

論文・報告

ケーブル制振用粘性せん断型ダンパーの開発

On the New Type of Damping Device Developed for Suppressing Wind-Induced Cable Vibrations of Cable-Stayed Bridges

米田 昌弘*
Masahiro YONEDA

前田 研一**
Ken-ichi MAEDA

町田 文孝***
Fumitaka MACHIDA

枝元 勝哉***
Katsuya EDAMOTO

柳澤 則文***
Norifumi YANAGISAWA

寺本 耕一***
Koichi TERAMOTO

It is significant to study the damping device for the cables of the cable-stayed bridges, because the structural damping plays an important role in the aerodynamic behaviour of the stay cables.

In this study, a new type of damping device using viscous-shear resisting force is investigated. Model tests were carried out to examine the relations between viscous-shear resisting force and parameters such as amplitude, velocity, temperature, etc. Cable vibration tests on a full scale bridge were also performed to demonstrate the effectiveness of the proposed damper. It was found that the damping of the stay cables with this new type of damper could be increased to the required level in the aerodynamic design.

Keywords: new type of damping device, wind-induced cable vibration, cable-stayed bridge

1. まえがき

斜張橋は、吊橋に次いで剛性の低い柔構造物であることから、桁部の耐風設計にあたっては、従来より風洞模型実験を実施して、動的耐風安定性を詳細に検討している。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およびポリエチレン管被覆の太径ケーブルの一般化を契機に、Wake galloping¹⁾やRain vibration²⁾等の風によるケーブル自身の振動が大きな問題として挙げられ、初期の設計段階からケーブル振動の対処方法³⁾について検討する機会も多くなっている。

斜張橋ケーブルの風による振動に対処する方法として、欧米ではプロトヌ橋、キュールブラント橋、サンシャインスカイウェイ橋、チョルン橋等に代表されるように、ケーブルにダンパーを装着する方法が積極的に採用されている。これに対し、わが国では名港西大橋、樫石島橋、岩黒島橋、呼子大橋等に代表されるように、ピアノ線や特殊な治具でケーブル同士を結合する方法が採用されてきた。しかしながら、荒津大橋でケーブルにオイルダンパーを装着する方法がはじめて採用され⁴⁾、確実な制振効果が得られたことから、ダンパー方式は有効なケーブル制振対策方法として注目を浴びつつある。また、欧米で採用されてきたダンパー方式では美観的に改

良の余地が残されていたのに対し、荒津大橋では自動車防護柵より低い位置にオイルダンパーを設置して美観に配慮するとともに、複素固有値解析を実施してダンパーの所要粘性減衰係数を設定するなど、ケーブル制振用ダンパーを工学レベルまで高めた業績は評価に値しよう。

このように、オイルダンパー方式は有効なケーブル制振対策方法として確立されつつあるが、風によってケーブルが楕円振動するような場合にも対処できるよう、一般には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必要がある。それゆえ、ダブルケーブルが採用された斜張橋にオイルダンパー方式を採用しようとする場合には、ダンパーの取り付け構造が複雑になる。また、オイルダンパー方式では、定期的な維持管理が必要であり、微小振幅時での効果等においても改良すべき問題点が残されていた。そこで、著者らは粘性体のせん断抵抗を利用し、一つのダンパーで面内と面外の2方向の微振動に対処できる、ケーブル制振用粘性せん断型ダンパーを開発すべく研究に着手した。この粘性せん断抵抗を利用したダンパーは橋梁用耐震ストッパー⁵⁾や配管の耐震装置⁶⁾として一部利用されているものの、地震時に比べ対象とする振幅域が小さい、風によるケーブル振動の制振に適用された実績は今までのところ報告されていない。

*川田工業㈱技術本部振動研究室室長 **川田工業㈱技術本部中央研究室室長 ***川田工業㈱技術本部中央研究室

振用粘性せん断型ダンパーの抵抗力特性を把握することとした。

(2) ケーブル制振用粘性せん断型ダンパーの抵抗力特性

配管の耐震装置として従来より用いられている粘性せん断型ダンパーでは、対象とした振動振幅域が粘性体厚さより大きく、その抵抗力特性は次式で表示される⁶⁾。

$$F = 0.59 e^{-0.043t} \cdot (v/d)^{0.5} \cdot S \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 F は抵抗力(kg)、 t は温度(°C)、 v は速度(cm/sec)、 d は粘性体の厚さ(cm)、 S は粘性せん断を期待する断面積(cm²)である。そこで、風による振動が最も発現する可能性が高いと予想された、最上段(C1)ケーブルを対象に式(1)を適用して、設計温度30°C、振動振幅0.5 cm、振動数0.5 Hzで粘性減衰係数が9 t/m/s程度となる供試体を製作し、室内実験により、ケーブル制振用粘性せん断型ダンパーの抵抗力特性を把握することにした。製作した供試体の概略図を図-2に示す。

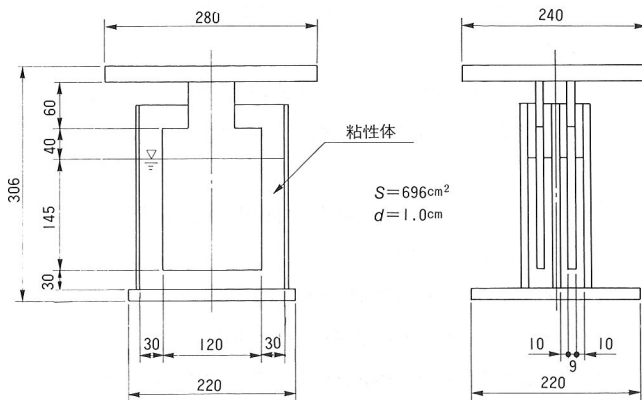


図-2 供試体の概略図

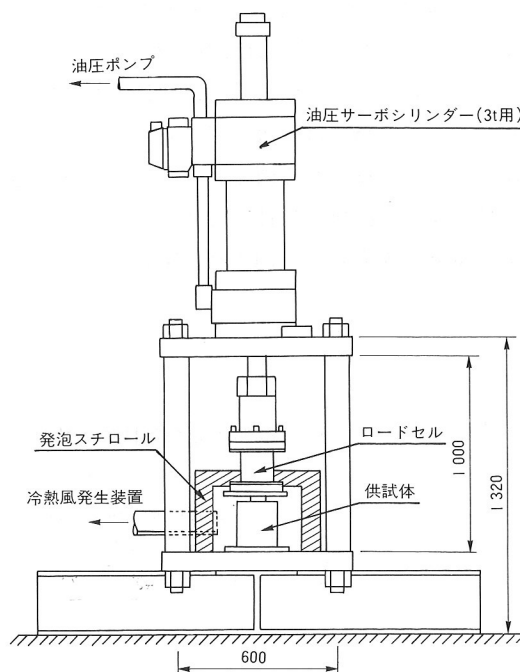


図-3 ケーブル面内方向に対する試験機概要図

室内実験では、油圧サーボシリンダーでケーブルを面内方向と面外方向に加振して抵抗力特性を把握することとした。参考までに、ケーブル面内方向の加振装置を図-3に、また、実験で対象とした加振振幅と加振周波数の組み合わせを表-3に示す。なお、実験にあたっては、抵抗力の温度依存性を把握するため、温度可変装置で0°C、20°C、40°Cなる温度条件を目標に実施している。3°C、20°C、40°Cなる条件の基で得られた、ケーブル面内方向の速度-抵抗力特性を図-4～6に、20°Cなる条件の基で得られた、ケーブル面外方向の速度-抵抗力特性を一例として図-7に示す。これらの図より、振動振幅 a が0.5 cm程度以下の場合、振動振幅域が粘性体厚さに比べ小さいことに起因し、抵抗力特性には振幅依存性が認められることが理解できよう。図-4～7およびその他の実験結果より、振動振幅が0.5 cm程度以下の場合におけるケーブル面内方向と面外方向の抵抗力特性はおおよそ $a^{0.34}$ に比例していたことから、 $a^{0.34}$ を補正係数とした式(2)において、係数 A を種々の設定温度と設定振幅から算出してみた。

$$F = A e^{-0.043t} \cdot a^{0.34} \cdot (v/d)^{0.5} \cdot S \quad \dots\dots\dots(2)$$

その結果、 $A=0.76$ なる値が得られたが、式(2)において $A=0.76$ とした抵抗力は、 $a=0.47$ cmなる振幅で式(1)の抵抗力と等しくなる。それゆえ、振動振幅 a が $a \leq 0.47$ cmなる場合における粘性せん断型ダンパーの抵抗力特性は、おおよそ次式で表示できるものと考えられる。

$$F = 0.76 e^{-0.043t} \cdot a^{0.34} \cdot (v/d)^{0.5} \cdot S \quad \dots\dots\dots(3)$$

(振幅 a が $a \leq 0.47$ cmの場合)

図-4～7には、式(1)および式(3)による推定値も併記してあるが、幾分ばらつきはあるものの、工学的には振幅 a が $a > 0.47$ cmで式(1)の、 $a \leq 0.47$ cmで式(3)の適用がほぼ許容できるものと考えられる。ただし、ここで得られた抵抗力特性は、表-3の試験条件の範囲内で、図-2に示した構造諸元を有する粘性せん断型ダンパーに対して得られた値であることに留意する必要がある。

さて、式(1)、(3)から判るように、ケーブル制振用粘性せん断型ダンパーは速度の1/2乗に比例することから、ここでは工学的な取り扱いを容易にするため、速度に比例する等価粘性減衰に置換する。減衰力が $C_n X^n$ の形で与えられる場合、等価粘性減衰係数 C_e は一般に次式で表示できる⁸⁾。

表-3 室内実験における加振条件

振 幅 振動数	0.5 mm	1.0 mm	2.0 mm	5.0 mm	10.0 mm	20.0 mm
0.5Hz	○	○	○	○	○	○
1.0Hz	○	○	○	—	—	—
2.0Hz	○	○	○	—	—	—
4.0Hz	○	○	○	—	—	—

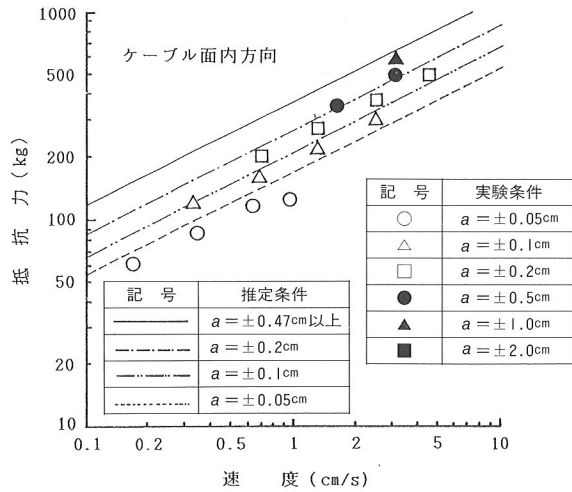


図-4 ケーブル面内方向に対する供試体の速度—抵抗特性（粘性体温度が3°Cの場合）

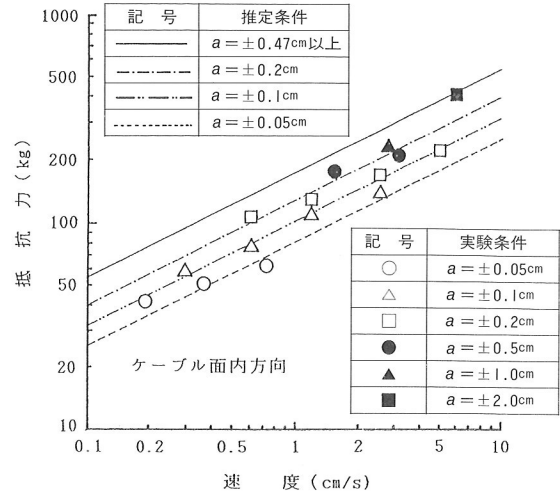


図-5 ケーブル面内方向に対する供試体の速度—抵抗特性（粘性体温度が20°Cの場合）

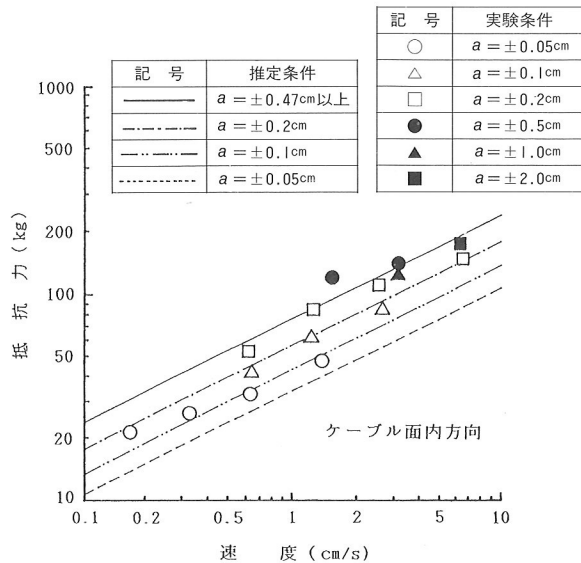


図-6 ケーブル面内方向に対する供試体の速度—抵抗特性（粘性体温度が40°Cの場合）

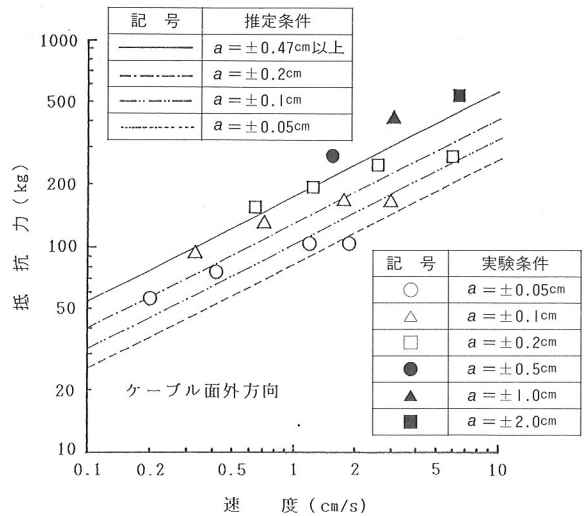


図-7 ケーブル面外方向に対する供試体の速度—抵抗特性（粘性体温度が20°Cの場合）

$$C_e = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma\left(\frac{n+2}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n+3}{2}\right)} C_n \cdot a^{n-1} \cdot \omega^{n-1} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 C_n は減衰係数、 a は振幅、 ω は固有円振動数、 Γ はガンマ関数である。上式において $n = 1/2$ とし、式(1)に対応する減衰係数を代入すると、振幅 a が $a > 0.47\text{cm}$ なる場合における、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次式で与えられる。

$$C_e = 0.66 e^{-0.043t} \cdot S \cdot d^{-0.5} \cdot a^{-0.5} \cdot \omega^{-0.5} \quad \dots\dots\dots(5)$$

また、振幅 a が $a \leq 0.47\text{cm}$ なる場合における、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、同様に次式で与えられる。

$$C_e = 0.85 e^{-0.043t} \cdot S \cdot d^{-0.5} \cdot a^{-0.16} \cdot \omega^{-0.5} \quad \dots\dots\dots(6)$$

式(5)、(6)より、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 a が小さいほど等

価粘性減衰係数は大きくなることが判る。

3. 実橋ケーブル試験

(1) 実験概要

下から3段目のケーブル(C5ケーブル)が張り渡された幸魂橋の架設状態で、実橋ケーブルに対する粘性せん断型ダンパーの性能確認実験を実施した。対象としたケーブルはP₁₁側のC5ケーブルである。C5ケーブルの構造諸元を表-4に、ケーブルのサグの影響を無視した場合のC5ケーブルの固有振動数(解析値)を表-5に示す。なお、実橋ケーブル試験では、室内実験で対象とした供試体と同じ抵抗特性を有する粘性せん断型ダンパーを用いている。

粘性せん断型ダンパーは、景観上の配慮から設置高さが中央分離帯の自動車防護柵高さと同程度になるように考え、上フランジから0.9mの高さ(ケーブル定着点から

表-4 C5ケーブルの構造諸元

ケーブル名称	ケーブル長さ l (m)	断面積 A_c (m ²)	重量 w (t/m)	張力 T (t)
C5	100.23	0.0121	0.1007	428.5

表-5 C5ケーブルの固有振動数(解析値)

次数	固有振動数 (Hz)
1次	1.019
2次	2.038
3次	3.057

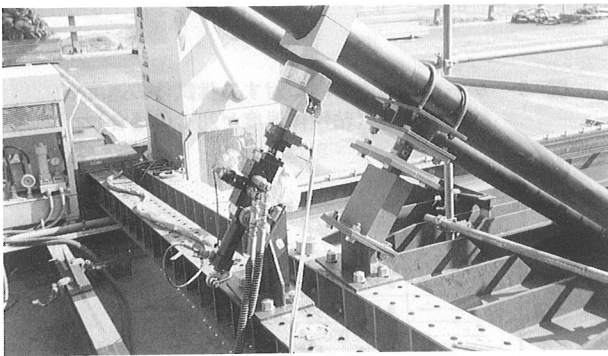


写真-1 実橋ケーブル試験状況

の高さは2.5 m, ダンパー取り付け位置/ケーブル長さ=0.0471)のケーブル法線方向に取り付けるものとした。なお、この際ダンパーによる制振効果を効率良く期待するために、桁側のケーブル緩衝装置を除去している。また、実橋ケーブル試験でも粘性せん断型ダンパーの温度依存性を把握するため、温度可変装置でダンパーの粘性体温度を0℃、20℃、40℃なる温度条件を目標に実施することとした。参考までに、実橋ケーブルでの試験状況(粘性せん断型ダンパーを設置した場合)を写真-1に示す。

(2) 実験結果と考案

一例として、粘性せん断型ダンパーの設置後における面内1次の減衰自由振動波形を図-8に、粘性せん断型ダンパーの設置前後における面内2次の減衰自由振動波形を図-9に示す。また、ダンパー設置前後における、面内振動の構造対数減衰率をそれぞれ表-6、7に示す。なお、本実験時に、C5上流側ケーブルを面内1次振動で加振した場合、共振現象で下流側ケーブルも大きく振動し、良好な減衰自由振動波形を得ることができなかった。それゆえ、図-8はサグが若干変化した後日に得られた面内1次の減衰自由振動波形であり、表-7にはこの値を記している。また、今回の加振振幅の範囲内では式(6)からも予想されるように、振幅が大きくなるにしたがって構造対数減衰率が増加するという振幅依存性も若干認められたが、その程度は比較的小さかったことから、表-7中には実験振幅域内の平均値を記している。これらの結果より、粘性せん断型ダンパーに起因した減衰付加効果は、

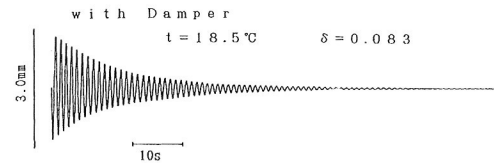


図-8 面内1次の減衰自由振動波形

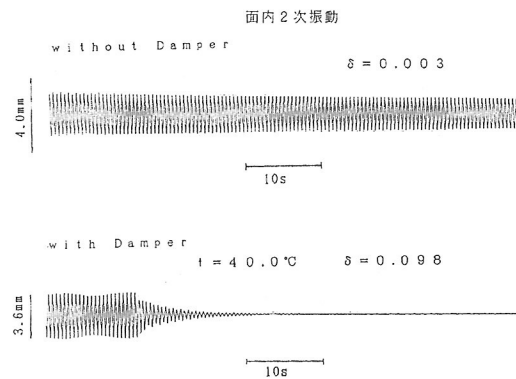


図-9 面内2次の減衰自由振動波形

表-6 C5ケーブルの構造対数減衰率
(面内振動; ダンパーが無い場合)

振動次数	構造対数減衰率
1	—
2	0.003
3	0.003

表-7 C5ケーブルの構造対数減衰率
(面内振動; ダンパーが有る場合)

振動次数	温度 (°C)	構造対数減衰率
1	—	—
	18.5	0.083
	—	—
2	-0.2	0.036
	18.5	0.064
	40.0	0.098
3	0.5	0.041
	18.5	0.064
	39.8	0.091

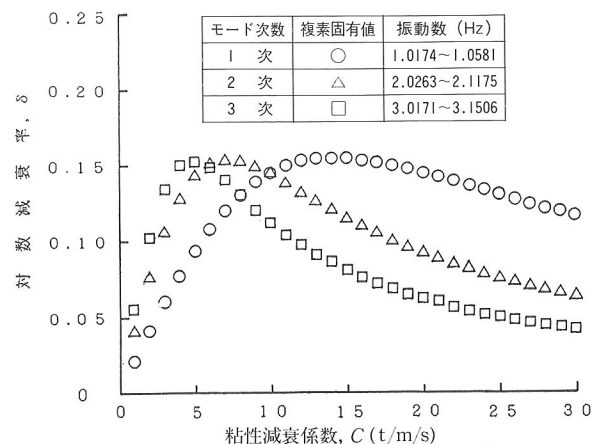


図-10 C5ケーブルに対する複素固有値解析結果

表-8 等価粘性減衰係数とダンパー効率

振動次数	温度 (°C)	等価粘性減衰係数 (t/m/s)	ダンパー効率
1	—	—	—
	18.5	14.22	0.54
	—	—	—
2	-0.2	23.97	0.46
	18.5	10.73	0.46
	40.0	4.26	0.74
3	0.5	18.99	0.63
	18.5	8.76	0.53
	39.8	3.50	0.64

最大片振幅が1.0 mm～2.0 mm程度と小さいにもかかわらず非常に大きいこと、また、0.1 mm以下の非常に小さな振幅域においても有効に作用していることが理解されよう。

ただし、粘性せん断型ダンパーに起因した減衰付加効果には、式(3)からも予想されるように明確な温度依存性が認められ、今回の実験では温度が高くなって相対的にダンパーの粘性減衰係数が小さくなった場合に、より大きな減衰付加効果が得られている。これは、実験で使用した粘性せん断型ダンパーは、数mm程度の微小振幅域ではC5ケーブルにとって幾分過大なものとなっており、それゆえ、図-10から判るように、温度が高くなって相対的にダンパーの粘性減衰係数が小さくなるほど、より大きな減衰付加効果を示したものと考えられる。

次に、実験での加振振幅域を考慮して、式(6)から等価粘性減衰係数(算定に用いた基準振幅は面内1次で0.15 cm, その他のモードで0.1 cm)を算出するとともに、この等価粘性減衰係数に対応する複素固有値解析の理論値と構造対数減衰率の実測値とを比較した。その結果を表-8に示す。表-8より、ダンパー効率には幾分ばらつきがあり、平均すると0.6程度となっている。このようにC5ケーブルの実橋試験から算出したダンパー効率が幾分小さくなっているのは、測定振幅域が非常に小さかったことに加え、実験条件より算出した等価粘性減衰係数が、ダンパー設置後の構造対数減衰率が最大となる最適粘性減衰係数と同程度か幾分大きくなっており、ダンパーの固定点としての作用を呈する領域で測定されたことが主たる要因と考えられる。このことは、表-8からも判るように、等価粘性減衰係数が小さくなるにしたがってダンパー効率が大きくなる傾向を示していることから理解できよう。なお、実験上の問題から、面外振動に対する結果は得られていないが、本ダンパーの機構を考えれば、面外方向にも同様に十分な効果が期待できるものと思われる。

ケーブル制振用粘性せん断型ダンパーは、特有の温度依存性と振幅依存性を示し、たとえば、実際の温度が設計温度より低い、振動の発達過程では幾分過大な粘性減

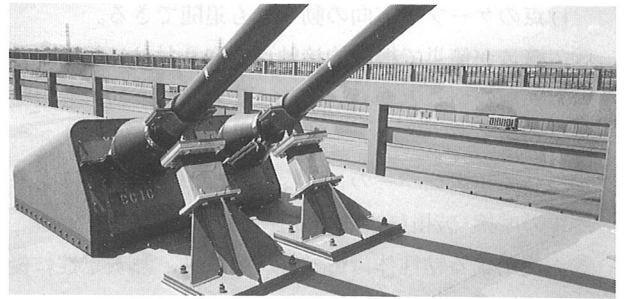


写真-2 粘性せん断型ダンパーの設置状況(その1)



写真-3 粘性せん断型ダンパーの設置状況(その2)

衰を与えることになる。しかしながら、振動振幅が大きくなるにしたがって、あるいは温度が高くなるにしたがって所要の粘性減衰係数の状態に近づき、付加される構造減衰は増加することになる。それゆえ、ダンパーの設計条件に十分配慮すれば、ここに報告した粘性せん断型ダンパーは、有効なケーブル制振対策の一つになり得るものと言えよう。

なお、幸魂橋では下から3段目ケーブルが張り渡された段階から、Wake gallopingと思われる風によるケーブル振動がしばしば観測されたことから、本橋の竣工直前に下から3段目以上のケーブルに対してこの粘性せん断型ダンパーが採用されている。粘性せん断型ダンパーの設置状況を写真-2、3に示すが、ダンパー設置後は、風による有害なケーブル振動は発現していないことを付記しておきたい。

4. まとめ

本研究は、斜張橋ケーブルの制振対策として新たに開発した粘性せん断型ダンパーについて報告したものである。まず、従来のオイルダンパー方式と比較した、粘性せん断型ダンパー方式の利点を以下にまとめる。

- ① 一つのダンパーで面内と面外の2方向に対処でき、経済性にも優れている。
- ② ケーブル張力の変動などによる、ダンパー取り付け

け点のケーブル方向の動きにも追従できる。

- ③ 構造が簡単で機械的接触点や取り付けに起因するガタがないことから、0.5 mm以下の微振動にも追従できる。
- ④ オイルダンパーのようなシールがないため、シールの摩擦・破損による性能変化がない。
- ⑤ 使用する粘性体は耐候性、耐久性、熱安定性に優れており、維持管理が容易である。

しかしながら、粘性せん断型ダンパーでは、温度依存性と振幅依存性によって抵抗力特性が変化する。そこで、室内実験と実橋ケーブル試験を実施し、ダンパーの抵抗力特性とその効果について検討した。得られた検討結果は、以下のとおりである。

- ① 今回開発した粘性せん断型ダンパーは、振動振幅 a が $a > 0.47$ cm では従来の配管用粘性せん断型ダンパーと同じく振幅依存性はほとんど認められないのに対し、 $a \leq 0.47$ cm では特有の振幅依存性が認められた。そこで、温度依存性に加え、振幅依存性をも考慮した、ダンパーの抵抗力特性に関する実験式を与えた。
- ② 工学的な取扱いを容易にするとともに、実務設計の便を考え、この実験式に基づいた一般的な等価粘性減衰係数の算定式を与えた。
- ③ 粘性せん断型ダンパーを設置したケーブルの構造対数減衰率の実測値と複素固有値解析の理論値の比較から、ダンパー効率について検討した。その結果、ダンパー効率は等価粘性減衰係数の大きさによって幾分ばらつきがあり、等価粘性減衰係数が最適粘性減衰係数に近づくにつれて若干大きな傾向を示すものの、平均すると0.6程度の値であった。なお、この値は、ダンパーが固定点として作用する領域の片振幅数mm程度の微振動状態で測定された実測値から算出したものであり、今後は、より大きな振幅でかつダンパーの等価粘性減衰係数が最適粘性減衰係数より小さい領域でダンパー効率を算出する必要があるものと考えられる。

この粘性せん断型ダンパーは、風による有害な振動が観測された下から3段目以上の幸魂橋ケーブルに対して採用されている。ダンパー設置後に観測された最大平均風速は15~20 m/s程度であるが、今までのところ、設置前に観測された有害なケーブル振動は発現しておらず、粘性せん断型ダンパーは有効に作用している。それゆえ、ケーブル表面に突起やV字溝を設ける空気力学的制振対策^{9)~13)}に加え、ケーブル制振用粘性せん断型ダンパーは、今後の有効なケーブル制振対策の一つになり得るものと言えよう。

最後に、本研究にあたり、貴重な御助言をいただきま

すとともに、実橋ケーブル試験の機会を御提供くださいました建設省北首都国道工事事務所の関係者各位に、心よりお礼を申し上げます。また、本ダンパーの開発にあたり、御協力いただきましたオイレス工業㈱の関係者各位にも、心よりお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 横山功一・中神陽一・神寄一夫：近接した2本ケーブルの対風応答特性について、土木学会第40回年次学術講演会講演概要集, I-217, pp.433~434, 1985年9月。
- 2) 樋上琇一：斜張橋ケーブルのRain Vibration, 日本風工学会誌, 第27号, pp.17~28, 1986年3月。
- 3) 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。
- 4) Yoshimura, T., Tanaka, T., Sasaki, N., Nakaya, S. and Higa, S.: Rain-Wind Induced Vibration of the Cables of the Aratsu Bridges, *Proc. of 10th National Symposium on Wind Engineering*, pp.127~132, December, 1988.
- 5) 伊関治郎：粘性せん断型ストッパー—多径間連続桁への一提案—, 橋梁, Vol.16, No.2, pp.1~4, 1980年2月。
- 6) 前田勝利・下田郁夫：粘性ダンパーを用いた配管の耐震・防振設計(その1), 配管技術, pp.105~110, 1983年8月。
- 7) 米田昌弘・前田研一・伊関治郎：新たに開発したケーブル制振用粘性せん断型ダンパーの減衰付加効果について, 第11回風工学シンポジウム論文集, pp.85~90, 1990年12月。
- 8) 亘理 厚：機械振動, 丸善, pp.88~91, 1966年4月。
- 9) 松本 勝・白石成人・北沢正彦・金 潤石・辻井正人：風雨条件下のケーブル振動現象に関する考察, 第10回風工学シンポジウム論文集, pp.133~138, 1988年12月。
- 10) 松本 勝・白石成人・北沢正彦・辻井正人・平井滋登：傾斜円柱の空力振動特性—ケーブルRain Vibrationとの関連性—, 第10回風工学シンポジウム論文集, pp.139~144, 1988年12月。
- 11) 松本 勝・北沢正彦・関本 宏・岸 明信・斉藤 通：東神戸大橋ケーブル風洞試験(その1), 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集, I-374, pp.800~801, 1989年10月。
- 12) 宮崎正男：斜張橋ケーブルの空力不安定振動と制振対策, 第10回風工学シンポジウム論文集, pp.145~150, 1988年12月。
- 13) Matsumoto, M., Yokoyama, K., Miyata, T., Fujino, Y. and Yamaguchi, H.: Wind-induced Cable Vibration of Cable-stayed Bridges in Japan, *Canada-Japan Workshop on Bridge Aerodynamics*, Ottawa, Canada, September, 1989.