

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4) 地盤変形を考慮した単杭モデルによる検討

鉄筋コンクリート造 相対変位 1次元地震応答解析
変位増分解析 2011年東北地方太平洋沖地震

正会員 ○津森崇行*1 同 秋田知芳*2
同 稲井栄一*3

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。既報その 1~その 3 では上部構造の慣性力によって生じる杭の応力を上部構造モデル、単杭モデル、一体モデルを用いて検討を行った^{1), 2)}。本報その 4 では地盤変形による杭の応力を、単杭モデルを用いて検討する。具体的には、検討対象建物の地盤の相対変位を 1 次元地震応答解析によって求め、地盤の相対変位を用いて単杭モデルの変位増分解析を行い杭の応力を算定する。

2. 検討対象建物概要

検討対象は 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。図 1 に杭伏図を示す。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³⁾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、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。

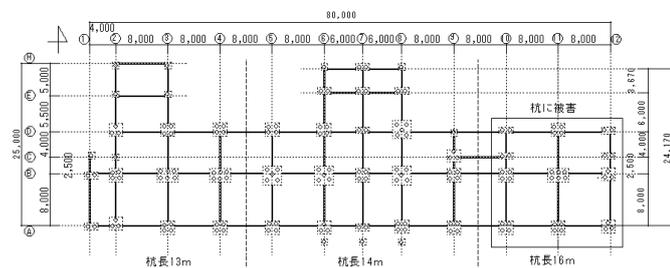


図 1 杭伏図

3. 地盤の応答解析

3.1 解析概要

図 2 に地盤の解析の模式図を示す。まず、観測点における地震波をもとに引き戻し計算によって基盤における地震波を算出する。以下、この地震波を引き戻し基盤波と呼ぶこととする。続いて、引き戻し基盤波を用いて、1 次元地震応答解析により検討対象建物の地盤変形を算出する。本解析で用いる基盤の単位体積重量は 20t/m³、せん断波速度は 480m/s とし、地盤の減衰定数は 5% とした。

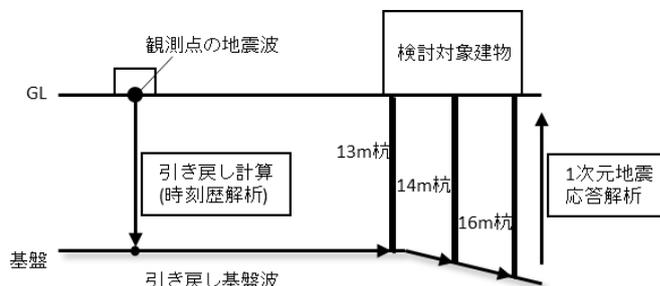


図 2 引き戻し計算と 1 次元地震応答解析の模式図

3.2 引き戻し基盤波の作成

2011 年東北地方太平洋沖地震時に検討対象建物の最寄りの K-NET 観測点で観測された EW 方向と NS 方向の 2 つの強震記録を用いる。観測された地震波は地表面上のものであるので、観測点の地盤をモデル化し、基盤面に入射される波形を引き戻し計算(時刻歴解析)によって求めた。観測点の地盤条件を表 1 に示す。

3.3 検討対象建物の地盤の相対変位の算出

杭頭に被害のあった 16m 杭の地盤をモデル化し、3.2 節で求めた引き戻し基盤波を用いて 1 次元地震応答解析を行い、基盤を基準にした相対変位を算出した。本解析は等価線形解析で行った。16m 杭の地盤条件を表 2 に示す。

3.4 解析結果

図 3 に基盤を基準にした地盤の相対変位の分布図を示す。深度別で見ると、相対変位の変化が深度 0~10m では小さくなったが深度 10~16m では大きくなった。最大値は、EW 地震波においては表層で 13mm、NS 地震波においては表層で 16mm であった。地震波別で見ると、EW 地震波よりも NS 地震波を用いた方が全体的に相対変位が大きくなった。

4. 地盤変形を考慮した杭の解析

4.1 解析概要

1 次元地震応答解析によって求めた地盤の相対変位を、図 4 に示すように水平地盤パネを介して杭に作用させ変位増分解析を行った。解析は各節点が図 3 に示す地盤の相対変位の値に達した時点で終了した。なお、杭の軸力は軸力 0kN と圧縮軸力 500kN の 2 ケースを設定した。

4.2 モデル化

図 4 に示すように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

表 1 観測点の地盤条件

深度 (m)	密度 (g/cm ³)	単位体積 重量 (t/m ³)	せん断波 速度 (m/s)
0~1	1.76	17.248	200
1~2	1.75	17.15	310
2~3	1.91	18.718	310
3~4	1.88	18.424	160
4~5	1.81	17.738	160
5~6	1.92	18.816	160
6~7	1.85	18.13	160
7~8	1.82	17.836	160
8~9	1.87	18.326	160
9~10	2.05	20.09	160
10~11	1.97	19.306	160
11~12	1.93	18.914	480
12~13	1.91	18.718	480

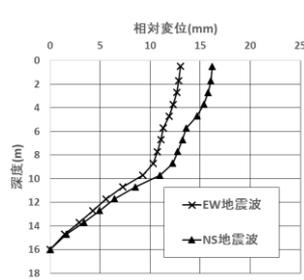


図 3 地盤の相対変位分布図

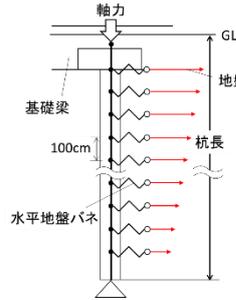


図 4 杭のモデル化

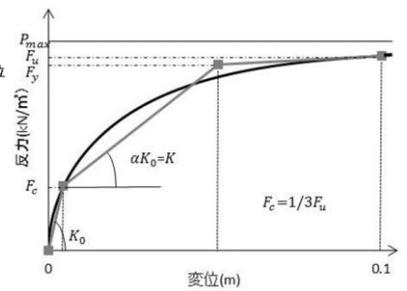


図 5 水平地盤バネのモデル化

表 2 16m 杭の地盤条件

深度 (m)	密度 (g/cm ³)	単位体積 重量 (t/m ³)	せん断波 速度 (m/s)
0~4.35	1.9	18.62	192
4.35~5.7	1.6	15.68	181
5.7~9.3	2	19.6	265
9.3~11.3	1.5	14.7	175
11.3~15.4	1.5	14.7	225
15.4~15.7	1.5	14.7	343
15.7~16	2	19.6	343

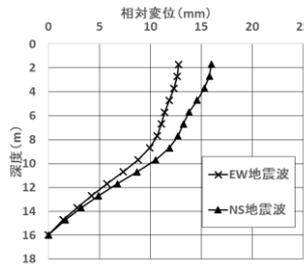


図 6 杭の相対変位分布図

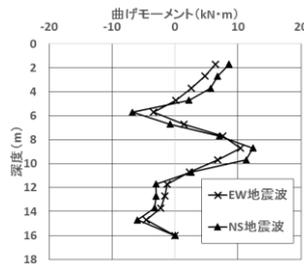


図 7 杭の曲げモーメント分布図

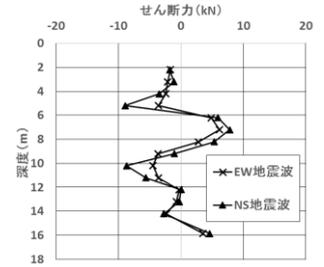


図 8 杭のせん断力分布図

割し(杭先端と杭先端から一番近い節点までは 130cm)、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。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 5 に水平地盤バネの骨格曲線のモデル化¹⁾を示す。水平地盤バネは、参考文献 4)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、そのときの地盤反力を塑性地盤反力 F_y とした。

4.3 解析結果・考察

杭の軸力 0kN のケースと圧縮軸力 500kN のケースではほぼ同様の結果であったので、ここでは軸力 0kN のケースのみを示す。図 6 に杭先端を基準にした杭の相対変位の分布図を示す。どのモデルも地盤の変形に従って杭が変形していることが確認できた。図 7 に杭の曲げモーメントの分布図を示す。最大値は、EW 地震波においては深度 8.7m で 10.4kN・m、NS 地震波においては深度 8.7m で 12.4kN・m であった。地震波別で見ると、EW 地震波よりも NS 地震波を用いた方が全体的に曲げモーメントの値は大きくなった。図 8 に杭のせん断力の分布図を示す。最大値は、EW 地震波においては深度 7.2m で 6.2kN・m、NS 地震波においては深度 5.2m で 9.0kN・m であった。地震波別で見ると、EW 地震波よりも NS 地震波を用いた方が全体的にせん断力の値は大きくなった。

一般的な PHC 杭の B 種の $\phi 400$ の軸力 0kN 時の許容曲

げモーメントは長期で 51kN・m、短期で 62kN・m であり、許容せん断力は長期で 116kN、短期で 147kN である⁵⁾ことから、本解析で算出した応力が許容応力度よりも小さいことが分かる。従って、地盤変形による杭基礎被害への影響は小さいと言える。

5. まとめ

地盤変形を考慮した単杭モデルによる検討で得られた知見を以下に示す。

- (1)EW 地震波よりも NS 地震波を用いた方が地盤の相対変位が大きく、それに対応して杭に生じる応力も大きくなった。
- (2)地盤変形によって杭に生じる応力は杭中間部で大きくなったが許容応力度よりも小さく、地盤変形による杭基礎被害への影響は小さい。

謝辞

本研究では防災科学技術研究所強震観測網(K-NET)の強震記録及び土質データを利用させていただきました。また、建物の地盤データは広島工業大学の金子治教授にご提供いただきました。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 東田実樹、秋田知芳、稲井栄一、向井智久、柏尚稔、平出務、金子治：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 1~その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.487-490、2016.8
- 2) 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、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.615-616、2017.8
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 三谷セキサン株式会社 HP：PHC パイル本体部標準性能表、URL「http://www.m-sekisan.co.jp/download/pdf/cat_pmc_pile.pdf」

*1 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)

Graduate Student, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ.
Lecturer, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ. Dr. Eng.
Prof, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ. Dr. Eng.