

2016年熊本地震と免震構造*

免震構造の地震時の挙動と利用者の声

森 田 慶 子**
高 山 峯 夫**

The Performance of Seismically Isolated Buildings in the 2016 Kumamoto Earthquake

Behavior of Seismically Isolated Buildings and Users' Comments

Keiko MORITA** and Mineo TAKAYAMA**

Abstract

An earthquake of magnitude 6.5 struck the Kumamoto Region of Kumamoto Prefecture at a depth of 11 kilometers at 21:26 JST on April 14, 2016. Severe shaking was observed, with a seismic intensity of 7 (the Japan Meteorological Agency, JMA, seismic intensity scale is used throughout this paper) measured in the town of Mashiki and a seismic intensity of 6-lower measured over a wide area of Kumamoto City. Further, an earthquake of magnitude 7.3 struck the same region at a depth of 12 km at 01:25 JST on April 16, and the maximum seismic intensity of 7 was observed. It is extremely rare for an earthquake of seismic intensity 7 to be observed twice in succession within a 28-hour period. It was announced afterwards that the earthquake on April 14 was a foreshock and the earthquake on April 16 was the main shock. While serious damage to buildings was confirmed in many places in Kumamoto and Oita prefectures, buildings with seismically isolated structures, "seismically isolated buildings", kept residents and users safe, and could continue to be used without any problems after the earthquakes. Most of the buildings with seismic-resistant structures, "seismic-resistant buildings", avoided collapse, but sustained damage such as furniture falling over, light fixtures falling down, service pipes rupturing, and cracks appearing in columns, beams, and walls. When the Kumamoto earthquakes occurred, there were 24 seismically isolated buildings, including 4 under construction, in Kumamoto Prefecture, and we surveyed 17 of these. Most are apartment buildings, followed by medical facilities, offices, and warehouses. We visually checked the inside and outside of the building and the isolation level, and at the same time, interviewed the building's users and managers. During the earthquakes of seismic intensity 7 that occurred in succession in Kumamoto, the seismically isolated buildings demonstrated their capabilities by functioning extremely well. This paper introduces the behavior of seismically isolated buildings during the earthquakes and users' comments..

Key Words : 2016 Kumamoto Earthquake, Seismically Isolated building, Questionnaire, user's comment

1. 概要

1.1 免震構造

地震国である我が国において、地震による建物被害の低減は古くからの大きな課題である。地震被害の経験から、我が国の建築構造は地震外力に抵抗するために建物に柱・梁・壁・筋交いなどの構造部材を適切に配置して一定の強度と剛性を確保する考え方が主流となり、その設計法も知見の蓄積と技術の発展により経験的なものから理論的に体系化されたものとなってきた経緯がある。こうした概念に対して、建物と地盤の間ですべりを生じる構造とすることにより、建物に大きな地震力を作用させないなどの工夫についても古くより考えられていた。

免震建物の概念そのものは、既に1800年代末から提案され始め、我が国においては河合浩蔵が1891年の『建築雑誌』に「地震ノ際大震動ヲ受ケザル構造」として、丸太を縦横に数段積み重ねた上に建物を建てる方法について述べている。実際の免震効果は確認されているわけではないが、そこには地盤と建物の間に絶縁層を設ける免震の発想が記述されている。

その後、1909年には米国において英国人 J. A. Calantarients により絶縁基礎システムに関する特許が、我が国では1924年には鬼頭健三郎よりボールベアリングによる「建築物耐震装置」、同年に山下興家により柱脚の摺動板と板ばねによる「構造物の耐震装置」に関する特許が提案されている。1923年の関東地震の際に仏像全体が滑ったために被害を免れ、1959年の改修の際に免震効果を狙って台座と仏像の間にステンレス板を敷

* 平成29年11月27日受付

** 建築学科

いた鎌倉の大仏における事例もある。これらの免震機構は、すべりや転がりの原理に基づく基礎絶縁といったごく自然な発想に基づくものであった。

このように「免震」の発想と効用に関する経験と期待が潜在しながらも、建物を免震化するための適切な装置・材料がなかったこと、地震時の建物の挙動を検証するための解析技術が未発達であったことなどから、しばらく免震建物が実用化されることはなかった。我が国では1920～30年代の佐野利器と真島健三郎による柔剛論争において結論が出ず、1950年代の戦後復興の流れによりその存在が顧みられなかったことなども、免震技術の発展を妨げた一因と思われる。

その後、1960年代の超高層ビルの誕生、1970年代のコンピュータと解析手法の発達などを経て、我が国において免震構造が本格的に現実のものとなるのは、積層ゴムの導入と開発が進む1980年代に入ってからである。日本では福岡大学の多田英之教授(当時)が1978年に積層ゴム支承の開発に着手し、1981年に実用化に成功した。実用化を受けて、多田教授と東京建築研究所山口昭一氏の指導により、1982年に我が国最初の積層ゴム支承を用いた免震建物となる八千代台住宅が誕生した後

は、免震部材の工業製品化と性能試験方法の確立、免震装置メーカーの増加、コンピュータによる応答解析技術の発達、建設会社による研究開発の推進、設計規準・指針の整備などを背景に、研究所、病院、電算センター、事務所等の業務施設を中心に免震構造が採用されてきた。1994年ノースリッジ地震(米国)、引き続き1995年兵庫県南部地震で免震建物優位性が実証され、以後多くの建物に免震構造が採用されてきている。さらに2005年の福岡県西方沖地震や2011年の東北地方太平洋沖地震でもその性能を発揮した。

1.2 調査概要

2016年熊本地震は益城町において震度7の揺れが2度連続して観測された希有な地震である。免震建物はこれまでの地震と同様に利用者の安全を守り、地震後も継続して建物の利用が可能であった。

地震発生時、熊本県内には工事中の4棟を含め、24棟(20箇所)の免震建物が建設されていた。24棟のうち11棟が告示免震である。これらの免震建物のうち17棟(13箇所)について建物調査を行った。熊本県の免震建物概要を表1.1に示す。調査は、建物の外周および

表 1.2 調査建物構造概要

所在地		用途	建設年	構造	階数	免震部材	免震クリアランス寸法(cm)	けがき記録
熊本市	A	病棟	2002	SRC	13+B1	NRB,LRB,SD,CLB	50	○
			2010	SRC	13+B1	NRB,LRB,SD	50	○
		診療棟	2006	SRC	7+B1	LRB	55	○
	B	事務所	2015	S+SRC	7+B1	NRB,USD,SnRB	65	○
	C	宿泊施設	2002	RC	12	HDR,OD	45	
	D	共同住宅	1998	RC	14	HDR	43	
				RC	11	HDR	43	
	E	共同住宅	2002	RC	14	NRB,HDR	60	
			RC	14	NRB,HDR	60		
F	共同住宅	2008	RC	15	NRB,USD,LD	60		
G	共同住宅	2008	RC	13	NRB,USD,LD	(35)*1		
山鹿市	H	医療施設	2011	RC	5	HDR	60	○
	I	事務所	2014	S+CFT	5+B1	NRB,LRB,ESD,USD	60	○
八代市	J	共同住宅	2008	RC	15	HDR,ESD,USD	60	△*2
	K	共同住宅	2008	RC	14	NRB,USD,LD	55	
菊池郡	L	倉庫	2013	S+SRC	2	NRB,LRB,ESD	58	○
阿蘇市	M	医療施設	2014	RC	4	NRB,LRB	50	○

*1: 大地震時の想定変形量 *2: 今回は有効な記録がとれていない

構造 RC: 鉄筋コンクリート造, S: 鉄骨造, SRC: 鉄骨鉄筋コンクリート造, CFT: コンクリート充填鋼管構造
免震部材 NRB: 天然ゴム系積層ゴム支承, LRB: 鉛プラグ入り積層ゴム支承, HDR: 高減衰積層ゴム支承, SnRB: 錫プラグ入り積層ゴム支承, ESD: 弾性すべり支承, CLB: 直動転がり支承, OD: オイルダンパー, SD: 鋼棒ダンパー, USD: U型鋼材ダンパー, LD: 鉛ダンパー

免震層の目視観察を基本とした。建物管理者や利用者への聞き取り調査を行うと共に、建物によっては室内調査も実施した。共同住宅が最も多く、続いて医療施設、事務所や倉庫である。戸建て免震住宅については残念ながら把握ができていない。調査を行った免震建物の構造概要を表 1.2 に示す。いずれの建物でも積層ゴム支承が用いられている。工事中の建物 4 棟のうち 3 棟については地震時の状況について聞き取り調査を行った。工事中の建物概要は表 1.2 に含まれていない。

免震建物の地震時の動きについては、8 棟の免震建物のけがき記録で確認することができた。けがき記録とは、写真 1.1 に示すようなけがき板と呼ばれる金属板にひっかき傷をつけることで免震建物と地盤の相対的な変形量の軌跡を記録するものである。

表 1.1 熊本県の免震建物概要

用途	共同住宅 12 棟	医療施設 7 棟	事務所・倉庫 5 棟
階数	1-4 階 3 棟	5-10 階 6 棟	11-15 階 15 棟
所在地	熊本市 18 棟	山鹿市・八代市 4 棟	その他 2 棟

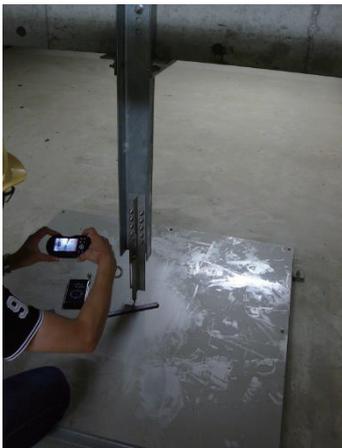


写真 1.1 けがき板計測の様子

1.3 けがき記録の概要

けがき板を設置している建物での聞き取り調査によれば、4月14日の前震後はほとんど動きが確認できなかったが、4月16日の本震後に大きな軌跡を残しているとのことであった。けがき板に残された軌跡の概要を表 1.3 に示す。最大両振幅は軌跡の Peak to Peak の寸法を測ったもので、最大片振幅は原点からの最大振幅を測ったものである。M 医療施設において最大両振幅 90cm、最大片振幅 46cm という軌跡が残っている。これは、これまでの地震で記録された免震建物の最大の変形量である。

表 1.3 けがき板に残された軌跡の概要

	用途	最大 両振幅 (cm)	最大 片振幅 (cm)
A	病棟	60	38
	診療棟	72	41
B	事務所	74	40
H	医療施設	19	10
I	事務所	16	8
L	倉庫	50	32.5
M	医療施設	90	46

1.4 用語について

本論で用いる用語を以下の様に定義する。

- (1) 免震構造の建物を免震建物とし、免震ではないものを「耐震構造」や「耐震建物」と呼称する。
- (2) 現在、免震構造で用いられているクリアランスという用語は、免震建物と擁壁などとのすき間を意味する。水平方向のクリアランスは単に「クリアランス」とし、鉛直方向のクリアランスを「鉛直クリアランス」と呼称する。(図 1.1)
- (3) エキスパンションジョイントとは、異なる性状を持った構造体同士を分割し、構造物にかかる破壊的な力を伝達しないようにする継目である。壁や天井のエキスパンションジョイントカバーを「エキスパンションジョイント」とし、床面に設置されているエキスパンションジョイントカバーを「クリアランスカバー」と呼称する。
- (4) エキスパンションジョイントやクリアランスカバーが衝突等によって形を変えた状況は変形と表現せず、「変状」と呼称する。変形量等の用語で用いられている変形と区別するためである。

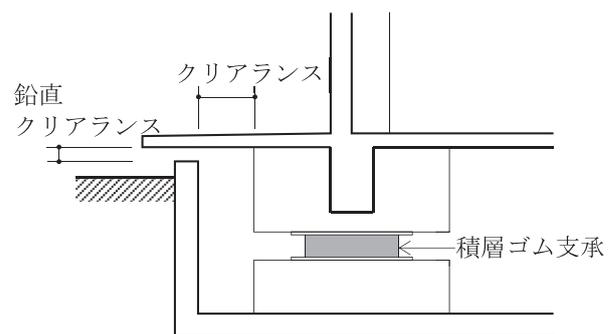


図 1.1 クリアランスと鉛直クリアランス

2. 熊本市の免震建物

熊本市の免震建物 11 棟 (7 箇所) の調査結果について紹介する。D 共同住宅に近い熊本市内の地震観測点 K-NET 熊本では本震で震度 6 強、その他の免震建物に近い地震観測点 JMA 熊本でも震度 6 強を観測している。

2.1 A 医療施設

A 医療施設は熊本市内の建物群である。建替え計画が進行中で、敷地内には、免震、新耐震、旧耐震の建物が混在している。旧耐震建物の一部の建物は大破し、新耐震建物は仕上げ材や内容物に損傷が生じ、復旧のため翌月曜日まで休診したものの、来院者に診療は行っていた。

SRC 造 13 階建て、地下 1 階の免震病棟は 2 期に分けて建設され、増築のときに一体化されている。天然ゴム系積層ゴム支承、鉛プラグ入り積層ゴム支承と鋼棒ダンパーが使用されており、増築の際に直動転がり支承が追加された。クリアランス寸法は 50cm である。SRC 造 7 階建て、地下 1 階の免震診療棟は鉛プラグ入り積層ゴム支承が使用されている。クリアランス寸法は 55cm である。免震病棟と免震診療棟は耐震構造の連絡棟をはさんで隣接しており、それぞれエキスパンションジョイントやクリアランスカバーを介して接続されている。

建物管理者への聞き取り調査では、免震建物はほぼ無被害で家具や診療器具の転倒もなく通常の業務を続けたことを確認した。免震病棟では患者が避難することはなかった。免震診療棟では、一時本震による断水や停電の影響を受けたが、外部からの支援や自家発電などにより病院としての機能を維持し、すぐに急患を受け入れる体制がとられた。

耐震構造の連絡棟では天井壁が落下したと報告されている。また、本震では揺れが大きかったこともあり、免震病棟に設置されている業務用エレベータ 3 基のうちの 1 基のガバナーロープ（调速機ロープ）が、昇降路内で絡まっていたことが地震後の点検で確認されている。すぐに絡まりをほどいたが、ロープに折り癖がついていたため、速やかに交換されたとのことである。

免震病棟のけがき記録は両振幅で 60cm（最大片振幅 38cm）、免震診療棟のけがき記録は両振幅 72cm（最大片振幅 41cm）であった（写真 2.1）。いずれも残留変形はほとんどなかった。建物外周部では、建物入り口などのクリアランスカバーや手すりの変状を確認した（写真 2.2）。免震病棟に設置されている鋼棒ダンパーは、大変形を経験したことによる表面塗装の剥離と取付けボルトの緩みを確認した（写真 2.3）。しかし、いずれの免震部材においても異常は見られず、本震後の点検でも使用上の問題は確認されなかった。

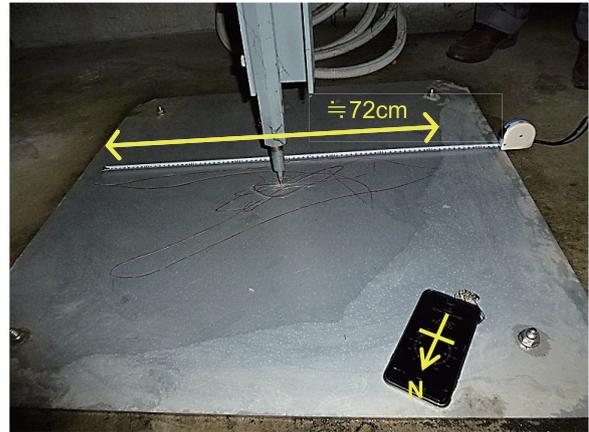


写真 2.1 免震診療棟のけがき記録



写真 2.2 クリアランスカバーと手すりの変状



写真 2.3 鋼棒ダンパーの塗装の剥がれ

2.2 B 事務所

B 事務所は S 造 + SRC 造、地上 7 階、地下 1 階の建物である。免震部材は錫プラグ入り積層ゴム支承、天然ゴム系積層ゴム支承と U 型鋼材ダンパーが使用されている。クリアランス寸法は 65cm である。また、免震層には天然ゴム系積層ゴム支承の別置き試験体が保管されていた。

免震層にはけがき板が設置されており、図 2.1 に示すような最大両振幅 74cm（最大片振幅 40cm）の動きが記録されたが、残留変形はほとんどなかった。B 事務所は

A 医療施設に近く、2つのけがき記録は似た形状をしている。天然ゴム系積層ゴム支承のフランジに取り付けられていたU型鋼材ダンパーは、免震層の動きに伴って大きく変形したために表面の塗装が剥がれ、元のU型の形状から形を変えている(写真2.4)。本震後の点検では、いずれの免震部材についても異常は確認されず、継続使用に問題なしと判断されている。

建物管理者は、本震の際に室内の家具の転倒はなく、壺の落下もなかったが、不安定な場所に置いていたTFTモニターが倒れていたと語った。建物外周部では、通用口の鋼製扉の取付け部が変状し、クリアランスカバー端部に設けられている鉄板が変状していた(写真2.5)。前震後に全体の1/3の鉄板がクリアランスカバーのコンクリート製の下に巻き込まれていたため、危険防止のためにすぐにもとに戻している。本震後には全体の4/5の鉄板がカバー下に巻き込まれていたとのことであった。

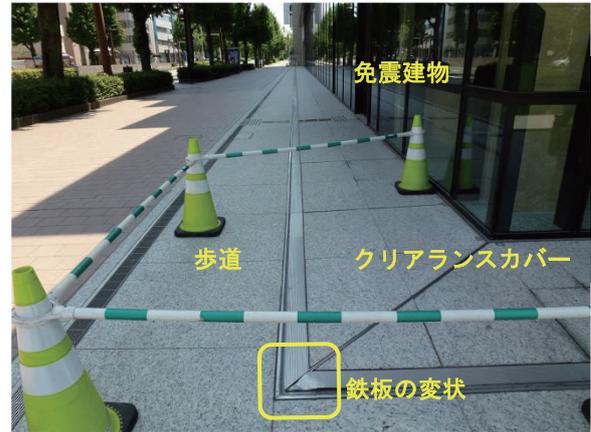


写真 2.5 建物外周部の様子

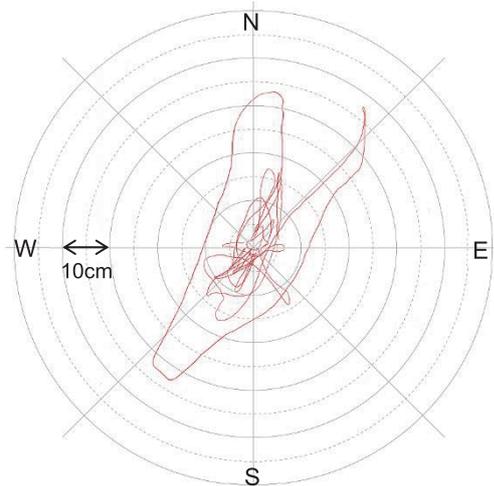


図 2.1 B 事務所の免震層の動き
(提供：国総研・建研)



写真 2.4 天然ゴム系積層ゴム支承とU型鋼材ダンパー

2.3 C 宿泊施設

C 宿泊施設は熊本市内の繁華街に位置するRC造12階建ての建物である。高減衰積層ゴム支承とオイルダンパーが使われており、クリアランス寸法は45cmである。

免震層の動きは、オイルダンパーのシャフトの摺動痕から最大で24cm動いたのではないかと推定している(写真2.6)。また、写真2.7に示すように高減衰積層ゴム支承が大変形を経験した後に確認することがあるゴム表面の膨らみができていることを確認した。

従業員によると、地震直後は1時間程停電し、50名程の宿泊客を1階ロビーに誘導したとのことである。断水したため一時営業を休止したが、ライフラインが整った4月30日から営業を再開している。室内は落下物などなく、建物には被害はなかった。1階事務室に設置していた複合機コピー機のキャスターはロックをかけていなかったため、30cmほど壁から移動していた。建物外周部はクリアランスカバーのタイルが破損していた(写真2.8)。免震層の残留変形はなかった。

また、従業員のひとり地震の際に耐震建物の自宅にいるときは縦揺れの際にゴゴッという音が聞こえるが、免震建物ではその音がしないと語った。

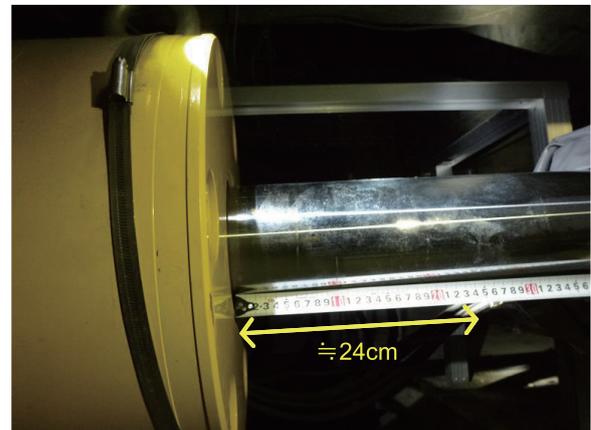


写真 2.6 オイルダンパーのシャフトの摺動痕

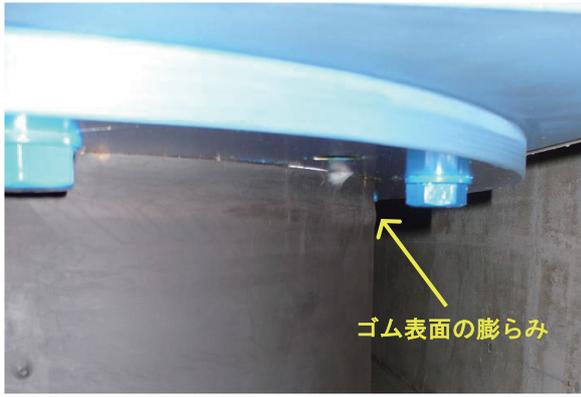


写真 2.7 高減衰積層ゴム支承のゴム表面の膨らみ



写真 2.8 クリアランスカバーのタイトルの破損

損傷している（写真 2.13）。このため避難階段下の積層ゴム支承の周辺のみ 3cm 程度の残留変形が残っていた。現在は、このような箇所には弾性すべり支承が用いられることが多い。幸いなことに、この損傷は免震建物の性能には影響を与えていない。



写真 2.9 クリアランスカバーの接触痕 (a 棟)

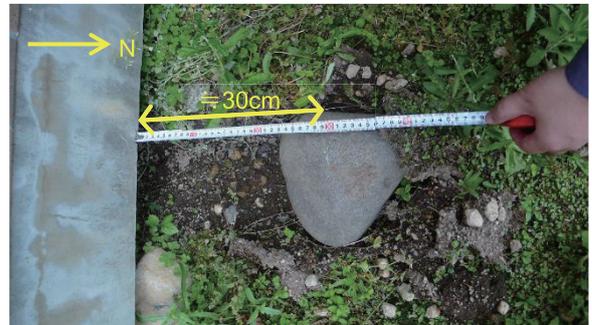


写真 2.10 移動した石 (a 棟)

2.4 D 共同住宅

D 共同住宅は熊本県で第 1 号の免震建物である。RC 造 14 階建ての a 棟と 11 階建ての b 棟は耐震構造の集会所をはさんで L 型のような形状で建っている。免震部材は高減衰積層ゴム支承が使われている。クリアランス寸法は 43cm である。

けがき板が設置されていないため正確な移動量は不明であるが、a 棟については、建物周辺部のクリアランスカバーが壁に残した跡（写真 2.9）や石に残された傷と移動したとみられる痕跡（写真 2.10）から、30cm 程度動いたと推定することができる。耐震建物と免震建物間のエクステンションジョイントは免震建物の動きによって破損していたため、写真 2.11 に示すとおり取り外されていた。b 棟は写真 2.12 に示すように 1 階柱頭に免震層が設けられている。建物周辺部では、フレキシブル配管となっていた雨樋の接合部が免震建物の移動したことによって外れていた。

マンション理事長と管理者によると、住民から建物内部の損傷や食器などの落下の等の報告はなかったとのことであった。免震層の点検などは半年おきに実施しており、今回の地震による免震建物の残留変形はほとんどなかった。ただし、2 階より上階が免震建物となっている b 棟の避難階段は、1 階階段床下に高減衰積層ゴム支承が設置されている。積層ゴム支承を変形させるのに十分な強度を持っていなかった階段壁が面外変形によって



写真 2.11 エクステンションジョイントの破損



写真 2.12 雨樋の破損 (b 棟)



写真 2.13 避難階段の点検口 →



写真 2.15 エキスパンションジョイントの接触痕

2.5 E 共同住宅

E 共同住宅は RC 造 14 階建ての a 棟と b 棟が、D 共同住宅と同様に耐震構造の集会所をはさんでほぼ一直線にならんで建っている。また、a 棟と b 棟はいずれも 1 階柱頭に免震層が設置されており、2 階以上が免震建物となっている。免震部材は高減衰積層ゴム支承と天然ゴム系積層ゴム支承が使われている。クリアランス寸法は 60cm である。

免震層で配管の断熱材を確認したところ、その剥離した長さから、東西方向に両振幅で 70cm 程度動いたのではないかと判断している (写真 2.14)。免震建物と耐震建物との間の 2 階部分のエキスパンションジョイントに写真 2.15 に示すような接触痕を確認した。29cm 程度動いたと判断している。

マンション管理者によると、住民から建物内部の損傷や食器などの落下等の報告はなかったとのことであった。免震建物と耐震建物との間のエキスパンションジョイントは本震の際に大きく変状したために取り外されていた。避難階段は同じく 1 階の階段床下で天然ゴム系積層ゴム支承によって支えられている。このため、同様に階段壁が面外変形によって損傷していた。残留変形はほとんどなかった。

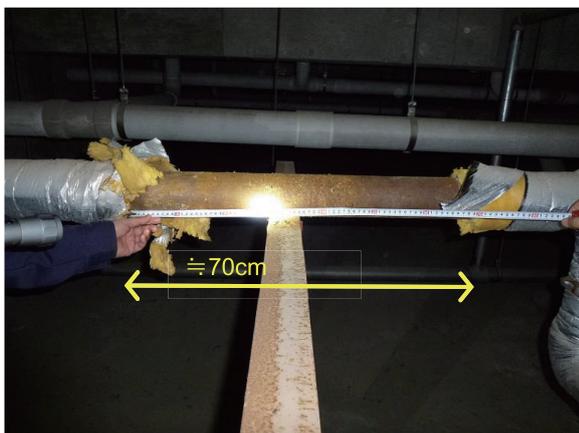


写真 2.14 配管の断熱材の剥離

2.6 F 共同住宅

F 共同住宅は RC 造 15 階建ての建物である。天然ゴム系積層ゴム支承、U 型鋼材ダンパー、鉛ダンパーが使用されている。免震層のクリアランス寸法は 60cm である。

建物外周部の犬走り部分の接触痕から、東西方向へ片振幅 25cm、南北方向は片振幅 10cm 程度動いたと判断している (写真 2.16)。残留変形はほとんどなかった。建物の周辺は地盤沈下していた (写真 2.17)。

建物 1 階に設けられた駐車場のスラブにクラックが発生していた (写真 2.18)。この真下に設置されていたダンパーの取付け基部が地震時の変形に伴ってスラブを突き上げたために生じたものであると考えられる。ダンパー上部の取付け基部は、スラブおよび梁との間に破損が生じていた (写真 2.19)。

管理者は、耐震建物に見られるような 1 階から 3 階付近に発生する亀裂の発生は認められなかったと語った。居住者へのアンケートでは、家具の転倒がなかったこと、立てていた細長い化粧品も倒れていなかったこと、ライフラインが止まらなかったため日常生活が継続できたこと、近所に住む親族が避難してきたことなどが示されており、いずれも免震構造の性能に満足しているという回答であった。

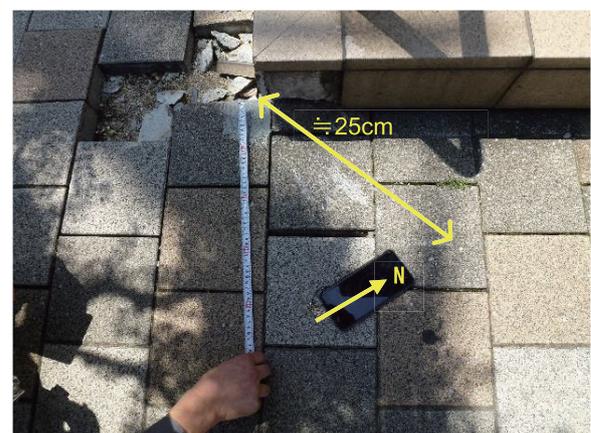


写真 2.16 クリアランスカバーの接触痕

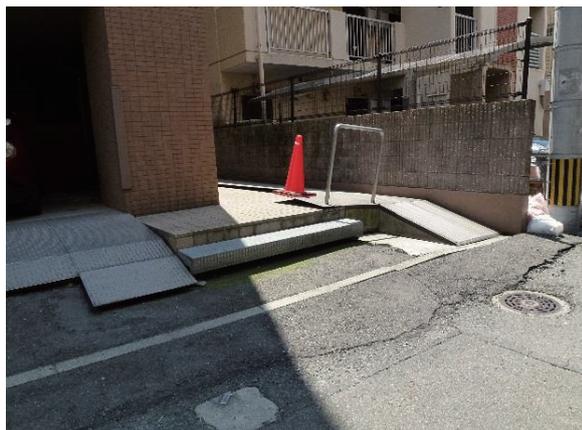


写真 2.17 建物周辺の地盤沈下



写真 2.18 駐車場床スラブのクラック



写真 2.19 ダンパー取付け基部及び床スラブの破損

2.7 G 共同住宅

G 共同住宅は RC 造 13 階建ての建物である。天然ゴム系積層ゴム支承、U 型鋼材ダンパー、鉛ダンパーが使用されている。免震層のクリアランス寸法は確認できなかったが、大地震時の想定変形量は 35cm となっていた。写真 2.20 に示すように、免震層のまわりには立ち上がり部分が設けられ、地面からやや高い部分に鉛直クリアランスが設けられた形式となっている。

上部構造 7 階、8 階、13 階の構造躯体を目視による観察を行ったがひび割れなどの発生は確認できなかった。

免震層の変形量については確認することができなかった。F 共同住宅と同じ形式で免震部材を設置しており、同様にダンパー上部の基部において床スラブとの間に破損が生じていた。

管理者によると、前震後は避難する人はいなかったようであるが、本震後には避難所に移動した住民もいたとのことであった。また、室内で家具などの転倒はなかったが、低層階の住民の話によると本震の際にバリバリという大きな音が聞こえたとのことであった。これは床スラブが破損した時の音ではないかと推定している。



写真 2.20 建物外周部

3. 山鹿市の免震建物

山鹿市の免震建物 2 棟の調査結果について紹介する。山鹿市内の地震観測点 K-NET 山鹿では本震で震度 5 弱を観測している。

3.1 H 医療施設

H 医療施設は RC 造 5 階建ての病棟および診療棟である新館のみ免震建物で、待合ロビーおよび玄関ホールは耐震建物である。免震建物と耐震建物は室内で繋がっており、エキスパンションジョイントとクリアランスカバーを介して接続されている。免震層には高減衰積層ゴム支承が設置されている。免震層のクリアランス寸法は 60cm である。免震層にははげがき板が設置されており、両振幅 19cm (最大片振幅 10cm) の動きが記録されていた。残留変形や免震部材の異常は確認されていない。建物管理者への聞き取り調査では、免震建物は家具や診療器具の転倒もなく通常の業務を続けたことを確認した。また、甚大な被害を受けた病院から患者を受け入れている。余震のたびにゆっくりとした揺れは感じるが、ガタガタという音はしない、とのことであった。建物内部で免震建物と耐震建物の境目にある天井パネルのずれが発生している (写真 3.1)。建物外周部では、クリアランスカバーの変状を確認した (写真 3.2)。建物から直接外部に通じる入り口付近のクリアランスカバーには変状は見られなかった (写真 3.3)。



写真 3.1 天井パネルのずれと
室内のクリアランスカバー



写真 3.2 クリアランスカバーの変状

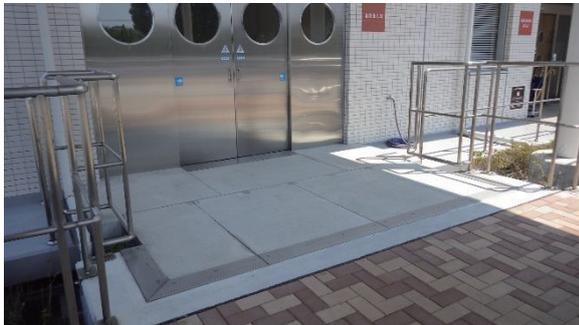


写真 3.3 直接外へ通じる入り口付近

今回の地震では、けがき板は交換しないが、今後も地震の度に確認を行い、記録を残していくとのことであった。

建物外周部については、エキスパンションジョイントに大きな変状は認められず、シーリング材がわずかにはみ出ている程度であった（写真 3.4）。入り口付近のクリアランスカバー付近には、地震時に動いたときに生じたとみられる縁石の傷が確認できる程度であった（写真 3.5）。



写真 3.4 外周部のエキスパンションジョイント



写真 3.5 入り口付近の様子

3.2 I 事務所

I 事務所は S 造 + CFT 造、地上 5 階、地下 1 階の建物である。免震部材は天然ゴム系積層ゴム支承、鉛プラグ入り積層ゴム支承、弾性すべり支承と U 型鋼材ダンパーが使用されている。クリアランス寸法は 60cm である。

免震層にはけがき板が設置されており、両振幅 16cm（最大片振幅 8cm）の動きが記録されていた。残留変形や免震部材に異常は確認されなかった。

建物管理者への聞き取り調査では、家具の転倒などの被害はなく、ライフラインも止まらなかったためにすぐに業務を継続することができたことを確認した。本震経験者は、免震建物は揺れると聞いていたが、実際に揺れ始めたときに驚いた、多少恐怖感を感じた、と語った。

4. 八代市の免震建物

八代市の免震建物 2 棟の調査結果について紹介する。八代市内の地震観測点 K-NET 八代では本震で震度 6 弱を観測している。

4.1 J 共同住宅

J 共同住宅は RC 造 15 階建ての建物である。高減衰積層ゴム支承、弾性すべり支承、U 型鋼材ダンパーが使用されている。免震層のクリアランス寸法は 60cm である。

弾性すべり支承の移動痕から免震層は東方向へ最大で片振幅 13cm 変形したと推定している（写真 4.1）。移動痕は、西 6cm、北 4.5cm、南 6.5cm であった。U 型鋼材ダンパーは一部塗装のはがれを確認（写真 4.2）したが、

いずれの免震部材においても異常は確認されていない。免震層には、建物所有者作成のけがき板が設置されていた(写真4.3)。残念ながら今回の地震では、けがき棒の剛性が足りなかったために弾性すべり支承の移動痕よりも変形量が小さく、正確な記録がとれていないようである。建物外周部でもエキスパンションジョイントなどの損傷は認められず、雨樋の破損を確認する程度であった(写真4.4)。

最上階の居住者の話では、本震ではゆっくりと大きく長い時間揺れたような感じがしたが、家具の転倒や上部構造の損傷はなく問題なく住み続けることができたとのことであった。また、隣に建つSRC造10階建ての耐震構造の宿泊施設では本震後、安全確認が終了する明け方まで宿泊客が屋外で待機していた。



写真4.1 弾性すべり支承の移動痕

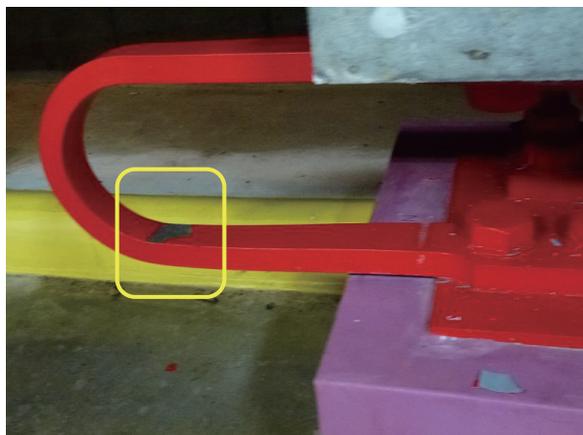


写真4.2 U型鋼材ダンパーの塗装の剥がれ

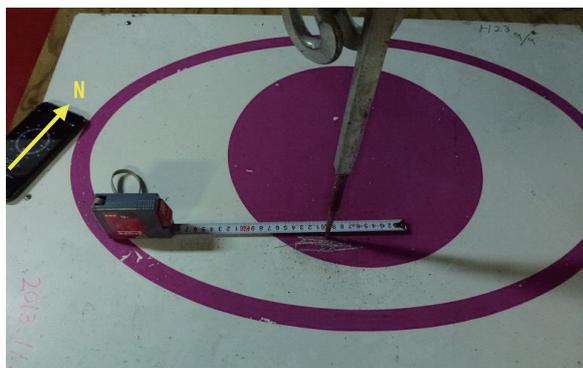


写真4.3 建物所有者作成のけがき板
※今回は有効な記録がとれていない



写真4.4 建物外周部の様子

4.2 K共同住宅

K共同住宅はRC造14階建ての建物である。天然ゴム系積層ゴム支承、U型鋼材ダンパーと鉛ダンパーが使用されている。免震層のクリアランス寸法は55cmである。

免震層の配管継ぎ手が伸び縮みした痕から、免震層は最大で片振幅7cm変形したと推定している(写真4.5)。免震層の変形によって、U型鋼材ダンパーの塗装の浮きや鉛ダンパーの表面にシワを確認しているが、いずれの免震部材においても損傷は見られなかった(写真4.6)。家具の転倒や上部構造の損傷も報告されていない。建物外周部においても損傷は認められなかった(写真4.7)。居住者へのアンケートでは、免震建物であるを知っている居住者が88%、今回の地震では一般の建物と比較して耐震性に優れていると思うと答えた居住者が94%であった。本震のときのゆっくりとした揺れに多少の恐怖を感じたが、以後問題なく住み続けているという回答であった。



写真4.5 配管継ぎ手の摺動痕



写真 4.6 免震層の様子



写真 4.7 建物外周部

下していなかったことに大変感激した、とのことであつた。

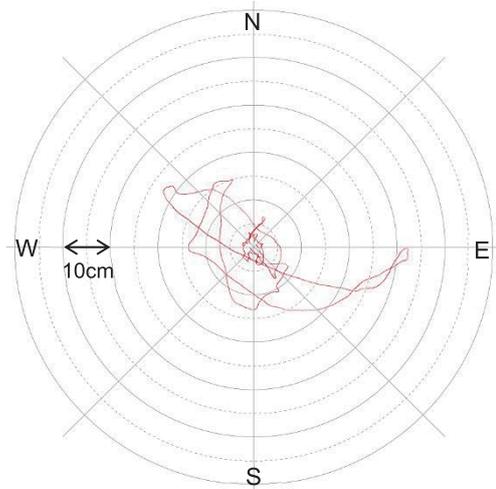


図 5.1 L倉庫の免震層の動き (提供：国総研・建研)



写真 5.1 耐火被覆の剥離

5. 菊池郡と阿蘇市の免震建物

菊池郡と阿蘇市の免震建物の調査結果について紹介する。

5.1 L倉庫

L倉庫は菊池郡にある建物である。近くの地震観測点 K-NET 大津では、本震で震度 6 強を観測している。L倉庫は柱が SRC 造、梁が S 造の 2 階建ての建物である。免震部材は天然ゴム系積層ゴム支承、鉛プラグ入り積層ゴム支承、弾性すべり支承が使用されている。クリアランス寸法は 58cm である。

免震層にはけがき板が設置されており、図 5.1 に示すような最大両振幅 50cm (最大片振幅 32.5cm) の動きが記録されていた。残留変形や免震部材に異常は確認されなかった。擁壁近くの部分では耐火被覆の剥離を確認した (写真 5.1)。建物外周部では、鉛直クリアランスから小動物などの侵入を防ぐための免震スカートをはみ出していた (写真 5.2)。免震建物と耐震建物とのエクステンションジョイントは、防犯のためにしっかりした作りのものを取り付けていたため、損傷が激しかった。写真 5.3 は、取り外して応急処置のカバーを掛けている状態である。建物周辺では地盤沈下を確認した (写真 5.4)。

管理者の話では、本震後に 5 時間程自家発電が稼働する事態となったが、免震建物内の可動棚からは何一つ落



写真 5.2 免震スカートのはみ出し



写真 5.3 エキスパンションジョイントの破損



写真 5.4 建物周辺の地盤沈下

5.2 M 医療施設

M 医療施設は阿蘇市内にある建物である。近くの地震観測点 K-NET 一の宮では本震で震度 6 弱を観測している。RC 造 2 階建ての診療棟と RC 造 4 階建ての病棟が 1 階の床板で支えられた免震構造となっている。免震層には天然ゴム系積層ゴム支承と鉛プラグ入り積層ゴム支承が設置されている。これらの免震建物は、エキスパンションジョイントを介して 1 階建ての耐震の外來棟に接続されている (写真 5.5)。免震建物側から壁がつきだして、地震時にクリアランスカバーが跳ね上がるのを抑えるような仕様になっている。

前震の際にちょうど耐震建物と免震建物間のクリアランスカバーの上にいる職員の方は、驚いて飛び降りたと語ってくれた。

免震の病棟と診療棟は地震直後から病院機能を維持して診療を継続している。また、本震後も病棟から入院患者を避難させる必要はなかった。病院長は、免震建物のおかげで、地震で機能停止となった周辺の耐震建物の 13 病院から患者を受け入れ、約 7 万人の医療を支えることができたと言ってくれた。

免震層には写真 5.6 に示すけがき板が設置されており、図 5.2 に示すような最大両振幅 90cm (最大片振幅 46cm) の動きが記録されていた。前震直後の軌跡は直

径 5mm 程度の五円玉の穴よりも小さな軌跡であったとのことで、本震の激しさを計り知ることができる。大変形を経験しているが、擁壁への衝突もなく、免震層の残留変形はほとんど残っていない。

使用されている天然ゴム系積層ゴム支承は、鋼板露出型と呼ばれるタイプで保護ゴムテープをあとから巻きつける様になっている。水平方向へ大きく変形したため、本震後には保護ゴムの一部がめくれあがっているのが確認された。めくれあがった保護ゴムは、地震後の点検の際に取り外され、支承の健全性確認が行われた。いずれの支承にも異常がないことが確認され、新たに保護ゴムが巻きつけられている。

建物外周部では免震建物と耐震建物をつなぐ部分のエキスパンションジョイントの変状 (写真 5.7) や入り口付近のクリアランスカバーの変状 (写真 5.8) を確認している。また、病棟内に設置されていた細長いロッカーの転倒、給湯室の液晶テレビの転倒と小型冷蔵庫の 10cm 程度の移動が報告されている。

M 医療施設から約 1.4km 離れた耐震建物の宿泊施設は、震災後、安全確認がとれるまで休業していた。震災から 1 ヶ月後に一部を除いて営業を再開している。本震の際にホテルの 3 階にいた従業員は、和室の障子が外れるほどひどく激しく揺れたために、とても恐ろしかったと語ってくれた。



写真 5.5 室内のエキスパンションジョイント

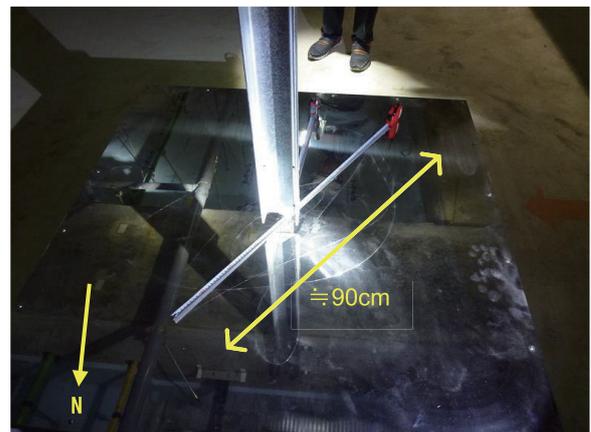


写真 5.6 けがき板

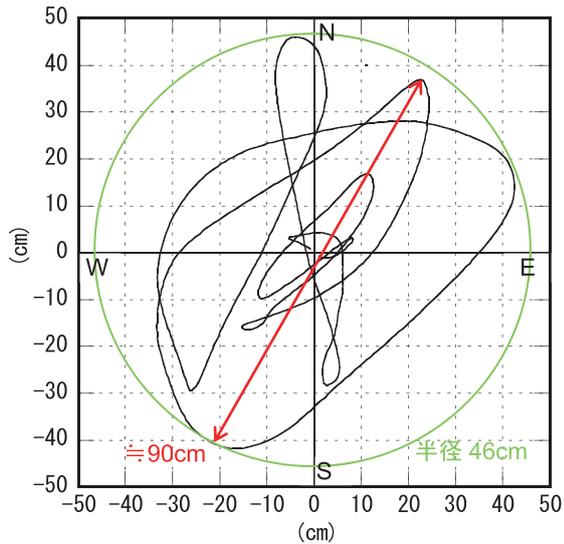


図 5.2 M 医療施設の免震層の動き

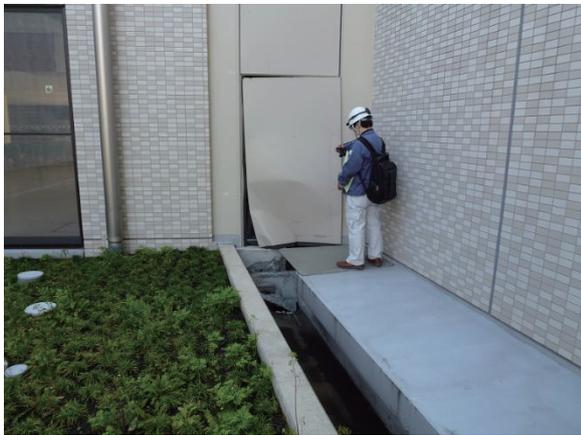


写真 5.7 エキスパンションジョイントの変状



写真 5.8 入り口付近の様子

6. 工事中の建物への聞き取り調査

工事中に免震層を固定しているかどうかについて、工事中であった3棟の設計者または施工者から話を聞くことができた。基本的には、上部構造がある程度まで建ち上がるまで免震層を固定しているということであった。免震部材にある程度の重量がかからないと、積層ゴム支

承が本来の性能を発揮しないためである。現在、何階まで建ち上がった段階で固定を外すかの規範となるものがないため、解析を行って設計者判断で計画を立てているとのことであった。また、足場と免震建物との寸法についてたずねた。足場と建物の間隔は工事関係者が落下しない20～30cm程度に設定しているとのことである。免震建物上の犬走りに足場を設置している建物と、免震でない地面に足場を設置している建物があった。免震層を固定していない時期に地震が発生した場合には、地面に設置している足場に免震建物が衝突する可能性もあることも留意したい。

7. アンケート調査

熊本市と八代市にある免震構造の共同住宅の居住者に対してアンケート調査¹⁾が実施されている。ここでは、アンケートの集計結果の概要と記述式回答を紹介する²⁾。表 7.1 に示すように合計 356 戸のうち 33.7% にあたる 120 戸から回答が得られている。

「免震構造と知っていたか」という問いに対して、回答者の 93% が「知っていた」と回答している (図 7.1)。今回の熊本地震で「免震構造の有効性を実感したか」という問いに対して、回答者の 97% が「耐震より優れている」と回答し、2% が「今回だけでは分からない」と回答している (図 7.2)。その理由は、記述式回答の中に示されている。

表 7.2 に特徴的な記述式回答を原文のまま示す。記述式回答から、免震建物が大きな効果を発揮し、居住者は生活の継続性の面で満足していることが読み取れる。初めて経験する大きくゆっくりとした揺れに恐怖心を感じた状況や大きな地震が継続した場合の不安もアンケート結果に反映されている。また、専門家と建物利用者のコミュニケーション不足のために、建物の耐震性能がうまく伝わっていないと感じる部分もあったことが読み取れる。今後は、建物利用者に対して免震部材の特徴や免震建物の特有の揺れ方などについて事前に丁寧な説明を行い、更に理解を深めてもらうことが大切であるということを感じた。

表 7.1 アンケート回答率

	回答数 (戸)	戸数	回答率 (%)
共同住宅 F	65	98	66.3
共同住宅 G	39	180	21.7
共同住宅 K	16	78	20.5
合計	120	356	33.7

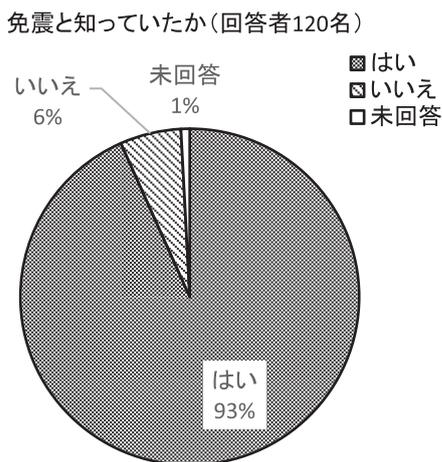


図 7.1 免震構造と知っていたか

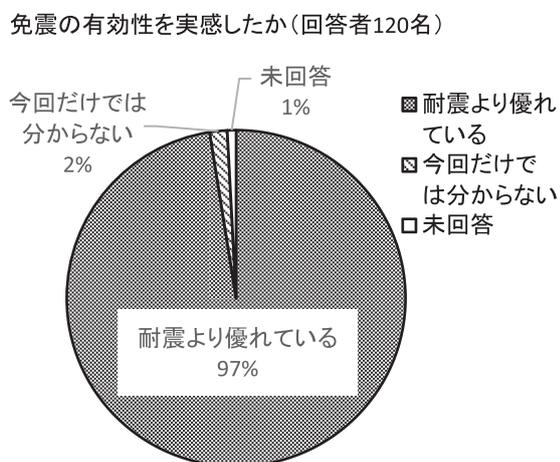


図 7.2 免震構造の有効性を実感したか

表 7.2 記述式回答

否定的意見	
1	免震構造は有効だが、マンションの外の状況や実際の揺れが分かりづらい点がある。本当の震度をテレビ等で把握する必要があった。従って部屋から逃げるべきかどうか判断に迷う
2	台風の時にすごく揺れて、地震よりも継続時間が長いので酔いそうで気持ち悪い
3	震度7以上の地震では対応出来るのか?また、何度も地震が続いたら免震構造でも有効性はあるのか?不安です
4	免震機能が何回もつのか不安だった。業者の人などと提携しているのか分からなかったし細かなひびも入っていたのでいくら免震といえども恐怖感があった
5	いつ起こるか分からない余震等に備えるためにも今回の地震で免震部のダメージなどを解かりやすく住民に説明していただき、その上でしかるべき工事を早急をお願いしたいと思います

肯定的意見	
1	食器が落ちたり、割れたりしてなかったので耐震性には本当に助かりました。身内も避難してきて、一晩ぐっすり休んでもらえました
2	立てていた細長いグロスやマスカラさえ落ちてなかったのすごいです。災害時、片付けが不要なのと、安心して暮らせるので人よりストレスが少ないと思う
3	職場でも震度5クラスを体験したが、自宅にいた前震、本震よりも低い震度だったが、職場のほうがはるかに怖かった
4	横になっている時は震度2や3でも感じますが、立っている時や、座って何かをしている時は、2や3では気づかない時が多かったです。室内の物が倒れなかった、食器や吊照明なども落ちなかった為、音にびっくりせずに前震、本震の時に子ども達は熟睡していました。おかげでパニックにならず、みんなで落ち着いて行動することができました。免震構造に感謝ばかりです
5	あんなにすごい地震で、となりの洋食屋はつぶれたのに、何一つ家の物は落ちてなかったです。ニュースを見て他の家は家具や冷蔵庫がおそってくるのだと初めて知りました。このマンションではTVも倒れず物も動かず、でした。このマンションで助けられたと感謝しています。断水の時も温水器の水を下から抜き、ずいぶん助かりました

8. 今後の課題とまとめ

免震建物は、1995年の兵庫県南部地震から2011年の東北地方太平洋沖地震まで続くいくつもの地震においても、その機能を十分に発揮している。今回の熊本地震においても、免震建物は、地震直後から建物機能を失わず継続使用が可能であった。

免震構造に全く問題がなかったわけではない。外付けの避難階段の損傷、ダンパー取付け基部の損傷、エキスパンションジョイントやクリアランスカバーの損傷などを確認している。

外付けの避難階段やダンパーの取付け基部の損傷は、損傷部に曲げようとする力が過剰にかかったため起きたものであると判断している。部材に曲げがかかる場合には過剰な力が作用する。全てのダンパーの取付け基部に同様の損傷が起きているわけではない。鉛直方向の圧縮力が作用している箇所のダンパー取付け基部には発生していない。ダンパーは基本的に鉛直方向に働く建物の重さを支えることはしない。しかし、免震層が水平方向に大きく変形したときに、圧縮力が作用している部分は対象物が上に伸び上がるようとする動きを抑え、曲げようとする力の影響を小さくしたのだらうと判断している。また、避難階段の損傷もその階段を支えている免震支承に十分な圧縮力が作用していなかったために曲げようとす

る力の影響が大きくなったのではないかと判断している。これらは設計上の配慮が足りなかった部分もあったのではないかと推定され、今後の課題として留意されていくことを望むものである。

エキスパンションジョイントやクリアランスカバーの損傷を確認している。免震構造が採用され始めた初期と比べると、建物入り口付近のクリアランスカバーは洗練されてきた。完全なバリアフリーを実現し、最近では免震構造ではないかのように思わせるデザインになっているものが多い。しかし、一部では「免震構造は地震の際に大きく移動する」ということが忘れられているのではないかとされるものもある。大地震の直後には、クリアランスカバーが写真 8.1 の様な状態となることも想定しておかなければならない。

また、免震層に設置されている地震のエネルギーを吸収する部材であるダンパーの形状変化を確認している。これらは繰り返し変形に伴って生じるものであり、予想範囲内である。ダンパーや積層ゴム支承などの免震部材は人間に例えると鎖骨の役割を果たしていると考えられる。建物の部材は人体と違って自己治癒能力はない。免震部材は大きく形状変化したり損傷したりすれば、必要に応じて交換することになる。免震部材の点検は地震発生後に一般社団法人日本免震構造協会「免震建物の維持管理基準」や各部材メーカーの取替基準に基づいて実施されている。今後も適切に運用されることを望む。

残念ながら今回調査を行った免震建物には地震計が設置されていなかった。また、ほとんどのマンションにおいて、けがき板の設置はなかった。地震の後の免震部材の健全性を確認するためには地震計による観測が有効である。地震計の設置が難しい場合には、少なくともけがき板を設置してほしい。けがき板の記録は、地震時の免震層の動きを確認した上で、免震部材の健全性を再確認するための指標となる。今回の地震でもけがき板を設置していた免震建物では、その記録をもとに免震部材が動いた量を確認でき、継続使用に問題なしの評価を速やかに行っている。目視による表面的な確認だけでなく、今までに蓄積された実験データを参考にしながら判断を下すことができるのである。また、地震の度に蓄積されるこのような記録の積み重ねが免震建物の性能を更に向上させるための一助となると考えている。

構造物が被災すると、その機能停止にともなう社会的・経済的影響は大きい。地震時に高い安全性と機能維持を發揮する免震構造を普及させることは、地震被害の軽減に効果的であると考えられる。ただ、最近では観測される地震動が非常に大きくなってきており、免震構造の設計においても十分な余裕を見込んでおくことも大切であると考えられる。



写真 8.1 本震直後の様子（提供：日本設計）

参考文献

- 1) 森田高市他：調査レポート 平成 28 年(2016 年)熊本地震による建築物等被害 第九次調査報告(免震建築物に関する調査), ビルディングレター, 2016 年 7 月, pp.1-10
- 2) 森田慶子：アンケートによる免震建物の性能評価 平成 28 年熊本地震に関するマンション住民へのアンケート調査, 地域共生研究, 第 5 号, 2017 年 3 月

謝辞 平成 28 年熊本地震における免震建物の調査は、一般社団法人日本建築学会九州支部災害調査委員会と一般社団法人免震構造協会の共同で実施したものである。調査に際して建物管理者や住民の方にご協力頂いた。また、国土交通省国土技術政策総合研究所(国総研)と国立研究開発法人建築研究所(建研)の調査に同行させていただいたものもある。図 2.1 と図 5.1 は国総研・建研がけがき板から複写を行い、デジタル化を行ったものを提供していただいた。写真 8.1 は本震直後の写真を日本設計に提供していただいた。ここに記して感謝の意を表します。