

「既存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(年度)

令和3年2月4日(木)
建築研究所研究評価委員会
構造分科会長 林 静雄

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既存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) 前課題における成果との関係

本研究課題は平成28年度から3カ年実施してきた「既存建築物の地震後継続使用のための耐震性評価技術の開発」の後継課題である。以下に各検討項目における成果の概要を示す。

① 熊本地震で被災した建築物における地震後継続使用性評価の分析：

新耐震設計ならびに耐震補強された既存建築物を対象として、地震発生前および後における時点の地震後の建築物の継続使用性評価手法の構築を目的として、特に2016年4月に発生した熊本地震で被災した建築物を対象

とした検討を実施した。

熊本地震で被災した庁舎の継続使用性の状況やその判断に関するヒアリングを実施した結果、地震後における建築物の部分的な応急措置や使用禁止エリアなどを許容した形で継続使用性が確保されている事例が多く、かつ、非構造部材の損傷レベルは構造部材のそれより許容される程度が大きい。このことは前の重点研究課題で提案した、地震後の継続使用性を判定する性能レベルは、活動上重要なエリアとそれ以外のエリアに区分して、それぞれの許容損傷レベルに応じて決定することの妥当性を示すものであることを確認した。

さらには、熊本地震による既存建築物の被害要因分析として、各種構造（RC造、鉄骨造、木造、非構造、基礎構造、地震入力）について現地で被災調査等を実施し、被害要因分析結果を建築研究資料として取り纏めた。さらには、現行基準に適合しているRC造建築物で大破の要因となっているピロティ形式構造の柱および壁梁部材、純ラーメン架構における柱梁接合部に加えて、既製コンクリート杭については、地震後の継続使用性を確保するために評価や補強が必要になる場合があることを明らかにした。

また既存建築物の地震後継続使用性評価手法の構築に向けた準備作業として、2018年に示された国交省の防災拠点ガイドラインの原案作成に協力し、本検討で得られている知見のいくつかを提供し、社会実装に貢献した。

② 既存建築物の地震後継続使用性を確保する技術開発：

①の検討で明らかになった既製コンクリート杭を用いた検討として、大きな軸力が作用した際の既製コンクリート杭において現行の学会指針で想定する破壊モードと異なる破壊モードが存在すること、杭体の曲げ降伏後の靱性能は極めて小さいことを明らかにした。一方、実大規模の部分架構実験により杭頭接合面における降伏機構を用いた靱性能確保の可能性やパイルキャップ部分における合理的高密配筋による高靱性能化を図れる可能性があることを示した。

③ 既存中高層建築物の地震後継続使用性を確保するための耐震改修工法の技術開発：

地震時における損傷が顕在化している中高層RC造非構造壁を対象として、超高強度繊維コンクリートプレキャスト壁を用いた耐震補強工法を提案し、接着面要素実験、袖壁付き柱の部材実験および架構実験結果に基づき、耐震補強設計を実施するために必要な補強された部材の剛性および強度評価方法や圧縮応力の大きくなる位置のパネル形状を変化させることで靱性能を大きく改善できることを示した。さらには本補強を実施した場合の架構の挙動を評価するための解析的検討を行い、部材や架構のモデル化として必要となる技術資料を収集した。

④ 被災建築物の地震後継続使用性判定に資するツールに関する基礎検討：

建築物の地震後の損傷評価を行うにあたり、建築研究所の本館（SRC造耐震構造）をモデル化し、過去の強震観測結果と比較し、地震時に損傷する階や部材の特定を行った。さらに共同研究相手であるJAXAの研究開発推進棟（免震構造）を多質点系でモデル化し、地震時の応答挙動の把握を行った。上記の検討に基づき、加速度計による強震観測と衛星情報を用いた連携方法について取り纏め、SIPで実施する計画を取り纏めた。

地震時の部位の損傷を判定する個別ツールの開発として、地上型3次元レーザースキャナーを用いた建物の損傷評価システムの構築に向け、以下の知見を得た。

- ・袖壁付き柱試験体に対して浮きや剥落の損傷性状を計測し、それが点密度によって計測値が異なる程度を確認するとともに、通常目視により評価される結果との整合性を確認した。その結果、浮き剥落と言った局所的な損傷を評価するのに必要な点密度を明らかにした。
- ・熊本で杭基礎が被災し上部構造物が傾斜した建築物を対象に計測を実施した。現地調査では特定の箇所の傾斜角を既存の計測手法（下げ振りをを用いた計測）で別途計測し、両者を比較したところ、レーザースキャナーの計測結果は実被害を精度よく評価できていることを示した。さらに建物の床上面を計測した結果を用いて床の鉛直方向の変位分布を示し、より詳細な損傷性状の把握が可能であることを示した。
- ・端島において最も老朽化している30号棟を対象に過去2年間の劣化性状の比較を行い、点群計測データの活用方法を示した。

(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こと。
- 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こと。

(3) 達成すべき目標

以下のアウトプットを具体的な目標とする

- 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) 2 年度の進捗・達成状況

(1) 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

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

前年度加力した試験体のデータを用いて、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、前年度作成したピロティ架構試験体を実験するための加力計測計画を立案し加力した。得られた荷重変形関係を平面骨組でモデル化を行ったところ、2 階梁部材端部に曲げばねを設定し、それらに適切な剛性・強度を与えることで実験値を概ね精度よく評価できることを確認した。

3) 損傷を受けた既存 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

前年度に提案した UFC パネルを接着剤によって貼り付ける工法（柱面への貼り付けに加え袖壁として適用）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。

(2) 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

昨年度と同様に、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とパイルキャップに着目し、当該部位に対する構造性能確認実験を実施した。杭体については、昨年度の一軸圧縮実験の結果に基づき、靱性杭（鋼管端部がアンボンド仕様）の部材実験を 20MN 加力装置にて実施した。その結果、大変形まで靱性のある挙動を確認した。また、パイルキャップについては、杭頭面曲げ破壊となる試験体を設計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を確認した。これらの破壊モードで靱性能を確保するための検討を次年度行う。また大地震時における杭の抵抗を考慮し基礎梁降伏を想定した際に、必要となるパイルキャップの構造性能を検討するための実験を実施し、パイルキャップ内の補強筋量が重要な役割を果たすことを確認した。

2) 負担応力に応じた杭基礎構造システムの開発

前年度に調査した既往技術の調査結果に基づき、杭頭部の半剛接工法の実績のある機関の開発者および設計者に

ヒアリングを行った。さらに、この杭頭部の半剛接工法を対象として、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、実際の建物をを用いた試設計の検討を開始した。

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棟の建物をを用いた試設計の検討を開始した。

(3) 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

前年度までに計測した部材レベルの損傷状態の評価結果と架構レベルの損傷状態の評価結果の精度を明らかにし、点群情報並びに高解像度写真を用いた損傷評価手法を提示した。また今年度研究テーマ1で実施される架構試験体の加力実験結果の計測を行う予定であったが、計測日程の調整が困難となり異なる2層壁架構試験体およびe-defenseで実施された実大5層架構試験体を対象に計測を実施（PRISMおよび基整促と連携）した。

① レーザースキャナーの計測結果の分析について、以前計測した耐力壁部材試験体において浮きと剥落面積の評価を検討した結果、剥落面積は概ね評価できているが、浮きはその程度が小さいもの（部材表面から3mm未満程度のもの）については計測誤差の影響で評価が困難であることを確認した。また昨年度計測した実大3層架構において加振時に計測したデータから各階層間変形を算定して変位計から算定されるデータと比較したところ、ある一定の変位以上からは高い相関性があることを確認した。

② 柱試験体に対して高解像度写真による検討を撮影写真の光量の違いを分析したところ、0.30mm以上のひび割れ幅は概ねどの光量においても大きなひび割れ幅評価の差は小さく、概ね精度よく評価できる（図4参照）ことを確認した。また幅0.30mmを下回るひび割れ幅の評価精度は低下しており、カメラで撮影した画素未満のひび割れ幅を評価することが適用限界であることを確認した。

2) 地震応答観測データに基づく評価手法の開発

①被災判定手法の検討：

建物内で観測されるデータを用いて被災度を判定する方法の構築を目的として、最上階変位と最下階層せん断力を用いた建物の性能曲線により被災判定結果を計算できる方法の検討を行った。まずは実大5層静的実験結果を用いて、部材損傷度と建物全体の被災度の関係を検討した結果、以下の結果が得られた。

・被災度区分判定基準に基づき、全層を考慮して耐震性能残存率R値を算出し、実験の被害状態と比較したところ、実験の被災状態と概ね一致することを確認した。また部材の損傷度として鉄筋の降伏を考慮してひび割れ幅のみによる過大評価を抑制すること、付帯壁付き部材は矩形部分と付帯壁を個別に損傷度を考慮し算定することでひび割れ幅が大きくなる変形領域でより適切なR値を算出することを確認した。

・2014及び2015年度試験体は共通して、「軽微」から「小破」の区分はベースシア-頂部変形角のトリリニア化曲線の第1~2折れ点間にあり、「小破」から「中破」の区分は第2折れ点付近にあり（図5参照）、架構内の柱主筋が降伏する点に位置する傾向があり建物の全体特性を表す構造特性曲線（ベースシア-頂部変形角）を用いて、建物被災状態を判定する方法に展開できる可能性を示した。

・上記の検討を踏まえ、2層及び8層および20層の建物を対象に動的および静的増分解析を行い、それらから得られる被災度の算定方法について検討を行っている。

②被災判定のために必要なデータの推定：

建物内に設置された加速度センサーの限定的な計測データから層せん断力を評価する方法およびベースシアと最上階変位から性能曲線の包絡線を求める方法についてe-defense振動台実験で計測された3層RC架構を対象に検討を行った。

建築研究所本館および軍艦島における最古住棟におけるGNSSセンサの実観測を行い、そのデータの特徴を分析し

た結果、年間における気温変動による建物の微小な変位を観測できていることを確認した。

③ その他（被災判定のためのセンサー性能確認試験法・廉価なセンサー・高精度時刻刻印等諸問題検討）

建物の被災判定を実施するための加速度センサーの性能を把握するための標準的な試験方法を振動台実験によって検討するとともに、携帯端末を含む廉価な加速度センサーの検討や、高精度時刻を有する観測システムの検証を e-defense 振動台で加振した 5 層架構実験（基整促、SIP と連携）を対象に検討した。関連して上記架構試験体に対して損傷度を現地計測するために昨年度から開発しているアプリを用いた検討を行い、これらのアプリを改善する内容について検討（UR 連携）を開始した。

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) 研究テーマと継続使用との関係の説明があいまいです。
- 2) 地震後の継続使用のために、
 - テーマ 1：既存建物の性能向上の一例
 - テーマ 2：現行設計法で不備な基礎構造の限界状態の把握
 - テーマ 3：被災建物の残存性能の早期判定法の開発といった位置づけと理解しています。従って、課題名も単に「鉄筋コンクリート造建築物・・・」が良いと思います。
- 3) 損傷の即時評価については使用するデバイスなどが日進月歩の面が強く、細かく制約を課す「マニュアル」的なものより、独立したシステム同士の連結に関する規格を記述した「プロトコル」的なものが望ましいように思われる。

参考：建築研究所としての対応内容

- 1) 各テーマと継続使用性との関係性を整理して示す所存である。特にテーマ 1 については、前課題で示した継続使用性を確保するための設計体系を述べた上で、現時点でどういった検討が不足しているかについて説明できるようにする所存である。
- 2) ご指摘のタイトルを含め再検討する所存である。
- 3) テーマ 3 の成果としてご指摘の点を踏まえて検討を行って参りたい。

3. 評価結果

- A 研究開発課題として、目標の達成を見込むことができる。
- B 研究開発課題として、目標の達成を概ね見込むことができる。
- C 研究開発課題として、目標の達成を見込むことができない。