

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

正会員 ○秋田知芳\*1 正会員 稲井栄一\*2

鉄筋コンクリート造 一体モデル 荷重増分解析  
2011年東北地方太平洋沖地震

1. はじめに

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解析を実施して被害要因の検討を行う。その1では上部構造モデルによる検討、その2では単杭モデルによる検討を行った。本報その3では一体モデルの荷重増分解析を行って杭基礎の被害要因を検討する。

2. 解析対象建物

解析対象は杭基礎を有する3階建てのRC造建物である。図1に基礎伏図を示す。地下階はなく、桁行方向(X方向)が11スパンのラーメン構造(一部耐震壁)、梁間方向(Y方向)が5スパンの耐震壁を含むラーメン構造である。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。既往の報告<sup>1)</sup>によると上部構造には9、10通りの柱と壁に、幅1~2mmのひび割れが見られ、下部構造には10~12通りの杭頭が圧壊し、PC鋼材の露出および変形が確認されている。

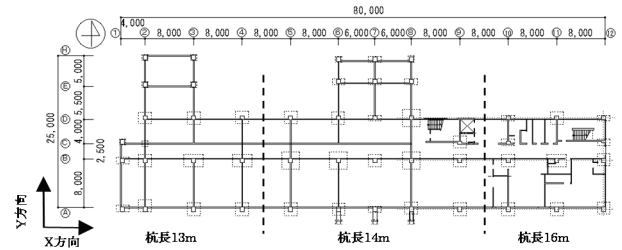


図1 基礎伏図

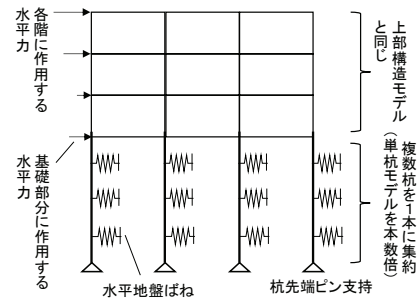


図2 一体モデルの概略

3. 解析概要

一体モデルは、上部モデル<sup>1)</sup>に下部モデル<sup>2)</sup>を取り付けたものとした。各モデルの詳細は文献1)および2)を参照されたい。図2に一体モデルの概略を示す。複数本杭がある場所には単杭モデルで求めたM-φ関係のMを本数倍し、それに近似したM-φ関係を持つ1本の杭を作成して取り付け、杭頭は剛接合とした。フーチングは剛域を設定し変形しないものとした。水平地盤ばねについては水平地盤反力を杭の本数倍した。地下部分の地震力は地下部分の重量に水平震度 $k^2$ を乗じて求めた。杭頭以深の水平力は杭の重量が小さいことからないものとした。また群杭係数 $\xi^3$ を考慮した。

表1 解析ケース

モデル	地盤ばねの剛性および反力の設定		基礎部分の外力の設定		説明
	杭頭ゼロ	全体1/2	震度2倍	震度4倍	
$I_0$	-	-	-	-	基準モデル
$I_{SM}$	○	-	-	-	表層部の水平地盤抵抗がないものと仮定
$I_{SH}$	-	○	-	-	地盤ばねのモデル化の評価精度を考慮
$I_{K2}$	-	-	○	-	基礎部分の外力の評価精度を考慮
$I_{K4}$	-	-	-	○	基礎部分の外力の評価精度を考慮
$I_{K2}'$	○	○	○	-	$I_0, I_{SM}, I_{K2}$ の組合せ
$I_{K4}'$	○	○	-	○	$I_0, I_{SM}, I_{K4}$ の組合せ

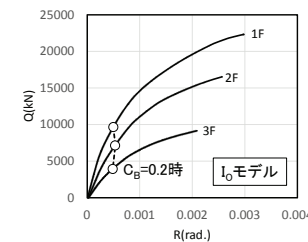


図3 荷重-変形関係

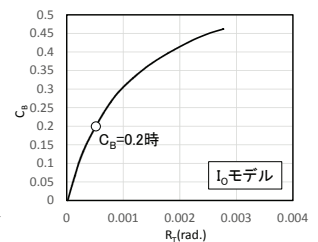


図4  $C_B$ - $R_T$ 関係

表1に解析ケースを示す。上部モデルに下部モデルを取り付けたものを基準の $I_0$ モデルとし、表層地盤のN値が小さいことを考慮し杭頭下の節点の水平地盤ばねの剛性をほぼゼロとした $I_{SM}$ モデル、水平地盤ばねの評価精度を考慮し水平地盤ばねの剛性および反力の値を1/2にした $I_{SH}$ モデル、地下部分の地震力の評価精度を考慮し水平震度を2倍と4倍にした $I_{K2}$ モデルと $I_{K4}$ モデル、各モデルを組合せた $I_{K2}'$ モデルと $I_{K4}'$ モデルの7つとした。載荷方向はX方向である。

4. 解析結果

4.1 荷重-変形関係

$I_0$ モデルの層せん断力(Q) - 層間変形角(R)関係を図3に、ベースシア係数( $C_B$ )と代表変形角( $R_T$ )の関係を図4

に示す。 $R_T$ は3階床の変形量を建物の3階床の高さで割ったものとする。1階の層間変形角が約0.003rad.の時に、上部構造の降伏前に杭頭が降伏し不釣り合いが大きくなったため解析を終了した。 $C_B=0.2$ 時(図中○印)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する。 $C_B=0.2$ 時の上部構造の層間変形角は各層とも約0.0005rad.となっている。

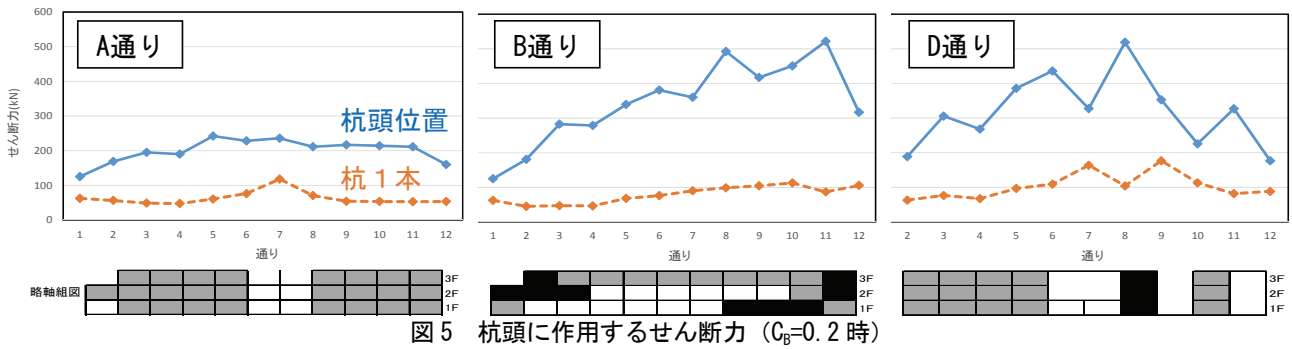


図5 杭頭に作用するせん断力 ( $C_B=0.2$ 時)

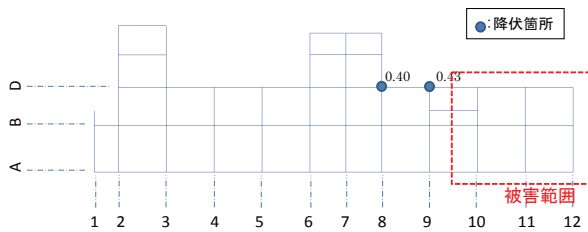
表2 杭頭せん断力の負担割合 ( $C_B=0.2$ 時) (%)

	杭長13m				杭長14m				杭長16m				合計
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
H	-	0.6	0.6	-	-	0.8	0.8	0.8	-	-	-	-	3.7
E	-	0.6	0.6	-	-	0.9	0.9	0.9	-	-	-	-	3.9
D	-	1.6	2.6	2.3	3.3	3.7	2.8	4.4	3.0	1.9	2.8	1.5	29.9
C	0.3	-	-	-	-	-	-	-	2.5	2.4	-	0.5	5.7
B	1.1	1.5	2.4	2.4	2.9	3.2	3.2	4.2	3.6	3.8	4.5	2.7	35.5
A	1.1	1.4	1.7	1.6	2.1	1.9	2.0	1.8	1.8	1.8	1.4	1.4	20.5
合計	2.5	5.8	7.9	6.3	8.3	10.6	9.8	12.2	10.9	10.0	9.0	6.1	100

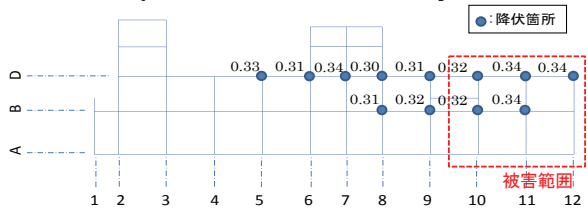
を見ると、杭頭に被害が生じた場所でせん断力が大きいという傾向はなかった。表2に  $C_B=0.2$  時の杭頭せん断力の負担割合を示す。通りで比較すると壁量が多いB、D通りで大きく、杭長で比較すると14m、16mの杭でやや大きい。

### 4.3 杭頭の降伏箇所

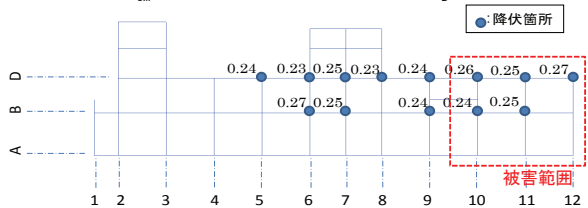
杭頭降伏箇所とその時の  $C_B$  を図6に示す。I<sub>0</sub>モデル、I<sub>SM</sub>モデル、I<sub>K4'</sub>モデルを示している。ここでは杭頭の最外縁の鉄筋が降伏した時を杭頭の降伏としている。I<sub>0</sub>モデルは2箇所で降伏し、その時の  $C_B$  は0.40と0.43であったが杭頭に被害が生じた箇所と一致しなかった。I<sub>SM</sub>モデルはD通りの大半の箇所で降伏し、B通りにも降伏が生じた。この時の  $C_B$  は0.30~0.34であった。I<sub>K4'</sub>モデルはI<sub>SM</sub>モデルよりも早期に降伏し、その時の  $C_B$  は0.23~0.27となった。7つのケースのうちI<sub>K4'</sub>モデルが実際の被害と最も近い結果となった。



(a) I<sub>0</sub>モデル (最終ステップ時  $C_B=0.46$ )



(b) I<sub>SM</sub>モデル (最終ステップ時  $C_B=0.36$ )



(c) I<sub>K4'</sub>モデル (最終ステップ時  $C_B=0.28$ )

図6 杭頭降伏箇所とベースシア係数

### 4.2 杭頭に作用するせん断力

杭頭に作用するせん断力を図5に示す。図中の略軸組図の黒塗りは、モデル化上耐震壁としている部分を表す。 $C_B=0.2$ 時に杭頭位置に作用するせん断力と、そのせん断力をその場所の杭本数で除して杭1本に作用するせん断力として表した値を示している。杭頭位置に作用するせん断力を見ると、B通りでは杭頭に被害が生じた場所(10~12通り)でせん断力が大きくなっている。また耐力壁がある場所でせん断力が大きくなる傾向がある。一方、杭1本に作用するせん断力

### 5. まとめ

一体モデルによる検討で得られた知見を以下に示す。

- 1) 一体モデルの解析では、本建物の地震時の状態としている  $C_B=0.2$ に近い状態で、実際の被害が生じていた箇所で杭頭降伏するという結果が得られたが、被害が生じていない箇所でも杭頭降伏が見られた。
- 2) 耐力壁による応力の集中や表層地盤の影響を大きく受けること、各杭が負担するせん断力の割合が場所によって異なることが被害要因として挙げられる。

### 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。また、一体解析による検討は元山口大学大学院生の東田実樹氏の尽力によるものである。ここに記して謝意を示します。

### 参考文献

- 1) 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
- 2) 国土交通省住宅局建築指導課ほか：2007年版建築物の構造関係技術基準解説書、p.262、2007.8
- 3) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、pp.280-284、2001

\*1 山口大学大学院創成科学研究科講師 博士(工学) Lecturer, Graduate School of Science and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ., Dr. Eng.  
 \*2 山口大学大学院創成科学研究科教授 博士(工学) Professor, Graduate School of Science and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ., Dr. Eng.