

ダブルケーブル方式を採用した斜張橋に対するケーブル制振用ダンパーの設置法に関する研究

INSTALLATION OF VISCOUS-SHEAR DAMPER FOR SUPPRESSING WIND-INDUCED VIBRATIONS

APPEARED IN PAIR OF PARALLEL STAY CABLES OF A CABLE-STAYED BRIDGE

米田昌弘*・内海 靖**・伊関治郎***

By Masahiro YONEDA, Yasushi UCHIUMI and Jiroh ISEKI

This paper deals with the installation of viscous-shear damper for suppressing wind-induced cable vibrations appeared in pair of parallel stay cables for a cable-stayed bridge. The installation method of the damper for a pair of parallel stay cables connected each other with special jigs is discussed with respect to the cable diameter to spacing ratio. Wake galloping of the cables was observed frequently on the prestressed concrete cable-stayed bridge with main span length of 145 m. Viscous-shear damper has been installed near the lower end of each cable to suppress the vibrations. It is noticed that wake galloping could be suppressed by the installation of dampers.

1. まえがき

近年における斜張橋の長径間化には目覚ましいものがあり、施工実績も増加の一途をたどっている。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やポリエチレン管被覆された太径ケーブルの一般化およびダブルケーブル方式の増加とともに、レインバイブレーションやウェイクギャロッピングと呼ばれる、風によるケーブル自身の振動が大きな問題として取り挙げられており、初期の設計段階からケーブル振動の対処方法^{1)・2)}について検討する機会も多くなっている。

従来、わが国では斜張橋ケーブルの風による振動に対処する方法としてステンレスワイヤや特殊な治具でケーブルどうしを結合する方法が一般に採用されてきた。しかしながら、荒津大橋³⁾でオイルダンパー方式が採用されたのを契機に、最近ではオイルダンパーや粘性せん断型ダンパーをケーブル端部付近に設置するダンパー方式が斜張橋ケーブルの主要な制振方法として位置づけられている。実際、上述の荒津大橋と天保山大橋⁴⁾ではオイルダンパー方式が、また、幸魂大橋⁵⁾、東名足柄橋⁶⁾、青森ベイブリッジ、毛見一号線橋梁⁷⁾、碓氷橋、羽田スカイアーチなど、施工中の橋梁まで含めるとすでに10橋以上にも及ぶ斜張橋で粘性せん断型ダンパーが、斜張橋のケーブル制振対策として採用されるに至っている。

風によるケーブル振動は、ケーブル面内（鉛直）方向成分が卓越するものの、ケーブル面外（水平）方向

* 工博 川田工業株式会社技術本部振動研究室長 (〒550 大阪市西区北堀江1-22-19)

** 川田工業株式会社技術本部長大橋部係長 (〒114 東京都北区滝野川1-3-11)

*** オイレス工業株式会社第二事業部副事業部長 (〒105 東京都港区芝大門1-3-2)

成分を無視できないこともあり、全体として楕円的な挙動を示す場合のことが知られている。それゆえ、オイルダンパー方式では、1本のケーブルに対して2個のオイルダンパーを設置するのが通常である。一方、粘性体のせん断抵抗を利用した粘性せん断型ダンパーはその構造から面内と面外の2方向の微振動に対処できることから、1本のケーブルに対して1個の粘性せん断型ダンパーを設置すれば良い。それゆえ、粘性せん断型ダンパーが初めて採用された幸魂大橋でも、ダブルケーブルを構成する各ケーブルに対し、それぞれ1個の粘性せん断型ダンパーが設置され、風によって発現したウェイクギャロッピングを制振している⁵⁾。また、碓氷橋でも同様にダブルケーブルを構成するそれぞれのケーブルに粘性せん断型ダンパーを設置しているが、一方でダブルケーブル方式が採用された斜張橋では、この方式の増加とともに、並列配置された2本のケーブルを特殊な治具で拘束した後、1個の粘性せん断型ダンパーで風によるケーブル振動に対処しようとする手法も考えられ、PC斜張橋である青森ベイブリッジではすでにこのような思想のもとで、写真-1に示すように粘性せん断型ダンパーが設置され、風による振動に対処されている。



写真-1 青森ベイブリッジでの設置状況

ところで、PC斜張橋ではポリエチレン管被覆された50mm～100mm程度の細径ケーブルが比較的狭い間隔で並列配置されることも多いが、このような形式でも風による激しいケーブル振動が報告されており、ケーブルの制振法についての検討が太径ケーブルを採用した場合と同様に重要な課題となっている。細径ケーブルを採用する場合、一般には構造設計上から100本程度以上の非常に多くのケーブルが配置されることも多く、青森ベイブリッジで採用されたダブルケーブルに1個の粘性せん断型ダンパーを設置する方法（青森ベイブリッジ方式）がダンパーの設置個数を低減させる目的から検討されることも予想される。しかしながら、2本の並列配置されたケーブルに発現が予想されるウェイクギャロッピングは、ケーブル間隔 S_0 とケーブル径 D_0 の比 S_0/D_0 の大きさによってその特性が変化することが知られている¹⁾。また、端部付近を治具で拘束した並列配置ケーブルに1個のダンパーを設置した場合、ケーブル間隔 S_0 のみならずダンパーのケーブル取り付け位置からダンパー作用点までの距離 L の大きさによってダンパーによる減衰付加効果も変化するものと予想される。それゆえ、ケーブル間隔 S_0 とケーブル径 D_0 の比 S_0/D_0 およびダンパーのケーブル取り付け位置からダンパー作用点までの距離 L の大きさに着目した、ダブルケーブル方式に対するダンパーの設置法に関する研究は、ケーブル制振対策を検討する実務技術者にとってきわめて重要でかつ有用なことから考えられる。

このような観点から、本文では、まず、粘性せん断型ダンパーの基本特性について記述した後、ダブルケーブル方式を採用した斜張橋のケーブル制振法について、端部付近を治具で拘束した2本の並列配置ケーブルに1個の粘性せん断型ダンパーを設置する手法の妥当性とその適用限界について検討する。また、ダブルケーブルに1個の粘性せん断型ダンパーを設置した場合における減衰付加効果の簡易推定法を示すとともに、多数の細径ケーブルが並列配置された実在のPC斜張橋を対象としたケーブル制振対策事例を報告し、実務技術者のための設計資料を提供する。

2. 粘性せん断型ダンパーの基本特性

粘性せん断型ダンパーの基本特性についてはすでに詳細を報告^{8)・9)}しているので、ここでは本論文の議論の展開に必要な記述のみにとどめる。

(1) 等価粘性減衰係数

ケーブル制振用粘性せん断型ダンパーの等価粘性減衰係数は、温度の上昇に伴って小さくなり、また、振幅 a が $a \leq 0.47\text{cm}$ の場合には振幅が小さいほど大きくなるという特性を有する。室内実験より得られた、振幅 a が $a \leq 0.47\text{cm}$ なる場合の等価粘性減衰係数算定式を以下に示す。

$$C_e = 0.85e^{-0.043t} \cdot S \cdot a^{0.34} \cdot d^{-0.5} \cdot a^{-0.5} \cdot \omega^{-0.5} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 C_e は等価粘性減衰係数($\text{kg} \cdot \text{s}/\text{cm}$)、 t は粘性体の温度($^{\circ}\text{C}$)、 d は粘性体の厚さ(cm)、 S は粘性せん断を期待する断面積(cm^2)、 a は振幅(cm)、 ω は固有円振動数(rad/s)である。

なお、振幅 a が $a > 0.47\text{cm}$ なる場合には振幅依存性は認められず、次式で等価粘性減衰係数を算定すれば良い。

$$C_e = 0.66e^{-0.043t} \cdot S \cdot d^{-0.5} \cdot a^{-0.5} \cdot \omega^{-0.5} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2) 等価ばね定数

粘性せん断型ダンパーのばね剛性は、粘性体の温度が高いほど、加振振動数が低いほど、また、振動振幅が大きくなるほど、小さくなるという特性を有する。室内実験より得られた、振幅 a が 0.5cm 程度以下なる場合の等価ばね定数算定式を以下に示す。

$$K_e = 0.46 \times e^{-0.043t} \cdot S \cdot \omega^{0.45} \cdot d^{-1.0} \cdot a^{-0.35} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 K_e は粘性せん断型ダンパーの等価ばね定数(kg/cm)である。

(3) 等価ばね定数と等価粘性減衰係数の関係式

式(1)と式(3)より、振動振幅が 0.5cm 程度以下なる場合、粘性せん断型ダンパーの等価ばね定数 K_e と等価粘性減衰係数 C_e には以下の関係式が成立することがわかる。

$$K_e = 0.54d^{-0.5} \cdot a^{-0.19} \cdot \omega^{0.95} \cdot C_e \quad \dots\dots\dots (4)$$

粘性せん断型ダンパーの製作にあたっては、粘性体の厚さ d として $d=1.0\text{cm}$ なるタイプの採用を基本としている。それゆえ、 $d=1.0\text{cm}$ なる基本タイプに対しては次の関係式が成立する。

$$K_e = 0.54a^{-0.19} \cdot \omega^{0.95} \cdot C_e \quad \dots\dots\dots (5)$$

したがって、制振対象とするケーブルの固有円振動数 ω と粘性せん断型ダンパーの設計基準振幅 a が与えられれば、粘性せん断型ダンパーの等価ばね定数 K_e は等価粘性減衰係数 C_e から決定できることになる。

なお、式(1)～式(5)はケーブル面内方向(鉛直方向)とケーブル面外方向(水平方向)のそれぞれに適用できる実験式であることを付記しておく。

3. 複素固有値解析による検討

(1) 対象としたケーブルとその構造諸元

図-1に示す1面吊り7段ケーブルの2径間連続鋼斜張橋(190m+190m)では、下から3段目ケーブル(C5ケーブル)が張り渡された段階から、ウェイクギャロッピングと考えられるケーブル振動がしばしば観測され、ダブルケーブルのそれぞれに粘性せん断型ダンパーを設置する方式でケーブルの制振が図られている。そこで、この橋梁の下から3段目ケーブル(C5ケーブル)に着目し、2本の並列配置ケーブルの端部付近を治具で拘束した後、1個の粘性せん断型ダンパーを設置すると仮定した場合および実橋ケーブルの制振法として実際に採用されているダブルケーブルのそれぞれにダンパーを設置した場合について複素固有値解析を実施し、ダンパーによって付加される構造減衰の大きさを比較することとした。なお、本橋の各段ケーブルはノングラウトタイプのHiAmアンカーケーブルをそれぞれダブルケーブルとして使用しており、着目したC5ケーブルの1本当りの構造諸元は表-1に示す通りである。表-1から、C5ケーブルの S_e/D_e 値(ケーブル間隔/ケー

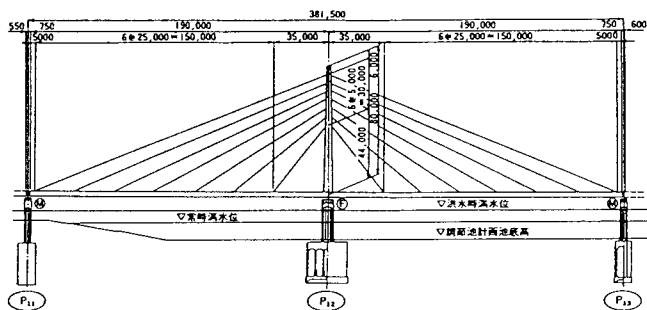


図-1 2径間連続鋼斜張橋

表-1 C5ケーブルの構造諸元

名称	ケーブル長 l (m)	断面積 A_c (mm ²)	重量 w (t/m)	張力 T (t)	ケーブル間隔 S_c (m)	ケーブル径 D_c (mm)	S_c/D_c
C5	100.70	0.0121	0.1007	428.5	0.750	0.155	4.84

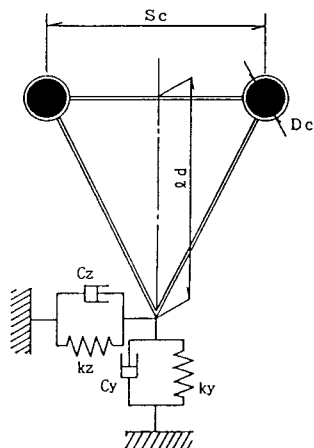


図-2 MODEL-D1と記号の説明

ブル径の比)は4.84であるが、ここではケーブル間隔が比較的狭い場合のことも想定し、その他の構造諸元は全く同一で S_c/D_c 値のみを2.42としたケースについても検討することとした。

(2) ケーブル間隔が比較的広い $S_c/D_c=4.84$ なる場合

端部付近を図-2に示すような治具で拘束した2本の並列配置ケーブルに1個の粘性せん断型ダンパーを設置したモデル(MODEL-D1)と1本のケーブルに1個の粘性せん断型ダンパーを設置(ダブルケーブルのそれぞれにダンパーを設置する場合に対応)したモデル(MODEL-S1)について、それぞれ複素固有値解析を実施することとした。なお、粘性せん断型ダンパーではその構造から1個のダンパーで面内と面外の2方向の振動に対処できることから、解析ではVoigtモデルに置換した1方向ダンパーを面内方向と面外方向にそれぞれ配置するものとしている。

表-2 等価粘性減衰係数と等価ばね定数の算定振幅

着目振動	次数	算定振幅 (cm)							
		t=40℃				t=-5℃			
		C_y	K_y	C_z	K_z	C_y	K_y	C_z	K_z
同位相動振	1次	0.30	0.30	—	—	0.30	0.30	—	—
	2次	0.30	0.30	—	—	0.30	0.30	—	—
	3次	0.30	0.30	—	—	0.30	0.30	—	—
逆位相動振	1次	—	—	0.60	0.60	—	—	0.60	0.60
	2次	—	—	0.60	0.60	—	—	0.60	0.60
	3次	—	—	0.60	0.60	—	—	0.60	0.60
片側単独動振	1次	0.15	0.15	0.30	0.30	0.15	0.15	0.30	0.30
	2次	0.15	0.15	0.30	0.30	0.15	0.15	0.30	0.30
	3次	0.15	0.15	0.30	0.30	0.15	0.15	0.30	0.30

表－3 MODEL-D1 ($S_c/D_c=0.75\text{m}/0.155\text{m}=4.84$, $\rho_a=0.750\text{m}$) に対する複素固有値解析結果

着目振動	次 数	$t=40^\circ\text{C}$					$t=-5^\circ\text{C}$				
		C_y ($t\cdot s/m$)	K_y (t/m)	C_x ($t\cdot s/m$)	K_x (t/m)	構造対数 減 衰 率	C_y ($t\cdot s/m$)	K_y (t/m)	C_x ($t\cdot s/m$)	K_x (t/m)	構造対数 減 衰 率
同 位 相 振 動	1 次	3.10	12.21	—	—	0.031	21.45	84.55	—	—	0.092
	2 次	2.19	16.69	—	—	0.041	15.17	115.53	—	—	0.093
	3 次	1.79	20.03	—	—	0.048	12.39	138.66	—	—	0.091
逆 位 相 振 動	1 次	—	—	2.77	9.58	0.080	—	—	19.20	66.35	0.064
	2 次	—	—	1.96	13.10	0.094	—	—	13.58	90.66	0.051
	3 次	—	—	1.60	15.72	0.100	—	—	11.09	108.81	0.044
片側単独 振 動	1 次	3.46	15.57	3.10	12.21	0.063	23.97	107.81	21.45	84.55	0.071
	2 次	2.45	21.28	2.19	16.69	0.077	16.96	147.31	15.17	115.53	0.060
	3 次	2.00	25.54	1.79	20.03	0.085	13.84	176.79	12.39	138.66	0.053

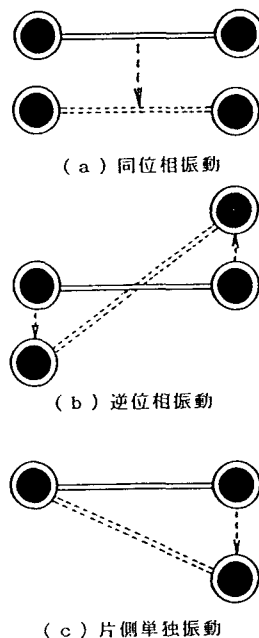
表－4 MODEL-S1に対する複素固有値解析結果

次 数	$t=40^\circ\text{C}$			$t=-5^\circ\text{C}$		
	C_y ($t\cdot s/m$)	K_y (t/m)	構造対数 減 衰 率	C_y ($t\cdot s/m$)	K_y (t/m)	構造対数 減 衰 率
1 次	3.10	12.21	0.054	21.45	84.55	0.082
2 次	2.19	16.69	0.068	15.17	115.53	0.071
3 次	1.79	20.03	0.076	12.39	138.66	0.064

粘性せん断型ダンパーの等価粘性減衰係数と等価ばね定数の算定にあたって必要となるダンパーの設計基準振幅 a は、ダンパーが取り付けられた位置でのケーブルの鉛直方向変位振幅を 0.3cm と仮定して得られる表－2に示す値を採用することとした。したがって、粘性せん断を期待する断面積 S が $S=424\text{cm}^2$ 、設計温度として $t=-5^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}$ なる条件を仮定し、着目振動モードの固有円振動数 ω とともにダンパーの設計基準振幅 a をそれぞれ式(1)および式(3)に代入すれば、粘性せん断型ダンパーの等価粘性減衰係数と等価ばね定数が算定できることとなる。なお、ここに、粘性せん断を期待する断面積 $S=424\text{cm}^2$ は、ダンパーの取り付け位置が $x/\ell=0.05$ 、設計基準振幅が $a=0.3\text{cm}$ 、設計温度が $t=-5^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}$ なる条件において、1次～3次モードの構造対数減衰率が 0.05 程度以上になるように設定されたものである。

また、表－2に記した同位相振動、逆位相振動は図－3 (a)、(b)にそれぞれ示した振動モードに対応するものであり、さらに、図－3 (c)に示した下流側単独振動とは、治具で拘束されたダブルケーブルでは発現しにくいと思われるものの風によるケーブル振動の複雑さを考え、上流側ケーブルのすべての方向の変位を拘束して下流側ケーブルのみが振動するようにしたモードである。

片側当り100部材に等分割したMODEL-D1 ($S_c/D_c=4.84$) に対する複素固有値解析結果を表－3に、また、MODEL-S1に対する複素固有値解析結果を表－4に示す。ここに、複素固有値解析にあたってはケーブルの各



図－3 制振すべき振動モード

表－5 MODEL-D1 ($S_c/D_c=0.375\text{m}/0.155\text{m}=2.42$, $\ell_d=0.750\text{m}$) に対する複素固有値解析結果

着目振動	次 数	$t=40^\circ\text{C}$					$t=-5^\circ\text{C}$				
		C_y ($\text{t}\cdot\text{s}/\text{m}$)	K_y (t/m)	C_x ($\text{t}\cdot\text{s}/\text{m}$)	K_x (t/m)	構造対数 減 衰 率	C_y ($\text{t}\cdot\text{s}/\text{m}$)	K_y (t/m)	C_x ($\text{t}\cdot\text{s}/\text{m}$)	K_x (t/m)	構造対数 減 衰 率
同 位 相 振 動	1 次	3.10	12.21	—	—	0.031	21.45	84.55	—	—	0.092
	2 次	2.19	16.69	—	—	0.041	15.17	115.53	—	—	0.093
	3 次	1.79	20.03	—	—	0.048	12.39	138.66	—	—	0.091
逆 位 相 振 動	1 次	—	—	2.77	9.58	0.087	—	—	19.20	66.35	0.020
	2 次	—	—	1.96	13.10	0.075	—	—	13.58	90.66	0.015
	3 次	—	—	1.60	15.72	0.067	—	—	11.09	108.81	0.012
片 側 単 独 振 動	1 次	3.46	15.57	3.10	12.21	0.091	23.97	107.81	21.45	84.55	0.030
	2 次	2.45	21.28	2.19	16.69	0.088	16.96	147.31	15.17	115.53	0.022
	3 次	2.00	25.54	1.79	20.03	0.084	13.84	176.79	12.39	138.66	0.019

節点におけるケーブル面外方向変位を拘束するとともに、ダンパーは、 ℓ をケーブル長、 x を端部からダンパー取り付け位置までの距離とすれば、 $x/\ell=0.05$ なる位置のケーブル法線方向に設置している。表－3と表－4の比較より、ダブルケーブルに1個の粘性せん断型ダンパーを設置したMODEL-D1 ($S_c/D_c=4.84$) では、MODEL-S1なる場合に比べ、 $t=40^\circ\text{C}$ での同位相1次振動に対する構造減衰が $\delta=0.031$ と耐風設計上の所要値の下限值程度になっているものの、 $t=-5^\circ\text{C}$ における同位相1次振動および $t=-5^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}$ なる温度条件のもとでの逆位相振動と片側単独振動の1～3次モードには構造対数減衰率で $\delta=0.04\sim 0.09$ 程度もの構造減衰が付加されていることがわかる。それゆえ、治具の製作費は幾分増加するものの、端部付近を治具で拘束した2本の並列配置ケーブルに1個の粘性せん断型ダンパーを設置する方法も、ここで対象とした $S_c/D_c=4.84$ と同程度 ($S_c/D_c=4\sim 5$) のケーブル間隔を有するダブルケーブルでは比較的有效なダンパー設置法の一つになり得る場合があるものと言える。

(3) ケーブル間隔が比較的狭い $S_c/D_c=2.42$ なる場合

本節では、上述のMODEL-D1において、ケーブル間隔 S_c のみを $S_c=0.375\text{m}$ とした $S_c/D_c=2.42$ なるダブルケーブルに、1個の粘性せん断型ダンパーを設置した場合の減衰付加効果を検討することとする。ここに、ケーブルの構造諸元、ダンパー容量、ダンパーの取り付け位置およびダンパーのケーブル取り付け位置からダンパー作用点までの距離 ℓ_d などは前節に示した解析条件と全く同一であり、また、ダンパーの等価粘性減衰係数と等価ばね定数を算定するにあたっての設計基準振幅も簡単のため表－2と同一の値を採用することとした。なお、表－2の設計基準振幅を $S_c/D_c=2.42$ なる場合に適用したことは、ダンパー取り付け位置におけるケーブルの変位として C_y と K_y では $a=0.3\text{cm}$ を、 C_x と K_x では $a=0.15\text{cm}$ を仮定した場合に対応する。

$S_c/D_c=2.42$ なる場合の複素固有値解析結果を表－5に示す。表－5からわかるように、 $t=-5^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}$ における同位相の1次～3次振動および $t=40^\circ\text{C}$ における逆位相と片側単独の1次～3次振動には耐風設計上は十分な減衰付加が認められているが、 $t=-5^\circ\text{C}$ なる温度状態での片側単独振動に対する減衰付加効果は比較的小さく、さらに $t=-5^\circ\text{C}$ なる温度状態での逆位相振動に対しては1～3次とも $\delta=0.015$ 程度以下のきわめて小さい減衰付加しか期待できないことがわかる。これは他の構造諸元は同じで S_c/D_c のみを $S_c/D_c=2.42$ としたことで、後述するように逆位相振動に対する粘性減衰係数とばね定数が $S_c/D_c=4.84$ なる場合に比べ4倍も大きくなり、ダンパーの固定としての作用効果が顕著に現れたことによる。

$t=-5^\circ\text{C}$ なる温度状態での逆位相振動の構造減衰を増加させる方法としては、粘性せん断型ダンパーの粘性

せん断を期待する断面積Sを小さくして、ダンパーの粘性減衰係数とばね定数を小さくすることが考えられる。しかしながら、この方法では逆に同位相振動に対する減衰付加効果が低下することとなる。それゆえ、 S_0/D_0 が比較的小さいダブルケーブルに対しては、ダンパーの取り付け位置をケーブル側に移動させて ℓ_a なる距離を短くする方法が最も効果的と思われる。しかしながら、この場合には、 S_0/D_0 が小さくなるとともにウェイクギャロッピングの励振力は一般に大きくなることから付加すべき構造減衰の所要値が増加すること、また、50mm～100mm程度の細径ケーブルが並列配置されたPC斜張橋では S_0/D_0 なる値が2程度の非常に小さな値が採用されることも多く、ダブルケーブルを端部付近で拘束するための治具の製作とその設置が困難になるなど、解決すべき数多くの問題点が存在することとなる。したがって、ここに示した複素固有値解析結果からは、 $S_0/D_0=2\sim3$ 程度以下のケーブル間隔が比較的狭いダブルケーブルに対しては、1本のケーブルに1個の粘性せん断型ダンパーを設置する従来のケーブル制振法の採用が好ましい場合が多いものと言える。

4. 構造減衰の簡易推定法

前章では、端部付近を治具で拘束した後に、1個の粘性せん断型ダンパーを設置する制振手法は、比較的ケーブル間隔が広いダブルケーブルに対しては有効な設置方法になり得る場合があるものの、ケーブル間隔が比較的狭い場合には耐風設計上十分な構造減衰を付加できない場合が多いことを例示した。しかしながら、ケーブル間隔が比較的狭いダブルケーブルが採用された斜張橋でも、ダンパーの設置個数を極力少なくし、ケーブル制振対策費用を低減させる努力は実務設計においてきわめて重要なことであり、端部付近を治具で拘束した後に、1個の粘性せん断型ダンパーを設置する制振対策法の適用可能性について、比較的簡単にしかも精度よく評価できる実用算定法を提示しておくことはきわめて有用なことと思われる。そこで、本章では、1本のケーブルに1個のダンパーを設置した場合の設計用減衰評価曲線を適用して、ダブルケーブルの同位相振動と逆位相振動および片側単独振動の構造減衰を推定する手法を示すこととする。

(1) 1本のケーブルに1個のダンパーを設置する場合

ケーブルにダンパーを設置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、減衰付加効果に与える粘性減衰係数やばね定数の大きさ、ダンパー設置高さの影響などを斜張橋ケーブルの全段について検討することは、非常に複雑で多大の労力と費用を要する検討作業となる。このような観点から、著者の一人は、式(6)に示す無次元パラメーター P_{TK} を導入して、1本のケーブルに1個の粘性せん断型ダンパーを設置した場合の減衰付加効果を、非常に簡単にしかも精度良く推定できる減衰評価曲線⁹⁾を提案している。

$$P_{TK} = \frac{x \cdot (\ell - x) \cdot k}{T \cdot \ell} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 k は粘性せん断型ダンパーのばね定数、 T はケーブル張力、 ℓ はケーブル長、 x はケーブル端部からダンパー取り付け位置までの距離を表す。なお、この無次元パラメーター P_{TK} は、剛性としてケーブル張力のみを考慮したスプリングモデルと粘性せん断型ダンパーが有するばね剛性のみを考慮したスプリングモデルをそれぞれ考え、同一の P なる集中荷重を作用させた場合の変位量の比率 y_T/y_K から算出したものである。

以下に、1本のケーブルに1個のダンパーを設置した場合の設計用減衰評価曲線を示す。

$$\begin{aligned}
 &0 < C/C^*_{opt}(n) \leq 1.2 \text{ なる範囲で} \\
 &\delta / \delta^*_{max}(n) = 0.116 \times \{C/C^*_{opt}(n)\}^3 - 1.245 \times \{C/C^*_{opt}(n)\}^2 + 2.129 \times \{C/C^*_{opt}(n)\} \\
 &1.2 < C/C^*_{opt}(n) \leq 7.0 \text{ なる範囲で} \quad \dots\dots\dots (7) \\
 &\delta / \delta^*_{max}(n) = -0.004 \times \{C/C^*_{opt}(n)\}^3 + 0.075 \times \{C/C^*_{opt}(n)\}^2 - 0.505 \times \{C/C^*_{opt}(n)\} + 1.468
 \end{aligned}$$

ここに、 $C_{opt}^k(n)$ は k なるばね定数を有するダンパーを設置した場合の n 次モードに対する最適粘性減衰係数であり、 $C_{opt}(n)$ をばね剛性のないダンパーを設置した場合の最適粘性減衰係数とすれば以下のように計算できる。

$$C_{opt}^k(n) = R_{opt} \times C_{opt}(n) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、

$$R_{opt} = 1.0 + 0.962 \times P_{TK} \quad \dots\dots\dots (9)$$

であり、 $C_{opt}(n)$ は、

$$P_c(n) = \frac{\sin^2 n\pi x/l}{w \times l \times f_n/g} \times \frac{l}{x} \quad \dots\dots\dots (10)$$

とすると次式で計算できる。

$$C_{opt}(n) = \alpha(n x/l) \times 6.25/P_c(n) \quad \dots\dots\dots (11)$$

また、式(10)において、 w はケーブルの単位長さ当りの重量、 g は重力加速度、 f_n は n 次モードの固有振動数であり、

$$f_n = \frac{n}{2l} \times \sqrt{g \times T/w} \quad \dots\dots\dots (12)$$

なる式から計算できる。さらに、式(11)中の補正係数 $\alpha(n x/l)$ は次式を用いて算定すれば良い。

$$\alpha(n x/l) = \begin{cases} 1.0 & (0 \leq n x/l \leq 0.15) \\ -0.87 \times (n x/l) + 1.13 & (0.15 < n x/l \leq 0.45) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (13)$$

一方、ばね剛性を有するダンパーを設置した場合の最適粘性減衰係数 $C_{opt}^k(n)$ に対応する構造対数減衰率の最大値 $\delta_{max}^k(n)$ としては、次式による計算値を用いれば良い。

$$\delta_{max}^k(n) = R_{max} \times \delta_{max}(1) \quad \dots\dots\dots (14)$$

ただし、

$$R_{max} = \begin{cases} 1.00 & (0 \leq P_{TK} \leq 0.01) \\ -0.085 \log P_{TK} + 0.830 & (0.01 < P_{TK} \leq 0.15) \\ -0.510 \log P_{TK} + 0.480 & (0.15 < P_{TK} \leq 5.00) \\ -0.145 \log P_{TK} + 0.225 & (5.00 < P_{TK} \leq 10.0) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (15)$$

であり、ばね剛性のないダンパーを設置した場合に、1次振動モードに付加される構造対数減衰率の最大値 $\delta_{max}(1)$ は次式を用いて算定する。

$$\delta_{max}(1) = (X/l) \times (3.125 + 6.25 \times X/l) \quad \dots\dots\dots (16)$$

(2) ダブルケーブルに1個のダンパーを設置する場合

ダブルケーブルの端部付近を治具で拘束して1個の粘性せん断型ダンパーを設置する場合、同位相振動、逆位相振動および片側単独振動の構造減衰はそれぞれ以下に示す手法で推定できる。

1) 同位相振動

上流側ケーブルと下流側ケーブルがそれぞれ同位相で振動する場合の取り扱い是非常に簡単であり、次式で定まる等価粘性減衰係数 c^d および等価ばね定数 k^d をそれぞれ c 、 k として前節の各式に代入すれば、1個の粘性せん断型ダンパーによって付加される構造減衰を推定できる。

$$\begin{aligned} c^d &= c_y/2 \\ k^d &= k_y/2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (17)$$

2) 逆位相振動

θ を回転角とすれば、上流側ケーブルと下流側ケーブルが逆位相で振動する場合の運動方程式は以下のように表示できる。

$$2m(S_0/2)^2 \ddot{\theta} + C_x \dot{\theta} + k_x \theta = 0 \quad \dots\dots\dots (18)$$

式(18)と1本のケーブルが鉛直たわみ振動する場合の運動方程式を等価と見なすことにより、容易に逆位相振動に対する粘性減衰係数 c^d およびばね定数 k^d を以下のように算出できる。

$$\begin{aligned} c^d &= \{ \dot{\theta} / (S_0/2) \}^2 \times C_x / 2 \\ k^d &= \{ \theta / (S_0/2) \}^2 \times k_x / 2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (19)$$

なお、上式より、ケーブル間隔とケーブル径の比 S_0/D_0 を4.84から2.42に変更した場合、その他の構造諸元が全く同一でも粘性減衰係数 c^d とばね定数 k^d はそれぞれ4倍も大きくなり、 S_0/D_0 の減少とともにダンパーの固定としての作用効果が現れることが容易に理解されよう。

3) 片側単独振動

y を鉛直方向変位とすれば、片側ケーブルが単独で鉛直振動する場合の運動方程式は以下のように表示できる。

$$mS_0^2 \ddot{y} + C_x \dot{y} + C_y (S_0/2)^2 \dot{y} + k_x \dot{y} + k_y (S_0/2)^2 y = 0 \quad \dots\dots\dots (20)$$

式(20)と1本のケーブルが鉛直たわみ振動する場合の運動方程式を等価と見なすことにより、容易に片側単独振動に対する等価粘性減衰係数 c^d および等価ばね定数 k^d を以下のように算出できる。

$$\begin{aligned} c^d &= \{ C_y \times (S_0/2)^2 + C_x \dot{y} \} / S_0^2 \\ k^d &= \{ k_y \times (S_0/2)^2 + k_x \dot{y} \} / S_0^2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (21)$$

すでに示した表-3、5は複素固有値解析によって算出した構造対数減衰率であるが、ここでは比較のため、同じ条件のもと上述の各式から算出される粘性減衰係数 c^d とばね定数 k^d を前節の各式にそれぞれ C 、 K として代入し、粘性せん断型ダンパーによって付加される構造対数減衰率を計算した。 $S_0/D_0=4.84$ と $S_0/D_0=2.42$ なる場合の推定結果をそれぞれ表-6、7に示す。表-6と表-3および表-7と表-5の比較から、式(17)～式(21)で定まる c^d および k^d を式(7)に代入して得られた構造減衰の推定値は複素固有値解析結果と非常に良く一致しており、ダブルケーブルに1個の粘性せん断型ダンパーを設置する手法の妥当性を検討する場合には有用な実用算定法であることが確認できたものと言える。

表-6 MODEL-D1に対する構造減衰の推定結果 ($S_0/D_0=4.84$, $\dot{y}_0=0.750m$)

着目振動	次数	t=40℃			t=-5℃		
		C^d (t・s/m)	K^d (t/m)	構造対数 減衰率	C^d (t・s/m)	K^d (t/m)	構造対数 減衰率
同位相振	1次	1.55	6.11	0.035	10.73	42.28	0.091
	2次	1.10	8.35	0.045	7.59	57.77	0.090
	3次	0.90	10.15	0.051	6.20	69.33	0.087
逆位相振	1次	5.54	19.16	0.083	38.40	132.70	0.066
	2次	3.92	26.20	0.092	27.16	181.32	0.051
	3次	3.20	31.44	0.094	22.18	217.62	0.044
片側単独振	1次	3.97	16.10	0.068	27.44	111.50	0.074
	2次	2.80	22.01	0.078	19.41	152.36	0.062
	3次	2.29	26.42	0.081	15.85	182.86	0.055

表-7 MODEL-D1に対する構造減衰の推定結果 ($S_0/D_0=2.42$, $\dot{y}_0=0.750m$)

着目振動	次数	t=40℃			t=-5℃		
		C^d (t・s/m)	K^d (t/m)	構造対数 減衰率	C^d (t・s/m)	K^d (t/m)	構造対数 減衰率
同位相振	1次	1.55	6.11	0.035	10.73	42.28	0.091
	2次	1.10	8.35	0.045	7.59	57.77	0.090
	3次	0.90	10.15	0.051	6.20	69.33	0.087
逆位相振	1次	22.16	76.64	0.088	153.60	530.80	0.016
	2次	15.68	104.80	0.076	108.64	725.28	0.012
	3次	12.80	125.76	0.068	88.72	870.48	0.011
片側単独振	1次	13.27	52.73	0.090	91.79	365.15	0.026
	2次	9.37	72.08	0.087	64.92	498.95	0.017
	3次	7.66	86.51	0.082	53.02	598.84	0.016

5. 多数の細径ケーブルが並列配置された実在PC斜張橋に対するケーブル制振

(1) 対象とした斜張橋とケーブルの構造諸元

対象とした橋梁は中央支間長が145mの3径間連続PC斜張橋（70.0m+145.0m+70.0m）であり、その一般図を図-4に示す。本橋のケーブル段数は11段であり、それぞれ61.6mm～82.0mmの細径ケーブルが $S_e/D_e=2$ 程度の間隔で並列配置されている。本橋では、架設途中から振動振幅のきわめて大きい1次モードのレインバイブレーションとウェイクギャロッピングがしばしば観測されていた。そこで、これらの実橋ケーブルに発生したケーブル振動を制御すべく、粘性せん断ダンパーを設置することとなった。

(2) 粘性せん断ダンパー

本橋のダブルケーブル間隔は上述したように $S_e/D_e=2$ 程度ときわめて狭く、ダブルケーブルの端部付近を特殊な治具で拘束して1個の粘性せん断ダンパーを設置する手法（青森ベイブリッジ方式）では、治具そのものの取り付けが困難であった。また、たとえ、治具の取り付けが可能であったとしても、高欄よりも低い位置にダンパーを設置するという条件のもとで青森ベイブリッジ方式を採用した場合、4章の(2)に示した実用算定法による予備検討の結果から、ウェイクギャロッピングの制御に最低限必要と考えられる $\delta=0.05$ 程度以上の構造減衰をケーブルに付加することは非常に困難であると判断された。そこで、本橋ではダブルケーブルを構成するそれぞれのケーブルに1個の粘性せん断ダンパーを設置する従来の一般的な方式でケーブル振動に対処することとなった。

表-8に示した諸元を有する中央径間側の最上段ケーブル（S-22）を対象に、まず、粘性せん断ダンパーの所要粘性体量（粘性せん断を期待する断面積）について検討した。ただし、本橋ケーブルでは桁側の端部から約1mの区間には防水ゴムが充填されており、また、その剛性もダンパーの設計段階では不明であったことから、ここでは防水ゴムのばね定数を無視した場合（CASE-1）と無限大とした場合（CASE-2）の2ケースを

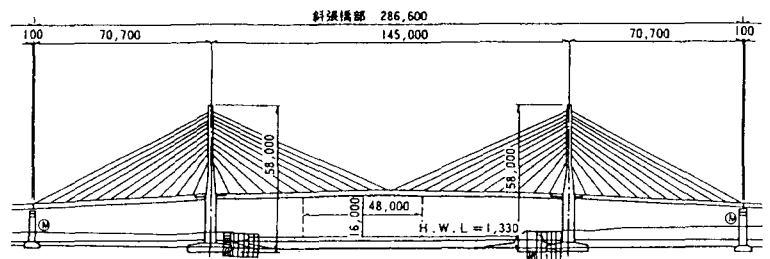


図-4 3径間連続PC斜張橋

表-8 S-22ケーブルの構造諸元

名称	ケース	ケーブル長 L (m)	重量 W (t/m)	張力 T (t)	ダンパー位置 x (m)
S-22	CASE-1	73.942	0.01277	71.8	2.437
	CASE-2	73.008	0.01277	71.8	1.503

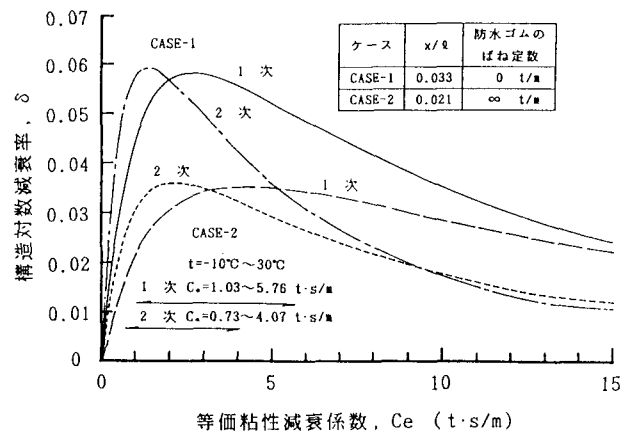


図-5 S-22ケーブルに対する $C-\delta$ 図

検討対象にすることとした。4章の(1)に示した実用算定式を用いて推定した、S-22ケーブルに対する $C-\delta$ （粘性減衰係数－構造対数減衰率）の関係を図-5に示す。なお、図-5では、ダンパーの設計基準振幅を0.3cmと仮定して、粘性せん断ダンパーの有するばね剛性を式(5)に示した等価粘性減衰係数 C_e の関数として評価している。さらに、粘性せん断ダンパーの設計基準温度は、架設地点付近の日最高気温と日最低気温の月別平均値を参考にして $t=-10^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ に設定している。図-5からわかるように、CASE-1では $t=30^{\circ}\text{C}$ における1次モードの等価粘性減衰係数は $C_e=1.033t\cdot\text{s/m}$ であり、この場合、ケーブルには $\delta=0.045$ 程度の構造減衰が付加されることとなる。そこで、この結果より、粘性せん断を期待する断面積 S を決定すると $S=115\text{cm}^2$ なる値が得られたことから、制振対策が必要なケーブルには $S=115\text{cm}^2$ なる粘性体を注入した粘性せん断ダンパーを設置することとなった。

ただし、実橋ケーブルに付加される実際の構造対数減衰率は、CASE-2の推定結果よりも大きいものの、防水ゴムの剛性効果でCASE-1の推定結果よりも多少低下するものと予想される。そこで、防水ゴムのばね定数の大きさと実橋ケーブルに付加される実際の構造対数減衰率の大きさを把握することを目的として、次節に述べる実橋ケーブル試験を実施することとした。

(3) 実橋ケーブル試験

中央径間側の最上段ケーブルであるS-22ケーブルを対象に実橋ケーブル試験を実施した結果、図-6に示すような減衰自由振動波形が得られた。参考までに、実験状況を写真-2に示す。この波形より算出した面内1次と面内2次の構造対数減衰率を表-9にまとめる。表-9より、粘性せん断ダンパー設置後の構造対数減衰率はウェイクギャロッピングの制御に最低限必要と考えられる $\delta=0.05$ より若干小さいものの、目標値には近い構造減衰が付加されていることが理解できよう。また、実際、粘性せん断ダンパーの設置作業中、平均で10m/s程度の雨まじりの強風が橋軸直角方向に作用したが、ダンパー設置前の最上段から8段目までのケーブルには激しいウェイクギャロッピングが発現したものの、ダンパー設置終了後のケーブルには有害なケーブル振動の発生は認められなかった。ただし、前述したように、ダンパー設置後の構造対数減衰率は $\delta=0.05$ よりも若干下回ることもあることから、ダンパー設置後のケーブルの挙動については今後とも継続し



写真-2 S-22ケーブルでの実験状況

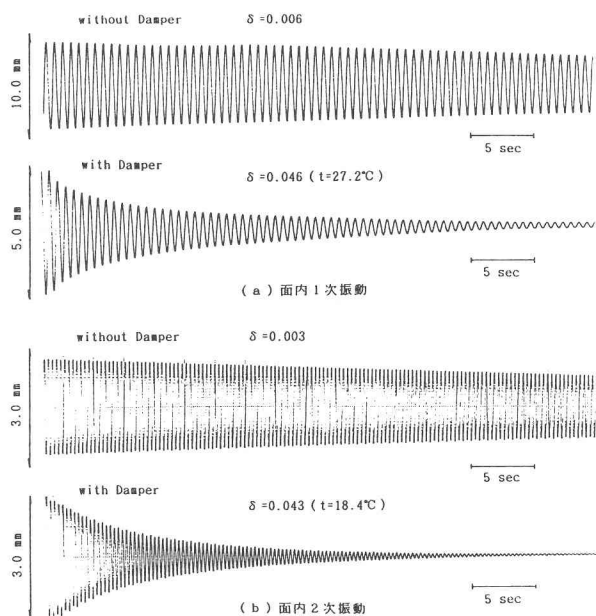


図-6 減衰自由振動波形の一例

表－9 S-22ケーブルの構造対数減衰率

次 数	ダンパーなし	ダンパーあり	
	構造対数減衰率	温 度 (°C)	構造対数減衰率
1 次	0.006	27.2	0.046
2 次	0.003	18.4	0.043

表－10 構造対数減衰率の実測値と解析値の比較

次 数	温 度 (°C)	Ce (t・m/s)	ke (t/m)	構造対数減衰率	
				解 析 値	実 測 値
1 次	27.2	1.45	11.47	0.042	0.040
2 次	18.4	1.51	22.63	0.046	0.040

て観察していく予定であることを述べておきたい。

なお、ダンパーを設置しない状態での実橋ケーブル試験から、ダンパーの設置予定位置と防水ゴムが充填された位置でのモード振幅比は1次モードで0.31、2次モードで0.29であることもわかった。そこで、防水ゴムが充填された区間のばね剛性を等間隔に配置した3本のばね（それぞれのばね定数 k は等しいと仮定）でモデル化したS-22ケーブルについて固有振動解析を実施した結果、防水ゴムのばね定数を1本当り $k=34.0\text{t/m}$ とした場合に1次モードで0.31なるモード振幅比が、また、 $k=50.0\text{t/m}$ とした場合に2次モードで0.29なるモード振幅比がそれぞれ得られた。以上の結果を踏まえ、実橋ケーブル試験結果と防水ゴムのばね剛性を考慮した複素固有値解析結果を比較してみることにした。比較結果を表－10に示す。ここに、構造対数減衰率の実測値としては、実橋ケーブル試験で得られたダンパー設置後の構造減衰からダンパー設置前の値を除去した構造減衰を記している。また、複素固有値解析にあたって必要となる粘性せん断型ダンパーの等価粘性減衰係数と等価ばね定数は、実橋ケーブル試験時での粘性体温度と構造減衰の算定振幅である0.075cmを用いて算出している。表－10より、両者の結果は比較的良く一致しており、2章で述べた粘性せん断ダンパーの等価粘性減衰係数と等価ばね定数の評価式ならびに実橋ケーブル試験結果より逆算した防水ゴムのばね定数に対する評価は、いずれもほぼ妥当で適切なものであったと言える。

6. まとめ

本論文は、端部付近を治具で拘束した2本の並列配置ケーブルに1個の粘性せん断型ダンパーを設置する手法の妥当性とその適用限界について検討するとともに、多数の細径ケーブルが並列配置された実在のPC斜張橋を対象にケーブル制振対策の設置事例とその実橋ケーブル試験結果を報告したものである。本研究で得られた主要な結果を以下にまとめる。

- (1) 端部付近を治具で拘束した後に1個の粘性せん断型ダンパーを設置する青森ベイブリッジで採用された制振手法は、 $S_e/D_e=4\sim 5$ 程度のケーブル間隔が比較的広いダブルケーブルに対しては有効な設置方法になり得る場合があるものの、ケーブル間隔が $S_e/D_e=2\sim 3$ 程度と比較的狭い場合には耐風設計上十分な構造減衰を付加できない場合が多い。
- (2) しかしながら、ケーブル間隔が比較的狭いダブルケーブルが採用された斜張橋でも、ダンパーの設置個数を極力少なくし、ケーブル制振対策費用を低減させる努力は実務設計においてきわめて重要なことと思われる。そこで、本文では、端部付近を治具で拘束した後に1個の粘性せん断型ダンパーを設置する手法（青森ベイブリッジ方式）を採用した場合の減衰付加効果を推定できる実用算定法を提案した。本実用算定法を適用すれば、比較的簡単にしかも精度よく、ダンパー設置後の同位相振動と逆位相振動および片側単独振動の構造減衰を推定できる。
- (3) 61.6mm～82.0mmの細径ケーブルが $S_e/D_e=2$ 程度の間隔で並列配置されたケーブル段数11段の3径間連続PC斜張橋（70.0m+145.0m+70.0m）では、架設途中から振動振幅のきわめて大きい1次モードのレインバイブレーションとウェイクギャロッピングがしばしば観測された。制振対策法について検討した結果、本橋ケーブルに対しては青森ベイブリッジ方式の適用は困難であり、ダブルケーブルを構成するそれぞれのケーブルに1個の粘性せん断ダンパーを設置する従来の一般的な方式でケーブル振動に対処することとなった。実橋

ケーブル試験の結果より、粘性せん断ダンパー設置後の面内1次と面内2次の構造対数減衰率はウェイクギャロッピングの制御に最低限必要と考えられる $\delta=0.05$ より若干小さいものの、目標値にほぼ近い構造減衰が付加されていることがわかった。また、実際、粘性せん断ダンパーの設置作業中、平均で10m/s程度の雨まじりの強風が橋軸直角方向に作用したが、ダンパー設置前の最上段から8段目までのケーブルには激しいウェイクギャロッピングが観測されたものの、ダンパー設置終了後のケーブルには有害なケーブル振動の発生は認められなかった。

(4) 本橋ケーブルでは、端部から約1mの区間に防水ゴムが充填されている。実橋ケーブル試験結果と固有値解析結果の比較から、防水ゴムが充填された区間のばね剛性を等間隔に配置した3本のばね（それぞれのばね定数 k は等しいと仮定）でモデル化した場合、防水ゴムのばね定数は1次モードで $k=34.0\text{t/m/本}$ 、2次モードで $k=50.0\text{t/m/本}$ なる値が得られた。また、実橋ケーブル試験結果と防水ゴムのばね剛性を考慮した複素固有値解析結果を比較した結果、両者の結果は比較的良く一致しており、粘性せん断ダンパーの等価粘性減衰係数と等価ばね定数の評価式ならびに実橋ケーブル試験結果より逆算した防水ゴムのばね定数に対する評価は、いずれもほぼ妥当で適切なものであると言えた。

斜張橋の設計・架設にあたっては、レインバイブレーションやウェイクギャロッピングなどのケーブル振動に対する制振がきわめて重要となりつつある。ダブルケーブル方式を採用した斜張橋のケーブル制振法について論じた本論文が、斜張橋ケーブルの制振に携わる実務技術者にとって有用な資料になることを心より願う次第である。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 米田昌弘・前田研一：斜張橋ケーブルの風による振動とその制振法，橋梁，Vol.28，No.4，pp.54～62，1992年4月。
- 3) Yoshimura, T., Tanaka, T., Sasaki, N., Nakatani, S. and S.Higa: Rain-Wind Induced Vibration of the Cables of the Aratsu Bridge, 第10回風工学シンポジウム論文集，pp.127～132，1988年12月。
- 4) 宮坂佳洋・南荘 淳・南條正洋・加道博章・石飛太郎：天保山大橋のケーブル振動とその対策，橋梁と基礎，Vol.26，No.4，pp.27～36，1992年4月。
- 5) 河田寛行・飯名 勇・山本暢明・武井光明・宮本義雄・安藤 修：幸魂橋（斜張橋部下り線）の施工と制振対策，橋梁と基礎，Vol.26，No.4，pp.11～16，1992年4月。
- 6) 木村秀夫・太田哲司・金井壮次・内海 靖・本田明弘：東名足柄橋（PC斜張橋）斜めケーブルの風洞実験および防振ダンパー，橋梁と基礎，Vol.25，No.12，pp.29～33，1991年12月。
- 7) 荒居祐基・加茂年彦・山下雅己・宮崎正男：毛見1号線橋梁（仮称）のケーブル制振対策，鋼構造年次論文報告集，第1巻，pp.365～368，1993年7月。
- 8) 米田昌弘・前田研一・伊関治郎・下田郁夫：ケーブル制振用粘性せん断型ダンパの開発，日本機械学会論文集（C編），58巻555号，pp.47～52，1992年11月。
- 9) 米田昌弘・下田郁夫：ケーブル制振用粘性せん断型ダンパーの減衰付加特性に及ぼすばね剛性の影響とその設計用減衰評価曲線，土木学会論文集，第480号／VI-21，pp.77～86，1992年11月。

（1993年9月16日受付）