

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	履歴型ダンパー配置が中低層鋼構造建物の応答性状に与える影響
Title	EFFECT OF PATTERNS OF HYSTERETIC DAMPER ARRANGEMENT TO EARTHQUAKE RESPONSE OF LOW AND MIDDLE-RISE STEEL BUILDING
著者(和文)	松澤祐介, 佐藤大樹, 栗林晃司, 北村春幸, 山口路夫, 西本晃治
Authors	Daiki Sato, Haruyuki Kitamura, Michio Yamaguchi, Kohji Nishimoto
出典 / Citation	構造工学論文集, Vol. 58B, , pp. 189-196
Citation(English)	Journal of structural engineering, Vol. 58B, , pp. 189-196
発行日 / Pub. date	2012, 3
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: http://ci.nii.ac.jp/naid/110009706519

履歴型ダンパー配置が中低層鋼構造建物の地震応答性状に与える影響

EFFECT OF PATTERNS OF HYSTERETIC DAMPER ARRANGEMENT
TO EARTHQUAKE RESPONSE OF LOW AND MIDDLE-RISE STEEL BUILDING

松澤 祐介*, 佐藤 大樹**, 栗林 晃司***, 北村 春幸****, 山口 路夫*****, 西本 晃治*****

Yusuke MATSUZAWA, Daiki SATO, Koji KURIBAYASHI, Haruyuki KITAMURA,
Michio YAMAGUCHI and Koji NISHIMOTO

The vibration control structure with steel dampers to absorb the seismic force has mainly prevailed in high-rise building. Near future, it will be expected to prevail in low and middle-rise building. Several studies have been made on the vibration control system in high-rise building. These show that the effect of response reduction is different from the arrangement of damper. Another example, damper is not worked effectively by bending deformation on upper part of building. But there has been a few studies tried to the vibration control system in low and middle-rise building.

In this paper, we change the damper arrangement and installation and consider the effect by response comparison. In addition, we evaluate the prediction method which can catch tendency of effective damper deformation. It would be helpful to know the optimum arrangement and installation in low and middle-rise building.

Keywords : *Hysteretic Damper, Low and Middle-Rise building, Damper Arrangement, Material Model, Effective Damper Deformation, Dynamic Time History Response Analyses*

履歴型ダンパー, 中低層建物, ダンパー配置, 部材レベルモデル, 実効変形, 時刻歴応答解析

1. はじめに

建物の応答を制御するために, 早期に降伏し地震動入力エネルギーを吸収する制振部材を組み込んだ制振構造が提案され, 主に 1995 年以降の高層建物で急速に普及している。制振構造においては, 地震時にダンパーに大きな変位が生じることで, 大きな減衰効果を得ることができる。その応答特性は, 主体構造とダンパーの地震に対する荷重抵抗の分担率, 及びダンパーのエネルギーの吸収特性によって支配される。中低層建物の絶対数は高層建物より多く, 今後は中低層建物でも制振構造が普及することが予想される。さらに, 2005 年にエネルギーの釣合に基づく耐震設計法¹⁾(以後, エネルギー法と呼ぶ)が制定された。エネルギー法は, 従来の許容応力度や保有耐力ではなく, エネルギー吸収能力によって構造性能を評価するもので, 超高層建物を除き, 鉄骨造, 鉄筋コンクリート造, その他の一般的な建物に対して, 適用することができるものである²⁾。エネルギー法の大きな特徴の一つとして, 履歴型ダンパーを有する建物の構造安全性の検証を行えることが挙げられる。履歴型ダンパーを有する建物の構造安全性については, これまで大臣認定等が必要であったが, エネルギー法で構造安全性を検証することによって, 建築主事の確認(構造計算適合判定が必要)で建設できるようになった。

高層建物の制振構造の特徴として, 建物の曲げ変形により上層でダンパーが有効に働かない場合や, ダンパー配置によって応答低減効果が異なるという研究報告が挙げられる^{3)~5)}。しかし, 中低層建物の制振構造における研究報告はまだ少ない。文献 6)では, 曲げ変形の影響を考慮したエネルギー法が提案されている。その中で, 曲げ変形により, 見かけ上ダンパーの降伏変形の増大し, 剛性低下する影響を表す剛性低下率を提案している。ダンパー剛性低下率は, 時刻歴応答解析なしで求まる値で, ダンパー剛性低下率を用いて, ダンパー配置の違いが応答に及ぼす影響を評価できると思われる。

本論文では, 履歴型ダンパーの配置の違いが中低層鋼構造建物の応答性状に与える影響を時刻歴応答解析結果及びダンパー剛性低下率を用いて検証する。具体的には, オフィスビルを想定した中低層建物に鋼製の履歴型ダンパーを取り付け, ダンパー平面配置と設置型及びダンパー量をパラメトリックに変化させる。その際, ダンパー平面配置と設置型の違いに伴う固有周期の変動にも着目する。時刻歴応答解析では, 層間変形角, ダンパーの累積塑性変形倍率に加え, 層間変形に対する実効変形の比(以後, 実効変形比と呼ぶ)に着目し, ダンパーによる制振効果を検討する。さらに時刻歴応答解析から求まる実効変形比と, 時刻歴応答解析なしで求まるダンパー剛性低下率を比較し, ダンパー剛性低下率の有用性を示す。

* 東京理科大学大学院理工学研究科 大学院生

** 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士(工学)

*** SUS株式会社(元 東京理科大学大学院 大学院生)

**** 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

***** 新日鉄エンジニアリング株式会社 博士(工学)

***** 新日鉄エンジニアリング株式会社 修士(工学)

Graduate Student, Faculty of Science and Eng., Tokyo Univ. of Science

Assistant Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

SUS Co., Ltd.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

Nippon Steel Engineering Co., LTD., Dr. Eng.

Nippon Steel Engineering Co., LTD., M. Eng.

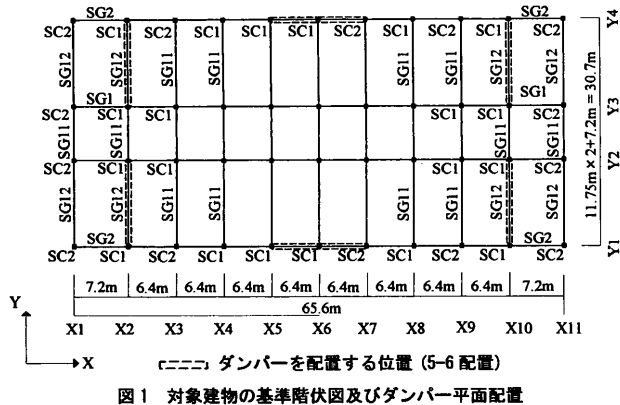


図1 対象建物の基準階伏図及びダンパー平面配置

表1 対象建物の部材断面

	符号	鋼材種類	階	部材
大梁	SG1	SN490B	1~R	H-600×250×12×22
	SG2		1~R	H-600×200×11×17
	SG11		1~R	H-800×300×13×26
	SG12		1~R	H-800×300×16×28
柱	SC1	BCR295	5	□-450×450×16
			3~4	□-450×450×19
	SC2		1~2	□-450×450×22
			4~5	□-450×450×16
			1~3	□-450×450×19

表2 各層重量

層	重量 (kN)
5	17583
4	14302
3	14326
2	14361
1	14415

2. 検討建物・入力地震動の概要

2.1 検討対象建物概要

本論文では5層建物を検討対象建物とし、図1に基準階伏図、図2に軸組図を示す。対象建物は、高さ21.3m、長辺方向(X方向)に65.6m、短辺方向(Y方向)に30.7mの鉄骨造建物である。基準とする純ラーメン構造の柱、梁の部材断面を表1に示す。また、各層重量を表2に示す。解析はX方向のみを対象とし、剛床を仮定した三次元立体架構モデルを用いる。基礎の梁はRC造とし、柱脚部をピン支持とする。スラブの合成効果は梁の曲げ剛性のみ考慮する。固有値解析の結果、主架構のみの状態における1次固有周期 T_1 は1.10sである。減衰は主架構の T_1 に対して $h=2\%$ となる剛性比例型とした。主架構は、制振構造の性状を明らかにするために弾性とする。

本論文でのダンパーの降伏層せん断力 Q_{yi} は、下式で求められる。

$$Q_{yi} = \alpha_{yi} \sum_{i=1}^N m_i \cdot g \quad (1)$$

ここで、 α_{yi} :ダンパーの降伏層せん断力係数、 N :全層数、 m_i : i 層の質量、 g :重力加速度である。なお、(1)式では α_{yi} をパラメータとしてダンパーの降伏層せん断力を変化させているので、 α_{yi} をダンパー量と呼ぶ。なお、 α_{yi} の増加(減少)に伴い、ダンパー剛性も増加(減少)する(付録A参照)。ダンパーの高さ方向に対する降伏耐力の比率は、全層で第1層の降伏耐力を用いた一律な分布($Q_{yi} = Q_{y1}$)とする。ダンパー配置及び設置型の違いが制振効果に与える影響を調べるために、平面配置3種類、設置型3種類の全9種類のモデルを作る。Y1, Y4 通りの2スパンにダンパーを連層で配置し、中央架構より5-6配置、3-8配置、1-10配置と呼ぶ。ダンパー設置はK型、V型、Z型とする。図2に例として、全9種類の中で、3種類の平面配置及び設置型を示す。ダンパーは、軸材にLY225材を用いた座屈拘束ブレースを使用し、1要素(一様断面)にモデル化した(付録A参照)。その際、各平面配置及び設置型でダ

配置位置番号

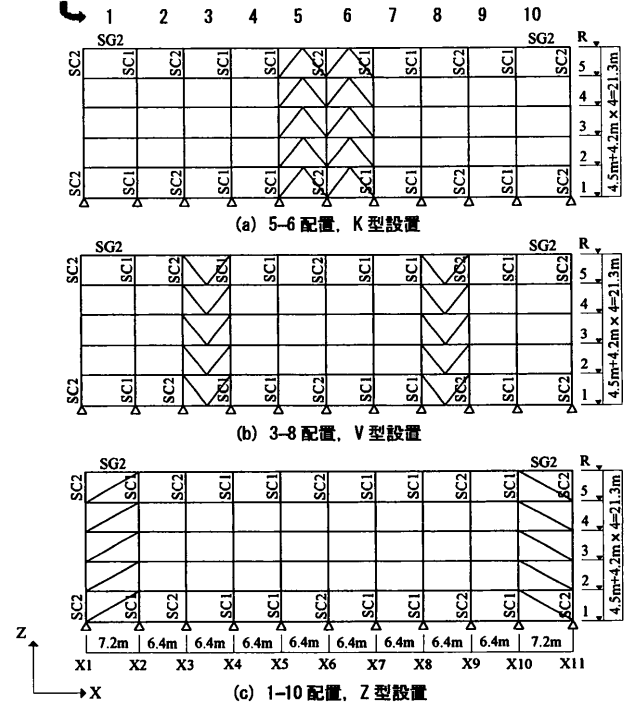


図2 ダンパー平面配置及び設置例(軸組図Y1-Y4通り)

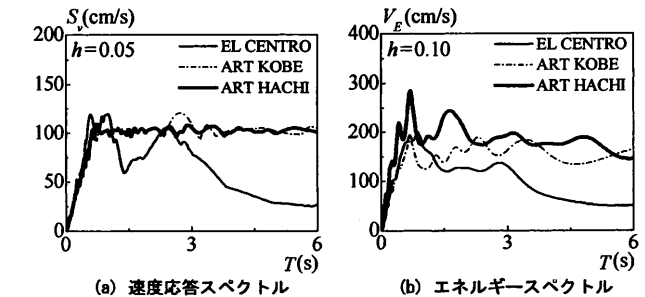


図3 各地震動のスペクトル

ンパーの水平方向の剛性を等しくしている。

2.2 入力地震動の概要

解析に用いる地震動は、最大速度を50 cm/sに基準化したEL CENTRO 1940 NS(以後、EL CENTROと呼ぶ)と、コーナー周期 $T_c=0.64$ s以降の領域で、 $S_v=100$ cm/s($h=5\%$)となる模擬地震動2波を用いた。模擬地震動の位相特性には、HACHINOHE 1968 EW(以後、ART HACHIと呼ぶ)及びJMA KOBE 1995 NS(以後、ART KOBEと呼ぶ)を用いる。図3(a),(b)に、速度応答スペクトルとエネルギースペクトルを示す。図4に各地震動の加速度時刻歴波形を示す。最大加速度はEL CENTROで509.13 cm/s²、ART HACHIで466.71 cm/s²、ART KOBEで489.58 cm/s²である。

3. ダンパー配置と設置型が応答に与える影響

3.1 弾性1次固有周期とエネルギーの速度換算値

ダンパー配置及び設置型の違いを検討する上で、入力エネルギーが同程度であることが、適切にダンパー配置及び設置型の影響を比較する上で望ましい。そこで本節では、代表値として、 $\alpha_{y1}=0.02, 0.08, 0.15$ でのダンパー配置及び設置型における弾性1次固有周期

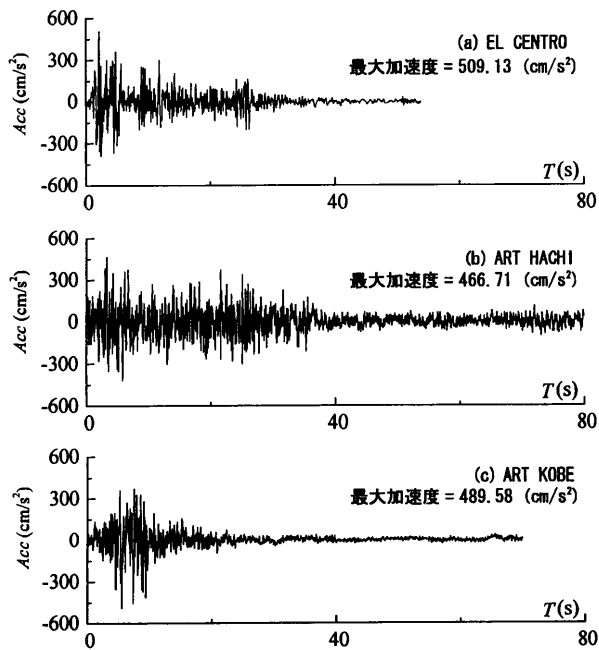


図4 入力地震動の加速度時刻歴波形

T_1 , 入力エネルギーの速度換算値 V_E を示す。入力エネルギーの速度換算値 V_E は、下式で求められる¹⁾。

$$V_E = \sqrt{\frac{2E}{M}} \quad (2)$$

ここで、 E : 入力エネルギー、 M : 建物総質量である。結果を表3に示す。表3より、ダンパー量が増えるとダンパー剛性も増加することで T_1 は短くなる。同じダンパー量で着目し、配置及び設置型の違いによる T_1 の変化を見ると、最も短いのはいずれの α_{y1} でも K 型、Z 型の 5-6 配置である。最も T_1 が長いのが、 $\alpha_{y1}=0.02$ のときは V 型、Z 型の 3-8 配置、1-10 配置であり、 $\alpha_{y1}=0.08, 0.15$ のときは V

表3 5層建物の弾性1次固有周期 T_1 , 入力エネルギーの速度換算値 V_E

ダンパー配置	ダンパー設置	α_{y1}	T_1 (s)	V_E (cm/s)		
				EL CENTRO	ART HACHI	ART KOBE
5-6配置	K型	0.02	0.94	161	189	110
		0.08	0.74	183	211	150
		0.15	0.64	198	259	159
	V型	0.02	0.95	161	189	110
		0.08	0.77	183	184	154
		0.15	0.69	208	277	141
	Z型	0.02	0.94	161	189	110
		0.08	0.74	187	211	150
		0.15	0.64	198	259	159
3-8配置	K型	0.02	0.95	161	189	110
		0.08	0.77	183	187	155
		0.15	0.69	210	283	141
	V型	0.02	0.96	162	189	189
		0.08	0.82	194	194	194
		0.15	0.77	189	182	174
	Z型	0.02	0.96	161	187	111
		0.08	0.80	189	189	189
		0.15	0.73	195	249	155
1-10配置	K型	0.02	0.95	162	189	109
		0.08	0.76	183	192	159
		0.15	0.67	207	278	140
	V型	0.02	0.96	162	189	109
		0.08	0.81	192	192	192
		0.15	0.75	196	215	165
	Z型	0.02	0.96	162	189	109
		0.08	0.78	184	184	184
		0.15	0.70	209	276	141

型の 3-8 配置である。ダンパー単体の剛性が等しい場合でも、固有周期に差異が生じるのは、ダンパー配置や設置型の違いによってダンパーの実効変形 (付録 C 参照) が変化するので、実効変形を考慮した見かけ上のダンパー (付加系) の剛性⁶⁾が変化するためである。これについては、4章で詳しく述べる。

次に入力エネルギーの速度換算値 V_E に着目する。まず、EL CENTRO での各ダンパー量における各配置及び設置型の V_E を見ると、ほとんど同じ値であることが分かる。一方、ART HACHI, ART KOBE ではダンパー量が同じであったとしても、各配置及び設置型で V_E が異なる。この要因は、ダンパーを付与した際の T_1 が ART HACHI, ART KOBE の卓越周期帯にあるためである。これより、EL CENTRO では、ダンパー配置及び設置型の違いによる V_E の変化の影響が小さいと言える。

3.2 地震動の違いによる検討

図5に、EL CENTRO, ART HACHI 及び ART KOBE における α_{y1} を 0.01 ~ 0.20 まで変化させたときの、絶対加速度の最大値 Acc_{max} の変化を示す。図5より、地震動に着目すると、EL CENTRO, ART HACHI は、 $\alpha_{y1}=0.01 \sim 0.07$ 付近でダンパー量が多くなると Acc_{max} は低減する傾向があり、 $\alpha_{y1}=0.09$ 付近 ~ 0.20 では上昇することより極値をとることが分かる。それに対し、ART KOBE では変動の幅が小さい。これより、ダンパー配置及び設置型の違いによる V_E の変化が小さく (前節)、 Acc_{max} で明快な極値を示す EL CENTRO を本章で以後用いる地震動とする。

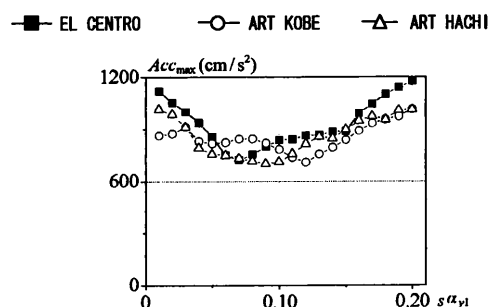


図5 各地震動による最大応答加速度の変化 (5-6 配置, K 型)

3.3 最大層間変形角の検討

図6(a) ~ (c)に、K 型、V 型及び Z 型における α_{y1} を 0.01 ~ 0.20 まで変化させたときの、最大層間変形角 R_{max} の変化を示す。図6(a) ~ (c)より、ダンパー量を多くすると、応答を低減できる傾向にある。いずれの配置、設置型でも、 $\alpha_{y1}=0.08$ 付近で R_{max} の低下に変化が見られる。次に各設置型のダンパー配置による違いに着目すると、K 型では配置による R_{max} の差がほとんどないことが分かる。一方、V 型、Z 型では $\alpha_{y1}=0.16$ 付近で、配置による R_{max} の違いが大きくなる。V 型における $\alpha_{y1}=0.16$ の際の 5-6 配置と 3-8 配置の R_{max} を比較すると、その差は 14% である。また、いずれの α_{y1} においてどの設置型でも、5-6 配置の R_{max} が最も小さい値となることから、建物中央にダンパーを設置する 5-6 配置はダンパーによる応答の低減効果を得やすい配置と言える。これは、5-6 配置はダンパーを設置して架構が隣り合う位置にあることで、架構全体の曲げ剛性が上昇し、他の配置よりも曲げ変形を抑えられることで、実効変形の低下が少ないためである。

次に、K、V、Zの設置型の違いで比較すると、各 α_{y1} の5-6配置での応答は、設置型による R_{max} の差がほとんどないことが分かる。一方、3-8配置、1-10配置では、 α_{y1} が大きい場合、K型の R_{max} がV型、Z型と比較して小さくなることを確認できる。

3.4 層せん断力係数の検討

図7(a)～(c)に、K型、V型及びZ型における α_{y1} を0.00～0.20まで変化させたときの、1層の全体架構及び主架構の層せん断力係数 α_1 、 $f\alpha_1$ と α_{y1} の関係を示す。図7のいずれにおいても、 $f\alpha_1$ はダンパー量が多くなると減少または一定となる。一方、 α_1 はどの配置、設置型でも $\alpha_{y1}=0.08$ 付近で極値をとり、 $\alpha_{y1}=0.08$ 付近～0.20では増加傾向にある。次に、ダンパー配置の違いに着目すると、図7(a)、(b)より、V型、Z型の α_1 、 $f\alpha_1$ は、 R_{max} (図6)の時と同様に、ダンパー量が多くなると配置による違いが大きくなる。

3.5 ダンパーエネルギー吸収率の検討

図8(a)～(c)に、K型、V型及びZ型における α_{y1} を0.01～0.20まで変化させたときの、ダンパーエネルギー吸収率 W_p/E (ダンパー

の吸収エネルギー W_p と地震入力エネルギー E の比)と α_{y1} の関係を示す。図8(a)～(c)より、 α_{y1} が大きくなると、 W_p/E は上昇する傾向にあるが、 $\alpha_{y1}=0.08$ 付近～0.20では一定または減少となる。配置による W_p/E の違いに着目すると、特にV型、Z型でばらつきが大きいことが分かる。V型の5-6配置と3-8配置を比較すると、 $\alpha_{y1}=0.20$ では最大で16%の差が生じる。また、いずれの α_{y1} においてどの設置型でも、5-6配置の W_p/E が最大値となる。次に設置型に着目すると、5-6配置では各 α_{y1} におけるK型、Z型の W_p/E が概ね同じ値となっているのに対し、V型はK型と比較して低い値となる。3-8配置では、K型の W_p/E がいずれの α_{y1} で最も大きく、V型、Z型では $\alpha_{y1}=0.14$ から減少傾向となる。1-10配置でも、 W_p/E はK型が最も大きく、V型が最も小さい。これより、K型は他の設置型に比べ、ダンパーが効率よく稼働していると言える。その要因を1層で説明すると、V型のダンパーは1階の柱頭位置に接続されているのに対し、K型は直接基礎に接続される。K型のダンパー軸力は1階の柱に影響を及ぼさない。そのため、K型の柱に伝わる全層ダンパー軸力の総和がV型

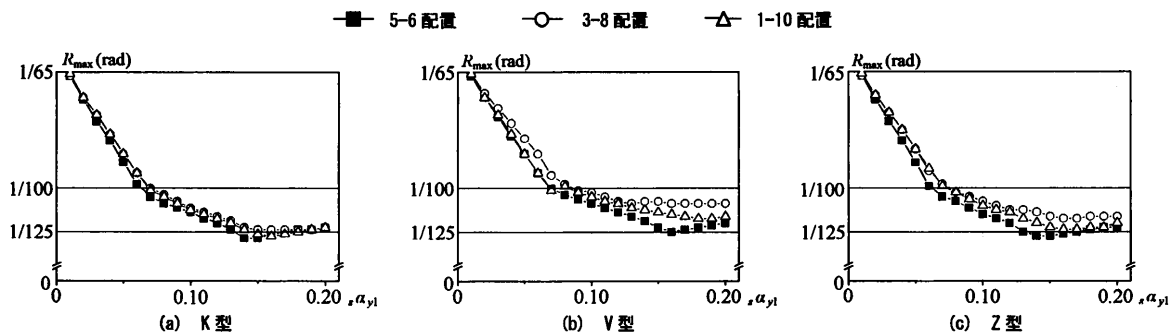


図6 最大層間変形角と α_{y1} の関係 (EL CENTRO)

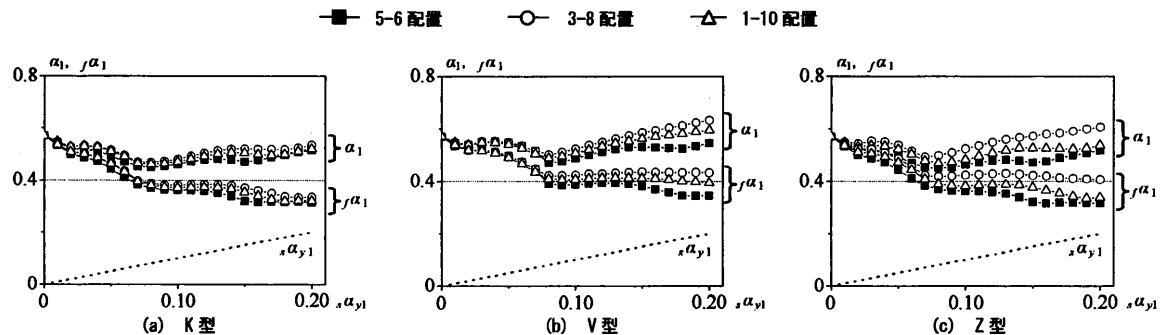


図7 1層の層せん断力係数(全体架構 α_1 、主架構 $f\alpha_1$)と α_{y1} の関係 (EL CENTRO)

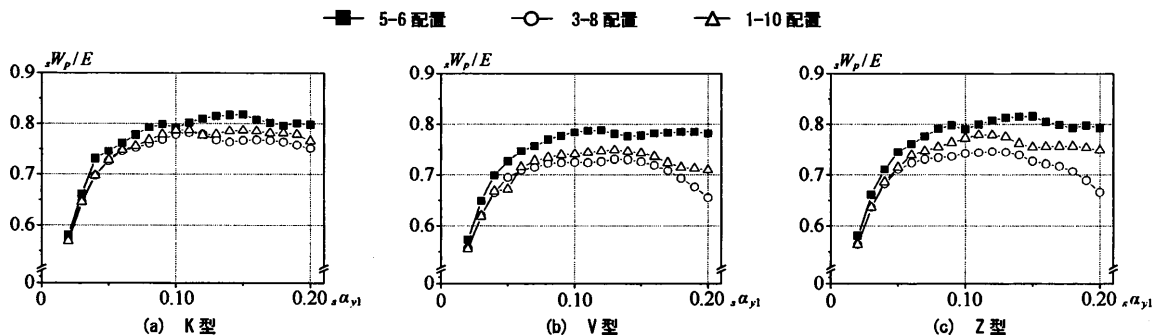


図8 ダンパーエネルギー吸収率と α_{y1} の関係 (EL CENTRO)

より1層分少なくなり、K型の柱の軸変形が小さくなる(付録B参照)。この事により、K型での架構全体の曲げ変形は、V型と比較して小さくなり、K型の実効変形比の低下が少なくなる。Z型は、一方が直接基礎に設置されるため、K型、V型の中間の効果を示している。

3.6 高さ方向の応答比較

ダンパー配置、設置型及びダンパー量の違いが制振効果に与える影響を、高さ方向の応答に着目し検討する。本節では、時刻歴応答解析結果より求めた層間変形角 R_i 、ダンパーの累積塑性変形倍率 η_i 、実効変形比 β_{ei} (付録C参照)を示す。

$s\alpha_{y1}=0.08$ でのダンパー配置の違いによる高さ方向分布の変化を図9(a)~(c)に示す。図9より、 R_i は配置による差がほとんどないが、僅かに5-6配置が、3-8配置、1-10配置と比較して、 R_i は小さくなっている。また、 R_i は2層で最も大きく、5層で最も小さい。 η_i も同様に配置による差はほとんどないが、2、3層で5-6配置が僅かに大きい。 η_i は5層でほぼ0となり、ダンパーがエネルギーを吸収していないことが分かる。一方、 β_{ei} では配置の違いによる変化が見られ、上層で5-6配置が大きいことが分かる。反対に、5層で最も β_{ei} が小さいのは、3-8配置と1-10配置でほぼ同じ値となっている。1-10配置は他の配置よりもスパンが長い為、ダンパーの取り付け角度 θ が小さい。そのため、ダンパーの水平分担が増加し、ダンパー効率が増している為 β_{ei} も大きくなる。全スパン同じ長さの場合を検討した結果、1-10配置の β_{ei} が最も低い結果となることを確認している。また、どの配置でも β_{ei} は上層で小さく、上層のダンパー稼働率が低いことが分かる。

次にダンパー配置の違いによる $s\alpha_{y1}=0.15$ での高さ方向分布の変

化を図10(a)~(c)に示す。図10より、ダンパー量が多くなると、5-6配置での R_i が他の配置より小さい傾向にある。一方、 $s\alpha_{y1}=0.08$ のときと同様に、 η_i は配置による差がほとんどない。4層と5層での η_i はほぼ0であり、4層と5層のダンパーはともに塑性化していないと言える。 β_{ei} は上層ほど小さく、配置では5-6配置で大きい値となる。 $s\alpha_{y1}=0.08$ と比較すると、ダンパー量の多い $s\alpha_{y1}=0.15$ では β_{ei} は小さくなっている。ダンパー量が多くなると、ダンパー配置による R_i の差が出やすいと言える。

ダンパー設置型の違いによる $s\alpha_{y1}=0.08$ での高さ方向分布の変化を図11(a)~(c)に示す。図11より、 R_i は設置型による差がほとんどないが、僅かにV型がK型、Z型と比べて小さい。同様に、 η_i でもK型、Z型がほぼ同値であるのに対し、V型は僅かではあるが小さい値となる。 β_{ei} は、全層でV型がK型、Z型と比べて小さい。その理由は3.5節でも述べたように、V型は設置上、柱に流れるダンパーの軸力がK型と比較して1層分多くなり、軸変形が大きくなることが挙げられる(付録B参照)。

次にダンパー設置型の違いによる $s\alpha_{y1}=0.15$ での高さ方向分布の変化を図12(a)~(c)に示す。図12 ($s\alpha_{y1}=0.15$)より、ダンパー量が多くなると、 R_i はV型が他の設置型より大きい傾向にある。一方、 η_i はほとんど設置型による差が見られない。 β_{ei} は $s\alpha_{y1}=0.08$ のときと同様にV型で小さくなる。 $s\alpha_{y1}=0.15$ では、 $s\alpha_{y1}=0.08$ の場合と比較してダンパー設置型による R_i の差が出やすくなる。これは、ダンパー配置の違いの検討のときと同様の傾向である。

図9~12より、ダンパー配置及び設置型の違いによる R_i 、 η_i の差はほとんどないが、 β_{ei} で差が生じ、 β_{ei} の大小関係が R_i 、 η_i の僅

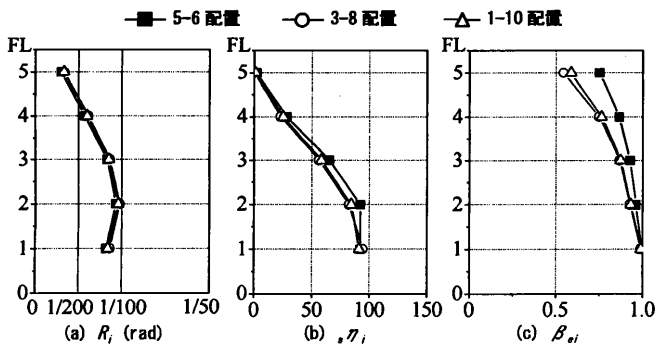


図9 ダンパー配置の違いによる高さ方向分布 (K型, $s\alpha_{y1}=0.08$, EL CENTRO)

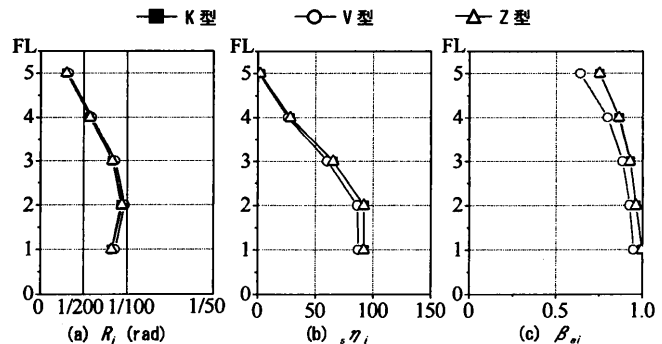


図11 ダンパー設置型の違いによる高さ方向分布 (5-6配置, $s\alpha_{y1}=0.08$, EL CENTRO)

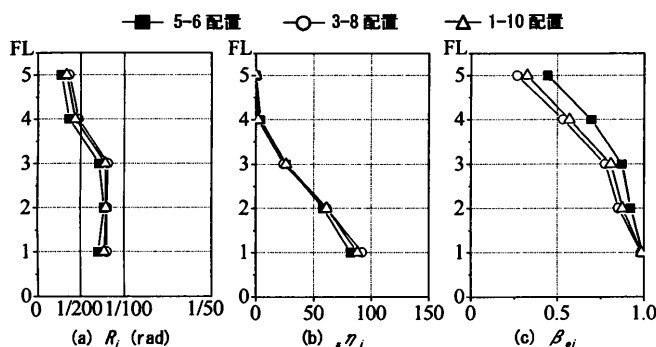


図10 ダンパー配置の違いによる高さ方向分布 (K型, $s\alpha_{y1}=0.15$, EL CENTRO)

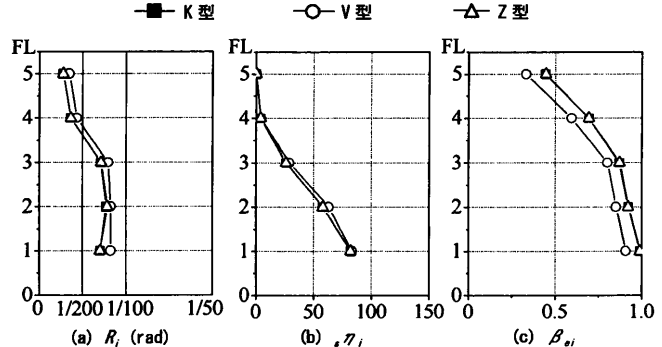


図12 ダンパー設置型の違いによる高さ方向分布 (5-6配置, $s\alpha_{y1}=0.15$, EL CENTRO)

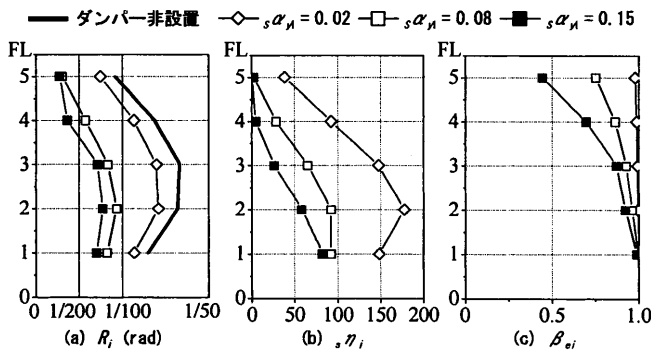


図13 ダンパー量の違いによる高さ方向分布 (5-6配置, K型, EL CENTRO)

かな差に影響していると考えられる。

ダンパー量の違いによる応答変化を確認するために、 $s\alpha_{y1}=0.02, 0.08, 0.15$ の3種類を用い、その高さ方向分布の変化を図13に示す。 R_i では、ダンパー非設置の際の応答も、図中に示す。図13より、 R_i は、ダンパー量が多いほど小さくなる。 $s\alpha_{y1}=0.08$ のときでは全層で1/100以下となり、ダンパー非設置との応答を比較すると、3層で応答が半減している。 η_i は、ダンパー量が少ないほど大きくなる。 $s\alpha_{y1}=0.08, 0.15$ では、5層の η_i がほぼ0であるのに対し、 $s\alpha_{y1}=0.02$ ではエネルギーを吸収して、ダンパーが塑性化している。 β_{ei} は、 $s\alpha_{y1}=0.02, 0.08$ では5層でも比較的大きい値となるが、 $s\alpha_{y1}=0.15$ になると0.5を下回ってしまう。これより、ダンパー量が多くなると最上層である5層の β_{ei} は小さくなり、曲げ変形の影響が大きくなる事が分かる。また、ダンパー配置及び設置型の違いによる R_i

の差はほとんどなかった。

4. 実効変形比に着目した評価手法の検討

本章では、文献6で提案しているダンパー剛性低下率 β_k を使い、実効変形比 β_{ei} と同等の評価が可能なのかを検証する。文献6では、せん断モデルを作成する際に、ダンパーのパネに直列パネを設けることで、ダンパーの実効変形を考慮したせん断モデルの提案をしている。その直列パネの剛性を導き出す過程でダンパー剛性低下率 β_k は算出される。ダンパー剛性低下率 β_k は主架構及びダンパーが弾性時における実効変形比を表す指標である(付録D参照)。

4.1 実効変形比の比較

3.6節でダンパー配置及び設置型の違いによる R_i, η_i の応答に差はほとんどないが、 β_{ei} で差が生じることを示した。本節では配置及び設置型の違いによる応答変化を考察しやすい最上層の5層の β_{ei} (= β_{e5})に着目する。 $s\alpha_{y1}$ を0.01~0.20まで変化させたときの、 β_{e5} を図14に示す。図14より、ダンパー量が多くなると、 β_{e5} は減少することが分かる。どの設置型でも、 $s\alpha_{y1}=0.08$ 付近で、急激に β_{e5} が小さくなるが、これは5層のダンパーが塑性化していないことが原因である。配置による β_{e5} の違いを見ると、どの設置型でも全ての $s\alpha_{y1}$ で5-6配置での β_{e5} が最も大きいことが分かる。逆に β_{e5} が最も小さいのは、 $s\alpha_{y1}=0.01\sim0.05$ 付近で1-10配置、 $s\alpha_{y1}=0.06$ 付近~0.20で3-8配置である。設置型に着目すると、配置による β_{e5} の差はZ型で大きく、 $s\alpha_{y1}=0.10$ での β_{e5} は、5-6配置で0.65、3-8配置で0.32となった。また、どの配置でもV型で β_{e5} は小さく、この影響でV型の R_{max} はK型、Z型と比べ大きくなったと言える(3.4節, 図7参照)。さらに、 β_{e5} の大きい配置及び設置型は、固有周期が短くなっている(3.1節, 表3参照)。

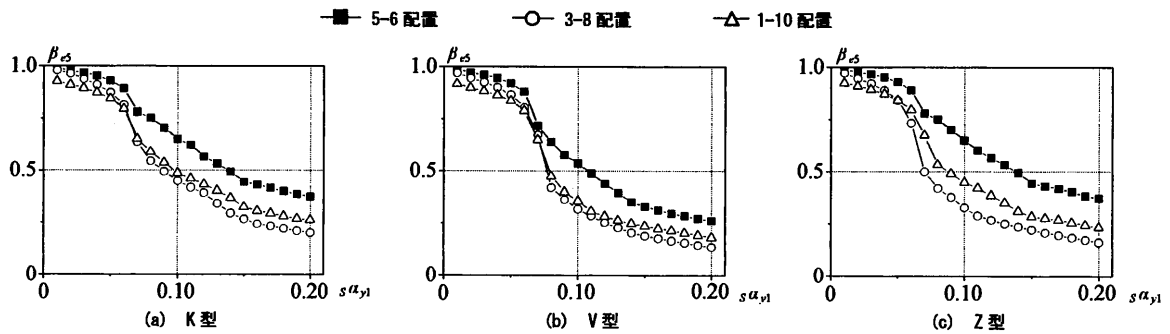


図14 $s\alpha_{y1}$ の変化による5層の β_{e5} の変化 (EL CENTRO)

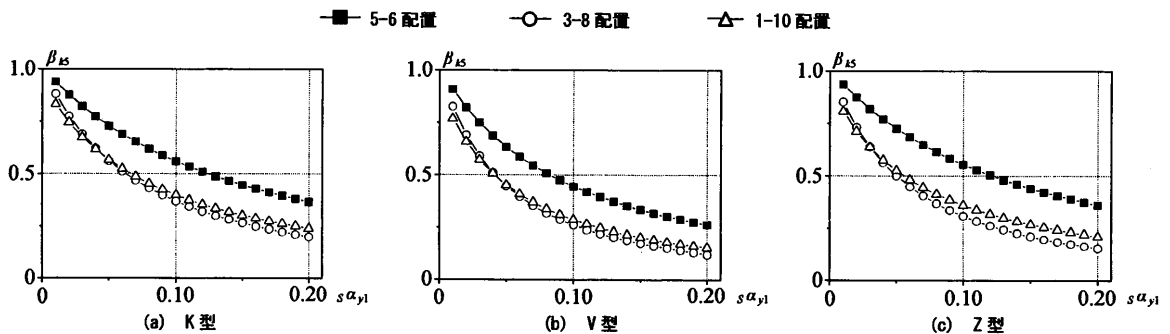


図15 $s\alpha_{y1}$ の変化による5層の β_{k5} の変化

4.2 ダンパー剛性低下率の比較

α_{y1} を0.01 ~ 0.20まで変化させたときの5層のダンパー剛性低下率 β_{k5} の値を図15に示し、前節で示した β_{c5} と比較する。 β_{c5} と β_{k5} を比較すると、5層のダンパーがほとんど塑性化しない、 $\alpha_{y1}=0.08$ 付近以降では、 β_{c5} と β_{k5} の値はほぼ同値となる。これは β_{k5} が、ダンパー及び主架構が弾性時の実効変形比であることに起因する。配置による違いに着目すると、 β_{c5} と同様に、どの設置型でも5-6配置の β_{k5} が全ての α_{y1} で大きいことが分かる。反対に最も β_{k5} が小さいのは、 $\alpha_{y1}=0.01 \sim 0.05$ 付近では1-10配置、 $\alpha_{y1}=0.06$ 付近 ~ 0.20では3-8配置となり、 β_{c5} (図14参照)と同様の傾向を示す。設置型に着目すると、配置による β_{k5} の差も β_{c5} と同様にZ型で大きく、どの配置でもV型の β_{k5} が最も小さい。 β_{k5} の評価順は、 β_{c5} と概ね一致していることが分かる。これより、ダンパー剛性低下率 β_{k5} で、 β_{c5} のダンパー配置及び設置型の違いによる傾向を、いずれの α_{y1} においても概ね確認することができる。

4.3 高さ方向分布の比較

前節で、いずれの α_{y1} においても β_{k5} で β_{c5} の影響を概ね評価できることを示した。本節では、高さ方向で比較をし、 β_{ki} の妥当性を示す。図16 ~ 18にそれぞれEL CENTRO, ART HACHI, ART KOBEを入力した際の β_{ki} を示す。図16 ~ 18より、配置による違いに着目すると、いずれの設置型、いずれの地震動でも β_{ki} は5-6配置が大きく、3-8配置が小さくなる。

図19に β_{ki} のダンパー配置の違いによる高さ方向分布の変化を示す。 β_{ki} は、 β_{ci} と値は異なるが、同様に5-6配置が大きく、3-8配置で小さい。次に、設置型に着目すると、いずれの配置、いずれの地震動でも、 β_{ki} はK型、Z型、V型の順で大きく、 β_{ki} も同様の傾向となる。これより、高さ方向においても β_{ki} のダンパー配置及び設置型の違いによる傾向を、 β_{ki} で評価できると言える。

5. おわりに

中低層建物に履歴型ダンパーを取り付け、ダンパー平面配置と設置型及びダンパー量をパラメトリックに変化させ、これらの違いが建物応答に及ぼす影響を検証した。さらに、ダンパー剛性低下率を時刻歴応答解析より求めた実効変形比と比較することで、ダンパー剛性低下率の妥当性を検証した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 実効変形比は、ダンパー平面配置及び設置型の違いによって差が生じ、実効変形比に着目することでダンパー平面配置及び設置型の違いによる層間変形角の僅かな差も捉えられる。
- (2) 本建物において、ダンパー平面配置及び設置型の違いによる層間変形角の影響は小さく、ダンパー平面配置及び設置型に関わらず、同等の制振効果を得られることが分かった。ダンパーを付与した際の応答低減効果は非常に大きいですが、応答低減を図るためにダンパー量を過剰に増やしても、あるダンパー量を超えると、層せん断力係数は逆に大きくなり、ダンパーエネルギー吸収率も減少または一定となった。
- (3) 各平面配置及び設置型の中で最も固有周期が短いのは、いずれの α_{y1} でもダンパーを中央に配置した5-6配置のK型、Z型であった。固有周期の短い平面配置及び設置型では、実効変形比が大きくなった。

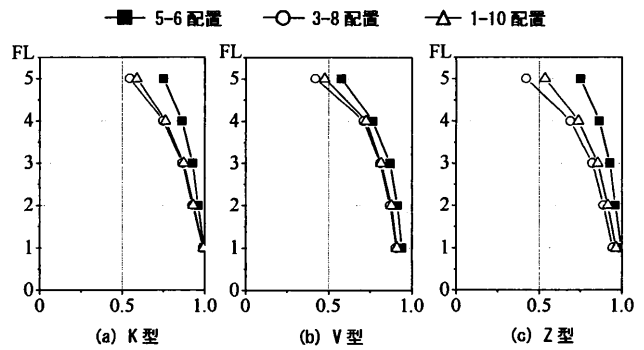


図16 ダンパー配置の違いによる β_{ki} の高さ方向分布 ($\alpha_{y1}=0.08$, EL CENTRO)

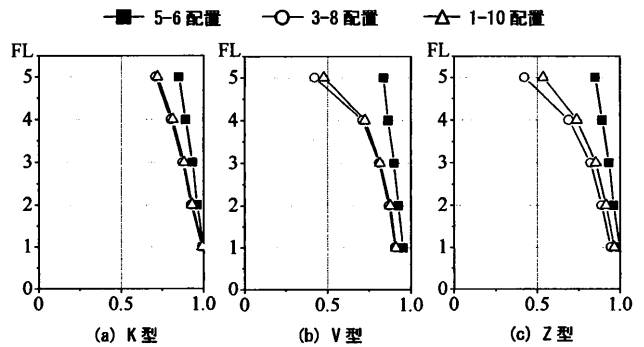


図17 ダンパー配置の違いによる β_{ki} の高さ方向分布 ($\alpha_{y1}=0.08$, ART HACHI)

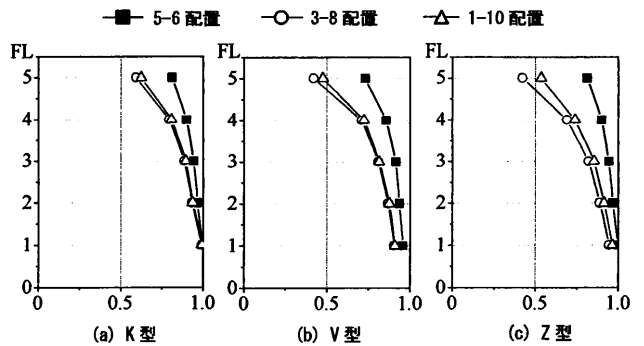


図18 ダンパー配置の違いによる β_{ki} の高さ方向分布 ($\alpha_{y1}=0.08$, ART KOBE)

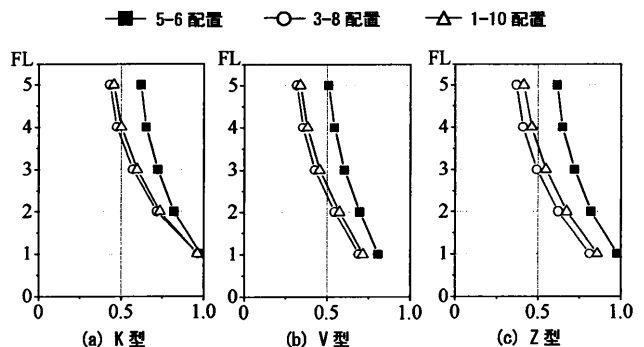


図19 ダンパー配置の違いによる β_{ki} の高さ方向分布 ($\alpha_{y1}=0.08$)

- (4) ダンパー剛性低下率を用いて、ダンパー平面配置及び設置型の違いによる影響を実効変形比と同等に評価できることが分かった。これより、時刻歴応答解析を行わずに求めるダンパー剛性低下率を用いて、適切なダンパー平面配置及び設置型の検討が可能になる。

今後は、主架構が塑性化する場合でも同等の制振効果が得られるかを検討する必要がある。

謝辞

本研究は新日鉄エンジニアリング株式会社、東京理科大学北村研究室による共同研究の一部を用いたものです。

参考文献

- 1) 秋山宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計，技報堂出版，1997
- 2) 独立行政法人 建築研究所：鋼構造建築物へのエネルギー法活用マニュアル平成 17 年国土交通省告示第 631 号「エネルギーの釣合に基づく耐震計算法」に準拠して，技報堂出版，2008.9
- 3) 島田侑，佐藤大樹，長江祐也，北村春幸，福山國夫，梶原浩一，井上貴仁，中島正愛，斉藤大樹，福和伸夫，日高桃子：超高層建物の下層階に部分配置する履歴型ダンパーの効果と影響に関する検討-長周期地震動を想定した耐震改修，日本建築学会構造系論文集，第 649 号，pp.549-557，2010.3
- 4) 日本建築構造技術者協会：応答制御構造設計法，彰国社，2000.12
- 5) 社団法人 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，明文社，2003.10
- 6) 栗林晃司，佐藤大樹，北村春幸，山口路夫，西本晃治：実効変形を考慮した履歴減衰型制振部材を有する鋼構造建物のエネルギーの釣合に基づく応答予測法，日本建築学会構造系論文集，第 661 号，pp.543-552，2011.3

付録 A ダンパー諸元の決定⁶⁾

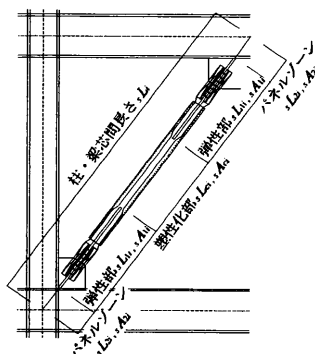
本論文では、ダンパー量をダンパーの降伏層せん断力係数 α_{y1} を変化させることによって表現する。第1層のダンパーの降伏層せん断力係数 α_{y1} が与えられた場合、第1層の塑性化部断面積 A_{c1} は、以下の式で求められる。

$$A_{c1} = \frac{N_{y1}}{\sigma_y}, \quad N_{y1} = \frac{Q_{y1}}{n \cos \theta_1}, \quad Q_{y1} = \alpha_{y1} \sum_{i=1}^n m_i \cdot g \quad (A1-3)$$

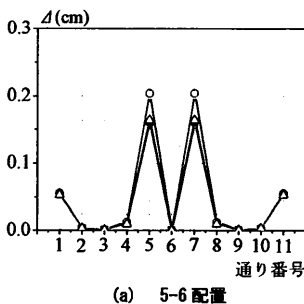
ここで、 N_{y1} : ダンパー1本分の降伏軸力、 σ_y : ダンパーの降伏応力度(=225 N/mm²)、 Q_{y1} : ダンパーの降伏層せん断力、 n : 1層当たりのダンパー本数(K型:4, V型:8)、 θ_1 : ダンパーの取り付け角度、 N : 全層数、 m_i : i 層の質量、 g : 重力加速度である。各層におけるダンパーの降伏層せん断力 Q_{yi} は、第1層のダンパーの降伏層せん断力 Q_{y1} と同じ値とし、全層一律($Q_{yi} = Q_{y1}$)とする。本論文で用いる座屈拘束ブレースは、ダンパーを1要素(一様断面)にモデル化した。 i 層のダンパーの軸方向の等価剛性 k_i 、等価断面積 A_i 及び等価降伏応力度 σ'_{yi} は、 A_{ci} を用いて、それぞれ次式で算出される。

$$k_i = \frac{E \cdot A_{ci}}{L_i} \cdot \lambda_i, \quad A_i = A_{ci} \cdot \lambda_i, \quad \sigma'_{yi} = \frac{\sigma_y}{\lambda_i} \quad (A4-6)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{L_{ci}}{L_i} + 2 \frac{L_{1i}}{L_i} \frac{A_{ci}}{A_{1i}} + \left(1 - \frac{L_{ci}}{L_i} - 2 \frac{L_{1i}}{L_i}\right) \frac{A_{ci}}{A_{2i}}} \quad (A7)$$



付図 A1 ダンパー配置図



(a) 5-6 配置

ここで、 E : 鋼材の弾性係数、 L_i : 柱・梁芯間長さ、 L_{ci} : 塑性化部長さ、 L_{1i} : 弾性部長さ、 A_{1i} : 弾性部断面積、 A_{2i} : パネルゾーン断面積である(付図 A1 参照)。本論文では、Z型の5-6配置、3-8配置(6.4m スパン)に付与したダンパーを基準値として $L_{ci}/L_i=0.25$ 、 $L_{1i}/L_i=0.325$ 、 $A_{1i}=2 \cdot A_{ci}$ 、 $A_{2i}=A_{ci}$ とした。各配置及び設置型でダンパーの水平方向の剛性を等しくするために、K型、V型の場合と1-10配置(7.2m スパン)の場合では、ダンパーの塑性化部長さを調節している。なお、ダンパーの復元力特性は二次勾配を0.001としたバリエーションとする。

付録 B 各設置型における柱軸変形分布

付図 B1(a)~(c)に各設置型における5-6配置、3-8配置、1-10配置のときの1層の柱軸変形分布を示す。横軸の通り番号は、図2の軸組図の通り番号(X1~X12)で、縦軸にその通り番号の1層の柱の軸変形 Δ (cm)の値を示す。付図 B1(a)より、どの設置型でもダンパーが設置されているX5とX7通りの柱で Δ が大きいことが確認できる。設置型に着目すると、V型がK型、Z型と比較して Δ が大きい。これより、V型では柱軸伸縮による曲げ変形がK型、Z型に比べ大きいため、V型の実効変形比が低い要因になっている(3.5節、図10参照)。付図 B1(b)、(c)も同様である。

付録 C 実効変形比、累積塑性変形倍率の算出手法

制振構造を考えた場合、柱の軸伸縮により生じる骨組全体としての曲げ変形の影響により、実効変形 δ_{max} は低下する。実効変形比 β_{ei} は、全体変形に対するせん断変形の比率を表される。以下の式より算出できる。

$$\beta_{ei} = \frac{\delta_{max}}{\delta_{max}'} \quad (C1)$$

ここで、 δ_{max}' : i 層の最大層間変形である。

$$\delta_{max}' = \frac{\hat{\delta}_{max}}{\cos \theta_i} \quad (C2)$$

ここで、 $\hat{\delta}_{max}$: i 層のダンパーの最大軸変形、 θ_i : i 層のダンパーの取り付け角度である。本建物では、各層においてK型、V型ではダンパーを8本、Z型ではダンパーを4本付与しているため、 $\hat{\delta}_{max}$ を求めるにあたってはK型、V型ではダンパー8本、Z型ではダンパー4本の平均値を取っている。

ダンパーの累積塑性変形倍率 η_i は次式より算出される。

$$\eta_i = W_{pi} / (\alpha_{y1} \cdot \delta_{y1}) \quad (C3)$$

ここで、 W_{pi} : ダンパーのエネルギー吸収量、 Q_{y1} : i 層のダンパーの降伏層せん断力、 δ_{y1} : i 層のダンパーの降伏層間変形である。

付録 D ダンパー剛性低下率の算出手法

ダンパー剛性低下率 β_{ki} は、以下の式より算出できる。

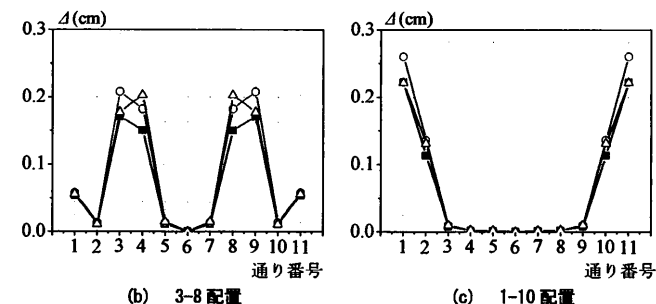
$$\beta_{ki} = \frac{\alpha_{ki}}{\alpha_{ki}'} \quad (D1)$$

ここで、 α_{ki} : 付加系(ダンパー+直列バネ)の剛性、 α_{ki}' : ダンパーの剛性である。 α_{ki} は以下の式で算出される(詳細は文献6参照)。

$$\alpha_{ki} = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N (\alpha_{Kmn} \cdot n) \quad (D2)$$

ここで、 N : 全層数、 α_{Kmn} : $[K]$ マトリクスの要素、 n : 第 n 層である。

■ K型 ○ V型 ▲ Z型



付図 B1 1層の柱軸変形分布