

# 自然堆積地盤の変形挙動に対するパイルドラフト敷設効果

名古屋大学 学生会員 田代むつみ

名古屋大学 国際会員 浅岡顕 中野正樹 野田利弘 山田英司  
(株)浅沼組技術研究所 正会員 高稲敏浩

## 1 はじめに

軟弱な粘土が堆積した地盤においては、べた基礎のような直接基礎のみで荷重を地盤が支持できたとしても、沈下量が大きくなる可能性がある。このような場合、支持杭を併用して沈下抑制を行うことが多いが、支持層が地盤深部に存在する場合、杭長が長くなり不経済となることもある。これに対し、地盤と杭との摩擦力を期待する「摩擦杭」をべた基礎に併用した「パイルドラフト」は、比較的短い杭長でも沈下量低減に有効であり、近年注目されつつある基礎形式である。

パイルドラフトは直接基礎と同様、ある程度の沈下を許容して地盤となじませる基礎形式であり、地盤の特性をよく理解する必要がある。2000年に改定された「建築基礎構造設計指針」<sup>1)</sup>においても、パイルドラフトの要求性能あるいは要求性能レベルに対応する検討項目として、従来の支持力に加えて、変形・沈下が重視されており、基礎の設計の際には、基礎～地盤間の相互作用を考慮した適切なモデル化による検討が必要である。実際、土は「弾塑性体」であり、上載荷重の大きさ・形状や、載荷速度、地盤の透水性に応じて土が異なる応力履歴を受け、その結果地盤の変形挙動が異なることに注意しなくてはならない。

そこで本論文では、飽和地盤を水～土2相系の弾塑性材料、パイルドラフトは弾性体を仮定し、基礎～地盤間の相互作用を考慮した水～土連成有限変形計算<sup>2)</sup>により、パイルドラフトの変形抑制・荷重伝達機構を解明する。また、杭長、杭配置が沈下量・荷重分担率に及ぼす影響についても検討する。なお、土の弾塑性構成式には、骨格構造<sup>3)</sup>(構造・過圧密・異方性)の働きに着目して、この発展則の違いにより砂と粘土の両者を統一的に扱う回転硬化<sup>4)</sup>上・下負荷面修正カムクレイモデル<sup>5)</sup>を用いた。

表-1 地盤の材料定数及び初期値

		上層地盤 砂層	中層地盤 軟弱粘土層	下層地盤 基礎層(砂)
<b>弾塑性パラメータ</b>				
圧縮指数	$\tilde{\lambda}$	0.0418	0.131	0.0418
膨潤指数	$\tilde{\kappa}$	0.0118	0.04	0.0118
限界状態定数	M	1.078	1.13	1.078
正規圧密線の切片	N	1.99	1.97	1.99
ポアソン比	$\nu$	0.3	0.4	0.3
<b>発展則パラメータ</b>				
構造劣化指数	$a, b, c$	1.5, 1.0, 1.0	1.27, 1.0, 1.0	1.5, 1.0, 1.0
正規圧密土化指数	$m$	0.04	5	0.04
回転硬化指数	$b_r$	0.514	0.0001	0.514
回転硬化限界定数	$m_b$	0.5	1.0	0.5
<b>初期値</b>				
構造の程度	$1/R^*_0$	2.0	10.0	1.0
過圧密比	$1/R_0$	5.0	3.0	20.0
異方性の程度	$\zeta_0$	0.231	0.375	0.231
応力比	$\eta_0$	0.231	0.375	0.231
(側圧係数)	$K_0$	0.8	0.7	0.8
透水係数	$k$ (cm/sec)	$4.09 \times 10^{-2}$	$3.7 \times 10^{-7}$	$4.09 \times 10^{-2}$
土粒子の密度	$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	2.65	2.6	2.65

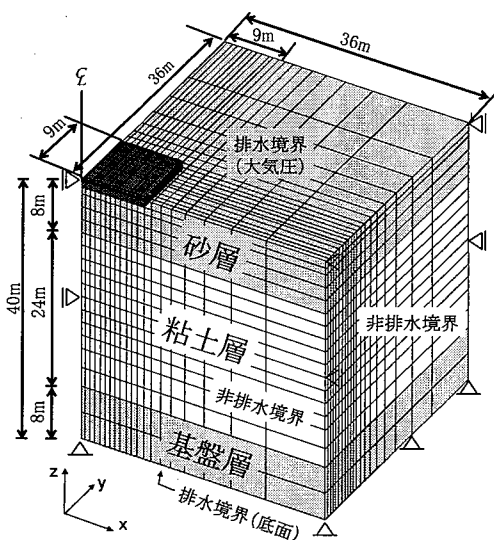


図-1 有限要素メッシュと境界条件

Deformation Behavior of Naturally Deposited Soils with Piled Raft Foundation :

Asaoka, A., Nakano, M., Noda, T., Yamada, E., Tashiro, M. (Nagoya Univ.) and Takaine, T. (Asanuma Co.)

## 2 パイルドラフトによる沈下抑制・荷重伝達メカニズム

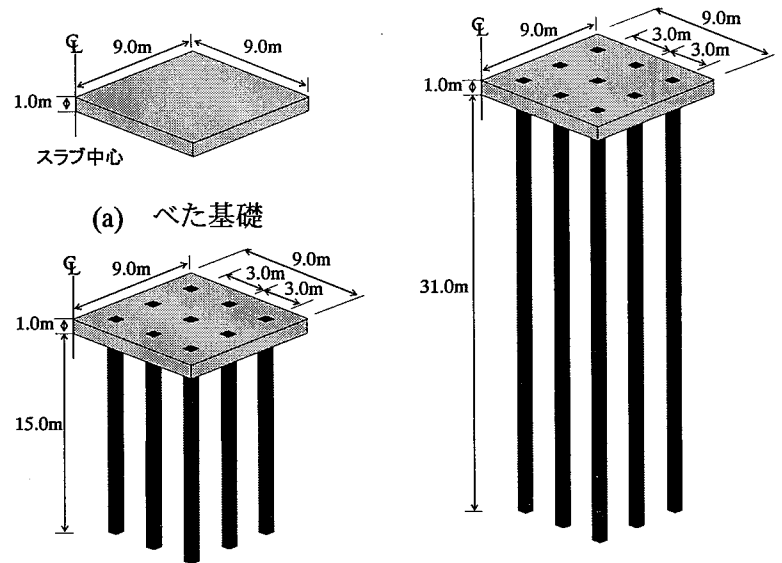
解析に用いた有限要素メッシュと境界条件を図-1に示す。地盤の対称性を仮定し、1/4領域を解析対象とする。地盤は上から中密な砂層（構造低位・過圧密）、厚く堆積した軟弱粘土層（構造高位・過圧密）、密な砂からなる基盤層（構造低位・超過圧密）の粘土・砂互層地盤を想定し、表-1に示す材料定数と初期値群を用いた。地盤の初期状態は、簡単のため初期の骨格構造は各層で深さ方向に均一とし、土被り圧に応じてその他の初期状態を決定した。なお、本計算例では各種計算結果を強調するため、地盤の圧縮性を高めている。

パイルドラフトは、1m厚・18m×18m幅の基礎スラブに、70cm角の杭を3m間隔で配置した（図-2(b)）。比較のために、べた基礎のみ（図-2(a)）、支持杭（図-2(c)）を敷設した場合についても検討した。なお、支持杭とパイルドラフトは杭長だけの違いで表現している。基礎の設置は、自重を考慮しながら当該部分の土要素を除去すると同時に、表-2に示す線形体で「瞬時」に置換し、土とパイルドラフトの重量差分で圧密（水～土連成）計算を行った。荷重条件は、荷重速度  $1\text{kN/m}^2$  で50日間等分布荷重を漸増荷重後、一定放置とした。

図-3に各基礎形式における時間～沈下量関係を示す。「(c)支持杭」では荷重終了直後にわずかに沈下が発生するのみで、その後の残留沈下もほとんど見られない。「(b)パイルドラフト」は、「(c)支持杭」には及ばないが、「(a)べた基礎」と比較すれば、荷重終了時の沈下量、及びその後の残留沈下の低減に十分有効であるといえる。

「(a)べた基礎」と「(b)パイルドラフト」において、荷重終了から圧密終了時までの地盤内部の平均有効応力増分 ( $\Delta p'$ ) 及び比体積増分 ( $\Delta v$ ) を図-4、図-5に示す。「(a)べた基礎」では基礎直下の地盤浅部で応力が増加しているのに対し、「(b)パイルドラフト」では杭先端の地盤深部に上載荷重を伝達していることが分かる。地盤は深部ほど拘束圧が大きく、同じ応力増分を受けた時にも圧縮量は小さい。つまり、パイルドラフトは杭間の土を一体化させたまま、摩擦杭を通して上載荷重を拘束圧の大きな地盤深部に伝達することで、沈下量を低減させていると言える。

図-6は、「(b)パイルドラフト」における、圧密終了時のせん断ひずみ分布図である。外側の杭周辺地盤で特にせん断ひずみが卓越しており、杭の摩擦抵抗は、外周の杭ほど大きいことが分かる。杭に発生する軸力、及びモーメントを見ても、外側の杭ほど値は大きくなり（杭番号は図-7参照）、荷重終了時が最も大きな値を示している（図-8、図-9）。



(a) べた基礎 (b) パイルドラフト（杭長:16m） (c) 支持杭（杭長:32m）  
図-2 計算に用いた基礎形式（1/4断面）

表-2 弾性体の材料定数

弾性係数( $\text{kN/m}^2$ )	$2.1 \times 10^7$
ポアソン比	0.4
単位体積重量( $\text{kN/m}$ )	25.0

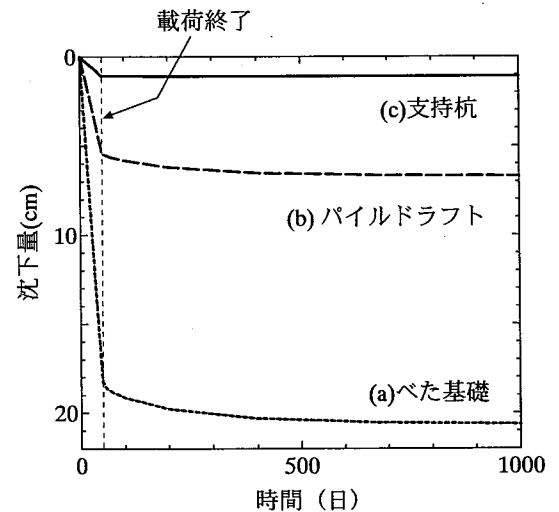


図-3 各基礎形式における時間～沈下量関係

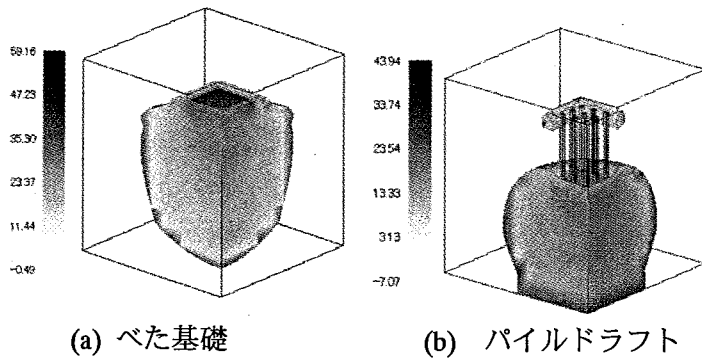


図-4 平均有効応力増分分布 (3.0kPa以上の増加部を表示)

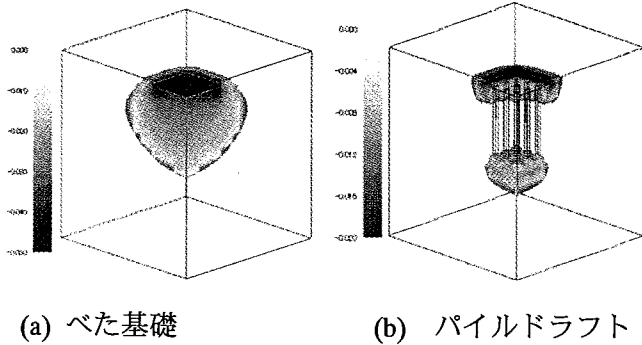


図-5 比体積増分分布 (-0.004以下の減少(圧縮)部を表示)

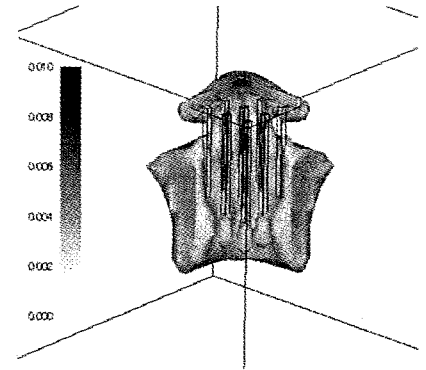


図-6 せん断ひずみ分布  
〔(b)パイルドラフト〕基礎部拡大、  
0.002以上を表示

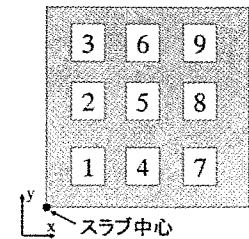


図-7 杭番号

### 3 パイルドラフトの杭長の影響

杭配置は図-2(b)と同様(杭間3m)のまま、杭長を変化させた時の影響を調べた。図-10は、最終沈下量及び杭の荷重分担率(上載荷重に対する杭頭の軸力の合計)の関係を示したものである。なお、砂層と粘土層の境界まで杭が貫入された時(杭長:8m)には、載荷中に杭先端の応力集中により粘土層側で「円弧すべり」破壊が起こり

(図-11)、所定の荷重まで載荷できなかった。また、図中杭長:0mの点はラフトのみ(べた基礎)、杭長:32mの点は支持杭の場合である。

杭がより長い場合には、より圧縮性の低い深部の層へと荷重を伝達するため、最終沈下量は小さく沈下量低減に有効である。その一

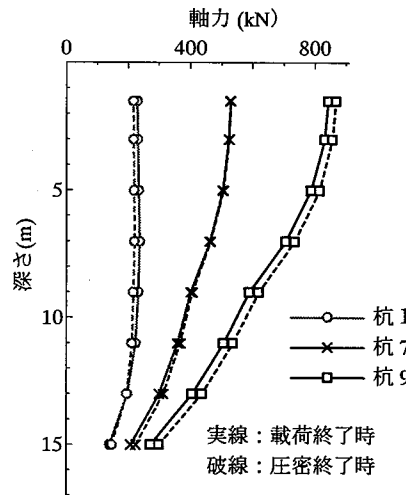


図-8 杭に発生する軸力

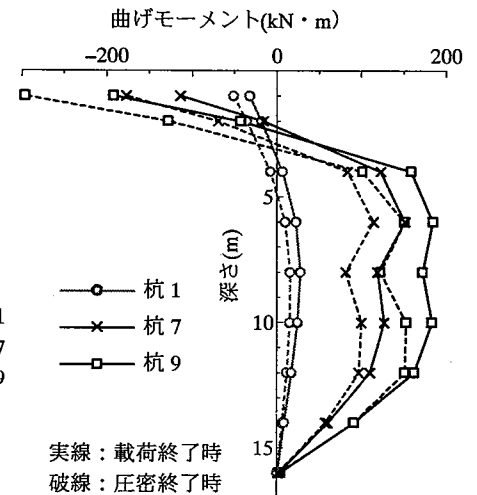


図-9 杭に発生する曲げモーメント

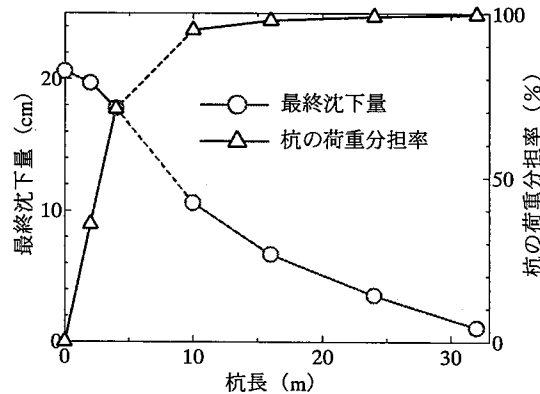


図-10 最終沈下量と杭の荷重分担率

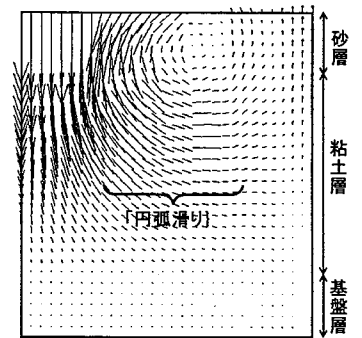


図-11 「すべり破壊」時の変位速度場(側面図)

方で、杭の荷重分担率は大きくなる傾向がある。今回の解析例においては、杭長が10m以上の場合、杭が90%以上の荷重を受け持つ結果となった。

#### 4 パイルドラフトの杭配置の影響

杭長が等しく（杭長:16m）杭配置の異なる基礎形式について、最終沈下量及び荷重分担率を比較した。計算に用いた杭配置を図-12に示す。杭配置①は図-2(b)で示したものと同一であり、その他に②～⑥の杭配置についても検討した。各杭配置における最終沈下量及び荷重分担率を表-3に示す。

杭配置①に対して約半分の本数まで杭を減らしても、スラブ端から杭までの距離が等しい杭配置（杭配置⑤を除くすべての杭配置）においては、最終沈下量、杭の荷重分担率がほとんど等しくなることが分かる。杭配置⑤のように、スラブ中心に杭を集中して配置した場合は、最終沈下量が大きくなり、ラフトの荷重分担率が大きくなる。図-6で示したように、パイルドラフトでは外側に配置された杭が大きな摩擦抵抗を発揮するため、杭を外側に配置するほど沈下量抑制には効果的であるが、杭の荷重分担率が大きくなると言える。

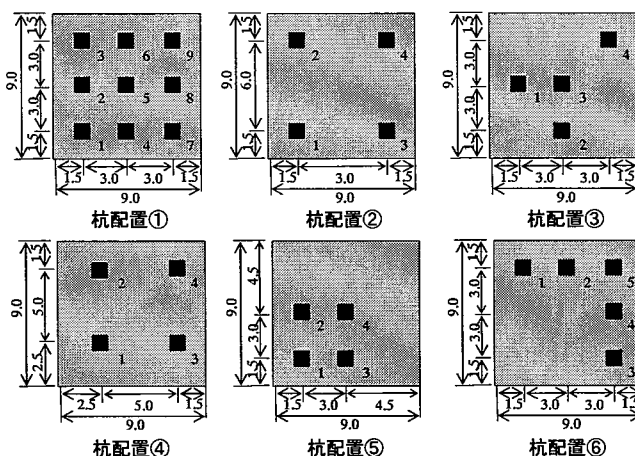


図-12 計算に用いた杭配置

表-3 杭配置と最終沈下量・荷重分担率

杭配置	杭本数	最終沈下量(cm)	杭の荷重分担率(%)
①	9	97.8	6.3
②	4	91.2	8.0
③	4	94.5	7.7
④	4	95.0	8.0
⑤	4	78.7	10.5
⑥	5	96.9	7.3

#### 5 まとめ

パイルドラフトの敷設効果について、地盤の変形を水～土連成の弾塑性材料として解く立場より説明を行った。パイルドラフトでは、摩擦杭を通して杭先端以深の、より拘束圧の大きな圧縮性の低い地盤に荷重を伝達することにより沈下量抑制効果がある。杭の摩擦抵抗は、外周の杭ほど大きな力は発揮する。このため、杭長が長く、杭が外側に配置された基礎形式ほど沈下抑制には効果的であるが、杭の荷重分担率は増加する。スラブの荷重分担を期待する場合には、スラブの張り出しを大きくするなどの措置が考えられる。なお実際の設計では、杭長・杭配置を統括的に考察し、経済性・施工性なども考慮した基礎形式の決定が必要である。

#### 参考文献

- 1) 建築基礎構造設計指針, 日本建築学会, 2001.
- 2) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T. (1994): Soil-water coupled behavior of saturated clay near/at critical state, S&F, 34(1), pp.91-105.
- 3) 三笠(1964): 土の工学的性質の分類表とその意義, 土と基礎, 12(4), 17-24
- 4) Hashiguchi, K. and Chen, Z.-P. (1998): Elastoplastic constitutive equations of soils with the subloading surface and the rotational hardening, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 22, pp.197-227.
- 5) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanics of soils, S&F, 42(5), pp.47-57.