

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—

Design Theory and Practice of Shallow Foundation, Piled Raft Foundation

三 村 衛 (みむら まもる)
京大大学院助教授 防災研究所

山 田 英 司 (やまだ えいじ)
名古屋大学大学院助手 地圏環境工学専攻

小 高 猛 司 (こたか たけし)
京大大学院助教授 土木工学専攻

野 田 利 弘 (のだ としひろ)
名古屋大学大学院助教授 地圏環境工学専攻

高 稲 敏 浩 (たかいね としひろ)
㈱浅沼組技術研究所

島 津 多 賀 夫 (しまづ たかお)
大成基礎設計㈱技術本部地盤解析室

1. はじめに

浅い基礎は、べた基礎やフーチング基礎に代表される直接基礎など、根入れの小さい（根入れ幅比がおおむね1以下の）基礎を指す¹⁾。これまで、このような浅い基礎の設計は、特に建築構造物など地盤に作用する上載圧が比較的小さい場合、地盤の支持力問題だけを検討すれば十分であった。しかし、浅い基礎を設置する地盤の浅い部分は軟弱層であることが多く、比較的重厚な構造物を建設する場合だけでなく、不同沈下や都市域で近接施工に伴う側方変位が問題となる場合には、たとえ支持力に全く問題がなくても、浅い基礎は使うことができず、不経済となる可能性が高い杭基礎として設計を行うことが多かった。

ところが近年、地盤の大沈下や不同沈下が予想される場合には、直接基礎に摩擦杭を併用する「パイルド・ラフト基礎」が日本でも検討されるようになり、浅い基礎の変形抑制・低減工法として注目を浴びてきている。この基礎形式は、杭基礎における杭とスラブを剛結したものとほとんど同じであるにもかかわらず、我が国の建築基準法などでは、異種基礎併用が原則禁止であった（2000年改正では可能となった²⁾）ため、この基礎の設計・施工例はそれほど多くない。従来の設計・設計思想が「仕様設計」で硬直的であったことに大きな要因があると考えられるが、直接基礎・杭・地盤間の相互作用や地盤の変形特性などが十分に評価できなかったことなど評価・解析手法が不十分であったことも背景にあると考えられる。しかし、ここ10数年間で研究成果が蓄積され、上記3三者間の相互作用を考慮できる解析手法（地盤・杭を等価な鉛直ばねに置き換え、直接基礎を梁で理想化した「(格子)梁・ばねモデル」など構造力学的に評価するモデルや、土を弾性体の連続体と見なして地盤の挙動も考慮するモデルなど、例えば、文献³⁾など）が開発されるに至り、この併用基礎は現在の性能設計の流れと合致するものとなっている。

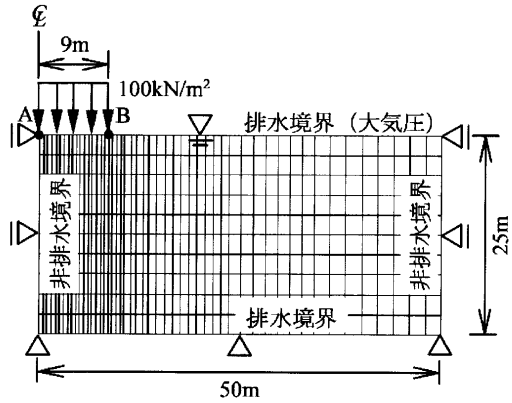
本報では、浅い基礎としてのパイルド・ラフト基礎に

対して、これまでの研究成果とは少し別の視点から、すなわち、特に土の「弾塑性の性質」に着目して、パイルド・ラフト基礎設置「地盤」の水～土連成変形解析例⁴⁾を紹介し、この基礎形式の変形抑制メカニズム（本基礎形式が上載荷重を下部のより強固で変形性が小さい層に伝達させ、上部軟弱層をつかまえることによって地盤の変形抑制効果が現れる）などについて触れる。解析事例には、簡単な平面ひずみ条件を仮定したものを示すが、計算はラフト部分と杭部分が地盤に比べて十分に堅く変形しないとして、直接基礎・杭によって変形が束縛された地盤の挙動を求める最も簡単なもの⁵⁾で、いわば、地盤の変形を解く「土質力学的アプローチ」である点が、基礎の変形を中心に据えて直接基礎・杭の変形を解く「構造力学的アプローチ」と異なる。

2. パイルド・ラフト基礎が設置された地盤の水～土連成解析

2.1 計算条件

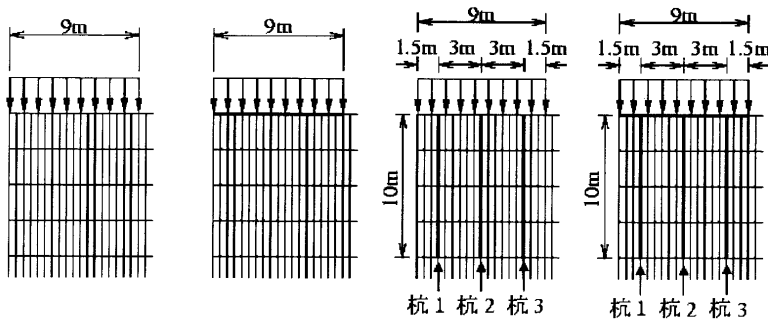
飽和粘土を水～土2相系材料とみなし、粘土の構成式に繰返し負荷が考慮できる下負荷面⁶⁾カムクレイモデルを用いた、水～土連成の有限要素法解析⁷⁾例⁴⁾を示す。30 kN/m²の上載圧が作用した等方正規圧密地盤から、この上載圧を除荷して再現した地盤を初期地盤とし、地表面にサーチャージ荷重はない。つまり、表面ほど過圧密比が大きい過圧密地盤であり、自重による初期応力が深度方向に大きくなっている地盤である。図—1と表—1にそれぞれ、地盤の境界条件と材料定数を示す。また、図—2に想定した4種類の基礎形式（基礎なし、直接基礎のみ、摩擦杭のみ、パイルド・ラフト基礎）を示す。ただし、基礎の役割は地盤の変形を束縛するものとして考え、地盤の変形場に制約条件を課し、本報では述べないが、束縛を実現するための束縛力として、基礎に作用する軸力・曲げモーメントなども算定できる。これらの基礎（幅9m）に、載荷速度1 kN/m²/dayで合計100 kN/m²まで等分布荷重を載荷した後に、荷重一定にして放置する。



図一 有限要素メッシュと境界条件

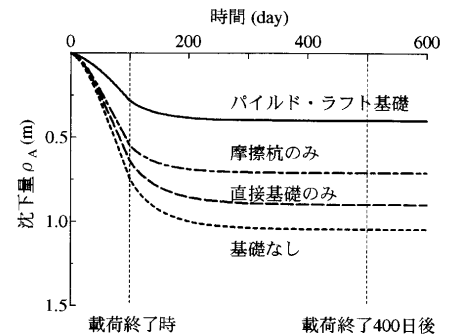
表一 地盤の材料定数

圧縮指数 $\bar{\lambda}$	0.108
膨潤指数 \bar{e}	0.025
限界状態定数 M	1.55
$p' = 98.1 \text{ kN/m}^2$ における	
正規圧密曲線上の比体積 N	1.95
ポアソン比 ν	0.30
正規圧密土化指数 ν_2	10.0
土の密度 ρ_s (t/m^3)	2.6
透水係数 k (m/sec)	3.7×10^{-8}



(1) 基礎なし (2) 直接基礎のみ (3) 摩擦杭のみ (4) パイルド・ラフト基礎

図二 計算に用いた基礎形式 (半断面)



図三 沈下量～時間関係

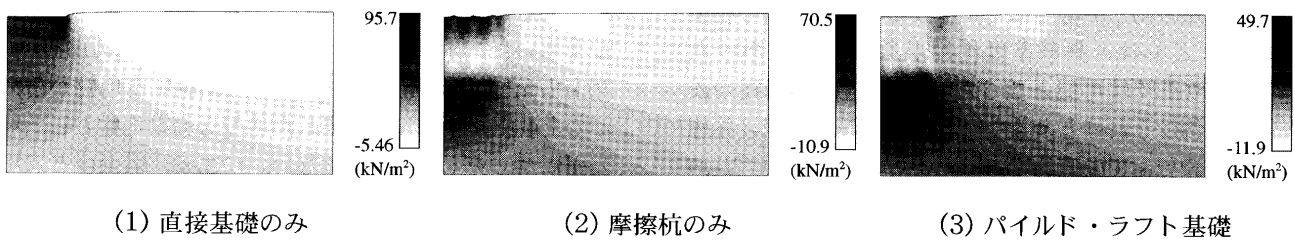
2.2 パイルド・ラフト基礎の沈下低減メカニズムとその効果

図一三に基礎形式の違いによる沈下量～時間関係の比較を示す。パイルド・ラフト基礎は、直接基礎に比べ、最終沈下量および残留沈下量の低減に有効であることが分かる。図一四、図一五は、載荷終了400日後（圧密終了時）の平均有効応力増分、比体積変化の地盤内分布である。パイルド・ラフト基礎は、杭間地盤を「一体化」してほとんど圧縮させることなく基礎に作用する荷重を

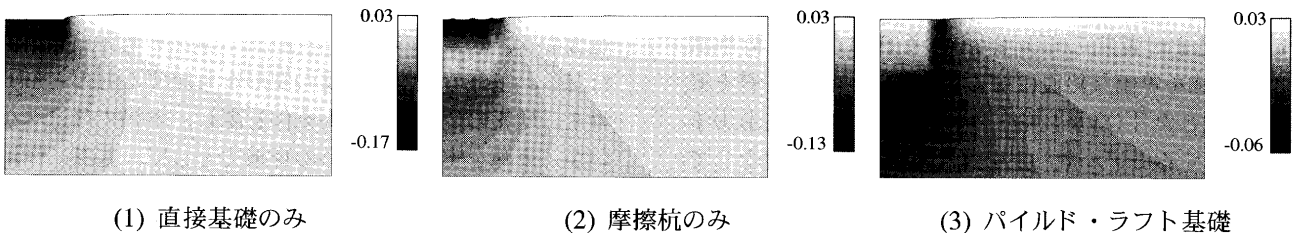
杭先端以深の地盤深部に一次元的に伝達して分散させている。図一六の概念図から分かるように、荷重載荷前の初期地盤内応力は、地盤浅部よりも地盤深部の方が大きく、荷重の伝達による地盤内応力増分が同じなら、初期応力が大きい地盤深部において圧縮性が小さくなり、沈下量が低減できる。

2.3 パイルド・ラフト基礎の不同沈下低減効果

図一七のような左右非対称の偏荷重を基礎に作用させる。この時は、基礎に不同沈下が生じるが、この場合は、



図一四 平均有効応力増分 ($\Delta p'$) の地盤内分布図



※ $\Delta v > 0$: 膨張、 $\Delta v < 0$: 圧縮

図一五 比体積変化 (Δv) の地盤内分布図

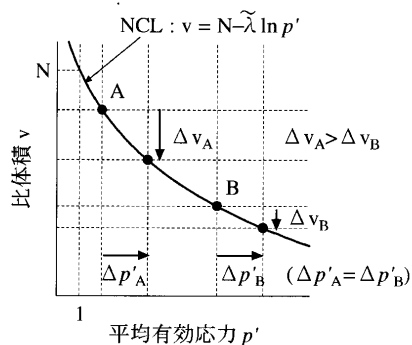


図-6 荷重増分に対する比体積の変化 (概念図)

パイルド・ラフト基礎は不同沈下量の低減に有効である (図-8)。一方、図-9に示すような基礎が傾斜している場合は、もちろん他の基礎形式に比べて最終沈下量等は小さい (図は省略) が、杭先端が傾斜した基礎部付近まで達しているような時には、かえってこの基礎形式の方が、不同沈下量が大きくなることもある (図-10)。

3. おわりに

「変形」と「強度」は独立して存在するものではなく、同じ構造物であっても変形を拘束すると支持力は上がり、荷重を深部に伝達・分散させることによって沈下を低減させることができる。建築分野と同様、土木分野で性能設計が注視される中、複数の浅い基礎の設計代替案を策

定・検討するためにも、単なる力の釣合いのみを考えるのではなく、応力～変形の発現メカニズムをより適切に勘案した手法 (弾塑性的な取扱い、換言すれば施工過程を考慮した取扱い) を用いてより精度の高いアプローチを指向する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 土質工学用語辞典, 地盤工学会, 1985.
- 2) 建築基準法施工令第38条, または建設省告示第1347号.
- 3) 土屋 勉・大築和夫・小幡 守: 軟弱地盤における建築構造物の即時沈下および圧密沈下の三次元有限要素法解析, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 361, pp. 123~131, 1986.
- 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) Asaoka, A., Noda, T. and Kaneda, K.: Displacement/traction boundary conditions represented by constraint conditions on velocity field of soil, Soils and Foundations, 38(4), pp.173~181, 1998.
- 6) Hashiguchi, K.: Subloading surface model in unconventional plasticity, Int. J. Plasticity, 9, pp. 217~245, 1989.
- 7) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Soil-water coupled behavior of heavily overconsolidated clay near/at critical state, Soils and Foundations, 37(1), pp. 13~28, 1997.

(原稿受理 2002.5.31)

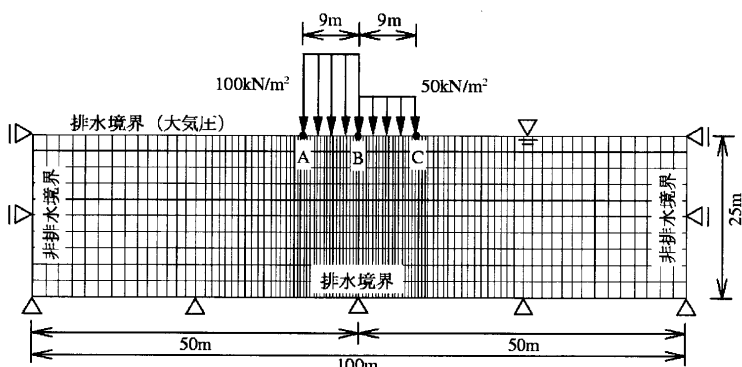


図-7 境界条件 (偏荷重が作用する場合)

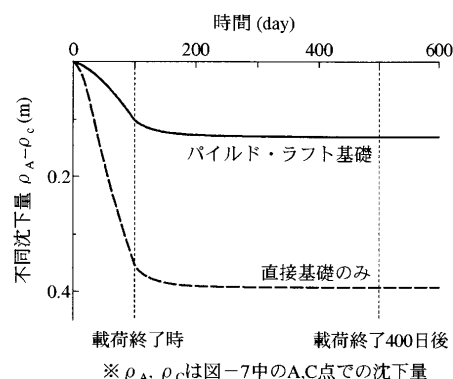


図-8 不同沈下量～時間関係 (偏荷重が作用する場合)

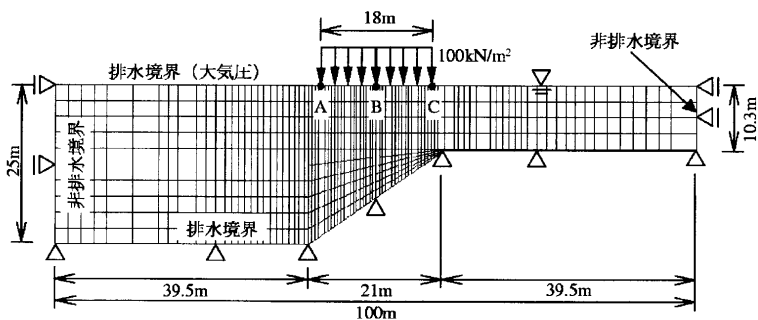


図-9 境界条件 (基礎が傾斜している場合)

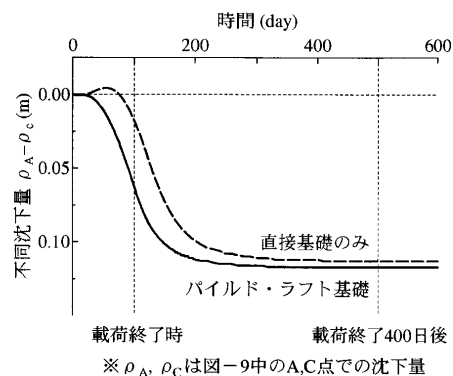


図-10 不同沈下量～時間関係 (基礎が傾斜している場合)