

平成 28 年熊本地震による建築物の被害調査 及び要因分析等の対応

構造研究グループ 上席研究員 井上 波彦

目次

I	はじめに
II	被害調査及び要因分析の結果
	1) 地震及び地震動
	2) 益城町内における悉皆調査
	3) 木造建築物
	4) 鉄骨造建築物
	5) RC (鉄筋コンクリート) 造等建築物
	6) 基礎及び地盤
	7) 免震建築物
	8) 非構造部材
III	まとめと今後の課題
	参考文献

I はじめに

平成 28 年 (2016 年) 熊本地震の発生を受け、国立研究開発法人建築研究所 (以下「建研」) は、国土交通省国土技術政策総合研究所 (以下「国総研」) と連携して前震の発生直後から研究者を現地に派遣し被災状況の把握に努めるとともに、その要因分析を行ってきた¹⁾。現地調査は、表 1-1 に示す国土交通省住宅局指導課よりの要請を受け実施した現行基準の有効性・妥当性の検証のほか、建研の研究課題に関連するデータ等を得るものとして実施している。さらに、これらの調査を進めるに当たって、一般社団法人日本建築学会 (以下「建築学会」) 等が実施している調査を幅広く収集した上で整理・取りまとめを図っている。

なお、これらの結果はすでに建研及び国総研より「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²⁾ 及び「平成 28 年 (2016 年) 熊本地震 建築物被害調査報告 (速報)」³⁾ として公表されており、本報告は主として構造安全性の観点からこれらの既報を元に再構成したものである。

表 1-1 現地調査 (国交省住宅局の要請によるもの)

回	月日	調査対象・区域等
4/14 地震 (前震) 発生 (M6.5)		
1	4/15	初動調査 (熊本市・益城町・南阿蘇村・西原村・山都町)
4/16 地震 (本震) 発生 (M7.3)		
2	4/16	木造 (熊本市・益城町・南阿蘇村)、RC 造 (熊本市・益城町・宇土市・宇城市)
3	4/19	鉄骨造・非構造・設備 (熊本市・益城町・西原村)
4	4/22	基礎・地盤 (熊本市・益城町)
5	4/26	火災 (熊本市・益城町・大津町・御船町)
6	4/26	木造 (益城町・南阿蘇村)
7	4/28	RC 造 (熊本市・益城町・宇土市)
8	4/28	鉄骨造 (益城町)
9	4/29	免震 (熊本市・阿蘇市・山鹿市・大津町)
10	5/19	木造・基礎・地盤 (益城町)
11	5/23	非構造 (熊本市・益城町)
12	6/ 6	RC 造 (熊本市)
13	6/ 8	鉄骨・非構造 (熊本市・宇城市・山都町) (体育館)
14	9/12	非構造 (熊本市・大津町・菊陽町・合志市)

II 被害調査及び要因分析の結果

1) 地震及び地震動

熊本地震の特徴は、内陸の活断層の活動に因ること、震源の近くでは強い揺れに何度も襲われた地区がある（最大震度7が複数回あるいは複数地点で観測された）こと、地表に地震断層が出現したこと、誘発された地震を含めた余震の活動域が九州をほぼ横断する長さを持つこと、が挙げられる。

気象庁の震度計、防災科学技術研究所のK-NETやKiK-netの強震計、および熊本県等の震度情報ネットワーク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^{4~6)}等。これらのうち、代表的な3地点（益城町宮園、KiK-net 益城、西原村小森）における本震の観測記録を、擬似速度応答スペクトルとして過去の被害地震と比較したものを図2-1として示す。なお図中の「BSL(Gs(s)*Z1.0)」は建築基準法に規定する大地震に相当する数値（地盤種別を第2種、地震地域係数を1.0とした場合）を示している。

益城町宮園およびKiK-net 益城では周期1秒付近で大きな値となっている。また、西原村小森の記録は本震時に周期3秒付近の成分が卓越していることがわかる。益城町宮園で観測された本震の記録は、周期0.6秒~1.8秒付近においてJR 鷹取（1995年兵庫県南部地震）の記録を超えていることがわかる。ただし、益城町宮園の観測記録は益城町役場の庁舎1階で得られたものであるため、地盤と建物の動的相互作用の影響によって周辺の地震動（地表）とは異なっている可能性がある。

これらの外部機関による観測に加えて、建築研究所では強震観測ネットワーク⁷⁾を構築しており、東京から西の18の観測地点で強震記録が得られた。震央距離が最も短い宮崎県の延岡県税・総務事務所1階で最大の計測震度5.0（震度5強）を記録したほか、他の九州の観測地点では震度4、中国、四国、関西、そして名古屋では震度2から3、東京周辺では震度1であった。本震の震央及び記録の得られた観測点の位置を図2-2に示す。

2) 益城町内における悉皆調査

熊本地震において建築物の被害が特に大きかった益城町中心部（安永、宮園、木山、辻の城、馬水、寺迫の一部）では、発災直後（2016年5月3日~8日）に日本建築学会による悉皆調査（以下単に「学会悉皆調査」）が実施されている⁸⁾。この学会悉皆調査の総数2,652棟のうち用途が倉庫や神社等のものを除いた2,340棟（木造1,955棟、鉄骨造276棟、RC造52棟、ほか57棟）について、各年代の耐震基準による建築物の被害の全体傾向の把握を目的として、学会悉皆調査及び建研・国総研が実施した建築物

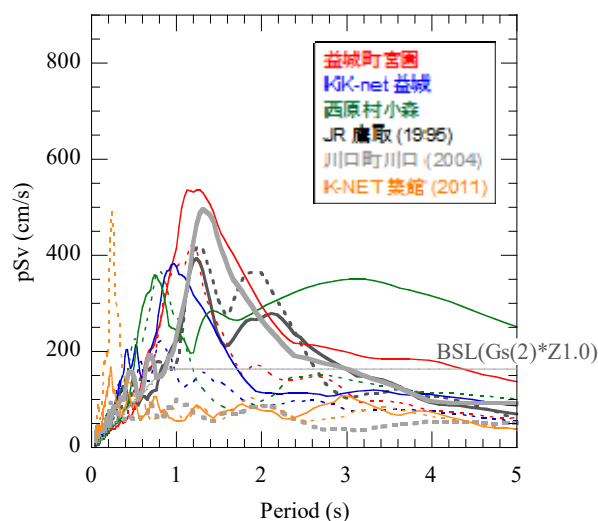


図2-1 本震と過去地震との比較

（減衰5%。破線はNS方向、実線はEW方向を表す）

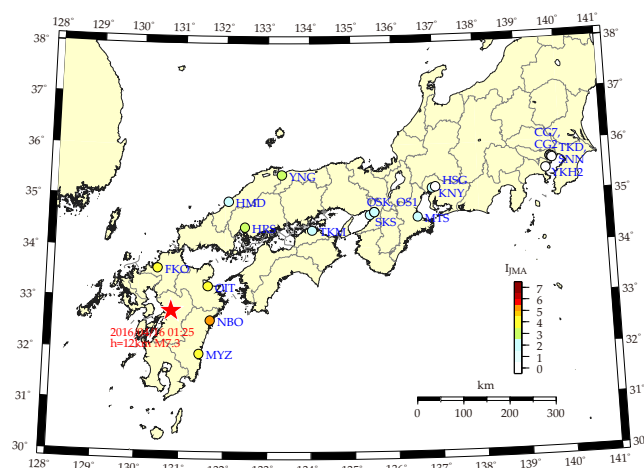


図2-2 震央位置(★)と強震観測地点(○)

被害の詳細調査の情報のほか、建築確認台帳や航空写真等の情報等も用い、構造別・建築時期別の建築物被害状況の整理を行った。なお建築物の被害レベルに関しては、学会悉皆調査にて判断に用いた Damage Grade^{9, 10)}を表2-1の通り読み替えて適用した。

調査エリアにおけるメッシュごとの倒壊率（＝メッシュエリア内の倒壊・崩壊の建築物の数／メッシュエリア内の全建築物数）を図2-3に示す。倒壊率は県道の南側で50%以上のエリアが多く、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倒壊率0%のエリアが多くなっている。

図2-4に国土地理院の治水地形分類図と倒壊建物が存在するエリア（倒壊エリア）との重ね合わせを示す。益城町中心部は県道28号沿いから北側にかけて河岸段丘の段丘面が広がり、秋津川に

近いエリアは旧河道と氾濫平野となっており、倒壊率の大きな区域は段丘面と一致する傾向がみられた。また、国土地理院の地形図に基づき過去の宅地の状況をさかのぼって調査した結果、倒壊・崩壊した建築物の位置は20世紀初頭から住宅地であった地区とよく一致し、1965年以降に開発された比較的新しい地区では倒壊率は小さい傾向にあった。

表2-2に構造別・建築時期別の被害状況の集計結果を、図2-5に木造の年代ごとの被害状況を示す。建築時期については、特に悉皆調査対象の8割以上を占める木造の基準改正を考慮し、新耐震基準が施行された1981年6月と性能規定化に関する改正基準が施行された2000年6月を分岐点として、①：1981年5月以前、②：1981年6月～2000年5月、③：2000年6月以降の3つの建築年代に分類した。なお木造に関しては、新耐震基準では必要壁量の増加が、2000年の性能規定化に基づく基準ではつり合いの良い壁配置の方法や筋かい及び柱脚柱頭接合部の緊結方法等が明確化されている。各構造について建築時期を考慮しない全体の数値に関しては、倒壊・崩壊した棟数は木造が297棟で最も多く、鉄骨造は10棟、RC造は2棟であった。倒壊・崩壊の割合も木造が15.2%で最も高く、鉄骨造が3.6%、RC造が3.8%であった。

表2-1 Damage Grade と建築物の被害レベルの対応

建築物の被害レベル	学会悉皆調査の Damage Grade
無被害	D0
軽微・小破・中破	D1/D2/D3
大破	D4
倒壊・崩壊	D5/D6

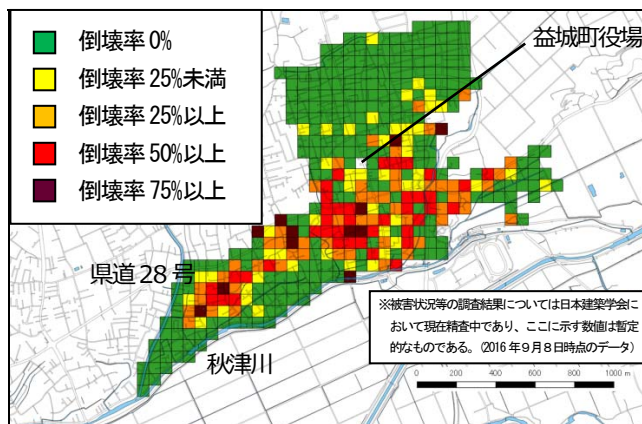


図2-3 倒壊率の分布 (国土地理院地図を編集)

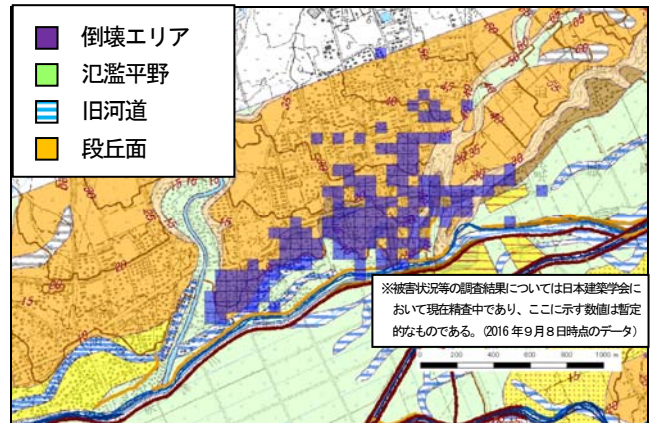


図2-4 治水地形分類図 (国土地理院) と倒壊エリア

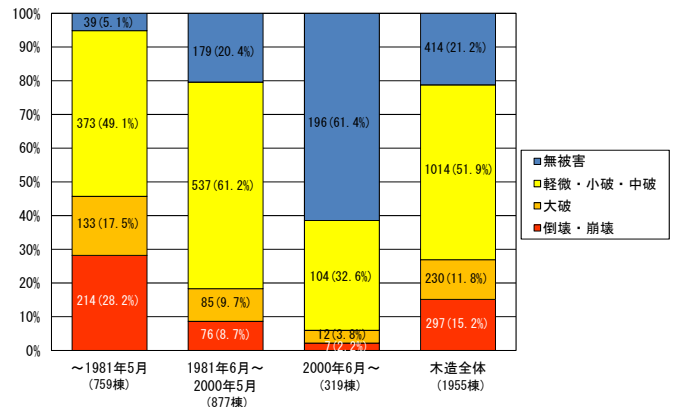


図2-5 木造の建築時期別の被害状況

表2-2 構造別・建築時期別の建築物被害状況

(括弧内の数値は各建築時期における割合 (%) を示す)

構造	被害レベル	建築時期		
		～1981.5	1981.6～2000.5	2000.5～
木造	無被害	39 (5.1)	179 (20.4)	196 (61.4)
	軽微・小破・中破	373 (49.1)	537 (61.2)	104 (32.6)
	大破	133 (17.5)	85 (9.7)	12 (3.8)
	倒壊・崩壊	214 (28.2)	76 (8.7)	7 (2.2)
鉄骨造	無被害	26 (45.6)	83 (54.2)	49 (74.2)
	軽微・小破・中破	22 (28.6)	55 (35.9)	14 (21.2)
	大破	5 (8.8)	10 (6.5)	2 (3.0)
	倒壊・崩壊	4 (7.0)	5 (3.3)	1 (1.5)
RC造	無被害	5 (33.3)	33 (89.2)	0 (0.0)
	軽微・小破・中破	8 (53.3)	4 (10.8)	0 (0.0)
	大破	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
	倒壊・崩壊	2 (13.3)	0 (0.0)	0 (0.0)

3) 木造建築物

①被害の概要と特徴

木造建築物に関しては、震度7を観測し多数の木造建築物が倒壊・崩壊等の被害を受けた益城町、西原村及び報道等で大きな被害の報告された南阿蘇村を中心に調査を行った。その概要は次のとおりである。

- ・益城町については、前出2)の悉皆調査によれば、1981年6月以降(新耐震基準)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く、旧耐震基準の倒壊率は28.2%であった。また、新耐震基準導入以降については、2000年6月の接合部等の基準の明確化(以下「2000年基準」)以降の木造住宅の被害率(2.2%)は、それ以前の被害率(約8.7%)に比べて小さかった。
- ・西原村では、築年数が概ね40年超えの旧耐震基準と推測される木造住宅の倒壊が多く確認された。また、傾斜地において、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、河陽黒川地区に、2階建ての木造アパートが多く存在し、そのうち7棟の倒壊を確認した。これらの木造アパートのうち、柱脚・柱頭、筋かい端部が確認できたものの多くは接合方法が釘打ち程度の比較的軽微な接合方法であった。倒壊した建築物の接合部を写真2-1に示す。
- ・それ以外の地域については、熊本市内及び嘉島町周辺で倒壊・大破の木造住宅を数棟確認したが、これら3地域よりは被害が少ない印象であり、築年数が概ね40年超と推定される木造住宅の被害が多かった。

②新耐震基準の倒壊建築物に関する分析(益城町内)

益城町においては、新耐震以降に建築確認を取得した木造住宅においても倒壊・崩壊したものが見られたことから、特にこれらを中心に構造的特徴を把握すること、及び、各種構造計算による耐震性能を把握することによる被害要因の分析を行った。分析対象とした木造建築物の位置を、悉皆調査の範囲とそれ以外に分けて図2-6に示す。

新耐震基準導入以降の木造住宅で倒壊・崩壊が確認された102棟のうち、接合部の状況等が確認できた木造住宅の全てについて接合部の仕様が不十分と考えられる等の何らかの被害要因が見られた。なお、熊本地震の特徴の一つに、前震・本震の二つの大きな地震が連続して発生した点が挙げられるが、前震で倒壊・崩壊したと考えられる木造住宅は、悉皆調査エリア内で35棟確認された。その中には2000年基準の木造住宅は存在せず、新耐震基準で

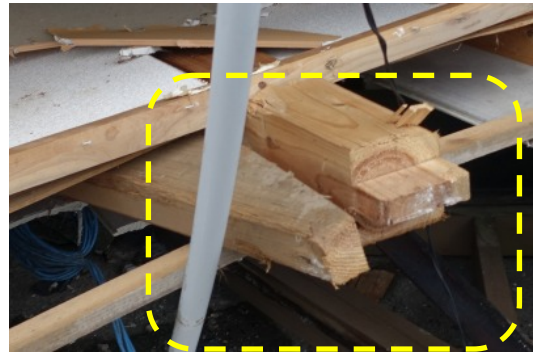


写真 2-1 倒壊建物の柱頭部(柱脚、筋かい端部は釘打ちのみ)

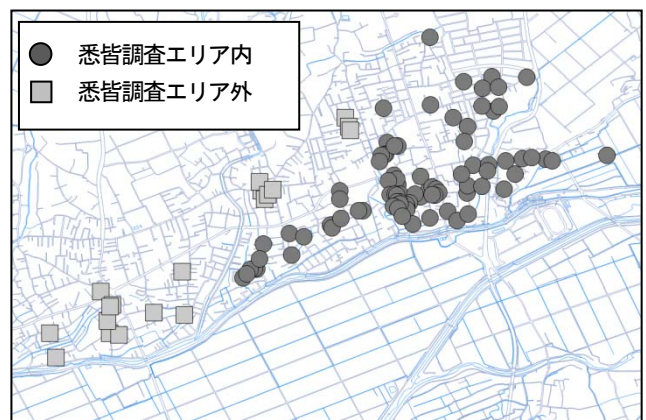


図 2-6 分析対象の木造建築物の位置(国土地理院地図を編集)

表 2-3 木造建築物の被害要因となり得る主な構造的特徴

仕様規定不適合、既存不適格の可能性	筋かい端部の金物が釘打ち程度
	筋かい端部の金物の施工が不適切
	柱脚・柱頭の接合方法が釘打ち・かすがい程度
	柱脚・柱頭のコナシが存在するが不十分
	柱脚・柱頭のコナシの施工が不適切
上記以外の要因	壁量不足
	2階の床面積が極めて小さい
	隣の建物の衝突
	増築・改築の影響
	鉄骨梁等により重量が重い
	生物劣化
平面不整形(構造体分離)	

それ以前の木造住宅が5棟あった。この5棟については、不十分な接合部の仕様、隣接建築物の倒壊等が倒壊・崩壊の主な要因の一つであったと推定される。

木造建築物における主な被害要因として抽出した構造的特徴を表2-3に、そのうち倒壊等の被害に特に影響の大きいと考えられる筋かい・端部接合部及び柱頭柱脚接合部の仕様の状況を図2-7に、それぞれ示す。

さらに、悉皆調査エリアでは、2000年基準の木造住宅319棟のうち7棟(約2.2%)の倒壊が確認されており、これらについて入手した図面等による原因分析を行った。

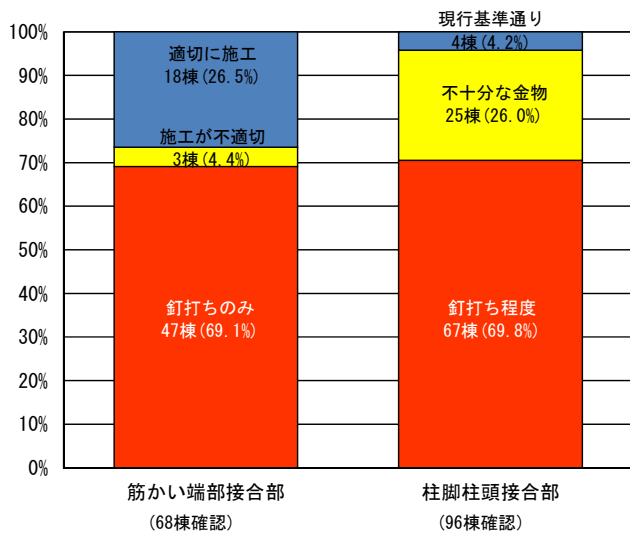


図2-7 筋かい・端部接合部と柱脚柱頭接合部の仕様の状況
(状況を確認できたもののみを対象とした集計)

2000年基準の木造で倒壊した7棟のうち被害要因となり得る特徴の見られなかった3棟を対象として構造計算や応答解析により分析を行ったところ、以下の結果を得た。なお骨組のモデル化、増分解析及びそれに基づく限界耐力計算や時刻歴応答解析については、国総研において公開されている木造住宅用の数値解析プログラム wallstat¹¹⁾ を用いて実施した。

- ・建築基準法施行令第46条及び品確法(住宅の品質確保の促進等に関する法律)に基づく評価方法基準による壁量計算では、分析対象の3棟と無被害の木造住宅で明確な差は見られなかった。
- ・許容応力度計算では3棟のうち1棟で検定比が1を超えるもの(規定を満たさないもの)があり、建物重量が大きかったことが原因と考えられる。
- ・保有水平耐力計算、限界耐力計算では、耐力壁以外の耐震要素を考慮すると、3棟全てについて保有水平耐力、損傷・安全限界変形角は基準を満たす結果となった。
- ・より実際の状況を反映した検討として、実態重量を考慮した上で地震動について建築物周辺での観測記録を用いて解析を実施した。3棟のうち1棟はKiK-net 益城の近隣にあり、同観測点

の記録を入力とした場合には倒壊しない結果となった。この建築物の周辺は他と比較して倒壊率が低い地域のため、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。

残りの2棟に関しては、その2棟に近傍で被害が軽微だった住宅1棟を加えて同様な解析モデルを構築したところ、被害の軽微な建築物では垂れ壁・腰壁等の影響で他の2棟の解析モデルに比べて剛性・耐力が大きくなっており、互いに近い距離にあるこれら3棟に入力された地震動が同等であったと仮定した場合には、こうした耐力壁以外の耐震要素の存在が被害状況に影響した可能性が考えられる。

4) 鉄骨造建築物

鉄骨造建築物に関しては、①益城町における調査、②学校体育館の調査③その他の鉄骨造建築物の調査の3つの被害調査を行った。なお被害の判定は文献¹²⁾に基づいている。

①益城町における調査

益城町における調査では、益城町宮園観測点を中心とした地域(安永・宮園・木山・辻の城・寺迫地区)において96棟の鉄骨造建築物の被害調査を行った。調査対象のうち平家は28棟(29.2%)、2階建てが59棟(61.5%)で、大半が小規模の建築物であった。被害調査を行った地域と建築物の位置を図2-8に示す。調査の結果、倒壊は1棟(1.0%)、大破は15棟(15.6%)であった。これらの計16棟においては、被害の要因となり得る次の特徴のいずれかが見られた。倒壊又は大破した建築物とこれらの特徴との対応関係を表2-4に示す。なお建築物の番号に*印が付いているものは、新耐震基準(1981年6月施行)以降の建設年と判明しているものである。

- 特徴1) 建設年が1980年以前と推定されるもの又は古いタイプの部材(日の字断面の柱)を用いたもの
- 特徴2) 隣の倒壊した建築物による力の作用、宅地擁壁部分の崩壊等の当該建築物以外の周辺状況による何らかの影響があったと推定されるもの
- 特徴3) 溶接部等で破断が生じていたもの

大破した建築物(建築物01)において見られた接合部(パネル・ダイアフラムの溶接部)の被害(破断)状況を写真2-2に示す。

②学校体育館の調査

鉄骨造建築物は、大空間の架構を容易に構成することができる構造として用いられることが多く、ここではその代表として学校体育館等(市民体育館も含む。以下単に「学校体育館」という)



図 2-8 調査地域及び建築物位置（濃色は倒壊・大破を示す）

表 2-4 倒壊した建築物と被害の特徴

（建築物 01 が倒壊、残りは大破。番号は速報³⁾ と対応）

建築物	01*	02	03	04	05*	06*	07	08
特徴 1		○	○	○			○	○
特徴 2					○			
特徴 3	○	○				○	○	
建築物	09*	10*	11*	12*	13*	14*	15*	16*
特徴 1				○	○			
特徴 2		○	○				○	
特徴 3	○	○		○		○		○



写真 2-2 倒壊した鉄骨造建築物の接合部の被害状況

について被害調査を行った。調査対象は、事前の熊本県及び熊本市からのヒアリング調査の情報に基づいて 15 棟を選定した。建設時期については、新耐震基準に基づくもの 5 棟、耐震改修済み 8 棟及び耐震診断の結果補強不要と判断されたものが 2 棟であった。

これらの学校体育館の調査から得られた被害形態とその特徴は次の通りである。これらのうち i～iii は 2011 年東北地方太平洋沖地震等の地震でも見られたもので、最後の被害形態 iv はこれまでの地震ではほとんど観察されなかった被害である。

- i) 鉛直ブレースの被害：耐震改修により取り替えられた平鋼ブレースでボルト孔欠損部等での破断の被害が見られた。一方で、新耐震基準に基づき設計された体育館のターンバックル付き丸鋼ブレースでは、ブレースの大きなたわみ、変形、伸びが観察されたが接合部等では破断していなかった。
- ii) 屋根面水平ブレースの被害：ボルト等の破断の被害が数棟で観察されたが、これらの中には 20 か所以上でボルト破断が観察されたものもあった。これらのブレースはいずれも、耐震改修以前のブレースがそのまま残されていたものであった。
- iii) 屋根支承部の被害：RC 架構とトラスの屋根の接続部（支承部）で、コンクリートの側方破壊とコンクリート片の落下、ひび割れが見られた。写真 2-3 に被害状況を示す。
- iv) 屋根トラスの被害：RC 架構に立体トラスの屋根が接続された 2 棟の体育館で、立体トラスを構成する部材のたわみ、破断、座屈、落下等の被害が見られた。写真 2-4 に被害状況を示す。



写真 2-3 屋根支承部のコンクリートの側方破壊

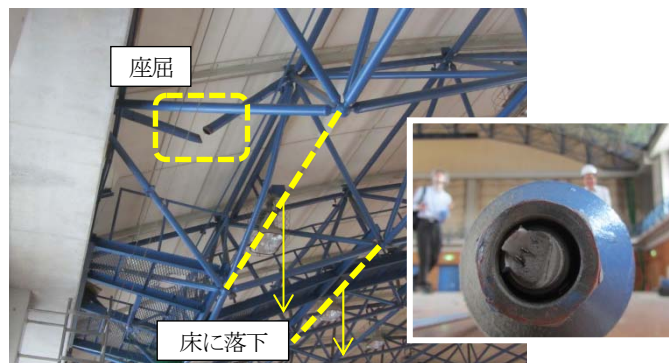


写真 2-4 立体トラスの被害（座屈部材及び落下部材の端部）

③その他の鉄骨造建築物の調査

熊本地震の発災直後に、鉄骨造建築物の全般的な構造被害の把握と、被害原因や詳細調査の必要性等について検討することを目的として、熊本市内等での比較的大きな規模の鉄骨造建築物や益城町で大きな被害が生じたものを対象として調査を実施した。

この調査の結果、熊本市内の立体駐車場の構造的な被害として、溝形鋼ブレース端部とブレース交差部のガセットプレート部分で座屈の被害が観察された。また、塔屋のブレースが破断している被害も観察された。西原村の工業団地では、外装材の一部が落下している工場建築物がいくつか見られたが、外観からは構造的な被害は確認されなかった。これらの建築物の被災度は、中破程度以下のものであり、大破に相当する大きな構造被害は観察されなかった。

5) RC (鉄筋コンクリート) 造等建築物

鉄筋コンクリート造及び鉄骨鉄筋コンクリート造（以下合わせて「RC造等」）建築物については、国総研・建研が地方自治体や報道等による被害情報に基づき、熊本市、宇土市、宇城市、八代市、人吉市、益城町、菊陽町、大津町、御船町、氷川町、嘉島町、西原村、南阿蘇村の地域で、建築物の倒壊や構造部材、非構造部材の被害を受けた建築物84棟について調査を行った。その結果、1981年の新耐震基準導入以降の建築物では大破に至ったものは報告されなかった。調査結果について、特に現行の基準・指針類との対応として、被害状況とその特徴を①新耐震基準のRC造等建築物及び②耐震改修されたRC造等建築物の2種類に分類して示す。なお被害の判定は文献¹²⁾に基づいている。

①新耐震基準以降のRC造等建築物の被害状況

- ・下階壁抜け構造（ピロティ構造）部の柱が曲げ・せん断・軸応力により損傷し、大破と判定された事例が3棟確認された。写真2-5に被害状況を示す。
- ・部分崩壊形となる純ラーメン架構の中間層に過大な残留変形が生じた事例が1棟確認された。柱梁接合部の損傷も確認された。
- ・杭基礎部の被害に起因すると考えられる建築物の傾斜が4棟確認された。このような被害は2011年東北地方太平洋沖地震でも確認されている。
- ・構造部材、非構造壁やエキスパンションジョイントおよびその周辺部の損傷により、地震後の継続使用性が阻害される事例が確認された。写真2-6に被害状況を示す。

②耐震改修されたRC造等建築物の被害状況

- ・耐震改修された建築物3棟において、建築物の損傷が大きい事

例が確認された。また、上部構造物の損傷は小さいものの、基礎構造の被害などにより継続使用性が阻害された事例も1棟確認された。写真2-7に杭の被害状況を示す。

2011年東北地方太平洋沖地震においても耐震改修されたRC造建築物の構造部材の被害が確認されているが、同じ被害パターンであるかは検証が必要である。



a) 柱頭部主筋の座屈・破断 b) 付着割裂破壊

写真2-5 ピロティ柱の被害状況



写真2-6 桁行き方向バルコニー側の方立て壁の被害状況



写真2-7 既製コンクリート杭頭部の損傷

6) 基礎及び地盤

基礎及び地盤に関する調査として、①益城町の被害調査及び②熊本市南区の液状化被害の目視踏査を実施し、その調査結果に基づく分析を実施した。

①益城町の被害調査

益城町中心部では、県道 28 号からの南北方向の距離に応じて、建築物及び地盤の被害程度に差異が見られるとの報告があった。そこで、被害状況を把握するために、益城町内を南北方向に通る 2 本の道路を抽出し（安永地区：A 通り、宮園地区：B 通り）、道路沿いの建築物に対して、基礎・地盤の地震被害に重点を置いた被害調査（以下、「通り悉皆調査」）を実施した。調査範囲を図 2-9 に示す。

調査の結果得られた被害形態の特徴を次に示す。

- ・宮園地区の県道 28 号の北側では、地形の関係上、盛土擁壁で宅地を造成している物件が多いが、県道 28 号に近づくにつれて、建築物被害及び盛土擁壁の被害が大きくなる傾向が見られた。写真 2-8 に盛土擁壁の被害状況を示す。
- ・安永地区、宮園地区共に、県道 28 号の南側では北側よりも建築物の被害が数多く見られた。
- ・県道 28 号の南側で見られた大破・倒壊の建築物において、地盤変状と基礎の損傷が共に認められる事例（写真 2-9）、及び地盤変状が認められるものの基礎の損傷が小さい事例が見られた。

1981 年以降の建築物を対象に、図 2-9 に示す A1～B4 の区分ごとに建築物大破以上の被害率、基礎被害顕著の割合、地盤変状ありの割合をそれぞれ算出し、比較したものを図 2-10 として示す。なお判定等については表 2-5 に基づき実施した。

建築物大破以上に対する基礎被害顕著の割合との関係については、建築物大破以上の割合が増大するほど基礎被害顕著の割合も増大するが、ほとんどは建築物大破以上＝基礎被害顕著の場合（45° の直線）より下側となっており、被害率の観点からは基礎の損傷が建築物の被害に及ぼした影響は大きくないと言える。また、建築物大破以上に対する地盤変状ありの割合の関係については、基礎被害顕著の場合と同様に、建築物大破以上の割合が増大するほど地盤変状ありの割合も増大するが、その増加量は小さい。また、建物大破以上の割合が小さい場合でも地盤変状ありの割合は約 40%以上となっていることから、建築物の被害に関係なく地盤変状が現れていることが分かる。さらに、基礎被害顕著の割合は地盤変状ありの割合より小さくなっていることから、地盤変状が生じて基礎の損傷が生じにくいことを示していると考えられる。

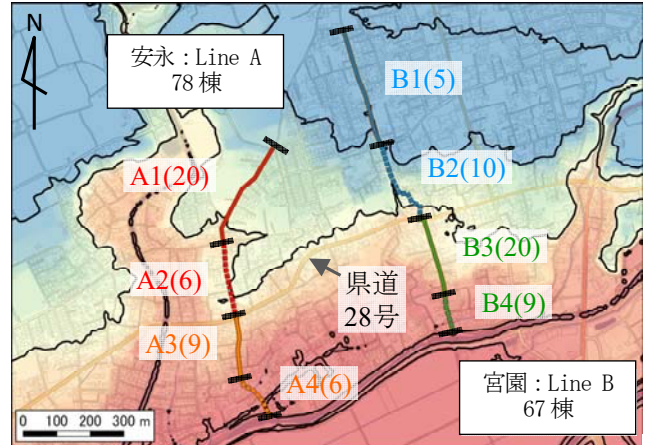


図 2-9 調査対象道路及び調査棟数(括弧内は 1981 年以降の棟数)
(背景地図：国土地理院基盤地図情報を使用)



写真 2-8 盛土擁壁の被害 (図 2-9 の B1 地域)



写真 2-9 地盤変状と基礎の損傷が共に見られた被害

以上のことから、この地域の建築物に対して、建築物に大破等の甚大な被害を生じさせた外力要因として地盤変状の影響は小さく、振動が主要因であった可能性が高いと考えられる。

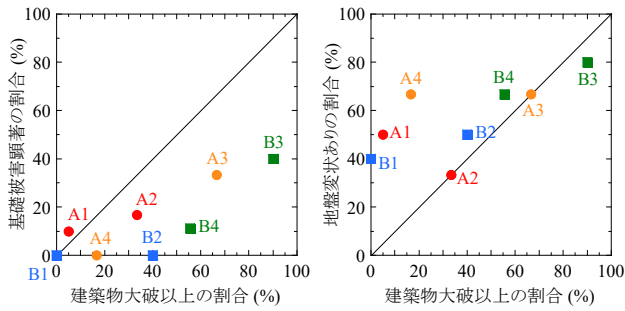


図 2-10 建築物被害と基礎及び地盤の被害の比較

表 2-5 被災度判定のクライテリア及び方法

項目	クライテリア	方法
建築年	—	外観目視、悉皆調査
用途、構造種別、階数、基礎形式	—	外観目視、ヒアリング、悉皆調査
沈下、傾斜	無/有	外観目視、傾斜計等
上部構造の被災度	文献 ⁹⁾ による	外観目視
基礎の被災度	無/軽微/部分的 /顕著/不明	外観目視
地盤変状の程度	無/軽微/顕著/ 不明	外観目視



写真 2-10 3階建て商用建築物の沈下・傾斜



写真 2-11 建築物の周辺地盤の沈下

②熊本市南区の液状化被害の現地踏査

地震発生直後に報道された情報や東京電機大学地震・地盤工学研究室による被害調査報告¹³⁾に基づき、液状化被害が報告された熊本市南区近見地区及び刈草地区について現地調査を実施した。

液状化被害調査についての特徴を以下に示す。

- ・液状化被害は南区で広く見られるが、液状化による地盤沈下量には地域差が見られた。なお、液状化による地盤沈下量の大小の原因は不明である。
- ・液状化により倒壊・崩壊に至った事例は見当たらなかった。

液状化によると思われる建築物の被害状況を写真 2-10 及び写真 2-11 に示す。

7) 免震建築物

免震構造に関しては、大地震時の挙動や地震後の被害状況を把握するために、熊本県内の免震建築物を対象として①被害状況に関する現地調査、②地震動特性に関する検討、③免震挙動に関するアンケート調査の3つを実施した。

①被災状況に関する現地調査

現地調査は、本震の震源周辺の地域として熊本県内の免震建築物（10 物件 12 棟）を対象に行った。これらの位置とその近傍の地震観測点を合わせて図 2-11 に示す。調査対象は過去の大臣認定等における性能評価やウェブで公開されている建築物情報に基づき抽出したものである。なお、把握している範囲では、熊本県内にはこれ以外も含めて 20 数棟の免震建築物が存在している。各免震建築物について、最寄りの観測点において計測された本震の震度は、建築物 A（阿蘇市）が 6 弱、建築物 D（山鹿市）が 5 弱、それ以外（熊本市中央区及び菊池郡）が 6 強であった。

今回の地震における免震建築物の被災状況としては、次のような特徴が見られた。なお、調査時に実施したヒアリング及び後述するアンケート調査によれば、ほとんどの使用者・管理者はこれらの被災状況に対しても上部構造に期待する免震性能は発揮されたと感じていると考えられる。

- (i) ダンパーの基部の損傷（建築物 C・I）

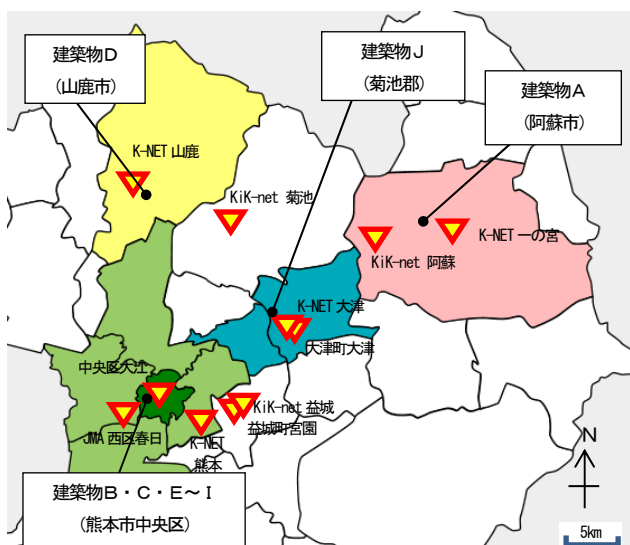


図 2-11 現地調査建築物 (A~J) 及び地震観測点 (▽) 位置

- (ii) 外付け階段の損傷 (建築物G・H)
- (iii) 免震材料の変状 (多数)
- (iv) クリアランス部の変状 (多数)

・被害 i 及び ii は、構造耐力上主要な部分に関する損傷であり、過去の震災調査では報告されたことのないものである。これらの要因はいずれも、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から地震時の免震層の応答変形及びそれに伴って生ずる曲げやせん断等の応力に対して周囲のより等の部材の配置、損傷部位の配筋などについて適切な設計が行われなかったことが考えられる。写真 2-12 に被害 i の状況、図 2-11 及び写真 2-13 に被害 ii の状況をそれぞれ示す。

・被害 iii は、鋼材ダンパーの屈曲部の残留変形や塗料の剥がれ、積層ゴム支承のカバーのずれ・脱落やゴム部分の膨れなどである。これらの要因は、地震時に免震材料に生ずる一方向又は繰返しの変形と考えられる。なお、今回の地震においては性能評価の範囲を超えるような著しい変形が作用したものはないと考えられる。写真 2-14 に鋼材ダンパーの変状を示す。

・被害 iv は、免震建築物が免震効果を発揮するために周囲や免震層内に設けられたクリアランス部において見られた変状である。免震建築物のクリアランス部には居住者や利用者の通行のためのエキスパンションジョイントや、逆に誤って人が立ち入ることによる危険 (落下・挟まれ等) 防止のための措置として柵やカバーが設置されることが多い。被害はこうした部分を中心に生じており、建築物の応答に合わせて可動するように設計され



写真 2-12 ダンパー基部及び接合部 (定着) の被害

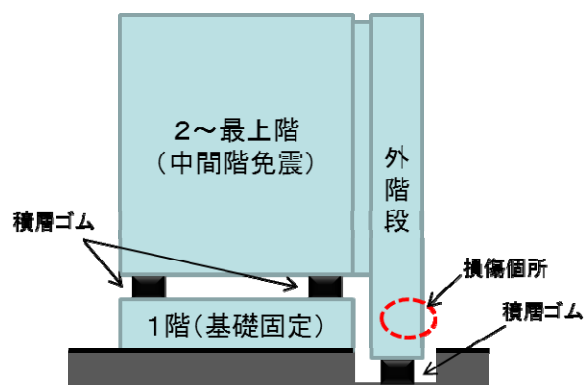


図 2-11 中間階免震の概要及び階段損傷箇所



写真 2-13 外付け階段の被害

るが実際には想定したとおりの挙動をしなかったことや、設計者・管理者等が地震時の免震層の可動範囲や動きの影響を適切に想定できなかったことが主な被害の要因と考えられる。その他、今回の調査の範囲では、損傷する前提で設計されているがその後の継続使用にあたって支障となる (通常は予想外の) 大きな損傷に至ったものなどがあつた。なお、こうしたクリアランス部の被害によって地震時の免震性能の低下などの影響が生



写真 2-14 鋼材部分の残留変形 (破線は原位置) と塗装のはがれ



写真 2-15 配管用吊りボルトの変形

ずることはなかったと考えられる。

写真 2-15 は免震建築物と周囲の擁壁との間 (クリアランス部) に設置された配管用の吊りボルトが免震層の応答によって擁壁に接触し、ボルト軸部の残留変形を生じたものである。写真手前側の同様の吊りボルトは建物側に近接して配置されているため変状は生じていなかった。このように、構造設計と設備設計など実務上の情報共有が不十分と思われる事例も見られた。

②地震時特性に関する検討

各建築物の近傍の観測点のうち5地点 (K-NET 一の宮、JMA 西区春日、中央区大江、K-NET 山鹿及びK-NET 大津) での本震の地震記録を用い、減衰 20%とした変位応答スペクトルを免震層の応答変位の予測値とした検討を実施した。

予測値と比較を行ったのは、罫書きによる応答変位の実測値 (4棟) 及び計算書等から得られた設計変位 (応答変位の推定値) (罫

書きを設置している4棟を含む8棟) である。検討の結果、免震層の応答変形の予測値は、実測値あるいは推定値と厳密には一致しないものの一定の対応が見られた。

また、各建築物について把握した地震時の変位は、震度5弱と観測値が小さかった K-NET 山鹿の近傍の建築物D (山鹿市) を除き、設計時において想定した免震層の変位とほぼ等しいかやや小さめの値であり、したがって調査建築物には2次設計レベルの地震力 (極めて稀に発生する地震に対応) が作用したものと考えられる。

③免震挙動に関するアンケート調査

現地調査を実施した熊本市中央区内の3棟 (建築物C・G・I) と、その他に八代市の免震建築物 (建築物Kとする。最寄りの観測点における震度は5強) 1棟の計4物件で、居住者に対するアンケート調査を実施した。表 2-6 にアンケートの回答数を示す。

表 2-4 建築物ごとのアンケート回答数

	建築物C	建築物G	建築物I	建築物K
最寄震度	6強	6強	6強	6強
回答数	39	10	64	16

アンケート結果に基づく主な分析を以下に示す。

- ・地震時に居住者が感じた震度は、前震より本震の方が大きい傾向を示した。
- ・4棟中1棟 (建築物G) では70%以上の、他の3棟では90%以上の居住者が、免震建築物について「一般の建物と比較して耐震性に優れている」と答えた。ただし、恐怖感や不快感については「まったくない」「あまりない」より「すこしあった」「かなりあった」とした回答が多く、いずれの建築物においても、本震時には半数以上の居住者が恐怖感を「かなりあった」と答えた。
- ・室内の揺れの状況として、吊り下げ物の落下があったとした回答は4棟すべてで10%以下であった。食器類について落下があったとした居住者は、4棟中1棟 (建築物G) では50%を超えていたが、他の3棟ではほとんどいなかった。

8) 非構造部材

非構造部材に関しては、報道、事前の聴き取り等や自治体 (熊本県及び熊本市) への確認によって非構造部材の被害状況を把握した。調査建築物の所在地は熊本市、宇城市、大津町、益城町、

御船町、山都町、菊陽町、高森町であり、調査行程上でも建築物の外観から調査を行った。内部調査を行った対象は、学校等体育館15件、音楽等用ホールを有する施設5件、運動施設4件、病院、商業施設、行政庁舎が各2件、学校校舎、展示用ホールを有する施設、美術館、空港旅客ターミナル、共同住宅が各1件である。

これらの調査の結果、非構造部材の被害の特徴は建築物の部位ごとに以下のようにまとめられる。

- ・吊り天井に関しては、特定天井の条件（現行の建築基準法施行令第39条第3項に規定される①6m超の高さにあり②水平投影面積200㎡超③質量2kg/㎡超）に該当する天井における被害を6棟6室で確認した。これらはいずれも特定天井に関する技術基準制定以前のものであり、野縁等を用いたいわゆる在来工法によるものが多く、また、単位面積重量の大きなラスモルタル天井の被害も見られた。被害状況を写真2-16に示す。特定天井以外で被害のあった天井は、いわゆる在来工法による天井やシステム天井も見られ、一般的な室や廊下以外だけでなく、特定天井の要件に対して、天井高さはあるが面積が基準値に満たないもの、面積はあるが全体的あるいは部分的に天井高さが基準値に満たないもの、などが見られた。
- ・ガラス開口部に関しては、サッシ窓では以前から被害が確認されている硬化性パテどめのガラス窓だけでなく、弾性シーリングのガラス窓についても、はめころし窓のガラス破損、引違い窓のガラス破損や障子脱落、窓サッシの損傷・外れ、など、様々な形態の被害が確認された。また、全面ガラスの開口部では、以前から地震被害が確認されている店舗前面に用いられる大判ガラスの損傷や、過去の地震や今回の地震で被害報告があまり見られない板ガラスを点支持する構法（DPG構法）のガラスの損傷・脱落が確認された。DPG構法における被害状況を写真2-17に示す。
- ・内装に関しては、比較的高所の仕上材の損傷・脱落、ブロックを用いた壁の損傷・傾斜、鉄骨屋根支承部のコンクリートの損傷・脱落、自立したコンクリート壁の傾斜・転倒などが確認された。
- ・外装に関しては、比較的古い鉄骨造に用いられた湿式工法や乾式構法の外壁の被害や、鉄筋コンクリート造建築物の下地コンクリートの損傷に伴う外壁タイルの損傷・脱落、横づかいしたALCパネル外壁での壁の傾斜や天井面レベルでのパネルの脱落、PCパネルの損傷、などが確認された。



写真2-16 特定天井の条件に該当する吊り天井の被害



写真2-17 DPG構法によるガラス窓の被害（脱落）

III まとめと今後の課題

前節に示す通り、熊本地震に対する建築構造基準に関連する各種の項目（地震及び地震動、益城町における悉皆調査、木造、鉄骨造、RC造等、基礎及び地盤、免震建築物、非構造部材）について検討を行った。その結果を現行基準の要求性能及びその妥当性の観点からまとめると次のとおりである。

1) 全体的な被害の傾向について

- ・現行規定による、あるいは耐震改修を行った建築物は、適切に倒壊防止性能を確保することができた。
- ・新耐震基準より前の建築物、あるいは現行規定の主旨が徹底できていない建築物については、倒壊・崩壊等の甚大な被害につながったものがあつた。（例：鉄骨造における接合部、RC造等のピロティ構造における設計）

これらの項目については、引き続き現状の研究活動を継続し、解説書等を通じて新築・改修・補強の各段階における適切な設計の周知・普及に努める必要がある。

2) 木造建築物について

- ・旧耐震基準では多数が倒壊するなど大きな被害を受けた。
- ・新耐震基準以降であっても2000年改正（現行規定）を境に被害

状況に差が見られた。

- ・ 悉皆調査の結果、現行規定によるもので倒壊・崩壊に至った建築物が7棟あり、被害の拡大につながる要因を検討した。(例：柱頭・柱脚・筋かい端部の不適切な金物等、重量の重い仕様、平面不整形・立面不整形・増改築、地震動そのものの大きさ)

これらの要因については、安全性に及ぼす影響を評価し、適切なルール(仕様規定・計算規定)を検討の上、周知・普及に努める必要がある

- ・ さらに、上記の被害要因のうち地震動については、益城町内における詳細な地盤調査を行って地震動を精査し、倒壊解析など詳細な検討につなげる必要がある。

3) 木造以外の分野について

- ・ 鉄骨造及び非構造部材に関連して、これまでの震災では報告されなかった被害として、体育館における鉄骨造屋根(支承部を含む)や大判ガラスによる外装パネルの脱落など、場合によって大きな被害につながるものが考えられるものが見られた。
- ・ これらについては、脱落を生じた要因の分析を行い、既存対策(改修・補強・除去)も含め被害防止に必要となる適切なルールについて検討する必要がある。

4) 建築物の機能継続について

- ・ 避難所や共同住宅において、構造安全性は確保されたが、被害の影響で地震後に想定した使用の継続が困難となる事例が見られた。
- ・ RC造等建築物に関して、耐震補強を行ったものでも、大破に至ったものが見られた。
- ・ 機能継続に影響した被害は、構造体の被害のほか、内装材・外装材・非構造壁等の被害傾斜等の被害も含まれており、今後は被害分析に基づく被災後の継続利用の阻害要因の分析を通して災害時の要求性能及びその確保に必要な留意事項、さらに留意事項を満足するための適切なルールについて検討する必要がある。

なお、本報告の冒頭で、建研及び国総研は「熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会」を設置し、検討内容に外部有識者の意見も反映するように努めてきたと記載した。この委員会は、建築構造の専門家、建築設計や建築審査の実務者を委員とし、幅広く収集・整理した建築物被害調査の情報を基に専門的、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。同委員会の報告²⁾の取りまとめにあたり根幹には建研及び国総研による被害調査報告¹⁾の内容が活用され、国土交通省

は、委員会の結論を踏まえて、建築基準のあり方を含め、建築物における耐震性の確保・向上方策について検討を行うこととしており、すでに資料として公表¹⁴⁾されている。まとめ1)～4)と重複する部分もあるが、これを引用して示す。

熊本地震における建築物被害の原因分析を踏まえた主な取組方針

1. 倒壊等防止のための取組方針

- 現行の耐震基準※については、有効性を確認。
これをさらに強化するのではなく、既存ストックを含め、現行基準が求める耐震性能の確保を目指す。
※昭和56年に導入された新耐震基準(木造は平成12年に接合部等の仕様を明確化)
 - ①旧耐震基準の建築物について、耐震改修、建替え等の促進。
 - ②新耐震基準の建築物について、接合部の重要性を踏まえ、以下の対策を実施。
 - ・ 既存の木造住宅について、平成12年以前のものを中心に、リフォーム等の機会をとらえ、同年に明確化した仕様に照らして、接合部等の状況を確認することを推奨(効率的な確認方法を年度内目途にとりまとめ)。
 - ・ 接合部について、適切な設計・施工がなされるよう、関係主体に注意喚起。
 - ③平成26年に新たに基準を設けた特定天井について、耐震改修等の促進。

2. 機能継続(使用し続ける、住み続ける)のための取組方針

- 建築基準法の遵守に加え、建築物に対するニーズに応じて、より高い性能の確保を目指す。
 - ①防災拠点の機能継続にかかるガイドラインをとりまとめ、必要な対策が講じられるよう周知・支援。
 - ②消費者がより高い耐震性能の住宅を選択できるよう、住宅性能表示制度の普及を推進。

建研は、国総研と連携して国土交通省の検討を技術的に支援するとともに、引き続き、関連する調査研究活動に積極的に取り組んでいく所存である。

【参考文献】※URLについては全て平成29年1月閲覧

- 1) 国立研究開発法人建築研究所：平成28年(2016年)熊本地震関係特設ページ，<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/2016/index.html>
- 2) 国土技術政策総合研究所：「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, 2016. 9, <http://www.nilim.go.jp/lab/hbg/0930/report.htm>
- 3) 国立研究開発法人建築研究所:平成28年(2016年)熊本地震建築物被害調査報告(速報), 建築研究資料No.173/国総研資料No.929, 2016.9
 - 4) 国立研究開発法人防災科学技術研究所:強震観測網(K-NET, KiK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>
 - 5) 気象庁:強震波形(熊本県熊本地方の地震), http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/1604160125_kumamoto/index.html
 - 6) 気象庁:地方公共団体震度計の波形データ, http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/1604160125_kumamoto/index2.html
 - 7) 国立研究開発法人建築研究所:強震観測網(国際地震工学センター), <http://smo.kenken.go.jp/ja>
 - 8) 菊池健児, 田中 圭:益城町の悉皆調査, 2016年熊本地震災害調査報告会資料, 2016年度日本建築学会大会(九州)災害部門緊急報告会, 2016.8
 - 9) 岡田成幸, 高井伸雄:地震被害調査のための建物分類と破壊パターン, 日本建築学会構造系論文集, 第524号, pp.65-72, 1999.10
 - 10) 高井伸雄, 岡田成幸:地震被害調査のための鉄筋コンクリート造建物の破壊パターン分類, 日本建築学会構造系論文集, 第549号, pp.67-74, 2001.11
 - 11) 国土技術政策総合研究所:木造住宅 倒壊解析ソフトウェア wallstat, <http://www.nilim.go.jp/lab/idg/nakagawa/wallstat.html>
 - 12) (一財)日本建築防災協会:震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 2016.3
 - 13) 東京電機大学理工学部理工学科地震・地盤工学研究室HP, <http://yasuda.g.dendai.ac.jp/>
 - 14) 国土交通省:第23回建築物等事故・災害対策部会 配布資料(資料1-2), http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/house05_sg_000205.html