

# 斜張橋並列ケーブルの耐風制振対策（その1）

樋口 俊一 野村 敏雄  
藤原 章博

## Anti-vibration Method for Wind-induced Vibration of the Cable Arrays of Cable-stayed Bridges (Part 1)

Shunichi Higuchi Toshio Nomura  
Akihiro Fujiwara

### Abstract

The use of two or more cable arrays is becoming increasingly popular for long-span, prestressed concrete cable-stayed bridges due to an increase in girder weight and ease of construction. With these cable arrays, the vibration problem of cables, called wake galloping, is often induced by wind. A new anti-vibration device for this problem is proposed in this report. Design background, numerical estimations and a field test of the device are also mentioned, and a simple method to estimate the efficiency of the device is proposed.

### 概 要

長大斜張橋やPC斜張橋では、荷重の増加や施工性への配慮から2本以上のケーブルを並列配置する事例が増えている。このような並列ケーブルにおいては、ウエイクギャロッピングと呼ばれる風に起因するケーブルの振動の発生が問題になっている。本報告では、ウエイクギャロッピング抑制対策として考案した、摩擦型減衰機能付スペーサーの開発において実施した装置の機構・設計方法に関する検討、減衰性能の解析的検討および実ケーブルを用いた振動実験について述べた。また、本装置の減衰性能の簡易推定法を提案した。

## 1. はじめに

近年、斜張橋は構造計算技術の発達に伴い、ますます長径間化する傾向にある。また、主桁にPC桁を用いたPC斜張橋の建設も多くなる中、荷重の増加や施工性への配慮から、2本以上のケーブルを並列配置する事例が増えている。このような並列ケーブルにおいては、ウエイクギャロッピングの発生が問題になっている。この現象は、風に起因するケーブルの振動で、低風速から広い風速範囲で観測されている現象であるが、その特性および発生原因は明らかになっていない部分が多い。本論文は、ウエイクギャロッピングの抑制対策の一つとして着目されているスペーサー型制振装置のうち、摩擦型減衰機能付スペーサーを開発するに当たり得られた知見についてまとめたものである。

## 2. ウエイクギャロッピングとケーブル制振対策

### 2.1 ウエイクギャロッピングの特性

ウエイクギャロッピングは並列配置されたケーブルにおいて、風上側のケーブルのウエイク（後流）が、風下側のケーブルを振動させる現象をいう。斜張橋ケーブルの振動調査<sup>1)</sup>によると、このような振動現象は並列配置されたケーブルを有するほとんどの斜張橋で発現が確認されている。

ウエイクギャロッピングの特性としては、以下のような現象が観察されている。

- ① ほとんど1次モードで振動する。
- ② 長いケーブルほど振幅が大きくなる。
- ③ ケーブル中心間隔が $4D\sim 5D$  ( $D$ :ケーブル径)を境に、それ以上の間隔では風上側ケーブルの影響が弱まり、発現の可能性が小さくなる。
- ④ 風下側のケーブルが単独もしくは風上・風下側ケーブルが逆位相で振動する。

これらのうち、特に④の現象に注目したスペーサー型制振装置を考案した。

2.2 既往の制振対策

ウエイクギャロッピングの制振方法としては、ケーブルの相互連結方式が現在実績のある唯一の方法であるが、この方法には効果を定量的に把握することができないという問題点がある。近年ケーブルの発振現象の一つであるレインバイブレーションに対して、減衰付加方式の制振方法であるケーブルダンパー（ケーブル端部付近と主桁をつなぐ形で設置するダンパー）の効果が明らかとなり、設置事例が増えている。ウエイクギャロッピングに対してもこの方法による制振対策が試みられた例も見られるが、顕著な効果は得られておらず、励振力の大きなウエイクギャロッピングの抑制には、レインバイブレーションと比較してもかなり大きな減衰付加が必要であると考えられている。

3. 減衰機能付スペーサー

ウエイクギャロッピング発生時の並列ケーブルが逆位相で振動するという観測結果をふまえて、本研究では従来のスペーサーに減衰機能を付与した新しいタイプの制振装置を考案した。これまでもスペーサーがケーブルの制振対策の一つとして提案されたことはあるが、それらは単にケーブルの間隔を保持するためのものであったり、連結による剛性の増加に期待したものであった。一方減衰機能付スペーサーは、ケーブル振動時の両ケーブルの相対変位を利用して減衰機構に変形を与え、ケーブルの振動エネルギーを吸収することにより振動を抑制するものである。

3.1 減衰機構

減衰機構としては、粘性減衰機構や摩擦減衰機構が候補にあげられる。また、近年性能の向上がめざましい高減衰ゴムの利用も考えられる。本研究では、これらの中から取り扱いが容易で過酷な使用条件でも安定した性能が得られると考えられる、摩擦型減衰装置について開発を進めることにした。

3.2 装置の概要と動作原理

図-1に、本研究で提案した摩擦型減衰機能付スペーサーの概要を示す。この装置はケーブル表面に取り付けた摩擦材料とケーブルケース間のすべりを許容し、上下流ケーブルの鉛直相対変位を摩擦材料とケーブルケース間の回転変位に変換して（図-2）摩擦減衰を得るものである。本装置は減衰力の発生機構が明らかであり、減衰力の調整も容易で（図-3）装置の構造がシンプルになるが、履歴減衰であるため減衰定数は振幅に依存するので等価減衰定数で評価する必要がある。

3.3 装置の設計

3.3.1 装置の等価減衰 考え方を簡単にするために、ケーブルを1自由度にモデル化する。摩擦減衰を持つ1自由度系の強制振動方程式は、

$$m\ddot{y} \pm F + ky = P_0 \cos \omega t \quad \dots\dots\dots(1)$$

である。ここで、F：減衰力（摩擦力）、 $\omega_n$ ：角振動数、 $\Delta$ ：装置の振幅、である。このとき等価減衰定数  $C_e$  は、

$$C_e = \frac{4F}{\pi \omega_n \Delta} \quad \dots\dots\dots(2)$$

であらわされる。

3.3.2 減衰力の算定

(1) 装置の力の釣り合い スペーサーの減衰装置の抵抗力  $f$  と減衰力  $F$  には以下のような関係がある（図-4）。

$$F \cdot L = f \cdot r \quad \dots\dots\dots(3)$$

(2) 装置の抵抗力 スペーサーの減衰装置の抵抗力  $f$  は以下のモデルで算定する（図-5）。

$$f = \mu NA \quad \dots\dots\dots(4)$$

3.4 減衰機能の解析的検討<sup>2)</sup>

減衰機能付スペーサーを設置した場合の、並列ケーブル-スペーサー系の振動特性について詳しく理解するために、それぞれのケーブルを1自由度の質点でモデル化して応答性状を検討した。ウエイクギャロッピング発生時の外力については明らかでない点が多いため、ここではこの2自由度系の自由振動について議論する。自由振動時の運動方程式を書けば、

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 = -c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \\ m_2 \ddot{x}_2 + k_2 x_2 = -c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \end{cases} \quad \dots\dots\dots(5)$$

である。この連立微分方程式の解は解析的に求められ、 $m_1 = m_2$ 、 $k_1 = k_2$  とすると、

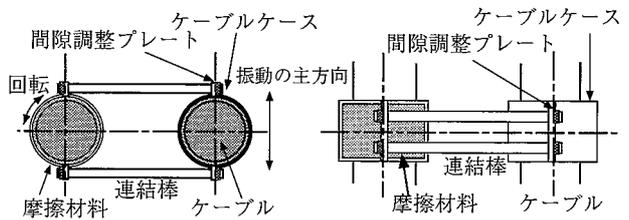


図-1 摩擦型減衰機能付スペーサー

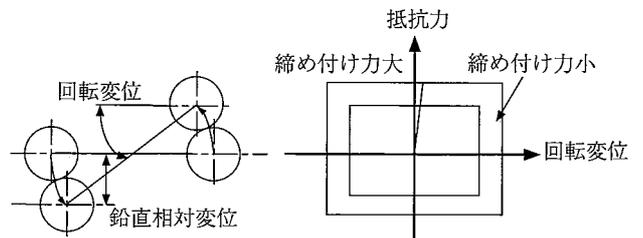


図-2 変位の変換メカニズム

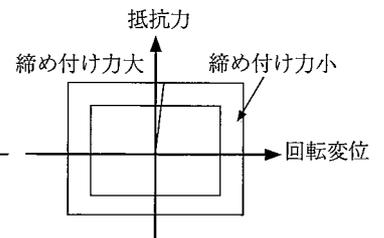


図-3 減衰力特性

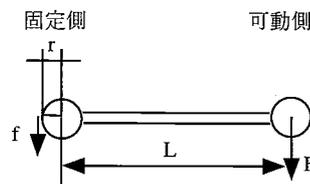


図-4 装置の力の釣り合い

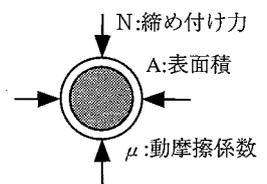


図-5 減衰装置の抵抗力

$$\begin{cases} x_1 = x_p + x_m \\ x_2 = x_p - x_m \end{cases} \dots\dots\dots(6)$$

である。ここで、

$$x_p = A_p \cos \omega t + B_p \sin \omega t \dots\dots\dots(7)$$

$A_p, B_p$  : 定数,  $\omega^2 = k/m$  (定常振動成分)

$$x_m = e^{-2\lambda t} (A_m \cos \omega^* t + B_m \sin \omega^* t) \dots\dots\dots(8)$$

$A_m, B_m$  : 定数,  $\omega^{*2} = \omega^2 - 4\lambda^2, \lambda = c/2m$   
(減衰振動成分)

これは、減衰機構が振動のねじりモード(逆相モード)のみに有効であることを示している。

#### 4. 予備解析

本項では、並列ケーブルに減衰機能付スペーサーを設置した場合、並列ケーブルにどの程度の構造減衰が付加され得るのかを確認するとともに、スペーサーの容量や配置が構造減衰にどのように反映されるのかを複素固有値解析<sup>3)</sup>により検討した。

##### 4.1 解析モデル

図-6は解析に用いた並列ケーブルモデルで、ケーブルが軸力による幾何剛性を考慮した2次元梁要素、減衰機能付スペーサーがダンパー要素で構成されている。ケーブルは長大PC斜張橋において、並列配置が想定されるSEEE-F500PHをモデル化したものである。このモデルを用いて、表-1に示したようなスペーサー配置について解析を行った。

##### 4.2 解析結果

図-7に解析結果の1例を示す。これは、スペーサーの減衰係数と並列ケーブル系に付加された対数減衰率 $\delta$  ( $\delta = 2\pi h$ ;  $h$ は減衰定数)の関係を示したもので、スペーサーにより並列ケーブル系には対数減衰率で40%もの減衰が付加されたことが示されている。ケーブルダンパーによる減衰性能の向上が対数減衰率で数%程度であることと比較しても、数倍の減衰効果が得られている。実際のケーブルにおいては、運動の3次元性やケーブルのねじれの問題などがあり、これらの影響で減衰性能が劣化することが予想されるが、減衰機能付スペーサーはこれらを割り引いても、他の手法と比較して十分な制振効果を持つ方法であると考えられる。

#### 5. 実大振動実験

減衰機能付スペーサーの実用化を念頭に実ケーブルを用いた振動実験を行い、本装置の制振性能の確認すると共に、実用化に際しての問題点等を抽出し検討した。

##### 5.1 実験の概要

実験はポリエチレン被覆PC鋼より線ケーブル(SEEE-F360t)2本を、スパン100mにおいてジャッキで固定し並列ケーブルを構成して行った(表-3)。

実験用スペーサーを写真-1に示した。このモデルでは、摩擦材料として金属(スペーサーA)および摩擦材用布材(スペーサーB)を用いている。表-2に装置の

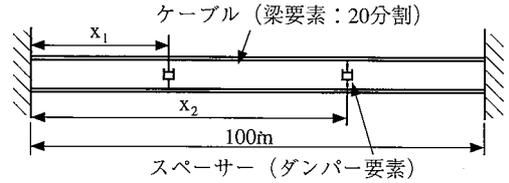


図-6 解析ケーブルモデル

表-1 解析ケース

ケース	スペーサー配置
1	x=10 cm
2	x=30 cm
3	x=50 cm
4	x <sub>1</sub> =10 m, x <sub>2</sub> =90 m
5	x <sub>1</sub> =30 m, x <sub>2</sub> =70 m

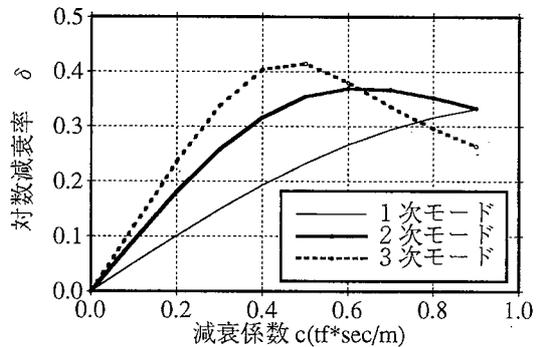


図-7 減衰性能と付加減衰（ケース1）

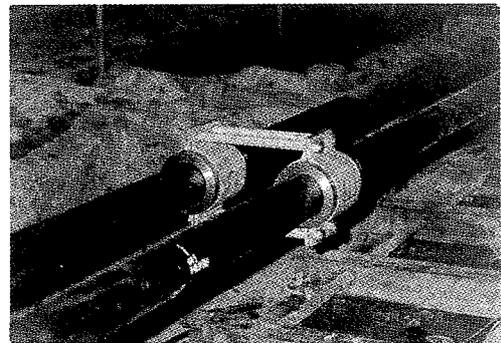


写真-1 実験用スペーサー

表-2 スペーサー諸元

種類	摩擦材料	摩擦材表面積(cm <sup>2</sup> )	動摩擦係数
スペーサーA	金属(表面湿潤状態)	314.2	0.2
スペーサーB	摩擦材用布材	314.2	0.4

表-3 ケーブル諸元

種類	SEEE-F360 t
振動長(l)	98.46 m
予定緊張力(N)	165.00 tf
予定振動数(f)	1.50 Hz
直径(D)	83.5 mm
ケーブル間隔	250.5 mm
重量(W)	18.53 kgf/m

表-4 配置試験ケース

ケース	スペーサー配置
1	x <sub>1</sub> =1/8L
2	x <sub>1</sub> =1/3L
3	x <sub>1</sub> =1/2L
4	x <sub>1</sub> =1/8L, x <sub>2</sub> =7/8L

諸元を示す。本装置は摩擦機構を利用するため、減衰性能が摩擦材料の動摩擦係数、表面積およびケーブルケースの締め付け力によって決定される。

### 5.2 スペーサー配置実験

本実験は減衰部に金属を用いたスペーサー A を用い、装置の配置が減衰に及ぼす効果に注目して行ったものである。実験では図-8のように、スペーサーの取り付け位置を変化させて減衰性能の違いを観測した。表-4に実験ケース一覧を示す。実験では片側ケーブルを手加振しケーブルに1次モードの振動を生じさせ、基準振幅に達した時点で解放する自由振動実験を行った。スペーサーの減衰性能はケーブル系のねじれ振動(両ケーブルの相対振幅による振動波形)の対数減衰率で評価した。また、本スペーサーの作動原理は摩擦減衰機構を利用したものであり、減衰が振幅ごとに変化することから、対数減衰率をケーブルの振幅ごとに整理した。また、ケーブル振幅としては相対振幅の1/2をケーブル径で除した無次元振幅を用いた。

図-9は、実験結果をスペーサーの設置位置と対数減衰率の関係で整理したものである。スペーサーの設置位置がケーブル中央に近くなるほど、減衰率も大きくなっている。また1/8Lの場合と(1/8L+7/8L)の場合の比較から、スペーサーを複数設置した場合には減衰が大きくなることがわかる。

図-10は、実験結果をケーブル振幅と対数減衰率の関係で整理したものである。ケーブル振幅が減少するに伴い対数減衰率が大きくなり、摩擦減衰機構の特徴が現れている。図中の実線は、無次元振幅0.2のとき対数減衰率0.04を得るような減衰力を発生する摩擦減衰型スペーサーを設置したと仮定した場合の、各振幅ごとの等価減衰定数から算定したケーブルの対数減衰率の推移を示したものである。実験結果の傾向はこの実線と良く一致しており、本スペーサーが想定通りの動作をしていることが確認できた。

### 5.3 スペーサー減衰性能調整実験

本実験は、スペーサー減衰部の摩擦力と減衰率の関係を把握する目的で行ったものである。この実験では減衰部に摩擦材用布材を用いたスペーサー B を使用した。減衰装置の摩擦力は摩擦面の締め付け力を変えることで調整した。摩擦面の締め付け力は、図-11に示したような間隔調整プレートでケーブルケースの外径を変化させて調整した。ケーブル加振方法は5.2と同様の手順で、両ケーブルフリーの自由振動実験を行った。

図-12は、実験結果を間隔調整プレートの枚数(締め付け力)と対数減衰率の関係で整理したものである。ここで、間隔調整プレートは枚数が少ないほど締め付け力が大きい(減衰力が大きい)ことになる。大振幅時(無次元振幅0.3)について比較すると、プレート枚数が多い(締め付け力が小さい)ほど対数減衰率が小さくなる傾向があるが、枚数が1~4枚の場合はあまり違いが見られない。一方小振幅時(無次元振幅0.1)においては、プレ

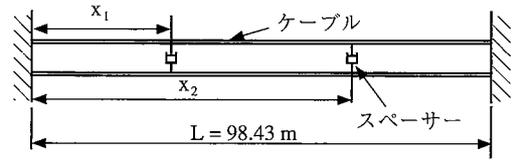


図-8 スペーサー配置

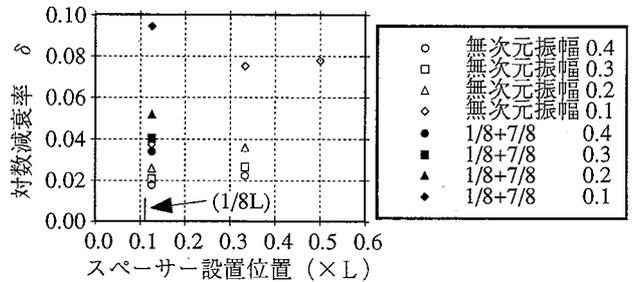


図-9 スペーサーの設置位置と対数減衰率の関係

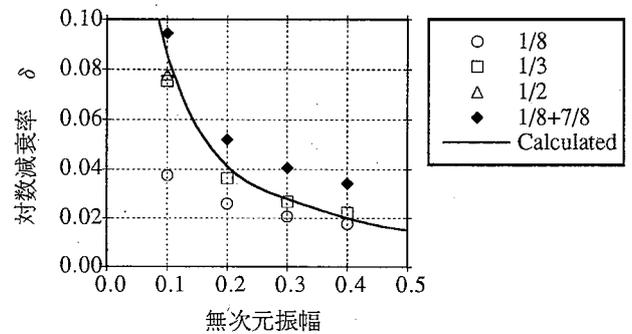


図-10 ケーブル振幅と対数減衰率の関係

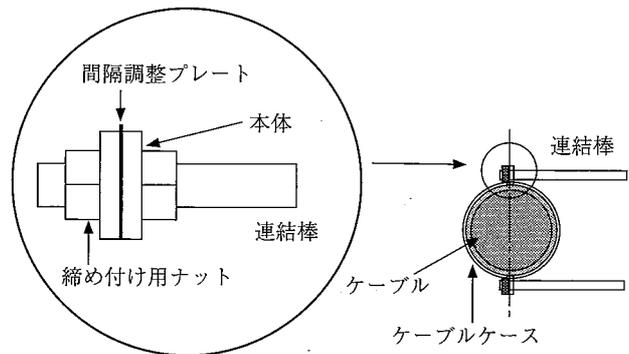


図-11 締め付け力調整用間隔調整プレート

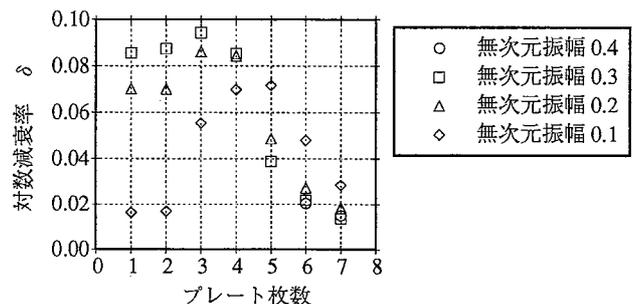


図-12 間隔調整プレートの枚数と対数減衰率の関係

ート枚数が1~2枚の場合に振幅が小さくなったにもかかわらず、対数減衰率が小さくなっている。この原因はケーブルケースの締め付け力が過大であったため、減衰装置の静止摩擦力がケーブルの小振幅でのねじれ反力を上回り、ケーブル自体がねじれたために減衰装置の相対振幅が小さくなったからである。

5.4 考察

減衰装置に必要なケーブルケースの締め付け力を、最大の減衰性能の得られたスペーサーBのプレート3枚の場合を例として求める。この場合、静止摩擦力より想定されるケーブルのねじれ角は $\theta_t=0.63^\circ$ で、ケーブルの最大相対変位より想定されるスペーサーの最大回転角 $\theta_c=4.40^\circ$ よりもかなり小さい<sup>4)</sup>。ケーブルの振幅が小さくなった場合には、ケーブルのねじれ角 $\theta_t$ の影響により減衰性能の劣化が起こることが予想されるが、実験では振幅がそれほど減少していない段階から減衰性能の低下が見られている(図-12)。その原因としては、スペーサーの減衰機構が摩擦型であるため摩擦面の接触の具合が減衰性能や作動状態にかなりの影響を及ぼしているものと思われる。これは本装置の実用化にあたり解決すべき課題であるとともに、減衰性能を改善するうえでの鍵になると考えられる。

6. 減衰機能付スペーサーの減衰性能の簡易推定法

減衰機能付スペーサーを取り付けたケーブルの減衰性能は、複素固有値解析を行えばある程度評価できる。しかしながら装置の実用化においては、装置の設計に際し減衰性能が簡単に評価できるような方法が必要になると考えられる。そこで、本章では減衰機能付スペーサーを取り付けたケーブルの減衰性能の簡易推定式を提案する。

6.1 簡易計算モデル

問題を単純にするために、減衰機能付スペーサーを付けたケーブル系の1次モード振動のみを対象にモデル化を行う。図-13(a)に、並列ケーブル系を2質点(m)でモデル化した簡易モデル1を示した。モデルにおいて、ケーブルの剛性(張力による幾何剛性)はバネ $k_3$ で、スペーサーの減衰はダッシュポット $c$ であらわされている。スペーサーに剛性がある場合にはスペーサーの剛性バネ $k_1$ を導入する。また、本モデルではスペーサーとケーブルをバネ $k_2$ を介して接続し、ケーブルのねじれ剛性を考慮した。ウエイクギャロッピング発現時のケーブルの振動として、2本のケーブルの逆位相振動のみを考慮すると、このモデルは図-13(b)のような1質点の簡易モデル2に置き換えることができる。

6.2 モデル定数の設定方法

簡易モデル2の質量 $m$ とバネ剛性 $k_3$ は、ケーブル系の振動エネルギーと簡易モデルの振動エネルギーが等価になるように決定する。ケーブルが1次モードの正弦曲線で定常振動すると仮定すると、1自由度モデルの等価質量 $m$ は、

$$m = \frac{1}{2} \rho l \quad \dots\dots\dots(9)$$

となる。また、簡易モデルのバネ定数 $k_3$ は、系の固有振動数がケーブルの固有振動数と一致するように決める。ケーブルの曲げ剛性を無視すると、バネ定数 $k_3$ は、

$$k_3 = \frac{\pi^2 T}{2 l} \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここに、 $T$ :ケーブル張力、となる。

ケーブルのねじれ剛性を考慮するためのバネ $k_2$ は次式で計算する。

$$k_2 = \frac{4k_\phi}{S_h^2} \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここに、 $S_h$ :ケーブル間隔(=3D)、 $k_\phi$ :スペーサー取り付け位置のケーブルのねじり剛性による回転バネ定数、である。

回転バネ $k_\phi$ は、スペーサーの設置位置により変わり、次式であらわされる。

$$k_\phi = \frac{GJ \cdot l}{l_1 \cdot (l - l_1)} \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここに、 $l_1$ :ケーブル端からスペーサーの設置位置までの距離、 $GJ$ :ケーブルのねじり剛性、である。

6.3 減衰性能算定方法

図-13(b)の固有値を算定するに際して、スペーサーのバネ $k_1$ とダッシュポット $c$ の定数を複素剛性 $k_1^*$ で表現する(図-14)。ここで、

$$k_1^* = 2k_1 + i(2\omega c) \quad \dots\dots\dots(13)$$

$\omega$ は系の固有円振動数であるが、ここではケーブルの非減衰固有円振動数 $\omega_0$ と等しい、すなわち

$$\omega = \omega_0 = \sqrt{\frac{k_3}{m}} \quad \dots\dots\dots(14)$$

と仮定する。これにより、この系の固有値が容易に求めることができる。全体の複素剛性 $k^*$ は、

$$k^* = \frac{k_1^* k_2}{k_1^* + k_2} + k_3 = a + ib \quad \dots\dots\dots(15)$$

である。ここに、

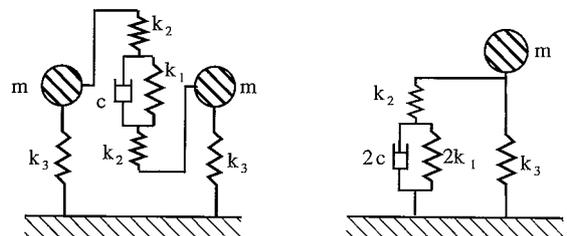


図-13(a) 簡易モデル1 図-13(b) 簡易モデル2

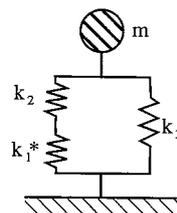


図-14 複素剛性モデル

$$a = \frac{2k_1k_2(2k_1+k_2) + 4(\omega c)^2k_2}{(2k_1+k_2)^2 + 4(\omega c)^2} + k_3 \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$b = \frac{2\omega ck_2^2}{(2k_1+k_2)^2 + 4(\omega c)^2} \quad \dots\dots\dots(17)$$

これより複素固有値  $p$  は、

$$p = \sqrt{-\frac{k^*}{m}} = i \left( \sqrt{\frac{a}{m} + \frac{b}{m}} \right) \quad \dots\dots\dots(18)$$

固有振動数  $f$  および減衰定数  $h$  は次式で求める。

$$f = \frac{\text{Im}(p)}{2\pi} = \frac{r}{2\pi} \cos \frac{\theta}{2} \quad \dots\dots\dots(19)$$

$$h = -\frac{\text{Re}(p)}{\text{Im}(p)} = \tan \frac{\theta}{2} \quad \dots\dots\dots(20)$$

ここに、

$$r = \frac{(a^2 + b^2)^{1/4}}{m^{1/2}} \quad \dots\dots\dots(21)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{b}{a} \quad \dots\dots\dots(22)$$

また、対数減衰率  $\delta$  は次式となる。

$$\delta = \frac{2\pi h}{\sqrt{1-h^2}} \quad \dots\dots\dots(23)$$

### 6.4 簡易推定式の精度

以上の簡易推定式によって得られるケーブルの減衰性能と、並列ケーブル・スパーサー系を3次元でモデル化して、複素固有値解析を行った結果得られたケーブルの減衰性能を比較する<sup>5)</sup>。計算モデルはケーブル中央部にスパーサーを取り付けた場合で、スパーサーの減衰部には復元力のある材料を使用している(バネ  $k_1$ がある)。図-15に、3次元複素固有値解析と簡易推定式により算定したケーブルの減衰性能曲線を示した。簡易推定式によるケーブル系の対数減衰率は、すべての減衰係数において複素固有値解析結果を上回るが、対数減衰率の変化の傾向を良く追従している。

## 7. まとめ

摩擦型減衰機能付スパーサーの開発に際して行った一連の実験および解析の結果、得られた知見をまとめて記す。

① 摩擦型減衰機能付スパーサーは、並列ケーブルの逆位相振動に対してのみ減衰付加の効果があるが、その効果は他の減衰付加手法と比較して大きい。

② 並列ケーブル系の1次モードの対数減衰率は、スパーサーの設置位置がケーブル中央に近いほど大きくなる。また、スパーサーを複数個配置すると、高次モードに対する減衰性能を改善することができる。

③ スパーサーの減衰性能は、ケーブルケースの締め

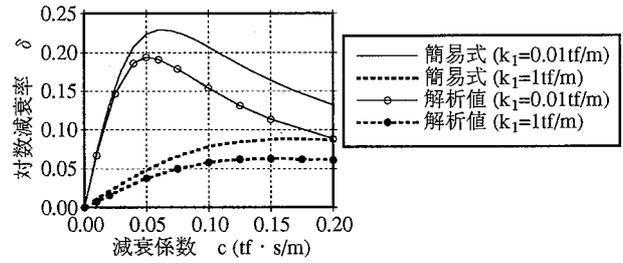


図-15 3次元複素固有値解析と簡易推定式によるケーブル減衰性能算定結果の比較<sup>5)</sup>

付け力を調整することで変更することができる。しかしながら、ケーブルケースに過大な締め付け力を与えると、減衰部の静止摩擦力とケーブルのねじれ剛性の相対的な大小関係からケーブルのねじれ角が大きくなり、減衰性能が低下する場合がある。

④ 実大実験の範囲では、スパーサーの設置によりケーブル系の1次モードの対数減衰率が最大  $\delta=0.10$ 程度に向上した。スパーサーの加工精度および設置精度を向上させれば、減衰性能のさらなる向上を見込めるものと考えられる。

⑤ 減衰機能付スパーサーのケーブルの1次モードに対する減衰性能は、ケーブルのねじり剛性を考慮した1自由度バネ・マスモデルである程度推定できる。

## 謝辞

本研究の内容は建設省土木研究所と民間15社および(財)土木研究センターとの共同研究「斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究」の一部として実施したものです。スパーサー型制振装置の開発を共に担当したC1グループ各位には、貴重なご意見や資料をいただきました。ここに記し、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) (財)国土技術開発センター：昭和63年度並列ケーブルの耐風性に関する検討報告書，(1989)
- 2) 樋口俊一，野村敏雄，藤原章博：ウエイクギャロッピングに対する構造的制振対策，第49回土木学会年次学術講演会概要集，(1994)
- 3) 西岡 隆：構造振動解析，培風館，(1987)
- 4) 樋口俊一，野村敏雄，藤原章博：斜張橋並列ケーブルの耐風制振対策，(株)大林組技術研究所研究報告書，(1995)
- 5) 建設省土木研究所：並列ケーブル耐風制振に関する共同研究報告書(その3)，(1995発行予定)