

(24) ケーブル制振用ダンパーに関する研究

住友建設(株) 土木部 正会員 ○春日 昭夫  
 同 上 正会員 梅津 健司  
 同 上 正会員 平 喜彦

1. はじめに

斜張橋において最近問題になっているものにケーブルの振動がある。これは、アンカー付近のケーブルの2次曲げ応力による疲労破断にもつながりかねないため、制振装置を取り付けて対処している。この場合、最も効率の良い方法に、ダンパーを取り付ける方法がある。ダンパーとしては自動車のショックアブソーバーや粘性ダンパーを使用した例があり、主桁付近に配置するため美観に与える影響が少なく、ダンパーの維持・管理も容易に行えるという利点がある。

ダンパーを制振装置としてケーブルに取り付けた場合、その減衰の度合いによって対数減衰率がピークをもつ振動特性を示す<sup>1)</sup>。したがって、実際にダンパーを設計する場合は、このピーク値が得られるように減衰係数を決定するのであるが、そのためにはケーブル毎に複素固有値解析を、10~20ケース行う必要がある。しかしながら、非減衰の固有値解析に比べ複素固有値解析は、マトリックスのサイズが大きくなるために多大な計算量を要するという問題がある。これを解決するために、簡易式による対数減衰率のピークを求める近似手法が提示されてきた<sup>2) 3) 4)</sup>。文献1)は、ケーブル振動の形状関数が減衰力によって変化することに注目して近似曲線を求めている。その結果、最大対数減衰率と最適減衰係数を別々に近似するのではなく、それらの関係に基づいた式より同時に求めることができるのである。文献2)は、対数減衰率と減衰係数の関係を4本の直線で近似しており、最大対数減衰率と最適減衰係数を別々の近似式で求めるようになっている。一方、文献3), 4) は、両者の関係を減衰係数の3次式で与えることによって、より正確な近似を行っている。

以上の推定式は粘性ダンパーを対象としたものである。粘性ダンパーは比較的簡単に高い減衰が得られる反面、減衰係数の温度に対する依存性が大きい。斜張橋のケーブルダンパーの場合、橋面付近に取り付けられることが多く、橋面温度の影響を大きくうけることになる。したがって、粘性ダンパーの場合は、設定温度をいくらにするかを含めて、一年を通して有効にダンパーが機能するように設計しなければならない。

一方、高減衰ゴムをダンパーに用いた場合、減衰性能は粘性ダンパーに比べて劣るものの、温度依存性は小さくなる。しかしながら、減衰の大きなゴムは、温度によりせん断弾性係数が変化し、ゴムのばね定数が変わるため減衰性能に影響を及ぼす。したがって、高減衰ゴムを用いたダンパーの設計においては、どういった物性のゴムを使用するのが重要になってくる。

本研究では、文献1)の推定手法に基づいて、粘性ダンパーと高減衰ゴムダンパーの対数減衰率の推定法を述べるものである。両タイプのダンパーとも形状関数の低減係数を変えるだけで同じアプローチにより求めることができる。

2. 粘性ダンパーの推定式<sup>1)</sup>

粘性ダンパーを用いた斜張ケーブルの解析モデルを図-1に示す。節点数は100で、初期張力でT=300tonを導入することにより幾何剛性を与える。なお、解析においては、ケーブルのサグの影響と振動による張力変化は無視する。

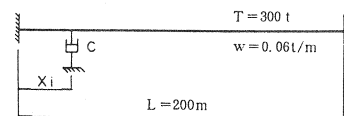


図-1 粘性ダンパー解析モデル

一般に、対数減衰率は次式により得られる。

$$\delta = \frac{2 \pi C \{ \phi(x_i) \}^2}{2 M \omega_n} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

$$M = \frac{1}{2} \mu L \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\omega_n = \frac{n \pi}{L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\phi(x_i) = \sin(n \pi \frac{x_i}{L}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、Cは減衰係数、 $\phi(x_i)$ はケーブル振動の形状関数、Mは換算質量、 $\mu$ は単位長さ当りの質量、Lはケーブル長、 $\omega_n$ はn次の円振動数、Tは張力、 $x_i$ はダンパー位置までの距離である。

ダンパーを設置したケーブル振動は、減衰力によりダンパー位置の振動モードが、Cの増加にともない減少していく。このことは、形状関数の低減係数を導入することにより表現できる。

$$\beta = e^{-0.36 \alpha C} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、

$$\alpha = \frac{\omega_n x_i (L - x_i)}{T L} \quad \dots\dots\dots (6)$$

複素固有値解析結果と式(5)を図-2に示す。

さらに、対数減衰率は式(1)により次式で表される。

$$\delta = \frac{2 \pi C \{\phi(x_i)\}^2}{2 M \omega_n} e^{-0.72 \alpha C} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式(7)をCで微分して0とおくことにより最大対数減衰率 $\delta_{max}$ を与える最適減衰係数 $C_{opt}$ が求められる。

$$C_{opt} = \frac{1}{0.72 \alpha} = \frac{T L}{0.72 \omega_n x_i (L - x_i)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

また、式(8)を式(7)に代入して $\delta_{max}$ を得る。

$$\delta_{max} = \frac{\{\phi(x_i)\}^2}{n^2 \pi \frac{x_i}{L} (1 - \frac{x_i}{L})} \quad \dots\dots\dots (9)$$

図-3に、複素固有値解析結果と式(7)を示す。実際のダンパーの設計において、その減衰係数を1次モードの $C_{opt}$ 以下に設定することを考えると、この近似式は実用上十分な精度を与えていると言える。

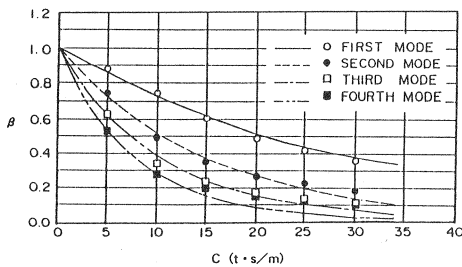


図-2 減衰係数と低減係数の関係

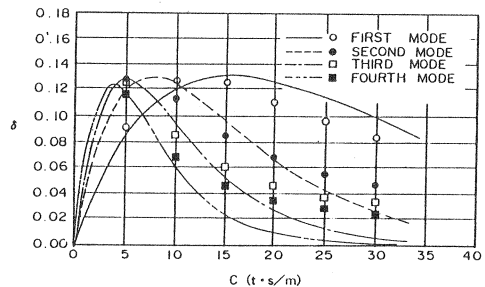


図-3 減衰係数と対数減衰率の関係

### 3. 高減衰ゴムダンパーの推定式

解析モデルを図-4に示す。解析の仮定は、粘性ダンパーのものと同じであり、ダッシュポットを複素ばねに置き換えたものである。

複素ばね定数  $k(u+iv)$  は、ゴムの内部摩擦係数  $\gamma$  が与えられれば次式で求めることができる。

$$u = \frac{4 - \gamma^2}{4 + \gamma^2}, \quad v = \frac{4\gamma}{4 + \gamma^2} \quad (10)$$

また、弾性ばね定数  $k$  は、

$$k = GA/t \quad (11)$$

で算出できる。ただし、 $G$  はせん断弾性係数、 $A$  は面積、 $t$  はゴム厚である。粘性ダンパーで用いた低減係数を次のように変更する。

$$\beta = e^{-0.36\alpha} \frac{kv}{\omega_n^2} \gamma^2 \quad (12)$$

この式において、 $kv/\omega_n$  は等価減衰係数を示している。複素固有値解析結果と式(12)を図-5に示す。この図より、低減係数は  $\gamma$  の影響を大きく受けないことがわかる。

対数減衰率は式(1)より次式で表される。

$$\delta = \frac{2\pi \{\phi(x_i)\}^2}{2M\omega_n} \frac{kv}{\omega_n} e^{-0.72\alpha} \frac{kv}{\omega_n^2} \gamma^2 \quad (13)$$

粘性ダンパーと同様、式(13)を  $k$  で微分して0とおくことにより最大対数減衰率  $\delta_{max}$  を与える最適弾性ばね定数  $k_{opt}$  が求まる。

$$k_{opt} = \frac{1}{0.72\alpha} \frac{\omega_n \gamma}{2v} \quad (14)$$

また、式(14)を式(13)に代入して  $\delta_{max}$  を得る。

$$\delta_{max} = \frac{\{\phi(x_i)\}^2}{n^2 \pi \frac{x_i}{L} (1 - \frac{x_i}{L})} \frac{\gamma}{2} \quad (15)$$

式(9)と式(15)を比較してみると、高減衰ゴムダンパーが粘性ダンパーの  $\delta_{max}$  の  $\gamma/2$  倍になることを示している。図-6に複素固有値解析結果と式(13)を示す。本提案式は、 $k$  が大きいところで誤差を生じているものの、最大値近傍は実用上問題ないと言える。このように、高減衰ゴムの弾性ばね定数と内部摩擦係数がわかれば、粘性ダンパーの手法と同様のアプローチで対数減衰率曲線を求めることができる。

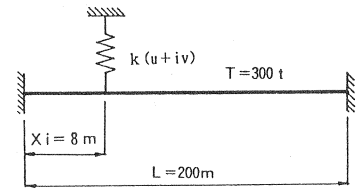


図-4 高減衰ゴムダンパー解析モデル

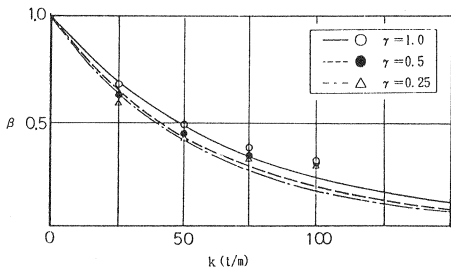


図-5 弾性ばね定数と低減係数の関係

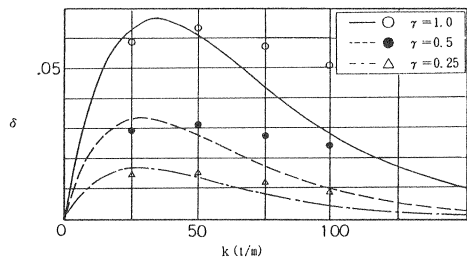


図-6 弾性ばね定数と対数減衰率の関係

#### 4. まとめ

ダンパーを設置したケーブルの振動において、減衰力により形状関数が変化するところに近似式を用いることで、対数減衰率と減衰係数の関係を求めることができた。そして、形状関数を変えることにより、粘性ダンパーと高減衰ゴムダンパーのいずれの場合でも本手法が適用可能であることを示した。これらの推定法により、複素固有値解析を行わずにダンパーを設計することが可能となった。本研究が、ケーブルダンパーの設計に際して一助となれば幸いである。最後に、高減衰ゴムのデータを提示していただいた(株)ブリジストン水津洋二氏に感謝の意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) 春日昭夫：ケーブル制振用ダンパーの最適減衰係数に関する研究，構造工学論文集，Vol. 37A，pp. 799-804，1991年3月
- 2) 米田昌弘・前田研一：ケーブル制振用ダンパーの粘性減衰係数設定に関する一考察，土木学会論文集，第410号/I-12，pp. 455-458，1989年10月
- 3) A. Sulekh・B. Pacheco・Y. Fujino：A Universal Curve for Modal Damping in Cables with Dashpot，土木学会第45回年次学術講演会概要集，I-465，pp. 960-961，1990年9月
- 4) 諸富正和・鳥野清・北川正一・井上朝登・中谷真二：ケーブル制振用ダンパーの付加構造対数減衰率推定法，土木学会第45回年次学術講演会概要集，I-476，pp. 982-983，1990年9月