

熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会 報告書 概要

1. 本委員会設置の目的・経緯

5 熊本県熊本地方で2016年4月14日にマグニチュード(M)6.5の地震(前震)が、4月16日にM7.3の地震(本震)が発生し、いずれも最大震度7を記録した。震度6弱を上回る地震は計7回観測され、熊本県を中心に数多くの建築物に倒壊などの被害をもたらした。気象庁は、一連の地震活動を「平成28年(2016年)熊本地震」と命名した。

10 本委員会は、国土技術政策総合研究所(以下「国総研」という)及び国立研究開発法人建築研究所(以下「建研」という)が実施してきた、建築物被害の現地調査の結果に加えて、一般社団法人日本建築学会(以下「建築学会」という)等が実施している調査内容を幅広く収集・整理するとともに、調査結果や関連データ等により、専門的・実務的知見を活かして、建築物被害の原因分析を行うことを目的としている。

15 本委員会は、国総研に設置されている「建築構造基準委員会」(委員長:久保哲夫 東京大学名誉教授)と建研に設置されている「建築研究所熊本地震建築物被害調査検討委員会」(委員長:塩原 等 東京大学教授)の合同開催の形で開催した。

国土交通省は、本委員会による分析のとりまとめを踏まえ、建築物の耐震性の確保・向上方策について検討することとしている。

2. 地震及び地震動の特徴

20 平成28年(2016年)熊本地震の特徴としては、内陸の活断層の活動によること、震源の近くでは強い揺れに何度も襲われた地区があること等が挙げられる。

25 気象庁、国立研究開発法人防災科学技術研究所(K-NET及びKiK-net)、及び熊本県等の震度計で多くの強震観測記録が得られ公開されている。震度7が観測された益城町および西原村で得られた地震動は、周期1~2秒の範囲で、前震についてはJR鷹取(1995)等の過去地震と同程度かそれ以下であったが、本震については過去地震を超える記録が観測されている(図1参照)。熊本市及び宇土市の本震記録も告示スペクトルを上回っていた。

30 秦らによる益城町の3地点における本震の記録では、周期0.5~1秒程度の範囲で過去地震を上回っていた。各地点での擬似速度応答スペクトルの振幅には違いが見られ、地震動の差違が当該地域の木造建築物の被害分布に影響を及ぼした可能性が示唆される。

益城町の木造建築物の被害集中域は、古くより住家がある市街地とおおむね対応し、段丘にはほぼ一致していた。地震動評価のためには追加の地盤調査等の必要がある。

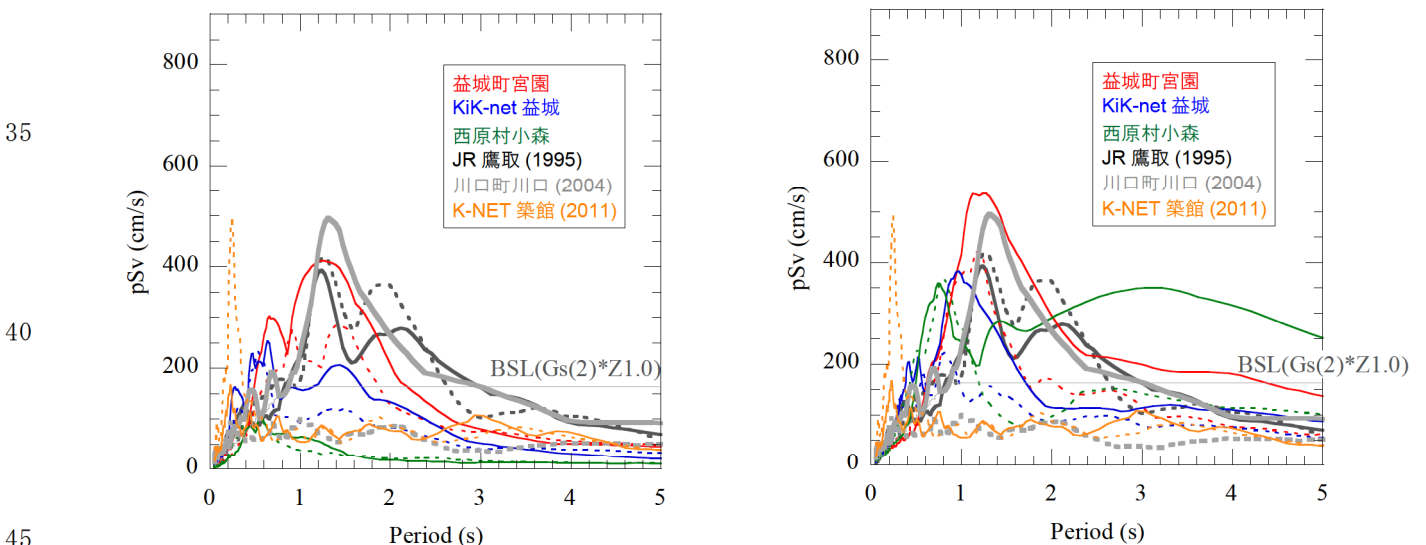


図1 擬似速度応答スペクトルの比較

(左:前震、右:本震、破線はNS方向、実線はEW方向を表す。

「BSL(Gs(2)*Z1.0)」は建築基準法令における地表面(第2種地盤、Z=1.0)の地震動に対応)

3. 被害状況・被害要因等の分析

3.1 調査方針

上述の「地震及び地震動の特徴」を踏まえ、本委員会として以下のような考えに基づき被害調査と要因分析を行った。その内容を踏まえた「総括」を「4」にまとめるとともに、今後必要となる検討項目についても示すこととした。

- ・極めて大きな地震動が作用し、多数かつ甚大な建築物被害が生じた益城町及びその周辺地域に着目して被害調査と分析等の検討を進めることとした。
- ・規模の大きな鉄骨造や鉄筋コンクリート造・鉄骨鉄筋コンクリート造（以下「鉄筋コンクリート造等」という）の建築物については、熊本市内などの地域における調査結果も対象とした。被害の程度としては、被災度区分判定における大破（設計の想定とは異なる破壊形式等のもの）にまで対象を広げて検討を行うこととした。
- ・大きな地震動が繰り返し作用したことについては、建築基準法の構造計算が、これまでの複数回の地震動による地震被害を踏まえつつ一の地震動を用いて安全性確認を行っていることから、一定の期間に発生した全体の地震を対象に、その結果としての被害状況について分析等を行うこととした。

3.2 益城町中心部における悉皆調査

建築学会によって益城町中心部において悉皆調査（以下「学会悉皆調査」という）が実施され、国総研・建研が実施した詳細調査等に基づく内容の精査を踏まえつつ、2,340棟（木造1,955棟、鉄骨造276棟、鉄筋コンクリート造52棟）についての集計・分析が行われている。なお、被害状況等の調査結果については建築学会において現在精査中であり、ここに示す数値は暫定的なもの（9月8日時点のデータ）である。

- ・倒壊率は県道の南側で高く、調査エリアの北東の辻の城地域と、南側の秋津川に近い地域では低い傾向にある（図2参照）。
- ・県道の南側では、倒壊・崩壊した建築物が古くから宅地であった段丘面に多く存在し、氾濫平野・旧河道には少なかった。
- ・倒壊建物の位置は20世紀初頭の住宅地と一致する傾向にあった。

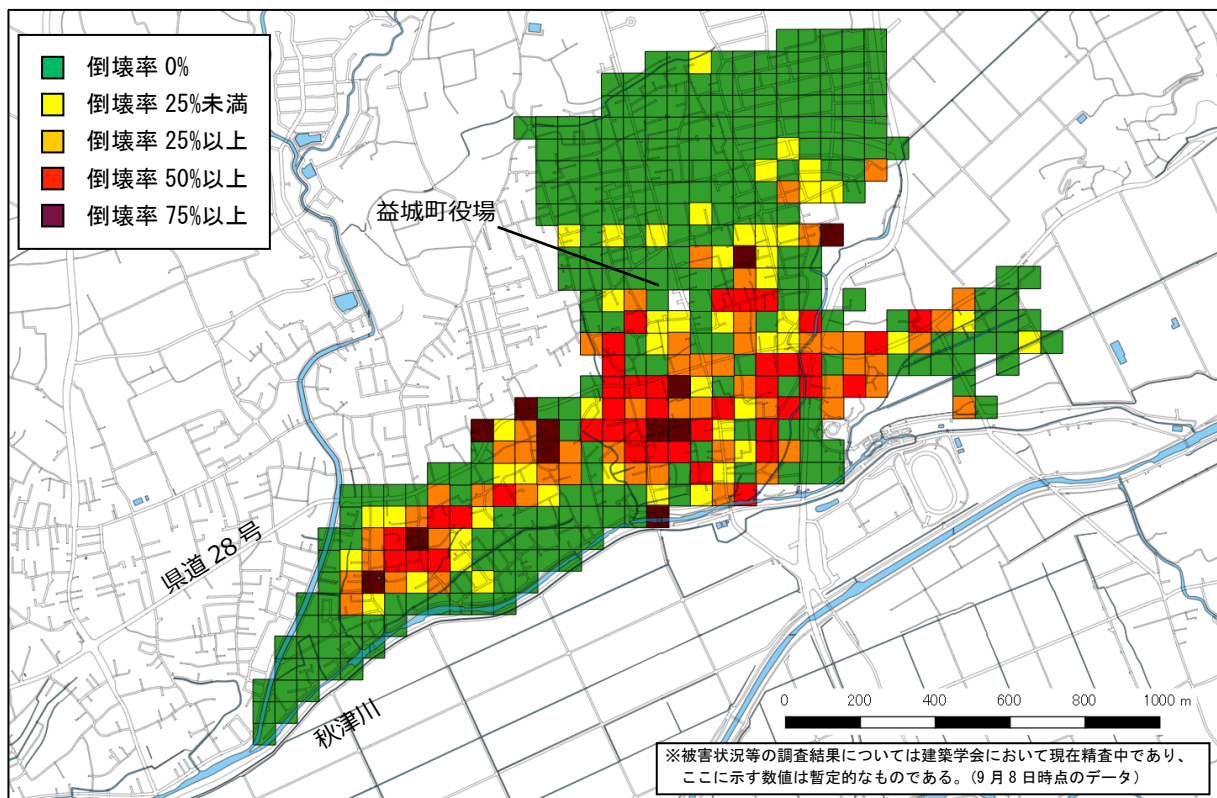


図2 学会悉皆調査結果による倒壊率の分布

3.3 木造建築物の被害の特徴と要因

国総研・建研は、主に益城町、西原村及び南阿蘇村を対象に現地調査を実施し、益城町の学会悉皆調査や入手した図面、構造計算等による集計・分析を行った。

- ・学会悉皆調査によれば、新耐震基準導入以降に比べて、それ以前（旧耐震基準）の木造住宅の被害率が顕著に大きい。新耐震基準導入以降では、2000年の接合部等の基準の明確化以降の木造住宅の被害率が、それ以前（昭和56年基準）の被害率と比較して小さい（図3参照）。
- ・益城町における国総研・建研の調査により、倒壊・崩壊が確認され、接合部の状況等が確認できた昭和56年基準の木造住宅全てについて、2000年に明確化された基準の接合部仕様を満たしていないことを確認した。また、接合部仕様以外の被害を大きくしたと考えられる要因として、地盤変状、隣棟の衝突、蟻害等がみられた。
- ・学会悉皆調査範囲において倒壊が確認された2000年以降の木造住宅7棟のうち3棟は接合部仕様が不十分であり、1棟は敷地の崩壊、基礎の傾斜等が確認された。残る3棟については、明確な被害要因が確認できず、震源や地盤の特性に起因して局所的に大きな地震動が作用した可能性が考えられる。
- ・学会悉皆調査範囲において前震で倒壊・崩壊したと確認された木造住宅に2000年以降のものは存在せず、昭和56年基準の木造住宅5棟すべてについて、不十分な接合部の仕様、隣接建物の倒壊等を確認した。
- ・学会悉皆調査範囲内の住宅性能表示制度を活用した木造住宅のうち、耐震等級が3であった16棟は14棟が無被害、2棟が軽微又は小破の被害であった。
- ・西原村では、旧耐震基準と推測される木造住宅の倒壊・崩壊と、傾斜地における敷地の被害や擁壁の崩壊が多数確認された。
- ・南阿蘇村では、2階建て木造アパート7棟の倒壊が確認されたが、柱脚・柱頭等の端部が確認できたものの多くは釘打ち程度の比較的軽微な接合方法であった。
- ・熊本市内等で倒壊・大破の木造住宅が数棟確認されたが、旧耐震基準と推定されるものの被害が多かった。

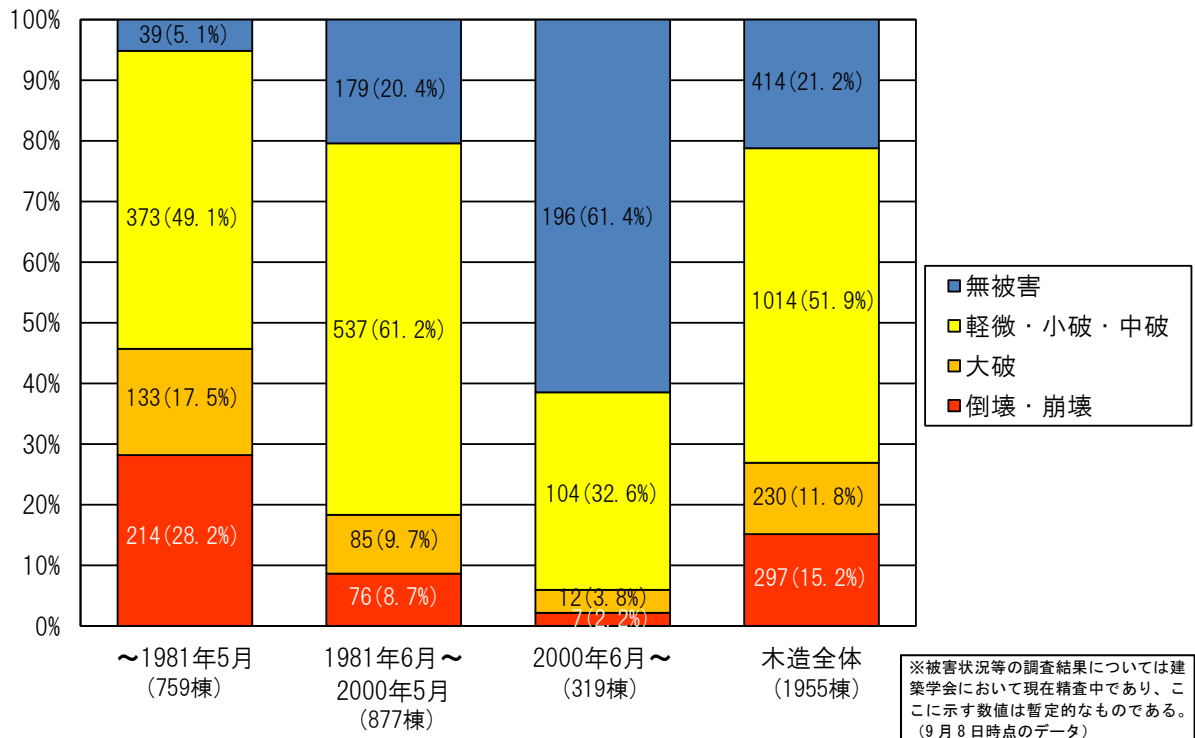


図3 学会悉皆調査結果による木造の建築時期別の被害状況

3.4 鉄骨造建築物の被害の特徴と要因

国総研・建研の被害調査と要因分析は、益城町での小規模鉄骨造、体育館、その他の鉄骨造建築物、に区分して実施した。

- ・益城町における学会悉皆調査において、新耐震基準導入以降の鉄骨造建築物（219 棟）のうち、倒壊・崩壊が確認されたものが 6 棟あった。このうち 2 棟は不十分な溶接方法又は不適切な柱降伏による層崩壊が要因と考えられるが、それらの対策が解説書等で示される以前（昭和 56 年基準）の建築物であった。残る 4 棟は、隣接建築物や周囲擁壁の衝突や倒壊、地盤の崩落が要因と考えられる。
- 5 益城町における国総研・建研の小規模鉄骨造の被害調査では、対象 96 棟のうち、倒壊 1 棟、大破 15 棟が確認された。この 16 棟の被害要因は、1)旧耐震基準またはその当時用いられていた古いタイプの部材（日の字柱）の使用、2)隣接建築物や周囲擁壁の倒壊等の外的な要因、3)溶接部等での破断 のいずれかまたは複数であり、倒壊した 1 棟は、3)に該当する昭和 56 年基準の建築物であった。
- 10 体育館のうち、被害が大きかった熊本市等の 15 棟（新耐震基準導入以降 5 棟、耐震改修済み 8 棟、耐震診断結果が改修不要 2 棟）の調査を行ったほか、国総研・建研の自治体の体育館の調査、文科省から体育館の調査結果の情報を収集した。鉛直ブレース（ボルト孔欠損部の破断）、屋根支承部（コンクリートの側方破壊、アンカーボルトの破断）、屋根面水平ブレース（接合部ボルトの破断等）、露出柱脚（コンクリートの側方破壊）において被害が見られ、それぞれ被害要因の分析がなされているが、立体トラスの被害（部材の落下）については現時点で原因が明確になっていない。体育館で倒壊・崩壊したものは無かったが、一部では構造耐力上主要な部分の被害や屋根面水平ブレースの被害、非構造部材の被害により、避難所等としての使用ができなかったことが報告されている。
- 15 その他の鉄骨造建築物については、国総研・建研の調査や建築学会の調査で、熊本市内等の建築物に構造耐力上主要な部分の被害が報告されている。

20 3.5 鉄筋コンクリート造等建築物の被害の特徴と要因

国総研・建研が熊本市、宇土市、宇城市など計 13 市町村で実施した調査、益城町の学会悉皆調査及びその他の機関で把握している調査に基づく要因分析を行った。

- ・鉄筋コンクリート造等建築物で倒壊・崩壊が確認された 10 棟は、すべて旧耐震基準の建築物である。
- ・新耐震基準導入以降で上部構造が大破と判定された鉄筋コンクリート造等建築物が 9 棟あった。うち 4 棟はピロティ構造であり、1)鉄筋の溶接継手の品質（1 棟）、2)部分スリットを有する壁のモデル化（1 棟）、3)せん断設計（2 棟）に原因があったと考えられるものであった。2)と 3)については、1997 年に運用の強化がなされているが、これらにはそれが未適用だったと考えられる。その他の 5 棟は、柱および柱梁接合部に大きな損傷が生じ一部の層に大きな残留変位が生じた 4 本柱の建築物（1 棟）および 1 層に損傷が集中して大破と判定された渡り廊下（4 棟）であった。
- 25 耐震改修済みの鉄筋コンクリート造等建築物で、倒壊・崩壊等を生じたものは報告されていないが、構造部材の損傷度の大きいものがあり、耐震診断が行われた渡り廊下で 1 層に 1/5 の残留変形角が生じたものが確認された。
- 30 スリットを有しない鉄筋コンクリート造方立て壁・袖壁やエキスパンションジョイントなど構造耐力上主要な部分として扱われていない部材の被害によって継続使用に影響を与えた事例が報告されている。
- 35 また、建築物の傾斜によって継続使用が困難になった事例が確認されているが、これについては杭の損傷などの可能性が考えられる。

3.6 基礎・地盤の被害の特徴と要因

40 国総研・建研が実施した益城町における調査及び熊本市南区における液状化に関する調査に基づく分析を行った。

- ・益城町における調査（計 145 棟）においては、建築物の敷地や周辺道路に著しい地盤変状を確認し、122 棟の建築物の基礎の被害を確認した。倒壊・崩壊又は大破した建築物について、敷地の地盤変状と基礎の被害との相関は明確ではなく、益城町における建築物の著しい被害は主として地盤変状以外の要因で発生したものと考えられる。
- 45 熊本市南区において、液状化の影響と考えられる建物の沈下・傾斜および地盤沈下が生じていることを確認した。当該地域内の建築物には、沈下・傾斜被害が生じていないものもあったが、建物規模・形状や地盤条件の差違が影響した可能性が考えられる。

3.7 免震建築物の被害の特徴と要因

国総研・建研で熊本市ほかの 12 棟の免震建築物の被害状況を調査し要因分析を行った。

- ・免震建築物は、家具の転倒防止などには一定の効果を発揮したが、12 棟中 5 棟で構造耐力上主要な部分の被害（ダンパー取付け基部の損傷及び外付け階段の損傷）が確認された。これらは、過去の震災の被害調査では報告されていない被害であり、免震材料や架構・部材のモデル化などで構造計算において考慮されていなかった部分があったことによる部材の断面や配筋等の不足によるものと考えられる。
- ・その他、過去の震災と同様に、免震材料の変状やクリアランス部の損傷が見られた。また、通路となる部分のエキスパンションカバー等のゆがみや破損によって被災直後の通行などに支障を生じたものがあった。

10 3.8 非構造部材の被害の特徴と要因

非構造部材の被害については、日本建築学会が熊本県及び大分県で実施した調査並びに国総研・建研が熊本市及び益城町近傍で実施した調査に基づき要因分析を行った。

- ・特定天井の落下は、国総研・建研が内部調査をした建築物 25 件のうち 6 室において確認され、その他自治体体育館等でも被害が報告されている。それらはすべて 2014 年の新基準導入以前の未対策のものである。
- ・被害を確認した天井は、規模、用途等様々であり、単位面積重量が重い天井及び不特定多数の人が使う室での被害も確認されている。被害の要因は、地震時の揺れ、接合部の耐力不足等と考えられる。
- ・益城町では、避難所 14 棟のうち 6 棟が天井材の脱落等により使用できなかった事例が報告されている。
- ・ガラスの被害が比較的新しい構法である D P G 構法で確認されており、ガラスの支持部材に生じた大きな応答が要因と考えられる。
- ・その他、過去の地震と同様、生じた加速度や層間変位に十分に追従できなかったことによる各種の非構造部材の被害が見られる。

4. 調査結果を踏まえた総括

25 本報告の第 2 章（地震及び地震動の特徴）及び第 3 章（被害状況・被害要因等の分析）の調査結果を踏まえ、「建築物の倒壊・崩壊等の防止」の観点を始め、「建築物の被災後の継続使用性」や本委員会で十分な検討を加えられなかった「その他の課題」についても、本委員会の検討結果の総括を各分野の報告から主要な項目を抜粋する形で示す。

30 各項目については、本委員会で直接の目的とする調査あるいは分析の結果に加えて、その対応として今後進めて行くべき検討の方向性についても、一例として下線を付して区別した上で示した。この下線部を参考として委員会設置者である国総研及び建研、また国土交通省においてより具体的な措置の検討がなされること、さらには、その他の関係機関や建物所有者、設計者、技術者、関係業界においても今後の活動に当たって参考にさせていただくことを期待したい。

35 なお、本章の内容は総括であり、第 2 章・第 3 章では各分野に個別の技術的課題も示されている。さらに、本報告に示されるほか、従来より調査研究や検討の対象となっている地震入力や建築物の耐震性能の評価・改善技術などに係る中長期的な対応を要する諸課題についても、熊本地震により得られた情報や知見も踏まえつつ、引き続き検討を推進してゆく必要がある。

4.1 建築物の倒壊・崩壊の防止について

40 木造及び鉄骨造で小規模の建築物を中心に、益城町及びその周辺の被害に基づき検討を行った。また、中規模～大規模な建築物についても、熊本市及びその周辺の被害を含めて検討することで、建築物の倒壊・崩壊等の被害とその要因の検討を行うための適切な情報が得られたと考えられる。

45 熊本地震による建築物被害が生じたのは、地震地域係数が 0.9 又は 0.8 の地域であったが、大きな被害を受けた木造の小規模な建築物については地震地域係数を用いないいわゆる壁量計算などによって設計されていることや、新耐震基準導入以降で倒壊・崩壊した鉄骨造は隣棟の倒壊や不十分な溶接が被害要因と見られることなど、今回の分析の範囲では、地域の被害状況に地震地域係数の影響は確認されなかった。なお、地震地域係数は、過去の地震記録により得られた各地域で予測される地震動の長期的な期待値を勘案して設定されており、そのあり方は中長期的に検討すべき課題であると考えられる。

また、益城町においては、震度 7 が 2 度観測され、熊本地域全体では震度 6 弱以上が 7 度観測された。

このような状況に対し、建築基準法令の構造計算が、これまでの地震被害において余震を含めた複数回の地震動の作用を経験しているという実態を踏まえつつ、極めて稀に生ずるものとして規定された一の地震動又は地震力を用いて構造安全性の検証を行っていることから、現行基準の有効性の検討に関する被害要因分析に当たっては、一連の地震の結果として、調査時点での被害を対象として分析を行うことを基本とした。

4.1.1 木造

- 旧耐震基準（新耐震基準導入以前のものをいう。以下同じ。）の木造建築物については、過去の震災と同様に新耐震基準導入以降の木造建築物と比較して顕著に高い倒壊率であった。必要壁量が強化された新耐震基準は、旧耐震基準と比較して、今回の地震に対する倒壊・崩壊の防止に有効であったと認められ、旧耐震基準の木造建築物については、耐震化の一層の促進を図ることが必要である。
- 新耐震基準導入以降の木造建築物では、接合部の仕様等が明確化された 2000 年以降の倒壊率が低く、接合部の仕様等が現行規定どおりのものは、今回の地震に対する倒壊・崩壊の防止に有効であったと認められる。このため、2000 年に明確化された仕様等に適合しないものがあることに留意し、被害の抑制に向けた取り組みが必要である。
- 大きな被害のあった益城町中心部においても、住宅性能表示制度に基づく耐震等級（構造躯体の倒壊等防止）が 3 のものには大きな損傷が見られず、大部分が無被害であった。このため、木造住宅に関して消費者に向けてより高い耐震性能を確保するための選択肢を示す際には、住宅性能表示制度の活用が有効と考えられる。

4.1.2 鉄骨造・鉄筋コンクリート造等

- 旧耐震基準の鉄骨造建築物及び鉄筋コンクリート造等建築物については、過去の震災と同様に倒壊や大破の被害が見られた。一方、耐震診断及びそれに基づき耐震改修された鉄骨造建築物及び鉄筋コンクリート造等建築物には、倒壊・崩壊の被害は見られなかった。このため、旧耐震基準の鉄骨造建築物や鉄筋コンクリート造等建築物については、耐震化の一層の促進を図ることが必要である。
- 新耐震基準は、今回の地震に対する鉄骨造建築物や鉄筋コンクリート造等建築物の倒壊・崩壊の防止に有効であったと認められる。しかし、柱はり接合部における不十分な溶接方法等により倒壊又は大破した鉄骨造建築物や、下階壁抜け柱が多く存在するピロティ構造でピロティ層が大破した鉄筋コンクリート造建築物が複数確認された。これらに関しては、1995 年兵庫県南部地震後に一連の運用基準が整備されているところである。このため、新耐震基準の建築物については、こうした被害事例やそれに対応した運用基準の周知など、被害の抑制に向けた取り組みが必要である。
- その他、鉄骨造による屋根において、これまでの震災でも見られた屋根支承部の被害などが確認された。これらについては、被害事例や対策方法の周知が必要である。

4.1.3 免震建築物

- 免震建築物は、概ね期待された性能を発揮した。しかし一部に、ダンパーの基部となる鉄筋コンクリート造部材の破壊など、地震時に作用する力が伝達できず、期待する性能が発揮されなくなるおそれのある破壊が見られた。これらについては、被害事例や対策方法の周知が必要である。

4.1.4 非構造部材

- 非構造部材の被害のうち特定天井に該当するものの脱落被害は、全て特定天井の基準を満たさないもので見られた。学校体育館等で落下防止対策として天井の撤去が進められている一方で、多目的ホールなど、用途・機能上必要な天井を設けざるを得ない施設もあり、特定天井について引き続き脱落被害の防止に向けた取り組みが必要である。
- その他、これまでの地震でも見られているようなガラス開口部、外壁パネル、防煙垂れ壁等の非構造部材等の落下が見られた。これらについては、引き続き、設計・施工上の留意事項について周知することが必要である。

4.2 建築物の被災後の機能継続等について

- 倒壊・崩壊防止など構造上の安全性は適切に確保されたが、構造部材や非構造部材等の部分的な損傷により、庁舎、体育館などの避難所、病院、共同住宅等で地震後に継続的に使用できなかった事例が確認された。こうした状況を踏まえ、今回の熊本地震を含む最近の地震被害において建築物の機能が損なわれ、継続的に使用できなかった事例について、その原因を明らかにする必要がある。
- 建築基準法令は、建築物の構造等に関する最低の基準を定めたものであり、今回の熊本地震のような大地震に際し構造部材や非構造部材等において損傷が生じないことや、被災後に継続して使用できることまでを要求しているものではない。したがって、災害時に機能を継続すべき庁舎や、防災・避難・救助等の拠点となることがあらかじめ想定されている施設については、被害を少しでも軽減し、期待される機能が被災後に維持できるようにするための検討を行うことが必要である。
- 共同住宅、事務所等その他の建築物についても、構造部材や非構造部材等の損傷による地震後の継続使用への影響を軽減する観点から、建築主や設計者が余裕のある設計を求める際に活用できる情報の提供等の対応を行うことが望まれる。

4.3 その他の課題

4.3.1 要因分析に至らなかったものの対応

- 益城町内において震源や地震動の特性に起因して局所的に大きな地震動入力があった可能性を評価するための地盤調査等による情報の把握やそれに基づく地震動の検討をはじめ、本報告の第3章（被害状況・被害要因等の分析）において被害や現象が報告されているものの、必要な情報が十分に得られていない等により要因分析に至っていないとされているものについては、引き続き情報収集や詳細な検討が必要である。

4.3.2 今後の調査研究の進捗に応じた対応

- 本委員会の調査時点では情報が得られていない項目について、今後、新たな被害や被害原因の報告があった場合には、必要に応じ被害調査や原因分析を行って適切な措置を講ずることを期待する。