

粘弾性体を利用した並列ケーブル用減衰機能付きスペーサと その実橋ケーブルへの適用に関する研究

米田昌弘¹・瀬戸内秀規²・吉岡昭彦³・下田郁夫⁴・川原壮一郎⁵

¹正会員 工博 川田工業(株)技術開発本部技術研究室 室長 (〒114 東京都北区滝野川1-3-11)

²正会員 工修 川田工業(株)技術開発本部技術研究室 (〒550 大阪市西区北堀江1-22-19)

³正会員 川田工業(株)技術開発本部技術研究室 (〒114 東京都北区滝野川1-3-11)

⁴正会員 工博 オイレス工業(株)技術二部 部長 (〒252 藤沢市桐原町8番地)

⁵オイレス工業(株)技術二部 課長 (〒105 東京都港区大門1-3-2)

本文では、長さが $l=200$ m および $l=100$ m なる並列ケーブルモデルを対象として複素固有値解析を実施し、減衰機能付きスペーサ方式（並列ケーブルのほぼ中間に治具を介して粘弾性体を設置するタイプ）によって付加される減衰特性はケーブルのねじれ剛性の大きさに著しく依存すること、ケーブル中心間隔やケーブル径の差異によっても変化することなどを明らかにした。また、アスファルト系の粘弾性体を減衰材とばね材として使用した減衰機能付きスペーサを製作して実橋ケーブルに適用し、本方式の実橋ケーブルにおける減衰付加特性を定量的に把握した。さらに、実橋ケーブル試験結果と複素固有値解析結果との対比から、実橋ケーブルのねじれ剛性を評価するなど、ウェイクギャロッピングの制振に関する実務上きわめて有用な技術資料を提供した。

Key Words : damper, vibration control, cable-stayed bridge, cable

1. まえがき

近年における斜張橋の長径間化や施工実績には目覚ましいものがある。しかしながら、主要構造部材であるケーブルを並列配置した斜張橋では、ウェイクギャロッピングと呼ばれるケーブル振動が発現することが一般に知られている¹⁾²⁾。ウェイクギャロッピング特性はケーブル中心間隔 S とケーブル径 D の比 S/D の大きさによって変化するが、通常、その励振力は風雨時に発生するレインバイブレーションと比較して強いことから、並列ケーブル方式を採用した斜張橋を設計・施工するにあたっては、ウェイクギャロッピングの制振がきわめて重要な検討課題となっている³⁾。

ウェイクギャロッピングの構造的対策としてはステンレスワイヤによるケーブル相互連結方式が知られているが、この方式では景観上の問題に加え、ワイヤの切断に備えた長期にわたる維持管理が必要となる。それゆえ、ウェイクギャロッピングを確実に制振できる空力的な制振方法についての研究は、近年の斜張橋の建設状況と長径間化傾向を考えた場合、きわめて急務な検討課題となっており、また、発注者や実務技術者からの要望も非常に高い。このような観点から、ウェイクギャロッピングの空力的対策として種々の方式が提案されているが^{4)~6)}、著者らもウェイクギャロッピングの空力的対策

としてケーブル表面にディンプルを設ける方法を考案し、部分模型風洞試験を実施してディンプル付きケーブルのウェイクギャロッピング特性について検討している⁷⁾。その結果、ディンプル付きケーブルでは、 $Re=4.0 \times 10^4$ なるレイノルズ数で超臨界域に達することから、たとえば、実験で使用した $D=78$ mm なるケーブルでは 8 m/s 程度以上の風速域においてウェイクギャロッピングの励振力がきわめて小さくなることを報告している。しかしながら、種々の空力的対策の中で最良と考えられるディンプル付きケーブルでも、 $Re < 4.0 \times 10^4$ なるレイノルズ数に相当する風速域 ($D=78$ mm なるケーブルでは 8 m/s 程度以下の風速) ではウェイクギャロッピングが発現し、制振するために若干の減衰を付加する必要があった。ディンプル付きケーブルに減衰を付加する手法として、先の論文⁷⁾ では桁側のケーブル端部付近に最も一般的な粘性せん断型ダンパーやオイルダンパーを設置することを考えていたが、実橋ケーブルへの適用にあたっては、より簡単で安価な減衰付加装置を検討対象とすることも予想される。

ところで、並列ケーブルの減衰付加装置としては、上述の各種ダンパー方式に加え、上・下流側ケーブルを減衰機能付きスペーサで結合する方式も考えられ、すでに横浜ベイブリッジでは渦励振と思われるケーブル振動の制振対策として減衰機能付きスペーサ（オイルダンパー

とばねから構成されたスペーサ)を採用するに至っている⁹⁾。この減衰機能付きスペーサでは、当然のことながら、逆位相モード(上・下流側ケーブルが逆位相で振動するモード)の構造減衰は増加するものの、同位相モード(上・下流側ケーブルが同位相で振動するモード)に対する減衰付加効果は期待できない。しかしながら、実在斜張橋の並列ケーブルで発現したウェイクギャロッピングの観測結果や風洞試験結果⁹⁾によれば、2本の並列ケーブルでは常に逆位相モードのウェイクギャロッピングが出現し、同位相モードのウェイクギャロッピングが発現した事例は報告されていない。また、レインパイプレーションについては上・下流側ケーブルが同位相で振動する可能性はあるものの、ディンプル付きケーブルでは、ディンプルによる空力制振効果によってレインパイプレーションの発現する可能性はきわめて低いと考えられている¹⁰⁾。さらに、渦励振についても同様に同位相モードの振動が発生する可能性はあるものの、その励振力は非常に弱く、上・下流側ケーブルの振動に若干の振幅や位相の差異が存在すれば、すでに横浜ベイブリッジで効果が認められているように減衰機能付きスペーサによって渦励振を制振できることとなる。すなわち、ディンプル付きの並列ケーブルでは、減衰機能付きスペーサを設置すれば、風による各種の振動を十分に制振できるものと考えられる。

一方、円形のノーマルケーブルを斜張橋の並列ケーブル($S=2D\sim 3D$)に適用した場合に発生するウェイクギャロッピングは励振力が非常に強く、それゆえ、ダンパーを設置する手法のみでは十分に制振できない場合が多いと考えられてきた。ところが、スクルートン数を幾分大きくした格子乱流中のばね支持実験から、ウェイクギャロッピング特性は気流中の乱れによって大きく変化し、たとえば、 $S=3D$ で直径が $D=76\text{ mm}$ なる円形のノーマルケーブルに乱れた気流(乱れ強さが $5\sim 7\%$ の格子乱流)が $\beta=7^\circ$ なる斜角で作用した場合、対数減衰率で $\delta=0.04$ 程度の構造減衰を付加すれば、風洞実験域内の 13 m/s 以下の風速域でウェイクギャロッピングが発現しなかったとの報告もなされている¹¹⁾。すなわち、減衰機能付きスペーサは、実橋ケーブルに対する減衰付加特性が明確にされれば、ディンプル付きケーブルのみならず、架橋地点の風環境によっては円形のノーマルケーブルに発現するウェイクギャロッピングに対しても、検討に値する制振装置の一つになり得る可能性があると思われる。しかしながら、減衰機能付きスペーサについては、横浜ベイブリッジにおける採用例⁹⁾や種々の基本的な検討結果^{12)~16)}は報告されているものの、本方式のウェイクギャロッピングに対する制振効果や設計上の留意点について十分に議論されていなかった。

そこで、著者らは、減衰機能付きスペーサ(並列ケー

ブルのほぼ中間にスペーサ治具を介して粘弾性体を設置するタイプ)に着目し、本方式の減衰付加特性を詳細に検討することとした。具体的には、 $S=2D\sim 4D$ なる間隔で並列配置された、長さが $\ell=200\text{ m}$ および $\ell=100\text{ m}$ なるケーブルに減衰機能付きスペーサを設置した場合について複素固有値解析を実施し、本方式の減衰付加特性とケーブルのねじれ剛性の関係ならびにケーブル中心間隔やケーブル径の差異が及ぼす影響などを明らかにすることとした。また、アスファルト系の粘弾性体を減衰材とばね材として使用した減衰機能付きスペーサを製作して実橋ケーブルに適用するとともに、実橋ケーブル試験結果と複素固有値解析結果を対比して実橋ケーブルのねじれ剛性や本方式の減衰付加特性について検討することとした。その結果、斜張橋の設計やケーブルの制振に携わる実務技術者にとって示唆に富んだ有用な知見が得られたことから、ここにその結果を報告する。

2. 複素固有値解析による減衰付加特性の検討

(1) 解析モデルと検討ケース

本研究では、表-1に示すように、ケーブル径が $D=96\text{ mm}$ (鋼線外径に対応する公称径は 76 mm)、ケーブル張力が $T=350\text{ tf}$ 、重量が $w=0.0246\text{ tf/m}$ なる構造諸元を有する $\ell=200\text{ m}$ の細径ケーブル(以下、Cable 200-D 96と記す)が、 $S/D=2.0\sim 4.0$ なる間隔でそれぞれ並列配置された場合を基本検討の対象とする。ここに、Cable 200-D 96は、わが国で建設された最大級の2径間連続PC斜張橋(195 m+195 m)における最上段ケーブルをモデル化したものである。また、一部のケースについては、表-2に示すように、ケーブル径が $D=155\text{ mm}$ (鋼線外径は 135.3 mm)、ケーブル張力が $T=1432.7\text{ tf}$ 、重量が $w=0.1007\text{ tf/m}$ なる構造諸元を有する $\ell=200\text{ m}$ の太径ケーブル(以下、Cable 200-D 155と記す)についても解析を実施することとした。ただし、Cable 200-D 155におけるケーブル張力は、弦として算出した固有振動数がCable 200-D 96の値と等しくなるように設定している。さらに、以上の長さ $\ell=200\text{ m}$ なるケーブルモデルに加え、 $\ell=100\text{ m}$ なる細径ケーブル(以下、Cable 100-D 96と記す)も対象として同様な複素固有値解析を実施し、減衰機能付きスペーサによる減衰付加効果について解析データを得ることとした。ただし、Cable 100-D 96なる場合の構造諸元は、上述したCable 200-D 96と全く同一の値($T=350\text{ tf}$ 、 $w=0.0246\text{ tf/m}$)を仮定することとしている。

減衰機能付きスペーサとしては、並列ケーブルの各表面に高減衰ゴム(あるいは粘弾性体)を設置して円形のスペーサ治具部分との間でせん断変形を生じさせるタイプと並列ケーブルのほぼ中間にスペーサ治具を介して高

表-1 Cable 200-D 96 の構造諸元

ケーブル長 ℓ (m)	ケーブル外径 D (mm)	鋼線外径 Ds (mm)	張力 T (ton·f)	重量 w (ton·f/m)	基本固有振動数 f_1 (Hz)
200.0	96.0	76.0	350.0	0.0246	0.934

表-2 Cable 200-D 155 の構造諸元

ケーブル長 ℓ (m)	ケーブル外径 D (mm)	鋼線外径 Ds (mm)	張力 T (ton·f)	重量 w (ton·f/m)	基本固有振動数 f_1 (Hz)
200.0	155.0	135.3	1432.7	0.1007	0.934

表-3 解析で用いたケーブルのねじれ定数

	ケーブル名	
	Cable200-D96	Cable200-D155
CASE- 5J	$1.638 \times 10^{-7} \text{ m}^4$	$1.645 \times 10^{-8} \text{ m}^4$
CASE-10J	$3.276 \times 10^{-7} \text{ m}^4$	$3.290 \times 10^{-8} \text{ m}^4$
CASE-15J	$4.913 \times 10^{-7} \text{ m}^4$	$4.935 \times 10^{-8} \text{ m}^4$
CASE-45J	$1.474 \times 10^{-6} \text{ m}^4$	$1.480 \times 10^{-6} \text{ m}^4$
CASE-90J	$2.948 \times 10^{-6} \text{ m}^4$	$2.961 \times 10^{-6} \text{ m}^4$

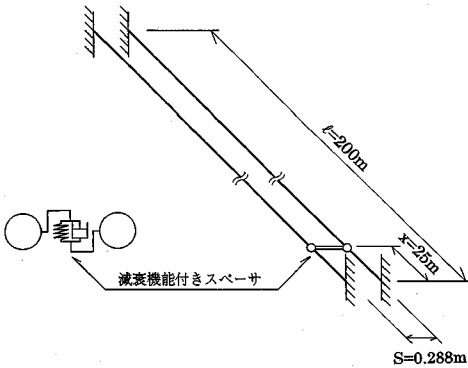


図-1 減衰機能付きスペーサのモデル化
(Cable 200-D 96, $S=3D$, $x=25 \text{ m}$)

減衰ゴム（あるいは粘弾性体）を設置するタイプが考えられるが、本研究では横浜ベイブリッジで採用されたものと同種の後者のタイプを検討対象とする。すなわち、減衰機能付きスペーサは図-1に示すようにばねとダッシュポットから構成されるものとし、たとえば、基本とした $\ell=200 \text{ m}$ なるケーブルでは、桁側のケーブル端部から $x=25 \text{ m}$ あるいは $x=50 \text{ m}$ なる位置にそれぞれ単独にスペーサを設置した場合および $x=25 \text{ m}$ と $x=50 \text{ m}$ なる位置に合計 2 個のスペーサを設置した場合について複素固有値解析を実施することとした。ここに、 $\ell=200 \text{ m}$ なるケーブルで、ダンパーの取り付け位置をケーブル長の $\ell/2$ 点に相当する $x=100 \text{ m}$ よりも低い位置 ($x=25 \text{ m}$, 50 m) に設定したのは、ダンパーの取り付け作業や供用後の維持管理を考え、取り付け位置が極端に高くないよう配慮したことによる。

複素固有値解析にあたっては、分割数に依存した解析誤差を極力小さくすることを考え、 $\ell=200 \text{ m}$ および $\ell=100 \text{ m}$ なるいずれのケーブルモデルにおいても、上・下流側ケーブルをそれぞれ 200 部材に分割するとともに、ケーブル張力やケーブルの曲げ剛性のみならず、ケーブルのねじり剛性をも考慮することとした。解析で用いた、Cable 200-D 96 と Cable 200-D 155 のねじれ定数を表

3に示す。ここに、CASE-5 J, CASE-10 J, CASE-15 J, CASE-45 J および CASE-90 J は、ケーブルの鋼線外径 (Cable 200-D 96 の鋼線外径は 76 mm , Cable 200-D 155 の鋼線外径は 135.3 mm) と等しい鋼棒 (せん断弾性係数は $0.81 \times 10^7 \text{ tf/m}^2$) を仮定し、その鋼棒が有するねじり定数のそれぞれ 5%, 10%, 15%, 45% および 90% なる値をケーブルのねじり定数として採用した場合に対応する。一方、減衰付加特性に及ぼす曲げ剛性の影響は、ケーブル張力の寄与が支配的であることから一般には非常に小さいが、本研究では文献 17) に示された値を参考にすべての解析ケースにおいて鋼線外径と等しい鋼棒が有する曲げ剛性の 15% を仮定することとした。また、本解析にあたってはケーブル両端を固定とするとともに、減衰機能付きスペーサのばね定数 k として $k=1.0 \text{ tf/m}$ なる値を仮定し、粘性減衰係数 C を $C=0.1 \sim 0.5 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$ (一部のケースについては $C=0.1 \sim 1.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$) なる範囲で変化させるものとした。ここに、 $k=1.0 \text{ tf/m}$ なるばね定数は、次章に示す $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ なる粘弾性体を、温度が 10°C 、加振周波数が 1.0 Hz ($\ell=200 \text{ m}$ なるケーブルモデルの 1 次固有振動数とほぼ等しい値)、加振振幅が 5 mm なる条件のもとで得られた実験値にほぼ対応する。

なお、斜張橋で並列ケーブルを採用する場合、ケーブル中心間隔 S とケーブル径 D の比 S/D は 4~5 程度以下の場合が多く、この場合には幾分楕円的な軌道を示す場合はあるものの、一般には鉛直方向の振動成分が卓越したウェイクギャロッピングが発現することが知られている。それゆえ、以下の検討では、逆位相の鉛直振動モードに着目し、並列ケーブルに減衰機能付きスペーサを設置した場合の減衰付加特性について検討した。したがって、特にことわりのない限り、次節以降においては鉛直の逆位相 n 次振動モードを単に n 次振動モードあるいは n 次モードと記すこととしている。

(2) 減衰機能付きスペーサを単独設置した場合

まず、 $S=3D$ に並列配置された $\ell=200 \text{ m}$ なる細径

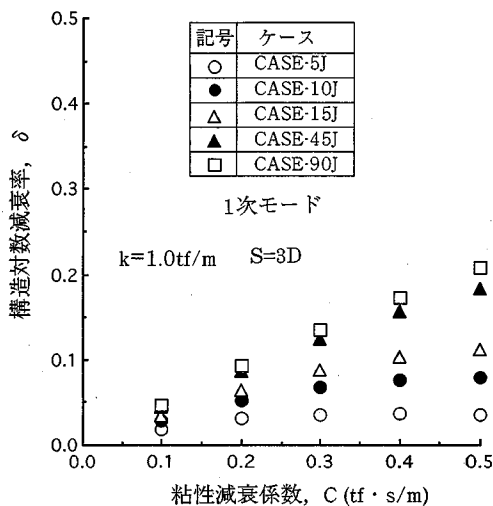


図-2 減衰付加特性に及ぼすねじれ剛性の影響 (Cable 200-D 96, S=3D, x=25 m)

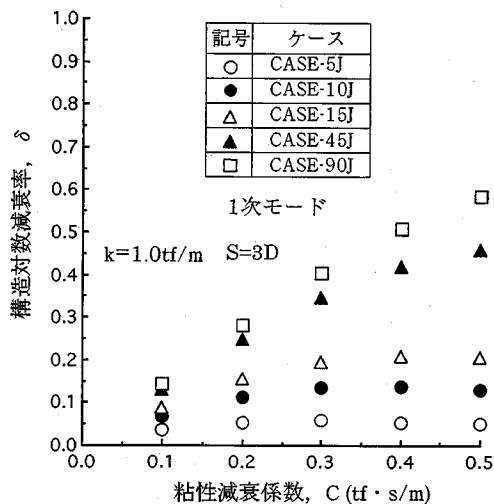


図-3 減衰付加特性に及ぼすねじれ剛性の影響 (Cable 200-D 96, S=3D, x=50 m)

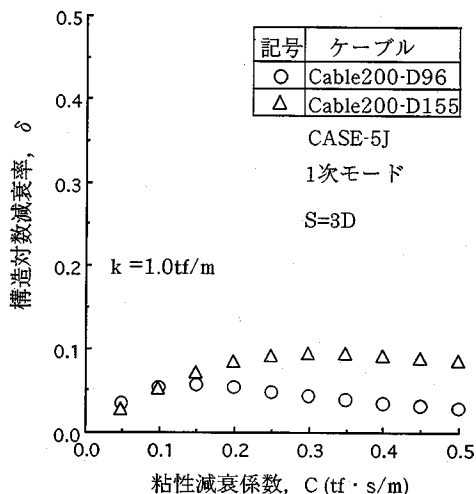
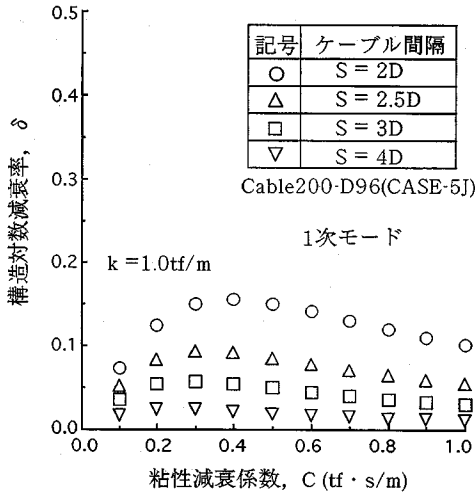


図-4 減衰付加特性に及ぼすケーブル径の影響 (CASE-5 J, S=3 D, x=50 m)

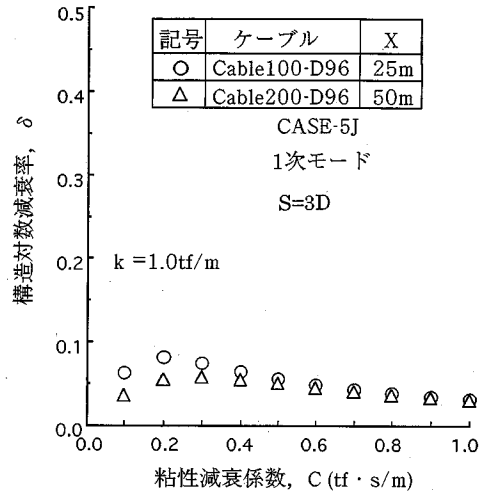
ケーブル (Cable 200-D 96) を対象とし、桁側のケーブル端部から $x=25\text{ m}$ と $x=50\text{ m}$ なる位置に 1 個の減衰機能付きスペーサをそれぞれ単独設置した場合について、複素固有値解析を実施した。得られた 1 次振動モードの構造対数減衰率 δ を、それぞれ図-2、図-3 に示す。図-2 と図-3 を比較すれば、1 次振動モードに付加される構造減衰は、スペーサ位置を $x=50\text{ m}$ とした場合の方が $x=25\text{ m}$ とした場合よりも大きくなっていることがわかる。しかしながら、減衰付加特性に及ぼすねじれ剛性の影響は基本的に同じ傾向を示していることから、ここでは $x=50\text{ m}$ なる位置に減衰機能付きスペーサを設置した場合について考察する。図-3 から、ケーブル

のねじり定数 J_c としてケーブルの鋼線外径と等しい鋼棒の 90% を仮定した CASE-90 J なる場合 (図中の □ 記号) では、たとえば、粘性減衰係数 C を $C=0.1\text{ tf}\cdot\text{s/m}$ に設定した場合にも 1 次の基本振動モードには $\delta=0.1$ 以上の構造減衰が付加されることがわかる。しかしながら、CASE-45 J, CASE-15 J, CASE-10 J, CASE-5 J なる場合の結果と比較すればわかるように、ケーブルのねじり剛性比 (鋼線外径と等しい鋼棒が有するねじり剛性との比率) が小さくなるにしたがって付加される構造減衰の最大値は低下し、この傾向は粘性減衰係数が大きくなるにしたがってより顕著になっている。すなわち、減衰機能付きスペーサの設計とその適用にあたっては、ケーブルのねじり剛性によって減衰付加効果が大きく変化することを認識し、より適切なねじり剛性値を仮定しなければならないと言える。

一方、ケーブル径の差異による影響を調べるため、 $S=3\text{ D}$ に並列配置された Cable 200-D 155 と Cable 200-D 96 のそれぞれについて、ケーブル端部から等しい位置に 1 個の減衰機能付きスペーサを設置した場合の解析結果を比較することとした。一例として、減衰機能付きスペーサの取り付け位置が $x=50\text{ m}$ でケーブルのねじれ剛性比を 5% とした場合 (CASE-5 J) の結果を比較して図-4 に示す。なお、これらの解析において、単位長さ当りの重量やケーブル張力は表-1、表-2 に示したように各ケーブルモデルで相違するものの、弦としての固有振動数はそれぞれ等しくなるように設定している。図-4 から、ケーブルのねじれ剛性比がそれぞれ等しい場合 (CASE-5 J) でも、ケーブル径が太くなってケーブルのねじれ剛性そのものが大きくなれば、減衰機能付きスペーサによって 1 次振動モードに付加される構造減衰の



図一五 減衰付加特性に及ぼすケーブル中心間隔の影響 (Cable 200-D 96, x=50 m)

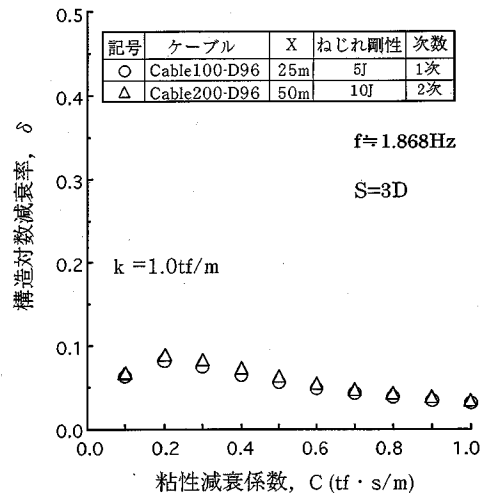


図一六 減衰付加特性に及ぼすケーブル長の影響 (x/l=0.25)

最大値は増加していることがわかる。

ところで、減衰機能付きスペーサによる減衰付加効果は、並列ケーブルの中心間隔Sによっても変化すると予想される。そこで、S=2D、S=2.5DおよびS=4Dとなるように並列配置された細径ケーブル (Cable 200-D 96) をそれぞれ対象とし、ケーブル端部からx=50 mなる位置に減衰機能付きスペーサを設置した場合についても複素固有値解析を実施した。一例として、CASE-5Jなる場合の解析結果を図一五に示す。なお、この図には、比較のため、上述したS=3Dなる場合の結果も併記している。図一五から、たとえば粘性減衰係数がC=0.2 tf·s/mなる場合、1次の基本振動モードに付加される構造対数減衰率は、S=2Dで $\delta \approx 0.12$ 、S=2.5Dで $\delta \approx 0.08$ 、S=3Dで $\delta \approx 0.05$ 、S=4Dで $\delta \approx 0.02$ となっており、減衰機能付きスペーサによって付加される構造減衰は、ばね定数と粘性減衰係数が等しければ、ケーブルの中心間隔Sが小さくなるにしたがって顕著な増加を示していることがわかる。なお、減衰機能付きスペーサを設置した並列ケーブルが逆位相モードで振動する場合、各ケーブルには鉛直変形とねじれ変形が生じ、それぞれの変形に対応した減衰がスペーサによって付加される。それゆえ、上述した結果は、ケーブルの中心間隔Sが小さくなるとともにケーブルのねじれ変形の影響が相対的に低下し、鉛直変形に対応した構造減衰成分が大幅に増加したためと考えられる。

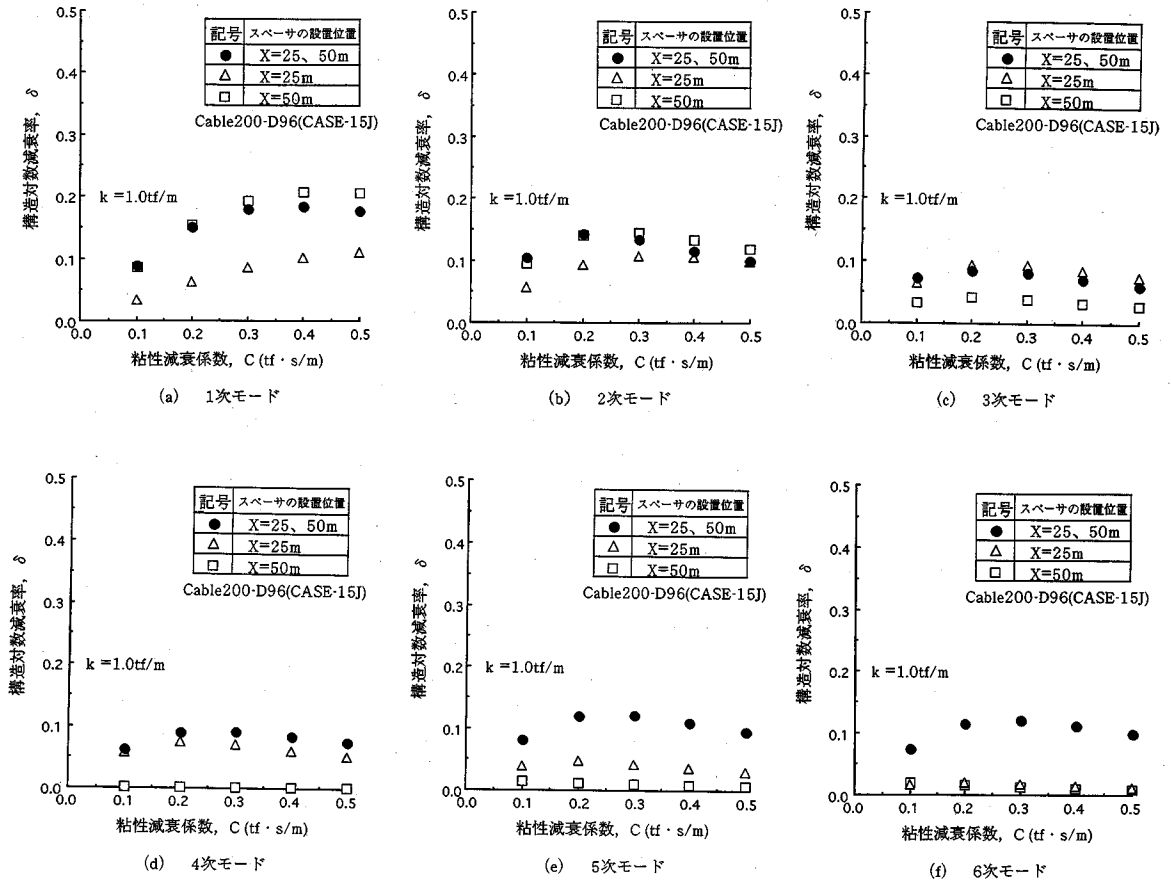
本解析結果から、減衰機能付きスペーサは対象としたケーブルの中心間隔Sが小さいほど有効な減衰付加対策になり得ると言えるが、一方で、従来の風洞実験結果⁷⁾からも明らかなように、ケーブルの中心間隔Sが2D \leq S \leq 3Dなる場合のウェイクギャロッピングはS=4D



図一七 固有振動数と単位長さ当たりのねじれ剛性を等しくした場合に付加される構造減衰の比較 (f=1.868 Hz, x/l=0.25)

なる場合と比較して励振力がきわめて強い。それゆえ、減衰機能付きスペーサの設計とその適用にあたっては、ケーブルの中心間隔Sが小さいほどより大きな構造減衰が付加されるものの、ケーブルの中心間隔Sが小さくなるにしたがって付加すべき所要の構造減衰は増加することに留意しなければならないと言える。

以上は $l=200$ mなる並列ケーブルに対する検討結果であるが、減衰機能付きスペーサによる減衰付加効果は、対象とするケーブルの長さによっても変化すると考えられる。そこで、 $l=100$ mなるCable 100-D 96を並列配置した場合についても同様に複素固有値解析を実施し、Cable 200-D 96なる場合の結果と対比することとした。



図一八 減衰機能付きスパーサを単独設置した場合と合計2個設置した場合の比較 (S=3D)

ケーブルの中心間隔が $S=3D$ で、減衰機能付きスパーサの設置位置が $x/l=0.25$ (Cable 100-D96 では $x=25$ m, Cable 200-D96 では $x=50$ m) なる場合の CASE-5J に対する比較結果を図一六に示す。図一六より、ケーブル長で無次元化した減衰機能付きスパーサの設置位置 x/l が同一であっても、ケーブル長の短い Cable 100-D96 の1次振動モードに付加される構造減衰の最大値は Cable 200-D96 よりも大きくなっていることがわかる。これは、単位長さ当たりで整理したケーブルのねじれ剛性および着目した1次モードの固有振動数が両者で相違していることに起因すると考えられる。そこで、Cable 100-D96 では CASE-5J の1次振動モード、Cable 200-D96 では CASE-10J の2次振動モードについて、減衰機能付きスパーサによって付加される構造減衰を比較した。その結果を図一七に示す。図一七から、ケーブルの単位長さ当たりのねじれ剛性と固有振動数を等しく設定した場合、両者の結果はほぼ一致していることがわかる。

(3) 複数個の減衰機能付きスパーサを設置した場合

振動モードを考えれば容易に推察されるように、長さが $l=200$ m なる並列ケーブルでは $x=50$ m なる位置が4次モードの節になることから、この位置に減衰機能付きスパーサを単独設置しても4次モードの構造減衰は増加しない。それゆえ、風的作用で高次モードのウェイクギャロッピングが発現するような場合には、複数個の減衰機能付きスパーサを併用設置する場合の検討も必要となろう。

そこで、Cable 200-D96 の $x=25$ m と $x=50$ m なる位置に合計2個の減衰機能付きスパーサを設置した場合について複素固有値解析を実施し、それぞれ単独に設置した場合の結果と比較することとした。なお、ケーブルのねじれ剛性を鋼線外径と等しい鋼棒が有する値の5% (CASE-5J) と15% (CASE-15J) に設定した場合について複素固有値解析結果を実施したところ、合計2個の減衰機能付きスパーサを設置したことによる効果は、程度の差はあるものの、いずれもほぼ同じ傾向を示していた。そこで、ここでは、読者の理解の便を考え、合計2個の減衰機能付きスパーサを併用設置した効果がより明確

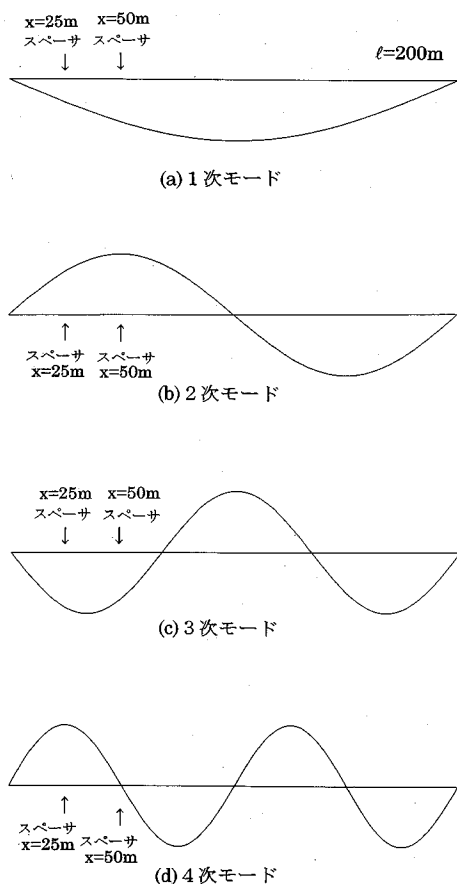


図-9 減衰機能付きスパーサの設置位置と振動モードの関係 ($n=1\sim 4$)

に認められた CASE-15J の結果を図-8 に示し、以下に考察を加える。ただし、粘弾性体のばね定数は周波数によっても幾分変化することから、厳密には着目した振動モードの固有振動数に応じてばね定数を変化させる必要がある。しかしながら、ここでは減衰機能付きスパーサを複数個 (2 個) 設置した場合の基本特性を把握することに主眼を置き、モード次数に関わらずばね定数として $k=1.0\text{tf/m}$ なる値を採用することとした。

図-8 から、合計 2 個の減衰機能付きスパーサを設置した場合の 1 次モードと 2 次モードの構造減衰は、 $x=50\text{m}$ なる位置に 1 個の減衰機能付きスパーサを単独設置した場合の結果とほぼ同程度であることがわかる。また、3 次モードと 4 次モードの構造減衰は、 $x=25\text{m}$ なる位置に 1 個の減衰機能付きスパーサを単独設置した場合の結果とほぼ同程度になっており、合計 2 個の減衰機能付きスパーサを設置した有意性は 1 次～4 次モードにおいてさほど認められないものとなっている。これに対し、減衰機能付きスパーサを合計 2 個設置した場合の 5 次モードや 6 次モードでは、 $x=25\text{m}$ あるいは $x=50\text{m}$ なる

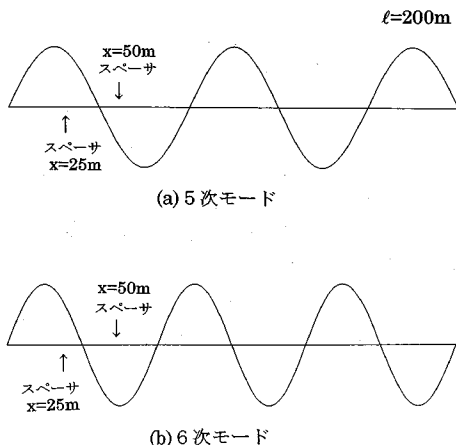


図-10 減衰機能付きスパーサの設置位置と振動モードの関係 ($n=5, 6$)

る位置に 1 個の減衰機能付きスパーサを単独設置した場合と比較してかなり大きな構造減衰が付加されていることがわかる。これは、1 次～4 次モードでは、 n をモード次数とすれば、図-9 からわかるように $200/n$ にほぼ相当する区間に 2 つの減衰機能付きスパーサが配置されたことによる相互干渉によって重ね合わせ効果が十分に得られなかったのに対し、5 次モードや 6 次モードでは、図-10 からわかるように、最初の $200/n$ なる区間には $x=25\text{m}$ なる位置の減衰機能付きスパーサが、次の $200/n$ なる区間には $x=50\text{m}$ なる位置の減衰機能付きスパーサがそれぞれ配置されることとなり、2 個の減衰機能付きスパーサを設置したことによる重ね合わせ効果が顕著になったものと言える。

3. 実橋ケーブル試験

前章に示した解析的な検討結果を踏まえ、高減衰ゴムよりも安価なアスファルト系の粘弾性体を減衰材とばね材として使用した写真-1 に示すような減衰機能付きスパーサを製作するとともに、実橋ケーブル試験を実施して本方式の減衰付加特性を把握することとした。

(1) 対象とした橋梁

対象とした橋梁は、図-11 に示すような 2 面吊り 2 径間連続 PC 斜張橋 (71.4 m + 63.4 m) である。架橋地点は切り立った崖が海岸のすぐ近所に迫った小さな入り江部で、比較的乱れの強い風が作用する風環境にある。本橋における各段ケーブルは、それぞれ細径のノーマル (円形) ケーブルが並列配置されている。ケーブル中心間隔とケーブル径の比 S/D は、主径間側の最上段ケーブル (S-1 ケーブル) で $S/D=2.56\sim 8.54$ とケーブル軸方向

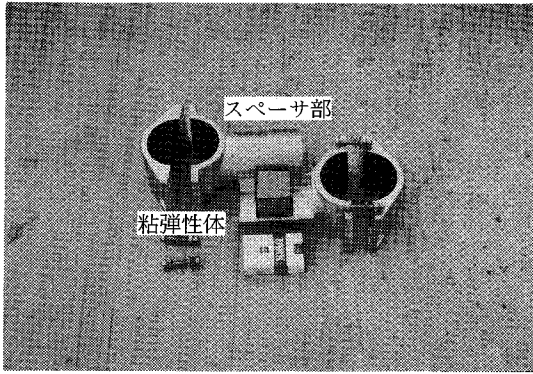


写真-1 減衰機能付きスペーサ

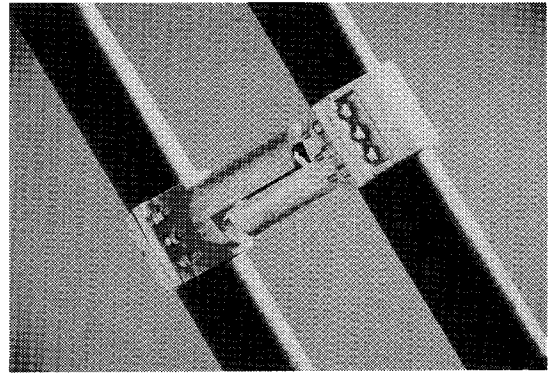


写真-2 減衰機能付きスペーサの設置状況

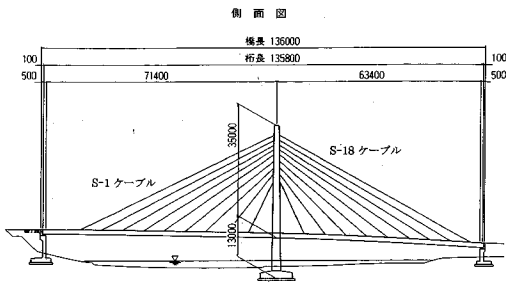


図-11 対象とした斜張橋

表-4 S-18 ケーブルの構造諸元

ケーブル長 l (m)	ケーブル外径 D (mm)	鋼線外径 Ds (mm)	張力 T (ton·f)	重量 w (ton·f/m)	基本固有振動数 ft (Hz)
66.68	82.0	62.0	67.95	0.01664	1.500

(2) 実験結果と考察

著者らの減衰機能付きスペーサは、アルミ合金製のスペーサ部分とアスファルト系の粘弾性体から構成されている。スペーサ部に組み込む前の粘弾性体寸法は $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ であるが、スペーサ部に組み込んで S-18 ケーブルに設置する場合には、スペーサ部分との付着が高まるように、せん断変形する部分の厚みが 4 cm 程度となるように圧縮して使用するものとしている。

対象橋梁のアプローチ部は実験時において未施工であったことから、減衰機能付きスペーサは地表に停車した高所作業車を利用して可能な限り高い位置に設置するものとした。その結果、対象とした S-18 ケーブルでは橋面上から $h=7.15\text{ m}$ ($x/l=0.219$) なる位置に、減衰機能付きスペーサを設置することができた。参考までに、減衰機能付きスペーサの設置状況を写真-2 に示す。

実験にあたっては、並列配置されたケーブルの片側一方を人力で面内（鉛直）方向に加振し、得られた減衰自由振動波形から構造減衰を算出するものとした。ただし、粘弾性体のばね定数と粘性減衰係数は温度によっても幾分変化することから、本実験時においては接触型温度計で粘弾性体の表面温度を測定するものとしている。その結果、実橋ケーブル試験時における粘弾性体の表面温度は、 $20.5^{\circ}\text{C} \sim 23.5^{\circ}\text{C}$ （平均すれば 22.0°C ）であった。なお、減衰機能付きスペーサを設置する前は、ケーブルを面内（鉛直）方向に加振した場合にも面外（水平）方向の振動成分が連成し、楕円的な挙動を呈していた。これに対し、減衰機能付きスペーサを設置した後の加振実験では、スペーサの寄与で面外（水平）方向の逆位相振動モードの構造減衰が増加し、面外（水平）方向の振動は

に著しく変化しているのに対し、短径間側の最上段ケーブル (S-18 ケーブル) では $S/D=2.56 \sim 3.90$ とケーブル軸方向への変化は小さい。したがって、短径間側の S-18 ケーブルは、主径間側の S-1 ケーブルと同程度の長さであるものの、ウェイクギャロッピングの励振力は強いと考えられる。また、実際、架設工事に携った技術者によれば、頻度はさほど多くないものの、ウェイクギャロッピングは主として S/D が小さい短径間側の並列ケーブルにおいて出現していたようである。そこで、実橋ケーブル試験にあたっては、短支間側の最上段ケーブルである S-18 ケーブル（海側に面した並列ケーブル）を対象とすることとした。

S-18 ケーブルの構造諸元を表-4 に示す。なお、対象としたケーブルでは、桁側の端部付近にウレタン材と比較的剛性の大きいゴム材（以下、慣用的な表記にしたがい、防振ゴムと記す）が、また、塔側の端部付近にも防振ゴムが設置されていることから、この防振ゴムの設置位置をケーブル端点と考えるのが妥当と思われる。そこで、防振ゴムの設置位置をケーブル端点と考えたケーブル長さを S-18 のケーブル長 l として採用し、表-4 中に記すこととしている。

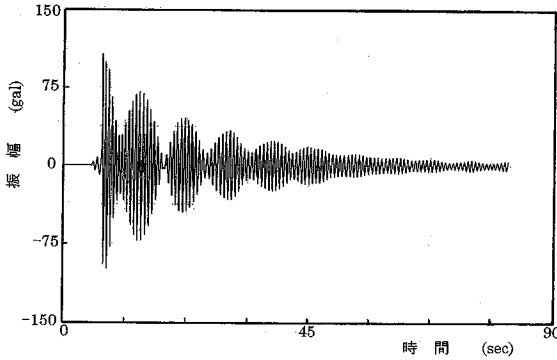


図-12 スペーサ設置後に得られた減衰自由振動波形(鉛直方向成分)の一例

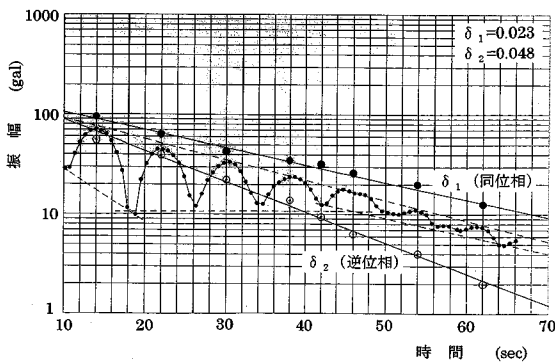


図-13 うなり波形の構造減衰を算出するための図式解法

ほとんど連成していなかったことを述べておく。

スペーサ設置後に得られた減衰自由振動波形(鉛直方向成分)の一例を図-12に示す。ここに、実験時における桁上での風速は3~4 m/sであった。この図から、減衰機能付きスペーサを設置した場合、近接した2種の振動モード(同位相と逆位相の基本振動モード)に起因して減衰波形にうなり現象が生じていることがわかる。したがって、通常の場合と異なり、両者の振動成分を分離し、それぞれの構造対数減衰率を算出する必要がある。なお、同位相モードと逆位相モードの基本振動数は、スペクトル解析結果から、それぞれ1.45 Hz、1.60 Hzであることが容易に確かめられた。そこで、本研究では、図-13に示したような図式解法¹⁸⁾を適用して、同位相と逆位相の基本振動モードにおける構造対数減衰率をそれぞれ算定した。減衰機能付きスペーサの設置前後における算定結果を表-5にまとめる。

減衰機能付きスペーサでは、当然のことながら、同位相振動モードに対する減衰付加効果は期待できない。それゆえ、同位相モードの構造対数減衰率は、減衰機能付きスペーサを設置する前の単独ケーブルにおける構造減衰と等しいと考えられるが、表-5からわかるように両

表-5 S-18ケーブルの構造対数減衰率

ケーブル名	構造対数減衰率		
	スペーサ設置前		スペーサ設置後
	1次	同位相1次	逆位相1次
S-18ケーブル	0.019	0.023	0.048

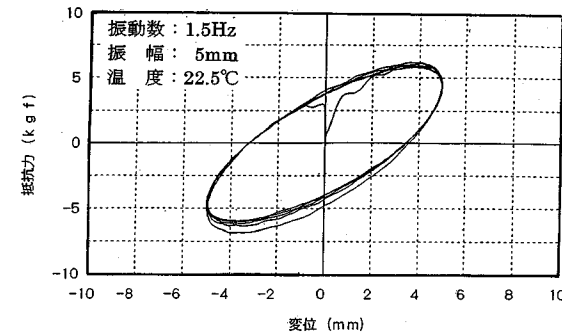
者には若干の差異が生じている。これは、主として図式解法を採用したことによる算出誤差に起因するものと考えられる。そこで、ここでは、減衰機能付きスペーサによって逆位相の基本振動モードに付加された構造減衰の大きさは、逆位相モードの構造対数減衰率から単独ケーブルの構造対数減衰率を差し引いて算出するものとした。その結果、逆位相の基本振動モードには $\Delta\delta=0.029$ (逆位相モードの構造対数減衰率から同位相モードの構造対数減衰率を差し引いた場合には $\Delta\delta=0.025$)なる構造減衰が減衰機能付きスペーサの設置によって付加されていることが確認できた。なお、スペーサを設置する前の単独ケーブルの構造対数減衰率が、無対策時における値として通常考えられている $\delta=0.003$ よりも大きいのは、ケーブルの端部付近に設置した防振ゴムに起因するものである。それゆえ、本橋ケーブルでは、振動振幅の大きな渦励振は発現していないことを併せて述べておく。

4. 減衰付加特性から逆算した実橋ケーブルのねじれ剛性

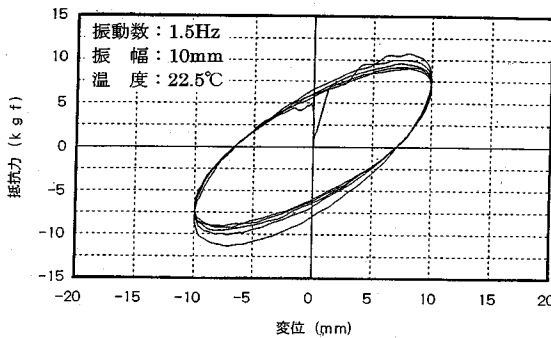
3章で示したように、減衰機能付きスペーサによって実橋ケーブルの逆位相振動モードに付加される構造減衰を定量的に把握することができた。そこで、本章では、実橋ケーブル試験と同じ条件のもとで室内実験を実施して粘弾性体の基本特性を把握するとともに、ケーブルのねじれ剛性をパラメータとした複素固有値解析結果と実橋ケーブル試験結果との対比から、実橋ケーブルのねじれ剛性を評価することとした。

(1) 粘弾性体の基本特性

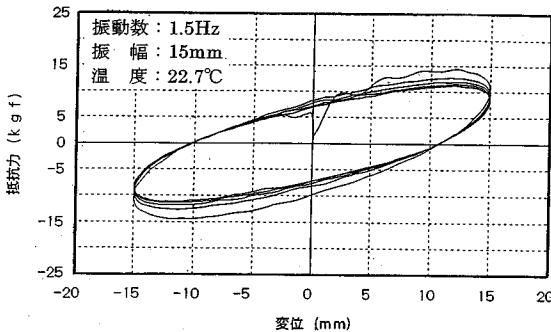
室内実験用の供試体(アスファルト系粘弾性体)は、実橋ケーブル試験で使用したものと同じく5 cm×5 cm×5 cmなる寸法のもので、室内実験時には実橋ケーブル試験時と同様にせん断変形する部分の厚みが4 cm程度となるように圧縮させるものとした。室内実験では、加振周波数をS-18ケーブルの基本固有振動数とほぼ等しい1.5 Hzに、また、温度条件は実橋ケーブル試験時と同じく22.0°Cを目標として設定した。温度 T_e が $T_e=22.5^\circ\text{C}$ で、加振振幅が5 mm、10 mm、15 mmなる場合の室内加振実験結果(変位-抵抗力線図)を図-14に示



(a) 加振振幅が5mmの場合



(b) 加振振幅が10mmの場合



(c) 加振振幅が15mmの場合

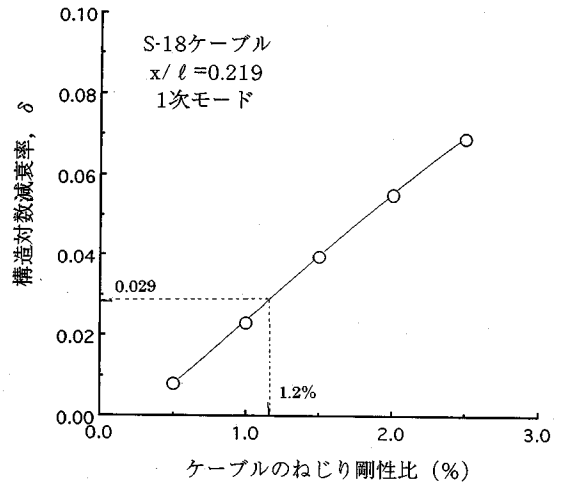
図一四 粘弾性体の室内加振実験結果 (変位-抵抗力線図)

す。また、それぞれの加振振幅における等価ばね定数 k_e と等価粘性減衰係数 C_e の算出結果を表一六にまとめる。

表一六から、アスファルト系粘弾性体の等価ばね定数 k_e と等価粘性減衰係数 C_e はいずれも振幅依存性を呈し、それぞれ加振振幅が小さくなるにしたがって徐々に増加する特性を有していることがわかる。このように、減衰材として使用したアスファルト系粘弾性体の等価ばね定数と等価粘性減衰係数には若干の振幅依存性が認められるものの、実橋ケーブル試験時とほぼ同じ温度条件下における特性値が得られたことから、次節ではこれらの値を用いた複素固有値解析結果と実橋ケーブル試験結

表一六 粘弾性体の特性値 ($T_e=22.5^\circ\text{C}$)

加振振幅	等価ばね定数	等価粘性減衰係数
	k_e (tf/m)	C_e (tf·s/m)
5mm	0.929	0.088
10mm	0.751	0.071
15mm	0.645	0.056
平均値	0.775	0.072



図一五 構造対数減衰率とケーブルのねじり剛性比の関係 (S-18ケーブル)

果との対比を行い、実橋ケーブルにおけるねじり剛性の評価を試みることにした。なお、本粘弾性体の温度依存性については、寸法が幾分異なる供試体を用いた別の室内実験結果から予備的に検討している。その結果、幾分ばらつきはあるものの、本粘弾性体の等価ばね定数 k_e と等価粘性減衰係数 C_e は、それぞれ $e^{-0.052T_e}$ におおむね比例するものであったことを述べておく。

(2) 実橋ケーブルにおけるねじり剛性

S-18なる上・下流側ケーブルをそれぞれ133部材に分割するとともに、 $x/l=0.219$ なる位置(この位置でのケーブル中心間隔とケーブル径の比 S/D は $S/D=2.92$)に減衰機能付きスペーサを設置したモデルを作成した。ここに、粘弾性体の等価ばね定数 k_e と等価粘性減衰係数 C_e は、実橋ケーブル試験で得られた逆位相1次モードの構造対数減衰率には結果として振幅依存性がほとんど認められなかったことから、加振振幅が5mm, 10mm, 15mmなる場合の値を単純平均した $k_e=0.775$ tf/s, $C_e=0.072$ tf·s/mなる値を採用することとした。

ケーブルのねじり剛性比(=ケーブルのねじり剛性/鋼線外径と等しい鋼棒が有するねじり剛性)をパラメー

ターとした複素固有値解析結果を図-15に示す。図-15から、複素固有値解析結果が実橋ケーブル試験結果($\delta=0.029$)と等しくなるためには、S-18ケーブル(ケーブル長が $\ell=66.7$ m, ケーブル径が $D=82$ mm)のねじれ剛性は、鋼線外径と等しい鋼棒($D=62$ mm)が有する値の1.2%程度と非常に小さな値でなければならないことがわかる。そこで、ケーブルのねじれ剛性が小さく算出された理由を検討するため、補足的に、粘弾性体の等価ばね定数は $ke=0.775$ tf/sのまま等価粘性減衰係数を $Ce=0.056$ tf·s/m(15 mmなる加振振幅で得られた値)に変更した場合および等価粘性減衰係数は $Ce=0.072$ tf·s/mのまま等価ばね定数を $ke=0.929$ tf/s(5 mmなる加振振幅で得られた値)に変更した場合についても複素固有値解析を実施し、同様な対比を行った。その結果、粘弾性体の等価ばね定数と等価粘性減衰係数を上述したように変更しても、S-18ケーブルのねじれ剛性比は、いずれも鋼線外径と等しい $D=62$ mmなる鋼棒が有する値の1.4%程度であった。それゆえ、粘弾性体が有する振幅依存性は、ケーブルのねじれ剛性比を推定するにあたって大きな影響を及ぼさないと考えられる。また、ケーブルの極慣性モーメント $I_0(I_0=8.156 \times 10^{-7}$ tf·s²·m/m)を考慮した場合についても複素固有値解析を実施して実橋ケーブル試験結果と対比したが、得られたケーブルのねじれ剛性比は極慣性モーメントを無視した場合とほぼ等しく1.3%程度であったことも併せて述べておく。

ケーブルのねじれ剛性に関するデータはきわめて少なく、著者らの知る限り、文献16)に報告されているのみである。この文献では、ケーブル径が $D=83.5$ mm, ケーブル張力が $T=1.618$ MN, ケーブル長が $\ell=98.43$ mの実大ケーブル模型に静的ねじれモーメントを載荷したところ、ケーブルのねじれ剛性は 5.08 KN·m²であったことを報告しているが、この値は鋼線外径と等しい鋼棒が有するねじれ剛性値のほぼ4%に対応する。減衰付加特性から逆算したS-18ケーブルのねじれ剛性比は上述したように1.2%程度とここに紹介した4%なる値より幾分小さいが、これにはケーブル長やケーブル張力などの差異が関係しているかも知れない。また、S-18ケーブルの複素固有値解析にあたり、防振ゴムの設置位置をケーブル端点と見なして両端を完全固定としたことも、両者におけるねじれ剛性比が幾分相違した要因の一つと考えられる。さらには、S-18ケーブルを対象とした実橋ケーブル試験は3~4 m/s程度の風速のもとで実施されたが、有風時における空力減衰の影響で構造減衰が見かけ上減少し、ねじれ剛性比の算出結果が小さくなった可能性も考えられる。ただ、いずれにしても、S-18ケーブルに対するねじれ剛性の逆算結果や文献16)で報告された結果を加味すれば、直径が80 mm程度の細径ケーブル

におけるねじれ剛性は鋼線外径と等しい鋼棒が有する値の高々数%(1%~4%)程度である可能性がきわめて高いと推察される。

なお、当然のことながら、ケーブルのねじれ剛性はケーブルの種類やケーブル径によっても相違すると考えられる。それゆえ、減衰機能付きスペーサの適用とその普及にあたっては、細径から太径にいたる種々のケーブルに対するねじれ剛性を定量的に把握することが急務の課題と言える。この方面における今後の研究を期待したい。

5. 減衰機能付きスペーサを設置した状態でのケーブル挙動と最終設置案に対する検討

実橋ケーブル試験が終了した後も、減衰機能付きスペーサをS-18ケーブルに設置(設置高さは実橋ケーブル試験時と同じく $h=7.15$ m)したままの状態とし、自然風中における実橋ケーブルの挙動を目視観察することとした。減衰機能付きスペーサを平成7年10月に仮設置してから約3ヶ月間が経過したが、本橋アプローチ部の施工を監督する発注者から、スペーサを設置していないケーブルにはしばしば逆位相モードのケーブル振動が観察されたのに対し、スペーサを設置したS-18ケーブルにはほとんど振動が発現していなかったとの報告をいただいた。ただし、降雨を伴った7~8 m/s程度の風が作用した時に、一度だけ同位相に近い振動モードでS-18ケーブルが振動したとの報告も併せていただいたが、この振動はその挙動から同位相モードのレインバイブレーションと考えられる。まえがきにも述べたように、減衰機能付きスペーサを設置しても同位相モードの構造減衰は増加しないが、本橋ではケーブル端部付近に設置されていた防振ゴムの寄与で同位相1次振動モードの構造減衰が $\delta=0.023$ と比較的大きく、それゆえ、同位相モードのレインバイブレーションが約3ヶ月間で一度しか目撃されなかったと考えられる。同位相モードのレインバイブレーションについては今後とも注意深い観察が必要であるが、発生頻度がさほど多くないことから、本橋のケーブルでは、当面、逆位相モードのウェイクギャロッピングのみに着目し、さらに長期間にわたって振動が発現しないように減衰機能付きスペーサの最終設置案について検討することとした。

最終設置案として、ケーブル中心間隔とケーブル径の比 S/D が比較的小さい短径間側ケーブル(たとえば、S-18ケーブルでは $S/D=2.56\sim 3.90$)に対しては、実橋ケーブル試験で採用したものと全く同じ特性値を有する減衰機能付きスペーサを $\ell/2$ 点($x/\ell=0.5$)に設置することを考え、S-18ケーブルを対象に複素固有値解析を実施することとした。なお、複素固有値解析にあたっては、前章の検討結果を踏まえ、ケーブルのねじれ剛性として

鋼線外径と等しい鋼棒が有するねじれ剛性値の1.2%に相当する値 ($J_c = 1.741 \times 10^{-8} \text{m}^4$) を、また、減衰機能付きスペーサの等価ばね定数 k_e と等価粘性減衰係数 C_e として先の検討と同じく $T_e = 22.5^\circ\text{C}$ なる場合の値 ($k_e = 0.775 \text{tf/s}$, $C_e = 0.072 \text{tf}\cdot\text{s/m}$) を採用することとした。

$\ell/2$ 点にスペーサを設置した場合に付加される1次モードの構造対数減衰率は $\delta = 0.030$ (防振ゴムの寄与も加えると $\delta = 0.049$) であり、実橋ケーブル試験で得られた $\delta = 0.029$ なる結果と比べ、スペーサ位置を高くしたにも係わらずきわめて微量な増加しか示さないと推察された。これは、ケーブル中心間隔とケーブル径の比 S/D が実橋ケーブル試験時のスペーサ位置 ($x/\ell = 0.219$) において $S/D = 2.85$ であったのに対し、 $\ell/2$ 点では $S/D = 3.23$ と幾分大きく、スペーサ位置を高くしたことによる効果が相殺されたためと考えられる。しかしながら、減衰機能付きスペーサを斜張橋のウェイクギャロッピング対策として採用するのは今回がはじめての事例であり、少しでも高い位置に設置した方がより大きな安心感が得られるという発注者の意向も加味して、 $\ell/2$ 点に減衰機能付きスペーサを設置するものとした。ただし、 $\ell/2$ 点のみに減衰機能付きスペーサを設置した場合、2次振動モードには構造減衰が付加されないことから、最終的に短径間側の上から6段目までのケーブルには $\ell/2$ 点と $\ell/4$ 点に減衰機能付きスペーサを併用設置することとなった。一方、主径間側のケーブルはケーブル中心間隔とケーブル径の比 S/D が著しく変化 (たとえば、S-1ケーブルでは $S/D = 2.56 \sim 8.54$) していることに起因してウェイクギャロッピングの発生頻度も非常に少なかったことから、上から6段目までの $\ell/4$ 点 (最上段であるS-1ケーブルのスペーサ設置位置における S/D は $S/D = 4.06$) のみに同じ特性値を有する減衰機能付きスペーサを設置することとした。なお、短径間側と主径間側の下から3段目までのケーブルにはきわめて稀にしか振動が発現せず、その振動振幅も非常に小さいものであったことから、当面は減衰機能付きスペーサを設置しないものとし、有風時におけるケーブル挙動を観察することになった。

6. まとめ

本論文は、アスファルト系の粘弾性体を利用した並列ケーブル用減衰機能付きスペーサ (並列ケーブルのほぼ中間にスペーサ治具を介して粘弾性体を設置するタイプ) とその実橋ケーブルへの適用について論じたものである。得られた主要な結果を以下にまとめる。

(1) ケーブルのねじり剛性をパラメータとした複素固有値解析結果から、減衰機能付きスペーサによって逆

位相の基本振動モードに付加される構造減衰の最大値はケーブルのねじり剛性が小さくなるにしたがって著しく低下することがわかった。それゆえ、減衰機能付きスペーサの設計とその適用にあたっては、ケーブルのねじり剛性によって減衰付加効果が大きく変化することを十分認識し、より適切なねじり剛性値を仮定しなければならない。

(2) 直径が $D = 155 \text{mm}$ と $D = 96 \text{mm}$ なるケーブルモデル (Cable 200-D 155 と Cable 200-D 96) について複素固有値解析を実施した。その結果、ケーブルのねじれ剛性比 (鋼線外径に等しい鋼棒が有するねじれ剛性との比率) がそれぞれ5%と等しい場合 (CASE-5 J) でも、ケーブル径が大きくなってケーブルのねじれ剛性そのものが大きくなれば、減衰機能付きスペーサによって逆位相の基本振動モードに付加される構造減衰の最大値は増加することがわかった。

(3) 減衰機能付きスペーサによって付加される逆位相基本振動モードの構造減衰は、その他の解析条件が等しければ、ケーブルの中心間隔 S が $S = 4D$, $3D$, $2D$ と小さくなるにしたがって顕著に増加する。

(4) ケーブル長で無次元化した減衰機能付きスペーサの設置位置を $x/\ell = 0.25$ ($\ell = 100 \text{m}$ なる Cable 100-D 96 では $x = 25 \text{m}$, $\ell = 200 \text{m}$ なる Cable 200-D 96 では $x = 50 \text{m}$) と等しくした場合、ケーブルのねじれ剛性比が同一であってもケーブル長の短い Cable 100-D 96 に付加される構造減衰の最大値は Cable 200-D 96 よりも大きい。これは、単位長さ当たりで整理したケーブルのねじれ剛性および着目した1次モードの固有振動数が両者で相違していることに起因する。

(5) $\ell = 200 \text{m}$ なるケーブルモデル (Cable 200-D 96) の $x = 25 \text{m}$ と $x = 50 \text{m}$ なる位置に合計2個の減衰機能付きスペーサを設置した場合の減衰付加特性を、それぞれの位置に単独設置した場合の結果と比較したところ、合計2個のスペーサを設置した有意性は逆位相の1次～4次モードにおいてさほど認められないものとなった。これに対し、減衰機能付きスペーサを合計2個設置した場合の逆位相5次モードや逆位相6次モードでは、 $x = 25 \text{m}$ あるいは $x = 50 \text{m}$ なる位置に1個の減衰機能付きスペーサを単独設置した場合と比較してかなり大きな構造減衰が付加される結果が得られた。これは n をモード次数とすれば、逆位相の5次モードや6次モードでは、最初の $200/n$ なる区間には $x = 25 \text{m}$ なる位置の減衰機能付きスペーサが、次の $200/n$ なる区間には $x = 50 \text{m}$ なる位置の減衰機能付きスペーサがそれぞれ配置されることとなり、2個の減衰機能付きスペーサを設置したことによる重ね合せ効果が顕著になったことに起因する。

(6) 実在橋梁のS-18ケーブル (ケーブル長が $\ell =$

66.7 m, ケーブル径が $D=82$ mm) に減衰機能付きスペーサを橋面から $h=7.15$ m なる位置に設置したところ, 逆位相の基本振動モードには $\Delta\delta=0.029$ なる構造減衰が付加されることが実験によって確認できた。また, 複素固有値解析結果と実橋ケーブル試験結果との対比から, 実橋ケーブルにおけるねじれ剛性を評価したところ, S-18 ケーブルのねじれ剛性は, 鋼線外径と等しい鋼棒 ($D=62$ mm) が有する値の 1.2% 程度と非常に小さな値でなければならないことがわかった。この算定結果には若干の誤差が含まれている可能性はあるが, 既往の測定結果を加味しても, 直径が 80 mm 程度の細径ケーブルが有するねじれ剛性は鋼線外径と等しい鋼棒が有する値の高々数% (1%~4%) 程度である可能性がきわめて高いと推察される。

(7) 実橋ケーブル試験で使用した減衰機能付きスペーサを S-18 ケーブルに設置した状態で, 自然風中における挙動を目視観察した。その結果, スペーサを設置していないケーブルにはしばしば逆位相モードのケーブル振動が観察されたが, スペーサを設置した S-18 ケーブルには振動がほとんど発現していないことがわかった。しかしながら, 約 3 ヶ月の観測期間中に一度だけの報告ではあったが, 降雨を伴った 7~8 m/s 程度の風が作用した時, S-18 ケーブルに同位相モードのレインバイブレーションと考えられる振動が発現した。

(8) 実橋ケーブル試験を実施した 2 面吊り 2 径間連続 PC 斜張橋 (71.4 m+63.4 m) でも, ケーブルのねじれ剛性比として 1.2% なる値 ($J_c=1.741 \times 10^{-8} \text{ m}^4$) を仮定した複素固有値解析結果を踏まえ, 最終的に短径間側の上から 6 段目までのケーブルには $l/2$ 点と $l/4$ 点に減衰機能付きスペーサを設置することとなった。一方, 主径間側のケーブルは, ケーブル中心間隔とケーブル径の比 S/D が著しく変化しており, また, ウェイクギャロッピングの発現頻度も非常に少なかったことから, 上から 6 段目までの $l/4$ 点に減衰機能付きスペーサを設置することになった。

スペーサ設置後のケーブル挙動については今後とも継続的に観察する予定であるが, 減衰機能付きスペーサは, ケーブル端部付近に設置するオイルダンパー方式や粘性せん断型ダンパー方式ならびに高減衰ゴム方式などと比較して安価な方式であり, 実務設計においても本方式の適用性について検討する機会がさらに増加すると考えられる。それゆえ, 今後は, 本文で提示した減衰機能付きスペーサの等価ばね定数や等価粘性減衰係数の特性式ならびに本スペーサに対する設計用減衰評価式についても詳細な検討を進めて行きたいと考えている。ウェイクギャロッピングに対する減衰機能付きスペーサの適用性と設計上の留意点を論じた本論文が, 斜張橋の設計やケーブルの制振に携わる実務技術者にとって有用な技術

資料になることを心から願う次第である。

参考文献

- 1) 宇都宮英彦, 鎌倉米康: 近接する並列円柱の空気力学的挙動, 土木学会論文報告集, 第 336 号, pp.1~8, 1983 年 8 月。
- 2) 国土開発技術センター: 斜張橋ケーブルの耐風性に関する検討報告書, pp.55~64, 1989 年 2 月。
- 3) 米田昌弘: PC 斜張橋ケーブルの風による振動とその対策, コンクリート工学, Vol. 32, No. 5, pp.23~30, 1994 年 5 月。
- 4) 久保喜延, 加藤九州男, 金尾 稔: 直列二本円柱の空力弾性挙動と振動抑制に関する一考察—斜張橋複ケーブルの振動を対象として—, 土木構造・材料論文集, 第 4 号, pp.49~54, 1989 年 1 月。
- 5) Yoshimura, T., Savage, M.G., Wakasa, T., Urano, D. and T. Osaki: A DEVICE FOR SUPPRESSING WAKE GALLOPING OF STAY-CABLES FOR CABLE-STAYED BRIDGES, 第 12 回風工学シンポジウム論文集, pp.297~302, 1992 年 12 月。
- 6) 久保喜延, 前田 博, 加藤九州男, 佐々木 誠: 斜張橋用複数本ケーブルの耐風挙動, 第 13 回風工学シンポジウム論文集, pp.251~256, 1994 年 12 月。
- 7) 米田昌弘, 宮地真一, 望月秀之, 枝元勝哉: ウェイクギャロッピングの空力的制振法に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 504 号/VI-25, pp.127~136, 1994 年 12 月。
- 8) 和田克哉, 東田弘實, 恵谷舜吾, 高野晴夫: 横浜ベイブリッジの耐風対策, 橋梁と基礎, Vol. 23, No. 8, pp.43~48, 1989 年 8 月。
- 9) 藤澤伸光: 並列ケーブルのウェイクギャロッピングに関する一実験, 第 13 回風工学シンポジウム論文集, pp.239~244, 1994 年 12 月。
- 10) Miyata, T., Yamada, H. and T. Hojo: Experimental Study on Aerodynamic Characteristics of Cables with Patterned Surfaces, *Journal of Structural Engineering*, JSCE, Vol. 40 A, pp.1065~1076, March, 1994.
- 11) 米田昌弘, 宮地真一, 枝元勝哉, 望月秀之, 瀬戸内秀規: ノーマルならびにディンプル付き並列ケーブルに斜風が作用した場合のウェイクギャロッピング特性について, 土木学会論文集, 第 534 号/VI-30, pp.97~108, 1996 年 3 月。
- 12) 小川一志, 野上千秋, 斎藤敏雄: 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, pp.1212~1213, 1994 年 9 月。
- 13) 野村敏雄, 藤原章博, 伊藤雅保, 松本香保里: 並列ケーブルのウェイクギャロッピングに対する構造的制振対策—風洞実験による減衰機能付きスペーサの有効性に関する検討—, 土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集, I-718, pp.1436~1437, 1995 年 9 月。
- 14) 藤原章博, 樋口俊一, 野村敏雄, 伊藤雅保: 並列ケーブルのウェイクギャロッピングに対する構造的制振対策—実大ケーブル実験による減衰機能付きスペーサの有効性に関する検討—, 土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集, I-719, pp.1438~1439, 1995 年 9 月。
- 15) 久保明英, 河村哲男, 赤嶺文繁, 河村直彦: 斜張橋並列

- ケーブル耐風制振用ねじれ減衰スペーサー, 土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集, I-720, pp.1440~1441, 1995 年 9 月.
- 16) 松本香保里, 中井裕司, 中村取志, 平 喜彦: 並列ケーブルの減衰スペーサーに関する研究(その 2) - 実大ケーブルによるスペーサーの減衰機能に関する検討 -, 土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集, I-721, pp. 1442~1443, 1995 年 9 月.
- 17) 坂本良文, 北條哲男, 江口立也, 矢野守俊: 斜張橋用ブ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, 第 446 号/I-19, pp.215~223, 1992 年 4 月.
- 18) 柴田 碧, 原 亮一: うなりをともなう減衰波形の解析法, 生産研究, 第 17 巻, 第 8 号, pp.14~16, 1965 年 8 月.
(1996.1.23 受付)

A STUDY OF SPECIAL SPACER WITH DAMPING DEVICE FOR SUPPRESSING WAKE GALLOPING IN TANDEM CABLES OF CABLE-STAYED BRIDGES AND ITS APPLICATION TO FULL SCALE BRIDGE

Masahiro YONEDA, Hideki SETOUCHI, Akihiko YOSHIOKA,
Ikuko SHIMODA and Souichiro KAWAHARA

This paper deals with a study of special spacer with damping device developed for suppressing wake galloping in tandem cables of cable-stayed bridges. Numerical calculations demonstrating the damping characteristics due to the installation of the proposed damper are presented for the tandem cable model with the length of 100 m and 200m. It was ascertained that the structural damping characteristics with this type of damper for the out of phase cables would be very dependent on the torsional rigidity of the cable. Cable vibration tests on a full-scale bridge were also performed to verify the effectiveness of the proposed damping device.