

論文・報告

ケーブル制振用ダンパーの 減衰付加特性に関する2, 3の考察

Some Considerations on Structural Damping
Characteristics of Stay Cables with Dampers

米田 昌弘*
Masahiro YONEDA

宮地 真一**
Shin-ichi MIYACHI

望月 秀之***
Hideyuki MOCHIZUKI

This paper presents some considerations on structural damping characteristics of stay cables with dampers. The results of complex eigenvalue calculations using cable models with dampers are compared with respect to flexial rigidity of the cable. It is found from these results that the structural damping characteristics of stay cables with dampers depend significantly on the value of flexial rigidity.

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. Therefore, complex eigenvalue calculations for two-span cable-stayed girder bridge model are also conducted to investigate the effect of internal resonance on the structural damping characteristics of stay cables with dampers.

Keywords: damper, cable-stayed bridge, stay cables complex eigenvalue calculation, flexial rigidity, internal resonance

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の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¹⁾やウェイクギャロッピング²⁾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上げられており、初期の設計段階からケーブル振動の対処方法^{3),4)}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、わが国ではステンレスワイヤや特殊な治具でケーブル同志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設置する方法がわが国では初めて採用され確実な制振効果が得られたことから⁵⁾、ダンパー方式は有効なケーブル制振方法として注目を浴びつつある。実際、荒津大橋を契機として、幸魂橋⁶⁾や東名足柄橋⁷⁾では粘性せん断型ダンパーが、また、天保山大橋⁸⁾ではオイルダンパー方式が、それぞれケーブル制振対策として採用されるに至っている。

ケーブルにダンパーを設置した場合の減衰付加特性は複素固有値解析を実施すれば推定でき、従来は剛性としてケーブル張力のみを考慮した鎖状のケーブル単体モデルを対象に検討を行っている。しかしながら、上述のケーブル単体モデルに対する複素固有値解析結果（ケーブルに付加される構造対数減衰率の理論値）と実橋ケーブル試験で測定された実測値には一般に差異が生じ^{9),10)}、文献10)では0.5~1.1程度の減衰付加効率（実測値/理論値）が報告されている。上述したように、斜張橋ケーブルの制振対策としてダンパー方式が増加しつつある現状を考慮した場合、ダンパーの減衰付加効率が0.5程度から1.0を超えるような広い範囲に分布する理由について検討しておくことは、ダンパー方式の信頼性を向上させる意味からも、極めて意義のあることと考えられる。

ダンパーの減衰付加効率は、実験上の誤差なども含め種々の要因によって変化するものと考えられるが、本研究では、従来の解析においてはケーブル自身の曲げ剛性が考慮されていないこと、およびケーブル単体モデルを対象としていたことからケーブル振動と桁振動との連成の影響が考慮されていないことにそれぞれ着目すること

*川田工業株式会社本部振動研究室室長 **川田工業株式会社本部振動研究室

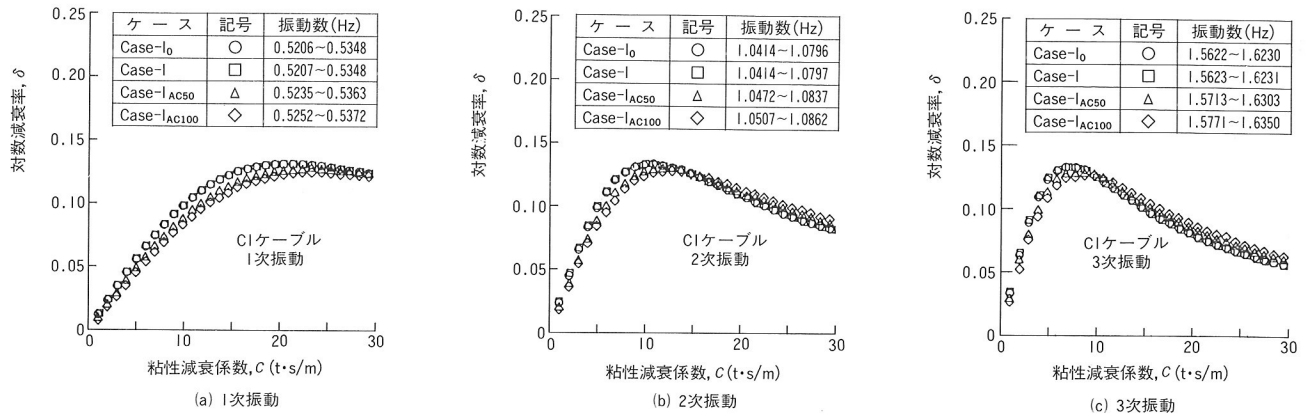


図-3 C1ケーブルに対する複素固有値解析結果

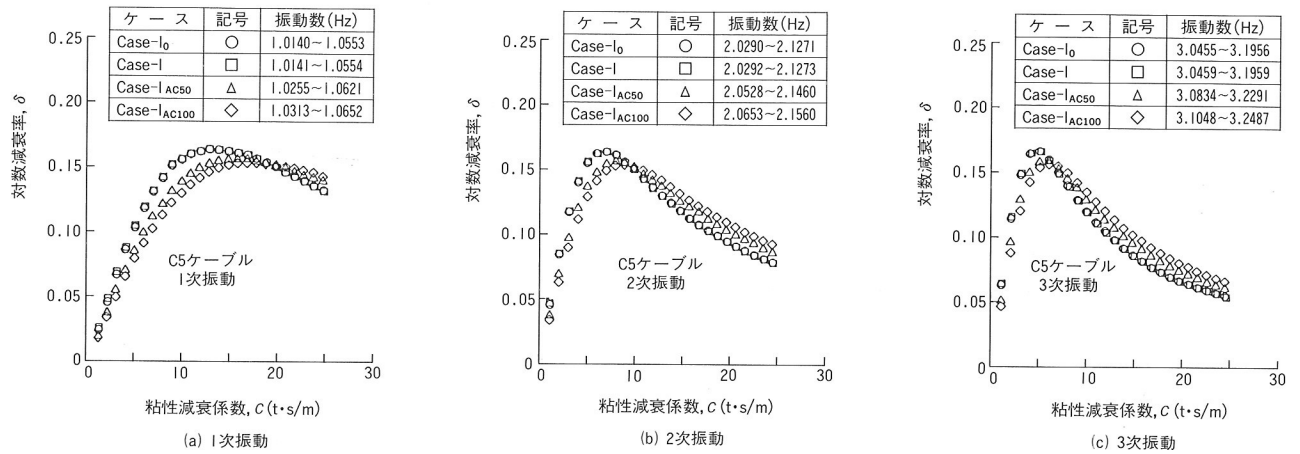


図-4 C5ケーブルに対する複素固有値解析結果

の、減衰付加特性にはCASE-I₀の場合と比較し明確な差異が生じている。すなわち、これらの場合、付加される構造対数減衰率の最大値 $\delta_{\max}$ の低下率は高々5%程度とわずかであるものの、最適粘性減衰係数 C_{opt} はケーブルの曲げ剛性の増加とともに10~30%程度も大きくなっている。このようにケーブルの曲げ剛性を考慮したことにより最適粘性減衰係数が増加するのは、ダンパー取り付け位置におけるモード振幅が曲げ剛性の増加とともに小さくなることに主として起因するものである。その結果、たとえば、CASE-I_{AC50}とCASE-I₀の構造対数減衰率の比率を同一の粘性減衰係数に対して計算すると、C1ケーブルの2次振動では $C=7\text{t}\cdot\text{s/m}$ なる場合に約0.93、C5ケーブルの1次振動では $C=9\text{t}\cdot\text{s/m}$ なる場合に約0.88、また、C5ケーブルの2次振動では $C=15\text{t}\cdot\text{s/m}$ なる場合に約1.06となっている。

従来は、剛性としてケーブル張力のみを考慮した鎖状のケーブル単体モデルを対象に複素固有値解析を行い、ケーブルにダンパーを設置した場合の減衰付加特性を把握している。したがって、ダンパーの減衰付加効率（実測値／理論値）を算定する際にも、理論値としてケーブル張力のみを考慮した鎖状のケーブル単体モデルの複素固有値解析結果を採用していた。一方、実橋ケーブル試

験で得られた実測値には、程度の差こそあれケーブルの曲げ剛性の影響が含まれている。したがって、ダンパーの減衰付加効率が0.5程度から1.0を超える広い範囲に分布するとの報告がなされている原因として、ケーブル張力のみを考慮した鎖状のケーブル単体モデルの複素固有値解析結果を減衰付加効率を算定する際の理論値として採用していたことも大きな要因の一つであると言えよう。

(3) 曲げ剛性を考慮したケーブルにダンパーを設置した場合の減衰評価曲線

前節の結果より、ケーブル制振用ダンパーの設計に当たっては、減衰付加特性に及ぼすケーブルの曲げ剛性の影響について検討する必要があることも十分に予想される。そこで、ここでは以下に示す無次元パラメータ P_{T1} を導入し、曲げ剛性を有するケーブルにダンパーを設置した場合の減衰評価曲線を提示する。

$$P_{T1} = 3EI_C \cdot l^2 / T \cdot x^2 \cdot (l-x)^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 EI_C はケーブルの曲げ剛性、 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 P_{T1} は、図-5に示すように剛性としてケーブル張力のみを考慮したモデルと、曲げ剛性のみを考慮したモデルをそれぞれ考え、 x なるダンパー取り付け位置に同一の P なる集

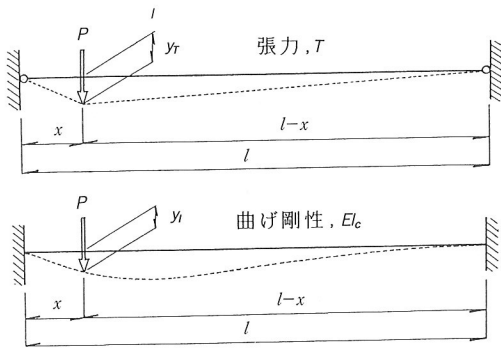


図-5 無次元パラメータ P_{Tl} の算出方法

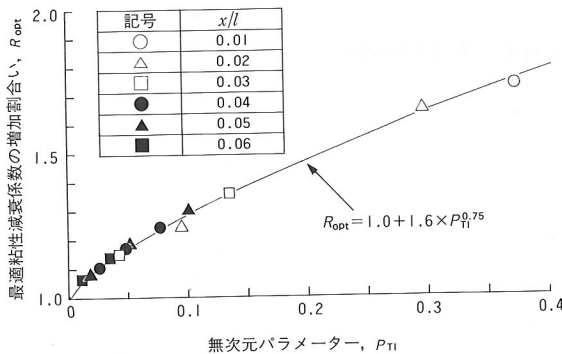


図-6 無次元パラメータ P_{Tl} と最適粘性減衰係数の増加割合 R_{opt} の関係

中荷重を作用させた場合の変位量の比率 y_T/y_l から算出したものである。

C1, C5 ケーブルの曲げ剛性やダンパーの取り付け位置を種々変化した場合の複素固有値解析結果をもとに、ケーブルの曲げ剛性に起因した最適粘性減衰係数の増加割合 R_{opt} と上記の無次元パラメータ P_{Tl} との関係を整理して図-6 に示す。図-6 より、 R_{opt} はおよそ次式で推定できることがわかる。

$$R_{opt} = 1.0 + 1.6 \times P_{Tl}^{0.75} \quad \dots\dots\dots(2)$$

したがって、文献4) に示されたケーブルの曲げ剛性を無視した場合の提案式を参照すれば、ケーブルの曲げ剛性を考慮した場合の最適粘性減衰係数 C^1_{opt} は

$$C^1_{opt} = R_{opt} \times 6.25 \times \frac{w \times l \times f_n / g}{\sin^2 n\pi x / l} \times \frac{x}{l} \quad \dots\dots\dots(3)$$

で与えられ、曲げ剛性を有するケーブルにダンパーを設置した場合の構造減衰は次式で推定できることとなる。

$0 < C/C^1_{opt} \leq 1.2$ なる範囲で

$$\delta / \delta^1_{max} = 0.116 \times (C/C^1_{opt})^3 - 1.245 \times (C/C^1_{opt})^2 + 2.129 \times (C/C^1_{opt})$$

$1.2 < C/C^1_{opt} \leq 7.0$ なる範囲で

$$\delta / \delta^1_{max} = -0.004 \times (C/C^1_{opt})^3 + 0.075 \times (C/C^1_{opt})^2 - 0.505 \times (C/C^1_{opt}) + 1.468 \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 δ^1_{max} は C^1_{opt} に対応する構造対数減衰率の最大値であり、ケーブルの断面2次モーメントの大きさが鋼線外径と等しい鋼棒の値の $P^{1c}\%$ とした場合に、次式で算

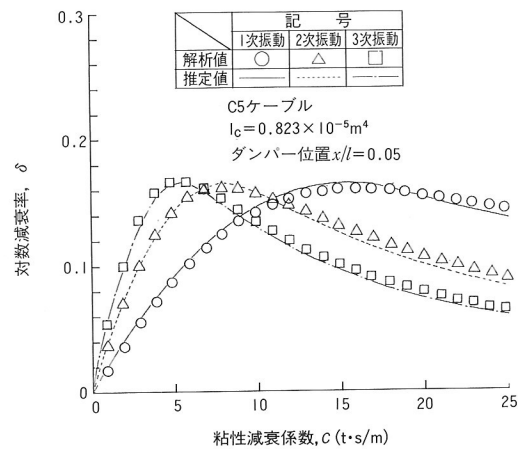


図-7 複素固有値解析結果とケーブルの曲げ剛性を考慮した減衰評価式との比較

定する。

$P^{1c} < 50\%$ の場合

$$\delta^1_{max} = \{1.0 - (P^{1c}/50) \times 0.05\} \times (x/l) \times (3.125 + 6.25 \times x/l)$$

$P^{1c} \geq 50\%$ の場合

$$\delta^1_{max} = 0.95 \times (x/l) \times (3.125 + 6.25 \times x/l) \quad \dots\dots\dots(5)$$

一例として、C5 ケーブルについて、ケーブルの断面2次モーメント I_c を $I_c = 8.225 \times 10^{-6} m^4$ (鋼線外径と等しい鋼棒を仮定した場合、その50%の断面2次モーメントに相当)、ダンパーの取り付け位置 x/l を $x/l = 0.05$ とした場合の適用結果を図-7 に示す。この結果から、式(2)～式(5)で与えた評価式を適用すれば、ケーブルの曲げ剛性を考慮した場合のダンパーによる減衰付加特性も、実用上十分な精度で推定できることが理解できよう。

4. ケーブルの横振動を考慮した斜張橋全体系モデルによる検討

(1) 解析モデルと解析ケース

検討の対象としたのは図-1 に示した斜張橋の全体系モデルである。なお、ケーブル部のモデル化に当たっては、事前に実施したケーブルの横振動を無視した全体系モデルの固有値解析結果を考慮し、下から3段目のC5 ケーブルのみをそれぞれ100部材に分割することとした。

C5 ケーブルの横振動を考慮した斜張橋全体系モデルの固有値解析結果を図-8 に示す。図-8 から、ケーブルの横振動を考慮した場合には複雑なモード形状を呈することが理解できよう。なお、図中において、全体系の3次～5次モード、7次～9次モードおよび11次～13次モードの固有振動数は、それぞれC5 ケーブル単体としての1次モード、2次モードおよび3次モードの固有振動数とほぼ等しいことを付記しておきたい。

(2) 複素固有値解析結果と考察

L側とR側のC5 ケーブルにそれぞれダンパーを設置した斜張橋全体系モデルについて複素固有値解析を実施

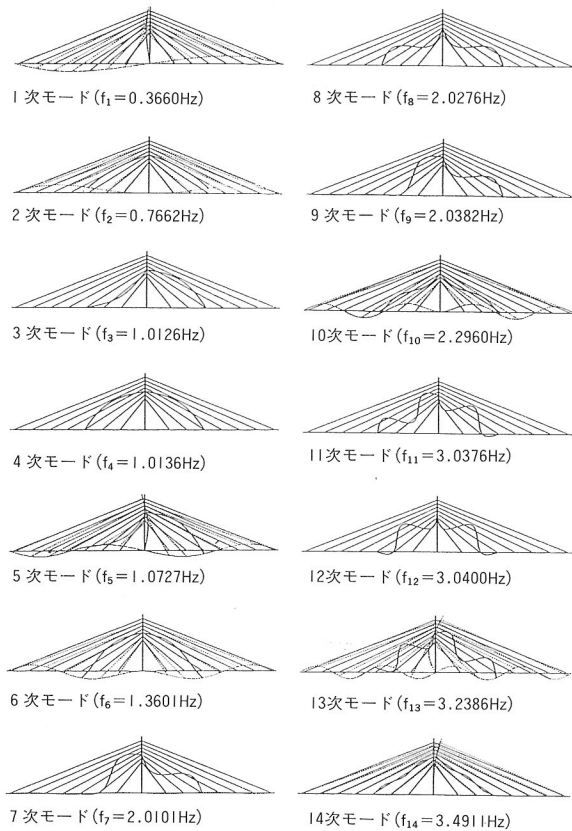


図-8 斜張橋全体系モデルに対する固有振動解析結果
(C5ケーブルの横振動を考慮した場合)

した。なお、ダンパーは主桁側ケーブル定着点からの高さが2.7mなる位置(ダンパーの設置位置を x 、ケーブル長を l とした場合、 $x/l=0.05$ となる位置)に設置するものと仮定した。

全体系モデルでC5ケーブルの断面2次モーメント I_c を無視した場合(MCASE- I_0)およびC5ケーブルの断面2次モーメントを $I_c=0.823 \times 10^{-5}\text{m}^4$ と想定した場合(MCASE- I_{AC50})の解析結果を、曲げ剛性を無視したケーブル単体モデルの解析結果(CASE- I_0)とそれぞれ比較して、図-9, 10に示す。ここに、MCASE- I_{AC50} で考慮したC5ケーブルの断面2次モーメント I_c は、鋼線外径と等しい135.3mmなる鋼棒の断面2次モーメント値である $1.645 \times 10^{-5}\text{m}^4$ の50%に相当する。

まず、図-9より、MCASE- I_0 の場合について考察する。この場合、ケーブル卓越振動である全体系の4次、8次、12次モードの構造減衰はそれぞれケーブル単体モデルの1次、2次、3次モードに付加される値とほぼ一致するのに対し、微小ながらもケーブルと桁が連成した全体系の3次、9次、11次モードの構造減衰はケーブル単体モデルの結果よりも若干小さい値を示す結果となっている。たとえば、全体系3次モードの構造対数減衰率(図中の記号; Δ)とケーブル単体モデルにおける1次モードの構造対数減衰率(図中の実線)との比は粘性減衰係数 $C=10\text{t}\cdot\text{s/m}$ で約0.95、 $C=25\text{t}\cdot\text{s/m}$ で約0.84と求め

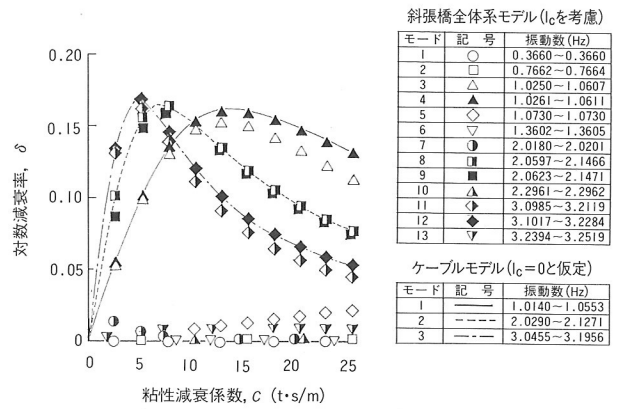


図-9 斜張橋全体系モデルに対する複素固有値解析結果
(C5ケーブルの曲げ剛性を無視した場合)

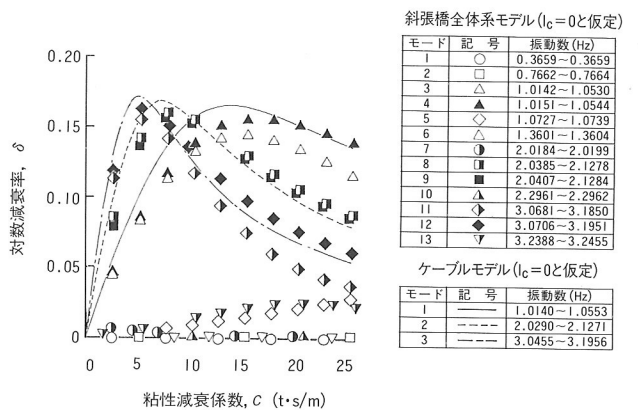


図-10 斜張橋全体系モデルに対する複素固有値解析結果
(C5ケーブルの断面2次モーメント; $c=0.823 \times 10^{-5}\text{m}^4$)

られ、同様に全体系11次モードとケーブル単体モデルにおける3次モードとの対数減衰率の比は $C=25\text{t}\cdot\text{s/m}$ で約0.84と低減する結果となっている。

次に、ケーブルの曲げ剛性を考慮した全体系モデルの解析結果(MCASE- I_{AC50})について考察する。この場合、図-10からわかるように、曲げ剛性を無視したケーブル単体モデルとの差異はMCASE- I_0 の場合よりもさらに大きくなっている。たとえば、全体系3次モードとケーブル単体モデルにおける1次モードの構造対数減衰率の比は $C=10\text{t}\cdot\text{s/m}$ で約0.84、全体系11次モードとケーブル単体モデルにおける3次モードの対数減衰率の比は $C=25\text{t}\cdot\text{s/m}$ で約0.68と低減する結果となっている。それゆえ、ダンパーの減衰付加効率が0.5から1.0を超える広い範囲に分布するとの報告がなされている原因として、ケーブル振動と桁振動が連成することによる影響も大きな要因の一つとなっている可能性が高いと思われる。

5. まとめ

斜張橋ケーブルの制振対策としてダンパー方式の採用が増加しつつあるが、一方で、実橋ケーブルに設置した

ダンパーの減衰付加効率は、一般に0.5程度から1.0を超えるような広い範囲に分布するとの報告がなされている。ダンパーの減衰付加効率は実験上の誤差なども含め種々の要因によって変化するものと考えられるが、本研究では、従来の解析においてはケーブル自身の曲げ剛性が考慮されていないこと、およびケーブル単体モデルを対象としていたことからケーブル振動と桁振動との連成の影響が考慮されていないことに、それぞれ着目し、ケーブル制振用ダンパーの減衰付加効率について考察した。得られた主要な結果を以下にまとめる。

(1) 剛性としてケーブル張力のみを考慮した従来のケーブル単体モデル、およびケーブル張力に加えケーブルの曲げ剛性をも考慮したケーブル単体モデルについて複素固有値解析を行い、それぞれの比較からダンパーの減衰付加特性に及ぼすケーブル曲げ剛性の影響について検討した。その結果、ケーブルの断面2次モーメントとして素線1本当たりの断面2次モーメントに素線本数を乗じた値を用いた場合には、ケーブル張力のみを用いた場合の解析結果とほとんど差異は見られなかった。しかしながら、ケーブルの鋼線外径と等しい鋼棒を仮定しその断面2次モーメントの50%に相当する値を用いた場合には、付加される構造対数減衰率の最大値 $\delta_{\max}$ の低下率は高々5%程度とわずかであるものの、最適粘性減衰係数 C_{opt} は10%~30%程度も大きくなり、ダンパーの減衰付加特性に及ぼすケーブル曲げ剛性の影響は無視できないことがわかった。

(2) したがって、ケーブル制振用ダンパーの設計にあたっては、減衰付加特性に及ぼすケーブル曲げ剛性の影響について検討する必要があることが十分に予想される。そこで、実務設計者の便を考え、曲げ剛性を考慮したケーブルにダンパーを設置した場合にも適用できる減衰評価曲線を提示した。

(3) ケーブルの横振動を考慮した斜張橋全体系モデルについても複素固有値解析を実施し、ケーブル単体モデルとの比較からダンパーの減衰付加特性に及ぼすケーブル振動と桁振動の連成の影響について考察した。その結果、ケーブル振動と桁振動が連成した場合、ダンパーによる減衰付加特性はケーブル単体モデルの結果よりも若干低下する結果が得られた。したがって、ケーブル振動と桁振動の連成は、ダンパーの減衰付加効率が0.5から1.0を超える広い範囲に分布するとの報告がなされている要因の一つとなっている可能性が高い。

ケーブルの曲げ剛性はケーブルの種類によっても変化し、未だ定量的評価は難しいのが現状である。それゆえ、ケーブル制振用ダンパーの信頼性を高める意味からこの方面における今後の研究を期待したい。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 横山功一・中神陽一・神崎一夫：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。
- 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) 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。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 宮坂佳洋・南莊 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。
- 9) 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。
- 10) 烏野 清・北川正一・堤 一・井上朝登・中谷真二：斜張橋ケーブル制振用ダンパーの簡易設計法, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.789~798, 1991年3月。
- 11) 米田昌弘・宮地真一・望月秀之：ケーブル制振用ダンパーの減衰付加特性に関する2, 3の考察, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.841~850, 1993年3月。
- 12) 新家 徹・広中邦汎・頭井 洋・西村春久：振動法によるケーブル張力の実用算定式について, 土木学会論文報告集, 第294号, pp.25~32, 1980年2月。
- 13) 島田忠幸・西村 昭：振動法によるケーブル張力測定値への曲げ剛性の影響, 土木学会論文集, 第398号/I-10, pp.409~412, 1988年10月。
- 14) 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。