

## (6) マイクロパイルで補強された既設基礎の解析的検討

### —動的模型実験の数値シミュレーション—

(株) 鴻池組 正会員 加藤 満, 谷 善友, 上野淳一  
独立行政法人土木研究所 正会員 大下武志, 福井次郎

#### 1. はじめに

道路橋等の既設構造物の耐震補強に際しては、橋脚部だけでなく基礎部も含めて補強を行うことが重要であるが、近年、マイクロパイル工法は既設基礎の有力な耐震補強技術の一つとして注目を集めている。マイクロパイル工法は、桁下等の空頭制限のある場所や狭隘で十分な施工空間を確保できない条件下でも増し杭による耐震補強を行うことができる等の特長を有している。

本報では、地震時に液状化が発生する可能性のあるゆるい砂質土層が存在する地盤を対象として行った動的模型実験<sup>1)</sup>の2次元有効応力解析による数値シミュレーションを実施し、用いた数値解析法の適用性について検討するとともに、マイクロパイル工法による既設基礎の耐震補強効果について解析的に検討した結果を報告する。

#### 2. 動的模型実験の概要<sup>1)</sup>

動的模型実験は、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われた<sup>1)</sup>。模型の概要を図-1 に示す。模型地盤は、相対密度 40%程度の上層砂層（液状化層を想定）と相対密度 80%程度の下層砂層によって構成されており、砂には遠州浜岡砂が用いられた（均等係数  $U_c = 2.11$ ）。また、既設杭模型には幅 30mm、厚さ 5mm のステンレス製平板（4 本）が用いられ、補強杭（マイクロパイル（斜杭））の模型には幅 10mm、厚さ 2mm のステンレス製平板（片側 5 本ずつの計 10 本）が用いられた。

入力波には、最大加速度 100gal、周波数 10Hz の正弦波と最大加速度 200gal のホワイトノイズ波の 2 種類が用いられ、加振実験の結果、液状化地盤における既設基礎の耐震補強としてのマイクロパイル（斜杭）の有効性が確認された。実験および実験結果の詳細については文献<sup>1)</sup>を参照して頂きたい。

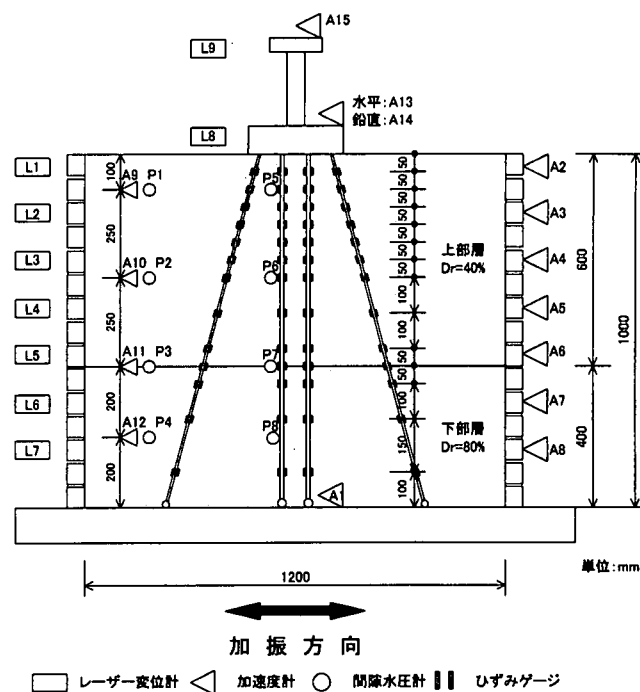


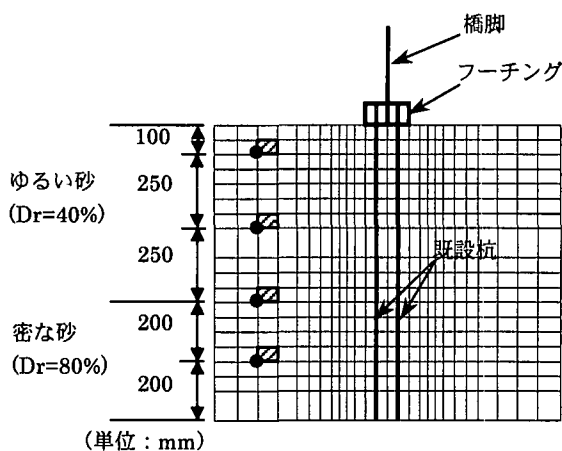
図-1 実験模型の概要<sup>1)</sup>

#### 3. 解析方法および解析モデル

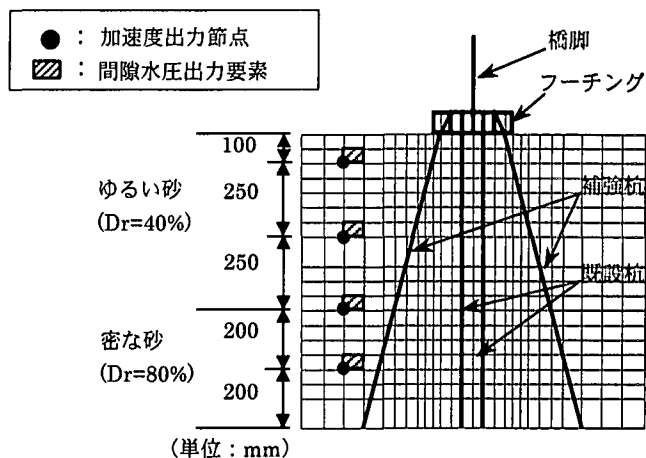
解析には、Oka ら<sup>2), 3)</sup>の砂の弾塑性構成式を組み込んだ土～水連成の二次元有効応力解析法<sup>4)</sup>(LIQCA-2D)を用いた。有限要素メッシュを図-2(a),(b)に示す。図-2(a),(b)は、いずれも動的模型実験<sup>1)</sup>の模型（図-1）をほぼ忠実にモデル化したものであり、図-2(a)は構造物が既設杭のみに支持されたモデル、図-2(b)はマイクロ

キーワード：耐震補強、増し杭、液状化、動的模型実験、有効応力解析

連絡先：〒101-8316 東京都千代田区神田駿河台 2-3-11 TEL：03-3296-7602, FAX：03-3296-8460, E-mail：katoht\_mt@konoike.co.jp



(a) 既設杭のみの場合



(b) 補強杭（斜杭）ありの場合

図-2 有限要素メッシュ

パイル（15°の斜杭）による補強が施されているモデルである。境界条件としては、メッシュ底面は剛基盤として固定境界とし、メッシュ側方は等変位境界とした。また、メッシュの底面と側方は非排水境界とし、土要素間と地下水位面（地表面と同じ高さ）は排水境界とした。

砂の材料パラメータは、実験の際に行った土質試験結果を用いて設定した。設定した材料パラメータを表-1に示し、表-1の材料パラメータを用いて行ったゆるい砂（Dr=40%）の要素シミュレーション結果を図-3に示す。

既設杭と補強杭と橋脚は弾性の梁要素としてモデル化し、杭先端部をメッシュの底面にピン結合した。また、フーチングは弾性材料としてモデル化した。動的模型実験で用いた模型の仕様に基づいて設定した構造物の材料パラメータを表-2（既設杭、補強杭、橋脚）～表-3（フーチング）に示す。表-2～表-3のうち、剛性に関するパラメータ（ヤング係数E、断面2次モーメントI、Lameの定数 $\lambda$ 、 $\mu$ ）は単位奥行きあたり（1mあたり）に換算して設定した。また、杭やフーチングと地盤との間には、すべりを表現するためにジョイント要素を設けた。

地盤内の初期応力は、Drucker-Prager型の弾塑性モデルを具備した初期応力解析プログラム（ini2d）<sup>5)</sup>を用いて自重解析によって算定した。なお、初期応力解析の際は、有限要素メッシュの側方境界を鉛直ローラーとした。

表-1 砂の材料パラメータ

砂の相対密度		40%	80%
透水係数	$k$ (cm/sec)	$1.95 \times 10^{-2}$	$1.95 \times 10^{-2}$
初期間隙比	$e_0$	0.752	0.630
圧縮指数	$\lambda$	0.03	0.03
膨潤指数	$\kappa$	0.0015	0.0015
初期せん断係数比	$G_0 / \sigma'_{m0}$	707.88	664.69
変相応力比	$M_m$	0.909	0.909
破壊応力比	$M_f$	1.269	1.350
硬化パラメータ	$B_0$	3000	6000
"	$B_1$	30	60
"	$C_f$	0	0
基準ひずみ（塑性剛性）	$\gamma_r^p$	0.003	0.004
基準ひずみ（弾性剛性）	$\gamma_r^e$	0.02	0.02
ダイレイタンス係数	$D_0$	2.0	0.5
"	$n$	2.5	20

液状化強度曲線 Dr=40%

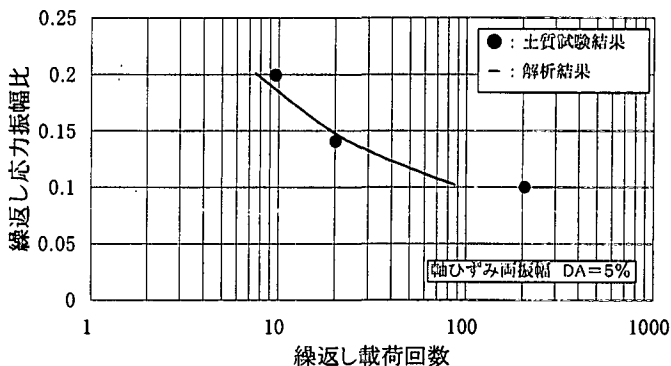


図-3 要素シミュレーション結果

表-2 杭と橋脚の材料パラメータ

	ヤング係数 E (MPa)	断面積 A (cm <sup>2</sup> )	断面2次モーメント I (cm <sup>4</sup> )
既設杭	2.03E+05	10.0	0.208
補強杭	2.03E+05	3.33	1.11E-02
橋脚	6.97E+04	65.4	1.02E+02

表-3 フーチングの材料パラメータ

	Lameの定数 λ (MPa)	Lameの定数 μ (MPa)
フーチング	5.50E+04	2.60E+04

3. 解析結果

入力加速度としてホワイトノイズ波形 (図-4; 最大加速度 200gal) を用いた場合の過剰間隙水圧比の時刻歴 (GL-10cm, GL-35cm, GL-80cm) を図-5 に示し、地盤応答加速度の時刻歴 (GL-10cm, GL-80cm) を図-6 に示す。図-5、図-6 とともに、(a)が既設杭のみ (補強杭なし) の場合であり、(b)が補強杭 (斜杭) ありの場合である。図-5 と図-6 から、ゆるい上部砂層 (Dr=40%) で過剰間隙水圧が上昇して液状化が発生することや液状化に

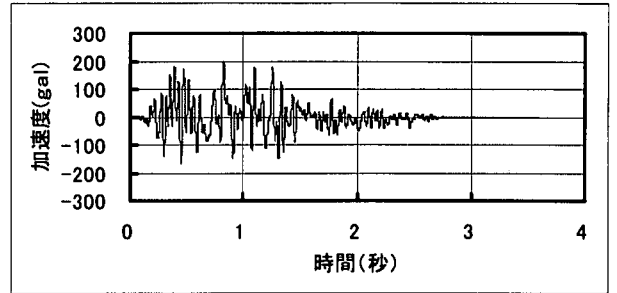
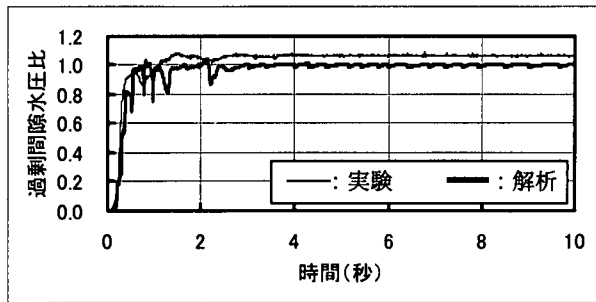
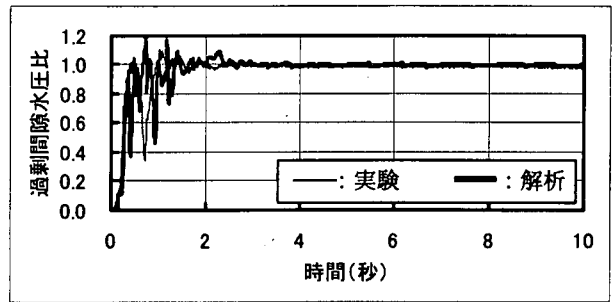


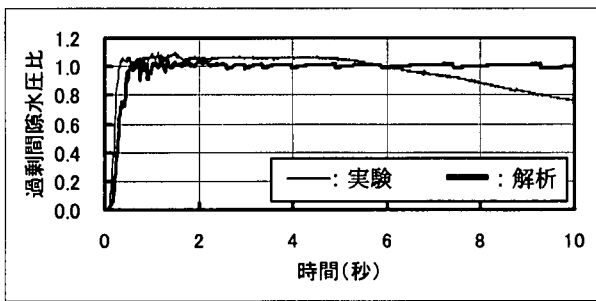
図-4 入力加速度



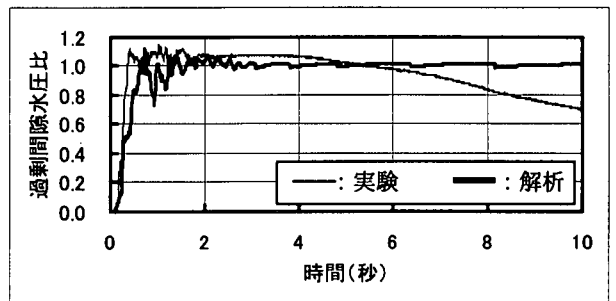
GL-10cm



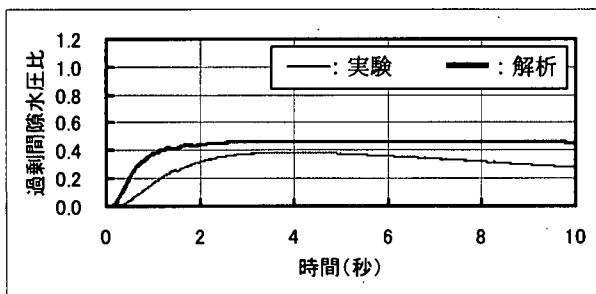
GL-10cm



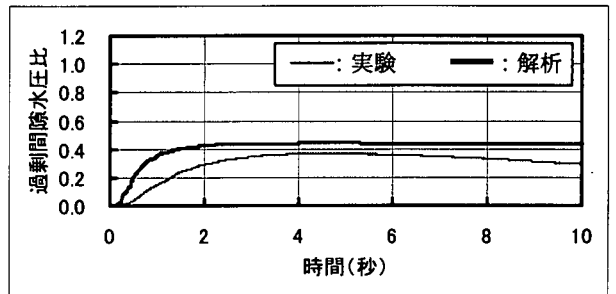
GL-35cm



GL-35cm



GL-80cm

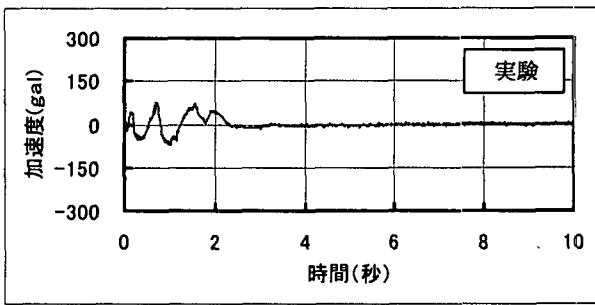


GL-80cm

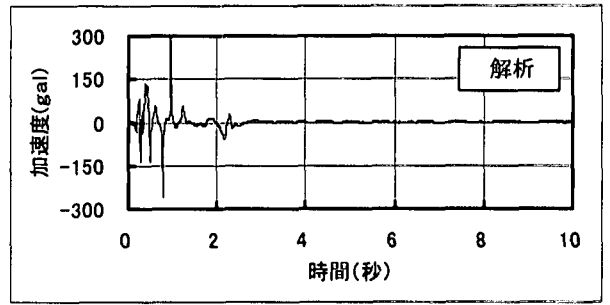
(a) 既設杭のみ (補強杭なし) の場合

(b) 補強杭 (斜杭) ありの場合

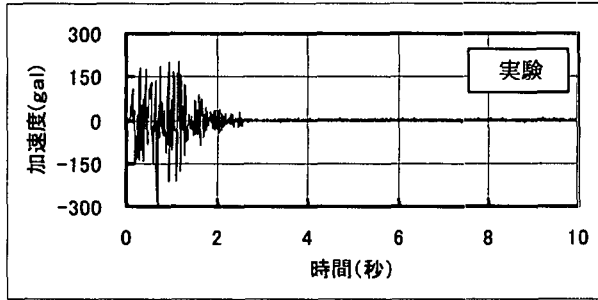
図-5 過剰間隙水圧比の時刻歴



GL-10cm

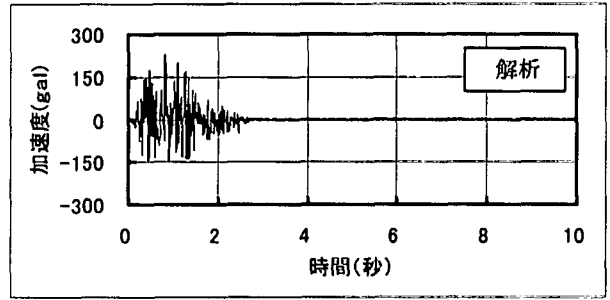


GL-10cm



GL-80cm

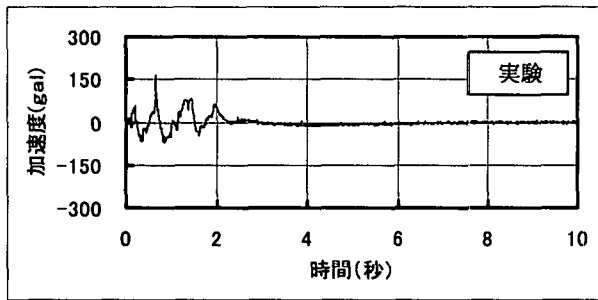
(実験結果)



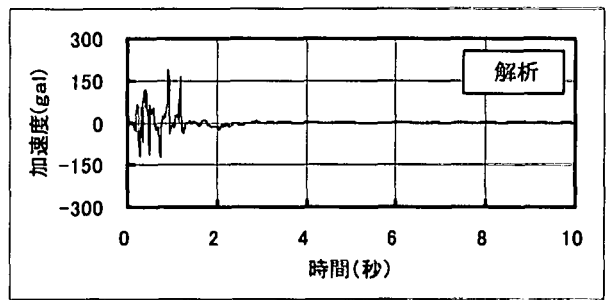
GL-80cm

(解析結果)

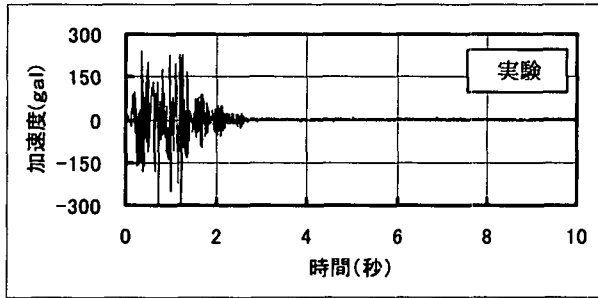
図-6(a) 応答加速度の時刻歴 (既設杭のみ (補強杭なし) の場合)



GL-10cm

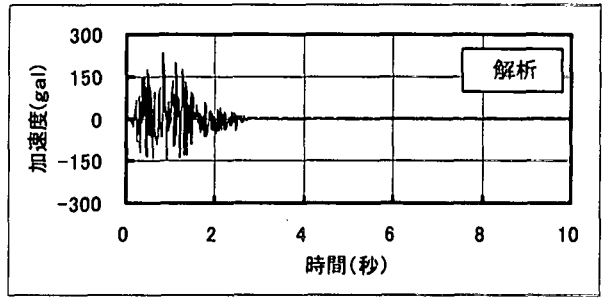


GL-10cm



GL-80cm

(実験結果)



GL-80cm

(解析結果)

図-6(b) 応答加速度の時刻歴 (補強杭 (斜杭) ありの場合)

至る時間、そして液状化によって加速度が減衰する様子等において実験結果と解析結果は概ね一致している。また、密な下部砂層 ( $D_r=80\%$ ) での過剰間隙水圧比や加速度の応答も解析結果は実験結果を概ね定性的に再現している。

既設杭のみ (補強杭なし) の場合のフーチング天端の水平変位の時刻歴を図-7に示す。解析結果は実験結果を概ね再現しているが、解析による水平変位量の最大値は実験値よりもやや小さい。この傾向は、補強杭ありの場合も同様であり、橋脚天端の水平変位の時刻歴についても同様な傾向を示した。既設杭のみ (補強

杭なし)の場合における既設杭(図-2(a),(b)の左側の杭)の曲げモーメントの深度分布を図-8(a)に示す。解析結果の曲げモーメント図は、動的模型実験において既設杭の杭頭部での曲げモーメントが最大となった時刻とほぼ同一時刻のものを示した。実験では、上部砂層が液状化に至る直前に既設杭の曲げモーメントが最大になったのに対し、解析では、上部砂層が液状化に至る直前(図-8(a))ではなく液状化に至った後(液状化に達してから0.5秒程度後)に既設杭の曲げモーメントが最大となった(図-8(b))。これは、主として、本来3次元

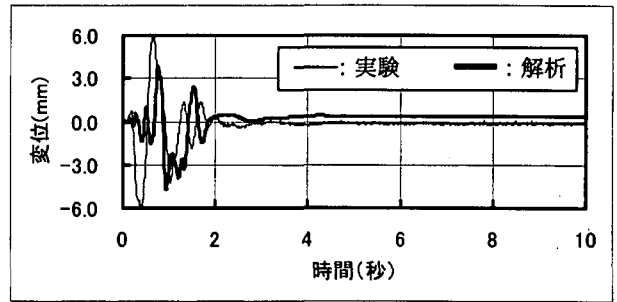


図-7 フーチング天端の水平変位の時刻歴  
(既設杭のみ(補強杭なし)の場合)

的な状態にある杭基礎構造物を2次元モデルに置き換えて解析を行っている影響であると考えられる。すなわち、杭が3次元的に配置されている場合は、例えば液状化した土が杭間を通り抜ける現象が認められるが、今回の2次元モデルの場合は、既設杭やフーチングがいわば壁状になっているため、液状化土の変位による影響をより大きく受けた。したがって、今回のような3次元的な構造物を対象とした解析で、より一層高い精度が要求される場合には、3次元モデルを用いた解析を行う必要があると考えられる。ただし、本報で示した解析結果からも分かるように、2次元解析でもある程度の精度は確保することができるため、実務においては状況に応じた使い分けが重要であろう。

次に、解析結果における既設杭(左側)の曲げモーメントおよび水平変位により、マイクロパイルによる既設基礎の補強効果について検討を試みた。補強杭がある場合とない場合の最大の曲げモーメントおよび水平変位の比較図を図-10に示す。図-10から、相対密度 $D_r=80\%$ の密な砂層では過剰間隙水圧の発生量が小さいために地盤の剛性が大きくは低下せず、既設杭の水平変位が比較的小さいことがわかる。一方、その上部の相対密度 $D_r=40\%$ のゆるい砂層では、過剰間隙水圧が大きく上昇して地盤の剛性が大幅に低下したため、補強がない場合は既設杭の水

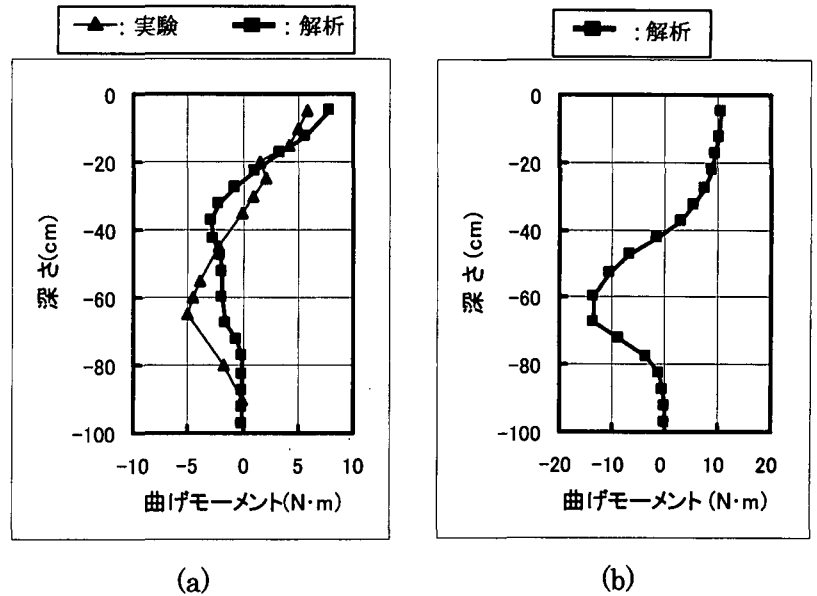


図-8 既設杭(左側)の曲げモーメントの深度分布  
(既設杭のみ(補強杭なし)の場合)

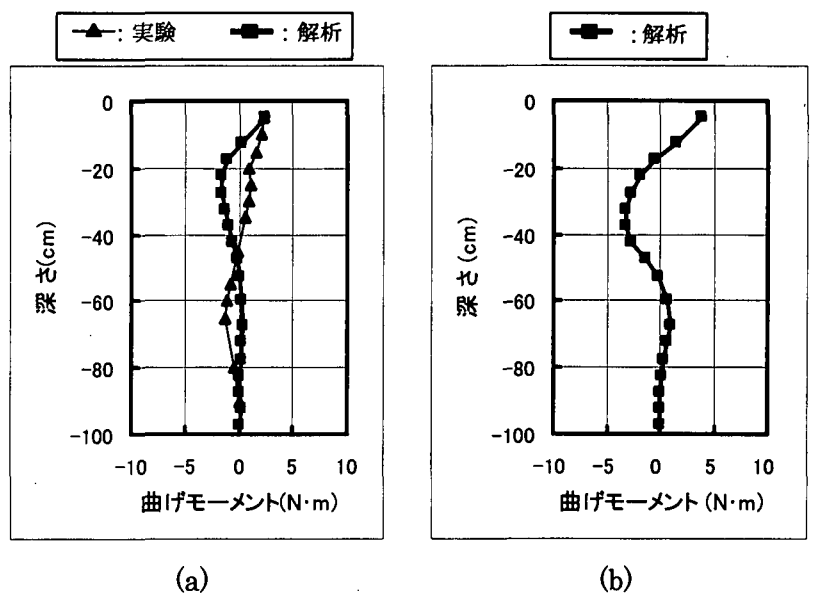


図-9 既設杭(左側)の曲げモーメントの深度分布  
(既設杭(斜杭)ありの場合)

平変位が大きくなるとともに曲げモーメント量も大きくなっている。しかし、マイクロパイルにより補強した場合は、補強しない場合に比べて水平変位や曲げモーメントが大幅に低減しており、マイクロパイルによる補強効果が明確にあらわれている。参考までに、フーチング天端の水平変位の時刻歴を図-11に示すが、補強杭ありの場合は補強杭なしの場合に比べて水平変位が大幅に減少していることが時刻歴からも確認できる。

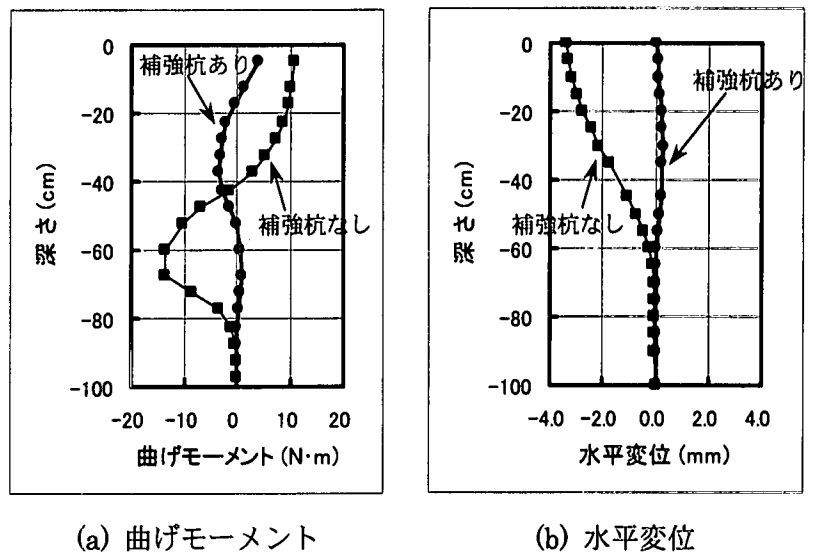


図-10 既設杭（左側）の曲げモーメントと水平変位の深度分布

#### 4. おわりに

本報では、既設基礎のマイクロパイルによる補強効果確認を目的とした動的模型実験の数値シミュレーションについて示した。限られた条件下での検討ではあるが、今回の解析的検討によって得られた結論を列挙する。

- ① 用いた2次元有効応力解析法は、今回のような液状化を考慮した動的模型実験結果を概ね再現できる。より一層の高い精度が要求される場合には、杭基礎構造物を3次元的にモデル化した解析を行う必要があると考えられるが、2次元解析でもある程度の精度が確保できるため、実務においては状況に応じた使い分けが必要であると考えられる。
- ② 動的模型実験結果と同様に、砂層が液状化して地盤反力等を期待することが困難な場合においても、マイクロパイル工法（斜杭）による既設基礎の耐震補強は非常に効果的である。

本研究は、マイクロパイル等の新技術を用いた官民共同研究「既設基礎の耐震補強技術の開発」（独立行政法人土木研究所、(財)先端建設技術センター、民間12社）の研究活動の一環として行ったものである。

#### 参考文献

- 1) 岸下崇裕・斉藤悦郎・相良昌男・大下武志・福井次郎：マイクロパイルで補強された既設基礎構造物の模型振動台実験，土木学会第6回耐震補強・補修技術及び耐震診断技術に関するシンポジウム発表論文集，土木学会，2002（投稿中）。
- 2) F.Oka, A.Yashima, M.Kato and K.Sekiguchi : A constitutive model for sand based on the non-linear kinematic hardening rule and its application, Proc. 10WCEE, pp.2529-2534, 1992.
- 3) F.Oka, A.Yashima, A.Tateishi, Y.Taguchi and S.Yamashita : A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, Geotechnique, Vol.49, No.5, pp.661-680, 1999.
- 4) F.Oka, A.Yashima, T.Shibata, M.Kato and R.Uzuoka : FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, Applied Scientific Research, Vol.52, pp.209-245, 1994.
- 5) 液状化解析手法 LIQCA 研究会 : ini2d マニュアル, 2000.

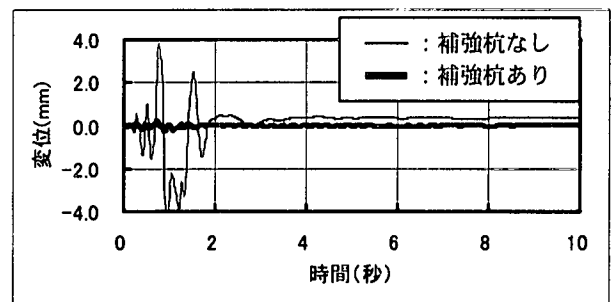


図-11 フーチング天端の水平変位の時刻歴