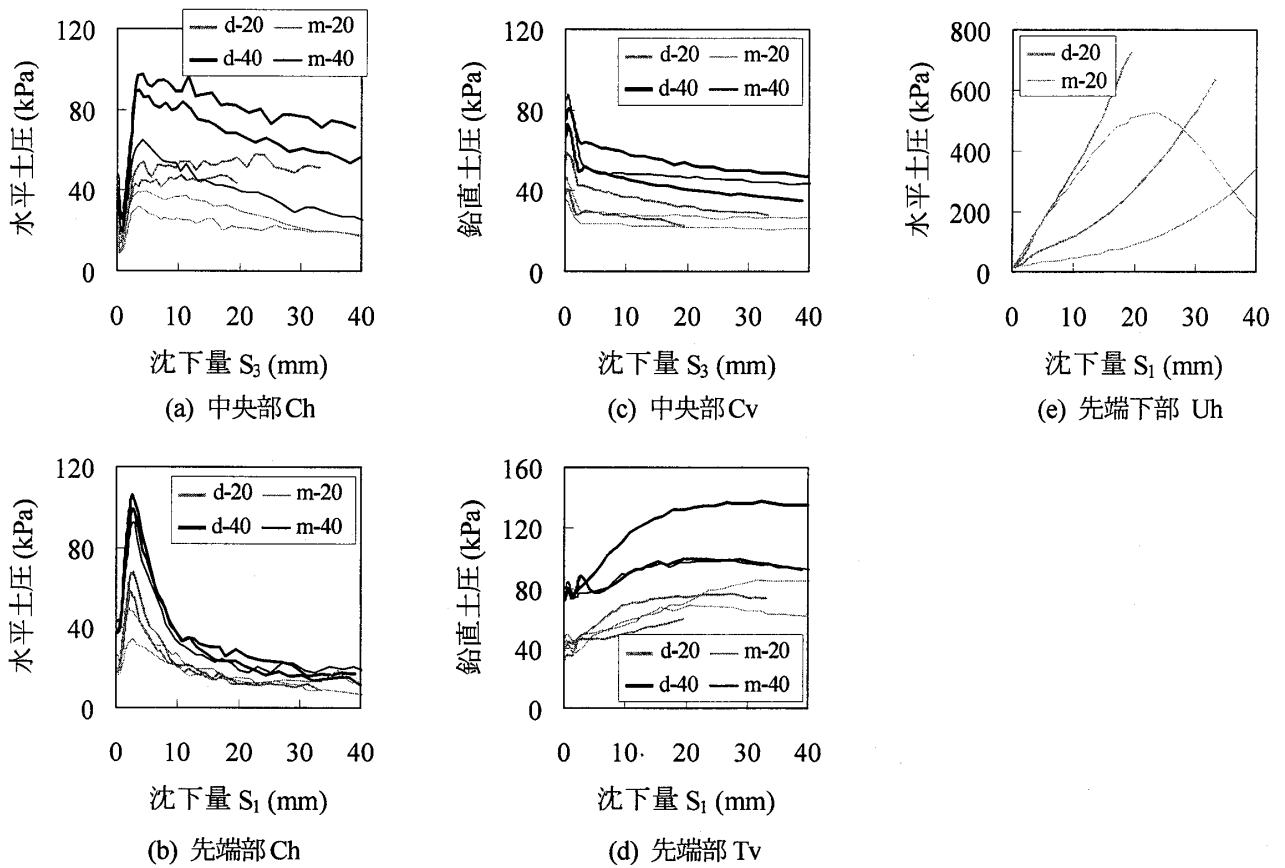


図 13 土中土圧と沈下量の関係

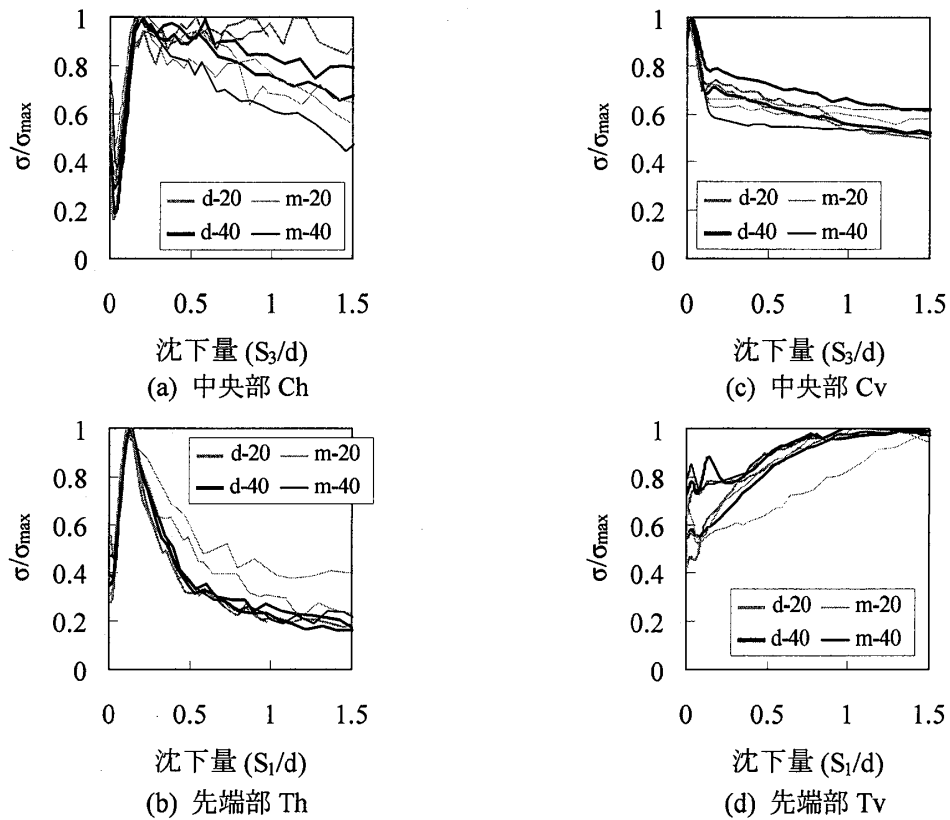


図 14 土中土圧と沈下量の関係 (正規化)

図 15 に鉛直土圧の変化率(任意の時点の土中土圧を載荷直前の値で除したものを)を示す。ここで、深度 0 は上載圧の値である。fs_{max}時を見ると、中央部では上載圧より低く、先端はほぼ同じである。また、側圧の影響はないが、密な地盤の方の変化率が若干高くなっている。残留抵抗時(20mm 沈下時)は、fs_{max}時とほぼ同じ傾向であるが、中央部は低下し、先端部では逆に若干上昇する傾向がある。

4. 2 考察

一般的な杭中央部との比較から、杭先端近傍における杭周面抵抗力特性や杭周面近傍の土中土圧について考察する。ここでは、3-4 区間および 1-2 区間の杭周面抵抗力と杭中央部および杭先端部の土中土圧とをそれぞれ対応させて比較検討を行う。

(1) 周面抵抗力と土中土圧の関係

図 16 は、周面抵抗力と水平土圧の関係である。なお、白抜きのマーカーは Dr=83%、塗り潰してあるマーカーは Dr=66% の計測値を示している。fs_{max}時を見ると、中央部および杭先端部共に周面抵抗力と土中土圧は比例関係を示しており、概ね中央部で fs : σ = 1 : 1.6、先端部で fs : σ = 1 : 1 となっている。残留抵抗(沈下量 20mm)時では、中央部は fs_{max}時と同じ傾向であるが、先端部では周面抵抗力が 0 に近く傾きが 0 となっている。

(2) 杭の挙動と土圧係数の関係

図 17 は、水平土圧を鉛直土圧で除した土圧係数 K である。なお、K=0.5 の破線は静止土圧係数である。中央部では、載荷直後は負のダイレイタンスの影響によって主働土圧状態(K<0.5)となっているが、0.1d 沈下後は受働土圧状態(K>0.5)となりピークに達する。その後、Dr=83%ではほぼ一定もしくは増加傾向、Dr=66%では減少傾向を示すが、受働土圧状態を保持する。一方、先端部では、載荷直後は負のダイレイタンスの影響で若干低下し主働土圧状態となるが、直ぐに増加して受働土圧状態となってピークに達する。ピーク後は急激に低下し、0.5d 沈下時までには主働土圧状態になっていることが分かる。

図 18 は、杭近傍地盤の応力変化を土圧係数を扁平率とした円を用いて描いた概念図であり、杭と砂地盤の相対的な挙動は、以下のように推察される。

- a) 載荷直後は、先端部および中央部共に負のダイレイタンスにより杭近傍地盤が収縮するため、水平土圧が減少して主働土圧状態になる。
- b) fs_{max}時では、杭近傍地盤が膨張するため、水平土圧が上昇して受働土圧状態となる。
- c) 残留時は、中央部は杭近傍地盤の応力変化が小さいため、受働土圧状態のままとなる。一方、先端部は杭の沈下に伴い近傍地盤が先端直下に引き寄せられるため、水平土圧が急激に低下して主働土圧状態となる。

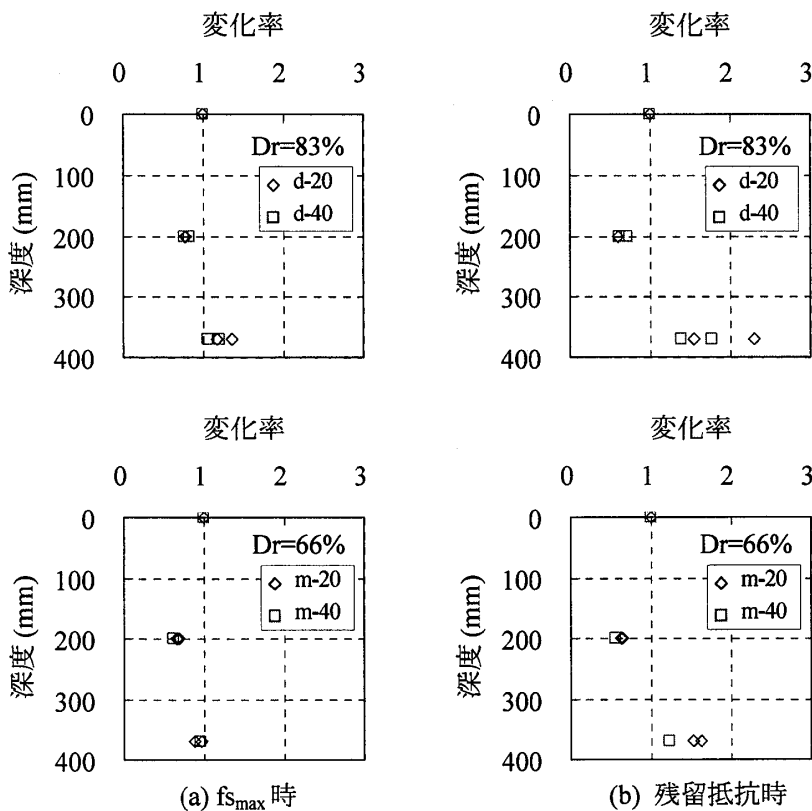


図 15 鉛直土圧の変化率

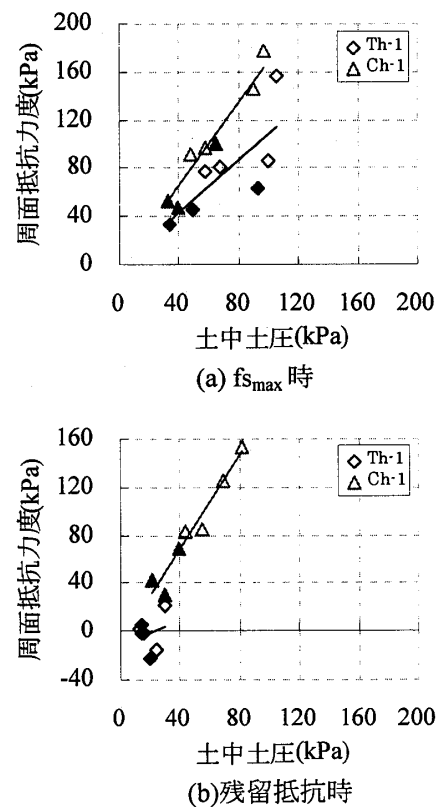


図 16 周面抵抗力と水平土圧の関係

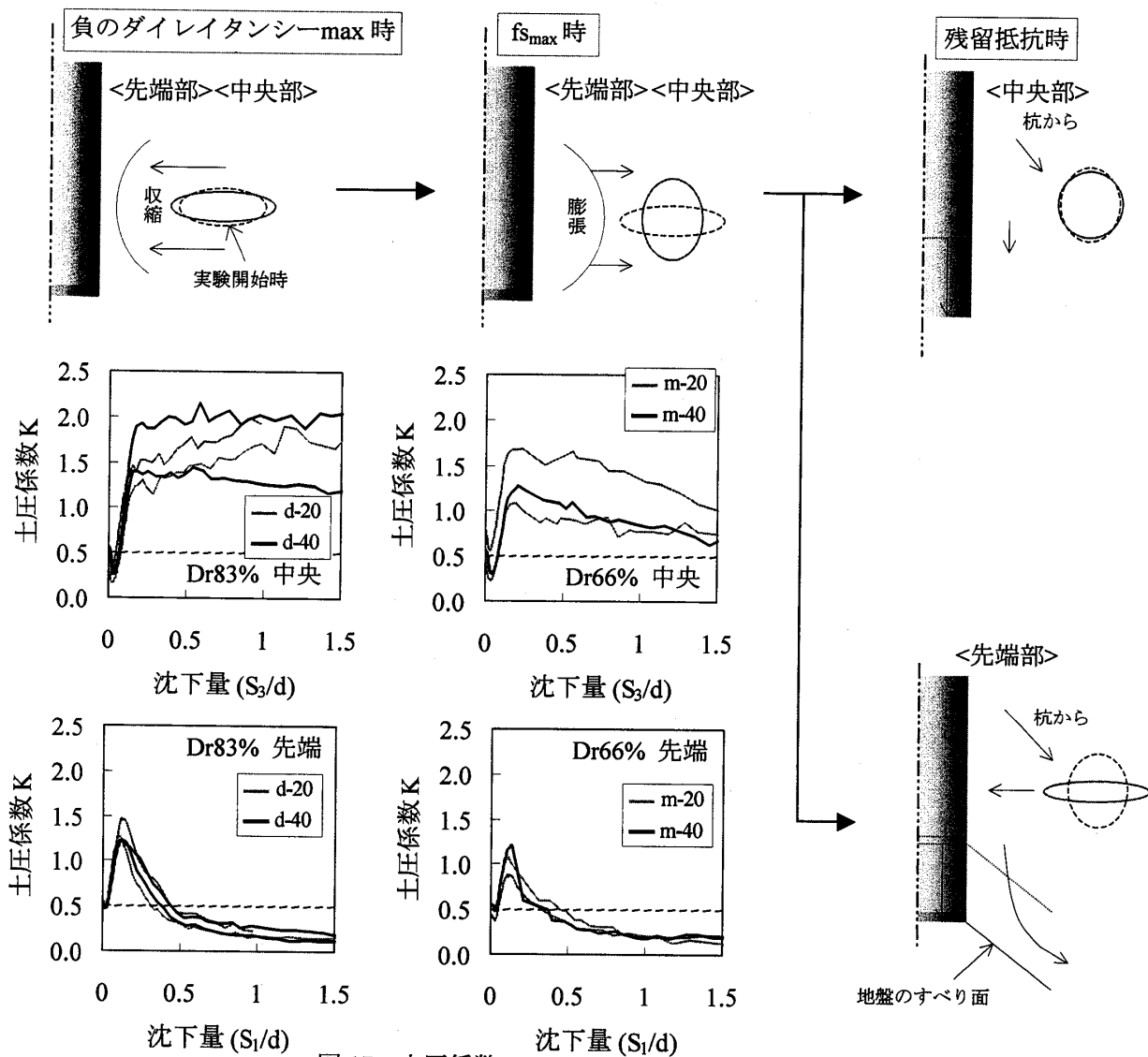


図 17 土圧係数

図 18 応力変化の概念図

5. まとめ

本論文では、杭頭載荷重の増大に伴う杭周面抵抗力度の特徴的な推移は、杭先端付近における土中土圧の変化で概ね説明できることが明らかになった。本実験で得られた結果は以下の通りである。

- ① 土圧計は間隔を 90 度以上空けて配置するのが良い。
- ② 本実験範囲に関する限り杭径の寸法効果はほとんどない。
- ③ 杭周面抵抗力度は、中央部ではピーク後緩やかに低下して最大値の 60~80%残留するのに対して、先端部ではピーク後急激に低下して負の値が生じる。
- ④ 杭周面近傍の水平土圧の推移は、それぞれ対応す

る区間の周面抵抗力度のそれと同様の傾向を示す。

- ⑤ 最大周面抵抗力度とそのときの水平土圧は比例関係を示すが、先端部は中央部よりも傾きが小さい。
- ⑥ 最大周面抵抗力時では、水平土圧が上昇して受働土圧状態となる。
- ⑦ 残留抵抗時は、中央部では受働土圧状態を保持するが、先端部は主働土圧状態となる。

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力と土中応力の関係, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.77, pp.145-148, 2004.7
- 2) 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

- *1 舞鶴工業高等専門学校 助手・博士 (工学)
- *2 室蘭工業大学 教授・工博
- *3 (株)日本設計 修士 (工学)
- *4 室蘭工業大学 技術職員
- *5 西松建設 (株)
- *6 (株)大林組

Research Associate, Maizuru National College of Tech., Dr.Eng.
 Professor, Muroran Inst. of Tech., Dr.Eng.
 NIHON SEKKEI, INC., M.Eng.
 Technician, Muroran Inst. of Tech.
 Nishimatsu Construction Co., Ltd
 ODAYASHI CORPORATION