

鉄骨ブレースで耐震補強した鉄筋コンクリート校舎の地震応答と補強効果に関する検討(その2 地震応答解析)

正会員 ○石木 健士朗\*<sup>1</sup> 同 北山 和宏\*<sup>2</sup>  
同 山村 一繁\*<sup>3</sup> 同 遠藤 俊貴\*<sup>4</sup>

鉄筋コンクリート 耐震補強 鉄骨ブレース  
地震応答解析 連層配置 千鳥配置

1. はじめに

本稿では(その1)に続き、表層地盤による増幅を考慮した地震動を用いて立体骨組による地震応答解析を行い、I中学校普通教室棟の地震時挙動を考察した。

2. 敷地における推定地震動の作成

I中学校の敷地での地震動を推定するため、2kmほど西に位置するKiK-net 芳賀観測点の地中(深度112m)で得られたEW方向およびNS方向の加速度時刻歴を当該敷地の工学的基盤(後述)に同時入力し、表層地盤による増幅を考慮する等価線形解析を行った。解析には、次元重複反射理論に基づくプログラムDYNEQ<sup>10)</sup>を用いた。I中学校敷地内の地盤ではボーリングデータが得られており(図1)、調査位置は普通教室棟の南である。地下水位はGL-0.55mであった。各地層のせん断波速度および湿潤単位体積重量は、N値および土質から中央防災会議による式<sup>11)</sup>を用いて算出した。土の繰返しせん断特性はHardin-Drnevichモデル<sup>12)</sup>を用いた。古山田・宮本らの研究<sup>13)</sup>から、基準ひずみは粘性土0.18%、砂質土0.10%、最大減衰定数は粘性土17%、砂質土21%と設定した。最小減衰定数は2%とした。有効ひずみは周波数によらないとして、有効ひずみ係数は0.65とした。深度15m以下の地層ではN値がほぼ50以上となることから、工学的基盤はせん断波速度341m/sの細砂層とした。

I中学校とKiK-net 芳賀観測点の標高はいずれも100m程度で、表層地盤の土質も類似した。図2に入力地震動

および解析結果として得られたI中学校の地表加速度時刻歴を比較して示す。芳賀観測点の最大地中加速度はEW方向172.8gal、NS方向176.9galであった。表層地盤の増幅効果によりI中学校地表の最大加速度はEW方向558.4gal、NS方向510.9galに増大し、最大速度はEW方向34.1kine、NS方向33.2kineであった。I中学校地表における表層地盤の一次固有周期は0.31秒で、芳賀観測点における表層地盤の増幅特性に近い<sup>14)</sup>。後述する立体骨組解析による建物の一次固有周期は補強前0.23秒、補強後0.21秒で、表層地盤の固有周期に近い値であった。図3に減衰定数3%時のEW方向における加速度応答スペクトルを示す。地表での地震動のスペクトルのピークが周期0.31秒にあり、本震時に建物が共振した可能性が高い。

3. 地震応答解析

前章で作成したI中学校の地表におけるEW方向およびNS方向の地震動(95~155秒の60秒間)を同時入力して地震応答解析を行った。数値積分はNewmarkβ法(β=1/4:平均加速度法)を用い、時間刻みは0.0004秒とした。粘性減衰は3%とし、瞬間剛性に比例させた。

図4に各層の最大層間変形角を示す。補強前を破線、補強後を青線でそれぞれ示した。桁行方向1,2階の最大層間変形角は鉄骨ブレースの増設により、それぞれ0.43%から0.38%、0.61%から0.48%に小さくなった。また、桁行方向3階の最大層間変形角は補強前後で0.34%から0.57%に増大した。これは3階の2階に対する初期層剛性の比

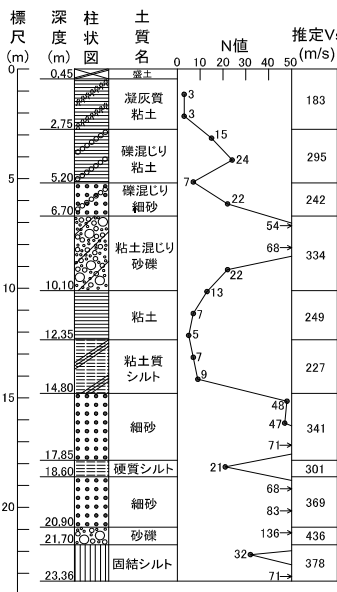


図1 I中学校敷地のボーリング柱状図

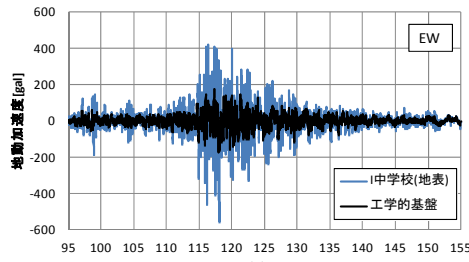


図2 地動加速度時刻歴(EW方向)

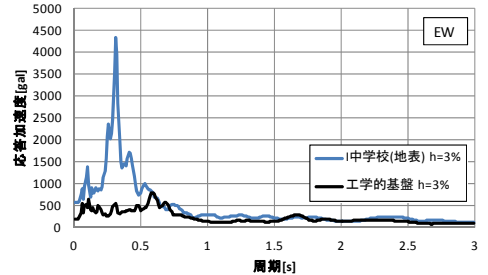


図3 加速度応答スペクトル(EW方向)

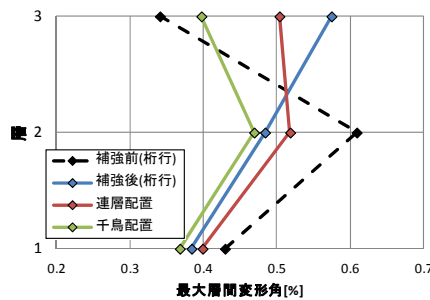


図4 各層の最大層間変形角

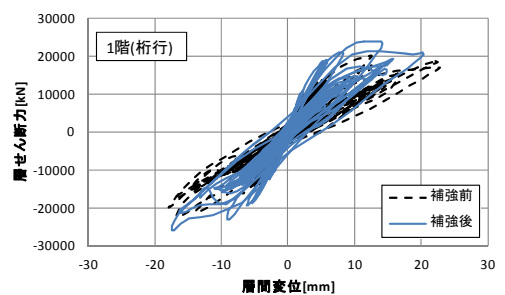


図5 1階の層せん断力-層間変位関係

が補強前後で 0.77 から 0.69 に低下したことから、1,2 階の耐震補強により相対的に 3 階の剛性が小さくなったためと考えられる。

図 5 に桁行方向 1 階における補強前後の層せん断力と層間変位の関係を示す。連層鉄骨ブレース架構の破壊モードが基礎浮き上がり回転に支配された影響で、補強後 1 階の最大層せん断力は約 17% 上昇した程度にとどまり、履歴形状も補強前後で顕著な差異は見られなかった。

図 6 に補強後 C-7~C-15 通りにおける地震終了時の機構図を示す。地動加速度が急激に大きくなる時刻 115 秒過ぎに、全ての階で柱・梁・壁部材の曲げ降伏あるいはせん断破壊がほぼ一斉に発生した。また、同時期に全ての鉄骨ブレース架構で浮き上がりが発生した。鉄骨ブレース架構の上に位置する 3 階の柱はすべてせん断破壊し、3 階 C 通りの柱 4 本がせん断破壊した実被害状況を再現できた。また鉄骨ブレース架構に取り付くすべての境界梁で両端に降伏ヒンジが形成された。これは境界梁が浮き上がり回転に抵抗したためと考えられる。一方、梁間方向の壁や直交梁は曲げ降伏あるいはせん断破壊したものもあったが、多くはひび割れ発生程度に留まった。鉄骨ブレース脇の柱がせん断破壊した点は実状と整合しないが、全体的に破壊モードは実被害状況とよく一致した。

#### 4. 本事例における耐震補強の改善案

対象建物の実被害を抑止するために必要な耐震補強方法を考察した。まず鉄骨ブレース増設数を変数とした地震応答解析を行ったところ、3 階に鉄骨ブレースを 2 枚増設すれば 3 階への応答変形集中を抑止できることが分かった。そこで、被害が大きかった C-8~C-14 通りの柱に取り付く腰壁・垂れ壁には全階で耐震スリットを設け、2 枚の鉄骨ブレースを(A)連層配置(3 階 C-9,10 通り・C-11,12 通り)した場合、(B)千鳥のように配置(3 階 C-10,11 通り・C-12,13 通り)した場合について地震応答解析を行った。

図 4 に前述した改善案(A),(B)について各層の最大層間変形角の分布を示す。千鳥配置した場合(緑線)は連層配置した場合(赤線)に比べて全階で最大層間変形角は小さくなった。図 7 に千鳥配置案における地震終了時の機構図を示す。連層配置案では連層鉄骨ブレース架構の浮き上がり回転が卓越し、ほぼ全ての鉄骨ブレースが弾性域に留まったのに対し、千鳥配置案は浮き上がりが抑制され、全ての鉄骨ブレースが座屈あるいは引張降伏した。なお、千鳥配置の場合には最大応答層せん断力も上昇し、鉄骨ブ

レースがエネルギーを吸収したことで履歴形状も紡錘形に近づいた。また、耐震スリットの設置によりせん断破壊する柱の本数は減少した。

#### 5. まとめ

表層地盤による増幅を考慮した地表地震動を用いて、建物の立体骨組地震応答解析を行ったところ、実被害状況を概ねよく再現できた。耐震補強した桁行方向 1,2 階の変形は補強前と比べて約 0.8~0.9 倍に小さくなった。相対的に剛性が小さくなった桁行方向 3 階の変形は、1,2 階の補強前後で 1.7 倍に増大した。対象建物の実被害を抑止するためには、耐震スリットと鉄骨ブレースの設置(千鳥配置)との併用が有効であることを指摘した。

#### 謝辞

二回にわたる現地調査の便宜を図って頂き、杭の掘削調査結果・設計図書を提供して頂いた I 町役場(入野正明町長)と I 町教育委員会(大貫宏衛教育長)に厚く御礼申し上げる。また、芳賀観測点の強震記録は防災科学研究所の KiK-net によるものである。記して謝意を示す。

#### 参考文献

- 1)石木健士朗, 北山和宏: 鉄骨ブレースで耐震補強した鉄筋コンクリート校舎の東北地方太平洋沖地震による被害, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.45-48, 2012.9
- 2)日本建築防災協会: 震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 2001.9
- 3)日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説, 2001.10
- 4)日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針 同解説, 2001.10
- 5)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
- 6)社団法人日本道路協会: 道路橋示方書(I 共通編 IV 下部構造編)・同解説, 2002.3
- 7)国土交通省住宅局建築指導課他監修: 2007 年版 建築物の構造関係技術基準解説書, 2007.8
- 8)日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010.2
- 9)日本建築学会: 鋼構造座屈設計指針, 2009.11
- 10)吉田望, 末富岩雄: DYNEQ: 等価線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
- 11)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
- 12)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
- 13)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
- 14)山中浩明, 津野靖士, 地元孝輔, 新色隆二: 2011 年東北地方太平洋沖地震の余震観測と微動アレイ観測による KiK-net 芳賀観測点周辺での地盤震動特性の評価, 日本地震工学会論文集, 第 12 巻, 第 4 号(特集号), pp.143-159, 2012

●: 曲げ降伏(白抜きはひび割れ) ▲: せん断破壊(白抜きはひび割れ) ■: 座屈・引張降伏 ※ローマ数字は実被害状況(損傷度Ⅲ以上)

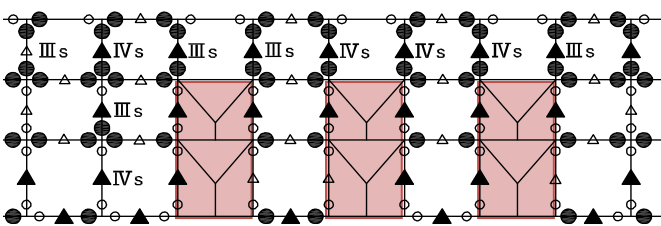


図 6 地震終了時における補強後 C 通り機構図

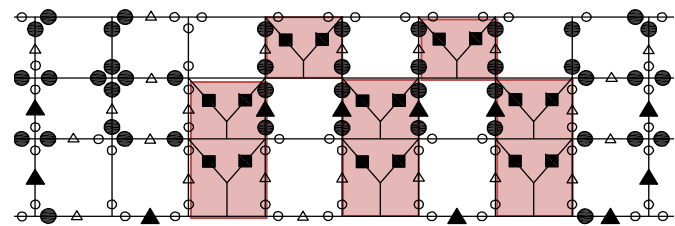


図 7 鉄骨ブレースを千鳥配置した場合の C 通り機構図

\*1 鹿島建設株式会社(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  
 \*3 首都大学東京大学院 建築学域 助教 工修  
 \*4 首都大学東京大学院 建築学域 助教 博士(工学)

\*1 Kajima Corporation, M.Eng. (Tokyo Metropolitan Univ.)  
 \*2 Prof., Tokyo Metropolitan Univ., Dr.Eng.  
 \*3 Assistant Prof., Tokyo Metropolitan Univ., M.Eng.  
 \*4 Assistant Prof., Tokyo Metropolitan Univ., Dr.Eng.