

東北地方太平洋沖地震において杭基礎が大破した建物の被害要因分析

その1 被害の概要と杭の被害シミュレーションのための解析モデル

正会員 ○金子 治^{*1} 正会員 川股紫織^{*2} 正会員 中井正一^{*3}
 正会員 関口 徹^{*3} 正会員 秋田知芳^{*4} 正会員 飯場正紀^{*5}
 正会員 向井智久^{*6} 正会員 平出 務^{*6} 正会員 柏 尚稔^{*6}
 正会員 谷 昌典^{*7}

地震被害 杭基礎 東北地方太平洋沖地震
 既製コンクリート杭 杭頭接合部 地盤ばね

1.はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)では、1981年の新耐震基準で設計された建築物や上部構造が耐震補強された建築物が、RC造の非耐力壁など設計時に十分な検討が求められていない部位の損傷や杭基礎の破損に伴う建物全体の傾斜のため、継続使用できなくなった事例が確認されている。これらの被害は、大地震時の建築物の倒壊は防止できたとしても、地震後の継続使用のためには別途適切な耐震対策が必要な場合があることを示唆しており、主たる防災拠点施設である庁舎や避難施設について、このような被害を防ぎ大地震後の機能維持・早期回復を可能とするための設計体系の構築に関する研究が進められている¹⁾。

本研究では、その一環として杭基礎の被害要因と対策に関する検討を実施しているが、そのうち、現行の耐震規準類に従って設計されていたものの一部の杭の破損により傾斜し継続使用不能となった被害事例の解析について報告する。(その1, 2)では、同じ建物内での杭の被害の違いに着目し、杭基礎と地盤ばねからなる解析モデルを用いて、一般の耐震設計では十分に考慮されない杭体や杭頭接合部の変形性能や地盤特性の詳細な評価を行った上で、被害過程の再現を行った結果を示す。

2.検討対象建物および被害の概要

検討対象は1987年竣工の8階建(軒高23.4m)の建物²⁾で、1~4階SRC造・5~8階RC造、NS方向連層耐震壁・EW方向非耐力壁付きラーメン構造である。杭伏図を図1に示すが、直径50cmの高強度プレストレストコンクリート杭(PHC杭、長期許容支持力960kN/本)が柱下2~5本ずつ配置されている。設計図書では杭頭レベルはGL-2.6~-2.7m、杭長30~33m、杭種は上杭C種7m、中杭・下杭A種15m+8m~11mの継杭である。杭頭接合部は、深さ750mmの中詰めコンクリート内に配置された接合鉄筋8-D13がパイルキャップに600mm定着されている。

土質柱状図を図2に示すが、埋土の下GL-4.4mまではN値4程度の粘性土で、以深は粘性土(N値10~15)・砂層(20~30)・砂礫(30~50)の互層となっており、杭の支持層はGL-30m付近の砂質土層、地下水位はGL-0.95mである。

本建物では地震後に北西向きに傾斜、8階床の最大相対沈下量は89mm、が生じた(図1)。建物内には幅0.2~0.5mm程度のひび割れが、南北外壁では幅1.0mm以上のび割れが確認され、南側外壁の窓開口間の方立壁は損傷が大きく、1,2,6階ではかぶりコンクリートが剥落した(図3)。

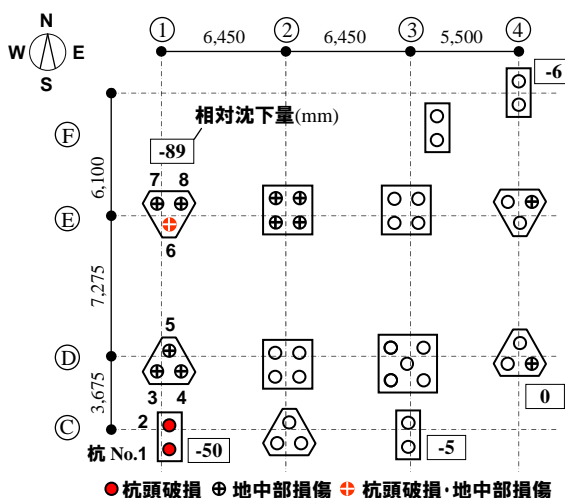


図1 杭伏図・杭の被害状況・沈下量

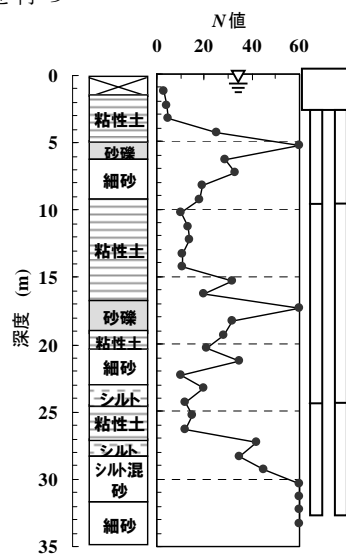


図2 土質柱状図

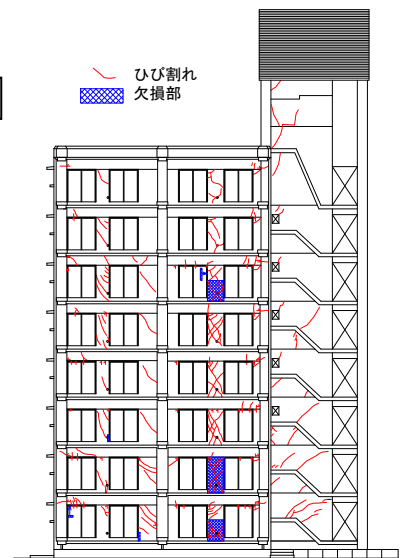


図3 南側外壁の被害状況

Analyses of damage factors to pile foundations during the 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake, Part 1 Outline of damage to pile foundations and analytical model for numerical simulation

KANEKO Osamu, KAWAMATA Shiori, NAKAI Shoichi,
 SEKIGUCHI Toru, AKITA Tomofusa, IIBA Masanori, MUKAI,
 Tomohisa, HIRADE Tsutomu, KASHIWA Hisatoshi, TANI Masanori

地震後に基礎下を掘削して杭頭の目視調査および弾性波を用いた非破壊検査(IT 試験)を行った。杭頭部が破損した杭は西端の1通りの3本(図1●: No.1,2,6)で、No.1,2は杭頭の圧縮破壊あるいは北西方向に向かうせん断破壊と見られる破壊、No.6はやや下がった位置から西北西方向にせん断破壊と考えられる破壊面が見られた(写真1)。

一方、IT 試験により地中部の損傷の可能性があると判定された杭は12本(図1+, No.6は杭頭と地中両方損傷)、地中部の損傷深さは杭頭-3.3~7.3mであった。

3. 杭-地盤モデルによる解析方法

対象建物の杭の状況は同一パイルキャップ内でも異なっており、被害要因の検討のためにはそれぞれの杭の条件を詳細に評価することが必要と考えられた。そこで、図4に示すように1通りの8本の杭について、地盤ばねは非線形性に加え荷重方向および杭間距離の影響(群杭効果)を、杭体および杭頭接合部は負担軸力に応じた非線形性を考慮した分離モデルを用いた静的増分解析により被害過程を分析することとした。

与える杭頭水平力(慣性力)および地盤変位は、敷地のせん断波速度(V_s)を N 値分布および建物横での常時微動観測に基いて設定した上で、近くの防災科学技術研究所強震観測網 K-NET 観測点の記録から求めた工学的基盤波を用いて1次元等価線形解析を行って評価した。

杭頭水平力は、地表面応答加速度に入力損失を考慮して求めた基礎階の層せん断力係数(C_B)から上部構造の分布形を A_i 分布として求めた水平力まで増分で与えた。ここで、NS 方向は $C_B=0.41$ としたが、EW 方向は被害状況や弾塑性荷重増分解析結果で計算した保有水平耐力を考慮して $C_B=0.34$ に低減した。杭軸力は一貫計算プログラムを用いた立体フレーム弾性解析による上部構造の解析で得られた軸力に C_B の比を乗じて求めた最大値で一定とした。

地盤変位は応答変位の最大値分布の杭先端からの相対値を杭頭水平力と同時に・同方向に与えた。

4. 一般的な杭の耐震設計方法による解析

上記手法により被害過程を検討した結果は(その2)³⁾に示すが、ここでは現状での一般的な杭の耐震設計⁴⁾に準じて、水平地盤反力係数 k_h は(1)式で評価し、①杭体は弾性、杭頭は固定条件としたはり-ばねモデルおよび②一様地盤(N 値=5で一定)とした弾性支承上のはりの弾性解(Chang 式)の計算結果と被害状況との比較を行った。

$$k_{h0}=80E_0B^{-3/4}, k_h=k_{h0} \cdot y^{-1/2} \quad (1)$$

ここで、 E_0 :地盤の変形係数、 B :杭径、 y :杭水平変位

$C_B=0.36$ 時の計算結果は、杭頭の曲げモーメント M_0 は①577kNm②476kNm と、いずれも杭頭部で終局曲げモー

メント M_u (449kNm($N=700$ kN))を超えるが、せん断耐力には達せず地中部は破損しない。これらの結果は実被害とは対応せず、既往の手法そのままでは大地震時の耐震性評価として適切ではないと考えられる。



写真1 杭頭の破損状況 (杭 No.1,2,6)

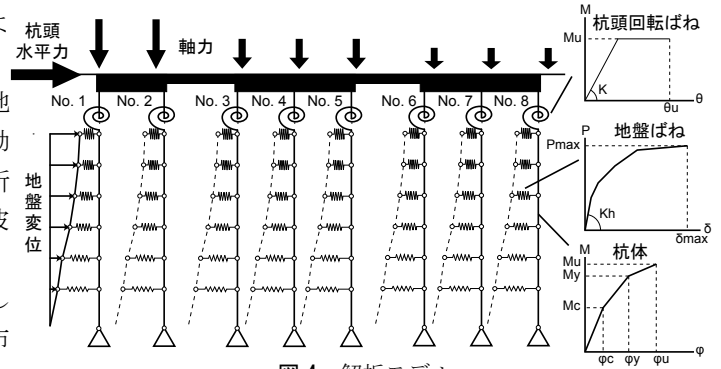


図4 解析モデル

5. まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震において杭の破損により杭の破損により継続しできなくなった建築物の被害状況と被害過程を検討するための解析方法について示した。

謝辞 本検討は平成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」および独立行政法人建築研究所の研究課題「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」において実施した建築研究所、千葉大学、山口大学、芝浦工業大学、戸田建設による共同研究の成果に基づくものである。被害調査に協力および資料提供いただいた福島県をはじめとする関係各位に謝意を表します。

参考文献 1) 尻無濱昭三他:東日本大震災において基礎杭が被災した共同住宅の被害と補修,コンクリート工学,Vol.53,No.3,pp.283~288,2015.3, 2)向井智久他:建築物の地震後の継続使用性に関する阻害要因分析 その1 プロジェクト全体概要,2014年度日本建築学会大会学術講演梗概集・構造 I,pp.37~38, 3)川股紫織他:問題その2 杭基礎の被害シミュレーションによる評価,2015年度日本建築学会大会学術講演梗概集(投稿中), 4)地震力に対する建築物の設計指針,日本建築センター,1984

*1 戸田建設 *2 ジャパンパイル
*3 千葉大学 *4 山口大学 *5 北海道大学
*6 建築研究所 *7 京都大学

*1 Toda Corporation *2 Japan Pile Corporation
*3 Chiba University *4 Yamaguchi University *5 Hokkaido University
*6 Building Research Institute *7 Kyoto University