

杭基礎に被害を受けた学校建物の水平力と地盤変位による杭応力に関する研究

鉄筋コンクリート造 荷重増分解析 変位増分解析  
2011年東北地方太平洋沖地震

準会員 ○吉本ナル\*1  
正会員 津森崇行\*2  
正会員 稲井栄一\*4

準会員 大橋未奈\*1  
正会員 秋田知芳\*3

1 はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では甚大な被害が生じ、杭基礎の被害も見られた<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て、下部構造は大地震に対して安全性の検討が義務付けられていない<sup>3)</sup>。杭基礎などの下部構造に被害が生じると建物が傾斜するなどの被害が生じるが人命に関わるような事態が起こりにくいということが、下部構造の大地震時に対する安全性の検討が規定されていない理由の1つである。しかし、杭基礎に被害が生じると建物の継続的な使用が困難になる場合があるため、特に避難所となるような建物では杭基礎の被害を防ぐ必要がある。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と考えられる<sup>4)</sup>。

既往の研究において<sup>5)6)</sup>、杭基礎に被害を受けた学校建物を対象として、上部構造の慣性力を水平力として作用させた解析、観測された地震動から求めた地盤変位を作用させた解析をそれぞれ実施して、杭の応力に関する検討がされてきた。しかし、水平力と地盤変位の両方を考慮した検討はなされていない。本研究では、水平力による杭の応力と地盤変位による杭の応力を重ね合わせた検討を実施し、実際の杭被害との比較検討を行う。

2 検討対象建物

2.1 建物概要

検討対象建物は、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、桁行方向が11スパンのラーメン構造（一部耐震壁）、梁間方向が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に杭伏図と柱状図を示

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）が行われている。また、本建物は支持地盤が傾斜しているため13、14、16mと長さの異なる杭が使用されており、1~4通りが13m（48本）、5~9通りが14m（71本）、10~12通りが16m（36本）の計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>7)</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。

3 単杭モデルによる解析

3.1 モデル化

杭は単杭モデルとし、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。杭は100cmずつの要素に分割し、そ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。単杭モデルは検討対象建物の杭基礎に従い13、14、16mの3種類を作成した。なお、本モデルでは地表面から杭先端までを杭長とした。

図2および図3に単杭モデルと水平地盤バネの骨格曲線のモデル図を示す。水平地盤バネはトリリニアとしている。参考文献<sup>8)</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 $1/10000$ として、面積が等価となる点を第2折れ点とし、そのとき

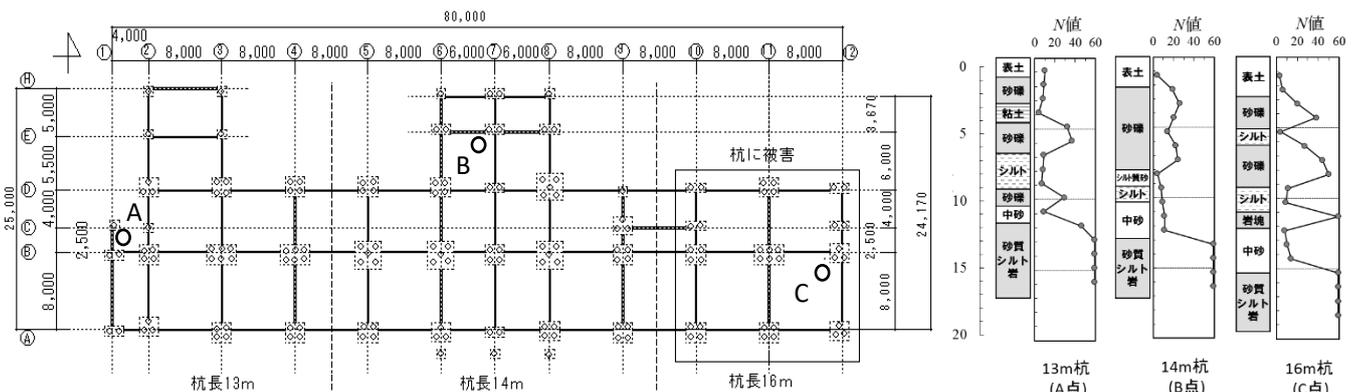


図1 杭伏図と柱状図

の地盤反力を塑性地盤反力 $F_y$ とした。

上記のように求めた水平地盤バネを取り付けたモデルをAモデル(図3参照)とし、剛性と水平地盤反力を1/2とした水平地盤バネを取り付けたモデルをBモデル(図3参照)とした。Bモデルは水平地盤バネの評価精度を考慮したモデルであり、一体解析モデルを用いた既往の研究<sup>9)</sup>において水平地盤バネの剛性と水平地盤反力を1/2としたケースが最も実際の被害状況に近かったことから設定している。

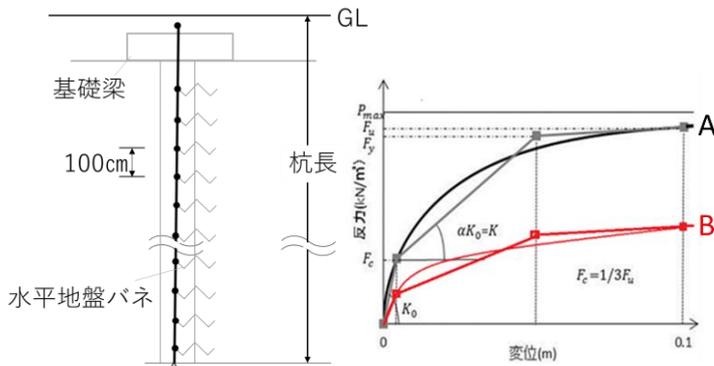


図2 単杭モデル

図3 水平地盤バネのモデル化

### 3.2 増分解析の方法

#### (1) 水平力による解析

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。図4左側に示すようにそれぞれの長さのモデルに対して軸力なしの場合と定軸力500kNを与えた場合について、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。

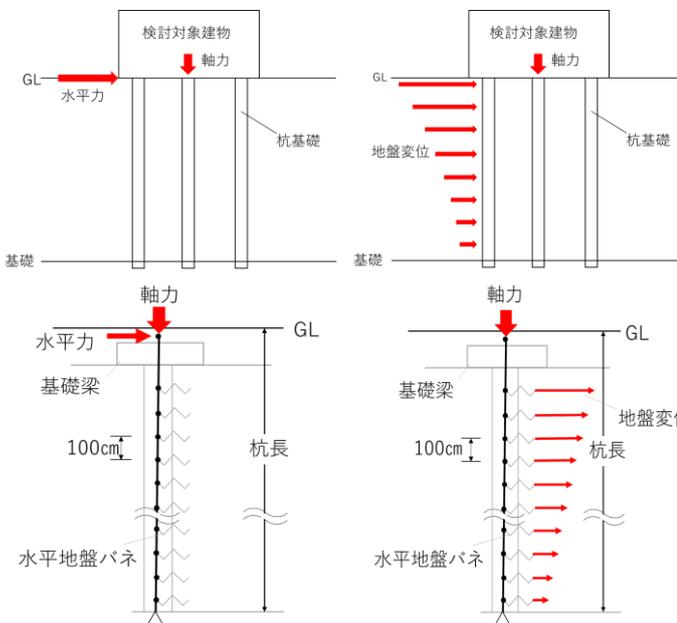


図4 増分解析の模式図

#### (2) 地盤変位による解析

既往の研究<sup>6)</sup>において求められた観測波による地盤の相対変位を、図4右側に示すように水平地盤バネを介して杭に作用させて変位増分解析を行った。なお、解析は観測波によって生じる地盤の相対変位に達するまで行う。

### 4 応力の重ね合わせ

#### 4.1 重ね合わせ方法

水平力(上部構造による慣性力)による応力と地盤変位による応力の両方を考慮する方法としては、水平力による応力と地盤変位による応力をそれぞれ求めた後に2つの応力を重ね合わせる方法と、水平力と地盤変位を同時に作用させた解析を行って応力を求める方法がある<sup>10)</sup>。ここでは前者の応力を重ね合わせる方法で検討を行う。重ね合わせの方法には、代数和(直和)と二乗和平方根の2つを用いる。重ね合わせの際、地盤変位による応力は解析終了時のものを用いればよいのに対して、水平力による応力は水平力の大きさを決める必要がある。次節では既往の研究における解析結果に基づいて重ね合わせの際に採用する水平力の大きさを決定する。

#### 4.2 重ね合わせ時の水平力

##### (1) 上部構造の解析に基づく水平力の値(水平力①)

図5に既往の研究<sup>11)</sup>で行われた上部構造の解析で得られた杭1本当たりのせん断力の値( $C_B=0.2$ 時)を示す。なお、上部構造の被害状況から地震時に建物に作用した水平力は $C_B=0.2$ 程度であると仮定している。軸Dの8通りおよび9通りのように極端にせん断力が大きくなっているのは、杭上部に耐震壁があるためとされている<sup>11)</sup>が、やや極端な値であると考えられるのでこれらを除外し、杭長ごとに平均的な値を水平力として採用することとした。図5より重ね合わせ時に用いる水平力の大きさは、13m杭で50kN、14m杭で100kN、16m杭で50kNとする。

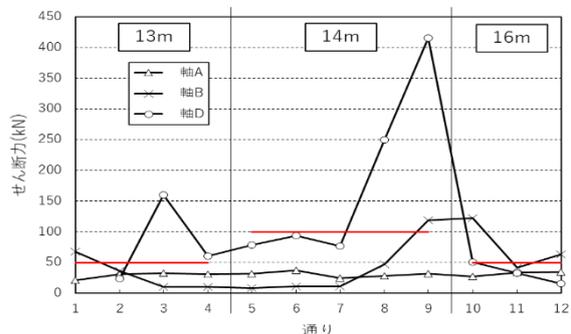


図5 上部構造の解析に基づく $C_B=0.2$ の時のせん断力<sup>11)</sup>

##### (2) 一体モデルの解析に基づく水平力の値(水平力②)

図6に既往の研究<sup>9)</sup>で行われた一体モデルの解析で得られた杭1本当たりのせん断力の値( $C_B=0.2$ 時)を示す。一体モデルの結果でも耐震壁直下の杭のせん断力はやや大きくなる傾向があるが、上部構造の解析に比べて極端な値にはなっていない。一体モデルでは軸力変動の影響等も考慮されていることから、ここでは杭長ごとに1番大

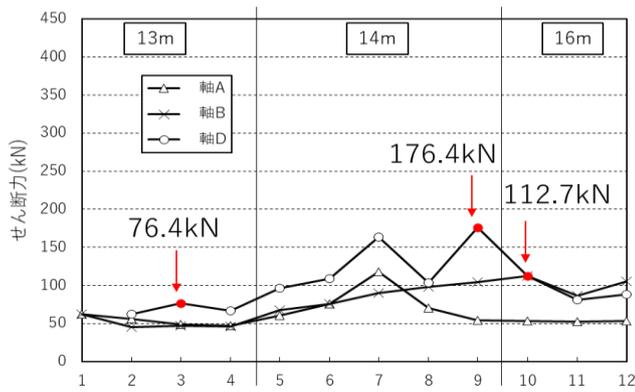
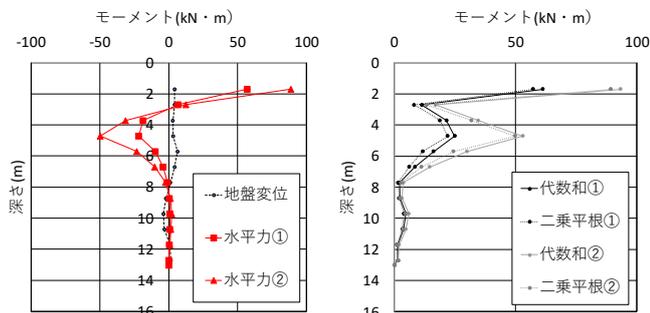


図6 一体解析に基づく  $C_B=0.2$  の時のせん断力<sup>9)</sup>

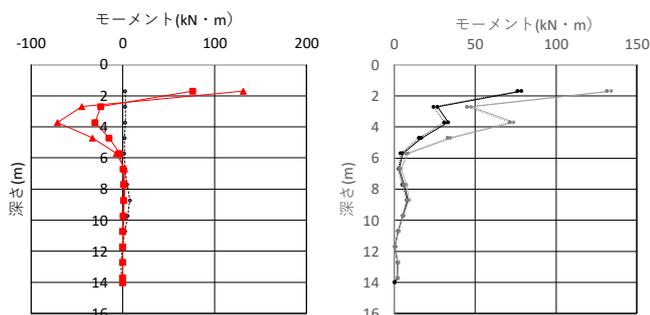
大きい値を水平力として採用することとした。重ね合わせ時に用いる水平力の大きさは、図6より13m杭は76.4kN、14m杭は176.4kN、16m杭は112.7kNとする。

#### 4.3 重ね合わせ方法の比較

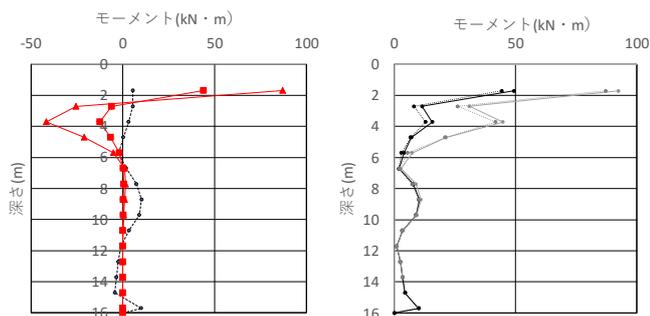
図7に地盤変位による杭のモーメントと水平力①および②による杭のモーメント(左図)、並びに地盤変位による



(a)13m 杭



(b)14m 杭



(c)16m 杭

図7 水平力と地盤変位の応力の足し合わせ

杭のモーメントと水平力①または水平力②による杭のモーメントを代数和または二乗平方根でそれぞれ足し合わせた時の杭のモーメント(右図)を示す。軸力なしと定軸力500kNでは大きな違いはなかったため、ここでは軸力なしの例を示している。地盤変位による杭のモーメントが水平力による杭のモーメントに比べて小さいため、重ね合わせ方法(代数和と二乗平方根)による違いはそれほど見られなかった。以降は、値がやや大きくなる代数和による重ね合わせの結果を用いることとする。

#### 4.4 杭頭降伏時の水平力

水平力を作用させた解析で得られた杭頭曲げモーメントと曲率の関係を図8に、杭の基礎梁位置の水平力と杭頭変位の関係を図9に示す。前節同様、軸力なしの例を示している。図中の●印は、水平力による杭頭降伏時を示している。杭頭降伏時は基礎梁位置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。杭頭降伏時のモーメントは13m、14m、16mの杭で同じ値となっている。Aモデルでは115kN・m、Bモデルでは113kN・mであり、Bモデルの方がわずかに小さくなった。杭頭降伏時の基礎梁位置の水平力は、Aモデルでは13m杭で126kN、14m杭で175kN、16m杭で174kN、Bモデルでは13m杭で96kN、14m杭で154kN、16m杭で142kNとなった。BモデルはAモデルに比べて降伏時の水平力は小さく、変位は大きくなった。

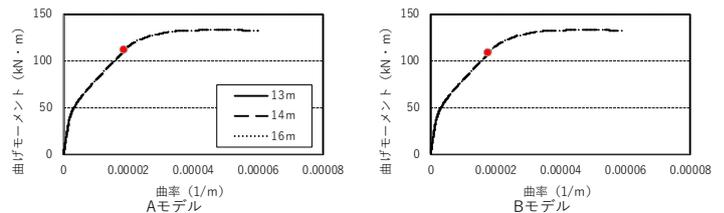


図8 杭頭モーメントー曲率関係

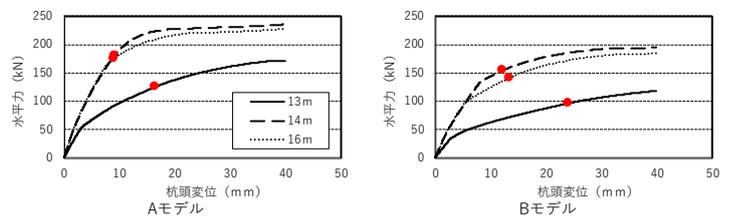


図9 基礎梁位置水平力ー杭頭変位関係

表1 水平力の値と杭頭降伏時に対する比率

		水平力①		水平力②		降伏時 せん断力(kN)
		せん断力(kN)	比率	せん断力(kN)	比率	
Aモデル	13m	52.5	0.41	78.9	0.61	126
	14m	101.0	0.57	177.4	1.01	175
	16m	52.4	0.30	115.1	0.65	174
Bモデル	13m	51.3	0.54	77.7	0.82	96
	14m	100.7	0.66	177.1	1.16	154
	16m	52.3	0.37	115.0	0.82	142

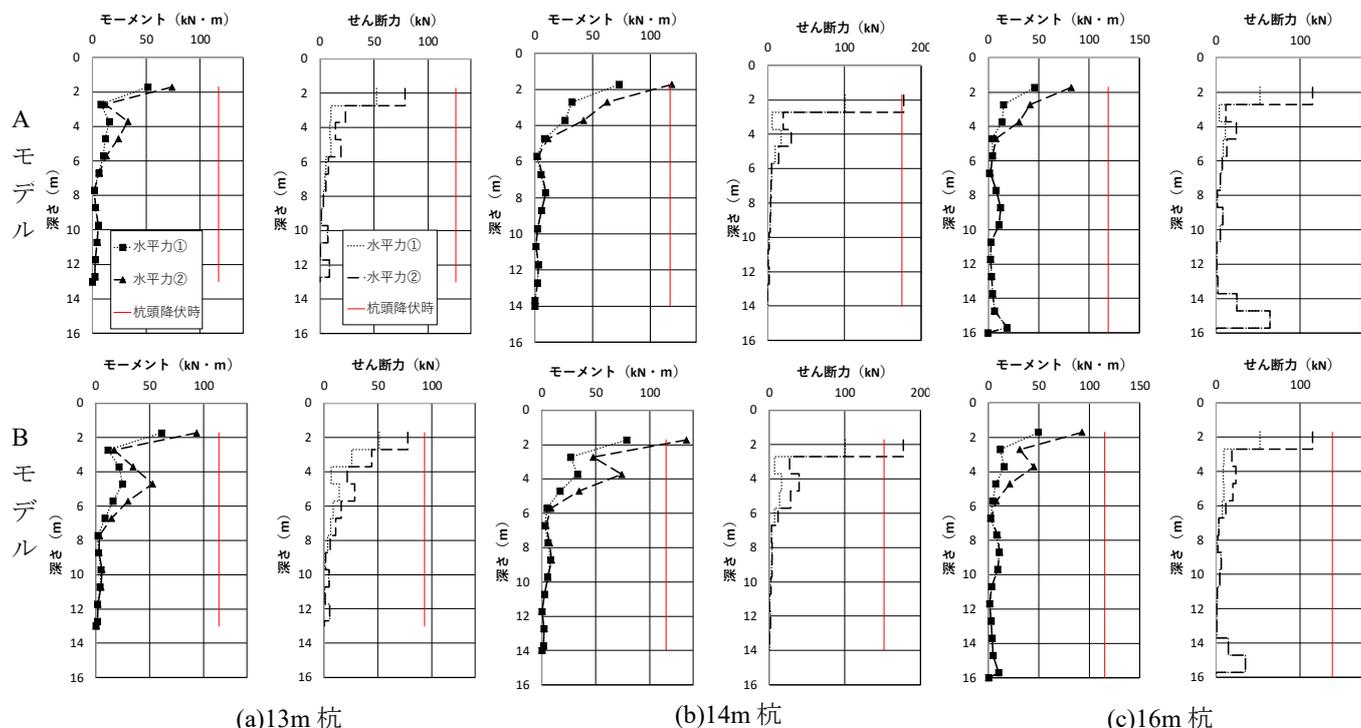


図 10 曲げモーメントとせん断力の分布

表 1 に水平力①および②による杭頭せん断力と地盤変位による杭頭せん断力を代数和により重ね合わせた値を示す。また、それらの値を杭頭降伏時の水平力で割ったものを比率として併せて示している。この比率が 1.0 以上であれば杭頭が曲げ降伏したものと判定される。

#### 4.5 杭頭降伏の検討

図 10 に A モデルおよび B モデルについて水平力①および②による杭応力（曲げモーメントおよびせん断力）に地盤変位による杭応力を代数和によって重ね合わせた結果を示す。図中の赤線は 4.4 節で示した杭頭降伏が生じる時の杭頭曲げモーメントおよび杭頭せん断力（水平力）の値を表している。A モデルでは 13m 杭および 16m 杭では杭頭は降伏には至らず、14m 杭では杭頭が降伏する結果となっている。B モデルについても A モデルと同様、13m 杭および 16m 杭では杭頭は降伏には至らず、14m 杭では杭頭が降伏する結果となった。ただし、水平地盤バネの剛性および水平地盤反力を 1/2 とした B モデルでは、13m 杭、16m 杭について、水平力②による場合に杭頭降伏時に対する比率が 8 割程度（表 1 参照）となり、A モデルよりも杭頭降伏に近い状態となっている。実際の被害では 16m 杭の杭頭が降伏しており、A モデルおよび B モデルとも杭頭降伏が生じる杭が異なっているが、杭頭降伏が生じる点で一致している。また、主に水平力によって杭に生じる応力により杭頭降伏が生じることが分かった。

#### 5 まとめ

水平力による杭の応力と地盤変位による杭の応力を重ね合わせた検討を実施し、実際の杭被害との比較検討を行い、以下の知見が得られた。

- 1) A モデルおよび B モデルとも 14m 杭のみで杭頭降伏が生じる結果となったが、実際の被害で杭頭降伏が生じる場所は異なるものの杭頭降伏が生じる点で一致した。
- 2) 水平力による杭応力に比べて地盤変位による応力は小さく、杭頭降伏に関して水平力による杭応力が支配的であった。

#### 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：建築物の構造関係技術基準解説書、pp.57-67、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) 原紺純花、秋田知芳、稲井栄一：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、日本建築学会中国支部研究報告集第 39 巻、pp.377-380、2016.3
- 6) 津森崇行、秋田知芳、稲井栄一：杭基礎に被害を受けた学校建物の耐震性能に関する研究、日本建築学会中国支部研究報告集第 42 巻 pp.103-106、2019.3
- 7) 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
- 8) 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、pp.1527-1535、2012.10
- 9) 矢野なつみ、秋田知芳、稲井栄一：杭基礎に被害を受けた学校建物の耐震性能に関する研究（その 3）一体モデルによる検討 pp.615-616、2017.8
- 10) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針 pp.288-289、2004.8
- 11) 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第 38 巻、pp.257-260、2015.3

\*1 山口大学工学部感性デザイン工学科 学部生  
 \*2 山口大学大学院創成科学研究科 大学院学生  
 \*2 山口大学大学院創成科学研究科講師 博士（工学）  
 \*3 山口大学大学院創成科学研究科教授 博士（工学）

Student, Dept. of Perceptual Sciences and Design Eng., Faculty of Eng. Yamaguchi Univ.  
 Graduate, Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi Univ.  
 Lecturer, Graduate School of Sciences and Engineering, Yamaguchi Univ. Dr. Eng.  
 Prof, Graduate School of Sciences and Engineering, Yamaguchi Univ. Dr. Eng.