

# パイルド・ラフト基礎に関する研究 (その1)

## 実用的沈下予測解析法と実設計への適用例

佐原 守 鈴木 直子 茶谷 文雄  
後閑 章吉 長屋 圭一 小寺 友博

(本社設計本部設計第九部) (本社設計本部設計第九部) (本社設計本部設計第七部)

## Study on Piled Raft Foundation (Part 1)

### A Practical Settlement Prediction Method and its Applications to Real Design

Mamoru Sahara Naoko Suzuki Fumio Chatani  
Shohkichi Gokan Keiichi Nagaya Tomohiro Kodera

#### Abstract

A piled raft foundation supports a building by the ground under the rafts and under pile heads. The settlement behaviors are thus very complex. Settlement analyses should consider the interaction effect of piles-ground-rafts and the re-distribution effect of the load due to raft rigidity. This report proposes a practical settlement prediction method that handles these complex behaviors. It shows two analysis examples where the proposed prediction method is applied to two real designs.

#### 概要

パイルド・ラフト基礎は、ラフト直下の地盤と杭の両方で建物を支持する基礎形式である。その沈下挙動を予測するためには、杭・地盤・ラフトの相互作用効果およびラフト剛性による接地圧の再配分効果を考慮する必要がある。本報では、このような複雑な沈下挙動を扱える実用的沈下予測解析法を提案するとともに、提案した解析法の実設計への適用例を2件示す。これらの適用結果から得た主要な研究成果は次の2点である。1.建物の地下部を逆打ち工法によって構築する場合、逆打ち用の杭を本設杭とするパイルド・ラフト基礎として設計すると、同杭を仮設杭として扱う直接基礎としての設計と比較して、ラフトをスリム化できる。2.大きな圧密沈下が発生する軟弱粘性土地盤においても、パイルド・ラフト基礎の適用が可能である。特に、建物の平面位置に応じて摩擦杭の長さを適切に調整することによって、建物の不同沈下量を抑制することができる。

#### 1. まえがき

建物の基礎形式は、直接基礎と杭基礎に大別される。したがって、従来、直接基礎で建物荷重を支持不能であれば、杭基礎を採用するのが一般的であった。しかし、近年、ラフト直下の地盤と杭の両方で建物を支持するパイルド・ラフト基礎と呼ばれる基礎形式が、不同沈下の抑制と基礎のスリム化を可能とする手段として注目されている。いわば、パイルド・ラフト基礎は、直接基礎と杭基礎の中間的な基礎形式であり、その沈下挙動を予測するためには、地盤を介してのラフトと杭の相互作用効果を評価する必要がある。

本報(その1)では、はじめに、パイルド・ラフト基礎の沈下挙動を予測可能な実用的解析法を提案し、FEMによる解析結果と比較検討してその有効性を検証する。次に、代表的な2種類の地盤・建物条件下において、パイルド・ラフト基礎を採用した実設計例を取り上げ、上記の解析法による沈下挙動、杭の軸力の深度分布および杭・ラフトの荷重分担等の基礎の挙動に関する検討結果を示す。第1の例は、堅い固結シルト層に支持させた超高層集

合住宅を逆打ち工法で施工する場合の実設計例である。これまで、建物完成後は仮設杭として設計上その存在を無視していた逆打ち用の杭(以降、逆打ち杭と略記)を本設杭として扱い、パイルド・ラフト効果を考慮している点と、施工過程に応じた荷重条件を考慮に入れている点に特徴がある。第2の例は、軟弱粘性土層に支持させた平屋倉庫の実設計例である。圧密沈下量の大きくなる建物中央部を長い摩擦杭で、沈下量の小さくなる隅角部および辺部を短い摩擦杭で支持させ、不同沈下量の抑制を図っている点に特徴がある。

次報(その2)では、パイルド・ラフト基礎の地震時挙動、および実用的耐震設計法について示す。

#### 2. 実用的沈下予測解析法

##### 2.1 予測解析法の概要と特徴

杭が鉛直荷重を受けて地盤中に貫入するとき、杭近傍の地盤は大きく変形して強非線形状態に至るが、その外周部の地盤は変形が小さく弾性状態に近い。このような杭・地盤・ラフト間の相互作用を考慮に入れた解析法と

して、Mindlinの第1解を拡張・応用する解析法がある。提案する実用的沈下予測解析法はこの解析法をさらに拡張したもの(以降、Mindlin解拡張モデルと略記)であり、以下の特長がある。

- 1)一般的なMindlin解拡張モデルが自立群杭を対象とした杭群・地盤系のみを扱っていることに対して、本モデルはラフトも含めたパイルド・ラフト基礎系全体を扱うことが可能<sup>1), 2)</sup>
- 2)杭周面～杭周地盤間にパイリニア型(non-linear)の非線形ばねを、また杭先端～杭先端直下地盤間にトリリニア型(non-linear)の非線形ばねを組入れて、線形領域から強非線形領域に至るまでの一連の挙動を扱うことが可能<sup>3)</sup>
- 3)多層地盤を扱うことが可能<sup>4)</sup>
- 4)ラフト剛性による接地圧の再配分効果を考慮可能<sup>2)</sup>

提案する実用的沈下予測解析法全体のフローをまとめて、Fig. 1に示す。Fig. 1中の「Mindlin解拡張モデルによる解析」の具体的な内容を、上記1)-3)の特徴に応じて、以降の2.1.1～2.1.3に示す。また、Fig. 1中の「格子梁モデルによる解析」の部分は上記4)の特徴に相当する。この内容を2.1.4に示す。

対象とすべき沈下量が即時沈下量の場合には、上記の実用的解析法をそのまま適用すればよい。圧密沈下量も考慮すべき場合には、即時沈下量の解析結果で得た各粘性土層中の増加地中応力を用い、Terzaghiの一次元圧密理論に適用して圧密沈下量を算定し、これを即時沈下量に加算した沈下量を扱い、Fig. 1に示すフローと同様の手順で解を算定する。

2.1.1 解析法の基本的な考え方 群杭中の各杭を半無限弾性地盤内の梁にモデル化し、Fig. 2に示すように、杭、地盤およびラフトを適切な間隔で要素に分割した解析モデルを想定する。ラフトは杭の中心を通る縦横線で区分される矩形要素に分割する。なお、このモデルではラフトの剛性は無視しているため、剛性の影響は後述の

$$\sum_{J=1}^{N+1} \sum_{L=1}^M W(I, K, J, L) F(J, L) + \sum_{H=1}^{NL} WL(H, K, I) Q(H) = \sum_{J=1}^N WP(I, K, J, K) F(J, K) + \sum_{J=1}^{N+1} \sum_{L=1}^M W(N+1, K, J, L) F(J, L) + WP(I, K, 0, K) R_0(K) \dots (1)$$

$$\sum_{J=1}^{N+1} F(I, K) = R_0(K) \dots (2)$$

- $W(I, K, J, L)$  : L杭のJ要素に単位荷重が作用した際にK杭のI要素中心位置における地盤の鉛直変位量
- $F(J, L)$  : L杭のJ要素に作用する杭周面摩擦力
- $WL(H, K, I)$  : H番目のラフトに単位分布荷重が作用した際にK杭のI要素中心位置における地盤の鉛直変位量
- $Q(H)$  : H番目のラフトに作用する等分布荷重
- $WP(I, K, J, K)$  : K杭のJ要素に単位荷重が作用した際のK杭先端部とI要素間の杭の軸圧縮量
- $W(N+1, K, J, L)$  : L杭のJ要素に単位荷重が作用した際にK杭先端直下における地盤の鉛直変位量
- $WP(I, K, 0, K)$  : K杭頭部に単位荷重が作用した際のK杭頭部とI要素間の杭の軸圧縮量
- $R_0(K)$  : K杭頭部に作用する荷重
- $N, M, NL$  : 杭の要素分割数、杭本数、ラフト数(添字中N+1および0は、杭先端部および杭頭部を示す。例えば、 $F(N+1, K)$ はK杭の先端抵抗力を示す。)

Fig. 2 Mindlin解拡張モデル  
Analytical Model Applied Mindlin's Solution

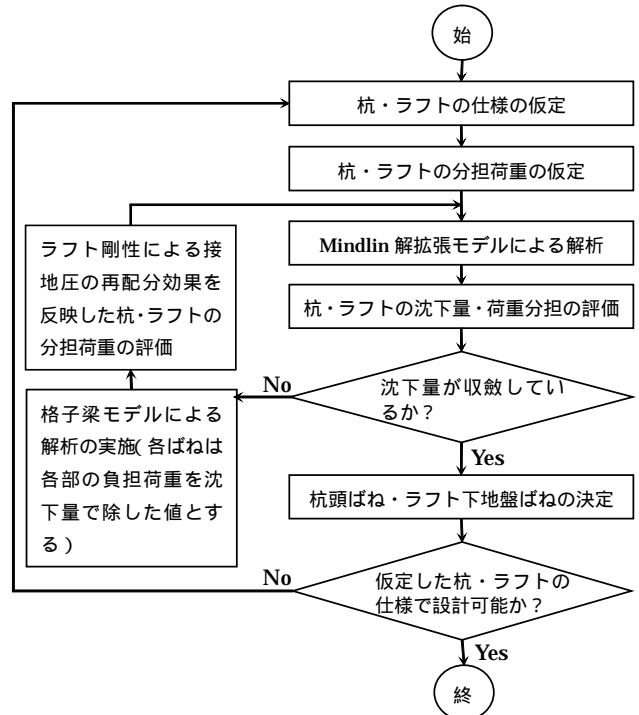
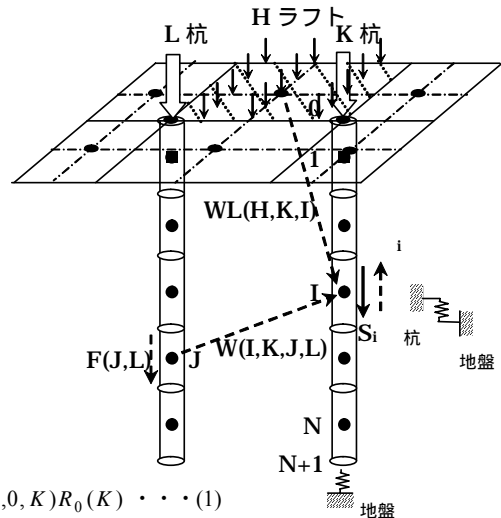


Fig. 1 実用的沈下予測解析法全体のフロー  
Flowchart of a Practical Prediction Method of Settlement



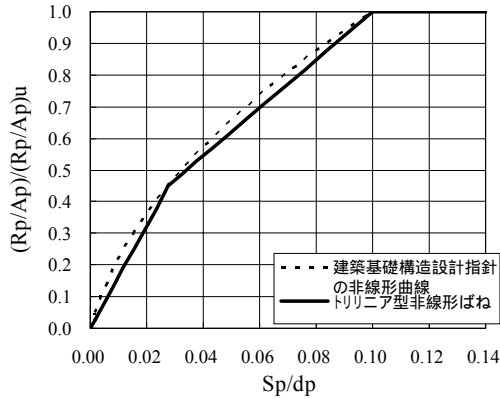


Fig. 3 杭先端地盤ばねの非線形性  
Non Linearity of Pile Tip Spring

2.1.4に示す方法によって評価する。

初めに, Fig. 2においてパイルド・ラフト基礎中の任意の杭, K杭に着目する。K杭のI要素上下端面の軸力および杭周面摩擦力の作用によって, その要素に軸圧縮が生じ, かつ沈下が生じて釣合った状態を想定する。この状態において, K杭の各要素の沈下量を杭頭変位, 杭先端抵抗力および杭周面摩擦力で表す式, および杭頭荷重が杭周面摩擦力と杭先端抵抗力の和に等しいとする力の釣合い式を求める。

次に, K杭の周囲に位置する任意の杭, L杭とラフトによるK杭への影響を評価する。L杭のJ要素に作用する周面摩擦力は, これと等価な地盤内応力として伝播すると共に, ラフトに作用する地盤反力も地盤内応力として伝播して, 相互作用効果が生じる。これらの地中応力によってK杭のI要素において発生する地盤変位を, Mindlinの第1解を用いて評価する。各杭要素の変位とその要素に接する地盤要素の変位が一致すると仮定すれば, K杭のI要素における変位の適合式は, Fig. 2中の式(1)で表される。左辺は地盤の変位を, 右辺は杭の変位を表している。ラフトから杭位置の地盤への影響は左辺第二項で表される。式(2)はK杭全体の力の釣合い条件を示し, 左辺は杭周面摩擦力と杭先端抵抗力の和を, 右辺は杭頭荷重を示す。

全ての杭要素において, このような連立方程式を組み立て連立させて解を求めると, 各杭要素における軸力, 摩擦力および変位などを求めることができる。

2.1.2 杭周面～杭周地盤間および杭先端～杭先端直下地盤間の非線形挙動 前項2.1.1に示した境界条件では杭周面～杭周地盤間の非線形挙動を表現することができないため, ここでは杭周面～杭周地盤間に, 仮想のバイリニア型の非線形ばねを設けることによって, これらの非線形挙動を表現できるように解析法を拡張している。すなわち, 杭要素変位と地盤要素変位の差の相対変位が, 与えたバイリニア型の関係を満足するように繰り返し収斂計算を行い, 連立方程式を解く。

同様に, 杭先端～杭先端直下地盤間にも仮想のトリリニア型の非線形ばねを設け, これらの非線形挙動を表現できるように解析法を拡張している。Fig. 3に, 建築基

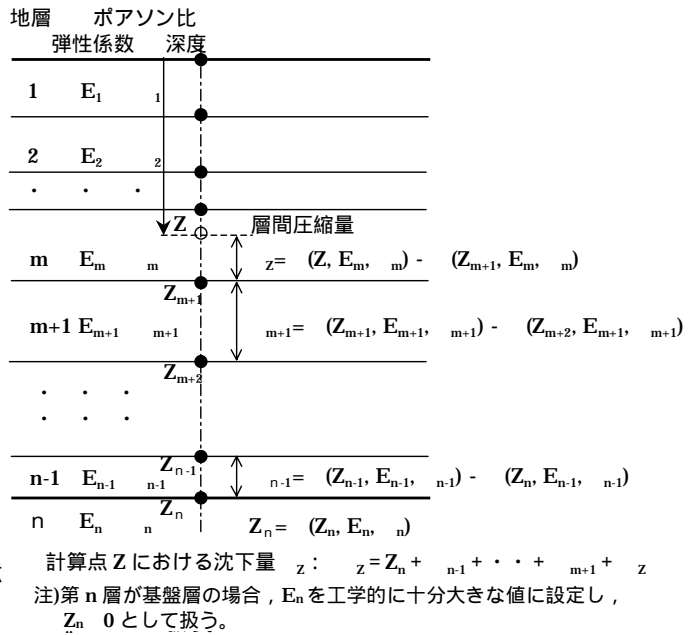


Fig. 4 多層系地盤における近似計算法  
Approximation Method in Multi-layer Stratum

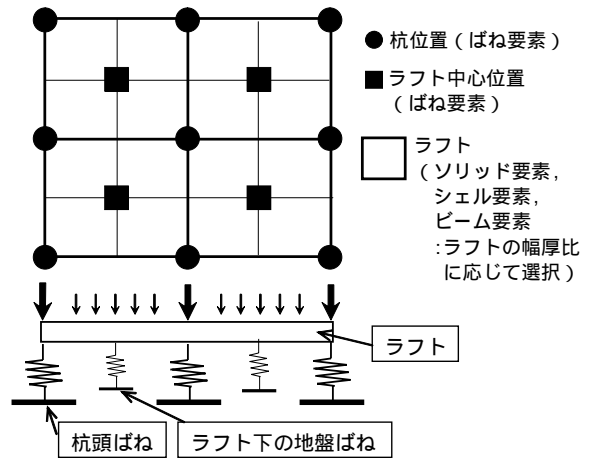


Fig. 5 格子梁モデル  
Grid Beam Model

礎構造設計指針(2001)に採用されている場所打ちコンクリート杭の杭先端支持力度～杭先端沈下量の関係を点線の曲線で示す。すなわち, 杭先端直下地盤の極限支持力度 $(R_p/A_p)u$ は, 杭先端沈下量 $Sp$ が杭径 $dp$ の10%に達した時点で発生するとみなす。ここでは, この指針の曲線を参考にして, Fig. 3中の太線で示すようなトリリニア型非線形ばねを採用している。

2.1.3 多層地盤への拡張 Mindlinの第1解は, 均質な半無限弾性地盤を対象とした解であることから, 多層地盤へ拡張・適用する場合には何らかの工夫が必要である。Mindlin解に基づく方法を多層地盤へと拡張・適用する方法は, 種々提案されているが, 本解析法ではその利便性を考えて, Fig. 4に示すような重ね合わせの原理を用いて多層系地盤へ拡張する近似計算法を採用している。すなわち, Fig. 4中の深度 $Z$ における沈下量  $z_z$ は,  $Z$ 以深の各

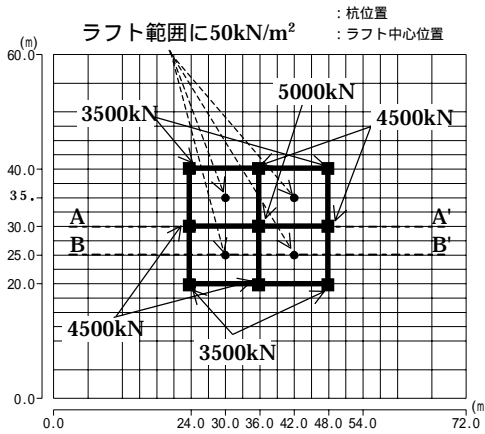


Fig. 6 杭およびラフトの平面配置図  
Plan of Piles and Rafts

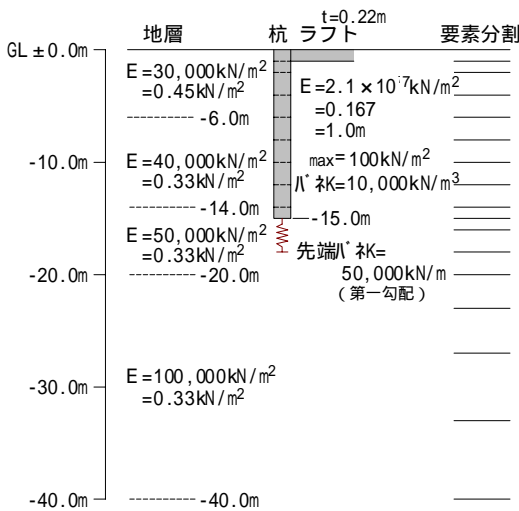


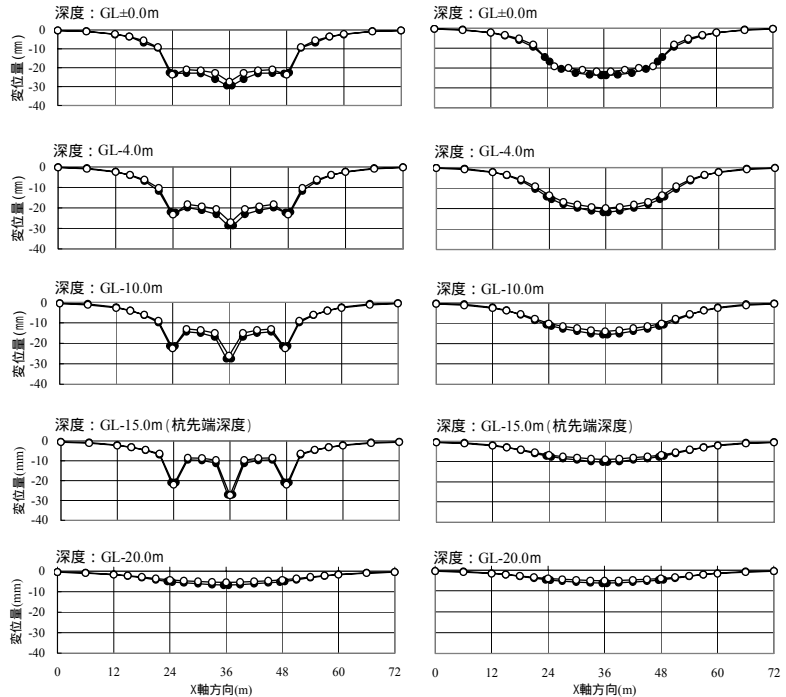
Fig. 7 地層構成・杭およびラフト  
Soil Profile and Piled Raft Foundation Section

地層間に発生している圧縮量の総和 ( $Z = Z_n + Z_{n-1} + \dots + Z_{m+1} + Z$ ) と考える。例えば、 $Z_{n-1}$  は  $n-1$  番目の地層間で発生している圧縮量であり、これは  $n-1$  番目の地層上端で発生している絶対沈下量 ( $Z_{n-1}, E_{n-1}, \gamma_{n-1}$ ) から  $n-1$  番目の地層下端で発生している絶対沈下量 ( $Z_n, E_n, \gamma_n$ ) を差し引いた値である。

2.1.4 ラフトの剛性による接地圧の再配分効果

本効果を評価するため、Fig. 5に示す解析モデルを設定する。図中の  $\square$  はラフトである。○は杭位置、□は杭に囲まれたラフトの中心位置であり、それぞれの位置にはばね要素を設ける。計算手順は以下の通りである。

- 1) Fig. 2の解析モデルにおいて、杭とラフトの分担荷重を仮定し、それぞれ集中荷重、分布荷重として与えて、各杭頭および各ラフト中心位置の沈下量を求める。
- 2) 各杭のばね剛性および各ラフト下の地盤のばね剛性を計算する。杭のばね剛性は杭頭荷重を沈下量で除し、また、ラフト中心位置の地盤のばね剛性はラフトの分担面積に加わる全荷重をラフト中心位置の沈下量で除すことによって求める。



(a)A-A'断面(杭芯部) (b)B-B'断面(杭と杭の中間部)

Fig. 8 沈下量分布図(○実用的解析法, FEM)  
Settlement Distribution (○Practical Method, FEM)

- 3) 2)で求めたばね剛性をFig. 5に示す格子梁モデル中のばねに与えて建物荷重を作用させ、ばね反力を計算する。
- 4) Fig. 2の解析モデルにおいて、3)で求めたばね反力を荷重として与え、沈下量を再度計算する。杭頭荷重は杭位置のばね反力を荷重とし、ラフト部の分布荷重はラフト中心位置のばね反力をラフトの分担面積で除した値とする。
- 5) 2)から4)の計算を、沈下量が収斂するまで行い、収斂値を解として採用する。

2.2 解析法の適用性の検討

提案した実用的沈下予測解析法の有効性を検証するために、FEMによる解析結果との比較・検討を行う。FEMによる解析は、汎用構造解析プログラムABAQUSを用いた。解析の対象としたパイルド・ラフト基礎の概要と荷重条件をFig. 6に、地層構成、杭長等をFig. 7に示す。

Fig. 6に示す杭芯部を通るA-A'断面および杭と杭の中間部を通るB-B'断面における沈下量分布を、各深度毎に比較してFig. 8に示す。両解析結果は概ね良く対応している。杭芯部を通るA-A'断面のラフト直下では、ラフトの存在により杭と地盤がほぼ一体となって挙動するため、沈下分布は下に凸の滑らかな形状を示す。しかし、深い位置では、杭が地盤中に貫入する挙動が卓越するため、杭の沈下量が大きくなり、地盤との相対変位は杭先端部で最大となる。また、杭先端部より深い位置では、沈下分布は再び滑らかになっている。一方、杭間部を通るB-B'断面については、杭の影響が小さくなるため、いずれの深さにおいても滑らかな沈下分布を示している。

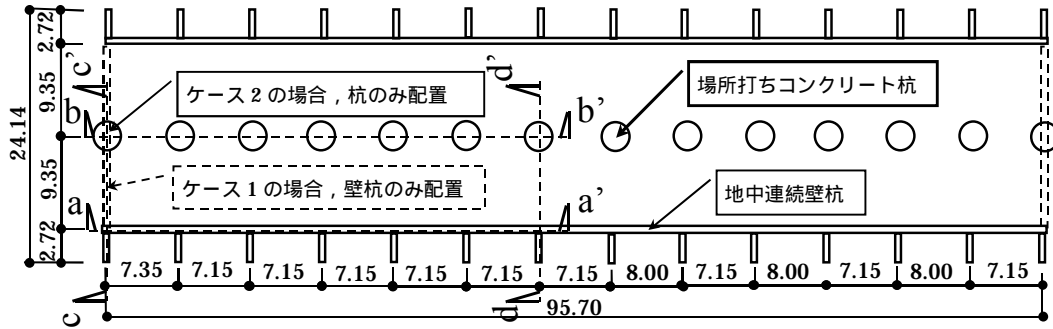


Fig. 9 建物平面図 (適用例1)

Table 1 解析ケース (適用例1)

ケース	ラフト打設時の地上階数	ラフト打設直前の荷重	ラフト打設後から竣工時までの荷重の増分	杭		ラフト
				内部	外周部	
1	10F	300kN/m <sup>2</sup>	290kN/m <sup>2</sup>	拡底杭 軸部径2.5m 拡底径3.5m 長さ7.0m	壁杭 厚さ0.7m 長さ15.0m	厚さ2.0m
2	5F	160kN/m <sup>2</sup>	430kN/m <sup>2</sup>	直杭 直径2.8m 長さ7.0m	壁杭 厚さ0.7m 長さ9.5m	厚さ2.0m

Table 2 杭・ラフトの荷重分担率(適用例1) (単位%)

分担位置		ケース1			ケース2		
		ラフト打設直前	ラフト打設後～竣工間	合計	ラフト打設前	ラフト打設後～竣工間	合計
中杭	杭	100	5	54	100	13	35
	ラフト	0	95	46	0	87	65
壁杭(辺)	杭	100	43	65	100	41	56
	ラフト	0	57	35	0	59	44
壁杭(隅)	杭	100	43	66	100	36	50
	ラフト	0	57	34	0	64	50
建物全体	杭	100	46	73	100	44	62
	ラフト	0	54	27	0	56	38

以上、提案する実用的沈下予測解析法による解析値は、FEMによる解析値とほぼ対応し、また、合理的な沈下性状を示すことがわかった。

### 3. 実設計への適用例

#### 3.1 堅い固結シルト層に支持させた超高層集合住宅

逆打ち工法によって直接基礎を施工する場合、従来、建物完成後の逆打ち杭は仮設杭として扱い、その存在を無視し、あくまでも直接基礎として設計していた。さらに、順打ち工法を採用した場合と同様に、全建物荷重がラフトに作用すると考えてラフトを設計していた。既往の逆打ち杭や逆打ち支柱の軸力の実測結果<sup>5)-7)</sup>によると、床付け時のラフトを打設するまでに、構築された建物荷重は全て逆打ち杭を介して、下部地盤に伝播している。一方、ラフト打設後から竣工までに構築される部分の建物荷重は、逆打ち杭とラフト直下の地盤で分担される。すなわち、ラフトは全建物荷重に対して設計する必要はなく、ラフト打設後に、ラフト下の地盤が分担する建物荷重だけに対して設計すればよい。なお、逆打ち杭を仮設杭として無視する設計は安全側ではあるが、逆打ち杭

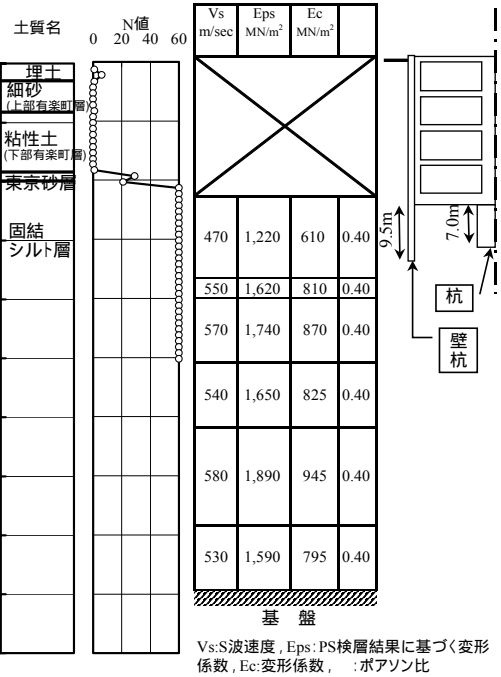


Fig. 10 建物断面図および土質柱状図 (適用例1) Underground Floor Section and Soil Profile (Design 1)

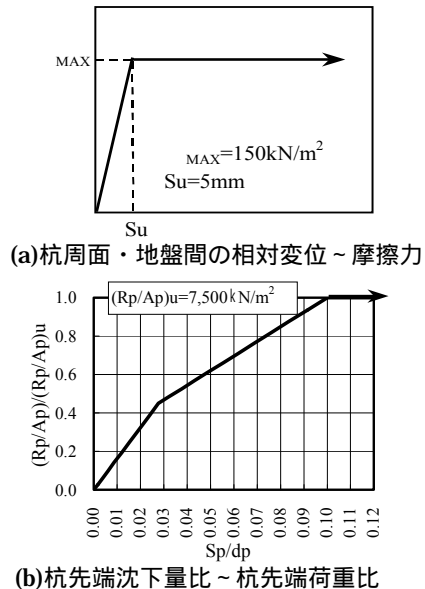


Fig. 11 杭周面～杭周地盤間および杭先端～杭先端直下地盤間の非線形性 (適用例1) Non Linearity of Skin Friction Spring and Pile Tip Spring

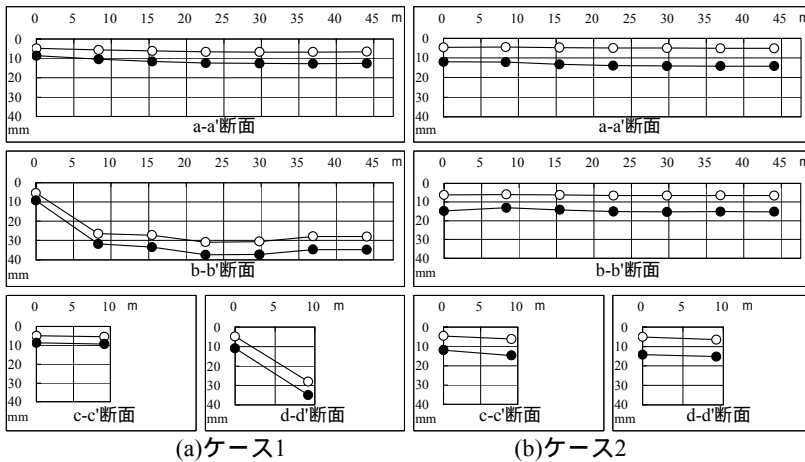


Fig. 12 沈下量分布図(適用例1) (○:ラフト打設直前時, 竣工時)  
Settlement Distribution (Design 1)

とラフト下の地盤の荷重分担の実情を無視した非合理的な設計となる。

ここでは、堅い固結シルト層に支持させた超高層集合住宅の基礎設計に、このような考え方を適用し、その沈下挙動を解析した結果から得た沈下量分布、杭軸力の深度分布、杭およびラフトの荷重分担の性状を示す。

建物は、RC造地上28F、地下4Fの超高層集合住宅であり、地下部分の平面寸法は96m×19mである。地下部分の平面をFig. 9に、地下部分の断面および土質柱状図をFig. 10に示す。解析は、地上部を10階まで構築した段階で掘削を完了させてラフトを打設するケースと、5階でラフトを打設するケースの2ケースについて行った (Table 1参照)。解析に用いた地盤定数をFig. 10に、杭周囲摩擦ばねおよび杭先端地盤ばねの地盤定数をFig. 11に示す。Fig. 11中、 $\gamma_{MAX}$ ,  $S_u$ ,  $R_p$ ,  $A_p$ ,  $S_p$ ,  $d_p$ は、それぞれ極限摩擦力度、極限摩擦力度時の変位量、杭先端荷重、杭先端面積、杭先端沈下量、杭先端径を示す。両解析ケースの沈下量分布、杭軸力の深度分布および杭・ラフトの荷重分担率を、それぞれFig. 12, Fig. 13およびTable 2に示す。

まず Fig. 13(a)に示すケース1におけるラフト打設直前および竣工時の杭軸力の深度分布を見る。中杭の軸力の深度分布は、同一形状を保ったまま水平に移動しており、杭周囲摩擦力が既に極限值に達していることが分かる。なお、 $Z=4m \sim 7m$ 間の軸力に変化が見られないが、これはこの部分が拡底部に相当しており、解析上摩擦力を無視して扱っているためである。よって、杭先端にかなりの軸力が伝達して中杭頭部の沈下量は約3cmに達している。一方、建物外周部の壁杭の摩擦力は極限值には達しておらず、壁杭頭部の沈下量は非常に小さい。したがって、両者間で発生する変形角が $2.54/1,000$ とやや大きな値となる。この変形角を建物の剛性を上げて抑制する対策を試みると、著しく不経済な断面設計を強いられた。

ついで、この不同沈下対策としてTable 1に示すケース2の条件における解析を行った。このケースでは、ラフト打設直前に発生する不同沈下量を抑制するために、拡底杭を直杭に変更した上で直径をやや大きくし、建物外周

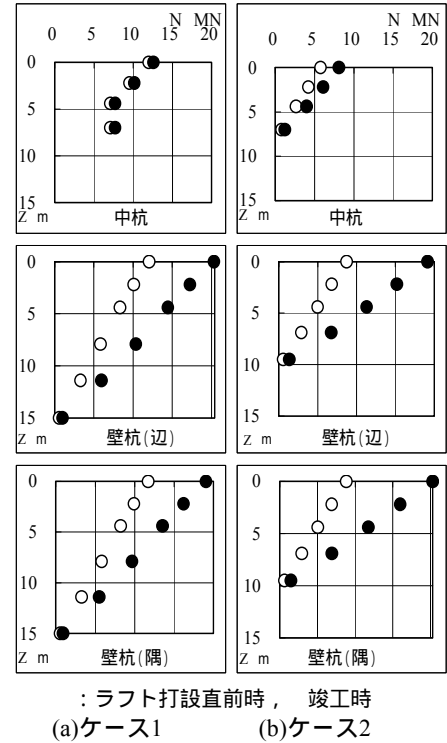


Fig. 13 杭軸力の深度分布(適用例1)  
Depth Distribution of Pile Axial Force (Design 1)

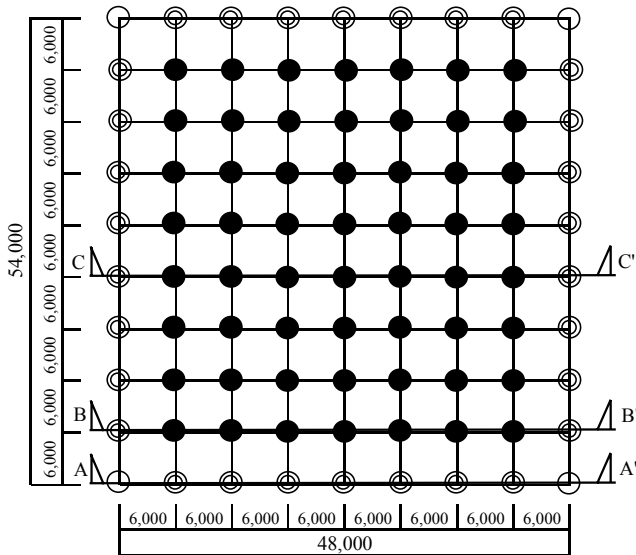
部の壁杭の長さを短くした。さらに、ラフト打設直前の杭頭負担軸力を低減するため、ラフト打設時の地上階数が10階から5階になるよう施工工程を変更した。このような変更によって、Fig. 12(b)に示す結果のように、発生する変形角を $0.03/1,000$ にまで抑制可能であることを明らかにした。

逆打ち杭によるパイルド・ラフト効果を無視した場合に必要なラフト厚は2.5mであり、考慮した場合のラフト厚は、ラフトに対する地盤反力が軽減されるため、2.0mとなる。このように、パイルド・ラフト効果を考慮することにより、基礎梁やラフト厚の低減、それに伴う掘削深さ、掘削土量の低減を見込むことができる。このような基礎のスリム化が環境負荷の低減につながることは明らかである。

### 3.2 軟弱粘性土層に支持させた倉庫

建物の平面における接地圧分布が一様であっても、建物の沈下量は中央部で最も大きく、辺部、隅角部の順に小さくなる傾向がある。このような不同沈下の低減を図るため、即時沈下に関しては、建物各部の荷重の大きさに応じて、長さの異なる摩擦杭を採用した実例があり、実測によってその効果も確かめられつつある<sup>8)9)</sup>。また、圧密沈下に関しては、浅香ら<sup>10)</sup>が同一杭長の摩擦杭を浅層に堆積する正規圧密粘土層内を貫通させて、深層の過圧密粘土層内にまで到達させたパイルド・ラフト基礎を採用した例を報告している。

ここでは、全層正規圧密状態にある軟弱粘性土層上に建つ平屋倉庫の基礎に、摩擦杭の長さを変えたパイル



杭長17m, 杭長14m,○杭長10m  
Fig. 14 建物平面図(適用例2)  
Building Plan (Design 2)

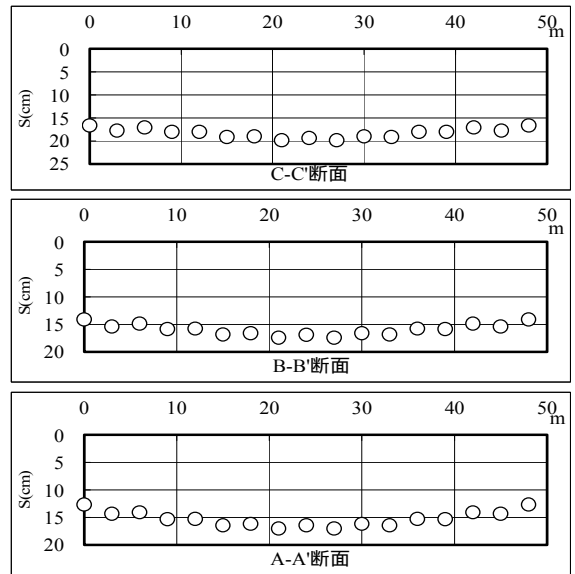


Fig. 16 圧密沈下量分布図(適用例2)  
Consolidation Settlement Distribution (Design 2)

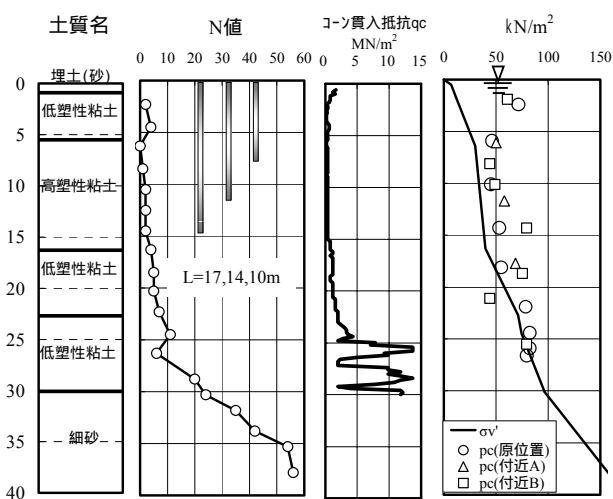


Fig. 15 土質柱状図(適用例2)  
Soil Profile (Design 2)

Z	pc	e <sub>0</sub>	C <sub>c</sub>	C <sub>v</sub>	I <sub>p</sub>
2.0	36	1.000	0.19	72.8	-
6.4	22	0.925	0.19	92.4	10
16.3	33	1.555	0.36	45.9	24
22.7	51	0.865	0.19	60.1	18
30.1	81	0.784	0.12	80.0	17

Z: 粘土層下端深度, pc: 圧密降伏応力, e<sub>0</sub>: 初期間隙比, C<sub>c</sub>: 圧縮指数, C<sub>v</sub>: 圧密係数, I<sub>p</sub>: 塑性指数

Table 3 杭・ラフトの荷重分担率(適用例2)  
Load Bearing Ratio of Pile and Raft (Design 2)

	ラフト	杭
中杭	56%	44%
辺杭	75%	25%
隅杭	87%	13%
建物全体	57%	43%

ド・ラフト基礎を採用した実設計例とその解析結果を示す。建物はS造平屋の倉庫であり、平面寸法は54m×48m、平均接地圧は24kN/m<sup>2</sup>、ラフト厚は180mmである。建物の供用期間として、30年を想定した。したがって、竣工後の30年間に生じる圧密沈下量を沈下検討の対象とした。建物の平面をFig. 14に、また建物の断面および土質柱状図をFig. 15に示す。地下水位はGL-0.5mである。表層からGL-6mまでは砂およびやや過圧密な低塑性粘土が堆積しているが、GL-6mから高塑性粘土および低塑性粘土が約24m堆積し、圧密試験結果からこれらの粘性土はほぼ正規圧密状態にあると判断される。圧密沈下解析に用いた地盤定数をFig. 15に示す。また、設計前に摩擦杭の鉛直載荷試験を実施しており、杭周面摩擦ばねおよび杭先端地盤ばねは、この試験結果を踏まえて設定した。

解析結果から得た30年経過後の沈下量分布をFig. 16に、杭軸力・増加地中応力・圧密沈下量の深度分布をFig. 17

に、杭・ラフトの荷重分担率をまとめてTable 3に示す。30年経過後の本粘土地盤の圧密度は57%である。最大圧密沈下量は中央部で約20cmに達するが、不同沈下量は小さく変形角は最大値でも $1.70 \times 10^{-3}$ であり、構造上も使用上も支障のない値である。弾性論では、不同沈下の発生しない剛板の接地圧の平面分布は、中央部よりも辺部、辺部よりも隅角部が大きくなる。Table 3においても同様の傾向が認められる。Fig. 17より、パイルド・ラフト基礎の相互作用効果を考慮した解析結果として、次の傾向が読みとれる。a)中杭の先端到達荷重は、隅杭の到達荷重よりやや大きい。中杭の周面と地盤間の相対変位が、隅杭のそれより小さいためと思われる。b)地盤内の増加地中応力は、杭先端直下の深さで最大となる。一方、同一深度であっても杭群から最も離れたラフト中心位置での応力は、杭中心位置の値よりかなり小さな値に留まる。c)増加地中応力の深度方向の変化は、杭中心位置では大きく、ラフト中心位置では小さい。d)建物中央部にお

るラフト中心位置の増加地中応力の深度分布によると、ラフト直下の値より杭先端深度における応力は、やや大きくなっている。ラフトと杭周から伝達した応力が重なり合っているためと思われる。

#### 4. 結語

本研究で得た主要な成果を要約して以下に列記する。

- 1)パイルド・ラフト基礎の実用的沈下予測解析法として、相互作用効果を考慮可能なMindlin解を拡張・応用した解析法を提案した。本解析法では、杭周面にバイリニア型の非線形ばねを、杭先端直下にトリリニア型の非線形ばねをそれぞれ組み入れており、杭周面近傍および杭先端直下の地盤の強非線形領域の影響を考慮できるとともに、ラフト剛性による接地圧の再配分効果も考慮できる。
- 2)FEMによる解析結果との比較により、提案した実用的解析法の有効性を検証した。
- 3)本解析法を2件のパイルド・ラフト基礎の実設計に適用した結果から、以下の知見を得た。
  - a)堅い固結シルト層に支持させた超高層集合住宅  
逆打ち杭を本設杭として利用するパイルド・ラフト基礎の採用により、同杭を仮設杭として扱う直接基礎としての設計と比較して、ラフトをスリム化することが可能である。
  - b)厚い軟弱粘性土上の中規模の平屋倉庫  
長さの異なる摩擦杭を配置したパイルド・ラフト基礎の採用によって、総沈下量のある程度許容し、不同沈下量を低減する設計が可能となる。

#### 謝 辞

超高層集合住宅へのパイルド・ラフト基礎の実適用と得られた知見は、(株)三菱地所設計との共同研究成果です。御協力と様々な配慮を頂きました関係各位の方々に深謝致します。

#### 参考文献

- 1) 佐原 守・秋野矩之・富永晃司：荷重伝達法に基づくパイルド・ラフト基礎の即時沈下に関する一解析法，日本建築学会構造系論文集，第561号，pp.111～118，(2002)
- 2) 秋野矩之・佐原 守：群杭とパイルド・ラフトの荷重～沈下解析法，第37回地盤工学研究発表会，pp.1471～1472，(2002)
- 3) 秋野矩之・佐原 守・野澤貴志：群杭とパイルド・ラフトの荷重～沈下解析(その2 杭周・杭先端の弾塑性バネ機能)，第38回地盤工学研究発表会，pp.1559～1560，(2003)
- 4) 秋野矩之：地盤の剛性評価と建物の沈下予測 - 建築物の即時沈下予測方法(その1) - ，日本建築学会構造系論文集，第412号，pp.109～119，(1990)
- 5) 山辺雅英・瀬戸川葆・大路英昭・秋野矩之・福井茂

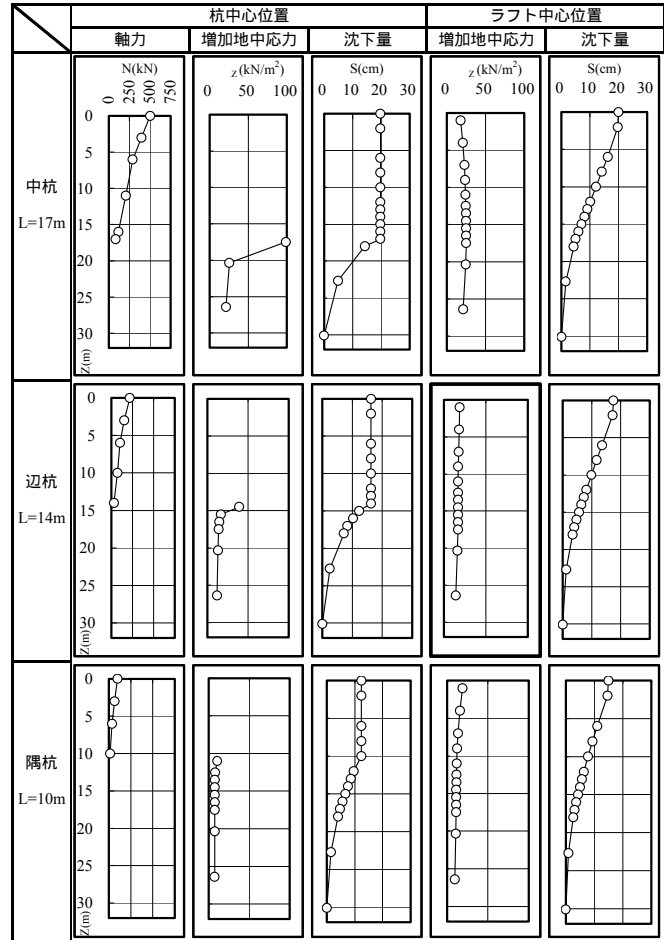


Fig. 17 杭軸力・増加地中応力・圧密沈下量の深度分布図(適用例2)

#### Depth Distribution of Pile axial Force and Increased Ground Stress (Design 2)

- 和：大深度掘削・逆打ち工法の建設工事における沈下・変状解析と実測結果(その1～その3)，第34回地盤工学研究発表会，pp.1383-1388，(1999)
- 6) 西山高士・秋山 猛・秋野矩之・森田康夫・森脇登美夫・富沢 健：大深度逆打ち工事における江戸川砂層の沈下解析と実測結果(その1・その2)，第37回地盤工学研究発表会，pp.1359-1362，(2002)
- 7) 清 広歳・秋野矩之・広瀬清豪：NHK大阪新放送会館・大阪歴史博物館建設工事における地盤挙動(その1・その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.697-700，(2002)
- 8) 佐原 守・秋野矩之・富永晃司：杭長の異なる摩擦杭基礎に支持された建築物の沈下性状について，日本建築学会構造系論文集，第544号，pp.77～84，(2001)
- 9) 佐原 守・秋野矩之・茶谷文雄・山中昌之・富永晃司：杭長の異なる摩擦杭基礎による建築物の不同沈下制御例，日本建築学会技術報告集，第12号，pp.79～82，(2001)
- 10) 浅香美治・桂 豊・玉置克之・内山 伸：パイルド・ラフト基礎で支持されたRC3階建物と支持地盤の沈下挙動，第46回地盤工学シンポジウム，pp.235～240，(2001)