模型水平載荷試験による群杭の地盤反力～変位関係

RELATION BETWEEN SUBGRADE REACTION AND DISPLACEMENT OF MODEL PILE GROUP BASED ON HORIZONTAL LOADING TEST

鈴木康嗣*, 安達直人**

Yasutsugu SUZUKI and Naohito ADACHI

Horizontal loading tests were conducted to investigate the characteristics of subgrade reaction of model pile groups. The relation between subgrade reaction and pile displacement traces a triangular loop due to pile group efficiency. The coefficient of subgrade reaction of pile group decreases with decreasing ratio of space between piles and pile diameter. A front pile of pile group has large subgrade reaction at shallow position and has large bending moment and shear force at pile top. However, a rear pile has relatively large subgrade reaction, bending moment and shear force at deep position. Based on the relation between subgrade reaction and pile displacement, hysteresis models are presented and can well simulate the test results.

Keywords : Pile group, Horizontal loading test, Model test, Subgrade reaction, Pile group efficiency, Hysteresis damping factor, Bending moment, Shear force

群杭, 水平載荷試験, 模型実験, 地盤反力, 群杭効率, 履歴減衰定数, 曲げモーメント, せん断力

1. はじめに

筆者らは、液状化地盤が杭に及ぼす力を評価するため、振動台実験を行い、地盤反力が杭と地盤の相対変位や相対速度とどのような関係にあるかを明らかにしてきた^{1), 2)}。液状化地盤における地盤反力特性を評価する上で、初期値となる液状化前の地盤反力特性を把握し、弾性状態から液状化後まで連続的なモデル化を行うことが重要である。液状化する前の地盤反力特性を実験的に求める手法としては、静的、動的な杭頭水平載荷試験や乾燥砂による振動台実験などが考えられる。本論文では、基本的な特性を実験的に把握することを目的として、静的水平載荷試験による検討を行った。

単杭の原位置水平載荷試験はこれまで多数実施されているが、群杭の原位置水平載荷試験は比較的少なく³⁾、同一地盤で杭本数や配置を変えた試験例^{4)~6)}はさらに少ない。また、室内における模型群杭の水平載荷試験例⁷⁾も決して多くない。重力場や遠心場における小型の模型試験は、相似則に基づく縮尺率が大きいこと、その適用性には問題を含んでいる。しかし、再現性の良い地盤でパラメータを多数変えた試験が可能なことや、模型杭の材料選定に自由度があるため杭が弾性状態のままで大変形させることが出来る等の利点がある。

杭の応力はひずみゲージの値から求めるのが一般的であるため、直接測定されるのは軸ひずみ（軸力）と軸ひずみから算出される曲

率（曲げモーメント）である。杭と地盤の力のやり取りは一般に地盤反力と変位の関係で決まるが、地盤反力は曲げモーメントを2階微分して、変位は曲率を2階積分して算出される値であるため、地盤反力と変位の関係を実験的に高い精度で評価するのは、特に原位置試験では非常に難しく、模型試験も含めて研究例^{8)~10)}は少ない。

一方、杭の水平抵抗に関する理論的・解析的研究としては、Poulosの一連の研究^{11), 12)}があり、群杭現象を大局的に評価している。また、杭前面地盤の塑性化をモデル化して単杭¹³⁾や群杭¹⁴⁾の解析が行われ、群杭模型の試験結果との対応が検討されている¹⁴⁾。これらの研究では、地盤反力と変位の関係をモデル化しているものの、試験結果から直接地盤反力と変位の関係を求めている訳ではない。

そこで本論文では、地盤反力と変位の関係を高い精度で評価するために、重力場において模型群杭基礎の水平載荷試験を実施した。この試験から得られた関係を基に、地盤反力係数、群杭効率および杭位置による曲げモーメントやせん断力の違いなどを実験的に見から検討するとともに、地盤反力～変位関係のモデル化について検討する。

2. 水平載荷試験の概要

試験モデルと計測点配置を図1に、模型杭の配置を図2に、試験

* 鹿島技術研究所建築構造グループ 上席研究員・工修

** 鹿島技術研究所都市防災・環境グループ 主任研究員
(広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻
大学院生)

Supervisory Research Engineer, Building Structure Group, Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation, M. Eng.
Senior Research Engineer, Disaster Prevention and Wind Engineering Group, Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation
(Graduate Student, Graduate School of Engineering, Department of Social and Environmental Engineering, Hiroshima University)

図1 試験モデルと計測点配置

図2 模型杭の配置と基礎形状

表1 試験ケースと荷重ステップ

試験ケース	杭本数(本)	杭配置縦×横	杭距離R/B	荷重ステップ(±N)
P2-25B	2	1X2	25.0	2.45, 4.9, 9.8, 14.7, 19.6, 29.4, 39.2, 49.0
P4-10B	4	2X2	10.0	4.9, 9.8, 19.6, 39.2, 58.8, 78.4, 98.0
P4-5.0B	4	2X2	5.0	4.9, 9.8, 19.6, 39.2, 58.8, 78.4, 98.0
P4-2.5B	4	2X2	2.5	4.9, 9.8, 19.6, 39.2, 58.8, 78.4, 98.0
P9-5.0B	9	3X3	5.0	11.0, 22.1, 44.1, 66.2, 88.2, 110.3, 132.3
P9-2.5B	9	3X3	2.5	11.0, 22.1, 44.1, 66.2, 88.2, 110.3, 132.3
P25-2.5B	25	5X5	2.5	30.6, 61.3, 122.5, 183.75, 245.0

表2 試験に用いた砂の諸元

	記号(単位)	値
土粒子密度	ρ_s (g/cm ³)	2.64
乾燥密度	ρ_d (g/cm ³)	1.53
最大密度	ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.67
最小密度	ρ_{dmin} (g/cm ³)	1.40
相対密度	D_r (%)	60
内部摩擦角	ϕ (度)	37

図3 試験に用いた砂の粒径加積曲線

図4 模型地盤のせん断波速度分布

図5 単杭の杭頭荷重～杭頭変位関係

ケースと荷重ステップを表1に示す。試験に用いた土槽は、振動台実験^{1), 2)}に用いた土槽¹⁵⁾と同じで、高さ2cmのせん断フレームを25段積層した幅1.0m×奥行1.0m×高さ0.5mのせん断土槽である。試験モデルは杭中心間距離と杭径の比R/B(2.5～25)と杭本数(2～25本)をパラメータとして7種類作製した。模型杭にはアクリル製の円筒(長さL=340mm, 外径B_o=16mm, 内径B_i=13mm, 曲げ剛性EI=5.0Nm²)を用いた。アクリルは、鉄やアルミに比べて降伏点の歪が大きく、弾性状態のままで大変形まで測定可能である。模型杭の杭頭は、中空部分を固定治具付きの鉄詮で塞ぎ、剛体基礎(直径16mmの穴があいた厚さ20mmの鉄板)と固定治具をボルトで固定した。また、杭下端も鉄詮で塞ぎ、深さ50cmの地盤中にフリーとした。図2に示したゲージ付杭には、杭内面の両側に32mm間隔(杭外径の2倍)で11点ずつ歪ゲージを貼付した。群杭基礎は杭頭を固定しているので、それに対応した単杭の試験として杭中心間距離R/B=25の2本杭の試験も実施した。模型地盤の諸元を表2に、粒径加積曲線を図3に示す。模型地盤は、振動台実験²⁾と同じ方法(ボイリング)で作製した相対密度Dr=60%の飽和砂を用いた。杭頭の水平荷重は、錘の重量をワイヤーを介して剛体基礎に伝え、表1に示した荷重ステップで2回ずつ繰返す正負交番繰返し載荷とした。

剛体基礎の水平変位を1点、鉛直変位を4点、2～3本の杭の曲げひずみ(図2参照)を深さ方向に11点ずつ(図1参照)測定した。事前に実施した片持ち梁形式のキャリブレーションから杭の曲げ剛性EIを求め、得られた曲率に掛け合わせて曲げモーメントとした。梁の理論に基づき、曲げモーメントを1階差分してせん断力を、2階差分して地盤反力を、曲率を2階積分して杭変位を算出した。

水平載荷試験および同じ方法で作成した液状化実験用の地盤で測定したせん断波速度分布を図4に示す。せん断波速度は、振動台に

パルス波を入力し、地中に設置した振動実験用の加速度計で測定した²⁾。図4には、12実験の測定値と平均値をプロットしている。せん断波速度は一般に、平均有効主応力 σ'_m の0.25乗に比例するとされている。 σ'_m を算出するには静止土圧係数が必要であるが、静止土圧係数を測定あるいは推定するのは非常に難しいので、せん断波速度が有効上載応力 σ'_v (kPa)の0.25乗に比例するとした次式の関係を図4に太実線で併記した。

$$V_s = 52 \sigma'_v{}^{0.25} \quad (\text{m/s}) \quad (1)$$

ここで、係数52は測定値に最も合致する値を設定した。(1)式から求めたせん断波速度の深度分布は概ね測定値と対応しており、作製された模型地盤のせん断波速度のばらつきは小さく、再現性が高い地盤模型が作成されたと判断される。

3. 試験結果

3.1 杭頭荷重～杭頭変位関係

単杭(R/B=25の2本杭であるが、本論文では単杭として扱う。)の杭1本あたりの杭頭荷重 Q_t と杭頭変位 δ_t の関係を図5に示す。基礎の水平変位は、図1に示したように基礎よりやや高い位置(基礎より10～16mm上)で測定している。そこで、基礎の鉛直変位から剛体基礎の回転角を算出し、この回転成分に起因した水平変位を換算して杭頭(基礎下端)位置の水平変位、すなわち図5の杭頭変位 δ_t を求めている。図5より、杭頭荷重と杭頭変位のループの中央部がくびれる傾向が認められる。これは、杭背面の地盤が緩んでいるかあるいは隙間が生じているため¹⁶⁾と考えられる。

群杭の杭1本あたりの杭頭荷重と杭頭変位の関係を図6にまとめて示す。R/B=10の4本群杭では、単杭と同様にループの中央部が

図6 群杭の杭頭荷重～杭頭変位関係

くびれる傾向が認められるが、それ以外のモデルでは明確には認められず、25本群杭ではほぼ紡錘形の履歴ループを示した。群杭では、杭の背後地盤がさらに背後の杭によって押されて動くため、杭間の地盤には緩みや隙間が生じ難いと考えられる。その結果、杭本数が増え、 R/B が小さくなるにつれて履歴ループのくびれが徐々に減り、紡錘形に近い履歴ループになったと考えられる。

なお、杭頭で最大約7mm（杭径16mmの約0.4倍）の水平変位が生じて、アクリルは弾性領域が広いので、杭は塑性化していない。従って、原位置水平載荷試験では得られない程の大きな水平変位まで、杭を弾性として地盤反力などを検討可能な試験になっている。

3.2 杭頭ばね定数と履歴減衰定数

杭頭荷重～杭頭変位関係の正方向側の新規荷重¹⁷⁾とそれに対応する変位から求めた杭頭ばね定数 K_t （割線剛性）と杭頭変位 δ_t の関係を図7に示す。杭頭変位の増加に従って杭頭ばね定数が徐々に低下することが分かる。建築基礎構造設計指針¹⁸⁾では、群杭効率を「杭頭水平変位量が約1cm時における群杭の杭頭水平荷重を同じ変位時の単杭杭頭水平荷重を杭本数倍したもので除した値」と定義し、群杭効率 e と杭中心間距離と杭径の比 R/B との関係を図8に示す実線のように定めている。本試験は模型であるため、相似則¹⁹⁾を考慮する必要がある。そこで、相似比を100とした場合（実杭径 $\phi=1600$ mmの杭頭変位1cmが、模型杭の杭頭変位 $\delta_t=0.1$ mmに相当）、および相似比を10とした場合（実杭径 $\phi=160$ mmの杭頭変位1cmが模型杭の杭頭変位 $\delta_t=1.0$ mmに相当）の群杭効率を図8に併記した。図8より、杭中心間距離が杭径の10倍でも群杭効率は0.7程度であり、明らかに群杭の効果が存在している。また、全体的に本試験の群杭効率のほうが基礎構造設計指針の値より小さく、群杭の効果が顕著である。

図5、図6に示した杭頭荷重～杭頭変位関係から求めた履歴減衰定数 h_t と杭頭変位 δ_t の関係を図9に示す。履歴減衰定数は文献¹⁷⁾の方法に従い、弾性エネルギーと履歴によるエネルギー消費の比として求めた。単杭の履歴減衰定数は、履歴ループの中央部がくびれるため杭頭変位が増加してもあまり増加せず、一定値となる傾向が認められる。一方、群杭の履歴減衰定数は単杭に比べてやや大きく、杭頭変位の増加に従って増える傾向が認められる。この傾向は、杭本数が増え、杭間隔が狭くなるに連れて顕著になる。

図7 杭頭ばね定数と杭頭変位の関係

図8 群杭効率と杭間隔の関係

図9 杭頭の履歴減衰定数と杭頭変位の関係

図10 単杭の地盤反力～杭変位関係

3.3 地盤反力～杭変位関係

単杭の深度42mmおよび74mm位置（杭頭から2、3番目のゲージ位置）における単位深さあたりの地盤反力 P （ $=pB$ 、 p ：単位面積あたりの地盤反力、 B ：杭径）と同一深度の杭変位 y の関係を図10に示す。地盤反力と杭変位の関係はほぼ正負対称形の履歴ループを描き、図5に示した杭頭荷重と杭頭変位の関係と同様にループの中央部がくびれる傾向が顕著に認められる。

4本群杭（ $R/B=10, 5.0, 2.5$ ）の深度42mm位置における前方

図11 4本群杭の地盤反力～杭変位関係 ($R/B = 10.0$) 図14 9本群杭の地盤反力～杭変位関係 ($R/B = 5.0$) 図12 4本群杭の地盤反力～杭変位関係 ($R/B = 5.0$) 図15 9本群杭の地盤反力～杭変位関係 ($R/B = 2.5$) 図13 4本群杭の地盤反力～杭変位関係 ($R/B = 2.5$) 図16 25本群杭の地盤反力～杭変位関係 ($R/B = 2.5$)

杭と後方杭（図2参照）の地盤反力と杭変位の関係を図11～図13に示す。図11に示した杭中心間距離が最も広いケース（ $R/B=10$ ）では、杭変位が小さい時は正負対称形であるが、杭変位の増大につれて杭の背面側で地盤反力が一定値に収束する傾向が認められ、降伏していると判断される。また、杭中心間距離が狭くなるにつれて地盤反力の降伏値が小さくなり、三角形の履歴ループとなる。この傾向は図13に示した杭中心間距離が最も狭いケース（ $R/B=2.5$ ）ではかなり顕著である。

9本群杭および25本群杭の深度42mm位置における前方杭、中間杭および後方杭の地盤反力と杭変位の関係を図14～図16に示す。前方杭と後方杭は4本群杭と同様に三角形の履歴ループとなるが、中間杭は正負の载荷に対して前方に杭があるため、両側の地盤反力が降伏して小さくなっている。また、中間杭に比べて後方杭の方が正方向の地盤反力が小さい。

3.4 地盤反力係数と履歴減衰定数

深度42mm位置における地盤反力係数 k_h と同一深度の杭変位 y の関係を図17(a), (b)に示す。図17(a)に示した4本群杭では、前方杭の地盤反力係数は単杭よりやや小さいが、 R/B による差はそれほど顕著ではなく、杭変位が増加するとその比はさらに縮まる傾向が認められる。一方、後方杭は R/B が小さいほど地盤反力係数が小さく、群杭の効果が顕著に現れている。図17(b)に示した9本群杭で

(a) 単杭および4本群杭

(b) 単杭、9本および25本群杭

図17 地盤反力係数と杭変位の関係

は、前方杭、中間杭、後方杭の地盤反力係数は R/B が小さいほど小さい。25本群杭の前方杭の地盤反力係数は、杭変位の小さな時から単杭の1/2程度である。一方、後方杭や中間杭の地盤反力係数は杭変位が小さな時から単杭の1/10程度と非常に小さい。

深度42mm位置における履歴減衰定数 h_h と同一深度の杭変位 y の関係を図18(a), (b)に示す。図18(a)に示した4本群杭の履歴減衰定数は、 $R/B=5.0$ の杭変位0.3mm以下の場合を除き単杭に比べてやや大きい。また、前方杭と後方杭の履歴ループは対称形なので、履歴減衰定数はほぼ同じ値となる。図18(b)に示した9本群杭と25本群杭の履歴減衰定数は、単杭に比べて明らかに大きい。中間杭の履歴ループの形状は前方杭と後方杭と明らかに異なっているが、履歴減衰定数はほぼ同じである。

設計⁽¹⁰⁾に用いる最も重要な地盤の定数は、地盤反力係数 k_h であり、群杭の効果により k_h が小さくなるため群杭効率 e が1以下となると解釈できる。図7に示した杭頭ばね定数から図8に示した群杭効率を求めると、地盤反力係数の影響だけでなく、杭の曲げ剛性の影響が含まれたものになってしまう。これまでは地盤反力に関するデータが乏しく、しかもその特性が明らかになっていなかったため、地盤反力から直接群杭の効果を評価することが難しかった。しかし、群杭の効果は図17に示したような地盤反力係数から直接評価すべきである。地盤反力係数を用いれば、前方杭、中間杭および後方杭に生じる曲げモーメントやせん断力の差を適切に評価できる。

3.5 地盤反力分布

杭1本あたりの杭頭水平荷重が2.5N時（表1に示した各試験の第2荷重時）および9.8N時（全7試験のデータが揃う最大荷重時）の前方杭、中間杭および後方杭の地盤反力分布を図19に示す。9.8N時の場合、前方杭の分布形状は単杭と似ているが、最浅部を除いて群杭の地盤反力は単杭より大きい。群杭の中間杭および後方杭の地盤反力は、単杭に比べて浅部で小さいが、逆に中間部や深部で大きい。特に25本群杭の後方杭では、深部の地盤反力が浅部よりも明らかに大きい。すなわち、群杭の浅部では前方杭が大きな地盤反力を受け持ち、中間杭や後方杭の地盤反力は小さくなる。一方、中間部や深部では中間杭や後方杭が大きな地盤反力を受け持っている。

杭頭水平荷重が2.5N時でも9.8N時と同様の傾向が認められるが、9.8N時に比べてその傾向が明確でなく、単杭と群杭の地盤反力分布の差は特に前方杭において小さい。これは、杭頭荷重あるいは杭頭変位が増大すると、群杭の特性がさらに顕著に発揮されることを示している。

3.6 杭変位分布

杭1本あたりの杭頭水平荷重が9.8N時の9本群杭（ $R/B=5.0$ 、2.5）および25本群杭（ $R/B=2.5$ ）の杭変位分布を図20に示す。杭頭を基礎に剛接しているため3本の杭変位は深度0cmで一致している。前方杭は浅部で大きな地盤反力を受けるため、杭が急激に曲げられて地中部の杭変位が小さくなるが、中間杭や後方杭では浅部の地盤反力が小さいために杭はあまり曲げられず、深度15cm付近までは直線的な杭変位分布を示す。そのため、地中部の杭変位は前方杭よりも大きくなる。一方、深部では中間杭や後方杭に比較的大きな地盤反力が生じて杭が曲げられている。このように、群杭では地

(a) 単杭および4本群杭

(b) 単杭、9本および25本群杭

図18 履歴減衰定数と杭変位の関係

(a) $Q_t = 2.5 \text{ N}$ 時

(b) $Q_t = 9.8 \text{ N}$ 時

図19 単杭および群杭の地盤反力分布

盤反力のみならず杭の変形も杭位置によって異なっている。なお、9本群杭の3本の杭下端変位はほぼゼロになるが、25本群杭では杭下端も回転して3本の杭下端変位は負になっている。

図20 9本群杭および25本群杭の杭変位分布

図21 単杭および25本群杭の曲げモーメント分布とせん断力分布

3.7 杭の曲げモーメントとせん断力

25本群杭の曲げモーメント分布およびせん断力分布を単杭と比較して図21に示す。前方杭の杭頭曲げモーメントは単杭に比べて2.5倍程度大きく、地中部曲げモーメントの最大値発生深度は単杭に比べて前方杭、中間杭、後方杭の順番で深くなる。また、地中部最大曲げモーメントは単杭に比べていずれの杭でも大きい。せん断力分布にも曲げモーメント分布と同様の傾向が認められ、前方杭の杭頭せん断力（杭頭の水平力）は単杭の2倍程度大きく、中間杭、後方杭では半分以下である。

杭頭の水平力分担比（曲げモーメントから求めた杭頭のせん断力 Q/Q_t / 杭1本あたりの杭頭荷重 Q_t ）と杭頭荷重 Q_t の関係を図22(a), (b)に示す。前方杭は図19に示したように大きな地盤反力を受け持つため、杭頭荷重の増加と共に水平力分担比が増え、最大では2倍以上になっている。一方、中間杭や後方杭では浅部において地盤反力をあまり負担しないので、徐々に水平力分担比が減り、最小では半分以下になっている。また、これらの傾向は R/B が小さいほど顕著である。

以上のように、群杭では杭の位置によって地盤反力分布が大きく異なるため、曲げモーメントやせん断力などの杭に生じる応力の最大値が杭位置によっては2倍以上も異なっている。これらの杭応力を適切に評価することが杭の設計において重要であると考えられる。

4. 地盤反力～変位関係のモデル化

4.1 試験結果に基づくモデル化

建築基礎構造設計指針¹⁸⁾では、単位深さあたりの杭の地盤反力 P 、水平地盤反力係数 k_h 、杭径 B および杭変位 y の関係を次式のように定義している。

(a) 単杭および4本群杭

(b) 単杭, 9本および25本群杭

図22 杭頭の水平力分担比と杭頭荷重の関係

$$P = p B = k_h B y \quad (2)$$

$$k_h = k_{h1} (y/y_1)^{-0.5} \quad (3)$$

ここで、 y は杭変位 (cm)、 y_1 は基準変位 ($=1.0$ cm)、 k_{h1} は基準変位 y_1 における基準地盤反力係数である。本模型試験のような杭径の小さなモデルに対して1 cmの基準変位は大きすぎると考えられる。そこで、文献¹⁰⁾に示されている杭径の1% ($=0.16$ mm) を基準変位と考え、地盤反力係数と無次元化変位 (y/y_1) の関係を両対数表示で図23に示す。いずれの杭もある範囲の無次元化変位に対して直線関係が認められるが、すべての範囲において直線関係が成立しているわけではない。また、単杭では無次元化変位が0.5程度以上の範囲でその傾きがほぼ-0.5となっており、(3)式の関係が確認できる。しかし、黒塗印で示した前方杭の傾きの絶対値は0.5より小さく、逆に後方杭の傾きの絶対値は0.5より大きい傾向が認められる。そこで、群杭の地盤反力係数は (y/y_1) の-0.5乗にこだわらず、 $-n$ 乗とする指数関数が現実的である。すなわち、

$$k_h = k_{h1} (y/y_1)^{-n} \quad (4)$$

比較的直線関係が認められる変位0.1 mm以上 (y/y_1 で0.625以上) の範囲のデータを用いて(4)式によって回帰した結果を表3に示す。 n の値は単杭と4本群杭 ($R/B=10$) の前方杭ではほぼ0.5、それ以外の方杭では0.5以下、後方杭では0.5以上の値となっている。特に、25本群杭の後方杭では0.87となり、0.5とはかけ離れている。

(3)式の関係は、地盤反力が最大値を持たないので設計上問題が生じる可能性があるため、建築基礎構造設計指針¹⁸⁾では地盤反力に上限を定めている。しかし、これでは曲線の連続性が損なわれる。初期

図23 両対数表示による地盤反力係数と無次元化変位の関係

図24 地盤反力係数の逆数と杭変位の関係

表3 (4)式, (5)式による回帰分析結果

試験 ケース	杭本数 (本)	杭距離 R/B	杭位置	(4)式		(5)式	
				k_{h1} (N/mm³)	n	k_{h2} (N/mm³)	p_{max} (N/mm²)
P2-25B	2	25.0	単杭	0.042	0.52	0.067	0.019
P4-10B	4	10.0	前方	0.026	0.50	0.030	0.017
			後方	0.019	0.57	0.026	0.0092
P4-5.0B	4	5.0	前方	0.020	0.26	0.021	0.036
			後方	0.013	0.65	0.025	0.0046
P4-2.5B	4	2.5	前方	0.023	0.42	0.019	0.028
			後方	0.011	0.79	0.052	0.0030
P9-5.0B	9	5.0	前方	0.022	0.37	0.026	0.018
			中間	0.011	0.47	0.013	0.0068
P9-2.5B	9	2.5	前方	0.017	0.33	0.016	0.026
			中間	0.0050	0.46	0.0045	0.0051
P25-2.5B	25	2.5	前方	0.0046	0.77	0.0062	0.0015
			後方	0.013	0.48	0.011	0.013
			中間	0.0032	0.74	0.0038	0.0011
			後方	0.0031	0.87	0.0039	0.0008

図25 k_{h1} , k_{h2} と R/B の関係

値と最大値を有する単純な連続曲線として双曲線関数がある。双曲線関数は、地盤のせん断応力とせん断ひずみの関係においてH-Dモデル²⁰⁾として知られている。そこで、次式に示す双曲線関数を定義した。

$$k_h = k_{h2} / (1 + y/y_2) \quad (5)$$

$$p_{max} = k_{h2} y_2 \quad (6)$$

ここで、 k_{h2} は初期地盤反力係数、 p_{max} は単位面積あたりの最大地盤反力、 y_2 は基準変位 ($= p_{max} / k_{h2}$) である。また、(5)式は次式に変換できる。

$$1/k_h = 1/k_{h2} + y/p_{max} \quad (7)$$

$1/k_h$ と杭変位 y の関係を単杭と前方杭、およびそれ以外に分けて図24に示す。また、比較的直線関係が認められる変位0.1mm以上の範囲のデータを用いて(5)式によって回帰した結果を表3に示す。図23の関数と同様に、いずれの杭もある範囲の水平変位に対して直線関係が認められ、(5)式の関係が成り立っているが、すべての範囲で直線関係が成立しているわけではない。

図23と図24を比較すると、相関が良い変位の範囲が異なり、一概にどちらの関数が良いかを判断するのは難しい。また、(3)式ではモデル定数が基準地盤反力係数 k_{h1} だけであるが、(4)式で指数 n をモデル定数とすることでモデル定数が二つとなり、(5)式で最大地盤反力 p_{max} を変えると同様に、同一の基準地盤反力係数に対して異なった非線形特性を定義できる。この点でも、(4)式と(5)式の優劣を判断するのは難しい。

(4)式と(5)式に基づき、杭変位が0.1mm以上の範囲のデータを用いて回帰した k_{h1} 、 k_{h2} (表3参照)とR/Bの関係を図25に示す。

k_{h1} と k_{h2} はR/Bが小さくなるに従って減少し、群杭効果で地盤反力係数の初期値が小さくなる傾向が明らかである。また、 k_{h1} が k_{h2}

より全体的に大きい、これは基準変位 y_1 の採り方によって変わるものである。

4.2 両モデルと試験結果の比較

表3に示した(4)式、(5)式のモデル定数を用いて、試験結果の地盤反力～変位関係と両モデルを比較した。単杭、4本群杭($R/B=10$)、9本群杭($R/B=5.0$)、および25本群杭($R/B=2.5$)の深度42mm位置における比較結果を図26に示す。群杭の場合は、前方杭の地盤反力の負側を後方杭と考え、前方杭と中間杭のみを示した。どちらのモデルも試験結果と非常に良く対応している。従って、(4)式の指数関数の指数 n をモデル定数と考えれば、指数関数モデルと双曲線関数モデルは地盤反力～変位関係のモデルとして利用可能であると考えられる。なお、データで回帰した範囲を超えた部分では、双曲線関数モデルの地盤反力が急激に降伏する傾向があるのに対して、指数関数モデルでは徐々に増加する傾向があるので、図26(b)に示した前方杭の負側(後方杭に相当)の地盤反力の急激な降伏現象を表現するには、最大地盤反力が明確な双曲線関数モデルが適している。しかし、中間杭のように地盤反力が徐々に増加する傾向が続いている場合には、指数関数モデルが適していると考えられる。

5. まとめ

群杭の地盤反力特性を把握するため、模型群杭基礎の水平載荷試験

図26 指数関数モデル、双曲線関数モデルと実験結果の比較

験を行った。得られた知見は以下のとおりである。

- 群杭の地盤反力～変位関係は、前方杭と後方杭の背面側で地盤反力が降伏して三角形の履歴ループを描き、中間杭では両方向で地盤反力が降伏して小さくなる。
 - 群杭効果は杭中心間距離(R/B)が狭くなるほど顕著であるが、杭中心間距離が杭径の10倍あっても生じている。
 - 浅部では前方杭が大きな地盤反力を受け持ち、中間杭や後方杭の地盤反力が小さくなる。一方、中間部や深部では中間杭や後方杭が大きな地盤反力を受け持つ。
 - 前方杭は荷重の増加と共に水平力の分担比が増え、中間杭や後方杭では減る。また、これらの傾向は杭中心間距離が狭いほど顕著である。
 - 地盤反力～変位関係の非線形性は、双曲線関数モデルとともに、指数 n をモデル定数とする指数関数モデルでも表現可能である。
- 今後、理論的・解析的な検討を加え、群杭の水平抵抗問題を解明して行く予定である。

参考文献

- 鈴木康嗣, 安達直人: 液状化・側方流動地盤における杭の地盤反力～変位関係、液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp. 531~538, 1999
- Suzuki, Y. and Adachi, N.: Characteristics of lateral ground force acting on pile in liquefied soil, Proc. of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp.1015-1019, 2001
- 地盤工学会: 杭の載荷試験に関する文献データベース, 基礎構造物の限界状態設計に関する研究委員会資料集, pp. IV-21~IV-33, 1996
- 柴田徹, 佐藤忠信, 北口清, 山崎洋: 群杭の静的水平抵抗に関する実験的研究, 第15回土質工学研究発表会講演集, pp. 981~984, 1980
- 芳賀孝成, 崎本純治, 土屋幸三郎: 群杭の水平抵抗に関する模型実験, 第16回土質工学研究発表会講演集, pp. 997~1000, 1981
- 青砥一浩, 富樫勝男, 尾形隆永, 清広誠: 鋼管群杭の大変形水平載荷試験(その1 試験概要), 土木学会第55回年次学術講演会, III-B, pp. 12~13, 2000
- 富永晃司, 山肩邦男: 砂地盤中の模型群ぐいに関する水平載荷試験結果と理論的考察, 日本建築学会論文報告集, 第326号, pp. 68-77, 1983.4
- 森伸一郎, 込山貴士, 木村亮: 遠心場において推定された杭の水平地盤反力特性, 第36回地盤工学研究発表会, pp. 1657~1658, 2001
- 大川寛, 末政直見, 片田敏行, 堀井宣幸: 遠心場における杭の水平交番載荷試験, 第36回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1659~1660, 2001
- 時松孝次, 鈴木比呂子, 佐伯英一郎: 実大杭の杭頭および地中水平載荷試験に基づく地盤反力変位関係, 日本建築学会構造系論文集, 第562号, pp. 53~58, 2002.12
- Poulos, H. G.: Behavior of laterally loaded piles: II-Pile groups, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.97, No.SM5, PP.733-751, 1971.5
- Poulos, H. G.: Lateral load-deflection prediction for pile groups, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.101, No.GT1, PP.19-34, 1975.1
- 岸田英明, 中井正一: 地盤の破壊を考慮した杭の水平抵抗, 日本建築学会論文報告集, 第281号, pp. 41-53, 1979.7
- 富永晃司, 山肩邦男: 地盤の塑性状態を考慮した群ぐいの水平抵抗理論—その1 塑性地盤反力について—, 日本建築学会論文報告集, 第317号, pp. 32-40, 1982.7
- 鈴木康嗣, 安達直人, 内藤幸雄, 津川恒久: 液状化時の地盤の大変形を再現可能なせん断土槽の開発, 日本建築学会技術報告集, 第11号, pp. 57~60, 2000.12
- Kishida, H., Suzuki, Y. and Nakai, S.: Behavior of a pile under horizontal cyclic loading, Proc. of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.1413-1416, 1985
- 地盤工学会: 杭の鉛直載荷試験方法・同解説, 2002
- 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 2001
- Iai, S.: Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, Soils and Foundations, Vol.29, No.1, pp.105-118, 1989.3
- Hardin, B. O. and Drnevich, V. P.: Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.98, No. SM7, pp.667-692, 1972.7

(2003年2月7日原稿受理, 2003年5月15日採用決定)