

並列ケーブル用減衰機能付きスペーサの減衰付加特性に関する 2, 3 の考察

米田昌弘¹・瀬戸内秀規²

¹正会員 工博 近畿大学助教授 理工学部土木工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

²正会員 工修 川田工業(株) 技術開発本部技術研究室 (〒550-0014 大阪市西区北堀江 1-22-19)

並列ケーブル用減衰機能付きスペーサについては種々の方式が提案されているが、各方式の減衰付加特性を比較した議論はこれまでのところ十分にされていない。そこで、本文では、並列ケーブルのほぼ中間にスペーサ治具を介して減衰材を設置するタイプ (TYPE-M) と並列ケーブルの各表面に減衰材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 (TYPE-S) に着目し、ケーブル中心間隔やケーブル径を変化させて複素固有値解析を実施した。その結果、各方式の減衰付加特性とケーブル中心間隔の関係ならびにケーブルのねじれ剛性が及ぼす影響などを把握することができた。また、従来不明であった両者による減衰付加特性の差異も明確にすることができた。

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

1. まえがき

主要構造部材であるケーブルを並列に配置した斜張橋では、ウエ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)}。ウエイクギャロッピングはケーブル中心間隔 S とケーブル径 D の比 S/D の大きさによって特性が変化するが、通常、その励振力は風雨時に発生するレインパイブレーションと比較して強く、また、発生頻度も高いことから、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、ウエ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⁾。

ウエ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、最近ではウエイクギャロッピングの空力的な制振方法についても、吉村ら⁴⁾、久保ら⁵⁾、宮崎ら⁶⁾をはじめとする研究者によって実施され、数多くの有用な知見が報告されている。また、著者ら⁷⁾もウエ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エイクギャロッピング特性について検討している。その結果、ディンプル付きケーブルでは、超臨界域以下の $Re < 4.0 \times 10^4$ なるレイノルズ数に相当する風速域 ($D=78\text{mm}$ のケーブルでは 8m/s 程度以下の風速) において励振力の弱いウエイクギャロッピングが幾分発現するものの、ケーブル端部付近にダンパーを設置して若干の減衰を付加すれば十分に制振できることを報告している。

ところで、斜張橋ケーブルの端部付近に設置するダンパーとしては、すでにオイルダンパー方式、粘性せん断型ダンパー方式、高減衰ゴム方式などが開発されているが、最近では並列ケーブルを対象とした、より安価な減衰機能付きスペーサについても活発な研究が実施されている^{8)~11)}。減衰機能付きスペーサでは、当然のことながら、2本の並列ケーブルが同位相で振動するモード (同位相モード) に対しては減衰付加効果を期待できないが、実在斜張橋の並列ケーブルで発現したウエイクギャロッピングの観測結果や風洞試験結果によれば、並列ケーブルでは常に逆位相モードのウエイクギャロッピングが出現しているようである^{1,2)}。それゆえ、減衰機能付きスペーサは、ディンプルをはじめとする空力的な対策 (レインバ

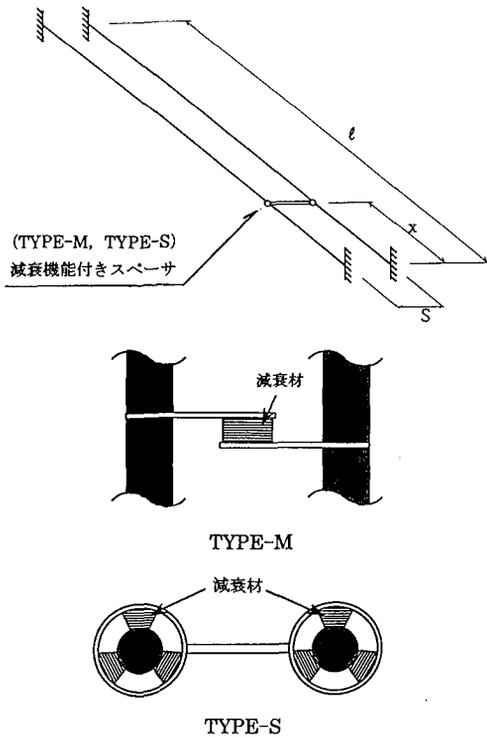


図-1 代表的な減衰機能付きスペーサ

イブレーションに加え、ウェイクギャロッピングにも有効な空力的対策)を施した並列ケーブルに対し、きわめて有効な減衰付加装置になり得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、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、上述したような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従来は考えられてきた。しかしながら、ウェイクギャロッピング特性は気流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、対数減衰率が $\delta=0.04$ 程度の構造減衰を付加すれば、風洞実験域内の 13m/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¹³⁾。それゆえ、減衰機能付きスペーサは、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。

減衰機能付きスペーサは、横浜ベイブリッジの並列ケーブルに発現した渦励振と思われる振動を制御する手法 (オイルダンパーとばねから構成されたスペーサ) としてはじめて採用されたが¹⁴⁾、現在では、図-1に示すように、並列ケーブルのほぼ中間にスペーサ治具を介して減衰材を設置するタイプ (以下、TYPE-M と記す) や並列ケーブルの各表面に減衰材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 (以下、TYPE-S と記す) など、種々の方式が考案されている。しかしながら、これらの減衰機能付きスペーサについては、個々の検討結果はすでに一部報告されているもの^{8)~11), 15)}、各方式の減衰付加特性を比較した議論は今までのところ十分になされていなかった。そこで、著者らは、上に示した代表的な2種類の減衰機能付きスペーサ (TYPE-M と TYPE-S) に着目して、ケーブル中心間隔やケーブル径を変化させて複素固有値解析し、両者の減衰付加特性を対比することとした。その結果、限定されたケーブルモデルに対する解析ではあるが、TYPE-M と TYPE-S による減衰付加特性の差異を明確にすることができたことから、ここにその結果を報告する。

2. 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 76mm)、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 $l=200\text{m}$ の細径ケーブル (以下、Cable200-D96 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、Cable200-D96 は、わが国で建設された最大級の2径間連続PC斜張橋 (195m+195m) 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、実在の鋼斜張橋で採用された並列ケーブルの諸元を参考に、ケーブル径が $D=155\text{mm}$ (鋼線外径は 135.3mm)、ケーブル張力が $T=430\text{tf}$ 、重量が $w=0.1007\text{tf/m}$ なる構造諸元を有する $l=100\text{m}$ 、 $l=200\text{m}$ の太径ケーブル (以下、それぞれ Cable100-D155, Cable200-D155 と記す) についても解析を実施することとした。それぞれの構造諸元を表-2、表-3にまとめる。

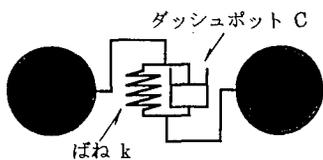


図-2 TYPE-M のモデル化

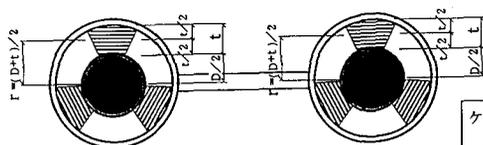


図-3 ケーブル中心から減衰材中心までの距離 r の説明

TYPE-M なる減衰機能付きスペーサは、図-2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 $x=50\text{m}$ なる位置に単独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 Cable200-D96 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($x=50\text{m}$)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。

一方、TYPE-S なる減衰機能付きスペーサは、ケーブル 1 本当たりのせん断変形にともなう減衰材のばね定数と粘性減衰係数をそれぞれ k, C とすれば、以下のようにねじれ変形に対するばね定数 k_θ と粘性減衰係数 C_θ に置換することができる。

$$k_\theta = r^2 \times k \quad (1)$$

$$C_\theta = r^2 \times C \quad (2)$$

ここに、 r は図-3に示すようにケーブル中心から減衰材中心までの長さを表し、 t を減衰材の厚みとすれば $r=(D+t)/2$ で表示される。したがって、TYPE-S なる減衰機能付きスペーサに対しては、スペーサ取り付け位置での各ケーブル節点 ($\ell=200\text{m}$ のケーブルでは、端部から $x=50\text{m}$ の位置) と水平つなぎ材の端節点間に k_θ と C_θ の諸

表-1 Cable200-D96 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 Cable100-D155 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)
100.0	155.0	135.3	430.0	0.1007	1.023

表-3 Cable200-D155 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	430.0	0.1007	0.511

表-4 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 (Cable100-D155)
CASE-1J	$3.28 \times 10^{-8} \text{ m}^4$	$3.29 \times 10^{-7} \text{ m}^4$
CASE-3J	$9.83 \times 10^{-8} \text{ m}^4$	$9.87 \times 10^{-7} \text{ m}^4$
CASE-5J	$1.64 \times 10^{-7} \text{ m}^4$	$1.64 \times 10^{-6} \text{ m}^4$
CASE-7J	$2.29 \times 10^{-7} \text{ m}^4$	$2.30 \times 10^{-6} \text{ m}^4$
CASE-9J	$2.95 \times 10^{-7} \text{ m}^4$	$2.96 \times 10^{-6} \text{ m}^4$
CASE-20J	$6.55 \times 10^{-7} \text{ m}^4$	$6.58 \times 10^{-6} \text{ m}^4$

元を入力し、複素固有値解析を実施すれば、本方式によって付加される構造減衰を算出できる。

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、細径ケーブル (Cable200-D96) と太径ケーブル (Cable100-D155, Cable200-D155) のねじれ定数を表-4に示す。ここに、CASE-1J, CASE-3J, CASE-5J, CASE-7J, CASE-9J および CASE-20J は、ケーブルの鋼線外径 (Cable200-D96 の鋼線外径は 76mm, Cable100-D155 の鋼線外径は 135.3mm) 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1%, 3%, 5%, 7%, 9%および20%なる値をケーブルのねじれ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(16)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。

ところで、TYPE-MとTYPE-Sで使用する減衰材としては、高減衰ゴムやアスファルト系の粘弾性体などが考えられるが、これらの材料はいずれも減衰付加材としてのみならずばね材としても機能し、それぞれの特性は、程度の差こそあるものの、温度、周波数、せん断ひずみに依存することが知られている。したがって、厳密には、温度条件を設定し、対象としたケーブルの固有振動数(周波数)ごとに、設計で想定したせん断ひずみに対応するばね定数と粘性減衰係数を算出しなければならない。しかしながら、このような検討は、異なる減衰機能付きスペーサによる減衰付加特性の対比を目的とした本研究では煩雑さが増すばかりで、本質を評価できない可能性もある。そこで、減衰機能付きスペーサではばね定数をできるだけ小さく設定した方が減衰効率が良くなること、また、ばね定数は材料の断面積や厚さを変化させることによって調整できることを考え合わせ、本研究ではばね定数を一定とし、粘性減衰係数のみを変化させるものとした。すなわち、本解析にあたっては、TYPE-MとTYPE-Sで使用する減衰材のばね定数 k としてはいずれも $k=1.0\text{tf/m}$ なる値(TYPE-Sでは $k_0=r^2 \times k$ なる関係から k_0 を逆算して入力)を仮定し、粘性減衰係数 C を $C=0.1 \sim 1.0\text{tf}\cdot\text{s/m}$ (TYPE-Sでは $C_0=r^2 \times C$ なる関係から C_0 を計算して入力)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、 $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$ の粘弾性体を、温度が 10°C 、加振周波数が 1.0Hz ($\ell=200\text{m}$ 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 5mm なる条件のもとで得られた実験値にほぼ対応することを参考までに付記しておく。

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最低次の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¹⁾。

それゆえ、以下の検討では、逆位相の鉛直1次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、次章以降においては鉛直の逆位相1次振動モードを単に1次振動モードあるいは1次モードと記すこととしている。

3. 複素固有値解析結果と考察

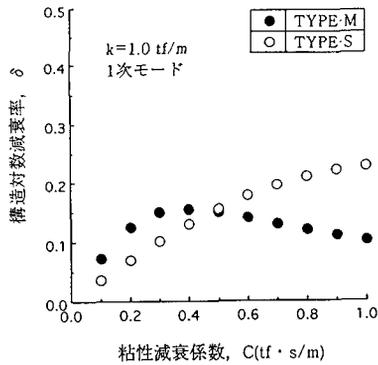
(1) 細径ケーブルでの対比

a) ねじれ剛性比を5%とした場合

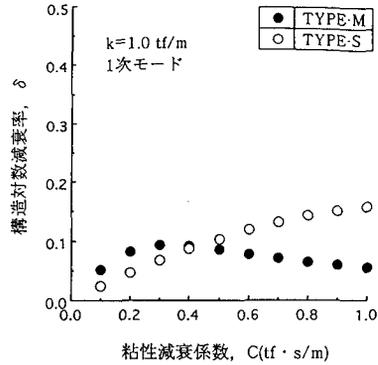
文献(10)では、ケーブル径が $D=83.5\text{mm}$ 、ケーブル張力が $T=165\text{ton}\cdot\text{f}$ 、ケーブル長が $\ell=98.43\text{m}$ の実大ケーブル模型に静的ねじれモーメントを載荷したところ、ケーブルのねじれ剛性は $5.18 \times 10^6 \text{kgf}\cdot\text{cm}^2$ であったことを報告しているが、この値は鋼線外径と等しい鋼棒が有するねじれ剛性値のほぼ4%に対応する。そこで、まず、Case-5Jなる場合を想定し、 $\ell=200\text{m}$ なる細径ケーブル(Cable200-D96)の $x=50\text{m}$ なる位置にTYPE-M、TYPE-Sなる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することとした。ただし、TYPE-Sの解析にあたっては、各ケーブルの減衰材の厚みを実橋ケーブルへの適用性を考えて $t=30\text{mm}$ と仮定し、 $r=(96+30)/2=63\text{mm}$ として k_0 と C_0 を算出するものとした。ケーブル中心間隔を $S=2.0D, 2.5D, 3.0D, 4.0D$ と変化させた場合に付加される、1次モードの構造対数減衰率 δ をそれぞれ比較して図-4に示す。

図-4からわかるように、TYPE-S(図中の○記号)では、 $S=2.0D \sim 4.0D$ なるいずれのケーブル中心間隔においても、付加される構造減衰は粘性減衰係数が大きくなるにしたがって増加し、 $C=0.4 \sim 0.5\text{tf}\cdot\text{s/m}$ 程度以上ではTYPE-M(図中の●記号)よりも大きな値を示している。すなわち、TYPE-Sは、粘性減衰係数の設定値に制約を設けないという条件のもと、TYPE-Mよりも大きな減衰をケーブルに付加できるものと言える。

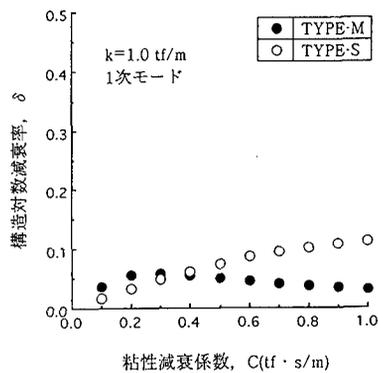
これに対し、TYPE-Mでは、 $S=2.0D \sim 4.0D$ なるいずれのケーブル中心間隔においても、付加される構造減衰は $C=0.3 \sim 0.4\text{tf}\cdot\text{s/m}$ なる粘性減衰係数で最大値(極大値)を呈し、これより大きな粘性減衰係数では逆に低下する結果となっている。このように、TYPE-Mなる減衰機能付きスペーサは、TYPE-Sなる減衰機能付きスペーサと



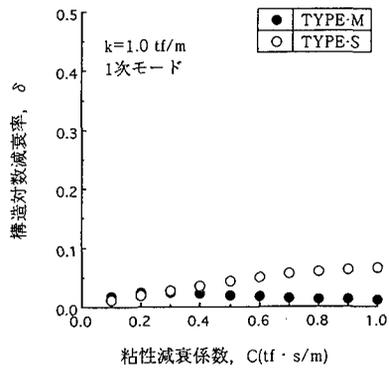
(a) S=2.0D



(b) S=2.5D



(c) S=3.0D



(d) S=4.0D

図-4 減衰付加特性とケーブル中心間隔の関係
(Cable200-D96, x=50m, Case-5J)

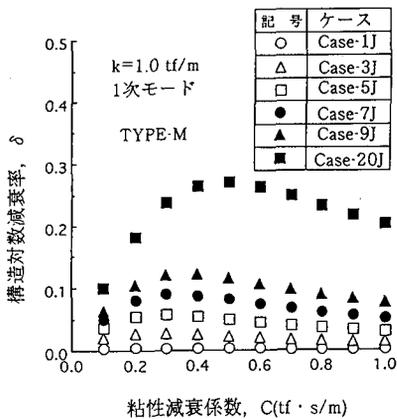


図-5 TYPE-Mによって付加される構造減衰とねじれ剛性の関係
(Cable200-D96, x=50m, S=3D)

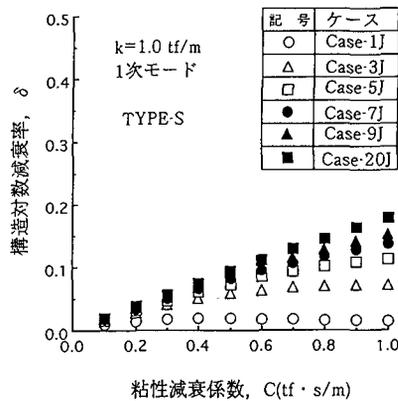
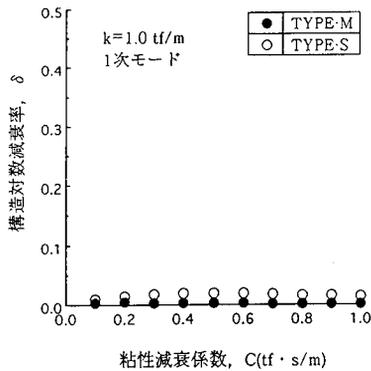
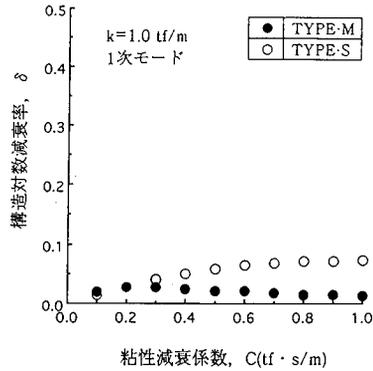


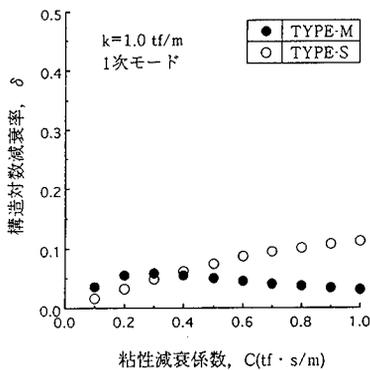
図-6 TYPE-Sによって付加される構造減衰とねじれ剛性の関係
(Cable200-D96, x=50m, S=3D)



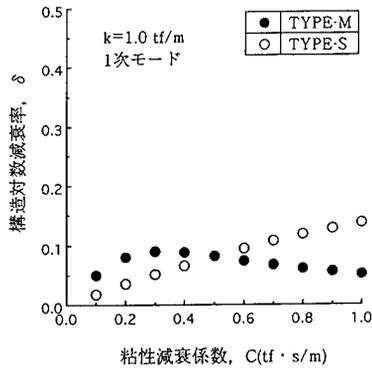
(a) Case-1J



(b) Case-3J



(c) Case-5J



(d) Case-7J

図-7 TYPE-SとTYPE-Mによって付加される構造減衰の比較
(Cable200-D96, $x=50\text{m}$, $S=3D$)

比較し、 $C \leq 1.0\text{tf}\cdot\text{s/m}$ の範囲に最適粘性減衰係数（構造減衰が最大となる場合の粘性減衰係数）が明確に存在することが特徴の一つと言える。これは並列ケーブルのほぼ中間にスペーサ治具を介して減衰材を設置した TYPE-M では、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 TYPE-S と比較し、より小さい粘性減衰係数からダンパー位置におけるモード振幅が低下したためである。また、 $S=2.0D$ の場合、TYPE-M によって付加される構造減衰は、 $C \leq 0.5\text{tf}\cdot\text{s/m}$ の範囲において TYPE-S よりも大きくなっている。この傾向はケーブルの中心間隔が広がるにしたがって低下するものの、 $S \leq 3D$ の場合には明確に認められる特性である。すなわち、Case-5J とした解析結果から、ケーブル中心間隔が $S \leq 3D$ なる並列ケーブルで粘性減衰係数もできるだけ小さく

設定するという条件のもと、TYPE-M は TYPE-S よりも大きな減衰をケーブルに付加できると言える。

b) ねじれ剛性比を変化させた場合

上述の検討では、ケーブルのねじれ剛性比を 5% と仮定していた。しかしながら、直径が 80mm 程度の細径ケーブルが有するねじれ剛性比（鋼線外径に等しい鋼棒が有するねじれ剛性との比率）は 4%～5% よりもさらに小さい場合があり得るとの報告¹⁵⁾もあるように、ケーブルのねじれ剛性に関してはなお不明な点も多く、今後とも継続的なデータの蓄積が必要である。このような状況を考え、 $S=3D$ （ウェイクギャロッピングの励振力が強いケーブル中心間隔）となるように並列配置された Cable200-D96 を対象とし、ケーブル端部から $x=50\text{m}$ の位置に TYPE-M、TYPE-S

なる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、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を実施した。TYPE-M および TYPE-S によって CASE-1J, CASE-3J, CASE-5J, CASE-7J, CASE-9J, CASE-20J なる場合に付加される、1 次モードの構造対数減衰率 δ をそれぞれ図-5, 図-6 に示す。

図-5 より、TYPE-M ではケーブルのねじれ剛性比の増加に比例して、付加される構造減衰も大きくなっていることがわかる。これに対し、TYPE-S では、図-6 からわかるように、ケーブルのねじれ剛性比が大きくなるにしたがって付加される構造減衰は増加しているものの、増加の程度はケーブルのねじれ剛性比が 5% 以上になるときわめて小さくなっている。すなわち、文献 11) にも一部報告されているように、TYPE-S では、ケーブルのねじれ剛性比が 5% 以上になれば、付加される構造減衰はケーブルのねじれ剛性にあまり依存せず、実務上は 5% における値と概ね等しい特性を有すると考えて差し支えない。また、図-7 は TYPE-M と TYPE-S によって付加される構造減衰を Case-1J, Case-3J, Case-5J, Case-7J について対比したものであるが、この図から $S=3D$ なるモデル (Cable200-D96) に対する減衰付加特性は、ケーブルのねじれ剛性比が 3% より小さい場合には TYPE-S の方が有利であるのに対し、ケーブルのねじれ剛性比が 5% 以上になると比較的小さな粘性減衰係数の範囲において TYPE-M の方が付加される構造減衰が大きく有利であると言える。

なお、TYPE-S によって付加される構造減衰の増加割合が 5% 以上のねじれ剛性比できわめて小さくなったのは、図-8 に示したようにスペーサ取付け位置におけるケーブル節点のねじれ角モード (この値が 1.0 に近づくにしたがって、減衰機能付きスペーサの寄与が飽和する) がねじれ剛性比 5% ですすでに 0.83 なる値を有し、これ以上のねじれ剛性比では除々に増加する傾向を示していることから理解される。

(2) 太径ケーブルでの対比

前節では $\ell=200\text{m}$ の細径ケーブル (Cable200-D96) を対象として詳細な検討を行った。しかしながら、減衰機能付きスペーサによる減衰付加特性はケーブル径によっても変化すると考えられることから、ここではケーブル径が $D=155\text{mm}$ で

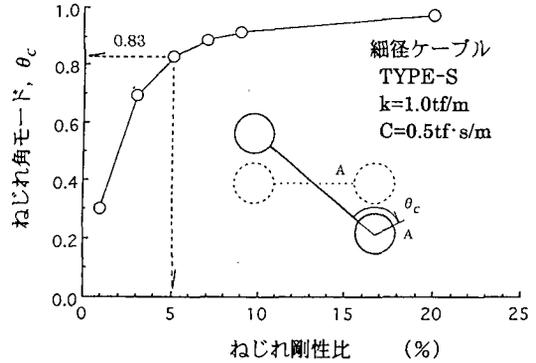


図-8 ケーブルのねじれ剛性比とねじれ角モードの相対差の関係 (Cable200-D96, $x=50\text{m}$, $S=3D$)

ケーブル長がそれぞれ $\ell=100\text{m}$, $\ell=200\text{m}$ なるモデル (Cable100-D155, Cable200-D155) についても、各スペーサ方式の減衰付加特性を対比することとした。ただし、TYPE-S の解析にあたっては、減衰材の厚みを前節と同様に $t=30\text{mm}$ と仮定し、 $r=(155+30)/2=92.5\text{mm}$ として k_0 と C_0 を算出するものとした。

a) $S=3D$ の場合

Cable200-D155 ($S=3D$) を対象とし、 $x=50\text{m}$ なる位置に TYPE-M および TYPE-S なる減衰機能付きスペーサをそれぞれ単独設置した場合に付加される構造減衰を、ケーブルのねじれ剛性比をパラメータとして計算した。各スペーサ方式によって付加される 1 次モードの構造対数減衰率 δ をそれぞれ図-9, 図-10 に示す。図-9 から、TYPE-M では、前節の結果 (Cable200-D96 を対象とした解析結果) と同様に、ねじれ剛性比の増加にともなって付加される構造減衰も大きくなっていることがわかる。これに対し、TYPE-S では、図-10 からわかるように、ケーブルのねじれ剛性比を 1%~20% なる範囲で変化させても、付加される構造減衰はいずれもほぼ等しいものとなっている。これは、表-1 からわかるように、太径ケーブル ($D=155\text{mm}$) のねじれ定数は CASE-1J でも $3.29 \times 10^{-7}\text{m}^4$ と細径ケーブル ($D=96\text{mm}$) の CASE-10J ($3.28 \times 10^{-7}\text{m}^4$) とほぼ等しいねじれ定数を有し、図-6 に対する知見からこれ以上ねじれ剛性を大きくしても構造減衰が増加しなかったためと考えられる。すなわち、減衰機能付きスペーサによって付加される構造減衰は、ケーブル長が同じであればねじれ剛性比 (鋼線外径に等しい鋼棒が有するねじれ剛性との比率) よりもケ

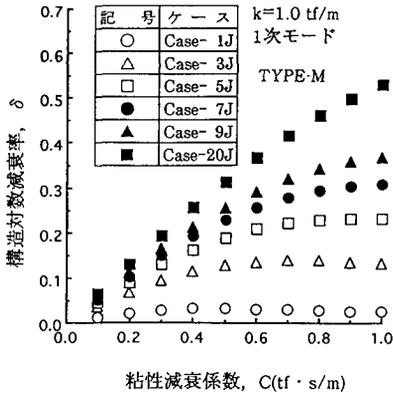


図-9 TYPE-Mによって付加される構造減衰とねじれ剛性の関係
(Cable200-D155, $x=50m$, $S=3D$)

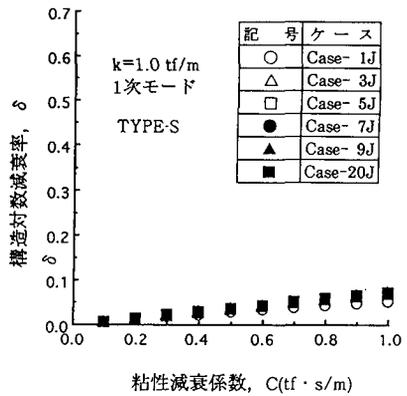


図-10 TYPE-Sによって付加される構造減衰とねじれ剛性の関係
(Cable200-D155, $x=50m$, $S=3D$)

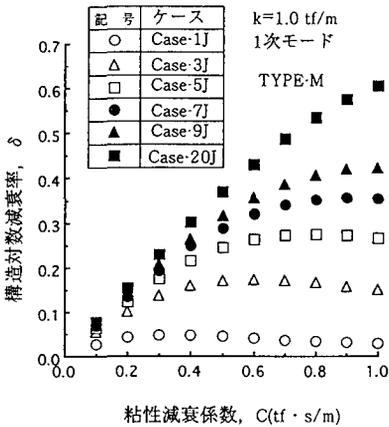


図-11 TYPE-Mによって付加される構造減衰とねじれ剛性の関係
(Cable100-D155, $x=25m$, $S=3D$)

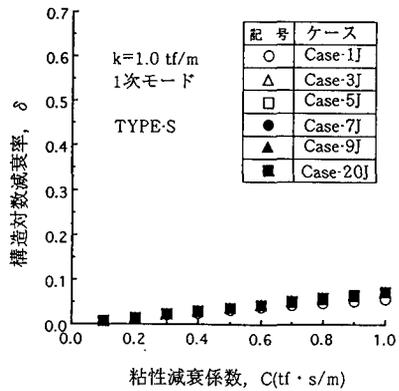


図-12 TYPE-Sによって付加される構造減衰とねじれ剛性の関係
(Cable100-D155, $x=25m$, $S=3D$)

ケーブルが有するねじれ剛性そのものの大きさに強く依存すると言える。したがって、 $S=3D$ の Cable200-D155 では、ケーブルのねじれ剛性比がたとえ 1% (ねじれ定数は $3.29 \times 10^{-7} m^4$) であっても、 $C=0.4tf \cdot s/m$ 程度以下なる粘性減衰係数の範囲で、また、ねじれ剛性比が 2%~3% (ねじれ定数では $6.58 \times 10^{-7} m^4 \sim 9.87 \times 10^{-7} m^4$) 以上であれば解析を実施した $C \leq 1.0tf \cdot s/m$ なる粘性減衰係数の範囲で、TYPE-Mの方がTYPE-Sよりも付加される減衰が大きくなっている。

なお、図-11と図-12は、補足的に、Cable100-D155 ($S=3D$) を対象とし、 $x=25m$

なる位置にTYPE-MおよびTYPE-Sなる減衰機能付きスペーサをそれぞれ単独設置した場合の結果を示したものである。この場合には、ケーブルの中心間隔とスペーサの取り付け位置が等しい ($S=3D$, $x/l=0.25$) ことから、Cable200-D155 ($S=3D$) とほぼ同じ結果を示していることがわかる。すなわち、Cable200-D155 ($S=3D$) で得られた知見は、Cable100-D155 ($S=3D$) に対しても成立することを述べておく。

b) $S=4D$ の場合

ケーブル長が $l=200m$ の Cable200-D155 ($S=4D$) を対象とし、 $x=50m$ なる位置にTYPE-M

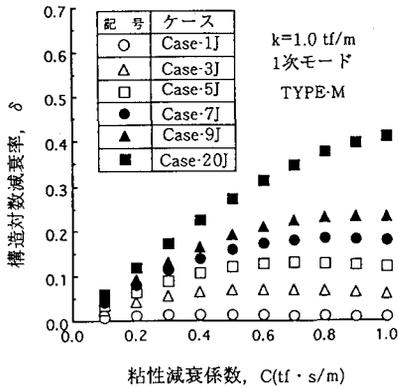


図-1 3 TYPE-M によって付加される構造減衰とねじれ剛性の関係
(Cable200-D155, $x=50\text{m}$, $S=4D$)

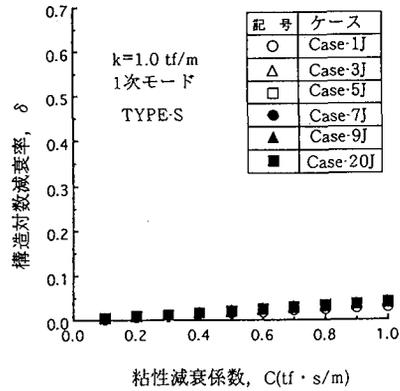


図-1 4 TYPE-S によって付加される構造減衰とねじれ剛性の関係
(Cable200-D155, $x=50\text{m}$, $S=4D$)

および TYPE-S なる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も同様の複素固有値解析を実施した。各スペーサ方式によって付加される 1 次モードの構造対数減衰率 δ をそれぞれ図-1 3, 図-1 4 に示す。これらの結果を図-9, 図-1 0 と比較すればわかるように、いずれのスペーサについても、Cable200-D155 ($S=4D$) では中心間隔が広がったことに起因して上述の Cable200-D155 ($S=3D$) よりも付加される構造減衰は幾分か小さくなっている。しかしながら、ねじれ剛性比が 2%~3% (ねじれ定数では $6.58 \times 10^{-7} \text{m}^4 \sim 9.87 \times 10^{-7} \text{m}^4$) 以上であれば、解析を実施した $C \leq 1.0 \text{tf} \cdot \text{s/m}$ なる粘性減衰係数の範囲で、TYPE-M の方が TYPE-S よりも付加される減衰が大きく有利であると言える。

4. まとめ

本論文は、代表的な 2 種類の並列ケーブル用減衰機能付きスペーサ (TYPE-M と TYPE-S) に着目し、細径 ($D=96\text{mm}$) と太径 ($D=155\text{mm}$) ケーブルに付加されるそれぞれの構造減衰を対比して両者の減衰付加特性の差異を検討したものである。得られた主要な結果を以下にまとめる。

(1) 細径ケーブル (Cable200-D96) のねじれ剛性比を 5% に仮定して複素固有値解析を実施した。その結果、TYPE-S では、 $S=2.0D \sim 4.0D$ なるいずれのケーブル中心間隔においても、付加される構造減衰は粘性減衰係数が大きくなるにしたがって増加した。これに対し、TYPE-M では、TYPE-S と相違し、 $C \leq 1.0 \text{tf} \cdot \text{s/m}$ の範囲に構造減衰が最

大となる最適粘性減衰係数が存在するという特徴を示した。

(2) ケーブルのねじれ剛性比を 5% と仮定すれば、TYPE-S は、細径ケーブル (Cable200-D96) で粘性減衰係数の設定値に制約を設けないという条件のもと、TYPE-M よりも大きな減衰をケーブルに付加できる。これに対し、TYPE-M は、ケーブル中心間隔が $S \leq 3D$ で粘性減衰係数をできるだけ小さく設定するという条件 ($C=0.4 \sim 0.5 \text{tf} \cdot \text{s/m}$ 程度以下) のもと、TYPE-S よりも大きな減衰をケーブルに付加できる。

(3) $S=3D$ の細径ケーブル (Cable200-D96) について、ケーブルのねじれ剛性比をパラメータとして複素固有値解析を実施した。その結果、TYPE-S では、ケーブルのねじれ剛性比が 3% 以下の場合に TYPE-M よりも大きな減衰が得られた。これに対し、ケーブルのねじれ剛性比が 5% 以上になると、比較的小さな粘性減衰係数の範囲 (ねじれ剛性比が 5% では $C \leq 0.3 \text{tf} \cdot \text{s/m}$ なる範囲) において TYPE-M の方が TYPE-S よりも減衰が大きくなることがわかった。

(4) $S=3D$ の太径ケーブル (Cable200-D155) についても、同様に、ケーブルのねじれ剛性比をパラメータとして複素固有値解析を実施した。その結果、TYPE-M によって付加される減衰は細径ケーブルの場合よりもさらにねじれ剛性比の増加に比例して大きくなった。これに対し、TYPE-S によって付加される減衰は細径ケーブルの場合よりも低下しており、また、ケーブルのねじれ剛性比を 1%~20% なる範囲で変化させても付加される構造減衰はいずれもほぼ等しいものとなってい

た。

(5) ケーブルのねじれ剛性比やその他の解析条件が同一であっても、太径ケーブルと細径ケーブルで減衰付加特性が相違したのは、減衰付加特性がケーブルのねじれ剛性比よりもケーブルが有するねじれ剛性そのものの大きさに強く依存するためと考えられる。

(6) $S=3D$ の太径ケーブル (Cable200-D155) では、1%のねじれ剛性比に相当するねじれ定数 ($3.29 \times 10^{-7} \text{m}^4$) しか期待できなくても $C=0.4 \text{tf} \cdot \text{s/m}$ 程度以下の粘性減衰係数で、また、2%~3%程度以上のねじれ剛性比に相当するねじれ定数 ($6.58 \times 10^{-7} \text{m}^4 \sim 9.87 \times 10^{-7} \text{m}^4$ 以上) を期待できれば、解析を実施した $C \leq 1.0 \text{tf} \cdot \text{s/m}$ の粘性減衰係数で、TYPE-M の方が TYPE-S よりも付加される減衰が大きくなった。したがって、実務設計にあたっては、ねじれ剛性の大きな太径ケーブルに対して TYPE-M を採用すれば、その特徴を有効に活用できると考えられる。

減衰機能付きスペーサは同位相モードに対する減衰付加効果を期待できないことから、同位相モードのレインバイレーションが発現するような場合には別途の対策 (たとえば、弾性シール材の充填やケーブルダンパーの設置) を講じなければならない。また、減衰機能付きスペーサの形式選定にあたっては、本文に示したようにケーブルのねじれ剛性が最も重要なパラメーターとなる。それゆえ、ケーブルのねじれ剛性については、今後とも継続的なデータの蓄積が必要であろう。しかしながら、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。種類の異なる減衰機能付きスペーサの減衰付加特性と適用性を対比した本論文が、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) たとえば, 横山功一, 日下部毅明: 斜張橋ケーブルの風による振動と対策, 橋梁と基礎, Vol.23, No.8, pp.75~84, 1989年8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) 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。
- 5) 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。
- 6) 鹿島主央, 宮崎正男: 斜張橋並列ケーブルのウェイクギャロッピングと空力制振対策, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, I-717, pp.1434~1435, 1995年9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の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) 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。
- 9) 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。
- 10) 松本香保里, 中井裕司, 中村収志, 平 喜彦: 並列ケーブルの減衰スペーサに関する研究(その2)-実大ケーブルによるスペーサ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。
- 11) 小川一志, 野上千秋, 久保明英, 河村哲男: 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), 構造工学論文集, Vol.42A, pp.555~563, 1996年3月。
- 12) 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。
- 13) 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ブル付き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．

- 14) 和田克哉，東田弘實，惠谷舜吾，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．
- 15) 米田昌弘，瀬戸内秀規，吉岡昭彦，下田郁夫，川

原壮一郎：粘弾性体を利用した並列ケーブル用減衰機能付きスパーサとその実橋ケーブルへの適用に関する研究，土木学会論文集，第 553 号／VI-33，pp.129～142，1996 年 12 月．

- 16) 坂本良文，北條哲男，江口立也，矢野守俊：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，第 446 号／I-19，pp.215～223，1992 年 4 月．

(1997.1.9 受付)

SOME CONSIDERATIONS ON SPECIAL SPACERS WITH DAMPING DEVICE FOR SUPPRESSING WAKE GALLOPING IN TANDEM CABLES OF CABLE-STAYED BRIDGES

Masahiro YONEDA and Hideki SETOUCHI

This paper deals with two kinds of special spacers with damping device (TYPE-S,TYPE-M) for suppressing wake galloping in tandem cables of cable-stayed bridges. It was ascertained that the structural damping characteristics with these types of dampers for the out of phase cables would be very dependent on the torsional rigidity of the cable. Effectiveness of TYPE-S and TYPE-M were also compared with respect to diameter of the cables. From these results, some useful informations are obtained for the vibration control of wake galloping by the installation of special spacers with damping device.