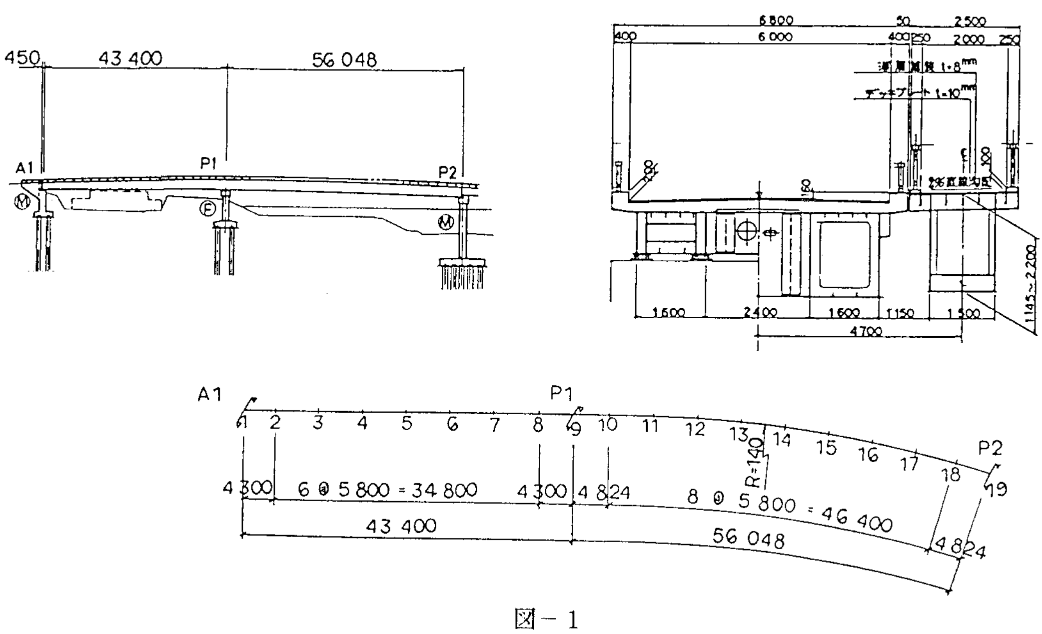
I —16　TMDを設置した場合の歩道橋の制振効果について

㈱アリヤス設計コンサルタント　　正員　田所　洋一
北海道大学　工学部　　正員　林川　俊郎

1．はじめに

支間長が40mを超える歩道橋の設計において，常に問題となるのが歩行者荷重によるタワミ振動の問題である．歩行者の歩行周波数は，老若男女を問わずほぼ 2Hzであり，この歩行周波数と橋の固有振動数が一致あるいは近接している場合，歩行者にとって本来不動と感覚的に知覚されている橋面が動いていることになり，人体自体も上下の振動を感じ，歩行者に不安，不快感を与える．

このことから，設計時には，橋の固有振動数が歩調範囲 1.5Hz～2.3Hz にならないよう種々の検討がなされている．例えば，(1)質量の増減　(2)主桁の剛性の増大　(3)固有振動数の大きい構造形式の採用，等があるが，既設道路橋に併設される歩道橋（側道橋）の場合，既設上下部の安定性の問題から，これらの対策法を採用できないことが多い．そこで最近，斜張橋の主塔の風による制振対策として，採用例が増加しているTMD（動吸振器）を歩道橋に設置した場合の制振効果，問題点について述べることにする．
図－１に対象とした橋梁の一般図と骨組図を示す．

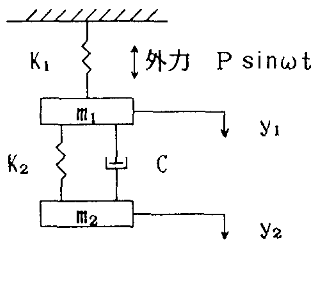


図－１

Structural Control Effect of Footbridges with Tuned Mass Dampers
by Youichi TADOKORO and Toshirou HAYASHIKAWA

2．TMDの理論

TMDは，主振動系の振動に同調させて振動させることにより振動エネルギーを吸収する方法である．すなわち，主桁に固有振動数がきわめて近い副振動体を取り付けることにより，振動系全体の減衰を高めようとするものである．TMDの原理については，古くからデン・ハルトック「機械振動論」[1]に詳しく述べられており，機械の分野では種々のものに取り付けられているようである．デン・ハルトックは，２自由度系の振動問題(図－２)として扱い，主振動系の減衰を０として下記の運動方程式 式(1)を導いている．又，式(1)より主振動系の応答を最小にする条件から最適同調比 式(2)，TMDの最適減衰定数 式(3)，主振動系の応答倍率 式(4)が導かれている．



図－２

$$m_1\ddot{y}_1 + K_1 y_1 + K_2(y_1-y_2) + C(\dot{y}_1-\dot{y}_2) = P\sin\omega t$$

$$m_2\ddot{y}_2 + K_2(y_2-y_1) + C(\dot{y}_2-\dot{y}_1) = 0 \quad \cdots\cdots (1)$$

最適同調比 $$f\,opt = \frac{1}{1+\mu} \quad \cdots\cdots (2)$$

TMDの最適減衰定数 $$h_2 opt = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1-\mu)^3}} \quad \cdots\cdots (3)$$

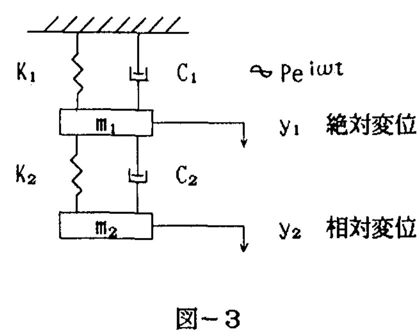
主振動系の応答倍率 $$L_1 = \sqrt{1+\frac{2}{\mu}} \quad \cdots\cdots (4)$$

ここに，m_i，C，k_iは各々質量，減率係数，バネ定数を表し，添字 $i=1$ は主桁，$i=2$ はTMDに関する量を表す．Pは外力の振幅，ωは外力の円振動数，μは質量比 m_2/m_1を表す．

しかし，これらの式はあくまでも主振動系の減衰を無視しているので，概略検討としては差しつかえないが，詳細設計時には主振動系(主桁)の減衰を考慮する必要があると考えられる．運動方程式は 式(5)の通りとなり[2]，この時の計算モデルを図－３に示す．

$$m_1\ddot{y}_1 + C_1\dot{y}_1 + K_1 y_1 - C_2\dot{y}_2 - K_2 y_2 = Pe^{i\omega t}$$

$$m_2(\ddot{y}_1+\ddot{y}_2) + C_2\dot{y}_2 + K_2 y_2 = 0 \quad \cdots\cdots (5)$$



図－３

式(5)より各々の動的応答倍率は式(6)(7)，TMD設置後の主振動系の対数減衰率は式(8)で与えられる．

$$L_1 = \frac{|y_1|}{y_{st}} = \left(\frac{\alpha^2+\beta^2}{\gamma^2+\zeta^2}\right)^{1/2} \quad \cdots\cdots (6)$$

$$L_2 = \frac{|y_2|}{y_{st}} = \left(\frac{\gamma^4}{\gamma^2+\zeta^2}\right)^{1/2} \quad \cdots\cdots (7)$$

ここに　　$y_{st} = P / k_1$　（静的変位）

$\alpha = f^2 - r^2$　　　$\beta = 2h_2 f r$

$\gamma = f^2(1-r^2) - \mu f^2 r^2 - r^2(1-r^2) - 4h_1 h_2 f r^2$

$\zeta = 2h_2 r f (1-r^2-\mu r^2) + 2h_1 r (f^2-r^2)$

$\mu = m_2 / m_1$（質量比）　　$f = \omega_2 / \omega_1$（同調比）

$r = \omega / \omega_1$（強制振動数比）　h_i は減衰定数を表す．

$$\delta eff = 2\pi (h_1 - \mu r T / 2) \qquad (8)$$

ここに

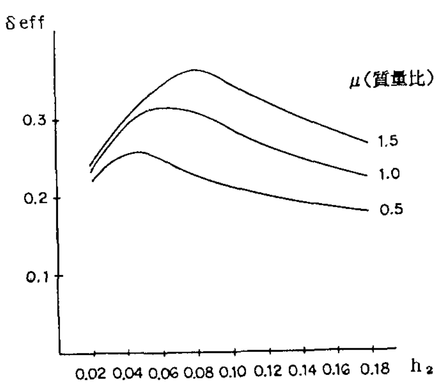
$$T = \frac{-2h_2 r^3 f}{(f^2 - r^2)^2 + 4h_2^2 f^2 r^2}$$

h_1：　主振動系の減衰定数

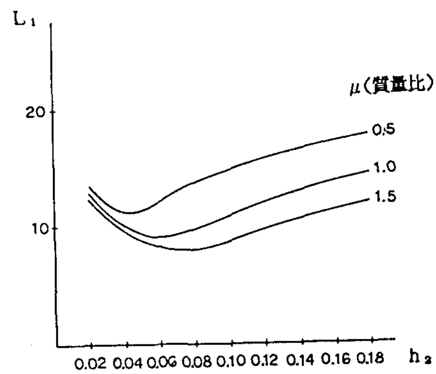
3．解析結果

質量比 μ=0.5%，1.0%，1.5%，同調比 $f = \dfrac{1}{1+\mu}$，h_1=0.021(実測値)のときのTMDの各減におけるδeff，L_1，L_2の計算結果をそれぞれ図－4，図－5，図－6に示す．

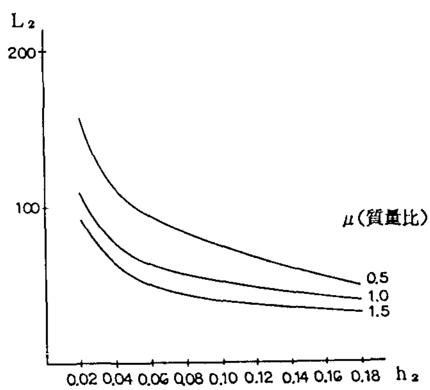
又，$r = \omega / \omega_1$ とδeffの関係を図－7に示す．



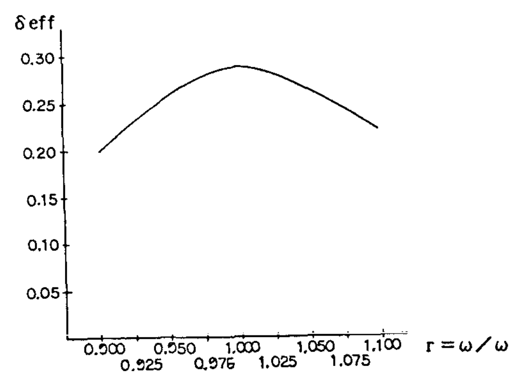
図－4



図－5



図－6



図－7

4．まとめ

以上の解析結果をまとめると以下の様である．

(1) 図−4，5，6よりＴＭＤの質量を大きくすると減衰効果は大きくなる．応答倍率は小さくなる．

(2) 図−4，5，6よりＴＭＤの減衰定数と主振動系の対数減衰率は比例しないで極値をもつ．

(3) 図−7より外力の円振動数によりδeffは変化するが，$\omega／\omega_1=1.0$で最大値となる．

国内において，歩道橋にＴＭＤが設置された例は一つだけである[3)]．　しかし，これは減衰機構のないＴＭＤで，減衰器を有したＴＭＤを歩道橋に設置した例は筆者らの知るかぎりではほとんどないと思われる．しかし，交通安全事業としての長支間の歩道橋（側道橋）の設置数は今後増大し，振動軽減対策がますます重要な検討課題になると思われる．

ＴＭＤの設置による対策法は，現時点で寒冷地における減衰器の耐久性，減衰係数の変化，同調の誤差等の問題があるが，一般に歩道橋は道路橋に比べ自重が小さいので軽量なＴＭＤですむ．外力が歩行者荷重であるため，励振周期にバラツキが少ない等のメリットがあり，歩道橋の振動軽減対策として有用であると考えられる．

5．あとがき

ＴＭＤを設置した場合の歩道橋の制振効果について若干述べた．今後の検討課題としては，制振目標をどのように設定するかということと，同調の誤差による制振効果の変動度合の把握等が考えられる．又，ＴＭＤを実橋に取り付けて，実際の制振効果の測定を行うことが必要だと思われる．

本論文をまとめるにあたり，資料を提供していただいた川崎重工㈱橋梁設計部の皆様と，貴重な助言をいただいた㈱橋梁設計コンサルタントの林 義税氏に感謝致します．

参考文献

1） デン・ハルトック　「機械振動論」　コロナ社　1986年

2） 田所・佐々木 ： 振動感覚を考慮した側道橋の設計　土木学会北海道支部論文報告集　第44集

3） 松崎・西岡・松本 ： 歩道橋に取り付けた吸振器の効果について　土木学会論文報告集　第261号