

斜張橋ケーブル制振用ダンパーの簡易設計法

A SIMPLE METHOD OF DESIGNING CABLE VIBRATION DAMPERS OF CABLE-STAYED BRIDGES

鳥野 清* 北川正一** 堤 一*** 井上朝登**** 中谷真二*****

By Kiyoshi UNO, Shoichi KITAGAWA, Hajime TSUTSUMI, Asato INOUE and Shinji NAKAYA

The effectiveness of cable vibration dampers on the stay cables of Aratsu-ohashi in Fukuoka city is confirmed, through an experimental and analytical evaluation. In designing these dampers it becomes necessary to estimate the structural damping by a complex eigenvalue analysis. This for all cables in a cable-stayed bridge is computationally very expensive and a simple method to estimate the effect of these dampers is desired. In this paper, we propose a formula for an estimation of the structural logarithmic decrement and the viscous damping coefficient. The results are compared with the complex eigenvalue analysis, the existing formula and our proposed formula. The accuracy and validity of the proposed methods is investigated. Various problems encountered in actual design of cable dampers are also discussed by a comparison of the analytical and experimental results.

1. ま え が き

福岡都市高速道路に建設された荒津大橋におけるケーブル振動の制振対策として、ダンパーを用いた結果、確実な制振効果を発揮することが実験より確認された。ケーブルにダンパーを設置した場合の減衰付加効果は初期の概略検討段階やダンパーの設計時に必要となるが、この値は複素固有値解析を行うことによって求められる。しかし、この解析を行う場合、スパン長、張力、ダンパーの設置位置が各ケーブルごとに異なると共に、ダンパーの粘性減衰係数値によって減衰効果が異なることから数多くの計算を必要とする。したがって、各ケーブルのダンパーによる減衰付加効果を簡便に推定できる方法が確立されれば、ダンパーを設計する上で非常に有効と考えられる。ケーブルダンパーの制振効果に関する研究としては Kavács¹⁾、米田・前田²⁾、藤野^{3) 4)}の研究がある。特に文献2) 4)ではケーブルダンパーの減衰付加効果に関して詳しく報告されている。本研究ではダンパーを設置した場合のケーブルの構造対数減衰率と粘性減衰係数の簡単な推定式を

* 工博 九州大学助教授 工学部土木工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

** 理修 九州大学助手 工学部土木工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

*** 工博 九州大学教授 工学部土木工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

**** 福岡北九州高速道路公社 技術管理課課長 (〒812 福岡市東区東浜2-7-53)

***** 三菱重工(株)広島製作所 鉄構部橋梁設計課 (〒730 広島市中区江波沖町5-1)

提案し、实在斜張橋のケーブル51本に対する複素固有値解析結果と提案式および既に発表されている推定式との比較により、その精度および妥当性の検討を行った。現在、建設が計画されている 400m 以上のケーブル長を有する斜張橋においては(1)サグの影響を無視できない、(2)取付位置を高くしなければ、ダンパーによる大きな付加構造対数減衰率が期待できない等の問題があることから、ここではサグの影響が無視できるケーブル長を対象としている。また、荒津大橋で実施されたダンパー制振の確認試験結果との比較により、実際にケーブルダンパーを設計する場合の問題点について検討を行った。

2. 斜張橋ケーブルの振動特性

表-1 荒津大橋ケーブルの固有振動数(Hz)

番号	スパン長 (サグ比)	次数	実験値		計算値	
			加振 試験	常時 微動	弦	棒 要素
W-1	L=166m (0.0049)	1	0.64	0.64	0.62	0.63
		2	1.26	1.25	1.23	1.23
		3	1.87	1.86	1.85	1.84
		4	2.52	2.48	2.47	2.47
		5	3.17	3.10	3.08	3.08
W-4	L=136m (0.0047)	1	0.74	0.74	0.72	0.72
		2	1.47	1.44	1.44	1.44
		3	2.22	2.15	2.16	2.16
		4	2.98	2.88	2.89	2.89
		5	3.75	3.59	3.61	3.61
W-7	L=107m (0.0032)	1	0.96	0.94	0.93	0.93
		2	1.90	1.86	1.86	1.86
		3	2.89	2.79	2.80	2.80
		4	3.83	3.74	3.74	3.74
W-13	L= 51m (0.0012)	1	2.08	1.98	1.98	1.93
		2	4.17	3.97	3.97	3.88

斜張橋ケーブルの振動特性とケーブルの数値解析モデルとの関係を検討するために、著者等が実施した荒津大橋のダンパー設置前の振動試験結果と数値解析結果を比較して表-1に示す。表中の実験値は小型加振機でケーブルを共振させた後の減衰自由振動から求めた固有振動数と常時微動のスペクトル解析より得られた値である。表中の計算値はサグのないケーブルに対して、曲げ剛性を無視した弦の振動として解析した結果と有限要素法⁵⁾を用いて張力による剛性を考慮した棒要素(ケーブルを37分割)として解析した結果である。ケーブルは通常風によってかなり振動していることから、常時微動試験と加振機試験を比べてみるとほぼ同等の結果が得られている。一般に斜張橋のケーブルは張力が大きいサグが小さく、表中の長さ166mのケーブルにおいてもサグが固有振動数に及ぼす影響は非常に小さい。このことより、スパン長250m程度まではサグの影響を無視してケーブルの振動特性を解析しても良いと考えられる。

3. 複素固有値解析

表-2 ケーブル諸元

	No.	L	W	T	η
A	W-1	166.06	0.098	418.1	0.0379
	W-4	136.11	0.098	384.5	0.0400
	W-7	106.57	0.098	394.2	0.0428
	W-13	51.38	0.079	319.7	0.0545
B	1	121.59	0.043	133.3	0.0378
	4	96.01	0.053	234.6	0.0437
	9	53.88	0.031	125.7	0.0591
	11	37.57	0.053	234.3	0.0690
C	1	219.60	0.101	202.9	0.0091 ~0.0182
	2	164.50	0.101	210.5	0.0122 ~0.0243
	3	68.00	0.101	176.8	0.0294 ~0.0588

本研究ではサグを無視できる範囲のケーブル長(250m程度)を対象としていることから、ケーブルの制振としてはほぼ6次以下の振動次数までを考えればよい。そこで、表-1に示す結果を参考にして、ケーブルにオイルダンパーを設置した場合の複素固有値解析⁶⁾は、ケーブルによる剛性を考慮した棒要素として有限要素法を用いて解析することにした。棒要素としての分割数が30以下の場合には固有振動数に対する影響は小さいが、付加構造対数減衰率を小さく見積る傾向がみられたことから、本解析では37分割とした。

L: スパン長(m) T: 張力(tf)
W: 単位長さ当り重量(tf/m) η : α/L

斜張橋のケーブル自身にも本来の構造対数減衰率が存在し、荒津大橋の振動試験によれば1次から5次の範囲で、通常 0.01 あるいはそれ以下であった(表-3 参照)。この値はケーブルにダンパーを設置した時

に生じる構造対数減衰率に比べてかなり小さいことから、本解析ではケーブル本来の構造対数減衰率を無視し、ダンパーのみによるケーブルへの付加構造対数減衰率を計算することとした。また、ケーブルの取り付け位置はケーブル下端より高いほど制振効果が大きい、美観上の問題より通常高欄の高さを限度として設計されることが多い。そこで、本解析においても基本的には桁上から2 mの高さの位置にダンパーを取り付けるものとした。

3.2 ケーブル諸元

本解析に用いたケーブル諸元の一部を表-2に示す。本文中では荒津大橋をA橋、他にケーブル長の範囲の異なる2つの橋をB橋、C橋とする。A橋ではケーブル長50~166mの範囲の計26本を対象とし、ケーブル取付位置(x_i)をスパン長(L)で割った η の範囲は0.0377~0.055である。B橋のケーブルはスパン長36~121mの範囲の22本を対象とし、A橋に比べて短いケーブルを有し、 η の範囲は0.0379~0.069となっている。C橋の長い方のケーブル長は220m、165mであり、 η の最小値は0.0091である。ここで、C橋においては η の範囲を変化させるためダンパーの取付位置を桁上2、3、4 mと3通りに仮定して解析を行った。

3.3 解析結果

A, B, C橋の51本のケーブルに対して複素固有値解析を実施し、ダンパーの粘性減衰係数Cとケーブルに付加される構造対数減衰率 λ_s の関係を調べた。図-1に解析結果の例としてA橋のW-1ケーブル($\eta=0.0378$)を示す。

図が示す特徴は文献2)、3)にも述べられているが、ここで整理してみると以下の通りである。ケーブル振動の各次数ごとに、ケーブルの付加構造対数減衰率を最大とするダンパーの最適粘性減衰係数が存在する。この最適粘性減衰係数の値は振動次数が高くなるにつれて小さくなっている。一方、最大構造対数減衰率も高次振動になるにつれて多少大きくなる傾向があるが、その差は非常に小さい。他のケーブルに対する複素固有値結果を全体的に比較してみると、ケーブル長(L)およびダンパー

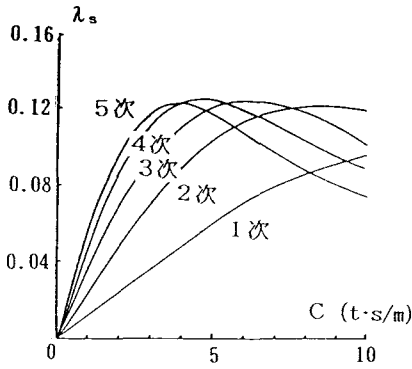


図-1 λ_s とCの関係

取付位置(x_i)によって、最大構造減衰率および最適粘性減衰係数の値が変化している。特に最大構造減衰率はパラメータ($\eta = x_i/L$)の影響を強く受ける。

次に、ダンパーの粘性減衰係数Cの値がケーブルの振動モードにどのような影響を与えるかを詳細に調べるために、A橋W-1ケーブルの3次の変位モードを例として図-2に示す。この変位モードは各質点の固有ベクトル成分の最大絶対値を1.00に基準化したものである。図はダンパー取付位置近傍を拡大したもので、

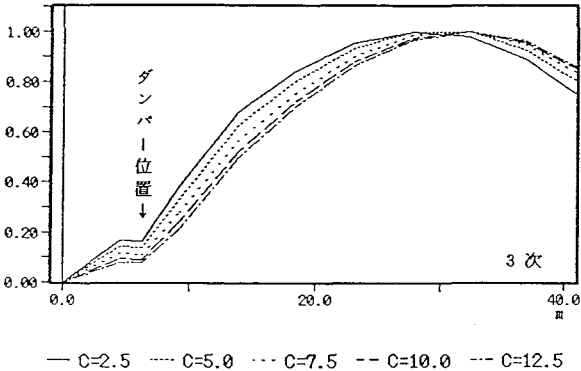


図-2 変位モード

横軸はケーブル長を示している。ダンパーの粘性減衰係数Cが大きくなるにつれて、ケーブルの振動モードが変化し、ダンパー取付位置が固定点に近づいていることがわかる。この傾向は高次振動になるほど大きい。このことはCの値が大きくなるにつれて、ダンパー取付位置のケーブル振動速度が小さくなることを示しており、このために減衰力が最大となる最適粘性減衰係数が存在することになる。

4. 減衰付加効果の推定式

4.1 既往の式

文献2)および文献4)において、すでに減衰付加効果の推定式が示されている。著者等の提案式との比較のために、その内容を簡単に示す。

ケーブルのs次振動を考えた場合のケーブルの最大構造対数減衰率 λ_s^0 とそれに対するダンパーの最適粘性減衰係数 C_s^0 とは次式で与えられる。

$$\text{文献2)} \quad \lambda_s^0 = 6.25 \eta (0.45 + \eta) \quad \text{文献4)} \quad \lambda_s^0 = 0.10 \frac{2\pi f_1 L W}{sg \eta} \quad (1)$$

$$C_s^0 = \frac{6.25}{P_c} \quad C_s^0 = 0.52 \eta \quad (2)$$

$$P_c = \frac{\eta \sin^2 s \pi \eta}{W L \frac{f_s}{g}} \quad (3)$$

ここで、

$$\eta = \frac{x_i}{L}$$

W : ケーブルの単位長さ当りの重量(tf/m)

g : 重力加速度(m/s²)

f_s : s 次の固有振動数(Hz)

$$\left(= \frac{s}{2L} \sqrt{\frac{gT}{W}} \right)$$

T : ケーブル張力(tf)

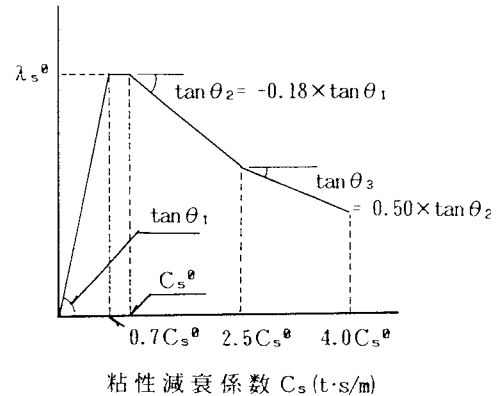


図-3 λ_s と C_s の関係
(文献2より)

いま、文献2)ではs次振動におけるケーブルの構造対数減衰率 λ_s と粘性減衰係数 C_s の関係を(1)、(2)式より得られた λ_s^0 と C_s^0 を用いて次の式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_s &= \lambda_s^0 \times \frac{C_s}{C_s^0(1-0.3)} & (0 < C_s \leq C_s^0(1-0.3)) \\ \lambda_s &= \lambda_s^0 & (C_s^0(1-0.3) < C_s \leq C_s^0) \\ \lambda_s &= \lambda_s^0 \times 1.0 - \frac{0.18}{C_s^0(1-0.3)} \times (C_s - C_s^0) & (C_s^0 < C_s \leq 2.5 C_s^0) \\ \lambda_s &= \lambda_s^0 \times 0.614 - \frac{0.09}{C_s^0(1-0.3)} \times (C_s - 2.5 C_s^0) & (2.5 C_s^0 < C_s \leq 4.0 C_s^0) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(4)式の関係を図-3に示す。

文献4)では λ_s と C_s の関係を縦軸をモード減衰(減衰定数)と η の比、横軸はモード次数s、ダンパー設置位置までのケーブル長 x_i 、ダンパーの容量C、ケーブルの単位長さ重量W、ケーブルの1次固有振動数 f_1 で無次元化した量で表している。詳しくは文献3)および4)を参照されたい。

4.2 提案式

3.3に示した解析結果を用いて、複素固有値計算を行うことなく、ケーブル制振用ダンパーの粘性減衰係数およびケーブルの構造対数減衰率の関係を求める式を提案する。

(1) 最大構造対数減衰率 λ_s^0

複素固有値解析より得られたケーブルの各次数の最大構造対数減衰率 λ_s^0 とダンパー取付け位置を示すパラメータ $\eta = x_i/L$ の関係を図-4に示す。この λ_s^0 と η の間にはほぼ直線の関係があり、他の振動次数においても同様の傾向がみられた。また、 λ_s^0 は振動次数 s と共に多少大きくなっていることから、 s 次の最大構造対数減衰率 λ_s^0 は η をパラメータとして次式で推定することができる。

$$\lambda_s^0 = (3.3 + 0.02s)\eta \quad (5)$$

ケーブル制振用のダンパーを設計する場合には、ある定数の粘性減衰係数をもつダンパーで高次振動まで減衰させることを目的とするため、かならずしも各次数の最大構造対数減衰率を正確に求める必要はない。サグが無視できるケーブル長の範囲内では、制振上問題となる振動次数としては6次程度まで考えれば良いことから、(5)式において $s=0$ とおいても誤差は少ないといえる。したがって、通常ダンパー設計用の推定式としては次式を用いれば十分であろう。

$$\lambda_s^0 = 3.3\eta \quad (6)$$

一方、文献2)および3)にも述べられているように図-4は η の値が0.01より小さい場合には、ケーブルの最大構造対数減衰率は0.03以下となり、ケーブルが長くなるとダンパーによる制振効果が小さくなることを示している。したがって、この場合にはケーブル取付位置 x_i を高くするなどの工夫が必要となろう。

(2) 最適粘性減衰係数 C_s^0

複素固有値解析により得られたA橋ケーブルの各振動次数の最適粘性減衰係数 C_s^0 と(3)式に示すパラメータ P_c の関係を図示したものが図-5である。この図より C_s^0 と P_c の間には良い相関がみられ、文献2)の提案している(3)式の精度が非常に高いことを示している。また、文献4)の結果も同様であった。一方、複素固有値解析結果によると各次数の C_s^0 は1次の最適粘性減衰係数 C_1^0 に対して、ほぼ次の式で近似できる。

$$C_s^0 = \frac{C_1^0}{s} \quad (7)$$

複素固有値解析より得られた最適粘性減衰係数 C_s^0 と1次の C_1^0 を用いて(7)式より推定した各次数の最適粘性減衰係数を比較してみたところ、両者にはほとんど差がみられなかった。したがって、(7)式を用いれば1

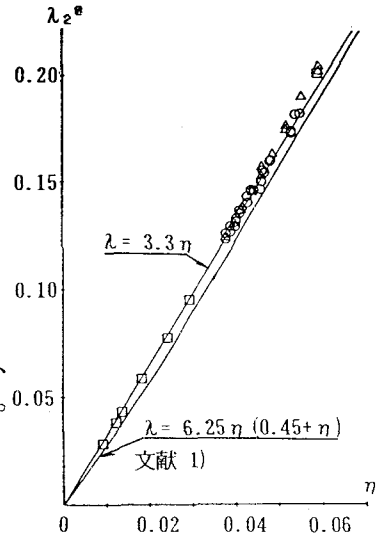


図-4 λ_s^0 と η の関係

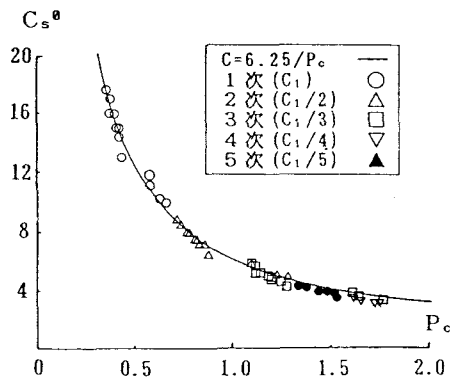


図-5 C_s^0 と P_c の関係

次の最適粘性減衰係数 C_1^0 より各次数の C_s^0 が簡単に計算できることになる。一方、既往の式である(1)式は固有値解析結果と良く一致していることから、ここでは、 C_1^0 を文献2)の(2)式より推定し、(7)式を用いて各次数の最適粘性減衰係数 C_s^0 を推定することにした。

$$C_1^0 = \frac{W L f_1}{g \eta \sin^2 \pi \eta} \quad f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{gT}{W}} \quad (8)$$

(3) 構造対数減衰率 λ_s と粘性減衰係数 C_s の関係

図-1に示したように、複素固有値解析で得られたケーブルの構造対数減衰率 λ_s とダンパーの粘性減衰係数 C_s の関係は振動次数によって異なる。一方、ケーブルの制振用のダンパーを設計する場合には、固定した粘性減衰係数をもつダンパー1個で、各次数の振動を制振する必要から、 $\lambda_s - C_s$ 曲線を正確に求める必要がある。

そこで、図-1に示す $\lambda_s - C_s$ 曲線において、各次数の最大構造対数減衰率 λ_s^0 で縦軸を、最適粘性減衰係数 C_s^0 で横軸を無次元化したものが図-6である。図-6に示すケーブルの η の範囲は 0.0091~0.0588 である。図より λ_s^0 と C_s^0 を用いて λ_s と C_s の関係を無次元化することにより、各次数の $\lambda_s - C_s$ 曲線が次数に無関係にほぼ一定の形状を示すことがわかる。この傾向は先の4.1で述べた文献3)、4)の無次元化量による図にも示されており、6次程度までは精度良く求められることが報告されている。本研究では設計時に簡単な式で計算できるように、 $\lambda_s - C_s$ の関係を3次関数で近似することにした。

いま、 λ_s^0 と C_s^0 で無次元化したパラメータを次式で定義する。

$$\bar{\lambda}_s = \frac{\lambda_s}{\lambda_s^0} \quad \bar{C}_s = \frac{C_s}{C_s^0} \quad (9)$$

図をみると $\bar{C}_s = 1.2$ 近傍で曲線の形状が変化することから、 $\bar{C}_s = 1.2$ の前と後で異なる3次関数を用いることにした。最小自乗法より得られた近似式を次に示す。

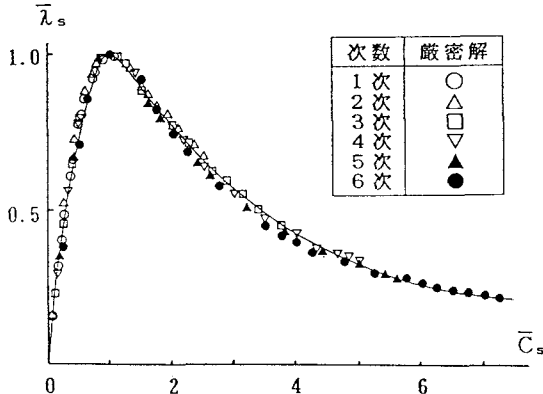


図-6 $\bar{\lambda}_s$ と $\bar{C}_s$ の関係

次数	厳密解	提案式	推定式 (既存)
1次	○	—	---
2次	△	—	---
3次	□	—	---
4次	▽	—	---
5次	▲	—	---

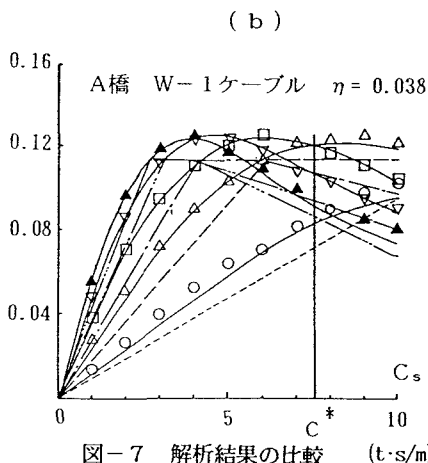
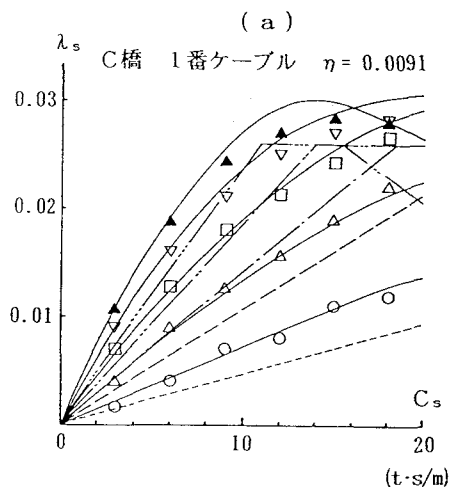


図-7 解析結果の比較 (t·s/m)

$$\overline{C}_s \leq 1.2 \quad \overline{\lambda}_s = 0.08 \overline{C}_s^3 - 1.16 \overline{C}_s^2 + 2.08 \overline{C}_s \quad (10)$$

$$\overline{C}_s \geq 1.2 \quad \overline{\lambda}_s = -0.0012 \overline{C}_s^3 + 0.0373 \overline{C}_s^2 - 0.3614 \overline{C}_s + 1.3460 \quad (11)$$

図中の実線は(10), (11)式より得られた近似式による曲線である。 η の影響を詳しく調べてみると、 η による差異は数%以内であり、かなりの精度で近似していることがわかる。

(6)式より各次数における最大構造対数減衰率 λ_s^0 および(7), (8)式より最適粘性減衰係数 C_s^0 が得られれば、任意の粘性減衰係数に対応する構造対数減衰率が得られることになる。

4.3 既往の式と提案式の比較

C橋 No. 1 ケーブル($\eta = 0.0091$)およびA橋のW-1 ケーブル($\eta = 0.0378$)に対する複素固有値解析結果と推定式による解析結果を比較して図-7に示す。提案式と厳密解を比較してみると、図-7(a)に示す η の小さいケーブルでは提案式より推定した構造対数減衰率が4次以上で小さく見積られている。この原因としては先の図-4に示すように η が小さい場合、構造対数減衰率が非常に小さな値となるため、誤差が大きくなるものと思われる。しかし、3次まではかなり精度よく推定しているといえる。図-7(b)のA橋では

表-3 実験値と計算値の比較

		(構造対数減衰率)			(固有振動数)				(構造対数減衰率)			(固有振動数)	
No.	次数	計算値	実験値		対策後		No.	次数	計算値	実験値		対策後	
			対策後	対策前	計算値	実験値				対策後	対策前	計算値	実験値
W-1	1	0.084	0.070	0.014	0.616	0.64	W-7	1	0.108	0.101	0.023	0.932	0.96
	2	0.123	0.075	0.007	1.232	1.26		2	0.140	0.076	0.008	1.864	1.90
	3	0.120	0.074*	0.008	1.848	1.87		3	0.129	0.138*	0.005	2.799	2.88
	4	0.107	0.065	0.004	2.466	2.52		4	0.112	0.055*	0.011	3.738	3.83
	5	0.094	0.081*	0.006	3.084	3.17	W-8	1	0.115	0.146*		1.021	1.07
W-2	1	0.087	0.065		0.649	0.67		2	0.144	0.134		2.043	2.15
	2	0.125	0.076		1.298	1.32		3	0.132	0.066		3.068	3.24
	3	0.121	0.062		1.948	2.00	W-9	1	0.124	0.108*		1.133	1.20
	4	0.108	0.057		2.599	2.67		2	0.152	0.065		2.268	2.38
	5	0.092	0.064*		3.251	3.31		3	0.136	0.111*		3.407	3.59
W-3	1	0.094	0.090		0.680	0.70	W-10	1	0.138	0.159*		1.285	1.37
	2	0.092	0.115*		1.360	1.41		2	0.146	0.131*		2.572	2.75
	3	0.123	0.069		2.042	2.10		3	0.121			3.864	
	4	0.108	0.070*		2.742	2.81	W-11	1	0.144	0.186*		1.467	1.55
	5	0.092	0.080*		3.409	3.53		2	0.150	0.085		2.936	3.12
W-4	1	0.096	0.124*	0.009	0.720	0.74		3	0.123			4.413	
	2	0.131	0.131*	0.004	1.441	1.47	W-12	1	0.163	0.131		1.681	1.76
	3	0.125	0.127*	0.006	2.163	2.22		2	0.158	0.082		3.368	3.53
	4	0.108	0.092*	0.004	2.887	2.98		3	0.127			5.043	
	5	0.093	0.091*	0.003	3.613	3.75	W-13	1	0.173	0.144	0.007	1.934	2.08
W-5	1	0.100	0.085		0.772	0.79		2	0.162	0.089	0.007	3.877	4.17
	2	0.135	0.076		1.544	1.58	E-4	1	0.102	0.089		0.779	0.81
	3	0.125	0.059		2.317	2.38		2	0.131	0.131*		1.558	1.62
	4	0.108	0.051		3.093	3.17		3	0.119	0.122*		2.337	2.43
W-6	1	0.104	0.138*		0.847	0.87	4	0.102	0.079		3.119	3.25	
	2	0.137	0.142*		1.695	1.74	(*: 振幅依存性あり)						
	3	0.127	0.082		2.545	2.62							
	4	0.110	0.069		3.398	3.50							

(*: 振幅依存性あり)

両者にほとんど差がなく、他のケーブルに対する解析結果においても η が0.2~0.6の範囲ではほぼ一致していた。一方、文献4)による値は我々の提案式とほぼ同様の結果を示していた。また、文献3)の結果と厳密解を比較した場合、 η の値にかかわらず各振動次数において全般に構造対数減衰率を小さく見積っていると共に、低次振動において λ -C₀曲線を直線式で近似しているために誤差が多少大きくなっている。

5. 荒津大橋の試験結果との比較

福岡市の福岡都市高速道路1号線に建設されている荒津大橋はスパン長345m、幅員21m、1面吊りマルチファン形式の3径間連続鋼斜張橋である。本橋は博多湾に面しており、冬季に10m/s程度の季節風が吹くことから、架設中にレインバイブレーションが発生した⁷⁾。このケーブル振動の制振対策として、本橋ではオイルダンパーが用いられることになり、ダンパー無し(対策前)およびダンパー取付後(対策後)のケーブルに対して振動試験による確認が実施された。

本橋では図-7に示す複素固有値解析結果を用いて、ダンパーの粘性減衰係数は各次数の構造対数減衰率が目標値0.05以上を達成するように、 $C=7.5t \cdot s/m$ (図-7(b)の C^* 値)と決定された。このCを有するダンパーがどの方向の振動に対しても有効に働くように、各ケーブルに2個ずつ直角方向に設置された。

表-3は実験により得られた対策前と後の構造対数減衰率および対策後の固有振動数を計算値と比較したものである。表中の固有振動数を実験値と理論値を比較してみると、両者の差は小さいといえる。表中の対策前はケーブルが本来有する構造対数減衰率であり、1次において多少大きな値がみられるが、一般的に0.01以下で非常に小さく、レインバイブレーション等の振動振幅がかなり大きくなることを示している。図-8は対策後のケーブルの構造対数減衰率の振幅依存性の例を示したものである。図によれば振動振幅によって2つ構造対数減衰率が得られ、いくつかのケーブルにおいても同様の傾向がみられた。表-3中の*印はこの振幅依存性のみられた場合を示したもので、構造対数減衰率としては最大値を示している。対策後の構造対数減衰率は各次数とも設計目標値0.05以上となっているものの、計算値との間にはかなりの差がみられる。そこで、実験より得られた対策前後の構造対数減衰率の差からダンパーによって付加された構造対数減衰率を求め、これと理論値との比を図-9に示す。データ数が少ないため、はっきりしたことはいえないが、各ケーブルおよび各次数で計算値と実験値はかなり異なっている。ケーブル本体の構造対数減衰率が小さいことから、これを見視した場合と計算値を検討するため対策後と計算値の比を図-10に示す。図によると1次振動では計算値の0.8~1.1程度となっているが、他の次数ではケーブル長に無関係に0.5~0.6程度となっている。

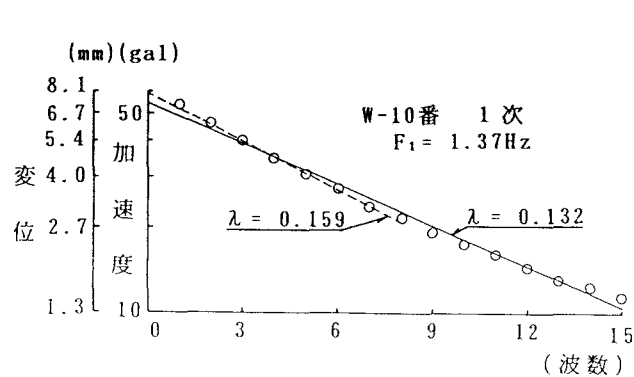


図-8 構造対数減衰率の振幅依存性

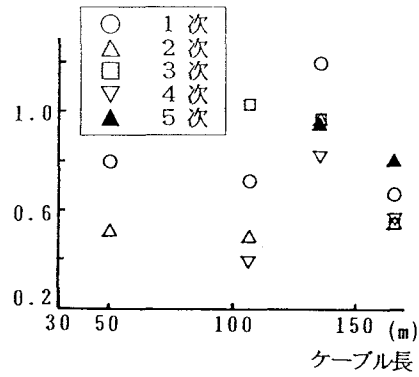


図-9 構造対数減衰率の実験値と理論値の比

構造対数減衰率が実験値と計算値とで異なる原因として、次のことが考えられる。

- 1) 計算値ではケーブル本体の構造対数減衰率を無視して計算しているため、1次のように計算値より大きな構造対数減衰率が得られる場合がある。
- 2) 実験より得られたケーブルの構造対数減衰率には振幅依存性がみられた。
- 3) ケーブルと桁が連成振動をするなど、斜張橋は複雑な振動特性を持つため、これらの影響が強く現れる。
- 4) オイルダンパーが微小振幅時に直線的に機能しない。
- 5) オイルダンパーとケーブルの設置位置において多少のガタが発生する。

上記の原因の中で(1)は計算値より大きな構造対数減衰率が期待でき、(4)、(5)はオイルダンパーの設計時および取付施工時に十分注意すれば解決できるものと考えられる。特にオイルダンパーをケーブルに取り付けるとケーブルの振動は非常に小さくなることから、微小振幅時よりダンパーが正常に作動するように設計する必要がある。また、(2)、(3)を複素固有値解析に考慮することは現在のところ難しいと思われる。したがって、現実には著者および文献4)の提案式で $\lambda_s - C_s$ 曲線を描き、最悪の場合には計算値の半分程度の構造対数減衰率しか期待できないものとして、設計目標値の2倍程度の構造対数減衰率と対応するダンパーの粘性減衰係数を用いれば良いと思われる。

6. 結 論

本解析で得られた結果は次の通りである。

1. 著者等の簡単な提案式によって、複素固有値解析に近い精度でケーブルの構造対数減衰率とダンパーの粘性減衰係数の関係を推定できることがわかった。
2. 荒津大橋における試験結果と複素固有値解析結果の比較より、実験より得られたケーブルの構造対数減衰率は1次を除いて理論値の0.5~0.6程度であった。現実には制振用ダンパーを設計する時にはこの点を考慮してダンパーの粘性減衰係数を決定する必要がある。

今後、主桁とケーブルの振動特性の関連、複素固有値解析上の問題等を検討していくと共に、実在斜張橋におけるケーブルの制振効果に関する試験を実施していく必要がある。

本研究を進めるにあたり東京大学藤野陽三助教授には貴重な御意見や文献の紹介を頂いた。また、本研究の数値解析において大学院生諸富正和君の助力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

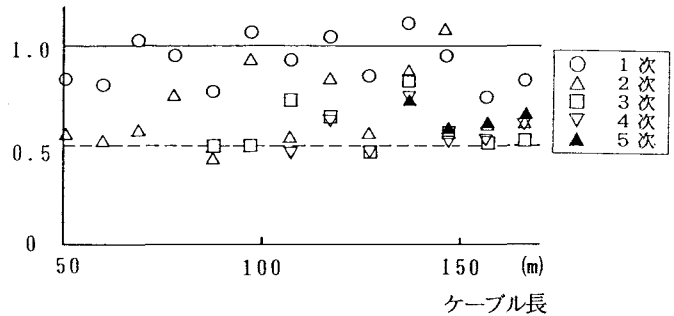


図-10 構造対数減衰率の実験値と計算値の比
(ケーブル本体の構造対数減衰率を無視した場合)

参 考 文 献

- 1) Kovács, I. : Zur Frage de Seilschwingungen und der Seildämpfung, Bautechnik, 1982, 325-332
(訳: 前田研一, 米田昌弘; 橋梁 昭和60年1月, 3月)
- 2) 米田昌弘, 前田研一: ケーブル制振用ダンパーの粘性減衰係数設定に関する一考察, 土木学会論文集, 第410号/I-12(1989), 455-458
- 3) 藤野陽三: 構造物の制振対策(土木分野), 日本風工学会誌, 第44号, 平成2年7月, 53-69
- 4) Sulech, A., Pacheco, B.M. and Fujino, Y. : A universal curve for modal damping in cables with dashpot, 第45回土木学会年次講演会, 平成2年9月
- 5) J.S.Przemieniecki著, 山田嘉昭, 川井忠彦訳: マトリックス構造解析の基礎理論, 培風館, 昭和46
- 6) 山田善一, 後藤洋三: 非比例減衰をもつ多自由度系の振動解析, 日本鋼構造協会第5回大会研究集会マトリックス構造解析法研究発表論文集, 昭和46, 346-353
- 7) Yoshimura, T., Tanaka, T., Sasaki, N., Nakatani S. and Higa S. : Rain-Wind Induced Vibration of the Cables of the Aratsu Bridge, Proc. of 10th National Symposium on Wind Engineering, 1988, 127-132

(1990年10月12日受付)