地盤の非線形性を考慮したパイルド・ラフト基礎の 沈下剛性と荷重分担に関する解析的検討

ANALYTICAL STUDY ON COMBINED STIFFNESS AND LOAD SHARING OF PILED-RAFT FOUNDATION CONSIDERING NONLINEAR BEHAVIOR OF GROUND

山本 春行*, 黄 赓**

Haruyuki YAMAMOTO and He HUANG

The piled-raft foundation has proved to be one of economical foundation. Simplified equations for estimating the behavior of piled-raft foundation were proposed by Randolph, and have been used in the primary design. These equations were estimated on the basis of the elasticity theory with respect to the application of the elastic range and many studies have been proved already. However, ground shows nonlinear behavior even if the external load is small. In this study, applicability of these equations was discussed by considering nonlinear behavior of ground by 3-dimensional finite element analyses.

Keywords: Piled-raft, Combined stiffness, Ratio of load sharing, Nonlinear analysis

パイルド・ラフト, 沈下剛性, 荷重分担比, 非線形解析

1. はじめに

パイルド・ラフト基礎は、杭基礎とベタ基礎を併用し、上部荷重を杭基礎とベタ基礎に分担させて構造物を支持する。1970年代に提案され¹⁾、不同沈下を抑制することや経済的であるなどの利点により幅広く用いられている。それ以来、パイルド・ラフト基礎の挙動に関する研究も多くなされている²⁾。例えば、パイルド・ラフト基礎で支持された建物の沈下挙動^{3),4)}や多層地盤におけるパイルド・ラフト基礎の挙動⁵⁾などがある。さらに、地震国として知られている日本の構造物については、耐震性能の評価が設計上不可欠であるため、地震時のパイルド・ラフト基礎の挙動^{6),7)}や水平力を受けるパイルド・ラフト基礎の挙動^{8),9),10)}などの研究が行われている。これらの研究に用いられている解析手法としては、境界要素法(BEM)¹¹⁾、3次元有限要素法(FEM)、並びにハイブリッド法¹²⁾などがある。

一方、2001年改訂された「建築基礎構造設計指針(AIJ指針)」にもパイルド・ラフト基礎が併用基礎の一種として記述されており¹³⁾、以後、パイルド・ラフト基礎を採用したケースが増加している。AIJ指針に示されているパイルド・ラフト基礎の挙動の簡易推定式は一次設計に用いられており、これらはラフトおよび群杭の沈下剛性からRandolphが提案したパイルド・ラフト基礎の沈下剛性と荷重分担比を推定する式¹⁴⁾に基づいて導かれたものである。ただし、これらの式は弾性理論に基づいて提案されたものであり、弾性範囲内の

適用性については、すでに多くの検討がなされている。しかし、地盤は初期の荷重レベルが小さい範囲から非線形挙動を示すため、厳密には、弾性領域は存在しない。したがって、本推定式を適用する場合には、この非線形挙動の影響に対してどの程度の適用性があるかどうかについても検討する必要がある。また、原位置載荷実験や遠心模型実験等によりその挙動を調べるのは実構造物と実地盤状況に最も近い条件ではあるが、推定式の適用範囲を網羅して検討するためには、異なる地盤条件とラフト基礎や群杭の構成条件との膨大な組み合わせによる実験ケースが必要となり、現実的ではない。一方、有限要素解析などの数値解析手法の発達により、解析精度が向上し、複雑な地盤状況や力学特性を模擬して、任意の境界形状や境界条件も精度良く表現できる。さらに、非線形問題も扱うことができるので、解析パラメータを様々に変化した数値実験手法として利用できる。したがって、本報告では、3次元有限要素法および弾塑性理論を用いてモデル解析を行い、同一の沈下量におけるラフト基礎モデルと群杭モデルの計算結果による個別の沈下剛性からパイルド・ラフト基礎の沈下剛性と荷重分担比をRandolphが提案した推定式により算定した。次に、これらの推定式による値とパイルド・ラフト基礎モデルの沈下剛性と荷重分担比の解析結果とを比較することにより地盤が非線形挙動をする場合での適用性について検討し、その結果を報告する。ただし、本報告で扱った剛性はすべて割線剛性とした。

* 広島大学大学院国際協力研究科 教授・工博

Prof., Graduate School for International Development and Cooperation of Hiroshima University, Dr. Eng.

** 広島大学 研究員・博士(工学)

Postdoctoral Fellowship, Hiroshima University, Dr. Eng.

2. パイルド・ラフト基礎の沈下剛性と荷重分担比の推定式

Clancy と Randolph が提案したパイルド・ラフト基礎の沈下剛性と荷重分担比の推定式は、下式である¹⁵⁾。式(1)は、沈下剛性に関する推定式である。

$$\frac{k_{pr}}{k_r} = \frac{1 + (1 - 2\alpha_{rp})(k_r/k_p)}{\{1 - \alpha_{rp}^2(k_r/k_p)\}(k_r/k_p)} \quad (1)$$

ここに、 k_{pr} ：パイルド・ラフト基礎の沈下剛性

k_p ：摩擦群杭の沈下剛性

k_r ：直接（ラフト）基礎の沈下剛性

α_{rp} ：ラフト基礎に対する群杭の影響係数¹⁵⁾

群杭とラフトの荷重分担比の推定式は式(2)である。

$$\frac{P_r}{P_p} = \frac{(1 - \alpha_{rp})(k_r/k_p)}{1 - \alpha_{rp}(k_r/k_p)} \quad (2)$$

ここに、 P_p ：摩擦群杭の分担荷重

P_r ：直接基礎の分担荷重

α_{rp} はラフト基礎の面積、群杭の本数とサイズ(各杭の直径と長さ)により式(3)から定められる係数である。

$$\alpha_{rp} = 1 - \frac{\ln(n)}{\ln(2r_m/d_p)} \quad (3)$$

ここに、 n はラフト基礎に対して杭の影響面積(杭一本あたりのラフト基礎の面積)の直径と杭径 d_p の比率である。 $r_m = 2.5\rho L_p(1 - v_s)$ 、 ρ は土層の均一係数、均一な地盤の場合が1であり、 L_p は杭の長さ、 v_s は地盤のポアソン比である。以上の推定式への地盤の非線形挙動の影響を検討するために、3次元有限要素モデルを用いて、群杭、ラフト基礎、パイルド・ラフト基礎それぞれの同一沈下量における解析結果と推定式による値との比較検討を行う。

3. 解析モデル

図1に示すモデルに基づいて、下記の3つの基本解析モデルを設定した。

モデル①：直接基礎（ラフト基礎）、モデル②：群杭

モデル③：パイルド・ラフト基礎

パイルド・ラフト基礎の場合、均一な地盤に杭が等間隔に配置されており、その上に正方形のラフト基礎(厚さ0.5m、幅20m)が設置されているモデルを解析対象とした。杭はコンクリート杭(杭径 $d=1000\text{mm}$ 、ヤング係数 $E_c=2.1 \times 10^7 \text{kN/m}^2$)を想定し、杭は弾性体、ラフトは剛体と仮定した。地盤の破壊にはドロッカー・プラーガー(Drucker-Prager)基準を適用し、関連流れ則による弾塑性解析を行った。地盤のポアソン比 v_s は0.3を仮定した。

なお、図1(b)に示すように、対称条件を用いて1/4モデルを解析対象とした。3次元有限要素解析に用いたモデルの要素分割を図2に示している。断面DC-2の分割は、後述(5. 解析精度の検証)の解析精度の検討において沈下が生じる鉛直方向の要素分割を断面DC-1の2倍に設定したものである。

表1示しているように、解析モデルの地盤特性については、弾性係数 E_s 、内部摩擦角 ϕ および粘着力 c の3つのパラメータで表している。そして、推定式への地盤の非線形挙動の影響を検討するた

図1 解析モデル（モデル③）

図2 要素分割図

表1 地盤定数

	(A)	(B)	(C)
E_s (kN/m ²)	10000	30000	150000
ϕ (deg.)	30	35	40
c (kN/m ²)	5	10	20

表2 杭配列

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
杭間隔 s (m)	9	6	4.5	4.5	4.5	2
s/d	9	6	4.5	4.5	4.5	2
$N \times N$	3×3 本	4×4 本	5×5 本	5×5 本	5×5 本	9×9 本
杭長 L (m)	15 m	15 m	15 m	21 m	28 m	28 m
α_{rp}	0.49	0.56	0.62	0.65	0.67	0.80

めに、3つの異なる地盤モデルを設定した。すなわち、非常に軟弱な地盤の場合（ケース A）、中間の硬さと強さを持つ地盤の場合（ケース B）および剛性ならびに強度が大きい地盤の場合（ケース C）である。A、B、Cの順に地盤の弾性係数、内部摩擦角および粘着力が増大し、地盤が硬くそして強くなっている。ケース B の場合の地盤は、N 値が 20 程度の正規圧密砂地盤を想定し、地盤の内部摩擦角 ϕ は、大崎の式¹⁶⁾により設定した。弾性係数については、経験式 $E=1.4N(\text{Mpa})$ ¹⁶⁾に基づいておよそその値を設定した。粘着力 c については、軟弱地盤に相当する程度の値を設定した。そして、ケース B に設定した地盤定数を参考にし、軟弱な地盤の場合のケース A と、より強い地盤の場合のケース C の地盤定数を設定した。

4. 解析ケース

解析ケースを設定する場合、 kr/kp の分布範囲は極めて重要であり、事前の検討を行い、杭の配列は表 2 に示すように設定した。モデル毎に杭を等間隔 (s) に設置し、正方形に配置した (N×N 本)。モデル (1)、(2)、(3)、(6) の順に設置する杭本数が増加する。そして、モデル (3) の杭の設置本数を変更せず、モデル (3)、(4)、(5) の順に杭の長さを増加させる。つまり、同じ地盤条件と载荷条件に対して、モデル (1) から (6) の順に kp が大きくなり、 kr/kp の値が小さくなる。これらの杭の配列により、 α_{rp} の値を定めた。ただし、モデル (6) については、「建築基礎構造設計指針 (AIJ 指針)」で定められている $\alpha_{rp}=0.8$ となるように設定した。表 1 と表 2 を組み合わせて実施した解析ケースの一覧を表 3 に示している (全 18 ケース)。最も軟弱な地盤と最も杭本数が多く長い杭とを組み合わせたケース (A)-(6) から、最も硬い地盤と最も杭本数が少なく短い杭とを組み合わせたケース (C)-(1) に向かって、 kr/kp の値は大きくなる。図 3 には、式 (1) と式 (2) に基づいて作成したラフト・群杭の剛性比 (kr/kp) とパイルド・ラフト・ラフトの剛性比 (kpr/kr)、群杭とラフトの荷重分担比 (Pr/Pp) の関係を示している。式 (2) より、群杭の沈下剛性が直接基礎の沈下剛性と同一場合 ($kr/kp=1$)、群杭とラフト基礎の荷重分担比も 1 となり、 α_{rp} の値とは関係なくすべて点 (1, 1) を通過する。なお、「建築基礎構造設計指針 (AIJ 指針)」では、 $\alpha_{rp}=0.8$ と定め、その適用範囲を $kr/kp \leq 1.0$ としている¹³⁾。

5. 解析精度の検証

解析結果には有限要素法により杭、ラフトならびに地盤を離散化して解析を行うなどの近似が含まれており、更に増分解析による近似があるので、計算結果の妥当性を評価するために、下記の条件により解析精度の検証を行った。群杭については、杭頭部に同じ変位を生じさせるために、杭頭を剛なフレームにより結合し、ケース (B)-(1) の解析結果により解析精度を検証する。

まず、地盤の極限支持力について検討する。直接基礎の極限支持力は次式のとおりでである¹⁷⁾。

$$q_d = \alpha c N_c + \beta \gamma_1 B N_r + \gamma_2 D_f N_q \quad (4)$$

ここに、 q_d は極限支持力、 α と β は基礎の形状係数、 γ_1 は基礎底面下にある地盤の単位体積重量、 γ_2 は基礎底面より上方にある地

表 3 解析ケース

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
(A)	(A)-(1)	(A)-(2)	(A)-(3)	(A)-(4)	(A)-(5)	(A)-(6)
(B)	(B)-(1)	(B)-(2)	(B)-(3)	(B)-(4)	(B)-(5)	(B)-(6)
(C)	(C)-(1)	(C)-(2)	(C)-(3)	(C)-(4)	(C)-(5)	(C)-(6)

図 3 式 (1) と式 (2) の関数グラフ

図 4 ケース (B)-(1) のラフト基礎モデルの解析結果

図 5 Steinbrenner の近似解法

盤の単位体積重量、 B は基礎底面の最小幅、 D_f は基礎の根入れ深さである。内部摩擦角が 35° の場合、 N_c は 46.83 である。なお、解析を簡便化するために、地盤の初期応力や杭、ラフト基礎の自重の影響を考慮せず解析を行った。地盤の極限支持力の近似値は約 562kN/m^2 である。解析結果の分布荷重と沈下量との関係を図 4 に示している。解析結果は極限支持力の値に向かって滑らかに収束しており、十分な解析精度を有するものと思われる。さらに、弾性域の地盤の沈下量および群杭の沈下量について荷重増分の第 1 ステップ目の解析結果を用いて検討し、解析精度を検証した。第 1 ステップにはかなり小さい荷重を作用させているので、ほぼ弾性状態に近い結果を得ることができる。

有限厚さの地盤の地表面沈下量の厳密解は導かれていないため、一般的に近似的な計算法が採用されている（ラフト基礎の剛性は 0）。Steinbrenner の近似解法¹⁸⁾がよく用いられ、図 5 に示すように、半無限弾性地盤での地表面沈下量 Se から深さ H の沈下量 Se' を差し引いた値で、深さ H に剛な基盤を有する有限厚さの弾性地盤の地表面沈下量 ΔSe を近似するものである。ただし、深さ H より下方にある剛な地盤を半無限弾性地盤としており、この部分の変形が各深さの沈下量に加わることの影響がある。また、基盤上面より遠く離れている地表面の沈下量 Se に与える影響より、基盤上面の近い位置の沈下量 Se' に与える影響が大きいため、式(5)により求められる地表面沈下量の値 ΔSe は、深さ H に剛な基盤を有する場合の地表面沈下量の実際の値より小さくなるものと考えられる。

$$\Delta Se=Se-Se' \tag{5}$$

一方、Sterinbrenner の近似解法とは異なる考え方で、Boussines の解¹⁹⁾と鏡像原理²⁰⁾を用いて近似解を求める方法もある。図 6 に示すように、剛な基盤上面を鏡面にし、地盤と荷重を反転させ、実荷重による沈下量から鏡像荷重による沈下量を差し引くことで求められる。つまり、式(6)に示すように、有限厚さ H の地表面沈下量 ΔSe は、半無限弾性地盤での地表面沈下量 Se と、反転させた荷重が実地盤地表面位置に生じさせる沈下量 Se'' との差である。ここに、 Se'' は荷重が深さ $2H$ の位置に生じさせる沈下量である。そこで、Steinbrenner の方法に沿って考えると、地表面の沈下量 Se から深さ $2H$ の沈下量 Se'' を差し引いたことになり、得られる解は Steinbrenner の近似解より大きくなることは当然であり、実際には剛な基盤が深さ H のところに存在しているため、鏡像原理を用いた近似解は剛な基盤を有する場合の実際の地表面沈下量よりも大きくなるものと考えられる。

$$\Delta Se=Se-Se'' \tag{6}$$

したがって、この二つの近似解の間に剛な基盤を有する場合の地表面沈下量の理論的な正解値が存在しているものと考えられる。つまり、Boussines の解と鏡像原理を併用した結果 $\geq$ 地表面沈下量の理論的な正解値 $\geq$ Steinbrenner の近似解である。表 4 に示すように、本解析の結果は Boussines の解と鏡像原理を併用した結果と Steinbrenner の近似解との中間に存在していることが分かる。そして、図 2 に示すように要素分割をさらに細分した場合の結果はほとんど変わらず（以後の解析は断面 DC-1 の要素分割により行った）、また、解析領域の側面（図 2 中の A-B、B-C）の境界条件として、

図 6 鏡像原理による近似解

表 4 解析結果と理論値の比較（ケース(B)）

	載荷中心部の地表 面沈下量	載荷隅角部の地表 面沈下量
Boussines の解と鏡像原理 を併用した結果	$12.24 \times 10^{-4}\text{m}$	$5.06 \times 10^{-4}\text{m}$
本解析値（図 2 の断面 DC-1）	$11.4301 \times 10^{-4}\text{m}$	$4.2237 \times 10^{-4}\text{m}$
本解析値（図 2 の断面 DC-2）	$11.4309 \times 10^{-4}\text{m}$	$4.2242 \times 10^{-4}\text{m}$
Steinbrenner の近似解	$10.14 \times 10^{-4}\text{m}$	$3.47 \times 10^{-4}\text{m}$

図 7 群杭とラフト基礎の分担荷重との関係（ケース(C)-(1)）

図 8 解析データの処理方法（ケース(C)-(1)の群杭モデル）

すべての方向を自由にした場合の解もほとんど変化しなかった（中心部で1%増加、隅角部で3%増加）。したがって、本解析結果は厳密解にかなり近いものと考えられる。一方、群杭の弾性沈下量の理論推定式は次式である^{21), 22)}。

$$\rho = \frac{PI}{Es \cdot d} \quad (7)$$

ここに、 I は沈下係数である。群杭に作用する荷重 P が増分第1ステップに相当する214 kNの場合、解析結果による杭の弾性沈下量は $5.66 \times 10^{-4} \text{m}$ であり、(7)式による杭の沈下量の計算値は $5.64 \times 10^{-4} \text{m}$ であった。群杭の弾性沈下量の解析値と計算値とはほとんど差がなかった。この僅かの違いが本解析モデルにおける解析誤差と考えられる。これらの検証から、作成したモデルの解析精度は、おおむね良好であることが分かった。

なお、式(2)において群杭とラフト基礎の分担荷重比を検討するためには、群杭とラフト基礎それぞれの分担荷重を解析結果から算

図9 ケース(C)-(1)の解析結果の荷重～沈下比関係

(a) ケース1 (A)-(1)～(6)

(b) ケース1 (B)-(1)～(6)

(c) ケース1 (C)-(1)～(6)

図10 解析結果と推定式(1)による近似解との比較

出することが必要である。ラフト基礎に作用する分担荷重 P_r は、パイルド・ラフト基礎に作用する総荷重 P_t から杭頭部に作用する分担荷重 P_p を差し引いたものであり、次式となる。

$$P_r = P_t - P_p \quad (8)$$

ただし、ラフト基礎の側面と地盤との間には摩擦力が存在することを考え、上式の適用性について解析結果による検討を行う。ラフト基礎直下の各地盤要素の鉛直応力にそれぞれの要素の水平断面積を乗じた値の合計によりラフト基礎の分担荷重を算出し、検討する。図 7 には、ケース(C)-(1)の解析結果による群杭、ラフト基礎の分担荷重比、ならびにラフト基礎の側面に作用する摩擦力の合計分担比と沈下量/杭径(%)との関係を示している。同図より、摩擦力の合計はラフト基礎の全分担荷重よりもかなり小さいことが分かる。したがって、本モデルの場合には、パイルド・ラフト基礎の分担荷重の計算に、式(8)を用い、ラフト基礎の分担荷重には、側面摩擦力を含めて考える。

6. 解析結果の処理方法

なお、沈下剛性の算定法については、ケース(C)-(1)の群杭の解析結果により説明する(図 8 参照)。群杭の沈下剛性(k_p)は、各沈下量に対応する沈下曲線上の点と原点とを結んだ直線の勾配(割線勾配)で表す。そして、ラフト基礎とパイルド・ラフト基礎の解析結果に対してもこの算定法を用いて同じ沈下量における沈下剛性(k_r 、 k_{pr})を算出する。

図 9 には、ケース(C)-(1)の解析結果のラフト基礎(R)、群杭(P)、パイルド・ラフト基礎(P-R)それぞれに作用する荷重の合計(作用合計荷重)と沈下比との関係を示している。初期の線形範囲を除き、パイルド・ラフト基礎の沈下比が最も小さく、群杭の沈下比が最も大きくなっており、同じ荷重が作用する場合、より小さい変位が生じる基礎はより大きい沈下剛性となり、ケース(C)-(1)については、群杭の沈下剛性 k_p よりラフト基礎(R)の沈下剛性 k_r が大きくなる。

7. 解析結果の検討

7. 1 沈下剛性に関する推定式(1)について

上記の割線勾配から算出した沈下剛性(k_p 、 k_r 、 k_{pr})を用いて推定式への適用性を検討する。図 10 には解析結果と推定式(1)による近似解との比較結果をラフト基礎と群杭の沈下剛性の比(k_r/k_p) - パイルド・ラフト基礎とラフト基礎の沈下剛性の比(k_{pr}/k_r)との関係により地盤モデル毎に示している。表 2 に示しているように、解析モデルにおいて α_{rp} の範囲は 0.49~0.80 の間となり、比較するための図 10 には、推定式(1)による近似解の曲線も 2 本引いている($\alpha_{rp}=0.49$ および $\alpha_{rp}=0.80$)。

初期の弾性状態に近い解析結果(1 ステップ目の荷重増分は十分小さくし、完全弾性解と数値計算上の誤差内で一致している)をまず検討ポイントとし(図 10 と図 12 中の各解析ケースの記号が大きく描かれている点)、その後、沈下比が 0.01 増加する時点毎に解析結果を検討した。なお、荷重増分法(ラフト基礎の極限支持力を予測し、適切な増分荷重を 20 ステップ分載荷)により解析を行ったため、各ケースの解析結果の最終沈下比は異なるが、沈下比の検討範

囲は 0.1 までに統一した。

地盤が硬くなるほど、ラフト基礎の沈下剛性の増加量が群杭の沈下剛性の増加量よりも大きくなるため、 k_r/k_p の値は、地盤定数のケース(A)、(B)、(C)の順に増大する。杭本数の増加および杭長の増加につれて、 k_p が大きくなるため、杭配列ケース(1)、(2)、(3)、(4)、(5)、(6)の順に、 k_r/k_p の値は減少する。しかし、地盤の塑性化が進行すると、同一沈下比に対して各ケースの応力状態もかなり異なるため、 k_r/k_p の大きさの関係がこの順番に従うとは限らない。すべての解析結果は、式(1)の推定式により得られる 2 本の曲線の近くに分布している。これらの結果をより明確にするために、各ケースの α_{rp} に対応する推定式(1)の値で解析結果を除いた値を求め図 11 の誤差分布図を示した。これらの結果より、剛性比(k_{pr}/k_r)については 0.88~1.07 の間に分布しており、弾性・非線形領域を問わずほぼ近似的な結果が得られていることが分かる。

なお、ケース(A)-(1)、(B)-(1)、(C)-(1)において、 k_r/k_p が 1 より大きくなる場合、解析結果によると k_r/k_p が増加しても k_{pr}/k_r の変化がほとんどなく、ほぼ $k_{pr}/k_r=1.2$ となっており、 $\alpha_{rp}=0.49$ の推定式(1)による近似解と良く一致する。地盤は非線形挙動を有するものとして解析を行っており、解析結果と推定式(1)による近似解との比較により、地盤の非線形領域(沈下比が 0.1 まで)においても割線剛性を用いる限り、推定式(1)の適用性は非常に良いことを確認した。

7. 2 荷重分担比に関する推定式(2)について

図 12 には解析結果と推定式(2)による近似解との比較結果をラフト基礎と群杭の沈下剛性の比(k_r/k_p) - パイルド・ラフト基礎における群杭部分とラフト基礎部分の負担荷重の比(P_r/P_p)との関係で示している。前述のように、推定式(2)は弾性理論に基づいて提案されたものであり、 k_r/k_p の値が 1 になる場合、群杭の分担荷重とラフト基礎の分担荷重は同じである。各解析ケースで、初期の弾性状態に近い場合あるいは非線形領域に至る場合に関わらず、 k_r/k_p の値によってはほぼ近似的な値となる場合もあるが、反対に、非常に大

図 11 解析結果と推定値の関係図

図 12 解析結果と推定式 (2) による近似解との比較

図 13 解析結果と推定値の関係図

大きく異なっている場合も見られる。杭本数の増加および杭長の増加と共に、群杭の荷重分担が大きくなり、杭配列ケース (1)、(2)、(3)、(4)、(5)、(6) の順に P_r/P_p の値が小さくなっていく。更に、杭配列ケース (6) を除けば、地盤定数のケース (A)、(B)、(C) の順に本解析結果が推定式 (2) による曲線により近づいていく傾向を示している。ケース (A)-(1)、(B)-(1)、(C)-(1) に対応する α_{rp} の値は 0.49 であり、 k_r/k_p が 1 より大きくなる場合でも、本解析結果と $\alpha_{rp}=0.49$ の推定式 (2) による近似解とはほぼ同じ値を示している。これらの結果をより明確にするために、各ケースの α_{rp} に対応する推定式 (2) の値で解析結果を除いた値を求め図 13 の誤差分布図を示した。これらの結果より、荷重分担比 (P_r/P_p) については、杭配列ケース (1)～(5) の場合には 0.40～1.34 の間に分布し、杭配列ケース (6) の場合の違いは非常に大きくなっていることが分かる (2.85～7.60)。杭配列ケース (6) の場合には、図 10 並びに図 11 に示した沈下剛性の良好な近似度に対して、本解析による荷重分担比は推定式 (2) よ

り極めて大きくなっており、杭本数や杭先端から基盤までの距離の影響が近似度に大きく現れたものと考えられる。ただし、弾性・非線形領域を問わずこれらの誤差の値は各ケース毎にあまり変動しないことが分かる。

8. まとめ

本報告では、ラフトおよび群杭の沈下剛性を用いてパイルド・ラフト基礎の沈下剛性と荷重分担比を推定する場合の地盤の非線形挙動の影響について検討した。3次元有限要素法および弾塑性理論によるモデル解析を行い、各沈下比に対応する割線剛性を用いて推定式の適用性を検討した内容は以下のとおりである。

- (1) 地盤が非線形挙動を有するものとして解析モデルを作成し、主に地盤の非線形挙動の影響を検討するために、解析モデルを簡便化し、均一な地盤に杭が等間隔に配置され、その上に正方形のラフト基礎が設置されることを仮定した。
- (2) 解析結果の精度を検証するために、直接基礎の極限支持力、弾性沈下量および群杭の弾性沈下量の理論値と解析値とを比較した結果、いずれもほぼ一致し、解析精度は良好であることが分かった。
- (3) ラフト基礎と群杭の沈下剛性からパイルド・ラフト基礎の沈下剛性を推定する式について、地盤が非線形挙動を示す場合にも、推定式により得られた曲線と本解析結果とはよく一致していることが分かり、非線形挙動による影響はあまりなく、非線形領域（沈下比 0.1 まで）でも推定式の適用性は非常に良い。
- (4) ラフト基礎と群杭の沈下剛性から、パイルド・ラフト基礎における群杭部分とラフト基礎部分の分担荷重の比を推定する式については、杭配列ケースならびに地盤モデルによっては非常に異なっている場合もあり、注意を要する。ただし、弾性・非線形領域を問わずこれらの誤差の値は各ケース毎にあまり変動しない。

本報告では、初期の地盤定数が一様な地盤の非線形挙動がパイルド・ラフト基礎の沈下剛性と分担荷重比を推定する式に及ぼす影響を検討し、剛性比に関する推定式の適用性は非常に良いことが確認できた。推定式の適用性についてさらに検討するためには、地盤定数が層毎に異なる多層地盤やラフト基礎の形状、ならびに長さが異なる摩擦杭を設置する場合等の影響を評価するためのモデルによるパラメータ解析が今後必要となる。

謝辞

本報告の内容については、日本建築学会基礎構造委員会「パイルド・ラフト基礎の設計法検討小委員会」で議論して頂きました。関

係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) Burland, J.B., Broms, B.B. and de Mello, V.F.B.: Behaviour of Foundations and Structures, Proc. 9th ICSMFE, Vol.2, pp.495-546, 1978.
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, pp.347-348, 2001, 10.
- 3) 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, 11.
- 4) 土屋 勉, 池田 隼人, 永井 宏：パイルド・ラフトで支持された建物の簡易沈下計算法, 日本建築学会技術報告集, 第22号, pp.167-170, 2005, 12.
- 5) Ta, L.D. and Small, J.C.: Analysis and Performance of Piled Raft Foundations on Layered Soil-Case Studies. Soils and Foundations Vol. 38, No.4, pp.145-450, 1998, 12.
- 6) 文 学章, 福和 伸夫：直接基礎、杭基礎とパイルド・ラフト基礎の動的相互作用特性, 日本建築学会構造系論文集, 第608号, pp.53-60, 2006, 10.
- 7) 鈴木 直子, 関 崇夫, 茶谷 文雄, 佐俣 紀一郎, 田中 耕太郎：地震時変動軸力の大きな高層建物を支持するパイルド・ラフト基礎, 日本建築学会技術報告集, 第15巻, 第29号, pp.89-94, 2009, 2.
- 8) 長尾 俊昌, 桑原 文夫, 小林 治男, 渡邊 徹：水平力を受けるパイルド・ラフト基礎の挙動解析, 日本建築学会構造系論文集 第577号, pp.63-68, 2004, 3.
- 9) 永井 宏, 土屋 勉：水平力を受けるパイルド・ラフトの非線形解析モデルおよび原位置水平載荷実験への適用例, 日本建築学会構造系論文集 第589号, pp.113-119, 2005, 3.
- 10) 真野英之, 中井正一：水平力を受けるパイルド・ラフト基礎の簡易解析法に関する一考察—ラフトの接地と回転による地盤性状の変化の考慮—, 日本建築学会構造系論文集 第589号, pp.121-127, 2005, 3.
- 11) Yamashita, K., Tomono, M. and Kakurai, M.: A Method for Estimating Immediate Settlement of Piles and Pile Groups. Soils and Foundations Vol.27, No.1, pp.61-67, 1987, 3.
- 12) 土屋 勉, 吉田 定展, 原口 和弥：ハイブリッド法による地盤と基礎の相互作用解析—I, 日本建築学会北海道支部建築報告集 No.68, pp.129-132, 1995, 3.
- 13) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, pp.339-348, 2001, 10.
- 14) Randolph, M.F.: Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts. 13th ICSMFE, New Delhi, India, pp.61-82, 1994.
- 15) Clancy, P. and Randolph, M.F.: Simple Design Tools for Piled Raft Foundations, Geotechnique 46, No.2, pp.313-328, 1996.
- 16) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, pp.113-146, 2001, 10.
- 17) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, pp.105-109, 2001, 10.
- 18) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, pp.124-125, 2001, 10.
- 19) 松岡 理, 勅使川原 誠司：Transversely-Isotropy の集中荷重の問題—3-Boussinesq の解の応用, 日本建築学会論文報告集, No.262, pp.93-101, 1977, 12.
- 20) Poulos, H.G. and Davis, E.H.: Load Transfer in End-Bearing Steel H-Piles, A.S.C.E., Vol.89, No.SM2, pp.1-25, 1963.
- 21) Poulos, H.G. and Davis, E.H.: Pile Foundation Analysis and Design, John Wiley & Sons, pp.86-89, 1980.
- 22) URL:<http://ja.scribd.com/doc/187383736/1980-POULOS-DAVIS-Pile-Foundation-Analysis-and-Design#scribd> (参照 2015.2.4)

ANALYTICAL STUDY ON COMBINED STIFFNESS AND LOAD SHARING OF PILED-RAFT FOUNDATION CONSIDERING NONLINEAR BEHAVIOR OF GROUND

Haruyuki YAMAMOTO * and *He HUANG* **

* Prof., Graduate School for International Development and Cooperation of Hiroshima University, Dr. Eng.

** Postdoctoral Fellowship, Hiroshima University, Dr. Eng.

The piled-raft foundation transfers loading to the ground by the raft and the piles together. It was proposed in the 1970s and is widely used with controlling settlement. Many researches have been done on the behavior of the piled-raft foundation. For example, the settlement behavior of the building supported by piled-raft foundation and behavior of the piled-raft foundation on layered soil, etc. The piled-raft foundation is described as a kind of the combined foundation by "The construction foundation structure design manual (AIJ design standard)" revised in 2001, and the case which used the piled-raft foundation is increasing. The simplified estimate equations are used for the primary design which describes behavior of the piled-raft foundation shown in the AIJ design standard, and these are derived from the equations by Randolph. The equations by Randolph presume the settlement rigidity of the piled-raft foundation and the ratio of loading share from the settlement rigidity of raft and pile foundation. These equations are proposed based on a theory of elasticity. However, ground has nonlinear behavior even if under small loading level. Therefore, it is also necessary to estimate the applicability of these equations when ground under nonlinear behavior.

It is not realistic to do a prototype test for this research because it's costly. On the other hand, analysis accuracy improves, a complicated foundation situation and mechanical characteristic are imitated by development of the numerical-analysis techniques, such as finite element analysis. Arbitrary boundary shape and boundary conditions can also be expressed with sufficient accuracy. Furthermore, since a nonlinear problem can also be dealt with, it can use as the numerical simulation technique to which the analysis parameter was changed variously. In this research, model analysis is performed by using the 3-dimensional finite element method with elastic-plastic theory. The analyses were carried out with elastic-plastic elements which were applied Drucker-Prager failure criterion of the ground with associated flow rule. In order to evaluate the validity of a calculation result, analysis accuracy was verified by discussion the elastic settlement of ground, pile foundation and the ultimate bearing capacity of raft foundation, respectively. Three different ground conditions are assumed. There are, in the case of the soft ground (case (A)), the intermediate ground (case (B)) and the hard ground (case (C)). Elasticity modulus of the ground, the internal friction angle and adhesive strength are increased in the order of (A), (B), (C), and the ground became stronger and harder. A total of 15 analyses cases were performed in combination with the parameter of piles spacing and the soil characteristics. Furthermore, settlement rigidity is treated by secant rigidity in this report. The analysis result was investigated for every increment step of a settlement ratio increasing 0.01 and the last at 0.1. For the equations which presume the settlement rigidity of the piled-raft foundation and the ratio of loading share, it finds that the analysis results are well in agreement with the results obtained by the estimate equation in each case under all ground conditions in this case study. There is almost no influence by a nonlinear behavior and the applicability of this estimate equation is very well also in a nonlinear domain (within the settlement ratio = 0.1).

(2014年9月8日原稿受理, 2015年3月5日採用決定)