



特 集

東日本大震災

【企画趣旨】

この度の未曾有の大震災に遭われた皆様方に、心よりお見舞い申し上げます。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、わが国の観測史上最大級のマグニチュード9.0という規模で、東日本は広範囲にわたり甚大な被害を受けました。とりわけ、東北地方の太平洋沿岸部は、地震の揺れによる直接的な被害だけにとどまらず、大津波により壊滅的なダメージを受けました。住居は破壊され、交通手段が断ち切れ、ライフラインは不通となり、被災された方々の苦労は想像を絶する大変なものでした。

われわれ技術者は、この大震災による被害を調査・分析し、それらを教訓として安全・安心な社会の復興に努めていかなければなりません。また、社会の高い信頼を得て、時代を超えて価値を持ち続ける建造物を、社会に提供することも私たちの責務であると考えます。

特集号を企画するにあたり、阪神・淡路大震災後に発刊された、当時の協会誌を振り返りました。ご寄稿いただいた皆様の提言や展望は、現在までに大部分が実現し、本震災でも多くの人命と社会資本を守ったものと実感しています。さまざまなメディアや専門誌で東日本大震災に関わる話題が、報道、報告されておりますが、プレストレストコンクリート技術協会誌でも、われわれコンクリートに関わる技術者が、東日本大震災を機にどのように考え、どのような復興への想いを抱いたのか、記録に残すことが大切であると考え、本特集を企画しました。

今回の特集号により、われわれ技術者が取組んできた社会資本整備の在り方、また、安全・安心な社会の創造への貢献を考える契機となれば幸いです。

本特集号 担当編集委員

赤松 輝雄・阿田 芳久・伊藤 朋紀・梅本 洋平
小野 秀平・鈴木 寛久・妹尾 正和

東日本大震災と建築物被害の特徴

加藤 博人*

東北地方太平洋沖地震の地震動による建築物の被害形態は、過去の地震被害において観察されたものとはほぼ同等であった。旧耐震基準による建築物では大きな被害が発生したものもあるが、現行耐震基準（1981年6月以降の耐震設計基準）で設計された建築物では構造被害は少なく、現行耐震基準の有効性が確認された。ただし、非構造部材の損傷は現行耐震基準で設計された建築物でも発生しており、更なる検討課題である。一方、津波によって鉄筋コンクリート造建築物にも特異な被害が発生した。これまで、一般の建築物では耐津波設計はあまり行われてこなかったが、今後は津波避難ビルなどでは必須となる可能性もあり、津波に対する設計法の検討が進められている。

キーワード：RC造建築物，SRC造建築物，非構造部材，地震動被害，津波被害

1. はじめに

平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震は、東日本の広い範囲で建築物に多大な被害をもたらした。また、本地震による特徴的な被害として、地震動によるものに増して津波による被害が顕著であったことがあげられる。被害の全体像については各機関から公表されている報告書に詳しいが^{1, 2)}、ここでは、鉄筋コンクリート（RC）造や鉄骨鉄筋コンクリート（SRC）造建築物を中心とした被害形態と特徴、設計基準等との関係について概説する。

2. 地震動による建築物被害の特徴

東北から関東地方の各地で強い地震動が観測され、さまざまな建築物被害が発生したが、特定の地域に特定の被害が集中するような傾向は見られていない。観測された地震動の周期特性は、建築物に大きな被害をもたらすとされる周期帯域（1～2秒）であまり大きくなかったともいわれているが、一般的には各地で観測された震度に比べると構造的な被害はさほど大きくなかったという印象である。また、一部の地域を除いて場所による被害状況の違いもそれほど顕著ではない。

調査で明らかになった構造被害は、そのほとんどが過去の地震被害においても観察されたものであった。ピロティ構造の1階層崩壊、中間階の層崩壊、柱のせん断破壊による軸力支持能力の喪失といった重大な被害も発生していた



* Hiroto KATO

(独) 建築研究所
構造研究グループ

が、それら被害を生じた建築物のほとんどは1981年6月以前の旧耐震基準で設計された建築物である。現行耐震基準（1981年6月以降の耐震設計基準）により設計された建築物については、SRC造建築物の柱脚ベースプレート付近での損傷があげられるが、同様の被害は1995年兵庫県南部地震でも発生したことが知られている。

現地調査で明らかとなったRC造、ならびにSRC造建築物の被害形態を構造部材と非構造部材に分けて次のように分類し、そのいくつかについて（下線付き）実例を紹介する。

S) 構造部材の被害

- S-1) 1階層崩壊
- S-2) 中間階の層崩壊
- S-3) 柱のせん断破壊
- S-4) 柱脚部や連層耐力壁側柱脚部の曲げ破壊
- S-5) 鉄骨鉄筋コンクリート造の露出柱脚のアンカーボルトの抜出しや主筋の座屈
- S-6) 並列する連層耐力壁を連結する境界梁のせん断破壊や付着割裂破壊
- S-7) 建築物の傾斜
- S-8) 塔屋の損傷や破壊、傾斜
- S-9) 耐震補強された建築物の損傷

N) 非構造部材の被害

- N-1) 袖壁付き柱の袖壁脚部の曲げ破壊
- N-2) 集合住宅の非構造壁の損傷
- N-3) 外装材の損傷、落下
- N-4) 屋上突出物の傾斜や脱落
- N-5) ブロック塀、石積み塀の倒壊

S-1) 1階層崩壊

1階の道路側構面には壁が少なく1階背面と上階には壁が多い、いわゆる偏心を伴ったピロティ構造の3階建てRC造建築物が、1階で層崩壊した被害例である（写真-1、須賀川市）。交差点側の隅柱が大きく破壊し、軸力支持能力を失って2階以上が落階した。ピロティ構造の被害は、都市部の建築物に特徴的な被害で、これまでたび



写真 - 1 ピロティ構造建築物の1階層崩壊

たび報告されている。都市部の狭小な敷地ではピロティ構造に対する需要は依然として高く、兵庫県南部地震以後、新築建築物に対しては耐震設計上の規定が強化されるなどの対応が取られている³⁾。旧耐震基準で設計された既存建築物についても耐震補強などの対策が求められてきたが、今回の被害は、その必要性を改めて認識させるものである。

S-2) 中間階の層崩壊

RC造3階建て学校校舎の2階が層崩壊した被害で、3階の一部も大破状態、1階柱にもせん断破壊が発生した(写真 - 2、福島市)。本建築物の1,2階の耐震診断結果は、構造耐震判定指標 I_{50} を下回るものであり⁴⁾、補強を計画している段階であった。ほかにも低層建築物で中間層崩壊を起こした事例が見られたが、今回、中高層建築物ではこのような被害は報告されていない。



写真 - 2 中間階で層崩壊した建築物

S-3) 柱のせん断破壊

写真 - 3は、RC造建築物の1階部分で腰壁、垂壁の影響で短柱化した柱(構造スリットなし)がせん断破壊した状況である(笠間市)。写真 - 4は、2階建てRC造建築物の1階柱の被害状況であるが、右側の柱は3月11日の本震では無損傷であったが、余震でせん断破壊が発生した



写真 - 3 短柱のせん断破壊



写真 - 4 柱のせん断破壊

もので、余震によって被災度が大きくなったことが確認された事例である(仙台市青葉区)。

旧耐震基準で設計された建築物の柱、とくに短柱のせん断破壊は周知の被害形態であり、せん断補強や構造スリットによる短柱の解消は耐震改修の重要な項目である。今回の地震でも同種の被害は多数報告されており、耐震改修を一層推進しなければならないことを示している。

S-5) 鉄骨鉄筋コンクリート造の露出柱脚のアンカーボルトの抜出しや主筋の座屈

SRC造9階建て集合住宅建築物の1階隅柱および連層耐力壁脚部で、鉄骨柱脚のアンカーボルトの抜出しや、鉄筋の座屈およびコンクリートの圧縮破壊が生じた被害例である(写真 - 5、郡山市)。このような被害は、旧耐震基準で設計された建築物ばかりでなく、現行耐震基準で設計された建築物でもいくつか確認されている。



写真 - 5 SRC造建築物連層耐力壁脚部の被害

S-9) 耐震補強された建築物の損傷

枠付き鉄骨ブレースによる耐震補強が行われていたRC造2階建て事務所建築物で(補強は桁行方向のみ)、枠付き鉄骨ブレースが取り付けいた柱にせん断ひび割れが発生した(写真 - 6、常陸大宮市)。耐震補強済みの建築物に被害が発生した例は、これまであまり知られておらず、被害原因を特定するため詳しい検討が求められる。

今回大きな地震動を受けた地域には、学校校舎を始めとして耐震補強済みの建築物が多数存在していた。調査した範囲では、耐震補強された建築物はほとんど被害を受けていないか、ごく軽微な被害に留まっており、耐震補強が有効に機能していたものと考えられる。

N-2) 集合住宅の非構造壁の損傷

集合住宅建築物では、非構造部材(壁)の損傷があちこちで確認された(写真 - 7)。それに伴って玄関ドアが変形し、開閉不能となって避難に支障を来す事態も発生していた。このような玄関周りの非構造壁やベランダ側方立て



写真 - 6 耐震補強済み建築物の被害



写真 - 7 集合住宅非構造壁の被害

壁等のせん断ひび割れの被害は、準拠した耐震設計基準の年代にかかわらず比較的多く見られた。

3. 津波による建築物被害の特徴

津波によって壊滅的な被害を受けた地域では木造建築物は軒並み消滅し、鉄骨造建築物も倒壊や流失した事例が多い。これまで漠然と津波に強いと考えられてきた RC 造建築物では、津波に流されず残存したものも多いが、かつて見たこともないようなさまざまな津波被害も確認された¹⁾。それらは、わが国の耐震設計が施された多数の RC 造建築物が、初めて経験した津波被害といえるものであった。

現地調査で確認された津波による RC 造建築物の被害形態を T-1) ~ T-8) 項に分類する。いずれも、通常の地震動による構造被害とは異なるものであり、津波による独特の被害形態であると解釈される。

- T-1) 崩壊 (1 階層崩壊)、倒壊
- T-2) 移動、転倒
- T-3) 流失
- T-4) RC 造壁の破壊
- T-5) 地盤洗掘と建築物の傾斜
- T-6) 漂流物の衝突
- T-7) 工作物の被害
- T-8) 残存建築物 (構造被害なし)
- T-1) 崩壊 (1 階層崩壊)、倒壊

RC 造 2 階建て事務所ビルが津波でなぎ倒され、完全に倒壊した状況である (写真 - 8, 名取市閑上)。すべての柱が 1 階柱脚部から同じ方向に曲げられ、写真のようにコンクリートが流失して鉄筋がむき出しとなっていた。なお、写真には推測される津波の作用方向を矢印で示す (以下同様)。



写真 - 8 津波で倒壊した RC 造建築物

調査範囲では、3 階建て以上の建築物では、このような倒壊や層崩壊は確認されていない。一般に階数が多くなれば、地震荷重で決まる 1 階の耐力も大きくなり、津波荷重に抵抗できた可能性はある。被害原因を検証するためには、建築物の耐力と作用した津波荷重の両面からの検討が必要である。

T-2) 移動, 転倒

津波によって元の位置から移動したり、転倒する建築物の被害が三陸地域で複数見られた。写真 - 9 は、RC 造 4 階建て建築物が原位置から約 70 m 流されて、崖の手前で横転した状況である (女川町)。道路上に引きずったような痕跡が見られないので、浮き上がって移動した可能性がある。当該建築物は、RC 造 5 階建ての同じような建築物と並んで建っていたものであるが、もう一方の建築物には構造的な被害は見られず、原位置に残存していた。また、杭 (外径 300 mm) が引き抜かれて転倒し、途中で折れている被害建築物も確認された (写真 - 10, 女川町)。写真 - 9 の建築物も右側の基礎部分には、同様に折損した杭が残留していた。

転倒被害は 4 階建て以下の建築物に見られており、いず



写真 - 9 移動, 転倒した建築物



写真 - 10 杭の引抜きを伴って転倒した建築物

れも最大浸水深が建築物の高さを上回っていたものと推測される。建築物が浸水すると浮力が働き、地盤の洗掘や建築物内に空気溜まりがができるとその影響が一層大きくなるため、津波による転倒モーメントが建築物の転倒耐力を上回ることが容易に起こりうる。転倒の被害原因を特定するためには、支持杭の引抜き抵抗力と併せて考える必要があり、詳細な検討が求められる。

T-4) RC 造壁の破壊

RC 造壁が津波によって面外方向に変形したり、破壊した事例が見られた。流入した津波の水圧で壁一面に亀甲状のひび割れが入り、壁板が打ち抜かれたり、壁脚部の鉄筋が切断される被害も複数観察された（写真 - 11、女川町）。



写真 - 11 RC 造壁の破壊

写真 - 12 の建築物では、津波が桁行方向壁面に作用し、大きく内側に変形していた。内観写真で分かるように、2階に床がなく高さ 10 m を超える大空間となっており、厚さ 300 mm の耐力壁が外側からの津波荷重によって内側に大きく湾曲していた。ちなみに、同じ建築物の 2 階に床があり階高が高くない部分では、耐力壁が湾曲するような被害は発生していない（仙台市宮城野区）。



写真 - 12 RC 造耐力壁の面外方向変形

T-8) 残存建築物（構造被害なし）

元の位置に残存している RC 造建築物も多数観察された。それらの多くは、非構造部材等の被害は生じているものの、構造躯体には地震動による被害もほとんど発生していない。写真 - 13 は 2006 年に建設された RC 造 4 階建て集合住宅で、津波避難ビルに指定されていた（南三陸町）。海岸直近に建つ建築物で、基礎部分は大きく洗掘されたが建築物自体には大きな構造被害はなく、避難ビルとして機能したことが報告されている。



写真 - 13 残存建築物（津波避難ビル）

4. 地震被害から学ぶこと

地震動による建築物の被害形態は、過去の地震被害において観察されたものとほぼ同等であり、現行耐震基準で設計された建築物では構造被害は少なく、現行耐震基準の有効性が確認された。

その一方で、非構造部材（壁）の損傷は準拠した耐震設計基準の年代にかかわらず多く発生しており、地震後の建築物の継続使用や機能維持という観点から、今後も検討すべき課題である。また、旧耐震基準による地方自治体の庁舎や公共施設が比較的大きな被害を受けて、使用できない事態が少なからず発生していた。耐震改修の必要性は認識されているが、どうしても後回しとなっていたものが多いようである。庁舎等は、地震後に対策拠点として機能する必要がある施設であり、一刻も早い耐震改修が求められる。

これまで、通常の建築物では津波荷重を対象とした構造設計が要求されることは、あまり一般的ではなかった。しかし今後は、被災地の復興ばかりでなく、将来、津波の襲来が予測されている地域で、津波避難ビルの建設や指定において津波に対する検討は必須のものとなる可能性がある。国土交通省では、津波に対する建築物の構造安全性等を確保するため、構造設計法の見直しにかかる検討を実施しており⁵⁾、今回の津波被害が教訓として生かされるものと考えられる。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所, (独) 建築研究所: 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震調査研究 (速報) (東日本大震災), 国総研資料第 636 号, 建築研究資料第 132 号, 2011 年 5 月
- 2) 日本建築学会: 2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報, 2011 年 7 月
- 3) 2007 年版建築物の構造関係技術基準解説書, 2007 年 8 月, pp.685-703
- 4) 財団法人建築防災協会: 2001 年版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準, 2001 年 10 月
- 5) 国土交通省: 平成 23 年度建築基準整備促進事業, 40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討, http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/jutakukentiku_house_fr_000037.html

【2011 年 9 月 1 日受付】