多層地盤における杭基礎の水平力作用時の応力-変形系

SYSTEMATIC ELASTIC THEORY ON STRESS AND DEFORMATION OF PILE FOUNDATION WITH SUPERSTRUCTURE ON MULTIPLE LAYER GROUND SUBJECTED TO LATERAL LOAD

中澤 瑤子*
Yohko NAKAZAWA

The aim of this paper is to systematically identify the characteristics regarding the stress/deformation of pile foundations with super-structure subjected to lateral load on multiple layers ground by elastic analysis. The characteristics of stress/deformation of piles could be treated as equivalent to single layer ground. The values of equivalent ground factor β_0 for pile top bending moment M_0 , β_m for maximum bending moment along pile length M_m and β_s for pile top shear force Q_0 were strongly related to the non-dimensional depth of the upper layer. The influence of structural rigidity and the difference between center and corner piles were able to be evaluated by non-dimensional restraint factor ω .

Keywords: pile foundation, elastic analysis, double layer ground, superstructure, lateral load, equivalent ground factor, non-dimensional restraint factor

杭基礎、弾性解析、2層地盤、上部架構、水平力、等価地盤定数、無次元回転拘束度

1. はじめに

上部架構からの水平反力を受けた杭の応力、変形を考える場合、上部架構と基礎はそれぞれ別の構造系に属するとして切り離して扱われることが多い。その場合、杭頭の境界を杭頭結合度いわゆる杭頭固定度¹⁾で把握し、架構では支点からの曲げ戻しのモーメントを考慮する考え方²⁾がある。しかし、この固定度と称するものは、基礎は剛で回転しないものとして、それへの杭頭の埋込み状況の堅固さを示す量であって、基礎が架構と一体であれば杭頭も基礎と共に回転しながら水平に移動するという境界条件を再現するものではない。この証左として、杭と架構を連続させて応力、変形を求めると、固定度が架構内の全ての杭で同一であっても、隅基礎と中基礎の杭ではその応力、変形が異なる³⁾ことが挙げられる。このような隅、中基礎の特性のうち、地盤が杭全長にわたって一定の場合(これを、1層地盤と称する)については、杭への地盤反力を弾性バネ定数として扱った上で、架構と杭を一体とした解析に基づいた一つの応力/変形系を文献⁴⁾に示した。なお、これは、隅、中基礎の応力、変形はそれぞれ絶対量では異なるものの、両基礎の応力/変形には共通する定性的かつ定量的特性が見出せたため、杭種や架構を限定しないひとつの応力/変形系として示したものである。ここに、隅・中基礎を総称する場合は、これを杭基礎と呼ぶこととする。

しかし、地盤が多層の場合や一部範囲が液状化して水平抵抗が低減し2層とみなせる場合など、多層地盤における杭⁵⁾あるいは杭基礎の挙動はまだ系統的に明らかになっていないと言いきれない。コンピュータの普及によってこれらの解析は容易になってきたものの、結果の工学的位置付けや正否の判断が困難となってゆくであろうことは、この他の杭の解析分野における状況などからも推察できる。また、最近の大地震の影響もあって、地盤からの外力によって杭の応力・変形を説明しようとする動向が多く見られる⁶⁾などが、この場合であっても上部架構が大きい場合はその慣性力による応力・変形は無視することはできず⁷⁾、杭の挙動の基本をなすものであることは否めない。このような視点にたつて、本報は、多層地盤、特に2層地盤につ

図1 地盤定数分布

* (株)アルマチュール構造設計事務所 工博

Armature Construction Bureau., Dr. Eng.

いて、杭頭に水平力を受けた場合の杭基礎の挙動を、杭と架構を一体とした解析によって系統的に明らかにするものである。図1に2層地盤における地盤定数分布を模式的に示した。地盤を k_h の一定値で表す場合を β 型($\beta=(k_h D/(4E_p I_p))^{0.25}$ 、 D : 杭径、 $E_p I_p$: 杭の曲げ剛性)、 k_h が深さ x に比例する場合($k_h=n_h \cdot x/D$)を η 型($\eta=(n_h/(E_p I_p))^{0.2}$)と呼ぶ。上・下層はサフィックス1、2で区別する。上層の地盤定数が下層よりも小さい場合($\beta_1 < \beta_2$ および $\eta_1 < \eta_2$)をAタイプ、大きい場合($\beta_1 > \beta_2$ および $\eta_1 > \eta_2$)をBタイプと呼ぶ。

2. 架構と杭基礎の一体解析法の概要

架構モデルは1層3スパンの骨組架構であって、杭基礎は1柱1杭形式である。解析に用いる杭種はPC杭および場所打ちコンクリート杭としたが、本報の結果は杭種および架構を限定しない一般的な特性である。解析では、杭および架構部材は弾性線材として扱うこととする。解析はまず、杭の区分解析を行う。方法は、杭を長さ方向に適宜区分し、区分ごとに杭の弾性支承梁理論(1)式を適用、区分の境界条件を一致させて杭全長を解くものである。なお、(1)式を各区分に適用するにあたって、 k_h は区分間の平均値を採用した。結果として、杭頭の応力変形式が(2)～(5)式で得られる。ここに、 Q_0 : 杭頭水平力、 M_0 : 杭頭曲げモーメント、 y_0 : 杭頭水平変位、 θ_0 : 杭頭回転角である。Koz'、Koy'、Kom'は区分解析で得られる係数値である。

$$\text{杭の基本式: } E_p I_p d^4 y / dx^4 + k_h \times D \times y = 0 \quad (1)$$

$$\beta \text{ 型: } Q_0 = 4Koz' \times y_0 \times E_p I_p \beta_1^3 - 2Koy' \times \theta_0 \times E_p I_p \beta_1^2 \quad (2)$$

$$M_0 = -2Koy' \times y_0 \times E_p I_p \beta_1^2 + 2Kom' \times \theta_0 \times E_p I_p \beta_1 \quad (3)$$

$$\eta \text{ 型: } Q_0 = 4Koz' \times y_0 \times E_p I_p \eta_1^3 - 2Koy' \times \theta_0 \times E_p I_p \eta_1^2 \quad (4)$$

$$M_0 = -2Koy' \times y_0 \times E_p I_p \eta_1^2 + 2Kom' \times \theta_0 \times E_p I_p \eta_1 \quad (5)$$

次いで、杭と架構の一体解析を行う。一体解析法は1層地盤の場合と同一であって、(2)、(3)式または(4)、(5)式を基礎節点で架構のたわみ角法⁹⁾の式に連結して節点方程式をたて、その他の架構の方程式とで連立に解き、架構および杭の応力、変形を得るものである。

本報では、杭頭は基礎に完全に埋め込まれており、基礎が回転すれば杭頭も等しい回転を生ずると仮定した。ただし、杭頭拘束度についての一連の特性を得るため、杭頭ピンおよび杭頭が回転しない(基礎固定と略称)条件でも解析を行った。杭先端はピンと仮定する。また、基礎の沈下は考慮しないこととした。

解析範囲は、架構の部材剛度は基礎梁剛度 $K_g=0.005, 0.01, 0.03m^3$ とし、1階柱剛度 $K_c=0.007m^3$ 、2階梁剛度 $K_b=0.004m^3$ の一定値とする。部材のヤング係数は $E_c=210 \times 10^9 kN/m^2$ である。杭径は、場所打ちコンクリート杭は $D=1.0, 1.2, 1.4m$ (ヤング係数: $E_p=210 \times 10^9 kN/m^2$)、

PC杭は $D=0.6, 0.8m$ ($E_p=400 \times 10^9 kN/m^2$)を採用し、杭長さ L は $6 \sim 20m$ の任意長さとして、杭径に対して短かすぎるものは省いた。地盤定数 $k_h=5,000, 10,000, 20,000 kN/m^3$ 、 $n_h=1,000, 2,200, 6,500 kN/m^3$ である。これは、 $\beta \approx 0.13 \sim 0.4 m^{-1}$ 、 $\eta \approx 0.2 \sim 0.5 m^{-1}$ 、上下の地盤定数比は β_2/β_1 (η_2/η_1) $=0.6 \sim 1.45$ にあたる。以上の範囲で適宜組み合わせで約200例の解析を行った。

杭の区分解析によって得られる係数値のうち、 η 型のKoy'- ηL 関係を図2に示した。同図は、2層地盤の杭無次元長さを $\eta L = \eta_1 \ell_1 + \eta_2 \ell_2$ (ℓ_1 : 上層厚さ、 ℓ_2 : 下層範囲にある杭の長さ)で表してある。上層の無次元層厚($\beta_1 \ell_1$ 、 $\eta_1 \ell_1$)を sk で記号化する。 sk 一定の場合のKoy'- ηL 関係は1層地盤のKoy'- ηL 関係⁹⁾に比例的な曲線である。Koz'、Kom'や β 型の図は省略したが同様である。このことから、まず2層地盤での杭の無次元長さは、 $\eta L = \eta_1 \ell_1 + \eta_2 \ell_2$ (あるいは $\beta L = \beta_1 \ell_1 + \beta_2 \ell_2$)で表して差し支えないことがわかる。なお、上述の解析範囲を βL 、 ηL で表すと、 $\beta L=1.3 \sim 5.0$ 、 $\eta L=1.5 \sim 7.2$ である。図2からさらに、2層地盤における杭長さの区分も、1層地盤での杭長さの区分と同一とみてよいことがわかる。すなわち、 $\beta L > 2.5$ 、 $\eta L > 3.1$ は長い杭、 $\beta L < 1.6$ 、 $\eta L < 2.0$ は短い杭にあたる。なお、これらの区分範囲は弾性解析によって得られたものであって、文献⁹⁾などで定義されている区分範囲とは限界値が異なる点に注意されたい。以後、解析結果をこの杭長さの区分に従って整理する。

3. 長い杭基礎の応力・変形特性

3.1 曲げモーメントについて

杭基礎の応力、変形はそのままでは一定の共通特性を示さないの、一体解析の結果得られた M_0 、地中部最大曲げモーメント M_m 、および Q_0 を杭頭水平変位あたりの値 $M_0/(y_0 E_p I_p)$ 、 $M_m/(y_0 E_p I_p)$ および $Q_0/(y_0 E_p I_p)$ に直して検討を行う。まず、 β 型地盤で、層数が2層以上の多層地盤について、基礎固定の場合の $M_0/(y_0 E_p I_p) - M_m/(y_0 E_p I_p)$ 関係を図3に示した。同図の各点の数字は層数である。地盤は、杭頭から無次元長さ2.0の範囲が2～7層の互層で、最上層とその下の第2層の組み合わせがAタイプで $sk=0.94$ 一定の場合、およびBタイプで $sk=0.79$ 一定の場合である。第3層以深の各層の地盤定数は交互に β_1 、 β_2 に等しいと考えておく。1層地盤の $M_0/(y_0 E_p I_p) - M_m/(y_0 E_p I_p)$ 関係は直線であり、2層地盤はほぼ楕円形の線上にある。その他の多層地盤はこの楕円内にあり、かつ層数が増えるにつれて2層地盤の値間で増減を繰り返しながら1層地盤に近づいてゆくことから、2層の場合が層序による影響を最も端的に示すと考えられる。以降は2層地盤について検討を行う。

β 型のA、Bタイプの $M_0/(y_0 E_p I_p) - M_m/(y_0 E_p I_p)$ 関係を図4、図5に示

図2 2層地盤のKoy'- ηL 関係

図3 多層地盤における $M_0/(y_0 E_p I_p) - M_m/(y_0 E_p I_p)$ 関係

で、 β_m 、 η_m は(22)、(23)式で表せた。 Δ_m 値を表3に示す。以後、等価式の表記は1層地盤の式と区別するため、下線を付した。

基礎固定： $Mo/(yoE_p I_p) = -2\beta_o^2$ かつ

$$M_m/(yoE_p I_p) = 0.416\beta_m^2 \quad (16)$$

$Mo/(yoE_p I_p) = -\eta_o^2$ かつ

$$M_m/(yoE_p I_p) = 0.28\eta_m^2 \quad (17)$$

杭頭ピン： $M_m/(yoE_p I_p) = 0.644\beta_m^2$ (18)

$$M_m/(yoE_p I_p) = 0.322\eta_m^2 \quad (19)$$

Moに関する等価地盤定数： $\beta_o = \beta_1 - \Delta_o \times (\beta_1 - \beta_2)$ (20)

$$\eta_o = \eta_1 - \Delta_o \times (\eta_1 - \eta_2) \quad (21)$$

M_m に関する等価地盤定数： $\beta_m = \beta_1 - \Delta_m \times (\beta_1 - \beta_2)$ (22)

$$\eta_m = \eta_1 - \Delta_m \times (\eta_1 - \eta_2) \quad (23)$$

図4、図5に、 $Mo/(yoE_p I_p)$ 一定に対する1層地盤での $M_m/(yoE_p I_p)$ を白丸で例示し、これに対応する2層地盤の $M_m/(yoE_p I_p)$ へ破線矢印を引いておいた。破線矢印の長さは1層と2層の $M_m/(yoE_p I_p)$ の差を表しており、2層地盤の $M_m/(yoE_p I_p)$ は1層地盤と比べて、 $Mo/(yoE_p I_p)$ の一定値に対してAタイプでは大きく、Bタイプでは小さいという特徴が見られる。この特性は、図6～図9において sk 一定では $\Delta_m > \Delta_o$ であって、(20)～(23)式によって等価地盤定数が、Aタイプは $\beta_m > \beta_o$ 、 $\eta_m > \eta_o$ 、またBタイプは $\beta_m < \beta_o$ 、 $\eta_m < \eta_o$ となることに表現されている。

図10に、 β 型のBタイプについて、 K_g 一定での一様解析で得た隅基礎および基礎固定の杭の $Mo/(yoE_p I_p)$ - sk 関係を示した。隅基礎の $Mo/(yoE_p I_p)$ の sk に対する変化の様子は、基礎固定の場合の変化にほぼ比例している。すでに、基礎固定の場合、 $Mo/(yoE_p I_p)$ の sk に対する変化は β_o の関係式として表せることから、基礎固定の曲線とほぼ同じ変化をする隅基礎の曲線も β_o の関係式として表せると推定できる。しかも、 $sk=0$ では β_2 の1層地盤での杭基礎の値すなわち $(-2+2\theta) \times \beta_2^2$ であり、 $sk>2$ では β_1 の1層地盤での杭基礎の値 $(-2+2\theta) \times \beta_1^2$ であって、この間を β_o の関係式として推移してゆくことを考えれば、その近似的な式としては $(-2+2\theta) \times \beta_o^2$ が考えられる。 $sk=0$ および >2 の範

囲では、 ω 値は(6)、(7)式で、 θ 値は1層地盤での $\theta-\omega$ 関係で表せることから、 $0 < sk < 2$ の範囲では、 β_o を(6)、(7)式に適用して ω 値を求め、1層地盤での $\theta-\omega$ 関係によって θ 値を得ればよいと推定される。以上に基づいて杭基礎の等価式を(24)、(25)式に示した。図10に、同等式による隅基礎の値を破線で併記したが、解析値とよく一致しており、以上の考察が裏付けられた。なお、解析による2層地盤での $\theta-\omega$ 関係図の記載は省略するが、 sk 一定でのこれらの曲線は1層地盤の $\theta-\omega$ 関係に比例的であるもののA・Bタイプでは異なる曲線であったため、無次元回転角を $\theta/(yo\beta_o)-\omega$ 等の一般特性として示すことはできなかった。

$$\text{杭基礎}： Mo/(yoE_p I_p) = (-2+2/(2\omega+1)) \times \beta_o^2 \quad (24)$$

$$Mo/(yoE_p I_p) = (-1+1.5/(4.5\omega+1.6)) \times \eta_o^2 \quad (25)$$

杭基礎の地中部最大曲げモーメントに関して、 $M_m/(yoE_p I_p)$ は数式で表現し難いので、 $Mo/(yoE_p I_p)-M_m/(yoE_p I_p)$ 関係図を利用して求める方法を図11～図14に示す。対象とする2層地盤は、上、下層の地盤定数が β_1 および β_2 (η_1 および η_2)である。まず、 β_1 あるいは β_2 (η_1 あるいは η_2)の1層地盤について、 $\omega=0 \sim \infty$ までの範囲でいくつかの適当な ω 値を選び、この ω に対する $(Mo/(yoE_p I_p), M_m/(yoE_p I_p))$ を(10)あるいは(11)式で求め、これらを結ぶと上下それぞれの限界曲線が得られる。この限界曲線上に、対象とする杭基礎の基礎梁剛度 K_g を用いて、 β_1 あるいは β_2 (η_1 あるいは η_2)の1層地盤での ω 値を(6)～(9)式で求め、 ω 値に対応する $Mo/(yoE_p I_p)$ 値の位置に■印を記す。ここで、当該2層地盤での無次元厚さを sk_{pec} で再度記号化する。この sk_{pec} に対応する $M_m/(yoE_p I_p)$ 値を(18)あるいは(19)式で得、その位置を左の限界直線上に●印する。さらに、 $sk=0 \sim 2$ (η 型は $sk=0 \sim 2.5$)の範囲で適当な sk 値を選び、この sk に対して(16)あるいは(17)式で $Mo/(yoE_p I_p)$ および $M_m/(yoE_p I_p)$ 値を求め、これらを結べば右の限界曲線が得られる。この曲線上に、 sk_{pec} に対応する $Mo/(yoE_p I_p)$ 、 $M_m/(yoE_p I_p)$ 値を●印で記す。■印間を右の限界曲線なりに結び、また●印間を上下の限界曲線なりに結ぶと、これらの交点が2層地盤の杭基礎の値にあたる

図6 等価地盤定数 β_o -無次元層境界深さ sk の関係
(β 型の杭頭曲げモーメントについて)

図7 等価地盤定数 η_o -無次元層境界深さ sk の関係
(η 型の杭頭曲げモーメントについて)

図8 等価地盤定数 β_m -無次元層境界深さ sk の関係
(β 型の地中部最大曲げモーメントについて)

図9 等価地盤定数 η_m -無次元層境界深さ sk の関係
(η 型の地中部最大曲げモーメントについて)

ので、この交点の値を読みとればよい。あらかじめ、当該杭基礎の $Mo/(yoE_pI_p)$ 値は(24)、(25)式で得られるので、交点をこの値に一致するように曲線を修正すれば、より解析値に近い $M_m/(yoE_pI_p)$ 値が得られる。図5に、(24)、(25)式で計算した $Mo/(yoE_pI_p)$ 値、および上記の図法で得られる $M_m/(yoE_pI_p)$ 値を一点鎖線で示したが、解析結果とよ

図10 $Mo/(yoE_pI_p)$ - sk 関係

図11 杭頭曲げモーメント-地中部最大曲げモーメント関係 (β型 Aタイプ)

図13 杭頭曲げモーメント-地中部最大曲げモーメント関係 (η型 Aタイプ)

図15 杭頭水平力-無次元層境界深さ関係 (β型Aタイプ)

図17 杭頭水平力-無次元層境界深さ関係 (η型Aタイプ)

く一致している。β型のその他の事例でも計算値/解析値は 1.0 ± 0.07 程度の範囲であり、η型ではこれよりやや良い一致をみた。

3.2 杭頭水平力について

解析で得た2層地盤における基礎固定の杭の $Qo/(yoE_pI_p)$ - sk 関係を、β型、η型のA、Bタイプにわけて図15~図18にプロットし、実線で結んでおいた。 $Qo/(yoE_pI_p)$ は、 $sk=0$ では β_2 あるいは η_2 の1層地盤の値 ($4\beta_2^3$ および $1.08\eta_2^3$) であり、 sk が增大するとAタイプでは減少、Bタイプでは増大して、β型では $sk \geq 2$ 、η型では $sk \geq 2.5$ 範囲で β_1 および η_1 の1層地盤の値 ($4\beta_1^3$ および $1.08\eta_1^3$) に一致する。この間の sk の変化に対する $Qo/(yoE_pI_p)$ 値の変化は、β型は sk が小さい程変化の程度が大きいが、η型はほぼ $sk < 0.5$ の範囲では緩やかに変化し、 $0.5 < sk < 1$ 間で変化の程度がやや大きく、 $1 < sk < 2.5$ の間は再び緩やかになるといった、わずかにS字型の変化をする。

図12 杭頭曲げモーメント-地中部最大曲げモーメント関係 (β型 Bタイプ)

図14 杭頭曲げモーメント-地中部最大曲げモーメント関係 (η型 Bタイプ)

図16 杭頭水平力-無次元層境界深さ関係 (β型Bタイプ)

図18 杭頭水平力-無次元層境界深さ関係 (η型Bタイプ)

以上の $Q_0/(y_0 E_p I_p)$ 値の一般特性は、Koz'等の係数の一般特性が判明しないので、(2)式あるいは(4)式によって考察することは難しい。そこで、 Q_0 に関しても2層地盤を1層地盤に置換する。 Q_0 に関する等価地盤定数を β_a 、 η_a で記号化する。 β_a 、 η_a は、2層地盤において基礎固定の解析で得た Q_0/y_0 値を1層地盤の式に代入して、 $\beta_a=(Q_0/(4y_0 E_p I_p))^{1/3}$ 、 $\eta_a=(Q_0/(1.08y_0 E_p I_p))^{1/3}$ で得た。これを $\Delta_a=(\beta_1-\beta_2)/(\beta_1-\beta_2)$ および $(\eta_1-\eta_2)/(\eta_1-\eta_2)$ で無次元化し、 Δ_a -sk関係を図19、図20に示したが、ほぼskで一義的にきまる曲線関係(同図実線)であったので、 β_a 、 η_a は(26)、(27)式で表せた。この β_a 、 η_a を用いて基礎固定の杭の $Q_0/(y_0 E_p I_p)$ は(28)、(29)式で表せる。 Δ_a 値を表4に示した。

図15～図18に、長い杭基礎についての一体解析値のうち隅基礎の $Q_0/(y_0 E_p I_p)$ 値を併記した。隅基礎の $Q_0/(y_0 E_p I_p)$ -sk曲線は、基礎固定の $Q_0/(y_0 E_p I_p)$ -sk曲線にほぼ比例的な変化をしていることから、基礎固定の杭と同様にその変化は β_a 、 η_a の関係式として表せると推定できる。しかも、sk=0では、1層地盤の杭基礎の値 $(4-2\theta)\times\beta_1^3$ あるいは

は $(1.08-\theta)\times\eta_1^3$ に一致し、 β 型のsk ≥ 2 では $(4-2\theta)\times\beta_1^3$ 、 η 型のsk ≥ 2.5 では $(1.08-\theta)\times\eta_1^3$ の1層地盤の杭基礎の値に一致することから、 $0<sk<2$ (η 型は $0<sk<2.5$) 間の杭基礎の $Q_0/(y_0 E_p I_p)$ の変化も、1層地盤の杭基礎の式の $\beta=\beta_a$ 、 $\eta=\eta_a$ とした(30)、(31)式で表せると考えられる。なお、 ω は $M_0/(y_0 E_p I_p)$ における β_0 、 η_0 を(6)～(9)式に適用した値とし、 θ は1層地盤の θ - ω 関係によるものとする。これらの等価式による値は図15～図18に破線で示すように解析値とよく一致する。その他の β 型、 η 型およびA、Bタイプについての計算値/解析値は、 1.0 ± 0.05 程度であった。

$$Q_0 \text{ に関する等価地盤定数: } \beta_a = \beta_1 - \Delta_a \times (\beta_1 - \beta_2) \quad (26)$$

$$\eta_a = \eta_1 - \Delta_a \times (\eta_1 - \eta_2) \quad (27)$$

$$\text{基礎固定: } Q_0/(y_0 E_p I_p) = 4\beta_a^3 \quad (28)$$

$$Q_0/(y_0 E_p I_p) = 1.08\eta_a^3 \quad (29)$$

表5 層境界深さ ℓ_1 (m) と M_m の発生深さ L_m (m)

	β 型2層地盤		η 型2層地盤	
	ℓ_1	L_m	ℓ_1	L_m
A,B共通	$P_1=2.5/\beta_1$	$L_{m1}=1.57/\beta_1$	$P_1=3.1/\eta_1$	$L_{m1}=2.15/\eta_1$
	$P_2=0.2/\beta_2$	$L_{m2}=1.57/\beta_2$	$P_2=0.7/\eta_2$	$L_{m2}=2.15/\eta_2$
Aタイプ	$P_3=1.74/\beta_1$	$L_{m3}=1.74/\beta_1$	$P_3=2.3/\eta_1$	$L_{m3}=2.3/\eta_1$
Bタイプ	$P_3=1.4/\beta_1$	$L_{m3}=1.4/\beta_1$	$P_3=1.9/\eta_1$	$L_{m3}=1.9/\eta_1$
A,B共通	—	$L_{m0}=d/\beta_1$	—	$L_{m0}=d/\eta_1$
	—	$L_{m0}=d/\beta_2$	—	$L_{m0}=d/\eta_2$

注) d_0 は表6の値

表4 Δ_a

sk	β 型	η 型
0	1.0	1.0
0.5	0.44	0.8
1.0	0.13	0.44
1.5	0.03	0.2
2.0	0	0.08
2.5	0	0

表6 d_0

ω	β 型	η 型
0	0.78	1.32
0.5	1.25	2.02
1.0	1.42	2.05
2.0	1.49	2.1
∞	1.57	2.15

図19 等価地盤定数 β_a と層境界深さの関係(β 型の杭頭水平力に関して)

図20 等価地盤定数 η_a と層境界深さの関係(η 型の杭頭水平力に関して)

図21 地中部最大曲げモーメント発生深さ—層境界深さ(Aタイプ)

図22 地中部最大曲げモーメント発生深さ—層境界深さ(Bタイプ)

図23 地中部最大曲げモーメント発生深さ—層境界深さ(Aタイプ)

図24 地中部最大曲げモーメント発生深さ—層境界深さ(Bタイプ)

$$\text{杭基礎: } Q_0/(y_0 E_p I_p) = (4-2/(2\omega+1)) \times \beta_a^3 \quad (30)$$

$$Q_0/(y_0 E_p I_p) = (1.08 - 1/(4.5\omega+1.6)) \times \eta_a^3 \quad (31)$$

以上の等価式によって、杭基礎の Q_0 、 M_0 、 M_m は以下の方法で計算できる。それぞれの杭基礎の $Q_0/(y_0 E_p I_p)$ 値は(30)あるいは(31)式で計算し、これに $E_p I_p$ を乗じて杭頭水平剛性 Q_0/y_0 を得る。 Q_0/y_0 を架構の全ての杭について合計し、これを $\Sigma Q_0/y_0$ で記号化する。杭頭水平変位 y_0 は全ての杭について等しいので、基礎全体に作用する水平力 Q_{all} および $\Sigma Q_0/y_0$ を用いて(32)式で計算出来る。杭頭曲げモーメントに関する $M_0/(y_0 E_p I_p)$ は(24)あるいは(25)式で計算し、また地中部最大曲げモーメントは図11～図14の $M_0/(y_0 E_p I_p) - M_m/(y_0 E_p I_p)$ 曲線図を作成することによって、その交点として値が得られる。これらの値に y_0 および $E_p I_p$ を乗じると、各杭基礎に生じる杭頭水平力 Q_0 、曲げモーメント M_0 および地中部最大曲げモーメント M_m 値が得られる。

$$y_0 = Q_{all} / (\Sigma Q_0/y_0) \quad (32)$$

$$Q_0 = Q_0/(y_0 E_p I_p) \times y_0 \times E_p I_p \quad (33)$$

$$M_0 = M_0/(y_0 E_p I_p) \times y_0 \times E_p I_p \quad (34)$$

$$M_m = M_m/(y_0 E_p I_p) \times y_0 \times E_p I_p \quad (35)$$

3.3 地中部最大曲げモーメントの発生深さ L_m について

η 型でAおよびBタイプの2層地盤について、解析で得た $\ell_1 - L_m$ 関係の一例を図21、図22に示した。基礎固定の場合、 ℓ_1 (m)が増大すると、 L_m はAタイプでは増大して最大深さ L_{max} に達し、Bタイプでは減少して最小深さ L_{min} に達する。さらに ℓ_1 が増大するとAタイプでは減少、Bタイプでは増大に転じて、いずれの場合も η_1 の1層地盤での深さに一致する。本解析の範囲での L_{max} 、 L_{min} は表5の値であった。同表の算定式の係数 d_0 は表6の値であって、 ω 値は、 L_{m1} に対しては(6)～(9)式で $\beta=\beta_1$ 、 $\eta=\eta_1$ として求め、 L_{m2} に対しては $\beta=\beta_2$ 、 $\eta=\eta_2$ として求める。なお、 L_{max} 、 L_{min} の場合のみ、 M_m の発生深さは ℓ_1 に一致するが、これ以外は層境界以外に発生する。ここに、 η_1 あるいは η_2 の1層地盤での発生深さに比べ、2層地盤での L_{max} が大きく L_{min} が小さいのは以下の理由による。 M_m は杭体せん断力が0の深さで発生するが、Aタイプでは上層の地盤反力が小さいので1層地盤よりも深くなり、Bタイプでは上層の地盤反力が大きいので1層地盤よりも浅くなるためである。以上の関係は図23、図24の折れ線で近似でき、また図21、図22において杭基礎の $\ell_1 - L_m$ は基礎固定の曲線に比例的であることから、基礎梁剛度が任意の杭基礎の $\ell_1 - L_m$ 関係は、図23、図24において、1層地盤での L_{m2} 、 L_{m1} 値(●印)間を基礎固定の折れ

表7 L_m に関する記号説明

L_{m1}	β_1 あるいは η_1 の1層地盤における基礎固定の杭の L_m (m)
L_{m2}	β_2 あるいは η_2 の1層地盤における基礎固定の杭の L_m (m)
L_{m1f}	β_1 あるいは η_1 の1層地盤における杭基礎の L_m (m)
L_{m2f}	β_2 あるいは η_2 の1層地盤における杭基礎の L_m (m)
L_{m01}	β_1 あるいは η_1 の1層地盤における杭頭ピンの杭の L_m (m)
L_{m02}	β_2 あるいは η_2 の1層地盤における杭頭ピンの杭の L_m (m)
P_1	2層地盤において基礎固定の杭の L_m が L_{m1} に一致する場合の層境界深さ ℓ_1 の最小値(m)
P_2	2層地盤において基礎固定の杭の L_m が L_{m2} に一致する場合の層境界深さ ℓ_1 の最大値(m)
P_3	2層地盤において基礎固定の杭の L_m が L_{max} あるいは L_{min} となる層境界深さ(m)

線に比例的に結んで得られる。各図の折れ点は記号で示し、表7に記号の説明をしておいた。

4. 短い杭基礎の杭頭曲げモーメントおよび杭頭水平力特性

杭長さ L が短い場合について、 η 型2層地盤での解析によって得た $M_0/(y_0 E_p I_p) - sk$ 関係の一例を、図25に示した。 $M_0/(y_0 E_p I_p)$ は、 $sk=0$ では、 η_2 の1層地盤での値(基礎固定は $-2Koy \times \eta_2^2$ 、杭基礎は $(-2Koy + 2Kom \theta) \times \eta_2^2$)であって、 sk が増大するとAタイプでは減少し、Bタイプでは増大して、 $sk=\eta_1 L$ では、 η_1 の1層地盤での値(基礎固定は $-2Koy \times \eta_1^2$ 、杭基礎は $(-2Koy + 2Kom \theta) \times \eta_1^2$)に一致する。このような変化の様子は、すでに述べた長い杭の場合と類似している。したがって、杭長さが短い場合についても、長い杭と同様の方法で等価な1層地盤への置換が可能と考えられる。

短い杭の M_0 に関する等価地盤定数 β_0 、 η_0 は、基礎固定の解析で得た M_0/y_0 値を短い杭の1層地盤の式に代入して、 β_0 および $\eta_0 = (-M_0/(2Koy \times y_0 E_p I_p))^{1/2}$ で得た。これを、長い杭と同様に Δ_0 に無次元化した。 Δ_0 を図6、図7にプロットしたが、 sk との関係はほぼ破線および一点鎖線で近似できたので、 β_0 および η_0 は(20)、(21)式で特定できた。したがって、基礎固定の短い杭の解析値の等価式として、(37)、(38)式が示せる。基礎固定と杭基礎の曲線の相似的な関係等を考慮すれば、短い杭基礎の $M_0/(y_0 E_p I_p)$ の等価式も、1層地盤式の $\beta=\beta_0$ 、 $\eta=\eta_0$ とした式で表せると推測できる。これを(39)、(40)式に示した。なお、無次元杭長さによって Koy 、 Kom の係数値や $\theta - \omega$ 関係が異なるので、 ω の関係式とはせず Koy 、 θ などのまま表示した。ここに、 ω は β_0 、 η_0 を(6)～(9)式に適用した値とし、 θ は1層地盤の $\theta - \omega$ あるいは $\theta - \beta L$ 、 $\theta - \eta L$ 関係図の値を用いる。 Koy 等の値は表1に例示した。等価式による隔基礎の値を破線で図25に示したが、解析値の特性をほぼ表しているといえる。

$$\text{基礎固定: } M_0/(y_0 E_p I_p) = -2Koy \times \beta_0^2 \quad (37)$$

$$M_0/(y_0 E_p I_p) = -2Koy \times \eta_0^2 \quad (38)$$

$$\text{杭基礎: } M_0/(y_0 E_p I_p) = (-Koy + Kom \times \theta) \times 2\beta_0^2 \quad (39)$$

$$M_0/(y_0 E_p I_p) = (-Koy + Kom \times \theta) \times 2\eta_0^2 \quad (40)$$

短い杭について、2層地盤での解析で得た $Q_0/(y_0 E_p I_p)$ と sk の関係を、図15～図18に併記した。隔基礎の関係曲線は基礎固定の関係曲線にほぼ比例的であって、また長い杭とも類似性が認められるので、短い杭基礎の Q_0 に関しても1層地盤への置換は可能と推定できる。等価地盤定数 β_0 、 η_0 は、解析で得た Q_0/y_0 値を1層地盤での基礎固定の式 $4Koz \times \beta^3$ 、 $4Koz \times \eta^3$ に代入して、 β_0 および $\eta_0 = (Q_0/(4Koz \times y_0 E_p I_p))^{1/3}$ で得た。これを、長い杭と同様の方法で Δ_0 に無次元化し、図19、図20に併記したが、 sk との関係はほぼ破線で示した曲線で近似できた

図25 杭頭曲げモーメント-層境界深さ関係(短い杭)

ので、 β_a 、 η_a は前述の(26)、(27)式で表せる。したがって、基礎固定の短い杭の $Q_0/(y_0 E_p I_p)$ の等価式は(41)、(42)式で表せる。杭基礎の等価式も、1層地盤の短い杭基礎の式にこの β_a 、 η_a を適用して(43)、(44)式で表せる。等価式による値を図15～図18に破線で示したが、解析値とよく一致している。

$$\text{基礎固定: } Q_0/(y_0 E_p I_p) = 4K_{oz} \times \beta_a^3 \quad (41)$$

$$Q_0/(y_0 E_p I_p) = 4K_{oz} \times \eta_a^3 \quad (42)$$

$$\text{杭基礎: } Q_0/(y_0 E_p I_p) = (4K_{oz} - 2K_{oy} \times \theta) \times \beta_a^3 \quad (43)$$

$$Q_0/(y_0 E_p I_p) = (4K_{oz} - 2K_{oy} \times \theta) \times \eta_a^3 \quad (44)$$

以上、長い杭、短い杭について、架構剛性の影響を考慮した杭基礎の特性を、等価式および図によって説明した。任意の地盤条件および架構条件での杭基礎の M_0 、 Q_0 および y_0 値は、これらの等価式によって解析結果と比較的良好に一致する値が得られる。2層地盤において、架構の剛性を考慮した場合の杭基礎の応力が、基礎固定の場合とどのような相違があるかを図25(Aタイプ)で比べてみる。例えば、上層が均一な厚さ $sk=1$ の場合、隅基礎でかつ短い杭の $M_0/(y_0 E_p I_p)$ は基礎固定の短い杭の値の約75%であり、中基礎の長い杭よりも約10%小さく、長い隅基礎とほぼ等しい。このことから、長い杭基礎の応力が、比較的剛な短い杭基礎よりも小さいとは限らないこと、短い杭基礎を基礎固定と仮定して応力を得ることは、過大な応力を想定すること、従って、杭体の変形量および地盤の変形量にかなり大きな誤差を生じる恐れのあること等がわかる。さらに、上層の層厚が各基礎ごとに変化する場合は等価地盤定数が各基礎ごとで異なり、かつ架構のスパン長さが異なる場合では、基礎に集まる ΣK_g が異なるため、各基礎の ω 、したがって θ も異なるので、各杭基礎の応力や変形がどのようなものであるかはより複雑となる。このように、杭基礎の応力・変形は、単に無次元杭長さの長・短や隅・中基礎の相違からだけで推定できるものではないため、その概略値を知る上でも以上の等価式を用いた計算による検討が望まれる。

5. 結論

架構に水平力が作用した場合の杭基礎について、地盤が多層状態での応力・変形特性を系統的に明らかにした。方法は、架構と杭を一体とした弾性解析であって、基礎梁剛度、杭種、杭径、杭長さおよび地盤定数などの組み合わせを変化させて解析した。杭への地盤反力は線形の水平バネ定数で想定した。地盤の水平反力係数 k_h が一定の場合を β 型、 k_h が深さに比例する場合を η 型と称し、上層地盤定数が下層よりも小さい場合をAタイプ、大きい場合をBタイプと呼んだ。以下、杭頭水平力 Q_0 、杭頭曲げモーメント M_0 、地中部最大曲げモーメント M_m 、杭頭水平変位 y_0 、杭の曲げ剛性 $E_p I_p$ 、杭頭回転拘束度 ω 、地盤の境界深さの無次元量 sk で記号化する。解析の結果、2層地盤における架構の杭基礎の応力・変形は、各基礎における杭径の相違、無次元杭長さの相違、地盤条件あるいは架構の基礎梁剛性さらには隅、中基礎の違いといった諸条件の影響を複雑に受けることがわかった。その一般特性として以下を明らかにした。

(1) 杭基礎の応力、変形の共通特性は、その絶対量でなく、単位水平変位あたりの $M_0/(y_0 E_p I_p)$ 、 $Q_0/(y_0 E_p I_p)$ 、 $M_m/(y_0 E_p I_p)$ に表れ、隅・中基礎の相違は ω によって表現できる。

(2) sk が変化する場合の $M_0/(y_0 E_p I_p) - M_m/(y_0 E_p I_p)$ 関係は、2層地盤はほぼ楕円の線上にあり、1層地盤はこの楕円を貫く直線である。多層

地盤は楕円内にあって、多層になるほど1層に収斂するので、杭基礎の応力/変形への層序の影響は2層の場合に最も顕著に現れる。

(3) 長い杭 ($\beta L > 2.5$ 、 $\eta L > 3.1$) において2層性を考慮すべき範囲は β 型: $sk < 2$ 、 η 型: $sk < 2.5$ である。これ以外は、杭全長にわたって上層地盤が広がった1層地盤に等しい。

(4) 2層地盤の杭基礎の $Q_0/(y_0 E_p I_p)$ 、 $M_0/(y_0 E_p I_p)$ は、等価地盤定数 β_a 、 β_o あるいは η_a 、 η_o の1層地盤の式で計算できる。ここに、 ω は β_o 、 η_o を1層地盤の ω 式に適用して求め、 θ は1層地盤の $\theta - \omega$ 関係図⁴⁾から読みとればよい。

(5) $M_0/(y_0 E_p I_p)$ の一定値に対する $M_m/(y_0 E_p I_p)$ は1層地盤に比べ、Aタイプでは大きく、Bタイプでは小さい。これらの特性は、等価地盤定数 β_o と β_m あるいは η_o と η_m 値の相違として表現できる。

(6) 任意の2層地盤において、 sk および K_g が変化する場合の杭基礎の $M_0/(y_0 E_p I_p) - M_m/(y_0 E_p I_p)$ 関係は不規則な四辺形の領域を形成する。この領域の上下限は、それぞれ上層あるいは下層の地盤定数をもった1層地盤の値であり、左右の限界は杭頭ピンおよび基礎固定の2層地盤の値である。この図を利用して杭基礎の $M_m/(y_0 E_p I_p)$ 値を特定できる。

(7) 2層地盤での M_m の発生深さ L_m が層境界深さ ℓ_1 と一致するのは、特定のある深さの場合に限られる。この深さは、基礎固定の場合、Aタイプでは $\ell_1 = L_{max} = 1.74/\beta_1$ あるいは $2.3/\eta_1$ 、Bタイプでは $\ell_1 = L_{min} = 1.4/\beta_1$ あるいは $1.9/\eta_1$ である。Aタイプで $\ell_1 < L_{max}$ およびBタイプで $\ell_1 < L_{min}$ の場合、 M_m は下層地盤内で発生する。その他の場合、 M_m は上層地盤内で発生する。以上の L_m と ℓ_1 の関係は、A、Bタイプそれぞれに折れ線で近似できる。基礎梁剛度一定の杭基礎の $\ell_1 - L_m$ 関係は、基礎固定の折れ線に比例的な折れ線として特定できる。

(8) 以上の一般特性を利用することによって、架構をもった隅基礎、中基礎についての妥当な応力・変形は簡単な計算で得られる。

参考文献

- 1) 日本建築センター：地震力に対する建築物の基礎の設計指針，pp.57-59，1984.9
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造設計指針・同解説，p.491，1971.5
- 3) 中澤瑤子，山肩邦男：架構剛性を考慮した群杭基礎の水平荷重時応力略算法，日本建築学会構造系論文報告集，第404号，pp.129-134，1989.10
- 4) 中澤瑤子：杭と架構を一体とした弾性解析による杭基礎の応力変形系（1層地盤の場合），日本建築学会構造系論文報告集，第512号，pp.127-132，1998.10
- 5) 横山幸満：くい構造物の計算法と計算例，山海堂，1985
- 6) 時松孝次，中澤明夫，大岡弘，社本康広，難波伸介：側方流動により被害を受けた建物杭基礎の破壊・変形モード，土と基礎，Vol.45，No.3，pp.13-16，1997.3
- 7) 中澤明夫，藤鉄盛史，難波伸介，中澤瑤子：兵庫県南部地震による建物杭基礎の被害調査報告（芦屋市の事例）：日本建築学会技術報告集，第3号，pp.77-85，1996.12
- 8) 武藤清：耐震設計法シリーズ，丸善，pp.107-109，1963
- 9) B.B.Broms：Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils，Proc.，ASCE，Vol.90，No.SM2，pp.27-63，1964.3

(1998年12月7日原稿受理，1999年4月22日採用決定)