

I-446

アウターケーブルを用いたけたの振動制御について

山口大学工学部 学生員○椿辰一郎

正員 會田忠義、麻生稔彦

横河ブリッジ 正員 清田鍊次、今田安男

1. まえがき けたの受動的振動制御の代表的手法としてTMDが用いられ、その制振効果は、十分に認められていることは周知の通りである。TMDの実装にあたって、比較的大きい負荷質量をつり下げることで、また、その振動振幅の大きさが問題となるケースがあり、種々の工夫がなされている。本研究では、けたの減衰性能を向上させる一手法として、最近良く利用されているアウターケーブルを用い、アウターケーブルとけたとの間にバネ・ダンパーからなる支材を挿入した機構を提案する。この制振機構を装備したけたの応答を調査し、この機構の制振効果を明らかにするとともに、その実用化の可能性を示す。

2. けたの運動方程式と振動解析 ケーブル初期力(圧縮力を正として)導入状態を基準として、この状態に周期外力が作用し、振動している状態を想定する。Fig.1を参照するときけたの運動方程式とケーブルのつりあい式は、次式となる。式中、 $\bar{v}(x)$: T_0 によるたわみ、 $v(x,t)$: 振動たわみ、 EI : 曲げ剛性、 m : 単位長さ質量、 $\bar{v}_0$: T_0 によるケーブル最下端のたわみ、 $v_0(t)$: ケーブル最下端の振動たわみ。

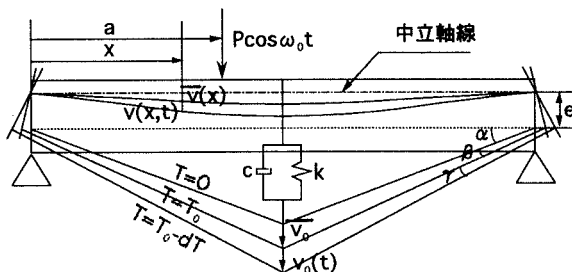


Fig.1 解析モデル

(けたの運動方程式)

$$EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} - T_0 v(x,t) + c_0 \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = k \left[v\left(\frac{L}{2}, t\right) - v_0(t) \right] \delta\left(x - \frac{L}{2}\right) + c \left[\frac{\partial v_0(t)}{\partial t} - \frac{\partial \left(\frac{L}{2}, t\right)}{\partial t} \right] \delta\left(x - \frac{L}{2}\right) + P \cos \omega_0 t \quad (1)$$

(けたの境界条件式)

$$x=0: v(x,t)=0, \quad EI \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} = dT_1 e = \frac{2EAe^2}{L\sqrt{1+(\alpha+\beta)^2}} \frac{\partial v_0(t)}{\partial x} + \frac{2EAe(\alpha+\beta)}{L\sqrt{1+(\alpha+\beta)^2}} v_0(t) \quad (2)$$

$$x=L: v(x,t)=0, \quad EI \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} = dT_2 e = \frac{2EAe^2}{L\sqrt{1+(\alpha+\beta)^2}} \frac{\partial v_0(t)}{\partial x} + \frac{2EAe(\alpha+\beta)}{L\sqrt{1+(\alpha+\beta)^2}} v_0(t) \quad (3)$$

(ケーブルのつりあい式)

$$k \left[v_0(t) - v\left(\frac{L}{2}, t\right) \right] + c \left[\frac{\partial v_0(t)}{\partial t} - \frac{\partial v\left(\frac{L}{2}, t\right)}{\partial t} \right] = \frac{4T_0 - 4EA(\alpha+\beta)^2}{L\sqrt{1+(\alpha+\beta)^2}} v_0(t) + \frac{2EA(\alpha+\beta)^2}{L\sqrt{1+(\alpha+\beta)^2}} \left[\frac{\partial v_0(t)}{\partial x} + \frac{\partial v\left(\frac{L}{2}, t\right)}{\partial x} \right] \quad (4)$$

けたの振動変位を次式で表す。

$$v(x,t) = \sum_{i=1}^N \rho_i(t) \Phi_i(x) \quad (5)$$

ここで、 $\rho_i(t)$: 時間に関する未知関数 $\Phi_i(x)$: けた単独の自由振動の i 次の固有関数

式(5)を運動方程式、境界条件式およびケーブルのつりあい式に代入して整理すると次式を得る。

$$m \rho_j''(t) + m \omega_j^2 \rho_j(t) - T_0 \rho_j'(t) + c_0 \rho_j'(t) + c \left[\sum_{i=1}^N \rho_i(t) \Phi_i\left(\frac{L}{2}\right) \Phi_j\left(\frac{L}{2}\right) - v_0(t) \Phi_j\left(\frac{L}{2}\right) \right] + k \left[\sum_{i=1}^N \rho_i(t) \Phi_i\left(\frac{L}{2}\right) \Phi_j\left(\frac{L}{2}\right) - v_0(t) \Phi_j\left(\frac{L}{2}\right) \right] = P \cos \omega_0 t - K \left[e \sum_{i=1}^N \rho_i(t) \Phi_i'(0) \Phi_j'(0) + \kappa v_0(t) \Phi_j'(0) \right] + K \left[e \sum_{i=1}^N \rho_i(t) \Phi_i'(L) \Phi_j'(L) + \kappa v_0(t) \Phi_j'(L) \right] \quad (6)$$

$$k \left[v_0(t) - \sum_{i=1}^N \rho_i(t) \Phi_i\left(\frac{L}{2}\right) \right] + c \left[\dot{v}_0(t) - \sum_{i=1}^N \dot{\rho}_i(t) \Phi_i\left(\frac{L}{2}\right) \right] = \left[\frac{4T_0}{L\sqrt{1+\kappa^2}} - 2K\kappa^2 \right] \left[\frac{4T_0}{L\sqrt{1+\kappa^2}} - 2K\kappa^2 \right] - K\kappa \left[\sum_{i=1}^N \rho_i(t) (\Phi_i'(0) + \Phi_i'(L)) \right] \quad (7)$$

けたの強制振動変位は、上記モード方程式の特解を次式で表し、

$$\{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N\}^T = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}^T \cos \omega_0 t + \{B_1, B_2, \dots, B_N\}^T \sin \omega_0 t \quad (8)$$

$$v_0 = a \cos \omega_0 t + b \sin \omega_0 t \quad (9)$$

上式を満たす A_j および B_j ($j=1, 2, \dots, N$) ならびに a および b を求めることにより次式で求められる。

$$v(x, t) = \sum_{j=1}^N (A_j \cos \omega_0 t + B_j \sin \omega_0 t) \Phi_j(x) \quad (10)$$

3. 数値解析結果 数値解析にあたり、スパン 30m、幅員 8.5m の合成けた(橋格:一等橋、主げた 4 本、建設省標準設計の床版および主げたを使用、けた 1 本あたりの $EI=8.18 \times 10^9 \text{ Nm}^2$ $m=1.99 \times 10^3 \text{ Nm}$)を対象けたとし、 $\phi=63\text{mm}$ のケーブル($E=1.57 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, $A=2440\text{mm}^2$, T_d (破断荷重)=3340kN)を用いた。この対象けたに対して、ケーブルの初期張力 T_0 、支材のバネ係数 k 、およびダンパーの減衰係数 c を下記のように置き、 α 、 β および γ の変動に伴う応答の挙動解析を行った。応答は、固有モードの 10 次までの和から求めた。

$$k = \alpha k_0, T_0 = \beta T_d, C = \gamma C_c$$

ここで、 $k_0=48EI/L^3$ (けたのスパン中央のバネ係数) $C_c=2m\omega_1$ (けたの 1 次振動に対する臨界減衰係数、 m : けたの単位長さ質量、 ω_1 : けたの 1 次の固有円振動数)

[ケーブルの初期張力 T_0 と支材ダンパーの減衰係数 c がけたの応答 $V_{\max}/V_{st}$ に与える影響]

ここで、 $k=0.5k_0$ の場合、 $T_0=\beta T_d$ ($\beta=0\sim 0.5$) および $C=\gamma C_c$ ($\gamma=0\sim 1.0$) の変動に伴うけたのスパン中央の最大応答 ($V_{\max}/V_{st}$, $V_{\max}$: 動的な最大変位(共振曲線の 1 次モードのピーク値)、 V_{st} : 周期荷重振幅による静的たわみ)の挙動を Fig. 2 に示す。特に $k=0.5k_0$ で、 $C=0.5C_c$ の場合の初期張力 T_0 の変動に伴う最大応答の挙動を Fig. 3 に示す。これらの図から張力の導入により、またダンパーの減衰性能の増加により、応答を抑えることができるが、 $\gamma=0.5$ より大きい範囲では、応答の顕著な減少はなく、また、 $\beta=0.5$ より大きい範囲での応答の顕著な減少はないといえる。

[支材のバネのバネ係数 k と支材ダンパーの減衰係数 c がけたの応答 $V_{\max}/V_{st}$ に与える影響]

$T_0=0.3T_d$ の場合、 $k=\alpha k_0$ ($\alpha=0.05\sim 3.0$) および $C=\gamma C_c$ ($\gamma=0\sim 1.0$) の変動に伴うけたのスパン中央の最大応答の挙動を Fig. 4 に示す。特に $T_0=0.3T_d$ で $C=0.5C_c$ の場合の支材のバネのバネ係数 k の変動に伴う最大応答の挙動を Fig. 5 に示す。これらの図から支材のバネのバネ係数 k の増強により、またダンパーの減衰性能の増加により、応答を抑えることができるが、 $\gamma=0.5$ より大きい範囲では応答の顕著な減少はなく、また、 $\alpha=0.5$ より大きい範囲での応答の減少はほとんどないといえる。

4. まとめ ①支材のバネ係数は、けたのスパン中央のバネ係数 ($48EI/L^3$) の 0.5 倍以下程度(ケーブルの初期張力に依存する)あれば十分である。②ケーブルの初期張力を増加させると共にダンパーの減衰性能を大きくすれば制振効果を上げることができるが、けたの 1 次振動に対する臨界減衰係数 ($2m\omega_1$) の 0.5 倍程度が限界であろう。設計にあたって、制振目標 ($V_{\max}/V_{st}$) を設定し、制作可能なダンパーの減衰性能が決まれば、導入すべきケーブルの初期張力および支材のバネ係数が決定可能である。

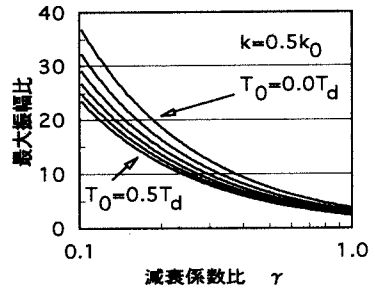


Fig.2 張力 - 減衰係数比 - 最大応答曲線

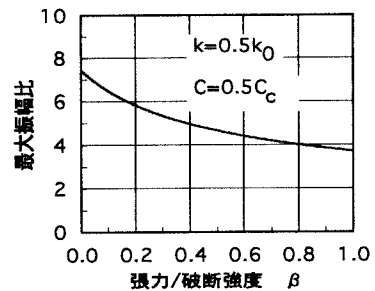


Fig.3 張力 - 最大応答曲線

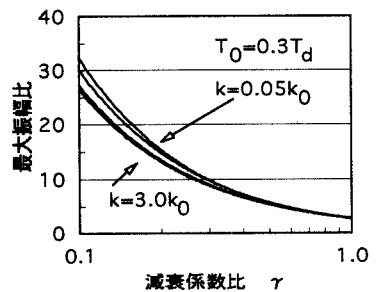


Fig.4 バネ係数 - 減衰係数比 - 最大応答曲線

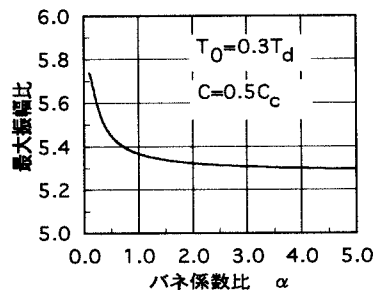


Fig.5 バネ係数 - 最大応答曲線