

粘性体ダンパーを組み込んだ制震構造物模型の振動実験 (その2. 粘性体ダンパー配置と振動性状について)

Experimental Study on the Vibration Control Structure Model with Viscous Damper (Part2. The Relation Between the Location of Viscous Damper and the Response of Structure)

飛田 喜則*

要 旨

制震装置を組み込んだ構造物の耐震性能やコスト等を決定する上で、制震装置の性能を把握し、さらに制震装置を各層へ適切に配置することが重要となる。そこで、粘性体ダンパーを組み込んだ構造物模型を用いて振動台実験をおこない、制震装置の配置方法がその応答に及ぼす影響について検討した。実験は、柱の鉛直方向の水平剛性分布が異なる3種類の試験体に対して、各層に組み込む粘性体の量を変化させておこなった。実験の結果、1) 粘性体ダンパーの総量が多くなるに従い、減衰定数が増加して応答が低減できるが、上層部の変形が大きい試験体では、粘性体の総量を増やしても応答にあまり変化がなかった、2) 変位モードに比例して粘性体量を配分する方法が、応答を低減する効果が最も大きい、3) 地震波を入力した場合、地震波によってその低減効果が異なることが明らかとなった。

キーワード：粘性体ダンパー／最適配置／地震応答／制震構造

1. はじめに

兵庫県南部地震において、多くの建築物の構造体に被害が生じた。それ以後、制震部材を用いて耐震性能や居住性能を向上させる構造物が多く建設または改築されることとなった。このような制震構造物の設計手法として、制震装置の配置方法に関する研究がなされ、最適な配置方法などが提案されている。これらの手法では、入力する地震動、対象となる構造物、または制震装置の非線形性などが理想化されており、おおよその制震装置の数量を把握するためには有効である。しかし、実際の構造物の応答は、それぞれに振動特性が異なること、各層の制震装置で非線形性の程度が異なること、入力地震動によっても周期特性が異なることなどから、地震応答解析を繰り返しおこなって確認することが必要である。また、制震装置を組み込んだ構造物は実際に大地震を経験し、それらの効果を検証された例は少ない。このため、制震装置を適切に配置する方法を確立し、実験等によって地震時の挙動を把握しておくことが必要である。

本研究は、柱の鉛直方向の水平剛性分布が異なる3種類の構造物模型について振動台実験をおこない、それに組み込む粘性ダンパーの量や配置方法が応答に及ぼす影響について検討をおこなった。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体は、各層の高さが約400mm（柱間300mm）、幅×奥行きが600×600mmの正方形平面で5層の建物模型



写真－1 試験体全景

*建築構造研究室

である。各層の重量は、ほぼ均一で約1200Nであり、その柱の鉛直方向の水平剛性分布が異なっている以下の3種類とした。試験体の形状（例としてType1）を図－1に、各試験体の諸元を表－1に示す。なお、これらの試験体は、水平剛性分布にかかわらず1次固有周期が0.70秒となるように計画した。

【試験体の種類】

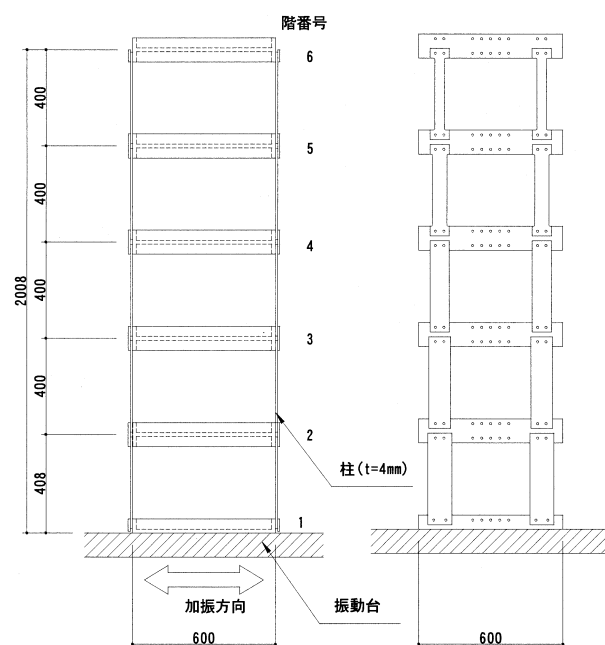
- (1) Type1：水平せん断力をAi分布とし、層間変位が各層で等しくなるように柱の水平剛性を算定した試験体
- (2) Type2：Type1に比べて、下層の水平剛性が低く、上層の水平剛性が高い試験体
- (3) Type3：Type1に比べて、下層の水平剛性が高く、上層の水平剛性が低い試験体

2.2 粘性体ダンパーの概要

本実験で使用したダンパーの形状を図－2に示す。粘性体ダンパーの構造は、ステンレス製の容器に粘性体を充填し、0.35cmのせん断隙間を有するように抵抗板を挿

表－1 試験体諸元

層	重 量	剛 性 (kN/mm)		
	(N)	Type1	Type2	Type3
5	1132.9	58.6	88.0	44.0
4	1218.1	88.0	102.6	73.3
3		117.4	117.3	117.3
2		131.9	124.7	146.6
1		146.6	131.9	175.9



図－1 試験体形状（Type1）

入したものである（以後、ダンパーと称す）。ダンパーのせん断抵抗力は、粘性体のせん断抵抗面積によって調整した。なお、今回の実験では、各Typeで外気温が異なるため、それぞれで粘性体の性能が異なることが考えられたが、粘性体の抵抗力等について温度による補正はおこなっていない。

2.3 粘性体ダンパーの分配方法

Type1～Type3の試験体について、それらに組み込むダンパーのせん断抵抗面積の総和を200cm²、250cm²または300cm²とした。さらに、それらを各層へ分配する分配率は、以下の3種類とした。粘性体の分配率を表－2に示す。

【粘性体ダンパーの配置方法の種類】

- (1) 各層一様型：各層で粘性体の分配率を一定
- (2) 剛性比例型：各層の柱の水平剛性に比例
- (3) 変位比例型：各層の変位（計算値）に比例

2.4 加振方法

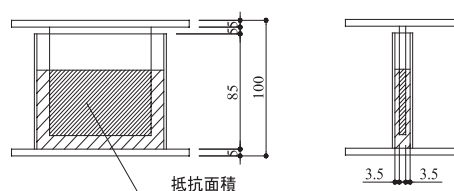
実験に用いた入力波は、正弦波および地震波とした（それぞれ正弦波実験、地震波実験と称す）。

正弦波実験は、入力する正弦波の最大加速度を20.0Gal、周期を0.1～1.0secの25ケースとし、試験体の応答がほぼ定常状態となるようにしておこなった。また、試験体の1次固有周期の正弦波で加振して応答がほぼ定常となった後に加振を停止させることによって自由振動実験もおこなった。

地震波実験は、入力する地震波をEL CENTRO NSおよびTAFT NSの2波とし、その最大加速度を50.0Galとした。なお、地震波の時間軸の調整はおこなっていない。

表－2 粘性体ダンパーのせん断面積分布率

層	一様配置	Type1		Type2		Type3	
		剛性比例	変位比例	剛性比例	変位比例	剛性比例	変位比例
5	0.20	0.11	0.04	0.16	0.00	0.08	0.11
4	0.20	0.16	0.16	0.18	0.10	0.13	0.23
3	0.20	0.22	0.22	0.21	0.21	0.21	0.23
2	0.20	0.24	0.29	0.22	0.32	0.26	0.23
1	0.20	0.27	0.29	0.23	0.37	0.32	0.20



図－2 粘性体ダンパーの形状

2.5 測定方法

試験体の各層の水平変位を振動台上に設置した剛なフレームからレーザー変位計で測定し、加速度を各層に設置した小型ひずみゲージ式加速度計で計測した。サンプリング周波数は、200Hzとした。

3. 実験結果

3.1 正弦波実験

正弦波実験の結果について述べる。

3.1.1 固有周期

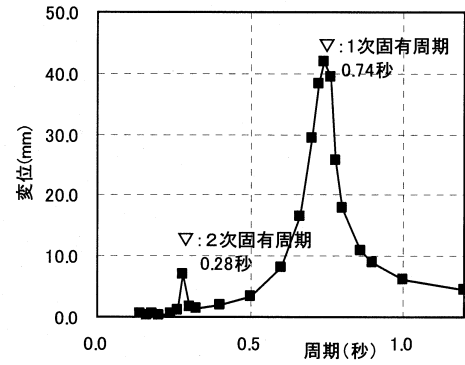
ダンパーが無い試験体について、加振周期とその頂部の応答変位または応答加速度との関係を図-3に示す。また、同様に求めた各試験体、各配置方法の固有周期一覧表を表-3に示す。これらから、ダンパーが無い試験体では、1次固有周期が約0.74～0.76秒、2次固有周期が約0.26～0.30秒であることがわかる。また、ダンパーを設置することによって、やや固有周期が短周期となるが、ダンパーの配置方法による変化がみられなかった。

3.1.2 変位分布

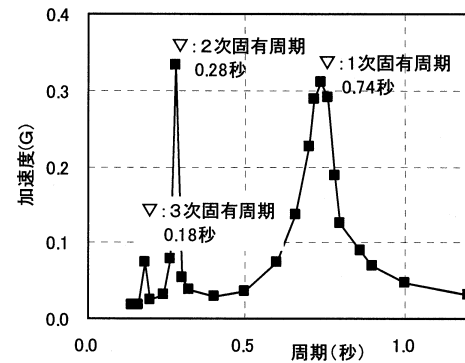
ダンパーが無い試験体について、1次固有周期で加振した時の変位分布を、その最大値（最上階変位）で基準化したものを図-4(a)に示す。また、最上階の変位（全変位量）に対する各階の層間変位の比を図-4(b)に示す。これより、Type1は、層間変位が一定になるように計画したが、それに比べてやや下層の変位が大きく、上層の変位が小さい結果となった。また、各タイプの変位分布をType1と比べると、Type2は下層の変位が大きく上層の変位が小さい分布であり、Type3はそれとは逆に下層の変位が大きく上層の変位が小さく、かつ各層の変位がほぼ一定である分布となった。

3.1.3 減衰定数

試験体頂部の自由振動波形から、1次固有周期の対数減衰定数を算出し、それらとせん断抵抗面積との関係を図-5に示す。これより、総せん断抵抗面積の増加に伴って減衰定数は増加していること、また、その増加率は、配置方法によって差があることがわかる。ここで、配置方法による減衰定数の変化傾向をみるために、せん断抵抗面積ごとに減衰定数の平均を算定し（図-5に記す）、これに対する各減衰定数の比を図-6に示す。図には、配置方法ごとの近似曲線を併記した。これより、剛性比例型および一様配置型の減衰定数は、平均値より小さく、変位比例型では、平均値に比べて大きくなる傾向であった。例えば、ダンパーの総せん断抵抗面積が300cm²では一様配置型、剛性比例型そして変位比例型の順に減衰定



(a) 応答変位

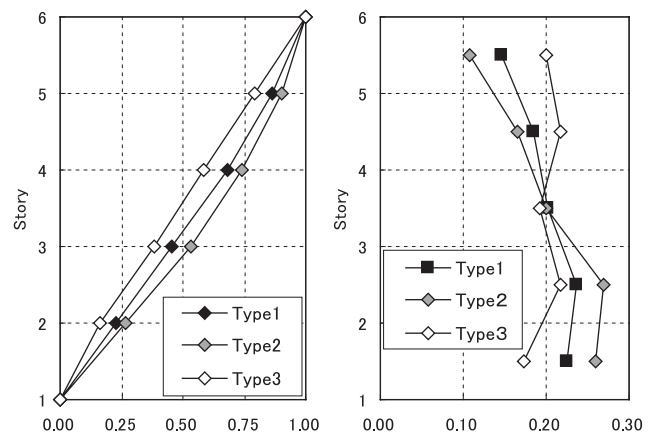


(b) 応答加速度

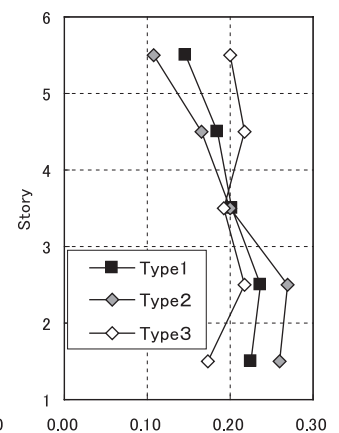
図-3 ダンパーが無い試験体の応答と加振周期との関係

表-3 固有周期

粘性体 配置方法	Type1			Type2			Type3		
	1次	2次	3次	1次	2次	3次	1次	2次	3次
なし	0.74	0.28	0.18	0.76	0.26	0.16	0.74	0.30	0.14
各層一様	0.74	0.28		0.74	0.26		0.72	0.28	
剛性比例	0.74	0.28		0.74	0.26		0.72	0.28	
変位比例	0.74	0.28		0.74	0.26		0.72	0.28	



(a) 変位分布
(最大値で基準化)



(b) 各層の変位割合

図-4 各試験体の変位分布

数が大きくなる傾向である。この差は、せん断抵抗面積が大きくなり減衰定数が大きくなるほど顕著である。

3.1.4 変位および加速度低減率

(a) 変位分布

総せん断抵抗面積が 250cm^2 の試験体について、Typeごとに配置方法の違いによる各層の変位低減率（低減率：ダンパー無しの試験体の応答変位および加速度の比）の分布図を図-7に示す。これより、ややばらつきがあるが、いずれのTypeでも一様配置型、剛性比例型、そして変位比例型の順で変位が各層で低減していることが確認できる。ただし、Type3は、配置方法によるにあまり差がない結果となった。この傾向は、他のせん断抵抗面積の場合でもほぼ同様であった。

(b) 加速度-変位低減率

各Typeの加速度の低減率と変位の低減率の関係を図-8に示す。図より、いずれのTypeでも加速度と変位が、ほぼ同じ低減率で低減している。また、Type3試験体では低減率が0.7付近に集中しており、配置方法やせん断面積の影響が小さいことがわかる。また、変位、加速度の低減率とダンパーのせん断抵抗面積および配置方法の影響について検討するため、せん断抵抗面積と変位低減率または加速度低減率の関係を図-9、図-10に示す。図には各せん断抵抗面

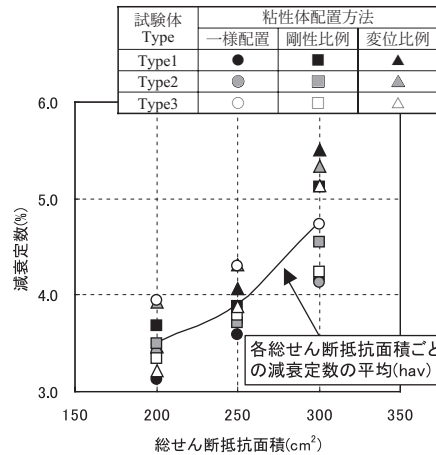


図-5 せん断抵抗面積と減衰定数の関係

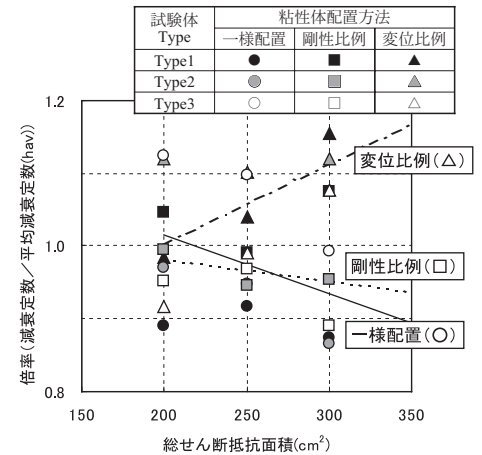


図-6 配置方法と減衰定数の関係

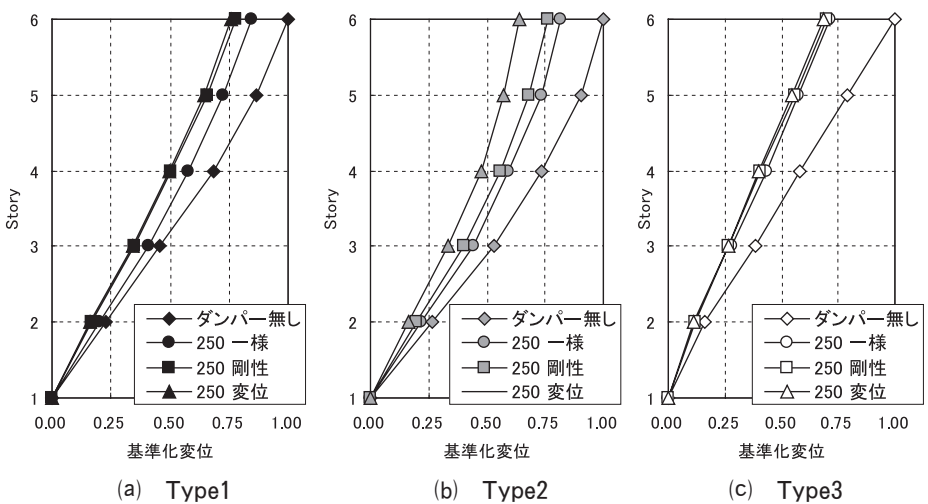


図-7 ダンパーを入れた場合の変位分布図

積で配置方法ごとに低減率の平均値を記している。これより、変位低減率および加速度低減率ともに、減衰定数

せん断抵抗面積 (cm²)	粘性体配置方法		
	一様配置	剛性比例	変位比例
200.0	●	■	▲
250.0	●	■	▲
300.0	○	□	△

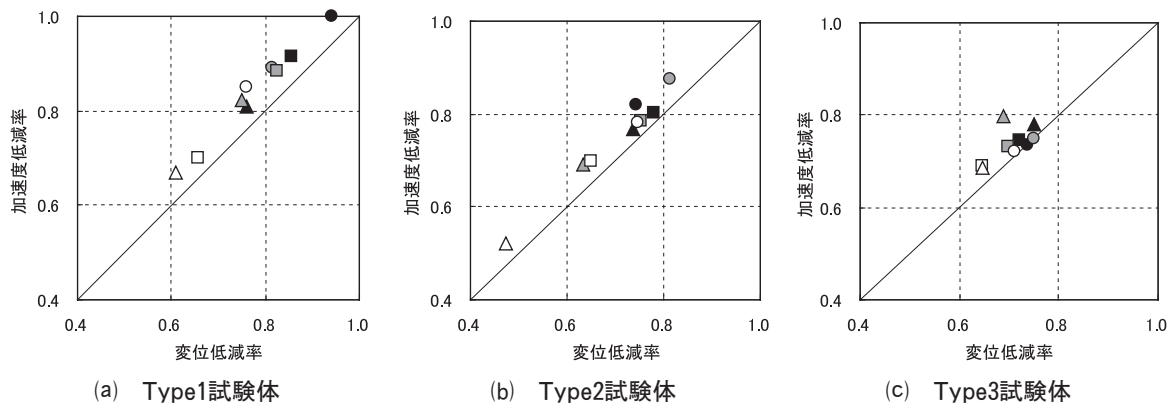


図-8 変位-加速度低減率の関係

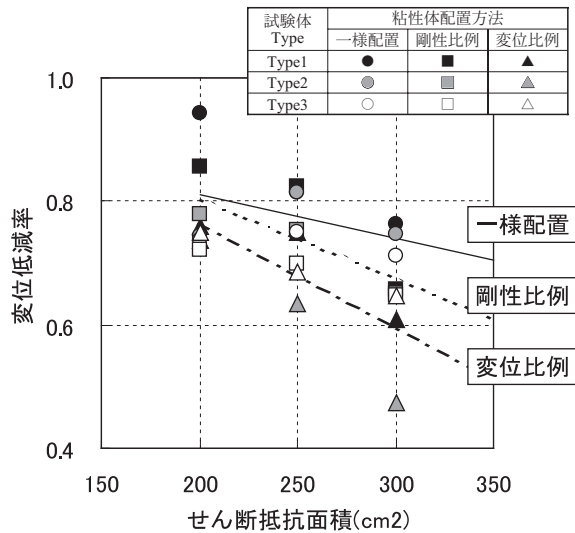


図-9 配置方法による変位低減率の違い

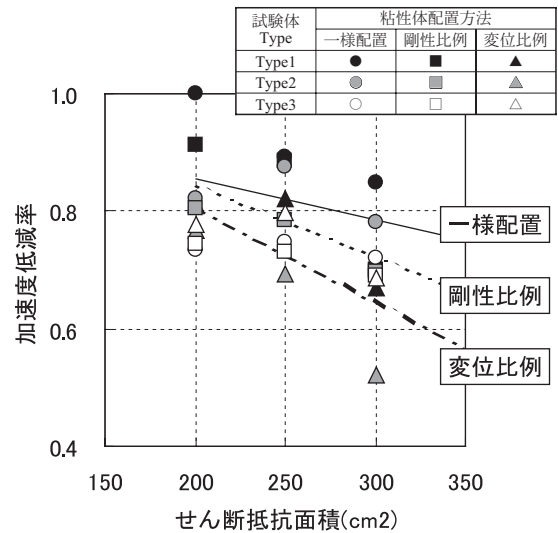


図-10 配置方法による加速度低減率の違い

の場合と同様に、応答を低減する効果は、変位比例型が最も大きく、次に剛性比例型、そして一様配置が最も小さい傾向にあった。その傾向は、ダンパーのせん断抵抗面積が大きくなるほど顕著である。

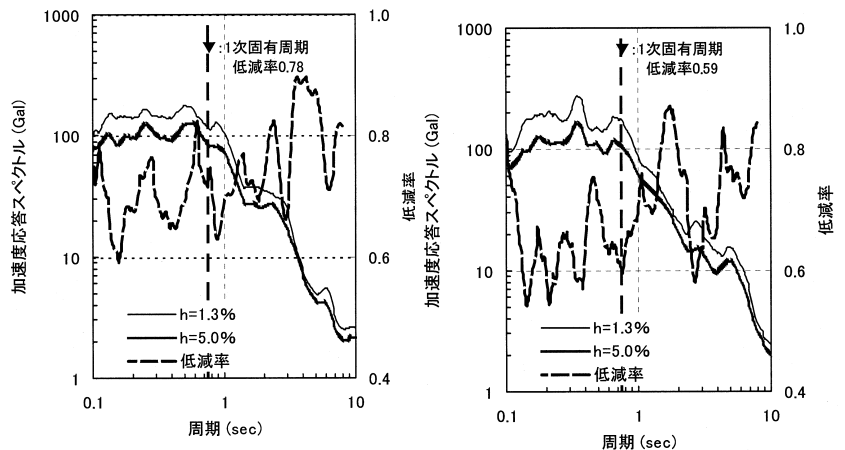
3.2 地震波入力時

3.2.1 応答スペクトルと低減率

入力地震動の加速度応答スペクトルを図-11に示す。図は、自由振動実験より求めたダンパーなし試験体の平均的な減衰定数(1.3%)、総せん断抵抗面積が300cm²の試験体の平均的な減衰定数(5.0%)の加速度応答スペクトルについて記載している。また、それらの加速度応答スペクトルの比を低減率として示している。これより、地震波を入力した場合、試験体の1次固有周期付近で低減率は、EL CENTRO NS波で約0.78、TAFT NS波で約0.59であることが推測できる。

3.2.2 加速度および変位の低減率

総せん断抵抗面積が300cm²のときの変位低減率と加速度低減率の関係を図-12に示す。図より、地震波を入力した場合の低減率は、正弦波入力時よりもばらつきがあるが、応答スペクトルからの推定した値付近であり、おおむね一様配置、剛性比例そして変位比例型の順で低減する効果が大きくなる傾向であることがわかる。また、変位よりも加速度の低減がやや大きい傾向であ



(a) EL CENTRO NS

(b) TAFT NS

図-11 応答スペクトルによる低減率の算定

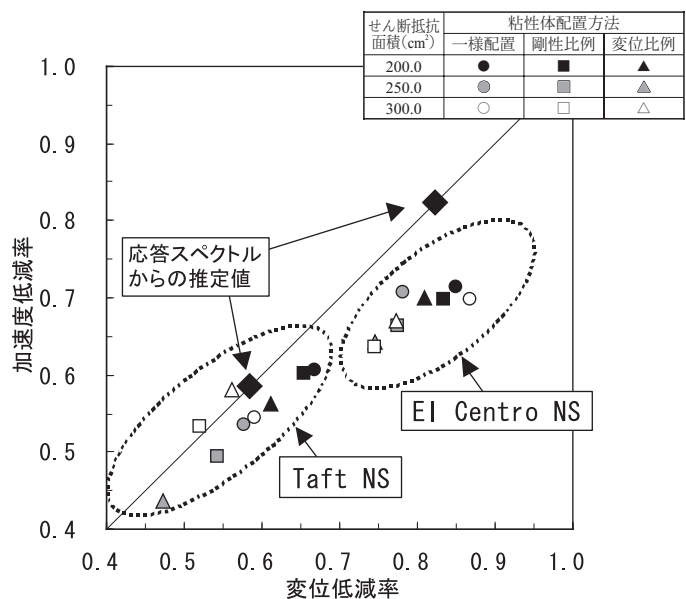


図-12 地震波入力時の変位、加速度低減率

た。これには、加速度の高次成分の低減効果が大きいことが影響していると考えられる。

4. まとめ

柱の水平剛性分布が異なる3種類の試験体に粘性体ダンパーを組み込み、各層への分配方法を変化させて、それらが応答に及ぼす影響について検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 粘性体ダンパーのせん断抵抗面積が増加するに従って、減衰定数は大きくなり、試験体の応答が低減する。
- (2) 試験体に挿入する粘性体ダンパーの総せん断抵抗面積が同じであっても、配置方法によって減衰定数および低減率（応答）には大きな差がある。つまり、粘性体ダンパーのせん断抵抗面積を各層に一樣にして配置するよりも、剛性、さらには変位に比例させて配置する方がより効果的である。ただし、上層部の変形が大きな試験体についてはその差は明確でなく配置方法に対する影響は小さい。
- (3) 地震波を入力した場合、試験体の低減率の平均的な値は、応答スペクトルからの推定値と一致するが、その場合でも、粘性体ダンパーの配置方法によって低減率（応答）が異なる。その低減の傾向は、正弦波加振時とはほぼ同様である。

今回は、粘性体ダンパーを様々な形で組み込んだ場合について振動台実験をおこなうことで、地震時の性状に関して基礎的な性状、および正弦波加振時との違いについて確認した。

今後、解析的な検討をおこなっていく予定である。

[謝 辞]

本実験の実施およびデータ整理をおこなうにあたり、大阪工業大学工学部建築学科大場新太郎教授をはじめ、同研究室大学院生ならびに学部生に多大なるご助力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 佐野剛志, 鈴木哲夫, 関松太郎: 応答スペクトルを用いたモーダルアナリシスによる減衰装置の効率配置手法について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp627-628, 1994
- 2) 笠井和彦: シンポジウム主旨及び制振性能に関する私見, パッシブ制振シンポジウム2000, pp61-76, 2000.3
- 3) 笠井和彦, 大原和之: 速度依存制振構造の設計, パッシブ制振シンポジウム2000, pp293-307, 2000.3

- 4) 大原和之, 笠井和彦: 粘弾性ダンパーの設計法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp967-968, 2000
- 5) 田中政寛, 飛田喜則, 大場新太郎: 粘性体ダンパーを組み込んだ5層建物模型の振動台実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集B-2分冊, pp329-330 2001
- 6) 多田聡, 飛田喜則, 大場新太郎: 振動実験に基づく制振ダンパーの最適配置に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集B-2分冊, pp.841-842 2002