

パイルド・ラフトで支持された 建物の簡易沈下計算法

A PRACTICAL APPROACH FOR SETTLEMENT OF BUILDING SUPPORTED BY PILED-RAFT

土屋 勉 ——*1 池田隼人 ——*2
永井 宏 ——*3

Tsutomu TSUCHIYA ——*1 Hayato IKEDA ——*2
Hiroshi NAGAI ——*3

キーワード：
パイルド・ラフト, 沈下, 実用計算法, 適用例

Keywords：
Piled-raft, Settlement, Practical solution, Application

This paper presents a new practical approach (named "CEM") for quickly and easily calculating the settlement of piled rafts in layered soft soils. We introduce the new concept "the equivalent column" for pile and surrounding soils in the method. Calculating the settlement of piled raft using the CEM provides a close approximation to results observed from the 5-story and the 3-story buildings in Tokyo area, as well as obtained from parametric studies by the three-dimensional finite element method.

1. はじめに

性能設計の考え方が普及するのに伴って、軟弱地盤における基礎として、パイルド・ラフト工法の有効性が指摘されるようになった。本工法を検討する場合は、沈下抑制のために使用する摩擦杭の配置を如何に効率よく設定するかが重要なポイントとなることから、沈下分布を事前に精度良く推定することが重要である。

沈下予測法としては、有限要素法¹⁾²⁾（以下FEMと略称）やMindlin解を利用したハイブリッド法³⁾⁴⁾⁵⁾など既に多くの手法が提案されている。しかし、橋梁基礎などの土木構造物に比べて、構造物平面が広くて杭本数が多い建築物においては、最近のコンピューター能力が向上したとはいえ、これらの解析法を実務的な構造設計で用いるのは容易ではない。パイルド・ラフトが常に軟弱地盤における基礎工法の選択肢の一つとして検討されるようになるためには、建物の沈下を極めて簡便に予測する計算法が必要と考える。

本報告では、当研究室で従来提案してきた実用計算法⁶⁾に改良を施し、新たに等価コラムという概念を導入した簡易計算法(コラム置換法, 以下CEMと略称)を構築した後、FEM解析結果および沈下実測例と比較することによって本計算法の適用性を検証する。

2. コラム置換法 (CEM) の構築

図1は、杭体とその周辺地盤をコラムに置換して、上部構造と深部地盤に連成する考え方を示したものである。上部構造-杭-地盤の連結部では、鉛直方向の変位と反力のみを考慮した2つのインターフェイス（杭頭 Int-A, 杭先端 Int-B）を設けており、相互作用システムは(1)式のような剛性方程式で表される。

$$\{P\} = ([\alpha] + [Ce] + [\beta] + [\gamma]) \cdot \{\delta\} \quad \dots\dots(1)$$

$\{P\}$: 上部構造の荷重ベクトル

$\{\delta\}$: 基礎（杭頭部と杭先端部）の沈下ベクトル

$[\alpha]$: 上部構造の剛性マトリックス

$[Ce]$: 置換コラムの軸方向剛性マトリックス

$[\beta]$: 杭先端以浅地盤のせん断剛性マトリックス

$[\gamma]$: 杭先端以深地盤の剛性マトリックス

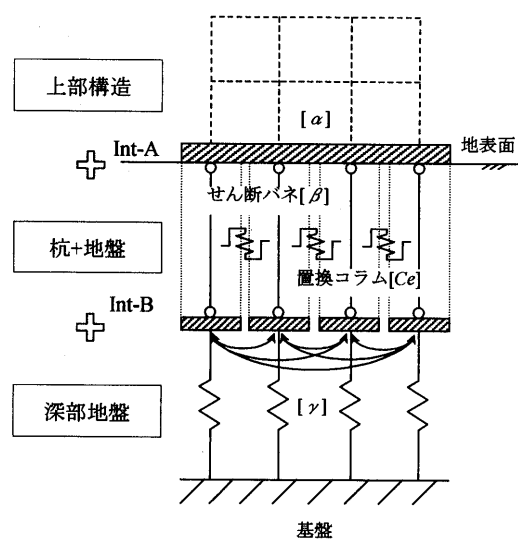


図1 一体解析の考え方

*1 室蘭工業大学 教授・工博
(〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1)

*2 ㈱日本設計 修士(工学)

*3 舞鶴工業高等専門学校 助手・博士(工学)

*1 Prof., Muroran Inst. of Tech., Dr. Eng.

*2 Nihon Sekkei Co., Ltd., M. Eng.

*3 Research Assoc., Maizuru National College of Tech., Dr. Eng.

(1) [α]マトリックス

上部構造の剛性評価としては、施工進展を考慮することを原則とする。RC骨組みの場合には、その階のコンクリート打設時点では剛性が0で、次の階の施工時点で所定の剛性が発現すると仮定する。上部構造を基礎底版や格子梁で代表させる場合には、基礎施工時点は剛性が0なので、1階施工時点以降が解析の対象範囲となる。なお、上部構造の剛性マトリックスは変位成分と回転角成分を有するので、鉛直方向の変位成分以外は事前にサブストラクチャー法⁷⁾を用いて別途消去して(1)式に組み込む。

(2) [Ce]マトリックス

杭とそれを取り囲む杭先端以浅の地盤のモデル化にあたっては、これらの軸方向剛性が等価になるように置換した円柱コラム(隣接する杭の中間線で囲まれた平面積を円形に置換)で評価する。なお、杭間隔が広い場合や杭配置が複雑な場合には、地盤のみのコラムを設定することもできる。図2のような多層地盤の場合は、地盤のみで等価な変形係数 E_s を算出した後、杭との面積比を考慮してコラムの等価変形係数 E_{equ} を以下のように算出する。

$$E_s = \frac{l_1 + l_2 + \dots + l_n}{\frac{l_1}{E_{s1}} + \frac{l_2}{E_{s2}} + \dots + \frac{l_n}{E_{sn}}} \quad \dots\dots(2)$$

$$E_{equ} = \frac{E_p \cdot A_p + E_s \cdot A_s}{A_p + A_s} \quad \dots\dots(3)$$

また、コラムがラフト外周部に位置する場合には、杭の周面摩擦力が外側領域に伝達するものとして、図3に示す軸力分布を仮定する。すなわち、杭周面を4つ面に区別して、辺部および隅角部では杭周面摩擦力がそれぞれ1面および2面から外部地盤に伝達するとみなした。したがって、辺部と隅角部の等価コラムのヤング係数は、一般部である(3)式を次のように補正した。

$$E_{辺部} = \frac{1}{\left(1 + \frac{3}{4}\right) \cdot \frac{1}{2}} E_{equ} = \frac{8}{7} E_{equ}, E_{隅角部} = \frac{1}{\left(1 + \frac{2}{4}\right) \cdot \frac{1}{2}} E_{equ} = \frac{4}{3} E_{equ} \quad \dots\dots(4)$$

(3) [β]マトリックス

隣接するコラム間では両者の沈下差(相対沈下)によって、せん断力が伝達されると仮定して、隣接する杭間地盤を図4に示すような壁状のせん断変形体⁶⁾(杭間隔 B , 杭長 L , 奥行き W)に置換した。(5)式はそれによる杭間地盤の剛性方程式であって、 $P_i \sim P_l$ および $\delta_i \sim \delta_l$ はそれぞれ $i \sim l$ 点の荷重および沈下を示す。なお、せん断剛性が有効に寄与する範囲を考慮するために、奥行き W に有効幅係数 ξ ($0 \leq \xi \leq 1$) を乗じる方式とした。

$$\begin{Bmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \\ P_l \end{Bmatrix} = \xi \cdot \left(\frac{W \cdot L \cdot G}{B} \right) \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ 3 & 6 & 3 & -6 \\ 6 & 3 & -6 & 3 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ 3 & 6 & 3 & 6 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ 6 & 3 & 6 & 3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \\ \delta_k \\ \delta_l \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(5)$$

(4) [γ]マトリックス

杭先端以深の地盤モデルについては、Mindlin 解を利用して求めた全コラム間の変位影響係数 I_{ij} の逆マトリックスである。なお、 I_{ij} の

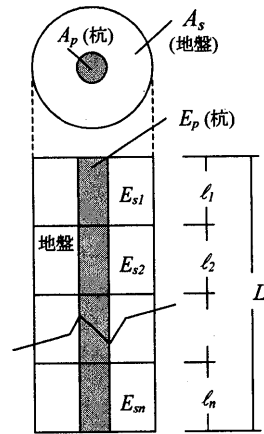


図2 置換コラム

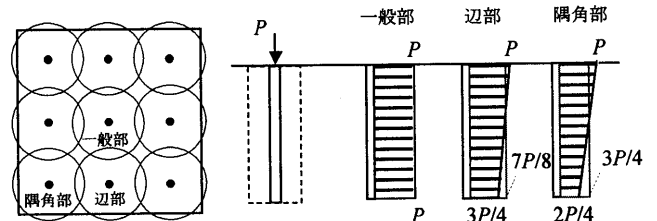


図3 置換コラムの軸力分布

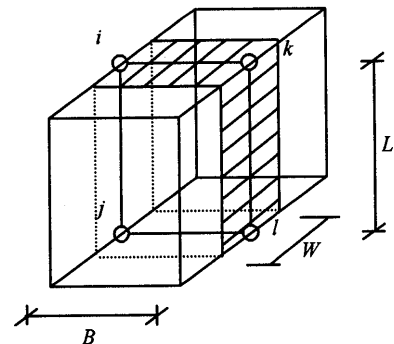


図4 杭間地盤のせん断モデル

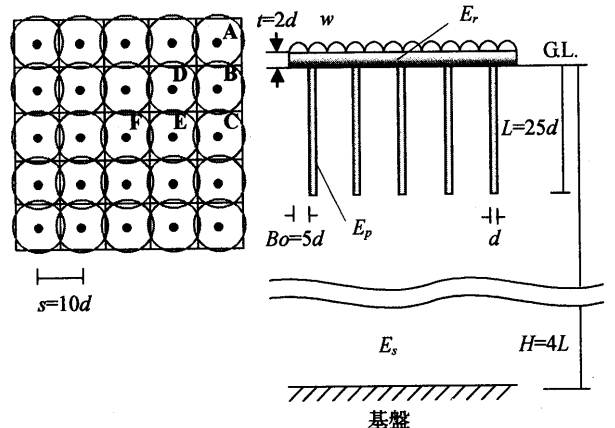


図5 解析モデルの諸元

対角要素では円形等分布荷重が作用するとして Mindlin 解を積分している。杭先端以深の多層地盤のモデル化にあたっては、別途予備計算を行った結果を参考にして、地盤層厚 $H/L > 3$ のときは Steinbrenner の近似解⁹⁾を用いるが、 $H/L \leq 3$ のときは基盤上面に鏡像原理⁹⁾を導入している。

3. FEM 解析値との比較

図5に示す正方配置された $5 \times 5 = 25$ 本の杭を有するパイルド・ラフトについて、本報告の CEM 計算値と FEM 解析値を比較する。上部構造は薄板要素で構成されたラフトにモデル化しており、等分布荷重 w が作用する場合を検討対象とする。

3.1 均一地盤の場合

図6は、(a)ラフト中央部沈下量 S_F と (b)中央-隅角間変形角 θ_{AF} について、地盤の変形係数 E_s を変化させて比較したものである。ここで、FEM 解析値との近似度を理解しやすくするために、図中には $\pm 10\%$ の誤差範囲を示してある。CEM 計算値として $\xi = 0.5$ および 0 の2通りを示したが、 S_F は ξ の値に関わらず FEM 解析値に良く近似した。 θ_{AF} については、 E_p/E_s の広い範囲に渡り置換コラム間のせん断力伝達を無視した $\xi = 0$ のモデルの近似度が良好であった。

3.2 多層地盤の場合

多層地盤に対する適用性を検討するために、図7のように杭先端以浅が2層になる場合 (Type1~4) および杭先端以深が2層となる場合 (Type5~8) を設定した。ここで、CEM の有効幅係数は $\xi = 0$ とした。

図8はラフト中央部沈下量 S_F を Type 別に比較したものである。CEM 計算値は FEM 解析値に比べて、杭先端以浅の地盤剛性が杭先端以深のそれよりも小さい場合には小さく、逆の地盤剛性分布では大きくなる傾向がある。ただし、これらの差はわずかであり、CEM 計算値と FEM 解析値は概ね近似している。

図9はラフトの中央部と隅角部間の変形角 θ_{AF} であるが、Type8を除いて、CEM 計算値は FEM 解析値の違いは 12% 以下であり、良く近似している。

4. 実測値との比較

4.1 関東ローム地盤における中層建物

正方形平面を有する関東ローム地盤上の中層建物 (RC5 階、建築面積約 552m^2 、平均接地圧約 86kN/m^2) の実測例¹⁰⁾を CEM 計算値と比較する。杭はソイルセメントと H 鋼によって構成されており、ヤング係数 $E_p = 9800\text{MPa}$ 、杭長 15.6m とした。計算における上部構造の剛性はラフトのみであって、ラフト厚 300mm 、ヤング係数 $2.1 \times 10^4\text{MPa}$ 、ポアソン比 $1/6$ とした。

図10は杭配置に基づいて等価コラムを配したものであるが、地盤のみのコラムも設定してある。荷重は基礎設計荷重から基礎重量 (7.1kPa) を差し引いた表1の値とした。

図11は沈下量に関する CEM 計算値と実測値を比較したものであるが、両者はほぼ近似した。

図12はA通りとC通りの杭頭軸力を比較したものであるが、CEM 計算値 (Cal-A, Cal-C) は実測値 (Me-A, Me-C) よりも幾分大きい。杭とラフトの荷重分担率は、実測値では杭:ラフト = $49:51$ であったが、CEM 計算値では $69:31$ であった。このような違いが生

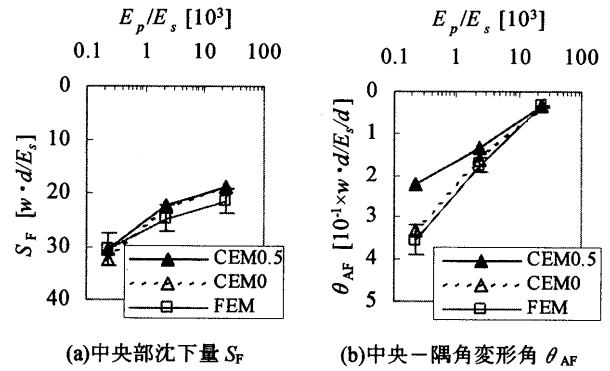


図6 地盤の変形係数 E_s の影響

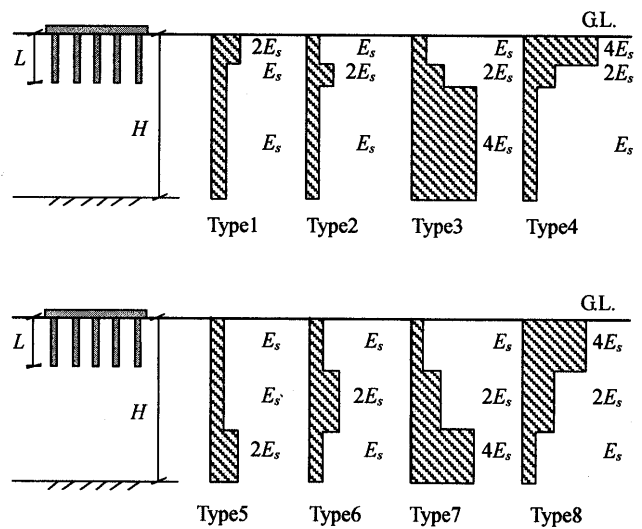


図7 地盤の変形係数分布

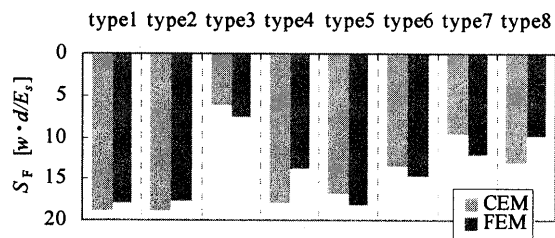


図8 ラフト中央部沈下量 S_F

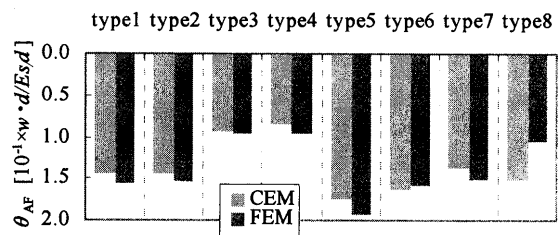


図9 中央-隅角変形角 θ_{AF}

じた原因の一つとして、今回の CEM では施工過程における地下水位の上昇を考慮しなかったことが上げられる。

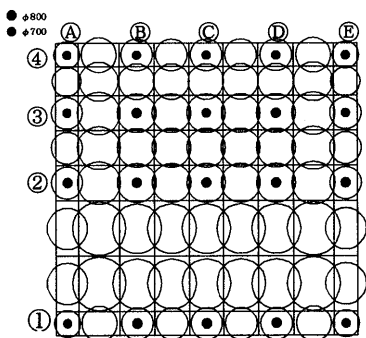


図10 杭径およびコラム配置

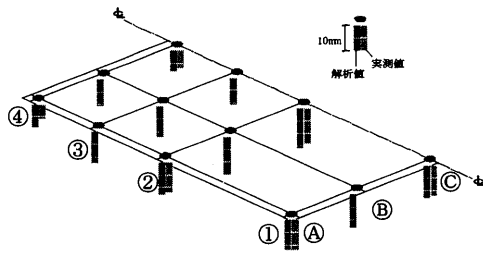


図11 沈下分布図

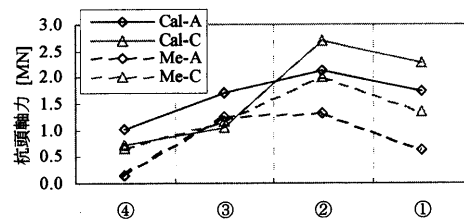


図12 杭頭軸力の比較

表1

	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
④	1.17	1.66	0.88	1.43	0.88
③	2.10	2.34	1.34	2.68	1.46
②	2.56	3.48	3.57	3.38	2.60
①	1.98	2.80	2.67	2.43	1.71

(MN)

表2 地盤の変形係数

深度 [m]	E_0 [MPa]	低減率	E [MPa]
2	110	0.12	13.1
7	80	0.30	24.1
12	70	0.55	38.5
25	95	0.63	59.8
40	165	0.78	129.5

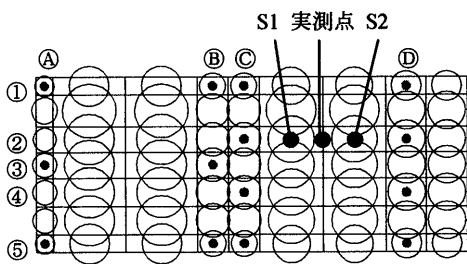


図13 コラム配置

表3 施工過程と荷重条件

	基礎1F打設時	2F床打設時(増分)	3F床打設時(増分)
荷重条件	18.8 [kN/m ²]	15.7 [kN/m ²]	9.4 [kN/m ²]

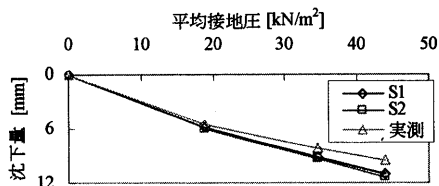


図14 沈下量の比較

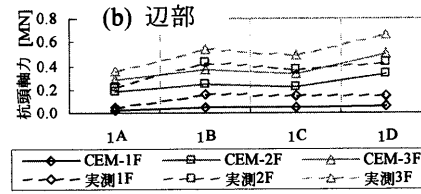
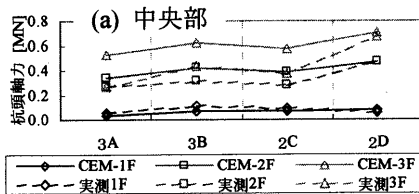


図15 杭頭軸力の比較

4. 2 沖積粘性土地盤における中層建物

図13に示す長方形平面を有する沖積粘性土地盤上の中層建物¹¹⁾(RC壁式3階, 建築面積約319m², 平均接地圧約70kN/m²)の実測例について同様に検討する. 文献¹¹⁾に基づいた地盤各層の変形係数を表2に示す. 杭のヤング係数 E_p は中空の断面を中実杭に置換して $E_p=2.3 \times 10^4$ MPa, 杭長25m, 杭径600mmとした. ラフトは, 厚さ600mm, ヤング係数 2.1×10^4 MPa, ポアソン比1/6とした. 上部構造剛性は基礎と1F施工時は0であり, 2F床打設以降にラフト部のみの剛性を考慮した. 表3は施工過程を考慮した荷重条件である.

図14は施工過程に伴う沈下量を比較したものである. CEM計算値(S1, S2)は実測値よりもわずかに大きい傾向があるものの, ラフト剛性が発揮されると中央付近の沈下増大が鈍化するなど実測の挙動に概ね近似した.

図15は杭頭軸力である. CEM計算値は, (a)の中央部ではほぼ実測値に近似し, (b)の外周部では幾分小さくなるが, 全体の荷重分担率については, 実測値では杭:ラフト=51:49に対してCEM計算値では53:47と良く近似した.

5. まとめ

パイルド・ラフトの沈下分布と杭軸力軸力を簡便に推定するコラム置換法(CEM)を構築して, その適用性について検討してきたが, 以下のようにまとめられる.

① 種々の変形係数を有する均一地盤と多層地盤に対して, 本報告

のCEM計算値とFEM解析値による沈下分布は概ね良く近似した.

② CEM計算値はパイルド・ラフトの実測挙動と概ね近似したが, 計算精度を更に向上させるためには, 工事に伴う地下水位変化や山留め壁の影響を評価するモデルの開発が今後必要となる.

参考文献

- 1) 土屋 勉, 大塚和夫, 小幡 守: 建築構造物の施工進展を考慮した沈下過程解析, 日本建築学会構造系論文報告集, No.376, pp62-70, 1987.5.
- 2) R. Katzenbach, U. Arslan and O. Reul: Soil-structure interaction of a piled raft foundation of a 121m high office building on loose sand in Berlin, Proc. Deep Foundation on Bored and Augur Piles, pp.215-221, 1998.
- 3) M.Kakurai, K.Yamashita and M.Tomono: Settlement behavior of piled raft foundation on soft ground, Proc. 8th Asian Regional Conf. on S.M.F.E, Vol.1, pp373-376, 1987.
- 4) P. Clancy and M.F. Randolph: An approximate analysis procedure for piled raft foundations, Int. Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.17, pp.849-869, 1993.
- 5) 日光秀和, 土屋 勉, 永井 宏: 鉛直荷重を受けるパイルドラフトの弾塑性ハイブリッド解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.653-654, 2002.8.
- 6) 土屋 勉, 谷岡靖之: 摩擦杭で支持された建物の簡易沈下計算法, 日本建築学会構造系論文集, No.489, pp33-39, 1996.11.
- 7) O.C.ツィエンキーヴィッツ著, 吉識雅夫 監訳: マトリックス有限要素法, 培風館, 1975.
- 8) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 2001.10.
- 9) H.G.Poulos and E.H.Davis: Pile foundation analysis and design, John Wiley & Sons, 1980.
- 10) 山田 毅, 山下 清, 他3名: パイルド・ラフト基礎とした中層建物の沈下挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1291-1292, 1992.8.
- 11) 玉置勝之, 桂 豊, 他4名: パイルドラフト基礎で支持されたRC3階建物の沈下挙動分析(その1~その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.497-500, 2001.9.

[2005年4月14日原稿受理 2005年7月22日採用決定]