杭－地盤系の非線形性を考慮した杭基礎建物の地震応答性状

EARTHQUAKE RESPONSE OF BUILDING SUPPORTED ON PILES CONSIDERED WITH NONLINEARITY OF PILE-SOIL SYSTEM

秀川 貴彦*, 岸本 美季*, 柏 尚稔**, 宮本 裕司***, 田村 修次****

*Takahiko HIDEKAWA, Miki KISHIMOTO, Hisatoshi KASHIWA,
Yuji MIYAMOTO and Shuji TAMURA*

To investigate effects of nonlinear soil-structure interaction, we study the influence of the nonlinearity of pile damage on building response. In this paper, it is presented that the results of the centrifuge tests considering elasto-plastic behavior of pile and its simulation analysis. The following conclusions were obtained: (1) The response of the building, which is calculated considering the nonlinear characteristics of pile damage during the main shock, is smaller than that of the building which is calculated without the nonlinearity of pile. (2) In frequency transfer function between the ground and the building, the reduction of predominant frequency is mainly caused by the nonlinearity of the soil around piles. (3) The nonlinearity of pile damage has a very small effect in the building response in aftershock.

Keywords : Nonlinear interaction, Pile damage, Centrifuge test, Structure response

非線形相互作用, 杭被害, 遠心実験, 地震応答

1. はじめに

杭基礎が用いられるような軟弱地盤では、強震動入力によって地盤は非線形化し、また杭および上部構造も塑性化するため地盤と建物の動的相互作用は複雑となる^①。そのため、上部構造への真の地震力を評価するといった点から、地盤や杭基礎の非線形性に関する実証データの蓄積は必要である。また、2004年新潟県中越地震を含めた最近の地震被害報告では、大加速度の強震記録が観測されるにも関わらず、周辺建物に大きな被害が見られないという指摘がされている^②。この原因として、建物の有する耐力の余力や、地表での観測記録と建物実効入力動の違いのほか、地盤と基礎との非線形相互作用効果等が挙げられている^③が、未だ全容が解明されるには至っていない。

既往の研究事例の中では、宮本ら^④、長谷川ら^⑤は、1995年兵庫県南部地震における杭基礎建物を対象として、液状化などを考慮した非線形地震応答解析を行っており、被害が小さかった要因について分析している。2004年新潟県中越地震については、宮本ら^⑥や土方ら^⑦が、地盤－基礎の非線形相互作用を考慮した応答解析を行っており、非線形相互作用が建物応答に与える影響について分析している。また、護ら^⑧は2007年新潟県中越沖地震の記録を用いて、杭基礎建物の応答評価を行っている。対象とする建物をSRモデルに置換することで、相互作用の影響を評価しており、応答結果と建

物被害の関係について検討している。

大地震による液状化や地盤の塑性化などの非線形相互作用効果を取り入れた実験や解析的検討は多数行われている中、杭の非線形性に着目した地震応答解析はそれほど多くない。酒向ら^⑨は、変動軸力を考慮した杭基礎の応答解析を行い、変動軸力の違いにより塑性化した杭が上部構造の応答に与える影響について分析を行っている。長江ら^⑩は、地震応答解析により、杭頭の曲げ降伏を認めることで上部構造の塑性変形を抑えることができるとしている。また、平塚ら^⑪は、杭頭接合条件の異なる杭基礎建物の解析から、建物応答に寄与する杭頭接合条件の影響について分析している。杭－地盤系の非線形性が建物応答に与える影響を実験により検討した例は、実地盤での大型実験^{例⑫}や大型振動台実験^{例⑬, ⑭}などがあるが、数は限られている。

そこで、本論文では、地盤と杭の塑性化による非線形相互作用を取り入れた遠心振動実験を行い、地盤－杭基礎系の非線形性が、強震動時の杭基礎建物の応答に与える影響を解明する。具体的には、杭頭部の杭断面が異なる三種類の杭を用いて、杭頭部を意図的に塑性化させる実験を行う。それに加えて、遠心振動実験のシミュレーション解析を、三次元有限要素解析を用いて行い、地盤の塑性化と杭頭部の塑性化が杭基礎建物の応答に与える影響について検討する。

* 大阪大学大学院工学研究科 大学院生

** 大阪大学大学院工学研究科 助教・博士(工学)

*** 大阪大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)

**** 京都大学防災研究所 准教授・博士(工学)

Graduated Student, Graduate School of Eng., Osaka University

Assist. Prof., Graduate School of Eng., Osaka University, Dr. Eng.

Prof., Graduate School of Eng., Osaka University, Dr. Eng.

Assoc. Prof., DPRI, Kyoto University, Dr. Eng.

図1 杭基礎試験体と加速度計設置位置

図2 杭詳細図

図3 単調載荷曲げ実験におけるM-φ関係

図4 ひずみ計測位置

図5 入力地震動

2. 遠心振動実験

2.1 実験概要

実験は、京都大学防災研究所の遠心力荷重装置を用いて 40g 場で行った。以下、試験体図および実験結果は全て実大スケールに換算して示す。図 1 に試験体と加速度計の設置位置を示す。実験は、図 2 に示す杭基礎の杭頭条件が異なる 3 ケースについて行う。Case1 は直径 8mm、肉厚 2mm、長さ 201mm (実寸大直径 32cm、肉厚 8cm) のアルミ製の中空杭 (以降、普通杭と呼ぶ) を用いている。Case2 は杭頭部を塑性化させるため、普通杭の杭頭部を直径 6mm、肉厚 1mm (実寸大直径 24cm、肉厚 4cm) に削った杭 (塑性杭と呼ぶ) を用いている。Case3 は、杭頭部を直径 5.34mm、肉厚 0.67mm (実寸大直径 21.4cm、肉厚 2.7cm) とした杭 (強塑性杭と呼ぶ) を用いている。各杭の単調載荷の曲げ実験における曲げモーメント M-曲率 ϕ 関係を図 3 に示す。

せん断土槽は土槽幅 45cm (加震方向)、奥行き 15cm、高さ 20cm である。地盤材料は豊浦砂を使用し、地盤の製作方法は空中落下法を用いた。地盤構成は、せん断土槽の底から 2cm の層を相対密度 $Dr=90\%$ で製作し、それより上部の地盤はややゆるい地盤として $Dr=60\%$ で製作した。杭基礎模型は、真鍮製の基礎構造・板バネ・上部構造で構成されている。基礎部は 4 本の杭で支持されており、杭端は真鍮製の台座に、杭頭は基礎部に固定した。基礎底面と地盤は 3mm (実寸大 12cm) 離れている。基礎の質量は 0.46kg (実物

重量約 29.5t)、上部構造の質量は 2kg (実物重量約 128t) で基礎固定時の固有振動数は 105Hz (実物の固有振動数約 2.6Hz) である。計測は、地盤にはせん断土槽の底部と地表面に、水平方向加速度計を設置した。杭基礎模型には、基礎と上部構造に水平方向加速度計を設置した。図 4 にひずみ計測位置を示す。1 本の杭にひずみゲージを 10 レベル貼付し、他 3 本の杭にひずみゲージを 3 レベル貼付した。

入力する地震波は、八戸波 (八戸 1968 NS) を用いた。Case1 の場合は、小加震 ($A_{max}=30\text{gal}$)、大加震 ($A_{max}=250\text{gal}$) の順序で加震を行った。Case2、Case3 の場合は、Case1 と同じように加震した後、一度試験体の杭頭部を確認し、その後、引き続いて余震による応答性状の変化を調べるため小加震時の地震動を再び入力した。図 5 に、入力地震動の加速度時刻歴と加速度応答スペクトルを示す。また、図 5 には、入力地震動による地表面での加速度応答スペクトルを合わせて示す。

2.2 実験結果

上部構造の応答について入力条件の違いで比較して示す。図 6 に各 Case の上部構造の地表面に対するフーリエスペクトル比を示す。すべての Case で、小加震、大加震の順でピーク振動数が小さくなっている。これは、入力が大きくなったことで杭基礎近傍の地盤が塑性化したため、また、大加震によって杭頭部が塑性化したためと考えられる。

図6 地表面と上部構造のフーリエスペクトル比 (A1/A3)

図7 上部構造の加速度応答スペクトル

図8 杭の最大曲率分布

図9 振動実験における杭頭でのM- ϕ 関係

図10 上部構造の加速度応答スペクトルの比較 (余震との比較)

上部構造の応答を杭頭条件の違いで比較するため、図7に減衰定数5%の上部構造の加速度応答スペクトルを示す。小加震のピーク振動数は、杭頭部の剛性が小さいほど長周期側に移動している。これは、杭頭部の剛性の差が連成系の周期に影響を与えていることが考えられる。ピーク値については、小加震では杭頭条件が異なっても差が見られないが、大加震ではCase1、Case2、Case3の順でピーク値が小さくなっている。入力地震動が大きい場合、杭頭の塑性化によって建物の応答特性は大きく変化することがわかる。

図8に杭の最大曲率分布を示す。入力地震動の大きさによらず、

杭頭部で曲率が大きくなっている。図9に遠心振動実験における杭頭での曲げモーメント M - 曲率 ϕ 関係を示す。なお、弾性域でのE2からE10での曲げモーメントは曲率に曲げ剛性を乗じることで算出し、塑性化したE1での杭頭曲げモーメントはE2、E3の曲げモーメントを線形で外挿して算出した。大加震ではCase2、Case3で杭頭が塑性化しており、 M - ϕ 関係はループを描いている。

大加震より前の小加震時の上部構造の応答と、大加震後に入力した余震としての小加震時の上部構造の応答を比較する。図10に大加震前後の上部構造の加速度応答スペクトル($\eta=5\%$)を比較して示

図11 解析モデル

表1 材料定数

	密度(t/mm^3)	ヤング係数(N/mm^2)	ポアソン比	材料モデル
上部構造	9.37×10^{-9}	1.03×10^5	0.30	剛体
柱	8.40×10^{-9}	1.03×10^5	0.30	弾性体
基礎	8.40×10^{-9}	1.03×10^5	0.30	剛体
杭	2.70×10^{-9}	6.55×10^4	0.30	弾性体
基盤	8.40×10^{-9}	1.03×10^5	0.30	剛体

	密度(t/mm^3)	せん断弾性係数(N/mm^2)	ポアソン比	材料モデル
地盤 ($\alpha=80$)	1.50×10^{-9}	6.7	0.33	弾塑性体
		10.5		
		12.9		
		15.7		
		18.7		
	1.80×10^{-9}	284.2		

表2 杭頭部の材料定数

	ヤング係数 (N/mm^2)	降伏応力 (N/mm^2)	降伏後の塑性硬化係数
Case1	6.55×10^4		
Case2	1.02×10^4	46.69	2.65×10^3
Case3	9.56×10^3	24.87	1.42×10^3

図12 地盤モデルの拘束条件の概要

図13 地表面の加速度応答スペクトル

す。大加震前後では、上部構造の応答にそれほど大きな差は生じなかった。これは、杭頭部が塑性化した後でも応答が小さい場合は、杭頭剛性は弾性時とほぼ変わらないため、また、杭周辺地盤は大加震により少し沈みこみ、多少の剥離が観察されたものの、応答に与える影響は大加震前後であまり変わらないためと考えられる。これより、本震により地盤の非線形化が進み、杭頭部が塑性化しても、余震による上部構造の応答は、本震前と比べてそれほど大きく変わらないことが分かる。

3. シミュレーション解析

3.1 解析モデルおよび解析手法

上部構造、柱、基礎、杭および地盤を、それぞれ三次元 FEM を用いてモデル化し、汎用ソフトである LS-DYNA¹⁰⁾を用いてシミュレーションを行う。図 11 にシミュレーション解析モデルを示す。上部構造および基礎はソリッド要素で剛体、柱はビーム要素で弾性体、地盤はソリッド要素で弾塑性体、また、杭はシェル要素で杭頭

部を弾塑性体、杭頭部以外を弾性体としている。杭と地盤の要素サイズは加振振動数の通過を考慮し、杭および杭周辺地盤では杭全長の剥離を考慮した接触条件を採用するため、要素サイズをより細かくした。各部の材料定数を表 1 に示す。地盤および上部構造を含めた杭支持建物には、それぞれ一次固有振動数に対して 5%となるような質量比例型の各部減衰を設定した。また、地盤の外周上の節点については、図 12 のように深さが等しい x,y,z 方向の変位が同一となるように設定した。

地盤のせん断弾性係数は、次に示す各層の S 波速度を用いて設定した。各層の S 波速度は深さに応じて式(1)¹⁰⁾のような関係があるとし、重複反射理論による一次元波動論 (Shake) を用いて、小加震時の加速度応答波形が実験結果と対応する係数 α を求めることで S 波速度を算出した。このシミュレーションでは $\alpha=80$ 程度が適当であった。

$$Vs = \alpha(H)^{1/4} \quad (1)$$

図14 実験とシミュレーション解析の比較(加速度時刻歴)

図15 実験とシミュレーション解析の比較(加速度応答スペクトル)

ここで、 V_s は S 波速度、 H は深さである。なお、相対密度 $Dr=90\%$ の層は、S 波速度を 400m/s とし、地盤のせん断弾性係数の算出には式(2)を用いた。

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (2)$$

地盤の非線形特性は、地盤内の応力がモール・クーロンの破壊基準に達することで塑性するような弾塑性体とし、標準的な砂地盤を想定して内部摩擦角 35° 、膨張角 5° とした。杭は図 11 に示すようにシェル要素でモデル化を行っている。杭頭部の材料定数を表 2 に示す。各杭頭部の初期曲げ剛性は、図 3 に示した単調載荷実験により得られた曲げモーメント M —曲率 ϕ 関係の実験結果の値と等価になるようにヤング係数を設定した。降伏応力や降伏後の塑性硬化係数は、実験結果と整合するように材料定数を設定した。図 3 には、杭頭部の単調載荷試験の結果と、各杭モデルに単調載荷をして得られた解析結果を合わせて示している。なお、本解析では主要動による応答を把握するため、入力地震動の主要動を含む 23 秒間の解析を行った。

3.2 上部構造と杭の応答

まず、図 13 に小加震と大加震により得られた地表面の加速度応

図16 杭の最大曲率分布 (大加震)

答スペクトルを示す。小加震では、実験結果に対して全体的に良好な対応を示している。大加震では、連成系の周期である約 0.5s 以降については概ね対応しているが、周期 0.2s~0.3s については実験に比べて過大評価となっている。地盤は、モール・クーロン条件を用いた弾塑性体としており、地盤内の応力が降伏局面に達するまでは弾性体として挙動し、これにより地盤の弾性固有周期にピーク値を有するためと考えられる。

図17 解析における杭頭部のM- ϕ 関係（大加震）

図18 余震による加速度応答スペクトル(h=5%)

図19 地表面と上部構造のフーリエスペクトル比

図20 杭頭部と杭周辺部の塑性ひずみ分布（大加震）

小加震と大加震により得られた上部構造の加速度時刻歴を図14に、加速度応答スペクトル(h=5%)を図15に、実験結果と解析結果とを比較して示す。時刻歴波形の解析結果は、実験結果をよく再現できていることが確認できる。加速度応答スペクトルにおいて、小加震のCase1では実験と解析でピーク振動数に多少の差が見られるものの、ピーク値は実験と対応しており、概ね実験結果を再現できている。大加震のCase3では、周期0.4s~1.0s近傍で多少の差が見られるものの、スペクトルの形状は対応している。

図16に実験と解析で得られた大加震による杭の最大曲率分布を比較して示す。各Caseにおいて、解析結果の杭頭部の曲率は、実験結果をよく再現できていることが確認できる。図17には、解析モデルにおける杭頭部の曲げモーメント-曲率関係を示している。図9で示した実験における杭頭部のM- ϕ 関係と概ね対応しており、Case2の杭頭部の塑性化に比べ、Case3では大きく塑性化が進んでいることが確認できる。

次に、大加震による残留ひずみを残したまま、継続して小加震を入力することで解析により余震の応答を検討する。図18にCase3の余震による上部構造の加速度応答スペクトルを実験結果と解析結果を比較して示す。実験と解析のスペクトルの形状にそれほど大き

な変化は見られない。そのため、本震により杭頭部が塑性化しても、余震による上部構造の応答は本震前と比べてそれほど大きく変わらないことが解析によっても確認できる。

3.3 入力地震動による伝達特性の変化

図19に地表面と上部構造のフーリエスペクトル比を、Case3の実験と解析の両方について示す。実験と解析で、どちらも小加震に比べ大加震の場合はピーク周波数が小さくなり、応答倍率も小さくなっている。このような傾向は、Case1とCase2においても確認している。ピーク振動数が小さくなる原因として、大加震による杭頭部および杭周辺地盤の塑性化が考えられる。

図20には、解析により得られたCase3の杭頭部と杭周辺地盤の相当塑性ひずみ分布を示している。それぞれ4本の杭頭部に塑性ひずみが発生しており、塑性化している。また、それぞれ4本の杭周辺の地盤が大加震によって塑性化している。しかし、杭間距離が広いために、杭周辺地盤の塑性化が他の杭に及ぼす影響はあまり大きくないことが確認できる。

4. 杭頭部の塑性化による影響

前章のCase3の解析モデルを用いて、大加震による杭頭部の塑性

図21 杭の最大曲率分布

図22 杭の最大曲率分布
(杭頭部を除く)

化が、杭基礎建物の応答にどのような影響を与えているのかを検証する。Case3の解析モデルと、材料定数はそのまま、杭頭部を弾性体とした応答結果と比較する。なお、杭頭部の塑性化による応答の違いをより明瞭にするために、入力地震動はCase3のシミュレーション解析に用いた大加震の波形の最大加速度を2倍(500gal)にした波形を用いた。

4.1 杭頭部の塑性化が杭応答に与える影響

杭全体の最大曲率分布を図21と図22に示す。図21では杭頭部を含めた杭全体の最大曲率分布を、図22では杭頭部を除いた杭の最大曲率分布を示している。図21より、弾塑性の杭頭部では弾性の杭頭部よりも大きい曲率が確認できる。深さ0.5m~1.0m付近の杭頭部直下の部分では、弾塑性の方が弾性に比べ小さい曲率となっている。これは、杭頭部が塑性化して、半剛接合に近い状態になったことにより、地中における杭の曲率分布および応力分布が変化したためと考えられる。次に、杭頭部のM-φ関係の履歴曲線を図23に示す。弾性の場合、最大曲率0.074(1/m)を示しており、また、弾塑性の場合、最大曲率0.094(1/m)となる。弾塑性の杭頭部の履歴曲線はバイリニア形に近い形状となり塑性化が進んでいることが確認できる。

4.2 杭頭部の塑性化が建物応答に与える影響

図24に、上部構造の加速度時刻歴と加速度応答スペクトル(h=5%)を示す。加速度の最大値は、弾塑性の場合で約600gal、弾性の場合で約680galとなり、どちらも解析上の時間で約5.9sに最大値を示している。加速度応答スペクトルでは、周期0.5~1.0s近傍において、弾塑性と弾性で約200gal~300gal程度の差が見られる結果となった。

図25に、地表面と上部構造間のフーリエスペクトル比を示す。図25には、Case3における小加震と大加震の解析結果も合わせて示している。まず、小加震と大加震、大加震の2倍入力で行った杭頭部が弾塑性の3ケースに着目する。入力地震動が大きくなることで、ピーク振動数や応答倍率が小さくなっていることが確認できる。次に、大加震の2倍入力で行った弾塑性と弾性の解析結果に着目する。ピーク振動数は弾塑性と弾性の場合でどちらも約1.3Hzとなり、大きな変化は見られない。一方、ピーク振動数における応答倍率は弾性的の場合に比べて約2割低減されている。これは、杭頭部が塑性

図23 杭頭部のM-φ関係

図24 加速度時刻歴と加速度応答スペクトル(h=5%)
(杭頭部が弾塑性と弾性の比較)

図25 地表面と上部構造のフーリエスペクトル比

化し変形が大きくなったことで、杭体自身の減衰が大きくなったと考えられる。

以上より、入力地震動の増大により地盤－杭基礎－上部構造連成系のピーク振動数は低振動数側に移行し、建物応答も小さくなる原因として、杭周辺地盤の塑性化の影響が大きいことや、杭頭部の塑性化により応答振幅も低減することがわかる。

5. 結論

本論文では、地盤と杭の塑性化による非線形性を考慮した遠心振動実験と、三次元有限要素解析を行い、杭頭部の塑性化が杭基礎建物応答に与える影響について分析を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- ① 遠心振動実験とシミュレーション解析から、入力地震動の増大により杭周辺地盤と杭頭の塑性化が進行し、地表面－杭基礎間のフーリエスペクトル比のピーク振動数、応答倍率とも小さくなることが確認できた。
- ② 実験と解析の両面から、大加震前後の小加震時の上部構造の応答はそれほど大きな差は生じないことがわかった。このことから、曲げ非線形の影響が卓越する場合、本震により地盤が非線形化し、杭頭部が塑性化しても、余震による上部構造の応答は、本震前と比べて大きく変わらないことが確認できた。
- ③ 塑性化を考慮した杭頭部直下の曲率は、考慮しない場合に比べて小さくなった。これは、塑性化の際に、杭頭部が半剛接合に近い状態となったためであり、そのため、地中における杭の曲率分布も変化した。
- ④ 杭頭部の塑性を考慮した場合と考慮しない場合で解析を行った。その結果、杭頭部が塑性化することで、塑性化を考慮しない場合に比べて建物応答は小さくなった。
- ⑤ 入力地震動が同じ場合、杭頭部の塑性化を考慮しても地表面－上部構造間のピーク振動数にはそれほど変化が見られなかった。よって、入力地震動の増大による伝達関数のピーク振動数の低下は、杭周辺地盤の塑性化の影響が大きいことが考えられる。

なお、本論文は限られた杭材を用いて行った実験であり、杭の材質が異なる場合の検討は今後の課題としたい。

謝辞

本研究を行うにあたり、京都大学防災研究所の田村研究室の皆様にも多大なご支援をいただいた。ここに記して、厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計、2006.2
- 2) 日本建築学会：2004年新潟県中越地震被害調査報告書、2006.8
- 3) 日本建築学会、基礎構造系振動小委員会：ワークショップ「非線形相互作用と耐震設計－最近観測される強震記録と建物被害の関係を考える－」2008.10
- 4) 宮本裕司、酒向裕司、古山田耕司、三浦賢治：1995年兵庫県南部地震の観測記録を用いた液状化地盤における杭基礎構造物の応答に関する解析的検討、日本建築学会構造系論文集、No.493、pp.3-30、1997.3
- 5) 長谷川正幸、護雅史、洲本正樹、浅香美治：1995年兵庫県南部地震における造杭支持建物の被災シミュレーションと杭基礎の耐震性能、日本建築学会構造系論文集、No.543、pp.87-95、2001.5
- 6) 宮本裕司、土方勝一郎他：2004年新潟県中越地震での地震動と建物応答に関する研究(その1～3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造II、pp.455-460、2006.9
- 7) 土方勝一郎、杉山達也、徳光亮一、山添正稔他：2004年新潟県中越地震で被害を免れたRC造校舎の入力地震動と地震時応答に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No.631、pp1519-1527、2008.9
- 8) 護雅史、飯場正紀、山本耕司、宮本裕司他：2007年新潟県中越沖地震における強震観測記録を用いた被災建物の応答評価、日本建築学会構造系論文集、No.651、pp.933-942、2010.5
- 9) 酒向裕司、宮本裕司：変動軸力を考慮した杭基礎の地震応答に関する解析的検討、日本建築学会構造系論文集、No.523、pp.79-86、1999.9
- 10) 長江拓也、内村均他：変形性能に優れた鉄筋コンクリート杭に支持される建物の地震応答解析、日本建築学会構造系論文集、No.555、pp.107-114、2002.5
- 11) 坪塚高弘、平石久廣他：杭頭接合条件が建物の地震応答性状に与える影響に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No.649、pp.625-633、2010.3
- 12) 土方勝一郎、杉山達也、伊東賢伸、藤原一成、酒向裕司、宮本裕司：群杭基礎の非線形挙動に関する振動実験および解析研究、25本杭試験体の実験結果とシミュレーション解析、日本建築学会構造系論文集、No.615、pp.109-117、2007.5
- 13) 田端憲太郎、佐藤正義、時松孝次、鈴木比呂子他：E-ディフェンシスによる非液状化地盤中の杭基礎の震動実験、その1～5、日本建築学会大会学術講演概要集、B-1、pp.635-644、2007
- 14) 田村修次、肥田剛典：大型せん断土槽を用いた液状化実験におけるRC杭の破壊が構造物挙動に及ぼす影響、日本建築学会構造系論文集、No.635、pp.91-96、2009.1
- 15) LS-DYNA Version 971 User's Manual Volume I II、2007.6
- 16) 宮本裕司、福岡篤信、安達直人、酒向裕司：液状化地盤における杭基礎の地震時応力に関する研究－杭基礎の遠心模型実験と解析的検討、日本建築学会構造系論文集、No.482、pp53-62、1996.4

(2010年8月10日原稿受理、2010年12月2日採用決定)