

沈下低減と荷重分担に着目した パイルドラフト敷設地盤の変形解析

野田利弘¹・田代むつみ²・高稲敏浩³・浅岡顕⁴

¹正会員 工博 名古屋大学助教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²学生会員 工修 名古屋大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³正会員 工博 (株)浅沼組 技術研究所 (〒569-0034 高槻市大塚町3-24-1)

⁴正会員 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

パイルドラフトを弾性体とし、飽和自然堆積地盤を水～土2相系の弾塑性体として、両者の相互作用を考慮した3次元有限変形解析を実施し、荷重伝達メカニズムに着目しながら、基礎形式(杭長・杭配置)・ラフト剛性・上載荷重が、沈下量低減と杭の荷重分担率に及ぼす影響を調べた。杭が長い場合ほど高拘束で低圧縮性の地盤深部に荷重が伝達され、また杭が外側に均等配置された場合ほど地盤から受ける杭の摩擦抵抗が大きくなるため沈下抑制により効果的であるが、杭の荷重分担率が大きくなる。逆にラフトへの荷重分担を期待する場合は、ラフトのたわみ(不同沈下量)が同時に大きくなるため注意を要する。また、杭先端部周辺土では構造の乱れに伴いせん断ひずみが局所的に発生する場合があることも示した。

Key Words : *piled raft, SYS Cam-clay model, soil-water coupled analysis, finite element method, settlement reduction, load sharing ratio*

1. はじめに

パイルドラフトとは、直接基礎と摩擦杭が複合してその両者で上部構造物を支持する併用基礎である。支持杭基礎と異なり、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、この基礎形式の検討には杭～地盤～直接基礎の相互作用を考慮した適切なモデル化が必要である。通常沈下量の算定には、地盤を有限要素法でモデル化するのは煩雑で実務的でないといわれ、地盤と杭は弾性バネとし、直接基礎のみ有限要素法でモデル化する手法が多く用いられている。この方法は、曲げ板要素あるいは梁要素でモデル化された直接基礎に、弾性論に基づいて評価された杭～地盤～直接基礎の相互作用を考慮した杭および地盤のバネを配したモデルで、「構造力学」的アプローチにより、基礎構造物自身の変形を解くものである¹⁾²⁾。これに対し、パイルドラフトによって変形が束縛された条件下で地盤の変形を解く「土質力学」的アプローチでは、地盤条件に応じて地盤の変形とともに、束縛力として基礎に働く部材力も求めることができる。実際に筆者らは、土を水～土連成³⁾の弾塑性材料としつつ、パイルドラフトが敷

設された飽和地盤の変形挙動を2次元平面ひずみ水～土連成解析で求めている⁴⁾⁵⁾。ここではパイルドラフトの剛性が地盤に比べて極めて高く、なおかつ地盤と基礎の間に相対変位が生じないものとして、土骨格の変位場に「距離不変」と「角度不変」の束縛条件を課すことで基礎の働きを表現し、地盤の変形と基礎部材に作用する部材力を求めるとともに、パイルドラフトの沈下抑制/荷重伝達メカニズムを明らかにしている。この解析手法は極めて平易で、同時に地盤から見たときの基礎の役割を明らかにする点で本質的な手法である。しかしこの手法では、①基礎が有限の断面を持たないため、パイルドラフトの形状や剛性の影響が評価できない、②2次元平面ひずみ条件下での検討のため、パイルドラフトの奥行き方向の杭配置や載荷面積などは正確には表現できない、等の問題点を残している。パイルドラフトの設計では、沈下を許容範囲内に抑えるために必要な、杭の仕様、本数、配置の決定が最重要視されており⁶⁾、基礎形状・剛性の違いが地盤の変形抑止に与える影響は、最も重要な検討課題の一つとなっている。

そこで本論文では、より実際の形でパイルドラ

フトを有限断面を有する弾性要素として表現し、3次元条件下で飽和地盤と基礎間の相互作用を考慮した解析を実施する。そして基礎形式（杭長・杭配置）に併せて、ラフト剛性・上載荷重がパイルドラフトの沈下量に与える影響を示す。なお地盤は砂・粘土互層の自然堆積地盤を想定し、土の弾塑性構成式として、塑性変形に伴う骨格構造⁷⁾（構造・過圧密・異方性）の働き／作用を表現できるSYS Cam-clay モデル（Super/subloading Yield Surface Cam-clay model）⁸⁾を用いる。このモデルは骨格構造の発展則の違いにより砂と粘土の両者の力学挙動を統一的に扱うことができる。モデルの概要は付録1に示す。パイルドラフトでは基礎形式を決定すれば、幾何条件および荷重条件により杭の支持力特性は評価できるが、実際に杭へ伝達される荷重の割合（荷重分担率）は、地盤との相互作用を考慮した変形解析を行って初めて分かるものである⁹⁾。この観点から、本論文では、パイルドラフトの沈下量に併せて杭の荷重分担率にも着目する。また、2次元平面ひずみ条件下での解析結果を示し、3次元条件の解析結果と比較・考察をする。

なお本論文では、具体的な基礎の設計論について論じるのではなく、典型的な砂・粘土のパラメータを用いた互層地盤を想定し検討する。また、基礎は簡単のため弾性体を仮定し、変形の進展に伴う杭の損傷などは表現していない。

2. 杭配置に応じたパイルドラフトの荷重伝達メカニズムと沈下量低減効果・杭の荷重分担率への影響

はじめに、杭配置の異なるパイルドラフトについて、荷重伝達メカニズムの違いに着目し、沈下量低減効果ならびに杭の荷重分担率に及ぼす影響を考察する。なお、以下の解析例では、各種解析結果を強調するために、地盤の圧縮性を若干実際の地盤より高めている。

(1) 解析条件

解析に用いた有限要素メッシュ及び境界条件は図-1に示す。解析は3次元で行い、地盤・基礎・荷重の対称性を仮定して1/4領域を解析対象とした。本論文では8節点アイソパラメトリック要素を用いて3次元変形場を表現し、この要素中心に全水頭を割り当てて水～土連成計算を行う。すなわち、田村流¹⁰⁾・Christian流¹¹⁾に基づいて水～土連成式（連続式）をモデル化する。支配方程式については文献12)と同じなので、本論文では付録2に、3次元条件下で異なる透水係数を有する不均質材料の場合の水～土連成式のモデル化についてのみ示す。

地盤は上層から順に、中密な砂層（層厚:8m）、軟弱粘土層（層厚:24m）および密な砂から成る基礎層（層厚:8m）の粘土・砂互層地盤を想定した。表-1に各層の材料定数及び初期値群を示す。地盤の初

表-1 地盤の材料定数および初期値

	①砂層	②軟弱粘土層	③基礎層
<弾塑性パラメータ>			
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
繰返し状態にある土の 等方正規圧密線の切片 N ($p' = 98\text{kPa}$, $q = 0$ 時の比体積)	1.99	1.97	1.99
ポアソン比 ν	0.3	0.4	0.3
<発展則パラメータ>			
構造劣化指数 a	1.5	1.27	1.5
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 $1/R_0^*$	2.0	10.0	1.0
過圧密比 $1/R_0$	5.0	3.0	20.0
応力比 η_0	0.231	0.375	0.231
異方性 ζ_0	0.231	0.375	0.231
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 ρ_s (t/m^3)	2.65	2.6	2.65

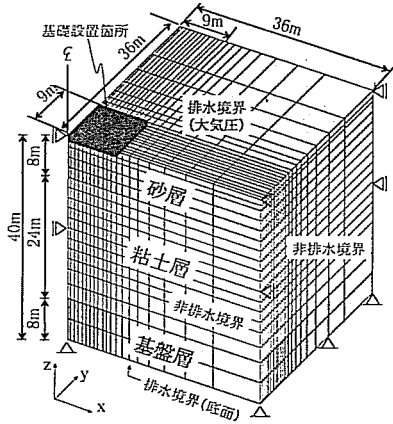


図-1 有限要素メッシュと境界条件 (1/4領域)

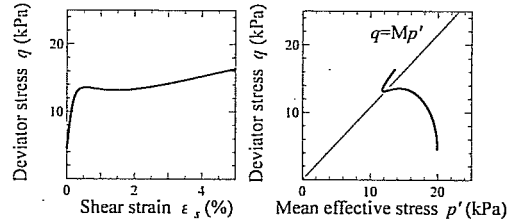
期状態は簡単のため、各層において過圧密比($1/R_0$)、構造の程度($1/R'_0$)、異方性(ζ_0)および応力比(η_0)が一樣であると仮定し、土被り圧に応じて地盤の応力状態と比体積が深さ方向に分布するように決定した(付録3参照)。図-2は、本解析で想定した各層の中央深さにある土要素の、原位置での非排水せん断挙動を示す。上層では中密な砂特有な硬化後の硬化挙動が、中層では過圧密で構造が高位な軟弱粘土の硬化後の軟化挙動、ならびに下層では密な砂の硬化挙動が見られる。水理境界は、地盤の上下両端面は排水境界とし、地表面と表面水位面が一致するように上端面の水圧は常にゼロに、下端面の水圧は初期静水圧分が作用するように設定した。また、地盤の側面は非排水境界とした。

パイルドラフトは、1m厚・18m×18m幅のドラフトに、70cm角の摩擦杭を設定条件に応じて配置した。また、簡単のため弾性体を仮定し、鉄筋コンクリートを参考に表-2の材料定数を用いた。本論文での基礎設置は、簡単のため、実務で行われるような「段階的」設置を考慮せず、基礎該当箇所の土要素を弾性体(パイルドラフト)に置換し、土とパイルドラフトとの重量差を「瞬時に(50秒で)」作用させて圧密計算を行うことで表現した。上載荷重は、等分布荷重を載荷速度1kPa/dayで50日間漸増載荷した後、一定放置とした。

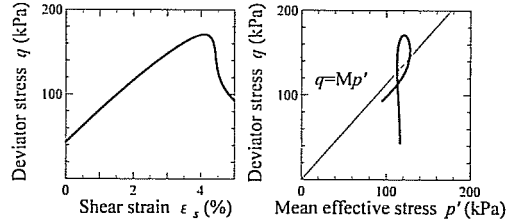
なお本解析では、杭要素と土要素の間に滑りを目的とした特別な要素は導入していないが、次章(図-13)で示すように、地盤特性に応じて構造劣化に伴い「滑り」が生じる場合がある。

(2) 杭配置に応じた沈下量低減効果と荷重分担率の違い

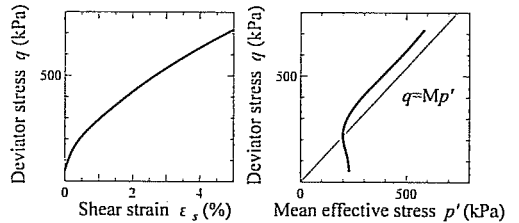
図-3に示す(A)-(K)の11種類の杭配置について、



①砂層(中密な砂)



②軟弱粘土層(過圧密で構造が高位な粘土)



③基礎層(密な砂)

図-2 各層の土要素の非排水せん断挙動

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	0.2
単位体積重量 (kN/m ³)	25.0

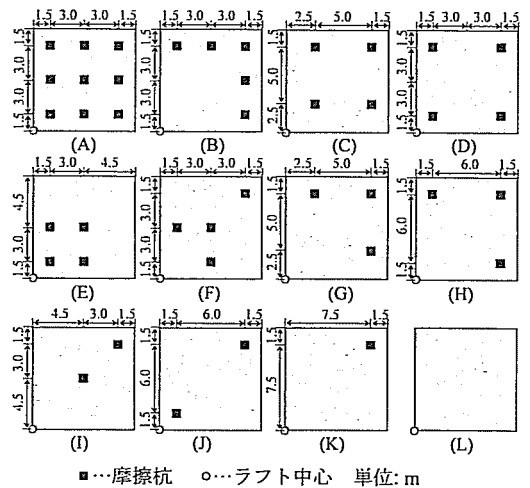


図-3 比較した杭配置 (1/4領域)

杭配置に応じたパイルドラフトの敷設効果を比較する。(A)~(K)は杭長(ラフト上端から杭先端まで)が16mと等しく、杭配置(杭本数)が異なるパイルドラフトである。なお、(L)はラフトのみのべた基礎を示し、これも参照する。表-3は、各杭配置について、(全断面における)杭本数、ラフト中央部における最終沈下量、残留沈下量(載荷終了後の沈下量)、不同沈下量(=[ラフト中央部の最終沈下量]-[ラフト端部の最終沈下量])および杭の荷重分担率を示す。本論文において杭の荷重分担率は、

表-3 杭配置の違いによる比較

杭配置	杭本数	最終沈下量 (cm)	残留沈下量 (cm)	不同沈下量 (cm)	杭の荷重分担率 (%)
(A)	36	6.63	1.27	0.426	94.65
(B)	20	7.49	1.27	0.923	92.48
(C)	16	7.67	1.33	0.676	91.22
(D)	16	7.81	1.34	0.645	90.09
(E)	16	9.91	1.53	-0.479	73.67
(F)	16	8.36	1.38	0.576	86.11
(G)	12	8.43	1.33	1.081	87.06
(H)	12	8.53	1.34	1.048	86.37
(I)	8	10.08	1.42	1.225	75.69
(J)	8	10.35	1.45	0.982	72.49
(K)	4	13.01	1.61	1.958	55.59
(L)	0	20.39	2.31	0.850	0

上載荷重に対する杭とラフト接合部における杭の軸力の合計としている。

パイルドラフトは、(L)べた基礎と比較すると、杭を四隅に各1本配置するだけで(杭配置(K))最終沈下量が約半分低減でき、沈下量低減に有効である。杭本数が多く、より外側に杭が配置された基礎形式ほど、最終沈下量・残留沈下量ともに小さくなるが、その一方で杭の荷重分担率は大きくなる傾向にある。また、ラフト中央部に杭が配置されない場合(杭配置(G),(H),(I),(K))は、杭本数が多くても不同沈下量がラフトのみ(L)べた基礎)よりも大きくなる。杭配置(E)のように杭をラフト中心に集中して配置した場合は、最終沈下量・残留沈下量が大きくなるが、荷重分担率は小さくなり、ラフト張り出し部にたわみ(「負」の不同沈下量)が大きくなる。

次に、このことを杭配置に応じたパイルドラフトの荷重伝達メカニズムを示しながら考察する。特に、杭配置(A),(E),(K)および(L)に着目し、載荷開始から圧密終了時までの地盤内の平均有効応力増分分布を図-4に、比体積増分分布を図-5に、せん断ひずみ分布を図-6に示す。

べた基礎(杭配置(L))では全荷重がラフト直下の地盤浅部に応力が伝達されるのに対し、パイルドラフト(杭配置(A),(E),(K))では摩擦杭を通して杭先端以深の地盤深部に荷重が伝達される。杭をラフ

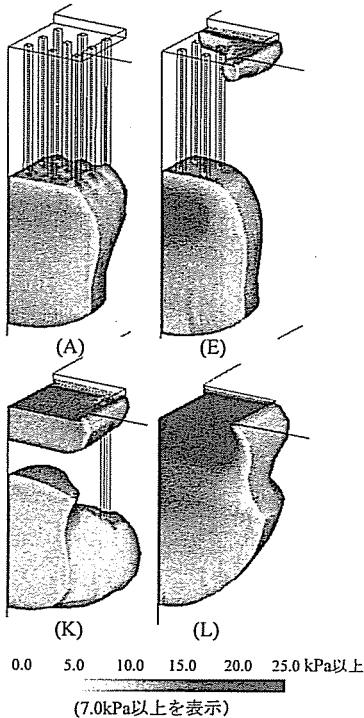


図-4 平均有効応力増分分布 (圧密終了時、基礎周辺を拡大表示)

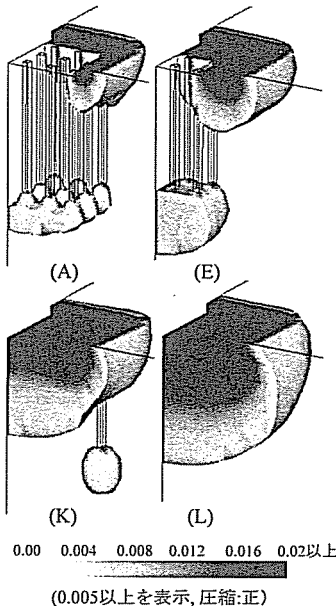


図-5 比体積増分分布 (圧密終了時、基礎周辺を拡大表示)

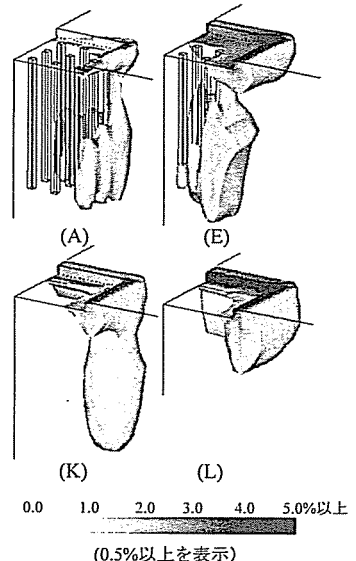


図-6 せん断ひずみ分布 (圧密終了時、基礎周辺を拡大表示)

ト中央に配置した杭配置(E)では、ラフト張り出し箇所であわみが生じ荷重が地表付近にも伝達される。また、杭本数が極端に少ない杭配置(K)でも、杭間の地盤の拘束が小さくラフトの中央部であわみが大きく生じるため、ラフト直下の地表付近の地盤にも荷重が伝達される。

地盤は深部ほど拘束圧が高く、ほとんどの場合、浅部に比べ同じ応力増分を受けた場合でも圧縮量は小さい。このためパイルドラフトは、摩擦杭により上載荷重を拘束圧の大きな地盤深部に伝達すること

で、沈下量低減が効果的になる^{4),5)}。したがって、杭が均等に配置されラフトのたわみが少なく、また杭本数が多い杭配置ほど、杭間の土をより一体化させた状態で荷重が杭先端に伝達されるため、沈下量は小さくなっている。

また図-6より、パイルドラフトでは外側の杭周辺地盤で特にせん断ひずみが卓越しており、杭の摩擦抵抗は外側の杭ほど大きい。このため、杭がより外側に配置され、杭の外周面積が大きな杭配置ほど、杭の荷重分担率が大きく、沈下量は小さくなる。

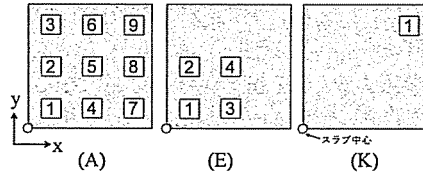


図-7 杭番号

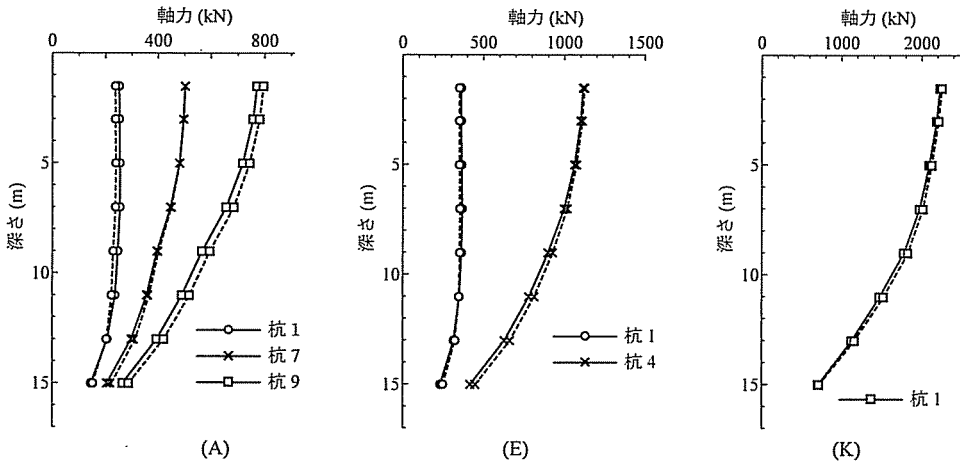


図-8 杭に発生する軸力 (実線: 載荷終了時, 破線: 圧密終了時)

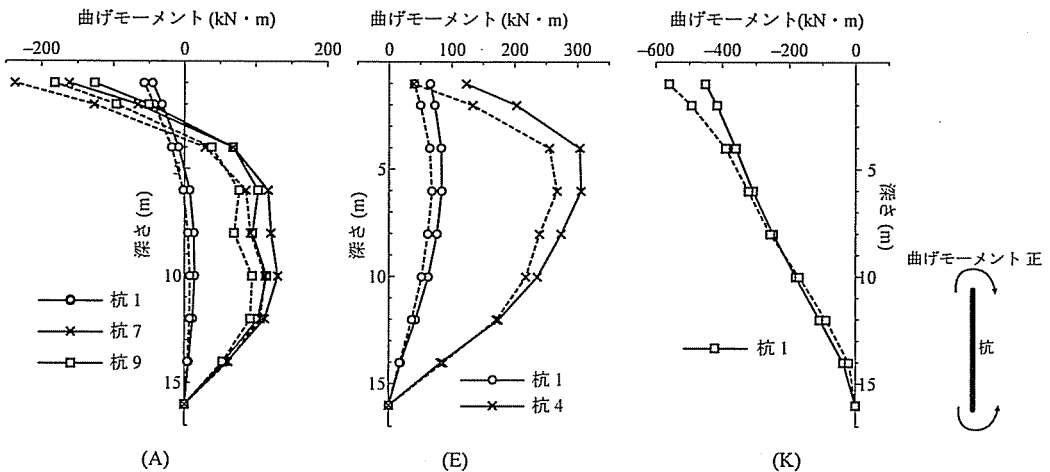


図-9 杭に発生する曲げモーメント (実線: 載荷終了時, 破線: 圧密終了時)

(3) 杭配置に応じた杭の発生部材力の違い

図-8および図-9は杭配置(A),(E)および(K)について、杭に発生する軸力および曲げモーメント分布を示す(各杭配置における杭番号は図-7を参照)。本解析における部材(杭)の曲げモーメントの算定法については、付録4に示す。載荷終了時の値は破線で、圧密終了時の値は実線で表す。今回の解析例では軸力の時間変化は少ないが、曲げモーメントは拘束圧が小さく高圧縮性の地盤浅部ほど変化が大きく、載荷終了時に最大値を示す。外側の杭ほど大きな部材力が発生しており、図-6のせん断ひずみ分布とよく対応している。杭配置(A)および(E)では、杭外周側の土がより圧縮するため正の曲げモーメントが発生するが、一方で(図-4と図-5も参照するとより分かりやすいが、)杭配置(K)では杭間側の土がより大きく圧縮するため負の曲げモーメントが発生する。

なお本解析例で想定した荷重(50kPa)は、杭配置(E),(K)のように杭本数が少ない基礎形式に対しては過大であり、さらに基礎は弾性体と仮定しているため、大きな部材力が発生している。

3. 沈下量低減・杭の荷重分担率に及ぼす諸要因

パイルドラフトの杭長、ドラフトの剛性および上載荷重を系統的に変化させ、これらの事項が沈下量および杭の荷重分担率に及ぼす影響を考察する。

(1) パイルドラフトの杭長の影響

図-10は、杭間隔が異なる杭配置について、杭間隔が3m及び15mの杭配置(A)および(K)をとりあげて、杭長のみを変化させた場合の、最終沈下量、残留沈下量

下量、不同沈下量の低減効果、および杭の荷重分担率を示す。図で不同沈下量は、10倍のスケールに拡大して表示している。杭長0mはラフトのみ(べた基礎)を指し、杭長32mは基盤層まで杭先端が基盤層(密な砂層)まで到達していることから支持杭に相当する。

いずれの杭配置においても、杭が長いほど荷重がより高拘束圧の地盤深部に伝達され、最終沈下量は小さく沈下量低減効果が大きい。また、杭の荷重分担率は、杭長の増加に伴って杭外周と地盤の総接触面積が増加するため、大きくなる。ただし杭配置(K)で粘土層浅部付近に杭が貫入された場合(杭長:8m,10m)は、他の杭長とやや傾向が異なり、最終沈下量が大きく荷重分担率が小さい値となった。またこれらの杭長では、図-11の杭長:10mの場合の沈下速度図が示すように、載荷途中で沈下速度が急激に増加し、「滑っては止まり」という現象を繰り返した。これは杭先端への応力集中に伴い、図-12①に示すように粘土層浅部で構造が乱され($R^* \rightarrow 1$)、図-13①に示すように杭先端部で杭に沿って局所的に大きなせん断ひずみが生じたためである。すなわち本解析では、杭要素と土要素の間に滑りを目的とした特別な要素を用いていないため両者に相対変位は生じないが、地盤特性に応じて構造劣化に伴うひずみの局所化(「滑り」)が生じる場合がある。この杭先端での「滑り」の結果、最終沈下量と荷重分担率に及ぼす杭長の影響が小さくなった。一方、図-12②と図-13②が示すように、杭が十分長い場合には、粘土層における構造の乱れは少なく、杭と周辺土の滑りは生じていない。

載荷終了後の過剰水圧消散に伴う残留沈下量についても、杭が中途半端に短い場合(杭長2m~10m)

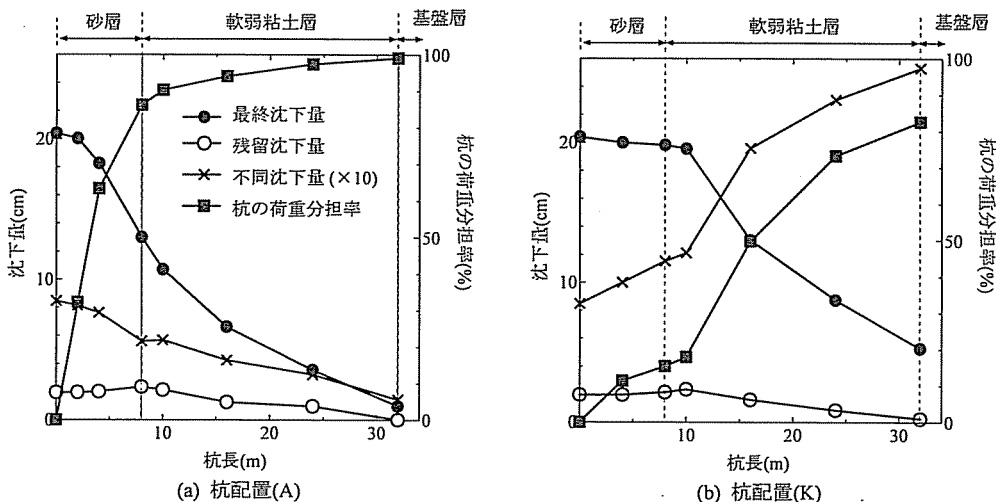


図-10 杭長の影響

には地盤構成の影響を受けていて、杭が（上層の）砂層・粘土層境界に近いほど荷重が低透水性の粘土層浅部にもより大きく伝達され、より大きく発生している。

一方で、杭長と不同沈下量の関係については、両者の配置で大きな違いが見られる。杭がラフト中央に配置されない杭配置(K)では、杭長が増加するにつれ不同沈下量も増加し、杭長32mの支持杭ではラフトのみ(べた基礎)の3倍以上に相当する2.5cmもの不同沈下が生じる。これに対し、杭が中心にも配置された杭配置(A)では、不同沈下量に対する杭長の影響は小さくなっている。

(2) ラフト剛性の影響

表-4は、杭配置(A),(E)および(K)における、ラフトの剛性の影響を示す。杭長はすべて16mである。①の弾性係数が 2.1×10^7 kN/m²の場合は前章までと同一の条件であり、②の弾性係数が 5.7×10^5 kN/m²

の場合は、ラフト厚30cmの剛性に相当する。また図-14は、剛性の低下に伴う各杭の杭頭荷重（ラフトとの接合部における杭の軸力）の変化を示す（各杭配置における杭番号は図-7参照）。

杭配置(A)のように均等に杭を配置した場合は、ラフトの剛性が小さいと、杭の荷重分担率はほとんど変化しないが、最終沈下量・残留沈下量・不同沈下量（ラフトのたわみ）が大きくなる。またラフト中心の内側の杭では杭頭荷重が増加するが、外側の杭では減少し、全体として各杭の杭頭荷重が平均化してゆく。これはラフトの剛性が無限に小さくなれば摩擦杭のみの挙動に近づき、杭の配置場所によらず各杭は均等に荷重を分担することに対応する。

一方、杭が偏って配置された杭配置(E)および(K)では、ラフトのたわみが激しい箇所へ荷重がより大きく伝達され、杭の荷重分担率は下がる。杭配置(E)では、ラフトの剛性が低いとラフト中央の沈下量は逆に減少するが、ラフト端部で大きなたわみが生じ、負の不同沈下量が大きく発生している。

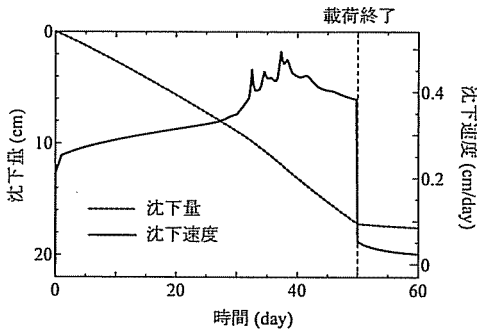


図-11 沈下速度（杭配置(K), 杭長:10m）

表-4 ラフト剛性の影響

ラフト弾性係数 (kN/m ²)	①			②		
	2.1 × 10 ⁷			5.7 × 10 ⁵		
杭配置	(A)	(E)	(K)	(A)	(E)	(K)
荷重分担率 (%)	94.65	73.67	55.59	94.92	67.47	49.97
最終沈下量 (cm)	6.63	9.91	13.01	7.18	9.49	22.40
残留沈下量 (cm)	1.27	1.53	1.605	1.35	1.48	1.63
不同沈下量 (cm)	0.426	-0.479	1.958	1.293	-2.622	14.89

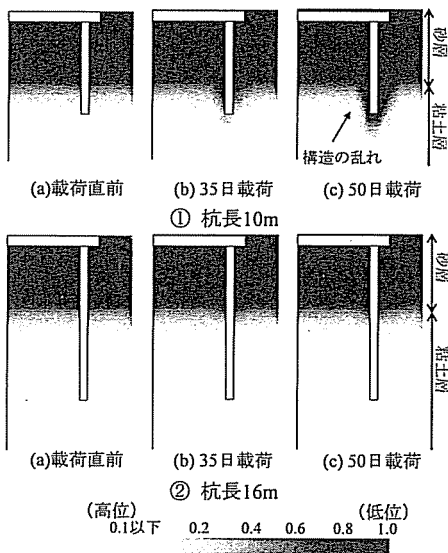


図-12 載荷中の構造 (R') の分布（杭配置(K)）

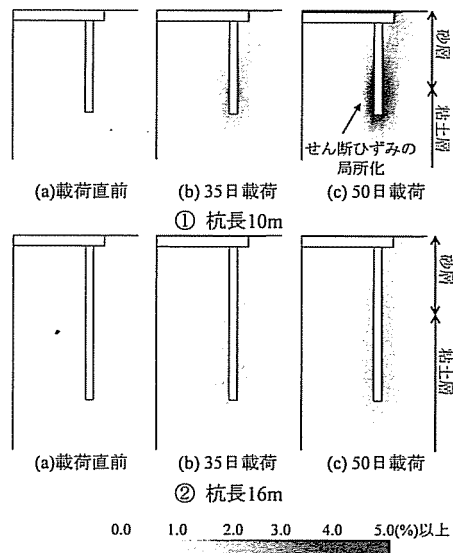


図-13 載荷中のせん断ひずみ分布（杭配置(K)）

(3) 上載荷重の影響

上述の解析では、全解析例において、上載荷重を50kPa（5階建てビルに相当）と設定した。ここでは、パイルドラフトが比較的低層・軽量の建築構造物にも多く採用されつつあることを考慮して、載荷荷重が小さい場合の杭の荷重分担率を示す。

図-15は、杭配置(A)の①杭長4mおよび②16mについて、上載荷重を10,30および50 kPaとした場合の、杭の荷重分担率の経時変化を示す。なお、載荷速度はすべて1kPa/dayと等しいため、載荷終了時刻（図中白丸）が異なる。

載荷中の杭の荷重分担率は、杭が短い場合（①杭長4m）、一度増加を示しその後減少するが、杭が長い場合（②杭長16m）には、増加傾向のみを示す。荷重一定放置中は、杭の荷重分担率の変化は小さくほぼ一定値となる。よって、杭が短い場合には上載荷重を小さくすることでラフトが分担する上載荷重の割合は減少するが、杭が長い場合にはその傾向は逆転する。

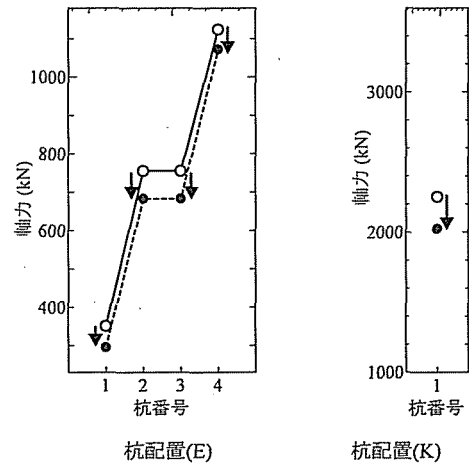
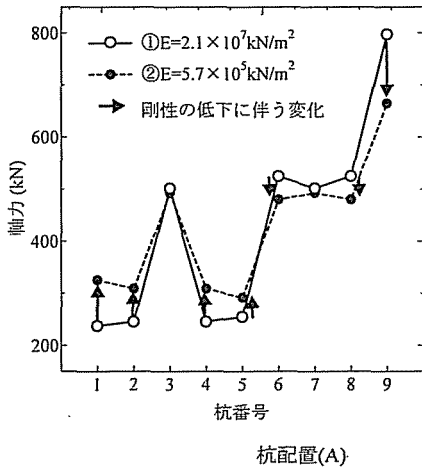


図-14 杭頭荷重の比較

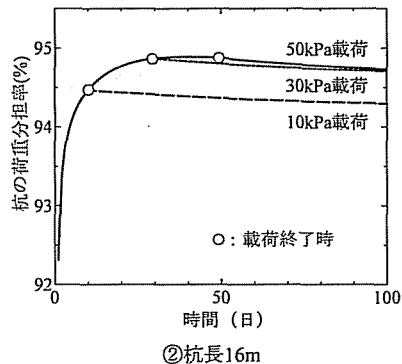
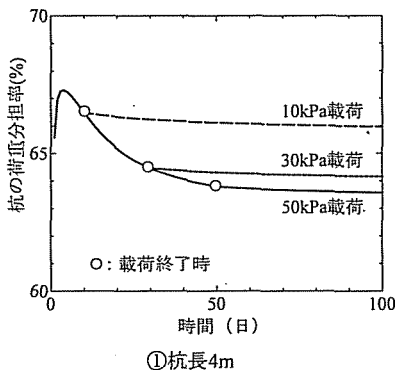
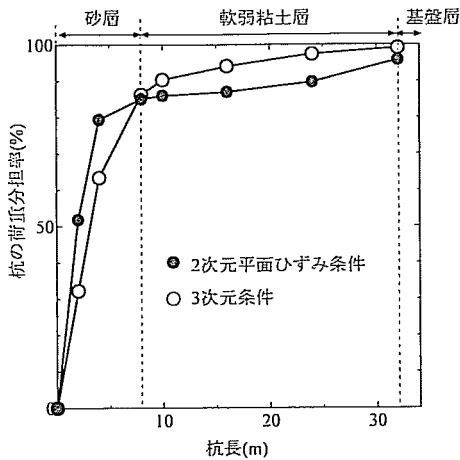


図-15 上載荷重の大きさの影響

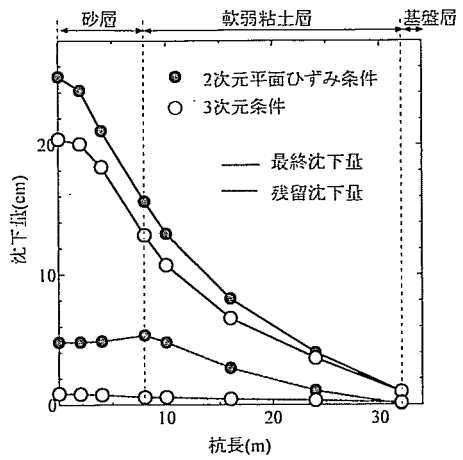
4. 3次元条件と2次元平面ひずみ条件との比較

上述の解析結果は、3次元条件下でのものである。ここでは、2次元平面ひずみ条件（以下では単に2次元条件と呼ぶ）下での解析結果と比較し、パイルドラフトで顕れる3次元効果を示す。なお、2次元条件の解析においても、地盤・基礎・荷重の対称性を仮定して、1/2断面を解析対象とした。ただし、解析に用いる地盤の幅・高さは、3次元条件と同一である。

図-16は、パイルドラフトの摩擦杭を3m間隔で配置し杭長が異なる場合（3次元条件では杭配置(A)に相当）の、最終沈下量、残留沈下量および杭の荷重分担率を示す。全体の傾向は3次元条件下のものとよく類似するが、定量的にやや異なる。2次元条件では、ラフトが奥行き方向に無限に表現されることに相当するため、その奥行き面積だけ過剰に荷重が載荷されることになる。一方で、杭は「板」と



(a) 最終沈下量と残留沈下量



(b) 荷重分担率

図-16 2次元と3次元条件下での解析結果の比較

して表現されるため、3次元条件に比べ過拘束となり、杭が長いほどその影響が強く現れている。今回想定した杭配置では、杭が十分長い場合の最終沈下量については両者の影響が相殺され、2次元・3次元条件でほとんど差がなかった。「杭」の荷重分担率は、2次元条件で一部（杭長10m, 16m）減少し、杭が長くなるほど杭抵抗が増加する様子が表現できない。残留沈下量は、杭として表現される3次元条件に比べ、「板」として表現される2次元条件で、より過剰間隙水圧の消散が遅くなることから、その値は大きくなる。

このように、パイルラフトの数値解析に対しては、2次元条件でも概ねの傾向をつかむことは可能である。しかし、沈下量や杭の荷重分担率に及ぼす、杭配置や載荷面積などの奥行き方向の影響を正確に表現するためには、やはり、3次元条件による、より実際的な表現が必要である。

5. まとめ

パイルラフトを弾性体、地盤を水～土連成材料として、両者の相互作用を考慮した3次元有限要素解析を実施し、パイルラフトの荷重伝達メカニズムに着目しながら、沈下量低減・杭の荷重分担率に及ぼす諸要因について考察した。以下に本論文における解析例より得られた知見を示す。なお、本論文では簡単のため、基礎は弾性体であると仮定したが、杭の損傷等をよりよく評価するためには、弾塑性体などによる表現も必要であると考えている。

- ・パイルラフトは、摩擦杭を通して杭先端で深の

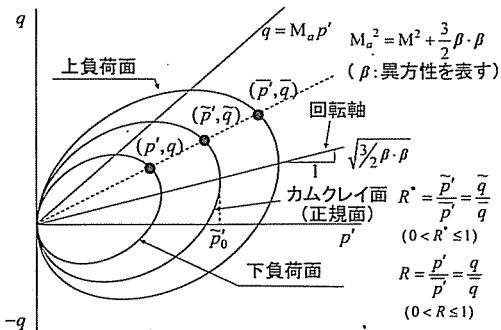
より拘束圧の大きな低圧縮性の地盤に上載荷重を伝達することにより、沈下量低減に効果的である。このため、ラフトのたわみが少なく、杭は均等かつより多く配置された基礎形式ほど、杭間の土を圧縮させることなく杭先端により多くの荷重を伝達するため、沈下量が少ない。

- ・杭の摩擦抵抗は、外周の杭ほど大きく発生するため、より外側に長い杭を配置するほど、沈下抑制効果が高いが、同時に杭の荷重分担率が上がる。ラフトの荷重分担率の増加を期待する場合は、ラフト剛性の低下や杭配置の変化により、ラフトのたわみを大きくする必要がある。
- ・杭がラフト全体に均等に配置されていない杭配置では、ラフトのみ（すなわち、べた基礎）よりも大きな不同沈下（ラフトのたわみ）を生じることがあり、杭が長いほどその影響は大きい。
- ・杭が短い場合、上載荷重が小さいほどラフトが分担する上載荷重の割合は小さい（杭の荷重分担率が大きい）が、杭が長い場合その傾向は逆転する。
- ・地盤と杭配置（本数・長さなどを含む）の条件によっては、載荷途中で沈下速度が増減を繰り返し、最終沈下量が予想以上に大きくなることがある。これは、杭先端で土の構造が乱され、せん断ひずみが局所的に大きく発生したためである。
- ・2次元平面ひずみ条件によるパイルラフトの解析では、杭は板として、また載荷は奥行き方向に無限に表現されるため、杭配置の違いを正確に表現することはできない。しかし、これらの杭と荷重の表現による両効果が相殺し、沈下や杭の荷重分担率に関する特性は、概ね2次元条件でも捉えることが可能である。

付録 1. SYS Cam-clayモデルの概要

(1) 構造・過圧密・異方性の定量化表現と各発展則

自然堆積土は、粘性土でも砂質土でも大抵「構造」が発達した過圧密状態にあり、そのせん断挙動には異方性が現れる。このような状態にある土の変形挙動を表すために、構造を十分になくした練返し状態でおおかつ正規圧密状態の土の弾塑性モデルを「土台」とする。このとき、構造がなく正規圧密状態にある土にも異方性は存在するので、本論文では関口・太田(1977)¹³⁾による異方性を表す応力パラメータ η^* とその発展を記述した回転硬化概念¹⁴⁾を修正Cam-clayモデルに導入してその土台とする。構造の程度は上負荷面概念¹⁵⁾を、過圧密の程度は下負荷面概念¹⁶⁾を導入し定量化する。すなわち、構造が発達した土は同じ間隙比でもCam-clayモデルが表現する練返し土よりも大きな力を支えることができるので、構造の程度はCam-clay面(正規面)の外側に相似な上負荷面を導入し、相似中心を原点 $p'=q=0$ として大きさの相似率を $R^*(0 < R^* \leq 1)$ で定義する。一方、過圧密状態にある土はこの上負荷面よりも内側に応力状態があるので、過圧密状態には上負荷面の内側に下負荷面を導入し、相似中心を原点 $p'=q=0$ としてその大きさの相似率を $R(0 < R \leq 1)$ で定義する。ここに、 p' は平均有効応力、 q はせん断応力で、有効応力 T' (引張：正) を用いて、それぞれ $p' = -\text{tr}T'/3$, $q = 3/2 \|S\|$ ($S = T' + p'I$, I : 等方テンソル, $\| \cdot \|$: ノルムを示す) となる。 R^* は0に近いほど構造が高位で、塑性変形が進むにつれ、構造が低位化(喪失)し1に近づく (R^* の発展則)。 R も0に近いほどより過圧密な土で、塑性変形の進展によって増加し、正規圧密状態へと近づくに従い、1に近づく (R の発展則)。したがって塑性変形が進んで構造が低位化すると同時に過圧密が解消(正規圧密状態へ移行)し、最終的Cam-clay面に一致す



図A-1 3つの負荷面

ると仮定する。これら3つの負荷面の位置関係は、軸対称条件を仮定すれば図A-1のように描くことができるが、Cam-clay面と現有効応力がある下負荷面を式示すと、次式になる。なお、Cam-clay面の形状として、修正Cam-clay modelを用いている。

Cam-clay面：

$$\text{MD} \ln \frac{\tilde{p}'}{p'_0} + \text{MD} \ln \frac{M^2 + \eta^{*2}}{M^2} + \int_0^t J \text{tr} D^p d\tau \quad (\text{A-1})$$

$$= f(\tilde{p}', \eta^*) + \int_0^t J \text{tr} D^p d\tau = 0$$

下負荷面：

$$f(p', \eta^*) + \text{MD} \ln R^* - \text{MD} \ln R + \int_0^t J \text{tr} D^p d\tau = 0 \quad (\text{A-2})$$

ここに、 $D = (\tilde{\lambda} - \tilde{\kappa})/M/(1+e_0)$ はダイレイタンス係数、 M , $\tilde{\lambda}$, $\tilde{\kappa}$ および e_0 は限界状態定数、圧縮指数、膨張指数および初期間隙比で $J = (1+e)/(1+e_0)$ (e は時刻 $t = t$ での間隙比) である。 $-\int_0^t J \text{tr} D^p d\tau$ (圧縮：正) は塑性体積ひずみに相当する。また、異方性を表す η^* は、有効応力、回転硬化変数 β などを用いて次式で表される。

$$\eta^* = \sqrt{3/2} \|\hat{\eta}\|, \hat{\eta} = \eta - \beta, \eta = S/p' \quad (\text{A-3})$$

本論文では、塑性変形の進展に伴う、構造(R^*)、過圧密(R)、異方性(β)の発展則を次式で与える。

$$R^* \text{ の発展則} : \dot{R}^* = JU^* \|D^p\| \quad (\text{粘土}),$$

$$\dot{R}^* = JU^* \sqrt{\frac{2}{3}} \|D_s^p\| \quad (\text{砂}),$$

$$U^* = \frac{a}{D} R^* (1 - R^*) \quad (\text{A-4})$$

$$R \text{ の発展則} : \dot{R} = JU \|D^p\|, \quad U = -\frac{m}{D} \ln R \quad (\text{A-5})$$

$$\beta \text{ の発展則} : \dot{\beta} = J \frac{br}{D} \sqrt{\frac{2}{3}} \|D_s^p\| \|\hat{\eta}\| \left(m_b \frac{\hat{\eta}}{\|\hat{\eta}\|} - \beta \right) \quad (\text{A-6})$$

ここに、 D^p は塑性ストレッチングでストレッチング D の和分解したときの塑性成分、 D_s^p はその偏差成分を表す。また、式(A-6)中 β は β の Dienes 速度¹⁷⁾である。式(A-4)~(A-6)の発展則パラメータ群 a, m, br, m_b はすべて定数で、各々の「役割」から a を構造低位化指数、 m を正規圧密土化指数、 br を回転硬化指数ならびに m_b を回転硬化限界定数と呼ぶ。なお発展則パラメータの値は、室内試験と構成式の応答比較から、典型的な粘土の挙動を示すように構造低位化と異方性の進展が遅く過圧密解消が速くなるような値⁸⁾を用いている。

(2) 関連流れ則と構成式

現有効応力は常に下負荷面 (式(A-2)) 上にあるので、下負荷面について、関連流れ則・Prager の適応条件など、通常の弾塑性諸法則を適用すると、負荷時の塑性乗数は次式となる。

関連流れ則： $D^p = \lambda \frac{\partial f}{\partial T'}$

$$\lambda = \frac{\frac{\partial f}{\partial T'} \cdot \dot{T}'}{J \frac{MD}{p'(M^2 + \eta^{*2})} (M_s^2 - \eta^2)} (> 0) \quad (A-7)$$

ここに、

$$M_s^2 = M_a^2 + br \frac{4M\eta^{*2}}{M^2 + \eta^{*2}} (m_b \eta^* - \sqrt{\frac{3}{2}} \hat{\eta} \cdot \beta) - MD \left(\frac{U^*}{R^*} - \frac{U}{R} \right) \sqrt{6\eta^{*2} + \frac{1}{3} (M_a^2 - \eta^2)^2} \quad (\text{粘土}) \quad (A-8)$$

$$M_s^2 = M_a^2 + br \frac{4M\eta^{*2}}{M^2 + \eta^{*2}} (m_b \eta^* - \sqrt{\frac{3}{2}} \hat{\eta} \cdot \beta) - MD \left\{ \sqrt{2} \frac{U^*}{R^*} \eta^* - \frac{U}{R} \sqrt{6\eta^{*2} + \frac{1}{3} (M_a^2 - \eta^2)^2} \right\} \quad (\text{砂}) \quad (A-9)$$

で、 $M_a^2 = M^2 + \zeta^2$, $\zeta = \sqrt{3/2} \|\beta\|$ である。

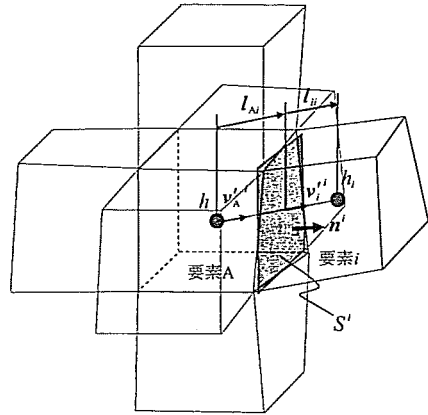
一方、有効応力変化は弾性変形によって生じるとして、非線形 Hooke 則を仮定すると構成式は、次式となる。

$$\dot{T}' = ED - \Lambda E \frac{\partial f}{\partial T'} \quad (A-10)$$

ここに、 E は弾性係数テンソル、 \dot{T}' は T' の Dienes 速度¹⁷⁾、 Λ は塑性定数 λ のストレッチング D による表現である。詳細は文献 8) に譲るが、負荷条件 $\lambda > 0$ から、硬化・軟化の敷居線 $q = M_s p'$ の傾き M_s は、構造低位化、過圧密解消 (と除荷時の過圧密の増加)、異方性の発達・消滅および現有効応力によって変化し、塑性圧縮・膨張の敷居線 $q = M_a p'$ の傾き M_a は異方性の発達・消滅に応じて変化する。

付録 2. 3次元条件下にある不均質材料の場合の水～土連成式 (連続式) のモデル化

間隙水の流れの表現には、田村流¹⁰⁾・Christian流¹¹⁾ を拡張して用いる。すなわち、当該土要素の土骨格の体積増加 (減少) 率は、当該要素に流入 (流出) した間隙水の流量に等しいとして、次式で与える。なおここでは、2次元平面ひずみ条件下にある不均



- h : 要素Aの中心における全水頭
- h_i : 要素iの中心における全水頭
- k_A : 要素Aの透水係数
- k_i : 要素iの透水係数
- v_A' : 要素Aを流れる流速ベクトル
- v_i' : 要素iを流れる流速ベクトル
- n' : 要素Aと要素iの境界面にある2組の互いに向き合う2節点をつなぐ2つのベクトルで作られる平面を考える時、この平面に直行する (要素Aから見た) 外向き単位法線ベクトル
- S' : 要素Aと要素iの境界面の重心を通り、法線ベクトル n' を有する平面にこの境界面を投影した時の面積
- L_{Ai} : 要素Aの重心から見た、要素Aと要素iの境界面の重心への相対位置ベクトル
- L_{ii} : 要素Aと要素iの境界面の重心から見た、要素iの重心への相対位置ベクトル

図A-2 間隙水の流れ

質材料のモデル化¹⁸⁾を参照している。

$$[\text{tr} D dv = \sum_{i=1}^6 \alpha_i (h_i - h)] \quad (A-11)$$

ここに α_i は、図A-2中の各記号を参照しながら次式で与える。

$$\alpha_i = \frac{k_A L_{Ai} \cdot n' \cdot k_i L_{ii} \cdot n'}{k_A L_{Ai} \cdot n' + k_i L_{ii} \cdot n'} S' \quad (\text{総和はとらない}) \quad (A-12)$$

付録 3. 初期地盤の決定方法

初期過圧密比 $1/R_0$ 、初期構造の程度 $1/R'$ および初期異方性 ζ_0 を有した地盤の地表面に等分布荷重 δ が作用し、一次元圧縮状態 (初期側圧係数

$K_0 = (3 - \eta_0)/(3 + 2\eta_0) = \text{一定}$, $\eta_0 (= q_0/p'_0)$: 初期応力比)にある時, 深さ h_i における比体積 $v(h_i) = 1 + e(h_i)$ は, 次式(A-13)で示される.

$$1 + e(h_i) = N_0 - \tilde{\lambda} \ln \frac{1 + 2K_0}{3} \times \left[\delta + \int_0^{h_i} \left\{ \gamma_s \frac{1}{1 + e(z)} + \gamma_w \frac{e(z)}{1 + e(z)} \right\} - \gamma_w \right] dz \quad (\text{A-13})$$

ここに, γ_s :土粒子の単位体積重量, γ_w :水の単位体積重量および $e(z):z=z$ での間隙比である. また, N_0 は見かけの一次元圧縮曲線の切片であり, 異方性の無い状態にある繰返し正規圧密土の等方正規圧密線 (NCL) の切片 N , 傾き $\tilde{\lambda}$ および膨潤線の傾き $\tilde{\kappa}$ を用いて, 以下の式で表される.

$$N_0 = N - (\tilde{\lambda} - \tilde{\kappa}) \ln \left[\frac{M^2 + (\eta_0 - \zeta_0)^2 R'_0}{M^2} \frac{R'_0}{R_0} \right] \quad (\text{A-14})$$

(A-13)式において $e(z)$ を h_i について微分すると,

$$\frac{de}{dh_i} = -\tilde{\lambda} \frac{1 + 2K_0}{3} \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1 + e(h_i)} \exp \left(\frac{e(h_i) + 1 - N_0}{\tilde{\lambda}} \right) \quad (\text{A-15})$$

が得られる. ここで $h_i = 0$ とおくと

$$e(0) = N_0 - 1 - \tilde{\lambda} \ln \frac{1 + 2K_0}{3} \delta \quad (\text{A-16})$$

となり, 地表面における間隙比が求まる. これにより, Newton-Raphson法を用いて $e(0)$ より深さ方向に計算し, 深さ h_i の Gauss 点の $e(h_i)$ を決定する.

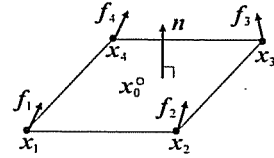
付録4. 部材 (杭) の曲げモーメントの算定法

本論文では, 杭に働く曲げモーメントを, 以下に示すように, 杭断面を構成する節点の等価節点力から算定している.

断面の重心座標を x_0 , また断面を構成する i 番目の節点について座標及び節点力をそれぞれ x_i, f_i ($i=1 \sim 4$) とする (図A-3参照). この時, 断面に作用するこの重心回りの曲げモーメント M は, 次式で与えられる.

$$M = \sum_{i=1}^4 (x_i - x_0) \times f_i \quad (\text{A-17})$$

ここに, “ \times ” は外積記号である. この M から, 断面の法線方向成分 (断面の外向き法線ベクトルを n) を取り除いた, 曲げモーメント M_i を次式のように算出し, そのノルム ($\|M_i\|$) を本論文の図中に示している.



図A-3 断面に作用する等価節点力

$$M_i = (I - n \otimes n) M \quad (\text{A-18})$$

ここに, I は単位テンソル, \otimes はテンソル積である.

参考文献

- 1) Poulos, H.G. and Davis, E. H. : *Pile foundation analysis and design*, John Wiley and Sons, 1980.
- 2) Randolph, M. F. : *Design of piled raft foundations*, *Proc. of the Int. Symp. on Recent Developments in Laboratory and Filed Tests and Analysis of Geotechnical Problems*, Bangkok, pp.525-523, 1983.
- 3) Asaoka, A., Nakano, M., and Noda, T. : *Soil-water coupled behavior of heavily overconsolidated clay near/at critical state*, *Soils and Foundations*, Vol.37, No.1, pp.13- 28, 1997.
- 4) 山田英司, 高稲敏浩, 水野和憲, 大野雅幸, 野田利弘, パイルド・ラフト基礎が設置された地盤の水～土連成弾塑性変形解析, 土木学会論文集, No.659/ III -52, pp.113-128, 2000.
- 5) 三村衛, 野田利弘, 山田英司, 高稲敏浩, 小高猛司, 島津多賀夫, 浅い基礎の設計理論と実際～パイルド・ラフト基礎を中心に～, 土と基礎, Vol.50, No.8, pp.15-17, 2002.
- 6) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 2001 改定.
- 7) 三笠正人: 土の工学的性質の分類表とその意義, 土と基礎, Vol.12, No.4, pp.17-24, 1964.
- 8) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. : *An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils*, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.5, pp.47-57, 2002.
- 9) 堀越研一, 山下清: 杭基礎の鉛直荷重～変位特性の評価法入門, 解析による群杭及びパイルド・ラフトの荷重～変位特性の評価方法 (その2), 土と基礎, Vol.48, No.1, pp.51-55, 2000.
- 10) 赤井浩一, 田村武: 弾塑性構成式による多次元圧密の数値解析, 土木学会論文集, 第269号, pp.95-104, 1978.
- 11) Christian, J. T. : *Undrained stress distribution by Numerical Method*, *Proceeding of ASCE*, Vol.94, SM6, pp.217-232, 1990.
- 12) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T. : *Soil-water coupled behaviour of saturated clay near/at critical state*, *Soils and*

Foundations, Vol.34, No.1, pp.91-105, 1994.

- 13) Sekiguchi, H. and Ohta, H. : Induced anisotropy and time dependency in clays, *Constitutive Equations of Soils* (Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Spec. Session 9), Tokyo, pp.229-238, 1977.
- 14) Hashiguchi, K. and Chen, Z. -P. : Elastoplastic constitutive equations of soils with the subloading surface and the rotational hardening, *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.* 22, pp.197-227, 1998.
- 15) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T. : Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.2, pp.99-110, 2000.
- 16) Hashiguchi, K. : Subloading surface model in unconventional plasticity, *Inter. Journal of Solids and Structures* 25, pp.917-945, 1989.
- 17) Green, A.E. and Naghdi, P.M. : A general theory of an elastic-plastic continuum, *Arch. Rat. Mech. and Anal.*, 18, pp.251-281, 1965.
- 18) Asaoka, A., Noda, T. and Fernando, G.S.K. : Effects of changes in geometry on the linear elastic consolidation deformation, *Soils and Foundations*, Vol.37, No.1, pp.29-39, 1997.

(2004. 5. 21 受付)

DEFORMATION ANALYSES OF PILED RAFT FOUNDATION IN TERMS OF SETTLEMENT REDUCTION AND LOAD SHARING RATIO

Toshihiro NODA, Mutsumi TASHIRO, Toshihiro TAKAINE and Akira ASAOKA

Settlement behavior of piled raft foundations on a natural deposited soil is numerically investigated in terms of the load transfer mechanism. Three-dimensional soil-water coupled deformation analyses are performed by modeling the piled raft as an elastic material and the soil as an two-phase elasto-plastic material. The followings are mainly clarified. Piled raft significantly reduces the settlement because the applied load is transferred through the piles into a deeper soil layer that is less compressive, and the outer piles mobilize the greater friction resistance. The more uniformly and/or the more outside the longer piles are arranged on the raft, the smaller the settlement and the greater the load sharing ratio of piles.