

# 複合地盤中の杭基礎の耐震性能検証

The earthquake resistance of pile foundations in improved ground

|                    |      |      |                     |
|--------------------|------|------|---------------------|
| 北武コンサルタント株式会社      | ○正 員 | 清水 均 | (Hitoshi Shimizu)   |
| 北武コンサルタント株式会社      | 正 員  | 渡辺忠朋 | (Tadatomo Watanabe) |
| 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 | 正 員  | 冨澤幸一 | (Kouichi Tomisawa)  |
| 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 | 正 員  | 西本 聡 | (Satoshi Nishimoto) |

## 1. はじめに

杭基礎の耐震補強工法として杭周辺に地盤改良を施す手法<sup>1), 2)</sup>が用いられているが、改良範囲や改良強度の設定法は体系化されていない。そこで筆者らは、建設コスト低減を目的として、軟弱地盤や液状化が想定される地盤中に施工する杭の周辺に地盤改良を施す複合地盤杭工法を提案し、改良により増加した地盤強度を主に杭の水平抵抗に反映する設計法を研究し実用化した<sup>3), 4)</sup>。

この工法の耐震性は震度法によって確認しているものの、地震動レベルや地盤条件に応じた耐震性能については不明確な点が残されている。また、これまでに各機関で、改良地盤中の基礎の耐震性に関する研究<sup>5), 6)</sup>が進められているが、設計法の体系化には至っていないのが現状である。そのため本研究では、改良地盤中の杭基礎の耐震設計法の確立を目的として、地盤改良工法で最も剛性が大きくなる深層混合処理工法による複合地盤を対象に、2次元の非線形動的有限要素法解析を実施し、複合地盤中の杭基礎の耐震性を検証した。

## 2. 解析モデル

### 2.1 解析対象現場

解析に用いたモデルは、検討成果の汎用性および共通性を考慮し、一般的な地盤条件下で実際に複合地盤杭工法を採用した橋台基礎とした。本橋台は、上部に液状化が想定される砂層、下部に軟弱なシルトが介在する地盤に施工した。橋台基礎の構造を図-1に示す。本現場では杭施工後に静的杭水平載荷試験を実施し、設計時に設定した改良地盤の水平地盤反力係数 $k$ が得られることを検証している。杭は頁岩基盤に支持された場所打ち杭(杭径 $\phi 1200\text{mm}$ 、杭長 $L=13\text{m}$ 、杭配列 $n=3\times 5=15$ 本)である。地盤改良範囲は図-1示す。この改良範囲は、原地盤各層の変形係数 $E_0$ から水平地盤反力係数 $k$ を算定し、改良深さ $1/\beta=7.0\text{m}$ としている。受働土圧領域に相当する改良幅は、両端の杭から $7.0\text{m}$ とした。地盤改良は、改良率 $a_p=78.5\%$ 、改良体の一軸圧縮強度 $q_{up}=400\text{kN/m}^2$ である。

### 2.2 解析モデル

2次元モデル解析とし平板要素を用いた(図-2)。なお、本検討の2次元解析モデルでは、事前に3次元解析を実施し、それらの相関性からフーチング幅を奥行きとして設定した<sup>7), 8)</sup>。杭体および地盤は非線形材料構成則を適用し<sup>9)</sup>、フーチング、橋台は弾性要素とした。円形断面を有する杭部材は、断面二次モーメント $I$ がほぼ等しくなる矩形断面に置換した。構造物と地盤の境界面には全

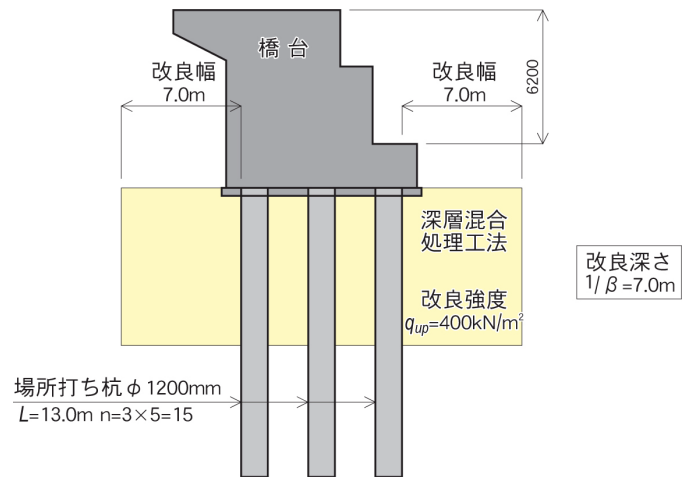


図-1 対象モデルの構造図

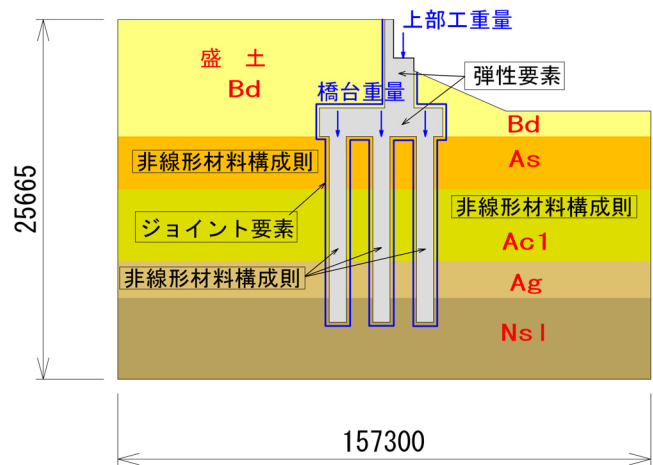


図-2 非線形有限要素法解析の2次元モデル図

てジョイント要素を配置した<sup>9)</sup>。フーチング幅に設定した奥行き方向の不連続性は、ジョイント要素で地盤と接続した。なお、解析領域は図-2に示すように地盤全層厚さの約10倍とし、境界には粘性境界要素を設けた。

杭体のRC要素には、岡村・前川ら<sup>10), 11)</sup>が開発した鉄筋コンクリートの履歴依存型非線形構成則を適用した。地盤要素は、その偏差応力-ひずみ関係においてOsakiモデル<sup>12)</sup>を適用し、静水圧成分は線形弾性とした。構造物と地盤の境界面に配置したジョイント要素は、引張およびせん断剛性を0とし、圧縮剛性のみ設定することで要素間の接触・剥離を考慮した。

表-1 非線形有限要素法解析時の地盤入力物性値

| 記号                                 | 土質     | N値 | 単位体積重量<br>$\gamma_o$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 変形係数<br>$E_o$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | ポアソン比<br>$\nu$ | せん断弾性係数<br>$G_o$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | せん断強度<br>$S_u$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | せん断弾性波速度<br>$V_s$<br>(m/s) |
|------------------------------------|--------|----|----------------------------------------------|---------------------------------------|----------------|------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------|
| Bd                                 | 砂質土    | 3  | 19.0                                         | 74,000                                | 0.3            | 28,000                                   | 33                                     | 118                        |
| As                                 | 砂      | 1  | 17.0                                         | 31,000                                | 0.3            | 12,000                                   | 11                                     | 76                         |
| Ac1                                | 粘土質シルト | 2  | 16.5                                         | 53,000                                | 0.3            | 20,000                                   | 24                                     | 100                        |
| Ag                                 | 砂礫     | 30 | 20.0                                         | 465,000                               | 0.3            | 179,000                                  | 210                                    | 296                        |
| Ag                                 | 砂礫     | 42 | 20.0                                         | 608,000                               | 0.3            | 234,000                                  | 275                                    | 339                        |
| Nsl                                | 頁岩     | 50 | 20.0                                         | 699,000                               | 0.3            | 269,000                                  | 244                                    | 363                        |
| 地盤改良体 強度 $q_{up}=400\text{kN/m}^2$ |        |    | 17.0                                         | 124,000                               | 0.17           | 53,000                                   | 157                                    | 175                        |

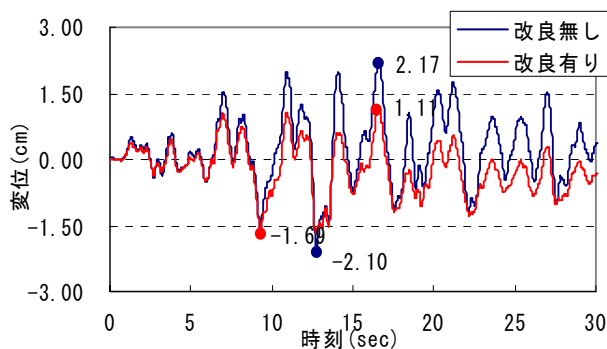


図-3 水平変位の時刻歴応答波形（レベル1地震動）

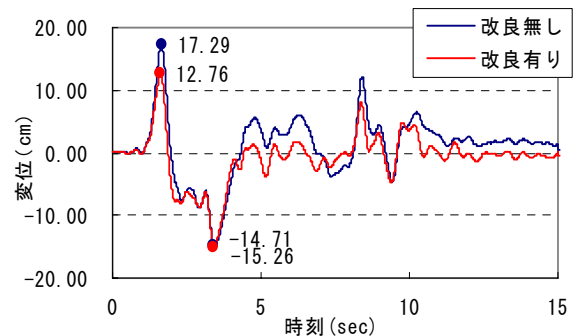


図-4 水平変位の時刻歴応答波形（レベル2地震動）

地盤物性値として、原地盤および複合地盤の単位体積重量  $\gamma$ 、変形係数  $E$ 、ポアソン比  $\nu$ 、せん断弾性係数  $G$ 、せん断強度  $S_u$ 、せん断弾性波速度  $V_s$  を設定した(表-1)。

### 3. 動的解析による耐震性能の検証

複合地盤杭の動的挙動は入力する地震動の規模によって改良体の影響が異なることが考えられるため、入力地震動として時刻歴加速度波形のうち、レベル1およびレベル2の2種類の地震動を用いた<sup>13)</sup>。

#### 3.1 杭変位

図-3・4は、地盤改良無しと地盤改良有りの場合の、それぞれレベル1・レベル2の地震動を入力した際に解析で得られた、フーチングの水平変位の時刻歴応答波形を示している。

変位はフーチング下面中心の最大相対変位（フーチング下面中心の絶対変位と杭下端部の絶対変位の差の最大値）であり、正が前面側（河川側）への変位、負が背面側（道路側）への変位を表している。

レベル1地震動では、地盤改良無しの前面側最大変位 2.17cm が改良後は5割の1.11cm まで減少している。また、レベル2地震動では、地盤改良無しの場合の橋台前面側最大変位 17.29cm に対し、改良後は7割程度の12.8cm に減少している。つまり、地盤改良を施すことで地震時に杭変位が抑止され、耐震性能が向上した。

#### 3.2 杭体断面力

図-5・6にレベル2地震動における地盤改良無しと有りの場合の、解析で得られた杭に発生する曲げモーメント  $M$  とせん断力  $S$  を示した。対象としたのは前面側（河川側）の杭である。杭曲げモーメント  $M$  は、地盤改良無し

で杭頭値  $M=0.15\text{kN}\cdot\text{m}$  であるのに対し、地盤改良有りでは  $M=0.05\text{kN}\cdot\text{m}$  となり3割に減少している。同様に、せん断力  $S$  も地盤改良無しで杭頭値  $S=450\text{kN}$  であるのに対し、地盤改良有りでは  $S=120\text{kN}$  と1/3程度となった。また、地盤改良有りでは改良境界面でせん断力  $S$  が増加しているが、これは地盤改良無しの杭頭値と同程度で問題ない。従って、地盤改良効果により杭体断面力も変位と同様に減少傾向を示し、耐震性能が向上する結果となった。

#### 3.3 杭体ひずみ

地盤改良の有無による最大ひずみの発現の違いを図-7・8に示す。図-7・8では、杭体のひび割れ時のひび割れ直交方向のコンクリートの平均引張ひずみに着目し、0.1%を限界値として区分した。なお、0.1%はRC部材が通常の使用状態としての限界値の目安として鉄筋応力度で  $140\text{N/mm}^2$  程度相当に設定した<sup>13)</sup>。これによると、改良無しの場合は、杭頭部と杭地中部の中間部に限界値を上回る最大  $\epsilon_{\max}=0.5\%$  のひずみ履歴を受けている。これに対して、改良有りの場合は0.1%を上回るひずみ履歴を受けている位置は同様に最大  $\epsilon_{\max}=0.3\%$  を示したが、改良無しの場合に比べてその領域が小さくなる傾向が確認された。これは、地盤改良を行なうことで杭の動的挙動が縮小し、杭体のひび割れ発生領域が縮小するためと考えられる。

図-9・10はレベル1地震動における地盤改良無しと地盤改良有りの杭頭軸方向ひずみの時刻歴応答値を整理したものである。最大値で、地盤改良無しの杭頭引張ひずみ  $\epsilon_{t\max}=0.42\times 10^{-3}$  と圧縮ひずみ  $\epsilon_{c\max}=-0.37\times 10^{-3}$  が、地盤改良有りでは  $\epsilon_{t\max}=0.36\times 10^{-3}$  と  $\epsilon_{c\max}=-0.28\times$

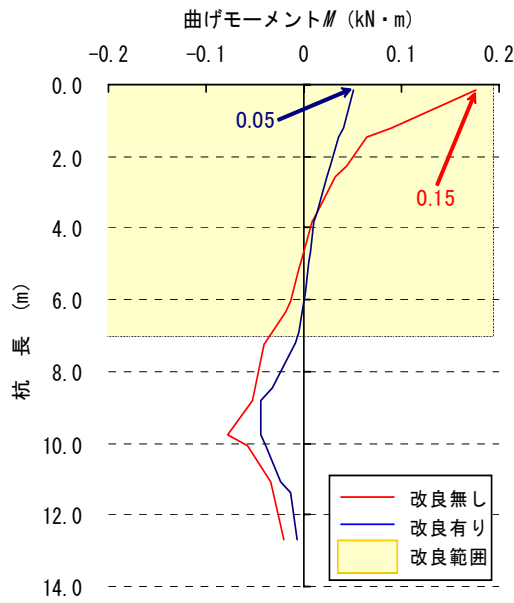


図-5 杭体の曲げモーメント

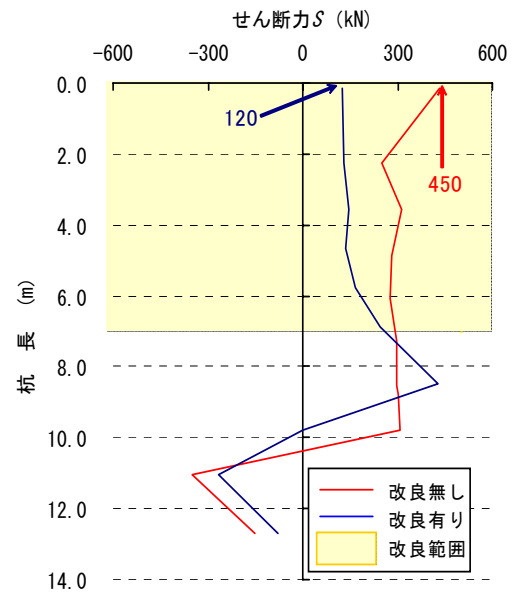


図-6 杭体のせん断力

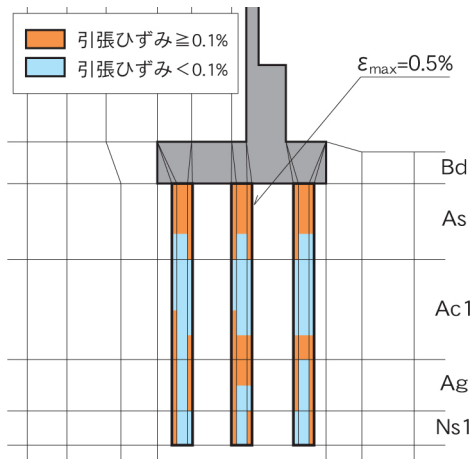


図-7 杭体のひずみの発生状況（地盤改良無し）

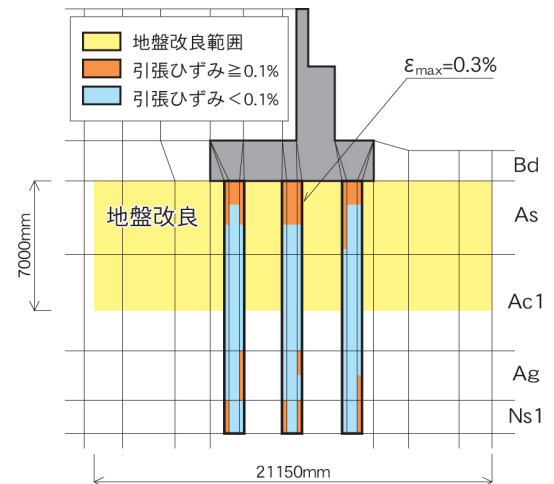


図-8 杭体のひずみの発生状況（地盤改良有り）

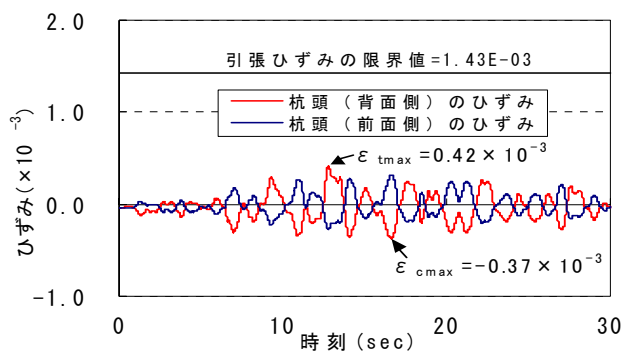


図-9 レベル1地震動における杭頭の杭軸方向ひずみの時刻歴応答波形（地盤改良無し）

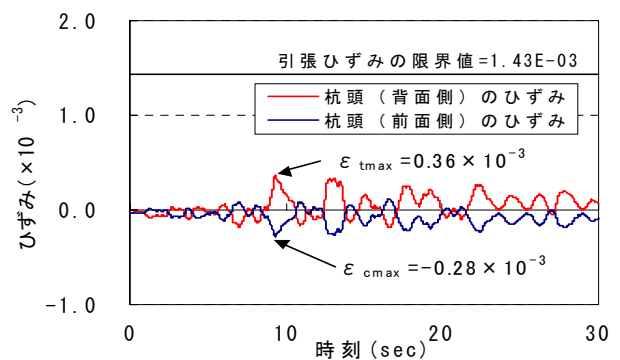


図-10 レベル1地震動における杭頭の杭軸方向ひずみの時刻歴応答波形（地盤改良有り）

$10^{-3}$ とわずかに減少している。同様に、図-11・12はレベル2地震動における地盤改良無しと地盤改良有りの杭頭の杭軸方向ひずみの時刻歴応答値を整理したものである。地盤改良無しの杭頭引張ひずみ  $\epsilon_{t \max} = 4.80 \times 10^{-3}$  および圧縮ひずみ  $\epsilon_{c \max} = -2.15 \times 10^{-3}$  が、地盤改良有りで  $\epsilon_{t \max} = 2.53 \times 10^{-3}$  および  $\epsilon_{c \max} = -0.89 \times 10^{-3}$  に半減している。

### 3.4 耐震性能の照査

複合地盤杭基礎の耐震性能を照査するために、道路橋示方書<sup>14)</sup>に示される耐震性能を満足する杭体のひずみの限界値を設定した。

道路橋示方書<sup>14)</sup>における耐震性能1(地震によって橋としての健全性を損なわない性能)の限界値とし、鉄筋

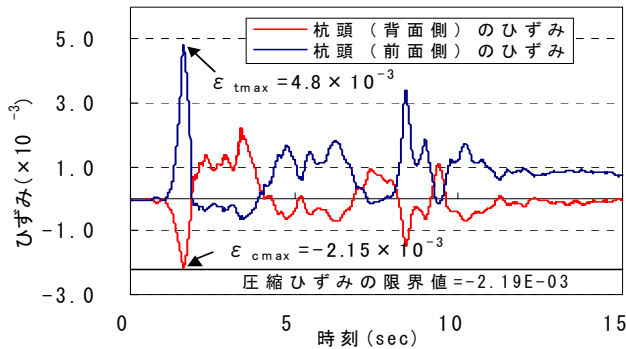


図-11 レベル2地震動における杭頭の杭軸方向ひずみの時刻歴応答波形（地盤改良無し）

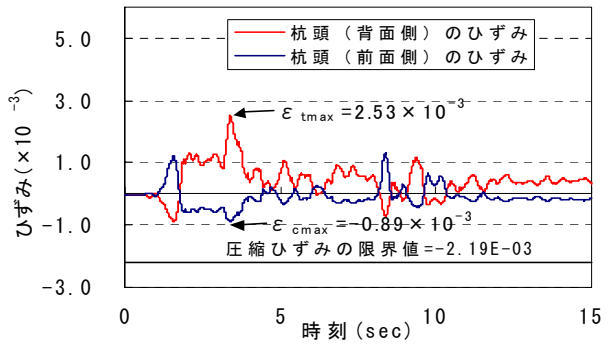


図-12 レベル2地震動における杭頭の杭軸方向ひずみの時刻歴応答波形（地盤改良有り）

の降伏応力時の引張ひずみ  $\varepsilon_t$  を限界値とした<sup>13)</sup>。また、耐震性能 2（地震による損傷が限定的なものに留まり、橋としての機能回復が速やかに行い得る性能）の限界値として、コンクリートの最大強度時の圧縮ひずみ  $\varepsilon_c$  を限界値とした<sup>18)</sup>。なお、道路橋ではレベル 1 地震動では耐震性能 1、レベル 2 地震動では耐震性能 2 を確保することが求められている。

鉄筋の降伏応力時の平均ひずみ  $\varepsilon_t$ 、コンクリートの最大強度時のひずみ  $\varepsilon_c$  を算定した<sup>9)</sup>。その結果、設定した限界値は図-9～12 に示すようにレベル 1 地震動で  $\varepsilon_t = 1.43 \times 10^{-3}$ 、レベル 2 地震動で  $\varepsilon_c = -2.19 \times 10^{-3}$  となった。杭体に発生している引張ひずみは、レベル 1 地震動で地盤改良の有無に関係なく限界値  $\varepsilon_t = 1.43 \times 10^{-3}$  以下となっており、所要の耐震性能 1 が確保されている。一方、圧縮ひずみは、レベル 2 地震動において地盤改良無しが限界値  $\varepsilon_c = -2.19 \times 10^{-3}$  と同程度の値を示し、所要の耐震性能 2 の限界値付近にある。これに対し、改良有りでは限界値を大きく下回っており耐震性能 2 が確保される結果となった。

以上より、本橋台において、基本設計で設定した範囲に深層混合処理工法による地盤改良を杭周辺に実施することで、杭変位やひずみが減少し杭の耐震性能が向上すると考えられる。

#### 4. まとめ

本検討では、2 次元動的非線形有限要素法により複合地盤中の杭の耐震性能について解析し、以下の結論を得た。

- 1) 杭周辺に地盤改良を施すことで水平地盤反力が増加し、地震時の杭水平変位や杭体ひずみの発現が抑止され耐震性能が向上することが明らかとなった。
- 2) 改良深さを  $1/\beta$  に設定し震度法で設計した複合地盤杭は、2 次元モデルの非線形動的有限要素法による動的解析より、レベル 1・レベル 2 地震動の耐震性能の照査を満足する結果となった。

#### 参考文献

- 1) 秋吉卓，淵田邦彦，松本英敏，尻無濱昭三：地盤改良による杭基礎－構造物系の耐震設計について，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.61-66, 2001。
- 2) 南荘淳，安田扶律，藤井康男，田蔵隆，大槻明，淵本正樹，中平明憲，黒田兆次：道路橋橋脚基礎杭の地震

被災解析とその対策法に関する研究，土木学会論文集，No.661 / I -53, pp.195-210, 2000。

- 3) 富澤幸一，西川純一：深層混合処理工法により形成した複合地盤における杭設計手法，土木学会論文集，No.799 / III -72, pp.183-193, 2005。
- 4) Tomisawa, K., Nishikawa, J : A design method concerning horizontal resistance of piles constructed in improved ground, 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, September 12-16, CD Rom 2h, pp.2187-2192, 2005。
- 5) 前田良刀，緒方辰男，徐光黎，平井卓：地盤複合基礎の開発とその支持力特性，土木学会論文集，No.686 / VI -52, pp.91-107, 2001。
- 6) 前中敏伸，土屋富雄，川崎浩司，西崎丈能：セメント系地盤改良体と杭の併用基礎のモデル土槽実験，土木学会年次学術講演会講演概要集第3部，vol.56, No.A, pp.706-707, 2001。
- 7) 石原哲哉，三浦房紀：構造物－杭－地盤系の相互作用解析における3次元解析と2次元解析との比較，土木学会論文集，No.501 / I -29, pp.123-131, 1994。
- 8) 黒澤到，福武毅芳，藤川智，大槻明，宇野壽郎：二次元および三次元液化解析の比較による杭・構造物系のモデル化の検討，第9回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.1351-1356, 1994。
- 9) Ashraf Shawky, 前川宏一：経路依存性を考慮したRC／地盤系の非線形相互作用に対する計算力学的アプローチ，土木学会論文集，No.532 / V -30, pp.197-207, 1996。
- 10) 岡村 甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解と構成則，技報堂出版，1991。
- 11) Maekawa, K, Pimanmas, A. and Okamura, H. : Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, London, 2003。
- 12) Ohsaki, Y.: Some Notes on Masing's Law and Non-Linear Response of Soil Deposits, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo(B), Vol.XXXV, No.4, pp.513-536, 1980。
- 13) 土木学会：コンクリート標準示方書 耐震性能照査編，pp.107-112, 2002。
- 14) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，pp.4-118, 2002。