

## 単杭モデルを用いた解析による学校建築の杭基礎被害に関する研究

鉄筋コンクリート造 水平地盤バネ 荷重増分解析  
2011年東北地方太平洋沖地震

## 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震において、杭基礎に被害を受けた建物が多く見られた<sup>1)2)</sup>。現行の法基準では上部構造は大地震に対する設計が義務付けられているのに対し、下部構造は大地震時の安全性の検討が規定されていない<sup>3)</sup>。しかし、杭基礎に被害が生じると建物の継続使用が困難になるため、学校建築など避難場所となる建物で杭基礎の被害を防ぐことが必要である。そのため今後は杭基礎についても大地震に対する設計が必要になるものと考えられる<sup>4)</sup>。

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震によって、杭基礎に被害を受けた学校建物の被害要因の解明を試みる。上記建物は支持地盤が傾斜しているため、長さの異なる杭が設置されているが、そのうち長さの長い杭が主に杭頭で破壊していたことが被害の特徴である。これらの被害要因を解明すれば、今後の被害防止策の検討に役立てることができる。上記建物の上部構造に着目して検討された既往の研究<sup>5)</sup>では、耐震壁による応力の集中及び、上部構造の偏心が被害の一因であると推測されている。また、同建物の下部構造に関する既往の研究<sup>6)</sup>では、柱頭の固定度が杭の破壊に関係していた可能性があると述べられている。しかし、上部構造から杭に作用する軸力やせん断力を含めた検討は十分になされていない。そこで本論では検討対象建物の下部構造に着目して単杭モデルの荷重増分解析を行い、

準会員 ○原紺純花\*<sup>1</sup> 正会員 秋田知芳\*<sup>2</sup>  
正会員 稲井栄一\*<sup>3</sup> 正会員 向井智久\*<sup>4</sup>  
正会員 柏尚稔\*<sup>4</sup> 正会員 平出務\*<sup>4</sup>  
正会員 金子治\*<sup>5</sup>

上部構造から作用する軸力やせん断力を含めて杭基礎に被害が生じた要因を検討する。

## 2. 検討対象建物概要

## 2.1 建物概要

解析対象は、2011年東北地方太平洋沖地震の被害に遭った学校建物で、杭基礎を有する3階建てのRC造建物である。地下階はなく、桁行方向（以下 X 方向と呼ぶ）が11スパンのラーメン構造（一部耐震壁）、梁間方向（以下 Y 方向と呼ぶ）が5スパンの耐震壁を含むラーメン構造である。本建物に配置されている壁の大半には開口が設けられている。図1に杭伏図、図2に柱状図を示す。基礎は杭基礎で、杭にはPHC杭（B種）400φが用いられており、現行の技術基準に従った耐震設計（許容応力度設計）が行われていた。杭長は1~4通りが13m（48本）、5~9通りが14m（71本）、10~12通りが16m（36本）となっており、計155本である。地盤は第2種地盤である。

## 2.2 被害概要

既往の報告<sup>6)</sup>によると上部構造は9、10通りの柱と壁に、幅1~2mmのひび割れが見られたが、コンクリートの剥落はわずかで、鉄筋は露出していない。下部構造は10~12通りの杭頭がすべて圧壊しており、PC鋼材が露出し変形もしていた。さらに、9通りを境に東側に建物が沈下していた。なお、液状化は見られなかった。

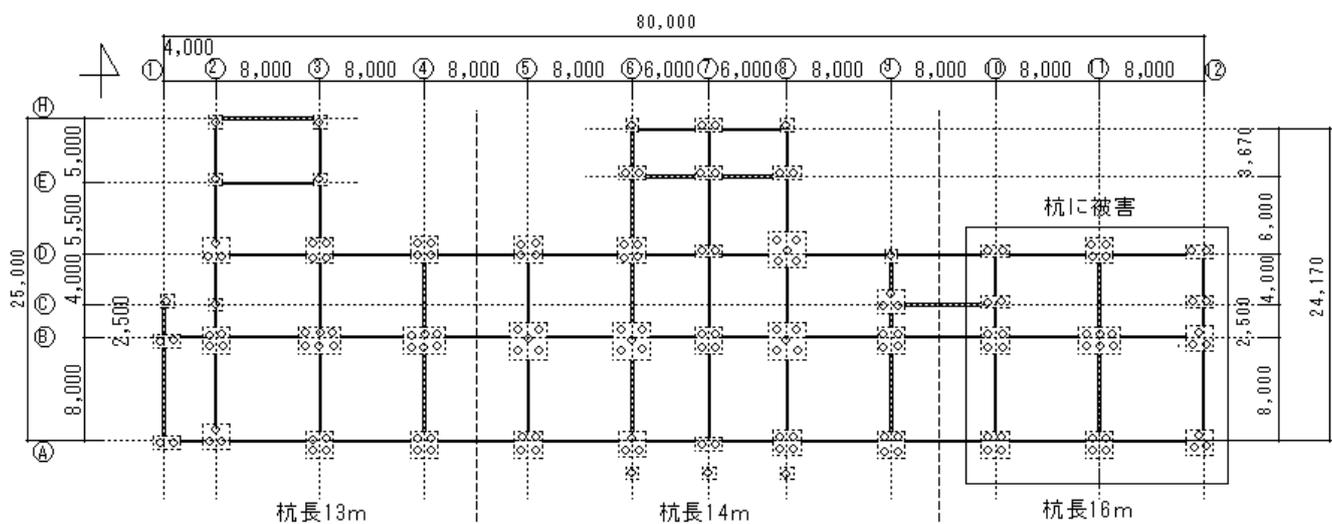


図1 杭伏図

### 3. 解析概要

#### 3.1 モデル化

図3にモデル図を示す。杭は単杭モデルとし、100cm ずつの要素に分割してモデル化している。杭断面は標準的なPHC杭(φ400)を参考にし、杭断面を36分割したFiberモデルでモデル化した。杭の要素の節点に水平地盤バネを取り付け、杭先端をピン支持とした。なお、本モデルでは杭長は地表面から杭先端までの長さとした。

図4に水平地盤バネの骨格曲線のモデル化の考え方を示す。水平地盤バネは、参考文献<sup>7)</sup>に基づいて水平方向の極限地盤反力 $P_{max}$ を求め、水平地盤反力 $P$ と水平変位 $d$ の関係を表す曲線を描き、 $d=0.1m$ のときの地盤反力を $F_u$ とし、 $1/3F_u$ となる点を第1折れ点の地盤反力 $F_c$ とする。また、第2折れ点後の剛性を初期剛性の $1/1000$ として、面積が等価となる点を第2折れ点とし、そのときの地盤反力を塑性地盤反力 $F_y$ とした。

#### 3.2 解析ケース

単杭モデルは、検討対象建物の杭基礎に従って13、14、16mの3種類を作成した。モデル上の杭頭から杭先端までの長さは、13mの杭が11.29m、14mの杭が12.29m、16mの杭が14.29mとなっている。それぞれの長さのモデルに

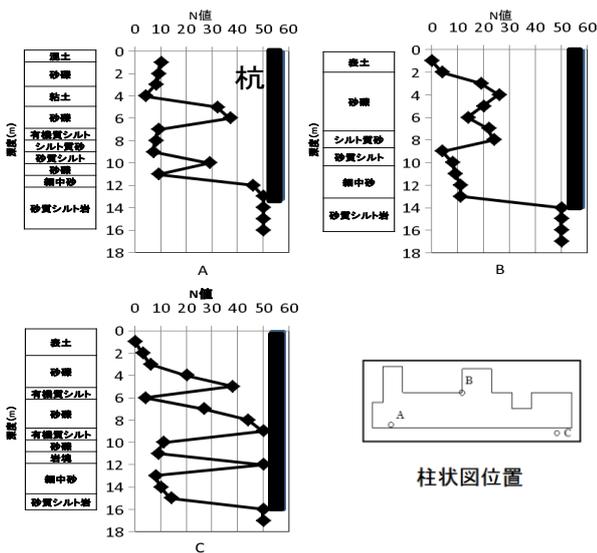


図2 柱状図

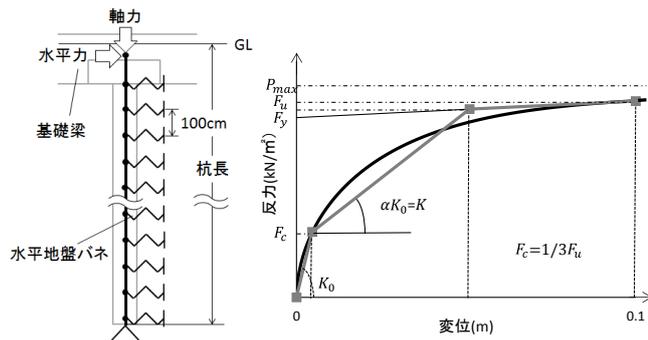


図3 杭のモデル化

図4 水平地盤バネのモデル化

一定の軸力(-500、0、500、1000、2000、圧縮側は正、引張側は負、単位は全てkN)をかけ、基礎梁位置に上部構造の慣性力に相当する水平力を与えて荷重増分解析を行った。解析は杭が概ね最大耐力を発揮する時点で終了した。

### 4. 解析結果

#### 4.1 杭頭せん断力—杭頭水平変位関係

図5に杭頭せん断力と杭頭水平変位の関係を示す。図中の○は、杭頭降伏時を示している。杭頭降伏時は、杭頭において最も外側の鉄筋が降伏した時のステップとする。最大耐力時の杭頭せん断力は、軸力2000kNのとき13mの杭でおよそ830kN、14mの杭でおよそ940kN、16mの杭でおよそ630kNとなり、16mの杭が最も小さい。杭頭水平変位は、13mの杭でおよそ80mm、14mの杭でおよそ50mm、16mの杭でおよそ90mmとなり、最大でおよそ90mmとなった。一方、杭頭降伏時の杭頭せん断力は、軸力2000kNのとき13mの杭でおよそ750kN、14mの杭でおよそ850kN、16mの杭でおよそ540kNとなり、16mの杭が最も小さい。杭頭水平変位は、13mの杭でおよそ30mm、14mの杭でおよそ25mm、16mの杭でおよそ35mmとなった。また、いずれの杭においても圧縮軸力を大きくするにつれてせん断剛性は上昇した。

#### 4.2 杭頭モーメント—曲率関係

図6に杭頭のモーメントと曲率の関係を示す。図中の○は、杭頭降伏時を示している。同じ大きさの軸力をかけたケースでは、いずれの杭もほぼ同じ杭頭モーメントとなった。これは、杭の長さは異なるが杭の断面は同じであるためである。また、いずれの杭においても圧縮軸力を大きくするにつれて杭頭モーメントは上昇した。

### 5. 杭の降伏耐力

#### 5.1 杭の曲げモーメントおよび水平変位の分布

図7に杭頭降伏時の杭頭曲げモーメント分布図および杭頭水平変位図を示し、図8に地盤の初期剛性の分布を示す。曲げモーメントおよび水平変位は圧縮軸力が大きい方が大きくなった。曲げモーメントは3つの杭で地表面からの深度が4m付近で最大となり、13mの杭は6m、14mの杭は5m、16mの杭は6m以深でほぼ0になっている。また、水平変位はいずれの杭も5m以深でほぼ0となった。図8より13mの杭は6m、14mの杭は4m、16mの杭は6mで地盤の初期剛性が急激に大きくなっていることがわかる。曲げモーメントおよび水平変位がほぼ0となる深度と一致することから、地盤の初期剛性の変化が杭上部に曲げモーメントと水平変位が集中している原因と考えられる。

#### 5.2 杭頭せん断力と軸力の関係

図9に最大耐力時と杭頭降伏時の杭頭せん断力と軸力の関係を杭長ごとに比較した図を示す。最大耐力とは図5で

示した杭頭せん断力の最大値、杭頭降伏時は図5の○の値である。最大耐力時、杭頭降伏時ともに13、14mの杭より16mの杭の杭頭せん断力が小さく、16mの杭の方が相対的に壊れやすいということがわかる。16mの杭の杭頭せん断力が小さくなるのは、地表から6mまでの地盤の初期剛性や塑性地盤反力が13m及び14mの杭に比べて小さいため

である。図10に参考文献<sup>5)</sup>で示されている上部構造の荷重増分解析から得られたベースシア係数  $CB=0.2$  時の上部構造の支点反力を、杭の本数で除して求めた杭1本あたりにかかるせん断力と軸力を示す。上部構造の解析結果と被害状況の比較から、地震時の水平力は  $CB=0.2$  程度であると推定されている。軸Dの8、9通りのせん断力と軸力が大

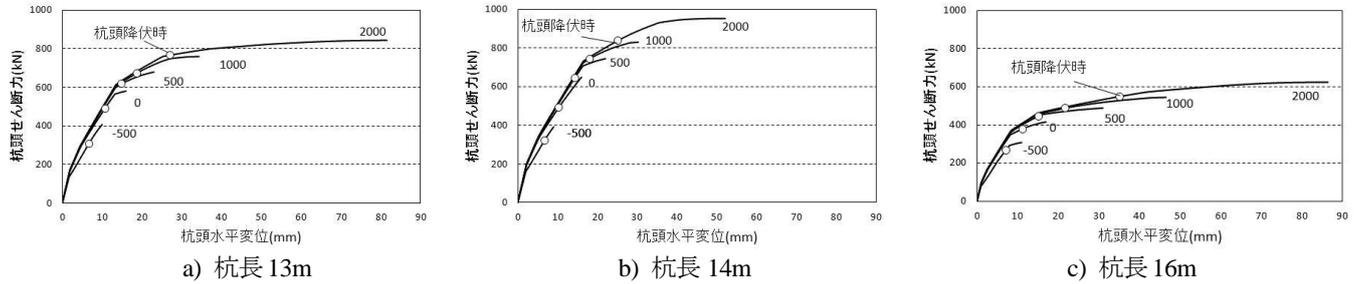


図5 杭頭せん断力—杭頭水平変位の関係

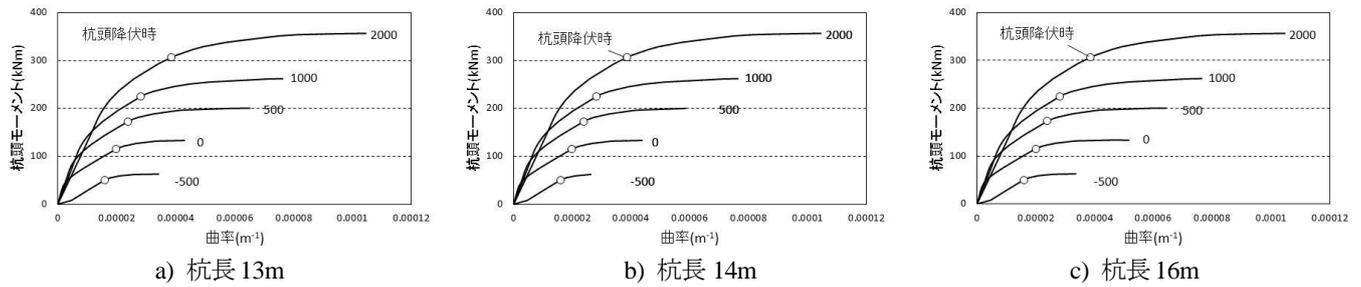


図6 杭頭モーメント—曲率の関係

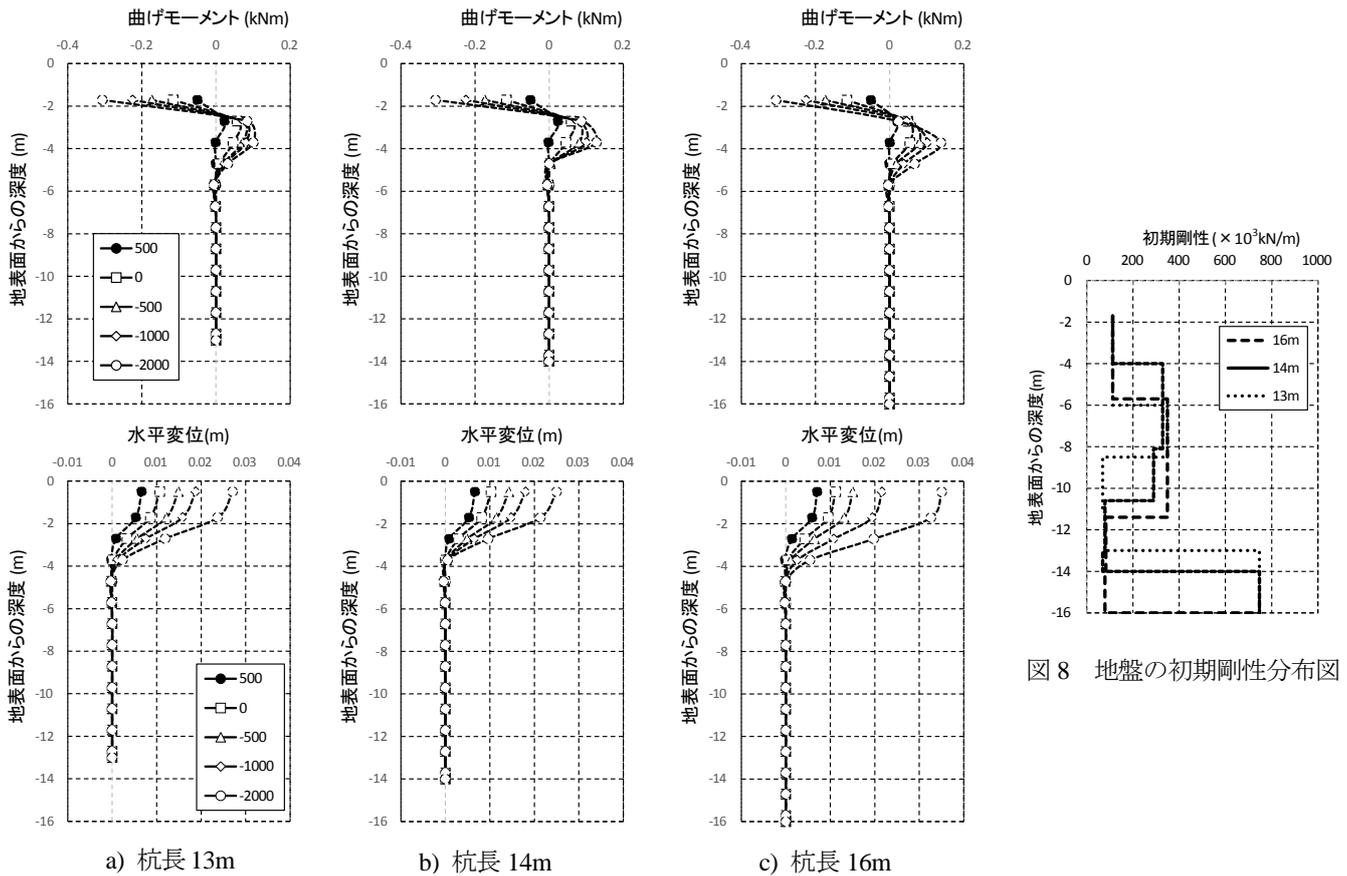


図7 杭の曲げモーメント分布図および水平変位図

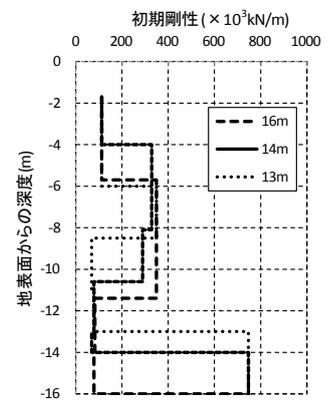


図8 地盤の初期剛性分布図

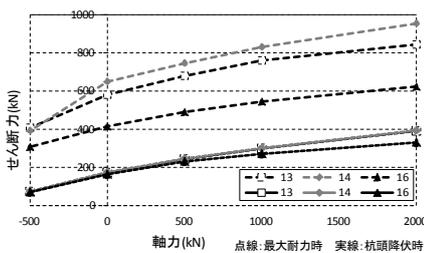
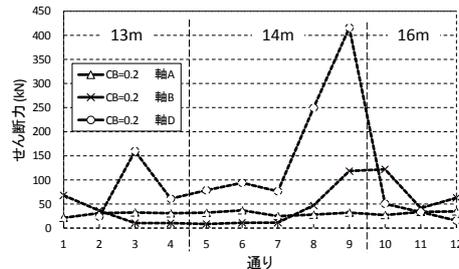
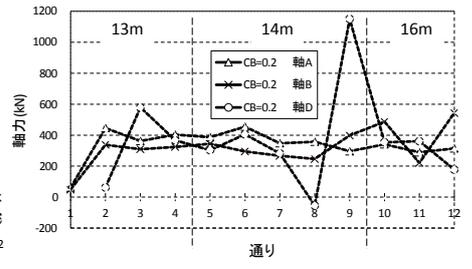


図9 杭耐力の比較

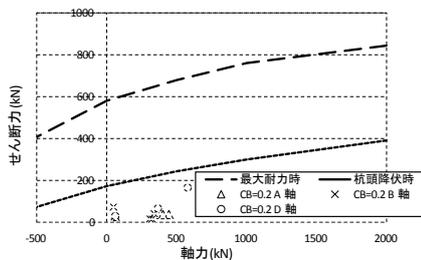


a) せん断力

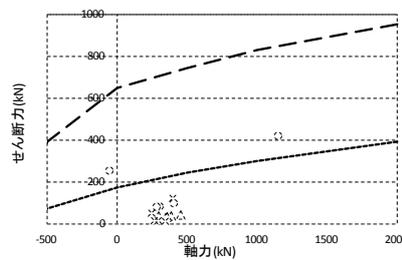


b) 軸力

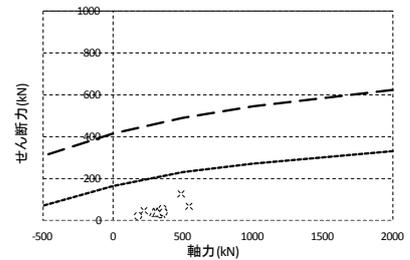
図10 杭1本あたりにかかるせん断力と軸力



a) 杭長 13m



b) 杭長 14m



c) 杭長 16m

図11 杭頭せん断力—軸力の関係

大きく変動するのは、耐震壁の影響である。図11に杭頭せん断力と軸力の関係に杭1本あたりにかかるせん断力と軸力をプロットした図を示す。ここで、杭1本あたりにかかるせん断力には地下震度0.1に相当する外力を加えている。軸Dの8、9通りのように耐震壁などの影響で応力が集中するところでは杭頭が降伏するが、それ以外ではいずれの杭も上部構造からの応力のみでは杭頭は降伏しないという結果が得られた。この理由として、地盤変形の影響が加味されていないことや、解析で得られた上部構造からの応力が実際の地震時よりも小さかった可能性があげられる。

## 6. まとめ

杭基礎に被害が生じた要因を検討するため、単杭モデルの荷重増分解析を実施した。杭がどの程度の応力で破壊するかに着目して検討し、以下の知見が得られた。

(1)杭頭が降伏するときの杭頭せん断力は地表面から6mまでの地盤条件の影響で16mの杭が相対的に小さくなるため、地震による被害が集中していた16mの杭が比較的壊れやすいということが分かった。

(2)耐震壁などの影響で応力が集中するところでは、杭頭が降伏するという結果が得られたが、それ以外では上部構造からの応力だけでは杭頭は降伏しなかった。

本論では上部構造からの応力による検討のみを行った。

今後は地盤変形を考慮したケースや複数杭での解析、一体解析による検討が必要である。

## 謝辞

本研究は科研費(課題番号:26242035)「大地震後に防災拠点施設の機能を維持できる耐震性能技術の開発」の助成を受けたものである。また、被害調査の一部は平成24、25年度国土交通省建築基準整備促進事業「基礎ぐいの地震に対する安全対策の検討」および建築研究所の重点研究課題「庁舎・避難施設等の地震後の継続使用性確保に資する耐震性能評価手法の構築」において実施したものである。後者の課題は、建築研究所、千葉大学、芝浦工業大学、山口大学、戸田建設との共同研究である。本研究の遂行にあたり共同研究者の方々から多大なるご協力を頂いた。ここに記して謝意を示します。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会:2011年東北地方太平洋沖地震被災調査速報、577pp.、2011.7
- 2) 日本建築学会文教施設委員会耐震性能等小委員会:文教施設の耐震性能等に関する調査研究報告書、570pp.、2012.3
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課ほか:建築物の高層関係技術基準解説書、pp57-67、2007.8
- 4) 日本コンクリート工学会:東日本大震災に関する特別委員会報告書、pp.359-360、2013.3
- 5) 東田実樹、秋田知芳、稲井栄一:杭基礎に被害を受けた学校建物の下部構造に起因する被害要因に関する研究、日本建築学会中国支部研究報告集、日本建築学会中国支部編38、pp257-260、2015.3
- 6) 金子治、中井正一:東日本大震災において被害を受けた杭基礎耐震性の評価、日本建築学会構造系論文集、第695号、pp.83-91、2014.1
- 7) 間瀬辰也、中井正一:単杭の杭周地盤ばねの評価法に関する検討、日本建築学会構造系論文集、第77巻 第680号、pp1527-1535、2012.10

\*1 山口大学工学部感性デザイン工学科 学部生  
 \*2 山口大学大学院理工学研究科講師 博士(工学)  
 \*3 山口大学大学院理工学研究科教授 博士(工学)  
 \*4 国立研究開発法人 建築研究所 博士(工学)  
 \*5 戸田建設株式会社技術開発センター 博士(工学)

Student, Dept. of Perceptual Sciences and Design Eng., Faculty of Eng., Yamaguchi Univ.  
 Lecturer, Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi Univ., Dr. Eng.  
 Prof., Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi Univ., Dr. Eng.  
 Building Research Institute, Dr. Eng.  
 Toda Corporation, R&D Center, Dr. Eng.