

自然堆積地盤の変形挙動に対するパイルドラフト基礎敷設効果

Deformation Behavior of Naturally Deposited Soils with a Piled Raft Foundation

高稲 敏浩*

要 旨

飽和砂・粘土互層地盤において、パイルドラフト基礎の杭配置、杭長の違いが沈下量・荷重分担率に及ぼす影響とその荷重分担機構の違いについて、水～土連成3次元弾塑性変形解析を用いて検討した。その結果、今回設定した地盤は、べた基礎の場合に沈下が20cm発生していて圧縮性が若干高いのだが、パイルドラフト基礎では杭で囲まれた領域が一体となって地盤深部へ荷重を伝達することで沈下量が低減する。また、外周の杭からのスラブ張出し部においてスラブが大きく荷重を分担することが分かった。

キーワード：有限要素法／弾塑性／パイルドラフト基礎／水～土連成解析／鉛直荷重

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、支持杭を用い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がある。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「パイルドラフト基礎」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。

パイルドラフト基礎は直接基礎と同様、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」¹⁾においても、パイルドラフト基礎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・沈下が重視されている。このことから、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、パイルドラフト基礎は弾性体を仮定し、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²⁾により、パイルドラフト基礎の変形抑制・荷重伝達機構を解明する。また、杭長、杭配置が沈下量・荷重分担率におよ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³⁾(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⁴⁾上・下負荷面修正カムクレイモデル⁵⁾を用いた。

2. パイルドラフト基礎による沈下抑制・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、層厚8m)、厚く堆積した軟弱粘土層(構造高位・過圧密、層厚24m)、密な砂からなる基盤層(構造低位・超過圧密、

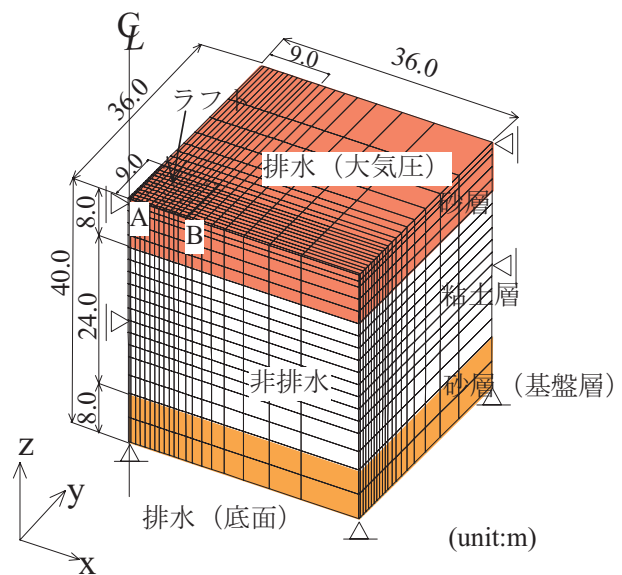


図-1 有限要素メッシュと境界条件

*土木研究グループ

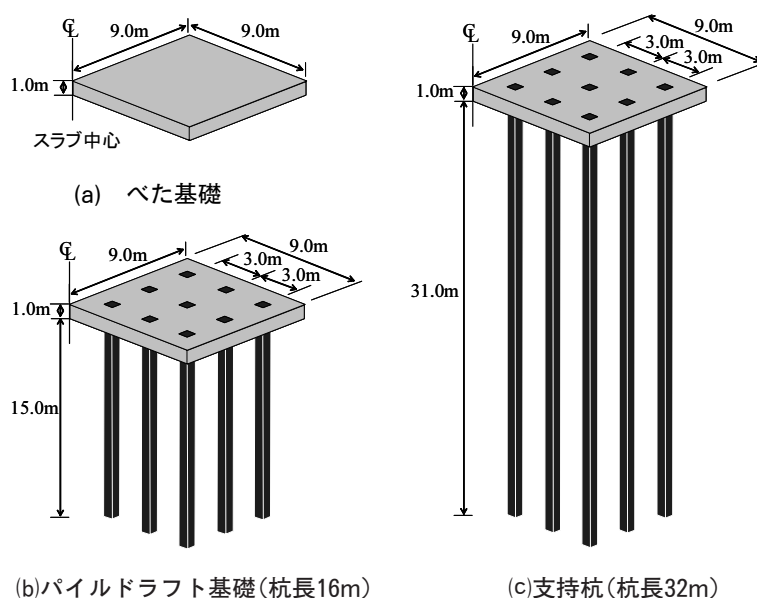
表－１ 地盤の材料定数および初期値

		上層地盤	中層地盤	下層地盤
		砂 層	軟弱粘土層	基盤層(砂)
弾塑性パラメータ				
圧縮指数	$\bar{\lambda}$	0.0418	0.131	0.0418
膨潤指数	$\bar{\kappa}$	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	ν	0.3	0.4	0.3
発展性パラメータ				
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	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
初期値				
構造の程度	$1/R_o$	2.0	10.0	1.0
過圧密比	$1/R_o$	5.0	3.0	20.0
異方性の程度	ζ_o	0.231	0.375	0.231
応力比	η_o	0.231	0.375	0.231
側圧係数	K_o	0.8	0.7	0.8
透水係数	k(cm/sec)	4.09×10^{-2}	3.7×10^{-7}	4.09×10^{-2}
土粒子の密度	$\rho_s(t/m^3)$	2.65	2.6	2.65

(N:p'=98kN/m²における繰返し土の等方正規圧密線上の比体積)

層厚8m)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。

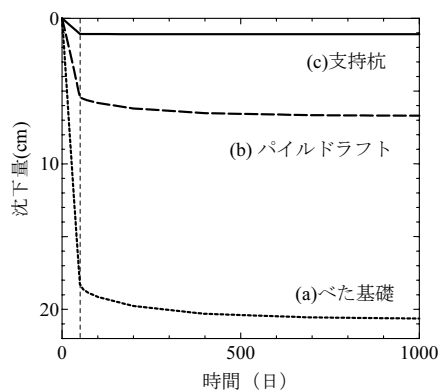
パイルドラフト基礎は、幅18m×18m、厚さ1mの基礎スラブに、70cm角の杭を3m間隔で配置した(図－2(b))。比較のために、べた基礎(図－2(a))および支持杭基礎(図－2(c))の場合についても検討した。なお、支持杭とパイルドラフト基礎は杭長みの違いで表現している。また、本論文での杭長は、スラブ天端から杭先端までの長さを示すものとした。基礎の設置は、自重を考慮しながら当該部分の土要素を除去すると同時に、表－２に示す線形弾性体で「瞬時」に置換し、土と基礎の重量差分を節点力で与え、圧密(水～土連成)計算を行った。載荷条件は、



図－２ 計算に用いた基礎形式

表－２ 弾性体の材料定数

弾 性 係 数 (kN/m ²)	2.1×10^7
ポ ア ソ ン 比	0.4
単位体積重量 (kN/m ³)	25.0



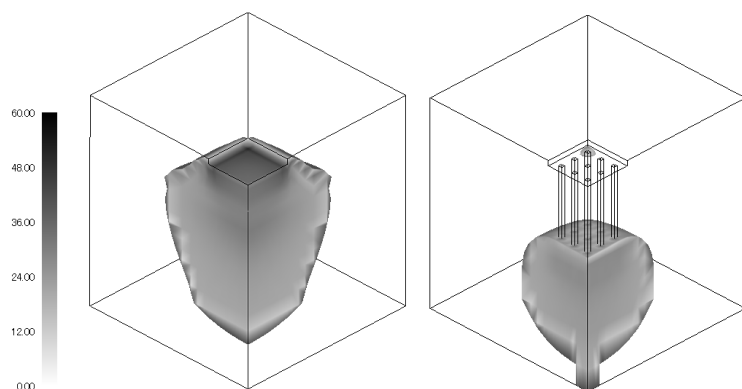
図－３ 時間～沈下量関係

載荷速度 $1\text{kN/m}^2/\text{day}$ で50日間、計 50kN/m^2 の等分布荷重の漸増裁荷とした。

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」では載荷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)パイルドラフト基礎」は、「(c)支持杭」にはおよばないが、「(a)べた基礎」と比較すれば、載荷終了時の沈下量、およびその後の残留沈下の低減に有効であることがわかる。

「(a)べた基礎」と「(b)パイルドラフト基礎」において、載荷終了から圧密終了時までの地盤内部の平均有効応力および比体積増分を図－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)パイルドラフト基礎」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、パイルドラフト基礎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。

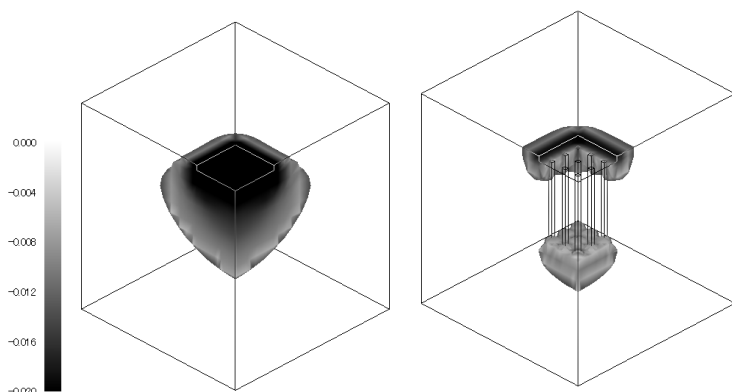
図－６は、「(b)パイルドラフト基礎」における、圧密終了時のせん断ひずみ分布図である。外側の杭周辺地盤で特にせん断ひずみが卓越しており、杭の摩擦抵抗は、外周の杭ほど大きいことが分かる。図－７および図－８から杭（杭番号は図－９参照）に発生する軸力、および曲げモーメントは、外側の杭ほど値は大きくなっているが、詳細については、第４章で考察する。



(a)べた基礎

(b)パイルドラフト基礎

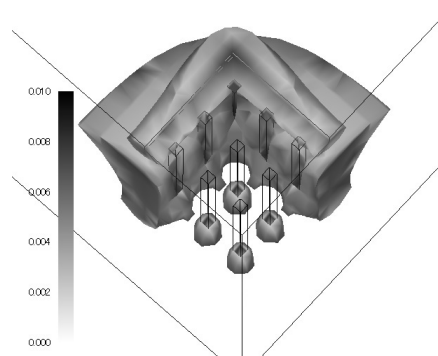
図－４ 平均有効応力増分の分布（ 5.0kPa 以上増加部を表示）



(a)べた基礎

(b)パイルドラフト基礎

図－５ 比体積増分の分布（ 0.004 以上減少（圧縮）部を表示）



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

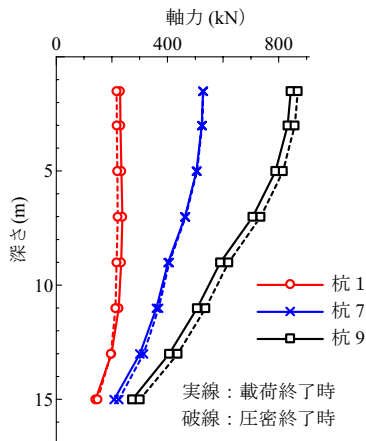


図-7 杭に発生する軸力

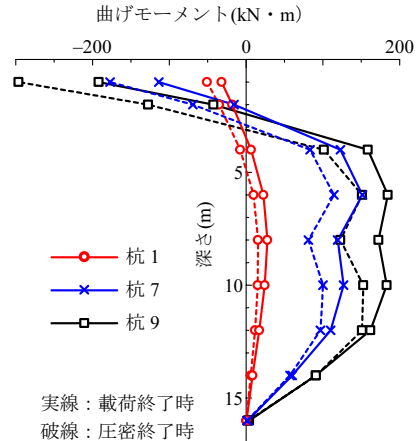


図-8 杭に発生する曲げモーメント

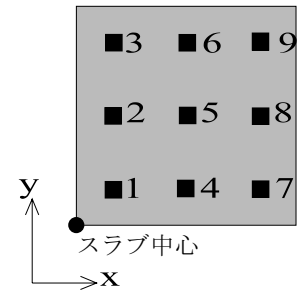


図-9 杭番号

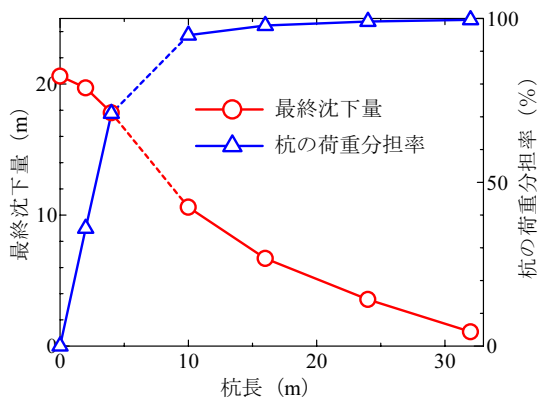


図-10 最終沈下量と杭の荷重分担率

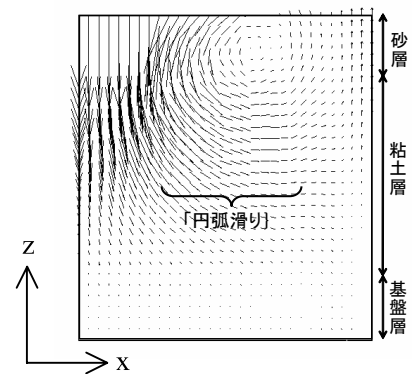


図-11 「すべり破壊」時の変位速度場（側面図）

3. パイルドラフト基礎の杭長の影響

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、最終沈下量および杭の荷重分担率（上乗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。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。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ている。また、杭が長くなるに従い、最終沈下量は小さくなるが杭の荷重分担率は大きくなっていることが分かる。これは、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、沈下量が小さくなり、一方で、杭の地盤へ伝達する荷重が大きくなるため、杭の荷重分担率は大きくなるためである。

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-11参照）、所定の荷重まで載荷できなかった。

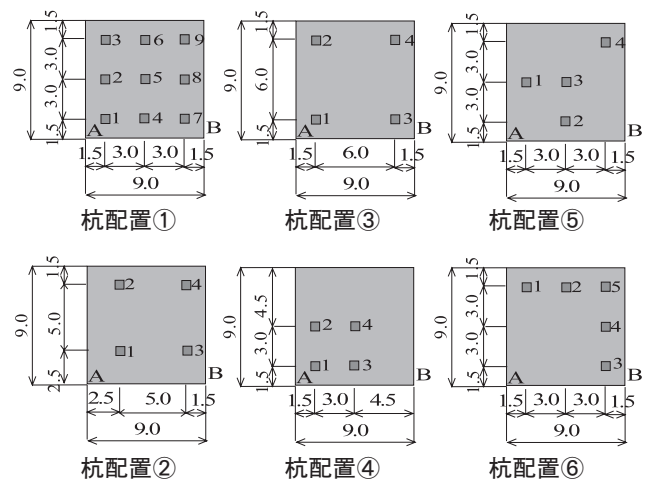


図-12 計算に用いた杭配置

4. パイルドラフト基礎の杭配置の影響

杭配置・杭本数の異なる基礎形式について、最終沈下量およ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

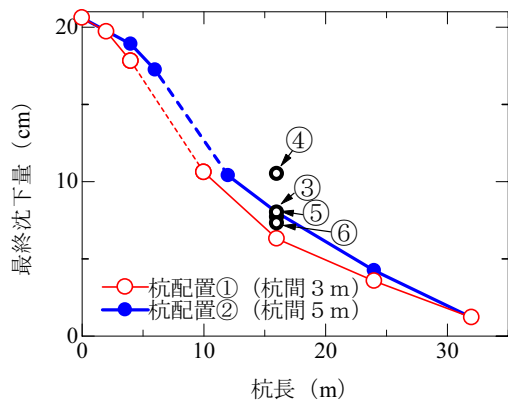


図-13 杭長～最終沈下量

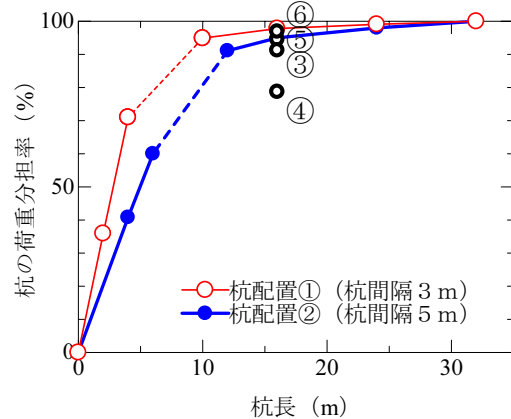


図-14 杭長～杭の荷重分担率

であり、杭配置②は、杭間隔を5mとしたものである。杭配置②について、杭長を変化させた時の最終沈下量および杭の荷重分担率を図-13、図-14にそれぞれ示す。また、杭配置③～⑥について、杭長を16mとした場合について検討し、それぞれの最終沈下量及び荷重分担率を図-13、14中に示している。なお、図-13、14には、図-10に示した杭配置①の場合についても再度表示している。

杭配置①（杭間隔3m）と杭配置②（杭間隔5m）を比較した場合、杭本数は約半分であるが、最終沈下量および杭の荷重分担率に大きな差は見られず、ほぼ同様な傾向を示している。ただし、軸力に関しては、図-15に示す杭配置②の杭長16mの場合の軸力分布をみると、図-7に示す杭配置①に対して約1.5倍～約2.5倍になっている。

また、杭配置③～⑥についてみると、杭配置が異なっても、最終沈下量の少ない場合は、杭の荷重分担率が大きくなっていることが分かる。また、杭配置③～⑥は、杭配置①に対して杭本数が約半分であるが、杭配置④を除くすべての杭配置において、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。これは、図-6に示したように、外側に配置された杭が大きな摩擦抵抗を発揮するため、スラブ端から杭までの距離が等しい杭配置③、⑤、⑥は同様な最終沈下量および杭の荷重分担率を示したと考えられる。

5. 異なる杭配置における荷重分担機構

今回設定した地盤では、杭配置④を除き、杭配置が異なっても杭長が同じであればほぼ同様な沈下量と荷重分担率を示している（図-13、14参照）。そこで、杭長が

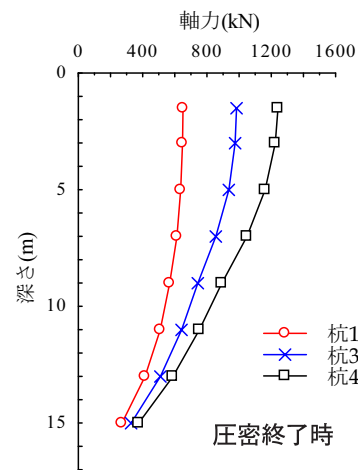
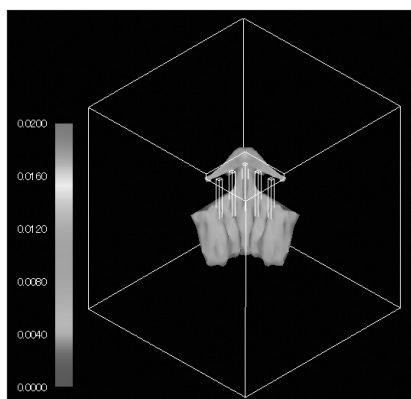
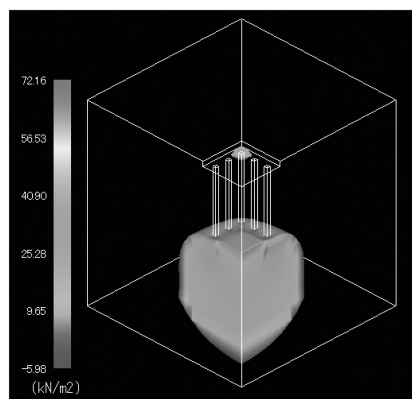


図-15 杭配置②(杭長16m)の軸力分布

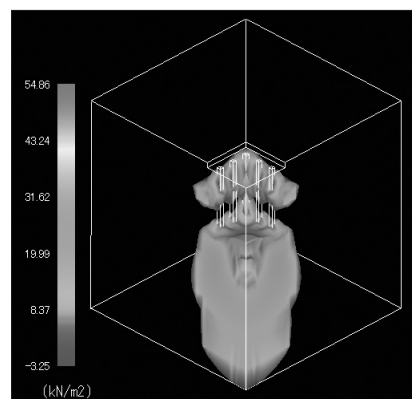
等しいが、荷重分担率が異なる杭配置④と⑥について、せん断ひずみ、せん断応力および平均有効応力増加の分布（図-16、図-17）を比較し、両者の荷重分担率の違いを考察する。杭配置⑥は15m四方を杭で囲んだ形式であるが、せん断ひずみの発生が杭外側で大きく、杭先端部分で平均有効応力の増加が大きい。すなわち、杭とスラブで囲まれた領域が一体となって地盤深部へ荷重を伝達している。このため、スラブ端から杭までの距離が等しい杭配置の場合には、同程度の沈下量が生じるものと考えられる。一方、杭配置④も杭外側でせん断ひずみが発生するが、スラブ端から杭芯まで4.5mあるため、平均有効応力増加図が示すように、スラブへ荷重がより大きく伝達されていて、スラブの荷重分担率が大きくなっている。これらのことは、せん断応力分布からも見てとることができる。



せん断ひずみ分布
(0.003以上を表示)

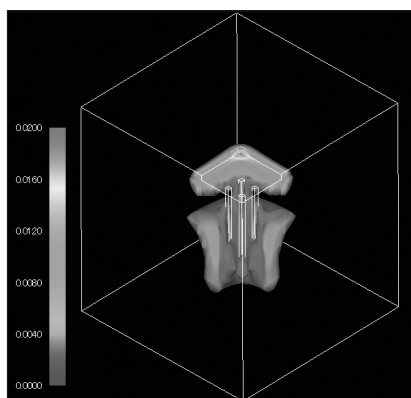


平均有効応力増分分布
(5kN/m²以上の増加部分を表示)

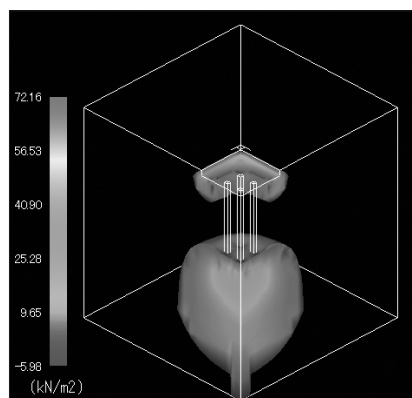


せん断応力分布
(6kN/m²以上の部分を表示)

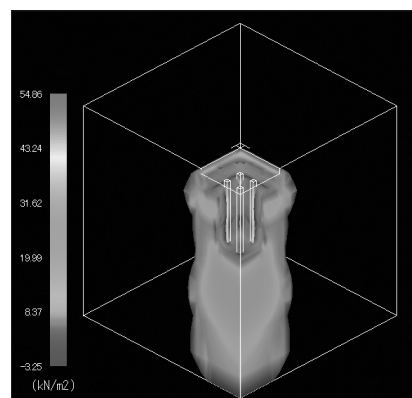
図-16 杭配置⑥の各分布



せん断ひずみ分布
(0.003以上を表示)



平均有効応力増分分布
(5kN/m²以上の増加部分を表示)



せん断応力分布
(6kN/m²以上の部分を表示)

図-17 杭配置④の各分布

6. まとめ

パイルドラフト基礎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。パイルドラフト基礎では、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。また、杭の摩擦抵抗は、外周の杭ほど大きな力を発揮する。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。さらに、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杭配置の決定が必要である。

最後に、ご指導を頂いた名古屋大学浅岡顕教授、野田利弘助教授に対し、感謝の意を表します。

[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. :Soil-water coupled behavior of saturated clay near/at critical state, S&F, 34(1), pp.91-105,1994.
- 3) 三笠正人：土の工学的性質の分類表とその意義，土と基礎、12(4), pp.17-24,1964.
- 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.197-227,1998.
- 5) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.:An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanics of soils, S&F, 42(5), pp.47-57,2002.