

多方向転動型同調質量ダンパーによる長柱構造物の制振対策

Vibration Control of Multi-direction Tuned Rolling Mass Damper for Pillar Structures

井田 剛史*, 三木孝則**, 高橋 多佳子***, 連 重俊****, 平野 廣和*****, 佐藤 尚次*****

Tsuyoshi Ida, Takanori Miki, Takako Takahashi, Shigetoshi Muraji, Hirokazu Hirano and Naotsugu Sato

*正会員 株式会社十川ゴム 研究開発部 (〒599-8244 大阪府堺市上之 516 番地)

** 学生員 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒112-0004 東京都文京区春日 1-13-27)

***正会員 修士(工学) 那覇市役所 (〒900-8585 沖縄県那覇市泉崎 1-1-1) (研究当時: 中央大学大学院)

****正会員 株式会社中井商工 (〒537-0023 大阪府大阪市東成区玉津 2-1-5)

*****正会員 工博 中央大学教授 総合政策学部 (〒192-0393 東京都八王子市東中野 742-1)

*****正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112-0004 東京都文京区春日 1-13-27)

This paper describes the development and design to vibration control of Multi-direction Tuned Rolling Mass Damper (MTRMD) system for pillar structures. MTRMD system is the combination of the container of the rotating ball and the hemisphere which stuck the synthetic rubber. The simulation and experimental model tests have been done to estimate the abilities the MTRMD system. The performance of the MTRMD was confirmed by the simulation and experiments with pillar structures. Therefore we have developed some reducing methods and equipments of stress and strain on substructures.

Key Words: vibration control, rolling mass damper, pillar structure

キーワード: 制振対策, 転動型同調質量ダンパー, 長柱構造

1. はじめに

阪神淡路大震災以後設計基準が改訂され、耐震性を高めるために橋梁の免震化が促進されてきた。その影響で上部構造物は揺れ易くなり、従来の風だけではなく橋梁上を通過する走行車両により生じる加振作用を受けることとなっている。特に橋梁上に設置されている付属施設である標識柱・照明柱などの長柱構造物は、これらの影響を直接受けることになり、長柱の取付部などの応力集中部において疲労損傷を生じる可能性が高くなって来ている。

標識柱・照明柱などの長柱構造物の損傷事例としては、1999年に標識柱の基部補強リブ上端に疲労き裂が発生することにより、強度が低下し高架下の平面街路に落下している¹⁾。このような落下事故には至っていないが、疲労によるき裂が確認されている標識柱があるとの報告もなされている²⁾。この原因としては、付属構造物のほとんどが標準設計としての基準があり、製造段階で設置場所における照査が義務付けされていないこと、さらに交通量の増大お

よび金属沓からゴム沓等への移行に伴い、標識柱や照明柱は以前より交通振動の影響を受け疲労が生じやすい環境下に置かれていることが考えられる。

これらのことから、新規に設置する付属構造物の設計に関しては、最新のコンピュータ技術や構造解析技術を取り入れることにより、静的な照査による設計から動的な照査を含めた構造設計手法へと改善されつつある³⁾。さらにライフサイクルコスト低減への関心などにより、構造物は、建設費の見地から所定の機能を果たせる寿命(可使寿命)や維持管理コストを考慮した、総合的な評価に変化している。これに対して既設の付属構造物の耐久性や寿命を延ばすことに関しては、供用下での現場施工を前提とすることから、様々な制約条件下において設計段階から照査をする必要がある。このため、既存の標識柱や照明柱の補強対策方法が各分野で検討されはじめている。新たな長柱に交換する場合には、基部のリブ構造の変更や板厚を上げた鋼管パイプなどの採用が行われている。補強の場合は、カーボン系繊維やアラミド系繊維などを巻き付けてこれを樹脂で固

めて補強する方法^{4)~6)}などが最近提案され、著者らも紫外線で硬化する紫外線硬化樹脂⁷⁾を用いた補強方法も提案をしている。

一方、補強と併せて振動している長柱構造物の制振対策方法を検討することも必要であり、制振対策と補強効果とが両立することが対策上重要なこととなる。照明柱の制振装置として転動型質量ダンパーを用いた研究としては、尾畑・島崎ら^{8),9)}が提案している円柱を転動子とした研究が挙げられる。また、その他製品化された例としては電磁ダンパー、小型同調質量ダンパー、同調液体ダンパーなどもある。しかし、制振方向が限定されたり、また特にコスト面が問題となり試験施工段階で終わっており、特別な制振対策が進んでいないのが現状である。そこで、現存の標識柱・照明柱の揺れを抑えて延命化することができ、簡単かつ低コストで多方向の振動に対応可能な制振装置を開発することが必要である。

以上の様な背景から、本論文では多方向に効果を発揮し、かつ既製品の組み合わせにより低コスト化可能な多方向転動型同調質量ダンパー（MTRMD: Multi-direction Tuned Rolling Mass Damper）を開発し、この効果を確認するために長柱モデルを用いてその制振装置の減衰性能評価を行った。

2. 多方向転動型同調質量ダンパー

(1) 従来型ダンパー

構造物の振動問題に対する対策手法として、制振装置の適用がある。従来、長柱構造物用の制振装置としては、発生する音の問題はあるが衝突による衝撃で制振させるチェーン式ダンパーや鋼球式ダンパーなどの衝撃ダンパーが実用化されている^{10)~12)}。近年では、高架橋上の標識柱や門型標識柱に同調質量ダンパー（TMD:Tuned Mass Damper）、同調液体ダンパー（TLD:Tuned Liquid Damper）の適用事例^{13),14)}も報告されている。

TMD は振り子式やバネ式など様々な形式があり、原理は構造物の固有振動数とほぼ等しい固有振動数を有し、構造物の振動に対して逆位相で TMD ダンパーを振動させて制振をはかるものである。制振装置としては一般的であり、TLD ほど設置面積を要せず好ましいが、可動部が導入されることにより大型

になり、かつ、メンテナンスが不可欠である。また、所定方向における制振に関して一定の効果を有するが、制振方向が限定される点で問題が残る。ところで、制振の対象となる長柱構造物の振動は、高架橋や長柱の構造に左右されるため、特定の方向に卓越した振動があるとは限らない。著者らの既往の研究^{15),16)}では、都市高速道路の標準的な標識柱や照明柱で 3~4.5Hz の狭い範囲で 1~3 次モードの発生があり、多方向の成分を含むことが確認されている。このため従来の TMD 等では振動モードにあわせたダンパーを用意する必要があり、コスト面で対処が難しいことがわかる。一方、衝撃ダンパーは、長柱に対するダンパーとして実績があるが、初期外力が緩やかな場合などの対応の難しさが残されている。

(2) 多方向転動型同調ダンパーの特徴

本論で提案する MTRMD は、長柱構造物の天端付近に設置される。図-1 ならびに写真-1 に示す様に、転動する球とそれを受ける減衰効果を高めるために粘弾性体である合成ゴムで構成された球面座の組み合わせである。大振幅時には衝撃ダンパーとしての機能を、小振幅時には TMD の機能を有する。この装置は、以下のような特徴を有している。

- ① 長柱の卓越する振動を効率よく抑制する。
- ② 多方向における振動に対応できる。
- ③ 比較的小振幅の振動も抑えられる。
- ④ 既存の長柱に対して比較的容易に設置可能で、かつメンテナンスが容易である。
- ⑤ 簡単な構造であり小型である。
- ⑥ 既製品などを用いて低コストで製作できる。
- ⑦ 制振作動時の騒音がほとんどない。

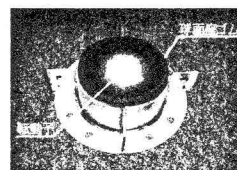


写真-1 転動型同調質量ダンパー

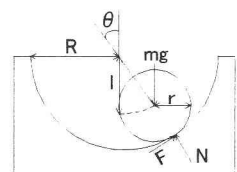


図-1 転動型同調質量ダンパー数値解析モデル

(3) 固有振動数の算出

ダンパーの固有振動数は、図-1 に示す転動子の半径 r と、それを受ける球面座の半径 R から構成される MTRMD の自由運動方程式から、求めることができる。ここで、 m は球の質量、 l は有効半径、 θ は球重心の振れ角、 F は外殻から受ける摩擦力、 N は垂直抗力、 g は重力加速度である。球は滑ることなく回転し運動すると考えると、図-1 の系より、外殻から受ける摩擦力 F 方向の釣り合い式は次式で表すことが出来る。

$$ml \ddot{\theta} = F - mg \sin \theta \quad (1)$$

またこの時、球の回転運動の式は次式になる。

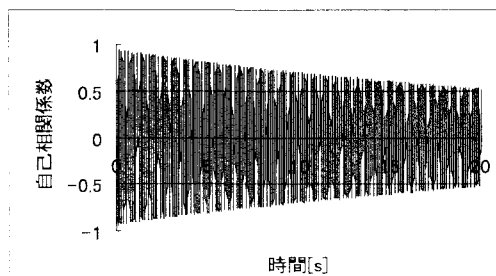
$$-Fr = \frac{1}{2}mr^2 \times \frac{l}{r} \ddot{\theta} \quad (2)$$

(1), (2)式を整理すると次の自由運動方程式を導くことが出来る。

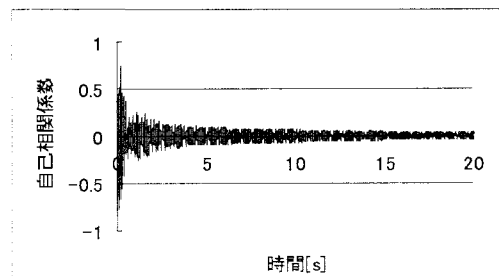
$$\ddot{\theta} + \frac{2}{3} \frac{g}{l} \sin \theta = 0 \quad (3)$$

θ が微小で $\sin \theta \approx \theta$ とすれば、固有振動数は式(4)で与えられる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{g}{l}} \quad (4)$$

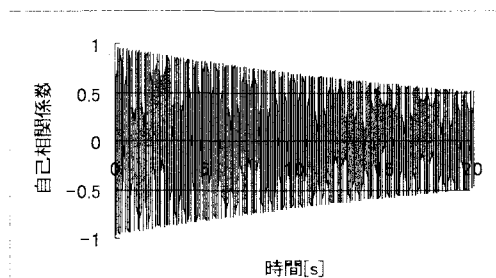


非制振時

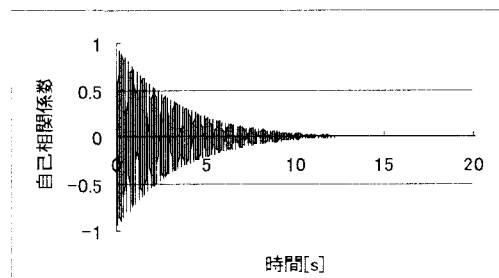


制振時

図-2 実験結果



非制振時



制振時

図-3 数値解析結果

3. 数値解析と簡易実験

MTRMD の制振効果を確認する目的で、長柱のモデルとして外径 $\phi 48.6\text{mm}$ 、長さ $1,800\text{mm}$ 、質量 9kg の片持ち梁鋼管柱を用いて簡易実験を行う。簡易実験の諸元としては、球の直径が 41.3mm 、球面座内径が 60mm 、質量 300g であり、これを鋼管の頭部に設置した。鋼管柱、ダンパーの固有振動数はそれぞれ 5.85Hz 、 4.2Hz である。実験では外力として約 5G の衝撃を鋼管柱へ与え、鋼管柱に取付けた加速度計で加速度を測定した。結果は原波形に含まれる不規則成分を取り除くため自己相関係数を用いた。これは測定したデータにはノイズが含まれているので、そのまま加速度-時間波形にすると一様な減衰特性を示す波形にはなりにくいため、時間波形前後の波形で相関のあるものだけを取り出せるようフィルターを掛けた形になる。非制振時と制振時の結果を図-2 に示す。

次に簡易実験から得られた減衰率を用いて、実験と同一諸元で 4 次のルンゲ・クッタ法を用いて数値解析を行った。ただし、球面座ゴムの効果ここでは考慮していない。実験と同様に結果を図-3 に示す。

図-2 及び図-3 から、実験結果と数値解析結果を比較すると、MTRMD を作用させない非制振時においては、双方の結果が良い一致を示していることがわ

かる。一方、MTRMD を作用させた制振時では、数値解析では一様な減衰特性を示す波形が現れているのに対し、実験では初期の段階に急激な減衰が生じ、その後なだらかに減衰する波形となっている。

この相違の原因は、MTRMD に衝撃力が作用した初期の段階で、球が球面座の粘弾性体であるゴムに衝突することにより一種の衝撃ダンパーの役割をしているためであると考えられる。

4. 衝撃ダンパー効果の検討

簡易実験で明らかになった、MTRMD の衝撃ダンパーとしての制振効果及び TMD ダンパーへの切り替わりのタイミングを解析により確認する。衝撃ダンパーの際に用いる理論は、球が受け皿の合成ゴムと衝突する際に、両者の動きは運動量の保存則と反発係数の関係式に従うものとした。それぞれの関係式は以下のである。ここで M は鋼管柱の質量、 m は球の質量、 V' は衝突後の鋼管柱の速度、 V は衝突前の鋼管柱の速度、 v' は衝突後の球の速度、 v は衝突前の球の速度である。 e は反発係数でここでは合成ゴムの一般的な値である 0.2 とした。

$$M V' + m v' = M V + m v \quad (\text{運動量の保存則})$$

$$V' - v' = -e(V - v) \quad (\text{反発係数の関係式})$$

$\mu = m/M$ とすると衝突後の鋼管柱と球の速度は以下のようにになる。

$$V' = \frac{(V + \mu v) - e\mu(V - v)}{1 + \mu} \quad v' = \frac{(V + \mu V') + e(V - v)}{1 + \mu}$$

これらの関係式を用いて時間等を設定することで衝撃ダンパーから転動型同調質量ダンパーへの切り替えを行う解析を行った。衝撃ダンパーから転動型同調質量ダンパーへの切り替えが約 0.7 秒で起こるケ

ースで解析結果の波形が実験結果の波形と最も一致したので、その際の解析結果と実験結果の比較を図-4 に示す。なお図-4 は振動初期における衝突による衝撃ダンパーとしての効果と転動型同調質量ダンパーへの切り替えを確認するため、自己相関係数のグラフの初期段階を拡大して示したものである。

図-4 より、実験結果と解析結果は時間経過と共に多少の位相のずれが生じるものの良い一致を示した。この結果から、転動型同調質量ダンパーは、0.7 秒付近までは球と受け皿の合成ゴムが衝突を繰り返す衝撃ダンパーとして作用し、この 0.7 秒付近で衝撃ダンパーの特性から TMD の特性へ切り替えが生じたと考えられる。

5. モデル実験

MTRMD は、高加速度が生じる様な初期段階の状況下では衝撃ダンパーの特性を、一定の加速度以下では TMD の特性を有することがわかった。次に加振機を使ったモデル実験での制振効果の評価を行う。ここでは、球面座材質の影響及び長柱の固有振動数との関係に加えて、加速度の影響について確認する。

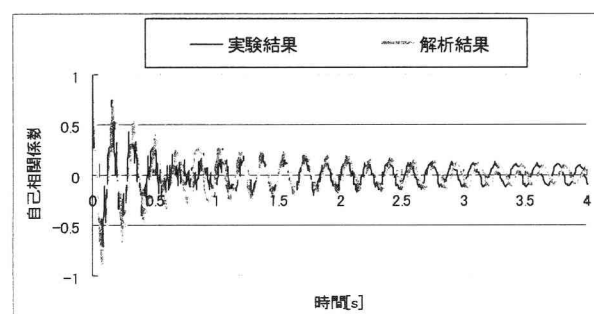


図-4 制振効果の比較

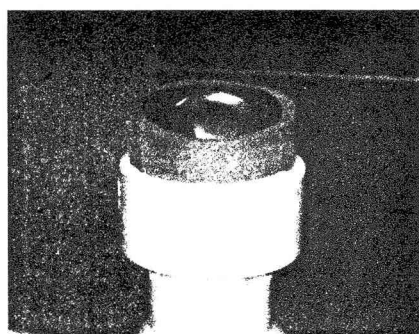


写真-2 MTRMD 装置

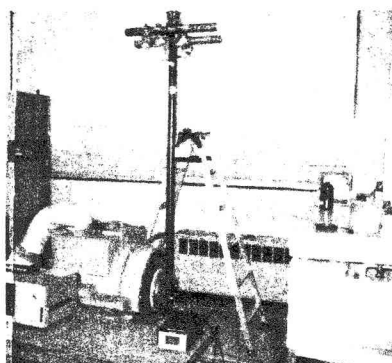


写真-3 実験概要

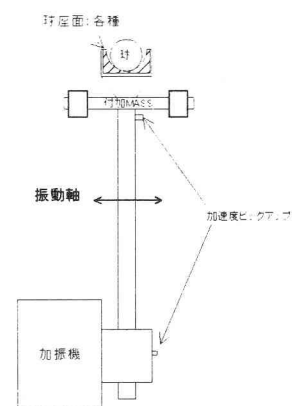


図-5 実験概念図

表-1 長柱の諸元

直径	長さ	重量	固有振動数（付加質量数） f_b					
			0 個	2 個	4 個	6 個	8 個	10 個
$\Phi 48.6\text{mm}$	1,800mm	9,100g	5.9Hz	5.3Hz	5.0Hz	4.6Hz	4.3Hz	4.0Hz

表-2 試験体諸元

実験ケース	球面座材質	転動子（鉄球）	ダンパー固有振動数 f_a	質量比
ダンパー無	—	—	—	—
試料①	ステンレス	$\phi 50.8(540\text{g})$	4.43Hz	3%~6%
試料②	合成ゴム（ブチル）	$\phi 50.8(540\text{g})$	4.43Hz	3%~6%

ダンパー無

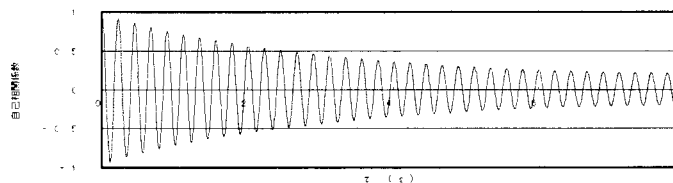
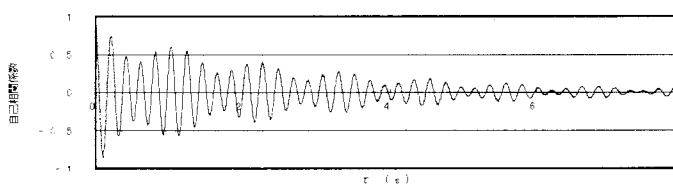
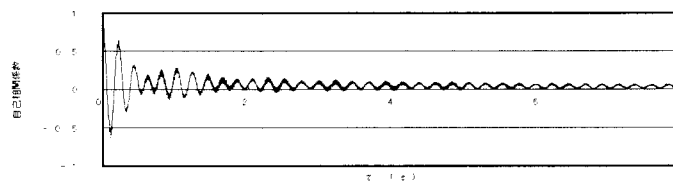
試料①
球面座（ステンレス）試料②
球面座（ブチルゴム）

図-6 各試料の自己相関係数

(1) モデル実験の概要

加振実験は、写真-2、3 及び図-5 に示すモデルを設置し、長柱基部に衝撃波を与え、その自由減衰波形を測定し、ダンパーの有無、球面座の材質違いによる比較を行った。計測機器として長柱頂部に加速度計、基部に加速度計とひずみゲージを設置した。

長柱の構造諸元を表-1 に示す。長柱は $\phi 48.6\text{mm}$ 長さ 1800mm、質量 9100g の片持ち梁鋼管柱である。これに固有振動数調整用に付加質量 720g/個を 0～10 個まで付加した。質量を付加することにより、長柱の固有振動数 f_b を 4.0Hz～5.9Hz まで調整できるようにした。また、加振条件は、パルス幅 10ms、パルスピーク値 0.5G 及び 1.5G のハーフサイン波を与えた。

試験体諸元を表-2 に示す。試料①は球面座に内径 $\phi 68\text{mm}$ のステンレスを用い、試料②は球面座に内径 $\phi 68\text{mm}$ のブチルゴムを用いた。転動子は共に

$\phi 50.8\text{mm}$ の鋼球（質量：540g）とした。

また、表-2 のダンパー固有振動数 f_a は、式(4)から求めた値、質量比は付加質量を 0～10 個まで付加した時の値である。

測定は、各試料の長柱モデルに衝撃波を与えた時の長柱頂部の加速度、長柱基部の加振軸方向及び加振軸垂直方向のひずみを測定し、それらの周波数スペクトル、対数減衰率及びその周波数依存性、長柱基部におけるひずみ振幅を求めた。

(2) モデル実験結果

図-6 に各試料における減衰波形を示す。ここで、加速度は 0.5G、長柱固有振動数は 4.5Hz である。図-6 より、試料①及び試料②の減衰がダンパー無に比べて大きいことが確認できる。特に試料②の球面座をゴムにした場合において、優れた減衰効果が得られることがわかる。

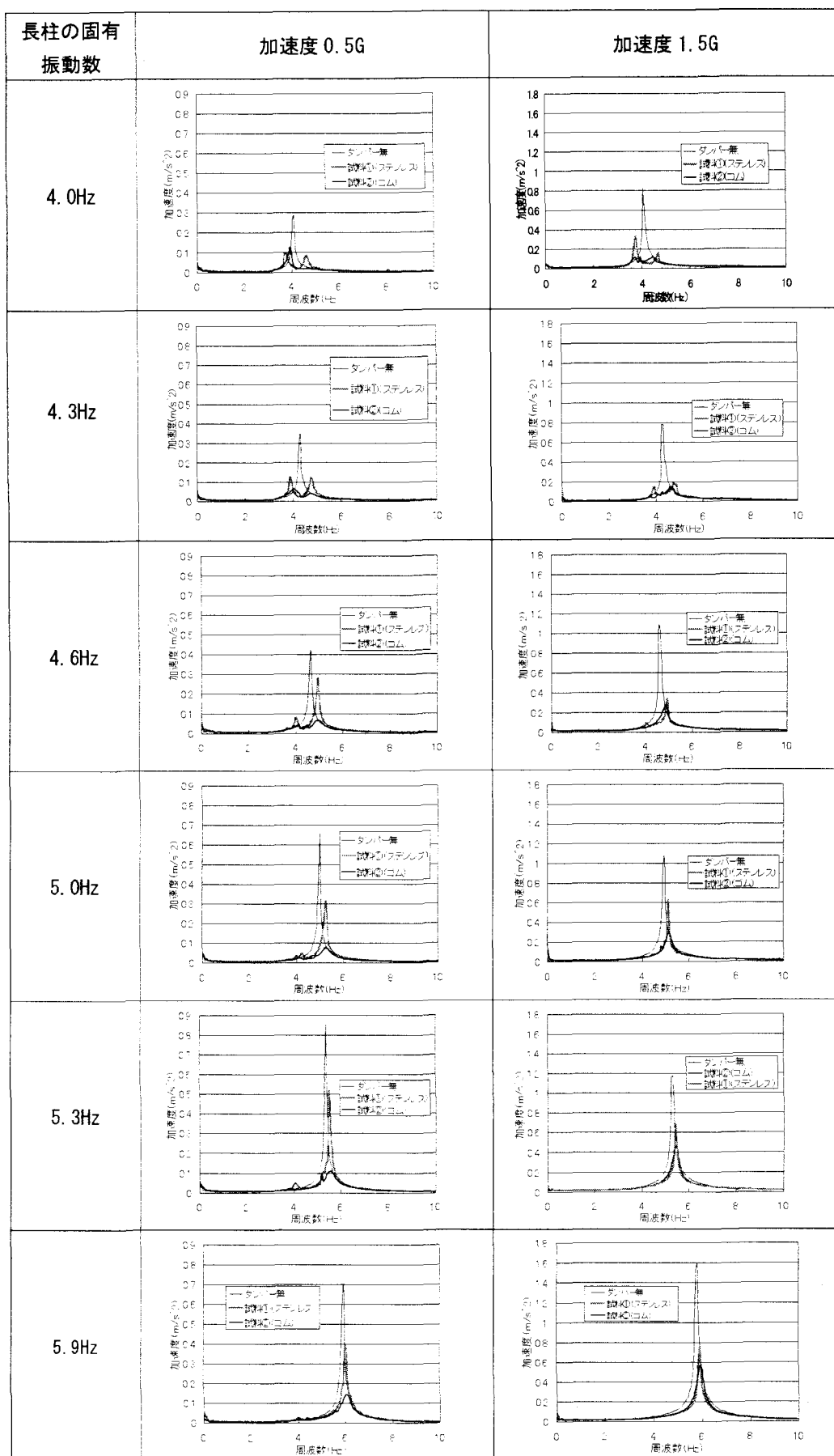


図-7 長柱頂部の周波数スペクトル

次に長柱の固有振動数を変化させた時の各基部加速度における長柱頂部の周波数スペクトルを図-7に示す。

本ダンパーが最も効果を発揮する長柱の最適固有振動数は、式(5)及び表-1, 2 の諸元より求められ、付加質量 6 個を取付けた 4.6Hz 付近であることが推定される。

$$fa = \left\{ \frac{1}{1 + \rho} \right\} fb \quad (5)$$

fa : 制振材の最適固有振動数

fb : 長柱の固有振動数

ρ : $\frac{\text{おもりの等価質量}}{\text{長柱の質量}}$

この推定と図-7 を比較すると、加速度 0.5G においては、試料①（ステンレス）で若干の差が生じるものの、付加質量が 6 個（4.6Hz）付近の長柱の周波数スペクトルが TMD で示される特徴的なスペクトルとしてあらわれており、ほぼ期待通りに TMD として作動していることがわかる。ところで、試料①と試料②を比較すると、試料②のピークが鈍くかつ低くなっているが、これはゴムの減衰定数がステ

ンレスに比べて高いためである。

次に加速度 1.5G では、得られる減衰のピークが低周波数側にシフトしていることがわかる。この原因として、試料②では、加速度の増大により、ゴム球面座と球における凝着摩擦が小さくなったことが影響しているものと考えられる。しかしながら、球が球面座に衝突する衝撃ダンパー挙動を示し、加速度 1.5G においても加速度低減効果が得られていることがわかる。それに対し、試料①では、元々ステンレスの摩擦係数が低いいため、その影響による低周波数シフトが加速度 0.5G でも生じており、またゴムに比べて摩擦係数の変化も少ないため、加速度 1.5G でも、周波数スペクトルの変化が少ないことがわかる。その様子を示すものとして、図-7 及び次式(6)で得られる長柱頂部の加速度低減率を表したものを図-8 に示す。さらに各試料の減衰曲線から得られた対数減衰率を図-9 に示す。

$$\text{加速度低減率 (\%)} = \frac{(\text{ダンパー無加速度} - \text{ダンパー有加速度})}{\text{ダンパー無加速度}} \quad (6)$$

図-8 及び図-9 より、試料②において、加速度 0.5G では、TMD としての減衰効果を発揮し、加速度 1.5G

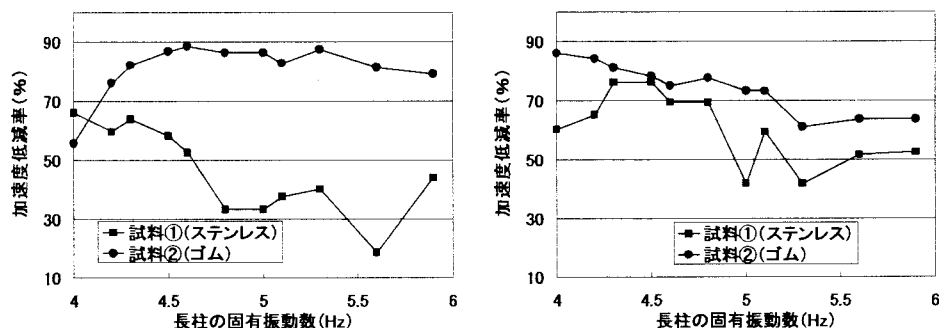


図-8 ダンパー作動時の加速度低減比（左：加速度 0.5G、右：加速度 1.5G）

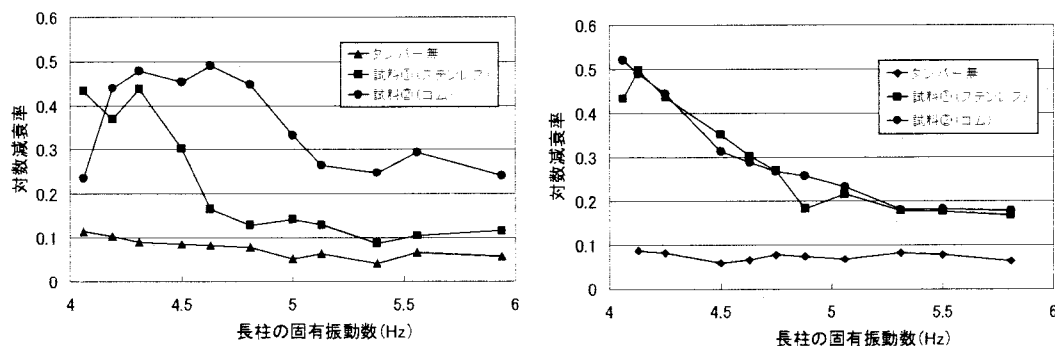
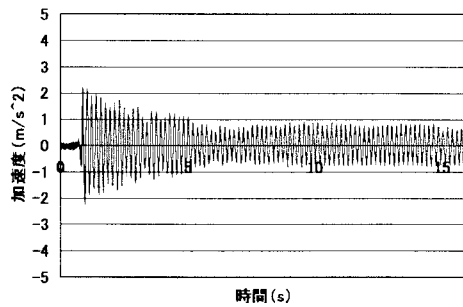
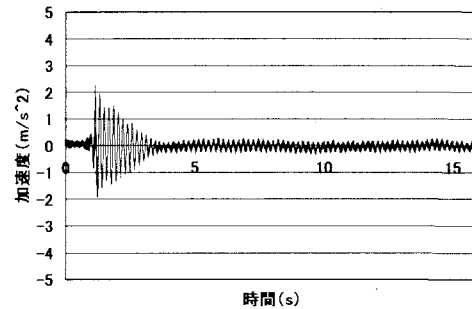


図-9 各試料における対数減衰率（左：加速度 0.5G、右：加速度 1.5G）



試料① 球面座（ステンレス）



試料② 球面座（ゴム）

図-10 5.3Hz の長柱における減衰曲線

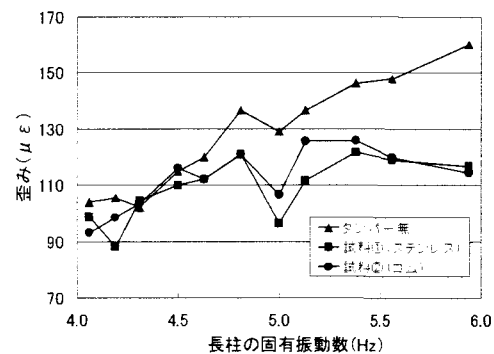
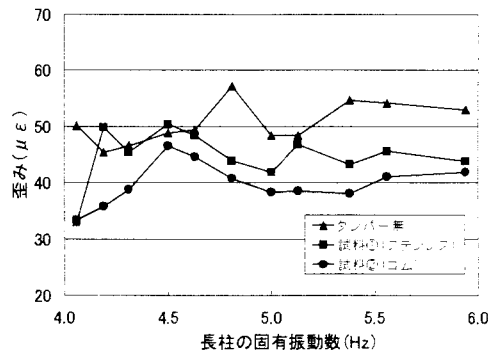


図-11 長柱基部におけるひずみ（左：加速度 0.5G、右：加速度 1.5G）

では、衝撃ダンパーとしての減衰効果を発揮することで、長柱の加速度を 60%以上低減していることがわかる。しかし、試料①においては、加速度 1.5G では衝撃ダンパーとしてある程度の効果が得られているが、加速度 0.5G では TMD として式 (5) で推定した通りには効果が発揮されていないことがわかる。これは、MTRMD を実振動下において条件設定する上で重要な項目であり、試料②のゴム球面座がその点で優れていることがわかる。

(3)揺れ戻し

前記にて減衰特性がダンパーにとって重要な項目であることを述べたが、さらに TMD の場合、同調域から離れた周波数域での挙動、つまり離調域での振動特性も安全性等の面から重要な項目となる。図-10 に試料①及び試料②の 5.3Hz の長柱における減衰曲線を示す。

図-10 より、試料①では、加振から 8 秒経過しても完全に波動が収束せず、再び振幅が大きくなる揺れ戻し現象が生じている。しかし、試料②ではそのような現象は生じることなく振動は収束しているこ

とがわかる。

この現象が生じる原因の一つとして、転動子と球面座の間の摩擦にあると考えられる。つまり、試料①の球面座がステンレス製、転動子が鋼製で、金属-金属接触による摩擦抵抗は小さいため、衝撃波減衰後も鋼球が転動し続け、それが再び起振力となったものと考えられる。これに対し、試料②は球面座がブチルゴムであるので、鋼球との接点での摩擦抵抗が十分に作用したものと考えられる。

これより、離調域においてダンパーが逆に起振力となり、常時振動を引き起こす原因となるなど安全面で問題となる可能性もあり、減衰効果の高いゴムが揺れ戻しを防ぐ面からも優れていると言える。

(4)長柱基部のひずみ

前項までにおいてダンパーによる長柱の加速度低減効果が確認されたが、長柱のような構造物において疲労寿命低下の原因となる長柱基部のひずみに、どの程度低減効果が得られたかを図-11 にて確認することができる。

同調質量ダンパーとして作用した加速度 0.5G に

おける試料②では、図-7の加速度振幅の低減により、最大30%程度のひずみ（応力）低減効果が得られるが、試料①ではその効果が小さい。加速度1.5Gでは、試料①、②共に衝撃ダンパーとしての作用によるのか、同等の曲線を示しており、共に、同調域からやや高周波数域で効果が得られていることがわかる。

これらの結果から、長柱基部のひずみを低減させるためには、ダンパーにより長柱の振幅を抑えることが重要であるが、逆にダンパーによる過度の反力を与えないことも必要である。

6. おわりに

本研究での多方向転動型同調質量ダンパー(MTRMD)の検討により、次のようなことが確認できた。

- (1) 多方向転動型同調質量ダンパーを適用させることで、ダンパーの固有振動数と長柱の固有振動数が漸近する最適固有振動数において、高い減衰性能が得られる。
- (2) 球面座が金属の場合、摩擦抵抗が小さいため、鉄球の転動が起振力となり揺れ戻し現象が起こる恐れがある。ゆえに、微振動を完全に減衰させるために、球面座には転動子との間で摩擦抵抗が期待できるゴム部材等を適用させることが必要である。
- (3) 長柱モデルに最適固有振動数を有する制振材を適用させると、動吸振の効果により長柱のスペクトルのピークはほぼ消え、最大90%程度まで加速度低減が可能となる。
- (4) 最適固有振動数を外れた制振材の場合、球面座にゴムを用いるとある程度の加速度低減効果は得られるが、金属の場合、その効果は小さくなる。
- (5) 長柱モデルに最適な制振材を用いた場合、長柱の疲労寿命低下の原因となる常時振動（低加速度）による応力に対しては、長柱の加速度低減効果により最大30%程度のひずみ低減効果が得られる。

以上の制振材設計によって、大きな減衰効果が期待できることが確認できた。

今後の課題としては、実レベルでの実験ならびに

観測が必要となる。これに関しては、2004年10月から都市高速道路高架橋に設置されている監視カメラ用ITV用ポールにMTRMDを設置し、本制振装置の有効性を確認するための1年間程度の長期実証実験を行う予定である。

謝辞:本研究を行うに際し、施工面から株式会社丸田光政氏から貴重な助言を得た。また、実験を行うに際しては、中央大学理工学部土木工学科の学生諸君から協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。最後に、本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(C)（代表者：平野廣和）の研究助成ならびに（財）先端建設技術センター研究助成を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 小塩達也，李相勲，山田健太郎，森成顕，森下宣明：交通荷重による標識柱の振動と疲労耐久性，構造工学論文集，Vol.47A，pp.1009-1017，2001。
- 2) 山田健太郎，近藤明雅，小林且典，宮本伸治，荒木準一：鋼管柱基部の疲労強度，構造工学論文集，Vol.38A，pp.1045-1054，1992。
- 3) (社)日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002。
- 4) 大倉一郎，福井唯夫，中村圭吾，松上泰三：炭素繊維シートによる鋼板応力の低下と剥離せん断応力，土木学会論文集 No.689/I-57，pp.239-249，2001。
- 5) 松村政秀，北田俊行，徳林宗孝，池田啓士，岡田崇：炭素繊維シートを円周方向に貼付する橋脚鋼管柱の耐震補強法に関する実験的研究，土木学会論文集 No.766/I-68，pp.17-31，2004。
- 6) 山内隆，中村一史，前田研一，鈴木博之：CFRP板により補修された鋼部材の疲労試験，土木学会第57回年次学術講演会，I-670，2002。
- 7) 連重俊，平野廣和，青木徹彦，井田剛史，野中眞一，丸田光政：紫外線硬化樹脂を用いた長柱構造応力低減と実大モデル疲労試験，土木学会論文集 No.735/VI-59，pp.185-195，2003。
- 8) 尾畑守夫，森尻渉，島崎洋治：転動型制振装置の自由振動における制振効果，構造工学論文集 Vol.47A，pp.381-391，2001。
- 9) 尾畑守夫，森尻渉，島崎洋治：転動型制振装置の照明柱に対する制振効果，土木学会論文集 Vol.766/I

- 68, pp. 339-330, 2004.
- 10) 山田勝彦, 飯田毅, 和泉夕祐, 多田仁志: 照明柱の風による振動とチェーンダンパの制振効果, 土木学会第 43 回年次学術講演会, I-307, pp.666-667, 1988.
 - 11) 和泉夕祐, 山田勝彦, 渡辺奉昭: 照明柱の風による振動とチェーンダンパの制振効果 (その 2. 実大振動試験), 土木学会第 43 回年次学術講演会, I-308, pp.668-669, 1988.
 - 12) 和田克哉, 恵谷瞬吾, 東田弘貫, 高野晴夫: 横浜ベークブリッジの耐風対策, 橋梁と基礎, Vol. 89, No. 8, pp. 43-48, 1989.
 - 13) 森口学, 吉村孝治, 吉川賀康: 1 号東山高架橋制振装置内蔵型照明柱について, 建設電気技術 2002 技術集, pp. 124-126, 2002.
 - 14) 街灯の揺れを抑える制振装置, 日経メディカル, No. 516, 1997.
 - 15) 松井謙介, 平野廣和, 佐藤尚次: 橋梁付属物としての門型標識柱の振動特性, 土木学会関東支部第 30 回技術研究発表会公演概要集, I-68, 2003.
 - 16) 三木孝則, 松井謙典, 平野廣和, 佐藤尚次: 門型標識柱の力学的特性評価に関して, 土木学会第 58 回年次学術講演会第 I 部門, I-746, 2003.

(2004 年 9 月 17 日受付)