

パイルド・ラフト基礎の簡易沈下計算法

正会員 ○大澤 隆幸*1
同 土屋 勉*2
会員外 青木 嵩宜*3

2. 構造-4.基礎構造-g.併用基礎

パイルド・ラフト, 沈下, 簡易計算法, 鉛直荷重, 軟弱地盤

1. はじめに

パイルド・ラフト基礎は直接基礎(ラフト)と杭基礎を併用した基礎形式¹⁾であって、荷重に対してラフトと杭が複合して抵抗する。近年、パイルド・ラフト基礎の沈下や支持力に関する研究の進展に伴い、中・高層建築物への施工例²⁾が増えてきている。今後、軟弱地盤に建設される住宅や比較的小規模な構造物に対しても、同工法の普及を図ることを視野にいとると、より簡便な沈下計算法の構築が必要である。

本報告では、パイルド・ラフトの沈下を簡便に計算することを目的として、単杭の沈下量に群杭効果による沈下増分を加算する計算方式について検討する。

2. 計算法の考え方

図-1は簡易計算法の概念であって、単杭の沈下量と群杭効果による沈下の和として計算される。本計算法では、パイルド・ラフトを構成する各杭頭に作用する荷重分担率 ϕ と杭先端面深度への応力分散係数 η が重要なファクターとして位置付けられる。

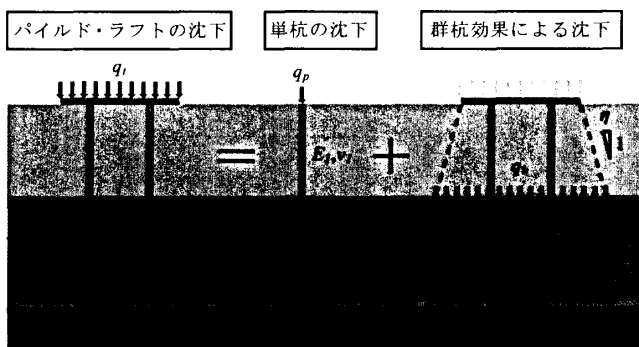


図-1 簡易沈下計算法の概念

2. 1 単杭の沈下

単杭の沈下は主として杭近傍の地盤変形に起因して発生すると考えて、荷重分担率 ϕ に応じた杭頭荷重を作用させて沈下計算を行う。図-2に示す荷重伝達法を用いるのを基本としている。

(1) 杭周囲の近傍地盤の剛性方程式

杭周囲近傍地盤の摩擦バネに関する剛性方程式は、(1)式のように杭軸部の要素に接する地盤の剛性 $\pi \cdot d \cdot \ell \cdot k_s$ が上下の節点に振り分けられる要素型のせん断バネで結合させた。すなわち、上下にある i, j 点がそれぞれ単位の変位を生じると、自点と他点に2:1の割合で摩擦力が作用するので、節点力と変位の間には次のような釣り合い式が得られる。

$$\begin{Bmatrix} F_i \\ F_j \\ F_k \end{Bmatrix} = \pi \cdot d \cdot \ell / 2 \cdot k_s \begin{bmatrix} 2/3 & 1/3 & -1 \\ 1/3 & 2/3 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \\ \delta_k \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

- F_i, F_j, F_k : i, j, k の鉛直方向節点力
- $\delta_i, \delta_j, \delta_k$: i, j, k の鉛直方向節点変位
- d : 杭径
- ℓ : 要素長さ
- k_s : 杭周囲のバネ剛性

この時のバネ定数 k_s は、Randolph³⁾による杭の沈下計算法を利用して、(2)式のように逆算して用いた。なお、一般地盤のバネ定数は無限大と仮定した。

$$k_s = \frac{E_s}{4d(1 + v_s)} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 E_s : 杭周囲地盤の変形係数
 v_s : ポアソン比

A simplified approach for estimating settlement of piled raft.

OSAWA Takayuki et al.

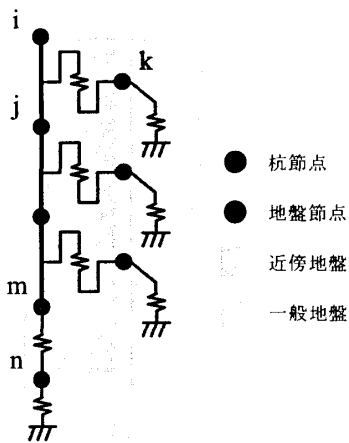


図-2 荷重伝達法

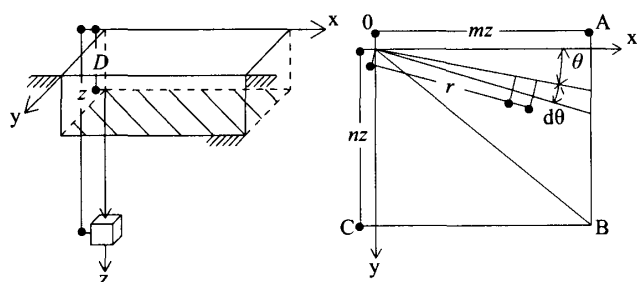


図-3 矩形分布荷重の沈下

(2) 杭先端の近傍地盤の剛性方程式

杭先端近傍のバネに関する剛性方程式は、(3)式のようにその節点に生じる変位量のみに関する節点型とする。

$$\begin{Bmatrix} F_m \\ F_n \end{Bmatrix} = \pi \cdot d^2 / 4 \cdot k_b \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \delta_m \\ \delta_n \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

- F_m, F_n : m, n の節点力
- δ_m, δ_n : m, n の節点変位
- k_b : 杭先端のバネ剛性

このときのバネ係数 k_b は、等分布荷重を受ける平均沈下量の計算式を用いて、(4)式のように求めた。

$$k_b = \frac{4E_b}{\pi(1 - \nu_b^2)d} \dots\dots\dots (4)$$

- ここで、 E_b : 杭先端地盤の変形係数
- ν_b : ポアソン比

2. 2 群杭効果による沈下増分

群杭効果は、杭先端深度に矩形等分布荷重 q_b を作用させた時の沈下増分として、図-3 のように Mindlin の第一解を積分した(5)式⁴⁾で計算する。

$$\xi = \frac{q_b}{16\pi(1 - \nu)G} \int \left[\frac{(z - D)^2}{R_1^3} + \frac{3 - 4\nu}{R_1} + \frac{5 - 12\nu + 8\nu^2}{R_2} + \frac{(3 - 4\nu)(z + D)^2 - 2(z + D)D + 2D^2}{R_2^3} + \frac{6(z + D)^2 z D}{R_2^5} \right] dr d\theta \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $R_1 = \sqrt{r^2 + (z - D)^2}$, $R_2 = \sqrt{r^2 + (z + D)^2}$

- ξ : 鉛直変位、 G : せん断弾性係数、
- ν : ポアソン比、 z : 計算点の深度
- D : 載荷点の深度
- r : 計算点の載荷点からの水平距離

なお、杭先端以深が多層系地盤の場合には、Steinbrenner の近似解¹⁾にならって、杭先端以深の各層の圧縮量を合計する。

3. 杭の荷重分担率 ϕ の解析

上記の計算法では、杭の荷重分担率 ϕ が予め適切に算定されていることが前提になっている。そこで、鉛直荷重が作用するパイルド・ラフトの諸元を種々変化させた解析結果に基づいて、杭の荷重分担率 ϕ を略算する方式について検討する。

3. 1 ハイブリッド解析モデル

図-4 にパイルド・ラフトの解析に用いたハイブリッドモデル⁵⁾ (以下、HYM と略記) を示した。すなわち、杭には線要素、ラフトには薄板要素を用いた有限要素法を適用し、地盤を介したこれらの相互作用については、Mindlin 解を導入した境界要素法を適用し、両者を結合する方法である。

解析を行ったパイルド・ラフトの形状を図-5 に示す。ラフト面に単位の等分布荷重 w が作用する正方形で、杭が等間隔に配置されているパイルド・ラフトを対象とする。

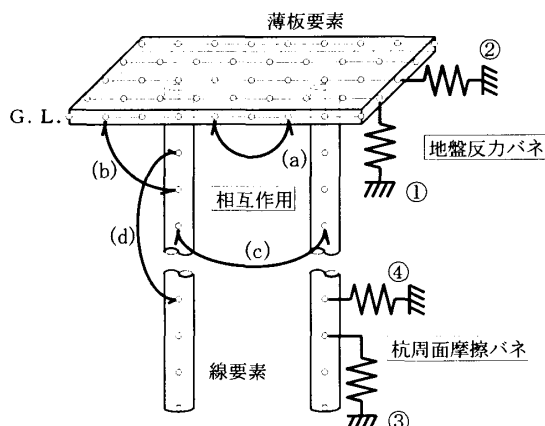


図-4 ハイブリッドモデル

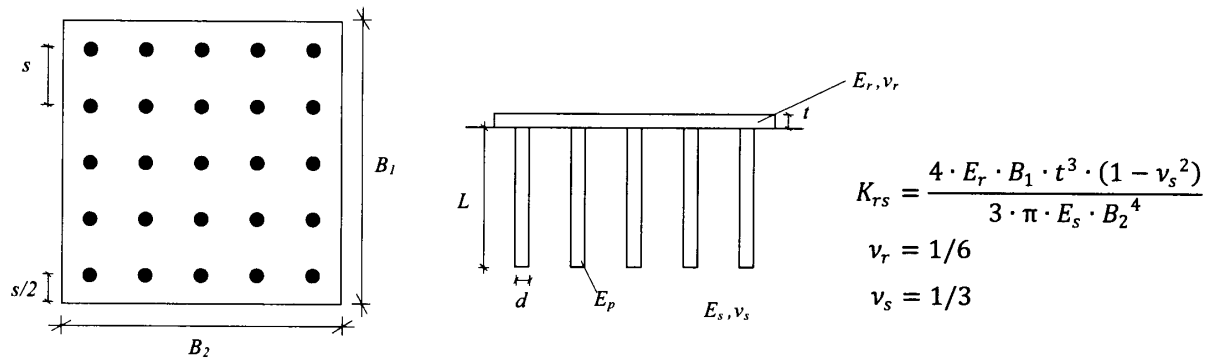


図-5 解析モデル

$$K_{rs} = \frac{4 \cdot E_r \cdot B_1 \cdot t^3 \cdot (1 - v_s^2)}{3 \cdot \pi \cdot E_s \cdot B_2^4}$$

$$v_r = 1/6$$

$$v_s = 1/3$$

表-1 解析因子

杭間隔 s/d	5	10	20
杭長 L/d	12.5	25	50
変形係数 $\log(E_p/E_s)$	3	4	5
杭本数 $n^{1/2}$	1	3	5

解析の際に変化させた因子は、表-1 に示すとおりで、杭間隔 s/d 、杭長 L/d 、杭と地盤のヤング係数比 E_p/E_s 、杭本数 n であり、太枠で囲んだ基本モデルを設定した。したがって、ある因子を変化させる場合、他の因子は全て基本モデルの値をとるものとする。なお、ラフトと地盤の相対剛性 Krs の影響は小さかったので、本報告では $Krs=0.1$ と一定とした。

3. 2 解析結果

表-2 の a) は、ハイブリッド法による解析結果であるが、記号の意味を以下に示す。

$$\phi_{ana} = \left(\frac{P_p}{P_p + P_r} \right) \dots \dots \dots (6)$$

- ϕ_{ana} : ハイブリッド法による杭頭荷重分担率
- P_p : 杭頭荷重の合計
- P_r : ラフト部の負担荷重

表中の a) によると、標準モデルの杭頭の荷重分担率は 51.4% となった。パイルド・ラフトの諸元を変化させると、杭間隔 s/d が狭い程、杭長 L/d が長い程、杭のヤング係数 E_p/E_s が大きい程、杭本数 n が多い程、杭頭の荷重分担率が高くなる傾向がみられる。

4. 杭の荷重分担率 ϕ の略算法

4. 1 略算法の誘導

ハイブリッド解析結果に基づいて杭頭荷重分担率の略算法を誘導するにあたり、以下の用語を定

表-2 HYM による解析結果

		a) $\phi_{ana} (\%)$	b) P_{rp}	c) ζ
s/d	5	73.6	0.359	0.379
	10	51.4	0.946	1.000
	20	22.4	3.464	3.664
L/d	12.5	28.8	2.472	2.615
	25	51.4	0.946	1.000
	50	66.5	0.504	0.533
$\log(E_p/E_s)$	3	45.4	1.203	1.272
	4	51.4	0.946	1.000
	5	51.7	0.934	0.988
$n^{1/2}$	1	32.3	2.096	2.217
	3	51.4	0.946	1.000
	5	57.2	0.748	0.791

義して解析結果を表-2 の b)~c) に整理した。

$$P_{rp} = \frac{P_r}{P_p} \dots \dots \dots (7)$$

P_{rp} : ラフトと杭の荷重負担比

$$\zeta = \frac{P_{rp}}{P_{rp}^*} \dots \dots \dots (8)$$

ζ : 各モデルの P_{rp} と基本モデルの P_{rp}^* の比
略算法の考え方は、次のように標準モデルのラフトと杭の荷重負担比 P_{rp}^* に各因子による修正係数 f を乗じて、種々の諸元を有するパイルド・ラフトの P_{rp} を算定するものである。

$$P_{rp} = \zeta \cdot P_{rp}^* \dots \dots \dots (9)$$

$$\zeta = f_s \cdot f_L \cdot f_{Ep} \cdot f_n \dots \dots \dots (10)$$

- f_s : 杭間隔 s/d に関する修正係数
- f_L : 杭長 L/d に関する修正係数
- f_{Ep} : 杭のヤング係数 E_p/E_s に関する修正係数
- f_n : 杭本数 n に関する修正係数
- $P_{rp}^* = 0.946$ (基本モデルの値)

表-3 解析因子

Case	1	2	3	4	5	6	7	8
s/d	5	20	5	20	5	20	5	20
L/d	12.5	12.5	50	50	12.5	12.5	50	50
$\log(E_p/E_s)$	3	3	3	3	5	5	5	5
$n^{1/2}$	2	2	2	2	2	2	2	2
Case	9	10	11	12	13	14	15	16
s/d	5	20	5	20	5	20	5	20
L/d	12.5	12.5	50	50	12.5	12.5	50	50
$\log(E_p/E_s)$	3	3	3	3	5	5	5	5
$n^{1/2}$	4	4	4	4	4	4	4	4

表-2 の ζ と各因子の関係を，指数関数 ($y=ax^b$) で近似させた後，基本モデルに一致させるための係数を乗じた結果が下式である。

$$f_s = 0.0229 \cdot (s/d)^{1.64} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$f_L = 40.5 \cdot (L/d)^{-1.15} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$f_{Ep} = 2.03 \cdot \{\log(E_p/E_s)\}^{-0.511} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$f_n = 2.05 \cdot (\sqrt{n})^{-0.653} \quad \dots\dots\dots (14)$$

杭頭荷重分担率の略算値 ϕ_{cal} は，上記の P_{rp} を下式に代入して得られる。

$$\phi_{cal} = \frac{1}{(1 + P_{rp})} \quad \dots\dots\dots (15)$$

4. 2 略算法の適用性

上記の(11)~(14)式は 1 つの因子のみを変化させて，他の因子は基本モデルと同じである。そこで，表-3 のように種々の因子を同時に変化させたモデルについて，ハイブリッド解析結果 ϕ_{ana} と略算結果 ϕ_{cal} を比較したのが図-6 である。両者の荷重分担率は，基本モデルの諸元から異なる同士を組み合わせたケースであっても，概ね 10%以内の差となっている。

5. おわりに

パイルド・ラフトの簡易な沈下計算法として，単杭の沈下量と群杭効果による沈下増分を加算する方法を構築した。本法では，杭頭荷重分担率 ϕ

杭頭荷重分担率 ϕ
0% 20% 40% 60% 80% 100%

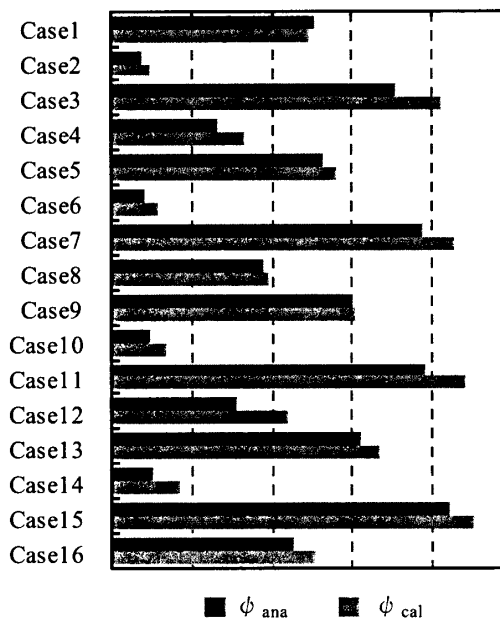


図-6 杭頭荷重分担率 ϕ の比較

と応力分散係数 η が必要である。

杭頭荷重分担率 ϕ については，諸元を種々変化させたパイルド・ラフトのハイブリッド解析を行い，その結果に基づいて ϕ の略算式を誘導した。

今後，地中への応力分散係数 η について検討すると共に，建物の沈下実測例を収集して本報の簡易計算法で得られる建物の沈下分布との比較を行う予定である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001.10.
- 2) 加倉井正昭：建築分野における併用基礎の利用，基礎工，Vol.37, No.10, pp.2-9, 2009.10.
- 3) Randolph and Wroth：Analysis of deformation of vertically loaded piles, ASCE, 104(GT12), pp1465-1488, 1978.
- 4) 秋野矩之：地盤の剛性評価と建物の沈下予測 建物の即時沈下予測方法(その1)，日本建築学会構造系論文報告集，No.412, 1990.6.
- 5) 土屋勉，永井宏：鉛直荷重を受けるパイルドラフトの応力・変形に関する解析的研究，構造工学論文集，Vol.47B, pp.375-380, 2001.3.

*1 室蘭工業大学大学院 博士前期課程
*2 室蘭工業大学大学院 教授・工博
*3 榊大林組

Graduate School, Muroran Inst. of Tech.
Professor, Muroran Inst. of Tech., Dr. Eng.
Obayashi Corp.