

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

On Vibration Control of a Footbridge subjected to Single Resonance Walking and Random Crowding

畑中 章秀*, 生田目尚美**
Akihide HATANAKA, Naomi NAMATAME

* 工博 (株)ニチゾウテック (〒550-0023 大阪府大阪市大正区鶴町2-15-26 Tel.06-6555-7055)

** 工修 (株)ニチゾウテック (〒550-0023 大阪府大阪市大正区鶴町2-15-26 Tel.06-6555-7055)

This paper describes vibration control of a footbridge with single resonance walking and random crowding using tuned mass damper (i.e., TMD) and active tuned mass damper (i.e., ATMD). We assume a footbridge with main span length of 40m, deck width of 2m and the 1st bending frequency of 2Hz. Its frequency is close to a pedestrian walking cycle. Vibrations due to a single resonance walking and random crowding with and without TMD and ATMD are simulated. We can conclude that TMD is effective for suppressing the vibration by a single resonance walking and is not always effective for suppressing the vibration by random crowding. However, the vibration by random crowding can be suppressed more effectively by good performance of ATMD with LQ regulator.

Key Words: ATMD, Footbridge, Random crowding, Single resonance walking, TMD, Vibration control

キーワード: ATMD, 歩道橋, 群集歩行, 単独共振歩行, TMD, 制振対策

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)¹⁾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²⁾。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場合がある³⁾。

従来の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⁴⁾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⁵⁾や研究例⁶⁾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⁷⁾。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⁸⁾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

対象とした歩道橋は支間長40m、幅員2m、単位長さ重量19.6kN/mの鋼製単純梁とした。歩道橋の減衰は、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	40m	幅員	2m
断面2次モーメント	0.04035 m ⁴	単位長さ重量	19.6 kN/m
対数減衰率 δ	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。

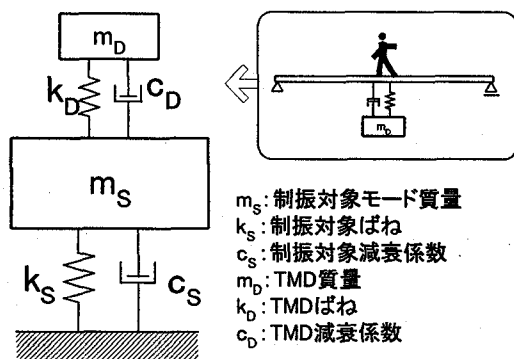


図-1 歩道橋-TMD系の解析モデル

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¹²⁾。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、

μ : 質量比 ($=m_D/m_s$)

γ_{opt} : 最適同調比 ($=f_D/f_s$)

$(\delta_D)_{\text{opt}}$: 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 $k_{D,\text{opt}}$ と減衰 $c_{D,\text{opt}}$ 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。

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

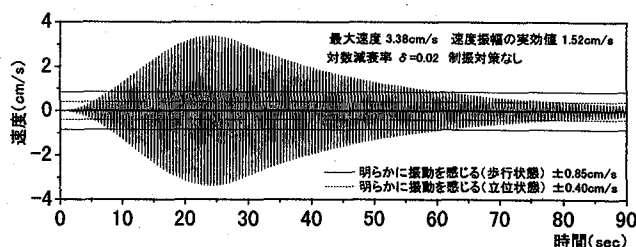
ここに、

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

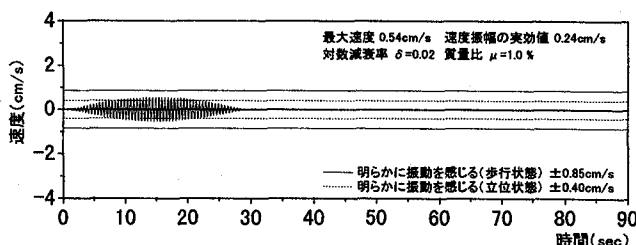
$M_{s,n}$: n 次モード一般化質量, α : 腰部加速度振幅 ($=0.4g$)

v : 歩行速度 ($=0.7f_0$ 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。

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

ここに、

V_E : 速度実効値, V_{max} : 最大速度

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

制振対策なしの速度実効値は1.52cm/sとなったが、著者らが計測した同規模の歩道橋(支間長44m)の単独共振歩行による応答(速度実効値1.38~1.87cm/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。

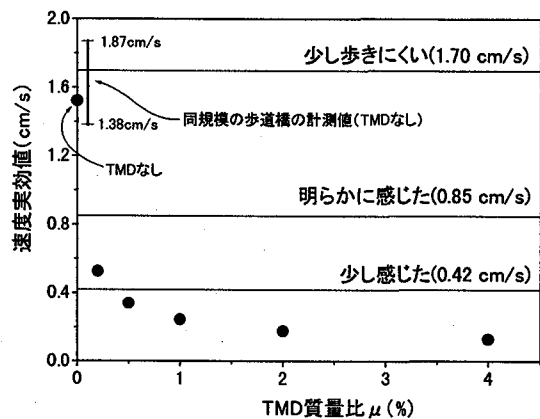


図-3 TMD 質量比と制振効果

表-2 振動限度¹³⁾

カテゴリー	限度値 (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¹⁴⁾が提案した「明らかに振動を感じた」レベル (0.85cm/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 (重錘駆動振幅の制約) 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 μ の平方根のオーダーであり、小さい¹⁵⁾。

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)

θ_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 ($0.7f_i$ 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¹⁴⁾ 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¹⁵⁾。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/m²) 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。これらの解析条件をまとめ、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/m²

(2) 群集歩行による歩道橋の振動応答解析

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

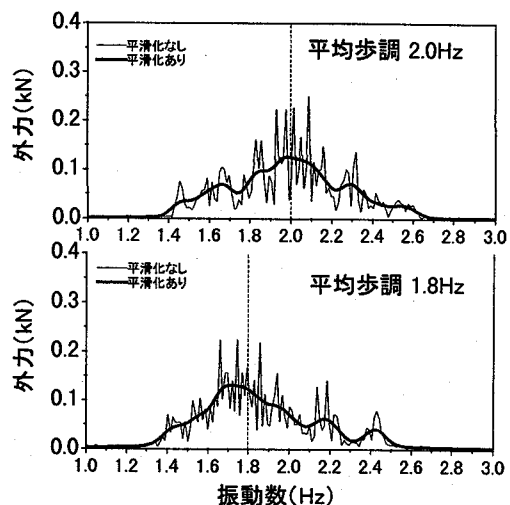


図-4 群集歩行外力の周波数分析結果 (約 30 人)

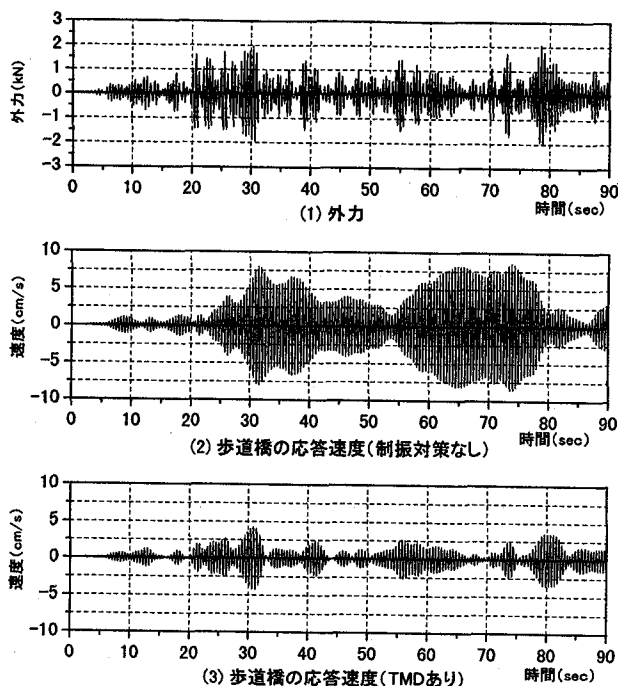


図-5 外力と歩道橋応答速度波形
(平均歩調 2.0Hz, 約 30 人)

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 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出し始め、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、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 のときの歩道橋応答速度のアンサンブル統計量の 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

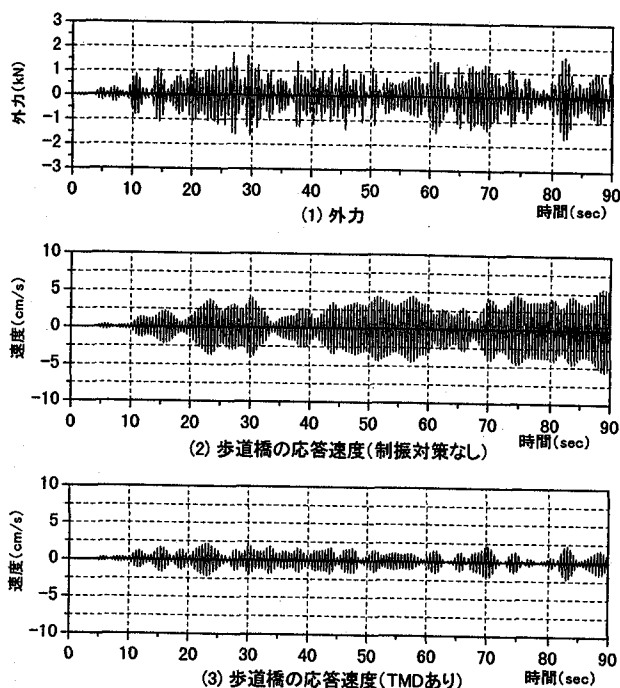


図-6 外力と歩道橋応答速度波形
(平均歩調 1.8Hz, 約 30 人)

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-8 より、制振対策なしのときの解析値は、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

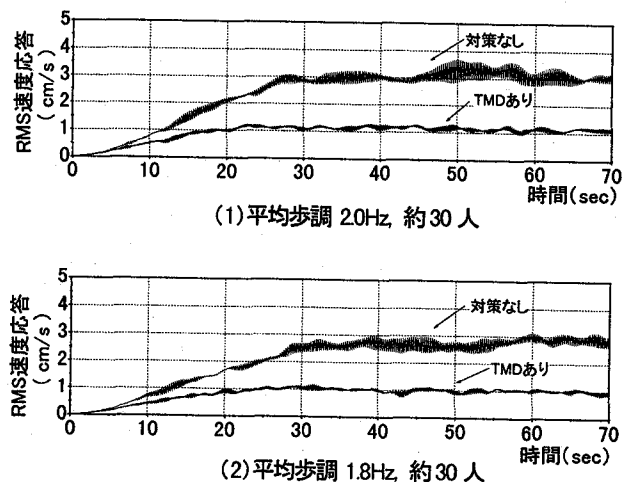


図-7 歩道橋応答速度 RMS 応答速度

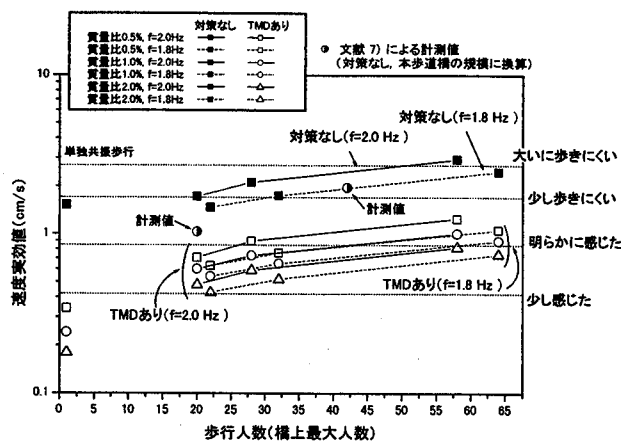


図-8 歩行人数と速度実効値

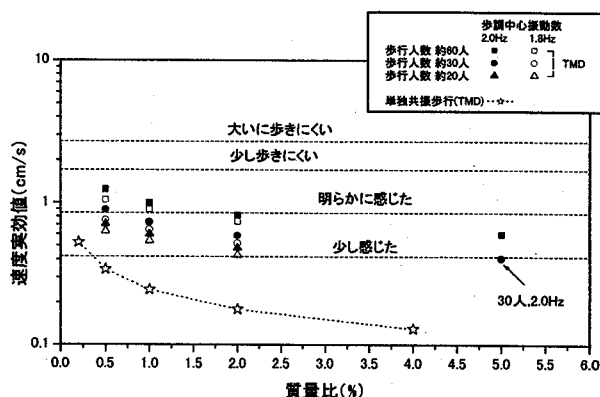


図-9 質量比と速度実効値

計測例においても確認されている。

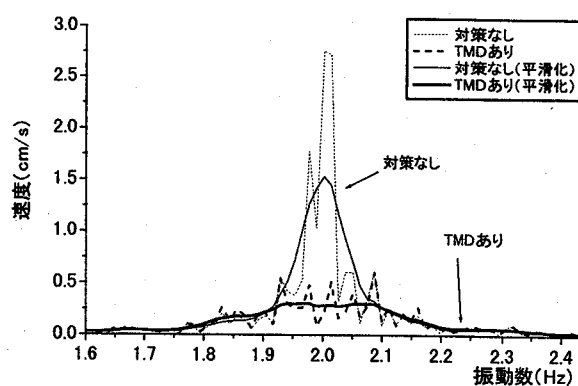
平均歩調の違いに着目すると、平均歩調が2.0Hzから1.8Hzに下がり、共振歩行をする歩行者の割合が少なくなっているにもかかわらず、歩道橋の応答は平均歩調が2.0Hzの場合と比べて1割程度の低減にとどまっている。また、平均歩調が1.8Hzの時も、歩道橋の応答は「少し歩きにくい」から「大いに歩きにくい」レベルである。

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。

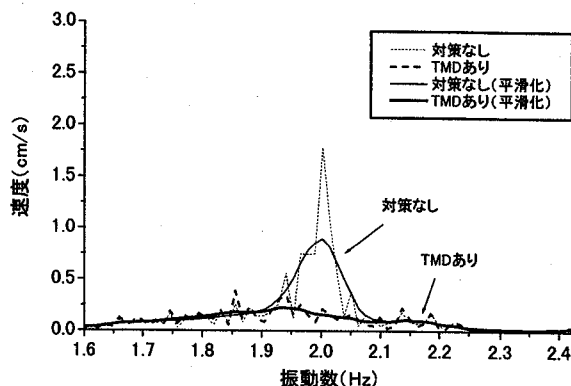
図-9に質量比と速度実効値の関係を示す。図より、TMDの応答は質量比が2.0%であっても群集歩行による応答値は「少し感じた」から「明らかに感じた」レベルであり、単独共振歩行時よりも制振効果は悪い。

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



(1) 平均歩調 2.0Hz



(2) 平均歩調 1.8Hz

図-10 歩道橋応答速度の周波数分析結果

怒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。

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¹⁰⁾、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 σ 応答レベルでは「少し歩きにくい」レベル、ピーク応答（3 σ 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旨とした場合、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 σ 応答レベルで「明らかに振動を感じた」レベル程度、3 σ 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容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^{17),18)}

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、

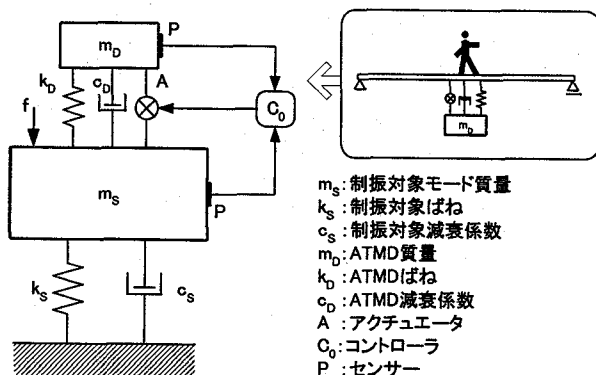


図-11 歩道橋-ATMD系の解析モデル

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のなので、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。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、

ω_D, ω_s : ATMD, 歩道橋の固有円振動数

μ : 質量比 ($=m_D/m_s$)

ξ_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当な係数 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。

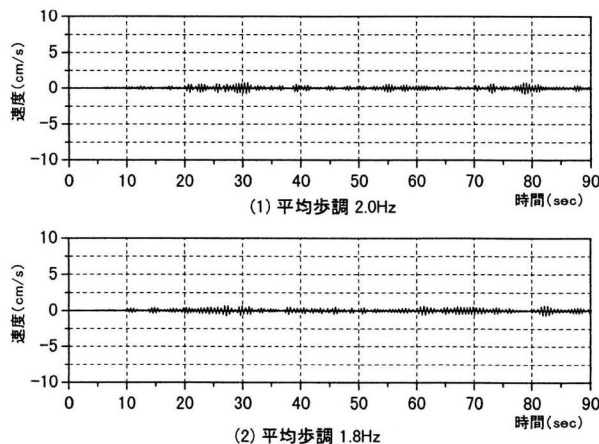


図-12 歩道橋の応答速度(対策なし, TMD, ATMD)
(約30人, 重み $R=1/(M_s\omega_s^2)^2 \times 10$, 質量比 $\mu=1.0\%$)

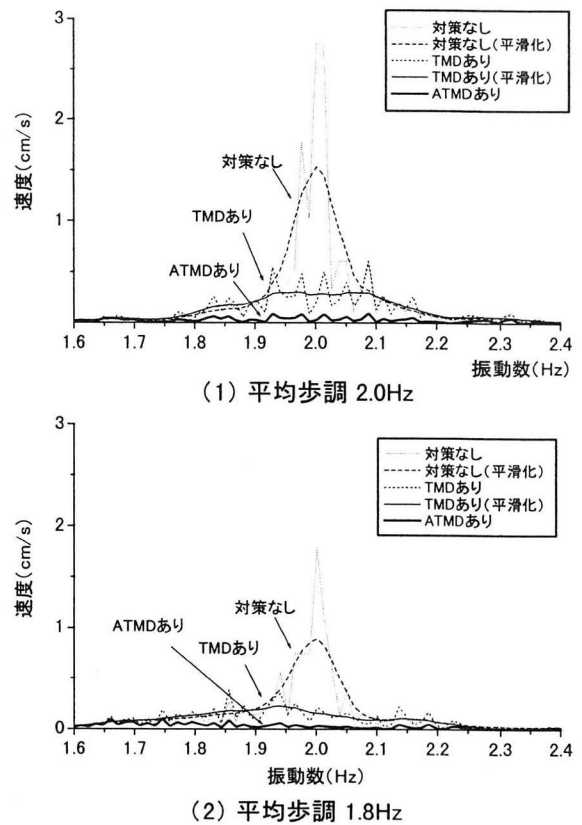


図-13 歩道橋応答速度 周波数分析の比較

図-12の応答速度の外力、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っ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

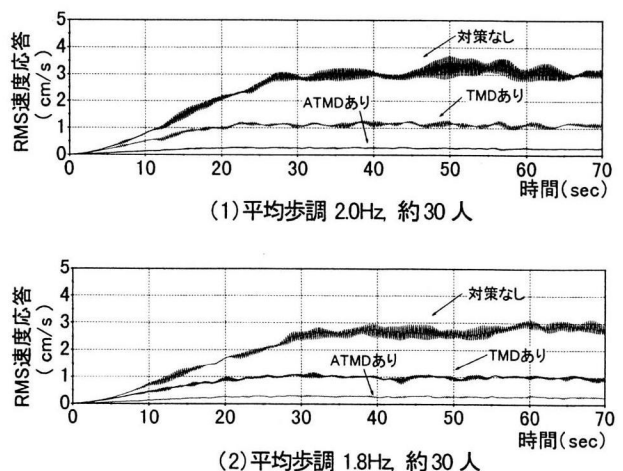


図-14 歩道橋 RMS 応答速度

なり低減されていることがわかる。

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-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、質量比が大きいく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)

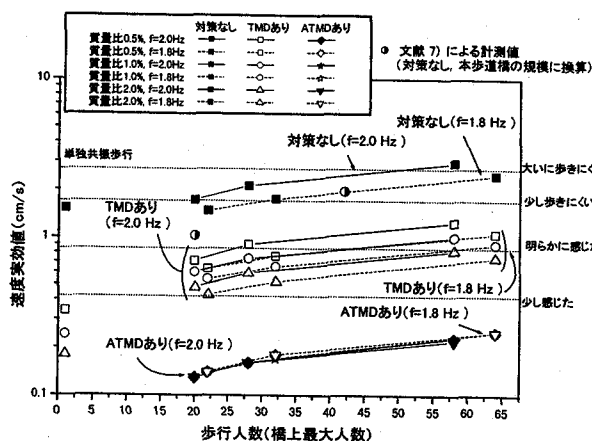


図-15 歩行人数と速度実効値

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。

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。

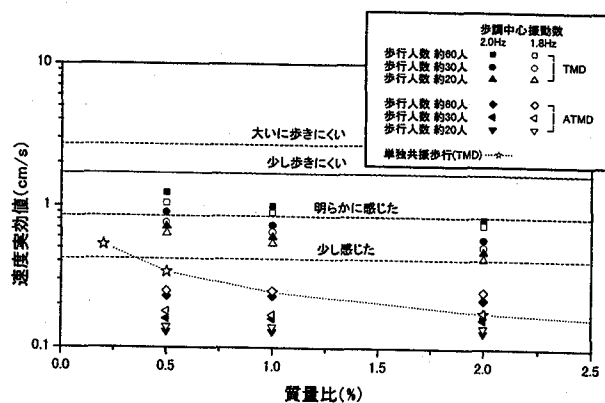


図-16 質量比と速度実効値

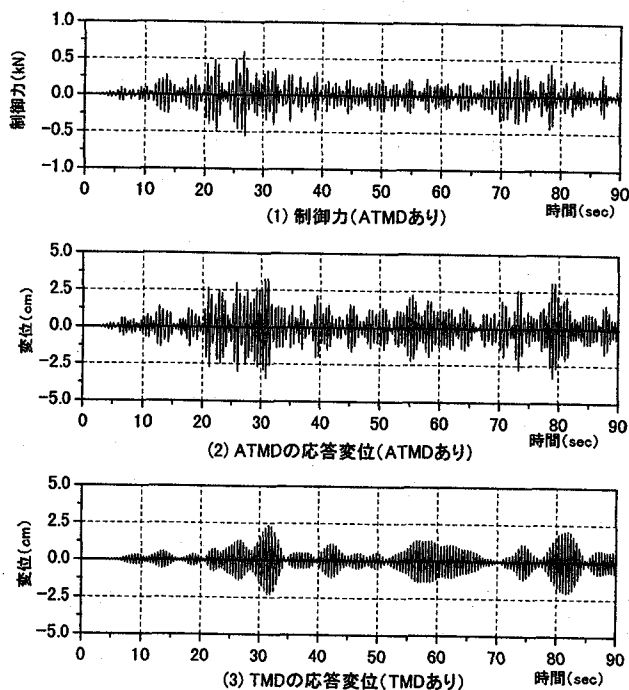


図-17 制御力と重錘変位量 (TMD, ATMD)
(平均歩調 2.0Hz, 約30人, 重み $R=1/(M_s\omega_s^2)^2 \times 10$)

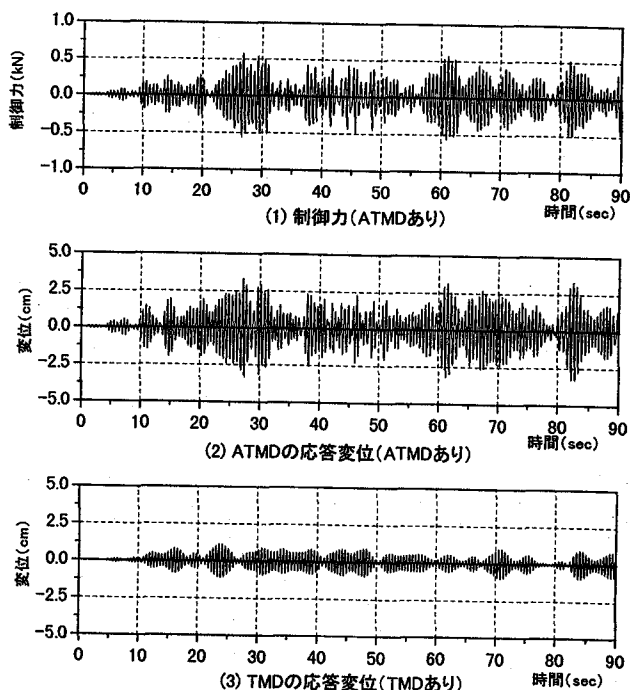


図-18 制御力と重錘変位量 (TMD, ATMD)
(平均歩調 1.8Hz, 約30人, 重み $R=1/(M_s\omega_s^2)^2 \times 10$)

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 応答が定常状態となる 40~70 秒の平均値を用いた。

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ことからわかる。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

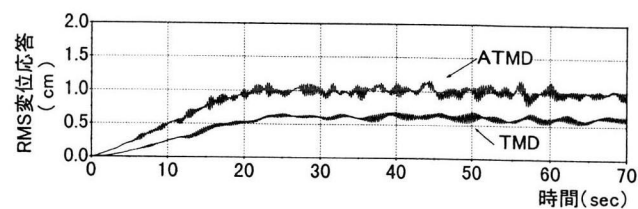


図-19 重錘変位量の RMS 応答変位 (TMD, ATMD)
(平均歩調 2.0Hz, 約 30 人, 質量比 1.0% 重み $R=1/(M_s \omega_s^2)^2 \times 10$)

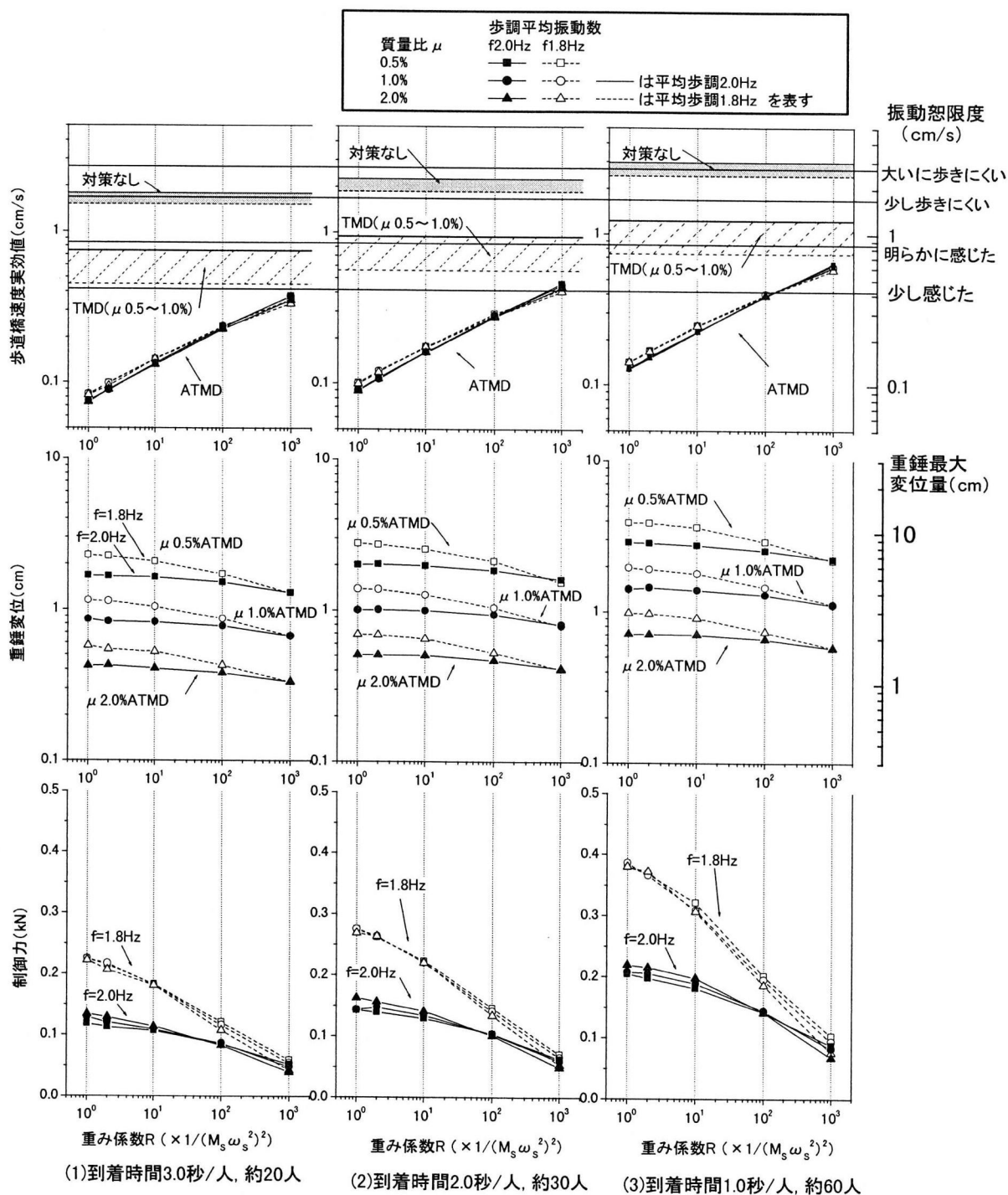


図-20 各歩行人数における重み係数と速度実効値、重錘変位量、速度実効値

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」⁹⁾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ので、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 $R = 1 / (M_s \omega_s^2)^2 \times 10^6$ 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。

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 $\pm 7\text{cm}$ 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 $\pm 4.5\text{cm}$ 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ずれて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，廣瀬彰則，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，菅 崇，上田 慶：歩道橋のアクティブ，バ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

(2002年9月13日受付)