

耐震教育における制振モデルの作成に関する提案 Proposal Study of Vibration Model with Seismic Control Damper Using on Education of Earthquake-resistant Structure

池田 義人, 遠藤 龍司 (職業能力開発総合大学校)

Yoshihito Ikeda and Ryuji Endo

Vibration phenomenon has been taught using advanced mathematics and dynamics in seismic education of Japan. Many students and engineers, without understanding these advanced theories have been carried out as practices the seismic design using the vibration analysis software. Thus, in this study focused on damping vibration under the concept to understand by calculation by myself, damping vibration model and basic mathematical theory were proposed to carry out the seismic educations.

Keyword: Education of Earthquake-resistant Structure, Seismic Control Damper, Vibration Model, Acceleration, resonance

1. はじめに

ここ数十年の日本は地震の活動期に入ったものと考えられ、近い未来においても、南海トラフを中心とした三連動地震や首都圏直下地震等の巨大地震の発生が懸念されている。中央防災会議は南海トラフ地震、首都圏直下地震、日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震および中部圏・近畿圏直下地震を対象とした大規模地震防災・減災対策大綱¹⁾を平成26年3月に決定し、対策の強化を図っている。この中で、事前防災の観点から12項目の方策が設定されており、例えば建築物の耐震化、津波対策および火災対策等に加えて長周期地震動対策が挙げられている。また、日本建築学会では2003年の十勝沖地震を契機に、長周期地震動への対策の検討が始まり、2007年に「長周期地震動と建築物の耐震性²⁾」を刊行し、さらに2010年の研究集会では東海・東南海・南海の三連動地震に対して、特に長周期地震の影響を受けやすい超高層建築物を対象として調査が実施され、耐震等に関する対策が報告された。このような中で、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、震源から離れた首都圏において長周期の地震動が卓越し、超高層建築物では、10分以上の長時間に渡りゆっくりとした揺れが観測された。こうした経験を踏まえ、日本建築学会から「長周期地震動と超高層建物の対応策—専門家として知っておきたいこと—³⁾」が2013年10月に出版され、具体的な設計方針が示されることになった。

一方、地震国である我が国の建築物の耐震設計は、振動理論に基づく必要があるが、多くのテキストや講習で

は数学や物理学、さらに構造力学の知識に基づく難解な理論の解説に終始することになり、建築物の振動現象を理解するに至らないばかりか、苦手意識を与える可能性も懸念されている。こうした問題に対して、近年は、力学に関心を持たせることを目的として、理論の説明にその現象が経験できる実験等を併用する教育手法が取り入れられ、一定の成果が報告されている⁴⁾。

ところで、耐震に関する振動では、外乱である地振動の卓越周期と、建築物の固有周期が一致するような共振が課題である。こうした共振現象は、複雑な建築物であってもその振動特性は1次固有周期が支配的であることから、初学者において1質点系の振動理論を確実に理解してから次のステップへ進むことが重要であると思われる。筆者の一人である遠藤は、1質点系の振動理論を理解させることを目的に、振動を複雑な計算プログラムを用いることなく、手計算程度で解けるような単純な問題にモデル化し、これに実験を併用した耐震教育手法を提案している。この中で用いる振動モデルは、主に共振現象を中心とした基本的な振動現象の理解と身近な実験を目的とすることから、極めて小型のモデルである。このモデルの柱材には薄板が用いられており、水平剛性および減衰比の小さな、非減衰に近い振動を対象としている。こうした共振現象に対して超高層建築物の耐震設計では、ダンパー等の減衰機構を設けることで、応答変位や応答加速度を小さくする制振構造が一般に用いられており、今後はすべての超高層建築物への設置が推奨されている。このように、近年の日本の耐震教育では、減衰機構を有する制振構造のメカニズムについて理解すること

が求められており, ここに実験を併用した教育プログラムを開発する意義がある. そこで本研究では, 前述した 1 質点系の手計算で解ける振動理論を用いた耐震教育に用いる簡易的な振動モデルの提案を目的とする. なお, モデルの開発に当たっては制振モデルの減衰の効果を明らかにすることを目的に, 減衰比の極めて小さいフレームモデルおよび銅製ブレースを取り付けた強度型モデルとの比較にてモデルの有効性を検証する.

2. 実験モデル

2.1. モデルの種類と概要

本研究で用いる実験モデルは, 図 1 に示すような, 柱と梁で構成されたフレームモデルを基本とし, 柱頭および柱脚には, ブレースの着脱が可能となるようにガセットプレートを溶接した. この柱と梁のみで構成されたモデルをフレームモデルと呼び, 写真 1 に示す制振ブレースを取り付けたモデルを制振モデル, 銅製の管で作成したブレースを取り付けたモデルを強度型モデルと呼ぶことにする. なお, 柱頭の接合および柱脚の支持方法は写真 2 の通りであり, すなわち, 柱脚をベースプレートに溶接し, ベースプレートを振動台に 9 本のボルトにより固定し, 1 質点系としてモデル化する. 表 1 にモデルの諸元を示す.



写真 1 モデルの外観



写真 2 モデルの接合部と支持部

表 1 基本モデルの諸元

材料の種類	SS400 材
ヤング係数	$2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
断面 2 次モーメント (柱)	$1.17 \times 10^5 \text{ mm}^4$
全質量	$1.78 \times 10^2 \text{ kg}$
質点の質量	$1.11 \times 10^2 \text{ kg}$
水平剛性	$3.41 \times 10^2 \text{ N/mm}$

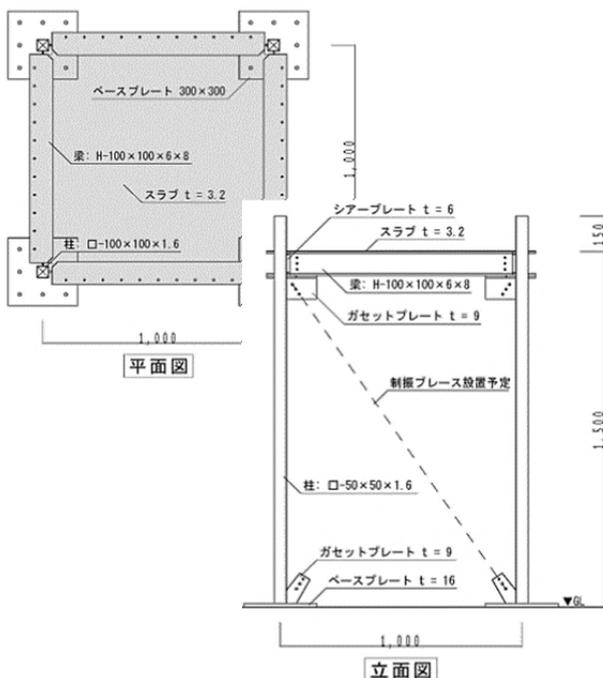


図 1 モデルの概要

2.2. 制振ブレースの特性

本研究で用いる制振ブレースの概要について述べる. 制振ブレースには, 分子間での摩擦によりエネルギーを吸収するアクリル系粘弾性体である VEM (Visco Elastic Material)を採用し, これを図 2 に示すように, 鋼材で挟むことで接着した粘弾性ダンパーをブレースの中央に配

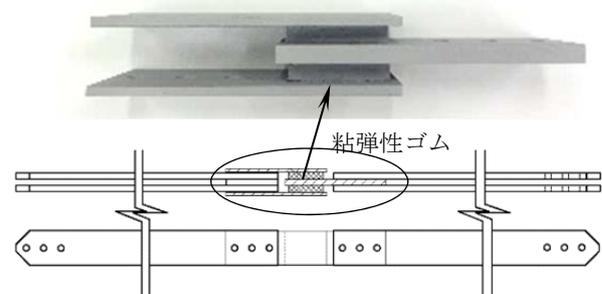
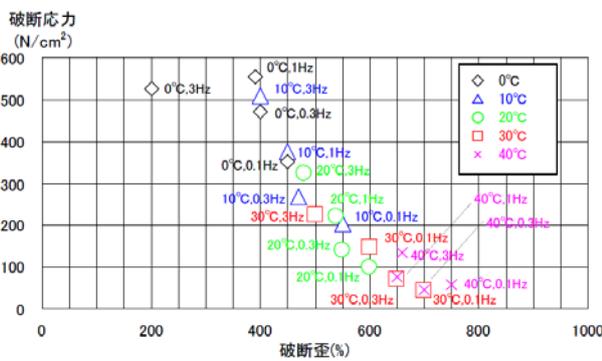
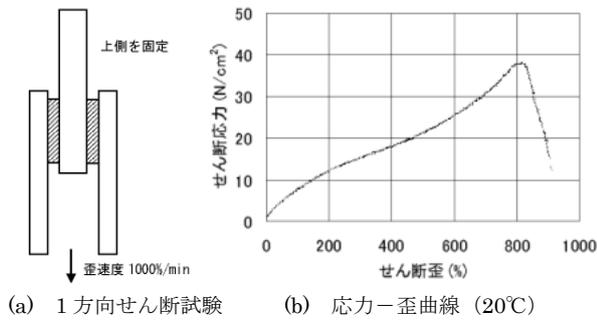


図 2 制振ブレースの概要

置した.

この粘弾性ダンパーは, スリーエムジャパン株式会社から提供されたものであり, 実際の建築物に採用されているものである. 同社から示された粘弾性体の変形性能については, 図 3 (a)の 1 方向せん断試験から得られた応力-歪曲線として図 3 (b)の通りとなっている. 図 3 (b)は, 提供いただいた資料を見やすくするために線の太さを調整した. ここに, 縦軸にはせん断応力が, 横軸にはせん断応力に対する変形量が粘弾性体の厚みに対する比で表されており, この図から高い変形能力を有することが確認できる. なお粘弾性体は, 図 3(c)に示すように, 温度と正弦载荷の振動数により変形性能が異なり, (b)に示した例は温度が 20°C の場合の実験結果である. 本実験

モデルの粘弾性体の厚みは開発元の設計に基づき 8mm とした。またホームページ⁵⁾では、荷重と変形の関係について図4の通り報告されており、粘弾性体の特徴である傾斜した楕円が確認できる。これによると、図4下に示すように小さな変形においてもエネルギーを吸収する能力を有していることから、本研究のような小型のモデルを対象とする実験に適していると考えられる。



(c) 破断応力と破断歪の関係
 図3 粘弾性体の変形性能
 (3M より提供)

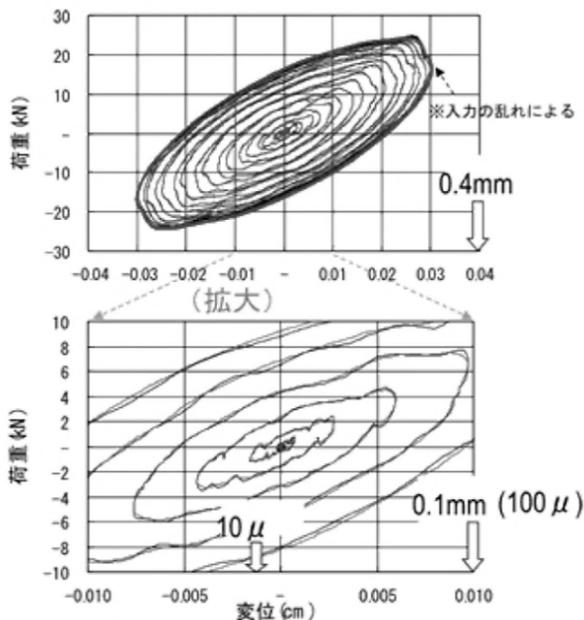


図4 粘弾性ゴムの性能
 (3M ホームページより抜粋)

3. 自由振動と応答計算

3.1. フレームモデルの固有値解析

図1および写真1に示したフレームモデルは、図5に示す1質点系でモデル化する。図5において m は質量、 c は減衰係数、 k は水平剛性である。また、 $x_g(t)$ は地動変位、 $x(t)$ は弾性変位であり、 $m\{\ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t)\}$ は地動を受けたときの質点に作用する慣性力、 $c\dot{x}(t)$ は減衰力、 $kx(t)$ は弾性力である。ここに $\dot{\quad} = \frac{d}{dt}$ である。

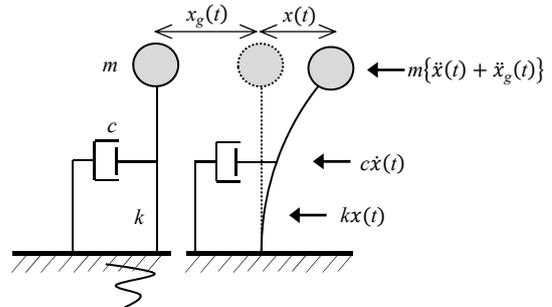


図5 減衰を考慮した1質点系モデルの振動

ダランベールの原理により、時間 t における釣合いとして次式の運動方程式が誘導される。

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

ここに右辺は地動により質点に生ずる慣性力であり、外力として評価される。運動方程式(1)により、まず特解を求めることにする。すなわち、式(2)に示す同次微分方程式の解を求めることにする。

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (2)$$

式(2)の両辺を m で割ることにより次式を得る。

$$\ddot{x}(t) + 2h\omega\dot{x}(t) + \omega^2x(t) = 0 \quad (3)$$

ここに、 $2h\omega = \frac{c}{m}$ 、 $\omega^2 = \frac{k}{m}$ であり、 h は減衰比と定義される。同次方程式(3)の解を次式で仮定する。

$$x(t) = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t} \quad (4)$$

式(4)を式(3)に代入することにより、

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \omega(-h \pm \sqrt{h^2 + 1}) \quad (5)$$

を得る。式(5)で得られた λ_1 および λ_2 により解を構成すると、

$$x(t) = e^{-\omega h t}(Ae^{\omega a t} + Be^{-\omega a t}) \quad (6)$$

を得る。ここに、 ω は非減衰の固有円振動数、 ω_d は次式で与えられる減衰を考慮した固有円振動数である。

$$\omega_d = \omega\sqrt{1 - h^2} \quad (7)$$

式(7)より、例え制振モデルにおいて減衰比 h が十数%に

なっても $\omega_d \approx \omega$ が成り立つことから、固有振動数は減衰を無視して次式により計算することができる。

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (8)$$

3.2. 応答計算

応答計算に当たってはよく知られているように、ランダム波である地震波に対する応答計算は解析的に解を得ることが困難であるため、近似的な数値解法として Newmark の β 法や Wilson の θ 法が知られている。しかしここでは、共振を対象とした振動現象を理解することを目的に、式(9)に示すように地動には調和運動を仮定し、数学解を求めることにする。

$$\ddot{x}(t) + 2h\omega\dot{x}(t) + \omega^2x(t) = -a \sin \omega_0 t \quad (9)$$

ここに ω は非減衰の固有円振動数であり、 ω_0 は地動の円振動数である。また a は地動加速度の振幅である。運動方程式(9)の解を次式で仮定する。

$$\begin{cases} x(t) = A \sin \omega t + B \cos \omega t \\ \dot{x}(t) = A\omega \cos \omega t - B\omega \sin \omega t \\ \ddot{x}(t) = -A\omega^2 \sin \omega t - B\omega^2 \cos \omega t \end{cases} \quad (10)$$

式(10)を式(9)に代入し整理すると、積分定数の意味を持つ未知係数 A および B を求めるための連立方程式を得る。

$$\begin{cases} (\omega^2 - \omega_0^2)A - 2h\omega\omega_0B = 0 \\ 2h\omega\omega_0A + (\omega^2 - \omega_0^2)B = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式(11)より A および B を求めると、

$$\begin{cases} A = -\frac{a}{\omega^2} \cdot \frac{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}{\left\{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2\right\}^2 + 4h^2 \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} \\ B = \frac{a}{\omega^2} \cdot \frac{2h \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)}{\left\{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2\right\}^2 + 4h^2 \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} \end{cases} \quad (12)$$

これより一般解は特解との重ね合わせにより、変位応答の式として次式を得る。

$$x(t) = e^{-\omega h t} (\alpha \sin \omega_0 t + \beta \cos \omega_0 t) + \frac{a}{\omega^2} \cdot \frac{1}{\left\{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2\right\}^2 + 4h^2 \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} \cdot \left\{ 2h \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right) \cos \omega_0 t - \left\{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2\right\} \sin \omega_0 t \right\} \quad (13)$$

式(13)の第 1 項は自由振動の項であり、 α および β は初期条件により決定される積分定数である。しかし、自由振動の項は短時間で無視できる程度に小さくなり、共振応答は変位、速度および加速度に関して次式で表すことができる。

$$\begin{cases} x(t) = \frac{a}{2h\omega^2} \cos \omega t \\ \dot{x}(t) = \frac{-a}{2h\omega} \sin \omega t = \frac{a}{2h\omega} \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \\ \ddot{x}(t) = \frac{-a}{2h} \cos \omega t = \frac{a}{2h} \cos(\omega t + \pi) \end{cases} \quad (14)$$

3.3. 減衰が応答に与える影響

減衰自由振動方程式により導かれた式(7)の関係および式(8)の仮定のもとで固有振動数は減衰の影響を無視することができる。しかし、応答は式(14)からも分かるように減衰の影響が極めて大きい。そこで、調和運動する地動のもとでの応答に関する数学解により、減衰と応答の関係を明らかにしておくことにする。式(14)を計算するに当たり、加速度振幅 $a = 1.0$ 、固有円振動数 $\omega = 1.0$ 、減衰比 $h = 0.05$ (5% の減衰) とした。このように設定することにより、応答値が入力に対する応答の比で表すことができ、すべての値は応答倍率として評価できる。

図 6 に変位、速度および加速度の応答値について時間 0~10 秒までの変化を示す。これよりそれぞれの応答の位相差は $\pi/2$ であり、変位と加速度の応答は正負逆の関係になることがわかる。また、入力が 1 に対して、応答の最大値は 10 を示しており、応答倍率は 10 として評価する。

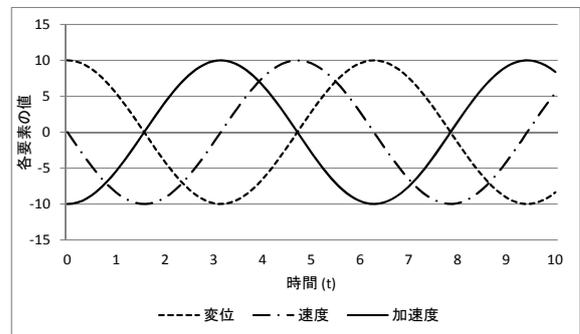


図 6 応答変位、応答速度および応答加速度の関係

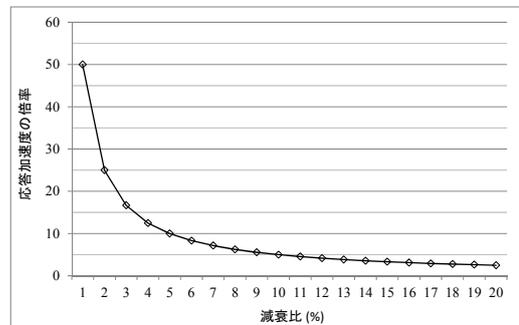


図 7 応答加速度と減衰比の関係

さて、次に加速度振幅 a および固有円振動数 ω を 1.0 に固定し、減衰比のみを 1~20% ($h = 0.01 \sim 0.2$) と変化させたときの応答加速度の倍率を図 7 に示す。縦軸は応

答倍率であり、横軸は減衰比である。非減衰に限りなく近い場合には、極めて大きな応答値を示しており、減衰比が大きくなるに連れ反比例的に応答値が小さくなる。当然、減衰比が小さいとき、加速度応答のみならず全ての応答値が大きくなる。

4. 振動実験による検討

4.1. 固有振動数の検討

フレームモデルに対して、振動試験装置を用いた各種実験を行い、前節で示した解析解との比較を試みる。本研究で用いる振動試験装置は X, Y および Z の各方向が独立に制御でき、テーブルの大きさは 2m×2m である。測定にあたっては、振動台に設置されたサーボ型加速度センサで地動の加速度を、フレームの梁に取り付けた圧電型加速度センサで応答加速度を計測した。

まず、振動の基本特性である固有振動数を確認するために、掃引試験を実施した。このときに得られたそれぞれのモデルの周波数応答関数を図 8～図 10 に示す。図において横軸は周波数であり、すべてのモデルに対応できるように 5Hz～50Hz の掃引周波数を設定した。縦軸は地動の入力に対する応答の比の大きさであり、値が大きいほど応答が大きいことを示している。図 8 に示すフレームモデルでは、8.98Hz 付近で 40 倍を超えるような極端に大きな応答が現れ、尖形のピークが見られる。これよりフレームモデルの固有振動数は 8.98Hz と決定した。

次に、図 9 に示す制振モデルの結果に着目する。フレームモデルに比べてピークの形状が鈍くなっており、その応答倍率も 2.5 倍程度と極めて小さくなっている。この結果から、制振モデルは共振点における応答を抑制する効果があることが明確にわかる。なお、このときの固有振動数は、12.71Hz でありフレームモデルに比べて少し高い結果となった。これは、ブレースにより水平剛性が大きくなったためであり、ブレースの効果の検討は後に行うことにする。最後に、図 10 に示す強度型モデルの結果を見ると、フレームモデルと同様に尖形のピークが見られ、共振点において大きな応答を示していることから、制振モデルのように応答を抑制する効果がないことがわかる。これより、同じ耐震構造物でも耐震に対する役割が異なることが説明できる。

4.2. 減衰比の検討

流体による付加減衰等を除き、通常の構造減衰等は計算で求めることができないため、実験により決定する必要がある。このときの実験方法については様々な方法が提案されているが⁶⁾、本研究では残留振動試験法およびインパクトハンマ加振法の 2 種類を用いることとし、基本的に試験体を自由振動させ、その振動が収まる過程の加速度の変化を計測する。具体的に残留振動試験法とは、共振周波数にて試験体を振動させ、振動が安定したところで振動台の振動を強制的に停止させることで、試験体を自由振動させる方法である。またインパクトハンマ加

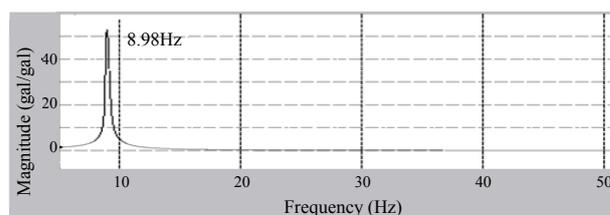


図 8 フレームモデルの掃引試験における応答関数

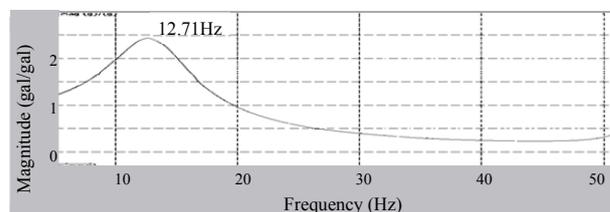


図 9 制振モデルの掃引試験における応答関数

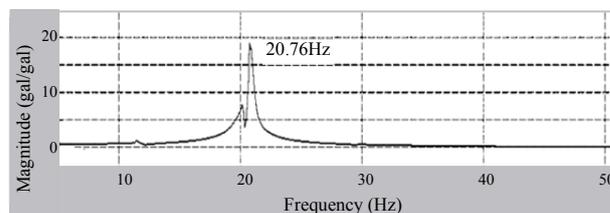


図 10 強度型モデルの掃引試験における応答関数

振法とは、インパクトハンマで試験体を直接加振することで、試験体を自由振動させる方法である。これらの減衰振動の波形より振幅減衰比を、式(15)を用いて計算した。

$$h = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{x_n}{x_{n+1}} \quad (15)$$

ここに x_n は自由振動が開始されてから n 番目の振幅であり、 x_{n+1} は次の振幅である。なお、減衰比は測定の方法や得られたデータの選定方法により、減衰の値に若干の差異が生ずることが知られており、本研究ではこれら 2 種類の試験結果の平均値を採用することとした。

減衰振動の一例として、残留振動試験法により得られた、フレームモデルの波形を図 11 に、また制振モデルの波形を図 12 にそれぞれ示す。図において横軸は時間であ

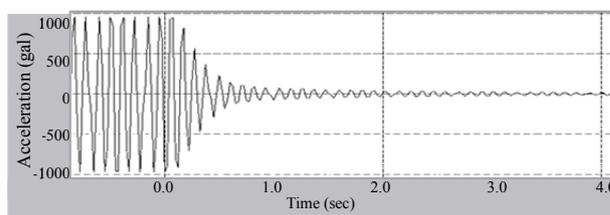


図 11 フレームモデルの残留振動試験結果

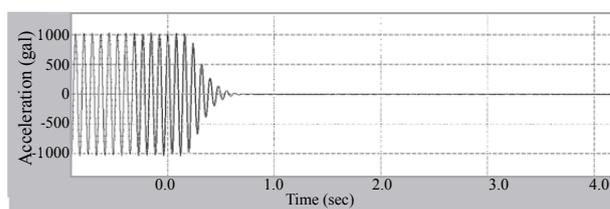


図 12 制振モデルの残留振動試験結果

り、縦軸は応答加速度である。フレームモデルの波形である図 11 に着目すると、時間の経過とともに振動が減少しているものの、振動台を停止させてから 4 秒後においても微小な振動が残っている。これに対して、制振モデルの波形である図 12 に着目すると、振動を停止してから 0.5 秒程度の僅かの時間で振動が完全に停止していることが分かる。この 2 つの図を比較することで、制振ブレースが振動を抑制している様子が目視で確認することができる。なお本実験により、フレームモデルの減衰比として約 2.44%、制振モデルの減衰比として約 18.27%、強度型モデルの減衰比として約 3.1% が得られた。フレームモデルの減衰比は一般的な鉄骨造の、制振モデルの減衰比は一般的な制振構造物の値として妥当であると考えられる。

ここで、各モデルの固有振動数について実験の立場から検討しておく。表 2 はそれぞれのモデルの固有振動数の実測値と式(8)を用いた計算値を示している。フレームモデルは 1 質点系でモデル化した計算値とほぼ一致し、振動教育に当たって実験と非減衰 1 質点系モデルのどちらの観点から解説しても矛盾は生じないことがわかる。また、ブレースを組み込んだ強度型モデルについては、ブレースの水平剛性 k_b を次式で評価するものとした。

$$k_b = \frac{AE}{L} \cos^2 \theta \quad (16)$$

ここに A はブレースの断面積、 E はヤング係数、 L はブレースの長さ、 $\cos \theta$ はブレースの取り付け角である。本実験で採用した銅管ブレースの直径は 15.88mm、厚さ 0.71mm の円形断面でありヤング係数は $1.18 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ である。

表 2 にはフレームに式(16)で示した水平剛性を付加した固有振動数の解析値を示してある。解析値と実験値はほぼ一致していることから、ブレースの水平剛性は式(16)により推定できることがわかる。

ところで、本実験で採用した制振ブレースは水平方向にも粘弾性ダンパーがむき出しになっており、単純に式(16)より推定することは困難である。そこで、表 2 に示してある制振モデルの固有振動数から逆に水平剛性を求めることにした。その結果、制振ブレース 1 本あたりの水平剛性は 255.5N/mm となった。この値をブレースの水平剛性として後に示す応答計算に用いることにする。

表 2 固有振動数の実験値と計算値

モデル	採用値	固有振動数(Hz)
フレームモデル	実験値	8.98
	解析値	8.82
強度型モデル	実験値	20.76
	解析値	20.93
制振モデル	実験値	12.71
	解析値	—

4.3. 応答加速度の検討

地動の卓越周期と建築物の固有周期が一致する共振において、構造物は極めて大きな応答加速度を示すが、特

に東北地方太平洋沖地震では、これにより首都圏の超高層ビルに長周期動揺が生じることとなった。また、大阪府咲洲庁舎は上記の地震により、震源から 700km 以上離れているにも関わらず、長周期動揺により設備のみならず天井ボードや壁面パネルの破損が報告されている。このため国土交通省は全国のすべての超高層建築物に制振ダンパーを取り付けることを推奨していることは既に述べた。そこで、本報では実験により得られた固有振動数でそれぞれのモデルに対して加振実験を行い、制振モデルの応答の低減程度を検証し、さらに数学解と比較する。

図 13 に、地動加速度として 45gal を入力した際のフレームモデルと制振モデルおよび強度型モデルの応答加速度を比較して示す。フレームモデルと強度型モデルの応答加速度が共に 800gal 近くの値を示しているのに対して、制振モデルの応答加速度はわずか 100gal 程度と顕著な制振効果が確認できる。また、これよりブレースによる耐震補強を施しても、振動応答が低減されるわけではなく、強度型とは、入力してきた地震力（水平力）を柱とブレースで受け持ち、せん断耐力に期待する構造であることの説明が容易になる。

図 14 および図 15 にフレームモデルと制振モデルの応答加速度の実測値と式(14)より求めた波形を比較して示す。このときに用いた固有円振動数は、いずれも式(8)による計算値である。フレームモデルにおいては、固有振動数および応答加速度のどちらにおいても精度よく一致している。これに対して、制振モデルでは制振ブレース

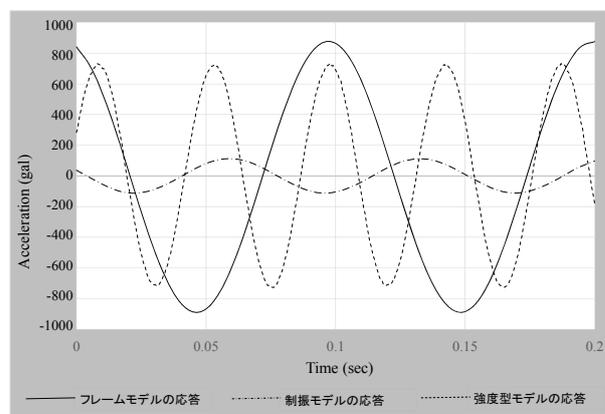


図 13 フレームモデル、制振モデルおよび強度型モデルの応答加速度（地動 45gal）

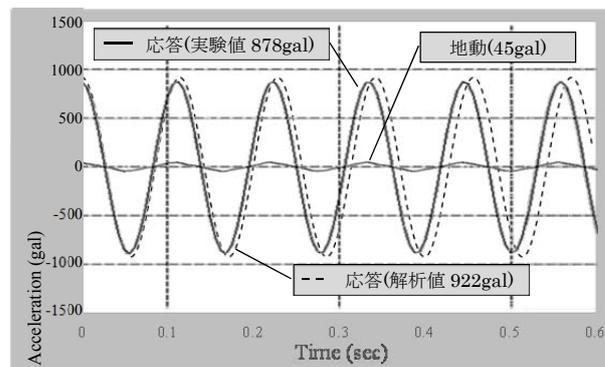


図 14 フレームモデルの応答加速度

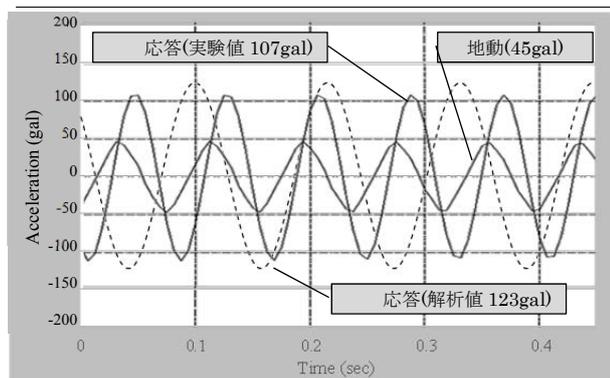


図 15 制振モデルの応答加速度

表 3 各モデルの応答倍率

モデル	採用値	応答倍率
フレームモデル	実験値	19.50
	解析値	20.49
強度型モデル	実験値	14.42
	解析値	16.31
制振モデル	実験値	2.38
	解析値	2.73

の剛性の効果から固有振動数に違いが見られるものの、減衰の効果を示す応答加速度では解析値と近い値を示している。このことから、応答加速度への減衰の影響が確認でき、応答値の差は減衰の評価に起因するものと考えられる。今後、荷重-変位曲線からの減衰も検討する必要があると思われる。さらに、それぞれのグラフから得られた値により、応答加速度倍率(応答/地動)を求め、表 3 に示す。これらの結果から、本モデルにより減衰と応答加速度、固有振動数の関係を解説するための振動モデルとしての有効性が確認できる。

ここで改めて減衰比と応答の関係に着目すると、図 7 に示したように、減衰比が 0.03 (3%)より小さな範囲では、減衰比に対する応答の変化が激しく、減衰比の変化が僅かであっても結果としての応答への影響が大きい。これに対して、減衰が大きくなると、応答加速度の変化が緩やかになり、減衰比の誤差の影響は小さくなる。このことから、建築物を制振構造とする場合には、減衰比を過剰に大きく設計しても、応答加速度を小さくする効果はそれほど期待できず、12~13%程度を超えていけば十分に応答を抑えられることがわかる。

5. まとめ

本研究で提案した制振モデルを含む 3 種類のモデルに対して加振実験を行ったところ、フレームモデル、強度型モデル、制振モデルのいずれにおいても、運動方程式から導かれた解析値と比較的精度良く一致する結果を得ることとなった。したがって、理論を解説するための振動モデルとして用いても矛盾が生じない。特に本研究で提案する振動モデルを用いた実験を通して、確認することができた制振構造の特性を以下に示す。

- ① 掃引試験により、制振モデルには、減衰の小さなフレームモデルや剛性を高めた強度型モデルのような尖形のピークは見られず、高減衰の応答関数の特徴が確認できた。
- ② 強制加振実験により、共振点における制振モデルの応答加速度は、フレームモデルや強度型モデルと比較して、極めて小さな値となり、制振(減衰)効果が確認できた。
- ③ 本研究で用いた振動モデルによる対数減衰でも、応答値にさほど違いがないことから、減衰を適切に評価することで応答値を予測できることが確認できた。

最後に、本研究で提案する振動モデルを用いることで、固有振動数および減衰機構が建築物の振動、特に応答加速度に与える影響を明確に示すことが可能であり、本モデルを用いることで、効果的な耐震教育が可能になると考えられる。今後は、本モデルを用いた耐震教育を展開し、その有効性については稿を変えて報告する。

謝辞 本研究で用いた粘弾性ゴムを提供いただいた、スリーエム株式会社にはここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 中央防災会議：「大規模地震防災・現在対策大綱」, 内閣府(2014).
- [2] 日本建築学会：「長周期地震動と建築物の耐震性」, 日本建築学会(2007).
- [3] 日本建築学会：「長周期地震動と超高層建物の対策—専門家として知っておきたいこと—」, 日本建築学会(2013).
- [4] 石川孝重, 平田京子：体感・実験・考察を通じて育む「初年次構造力学教育」, *建築雑誌*, Vol.128, pp.062(2013).
- [5] <http://www.mmm.co.jp/tape-adh/construction/vds/about/index.html> (2016.1.31).
- [6] 日本建築学会：「建築物の減衰」, 日本建築学会(2000).

(原稿受付 2016/2/26, 受理 2016/6/9)

*池田義人,
職業能力開発総合大学校, 〒187-0035 東京都小平市小川西町
2-32-1 email:y-ikda@uitech.ac.jp
Yoshihito Ikeda, Polytechnic University of Japan, 2-32-1
Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035

*遠藤龍司, 工学博士
職業能力開発総合大学校, 〒187-0035 東京都小平市小川西町
2-32-1 email:endo@uitech.ac.jp
Ryuji Endo, Polytechnic University of Japan, 2-32-1
Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035