

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

米田昌弘*・下田郁夫**

本文では、主要なケーブル制振対策の一つである粘性せん断型ダンパーを対象に、ばね剛性の大きさを評価できる算定式を与え、設計上重要な減衰付加効率について検討している。また、ばね剛性を有するダンパーをケーブルに設置した場合にも適用できる、設計用減衰評価曲線を与えるとともに粘性せん断型ダンパーのより厳密な設計法にも言及し、斜張橋ケーブルの制振対策に関する有用な知見を報告している。

Key Words : vibration control, wind-induced cable vibration, damper, complex-eigenvalue calculation, cable-stayed bridge

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、レインパブレーション¹⁾やウエ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^{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、わが国では名港西大橋、櫃石島橋、岩黒島橋等に代表されるように、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⁵⁾でケーブルにオイルダンパーを設置する方式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方式が斜張橋ケーブルの主要なケーブル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⁶⁾ではオイルダンパー方式が、また、幸魂大橋⁷⁾や東名足柄橋⁸⁾をはじめとして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。

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)}、オイルダンパーを採用した荒津大橋では0.5~1.1程度の減衰付加効率(実測値/理論値)が、また、粘性せん断型ダンパーが採用された幸魂大橋では0.5~0.7程度の減衰付加効率がそれぞれ報告されている。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最も小さい場合には0.5程度にも低下する原因を解明することはダンパー方式の設計ならびにその信頼性を向上させる意味からもきわめて意義のあることと考えられる。

このような観点から、著者らは、従来の複素固有値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て検討を加え、ケーブルの曲げ剛性ならびにケーブル振動と桁振動との連成がオイルダンパー方式の減衰付加効率に幾分ではあるが影響を及ぼす要因となっている可能性を報告している¹¹⁾。

これに対し、粘性体のせん断抵抗を利用した、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粘性せん断型ダンパーでは、上述の要因もさることながら、ダンパーの有する粘弾性的な特性が減衰付加効率を低下させる主要因になっているものと思われる。それゆえ、粘性せん断型ダンパーを採用する場合、厳密にはそのばね剛性を適切に評価し解析で考慮する必要があるものと思われるが、粘性せん断型ダンパーが有するばね剛性は減衰抵抗力に比べ一般に小さいと考えられていたこともあり、従来はその影響を考慮していなかった。前述したように、粘性せん断型ダンパーは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ケーブル制振対策として採用されている現状を考えた場合、より厳密な

* 正会員 工博 川田工業(株)技術本部振動研究室長
(〒550 大阪市西区北堀江1-22-19)

** 正会員 オイレス工業(株)技術二部長

モデル化や解析によって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について検討し、減衰付加効率の大きさを定量的に評価しておくことはこの種のダンパーを設計する上できわめて有用なことから考えられ、また急務の検討課題となっている。

粘性せん断型ダンパーの減衰抵抗力特性および減衰力のみを考慮した場合の減衰付加効率についてはすでに報告¹²⁾しているが、先の論文では粘性せん断型ダンパーの有するばね剛性を考慮していなかったことから、減衰付加効率に関する十分な議論はなされていなかった。そこで、本文では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を明確にするという視点から、まず、室内実験結果を再整理し、粘性せん断型ダンパーのばね剛性の大きさを適切に評価するとともに新たな知見としてそのばね定数算定式を与えることとした。また、粘性せん断型ダンパーの実橋ケーブル試験結果と試験条件から算出した等価粘性減衰係数および等価ばね定数を用いた複素固有値解析結果との比較から、粘性せん断型ダンパーの減衰付加効率について検討した。そして、提案した実験式を用いて等価粘性減衰係数と等価ばね定数を適切に評価すれば、付加される構造減衰の理論値は実験値とほぼ一致し、粘性せん断型ダンパーの減衰付加効率として設計上1.0なる値を採用できることを示す。さらに、ばね剛性を有するダンパーをケーブルに設置した場合にも適用できる、設計用減衰評価曲線を新たに与えるとともに粘性せん断型ダンパーのより厳密な設計法にも言及し、斜張橋ケーブルの制振対策に関する有用な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

(1) 室内実験の概要

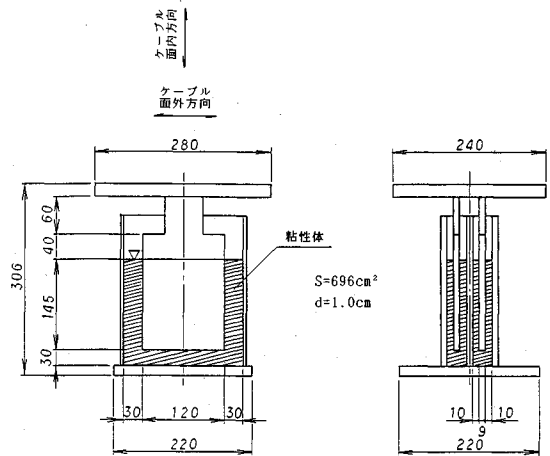
粘性せん断型ダンパーでは、配管の耐震装置用としてすでに使用実績のある、表一に示すような物性を有する粘性体 (SA-P 粘性体) を用いている。

文献12)で報告したように、室内実験ではSA-P粘性体の減衰力特性を把握するため、図一1に示す供試体を用いてケーブル面内方向 (鉛直方向) とケーブル面外方向 (水平方向) の加振実験を行っている。なお、実験にあたっては、加振振幅が0.5mm~20mm、加振周波数が0.5Hz~4.0Hzの範囲の組み合わせを考え、また、温度依存性を把握するために0℃、20℃、40℃なる温度条件を目標に実施している。

加振実験で得られた代表的な変位一抵抗力線図 (リサーチ図) を図二に示すが、この結果からも若干ではあるがSA-P粘性体が有する粘弾性的性質が確認できよう。なお、変位一抵抗力線図は加振中立点に対し非対称形を示しているが、この理由は、図一1の供試体構造から判断されるように変位振幅が大きくなるに従い

表一 使用した粘性体の物性

| | |
|--------|-----------------|
| 比 重 | 0.92 |
| 粘 度 | 3000 Pa·s (40℃) |
| 発 火 点 | 240℃ |
| ガラス転移点 | -40℃ |



図一1 供試体の概略図

ケーブル面内、面外方向ともに可動抵抗板とケーシング面間に生じる液圧の発生が顕著になったことによるものと考えられる。

(2) 等価粘性減衰係数

粘性せん断型ダンパーの等価粘性減衰係数についてはすでに詳細を報告¹²⁾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。

振動振幅 a が $a > 0.47$ 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 (実験式) で与えられる。

$$C_e = 0.66e^{-0.043t} \cdot S \cdot d^{-0.5} \cdot (a \cdot \omega)^{-0.5} \dots \dots \dots (1)$$

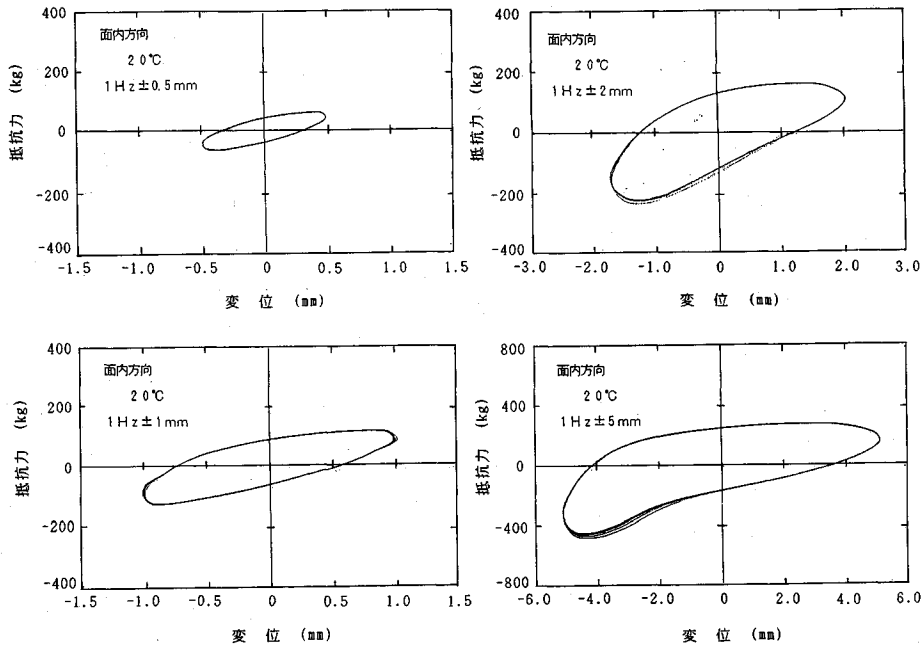
ここに、 C_e は等価粘性減衰係数 (kg·s/cm), t は粘性体の温度 (°C), d は粘性体の厚さ (cm), S は粘性せん断を期待する断面積 (cm²), a は振動振幅 (cm), ω は固有円振動数 (rad/s) である。

一方、振動振幅 a が $a \leq 0.47$ cm なる場合、粘性せん断型ダンパーの減衰抵抗力には振幅依存性が認められ、その等価粘性減衰係数は $a^{0.34}$ を補正值とした次式で計算できる。

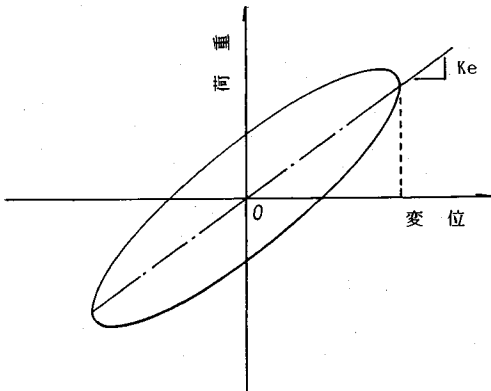
$$C_e = 0.85e^{-0.043t} \cdot S \cdot a^{0.34} \cdot d^{-0.5} \cdot (a \cdot \omega)^{-0.5} \dots \dots \dots (2)$$

(3) 等価ばね定数

室内実験で得られた加振振幅が5mm以下の変位一抵抗力線図を分析した結果、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、粘性せん断型ダンパーのばね剛性は小さくなることが判明した。なお、ここに加振振幅が5mm以下の実験結果に着目したのは、10mm以上の振幅の大き



図—2 変位—抵抗力線図の一例



図—3 等価ばね定数 K_e の定義

いデータは前述したように加振中立点に対し著しい非線形性を呈していたことによる。

そこで、粘性せん断型ダンパーのばね剛性に及ぼす温度依存性、振動数依存性および振幅依存性についてより詳細に要因分析した結果、粘性せん断型ダンパーの等価ばね定数 K_e (kg/cm) の算定式として以下に示す実験式が得られた。

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

なお、ここでの等価ばね定数は、文献13)を参照して図—3に示す定義に従い、算出したものである。

式(3)による等価ばね定数の推定値を室内実験から算出した鉛直方向と水平方向の実験結果(加振振動数 f が $f \leq 4.0$ Hz, 加振振幅 a が $a \leq 0.5$ cm なる実験結果)

と比較して図—4, 5に示す。この図より、加振振動数 f が $f \leq 4.0$ Hz, 加振振幅 a が $a \leq 0.5$ cm なる領域において、式(3)で計算した等価ばね定数は、若干の誤差はあるものの、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)のそれぞれに対しほぼ妥当な推定結果を与えていることが理解できよう。

3. 粘性せん断型ダンパーの減衰付加特性

(1) 実橋ケーブル試験の概要

ケーブル制振用粘性せん断型ダンパーの開発にあたっては、ダンパーの性能を確認するため、実橋ケーブル試験⁹⁾を実施している。実験対象としたケーブル(C5ケーブル)の構造諸元を表—2に、ケーブルのサグを無視した場合の固有振動数(解析値)を表—3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力特性を有する粘性せん断型ダンパー($S = 696 \text{ cm}^2$, $d = 1 \text{ cm}$)を用い、景観上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、上フランジから0.9 mの高さ(ケーブル定着点からの高さは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られている。また、この際、ダンパーによる減衰付加効果を効率良く期待するために、桁側の緩衝装置(ケーブル定着部の2次応力を緩和するための緩衝材)は除去されている。さらに、実験では粘性せん断型ダンパーの温度依存特性を把握するため、温度可変装置を用いて粘性体温度がほぼ0°C, 20°C, 40°Cとなる場合について実施している。

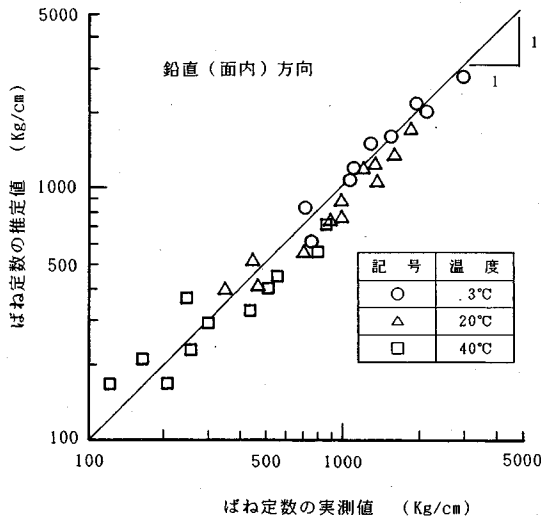


図-4 ばね定数の実測値と推定値の比較(鉛直方向)

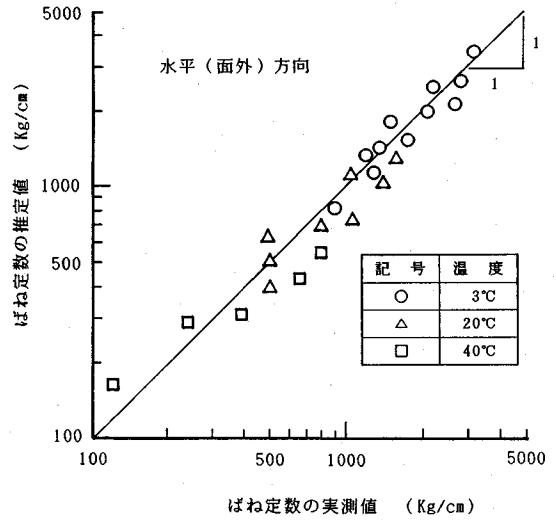


図-5 ばね定数の実測値と推定値の比較(水平方向)

表-2 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 Ac (m ²) | 積重 w (t/m) | 電張 T (ton) | 力 |
|--------|-----------------|----------------------------|---------------|---------------|---|
| C5 | 100.23 | 0.01205 | 0.1007 | 428.5 | |

表-3 C5ケーブルの固有振動数

| 次 | 数 | 固有振動数 (Hz) |
|---|---|------------|
| 1 | 次 | 1.019 |
| 2 | 次 | 2.038 |
| 3 | 次 | 3.057 |

表-4 実橋ケーブル試験結果

| 振動次数 | ダンパー設置前 | | ダンパー設置後 | |
|------|---------|--------|---------|--------|
| | 構造対数減衰率 | 温度(°C) | 構造対数減衰率 | 温度(°C) |
| 1 次 | - | 18.5 | 0.083 | - |
| | | - | - | - |
| | | - | - | - |
| 2 次 | 0.003 | -0.2 | 0.036 | - |
| | | 18.5 | 0.064 | - |
| | | 40.0 | 0.098 | - |
| 3 次 | 0.003 | 0.5 | 0.041 | - |
| | | 18.5 | 0.064 | - |
| | | 39.8 | 0.091 | - |

その結果、本ダンパーに起因した減衰付加効果は、一例として示した図-6および実験結果をまとめた表-4からわかるように、最大片振幅が1.5 mm程度と小さかったにもかかわらず非常に大きいこと、また、従来のオイルダンパーでは作動しない0.1 mm程度以下の非常に小さな振幅域においても有効に作用することを確認している。しかしながら、次節に述べるように、実橋ケーブルにダンパーを設置した場合の構造対数減衰率の実測値は、ダンパーの減衰抵抗力のみを考慮したケーブル単体モデルに対する複素固有値解析結果(理論値)と比較し30~60%程度も低下する結果となっており、その原因究明が急務の検討課題となっていた。

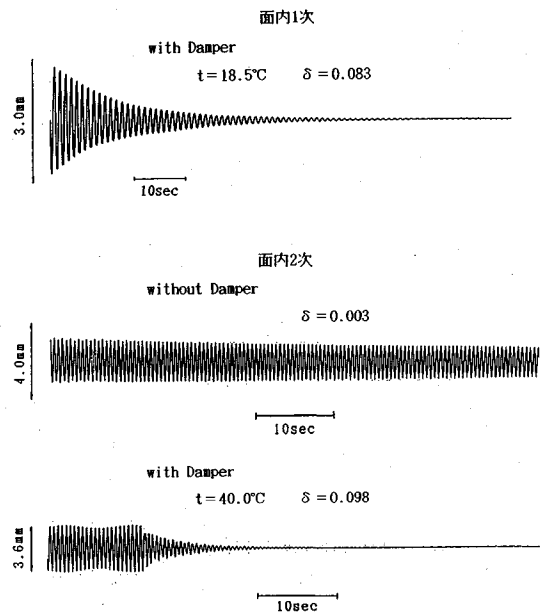


図-6 実橋ケーブル試験で得られた減衰自由振動波形の一例

(2) 減衰付加効率

ばね剛性を考慮した場合の検討結果との対比を考え、ここでは、まず、ダンパーの減衰抵抗力のみを考慮した複素固有値解析結果をダンパーによって付加される構造減衰の理論値と仮定し、減衰付加効率の再計算結果を示すこととする。なお、ここに示す再計算結果は、ダンパーの等価粘性減衰係数を算定する基準振幅が文献12)における設定値(面内1次で0.15 cm、面内2次と面内3次で0.10 cm)と若干相違するものである。複素固有値解析にあたっては、実橋ケーブル試験時において対象としたC5ケーブル以外の他段ケーブルや桁部の振動は

表一五 ダンパー設置後に付加された構造対数減衰率の実測値と解析値の比較 (減衰抵抗力のみを考慮した場合)

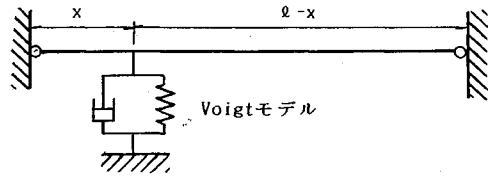
| 振動次数 | 温度 (°C) | 実測値 | | 複素固有値解析結果 | | 減衰付加効率 |
|------|---------|---------|------------------|-----------|------|--------|
| | | 構造対数減衰率 | 等価粘性減衰係数 (t·s/m) | 構造対数減衰率 | 減衰率 | |
| 1 次 | - | - | - | - | - | - |
| | 18.5 | 0.080 | 15.88 | 0.155 | 0.52 | - |
| | - | - | - | - | - | - |
| 2 次 | -0.2 | 0.033 | 25.10 | 0.079 | 0.42 | - |
| | 18.5 | 0.061 | 11.23 | 0.141 | 0.43 | - |
| | 40.0 | 0.095 | 4.46 | 0.139 | 0.68 | - |
| 3 次 | 0.5 | 0.038 | 19.88 | 0.068 | 0.56 | - |
| | 18.5 | 0.061 | 9.17 | 0.128 | 0.48 | - |
| | 39.8 | 0.088 | 3.66 | 0.153 | 0.58 | - |

表一六 ダンパー設置後に付加された構造対数減衰率の実測値と解析値の比較 (減衰抵抗力とばね剛性を考慮した場合)

| 振動次数 | 温度 (°C) | 実測値 | | 複素固有値解析結果 | | 減衰付加効率 |
|------|---------|---------|------------------|--------------|-------|--------|
| | | 構造対数減衰率 | 等価粘性減衰係数 (t·s/m) | 等価ばね定数 (t/m) | 減衰率 | |
| 1 次 | - | - | - | - | - | - |
| | 18.5 | 0.080 | 15.88 | 82.5 | 0.071 | 1.13 |
| | - | - | - | - | - | - |
| 2 次 | -0.2 | 0.033 | 25.10 | 251.9 | 0.041 | 0.81 |
| | 18.5 | 0.061 | 11.23 | 112.7 | 0.066 | 0.92 |
| | 40.0 | 0.095 | 4.46 | 44.7 | 0.074 | 1.28 |
| 3 次 | 0.5 | 0.038 | 19.88 | 293.4 | 0.037 | 1.03 |
| | 18.5 | 0.061 | 9.17 | 135.3 | 0.062 | 0.98 |
| | 39.8 | 0.088 | 3.66 | 54.1 | 0.078 | 1.13 |

連成していなかったことから、100 部材に分割した鎖状のケーブル単体モデルを採用する。実橋ケーブル試験で対象としたケーブルの固有振動数 (面内 1 次が 1.02 Hz, 面内 2 次が 2.04 Hz, 面内 3 次が 3.06 Hz) と加振振幅域 (基準振幅は面内 1 次, 面内 2 次, 面内 3 次とも最大片振幅の約 1/2 に相当する 0.075 cm を採用) を考慮して式 (2) から等価粘性減衰係数 C_e を計算するとともに、等価粘性減衰係数が C_e なるダンパーを実験と同じく x/l (ダンパーの取り付け位置/ケーブル長) = 0.0471 なる位置に配置したケーブルモデルに対する複素固有値解析結果を構造対数減衰率の実測値 (実橋ケーブル試験結果) と比較した。その結果を表一五に示す。ここに、実橋ケーブル試験結果は、ダンパー設置後の構造対数減衰率からダンパー設置前の値を差し引いたものであり、この際、面内 1 次振動のダンパー設置前の値は面内 2 次および面内 3 次と同じ値を仮定した。表一五より、減衰抵抗力のみを考慮した場合には、粘性せん断型ダンパーの減衰付加効率は 0.4~0.7 程度の範囲に分布する結果となっていることが理解できよう。

次に、粘性せん断型ダンパーの減衰抵抗力に加え、式 (3) による等価ばね定数の推定値を用いた複素固有値解析を行い、同様に減衰付加効率を計算した。その結果を表一六に示す。なお、複素固有値解析にあたっては、粘性せん断型ダンパーを図一七に示すようにばねとダッシュポットを並列につないだ Voigt モデルで置換している。また、式 (3) における等価ばね定数を算定するにあたっての基準振幅は、等価粘性減衰係数の場合と同じく、面内 1 次, 面内 2 次および面内 3 次とも実験での



図一七 粘性せん断型ダンパーのモデル化

表一七 等価ばね定数の推定値と逆算値の比較

| 振動次数 | 温度 (°C) | 等価ばね定数 (t/m) | |
|------|---------|--------------|-------|
| | | 推定値 | 逆算値 |
| 1 次 | - | - | - |
| | 18.5 | 82.5 | 69.9 |
| | - | - | - |
| 2 次 | -0.2 | 251.9 | 326.4 |
| | 18.5 | 112.7 | 125.5 |
| | 40.0 | 44.7 | 25.9 |
| 3 次 | 0.5 | 293.4 | 283.0 |
| | 18.5 | 135.3 | 138.5 |
| | 39.8 | 54.1 | 43.4 |

最大片振幅の約 1/2 に相当する 0.075 cm を採用している。表一六より、若干の誤差はあるものの、ばね剛性を考慮した場合の減衰付加効率は 1.0 程度に分布しており、解析値は実験値と良く対応していることが理解できよう。なお、減衰付加効率に対する若干の誤差は、表一七からもわかるように主として等価ばね定数の推定誤差に起因するものである。

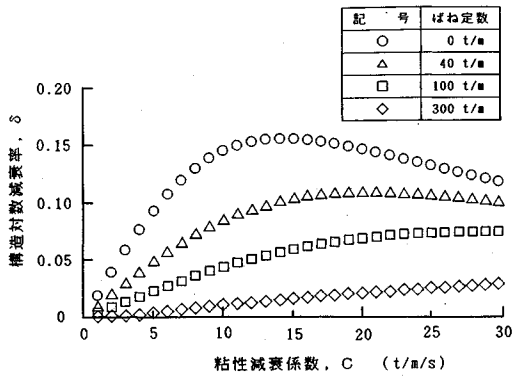
以上の検討結果より、提案した実験式を用いて等価粘性減衰係数と等価ばね定数を適切に評価すれば、ばね定数の推定精度に起因した若干の誤差はあるものの、粘性せん断型ダンパーによって付加される構造対数減衰率の理論値は実験値とほぼ一致し、設計にあたり粘性せん断型ダンパーの減衰付加効率として 1.0 なる値が採用できるものと言えよう。

4. 減衰評価曲線

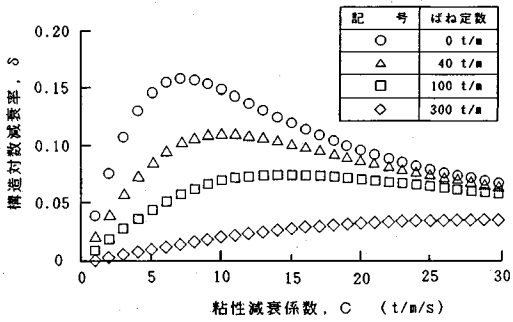
ケーブル制振対策として粘性せん断型ダンパーを採用する場合には、前章に示したように減衰付加特性に及ぼすばね剛性の影響を適切に評価する必要がある。ばね剛性を有するダンパーをケーブルに設置した場合、図一八に示した C5 ケーブルに対する結果からもわかるように、ばね定数 k の増加とともにダンパーによって付加される構造対数減衰率の最大値 δ_{max} は小さくなり、また、 δ_{max} を与える最適粘性減衰係数 C_{opt} は大きくなる。そこで、ここでは実務設計者の便を考え、以下に示す無次元パラメーター P_{TK} を導入し、ばね剛性を有するダンパーをケーブルに設置した場合にも適用できる設計用減衰評価曲線を提案する。

$$P_{TK} = \frac{x \cdot (\ell - x) \cdot k}{T \cdot \ell} \dots \dots \dots (4)$$

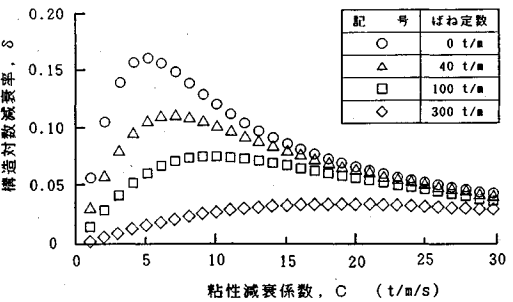
ここに、 k はダンパーが有するばね定数、 T はケーブル張力、 ℓ はケーブル長、 x はケーブル端部からダンパー



(a) 1次振動



(b) 2次振動



(c) 3次振動

図-8 ばね剛性を考慮した場合の複素固有値解析結果の一例 (C5ケーブル, $x/l=0.0471$)

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、図-9 に示すように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。

100 m 級と 200 m 級のケーブルを対象に、ダンパーのばね定数およびダンパーの取り付け位置を種々変化させた場合について複素固有値解析を行い、無次元パラメーター P_{TK} と最適粘性減衰係数の増加割合 R_{opt} (ダン

ケーブル張力に起因したばね定数 $k_T = \frac{T \cdot l}{x(l-x)}$ $\therefore y_T = P/k_T$

ダンパーが有するばね定数 k $\therefore y_K = P/k$

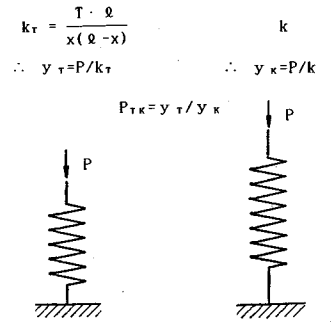


図-9 無次元パラメーター P_{TK} の算出方法

パーのばね剛性を考慮した場合の最適粘性減衰係数/ダンパーのばね剛性を無視した場合の最適粘性減衰係数)の関係ならびに無次元パラメーター P_{TK} とダンパーによって付加される構造対数減衰率の最大値が低下する割合 R_{max} (ダンパーのばね剛性を考慮した場合に付加される構造対数減衰率の最大値/ダンパーのばね剛性を無視した場合に付加される構造対数減衰率の最大値)の関係と比較してみた。その結果をそれぞれ図-10, 11 に示す。図-10, 11 から、次式を適用すれば非常に良い精度で R_{opt} と R_{max} を推定できることがわかる。

$$R_{opt} = 1.0 + 0.962 \times P_{TK} \dots \dots \dots (5)$$

$$R_{max} = \begin{cases} 1.0 & (0 \leq P_{TK} < 0.01) \\ -0.085 \log P_{TK} + 0.830 & (0.01 \leq P_{TK} \leq 0.15) \\ -0.510 \log P_{TK} + 0.480 & (0.15 < P_{TK} \leq 5.00) \\ -0.145 \log P_{TK} + 0.225 & (5.00 < P_{TK} \leq 10.0) \end{cases} \dots \dots \dots (6)$$

ところで、ケーブルにばね剛性のないダンパーを設置した場合の減衰評価曲線についてはすでに幾つか示されており^{4), 10), 14), 15)}、著者の一人もパソコンなどを利用してダンパー設置後に付加されるケーブルの構造減衰を推定できる評価式¹⁾をすでに提案しているが、ここではより精度良く推定できる減衰評価曲線を以下に示すこととする。

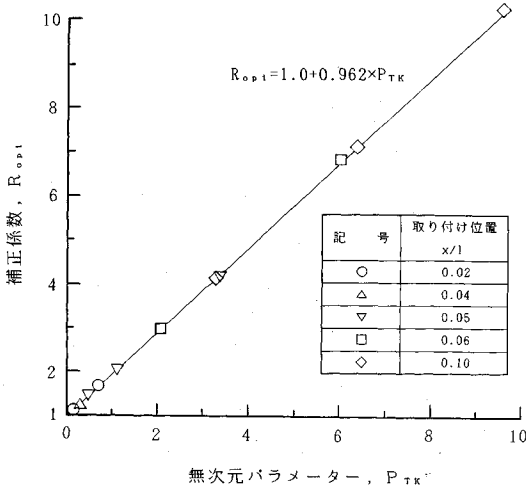
$0 < C/C_{opt}(n) \leq 1.2$ なる範囲で

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

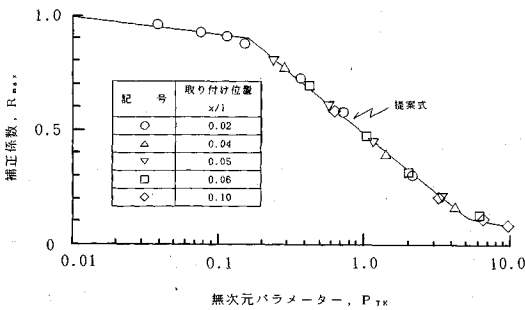
$1.2 < C/C_{opt}(n) \leq 7.0$ なる範囲で

$$\delta/\delta_{max}(n) = -0.004 \times \{C/C_{opt}(n)\}^3 + 0.075 \times \{C/C_{opt}(n)\}^2 - 0.505 \times \{C/C_{opt}(n)\} + 1.468 \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 n 次モードに対する最適粘性減衰係数 $C_{opt}(n)$ は、



図—10 無次元パラメーター P_{TK} と補正係数 R_{opt} の関係



図—11 無次元パラメーター P_{TK} と補正係数 R_{max} の関係

$$P_c(n) = \frac{\sin^2 n\pi x/l}{w \times \ell \times f_n/g} \times \frac{\ell}{x} \dots\dots\dots (8)$$

なる無次元パラメーターを仮定すれば、次式で計算できる。

$$C_{opt}(n) = \alpha(nx/l) \times 6.25/P_c(n) \dots\dots\dots (9)$$

また、式(8)において、 w はケーブルの単位長さ当りの重量、 g は重力加速度であり、 n 次モードの固有振動数 f_n は

$$f_n = \frac{n}{2\ell} \times \sqrt{gT/w} \dots\dots\dots (10)$$

で計算できる。さらに、式(9)中の補正係数 $\alpha(nx/l)$ は次式を用いて算定すれば良い。

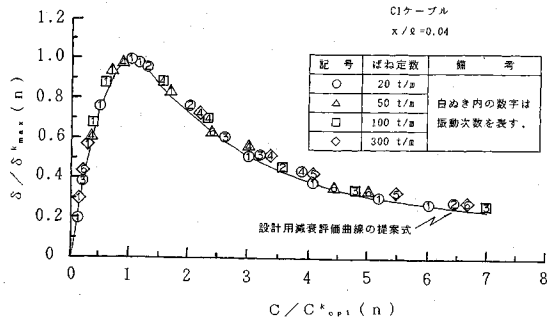
$$\alpha(nx/l) = \begin{cases} 1.0 & (0 \leq nx/l \leq 0.15) \\ -0.87 \times (nx/l) + 1.13 & (0.15 < nx/l \leq 0.45) \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

一方、最適粘性減衰係数 $C_{opt}(n)$ に対応する構造対数減衰率の最大値 $\delta_{max}(n)$ は次式を用いて算定する。

$$\delta_{max}(n) = \delta_{max}(1) = (X/l) \times (3.125 + 6.25 \times X/l) \dots\dots\dots (12)$$

表—8 C1ケーブルの構造諸元

| ケーブル名称 | ケーブル長さ R (m) | 断面積 Ac (m ²) | 重量 w (t/m) | 張力 T (ton) |
|--------|--------------|--------------------------|------------|------------|
| C1 | 199.25 | 0.01528 | 0.1278 | 561.0 |



図—12 設計用減衰評価曲線の提案式と複素固有値解析結果の比較

なお、ダンパーによって n 次モードに付加される構造対数減衰率の最大値 $\delta_{max}(n)$ はモード次数 n の増加とともに幾分大きくなる傾向を示し、より厳密には次式で定まる補正係数 $\beta(nx/l)$ を式(12)の $\delta_{max}(n)$ に乗ずれば算出できる。

$$\beta(nx/l) = \begin{cases} 1.0 & (0 < nx/l \leq 0.15) \\ 50.876 \times (nx/l - 0.15)^3 - 11.463 \times (nx/l - 0.15)^2 + 1.594 \times (nx/l - 0.15) + 1.0 & (0.15 < nx/l \leq 0.45) \end{cases} \dots\dots\dots (13)$$

しかしながら、ダンパー方式によってケーブル振動に対処する場合、 nx/l なる値はさほど大きくなく補正係数 $\beta(nx/l)$ の値も 1.0 に近いこと、また、ダンパーの設計も一般に安全側となるように考えて、ここではモード次数に関係なく、式(12)で定まる $\delta_{max}(n)$ を採用することとした。

以上の知見を踏まえ、ケーブルにばね剛性を有するダンパーを設置した場合にも適用できる設計用減衰評価曲線として、式(7)の $C_{opt}(n)$ と $\delta_{max}(n)$ をそれぞれ

$$C^k_{opt}(n) = R_{opt} \times C_{opt}(n) \dots\dots\dots (14)$$

$$\delta^k_{max}(n) = R_{max} \times \delta_{max}(n) \dots\dots\dots (15)$$

で計算される $C^k_{opt}(n)$ と $\delta^k_{max}(n)$ にそれぞれ置き換えた次式の適用性について検討することとした。

$0 < C/C^k_{opt}(n) \leq 1.2$ なる範囲で

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

$1.2 < C/C^k_{opt}(n) \leq 7.0$ なる範囲で

$$\delta/\delta^k_{max}(n) = -0.004 \times \{C/C^k_{opt}(n)\}^3 + 0.075 \times \{C/C^k_{opt}(n)\}^2 - 0.505 \times \{C/C^k_{opt}(n)\} + 1.468 \dots\dots\dots (16)$$

一例として、表一8に示した構造諸元を有するケーブル(C1ケーブル)を対象に、ダンパーの取り付け位置を $x/l=0.04$ に固定し、ばね定数 k を $k=20 \text{ t/m}$, 50 t/m , 100 t/m , 300 t/m と変化させた場合について、得られた複素固有値解析結果を上述の推定式と比較することとした。その結果を図一12に示す。この図から、式(16)による構造対数減衰率の推定値は、複素固有値解析結果と非常に良く対応していることが理解できよう。さらに、結果は省略するが、ダンパーの取り付け位置やケーブル諸元を種々変化させたその他のケーブルに対する適用性も非常に良好であり、式(16)はばね剛性を有するダンパーを設置した場合にも適用できる設計用減衰評価曲線であることが判明した。

5. 粘性せん断型ダンパーの設計法

粘性せん断型ダンパーのばね剛性は式(3)からもわかるように、粘性体の温度のみならず振動振幅や加振振動数によっても変化することから、式(16)を適用して粘性せん断型ダンパーによる減衰付加量をより厳密に推定する際には、以下に述べるように若干の工夫が必要となる。

まず、式(2)と式(3)より、振動振幅が5mm程度以下の場合、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。

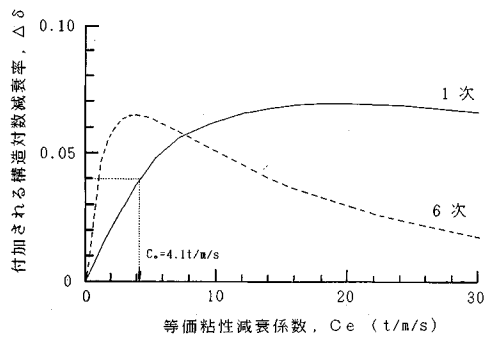
$$K_e = 0.54d^{-0.5}a^{-0.19}\omega^{0.95}C_e \dots\dots\dots(17)$$

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。

$$K_e = 0.54a^{-0.19}\omega^{0.95}C_e \dots\dots\dots(18)$$

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を設計する際の基準振幅 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。そこで、式(16)と式(18)を用い、前章に示したC1ケーブルを対象に、ケーブル制振用粘性せん断型ダンパーの設計法(粘性体の注入量の設定法)について詳述することとする。

今、ダンパーの取り付け位置が $x/l=0.04$ 、設計基準振幅として $a=0.3 \text{ cm}$ 、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、この条件のもとで3Hz程度以下の振動モードについて、ダンパーによって付加される構造対数減衰率 $\Delta\delta$ が $\Delta\delta \geq 0.04$ となるように粘性体の注入量(粘性せん断を期待する断面積 S)を決定するものとする。計算にあたっては、対象としたC1ケーブルの固有振動数が $f_1=0.521 \text{ Hz}$ (1次) $\sim f_6=3.123 \text{ Hz}$ (6次)



図一13 粘性せん断型ダンパーを設置した場合の等価粘性減衰係数と構造対数減衰率の関係(C1ケーブル, $x/l=0.04$)

表一9 C1ケーブルに対する構造対数減衰率の推定値

| 次数 | $t=40^\circ\text{C}$ | | | | $t=-5^\circ\text{C}$ | | | |
|----|----------------------|----------------|----------------|-------|----------------------|----------------|----------------|-------|
| | C_e (t·s/m) | k_e (t/m) | 構造対数減衰率 推定値 | 解析値 | C_e (t·s/m) | k_e (t/m) | 構造対数減衰率 推定値 | 解析値 |
| 1次 | 4.33 | 9.05 | 0.042 | 0.040 | 29.98 | 62.67 | 0.066 | 0.067 |
| 6次 | 1.76 | 20.16 | 0.062 | 0.066 | 12.13 | 139.27 | 0.045 | 0.046 |

表一10 C5ケーブルに対する構造対数減衰率の推定値

| 次数 | $t=40^\circ\text{C}$ | | | | $t=-5^\circ\text{C}$ | | | |
|----|----------------------|----------------|----------------|-------|----------------------|----------------|----------------|-------|
| | C_e (t·s/m) | k_e (t/m) | 構造対数減衰率 推定値 | 解析値 | C_e (t·s/m) | k_e (t/m) | 構造対数減衰率 推定値 | 解析値 |
| 1次 | 3.08 | 12.13 | 0.053 | 0.049 | 22.19 | 87.49 | 0.078 | 0.077 |
| 3次 | 1.78 | 19.88 | 0.070 | 0.069 | 12.29 | 137.61 | 0.064 | 0.063 |

であることから、6次モードまでについて $\Delta\delta \geq 0.04$ となるようにすれば良い。等価粘性減衰係数 C_e の範囲を $C_e=1 \sim 30 \text{ t} \cdot \text{s/m}$ とすれば、 C_e を式(18)に代入して算出した等価ばね定数 K_e に対応する構造減衰の付加量は式(16)から推定できる。参考までに、1次モードと6次モードに対する等価粘性減衰係数と付加される構造対数減衰率の関係を図一13に示す。

$t=40^\circ\text{C}$ において1次モードの構造対数減衰率が $\Delta\delta \geq 0.04$ となるためには、1次モードに対する等価粘性減衰係数 C_e が次式を満足する必要がある。

$$C_e \geq 0.85 \times e^{-0.043 \times 40} \times S \times 0.3^{0.34} \times 1.0^{-0.5} \times 0.3^{-0.50} \times (2\pi \times 0.521)^{-0.5} = 0.120 \times S \dots\dots\dots(19)$$

図一13からわかるように、 $\Delta\delta \geq 0.04$ となる C_e の値は $C_e \geq 4.1 \text{ t} \cdot \text{s/m} = 41 \text{ kg} \cdot \text{s/cm}$ である。ここでは、設計にとって若干安全側となるように $C_e = 43 \text{ kg} \cdot \text{s/cm}$ なる値を採用することとし、この値を式(19)に代入すれば $S = 424 \text{ cm}^2$ が得られる。そこで、 $S = 424 \text{ cm}^2$ なるもとで、1次モードと6次モードに対し、 $t=40^\circ\text{C}$ と $t=-5^\circ\text{C}$ なる場合の減衰付加量を式(16)を用いて推定した。その結果を表一9に示す。表一9より、粘性体の注入量として $S = 424 \text{ cm}^2$ となるよう決定すれば、 $t=-5^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ なる温度条件下で1次モードのみならず6次モードに対しても所要の構造減衰が付加されていることがわかる。なお、表一9には参考までに複素固有値解析結果も付記してあるが、式(16)より計算した構造減衰

の推定値は複素固有値解析結果と良く対応していることが理解できよう。

ところで、斜張橋の各段ケーブルについて上述の手法で最適な粘性体量を決定したダンパーをそれぞれのケーブルに設置することは最良ではあるが、一方で外見は同じで粘性体量の異なる多種類のダンパーを採用することはダンパーの確認作業なども含め現場での設置作業が複雑になることも予想される。そこで、C1ケーブルに対して決定された $S=424\text{ cm}^2$ なるダンパーをC5ケーブルに設置した場合に付加される構造対数減衰率を計算することとした。その結果を表-10に示す。ここに、C5ケーブルに対するダンパーの取り付け位置は、3章に示した場合と同じく $x/l=0.0471$ としている。表-10より、C1ケーブルに対して最適となるよう粘性体量が決定されたダンパーは、C5ケーブルにおける3 Hz程度以下の振動モード ($f_1=1.02\text{ Hz}\sim f_3=3.06\text{ Hz}$) に対しても設計所要値を上回る構造減衰が付加されていることがわかる。それゆえ、実務設計にあたっては、C1ケーブル～C5ケーブルに対し、同一の $S=424\text{ cm}^2$ なるダンパーを設置すれば良いこととなる。

6. ま と め

本論文は、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対する信頼性の向上と本ダンパーのより厳密な設計法を確立することを目的として、室内実験結果から本ダンパーのばね剛性を評価するとともに、実橋ケーブル試験結果とばね剛性を考慮した複素固有値解析結果の比較から、粘性せん断型ダンパーの減衰付加効率について検討したものである。得られた主要な結果を以下にまとめる。

(1) 粘性せん断型ダンパーのばね剛性には、温度依存性に加え振幅依存性と振動数依存性が認められた。そこで、工学的な取扱いを容易にするとともに、温度依存性と振幅依存性ならびに振動数依存性を考慮した一般的な等価ばね定数の算定式を与えた。

(2) 実橋ケーブル試験で得られた構造対数減衰率の実測値と複素固有値解析による理論値との比較から、ダンパーの減衰付加効率について検討した。その結果、提案した実験式を用いて等価粘性減衰係数と等価ばね定数を適切に評価すれば、付加される構造対数減衰率の理論値は実験値とほぼ一致し、設計にあたり粘性せん断型ダンパーの減衰付加効率として1.0なる値が採用できることを示すことができた。

(3) 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るが、複素固有値解析の実施は非常に複雑で多大の労力と費用を要する。そこで、本文では、実務設計者の便を考え、ばね剛性を有するダンパーを設置した場合にも適用できる、

設計用減衰評価曲線を与えた。

(4) 粘性せん断型ダンパーの粘性減衰係数とばね定数は、粘性体の温度に加え振動振幅や加振振動数によっても変化することから、粘性せん断型ダンパーの設計が容易に行えるよう、等価ばね定数 K_e と等価粘性減衰係数 C_e の関係式を提示した。また、約200 mのケーブルを対象に、粘性せん断型ダンパーの具体的な設計法についても例示した。

近年の斜張橋建設にあたっては、主桁や主塔の耐風検討に加え、ケーブルの制振対策に関する検討もきわめて重要となりつつある。ケーブル制振用粘性せん断型ダンパーの特性とその設計法について詳述した本文が、ケーブル制振対策を検討する実務設計者にとって有益な資料になることを心より願う次第である。

なお、今後は、ケーブル制振用粘性せん断型ダンパーが設置されたその他の橋梁をも対象に、複素固有値解析結果と実橋ケーブル試験結果との比較を行い、減衰付加効率に関するデータの蓄積を図って行く予定である。

謝 辞：本研究での複素固有値解析にあたり、望月秀之君（川田工業（株））の御協力をいただいた。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 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。
- 2) 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。
- 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., Nakaya, S. and S. Higa: Rain-Wind Induced Vibration of the Cables of the Aratsu Bridges, 第10回風工学シンポジウム論文集, pp.127~132, 1988年12月。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) 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。

- 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. 37 A，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. 39 A，pp. 841～850，1993年3月。
- 12) 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。
- 13) 小西一郎・高岡直善：構造動力学，丸善，pp. 39～43，1973年6月。
- 14) 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，pp. 455～458，1989年10月。
- 15) 藤野陽三・Pacheco M. Benito・Sulekh Ajai：ダンパーをつけた斜張橋ケーブルの減衰評価曲線，橋梁と基礎，Vol. 26，No. 4，pp. 41～45，1992年4月。

(1993. 3. 10 受付)

EFFECTS OF ELASTICITY ON THE DAMPING CHARACTERISTICS OF VISCOUS SHEARING DAMPER AND ESTIMATION CURVE FOR MODAL DAMPING IN STAY CABLES WITH THIS TYPE OF DAMPERS

Masahiro YONEDA and Ikuo SHIMODA

In recent years, wind-induced cable vibrations of cable-stayed bridges have been observed, and phenomena of these have become a major problem in the wind engineering. In the present paper, the effects of elasticity on the damping characteristics of viscous shearing damper are investigated, and the full scale measurements for a actual bridge cable are compared with the results of complex-eigenvalue calculations taken into consideration the elasticity in order to examine the damper effectiveness. Furthermore, a simple design curve for estimating the modal damping in stay cables with dampers is proposed from the practical point of view. The use of the design curve is also illustrated through actual examples of bridge stay cables.