

# 振動台実験を用いた杭基礎の耐震補強効果の検証および数値解析

## Verification of seismic strengthening effect on group-pile foundation with shaking table test and numerical experiment

岡良亮<sup>1</sup>, 森河由紀弘<sup>2</sup>, 三井翔平<sup>3</sup>, 張鋒<sup>4</sup>

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 名古屋工業大学・大学院・社会工学専攻

3 名古屋市役所

4 名古屋工業大学・高度防災工学センター・E-mail : cho.ho@nitech.ac.jp

### 概 要

本研究では、既設杭基礎構造物を対象とした耐震対策として、杭基礎周辺の地盤を部分的に改良する工法に着目し、種々の改良仕様についての実験的、解析的検証を行った。1/50 スケールを想定した重力場振動台モデル実験では飽和地盤を対象として種々の改良仕様における杭基礎構造物の耐震補強効果を検証した。実験より、地盤改良で杭基礎部を補強したケースでは杭頭部における曲げモーメントが抑制されたが、改良体下端部において曲げモーメントが大きくなり、最大曲げモーメントは無補強のケースと同程度であることが明らかになった。一方、実験と同様の条件下で3次元動的有限要素解析を行った結果、補強したケースでは杭頭部の曲げモーメントが抑制される傾向にあったが、改良体下端部において曲げモーメントが大きくなるなど、実験と同様の傾向が確認された。ただし、解析で確認された変形モードの違いは実験では確認することができなかった。また、解析では無補強のケースと比べて杭を補強した場合において、曲げモーメントが最大で3割程度抑制できた。

キーワード：群杭基礎，耐震補強，振動台実験

## 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。杭基礎周辺の部分的な地盤改良は、杭基礎周辺の地盤をセメント等で深度的方向に部分的に改良し、改良体により杭基礎を拘束・補強する工法である。部分的な地盤改良は従来の補強工法に比べ、杭の本数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特徴を持っている。本稿では、飽和地盤を対象として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重力場における振動台モデル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、上部構造・杭基礎・地盤一体系の耐震評価を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 重力場振動台実験装置

重力場振動台実験装置はメンテナンス性において優れている空圧式加振装置とせん断土槽によって構成されている。空圧式加振装置の主な性能は、最大空圧1.0MPa、最大振幅0.05m、最大加振重量 $9.8\text{m/sec}^2$ である。せん断土槽は横幅1.2m、奥行き1.0m、高さ0.8mで一層0.03mの格子枠×25層から構成されており、格子枠がベアリングによって連結されているため、深度方向において実地盤に近い境界条件（せん断変形）を再現可能となっている。

### 2.2 構造物モデル

本実験は重力場で行うため相似則を完全に満たすことはできないが、Buckinghamの $\pi$ 定理を用いた $s=1/50$ スケールの相似則を適用した杭基礎構造物（9本群杭基礎）、及び上部構造物のモデルを用いている。構造物モデルの寸法を表1、及び図1に示す。なお、モデル杭にはアルミニウムパイプを用いて、杭下端部をウレタンブッシュ構造とすることにより杭を完全には拘束せず、回転支点（ヒンジ結合）に近い構造となっている。

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 <sup>2</sup> ) 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

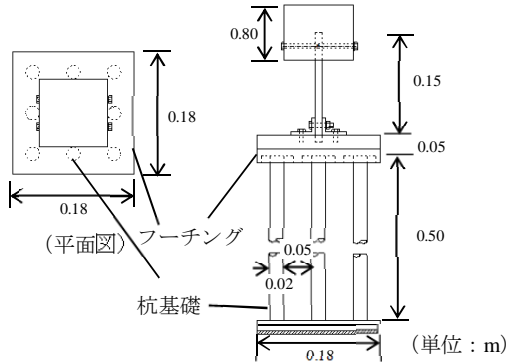


図 1 構造物モデル

### 2.3 改良体について

本研究の耐震補強方法は機械式攪拌工法、あるいは高圧噴射工法といった一般的な地盤改良工法によるものを想定しているため、豊浦標準砂と藤ノ森粘土の混合土に固化材(高炉セメント B 種)、および水を混ぜて作製した。その際、混合土の比率、及び固化材添加率を変えた一軸圧縮強度試験を行い、各配合における応力-ひずみ関係での一軸圧縮強度や変形係数のばらつきが少ないものを選び、最適な配合条件を決定した。改良体の一軸圧縮試験を実施した結果、一軸圧縮強度は 600kN/m<sup>2</sup> となった。

### 2.4 実験ケース

地盤の部分固化による改良パターンは多種多様であるが、本実験では中村ら<sup>1)</sup>によって実施された乾燥砂を用いた同様の実験を参考に改良パターンを選定した。

実施したケースは無補強の Case0、杭基礎周辺部をブロック状に改良した Case1、Case1 と同程度の改良土量でブロックを薄層化した多段式に配置した Case2 の計 3 ケースについて実施した。実験ケースを図 2 に示す。

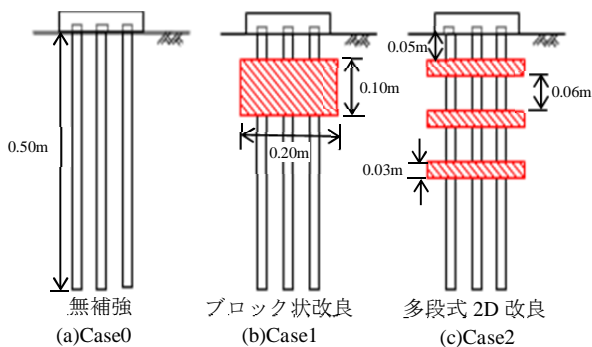


図 2 実験ケース

### 2.5 計測機器

実験で使用した加速度計及び、ひずみゲージの計測箇所を図 3 に示す。ひずみゲージは奥行方向における中央杭 3 本において、9 深度に対し設置した。また加速度計および間隙水圧計は加振装置上面、土層中央部と端部における 4 深度、フーチング上部、構造物部に設置した。

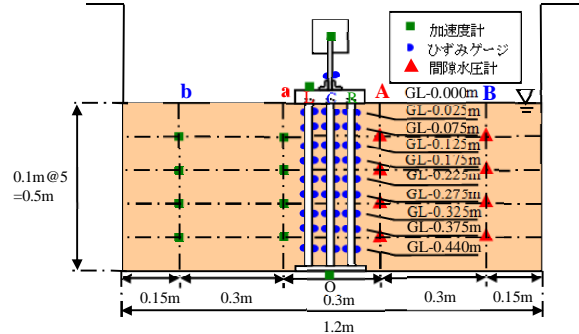


図 3 計測器設置位置

### 3. 重力場振動台実験結果

モデル地盤は水中落下高さ 0.10m で水中落下法を行い、地盤の作製を行った。作製地盤は相対密度 24%程度であった。入力加振加速度は 2m/sec<sup>2</sup> 程度とし、4Hz の振動を 10 秒間与えた。加振装置上で測定された Case0 における入力加振加速度の時刻歴を図 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。

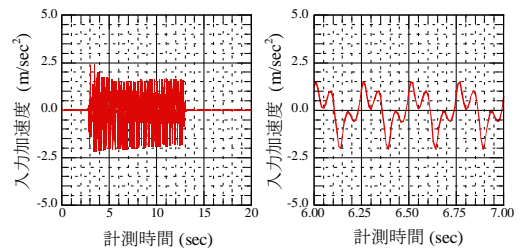


図 4 入力加振加速度

### 3.1 過剰間隙水圧

図 5、図 6 にブロック状改良(Case1)における A 点(土槽中央部)の過剰間隙水圧および過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。この結果は他の 2 ケースもほぼ同じ結果となった。計測したすべての深度において液状化(過剰間隙水圧比が 1.0)に至っており、また加振中においてはサイクリックモビリティに伴う水圧の変動(有効応力の回復)が確認できる。

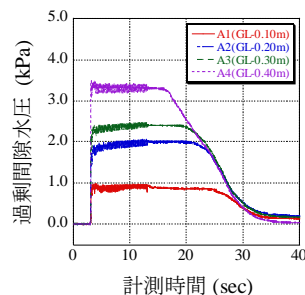


図 5 過剰間隙水圧

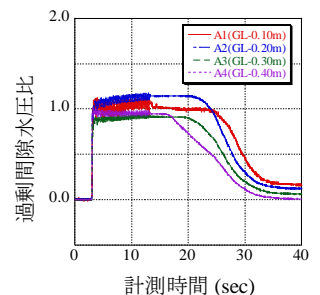


図 6 過剰間隙水圧比

### 3.2 曲げモーメント

図7にL杭(左側), C杭(中央), R杭(右側)での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)では、杭頭部で曲げモーメントが最大になっている。これは、杭上端部がフーチングにより固定端となっているため、ヒンジ固定の杭下端部に比べ曲げモーメントが発生しやすいためだと考えられる。一方、補強した Case1, Case2 においては無補強と比較して杭頭部の曲げモーメントが大きく抑制されている。これは、剛性の高い改良体が地盤のせん断変形に抵抗したためであると考えられる。また、多段式に改良した Case2 では、改良効果が広範囲になっていることが確認できる。すなわち、改良土量が同程度であっても、改良範囲を広くすることで広範囲の改良効果が確認できた。しかし、補強したケースでは改良体下端付近で曲げモーメントが最大になっている。これは、改良体と周辺地盤の剛性差が大きくなったため、局所的に応力集中が発生したためであると考えられる。

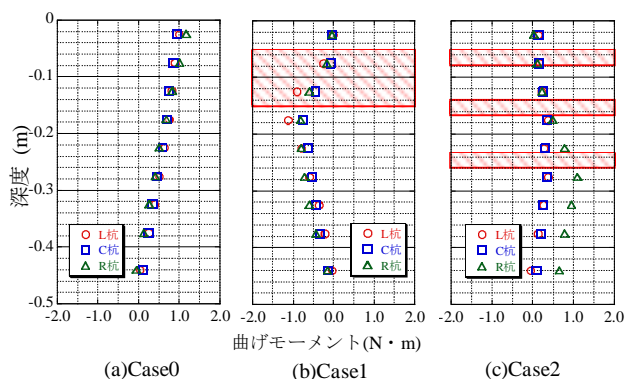


図7 曲げモーメント深度分布(実験)

### 3.3 軸力

図8にL杭, C杭, R杭のうち最大軸力が計測された時刻における軸力の分布を示す。各ケース共に左右の杭が加振により圧縮と伸張を交互に受け持つため、C杭の軸力はほぼ0であった。また、無補強(Case0)では杭の軸力が深度に寄らずほぼ一定の値となっており、軸力が杭下端まで正確に伝達されていることが確認された。一方、補強した全てのケースで、改良体以深において同程度の軸力が発生しているが、改良体下端部より上部では軸力が減少していることが確認できる。

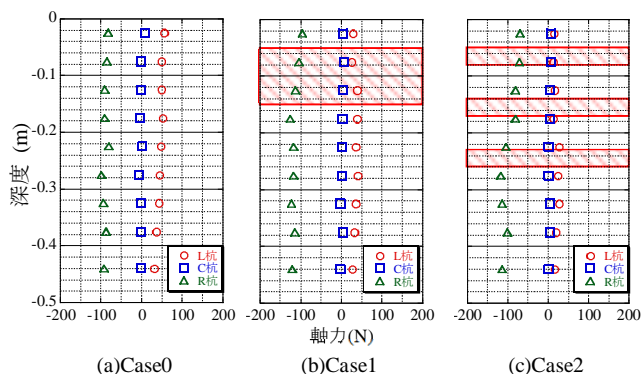


図8 軸力深度分布(実験)

## 4. 3次元動的FEM解析概要および解析条件

ここでは、実験と同条件で実施した3次元FEM解析の概要について説明する。本研究の解析は土水連成有限要素解析プログラム「DBLEAVES」を用いる。「DBLEAVES」は、地盤-基礎-構造物の相互作用を考慮して、繰返し静的・動的土・水連成の境界値問題を解くことが可能なプログラムである。

### 4.1 地盤モデル

地盤は回転硬化型弾塑性構成式「Cyclic mobility model<sup>2)</sup>」を適用した。Cyclic mobility modelは土の力学挙動に大きな挙動を与える土の密度や過圧密比、自然堆積過程に形成された構造、および応力履歴を受けることで発生した土の応力誘導異方性を一つのモデル表現できるという特徴を有している。解析地盤は実験と同様に湿潤状態の豊浦標準砂とした。地盤材料パラメータは豊浦標準砂の排水三軸圧縮試験に基づいて行った要素シミュレーションにより決定した。地盤の材料パラメータを表2に示す。

表2 地盤材料パラメータ

Parameter of Soil material		Value
Compression index	$\lambda$	0.05
Swelling index	$\kappa$	0.0064
Stress ratio at critical state	M	1.3
Void ratio ( $p^*=98\text{kPa}$ on N.C.L)	$e_0$	0.87
Poisson's ratio	$\nu$	0.3
Degradation parameter of over consolidation state	m	0.01
Degradation parameter of structure	a	0.5
Evolution parameter of anisotropy	$b_s$	1.5
wet unit weight	$\gamma_s$	15.47
(under water)		(5.47)
Permeability	k	5.77E-4
Initial degree of structure	$R_0$	0.8
Initial degree of over consolidation ratio (OCR)	$1/R_0$	7.5
Initial anisotropy	$\zeta_0$	0

### 4.2 下部構造物モデル

杭については杭の軸力変動による曲げ剛性への影響や、非線形性を考慮することが可能である「AFD model」を用いている。杭は実験と同様のアルミパイプをモデル化した。フーチングはアルミ製であるため、弾性体 ( $E=7.0 \times 10^7 \text{kPa}$ ) とした。杭下端はヒンジ結合とした。

### 4.3 上部構造物モデル

上部構造物については、橋脚部をトリリニアモデル、上部工は質点(実験と同様に質量6kg)によりモデル化した。改良体は一軸圧縮試験等により得られたパラメータを用いて弾性体としてモデル化した。

### 4.4 解析メッシュ

解析メッシュは対称性を考慮して半断面の3Dメッシュとした。地盤寸法は、実験に用いたせん断土槽と同様の幅1.2m、奥行き1.0m(半断面のため0.5m)、地盤高さ0.5mとした。図9に解析に用いた有限要素解析メッシュを示す。

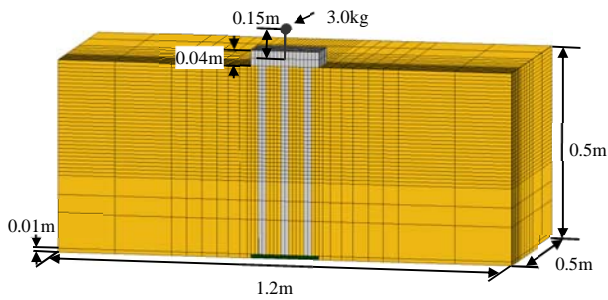


図9 解析メッシュ (3D-FEM)

## 5. 3次元動的 FEM 解析結果

解析結果と振動台実験結果の比較・考察を行うとともに、定量的に最大曲げモーメントの比較を行うことによりその効果の検証を行う。ここで、入力地震動は、無補強 (Case0) 実験において振動台上で計測された応答加速度を地盤底面より与えた。

### 5.1 曲げモーメント

図10にL杭、C杭、R杭で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。図10より、全ケースにおいて、深度-0.25m~-0.35m付近で曲げモーメントの正負が入れ替わっている。これは地盤の変形モードが杭の挙動に影響したものと考えられる。この傾向は実験では確認されていないが、実験において杭下端部が完全な自由端でないことが原因であると考えられる。無補強 (Case0) では、杭頭部で曲げモーメントが最大になっており、補強したケースにおいては無補強と比較して杭頭部の曲げモーメントが大きく抑えられているおり、実験と同様の結果となった。また、Case1と同程度の改良土量で多段式に改良した Case2 では、広範囲の改良効果が確認できた。一方で、補強したケースでは改良体下端付近で曲げモーメントの増大を確認した。

図11にCase0を1.0とした各ケースの最大曲げモーメントの比率を示す。図11よりブロック状改良では曲げモーメントの低減は確認されなかったが、多段式改良では約3割曲げモーメントが低減しており、改良効果が確認できた。

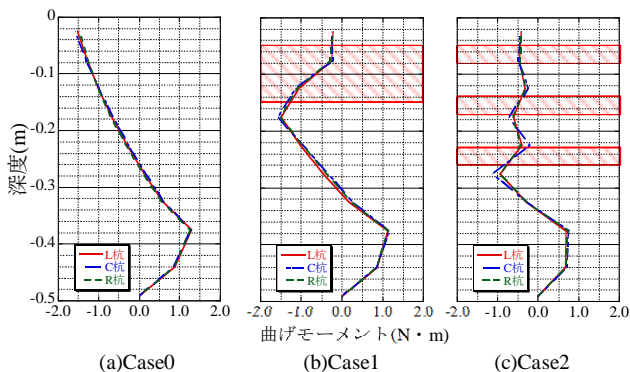


図10 曲げモーメント深度分布 (解析)

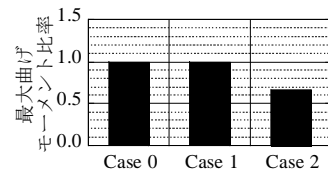


図11 最大曲げモーメント比率

### 5.2 軸力

図12にL杭、C杭、R杭のうち最大軸力が計測された時刻における軸力の分布を示す。実験と同様に、各ケース共に左右の杭が加振により圧縮と伸張を交互に受け持つため、C杭の軸力はほぼ0であり、また、無補強 (Case0) では杭の軸力が深度に寄らずほぼ一定の値となっており、軸力が杭下端まで一様に伝達されていることが確認された。一方、補強した全てのケースで、改良体で深において同程度の軸力が発生しているが、改良体より上部では軸力が減少していることが確認され、実験と同様の結果となった。また、軸力の最大値に着目すると、無補強のケースと比較して補強したケースで軸力の最大値が大きくなった。

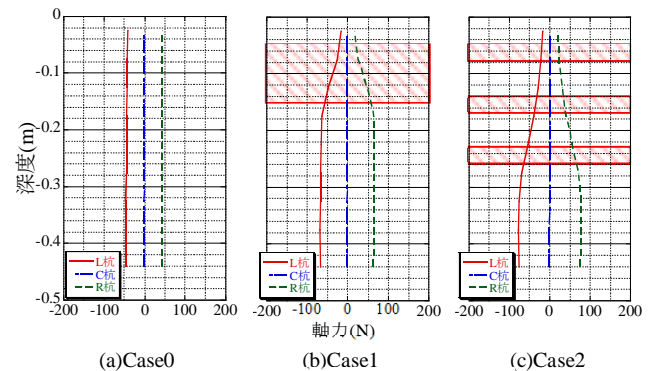


図12 軸力深度分布 (解析)

## 6. まとめ

本研究では、杭基礎周辺地盤を部分固化する工法において、改良体が及ぼす影響を上部構造・杭基礎・地盤一体系で耐震評価を行った。重力場における振動台実験と同条件による解析で明らかになった点を以下にまとめる。

- ・改良体により杭頭部で曲げモーメントが抑えられる、杭下端部において曲げモーメントが増大する傾向が実験と解析の両方で確認された。
- ・解析において、多段式改良では無補強と比べ最大曲げモーメントは約3割抑制されたことを確認した。

### 参考文献

- 1) 中村圭佑, 三井翔平, 森河由紀弘, 包小華, 張鋒: 振動台実験を用いた杭基礎の耐震補強効果の検証および数値解析、第47回地盤工学研究発表会発表講演集、pp1107~1110
- 2) F. Zhang, B. Ye, T. Noda, M. Nakano and K. Nakai : Explanation of cyclic mobility of soils: Approach by stress-induced anisotropy, Soils and Foundations, Vol.47, No.4, 635-648. 2007