連結制震システムの開発

Development of Vibration Control System with Connecting Damper

上　寛樹＊　山上　聡＊　反町　敦＊＊

要 旨

超高層 RC 造集合住宅を想定し、建物中央部に配した連層立体耐震壁と外周部ラーメン架構を連結するダンパーを設置することにより、相互の振動特性の違いを利用して効率的に地震エネルギーを吸収し、地震応答を抑制する連結制震システムの開発に取り組んだ。

フレーム模型を用いた振動台実験において、連結制震の基本的性状と有効性を把握した。また、実規模建物を想定し、50 階建連結制震モデル建物による地震応答解析を行った。その結果、連結制震により、地震波の種類によらず地震応答を低減することができ、大地震時においても架構の損傷を軽微に留めることが可能であることを確認した。

キーワード：　超高層、コア壁、連結制震、振動台実験、地震応答解析、損傷制御

1．まえがき

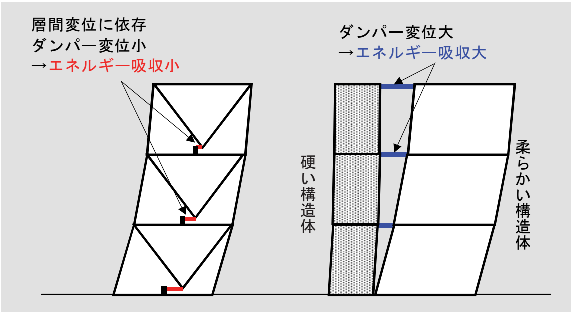
近年盛んである超高層 RC 造集合住宅の計画においては、単に建築基準法で定められる性能を満足するだけでなく、大地震後も構造躯体の損傷を小さくして機能維持を図ることや、構造躯体のスリム化・部材構成の単純化によるフレキシブルな居住空間の実現など、付加価値が求められるようになってきている。

免震構造はこのような要求を満たす一つの方法であるが、免震層を設けることによるプランニングの制約を避けられない。そのため免震構造だけでなく、架構に組み込んだダンパーにより地震エネルギーを吸収して地震応答を低減する「制震構造」も含め、建物条件に応じ、最も合理的な構法を選択することが重要である。

制震構造では地震エネルギーを吸収するために、層の変形に伴う上下階の水平変位差（層間変位）を利用し、架構の層間にダンパーを設置するのが一般的である（図－１(a)）。層間変位は曲げ変形とせん断変形の和となるが、通常、建物の上層になるほど層間変位における曲げ変形の占める割合が大きくなる。そのため、特に超高層建物の上層部ではダンパーが有効に機能するのに十分なせん断変形が生じない。

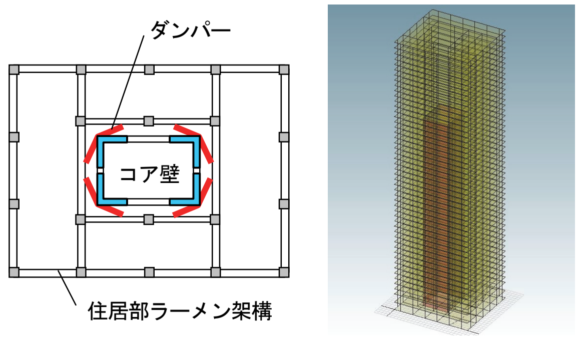
一方、振動特性の異なる二つの構造体の地震時応答の差を利用し、構造体間をダンパーで繋ぐことで構造体全体の応答を低減する「連結制震」と呼ばれる構法が考案されている。この構法では、図－1 (b) に示すように、上層階での大きな応答差を利用してダンパーを効率よく効かせることが可能なため、超高層建物に適した制震構法であると言える。

現在、建物平面中心部のコア部分に連層立体耐震壁（コア壁）を、その外周に住居部分となるラーメン架構を配し、両架構間にダンパーを設置した連結制震構法の



(a)　一般的な制震　　　(b)　連結制震

図－１　一般的な制震と連結制震



図－２　コア壁を利用した連結制震構法

＊技術研究所　＊＊東日本支社建築設計部

開発を進めている（図－２）。本報告では、連結制震構法の地震応答低減効果の把握を目的に実施した、フレーム模型を用いた振動台実験、ならびに実規模建物での制震効果を確認するための 50 階モデル建物を用いた地震応答解析結果について報告する。

２．フレーム模型を用いた振動台実験

2.1　実験概要

連結制震の地震応答低減効果を検証するため、フレーム模型を用いた振動台実験を行った。模型の概要を図－３に示す。模型は、各層のおもりをバネ鋼板で連結した 3 質点フレームモデル 2 台（A フレーム、B フレーム）を振動台上に並列して設置し、それらの頂部をダンパーにより連結している。B フレームはバネ鋼板の枚数を、各層共Aフレームの 1.5 倍とすることで、フレームの剛性を変えて固有周期に差をつけている。なお固有周期はAフレームが 0.8 秒、B フレームが 0.6 秒である。ダンパーは、粘性体を満たした容器に抵抗板を浸漬し、抵抗板が粘性体中を動く際の粘性抵抗を利用して減衰力を発揮する。粘性体容器は A フレーム頂部に設置したスライドレール上に取り付けられており、ロッドにより B フレーム頂部と接続することで、B フレーム頂部と同一の水平変位が生じる。一方、抵抗板は A フレーム頂部に固定されているため、A、B 両フレーム間の相対的な変位に応じて粘性体中を動くことにより、減衰力が得られる仕組みである。なお、ダンパーの減衰力は(1)式で表される。

$$F=0.284\cdot exp(-0.023t)\cdot S\cdot(V/d)^{0.53} \qquad (1)$$

ここで、F：抵抗板 1 面あたりの減衰力(N)

t：粘性体温度(℃)

S：抵抗板 1 面の浸漬面積(cm^2)

V：抵抗板と粘性体の相対速度(cm/sec)

d：抵抗板と容器とのせん断隙間(cm)

主な計測項目は、振動台ならびに模型各層の加速度と層間変位、A-B フレーム間の相対変位、およびダンパー接続ロッドに生じる軸力である。

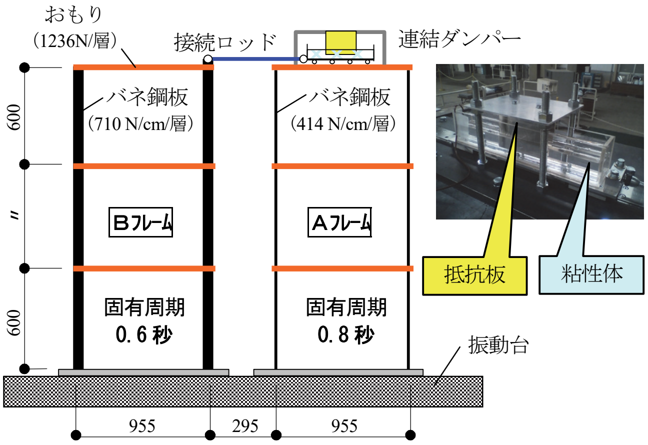
振動台による加振は水平一方向とし、加振波は以下の 3 波とした。

・各フレームの固有周期（A：0.8 秒、B：0.6 秒）に周期を合わせた正弦波を、時刻歴で重ね合わせた波（＝正弦波重ね合せ）

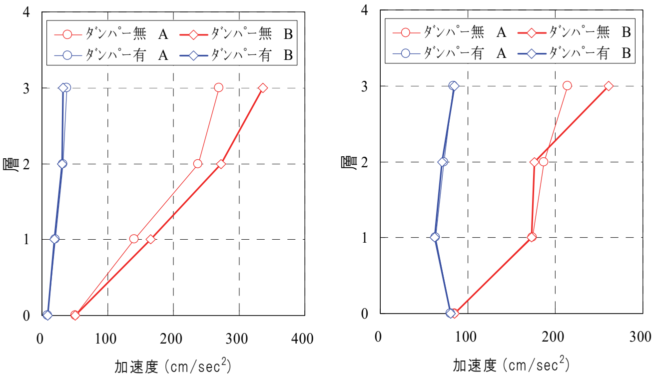
・異なる周波数成分を均等に含む波（＝ランダム波）

・兵庫県南部地震神戸海洋気象台南北方向観測波（＝JMA 神戸波）

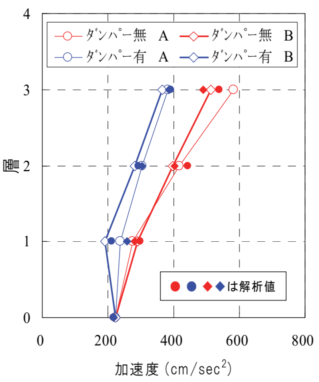
なお、加振においてはフレームの層間変位が最大 5cm 程度以下となるよう加速度レベルを設定した。各加振波の入力加速度はそれぞれ、正弦波重ね合せが 30gal、ランダム波が 100gal、JMA 神戸波が 150gal となっている。



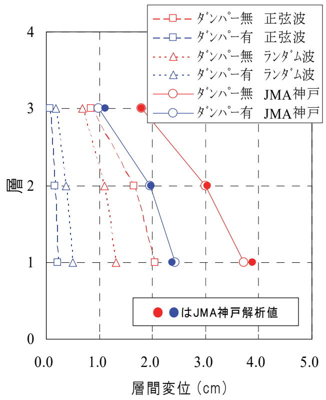
図－３　フレーム模型の概要



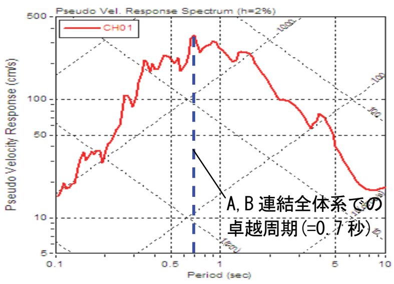
(a) 正弦波重ね合せ　　(b) ランダム波



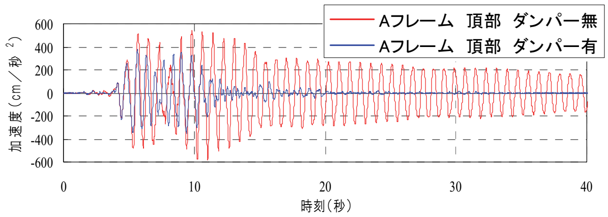
(c) JMA 神戸波



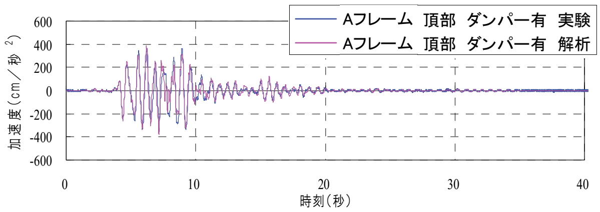
図－４　最大応答加速度　　図－５　最大応答層間変位



図－６　JMA 神戸波の速度応答スペクトル



図－７　Ａフレーム頂部の応答加速度波形（JMA 神戸波）



図－８　実験値と解析値の比較（JMA 神戸波）

2.2　実験結果

加振 3 波それぞれについて、A フレーム、および B フレームの各層における最大応答加速度を**図－４**(a)～(c)に、A フレームの最大応答層間変位を**図－５**に示す。

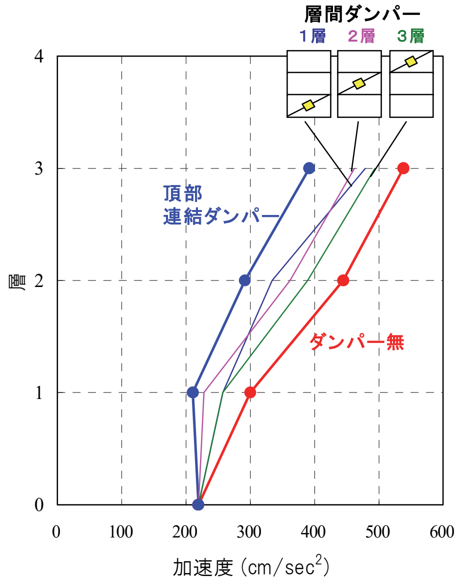
連結ダンパー有の場合、ダンパー無の場合に比べ、A, B 両フレーム共に応答低減効果が見られる。ダンパー有の場合の最大応答加速度は、正弦波重ね合せでは 10～20%程度に、ランダム波では 30～40%程度に、また JMA 神戸波では 65～85%程度に低減されている。いずれの波においても最上層の応答低減効果が最大となっており、建物上層でも制震効果が大きいという連結ダンパーの長所が表れている。なお、JMA 神戸波における応答低減量が他の 2 波に比べて小さくなっているが、これはダンパーで連結したフレーム全体としての振動系における固有周期が 0.7 秒となっており、**図－６**に示す JMA 神戸波の応答スペクトルにおける卓越周期に合致しているためである。

図－７に同地震波における A フレーム頂部応答加速度の時刻歴波形を、連結ダンパーの有無により比較して示す。連結時の固有周期が JMA 神戸波の卓越周期に当たっているにもかかわらず、応答が大きく抑制されていることがわかる。

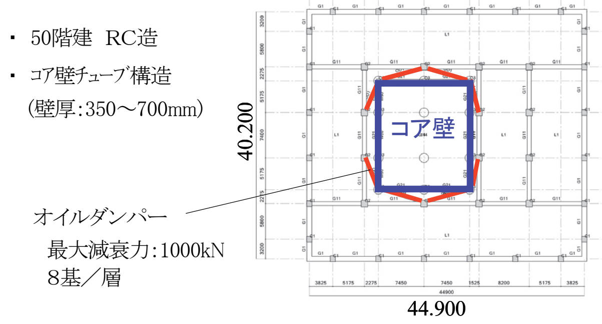
図－４(c)および**図－５**中には、質点系解析モデルを用いた時刻歴応答解析による JMA 神戸波の解析値をプロットしている。また**図－８**に、A フレーム頂部応答加速度の時刻歴波形を、実験と解析を比較して示す。解析には 3 次元フレーム汎用解析プログラム RESP-F3T を使用し、解析モデルは、各層重量を質点に、層間のバネ鋼板を等価せん断バネに置換した 3 質点串団子モデルを頂部ダンパーにて並列に連結したモデルとした。加速度、層間変位、応答時刻歴波形共に解析は実験をよくシミュレートできており、解析方法の妥当性が確認できた。

2.3　連結ダンパーと層間ダンパーの制震効果の比較

架構の層間にダンパーを組み込む一般的な制震構法（層間ダンパー）と、連結ダンパーを用いた連結制震構法の制震効果の違いを検証するため、前述の 3 質点串団子モデルを用いた解析検討を行った。実験に用いたものと同じ特性のダンパー1 基を、層間ダンパーモデルでは特定の 1 層に組み込んだもの、連結ダンパーモデルでは実験と同様に頂部に設置して比較した。**図－９**に JMA 神戸波における A フレームの最大応答加速度を示す。層間ダンパーモデルでは、ダンパーを設置した層に応じて応答低減効果の分布に差はあるが、連結ダンパーの応答低減量に対して概ね半分程度に留まっている。従って、同じ量のダンパーを用いた場合、連結制震は従来の一般的制震に比べて制震効率の高い構法であるということがわかる。



図－９　連結ダンパーと層間ダンパーの制震効果の比較（JMA 神戸波）

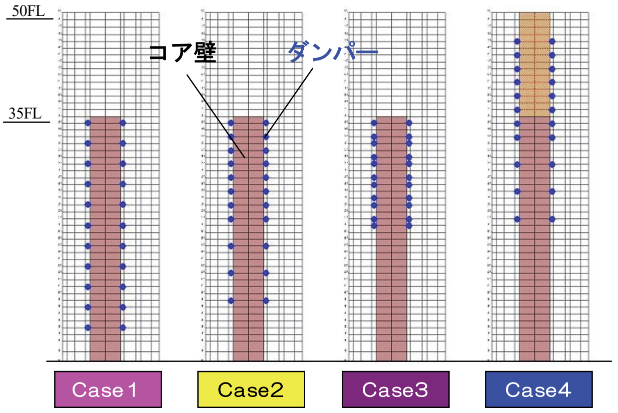


図－10　モデル建物の概要

3．立体フレームモデル建物を用いた地震応答解析による連結制震効果の検証

3.1　解析概要

コア壁を利用した連結制震構法の実規模建物での制震効果を検証するため、超高層 RC 造モデル建物を設定し、立体フレームモデルによる地震応答解析を行なった。



図－11　解析ケース

表－１　主架構とコア壁の固有周期

固有周期 (秒)	主架構		コア壁			
			Case1～3		Case4	
	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向
1次	5.16	5.34	1.07	0.94	1.94	1.71
2次	1.81	1.85	0.25	0.23	0.44	0.39
3次	1.00	1.00	0.12	0.11	0.19	0.17

表－２　入力地震動一覧

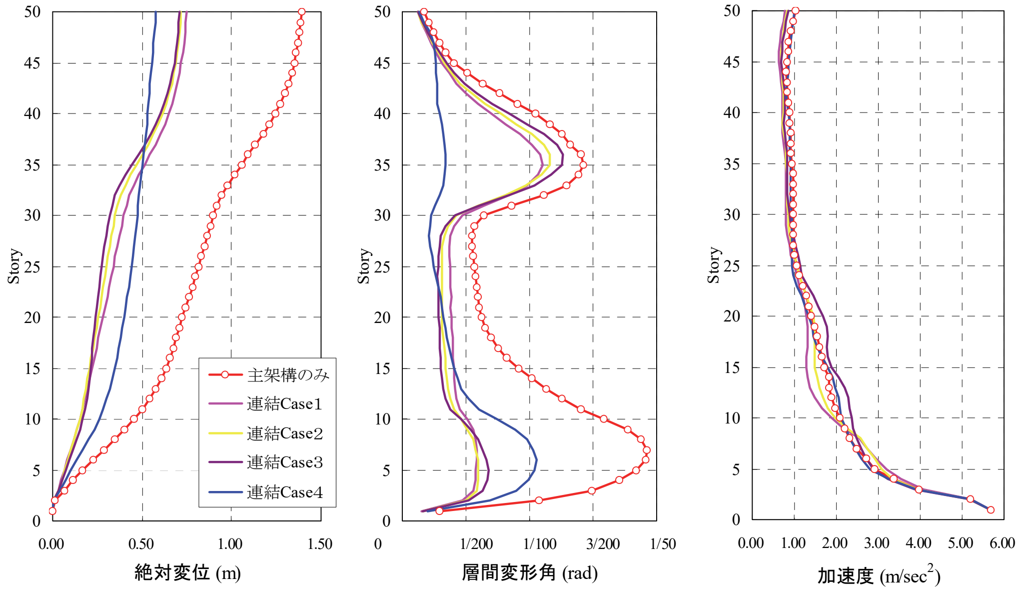
地震波	継続時間 (秒)	最大加速度 (cm/s^2)	最大速度 (cm/s)
EL CENTRO 1940 NS	54	511	50.0
TAFT 1952 EW	54	497	50.0
HACHINOHE 1968 NS	51	333	50.0
告示波１ (ABN951 EW 位相)	200	636	85.3
告示波２ (HACHINOHE NS 位相)	60	569	33.4
告示波３ (JMA 神戸位相)	60	594	26.3
対策試案　区域８波 (阿倍野表層)	600	159	18.3

図－10 にモデル建物の概要を示す。建物階数は 50 階、軒高約 164m の鉄筋コンクリート造集合住宅である。平面形状は外周架構の見付幅が約 45m×40m の矩形である。架構は、平面中央のコア部分に 1 辺約 16m のロの字型連層立体耐震壁（以下、コア壁と称す）を配し、それを取り囲む住居部分を外周ラーメン架構（以下、主架構と称す）で構成している。コア壁と主架構は構造的に独立しており、クリアランス部分に両架構を連結するオイルダンパーを設置している。

解析ケースを**図－11** に示す。解析は X（長辺）方向について行い、ダンパーの立面的な配置が地震応答に及ぼす影響を把握するため、ダンパーの総台数を一定とし、ダンパー設置階の異なる 4 ケースを設定した。ダンパー総台数は文献 1)を参考に、最大減衰力 1000kN のオイルダンパーを計 88 基（1 層 8 基×11 層）配置した。Case1～3 はコア壁を 35 階までとし、Case1 ではダンパーを高さ方向に 3 層毎に均等に、Case2 では上階を密に、また Case3 では 21～35 階に集中的に配置している。Case4 はコア壁を主架構と同じ 50 階までとし、ダンパーを 21 階以上の上層部に密に配置した。

コア壁、および主架構単独での固有周期を**表－１**に示す。1 次固有周期は、コア壁の Case1～3 では 1.07 秒、Case4 では 1.94 秒、主架構では 5.16 秒となっている。

応答解析に用いた地震動の一覧を**表－２**に示す。実地震観測波として EL CENTORO NS、TAFT EW、ならびに HACHINOHE NS の 3 波、平成 12 年建設省告示に定めるスペクトルに適合した告示波 3 波（兵庫県南部地震における阿倍野消防署・JMA 神戸の各位相、HACHINOHE NS 位相）、および長周期地震動として文献 2)に示された区域 8 地震波（阿倍野表層）の合計 7



図－12　主架構の最大応答値（告示波２）

波にて検討した。地震動の強さはいずれもレベル 2 相当（建物耐用年限中に経験しうる最大級の地震動）である。

なお、解析には建築構造解析プログラム RESP-D を使用した。

3.2　解析結果

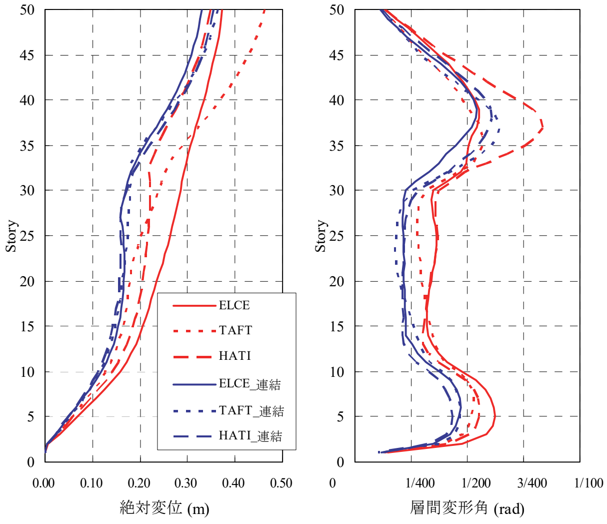
a．ダンパー配置と地震波の違いが応答に及ぼす影響

応答解析に用いた 7 波のうち、主架構単独での応答が最も大きくなった告示波 2（HACHINOHE NS 位相）について、連結制震とした場合の主架構の最大応答値を図－12 に示す。なお、同図中には主架構単独（非連結）での応答値を○印で示している。連結制震とした場合、主架構の応答はいずれの配置ケースにおいても全層に渡って応答低減効果が得られている。最上層の変位は非連結に比べて半分以下となっており、大地震時の居住性が大きく改善されていることがわかる。Case1～3 の低減効果にはそれほど差が見られないが、応答の大きい 7 階、および 35 階付近ではダンパーを均等配置した Case1 の層間変形角が最も小さくなっている。50 階までダンパーを配置した Case4 では、他のケースに比べて 7 階付近の層間変形角の低減効果が小さい。逆に 35 階付近の層間変形角は 1/200rad 以下に大きく低減されており、超高層上層部においてもダンパーによる制震効果が高いという連結制震の長所が表れている。なお、この場合はコア壁を上階まで構築する必要があるため、途中階までダンパーを配する場合に比べて躯体コストが増大することに留意する必要がある。

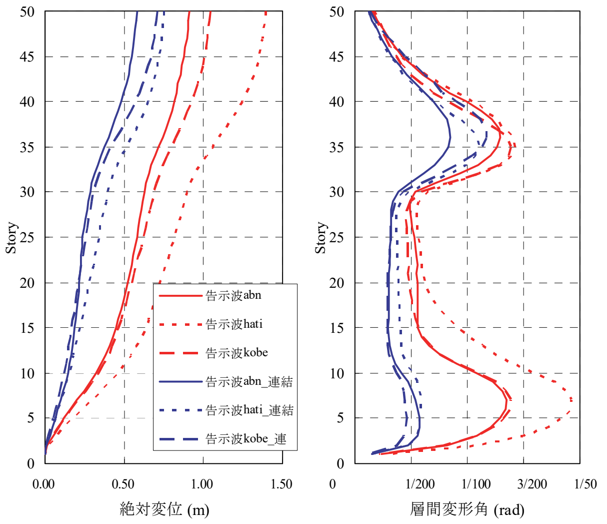
図－13 (a) ～ (c) に実地震観測波、告示波、および区域 8 波に対する Case1 の応答値をそれぞれ示す。いずれの地震波においても連結制震による応答低減効果が表れている。特に実地震波と区域 8 波に対しては、層間変形角が 1/200rad 程度以下と、主架構がほぼ弾性範囲内に抑えられている。告示波については 35 階付近においては層間変形角は 1/100rad 程度までの低減に留まっているが、他の階ではほぼ 1/200rad 以下に抑えられている。これらの結果は、前述のように上階までコア壁を構築してダンパーを配置するなど、構造計画上の工夫により、主架構全体を弾性範囲内に留める設計が可能であることを示唆している。

b．エネルギー吸収

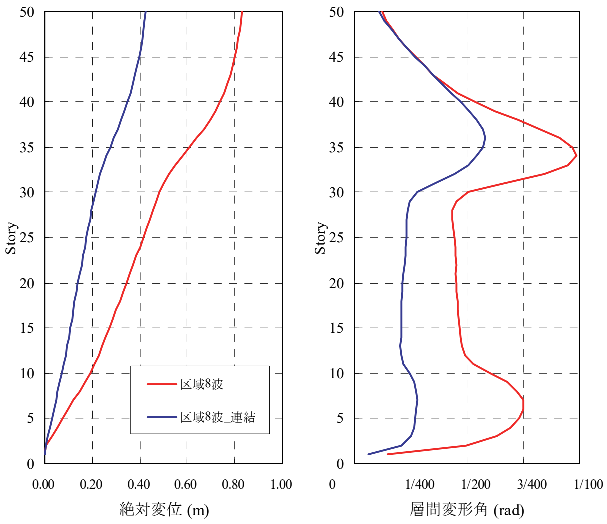
図－14 (a) ～ (c) に連結ダンパーと構造体（主架構部分）それぞれのエネルギー吸収量を Case1～4 について比較したものを示す。いずれの地震波においてもダンパーの吸収量は構造体のそれを上回っている。ダンパーのエネルギー吸収量は、観測 3 波では Case2、告示波では Case1、また区域 8 波では Case4 が最も大きくなっており、エネルギー吸収を最大とするダンパー配置は、個々の地震波の特性に応じて異なり、ある一つの形式に特定できないことが分かる。また、Case3 はいずれの地震波においても他のケースに比べて構造体のエネルギー吸収



(a) 実地震観測波

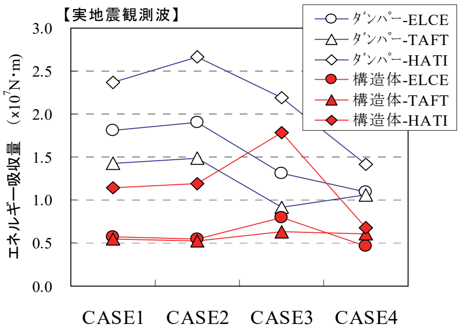


(b) 告示波

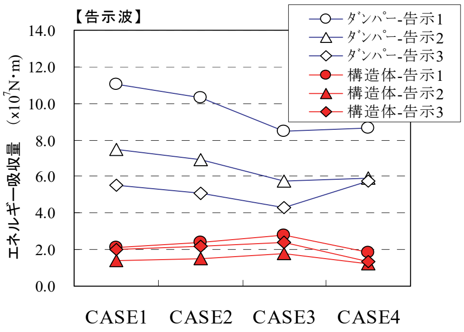


(c) 長周期地震動（区域８波）

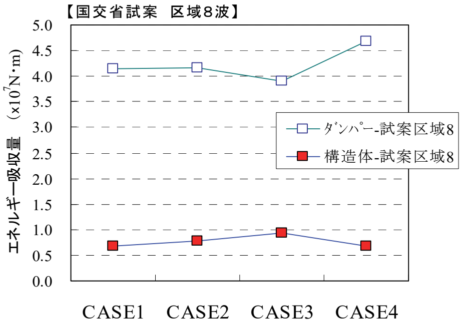
図－13　各地震波における主架構の最大応答値（Case1）



(a) 実地震観測波

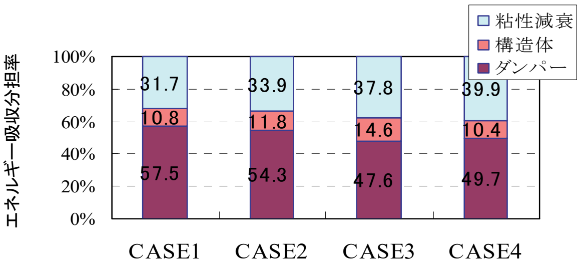


(b) 告示波

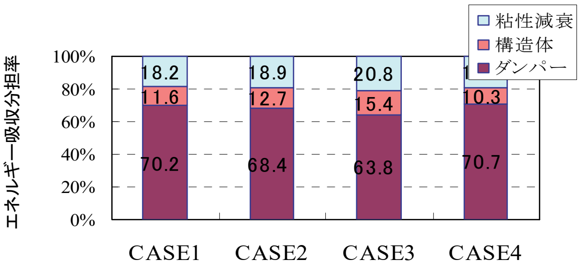


(c) 長周期地震動（区域８波）

図−14　ダンパーと構造体（主架構）のエネルギー吸収量



(a) 告示波２



(b) 長周期地震動（区域８波）

図−15　エネルギー吸収割合

が大きくなっている。Case3 では、前述の**図−11** でダンパーを配置していない下層部の応答が他のケースよりも大きくなっていることからも分かるように、ダンパーを局部的に集中して配置することは、応答低減効率が低下し、結果として構造体の損傷度合を大きくしてしまう可能性があり、合理的な配置法とは言えない。

図−15 に告示波 2（HACHINOHE NS 位相）、ならびに区域 8 波について、エネルギー全吸収量における、ダンパー、構造体、および粘性減衰それぞれの吸収割合を示す。ダンパーのエネルギー吸収割合は、告示波 2 では約 48〜58%となっている。層間にダンパーを設置する一般的な制震構法においては、ダンパーのエネルギー吸収割合がせいぜい 10 数%であることを考慮すれば、連結ダンパーが非常に高い制震効率を有していることが分かる。

また、長周期地震動である区域 8 波では、ダンパーのエネルギー吸収割合は約 64〜71%に達している。長周期の揺れが長時間続く地震動に対し、共振による応答増幅が引き起こす損傷が危惧される超高層建物において、連結制震は大変有効な構法であると考えられる。

4．まとめ

フレーム模型を用いた振動台実験により、連結制震構法の制震効果を把握し、同構法が従来の層間ダンパーによる制震に比べ、効率の優れた方法であることがわかった。また、実規模建物を想定した立体フレームモデルを用いた解析検討により、コア壁を利用した連結制震構法が、主架構部分の応答を効果的に低減できること、応答低減効果はコア壁の規模やダンパー配置に影響を受けること、また大地震時でも主架構を弾性範囲内に留められる可能性があることが確認できた。

5．おわりに

今後、模型実験においては各層の剛性やダンパー特性、配置を要因とした追加実験の実施、また立体フレームモデルによる解析検討では、階数や平面規模、コストも踏まえた適用範囲の把握を計画している。それらと共に、実験と制震設計を繋ぐための理論的なアプローチにも取り組んでいきたい。

【参考文献】

1) 西村勝尚、福本義之、他、「連結制振構造を適用した超高層ＲＣ造建物の制振効果」、GBRC vol.35 No.2 2010.4
2) 国土交通省、「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案について」、平成 22 年 12 月 21 日