

「新耐震基準で設計された鉄筋コンクリート造建築物の地震後継続使用のための耐震性評価手法の開発」(平成31年度～令和3年度) 評価書(終了時)

令和4年4月6日(水)
建築研究所研究評価委員会
構造分科会長 田才 晃

1. 研究課題の概要

(1) 背景及び目的・必要性

我が国の既存建築物においては、1981年以前、すなわち旧耐震基準により建設された公共建築物(特に学校校舎)を中心として耐震診断・補強が広く実施されており、平成27年度までに住宅および特定建築物の耐震化率を90%以上とすること目標に向かって様々な施策が実行されている。また、それらの設計体系は耐震安全性を確保する方法として広く社会に定着している。

2011年に発生した東日本大震災による震動被害では、過去の震災被害事例同様、現行基準で設計された建築物や現行基準に照らして耐震補強された建築物の倒壊は確認されていない。しかしながら、設計時に考慮していない部位が大きく損傷し、地震後継続使用できない建築物が散見され、現行基準の要求レベルを確保するだけでは、地震後の建築物の継続使用性は必ずしも確保されないことも明らかとなった。そこで2013年度より重点研究課題「庁舎・避難施設等の地震後の継続使用性評価手法の構築」として、地震後の継続使用が強く求められる庁舎および避難施設(RC造置き屋根体育館)の建物用途を対象に、また部位は地震被害が顕著であったRC造非耐力壁、RC柱と鉄骨屋根接合部、RC杭基礎を対象に絞って実施し、地震後の継続使用性を確保するための設計体系の基礎部分を確立するため、以下の検討を実施してきた。

1. 地震後継続使用性を確保するための要求性能の提案
2. 地震後継続使用性を判断する部位の損傷評価技術の開発
3. 地震後継続使用性を確保するための建築物の耐震設計と耐震性能評価手法の検討

以上より、新築建築物に対する設計では、構造部材の断面を要求性能に応じて設計できることから、その設計法の道筋や実現可能性はおおよそ示すことができたため、2016年度からは、新耐震以降に建設された既存建築物を対象として、地震後の継続使用性評価技術開発のため、以下の検討を実施した。

1. 地震後の継続使用性に資する建築物の耐震性評価手法の検討
2. 地震後の継続使用性に資する部位の耐震性能評価手法および継続使用性向上耐震技術の開発
3. 被災建築物の地震後継続使用性を迅速に判定する技術のための基礎検討

以上の項目を実施したことで、新耐震以降に設計されたRC造建築物に対する地震後の継続使用性を確保するための基礎部分は概ね構築できたことから、今後はこれらの技術を用いて実用化に資する検討として、建築物の地震後継続使用のための耐震性評価手法の開発が必要である。

(2) 研究開発の概要

本研究課題では、新耐震以降の既存建築物の地震後の継続使用性確保に資する検討として、大別して以下2つの項目の検討を目的とする。

- 1) 近年の大地震による被害が顕在化している部位を対象として、地震時における耐震性評価手法を取り纏め、地震後の継続使用性の確保に資する検討を行う。
- 2) 被災建築物の迅速な被災状態の判定に資する検討を行う。

(3) 達成すべき目標

以下のアウトプットを具体の目標とする

- ① 新耐震以降の既存 RC 造建築物を対象とした大地震時に対する継続使用評価手法・補強設計方法に関する技術資料
- ② 既製コンクリート杭等を用いた基礎構造システムの設計手法に関する技術資料
- ③ 被災建築物の迅速な損傷性状評価手法に関する技術資料

(4) 達成状況

研究テーマ 1 : 新耐震以降の既存 RC 造建築物を対象とした地震後継続使用性の評価手法と継続使用性確保のための補強設計手法に関する検討

1) 熊本地震によって大破した新耐震以降に建設された既存 RC 造建築物の被害情報の収集・分析

熊本地震によって大破した新耐震以降に設計された既存 RC 造建築物の図面情報等を収集し、それに基づき現行基準で大地震時の損傷を十分に制御できない課題を明らかにし、それらプロトタイプ架構としてピロティ構造建築物の抽出を行った。また、本成果として建築研究資料を出版した。また日本建築学会の熊本地震 WG と連携して本情報の提供を行い、学会側で出版される資料についても進める予定である。

2) 対象となる既存 RC 造建築物の継続使用性評価に関する研究

1) で抽出されたプロトタイプに対して、ピロティ構面の柱部材および架構試験体を作成し 20MN 加力装置を用いた構造実験を PRISM②-1 で実施した。ピロティ柱試験体の構造特性並びに損傷状態、破壊モードを分析し、それらの剛性・強度評価を行った。また、ピロティ架構試験体を実験結果では、対象建築物の建設当時の基準では想定されていない破壊モードであり、現行基準及び日本建築学会 RC 規準 2018 などの技術資料と比較し、試験体の基準に対する適合状況を確認した。実験では、ピロティ柱の柱脚に塑性ヒンジが発生した後、2 階壁脚スリップ変形の後、2 階梁端に塑性ヒンジが発生し、崩壊メカニズムに達したと考えられる。以上のことから、2 階壁脚部のスリップ変形の抑制が上記メカニズムの起点である可能性があることを示した。またスリップ変形を抑制するために壁縦筋量を増加させた補強試験体（下記の 3）で実施した試験体において当該破壊を防止できていることを確認できたことから、ピロティ層の崩壊時強度に対して、壁脚部のスリップ変形抑制強度を確保する考え方を示した。

3) 既存 RC 造建築物の継続使用性確保のための補強設計手法に関する研究

1) で抽出されたプロトタイプが大地震時によりある程度損傷した状態を想定し、それらに適切な補修・補強工法を選定した。それらの要素試験体の製作および構造実験と、柱試験体に対する補修補強工事の発注を PRISM②-1 で実施した。さらには補強効果を確認するために、無損傷の柱に対して RC 壁補強および UFC 壁補強を PRISM②-1 で実施し、その補強効果を取り纏めた。

また、UFC パネルを接着剤によって貼り付ける工法を用いて、補強したせん断破壊するピロティ柱試験体に対して加力した結果、柱面への貼り付けることによる大幅な強度上昇と破壊モードをせん断から曲げへ改善できることを示した。また、部材試験体で効果が見られた工法をピロティ架構試験体に適用して加力した結果、強度向上に加え、靱性能を確保できることも確認した。

また、UFC パネルを接着剤によって貼り付ける工法（柱面への貼り付け）では、施工合理性の高い UFC パネルの分割工法を対象に、UFC パネルを分割する影響を検討するための実験を実施した。UFC パネルの分割することで、最大耐力以降のせん断力の低下が顕著に見られたものの、最大荷重までの骨格曲線は本研究の提案式からおおよそ評価できることを確認した。

また上記の一連の実験によって得られた知見を用いて、10 層の RC 造ピロティ形式の共同住宅を対象に、継続使用性を確保するための設計を実施し、その結果をまとめた。

研究テーマ2：大地震後に継続使用を確保できる既製コンクリート杭等を用いた基礎構造システムの設計手法に関する検討

1) 既製コンクリート杭等を用いた靱性型基礎構造システムの開発

既製コンクリート杭を用いた基礎構造システムに靱性能を付与するために必要となる部位として杭体（中実杭工法）とパイルキャップ（降伏埋込工法）に着目し、当該部位に対する構造性能確認実験を実施した。杭体（中実杭工法による既製コンクリート杭）では、一軸圧縮試験、杭体部材実験、部分架構実験をそれぞれ実施し、靱性能の高い曲げ挙動を実験により確認した。パイルキャップ（降伏埋込工法）では、杭頭面曲げ破壊となる試験体を設計（パラメータ：埋込深さおよび軸力）して実験を強度試験棟にて行い、その破壊モードに制御できることおよび杭部材角として4-5%まで靱性能を確保できることを確認した。

また、パイルキャップの保証設計に必要なせん断耐力を検証するための部分架構試験体を製作し構造実験を実施した結果、パイルキャップを拘束するせん断補強筋がパイルキャップのせん断耐力に与える影響を考慮した設計式を検討した。

2) 負担応力に応じた杭基礎構造システムの開発

既存技術の調査として杭頭部の半剛接工法に着目し、大地震を想定した地震後継続使用性を確保するための構造設計手法の確立を目的に、実際の建物を用いた試設計の検討を実施した。ランク B（杭の降伏ヒンジを許容する設計）は定着筋破断を制御できないことから、ランク A（杭を終局強度以内に収める設計）を検討した結果、太径定着筋を用いた開発の必要性はあるが、杭頭固定とした場合の試設計に対して杭頭部の曲げモーメントが低減され、その結果、杭体・基礎梁およびパイルキャップにおいて合理的な設計が行えることを示した。

3) 大地震を想定した地震後継続使用性を確保するための構造設計手法に関する検討

既製杭を対象とした大地震を想定した地震後継続使用性を確保するための構造設計手法の確立を目的に、前年度の調査で得られた内容より、過去の建築研究所の研究課題で提案した設計手法の見直し結果に基づいて、3棟の建物を用いた試設計の検討を行った。この検討では1)の構造実験で靱性能を確認できた2つの工法（中実杭工法と降伏埋込工法）を対象としている。以上の試設計検討より、ここで示した工法を用いることで既製コンクリート杭を用いた場合でも継続使用性を確保できることを示した。

研究テーマ3：被災建築物の迅速な損傷性状評価手法に関する検討

1) 地震後における被災建築物外観の損傷状態の計測データに基づく評価手法の開発

地震後の迅速な損傷性状評価手法として、3次元レーザースキャナーおよび高解像度写真を活用した方法を対象として試験体および実建物を対象とし計測を行った。3次元レーザースキャナーによる点群計測を行ったのは、熊本地震で被災した建築物、研究テーマ1で実施している柱試験体、別課題で検討している壁梁試験体、e-defenseで実施されたRC造3層架構試験体、2層壁架構試験体、e-defenseで実施された実大5層架構試験体である。一方、高解像度写真計測は、研究テーマ1で実施している柱試験体（定点から撮影）、e-defenseで実施されたRC造3層架構試験体（定点から撮影）、端島における30号棟（UAVを用いて計測）を対象とした。

これらの計測を行ったデータを用いて検討を行った結果、3次元レーザースキャナーによる点群計測結果を用いて残留変形角および浮き剥落面積を評価するための条件および手法とその精度を明らかにした。また高解像度写真計測を用いてひび割れ幅を評価するための条件及び手法とその精度を明らかにした。

2) 地震応答観測データに基づく評価手法の開発

建物の被災判定を実施するために、強震計等に基づく観測システムと衛星測位センサに基づく観測システムを基幹観測システムと位置づけ、建築研究所本館、大阪府庁舎、e-defense 振動台で加振した5層架構実験、戸田建設屋外実験施設内にある架構試験体、端島における最古住棟へシステムを導入し、その有効性についての検討

を行った。その結果、衛星測位センサを用いて建物の最上階の変位はセンチメートルオーダーで、残留変形はミリオーダーで計測できることを確認し、建築物の被災判定に十分使えることを示した。なおSIPではこの結果を受けて実建物への観測システムの構築を行っている。またこれまでに実施したセンサの振動実験結果に基づき、被災判定に必要なセンサの試験方法について纏めた。

2. 研究評価委員会（分科会）の所見（担当分科会名：構造分科会）

（1）研究開発の成果

- ① 建物の継続使用性のポイントとして、ピロティおよび杭に絞って実験的な検討を行っている。継続使用の枠組みとなる考え方が提案・実証され、実現可能性を示す成果を得ている。さらに損傷評価・構造ヘルスマモニタリングの手法として、点群・GNSS・ドローンなど最新技術の応用も検討している。

（2）研究成果の発表状況、外部機関との連携等

- ② 建築学会・JCIなどに論文を発表するだけでなく、国際会議として17WCEEでも成果を発表し、成果の最大化へ向けての努力がされている。また、大学・専門業者などと連携し、多くの知見・研究リソースを得ている。また本課題と関連のある多くの外部資金も獲得しています。

（3）総合所見

- ③ 成果は十分に上がっていると思います。ただし、継続使用性がどの程度向上したのか、分かるように成果を見せた方が良いと思いました。被害を減らせれば、継続使用性が上がるというのであれば、耐震補強法の研究と変わらないように見えます。また、継続使用性という言葉が、狭い意味に使われすぎていると感じました。
- ④ 地震被害を分析し、新耐震基準で設計された建物の継続使用性に関する弱点としてピロティ・杭を抽出した。地震後の継続使用性については、袖壁の活用を含むガイドラインが建研の研究成果として提案されているが、これを補完する研究成果が得られている。ただし、現象の解明や対策案の例示に今回の成果はとどまっており、国立の研究法人としてはさらなる一般化や普及の取り組みが求められる。
- ⑤ 地震時の継続使用ということであれば、高台移転（対津波）と免震（対地震動）が現時点の第一選択ではないかと思われ、新築のRC構造としてここまで継続使用を考える必要があるのかどうかは素朴な疑問として残る。継続使用性に関してはRCの枠を超えて広い見地から建研としての方向性を示していただきたい。むしろ、既存のRC建物にこれまでの研究課題の成果が応用できるのではないか？
- ⑥ 最新の技術を利用した構造ヘルスマモニタリング・損傷検知に関する各種検討が行われた。この挑戦的な試みを高く評価したい。研究を継続し、いくつかについては社会実装に進むことを期待したい。
- ⑦ 研究テーマ1～3それぞれについて大変貴重な成果を上げている。テーマ1では地震被害の多いピロティ形式の構造で、崩壊メカニズムを明確にし補強方法を提案しており、大変貴重な研究成果だが、これらをもとに、具体的な設計手法の提案（新築、既存を含めて）まで行えるとさらに有意義なものとなると考えられる。
- ⑧ テーマ2では、脆性的な破壊が想定される既製コンクリート杭に鋼管を巻くことでの靱性を向上させ、パイルキャップの設計と合わせて杭頭降伏を許容する設計を可能にしていることは、杭の経済的な設計においては大変有意義である。被災後の鉛直支持能力や余震など被災後の残存耐震性能などについても言及できるとさらなる意義が出てくると思う。
- ⑨ テーマ3では比較的簡易な方法で、被災後の建物の状況を把握する方法を提案しており、今後の簡易な被災度判定の可能性を広げていると考える。今回提案された観測方法と被災度の定量的な関係が提案できれば非常に有意義であると考えられる。
- ⑩ 近年の大地震により、新耐震設計法で設計された鉄筋コンクリート造建築物に見られた構造被害の分析結果に基づいて、既存ピロティ建築物の耐震安全性、既製コンクリート杭を用いた基礎構造システムの靱性向上、地震後の継続使用性を考慮した耐震性評価法、耐震改修法、さらに被災建築物の迅速な評価手法を開発する課題であり、社会のニーズに合致した研究開発であるといえます。構造実験、

地震応答解析、試設計、実建物の計測等の研究手法を駆使し、上記の個別テーマそれぞれに対し、研究期間内に達成しうる十分な成果を得ています。研究成果をわかりやすく社会に周知し、次期中長期目標に発展的に生かすことを期待します。

(参考) 建築研究所としての対応内容

・ 所見③への対応

通常の耐震補強は補強後の損傷を陽には扱えないが、ここで検討している方法はそれを陽に扱い、それに基づき設計を行うものとなっている。なお後継の指定課題では、継続使用性そのものをテーマとして扱うわけではないが、耐震レジリエンス性能を扱う予定であり、関係の深いテーマとなっている。この課題で示した継続使用性に基づく設計方法に基づき、耐震レジリエンス性能を扱える設計体系の構築に邁進する所存である。

・ 所見④への対応

本研究で得られた成果を一般化し普及する取り組みは、今後建築学会との連携も含め検討を行う所存である。

・ 所見⑤への対応

本研究では、新耐震以降の既存 RC 建築物を対象としたものである。高台移転や免震などの選択肢がとれない場合の選択肢を提示することを目的としている側面もある、次期後継課題において RC 造以外への展開を視野に入れた検討を行って参りたい。

・ 所見⑥への対応

SIP は R4 年度も実施予定であり、R4 年度は社会実装に向けた取り組みを行っていく所存である。

・ 所見⑦への対応

ここでの成果を踏まえて、ピロティ建築物における、新築、既存も含めたより一般的な設計手法の提案について、引き続き建築学会とも連携した検討を行って参りたい。

・ 所見⑧への対応

地震後の鉛直支持能力や余震など被災後の残存耐震性能などについて、今回の成果を活用して実施できる状態であるが、その検討については時期を改めて実施することとさせて頂きたい。

・ 所見⑨への対応

今回の提案した方法と被災度の定量的な関係について、後継課題においても引き続き検討を行って参りたい。

・ 所見⑩への対応

研究成果をわかりやすく社会に周知することについては報告書の取り纏めを行う所存である。また今回得られた成果は後継の指定課題において引き継ぎ発展的に活かすことを行う所存である。

3. 評価結果

- A 本研究で目指した目標を達成できた。
- B 本研究で目指した目標を概ね達成できた。
- C 本研究で目指した目標を達成できなかった。