

小型制振装置 BH-TMD の開発

幽谷 栄二郎* 細見 雅生**

歩道橋の支間長が 40m を超えるようなとき、橋の振動数が人の歩行時の振動数に共振し、歩行者に不安感や不快感を与える振動を発生する場合がある。このため、歩道橋の設計をする場合、“立体横断施設技術基準・同解説¹⁾”では、橋の固有振動数が歩行時の振動数に同調する 2Hz 前後 (1.5~2.3Hz) にならないようにする必要があるとしている。しかし、実際にはこの振動数を避けられないことがある。このような場合、同調型質量ダンパー (TMD : Tuned Mass Damper) による制振対策が効果的で、よく使用されている。本稿では、板バネと高減衰ゴムを組み合わせたシンプルな構造でメンテナンスフリーを目指して開発した小型制振装置 BH-TMD の概要と性能試験の結果について紹介する。

キーワード：歩道橋，小型制振装置，温度依存性，メンテナンスフリー

まえがき

支間長が 40m を超えるような歩道橋では、歩道橋の支間が長くなることで、固有周期が長周期になる。歩行者による外力がこの周期と同調し、利用者に不安感や不快感を与えるような振動が生じることがある。この共振固有振動数域が 1.5~2.3.Hz で、基準¹⁾ではこの振動数域を避けて歩道橋を設計するように定めている。設計時の対策としては、桁高の増加やフランジ厚の増厚などにより主桁剛度を増し、振動数を高くするような方法が主流となっている。しかし、桁高制限がある場合や、桁高増加などにより建設費用の増大が予測される場合には、小型の制振装置 TMD (Tuned Mass Damper) が振動対策として用いられている。小型の TMD としては、多種類の装置が提案されているが、歩道橋の工事費と比較して高価なものとなっている。また、ほとんどの TMD ではメンテナンス費が必要な場合が多い。このような初期コストとランニングコストの問題から、前述の主桁剛度を増す方法で、橋梁の固有振動数を共振域から外して対応している場合が多い。

本稿で紹介する BH-TMD (Bobbie Head Tuned Mass Damper) : 首振り型同調質量ダンパーは、歩道橋のメンテナンスを含むトータルコストの削減を目指して、経済性に重点を置いて開発を行ったものである。

1. プロトタイプの概要

BH-TMD プロトタイプの写真を写真-1 に、概要図を図-1 に示す。

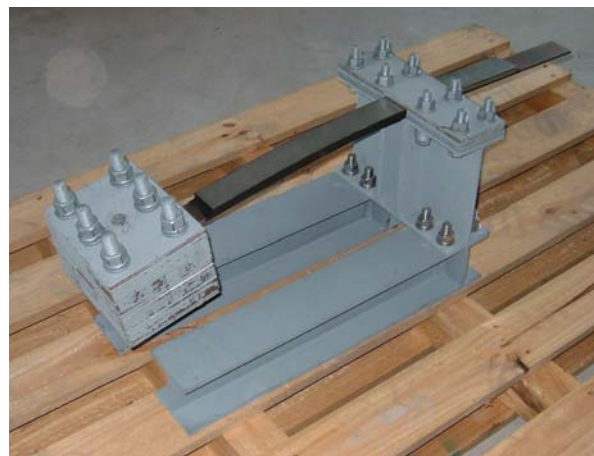
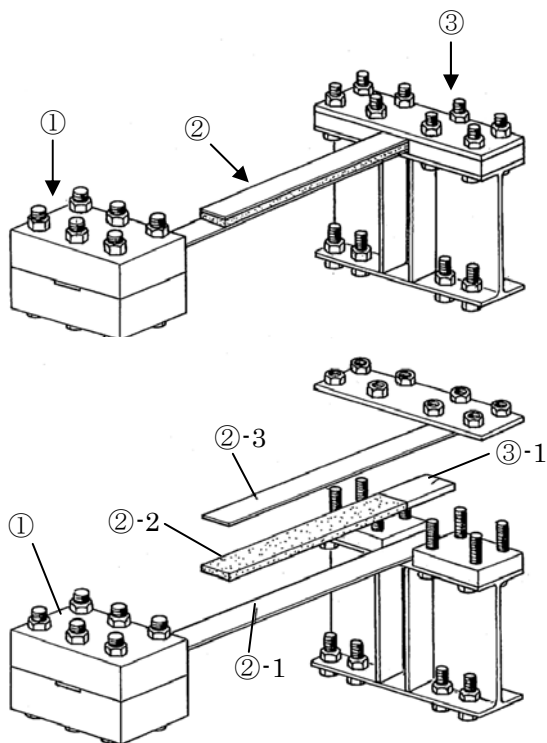


写真-1 BH-TMD プロトタイプ

* 技術研究室 ** 技術研究室室長

BH-TMD は、板バネと高減衰ゴムと錘で構成したシンプルな構造である。ゴムの減衰効果が高めるために拘束板をゴムに貼りつけている。高減衰ゴムには、温度変化の影響の少ないものを使用している。



各部名称	
①	: 重錘
②	: アーム部
②-1	: 板バネ
②-2	: 高減衰ゴム
②-3	: 拘束板 (ステンレス板)
③	: 取り付け台
③-1	: 取り付け部フィラープレート

図-1 プロトタイプ概要図

2. TMD の最適設計

単一動吸振器 (single-TMD) で設計する場合、Den Hartog らの理論式²⁾により、最適設計値が次式により求められる。

(1) 最適同調: γ

$$\gamma = \frac{\omega_n}{\Omega_n} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (1)$$

ω_n : TMD の振動数

Ω_n : 主振動系の振動数

μ : 質量比 (TMD 重錘質量/主振動系質量)

(2) 最適減衰率: ζ_{opt}

$$\zeta = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} = \zeta_{opt} \quad (2)$$

ただし、減衰率を $\zeta = c/2\sqrt{mk}$ と定義。

m : TMD の質量

k : TMD のバネ定数

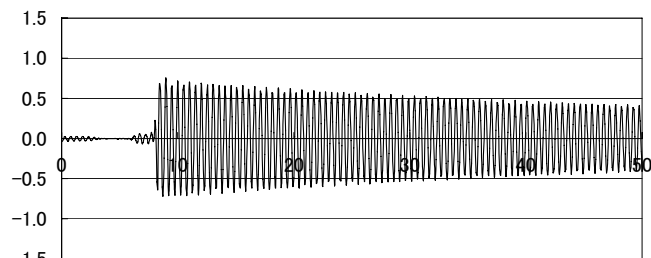
3. プロトタイプ性能試験

(1) 試験概要

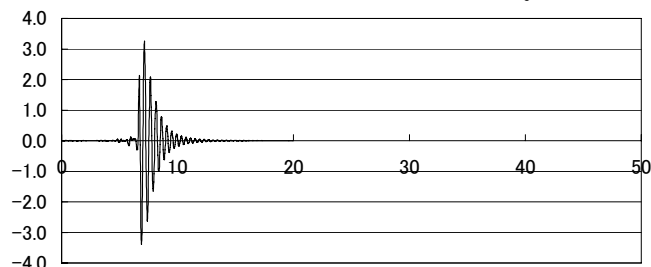
プロトタイプの諸元および目標値を以下のように定める。

- ・ 重錘重量: 30kgf
- ・ 振動数 f : 1.5~2.3Hz
- ・ 減衰率 c/c_c : 0.04~0.06
 - ※ 式 (2) より算出, 質量比 0.5~1.0% の最適減衰率
- ・ 板バネ断面: 幅 50mm×厚さ 6mm (材質 SUP9)
- ・ 拘束板断面: 幅 50mm×厚さ 1.5mm (材質 SUS304)

性能試験は、重錘を強制変位させて、自由減衰中の加速度時系列データを収録し、データ整理を行っている。高減衰ゴムによる減衰効果を、時系列データの一例で示すと図-2 のようになる。図のように、高減衰ゴムの効果で、大きな減衰力が得られ、減衰率の目標値 (質量比 1.0%) である $c/c_c=0.06$ もクリアしている。



(a) 高減衰ゴムなし: $f=2.0\text{Hz}$, $c/c_c=0.0009$



(b) 高減衰ゴム厚 12mm: $f=2.0\text{Hz}$, $c/c_c=0.07$

図-2 自由減衰時の時系列データ

(横軸: 時刻 sec, 縦軸: 加速度 m/sec^2)

(2) 振動数特性

アーム長(板バネ付け根から重錘中心までの距離)を変化させたときのグラフを図-3に示す。

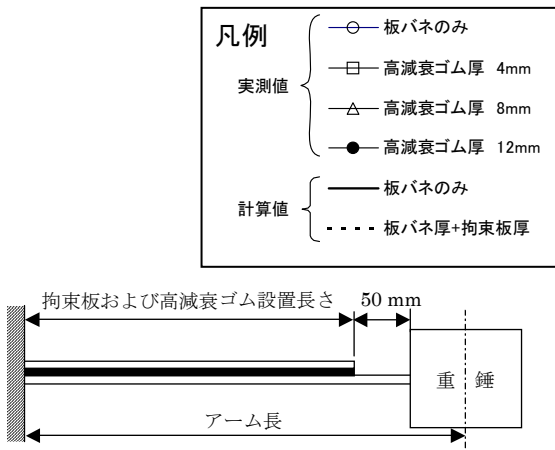
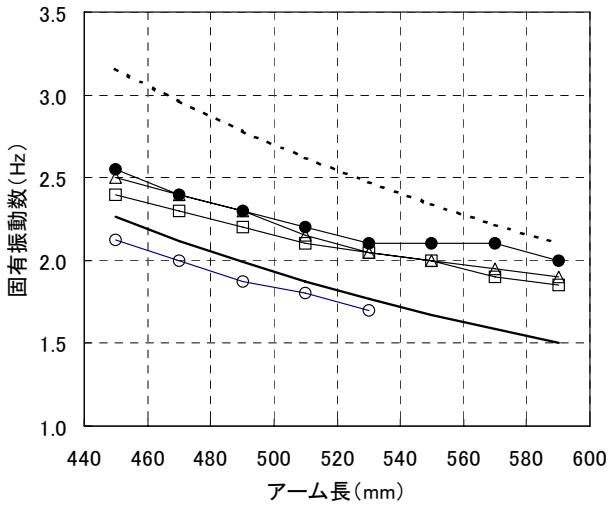


図-3 アーム長と固有振動数

グラフには、実測値と板バネのみの計算値、および板バネ厚+拘束板厚(密着して一体となった状態)の計算値を示している。拘束板と高減衰ゴムの影響は、アームが長くなるほど大きくなっており、板バネ厚+拘束板厚の計算値に近くなっている。高減衰ゴムにより、板バネと拘束板が一体化しているのがわかる。また、高減衰ゴムが厚くなるほど、振動数が上がる傾向が認められる。これは、断面2次モーメントの増加によるものと考えられるが、その影響は大きくない。図-4は、アーム長を590mmに固定し、高減衰ゴム厚12mmの拘束板を切断して短くしたときの固有振動数の変化を示している。拘束層を短くしていくと、板バネのみの計算値1.5Hzに近くなっていく様子がわかる(図-3参照)。また、振動数の減少と拘束板長さは、ほぼ比例関係にあり、拘束板が短くな

ることで、拘束板と板バネの一体化が薄れている。

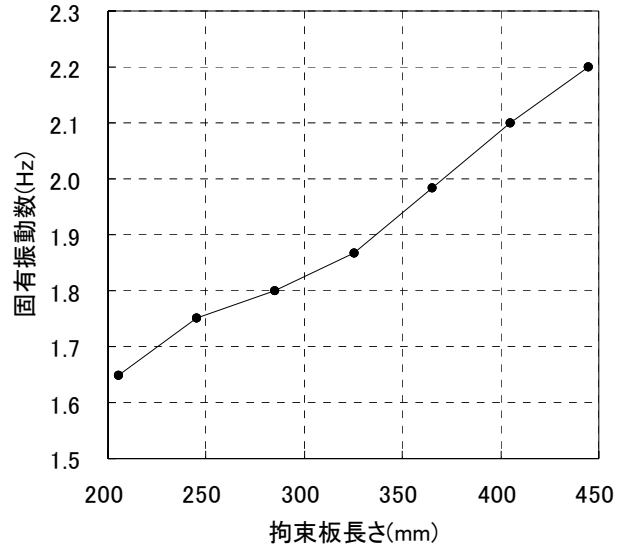


図-4 拘束板長さと固有振動数

(3) 減衰特性

高減衰ゴム厚と減衰率(c/c_c)の関係を示したものを図-5に示す。減衰率は、計測データから平均的な値を示している。

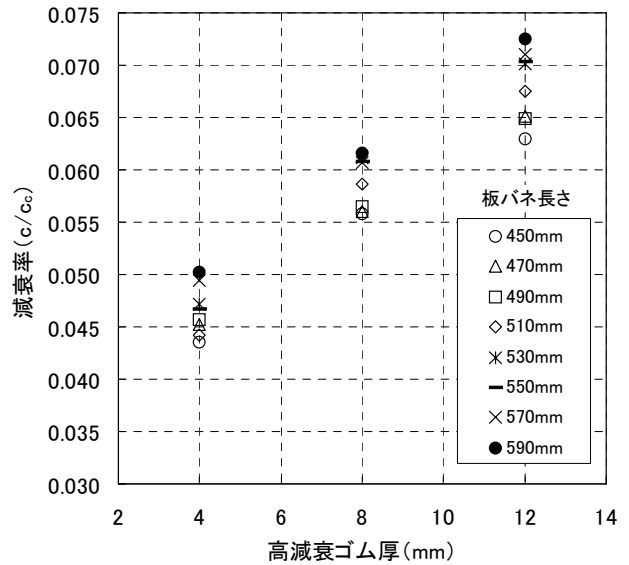


図-5 高減衰ゴム厚と減衰率 (c/c_c)

高減衰ゴムの厚さを変化させたとき、厚みの増加にほぼ比例して減衰率が増加する結果が得られた。板バネ長さが長くなる=高減衰ゴムおよび拘束板の設置範囲が広がることで、減衰が大きくなる傾向を示している。高減衰ゴムの厚さ8mmで減衰率の目標値0.06をクリアしている。single-TMDとして使用しても利用可能な範囲の減衰効果が得られる。

高減衰ゴムによる減衰効果は、理論的には制振鋼板の考え方をういており、プロトタイプに用い

たものは、拘束タイプと呼ばれ、複合板としての損失係数 η は、式(3)で算出される²⁾。実測値と比較すると表-1のようになる。比較の結果、理論値と実測値との差は大きなものとなっている。高減衰ゴム厚 4mm では理論値の 40%程度、8mm では 35%程度、12mm では 30%程度となっており、高減衰ゴム厚が厚くなるほど理論値から離れている。制振鋼板は、比較的高周波の振動もしくは、それに伴う固体伝搬音の低減を図るもので、振動振幅も微小なものを対象としている。プロトタイプでは、低周波で、高減衰ゴムのせん断変形量も大きなものであるため、理論式に当てはまらない結果となっているものと考えられる。また、板バネ固定部の鋼板摩擦面のすべりなどによる減衰性能低下も考えられる。後者の原因が主要因であれば、商品化段階でさらに性能を上げる余地がある。

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \frac{12g\eta_2}{1+2g+(1+\eta_2^2)g^2} \cdot \frac{E_3h_3}{E_1h_1} \cdot \left(\frac{h_{31}}{h_1}\right)^2 \\ h_{31} &= h_2 + \frac{h_1+h_3}{2} \\ g &= \frac{f_s}{f} \\ f_s &= \frac{G_2h_1}{4\pi E_3h_3h_2} \sqrt{\frac{E_1}{3\rho_1}} \end{aligned} \right\} (3)$$

- ただし、 E_1 ：板バネのヤング係数
- E_3 ：拘束板のヤング係数
- h_1 ：板バネの厚さ
- h_2 ：高減衰ゴムの厚さ
- h_3 ：拘束板の厚さ
- η_2 ：高減衰ゴムの損失係数
- g ：せん断パラメータ
- G_2 ：高減衰ゴムの剛性率
- ρ_1 ：板バネの密度

表-1 減衰率 (c/c₀) の実測値／理論値

高減衰 ゴム厚 (mm)	アーム長 (mm)								平均値
	450	470	490	510	530	550	570	590	
4	41%	42%	41%	39%	41%	40%	41%	42%	41%
8	37%	36%	35%	35%	35%	34%	34%	33%	35%
12	32%	32%	31%	31%	31%	31%	31%	31%	31%

図-6は、拘束板長さと減衰率の関係を示している。■で示した拘束板切断時のものと、白抜きのマークで示した板バネ長さを変化させたものを比べると、切断時の方が勾配が急なことから、重錘付近の高減衰ゴムによる減衰効果が高いことがわかる。

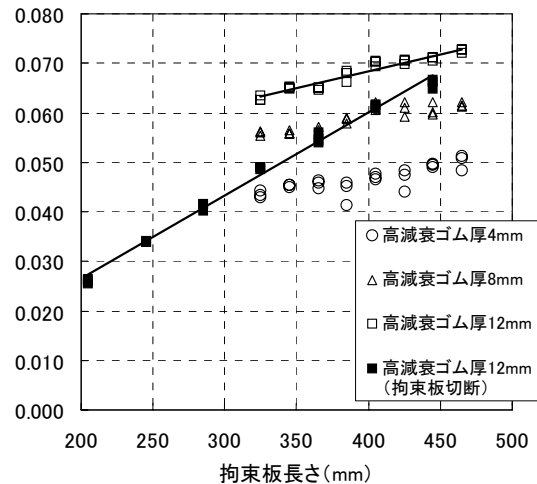


図-6 拘束板長さと減衰率 (c/c₀)

(4) 高減衰ゴムの特徴

ゴムは、温度の変化により減衰性能が変化する材料であり、通常は常温(20℃程度)でその減衰性能がピークになるように配合設計されている。しかし、TMDのような制振装置の減衰器として用いる場合、温度変化により減衰性能が変化すると、制振性能に影響を及ぼすことになる。そこで、鋼箱桁内などの高温の環境や寒冷地などの低温の環境下でも、安定した減衰性能を得るために、-50℃にピークがくるように配合した高減衰ゴムを用いることとした。表-2に高減衰ゴムの組成成分を示す。

表-2 高減衰ゴムの組成成分

組成物	割合
天然ゴム	100
プロセスオイル	30
カーボンブラック	80
亜鉛華	10
ステアリン酸	1.5
老化防止剤	6
加工助剤	2
加硫剤、加硫促進剤	4

図-7に減衰性能の指標として用いる損失係数 $\tan \delta$ と温度の関係を示している。道路橋示方書で規定されている温度変化の範囲 $-20^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ までの範囲で、安定した減衰性能が得られている。

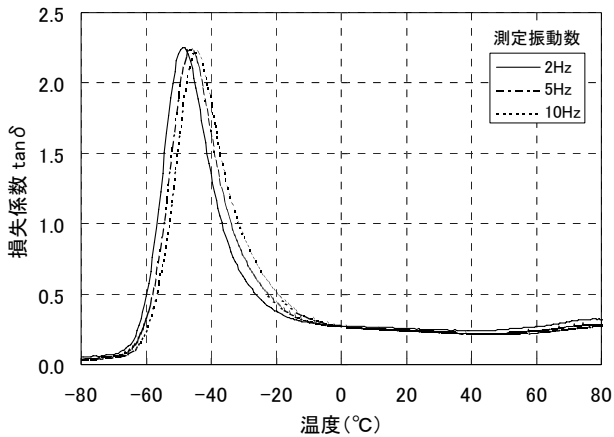


図-7 高減衰ゴムの損失係数の温度依存

また、高減衰ゴムと鋼板との接着については、加硫接着により、 490 N/cm^2 以上の接着強度が得られる。

4. プロトタイプ疲労試験

(1) 試験概要

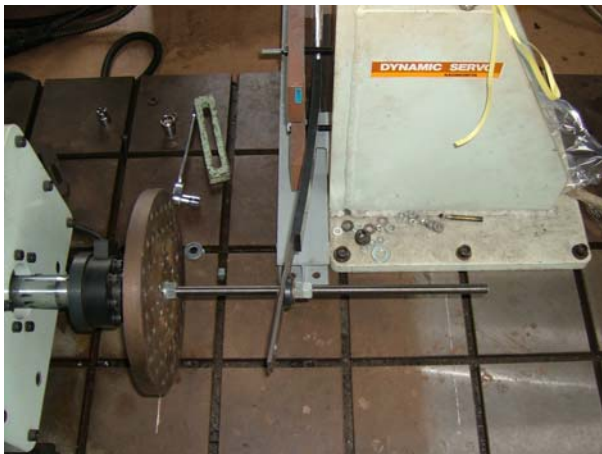


写真-2 疲労試験状況

重錘アーム部分（板バネ厚 6mm, 高減衰ゴム厚 8mm, ステンレス板厚 1.5mm）について、写真-2のように、アームを強制変形させて、疲労試験を実施した。強制変形は、重錘自重によるたわみ量 60mm を中立状態としている。

疲労試験の諸元は、下記のように設定している。

- ・アーム長：490mm
- ・変位振幅 $\pm 15\text{mm}$
- ・振動数 2.3Hz（歩道橋の共振振動数最大値）

アームの特性変化（固有振動数および減衰率）を

確認するため、繰り返し回数 1, 15, 30, 50, 70, 145, 200 万回で、アーム長 490mm での自由振動試験もあわせて行っている。

(2) 試験結果

疲労試験繰り返し回数と固有振動数および減衰率 (c/c_0) の関係を示したものを、それぞれ図-8、図-9に示す。固有振動数および減衰定数は安定した値となっており、疲労上問題がないことがわかる。減衰率に多少のバラツキが見られるが、これは、強制変形後の自由振動であることと、減衰が大きく計測波数が少ないことに起因している。また、試験終了後、アーム部の残留変形を確認したが、変形は認められなかった。

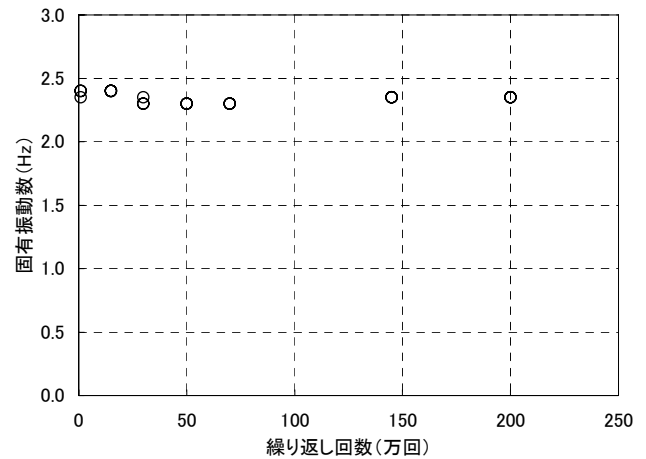


図-8 振動数に与える影響

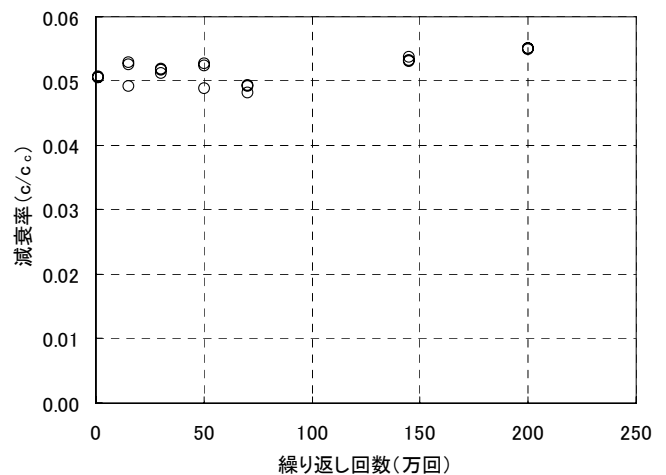


図-9 減衰率に与える影響

5. 歩道橋解析例

歩道橋の解析モデルを作成し、汎用振動解析ソフト (COSMOS) を使用して、時刻歴応答解析を行った。モデル図を図-10に示す。

(1) 歩道橋（主振動系）の条件

- 支間長：50m
- 幅員：2.7m
- 総重量：約 60 t
- 固有振動数：1.60Hz（たわみ 1 次モード）
- 構造減衰率：0.01（対数減衰率）

外力は、支間中央に载荷し、一人が主振動系と完全共振状態で歩行した時のものを想定している。

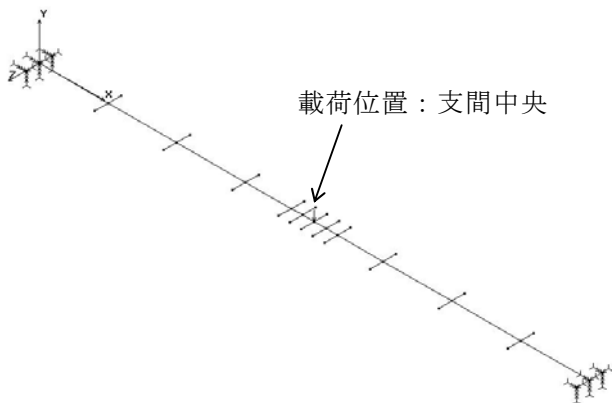


図-10 モデル図

(2) 歩道橋の振動レベル評価

歩道橋の振動レベル評価の指標として、表-2 のような歩行時のカテゴリと刺激の下限値が示されている。歩道橋の振動使用性を満足する振動速度の実効値は、0.85cm/s（カテゴリ番号 2：明らかに感じた）とされ、これ以下の振動レベルに振動を抑制するように推奨されている。

表-2 歩行時のカテゴリと刺激の下限値³⁾

番号	カテゴリの内容	下限値 (cm/sec)	
		ピーク値	実効値
1	少し感じた	0.6	0.42
2	明らかに感じた	1.2	0.85
3	少し歩きにくい	2.4	1.7
4	大いに歩きにくい	3.8	2.7

※（実効値）＝（ピーク値）/√2

(3) 解析結果

1) 制振装置（TMD）なし

図-11 に支間中央における鉛直方向振動速度の時系列データを示す。振動速度のピーク値は、2.80cm/s（実効値 1.98cm/s）となっており、“少し歩きに行くい～大いに歩きにくい”レベルになっている。また、歩行者は、橋面を 40sec 程度で渡り終わるが、その後も振動がしばらく持続している。

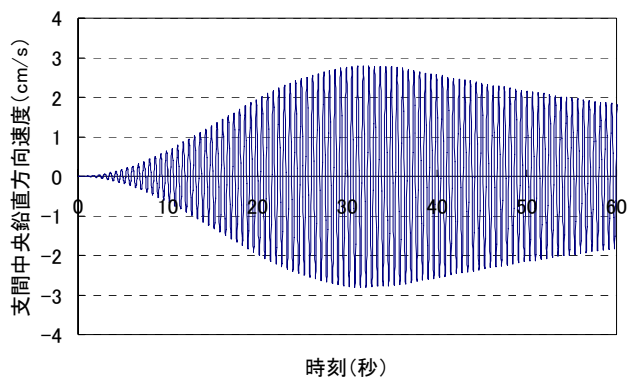


図-11 支間中央鉛直方向速度（TMD なし）

2) single-TMD（一般的な TMD 1 台）設置

図-12 に支間中央に重錘重量 300kgf（質量比 0.5%）の最適設計された TMD を 1 台設置した場合の支間中央における鉛直方向振動速度の時系列データを示す。

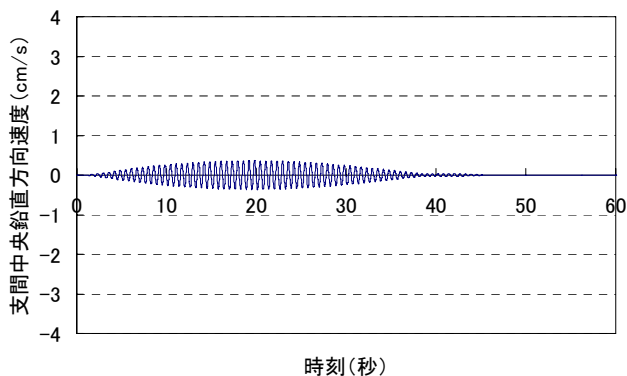


図-12 支間中央鉛直方向速度（single-TMD）

制振装置の設置により、振動速度のピーク値は、0.36cm/s（速度実効値 0.25cm/s）に抑制され、“少し感じた”レベル以下になっている。また、歩行者が渡り終えると同時に振動はおさまっている。

3) BH-TMD 設置

BH-TMD は、重錘重量 30kgf を限度としているため、支間中央付近（モデル図中央橋軸直角方向部材先端）に 10 台分散させて解析を行った。

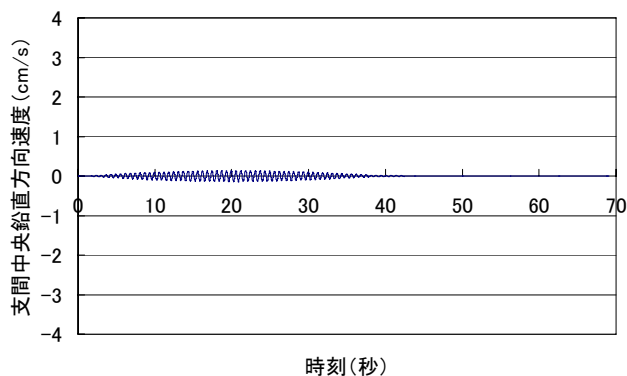


図-13 支間中央鉛直方向速度（BH-TMD）

図-13 に支間中央における鉛直方向振動速度の時系列データを示す。制振装置の設置により、振動速度のピーク値は、0.14cm/s（速度実効値0.099cm/s）となっており、single-TMD を1台設置する場合よりも、さらに振動抑制効果がある。

6. まとめ

プロトタイプを用いた実験により基本性能と疲労強度が十分であることを確認できた。また、振動解析により本 BH-TMD が歩道橋に対して通常の TMD より振動抑制効果が大きいことを確認した。

BH-TMD の特徴をまとめると下記のようなになる。

特 徴

- 構造部材の役割も果たす板バネを用いることで、構成部材を少なくし小型（重錘部の重量：最大 30kg 程度）で、経済的な構造を実現
- 高減衰ゴムを減衰機構に使用することでメンテナンスフリー
- 重錘を板バネのみで支えることにより、小振幅の振動に対しても敏感に作動
- 小型軽量のため、設置作業が容易：既設橋への取り付けが容易

あとがき

本制振装置は、倉敷化工株式会社と共同で開発を行ったものである。高減衰ゴムの選定や疲労強度の確認など、弊社とゴムメーカーとの共同作業により初めて実現できた内容であると考えています。今後も共同開発の体制を継続発展させ、商品化に取り組んでいきます。なお、本装置は特願 2004-172582 として、特許出願中です。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：立体横断施設基準・同解説，1979.1.
- 2) 株式会社エヌ・ティー・エス：現場実務者と設計者のための実用騒音・振動制御ハンドブック，2000.5.
- 3) 梶川康男・小堀為雄・岡田晃：振動と人間 II. 橋梁振動の評価（上），橋梁と基礎，pp.37-41，1979.8.

- 4) 梶川康男・小堀為雄・岡田晃：振動と人間 II. 橋梁振動の評価（下），橋梁と基礎，pp.44-47，1979.9.
- 5) 田中信治・加藤雅史：歩道橋設計時における振動使用性のチェック方法，橋梁と基礎，pp.29-33，1995.11.
- 6) 権映録・畑中章秀：高欄設置用の薄型 TMD を用いた既設歩道橋の制振対策，橋梁と基礎，pp.23-27，2002.12.