橋梁の連成フラッタに対する制振装置の制御メカニズムに関する考察

神戸製鋼所 正会員 岡田 神戸製鋼所 徹 本家 浩一 神戸製鋼所 正会員 杉井 謙一 立命館大学 正会員 小林 紘士

1.まえがき 著者らは,橋梁の連成フラッタに対して振子型動吸振器¹⁾およびジャイロダンパ²⁾による制振を試み, 2次元風洞実験および解析により,その高い耐風安定化効果を確認している.本論文では,信号処理理論的な考察 により³⁾, フラッタの発生メカニズムとこれら制振装置による制振のメカニズムを考察する.

2.連成フラッタ

2.1 解析モデル 本研究では、フラッタ振動系を曲げと捩れの2次元モデルで表現する. 桁幅を B,橋梁の単位長さあたりの重量および極慣性モーメントをそれぞれ m および I, 曲げおよび捩れ剛性をそれぞれ k_n および k_{θ} , 減衰係数を c_n , c_{θ} とする.鉛直変位を桁幅 の半分(B/2)で無次元化してη, 捩れ角をθで表すと, 運動方程式は次式で表される.

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\eta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{\eta} & 0 \\ 0 & c_{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\eta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{\eta} & 0 \\ 0 & k_{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \\ M \end{bmatrix}$$

右辺の非定常空気力 L, M は, 非定常空気力係数 $L_{\eta R}$, $L_{\eta I}$, $L_{\theta R}$, $L_{\theta I}$, $M_{\eta R}$, $M_{\eta I}$, $M_{\theta R}$, Μ_θ と空気密度ρおよび円振動数ω,桁幅 Bを用いて次式で表す.

$$L = \pi \rho B^2 \omega^2 \left(L_{\eta R} \eta + L_{\eta I} \frac{\dot{\eta}}{\omega} + L_{\theta R} \theta + L_{\theta I} \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right), M = \pi \rho B^4 \omega^2 \left(M_{\eta R} \eta + M_{\eta I} \frac{\dot{\eta}}{\omega} + M_{\theta R} \theta + M_{\theta I} \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right)$$
(2)





70 60

0.12

60,

0.12

50m/s

0.16

0.16

0.20

(1)

幅 B を 38.5m, m を 46.7tf/m, I を 12.152tfm²/m,曲げと捩れの振動数はそれぞれ 0.065Hz,

0.15Hz とし,対数減衰率は各モードとも0.02 とする.空気力は平板翼の理論値を用いた.この場合,無風時の曲げ および捩れモードを起点とする両分岐のうち,捩れ分岐が不安定となり,風速 65m/s でフラッタが発現する.

2.2 連成フラッタのメカニズム 式(1)と式(2)を整理し,減衰および剛性マトリクスの非対角成分となる連成空気力を 外力として取り扱うと,運動方程式は次式で表すことができる.

 $I\ddot{\theta} + (c_{\theta} - \pi\rho B^{4} M_{\theta I} / \omega)\dot{\theta} + (k_{\theta} - \pi\rho B^{4} M_{\theta R})\theta = M_{\eta}$ (4) $m\ddot{\eta} + (c_n - \pi\rho B^2 L_{nI} / \omega)\dot{\eta} + (k_n - \pi\rho B^2 L_{nR})\eta = L_{\theta}$ (3) ここで, L_θ, M_nはそれぞれ次式で表せる揚力および空力モーメントの連成空気力とする.

 $L_{\theta} = \pi \rho B^2 \omega^2 \left(L_{\theta R} \theta + L_{\theta I} \dot{\theta} / \omega \right)$ (5)90 G_H (曲げ) η $M_{\eta} = \pi \rho B^4 \omega^2 \left(M_{\eta R} \eta + M_{\eta I} \dot{\eta} / \omega \right)$ Phase deg (6)đĐ G_M G_L (揚力) . U-10 (モーメント) 50m/s -90 式(3)~(6)をそれぞれ伝達関数 G_H, -180 G_T (捩れ) G_T , G_L , G_M で表すと, 系全体は図2の -270 L -20 L 0.08 0.12 0.16 0.08 ブロック線図に展開できる.ここで, 図2 フラッタ振動系 Frequency Hz Frequency Hz L_{θ} η M_{n} θ L_{θ} と回るループが不安定となる現象が連成フ (a)全体系開ループ(Gain) (b)全体系開ループ(Phase) 110 ラッタである.系の安定性は全体系の開ループ伝達関数 70 $(-G_H G_M G_T G_I)$ のゲインと位相, すなわちボード線図から判別で 70 <u>ප</u> 100 Ð 80m/s Gain Gain き,位相角が180°となる振動数で,ゲインが0dBを越えると 00 不安定となる³⁾.ここで,図3に風速を50~80m/sに変化させ 50m/s -110<u></u>0.04 たとき各伝達関数を示す.図(a),(b)は全体系開ループのゲイ 80 0.04 0.12 0.08 0.16 0.08 Frequency Hz Frequency Hz ンと位相,図(c)はθから Mnまでの連成空気力と曲げを合成し (c) 曲げ+連成空気力(G_LG_HG_M [θ M_η]) (d) 捩れ($G_T[M_\eta \quad \theta]$) た伝達関数 $G_L G_H G_M$ のゲイン,図(d)には捩れ G_T のゲインを示 図3 基本モデルのボード線図

キーワード:超長大吊橋,連成フラッタ,振子型動吸振器,ジャイロダンパ,信号処理理論 〒651-2271 神戸市西区高塚台 1-5-5 TEL 078-992-5640 FAX 078-993-2056

す.図中の黒丸は位相角が180°となる振動数(位相交差周波数)を示す.図(c)と図(d)のdB和に相当する図(a)から, 風速の増加に伴いゲインが増加し,風速70m/sで黒丸が0dBを越えるのが確認できる.これは図1のフラッタ風速 65m/s に対応する.位相交差周波数は図(d)の捩れのピーク近傍に位置し,風速増加に伴い低周波側に推移する.捩 れのゲインは減少するものの,図(c)において,連成空気力の増加に加え,曲げのピークに近づきゲインが増加する. これが連成フラッタの発生メカニズムとなる.

3.フラッタ制御

3.1 振子型動吸振器¹⁾図4(a)に示す振子型動吸振器は,橋梁の捩れ振動に対して効果を有する. l₂とl₁がほぼ等しいと仮定すると,式(4)の橋梁の捩れ振動系は次の運動方程式で表される.

 $\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & m_d l_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{\theta'} & 0 \\ 0 & c_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{\theta'} & m_d l_2 g \\ m_d l_2 g & m_d l_2 g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{\eta} \\ 0 \end{bmatrix} \qquad \text{where } \begin{cases} k_{\theta'} = k_{\theta} - \pi \rho B^4 M_{\theta R} \\ c_{\theta'} = c_{\theta} - \pi \rho B^4 M_{\theta I} / \omega \end{cases}$ (7)

ばね質量系で構成される動吸振器の性能を表す質量比に相当するものとして,振子型吸振器の制振効果は,次の等価を慣性モーメント比 μ_{et} で評価できる¹⁾.

$$\mu_{et} = m_d l_2^2 / I \tag{8}$$

振子長さ *l*₂は,動吸振器のチューニング振動数から決まり,非常 に長周期な超長大橋に対して,軽量でも*µ_{et}*は大きくなる. **3.2 ジャイロダンパ**^{2),4)} 図 4(b)に示すジャイロダンパも,橋梁の

捩れ振動に対して効果がある .ロータの軸回りの極慣性および回転角速度をそれぞれ I_r , Ω , ロータを含むジンバル系の極慣性を I_G で表し, I_G は Iに比べて十分に小さく, 各変位は微小と仮定すると, 式(4)の捩れ振動系は,

$$\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{\theta'} & -I_r \Omega \\ I_r \Omega & c_{\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{\theta'} & 0 \\ 0 & k_{\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_\eta \\ 0 \end{bmatrix}$$
(9)

となる.制振効果は,次式の等価極 慣性モーメント比 μ_{es} で評価でき²⁾,

$$\mu_{eg} = \frac{I_r}{I_G} \frac{I_r}{I} \left(\frac{\Omega}{\omega_{\varphi}}\right)^2 \tag{10}$$

*I,*が大きいほど,また,ロータ回転数 Ωの二乗に比例してμ_{eg}は大きくなり, 制振性能は向上する.





3.3 制御メカニズム 基本橋梁に重量比 5%(2335kg/m)の振子型動吸振器を取付け,最適パラメータ(固有振動数 0.094Hz,減衰比 0.13)に設定した時のボード線図を図 5 に示す.各図は図 3 と同様である.図(a)から風速 80m/s で もゲインは 0dB を下回り,フラッタが発生しないことが確認できる.図 3(d)と図 5(d)の比較から,動吸振器により 捩れのゲインが減少するとともに,黒丸の位相交差周波数が高周波側に推移することが分かる.その結果,図(c)の 曲げに関しても,位相交差周波数がピークから離れてゲインが下がる.これが動吸振器の制御メカニズムである.

次にジャイロダンパの結果を示す.ロータ諸元等は,等価極慣性モーメント比 μ_{eg} が,図5の振子型動吸振器とほぼ一致する様に与え($\mu_{el}=\mu_{eg}=15\%$),ジンバル系の固有振動数および減衰比も等しくおいた.捩れの伝達関数のみを図6に示す.図5(d)の動吸振器の伝達特性にほぼ一致し,同様の制御メカニズムになっていること,また等価極慣性モーメント比が等しければ,フラッタに対してほぼ等しい効果を有することが確認できる.

<u>4</u>.まとめ</u> 振子型動吸振器およびジャイロダンパのフラッタ制御メカニズムを明らかにした.そのメカニズムは 両制振装置とも, 捩れ系の振動伝達特性を下げることと, 系全体の位相を変化させることの二つの効果による.

【参考文献】1)岡田他:振子式動吸振器による橋桁の連成フラッタの制御,風工学シンポジウム論文集,pp341-346,1998,2)岡田他:ジャイロ 制振装置による橋桁の連成フラッタの制御,構造工学論文集,Vol46A,pp1105-1114,2000,3)藤澤:近似空気力を用いたフラッタ特性の考察,風 工学シンポジウム論文集,pp485-490,1996,4)藤澤:機械式ダンパによる連成フラッタの制御,土木学会次学術講演会概要集,pp1508-1509,1995