

## 第1章

### はじめに

## 1.1 背景と目的

平成28年4月14日21時26分に熊本県熊本地方の深さ約10kmでマグニチュード(M)6.5の地震が発生し、上益城郡益城町で最大震度7を記録しました。さらに、約28時間後の4月16日01時25分に同地方の深さ約10kmでM7.3の地震が発生し、上益城郡益城町で再度震度7を、また阿蘇郡西原村でも震度7を記録しました。これらの地震により、熊本県を中心に数多くの建築物に倒壊などの被害がもたらされました。これらの地震の発生を受け、建築研究所では国土交通省国土技術政策総合研究所と連携して、建築物を中心とした被害状況を把握し必要な対策等に活かすため、情報収集、現地調査、調査結果のWeb公開等のさまざまな活動を実施して参りました。現地調査は、国土交通省住宅局からの要請に基づき、木造建築物、鉄骨造建築物、鉄筋コンクリート造等建築物、地盤・基礎、免震建築物、非構造部材、建築設備、火災について14次に亘る調査班が派遣されていますが、それとは別に建築研究所指定課題「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(H28-30)」の自主調査として、本研究課題において庁舎建築物の継続使用性に関するヒアリング調査をはじめとして、詳細な分析を実施しましたので、ここにその検討結果をとりまとめました。

本検討では、初動時点の現地被害調査に加え、その後の詳細分析のためのさらなる現地調査やそれらの調査結果を活用した解析検討を行っています。その結果より、主として1981年以降に設計された、または耐震補強等によって現行基準相当の耐震性能を保有し、かつ被害の大きかった鉄筋コンクリート造建築物および旧耐震基準で設計された鉄筋コンクリート造建築物の計8棟について詳細な分析を実施しています。ここでの検討が今後より安全で安心な建築物の供給に貢献できることを期待しています。

## 1.2 検討概要

### 1.2.1 継続使用性に関するヒアリング調査

熊本地震によって被災した庁舎を対象にして、継続使用性の判断に関する実態把握を目的としたヒアリング調査を実施した。今般の地震後に、各庁舎の管理者がどのように庁舎内の損傷を発見し、その損傷から地震後の庁舎の必要機能を鑑み、継続使用の可否をどのように判断したか等を知ることは、本研究を推進するうえで貴重な知見となる。対象にした建築物は熊本県内の庁舎計19棟であり、その多くが震度6以上を経験している。

## 1.2.2 建築物 A

1995年兵庫県南部沖地震では、新耐震基準の鉄筋コンクリート造建物で柱梁接合部が大破した例が報告されている。柱梁接合部入力せん断力の制限など、当時の建築学会の終局強度型耐震指針に適合する柱梁接合部であったにも関わらず大きく損傷したことが報告されている。一方、今回の熊本地震において、1998年に竣工した同県内の5階建て鉄筋コンクリート造庁舎建物である建築物Aは、柱梁接合部が大きく損傷しただけでなく、中間層で大きな残留変形が生じている。したがって、大地震における大破被害を抑制し地震後継続使用を確保するためには、建築物Aの被害要因を分析することが必要である。

この建物被害を対象として、現行の柱梁接合部の耐震設計規定の妥当性、現行設計で使われている非線形静的増分解析手法、非線形時刻歴応答解析法におけるモデル化手法などの合理性を検討する。建築物Aは、3階から上が1×1スパンの搭状のラーメン構造であり、柱梁接合部の構造性能に影響を受けやすいこと、柱に作用する変動軸力の影響が大きい構造形式であるという特徴を有している。本検討では、柱梁接合部の既存の耐震設計規定への適合性を確認し、静的増分解析により保有する耐震強度のレベルを検討する。さらに、構造システムの地震応答が大きくなった要因を検討するために、(1)変動軸力の影響、および、(2)柱梁接合部耐力の影響を反映させた骨組の地震応答解析モデルを作成し、近隣地域で観測された地震波を用いた動的地震応答解析を行い、それぞれの要因が地震応答に及ぼした可能性を検討する。



図 1.2.2.1 建築物 A

### 1.2.3 建築物 B

1995年兵庫県南部地震において、新耐震基準で設計されたものも含むピロティ建築物で重大な被害が数多く確認され、ピロティ建築物の設計法は、その後の告示改正や技術基準解説書改訂による設計法の提示を経て現在に至っているものの、その破壊性状や構造性能は未だ明らかではない部分が多い。2016年熊本地震でも、1992年に熊本県熊本市に建設されたピロティ形式の10階建て共同住宅である建築物 B において、1階ピロティ周辺の構造部材に大きな被害が発生し、被災度「大破」と判定されており、前述のピロティ建築物に関する告示改正や技術基準解説書に示される設計法の適用を受けていない新耐震ピロティ建築物が有する問題点に関する知見の更なる収集が必要である。

そこで、建築物 B について、地震による被害が大きかった梁間方向を対象として、架構全体を対象とした2次元有限要素解析による Pushover 解析を行い、崩壊機構の検証や、主に1階ピロティ周辺の部材の応力状態を把握するとともに、ピロティ柱梁の断面寸法とピロティ階直上の耐震壁の壁縦筋量をパラメータとしたパラメトリックスタディおよび現行の技術基準解説書に示される設計法との関連について検討を行い、本建築物で確認された被害要因について分析する。



図 1.2.3.1 建築物 B

#### 1.2.4 建築物 C

現行の建築基準法では、大地震時に建物の倒壊を防ぎ人命を確保するための規定が設けられている。しかし、熊本地震では、地震後の建物の機能停止による生活困窮がみられたことから、大地震時の人命確保に加え、地震後も建物の機能を維持し、生活基盤を喪失させない継続使用性の確保が必要である。その実現に向け、建物の継続使用性を確保するための設計法が求められる。この実施のために、実建物の地震後の被害を再現できるモデルの構築を行い、部材の損傷度合を把握することがまず必要と考えられる。

そこで本検討では、熊本地震で被災した4階建てピロティ形式のRC造建物を対象として、部材の損傷を再現できるモデル化の構築を行う。構築したモデルを用いて、部材のモデル化の違いが応答に与える影響を検討し、応答の観点からモデルと実被害の比較検討を行い、モデルの妥当性を示す。

また、建物の継続使用性を確保するための設計法を提案するうえで課題となる問題点等の基礎的検討を行う。具体的な検討方法は以下の通りである。

1998年に新耐震基準で建設され、熊本地震にて1層崩壊を起こした4層鉄筋コンクリート造のピロティ形式の共同住宅を対象に、建物のモデル化を行う。本建物は、耐震スリットが一部設けられているが、建設当初の計算書からはスリットの情報が読み取れなかった。そこで壁のモデル化の違いによる建物応答への影響の検討を行うため、ラーメン架構モデルと2方スリット想定モデルおよび3方スリット想定モデルを構築する。さらに、この建物は5つの棟が、梁が付随しないスラブのみ(1階は基礎梁)により連結されており、梁が付随しないスラブのモデル化の違いによる建物応答への影響の検討を行うため、5つの棟を別々にモデル化したものと、5つの棟をピン梁および梁が付随しないスラブで繋いだ連棟モデルを構築する。

構築したモデルを用いて静的増分解析および動的応答解析を行う。動的応答解析では、近隣地域で観測された地震波を用いた解析を行う。応答の観点から壁や梁が付随しないスラブのモデル化の違いによる建物応答への影響の検討を行い、抽出したモデルの解析結果から推定した部材損傷度合を実被害と比較することで耐震スリットの設計条件を推察し、構築したモデルの妥当性を示す。

また、対象建物のピロティ階に対して、現在推奨されているピロティの設計方法に基づきピロティ柱の部材断面を算定し、建物応答へ与える影響を検討する。

### 1.2.5 建築物 D

2016年の熊本地震では、非耐力壁や杭の損傷が激しく、地震後の機能を維持することができない共同住宅が多くみられている。これにより、被災者は避難所生活や車中泊を強いられ、ストレスやエコノミークラス症候群など2次災害を招いている。今回の熊本地震において、昭和50年代前半に建設された11階建ての共同住宅である建築物Dは、共用廊下側の壁に損傷が生じている。このような被害が発生すると地震後の継続使用性を妨げる要因の一つとなる可能性も高く、非耐力壁の損傷軽減を実現するための方策が求められており、そのためにはまず当該建築物の被害要因を分析することが必要である。

建築物Dは、5スパンの建物D-1（全階住宅）と6スパンの建物D-2（1階部分ピロティ、2階以降は住宅）の2棟の建物がエキスパンションジョイントを介して連結された構成である。不確定要素である建物の減衰や入力地震動の大きさ等の因子を変動させて動的解析を実施し、その得られた結果と共用廊下側壁の損傷分布の比較から、応答挙動を把握することを目的とする。さらに、建物D-1では、共用廊下側壁を修復する際に要した労務量にも着目し、より詳細に実被害を説明できるモデルおよび因子の組み合わせを検討した。一方で、建物D-2では、共用廊下側桁行方向の5階1スパンを対象として有限要素解析を行い、方立壁が負担したと思われる軸力比を推定し、損傷範囲、損傷度等について被害調査結果と比較を行う。

また、室内の被害状況やその被害が住民生活に及ぼす影響、さらにはモニタリング技術に対する需要を把握するために、居住者を対象にアンケート調査を行い、それらのとりまとめを行って、部位の損傷度とそれが地震後の共同住宅の生活に及ぼす影響を明らかにする。

## 1.2.6 建築物 E

2011年に発生した東日本大震災では、建築物の杭基礎の地震被害によって地震後継続使用できなくなる事例が報告された。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。一方、今回の熊本地震において、1980年に建設された同県内の鉄筋コンクリート造庁舎建物である建築物 E は、上部構造物の被害と共に杭基礎においても被害が見られた。地震後に実施した建築物の関係者へのヒアリングの結果、建築物 E は杭基礎の被害によって恒久復旧が困難と判断され、建築物の解体が決定した。以上より、大地震における地震後継続使用を確保するために、建築物 E の被害要因を分析することが必要である。

この建物被害を対象として、現行の杭基礎の耐震設計規定の現状を把握すると共に、大地震時の耐震設計を想定した、非線形静的増分解析手法、非線形時刻歴応答解析法におけるモデル化手法などの合理性を検討する。建築物 E は、桁行方向 9 スパン、張間方向 4 スパンの RC 造の地上 3 階、塔屋 1 階の庁舎建築物で、平面形状は長方形である。また、プレキャスト外フレーム工法や鉄筋コンクリート造壁の増し打ち工法等により、耐震補強が実施されている。本検討では、解析モデルを上部構造と下部杭基礎構造の分離モデルとして検討を行う。それぞれのモデル化手法を示すと共に、解析結果と地震被害調査結果との比較検討を実施する。また、現在の杭基礎の耐震設計について、今後の課題と杭の設計のあり方を整理する。



図 1.2.6.1 建築物 E

### 1.2.7 建築物 F

近年、UAV（以下、ドローン）の建築物の災害調査等への活用が注目されている。しかしながら、実際の地震で被災した建物を対象として災害調査が行われた例はほとんどないのが現状である。今回の熊本地震において被災した建築物 F は 1974 年に建設された 3 階建て RC 造庁舎建物であり、長手方向は柱の軽微な曲げひび割れ、短手方向は短スパン梁のせん断破壊、耐震壁のせん断破壊等が生じたが、被災後も補修等を行って継続使用している。この建築物 F を対象として、ドローンを用いた被災調査の有用性を確認することを目的に、人間とドローンによる建物損傷状況の視認性の比較や、ドローンでの調査可能範囲および損傷計測作業の効率性の確認などを行う。

調査ではまず、人間による被災度区分判定結果と、ドローンを用いて被災度区分判定を行ったと仮定して得た判定結果の比較を行う。その結果から、外周部の損傷度把握や被災度区分判定にドローンを用いることの有効性を検討する。また、人間による調査では難しい高層階の損傷状況把握について、ドローンの空撮で可能となるか検討する。

次いで、ドローンを用いて実際に生じたひび割れを撮影し、人間の目視によるひび割れ幅評価と、撮影画像からのひび割れ幅評価を行う。カメラの画素数や撮影距離をパラメータとして、ドローンによるひび割れ幅評価の有効性を検討する。さらに、2機のドローンを用いた建物傾斜の評価や、FPV 撮影動画のリアルタイム視聴調査を行い、これらの有用性を検討する。



図 1.2.7.1 建築物 F

### 1.2.8 建築物 G

1995年兵庫県南部沖地震では、新耐震基準の鉄筋コンクリート造建物で柱梁接合部が大破した例が報告されている。柱梁接合部入力せん断力の制限など、当時の建築学会の終局強度型耐震指針に適合する柱梁接合部であったにも関わらず柱梁接合部が大きく損傷したことが報告されている。一方、今回の熊本地震においては、1981年以前に古い耐震基準で設計され竣工した複数のRC造建物が倒壊した事例が確認されている。特に1968年に竣工した熊本県内の5階建て鉄筋コンクリート造庁舎建物である建築物Gは柱梁接合部の破壊に伴い局部崩壊した建築物であり、現行耐震診断の高度化の観点から、本建物の被害要因を分析する。具体的には建築物Gの被害から、現行の柱梁接合部の耐震設計規定の妥当性を検討するとともに、非線形静的増分解析手法と非線形時刻歴応答解析法に使われる現行のモデル化手法の適用性を検討する。

建築物Gは2×2スパンの低層ラーメン構造で、大地震時には部材の塑性化による層間変位応答が大きくなりやすく、特に柱梁接合部の損傷が耐震性能に影響しやすい構造形式である。そこで、柱梁接合部の既存の耐震設計規定への適合性を確認し、静的増分解析により保有する耐震強度のレベルを検討する。さらに、構造システムの地震応答が大きくなった要因を検討するために、柱梁接合部耐力の影響を反映させた骨組の地震応答解析モデルを作成し、近隣地域で観測された地震波を用いた動的地震応答解析を行う。さらに、柱梁接合部の破壊が局部崩壊に至る原因について部材と架構の鉛直力支持能力を検討する。

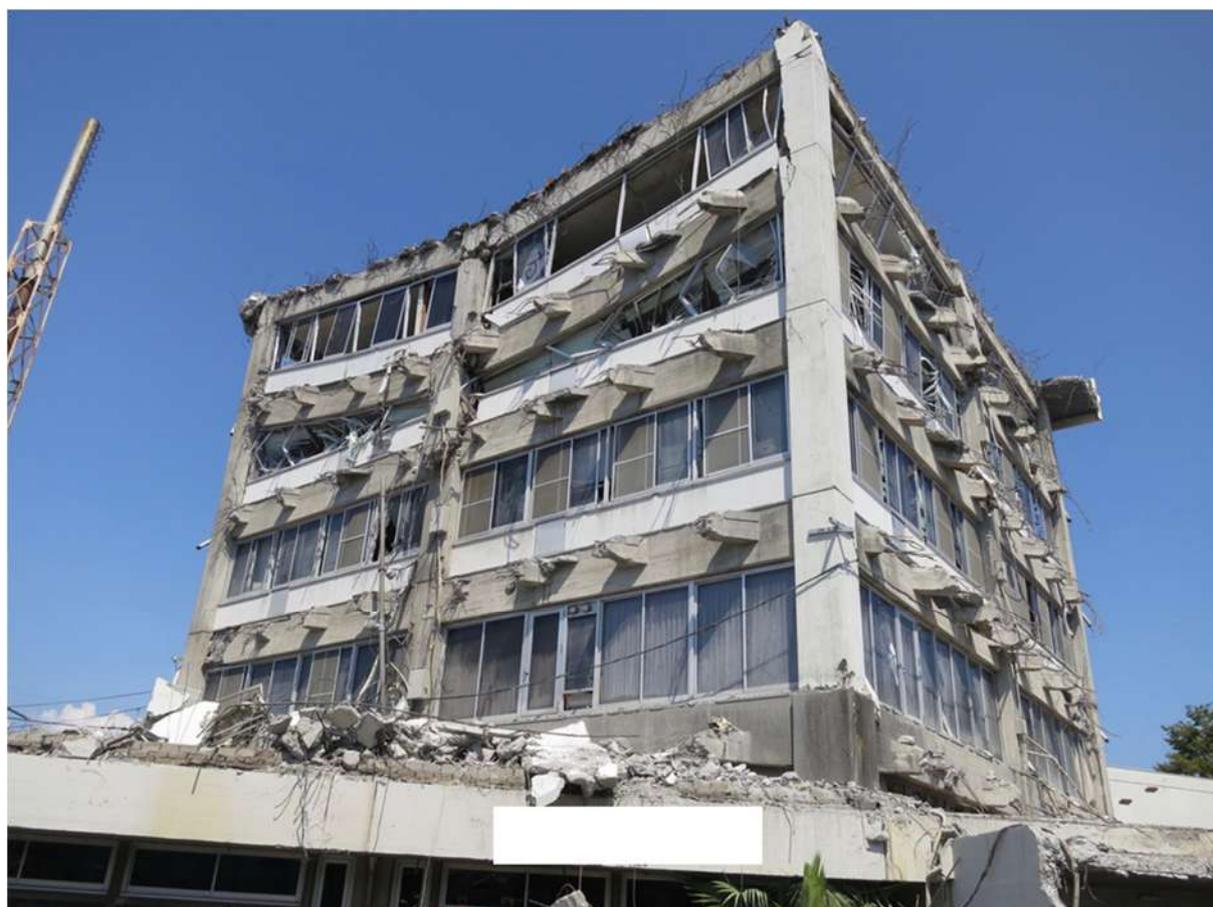


図 1.2.8.1 建築物 G