

水平荷重が作用するパイルド・ラフト基礎の 解析手法と原位置載荷実験への適用

森 利弘* 小川 敦* 渡辺 則雄*

鉛直荷重が作用する場合のパイルド・ラフト基礎解析手法と同じハイブリッド法を用い、水平荷重作用時における解析手法を開発した。本開発により、長期鉛直荷重時に加え、地震時の水平荷重作用時までを含めたパイルド・ラフト基礎の評価が可能となる。本稿では、ハイブリッド法によるパイルド・ラフト基礎水平荷重作用時の解析手法を示すとともに、原位置において実施した水平載荷実験に対するシミュレーション解析を行った。ラフトの滑動、杭の塑性水平地盤反力および地盤剛性の非線形性を考慮することにより、地震時における大変位領域まで本手法が概ね適用できることを示した。

キーワード：パイルド・ラフト基礎、水平支持力、数値解析、原位置実験

1. はじめに

パイルド・ラフト基礎は、直接基礎（以下ラフトとも表現する）と杭（主に摩擦杭）による併用基礎である。直接基礎の支持力と杭の支持力の両方で構造物を支持する基礎形式であるため、その支持性能は複雑であり、特定条件下で採用されることが多い。例えば、鉛直荷重に対しては直接基礎のみで支持力を確保することとし、杭は沈下抑制を目的として併用することがある。直接基礎の支持力は簡易な支持力算定式を用いて計算することができるが、杭を併用した直接基礎の沈下量あるいは杭の軸力などの算定に当たっては詳細な解析法が必要となる。解析法として有限要素法またはハイブリッド法が考えられるが、前者の場合、3次元によるモデル化が必要となり、精度良く計算するためには多大な労力を必要とする。一方、ハイブリッド法では工夫を凝らすことにより、簡略化が可能である。既に鉛直荷重が作用する場合についてはその特徴を活かした解析手法を開発し¹⁾、低層建物を中心に沈下抑制を目的とした条件下で適用してきた。しかしながら、パイルド・ラフト基礎は今日では低層建物のみならず高層建物にも使用されるようになり、地震時の解析法が従来にも増して重要になってきた。そこで、鉛直荷重時と同じハイブリッド法を用い、水平荷重時の解析手法を開発した。基本的な解の誘導は鉛直荷重時と同じであるが、地盤剛性ならびに杭剛性の非線形性、ラフトと地盤間の滑動、杭の塑性水平地盤反力など地震時における非線形挙動を取り扱えるようにした。

本稿では、ハイブリッド法による解析手法の詳細を示すとともに、その適用性を確認するために原位置水平載荷実験のシミュレーション解析を実施したのでその結果についても併せて報告する。

2. 解析方法

2.1 解析モデルと解析条件

本解析では、直接基礎と杭を有限要素法で、地盤を半無限弾性体の解を用いた境界要素法でそれぞれモデル化し、両者を組合せたハイブリッド法¹⁾を用いる。解析モデルの概念図を Fig. 1 に示す。なお、水平荷重作用時における解析を実施する前に鉛直荷重作用時における解析を実施し、ラフトの鉛直地盤反力を算定しておく必要があること、基礎の埋込み効果は考慮できないことを付記しておく。

直接基礎は平板要素または梁要素、杭は梁要素とし、要素分割は次のように行う。有限要素法による直接基礎と杭の要素分割により、直接基礎と地盤が接触する地表面に節点 $1 \sim N_r$ とこれらの節点の構成する要素を、また、地盤内の杭の中心軸上に節点 $N_r + 1 \sim N_r + N_p$ とこれらの節点の構成要素を設ける。これらの節点は、地盤に対しても共通の節点として取り扱う。すなわち、直接基礎と地盤、杭と地盤はそれぞれ互いに接触し、荷重の伝達および水平変位の連続性が保持されるものとする。地盤は半

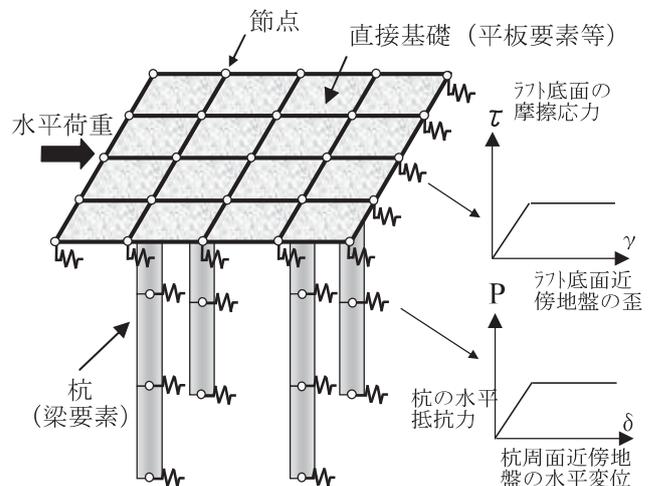


Fig. 1 解析モデルの概念図
(非線形性については本文 2.3 参照)

* 技術研究所 地盤基礎研究グループ

無限の地盤内に点荷重が作用する場合の Mindlin の解²⁾を用い、地盤内任意点の水平変位量および応力の算定を行う。なお、地盤内の変位および応力の伝達に対して杭が地盤内に占める容積が及ぼす影響は無視できるものとする。

2.2 定式化の手順

基本的な定式化の手順は、鉛直荷重が作用する場合¹⁾と同じとする。パイルド・ラフト基礎と地盤を連成して解析する際、まず地表面より下部にある杭と地盤を取扱い、地表面における水平方向の荷重と変位の関係を求める。次に地表面より上部にある直接基礎の荷重と変位の関係を求め、地表面より下部のそれとを地表面で加え併せて全体系の荷重と変位の関係を求める。以下にその基本手順を示す。

2.2.1 地盤の水平方向荷重と変位の関係

杭を考慮しない多層構造を有する半無限地盤において地表面と地盤内の各節点に水平方向荷重が作用した場合の各節点における水平変位量は、変位影響係数を用いた式(1)で表される。式(1)は弾性論の変位解から得られる一般的な式である。

$$\delta_i = \sum_{k=1}^{L_i} \sum_{j=1}^{N_r+N_p} \mu_{ij}^k \bar{Q}_j \quad (i=1,2,\dots,N_r+N_p) \quad (1)$$

ここに、

δ_i : 節点 (変位点) i の全水平変位量

L_i : 変位点が地盤内にある場合、節点より下部にある地層の総数、ただし第 L_i 層の上面高さは節点 i の高さとする。変位点が地表面にある場合、地盤を構成する地層の総数。

N_r : 地表面上の節点の総数

N_p : 杭の中心軸上に設けた節点の総数

$h \bar{Q}_j$: 節点 (荷重点) j に作用する相互間力

(直接基礎と地盤との間の摩擦力、または杭と地盤との間の水平地盤抵抗力)

μ_{ij}^k : 荷重点 j に相互間力が作用したときの変位点 i の直下地盤の第 k 層に生じる水平変位に関する影響係数

ここで、多層構造を有する場合の変位影響係数は、Fig.2 に示した考え方で算定する。変位点 i が地表面にある場合を示したが、地盤内にある場合も同じ方法で算定する。

荷重点 j が地表面にある場合、荷重は各負担区画 (平面) での矩形等分布荷重とし、荷重を数値積分して変位点 i での変位影響係数を算定する。荷重点が地盤内にある場合、同一杭における節点間では同じく各負担区画 (杭の水平投影区画) での矩形等分布荷重を数値積分して、また異なる杭の節点間では集中荷重として算定する。

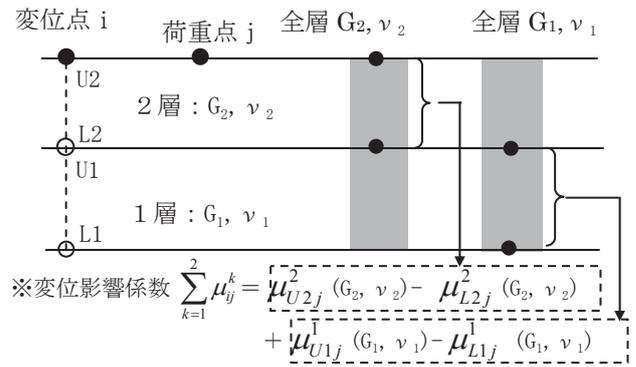


Fig. 2 多層地盤での変位影響係数の探り方

式(1)の関係をマトリックス表示し、地盤の撓性マトリックスの逆行列を求めることにより、地盤の水平方向荷重と変位の関係は式(2)となる。各節点は実質 1 自由度 (水平方向変位) を有する。

$$\begin{Bmatrix} h \bar{Q}_r^G \\ h \bar{Q}_p^G \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} h K_{rr}^G & h K_{rp}^G \\ h K_{pr}^G & h K_{pp}^G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_r^G \\ \delta_p^G \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここに、

$\begin{Bmatrix} \delta_r^G \\ \delta_p^G \end{Bmatrix}$: 地表面上および地盤内の各節点の水平変位量を表すベクトル

$\begin{bmatrix} h K_{rr}^G & h K_{rp}^G \\ h K_{pr}^G & h K_{pp}^G \end{bmatrix}$: 地盤の剛性マトリックス

$\begin{Bmatrix} h \bar{Q}_r^G \\ h \bar{Q}_p^G \end{Bmatrix}$: 地表面上および地盤内の各節点に作用する相互間力を表すベクトル

2.2.2 杭で補強された地盤の荷重と変位の関係

杭を梁要素としてモデル化することにより、杭に作用する荷重と変位の関係は式(3)となる。各節点は 2 自由度 (水平方向変位と回転成分) を有する。

$$\begin{Bmatrix} h \bar{Q}_r^P \\ h \bar{Q}_p^P \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} h K_{rr}^P & h K_{rp}^P \\ h K_{pr}^P & h K_{pp}^P \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_r^P \\ \delta_p^P \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここに、

$\begin{Bmatrix} h \bar{Q}_r^P \\ h \bar{Q}_p^P \end{Bmatrix}$: 杭頭節点および地盤内の各杭節点に作用する相互間力を表すベクトル

$\begin{bmatrix} h K_{rr}^P & h K_{rp}^P \\ h K_{pr}^P & h K_{pp}^P \end{bmatrix}$: 杭の剛性マトリックス

$\begin{Bmatrix} \delta_r^P \\ \delta_p^P \end{Bmatrix}$: 地表面上および地盤内の杭各節点の水平変位量を表すベクトル

地盤内の節点 (杭の中心軸上) においては、杭側面における力の釣合い条件から式(4)、また、変位の連続性から式(5)が成り立つ。

$$\begin{Bmatrix} h \bar{Q}_p^G \\ h \bar{Q}_p^P \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} h \bar{Q}_p^P \\ h \bar{Q}_p^G \end{Bmatrix} = \{0\} \quad (4)$$

$$\begin{Bmatrix} \delta_r^G \\ \delta_p^G \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \delta_r^P \\ \delta_p^P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \delta_r^{GP} \\ \delta_p^{GP} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式(2)～(5)により、杭で補強された地盤の荷重と変位の関係は式(6)となる。

$$\begin{Bmatrix} \bar{Q}_r^{GP} \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} {}_h K_{rr}^{GP} & {}_h K_{rp}^{GP} \\ {}_h K_{pr}^{GP} & {}_h K_{pp}^{GP} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_r^{GP} \\ \delta_p^{GP} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

ここに、

$\begin{Bmatrix} \bar{Q}_r^{GP} \end{Bmatrix}$: 杭で補強された地盤の地表面上に作用する荷重で、直接基礎から杭頭および地盤に伝達される相互間力を表すベクトル

$\begin{bmatrix} {}_h K_{rr}^{GP} & {}_h K_{rp}^{GP} \\ {}_h K_{pr}^{GP} & {}_h K_{pp}^{GP} \end{bmatrix}$: 杭で補強された地盤の剛性マトリックス

$\begin{Bmatrix} \delta_r^{GP} \\ \delta_p^{GP} \end{Bmatrix}$: 杭で補強された地盤の地表面上および地盤内の各節点の水平変位を表すベクトル

2.2.3 杭で補強された地盤の地表面上における水平方向荷重と変位の関係

式(6)の杭で補強された地盤の剛性マトリックスの逆行列を求め、地表面の節点間における荷重と変位の関係を求めると以下となる。

$$\begin{Bmatrix} \delta_r^{GP} \\ \delta_p^{GP} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} {}_h F_{rr}^{GP} & {}_h F_{rp}^{GP} \\ {}_h F_{pr}^{GP} & {}_h F_{pp}^{GP} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{Q}_r^{GP} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

分離して

$$\begin{Bmatrix} \delta_r^{GP} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} {}_h F_{rr}^{GP} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{Q}_r^{GP} \end{Bmatrix}$$

部分マトリックスの逆行列を求めると式(8)となる。

$$\begin{Bmatrix} \bar{Q}_r^{GP} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} {}_h K_{rr}^{GP} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_r^{GP} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

ここに、

$\begin{bmatrix} {}_h F_{rr}^{GP} & {}_h F_{rp}^{GP} \\ {}_h F_{pr}^{GP} & {}_h F_{pp}^{GP} \end{bmatrix}$: 杭で補強された地盤の撓性マトリックス

$$\begin{bmatrix} {}_h K_{rr}^{GP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}_h F_{rr}^{GP} \end{bmatrix}^{-1}$$

2.2.4 全体系の構成と解

直接基礎を構成する部材に対して有限要素法を適用しモデル化すると式(9)が得られる。各節点は2自由度(水平2方向)を有する。

$$\begin{Bmatrix} Q_r^R \\ \bar{Q}_r^R \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \bar{Q}_r^R \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} {}_h K_{rr}^R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_r^R \end{Bmatrix} \quad (9)$$

ここに、

$\begin{Bmatrix} Q_r^R \end{Bmatrix}$: 直接基礎の各節点に作用する荷重を表すマトリックス

$\begin{Bmatrix} \bar{Q}_r^R \end{Bmatrix}$: 地盤が直接基礎に及ぼす相互間力を表すマトリックス

$\begin{bmatrix} {}_h K_{rr}^R \end{bmatrix}$: 直接基礎の剛性マトリックス

$\begin{Bmatrix} \delta_r^R \end{Bmatrix}$: 直接基礎各節点の水平変位を表すマトリックス

地表面上の節点における力の釣り合いから式(10)、また変位の連続性から式(11)が成り立つ。

$$\begin{Bmatrix} \bar{Q}_r^R \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \bar{Q}_r^{GP} \end{Bmatrix} = \{0\} \quad (10)$$

$$\begin{Bmatrix} \delta_r^R \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \delta_r^{GP} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \delta_r^{RGP} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

式(8)～(11)により、杭で補強された地盤と直接基礎を併せた全体系における地表面上の節点における支配方程式が次のように得られる。

$$\begin{Bmatrix} Q_r^R \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} {}_h K_{rr}^{RGP} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_r^{RGP} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

ここに、

$\begin{bmatrix} {}_h K_{rr}^{RGP} \end{bmatrix}$: 杭で補強された地盤と直接基礎を併せた全体系における地表面上の節点での剛性マトリックス

$$\begin{bmatrix} {}_h K_{rr}^{RGP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}_h K_{rr}^R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}_h K_{rr}^{GP} \end{bmatrix}$$

式(12)を解いて $\begin{Bmatrix} \delta_r^{RGP} \end{Bmatrix}$ が求まると以下の手順により残りの未知量を求めることができる。

$\begin{Bmatrix} \delta_r^{GP} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \delta_r^{RGP} \end{Bmatrix}$ であるから、式(8)より直接基礎と杭頭および地盤との相互間力 $\begin{Bmatrix} \bar{Q}_r^{GP} \end{Bmatrix}$ が得られ、続いて式(7)から $\begin{Bmatrix} \delta_p^{GP} \end{Bmatrix}$ が求まる。また、式(5)を用いると式(3)から残りの相互間力が得られる。なお、地表面任意節点直下地盤の任意深さにおける水平変位は式(1)を用いて求めることができる。

2.3 非線形性の取扱い

前節2.2に示した定式化は線形解析を想定したものであるが、本解析では以下の非線形性を取扱えるようにしている。

2.3.1 地盤の剛性

地盤のせん断弾性係数 G に非線形性を考慮する場合には、式(13)による地盤のひずみ依存性を考慮する。

$$G = \alpha \cdot G_0 \quad (13)$$

ここに、

G_0 : 地盤の初期せん断弾性係数

α : せん断ひずみ (γ) に応じた低減係数

解析は荷重増分形式で行い、各荷重増分において式(13)の関係が満足するまで収斂計算を行う。すなわち Mindlin の応力解から得られるせん断応力を1ステップ前のせん断弾性係数で除したせん断ひずみが式(13)を満足するまで収斂させた時のせん断弾性係数を使用する。

2.3.2 直接基礎と地盤間の摩擦力

直接基礎と地盤間の滑動を考慮できるようにその間の摩擦力は最大摩擦力を超えないものとする。つまり、ラフト底面近傍地盤のせん断ひずみ γ と摩擦応力 τ の関係は前掲 Fig.1 に示すような完全弾塑性を仮定する。解析上は、地盤の撓性マトリックスにおいて当該節点に対応する対角項を千倍することによって対処する。地表面地盤の粘着力が最大摩擦応力を下回る場合には、粘着力を超えないようにする。最大摩擦力はラフト底面の鉛直地盤反力に摩擦係数を乗じて算定するが、鉛直地盤反力は別途行う鉛直荷重作用時の解析¹⁾により各ラフト節点の鉛直地盤反力を算定しておく必要がある。なお、水平

荷重作用時には鉛直地盤反力の値は変わらないものとしている。

2.3.3 杭と地盤間の水平抵抗力

杭と地盤間の水平抵抗力は塑性水平地盤反力を超えないものとする。つまり、杭の水平抵抗力と杭周面近傍地盤の水平変位の関係は前掲 Fig. 1 に示すような完全弾塑性を仮定する。解析上は、2.3.2 に示したのと同じ方法で対処する。塑性水平地盤反力は、建築基礎構造設計指針³⁾などを参考に算定する。

2.3.4 杭の剛性

杭剛性の非線形性として、杭の曲げ剛性 EI の低減を考慮することができる。杭の曲げモーメントと曲率の関係をトリリニアモデルで表すこととしている。なお、杭のせん断剛性は考慮していない。

3. 原位置実験のシミュレーション解析

前章に示した解析手法の適用性について検討するために、原位置において実施した水平載荷実験⁴⁾に対するシミュレーション解析を実施した。

3.1 原位置実験の概要

実施した実験ケースの一覧を Table. 1 に、試験体の断面を Fig. 3 に示す。

実験ケースは4本の杭を用いたパイルド・ラフト基礎 (PR6) に加え、比較用としてラフト単体 (R2) および杭単体 (P4) の3ケースとした。ラフトは鉄筋コンクリートとし、その寸法は平面 1.5m×1.5m×高さ 0.5m である。ラフトの下には碎石 (クラッシュラン C-40) を 5cm 敷設している。杭は回転埋設鋼管杭 (材質 STKN490, 厚さ 6mm) とし、鋼管の軸径 ϕ 114.3mm に対して先端羽径は 250mm, 長さ 5m である。パイルド・ラフト基礎における杭の中心間隔は群杭による影響が生じないように鋼管軸径の約6倍とした。また、パイルド・ラフト基礎 (PR6) における杭頭接合法は固定であるが、杭単体 (P4) におけるそれは自由とし、Fig. 3 に示すように突出杭となっている。

載荷時における杭の負担荷重および杭の曲げモーメント分布を計測するために、Fig. 3 に示す位置にひずみゲージを設置している。

載荷方法は、カウンターウエイトによる鉛直載荷を行った後、反力壁に取り付けたサーボ型油圧アクチュエータを用い、最大水平変位 100mm (杭径の約9倍) まで変位制御方式で行った。鉛直載荷はラフトの長期荷重相当の 172.2kN (76.5kN/m²) とした。なお、P4 では鉛直載荷は実施していない。

実験地の土質柱状図と杭設置深度を Fig. 4 に示す。杭の先端はN値6の細砂層とした。なお、埋土層はローム質土および粘土を主体とした地盤である。Fig. 4 には記載していないが、GL-8m 以深の地層は、GL-8m~14.3m 間は

Table 1 原位置実験のケース一覧

試験体名	基礎形式	平面配置	ラフト辺長 (m)	杭長 (m)	杭径 (mm)	杭頭接合法
PR6	パイルド・ラフト		1.5	5	114.3 / 250	固定
R2	ラフト		1.5	—	—	—
P4	杭		—	5	114.3 / 250	自由

注：試験体名は文献 4) に準拠している。

Table 2 解析に用いた地盤定数

深度 GL-(m)	N 値	G (MN/m ²)	γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)
0 ~ 1.6	3	4.04*1	16.3	35.5	—
1.6~3.5	0.5	1.37*1	15.4	22.5	—
3.5~5.4	6	6.46*2	17.0	—	25.5
5.4~14.3	10	6.07*1	16.4	77.5	—

注：*1 は一軸圧縮試験結果の初期剛性 (E) を用いて算定

*2 は E=2.8N から算定した E を用いて算定

算定式 $G=E/2/(1+\nu)$, ν は地盤のポアソン比

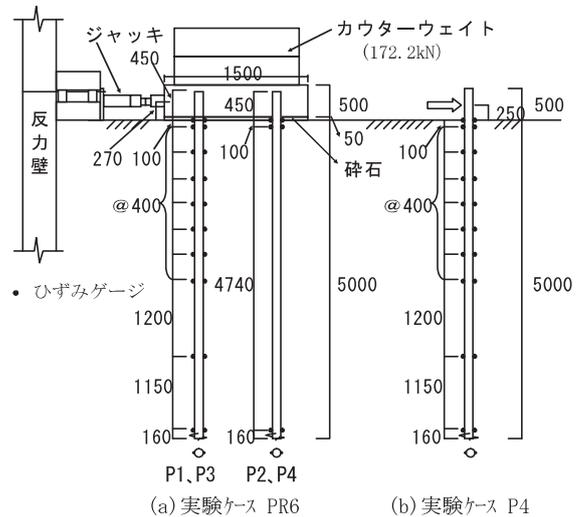


Fig. 3 試験体の断面配置

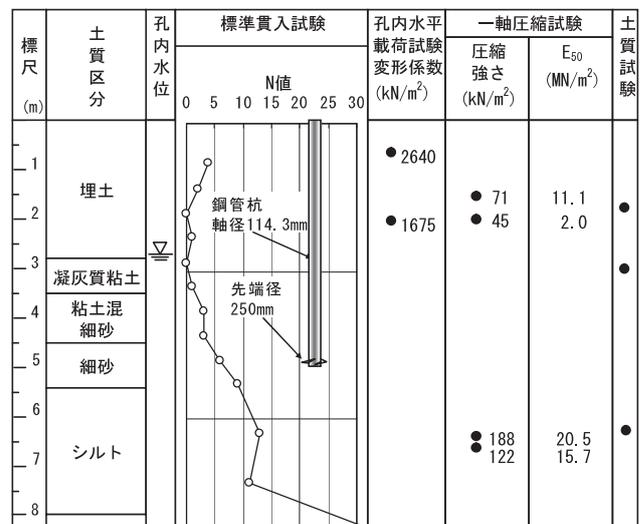


Fig. 4 土質柱状図と杭設置深度

シルト層と細砂層の互層，GL-14.3m 以深はN値 50 以上の細砂層である。

3. 2 原位置実験の解析条件

解析は Table1 に示す全ケースを対象とする。ラフトおよび杭は線形とし、ラフトは 64 要素、杭は 20 要素（杭 1 本当たり）に分割した。ヤング係数はそれぞれ 2.27×10^7 (kN/m²)、 2.05×10^8 (kN/m²) とした。解析に用いた地盤定数を Table2 に示す。埋土層はN値および一軸圧縮試験結果を踏まえ、2層に分割することとした。また、凝灰質粘土はN値から埋土層の下部と同じ定数を採用した。地盤のせん断弾性係数は、粘性土の場合、一軸圧縮試験における初期剛性Eを用いて算定した。

ラフト底面における鉛直地盤反力は鉛直載荷時の解析結果⁵⁾、地盤の摩擦係数にはラフト単体(R2)の実験結果から推定した値(=0.62)を用いた。また、杭の塑性水平地盤反力 P_y には文献3)による下記算定式を用いた。

- GL±0～-0.29m（粘性土地盤で $z/B \leq 2.5$ の場合）

$$P_y = 2(1 + 1.4z/B)c_u BL \quad (\text{kN})$$
 - GL-0.29～-3.5m（粘性土地盤で $z/B \geq 2.5$ の場合）

$$P_y = 9c_u BL \quad (\text{kN})$$
 - GL-3.5～-5.0m（砂質土地盤の場合）

$$P_y = 3K_p \gamma Bz \quad (\text{kN/m})$$
- ここに、 z ：深さ(m)、 B ：杭径(m)
 c_u ：非排水せん断強度(kN/m²)
 L ：杭の深度方向に分割した長さ(m)
 K_p ：受働土圧係数
 γ ：地盤の単位体積重量(kN/m³)

解析ケースは、上記に示したラフトの滑動および杭の塑性地盤反力を考慮するケース(CASE1)に加え、地盤の非線形特性として、既往モデルのうち、粘性土のせん断ひずみに応じた低減係数 α （式(13)）が平均的な値を示す大崎・原モデル⁶⁾を採用したケース(CASE2)の2ケースとした。なお、地盤の非線形特性はその影響が大きいと予想される深度GL±0～-3.5mの粘性土を対象とした。

3. 3 解析結果

杭単体(P4)における水平荷重～水平変位関係を Fig. 5 に示す。水平変位には荷重載荷点での杭変位を示した。Fig. 5 に示すように単杭の結果では、全体的に解析による変位は実験値より小さく、Table 2 に示した地盤剛性Gの値は大きめの評価となっている。地盤剛性として孔内水平載荷試験による変形係数から算定した値を用いると実験結果とほぼ一致する。この変形係数は一軸圧縮試験による値の1/4程度である。水平荷重の増大に伴い、解析では杭頭より徐々に水平反力が塑性化し、変位が急増していく。実験においても変位60mm程度まではその傾向が見られるが、実験ではそれ以降解析程顕著ではない。解析CASE1とCASE2では差がほとんど見られないが、これは単杭の場合、本解析では地盤の剛性低下が顕著に生じないことによる。

杭単体(P4)における杭の曲げモーメント分布を Fig. 6

に示す。最大曲げモーメントの値およびその発生深度は実験値と一致しているが、深度2m付近での値は実験値に比べ小さい。この深度における地盤剛性の値が解析では特に大きめの評価となっているために杭の曲げモーメントならびに杭の変位が小さくなったと考えられる。

ラフト単体(R2)における水平荷重～水平変位関係を Fig. 7 に示す。ラフト単体の結果では、水平荷重が小さい場合、解析による変位は大きく、地盤剛性Gが小さめの評価となっている。これは単杭の結果と逆の傾向である。荷重増大に伴い、実験では荷重～変位に非線形性が表れているが、解析CASE2では実験値と概ね一致しており、地盤のひずみ依存性による剛性低下を考慮することの有効性が確認できる。

パイルド・ラフト(PR6)における水平荷重～水平変位関係を Fig. 8 に示す。水平変位はラフトの変位である。水平荷重が小さい場合、解析による水平変位は、若干大きい、杭単体およびラフト単体の結果と比べると良く

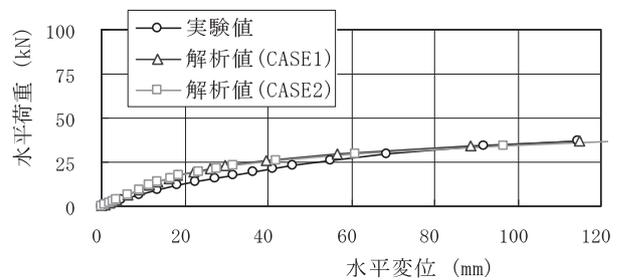
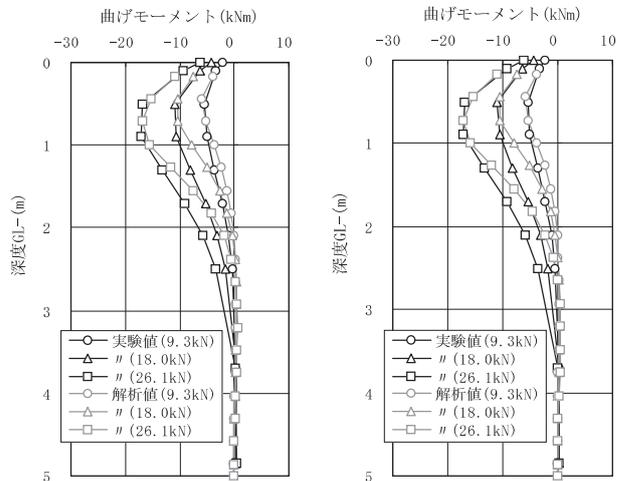


Fig. 5 杭単体(P4)の水平荷重～水平変位



(a) 解析 CASE1 (b) 解析 CASE2

Fig. 6 杭の曲げモーメント分布 (P4)

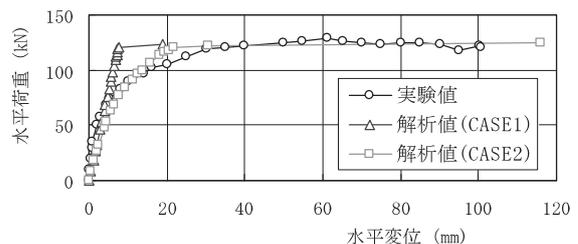


Fig. 7 ラフト単体(R2)の水平荷重～水平変位

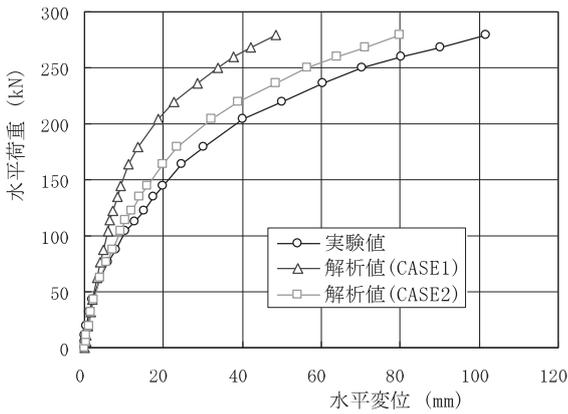


Fig. 8 パイルド・ラフト (PR6) の水平荷重～水平変位

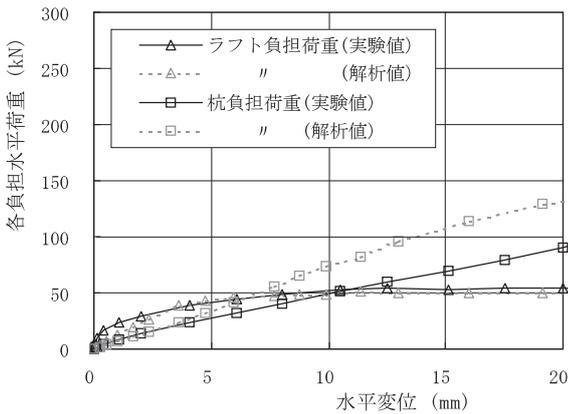


Fig. 9 各負担荷重～水平変位 (PR6)

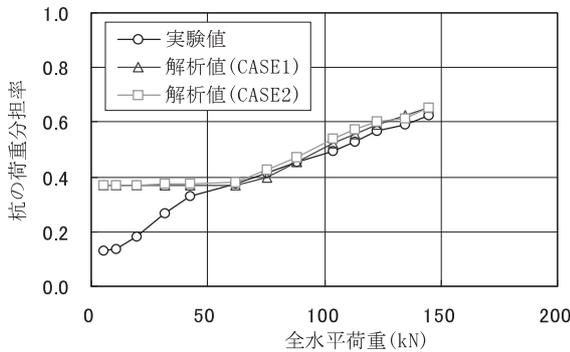


Fig. 10 杭の荷重分担率～水平荷重 (PR6)

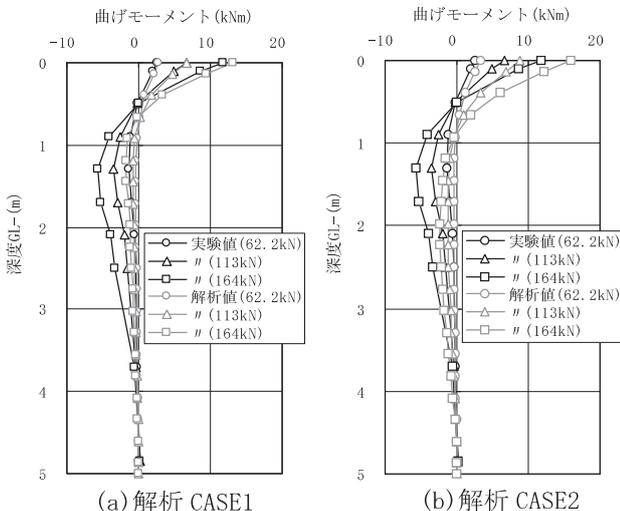


Fig. 11 杭の曲げモーメント分布 (PR6)

一致している。荷重増大に伴い水平変位は実験値に比べ小さくなっているが、荷重-変位関係における非線形特性について見ると、解析 CASE2 では実験値と類似している。

パイルド・ラフト (PR6) におけるラフトまたは杭の各負担荷重と水平変位の関係を Fig. 9 に示す。Fig. 9 には実験において各負担荷重が明確に算定できる水平変位 20mm までの結果を示している。Fig. 9 に示すように、ラフトについては荷重が小さい段階を除き、概ね再現できているのに対し、杭については逆に荷重が小さい段階を除き、差が生じている。この杭の変位性状の差が、Fig. 8 に示したパイルド・ラフト基礎全体の変位性状の差になっている。

一方、パイルド・ラフト基礎の全水平荷重に対する杭の負担荷重の割合について見ると、Fig. 10 に示すように全水平荷重が 50kN よりも大きい範囲での分担率は解析値と実験値でほぼ一致しており、全水平荷重の増大に伴い、杭の負担荷重が増加する特徴がよく再現できている。今回の実験ではラフト直下の地盤が粘性土であるためにラフトの鉛直地盤反力の値に係わらず、摩擦係数はほぼ一定値となっており、ラフトの滑動が生じる荷重を適切に予測できていることによる。なお、初期荷重段階における杭の荷重分担率の差は、ラフト直下地盤の剛性を解析では小さめに評価していることによる。

パイルド・ラフト (PR6) における杭の曲げモーメント分布を Fig. 11 に示す。解析における杭頭の曲げモーメントは実験値より大きく、地中でのそれは逆に小さくなっている。これは文献 4) で記載したように水平荷重に伴うラフトの回転が原因と考えられる。なお、ラフトの回転による傾斜角は荷重 164kN では 0.35° 、最大荷重 279kN では 1.52° であった。

4. まとめ

水平荷重が作用するパイルド・ラフト基礎の解析法としてハイブリッド法による解析手法を示した。地震時における大变位領域までの適用を考え、地盤剛性の非線形性、ラフトと地盤間の滑動、杭の塑性水平地盤抵抗を取り扱えるようにした。原位置におけるパイルド・ラフト基礎水平荷重実験に対するシミュレーション解析を実施した結果、地盤剛性 G の採り方に課題が残されているが、前記した非線形性を考慮することにより地震時における大变位領域まで本解析手法が概ね適用できることを示した。

謝辞

本解析手法のプログラム開発に際して、御助言頂いた広島大学名誉教授 富永晃司先生に謝意を表します。

また、本開発は(株)テクノックスおよび(株)トーヨーアサノとの共同研究として実施したことを付記しておく。

参考文献

- 1) 藤木広一：直接基礎と摩擦杭で支持されたパイルドラフト基礎の解析手法，熊谷組技術研究報告，第 59 号，2000.12
- 2) R. D. Mindlin：Force at a Point in the Interior of a Semi-Infinite Solid, Physics, Vol. 7, No. 5, pp. 195~202, 1936
- 3) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，p. 278-280, 2001
- 4) 浅井陽一他：パイルド・ラフト基礎の鉛直・水平載荷実験(その 5~その 6)，日本建築学会大会学術講演梗概集，2008.9
- 5) 森利弘他：パイルド・ラフト基礎の鉛直・水平載荷実験(その 7)，日本建築学会大会学術講演梗概集，2008.9
- 6) 原昭夫：土の動的変形特性と地盤の応答解析に関する研究，東京大学学位論文，1980

Analysis technique for piled raft foundations subjected to horizontal load and application of in situ loading tests

Toshihiro MORI, Atsushi OGAWA and Norio WATANABE

Abstract

This paper presents a hybrid method for analyzing the behavior of piled raft foundations subjected to horizontal load. In this analysis, it is treated the nonlinear property of degradation of soil stiffness, slide of raft and the plastic lateral bearing capacity of piles. Although a subject is looked at by evaluation of shear modulus of soil, it was found that the proposed method explained well the horizontal behavior of the piled raft foundation up to the large displacement domain in case of an earthquake from the comparison of analyses and in-situ loading tests.

Keywords: Piled raft foundation, Horizontal load bearing capacity, Simulation analysis, In situ test
