

高耐力マイクロパイルとハイドレーンパイルを併用した 既設構造物基礎の液状化対策工法に関する研究

岸下 崇裕 岡野 幹雄
斉藤 悦郎^{*1}

概 要

高耐力マイクロパイル(HMP)工法は、既設基礎の耐震補強工法として、地震時保有水平耐力法や振動台実験により補強効果が確認されてきた。ただし、液状化地盤中において高耐力マイクロパイルを直杭として補強する場合には、非液状化地盤時に比べ補強に必要な本数が多くなる傾向であり、このような場合には、斜杭による補強が効果的となる。しかし、近接構造物や敷地の問題等により斜杭の施工が困難な場合も考えられ、そのような場合には、他の液状化対策を併用することが合理的であると思われる。

一方、限られた施工スペースで実施可能な既設構造物の液状化対策工法の一つにハイドレーンパイル(HDP)工法がある。本工法は、鋼矢板や鋼管杭に中空排水部材が一体化された液状化対策用鋼材(ハイドレーンパイル)を構造物周囲に打設するものであり、実験や解析により多様な構造物への適用性が確認されている。

そこで本研究では、狭隘地や既設橋梁下などの施工上の制約が厳しい個所でも実施が可能で、かつ、より有効な既設構造物基礎の液状化対策工法としてHMPとHDPを併用した工法に着目し、模型振動台実験によりその効果について検証を行った。

Liquefaction Countermeasure Method for Existing Structure Foundations Using High Capacity Micropile with High Drain Pile

Abstract

The seismic retrofitting effect of high capacity micropiles (HMP) has already been confirmed by trial calculations using the ductile design method and shaking table tests. However, the number of HMPs installed in ground susceptible to liquefaction is usually higher than for ground not susceptible to liquefaction. In this case, reinforcement by batter piles becomes effective. Usually, installation of batter piles is problematic due to their influence on adjacent existing structures and site boundaries. To solve these problems, it is very reasonable to use other liquefaction countermeasure methods in combination with perpendicular HMPs.

The high drain pile (HDP) method is considered a suitable liquefaction countermeasure for application in narrow construction spaces. In this method, "high drain piles", which are steel sheet-piles or steel pipe piles with drainage members, are installed in liquefaction ground around structures. The effectiveness of this method has been already verified by various experiments and numerical analysis.

In this study, a combined HMP and HDP approach is proposed as a new liquefaction countermeasure for sites where working spaces are limited (such as under existing bridge piers). The effectiveness of the method is verified by shaking table tests using prototype models.

キーワード: マイクロパイル, 液状化対策,
既設基礎, 鋼矢板

*1 土木本部 営業統括部

§1. はじめに

既設構造物基礎に対する実用的な耐震補強工法の一つに、基礎周囲に高耐力マイクロパイル(HMP)を打設する工法がある。本工法は、既設橋梁直下などの厳しい施工条件においても実施が可能な工法として注目されている。また、地震時保有水平耐力法¹⁾や動的な有限要素法²⁾による解析的検討あるいは振動台実験^{3),4)}により補強効果も確認されており、既に既設橋梁の耐震補強として実績のある工法である⁵⁾。ただし、液状化地盤中においてHMPを直杭として補強する場合には、非液状化地盤時に比べ補強に必要な本数が多くなる傾向であり、このような場合には、斜杭による補強が効果的となる^{1),4)}。しかし、近接構造物や敷地の問題等により斜杭の施工が困難な場合も考えられ、そのような場合には、他の液状化対策を併用することが合理的であると思われる。

一方、限られた施工スペースで実施可能な既設構造物の液状化対策工法の一つにハイドレールパイル(HDP)工法がある。本工法は、鋼矢板や鋼管杭に中空排水部材が一体化された液状化対策用鋼材(ハイドレールパイル)を構造物周囲に打設するものであり、実験や解析により多様な構造物への適用性が確認されている^{6),7),8)}。また、河川堤防や地中構造物などの液状化対策に適用されている^{9),10)}。本工法を杭基礎に適用した場合、鋼材の強度・剛性に加え、周辺地盤の過剰間隙水圧消散促進による水平方向の安定性向上が期待できるが、鋼矢板タイプでは基礎のロッキングに対する鉛直方向の安定性が問題になる場合も考えられ、他の手段によってそれを確保する必要性が生じる可能性がある。

そこで本研究では、狭隘地や既設橋梁下などの施工上の制約が厳しい個所でも実施が可能で、かつ、より有効な既設構造物基礎の液状化対策工法として HMP と HDP を併用した工法に着目し、模型振動台実験によりその効果について検証を行った。

§2. 工法の概要

2.1 ハイドレールパイル工法

ハイドレールパイルとは、図1、写真1に示すように、鋼管杭、鋼矢板などに中空排水部材(孔部に土砂侵入防止フィルターが設けられた有孔溝形鋼)が一体化された鋼材である。本工法は、構造的対策としての鋼材の機能・効果に加え、地震時に鋼材周辺地盤の過剰間隙水圧の上昇を抑えることにより、地盤の抵抗を期待しうる工法である。また、大きな地震動によって鋼材周辺を含む地盤が液状化した場合でも、地震終了後には周辺地盤の過剰

間隙水圧を速やかに逸散させ、構造部材としての鋼材の機能を早期に回復することにより、構造物や地盤の変形を軽減する効果を期待するものである。

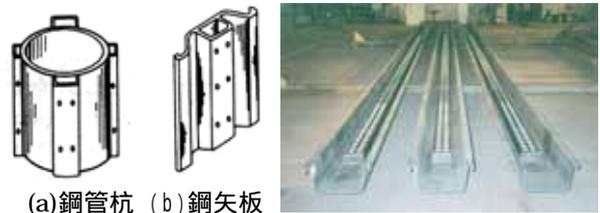


図1 HDPの構造例 写真1 HDP 鋼矢板タイプ

2.2 HMP と HDP の併用工法

本工法は、基礎周辺の地盤が液状化する場合の橋梁基礎の耐震補強として、HMP による増し杭を施工するとともに、基礎周囲をHDPの鋼矢板タイプ(HDSP)で締切る工法である。工法の概要を図2に示す。本工法は、液状化地盤において近接構造物や敷地等の問題によりHMPによる斜杭補強ができない場合でも、HDSPP締切り壁により基礎の水平方向の耐力を確保し、また、HMP直杭により鉛直方向の支持性能を確保するものである。すなわち、水平方向、鉛直方向の補強効果を兼ね備えた工法であり、地盤の液状化時にロッキングやサイドスエーが生じる構造物基礎に対して、特に有効な工法である。

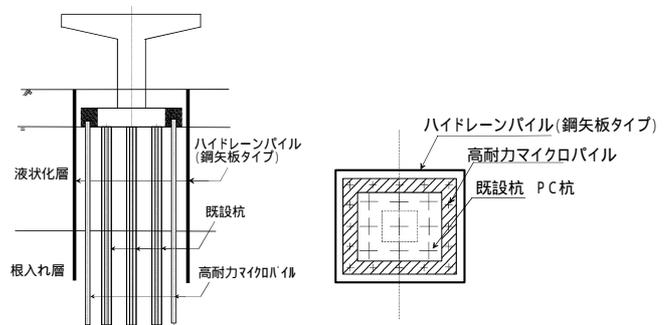


図2 HMP と HDSP の併用工法の概要

§3. 振動台実験

3.1 実験概要

模型振動台実験は、幅 1.2m × 奥行き 0.8m × 高さ 1.0mのせん断土槽を用いて重力場で行った。図3に模型実験の概要を示す。模型地盤は、非液状化層である下層部と液状化層の上層部の2層構造とした。下部層は、空中落下法で地盤を作成した後、振動台を加振して相対密度が $D_r=80\%$ となるように締固めた。一方、上部層は乾燥砂を水中落下させて作成した。上部層の初期相対密度は $D_r=30\%$ 程度であった。

模型地盤に用いた試料は、表1に物性値を示す浜岡砂である。図4に非排水繰返し三軸試験を行って求めた浜岡砂の液状化強度曲線を、豊浦砂 $D_r=50\%$ の結果と比較して示した。浜岡砂の液状化強度は相対密度の増加と共に高くなり、浜岡砂の $D_r=40\%$ の液状化強度が豊浦砂の $D_r=50\%$ のものと同程度である。

杭模型は、既設杭は600mmのPC杭を、補強杭は177.8mmのHMPをモデル化し、実物大の1/20スケールで作成した。表2に既設杭および補強杭の諸元を示す。なお、本実験は、補強効果を定性的に把握することを目的としているので、模型杭の曲げ剛性は、相似則により求められた曲げ剛性をさらに1/10にした。既設杭模型は、幅30mm、厚さ5mmのステンレス製平板を、HMP模型は幅10mm、厚さ2mmの平板を用いた。表-3.3に模型杭の諸元を示す。既設杭模型は、4本を群杭としてフーチング部に剛結させ、杭先端部はピン結合とした。補強杭は、片側5本ずつの計10本とした。図5に模型杭の概略図を示す。

H DSPは、鋼矢板の型を対象に相似則により、厚さ3mmの鋼板を貼り合せて作成した。張り合わせ位置には、硬質ゴムを設置し外部からの水の出入りを少なくさせた。排水材料は、鉛直方向の通水が可能な樹脂製格子材にステンレスメッシュを貼付けた厚さ8mmの部材を鋼矢板の曲げ剛性に影響しないように設置した⁶⁾。写真2に既設モデルおよびH DSP模型を設

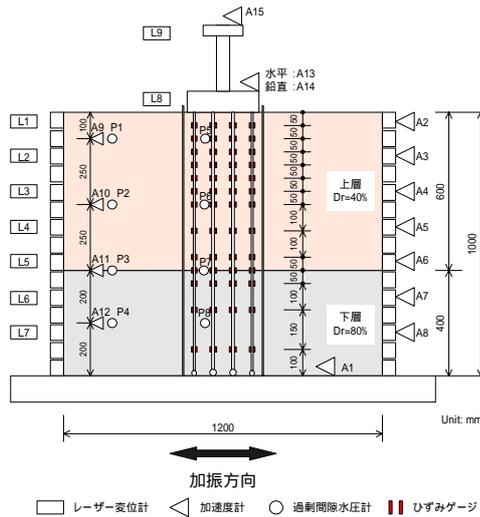


図3 実験概略図

表1 浜岡砂の物性値

土粒子の密度	s	2.699 g/cm ³
粒 度	礫分	0%
	砂分	100.00%
	シルト分	0.00%
	粘土分	0.00%
	均等係数	2.31
	曲率係数	1.03
最大乾燥密度	d max	1.694 g/cm ³
最小乾燥密度	d min	1.396 g/cm ³

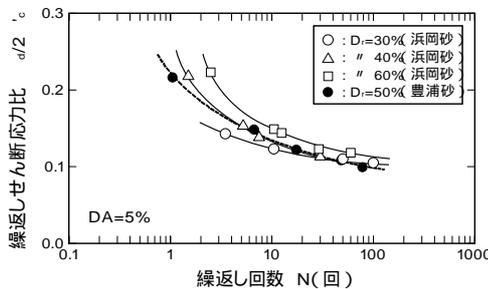


図4 浜岡砂と豊浦砂の液状化強度曲線

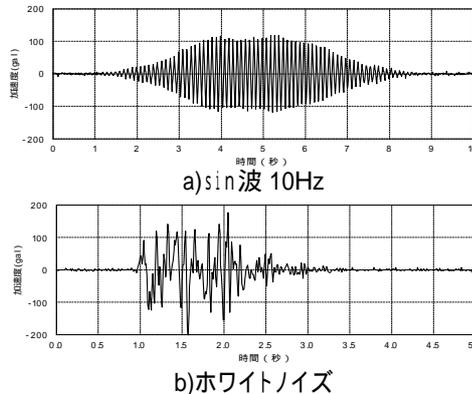


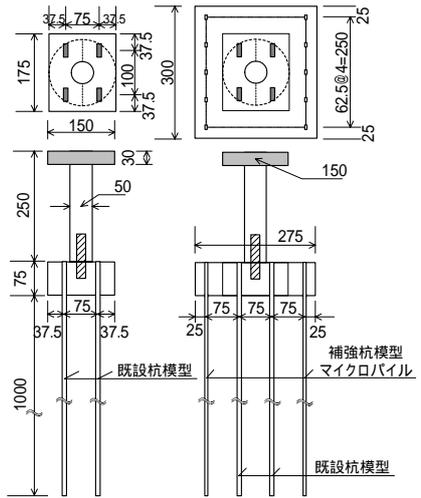
図6 入力加速度波形

表2 検討を行った杭の諸元

	杭形式	杭径 (mm)	肉厚 (mm)	曲げ剛性 EI(kN・m ²)
既設杭	PHC杭 B種	600	90	2.00E+05
補強杭	高強度鋼管	177.8	12.7	2.47E+03

表3 模型杭の形状

杭模型	材質	幅 (mm)	厚さ (mm)	曲げ剛性 EI(N・cm ²)
既設杭	ステンレス SUS304	30	5	5.52E+05
補強杭		10	2	1.18E+04



(a)既設モデル (b)HMP 直杭補強モデル

図5 杭模型の概略図



写真2 実験模型完成状況

表4 実験ケース

実験ケース	HMP	HDSP	排水機能
case11	無し	無し	無し
case12	無し	有り	無し
case13	無し	有り	有り
case21	有り	無し	無し
case22	有り	有り	無し
case23	有り	有り	有り

置した状況を示す。

入力加速度は、地盤模型の固有周期が0.104秒に相当するので、周波数10Hz、最大加速度100galの正弦波

と、ホワイトノイズを用いた。図 6 に入力加速度波形を示す。

計測は、地盤の挙動を把握するために地盤中に加速度計と間隙水圧計を、杭の挙動を把握するために杭に加速度計とひずみゲージを設置して行った。なお、杭近傍の間隙水圧を計測するために、杭には間隙水圧計も設置している。さらに、上部構造物とせん断枠の挙動を確認するために、加速度計とレーザー変位計を両者にそれぞれ設置して計測を行った。

§4 . 振動台実験結果

4.1 時刻歴応答

図 7 にホワイトノイズ入力時における各実験結果の時刻歴応答を示す。図中の 1 段目は、入力加速度(A1)と地盤の加速度(A9)を、2 段目は入力加速度とフーチングの加速度(A13)を、3 段目はせん断枠(L1)とフーチングの変位(L8)を、4 段目は杭頭曲げモーメントを、5 段目は杭周辺

の過剰間隙水圧比を示している。

既設モデル(case11)および直杭補強モデル(case21)の過剰間隙水圧発生状況は、加振と同時に P1 および P2 の過剰間隙水圧比が上昇し瞬時に 1 を超えている。P3 の値も 0.8 まで達しており、上部層全体が液状化しているものと判断できる。鋼矢板で締切ったモデル(case12, case22)では、上記と同様に P5 および P6 の過剰間隙水圧が上昇し瞬時に 1 を超えている。ただし、P7 は 0.7 程度であった。このことより、鋼矢板で締切られた地盤内において層境界付近に一部液状化までに至らない部分があるものの、全般的に液状化しているものと判断される。それに対し、排水機能付の鋼矢板モデル(case13, case23)は、P5 の過剰間隙水圧比が上昇するものの、P6 および P7 においてほとんど発生しておらず、鋼矢板で締切られた地盤内は、液状化していないものと判断できる。

既設モデル(case11)および直杭補強モデル(case21)におけるフーチングの加速度応答および変位応答は、地盤の液状化にともない長周期化し大きく揺れ、せん断枠の

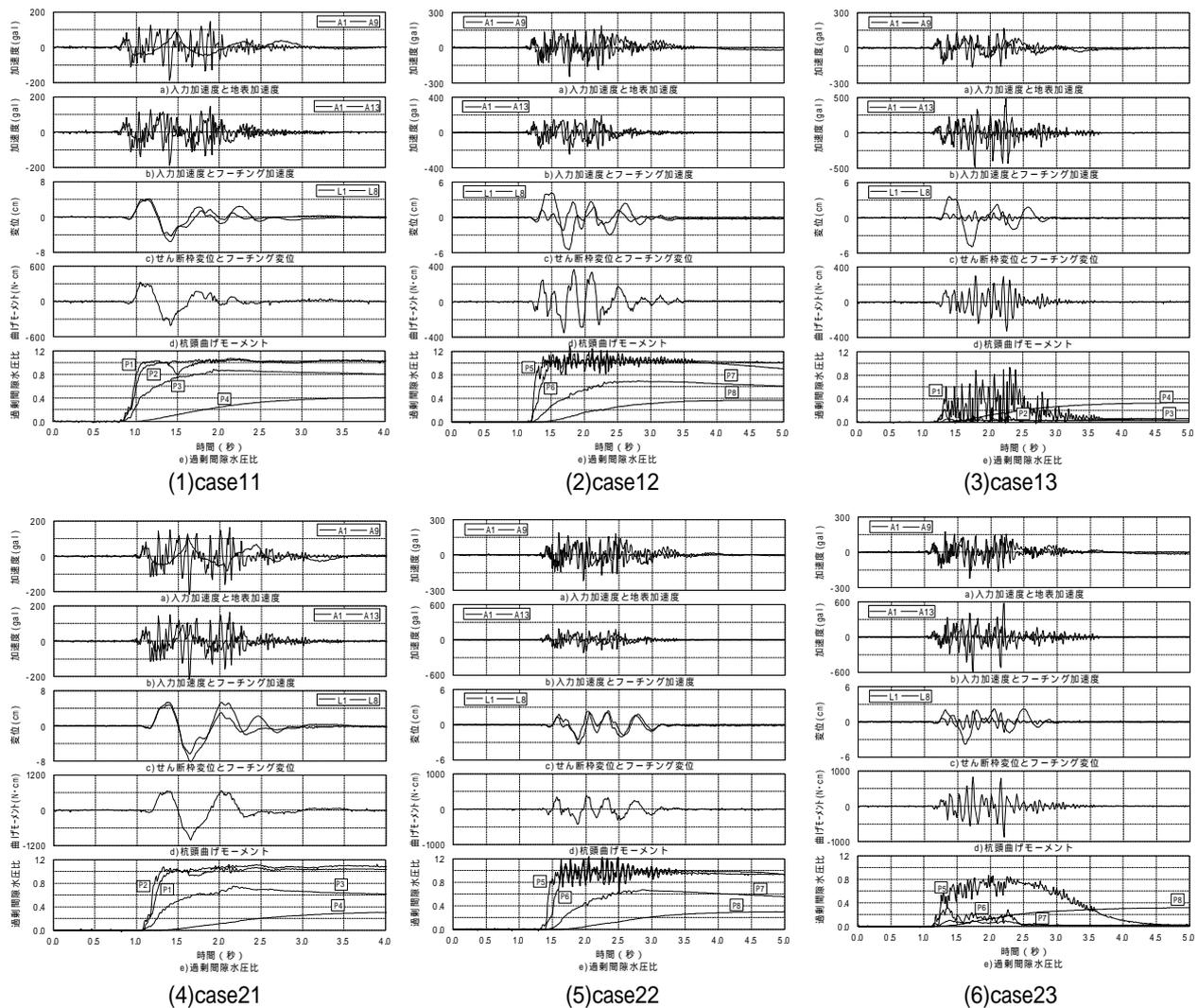


図 7 時刻歴応答比較(ホワイトノイズ入力時)

応答と同じ挙動を示した。鋼矢板で締切ったモデル(case12, case22)におけるフーチングの加速度応答および変位応答は、多少地盤の応答とずれがあるもののほぼ同じ応答を示している。それに対し、排水機能付の鋼矢板モデル(case13, case23)は、地盤の応答に比べ短周期で応答していることが分かる。図8に加速度スペクトルを示す。図中の点線は入力加速度(A1)を、実線は地表面加速度(A9)を、太線はフーチング加速度(A13)の値を示している。図で示されるようにフーチングの卓越周波数は、鋼矢板で締切りさらに排水機能を付加することにより高くなっている。このことは、鋼矢板で締切り排水機能を付加することにより、杭周辺の地盤は、周辺地盤に比べせん断剛性を有していることを意味している。

杭頭曲げモーメントの時刻歴は、フーチングの加速度応答や変位応答と同様な挙動を示している。そのため、既設モデル(case11)、直杭補強モデル(case21)、既設+鋼矢板モデル(case12)および直杭補強+鋼矢板モデル(case22)では、地盤の液状化時に最大値を、既設+排水機能つき鋼矢板モデル(case13)および直杭補強+排水機能つき鋼矢板モデル(case23)では、入力加速度がピーク時に最大値を示した。

4.2 既設杭の曲げモーメント分布

図9および図10に杭頭曲げモーメントが最大となる時刻における既設杭の曲げモーメント分布を示す。図中の印は既設モデルや直杭補強モデルの結果を、印は鋼矢板による締切りモデルの結果を、印は排水機能つき鋼矢板モデルの結果を示している。

図で示されるようにsin波10Hzの結果では、排水機能つき鋼矢板モデル(case13, case23)の結果が最も大きな値を示した。排水機能つき鋼矢板モデルでは、杭周辺地盤が液状化していないために、他のモデルに比べフーチングに大きな慣性力が生じるために最も大きな値を示した。

それに対して、ホワイトノイズ入力時は、既設モデル

(case11)や直杭補強モデル(case21)の結果が最も大きな値を示した。ホワイトノイズ入力時における既設モデルや直杭補強モデルは、液状化した地盤と同程度応答を示し

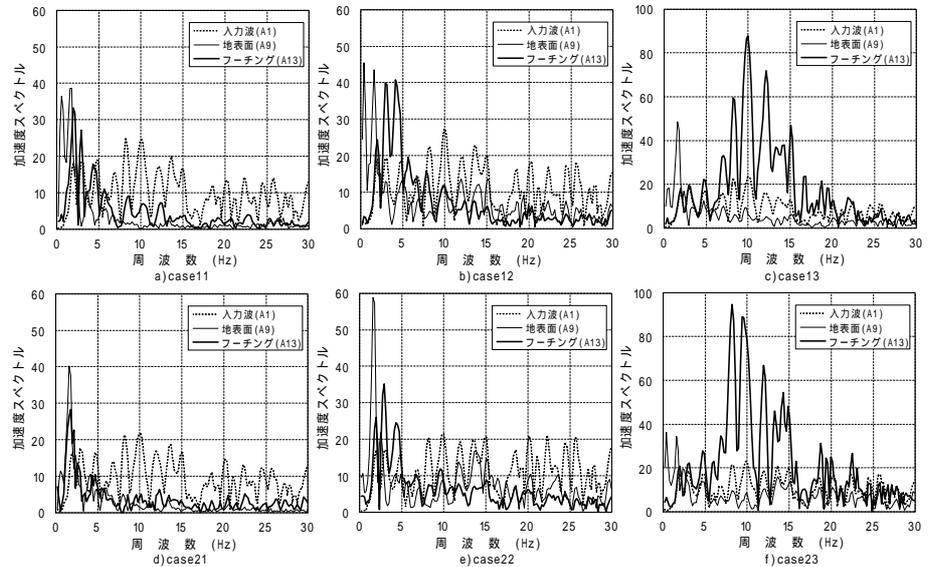


図8 加速度スペクトル

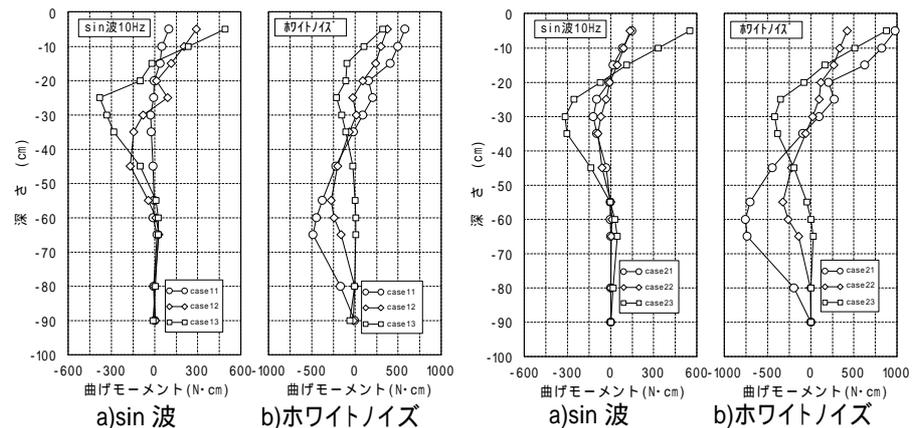


図9 曲げモーメント分布 (既設モデル)

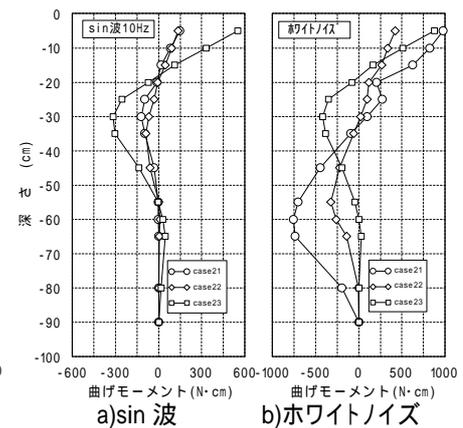


図10 曲げモーメント分布 (直杭補強モデル)

た。それに対し鋼矢板モデル(case12, case22)や排水機能つき鋼矢板モデル(case13, case23)では、鋼矢板で締切ることにより周辺地盤の応答より杭周辺地盤の応答が小さくなっている。このため、鋼矢板モデルや排水機能つき鋼矢板モデルの曲げモーメントは、既設モデルや直杭補強モデルに比べ小さくなったものと考えられる。

4.3 慣性力や曲げモーメントの相関関係について

図11にフーチングに作用する慣性力とフーチング変位との関係を示す。図で示されるようにフーチング位置での慣性力と変位との関係には、実線で示される既設モデルおよび直杭補強モデル、破線で示される鋼矢板モデルおよび一点破線で示される排水機能つき鋼矢板モデルの三つに区分される。この結果により排水機能つき鋼矢板

を用いることにより、既設基礎の慣性力に対する抵抗力が増えていることを示している。

図 12 に既設杭の杭頭曲げモーメントとフーチング変位との関係を示す。図で示されるように、杭頭曲げモーメントとフーチング変位との関係は、実線で示される既設モデル、直杭補強モデルおよび鋼矢板モデルおよび一点破線で示される排水機能つき鋼矢板モデルの二つに区分される。排水機能つき鋼矢板モデルに発生する曲げモーメントが他のモデルに比べ大きくなっているのは、杭周辺地盤が液化化していないため、フーチングに作用する慣性力が杭周辺地盤の変位による影響に加わっているためである。

§5.まとめ

液化化地盤中にある既設基礎に対する耐震補強方法として、高耐力マイクロパイルとハイドレンパイルの併用工法の適応性について模型振動台実験により検討を行った。以下に模型振動台実験より得られた知見を示す。

- (1) 鋼矢板により締切ることにより、締切られた地盤内の過剰間隙水圧の発生状況を多少抑止できることは確認できたが、既設杭に生じる曲げモーメントを抑える効果は確認できなかった。
- (2) 排水機能つき鋼矢板を用いて既設基礎構造物を締切ることにより、締切られた地盤内の過剰間隙水圧の発生状況を抑止できることが確認された。さらに、ホワイトノイズ等のランダム波において既設杭に生じる曲げモーメントを抑える効果が確認された。

謝 辞 本研究に貴重なご意見、ご協力をいただいた住友金属工業(株)小山精一氏、才村幸生氏、田中宏征氏、桑嶋 健氏の皆様に深謝いたします。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所他:共同研究報告書第 246 号 既設基礎の耐震補強技術の開発に関する共同研究報告書(その1), 2000.
- 2) 角田晋相・原田尚幸・岸下崇裕・相良昌男・福井次郎・大下武志:既設基礎の耐震補強技術に関する検討-動的解析によるマイクロパイルを用いた複合基礎の検討-, 土木学会第 57 回年次学術講演会, -630, pp.1259-1260, 2002.
- 3) 独立行政法人土木研究所他:共同研究報告書第 278 号 既設基礎の耐震補強技術の開発に関する共同研究報告書(その2), 2001.

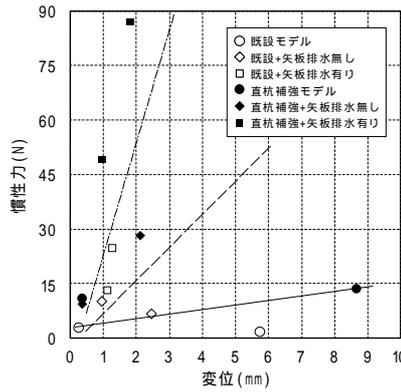


図 11 慣性力と変位の関係

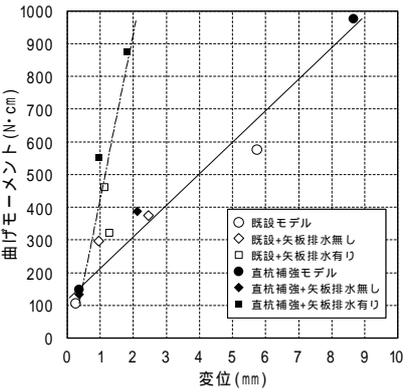


図 12 曲げモーメントと変位の関係

- 4) 独立行政法人土木研究所他:共同研究報告書第 282 号 既設基礎の耐震補強技術の開発に関する共同研究報告書(その3), 2002.
- 5) 岸下崇裕・畑野俊久・江口 孝・田坂友次郎・杉内茂美:高耐力マイクロパイルによる既設基礎の耐震補強事例, 第 4 回耐震補強・補修技術・耐震診断に関するシンポジウム講演論文集, pp.85-92, 2000.
- 6) 野田節男・喜田 浩・飯田 毅:排水機能付き鋼杭による液化化対策に関する実験研究, 第 8 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.885-890, 1990.
- 7) 清田正人・安田 進・喜田 浩・兼重幸生:液化化過程における排水機能付き杭の水平抵抗に関する研究, 土木学会第 47 回年次学術講演会, 第 部門, pp.246-247, 1992.
- 8) 東畑郁生・水谷崇亮・中井則之・磯田 将:地中壁を用いる沈下・浮上りの軽減, 土と基礎, Vol.50-2, pp.16-18, 2002.
- 9) 建設省土木研究所他:共同研究報告書第 186 号, 液化化対策工法設計・施工マニュアル(案), 1999.
- 10) 山下清貴・吉村 正:地下鉄坑口付近の液化化対策 - 営団地下鉄 東西線・千代田線 -, 土木施工, Vol.42, No.3, pp.8-17, 2001.



岸下崇裕

ひとこと

本年度は、模型振動台実験により定性的であるが補強効果を確認した。今後は、有効応力による地震応答解析を実施し、定量的な評価を行い設計手法の提案を行う予定である。