

## 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

A STUDY ON PRACTICAL ESTIMATION METHOD FOR  
STRUCTURAL DAMPING OF STAY CABLES WITH DAMPERS

米田昌弘\*・前田研一\*\*

By Masahiro YONEDA and Ken-ichi MAEDA

This paper is concerned with cable vibration dampers for increasing the structural damping of stay cables in cable-stayed bridges. Complex eigenvalue calculations have to be worked out in designing the details of cable vibration dampers. Although advancing computer technology has made complex eigenvalue calculation an easy task, calculations for all cables in cable-stayed bridges will require the great number of computational cost.

Therefore, in this brief paper, the effects of cable vibration dampers on the structural damping characteristics are investigated by means of complex eigenvalue calculations using cable model with the length of 200 m. Practical estimation method are also proposed on the basis of these analyses in order to reduce the computational cost of complex eigenvalue calculation.

*Keywords: cable, damping, complex eigenvalue calculation, cable-stayed bridge*

## 1. ま え が き

斜張橋は、吊橋に次いで剛性の低い柔構造物であることから、桁部の耐風設計にあたっては、従来より風洞模型実験を実施して、動的耐風安定性を詳細に検討している。しかしながら、斜張橋の長径間化に伴うケーブルの長大化およびポリエチレン管被覆の太径ケーブルの一般化を契機に、Wake galloping や Rain vibration 等の風によるケーブル自身の振動が大きな問題として取り上げられ、初期の設計段階からケーブル振動の対処方法について検討する機会も多くなっている。

ケーブルの風による振動に対処する方法として、欧米ではケーブルにダンパーを挿入する方法が積極的に採用されているのに対し、わが国では、ピアノ線や特殊な治具でケーブル同士を結合する方法が採用されてきた。しかしながら、荒津大橋でケーブルにダンパーを挿入する方法がはじめて採用され<sup>1)</sup>、確実な制振効果が得られたことから、ダンパー方式は有効なケーブル制振対策方法として注目を浴びつつある。また、桁とケーブルが連成

振動を生じる可能性の高いマルチケーブル形式斜張橋では、連成振動に関係する特定のケーブルにダンパーを挿入すれば、ケーブル部のみならず桁部の構造対数減衰率も増加できる<sup>2)</sup>ことから、わが国でも、今後、ケーブルにダンパーを挿入する制振対策方法を積極的に検討する気運が高まるものと予想される。

ところで、ケーブルにダンパーを挿入した場合の減衰付加効果は、複素固有値解析を実施すれば推定できるが、減衰付加効果に関与する粘性減衰係数の大きさやダンパー設置高さの影響を、斜張橋ケーブルの全段について検討することは、非常に繁雑で多大の労力と費用を要する検討作業となる。それゆえ、ケーブルにダンパーを挿入した場合の減衰付加効果を比較的簡単に、しかも比較的精度良く推定できる手法を確立することは、初期の概略検討段階のみならず詳細検討段階における複素固有値解析の実施回数を低減させるうえで、非常に有効であるといえよう。

なお、ダンパーを挿入した場合の減衰付加効果を簡単に推定する手法として、振動エネルギー法に基づく方法が従来より知られているが、この方法では、粘性減衰係数の非常に小さい範囲でしか適用できず、改良の余地が残されていることを述べておきたい。

このような観点から、本研究は、ケーブル制振用ダン

\* 正会員 工博 川田工業(株)技術本部振動研究室長  
(〒550 大阪市西区北堀江1-22-19)

\*\* 正会員 工博 川田工業(株)技術本部中央研究室長  
(〒114 北区西ヶ原3-45-4)

パーに着目して、ダンパー設置後の構造減衰が最大となる最適粘性減衰係数を支配するパラメータを示すとともに、任意の大きさの粘性減衰係数を有するダンパーをケーブルに設置した場合、複素固有値解析による構造減衰付加効果を簡単に推定できる手法について検討したものである。

### 2. ケーブルにダンパーを設置した場合の構造減衰特性

まず、ケーブルにダンパーを設置した場合の構造減衰特性を把握する目的で、図-1に示すように  $x_i/l = 7.5/200 = 0.0375$  にダンパーを設置した 200 m のケーブルを対象として、複素固有値解析を実施した。なお、ここで対象としたケーブルの構造諸元は表-1に示すとおりである。得られた解析結果を図-2に示す。

この結果より、ケーブルにダンパーを挿入した場合の構造減衰について、以下のような基本的特性を把握することができる。

- 1) ケーブルの構造減衰は粘性減衰係数の増加とともに大きくなるが、ある最適の粘性減衰係数で最大の構造減衰に達した後は、ダンパーが固定点に近づくことにより、粘性減衰係数の増加とともにゆるやかに減少する。
- 2) 最適粘性減衰係数の大きさは、高次の振動モードほど小さくなる。
- 3) ダンパーを設置した場合に得られる最大の構造対数減衰率は、高次の振動モードになるに従って若干大きくなる傾向を示すものの、工学的にはどの振動モードの構造減衰もほぼ同程度の大きさとみなすことができる。

また、図-2に示した複素固有値解析結果に加え、ケーブルの構造諸元およびダンパーの取付け位置を種々変化させて実施した数多くの複素固有値解析結果より、ダンパーの粘性減衰係数  $C$  とダンパーによって付加される構造対数減衰率  $\delta$  の関係は、図-3に示すように仮定できることがわかった。

### 3. 減衰付加効果の推定式

図-3に示した  $C$ - $\delta$  図を考慮すればわかるように、

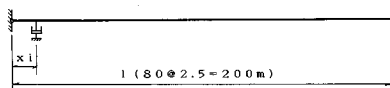


図-1 対象としたケーブルモデル

表-1 ケーブルモデルの構造諸元

|       |                |                      |
|-------|----------------|----------------------|
| ケーブル長 | l              | 80 @ 2.5 = 200 m     |
| 断面積   | A <sub>c</sub> | 0.015 m <sup>2</sup> |
| 重量    | w              | 0.130 t/m            |
| 張力    | T              | 550.0 t              |

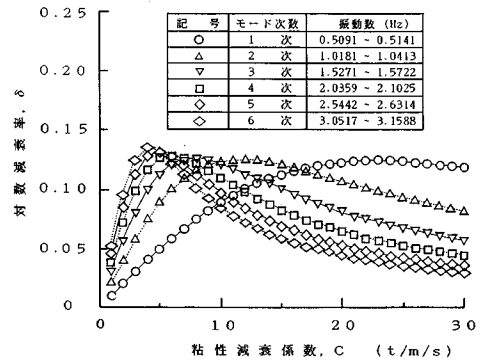


図-2 ケーブルモデルの複素固有値解析結果

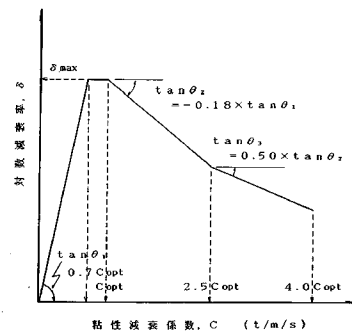


図-3 C- $\delta$  図の仮定

最適粘性減衰係数  $C_{opt}$  と  $C_{opt}$  に対応する構造対数減衰率の最大値  $\delta_{max}$  が適切に評価されれば、ケーブルに任意の粘性減衰係数  $C$  を有するダンパーを設置した場合の構造対数減衰率  $\delta$  を推定できることになる。

#### (1) 最適粘性減衰係数 $C_{opt}$ の評価

ダンパーを設置した場合の減衰付加効果を簡単に推定する手法としては、ケーブルの振動モード  $y(x)$  を

$$y(x) = \sin \frac{n\pi}{l} x \dots \dots \dots (1)$$

と仮定し、ケーブルが1サイクルに消費する振動エネルギーはダンパーが1サイクルに吸収したエネルギーに等しいという条件のもとで導かれた以下の式が良く知られている<sup>3)</sup>。

$$\delta = \frac{\sin^2 n\pi x_i / l}{w \times l \times f_n / g} \times C \dots \dots \dots (2)$$

(n = 1, 2, 3, \dots)

ここに、 $\delta$  はダンパー設置に起因した構造対数減衰率、 $C$  はダンパーの粘性減衰係数、 $l$  はケーブル長、 $x_i$  はケーブル端部からダンパー取付け位置までの距離、 $w$  はケーブルの単位長さ当たりの重量、 $g$  は重力加速度である。また、 $f_n$  は  $n$  次モードの固有振動数であり、 $T$  を張力とすると  $f_n = n/2 l \times \sqrt{gT/w}$  で計算できる。

式 (2) からわかるように、この方法で推定する対数

減衰率  $\delta$  は粘性減衰係数  $C$  に一次比例することになり、前章の1) で述べたように、ある最適の粘性減衰係数で最大の構造減衰に達した後は、粘性減衰係数の増加とともにゆるやかに減少するという基本的特性と相反する結果となる。

後述する、構造減衰付加効果の推定式は、式(2)の考え方を基本的に踏襲していることから、ここでは、最適粘性減衰係数  $C_{opt}$  の特性とその評価方法について具体的に検討する。まず、前章の計算結果および若干の工学的判断から、 $C_{opt}$  は以下に示すパラメーター  $P_c$  で規定できるものと仮定した。

$$P_c = \frac{\sin^2 n \pi x_i / l}{w \times l \times f_n / g} \times \frac{l}{x_i} \dots \dots \dots (3)$$

この妥当性を検証するために、前章の計算結果およびケーブルの長さ、重量、張力をそれぞれ 55~200 m, 0.065~0.20 t/m, 275~1100 t の範囲で種々変化させて補足的に実施した複素固有値解析結果に対して、それぞれの  $C_{opt}$  と  $P_c$  の関係を整理した。その結果を図-4に示す。なお、補足計算にあたっては、ダンパー取付け位置  $x_i/l$  を 0.0125~0.1250 の範囲で変化させている。

図-4より、最適粘性減衰係数  $C_{opt}$  は、振動モード形状にほとんど依存せず、パラメーター  $P_c$  と以下のように関係づけられることがわかる。

$$C_{opt} = \frac{6.25}{P_c} \dots \dots \dots (4)$$

(2) 構造対数減衰率の最大値  $\delta_{max}$  の評価

式(4)に示したように、パラメーター  $P_c$  がわかれば、各振動モードに対する最適粘性減衰係数  $C_{opt}$  は比較的良好な精度で推定できる。

それゆえ、構造減衰付加効果の推定式を提案するにあたり残された問題は、最適粘性減衰係数  $C_{opt}$  に対応する構造対数減衰率の最大値  $\delta_{max}$  について推定することにある。この問題を解決するため、 $C_{opt}$  に対応する複素固有値解析で得られた構造対数減衰率と式(2)において  $C=C_{opt}$  とした場合の値とを比較してみた。1次振動モードに対する比較結果を図-5に示す。

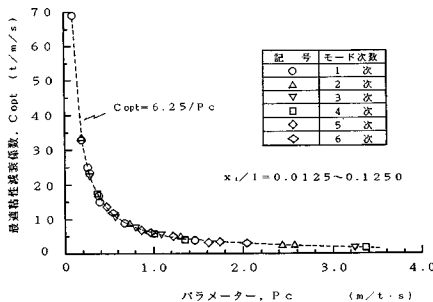


図-4 パラメーター  $P_c$  と最適粘性減衰係数  $C_{opt}$  の関係

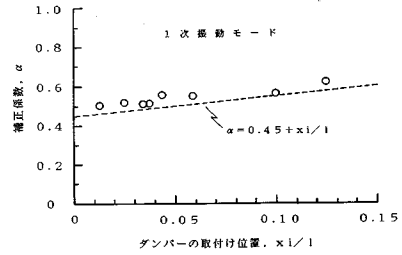


図-5 ダンパーの取付け位置  $x_i/l$  と補正係数  $\alpha$  の関係

この結果より、式(2)において  $C=C_{opt}$  とした場合の構造対数減衰率を補正する係数  $\alpha$  を導入し、その値を

$$\alpha = 0.45 + x_i/l \dots \dots \dots (5)$$

すれば、1次振動モードに対する  $\delta_{max}$  は、

$$\delta_{max} = \frac{\sin^2 n \pi x_i / l}{w \times l \times f_n / g} \times C_{opt} \times \alpha \dots \dots \dots (6)$$

( $n=1$ )

なる式でおおよそ推定できることがわかる。

2次振動モード以上の  $\delta_{max}$  についても、式(5)と類似の補正係数を仮定すれば推定できるが、前章の3) で示した知見より、ここでは式(6)で与えられる  $\delta_{max}$  を2次以上の高次振動モードの  $\delta_{max}$  として適用することにする。

(3) 構造減衰付加効果の推定式

以上のようにして、 $C_{opt}$  と  $\delta_{max}$  を評価すれば、ケーブルに任意の粘性減衰係数  $C$  を有するダンパーを設置した場合の構造対数減衰率  $\delta$  は、図-3に示した  $C-\delta$  図を具体的に表した、次式で推定できることになる。

$$\delta = \begin{cases} \delta_{max} \times \frac{C}{C_{opt}(1-0.3)} & \{0 < C \leq C_{opt}(1-0.3)\} \\ \delta_{max} & \{C_{opt}(1-0.3) < C \leq C_{opt}\} \\ \delta_{max} \times \left\{ 1.0 - \frac{0.18}{C_{opt}(1-0.3)} \times (C - C_{opt}) \right\} & \{C_{opt} < C \leq 2.5 C_{opt}\} \\ \delta_{max} \times \left\{ 0.614 - \frac{0.09}{C_{opt}(1-0.3)} \times (C - 2.5 C_{opt}) \right\} & \{2.5 C_{opt} < C \leq 4.0 C_{opt}\} \end{cases} \dots \dots \dots (7)$$

4. 適用例

前章では、ケーブルにダンパーを設置した場合の構造対数減衰率を推定する手法について述べたが、ここでは、図-6に示す実橋の斜張ケーブルに着目し、本提案式の適用性について検討した。

着目するケーブルは、中央径間側の1段目(最上段)と11段目(最下段)ケーブルであり、それぞれ  $C_1$ ,

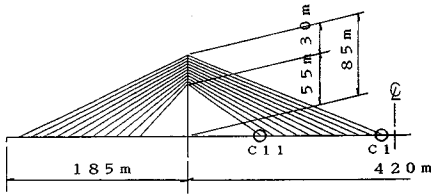


図-6 対象とした斜張橋

表-2 対象としたケーブルの構造諸元

| ケーブル名 | ケーブル長<br>l (m) | 断面積<br>A <sub>c</sub> (m <sup>2</sup> ) | 重量<br>w (t/m) | 張力<br>T (t) |
|-------|----------------|---|---------------|-------------|
| C1    | 215.11         | 0.0090                                  | 0.0986        | 376.8       |
| C11   | 92.28          | 0.0071                                  | 0.0783        | 310.8       |

C11 ケーブルと記すことにする。また、対象とした斜張橋の上、下流側ケーブルはそれぞれダブルケーブルであるが、着目ケーブルの1本当たりの構造諸元は表-2に示すとおりである。

ケーブル制振対策としてダンパー方式を採用する場合、制振効果を効率良く期待するためには、桁側のケーブル緩衝装置を除去するか、あるいは許容できる範囲内でケーブル定着点側に移動させることが望ましい。本研究では、桁側のケーブル緩衝装置を除去しても差し支えないと考え、ダンパー（減衰力は速度比例型）はケーブル定着点から2.0mの高さのケーブル法線方向に取り付けるものと仮定した。それゆえ、C1, C11 ケーブルに対する  $x_c/l$  値は、それぞれ 0.0235, 0.0364 となる。

それぞれのケーブルに対する、実用算定式による推定結果と複素固有値解析結果とを比較した。その結果の一部を図-7, 8に示す。

図-7, 8より、式(7)による推定値は、複素固有値解析結果に比べ幾分小さく、設計にとって安全側の傾向を示しているものの、両者の結果はおおむね良く一致していることがわかる。それゆえ、式(3)に示したパラメーター  $P_c$  の設定および式(7)の推定式がほぼ妥当であったといえよう。

5. あとがき

本論文で提案した推定式は、ケーブルにダンパーを挿入した場合の最適粘性減衰係数の大きさや任意の粘性減衰係数に対応する減衰付加効果を、比較的簡単に、しかも比較的良好な精度で推定できることから、初期の概略検討段階のみならず詳細検討段階における複素固有値解析の実施回数を低減させるうえで、非常に有効である。本論文が、ケーブル制振用ダンパーを検討する際の一助に

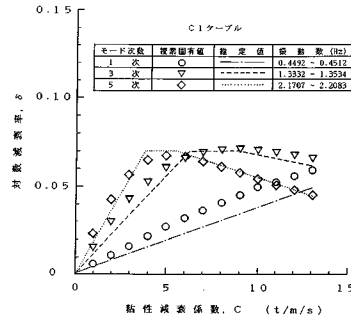


図-7 複素固有値解析結果と実用算定式による推定値の比較 (C1ケーブル)

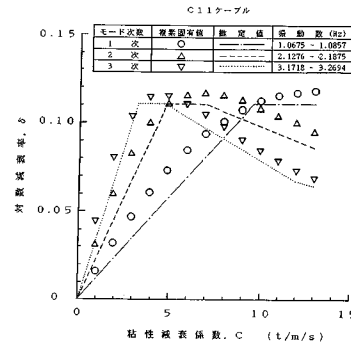


図-8 複素固有値解析結果と実用算定式による推定値の比較 (C11ケーブル)

なれば幸いである。

なお、わが国においても、ダンパー方式がケーブル制振対策として一般化し、複素固有値解析結果と実測値との比較対比データが蓄積されれば、実橋ケーブルにおける実際の構造減衰付加効果についても詳細な検討が実施できるものと考えられる。この方面における今後の研究を期待したい。

参考文献

- 1) Yoshimura, T., Tanaka, T., Sasaki, N., Nakatani, S. and Higa, S.: Rain-Wind Induced Vibration of the Cables of the Aratsu Bridge, Proc. of 10th National Symposium on Wind Engineering, pp.127~132, December, 1988.
- 2) 前田研一・米田昌弘：マルチケーブル形式斜張橋の構造減衰特性に及ぼすケーブルダンパーの効果，土木学会論文集，第398号/I-11, pp.451~454, 1989年4月。
- 3) たとえば，倉西 茂・高橋龍夫：ダンパーをもつ梁のたわみ振動，土木学会論文報告集，第187号，pp.9~22, 1971年3月。

(1989.3.9・受付)