

塔状構造に装着したケーブル・マスダンパーの制震性能に関する実験的研究

Experimental study on a performance of seismic vibration control of a cable-mass damper mounted at the top of towering structures

片山拓朗*, 高野涼平**, 山尾敏孝***

Takuro KATAYAMA, Ryohei TAKANO, Toshitaka YAMAO

*正会員 博士(学術) 崇城大学教授 工学部環境建設工学科 (〒860-0082 熊本県熊本市池田 4-22-1)

**工修 西日本システム建設株式会社 施工本部アクセス部 (〒862-0976 熊本市九品寺 3-15-7)

***正会員 工博 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

This paper presents a cable-mass damper system for vibration control of towering structures during strong winds and earthquakes. A damped vibration system which is set up on the top of the structure consists of a kinetic mass, which has rollers and a sliding mass, and a pre-tension cable connecting the sliding mass to the base of the structure. Restoring force of the kinetic mass for the damper system is produced by the initial tension of the cable and damping force is yielded by rolling friction of the rollers in that system. The initial tension of the cable is tuned up so that the natural frequency of the damper corresponds with the first natural frequency of the structure. The effect of a cable-mass damper system on the seismic response of towering structures was investigated by vibration tests using the shaking table of Kumamoto University. From some experimental results, it was shown that the maximum seismic responses of the structure are reduced to approximately 30% by the proposed damper system whose mass ratio is 0.8%.

Key Words: vibration control, kinetic mass, pre-tension cable, towering structure, earthquake

1. はじめに

1985 年にメキシコの太平洋沿岸で発生したメキシコ地震 (M8.1) では、400km 以上離れたメキシコ市において、地震波の卓越振動数と近接した固有振動数を持つ多くの高層建築物が倒壊した¹⁾。また、2003 年に北海道襟裳岬の東方沖で発生した十勝沖地震 (M8.0) では、200km 以上離れた苫小牧市において地震波の卓越振動数と近接したスロッシング振動数を持つ石油タンクに多数の被害が生じた²⁾。これらは建築物の振動モードや石油タンクのスロッシングモードが地震動と共振し、想定外の大振幅振動により破壊が生じたものと考えられる。

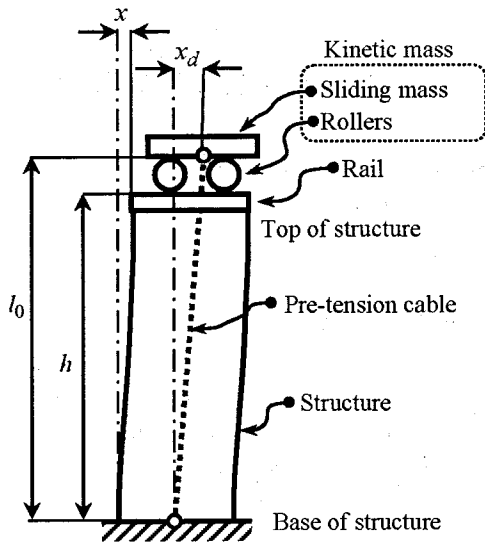
構造物の固有振動数を想定される地震波の主要なスペクトルから外すことができれば、地震動と構造物の共振が避けられる。ただし、多くの構造物の固有振動数の実績は想定される地震波のスペクトルの範囲内にある。また、塔状構造物と超高層ビルでは固有周期の長周期化により地震力の低減が図られてきたが、2003 年の十勝沖地震のようなやや長周期の地震動が現実的な脅威となっている。

塔状構造物の地震時共振対策すなわち制震対策としては TMD と TLD などの減衰振動系を付加する方法、AMD

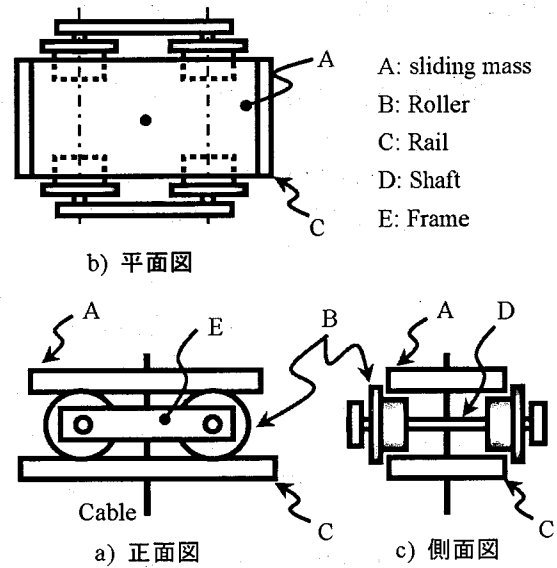
のようにアクチュエータで発生させた質量の慣性力を減衰力とする方法およびオイルダンパー等の減衰部材を構造物に組み込む方法が実用化されている³⁾。しかし、TMD は制震性能を確保するためには質量が大きくなる、AMD では地震時におけるエネルギー源の信頼性、減衰部材の方法では部材数が多くなるなどの問題がある。

ところで、筆者らは塔状構造物における大振幅の風振動の制振対策として運動体とケーブルからなるケーブル・マスダンパーシステムを提案し、その制振効果を模型実験により確認した⁴⁾。このダンパーシステムは構造物の上部にコロとスライディングマスからなる運動体を設置し、スライディングマスと構造物基部をケーブルで連結したものである。運動体の復元力にはケーブルの初期張力を利用し、減衰力にはコロの転がり摩擦を利用する。また、ケーブルの初期張力はダンパーの固有振動数を構造物の固有振動数に一致するように調整される。

本論文では、文献 4) のケーブル・マスダンパーシステムを地震時の吊橋主塔、橋脚、煙突などの塔状構造物の制震法として提案し、構造物模型とダンパー模型および導電式振動発生機を用いた模型振動実験により明らかにした提案のダンパーシステムの制震効果を報告する。



図—1 ダンパーシステムの基本配置



図—2 運動体の基本構造図

2. ダンパーシステムの構成と固有振動数

2.1 システムの配置と運動体の基本構造

図—1 は塔状構造物における提案のケーブル・マスダンパーシステムの基本配置である。コロとスライディングマス（以後マスと略す）からなる運動体を、構造物上部のレールに乗せ、マスと構造物基部を初期張力が導入されたケーブルで連結する。運動体の復元力には主にケーブルの初期張力を利用し、減衰力には主にコロの転がり摩擦を利用する。ここで、構造物の高さを h 、静止時のケーブルの長さを l_0 、振動時の構造物上部とマスの変位をそれぞれ x 、 x_d とする。

図—2 は運動体の基本構造図である。コロはレールからの脱線を防ぐフランジを持つ。コロの総数は4個で、2本のシャフトと2個の軸受け付フレームで一体化し、滑らかに回転するものとする。以後はこの4個の一体化されたコロを単にコロと呼ぶ。運動体はこのコロと矩形板のスライディングマスで構成する。

2.2 ケーブル張力と運動体の復元力

図—3 に静止時と自由振動時のマスに作用するケーブル張力を定義する。レールは水平で動かないものとする。静止時のケーブル張力すなわち初期張力を P_0 とし、自由振動時の張力を $P(x_d)$ とする。張力 $P(x_d)$ の水平分力 $H(x_d)$ と鉛直分力 $V(x_d)$ はそれぞれ、

$$H(x_d) = s x_d + \left(\frac{P_0}{l_0} - s \right) x_d \left\{ 1 + \left(\frac{x_d}{l_0} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$V(x_d) = s l_0 + (P_0 - s l_0) \left\{ 1 + \left(\frac{x_d}{l_0} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

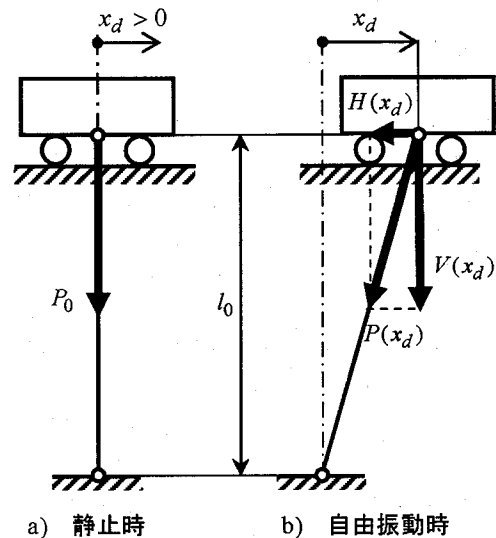
と表される。ここに、 s はケーブルの軸方向バネ定数とする。ケーブルの弾性係数と断面積をそれぞれ E 、 a とすると、 $s = Ea/l_0$ である。

ここで $|x_d/l_0| \ll 1$ と仮定すると、 $H(x_d)$ と $V(x_d)$ は次の様に近似できる。ここに、 k_0 はバネ定数とする。

$$H(x_d) \approx k_0 x_d \quad (3)$$

$$V(x_d) \approx P_0 \quad (4)$$

$$k_0 \equiv \frac{P_0}{l_0} \quad (5)$$



図—3 ケーブル張力と分力の定義

2.3 ダンパー単体の固有振動数

運動体の復元力を(3)式で表すと、ダンパー単体の水平方向振動モデルは1個のスライディングマス、1個のコロおよび1個の弾性バネで表すことができる。その振動モデルの模式図を図—4 に示す。ここに、マスの質量を m_s 、コロの質量を m_r 、コロの極慣性モーメントを j_r 、

コロの直径を d_r とする。

図—5 はコロに働く摩擦力と転がり摩擦による抵抗モーメントを図示したものである。ここではコロに働く鉛直力は省略する。コロとレールの接点に働く摩擦力を Q_t 、コロとマスの接点に働く摩擦力を Q_s とする。また、コロの転がり抵抗モーメントを M_r とする。 M_r はコロの回転方向と逆向きに作用するものとする。

ここで、マスが変位 x_d を生じたときのコロの水平変位と回転角および転がり距離をそれぞれ x_r, θ, φ とする。水平変位と回転角は静止時のマスとコロおよびコロとレールの接点を通る直線 O—O を基準として計る。回転角 θ は時計回りを正とする。

図—5 よりマスの運動方程式は次式となる。

$$m_s \ddot{x}_d + k_0 x_d + Q_s = 0 \quad (6)$$

また、コロの運動方程式は水平方向と回転方向に対してそれぞれ次式となる。

$$m_r \ddot{x}_r + Q_t - Q_s = 0 \quad (7)$$

$$j_r \ddot{\theta} - (Q_t + Q_s) \frac{d_r}{2} + \text{sgn}(\dot{\theta}) M_r = 0 \quad (8)$$

ここで、コロの回転角と転がり距離には $\varphi = \theta d_r / 2$ の関係があり、マスとコロの水平変位には $x_d = 2x_r = 2\varphi$ の関係があるので、次式が成り立つ。

$$x_r = \frac{x_d}{2}, \quad \dot{x}_r = \frac{\dot{x}_d}{2}, \quad \ddot{x}_r = \frac{\ddot{x}_d}{2} \quad (9)$$

$$\theta = \frac{x_d}{d_r}, \quad \dot{\theta} = \frac{\dot{x}_d}{d_r}, \quad \ddot{\theta} = \frac{\ddot{x}_d}{d_r} \quad (10)$$

ここに、 $\dot{x}_d, \dot{x}_r, \dot{\theta}$ は速度を、 $\ddot{x}_d, \ddot{x}_r, \ddot{\theta}$ は加速度を表す。(9)式を(7)式に、(10)式を(8)式に代入し、さらに Q_t と Q_s について解くと次式を得る。

$$Q_t = \left(\frac{j_r}{d_r^2} - \frac{m_r}{4} \right) \ddot{x}_d + \text{sgn}(\dot{x}_d) F_r \quad (11)$$

$$Q_s = \left(\frac{m_r}{4} + \frac{j_r}{d_r^2} \right) \ddot{x}_d + \text{sgn}(\dot{x}_d) F_r \quad (12)$$

ここに、 F_r は転がり摩擦力として、次式とする。

$$F_r = \frac{M_r}{d_r} \quad (13)$$

さらに、(12)式を(6)式に代入すると、次の運動方程式を得る。

$$m_d \ddot{x}_d + k_0 \ddot{x}_d = -\text{sgn}(\dot{x}_d) F_r \quad (14)$$

ここに、 m_d は次式の運動体の有効質量とする。

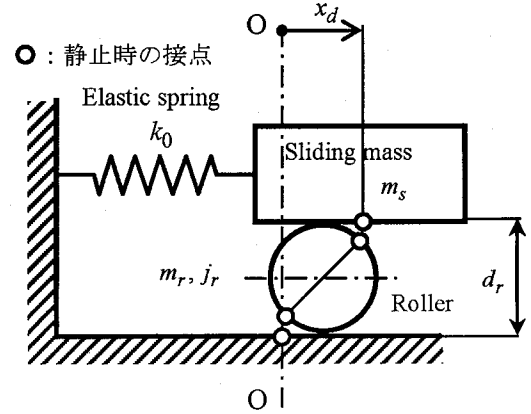
$$m_d = m_s + \frac{m_r}{4} + \frac{j_r}{d_r^2} \quad (15)$$

(14)式において、転がり摩擦力 F_r を無視すると、次の非減衰系の初期固有振動数 f_{d0} の算定式を得る。

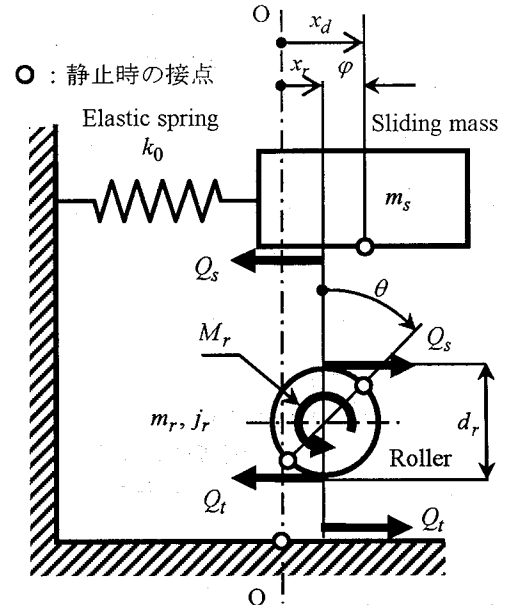
$$f_{d0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_0}{m_d}} \quad (16)$$

なお、(4)式が成り立つ範囲ではコロに作用する鉛直力は一定となるので、実験などによりスライディングマスの見かけの動転がり摩擦係数 μ_d を求めることができれば、転がり摩擦力 F_r は次式で評価できる。

$$F_r \approx \mu_d (m_s g + P_0) \quad (17)$$



図—4 ダンパー単体の振動モデル



図—5 コロとマスに働く力の定義

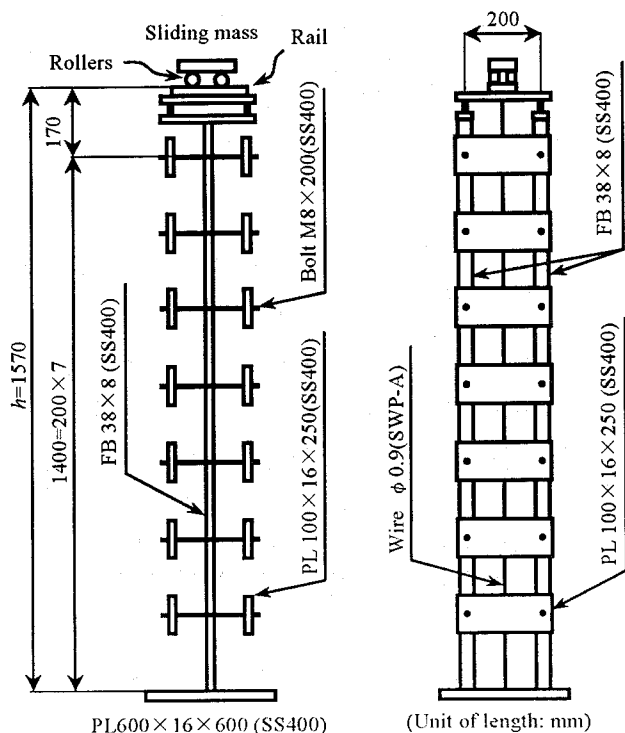
3. 模型振動実験

3.1 構造物模型の振動特性

(1) 構造物模型の諸元

提案のダンパースステムの制震効果を確認するために、構造物模型とダンパー模型および熊本大学の導電式振動発生機（以後振動台と略す）を用いて模型振動実験を行った。模型振動実験の対象とする実構造物の特性は、S 造建築物の実績を参考にして⁵⁾、高さが 50m、1 次固有振動数が 1.0Hz、1 次減衰定数が 2.0% と仮定した。

構造物模型の構造形式は鋼製片持ちはりとし、高さを 1.57m、総質量を 60kg とした。構造物模型の概略設計図



図—6 構造物模型の概略設計図

を図—6に、模型の外観を写真—1に示す。模型の主はりには2本のみがき平角鋼38×8(SS400)を用いた。

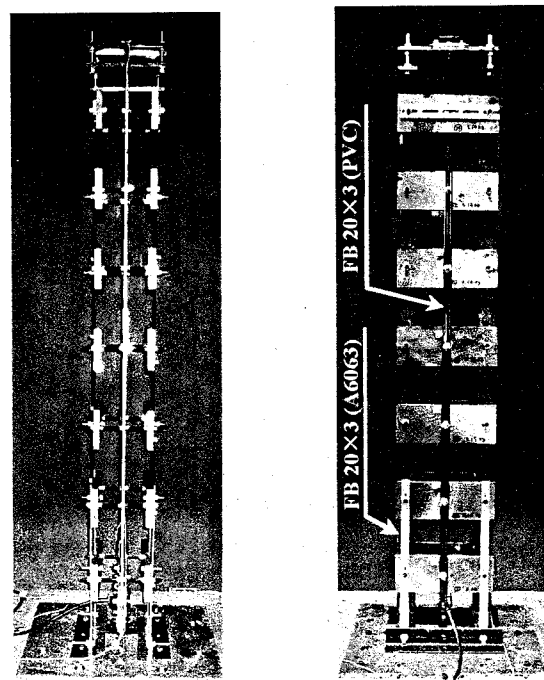
固有振動数の調整は写真—1に示す基部の4本のアルミ平角棒20×3(A6063)で行い、減衰定数の調整は模型側面に取り付けた2本のポリ塩化ビニール平角棒20×3(PVC)と模型本体の摩擦で行った。ビニール平角棒の下端はベースプレートに固定し、棒と模型の連結箇所 bolts 締付力により摩擦力を調整した。これらは設計図に示していない。なお、実験に用いる地震波のスペクトル特性が変化するため、時間の縮尺は行わなかった。

(2) 構造物模型の振動特性

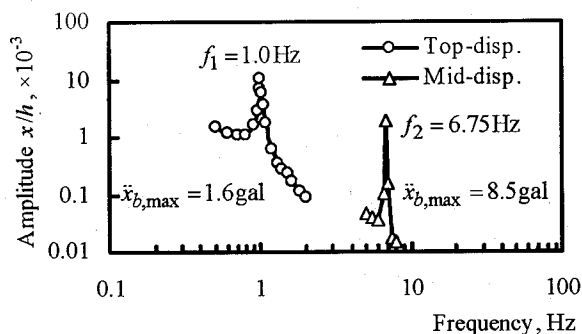
振動台を用いた模型基部の正弦波加震により得られた模型の変位共振曲線を図—7に示す。振動台の加震加速度は、加震振動数0.5~2.0Hzにおいて $\ddot{x}_{b,max} = 1.6\text{gal}$ 、加震振動数5.0~8Hzにおいて $\ddot{x}_{b,max} = 8.5\text{gal}$ とした。共振曲線のピークより、構造物模型の1次固有振動数が $f_1 = 1.0\text{Hz}$ 、2次固有振動数が $f_2 = 6.75\text{Hz}$ であることが確認された。1次の振幅は模型最上部の変位で、2次の振幅は模型中間部の変位である。変位はレーザー変位計で計測した。なお、図中の x/h は無次元変位である。

図—8は共振時の変位記録より推定した振動モードの大きな形状である。1次と2次ともに片持ちはりの典型的な振動モードを示した。この1次振動モードを提案のダンパーシステムの制震対象とする。

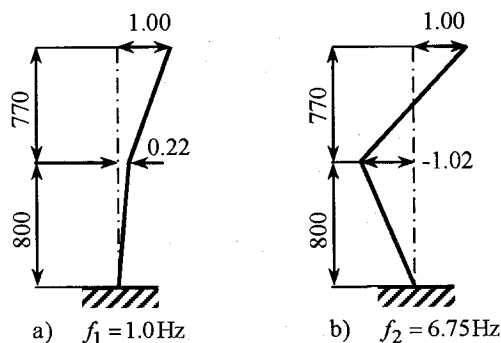
図—9は、1次共振後の自由振動において観測した変位波形においてピークから次のピークまでの1波形毎に固有振動数と減衰定数を計算し、それらと平均振幅の関係



写真—1 構造物模型の外観



図—7 構造物模型の変位共振曲線



図—8 構造物模型・振動モードの形状

を比較したものである。平均振幅とは1波形の最初のピーク変位と終わりのピーク変位の平均である。図中の振幅は平均振幅を構造物の高さで除した無次元平均振幅である。固有振動数は振幅に関わらず一定であり、構造物模型は弾性振動体と考えられる。減衰定数は振幅が0.004より小さいところでは2%を超えるが、振幅が0.004を超えところでは概ね2%である。振幅が小さいところでは

減衰が大きくなる特徴は、前項で説明したように、摩擦を用いて減衰の大きさを調整するところに原因があると考えられる。ただし、本論文で問題とする地震動による振動は無次元振幅が $4/1000$ を超えるような大振幅振動を想定しており、図-9 の減衰の特徴は提案のダンパーシステムの有効性を検証する上で支障とはならないと考えられる。

なお、2 次振動モードの固有振動数と減衰定数も 1 次振動モードと同様の特徴を示した。減衰定数の大きさは概ね 2% 以上であった。

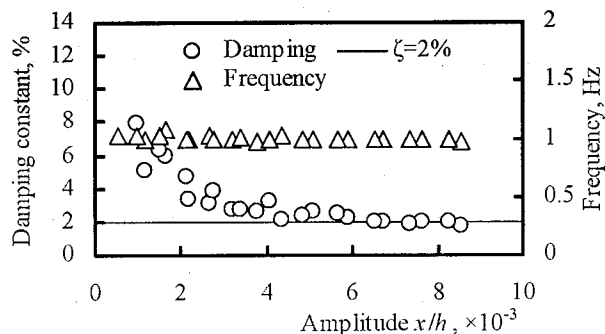


図-9 1 次振動モードの固有振動数と減衰定数

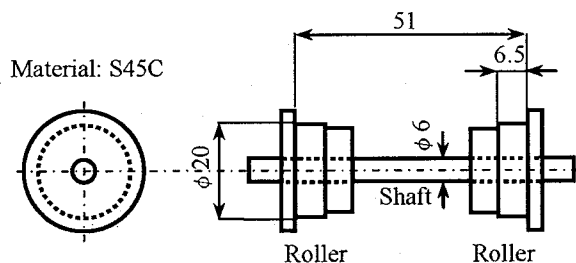


図-10 フランジ付きコロとシャフトの形状

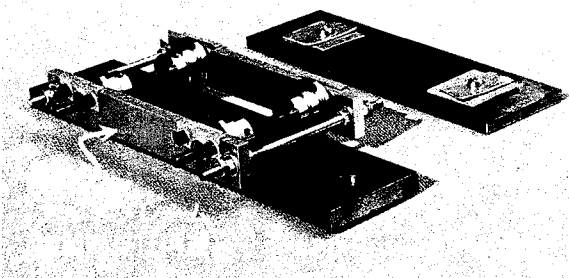


写真-2 運動体の外観

3.2 ダンパー模型の振動特性

(1) ダンパー模型の諸元

図-10 にフランジ付きコロとシャフトの形状を示す。コロの間隔は図中の 51mm として、コロをシャフトに固定する。コロの外径は $d_r = 20\text{mm}$ 、コロとシャフトの材質は S45C とした。フランジの役割はレールとマスから

のコロの脱輪防止である。

写真-2 はマスを取り外した状態の運動体の外観である。図-10 で示したシャフトと一体になったコロはアルミフレームで固定されている。写真では分からないがアルミフレームに内蔵された鋼製軸受けにシャフトが固定されているため、コロは滑らかに回転できる。前後のシャフトの間隔は 80mm である。フランジ付きコロとシャフトとフレームからなるコロの合計質量は $m_r = 296\text{g}$ である。

マスはみがき平角鋼 $50 \times 6 \times 160\text{mm}$ (S45C) とし、調整用質量を取り付けて、マスの質量が $m_s = 426\text{g}$ となるように調整した。マス側のケーブル固定金具の質量とケーブルの質量の半分はマスの質量に含めた。(15)式のコロの回転慣性の項は十分小さく、換算質量はマスとコロの質量で計算すると、 $m_d = 500\text{g}$ となる。

レールはみがき平角鋼 $50 \times 9 \times 200\text{mm}$ (S45C) とした。ケーブルはピアノ線 $\phi 0.9\text{mm}$ (SWP-A) とした。ケーブル張力の調整はターンバックルの回転量で行い、ケーブル張力は構造物基部に配置したロードセルで計測した。

(2) ダンパー模型の復元力特性と転がり摩擦

図-11 は実験で測定したケーブルの軸方向ばね定数 s と初期調力 P_0 の関係である。構造物模型にダンパー模型を取り付け、構造物模型の上部を固定し、ターンバックルを回転させて、ケーブル張力を測定した。その結果を s と P_0 の関係としてまとめたものである。軸方向ばね定数の理論値 $s = Ea/l_0 = 81.0\text{N/mm}$ は、 $E = 2.0 \times 10^5\text{N/mm}^2$ 、 $a = 0.636\text{mm}^2$ 、 $l_0 = 1570\text{mm}$ として計算したものである。初期張力が 70~100N の範囲では実験値と理論値はよく一致しているが、70N 未満では実験値は理論値を下回る。これはケーブル取り付け部のケーブルのたるみ等により軸方向ばね定数に非線形性が表れたものと考えられる。(16)式と(5)式によれば、有効質量を $m_d = 500\text{g}$ とすると、ダンパーの初期固有振動数を構造物模型と同じ 1.0Hz にするための初期張力は $P_0 = 31.0\text{N}$ となる。

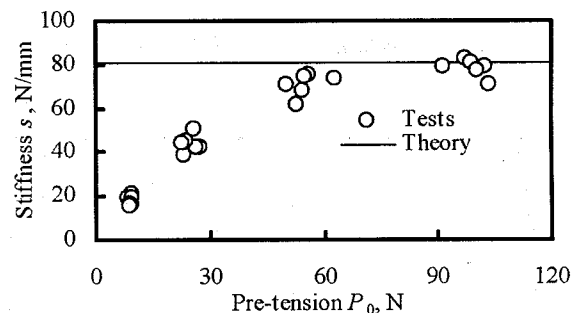


図-11 ケーブルの軸方向ばね定数

図-12 は実験により得られた(3)式の復元力と水平変位の関係の一例である。構造物模型にダンパー模型を取り付け、構造物模型の上部を固定し、マスに水平力を作

用させた。水平力と変位はそれぞれ微小荷重用ロードセルとレーザー変位計で計測した。ケーブルの初期張力は $P_0 = 28\text{N}$ 、ケーブル長は $l_0 = 1570\text{mm}$ である。

図-12 より、実験値は(1)式の理論式と良く一致するが、(3)式の近似式は無次元振幅 $\pm 1/100$ 以上では差が大きいことが分かる。よって、無次元振幅が $\pm 1/100$ を超える範囲では(3)式が成り立たないので、注意が必要である。

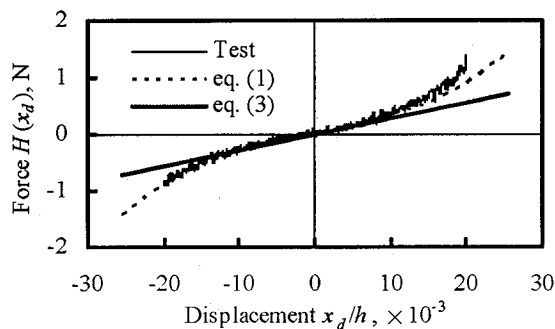


図-12 ダンパーの復元力と水平変位

図-13 と図-14 は傾斜法で求めた運動体の静止転がり摩擦係数 μ_s と動転がり摩擦係数 μ_d の頻度分布である。ケーブルの初期張力 P_0 は等価な重りによる力に置き換え、 $m_s g + P_0 = 30\text{N}$ とした。 μ_s の実験値は $1.0 \times 10^{-3} \sim 1.6 \times 10^{-3}$ に分布し、それらの平均値は $\bar{\mu}_s = 1.33 \times 10^{-3}$ であった。 μ_d の実験値は $0.4 \times 10^{-3} \sim 0.5 \times 10^{-3}$ に分布し、それらの平均値は $\bar{\mu}_d = 0.44 \times 10^{-3}$ であった。

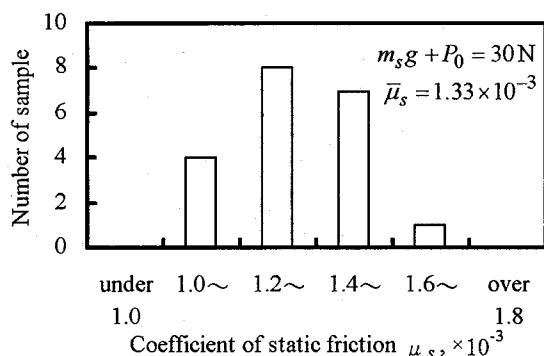


図-13 静止転がり摩擦係数の頻度分布

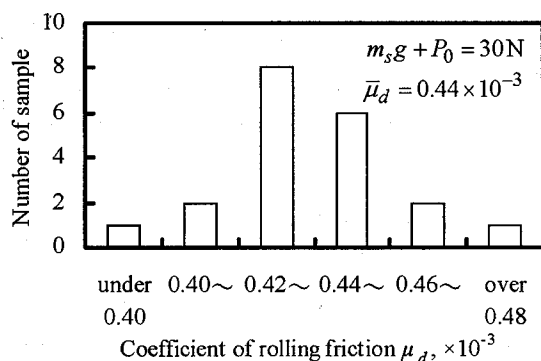


図-14 動転がり摩擦係数の頻度分布

(3) 振動特性

図-15 は運動体に強制変位を与え、その後の自由振動における変位応答とケーブル張力応答の一例である。この自由振動における1波形毎の固有振動数と減衰定数および平均振幅の関係を図-16 に示す。固有振動数には、振幅の増分と振動数の増分が比例する傾向が見られる。図中には最小二乗法によって得られた直線回帰式を示している。張力を変化させた場合でも同様な傾向を示した。これより、模型実験で用いたダンパーの固有振動数は次の実験式で近似できると考えられる。 α は係数である。

$$f(x_d/h) \approx f_{d0} + \alpha \frac{x_d}{h} \quad (18)$$

f_{d0} は(16)式の初期固有振動数である。紙面の都合上、(18)式の是非については別の機会に報告を行うものとし、実験で得られた(18)式の一次式の切片 f_{d0} と(16)式の比較を図-17 に示す。図-17 より実験値と(16)式は良く一致しており、(16)式によりダンパーの初期固有振動数の推定が可能と考えられる。

さて、図-16 では振幅が小さいと減衰定数が急激に大きくなり、振幅が大きくなると緩やかに減衰定数が小さくなる様子が分かる。図中には、次式で示す運動体の動転がり摩擦より求めた等価減衰定数 ζ_e を示している。

$$\zeta_e = \frac{F_r}{2\pi^3 m_d f x_d / h} \quad (19)$$

ここに、転がり摩擦力は、 $\bar{\mu}_d = 0.44 \times 10^{-3}$ 、 $m_d = 0.426\text{kg}$ 、 $P_0 = 28\text{N}$ を(17)式に代入し、 $F_r \approx 0.0142\text{N}$ とした。

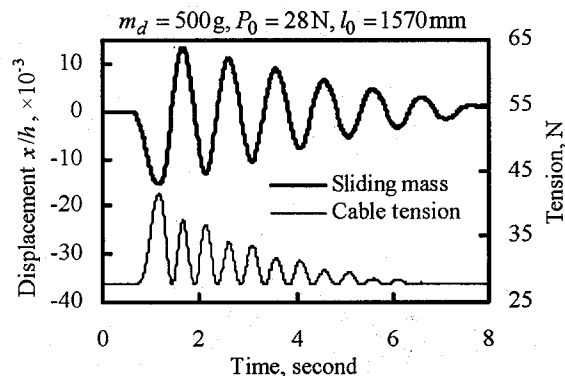


図-15 ダンパー単体の自由振動の一例

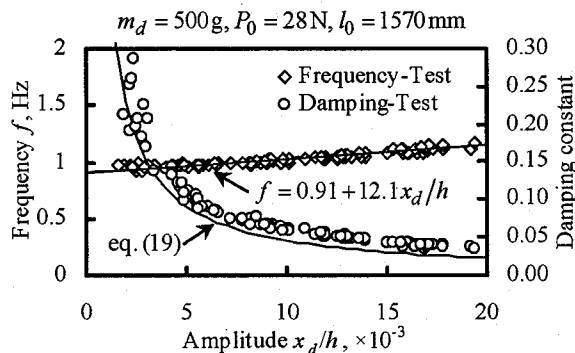
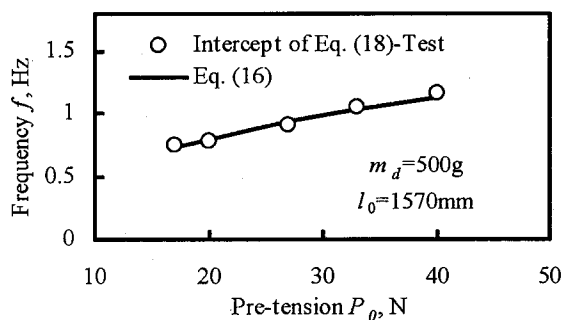


図-16 ダンパーの固有振動数と減衰定数



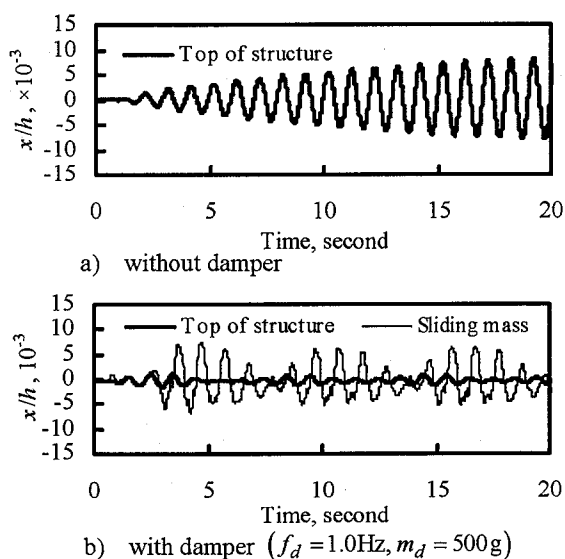
図—17 ダンパーの固有振動数 f_{d0} の比較

図—16 で示すように、実験で得られた減衰定数は (19) 式より大きい、振幅と減衰定数の関係は概ね一致している。これより (19) 式を用いて転がり摩擦に起因するダンパーの減衰定数の推定が可能と考えられる。

また、ダンパーの固有振動数は振幅に依存するため、本実験では、振幅範囲 $5 \times 10^{-3} \leq |x_d/h| \leq 15 \times 10^{-3}$ における波形毎の振動数の平均値を平均固有振動数 f_d として、これを構造物の固有振動数と一致させるものとした。

3.3 正弦波加震に対する制震効果

図—18 は、ダンパーを付けない場合とダンパーを付ける場合の構造物模型上部の変位応答について、正弦波加震開始直後の過渡振動を比較した一例である。図—19 は同じく正弦波加震時の定常振動を比較したものである。ダンパーを付ける場合はスライディングマスの変位応答も示している。加震振動数と加震加速度はそれぞれ 1.0Hz と 1.6gal である。ダンパーを付けない場合は徐々に振動が大きくなり定常振動に至る過程が確認され、ダンパーを付ける場合は加震直後からダンパーが効き始め、構造物の振動を小さくする過程が確認される。ダンパーを付けた定常振動ではスライディングマスと構造物の変位応答の位相のずれが約 90° であることが確認される。



図—18 正弦波加震直後の過渡振動の比較

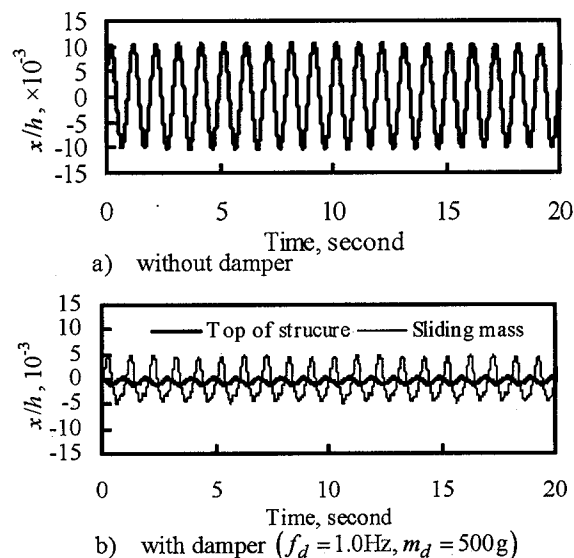
図—20 は、ダンパーを付けない場合とダンパーを付ける場合の正弦波加震による構造物上部の変位共振曲線を比較したものである。ダンパーの平均固有振動数 f_d は 0.8Hz と 1.0Hz および 1.2Hz の 3 ケースとした。加震最大加速度は 1.6gal である。 $f_d = 0.8\text{Hz}$ の場合は、0.7Hz と 1.125Hz 付近に共振点が確認され、構造物の最大振幅は約 0.0032 となり、その時のスライディングマスの振幅は約 0.0112 であった。また、 $f_d = 1.0\text{Hz}$ の場合は、0.8Hz と 1.2Hz 付近に共振点が確認され、構造物の最大振幅は 0.0020 となり、その時のスライディングマスの振幅は約 0.0096 であった。さらに、 $f_d = 1.2\text{Hz}$ の場合は、0.9Hz 付近に共振点が確認され、構造物の最大振幅は 0.0064 となり、その時のスライディングマスの振幅は約 0.0253 であった。これらの結果より、正弦波加震においては、ダンパーの平均固有振動数を構造物の 1 次モードの固有振動数に合わせると制震効果が高くなると考えられる。

図—21 は、図—20 の正弦波加震・定常振動時における構造物模型上部に対するスライディングマスの変位の位相遅れを比較したものである。ダンパーの固有振動数に関わらず、ダンパーを付けた構造物の共振点では約 160° または約 $10 \sim 20^\circ$ の遅れが生じていることが確認された。

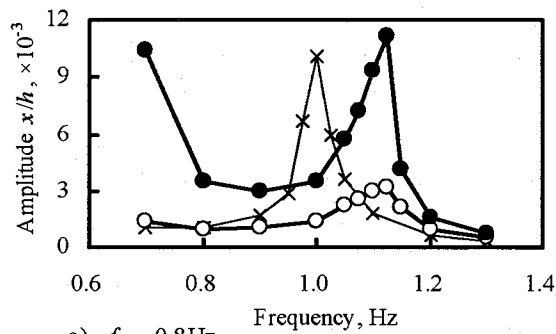
3.4 地震波に対する制震効果

(1) 入力波の特性

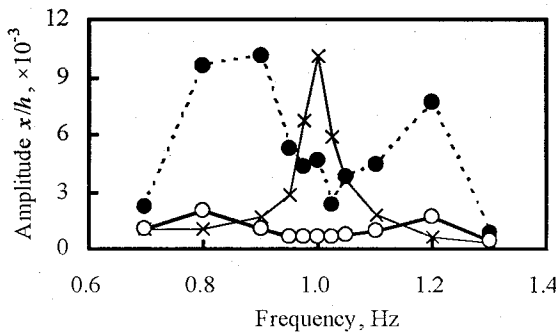
提案ダンパーの制震効果を確認するため、構造物模型の 1 次固有振動数 1.0Hz 付近に卓越振動数 1.05Hz を持つ宮城県沖地震 (1978 年, M7.4) の加速度記録 (最大加速度 258gal, NS 成分) を入力波とした。入力波のフーリエスペクトルと加速度記録を図—22 と図—23 に示す。フーリエスペクトルは宮城県沖地震の加速度記録から求めたもので、図—23 の加速度記録は実験時の振動台の測定記録である。



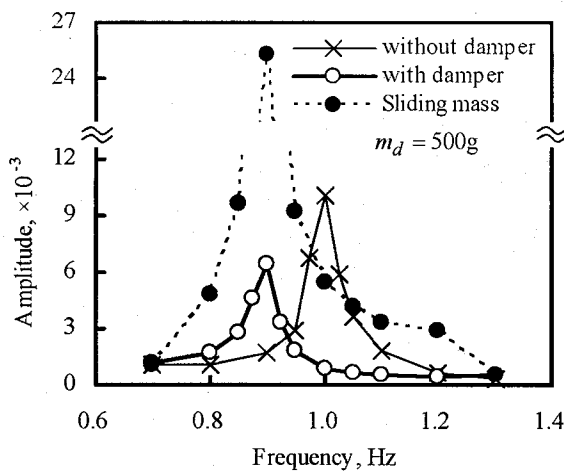
図—19 正弦波加震時の定常振動の比較



a) $f_d = 0.8\text{Hz}$



b) $f_d = 1.0\text{Hz}$



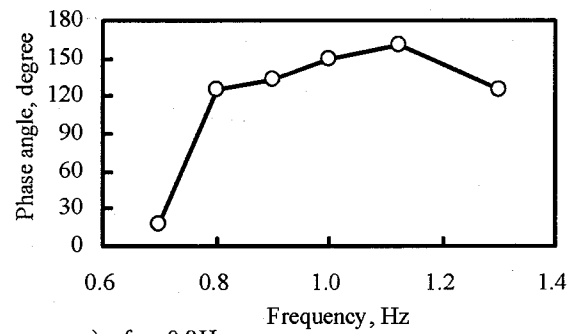
c) $f_d = 1.2\text{Hz}$

図—20 正弦波加震による変位共振曲線の比較

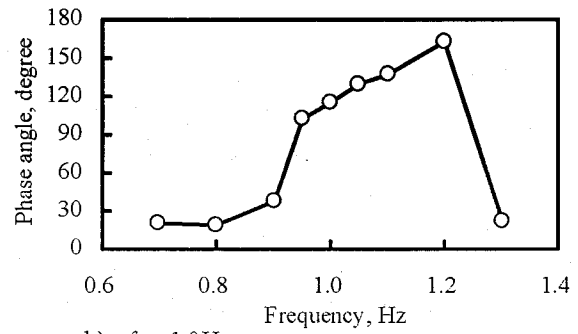
(2) 地震時応答の一例

図—24 にダンパーを付けない場合の構造物模型の変位応答と加速度応答の一例を示す。入力波の最大加速度は 10gal に規格化している。構造物模型の縮尺が約 $1/30$ であるため、実物では最大加速度 300gal の中規模の地震に相当する。図—24 より変位と加速度共に 1 秒前後の周期的な波形が連続しており、 1 次振動モードの振動が主成分であることが分かる。なお、応答波形のスペクトル特性については後述する。模型上部の無次元変位応答の最大値は 0.0094 であり、最大加速度は 88.6gal で入力最大加速度の約 9 倍であった。

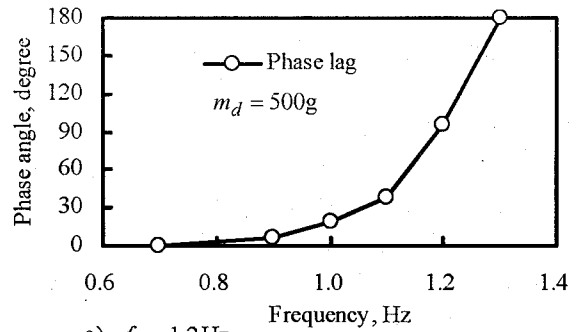
図—25 はダンパーを付けた場合の変位応答と加速度応答の一例である。ダンパーの有効質量は $m_d = 500\text{g}$ 、平均固有振動数は $f_d = 1.0\text{Hz}$ である。加速度応答は全体的に小さくなり、最大加速度は 32gal で入力最大加速度



a) $f_d = 0.8\text{Hz}$



b) $f_d = 1.0\text{Hz}$



c) $f_d = 1.2\text{Hz}$

図—21 正弦波加震時の運動体変位の位相遅れ

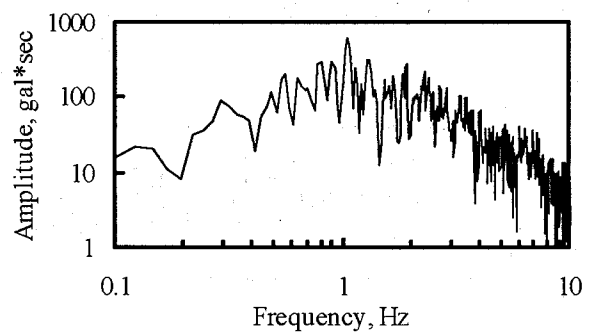
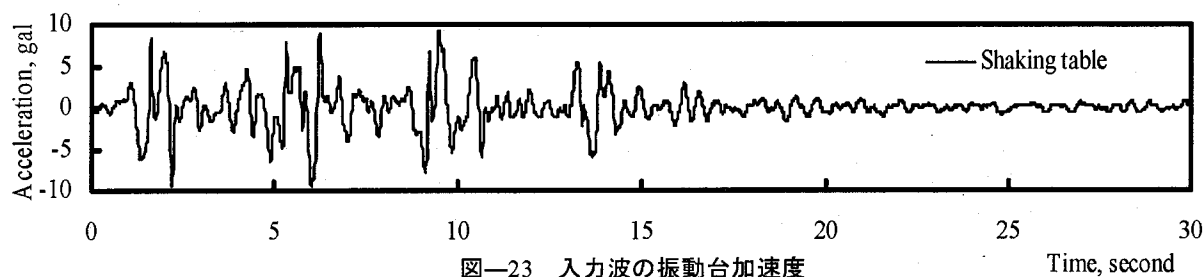
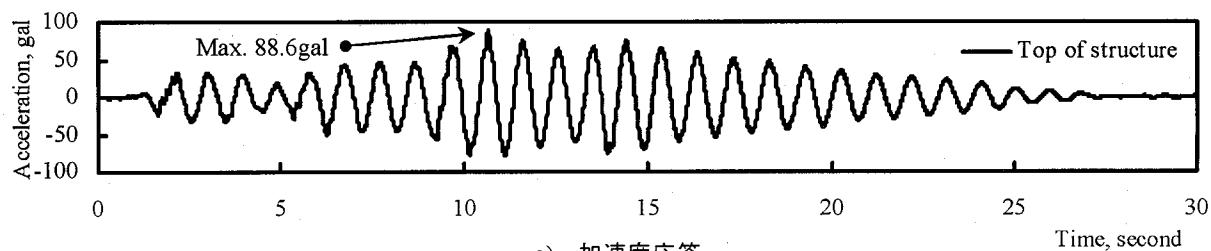


図 22 入力波の加速度・フーリエスペクトル

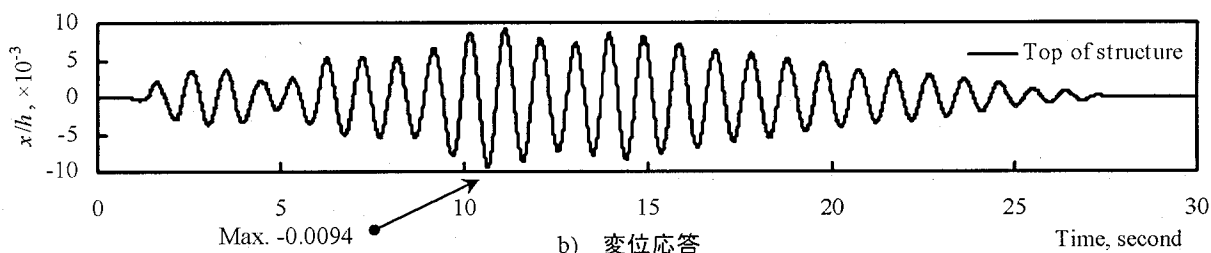
の約 3 倍であった。また、変位応答も全体的に小さくなり、最大変位は 0.0032 でダンパーを付けない場合の 34% に減少した。ダンパーのスライディングマスは加震直後から構造物の変位に遅れながら大きく振動を始め、構造物が最大変位を示す付近で最大変位 0.0337 を生じた。これは構造物の変位の約 10 倍にあたる。これより、ダンパーが振動することによって構造物の振動を小さくする様子が分かる。



図—23 入力波の振動台加速度

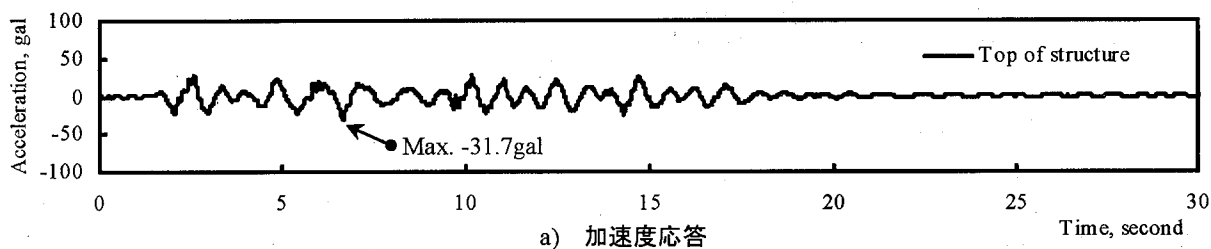


a) 加速度応答

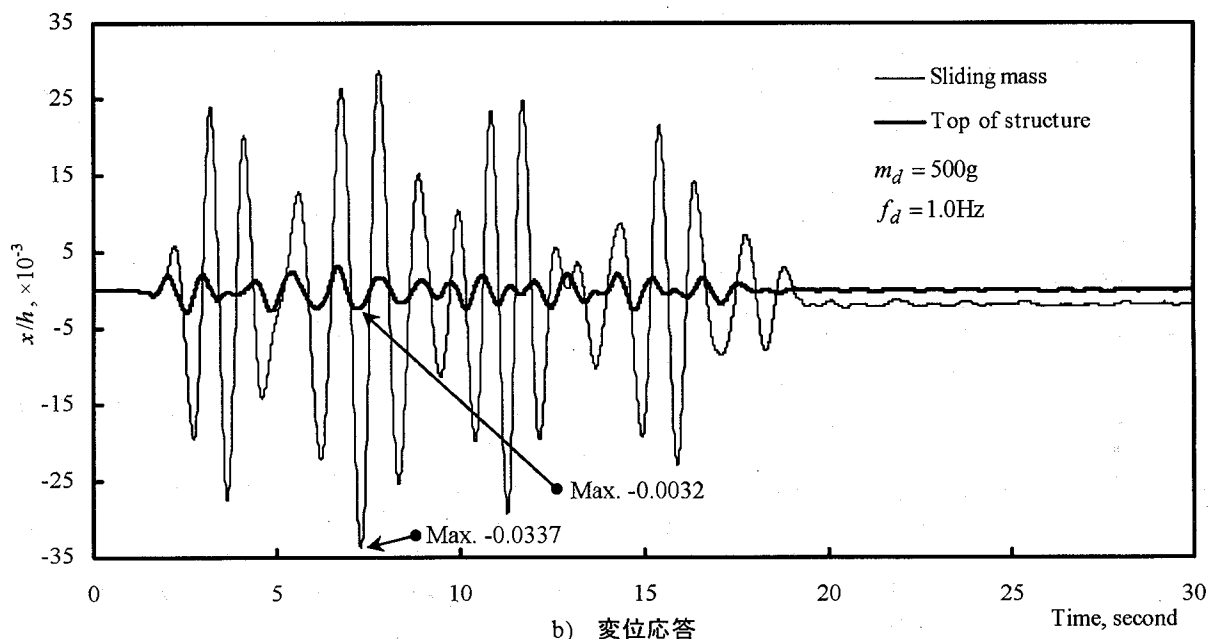


b) 変位応答

図—24 ダンパーを設置しない構造物模型の応答



a) 加速度応答



b) 変位応答

図—25 ダンパーを設置した構造物模型の応答

(3) 加速度応答のスペクトル分析

図-26 は、図-24 と図-25 の模型上部の加速度応答のフーリエスペクトルである。ダンパーを付けない場合、模型の1次固有振動数である1.0Hz付近に明瞭なピークが見られ、加速度応答の主成分は1次振動モードであることが分かる。これに対して平均固有振動数 $f_d=1.0\text{Hz}$ のダンパーを設置した場合、1.0Hz付近の振動成分は著しく小さくなっている。また、紙面の都合上省略するが、変位応答についても同様な結果が得られた。

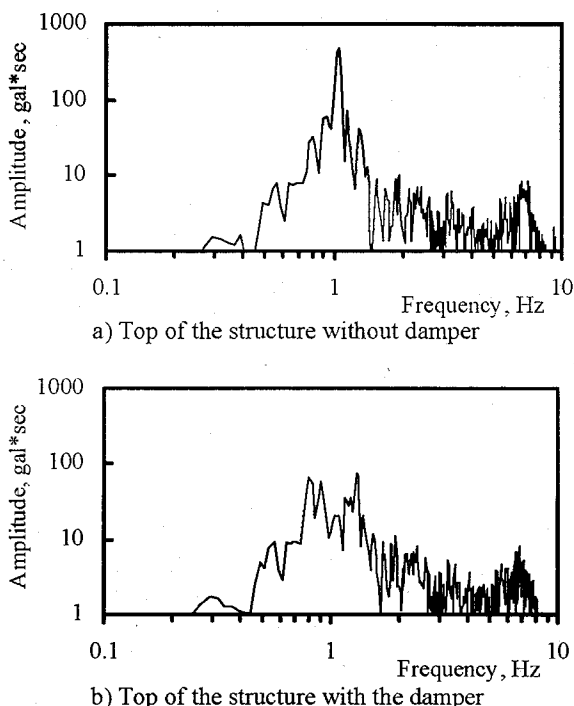


図-26 加速度応答のフーリエスペクトル

(4) 同調比と制震効果

図-27 は、ダンパー模型と構造物模型の固有振動数の比すなわち同調比 $\gamma = f_d/f_1$ が制震効果に及ぼす影響を検討したものである。ダンパーを付けた模型上部の最大応答とダンパーを付けない最大応答の比すなわち減少比を示している。また、スライディングマスとダンパーを付けない模型上部の最大変位の比も示した。

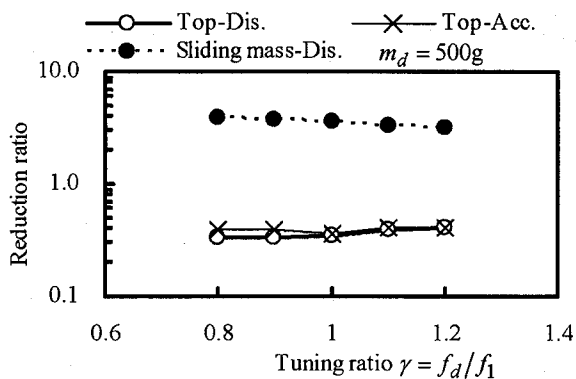


図-27 同調比と制震効果

図-27 より、0.8~1.2 の広い同調比の範囲において、加速度応答と変位応答を30~40%程度に減少できることが分かる。ただし、スライディングマスの変位が、ダンパーを付けない構造物の最大変位の約3倍となるので、スライディングマスの移動長およびケーブルの移動スペースを構造物中に確保しなければならないことが分かる。

4. まとめ

本論文では、塔状構造物の制震装置として、コロとスライディングマスからなる運動体と初期張力が導入されたケーブルで構成するケーブル・マスダンパーシステムを提案した。縮尺1/30の構造物模型とダンパー模型および振動台を用いた模型振動実験では、構造物模型基部の正弦波加震により共振曲線の変化を調べ、宮城県沖地震の加速度記録を入力波として具体的に制震効果を調べた。その結果、提案のダンパーシステムは以下の特徴を持つことが分かった。

- 1) 提案のダンパーシステムは地震動による塔状構造物の振動を低減できる。
- 2) 一次振動モードが主となる振動において、質量比 $m_d/m = 0.5\text{kg}/60\text{kg} = 0.83\%$ のダンパーを用いる場合、加速度応答と変位応答を30~40%程度に低減できる。
- 3) 0.8~1.2の幅広い同調比の範囲で制震効果が期待できる。
- 4) 運動体を構成するスライディングマスの変位は大きく、スライディングマスとケーブルの移動スペースを構造物中に確保する必要がある。

本論文で報告した提案のダンパーシステムの制震効果は比較的小さな構造物模型と宮城地震の地震波を用いた振動台実験に基づいたものであり、実用性を判断するためにはより詳細な検証が必要と考えられる。また、提案のダンパーシステムの制震メカニズムは詳細を検討中であり、別の機会に報告を行う予定である。

参考文献

- 1) 岡田義光：日本の地震地図，東京書籍，pp.232-236，2004。
- 2) 大田外氣晴，座間信作：巨大地震と大規模構造物，共立出版，pp.82-95，
- 3) 藤野陽三：建設系構造物の振動制御，JSSC，No.12，pp.2-7，1994。
- 4) 片山拓朗，山尾敏孝，高野涼平：塔状構造物の逆振り子ダンパーに関する実験的研究，鋼構造年次論文報告集，第13巻，日本鋼構造協会，pp.25-32，2005。
- 5) 日本建築学会：建築物の減衰，日本建築学会，pp.131-133，1988。

(2006年4月13日 受付)