

## 第5章

---

### 歩道橋における振動対策の事例

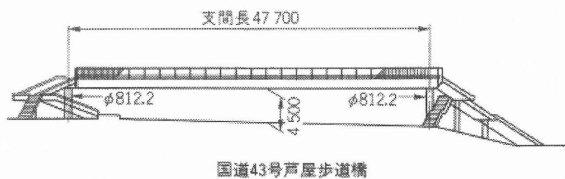
## 5-1 高欄設置用の薄型 TMD を用いた既設横断歩道橋の制振対策

振動問題：支間長 47.7m の鋼製歩道橋において、歩行者との共振による振動が発生し、その制振対策として、高欄部分に同調質量ダンパー (Tuned Mass Damper, 略称「TMD」) が設置された。

### 1. はじめに

歩道橋は一般的に細長い柔構造であり、主桁の単位長さ質量が小さい場合には、歩行者の通行によって振動が容易に発生することがある。特に、歩行者の歩調と歩道橋の固有振動数が接近する場合には、共振現象が発生し、大きな振幅となって歩行者に不快感を与える恐れがある。歩行者が普通に歩く場合の歩調は、2Hz 近傍が卓越するとされている。このため、立体横断施設技術基準・同解説 (昭和 54 年 1 月：以降「基準」と呼ぶ)<sup>1)</sup> では、主桁の固有振動数が 2Hz 前後 (1.5~2.3Hz) に入らないように設計するように規定している。

ここでは、既設歩道橋において発生した振動問題とその対策事例を紹介する。図-1 に対象とする国道 43 号芦屋歩道橋の概要図を、表-1 にその設計諸元を示す。支間長 47.7m の単純箱桁橋である。本橋は国道 43 号と市道 215 号との交差点上に架かっており、国道上の交差点を跨ぐことから中間支点を設けることができず、一般的な横断歩道橋としては比較的長支間を有している (図-2)。比較的長支間で、しかも軽量 (単位長さ当りの死荷重が 11.2kN/m) であること、さらに、橋の固有振動数が歩行者の歩調 (2Hz) と比較的近いこともあり、歩行者との共振に伴う不快振動の発生が問題となった。また、建設年次が昭和 51 年であり、上述の「基準」が適用される以前の歩道橋であった。



国道43号芦屋歩道橋

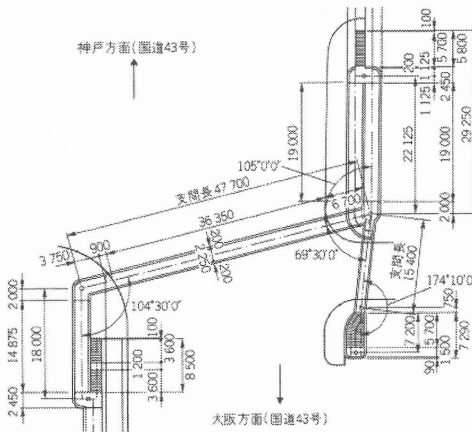


図-1 対象とする国道 43 号芦屋歩道橋の一般図

表-1 国道 43 号芦屋歩道橋の設計諸元

項目	種類・数値
形式	主桁：単純箱桁
	斜路：単純 I 桁
支間長	47.7m
有効幅	主桁：2.25m
	斜路：2.25m
	階段：1.5m
桁下空間	4.7m
死荷重	11.2kN/m

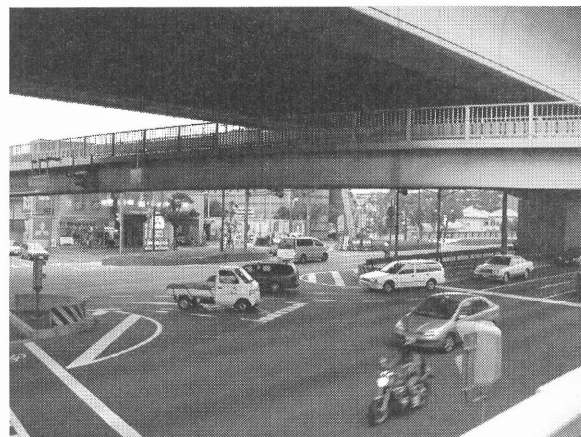


図-2 現地状況写真 (TMD設置前)

そこで、共振応答を低減する目的で制振装置の適用を検討し、装置の設計・製作・架設を行った。以下では、制振装置の概要とその制振効果について述べる。

## 2. 原因究明

### 2.1 減衰自由振動実験

制振装置を設計する前に減衰自由振動実験により歩道橋の固有振動数と構造減衰率を計測した。図-3 に橋の中央でジャンプ加振している様子を示す。ここでは歩調に最も近接しており、振動使用性に最も影響が大きいと考えられる鉛直たわみ対称 1 次モードを対象とした。

図-4 に減衰自由振動波形を示す。現地調査の結果、本橋の固有振動数が 1.85Hz と歩行者の最頻歩調 (2Hz) に非常に近いこと、また、構造減衰率が 0.011 (複数回の平均値) と同様の鋼橋の中でも低い値であり、非常に揺れやすい状況にあることが

分かった。



図-3 減衰自由振動実験（歩道橋の人力加振）

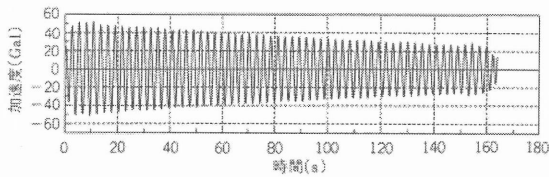


図-4 減衰自由振動波形（TMD設置前）

## 2. 2 共振歩行実験

次に、鉛直たわみ対称1次固有振動数（1.84Hz）に歩調を合わせてスピーカー音を発生し、この発生音に合わせて共振歩行（単独共振歩行）を行った（図-5）。図-6 に共振応答波形（支間中央での応答）を示す。歩行開始から共振応答が発達し始めて、応答振幅の最大値は3.97cm/sに達している。これを次式で与えられる速度実効値に換算すると、2.81cm/sとなった。

$$V_E = V_{max} / \sqrt{2} \quad (1)$$

ここに、 $V_E$ ：振動速度の実効値（速度実効値）（cm/s）

$V_{max}$ ：振動速度の最大振幅値（cm/s）

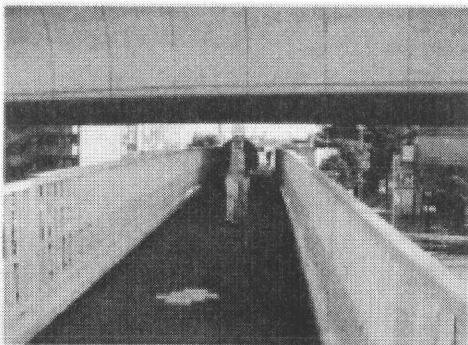


図-5 単独共振歩行実験

この速度実効値を表-2で与えられる振動忍限度<sup>2)</sup>と比較することで振動使用性を評価した。これより、本橋の場合、「大いに

歩きにくい（速度実効値：2.7cm/s）」速度振幅に達しており、立位状態では「不快である」速度振幅も超過している。以上より、本歩道橋は何らかの制振対策が必要と結論付けた。

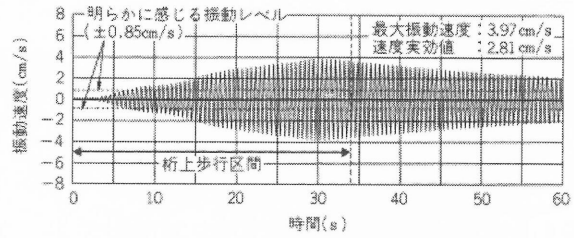


図-6 共振歩行による振動速度波形（TMD設置前）

表-2 立位・歩行状態に対する振動忍限度

立位状態	忍限度・実効値 (cm/s)
少し感じた	0.18
明らかに感じた	0.40
不快である	1.90
苦痛である	5.00

歩行状態	忍限度・実効値 (cm/s)
少し感じた	0.42
明らかに感じた	0.85
少し歩きにくい	1.70
大いに歩きにくい	2.70

## 3. 対策方法

### 3. 1 制振対策の選定

上述のように現地計測の結果、歩行者との共振により明らかに不快な振動が生じることが判明した。当初、桁内にコンクリートを流し込んで質量を増やしたり、付加的な部材を溶接することで桁の剛性を増したりする対策案が検討された。しかし、改良が大掛かりとなることや、対策に付随して橋脚基礎も補強する必要が生じるなど、施工性や経済性の面で実現が困難と判断された。そこで、制振装置を設置することで桁本体の減衰性を高め、共振応答を低減させる対策案が採用された。ここで取り扱う制振装置は、同調質量ダンパー（Tuned Mass Damper、略称「TMD」）と呼ばれるものである（図-7）。対象とする構造物に対して高い減衰要素を付与した副振動系を形成することにより、構造物本体の振動を制御しようとするものである。

### 3. 2 動的応答解析による制振効果の検討

#### (a) 歩行外力モデル

制振装置を採用するに当たり、歩行外力モデルを用いた動的応答解析を行い、制振効果を確認した。解析に先立ち、歩道橋の実応答を適切に表現できる歩行外力モデルの選定が必要と考え、歩行外力モデルとして正弦波と半正弦波の2波を想定し（図-8）、

各々の歩行外力による速度応答を求めた。解析に用いた歩行外力は式 (2) に示す通りである。

$$F(t) = \alpha W f(t) \cdot \phi(vt) \quad (2)$$

ここに、W：人の体重 (=60kg と仮定)

$f(t)$ ：外力関数 (=sin(2πft)，f=1.84Hz，完全共振状態)

$\phi(vt)$ ：歩道橋上での移動効果を表す関数

$$\phi(t) = \sin\left(\frac{\pi vt}{L}\right)$$

v：歩行速度

L：支間長

α：腰部加速度振幅 (=0.4g)

図-9 下段は半正弦波を歩行外力として解析した結果であり、上段に示す計測値とほぼ一致している。一方、正弦波を用いた場合は計測値のほぼ2倍の応答振幅値が得られた。そこで、本解析の歩行外力としては半正弦波を採用し、以下によるTMDの制振効果を検討した。

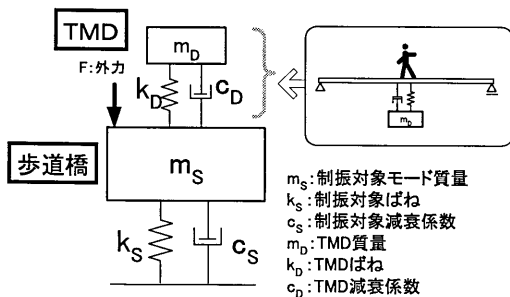


図-7 歩道橋-TMD系の振動モデル

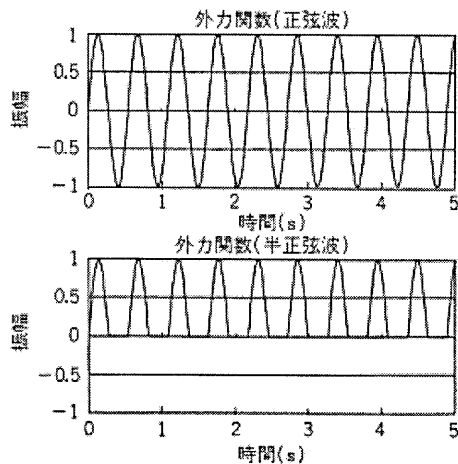


図-8 外力関数 (正弦波・半正弦波)

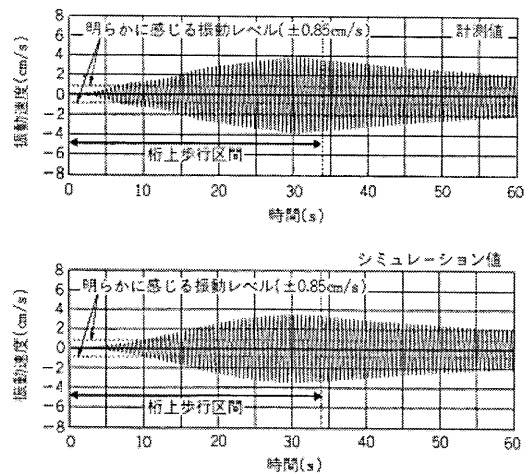


図-9 動的応答解析と計測値の比較 (TMD設置前)

(b) TMDによる制振効果の数値検討

制振対象となる鉛直たわみ対称1次モードに対して、次式によりTMDの振動諸元(固有振動数・構造減衰)を設定した。次式は調和外力に対する最適値である<sup>3)</sup>。

$$(f_{TMD})_{opt} = \frac{f_s}{1 + \mu} \quad (\text{最適振動数})$$

$$(\delta_{TMD})_{opt} = 2\pi \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (\text{最適減衰率}) \quad (3)$$

ここに、 $f_s$ ：歩道橋の固有振動数

$\mu$ ：歩道橋とTMDの質量比

式(3)にあるようにTMDの制振効果は構造物とTMDの質量比によって左右されるために、質量比と制振効果の関係を動的応答解析により検討した。表-3に各質量比に対する最適振動数および最適減衰率を示す。

表-3 TMDの質量比と最適振動諸元

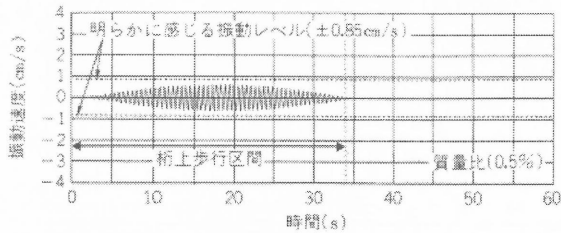
質量比 (%)	質量 (kg)	最適振動数 (Hz)	最適減衰率
0.5	135	1.83	0.27
1	270	1.82	0.38
1.5	407	1.81	0.47
2	543	1.80	0.54
3	815	1.79	0.66

図-10は質量比を0.5%と1%とした場合の速度応答の解析結果である。TMDを設置しない場合(図-9)と比較すると、約1/6の応答低減が認められ、「明らかに感じる(速度実効値：0.85cm/s)」の速度振幅を下回る応答となっている。

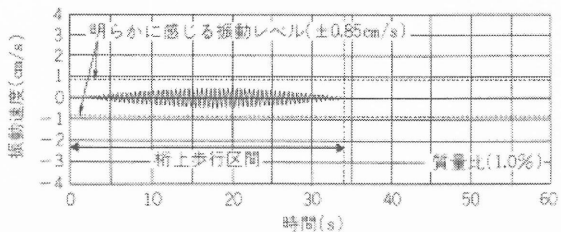
図-11に質量比と歩道橋の応答振幅(速度実効値)の関係を示す。図中には表-2で示した振動許限度を併記する。質量比を0.5%以上大きくしても制振効果が顕著に向上することはないが、質量比1%で「少し感じる(速度実効値：0.42cm/s)」速度振幅を下回る応答にまで抑制できる。

次に、目標とする制振目標について考察する。表-4に提案さ

れている代表的な制振目標を示す。このように各研究者により制振目標が提案されているものの、基準として明確に規定された数値はない。当然、揺れを感じないレベルにまで振動を抑制することが理想であるが、設置スペースの制約や経済性を考慮すると、重錘質量をいくらでも大きくできるわけではなく、合理的な考えのもと制振目標を設定し、その目標を満足するようなTMDを設計すべきと考える。



(a) 質量比0.5%



(b) 質量比1%

図-10 TMD設置後の動的応答解析結果

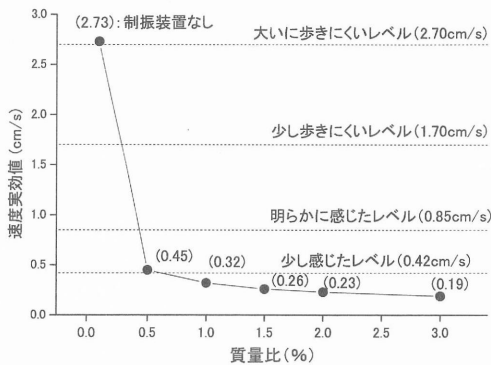


図-11 TMD質量比と速度実効値の関係

表-4 制振目標の提案例

照査方法	荷重状態	振動許容値・実効値 (cm/s)	振動感覚
小堀, 梶川, 城戸 <sup>4)</sup>	最頻歩調1人	0.42	感じない
梶川 <sup>5)</sup>	単独歩行状態	1.7	少し歩きにくい
	群集載荷状態	1.7	少し歩きにくい
	単独走行状態	2.7	大いに歩きにくい
田中・加藤 <sup>9)</sup>	共振歩調1人	0.85	明らかに感じる

本橋の場合、横断歩道上に架かる橋であり、多くは横断歩道を利用するため最少人数(1人)の歩行者がたまたま歩く程度の利用状況である。また、近くに小学校があり、小学生による群集歩行に曝されることはあっても、大人の群集歩行に曝される機

会は少ない。

このような状況を考慮すると、本橋の使用限界状態は単独共振応答によりもたらされるものと考えられる。さらに、固有振動数が1.84Hzと歩行者の最頻歩調の2Hzよりもやや小さく、完全共振状態はごく稀にしか生じないと考えられる。そこで、本業務では、田中・加藤の提案にならない共振応答が「明らかに感じる」速度振幅以下になることを制振目標として質量比1%のTMDを採用した。質量比1%のTMDを用いれば、動的応答解析上は「少し感じるレベル」以下に共振応答を抑制することができる。しかし、実際には計算条件の不確定性(特に、歩行外力モデルの誤差)や群集荷重による応答発現の可能性を考慮した安全側の質量比と考える。

### 3.3 制振装置の概要

制振装置を実現するにあたり、どのような規模の装置をどこに設置するかが問題となる。本橋は国内でも有数の交通量を誇る幹線道路を跨ぐ歩道橋であり、大掛かりな架設工事を回避する必要があった。そこで、施工性に加えて経済性を考慮して高欄の一部を除去して、その狭い設置スペースにTMDを設置することとした。図-12~図-14は各々TMDの高欄への設置状況ならびにTMD内部の状況を示したものである。本TMDは高欄の一部を切断し、その部分にはめ込む構造(高さ855mm×幅1100mm×厚さ150mm)とするために非常に薄型になっている。

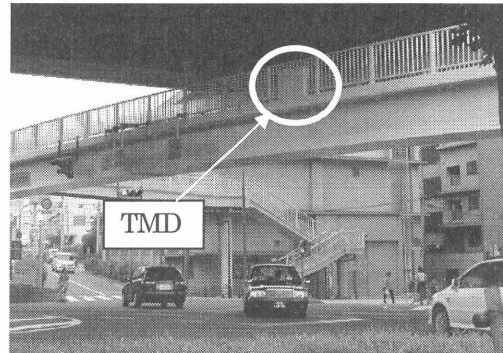


図-12 TMDの設置状況(その1)

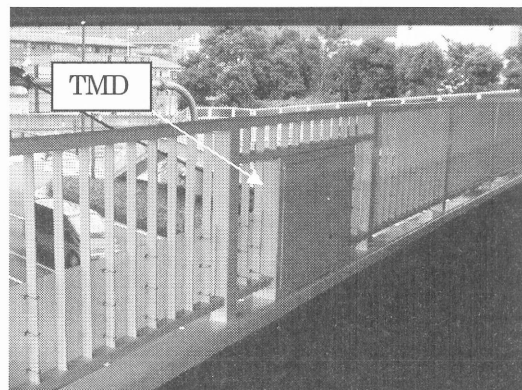


図-13 TMDの設置状況(その2)

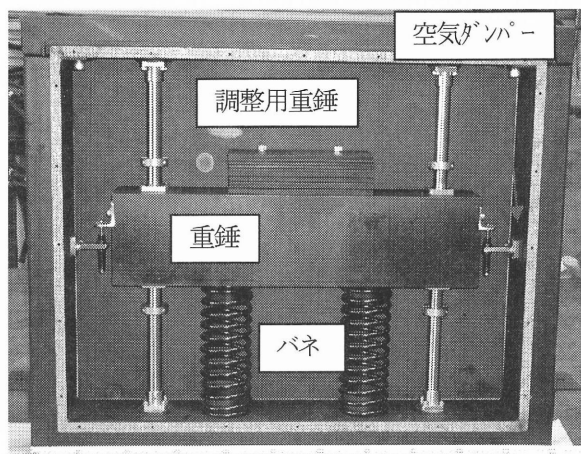


図-14 TMDの機械構成

#### 4. 対策効果

##### 4.1 減衰自由振動実験

TMDを作動させた状態での加振減衰波形を計測した。図-15に計測結果を示す。

なお、本歩道橋は塗装塗替工事に加えて路面の舗装工事も行われており、事前に計測した鉛直たわみ1次モードの固有振動数(1.84Hz)と、塗装・舗装後に計測した固有振動数を比較すると、後者の方が約2%低い値(1.80Hz)となった。若干ではあるが、全重量が増加したためと考えられる。そこで、調整用重錘を追加して、制振装置の固有振動数を最適値に調整した。制振装置を作動させた状態での加振減衰波形をみると、若干のうなり振動が認められるものの約10秒で振動が減衰する様子が読み取れる。

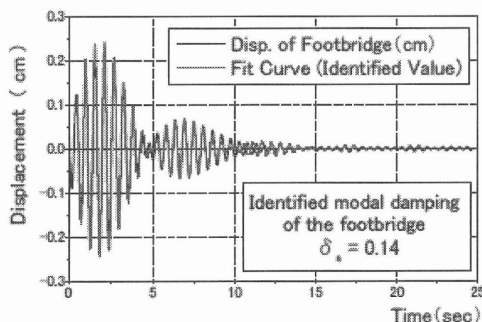


図-15 減衰自由振動波形 (TMD設置後)

うなりを伴う減衰自由振動波形から構造減衰を直接読み取ることが難しいために、ここでは2自由度振動モデルの減衰自由振動波形に適合するようなパラメータ同定<sup>7)</sup>を行い、モード減衰を算定した。図-15中に適合波形を併記する。推定されたモード減衰は0.14となり、TMD設置前と比べると13倍もの減衰増加となった。

##### 4.2 共振歩行実験

TMDを作動させた状態での共振歩行実験を行った。図-16

に実験結果を示す。図から分かるように歩道橋の振動は明らかに抑制されている。振動応答結果(速度実効値)は制振目標値である「明らかに感じる振動(速度実効値:0.85cm/s)」を下回る値が得られた。

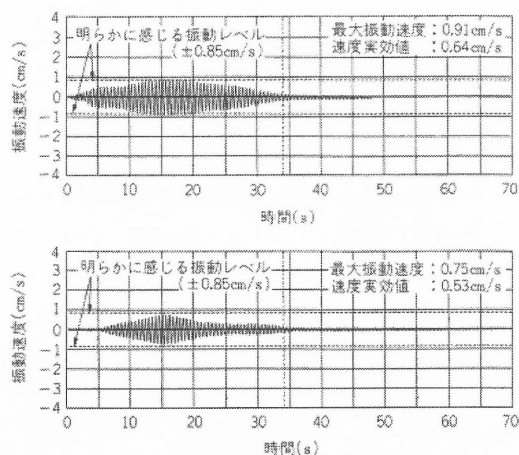


図-16 共振歩行による振動速度波形 (TMD設置後)

#### 5. まとめ

本章では、「歩道橋における振動問題の対策事例」として、国道43号芦屋歩道橋での事例を紹介した。本件では単独歩行者との共振に対する対策として、TMDの適用事例を紹介したが、群集歩行のような不規則性の強い振動に対しては必ずしも有効ではないことを付記する。また、水平方向の剛性が低いケーブル構造を採用したような歩道橋の場合、人の水平方向の体重移動に伴い水平方向の共振応答が生じるケースがある。この場合、橋体の水平方向振動に対して人の歩行があたかも積極的に同期するような一種の自励振動的な現象が生じることが知られている。この振動に対する制振対策として、当然、TMDの適用が考えられるが、歩行外力が未知な部分が多く、制振効果の事前検討(特に、質量比の設定)を注意深く実施する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説、丸善、1979.1.
- 2) 日本鋼構造協会：人にやさしい歩道橋計画設計指針・同解説、1997.6.
- 3) 山口：構造振動・制御、共立出版、1996.5.
- 4) 小堀、梶川、城戸：振動感覚を考慮した歩道橋の設計、橋梁と基礎、1974.12.
- 5) 梶川：振動感覚を考慮した歩道橋の使用性照査法に関する考察、土木学会論文報告集、No.325、1982.
- 6) 田中・加藤：桁形式歩道橋の設計時振動使用性照査手法の提案、構造工学論文集、Vol.40A、1994.
- 7) 岡林、山森、讃岐、田村：近接固有値を有する構造物の振動特性推定、No.633/I-49、1999.10.

(※) 本資料は、橋梁と基礎2002-12にて公表済み

## 5-2 単独共振歩行および群集歩行に対する歩道橋の制振について

振動問題： 単独歩行および群集歩行に対する歩道橋の制振について数値検討を行った。各々の歩行状態に対するパッシブマスダンパー（TMD）とアクティブマスダンパー（ATMD）の適用性や限界について考察した。

### 1. はじめに

人は歩道橋を通行中に大きな振動を感じると「橋が壊れるのではないか」等の不安を感じる。特に、経済的に設計された支間長40m程度の歩道橋では鉛直たわみ1次固有振動数が歩行者の最頻歩調である2Hzに近くなるものが多いので、歩行者の歩調が歩道橋と共振しやすく、歩行者が不快な振動を感じる場合が多い。このため立体横断施設技術基準・同解説（昭和54年1月）<sup>1)</sup>では、この共振を避けるために主桁の固有振動数が1.5Hzから2.3Hzの範囲に入らないよう規定している。

最近では、歩道橋の振動使用性を評価するために単独共振歩行による外力モデルを用いた動的応答解析を行い、設計段階で振動使用性をチェックするケースが増加している<sup>2)3)</sup>。そして、歩行者との共振応答が大きい場合には同調質量ダンパー（Tuned Mass Damper, 以下、TMDと略称する）を用いた制振対策を取ることがある<sup>4)</sup>。

従来歩道橋の振動に関する研究例をみると、歩道橋に生じる振動として単独歩行者との共振が使用限界状態になるとの判断から、単独歩行者の歩行外力や共振応答の評価に関する研究<sup>5)6)</sup>が多いが、競技場やイベント会場近くにシンボルやモニュメントとして建設される歩道橋は群集歩行による振動影響も懸念される。しかし、群集歩行に対する計測例<sup>7)</sup>や研究例<sup>8)9)</sup>は少ない。

街中にある歩道橋では、群集歩行として歩行者の一群が通過する場合は振動感覚的には問題とならない<sup>7)</sup>。しかし、イベント会場の近くに建設される歩道橋の場合、街中よりも大きな歩行密度を有する群集が継続して通過するために、定常的にある一定レベル以上の応答が生じることになる。このような状況下では、群集歩行による強制振動によっても振動使用性の問題が生じる可能性があるとして予想される。著者らもイベント会場近くの歩道橋において群集歩行時の振動計測を行ったが、歩行密度が大きい群集荷重が連続的に通過する状況下では、不安を訴える歩行者が多くなる状況を経験している。

本論文では制振装置を用いた歩道橋の制振対策について検討している。従来、単独歩行者との共振を低減させるためにTMDを適用する例<sup>10)</sup>は多いが、上述の理由により群集歩行状態に対するTMDの制振効果についても検討した。さらに、群集歩行に対しては、TMDに駆動モーターを付加したアクティブTMD（以下、ATMDと略称する）の適用性についても検討している。これらの検討を通して、歩行状態（単独共振歩行と群集歩行）に応じた各制振装置の適用性について考察した。

### 2. TMDを用いた単独共振歩行および群集歩行時の歩道橋の制振

本節では、歩行者と共振しやすい歩道橋を想定し、単独共振歩行と群集歩行に対するTMDの制振効果を検討した。

#### 2.1 対象とした歩道橋の概要と解析モデル

対象とする歩道橋として支間長40m、幅員2m、単位長さ重量19.6kN/mの鋼製単純梁を想定した。構造減衰は、対数減衰率 $\delta=0.02$ とした。文献11)によると、この対数減衰率はこの規模の歩道橋としては下限値に近い。歩道橋の鉛直たわみ1次固有振動数は、歩行者の最頻歩調に等しい2Hzとし、これを制振対象モードとする。対象とした歩道橋の構造諸元を表-1に示す。

表-1 対象とした歩道橋の構造諸元

支間長	40 m	幅員	2 m
断面2次モーメント	0.04035 m <sup>4</sup>	単位長さ重量	19.6 kN/m
対数減衰率 $\delta$	0.02	固有振動数	2.0 Hz
減衰定数 h	0.32%	—	—

解析モデルは、歩道橋の制振対象振動モードを鉛直たわみ1次モードとして1質点のバネ・減衰系にモデル化し、これにTMDのマス・バネ系を付加した2質点系モデルとした。図-1に解析モデルを示す。

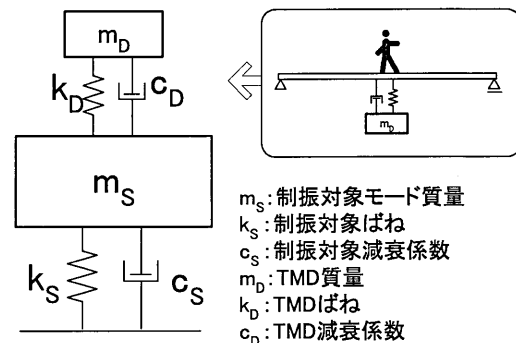


図-1 歩道橋-TMD系の解析モデル

また、歩道橋に設置するTMDは、調和外力に対して最適なTMDとした。調和外力に対する最適TMDの諸元は次式により与えられる<sup>12)</sup>。なお、添字optは最適設計された値を意味する。

$$\gamma_{\text{opt}} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (1)$$

$$(\delta_T)_{\text{opt}} = 2\pi \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \quad (2)$$

ここに,

$\mu$  : 質量比 ( $= m_D / m_s$ )

$\nu_{opt}$  : 最適同調比 ( $= f_D / f_s$ )

$(\delta_D)_{opt}$  : TMDの最適減衰率

歩道橋の振動特性値を既知として TMD の質量を決定すると、式 (1), (2) より TMD の最適なばね定数  $k_{D,opt}$  と減衰  $c_{D,opt}$  が求められる。

## 2.2 単独共振歩行に対する制振効果

上述の歩道橋に対して、単独共振歩行に対する応答解析を実施した。なお、歩行外力は本解析では式 (3) のように正弦波外力としてモデル化した。

$$\left. \begin{aligned} F(t) &= \frac{f(t)}{M_{s,n}} \Phi(\nu t) \\ f(t) &= \alpha W \sin(2\pi f_0 t) \\ \Phi(x = \nu t) &= \sin(\pi x / L) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

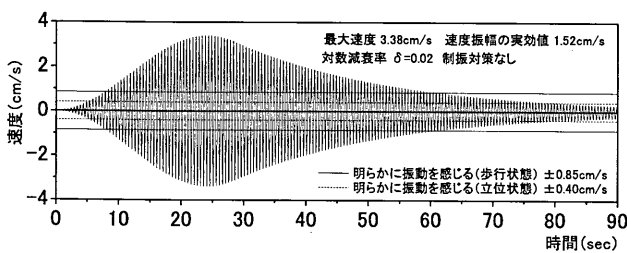
ここに,

$L$  : 支間長 (m),  $W$  : 人の体重 ( $= 0.588 \text{ kN} = 60 \text{ kg}$ )

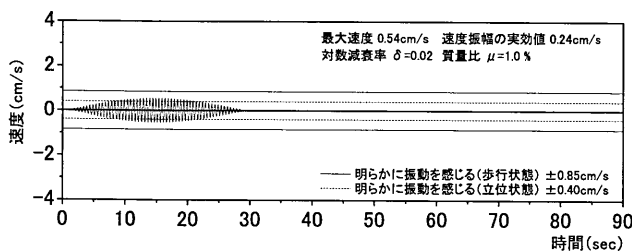
$M_{s,n}$  :  $n$  次モード一般化質量,  $\alpha$  : 腰部加速度振幅 ( $= 0.4 \text{ g}$ )

$\nu$  : 歩行速度 ( $= 0.7 f_0 \text{ m/s}$ ),  $f_0$  : 歩調 (Hz)

式 (3) の歩行外力を用いて TMD 設置前後の応答を比較した。応答波形の一例として、TMD 設置前後の歩道橋の速度応答波形を図-2 に示す。TMD の質量比は 1.0% としている。図より、TMD 設置後は応答値が約 1/6 に低減されていることがわかる。



(1) 制振対策なし



(2) 質量比  $\mu=1.0\%$  の TMD 設置

図-2 単独共振歩行応答波形 (TMD 設置前後で比較)

図中の速度実効値とは、歩行者が歩道橋を渡る間に受ける平均的な振動刺激に相当し、単独共振歩行に対しては次式により定義される。

$$\left. \begin{aligned} V_E &= \beta \cdot V_{RMS} \\ \beta &= \frac{1}{L} \int_0^L \sin(\pi x / L) dx = \frac{2}{\pi} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに,

$V_E$  : 速度実効値,  $V_{max}$  : 最大速度

$V_{RMS}$  : 速度の RMS,  $V_{RMS} = V_{max} / \sqrt{2}$

制振対策なしの速度実効値は  $1.52 \text{ cm/s}$  となったが、著者が計測した同規模の歩道橋 (支間長  $44 \text{ m}$ ) の単独共振歩行による応答 (速度実効値  $1.38 \sim 1.87 \text{ cm/s}$ , 図-3 参照) と同程度であった。

次に TMD の制振効果を検討するために質量比を変えて TMD 設置前後の速度実効値を算定した。図-3 に結果を示す。なお、質量比 0% の値は制振対策なしの速度実効値である。また、図中の横線は小堀・梶川により提案された振動限度で、表-2 に示す。図より、制振対策なしの場合、歩道橋の応答は「明らかに感じた」レベルを超え「少し歩きにくい」レベルに近い応答になっている。

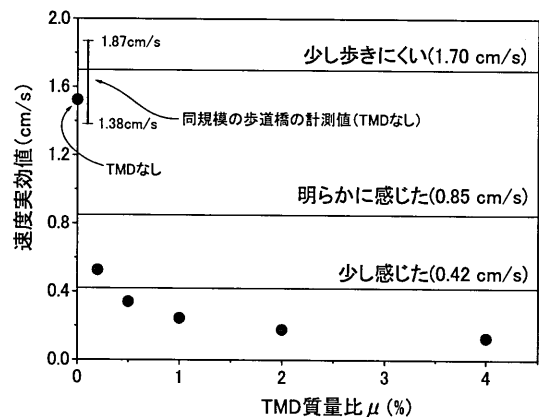


図-3 質量比と速度実効値

表-2 振動限度<sup>13)</sup>

カテゴリー	限度 (速度実効値 cm/s)
少し感じた	0.42
明らかに感じた	0.85
少し歩きにくい	1.70
大いに歩きにくい	2.70

いま、仮に単独共振歩行による制振目標を田中・加藤<sup>11)</sup>が提案した「明らかに振動を感じた」レベル ( $0.85 \text{ cm/s}$ ) とすると、本歩道橋では質量比  $\mu=0.2\%$  程度の TMD を設置すれば単独共振歩行に対しては十分な制振効果が得られることがわかる。なお、実設計では TMD の同調誤差や設置スペースの制約 (重錘種別振幅の制約) 等を考慮して、TMD の質量比はもう少し大き目に設定



される。また、TMD を設置したことによって歩道橋の固有振動数は増減するが、固有振動数への影響は質量比 $\mu$ の平方根のオーダーであり、小さい<sup>12)</sup>。

### 2.3 群集歩行に対するTMDの制振効果

群集歩行にさらされる歩道橋の応答解析を行い、群集歩行に対するTMDの制振効果を検討する。

#### (1) 群集歩行外力のモデル化

群集歩行による荷重列は、式(3)で与えられる単独歩行外力の重ね合わせとして次式により定義される。

$$F(t) = \frac{1}{M_{s,n}} \sum_{i=1}^n \alpha W_i \sin[2\pi f_i(t - T_i) + \theta_i] \cdot \Phi[v_i(t - T_i)] \quad (5)$$

$f_i$  : 歩行者の歩調 (正規分布  $N(m,0.2)$   $m=2.0, 1.8$  Hz に従うと仮定し、乱数発生)

$\theta_i$  : 位相差 ( $0 \sim 2\pi$  の一様乱数を発生)

$T_i$  : 到着時間,  $v_i$  : 歩行速度 ( $0.7 f_i$  m/s)

群集歩行外力は、一般的な歩行状態に比較的近いと思われる2列歩行とし、到着時間を1.0, 2.0, 3.0秒/人列と変化させた。各歩行者の歩調の位相差は一様乱数により与えた。歩調は平均2.0Hz、標準偏差0.2Hzの正規分布に従うと仮定し、乱数を発生して決定した。なお、歩行者の到着特性はアーラン分布やポアソン分布に従うとされているが、定常応答に対しては確率分布による違いは少ない<sup>14)</sup>と考え、本論文では一定の到着時間間隔を与えた。

また、群集歩行時の平均歩調は歩行密度と関係があり、基本的には密度が高い場合には歩行速度が遅くなる傾向にある<sup>15)</sup>。本論文では、歩行者が自由に歩ける程度の群集歩行密度(0.25~0.75人/m<sup>2</sup>)を想定しており、この場合、文献15)を参照すると最大で約1割程度平均歩調が低下する。そこで、歩調が平均的に1割低下したケース(平均歩調1.8Hz)も検討した。これらの解析条件とそれぞれのケースにおける歩道橋上の最大人数をまとめたものを表-3に示す。

表-3 各ケースの歩道橋上最大人数

平均歩調 f (Hz)	2.0 Hz	1.8 Hz
歩行速度(m/s)	1.4 m/s	1.26 m/s
到着時間 (sec/人)		
1.0	58人 (0.73)	64人 (0.80)
2.0	28人 (0.35)	32人 (0.40)
3.0	20人 (0.50)	22人 (0.28)

\* ( ) 内は歩行密度 人/m<sup>2</sup>

#### (2) 群集歩行による歩道橋の応答解析

到着時間2.0秒(歩道橋上の最大人数 = 約30人)とし、歩調

の平均が2.0Hz、1.8Hzと変化した場合の群集歩行外力を計算した。外力の周波数分析結果を図-4に示す。また図-4にはそれぞれの周波数分析波形の特徴を際立たせるために、波形を隣接平均法にて平滑化したものをあわせて示す。

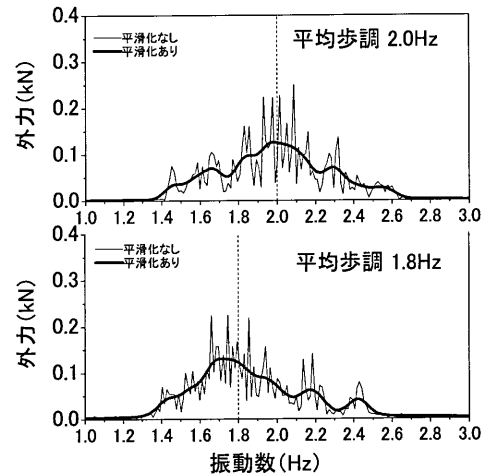


図-4 群集歩行外力の周波数分析結果 (約30人)

図-4より、群集歩行外力の平均歩調が2.0Hzから1.8Hzに変化していること、平均歩調を中心にしてばらついている様子が表現できていることがわかる。この外力を用いて、TMD設置前後の歩道橋の応答を計算した。設置するTMDは、単独共振歩行に対して十分な制振効果のある質量比 $\mu=1.0\%$ のTMDとした。

応答波形の一例として、平均歩調2.0Hz、1.8Hzの場合の外力波形、歩道橋応答速度(制振対策なしとTMDあり)を図-5、図-6に示す。

歩行者は0秒のときに歩道橋に進入し始め、約30秒後に歩道橋上の人数が最大人数に達する。よって、図-5(1)、図-6(1)の外力の振幅は、はじめの30秒間で徐々に大きくなり、その後は約2.0kNを最大としてランダムな波形となっている。

TMD設置前の歩道橋の応答をみると、平均歩調2.0Hzの場合、30~40秒と60~70秒において共振応答の発達が読みとれる。一方、平均歩調1.8Hzの場合は顕著な共振応答は認められないものの、狭帯域の不規則応答となっている。また、制振対策なしとTMDありの応答波形を比較すると、いずれの平均歩調であってもTMDによって応答が低減されている。

ところで、歩行外力は式(3)や図-5(1)、図-6(1)からわかるように不規則な外力であり、その応答も不規則な現象である。そこで、これらの平均的な応答を見るために、応答計算を100回繰り返して、そのアンサンブル統計量を計算した。図-7に一例として、到着時間2.0秒(歩道橋上に約30人)とした場合の平均歩調2.0Hz、1.8Hzの時の応答速度のアンサンブル統計量であるRMS応答速度を示す。

図-7より、TMDによって歩道橋の応答速度は約1/3程度に低減されていることがわかる。また、40秒~70秒で速度はほぼ一定になっていることもわかる。そこで、40秒~70秒の値を平均し、歩行者が歩道橋を渡る間に受ける平均的な振動刺激に換算し( $2/\pi$ をかける)、速度実効値を計算した。歩行人数と速度実

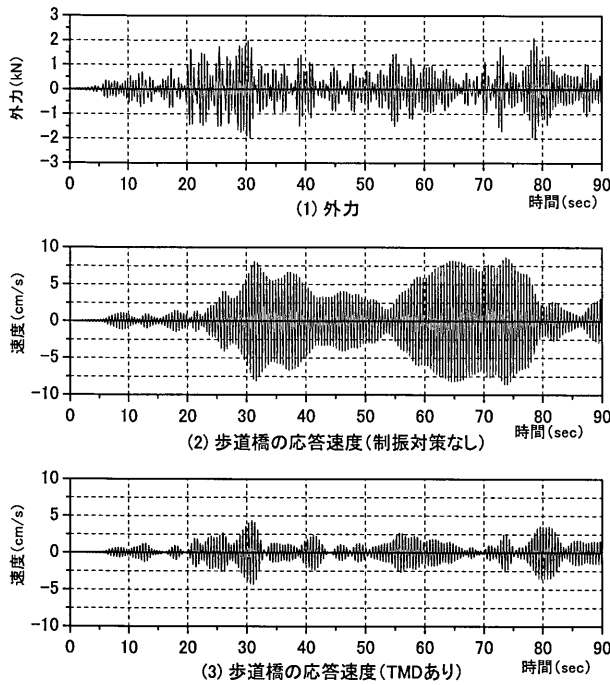


図-5 外力と応答速度波形  
(平均歩調 2.0Hz, 約 30 人)

効値の関係を図-8 に示す。また、文献 7) の群集歩行による計測値を本歩道橋の規模に換算した数値をあわせて示す。

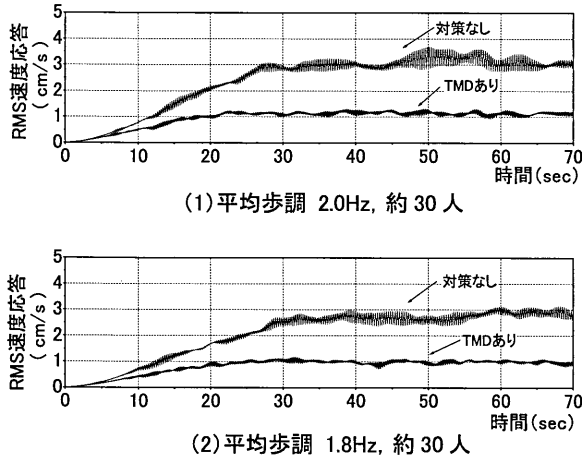


図-7 RMS 速度応答

図-8 より、制振対策なしの時の解析値は、文献 7) の計測値(対策なし) とほぼ一致していることがわかる。また、制振対策なしのとき、歩道橋上の人数が 20 人を超えると歩道橋の応答は単独共振歩行による応答よりも大きくなり、その応答レベルは「少し歩きにくい」から「大いに歩きにくい」の範囲であることがわかる。人数が増えると応答値も大きくなる。なお、単独共振歩行の応答値が 20 人程度の群集歩行と一致することは文献 7) の計測例においても確認されている。

平均歩調の違いに着目すると、平均歩調が 2.0Hz から 1.8Hz に下がり、共振歩行をする歩行者の割合が少なくなっているにもか

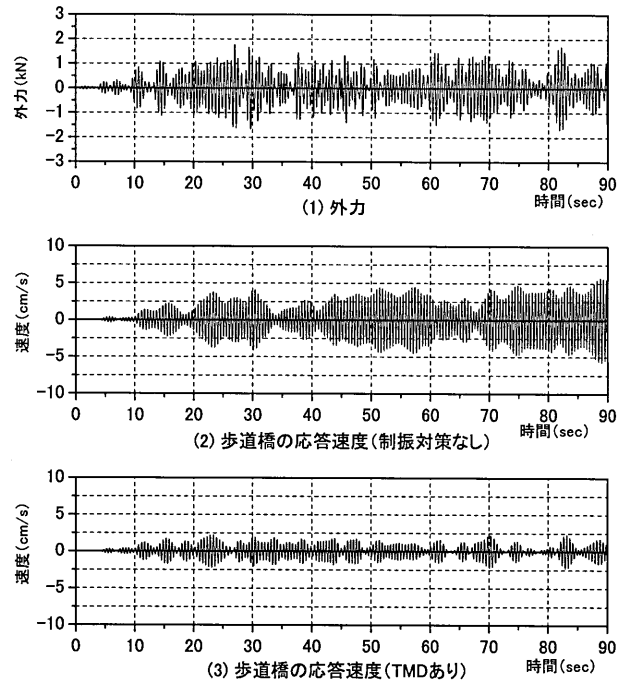


図-6 外力と応答速度波形  
(平均歩調 1.8Hz, 約 30 人)

かわらず、歩道橋の応答は平均歩調が 2.0Hz の場合と比べて 1 割程度の低減にとどまっている。また、平均歩調が 1.8Hz の時も、歩道橋の応答は「少し歩きにくい」から「大いに歩きにくい」レベルである。

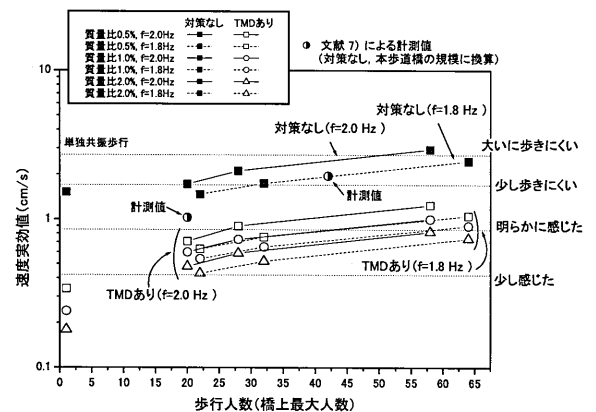


図-8 歩行人数と速度実効値

TMD を設置した場合、歩道橋の応答は低減され、応答速度は「少し感じた」から「明らかに感じた」のレベルとなる。また、平均歩調による違いも対策なしのときと同じ傾向にある。

図-9 に質量比と速度実効値の関係を示す。図より、TMD の応答は質量比が 2.0% であっても群集歩行による応答値は「少し感じた」から「明らかに感じた」レベルであり、単独共振歩行時よりも制振効果は悪い。

図-10 は図-5 と図-6 の歩道橋の応答波形の周波数分析を制振対策なしと TMD ありの場合で比較したものである。波形の特

徴を際立たせるために、隣接平均法にて平滑化した波形をあわせて示す。図より、TMD によって、応答の共振成分はよく低減されているが2.0Hz 付近以外の強制振動成分は低減されていない。

以上のことより、考慮した歩調範囲の条件下では、群集歩行による歩道橋応答は、TMD によって共振成分についてはよく低減されるが、強制振動成分の大きな低減は期待されない。また、低減されなかった強制振動成分による歩道橋の速度応答値は振動恣限度に対して無視できないレベルであることがわかった。

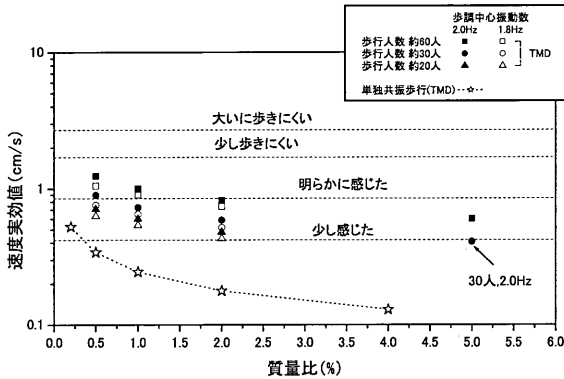
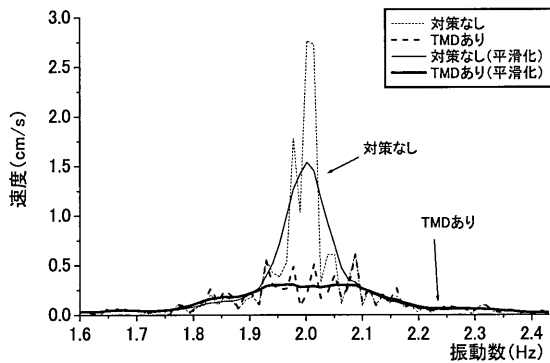
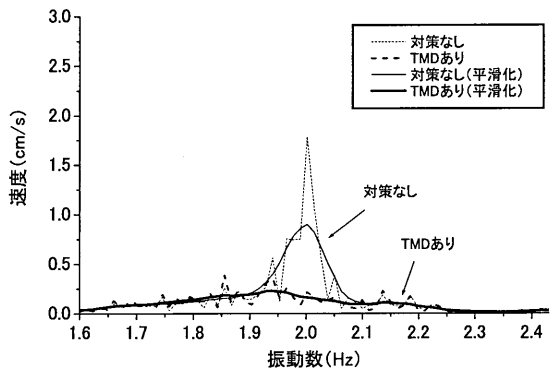


図-9 質量比と速度実効値



(1) 平均歩調 2.0Hz



(2) 平均歩調 1.8Hz

図-10 応答速度の周波数分析結果

## 2.4 TMD による制振効果と振動使用性について

歩道橋の振動使用性の許容レベルは各研究者により提案されているものの、現状では明確な規定はない。多くの場合、共振歩

行を対象として提案されており、例えば、田中・加藤は共振歩行時の速度実効値を「明らかに感じた」レベル (0.85cm/s) 以下にすることを制振目標として提案している。

これは歩行者による共振応答が希にしか生じない現象であるため、仮に共振が生じたとしても「明らかに感じた」レベル以下の応答であれば振動使用性には問題がないとの判断に基づくものである。本研究では、歩行者の最頻歩調2.0Hz に等しい固有振動数を有する歩道橋を想定しているが、実際の歩道橋では多少のずれは存在するであろうし、また、歩行者が歩道橋を渡りきる間にも歩調が変化し<sup>16)</sup>、大きな共振応答に発達しないケースもあることを考えると合理的な制振目標レベルと考える。上述の解析で示したようにTMDを設置することにより、この応答レベルは容易に達成することができる。

一方、群集歩行の発生状況、例えばイベント終了時の群集などでは、ある程度の群集歩行状態が定常的に続くため、歩行者は常時あるレベル以上の振動を体感することになる。したがって、質量比1.0%のTMDを設置したとしても約60人の群集歩行にさらされた場合、歩行者は常に「明らかに振動を感じた」レベルを体感することになる。さらに、 $2\sigma$  応答レベルでは「少し歩きにくい」レベル、ピーク応答 ( $3\sigma$  応答) レベルでは「大いに歩きにくい」レベルを体感することになり、田中・加藤の提案に従えばこれは許容できないレベルと判断される。

現状では、群集歩行時の振動使用性レベルの明確な規定はないが、仮に田中・加藤の提案と同等レベルの振動使用性を確保することを目指した場合、少なくとも定常応答レベル (RMS 応答速度レベル) で「少し振動を感じた」レベル以下に抑える必要があるものと考えられる。この場合、 $2\sigma$  応答レベルで「明らかに振動を感じた」レベル程度、 $3\sigma$  応答レベルでも「少し歩きにくい」レベルを下回ることになる。

このように考えると群集歩行に対しては、質量比を少なくとも約5%以上にしない限り「少し振動を感じた」レベルを下回ることとはなく(図-9)、制振効果には限界があると考えられる。また、本研究で対象とした歩道橋は対数減衰率 $\delta=0.02$  であるが、減衰を $\delta=0.04$  とした場合においても同様の解析を行った。その結果、対策なしの応答値は $\delta=0.02$  の場合よりも約25%低減するが、TMD設置後の応答値は $\delta=0.02$  の場合とほとんど変わらず、制振効果には限界があることを確認している。そこで、以下ではATMDを用いた制振対策について検討した。

## 3. 群集歩行に対するATMDの制振効果

群集歩行による歩道橋の応答は、TMDによってある程度は低減される。しかし強制振動成分は低減されず、低減しきれない速度応答値は振動恣限度に対して無視できない程度であると考えられる。この無視できない応答を低減する方法としてATMDの適用を考えた。以下では、群集歩行に対するATMDによる歩道橋の制振効果を確認するために歩道橋の応答解析を行った。

### 3.1 解析モデルと状態方程式<sup>17),18)</sup>

歩道橋にATMDを設置した場合の応答解析を実施するための

解析モデルを図-11 に示す。歩道橋の制振対象を鉛直たわみ 1 次モードのみとして、歩道橋を 1 質点系でモデル化し、これに ATMD を付加した 2 質点系モデルによって検討する。ATMD は、対象構造物の応答をセンサー（加速度計など）によって検出し、その応答に応じた制御力をアクチュエータにより発生させて制振効果を得る。なお ATMD は、TMD にアクチュエータやセンサーを付加したものであるため、アクチュエータやセンサーが故障あるいは停電により停止しても TMD として作動する。

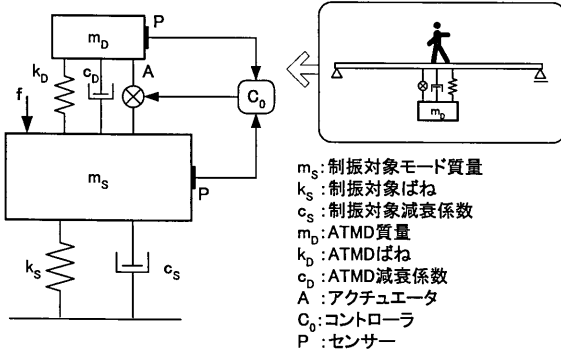


図-11 歩道橋-ATMD 系の解析モデル

運動方程式は以下ようになる。

$$\left. \begin{aligned} m_D(\ddot{x}_D + \ddot{x}_S) + c_D\dot{x}_D + k_Dx_D &= -u \\ m_S\ddot{x}_S + c_S\dot{x}_S + k_Sx_S &= f - m_D(\ddot{x}_D + \ddot{x}_S) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここに、

$m_D$ : ATMD 重錘質量                       $m_S$ : 歩道橋質量  
 $c_D$ : ATMD 減衰係数                       $c_S$ : 歩道橋減衰係数  
 $k_D$ : ATMD ばね定数                       $k_S$ : 歩道橋ばね定数  
 $x_D$ : ATMD 相対変位                       $x_S$ : 歩道橋変位  
 $f$ : 外力                                       $u$ : 制御力

式 (6) を状態方程式に置き換えると次式ようになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{x}_D \\ \dot{x}_S \\ x_D \\ x_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2(1+\mu)\xi_D\omega_D & 2\xi_S\omega_S & -(1+\mu)\omega_D^2 & \omega_S^2 \\ 2\mu\xi_D\omega_D & -2\xi_S\omega_S & \mu\omega_D^2 & -\omega_S^2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_D \\ \dot{x}_S \\ x_D \\ x_S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1/m_S \\ 1/m_S \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} f + \begin{bmatrix} -(1/m_S + 1/m_D) \\ 1/m_S \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (7)$$

$$\dot{X} = AX + ef + Bu \quad (8)$$

ただし、

$\omega_D, \omega_S$ : ATMD, 歩道橋の固有円振動数  
 $\mu$ : 質量比 (=  $m_D / m_S$ )  
 $\xi_D$ : ダッシュポットの減衰定数 (=  $c_D / (2m_D\omega_D)$ )  
 $X$ : 状態ベクトル  
 $A$ : 状態マトリックス

制御力  $u$  は、センサーにより得られる構造物の応答に適切な係数  $K$  をかけたものとし、次式で与える。

$$u(t) = -KX(t) = -k_1\dot{x}_D(t) - k_2\dot{x}_S(t) - k_3x_D(t) - k_4x_S(t) \quad (9)$$

ただし、

$K$ : フィードバックゲイン

フィードバックゲインの決定には LQ 最適制御理論に基づき決定する。評価関数は歩道橋の応答と制御力に対し、 $Q$  と  $R$  の重み係数を与える次式を用いた。

$$J = \int_0^\infty [x(t)^T Qx(t) + R\{u(t)\}^2] dt \quad (10)$$

ただし、

$Q$ : 状態ベクトルにかかる重み行列

$R$ : 入力ベクトルにかかる重み行列

評価関数が最小となるような制御力  $u$  は次式のように与えられる。

$$u = -R^{-1}B^T P X = -K X \quad (11)$$

ただし、 $P$ : リカッチ方程式を満たす正定な解

LQ 最適制御理論では、式 (10) の重み係数行列  $Q$  と  $R$  を適当に与えることによって振動特性と入力エネルギー消費とのバランスを取ることができ、最適なフィードバックゲインベクトル  $K$  を求めることができる。例えば、 $R$  を小さくすれば制御量が大きくなり、良好な制振効果が得られる反面、大きなエネルギーが要求される。また、 $Q$  は相当する応答値に応じて定める。これらの係数が ATMD を設計する重要なパラメータとなる。

### 3.2 群集歩行に対する ATMD の制振効果

いま、状態ベクトルにかかる重み行列  $Q$  を歩道橋の速度と変位に重みをかけて、式 (12) のように与える。

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$Q_{22} = 1 / \omega_S^2, \quad Q_{44} = 1$$

そして、制御力にかかる係数  $R = 1 / (M_S \omega_S^2)^2 \times 1000, \times 100, \times 10, \times 2, \times 1$  と 5 種類与え、式 (11) よりフィードバックゲインを得る。得られたフィードバックゲインを用いて、式 (7) の状態方程式を解くことによって歩道橋の応答解析を実施した。また、2.3 節と同様に ATMD の質量比  $\mu = 0.5, 1.0, 2.0\%$ 、外力は平均歩調 2.0, 1.8Hz と変化させた。

応答波形の一例として、ATMD を設置し、到着時間 2.0 秒 (歩道橋上に約 30 人)、平均歩調が 2.0Hz と 1.8Hz の場合の歩道橋応答速度波形を図-12 に示す。このときの重み係数は  $R = 1 / (M$

$s\omega_s^2)^2 \times 10$ , 質量比  $\mu=1.0\%$  である。また, 平均歩調が 2.0Hz, 1.8Hz の場合の応答速度波形の周波数分析結果を図-13 に示す。

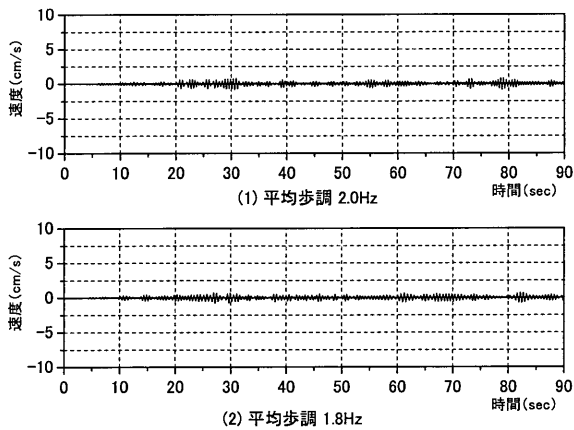
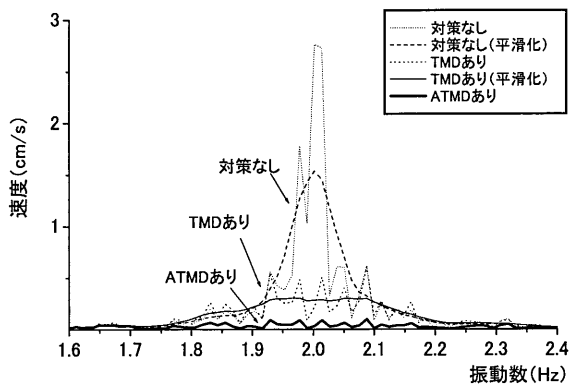
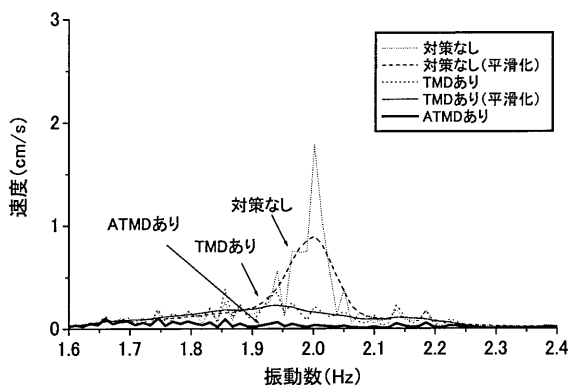


図-12 歩道橋の応答速度 (AMD)  
(約 30 人, 重み  $R=1/(M_s\omega_s)^2 \times 10$ , 質量比  $\mu=1.0\%$ )



(1) 平均歩調 2.0Hz



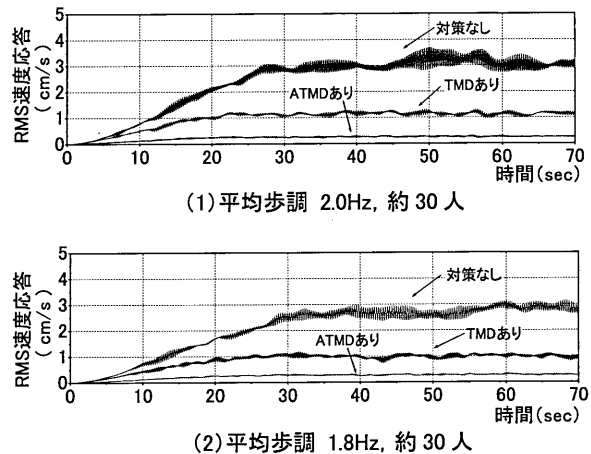
(2) 平均歩調 1.8Hz

図-13 応答速度の周波数分析結果

図-12 の応答速度の外力は, 図-5 と図-6 の外力と同じである。図-12 と図-5・図-6 を比較すると, ATMD を設置した歩道橋の応答速度は TMD を設置した歩道橋の応答速度よりもかなり低減されている。また, 図-13 から, TMD ではあまり低減することができなかつた群集歩行による歩道橋の強制振動成分が, ATMD では十分に低減されていることがわかる。

ATMD によって低減された歩道橋の応答速度がどのようなレ

ベルであるかを見るために, 各ケースについてアンサンブル統計量を計算した。図-14 に, 図-12 や図-13 と同条件の平均歩調 2.0Hz, 1.8Hz のときのアンサンブル統計の RMS 応答速度を一例として示す。この図からも, ATMD を設置した場合, 応答値がかなり低減されていることがわかる。



(1) 平均歩調 2.0Hz, 約 30 人

(2) 平均歩調 1.8Hz, 約 30 人

図-14 RMS 速度応答

図-14 の RMS 応答速度が, 定常応答となる 40 秒~70 秒の平均値から速度実効値を算出した。歩行人数と速度実効値の関係を図-15 に示す。なお, ATMD の速度実効値は, 重み係数  $R=1/(M_s\omega_s^2)^2 \times 10$  とした場合の結果をプロットした。図より, ATMD を歩道橋に設置した場合, その応答は「少し感じた」レベル以下となり, 群集歩行による歩道橋の応答を十分に低減できることがわかる。

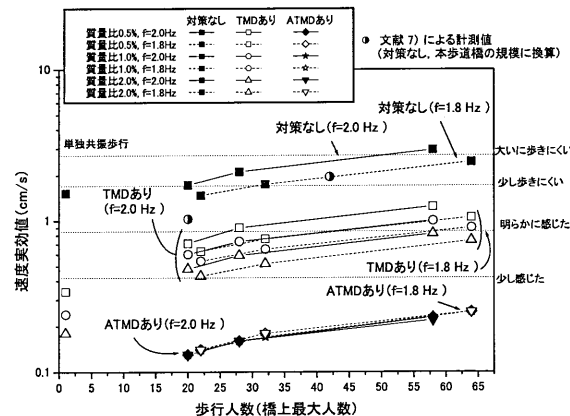


図-15 歩行人数と速度実効値

図-16 は, 歩道橋の速度実効値と質量比の関係を示したものである。TMD を設置した場合, 質量比が大きいほど応答低減が大きくなるが, ATMD を設置した場合は質量比には関係なく, ほぼ一定である。ATMD を設置した場合は, 質量比 0.5% でも歩道橋の応答を「少し感じた」レベル以下に低減することができる。

平均歩調 2.0Hz, 1.8Hz, 到着時間 2.0 秒 (歩道橋上に約 30 人) の場合の制御力, ATMD の重錘変位と, 比較のために TMD の重錘変位を図-17, 図-18 に示す (これらの図は図-12 と同条件

である)。ATMD と TMD の応答変位を比較すると平均歩調が 2.0Hz, 1.8Hz どちらの場合も, TMD の重錘変位に比べて ATMD の重錘変位が明らかに大きいことがわかる。また, 平均歩調が 2.0Hz, 1.8Hz での制御力を比較すると, 1.8Hz の制御力は 2.0Hz の制御力よりも明らかに大きい。

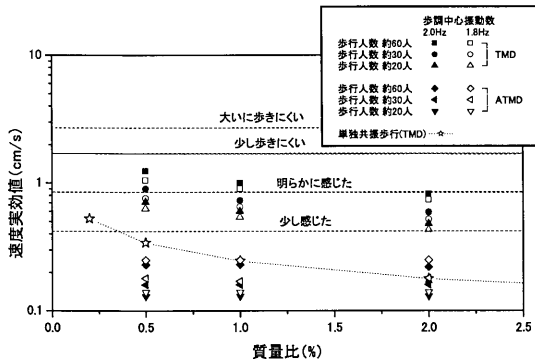


図-16 質量比と速度実効値

制御力や重錘変位量も歩道橋応答速度と同じく不規則な現象である。そこで, 歩道橋応答変位量と同様にして, 制御力, 重錘変位量の RMS 応答を求めた。図-19 に TMD と ATMD の RMS 応答変位の一例を示す。なお, このときの解析条件は質量比  $\mu = 1.0\%$ , 平均歩調 2.0Hz, ATMD の重み係数  $R = 1 / (M_s \omega_s^2)^2 \times 10$  である。図-19 より, ATMD 重錘の変位量は TMD よりも約 1.7 倍大きいことがわかる。

歩道橋の速度実効値, 重錘変位量, 制御力は重み係数  $R$  を操作することで変化する。よって, 重み係数  $R$  とこれらの設計パラメータの関係を考慮して, 最もよい重み係数を決定することができる。重み係数  $R$  と速度実効値, 重錘変位量と制御力の RMS 応答値の関係をまとめたものを図-20 に示す。なお, 重錘変位量と制御力の RMS 応答値は速度実効値と同様, RMS 応答が定常状態と

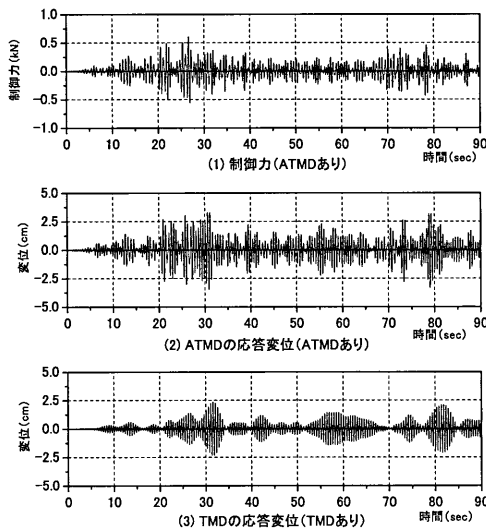


図-17 制御力と重錘変位量 (TMD, ATMD)  
(平均歩調 2.0Hz, 約 30 人, 重み  $R = 1 / (M_s \omega_s^2)^2 \times 10$ )

なる 40~70 秒の平均値を用いた。

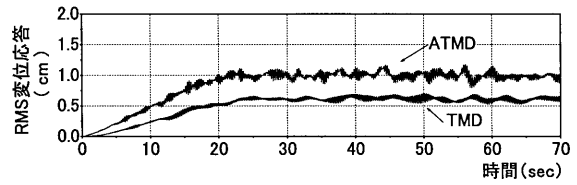


図-19 重錘の RMS 応答変位 (TMD, ATMD)

(平均歩調 2.0Hz, 約 30 人, 質量比 1.0%重み  $R = 1 / (M_s \omega_s^2)^2 \times 10$ )

図-20 より, 歩道橋上最大人数が多いと歩道橋の速度実効値, 重錘変位量, 制御力は大きくなる。よって, 歩行者の最大規模に応じて, 重み  $R$  を決定することができる。なお, 重み  $R$  が大きくなるほど, 歩道橋速度実効値は大きくなり, 制振効果が減少することもわかる。

「立体横断施設技術基準・同解説」<sup>1)</sup>によると, 幅員と歩行者数の関係から設計歩行者数を次式のように算定している。

$$W = Q / 54 \quad (13)$$

ただし,  $W$ : 幅員 (m),  $Q$ : 設計歩行者数 (人分)

式 (13) から, 幅員 2m で歩行者は約 100 人分となる。本歩道橋は支間長 40m を対象としており, 歩道橋上の歩行者は約 30 秒間で橋を渡りきる。到着時間 1.0 秒/人・歩道橋上に約 60 人という歩行者の規模は 120 人分となり, 設計歩行者数とはほぼ同じ規模の歩行者である。そこで, 図-20 (3) の到着時間 1.0 秒/人を見ると, 重み係数  $R$  は  $R = 1 / (M_s \omega_s^2)^2 \times 10^2$  以下に決定すれば, 速度実効値が「少し感じた」レベル以下となり, 制振目標を達成する。

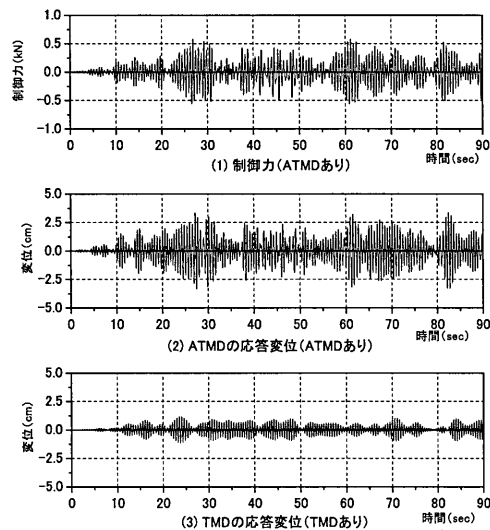


図-18 制御力と重錘変位量 (TMD, ATMD)  
(平均歩調 1.8Hz, 約 30 人, 重み  $R = 1 / (M_s \omega_s^2)^2 \times 10$ )

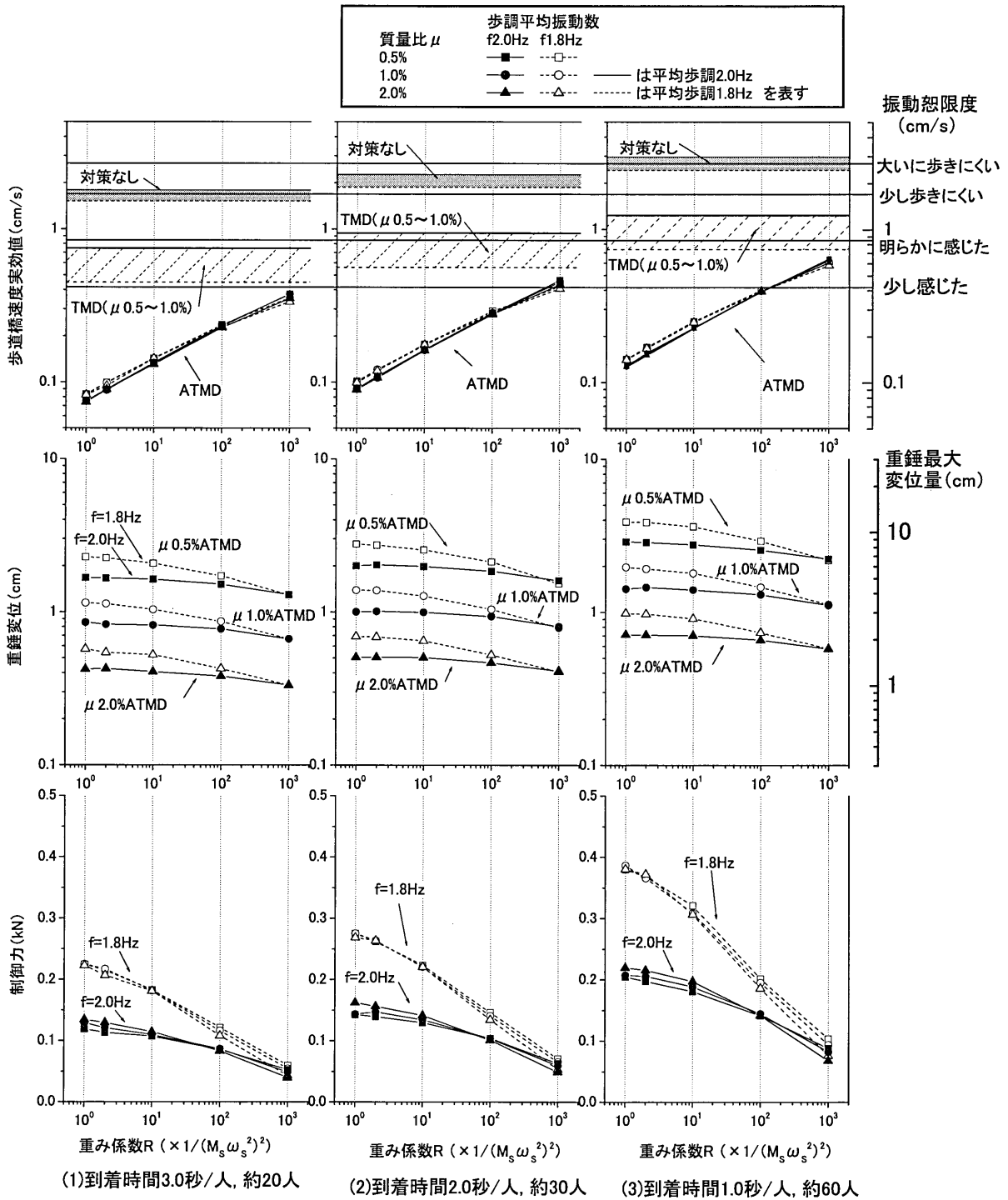


図-20 各歩行人数における重み係数と速度実効値, 重錘変位量, 速度実効値

また、重錘変位量が正規分布に従うと仮定すると、最大変位量はRMS 応答変位の3倍になる。質量比 $\mu=0.5\%$ のATMDを採用した場合、十分な制振効果を得るためには重錘の最大変位が±7cm以上となり、ばねの耐久性を考慮すると実現不可能と考えられる。質量比 $\mu=1.0\%$ のATMDを採用した場合は、重錘の最大変位量が±4.5cmであり実現可能な範囲であると思われる。

アクチュエータの容量も同様にして決まる。しかし平均歩調が2.0Hzよりも1.8Hzの場合の方が大きな制御力を必要とするので、アクチュエータの容量を決定するときには注意が必要である。

#### 4. まとめ

本論文では、歩行者と共振しやすい歩道橋を想定し、単独共振歩行と群集歩行に対してTMDを用いた場合の制振効果を検討した。さらに、群集歩行に対しては、ATMDの適用性についても検討した。そして、これらの検討を通して、歩行状態に応じた歩道橋の振動特性の相違と各制振装置の適用性について考察した。結果を以下にまとめる。

(1) 単独共振歩行に対する歩道橋の制振対策としてTMDは有効であり、比較的小さな質量比で振動使用性を満足することができる。

(2) 群集歩行による応答は、歩行人数がある人数(本解析では20名程度)を超えると単独共振応答よりも大きくなり、振動使用性上問題となる可能性がある。

(3) 群集歩行による歩道橋の応答は、群集の平均歩調が1割低下し、共振周波数帯域からはいずれも顕著に応答が低下することはない。また、ある人数(本解析では20名程度)以上になると単独共振応答よりも大きくなり、振動使用性上問題となる可能性がある。

(4) 群集歩行による歩道橋の応答は、TMDによって共振成分についてはよく低減されるが、強制振動成分は低減されないため、制振効果には限界がある。

(5) 群集歩行に対する歩道橋の制振対策としてATMDを用いた場合、歩道橋の応答を十分に低減することができ、群集歩行に対する歩道橋の制振対策としてATMDは有効である。

(6) ATMDを用いた場合、重錘の変位がTMDよりも大きくなり、バネの耐久性上の問題が生じる可能性がある。このため質量比1%以上のATMDとする必要がある。また、平均歩調が変化すると、制御力が大きくなるため、駆動モーターの選定に際しては留意する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解析，丸善，1979年1月
- 2) 角本周，前田研一，梶川康男，黒野雅利：近接固有振動数を有する吊床版歩道橋の振動使用性に関する検討，橋梁交通振動に関するコロキウム論文集PARTB，pp.207-214，1995年11月
- 3) 梶川康男，久保修平，深田幸史，近藤真一：上路式PC吊床版橋の振動特性，橋梁交通振動に関するコロキウム論文集

PARTB，pp.97-104，2001年11月

- 4) 横谷利昭，廣瀬章則，田谷光，南條正洋，畑中章秀：同調質量ダンパーを用いた歩道橋の制振，橋梁振動コロキウム論文集，pp.269-276，1997年
- 5) 田中信治，加藤雅史：設計時における歩道橋の振動使用性照査法，土木学会論文集No.471/I-24，pp.77-84，1993.7
- 6) 米田昌弘：種々の歩行外力モデルを用いた単純桁歩道橋の動的応答解析と共振歩行試験結果に対する考察，構造工学論文集Vol.46A，pp.439-448，2000年3月
- 7) 牛尾正之，南條正洋：歩道橋の振動に関する諸問題，日立造船技報第33巻第3号，昭和47年8月
- 8) 梶川康男：振動感覚を考慮した歩道橋の使用性照査法に関する考察，土木学会論文集，No.325，1982年
- 9) J. E. Wheeler：Prediction and Control of Pedestrian-Induced Vibration in Footbridges，ASCE，Vol.108，No.ST9，pp.2045-2065，1982.9
- 10) 塩尻弘雄，横川英彰，管崇，上田慶：歩道橋のアクティブ，パッシブコントロール，計算工学講演会論文集Vol.4，pp.607-608，1999.5
- 11) 田中信治：歩道橋の振動特性と使用性設計法に関する研究，名古屋大学博士学位論文，平成6年10月
- 12) 山口宏樹：構造振動・制御，共立出版株式会社，1996年
- 13) 小堀為雄・梶川康男：橋梁振動の人間工学的評価法，土木学会論文集第230号，pp.23-31，1974年10月
- 14) 梶川康男，小堀為雄：振動感覚を考慮した歩道橋の確率論的設計，土木学会論文集第285号，pp.29-36，1979年5月
- 15) 交通工学研究会(編)：交通工学ハンドブック，技報堂出版，1984年
- 16) 平尾美佳，米田昌弘，伊達敬子：歩行者の平均歩調に着目した歩道橋の振動応答特性，土木学会関西支部平成14年度年次学術講演会講演概要集，I-70-1~2，2002.5
- 17) 背戸一登，松本幸人：パソコンで解く振動の制御，丸善株式会社，平成11年3月
- 18) 小郷寛，美多勉：システム制御理論入門，実教出版株式会社，1979年12月

(本稿は、構造工学論文集Vol.49A，2003.3に掲載されている)