

## (5) マイクロパイルにより補強された既設構造物基礎の模型振動台実験

株式会社フジタ	正会員	○岸下	崇裕
同 上	正会員	齊藤	悦郎
同 上	正会員	相良	昌男
土木研究所	正会員	福井	次郎
同 上	正会員	大下	武志

### 1. はじめに

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、多くの土木構造物に対し、多くの被害をもたらした。このため、平成8年12月に道路橋示方書が改訂され、プレート境界型の地震動に加え内陸直下型の地震動を考慮した設計地震力が新たに規定された。橋脚や基礎等の構造部材は、この地震動に対して地震時保有水平耐力法による耐震設計が規定された。

平成12年2月には、「既設道路橋基礎の補強に関する参考資料」が社団法人道路協会から発行された。この資料では、既設橋脚基礎の耐震補強をはじめ、基礎周辺の局所洗掘や河床低下が生じた場合など、各種補強工法の概要や設計計算の考え方などをまとめられている。とくに既設基礎の補強方法は、作業空間を確保するための交通規制や、桁下制限等の制約条件下の施工となり、大規模でかつ工期・工費を要することが多い。そこで、マイクロパイル工法といった基礎の補強に関する新技術・新工法を併せて、耐震補強効果とともに、合理的な工法を検討する必要があると示されている。

一般にマイクロパイル工法は、地中に小径の削孔を行い、異形鉄筋、鋼管などを補強材として挿入し、グラウト(セメントミルクあるいはモルタル)を注入して築造する場所打ちまたは埋め込みによる直径300mm以下の小口径杭の総称である。米国では、1989年のロマ・プリエタ地震以後、既設構造物による制約条件下における有効的で経済的な基礎の耐震補強工法の一つとして、カリフォルニア州交通局を中心に、マイクロパイル工法が採用されてきた<sup>2),3)</sup>。しかし、マイクロパイルのように小口径の杭で補強され、異径杭が組合された基礎の動的問題や耐震設計法に関する研究<sup>4)</sup>はきわめて少ない。

そこで、平成11年度より「既設基礎の耐震補強技術の開発」に関する官民共同研究(独立行政法人土木研究所、財団法人先端建設技術センター、民間12社)が開始されている<sup>5),6)</sup>。この共同研究では、合理的かつ確実な耐震安全性を確保する基礎の補強方法として、マイクロパイル工法を中心にその設計・施工法の確立を目的としている。

本論文は、液状化地盤中にあるマイクロパイルで補強された杭基礎構造物の動的挙動やその補強効果を把握するために実施した模型振動台実験の結果についてまとめたものである。

### 2. 実験概要

実験は、大型振動台の上に設置したせん断土槽を用いて重力場で実施した。図1に実験装置の概略図を、写真1にせん断土槽を示す。せん断土槽は、加振方向にせん断変形する15段の独立した鋼製枠からなっている。その内側寸法は、幅1.2m、奥行き0.8m、高さ1.0mである。

#### (1) 模型地盤

実験の模型地盤は、模型杭をせん断土槽内に設置した後、乾燥状態の遠州浜岡産の砂を下部層は空中落下法で、上部層は水中落下法で作成し2層構造とした。下部層は、非液状化層とするため、あらかじめ乾燥砂を空中落下させて作成した後、振動台を加振して相対密度が80%になるように締め固め、底部より水を注水

キーワード：耐震補強、既設基礎、小口径杭、斜杭、振動台実験

連絡先：〒243-0125 厚木市小野 2025-1 電話(046)250-7095 FAX(046)250-7139 E-mail:kisisita@fujita.co.jp

して作成した。上部層は、乾燥砂を水中落下させて作成し、初期の相対密度が40%程度であった。図2に模型実験概略図を示す。浜岡砂の物理的な性質を表1に示す。

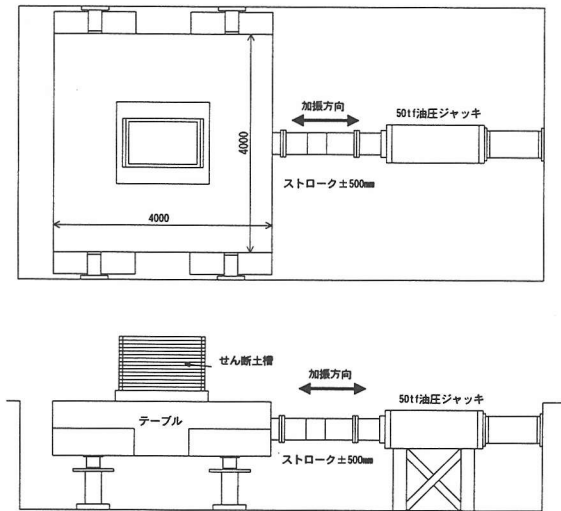


図1 大型振動台概略図

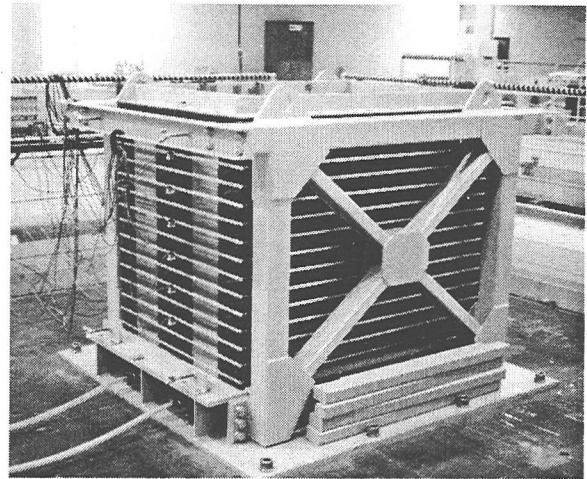


写真1 せん断土槽

表1 浜岡砂の物性値

土粒子の密度 $\rho_s$	g/cm <sup>3</sup>	2.687
自然含水比 $\omega_n$	%	0.2
均等係数 $U_c$		2.11
曲率係数 $U_c'$		1.03
最大粒径	mm	0.85
50%粒径 $D_{50}$	mm	0.262
20%粒径 $D_{20}$	mm	0.170
透水係数 ( $D_r=45\%$ )	cm/s	$1.95 \times 10^{-2}$
砂の最大密度 $\rho_{dmax}$		1.719
砂の最小密度 $\rho_{dmin}$		1.429
最小間隙比 $e_{min}$		0.564
最大間隙比 $e_{max}$		0.881

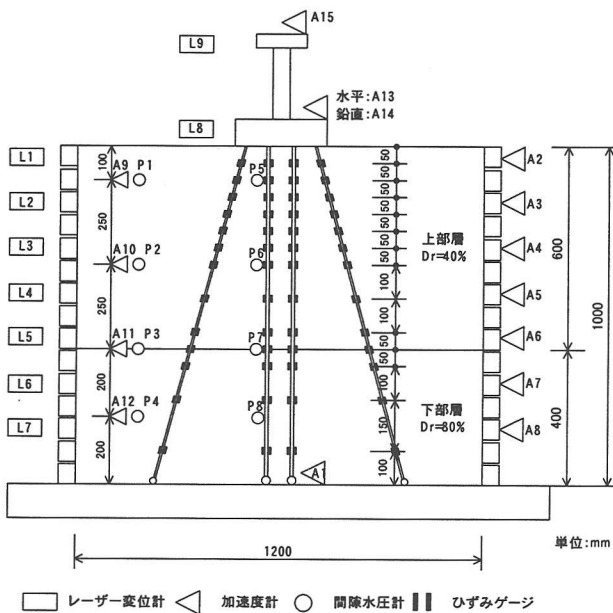


図2 実験概略図

## (2) 杭模型

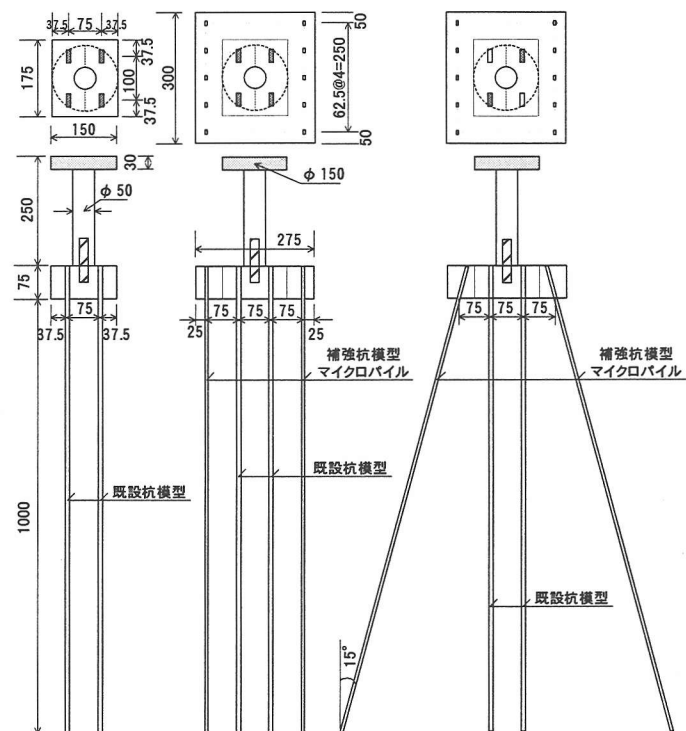
杭模型は、既設杭はφ600mmのPC杭を、補強杭はφ177.8mmの小口径鋼管杭をモデル化し、実物大の1/20スケールで作成した。表2に既設杭および補強杭の諸元を示す。なお、本実験は、補強効果を定性的に把握することを目的としているので、模型杭の曲げ剛性は、相似則により求められた曲げ剛性をさらに1/10にした。既設杭模型は、幅30mm、厚さ5mmのステンレス製平板を、小口径杭模型は幅10mm、厚さ2mmの平板を用いた。表3に模型杭の諸元を示す。既設杭モデルは、4本を群杭としてフーチング部に剛結させ、杭先端部はピン結合とした。補強杭は、片側5本ずつの計10本とした。図3に模型杭の概略図を示す。

表2 検討を行った杭の形状

	杭形式	杭径 φ (mm)	肉厚 (mm)	曲げ剛性 EI (kN・m <sup>2</sup> )
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・mm <sup>2</sup> )
既設杭	ステンレス SUS304	30	5	5.52E+07
補強杭		10	2	1.18E+06



a) 既設モデル b) 直杭補強 c) 斜杭補強

図3 模型杭概略図

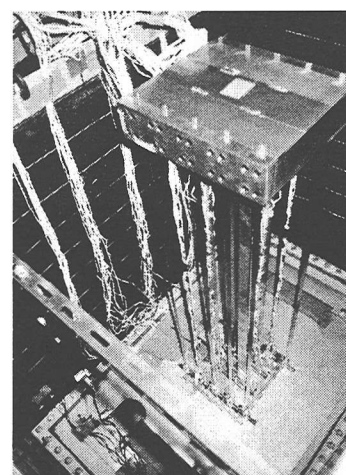
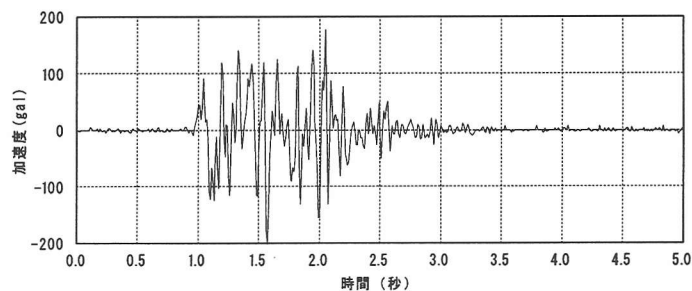


写真2 杭模型設置状況

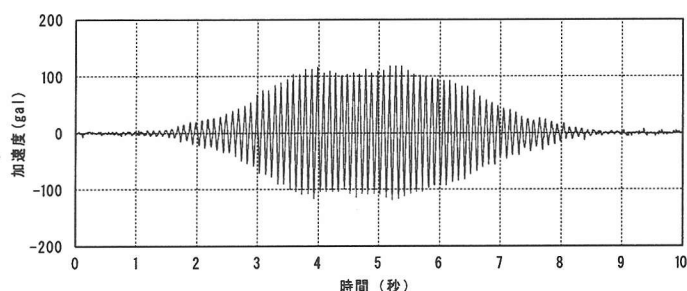
### (3) 実験方法

実験は、既設杭モデル、小口径の鋼管杭を直杭で増杭したモデルと斜め(15度)に増杭したモデルで検討を行った。また、各々のモデルに対し上部荷重の影響についても検討を行った。入力加速度は、最大加速度 100gal、周波数 10Hz の sin 波と最大加速度 200gal のホワイトノイズを2種類用いた。図4に入力波形を示す。

実験模型には、地盤中に加速度計(A9~A12)と間隙水圧計(P1~P4)を、模型杭に間隙水圧計(P5~P8)とひずみゲージを、せん断枠に加速度計(A2~A8)とレーザー変位計(L1~L7)および上部構造物に加速度計(A13~A15)とレーザー変位計(L8~L9)をそれぞれ設置して計測を行った。



a) ホワイトノイズ



b) sin波10Hz

図4 入力加速度波形

### 3. 実験結果

#### (1) 時刻歴応答

図5～図7に各モデルの時刻歴応答を示す。時刻歴応答は、左側に sin 波 10Hz の結果を右側にホワイトノイズの結果を示している。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段目は地盤部の過剰間隙水圧比を示している。

##### a) 入力加速度が sin 波の時

図より模型地盤は、加速度の増加に伴い、地表部より順次 (P1→P2→P3) 液状化し、最終的に上部層全体が液状化していることがわかる。上部層の地盤が液状化しているため、地盤上部の加速度応答 A9 は、P1 の過剰間隙水圧比が1を超えるあたりから急激に減少しほとんど応答しなくなっている。また下部層は、過剰間隙水圧比が0.4以下であることから液状化にいたっていないことが分かる。

既設杭モデルと直杭補強モデルのフーチング部における加速度応答 A13 は、P2 の過剰間隙水圧比が1になるまでは増加しているがそれ以後急激に減少している。これは、上部層が液状化したために加速度が伝達しづらくなったためである。また液状化後の加速度応答は、入力加速度に対して位相が 180° づれて応答している。斜杭補強モデルの加速度応答は、上部層の液状化状態に影響されずに漸次増加し、入力加速度と同位相で応答している。これは斜杭で補強された既設基礎が、既設基礎や直杭で補強された基礎に比べ、基礎全体の剛性が強いために、周辺地盤の影響を受けずに応答していることを示している。またフーチングの変位応答 L8 や杭頭部の曲げモーメントの応答も同様な傾向を示している。

##### b) 入力加速度がホワイトノイズの時

図より模型地盤は、加振と同時に P1 と P2 過剰間隙水圧が上昇し、上層部が瞬時に液状化状態になっていることがわかる。地盤上部の加速度応答は、上部層地盤の液状化に伴い、長周期化している。下部層の過剰間隙水圧比は、sin 波の時と同様に 0.4 以下であり、液状化にいたっていないことが分かる。

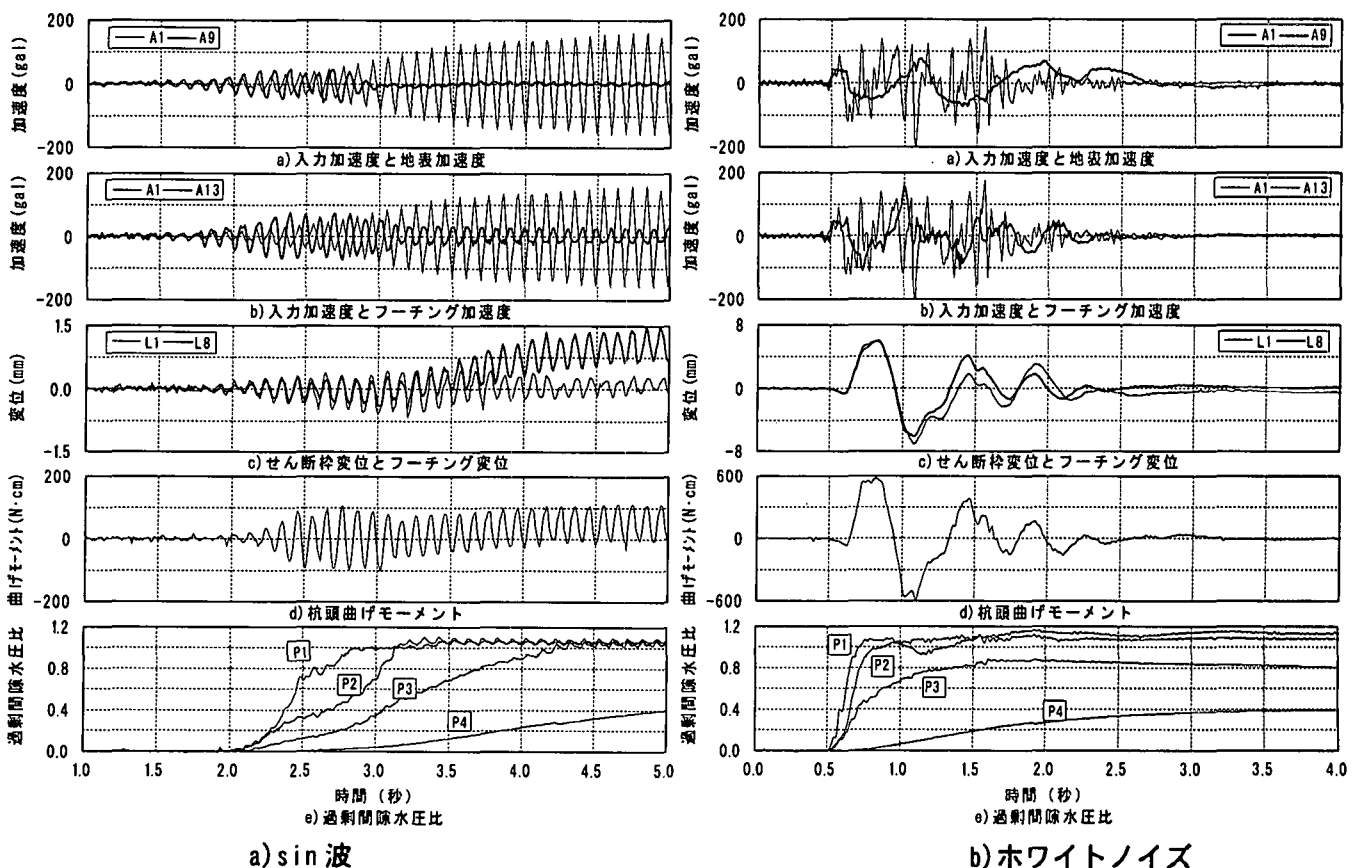


図5 既設杭モデルの時刻歴応答

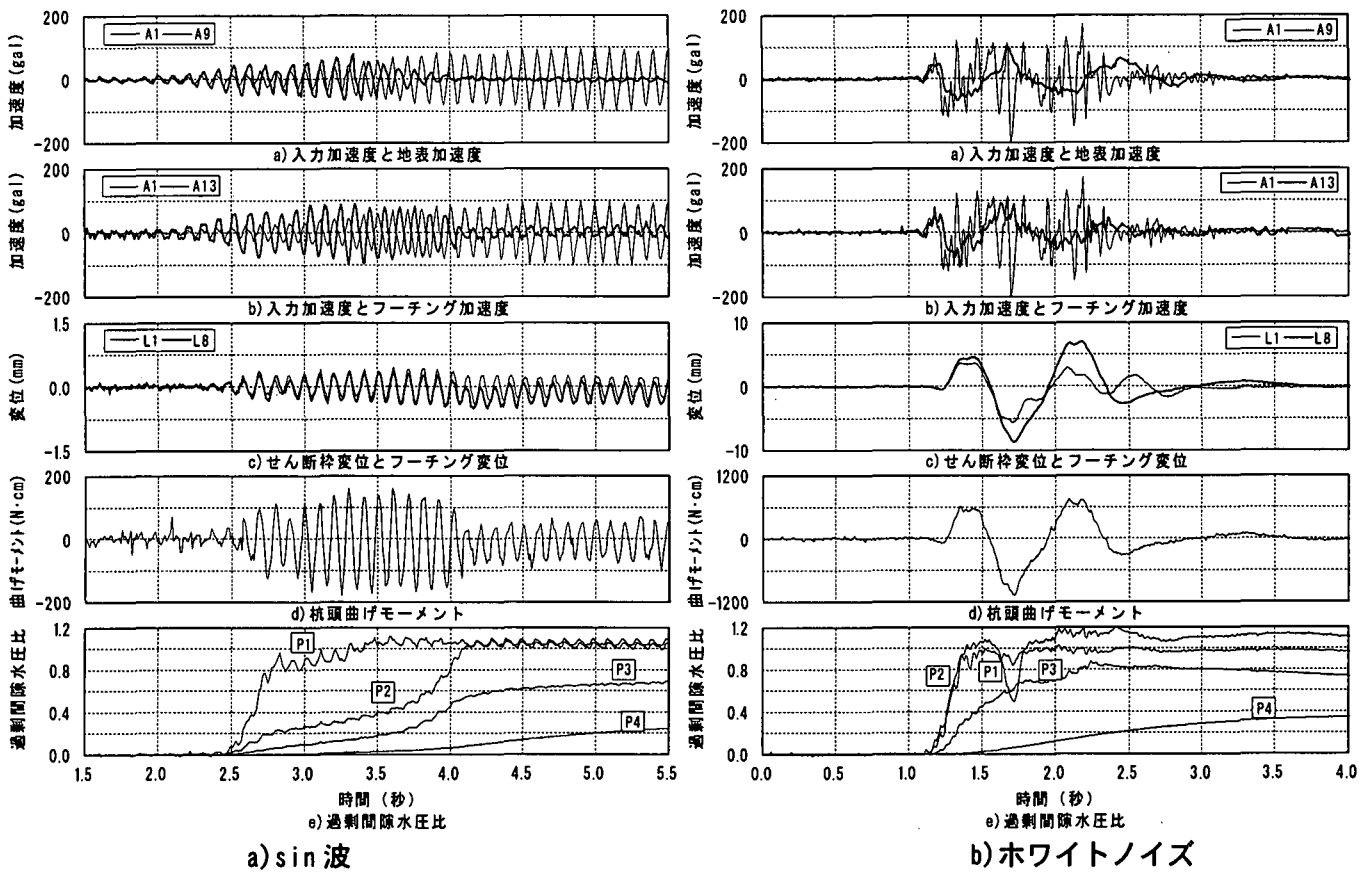


図6 直杭補強モデルの時刻歴応答

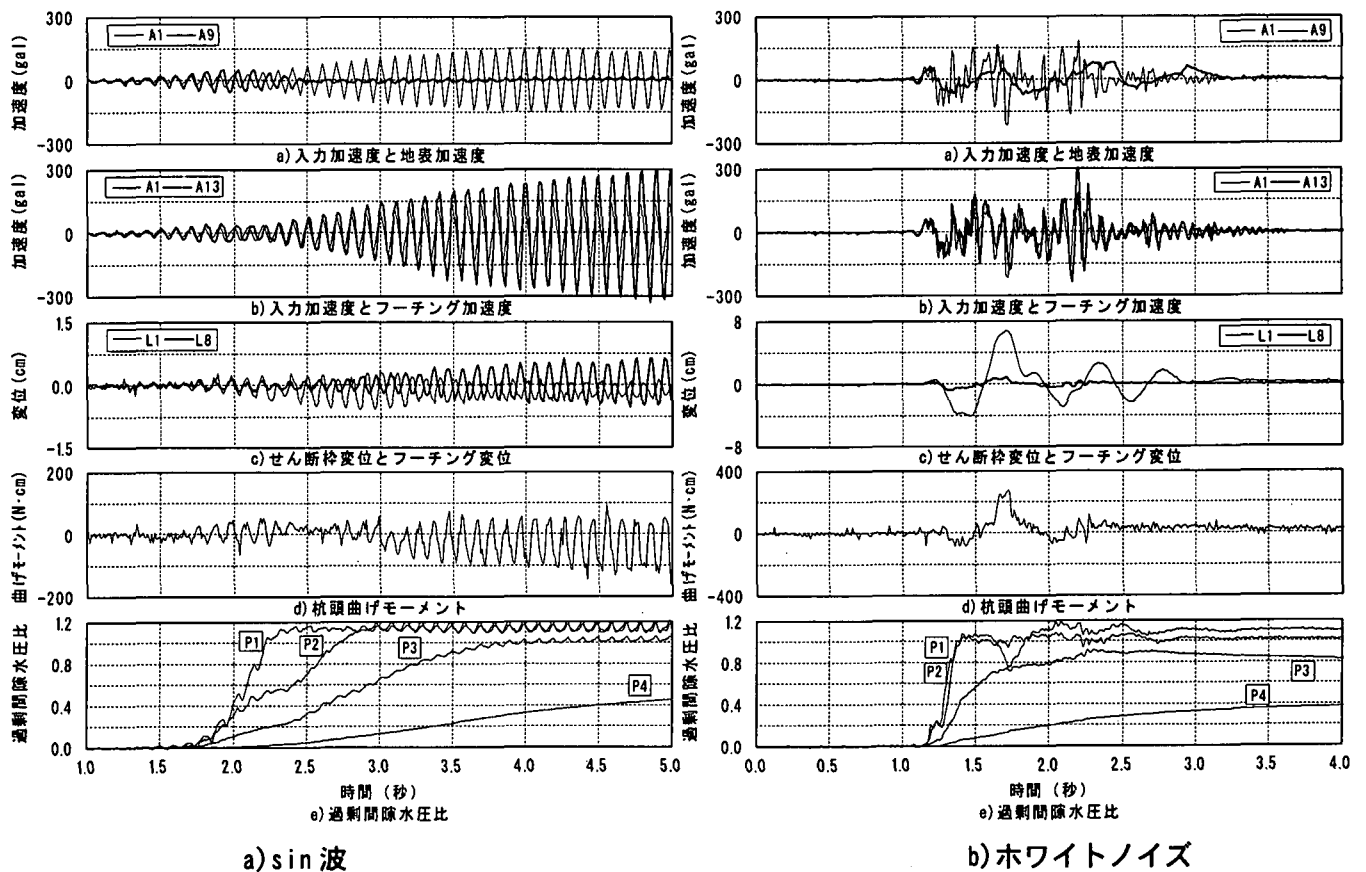


図7 斜杭補強モデルの時刻歴応答

既設杭モデルと直杭補強モデルのフーチング部における加速度応答 A13 は、液状化した地盤の影響を受け地盤と同様の応答を示した。フーチングの変位応答 L8 は、せん断枠変位 L1 と同等の応答を示した。このこ

とにより既設基礎モデルや直杭補強モデルが地盤と一緒に応答していることが分かった。

斜杭補強モデルのフーチング部における加速度応答は、液状化した地盤の影響を受けずに入力加速度と同等の応答を示した。フーチングの変位応答は、地盤の変位応答に比べかなり小さな応答値を示した。これは、液状化時に生じる水平方向の外力に対し、斜杭補強された基礎の抵抗力が既設杭や直杭補強された基礎に比べ大きいことを示している。

上記のことより、液状化地盤中における基礎の耐震補強方法として斜杭で補強することが最も有効であることが確認された。

## (2) 曲げモーメント分布

図8に既設杭の曲げモーメント分布を示す。図中の曲げモーメント分布は、既設杭頭部の曲げモーメント値が最大となる時刻の分布を示している。図中の○印は、既設モデルの結果を、◇印は直杭補強モデルの結果を、□印は斜杭補強モデルの結果を示している。

図で示されるように sin 波時の曲げモーメントは、既設モデルと直杭補強モデルにおいて、-30cm の位置で地中部の最大値を示した。それに対し斜杭補強モデルは、地中部の最大値は-60cm 近傍であった。図5、図6で示されるように、既設モデルと直杭補強モデルの杭頭曲げモーメントは、P2 (G.L.-35cm) の過剰間隙水圧比が1に達する近傍で最大値となり、フーチングに作用する加速度が最大となる時刻と一致している。それに対し斜杭補強モデルの杭頭曲げモーメントは、図7で示されるように、液状化地盤の影響を受けずに応答をし、入力加速度が最大となる時刻で最大値を示した。ちなみに最大となる時刻の地盤の状況は、P3の過剰間隙水圧も約0.9程度であり上部層全体が液状化している状態であった。このことから、sin波の実験結果は、フーチングに作用する慣性力が支配的な結果を示しているものと思われる。

またホワイトノイズの結果では、各モデルともに-60cm 近傍で地中の最大値を示した。ホワイトノイズの実験では、曲げモーメントが最大となる時刻と、地盤変形およびフーチングの変形が最大となる時刻がほぼ一致している。このことからホワイトノイズの実験結果は、フーチングの変形量が支配的な結果を示しているものと思われる。

また図より液状化地盤に対するマイクロパイルの補強は、慣性力が支配的な入力波形時には顕著な補強効果は得られないが、地盤の変形が支配的な入力波形時には斜杭が最も効果的な補強効果を有していることが確認された。

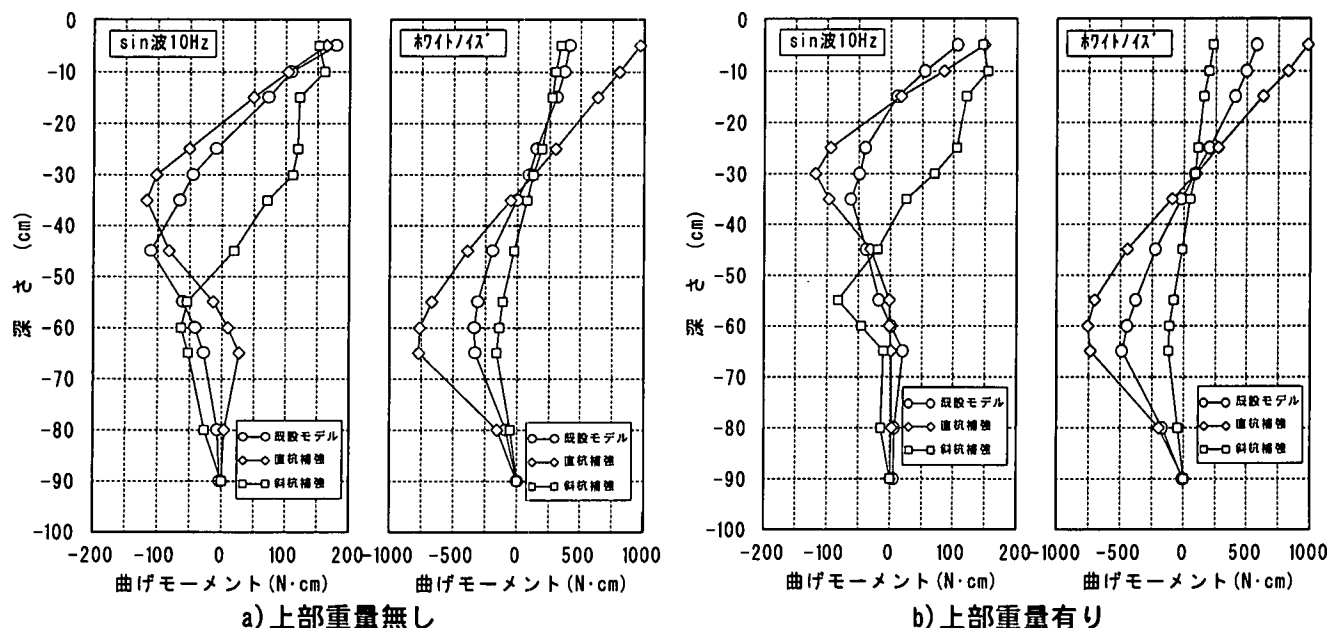


図8 既設杭に生じる曲げモーメント分布

### (3)耐震補強効果について

液状化地盤中の既設基礎に対するマイクロパイルによる補強効果を確認するために、地盤やフーチングの加速度応答と変位応答、杭頭曲げモーメントの比較を行った。

表3に杭頭曲げモーメントが最大となる時刻の地盤やフーチングの加速度と変位を示す。図8で示されるように Sin 波 10Hz の結果では、既設杭に生じる最大曲げモーメントはどのケースにおいてもほぼ同じ値を示した。フーチングの変位応答に違いがあるものの最大値がどのケースも表3に示されるように、1.0mm程度と非常に小さいために曲げモーメントも同程度になったものと考えられる。それに対してホワイトノイズの結果は、直杭補強モデルの値が一番大きく、次に既設モデル、斜杭補強モデルの順に小さくなっている。これは、斜杭補強モデルのフーチング変位量が、地盤に比べ 1/10 ほど小さかったためである。図9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。前節で示したように sin 波の実験において慣性力が支配的な実験結果を示しているため、図には sin 波のみの結果を示した。図で示されるように慣性力と変位との関係は、基礎の構造形式の違いにより相関があるよう見受けられる。そこで慣性力と変位の勾配を用いて、マイクロパイルの補強効果を算出すると、直杭補強モデルで 4.6 倍、斜杭補強モデルで 8.8 倍であった。図10に杭頭曲げモーメントと変位との関係を示す。図中に示す白色の印は sin 波の結果を、黒色の印はホワイトノイズの結果を示している。図で示されるように基礎の構造形式にかかわらずほぼ直線であらわされる。これは、液状化地盤中の基礎の耐震補強方法は、変形を抑止することがより有効的であることを意味している。上記の結果より、液状化地盤中における既設基礎の耐震補強方法として、液状化地盤の影響を受けない斜杭補強が有効的であると考えられる。

表3 最大値比較

モデル	入力波	地盤		フーチング		杭 曲げモーメント (N・cm)
		加速度 (gal)	変位 (mm)	加速度 (gal)	変位 (mm)	
既設	sin波	1.17	0.254	-135.27	-0.920	-177.83
	ホワイトノイズ	55.58	7.031	57.44	6.025	575.16
直杭補強	sin波	100.09	0.316	157.60	0.383	196.10
	ホワイトノイズ	69.96	6.125	88.46	8.659	976.13
斜杭補強	sin波	2.01	0.042	37.80	0.570	155.37
	ホワイトノイズ	21.05	6.743	146.85	0.702	218.35

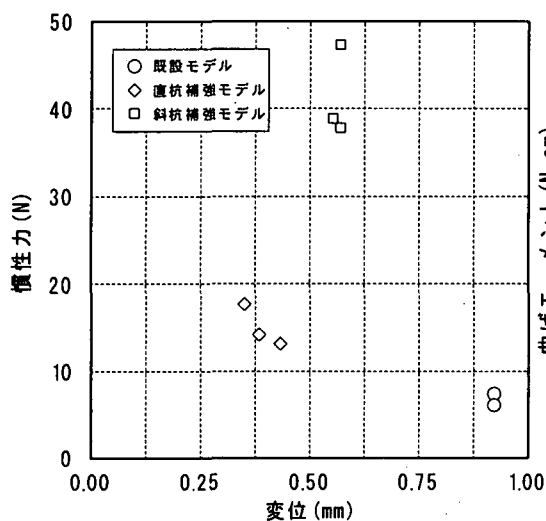


図9 慣性力と変位の関係

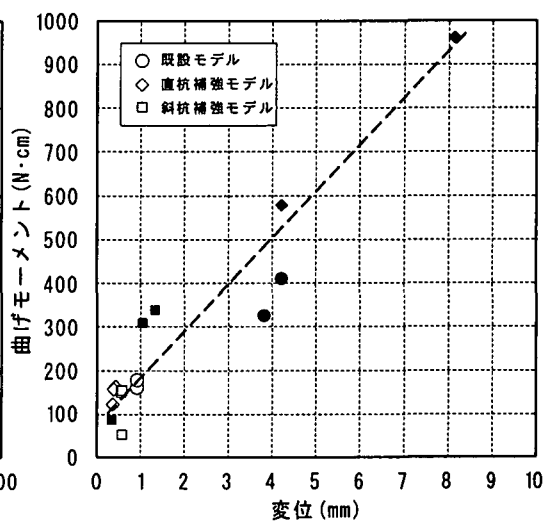


図10 曲げモーメントと変位の関係

#### 4. おわりに

本振動台実験により、定性的であるが以下の効果が確認された。

- ①小口径杭を直杭で補強された既設基礎の液状化時の応答は、既設基礎の応答と同じ挙動を示した。
- ②小口径杭を斜杭で補強された既設基礎の液状化時の応答は、液状化地盤の影響を受けずに応答していることが確認できた。さらに、液状化地盤における既設基礎の耐震補強方法としては、小口径杭を斜杭で用いることが有効的であることが確認された。

なお、本検討は、独立行政法人土木研究所共同研究「既設基礎の耐震補強技術の開発」の平成 13 年度における活動の一環として行われたものである。

#### 【参考文献】

- 1) 既設道路橋基礎の補強に関する参考資料：社団法人日本道路協会，平成 12 年 2 月
- 2) D.A. Bruce : Fundamental Test on The Performance of high Capacity Pin Piles, DFI Conference, 1993.
- 3) Ray Zelinski : Reprinted from Earthquake-Induced Movement and Seismic Remediation of Foundations and Abutments, ASCE Soil Dynamics Committee of the Geotechnical Engrg. , 1995.
- 4) 岸下崇裕, 齊藤悦郎, 山根隆志, 大谷義則, 三浦房紀, 谷藤正樹 : 高耐力マイクロパイルによる既設構造物基礎の耐震補強, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, pp.161-166, 1998.
- 5) 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) : 独立行政法人土木研究所, 平成 12 年 8 月
- 6) 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) : 独立行政法人土木研究所, 平成 13 年 12 月