

## 付Ⅱ-2 「耐震補強建物の地震による被災状況」

### 1. はじめに

兵庫県南部地震（1995年）での建物被害の教訓から、既存建物の耐震診断の実施およびそれによって耐震性能が劣ると判断された建物の耐震補強が国家の施策として強力に推進されてきた。このような社会情勢のもとで耐震補強された既存建物の数は着実に増えて行ったが、比較的大きな地震動を経験した耐震補強済み建物が現れ始めたのは概ね2003年5月の三陸南地震<sup>1)</sup>や2004年の新潟県中越地震<sup>2)</sup>のときからであった。ここではその後の2011年に発生した東北地方太平洋沖地震によって被災した耐震補強済み建物の事例を紹介するとともに、そこから得られた教訓等を示す。なお本稿では在来工法による耐震補強を対象とし、免震・制振による耐震補強については触れない。

### 2. 統計的な知見

東北地方太平洋沖地震（2011年）では、東北地方から関東地方までの広範囲に立地する多数の耐震補強済み建物が極めて大きな地震動を初めて経験したと考えられる。日本建築学会等による報告<sup>3)</sup>では、この地震によって震動被害を受けた東北および北関東の鉄筋コンクリート造（RC）文教施設（未補強建物：313棟、耐震補強済み建物：55棟、合計368棟）を対象として、耐震補強の有無による地震被害の差異について統計的に分析した。なお耐震補強の工法種別は、鉄骨ブレース、RC耐震壁の増設あるいは増し打ち、外付けRCブレース、柱のコンクリート増し打ち、炭素繊維巻き立てなどの在来工法に限定した。統計分析の結果、以下の結論が得られている。

- 1) 上部構造が小破以上の被害を受けた棟数は、未補強建物群および耐震補強済み建物群ともにそれぞれの母数の約半数とほぼ同率であったが、耐震補強することによって甚大な被害（大破）は防止できた。
- 2) 未補強建物群で中破以上の被害を受けた建物比率は24%であったが、耐震補強済み建物群におけるその比率は16%に低下した。耐震補強は有効に機能して、上部構造の地震被害を抑制できたと判断する。
- 3) 耐震補強を施した建物の耐震性能残存率 $R$ は70%（中破）から100%（無被害）まで分布した。耐震補強によって $I_s$ 値および $C_p S_D$ 値ともに0.7を上回ったにもかかわらず耐震性能残存率 $R$ は80%以下になって、中破と判定された建物が複数あった。これらは耐震補強を施さなかった上層階あるいは張間方向で被害を受けた事例等であった。

なお同報告<sup>3)</sup>は上部構造のみならず基礎構造の被害についても言及している。すなわち基礎構造が小破以上の被害を受けた棟数の比率は、耐震補強済み建物群では約25%であり、未補強建物群よりも二倍以上大きかった。このように上部構造の耐震補強によって基礎構造の被害が激化する傾向を指摘した。この原因として、上部構造の耐震補強による水平耐力の増大が杭体や地盤へ過度な応力を作用させた可能性を例示した。

### 3. 被害事例の総括

文献 3)によると、耐震補強を施したにもかかわらず東北地方太平洋沖地震（2011 年）によって上部構造あるいは基礎構造が小破以上の被害を受けた RC 建物が約 30 棟存在したことが判明している。

上部構造の被害については、耐震補強を施した部位から離れた柱あるいは耐震壁において、せん断破壊やせん断ひび割れが発生した事例があった。また耐震補強を施さなかった方向（学校建物では張間方向）あるいは階における鉛直部材のせん断破壊やせん断ひび割れが見られた。このような地震被害の要因として、平面内における耐震補強部材（水平力抵抗要素）の偏った集中配置、あるいは建物全体の鉛直方向の剛性分布が不均一となったこと、等を指摘した。これらは形状指標  $S_D$  の算定精度が十分ではない可能性や、剛床仮定の適用に注意が必要な場合があることを示唆している。

基礎構造については、上部構造が中破の被害を受けるとともに、RC 杭の頭部がせん断破壊し、杭主筋が座屈する等の激しい損傷が見られた事例が複数あった。耐震補強設計において、杭の鉛直支持能力が検討されることは多い。一方、杭頭の配筋詳細は不明なことが多いため杭の水平方向の耐力が検討されることはほとんどない。しかし上部構造の耐震補強が基礎構造の破壊を誘発するとしたら、ことは重大である。この問題の発生の可能性は地盤状況等によってある程度は想起されると思われる。その場合には、より慎重な耐震補強設計が求められる。

### 4. 個別の被害事例

耐震補強を施したにもかかわらず東北地方太平洋沖地震（2011 年）によって上部構造あるいは基礎構造に損傷を生じた RC 建物が文献 4)に例示されている。ここではその幾つかを抜粋して紹介する。

#### 4.1 耐震補強の有無による被害の差異 ～仙台市立 T 小学校～

この小学校にはほぼ同時期に建設された二棟の 3 階建て RC 校舎がある（付写真 II.2-1）。西校舎（1974 年竣工）では耐震診断の結果、補強不要と判定された。この校舎の  $I_s$  値は 1 階桁行方向で最小の 0.80 であり、このときの靱性指標  $F$  および累積強度指標  $C_T S_D$  はそれぞれ 1.75 および 0.46 であったので、靱性依存型の建物と判断できる。一方、東校舎（1973 年竣工）では 1 階および 2 階を鉄骨ブレース（付写真 II.2-2）および RC 耐震壁で補強した。また 3 階の  $I_s$  値は 0.73 と目標値を満足したが、下階との剛性のバランスを考慮して RC 耐震壁が 3 階に増設され、補強後の  $I_s$  値は 0.88 に増大した。東校舎の補強後の  $I_s$  値（0.73 から 0.88）は各階ともに  $F=1.0$  で決まっており、強度抵抗型の建物である。

2011 年の地震では両校舎とも損傷を蒙ったが、その程度には差があった。耐震補強を施さなかった西校舎では、1 階桁行方向の損傷が最も大きく、短柱および柱付き壁のせん断破壊

が多数生じた（付写真Ⅱ.2-3）。その耐震性能残存率  $R$  は 67%であり、中破と判定された。地震動による応答変形は耐震診断で予想した通りに大きくなって短柱がせん断破壊したものの、建物の倒壊は防止できた。この点で耐震診断の結果は妥当であったと判断できる。しかしながら被災した柱の補修を行うまでの長期間、西校舎は使用不能となった。

一方、耐震補強を施した東校舎では、補強量の少なかった 3 階において多数の柱に損傷度ⅡからⅢのひび割れが発生した。3 階の耐震性能残存率  $R$  は 81%であり、小破と判定された。このように西校舎と比較すると被害は小さく、東校舎の継続使用に特段の支障はなかった。



付写真Ⅱ.2-1 校舎の全景（左が東校舎、右が西校舎）



付写真Ⅱ.2-2 東校舎 1 階および 2 階の鉄骨ブレース補強



付写真Ⅱ.2-3 西校舎1階短柱のせん断破壊

#### 4.2 境界梁の被害 ～T大学青葉山キャンパスのD・0棟～

この建物（1966年竣工、付写真Ⅱ.2-4）は地上8階、塔屋2階の耐震壁付きRCフレーム構造で、桁行・張間両方向ともにRC耐震壁を増設して強度抵抗型の耐震補強を1996年に実施した。一部の梁には補強設計図書にはないものの炭素繊維シートの貼付け補強がなされた。2011年の地震では張間方向と塔屋の被害が甚大であった。張間方向の並列する連層耐震壁を連結する境界梁がせん断破壊した。またその一部は有孔梁であり、円孔を斜めに横切るせん断ひび割れや梁下端筋に沿った付着割裂ひび割れも見られた（付写真Ⅱ.2-5）。塔屋は耐震壁の偏在が顕著だったが耐震補強されなかったため、柱および壁が崩壊する著しい被害を生じた。

この建物の耐震性能残存率 $R$ は6階で33%となり、大破に該当した。ただし顕著な損傷は梁に集中したので、柱や壁による軸力保持能力は維持された。この点では耐震補強が有効に機能したと判断できる。しかし二次診断の結果を参照して耐震補強を行ったため、境界梁が十分に補強されずに顕著な損傷を招いた。このため当該建物は地震後の復旧を断念して改築された。このような並列・連層耐震壁を有する建物では、連層壁や境界梁の地震時挙動を適切に考慮できる耐震診断手法を選択することの必要性を本件は物語っている。



付写真Ⅱ.2-4 D・0棟の全景



付写真Ⅱ.2-5 並列する連層耐震壁を連結する有孔梁の損傷

#### 4.3 上部構造および基礎構造の被害 ～栃木県市貝町立Ⅰ中学校～

この学校の3階建てRC校舎（1974年竣工、付写真Ⅱ.2-6）では、付図Ⅱ.2-1のように1階および2階の桁行方向を鉄骨ブレースで耐震補強したが、所定の性能を満足するとして補強しなかった3階の桁行方向において中破の被害を生じ、さらに基礎下の掘削によってRC杭（杭長6m程度）の激しい損傷が明らかとなった。なお当該建物の補強後の $I_s$ 値は各階ともに $F=1.0$ で決まっており、強度抵抗型の建物と判断される。

桁行構面の柱の損傷状況を付図Ⅱ.2-1に示す。ローマ数字は損傷度を表す。桁行方向3階では四本の柱がせん断破壊して（付写真Ⅱ.2-7）、耐震性能残存率 $R$ は77%であった。耐震補強を施した1階および2階でも数本の柱がせん断破壊した（付写真Ⅱ.2-8）。3階に被害が集中した原因の一つとして、1階および2階の鉄骨ブレース架構に隣接する腰壁および垂れ壁が鉄骨ブレース架構の水平剛性を増大させ、相対的に3階の水平剛性が低下した可能性を指摘した。

RC杭には曲げひび割れ、せん断ひび割れやコンクリートの剥落が発生し、杭頭部のせん断

破壊や折損、あるいは杭主筋の座屈が見られた（付写真Ⅱ.2-9）。これより基礎構造の被災度は大破と判定された。上部構造の耐震補強による水平耐力の増大が杭体に過度の応力を作用させた可能性を文献4)では指摘した。その後の研究5)では、当該建物の上部構造および杭基礎の被害の相互関係を検証するために建物－杭－地盤連成系モデルによる多質点系地震応答解析を実施した。その結果、上部構造では実被害で柱のせん断破壊が集中した3階の応答変形が最大となった。また上部構造を耐震補強することで杭頭部の曲げ変形は補強前よりも約6倍大きくなって曲げ破壊が発生し、実被害を概ね再現できたことを示した。

なお当該建物はその上部構造および基礎構造の著しい損傷によって復旧は断念されて取り壊され、新しく建て直された。



付写真Ⅱ.2-6 校舎の全景



付写真Ⅱ.2-7 3階柱のせん断破壊



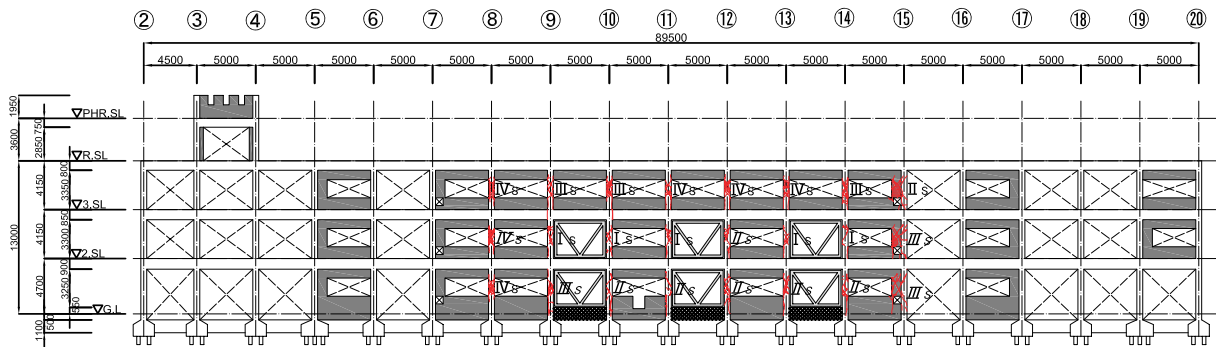
付写真Ⅱ.2-8 鉄骨ブレースに近接した柱のせん断破壊



(a) 杭頭のせん断破壊と杭主筋の座屈

(b) 杭頭の折損

付写真Ⅱ.2-9 RC杭の損傷



付図Ⅱ.2-1 鉄骨ブレースの配置と柱の損傷状況

#### 4.4 耐震補強途中での被害 ～那須町立K小学校～

耐震補強途中で中破の被害を生じた3階建てRC校舎（1974年竣工、PC杭基礎）の被害の概要を示す。当該校舎の桁行方向は108mと長く、24スパンのフレーム構造である。そのうち東側の11スパン分が第一期工期部分として2010年2月に耐震補強された（付図Ⅱ.2-2）。桁行方向の1階から3階まで鉄骨ブレースが設置された（付写真Ⅱ.2-10）。張間方向の1階および2階には廊下のための開口を設けたRC耐震壁が増設され、東妻面のRC耐震壁は増し打ちおよび開口閉塞によって補強された。西側13スパン分の第二期工事は未実施のままで2011年3月の地震に遭遇した。

第一期の耐震補強工事が完了した段階での $I_s$ 値は、桁行方向の1階から3階の順に0.58、0.58および0.72、張間方向の1階から3階の順に0.56、0.55および0.85であった。いずれの $I_s$ 値も靱性指標 $F=1.0$ で決定した。

桁行構面において損傷度III以上の被害を受けた鉛直部材の位置を付図Ⅱ.2-2に示す。耐震補強を施した東の部分では、桁行方向の柱および耐震壁が損傷度II以下の被害を受けたが、損傷の程度は比較的軽微だった。それに対して未補強の二期工事予定部分では、三本のRC

柱がせん断破壊し（付写真Ⅱ.2-11）、他の五本に損傷度Ⅲのせん断ひび割れが発生した。

張間方向では、増設した RC 耐震壁の開口上部の短スパン梁に損傷度Ⅲ程度のせん断ひび割れが生じた。この梁は桁行方向の三連層鉄骨ブレースに直交して接続した。隣接する二つの連層鉄骨ブレースに挟まれた境界梁の端部には曲げひび割れが生じた。鉄骨ブレース脇の RC 柱には輪切り状のひび割れが見られた。これらはいずれも連層鉄骨ブレースを含む RC 部分架構の浮き上がり回転あるいは全体曲げ挙動の兆候を示すものである。

桁行方向 1 階の耐震性能残存率  $R$  は 78% で、建物全体としては中破と判定された。ただし耐震補強を施していない二期工事予定部分だけで判定すると大破に近かった。このように補強済み工区の部分では軽微な被害にとどまったが、未補強工区の部分で RC 柱のせん断破壊等の激しい損傷を生じた。

本事例は耐震補強途中の被災ではあるが、耐震補強を実施する際には鉄骨ブレースなどの水平力抵抗要素を平面内に偏って集中的に配置することなく、ある程度分散してバランス良く配置するべきことを示唆する。なお当該校舎はその後、被災部分を補修するとともに耐震補強設計を見直して第二期の耐震補強工事を実施し、現在も使用されている。

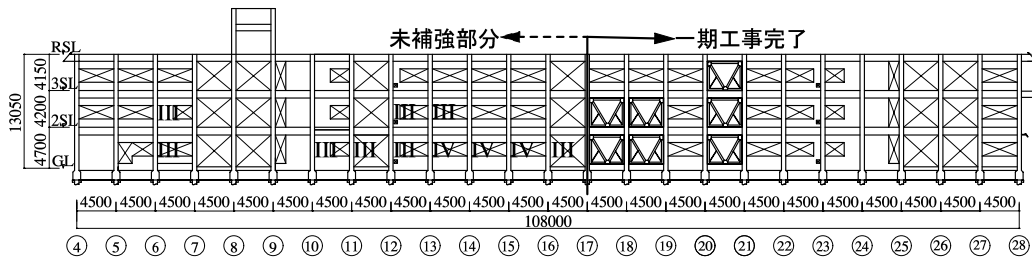


付写真Ⅱ.2-10 校舎の北側構面



付写真Ⅱ.2-11 せん断破壊した三本の柱





付図Ⅱ.2-2 耐震補強の実施状況（鉄骨ブレースの配置）と柱の損傷状況

### 参考文献

- 1) 北山和宏、前田匡樹：平成 15 年 5 月 26 日宮城県沖の地震による文教施設の被害調査報告、文教施設協会、季刊文教施設、2003 年夏号、pp.97-104.
- 2) 本多良政、加藤大介：2004 年新潟県中越地震における耐震補強した RC 造建物の補強の効果、日本建築学会構造工学論文集 B、2006 年 3 月、pp.313-319.
- 3) 東日本大震災合同調査報告書編集委員会（日本建築学会ほか）：東日本大震災合同調査報告 建築編 1 鉄筋コンクリート造建築物、2015 年 5 月.
- 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事例集 第Ⅲ集、4-2 節「2011 年東北地方太平洋沖地震における栃木県での事例」、2014 年 5 月、pp.279-306.
- 5) 新井 昂、北山和宏：耐震補強された鉄筋コンクリート建物における上部構造と杭基礎の地震被害の相関に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.38、No.2、2016 年 7 月、pp. 1147-1152.