

既設群杭基礎の地盤部分改良工法の耐震補強効果に関する研究

Research on seismic enhancement effect of partial-ground-improvement method for existed group-pile foundation

西遥輝¹, 岡良亮², Kheradi Hamayoon¹, 張鋒³

¹名古屋工業大学・大学院・創成シミュレーション工学専攻

²株式会社大林組

³名古屋工業大学・大学院・工学研究科・E-mail: cho.ho@nitech.ac.jp

概 要

本研究では、先端支持杭の耐震対策として杭基礎周辺地盤をセメント等で部分的に改良する工法の耐震補強効果を 1G 場振動台実験装置を用いたモデル実験と数値解析により検討した。さらに 3 次元弾塑性動的 FEM 解析を用いて実スケール場において数値実験を行い、種々の地盤改良仕様について工法の改良効果の違いを検討した。その結果、無補強のケースにおいて杭頭部で大きな曲げモーメントを生じたが、改良したケースにおいては同箇所の曲げモーメントが抑制され、耐震補強効果が確認された。また、地層境においても無補強のケースでは大きな曲げモーメントを生じていたが、地層境周辺を改良することで同箇所の曲げモーメントが抑制され、特に液状化地盤において明確な補強効果が確認された。

キーワード：群杭基礎，耐震補強，有限要素解析

1. はじめに

杭基礎の損傷は構造物の性能を著しく低下させるだけでなく、復旧や調査にも多大なコストや労力を要するため、我が国においても 1995 年に起きた兵庫県南部地震以降、杭基礎構造物の効果的な耐震補強方法の確立が望まれている。特に既設杭基礎構造物の耐震補強は用地や構造体そのものの制約条件が厳しいため、施工が比較的容易であり効果的な耐震補強方法の確立は困難を極めている。

このような背景の中、本研究では既設杭基礎構造物を対象とした耐震補強対策について、杭基礎周辺の部分的な地盤改良に着目した。この耐震補強対策は、杭基礎周辺地盤をセメント等で部分的に改良し、改良体により杭基礎を拘束・補強する工法である¹⁾。特徴として、従来の補強工法に比べ、増し杭やフーチングの拡幅を必要としないため、施工条件や経済性の面で有利であるという点などが挙げられる。本稿では、種々の地盤改良の仕様について、杭基礎の耐震補強効果を実構造物の 1/50 スケールを想定した 1G 場における振動台実験を行うことにより検証した。さらに実験と同様の条件下で 3 次元動的 FEM 解析も実施した後、実スケールまで拡張した数値実験を実施し、上部構造・杭基礎・地盤一体系の耐震評価を行った。既往の研究では、改良深度の検討²⁾³⁾や実験における再現性の確認⁴⁾についての研究が行われている。

2. 振動台実験による群杭基礎耐震補強効果の検討

2.1 実験概要

本実験は 1G 場振動台実験装置、せん断土槽およびモデル構造物を用いて行った。振動台実験装置は空圧式加振装置であり、主な性能は、最大空圧：1.0MPa、最大振幅：0.05m、最大加振重量：18kN、最大加振加速度：9.8m/sec²である。せん断土槽は、加振方向 1.2m、奥行方向 1.0m、高さ 0.8m で構成されており、実地盤での挙動に近づけるため一層 0.03m×25 層からなる格子枠にゴム板を固定させている。実験で用いる構造物は、実構造物に相似則を適用した上部構造物と杭基礎構造物からなる 1/50 スケールのモデル構造物となっている(表 1 および図 1)。ここで、杭下端部はウレタンブッシュ構造とし回転を許す構造となっている。

表 1 構造物モデル

項目	実物寸法	模型寸法	相似比
杭径 (m)	1.00	0.02	50
杭の厚み (m)	0.014	0.001	14
杭長 (m)	25.00	0.50	50
杭間隔 (m)	3.00	0.05	50
杭の曲げ剛性 (N・m ²)	1.11E+09	1.89E+02	5.87E+05
上部工の質量 (kg)	750000.00	6.00	125000
橋脚長 (m)	7.50	0.15	50
フーチング幅 (m)	9.00	0.18	50
フーチング厚さ (m)	2.50	0.05	50

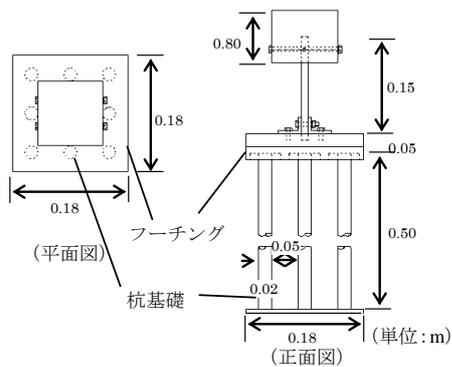


図1 構造物模型

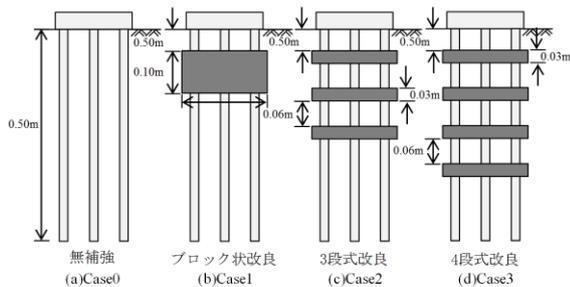


図2 実験ケース

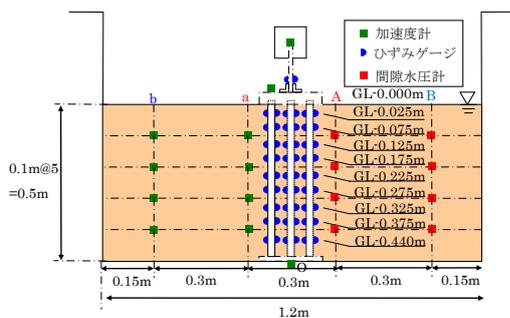


図3 計測機器設置箇所

表2 計測機器設置一覧

項目	設置位置	
ひずみゲージ	中心杭	9 深度×3 箇所
	橋脚	1 箇所
加速度計	振動台	1 箇所
	地盤	4 深度×2 箇所
	フーチング	1 箇所
間隙水圧計	上部構造物	1 箇所
	地盤	4 深度×2 箇所

2.2 実験条件

入力加速度は 2m/sec^2 程度で周波数 4Hz の振動を 10 秒間とした。モデル地盤には豊浦標準砂を用いた。乾燥地盤は空中落下法、飽和地盤は水中落下法でそれぞれ作製し、相対密度はそれぞれ 79.8%、24.2%とした。

地盤改良による部分固化には一軸圧縮試験を行った結果、豊浦標準砂と藤森粘土を 8:2 の割合で混合し、さらにセメントを重量比で 3% 混合したものを用いた。なお、改良体の一軸圧縮強度は 600kN/m^2 であった。実験パターンは図 2 に示すように、無補強(Case0)、ブロック状改良(Case1)、薄層 3 段式改良(Case2)、薄層 4 段式改良(Case3) の計 4 ケースについて実験を行い、比較検討を行った。

実験における計測データとして加速度、間隙水圧、およ

び杭のひずみを測定した。測定機器の設置位置を表 2 および図 3 に示す。計測したひずみのデータより曲げモーメント、軸力、杭変位を計算した。

2.3 実験結果および考察

無補強(Case0)における乾燥地盤および飽和地盤の入力加速度をそれぞれ図 4 に示す。なお、入力加速度は全てのケースにおいてほぼ同程度であった。

図 5 および図 6 にそれぞれ乾燥地盤および飽和地盤における L, C, R 各杭のうち最大曲げモーメントが計測された時刻における曲げモーメント分布を示す。無補強(Case0)のケースにおいて乾燥地盤および飽和地盤において杭頭部で曲げモーメントが最大となる一方で、改良したケースでは両地盤において杭頭部の曲げモーメントが抑えられている。また、乾燥地盤において図 5(c)Case2 より、同程度の改良土量であっても改良範囲を広げることで、その範囲において改良効果を与えることが確認された。

また図 6 より飽和地盤において、改良体を多段にすることで曲げモーメントが抑えられる領域は広がるが、改良体下端部付近では大きな曲げモーメントが生じていることが分かる。これは、液状化によって深い場所においても地盤の剛性が小さく、改良体により拘束されている下端部で振動台からの加速度の影響を受けたためであると考えられる。

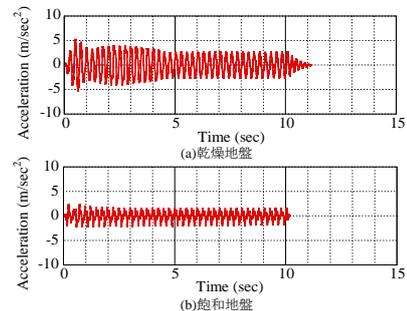


図4 入力加速度

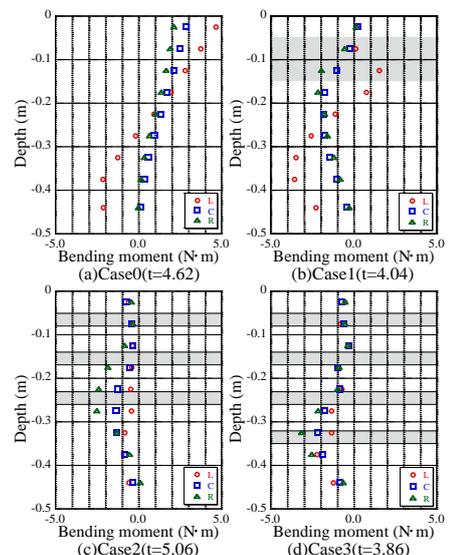


図5 最大値発生時の曲げモーメント深度分布(乾燥)

表 3 地盤材料パラメータ

Compression index λ	0.05
Swelling index κ	0.0064
Stress ratio at critical State R_f	3.3
Void ratio N ($p'=98\text{kPa}$ on N.C.L)	0.87
Poisson's ratio ν	0.3
Degradation parameter of overconsolidation state m	0.01
Degradation parameter of structure a	0.5
Evolution parameter of anisotropy b_r	1.5
Initial degree of structure R	0.99
Initial degree of overconsolidation $1/R_0$ (dry, saturation)	7.5,3.0
Initial anisotropy ξ_0	0

3.2 解析結果

図 8 に乾燥条件における杭頭部(GL-0.025m)および Case1 において改良体下端部にあたる箇所(GL-0.175m)の C 杭曲げモーメント時刻歴の実験結果と解析結果を示す。なお、左の杭を L 杭, 中央の杭を C 杭, 右の杭を R 杭としている。図 8 より無補強の Case0 では杭頭部で大きな曲げモーメントが発生していることがわかる。一方, Case1 の改良ケースでは杭頭部で曲げモーメントが抑制されている。これは, 改良体により杭変形が抑えられたためである。また, 図 8 よりこれらの傾向は実験と解析で同様の結果となっていることがわかる。図 9 に乾燥条件で, 解析において曲げモーメントが最大を計測した時刻における曲げモーメント分布の実験結果と解析結果の比較を示す。図 9 より実験と解析の比較をすると, 杭頭部において曲げモーメントが抑えられ, 改良体の下端部において曲げモーメントが増大するという同様の傾向が確認された。また, 改良を多段にしたケースでは, 改良効果も深度方向に広がった。

図 10 に飽和条件 Case0 の地点 A(R 杭より 8cm の地点)における過剰間隙水圧比時刻歴の実験と解析の比較を示す。実験結果では加振開始直後に間隙水圧が急上昇したが, 解析結果では比較的緩やかに間隙水圧が上昇しており, 実験結果と解析結果では地盤の剛性低下の速さに違いがみられた。図 11 に飽和条件における杭頭部(GL-0.025m)および Case1 において改良体下端部にあたる箇所(GL-0.175m)の C 杭曲げモーメント時刻歴の実験結果と解析結果を示す。間隙水圧上昇速さの違いにより加振開始直後には実験と解析の結果に違いが見られるが, それ以降両者の結果は概ね一致している。図 12 に飽和条件で解析において曲げモーメントが最大を計測した時刻における曲げモーメント分布の実験結果と解析結果の比較を示す。実験結果および解析結果ともに, 無補強 Case0 では杭頭部で曲げモーメントが最大となり, 改良したケースでは改良体下端部で最大の曲げモーメントを生じるという同様の傾向が確認された。

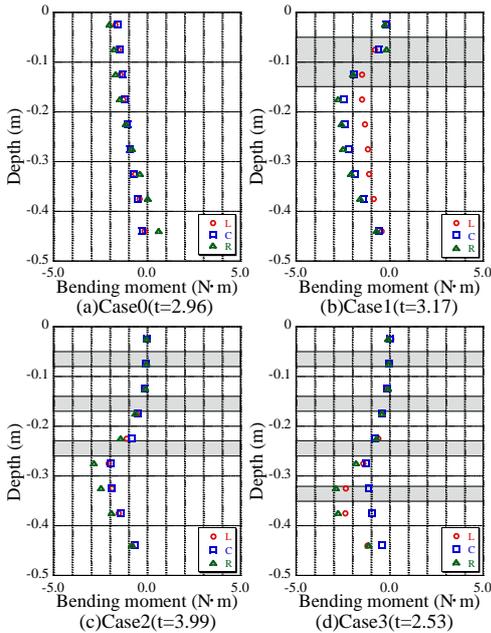


図 6 最大値発生時の曲げモーメント深度分布(飽和)

3. 1G 振動台実験のシミュレーション

3.1 解析条件

解析には土・水連成を考慮した弾塑性有限要素解析コード DBLEAVE⁵⁾を用いた。図 7 に 3次元解析メッシュ(節点数 24648, 要素数 21735)を示す。この解析メッシュは奥行方向の対称性を考慮して手前面を半断面とした。地盤は実験と同様に均一な豊浦標準砂とし, 力学特性については回転硬化型弾塑性構成式 Cyclic mobility model⁶⁾を用いて表現した。地盤材料パラメータは表 3 に示す。杭模型は実験で用いたアルミパイプを AFD モデル⁷⁾および, ハイブリッド要素⁸⁾を用いてモデル化した。上部構造物を模擬した重りは 3kg の質点とした。また, セメントを混合して作製した改良体は一軸圧縮試験の結果から弾性係数 $E=1.0E5\text{kPa}$ の弾性体とした。解析ケースは実験と同様の図 2 に示すような計 4 ケースに対してそれぞれ乾燥条件と飽和条件のケースとした。Case1 を基本の改良パターンとして, Case2, 3 は改良体を多段に配置した。また, 解析における加振は, 実験において実際に振動台上で計測された図 4 の加速度を入力加速度としてメッシュの底面から与えた。

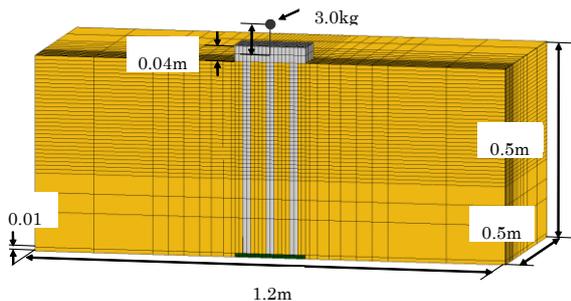
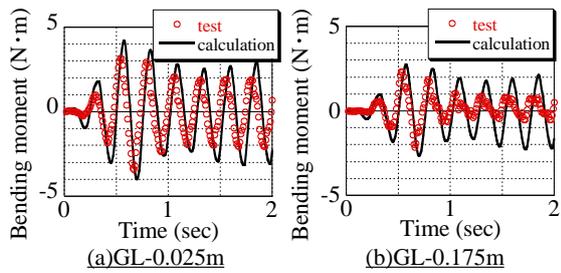
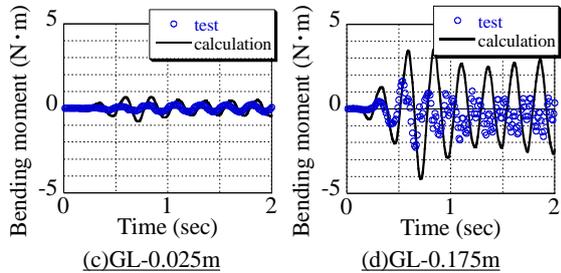


図 7 3次元解析メッシュ

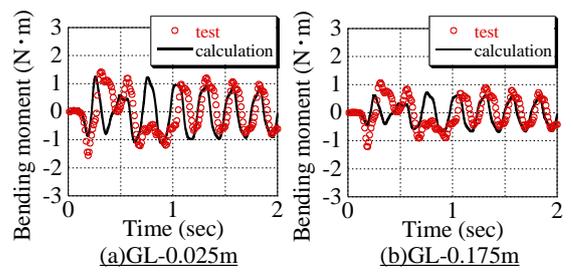


Case0 (無補強, C杭)

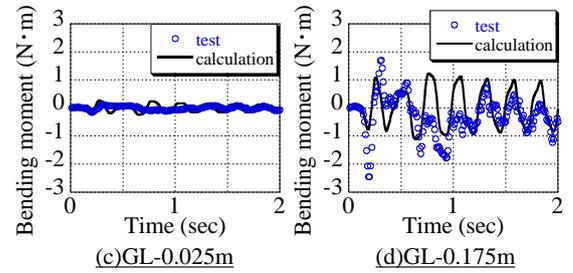


Case1 (ブロック状改良, C杭)

図 8 Case1, 2のC杭曲げモーメント時刻歴(乾燥)

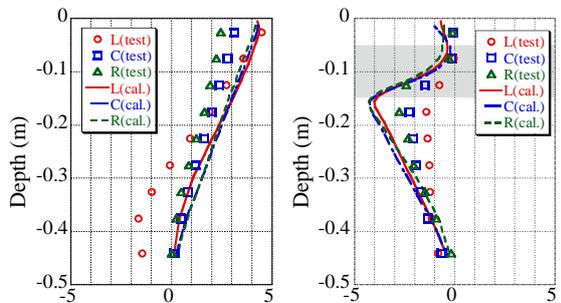


Case0 (無補強, C杭)

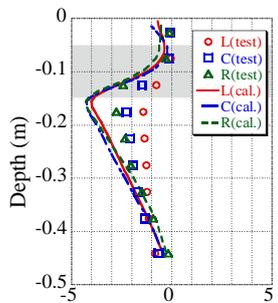


Case1 (ブロック状改良, C杭)

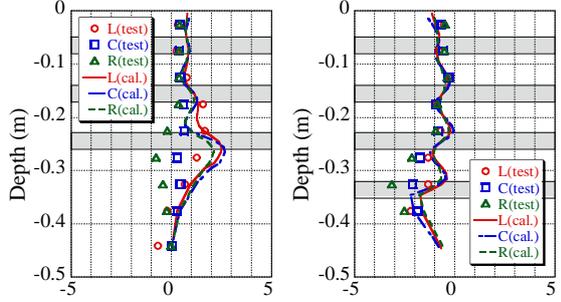
図 11 Case1, 2のC杭曲げモーメント時刻歴(飽和)



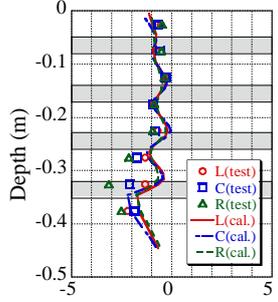
(a)Case0(t=0.71sec)



(b)Case1(t=0.71sec)

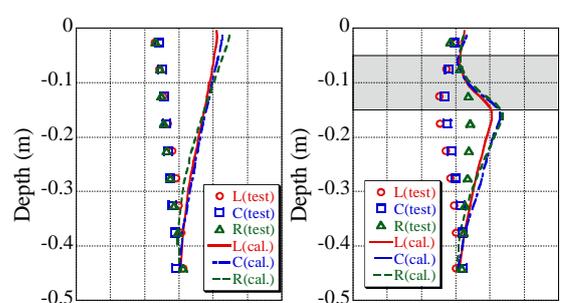


(c)Case2(t=1.25sec)

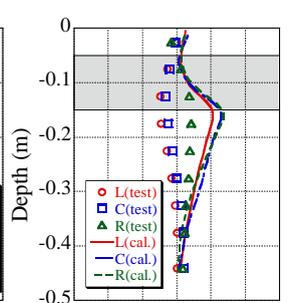


(d)Case3(t=0.70sec)

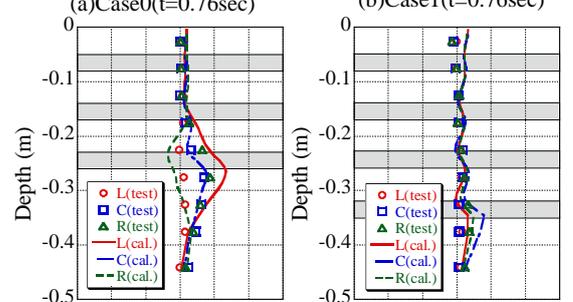
図 9 曲げモーメント分布実験・解析の比較(乾燥)



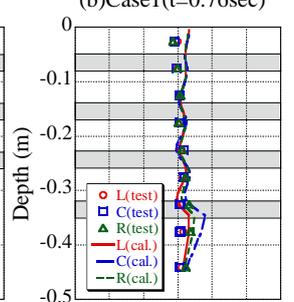
(a)Case0(t=0.76sec)



(b)Case1(t=0.76sec)



(c)Case2(t=3.85sec)



(d)Case3(t=0.76sec)

図 12 曲げモーメント分布実験・解析の比較(飽和)

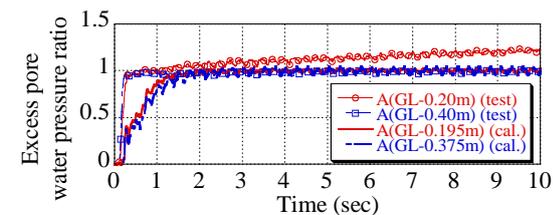


図 10 過剰間隙水圧比の時刻歴の実験・解析比較(Case0)

4. 実スケール地盤における数値実験

4.1 解析条件

数値実験は DBLEAVE を用いた 3次元動的弾塑性 FEM 解析を用いて行った。図 13 に解析メッシュ(節点数 15612, 要素数 13680)を示す。また, 解析は奥行方向の対称性を考慮して半断面として計算を行った。上部構造物は 600t(実桁重量の半分)の質点としてモデル化した。また, 杭先端は支持層に 1.5m 貫入させた。力学特性については, 地盤

に Cyclic mobility model を適用し、コンクリート杭には AFD モデルおよび、ハイブリッド要素を用いた。各パラメータを表 4～表 6 に示し、杭の配置図を図 14 に示す。また、改良体は弾性係数 $E=1.0E5kPa$ の弾性体とした。解析ケースは図 15 に示すような計 4 ケースに対してそれぞれ乾燥条件と飽和条件のケースとした。補強パターンは Case1 を基本の改良パターンとして、Case2, 3 は Case1 と同じ改良土量で成層地盤の層境を考慮して多段に改良体を配置した。地震動は図 16 の加速度を用いた。

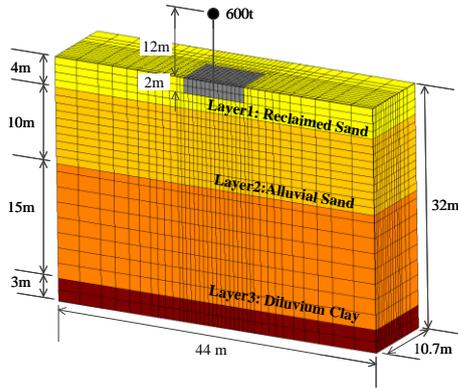


図 13 解析メッシュ

表 4 地盤材料パラメータ

Soil	R_f	ν	N	λ	κ	m	m^*	b_r
Layer 1	3.3	0.30	0.87	0.05	0.0064	0.01	0.50	1.5
Layer 2	3.3	0.30	0.87	0.05	0.0064	0.01	0.50	1.5
Layer 3	3.3	0.40	0.88	0.083	0.0035	1.1	0.020	0.50

表 5 状態変数の初期値

Soil	OCR	R_0^*	ξ_0	γ (kN/m ³)	k (m/sec)
Layer 1	2.0	0.75	0.00	18	1.0×10^{-4}
Layer 2	5.0, 8.0, 15	0.75	0.00	17	1.0×10^{-4}
Layer 3	2.0	0.75	0.00	17	1.0×10^{-4}

表 6 杭部材の諸元

Compressive strength of concrete:	$\sigma_c=3.8E04$ kPa
Tensile strength of concrete:	$\sigma_t=3.0E03$ kPa
Young's modulus of concrete:	$E_c=3.0E07$ kPa
Yielding strength of steel:	$\sigma_{yo}=3.4E05$ kPa
Young's modulus of steel:	$E_s=2.1E08$ kPa
Arrangement of the reinforcement:	
main: $\phi 29 \times 28$, hoop: $\phi 16 @ 300$, OB (overburden of RC): 15cm	

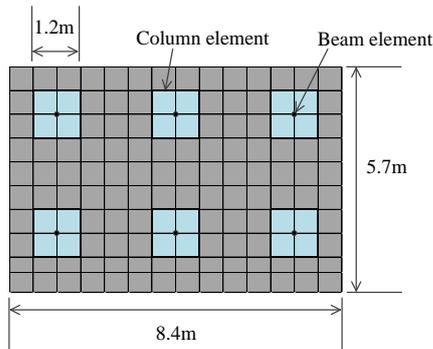


図 14 杭配置図

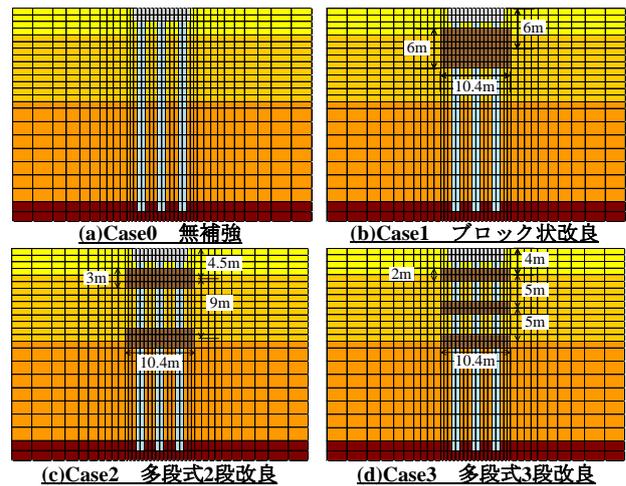


図 15 解析ケース

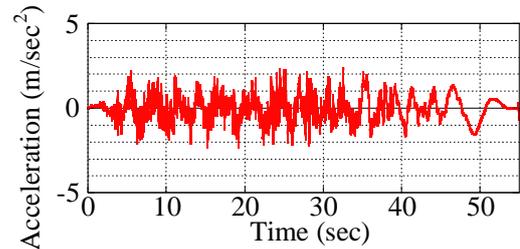


図 16 入力地震動

4.2 解析結果

図 17 に乾燥条件において最大値を計測した時刻における曲げモーメントの深度分布を示す。全ケースにおいて 36 秒付近で曲げモーメントが最大値を計測しているが、これは 36 秒付近で比較的大きな加速度が生じているためであると考えられる。Case0 の無補強ケースに着目すると、杭頭部で最大の曲げモーメント ($M=2.73MN \cdot m$) が発生しており、地層境 (GL-14m) 付近においても大きな値を示している。これは、それぞれフーチングと杭の剛結による作用と地盤の剛性差によるものであると考えられる。Case1 のブロック状改良では、改良体による杭の変形抑制効果により杭頭部の曲げモーメントが抑制されているが、一方で、地層境における曲げモーメントが Case0 より大きな値となった。Case2, 3 に着目すると Case0, 1 と比較して地層境における曲げモーメントが低減している。このことから多層地盤の層境に改良体を配置することで、効果的に耐震補強効果が得られることがわかった。図 20 により最大曲げモーメントを各ケースで比較すると、どの改良ケースにおいても、Case0 無補強ケースと比較して曲げモーメントの低減が確認された。

図 18 に飽和条件において最大値を計測した時刻における曲げモーメントの深度分布を示す。4 ケース中 3 ケースにおいて 50 秒付近で曲げモーメントが最大値を計測しているが、これは、50 秒付近で比較的大きな長周期の加速度が生じており、共振に近い状態となったためだと考えられる。また、図 19 に最大の曲げモーメントを計測した時刻付近である 36 秒、および 50 秒の過剰間隙水圧比の分布を示す。どちらの場合も上層の砂層の過剰間隙水圧比が 1.0 に達しており液化化していることがわかる。また、下部の粘土層

も液状化には至っていないものの、有効応力が減少していることがわかる。図 18 の Case0 に着目すると、杭頭部および地層境(GL-14m)付近で大きな曲げモーメントが生じていることがわかる。また、乾燥条件の場合と比較して曲げモーメント最大値が大きくなっているが、これは地盤の液状化により地盤の抵抗が小さくなり、杭が変形しやすくなったためだと考えられる。Case1 のブロック状改良では、改良体による杭の変形抑制効果により杭頭部の曲げモーメントが抑制されているが、一方で、改良体を配置していない地層境では比較的大きな曲げモーメントが発生した。Case2, 3 に着目すると Case0, 1 と比較して地層境における曲げモーメントが低減しており、地層境に改良体を配置することで、耐震補強効果が得られた。図 20 により最大曲げモーメントを比較すると、改良体を多段に配置したケースでより大きな耐震補強効果を確認した。

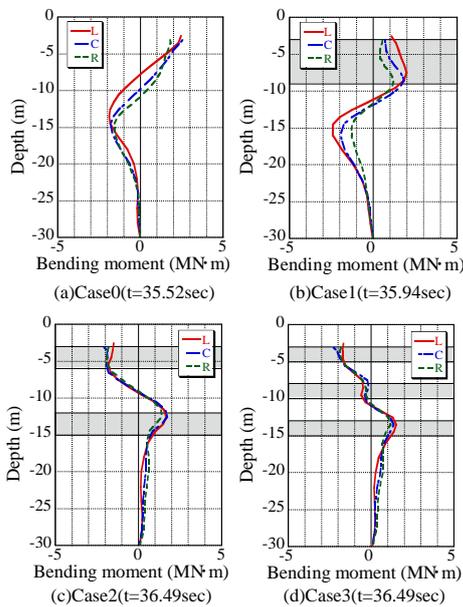


図 17 曲げモーメント分布(乾燥)

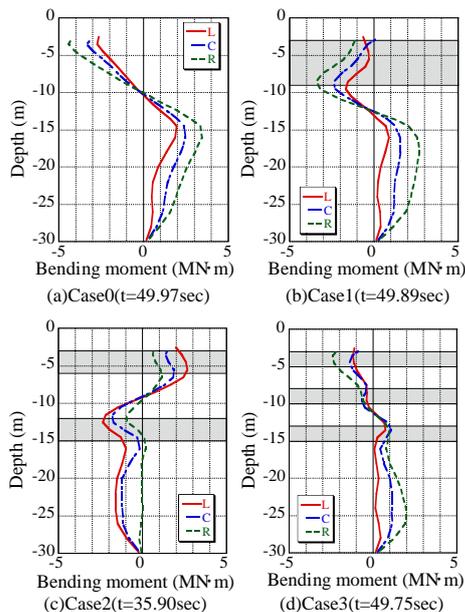


図 18 曲げモーメント分布(飽和)

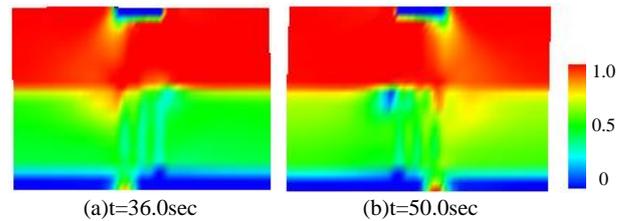


図 19 過剰間隙水圧分布(Case0)

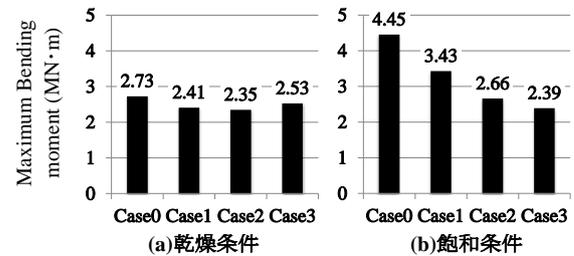


図 20 最大曲げモーメントの比較

5. まとめ

本稿では、地盤の部分改良による杭基礎の耐震補強工法に着目して、1G 振動台実験を用いたモデル実験および 3 次元動的 FEM 解析による 1G 場振動台実験のシミュレーション解析を行った上で、FEM 解析を実物スケールまで拡張して数値実験を実施した。その結果、液状化地盤において同工法による杭の曲げモーメント低減効果が確認された。また、改良を多段にすることで曲げモーメント低減効果が大きくなることも確認した。

参考文献

- Adachi, Y. (2009): A study on damage mechanism of pile foundations at earthquake and the development of earthquake resistant reinforcement method, Doctoral dissertation, Toyohashi University of Technology.
- 中村圭佑・陳英芝・包小華・近藤祥光・張鋒：既設群杭基礎における地盤の部分固化工法の数値実験—その 1, 第 45 回地盤工学研究発表会発表講演集, 1167-1168.
- 近藤祥光・陳英芝・包小華・中村圭佑・張鋒：既設群杭基礎における地盤の部分固化工法の数値実験—その 2, 第 45 回地盤工学研究発表会発表講演集, 1169-1170.
- 岡良亮・小島崇裕・Kheradi H・張鋒：1G 場振動台実験機を用いた杭基礎耐震補強効果の検証実験の再現性, 平成 25 年度土木学会中部支部研究発表会, III-19.
- Ye, B., Ye, G. L., Zhang, F. and Yashima, A. : Experiment and numerical simulation of repeated liquefaction-consolidation of sand, Soils and Foundations, Vol.47, No.3, pp.547-558, 2007.
- Zhang, F., Ye, B., Noda, T., Nakano, M. and Nakai, K. (2007) : Explanation of cyclic mobility of soils: Approach by stress-induced anisotropy, Soils and Foundations, Vol.47, No.4, 635-648.
- Zhang, F. and Kimura, M. : Numerical prediction of the dynamic behavior s of an RC group-pile foundation, Soils and Foundations, Vol.42, No.3, pp.72-92, 2002.
- Zhang, F., Kimura, M., Nakai, T. and Hoshikawa, T. : Mechanical Behavior of Pile Foundations Subjected to Cyclic Lateral Loading Up to the Ultimate State, Soils and Foundations, Vol. 40, No. 5, pp.1-17, 2000.