

既存鉄筋コンクリート建物における耐震補強が上部構造と杭基礎の地震時挙動に及ぼす影響

正会員 新井 昂\*1  
正会員 北山 和宏\*2

鉄筋コンクリート建物 杭基礎 耐震補強  
地震被害 建物-杭-地盤連成系 多質点系地震応答解析

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では耐震補強されたにもかかわらず被害が生じたRC建物が複数確認された<sup>1)</sup>。さらに同報告<sup>2)</sup>は、耐震補強された建物は未補強建物に比べ基礎構造の被害が激化する傾向にあることを指摘した。そこで本研究は、鉄骨ブレースで1・2階を耐震補強したが、同地震で上部構造は中破し、基礎構造は大破した3階建てRC造学校校舎を対象として次の検討を行った。すなわち耐震補強が上部および基礎構造の地震時挙動に与える影響を分析するため、対象建物における耐震補強前後の建物-杭-地盤連成系モデルを作成し、地震応答解析を行い、地震応答性状について比較考察する。なお、当該建物における被害状況や上部構造の地震応答性状は既報<sup>2)</sup>により報告された。

2. 推定地震動の作成

一次元重複反射理論に基づく等価線形解析プログラムDYNEQ<sup>3)</sup>を用いて本震時に対象建物に入力された地震動の推定を行った。図-1に地盤のモデル化に用いた当該敷地の地盤調査結果および中央防災会議の式<sup>4)</sup>より推定したせん断波速度 $V_s$ を示す。土の繰返しせん断特性は、Hardin-Drnevichモデル<sup>5)</sup>を用いた。ここで各層の基準せん断ひずみ<sup>6)</sup>は粘性土0.18%、砂質土0.10%とし、最大減衰定数<sup>6)</sup>は粘性土17%、砂質土21%とした。また有効ひずみ係数は0.65とした。解析モ

デルに入力する地震動は、当該学校から約3km離れたKiK-net芳賀観測点の地中(深度112m)で観測された本震時の加速度時刻歴(EW方向)とする(図-2参照)。深度20.9m以深の砂礫層で推定せん断波速度が400m/sを超えるので、砂礫層以深を工学的基盤と判断し、地震波の入力を行った。

図-2に当該敷地の地表加速度時刻歴を示す。KiK-net芳賀観測点の最大地動加速度は172.8galだったのに対し、当該敷地の最大地表加速度は585.5galとなった。土の最大せん断ひずみは0.16%であり、等価線形解析の適用範囲内であった。図-3に減衰定数3%時における加速度応答スペクトルを示す。加速度応答スペクトルの卓越周期は0.32秒であった。一方、後述する建物-杭-地盤連成系モデルの一次固有周期は0.26秒であり、本震時に建物が共振した可能性が高い。

3. 建物-杭-地盤連成系モデルを用いた地震応答解析

3-1 モデル概要

弾塑性解析プログラムSNAP<sup>7)</sup>を使用して建物-杭-地盤連成系モデルによる多質点系地震応答解析を行った。図-4に解析モデルを示す。上部構造は各階を質点とせん断ばねに置換した3質点等価せん断型モデルとした。表-1に各階の復元力特性を示す。各階の骨格曲線はトリリニアモデルとした。ここで初期剛性は対象建物における立体骨組モデルの静的漸増載荷解析結果を用いた。その他の特性点は耐震診断結果<sup>2)</sup>

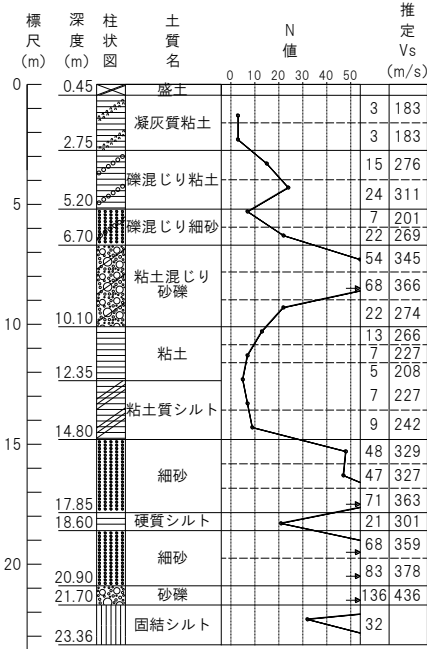


図-1 地盤調査結果

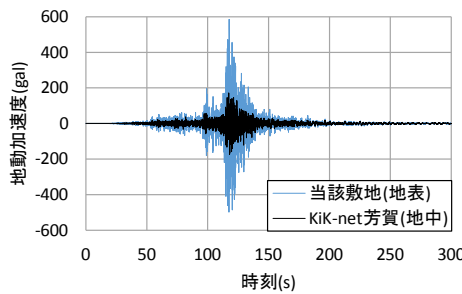


図-2 当該敷地の地表加速度時刻歴

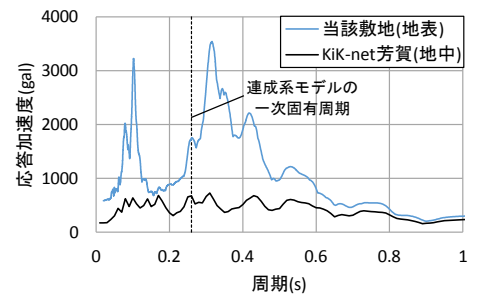


図-3 加速度応答スペクトル

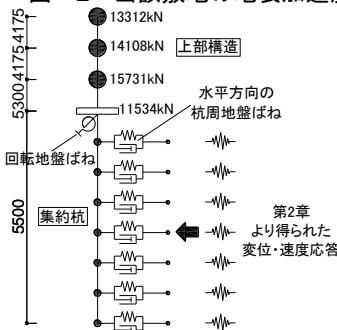


図-4 解析モデル

表-1 上部構造の復元力特性

	1階		2階		3階	
	補強前	補強後	補強前	補強後	補強前	補強後
初期剛性(kN/mm)	6282	6966	5290	5731	4137	4345
ひび割れ変位(mm)	1.1	1.6	1.1	1.6	1.1	1.1
ひび割れ耐力(kN)	7029	11041	5879	9236	4670	4670
第2剛性(kN/mm)	700	1126	754	1224	600	598
降伏変位(mm)	21.2	21.2	16.7	16.7	16.7	16.7
降伏耐力(kN)	21086	33122	17637	27709	14010	14010

表-2 杭の曲げ復元力特性

	初期剛性 (kN・m)	第1点曲率 (1/m)	第1点耐力 (kN・m)	第2剛性 (kN・m)	第2点曲率 (1/m)	第2点耐力 (kN・m)
単杭	10142	0.002	21	1849	0.014	42
群杭(220本)	2231213	0.002	4528	406847	0.014	9194

を用いて、既報<sup>8)</sup>と同様の方法で算出した。なお降伏点後の第3剛性は初期剛性の1/1000倍とした。また各階の履歴特性は補強前の場合、1・2階で原点指向型モデル、3階で武田モデルとした。一方、補強後は全階で武田モデルとした。

杭基礎は対象建物を支持する220本の杭を1本に集約し、材端ばねモデルとした。杭は曲げのみ非線形性を考慮し、長期軸力を考慮した杭の断面解析より得られた曲げモーメント $M$ -曲率 $\phi$ 関係をトリリニアにモデル化した。ここで杭は300φのRC杭であり、コンクリート圧縮強度を39.2N/mm<sup>2</sup>、鉄筋の降伏強度を294N/mm<sup>2</sup>と仮定して断面解析を実施した。表-2に杭の曲げ復元力特性を示す。第1点耐力は曲げひび割れが発生する点、第2点耐力は最大耐力、第2点曲率は $M$ - $\phi$ 関係における履歴面積とトリリニアモデルの履歴面積が一致するように設定した。第3剛性は初期剛性の1/1000倍とし、履歴特性は武田モデルとした。

地盤ばねは文献9)を参考に算出した。水平方向の杭周地盤ばねは杭の各質点位置に取り付けた。非線形特性は双曲線モデルとし、初期剛性はFrancisの式、極限地盤反力はBromsの式を用いて算出し、群杭効果を考慮した。また逸散減衰としてGazetasらの減衰定数を与えた。回転地盤ばねは基礎に取り付け、限界耐力計算法により算出した。

応答計算において、数値積分はNewmark $\beta$ 法( $\beta=1/4$ )を用い、減衰は瞬間剛性比例型とし、粘性減衰は3%とした。入力地震動は前章で作成した推定地震動(0~300秒)とし、杭先端位置での加速度時刻歴および各地盤の応答変位・速度は杭の各質点に取り付けた杭周地盤ばねを介して入力した。

### 3-2 解析結果

図-5に補強前後における上部構造の最大応答層間変形角 $R$ を示す。両者を比較すると、1・2階は鉄骨ブレース増設により補強後の最大層間変形角は補強前の約0.3~0.5倍になったのに対し、3階の最大層間変形角は5倍以上に増大した。また各階の降伏到達時刻について、補強前は1・2階のみ時刻98秒に降伏したのに対し、補強後は3階のみ時刻115秒に降伏した。実被害において3階に被害が集中した原因として、耐震補強により1・2階の保有水平耐力が増大した結果、3階が1・2階より先に降伏したため、変形が3階に集中した。よって耐震補強を実施する際には、各階の耐力バランスに注意

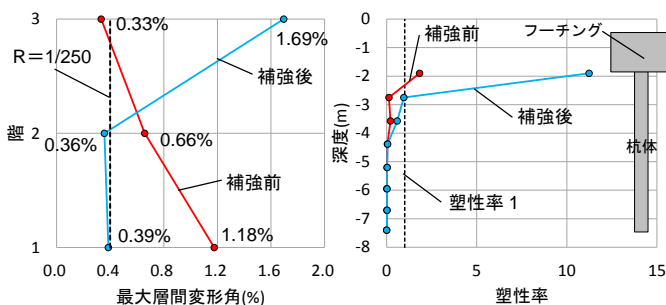


図-5 上部構造の最大層間変形角

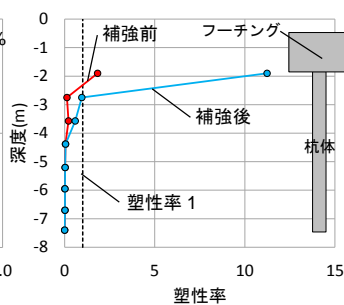


図-6 杭の塑性率分布

する必要があると考える。

図-6に杭の塑性率分布を示す。ここで塑性率は第2点曲率に対する最大応答曲率の比である。補強前後ともに杭頭部が曲げ降伏したが、補強前後で塑性率が1.8から11.2に増大し、杭応答に差異が生じた。図-7に耐震補強前後における杭頭に生じるせん断力の時刻歴を示す。図中の点線は文献10)による提案式を準用して算出した杭のせん断終局耐力である。補強前は1・2階が降伏した時刻98秒時に最大せん断力となったが、せん断終局耐力には到達しなかった。一方、補強後は3階が降伏した時刻115秒時にせん断終局耐力に到達した。補強前は上部構造が早期に降伏することで杭頭に生じる水平慣性力は頭打ちとなり杭応答が抑えられたが、補強後は上部構造の保有水平耐力増大により、杭頭に生じる水平慣性力が増大したため、せん断終局耐力に到達したと考える。

### 4. まとめ

1・2階が耐震補強された3階建てRC学校校舎を対象に、耐震補強前後における建物-杭-地盤連成系モデルを作成し、多質点系地震応答解析を実施した。その結果、上部構造は1・2階の耐震補強により、3階の降伏が先行したため3階に変形が集中したことを指摘した。また上部構造を耐震補強することで杭頭に生じる水平慣性力は大きくなり、降伏点曲率に対する最大応答曲率の比で定義する塑性率は補強前後で1.8から11.2に増大した。また補強後のみ杭頭部がせん断終局耐力に到達した。既存RC建物を耐震補強する際には上部構造と基礎構造の耐震性能バランスに配慮する必要がある。

【謝辞】設計図書および杭の掘削調査結果を提供していただいた1町役場(入野正明町長)に厚く御礼申し上げます。また、芳賀観測点での強震記録は防災科学技術研究所のKiK-netによるものである。記して謝意を示す。  
 【参考文献】1)東日本大震災合同調査報告書編集委員会：東日本大震災合同調査報告書 建築編 1 鉄筋コンクリート造建築物, 2015.5 2)石木健士朗, 北山和宏, 山村一繁, 遠藤俊貴：鉄骨ブレースで耐震補強された鉄筋コンクリート建物の被害と地震時挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.35, No.2, pp.1123-1128, 2013.7 3)吉田望, 末富岩雄：DYNEQ：等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム, 佐藤工業(株)技術研究所報, pp.61-70, 1996 4)中央防災会議事務局：中央防災会議「東海地震に関する専門調査会」(第10回), 関連図表2, [資料2-2], 2001.11 5)Hardin, B. O. and Drnevich, V. P.: Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves, J. SMFD, Proc., ASCE, Vol.98, No.SM7, pp.667-692, 1972 6)古山田耕司, 宮本裕司, 三浦賢治：多地点での原位置採取試料から評価した表層地盤の非線形特性, 第38回地盤工学会研究発表会, pp.2077-2078, 2003.7 7)構造システム：任意形状立体フレームの弾塑性解析プログラム SNAP Ver.6 テクニカルマニュアル, 2012.2 8)星野和也, 北山和宏, 遠藤俊貴：構造耐震指標が同程度で地震被害に差を生じた二棟の鉄筋コンクリート建物の耐震性能(その1：被害が軽微であった建物の耐震性能), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, 2015年9月, pp.387-388. 9)日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 2006 10)岸田慎司, 堀井昌博, 桑原文夫, 林静雄：大口径PHC杭のせん断終局強度の計算方法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第532号, pp.101-110, 2000

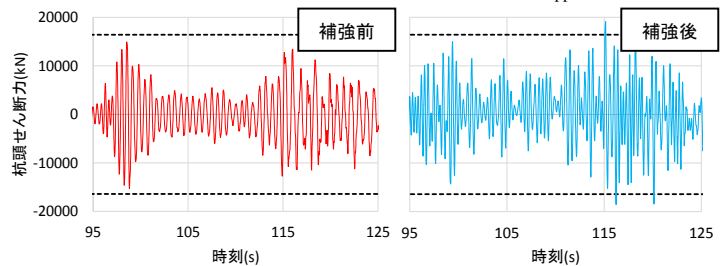


図-7 杭頭に生じるせん断力時刻歴(95~125秒)

\*1 三井住友建設株式会社(元首都大学東京大学院) 修士(工学)  
 \*2 首都大学東京大学院 建築学域 教授 工博

\*1 Sumitomo Mitsui Construction Co., Ltd., M.Eng. (Tokyo Metropolitan University)  
 \*2 Professor, Tokyo Metropolitan University, Dr.Eng