

# せん断型制振構造体の自由振動実験と解析

松山俊樹<sup>\*1</sup>・酒井雄基<sup>\*1</sup>・島崎洋治<sup>\*2</sup>

## A simple vibration control system for shear structures under free vibration

by

Toshiki MATSUYAMA, Yuuki SAKAI, Yoji SHIMAZAKI

(Received on Sep.28,2001, accepted on Jan.22,2002 )

### Abstract

A simple vibration control system presented here involves two combined structures with some simple vibration dissipation material between them. By combining two inclined cantilever-like constructions at the top of these structures and placing highly damping rubber where they join, the vibrational energy can be effectively dissipated by a small amount of vertical oscillatory motion.

**Keywords:** Vibration Control , Free Vibration , Highly Damping Rubber , Shear Structure

## 1. まえがき

### 1.1 はじめに

建物を取り巻く社会環境や自然環境によって、様々な振動が生じ、建物に影響を及ぼしている。これらの振動により構造体に機能上の問題が生じたり、ときには構造物としての機能を果たせなくなる場合がある。これらの振動源は自然発生的なものと、人間の生活活動から発生する人工的なものがある。自然現象の代表例としては地震や風などが挙げられ、人工現象の代表例としては自動車や列車などの交通振動や建設機械、工作機械などによって発生する振動が挙げられる。近年、振動によって建物の安全性、機能性、居住性が損なわれないようにするための構造、すなわち制振構造を採用した事例が増えている<sup>1)</sup>。

制振には、外部から力を受けることなく構造物の振動を抑えるパッシブ制振と、外部から供給されるエネルギーを利用して振動を低減するアクティブ制振がある。一般には何らかのダンパー装置やアクチュエーターなどの装置を建物の下部、頂部、各階、隣棟間などに取り付けて、構造物の振動を制御、または構造物を揺れにくくする。従来の制振装置は、その性能を確実にするために複雑化し、コストが高くなるとともに維持管理の問題などがある。

本研究では、構造物を水平方向の振動に対して鉛直方向にも連動するように組み合わせることで、振動に対する減衰効果を格段に大きくすることができる構造体を提案する。構造体として傾斜した柱を持つ1層ラーメン構造模型を2棟連結させた1層型と、2層ラーメン構造模型を2棟連結させた2層型の構造体を用意する<sup>2)3)</sup>。それぞれの構造体において2棟間の床連結部分には高減衰ゴムを使用する。これら2つの構造体は柱の傾斜により水平方向の振動に対して鉛直方向にも連動する。このた

め高減衰ゴムが鉛直方向にせん断変形することによって構造物全体の振動を吸収することができる。この構造体の減衰効果を調べるために自由振動実験を行い、数値解析によってこの実験を確認した結果を示す。

### 1.2 基本的な構想

構造物の振動に対する変形モデルは片持ちばりのような曲げ変形すると仮定できるものとラーメン構造のようにせん断変形すると仮定できるものがある。Fig.1に示すように曲げ変形の場合、構造物の中心線でせん断力が最大となる。この場合、せん断力が最大となる中心線で2つの構造物に分け、これら2つの構造物の間に減衰装置を取り付けることによって制振効果を得ることができる。一方、Fig.2に示すような、せん断変形型モデルの場合、構造物は水平方向に変位する。このようなせん断型構造物を2棟並列させ、柱に傾斜角を与えることにより左右の構造物を鉛直方向にも運動させることができる。この場合、左右の構造物の連結部分に減衰装置を取り付けることによって制振効果を得ることができる。

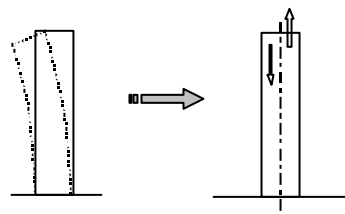


Fig.1 Bending structure.

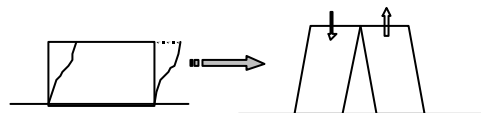


Fig.2 Shearing structure.

\*1 大学院工学研究科土木工学専攻博士課程前期

\*2 工学部土木工学科教授

## 2. 振動実験

### 2.1 実験模型

Fig.3 は 1 層型の制振構造体である。Fig.4 は 2 層型の制振構造体である。Fig.3 および Fig.4 は構造体を説明する目的のため誇張して描いてある。模型はエヌアイシ・オートテック株式会社のアルミニウム製の製品部材を組み合わせたラーメン構造で、梁(型式 AFS-2040-4 シリーズ、部材番号 )と柱(アルミニウム板、部材番号 )は剛結合となるように、梁の両端の部材(型式 ABJF-2040-4、部材番号 )をかぶせて、片側につき長さ 4cm の 2 本のネジでとめてある。2 棟間には図に示すように高減衰ゴムが瞬間強力接着剤によって取り付けられている。1 層型の構造体は 1 基あたり高さ 50cm、幅 30cm、柱長 42cm である。2 層型の構造体は 1 基あたり高さ 92cm、幅 30cm、柱長 40cm である。その他の部材の寸法と個別に計測した質量を Table 1 に示す。また、柱に傾斜角をつけない場合の構造体も同様の材料を用いて 1 層型および 2 層型を用意する。柱材のアルミニウムのヤング率は  $7.03 \times 10^{10} \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$  である。高減衰ゴムの寸法は 1 層型では長さ 4cm、幅 0.2cm、厚さ 0.1cm で、2 層型では長さ 2cm、幅 0.2cm、厚さ 0.1cm である。また、高減衰ゴムの弾性係数は材料メーカーの資料より  $G=5.884 \times 10^5 \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$  と仮定してある。高減衰ゴムのばね定数  $k'$  は接触面積  $A$  と厚さ  $h$  より、次のように求まる。

$$k' = G \frac{A}{h} \quad (1)$$

よって、1 層型の場合

$$k'_1 = 5.884 \times 10^5 \times \frac{8 \times 10^{-5}}{1 \times 10^{-3}} = 4.707 \times 10^4 \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$$

2 層型の場合

$$k'_2 = 5.884 \times 10^5 \times \frac{4 \times 10^{-5}}{1 \times 10^{-3}} = 2.353 \times 10^4 \text{N} \cdot \text{m}^{-1} \quad \text{となる}$$

### 2.2 実験方法

実験は、それぞれの構造体の点 A に初期変位 1.5cm を与えて構造物を自由振動させる。この加速度応答を 1 層型では点 B、2 層型では点 C、D に設置した加速度計で計測する。サンプリング時間は時間刻み 0.01sec で 1000 点、合計 10 秒間計測する。構造体の最下層は実験台に万力を用いて拘束した。実験は Fig.3、Fig.4 に示した柱に傾斜角をつけた 1 層型と 2 層型の模型と、柱に傾斜角をつけない 1 層型と 2 層型の 4 通りについて行った。

## 3. 理論式

### 3.1 自由物体図

構造体は初期変位を与えることにより自由振動し、柱の傾斜角により、鉛直方向にも同時に振動する。このとき、高減衰ゴムはせん断方向のみに自由度をもつと仮定できるので、1 層型は 1 自由度、2 層型は 2 自由度をもつ振動系となる。本研究では 1 層型、2 層型ともに左右対称の構造物を組み合わせていることから、Fig.5 に 1 層型模型の一方の構造物についてモデル化した図を示す。Fig.6 に 2 層型模型の一方の構造物についてモデル化した図を示す。1 層型、2 層型ともに、柱はせん断変形をするため質点は柱に垂直な方向に運動すると考える。

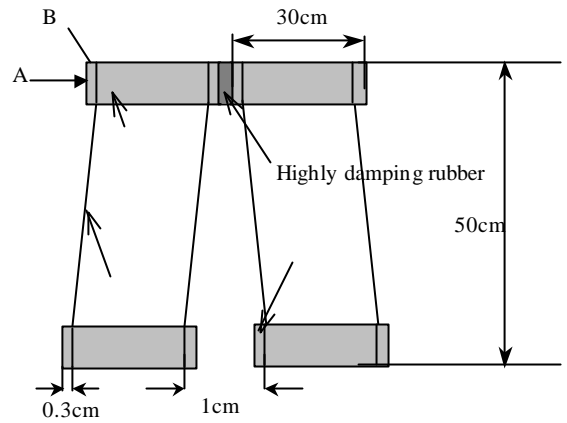


Fig.3 Single-story structure.

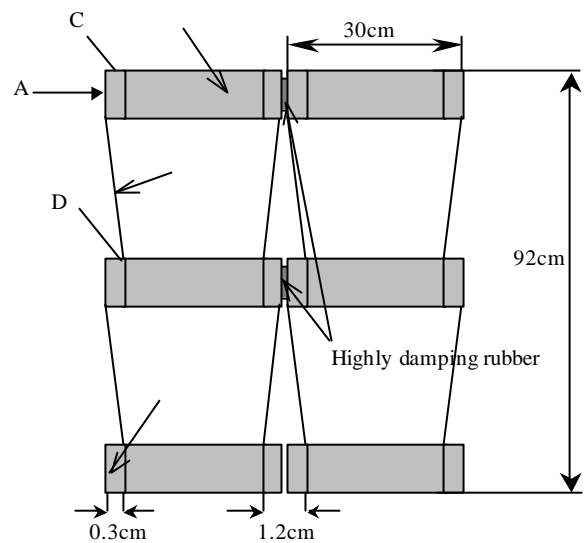


Fig.4 Two-story structure.

Table 1 The mass of every member.

No.	Dimension (mm)	Mass (kg)	Number
	40×300×20	$2.362 \times 10^{-2}$	4
	500×2×20	$0.546 \times 10^{-2}$	4
	40×3×60	$0.181 \times 10^{-2}$	8
	40×1×2	-	2
	40×300×20	$2.362 \times 10^{-2}$	6
	480×2×20	$0.436 \times 10^{-2}$	8
	40×3×60	$0.181 \times 10^{-2}$	20
	20×1×2	-	4



Fig.5 Single-story model.

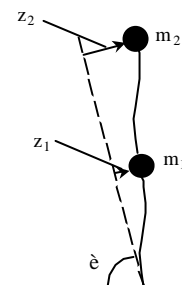


Fig.6 Two-story model.

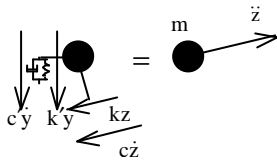


Fig.7 Free body diagram for m.

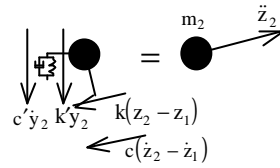


Fig.8 Free body diagram for m2.

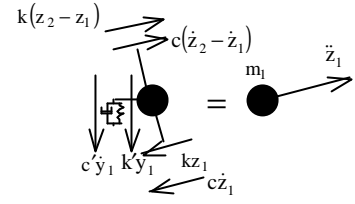


Fig.9 Free body diagram for m1.

Fig.7 は 1 層型における質量  $m$  の自由物体図である。Fig.8 および Fig.9 は 2 層型の各層における質量  $m_1$ ,  $m_2$  の自由物体図である。防振ゴムの 2 要素モデルはゴムの振動特性を十分に把握することはできないが、本研究では構造体の制振効果を調べることが目的としたため、高減衰ゴムは力学的モデルとしては基本的な、ばねとダッシュポットを並列に結合した 2 要素モデルを用いた。この場合、弾性要素と粘性要素のひずみは等しいことになる。ここで、 $y$  は鉛直方向の変位、 $z$  は柱に垂直な方向の変位である。Fig.7~Fig.9 をそれぞれ参考にして各層の質量  $m$  に加わる力のつりあいを考えると運動方程式は次のように示すことができる。

### 3.2 1 層型の場合

運動方程式は Fig.7 を参考にすると次のように示すことができる。

$$-kz - c'z - (k'y)\cos\epsilon - (c'y)\cos\epsilon = m\ddot{z} \quad (2)$$

ここで、 $y = z\cos\epsilon$  より、

$$\dot{y} = \dot{z}\cos\epsilon \quad (3)$$

式(2)に式(3)を代入し、整理すると式(4)に示すような 1 層型の運動方程式を得ることができる。

$$m\ddot{z} + (c + c'\cos^2\epsilon)\dot{z} + (k + k'\cos^2\epsilon)z = 0 \quad (4)$$

### 3.3 2 層型の場合

2 層部分のつりあいは次式のように書くことができる。

$$-k(z_2 - z_1) - c(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) - c'\dot{y}_2\cos\epsilon_2 - k'y_2\cos\epsilon_2 = m_2\ddot{z}_2 \quad (5)$$

ここで、 $y_2 = z_2\cos\epsilon_2$  より

$$\dot{y}_2 = \dot{z}_2\cos\epsilon_2 \quad (6)$$

また、1 層部分のつりあいは次式のように書くことができる。

$$-kz_1 + k(z_2 - z_1) - k'y_1\cos\epsilon_1 - c\dot{z}_1 + c(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) - c'\dot{y}_1\cos\epsilon_1 = m_1\ddot{z}_1 \quad (7)$$

ここで、 $y_1 = z_1\cos\epsilon_1$  より

$$\dot{y}_1 = \dot{z}_1\cos\epsilon_1 \quad (8)$$

式(5)に式(6)を、式(7)に式(8)をそれぞれ代入する。また、 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon$  であるから、これらを整理すると式(9)、(10)のような 2 層型の運動方程式を得ることができる。

$$m_2\ddot{z}_2 - c\dot{z}_1 + (c + c'\cos^2\epsilon)\dot{z}_2 - kz_1 + (k + k'\cos^2\epsilon)z_2 = 0 \quad (9)$$

$$m_1\ddot{z}_1 + (2c + c'\cos^2\epsilon)\dot{z}_1 - c\dot{z}_2 + (2k + k'\cos^2\epsilon)z_1 - kz_2 = 0 \quad (10)$$

$m$  : 質量       $\epsilon$  : 柱の変形(運動)前の傾斜角  
 $k'$  : 高減衰ゴムのばね定数       $c'$  : 高減衰ゴムの減衰係数  
 $k$  : 構造物のばね定数       $c$  : 構造物の減衰係数  
 ただし、添え字はそれぞれ、1 層、2 層の要素を示す。

## 4 . 実験および解析結果

柱の角度  $\epsilon$  は、1 層型で  $\epsilon = 89.3^\circ$ 、2 層型で  $\epsilon = 89.14^\circ$  であ

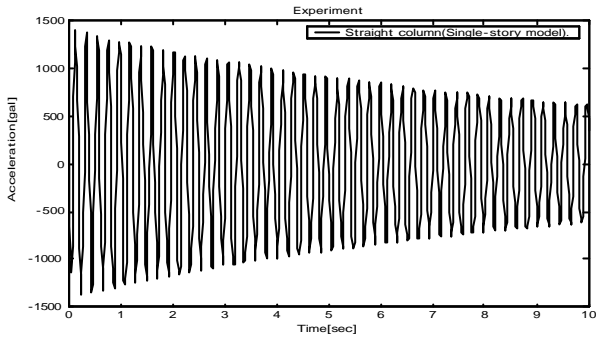
る。式(4)、(9)および(10)の解析には 4 次のルンゲクッタ法を使用し、柱に傾斜角がない場合は  $\epsilon = 90^\circ$  として解析を行った。1 層型構造物の減衰係数は、柱に傾斜角をつけなかった場合の自由振動実験波形より得られた対数減衰率から逆算して  $1.96 \times 10^{-6} \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$  とした。高減衰ゴムの粘性減衰係数  $c'$  の値は、柱に傾斜角をつけた場合の自由振動実験波形より得られた対数減衰率から逆算して  $1.764 \times 10^{-1} \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$  とした。2 層型の場合、1 層型と同様に自由振動実験より得られた波形から減衰係数を逆算したが、振動波形に乱れがあるため 1 次モードが卓越するようにスムージングを行い、対数減衰率を求めた。その結果、構造物の減衰係数は  $9.8 \times 10^{-6} \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ 、高減衰ゴムの粘性減衰係数  $c'$  の値は、 $1.176 \times 10^{-1} \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$  として解析を行った。Fig.10 は 1 層型の柱に傾斜角がない場合(a)とある場合(b)の実験結果で、Fig.11 は 1 層型の柱に傾斜角がない場合(a)とある場合(b)の解析結果である。Fig.12 は 2 層型の柱に傾斜角がない場合(a)とある場合(b)の実験結果である。Fig.13 は 2 層型の柱に傾斜角がない場合(a)とある場合(b)の解析結果である。図中の横軸は時間、縦軸は加速度である。時間は 10 秒間とり、加速度の最大値は 1 層型の柱に傾斜角をつけない場合では 1400gal、柱に傾斜角をつけた場合では 1300gal 程度である。2 層型の柱に傾斜角をつけない場合では最上階部分の最大加速度は 600gal、柱に傾斜角をつけた場合では最上階部分の最大加速度は 500gal 程度である。1 層モデル 2 層モデルともに実験結果と解析結果は柱に傾斜角をつけた場合は、柱に傾斜角をつけない場合よりも大きな減衰効果を示し、約 3 秒後にはほぼ静止状態まで制振されていることがわかる。そして実験結果と解析結果を比べると最大加速度をはじめ、減衰のしかたも両者は概ね一致している。特に 2 層モデルにおいては実験結果で加速度応答が乱れているがこれは 1 次の波と 2 次の波が混ざって表れたものであり、解析においてもその様子が表れている。

## 5 . まとめ

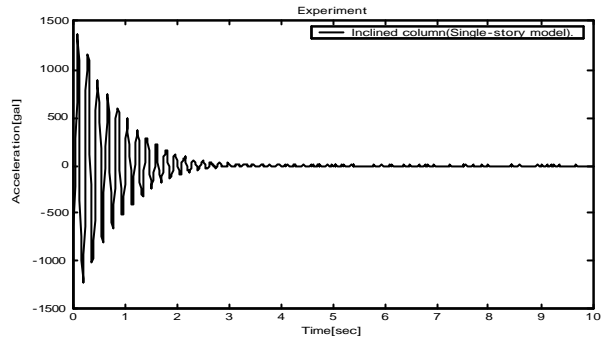
傾斜した柱を持つ 2 つのラーメン構造の各層を、高減衰ゴムにより連結することで格段に大きな減衰効果が得られる構造体を提案した。

まず、1 層ラーメン構造モデルで実験と解析を行い、実験と解析ともに柱に傾斜角をつけた場合、より大きな減衰効果が得られることが分かった。次に、この構造体を 2 層ラーメン構造モデルの場合に拡張し、実験と解析により、柱に傾斜角をつけることによって有効な減衰効果が得られることを確認することができた。これらのことから、多層ラーメン構造の場合においてもこの構造体の制振効果を期待できる可能性を示した。

ここではせん断型制振構造体の制振効果の有効性を確認するために、実験模型および解析モデルを簡略化して行った。今後、実際の土木構造物などへの応用を目標に、減衰材料を含めた減

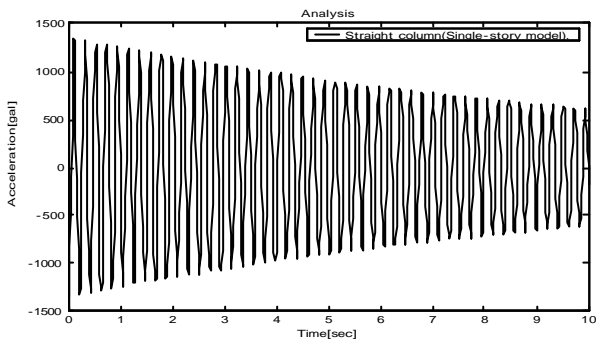


(a) Straight column .

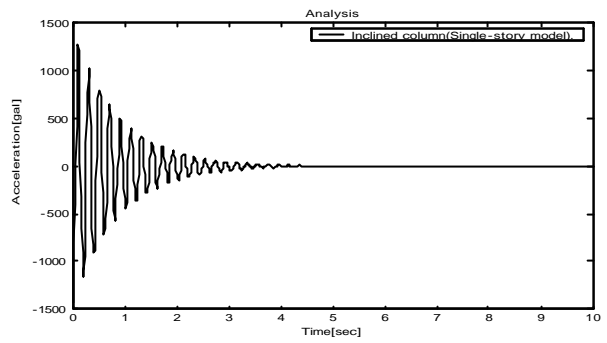


(b) Inclined column .

Fig.10 Experiment (Single-story model).

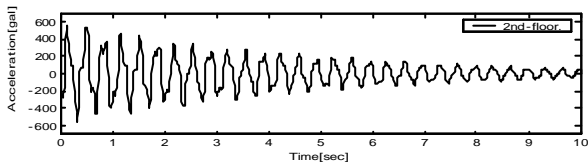
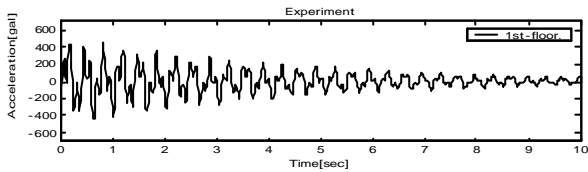


(a) Straight column .

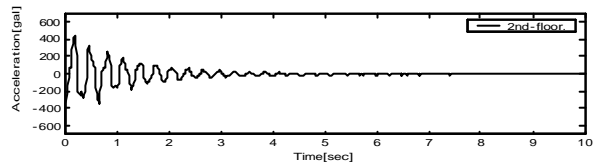
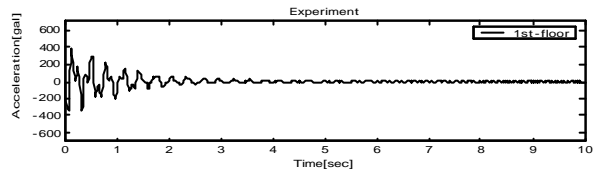


(b) Inclined column .

Fig.11 Analysis (Single-story model).

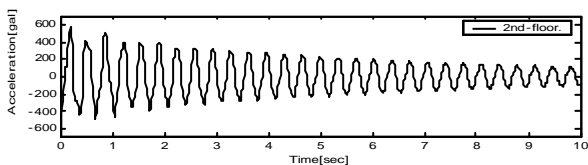
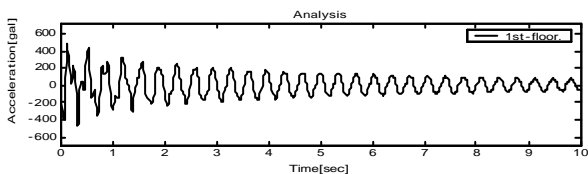


(a) Straight column .

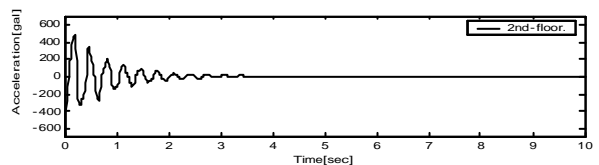
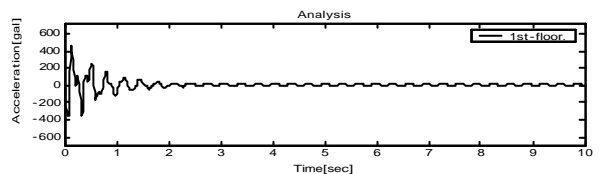


(b) Inclined column .

Fig.12 Experiment (Two-story model).



(a) Straight column .



(b) Inclined column .

Fig.13 Analysis (Two-story model).

衰機構を工夫し構造模型に鋼材を使用するなどしてより実物に近い模型を制作して実験および解析を行なう計画である。

参考文献

- 1) 金田勝徳他：建築の耐震・耐風入門, 彰国社, 1996, pp.112-128
- 2) 松山俊樹他：ある制振構造体に関する一考察, 土木学会第 27 回関東支部技術研究発表会講演概要集, 2000, pp.32-33 .

- 3) 松山俊樹他：2 層せん断型制振構造体に関する実験的研究, 土木学会第 28 回関東支部技術研究発表会講演概要集, 2001, pp.28-29 .