

PCa版に粘弾性ダンパーを組み込んだ制震システムの開発

Development of Seismic Control System using Wall Panels with Viscoelastic Dampers

小幡 達也 TATSUYA OBATA

鈴木 亨 TORU SUZUKI

中南 滋樹 SHIGEKI NAKAMINAMI

第一構造デザインディビジョン 木田 英範 HIDENORI KIDA

近年、建物の地震時および強風時の応答を制御するために制震構造が広く採用されている。一般的な制震構造では、構造体の層間変形をダンパーに入力させて建物に減衰を与える方法が採られているが、本研究では非構造部材間の相対変形に着目し、外壁のPCa版にダンパーを設置することで建物に減衰を付加する制震システムの開発を目指した。4枚のPCa版に粘弾性ダンパーを設置した架構の動的加力試験を実施し、その結果をもとに解析的検討を行い、本システムによって建物に数%の減衰を付加できるという結論を得た。

キーワード：制震構造，粘弾性ダンパー，非構造部材，PCa版，解析モデル

In recent years, seismic vibration control dampers have widely applied to reduce building's response to the earthquake and the wind. In general, dampers are used to work for relative story displacement of buildings. In this study, dampers working for relative displacement of nonstructural members of PCa curtain walls are developed. As the result of dynamic loading test and response analysis of PCa curtain wall framework with developed dampers, it is confirmed that this nonstructural system is able to add a few percent of damping to the structure.

Key Words: Seismic Control System, Viscoelastic Damper, Nonstructural Member, PCa Curtain Wall, Analysis Model

1. はじめに

近年、建物の地震時および強風時の応答を制御する手段として制震構造が広く採用されている。従来の制震構造では構造体の層間変形をダンパーに入力し、建物に減衰を付加するのが一般的である。この場合、構造体でダンパーの反力を受けるため、大きな減衰力のダンパーを設置することができ、設置数も少なくすることが可能であるが、反面、そのための躯体の補強が必要となり、ダンパーのサイズが大きな場合は意匠計画との取り合いも難しくなる。

一方、従来の設計では外壁のPCa版などの非構造部材の復元力については積極的には考慮されていない。しかし非構造部材にダンパーを設置し、その復元力を適切に評価することができれば、有効な制震の手段になり得ると考える。

以上の考えに基づき、本研究では外壁のPCa版に小型のダンパーを多数設置して建物に数%の減衰を付加す

る制震システムを開発した。ダンパーを小型化することで、取付けが容易となるほか、ダンパー設置に伴う躯体やPCa版取付部の補強を不要とすることができる。

2. 架構試験の概要

本システムの減衰機構を図-1に、PCa版ファスナー部の詳細を図-2に示す。ロック型PCa版は、建物に層間変形が生じた場合に図-1に示した変形状態となる。このときPCa版の目地を跨ぐように設置された粘弾性ダンパーにせん断変形が生じ、エネルギーを吸収する仕組みである。

複数枚のロック型PCa版に粘弾性ダンパーを設置した場合の版全体のロック挙動の把握と、PCa版の復元力特性を考慮したダンパー性能の把握を主目的として架構試験を実施した。なお、ファスナーおよび取付金物の安全性の検討、および版間シールによる影響の確認も併せて行った。

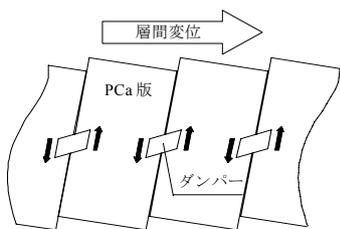


図-1 減衰機構

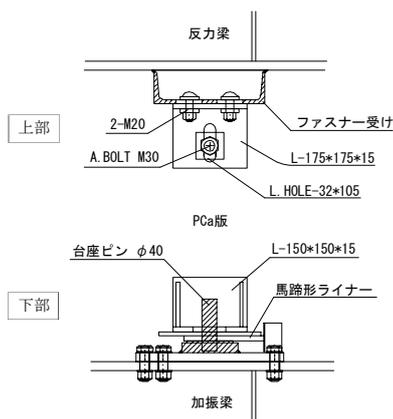


図-2 PCa版の取付部詳細

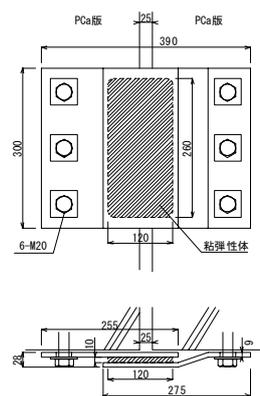


図-3 ダンパーの概要

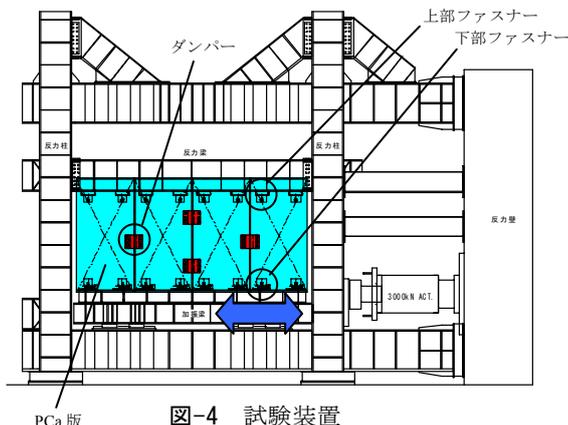


図-4 試験装置

表-1 試験体の諸元

部材	高さ	幅	厚さ	重さ	備考
	mm	mm	mm		
PCa版	2,500	1,250	160	1.2 ton	アスペクト比:0.5
ダンパー	装置全体	300	390	15 kg	-
	粘弾性体	260	120	406 g	スチレン・オレフィン系

表-2 試験ケースおよびパラメーター一覧

試験ケース	正弦波加振					地震応答波加振 下記地震波を10層JSSIテーマスタックチャージに入力した場合の10層の応答波形
	振動数	層間変位	層間変形角	想定ダンパー変位	想定ダンパー歪み	
	Hz	mm	rad	mm	%	
CASE1: ダンパーなし	0.1	1.4	1/1374	0.5	5	ELCENTRONS (V _{max} =50cm/sec)
		2.8	1/687	1.0	10	TAFT EW (V _{max} =50cm/sec)
CASE2: ダンパー1基	0.3	9.3	1/207	5.0	50	HACHINOHE EW (V _{max} =50cm/sec)
		17.0	1/113	10.0	100	JMA KOBE NS (V _{max} =50cm/sec)
CASE3: ダンパー4基	1.0	32.2	1/60	20.0	200	告示波(苫小牧NS位相)
		48.0	1/40	30.0	300	-

表-3 繰返し試験のパラメータ

想定外力	振動数	ダンパー歪み	繰返し回数
大地震	0.3Hz	200%	10
暴風	0.25Hz	133%	150



写真-1 試験時のダンパーの状況

(1) 試験体

試験体はダンパーを設置した PCa 版 4 枚であり、設置するダンパーの数をパラメータとした。PCa 版は幅および高さを実大の約 1/2 とし、厚さおよびファスナー部は実大とした。ダンパーは本システムのために新たに開発したもので、スチレン・オレフィン系の粘弾性体を 2 枚の鋼板で挟み込んだ構造であり、粘弾性体のせん断面積は 31,200 mm²、せん断厚さは 10mm である。試験には実機のダンパーを使用した。試験体の諸元を表-1 に、ダンパーの概要を図-3 に示す。試験体の PCa 版 4 枚に設置できるダンパーの数は、ダンパー反力とファスナー耐力との関係、およびダンパー反力と PCa 版の自重との関係から、中央の目地部で最大 2 基、両側の目地部では最大 1 基である。

(2) 試験装置および計測項目

試験装置を図-4 に示す。PCa 版を上部反力梁と下部加振梁に固定し、3,000kN アクチュエータにより動的に加振した。計測項目は、層間変位(上部反力梁と加振梁との相対変位)、アクチュエータの荷重、各ダンパーのせん断変形量、粘弾性体の温度、各 PCa 版の水平および鉛直変位とした。

(3) 試験ケースおよびパラメータ

試験はダンパー設置数の異なる 3 ケースについて、正弦波加振(4 振動数・6 振幅)と地震応答波加振(5 波)を行った。表-2 に試験ケースとパラメータの一覧を示す。入力振幅(層間変位)は、CASE1 でのダンパー設置予定位置の変位が表の想定ダンパー変位の値にな

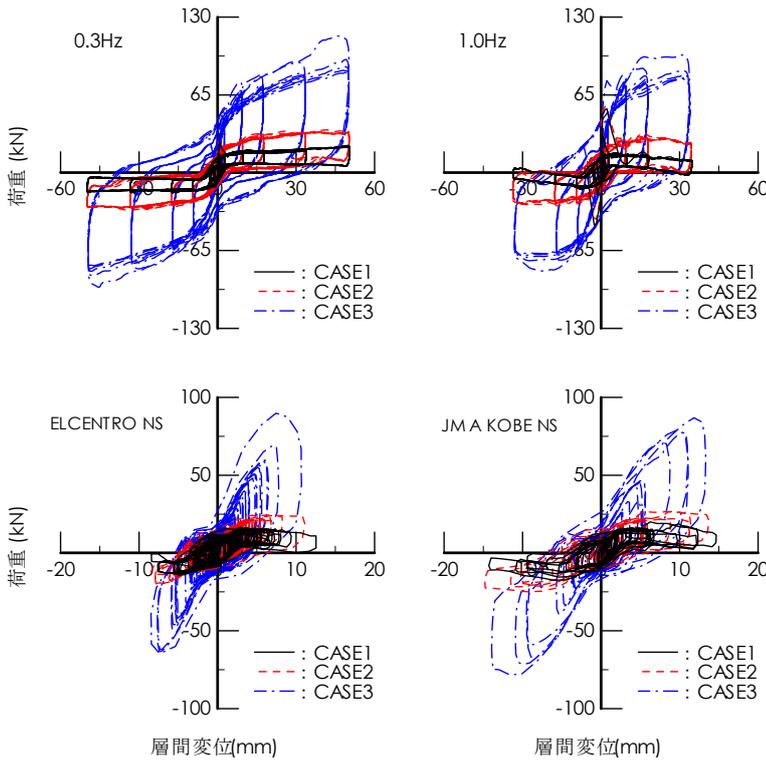


図-5 履歴曲線

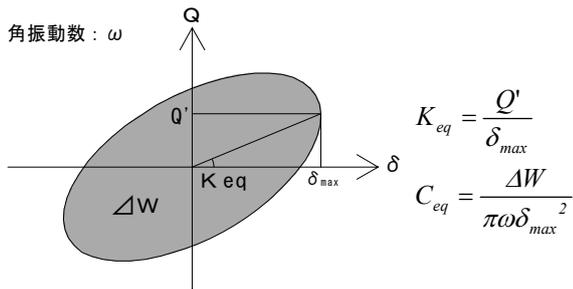


図-8 等価剛性・等価減衰係数の算出方法

るように決定した。したがって CASE2, CASE3 でのダンパー部の実変位は同表の値とは一致しない。また、試験は振動数ごとに振幅について昇順で行い、最大振幅の加振後にダンパーを新品と交換した。地震応答波加振は、表-2 に示した各地震波に対する 10 層の JSSI テーマストラクチャー¹⁾の 10 階の応答波形を入力波とした。表-2 の基本試験のほかに耐久性能確認として、表-3 に示す繰返し試験を実施した。試験時のダンパーの状況を写真-1 に示す。

3. 架構試験の結果

(1) 履歴曲線および特性値

架構試験で得られた履歴曲線のうち代表的なものを図-5 に示す。上段が正弦波加振、下段が地震応答波加振の結果である。PCa 版の復元力特性は面積を持った S

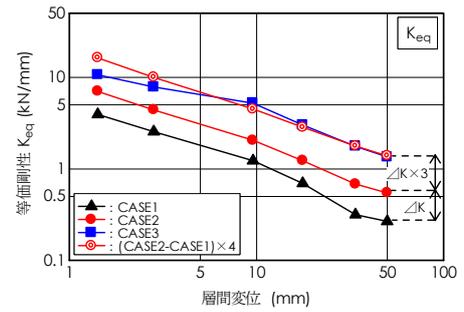


図-6 等価剛性

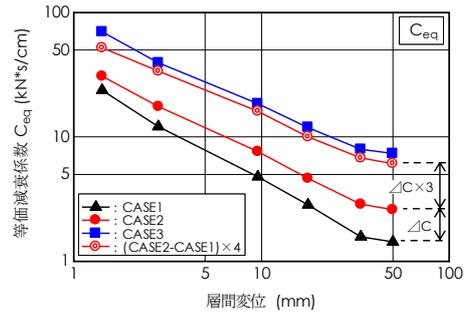


図-7 等価減衰係数

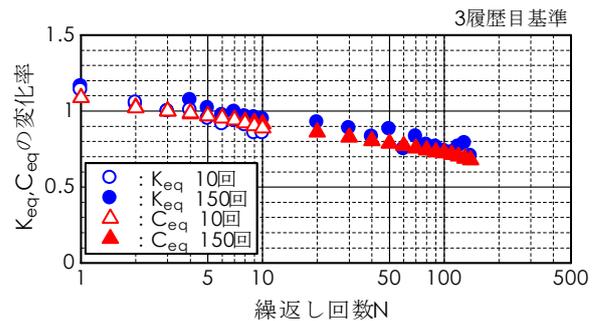


図-9 繰返しに伴う $K_{eq} \cdot C_{eq}$ の推移

字曲線 (図中 CASE1) であり、これにダンパーを設置することでバイリニアに近い履歴を示すようになり、履歴面積も飛躍的に増大している。

正弦波加振試験において、1 履歴目の荷重が 2 履歴目以降に比べて大きな値を示しているが、これはダンパーの特性 (初期硬化) によるものである。以降の実験値および実験値から算出する値は、この初期硬化の影響を排除するために、特に断らない限り 3 履歴目のものを採用している。架構試験から得られた架構全体の特性値 (等価剛性 K_{eq} と等価減衰係数 C_{eq}) を図-6、図-7 に、それぞれの算出方法を図-8 に示す。どちらの特性値も CASE3 の値は CASE1 の値のおよそ 4 倍程度となっている。また、ダンパー設置数による特性値の増加傾向を検討すると、各特性値の CASE1 (ダンパーなし) から CASE3 (ダンパー4 基) への増分は CASE1 から CASE2 (ダンパー1 基) への増分のほぼ 4 倍となっており、こ

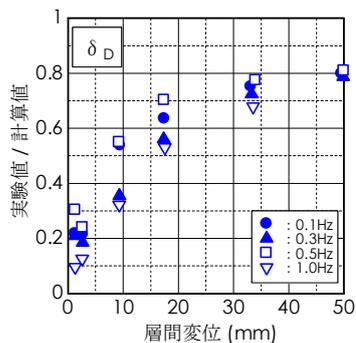


図-10 ダンパーへの入力せん断変形量

れらはダンパーの設置数に比例して増加すると考えられる。

(2) 繰返し耐久性

繰返し耐久試験の結果を図-9に示す。同図は繰返しに伴う等価剛性と等価減衰係数の変化率を3履歴目の値を基準として表している。どちらも加振開始直後の10サイクル程度でおよそ8割に減少し、150サイクル終了時には7割程度となった。この現象は、繰返し加振に伴うダンパーの粘弾性体温度の上昇に起因すると考えられる。後述するように本ダンパーには温度依存性があり、ダンパー単体の等価剛性、減衰係数は高温になるほど低下するが、このことと上記繰返し試験の結果が対応している。復元力のモデル化にあたっては、繰返しに伴う性能の低下を適切に評価する必要がある。

(3) ダンパーへの入力せん断変形量

層間変形量とPCa版のアスペクト比、およびファスナー位置から幾何学的に求めることができるダンパーへの入力せん断変形量の計算値を $D \delta_{CUL}$ とし、実験において実際にダンパーに入力したせん断変形量を $D \delta_{EXP}$ として、入力効率 $D \delta_{EXP} / D \delta_{CUL}$ と層間変形量の関係を図-10に示す。入力効率は大変形時ほど大きな値となっているが、最大でも0.8程度である。ダンパーに計算どおりのせん断変形が入力しない原因として考えられるのは、PCa版のファスナー部やダンパー取付部のクリアランスの影響である。PCa版のファスナー部には上下それぞれ2mmの水平方向のクリアランスがあるため、ある領域ではPCa版が層間変位に追従してスウェイしてしまい、ロッキングしない。また、ダンパーの取付ボルトとボルト孔のクリアランス(試験体では0.5mm)により、PCa版のロッキングに対してダンパーが回転してしまい、せん断変形しない領域がある。これらの影響で、ダンパーには計算どおりの変形が入力せず、特に微小変形領域ではその影響が相対的に大きくなるため、効率が

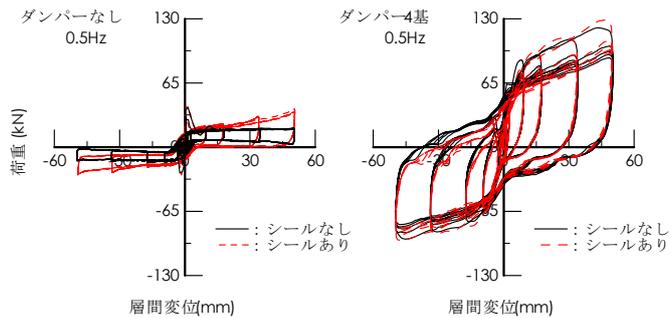


図-11 シールの有無による履歴曲線の比較

悪くなっていると考えられる。ただし、ファスナーおよびダンパー取付部のクリアランスを小さくすることで、入力効率を上げることができると思われる。

(4) 版間のシールの影響

版間にシールを施した場合の履歴曲線とシールなしの場合とを比較したものを図-11に示す。PCa版の場合にはシールの有無による差異が認められるが、ダンパーを設置した場合の両者はほとんど変わらない。よって以下の検討においては、シールの影響は無視することとする。

(5) ファスナーおよび取付金物の強度

実験に用いたPCa版のファスナーおよび取付金物はすべて一般的に使用されているものであり、特別な加工や補強は施していない。ダンパーの反力に対する安全性は事前の検討で確認しているが、実験後の目視においても有害な変形等は認められなかった。

4. 復元力特性のモデル化

(1) ダンパーの復元力モデル

本研究で開発したダンパーの単体試験を架構試験に先立って実施した。試験は3温度、6歪振幅、4振動数について正弦波入力により行った。従来の粘弾性ダンパーと同様に本ダンパーも温度・振動数・ひずみ依存性を有する。また、履歴曲線はひずみが大きくなるに従って、徐々に楕円型からバイリニア型へと移行していく。図-12、図-13にダンパーの単体試験から得られた特性値を示す。図中の実線は実験値の回帰式である式(1)、式(2)を表している。

$$G' = 19.9 \cdot \alpha_1(T) \cdot f^{0.14} \cdot \gamma_{\max}^{-0.80 \cdot \beta_1(T)} \quad (1)$$

$$C' = 0.74 \cdot \alpha_2(T) \cdot f^{-0.92} \cdot \gamma_{\max}^{-0.59 \cdot \beta_2(T)} \quad (2)$$

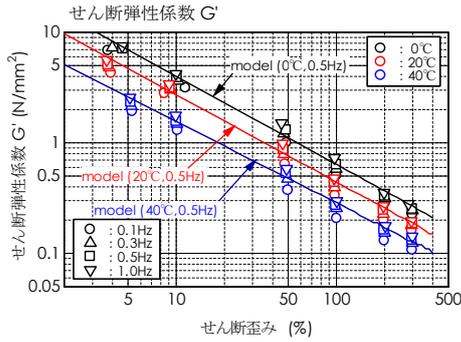


図-12 ダンパー単体の G' - γ_{\max} 関係

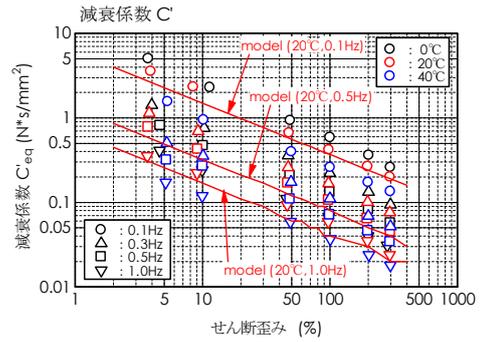


図-13 ダンパー単体の C' - γ_{\max} 関係

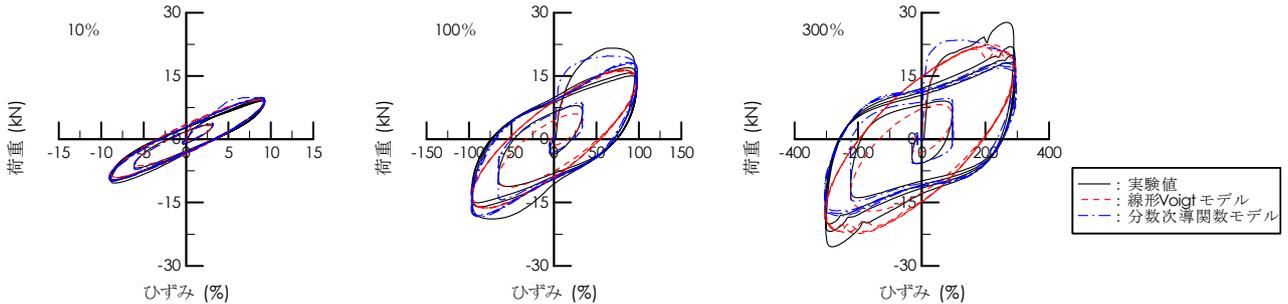


図-14 ダンパー単体の履歴曲線 (20°C・0.5Hz)

ただし、

G' [N/mm²] : せん断弾性係数

C' [N・s/mm²] : 等価減衰係数

f [Hz] : 振動数 , γ_{\max} [%] : 最大ひずみ

$\alpha_1(T)$, $\alpha_2(T)$, $\beta_1(T)$, $\beta_2(T)$: 温度依存係数

$$\alpha_1(T) = -0.025 \cdot T + 1.51$$

$$\beta_1(T) = -0.000074 \cdot T^2 + 0.001 \cdot T + 1.009$$

$$\alpha_2(T) = -0.00043 \cdot T^2 + 0.00047 \cdot T + 1.16$$

$$\beta_2(T) = -0.00019 \cdot T^2 + 0.0057 \cdot T + 0.96$$

T [°C] : 環境温度

ダンパー単体のモデル化は、線形 Voigt モデルと分数次導関数モデル²⁾について行った。図-14 にダンパーの履歴曲線の一例と、線形 Voigt モデルおよび分数次導関数モデルによる履歴曲線を示す。線形 Voigt モデルには式(1)、式(2)の G' と C' を用い、分数次導関数モデルの作成は文献^{2),3),4),5)}によった。分数次導関数モデルにおける主要な係数は本報末尾の補足に記す。どちらも実験値をおおむね捉えているが、ひずみが大きくなるに従い、線形 Voigt モデルではダンパーの非線形性に追従できなくなる。しかし線形 Voigt モデルは扱いが簡便であり、後述するように市販のプログラムによる時刻歴応答解析などを行う場合には有用である。なお、Voigt モデルにおける G' 、 C' と等価剛性 K [N/mm]、等価減衰係数 C [N・s/mm] との関係は式(4)で表される。

$$K = \frac{A}{d} G', \quad C = \frac{A}{d} C' \quad (4)$$

ここで、 A : せん断面積、 d : せん断厚さ

(2) PCa 版の復元力モデル

実験結果をもとに PCa 版に粘弾性ダンパーを設置した場合の復元力特性をモデル化する。ダンパーを設置した PCa 版 1 枚の変形および応力状態を図-15 のように仮定すると、支点まわりのモーメントの釣り合いから式(5)が成り立つ。式中の記号は図-15 に対応している。

$$F = \frac{I}{h - \mu \cdot b} \cdot \left(\frac{W}{2} \cdot b + Q_1 \cdot \frac{B+b}{2} + Q_2 \cdot \frac{B-b}{2} \right) \quad (5)$$

(ただし、 $\delta \geq 0$, $\dot{\delta} \geq 0$ の場合。以降も同じ。)

ここで、 F : ファスナー部における水平方向反力

B : PCa 版の幅、 W : PCa 版の自重

b, h : 左右および上下のファスナー間距離

Q_1, Q_2 : 左右のダンパーの鉛直方向減衰力

μ : ファスナー部における摩擦係数

同様に、複数枚の PCa 版に任意の数のダンパーが設置された系がロッキング運動を行う場合の系全体の復元力 $F_{(N,n)}$ は、式(6)で与えられる。

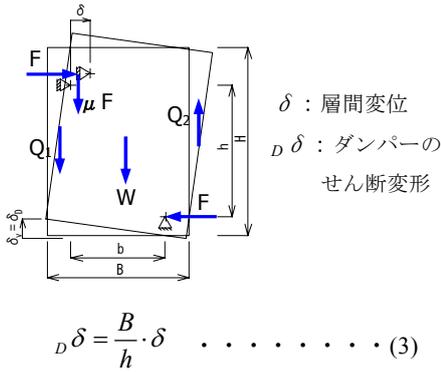


図-15 PCa版の変形および応力状態

$$F_{(N,n)} = \frac{W/2 \cdot b}{h - \mu \cdot b} \cdot N + Z \cdot Q_V({}_D\delta) \cdot n + N \cdot F_m \quad (6)$$

$$Z = \frac{B}{h - \mu \cdot b}$$

ここで、 N : PCa版の枚数、 n : ダンパー設置数
 $Q_V({}_D\delta)$: ダンパー1基の鉛直方向減衰力
 ${}_D\delta$: ダンパーのせん断変形量
 F_m : PCa版1枚に働く慣性力

式(6)の ${}_D\delta$ を実験で計測したダンパー部の実変位 ${}_D\delta_{EXP}$ として分数次導関数モデルにより $Q_V({}_D\delta)$ を算出した場合に得られる履歴曲線と、実験値との比較を代表的なものについて図-16に示す。なお、式(6)において $n=0$ とした場合とCASE1(ダンパーなし)の実験値との対応から、摩擦係数 μ は式(7)により層間変位 δ [mm]に依存する変数とした。

$$\mu = \begin{cases} 0.01 \cdot \delta + 0.4 & (|\delta| \geq 20) \\ 0.6 & (|\delta| \leq 20) \end{cases} \quad (7)$$

図-16ではモデルによる計算値は実験値をよく捉えており、式(6)の妥当性が確認できた。また式(6)は、系の復元力が、PCa版の傾斜復元力(第1項)と、ダンパーの鉛直方向減衰力に係数 Z を乗じて水平方向に変換したもの、およびPCa版の慣性力(第3項)の和で評価できることを表している。

次に、市販の応答解析プログラムを用いた解析を行うために、ダンパーの復元力を線形Voigtモデルとした場合について検討する。線形Voigtモデルにおいては式(6)の第2項の $Z \cdot Q_V({}_D\delta)$ は、図-15中の式(3)の関係を考慮して式(8)のように変形できる。

$$Z \cdot Q_V({}_D\delta) = Z \cdot (K \cdot {}_D\delta + C \cdot \dot{{}_D\delta}) = Z \cdot \left(K \cdot \frac{B}{h} \cdot \delta + C \cdot \frac{B}{h} \cdot \dot{\delta} \right) = {}_D K \cdot \delta + {}_D C \cdot \dot{\delta} \quad (8)$$

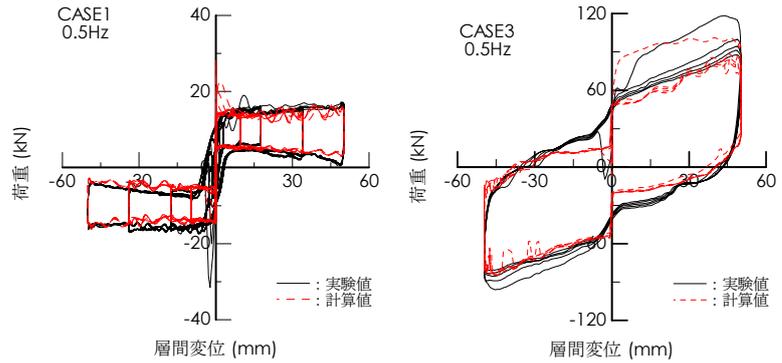


図-16 架構の履歴曲線(分数次導関数モデル)

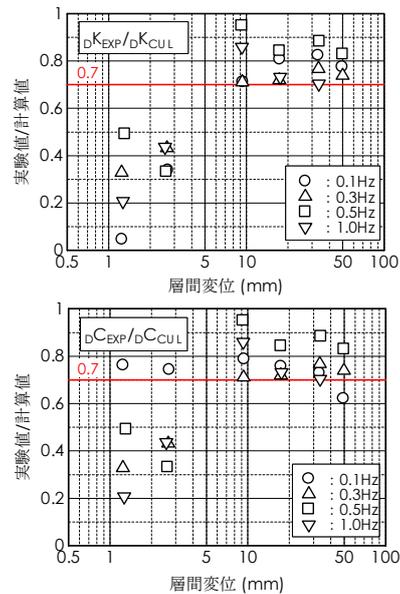


図-17 ${}_D K \cdot {}_D C$ の計算値と実験値の比較

ただし、 ${}_D K = Z \cdot \frac{B}{h} \cdot K$ 、 ${}_D C = Z \cdot \frac{B}{h} \cdot C$

ここで、 ${}_D K$ 、 ${}_D C$ は層間変位に対するダンパーの水平方向の剛性および減衰係数とみなせる。したがって、これらの値を応答解析プログラムの制震要素に対して適用すればよいことになるが、ここで注意を要するのは、式(8)の誘導に用いた式(3)が厳密には成り立たないということである。つまり3章(3)で述べたように、実験におけるダンパー変位は計算値よりも小さな値になることを考慮しなければならない。しかし応答解析プログラムにおいてダンパーへの入力変位を低減するのは簡単ではないため、 ${}_D K$ 、 ${}_D C$ を低減させることで上記の影響を考慮することを考える。 ${}_D K$ 、 ${}_D C$ の計算値に対する実験値の比率を図-17に示す。なお、架構試験での層間変位と荷重から求めた系全体の K_{eq} (図-6)、 C_{eq} (図-7)それぞれについて、CASE3の値からCASE1の値を差し引いたものを、ダンパー4基による実験値 ${}_D K_{EXP}$ 、 ${}_D C_{EXP}$ とし

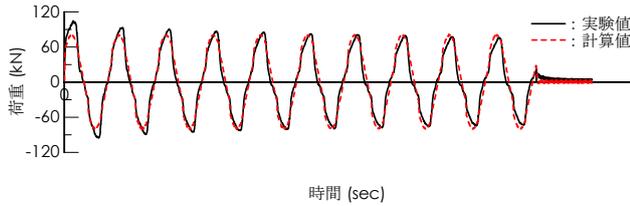
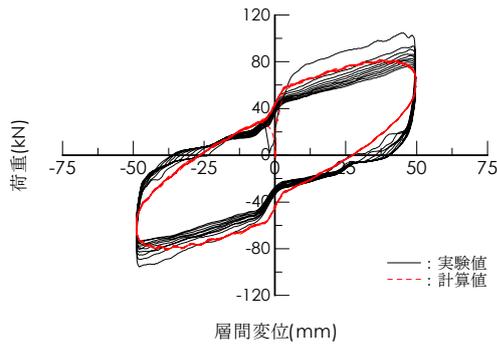


図-18 履歴曲線および荷重の時刻歴の実験値と計算値 (線形 Voigt モデル) の比較 (繰返し 10 回試験)

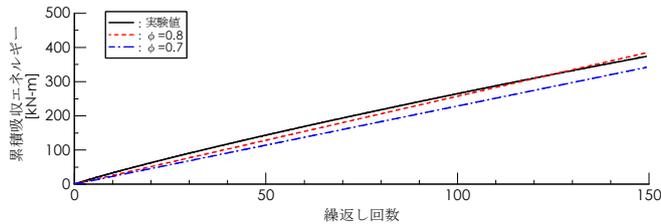


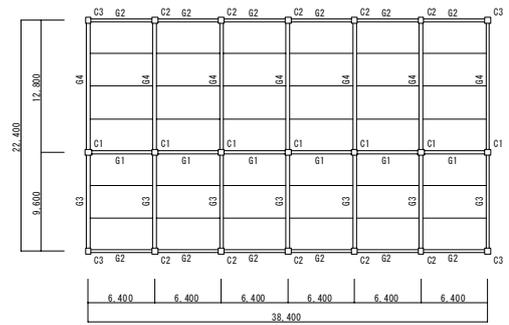
図-19 累積エネルギー吸収量の実験値と計算値 (線形 Voigt モデル) の比較 (繰返し 150 回試験)

た。図-17 と図-10 はよく似た傾向を示しており、両者に因果関係が存在することが推測され、 DK 、 DC の低減をもって、ダンパーへの入力変位の低減に代えることは妥当であると考えられる。図-17 では層間変位 10mm 以上の領域ではほぼ 0.7~0.9 の値をとっており、したがって線形 Voigt モデルにおいては、 DK 、 DC に低減係数 $\phi = 0.8$ を乗じることとする。なお、層間変位 10mm は、試験体では層間変形角 1/192、実大架構に換算すると約 1/350 に相当する。これより小さな変形領域では、 $\phi = 0.8$ とした場合にダンパーの性能を過大評価することになるが、解析では建物の応答が上記層間変形角を上回るレベルの外力を想定するのが一般的であると思われるので、問題ないものとする。

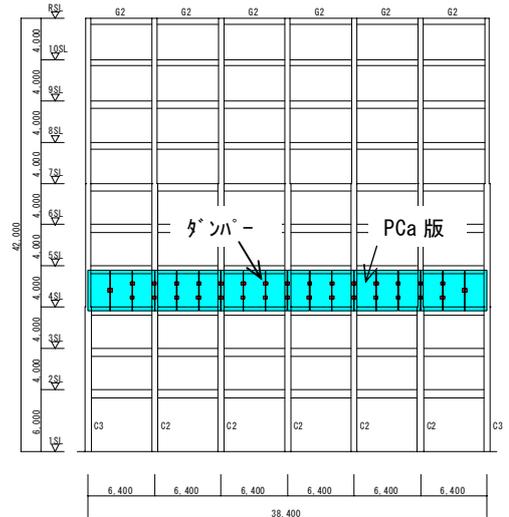
また、プログラム上の扱いを簡単にするという同様の理由により、摩擦係数 μ の値は 0.6 で一定とする。

以上より、線形 Voigt モデルによる系の復元力は式(9)となる。

$$F_{(N,m)} = \frac{W/2 \cdot b}{h - \mu \cdot b} \cdot N + \phi \cdot (D K \cdot \delta + D C \cdot \dot{\delta}) \cdot n + N \cdot F_m \quad (9)$$



(a) 伏図



(b) 軸組図

図-20 建物概要およびダンパーの配置

式(9)による履歴曲線および荷重の時刻歴を実験値と比較したものを図-18 に示す。また、繰返し 150 回試験時の累積吸収エネルギーの実験値と計算値の比較を図-19 に示す。図-18 によると、線形 Voigt モデルを用いた計算値は十分な精度で実験値を捉えている。また、図-19 によると、繰返し 100 回程度まではエネルギー吸収量の計算値は妥当な値であり、繰返しによる粘弾性体の温度上昇による性能低下についても低減係数 ϕ によって評価できるものとする。一方、繰返し回数がある程度大きくなると計算値はエネルギー吸収量を過大に評価してしまう。したがって、特に継続時間の長い繰返し荷重を想定する場合には、図-19 に示すように低減係数 ϕ を 0.7 とするなどして適宜調整する必要がある。

5. 応答解析による効果の検証

(1) 適用建物の概要およびダンパーの配置

本システムの効果を検証するために、10 層の JSSI テーマストラクチャー (在来タイプ)¹⁾ に PCa 版およびダンパーを組み込んだモデルを作成し、固有値解析および

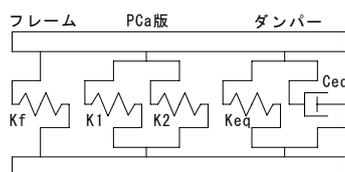


図-21 解析モデル

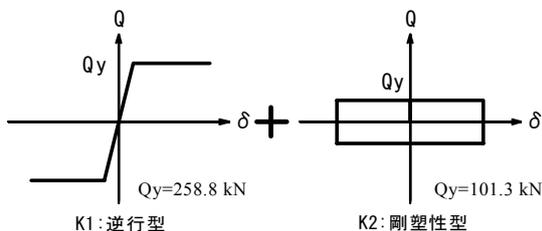


図-22 PCa版の復元力特性

表-4 制震要素の K_{pro} , C_{pro} (1フロア64基分)

層間変形角	K_{pro}	C_{pro}
rad	kN/cm	kN・s/cm
1/400	608.5	77.9
1/200	349.6	51.4
1/100	200.9	34.5

表-5 固有値解析結果

解析ケース	層間変形角	1次固有周期	1次固有振動数	等価減衰定数
		T (sec)	f (Hz)	h
1 基準	-	1.422	0.703	0.02
2 ダンパー-64基	1/400	1.357	0.737	0.046
	1/200	1.383	0.723	0.037
	1/100	1.399	0.715	0.032
3 PCa版考慮+ダンパー-64基	1/400	1.349	0.741	0.045
	1/200	1.376	0.727	0.037
	1/100	1.391	0.719	0.032

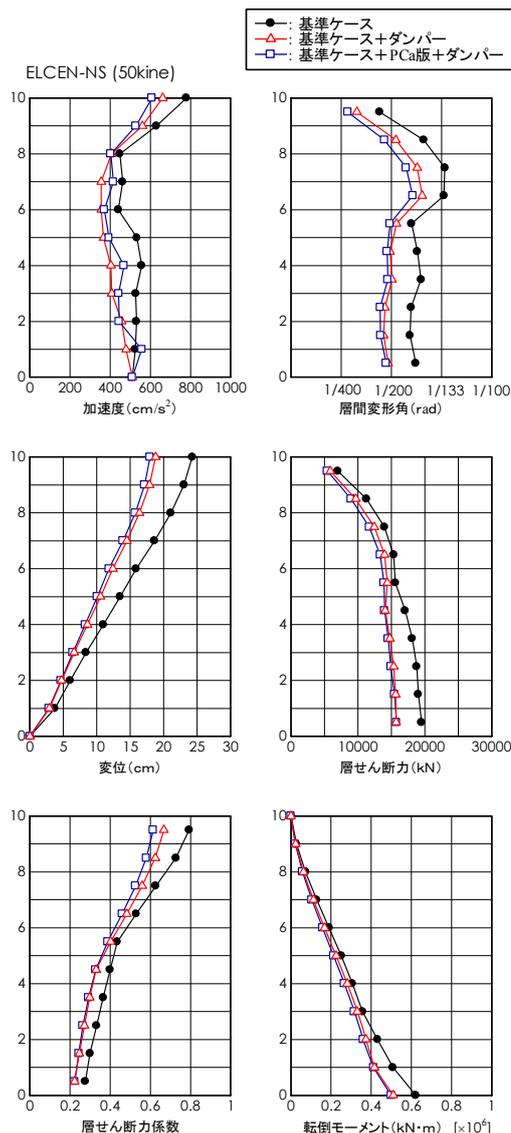


図-23 時刻歴応答解析の最大応答値

時刻歴応答解析を実施した。JSSI テーマストラクチャーの概要と PCa 版およびダンパーの設置例を図-21 に示す。建物は鉄骨造 10 階建、基準階高 4m であり、各階の X 方向に、コーナーを除いて 4m×2m の PCa 版が 36 枚、ダンパーが 64 基設置されるものとした。なお、解析は X 方向についてのみ行い、解析プログラムは構造計画研究所の RESP-M/II を用いた。

(2) 解析モデル

解析モデルは図-21 に示すように、フレームの等価せん断ばねに対して、PCa 版の等価せん断ばねとダンパーの制震要素を並列に配置したものとした。そのうち、PCa 版の復元力特性は逆行型と剛塑性型の並列でモデル化し (図-22)、それぞれの Q_y は式(9)において $N=36$, $\mu=0.6$ としたときの第 1 項の値と等しくなるように定

めた。また、ダンパーの材料値である K , C を求める際の温度は 20°C、振動数は建物の 1 次固有振動数、最大ひずみは、固有値解析時には想定した 3 つの層間変形角に対応するひずみとし、応答解析時には各層ごとの最大層間変位に対応したひずみとした。このようにして求めた K , C を式(8)により DK , DC に変換し、低減係数 ϕ を乗じて制震要素の K_{pro} , C_{pro} とした。これらの値を表-4 に示す。

(3) 解析結果

解析はダンパーおよび PCa 版を設置しない基準ケース、基準ケースにダンパーの復元力のみを考慮した場合、基準ケースにダンパーと PCa 版両方の復元力を考慮した場合の 3 パターンについて行った。固有値解析の結果を表-5 に示す。ダンパーの特性上、変形が大きくなる

につれて効果が小さくなる傾向が見られる。層間変形角1/200の場合で基準ケースと比較すると、ダンパーのみ考慮した場合、ダンパーとPCa版を考慮した場合ともに1.7%の減衰を上乗せできている。また、時刻歴応答解析結果の一例を図-23に示す。図はELCENTRO NS(最大速度50cm/sec)を入力地震動とした場合の最大応答値である。すべての項目について一定の低減効果が認められる。一方、PCa版の復元力を考慮した場合と考慮しない場合では応答に大きな差は認められないことから、解析上これを無視しても差し支えないと考えられる。

6. まとめ

本研究では、非構造部材であるPCa版にダンパーを組み込んだものを建物の制震要素とする制震システムの開発を目的として、ダンパーの開発および単体性能試験、PCa版にダンパーを組み込んだ架構の動的加力実験を行った。実験結果をもとに、PCa版にダンパーを組み込んだ系の復元力特性をモデル化した。さらに、構築したモデルを用いて実際の建物に本システムを適用した場合の効果を解析によって確認した。本研究から得られた知見を以下に記す。

- ① PCa版にダンパーを設置した場合の架構の復元力は、PCa版の傾斜復元力とダンパーの減衰力、およびPCa版の慣性力を足し合わせたものとなり、式(6)で評価できることを確認した。
- ② ダンパーに入力するせん断変形は計算値よりも小さな値となる。
- ③ 解析上、ダンパーは水平方向に置換したVoigtモデルの K および C に低減係数を乗じることで評価できる。
- ④ 本報の解析例では建物に2%前後の減衰を付加することができ、最大応答値にも低減効果が認められた。
- ⑤ 応答解析時には、PCa版の剛性の影響は小さいため、これを無視してもよいと思われる。

謝辞：本研究は(株)免制震デバイス、並びに東海ゴム工業(株)との共同研究として実施した。また、実験に当たりSMCコンクリート(株)より多大なご助言を頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 関谷英一, 森裕重, 大淵敏行, 吉江慶祐, 原博, 有馬史子, 竹内百合, 斉藤芳人, 石井正人, 笠井和彦: 制震設計に用いた4層,10層,20層JSSIテーマストラクチャーの詳細, 2004パッシブ制震構造シンポジウム論文集,pp263-278,2004.11
- 2) 笠井和彦, 寺本道彦, 大熊潔, 所健: 粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則(その1線形領域における温度・振動数依存のモデル化), 日本建築学会構造系論文集, 第543号,pp77-86,2001.5
- 3) 笠井和彦, 所健: 粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則(その2 温度上昇および歪・歪速度がもたらす非線形性のモデル化), 日本建築学会構造系論文集, 第561号,pp55-63,2002.11
- 4) 笠井和彦, 大木洋司, 所健: アクリル系粘弾性ダンパーの解析アルゴリズムとサブルーチン, 2001パッシブ制震構造シンポジウム論文集,pp127-140,2001.12
- 5) 笠井和彦, 大木洋司, 雨宮健吾, 木村勝彦: イソブチレン系粘弾性体の温度・振動数・振幅依存性を考慮した非線形力学モデルの構築, 2002パッシブ制震構造シンポジウム論文集,pp181-194,2002.12

補足：本研究で開発した粘弾性ダンパーの分数次導関数モデルにおける主要な係数を以下に記す。

時刻 t におけるダンパーのひずみを $\gamma(t)$ 、応力を $\tau(t)$ として、分数次導関数モデルの線形領域における構成則は式(10)で表すことができる。

$$\tau(t) + aD^\alpha \tau(t) = G \left[\gamma(t) + bD^\alpha \gamma(t) \right] \quad (10)$$

$$a = a_{ref} \lambda^\alpha, \quad b = b_{ref} \lambda^\alpha$$

$$\lambda = \exp \left[-p_1 (\theta - \theta_{ref}) / (p_2 + \theta - \theta_{ref}) \right]$$

ここで、 D^α は分数微分演算子、 α は分数微分の次数を表す。また、 a_{ref}, b_{ref} はそれぞれ基準温度 θ_{ref} での a, b の値であり、 λ はシフトファクターと呼ばれる。

本文中の図-14では、式(10)の各係数を下記に示す値とし、さらに非線形性を考慮して算出したものを示した。

$$a_{ref}=0.40, \quad b_{ref}=13.0, \quad \theta_{ref}=20, \quad p_1=-10.97, \quad p_2=-76.01, \\ G=43.22, \quad \alpha=0.2800$$