



杭基礎の鉛直荷重～変位特性の評価法入門

4. 解析による群杭およびパイルド・ラフトの荷重～変位特性の評価方法（その1）

山下 清（やました きよし）

（株）竹中工務店技術研究所研究開発部地盤基礎第1グループ

堀越 研一（ほりこし けんいち）

大成建設（株）技術研究所自然環境部土質研究室

4.1 はじめに

3章では単杭の荷重～変位関係の評価法について述べたが、通常、杭基礎では複数の杭が用いられ、杭頭に設けられた基礎スラブ（床版）などを通じて上部構造の荷重が地盤中の杭に伝達される。このような群杭としての沈下量は、杭1本あたりの荷重が単杭と同じであったとしても、単杭の沈下量に比べて大きくなる場合がある。同様に、群杭としての極限支持力は必ずしも単杭の極限支持力の杭本数倍とはならない。このような杭～地盤の相互作用に基づく群杭の性状を一般に、群杭効果と呼んでいる。群杭の荷重～変位関係の評価にあたっては、群杭効果を適切に考慮することが必要である。群杭の沈下には、即時沈下と圧密沈下がある。杭先端支持層の下部に軟弱な粘性土層がある場合や粘性土地盤中の摩擦群杭の場合には、地中応力の重合わせによって過大な圧密沈下が生じる場合があるので、圧密沈下についても十分な検討を行うことが必要である。

パイルド・ラフト基礎（piled raft foundation）とは、べた基礎やラフト基礎とよばれるような直接基礎に杭を併用した基礎形式であり、直接基礎と杭が一体となって荷重を支持するものをいう。通常の杭基礎では、構造物の全荷重を杭のみで支持するものとして、基礎スラブ底面の地盤の抵抗力は無視するが、パイルド・ラフト基礎では、基礎スラブ底面における地盤の抵抗力について十分な検討を行ったうえで、この抵抗力を基礎の設計に積極的に取り入れることによって、杭基礎に対して杭長、杭径、杭本数を減らし、基礎全体の合理化を図ろうとするものである。

4章では、群杭およびパイルド・ラフト基礎の荷重～変位関係の評価法について述べる。

4.2 群杭の荷重～変位特性の評価方法

群杭の沈下量の算定法は、群杭全体を直接基礎的に扱う簡易な計算法と、個々の杭をモデル化して検討する詳細な計算法に大別される。以下に代表的な方法についてその概要を記す。各方法の詳細やはかの方法については、多くの文献があるのでそれらを参照されたい^{1),2)}。

4.2.1 簡易な計算法

(1) 等価荷重面法

この方法は、地中のある深さに群杭と等価な沈下量を与える荷重面（等価荷重面）を設置し、等価荷重面に構

造物の荷重を載荷することにより、群杭の沈下量を直接基礎と同様な方法を用いて算定するものである。この方法は、群杭の平面規模が杭長に比べて比較的大きい場合に適用される。なぜなら、その場合群杭全体を一つの基礎とみなしたときの断面形状は浅い基礎と類似し、その沈下性状は基礎スラブの剛性を無視した直接基礎の沈下性状に近づくことが明らかにされているからである³⁾。

Tomlinson（トムリンソン）⁴⁾は等価荷重面の深さを、主に周面摩擦力で支持する杭では図—4.1 (a)のように主たる支持層への根入れ長さ L' の2/3の深さに、岩盤上の杭のような先端支持杭では図—4.1 (b)のように杭先端深さに等価荷重面を設定し、前者の杭では荷重の広がり外周の杭から下方に4:1と仮定することを提案した。このとき、群杭の沈下量は式(1)で与えられる。

$$w_{\text{avg}} = w_{\text{raft}} + \Delta w \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

w_{avg} ：群杭の平均沈下量

w_{raft} ：等価荷重面の沈下量

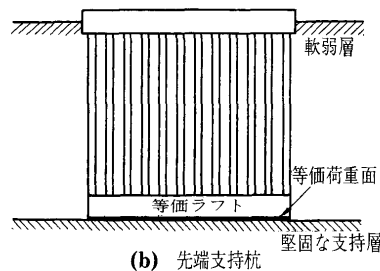
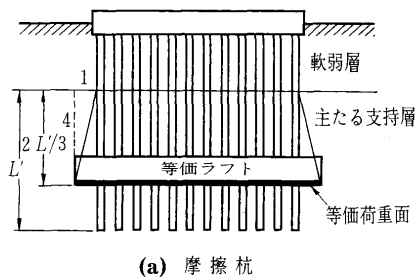
Δw ：等価荷重面から上の杭体を自立柱としたときの杭体の弾性圧縮量

ここで、等価荷重面の沈下量は、荷重面下部の各土層の圧縮量を、弾性論や一次元圧密理論を用いて求める。また、 Δw は相対的に小さい値であるので無視されることも多い。国内の基準・指針類でも、軟弱粘性土層や薄い支持層（中間層）で支持する摩擦群杭の圧密沈下量を求めるときに等価荷重面法が採用されている^{5),6)}。支持杭については、建築基礎構造設計指針⁶⁾では以下の方法を推奨している。杭周面から地盤への荷重伝達を無視し、杭頭に作用する荷重のすべてが杭先端部から地盤に伝わると仮定する。1本の柱を複数の杭で支持する場合は、杭群を囲んだ面積に対して杭頭荷重を杭先端深さで等分布荷重として与え、隣接の柱を支持する杭が及ぼす地中応力を考慮して沈下量を計算する。1本の柱を1本の杭で支持する場合は、各杭の先端端断面面積に対して杭頭荷重を等分布荷重として与え、同様に計算する。

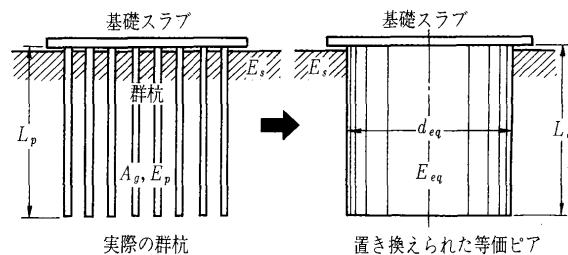
(2) 等価ピア法

この方法は図—4.2に示すように、群杭をこれと等価な直径、弾性係数をもつ1本の大径杭（ピア）に置き換え、単杭の沈下の理論解を用いて群杭の平均的な沈下量を求めるもので¹⁾、群杭の平面規模が杭長に対して小さい場合に適用できる。等価なピアは、長さは杭群と等しく、断面面積は杭群の平面的な面積（最外縁の杭を結んだ線で囲まれた面積）と等しいと仮定すると、ピアの直

講 座



図—4.1 等価荷重面法⁴⁾



図—4.2 等価ピア法^{1),3)}

径 d_{eq} は、式(2)で与えられる³⁾。

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{4}{\pi}} \sqrt{A_g} = 1.13 \sqrt{A_g} \quad (2)$$

A_g : ピアの断面積

同様にピアの変形係数 E_{eq} は、杭と杭間の土で構成されるブロックと等価なものを仮定すると、式(3)で与えられる。

$$E_{eq} = E_s + (E_p - E_s) \frac{A_p}{A_g} \quad (3)$$

E_p : 杭の弾性係数

E_s : 杭の貫入範囲における平均的な地盤の変形係数

A_p : 杭の断面積の合計 (杭1本あたりの断面積 × 杭本数)

ここで、単杭の沈下の解析法については3.2を参照されたい。近年この方法について、沈下量に関する計算精度の検証とともに、有限深さの土層や地盤剛性が深さ方向に増加する土層など、実地盤に近い条件での適用性を高める提案がなされている^{7),8)}。

(3) 群杭と単杭の沈下量比を用いる方法

単杭の沈下量に対し、群杭効果を考慮した群杭の平均沈下量の概略値を推定する経験的な手法が提案されている^{2),3)}。一例として、等しい荷重を受ける n 本の同一の杭からなる群杭について、群杭と単杭の沈下剛性 (杭頭荷重/杭頭沈下量) の関係を次式に示す³⁾。

$$k_p = n^{(1-e)} k_1 \quad (4)$$

k_p : 群杭全体の平均的な沈下剛性

k_1 : 単杭の沈下剛性

n : 杭本数

e : 支持形態による定数で、摩擦杭では0.3~0.5, 支持杭では0.2以下

4.2.2 詳細な計算法

群杭の沈下量を、より詳細に検討する場合に用いる解析法としては、境界要素法、ハイブリッド法、有限要素法がある。これらの方法によれば、群杭を構成する個々の杭についての荷重~沈下量関係が算定できる。

(1) 境界要素法 (Mindlin 解による数値解析法)

この方法は、3.2.4でも述べたように、土を連続体として扱い、すべての杭要素間で変位の相互作用を考慮するので、単杭と同様に群杭に対しても適用できる。しかし、杭本数の増加に伴い計算量も大幅に増加する。そこで、Poulos (プーラス)⁹⁾は相互作用係数 (interaction factor) を用いる方法を提案した。相互作用係数 α は、

等しい荷重を受ける隣接した同一の2本の杭に対し、次式で定義される。

$$\alpha = \Delta S / S_1 \quad (5)$$

ΔS : 等しい荷重を受ける隣接杭による沈下増分

S_1 : 自身の荷重による沈下量

図—4.3は、相互作用係数の計算例である¹⁾。この相互作用係数と重ね合わせの原理を用いて、群杭中の k 杭の杭頭沈下量 w_k は、次式で表される。

$$w_k = w_1 \sum \alpha_{kj} P_j \quad (6)$$

w_1 : 単杭の単位荷重による杭頭沈下量

α_{kj} : k 杭と j 杭間の相互作用係数

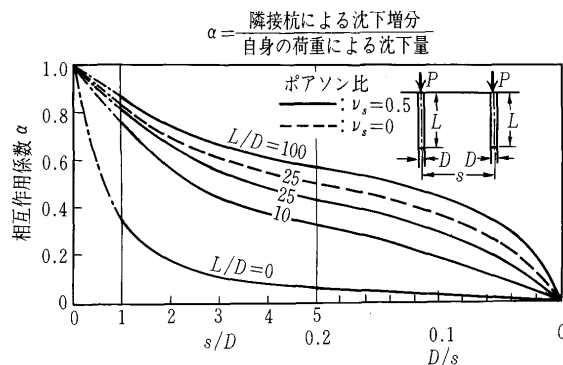
($k=j$ のとき, $\alpha_{kj}=1$)

P_j : j 杭の杭頭荷重

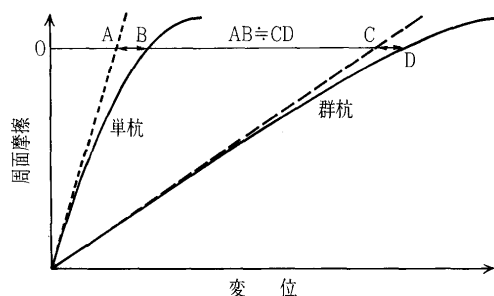
この方法では Mindlin 解を用いることから、基本的には半無限均一弾性地盤が適用対象である。ただし、近似的ではあるが不均一地盤への適用も図られ^{10),11)}、杭と地盤の境界のすべりを考慮できるようにも拡張されている。

(2) ハイブリッド法

杭間隔が極端に小さくなければ、群杭の破壊機構はブロック破壊的とはならず、各単杭の貫入破壊的なものになる。このとき、杭周囲の地盤ではせん断変形が卓越するため地盤の変形係数 (割線せん断弾性係数) は、載荷に伴って生じるせん断ひずみによって杭近傍では著しく低下するが、逆に杭近傍を除けばあまり低下しないとみなせる。この考え方にに基づき、地盤の非線形性を考慮して群杭の沈下を求めるハイブリッド法が提案されている^{3),12)}。この方法では群杭中の各単杭の荷重~沈下関係は、杭周囲の地盤の荷重~変位関係に極限支持力を考慮した荷重伝達法 (3.2.3参照) などの方法により求める。一方、異なる杭間の相互作用は地盤を弾性体とし、境界



図—4.3 半無限均一弾性体における相互作用係数¹⁾



図—4.4 群杭の周面摩擦における非線形相互作用のモデル化³⁾

要素法により求める。すなわち図—4.4において、群杭の非線形沈下増分(CD)は単杭の値(AB)とほぼ等しいとして、土の非線形性を考慮した単杭の沈下量(OB)に、微小ひずみレベルの土の変形係数を用いて計算した周りの杭から受ける弾性沈下量(AC)を加え、群杭としての沈下量(OD)を求めるものである³⁾。

Mandolini (マンドリーニ) と Viggiani (ビジアーニ)¹³⁾は、境界要素法における相互作用係数法を発展させ、群杭中の各単杭の荷重～沈下関係に非線形性を導入した。すなわち式(6)において、群杭中の k 杭の杭頭荷重 P_k による k 杭自身の沈下量を求める場合の相互作用係数 α_{kk} の値を一定($\alpha_{kk}=1$)とせず、杭頭荷重の増加に伴って相互作用係数の値が増加するように、次式に示す双曲線関数で近似することを提案している。

$$\alpha_{kk} = 1 / (1 - P_k / P_{k, \text{lim}}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$P_{k, \text{lim}}$: 荷重～沈下関係を双曲線近似したときの k 杭のみかけの極限支持力

ただし、 $\alpha_{kj} (k \neq j)$ についてはO'Neill (オニール)ら¹²⁾の考え方にに基づき、杭頭荷重の大きさによらず一定値とした。また、杭間の相互作用の影響が及ぶ限界の距離 r_m (3.2.2参照)を導入している。解析に用いる地盤の変形係数については、杭の施工に伴う杭周囲の地盤剛性の変化などを考慮し、原則として載荷試験に基づくこととしている。具体的には、単杭の載荷試験における初期の荷重～沈下関係を、多層地盤を考慮した境界要素法によりシミュレートして地盤の変形係数を逆算する。

(3) 有限要素法

有限要素法は、地盤の不均一性や非線形性を考慮できる有力な解析手段として、地盤工学にかかわる多くの境界値問題に適用されている。杭の沈下に対しても3.2.5および3.3.2で述べたように、Ottaviani (オッタビアーニ)¹⁴⁾の群杭に関する三次元線形解析をはじめ、Jardine (ジャディーン)ら¹⁵⁾による微小ひずみからの土の材料非線形性を導入した解析など多くの事例が報告されている。

4.3 パイルド・ラフトの荷重～変位特性の評価方法

4.3.1 パイルド・ラフト基礎

パイルド・ラフト基礎は、直接基礎の支持能力を生かしつつ、沈下量を許容値以内に低減させるために杭を併

用する基礎形式である。この場合の杭の役割は、上部構造の荷重の一部を杭体を通じてより深部の地盤に伝達することにより、直接基礎の接地圧を減少させ、かつ地盤内の応力分布を均等化させることにより、基礎としての沈下量もしくは不同沈下量を低減させることである¹⁶⁾。

パイルド・ラフト基礎の発想は、決して新しいものではなく、この基礎形式の有効性については1977年の第9回国際土質基礎工学会議でBurland (バーランド)ら¹⁷⁾が報告している。また、同様な考え方はすでに1950年代に、メキシコシティにおける超高層建物の基礎設計に採り入れられている¹⁸⁾。Burlandらは、杭を直接基礎の沈下抑止のために用いる“piles as settlement reducers”の概念を述べ、次の二つの質問を投げかけている。

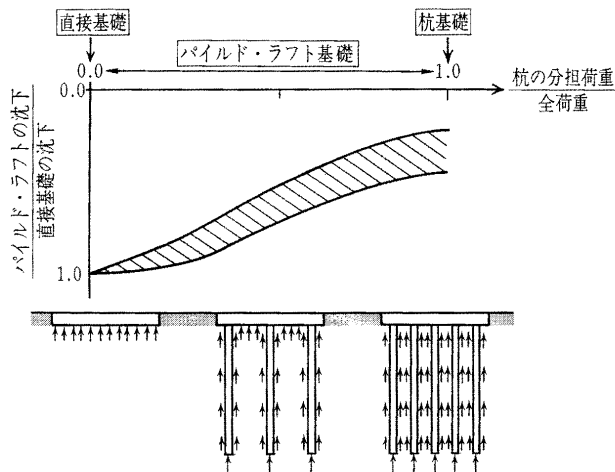
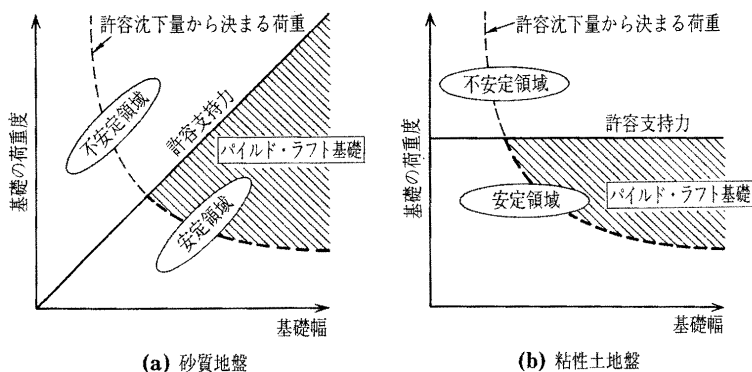
質問1: その構造物の荷重を支持するために必要な杭は何本か?

質問2: その構造物の沈下量を許容値以内に抑えるために必要な杭は何本か?

ここで重要なことは、質問2における杭の本数が質問1の本数より常に、しかもかなり少ないことである。ただし、質問1に対する答は、杭の支持力に基づいた力の釣合いのみから得られるが、質問2の答を得るためには、杭と地盤と直接基礎部(以下、ラフトと記述)の相互作用を考慮した変形の評価が必要となる。第9回国際土質基礎工学会議以後、ヨーロッパ、東南アジアや我が国からパイルド・ラフト基礎の実施例に関する報告が多数なされ^{19)~31)}、この基礎形式の有効性を示す実測データが国際的に蓄積された。1994年の第13回国際土質基礎工学会議においてRandolph (ランドルフ)³⁾は、杭基礎の設計に関する総括報告の中で、杭の設計は従来の支持力に基づくものから沈下に基づくものに変換すべきことを述べ、パイルド・ラフト基礎の有用性を強調した。近年、本来の現象をより忠実に検討するという意味での性能規定設計法への流れの中、実測データの蓄積と計算機の高速化による有効な計算手法の開発とが相まって、パイルド・ラフト基礎が注目されるようになったといえよう。

パイルド・ラフト基礎を既存の基礎形式に対して位置づけると、図—4.5のように直接基礎と杭基礎の中間の領域を埋めるものとみなせる³¹⁾。したがって、パイルド・ラフト基礎には、直接基礎に近いものから杭基礎に近いものまで含まれるが、直接基礎単独では設計上の要求性能を満足しない場合に、最小限の杭を付加することにより基礎としての荷重～沈下性状を改善する目的で使用する人が多い。この場合、パイルド・ラフト基礎は、従来の直接基礎の適用範囲を広げることを可能にした基礎形式とも考えられる。図—4.6 (a), (b)は直接基礎の許容荷重度と基礎幅の関係を示したものである³²⁾。この図において、右上がりおよび水平の直線は地盤の許容支持力度を表し、この直線より下側は支持力的に安定な領域である。一方、ある許容沈下量に対応する荷重度は弾性沈下の場合、破線で図示するような右下がりの曲

講 座

図—4.5 パイルド・ラフト基礎の位置付け³¹⁾

(a) 砂質地盤

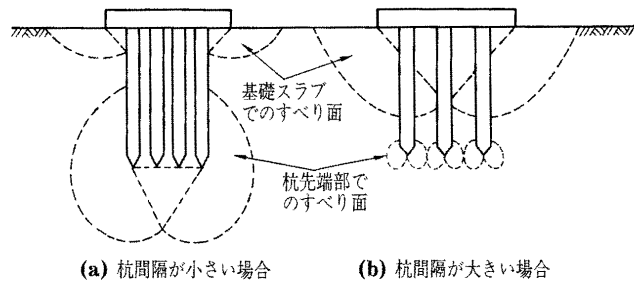
(b) 粘性土地盤

図—4.6 基礎の荷重度からみた適用範囲³²⁾

線になる。この曲線と地盤の許容支持力度を表す直線のうち、荷重度の小さい方より下側の範囲では直接基礎で設計可能であり、それより上側ではほかの基礎形式、例えば杭基礎を採用することが多い。ここで、支持力的には安定であるが沈下が過大な場合、すなわち図—4.6 (a), (b)中の斜線部にあたる範囲がパイルド・ラフト基礎の主な適用対象と考えられる。また、パイルド・ラフト基礎の破壊機構については、群杭基礎の模型実験結果に基づいた提案がなされている^{33),34)}。パイルド・ラフト基礎に相当する杭間隔が大きい群杭基礎の破壊機構は図—4.7 (b)のようになり、その極限支持力は、直接基礎の極限支持力と、ラフトの接地圧が杭の先端支持力に及ぼす影響を考慮した個々の杭の極限支持力の和との合算で表される。

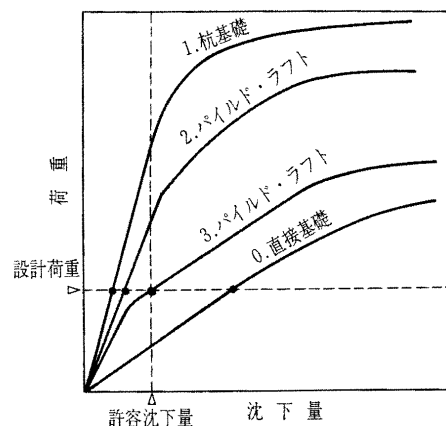
直接基礎をパイルド・ラフト基礎とすることにより、一般に以下の点が改善される²⁹⁾。

- 基礎の平均沈下量および不同沈下量の低減
- 荷重の偏心や予期しがたい表層の土質性状のばらつきによる基礎の全体傾斜の低減
- 基礎梁、基礎スラブの曲げモーメント、せん断力の低減
- 荷重が大きく異なる部分の境界部における沈下量差の低減
- 基礎全体としての地盤破壊に対する支持力安全率の増加



(a) 杭間隔が小さい場合

(b) 杭間隔が大きい場合

図—4.7 パイルド・ラフト基礎の破壊機構^{33),34)}図—4.8 パイルド・ラフト基礎の荷重～沈下関係³⁵⁾

一方、この基礎形式の適用が難しい地盤条件としては、以下に示すような、ラフト底面下にある地盤の抵抗が十分に期待できない場合である。すなわち、

- ラフト直下が軟弱な粘性土地盤で、その強度が著しく小さい
- ラフト直下の地盤が緩い砂質地盤で地震時に液状化するおそれがある
- 広域の地盤沈下が進行中である

などの場合である。

4.3.2 パイルド・ラフトの荷重～変位の評価法

(1) パイルド・ラフト基礎の荷重～沈下

図—4.5のように直接基礎と杭基礎を連続的にみたとき、その荷重～沈下関係を模式的に表したものを図—4.8に示す³⁵⁾。ここで、曲線0は直接基礎の荷重～沈下関係であり、設計荷重に対して沈下量が過大となる可能性を示している。曲線1は通常の杭基礎、すなわちすべての荷重を杭によって分担させ、杭のみの極限支持力に対して2～3の安全率を用いた場合で、設計荷重に対する杭の沈下量は非常に小さくなる。曲線2,3は、パイルド・ラフト基礎に対応するものである。曲線2は、杭の安全率を通常の杭基礎より低くした場合で、クリープパイルとよばれるような設計に相当する。この考え方は、各杭に作用する荷重を極限支持力の70～80%以下とすることで、長期的なクリープ沈下を防止しかつ杭の合理化を図るものである²⁰⁾(4.4.2(2)参照)。杭基礎に比べ杭の沈下剛性が小さいため、多くの荷重が基礎スラブから直接地盤に伝達し、沈下量は曲線1より大きくなる。曲線3は、杭に作用する荷重をさらに大きくし、

設計荷重レベルで杭の極限支持力に近い支持力を発揮させる場合である。ここで、曲線2,3とも沈下量が許容値以内にあることがポイントである。

曲線2や曲線3のようなパイルド・ラフト基礎の荷重～変位特性の評価にあたっては、杭の抵抗とラフト底面に作用する地盤の抵抗を同時に考慮するため、図—4.9に示す杭と地盤とラフトの相互作用を考慮し、ラフトと杭が一体化した基礎としての挙動を把握する必要がある。

(2) 既往の沈下解析手法

パイルド・ラフト基礎の沈下挙動を解析する方法は、群杭の場合と同様に簡易な手法から計算機を駆使して杭と地盤とラフトの相互作用をすべて考慮する手法まで、いくつかの方法が提案されている。

i) 簡易な計算法

パイルド・ラフト基礎の平面規模が杭長に比べて比較的大きく、平面形状が整形(矩形あるいはそれに近い形状)であり、荷重分布がほぼ均等で杭配置が規則的かつ杭径、杭長がほぼ等しい場合について、パイルド・ラフト基礎の沈下量、ラフトと杭の荷重分担比を簡易に計算する手法が提案されている³⁶⁾。この方法は、4.2.1(1)で述べたように平面規模が杭長に比べて大きい群杭ではその断面形状は浅い基礎と類似することから、同様な形状のパイルド・ラフト基礎の沈下性状も、杭の存在を無視したラフトの沈下量と同様になることに基づくものである。ここで、パイルド・ラフト基礎における杭の存在が沈下量を均等化させる効果については、ラフトの沈下量に、ラフトとパイルド・ラフト基礎の沈下剛性比を乗じて低減することにより評価する。ラフトとパイルド・ラフト基礎の沈下剛性比は、弾性論に基づくラフトと杭の相互作用に関する検討から得られた式(8)で表される^{3),37),38)}。

$$\frac{k_r}{k_{pr}} = \frac{\{1 - 0.64(k_r/k_p)\}(k_r/k_p)}{1 - 0.6(k_r/k_p)} \dots\dots\dots (8)$$

k_{pr} : パイルド・ラフト基礎の平均的な沈下剛性

k_p : 群杭の平均的な沈下剛性

k_r : ラフトの平均的な沈下剛性

また、杭が分担する荷重は、式(9)で表されるラフトと群杭の荷重分担比から算定される。

$$\frac{P_r}{P_p} = \frac{0.2(k_r/k_p)}{1 - 0.8(k_r/k_p)} \dots\dots\dots (9)$$

P_p : 群杭の分担荷重

P_r : ラフトの分担荷重

ここで、ラフトの剛性が土の剛性に比べて非常に大きく、不同沈下量の分布に与える影響が大きい場合には、ラフトと土の相対剛性と不同沈下量の関係(4.3.4図—4.21)³⁹⁾を考慮して、ラフトの沈下量を低減させることもできる。式(8)、式(9)中の群杭の沈下剛性は、4.2に示した方法により求められる。

この方法では個々の杭への伝達荷重やラフトの部材応力は評価できないので、適用範囲はパイルド・ラフト基礎の適用性を予備的に検討する場合や概略の沈下挙動を求める場合などであろう。

ii) 詳細な計算法

杭と地盤とラフトを一体として解析する方法である。この解析を行えば、基礎の沈下量、不同沈下量と同時に個々の杭の分担荷重、ラフトの接地圧、ラフトを構成する基礎梁、基礎スラブに生じる応力など、基礎の部材設計に必要な情報を得ることができる。詳細計算法としては、以下の機能を有することが望ましい³⁵⁾。

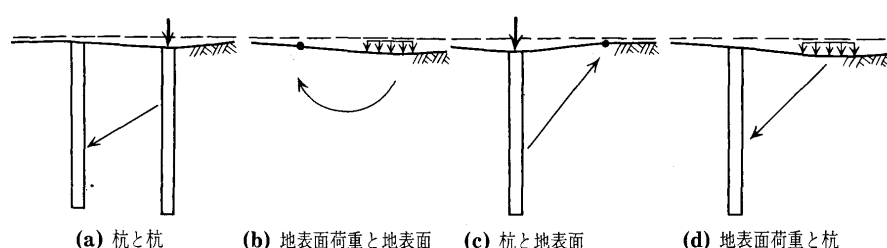
- ① 杭と地盤とラフトの相互作用の評価
- ② 地層構成(多層地盤)を反映できる地盤のモデル化
- ③ 杭とラフトの荷重分担の評価
- ④ 杭に極限荷重が作用した後の、基礎全体の荷重～沈下関係の評価
- ⑤ 基礎全体における沈下量と不同沈下量の分布の評価
- ⑥ ラフト(基礎梁、基礎スラブ)の曲げモーメントおよびせん断力の評価

このうち④は、パイルド・ラフト基礎では、図—4.8の曲線3のように常時荷重の下で杭に極限支持力に近い荷重が載荷されることもあり、そのときの杭の非線形挙動を評価することに対応する。以下に代表的な計算法を示す。

(a) 有限要素法と弾性論を組み合わせた沈下解析法

この方法は、ラフトを曲げ板要素、梁要素などでモデル化し、杭と地盤とラフトの相互作用について Mindlin 解などの弾性論に基づく方法を用いるものである。三次元的なモデル化が容易で、かつ有限要素法に比べて入出力データの作成や計算に要する時間が大幅に少ないメリットがあり、多くの手法が提案されている^{38),40)~46)}。ここでは一例として、初期に提案された Hain (ヘイン)らの方法⁴⁰⁾を発展させた伴野らの方法⁴¹⁾について述べる。

この方法は上部構造をモデル化するための有限要素と、

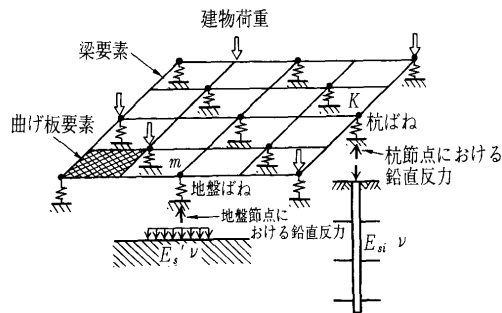


図—4.9 杭と地盤とラフトの相互作用⁴¹⁾

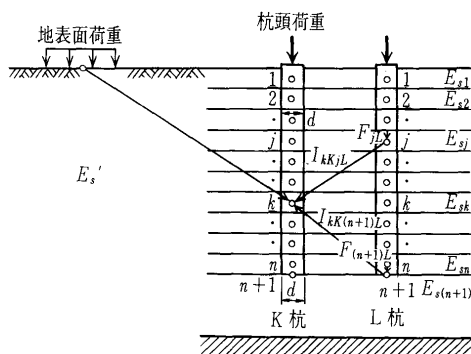
講 座

杭と地盤とラフトの相互作用を評価するための弾性論に基づく手法とを組み合わせたものであり、詳細計算法に要求される機能の①, ③, ⑤, ⑥を備え, ②は近似的な手法で対応し, ④については杭周囲の局所的なすべりのみ考慮している。図—4.10に, 基礎地盤の解析モデルの概要を示す。上部構造(ラフトで代表させることが多い)を梁要素と曲げ板要素でモデル化する。ラフトに設けた節点のうち, 杭位置の全節点と地盤に接する節点のいくつかに鉛直ばねを設置する。これらの鉛直ばね定数の初期値を設定し, この有限要素モデルに建物荷重(鉛直集中荷重もしくは分布荷重)を作用させて有限要素解析を行い, 杭節点, 地盤節点における鉛直反力を求める。つぎに, 得られた反力を下向きの荷重として, 弾性論に基づいてモデル化した杭および地盤に作用させる。荷重は, 杭に対しては集中荷重として杭頭に作用させ, 地盤にはその節点の負担面積と等価な面積の円を考え, 等分布荷重として地盤面に作用させる。杭節点および地盤節点における鉛直変位は, 図—4.11に示す杭と地盤とラフトの相互作用を考慮して算定する。得られた沈下量と各節点の反力(既知)より, 各節点において新しい杭のばね定数と地盤のばね定数を求め, 初期値と比較する。このプロセスを, すべての杭および地盤のばね定数が一定値に収束するまで繰り返す。

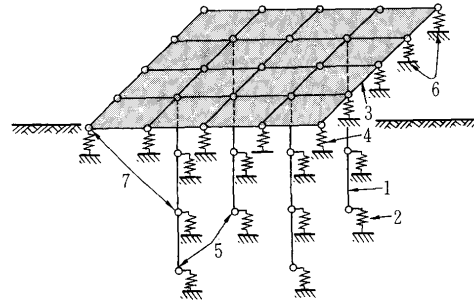
Clancy (クレンシー) と Randolph³⁸⁾は, 4.2.2(2)のハイブリッド法を発展させ, 杭とラフトの相互作用を考慮した手法を提案している。その概念は, 図—4.12に示



図—4.10 有限要素法と弾性論を用いた解析法⁴¹⁾



図—4.11 杭と杭およびラフトと杭の相互作用⁴¹⁾



- 1: 一次元杭要素
- 2: 杭節点ばね(荷重伝達ばねを利用)
- 3: 二次元平板要素
- 4: ラフト接点ばね(Giroudの解を利用)
- 5: 異なる杭間の相互作用(Mindlin解を利用)
- 6: 床版間の相互作用
- 7: 床版と杭との相互作用

図—4.12 有限要素法と弾性論を用いた解析法³⁸⁾

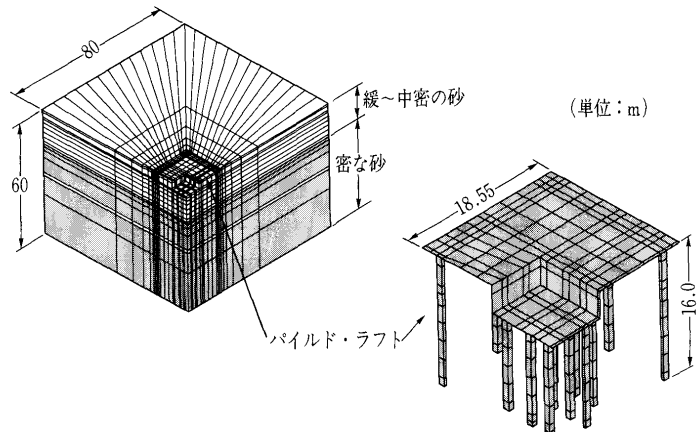
すようにラフトは曲げ板要素として, 杭は一次元の梁要素として有限要素でモデル化し, 異なる杭間およびラフトと杭間の相互作用の評価には Mindlin 解を用いるものである。

以上に述べた Mindlin 解を用いる手法は, 基本的には均一な半無限弾性地盤に適用が限られている。これに対し, 有限多層地盤法(finite layer method)を用いて, 多層弾性地盤上のパイルド・ラフト基礎を, 精度よく解析する手法が提案されている⁴⁷⁾。

(b) 有限要素法

この方法はパイルド・ラフト基礎をラフトだけでなく杭, 地盤についても有限要素でモデル化するもので, 軸対称モデルに置き換えるもの⁴⁸⁾や, 三次元モデルとして扱うもの³¹⁾がある。土の応力～ひずみ関係に弾塑性構成式を用いれば, 地盤の局所的な塑性化を含めた詳細な解析を行うことができる。最近の計算機の著しい進歩により, 実務設計で地盤に弾塑性モデルを用いた三次元解析を行うことが可能となっている。図—4.13に解析モデルの一例を示す³¹⁾。

(以下次号に続く)



図—4.13 三次元有限要素法モデル³¹⁾