

粘弾性カラムダンパーの開発

石川 理都子 諏訪 仁 関 松太郎
 後閑 章吉 遠藤 文明
 (本社 設計第12部) (本社 設計第12部)

Development of Visco-Elastic Column Damper

Ritsuko Ishikawa Hitoshi Suwa Matsutaro Seki
 Shokichi Gokan Fumiaki Endo

Abstract

This report describes a Visco-Elastic Column Damper developed as a new vibration control system. The Visco-Elastic Column Damper is effective under both wind and earthquake loadings, although its dynamic characteristics depend on temperature, strain and vibration frequency. Therefore, the authors evaluated these characteristics quantitatively from harmonic and static loading tests using a full-scale device, and present an analytical model that takes into account strain and frequency dependence. The analytical model is verified by simulation analysis of random loading test, and the advantages of the damper are confirmed by dynamic response analysis of wave and seismic loading on a reinforced concrete building.

概要

当社で開発した粘弾性カラムダンパーについて、実大試験体による加力試験によりその動的性状を定量的に評価し、動的応答解析によってその有効性を確認した結果を報告する。粘弾性カラムダンパーは風力から地震力まで幅広く減衰性能を発揮するシステムであるが、その動的性状が温度、変形量、加振振動数に依存するため、デバイス単体の正弦波加力試験および制振間柱全体の静的加力試験により粘弾性体の歪依存性と振動数依存性を評価し、これらの依存性を考慮できる要素モデルを作成した。さらに、ランダム波加力試験のシミュレーション解析によって要素モデルの妥当性を検証するとともに、高層RC建物に粘弾性カラムダンパーを適用した場合について風応答解析および地震応答解析を行い、制振効果を確認した。

1. はじめに

粘弾性体を用いた制振装置は、微小振幅から大振幅までほぼ一定の等価減衰定数を有し、大地震に対する応答低減だけでなく日常の風荷重に対する居住性の向上にも効果が期待されている。また、弾性範囲内でエネルギー吸収能力を持つとともに、変形能力に優れているため、地震時に損傷したり性能が低下したりすることが少なく、コストパフォーマンスの点でも有利といえる。

しかし、粘弾性体の力学特性はせん断変形のみならず加振振動数や温度に依存することが指摘されており、これらの条件が構造物全体の振動特性に影響を与えることになるため、実建物への適用にあたっては各条件をパラメータとして粘弾性体の性質を定量的に把握しておく必要がある。

現在までに制振装置として製品化されたものの多くは減衰性能を付与する手段として熱可塑性の材料が使われており、そのため、成形は容易であるが季節によって剛性が数十倍も異なるほど温度依存性が大きく、設計が困

難となる。そこで当社では、減衰力を分子間の摩擦抵抗力より得ることで温度依存性を低減した新材料を採用し、間柱組込型の「粘弾性カラムダンパー」を開発した。

本報告では粘弾性カラムダンパーの実大試験体を用いた動的および静的加力試験を行い、その動的性状を定量的に評価する。さらに、試験結果を元に粘弾性体の歪依存性および振動数依存性を考慮できる要素モデルを作成し、加力試験のシミュレーション解析と高層RC建物の応答解析により、要素モデルの妥当性と粘弾性カラムダンパーの制振効果を確認する。

2. 実大試験体の加力試験

2.1 実験概要

粘弾性カラムダンパーの形状は、Fig. 1のように長さ1000mm、高さ200mm、厚さ12mmの粘弾性体4枚を厚さ9mmの鋼板5枚の間にて交互に挟み込んだものとなっており、これを取り付けプレートを介して間柱の中間に設置するものとする。

粘弾性カラムダンパーの面内方向に構造物が変形することにより粘弾性体にせん断変形が生じ、抵抗力が発生する仕組みとなっている。その力は粘弾性体の面積 S と厚さ d の比 (形状比 S/d) にほぼ比例することが確認されており、粘弾性体の性能を表す場合、せん断剛性を形状比で基準化した値を用いるのが一般的である。

粘弾性体の剛性および減衰は、せん断歪、加振振動数、および温度に依存する。このうち温度依存性については、一般的な粘弾性体では $0^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ の間の剛性変化が 20~30 倍になるのに対し、粘弾性カラムダンパーに用いた材料では 2~3 倍程度であることが確認されている。このため、実験中の気温変化やエネルギー吸収による温度上昇が粘弾性体の特性に与える影響は少ないと判断し、加力ごとに粘弾性体の温度を測定して温度変化が大きくなりすぎないように留意するにとどめた。

2.2 制振装置の動的加力試験

粘弾性カラムダンパーの実大試験体に対し、動的アクチュエータを用いて正弦波加力試験およびランダム波加力試験を行った。試験装置の概要をFig. 2に、加力ケースをTable 1とTable 2、加力波形をFig. 3とFig. 4に示す。正弦波加力試験の加力波形は3周期とし、加振振動数が0.1~3.0Hzの場合には前後にそれぞれ3周期づつ加振力を漸増減させて予備加力を行った。

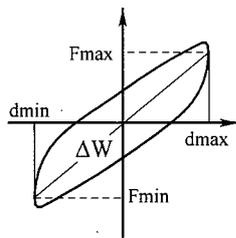
正弦波加力試験により測定された荷重-変位曲線からバターワース型のローパスフィルターによりノイズを除去し、滑動体の摩擦力と慣性力を補正した上で、予備加力を除いた2周期目を取り出し、次式を用いて粘弾性体の形状比で基準化した等価剛性と等価減衰を求めた。

$$Geq = \frac{(F_{max} - F_{min})}{(d_{max} - d_{min})} \times \frac{1}{S/d}$$

$$Heq = \frac{2\Delta W/\pi}{(d_{max} - d_{min})(F_{max} - F_{min})}$$

$$Ceq \approx 2Geq \times Heq/\omega$$

ω : 加振振動数 (rad/sec)
 ΔW : 履歴ループの面積
 S/d : 粘弾性体の形状比



正弦波加力試験の結果より算定した等価減衰と等価剛性をTable 3およびFig. 5, Fig. 6に示す。等価剛性は振動数が高くなるにしたがって増加するが、2~3Hzでおおむね一定となり、歪が大きいほど振動数依存性が小さくなる傾向がある。また、等価剛性の歪依存性が大きく、微小振幅と大振幅で10倍ほどの差が出るのがわかる。一方、等価減衰定数は歪や振動数に依存せず、ほぼ一定の値を示している。

なお、試験結果の一部について、荷重-変位曲線と時刻歴波形をFig. 7に、等価剛性と等価減衰の算出に用いた履歴ループをFig. 8に示す。摩擦抵抗力が大きいとループは矩形状となり、歪が200%程度になるとハードニング現象により荷重が増加する。

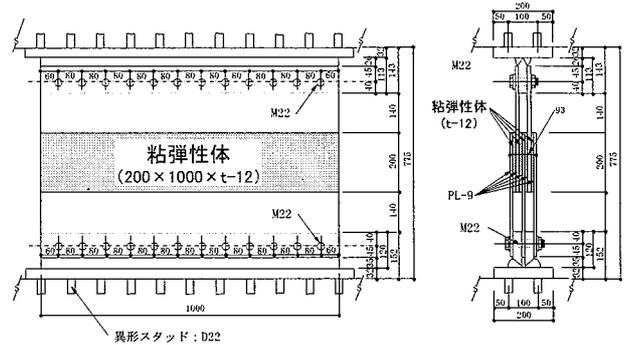


Fig. 1 粘弾性カラムダンパーの形状
Visco-Elastic Column Damper

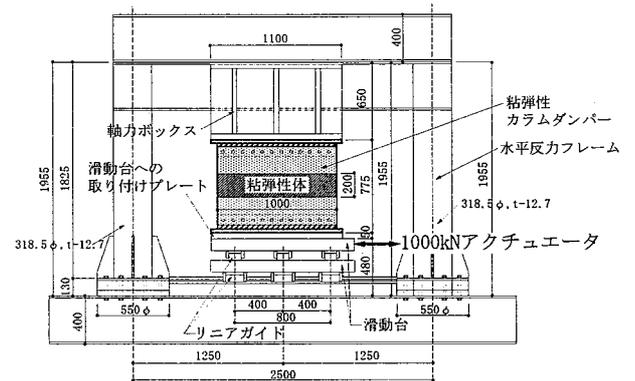


Fig. 2 試験装置の概要
Dynamic Loading System

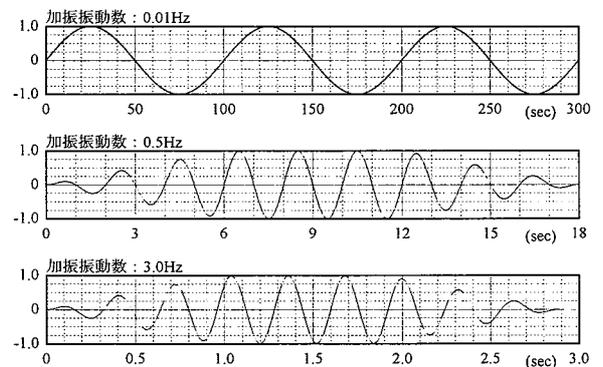


Fig. 3 正弦波加力波形
Harmonic Loading Wave

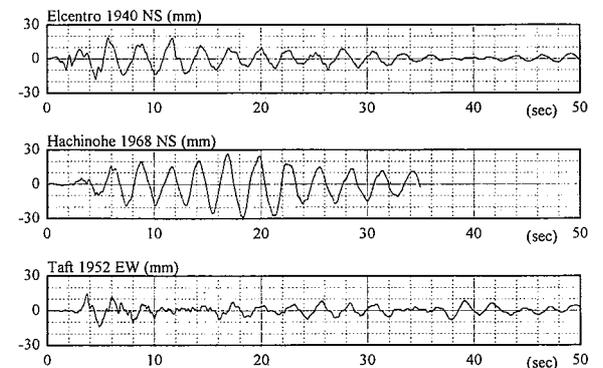


Fig. 4 ランダム波加力波形
Random Loading Wave

Table 1 正弦波加力ケース
Harmonic Loading Cases

| せん断変形 | | 加振振動数 (Hz) | | | | | | |
|-------|---------|------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| 歪 (%) | 変位 (mm) | 0.01 | 0.1 | 0.25 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 |
| 1 | 0.12 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 3 | 0.36 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 5 | 0.6 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 10 | 1.2 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 20 | 2.4 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 50 | 6.0 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 100 | 12.0 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | — |
| 200 | 24.0 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | — | — |
| 250 | 30.0 | — | ○ | ○ | ○ | ○ | — | — |

Table 2 ランダム波加力ケース
Random Loading Cases

| | 加力波形 | せん断歪 (%) | 層間変位 (mm) |
|--------|------------------|----------|-----------|
| エルセントロ | Elcentro 1940 NS | 153 | 18.3 |
| 八戸 | 八戸 1968 NS | 240 | 28.8 |
| タフト | Taft 1952 EW | 119 | 14.3 |

Table 3 動的加力試験による等価剛性と等価減衰
Properties of Visco-Elastic Material by Harmonic Loading

| Geq (kg/cm ²) | 0.01Hz | 0.1Hz | 0.25Hz | 0.5Hz | 1.0Hz | 2.0Hz | 3.0Hz |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1% | 24.091 | 38.098 | 44.862 | 51.991 | 57.501 | 66.353 | 69.407 |
| 3% | 18.346 | 25.555 | 29.902 | 33.676 | 38.526 | 45.908 | 47.853 |
| 5% | 13.801 | 18.415 | 21.435 | 24.158 | 27.137 | 31.695 | 33.370 |
| 10% | 9.325 | 11.663 | 13.504 | 15.392 | 17.295 | 19.957 | 21.183 |
| 20% | 6.061 | 7.468 | 8.875 | 9.850 | 10.914 | 12.629 | 13.526 |
| 50% | 3.683 | 4.930 | 5.316 | 5.673 | 6.365 | 6.948 | 7.454 |
| 100% | 2.653 | 3.085 | 3.405 | 3.752 | 4.191 | 4.481 | |
| 200% | 2.516 | 2.699 | 2.786 | 2.935 | 3.136 | | |

| Heq (%) | 0.01Hz | 0.1Hz | 0.25Hz | 0.5Hz | 1.0Hz | 2.0Hz | 3.0Hz |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1% | 29.835 | 24.893 | 22.199 | 20.665 | 19.373 | 17.428 | 16.841 |
| 3% | 25.983 | 24.774 | 24.171 | 23.583 | 22.953 | 21.239 | 21.431 |
| 5% | 25.197 | 24.347 | 24.246 | 24.058 | 23.899 | 22.817 | 22.779 |
| 10% | 23.703 | 24.350 | 24.489 | 24.718 | 25.237 | 24.870 | 24.925 |
| 20% | 22.430 | 24.477 | 24.774 | 25.341 | 26.435 | 26.018 | 26.075 |
| 50% | 20.750 | 23.640 | 24.463 | 25.687 | 26.015 | 26.526 | 27.163 |
| 100% | 20.935 | 22.796 | 24.337 | 25.694 | 27.225 | 29.415 | |
| 200% | 19.375 | 20.735 | 22.170 | 22.591 | 24.548 | | |

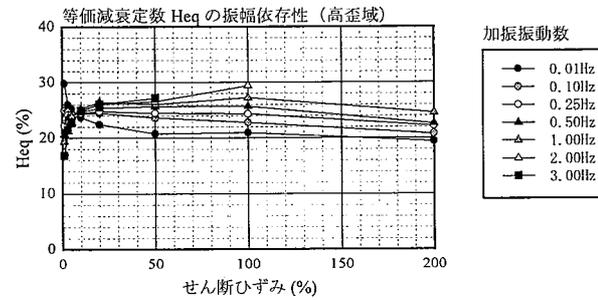
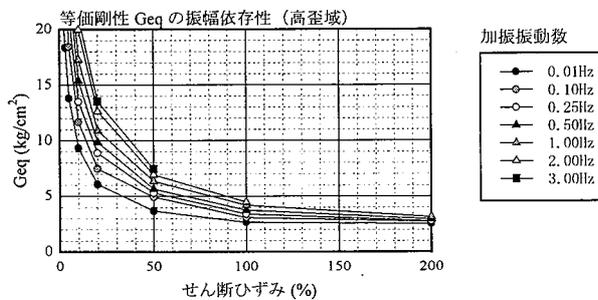
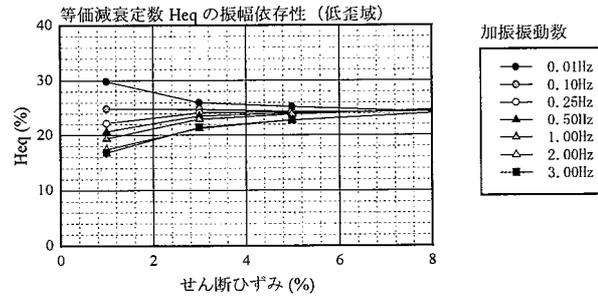
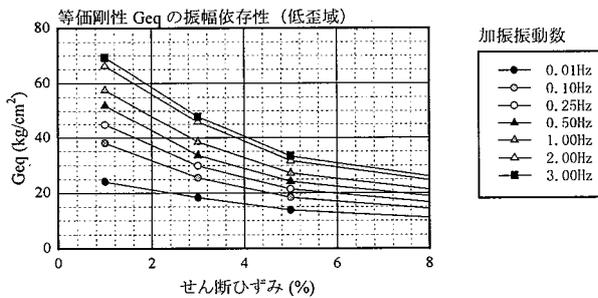
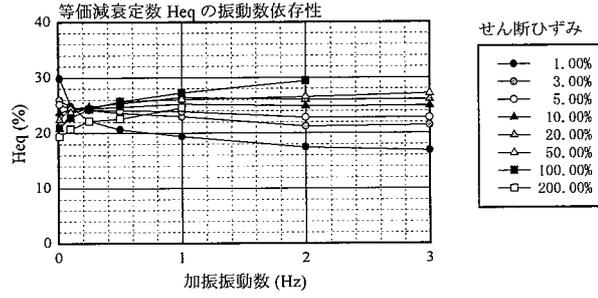
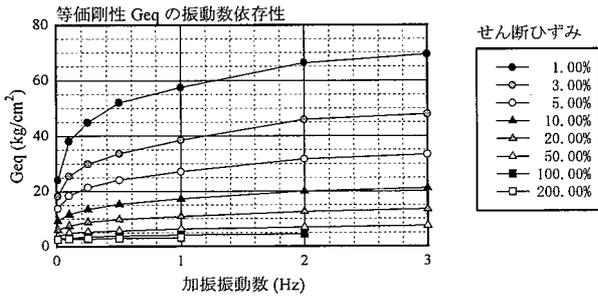


Fig. 5 動的加力試験による等価剛性
Equivalent Stiffness of Visco-Elastic Material

Fig. 6 動的加力試験による等価減衰定数
Equivalent Damping Ratio of Visco-Elastic Material

2.3 制振間柱の静的加力試験

粘弾性カラムダンパーを RC 造の間柱に組み込んだ場合に、全体の減衰性能が制振装置のみの減衰性能と比較してほとんど差異がないことを確認するため、ダンパーを取り付けた制振間柱について静的な繰り返し加力試験を行った。

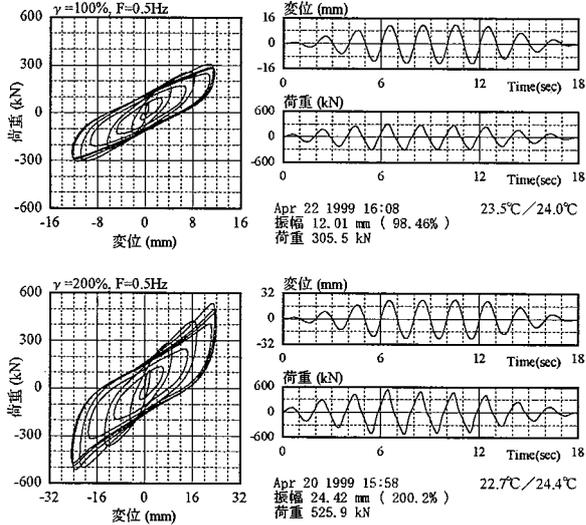


Fig. 7 正弦波加力試験結果
Results of Harmonic Loading Test

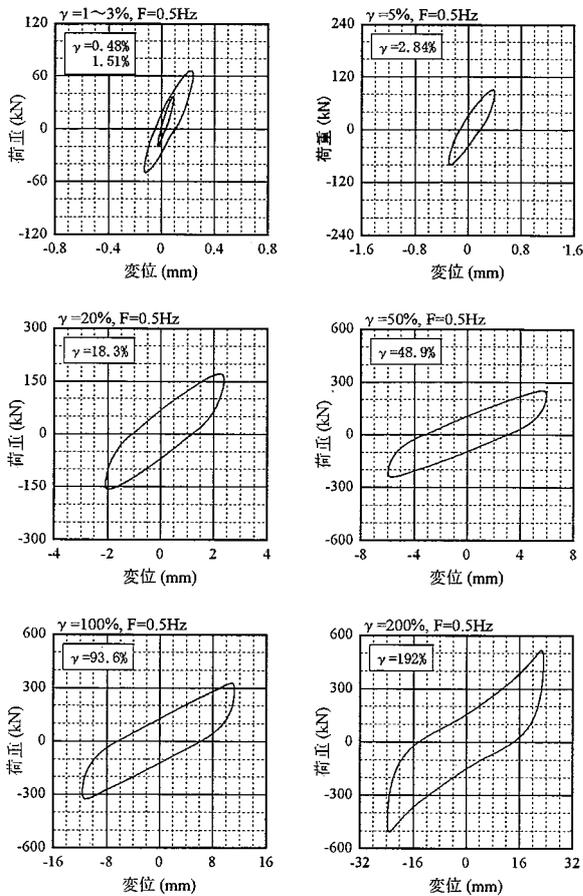


Fig. 8 正弦波加力試験による履歴ループ
Hysteresis Loop by Harmonic Loading Test

試験装置の概要をFig. 9に示す。測定した荷重-変位曲線をFig. 10に、各加力サイクルについて等価剛性と等価減衰を算出した結果を動的加力試験における加振振動数0.01Hzの結果と比較したものをFig. 11に示す。粘弾性体のせん断歪が250%を越えると、ハードニング現象により等価剛性が増加し、荷重が指数関数的に増加する傾向のあることがわかる。また、剛性、減衰とも動的加力試験の結果とおおむね対応している。

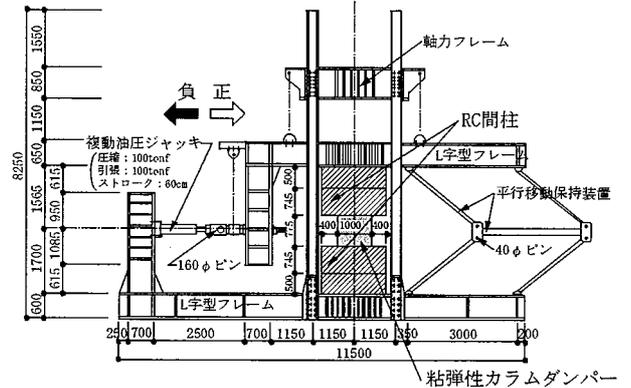


Fig. 9 静的加力試験装置
Static Loading System

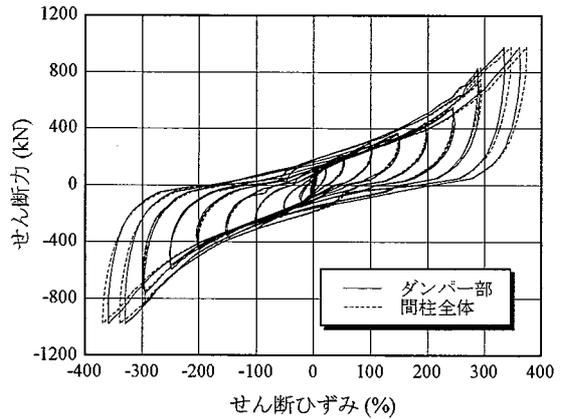


Fig. 10 静的加力試験結果
Result of Static Loading Test

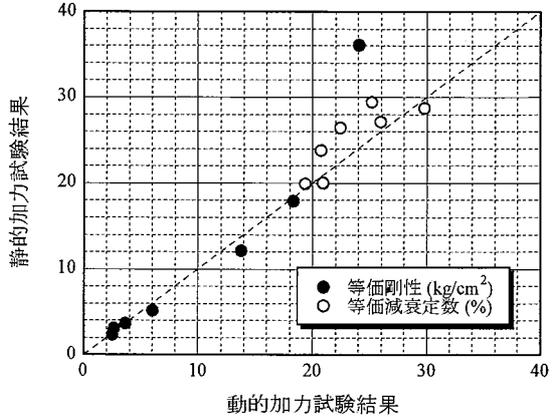


Fig. 11 静的加力試験と動的加力試験結果の比較
Results of Static and Dynamic Loading Test

3. 制振装置のモデル化

3.1 モデル化の概要

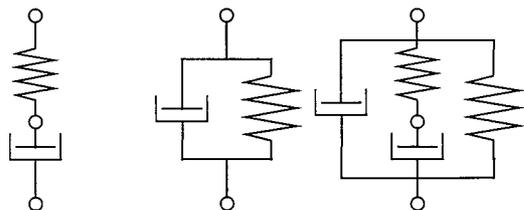
粘弾性ダンパーに用いられる粘弾性体には、歪依存性、振動数依存性、および温度依存性があり、一般的に低歪、高振動数、低温になるほど剛性が増加することが知られているが、定量的な特性は粘弾性体の原料や成形方法によって様々である。

このうち、歪依存性の少ない線形粘弾性ダンパーに関しては、Fig. 12のようにバネとダッシュポットを組み合わせた種々の力学モデルが提案されている。振動数依存性は、バネとダッシュポットを直列に配置した Maxwell モデルを組み込むことで実現され、一般的には要素数が多いほど粘弾性ダンパーの特性を精度良く模擬できるが、それに従って解析自由度も大きくなる。

また、振動数依存性を直接表現するモデルとして、分数次導関数モデル、減退記憶理論モデルなどが提案されているが、いずれも解析アルゴリズムを含めてのモデル化であるため、既存の応答解析プログラムに導入することは困難である。

歪依存性の大きい非線形粘弾性ダンパーに関しても、バネとダッシュポットを組み合わせたものに非線形性を持たせた形のモデルがいくつか提案されているが、材料による特性の違いが大きいいため、現在のところ一般化された手法はない。

本報告で扱った粘弾性体は、温度依存性は小さいが、歪依存性が非常に大きいという特徴を有しており、また、そのループ形状が高減衰ゴムと同様の矩形状となることから、非線型特性として修正バイリニア型の復元力特性を採用し、剛性・減衰とも広い範囲で振動数依存性を考慮できる 4 要素モデルを構築する。要素モデルの構成と復元力特性の概要をFig. 13に示す。



Maxwell モデル Kelvin-Voigt モデル 4 要素モデル

Fig. 12 粘弾性ダンパーのモデル化例

Examples of Numerical Model for Visco-Elastic Damper

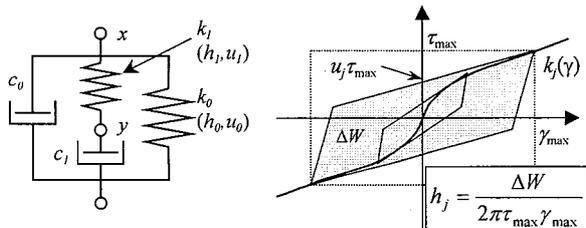


Fig. 13 要素モデルの構成と復元力特性

Constitution of Presented Element Model and Hysteresis Loop

3.2 要素モデルの構築手順

4 要素モデルは、Kelvin-Voigt モデルに、バネ要素とダッシュポット要素を直列に接続した Maxwell モデルを組み合わせたもので、広範囲にわたり等価剛性、等価減衰の振動数依存性を考慮することができる。

バネ要素が修正バイリニア型の復元力特性を持つ場合、履歴減衰を含めたバネの複素剛性は $k(1+2ih)$ で表される。ダッシュポット要素のダンパー値を一定とし質量を無視すると、外力 p に対する運動方程式は以下ようになる。

$$\begin{bmatrix} k_0(1+2ih_0)+k_1(1+2ih_1) & -k_1(1+2ih_1) \\ -k_1(1+2ih_1) & k_1(1+2ih_1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_0 & 0 \\ 0 & c_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p \\ 0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

$\dot{y} = i\omega y$ とおいて中間節点 y の自由度を消去すると、

$$\left[k_0(1+2ih_0) + \frac{i\omega c_1 k_1(1+2ih_1)}{k_1(1+2ih_1) + i\omega c_1} \right] x + c_0 \dot{x} = p \dots\dots\dots (2)$$

さらに $\dot{x} = i\omega x$ とし、左辺を実数部と虚数部に分けて整理すると以下ようになる。

$$\left(k_0 + \frac{\omega^2 c_1^2 k_1}{k_1^2 + (2h_1 k_1 + \omega c_1)^2} \right) x + \left(c_0 + \frac{c_1 k_1^2 (1+4h_1^2)}{k_1^2 + (2h_1 k_1 + \omega c_1)^2} \right) \dot{x} + \frac{2}{\omega} \left(h_0 k_0 + \frac{h_1 \times \omega^2 c_1^2 k_1}{k_1^2 + (2h_1 k_1 + \omega c_1)^2} \right) \dot{x} = p$$

したがって、等価剛性と等価減衰は次式で表される。

$$Geq = k_0 + \hat{k}_1, \quad Ceq = c_0 + \hat{c}_1 + \frac{2(h_0 k_0 + h_1 \hat{k}_1)}{\omega} \dots\dots (3)$$

$$\hat{k}_1 = \frac{\omega^2 c_1^2 k_1}{k_1^2 + (2h_1 k_1 + \omega c_1)^2}, \quad \hat{c}_1 = \frac{c_1 k_1^2 (1+4h_1^2)}{k_1^2 + (2h_1 k_1 + \omega c_1)^2}$$

ここで、 $\omega=0$ で $Geq=k_0$, $Heq=h_0$, $\omega=\infty$ で $Geq=k_0+k_1$ となることから、加振振動数 0.01Hz に対する Geq と Heq をそれぞれ k_0 , h_0 , 加振振動数 3.0Hz に対する Geq から k_0 を引いたものを k_1 とみなして、最小二乗近似により k_0 , h_0 , k_1 を求める。次に、(3)式による値と試験結果との相関係数が最大となるように、遺伝的アルゴリズムを用いた最適化計算により h_1 , c_0 , c_1 を算定し、さらに h_0 と h_1 から以下の関係式を用いて u_0 , u_1 を求めることとする。

$$u_0 = \frac{\alpha-1}{4\alpha} \left[(2+\pi h_0) \pm \sqrt{(2+\pi h_0)^2 - \frac{8\alpha}{\alpha-1} \times \pi h_0} \right] \dots\dots (4)$$

3.3 試験結果によるパラメータの推定

まず近似の精度を高めるため、正弦波加力による動的試験結果を元に、静的加力試験結果を参考にして Heq は対数軸で直線、 Geq は歪-荷重曲線が指数関数になると仮定して、250~400%の歪に対して外挿を行った。その後、最小二乗法により k_0 , h_0 , k_1 をそれぞれ歪 γ の多項式に近似した。

次に、 h_1, c_0, c_1 を既知数とし、Fig. 14に示す手順で最適化計算を行った。ただし、 c_0, c_1 は定数とし、 h_1 は歪の3次式であるとしてその係数を求めた。解の候補となる各個体は、最適化の対象とする6種類の未知数(h_1 の0~3次の係数および c_0, c_1)をそれぞれ2進数に変換して並べたビット列で表されるものとする。

最適化の対象とする範囲内の振動数と歪に対し、加力試験および(3)式で得られる等価剛性と等価減衰を合わせた集合をそれぞれ X, Y とし、適応度を次式で算定する。なお、 \bar{x}, \bar{y} は各集合の平均値、 M は h_1 が負になる要素の個数とする。

$$f = \frac{1}{M} \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{Cov}(X, Y) = \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^2}, \sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - \bar{y})^2}$$

未知数 x は最小値 x^- と最大値 x^+ の間にあるものとし、次式で整数値 y に基準化した上で、 n 桁の2進数に変換する。

$$y = \frac{x - x^-}{x^+ - x^-} (2^n - 1)$$

ここで、未知数の精度を小数点以下2桁とするため、未知数の範囲とビット数との関係を次式で定める。

$$x^+ - x^- = 0.01(2^n - 1)$$

さらに、ダンパー値 c_0, c_1 は正の値を持ち等価減衰係数 C_{eq} 以上にはならないことを考慮し、また、等価減衰定数の振幅依存性が小さいことから、歪と h_1 との関係が緩やかなカーブを描くように係数の範囲を設定することと

し、Table 4のパラメータを用いた。

最後に、第一/第二勾配比を6.5として h_0, h_1 を(4)式に代入し、最小二乗法により歪の3次式に近似したものを u_0, u_1 とした。

ここで、全ての歪領域に最適解を得ることは困難であるため、解析の対象を地震応答と風応答に分け、地震応答解析用には10%~400%、風応答解析用には1%~20%の範囲を対象としてパラメータを推定し、それぞれについてTable 5とTable 6の結果が得られた。

3.4 動的加力試験のシミュレーション解析

制振装置のモデル化の精度について検証するため、作成した4要素モデルを用いて正弦波加力試験およびランダム波加力試験のシミュレーション解析を行った。解析モデルは無質量とし、下端を固定して上端の節点に実験により得られた変位波形を強制変位として与えた。Newmark-β法による応答解析により、加振点に接続する各構成要素のパネ力および減衰力の和を荷重として、実験結果との比較検討を行った。

正弦波加力解析により得られた履歴ループを実験結果と比較してFig. 15に示す。解析結果は広い振動数範囲に

Table 4 未知数の範囲とビット数
Range and Number of Bits for Unknown Parameters

| 未知数 | 最小値(x^-) | 最大値(x^+) | ビット数(n) |
|----------|--------------|-----------------|--------------------|
| $h_1[0]$ | 0.00 | 81.91 | 13 |
| $h_1[1]$ | -40.95 | 0.00 | 12 |
| $h_1[2]$ | 0.00 | 20.47 | 11 |
| $h_1[3]$ | -10.23 | 0.00 | 10 |
| c_0 | 0.00 | max(C_{eq}) | $\log_2(100x^++1)$ |
| c_1 | 0.00 | max(C_{eq}) | $\log_2(100x^++1)$ |

Table 5 4要素モデルのパラメータ (地震応答解析用)
Parameters for Earthquake Response Analysis

| | 0次 | 1次 | 2次 | 3次 | 4次 | 5次 |
|-------|---------|----------|---------|---------|--------|---------|
| k_0 | 8.2130 | -12.8110 | 10.6368 | -4.2358 | 0.8291 | -0.0623 |
| h_0 | 0.2347 | -0.0427 | 0.0141 | -0.0017 | | |
| u_0 | 0.4263 | -0.0997 | 0.0345 | -0.0043 | | |
| k_1 | 10.6228 | -19.2846 | 15.8169 | -6.4274 | 1.2585 | -0.0957 |
| h_1 | 0.0001 | -0.0065 | 0.1031 | -0.0251 | | |
| u_1 | 0.0025 | -0.0410 | 0.2016 | -0.0475 | | |
| c_0 | 0.0000 | | | | | |
| c_1 | 2.5500 | | | | | |

Table 6 4要素モデルのパラメータ (風応答解析用)
Parameters for Wind Response Analysis

| | 0次 | 1次 | 2次 | 3次 | 4次 | 5次 |
|-------|---------|----------|---------|-----------|----------|----------|
| k_0 | 27.3030 | -330.389 | 8.54E+2 | 6.24E+3 | 3.01E+4 | -2.73E+5 |
| h_0 | 0.3173 | -2.2944 | 20.8707 | -58.6201 | | |
| u_0 | 0.6830 | -7.4766 | 69.5566 | -196.1201 | | |
| k_1 | 55.7239 | -1.13E+3 | 8.88E+3 | -8.89E+3 | -1.52E+5 | 4.25E+5 |
| h_1 | 0.0002 | -0.0018 | 0.1833 | -0.0449 | | |
| u_1 | 0.0003 | -0.0028 | 0.2875 | -0.0662 | | |
| c_0 | 0.0000 | | | | | |
| c_1 | 14.0300 | | | | | |

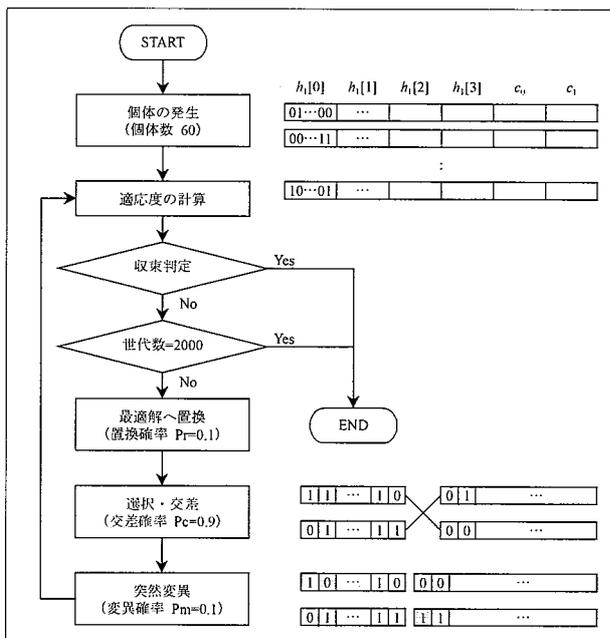


Fig. 14 最適化計算フロー
Analytical Flow for Optimization

わたってループの傾き、面積とも実験結果とよく一致しているが、0.5Hz 近傍でやや剛性を高めに評価してしまったことと、バイリニア型の履歴ループを採用しているためにハードニングを起こす高歪域でのループ形状までは再現できない点が、今後の課題といえる。

次に、ランダム波加力による応答解析結果をFig. 16に、実験結果をFig. 17に示す。解析結果は全般的に実験結果と一致しており、入力波の違いによる特徴をよく表しているが、波形の後半部で荷重が実験結果よりも大きくなっている。これは、漸減载荷時に実験結果では等価剛性が一定となるのに対し、修正バイリニアモデルではループ形状が一定となり等価剛性が増加するためである。この違いは、最大応答値を見る場合には問題とならないが、波形についてはダンパーの効果を過大評価する原因となるので、注意が必要である。

3.5 高層RC建物の応答解析

制振装置の効果を確認するため、Fig. 18に示すRC建物を対象に地震応答解析および風応答解析を実施した。

構造物は等価曲げせん断モデルとし、せん断成分は武田モデル型の復元力特性を持つせん断バネ、曲げ成分は弾性回転バネでモデル化する。制振装置は主目的を風応答に対する居住性の向上とし、2階から27階まで各階5台づつ設置するものとした。非制振のケースについては、レベル2地震時の制振装置に相当する120ton/cmの線形バネを制振装置の代わりに設けた。

Fig. 19は制振装置の減衰定数および装置とフレームの

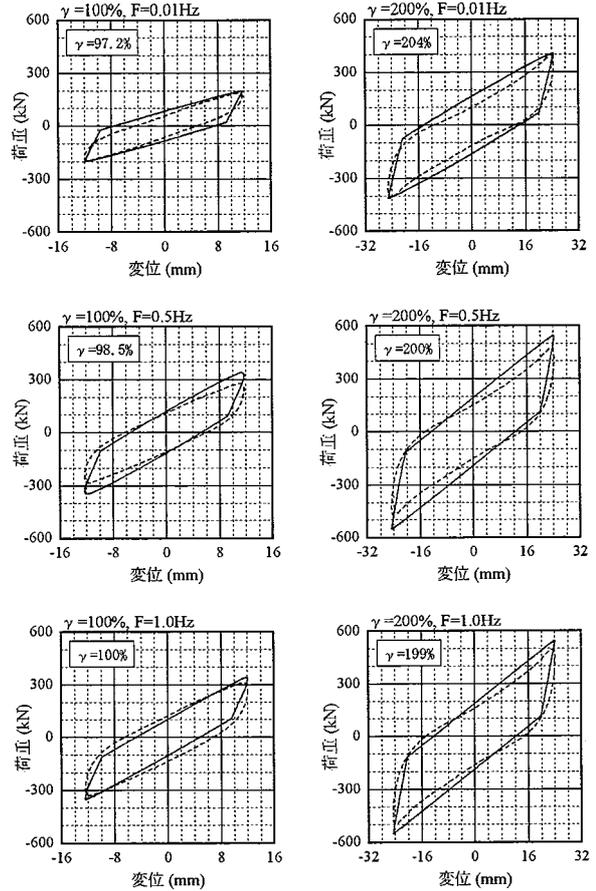


Fig. 15 正弦波加力解析結果
Hysteresis Loop by Harmonic Loading

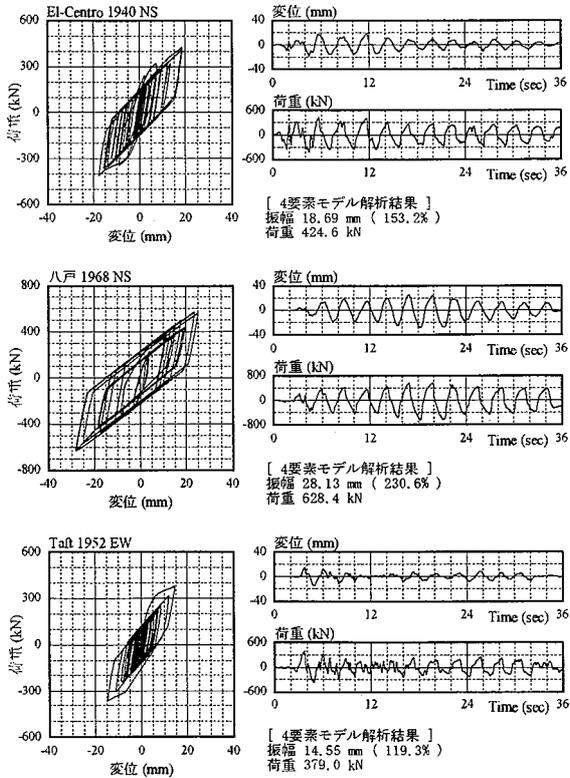


Fig. 16 ランダム波加力解析結果
Results of Analysis by Random Loading

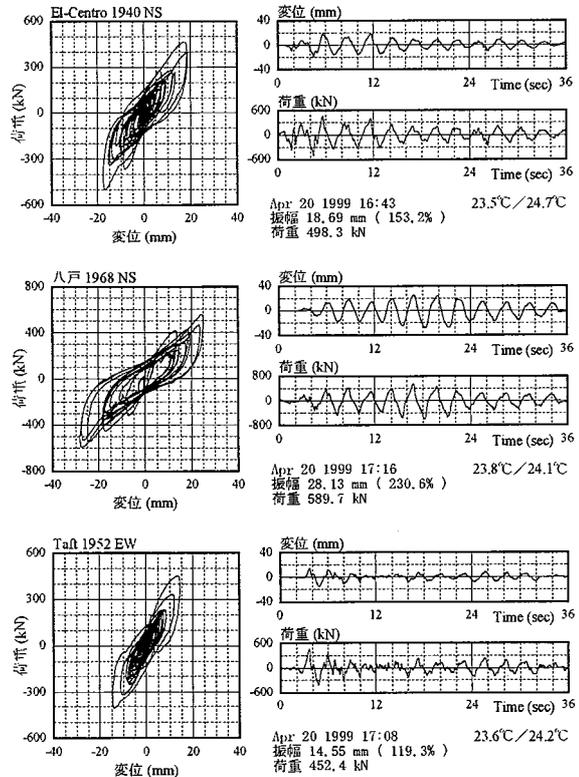


Fig. 17 ランダム波加力試験結果
Results of Test by Random Loading

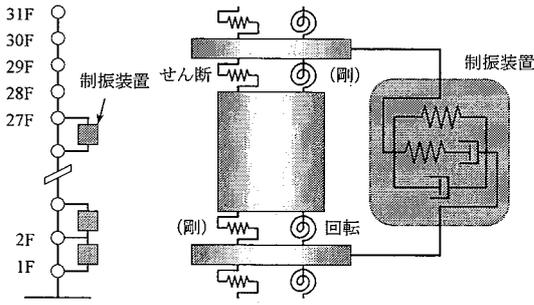


Fig. 18 応答解析モデル
Analytical Model

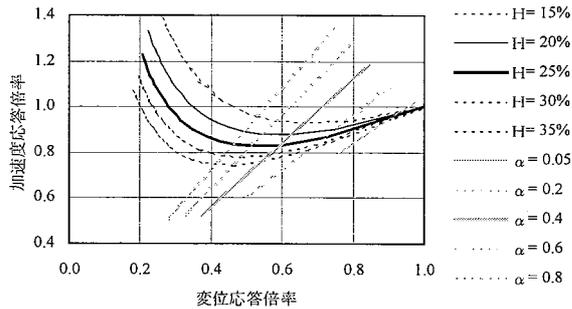


Fig. 19 粘弾性カラムダンパーによる応答低減効果
(H: 装置の減衰定数, α : 装置とフレームの剛正比)
Reduction of Response with VECD

剛性比より求められる加速度・変位応答スペクトルの低減率を表した図である。剛性比は風応答時で0.4, レベル2地震時で0.05となり, 減衰定数は試験結果より平均して約25%となる。これらの剛性比と減衰定数を示す線の交点で応答倍率をみると, 風に対して約40%, 地震に対して約10%の応答低減が期待できることがわかる。

再現期間1年の風荷重を各層に外力として与えた場合の解析結果をFig. 20に, エルセントロ波をレベル1, レベル2に基準化して入力した場合の解析結果をFig. 21に示す。その結果, 風に対しては最大加速度で60%~70%という高い制振効果が得られ, さらに地震に対しても10%~20%程度応答を低減できることが確認できた。レベル2地震時の19階における履歴減衰定数を半サイクルごとに算出した結果をFig. 22に示す。フレームの減衰は平均3%程度で, 制振装置による減衰が支配的である。

4. まとめ

本報告では粘弾性カラムダンパーの実大試験体を用いた動的および静的加力試験を行い, その動的性状を定量的に評価した。また, 粘弾性体の振幅依存性および振動数依存性を考慮できる要素モデルを作成し, シミュレーション解析と応答解析により, その妥当性と粘弾性カラムダンパーの制振効果を確認した。

参考文献

- 1) 早稲田大学理工総研プロジェクト研究: 粘弾性ダン

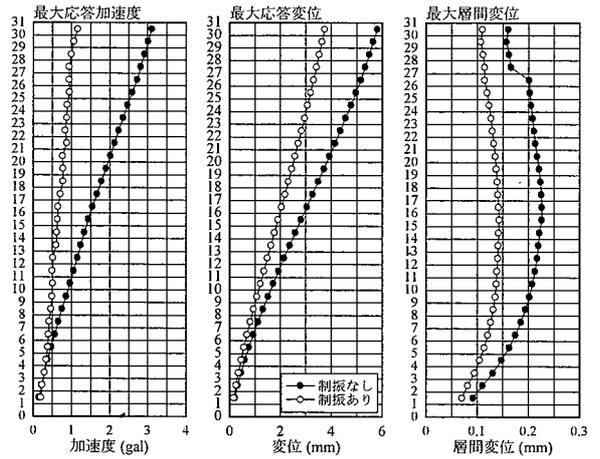


Fig. 20 風応答解析結果
Response by Wind

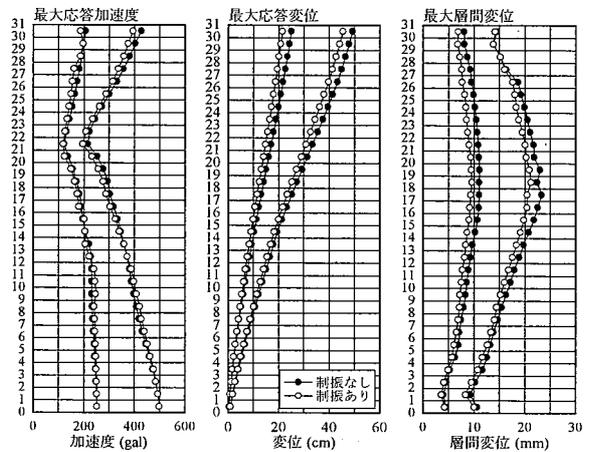


Fig. 21 地震応答解析結果
Response by Earthquake

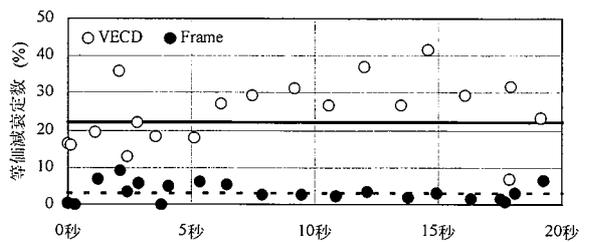


Fig. 22 ダンパーとフレームの履歴減衰
Hysteresis Damping of VECD & Frame

パーの開発と耐震設計・耐震補強への応用に関するシンポジウム論文集, (1998,1999)

- 2) 東京工業大学建築物物理研究センター: パッシブ制振構造シンポジウム論文集, (2000)
- 3) 曾田五月也, 他: 繰返加力にもとづく粘弾性ダンパーの力学モデルの構築, 構造系論文報告集 No.457, pp.29~36, (1994)
- 4) 伊藤嘉朗, 他: 振動数依存性を有する粘弾性体の動的抵抗の時刻歴解析用モデル化手法, 構造系論文報告集 No.525, pp.41~48, (1999)