

マルチケーブル形式斜張橋の構造減衰特性に及ぼす ケーブルダンパーの効果

EFFECTS OF CABLE VIBRATION DAMPERS ON THE WHOLE STRUCTURAL DAMPING OF MULTI-CABLE-STAYED BRIDGES

前田 研一*・米田 昌弘**

By Ken-ichi MAEDA and Masahiro YONEDA

It will be significant to study the devices for increasing the structural damping of the cable-stayed bridges, because the structural damping plays an important role in the aerodynamic behaviour. It may happen that the transverse local vibrations of the cables as a partial structure system couple with the vibrations of the cable-stayed bridge as a whole structure system, for those bridges in recent years which tend to be more longer and to have the multi-cable system.

Therefore, in this brief paper, the effects of cable vibration dampers on the whole structural damping of multi-cable-stayed bridges was investigated by means of complex eigenvalue calculation. And it was shown that the structural damping of this type of bridges having the dampers in the stay cables could be increased as much as significant in aerodynamic design.

Keywords: structural damping, cable-stayed bridge, aerodynamic stability

1. ま え が き

斜張橋の使用実績は最近急速な伸びを示しているが、斜張橋は吊橋に次いで剛性の低い橋梁形式であることから、風による振動に対して細心の注意を払う必要がある。

風によって誘起される振動は、幾何学的な断面形状に著しく依存することから、現在では個々の橋梁ごとに風洞模型実験を実施して、対象とした橋梁の動的耐風安定性を検証する方法が一般に採用されている。しかしながら、風洞模型実験により、空気力学的に最も優れた断面形状を見出した場合にも、静的設計との関係から、実橋にそのまま適用することは容易でないことも多い。それゆえ、静的設計の段階から、過去の空気力学的に良好と考えられる断面形状を採用するとともに、剛性・質量・構造減衰のような構造的要因の寄与をできるだけ大きくする努力も必要である。

これらの構造的要因の中でも、構造減衰は橋梁の動的耐風安定性を支配する最も重要なものであるが、斜張橋では可動支承部でのクローン減衰の寄与が小さく¹⁾、横

山ら²⁾が報告するようにその構造対数減衰率は同じ中央支間長を有する箱桁橋よりも一般に小さい。それゆえ、動的耐風安定性の信頼性を向上させる意味からも、斜張橋の構造減衰を高める方法について検討することは重要であろう。

ところで、斜張橋の動的耐風安定性の検討にあたっては、風による桁部の振動のみならず、Wake galloping³⁾やRain vibration⁴⁾等の風によるケーブル自身の振動にも対処する必要がある。ケーブルの風による振動に対処する方法として、わが国では一般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、また、欧米では積極的にケーブルにダンパーを挿入する方法がしばしば採用されている。また、斜張橋の桁部にT.M.D.を設置して構造減衰を増加させ、桁部の動的耐風安定性を向上させる方法もいくつか実施されているようである⁵⁾。しかしながら、これらの方法は、通常の場合、ケーブル部と桁部の耐風性を同時に向上させることはできない。

一方、著者ら⁶⁾は、ケーブルの横振動数を、ケーブルの横振動を無視した斜張橋全体系の桁の固有振動数に接近させると、システムダンピング効果とよばれる一種のT.M.D.としての作用効果が期待できることを報告している。ますます長大化し、架設上の配慮からマルチケーブル形式が採用される傾向にある最近の長大斜張橋で

* 正会員 工博 川田工業(株)技術本部中央研究室長
(〒114 北区滝野川1-3-11)

** 正会員 工博 川田工業(株)技術本部中央研究室主任研究員(同上)

は、意図的にケーブルの横振動数を調律しなくても桁とケーブルが連成振動を生ずる可能性も十分に予想される。しかしながら、このシステムダンピング効果は、十分な大きさのケーブルの構造減衰が確保されていることが前提条件であり、現状では不確定な要素を含んでいる⁷⁾。そこで、著者らは、桁とケーブルが連成振動を生じる可能性のあるマルチケーブル形式斜張橋において、連成振動に関係する特定のケーブルにダンパーを挿入することによって、ケーブル部のみならず桁部の振動に対応する構造対数減衰率を確実に増加させることを考えた。なお、著者らの知るかぎり、このような場合のダンパーによる減衰付加効果は、今までのところ、検討されていない。

本研究は、このような観点から、桁とケーブルが連成振動を生ずる可能性のあるマルチケーブル形式斜張橋を対象として、複素固有値解析により連成振動に関係する特定のケーブルにダンパーを挿入した場合の構造減衰特性を把握し、斜張橋の動的耐風設計上の基礎資料を得ることを試みたものである。

2. 対象としたマルチケーブル形式斜張橋とその非減衰固有振動数特性

対象としたマルチケーブル形式斜張橋は、図-1に示すような中央支間長が420 mの3径間連続形式である。この斜張橋は、文献6)で対象とした実橋設計例を引用したものであるが、断面諸量については文献6)では断面変化した値を示していることから、ここでは表-1に示す値を用いることとした。

まず、斜張橋の非減衰固有振動数特性を把握するために、実固有値解析（以下、固有値解析と記す）を実施した。ケーブル全段の横振動を無視した場合に得られた固有値解析結果を表-2に示す。また、中央径間側のケーブル全段についてその密度と張力をそれぞれ11.0 t/m³、1050 tと仮定し、ケーブルの横振動を考慮した場合に

表-2 ケーブルの横振動を無視した場合の非減衰固有振動数

次	数	非減衰固有振動数	振動モード
1	次	0.3889 Hz	たわみ対称1次
2	次	0.4398 Hz	(橋軸方向)
3	次	0.7224 Hz	たわみ逆対称1次

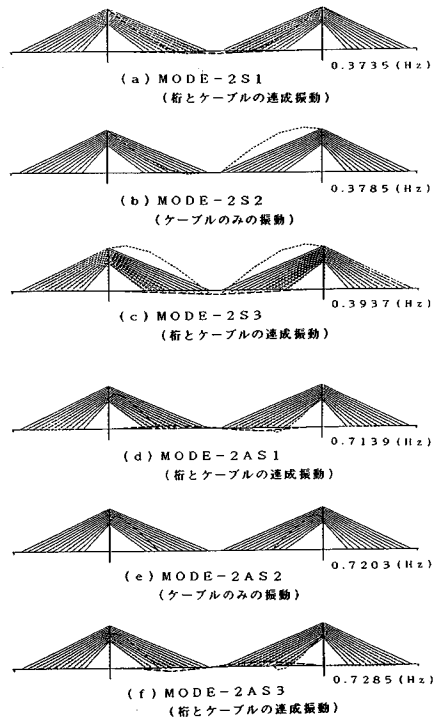


図-2 実固有値解析結果の一例

ついて固有値解析を実施した。得られた解析結果の一例を図-2に示す。なお、ここで仮定したケーブル密度は文献6)からそのまま引用したものであり、また、ケーブル張力は文献6)で示されたケーブル全段の値をほぼ平均したものに对应する。

図-2(a)~(c)より、この場合には、桁とケーブルが連成した2つのモード (MODE-2S1とMODE-2S3)とケーブルのみが振動する1つのモード (MODE-2S2)が存在していることがわかる。これは11段目ケーブルの横振動数が、ケーブル全段の横振動を無視した斜張橋全体系の桁の鉛直たわみ対称1次振動数 (0.3889 Hz)と非常に接近していたことに起因する。また、3段目ケーブルの横振動数は、桁の鉛直たわみ逆対称1次振動数 (0.7224 Hz)と非常に近く、図-2(d)~(f)より、同様に桁とケーブルが連成した2つのモード (MODE-2AS1とMODE-2AS3)とケーブルのみが振動する1つのモード (MODE-2AS2)が存在していることもわかる。

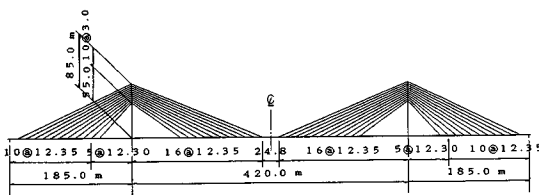


図-1 対象としたマルチケーブル形式斜張橋

表-1 断面諸量

	断面積 (m ²)	断面2次モーメント (m ⁴)	弾性係数 (t/m ²)
桁	1.319	53.062	21000000.
タワー	1.865	6.811	21000000.
ケーブル	0.032	0.000	20500000.
水平ばね (3 m)	1.000	0.000	36000.

3. ケーブルにダンパーを挿入した場合の構造減衰特性

(1) ダンパーの設置方法

2. で述べたような、ケーブルの横振動を考慮した場合の非減衰固有振動数特性を把握した後、連成振動に関係する中央径間側の11段目と3段目のケーブルにダンパー（減衰力は速度比例型とする）を挿入することにした。

図-3からわかるように、ダンパーのケーブル定着位置は桁上から1.0mと1.5mの2ケースとし、また、桁上での定着はケーブル定着位置から法線方向の延長線上の桁位置とした。

(2) 複素固有値解析結果とその考察

11段目の2本のケーブルおよび3段目の2本のケーブルにダンパーを挿入した場合について、それぞれ複素固有値解析を実施した。なお、複素固有値解析に関する研究はすでにいくつか報告⁸⁾されているので、ここでは具体的な解析手法の説明は省略する。

得られた複素固有値解析結果の一部を図-4~9に示す。図-4, 5より、MODE-2S1~MODE-2S3の構造対数減衰率は、11段目ケーブルに設置した2か所のダンパーの粘性減衰係数の合計が大きくなるに従って増加するが、ある最適の粘性減衰係数で最大の構造対数減衰率に達した後は、粘性減衰係数の増加とともに構造対数減衰率は逆に減少する傾向を示すことがわかる。また、ダンパー取付け位置 h が高いほど構造対数減衰率が大きくなっていることもわかるが、これはダンパー取付け位置におけるケーブルと桁のモード振幅の差（以下、相対変位モードと記す）の差異に起因するものである。さらに、たとえば、 $h=1.5$ m で1か所当たり $150/2=75$ t/m/s（上下流側のケーブルがそれぞれダブルケーブルとすると $75/4=18.75$ t/m/s）のダンパーを挿入した場合を想定すると、図-4より、MODE-2S1で0.045、MODE-2S2で0.07、MODE-2S3で0.025程度の減衰増加を期待できることがわかる。なお、ここで、上述したように1か所当たりのダンパーの所要粘性減衰係数は18.75 t/m/sであるが、この程度の所要粘性減衰係数であれば、ダンパーの製作および製作したダンパーの所定箇所への設置も比較的容易であることを付記しておく

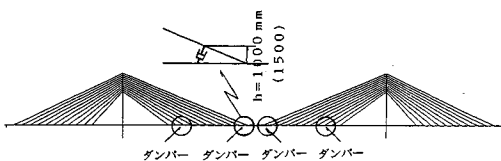


図-3 ダンパーの設置位置

たい。本四公団の風洞試験要領⁹⁾で規定されている構造対数減衰率がトラス形式で0.03、箱桁形式で0.02であること、また、実測されたケーブルの構造対数減衰率はそれほど大きくなく、一般に0.02程度¹⁰⁾を下回る場合も多いことを考慮すれば、ここで例示した構造対数減衰率の増加は、斜張橋の動的耐風設計を検討するうえで有意な量と考えられる。

一方、図-6より、MODE-2AS1~MODE-2AS3の構造対数減衰率についてもほぼ同様のことがいえるものの、MODE-2AS1に対する最適粘性減衰係数の大き

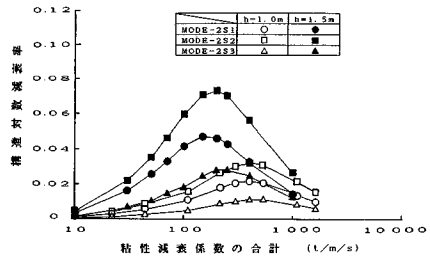


図-4 構造対数減衰率の変化 (MODE-2S1~2S3)

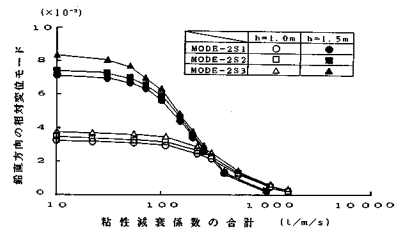


図-5 ダンパー取付け位置における鉛直方向の相対変位モードの変化 (MODE-2S1~2S3)

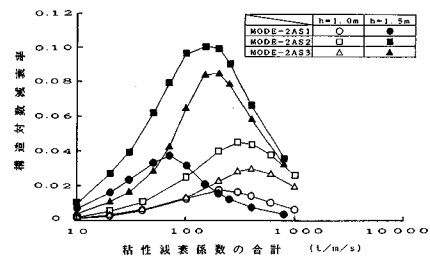


図-6 構造対数減衰率の変化 (MODE-2AS1~2AS3)

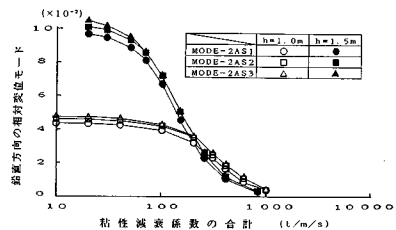


図-7 ダンパー取付け位置における鉛直方向の相対変位モードの変化 (MODE-2AS1~2AS3)

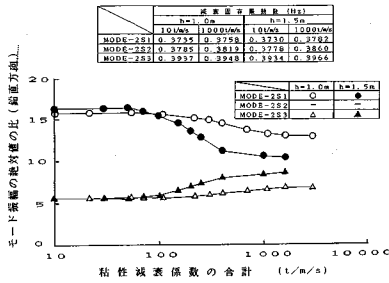


図-8 ケーブル中央点と桁中央点におけるモード振幅の絶対値の比の変化 (MODE-2S1~2S3)

さは、他のモードに比べかなり小さくなっており、また、ダンパー取付け位置 h が 1.5 m になると MODE-2 AS 1 と MODE-2 AS 3 の構造対数減衰率は粘性減衰係数の大きさによって逆転していることがわかる。これは、3 段目のケーブル長が 11 段目ケーブルの 1/2 程度の長さであることから、図-8 と図-9 の比較からわかるように、粘性減衰係数の大きさによってケーブルの (減衰) 横振動数が比較的敏感に影響を受け、桁とケーブルの連成の度合いに著しい変化が生じたことに起因するものと考えられる。ここに、図-8, 9 の縦軸は、それぞれケーブル中央点と桁中央点およびケーブル中央点と桁 1/4 点における鉛直方向のモード振幅の絶対値の比を表わしており、これらの値が大きいくほど、ケーブルと桁の連成の程度が大きいくことを意味する。

4. あとがき

本研究は、最近、ますます長大化し、架設上の配慮からマルチケーブル形式が採用される傾向にある長大斜張橋では、意図的にケーブルの横振動数を調律しなくても桁とケーブルが連成振動を生ずる可能性が高いことに着目し、連成振動に関係する特定のケーブルにダンパーを挿入した場合の斜張橋全体系の構造減衰特性について検討したものである。その結果、上述の条件を満足する特定のケーブルにダンパーを挿入すれば、耐風設計上、有意な量まで、斜張橋全体系の構造対数減衰率を増加できることを示唆できた。

なお、箱桁形式の場合およびトラス形式でも弦材高が比較的大きい場合には、ケーブルはそれらの上フランジ面よりかなり低い位置に定着されることが多い。それゆえ、ダンパーを路面からそれほど高くない位置に設置した場合にも、十分にその効果を期待できよう。また、この場合にはダンパー設置箇所をケーブルカバーで覆うことも可能であり、美観的にもそれほど低下することはないものと考えられる。

さらに、本研究では鉛直たわみ振動のみに着目してダンパー挿入の効果を具体的に検討したが、著者ら⁷⁾がす

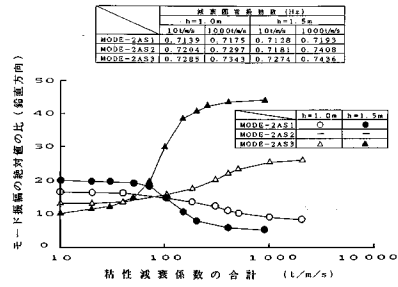


図-9 ケーブル中央点と桁 1/4 点におけるモード振幅の絶対値の比の変化 (MODE-2 AS 1~2 AS 3)

で指摘しているように、桁とケーブルの連成はねじれ振動においても生じ、特に主桁の基本振動 (対称 1 次振動) とケーブルが連成する可能性は鉛直たわみ振動の場合よりも高いと予想される。

今後、ねじれ振動に対する理論検討や模型実験によるダンパー効果の検証およびダンパー設置を前提とした実施設計上の問題点についても研究を進めていく予定である。最後に、本研究にあたり、常に適切なご助言をいただいた東京大学 伊藤 学教授、同 藤野陽三助教授、および貴重な資料をご提供していただいたオイレ工業 (株) 伊関治郎氏に心より感謝致します。

参考文献

- 1) 米田昌弘・伊藤 学：橋梁構造におけるクーロン減衰の寄与について、土木学会第 42 回年次学術講演会講演概要集, I-344, pp.722~723, 1987 年 9 月。
- 2) 横山功一・中神陽一・永原 隆：箱桁橋の振動実験, 土木技術資料, 28 巻 4 号, pp.3~8, 1986 年 4 月。
- 3) 横山功一・佐藤弘史・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。
- 4) 樋上瑋一：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。
- 5) Wallace, A. A. C. : Wind Influence on Kessock Bridge, Eng. Struct., Vol. 7, pp.18~22, January, 1985.
- 6) 前田幸雄・前田研一・米田昌弘：斜張橋のたわみ風琴振動におけるシステムダンピング効果に関する研究, 土木学会論文集, 第 344 号 / I-1, pp.185~193, 1984 年 4 月。
- 7) 前田研一・米田昌弘・前田幸雄：斜張橋のシステムダンピング効果の実際とその応用, 橋梁と基礎, Vol. 22, No. 3, pp.27~35, 1988 年 3 月。
- 8) たとえば, 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, pp.346~353, 1971 年 6 月。
- 9) 本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋風洞試験要領 (1980)・同解説, pp.2~10, 1980 年 6 月。
- 10) 横山顕二・山川修三・坂田 弘・斎藤 通・鈴木智巳：斜張橋の大型化に対するケーブルの振動とその防止対策, 三菱重工技報, Vol.14, No.3, pp.20~29, 1977 年 5 月。(1988.5.31・受付)