

論文 RC 造間柱型ダンパーを設置した制震構造建物の制震効果に関する研究

小山 大樹^{*1}・亘 健太郎^{*1}・坂本 駿仁^{*1}・北嶋 圭二^{*2}

要旨 : RC 造間柱型ダンパーを設置した制震構造建物は、ひび割れによる間柱部の曲げ変形の進展および間柱と梁の接合する節点の回転により、ダンパーの降伏変位に遅れが生じる。その際の RC 造間柱型ダンパーのエネルギー吸収性能を把握するために、RC 造間柱型ダンパー単体および RC 造間柱型ダンパーを設置した 3 層 1 スパン RC 造フレームの解析スタディーを実施する。これらの影響を把握した上で、著者らが提案している等価線形化法に基づく制震設計法による制震設計スタディーを実施し、時刻歴応答解析結果から RC 造間柱型ダンパーを設置した制震構造建物の制震効果について検討する。

キーワード : 制震構造, 耐震性能, 制震間柱, RC 造間柱, 時刻歴応答解析

1. はじめに

近年、大地震後にも建物を継続使用するために高い耐震性能が求められている。そこで、建物へ入力される地震エネルギーをダンパーで吸収させることで、建物の耐震性能を向上させる制震構造が広く普及されている¹⁾。この際、ダンパーの取付け方法はブレース型や間柱型と様々であるが、間柱型ダンパーは開口部を塞ぐことなく設置できる特徴を持つ。

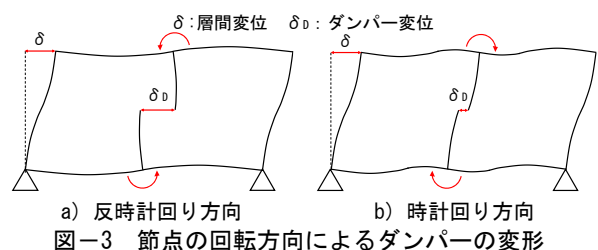
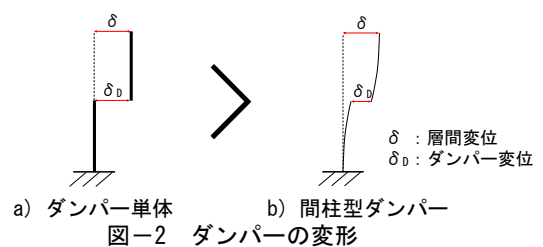
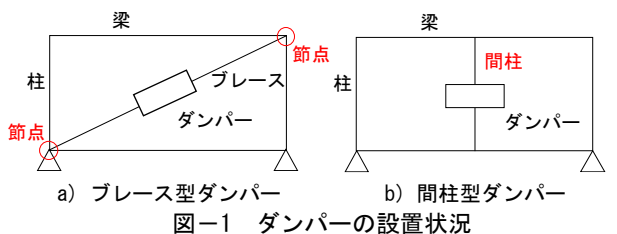
ダンパーの設置状況を図-1 に示す。ブレース型ダンパーは対角線状の節点間にブレースを介してダンパーを設置するため、層間変位を直接ダンパーへ伝達することが出来る。しかし、間柱型ダンパーは梁と間柱を介してダンパーを設置するため、層間変位をダンパーへ伝達する途中で、様々な要因によりダンパー変位の低下が考えられる。第一の要因は、間柱型ダンパー(ダンパー+間柱部)の間柱部の変形の影響である。間柱部が曲げ変形およびせん断変形するため、ダンパー変位は層間変位より小さくなる(図-2)。第二の要因は、間柱型ダンパーが取り付く梁と間柱型ダンパーの節点の回転角の影響である。図-3a)のように節点が反時計回りに回転すると間柱部が剛体であればダンパー変位は層間変位より大きくなるが、b)のように時計回りに回転するとダンパー変位は層間変位より小さくなる。節点の回転方向は、梁と間柱の剛性により決定される。なお、間柱やフレームが RC 造である場合、ひび割れや降伏による剛性低下が生じるため、これらの関係はより複雑になる。

そこで本論文では、RC 造間柱型ダンパーを設置した制震構造建物の制震効果を明らかにすることを目的とし、まず、RC 造間柱型ダンパー単体および RC 造間柱型ダンパーを設置した 3 層 1 スパン RC 造フレームの解析スタディーを実施し、RC 造間柱型ダンパーのエネルギー吸収性能を把握する。また、これらを把握した上で筆者ら

が提案している等価線形化法に基づく制震設計法²⁾を用いて制震設計スタディーを実施し、RC 造間柱型ダンパーを設置した制震構造建物の制震効果について検討する。

2. 検討対象建物

RC 造間柱型ダンパーを設置する制震構造建物の基準フレームは、日本建築防災協会「構造設計・部材断面事例集」³⁾の桁行方向スパン 7.6 m, 10 階建ての RC 造共同住宅を参考にし、保有水平耐力が必要保有水平耐力とほぼ同程度となるように柱・梁断面を設計した。図-4 に基準フレームの基準階伏図を、図-5 に軸組図を、表-1 に各部材寸法を示す。



*1 日本大学大学院 理工学研究科海洋建築工学専攻 博士前期課程 (学生会員)

*2 日本大学 理工学部海洋建築工学科 教授 博士(工学) (正会員)

3. ダンパー単体およびRC造間柱型ダンパー単体の解析スタディー

本章では、RC造間柱型ダンパーを設置した3層1スパンRC造フレームの解析スタディーの第一段階の検討として、ダンパー単体およびRC造間柱型ダンパー単体の解析スタディーを行い、間柱部の曲げ変形成分がダンパーのエネルギー吸収性能に及ぼす影響を把握する。

3.1 解析概要

解析対象は、ダンパー単体とRC造間柱型ダンパー単体(以下、間柱型ダンパー単体)とする。解析には、3次元フレーム汎用解析プログラム「RESP-F3T」を用いた。

表-2にダンパー諸元を示す。ダンパーはレンズ型せん断パネルダンパー⁴⁾を使用し、耐力の異なるLD12-6、LD16-8、LD24-12の3タイプについて解析を行う。ダンパー単体は、1本の水平弾塑性ばねでモデル化し、履歴特性はノーマルバイリニアを用いた。ダンパーの降伏後剛性低下率は初期剛性に対し1/300に設定した。

図-6に間柱型ダンパー単体の解析モデルを、表-3に間柱部断面表、表-4に解析諸元を示す。間柱型ダンパー単体は、上下間柱部とダンパーの3部材を1本の直列部材として扱い(階高 $H=3,010\text{mm}$)、曲げ特性を材端剛塑性ばね、せん断特性を水平弾塑性ばねでモデル化した。水平弾塑性ばねの弾性剛性は、ダンパー単体の水平剛性と間柱部のせん断剛性を直列結合して求めた等価剛性とし、履歴特性はノーマルバイリニアを用いた。また、間柱部はLD12-6の降伏荷重に対して曲げひび割れが発生しないような断面を設定した。

ダンパー単体および間柱型ダンパー単体の解析は、頂部水平変位を変位制御による片押し解析と正負交番の繰り返し解析を行う。頂部水平変形角(R)を片押し解析では $R=1/100\text{rad}(=30.1\text{mm})$ 到達時まで、繰り返し解析では $R=1/333, 1/1333, 1/500, 1/200, 1/133, 1/100\text{rad}$ を目標値とした。

3.2 解析結果

(1) 片押し解析結果

図-7a)~c)に間柱負担せん断力-層間変位関係を、d)に層間変位に対する間柱の水平弾塑性ばね変位の割合(以下、ダンパーの実効変形比)の推移を示す。なお、図中“○”は間柱部の曲げひび割れ発生時を、“△”はダンパーの降伏時を示す。

間柱型ダンパー単体のダンパー降伏時の層間変形角(R_{dy})はLD12-6で $1/1760\text{rad}(1/3202\text{rad})$ 、LD16-8で $1/598\text{rad}(1/2408\text{rad})$ 、LD24-12で $1/242\text{rad}(1/1610\text{rad})$ であった。なお、()内はダンパー単体の降伏時層間変形角を示している。LD12-6では、ダンパーが降伏するまで間柱部の曲げひび割れは生じないため、間柱部の曲げおよびせん断変形分のみダンパー単体より降伏変位が遅れた。しかし、ダンパーの耐力が大きいLD16-8、LD24-12では、ダンパ



表-1 柱梁寸法

階	柱
	$D \times D \times D_y$
9~10	1,000 x 650
6~8	1,000 x 700
4~5	1,000 x 750
1~3	1,000 x 800
階	梁
	$b \times D$
7~11	550 x 800
2~6	650 x 900

単位:mm

表-2 ダンパー諸元

LSPDtype	板厚 t_f [mm]	中央部厚さ t_c [mm]	初期剛性 k_i [kN/mm]	降伏荷重 F_y [kN]	降伏変位 δ_y [mm]
LD12-6	12	6	171	160	0.94
LD16-8	16	8	228	284	1.25
LD24-12	24	12	342	640	1.87

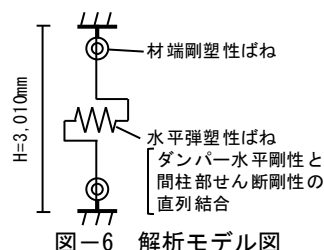


表-3 間柱部断面表

間柱	
$B \times D$	250 x 1100
主鉄筋X	10-D25
主鉄筋Y	-
帯筋	2-D10@100

表-4 解析諸元

部材	要素	成分	モデル	復元力特性
間柱	ビーム	曲げ	材端ばね(M-θ型)	トリリニア(Takedaモデル)
		せん断	水平ばね	バイリニア(ノーマル)

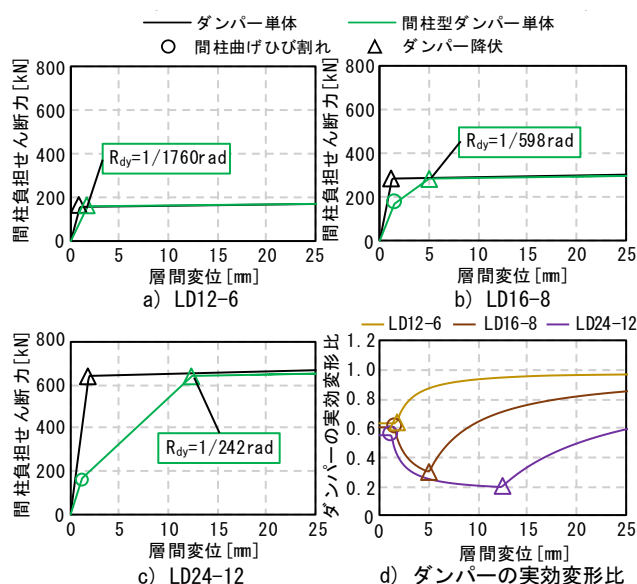


図-7 片押し解析結果

ーが降伏するまでに間柱部で曲げひび割れが生じ、間柱部の曲げ変形が進展したことでダンパー単体より降伏変位が大幅に遅れた。

ダンパーの実効変形比(図-7d))は、間柱部の曲げひび割れが生じることで大きく低下し、ダンパーが降伏する

ことで上昇する傾向を示した。また、層間変形角 $1/120\text{rad}$ 到達時のダンパーの実効変形比は LD12-6 で 0.96, LD16-8 で 0.83, LD24-12 で 0.60 であり、ダンパーの降伏変位が遅れるほどダンパーの実効変形比は小さくなった。

(2) 繰り返し解析結果

図-8a)～c)に間柱負担せん断力-層間変位関係を、d)に各サイクルのダンパー単体に対する間柱型ダンパー単体の履歴面積比を示す。間柱型ダンパー単体は、ダンパーの降伏変位が遅れることで、ダンパー単体より履歴面積が小さくなった。各サイクルの履歴面積比(図-8d))は、ダンパーが降伏するまでは低下し、降伏後から上昇する傾向を示し、図-7d)のダンパーの実効変形比の傾向と概ね対応していた。そのため、片押し解析でダンパーの実効変形比を確認することで、間柱型ダンパーのエネルギー吸収性能(履歴面積)を評価できることが確認できた。

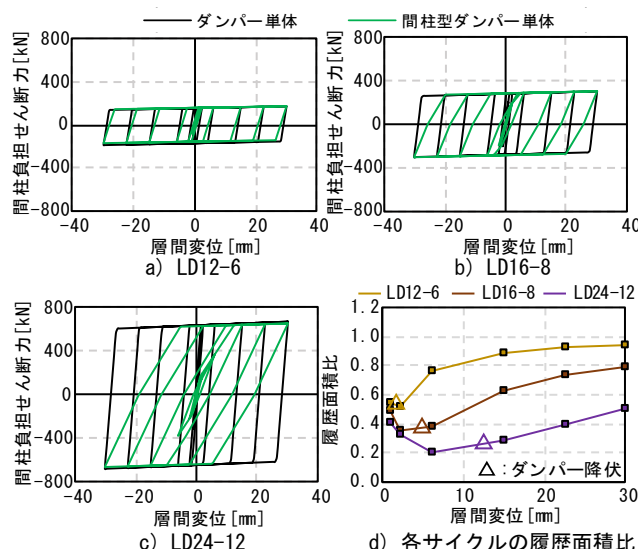


図-8 繰り返し解析結果

4. RC 造間柱型ダンパーを設置した 3 層 1 スパン RC 造フレームの解析スタディー

本章では、前章で示した解析結果をもとに、RC 造間柱型ダンパーを設置した 3 層 1 スパン RC 造フレームの解析スタディーを行う。

4.1 解析概要

解析対象は、3 層 1 スパン RC 造フレーム(以下、フレームのみ)と間柱型ダンパーを設置したフレーム(以下、間柱型ダンパー付きフレーム)とする。解析には、3 次元フレーム汎用解析プログラム「RESP-F3T」を用いた。

図-9 にフレームのみと間柱型ダンパー付きフレームの解析モデルを、表-5 に各部材断面表を、表-6 に解析諸元を示す。フレームは、2 章に示した検討対象建物の 6 ～ 8 階部分に相当し、スパン 7,600 mm、階高 3,010 mm、全高 9,030 mm である。間柱型ダンパー付きフレームの解析モデルは、フレームのみの解析モデルの各スパン中央に間柱型ダンパーを設置した。各部材ともに、曲げ特性を材端剛塑性ばねで、せん断特性を水平弾塑性ばねでモデル化した。間柱の水平弾塑性ばねは、前章と同様の方法でモデル化し、ダンパーも LD12-6、LD16-8、LD24-12 の 3 タイプについて解析を行う。

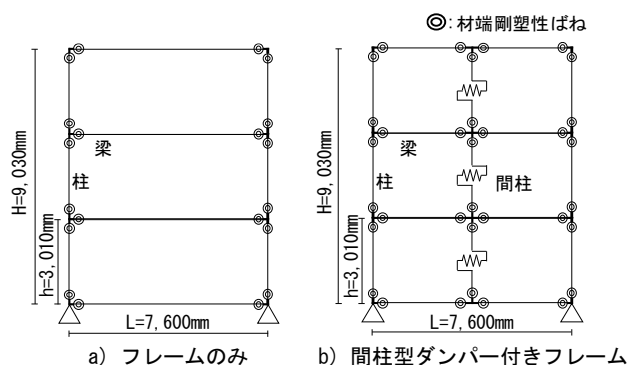


図-9 解析モデル

解析は、頂部水平変位を変位制御による片押し解析と正負交番の繰り返し解析を行う。頂部水平変形角(R)を片押し解析では $R=1/100\text{ rad}(=90.3\text{ mm})$ 到達時まで、繰り返し解析では $R=1/3333, 1/1333, 1/500, 1/200, 1/133, 1/100\text{ rad}$ を目標値とした。なお、解析評価対象は、中間層部分である 2 層部分とする。

4.2 解析結果

(1) 片押し解析結果

図-10 に $R=1/120\text{ rad}$ 到達時の節点位置での曲げモーメント図を示す。間柱型ダンパー付きフレームは、梁と間柱の節点に曲げモーメントが作用することで梁の曲げモーメント勾配が大きくなり、フレームのみより節点位置での曲げモーメントが大きくなった。そのため、柱 1 本当たりの負担せん断力が増えている。また、ダンパーの耐力が大きい LD24-12 では、フレームのみより節点位置で大きな曲げモーメントが生じ、間柱が取付く大梁中央部にも曲げひび割れが生じた。

表-5 各部材断面表

	梁	柱	間柱
部材断面			
B × D [mm]	550 × 800	700 × 1000	250 × 1100
主筋	16-D32	16-D32	20-D22
せん断補強筋	3-S13@150	3-S16@100	2-D10@100

表-6 解析諸元

部材	要素	成分	モデル	復元力特性
梁	ビーム	曲げ	材端ばね (M-θ 型)	トリリニア (Takedaモデル)
		せん断	水平ばね	トリリニア (原点指向型)
柱	ビーム	曲げ	材端ばね (M-θ 型)	トリリニア (Takedaモデル)
		せん断	水平ばね	トリリニア (原点指向型)
間柱	ビーム	曲げ	材端ばね (M-θ 型)	トリリニア (Takedaモデル)
		せん断	水平ばね	バイリニア (ノーマル)

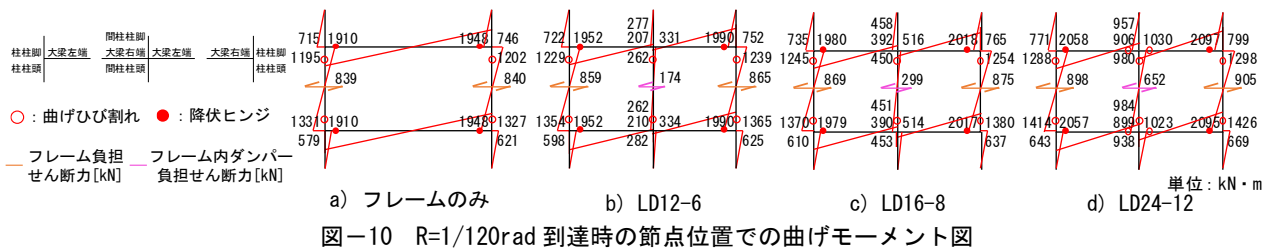


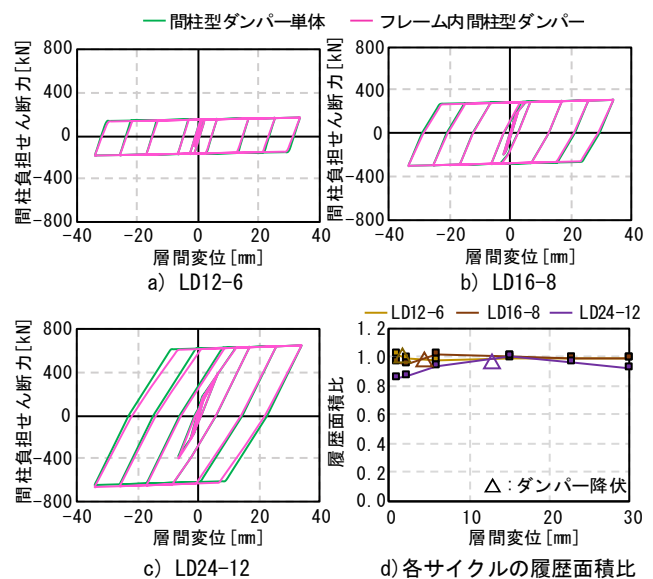
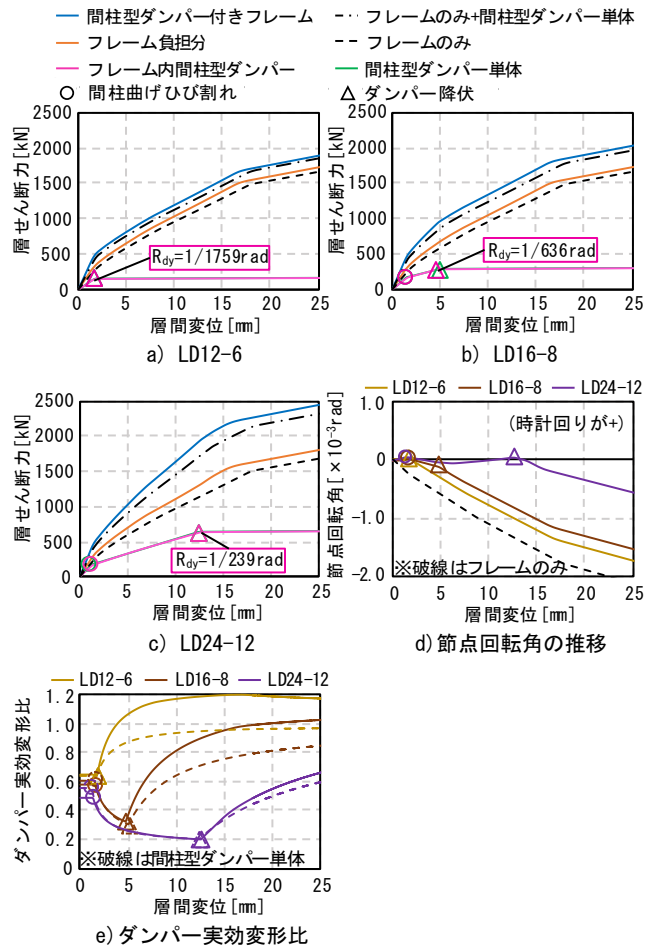
図-11a)～c)に間柱型ダンパー付きフレームの層せん断力-層間変位関係を、d)に梁と間柱の節点の回転角推移を、e)にダンパーの実効変形比の推移を示す。また、参考として前章で示した間柱型ダンパー単体の負担せん断力-層間変位関係(図中——)と、フレームのみの負担せん断力-層間変位関係(図中——)と、また、これらを単純累加した層せん断力と層間変位の関係(図中——)を示す。

間柱型ダンパー付きフレームのフレーム負担せん断力は、図-10 に対し記した理由により、同じ層間変位時にフレームのみより大きくなった。また、フレーム内間柱型ダンパーのダンパー降伏時の層間変形比(R_{dy})は LD12-6 で 1/1759 rad, LD16-8 で 1/636 rad, LD24-12 で 1/239 rad であり、梁を介して間柱が取付いているにも関わらず、間柱型ダンパー単体と概ね一致していた。これは、梁と間柱の節点の回転角(図-11d))が、フレームのみ場合の反時計回りの回転(図中破線)と節点に作用する曲げモーメントによる時計回りの回転が相殺して、ダンパーが降伏するまで回転角がほぼ 0 付近であったためと考えられる。ただし、ダンパーが降伏して間柱型ダンパーの剛性が低下すると、節点は反時計回り方向に回転し始めた。

層間変位に対する間柱の水平弾塑性ばね変位の割合であるダンパーの実効変形比(図-11e))は、前章と同様に、間柱曲げひび割れが生じることで大きく低下し、ダンパーが降伏することで上昇する傾向を示した。さらに、ダンパーの降伏後から節点が反時計回り方向に回転したことで、間柱型ダンパー単体よりダンパーの実効変形比は大きくなり、ダンパーの降伏変位が早い LD12-6 では、間柱の水平弾塑性ばね変位が層間変位より大きくなった。

(2) 繰り返し解析結果

図-12a)～c)に間柱負担せん断力-層間変位関係を、d)に各サイクルの間柱型ダンパー単体に対するフレーム内間柱型ダンパーの履歴面積比を示す。フレーム内間柱型ダンパーは、ダンパーの実効変形比が間柱型ダンパー単体より大きいことで、履歴面積も大きくなると予想したが、間柱型ダンパー単体とダンパー降伏時の層間変位が概ね一致していたため、横軸を層間変位とした図-12 では、履歴面積および各サイクルの履歴面積比に大きな差は見られなかった。すなわち、フレーム内間柱型ダンパーの履歴面積は、ダンパーが降伏するまでの挙動で決まることがわかった。



以上の検討から、RC 造間柱型ダンパーのエネルギー吸収性能(履歴面積)は、ダンパーの耐力が大きい程、間柱部の曲げ変形が進展してダンパーの降伏変位が遅れ、履歴面積が小さくなることが確認できた。

5. 制震設計スタディー

本章では、前章までの解析結果をもとに、著者らが提案している等価線形化法に基づく制震設計法²⁾を用いて制震設計スタディーを実施し、RC 造間柱型ダンパーを設置した制震構造建物の制震効果について検討する。

5.1 解析概要

図-13 に制震設計のフロー²⁾を示す。制震設計スタディーは、2 章で示した RC 造 10 階建て建物の桁行方向を対象に、RC 造間柱型ダンパーを用いて行う。なお、ダンパーはレンズ型せん断パネルダンパーを用いる。柱や梁、間柱の曲げ履歴特性は武田モデルを、ダンパーの履歴特性はノーマルバイリニアを用いた。解析には、静的増分解析で「Super Build/SS3」を、時刻歴応答解析で立体フレーム動的弾塑性解析プログラム「SS21/3D・DynamicPRO」を用いた。時刻歴応答解析における構造減衰の減衰定数(h)は、安全限界時の等価剛性比例型²⁾で5%に設定した。

5.2 入力地震動

入力地震動は、地動最大速度を 50 cm/sec に基準化した観測波 3 波(El Centro-NS, Taft-EW, Hachinohe-NS)と日本建築センター模擬波(基盤波)BCJ-L2 を採用した。表-7 に入力地震動諸元を、図-14 に入力地震動特性(加速度応答スペクトル(h=5%))を示す。

5.3 静的増分解析および構造特性曲線の評価

静的増分解析は表-8 の Ai 分布に基づく外力分布による荷重増分法で行った。図-15 に柱・梁主架構のみの静的増分解析結果(各層の層せん断力-層間変形角関係)を示す。本検討では、どこかの層が層間変形角 1/50 rad に達した時を安全限界と定義し、また、柱・梁のいずれか

が降伏した時を損傷限界と定義した。ここで、制震構造建物の目標変位は損傷限界以下となるように定義し、その時の層間変形角は 1/120 rad とした。ベースシア係数(C_B)は、安全限界時に 0.35, 目標変位時に 0.27 であった。

静的増分解析結果を限界耐力計算⁵⁾と同じ方法により 1 自由度系に縮約した構造特性曲線と、入力地震動の応答スペクトル(h=5%)を合わせて示したのが図-16 である。縮約 1 自由度系における安全限界変位は 34.4 cm(安全限界周期は 1.70 sec), 目標変位は 15.6 cm(目標変位時等価周期は 1.34 sec)であった。

5.4 各層のダンパー量の算定

縮約 1 自由度系における目標変位時の必要減衰性能は、応答変位が目標変位となる時の減衰定数の大きさとして評価した。必要減衰性能の最大値は 12%(BCJ-L2)であり、この値から目標変位時の構造減衰 4%を差し引いた 8%をダンパーによる必要付加減衰量と設定した。

制震構造建物の必要ベースシア係数(rC_B)は、主架構のどこかの層が目標変位に達した時のベースシア係数(C_B)に基づき算定する方法(手法 1)と、各層各々が目標変位に達した時のベースシア係数に基づき算定する方法(手法 2)の両手法により算定した。算定の結果、主架構のベースシア係数(C_B)は手法 1 で 0.27, 手法 2 で 0.34 となった。

また、必要ベースシア係数(rC_B)の算定に際し、各層同一のダンパー塑性率(μ_d)の設定が必要となる。ブレース型ダンパーであれば設定したダンパー塑性率を満足するようにブレース断面を設計すれば良いが、間柱型ダンパーの場合には前章までの検討で示したように、ダンパーの降伏変位が容易には決まらないため、ダンパー塑性率を各層で同一にするのが困難となる。そこで本検討では、ダンパー塑性率を各層同一(μ_d=4)と仮定して、必要ベ

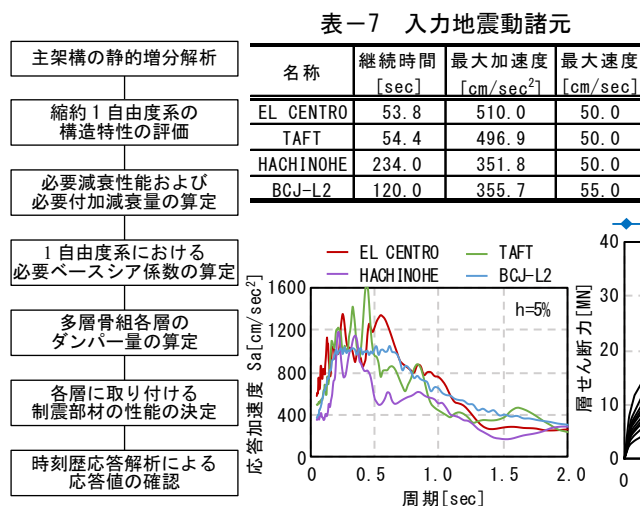


図-13 制震設計フロー

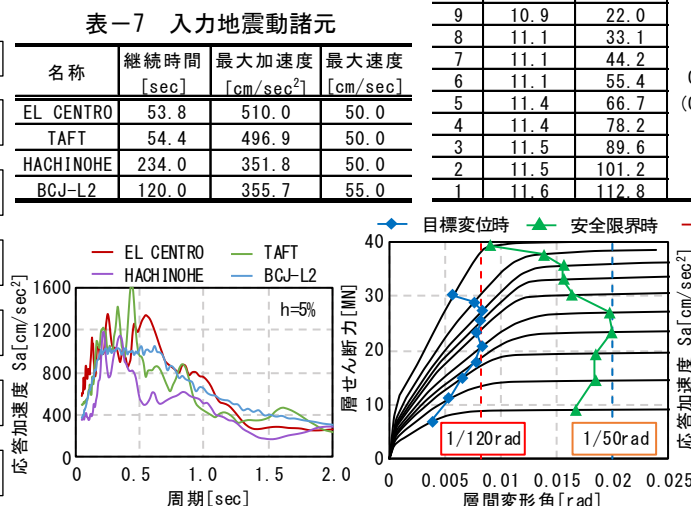


図-14 入力地震動特性

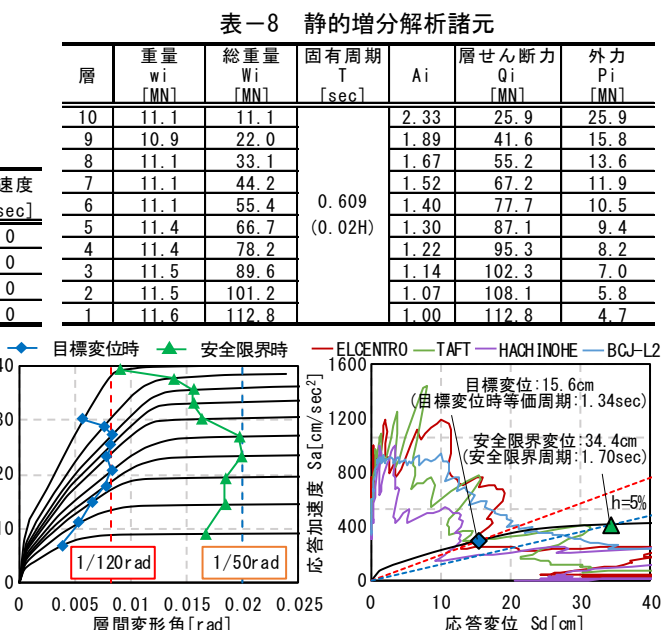


図-15 静的増分解析結果

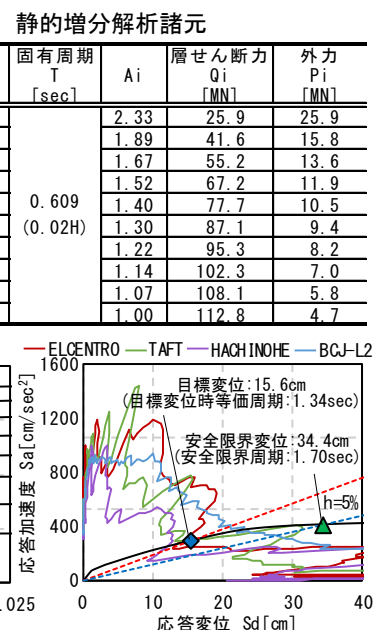


図-16 構造特性曲線と
応答スペクトル

表-9 制震ダンパー量の算定

層	主架構 [kN]	$r_{CB}=0.32$			$r_{CB}=0.35$		
		制震建物 [kN]	ダンパー [kN]	設置するダンパー のタイプ×基数	制震建物 [kN]	ダンパー [kN]	設置するダンパー のタイプ×基数
10	8,828	8,378	-	-	9,133	305	LD12-6 × 4
9	13,562	13,486	-	-	14,701	1,139	LD12-6 × 8
8	17,179	17,879	700	LD12-6 × 8	19,489	2,310	LD12-6 × 16
7	18,811	21,755	2,944	LD16-8 × 12	23,714	4,903	LD19-9.5 × 16
6	20,880	25,154	4,273	LD16-8 × 16	27,419	6,539	LD22-11 × 16
5	24,174	28,190	4,016	LD16-8 × 16	30,729	6,555	LD22-11 × 16
4	25,687	30,841	5,154	LD19-9.5 × 16	33,618	7,931	LD22-11 × 16
3	27,364	33,098	5,734	LD19-9.5 × 16	36,079	8,715	LD24-12 × 16
2	30,583	35,002	4,419	LD16-8 × 16	38,155	7,572	LD22-11 × 16
1	38,498	36,523	-	-	39,812	1,314	LD12-6 × 12

● EL CENTRO ▲ TAFT ■ HACHINOHE ◆ BCJ-L2

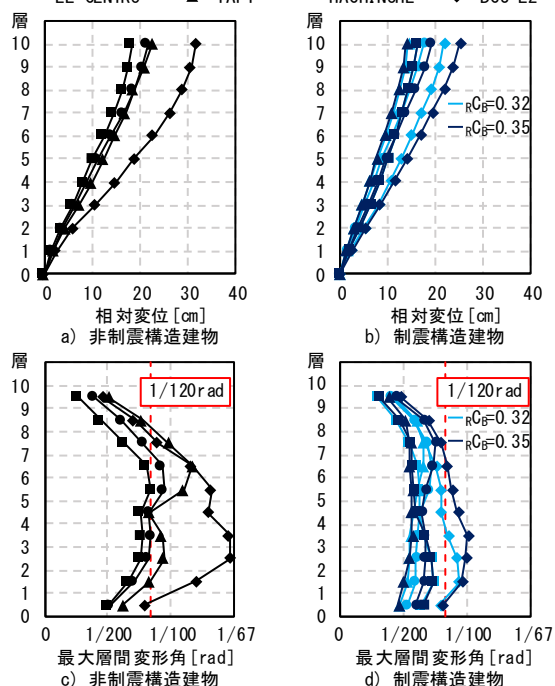


図-17 時刻歴応答解析結果

スシア係数を算定した。算定の結果、必要ベーススシア係数(r_{CB})は手法1で0.32、手法2で0.35であった。

各層のダンパー量は、制震構造建物の静的増分解析の際に、必要ベーススシア係数(r_{CB})に到達するステップで各層同時に目標変位に達するように設定し、その際の各層各々が目標変位に達した時の主架構の層せん断力を差し引くことで算定できる²⁾。表-9に算定結果と設置するダンパーのタイプと基数を示す。なお本建物は、間柱型ダンパーを1スパンに1基設置すると、1層あたり最大16基設置可能である。また、各層の間柱部の断面は4章で用いた断面と同様の断面(表-5)を用いることとした。

5.5 時刻歴応答解析による応答値の確認

図-17に非制震構造物および制震構造物の時刻歴応答解析結果(相対変位および最大層間変形角の最大値)を示す。等価高さ相当である7階の非制震構造物の相対変位は、BCJ-L2で26.4cmであり、図-16の構造特性曲線とスペクトルの交点とほぼ一致している。制震構造物の相対変位は、BCJ-L2の $r_{CB}=0.32$ で17.1cm、 $r_{CB}=0.35$ で19.4cmであり、目標変位の15.6cmより大きな応答が生じる結果となった。また、制震構造物の

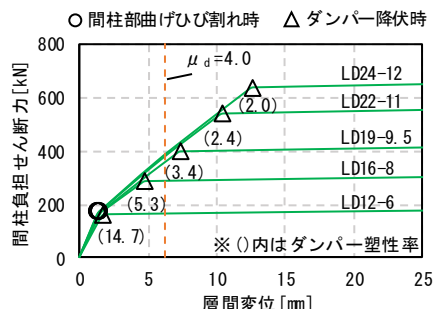


図-18 間柱型ダンパー単体の復元力特性

各層の最大層間変形角は、耐力が大きいダンパー(LD19-9.5以上)を設置した層で目標変位である層間変形角1/120radを超えていた。また、 $r_{CB}=0.35$ の方が各層に設置するダンパーの耐力が大きいにも関わらず、各層で $r_{CB}=0.32$ より大きな応答が生じる結果となった。

そこで、この結果の要因を調べるため、制震構造物に設置している間柱型ダンパーに対し、3章と同じ片押し解析を行い、復元力特性を確認した(図-18)。耐力がLD19-9.5以上の間柱型ダンパー単体のダンパー塑性率(μ_d)は、仮定したダンパー塑性率($\mu_d=4$)を満足していないことがわかる。そのため、 $r_{CB}=0.35$ の方が各層に設置するダンパーの耐力が大きいにも関わらず、各層のダンパー塑性率が小さいために、 $r_{CB}=0.32$ より大きな応答が生じる結果となった。すなわち、仮定したダンパー塑性率と実際のダンパー塑性率の相違が応答値に大きな影響を及ぼしていることが確認できた。

6. まとめ

RC造間柱型ダンパー単体およびRC造間柱型ダンパーを設置した3層1スパンフレームの解析スタディーから、RC造間柱型ダンパーのエネルギー吸収性能を把握し、制震設計スタディーを通してRC造間柱型ダンパーを設置した制震構造物の制震効果について確認した。

参考文献

- 1) 日本免震構造協会：パッシブ制振構造 設計・施工マニュアル 第3版, 2013.11
- 2) 歌田航己, 北嶋圭二ほか：等価線形化法による制震補強設計法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.377-382, 2018.9
- 3) 日本建築防災協会：構造設計・部材断面集 初版, 2007.6
- 4) 山崎康雄, 小山大樹, 新保拓海, 北嶋圭二：レンズ型ダンパーを取付けたRC造間柱の構造性能に関する研究, コンクリート工学会年次論文集, Vol.40, No.2, pp.937-942, 2018
- 5) 国土交通省住宅局建築指導課ほか：2015年度版建築物の構造関係技術基準解説書, 2015