

性能向上型防災共同住宅の提案 — レンズダンパーを用いた 14 階建 RC 造建物の試設計 —

Proposing an Apartment Building on Structural High Performance with Enhanced Earthquake Resistance

— Trial Design of 14-Story RC Building Equipped with Lens Dampers —

川瀬 晶子 ^{*1}	久保田 雅春 ^{*1}	大澤 健 ^{*2}
Shouko Kawase	Masaharu Kubota	Takeshi Oosawa
岡本 和幸 ^{*3}	丸 貴士 ^{*3}	小竹 麻世 ^{*3}
Kazuyuki Okamoto	Takashi Maru	Mayo Kotake

【要旨】

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、RC造中高層共同住宅において、方立壁・袖壁等の非耐力壁に損傷が生じた事例が散見された。主架構がほぼ健全であるにも拘らず、非耐力壁に多数の甚大な損傷が生じたために、解体された建物もあった。

地震による非耐力壁の損傷を軽減させる手法としては、構造スリットを設けて主架構と非耐力壁を切り離すのが一般的であるが、非耐力壁を耐震要素として積極的に活用することで建物の耐震性能を向上させることも可能であると考えられる。

そこで筆者らは、新築のRC造中高層共同住宅を対象として、RC間柱にレンズダンパーを設置し地震時の変形をレンズダンパーに集中させることで躯体の損傷を防ぐ技術の開発に着手し、2015年に発足した社内プロジェクトの中で、実案件への適用に向けて試設計を行った。本報では、試設計の概要を報告する。

【キーワード】 レンズダンパー 制震 防災 RC造 共同住宅

1. プロジェクトの背景および趣旨

1.1 近年の大地震における建物の被害状況

(1) 兵庫県南部地震

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、短時間に大きな加速度とエネルギーを持つキラパルス波が発生した。このキラパルス波は、RC造構造と共振現象を引き起こし、建物が倒壊に至る甚大な被害を及ぼした。内陸性の直下型地震と言うこともあり、建物の倒壊の被害が大きく報道され、国民の多くの目にさらされることとなった。

(2) 東北地方太平洋沖地震

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(3.11地震)では、津波による甚大な被害がクローズアップされ、地震そのものにより生じた建物被害についてはあまり報道されなかった。しかし、建物が倒壊する前に長時間揺られることで、RC造中高層共同住宅において、写真-1に示すように、柱・梁の主架構に致命的

な被害がなくとも、方立壁・袖壁等の非耐力壁に被害を受けた事例が散見された。これは、長時間地震動による特徴的な建物の被害である。主架構は健全であっても、非構造壁に大きな損傷が生じたために、建物の継続使用を断念して解体した建物もあった。



写真-1 非耐力壁の被害状況

1.2 国の研究機関の動向

3.11 地震における庁舎や住宅等の被災状況を踏まえて、地震後の継続使用性確保のための耐震性評価手法を提案し、将来的に設計手法のガイドラインを提示することを目的とした研究が、国土交通省建築研究所（以下、建研）と国土技術政策総合研究所（以下、国総研）により開始された。対象とされた建物は、地震後も機能を維持する必要性の高い防災拠点施設等や共同住宅、学校である。この研究の中で提示された継続使用性確保のための要求性能（案）を表-1～表-3に示す。

表-1に示すように、対象建物を活動上重要なエリアとそれ以外のエリアに分け、エリア毎の継続使用状況の観点から、S、A、Bの3段階で要求性能が設定されている。ここで、「活動上重要なエリア」は、災害対策本部となるフロアや電気室、エレベーター室、廊下・階段等の避難路等を指している。最上位のSランクは、全エリアで使用制限することなく継続使用可能とされ、その下のAランクは、活動上重要なエリア以外のエリアで、一定期間の使用制限を許容しており、最下位のBランクでは、活動上重要なエリアでも、一定期間の使用制限を許容している。

また、大地震後の継続使用性確保（避難路の確保、建物機能の維持等）のために特に重要と考えられる部位において、表-2に示すように、大地震後の状態（補修工事の規模、継続使用の可否等）の分類が設定されている。

共同住宅における要求性能と各部位の分類との関係については、表-3のように設定されている。共同住宅の場合、活動上重要なエリアの専有部（バルコニー等）における応急措置や修復の実施は困難であると考えられるため、Bランクでも構造部材および専有部の袖壁・方立壁の分類がIIとされている。

耐震ソリューション部は、この研究の一環として設置された「継続使用WG」（2013年度～2015年度）に参加し、共同住宅の非構造壁（間柱）を積極的に活用する手段として、間柱型レンズダンパー（十分な耐力・剛性を確保した間柱の中央部にレンズダンパーを取り付けたもの）を提案した。結果として、WGの試設計建物において、間柱型レンズダンパーの応答変形抑制効果により、大地震後の継続使用性が向上することを確認した。

1.3 プロジェクトの趣旨

継続使用WGでの検討結果を受けて、耐震ソリューション部は、間柱型レンズダンパーのRC造建物への適用に向けた詳細検討に着手した。並行して、意匠設計Gに基本設計を依頼し、共同住宅に間柱型レンズダンパーを設置しても、居住性の維持が可能であることを確認した。半年のF/Sを経て、方向性が見えてきたことから、2015年度に本社建築事業本部および首都圏建築支店が参加す

表-1 継続使用性確保のための要求性能

ランク	活動上重要な エリア	左記以外の エリア
S	●	●
A	●	○
B	○	○

●：使用制限することなく継続使用できる
○：一定期間の使用制限の後、継続使用できる

表-2 各部位の分類と大地震後の状態

部位	分類	大地震後の状態
矩形柱、 袖壁、 方立壁	I	応急処置を要しない軽微な損傷のみ許容する。
	II	応急措置または軽微な修復の実施を許容する。
	III	応急措置または修復の実施を許容する。
建築設備	I	人命の安全確保。二次災害の防止。 大きな補修をせずに、必要な機能を相当期間継続できる。
	II	人命の安全確保。二次災害の防止。 短期間の補修により、必要な機能を回復できる。
建具	I	人命の安全確保。二次災害の防止。

表-3 要求性能と各部位の分類の関係

ランク	構造部材 (矩形柱)	袖壁・方立壁		
		活動上 重要なエリア		左記 以外の エリア
		専有部	共用部	
S	I	I	I	I
A	II	II	II	III
B	II	II	III	III

ランク	建築設備		建具
	エレベーター設備	給排水設備	玄関扉 ガラス窓
S	I	I	I
A	II	II	I
B	II	II	I

るプロジェクト（以下、当プロジェクト）が発足した。

当プロジェクトの目標は、間柱型レンズダンパーを設置することで、地震被災後も継続使用が可能なRC造中高層共同住宅を開発することである。各部署が横断的かつ有機的に連携し、2015年度にはプロトタイプを試設計を実施、2016年度には実案件の基本設計を行い、デベロッパーへの提案を行った。

なお、当プロジェクトは、当社の柱となる施策の一つである「耐震ソリューション営業の展開」の中核に位置づけられている。また、建研と国総研により実施されている前述の研究の成果を注視し、当プロジェクトの方針に反映させていくこととする。

2. 試設計の概要

2015年度に当プロジェクトにおいて実施した試設計の概要を示す。

2.1 試設計方針

本試設計では、第一段階として汎用型プランを作成することを目指した。

① 非常用エレベーターは設けない ② 階段は1箇所のみとする ③ 一般的な共同住宅よりもやや余裕のある空間を作るという条件で、階数、各階の住戸数、梁下高さを設定した。図-1に外観パースを示す。

尚、建設地は、免震クリアランスが確保できない首都圏近郊の狭小敷地を想定した。



図-1 外観パース

2.2 レンズダンパー設置計画

図-2に平面図、図-3に軸組図を示す。

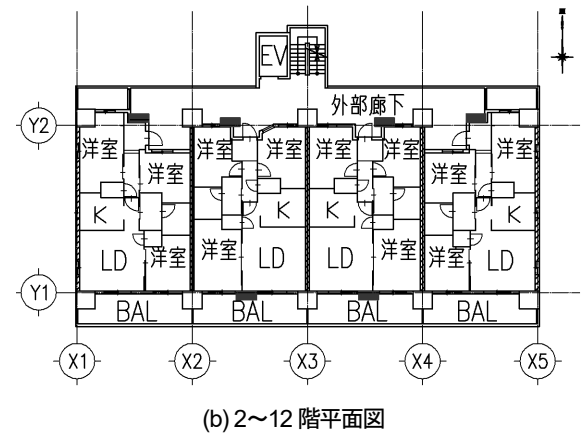
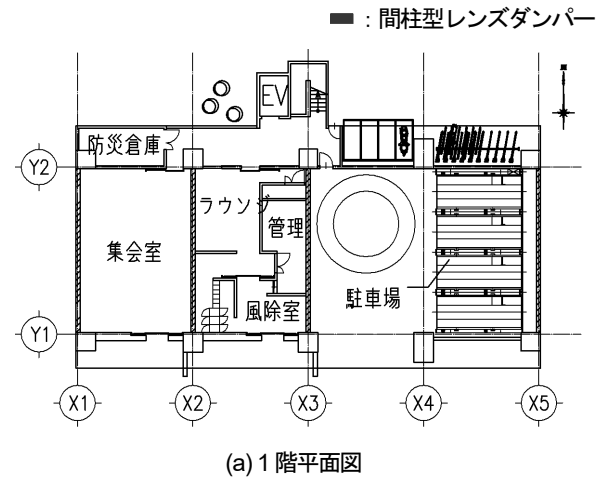


図-2 平面図

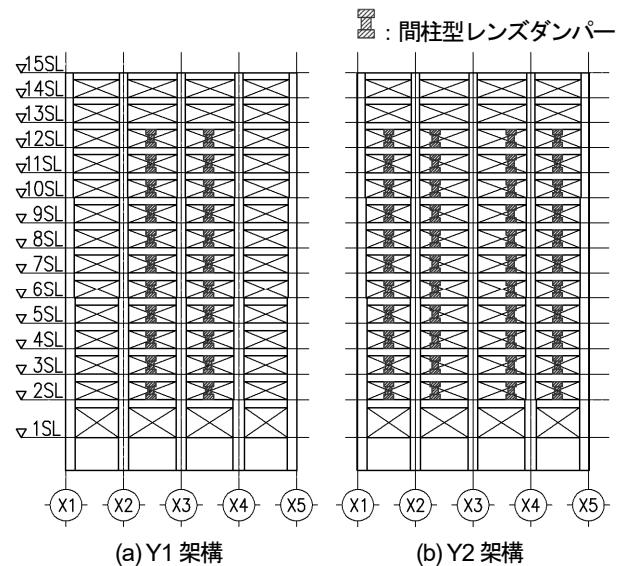


図-3 軸組図

桁行方向は7.05 m×4 スパン，梁間方向は10.20 m×1 スパンとする。

間柱型レンズダンパーは，2～12 階に6 基ずつ，桁行方向に設置する。取付け位置は，バルコニー側はスパン中央，廊下側は玄関扉脇とする。なお，各居室で十分な開口面積を確保できるよう，各住戸の間取りは，間柱型レンズダンパーの配置を考慮して設定した。

図-4 に，廊下側の間柱型レンズダンパー取付けイメージを示す。レンズダンパー周辺のデザインについては，外観を損ねたり圧迫感が生じたりすることがないように配慮したものとした。

表-4 に間柱型レンズダンパーの諸元を示す。レンズダンパーの鋼材種別は全てLY225 とし，形状はtype 12-6～type 22-11 とした。

なお，レンズダンパーとRC 間柱の接合部については，十分な応力伝達能力を有していることを前提とし，詳細設計は省略した。



図-4 間柱型レンズダンパー取付けイメージ

2.3 構造設計方針

(1) 検討方針

桁行方向を検討対象とする。

間柱型レンズダンパーは付加制震とする。

表-5 に検討モデルの一覧を示す。

model-1 では，主架構のみで，一次設計・二次設計を満足することを確認する。ただし，新耐震設計による標準的な建物を想定し，二次設計では，保有水平耐力が必要保有水平耐力をわずかに上回る程度となるよう設計を行う。

model-2 では，model-1 に対して，柱・大梁の断面を大きくし，一次設計・二次設計を満足すること，および極めて稀に発生する地震（以下，極稀地震）に対する応答層間変形角が設計クライテリア以下となることを確認する。

model-3 では，model-1 に間柱型レンズダンパーを付加し，極稀地震に対する応答層間変形角が設計クライテリア以下となることを確認する。

応答層間変形角は，部材立体モデルの時刻歴応答解析により確認する。「極稀地震被災後も躯体・設備機器・建具等が継続使用可能な状態にあること」を設計目標として，設計クライテリアは1/150 rad.とする。

検討用地震波は，告示地表波1波とする。地盤による増幅を考慮し，告示基盤波（神戸位相）の加速度波形に1.2 を乗じたものを採用する。

一次設計・二次設計は（株）構造システムの一貫構造計算プログラム「BUS-5」，時刻歴応答解析は（株）構造システムの弾塑性立体応答解析プログラム「SNAP ver.6」を用いて行う。

表-4 間柱型レンズダンパー諸元

階	レンズダンパー	RC間柱 幅 (mm)×せい (mm)	基数
14	-	-	-
13	-	-	-
12	type 12-6	450×1100	6
11	type 16-8	450×1100	6
10	type 19-9.5	450×1100	6
9	type 19-9.5	450×1100	6
8	type 19-9.5	450×1100	6
7	type 19-9.5	450×1100	6
6	type 22-11	450×1100	6
5	type 22-11	450×1100	6
4	type 22-11	450×1100	6
3	type 22-11	450×1100	6
2	type 19-9.5	450×1100	6
1	-	-	-
合計			66基

表-5 検討モデル

検討モデル	設計方針
model-1	主架構のみ。
	一次設計・二次設計を満足する。
model-2	主架構のみ。
	一次設計・二次設計を満足する。
	応答層間変形角 1/150 rad. 以下。
model-3	model-1 に
	間柱型レンズダンパーを付加。 応答層間変形角 1/150 rad. 以下。

(2) レンズダンパーの特徴

レンズダンパーはLY材（純鉄に近く靱性の高い鋼材）を使用した1枚板の制震ダンパーである。中央部に凹レンズ状の切削加工が施されており、地震時の応力およびひずみがパネル全体に分散されるため、2～3回の極稀地震に対して、十分なエネルギー吸収能力を発揮することができる。

レンズダンパーの各部の寸法は、図-5に示すように板厚（ T ）に比例するため、相似則が成立し²⁾、板厚を変えることでレンズダンパーの設計荷重を自由に設定することができる。

レンズダンパーの板厚は、12～24mmがラインアップされている。板厚が薄いため、共同住宅の共用廊下やバルコニーに設置できるサイズの間柱型ダンパーを構築することが可能となった。

(3) 間柱型レンズダンパーのモデル化

間柱型レンズダンパーの解析モデルは、レンズダンパーのせん断バネとRC間柱のせん断バネを直列に配置したものとす。曲げバネおよび軸バネは設けない。

レンズダンパーのせん断バネの履歴特性は、図-6に示すひずみ硬化型トリリニアモデルとする。耐力・剛性は、LY材の材料特性およびレンズダンパーの形状に応じて設定された値を使用する。

RC間柱については、ひび割れによる剛性低下が生じないことを前提とし、せん断バネの履歴特性は弾性モデルとする。なお、せん断バネの剛性は、せん断力をRC間柱の曲げ変形およびせん断変形による層間変位で除した値とする。

また、レンズダンパーおよびRC間柱のせん断バネの変形は、層間変位から、大梁の曲げ変形に伴い生じる間柱型レンズダンパーの回転による変位を引いた値とする。

2.4 検討結果

(1) 保有耐力計算結果

model-1およびmodel-2で、一時設計・二次設計を満足することを確認した。保有水平耐力の計算結果は、model-1で $Q_u/Q_{un}=1.03$ 、model-2で $Q_u/Q_{un}=1.51$ であり、model-3はmodel-1とmodel-2の中間程度の値となった。

(2) 最大応答層間変形角

各モデルの応答層間変形角を図-7に示す。

応答層間変形角の最大値は、mode-1で1/83 rad. (9階)、model-2で1/163 rad. (9階)、model-3で1/175 rad. (8階)となり、model-2・model-3ともに設計クライテリアを満足することが確認できた。

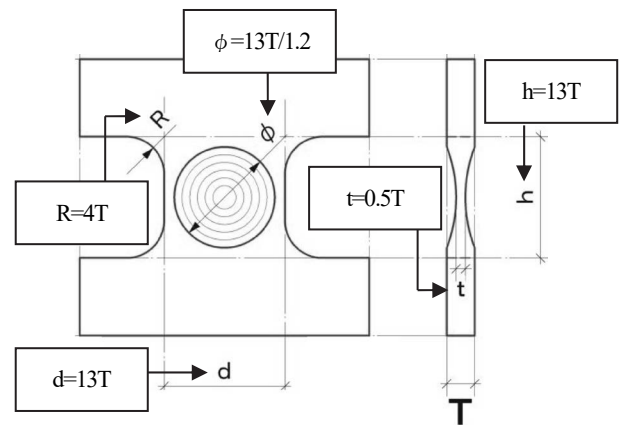


図-5 レンズダンパーの形状

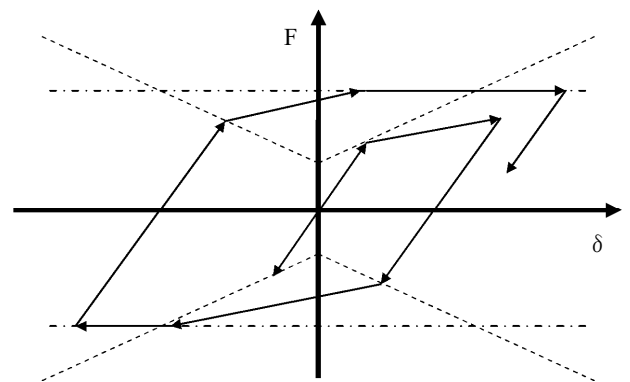


図-6 レンズダンパーの履歴特性

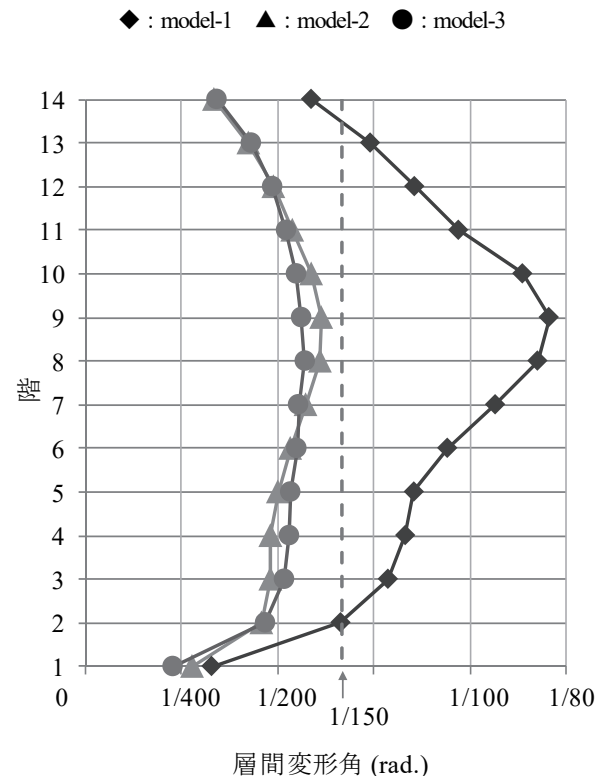


図-7 最大応答層間変形角

2.5 結果検証

(1) 部材断面の比較

図-8に model-2 と model-3 の2階バルコニー側の部材断面を示す。model-2の方が各開口の幅が50mm小さい。また、梁せいが200mm大きいため、階高も200mm大きくして開口高さを確保する必要があるとともに、建物高さが1700mm高いため、非常用エレベーターの設置も必要となる。

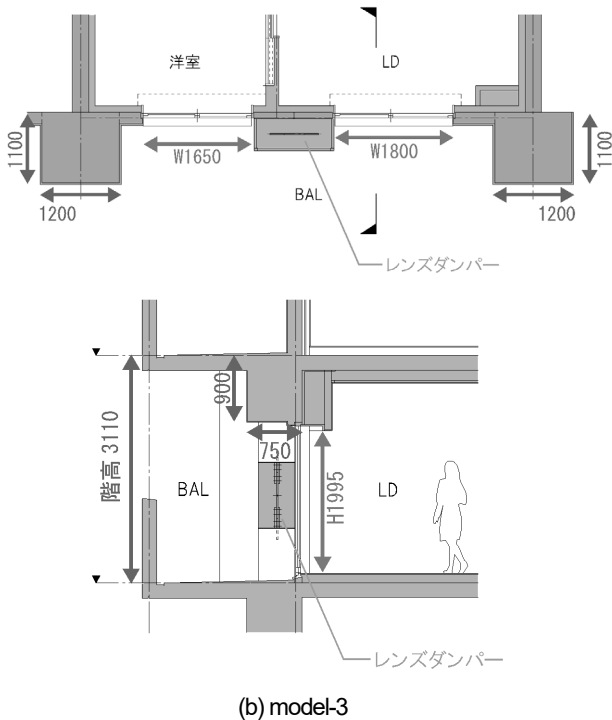
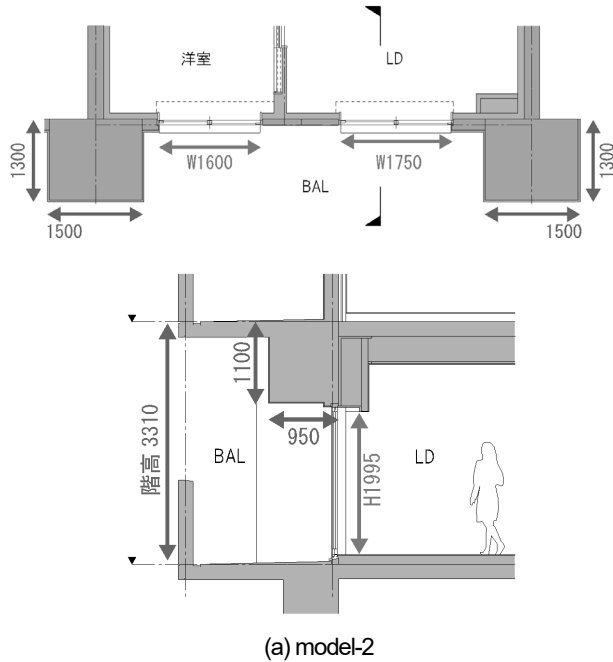


図-8 部材断面の比較

(2) 被害状況の比較

「時刻歴応答解析結果から推定した極稀地震被災後の建物の補修工事費」を「現時点で建物を新築する場合の建設費」で除して100を乗じた値を、「被害指標」と定義する。表-6に示すように、被害指標から建物の被害状況を推定する。

図-9に結果を示す。被害指標は、model-1で40%と高い数値を示し、model-2およびmodel-3では17%前後となった。この結果から、極稀地震によりmodel-1は大破に至るが、model-2およびmodel-3では小破に留まると推定される。

被害指標は一般的に用いられている指標ではないが、model-1とmodel-2・model-3で被害指標に大きな差があることから、極稀地震による被害状況にも明確な差が生じると想定できる。

表-6 被害指標と被害状況の関係

被害指標	ランク	被害状況
0~10%	軽微な被害	二次壁の損傷もほとんどない
10~20%	小破	二次壁にせん断ひび割れ
20~30%	中破	柱・耐震壁にせん断ひび割れ
30~60%	大破	柱の鉄筋が露出・座屈
60~100%	倒壊	建物の一部または全体が崩壊

※ ランクが「小破」以下であれば、建物の継続使用は可能であると位置づける

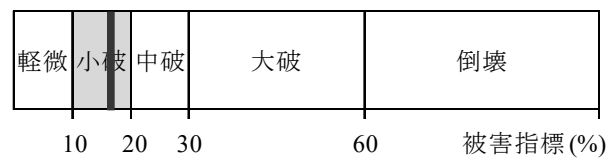
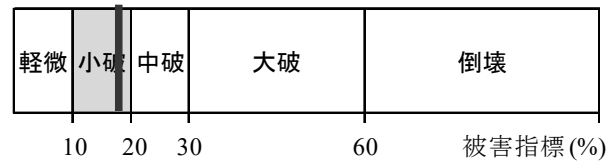
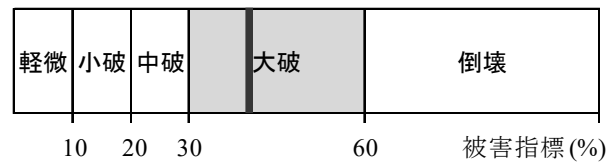


図-9 被害状況の比較

2.6 まとめ

試設計における検討結果のまとめとして、以下の①～⑧に性能比較を示す。また、◎○△の3段階で評価した性能比較の一覧を表-7に示す。

① 建物耐力（強度）

model-1 は、 $Q_u/Q_{un}=1.03$ で、建築基準法における標準的な建物耐力を有しており、model-2 は、 $Q_u/Q_{un}=1.51$ で、標準の1.5倍の建物耐力を有している。

model-3 は、間柱型レンズダンパーの剛性・耐力が付加されるため、model-1 と model-2 の中間程度の建物耐力となる。

② 柱・大梁の塑性化

model-1 は、最大層間変形角が1/83 rad.に達するため、柱・大梁の塑性率も大きくなる。

model-2 および model-3 は、最大層間変形角が1/150 rad.以下であるため、柱・大梁の塑性率は小さい。

③ イニシャルコスト

model-2 では、model-1 と比較して柱・大梁断面が大きいに、建物高さの増加に伴い非常用エレベーターの設置も必要となるため、イニシャルコストの増加が見込まれる。

model-3 では、間柱型レンズダンパーおよび仕上げ材等の材料費、間柱型レンズダンパー設置工事費および付帯工事費が必要となるため、イニシャルコストは増加する。

④ 施工性

model-1 および model-2 は、従来の手法で施工を行うことができる。

model-3 では、間柱型レンズダンパーの設置において、効率よく施工を行うための手法を検討する必要がある。施工性向上のために、RC 間柱をプレキャスト化すること等を考えている。

⑤ 事業性

model-1 では、極稀地震被災後に大規模な補修工事が必要となる可能性が高いため事業性に劣る。

model-2 では、③に記したとおり、階高の増加に伴い、非常用エレベーターの設置が必要となり、イニシャルコスト、ランニングコストともに増大する。階数を減らして、建物高さを抑えることもできるが、住戸の数が減るため、事業性に劣る。

model-3 は、柱・大梁の断面、階数、建物高さを model-1 と同じとしたが、間柱型レンズダンパーにより、地震時の建物の応答変形を抑制することができるため、事業性に優れている。

⑥ 継続使用性

model-1 は、建築基準法に準拠して設計を行っているため人命保護を目的とした建物の倒壊を防ぐことはできるが、地震時の応答変形が大きいため、躯体が大破する

とともに、設備機器や建具に大きな損傷が生じると推定される。よって、極稀地震発生直後の避難および被災後の継続使用は困難であると考えられる。

model-2 および model-3 は、応答層間変形角が1/150 rad.以下であるため、躯体の損傷は小破に留まり、設備機器や建具も健全な状態に保たれ、玄関扉の開閉も容易に行うことができると推定される。よって、極稀地震発生直後の安全な避難および被災後の建物の継続使用が可能であるとと考えられる。

⑦ 被災後の修復性

model-1 では、躯体の大破や設備機器・建具の損傷により、大規模な補修が必要となり、住民の避難が長期化する可能性がある。補修工事が完了する前に余震が繰り返し生じた場合は、さらに被害が拡大すると考えられる。また、補修工事が完了しても、再度極稀地震が生じると、1回目と同程度の被害が生じると考えられる。なお、補修工事の実施が困難な箇所（バルコニー側の非耐力壁等）に多数の重大な損傷が生じた場合は、補修を断念し解体せざるを得なくなる可能性もある。

model-2 および model-3 では、躯体の小規模な補修が必要となるが、設備機器・建具は健全な状態に保たれるため、補修工事中も継続使用が可能であると考えられる。また、補修工事が完了する前に余震が繰り返し生じたとしても、被害が拡大することはないと考えられる。

⑧ 総合評価

model-3 は、標準的な柱・大梁断面をもつ建物に間柱型レンズダンパーを付加することで、地震時の建物の応答変形を抑えることができる。極稀地震被災後は、躯体の小規模な補修が必要となるが、設備機器や建具は健全な状態に保たれるため、地震直後でも安全に避難することができ、補修工事中も継続使用が可能であると考えられる。以上のことから、事業性・継続使用性に優れていると判断できる。イニシャルコストおよび施工性については、model-1 と比較してやや劣るが、まだ改善の余地があると考えられる。

表-7 性能比較

性能	model-1	model-2	model-3
① 建物耐力（強度）	○	◎	◎
② 柱・大梁の塑性化	△	◎	◎
③ イニシャルコスト	◎	△	○
④ 施工性	◎	◎	○
⑤ 事業性	△	△	◎
⑥ 継続使用性	△	◎	◎
⑦ 被災後の修復性	△	◎	◎
⑧ 総合評価	△	○	◎

3. 今後の展開

2016年度には低層のRC造集合住宅を対象として、基本設計を実施し、間柱型レンズダンパーの設置により建物の応答変形が抑制されることを確認した。今後は、試設計における静的弾塑性解析および時刻歴応答解析の結果から、間柱型レンズダンパーが周辺部材に及ぼす影響を精査し、より適切な設計が行えるようにする必要がある。

また、2016年度に間柱型レンズダンパーの実大加力実験を実施し、多くの知見を得た。それらの実験結果に基づき、RC間柱部分の復元力特性の評価方法、レンズダンパーとRC間柱の接合部の詳細設計の検討を行っていく予定である。

さらに、エネルギーの釣合いに基づく耐震計算法を適用することにより、間柱型レンズダンパーを設置した建物を静的設計により通常の確認申請で行えるようにするとともに、主架構部材断面の削減の可否を検討する予定である。

これまで行ってきた検討は、ハード面が主体であったが、CASBEE等でも挙げられている住まいや暮らしに対して建物に求められる強靱性、回復性、耐久性などを考

慮したレジリエンス住宅の考え方³⁾も視野に入れ、開発技術をどのように使うか、ソフト面の検討も必要であると考えている。

謝辞：本試設計を実施するにあたり、首都圏建築支店および本社建築事業本部の営業・意匠設計・設備・構造設計・積算の担当者の方々、並びにレンズダンパー推進協議会の皆様には、多大なご協力をいただきました。本紙面をお借りして感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 喜々津 他：地震後の継続使用性を確保した新築建物の設計・耐震性能評価（その1～6）、日本建築学会学術講演梗概集，pp45-56，2015。
- 2) 山崎 他：レンズ型せん断パネルダンパーの開発（その1～8）、日本建築学会学術講演梗概集，pp835-842，2013，pp851-858，2014。
- 3) 一般社団法人 日本サステナブル建築協会：健康を支え災害に備える住まいと暮らし CASBEE レジリエンス住宅チェックリスト（2016年版），2016。

Summary The March 11, 2011 earthquake off the Pacific coast of the Tohoku region in Japan caused damage to non-load-bearing walls such as partial walls and wing walls of many high-rise and medium-rise reinforced concrete apartment buildings. Some of those buildings had to be demolished because of the heavy damage many non-load-bearing walls had suffered even though main frames remained structurally mostly sound.

In order to mitigate damage to non-load-bearing walls, it is common practice to isolate main frames and non-load-bearing walls by providing structural slits. A possible alternative may be to enhance the earthquake resistance of the building by making effective use of non-load-bearing walls as earthquake-resisting elements.

The authors, therefore, set out to develop a technology to prevent damage to structural frames of newly constructed middle-rise and high-rise apartment buildings by providing reinforced concrete studs with lens dampers (lens-shaped shear panel dampers) so that seismically induced deformation concentrates in the dampers. In an in-house project launched in 2015, the authors developed a trial design embodying the new concept. This report briefly describes that design.

Key Words : Lens Shear Panel Damper; Damping; Disaster Preventing; RC, Apartment House