

ラフトの接地効果を考慮した水平力を受けるパイルドラフト基礎の解析

真野 英之
(技術研究所)

Analysis of Horizontally Loaded Piled Raft Foundation Considering Effects of Contact between Raft and Soil

by Hideyuki Mano

Abstract

This paper describes the development of a simplified nonlinear analysis to predict behavior of a horizontally loaded piled raft foundation. In the proposed method, two new effects have been introduced to the previous method. One is the change of ultimate soil resistance against piles due to the contact between the raft and the underlying soil. The other is change of soil stiffness due to the contact pressure between the raft and the soil surface. A comparison with centrifuge test of piled raft foundations and freestanding pile groups indicates that the proposed method can give a fairly good prediction of the behavior of a horizontally loaded piled raft foundation.

概要

水平力を受けるパイルドラフト基礎の新しい挙動解析手法を提案した。解析法は、ラフトー地盤ー杭間の相互作用を考慮するだけでなく、ラフトが接地することによるラフト直下地盤の性状変化を考慮できるようにした。遠心模型実験の結果と比較を行い、提案手法が、パイルドラフト基礎の挙動を良く表現できることを確認した。また、ラフトの接地効果を考慮しない場合は、基礎の変位や杭頭曲げモーメントを著しく過大評価する可能性があることを確認した。

§ 1. はじめに

地盤が保有している支持力を有効に活用して、建物の不同沈下を合理的、経済的に抑制する基礎工法としてパイルドラフト基礎が採用される事例が増えてきている。パイルドラフト基礎は、もともと建物の絶対沈下や不同沈下を許容値内に収めるために開発された工法であることから、鉛直荷重を受ける際のラフトと杭の荷重分担や不同沈下に関する研究は数多く発表されている。これに対し、地震時に水平力を受けるパイルドラフト基礎の挙動については、これまで研究が少なかったが、近年に至り研究が盛んになってきており、原位置実験や模型実験による挙動の確認、静的および動的挙動の解析的研究などが行われている（例えば1）～3））。

これらの成果により水平力を受けるパイルドラフト基礎の挙動についても、徐々に解明されつつあるものの、未だ不明な点も多い。

パイルドラフト基礎は、ラフトが常に接地することから、ラフトー地盤ー杭間の相互作用が生じ、通常の杭基礎よりも挙動が複雑になる。

筆者らも、地盤の非線形性を考慮した解析手法の提案を行い⁴⁾、遠心模型実験結果⁵⁾との比較によって、解析手法の妥当性を検証してきた。その結果、水平荷重は、載荷初期にはラフト底面摩擦が主に負担するが、徐々に杭の負担率が増加すること、水平力を受けるパイルドラフト基礎中の杭の挙動は、ラフトの影響がない杭基礎とは異なったものとなることなどが確認された。また、水平力を受けるパイルドラフト基礎の挙動を評価するためには、水平力に関するラフトー地盤ー杭間の相互作用を考えるだけでは十分でなく、ラフトが接地する効果を考慮する必要があることが明らかになった。

本報では、ラフトが接地する効果として、接地圧によるラフト直下の地盤性状の変化とラフトが地表面付近の地盤の鉛直変位を抑制することによる杭の地盤反力の変化の影響を考慮する手法を提案する。提案手法と遠心実験の結果と比較を行った結果、これら2つの効果を考慮することにより、パイルドラフト基礎の荷重ー変位関係、および杭の曲げモーメント分布ともよく表現できることを確認した。

§ 2. 解析手法

提案する解析手法は、文献 4) に発表した手法に改良を行ったものである。以下、解析手法の概要を説明する。

パイルドラフト基礎は、ラフトが接地することにより、群杭基礎と比べて以下の影響についても考慮する必要がある。

- (1) 水平荷重を杭のみでなくラフト底面摩擦でも分担
- (2) ラフト底面摩擦による杭への影響
- (3) 杭が地盤を押し下す力（杭に作用する地盤反力の反力）によるラフトへの影響
- (4) ラフト底面摩擦によるラフト直下地盤の剛性変化
- (5) 接地圧によるラフト直下地盤の剛性の変化
- (6) ラフトの接地による杭の極限地盤反力の変化

そこで、提案手法では、パイルドラフト基礎に作用する水平力を、ラフト底面摩擦で負担される荷重と杭頭せん断力で負担される荷重に分割し、相互作用やラフトの接地効果を考慮してラフト変位と各杭頭変位が等しくなる荷重分担を求める手法とした。解析の基本的な仮定は以下のとおりである。

- ・パイルドラフト基礎は M_p 本の線形弾性体の杭と、剛なラフトよりなる。
- ・杭の変形により剛性が低下する地盤の範囲は、杭近傍に限られるものとし、ラフト下の地盤の剛性低下は、ラフト底面摩擦と地震時地盤変位により生じる。
- ・ラフト底面摩擦による地盤剛性の変化は、ラフト中心直下の地盤のせん断ひずみで代表して表せるものとし、水平方向には同じ剛性の層が連続するものとする。
- ・地盤剛性が変化しても、地盤の応力状態は変化しないものとする。つまり、多層地盤の地中応力は、均一な地盤の応力状態で表せるものとする。
- ・杭近傍地盤の変位- 剛性低下関係は、ラフト底面摩擦による地盤剛性の変化に影響を受けないものとする。
- ・底面摩擦や杭の変位などにより、地中のある地点に生じる地盤変位は、地盤の等価剛性を用いることにより Mindlin 解などの弾性解で表せるものとする。

2. 1 ラフト底面摩擦による地盤剛性の変化

地盤は水平な n 層からなるものとし、最初に等価線形解析により自由地盤における各層境における地震時地盤変位 $s\delta_{zi,g}$ ($i=0\sim n$)、および各層の有効せん断歪み $\gamma_{i,g}$ ($i=1\sim n$) を求める。

ラフト中央直下における各層の初期地盤剛性を $(E_i)_0$ をラフトの接地圧を考慮して以下のように求める。

$$(E_i)_0 = E_{fi} \left(\frac{\sigma'_{v0i} + \Delta\sigma'_{vi}}{\sigma'_{v0i}} \right)^{0.5} \quad (1)$$

ここに、 E_{fi} は自由地盤における i 層の初期地盤剛性、 σ'_{v0i} は、各層中心における初期鉛直有効応力、 $\Delta\sigma'_{vi}$ は接地圧による鉛直有効応力増分を表す。

パイルドラフト基礎に作用する水平力 PRQ をラフトと杭の水平荷重負担率を仮定し、ラフト負担荷重 RQ と杭負担荷重 PQ に分割する。地盤を任意の剛性 E_e を有する半無限均質弾性地盤としたときの、ラフト負担荷重 RQ によるラフト中央直下における水平地盤変位を弾性理論解を用いて求める。各層の剛性が $(E_i)_0$ の場合の RQ による平均せん断歪みは、図-1 に示すように次式で与えられる。

$$\begin{aligned} (\gamma_i)_1 &= (\gamma_{i,R})_1 + \gamma_{i,g} \\ &= \left(s\delta_{(z_{i-1})e} - s\delta_{(z_i)e} \right) E_e / h_i (E_i)_0 + \gamma_{i,g} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 $(\gamma_i)_1$ は、最初の繰り返し計算における i 層の平均せん断歪み、 $(\gamma_{i,R})_1$ は、最初の繰り返し計算における i 層のラフト底面摩擦による平均せん断歪み、 z_i は、 i 層下面深度、 $s\delta_{zibe}$ は、半無限均質弾性地盤において、ラフト中央直下深さ z_i における RQ による地盤の水平変位、 h_i は、 i 層の層厚である。() の後ろの添え字の数字は、繰り返し計算における回数を表す。

図-1 に示すようにせん断歪みによる地盤の剛性低下曲線から $(\gamma_i)_1$ に対応する地盤の弾性係数 $(E_i)_1$ が求まる。地盤剛性が変化しても地盤の応力状態は変わらないとの仮定により、地盤の弾性係数が $(E_i)_0$ から $(E_i)_1$ に低下し

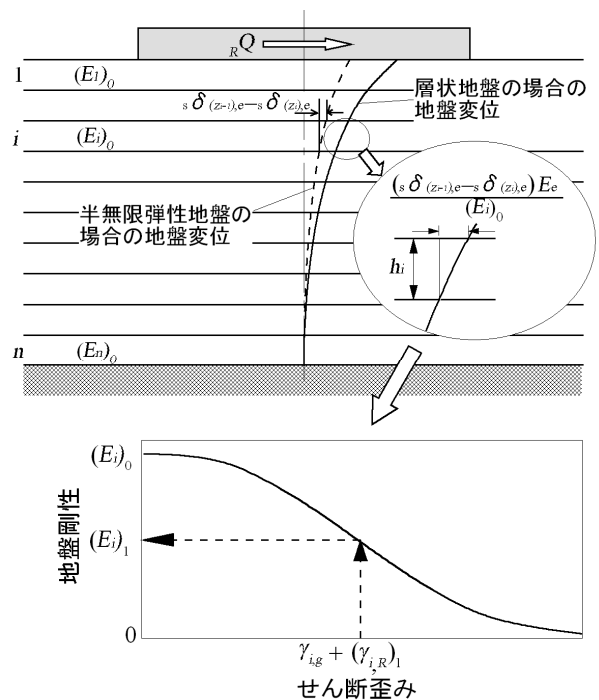


図-1 ラフト底面摩擦による地盤剛性の変化

たことにより、 i 層のせん断ひずみは(2)式の $(E)_0$ を $(E)_1$ に変えた分だけ増加する。繰り返し収束計算により、地震時地盤変位とラフトに水平荷重 RQ が作用した場合の i 層の弾性係数 E が求まる。

2.2 ラフト底面摩擦分布の算出

前節のラフト底面摩擦分布は、半無限均質弾性地盤上に剛なラフトが存在する場合の分布であり、深度方向に剛性が変化する地盤に対する値とは異なる。このため、以下の手法により、ラフト底面摩擦分布を計算する。図-2に示すようにラフトを M_R 個の要素に分割する。地盤を弾性係数 E_e 、ポアソン比 ν_s の半無限均質弾性地盤として、ラフトの各要素に底面摩擦力 P_t ($t=1\sim M_R$) が作用した場合の各要素中心直下の各層境界深度 z_i における地盤変位を求める (図-3 参照)。 P_t は円形等分布水平荷重として扱う。 RQ によるラフト要素 s 直下の地表面変位 ${}_s\delta_s(z_0)$ は、各層に生じるせん断変形を、地盤の弾性係数比 (E_e/E_i) として、全層分足し合わせたものとなることから、以下の式で与えられる。

$${}_s\delta_s(z_0) = \sum_i^n \sum_t^{M_R} \left(I_{s(z_i),t} - I_{s(z_{i-1}),t} \right) P_t E_e / E_i \quad (3)$$

ここに、 $I_{s(z_i),t}$ は、ラフト要素 t に作用する摩擦力の要素 s 直下の深さ z_i への変位影響係数であり、式(4)で表される⁶⁾。また、上式において底面摩擦力 P_t は、 $P \leq \mu V_t$ の関係がある。 μ は地表面とラフトの間の摩擦係数、 V_t はラフト t 要素に作用する接地力 (接地圧×要素面積) である。

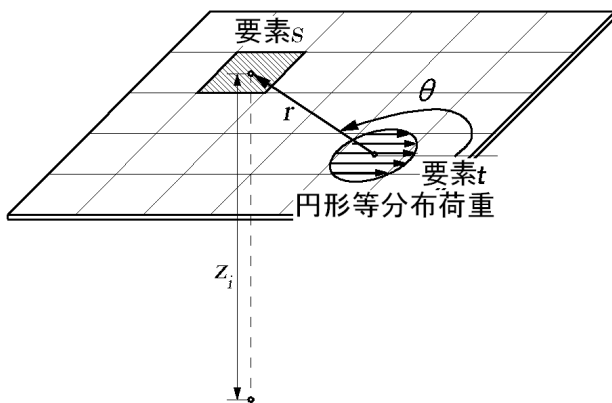


図-2 ラフトの要素分割と円筒座標

$$I_{s(z_i),t} = u \cos \theta + v \sin \theta$$

$$u = \frac{a}{4G_e S_A} [C + D] \cos \theta \quad (4)$$

$$v = \frac{a}{4G_e S_A} [C - D] \sin \theta$$

$$C = -\int_0^\infty (2\nu_s + \xi z_i) e^{-\xi z_i} \frac{1}{\xi} J_1(\xi a) J_2(\xi r) d\xi$$

$$D = \int_0^\infty (\xi z_i - 2(2 - \nu_s)) e^{-\xi z_i} \frac{1}{\xi} J_1(\xi a) J_0(\xi r) d\xi$$

ここに、 r , θ , z_i は、 t 要素中心を原点とした円筒座標である (図-2 参照)。 a は t 要素の等価半径、 G_e は半無限均質弾性体のせん断剛性、 J_n は n 次のベッセル関数である。

ラフトと地表面間で滑りが生じるまでは、各要素直下の地表面変位は等しいこと、および各要素に作用する底面摩擦力の総和は RQ となる条件から、ラフトの底面摩擦分布が求まる。 RQ によるラフト変位 ${}_R\delta_{,R}$ は滑りを生じていない任意の要素直下の地表面変位として次式で表される。

$${}_R\delta_{,R} = {}_s\delta_t(z_0) \quad (5)$$

2.3 ラフトの変位

図-4 は、杭-地盤-ラフト間および杭-地盤-杭間の相互作用を示す。これらの相互作用により任意のラフト要素直下の地表面に生じる変位は次式で表される。

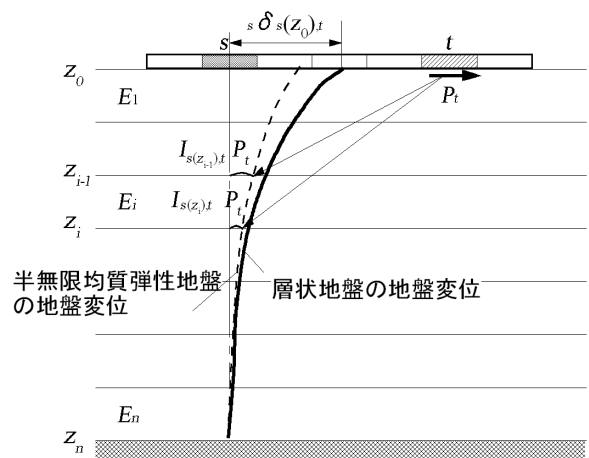


図-3 各ラフト要素直下の地表面変位の算出

$${}_R\delta_{s,L(z_i)} = \sum_{L=1}^{M_P} \sum_{j=0}^m I'_{s,L(z_j)} \cdot {}_P F_{L(z_j)} \quad (6)$$

ここに、 ${}_P F_{L(z_j)}$ は、 L 杭の深度 z_j において杭が地盤を押す力(=地盤反力)。 ${}_R\delta_{s,L(z_j)}$ は、 ${}_P F_{L(z_j)}$ により、ラフト要素 s 中央直下の地表面に生じる変位。 $I'_{s,L(z_j)}$ は、 L 杭深度 z_j に作用する単位力によるラフト要素 s 中央直下の地表面への等価変位影響係数。 m は、杭先端までの地盤層数である。

等価変位影響係数 $I'_{s,L(z_j)}$ は、Poulosの提案⁷⁾に倣い、Mindlinの第2解に次式で表される平均地盤剛性 E_{1j} を用いて求める。

$$E_{1j} = (2E_1 + (E_j + E_{j+1})) / 4 \quad (7)$$

ラフトは剛であるため、杭-地盤-ラフトの相互作用によるラフト変位 ${}_R\delta_{s,P}$ は、ラフトと地表面の間で滑りを生じていない各ラフト要素直下の地表面変位 ${}_R\delta_{s,L(z_j)}$ の平均とした。よって ${}_R\delta_{s,P}$ は、次式で表される。

$${}_R\delta_{s,P} = \left(\sum_s \sum_L \sum_j {}_R\delta_{s,L(z_j)} \right) / M'_R \quad (8)$$

ここに、 M'_R は、ラフト-地表面間で滑りを生じていないラフト要素数である。

式(5)と式(8)より、ラフトの水平変位は次式で表される。

$${}_R\delta = \delta_{(z_0),g} + {}_R\delta_{,R} + {}_R\delta_{,P} \quad (9)$$

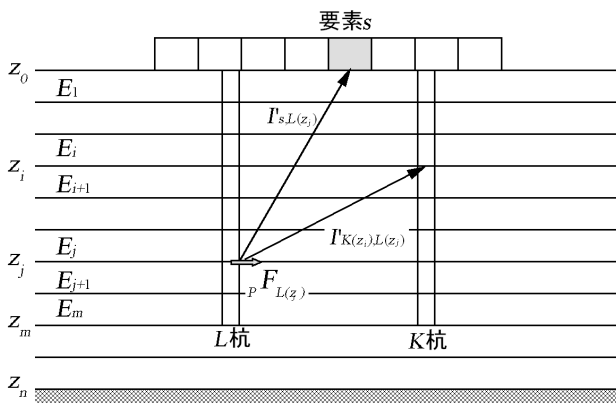


図-4 杭-地盤-ラフトと杭-地盤-杭の相互作用

ラフトが完全に滑りを生じた後は、ラフトの水平変位は各杭頭変位と等しいものとして得られる。

2.4 杭位置における地盤変位

(1) ラフト底面摩擦による変位

2.2で求めた底面摩擦分布を用いて、 ${}_RQ$ による各杭位置に生じる地盤変位は、次式で表される。

$${}_P\delta_{K(z_i),R} = \sum_{t=1}^{M_R} \left(I_{K(z_{i-1}),t} - I_{K(z_i),t} \right) P_t E_e / E_i \quad (10)$$

ここに、 ${}_P\delta_{K(z_i),R}$ は、 K 杭位置、深さ z_i における水平地盤変位、 $I_{K(z_i),t}$ は、地盤剛性 E_e を有する半無限均質地盤における P_t による変位影響係数である。

(2) 他杭からの影響による変位

K 杭位置における他の杭からの影響による地盤変位は次式で表される。

$${}_P\delta_{K(z_i),P} = \sum_{L=1}^{M_P} \sum_{j=0}^m I'_{K(z_i),L(z_j)} \cdot {}_P F_{L(z_j)} \quad (11)$$

ただし、 $(L \neq K)$

ここに ${}_P\delta_{K(z_i),P}$ は、他杭からの影響により K 杭位置の深度 z_i に生じる地盤の水平変位、 $I'_{K(z_i),L(z_j)}$ は L 杭の深度 z_j に作用する力による K 杭位置の深度 z_i における変位影響係数。 $I'_{K(z_i),L(z_j)}$ は、式(7)と同じく式(12)で表される等価剛性を用いることによりMindlinの第2解で求まる(図-4参照)。

$$E_{ij} = ((E_i + E_{i+1}) + (E_j + E_{j+1})) / 4 \quad (12)$$

式(10)と式(11)および地震時地盤変位より、各杭位置に生じる水平地盤変位は次式で表される。

$${}_P\delta_{K(z_i)} = {}_s\delta_{(z_i),g} + {}_P\delta_{K(z_i),R} + {}_P\delta_{K(z_i),P} \quad (13)$$

ここに ${}_P\delta_{K(z_i)}$ は、 K 杭位置の深度 z_i における水平地盤変位を表す。

2.5 各杭頭荷重の計算

杭近傍地盤の地盤剛性を非線形地盤バネで表す。各杭頭に作用するせん断力 ${}_PQ_K$ ($K=1 \sim M_P$)を仮定

し、 pQ_K と $s\delta_{K(z)}$ を非線形地盤バネを介して杭に作用させることで、杭の変位分布を求める。

杭の地盤バネは、割線剛性が変位の0.5乗に反比例するもの⁸⁾とし、接地圧の影響とラフトが接地することによる杭の極限地盤反力の変化を考慮する。杭の水平地盤反力係数 k_h は図-5に示すように式(14)で与えられる。

$$k_h = k_{h0}(y/y_0)^{-0.5} \quad (14)$$

(ただし、 $k_h \leq k_{h0}$)

$$k_{h0}B = 1.3 \frac{E_{i,K}}{1-\nu_s^2} \sqrt[12]{\frac{E_{i,K}B^4}{E_P I_P}} \quad (15)$$

$$y_0 = \frac{0.01 \lambda}{\eta^2} \quad (16)$$

ここに、 k_{h0} は、初期水平地盤反力係数で、岸田・中井⁹⁾に基づき(15)式で与えられる。 B は杭径、 $E_P I_P$ は杭の曲げ剛性、 $E_{i,K}$ は、接地圧による拘束圧の増加の影響と地震時地盤変位の影響を考慮した K 杭位置層の地盤の初期剛性である。 y_0 (単位m)は、 $k_h \leq k_{h0}$ の条件より、 $k_h = k_{h0}$ とする変位の最大値で式(16)で表される。式(16)における η は、地表面の拘束がない地盤に設置された杭における水平地盤反力係数の非線形性を表す係数であり、水平変位1cm時の水平地盤反力係数が初期水平地盤反力係数の $1/\eta$ になることを表す(図-5点線)。 λ は、ラフトが接地することによる極限地盤反力の変化の影響を表す係数であり、以下のように設定した。

地表面が拘束されていない通常の杭が水平力を受けると、図-6に示すように、地表面付近では、上載圧が小さいため地盤は、杭の前方および上方に向かう動きを示すが、ある程度深いところでは、土の上載効果のために水平方向のみに動くと考えられる。このため、図に示したように地表面に近いI領域と深いII領域ではそれぞれ異なった極限地盤反力を取る。岸田、中井⁹⁾によれば、

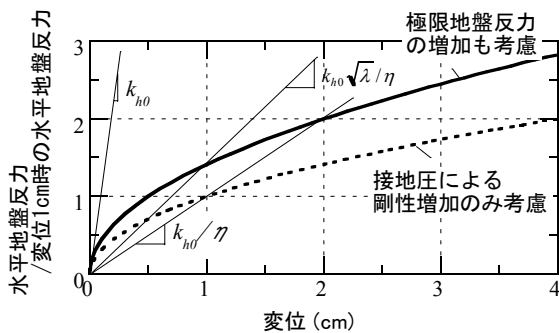


図-5 杭の水平地盤反力の変化

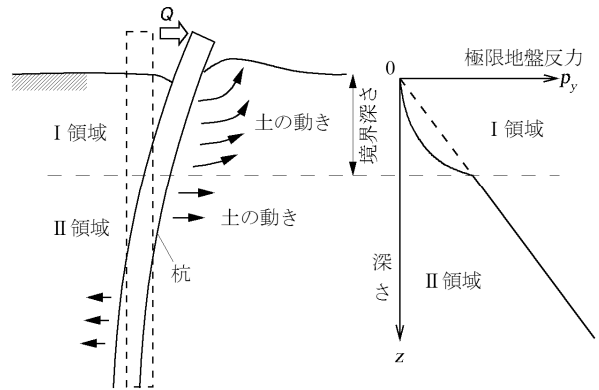
I領域は杭前面の土のクサビが押し上げられる抵抗で、II領域は2次元問題の解として極限地盤反力が与えられ、砂地盤の場合、以下の値を提案している。

$$p_{y1} = \gamma z \left\{ \frac{K_0 \tan \phi \cdot \sin \alpha_2}{\tan(\alpha_2 - \phi)} \cdot \frac{z}{B} + K_0 \tan \alpha_2 (\tan \phi \cdot \sin \alpha_2 - \tan \alpha_1) \frac{z}{B} - K_A + \frac{\tan \alpha_2}{\tan(\alpha_2 - \phi)} \left(1 + \frac{z}{B} \tan \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2 \right) \right\} \quad (17)$$

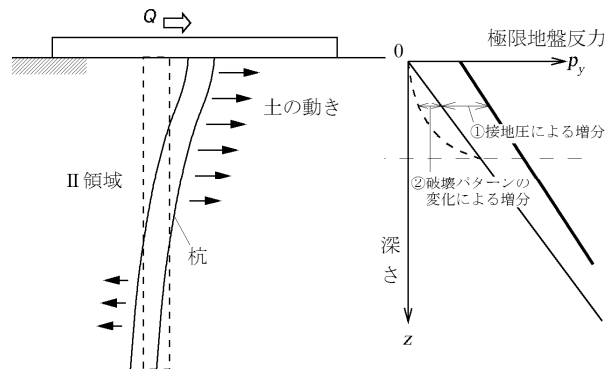
$$p_{y2} = F_\phi \gamma z \quad (18)$$

$$F_\phi = \frac{\cos\left(\frac{\pi - \phi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\pi + \phi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)} \cdot \frac{1 - \sin \phi}{\cos \phi} \cdot \exp\left\{ \left(\frac{3}{2} \pi - \phi \right) \tan \phi \right\} - K_A \quad (19)$$

ここに、 p_{y1} 、 p_{y2} は、I領域、II領域の極限地盤反力、 z は深さ、 γ は土の単位体積重量、 K_0 は静止土圧係数、 K_A はRankineの主働土圧係数、 ϕ は砂の内部摩擦角、 α_1 、 α_2 はクサビの水平および鉛直角度を表す。砂地盤の場合、クサビの角度 α_1 、 α_2 は、次式で表される。



(1) 地表面の拘束がない場合



(2) ラフトが接地する場合

図-6 杭周辺の地盤の動きと極限地盤反力係数

$$\alpha_1 = \frac{\phi}{2}, \quad \alpha_2 = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \quad (20)$$

ラフトが接地することにより、地表面付近の土は、図-6(2)のように上方に移動することができず、結果、深度によらずⅡ領域の値 p_{y2} をとるものと考えられる。初期剛性は変わらず、極限地盤反力のみ $\lambda (=p_{y2}/p_{y1})$ 倍に変化する。この場合の地盤反力-変位関係は、もとの地盤反力-変位関係を、図-5 太実線に示すように原点を中心に相似形に λ 倍拡大したもので与えることとし、これを式で表したのが、式(16)である。

2.3、2.4 節で述べた杭が地盤を押し力 $PFK(z)$ は、地盤バネ力として得られる。

以上のことを考慮して、繰り返し収束計算によりラフト変位と各杭頭変位が等しくなる杭頭せん断力 $PQ_K (K=1 \sim Mp)$ を求める。もし杭頭せん断力の総和である ΣPQ_K が、初期に仮定した杭負担荷重 PQ と等しくない場合は、杭とラフトの荷重負担率を変えて再度計算し直す。

§ 3. 遠心模型実験結果との比較

2 章で説明した解析手法の妥当性を遠心模型実験の結果⁵⁾と比較することで検証する。

3.1 実験概要

遠心模型実験は、遠心加速度 30 g (縮尺 1/30) 下でほぼ同諸元を有するパイルドラフト基礎 (Case1) と自立群杭基礎 (Case2) の静的水平載荷実験を実施した。実験モデルを、図-7 に、実験諸元を表-1 に示す。地盤は、相対密度 90%以上の豊浦砂を用いた。基礎は、剛体とし、ラフトおよび上部構造の総重量は、88.7N (実換算 2395kN) である。

杭は、模型寸で径 12mm、肉厚 0.5mm、長さ 180mm の開端の真鍮管とした。杭の水平抵抗を揃えるため、Case1 と 2 では、杭の表面粗さを変えて、鉛直支持力のみ変化させた。パイルドラフト基礎では、ラフトと杭の鉛直荷重の負担率がほぼ 1 : 1 となるよう杭の表面粗さを調整した。自立群杭基礎では、杭表面全体を粗くすることで、杭のみで構造物の支持が可能であり、ラフト底面を地表面から 5mm 離れた。両ケースとも、杭頭は、ラフトに剛に接合した。

パイルドラフト基礎においては、ラフト底面と地表面との摩擦が十分に確保されている必要がある。過去の実験において、整形した地表面に剛なラフトをおいただけでは、ラフト底面と地表面の微小な凹凸により、底面摩

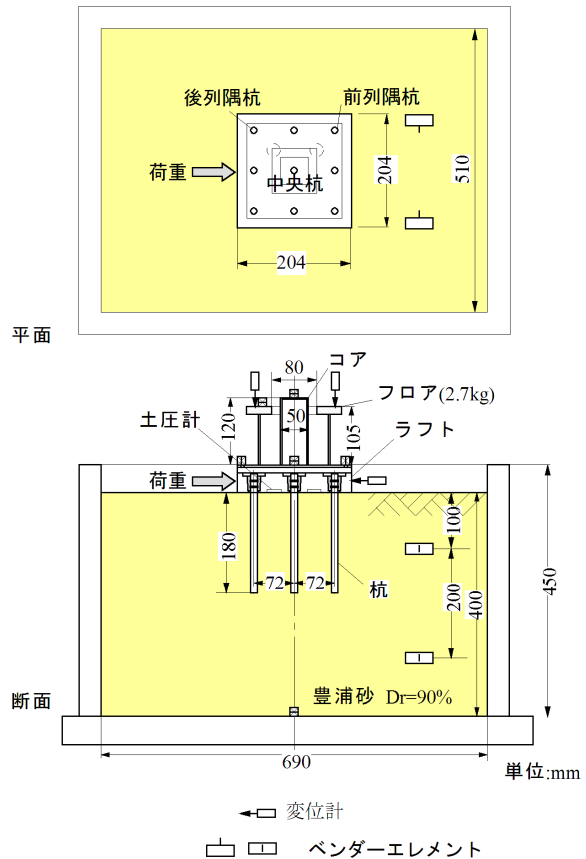


図-7 実験模型 (パイルドラフト)

表-1 実験諸元

	項目	模型	実換算
構造物とラフト	幅×長さ	204mm × 204mm	6.24m × 6.24m
	質量	9.05kg	244t
	重量	88.7N	2395kN
杭	直径	12mm	360mm
	長さ	180mm	5.4m
	曲げ剛性	$3.01 \times 10^{-5} \text{ kNm}^2$	24.4 kNm ²
地盤	層厚	400mm	12.0m
	密度	1.63t/m ³	1.63t/m ³

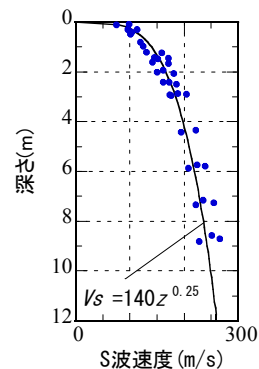


図-8 地盤の S 波速度分布

擦が十分には発揮されていないものと判断されたため、遠心加速度 30 g 下において実換算で 30~100gal の予備加振を数回行い行った。加振前後におけるラフト底面の土圧計指示値の変化が微小となることで、ラフト底面全体が接地したものと判断し実験に供した。地盤が密なこと、および剛体土槽を使用していることにより、予備加振による地盤の沈下は微小であり、加振前後における地盤の S 波速度にも変化はなかった。予備加振後、一旦遠心力を除荷し、ジャッキや計器を取り付けた後実験を行った。

実験は、0.1mm/分(実換算 3mm/分)の変位制御とし、一方向単調載荷で実施した。

模型地盤中に接地したベンダーエレメントによる S 波速度計測結果を図-8 に示す。自由地盤におけるせん断波速度 V_s (m/s) の分布は、実物換算深度 z (m)を用いて概ね以下の式で表される。

$$V_s = 140z^{0.25} \quad (21)$$

3.2 解析定数の設定

地盤や杭の水平地盤反力の初期剛性は、S 波速度分布と接地圧の影響を考慮して設定した。水平力載荷前のラフトの接地圧分布は等分布を仮定した。

砂の内部摩擦角 ϕ は、相対密度より 45° とした¹⁴⁾。

式(6)における η の値は、単杭の水平載荷試験結果から、平均で $\eta=25$ 、 $\lambda=3.22$ を用いることとした。自立群杭基礎では、同様に杭径の 1.5 倍の深さにおいて $\eta=25$ とし、各深度の p_{y1} に応じて η の深度分布を求めた。

解析は、ラフト要素を 10×10 の 100 要素に分割し、載荷荷重は、1960kN を 20 ステップに分割して計算した。

3.3 解析結果との比較

実験結果と提案手法との比較を行い、以下に結果を述べる。結果には、提案手法によるもの他、ラフトが接地する効果として、破壊パターンの変化による極限地盤反力の影響は考慮せずに接地圧による地盤剛性の変化の影響のみ考慮したものおよび両方とも未考慮のものの結果を併せて示した。

図-9 にパイルドラフト基礎と自立群杭基礎の水平荷重-変位関係を示す。

自立群杭基礎、パイルドラフト基礎とも提案手法は、実験値とよく一致している。パイルドラフト基礎においては、破壊パターンの変化および接地圧による地盤剛性増加を無視した結果は、変位を過大評価する傾向が著しく、実験結果と大きく乖離している。このことから、パイルドラフト基礎の挙動を評価するには、ラフト-杭間

の相互作用を考慮するだけでなく、ラフトが接地する効果を適切に考慮することが重要であるといえる。

図-10 にラフト負担荷重、杭負担荷重-ラフト水平変位関係を併せて示したパイルドラフト基礎の荷重-変位関係を示す。載荷初期には、ラフトの負担荷重が大きく、パイルドラフト基礎全体の荷重-変位関係もラフトの挙動に近い挙動となる。変位 1.5mm 付近でラフト底面摩擦は、極限に達し以後ほぼ一定値を保つ。これに対し、杭負担荷重は、変位に対しほぼ直線的に増加している。パイルドラフト基礎の杭負担荷重-変位関係と、図-9 中に記した自立群杭の結果とを比較すると、同じ変位においてパイルドラフト基礎のほうが荷重が大きくなっている。パイルドラフト基礎では、ラフト底面摩擦により杭に生じる変位成分があるにもかかわらず、同一変位における杭負担荷重が大きくなっているということは、ラフトの接地効果による杭周辺の地盤剛性の増加が大きいことを示している。

パイルドラフト基礎において、ラフト底面摩擦が極限

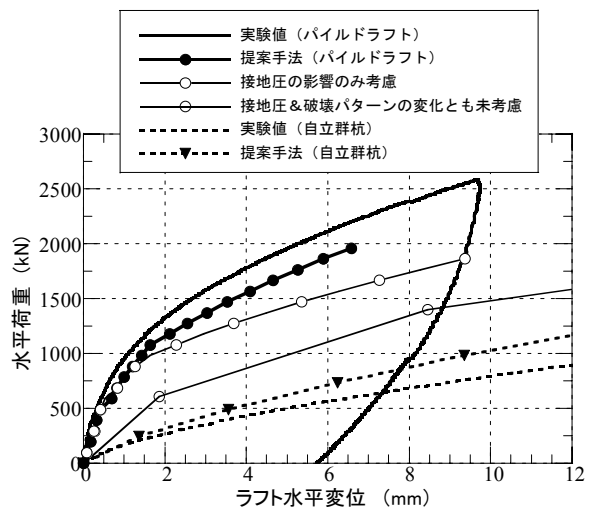


図-9 水平荷重-変位関係

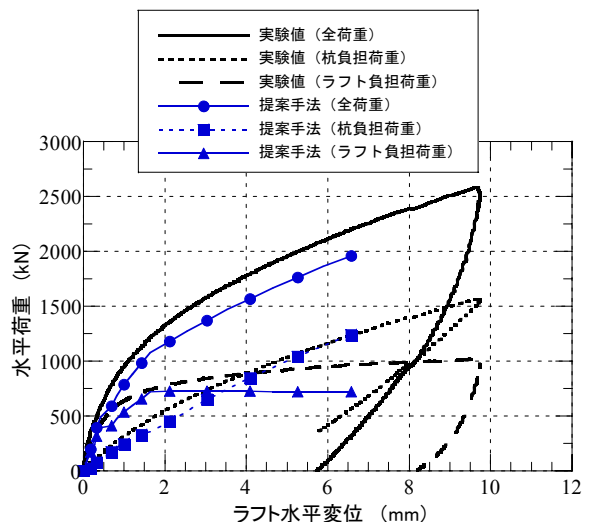
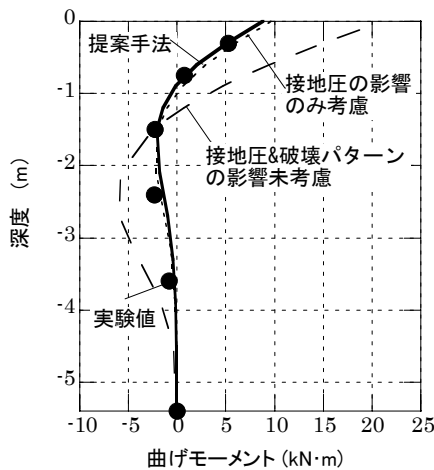
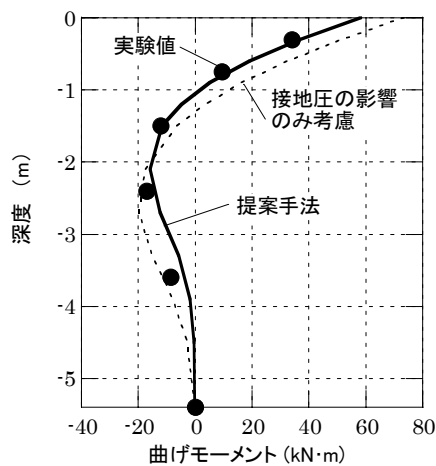


図-10 パイルドラフト基礎の杭、ラフト負担荷重



(1)490kN 載荷時



(2)1380kN 載荷時

図-11 杭の曲げモーメント分布

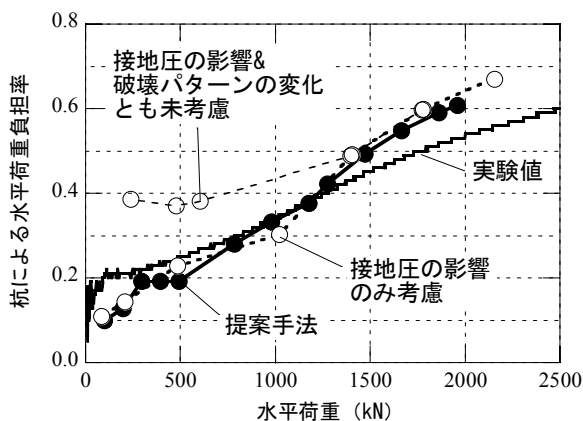


図-12 杭の荷重分担率の推移

に達する以前の載荷荷重 490kN、および極限に達し、ラフトと地表面との間で完全に滑りを生じた後の 1380kN における隅杭の曲げモーメント分布の比較を図-11 に示す。490kN、1380kN は、水平震度でそれぞれ約 0.2、約 0.58 に相当する。490kN 載荷時は、接地圧と破壊パターンの影響を両方とも考慮しない結果は、変位を過大評価するため、杭の曲げモーメント分布も実験値とは大きく異なっている。破壊パターンの変化の考慮の有無については、杭の負担荷重がまだ小さく、水平地盤反力の低下も小さいため、差は小さく、解析結果は両者とも比較的良く一致している。一方、1380kN 載荷時において

<参考文献>

- 1)永井宏, 土屋勉: “杭頭拘束条件に着目したパイルド・ラフト基礎の原位置水平載荷実験”, 日本建築学会構造系論文集, 第 579 号, pp.47-53, 2004.5
- 2)土屋富男, 永野浩一, 濱田純次, 山下清: “大型土槽を用いたパイルドラフト基礎の水平載荷実験 その1~その2”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.471-474, 2003.9
- 3)Horikoshi K., Matsumoto T., Hashidume Y., Watanabe T. and Fukuyama H.: “Performance of piled raft foundations subjected to static horizontal loading”, International Journal of Physical Modeling in Geotechnics, 2, pp.37-50, 2003
- 4) 真野英之, 中井正一: “地盤の非線形性を考慮した水平力を受けるパイルドラフト基礎の杭応力の簡易算定法”, 構造工学論文集 47B, pp.427-434, 2001
- 5) Mano H. and Nakai S.: “Stress of Piles in a Piled Raft Foundation during Earthquake”, The 11th ICSDEE / The 3rd ICEGE Proceedings, Vol.1, pp.726-733, 2004.1
- 6) 最上武雄編著: 土質力学, pp.243-245, 技報堂 1977
- 7) Poulos, H. G.: “Settlement of single piles in nonhomogeneous soil”, Proc. ASCE, Vol.105, No.GT5, pp.627-641, 1979
- 8) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 第 6 章, pp.269, 2001
- 9) 岸田英明, 中井正一: “地盤の破壊を考慮したくいの水平抵抗”, 日本建築学会論文報告集, 第 281 号, pp.41-55, 1979

は、破壊パターンの変化の考慮していないものは、杭頭曲げモーメントを過大に評価しているのに対し、提案手法ではよく一致している。

パイルドラフト基礎において、載荷に伴う杭の荷重負担率の推移を図-12 に示す。提案手法は、ごく小さい荷重領域を除き、実験結果を概ね表現できている。

§ 4. 結論

本論文では、ラフトが接地する効果を考慮した水平力を受けるパイルドラフト基礎の挙動解析手法を提案し、遠心実験の結果と比較を行った。提案した解析法は、水平力を受けるパイルドラフトの挙動を良く表現できることを確認した。また、水平力を受けるパイルドラフト基礎は、ラフト底面摩擦と杭との相互作用のみでなく、接地圧による地盤剛性の変化の影響や、ラフトが接地することにより、杭の極限地盤反力の増加が、挙動に大きな影響を与えていることが確認された。

謝辞

本研究を実施するに当たり、千葉大学工学部中井正一教授より適切なご指導を頂きました。末筆ながらここに感謝の意を表します。