

マイクロパイルにより補強された杭基礎の動的挙動について

岸下崇裕¹・斉藤悦郎²・相良昌男³・福井次郎⁴・大下武志⁵

¹正会員 工修 株式会社フジタ 技術センター 土木研究部 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)
E-mail:kisisita@fujita.co.jp

²正会員 工博 株式会社フジタ 土木本部 営業部 (〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷5-8-10蔵ビル)
E-mail:esaito@fujita.co.jp

³正会員 工修 株式会社フジタ 技術センター 土木研究部 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)
E-mail:sagara@fujita.co.jp

⁴正会員 工修 独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)
E-mail:fukui@pwri.go.jp

⁵正会員 独立行政法人土木研究所 技術推進本部 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)
E-mail:oshita@pwri.go.jp

マイクロパイルで補強された既設基礎の動的な挙動および補強効果を確認するために、振動台実験を実施した。用いたモデルは既設モデル、既設モデルにマイクロパイルを直杭で補強したモデルおよび斜杭で補強したモデルの3種類である。その結果、直杭補強の応答は、既設基礎と同じ動的挙動を示し、マイクロパイルという異種杭の補強により動的挙動に対して影響が無いことが確認できた。斜杭補強は、フーチングや上部構造物の応答を抑制し、既設杭の断面力が最も小さくなることが確認された。また非線形動的応答解析によって振動台実験をシミュレーションした結果、解析結果と実験結果が良く一致し、マイクロパイルによる補強効果を実験によってもまた数値シミュレーションによっても確認することができた。

Key Words : *micro pile, shaking table test, existing foundation retrofit, seismic response analysis, inclined pile*

1. はじめに

兵庫県南部地震以後の応急復旧とともに「震災対策緊急橋梁補強事業」として、首都高速道路等の橋脚の柱部を鉄板または炭素繊維で巻きたてる耐震補強工事がなされてきたが、基礎の耐震補強を行った事例は数少ない。しかしながら、国土事情、災害時における交通網の確保や構造物の再利用等を考えると基礎の耐震補強は必要になってくるものと思われる。

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¹⁾。この共同研究は、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、マイクロパイルを中心にその設計・施工法の確立をその目的としている。

一般にマイクロパイルは、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。アメリカでは、1989年のロマ・プリエタ地震以後、既設構造物等による制約下においても有効かつ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、マイクロパイルが採用されてきた^{2),3)}。

マイクロパイルは、既設構造物による制約条件下における施工性において他の工法に比べ優位になるものの、小口径であるために地震時における水平方向の補強効果があまり期待できないものと一般的に思われている。そこで筆者らは、マイクロパイルによる地震時の補強効果を非線形地震応答解析によって検討を行った⁴⁾。非線形地震応答解析の結果では、既設と同種のコンクリート杭で補強した結果に比べ、マイクロパイルにより補強された結果のほうが、既設基礎の断面力を抑える傾向にあった。特にマイク

ロパイルを斜に打設することにより、より効果的な結果を得ており、マイクロパイルの有効性を明らかにしている。

一方、木村ら^{5),6)}は、ジャケット式鋼管杭基礎の水平抵抗や動的挙動について遠心模型実験を行い、斜杭を適切に配置することにより、風や地震力などの水平外力に対して基礎の抵抗力を合理的に増強することができることを確認している。この結果より、基礎の耐震補強として斜杭を用いることは、合理的な補強効果が得られるものと思われる。

また田蔵ら^{7),8)}は、斜杭を有する基礎の地震観測結果や地震応答解析結果より、斜杭には直杭と同程度の軸ひずみが生じ、直杭以上の曲げひずみが発生することも指摘している。この結果より、コンクリート杭に比べ靱性能に優れた鋼製のマイクロパイルを斜杭補強として用いることは、コンクリート製杭の補強に比べより有効に働くことが期待できる。

木村らや田蔵らの研究は、同種同径杭により構成された杭基礎の動的挙動を示したものである。それに対し、マイクロパイルのように小口径の杭で補強され、異径杭が組合わされた基礎の動的挙動や補強効果に関する研究は前述の文献4)を除いてはほとんど無いのが実情である。

そこで本論文は、マイクロパイルで補強された基礎模型の振動台実験および非線形動的応答解析を実施し、マイクロパイルにより補強された基礎の動的挙動や補強効果を検討し、補強された基礎の耐震設計法確立のための基礎データを取りまとめたものである。

2. 実験の概要

実験は、1次元の大型振動台上に、長さ1.2m、幅0.8m、高さ1mで15段のフレームから構成されたせん断土槽を設置して行なった。実験に用いた地盤は、せん断土槽内に乾燥状態の遠州浜岡産の砂を空中落下法で投入する事により作成した。落下高さは、初期の相対密度が60%程度になるように1.5mとした。浜岡砂の物理的な性質を表-1に示す。

杭模型は、既設杭はφ600mmのPC杭を、補強杭はφ177.8cmのマイクロパイルをモデル化し、実物大の1/20スケールで作成した。模型杭の諸元を表-2に示す。なお、本実験は、補強効果をより顕著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、相似則より求められた値よりさらに1/10とした。フーチング模型は、杭模型と同種のステンレスで製作した。杭とフーチング結合は、杭模型を分割

表-1 浜岡砂の物性値

土粒子の密度 ρ_s	N/mm ³	0.269
自然含水比 ω_0	%	0.20
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(Dr45%)	cm/s	1.95×10^{-2}
砂の最大密度 $\rho_{c,max}$	N/mm ³	0.172
砂の最小密度 $\rho_{c,min}$	N/mm ³	0.143
最小間隙比 e_{min}		0.564
最大間隙比 e_{max}		0.881

表-2 模型杭の諸元

杭模型	材質	径 (mm)	厚さ (mm)	曲げ剛性 $EI(N \cdot mm^2)$
既設杭	ステンレス SUS304	30	5	5.52×10^7
補強杭		10	2	1.18×10^5

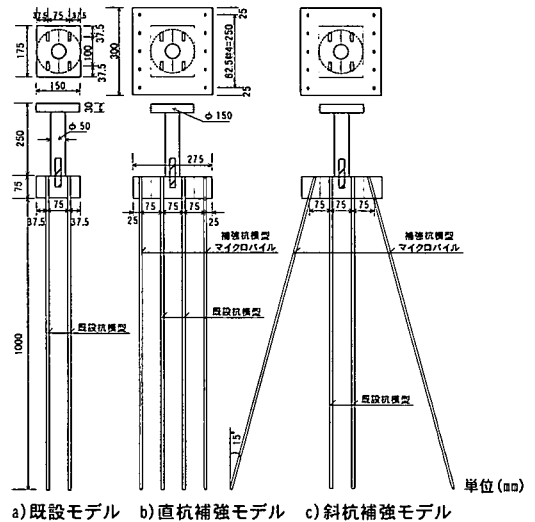


図-1 模型杭の概略図

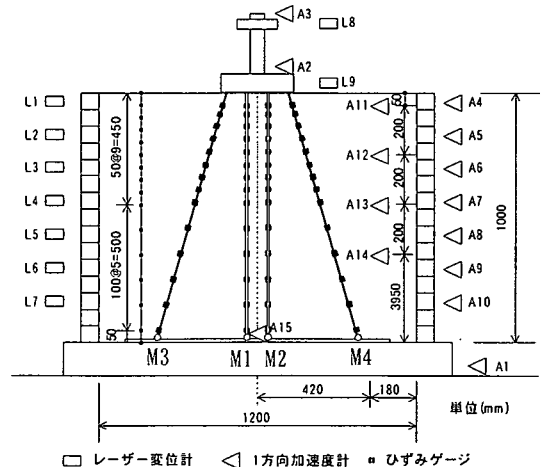


図-2 模型実験概略図

したフーチング模型ではさんで行った。また杭先端は、ピン結合とした。

本実験では、既設杭模型を4本とした既設モデル、既設モデルの加振方向前後に5本ずつのマイクロパイル模型を配置した直杭補強モデルおよびマイクロパイルを15度傾けた斜杭補強モデルの3タイプの模型を用いて検討を行った。図-1に模型杭の概略図を示す。上部構造物は、上部重量無しと上部重量有りの2タイプの模型を用い、その応答の違いが補強効果へ与える影響についても検討を行った。図-1に示したハッチング部は、上部重量を表し、その重量は9kgであった。

図-2に模型実験の概略図を示す。模型地盤部の加速度応答は、0.2mmの鋼製板に加速度計(A11~A14)を取り付けて計測を行った。杭基礎模型の応答は、フーチングおよび模型上端には変位計(L8, L9)と加速度計(A2, A3)を、既設杭模型およびマイクロパイル模型の断面力は、ひずみゲージを各杭14断面貼り付けて計測を行った。また、せん断土槽のフレームには、加速度計(A4~A10)と変位計(L1~L7)を設置した。

入力波は、模型地盤の固有周期が0.104秒に相当するので、ほぼその共振振動数に相当する周波数10Hzの正弦波とした。図-3に入力加速度波形を示す。入力最大加速度は、100gal、200galおよび300galの3種類とした。図で示されるように入力加速度の増加勾配は一定とした。

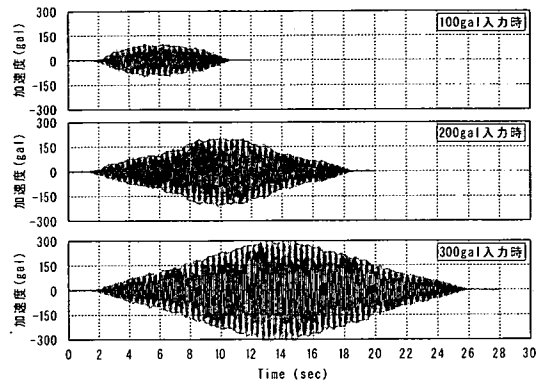


図-3 入力加速度波形

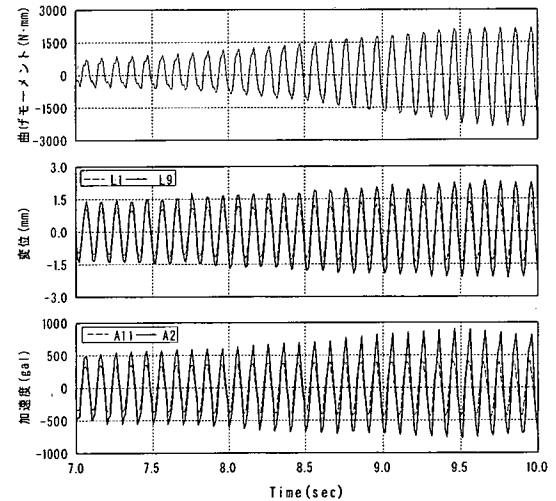


図-4 既設モデルの応答
(上部重量有り, 200gal入力時)

3. 実験結果

(1) 時刻歴応答

a) 地盤および模型杭の応答

既設モデルの時刻歴応答を図-4および図-5に示す。図中の上段は、既設模型杭頭部の曲げモーメント、中段はせん断枠(L1)とフーチング(L9)の水平変位応答を下段は地表部(A11)とフーチング(A2)の加速度応答を示している。図-4は、最大入力加速度が200gal時の結果を、図-5は最大入力加速度が300gal時の結果を示している。図-4で示されるように200gal入力時の応答は、曲げモーメント応答、変位応答および加速度応答ともに入力加速度の増加に伴い、漸次増加している。それに対して図-5で示されるように300gal入力時には、変位や杭頭部の曲げモーメントは、11秒以降その中心軸がずれている。加振後の水平変位は、フーチング(L9)で-1.05mm、構造物上部で-8.42mmと、構造物模型の上下で7.37mmの変位差が生じていた。加振後の既設模型は、

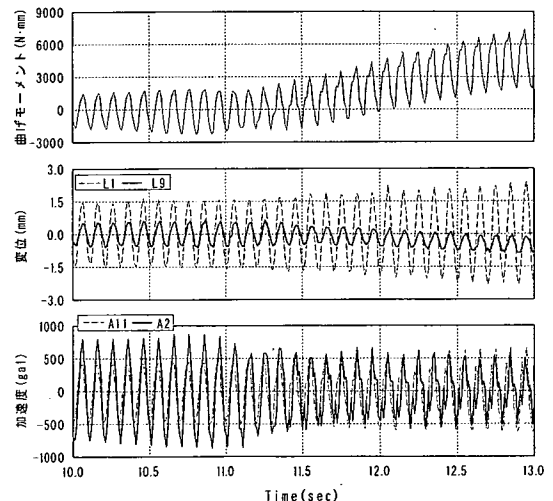


図-5 既設モデルの応答
(上部重量有り, 300gal入力時)

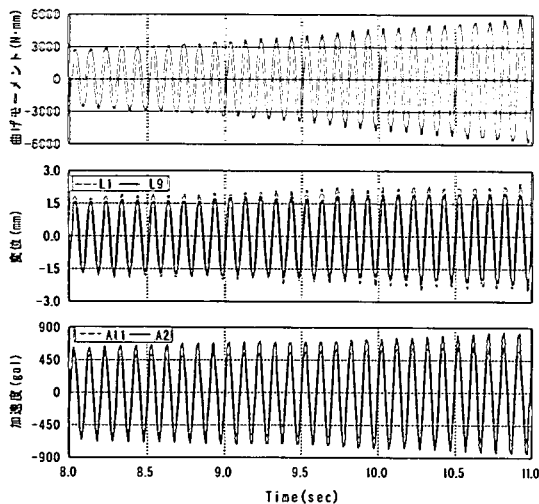


図-6 直杭補強モデルの応答
(上部重量有り, 300gal入力時)

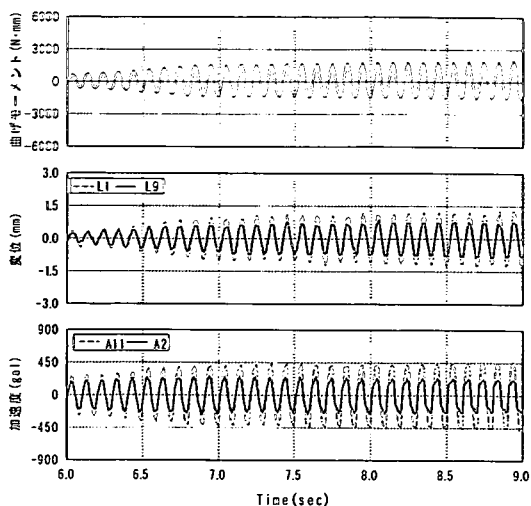


図-8 斜杭補強モデルの応答
(上部重量有り, 300gal入力時, 6秒~9秒)

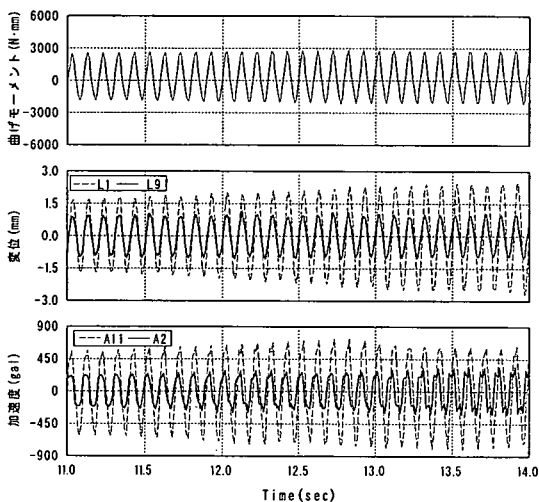


図-7 斜杭補強モデルの応答
(上部重量有り, 300gal入力時, 11秒~14秒)

1.69度傾いた状態になっていた。また砂を搬出した後確認した結果、杭模型は曲がっていなかったが、フーチングより杭模型が抜け出していた。これは、上部重量の慣性力により生じる構造物基部の曲げモーメントに対し、杭頭部反力が抵抗できなかったために杭がフーチングから抜け出したものと考えられる。

図-6に300gal入力時の直杭補強モデルの応答を示す。直杭補強モデルの応答は、杭の曲げモーメント、変位応答および加速度応答ともに入力加速度の増加に伴い、漸次増加している。フーチングの変位応答(L9)や加速度応答(A2)は、周辺地盤とほぼ同じ応答(それぞれL1, A11)を示している。マイクロパイルで補強された模型基礎は、300gal入力時においても

表-3 最大水平変位量 (300gal入力時)

	重量	水平変位(mm)		
		せん断枠 L1	フーチング L9	上端 L8
既設モデル	無し	2.74	1.95	2.10
直杭補強モデル		2.77	2.53	2.54
斜杭補強モデル		2.78	1.40	0.53
既設モデル	有り	2.74	1.35	9.64
直杭補強モデル		2.72	2.53	3.01
斜杭補強モデル		2.77	1.18	0.56

傾くようなこともなく応答していることが確認された。

図-7に300gal入力時の斜杭補強モデルの応答を示す。斜杭補強モデルの応答は、杭の曲げモーメント、フーチングの変位応答(L9)および加速度応答(A2)ともに入力加速度が増加しているにもかかわらずほぼ一定の値で応答している。せん断枠の変位応答(L1)や地盤の加速度応答(A11)は、他の実験ケースと同様に入力加速度の増加に対して漸次増加している。図-8に入力加速度が150galまでの応答を示す。図で示されるように、ほぼ6.5秒までは、周辺地盤と同じ応答値を示しているが、それ以降の14秒までの地盤変位の増加は1.9mmであるのに対し、フーチング変位の増加は0.6mmと少なくなっている。これは、既設基礎に対して斜杭補強することによって、地盤変位や慣性力に対する基礎全体の抵抗力が増加していることを意味している。

表-3に入力加速度が300gal時の最大水平変位を示す。表中には、せん断枠上端(L1)、フーチング(L9)および構造物上端(L8)の値を示している。表に示されるように、せん断枠上端(L1)の変位は、どの実験

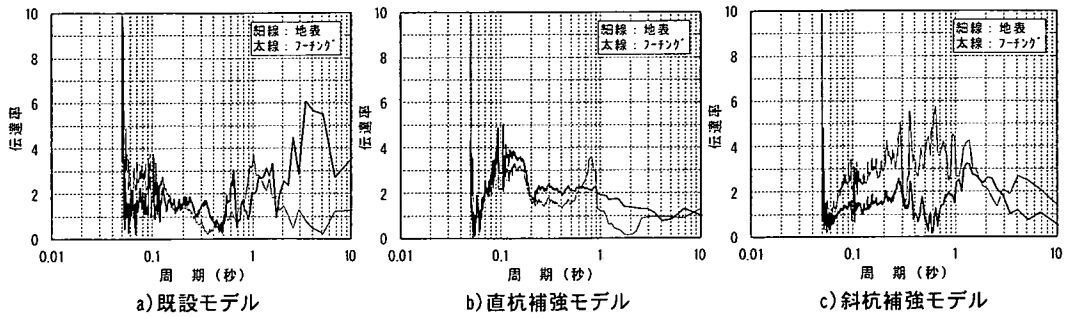


図-9 基盤に対する地表およびフーチング部の周波数伝達率 (上部重量有り, 300gal入力時)

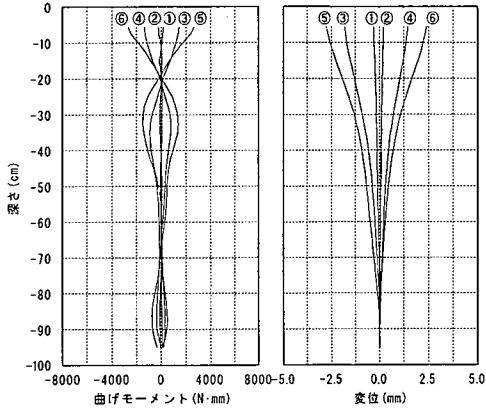


図-10 既設杭の曲げモーメント分布と変位分布 (既設モデル, 上部重量無し, 300gal入力時)

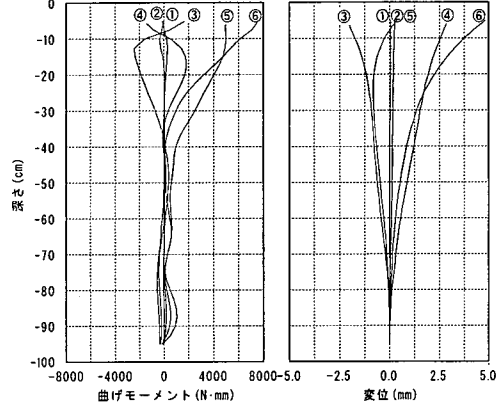


図-11 既設杭の曲げモーメント分布と変位分布 (既設モデル, 上部重量有り, 300gal入力時)

結果においても2.7mm程度であった。このことより加振時の地盤の変形量が同程度であったことが分かる。既設モデルや直杭補強モデルのフーチング(L9)と構造物上部(L8)の最大水平変位は、上部重量無しの場合にはほぼ同じ値を示し、上部重量ありの場合は構造物上部の方が大きな値を示した。このことより、既設モデルや直杭補強モデルの上部構造物は、上部重量無しではサイドスウェーの状態に、上部重量有りではロッキング状態になっていることが確認できた。それに対し、斜杭補強モデルは、構造物上部の値がフーチングの値より小さくなっており、既設モデルや直杭補強モデルと比べ小さな値を示した。

図-9に底版(A15)に対する地表(A11)およびフーチング部(A2)の伝達率を対比したものを示す。図で示されるように、既設モデルと直杭補強モデルの伝達率は、地表部とフーチング部でほぼ同じ値を示した。それに対し、斜杭補強モデルは、フーチング部が地表部に対し、ほぼ1/2~1/4になっていることが分かる。このことから斜杭補強には、減震効果があることが確認された。これは、田蔵ら^{7),8)}による実橋梁の地震観測により得られた結果と同様である。

b) 既設杭の挙動

図-10から図-13に既設杭の曲げモーメント分布と

変形を示す。図中の曲げモーメント分布は、実験より得られた曲げモーメントを基に3次のスプライン関数で補間したものである。杭の変形量は、補間された曲げモーメントを2回積分することにより求めた。境界条件として杭先端はせん断土槽底面に固定していることから、杭先端の変形量は0とした。また、図中の凡例①は、底版加速度(A17)が100gal時の値を、②は-100gal時の値を、③は200gal時の値を、④は-200gal時の値を、⑤は300gal時の値を、⑥は-300gal時の値を示している。

図-10に既設モデルで上部重量無しの結果を示す。図で示されるように既設モデルの曲げモーメント分布は、入力加速度の増加に伴い杭頭部や地中部(-30cm)の曲げモーメントが増加している。既設モデルの杭変形は、入力加速度の増加に伴い杭頭部の変形が増加している。

図-11に既設モデルで上部重量有りの結果を示す。図で示されるように既設モデルの曲げモーメント分布は、入力加速度が200galまでは左右対称に増加しているが、300gal時ではプラス側に分布している。杭の変形は、曲げモーメントと同様に200galまでは左右対称に増加しているが、300gal時⑥では減少している。これは、a)で記述したように杭模型が傾い

たためである。

図-12に上部重量がある場合の直杭補強モデルの結果を示す。図で示されるように直杭補強モデルの曲げモーメント分布は、入力加速度の増加に伴い杭頭部や地中部(-30cm)の曲げモーメントが増加する傾向にある。杭の変形は、入力加速度の増加に伴い杭頭部の変形が増加する傾向にある。マイクロパイルを直杭で補強した既設杭の曲げモーメント分布や変形は、既設モデルの曲げモーメント分布や変形と同様な傾向を示した。さらに、既設モデルが傾いた入力加速度に対して直杭補強モデルの曲げモーメントや変形が左右対称に応答していることから、マイクロパイルによる補強効果はあるものと判断される。

図-13に上部重量がある場合の斜杭補強モデルの結果を示す。示されるように斜杭補強モデルの曲げモーメント分布は、既設モデルや直杭補強モデルの分布と異なり、-30cmより上で曲げモーメントが発生し、-10cmで最大となり杭頭部に向かい減少している。杭の変形も同様に、既設モデルや直杭補強モデルの変形が杭頭部に向かい増大しているのに対し、-20cm近傍をピークに杭頭部に向かい減少している。既設モデルや直杭補強モデルは、上部構造物の慣性力により橋脚基部にモーメントが生じ、フーチングが慣性力の作用方向へ倒れこむ応答を示す。これらのことが良く分かるように変形の概略図を図-14に示す。特に本実験では、加振に伴い地盤がせん断変形することにより、模型地盤が沈下し模型杭が地盤面より突出するため、この傾向が顕著にでている。それに対し斜杭補強モデルは、慣性力作用方向の前方にある斜杭が水平変形することにより立ち上がるため、フーチングを持ち上げる外力が作用する。そのため、図で示されるように既設杭の変形は、地中部が最大となり、杭頭部に近づくにつれ減少する分布を示すものと考えられる。

(2) 補強効果について

a) 最大曲げモーメント分布

マイクロパイルによる補強効果を確認するために既設杭に生じる曲げモーメントにより比較を行った。図-15～図-17に既設基礎の杭頭部に生じる曲げモーメントが最大となった時刻における曲げモーメントの深度分布の比較図を示す。左側の図は上部重量がない場合の実験結果を、右側の図は上部重量ありの実験結果を示している。また表-4には、既設杭における杭頭部と地中部の最大値および、既設モデルと補強モデルの比較や上部重量が有る無しの影響について比較した結果を示している。

上部重量無しの実験結果では、図や表に示される

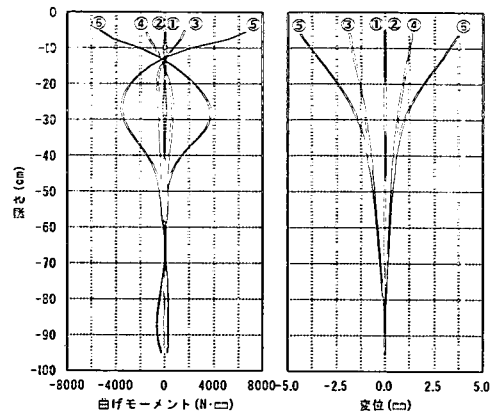


図-12 既設杭の曲げモーメント分布と変位分布 (直杭補強モデル, 上部重量有り, 300gal入力時)

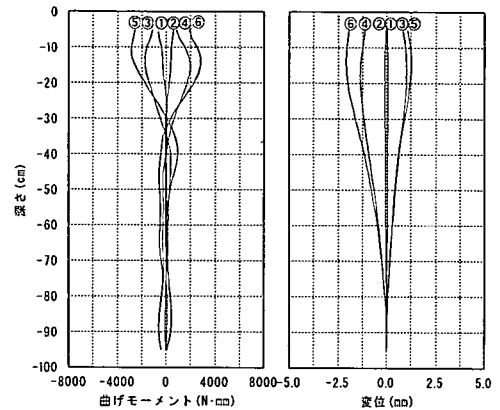
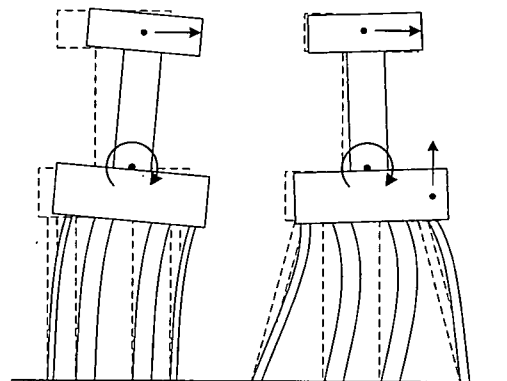


図-13 既設杭の曲げモーメント分布と変位分布 (斜杭補強モデル, 上部重量有り, 300gal入力時)



a) 直杭補強モデル b) 斜杭補強モデル

図-14 補強された基礎の変形概略図

ように直杭補強モデルの結果が杭頭部および地中部において最も大きな値を示し、次に斜杭補強モデル、既設モデルの順であった。本実験における直杭補強モデルと斜杭補強モデルのフーチングは、既設モデ

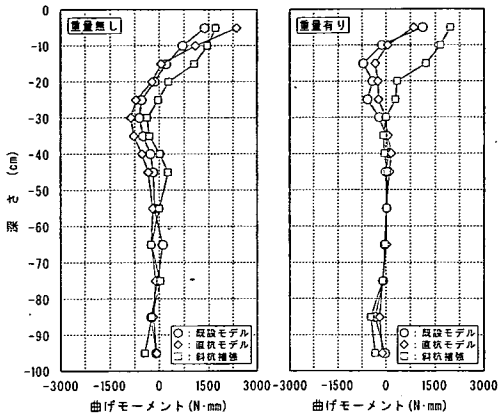


図-15 杭頭部最大時刻の曲げモーメント分布
(100gal入力時)

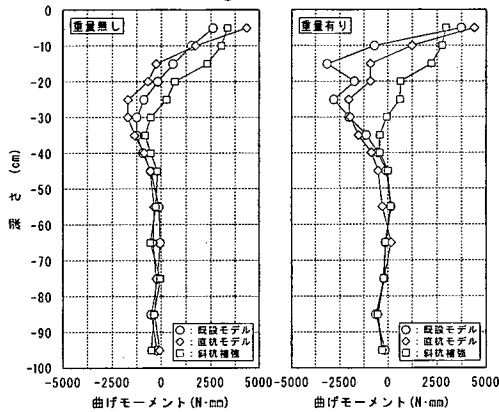


図-16 杭頭部最大時刻の曲げモーメント分布
(200gal入力時)

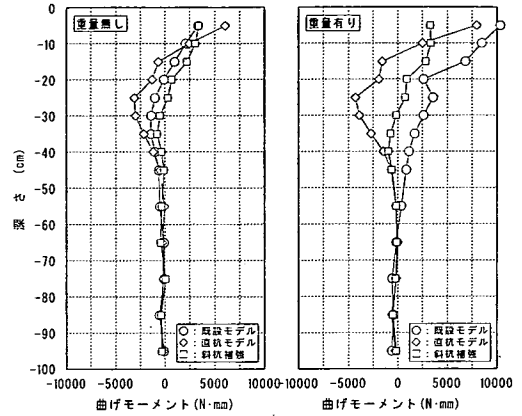


図-17 杭頭部最大時刻の曲げモーメント分布
(300gal入力時)

表-4 杭頭部および地中部の最

モデル	重量	杭頭部曲げモーメント(N·mm)			地中部曲げモーメント(N·mm)		
		100gal	200gal	300gal	100gal	200gal	300gal
既設モデル	無し	1360	2611	3324	-616	-1447	-1447
直杭補強モデル		2347	4338	6044	-872	-1708	-3125
斜杭補強モデル		1702	3342	3357	-440	-810	-777
既設モデル	有り	1116	3744	10300	-721	-3151	-625
直杭補強モデル		839	4407	7923	-348	-2026	-4295
斜杭補強モデル		1954	2950	3342	-468	-553	-961
補強モデル/既設モデル							
		杭頭部			地中部		
直杭補強モデル	無し	1.73	1.66	1.82	1.41	1.18	2.16
斜杭補強モデル		1.25	1.28	1.01	0.71	0.56	0.54
直杭補強モデル	有り	0.75	1.18	0.77	0.48	0.64	6.87
斜杭補強モデル		1.75	0.79	0.32	0.65	0.18	1.54
重量有りの結果/重量無しの結果							
		杭頭部			地中部		
既設モデル		0.82	1.43	3.10	1.17	2.18	0.43
直杭補強モデル		0.36	1.02	1.31	0.40	1.19	1.37
斜杭補強モデル		1.15	0.88	1.00	1.06	0.68	1.24

ルのフーチングに比べ重量比で2.8倍大きくなっている。そのために上部構造物に同じ加速度が作用する場合には、既設モデルに比べ直杭補強モデルや斜杭補強モデルには2.8倍の慣性力が作用することになる。それに対し、直杭補強モデルでは既設モデルに対し杭頭部で約1.7倍、地中部で約1.6倍程度であった。また斜杭補強モデルでは、既設モデルに対し杭頭部で約1.2倍、地中部で約0.6倍程度であった。直杭補強モデルや斜杭補強モデルの結果は、フーチング拡大に伴う慣性力増加2.8倍より小さくなくなり、慣性力増加に伴うマイクロパイルの補強効果が確認された。このことから、地盤変形が卓越する入力動に対し、増加慣性力に対し適正な本数マイクロパイルを補強することにより、補強効果は得られるものと考えられる。

上部重量有りの曲げモーメントは、重量無しの結果に比べ杭頭部および地中部において増加する傾向にある。上部重量の慣性力により橋脚基部に曲げモーメントが付加されたためである。重量有りの実

験結果では、既設モデルと直杭補強モデルの結果が比較的良く似た傾向を示し、入力加速度の増大に対して応答の増大の割合が大きい。一方斜杭補強モデルの曲げモーメントは、入力増大に対して最大値の増大の割合は大きくない。表-4の下段に重量ありの結果を重量無しの結果で割った値を示す。表で示されるように、杭頭部において既設モデルの値が300gal入力時では3.0倍以上あるのに対し、直杭補強モデルでは1.3倍程度、斜杭補強モデルでは1.1倍程度と上部重量による影響が補強することにより小さくなる結果となった。

なお、本振動台実験の結果は、地盤変形が卓越する入力動に対するものである。入力動の違いによる補強効果については、後述する非線形動的解析により検討した。

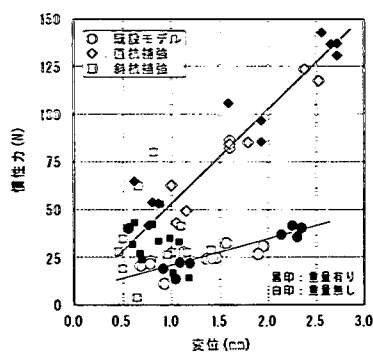


図-18 慣性力と変位との関係

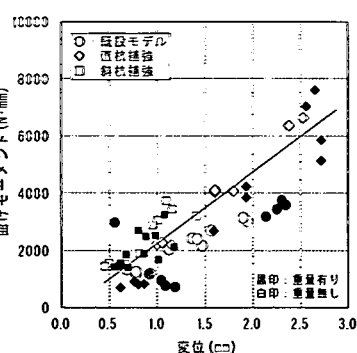


図-19 曲げモーメントと変位との関係

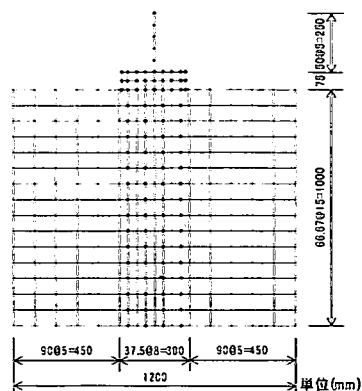


図-20 解析に用いたメッシュ図

表-5 解析に用いた定数

地盤部解析定数			
単位体積重量	ρ (kN/m ³)		15.7
せん断波速度	V_s (m/s)		170
ポアソン比	λ		0.490
初期せん断剛性	G_0 (kPa)		4700
修正R-0 パラメータ	基準ひずみ	$\gamma_{0.5}$	1.00×10^{-4}
	最大減衰定数	h_{max} (%)	25
既設杭解析定数(1本当り)			
単位体積重量	ρ (kN/m ³)		20.0
ポアソン比	λ		0.167
断面積	A (m ²)		1.50×10^{-4}
断面2次モーメント	I (m ⁴)		3.13×10^{-10}
弾性係数	E (kN/m ²)		2.00×10^8
マイクロパイル解析定数(1本当り)			
単位体積重量	ρ (kN/m ³)		20.0
ポアソン比	λ		0.167
断面積	A (m ²)		2.00×10^{-5}
断面2次モーメント	I (m ⁴)		6.67×10^{-12}
弾性係数	E (kN/m ²)		2.00×10^8

b) 相関関係について

上項に示されるように既設杭の曲げモーメントに対してマイクロパイルによる補強効果がある程度確認することが出来た。そこで、さらにフーチングに作用する慣性力、変位や杭頭曲げモーメントを用いて補強効果について検討を行った。

図-18にフーチングに作用する水平方向の慣性力とフーチングの水平変位の関係を示す。ここで示す慣性力は、フーチングの質量に作用する最大応答加速度を掛けた値とした。図中に示しているデータは、フーチング加速度が最大となる時刻、フーチング変位が最大となる時刻および杭頭曲げモーメントが最大となる時刻のデータをプロットしたものである。また図中に示す白印は重量無しの結果を、黒印は重量ありの結果を示している。

図に示されるようにフーチングに作用する慣性力と変位との関係は、既設モデルと補強モデル（直杭補強モデル、斜杭補強モデル）に分けられる。特にフーチングの変位が1.0mmより大きくなると、その傾向が顕著に現れている。この勾配の違いは、同じ慣性力に対しては補強された基礎の変形の方が、既設基礎に比べ小さくなることを示している。

図-19に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、杭頭に生じる曲げモーメントは、フーチング変位とほぼ比例関係にあることが分かる。このことより、杭の耐震補強では、補強後の基礎の変形量を減らせない限り、既設杭に対する補強効果が顕著に表れないものと判断される。

上述の図-18、19に示す実験結果より、既設杭の耐震補強には、斜杭による補強が有効であることが確認された。この結果は、文献5)や文献6)で示されている斜杭を有する群杭基礎の水平抵抗力と同様の結果である。

4. 動的応答解析による検討

杭基礎構造物の動的応答解析には、広く一般に有限要素法が使用されている。本章では二次元有限要素法による動的応答解析を行い、振動台実験結果と解析結果との対比からその有効性について検討した。

(1) 解析概要

解析は、地盤と構造物を連成解析することの出来る解析コード“DINAS”⁹⁾を用いて行った。地盤は、平面歪み要素を用い、非線形性は龍岡・福島¹⁰⁾による修正R-0モデルとした。図-20に解析に用いたメッシュ図を、表-5に解析に用いた定数を示す。表中の初期せん断剛性 G_0 は、振動実験前にせん断土槽底面を打撃して得られたせん断波速度より算出したものである。既設杭やマイクロパイルは、実験において

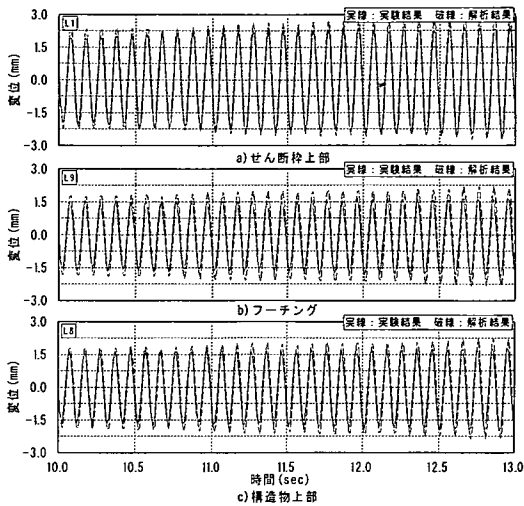


図-21 変位応答の比較
(既設モデル，上部重量無し，300gal入力)

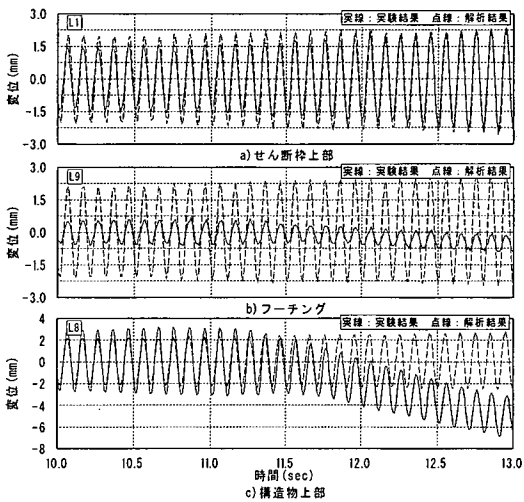


図-22 変位応答の比較
(既設モデル，上部重量有り，300gal入力)

破損していなかったことから線形の梁要素とし、杭と地盤は節点を共有させた。フーチング部は、線形の平面ひずみ要素を用い、フーチング部と地盤部の節点は共有させなかった。地盤部の境界条件は、底面境界は固定とし、側方境界は繰り返し境界 (MPC境界) とした。解析に用いた入力加速度は、土槽底面 (A15) で計測された値を用いた。

地盤・杭・構造物系は、三次元モデルで表現し解析することが理想的である。しかし、一般に三次元解析に要する時間や計算要領は非常に膨大となり、実務では二次元解析モデルが多く使われている。二次元有限要素法により三次元的な挙動を十分に表現するには、地盤の奥行き方向幅をどのように定めるかが問題となる。この奥行き幅の問題に関しては、

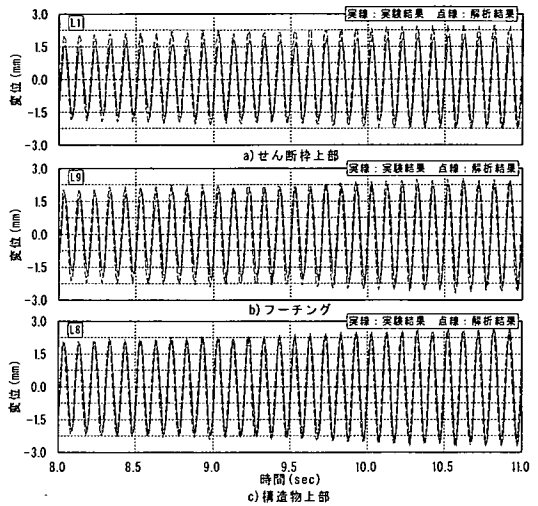


図-23 変位応答の比較
(直杭補強モデル，上部重量有り，300gal入力)

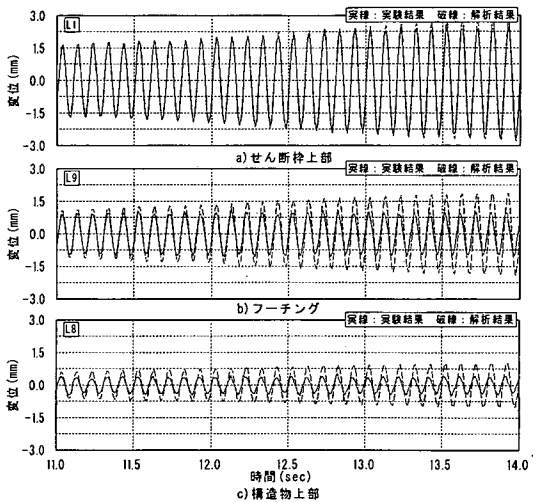


図-24 変位応答の比較
(斜杭補強モデル，上部重量有り，300gal入力)

岸下・三浦¹¹⁾や淵本・田蔵¹²⁾らの研究により、定性的ではあるがフーチング幅の2倍とすることにより三次元解析結果を模擬できることが確認されている。よって、本解析においても地盤の奥行き幅は、フーチング幅の2倍として検討を行った。

(2) 試験結果と解析結果の比較

a) 変位応答

図-21から図-24に、実験結果と解析結果の変位応答の比較を示す。図の上段は、せん断棒の上端部 (L1) の水平変位を、中段はフーチング (L9) の水平変位を、下段は構造物上端 (L8) の水平変位を示している。また、図中の実線は実験結果を破線は解析結果を示している。図-21に既設モデルで上部重量が無

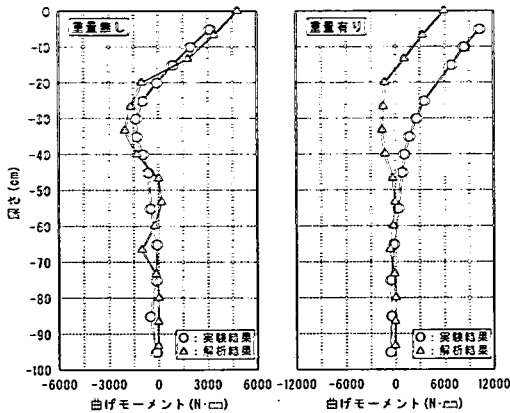


図-25 既設杭の解析結果と実験結果との比較
(既設モデル, 300gal入力)

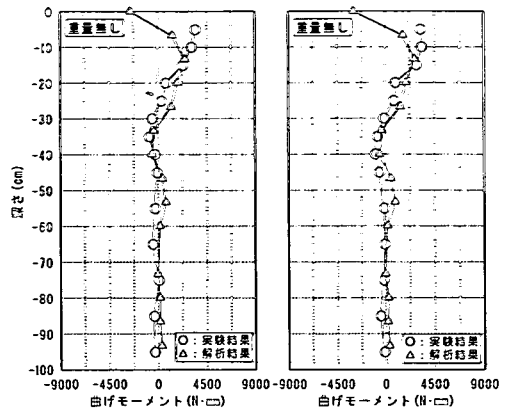


図-27 既設杭の解析結果と実験結果との比較
(斜杭補強モデル, 300gal)

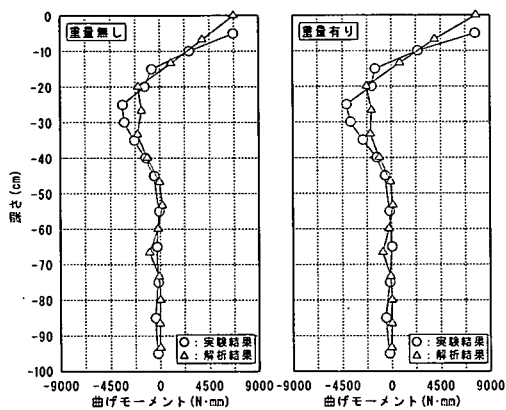


図-26 既設杭の解析結果と実験結果との比較
(直杭補強モデル, 300gal入力)

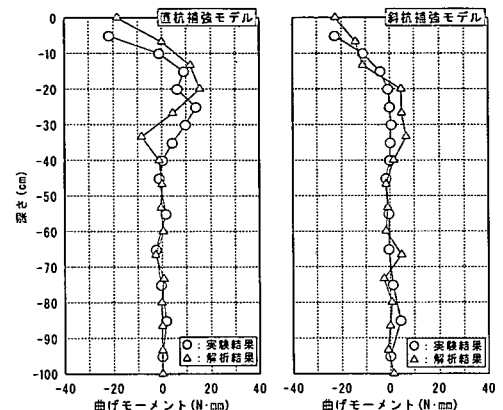


図-28 マイクロパイルの解析結果と実験結果との比較
(上部重量有り, 300gal)

い場合の比較結果を示す。図で示されるように上部重量がない既設モデルの解析結果は、せん断砕の上部、フーチングおよび構造物上部で実験結果とよく一致している。

図-22に既設モデルで上部重量が有る場合の比較結果を示す。図で示されるように上部重量がある場合の既設モデルの解析結果は、せん断砕上部では良く一致している。それに対してフーチング位置では、解析結果のほうが大きな値を示した。上部重量を有する既設モデルの実験結果は、3.1節で示したように加振時にフーチングから杭模型が抜け出し、杭基礎模型全体が大きく傾いた。そのため、構造物上部の応答は、実験結果と解析結果で違いが生じている。

図-23に直杭補強モデルで上部重量有る場合の比較結果を示す。図で示されるように解析結果は、せん断砕の上部、フーチングおよび構造物上部で実験結果とよく一致している。

図-24に斜杭補強モデルで上部重量有る場合の比較結果を示す。図で示されるよう解析結果は、せん

断砕上部では実験結果とよく一致している。それに対してフーチングや構造物上部で、解析結果が実験結果に比べ大きな応答を示した。解析結果におけるフーチングや構造物の変位応答は、地盤変位に追従して増加している。それに対し実験結果は、図-7で示されるように地盤変位の増加に比べフーチング変位の増加量はきわめて少なかった。

加振後の地盤は、沈下し杭が6mm程度頭出していた。このことから杭模型は、加振中どの段階からかさだかではないが頭出した状態で揺れていたものと考えられる。それに対して本解析では、地表の節点と杭頭節点を共有しており、杭模型が地盤より頭出した状態となっていない。そのため解析では、地盤変位の影響を受け大きくなった可能性が考えられる。

b) 曲げモーメント分布

図-25～図-27に既設杭(M1)の曲げモーメント分布について解析結果と実験結果の比較を示す。図中の○印は実験結果を、△印は解析結果を示している。また図中の値は、杭頭部の曲げモーメントが最大と

なる時刻の値を示している。図で示されるように、直杭補強モデルや斜杭補強モデルの杭頭部で実験結果と解析結果に多少の差がある。これは前節で示したように実験では杭が頭出しているため、杭頭部における曲げモーメント量が解析結果より大きくなった可能性が考えられる。

図-28にマイクロパイル(M3)の曲げモーメント分布の比較を示す。図の左側は、直杭補強モデルの結果を、右側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、マイクロパイルの曲げモーメント分布は、深度方向の分布傾向は似ているものの、既設杭と同様に実験結果が解析結果より大きくなった可能性が考えられる。

c) 杭基礎構造物の変形について

図-29に杭頭部の曲げモーメントが最大となる時刻の杭基礎構造物の変形を示す。図で示されるように直杭補強モデルの変形は、既設モデルの変形と同じ傾向を示した。それに対して斜杭補強モデルの変形は、図-14で示したように変形方向前面のマイクロパイルが水平変形により起き上がるりことにより、フーチングや上部構造物の変形が抑止されていることが分かる。

以上より、振動台実験のシミュレーションは、地盤の沈下状態を表すことができなかつたために、応答や断面力において差が生じる結果となった。

(3) 補強効果について

振動台実験と同様に既設杭に生じる曲げモーメントを基に補強効果について検討した。補強効果の検討は、振動台実験で用いた10Hzの正弦波に加え、5Hzと15Hzの正弦波についても非線形動的応答解析を実施した。表-6に既設モデルと補強モデルを比較した結果を示す。表中の値は、300gal入力時において既設杭杭頭部に生じた最大曲げモーメントを基に算出した結果である。

表に示されるように既設モデルとの比較では、フーチング拡大に伴う慣性力増加2.8倍より小さく、上部重量の影響では、補強することにより既設モデルより小さくなっている。この結果より、入力周波数を変えて実施した動的応答解析においても振動台実験と同じ補強効果を得られることが確認された。

5. おわりに

マイクロパイルにより補強された既設杭基礎の模型振動台実験および非線形動的応答解析により以下の点が確認された。

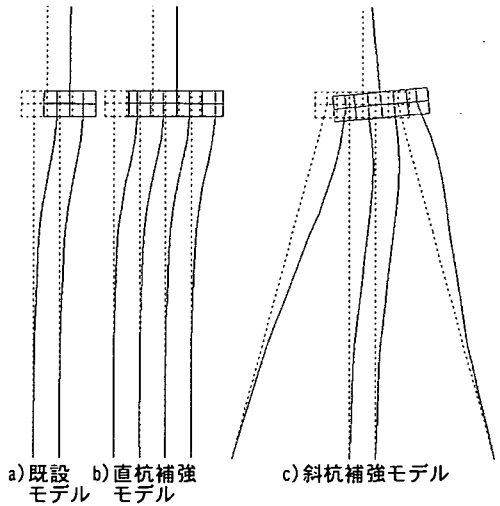


図-29 杭基礎構造物の変形図

表-6 既設杭杭頭部に生じる曲げモーメント比

モデル	重量	動的応答解析結果			
		10Hz	5Hz	10Hz	15Hz
補強モデル/既設モデル					
直杭補強モデル	無し	1.82	1.20	1.35	1.19
斜杭補強モデル	無し	1.01	0.75	0.68	1.01
直杭補強モデル	有り	0.77	1.12	1.28	1.12
斜杭補強モデル	有り	0.32	0.60	0.77	0.91
重量ありの結果/重量無しの結果					
既設モデル		3.10	1.24	1.31	1.13
直杭補強モデル		1.31	1.14	1.20	1.07
斜杭補強モデル		1.00	0.99	1.08	1.01

- ① フーチングに作用する慣性力と変位との関係は、既設モデルの結果とマイクロパイルで補強されたモデルとの結果に分類され、同じ慣性力に対しマイクロパイルにより補強された場合には応答変位がかなり低減されることが確認された。
- ② 杭頭部に生じる曲げモーメントと変位量との関係より、フーチングの変位量を小さくすることが、既設基礎の補強効果につながり、斜杭による補強がより有効であることが確認された。
- ③ 既設モデルの変形と直杭補強モデルの変形は、同じ変形モードとなっており、異径杭からなるマイクロパイルによる補強が既設杭の応答へ与える影響は無いことが確認された。
- ④ 斜杭補強モデルの変形は、変形方向前面のマイクロパイルが変形に伴い起き上がるため、荷重作用方向生じる変形に対して抑止する効果が確認された。その結果、上部構造物やフーチングに作用する加速度や変位が、既設モデルや直杭補強モデルに比べ減少することが確認された。
- ⑤ 2次元非線形動的応答解析により振動台実験のシミュレーションを行った。振動台実験の非線形動的応答解析では、地盤の沈下状態を表すことができなかつたために、応答や断面力において

差が生じる結果となった。

上述のように、マイクロパイルを用いて基礎の補強をすることにより、慣性力に対する変位抑止や斜杭による補強効果が確認された。このことは、既設構造物下における狭隙な空間での施工や斜杭施工等を考慮すると、既設基礎の耐震補強工法としてマイクロパイルが有効であるものとも思われる。

今後は、実構造物を対象にマイクロパイルにより補強された基礎の地震応答解析を実施し、耐震補強効果や設計法について検討を行う予定である。

謝辞：本研究の振動台実験は、独立行政法人土木研究所と民間12社との共同研究「既設基礎の耐震補強技術の開発」の一環として行われたものであることを記し、共同研究の皆様の協力に対して感謝の意を表す。また、振動台実験のシミュレーションを行うに当たり、ご指導を頂きました山口大学の三浦房紀教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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、2000。
- 2) Ray Zelinski: Reprinted from Earthquake-Induced Movement and Seismic Remediation of Foundations and Abutments, ASCE Soil Dynamics Committee of the Geotechnical Engrg., 1995.
- 3) Bruce D.A.: Fundamental Test on The Performance of High Capacity Pin Piles, DFI Conference, 1993.
- 4) 岸下崇裕、斉藤悦郎、山根隆志、大谷義則、三浦房紀：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10回日本地震工学シンポジウム、pp.161-166、1998。
- 5) 木村 亮、牧野洋志、吉田 敦、岡部俊三、大石善

啓、大川賢紀、亀井宏之：斜杭を有する群杭基礎の水平抵抗に関する遠心模型実験、第33回地盤工学研究発表会、pp.1499-1500、1998。

- 6) 大川賢紀、亀井宏之、張 鋒、木村 亮：ジャケット式鋼管杭基礎の動的遠心模型実験、土木学会第56回年次学術講演概要集Ⅲ、pp.738-739、2001。
- 7) 田蔵 隆、中松 新、清水勝美、木全宏之、増野正男、岡内 功：斜杭を有する群杭基礎の地震時挙動特性に関する考察、第19回土質工学研究発表会、pp.721-724、1984。
- 8) 大平 彰、田蔵 隆、中松 新、清水勝美：軟弱地盤中の基礎杭の地震時挙動特性に関する研究、土木学会論文集、第362号/Ⅰ-4、pp.417-426、1985。
- 9) 「3次元地盤・構造物連成地震応答解析システムDINAS」マニュアル、株式会社CRCソリューションズ、2002。
- 10) 龍岡文夫、福島信二：砂のランダム繰り返し入力に対する応力～歪関係のモデル化について(1)、生産研究、30巻9号、pp.356-359、1978。
- 11) 岸下崇裕、三浦房紀：2次元FEM解析による杭基礎の動的挙動について、杭基礎の耐震設計法に関するシンポジウム論文集・報告書、pp.105-108、2001。
- 12) 淵本正樹、田蔵 隆：2次元有限要素法による地盤・杭・構造物系の地震応答解析による地盤の奥行き方向解析幅に関する一考察、清水建設研究報告、第73号、pp.35-46、2001。

(2002.8.7受付)

DYNAMIC BEHAVIOR OF AN EXISTING FOUNDATION REINFORCED WITH MICROPILES

Takahiro KISHISHITA, Eturo SAITO, Masao SAGARA, Jiro FUKUI
and Takeshi OSHITA

Shaking table tests were conducted on foundation models to elucidate the dynamic behavior of existing foundations strengthened with micropiles and verify the effect of such seismic retrofit. The tests were then simulated by numerical analysis. Three models were used in the tests: a model representing the existing piles, model strengthened with vertical micropiles added in the front and back of the existing foundations, and model strengthened with battered micropiles. As the results of simulation by nonlinear seismic response analysis agreed well with the results of the experiments, the strengthening effect of micropiles was confirmed both by testing and numerical simulation.