

並列ケーブルの耐風制振装置 (ケーブル結合部に高減衰ゴムを用いたスペーサ)

Damping Device for Tandem Stay Cables.
(Spacer with High Damping Rubber)

小川一志*, 野上千秋**, 久保明英***, 河村哲男****

Kazushi OGAWA, Chiaki NOGAMI, Akihide KUBO and Tetsuo KAWAMURA

*工博 川崎重工業株式会社 鉄構事業部 橋梁技術総括部 技術部 部長 (〒673兵庫県明石市川崎町1-1)

** 川崎重工業株式会社 鉄構事業部 橋梁技術総括部 技術部 (同上)

*** 株式会社ピー・エス 土木技術部 主任研究員 (〒170東京都豊島区南大塚3-20-6大塚Tビル6F)

**** 株式会社ピー・エス 大阪支店 土木技術部長 (〒542大阪府大阪市中央区南船場2-9-8)

In this paper, we investigate the new damping device for the out-phase vibration of tandem stay cables. This device uses the spacer with high damping rubber which is fitted between the cable and the spacer. We have examined the damping effects of the device with numerical analysis and vibration test. The numerical analysis shows the basic characteristics of damping effects by the device. The shear deformation of rubber that causes damping effects of the device is influenced by the torsional rigidity of cable, the shear rigidity and damping capacity of rubber. The vibration test shows that valuable damping to the tandem stay cables, such as logarithmic decrement $\delta=0.05$, can be obtained by using the device.

Key Words: cable-stayed bridge, tandem cables, damper, high damping rubber

1. はじめに

近年、長大なスパンを持つ橋梁が数多く建設されており、これらの耐風安定性確保がますます重要な問題となってきた。特に斜張橋については、主桁、主塔以外にケーブルの空力弾性振動の問題を考慮する必要がある。長大斜張橋のケーブルは大きな張力に耐えることが要求されるため、建設コストおよび点検整備等のメインテナンスの面から考えると、これを1本ケーブルとするよりも複数本ケーブルとするほうが合理的である。しかしながら空力特性の面から考えると、複数本ケーブル(特に並列2本ケーブル)では、上流側に配置されたケーブルの後流の影響を受け、下流側のケーブルがたわみ振動する現象であるウェイクギャロッピングの発生が懸念されることは周知のところである。ウェイクギャロッピングは比較的低風速で発生し、また大振幅となる可能性が大きいことが知られている。このことはケーブルの振動により、主塔および主桁とケーブルとの定着部におけるケーブルの疲労破壊、通行者に与える心理的悪影響等の問題が生じる可能性が高いことを示すものである。

並列ケーブルのウェイクギャロッピング制振対策としては、ケーブルの外部形状および配置を工夫してこれを

制しようとする空力的手法と、構造減衰を付加する装置によって制振を試みる構造力学的手法とが考えられる。本研究では、後者の方法の一つとして、並列するケーブルを連結するスペーサ(図-1)を活用して新しい構造力学的制振装置を開発することを目的としている。

まず研究の第1段階として、並列ケーブルをスペーサによって連結した場合の効果について検討した。スペーサの個数、配置および結合条件等を変化させたケースについて振動解析を行い、それぞれの振動特性の調査を行った。その結果スペーサとケーブルとの結合においてケーブル軸まわりの回転を拘束することにより、並列ケーブルねじれ振動(面外逆位相モード:ここでは2本のケーブルで形成される平面を考える)の振動数が高められることが分かった。この現象はケーブルとスペーサ結合部において発生するケーブル軸回りのせん断力に起因するものであるとの見解を得た。そこで、ケーブルとスペーサ取付部の間に高減衰ゴムを挟む工夫をすれば、ケーブルねじれ振動(面外逆位相モード)によってケーブルとスペーサ間の高減衰ゴムがせん断変形し減衰力が発生すると考えられ、これにより構造減衰が増加、さらには、ねじれ空力振動の安定化が図れるのではないかと

の考えに至った。この減衰付加効果を検討するため研究の第2段階として、ケーブルとスペーサの結合部に減衰機能を付与したモデルについて複素固有値解析を行った。その結果ねじれ振動（面外逆位相モード）に対する減衰付加効果が認められることが分かった。

次に、実寸規模の模型を用いた振動実験を行い、ケーブルとスペーサの結合部に減衰機能を付与した場合（回転減衰機能付きスペーサ）の構造減衰付加効果の実証を行った²⁾³⁾。その結果、ケーブルねじれ振動に対して減衰付加効果が認められた。さらに実験条件に則した振動解析を行い、実験結果と解析結果の比較を行ったところ、小振幅域で誤差が生じているが、振幅が大きくなるに従い解析値が実験値に漸近することが確認された。

2. スペーサによる制振対策

スペーサとケーブルとの結合条件およびスペーサの配置形式に着目してスペーサによるケーブル結合効果を調査した。

(1) 解析条件

振動解析モデルを図-2に示す。また、振動解析条件を表-1示す。本モデルは瀬戸大橋クラスの斜張橋を想定しており、ケーブル径を $D=0.16\text{m}$ とするとケーブル間隔は $3D$ に相当する。特に今回の解析においては、通常のケーブル振動解析では無視されているケーブルの曲げ剛性とねじれ剛性を考慮したモデルを使用するものとした。曲げ剛性については充実断面の15~20%程度との報告例⁴⁾があるためこれを充実断面の15%とし、ねじれ剛性についてもこれに倣い充実断面の15%を用いて計算した。後に述べる実物大模型振動実験時に実施した静的荷重載荷によるねじれ剛性測定試験によると、試験に用いたケーブルの場合外径の等しい充実円断面の20%弱のねじれ剛性を持つことが確認されており、このことより解析に用いたねじれ剛性は現実的な値であると考えられる。解析モデルの格点配置は1ケーブル当り49格点を等分配置しており、それぞれの格点に集中質量を定義している。スペーサ格点はスペーサと両ケーブルの結合点2格点の間に1格点設け3格点2要素としてモデル化しており、質量は3格点に等分配している。

(2) 振動解析結果

a. スペーサとケーブルの結合条件の影響

スペーサと並列ケーブル間の結合条件が、並列ケーブルの振動特性に及ぼす影響を調査した⁵⁾⁶⁾。スペーサは等間隔に3個配置した。スペーサと並列ケーブルとの結合点におけるスペーサの結合条件としてⅠ.6自由度固定、Ⅱ.ケーブル軸回りの回転のみ開放（5自由度固定）の各ケースについて振動解析を行った結果を表-2に示す。表中、ケーブル軸回りの回転を開放したケースでは、ねじれ振動（面外逆位相モード）の振動モードおよび振動数が、曲げ振動（面外同位相モード）の値と同一になっている。曲げ振動モードはスペーサ設置の影響を受けない

モードであることから、ケーブル軸回りの回転を開放するとスペーサによるケーブル振動の拘束効果は（微小振動の範囲では）無くなることになる。6自由度固定のケースでは、ねじれ振動モードの振動数（1次、2次）が、ケーブル軸回りを開放したケースにおける振動数の約2倍となっていて、スペーサによるケーブル結合効果が認められる。

b. スペーサの配置個数の影響

スペーサの配置個数に着目し、スペーサが並列ケーブルの振動特性に及ぼす影響を調査した。検討対象のスペーサ個数は1, 3, 5の3ケースとした。固有振動数の解

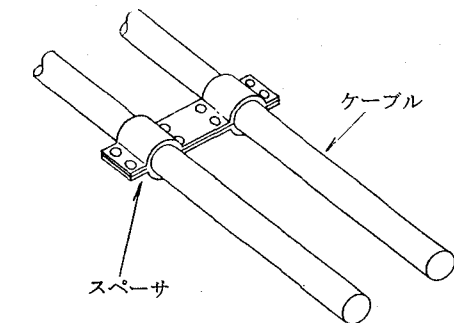


図-1 スペーサ

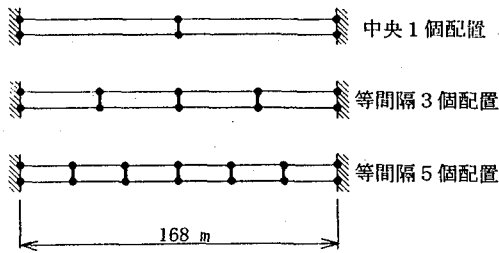


図-2 振動解析モデル

表-1.a 解析条件（ケーブル）

項目	諸元
ケーブル長	168 m
ケーブル間隔	0.48 m
ケーブル重量	69 Kgf/m
ケーブル張力	268 tf/ケーブル
ケーブル断面積	2.01E-02 m ²
断面2次モーメント	4.83E-06 m ⁴
ねじり定数	9.65E-06 m ⁴
ヤング率	2.10E+07 tf/m ²
ポアソン比	0.30

表-1.b 解析条件（スペーサ）

項目	諸元
スペーサ断面積	9.6E-04 m ²
断面2次モーメント	
強軸回り	2.05E-06 m ⁴
弱軸回り	2.88E-09 m ⁴
ねじり定数	1.13E-08 m ⁴
ヤング率	2.10E+07 tf/m ²
ポアソン比	0.30
スペーサ重量	4.0 kgf/1ヶ所

表-2 スペーサ拘束条件の違いによるねじれ振動（面外逆位相）モードの比較（等間隔3スぺーサ配置）

拘束条件	6自由度固定		ケーブル軸回りの回転のみ開放	
着目モード	面外同位相モード （曲げモード）	面外逆位相モード （ねじれモード）	面外同位相モード （曲げモード）	面外逆位相モード （ねじれモード）
モード図				
振動数	f=0.605 Hz	f=1.278 Hz	f=0.605 Hz	f=0.605 Hz
モード図				
振動数	f=1.210 Hz	f=2.032 Hz	f=1.210 Hz	f=1.210 Hz

析結果を表-3に示す。全般的な傾向として、スペーサ個数が増えると、ねじれ振動（面外逆位相モード）の振動数は高くなる。その傾向は低次振動のとき程顕著に認められる。スペーサの設置位置が、スペーサ無しケーブルにおける振動モードの節にあたる時は当然のことながらスペーサの結合効果は無くなる。

以上の解析ではスペーサ配置は等間隔であったが、不等間隔にした場合の影響を表-4に示す。スペーサ間隔は6：4：5：6：4：5とした。この場合、高次振動において不等間隔によるケーブル振動モード形状への影響がより顕著に現れている。

(3)解析結果の評価

a. スペーサとケーブルの結合条件

スペーサと並列ケーブルとの結合条件で、ケーブル軸回りの回転を開放するとスペーサによるケーブル振動の拘束効果はなくなり、拘束するとねじれ振動（面外逆位相モード）の振動数が約1.5～2倍と高くなる。ねじれ振動数が高くなることは、それだけ（振動数の2乗に比例して）ねじれ剛性が高くなっていることになるが、このことは、ケーブル軸回りの固定部に大きなせん断力が作用することを意味する。したがって、図-3に示すように、ケーブルとスペーサ取付部の間に高減衰ゴムを挟む構造を工夫すれば、ねじれ振動に対する構造減衰の増加、さらには、ねじれ空力振動の安定化を図ることが可能であると考えられる。

b. スペーサの配置数

スペーサを等間隔配置する場合、スペーサの個数を制振対象とするケーブル振動の最高次数以上にすれば、スペーサ配置によってねじれ振動（面外逆位相モード）の

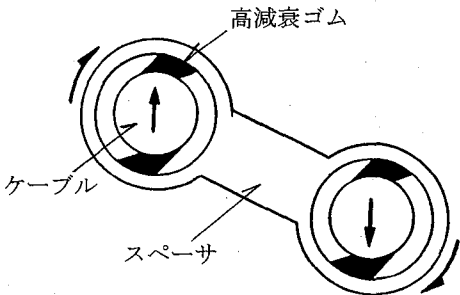


図-3 回転減衰機能付きスペーサ

表-3 スペーサ配置個数とねじれ振動数の関係

ねじれ モード次数	スぺーサ無し	ケーブル中央 1スぺーサ配置	等間隔 3スぺーサ配置	等間隔 5スぺーサ配置
1次	0.605	1.011	1.278	1.350
2次	1.210	1.210	2.032	2.398
3次	1.816	2.088	2.356	3.063
4次	2.422	2.422	2.423	3.430
5次	3.028	3.223	4.100	3.616
6次	3.636	-	4.191	3.642

(単位：Hz)

* スペーサ拘束条件は何れも6自由度固定

表-4 スペーサ配置間隔とねじれ振動モードの関係

	等間隔5スぺーサ配置	不等間隔5スぺーサ配置
モード図		
振動数	f=1.350 Hz	f=1.344 Hz
モード図		
振動数	f=2.398 Hz	f=2.340 Hz
モード図		
振動数	f=3.063 Hz	f=2.963 Hz
モード図		
振動数	f=3.430 Hz	f=3.162 Hz
モード図		
振動数	f=3.616 Hz	f=3.755 Hz
モード図		
振動数	f=3.642 Hz	f=3.847 Hz

振動数を高めることができる。しかしながら、むやみにスペーサ数を増やしても、スペーサ設置によるねじれ振動数への効果はあまり変わらない。

3. 回転減衰機能付きスペーサ（解析的検討）

スペーサとケーブルの結合部に減衰装置（高減衰ゴム）を付設した場合の付加減衰効果（対数減衰率）を調査した。

(1)解析条件

a. 減衰の考え方

ケーブルとスペーサ取付部の間に高減衰ゴムを挟んだ構造を考えた場合、ねじれ振動（面外逆位相モード）時にケーブルとスペーサの固定部に生じるケーブル軸回りのセン断力がゴムに作用することになる。ケーブルのねじれ振動に伴いゴムがセン断変形した場合に生じる減衰力をケーブルの制振力に利用するのがねらいである。ここでねじれ振動により生じるケーブル軸回りの回転に着目する。ケーブルとスペーサ間に生じるケーブル軸回りのトルクとセン断力の関係を基に、高減衰ゴムのセン断減衰をケーブル軸回りの回転減衰に置き換えて考えることにする。図-4において、角速度を V_θ 、セン断減衰部の接線方向の線速度を V_s 、回転中心からセン断減衰部までの距離を l とする。 V_θ が微小である場合

$$V_s = l \cdot V_\theta$$

セン断減衰係数を C_s 、角速度 V_θ によるセン断減衰力を F とすると

$$F = C_s \cdot V_s = C_s \cdot l \cdot V_\theta$$

F による回転中心回りの回転モーメントを M とすると

$$M = F \cdot l = C_s \cdot l^2 \cdot V_\theta$$

回転中心回りの回転減衰を考え、この減衰係数を C_θ とすると

$$\begin{aligned} C_\theta &= M / V_\theta \\ &= C_s \cdot l^2 \cdot V_\theta / V_\theta \\ &= C_s \cdot l^2 \quad \dots\dots\dots \text{式1} \end{aligned}$$

同様の考え方でゴムのセン断バネ定数 K_s を回転バネ定数 K_θ に置き換えると

$$K_\theta = K_s \cdot l^2 \quad \dots\dots\dots \text{式2}$$

となる。

ここで実際の高減衰ゴムの特性に付いて触れておく。ゴムのセン断バネ定数はゴムの種類、設置形状（セン断面積およびゴム厚）およびゴムのひずみ量によって変化し、セン断減衰係数はゴムの種類、セン断バネ定数、振動数等によって変化する値である。このため所要の回転バネ定数および回転減衰係数を実現するためには、ゴムの種類およびゴムの形状（ゴム厚、ゴム幅）を検討する必要がある。また対象とするケーブル径によって回転減衰係数および回転バネ定数の値が採り得る範囲も大きく変化する。

b. 解析モデル

解析モデルは基本的に2. におけるスペーサ中央1カ

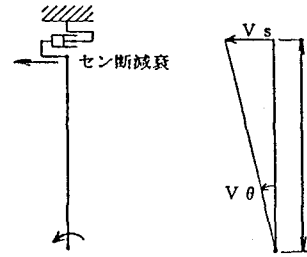


図-4 回転減衰のモデル

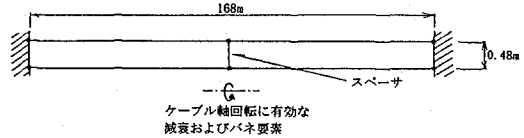


図-5 振動解析モデル（減衰効果検討用）

所配置と同様であるが、新たにケーブルとスペーサの結合部にケーブル軸回りの回転に有効な回転減衰および回転バネ要素を配している。振動解析モデルを図-5に示す。振動解析条件は表-1に準じるものとする。また、2. と同様にケーブルの曲げ剛性とねじれ剛性を考慮したモデルを使用するものとする。

(2)振動解析結果

a. スペーサの回転減衰係数の影響

スペーサ部の回転減衰係数を変化させた場合の、ねじれ振動（面外逆位相モード）に対する構造減衰（対数減衰率）の関係を調査した。解析モデルのスペーサはケーブル中央1ヶ所設置とし、ねじれ振動の最低次振動モードに着目した。スペーサとケーブルとの結合条件としてケーブル軸回りの回転を開放し、これに対応する回転方向に有効な減衰要素を設定した。なお、実際のスペーサは回転減衰と同時に回転バネの特性も持っているが、ここでは回転減衰のみによる影響に着目するため回転バネは考慮しないものとする。結合部1ヶ所あたりの回転減衰係数 C_θ を0.003～3000Kgf・m・s/rad. の間で変化させて振動解析を行った結果を図-6、表-5に示す。図中において $C_\theta=0.003\sim30\text{Kgf}\cdot\text{m}\cdot\text{s/rad.}$ の間では、 C_θ の増加に対して対数減衰率 δ がほぼ正比例で増加することが分かる。これに対し $C_\theta=300, 3000\text{Kgf}\cdot\text{m}\cdot\text{s/rad.}$ のケースについては C_θ の増加に対する δ の増加が頭打ちになり、さらには δ の値が減少することが分かる。 C_θ と δ が比例関係にある領域におけるケーブルねじれ振動の振動数はおよそ0.60～0.61Hzであり、それ以上の C_θ に対しては約1.0Hzとなっている。比例領域におけるケーブルのねじれ振動数がスペーサを設置しない場合の値とほぼ等しいのに対し、これよりも更に高い C_θ の領域における振動数は1)で検討したスペーサ結合条件が6自由度固定のケースとほぼ等しくなっている。このことよりこの領域においてはスペーサの減衰力が過大となって拘束効果が大きくなり、高減衰ゴムに十分なセン断変形が生じなくなったため減衰能力が低下したと判断できる。

b. スペーサの回転バネ定数の影響

前項で考慮しなかったスペーサ部の回転バネの影響をみるために、回転バネ定数を変化させた場合の、ねじれ振動（面外逆位相モード）に対する構造減衰（対数減衰率）の関係を調査した。a. と同様に解析モデルのスペーサはケーブル中央1ヶ所設置とし、ねじれ振動（面外逆位相モード）の最低次振動モードに着目した。結合部1ヶ所あたりのスペーサ回転減衰係数 $C_\theta = 0.3, 3.0, 30, 300$ の4種類に付いて、スペーサ回転バネ定数 K_θ を $0 \sim 3000 \text{Kgf}\cdot\text{m/rad.}$ の間で変化させて振動解析を行った結果を図-7と表-6に示す。図中、 $K_\theta = 30 \text{Kgf}\cdot\text{m/rad.}$ 以下の領域においては、 K_θ の値によらず対数減衰率 δ が一定の値となっているが、 K_θ の値が更に増加すると、 K_θ の増加に対して δ が減少することが分かる。この傾向は4種類の C_θ の値で計算したすべてのケースに見られる。この時ケーブルのねじれ振動数が増加していることより（表-6）、回転バネによる拘束効果が大きくなり、高減衰ゴムに十分なセン断変形が生じなくなったため減衰能力が低下したと判断できる。

例外的に $C_\theta = 300 \text{kgf}\cdot\text{m}\cdot\text{s/rad.}$ のケースに付いては、すでに回転減衰による拘束効果が十分大きく、 K_θ の値が十分小さい条件 ($K_\theta = 0$) の下でも、すでに減衰効率が悪くなっていることが分かる。

c. ケーブルの軸回りねじれ剛性の影響

ケーブルのねじれ剛性（ケーブル軸回り）を変化させた場合の、ねじれ振動（面外逆位相モード）に対する構造減衰（対数減衰率）の関係を調査した。a. と同様に解析モデルのスペーサはケーブル中央1ヶ所設置とし、ねじれ振動（面外逆位相モード）の最低次振動モードに着目した。結合部1ヶ所あたりの回転バネ定数 K_θ を $30.0 \text{Kgf}\cdot\text{m/rad.}$ に固定し、回転減衰係数の値 $C_\theta = 0.3, 3.0, 30, 300$ の4種類に付いて、ケーブルのねじれ剛性を $0 \sim$ 充実断面の100% の間で変化させて振動解析を行った結果を図-8と表-7に示す。いずれのケースもケーブルのねじれ剛性が小さい領域（充実断面の5~10%以下）で対数減衰率が低くなっており、それよりもねじれ剛性が高い領域においては、構造減衰率がほぼ一定となる傾向を示している。ケーブルのねじれ剛性が小さい程ねじれ振動時（面外逆位相モード）にケーブルとスペーサ間に生じるトルクが小さくなり、このため高減衰ゴムに生じるセン断変形量が減少し減衰効果が低下すると考えられる。ある程度ケーブルのねじれ剛性が高くなれば、ねじれ剛性によらず減衰効果（ δ ）がほぼ一定となる傾向に関しては、この領域においてスペーサの拘束力よりもケーブルのねじれトルクが優るため、スペーサの回転による高減衰ゴムのセン断変形が十分に行われる結果、減衰効果が比較的安定して発生するものと考えられる。

4. 回転減衰機能付きスペーサ（実験的検討）

実寸規模の模型を用いた振動実験を行い、回転減衰機

能付きスペーサの構造減衰付加効果の実証を行った。

実験は住建コンクリート工業株式会社 小山工場において行われた。詳細は参考文献³⁾に記されている。

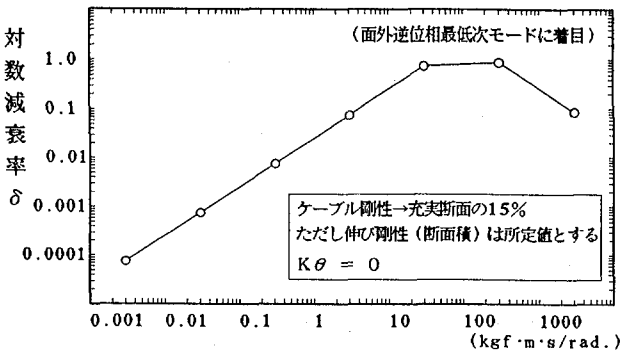


図-6 スペーサの減衰係数と対数減衰率の関係

表-5 スペーサの減衰係数と対数減衰率の関係

K_θ *	C_θ *	固有振動数	対数減衰率
Kgf·m/rad.	Kgf·m·s/rad.	Hz	δ
考慮せず	0.000	0.6050	0.00000
	0.003	0.6050	0.00007
	0.030	0.6050	0.00073
	0.300	0.6050	0.00734
	3.000	0.6050	0.07338
	30.000	0.6096	0.73897
	300.000	0.9857	0.87817
	3000.000	1.0111	0.08491

(*: スペーサ結合部1ヶ所当たり)

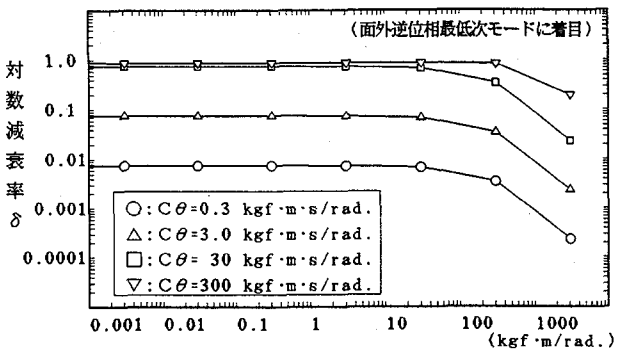


図-7 スペーサのバネ定数と対数減衰率の関係

表-6 スペーサのバネ定数と対数減衰率の関係

K_θ kgf·m/rad.	$C_\theta = 0.3$		$C_\theta = 3.0$		$C_\theta = 30.0$		$C_\theta = 300.0$	
	f (Hz)	δ	f (Hz)	δ	f (Hz)	δ	f (Hz)	δ
0.000	0.605	0.007	0.605	0.073	0.610	0.739	0.986	0.878
0.003	0.605	0.007	0.605	0.073	0.610	0.739	0.986	0.878
0.030	0.605	0.007	0.605	0.073	0.610	0.739	0.986	0.878
0.300	0.605	0.007	0.605	0.073	0.610	0.738	0.986	0.878
3.0	0.607	0.007	0.607	0.073	0.612	0.732	0.986	0.878
30.0	0.623	0.007	0.623	0.067	0.627	0.673	0.983	0.876
300.0	0.732	0.003	0.732	0.035	0.736	0.343	0.964	0.834
3000.0	0.939	0.000	0.939	0.002	0.939	0.002	0.953	0.195

回転減衰係数 C_θ の単位: $\text{kgf}\cdot\text{m}\cdot\text{s/rad.}$

(1) 試験条件

a. 回転減衰機能付きスペーサ諸元

実験に使用した回転減衰機能付きスペーサを写真-1に示す。並列ケーブルにねじれ変位（面外逆位相モード）が生じた場合ケーブルとスペーサ取付部の間に挟んだ高減衰ゴムには必然的にセン断変形が生じる。本スペーサはこの変形に伴い発生する履歴減衰で並列ケーブルの減衰性能を高めようと工夫したものである。並列ケーブルの長さ方向中央位置に本スペーサ 1 体を取り付けて行った実験について報告する。

実験ではスペーサ片側あたり縦5cm、幅2.5cm、厚さ3cmのブリジストン製高減衰ゴムKL301を2個使用した。これは同社の製品中セン断弾性係数が最も小さい製品となっている。高減衰ゴムKL301の減衰特性を表-8に示す。履歴特性は図-9に示すバイリニア型となる⁷⁾。回転減衰機能付きスペーサ実験モデルを図-10に示す。この系における回転バネ定数および回転減衰係数の計算値に付いては、5.において説明するものとする。

b. ケーブル諸元

プレテンション桁製作用反力台に長さ100mの斜張橋ケーブル2本を並列に張り、これにスペーサを取付け、実寸レベルの性能確認試験を行った。ケーブルには1本当たり165tfの張力が導入されている。ケーブル重量は、18.53kgf/m、ケーブル径は83.5mm、ケーブル間隔はケーブル径の3倍で250.5mmとした。ケーブル単体の振動実験で最低次モードの振動数1.54Hzが計測された。ケーブル諸元を表-9に示す。実験状況を写真-2に示す。

c. 加振方法および計測方法

固有周期に合わせたタイミングで、並列配置した2本のケーブルを交互に下方方向に加力して最低次の並列ケーブルねじれ振動（面外逆位相モード）を起振し、その後の自由振動を観察した。加力は1名で行い、その際の加力は約50～70kgと感じられた。

実験ではケーブルの面外方向変位をレーザー変位計を用いて、サンプリング間隔0.01秒で計測した。

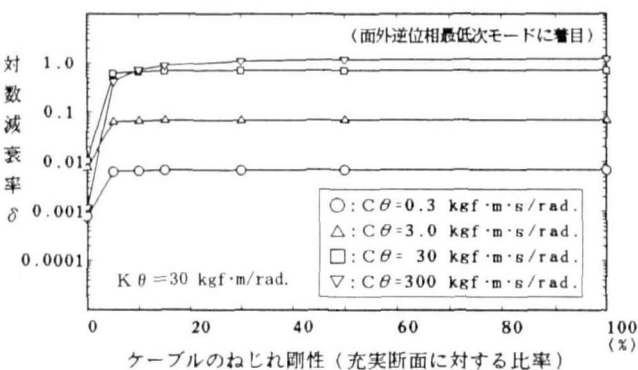


図-8 ケーブルの軸回りねじれ剛性と対数減衰率の関係

表-7 ケーブルの軸回りねじれ剛性と対数減衰率の関係

ねじれ剛性 (比率)	C θ = 0.3		C θ = 3.0		C θ = 30.0		C θ = 300.0	
	f (Hz)	δ	f (Hz)	δ	f (Hz)	δ	f (Hz)	δ
0 %	0.611	0.001	0.611	0.008	0.614	0.011	0.614	0.001
5 %	0.622	0.006	0.622	0.063	0.635	0.609	0.828	0.417
10 %	0.623	0.007	0.623	0.066	0.629	0.658	0.926	0.711
15 %	0.623	0.007	0.623	0.067	0.627	0.673	0.983	0.876
30 %	0.623	0.007	0.623	0.068	0.625	0.686	1.069	1.085
50 %	0.623	0.007	0.623	0.068	0.625	0.691	1.118	1.168
100 %	0.623	0.007	0.623	0.069	0.624	0.695	1.164	1.216

ねじれ剛性は充実断面に対する比率を示す
回転減衰係数 C θ の単位 : kgf·m·s/rad.

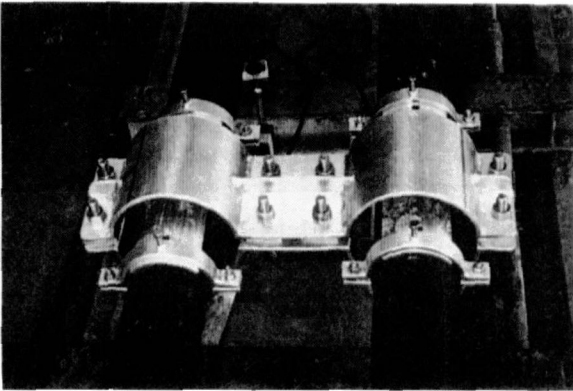


写真-1 回転減衰機能付きスペーサ

表-8 高減衰ゴムKL301の減衰特性⁷⁾

材料 : KL 3 0 1						
項目	適用領域	定 数				
		a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄
G _d	0.1 < γ < 1.5	14.37	-27.95	30.57	-15.53	2.925
	1.5 < γ < 3.0	7.897	-5.427	2.366	-0.4935	0.04300
	γ = 1.5 ;	G _d = 3.632 kgf/cm ²				
項目	適用領域	定 数				
		b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	
h _{eq}	0.1 < γ < 3.0	1.592E-01	2.580E-03	-8.144E-04	-1.110E-03	
	γ = 1.5 ;	h _{eq} = 0.157				
項目	適用領域	定 数				
		b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	
u	0.1 < γ < 3.0	3.071E-01	-9.267E-03	-8.038E-03	2.147E-04	
	γ = 1.5 ;	u = 0.24				

等価セン断弾性係数 : G_d = a₀ + a₁ γ + a₂ γ² + a₃ γ³ + a₄ γ⁴
等価減衰定数 : h_{eq} = b₀ + b₁ γ + b₂ γ² + b₃ γ³
等価荷重特性値 : u = c₀ + c₁ γ + c₂ γ² + c₃ γ³ γ : セン断ひずみ

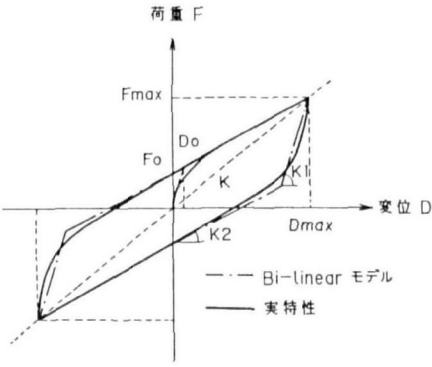


図-9 高減衰ゴムの履歴特性⁷⁾

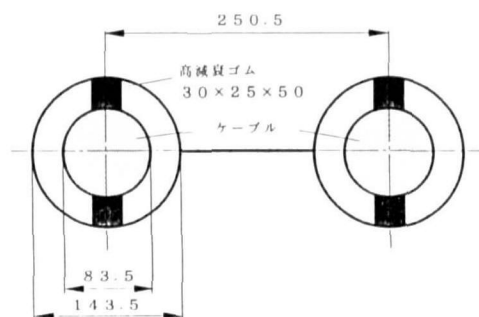


図-10 回転減衰機能付きスペーサ実験モデル

表-9 供試ケーブル諸元

種 類	F360t
ケーブル長	100.00 m
ケーブル張力	165 tf
測定振動数	1.54 Hz
ケーブル径	83.5 mm
ケーブル間隔	250.5 mm
ケーブル重量	18.53kgf/m

(2) 試験結果

スペーサ取付位置で計測した2本のケーブルの面外方向変位波形の1例を図-11に示す。上段の2図は2本のケーブルそれぞれの波形を表し下段の図は2本のケーブル変位の間の面外逆位相成分波形（並列ケーブルのねじり波形）を表している。各ケーブルの波形に大きなうねりが認められるが、これはケーブル中央位置で2本のケーブルを上から交互に押さえつけて人力加振したため、2本のケーブルに同位相の振動と逆位相の振動が連成したことによるものである。しかしながら並列ケーブルのねじり波形は整った減衰形状を示している。本実験におけるスペーサはその機構上ケーブルねじり変位（面外逆位相変位）にのみ有効に作用することから、実験により得られた波形からスペーサの減衰特性を十分に評価し得ると考えられる。ねじり振動波形の振幅と波数の関係を片対数表示したものを図-12に示す。回帰直線の勾配より得られたねじり振動振幅（片振幅）1～8cmにおける平均的な対数減衰率は $\delta=0.06$ であり、また減衰率の振幅依存性は見られないことがわかる。ケーブル単体の振動実験では最低次の固有振動数として1.54Hz、ケーブルの構造減衰として対数減衰率で0.01が測定されており、スペーサを用いた場合の計測値は構造減衰 $\delta=0.01$ を含んだ値となっている。このことより、本実験に用いたスペーサによる付加減衰量は $\delta=0.05$ 程度であるといえる。

5. 試験結果と解析値との比較

構造減衰計測試験に対応した解析モデルによる複素固有値解析を行い、試験結果と解析値との比較検討を行った。

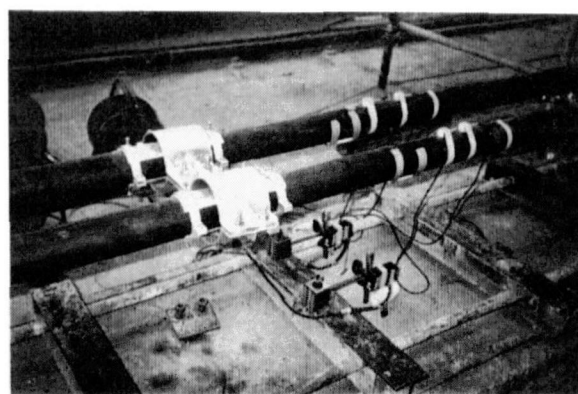


写真-2 実験状況

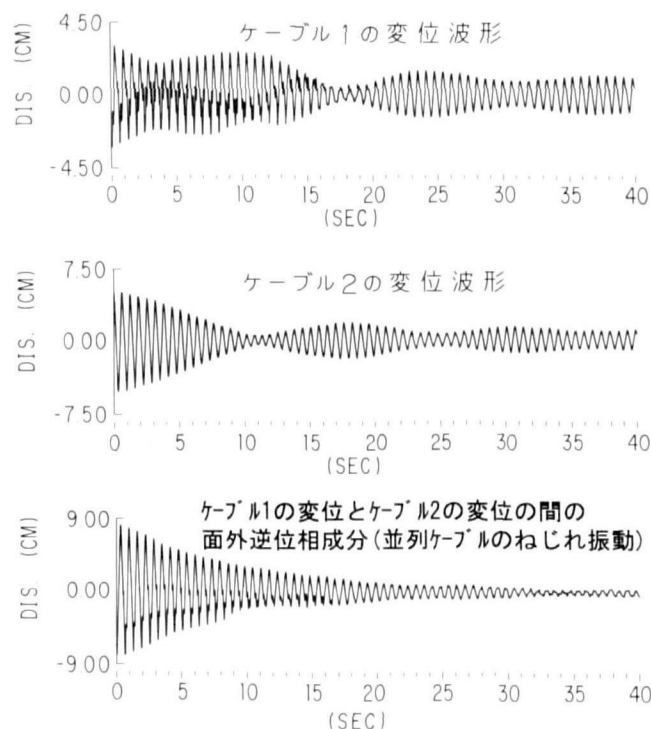


図-11 並列ケーブル減衰波形の1例

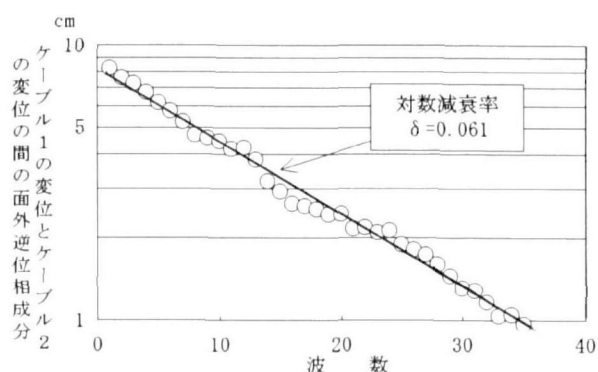


図-12 波数と振幅の関係

(1)解析条件

a. 解析モデル

解析モデルは基本的に3. で用いたものと同様とし、ケーブル長、ケーブル間隔等のパラメータを供試モデルの諸元(表-9)に適合するよう調整した。ケーブルの曲げ剛性は、2. に示した理由により充実断面の15%を考慮するものとした。ねじれ剛性に付いては静的載荷による実測試験を行った結果、供試ケーブルの場合充実断面の20%弱であることが確認されたため解析ではこれに従うものとする。

b. スペーサの特性

セン断変形した高減衰ゴムの履歴特性は図-9に示すようにバイリニア型に近い特性を示す。しかし今回行った複素固有値解析においては、簡単のためバネ定数としては等価剛性 K を、また減衰係数については等価な速度比例型の減衰に置き換えて用いるものとした。

図-9におけるパラメータとして、等価剛性 K 、1次剛性 $K1$ 、2次剛性 $K2$ 等の値は、使用する高減衰ゴムに固有の特性値であり、ゴムの形状およびゴムのセン断ひずみ量に関する値としてゴムメーカーのカatalog⁷⁾から知り得るため、算出に関する説明は省略する。

速度比例型減衰係数の計算方法について述べる。

1周期の間に高減衰ゴムで消費される減衰エネルギー W は図-9に示す履歴曲線で囲まれた部分の面積で表されており、この値は $K1$ 、 $K2$ 等のパラメータから計算可能である。1周期において消費される減衰エネルギーが W と等しくなるような速度比例型の減衰係数 C を仮定し、その数値を以下に示す方法で算出した。

高減衰ゴムのセン断変形 X を次式のように記述する

$$X = X_0 \cos \omega t$$

ここで X_0 : 振動片振幅, ω : 角振動数, t : 時間

減衰力 F は、

$$\begin{aligned} F &= C \cdot \dot{X} \\ &= C \cdot \omega \cdot X_0 \sin \omega t \end{aligned}$$

ここで C : 等価減衰係数(速度比例型), $\dot{X}$: 変形速度
減衰力 F によって1周期に消費されるエネルギーを W' とすると、

$$\begin{aligned} W' &= \int_0^T F \cdot dx \\ &= C \cdot \omega^2 \cdot X_0^2 \int_0^T \sin^2 \omega t \, dt \\ &= C \cdot \omega \cdot X_0^2 \cdot \pi \end{aligned}$$

$W' = W$ と仮定すると

$$C = W / (\omega \cdot X_0^2 \cdot \pi) \quad \dots\dots\dots \text{式4}$$

ここで、高減衰ゴムのセン断変形 X_0 とセン断ひずみ γ の関係は、ゴム厚 Hr を用いて次式で表すことができる

$$\gamma = X_0 / Hr \quad \dots\dots\dots \text{式5}$$

W がセン断ひずみ γ によって決定される値であることより、等価減衰係数 C は式4、式5を用いて、 γ によって決

定することができる。

等価減衰係数 C および等価剛性 K は、いずれも高減衰ゴムのセン断変形に関する値であるため、これらの数値をそれぞれ式1、式2における C_s および K_s に代入して、回転減衰係数 C_θ および回転バネ定数 K_θ に変換して解析に用いるものとする。このときの回転中心からセン断減衰部までの距離 l は、ケーブル中心から高減衰ゴム厚の中央までとしている。($l=56.75\text{mm}$)

(2)解析結果

高減衰ゴムのセン断ひずみ γ を0.1~2.0の間で変化させて振動解析を行った結果(対数減衰率 δ)を図-13と表-10に示す。ここで、前述の試験結果にはケーブル単体の構造減衰として $\delta=0.01$ が含まれており、これに対応するため解析結果にも $\delta=0.01$ を加算して示してある。試験結果を解析結果に重ねて図-13に示し比較する。図中に示した試験値の範囲は試験振幅の1~8cmに相当する。これによると解析結果はセン断ひずみが小さい領域で減衰が増加する傾向が見られ、実験結果と比較して大きな減衰値をとっていることが分かる。実験による相対変位波形片振幅が6~7cmに相当する $\gamma=0.5$ 付近では、実験結果に対して解析値が35%程度大きな値となっている。セン断ひずみが大きい領域においては解析値は実験値に漸近する結果を示している。

3) 解析結果の評価

解析結果と比較して試験結果の減衰率が低くなる原因について考察を加える。

解析に引用した高減衰ゴムの減衰特性は橋梁用支沓を

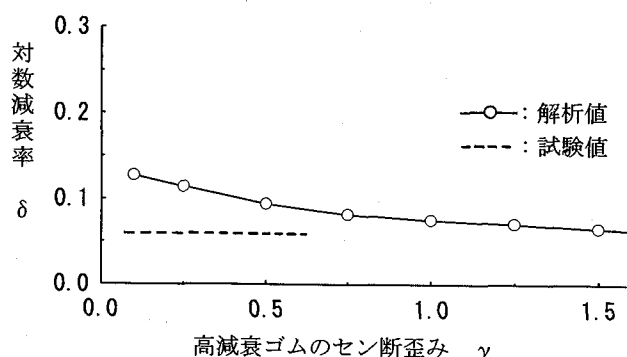


図-13 セン断ひずみと対数減衰率の関係

表-10 セン断ひずみと対数減衰率の関係

γ	K_θ *	C_θ *	対数減衰率 δ
	kgf·m/rad.	kgf·m·s/rad.	
0.10	31.845	1.0495	0.127
0.25	24.320	0.8032	0.114
0.50	16.852	0.5578	0.094
0.75	13.357	0.4423	0.082
1.00	11.768	0.3888	0.076
1.25	10.755	0.3534	0.071
1.50	9.720	0.3164	0.066
1.75	9.136	0.2932	0.063
2.00	8.714	0.2742	0.060

(*: スペーサ結合部1ヵ所当たり)

対象に試験された値であり、試験片の形状係数(=横長／縦長)が3.0～4.0程度である。従って、この減衰特性はセン断変形のみについて求められたものと考えられる。これに対し今回の試験で用いたゴム片の形状係数は0.8と小さく、かなり縦長の形状となっており、試験結果には曲げ変形の影響が含まれていると考えるべきであろう。今回の試験においては、ゴム片の曲げ変形によって本来のセン断変形が緩和され、このため減衰効果が低下したものと考える。

より詳細な解析結果を得るためには、高減衰ゴムの形状効果に付いて更に検討を加えることが必要であると考えられる。

6. まとめ

以上の検討により得られた知見を以下に示す

- (1) スペーサとケーブルの結合条件としてケーブル軸まわりの回転を拘束した場合、ねじれ振動(面外逆位相振動モード)の振動数が増加する拘束効果が認められた。
- (2) スペーサとケーブル取付部の間の回転によりセン断変形を生じる部分に適当な減衰係数の高減衰ゴムを挟む構造によって、ねじれ振動に対して有効な減衰付加効果を与えることが可能である。
- (3) スペーサに設置した高減衰ゴムによる回転減衰および回転バネの強さが過大であると、ケーブルとスペーサ間の回転に対する拘束効果が増大し減衰効果が低下する。この現象はスペーサの回転バネ定数とケーブルのねじれ剛性の大きさの比に関係しており、使用するケーブルのねじれ剛性が相対的に低いほどケーブルとスペーサ間の回転は拘束され、減衰効果が低減される。
- (4) 今回検討した減衰機能付きスペーサの配置はケーブル中央1ヶ所のケースであり、最低時のねじれ振動モードを対象にしている。高次の振動モードへの適用を考えた場合、剛結されたスペーサと同様にスペーサの配置個数を増やすことで対応可能であると考えられる。
- (5) 実寸規模の模型を用いた減衰測定試験により、高減衰ゴムを用いた回転減衰機能付きスペーサの減衰付加効果の有効性が確認された。試験に用いたスペーサの場合、付加減衰量は対数減衰率 $\delta=0.05$ 程度であった。
- (6) スペーサの減衰効果について、試験結果と解析結果

を比較したところ、振幅の低い領域で解析による対数減衰率が実験値より大きくなる誤差が生じるが、振幅が増加するに従い解析値が試験値に漸近する結果が得られた。

謝 辞

本研究は平成4年度～6年度における建設省土木研究所、(財)土木研究センターおよび民間企業15社(石川島播磨重工業株式会社、株式会社エスイー、株式会社大林組、鹿島建設株式会社、川崎重工業株式会社、清水建設株式会社、住友建設株式会社、住友重機械工業株式会社、株式会社長大、飛島建設株式会社、日本鋼管株式会社、株式会社ピー・エス、日立造船株式会社、三井造船株式会社、三菱重工業株式会社；五十音順)による共同研究「斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する研究」の一環として実施した。御意見ならびに貴重なデータを頂戴した共同研究の各位に感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究報告書(その1);建設省土木研究所共同研究報告書, 1993. 3
- 2) 久保・河村・赤嶺・河村; 斜張橋並列ケーブル耐風制振用ねじれ減衰スペーサ, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, I-B 720, 1995. 9
- 3) 斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究報告書(その3);建設省土木研究所共同研究報告書, 1996. 4
- 4) 坂本・北条・江口・矢野; 斜張橋用プレ防食型ケーブルの二次応力および曲げ疲労強度に関する検討, 土木学会論文集, No. 446/I-19, 1992. 4
- 5) 小川・野上・斎藤; 並列ケーブルの振動特性に及ぼすスペーサの効果, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集, I-607, 1994. 9
- 6) 斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究報告書(その2);建設省土木研究所共同研究報告書, 1994. 9
- 7) 株式会社ブリジストン; 高減衰ゴム製品等に関する各種カタログ
- 8) 長島・水津・須藤; 道路橋免振用高減衰ゴム支沓の動的特性, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, I-672, 1991

(1995年9月18日受付)