回転慣性質量を利用した TMD による上下動制振に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON VERTICAL VIBRATION CONTROL BY A TMD USING A ROTATING INERTIA MASS

半澤 徹也*, 磯田 和彦*
Tetsuya HANZAWA and Kazuhiko ISODA

A tuned mass damper (TMD) using a rotational inertia mass has been developed to reduce vertical vibrations of beams and slabs subjected to walking excitations and earthquake motions. The newly developed TMD is composed of a spring and a ball screw mechanism with a fly wheel. Vibration tests of a beam structure were carried out to show the effectiveness of the TMD using a rotational inertia mass and compare the test results with those of simulation analyses using a theoretical model.

Keywords : *Rotating inertia mass, Vertical vibration control, Beam vibration, Tuned mass damper*
回転慣性質量, 上下動制振, 梁振動, 同調質量減衰器

1. はじめに

大スパンを有する構造物では, 人間の歩行による振動で居住者が不快感を感じたり, 地震による積載物の飛び跳ね, 転倒落下といった問題が生じる場合がある。このような大スパン梁の上下振動を抑制するため, 梁に制振機構を付加する方法がある。制振機構としては, 主として下記の2つが適用されている。

①梁のたわみに伴って変形する部分に粘性減衰(粘弾性ダンパー)を付加する¹⁾

②たわみ振幅の大きい箇所に TMD (動吸振機構) を設置する²⁾

①の方法は振動数の依存性が少ない減衰特性を付加できるが, ダンパーの変形量が小さいために振動低減効果は概して小さい。一方, ②の方法は共振振動数近傍の振動を効果的に抑制できるが, TMD の精緻な同調作業が必要である。同調比に対するロバスト性を向上させるには, 質量比を大きくして適切な減衰定数を設定する必要があるが, 主構造への荷重負担が増加する問題がある。これに対して森田・石丸³⁾は, 梁中央部下側に補助質量を設け, 梁とトグル機構を介して接続した張弦梁構造 (TSS) を提案し, 振動理論と解析により比較的小さな補助質量で大きな制振効果が得られるとしている。

トグル機構以外の変位拡大機構としてはボールねじ機構がある。ボールねじ機構はコンパクトで変位の拡大率も大きく, これを利用

した慣性質量ダンパー (慣性接続要素) が研究されている。柴田, 奥村ら⁴⁾は, 特定振動数の振動を伝達しない「振動遮断装置」をこの慣性質量ダンパーと並列ばねで構成し, それを応用した免制震構造を提案している。また, 柳崎, 石丸⁵⁾は慣性質量ダンパーを免震装置と並列配置させた変位抑制型免震機構を開発している。一方, この慣性質量ダンパーと付加ばねを直列にして, 構造体ばねに並列に配置した場合は, TMD と同様に特定の振動数で振動を抑制する効果がある。齊藤ら^{6)~8)}は定点理論から1質点系の最適応答制御の条件を明らかにしている。松岡・砂子田⁹⁾はボールねじを用いた磁気ダンパーとばねを直列にした装置で変位伝達関数を求め最適条件を示している。また, 関根, 栗田¹⁰⁾はインパルス応答の二乗平均値平方根 (RMS) を用いて1質点系の最適設計法を提案している。

本論文は, ボールねじ機構を利用することで, 小さな錘の質量で大きな TMD 効果が得られることに着目して, 慣性質量ダンパーを梁の上下動制振に応用しようとしたものである。梁の上下振動は, 構造物の水平方向の振動に比べて卓越振動数が高く, 振幅が小さい。また, 実際のボールねじ機構には摩擦などの内部抵抗が避けられない。そのために本研究では, 実大のボールねじ機構を用いた振動実験を行い, 理論と照合するとともに摩擦などの内部抵抗をモデル化した。さらに, 実構造物の梁に制振機構を適用した場合の振動低減効果を時刻歴応答解析により検討した。なお, 提案する梁の上下制

* 清水建設株式会社 工務部

Research Assoc., Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.

振機構は、ボールねじ機構と減衰機構と付加ばねから構成されるが、本論文では、減衰機構を設けていない実大ボールねじ機構を対象として振動実験とモデル化を行っている。

2. ボールねじ機構と慣性質量効果

図1にナット回転型のボールねじ機構を示す。ボールナットは回転自在、軸方向変位を拘束とし、ボールねじは軸方向変位を自在、回転拘束としている。ボールねじとボールナットの間に鋼球が介在し、ボールねじの直動変位に対して、ボールナットに回転運動が生じる。摩擦等の抵抗がなければ、運動の変換に静的な抵抗は生じないが、ボールナットにはフライホイール（回転錘）が一体化されており、この回転角速度の変化によって、動的な慣性抵抗が生じる。

図1 ボールねじ機構

ボールねじの変位 x により、回転慣性モーメント I_θ をもつフライホイールを θ 回転させたときの慣性抵抗力 F とする。ボールねじのリード（ねじ山ピッチ） L_d 、フライホイールを円盤状として径 D 、質量 m とすると、 $x = \theta L_d / (2\pi)$ から次式が成立する。

$$F = \frac{I_\theta \ddot{\theta}}{L_d / (2\pi)} = \left(\frac{2\pi}{L_d} \right)^2 I_\theta \ddot{x} = \frac{\pi^2 D^2}{2L_d^2} m \ddot{x} = \psi \ddot{x} \quad \dots\dots\dots (1)$$

上式の ψ が直動方向の慣性質量であり、回転錘の質量 m の数百倍～数千倍の値に拡大される。上式より、この反力は直動方向の加速度（ボールねじとボールナットとの間の相対加速度） $\ddot{x}$ に比例することがわかる。この慣性質量を TMD 機構の錘として利用すれば、小さな回転錘でも大きな慣性質量効果が得られるため、梁への重量負荷を増さずに大きな制振効果が期待できる。

本論文で対象とする制振機構を図2に例示する。梁の中央部に付加ばねを介して慣性質量と減衰機構を設置し、下階の床から支柱で接続する形態と、梁の両端との間に下弦材による付加ばねを介して、慣性質量と減衰機構とを梁に接続する形態である。慣性質量および直列に配した付加ばねからなる付加振動系の固有振動数を、構造梁の固有振動数と同調させることにより、TMD 機構となる。なお、いずれの形態も力学的には図3のようにモデル化される。構造体に調和加振力 $F = f_0 e^{i\omega t}$ を受ける場合の振動方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} M\ddot{X} + C\dot{X} + KX + P &= f_0 e^{i\omega t} \\ P &= \psi \ddot{x}_d + c_d \dot{x}_d = k_d (X - x_d) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 X ：構造体変位（複素振幅表現）、 x_d ：ダンパー変位、 M ：構造体質量、 K ：構造体剛性、 C ：構造体粘性減衰係数、 ψ ：慣性質量、 c_d ：ダンパーの粘性減衰係数、 k_d ：付加ばね剛性である。この系の動的応答倍率は次式の絶対値 $|X/X_{st}|$ で表される。

図2 提案する制振機構の設置例

図3 制振機構を設置した構造体の力学モデル

図4 床板の応答倍率

図5 ダンパー変位と床板変位

$$\frac{X}{X_{st}} = \frac{1}{1 - \xi^2 + 2h\xi i + \frac{\eta^2(-\xi^2 + 2h_d\eta\xi i)}{\eta^2 - \xi^2 + 2h_d\eta\xi i} \mu} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $X_{st} = f_0 / K$ ：構造体の静的変位、 $\xi = \omega / \omega_0$ ：加振円振動数と構造体固有円振動数との比、 $\eta = \omega_d / \omega_0$ ：ダンパー系の固有円振動数と構造体固有円振動数との比、 $h = C / (2M\omega_0)$ ：構造体の減衰定数、 i ：虚数単位、 $h_d = c_d / (2\psi\omega_d)$ ：ダンパー系の減衰定数、 $\mu = \psi / M$ ：質量比、 $\omega_0 = \sqrt{K/M}$ ：構造体の固有円振動数、 $\omega_d = \sqrt{k_d/\psi}$ ：ダンパー系の固有円振動数である。また、ダンパー変位（複素振幅表現）は次式となる。

$$x_d = \frac{\eta^2}{\eta^2 - \xi^2 + 2h_d\eta\xi i} X \quad \dots\dots\dots (4)$$

計算例として、後述の実験加振装置の動的応答倍率（調和加振時の床板の静的変位に対する動的変位の比）を図4に、床とダンパーの変位を図5に示す（ $h = h_d = 0.0065$ ）。ボールねじ機構が無いと、床板は固有振動数（4.33Hz）で共振するが、ボールねじ機構を共振させることで2つのピークが生じる。そして、減衰機構により適切

図6 ボールねじ機構

写真1 ボールねじ機構

図7 加振装置

表1 諸元

床板剛性(N/m)	6.61×10 ⁵	
床板振動数(Hz)	4.33	
有効質量(kg)	893.1	
板ばね剛性(N/m)	7.62×10 ⁴	
フライホイール		
リード	慣性質量(kg)	寸法(mm)と実質量(kg)
リード5 (N05)	84.1	D=49,t=12,m=0.178
リード10 (N10)	84.1	D=69,t=12,m=0.355

な減衰定数を設定すれば、そのピーク高さを低くすることができる。また、ダンパーの変位は約3.5Hz～5.5Hzの範囲（共振域）で床板の変位よりも大きくなることわかる。

3. 実験内容

3.1 試験体

図6に支柱形態に適用した場合のボールねじ機構を示す。ボールねじが上下2カ所で軸受け（鉛直方向は自由）され、さらに板ばねに固定されたもので、板ばねの変位によりボールねじが上下方向に変位するとボールナットが回転する。ボールナットにはフライホイールが固定され、慣性質量効果が得られる。本研究の実験では、ボールねじのリードを5と10とした2体の試験体を用意した。

3.2 加振装置と加振方法

加振装置を図7に、ボールねじ機構の周囲を写真1に示す。幅5m、奥行き1.3m、厚さ25mmの銅板に、質量を付加するために1100×550×32mmの銅板2枚をボルトで固定し、両端を治具で固定したものを構造床板とした。その中央部直下に制振機構を設置して、その直上に設置した起振器により加振し、制振機構の有無による振動性状の違いを検討した。加振装置の諸元を表1に示す。床板および板ばねのばね剛性は実測値、床板の固有振動数は加振実験結果から得られた値である。床板の有効質量はばね剛性と固有振動数から求めた値である。フライホイールの慣性質量（計算値）は、床板の有効質量の9.4%であり、実際の質量の237倍（リード10の場合）

図8 床のみの加速度 Fourier 振幅

図9 床のみの自由振動

および472倍（リード5の場合）となっている。計測は、床板中央部および試験体板ばねの中央部の加速度および変位、起振器可動部の加速度、および試験体下端に設置したロードセルによる荷重値である。加振方法は、加速度一定 sweep 加振（1.5Hz～7.0Hz、掃引時間一方向8分）および正弦波加振（加速度、振動数一定加振、共振振動数付近で1振動数あたり2分程度）である。計測のサンプリング振動数は200Hzである。

図10 sweep 加振時床板加速度 (リード5)

図13 sweep 加振時床板加速度 (リード10)

図11 加速度のFourier 振幅
(リード5, 0.60G)

図12 ダンパーの荷重変位関係
(リード5, 0.60G)

図14 加速度のFourier 振幅
(リード10, 0.30G)

図15 ダンパーの荷重変位関係
(リード10, 0.30G)

4. 実験結果

4.1 試験体を設置していない床板のみの振動性状

図8に sweep 加振 (加振レベル0.05G, 加振力 $=0.05 \times 10.8\text{kg} \times 9.8\text{m/sec}^2 = 5.3\text{N}$, 10.8kg は可動部質量) 時の床板加速度波形の Fourier 振幅を, 図9に正弦波加振 (4.4Hz, 加振レベル0.1G) を急止させた時の自由振動波形を示す。Fourier 振幅のピーク値は4.33Hz となっている。固有振動数付近の自由振動波形の包絡線から, 減衰定数は0.65%と推定される。なお, Fourier 振幅は刻み時間0.005秒, データ数108800の原データを用いて, 文献11) のプログラム FAST による FFT 値に刻み時間を掛けた値とした (図11, 図14も同様)。

4.2 リード5

図10に sweep 加振時の床の加速度波形を示す。図4によれば床の固有振動数の左右にピークが発生するはずであるが, 入力レベルが小さいうちはそれらはみられない。入力レベルを上げて0.6G の場合になると, 2つのピークが顕在化している。その場合の Fourier 振幅を図11に示す。ピーク値は3.8Hzと5.3Hzに現れており, 図4とはほぼ一致している。0.6G レベルで正弦波加振を行い, 3.9Hzおよび5.1Hzにおける慣性質量ダンパーの荷重変形関係 (ボールナット変位とロードセルの荷重値) を図12に示す。式(2)から明らかなように, ダンパーの荷重は慣性力に応じたもので, データから最小自乗法により算出される一次直線の傾き (図中 a 値) は負勾配となっており, その大きさはほぼ振動数の二乗に比例している。また, 減衰機構を設けていないが荷重変形関係は閉ループを描いている。ダンパーの変位=0における切片荷重の平均はそれぞれ約0.0232

kN, 0.0237kN であった。

4.3 リード10

図13に sweep 加振時の床の加速度波形を示す。リード10では, 入力レベルが0.1G から2つのピークが生じ始め, 0.15G では顕在化している。入力レベルが0.3G の場合の Fourier 振幅を図14示す。ピーク値は3.85Hzと5.39Hzに現れている。0.3G レベルで正弦波加振を行い, 3.9Hzおよび5.3Hzのダンパーの荷重変形関係を図15に示す。リード5の場合と同様, データから最小自乗法により算出される一次直線の傾き (図中 a 値) はほぼ振動数の二乗に比例している。また, 減衰機構を設けていないが荷重変形関係は閉ループを描いており, ダンパーの変位=0における切片荷重の平均はそれぞれ約0.0109kN, 0.0111kN であった。

5. ボールねじ機構 (リード10) の内部抵抗

前節の実験結果では, リード5よりもリード10の方が小さな入力レベルから作動した。これは, リード10の方がボールねじの溝の勾配が大きいために, ボールと溝との間の摩擦や潤滑剤による抵抗が小さいためと考えられる。手動でも, リード10の方がリード5よりも遙かに軽く感じられた。そこで, 以下ではリード10を対象に解析との整合性について検討する。入力レベルが大きくなると2つのピークが現れないことや, ダンパーの荷重変形関係に閉ループが見られることから, 非線形の抵抗があるものと思われる。すなわち, 入力レベルに関わらず実験データを説明するには, 非線形減衰モデルが必要になる。この抵抗を鋼球と溝の間の摩擦や潤滑剤によるも

図 17 sweep 加振時床板加速度（リード 10、解析）

のと考え、図16のような摩擦ばねとダッシュポットをボールねじ機構に付加したモデルを仮定した。このうち p_0 はデジタル荷重計を用いて準静的にボールねじを押すことにより、概算値を得た。 k_0 、 c_0 は 0.05G、0.1G、0.15G、0.2G、0.3G の sweep 加振時の応答加速度および変位波形と正弦波加振共振時のダンパーの荷重変形関係が整合するようにパラメトリックスタディを行って求めた。その結果、リード10のボールねじ機構のモデルを表2のように設定した。

図16 ボールねじ機構モデル

表 2 ボールねじ機構モデルの諸元

k_0	1×10^3 (N/mm)
p_0	2.7 (N)
c_0	90 N/m/s

なお、解析は3節の周波数領域の解析ではなく、sweep 加振時の起振器可動部の加速度に可動部質量を乗じた値を加振力として、時刻歴応答解析で行った。慣性質量要素は節点間の相対加速度に対して慣性力を生じるようにモデル化される¹²⁾。

図17に床板の加速度波形を示す。解析波形は図13の実験波形をよく説明していることがわかる。図18に正弦波加振による床板の加速度と変位の最大値を示す。解析は0.1G、0.2G、0.3Gの入力レベルに対して0.05Hz ピッチで行っている。図19に3.9Hzの正弦波加振(0.1G、0.2G、0.3G)におけるダンパーの荷重変形関係の比較を示す。これらにおいても、解析は実験値をよく説明しているといえる。

荷重変形関係の推移から、入力レベルの増大に伴いループは扁平となり、ボールねじ機構の内部抵抗による減衰の影響が小さくなってゆくこと、それによって sweep 加振では2つのピークが顕在化し始め、3節の理論と整合するものと考えられる。

図20に正弦波加振(加振レベル0.1G、0.3G)を急止させた時の自由振動波形を示す。床のみの場合の図9と比較すると、いずれも振

図 18 正弦波加振時床中央の最大加速度・変位（リード 10）

図 19 正弦波（3.9Hz）加振時荷重変形関係（実験と解析）

動は急激に収束している。この減衰は振幅に依存しており、包絡線から減衰定数を概算すると、それぞれ約10%、3%程度となる。減衰が大きい TMD 機構では構造物の自由振動を短時間で収束し、「後揺れ」への効果が期待できると思われる。これは次節で検討する。

なお、表2の諸元は実験で用いた慣性質量に基づくものであり、より大きな慣性質量を用いる場合には別途検証が必要と考えられる。

図20 加振レベル0.1Gと0.3Gにおける自由振動

6. 実大梁に対するシミュレーション解析

6.1 歩行荷重に対する検討

本節では、前節の解析モデルを用いて、実際の梁・床を対象として歩行および地震動に対するシミュレーション解析を行い、付加制振機構の実用性に関する検討を行う。

構造体は床スラブ付きの梁を想定する。構造体と解析モデルを図21に示す。平成12年告示1459号によれば、建物の使用上の支障が生じないための条件は、長期荷重による撓み角が $1/250$ 以下である。図21の構造体は、静的撓み角が $1/910 < 1/250$ となっており、告示の規定を満足している。次に、外乱と諸元は以下のように設定する。

- ・床梁の断面2次モーメント： $I = 2 \times 274760 = 549530 \text{ cm}^4$ 。周期の変動を考慮したケースとして2/3倍、1.5倍も追加し、G0、G1、G2モデルと表す。
- ・構造質量：集中質点系では、有効質量は $0.6 \times 3.6 \times 16.5 \times 0.49 = 17.46 \text{ t}$ だが、解析モデルは梁を20分割して19質点系とする。各質点の質量は 1.782 t とする。固有値解析結果を表3に示す。
- ・外乱：文献13)の歩行荷重を、梁中央質点に加振力として与える。歩行荷重波形とFourier振幅を図22に示す。卓越振動数は 1.86 Hz であるが、実際の外乱の卓越振動数は一人歩行～一人小走りでは $1.6 \sim 3.3 \text{ Hz}$ と幅を持っている¹⁴⁾。そこで、刻み時間を伸縮し、卓越振動数が 1.86 Hz の他に、 2.03 Hz 、 1.66 Hz 、 2.49 Hz の4通りの荷重を与えた。これらは対象床梁(G0、G1、G2モデル)の固有振動数の約1/2倍となる。これらをF0、F1、F2、F3荷重と表す。
- ・構造減衰：実測による結果^{15)、16)}では、床梁の減衰定数は概ね1%～10%とかなりばらつきがあるが、ここでは一次固有振動数で1%の初期剛性比例型とする。
- ・慣性質量：質量比として、従来型TMD相当として 0.01 (0.17464 t)、本論の機構で無理なく実現できる値として 0.05 (0.8732 t)、 0.1 (1.7464 t)の3ケースを設定する。付加減衰、ばね剛性はこの質量比に対して後述の最適値を与えた。これらをD0、D1、D2ダンパーと表す。以上の解析パラメータの記号を表4にまとめる。
- ・ボールねじ機構の内部減衰（摩擦・減衰係数）は表2とする。
- ・制振機構において、制振効果を得るために必要な負荷減衰機構として、粘性減衰係数を与える。主架構(G0)と同調するための付加剛性と粘性減衰係数は、質量比に対して加速度応答倍率の2つのピークがほぼ等しくなるように、式(3)を用いて数値的に求め、設定した。制振機構の諸元を表5に示す。質量比が大きい場合の減衰係数は表2の減衰係数よりも遙かに大きく、ボールねじ機構の内部粘性減衰が解析結果に与える影響は小さいと考えられる。制振機構無しの床にF0およびF1荷重を入力した場合の加速度波形、制振機構ありの床にF1荷重を入力した場合の加速度波形を図

図21 スラブ付き梁と解析モデル

表3 固有値解析結果

振動数(Hz)	周期(s)	モード
4.07	0.246	鉛直1次
15.2	0.0657	鉛直2次
31.1	0.0321	鉛直3次

図22 歩行荷重の波形とFourier振幅

表4 解析パラメータ

梁 (固有振動数)	G0	標準 (4.07Hz)	
	G1	剛性 2/3 倍 (3.32Hz)	
	G2	剛性 1.5 倍 (4.98Hz)	
荷重 (卓越振動数)	F0	標準 (1.86Hz)	
	F1	2.03Hz	
	F2	1.66Hz	
	F3	2.49Hz	
質量比	D0	0.01	付加剛性、 減衰は表 5
	D1	0.05	
	D2	0.1	

表5 制振機構の諸元

	慣性質量 (t)	付加減衰係数* (N/m/s)	板ばね剛性 (N/mm)
D0	0.17464	558.4	116.8
D1	0.8732	6730.4	636.2
D2	1.7464	21496.0	1457.2

*ボールねじ機構の内部粘性減衰を含む

図23 床梁の加速度波形

23に示す。制振機構がない場合、F0荷重では最大加速度は 3.3cm/sec^2 となっているが（G0F0）、わずかに歩調を速めたF1荷重では 7.0cm/sec^2 となっている（G0F1）。制振機構を付けると最大加速度はそれぞれ 4.6 、 2.5 、 2.1cm/sec^2 となっている（G0D0F1、G0D1F1、G0D2F1）。これらの結果から、床は固有振動数の1/2の卓越振動数を持つ荷重波形に共振し振幅が大きくなること、ダンパーによって最大加速度が低減されること、低減効果は質量比が大きいものほど顕著であることがわかる。また、加振時間である10秒以後の応答の比較から、制振機構によって後揺れが低減されていると言える。

解析結果の一覧を表6および図24に示す。図では荷重の種類にかかわらず各梁・各制振機構の場合における最大加速度を示している。制振機構がない場合、梁の最大加速度は $7\sim 8\text{cm/sec}^2$ で、一般事務室の居住性としては大きな値を示している¹⁴⁾。質量比10%の制振機構を付加すると、床の固有振動数のばらつきや加振振動数のばらつきを考慮しても、 3cm/sec^2 程度となり、共振時の応答最大加速度は大幅に低減されていることがわかる。なお、制振機構がない場合のG2で、F3とともにF2の場合の応答が大きいのは、F3の卓越振動数が床の振動数の1/2倍、F2の卓越振動数が1/3倍になっており、ともに倍調波で共振していることに拠る。

6.2 上下地震動に対する検討

質量比0.1の制振機構を設置した梁の地震応答解析を行い、制振機構を持たない場合の応答と比較する。地震波は代表的な強震記録であるEl Centro、Taft、八戸、JMA神戸の上下動（原波）であり、

表6 実大梁の歩行解析最大加速度一覧（ cm/sec^2 ）

梁	梁のみ				D0			
	F0	F1	F2	F3	F0	F1	F2	F3
G0	3.3	7.0	3.8	4.6	3.2	4.6	3.6	4.4
G1	4.2	4.4	6.5	5.2	3.9	3.8	5.2	4.9
G2	5.4	3.3	8.1	7.4	5.2	3.3	6.8	6.4

梁	D1				D2			
	F0	F1	F2	F3	F0	F1	F2	F3
G0	2.4	2.5	2.8	3.3	2.2	2.1	2.5	2.8
G1	2.9	3.3	3.0	4.0	2.5	2.8	2.2	3.7
G2	3.7	2.3	3.5	3.1	3.3	2.6	2.3	2.1

図24 各梁の最大加速度値

図25 代表的な強震記録の上下動のFourier振幅

図21のモデルの両端に入力した。データの継続時間は八戸が30秒、それ以外は40秒で、解析はすべて40秒まで行った。また、梁は弾性としている。地震波の応答スペクトル（減衰1%）を図25に示す。図には各梁の固有振動数も示してある。

梁中央部の加速度波形の例（JMA神戸とEl Centroの原波、制振機構無しおよび有りの場合）と最大加速度の一覧をそれぞれ図26、図27および表7に示す。最大加速度は地震動および梁の種類によって異なり、JMA神戸が最も大きく、制振機構が無い場合には 2000cm/sec^2 程度となる。制振機構を設置した場合には 1100cm/sec^2 程度にまで低減している。一方、最も応答が小さいのはEl Centroの場合で、制振機構が無い場合には 400cm/sec^2 程度、制振機構を設置した場合には最大値で 380cm/sec^2 で、それほど最大値は低減していない。ただし、図27に示すとおり、これは局所的な値であり、制振機構により、応答波形は全般的に低減されている。

最大加速度応答の低減率を表8に示す。応答低減率は地震動と梁の固有振動数によってこととなるが、図25、表7から、応答が大きくなる場合、すなわち梁の固有振動数近傍の加速度応答スペクトルが卓越するような場合には、より顕著な応答低減を示している。JMA神戸およびEl Centroの応答波形を10秒区間ずつ用いて求めたFourier振幅を図28、図29に示す。制振機構が無い梁では、JMA神戸の場合には10秒以降、El Centroの場合には30秒以降から応答は収まってゆくが、その過程においても制振機構がある場合には、共振成分の応答低減により、応答をより小さなものになっていることがわかる。

図26 JMA 神戸（原波）と床応答（制振機構無しと有り）

図27 El Centro（原波）と床応答（制振機構無しと有り）

図28 JMA 神戸床応答の Fourier 振幅

図29 El Centro 床応答の Fourier 振幅

表7 実大梁の地震応答解析最大加速度一覧 (cm/sec²)

梁	梁のみ				D2			
	EL	TA	HA	KO	EL	TA	HA	KO
G0	400	700	1600	2330	380	250	330	1120
G1	440	560	860	1960	270	320	280	740
G2	550	530	480	2070	360	330	330	1130

表8 実大梁の地震応答解析の応答低減率

梁	D2			
	EL	TA	HA	KO
G0	0.95	0.36	0.21	0.48
G1	0.61	0.57	0.33	0.38
G2	0.65	0.62	0.69	0.55

7. 結論と今後の課題

本論では、回転慣性質量を利用して梁の上下振動の低減を図る機構を提案し、実大ボールねじ機構を用いた加振実験を行い、その実用性に関する検討を行った。本研究で得られた結論を以下に述べる。

- 1) ボールねじ機構を利用することで、実質量が小さい錘でも大きな TMD 効果が得られることを実験によって確認した。
- 2) 入力レベルが小さいと、ボールねじ機構の内部抵抗により、制振機構の共振が阻害される。
- 3) ボールねじ機構の内部抵抗を粘性減衰および摩擦によりモデル化し、実験結果をよく説明しうる解析モデルを構築した。
- 4) 実大梁へ適用した場合のシミュレーション解析により、本機構では従来 TMD に比べて非常に小さな実質量でも、質量比を大きく設定することができ、歩行共振時および地震時の応答加速度を大幅に低減し得ることがわかった。

なお、実験ではボールねじ機構のみを設置し、減衰機構を設けていない。減衰機構については今後の課題である。

参考文献

- 1) 小川, 沼野, 水本, 塩谷, 須賀川: 粘弾性体を用いた上下動制振装置の効果について—実建物での地震観測記録—, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造(1), pp.1013-1014, 1992.8
- 2) 高橋, 片山, 吉岡, 今沢: 床構造体の減衰性能に関する実験的研究(その2) 動制振器を適用した実構造体における振動実験, 日本建築学会構造系論文集第507号, pp.61-67, 1998.5
- 3) 森田, 石丸, 木田, 佐藤, 藤森: 変形増幅機構を有する TMD の開発研究 建築学会技術報告集第25号, pp.91-, 2007.6
- 4) 柴田, 袖山, 奥村ほか: 慣性接続要素を用いた免制震装置の開発(その1~その4), 日本建築学会大会梗概集構造 B-2, pp.731-738, 2006.9
- 5) 柳崎, 泰, 石丸, 古橋: DM 効果を利用した免震システムに関する基礎的研究(その1~その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集構造 B-2, pp.1041-1044, 2007.8
- 6) 斉藤, 栗田, 井上: 慣性接続要素を利用した線形粘性ダンパーによる一質点構造の最適応答制御と Kelvin モデル化手法に関する考察, 構造工学論文集 Vol. 53B, pp.53-66, 2007.3
- 7) 斉藤, 中津, 木田, 井上: 慣性接続要素と最適化された柔バネ要素と粘性要素を有する一層応答制御システムの振動実験, 構造工学論文集 Vol. 54B, pp.623-634, 2008.3
- 8) 斉藤, 井上: 慣性接続要素を利用した粘性ダンパーをもつ制振構造の最適応答制御に関する一考察, 日本建築学会技術報告集第13巻第26号, pp.457-462, 2007.12
- 9) 松岡, 大亦ほか: 抵抗力拡大機構を用いた磁気ダンパ弾性支持法に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, 72巻716号, pp.1056-1063, 2006.4
- 10) 関根, 栗田: 制振構造システムにおける慣性接続要素を用いた粘弾性ダンパーの最適設計に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造 B-2, pp.641-642, 2008.9
- 11) 大崎順彦: 地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 昭和60年2月
- 12) 古橋, 石丸: 慣性接続要素によるモード分離, 日本建築学会構造系論文集第576号, pp.55-62, 2004.2
- 13) 塩谷, 早川: 人の歩行による動的加重の時刻歴モデル(その1, その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集構造(1), pp.77-80, 1995.8
- 14) 日本建築学会: 居住性能に関する環境振動評価の現状と規準, pp.29, 2000.6
- 15) 内田, 桐原, 青柳, 川村: 床ばりの振動性状に関する研究(その1 実測結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.827-828, 昭和53年9月
- 16) 櫛田: 床の振動性状と最適環境を考慮した設計法に関する研究—床振動評価基準に関する考察, 日本建築学会計画系論文集第404号, pp.1-7, 1989.10

(2008年9月16日原稿受理, 2009年2月25日採用決定)