

「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」

(平成 28 年度～平成 30 年度) 評価書 (年度)

平成 30 年 3 月 5 日 (月)

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。そこで平成 25 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、新築の建築物に対する設計では、構造部材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されたものの、既存建築物を対象とした際の継続使用性評価については以下の技術的な課題が残されている。

課題 1. 一般用途の建築物（住宅や事務所ビル等）にも適用できる耐震性評価体系の構築が必要

課題 2. 時刻歴応答解析を用いない損傷評価技術が必要

課題 3. 既存中高層建築物の地震後の損傷を低減できる耐震改修技術が必要

前述の重点研究課題において、被災した建築物の管理者へのヒアリング調査を分析した結果、地震後の建築物の継続使用性は図 1 の通り判断されているが、図より応急危険度判定で一見して危険となる場合を除き、その後の詳細調査において継続使用性の判定が行われている。このことは 継続使用性を判定するまでに時間を要するため、その間、建築物は利用できない状態となる場合も存在する。一方、近年建築物の地震時の挙動をデジタル化して表示することで、地震後の初動対応を支援するツールが各所で開発されつつある。建築研究所においては全国約 60 箇所において強震観測を実施し、地震時の建築物の応答性状の解明に貢献してきているものの、当該応答性状から地震後の継続使用性を迅速に判定する手法の構築には至っていないことから、以下の技術的課題が存在している。

課題 4. 被災建築物の地震後継続使用性を早期に判定する技術が必要

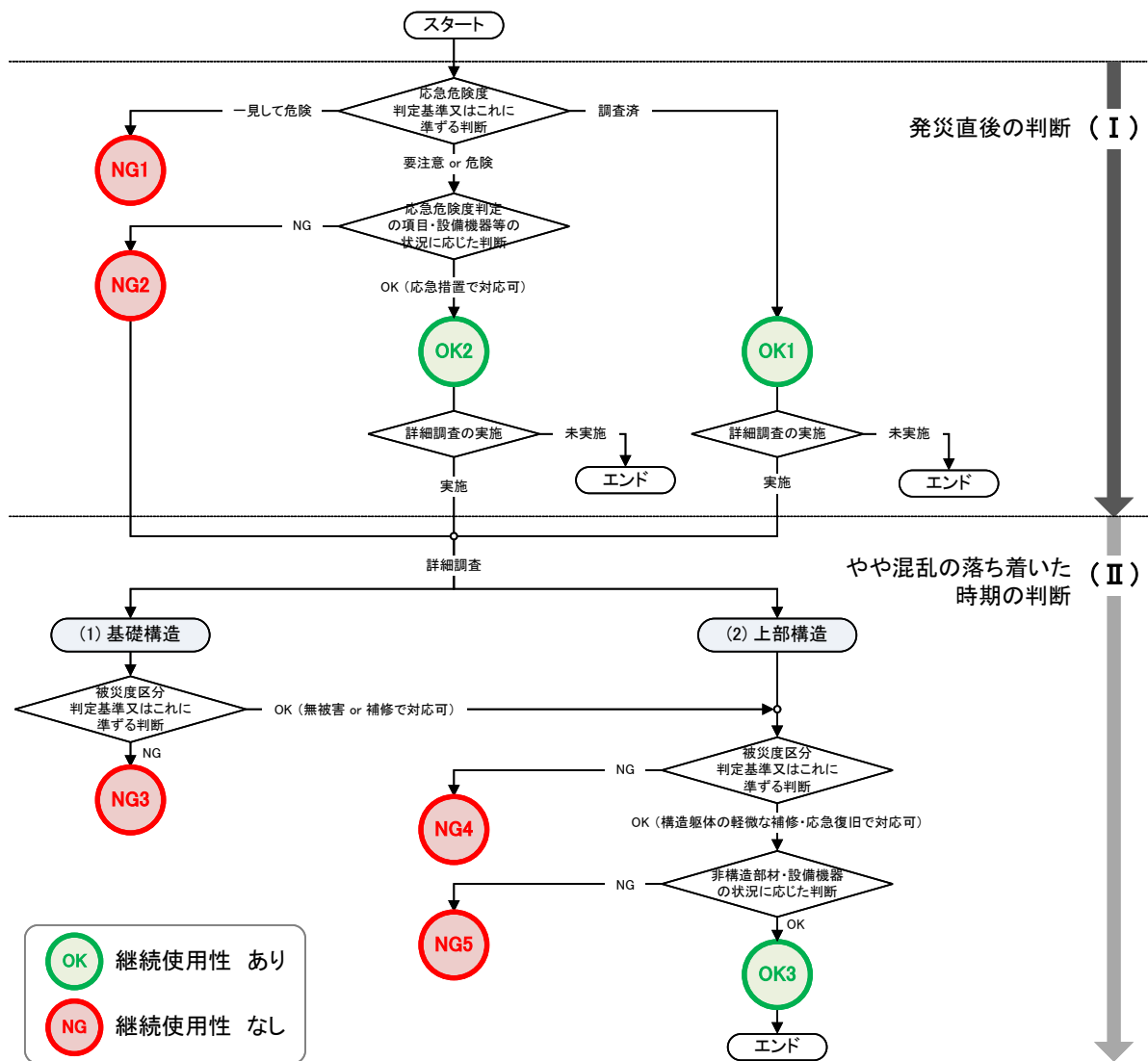


図1 建築物の地震後の継続使用性の分析フロー

そこで上記課題 1-3 について、本研究では、平成 27 年度までに実施してきた重点研究課題の成果を引き継ぎ、一般の既存建築物（地震後継続使用を必要とする共同住宅や事務所ビル等）を対象として、地震後の継続使用性を評価するに必要な技術開発を行い、時刻歴応答解析によらない損傷評価手法を提案し、かつ既存中高層建築物の継続使用性向上に資する耐震補強設計に役立つ技術を開発し、将来的に取り纏める評価指針に役立つことを目的とする。さらに上記課題 4 については、被災建築物の地震後継続使用性の判定に役立つツールの開発を行い、地震後の被災調査の合理化に資する判定手法の確立に資することを目的とする。なおここでは、周辺インフラが対象建築物の地震後継続使用性に与える影響は考慮しない。

将来的には、ここで開発する評価手法に基づき、部位の修復性を含めた建築物の地震後の機能性を評価できるよう手法を拡張し、さらに地震後の機能性に影響を与える建築物周辺のインフラが有すべき必要な条件・性能について他分野と連携して検討するなどの展開が期待される。また平成 27 年度までに実施した重点課題で取り纏めた地震後継続使用性確保のための要求性能についての知見を活用する。

これらの研究課題によって地震後の継続使用性に資する耐震性能評価法が確立すれば、通常建設されている建築物以上の耐震性能を明確に示すことができ、品確法や長期優良住宅制度などの耐震性能表示手法の発展に資する研究課題であり、建築研究所で実施することが必要である。

2) 前課題における成果との関係

平成 25 年度より重点課題「庁舎・避難施設等の地震後の継続使用性評価手法の構築」を、地震後の継続使用が強く求められる RC 造庁舎および避難施設（RC 造置き屋根体育館）を対象用途として、また東日本大震災において損傷が顕在化した RC 非耐力壁、RC 柱と S 造屋根との接合部、RC 造杭基礎を対象部位として、地震後の継続使用性を確保するための設計体系の確立を最終目的として、以下の検討を実施した。その結果、継続使用性を確保するための設計手法の基礎部分を構築し、新築建築物を対象とした設計法として確立できる可能性を見いだした。

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耐震設計と耐震性能評価手法の検討

(2) 研究開発の概要

課題では、一般的な既存建築物の地震後の継続使用性に関する耐震性評価手法を取り纏め、加えて既存中高層建築物の地震後継続使用性に直接寄与できる耐震改修工法を提示する。また地震被害後に計測された地震時応答や損傷データに基づき、被災建築物の継続使用性を判定するツールを提示する。

(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 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
- ② 既存建築物の地震後継続使用性評価指針の原案
- 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技術集
- ④ 被災建築物の地震後継続使用性判定に資するツール集

(4) 29年度の進捗・達成状況

(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提案

2) 熊本地震による既存建築物の被害要因分析と地震後継続使用性評価

RC 造について、昨年度の調査結果に加え、現地で被災調査等を追加で実施し、その結果を用いて実施した検討内容は以下の通り：

① 中間層の柱梁接合部において損傷集中し大破した庁舎（建設年 1998 年）

当該庁舎の設計図書を入手し、それらを元にモデル化を行った。特に大きな損傷となった柱梁接合部について建築学会から刊行された指針を元にその分析を行った結果、実際の損傷箇所との整合性が確認され、現行基準における課題として「柱梁接合部降伏と局部崩壊との関係」を浮き彫りにした。

② ピロティ階の柱、梁、スリット付き壁が大きく損傷し大破した共同住宅（建設年 1992 年）

コンクリートおよび鉄筋の抜き取り調査及びそれらの材料試験を実施し、被災建築物に用いられた材料特性を把握した。それらを用いて被害要因分析のための解析を実施した。その結果、現行基準における課題として「連層耐震壁の枠梁と必要壁縦筋量」を浮き彫りにした。

③ ピロティ階の柱が大きく損傷し大破した共同住宅（建設年 1998 年）

当該建物の設計図書を入手し、それらをもとに部分架構の立体モデル化を行った。立体モデルの静的増分解析を行い、2 階より上の耐力壁の部分スリット部のモデル化の違いによるピロティ階柱応力、特に転倒モーメントによる変動軸力の違いを明らかにし、隅柱に被害が集中した要因を明らかにした。

④非構造壁が大きく損傷した共同住宅（建設年：1979年，1981年）

微動計測を実施し、各共同住宅の振動特性を把握するための調査を実施した。また2棟の共同住宅について建物モデルを構築し、実被害との相関性について検討した結果、近隣の地表面において観測された地震動を用いた場合、実被害よりも大きな損傷となる結果が得られ、実際に当該建築物に入力した地震動の大きさについて検討した。また当該建築物の継続使用性を確保するために非構造壁を対象として耐震改修効果について検討を行なった。さらに当該建築物はいずれも地震後補修され現在も使い続けられているため、補修時の情報を収集し、損傷と修復に関する関係性を分析し、地震後継続使用の際に必要な指標の検討を行う予定である。

⑤耐震補強されたが杭が大きく損傷した庁舎（建設年：1980年）

当該庁舎の室内において被災調査を実施し、被災度区分判定を実施した結果、上部構造物の損傷としては中破、基礎構造の損傷を考慮すると大破と判定した。さらにこれらの設計図書および耐震補強時の計算資料を入手し、上部構造物の立体モデルに対して静的増分解析を行った結果、上部構造物は耐震補強により十分な水平強度を有していること、当該建築物の被災状況は層間変形角 $1/300$ 以内と考えられることを確認した。さらに杭基礎に関する分析について、上部構造物の慣性力ならびに地盤変位を考慮した杭の損傷評価に関する結果が得られた。当該庁舎は現在解体工事が進められており、解体時点で杭を含めた調査を実施する予定である。

⑥柱梁接合部の損傷により局部崩壊した庁舎（建設年：1965年）

現地解体時に入手した材料に対して材料実験を実施した。また当時の設計図面および耐震診断時の計算資料を入手し、建物を立体でモデル化し解析検討を実施した結果、柱梁接合部が釣り合い破壊することを確認した。また時刻歴応答計算によって地震応答性状を確認し、実際の被害との関係性を分析した。

3) 既存建築物の地震後継続使用性評価手法の提案

国交省主体で検討されている防災拠点ガイドライン策定に関する打ち合わせに参加し、新築建築物の設計時に用いられる内容について検討している。次年度はここで纏められる内容を参考に、ガイドラインの原案を検討する。

(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

2) 中高層既存建築物に対する耐震性向上技術の開発

①RC壁に対する耐震改修技術開発

超高強度繊維コンクリートプレキャスト袖壁を用いた耐震補強工法を提案し、その有効性について昨年度実施した架構実験結果を用いて検証した。また施工の合理化を目指して袖壁を分割して利用する工法について展開し、そのための部材実験を実施した。その結果、分割した場合も十分な強度を向上させることができた。また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強度および靱性能を向上させる補強とできることを確認した。次年度はこれらの補強効果を評価するための実験並びに解析検討を実施する予定である。さらには壁に生じる損傷評価手法として高解像度カメラ（5000万画素程度）を用いた方法を適用し、その妥当性について確認した。

②コンクリート杭に対する耐震性向上技術開発

実大で大きな地震時応力を作用させた既製コンクリート杭および現場打ちRCおよびSRC杭を対象に、杭体の曲げ実験、せん断実験、および既製杭を有する部分架構を対象とした構造実験を実施し、その効果を分析した。その結果、既製コンクリート杭のせん断実験では軸方向に割裂する破壊、場所打ちSRC杭の曲げ実験では鋼管が座屈後破断する破壊が確認した。また既製杭を用いた部分架構実験を今後実施する予定である。また、2月末に見学会を実施予定であり、関係者との意見交換を行い、今後の実施計画に反映させる予定である。次年度は、靱性のある部分架構システムに必要なパイルキャップ部分の構造性能評価のための構造実験を実施予定である。

(3) 被災建築物の継続使用性を判定する技術の開発

1) 強震観測に基づく既存建築物の耐震性能評価と継続使用性の関係分析

建築研究所で保有する強震観測システムと JAXA が保有する衛星測位システムを用いた建物の変形観測システムを相互に融合させた新たなシステム開発について、共同観測を行うための対象として、建築研究所の本館および新館と JAXA が保有する免震構造である研究推進棟を選定し、前者に建物上部と地上に衛星データを受信する装置を設置し観測を開始した。これまでに、震度 2 程度の揺れを複数回観測できたため、それぞれの観測データの分析を進めている。また双方のデータはそれぞれのシステムで記録されているため、双方のデータの一括収集および分析できる包括的なシステム構成を検討する予定である。

また一般公募により、国際航業が有する衛星測位システムを用いた残留変形評価手法構築のための観測を行う。JAXA が有するシステムより廉価な分、測定精度は落ちるがその分を計測データの解析手法により計測精度の向上を図っており、これらのシステムの有用性を建築研究所本館および新館、さらには長崎県端島における住棟において検証する予定である。

2) 地震時の部位の損傷を判定する個別ツールの開発

①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、昨年度までに計測した実建物や試験体について以下の分析を行った。

- ・計測した点群データから実大架構試験体の境界線を抽出する方法を提案し、抽出した線を用いて、各階の残留層間変位の計測を行い、実験結果から得られた計測結果と整合していることを確認した。またそれらを図面化する方法を提案した。
- ・計測した歴史的建造物の点群データを用いて、VR 技術を用いた可視化手法の可能性を検討し、実際に運用する際の問題点を明らかにした。今後は当該建造物の管理者も交えて実用化のための課題を整理する予定である。

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) 耐震補強、杭の実験も耐震性状の把握にとどまっています。東日本大震災や熊本地震での継続使用の可否調査研究と関連付けて、実験結果と継続使用するための損傷限界との関係についての議論を進めることも希望します。
- 2) 建物の継続使用性を向上することは、広域で被害が多発する南海トラフの巨大地震が発生すれば、被害を最小化する上でも、迅速な対応が望まれると考えられる。その意味で、本研究の意義や果たす役割は大きい。このような役割を果たす上でも、熊本地震の被害の検証も建築研究所の重要なミッションと考える。特に、継続使用性を考える上で、作用した地震動レベルを考え、許容される損傷レベルか否かをも含めて検討されることを期待したい。また、継続使用性を判定する新たな技術開発も期待されるが、多くの建物が被害を受ける中、どのような場面で使われるのか、具体的な説明や技術の使い分け方法についても検討されることを期待する。
- 3) 継続使用性向上耐震技術の開発において、超高強度繊維コンクリート PCa 袖壁を用いた耐震補強工法に重点をおかれているが、共同住宅の袖壁補強に限定されているのが気になる。コンクリート杭の耐震性向上技術開発において、実験で性能確認した後の次の展開を示すことも重要と考える。衛星測位システムを活用した被災建築物の継続使用性を判定する技術は、非常に将来性があり、新しい判定システム（損傷評価、継続使用性評価等）に展開していくことを期待する。
- 4) 実施内容が多岐にわたっているので、研究全体のストーリーが見えにくくなっているように思います。熊本地震の検討（研究テーマ 1）の成果が、研究テーマ 2、3 の実施内容とうまく結びつくとよいと思います。建物の継続使用性を判断するには、構造体の健全性以外に、天井等の非構造部材の安全性の判断も重要と思います。

参考：建築研究所としての対応内容

- 1) 今年度は現時点までに実験データ収集を当面の目標として活動しており、現在その実験データの分析を開始している。まず耐震補強工法については、ここで補強された部材の骨格曲線評価など、補強効果を評価するために必要となる知見の取り纏めやそれらを実構造物に適用した場合の評価例の作成を開始している。また杭について、杭体そのものの終局強度評価に加え、パイルキャップを有する部分架構としての構造性能評価についても検討を行っており、最終年度にはこれらの結果を総合的にとりまとめる所存である。一方、前課題で纏めた図1のフローの妥当性について、熊本地震で被災した庁舎の事例19棟を対象に検討を進めたところ、概ね同様の傾向にあることを確認している。また民間建築物で被災した複数の建築物についても被災度区分判定を実施し、損傷レベルと地震後の継続使用性について分析を纏める所存である。
- 2) 熊本地震で被災した建築物の地震後継続使用性と損傷レベルの関係を纏める所存である。また継続使用性を判定する技術開発については、被災した建築物の継続使用性に関する評価を対象としており、被災建物の損傷データ等の収集後に、分析に要する作業を明らかにした検討を進めて参りたい。
- 3) 本補強の対象については、袖壁や方立壁が取り付く建築物であれば、共同住宅のみに限定しているわけではないが、近年の被害事例として、共同住宅のこのような非構造壁の被害が顕著であることから、まずは共同住宅を対象とした検討を実施している。これらの知見は、同様の非構造壁を有する住宅以外の用途の建築物にも適用できると考えている。衛星測位システムは今後も宇宙データの産業利用の観点からも技術開発が推進される分野であることから、その動向を注視しつつ、現状できる建築において利用できる評価技術の限界と今後の発展性について纏めて参りたい。
- 4) 熊本地震で被災した建築物を対象に、テーマ2で開発している技術で耐震改修される場合の評価の実施を検討予定であり、ある程度はテーマ1と2が連携した形でとりまとめる所存である。また熊本地震で被災した建築物を対象に、テーマ3で検討している点群技術を用いた検討も進めており、こちらもテーマ1と3が連携した形でとりまとめる所存である。

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。