

液状化地盤中の翼付杭の振動変位抑制効果 に関する小型振動台実験

森 伸一郎¹ ・ 三輪 滋²

¹正会員 工博 愛媛大学工学部 環境建設工学科 助教授 (〒 790-8577 愛媛県松山市文京町 3 番)

²正会員 飛島建設株式会社 技術研究所 地盤耐震研究室長 (〒 270-0222 千葉県関宿町木間が瀬 5472)

大規模地震の際に、液状化した地盤の中でも、地盤との相対変位に対して安定した水平抵抗を発揮する機能を有することを期待した翼付杭を、新しい概念の液状化対策杭として考案した。振動台実験により普通杭と翼付杭のモデルの杭頭振動変位振幅を比較し、その効果を検討した。乾燥砂または飽和砂から成る地盤に対して実験を行い、入力加速度、地盤の密度、杭頭付加質量をパラメータとして検討した。スペクトル分析と杭の慣性力～変位関係に基づき、杭頭変位低減メカニズムを明らかにした。どの場合でも約 80% に低減する効果があること、杭の剛性の増加と杭の投影面積の増加に比例する地盤ばね増大効果以上の水平抵抗増大効果があること、これらの効果は杭頭慣性力に対することがわかった。

Key Words : earthquake, wing-pile, remediation, liquefaction, shaking table test, cyclic mobility, pore water pressure, vibrational displacement

1. はじめに

本論文は、低頻度の大規模地震の際に、液状化した地盤の中でも、地盤との相対変位に対して安定した水平抵抗を発揮することを機能として有する翼付杭を、新しい概念の液状化対策杭として考案し、振動台実験によりその効果を検討したものである。

これまで、地盤の液状化対策工法として、密度の増大、地盤の固結、間隙水圧の消散促進、せん断変形の抑制など¹⁾が実施されている。杭基礎においては、これらの液状化対策工法を採用するほかに、杭本数の増加や杭断面の増大によって、杭群の剛性・強度を増大させるという構造的な対策¹⁾が行われている。

しかしながら、杭体そのものに液状化に対する対策機構を付加したものは少ない。宮坂ら²⁾は、液状化により地盤が側方流動する場合にでも、杭体が地盤の変形に追従して変形しながらも、鉛直支持機能を失わないようにするという杭を開発している。喜田ら³⁾は、鋼杭に排水機能の付いた部材を付加することにより、液状化対策を図ることを試みている。実験結果³⁾によれば、この対策杭には、液状化に到るまでは約 0.7～0.9 の杭頭変位低減効果があるが、

液状化発生後は約 1.1～1.2 に増大する。三上ら⁴⁾は、複数の杭頭間に設置した減衰装置と杭頭下部とを斜材で繋ぐことによって杭頭変位を抑制しようとする「制震杭」を開発している。数値解析結果によれば、この対策杭には、約 0.75～1.0 の低減効果があるが、液状化層が厚くなると効果が得られない⁴⁾。

一方、本研究で対象にする杭体外周に翼体を付けるというアイデア⁵⁾は、形状的には、鉛直支持力の増大を図る考案⁶⁾にはじまり、水平抵抗の増大を図る考案^{7)・8)}も古くから認められており、最近でも同様な考案^{9)・10)・11)}が出されている。これまでの水平抵抗の増大を図る考案は、いずれも杭頭付近に杭軸方向に連続的な翼体を付加することにより、見かけの杭幅を拡げ、地盤ばねの増大を図ろうというものである。しかし、これらの考案には地盤の液状化のことは一切考えられていない。さらに、これらの考案はアイデアのみであり、技術的に検討した関連文献は見いだせられない。

しかし、杭と同様に深い基礎であるケーソンにおいては、その軸方向に連続的な翼体を付加することにより、深い基礎本体の直径を増大させることなく、基礎の水平抵抗を増大させようとする試みが、先の考案⁷⁾より以前に既に検討・実施されている。すな

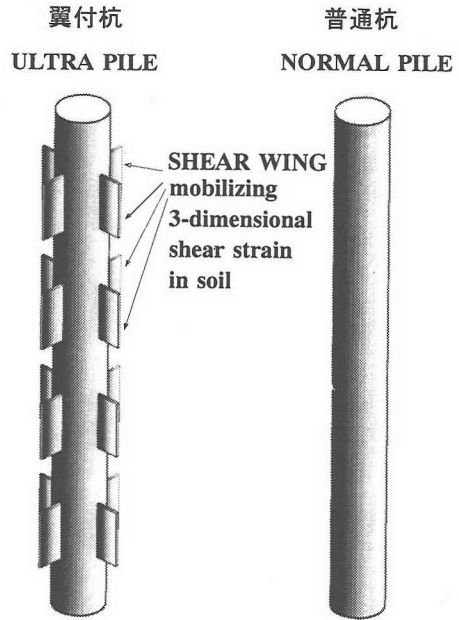
わち、室内模型実験により検討され有用性を確認した^{1,2)}後、実際の構造物として構築され、その構造物で現場実験が実施され³⁾、その効果が詳しく検討されている⁴⁾。しかしながら、この場合についても、見かけの杭幅を拡げ、地盤ばねの増大を図ろうというものであり、しかも、地盤の液状化のことは一切考えられていない。

本研究で対象にする杭体外周に翼体を付けるというアイデア⁵⁾では、見かけの杭幅を拡げることによる地盤ばねの増大は副次的なものである。このアイデアで期待する主体的な効果は、中密～密な地盤における土のダイレイタンスーに起因する地震時のサイクリックモビリティ現象を積極的に利用するものである。すなわち、液状化の可能性のある土層に対応させて、杭軸方向に平行な方向に断続的に翼状突起物を杭体に付加することにより、杭体周辺の地盤の3次元的なせん断ひずみを励起させ、液状化により低下しようとした見かけの地盤ばねを小さい杭変位において回復させようとするものであり、大規模地震の際に杭の水平抵抗を安定的に発揮させようとするところに特徴がある。ここで、このように杭軸方向に平行な方向に断続的あるいは連続的に翼状突起物を有する杭を翼付杭と呼ぶこととする。図-1に液状化対策杭としての翼付杭の概念図を示す。

本論文は、小型の杭模型を用いて振動変位の抑制効果に関する振動台実験を実施し、地盤振動の影響が無視できるものと仮定したとき、杭頭質量慣性力に起因する杭頭部の振動変位振幅を抑制する物理的なメカニズムについて着目し、翼付杭の振動変位抑制効果を定量的に評価したものである。前述のように、翼状突起物を有する深い基礎に関してこれまでも多くの考案が出されており、今後も同様な発想の出現を予想すれば、翼付杭の技術的検討は有用であると考えられる。

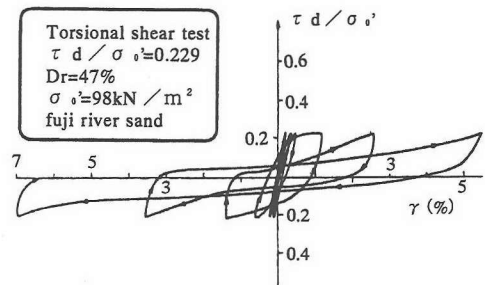
2. 液状化対策としての翼付杭の基本的な考え方と本論文の目的

飽和した緩い砂地盤が地震時に繰返しせん断されると、非排水状態では過剰間隙水圧が蓄積され液状化する。しかし、密な砂地盤ではある程度以上にせん断ひずみが大きくなると、正のダイレイタンスー特性により負の間隙水圧が生じせん断剛性は急激に回復する。図-2に(a)緩い砂と(b)中密な砂の室内試験におけるせん断応力～せん断ひずみ関係の例¹⁵⁾を示す。この様な現象はサイクリックモビリティ現象と呼ばれ、中密砂の場合や細粒分の比較的多い砂でも、大きなせん断ひずみが生じると起こる。

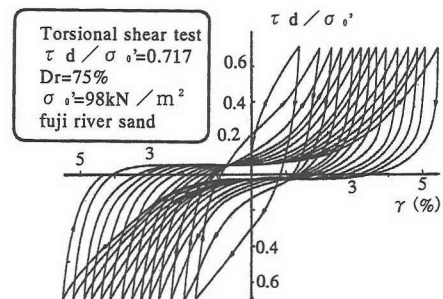


Concept of Under-Liquefaction Tranquilizing Pile

図-1 普通杭と対比した液状化対策杭としての翼付杭の概念図



(a) 緩い砂の場合



(b) 中密な砂の場合

図-2 緩い砂と中密な砂におけるせん断応力～せん断ひずみ関係の1例 (Ishihara¹⁵⁾)

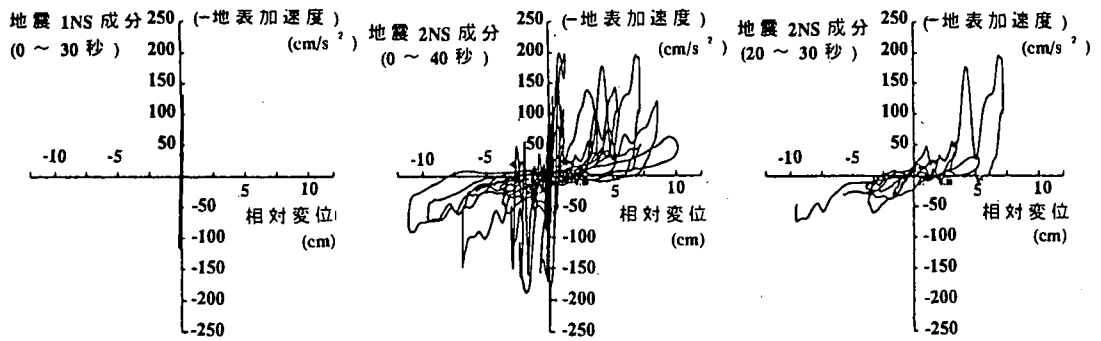


図-3 シルト質細砂の液状化した地盤の地震記録より得られた応力ひずみ関係 (森ら¹⁶⁾)

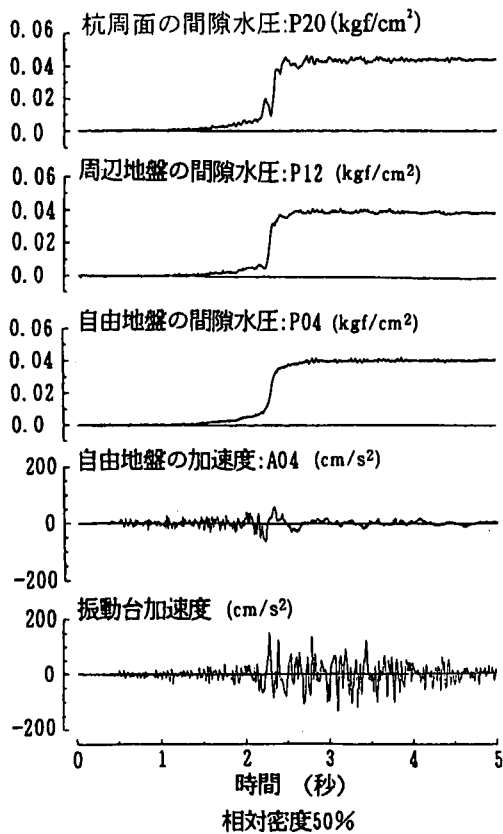


図-4 緩い地盤における間隙水圧と加速度の時刻歴¹⁷⁾

また、図-3に実際の液状化したシルト質細砂の地盤で記録された地震記録より得られた応力ひずみ関係¹⁶⁾を示す。図-2(b)と同様にサイクリックモビリティ現象が現れているのがわかる。

次に、杭周辺での間隙水圧挙動に関して、著者の一人が実施した地盤-杭-構造物の大型振動台実験における結果¹⁷⁾に基づいて見てみる。この実験は、完全飽和させた緩い地盤(相対密度 $D_r=50\%$)と密な地盤($D_r=80\%$)の中に超高層建物とそれを支持

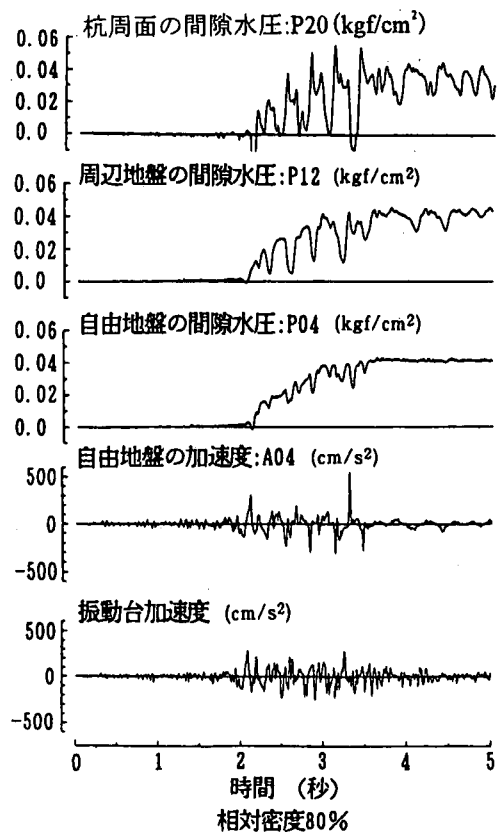


図-5 密な地盤における間隙水圧と加速度の時刻歴¹⁷⁾

する剛性の高い杭のモデルをせん断土槽内に作成した供試体に対する相似則に基づいた振動台実験である。この実験では、入力地震波として用いた1983年日本海中部地震・秋田港波を入力したときに、最大過剰間隙水圧が初期有効上載圧にようやく達するような加振レベルを目指し、入力最大加速度は、緩い地盤では約 150cm/s^2 、密な地盤では約 300cm/s^2 としている。

図-4に緩い地盤における、図-5に密な地盤におけ

る、(a)杭周面・(b)周辺地盤・(c)自由地盤での間隙水圧の時刻歴を(d)地盤と(e)振動台の加速度時刻歴とともに示す¹⁷⁾。緩い地盤においては、2.2s以降で自由地盤の加速度応答に長周期化・低振幅化が顕著に見られ、過剰間隙水圧も急激に上昇し、液状化に到っている。周辺地盤の応答加速度や周辺地盤と杭周面の応答は、概ね自由地盤のそれらと同様であるが、微妙に異なっている。一方、密な地盤では、自由地盤の加速度応答に特に顕著な鋭いパルス波が見られ、そのパルス波に対応して自由地盤の過剰間隙水圧には谷が見られる。周辺地盤では、加速度応答のパルス波は顕著ではないが、過剰間隙水圧の応答には一層大きな谷が見られる。杭周面の過剰間隙水圧の応答における対応する振幅成分は極めて大きく、これら一連の応答は、地盤と杭との相対変位に起因する杭周辺地盤の水平面内のせん断ひずみにその原因があると考えられる。すなわち、自由地盤の過剰間隙水圧の挙動は、水平加振による鉛直面内のせん断に起因するものであるが、杭周辺の地盤の過剰間隙水圧挙動は、それに加えて地盤と杭との相互作用の結果生じる相対変位と水平面内のせん断ひずみに起因するものであると言える。

以上のような事実を基に、杭周辺の地盤に局所的に3次元的なせん断ひずみを励起することで、土本来のダイレイタンス特性を積極的に利用して、液状化地盤中の杭の水平抵抗の回復を図ることを目的にした、杭体外周に翼状突起物を設けた液状化対策杭を考案した。本論文では、これを「翼付杭」と称し、翼状突起物の付いていない杭を「普通杭」とよぶ。この考案で前提とする仮説は以下の通りである。

- 仮説1：杭体外周に翼状突起物を設けることにより、杭周辺の地盤では3次元的なせん断ひずみが普通杭より励起される。
- 仮説2：その結果、普通杭に比べ翼付杭では過剰間隙水圧が発生しやすくなる。
- 仮説3：地震外力が大きくなり杭の（相対）変位が大きくなると、翼付杭は普通杭に比べて早い段階で、局所的なせん断ひずみが大きくなりサイクリックモビリティ現象を呈し、見かけ上地盤ばねの早期回復につながる。

これらの仮説を説明するために、図-6に翼付杭に期待する変位抑制効果の物理的なメカニズムの概念を示す。この図は、普通杭では大きな相対振動変位が生じたときに生じるであろうサイクリックモビリティによる水平抵抗の回復を、翼付杭では相対的

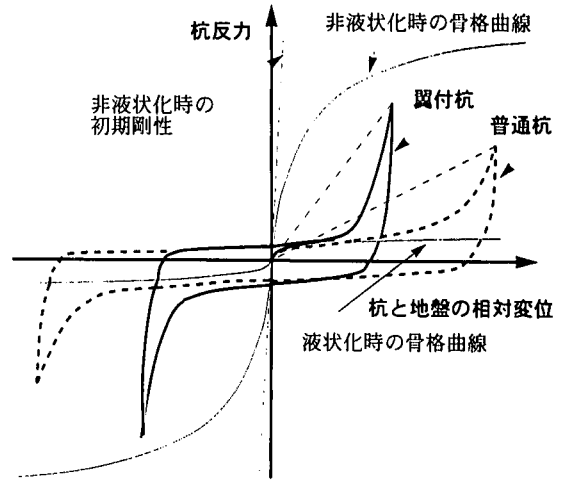


図-6 翼付杭に期待する変位抑制効果の物理的なメカニズムの概念図

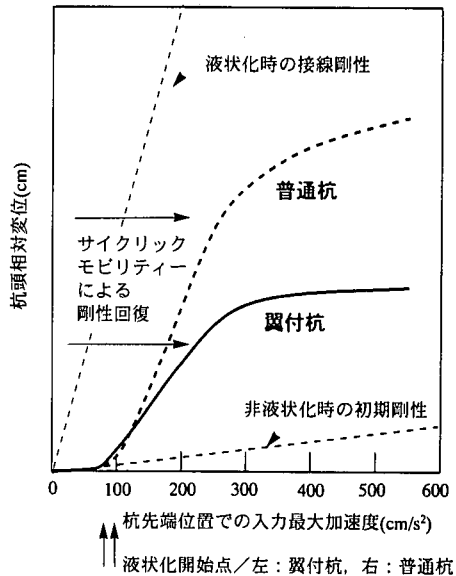


図-7 地震動の入力レベルの違いによる杭の変位挙動特性の模式図

に小さな相対振動変位のときに同様の水平抵抗の回復を図ることを模式的に示している。図-7に、そのようなメカニズムで変位抑制の効果が現れると仮定したときに期待される、地震動の入力レベルの違いによる杭の変位挙動特性の違いを模式的に示す。例えば、入力レベルが 150cm/s^2 程度までの地震動ではそれほど大きな差はないが、 300cm/s^2 程度以上の低頻度の大規模地震で差異が大きくなる。

以上の、仮説に基づく期待効果に対して、小型の模型杭を用いた振動台実験^{18) - 21)}に基づき実現可能性を検討するのが、本論文の目的である。

3. 実験方法

(1) 実験方法の概要

以下に述べる実験に先立ち、同様な振動台実験を実施した。そのとき、杭先端の固定条件を自由とし、地盤が液状化した場合にはピンとなるように、先端部 5cm を豆砂利の層とした⁵⁾。しかしながら、地盤が液状化すると有効上載圧も低下するため、この豆砂利層は有効な水平方向支持土層とはなり得ず、実験結果は信頼できるものとはならなかった⁵⁾。この実験を踏まえ、以下の実験では、再現性の高い実験を実施することを最大の目標とした。

3次元振動台に、翼付杭と普通杭の1対の模型杭を模型地盤内に設置した1方向にのみせん断変形が自由なせん断土槽を搭載し、水平1方向に加振する実験を行った。加振は段階加振とし、1つの供試体を弱・強の加振を繰返し、6回加振した。1つの供試体で1対の模型杭を設置したので、地盤及び加振入力波の再現性の違いによる影響を考えなくてもよい。図-8に実験に用いた模型と計測器の配置を示す。

実験に用いた振動台は、平面寸法が4m×4m、搭載重量が定格10tf、最大20tfの3次元6自由度の油圧サーボ式振動台で、加振能力としては、最大変位で水平±20cm、鉛直±10cmであり、最大加速度で、正弦波単軸入力時に水平2G（定格時1G）、鉛直1.6G（定格時0.8G）である。

(2) 実験模型

模型地盤は、図-8に示した幅50cm×奥行き50cm×深さ40cmの寸法を有し、5%までせん断変形が可能なせん断土槽内に作成した。地盤材料には豊浦標準砂を用いた。模型地盤は、土槽内に普通杭、翼付杭および計器を設置した後、最下部に円盤を約5cm敷き、さらに乾燥させた豊浦標準砂を砂散布器から空中落下法により作成した。地盤密度は、落下高さおよび砂散布器の移動速度で調整し、初期密度を相対密度 D_r が約40%になるようにした。乾燥状態の地盤作成後、二酸化炭素を土槽底より通気し、地盤内の空気の置換完了を確認した後、続いて土槽底より脱気水を通水し、地盤を飽和させた。飽和後約10時間養生して実験を行った。加振前の地盤の層厚は約34cmである。

杭模型は直径30mm、厚さ2mm、長さ450mmの亚克力製パイプを用いて作製した。図-9に模型杭を示す。翼付杭には、杭周囲に厚さ2mmの亚克力製の翼（幅が杭径の1/2、長さが杭径と同じ30mm）を90°間隔に配し、深さ方向には翼幅相当長さの間隔を置いて4段設置した。翼体は、杭体

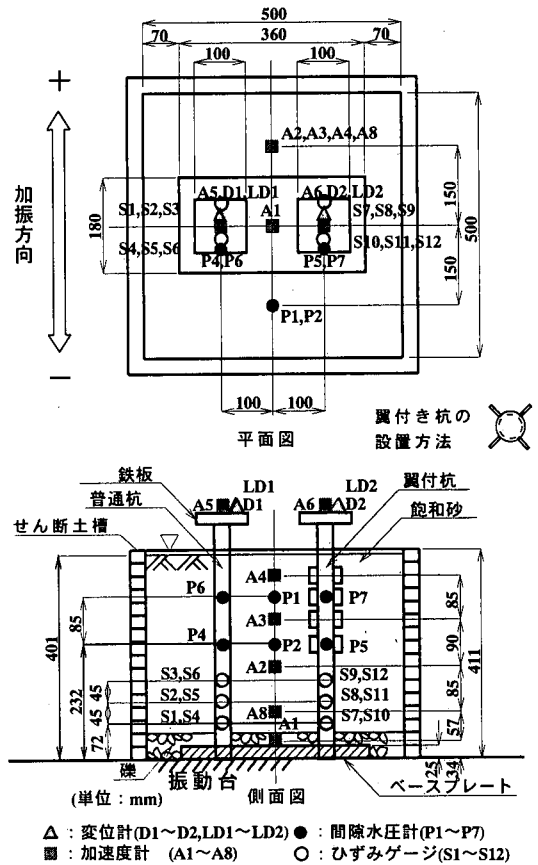


図-8 実験に用いた模型と計測器配置

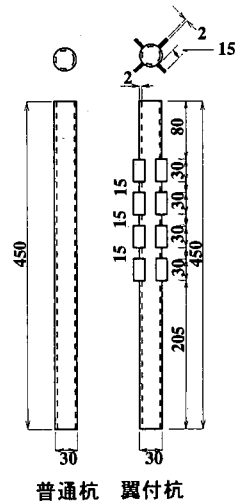


図-9 アクリル製パイプを用いた模型杭

に翼断面相当の穴を開け、そこに挿入してアクリル用接着剤で固着した。模型杭の杭頭には集中質量として鉄板を載せ固定した。翼付き杭は翼が加振方向に対し斜め 45° 方向になるように設置した。なお、曲げ剛性は、普通杭は $5.546 \times 10^4 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^2$ であり、翼付き杭の翼の設置部分は $15.539 \times 10^4 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^2$ である。

1 対の模型杭の間隔は 200mm であり、杭径の 6.7 倍に相当する。翼付杭の存在による地盤内応力への影響範囲は、杭外周より杭径の 2.5 倍程度の範囲であり、それ以上離れたところでは影響は僅かであることが、別途実施した 3D-FEM 解析により確かめられている。幅 1.5m \times 奥行き 1.5m \times 深さ 1.0m の領域の地盤の中央に杭（地中部長さ 1m）を想定して、杭頭部に静的に水平力を載荷するという解析である。杭はシェル要素で地盤はソリッド要素でモデル化されている。杭は断面を 32 分割、地盤は水平面内を 288 分割、両者とも深さ方向に 40 分割し、杭周辺もしくは浅いほど要素サイズは小さくなるように考慮されている。対象条件により 1/2 断面を解析した。非線形解析では、地盤の非線形性に加え杭と地盤との剥離滑りが考慮されている。図-10に結果の例として、ある翼位置の深さにおける地盤の水平面内に生じるせん断応力 (τ_{xy}) のコンター図の一例を示す（杭周辺部のみ示す。載荷方向は図右方向）。(a)は線形解析、(b)は非線形解析であり、無視できないと考えられる応力コンターを最も外側に示している。このような解析に基づき、線形では杭径の 5 倍程度、非線形では杭径の 2 倍程度杭周面から離れると杭の影響はさほど大きくないと判断した。したがって、杭径の 5 倍以上離れた 2 本の杭は相互に影響しないと考えられる。

また、模型杭は土槽端から 150mm のところに設置しているが、この土槽では、土槽端から 100mm 以上離れば土槽境界の影響はないことがわかっている。一例として、図-11に本実験と同じ土槽を用いた別の飽和地盤加振実験における地盤の応答水平加速度の平面分布を示す。

(3) 計測項目と計測方法

主として計測した項目は、振動台の加速度、杭頭部の鉄板の加速度および変位、杭周面における間隙水圧、地盤内の加速度及び間隙水圧である。地盤および杭周面の間隙水圧は 2 深度で計測し、深さを合わせた。変位計は、力に対する抵抗のない差動トランス式変位計 (LVDT) である。また、杭下部表面にひずみゲージを 3 断面に 2 枚を 1 対として貼付し、曲げひずみを計測した。また、杭周囲の間隙水

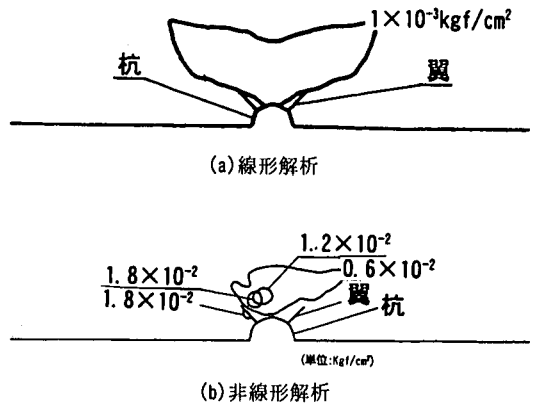


図-10 ある翼位置の深さにおける地盤の水平面内に生じるせん断応力 (τ_{xy}) のコンター

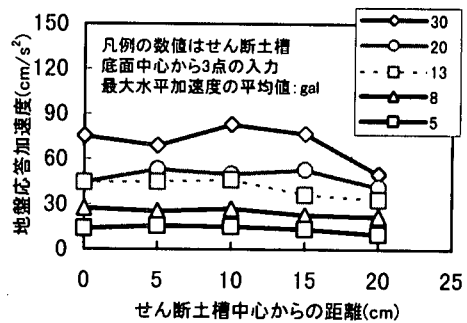


図-11 同じ土槽を用いた別の飽和地盤加振実験における地盤の応答水平加速度の平面分布

圧変化を計測するために間隙水圧計を杭 1 本につき 2 個取り付けた。さらに地盤内には間隙水圧計および加速度計を埋設し挙動を計測した。

さらに、供試体の準備、加振の前後の各段階で、土槽下部水平打撃による S 波検層と沈下測定を実施し、S 波速度と密度の変化を計測した。沈下量測定は、全ての加振前後に、土槽上部に張ったピアノ線を基準にして地表面の高さを定規で測定した。定規の目盛りを 1mm 単位で読みとり、 $11 \times 11 = 121$ 地点で測定した。

(4) 入力加振波

実験に用いた入力加振波は 1Hz から 30Hz まで、加速度振幅特性がフラットなランダム波で、応答スペクトル強度の比が約 1:3 のものを 2 種類用いた。地震波の継続時間は 40s とし、時刻歴中心部は平坦で最初と最後の 3s 間は徐々に増減するような包絡形とした。加振波の最大加速度は 100 cm/s^2 と 300 cm/s^2 を目安とした。図-12に入力加振波の時刻

歴の1例を示す。このような入力波を用いたのは、急激な過剰間隙水圧を避けること、模型の応答特性の変化を伝達関数により追跡できること、を可能とするためである。

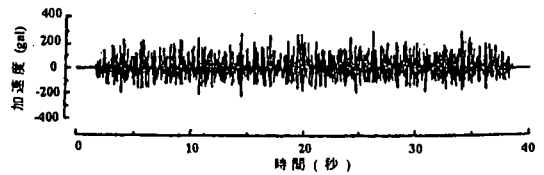


図-12 入力加振波加速度時刻歴の1例

(5) 相似則

本研究の目的は、翼付杭が普通杭に比べて液状化時の変形性能に期待する効果が現れるか否かを確認するための、どちらかと言えば定性的な評価を主眼とした実験である。したがって、実験においては、特定の実物を想定し厳密な相似則を適用したわけではない。しかし、模型実験では相似則については不可避であり、実物と乖離しないように次のように考えて実験を実施した。相似則としては、井合の相似則²⁶⁾に地盤の初期剛性が平均有効主応力の平方根に比例すると仮定して得られるものを念頭に置いた。表-1に念頭に置いた相似則を示す。

加振波は、実験では1～30Hzのホワイトノイズであり、実物では0.1～3Hzの振動を考えていることになる。沖積地盤の変形に寄与する成分を含んだ地震動と考えられる。地盤の層厚は、せん断土槽高さが40cmであり、実物では概ね8m程度の地盤を考えることになる。地盤の1次卓越振動数は、実験の結果では17～30Hzであり、実物では1.7Hzから3Hz程度の地盤を想定することになる。模型杭の曲げ剛性は $5.546 \times 10^4 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^2$ であり、実物では $5.5 \times 10^{10} \text{ kgf}\cdot\text{cm}^2$ 程度の杭、たとえば、径400mm厚さ12mmの鋼管杭（腐食代0.5mm:EI=5.52 $\times 10^{10} \text{ kgf}\cdot\text{cm}^2$ ）に相当する。

(6) 実験ケースと実験精度

表-2に実験ケースとその条件を示す。相対密度、最大入力加速度、乾燥・飽和および杭頭質量の影響を調べることを目的に、実験のパラメータを設定して、段階加振実験を行った。表中の実験ケース名は、飽和地盤（S）と乾燥地盤（D）、杭頭重量の小さい場合（L）と大きい場合（H）が区別できるようにし、ハイフンの後の数字は加振順序を示している。また、乾燥地盤では、加振の繰返しによる密度変化が緩やかであるのに対し、飽和地盤における加振による相対密度の変化は、表-2からわかるように、最初の強い加振（SL-2、SH-2）で、ほぼ全層が液状化して相対密度が大きくなるが、その後の密度変化は小さくなる。

本論文で対象とする実験に先立つ予備実験では、杭の先端を土槽底盤に固定したスリット入りキャップに設置し、針金により緊結していたが、固定度の不完全性が実験結果を左右している疑いがあった。

表-1 念頭に置いた相似則

項目	相似則	模型の相似比
長さ	λ_L	1/21.5
質量・密度	1	1
ひずみ	$\lambda_L^{1/2}$	1/4.64
加速度	1	1
時間	$\lambda_L^{3/4}$	1/10
振動数	$\lambda_L^{-3/4}$	10
変位	$\lambda_L^{3/2}$	1/100
速度	$\lambda_L^{3/4}$	1/10
応力	λ_L	1/21.5
間隙水圧	λ_L	1/21.5
地盤の剛性	$\lambda_L^{1/2}$	1/4.64
透水係数	$\lambda_L^{3/4}$	1/10
杭の曲げ剛性	$\lambda_L^{9/2}$	1/990776

表-2 実験ケースとその条件

実験ケース	入力加速度 (cm/s ²)	加振前相対密度 (%)	備考
SL-1	156	44.1	地盤条件 : 飽和砂 杭頭重量 : 2.17kg
SL-2	335	47.3	
SL-3	164	66.5	
SL-4	469	71.3	
SL-5	160	74.2	
SL-6	314	74.6	
SH-1	140	41.2	地盤条件 : 飽和砂 杭頭重量 : 5.39kg
SH-2	478	45.6	
SH-3	115	65.1	
SH-4	400	68.9	
SH-5	115	73.8	
SH-6	301	73.3	
DL-1	208	37.7	地盤条件 : 乾燥砂 杭頭重量 : 2.17kg
DL-2	491	43.1	
DL-3	164	47.2	
DL-4	327	47.6	
DL-5	122	51.0	
DL-6	463	50.8	

そこで、2本の普通杭による固定度の影響が顕著な気中加振を実施し、それまでの方法と改良した固定方法について固定度の影響を調べた。図-13に2本の普通杭を気中加振した際に現れた固定度の影響を示す。改良前の方法（図-13(a)）では、時間の経過とともに位相がずれ、振幅が異なることが確認されたが、改良した方法（図-13(b)）では、位相・振幅とも2本の杭の応答はほぼ合致しており、杭先端の固定方法は固定度の極めて高い方法であることがわかった。改良した杭先端の固定方法とは、土槽底版

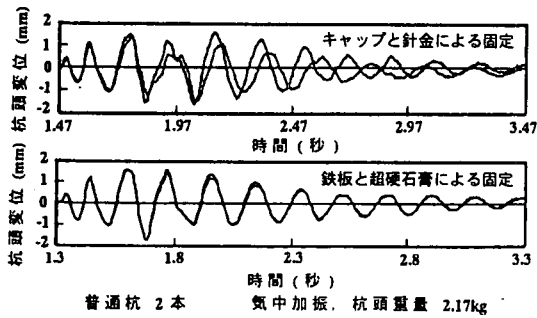


図-13 2本の普通杭を気中加振した際に杭頭変位波形に現れた固定度の影響 (加振波は1995年兵庫県南部地震JMA神戸NS波)

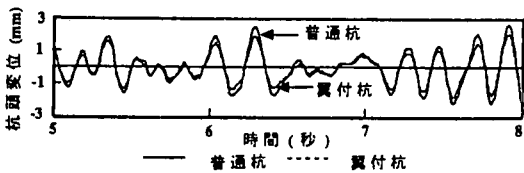


図-14 杭頭変位時刻歴波形の1例 (SH-4)

にボルトで緊結できるようにした厚さ25mmの鉄製ベースプレートに、杭外径の1.2倍の径の円形開口を設け、そこに杭先端を挿入した後、超硬石膏を隙間に流入し、充填・固定させる方法である。

以降、すべてこの改良方法による実験結果である。

4. 振動変位抑制効果の影響要因の検討

(1) 影響要因の検討手順

ここでは、振動台実験の実験結果をもとに、翼付杭の振動変位抑制効果および、相対密度、入力最大加速度、乾燥砂と飽和砂との違いという要因が振動変位抑制効果に及ぼす影響の検討について報告する。

本章では、杭頭変位は杭頭の変位計による計測時刻歴に基づいて検討しているが、杭頭の加速度計の計測時刻歴を積分して得られる計算変位時刻歴とほぼ一致することを確認している。

(2) 翼付杭の振動変位抑制効果の傾向

図-14に杭頭変位時刻歴波形の1例 (SH-4) を示す。普通杭に比べ翼付杭の杭頭変位が小さくなっていることから、翼付杭に変位抑制効果があることが確認できる。

図-15に加振の繰返しに伴う過剰間隙水圧の時刻歴に現れる模型地盤の液状化特性を示す。加振の繰返しによる密度変化に伴い、過剰間隙水圧が上昇しにくくなっている様子と、加振中は過剰間隙水圧が一定でないことがわかる。そこで、杭頭変位の検討

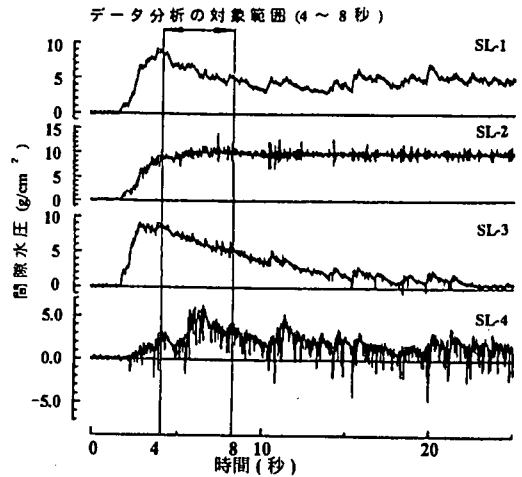


図-15 過剰間隙水圧の時刻歴に現れる模型地盤の液状化特性 (P-5: 初期設置深さ16.9cm)

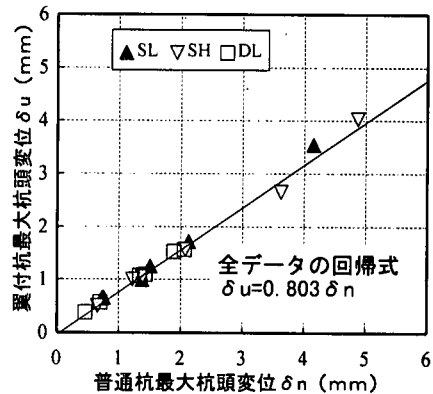


図-16 全加振ケースより得られた普通杭と翼付杭の最大杭頭変位の関係

は、各実験ケースの最大杭頭変位と、図-15に示すように、間隙水圧が上昇した前後の、比較的安定して間隙水圧が大きい時間帯 (4~8s) における杭頭変位の全両振幅値を対象とした。

図-16に、全加振ケースより得られた普通杭と翼付杭の最大杭頭変位の関係を示す。この図によれば、明らかに翼付杭は普通杭に比べ杭頭変位が小さく概ね線形の関係にある。原点を通る回帰直線の係数 (以下、回帰係数と呼ぶ) は、0.803である。翼付杭の普通杭に対する最大杭頭変位の比を最大値低減率と呼ぶ。すなわち、翼付杭の杭頭振動変位の最大値低減率は、約0.8である。

最大値低減率の杭頭変位依存性を見るために、図-17に、翼付杭の最大値低減率と普通杭の最大杭頭変位の関係を示す。3mm以上ではデータが少ない上にばらつきが大きい、3mm以下では最大値低減率は杭頭変位に依存して、変位が大きいほど最大値低減率は小さくなっている。最大値低減率は、

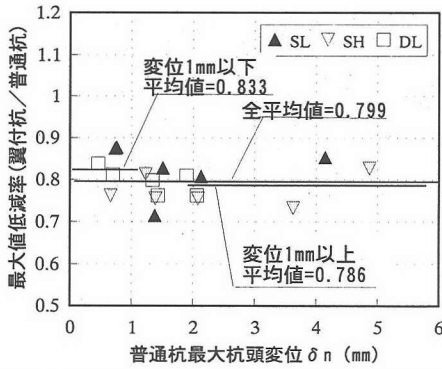


図-17 翼付杭の最大値低減率と普通杭最大杭頭変位の関係

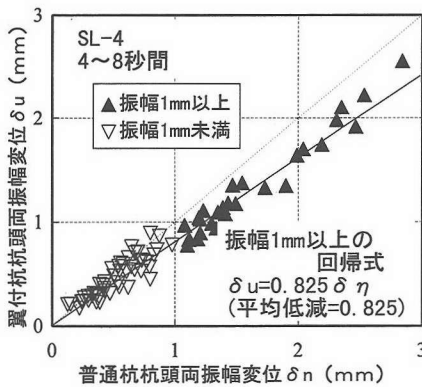


図-18 普通杭の両振幅と翼付杭の両振幅杭頭変位

その1mm以下の平均値は0.833、1mm以上の平均値は0.786となる。

以上のことから、大局的に最大値低減率は、最大杭頭変位の大きさに依存せず、全データは、0.7～0.9の範囲にあり、平均値は0.799となる。

また、2種の杭がほとんど同位相で振動していることから、杭頭変位波形より各々の杭頭変位の両振幅を読みとる。図-18に普通杭と翼付杭の両振幅の関係を示す。また、図-19に普通杭の両振幅と翼付杭の普通杭に対する両振幅の比の関係を示す。

図-19より、実験精度上げらつきが少なく、有効と考えられる1mm以上の変位振幅の比の平均値を算出したところ0.811であり、図-16の最大杭頭変位と同様の傾向が見られた。また、図-18より1mm以上の振幅の回帰係数は、0.825である。以上のように1mm以上の変位振幅の比の平均値や回帰係数は、それぞれ平均的な杭頭変位低減率と見ることができ、ここでは、1mm以上の振幅を対象とした原点を通る1次回帰係数を平均低減率と呼ぶ。

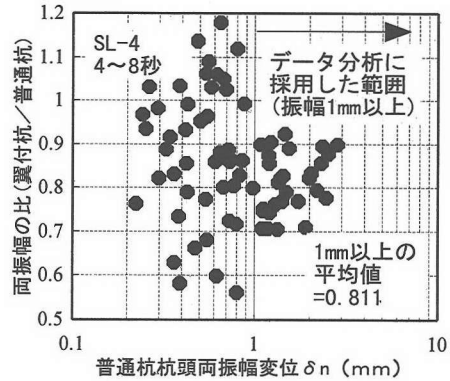


図-19 普通杭の両振幅と翼付杭の普通杭に対する両振幅の比の関係

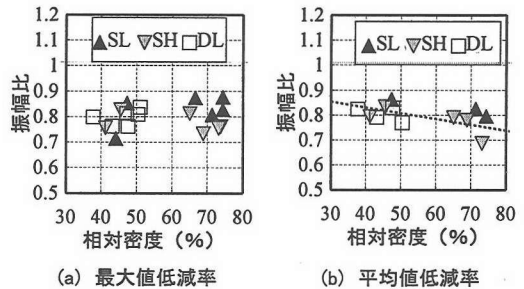


図-20 相対密度と杭頭変位低減率の関係

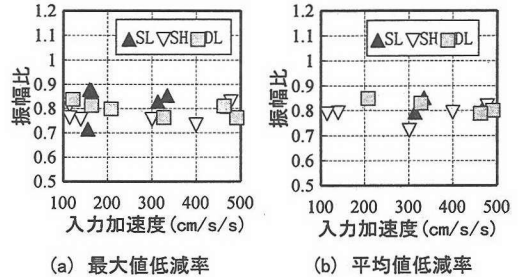


図-21 最大入力加速度と杭頭変位低減率の関係

(3) 振動変位抑制効果に及ぼす影響要因の検討

a) 地盤の密度変化による影響

図-20に相対密度と低減率の関係を示す。最大値低減率では、明瞭な相関は見られないが、平均低減率では、相対密度が大きいほど小さく、振動変位抑制効果が大きくなる傾向がみられた。

b) 最大入力加速度による影響

図-21に最大入力加速度と低減率の関係を示す。最大値低減率でも平均低減率でも、両者とも明瞭な相関は見られなかった。

c) 乾燥砂と飽和砂の影響

地盤を乾燥砂とした場合(DL)は、図-20に示すように、加振による密度変化が小さいこともあり相対密度と低減率に明瞭な相関は見られなかった。また、

図-20と図-21でわかるように、飽和砂に比べて低減率のばらつきがやや小さい。これは、間隙水圧応答の影響を受けないためと考える。

(4) まとめ

小型模型の実験の結果得られた振動変位抑制効果の傾向と影響要因について次のようにまとめられる。

- ① 翼付杭は、普通杭に対して振動変位抑制効果が見られた。今回の実験において、その効果の程度は、回帰係数や振幅比などから求められる杭頭変位低減率で表すと約0.8であった。
- ② 1mm以上の杭頭変位振幅の記録から、翼付杭の振動変位抑制効果は、相対密度が大きいほど大きくなる傾向が見られた。
- ③ 翼付杭の振動変位抑制効果は、最大入力加速度の違いとの相関は小さいと考えられる。
- ④ 飽和砂では、振動変位低減率にばらつきが見られるが、乾燥砂の場合は、いずれの条件でも翼付杭の振動変位の低減率のばらつきは小さい。

5. 振動変位抑制のメカニズムの検討

ここでは、振動数領域における検討および、時刻歴記録から杭と地盤の相互作用の剛性について検討を行い、翼付杭の振動変位抑制効果のメカニズムについて考察する。

(1) 振動変位抑制効果の振動数領域における検討

図-22に翼付杭と普通杭の杭頭変位の振幅比（翼付杭／普通杭）を振動数領域で比較した一例（SL-6）を示す。この図（振幅比スペクトル）は、杭頭の加速度記録のフーリエスペクトル比（A6/A5）として得られる。変位計の記録（LD2/LD1）でも同様な結果が得られるが、高振動数領域でばらつきが大きくなる。振幅比が1.0以下となる振動数領域で振動変位抑制効果が現れていると解釈できる。図-22では13Hzを境界として低振動数領域で効果が現れ、10～11Hzで最も振幅比が小さく効果が現れていることがわかる。他のケースにおいても、このように変位振幅抑制効果が低振動数側の振動数領域で発現すること、効果が現れる振動数より1～3Hz低い振動数で振幅比が最も小さくなる（以下、最大低減振動数と呼ぶ）。いずれの加振ケースでもこの現象が確認できるが、最大低減振動数はケースにより異なる。

図-23に各ケースの最大低減振動数と地盤の1次卓越振動数、杭-地盤連成系の1次卓越振動数との関係を示す。地盤および杭-地盤連成系の1次卓越

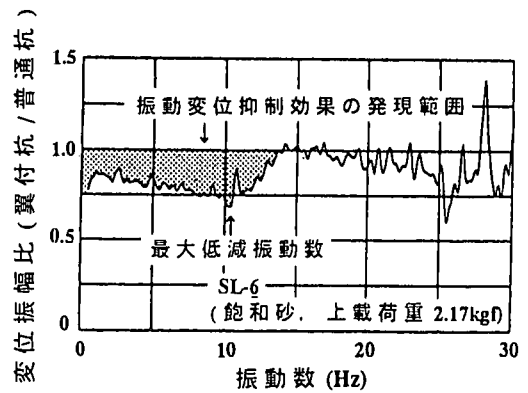


図-22 翼付杭と普通杭の杭頭変位の振幅比（翼付杭／普通杭）を振動数領域で比較した一例（SL-6）

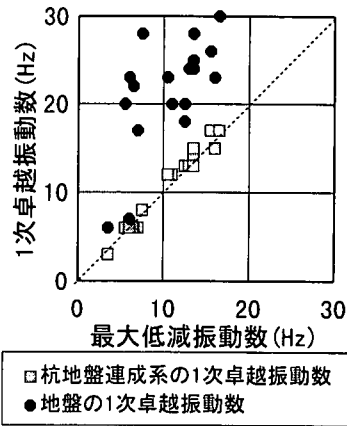


図-23 各ケースの最大低減振動数と地盤および杭-地盤連成系の1次卓越振動数との関係

振動数は、地盤の地表面に近い加速度（A4）と普通杭の杭頭の加速度（A5）の入力地震動加速度（A1）に対する伝達関数の1次卓越振動数として読みとったものである。最大低減振動数は連成系の1次卓越振動数とほぼ一致しているが、地盤の1次卓越振動数とは明瞭な相関は見られない。図-23より、振動変位抑制効果の発現は、連成系の1次固有振動数に依存し、低振動数領域で発現すると考えられる。

また、一連の実験における地盤の1次固有振動数は連成系の1次固有振動数より大きいことから、振動変位抑制効果の発現している振動数領域では地盤は概ね単純せん断状態にあること、杭頭部付近は地盤の振動と同位相ばかりではなく逆位相となって挙動している場合もあることがわかる。すなわち、地盤の変形を受けている状態での実験でありながら、

連成系の1次卓越振動数以下の振動数領域で低減効果が確認されることは、杭の変位低減効果は杭頭慣性力に対して有効であると考えられる。また、杭の曲げひずみが杭頭の変位と相関が高いことが実験で確認されており、総合して考えると、上部構造の慣性力による杭の変位や曲げひずみの低減効果の発現が確認できたと考えられる。

次に、地盤の変形の影響について考察してみる。地盤の1次卓越振動数は17～30Hzにある。図-22に示したような伝達関数から考察する。たとえば図-22によると、17～30Hzでは全体的に低減されているが28Hz付近のように振動数によっては増幅されることもある。全てのケースについて検討すると、この振動数領域で低減されている場合が多いがやや増幅されている場合もあり、平均的にはほぼ1であり、連成系の1次卓越振動数以下の振動数領域で見られたような明瞭な低減効果も増幅効果もない。すなわち、翼付杭には振動状態にある地盤の変形の影響については、メカニズムの説明できるような顕著な影響は無いと考えられる。ただし、地盤に残留変形が残るような、液状化による側方流動のような大きい片側への地盤変形に対する影響はこの実験からは不明である。

(2) サイクリックモビリティ発現による剛性の回復の検討

杭頭の両振幅変位に注目した検討では、地盤の相対密度が大きい場合に振動変位抑制効果が大きいことが示された。翼付杭の主なねらいである、サイクリックモビリティ(cyclic mobility: 以下CMと略す。)による相互作用剛性の回復が効果として現れていることを確認する上で、相対密度は重要な着眼点である。ここではCMの効果がより明瞭に現れると予想される加振加速度の大きな加振ケース(SL-2, SL-4, SL-6, SH-2, SH-4, SH-6)について、過剰間隙水圧上昇量が比較的安定した時間帯の時刻歴記録からそのメカニズムを考察する。

先に検討したように、杭頭の振動変位低減効果が杭系の1次卓越振動数以下の低振動数領域で見られることと地盤の1次卓越振動数はもっと高いことから、振動変位は概ね地盤に対する相対的な振動変位が卓越していると推察される。すると、杭頭変位に対する見かけの杭頭剛性は、地表面付近の比較的浅い地盤内における相互作用ばね剛性を反映したものであると考えられるので、(杭頭慣性力)～(杭頭変位)関係を検討する。杭頭慣性力は杭頭の加速度と杭頭部のおもりの質量と掛けたものに負号を付けることにより、また、杭頭変位は杭頭加速度をFFT

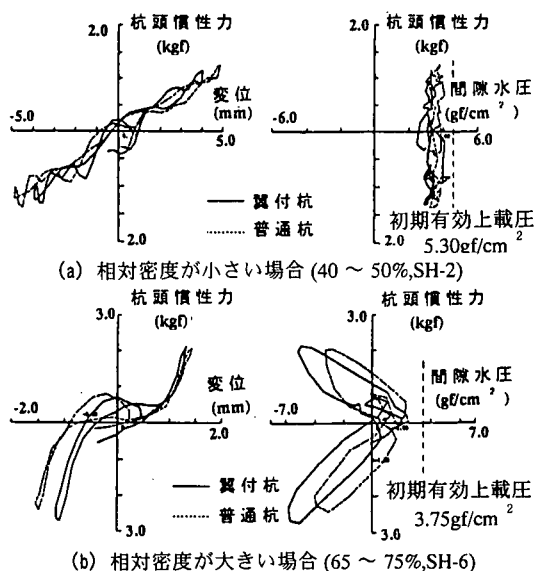


図-24 杭頭慣性力と杭頭変位の関係の代表例

と逆FFTを利用して周波数領域で2回積分することにより求めた。図-24に(a)相対密度が小さい(40～50%)場合(SH-2)と(b)比較的大きい(65～75%)場合(SH-6)の代表的な例を示す。また、図-24には間隙水圧に現れるCM現象の状況を見るために、(杭頭慣性力)～(過剰間隙水圧)関係も併せて示す。いずれの場合も翼付杭の方が普通杭よりも変位振幅が小さく、変位抑制効果が確認できる。しかし、相対密度の小さい場合は、間隙水圧上昇後の(杭頭慣性力)～(杭頭変位)関係は乱れはあるものの全体的には直線的であり、剛性は小さく低下したままでCM現象は翼付杭でも明瞭には現れていない。このことは、過剰間隙水圧がほぼ初期有効上載圧に達した状態で、杭頭慣性力の増加に伴う応力の回復が見られないことから裏付けられる。一方、相対密度が比較的大きい場合には、双方の杭に変形の増大に伴う剛性の回復が見られ、CMが発現していると考えられる。このとき杭頭慣性力の増加時に、間隙水圧は減少する関係が見られ、有効応力が回復していることを示している。また、CM現象による剛性の増加は翼付き杭の方が若干大きい。

次にCMの有無による効果の違いを見るために、図-24に示したようなループをいくつか選び、翼付杭と普通杭の変位振幅比(逆数は割線剛性比)を比較して定量的に検討する。図-25に翼付杭と普通杭の変位振幅比または剛性比と相対密度の関係を示す。相対密度が小さい場合には、振幅比で0.80～0.88、剛性比で1.11～1.18であるのに対し、相対密度が

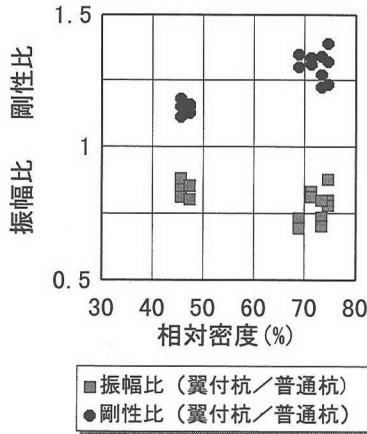


図-25 相対密度に対する翼付杭の変位振幅比・剛性比との関係

比較的大きい場合には、それぞれ概ね0.70～0.81、1.22～1.39となっており、振幅比の低減、剛性の増加において向上が見られる。このように、地盤の相対密度が比較的大きい場合には、CMが明瞭に発現しており、また翼付杭の振動変位抑制効果はより大きくなっている。翼の付加により、より安定的なCMの発現が見られると考えられ、これが振動変位抑制効果の向上につながっていると推定される。

(3) まとめ

以上の振動数領域で行った考察と杭頭慣性力～杭頭変位の関係の考察に基づいた振動変位の抑制のメカニズムに関する考察結果をまとめる。

- ① 振動変位抑制効果は、地盤の1次卓越振動数とは関係がないこと、杭-地盤連成系の1次固有振動数付近でほぼ最大となり、これより数Hz高いところから低振動数側で安定的に発揮される。
- ② 比較的大きい相対密度の地盤では、翼付杭の普通杭に対する振動変位抑制効果の向上が見られ、杭に翼をつけることでサイクリックモビリティがより安定的に発現しやすくなることに起因すると考えられる。しかし、緩い地盤ではそのような現象はなかった。
- ③ この実験における杭頭の振動変位低減効果は、主に杭頭質量慣性力に起因する変位を低減する効果である。

6. 振動変位抑制効果の定量評価

(1) はじめに

地震時に振動している液状化地盤において頭部質量を持つ杭の振動変位を抑制する物理的なメカニ

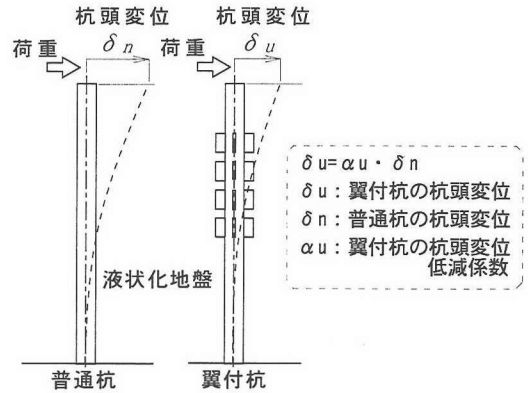


図-26 杭頭変位低減係数の模式図

ニズムの解明は、それを目的としたさらなる詳細な実験や3次元FEMやDEMなどの数値解析によらざるを得ないが、以上の考察により、翼付杭には杭頭の振動変位を抑制する効果があることやその振動変位は主に杭頭質量慣性力に起因することがわかった。そこで、ここでは、地盤振動の影響が無視できるものと仮定したとき、杭頭質量慣性力に起因する杭頭部の振動変位振幅を抑制する物理的なメカニズムについて着目し、翼付杭の振動変位抑制効果を定量的に評価する。

(2) 翼付杭の杭頭変位抑制効果の定式化

a) 翼付杭の杭頭変位抑制効果の数式表現

ここでは、杭頭自由・先端固定の場合を想定して、翼付杭の杭頭の振動変位抑制効果を、式(1)のように普通杭（無対策杭）の振動変位に対する低減係数として表す。図-26に杭頭変位低減係数の意味を模式的に示す。

$$\delta u = \alpha u \cdot \delta n \quad (1)$$

ここで δu : 翼付杭の杭頭変位

δn : 普通杭の杭頭変位

αu : 翼付杭の杭頭変位低減係数

翼付杭の杭頭変位抑制効果は、翼を付加することにより発現する。翼の付加は杭体の剛性変化と周辺地盤との相互作用の変化をもたらす。相互作用の変化は杭周辺の応力状態に起因するものであり、飽和砂地盤ではさらに間隙水圧応答の変化をもたらす。そこで杭頭変位低減係数 αu を低減の要因別に分けて考える。

b) 剛性増加による低減係数: α_r

剛性増加による低減係数 α_r は、杭体に翼が付いたことによる杭軸方向の曲げ剛性の増加に起因する杭頭部の柔性の低減によるものである。この α_r は、端部に集中荷重が作用する片持ち梁であるので、実験でも計算でも求められる。

c) 相互作用の変化による低減係数: α_w

翼状の突起物が存在することによる相互作用の変化とは、相互作用ばねの増大を意味しているが、単なる受圧面積増加による地盤ばねの増大 (α_{w1}) だけではなく、翼状突起物が付いたことによる見かけの水平地盤反力係数の変化による地盤ばねの増大 (α_{w2}) も含むと考えている。この相互作用の変化による低減係数を α_w ($= \alpha_{w1} \cdot \alpha_{w2}$) とする。この低減係数は、地盤の密度、細粒分含有率、弾性係数、ダイレイタンシー特性などの違いにより異なるものと考えている。

d) サイクリックモビリティー発現などによる低減係数: α_c

地盤と杭との相対変位が増大すると、杭周辺地盤の3次元のせん断ひずみの増加に伴い杭周辺の間隙水圧が急激に小さくなる現象に起因して、見かけの相互作用ばねの剛性が回復する現象が考えられる。メカニズム的には近傍地盤の3次元応力ひずみ空間の $\tau_{max} \sim \gamma_{max}$ の変化に起因する杭周土圧～杭相対変位の変化の総和として現れるという仮説を考えている。現象的には杭頭水平力～杭頭変位の関係に現れる。このようなサイクリックモビリティー（以下CMと略す）発現などによる変位の低減効果を低減係数 α_c として表す。

e) 翼付杭の杭頭変位低減係数の定式化

式(1)で定義した翼付杭の杭頭変位低減係数を、前述した各要因による低減効果が独立して評価できることを仮定して、式(2)で表す。 α_r は結果として現れるものであり目的とする効果は α_w と α_c である。

$$\alpha_u = \alpha_r \cdot \alpha_w \cdot \alpha_c \quad (2)$$

- ここで α_u : 翼付杭の杭頭変位低減係数
- α_r : 剛性増加による低減係数
- α_w : 相互作用変化による低減係数
- α_c : サイクリックモビリティー発現特性の変化などによる低減係数

(3) 実験結果による低減係数の定量的評価

杭頭変位の低減効果は地盤の相対密度に依存するので、飽和砂地盤を緩い場合 ($Dr=41 \sim 47\%$, 平均

表-3 実験と計算から求めた要因別低減定数

	翼付杭の杭頭変位低減率	相対密度45%	相対密度71%
実	最大値低減率: $\alpha_u(\max)$	0.715~0.853	0.733~0.875
	平均低減率: $\alpha_u(\text{mean})$ 平均低減率の平均値	0.794~0.863 0.831	0.687~0.825 0.776
験	平均低減率を下回る 最大値低減率: $\alpha_u(\max)_{\text{low}}$	0.715~0.828 平均 = 0.766	0.733~0.761 平均 = 0.750
	数値計算	地盤がないとき $\alpha_u = \alpha_r$	0.912
算	逆算地盤バネ (kgf/cm^3) 地盤反力の受圧面考慮 $\alpha_u = \alpha_r \cdot \alpha_{w1}$ α_{w1}	0.041 0.900 0.987	0.413 0.865 0.948
	逆算	$\alpha_u(\text{mean}) \rightarrow \alpha_r \cdot \alpha_w$ α_w	0.831 0.911
算	$\alpha_u(\max)_{\text{low}} \rightarrow \alpha_r \cdot \alpha_w \cdot \alpha_c$ α_c	0.766 0.922	0.750 0.966
	実験	$\alpha_u = \alpha_r \cdot \alpha_w \cdot \alpha_c$: 参考 α_c (CM現象を確認)	分析未実施 0.694~0.735 0.891~0.941

実験の最大値低減率: 翼付杭の普通杭に対する最大杭頭変位の比率
 実験の平均低減率: 翼付杭と普通杭の1mm以上の両振幅変位関係図の原点を通る1次回帰係数のこと。
 参考のため、表の最下部には慣性力～杭頭変位関係に明確にCMが確認された位相での低減率を示した。

45%) と密な場合 ($Dr=65 \sim 75\%$, 平均71%) に分けて、低減効果を要因別に定量評価する。表-3に翼付杭の杭頭変位低減率の実験結果と式(2)にもとづいて分析した要因別低減係数を結果を示す。

実験に用いたアクリル製小型模型杭では、全断面を有効とすると $\alpha_r=0.912$ である。また、加振実験SLの結果をもとに、杭をウィンクラー型の離散水平ばねに支持された先端固定・杭頭自由の梁に置き換えたモデルで地盤ばねを逆算した。地盤ばねは見かけの幅に比例するとして算出し、地盤反力係数に幅と離散ばねの分担長さを乗じている。普通杭の杭頭変位が合うように全層一定の地盤ばねと地盤反力係数を逆算して求め、翼付杭の翼付部分の地盤ばねについては、見かけの杭幅(投影幅)の分だけのばねの変化を考えた同じモデルで解析した。このような2種の杭の計算で求められる杭頭柔性比を以て、低減係数 $\alpha_r \cdot \alpha_{w1}$ を求めた。表-3に翼付杭の杭頭変位低減率とその要因分析結果を示した。

最大値の低減効果は、18の加振実験でその発現理由が微妙に異なる。1mm以上の両振幅変位の原点を通る1次回帰係数で示される平均低減率は、定常的に現れるものである。低減係数 $\alpha_r \cdot \alpha_w$ に相当するものと捉えることができる。また、最大値の低減率が平均低減率の平均値を下回る場合があるが、この場合には、CMの発現もしくは他の土の抵抗機構の変化に起因するものと捉えられる。

表-3は以上のような解釈にもとづいて実験結果を

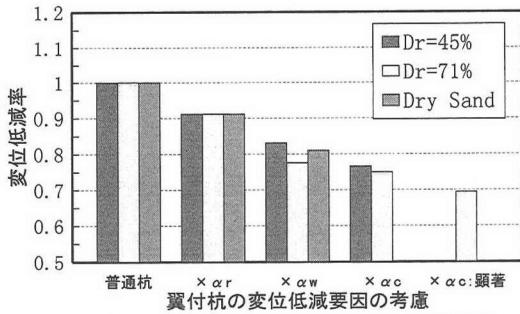


図-27 翼付杭の各要因を加味した杭頭変位低減率

整理し、各要因の低減係数を算出したものである。実験から逆算された α_w は数値解析的に逆算された α_{w1} に比べて小さい。数値解析で前提としているウインクラーの仮定は隣り合うばねは連成しないことを意味しているので、実際には見かけの面積の増大に比例する地盤ばねの貢献以上に水平抵抗増大効果があることを意味している。翼と地盤との相互作用の結果として翼周辺の地盤内応力の3次元的な変化が杭頭変位の低減に貢献しているものと考えられる。

しかし、逆算されたCM発現による低減係数 α_c は密な地盤よりも緩い地盤で小さくなり、図-24(a)と矛盾する。したがって、緩い砂で得られた小さい α_c は、CM発現に原因を求められない。緩い砂では完全液状化状態になっており、液状化地盤を粘性流体として考えた場合の抵抗の違いなどに原因を求めるなどの捉え方が考えられるが、現時点ではそのような観点から検討していないので説明が付かない。しかし、実験結果として対策の効果が現れているのは事実である。また、密な地盤の場合には特に相対変位が大きくならずともCMが発現されるため α_w に既にその一部が評価されていると考えられる。

図-27に以上の定量的な翼付杭の各要因を加味した杭頭変位低減率を図で示す。

(4) まとめ

小型模型実験結果にもとづき、数値解析を併せて行うことにより、翼付杭の杭頭変位低減効果を定量的に評価し次の結論を得た。

- ① 杭体の剛性増加による低減率は約0.9である。
- ② 相互作用の変化も併せた低減率は、約0.8であり、見かけの杭抵抗面積に比例する地盤ばねの増以上の水平抵抗の増大効果がある。
- ③ サイクリックモビリティ発現ほかの土の抵抗機構の変化に起因して低減率は約0.7となりうる。

7. 他の対策方法との効果比較

(1) 比較の方法

実験条件がそれぞれ異なり、厳密な考察の材料となる情報が不足しているが、杭頭変位の低減ということに着目した他の液状化対策工法に関する実験結果と比較することは、液状化対策技術の進展の観点から有意義であると考えられる。実験条件の違いがあるので大雑把な比較ではあるが、杭頭変位の低減効果という観点から既往の他の研究と比較する。

(2) 周辺地盤締め固め工法

杭基礎構造物の液状化対策として、もっとも一般的な方法は周辺地盤を締め固める工法であろう。

古関ら²⁷⁾は未改良地盤を $Dr=60\%$ 程度、締め固め改良地盤を $Dr=90\%$ 程度として、シリコンオイルで飽和させた豊浦砂地盤の中に頭部におもりを付け突出した状態の単杭を設置し、遠心荷重装置により正弦波加振を行い、杭頭変位と杭の曲げひずみを測定した。実験は50Gの場合で、周波数60Hzの正弦波20波を用いて段階的に加振するものである。

図-28に改良幅と杭頭変位の関係²⁷⁾を示す。この図で改良幅0mは未改良地盤を表す。図によれば、改良幅に依存している様子は読みとれない。そこで、この図より杭頭変位量を読み取り、改良した場合の上限値と下限値について未改良の場合と比較する。

表-4に図-28より読み取った杭頭変位量を示す。次の2つの図はこの表に基づいている。図-29に未改良地盤中の杭頭変位に対する改良地盤の杭頭変位の関係を示す。概ね正の相関があり、その比は0.8~0.9である。未改良のときの杭頭変位に対する改良のときの杭頭変位の比を低減率とする。表-4からは、低減率は入力の大きさには依存しないことがわかる。これらの傾向は翼付杭と同様である。

(3) 排水機能付き杭

喜田ら³⁾は排水機能の付いた杭について1G場での模型振動台実験を行い、同機能のない普通杭と杭頭変位について比較している。模型地盤には豊浦砂を用いて、セルローズ溶液で飽和させており、杭頭におもりを載せた1本杭と4本杭について実験している。

図-30に排水機能付き杭における杭種の違いと杭頭最大水平変位振幅の関係を示す。この結果から読みとると、液状化に到るまでに生じる変位振幅の最大値について低減率は約0.7~0.9であるが、液状化の程度が高くなるほど($F_L=1 \rightarrow F_L=0.6$)、杭頭重量が重くなるほど(0.8kgf \rightarrow 4.0kgf)、低減率は大

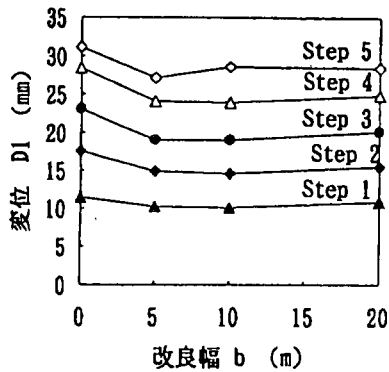


図-28 改良幅と杭頭変位の関係

表-4 締固め改良による杭の液状化対策の効果
建設省土木研究所の遠心実験(1994)²⁷⁾

ケース	入力(G)	杭頭変位(mm)			低減率	
		未改良	改良		上限	下限
Step1	0.086	31.1	28.4	27.1	0.91	0.87
Step2	0.128	28.2	24.6	23.8	0.87	0.84
Step3	0.166	23.1	20.1	18.9	0.87	0.82
Step4	0.208	17.5	15.4	14.5	0.88	0.83
Step5	0.244	11.4	10.2	9.9	0.89	0.89
平均		—	—	—	0.88	0.85

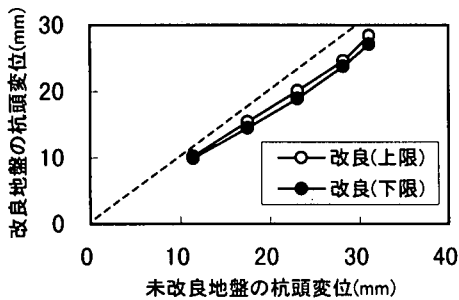


図-29 未改良地盤と改良地盤の杭頭変位

きくなり、効果が減少するのがわかる。

さらに、液状化状態になった後には、普通杭よりも排水杭の方が杭頭変位が大きくなるという結果が得られている³⁾。

(4) 比較

図-31に各対策法の効果を杭頭変位低減率で比較して示す。周辺地盤締固め工法の場合には、0.82～0.91であり、改良幅によらない。排水機能付き杭は、0.7～0.9であるが、液状化が生じると液状化の程度が高いほど低減率は大きくなり、効果は小さくなる。また、実験によるものではないが、三上ら⁴⁾の「制震杭」については0.75～1.0である。

一方、翼付杭では低減率は安定的に0.8程度であ

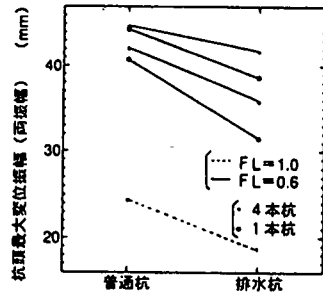


図-30 排水機能付き杭における杭種の違いと杭頭最大水平変位振幅の関係

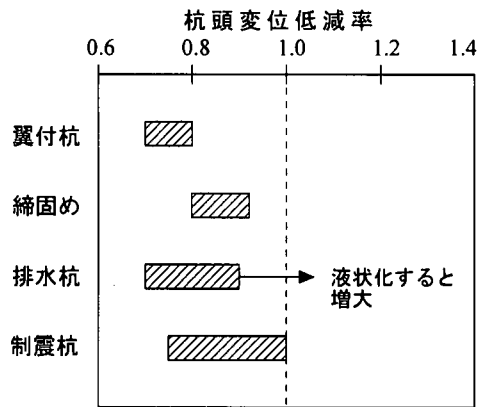


図-31 杭頭変位低減率で比較した杭の液状化対策法の効果

り、何らかの土の抵抗機構の変化に起因して水平抵抗の増大効果が強く発現すれば0.7程度となる。

すなわち、翼付杭は他の方法と比べて同等もしくはより効果的である可能性がある。しかし、それぞれ実験条件ほかの前提条件が同一と考えられないので定量的な比較は困難である。

8. 結論

これまで一般に、緩い砂で液状化が生じ、密な砂では液状化は生じにくいと考えられているが、レベルの大きい地震動の下では中密な砂でも液状化すると考えられる。また、中密以上の砂には、サイクリックモビリティという材料特性がある。この特性に基づいた杭と地盤との相互作用特性への影響を利用するとの発想の下に、杭と地盤の相対変位がより小さいときに見かけの地盤ばねの剛性回復効果が現れるという仮定に基づき考えられた翼付杭の効果を実験的に検討した。アクリル製の小型模型杭をせん断土槽内に作成した地盤中に設置した振動台実験を行い、翼付杭と普通杭の振動変位を比較検討することにより、翼付杭の振動変位低減効果を考察し、次

の結論を得た。

- (1) 翼付杭は、普通杭に対して振動変位を抑制する効果が見られ、その効果の程度は、回帰係数や振幅比などから求められる杭頭変位低減率で表すと大局的に約0.8である。
- (2) 1mm以上の杭頭変位振幅の記録から、翼付杭の平均的な振動変位抑制効果は、相対密度が大きいほど大きくなる傾向が見られた。しかし、最大振幅ではそのような傾向は認められなかった。また、翼付杭の振動変位抑制効果は、最大入力加速度の大きさと相関がほとんどない。
- (3) 飽和砂では、振動変位低減率にばらつきが見られるが、乾燥砂の場合は、翼付杭の振動変位の低減率のばらつきは小さい。
- (4) 振動変位を抑制する効果は、杭-地盤連成系の1次固有振動数でほぼ最大となり、これより低振動数領域で発揮される。実験における地盤の1次固有振動数は連成系の1次固有振動数より大きいことから、地盤は概ね単純せん断状態にある。
- (5) 翼付杭には、上部構造の慣性力による杭の変位や曲げひずみの低減効果の発現が確認できたと考えられる。また、振動状態にある地盤の変形に対しては、メカニズムの説明できるような顕著な影響は無いと考えられる。
- (6) 翼付杭の普通杭に対する振動変位抑制効果の向上は、比較的相対密度の大きな地盤では、杭周辺地盤のサイクリックモビリティに起因する場合があるが、原因はそれだけではない。一方、相対密度の小さい地盤では、サイクリックモビリティは見られなかった。最も効果のある場合で低減率は約0.7となりうる。
- (7) 杭体の曲げ剛性の増加による杭頭変位低減に加えて、翼を付けたことによる相互作用特性の変化に起因する低減効果がある。また、その相互作用の変化も併せた低減には、見かけの杭抵抗面積増加に比例する地盤ばねの剛性増大以上に地盤抵抗の増大が見込める。
- (8) 杭頭変位低減効果に着目すると、翼付杭は、締固め工法や排水機能付き杭や制震杭に比べて、

同等かもしくはそれ以上の効果が安定して得られる対策工法である可能性がある。

今後の検討課題は、効果発現のメカニズムの解明、実際の杭～地盤を想定したときの適用性や低減効果の向上方法の開発である。

謝辞：本研究は、著者らが独自に進めていた研究・開発を出発点とし、川崎製鉄株式会社との共同研究として実施した研究の成果の一部を使用してまとめたものであり、共同研究の実施、成果の使用に際しては、川崎製鉄株式会社建材技術部の高橋 千代丸氏、橋本 正治氏、木村 保氏、沖 健氏、同社鋼構造研究所の小池 武博士、橋本 修身氏、宇都宮 紳三氏には御協力、御便宜を戴きました。また、研究の推進にあたっては、飛鳥建設株式会社の故 宮内 章副社長、同社技術研究所の平松 勝二前所長、長谷川 昌弘所長、境野 典夫研究員に、実験の実施に当たっては、笹木 弘、槇島 修の各研究員、田口 勝二、染谷 昇の各技術員に多大な協力を得ました。最後に記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 土質工学会：液状化対策の調査・設計から施工まで、土質工学会、pp.123-174, 1993.
- 2) 宮坂 享明、三浦 房紀、平田 大三：高性能耐震ジョイント杭の開発とその側方移動する液状化地盤に対する応答、土木学会論文集、No.513 / I -31, pp.201-211, 1995.4.
- 3) 喜田 浩、田中 宏征、才村 幸生、飯田 毅、安田 進、野村 博之：液状化対策としての排水機能付き鋼材の適用に関する振動台実験、土木学会第23回地震工学研究発表会講演概要、pp.341-344, 1995.7.
- 4) 三上 博、上原 清治、山口 隆史、高橋 直樹：杭基礎の制震工法に関する研究、土木学会第23回地震工学研究発表会講演概要、pp.385-388, 1995.7.
- 5) 森 伸一郎、三輪 滋：新しい液状化対策杭の振動台実験、土木学会第23回地震工学研究発表会講演概要、pp.357-360, 1995.7.
- 6) 特許公告、特公昭 36-27086, 1961.
- 7) 特許公告、特公昭 45-39296, 1970
- 8) 特許公告、特公昭 50-28722, 1975
- 9) 実用新案出願、実願昭 61-121321, 1986
- 10) 特許公開、特開昭 62-202115, 1987
- 11) 実用新案出願、実願平 1-79186, 1989
- 12) 野口 勇二郎、後藤 尚男、中川 弘、西川 恭爾：翼壁式井筒の水平抵抗に関する模型実験的研究、土木学会第7回地震工学研究発表会講演概要、pp.23-24, 1964.10.
- 13) 野口 勇二郎、後藤 尚男、中川 弘、西川 恭爾：翼壁式井筒とその水平抵抗に関する現地試験について、土木学会第7回地震工学研究発表会講演概要、pp.25-26,

- 1964.10.
- 14) 後藤 尚男, 西川 恭爾, 秋吉 卓, 江口 肇: 翼壁式井筒の水平抵抗について, 第 8 回日本道路会議論文集, pp.564-567, 1966.4
 - 15) Ishihara, K.: Stability of Natural Deposits during Earthquakes, Proc. of 11th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.321-376, 1985.8.
 - 16) 森 伸一郎, 三輪 滋, 関 宝琪: 液状化した地盤の地震時挙動に関する検討, 土木学会第 22 回地震工学研究発表会講演概要, pp.51-54, 1993.7.
 - 17) 森 伸一郎, 滝本 幸夫, 戸早 孝幸, 武藤 正人, 池田 隆明: 液状化地盤における杭基礎構造物の動的相互作用と液状化解析の適用性, 土質工学会 構造物の基礎と地盤との動的相互作用に関するシンポジウム発表論文集, pp.173-180, 1990.7.
 - 18) 笹木 弘, 森 伸一郎, 三輪 滋, 榎島 修, 宇都宮 紳三: 液状化対策としての翼付杭の振動変位抑制効果に関する小型振動台実験 (その 1: 実験概要), 1996 年度日本建築学会大会学術講演梗概集構造 I, pp.559-560, 1996.9.
 - 19) 榎島 修, 森 伸一郎, 三輪 滋, 笹木 弘, 宇都宮 紳三: 液状化対策としての翼付杭の振動変位抑制効果に関する小型振動台実験 (その 2: 振動変位抑制効果の影響要因の検討), 1996 年度日本建築学会大会学術講演梗概集構造 I, pp.561-562, 1996.9.
 - 20) 三輪 滋, 森 伸一郎, 笹木 弘, 榎島 修, 宇都宮 紳三: 液状化対策としての翼付杭の振動変位抑制効果に関する小型振動台実験 (その 3: 振動変位抑制のメカニズムの検討), 1996 年度日本建築学会大会学術講演梗概集構造 I, pp.563-564, 1996.9.
 - 21) 森 伸一郎, 三輪 滋, 榎島 修, 笹木 弘, 宇都宮 紳三: 液状化対策としての翼付杭の振動変位抑制効果に関する小型振動台実験 (その 4: 振動変位抑制効果の定量評価), 1996 年度日本建築学会大会学術講演梗概集構造 I, pp.565-566, 1996.9.
 - 22) 笹木 弘, 森 伸一郎, 三輪 滋, 榎島 修: 新しい液状化対策杭の振動変位抑制効果を評価する小型振動台実験, 第 51 回土木学会年次学術講演会講演概要集 I B, pp.790-791, 1996.9.
 - 23) 榎島 修, 森 伸一郎, 三輪 滋, 笹木 弘: 新しい液状化対策杭の小型振動台実験での振動変位抑制効果に及ぼす影響要因, 第 51 回土木学会年次学術講演会講演概要集 I B, pp.792-793, 1996.9.
 - 24) 三輪 滋, 森 伸一郎, 笹木 弘, 榎島 修: 新しい液状化対策杭の小型振動台実験での振動変位抑制のメカニズム, 第 51 回土木学会年次学術講演会講演概要集 I B, pp.794-795, 1996.9.
 - 25) 森 伸一郎, 三輪 滋, 榎島 修, 笹木 弘: 新しい液状化対策杭の小型振動台実験での振動変位抑制効果の定量評価, 第 51 回土木学会年次学術講演会講演概要集 I B, pp.796-797, 1996.9.
 - 26) 井合 進: 1G 場での地盤・構造物系の模型振動実験の相似則について, 土木学会第 19 回地震工学研究発表会講演集, pp.341-344, 1987.7.
 - 27) 古関 潤一, 高橋 晃浩, 松尾 修, 小淵 凡夫, 吉澤 努: 杭基礎構造物の液状化対策に関する検討 (その 2), 第 29 回土質工学研究発表会発表講演集, pp.963-966, 1994.6.

(1997. 10. 14 受付)

SHAKING TABLE TESTS TO ELUCIDATE PILE DISPLACEMENT REDUCTION EFFECT OF A NEW CONCEPTUAL REMEDIATING WING-PILE IN LIQUEFYING GROUND

Shin'ichiro MORI and Shigeru MIWA

A wing-attached pile is proposed as a new concept of liquefaction remediation to expect a tranquilized lateral resistance even in a liquefying ground due to a strong earthquake motion. Elucidation of the proposed wing-pile with a pile-top displacement reduction effect is presented by showing results of a series of shaking table tests and comparing between a wing-pile and a normal pile. A reduction factor of pile top displacement of wing pile is studied related to magnitude of an input motion, density of ground, mass of pile top and cyclic mobility appearance. Magnitude of a reduction factor is about 0.8, which is same as a pile in compacted ground.