大振幅水平載荷実験による群杭・地盤系の非線形挙動

NON-LINEAR BEHAVIOR OF PILE GROUP-SOIL SYSTEM BASED ON
HORIZONTAL LOADING TEST SUBJECT TO LARGE DISPLACEMENT

倉田 高志*, 柏 尚稔**, 林 康裕***, 田村 修次****, 吹田 啓一郎*****

Takashi KURATA, Hisatoshi KASHIWA, Yasuhiro HAYASHI,

Shuji TAMURA and Keiichiro SUITA

Nonlinear soil-structure interaction effects under strong ground motions should be considered in the seismic design. This paper presents the results of cyclic loading test for pile foundation in dry sand to investigate the nonlinear behavior of pile foundation in large displacement range. The experimental parameters are the number of piles, loading rate, relative density of soil and alignment of pile group. The major findings obtained from tests are summarized as follows: 1) the soil around piles deformed significantly even at small amplitude, 2) shear force-displacement relationship, resultantly secant stiffness and equivalent damping factor, at pile head shows significant nonlinearity even in very small displacement range, 3) shear force at pile head hold almost constant value after the soil get failed.

Keywords : Pile group, Horizontally cyclic loading test, Dry sand, Secant stiffness, Equivalent damping factor

群杭, 繰り返し水平載荷試験, 乾燥砂, 割線剛性, 等価減衰定数

1. はじめに

南海地震、東南海地震、東海地震をはじめとするプレート境界型の巨大地震の発生が懸念されているが、その発生前後には各地で活断層による内陸直下の地震が多発すると言われている。そのような地震の代表例として、兵庫県南部地震、鳥取県西部地震、新潟県中越地震などが挙げられるが、これらの震源域では設計用地震荷重を大きく上回る高レベル地震動が観測された。このような地震動が作用した場合の建築物の地震時挙動を解明し、建築物の耐震設計に合理的に反映させるためには、建築物と地盤間の強非線形相互作用効果を適切に考慮することが不可欠である。よって、まずは実験データを蓄積しながら現象を解明する必要があると考えられる。

群杭基礎と地盤間の強非線形相互作用効果を調べた既往の実験的研究の中で、単調載荷で杭径以上の水平変位を杭頭に与えた実験として、履歴特性及び地盤変形に着目した白方らの模型実験¹⁾、全ての杭について塑性ヒンジが発生し、かつ地盤も塑性化に至るまでの挙動を考察した富永らの模型実験²⁾が挙げられる。杭径以内の変位ではあるが、鋼管杭の杭頭に塑性ヒンジが発生するまで繰返し載荷した青砥らの実大実験³⁾がある。また、杭が弾性範囲内での実験ではあるが、群杭中の杭頭せん断力の分担と地盤変位の経過に着

目したBrownらの研究⁴⁾、飽和砂地盤で様々な群杭配置を対象に地盤反力・杭変位関係、杭頭バネ定数、減衰定数について比較検討をした鈴木らの研究⁵⁾や、動的載荷による影響をみた小林ら⁶⁾、大谷ら⁷⁾などの実験がある。また、群杭基礎周辺地盤の塑性化現象に着目し、理論式を構築し実大杭頭単調実験と比較検証を行った山肩らの研究^{8),9)}もある。

これらの研究では、一部の単調載荷実験を除き、動的載荷も含めて杭径以上の大振幅で繰返し載荷した実験例は見あたらず、また、杭配置に対して載荷方向を45度変えた繰返し載荷の実験例については皆無である。そこで本研究は、使用する杭の断面形状・長さを一定として、杭配置、載荷速度(動的・静的)、地盤密度、載荷方向などをパラメータとして、群杭の大振幅まで漸増繰返し載荷実験を系統的に実施した。本論文では、群杭基礎に大振幅水平変位を与えて、群杭中の各杭が弾性限界を超え、塑性ヒンジを形成した後、さらに変形を加え、杭径以上の変位まで載荷する一連の過程における①地盤の変状、②杭頭荷重・杭頭変位関係、③割線剛性・履歴減衰定数、④極限状態での地盤と杭の挙動を杭・地盤系の強非線形性に着目し、実験結果の報告を行う。

* 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程
** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 博士課程・工修

*** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博
**** 京都大学防災研究所 准教授・工博
***** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授・工博

Graduate Student, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ.
Graduate Student, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., M. Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.
Assoc. Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Dr. Eng.
Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

2. 実験方法

杭・地盤模型と実験装置の全体を図1に示す。固定土槽は高さ1.0m、幅1.2m、奥行き3.0mである。図中に示すように、杭試験体の杭頭部分は、載荷フレームに固定度の高いフーチングを介し、高力ボルト接合されている。フーチングと杭頭部分との接合の詳細は図2のようになっており、杭頭部分は十分な固定度を持って接合されている。杭先端は土槽底より離れており自由である。載荷フレームは摩擦の小さいガイドローラーで上下面外の移動を拘束するよう支持され、一端をアクチュエータに連結して水平1方向だけ載荷される機構となっている。

実験地盤は材料物性が明らかな乾燥した豊浦砂を用い、深さ950mmの地盤を作成した。各試験体で地盤と杭の挙動を精度良く比較するため、実験ごとの地盤の条件が同一になるようにする必要がある。よって本実験では厚さ100mmの層を9層、厚さ50mmの層を1層、計10層に分け砂を積み重ねる。その際、各層で所定の相対密度となるように砂重量を決定し、層厚が目標値となるように管理しながら締め固めた。

杭の諸元を表1に示す。杭試験体は $\phi 60.5 \times 8.0$ 、長さ1000mmの鋼管(STK400)を使用した。短柱圧縮試験の結果、鋼材の降伏応力は 288N/mm^2 であり、杭の断面形状から降伏モーメント $4.60\text{kN}\cdot\text{m}$ 、全塑性モーメント $6.80\text{kN}\cdot\text{m}$ を算出した。また、弾性域でかつ地盤に埋まっていない位置の歪を用いて、杭頭が全塑性モーメン

図1 杭・地盤模型と実験装置 (単位:mm)

トに達しているか否かを判断した。

表2に7種類の実験の諸元を示す。杭本数の異なる実験として、単杭を模して載荷直交方向に杭径の6倍の間隔(杭中心間隔370mm)で2本ならべた2P、群杭を模して杭径の3倍の間隔(杭中心間隔185mm)で 2×2 本配置した4P、 3×3 本配置した9Pの3種類を設定した。また、4Pを基準とし条件の異なる実験として、正弦波で動的載荷した4P-D、相対密度45%の地盤を設置した4P-L、載荷方向を 45° 回転させた4P-X、境界条件の影響を調べるため杭試験体位置を500mmずらし土槽壁面までの距離D(図1に示す)を2000mmに変えた4P-Bの4種類を設定した。各実験の相対密度は2Pが63%、4Pが61%、9Pが62%、4P-Dが62%、4P-Lが45%、4P-Xが62%、4P-Bが61%であった。なお、各実験の地盤の単位体積重量は4P-Lが 14.3kN/m^3 、その他の実験ではいずれも 14.8kN/m^3 であった。載荷プログラムについて、静的載荷をした実験では $\pm 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 18, 24, 30, 45, 60\text{mm}$ の順に漸増振幅で2サイクルずつ繰り返した後、120, 180mmの振幅で1サイクルずつ漸増載荷した。ただし、単杭の実験(2P)のみ24mmまでの

図2 フーチングと杭頭部分の接合方法

表1 杭の諸元

杭長	$l = 1000\text{mm}$
杭径(実測値)	$\phi = 60.23\text{mm}$
厚さ(実測値)	$t = 8.86\text{mm}$
降伏応力	$\sigma_y = 288\text{N/mm}^2$
降伏モーメント	$M_y = 4.60\text{kN}\cdot\text{m}$
全塑性モーメント	$M_p = 6.80\text{kN}\cdot\text{m}$

表2 実験の諸元

実験	2P	4P	9P	4P-D	4P-L	4P-X	4P-B
杭本数	2本	4本	9本	4本	4本	4本	4本
相対密度	63%	61%	62%	62%	45%	62%	61%
載荷速度	静的	静的	静的	動的	静的	静的	静的
載荷方向	0°	0°	0°	0°	0°	45°	0°
杭の位置(D)	1500mm	1500mm	1500mm	1500mm	1500mm	1500mm	2000mm
杭の配置 (Loading)							

繰返し載荷とした。静的実験の載荷速度は、最大0.5mm/secに設定した。動的載荷した実験(4P-D)では、静的試験と同様の載荷振幅で正弦波を用いて載荷を行った。動的実験の載荷速度を静的実験と差をつけるため、アクチュエータの性能上最速の速さで載荷した。各振幅における加振周期は、振幅30mmまでは0.5秒で、その後は振幅の増大に伴って周期を長くし、振幅180mmでは周期2秒で載荷した。

荷重、変位、歪、圧力の計測は、アクチュエータと載荷フレームの間に設置したロードセル、アクチュエータ内蔵の変位計、各杭に取り付けた歪ゲージ、圧力計を用いて行った。杭に取り付けた歪ゲージと土圧計の配置を図3に示す。杭のセンサー配置パターンは、歪ゲージを100mm間隔で貼付したA1、歪ゲージを200mm間隔で貼付したA2、土圧計を200mm間隔で設置したB1、センサーを設置していないNの4種類とし、杭配置の対称性を考慮して全体のセンサー配置を決定している。また、杭の変形量を調べるため、4P-Xと4P-Bについては杭の深さ200mm、400mm、600mm、800mmでそれぞれワイヤーを取り付け、土槽の妻面のピンホールを通して外に出し、その先の変位計で水平変位を直接測った(図1)。

3. 地盤変状

2P、4P、9P、4P-L、4P-Xの実験で観測された地盤変状を図4、5、6、7、8に示す。図中に記した実線は各振幅の載荷終了時における地盤表面の形状を表し、平面図の点線は地盤のすべりによって現れた線状の痕跡を表す。また、すり鉢状の地盤変形が現れた杭周囲の地盤(以下、杭周囲地盤と呼ぶ)は振幅12mmから30mmの間で、杭周囲地盤より外側の地盤(以下、外周地盤と呼ぶ)は振幅60mm以上で、地盤変状の特徴が顕著に現れたので、それぞれ代表的な様子を以下の写真に示す。すなわち、2P、4Pの振幅12mm、振幅24mm載荷時の地盤の様子を写真1、2、3に、4Pの載荷方向に並ぶ杭の間の地盤に現れた変状線を写真4に、4P-Xの振幅18mmの載荷時の地盤の様子を写真5に、大振幅での杭周囲の地盤変状として9Pの振幅180mm載荷時の地盤の様子を写真6に、振幅180mm載荷時の4P、4P-Bの外周地盤の様子を写真7、8に示す。

2Pの場合、載荷の初期では載荷方向の前面の地盤に目視で微かに分かる程度の低い盛り上がりが見られ、逆に後方では杭の移動に伴ってできる地盤と間の隙間へ砂が崩れながら落下して斜面を形成した。この斜面は載荷の繰返しに伴ってすり鉢状になり、振幅8mmで顕著に観察されるようになった。以下、この杭周囲地盤の変形状態をすり鉢と呼ぶ。Brownらの研究⁴⁾でもこのすり鉢状の地盤変状が観察されたと報告されている。また、外周地盤は広範囲にわたり徐々に盛り上がった。その後、写真1の(a)、(b)で示すように、振幅の増大に伴ってすり鉢の径と深さが成長し、振幅24mmで深さ100mmに達し、平面で見ると短径310mm、長径380mmの楕円の穴になった(図4、写真1)。

4Pの場合、載荷方向外側の杭周囲地盤は載荷正方向側・負方向側それぞれに対し、大きなすり鉢のくぼみ一つずつ形成した。このすり鉢はそれぞれ載荷直交方向に並ぶ2本の杭を中心とするすり鉢であった。載荷方向に並ぶ杭間の地盤はすり鉢状にならず、山形の形状で振幅の増加に伴って徐々にその頂きの高さが低くなるのが観察された(図5)。また、外周地盤は2Pと同様に広範囲にわたり徐々に盛り上がった。写真2の(a)、(b)で示すように、振幅の増大に伴ってすり鉢の径と深さが成長し、振幅18mmを超えると、載荷方向で挟まれる杭間の地盤は周囲との間にずれを生じ、杭径と同じ間隔の2本の平行な地盤変状線(以下、変状線と呼ぶ)が地表に現れた(写真4)。この変状線で囲まれる地盤は杭と一体となって移動した。その後、振幅30mmでは杭間の砂が崩れ始め、振幅60mmで4本の杭を中心に深さ150mm、短径600mm、長径880mmの大きなすり鉢に成長した。振幅60mmを超えると外周地盤はさらに広範囲にわたって隆起し、はっきりとした段差が現れた(写真7)。

次に、4Pと実験条件の異なる実験とで比較を行った結果について説明する。4Pと境界条件の異なる4P-Bでは、杭周囲地盤の地盤変状について、4Pとの間に明確な違いはみられなかった。また、写真7、8より振幅60mmを超えて現れた外周地盤の段差の範囲を比較してみると、杭から段差が出来る位置までの距離B(4P-Bについては土槽までの距離が広い側)に差はなかった。よって、杭周囲地盤の地盤変状、外周地盤の段差の発生位置は土槽側面の抵抗によって大きく影響されないと推察される。動的載荷をした4P-Dについても、杭周囲地盤の地盤変状・外周地盤の段差の範囲は4Pとの間

図3 センサー配置図

に明確な違いが見られず、これらは荷重速度の影響をほとんど受けないことが分かった。相対密度の小さい4P-Lについて、杭周囲地盤にすり鉢を形成する地盤変状は4Pと共通するが、外周地盤は4Pと異なり全体的に沈下する挙動が観察された(図7(a))。この外周地盤の沈下は、ゆるい地盤が荷重に伴ってより密な地盤になるために生じたと考えられる。45度方向荷重した4P-Xの地盤変状は、0度方向荷重の4Pのように荷重正方向側・負方向側それぞれに、大きなすり鉢を一つずつ形成するのではなく、群杭全体を囲む一つの大きなすり鉢を形成し、各杭の周囲にも局所的なくぼみを形成した(図8、写真5)。荷重方向の杭間の地盤に45度方向に変状線が現れ、変状線で囲まれる地盤は杭と一体となって移動した。振幅30mmを超えると個別にできたすり鉢の大きさは拡大し、各杭の近傍に形成した局所的なくぼみの大きさも拡大した。荷重条件を変えた実験全てについて、4Pと同様に振幅60mmを超えると外周地盤にはっきりとした段差が現れた。

9Pの場合も4Pとよく似ており、4Pで見られた地盤変状の特徴が同様に観察された。ただし、4Pと同様にすり鉢が外周杭の周囲にそれぞれ二つ形成されるが、9本のうち荷重方向の中間に位置する3本の杭の周囲の地盤は4Pの杭間の地盤と比べて、崩れるのが遅いという特徴が見られた(図6、写真3)。振幅60mmでは二つのすり鉢が重なり、9本の杭を中心とする深さ150mm、短径820mm、長径1020mmの大きな一つのすり鉢へと成長した。また、4Pと同様に外周地盤は広範囲にわたって隆起し、振幅60mmを超えとはっきりとした段差が現れた。

実験終了後の杭の状況は写真6に例示するように、杭先端が中央へ寄る向きに残留変形が生じている。これは図9に示すように正負交番繰返し荷重で常に前方杭に残留変形が生じた結果であり、その理由は前方杭と後方杭のせん断力分担の非対称性によると考えられる。

4. 杭頭荷重－杭頭変位関係

振幅 24mm までの 2P、4P、9P の杭頭荷重－杭頭変位関係を図 10 に示し、4P、9P、4P-D、4P-L、4P-X、4P-B の振幅 180mm までの杭頭荷重－杭頭変位関係を図 9 に示す。全ての実験で、杭頭荷重－杭頭変位関係の履歴特性に後述のような同様の傾向が見られたので、2P、4P、9P についての結果を示す。また、各実験において、正方向載荷の前方杭・もしくは中間杭の杭頭が全塑性状態に至った「変位(振幅・サイクル数)」を図 11 中に矢印で示す。

杭頭荷重－杭頭変位関係の履歴特性には、小振幅領域から非線形性が見られるが、振幅 30mm までは同一振幅で 2 サイクル繰り返してもループはほぼ重なる。また、前章で示したように、振幅 8mm から杭周囲の地盤にすり鉢が形成されて杭の埋込が浅くなるが、剛性の急激な変化はなく、振幅の増加に伴ってループは、杭頭荷重の最大値発現まで、原点を中心に相似形に拡大し、ループの中央が少しくぼんだ紡錘形を示す。

さらに振幅を大きくすると杭頭荷重は最大値に至る。杭頭荷重の最大値(最大値に至った時の振幅)は 4P が 40kN(60mm)、9P が 75kN(45mm)、4P-D が 45kN(60mm)、4P-L が 27kN(60mm)、4P-X が 38kN(90mm)、4P-B が 35kN(60mm)であった。ここで、いずれの実験においても、杭頭荷重が最大値に至った際に、前方杭や中間杭の杭頭モーメントは全塑性モーメントを超えていたが、後方

杭が全塑性モーメントに至ることはなかった。一例として、4P の杭頭荷重が最大値に至った時の杭の曲げモーメント分布とそのときの地盤変状を図 12 に示す。杭の曲げモーメント分布を見てもわかる様に、本実験の杭が Broms の算定式で定義される杭長さが「短い杭か中間長さ杭」に分類されることを示している。杭頭付近は塑性化していたので、鋼管の素材試験の結果を元に、弾性域でかつ地盤に埋まっていない位置の歪(図 12 の矢印部分)を用いて、塑性化した断面の曲げモーメントを算出した。そのとき、前方杭は全塑性モーメントに達していたが、後方杭は全塑性モーメントに至っていなかった(図 12)。

一方、富永らの模型実験²⁾、青砥らの実大実験³⁾では、杭頭荷重が最大値に至った後に、低下する傾向は見られなかった。しかし、本実験においては、杭頭荷重は最大値に至った後、徐々に低下しており、さらに変位 100mm 以上で一定値に収束している。ここで、杭頭荷重が最大値に至った後、低下し始める付近で、前章に記述した外周地盤に段差が現れている(写真 7、8)。

5. 割線剛性と等価減衰定数

杭・地盤系の非線形性を示す指標として、各振幅の杭頭最大変位時の割線剛性と等価減衰定数について考察する。割線剛性と等価減衰定数は正載荷と負載荷の平均値を用いる。図 13 に載荷荷重を各

(a) 振幅 12mm

(a) 振幅 12mm

(a) 振幅 12mm

(b) 振幅 24mm

写真 1 2P の地盤変状

(b) 振幅 24mm

写真 2 4P の地盤変状

(b) 振幅 24mm

写真 3 9P の地盤変状

写真 4 杭間に現れた変状線
(4P, 振幅 18mm)

写真 5 4P-X の地盤変状 (振幅 18mm)

写真 6 9P の地盤変状 (振幅 180mm)

写真 7 4P の外周地盤の地盤変状 (振幅 180mm)

写真 8 4P-B の外周地盤の地盤変状 (振幅 180mm)

実験の杭本数で除した1本あたりの平均杭頭せん断力-杭頭変位関係と割線剛性の算出方法を示し、図14に等価減衰定数の算出方法¹⁰⁾を示す。割線剛性、等価減衰定数の載荷振幅依存性を図15、16に示し、(a)杭本数、(b)動的と静的、(c)載荷方向、(d)相対密度についてそれぞれ比較する。

まず、割線剛性について、どの実験についても載荷振幅の増加に伴って減少する傾向がある。同一の載荷振幅で各実験を比較したところ、振幅60mmまでは、割線剛性は杭本数が少ないほど大きく(図15(a))、相対密度が小さい4P-Lの方が小さい(図15(b))。それらの差は振幅の増大に伴って徐々に減少し、振幅60mmになるとほぼ等しくなる。載荷速度の速い4P-Dと載荷方向の異なる4P-Xの割線剛性は、小振幅からほぼ4Pと同じであった(図15(b)、(c))。このように、杭1本あたりの平均でみると割線剛性は杭本数の違い、相対密度による影響を受け、載荷速度や載荷方向による影響をほとんど受けない。しかし、振幅が増大すると最終的には載荷初期の約8%まで減少し、杭本数や相対密度による割線剛性の差も小さくなる。

図9 実験終了後の杭の変形(9P)

図10 杭頭荷重-変位関係(振幅24mmまで)

図12 4Pの最大耐力時の曲げモーメント分布

図16より等価減衰定数の振幅依存性には杭本数、相対密度、載荷速度、載荷方向の影響は小さく、いずれも振幅30mmまでは振幅とともに微増するがほぼ一定で約10%であるが、振幅30mmを超えると約50%まで急増する。このような等価減衰定数の急増は、杭の塑性化の影響のみに起因するとは考えにくい程大きく、次章で説明する地盤の破壊の影響が大きいのと考えられる。なお、鈴木らの研究⁵⁾と比較したところ、割線剛性については、本実験と同様に、杭頭変位の増加に伴って小さくなる傾向を示したが、等価減衰定数については振幅に依らずほぼ一定の値を示しており、本実験でみられた振幅30mmを超えて急増する特徴は見られなかった。

図11 杭頭荷重-杭頭変位関係(振幅180mmまで)

図中の↓は正方向載荷の「前方杭」もしくは「中間杭」の杭頭が全塑性状態に至った「変位(振幅・cycle数)」を表す

図13 平均杭頭せん断力-杭頭変位関係(4P)

図14 等価減衰定数の算出方法

6. 杭・地盤系の限界状態

杭頭変位が60mmを超えると、写真7、8に示すような外周地盤の段差が全ての実験において現れた。図11に示した杭頭荷重－杭頭変位関係においても、杭頭荷重の最大値発現後に杭頭変位が60mmを超えて大きくなると、杭頭荷重が徐々に一定値に収束した。本論文では、杭頭荷重が一定値に収束した原因を明らかにするために杭頭の歪の挙動、杭頭最大変位時の杭の変位・土圧を調べた。以下では杭に変位計を直接取り付け付けた4P-Xの結果を用いて述べる。

振幅120mmでの履歴ループを図17に、正方向載荷時に前方に位置する杭の地表面より50mm下の断面の歪と杭頭変位との関係を図18に示す。ここで、図17、図18中のR1、R2は、杭頭変位60mm以上の荷重が一定となる領域を示す。杭頭荷重が一定となる領域R1、R2では、杭の歪は殆ど増加することなくほぼ一定値を保っている。この傾向は全ての実験で共通しており、杭頭荷重が一定値に収束するとき、杭頭変位が増加しても杭自身の変形は進行していないこと

図15 割線剛性

図16 等価減衰定数

図17 杭頭荷重－杭頭変位関係 (4P-X, 振幅120mm)

図18 杭歪－杭頭変位関係 (4P-X, GL-50mm)

図19 各振幅の最大変位時での杭の変位 (4P-X)

(a) 前方杭 (振幅45mm, 60mm)

(b) 前方杭 (振幅120mm, 180mm)

(c) 中間杭 (振幅45mm, 60mm)

(d) 中間杭 (振幅120mm, 180mm)

図20 各振幅の最大変位時での土圧 (4P-X)

が分かる。

また、代表的な載荷振幅における杭頭変位最大時の杭の変形を図19に、杭の土圧分布を図20に示す。まず、図19より杭頭変位が60mmまでは杭のたわみは増大し続けるが、杭頭変位が60mmを超えるとたわみは増加せず、杭全体が剛体的に変位している。すなわち、杭自身の変形は進行していないことが分かる。一方、図20より、杭頭変位が60mmを超えると、550mmより浅い部分の杭に作用する土圧が小さくなり、750mmより深い部分の土圧が大きくなる傾向が見られた。

以上より、杭頭荷重が最大値に至った後、徐々に低下して一定値に収束している時、杭は地盤中を剛体変位し、550mmより浅い地盤の水平抵抗力が限界に達して破壊し、外周地盤に明瞭な段差を形成したと考えられる。この時、杭と地盤の間では主に750mmより深い位置で応力が伝達されていると考えられる。

7. まとめ

杭径を超える大振幅で、かつ載荷方向や載荷速度などの載荷条件を変えて、乾燥砂地盤における単杭と群杭を模した実験の繰返水平載荷実験を行った結果、以下の知見が得られた。ただし、本実験での杭はBromsの算定式で定義される杭長さが「短い杭か中間長さ杭」に分類される。

- ① 杭頭載荷によって、杭周囲地盤には明瞭なすり鉢状の変形やすべり線が生じた。生じたすり鉢の形状は、杭配置・地盤の相対密度・載荷方向によって異なる。しかし、いずれの実験においても、杭頭変位が大きくなる(60mm以上)と群杭全体を囲む1つの大きなすり鉢へと成長する一方、群杭から離れた外周地盤表面に明瞭な段差が現れた。
- ② 載荷振幅の増大に伴って、杭頭荷重は最大値に至った後、徐々に低下して一定値に収束した。杭頭荷重-変位関係は、比較的安定した紡錘型の履歴特性を示し、地表に見られた地盤変状の違いや実験条件による影響は小さかった。
- ③ 平均杭頭せん断力-杭頭変位関係の割線剛性は、杭配置や地盤の相対密度によって差があるが、振幅の増大に伴う割線剛性の減少とともに、実験間の差も減少していく。一方、等価減衰定数は実験条件に大きく影響を受けず、振幅30mmまではほぼ一定であるが、30mmを超えると急増した。
- ④ 杭頭荷重の最大値以降の低下や外周地盤表面に見られた明瞭な段差は、地盤の水平抵抗力が限界に達して地盤が破壊したためであった。

謝辞

本研究は、科研費基盤研究(B)「耐震性能評価向上のための建築物への地震動入力低減機構解明に関する実証的研究(研究代表者:林康裕)」の一部として実施されました。

参考文献

- 1) 白方邦博, 中島寿, 竹澤請一郎, 上本秀之, 水野正之: 群杭の水平抵抗と地盤の崩壊形状に関する模型実験(その1), 土質工学研究発表会, E-4, pp.1601-1602, 1992.6
- 2) 富永晃司, 山本晴行, 染川常二: 鉛直力を受ける群杭の水平挙動に関する模型実験, 日本建築学会構造系論文集, No.394, pp.130-140, 1988.12
- 3) 青砥一浩, 富樫勝男, 尾形隆永, 佐藤立: 鋼管群杭の大変形水平載荷試験とその数値シミュレーション, 第46回地盤工学シンポジウム, pp.229-pp234, 2001.11
- 4) Brown, D. A., Morrison, C., Reese, L. C.: Lateral Load Behavior of Pile Group in Sand, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.114, No.11, pp.1261-1276, 1988. 11
- 5) 鈴木康嗣, 安達直人: 模型水平載荷試験による群杭の地盤反力-変位関係, 日本建築学会構造系論文集, No.570, pp.115-122, 2003.8
- 6) 小林恒一, 八尾眞太郎: 動的な水平載荷を受ける群杭基礎の挙動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.425, pp.121-130, 1991.7
- 7) 中島勝弘, 大谷順, 帆足奈央: 動的な水平荷重下における群杭効率の定量的評価に関する模型実験, 土質工学研究発表会, D-6, pp.1769-1770, 2000.6
- 8) 富永晃司, 山肩邦男: 地盤の塑性状態を考慮した群杭の水平抵抗理論—その1: 塑性地盤反力について—, 日本建築学会論文報告集, No.317, pp.32-39, 1982.7
- 9) 富永晃司, 山肩邦男: 地盤の塑性状態を考慮した群杭の水平抵抗理論—その2: 理論及び実験結果との比較検討—, 日本建築学会論文報告集, No.321, pp.89-96, 1982.11
- 10) 日本建築学会: 入門・建物と地盤との動的相互作用, pp.238-239, 1996

(2006年7月3日原稿受理, 2006年12月22日採用決定)