

「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2年2月18日(火)
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な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) 1 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

31 年度（令和元年度）

- 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物の抽出を行った。また、本成果として建築研究資料の原案を作成し、現在、出版手続きを行っている。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編集作業を進める予定である。
- 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、ピロティ構面の部材実験を行った。部材試験体については変動軸力を載荷した場合の骨格曲線や破壊モードを分析し、これまでに実施されている柱試験体は多くなく、またそれら（既往の文献の試験体を含む）の降伏時剛性評価に課題があることを確認した。また文献調査の結果、当該柱試験体に対する迅速な補強工法も確認されなかった。
- 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
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。それらの内、補強された試験体を対象に構造実験を実施し、無損傷の柱試験体に対する補強効果を確認するとともに、それらの終局強度評価の検討を行った。破壊モードについて、RC 壁を袖壁として利用した試験体および UFC パネルをせい面に貼り付けた試験体は全体がせん断破壊となり、UFC 袖壁を用いた試験体は当該壁が曲げ破壊の様相となった。今後これらを元に終局強度の検討を実施する。

(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

31 年度（令和元年度）

- 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等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頭部を抽出し、当該部位に対する構造性能確認のため一軸圧縮試験を、20MN 加力装置によって実施した。またパイルキャップの構造性能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強度に与える影響を考慮した設計式を検討した。さらには杭頭面曲げ降伏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。

昨年度までに実施した検討内容を建築研究資料として取り纏め、公開した。

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、それらの情報収集のために日本建設業連合会にヒアリングを行い、情報提供を受ける機関を特定した。また半剛接工法を対象とした設計方法の調査を行った。

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

現在の最新の知見を収集し、以前の課題において実施した大地震時を想定した際の杭基礎構造システムの設計手法の見直しを図るために、3 棟の建物の試設計を行うための予備検討を行い、過去の研究課題で提案した設計手法の見直しを日本構造技術者協会と連携して行った。

(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

31 年度 (令和元年度)

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、主として前課題で検討してきている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た計測計画を立案した。

本検討では、レーザースキャナー計測に関して、昨年に収集した実建築物、および今年度研究テーマ1で実施している柱試験体を対象とした。一方、1.5億画素カメラを用いた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)を対象とした。

研究テーマ1で実施した部材試験体を対象とした計測を行い、コンクリートの浮きや剥落部分の面積評価において、点群のばらつきを考慮することで適切に評価できることを示した。一方、昨年収集したレーザースキャナーの計測結果の分析について、昨年度計測した建築研究所建屋の結果を分析した結果、航空レーザー、UAV レーザー、地上型レーザーで被災状態を模擬した状態で計測を行い、飛行体レーザーからは、建物の沈下や傾斜については概ね評価できることを、地上型の固定レーザーからは、部材の浮き剥落などの損傷を評価できることを明らかにした。また、レーザー計測した点群の内、対象物以外に当たって得られたデータのばらつきが大きいことを明らかにし、損傷評価においてコンクリートの浮き剥落などの損傷分析にそれらを用いることが困難であることを示した。さらにはUAV レーザーではUAV そのものの飛行スピードと飛行方向に対するレーザーの照射角度が計測精度に影響を与えることを確認した。また熊本地震で広範囲に被災したエリアにおける点群データから被害前後の差分を計算した。高解像度写真によるデータについては、3.0mm/pxの精度を確保し、12m程度離れている2地点から撮影した写真から幅0.1mmのひび割れを検知できることを確認した。またそれらのひび割れ幅を輝度等の画像の明るさに関する指標を用いて判定する方法を考案し、その精度を検証したところ、0.3mm以下の精度は安全側に評価する傾向があるが、それ以上のひび割れについては適切に評価できることを確認した。

2) 地震応答観測データに基づく評価手法の開発

建物全体の振動性状については、建築研究所で長年実施されてきて、その実績がある強震計等に基づく観測システムを、建物全体の応答変位については前課題で開発を進めている測位衛星情報に基づく観測システムを対象とする。この2つのシステムを基幹観測システムと位置づけ、本システムに高精度な時刻を付与するシステムを建築研究所本館に9月末に導入した。本システムは既設のTV配線網を活用するものであるが、10月末にTVブラスターが故障し、それらの修理が12月中旬までかかったことにより、その間の計測はできていないが、1月初旬

に中程度の地震による建物応答が発生しており、そのときにデータが自動観測できていることを確認した。一方で GNSS センサーから求まる変位データの精度を検証するために移動式振動台を建築研究所本館建屋屋上に設置し加振実験を行い、概ね台の揺れを評価できることを示した。

軍艦島の 3 棟の RC 造建築物に GNSS センサーを取り付け、長期観測を実施した結果を分析したところ、温度変化と建物の変形性状の相関性が確認された。またそれらの変位測定精度が数 mm オーダーで計測できていることを確認した。

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) 研究目標が幅広いがゆえにまとまりがなくならないよう、3 テーマ個々に研究期間内に重点的に進めるサブテーマを定め、そこに力を集中させることも重要と思われる。
- 2) おそらく個々には良い研究成果が期待できるものの、その成果を総合的にどのように使ってゆくか、といった適用シーンへの意識があってもよいのでは？より社会に役立つように成果を使いやすい形に仕上げていただきたい。
- 3) 「既存鉄筋コンクリート造」という課題ですが、研究内容は新設にも対応できるものと思います。課題を「既存」にこだわる必要がありますでしょうか。
- 4) 建物のモニタリングは、今後ますます重要になるので、安価で多くの建物に適用できる体制が望まれる。
- 5) 既成コンクリート杭に関する研究については、別テーマの下で行うべきテーマに見える。
- 6) 民間の建物内部の映像を誰が分析するのか。誰が使う技術なのか、膨大な数の被害建物に適用可能な技術なのか、本当に国策としてすすめるべき研究テーマなのか、説明が必要ではないか。
- 7) コンクリート工学年次論文集は、大学では査読として認められる成果でないことを附言したい。

参考：建築研究所としての対応内容

- 1) 各テーマで実現するアウトプットを明確にした検討を進めて参りたい。
- 2) 得られるアウトカムを明確にした検討を進めて参りたい。
- 3) タイトルから既存を取り除くことを含めて再度整理を進める所存である。
- 4) 本検討と平行してモニタリングが広く普及するための枠組みの検討を外部機関と連携して進める所存である。
- 5) 本課題では前課題の後継課題で、パイルキャップを含めた杭の構造性能に関する実験研究を展開しており、そのために必要な最低限の体制は組んで実施しており、これまでに示している研究方法・体制に基づき実施する所存である。
- 6) 写真等を用いた損傷評価に基づき迅速に被災判定を行うことは、国として取り組むべき課題と認識している。その上で、本検討課題ではこれら技術がどの程度まで活用できる技術であるかや、活用できる場合の評価手法を検討することを目的として実施している。（課題説明資料では「地震時における建物や部位の応答を、直接計測したデータに基づき、被災建築物の迅速な損傷性状評価手法の検討を行う。その検討結果に基づき、地震後の建築物の継続使用性判定のための各種計測装置の必要性能とそれらの利用方法を纏める」）。なお、実際の被災時にはこのような検討を調査者が実施できるようにする必要があるが、現時点において本課題ではそこまでを対象としていない。
- 7) コンクリート工学年次論文集は、建築研究所では査読論文としてみなされていることに加え、建築・土木分野に関するコンクリート専門家が査読を 2 名で行い、さらにはその発表を行い多くの議論がなされ情報共有もできる年次の論文集である。また投稿時期も 1 2 月であり年度で実施している検討結果を纏めるのに適した時期である。以上のことから現時点においては、本成果の最大化に向けた取組みとして必要であると判断している。

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。