# 論文 粘弾性制振デバイス付きRC造骨組の耐震性能に関する研究

和泉 信之\*1・竹中 啓之\*2・千葉 脩\*3・阿世賀 宏\*4

要旨:粘弾性制振デバイス付き RC 造間柱が組み込まれた RC 造骨組を対象として,間柱の 実大試験体および1層1スパン骨組の模型試験体を用いた動的水平載荷実験を行った。その 結果,粘弾性制振デバイスの付加により,間柱および骨組について地震時におけるエネルギ 一吸収能力が向上することを実証した。さらに,粘弾性制振デバイス付き RC 造間柱を対象 とした解析モデルを提案し,間柱および間柱が組み込まれた骨組の復元力特性について,実 験結果との比較を行い,その提案モデルの妥当性を示した。

キーワード: RC 造骨組,制振デバイス,粘弾性体,耐震性能,復元力特性

### 1. はじめに

著者らは,鉄筋コンクリート造(RC造)建 築物などの大地震時の損傷制御を目的として, エネルギー吸収型デバイス,いわゆる制振デバ イスの適用に関する研究を行ってきた。

本研究で取り扱う制振デバイスは、粘弾性体 と鋼板を交互に設けた多層型ダンパー(以下, 粘弾性ダンパーと呼ぶ)である。この粘弾性ダ ンパーを柱の中央部に設けて,その上下の柱に 接合した RC 造間柱(以下,制振柱と呼ぶ)と し, RC 造骨組に組み込んでいる(図-1)。

RC 造骨組では,鉄骨造とは異なり,ひび割 れにより制振デバイスの接合部材や周辺骨組の 剛性が低下し変形が増大して,制振デバイスの 効果が低減することが危惧される。そのため, 制振デバイスの適用には,制振デバイス付き部 材や骨組を対象とした性能評価および解析モデ ルの妥当性の検証が必要である。

本論文では、制振柱の実大試験体および制振 柱を組み込んだ骨組模型試験体の動的載荷実験 を行う。実験結果から、粘弾性ダンパーの RC 造骨組に対する減衰付加効果を実証する。さら



に,制振柱を対象とした解析モデルを提案し, その復元力特性の妥当性を示す。

#### 2. 実験概要

## 2.1 実験計画

本実験では、制振柱単体を対象とした「制振 柱実験」および制振柱付き RC 造骨組を対象と した「骨組実験」を計画する。

制振柱実験では,低降伏点鋼ダンパーを用い た柱試験体の実験<sup>1)</sup>終了後に,粘弾性ダンパー に取替えて動的水平載荷実験を行う。

骨組実験では,まず骨組試験体のみの動的載

*1	戸田建設	(株)	構造設計部主管	博(工)	(正会員)
*2	戸田建設	(株)	技術研究所	工修	(正会員)
*3	戸田建設	(株)	技術研究所所長	工修	(正会員)
<b>*</b> 4	西松建設	(株)	技術研究所部長	博 (工)	



表--1 制振柱実験試験体の材料定数

	割線剛性 圧		縮強度	割裂強度		
コンクリート	$(\times 10^{5} \text{N/mm}^{2})$ (N/mm <sup>2</sup> )		l/mm²)	(N/mm²)		
	0. 35		34.9	3. 29		
鋼材	ヤング係数	降	伏強度	引張強度		
(材料種別)	$(\times 10^{5} \text{N/mm}^{2})$	(N/mm <sup>2</sup> )		(N/mm²)		
PL16(SM490)	2. 11	352		539		
PL22 (SM490) 2.13 43		437	587			
	1		(h = 6 - L			
鉄筋	ヤング係数	降	伏強度	引張強度		
(材料種別)	$(\times 10^{5} \text{N/mm}^{2})$	(N/mm²)		(N/mm²)		
D41 (SD490)	1.96	520		692		
D25 (SD490)	1.96	555		733		
D16 (SD295)	1.86	360		549		
<b>粘强性体</b>	51 張强度		1甲 ひ			
	(N/mm <sup>2</sup> )		(%)			
ジエン系 1.22			867			

荷実験(以下,骨組基本実験と呼ぶ)を行う。 次に,低降伏点鋼ダンパーを用いた骨組試験 体の動的載荷実験<sup>2)</sup>を行い,低降伏点鋼ダンパ

ーを粘弾性ダンパーに取替えて動的載荷実験 (以下,骨組動的実験と呼ぶ)を行う。

粘弾性ダンパーには,ジエン系およびアクリ ル系の粘弾性体を用いる。粘弾性体には,一般 に振動数,温度および振幅依存性がある。粘弾 性ダンパーでは,粘弾性体のせん断変形により 減衰力を発揮させるため,粘弾性体を鋼板の間 に接着している。ジエン系の粘弾性ダンパーは, 鋼板の間にジエン系ゴムを流し込み成型してい る。一方,アクリル系の粘弾性ダンパーは,ア クリル系高分子シートを自己接着力により鋼板 に貼り付けている。

#### 2.2 制振柱実験計画

#### (1) 試験体概要

制振柱実験の試験体は、実大規模の試験体1



図-3 制振柱実験試験体の載荷方法



体(図-2)である。粘弾性ダンパーは、ジエ ン系ゴムを鋼板と交互に 10 層設けたデバイス で、RC 造柱に鋼製継手により接合している。

## (2) 載荷方法および載荷履歴

載荷は、図-3に示すように柱頭の水平変形 角(R rad.)で制御した正弦波載荷とする。載荷 履歴の例を図-4に示す。周期は、超高層住宅 を想定して2秒および4秒とする。

#### 2.3 骨組実験計画

#### (1) 試験体概要

骨組実験の試験体は、1 層 1 スパンの RC 造 骨組に、粘弾性ダンパーを用いた制振柱をスパ ン中央に組み込んだ約 1/2 縮尺の模型試験体 1 体である(図-5)。骨組は、梁曲げ降伏先行型 架構として設計している。粘弾性ダンパーは、 ジエン系およびアクリル系材料を用いた 2 体で



ある。試験体の材料特性を表-2に示す。粘弾 性ダンパーは, RC 造柱に鋼製継手により接合 している。

## (2) 載荷方法および載荷履歴

載荷は、左右の柱上部のピン支承に取付けた 加力用装置により骨組の水平変形角(Rf rad.) で制御した正弦波載荷(図-6)とする。載荷 履歴の例を図-7に示す。周期は、制振柱実験 と同様に2秒および4秒とする。また、Rf は 1/800の他に、稀に生じる地震動による変形を 上回る大きさとして、1/300程度を目標とする。 しかし、動的載荷では加力梁の水平変位で制御 したため、ひび割れ等の影響により、最大のRf は、骨組基本実験では 1/230、骨組動的実験で は 1/291程度であった。





図-6 骨組実験試験体の載荷方法

表---2 骨組実験試験体の材料定数

鉄筋・鋼材	ヤング係	数	降伏強度	引張強度	
(材料種別)	(×10 <sup>5</sup> N/m	m²)	$(N/mm^2)$	$(N/mm^2)$	
D22 (SD490)	1.93		509	685	
D19 (SD490)	1.92		523	666	
$\phi$ 6 (USD685)	1.80		701	846	
D6 (SD295)	1. 71		330	469	
PL19(SM490)	2.11		360	517	
1	1		1	1	
	ヤング係数		圧縮強度	割裂強度	
	$(\times 10^{5} \text{N/mm}^{2})$		$(N/mm^2)$	(N/mm <sup>2</sup> )	
梁,制振柱 0.2			31	2.35	
柱	0.35		55	4.56	
本下 5 法 小十	引張強度		伸び		
柏州土	$(N/mm^2)$		(%)		
ジェン	1. 22		867		
マカリリ	0.35		810		

#### 3. 実験結果

#### 3.1 制振柱実験結果

制振柱,粘弾性ダンパーの水平力一水平変形 角,せん断歪度関係を図-8,図-9に示す。 履歴ループは,楕円に近い形状を示した。また, 粘弾性ダンパーの水平変形が制振柱の水平変形 に占める割合は,約8割以上であった。なお, 粘弾性ダンパーの温度は,実験時の室内温度と ほぼ同じ約7~10度であり,本実験では繰り返 し載荷による温度上昇は小さく,載荷回数によ る減衰力への影響は小さいと考えられる。

3.2 骨組実験結果

#### (1) 実験経過

骨組基本実験では、梁端部に曲げひび割れが 発生したが、載荷後ひび割れはほぼ閉じていた。

骨組動的実験では,梁のひび割れはやや進展 し,残留ひび割れ幅は梁端部で最大 0.08mm で あった。梁主筋は,弾性範囲であった。なお, 粘弾性ダンパーの温度は約 16~18 度であり,制 振柱実験と同様に大幅な温度上昇はなかった。

(2) 水平力—水平変形角関係

骨組基本実験と骨組動的実験における水平力 一水平変形角関係の比較を図-10に示す。

骨組動的実験の水平力一水平変形角関係は, 骨組のみの実験結果に比べて面積の大きな楕円 形状のループを示した。鉄筋降伏以前において も粘弾性ダンパーによる RC 造骨組のエネルギ 一吸収能力の向上が可能なことがわかる。

#### 実験結果の考察

## 4.1 制振柱の等価剛性・等価減衰

制振柱の等価剛性,等価粘性減衰定数と水平 変形角(Rrad.)の関係を図-11,図-12に 示す。等価剛性はR=1/170程度(粘弾性ダンパ ーのせん断歪度約 100%相当の変形)を越えた 変形からほぼ一定である。等価粘性減衰定数は, Rが大きくなるに伴い若干増加するが,ほぼ一 定値である。一方,周期2秒と4秒では等価剛 性および等価減衰定数は異なっており、振動数 依存性が比較的大きいことがわかる。











## 4.2 骨組のエネルギー吸収量

骨組のエネルギー吸収量の比較を図-13に 示す。ダンパーの付加により、骨組のエネルギ 一吸収量が増大している。等価粘性減衰定数で は、骨組のみが 0.02 程度 (Rf=1/230)、アクリ ル系ダンパー付き骨組が 0.10 程度(Rf=1/291) であり、制振柱による減衰増大がわかる。

## 4.3 制振柱および骨組の解析モデル

制振柱の解析モデルは,多層構造物の弾塑性 解析への適用が容易なように、RC 造柱の変形 を曲げばねに、粘弾性ダンパーを線形ばねとダ ッシュポットを並列に配置したモデルに置換し たマクロ的な部材モデル(図-14)とする。 曲げに関する復元力特性は、ひび割れ点および 降伏点を考慮した TEKADA モデル<sup>3)</sup>とする。粘 弾性ダンパーは、フレームモデルへの適用を前 提に単純化を図り,線形ばねおよびダッシュポ ットの数を最小の1要素とする。要素モデルの 等価剛性および等価減衰係数は、粘弾性体の材 料の実験結果 4),5)に基づく算定式により設定す る。算定式には、粘弾性体の振動数、温度およ び振幅依存性を考慮しており、解析ケースおよ

表—3 粘弾性ダンパーの解析用定数

t

(°C)

8.5

8.5

8.5

17

17

17

17

r

(%)

77.5

154.8

45.2

87.5

f

(Hz)

0.25

0.25

0.5

0.25

0.5

0.25

0.5

ケース

1

2

3

4

5

6

7

実験

柱

柱

柱

骨組

骨組

骨組

骨組

粘弹性体

ジエン

ジェン

ジェン

ジエン

ジエン

アクリル

アクリル









	f:振動数(Hz) t:粘弾性体温度(℃) r:粘弾性体のせん断歪度(%) .Keg.等価剛性
Ceq	Ceq:等価粘性係数
(kN·s/mm)	ここで, $Keq = G' \times s \times n/d$
7.88	$Ceq = 2 \cdot heq \times Keq / (2 \cdot \pi \cdot f)$
7.32	G':粘弾性材料の
4.99	貯廠せん断弾性挙(KN/MM <sup>4</sup> ) 。・批弾性体の投影両積(mm)
6.82	n・粘弾性体の層数

d: 粘弾性体の厚さ(mm)

78.5 19.96 4.12 heq:等価粘性減衰定数 130 7.17 14.08 G', heq は, 振動数,温度,せん断歪度から 114 15.36 5.08 材料メーカーのデータ 4)5)より定める。

Keq

(kN/mm)

20.34

18.63

26.66

15.72

6.82

び解析用定数を表-3に示す。また,鋼製継手 部におけるウェブ板の弾性せん断変形は,線形 ばねで別途考慮する。

骨組の解析モデルは, RC 造部材の弾塑性特 性に立脚したフレームモデルとする。柱および 梁の部材モデルは,曲げ変形は非線形性を考慮 し,せん断変形および軸変形は弾性とする。ま た,柱梁接合部には剛域を,制振柱と梁の接合 部にはせん断パネルを設ける。

#### 4.4 制振柱および骨組の復元力特性

解析モデルを用いた制振柱の復元力特性と実験値との比較例を図-15に示す。制振柱のエネルギー吸収量の解析値は、実験値に対して、ケース1(R=1/227,周期4秒)が112%、ケース2(R=1/116,周期4秒)が104%、ケース3(R=1/324,周期2秒)が119%である。

次に、制振柱の解析モデルを用いた骨組のエ ネルギー吸収量と実験値との比較例(周期4秒) を図—16に示す。目標水平変形角Rf=1/300に おける骨組のエネルギー吸収量の解析値は、実 験値に対して、周期4秒ではジエン系が82%、 アクリル系が83%で、周期2秒ではジエン系が 95%、アクリル系が80%である。また、等価粘 性減衰定数を見ると、解析値の実験値に対する 比率はエネルギー吸収量とほぼ同等である。

これらから,解析モデルは概ね実験結果を表 現していることがわかる。

#### 5. 結論

これまでの実験および解析から得られた知見 を以下に述べる。

- (1)粘弾性ダンパーを取り付けた RC 造間柱は、 水平変形角 1/76 程度までエネルギー吸収能 力に富む楕円形状の履歴性状を示す。
- (2) 粘弾性ダンパーの付加により,梁主筋の降伏 以前においても, RC 造骨組のエネルギー吸 収能力を向上させることができる。
- (3) 提案した粘弾性ダンパーが付加された RC 造間柱の解析モデルは,間柱および間柱付き 骨組の復元力特性を概ね表現できる。





#### 参考文献

- 1)和泉信之,竹中啓之,大井貴之,千葉 脩: 低降伏点鋼パネルを組み込んだ RC 柱の耐震 性能に関する実験的研究,コンクリート工学 年次論文集, Vol.22, No.3, pp.1099-1104, 2000.6
- 2)和泉信之,竹中啓之,千葉 脩,阿世賀 宏: 制振デバイス付き RC 造骨組の耐震性能に関 する研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1057-1062, 2002.6
- 3)Takeda, Sozen and Nielsen :Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal, Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST12, pp.2557-2573, 1970
- 4)昭和電線電纜株式会社:粘弾性ダンパー 「SDM-1」設計資料,1999.7
- 5)住友スリーエム株式会社: VEM 粘弾性ダンパ 一資料集, 2000.12