

## 杭基礎に被害を受けた学校建物の上部構造に起因する被害要因に関する研究

鉄筋コンクリート造 上部構造モデル 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、上部構造には大地震に対する設計が義務付けられているのに対し、下部構造に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となる場合があるため、学校建物など災害時に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。本論では、上部構造に起因する被害要因を荷重増分解析により検討し、被害杭に大きなせん断力や軸力が作用する傾向があったかどうか、また上部構造の耐力がどの程度であったかを明らかにする。

## 2. 解析モデル

## 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。図1に基礎伏図、図2に軸組図を示す。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3に柱状図を示す。基礎は杭打ち独立基礎で、杭にはPHC杭（B種）400φが用いられている。杭長は1~4通りが13m、5~9通りが14m、10~12通りが16m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>5)</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。

正会員 ○東田実樹\*<sup>1</sup> 同 秋田知芳\*<sup>2</sup>  
同 稲井栄一\*<sup>3</sup> 同 向井智久\*<sup>4</sup>  
同 柏尚稔\*<sup>4</sup> 同 平出務\*<sup>4</sup>  
同 金子治\*<sup>5</sup>

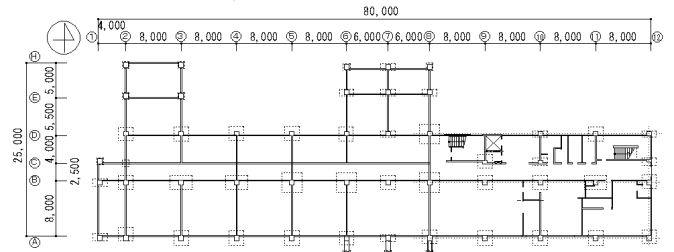
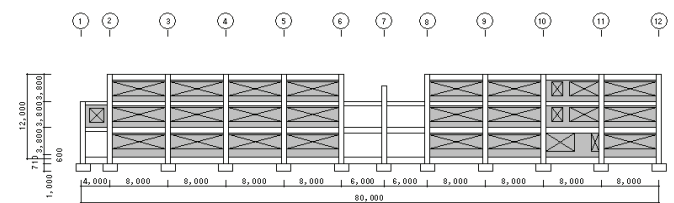
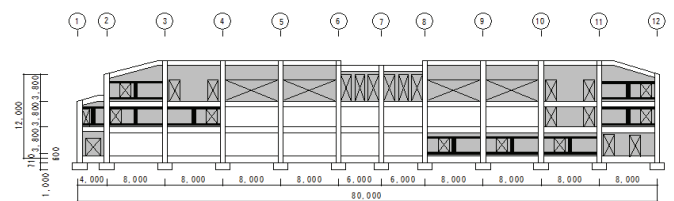


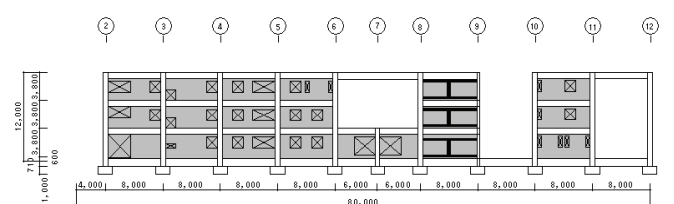
図1 基礎伏図



(a) A通り



(b) B通り



(c) D通り

図2 軸組図(工は耐力壁、色つきは壁を示す。)

## 3. 解析概要

## 3.1 解析方法

解析モデルは、上部構造（基礎梁含む）をモデル化した立体骨組とする。柱部材や梁部材を線材に置換したフレームモデルとしている。梁部材は材端ばねモデルとし、曲げに対するスケルトンカーブは曲げひび割れ、曲げ降伏を考慮したトリリニア型とする。柱部材はマルチスプリングモデルとし、壁部材はエレメント置換して材端ばねモデルとする。荷重増分解析に用いる水平力分布はAi分布に基づいて設定し、最大層間変形角が0.02radに達した時点で解析を終了した。

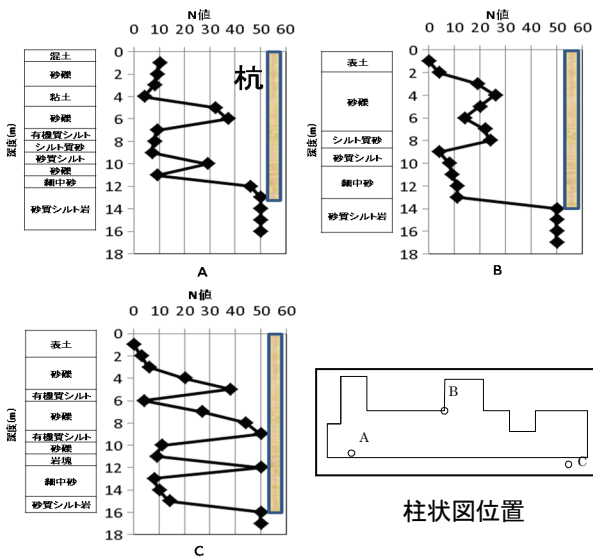


図3 柱状図

### 3.2 解析ケース

解析にあたり、対象建物をそのままモデル化した O モデルと、対象建物から全ての壁を取り除いてモデル化した F モデルの 2 つのモデルを作成した。表 1 に O モデルと F モデルの偏心率等、表 2 に 1 次固有周期を示す。F モデルに比べ O モデルは偏心率が大きくなっている。また、いずれのモデルも X 方向と Y 方向の 1 次固有周期の差は小さい。それぞれのモデルに対して、X 方向、Y 方向の正負に载荷し、合わせて 8 ケースの解析を行った。図 1 の左から右、下から上へ载荷する方向を正方向とする。正負の結果を比較した際にほとんど差がなかったため、本論では以下の 4 章、5 章において正方向のケースのみを示す。

表 1 O モデルと F モデルの偏心率等 表 2 固有周期 [sec]

	Oモデル(X方向)	Oモデル(Y方向)	Fモデル(X方向)	Fモデル(Y方向)
重量(kN)	48356		41554	
質量重心(mm)	37654	9073	37287	8781
剛心(mm)	36014	10738	38471	8932
偏心率	0.078	0.127	0.037	0.016

	Oモデル	Fモデル
X方向	0.142	0.352
Y方向	0.119	0.363
振れ	0.103	0.323

### 4. 解析結果

#### 4.1 荷重—変形角関係

層せん断力 (Q) —層間変形角 (R) 関係について、O モデルと F モデルを比較したものを図 4 に示す。X 方向の 1 階の層せん断力は、変形角が 0.02rad の時点で、O モデルが F モデルの約 2.6 倍である。これは、図 2 を見ると X 方向に開口付の壁が非常に多く配置されているため、フレームのみの F モデルに比べて耐力が非常に大きくなっていると考えられる。また、Y 方向の 1 階の層せん断力は、変形角が 0.02rad の時点で、O モデルが F モデルの約 3.5 倍である。

#### 4.2 ベースシア係数—代表変形角関係

ベースシア係数 ( $C_B$ ) と代表変形角 ( $R_t$ ) の関係について、O モデルと F モデルを比較したものを図 5 に示す。代表変形角は 2 階床の変形量を建物の 2 階床の高さで割ったもの

とする。ベースシア係数は、X 方向の  $R_t$  が 1/100 rad の時点で、O モデルが F モデルの約 2.3 倍、Y 方向の  $R_t$  が 1/100rad の時点で、O モデルが F モデルの約 3.5 倍である。

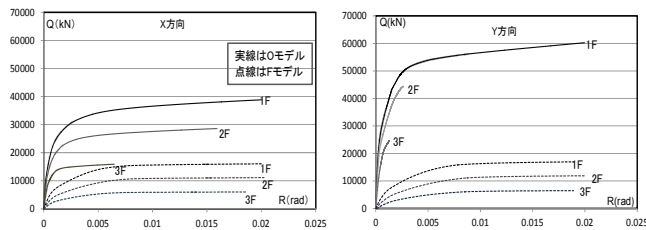


図 4 層せん断力—層間変形角関係

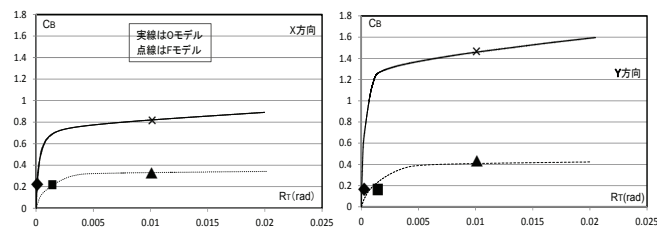


図 5 ベースシア係数—代表変形角関係

### 5. 被害要因の検討

#### 5.1 上部構造の耐力

各通りの負担する X 方向の 1 階の層せん断力について図 6 に示す。また、X 方向の各通りの負担する層せん断力を、全通りの負担する層せん断力で割った割合を表 3 に示す。ここでは、一次設計時に相当する  $C_B=0.2$  の時点と、概ね保有水平耐力に達していると判断できる  $R_t=1/100$  の時点の値を示している。図 5 に O モデルの  $C_B=0.2$  (◆印)、 $R_t=1/100$  (×印)、F モデルの  $C_B=0.2$  (■印)、 $R_t=1/100$  (▲印) の位置をそれぞれ示す。O モデルの  $C_B=0.2$  時点は建物にひび割れがわずかに発生している状態と考えられ、この時の値が本建物の地震時の状態に対応すると仮定して検討を行う。

表 3 より、F モデルでは A、B、D の負担する層せん断力の割合は  $C_B=0.2$  の時が 0.23~0.28、 $R_t=1/100$  の時が 0.25~0.27 で大きな違いは見られない。一方、O モデルでは D 通りの負担する層せん断力の割合が、 $C_B=0.2$  の時は全体の約 5 割、 $R_t=1/100$  の時は全体の約 4 割となっており、他の通りと比較して大きくなっている。これは、図 2 を見ると南側の A 通りに開口が多く設けられ、北側の D 通りの壁量が相対的に多くなっているためと考えられる。

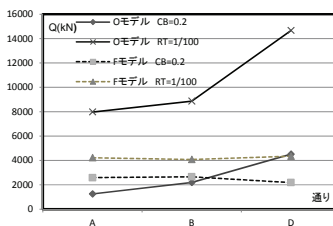


図 6 せん断力分担

表 3 せん断力割合

		A	B	D	C,E,H
Oモデル	$C_B=0.2$	0.13	0.23	0.47	0.17
	$R_t=1/100$	0.2	0.22	0.37	0.21
Fモデル	$C_B=0.2$	0.27	0.28	0.23	0.22
	$R_t=1/100$	0.26	0.25	0.27	0.22

## 5.2 杭頭に作用する軸力

杭頭に作用する軸力を図7に示す。ここでの杭頭に作用する軸力とは、上部構造の鉛直支点反力とする。X方向は壁量が多いA、B、D通り、Y方向は被害が見られた9~12通りを示している。図中の略軸組図の黒塗りは、モデル化上耐震壁としてみなしている部分を表す。X方向についてOモデルの $C_B=0.2$ の時を見ると、杭頭が圧壊していた10~12通りは、杭頭が圧壊していない1~9通りと比較して、特に大きな軸力は作用しておらず、必ずしも被害が生じた位置で変動軸力が大きいというわけではない。Y方向についてOモデルの $C_B=0.2$ の時を見ると、耐震壁の引張側と圧縮側で軸力変動が生じている様子が見て取れる。また、OモデルとFモデルの $C_B=0.2$ の時と $R_T=1/100$ の時をそれぞれ見ると、両方向とも変形が大きくなると耐震壁がある場所で軸力変動も大きくなるのが分かる。

## 5.3 杭頭に作用するせん断力

杭頭に作用する各通りのせん断力の割合を図8に示す。せん断力の割合は、各節点に作用するせん断力を通りに作用するせん断力の合計で割って求めている。なお、ここでの杭頭に作用するせん断力とは、上部構造の水平支点反力とし、基礎部分に作用する慣性力は含まれてない。図7と同様、X方向は壁量が多いA、B、D通り、Y方向は被害が見られた9~12通りを示す。X方向についてOモデルの $C_B=0.2$ の時を見ると、B通りおよびD通りで耐震壁が存在する場所でせん断力の負担が大きくなる傾向があることが分かる。せん断力の負担が大きい場所は東側（8~11通り）にあり、東側（9~12

通り）で被害が生じた一因になっていると推測できる。

## 5.4 水平変位

図9にY方向加力時のY方向の水平変位（2階床位置）、図10にOモデルの $R_T=1/100$ の時の変位図をそれぞれ示す。図10の点線は建物の元の位置、実線は建物の変位後の位置を拡大率10倍で表している。図9のOモデルの $R_T=1/100$ および図10を見ると、杭頭に被害が見られた東側の変位が大きくなっており、10~12通りの杭に被害が集中した一因になっていると推測できる。 $R_T=1/100$ の時にFモデルよりもOモデルで変位が大きいのは、図4よりOモデルでは1層に変形が集中しているからである。東側の変位が大きいのは、表1より、Y方向の偏心率が0.127で保有水平耐力計算における制限値の0.15に近く、比較的偏心が大きいためであると考えられる。

## 6. まとめ

上部構造に起因する被害要因を検討するため、上部構造モデルの荷重増分解析を実施した。被害杭に大きなせん断力や軸力が作用する傾向があるかどうか、上部構造の耐力がどの程度であるかについて検討を行い、以下の知見が得られた。

- (1) 解析対象とした学校建物はX方向においては、耐震壁および雑壁が比較的多く配置されているため、耐力が大きくなる傾向があり、耐震壁および雑壁を取り除いたFモデル（ $C_B=0.35$ 、 $R_T=1/100$ 時）と比較すると耐力は約2.3倍（ $C_B=0.8$ 、 $R_T=1/100$ 時）となった。
- (2) 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おり、開口の状況により解析時に耐震壁としてモデル化さ

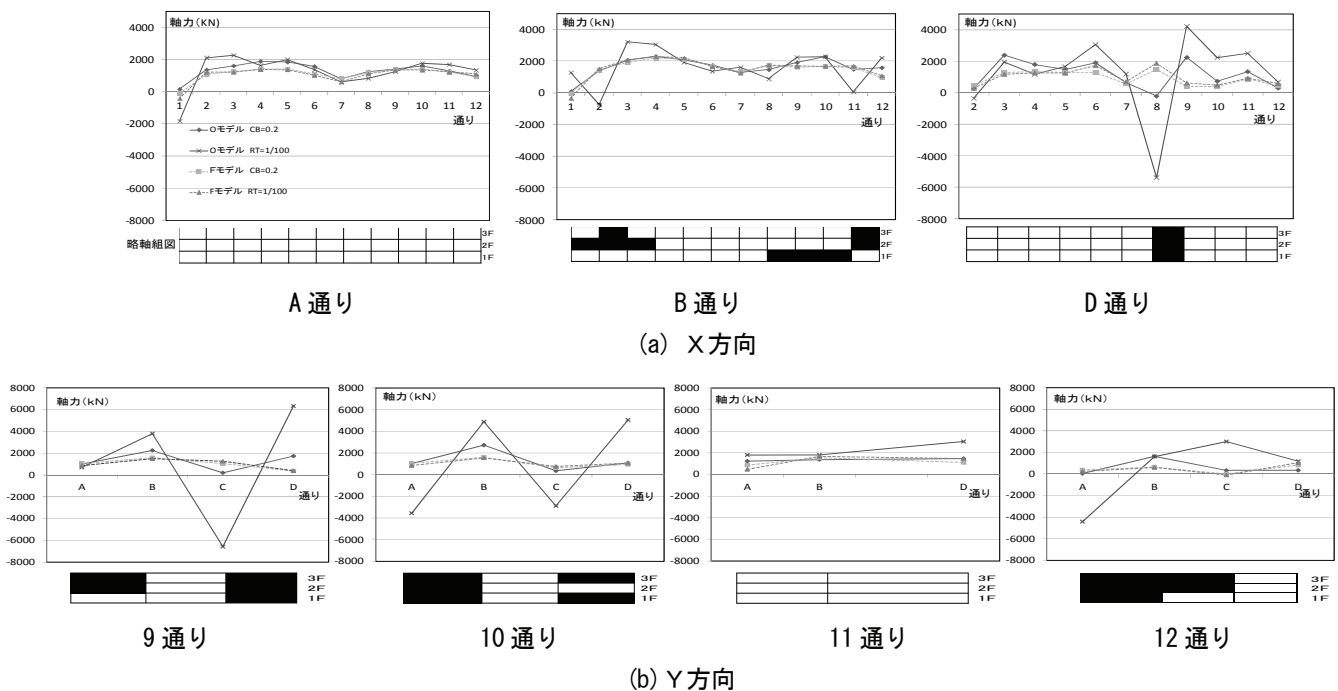


図7 杭頭に作用する軸力

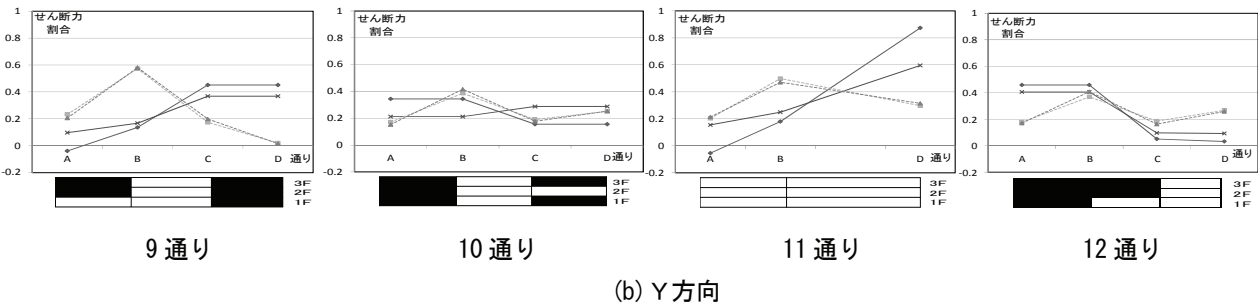
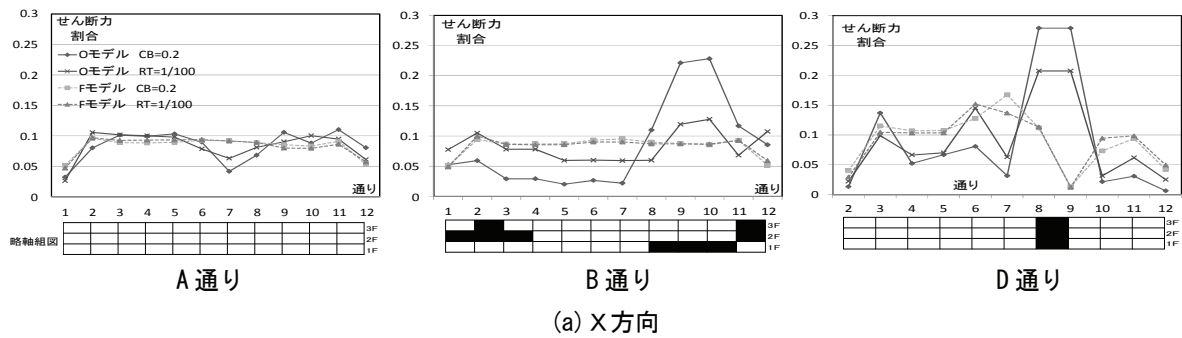


図8 杭頭に作用するせん断力

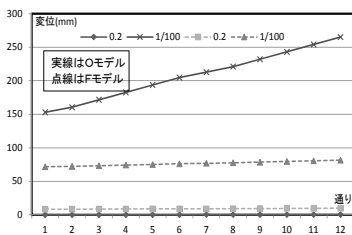


図9 水平変位

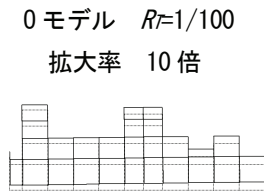


図10 変位図

れた部分の直下の杭に作用するせん断力および軸力は大きくなる傾向があった。

(3) 杭頭に作用するせん断力を検討した結果、杭頭の被害が集中した建物の東側で耐震壁の影響によりせん断力の負担が大きくなる傾向があった。耐震壁による応力の集中が杭被害の一因となっていた可能性がある。

(4) Y方向の偏心率が比較的大きいため、建物の東側で水平変位が大きくなった。水平変位が大きい10~12通りは杭頭が圧壊しており、上部構造の偏心が被害の一因であると推測できる。

本論では、上部構造モデルによる検討のみを行っており、下部構造と上部構造の連成の影響は考えていない。今後は下部構造モデルによる解析および一体解析を行って、より詳細に検討していきたい。

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、507pp、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) 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の耐震性の評価、日本建築学会構造系論文集、第695号、pp.83-91、2014.1

\*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 独立行政法人 建築研究所  
 \*5 戸田建設株式会社技術研究所

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