

斜張橋ケーブルを対象とした併用ダンパー方式の減衰評価手法とその設計法に関する研究

米田昌弘¹・望月秀之²・瀬戸内秀規³

¹正会員 工博 川田工業㈱ 技術本部研究室長 (〒550 大阪市西区北堀江 1-22-19)

²正会員 川田工業㈱ 技術本部研究室 (同上)

³正会員 工修 川田工業㈱ 技術本部研究室 (同上)

風による斜張橋ケーブルの振動とその制振に関する検討は今までも増して重要となりつつあり、大規模な長大斜張橋では、空力的対策に加え、1本のケーブルに2基のダンパーを設置する併用ダンパー方式を対策案の一つとして検討する機会が増加するものと推察される。このような状況を踏まえ、本文では、併用ダンパー方式を採用した場合の減衰評価手法を提示している。また、提案した減衰評価手法を適用して、併用ダンパー方式の特徴を明らかにするとともに設計上の留意点についても言及し、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 : cable, cable-stayed bridge, vibration control, damper

1. まえがき

周知の如く、斜張橋ケーブルの風による振動に対処する方法として最近ではケーブル端部付近にダンパーを設置する方式が主要な制振対策として位置づけられつつある¹⁾。ダンパーを設置する手法としては、荒津大橋や天保山大橋で採用されているオイルダンパー方式²⁾、幸魂大橋や東名足柄橋等で採用されている粘性せん断型ダンパー方式³⁾が最も一般的であるが、最近では高減衰ゴムを設置する方式⁴⁾も開発され実橋ケーブルへの適用例も報告されている。また、厳密にはダンパー方式に分類できないが、渦励振など比較的励振力の弱いケーブル振動に対して、弾性シール材の設置で対処する事例⁵⁾も増加している。

これら各種ダンパー方式の特徴として、たとえば、オイルダンパー方式や粘性せん断型ダンパー方式では、確実に減衰を付加できるものの、ケーブルのサグ変化などにもなう2次応力の低減は期待できない。一方、高減衰ゴム方式ではケーブルのサグ変化にもなう2次応力にもある程度対処できるが、ケーブルに付加される構造減衰の最大値は、オイルダンパー方式や粘性せん断型ダンパー方式に比べ、一般に小さくなる。さらに、弾性シール材を設置する手法では、その本来の機能からケーブルのサグ変化にもなう2次応力の低減には十分に対処できるが、弾性シール材のばね定数は非常に大きく、ケーブルに付加される構造減衰の最大値は高減衰ゴム方式よりもさらに小さいものとなる。

したがって、実務設計にあたっては、対象とするケーブル振動の励振力と上述した各方式のそれぞれの特徴を考慮合わせて、実橋で採用すべきダンパーを具体的に選定することとしている。しかしながら、従来は最長ケーブルが250m程度以下の斜張橋を対象とする場合がほとんどであり、景観に対する配慮から高欄や自動車防護柵高さを越えない位置に1基(粘性せん断型ダンパーや高減衰ゴムでは1個、オイルダンパーでは1対)のダンパーを設置することによってケーブル制振が図られ、また実際、風によるケーブル振動に対して十分な対処が可能であった。これに対し、最長ケーブルが250m~300m程度以上の大規模な長大斜張橋では、高欄や自動車防護柵と同程度の高さにダンパーを設置するという条件下で、たとえばレインパイプレーションの発現する可能性が高い3Hz程度以下のすべての振動モードに対して所定の構造減衰を付加することは一般に困難である。それゆえ、大規模な長大斜張橋では、ケーブル制振に関して、2つの設計思想が存在するものと考えられる。すなわち、一つはケーブル表面に凹型や凸型等の粗度を付与する方法(空力的対策の採用)であり、もう一つは、高欄や自動車防護柵高さは若干越えるものの、2基のダンパーを併用して所定の構造減衰を付加する方法である。実際、中央支間長が485mで最長ケーブルが約215mの東神戸大橋では前者の空力的対策(ケーブル表面に適当な間隔で小さな突起を設ける方法)が、また、中央支間長が510mで最長ケーブルが約285mの鶴見つばさ橋では後者の2基のダンパーを併用する手法(下方側に高減衰

ゴム、上方側にオイルダンパー) がすでに採用されるに至っている^{6),7)}。

近年における斜張橋の長径間化と施工実績は目覚ましく、その機能美から本形式はますます盛んに建設されていくものと予想される。それゆえ、風によるケーブル振動とその制振に関する検討も今までにも増して重要となり、大規模な長大斜張橋では、空力的対策に加え、1本のケーブルに2基のダンパーを設置する併用ダンパー方式を対策案の一つとして検討する機会が増加するものと推察される。しかしながら、1本のケーブルに2基のダンパーを設置した場合の減衰付加効果を検討する場合、当然のことながら、1本のケーブルに1個のダンパー設置を前提とした従来の設計用減衰評価曲線^{2),8)-10)}はそのままでは適用できない。一方、斜張橋ケーブルの全段について複素固有値解析を実施することは、非常に繁雑で多大の労力と費用を要する検討作業となる。それゆえ、併用ダンパー方式を採用した場合にも適用できる減衰評価手法の提示が、実務技術者から強く望まれていた。

このようなダンパー方式による新しいケーブル制振の動向に配慮し、著者らは、1本のケーブルに2基のダンパーを併用する方式を採用した場合の減衰評価手法を提示することとした。本評価手法の基本概念は、下方側ダンパーの寄与で上方側ダンパーの設置位置が、また、上方側ダンパーの寄与で下方側ダンパーの設置位置がそれぞれ見かけ上短くなることを考慮し、従来の設計用減衰評価曲線(1本のケーブルに1個のダンパーを設置した場合の減衰評価曲線)から計算した上方側ダンパーのみと下方側ダンパーのみによる構造減衰をそれぞれ重ね合わせようとするものである。したがって、2基のダンパーが併用された場合にもパソコンなどを利用すればきわめて短時間にしかも比較的精度良くケーブルに付加される構造減衰を推定でき、実務上の有用性もきわめて高いと考えられる。一方、併用ダンパー方式については鶴見つばさ橋での実施例があるのみで、本方式の特徴や設計上の留意点については未だ十分に解明されているとは言えない。そこで、提案した減衰評価手法を適用して、1本のケーブルに1基のダンパーを設置した場合と2基のダンパーを併用した場合の減衰付加特性について対比を行い、併用ダンパー方式の特徴を明らかにするとともに設計上の留意点についても言及することとした。その結果、斜張橋の設計や制振に携わる実務技術者にとってきわめて有用な知見が得られたことから、ここにその結果を報告する。

2. 減衰評価手法

細径ケーブルを使用することの多いPC斜張橋では、角折れ緩衝装置(弾性シール材)を施したケーブルを対

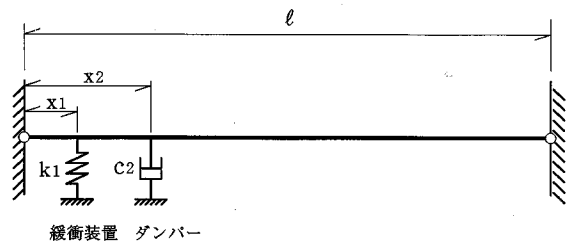


図-1 緩衝装置が併用された場合の検討モデル

象として、ダンパーによる減衰付加効果を検討することもしばしば行われている。これは併用ダンパー方式の特殊なケースと考えられ、当然のことながら、従来の設計用減衰評価曲線では十分な検討を実施できない。それゆえ、本章では、1本のケーブルに2基のダンパーを設置する併用ダンパー方式のみならず、角折れ緩衝装置が下方側に配置され、さらに上方側にもダンパーが設置された場合についても節を設け、ケーブルに付加される構造減衰を従来の設計用減衰評価曲線(1本のケーブルに1個のダンパーを設置した場合の減衰評価曲線)を適用して算定する手法を提示することとする。なお、設計用減衰評価曲線として種々のものがすでに提案されているが、本研究で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文献10)に示された評価式を適用するものとした。

(1) 角折れ緩衝装置が併用された場合

ケーブル定着部での疲労強度が比較的小さいケーブルを採用した斜張橋では、ケーブル定着部での疲労強度を確保する必要から、図-1に示すようにケーブル端部から x_1 なる位置に桁側緩衝装置を設置した状態で、 x_2 なる位置にダンパー(ダッシュポット)を設置した場合の減衰付加効果を検討することもしばしば行われている。このように角折れ緩衝装置が併用された検討モデルに対し、実務設計では設計にとって安全側の立場から桁側の緩衝装置が設置された位置を固定点と考え、既往の設計用減衰評価曲線を適用してダンパーによる減衰付加効果を推定する場合が多い。しかしながら、この方法は角折れ緩衝装置のばね定数を無限大と仮定した場合に相当し、それゆえ、ダンパーの減衰付加特性に及ぼす緩衝装置の影響を詳細に検討する必要がある場合には複素固有値解析を実施せざるを得なかった。

これに対し、ここで提示する最初の手法(後述する手法と区別するため、本文ではMETHOD-1と呼称する)は、桁側の緩衝装置の影響でダンパーの設置位置 x_2 が見かけ上短くなると考えて、ケーブルに付加される構造減衰を推定しようとするものである。なお、角折れ緩衝装置は一般に塔側にも設置されるが、通常、桁側に比べて

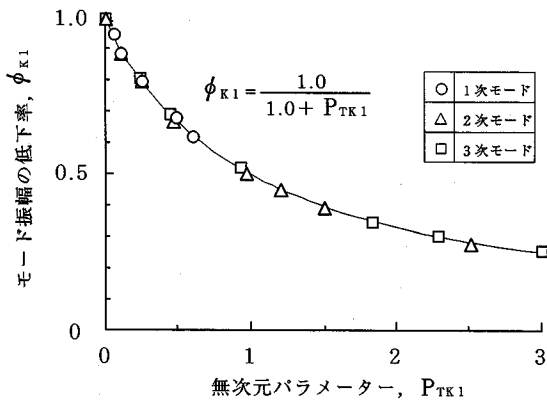


図-2 無次元パラメーター P_{TK1} とモード振幅の低下率 ϕ_{k1} の関係

ケーブル端部からの取り付け位置は短く、また、ばね定数は大きい。したがって、以下の議論にあたっては、塔側の緩衝装置が設置された位置をケーブル端部と仮定することとしている。

今、種々の構造諸元を有する長さ 100 m のケーブルを対象として、緩衝装置の取り付け位置 x_1 とそのばね定数 k_1 を変化させて固有振動解析を実施すれば、 x_1 点におけるモード振幅の低下率 ϕ_{k1} (ばね定数が k_1 なる場合のモード振幅/ばねを設置しない場合のモード振幅) と無次元パラメーター P_{TK1} の関係が図-2 のように得られる。なお、無次元パラメーター P_{TK1} は次式で定義され、ばね剛性とケーブル張力に起因した剛性との比を表すものである¹⁰⁾。

$$P_{TK1} = \frac{x_1 \cdot (\ell - x_1) \cdot k_1}{T \cdot \ell} \quad (1)$$

ここに、 T はケーブル張力、 ℓ はケーブル長である。図-2 より、モード振幅の低下率 ϕ_{k1} と無次元パラメーター P_{TK1} には、モード次数に係わらず、以下の関係が成立することがわかる。

$$\phi_{k1} = \frac{1.0}{1.0 + P_{TK1}} \quad (2)$$

したがって、桁側緩衝装置を併用した場合、上方側オイルダンパーの取り付け位置 x_2 は、

$$\phi_{k1} \times \sin(n\pi x_1 / \ell) = \sin \frac{n\pi(x_1 - x_{k1})}{\ell - x_{k1}} \quad (3)$$

なる関係式から誘導した、次式で計算される x_{k1} なる距離だけ短くすると仮定できよう。

$$x_{k1} = \frac{n\pi x_1 - \ell \times \sin^{-1}\{\phi_{k1} \times \sin(n\pi x_1 / \ell)\}}{n\pi - \sin^{-1}\{\phi_{k1} \times \sin(n\pi x_1 / \ell)\}} \quad (4)$$

ここに、 n はモード次数である。

以上の議論より、対象とした検討モデル(下方側に緩衝装置、上方側にオイルダンパーが設置されたモデル)は図-3 に示したモデル(長さ $\ell - x_{k1}$ なるケーブルの x_2

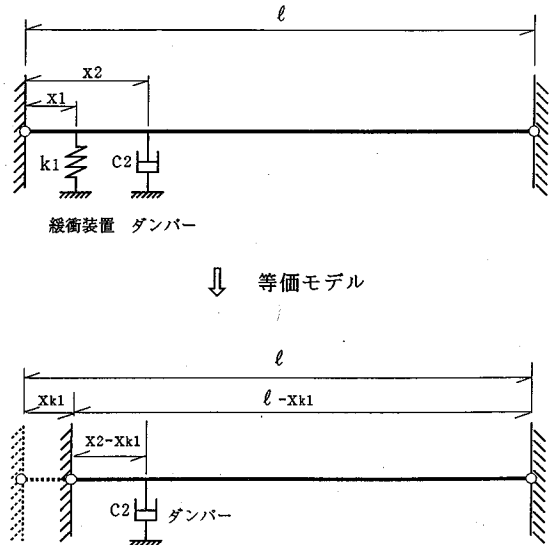


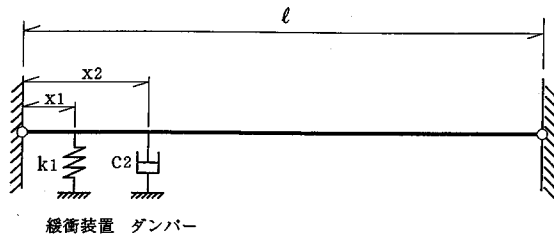
図-3 等価モデルへの置換 (METHOD-1)

$-x_{k1}$ なる位置に、粘性減衰係数が C_2 なるオイルダンパーを設置したモデル) と等価となり、既往の設計用減衰評価曲線を適用することによって、ケーブルに付加される構造減衰を推定できることになる。なお、ここでは、角折れ緩衝装置の上方に設置するダンパーとしてオイルダンパーを想定していたが、粘性減衰係数が C_2 でばね定数が k_2 なるダンパーを上方側ダンパーとして採用する場合には、同じ特性を有するダンパーを長さ $\ell - x_{k1}$ なるケーブルの $x_2 - x_{k1}$ なる位置に設置したモデルと等価となる。

一方、上述した推定方法に加え、桁側緩衝装置(設置位置は x_1) のばね定数 k_1 を x_2 なる位置(ダンパーが設置される位置)での等価ばね定数 k_2^* に変換する手法(上述の METHOD-1 と区別するため、以下では METHOD-2 と呼称する)を採用しても、同様にケーブルに付加される構造減衰を推定できると考えられる。すなわち、ばね定数が k_1 なる緩衝装置が x_1 に設置された場合の x_2 での 1 次モード振幅を $y_{k1}(x_2)$ 、ばね定数が k_2^* なる等価ばねを x_2 なる位置に設置した場合の x_2 での 1 次モード振幅を $y_{k2^*}(x_2)$ とすれば、 k_1 なるばね定数を有する緩衝装置の x_2 なる位置での等価ばね定数 k_2^* は

$$y_{k1}(x_2) = y_{k2^*}(x_2) \quad (5)$$

なる条件から算定できる。ここで、1 次振動モードは等分布荷重 p が作用した場合の静的変形で近似できることを考慮すれば、構造力学の基礎知識を適用して得られる $y_{k1}(x_2)$ と $y_{k2^*}(x_2)$ の解析解を式(5)に代入して整理することにより、等価ばね定数 k_2^* の算定式として次式が得られることとなる。



↓ 等価モデル

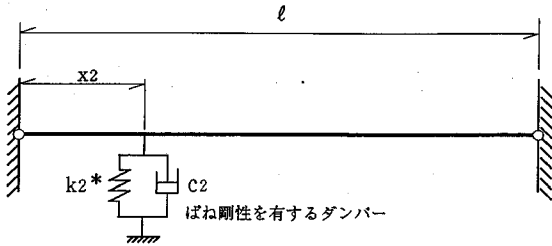


図-4 等価モデルへの置換 (METHOD-2)

$$k_2^* = \frac{Tl}{x_2(l-x_2)} \times \frac{x_1}{x_2 [Tl / \{k_1 x_1 (l-x_1)\} + 1.0] - x_1} \quad (6)$$

よって、対象とした検討モデル（下方側に緩衝装置，上方側にオイルダンパーが設置されたモデル）は，図-4に示したモデル（長さ l なるケーブルの x_2 なる位置に，ばね定数が k_2^* で粘性減衰係数が C_2 なるダンパーを設置したモデル）と等価となり，既往の設計用減衰評価曲線を適用すれば，ケーブルに付加される構造減衰を推定できることになる。なお，角折れ緩衝装置の上方に，粘性減衰係数が C_2 でばね定数が k_2 なるダンパーを設置した場合には，粘性減衰係数が C_2 ，ばね定数が $k_2 + k_2^*$ なるダンパーを長さ l なるケーブルの x_2 なる位置に設置したモデルと等価となり，同様に既往の設計用減衰評価曲線を適用すれば，ケーブルに付加される構造減衰を推定できることとなる。

(2) ダンパーを併用した場合

本節ではより一般的な議論を展開するため，図-5に示すようにケーブル端部から x_1 と x_2 なる位置のそれぞれに，粘性せん断型ダンパーや高減衰ゴムに代表されるばね剛性を有するダンパー（ばねとダッシュポットから構成されるダンパー）が設置された場合を想定する。

2基のダンパーを併用した場合，上方側ダンパーが設置される x_2 なる位置でのモード振幅は下方側ダンパーの寄与によって低下することから，上方側ダンパーのみによって付加される構造減衰（下方側ダンパーによって付加される構造減衰を無視した値）は， x_2 なる位置に同じばね定数と粘性減衰係数を有する1基のダンパーを設

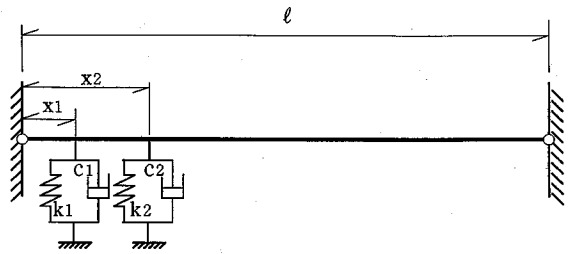


図-5 ダンパーが併用された場合の検討モデル

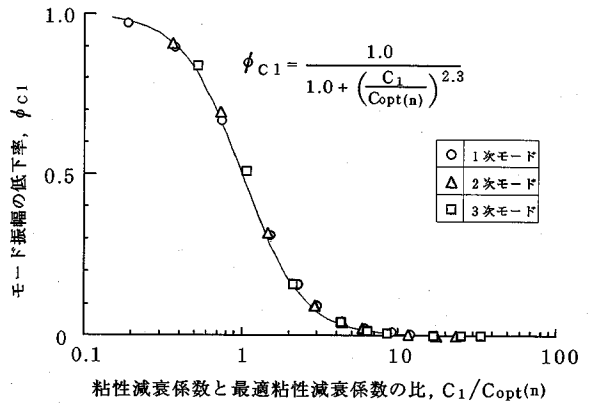


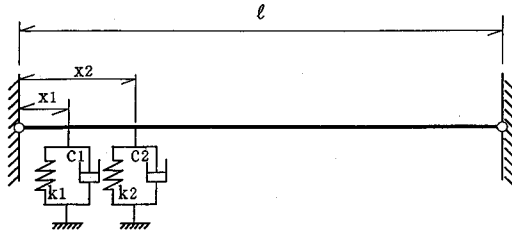
図-6 無次元化した粘性減衰係数 $C_1/C_{opt}(n)$ とモード振幅の低下率 ϕ_{c1} の関係

置した場合の構造減衰と比較して小さくなる。

ばね効果のみによるモード振幅の低下率 ϕ_{n1} についてはすでに式(2)に示している。そこで，ケーブルに1個のダッシュポットを設置した場合について，ダッシュポット設置位置におけるケーブルのモード振幅の低下率を把握することとした。種々の構造諸元を有する長さ100mなるケーブルを対象として，ダッシュポットの取り付け位置 x_1 と粘性減衰係数 C_1 を変化させて複素固有値解析を実施すれば，モード振幅の低下率 ϕ_{c1} （粘性減衰係数が C_1 なる場合のモード振幅/ダッシュポットを設置しない場合のモード振幅）と $C_1/C_{opt}(n)$ の関係が図-6のように得られる。ここに， $C_{opt}(n)$ は，ダッシュポットを設置した場合における n 次モードの最適粘性減衰係数である。図-6より，モード次数に係わらず，ダッシュポットの取り付け点におけるモード振幅の低下率 ϕ_{c1} と $C_1/C_{opt}(n)$ には，以下の関係が成立することがわかる。

$$\phi_{c1} = \frac{1.0}{1.0 + \{C_1/C_{opt}(n)\}^{2.3}} \quad (7)$$

したがって，上方側ダンパーの取り付け位置は，式(4)を参照すれば容易に推察されるように，ばね剛性を有する下方側ダンパーの作用によって，見かけ上，次式で計算される x_{c1k1} だけ短くすると仮定できよう。



↓ 等価モデル

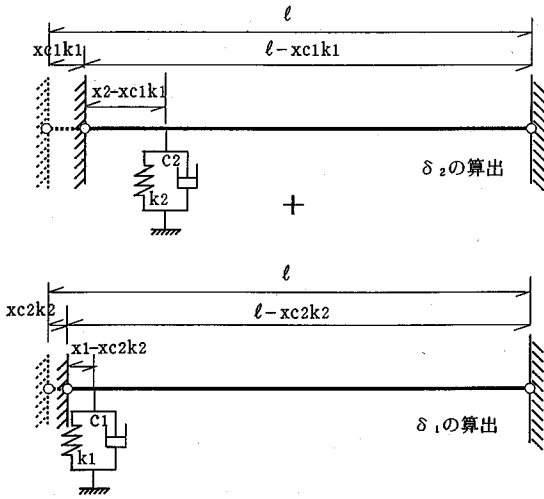


図-7 等価モデルへの置換 (併用ダンパー方式)

$$x_{c1k1} = \frac{n\pi x_1 - l \times \sin^{-1}\{\phi_{c1} \times \phi_{k1} \times \sin(n\pi x_1/l)\}}{n\pi - \sin^{-1}\{\phi_{c1} \times \phi_{k1} \times \sin(n\pi x_1/l)\}} \quad (8)$$

よって、長さ l なるケーブルの x_2 なる位置に設置された上方側ダンパーによる減衰は、同一のばね剛性を有するダンパーを長さ $l - x_{c1k1}$ なるケーブルの $x_2 - x_{c1k1}$ なる位置に設置した場合とほぼ等価になり、既往の設計用減衰評価曲線を適用すればケーブルに付加される構造対数減衰率 δ_2 が算出されることとなる。

同様に、上方側ダンパーの影響によって、下方側ダンパーが設置される位置でのモード振幅は低下する。この場合は、

$$\sin \frac{n\pi x_{c2k2}}{l} = \phi_{c2} \times \phi_{k2} \times \frac{x_1}{x_2} \times \sin \frac{n\pi x_2}{l} \quad (9)$$

なる関係式から誘導した、次式で算定される x_{c2k2} なる距離だけ下方側ダンパーの設置位置が短くなると仮定する。

$$x_{c2k2} = \frac{l}{n\pi} \times \sin^{-1}\left(\phi_{c2} \times \phi_{k2} \times \frac{x_1}{x_2} \times \sin \frac{n\pi x_2}{l}\right) \quad (10)$$

ここに、 ϕ_{c2} と ϕ_{k2} はそれぞれ次式から算定される。

$$\phi_{c2} = \frac{1.0}{1.0 + \{C_2/C_{opt}(n)\}^{2.3}} \quad (11)$$

表-1 100 m ケーブルの構造諸元

ケーブル長 l (m)	断面積 A (m ²)	重量 w (t·f/m)	張力 T (t·f)
100.0	0.01135	0.0948	645.0

表-2 250 m ケーブルの構造諸元

ケーブル長 l (m)	断面積 A (m ²)	重量 w (t·f/m)	張力 T (t·f)
250.0	0.01089	0.0893	430.0

$$\phi_{k2} = \frac{1.0}{1.0 + P_{TK2}} \quad (12)$$

よって、長さ l なるケーブルの x_1 なる位置に設置された下方側ダンパーによる減衰は、同一のばね剛性を有するダンパーを長さ $l - x_{c2k2}$ なるケーブルの $x_1 - x_{c2k2}$ なる位置に設置した場合とほぼ等価になり、既往の設計用減衰評価曲線を適用すればケーブルに付加される構造対数減衰率 δ_1 が算出されることとなる。

したがって、図-7に示したように、対象とした解析モデル (下方側と上方側にそれぞればね剛性を有するダンパーを設置したモデル) に付加される構造減衰は、上述の手順で定まる δ_1 と δ_2 の合計値にほぼ等しくなると推察されるが、その妥当性については次章において具体的な数値計算例を示し、検証することとする。なお、下方側にばね剛性を有するダンパーを、上方側にオイルダンパーをそれぞれ設置した場合には、式(10)において $\phi_{k2} = 1.0$ とすればよい。また、上・下方側ともオイルダンパーを設置した場合には、式(8)と式(10)においてそれぞれ $\phi_{k1} = 1.0$ 、 $\phi_{k2} = 1.0$ とすれば対処できる。さらに、式(8)において $\phi_{c1} = 1.0$ とすれば、角折れ緩衝装置を併用する場合の推定法である METHOD-1 に一致することを付記しておく。

3. 提案した減衰評価手法の妥当性

本章では、表-1、表-2に示すような長さがそれぞれ $l = 100$ m と $l = 250$ m のケーブルモデルを対象として、角折れ緩衝装置が施されたケーブルにダンパーを設置した場合および2基のダンパーを併用した場合について、前章に示した減衰評価手法に基づく構造減衰の推定結果とより厳密な複素固有値解析による結果とを比較し、提案した減衰評価手法の妥当性を検証することとする。なお、複素固有値解析にあたっては、分割数に依存した解析誤差を極力小さくすることを考え、100 m ケーブルでは100部材に、250 m ケーブルでは250部材に分割するとともに、本研究では汎用プログラムである

表-3 CASE-1 A に対する複素固有値解析結果と推定値の比較

(a) 1次モード

下段側 緩衝装置 $x_1=2.0\text{m}$	上段側 ダンパー $x_2=5.0\text{m}$	1次モードの 構造対数減衰率			
		複素 固有値	推定値		
			METHOD -1	METHOD -2	
k_1 (tf/m)	C_2 (tf·s/m)	300.0			
	1.0		0.013	0.015	0.015
	3.0		0.038	0.041	0.041
	5.0		0.062	0.064	0.064
	10.0		0.107	0.107	0.107
	15.0		0.129	0.131	0.131
	20.0		0.134	0.138	0.137
	25.0		0.130	0.129	0.129
30.0	0.122	0.118	0.118		

(b) 3次モード

下段側 緩衝装置 $x_1=2.0\text{m}$	上段側 ダンパー $x_2=5.0\text{m}$	3次モードの 構造対数減衰率			
		複素 固有値	推定値		
			METHOD -1	METHOD -2	
k_1 (tf/m)	C_2 (tf·s/m)	300.0			
	1.0		0.037	0.040	0.039
	3.0		0.098	0.097	0.096
	5.0		0.131	0.129	0.128
	10.0		0.125	0.120	0.122
	15.0		0.097	0.093	0.095
	20.0		0.077	0.073	0.075
	25.0		0.063	0.059	0.060
30.0	0.054	0.049	0.050		

表-4 CASE-1 B に対する複素固有値解析結果と推定値の比較

(a) 1次モード

下段側 緩衝装置 $x_1=2.0\text{m}$	上段側 ダンパー $x_2=4.0\text{m}$		1次モードの 構造対数減衰率				
	k_1 (tf/m)	C_2 (tf·s/m)	k_2 (tf/m)	推定値			
				METHOD -1	METHOD -2		
300.0	300.0	300.0	1.0	4.50	0.007	0.008	0.008
			3.0	13.51	0.020	0.021	0.020
			5.0	22.51	0.030	0.031	0.030
			10.0	45.02	0.047	0.047	0.046
			15.0	67.53	0.055	0.054	0.053
			20.0	90.04	0.058	0.056	0.057
			25.0	112.55	0.059	0.057	0.058
			30.0	135.06	0.057	0.056	0.058

(b) 3次モード

下段側 緩衝装置 $x_1=2.0\text{m}$	上段側 ダンパー $x_2=4.0\text{m}$		3次モードの 構造対数減衰率				
	k_1 (tf/m)	C_2 (tf·s/m)	k_2 (tf/m)	推定値			
				METHOD -1	METHOD -2		
300.0	300.0	300.0	1.0	12.78	0.019	0.020	0.020
			3.0	38.35	0.045	0.045	0.042
			5.0	63.91	0.057	0.054	0.053
			10.0	127.82	0.060	0.057	0.058
			15.0	191.73	0.053	0.052	0.053
			20.0	255.64	0.045	0.045	0.047
			25.0	319.55	0.039	0.039	0.040
			30.0	383.46	0.035	0.034	0.034

NASTRAN を用いて複素固有値解析 (解法はデターミナント法) を実施することとした。また、複素固有値解析と減衰評価手法に基づく計算は振動数が 3 Hz 程度以下となるすべての鉛直振動モード (レインバイブレーションの発現する可能性が高い振動モード) について実施しているが、紙面の都合もあり、以下では 100 m ケーブルに対しては 1 次モード (1.291 Hz) と 3 次モード (3.873 Hz)、250 m ケーブルに対しては 1 次モード (0.434 Hz) と 4 次モード (1.736 Hz) ならびに 7 次モード (3.041 Hz) について対比することとする。

(1) 角折れ緩衝装置が併用された場合

角折れ緩衝装置が $x_1=2.0\text{m}$ なる位置に施された 100 m ケーブルを対象に、 $x_2=5.0\text{m}$ なる位置にオイルダンパーを設置した場合 (CASE-1 A) および $x_2=4.0\text{m}$ なる位置に粘性せん断型ダンパーを設置した場合 (CASE-1 B) のそれぞれについて、複素固有値解析結果と提案した

減衰評価手法による推定結果を比較した。その結果を表-3、表-4 に示す。ここに、角折れ緩衝装置のばね定数 k_1 としては $k_1=300\text{tf/m}$ なる値を仮定し、また、粘性せん断型ダンパーの等価ばね定数 k_2 と等価粘性減衰係数 C_2 は、文献 10) から引用した次式において、所定の固有円振動数 ω と $a=0.5\text{cm}$ なる基準振幅値を代入して算出することとした。

$$k_2 = 0.54a^{-0.19} \cdot \omega^{0.95} \cdot C_2 \quad (13)$$

表-3 と表-4 からわかるように、METHOD-1 と METHOD-2 による推定結果は、若干の差異はあるものの、それぞれ複素固有値解析結果と比較的良好一致しており、いずれの手法でも実用上ほぼ十分な精度で角折れ緩衝装置を施したケーブルにダンパーを設置した場合の構造減衰を推定できると言える。

(2) ダンパーを併用する場合

250 m ケーブルを対象として、 $x_1=3.0\text{m}$ と $x_2=10.0$

表一五 CASE-2 A に対する複素固有値解析結果と推定値の比較

下段側 ダンパー	上段側 ダンパー	構造対数減衰率					
		1 次		4 次		7 次	
$X_1=3.0\text{m}$	$X_2=10.0\text{m}$	複素 固有値	推定値	複素 固有値	推定値	複素 固有値	推定値
C_1 (tf·s/m)	C_2 (tf·s/m)						
10.0	1.0	0.029	0.031	0.079	0.081	0.091	0.091
	3.0	0.058	0.061	0.121	0.126	0.116	0.119
	5.0	0.083	0.086	0.119	0.127	0.091	0.092
	10.0	0.121	0.125	0.083	0.084	0.052	0.052
	15.0	0.130	0.138	0.060	0.059	0.036	0.035
	20.0	0.125	0.128	0.046	0.044	0.027	0.027
	25.0	0.115	0.114	0.038	0.036	0.022	-
30.0	0.104	0.102	0.032	0.031	0.018	-	

表一六 CASE-2 B に対する複素固有値解析結果と推定値の比較

下段側 ダンパー	上段側 ダンパー	構造対数減衰率					
		1 次		4 次		7 次	
$X_1=7.0\text{m}$	$X_2=10.0\text{m}$	複素 固有値	推定値	複素 固有値	推定値	複素 固有値	推定値
C_1 (tf·s/m)	C_2 (tf·s/m)						
3.5	1.0	0.042	0.045	0.110	0.114	0.117	0.114
	3.0	0.069	0.075	0.126	0.135	0.101	0.102
	5.0	0.092	0.098	0.113	0.126	0.078	0.082
	10.0	0.124	0.132	0.077	0.082	0.047	0.049
	15.0	0.130	0.141	0.057	0.058	0.033	0.033
	20.0	0.124	0.130	0.044	0.044	0.026	0.026
	25.0	0.113	0.115	0.036	0.035	0.021	0.021
30.0	0.103	0.102	0.031	0.030	0.018	-	

表一七 CASE-2 C に対する複素固有値解析結果と推定値の比較

下段側 ダンパー	上段側 ダンパー	構造対数減衰率						
		1 次		4 次		7 次		
$X_1=4.0\text{m}$	$X_2=10.0\text{m}$	複素 固有値	推定値	複素 固有値	推定値	複素 固有値	推定値	
C_1 (tf·s/m)	k_1 (tf/m)	C_2 (tf·s/m)						
10.0	100.0	1.0	0.017	0.018	0.055	0.051	0.071	0.064
		3.0	0.037	0.039	0.096	0.088	0.102	0.094
		5.0	0.055	0.056	0.103	0.100	0.086	0.082
		10.0	0.088	0.088	0.079	0.076	0.051	0.050
		15.0	0.103	0.105	0.059	0.056	0.036	0.034
		20.0	0.105	0.109	0.046	0.042	0.027	0.030
		25.0	0.101	0.101	0.038	0.034	0.022	0.024
30.0	0.095	0.092	0.032	0.032	0.018	-		
20.0	200.0	1.0	0.015	0.015	0.045	0.041	0.057	0.053
		3.0	0.032	0.032	0.083	0.074	0.092	0.087
		5.0	0.047	0.047	0.093	0.088	0.082	0.080
		10.0	0.077	0.075	0.076	0.072	0.051	0.049
		15.0	0.092	0.091	0.058	0.054	0.036	0.033
		20.0	0.097	0.098	0.046	0.042	0.027	0.025
		25.0	0.095	0.095	0.037	0.033	0.022	0.026
30.0	0.090	0.087	0.032	0.028	0.018	-		

表一八 CASE-2 D に対する複素固有値解析結果と推定値の比較

下段側 ダンパー	上段側 ダンパー	構造対数減衰率						
		1 次		4 次		7 次		
$x_1=4.0\text{m}$	$x_2=10.0\text{m}$	複素 固有値	推定値	複素 固有値	推定値	複素 固有値	推定値	
C_1 (tf·s/m)	k_1 (tf/m)	C_2 (tf·s/m)	k_2 (tf/m)					
2.5	25.0	1.0	0.012	0.014	0.046	0.046	0.072	0.067
		3.0	0.030	0.033	0.091	0.089	0.109	0.102
		5.0	0.047	0.049	0.103	0.104	0.090	0.088
		10.0	0.079	0.080	0.080	0.079	0.053	0.057
		15.0	0.062	0.060	0.055	0.054	0.035	0.034
		20.0	0.070	0.069	0.044	0.042	0.027	0.025
		25.0	0.073	0.073	0.037	0.034	0.022	0.021
10.0	100.0	30.0	0.073	0.072	0.031	0.028	0.018	0.018
		1.0	0.012	0.014	0.042	0.040	0.057	0.052
		3.0	0.027	0.029	0.076	0.074	0.087	0.080
		5.0	0.040	0.043	0.088	0.084	0.079	0.078
		10.0	0.067	0.068	0.074	0.073	0.050	0.050
		15.0	0.055	0.053	0.052	0.047	0.034	0.036
		20.0	0.063	0.061	0.043	0.039	0.027	0.026
25.0	0.067	0.065	0.036	0.034	0.022	0.021		
30.0	0.068	0.066	0.031	0.028	0.018	0.017		

m なる位置にオイルダンパーを設置した場合 (CASE-2 A) および $x_1=7.0\text{m}$ と $x_2=10.0\text{m}$ のきわめて近接した位置にオイルダンパーを設置した場合 (CASE-2 B) のそれぞれについて、複素固有値解析結果と提案した減衰評価手法による推定結果を比較することとした。なお、下方側オイルダンパーの粘性減衰係数 C_1 として、CASE-2 A では $C_1=10.0\text{tf}\cdot\text{s/m}$ なる値を、CASE-2 B では $C_1=3.5\text{tf}\cdot\text{s/m}$ なる値に設定することとしている。それぞれのケースに対する比較結果を表一五、表一六に示す。ここに、7 次モードにおいて推定値を記していない個所は文献 10) の減衰評価曲線が適用範囲外 ($C_2/C_{Op}(n) > 7.0$) となったことによる。表一五、表一六より、ケーブルに付加される構造減衰が最大となる付近において、推

定値は複素固有値解析結果に比べ若干大きくなっているものの、両者の結果はおおむね良く一致していることが理解されよう。

次に、 $x_1=4.0\text{m}$ なる位置にばね剛性を有する下方側ダンパーを設置するとともに、 $x_2=10.0\text{m}$ なる上方側にオイルダンパーを設置した場合 (CASE-2 C) ならびにばね剛性を有するダンパーを設置した場合 (CASE-2 D) についても、同様に複素固有値解析結果と提案した減衰評価手法による推定結果を比較することとした。その結果を表一七、表一八に示す。表一七、表一八より、ばね剛性を有するダンパーを上方側ダンパーや下方側ダンパーとして採用した場合にも、推定値は複素固有値解析結果と比較的良好に一致していることが容易に理解されよう。

以上の検討結果より、下方側ダンパーの寄与で上方側

ダンパーの設置位置が、また、上方側ダンパーの寄与で下方側ダンパーの設置位置がそれぞれ短くなると仮定して、従来の設計用減衰評価曲線から計算した上方側ダンパーのみと下方側ダンパーのみによる構造減衰を重ね合わせる本減衰評価手法はほぼ妥当であり、実務上の有用性も高いと言えよう。なお、本文で提示した以外の数多くのケースについて検討した結果、本減衰評価手法は、下方側ダンパーと上方側ダンパーの設置位置が $x_1/x_2 \leq 0.8$ で、かつ下方側オイルダンパーの粘性減衰係数が $C_1/C_{opt}(n) \leq 5.0$ (下方側にばね剛性を有するダンパーを設置した場合、その最適粘性減衰係数を $C_{opt}(n)$ とすれば、 $C_1/C_{opt}(n) \leq 5.0$) なる場合にもほぼ十分な精度で、ケーブルに付加される構造減衰を推定できたことを付記しておく。

4. 併用ダンパー方式の特徴とその設計上の留意点

1本のケーブルに2基のダンパーを設置する併用ダンパー方式については鶴見つばさ橋での実施例があるのみで、本方式の特徴や設計上の留意点については未だ十分に解明されているとは言えない。そこで、本章では提案した減衰評価手法を適用してケーススタディを実施し、併用ダンパー方式の特徴とその設計上の留意点について検討することとした。

ケーブル制振用ダンパーとしては種々の方式が開発されており、2基のダンパーを設置する場合にも多数の組み合わせが想定できる。しかしながら、ケーブル振動を誘起させる風の励振力は鉛直方向成分が卓越していることから、下方側ダンパー（オイルダンパーでは1対）によって鉛直方向と水平方向に構造減衰を付加すれば、上方側では鉛直方向のみを対象として構造減衰を増加させれば良いと考えられる。すなわち、1個のオイルダンパーを上方側の鉛直方向のみに設置することも可能であり、この場合にはオイルダンパーの粘性減衰係数が小さいほどダンパー本体とその設置用架台が小型化されることとなる。このような観点から、本ケーススタディでは、上・下方側ともオイルダンパーを採用した場合、粘性せん断型ダンパー（下方側）とオイルダンパー（上方側）を併用した場合および高減衰ゴム（下方側）とオイルダンパー（上方側）を併用した場合のそれぞれに着目することとした。

なお、併用ダンパー方式を採用する場合にも、景観に対する配慮から下方側ダンパーは高欄や自動車防護柵高さを越えない位置に設置することが望ましいと言える。そこで、本検討では、取り付け位置を $x_1=6.0\text{m}$ とした場合に、下方側ダンパーは高欄や自動車防護柵高さと同程度の高さに設置されるものと仮定した。一方、上方側

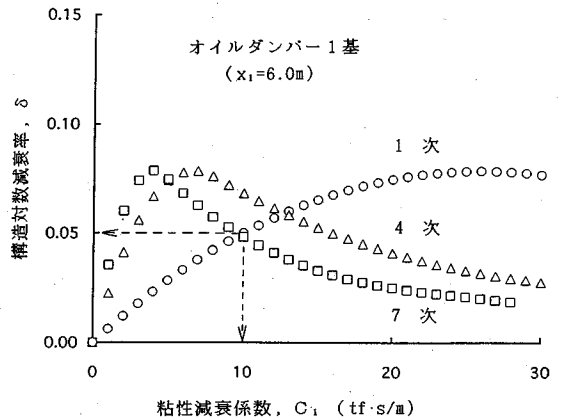


図-8 1基のオイルダンパーによって付加される構造減衰

ダンパーについては高欄や自動車防護柵高さを越える $x_2=10.0\text{m}$ なる位置に設置するものとしたが、ダンパー本体および設置用架台をできるだけ小さくして景観に配慮するとの観点から、上方側オイルダンパーの粘性減衰係数は、後述するよう基本的に $3.0\text{tf}\cdot\text{s/m}$ なる値よりも小さく設定することとした。

(1) 上・下方側ともオイルダンパーを採用する場合

対象としたケーブルは表-2に示した構造諸元を有する 250m ケーブルである。まず最初に、高欄や自動車防護柵高さと同程度の高さにダンパーを設置した場合の減衰付加特性を把握するため、 $x_1=6.0\text{m}$ なる位置に1個のオイルダンパーを鉛直方向に設置した場合の構造減衰を推定することとした。1次モードと4次モードならびに7次モードに対する推定結果を図-8に示す。図-8より、 $C_1=10.0\text{tf}\cdot\text{s/m}$ 程度の粘性減衰係数を有するオイルダンパーを設置すれば、1次モード～7次モードには少なくとも $\delta=0.05$ 程度以上の構造減衰が付加されることがわかる。ただし、オイルダンパー方式では複素固有値解析結果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、設計にあたっては 0.5 なる減衰付加効率を採用するのが通常である⁹⁾。すなわち、実務設計にあたっては、1次モード～7次モードに付加される構造対数減衰率は $\delta=0.025$ 程度以上であると認識しなければならないが、本節では簡単のため減衰付加効率による影響を無視して議論することとする。

併用ダンパー方式の基本的な特性を把握するため、下方側オイルダンパーの粘性減衰係数 C_1 を上述した $C_1=10.0\text{tf}\cdot\text{s/m}$ (理論上、1次～7次モードの構造対数減衰率が少なくとも $\delta=0.05$ 程度以上となる粘性減衰係数) なる値に設定し、上方側オイルダンパーの粘性減衰係数 C_2 を種々変化させてケーブルに付加される構造減衰を推定することとした。1次モードと4次モードなら

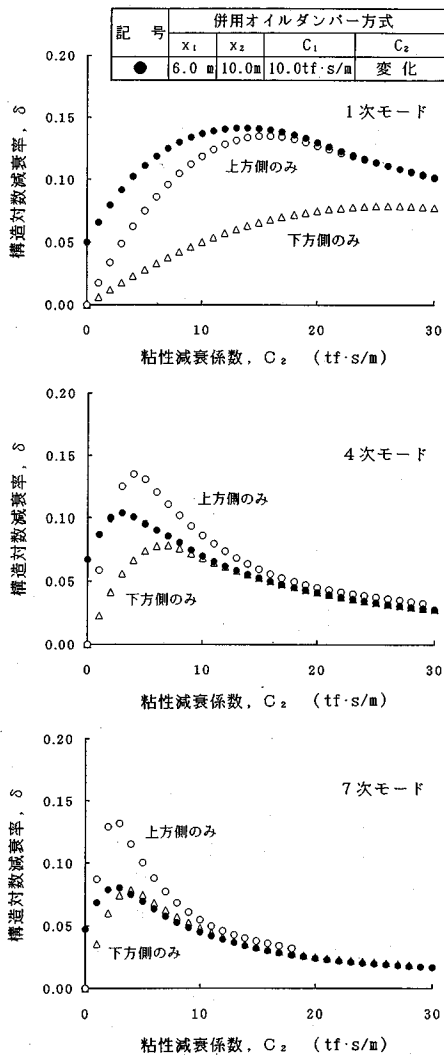


図-9 併用オイルダンパー方式 ($C_1=10.0$ tf·s/m に固定) によって付加される構造減衰

びに7次モードに対する結果を図-9に示す。なお、この図には下方側 ($x_1=6.0$ m) のみにオイルダンパーを設置した場合 (図中の△記号) と上方側 ($x_2=10.0$ m) のみにオイルダンパーを設置した場合 (図中の○記号) の結果も参考までに併記している。図-9より、併用ダンパー方式によって各振動モードに付加される構造減衰の最大値はモード次数の増加とともに低下し、1次モードでは上方側 ($x_2=10.0$ m) のみにオイルダンパーを設置した場合の最大値に、また、7次モードでは下方側 ($x_1=6.0$ m) のみにオイルダンパーを設置した場合の最大値に、それぞれほぼ等しくなっていることがわかる。すなわち、図-7に示した等価モデルからも推察されるように、併用ダンパー方式を採用しても、各振動モードに付加される構造減衰の最大値は、上方側のみにオイルダン

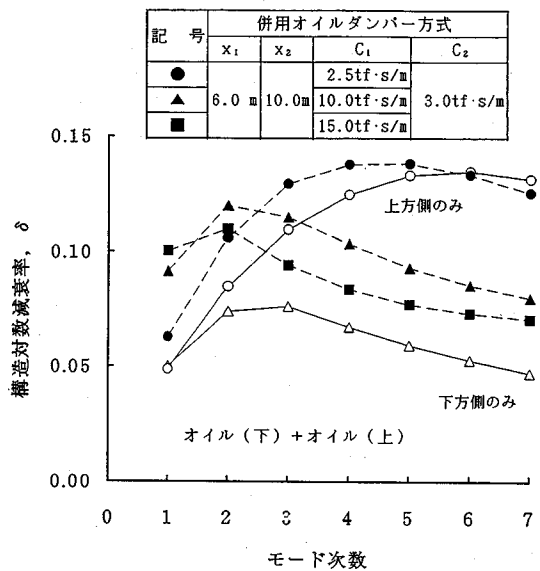


図-10 併用オイルダンパー方式 ($C_2=3.0$ tf·s/m に固定) によって付加される構造減衰

パーを設置した場合の最大値と同程度かそれ以下の値になることを十分認識していなければならない。

しかしながら、同じく図-9から、上方側オイルダンパーの粘性減衰係数を適切に設定すれば、併用ダンパー方式によって、上方側 ($x_2=10.0$ m) のみに同じ粘性減衰係数を有するオイルダンパーを設置した場合よりも、大きな減衰付加効果が得られていることがわかる。そこで、上・下方側オイルダンパーの粘性減衰係数をそれぞれ変化させて各振動モードに付加される構造減衰を算定し、併用ダンパー方式の特徴と設計上の留意点について検討することとした。ただし、併用ダンパー方式では、上方側ダンパーが高欄や自動車防護柵高さを越える位置に設置されることから、景観をできるだけ損なわないよう配慮する必要がある。すなわち、上方側 ($x_2=10.0$ m) のみにオイルダンパーを設置するとした場合、粘性減衰係数を $C_2=6.0$ tf·s/m に設定すれば、1次～7次モードに $\delta=0.05$ 程度以上の構造減衰が付加されることとなるが、ダンパー本体やダンパー設置用架台が大きくなりすぎ、景観上の問題から採用が困難になることも予想される。しかしながら、上方側オイルダンパーの設置高さが同じであってもオイルダンパーの粘性減衰係数が小さいほどダンパー本体や設置用架台は小さく設計でき、景観に対しても少なからず配慮できることとなる。このような理由から、本ケーススタディでは、上方側オイルダンパーの粘性減衰係数として 3.0 tf·s/m (6.0 tf·s/m $\times 1/2$) 以下なる値に設定することとした。

上方側オイルダンパーの粘性減衰係数 C_2 を $C_2=3.0$ tf·s/m に、下方側オイルダンパーの粘性減衰係数 C_1 を

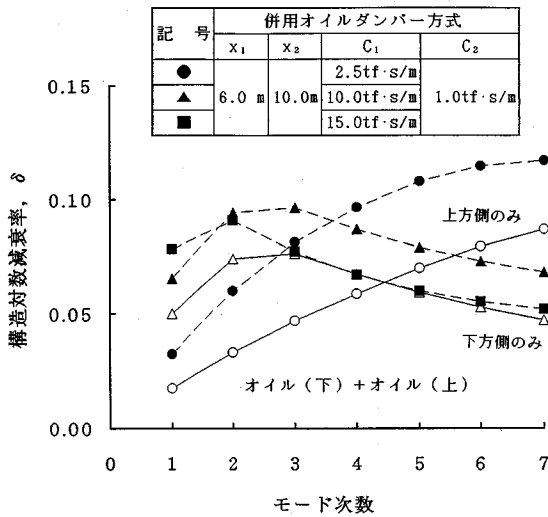


図-11 併用オイルダンパー方式 ($C_2=1.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$ に固定) によって付加される構造減衰

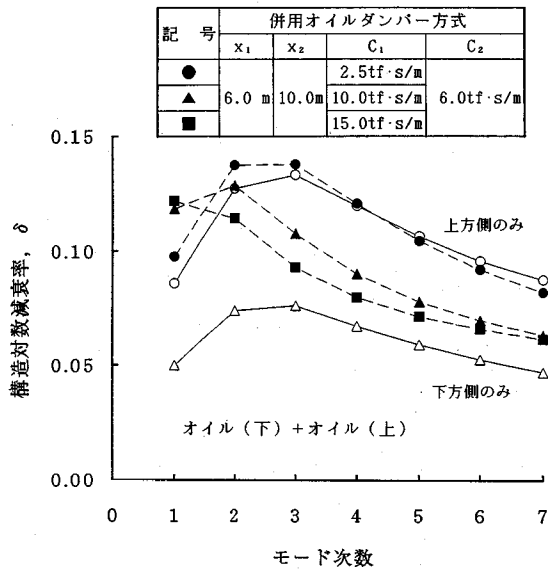


図-12 併用オイルダンパー方式 ($C_2=6.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$ に固定) によって付加される構造減衰

$C_1=2.5 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$, $10.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$, $15.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$ なる値に変化させてケーブルに付加される構造減衰を算出した。その結果を図-10に示す。なお、図-10には下方側 ($x_1=6.0 \text{ m}$) のみに $C_1=10.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$ なるオイルダンパーを設置した場合 (図中の△記号) および上方側 ($x_2=10.0 \text{ m}$) のみに $C_2=3.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$ なるオイルダンパーを設置した場合 (図中の○記号) の結果も付記している。図-10からわかるように、併用ダンパー方式 (図中の黒ぬり記号) では、下方側 ($x_1=6.0 \text{ m}$) のみに $C_1=10.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$ なるオイルダンパーを設置した場合と比較してより大きな構造減衰

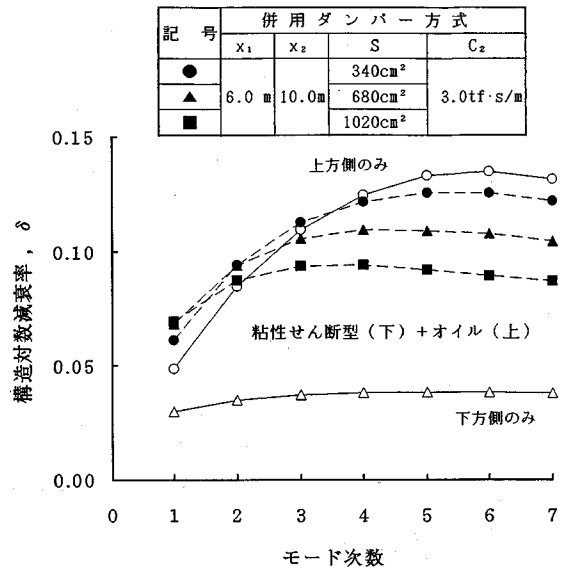


図-13 併用ダンパー方式 ($C_2=3.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$ に固定) によって付加される構造減衰 (粘性せん断型ダンパー+オイルダンパー; 減衰付加効率の差異を無視)

が付加されており、本方式の有用性が認められる結果が得られている。しかしながら、たとえば、下方側オイルダンパーの粘性減衰係数が $C_1=10.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$ なる併用ダンパー方式 (図中の▲記号) では、上方側 ($x_2=10.0 \text{ m}$) のみに $C_2=3.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$ なるオイルダンパーを設置した場合と比較し、3次モードまではより大きな構造減衰が付加されているものの、4次モード以上では逆に低下する結果となっている。それゆえ、併用ダンパー方式を採用するにあたっては、下方側ダンパーの粘性減衰係数として適切な値を設定し、高次モードの構造減衰が耐風設計上の所要値を下回らないよう配慮する必要があると言える。なお、図-11は上方側オイルダンパーの粘性減衰係数をきわめて小さな $C_2=1.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$ なる値とした場合の結果であるが、図-10と図-11を比較すればわかるように、付加される構造減衰は $C_2=3.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$ なる場合よりも若干小さくなっているものの同様に併用ダンパー方式の有用性が認められている。すなわち、長大なケーブルではサグ(たるみ)の影響で1次モードの構造減衰がもともと大きいという知見¹¹⁾を加味して構造減衰の所要値の大きさを適切に設定すれば、十分に採用できる制振案であると言える。

一方、上方側オイルダンパーの粘性減衰係数を $C_2=6.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$ とした併用ダンパー方式についても補足的に検討した。その結果を図-12に示す。図-12からわかるように、この場合にはオイルダンパーを併用したことによる有用性は比較的少なく、とりわけ、下方側オイルダンパーの粘性減衰係数が $C_1=10.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$ より大きい

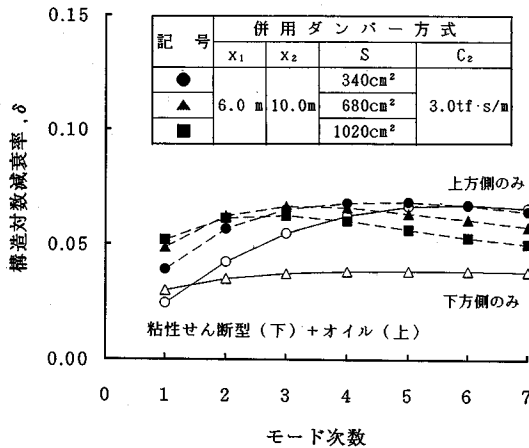


図-14 併用ダンパー方式 ($C_2=3.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$ に固定) によって付加される構造減衰(粘性せん断型ダンパー+オイルダンパー; 減衰付加効率の差異を考慮)

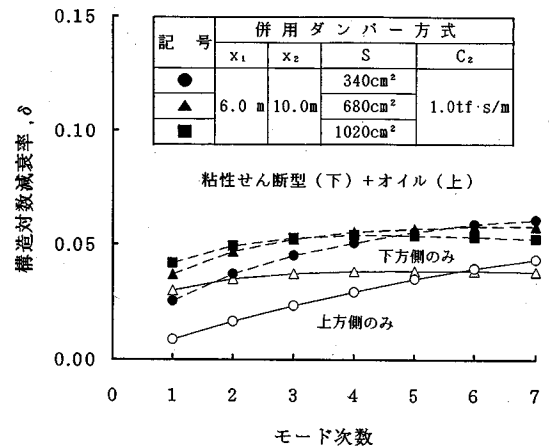


図-15 併用ダンパー方式 ($C_2=1.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$ に固定) によって付加される構造減衰(粘性せん断型ダンパー+オイルダンパー; 減衰付加効率の差異を考慮)

場合には3次モード以上の構造減衰が大幅に低下する結果となっている。すなわち、併用ダンパー方式では、景観上からも、また、減衰付加特性からも、上方側オイルダンパーの粘性減衰係数を、上方側のみに1個のオイルダンパーを設置するとした場合の所要粘性減衰係数よりかなり小さく設定することがきわめて重要であると言える。

(2) 粘性せん断型ダンパー(下方側)とオイルダンパー(上方側)を併用する場合

前節と同じく、対象とする振動は250 m ケーブルの1次～7次モードである。まず、 $x_1=6.0 \text{ m}$ なる位置に粘性せん断型ダンパーのみを設置するとした場合、文献10)を参照して粘性せん断を期待する断面積 S を $S=680 \text{ cm}^2$ に設定すれば、 $t=40^\circ\text{C}$ なる温度条件下で1次～7次モードには $\delta=0.03$ 程度以上の構造減衰が付加されることとなる。そこで、粘性せん断を期待する断面積 S を $S=340 \text{ cm}^2$ ($680 \text{ cm}^2 \times 0.5$)、 680 cm^2 、 1020 cm^2 ($680 \text{ cm}^2 \times 1.5$) とそれぞれ仮定して等価粘性減衰係数と等価ばね定数を算出するとともに、上方側オイルダンパーの粘性減衰係数を $3.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$ に設定して、ケーブルに付加される構造減衰を比較することとした。その結果を図-13に示す。なお、この図には、下方側 ($x_1=6.0 \text{ m}$) のみに $S=680 \text{ cm}^2$ なる粘性せん断型ダンパーを設置した場合(図中の△記号)および上方側 ($x_2=10.0 \text{ m}$) のみに $C_2=3.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$ なるオイルダンパーを設置した場合(図中の○記号)の結果も付記している。

図-13からわかるように、粘性せん断型ダンパー(下方側)とオイルダンパー(上方側)を併用する方式(図中の黒ぬり記号)でも、下方側 ($x_1=6.0 \text{ m}$) のみに $S=680 \text{ cm}^2$ なる粘性せん断型ダンパーを設置した場合と比

較してより大きな構造減衰が付加されており、併用方式の有用性が認められる結果が得られている。しかしながら、たとえば、下方側に $S=680 \text{ cm}^2$ なる粘性せん断型ダンパーを設置した併用方式では、上方側 ($x_2=10.0 \text{ m}$) のみに $C_2=3.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$ なるオイルダンパーを設置した場合と比較して、1次モードと2次モードの構造減衰はわずかに増加する程度であるのに対し、高次モードの構造減衰は逆にかなり低下する結果となっていることがわかる。

ところで、オイルダンパーの減衰付加効率は0.5程度であると考えられているのに対して、粘性せん断型ダンパーでは等価粘性減衰係数と等価ばね定数を適切に評価すれば、ほぼ1.0なる減衰付加効率が採用できることが知られている¹⁰⁾。異なる特性を有するダンパーを併用した場合における減衰付加効率については今後の検討を待たなければならない。しかしながら、ここでは上述の知見から、下方側の粘性せん断型ダンパーによる減衰寄与分(2章に示した手順で算出される δ_1) はそのまま、上方側のオイルダンパーによる減衰寄与分(2章に示した手順で算出される δ_2) のみに0.5なる減衰付加効率を乗じて、異なる特性を有するダンパーを併用した場合の減衰付加特性を評価することとした。なお、複素固有値解析では、併用ダンパー方式による構造減衰(理論値)を正確に計算できるが、上・下方側ダンパーによるそれぞれの減衰寄与は算定できない。したがって、2章に示した減衰評価手法は異なる特性(減衰付加効率)を有するダンパーを併用した場合の検討に、とりわけ有用なものであることを述べておきたい。

上方側オイルダンパーの粘性減衰係数が $C_2=3.0 \text{ tf}\cdot\text{s/m}$ なる場合について減衰付加効率の差異を考慮し、併用ダンパー方式による減衰付加特性を検討すれば、図

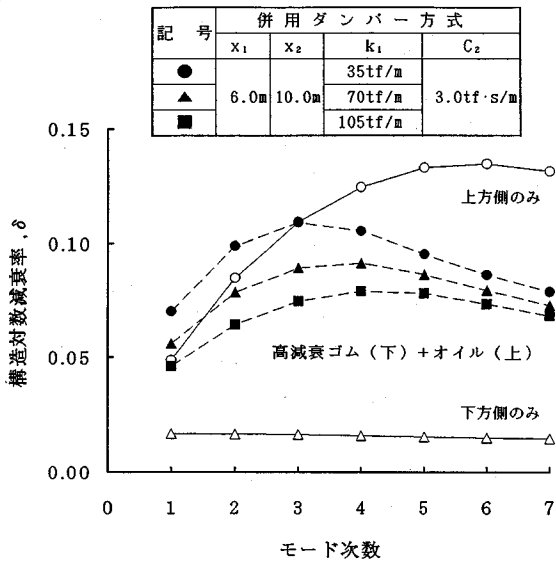


図-16 併用ダンパー方式 ($C_2=3.0\text{tf}\cdot\text{s/m}$ に固定)によって付加される構造減衰(高減衰ゴム+オイルダンパー；減衰付加効率の差異を無視)

—14に示す結果が得られる。図-14より、減衰付加効率の差異を考慮した場合、粘性せん断型ダンパーとオイルダンパーを併用する方式は、上方側だけにオイルダンパーを設置する従来方式(図中の○記号)と比較し、低次モードに付加される構造減衰が耐風設計上有意な程度まで増加することがわかる。また、粘性せん断を期待する断面積 S を適切に選定すれば、高次モードにおける構造減衰の低下割合もきわめて小さくなることが理解できよう。なお、図-15は上方側オイルダンパーの粘性減衰係数をきわめて小さい $C_2=1.0\text{tf}\cdot\text{s/m}$ とした場合の結果であるが、図-14と図-15を比較すればわかるように付加される構造減衰は $C_2=3.0\text{tf}\cdot\text{s/m}$ なる場合よりも若干小さくなっているものの同様に併用ダンパーとしての有用性が認められている。すなわち、長大なケーブルではサグの影響で1次モードの構造減衰がもともと大きいという知見¹¹⁾を加味して構造減衰の所要値の大きさを適切に設定すれば、十分に採用できる制振案であると見えよう。

(3) 高減衰ゴム(下方側)とオイルダンパー(上方側)を併用する場合

対象とする振動は同様に250mケーブルの1次～7次モードである。高減衰ゴムの n 次モードに対する等価粘性減衰係数 $C_e(n)$ は一般に次式で表示される¹¹⁾。

$$C_e(n) = \frac{1}{\omega_n} \times \frac{4\gamma}{4+\gamma^2} \times k_e \quad (14)$$

ここに、 ω_n は n 次モードの固有円振動数、 k_e は高減衰ゴムの等価ばね定数である。また、 γ は内部摩擦係数であ

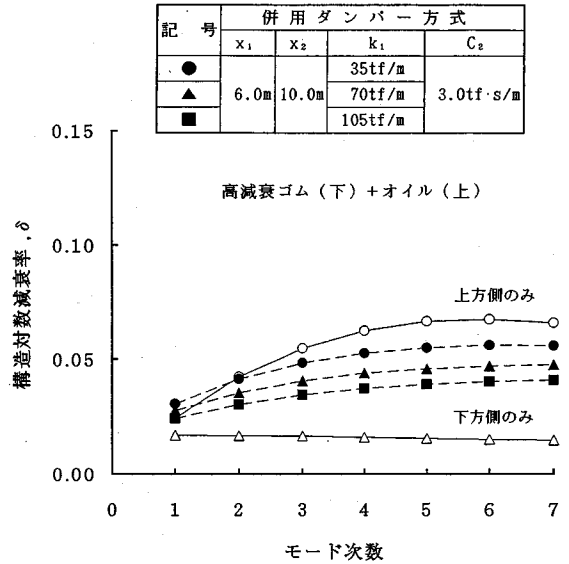


図-17 併用ダンパー方式 ($C_2=3.0\text{tf}\cdot\text{s/m}$ に固定)によって付加される構造減衰(高減衰ゴム+オイルダンパー；減衰付加効率の差異を考慮)

り、本検討では $\gamma=0.5$ なる値を採用することとする。

まず、 $x_1=6.0\text{m}$ なる位置に高減衰ゴムのみを設置するとした場合、文献1)を参照して最適ばね定数を決定すれば $k_e(=k_1)=70\text{tf/m}$ なる値が得られる。すなわち、 $k_1=70\text{tf/m}$ なる高減衰ゴムを $x_1=6.0\text{m}$ なる位置に設置すれば、1次～7次モードにはほぼ等しい $\delta=0.017$ 程度の構造減衰が付加されることとなる。そこで、下方側に設置する高減衰ゴムのばね定数として $k_1=35\text{tf/m}$ ($70\text{tf/m}\times 0.5$)、 70tf/m 、 105tf/m ($70\text{tf/m}\times 1.5$)とそれぞれ仮定して式(14)から等価粘性減衰係数を算出するとともに、上方側オイルダンパーの粘性減衰係数を $3.0\text{tf}\cdot\text{s/m}$ に設定して、ケーブルに付加される構造減衰を比較することとした。その結果を図-16に示す。なお、この図には、下方側 ($x_1=6.0\text{m}$) のみに $k_1=70\text{tf/m}$ なる高減衰ゴムを設置した場合(図中の△記号)および上方側 ($x_2=10.0\text{m}$) のみに $C_2=3.0\text{tf}\cdot\text{s/m}$ なるオイルダンパーを設置した場合(図中の○記号)の結果も付記している。

図-16からわかるように、高減衰ゴムとオイルダンパー(上方側)を併用する方式(図中の黒ぬり記号)でも、下方側 ($x_1=6.0\text{m}$) のみに $k_1=70\text{tf/m}$ なる高減衰ゴムを設置した場合と比較してより大きな構造減衰が付加されており、併用方式の有用性が認められる結果が得られている。しかしながら、最も効果が認められた $k_1=35\text{tf/m}$ なる高減衰ゴムを併用した場合でも、1次モードと2次モードの構造減衰は、上方側 ($x_2=10.0\text{m}$) のみに $C_2=3.0\text{tf}\cdot\text{s/m}$ なるオイルダンパーを設置した場合と比較して、1次モードと2次モードの構造減衰はわ

ずかに増加する程度であるのに対し、高次モードの構造減衰はモード次数の増加とともに大幅に低下する結果となっている。

ところで、高減衰ゴム方式では粘性せん断型ダンパーと同様に、ほぼ1.0なる減衰付加効率が採用できることが知られている。そこで、下方側の高減衰ゴムによる減衰寄与分(2章に示した手順で算出される δ_1)はそのまま、上方側のオイルダンパーによる減衰寄与分(2章に示した手順で算出される δ_2)のみに0.5なる減衰付加効率を乗じて、異なる特性を有するダンパーを併用した場合の減衰付加特性を評価することとした。上方側オイルダンパーの粘性減衰係数が $C_2=3.0\text{tf}\cdot\text{s}/\text{m}$ なる場合の結果を図-17に示す。図-17より、高減衰ゴム(下方側)とオイルダンパー(上方側)を併用した場合の構造減衰は、減衰付加効率の差異を考慮しても、上方側のみに $C_2=3.0\text{tf}\cdot\text{s}/\text{m}$ なるオイルダンパーを設置した場合に付加される値(図中の○記号)とほとんど同じかそれ以下であることがわかる。それゆえ、高減衰ゴム(下方側)とオイルダンパー(上方側)を併用する方式は、上・下方側ともオイルダンパーとした場合や粘性せん断型ダンパー(下方側)とオイルダンパー(上方側)を併用した場合と比較して減衰付加特性は小さく、ケーブルのサグ変化に伴う2次応力の低減を期待すべき時に採用する併用方式であると言えよう。

5. まとめ

本論文は、1本のケーブルに2基のダンパーを設置する併用ダンパー方式の減衰評価手法とこの方式を採用するにあたっての設計上の留意点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) 長さ l なるケーブルにおいて、ダンパーより下方の x_1 なる位置に桁側角折れ緩衝装置が併用された場合、ダンパーの設置位置 x_2 は角折れ緩衝装置の影響で本文に提示した x_{k1} なる距離だけ短くすると仮定できる。したがって、ダンパーのばね定数を k_2 、粘性減衰係数を C_2 とすれば、対象とした検討モデルは、長さが $l-x_{k1}$ なるケーブルの x_2-x_{k1} なる位置に同じ特性を有する上方側ダンパーを設置したモデルと等価となる。一方、対象とした検討モデルは、本文で提示した算定式から、等価ばね定数 k_2^* を計算すれば、長さが l なるケーブルの x_2 なる位置に、ばね定数が $k_2^*+k_2$ で粘性減衰係数が C_2 なるダンパーを設置したモデルとも等価となる。

(2) 長さ l なるケーブルの x_1 と x_2 なる位置にばね剛性を有するダンパーが併用された場合、上方側ダンパーの設置位置は下方側ダンパーの影響で本文に提示した x_{c1k1} なる距離だけ、また、下方側ダンパーの設置位置は上方側ダンパーの影響で x_{c2k2} なる距離だけ、それぞ

れ短くなると仮定できる。したがって、上方側ダンパーのばね定数を k_2 、粘性減衰係数を C_2 とすれば、併用方式における上方側ダンパーのみによる寄与は、同じばね定数と粘性減衰係数を有する1個のダンパーを長さが $l-x_{c1k1}$ なるケーブルの x_2-x_{c1k1} なる位置に設置した場合とほぼ等価となる。また、下方側ダンパーのばね定数を k_1 、粘性減衰係数を C_1 とすれば、併用方式における下方側ダンパーのみによる寄与は、同じばね定数と粘性減衰係数を有する1個のダンパーを長さが $l-x_{c2k2}$ なるケーブルの x_1-x_{c2k2} なる位置に設置したモデルとほぼ等価となる。

(3) 以上の各等価モデルに対して既往の設計用減衰評価曲線(1本のケーブルに1個のダンパーを設置した場合の減衰評価曲線)を適用すれば、角折れ緩衝装置が施されたケーブルにダンパーを設置した場合および1本のケーブルに2基のダンパーを併用した場合の構造減衰をそれぞれ推定できることとなる。そこで、長さが100mと250mのケーブルを対象として複素固有値解析結果と本手法による推定結果を比較したところ良好な一致が得られ、本文に提示した減衰評価手法は実務上の有用性もきわめて高いものであることがわかった。

(4) 提案した減衰評価手法を適用してケーススタディ(250mケーブルの $x_1=6.0\text{m}$ と $x_2=10.0\text{m}$ にそれぞれ上・下方側ダンパーを設置したケース)を実施し、併用ダンパー方式の特徴と設計上の留意点について検討した。その結果、上・下方側にそれぞれオイルダンパーを設置した場合に付加される構造減衰は、下方側のみにオイルダンパーを設置した場合と比較して明らかに増加するものの、各モードに付加される構造減衰の最大値は、上方側のみにオイルダンパーを設置した場合の最大値と同程度かそれ以下になることがわかった。しかしながら、上・下方側オイルダンパーの粘性減衰係数をそれぞれ適切に設定すれば、上方側のみに同じ粘性減衰係数を有するオイルダンパーを設置した場合と比較し、高次モードの構造減衰は幾分低下するものの、低次モードの構造減衰は耐風設計上有意な程度まで増加できることがわかった。

(5) 粘性せん断型ダンパー(下方側)とオイルダンパー(上方側)を併用する方式でも、上・下方側ダンパーの諸特性を適切に設定するとともに減衰付加効率の差異を考慮すれば、上方側のみに同じ粘性減衰係数を有するオイルダンパーを設置する従来方式と比較し、低次モードの構造減衰は耐風設計上有意な程度まで増加できることがわかった。

(6) 高減衰ゴム(下方側)とオイルダンパー(上方側)を併用する方式は、上・下方側ともオイルダンパーとした場合や粘性せん断型ダンパー(下方側)とオイルダンパー(上方側)を併用した場合と比較して減衰付加特性

は小さく、ケーブルのサグ変化に伴う2次応力の低減を期待すべき時に採用する併用方式であることがわかった。

近年における斜張橋の長径間化と施工実績は目覚ましく、その機能美から本形式はますます盛んに建設されていくものと予想される。それゆえ、風によるケーブル振動とその制振に関する検討も今までにも増して重要となり、大規模な長大斜張橋では、空力的対策に加え、1本のケーブルに2基のダンパーを設置する併用ダンパー方式を対策案の一つとして検討する機会が増加するものと推察される。このような状況のもと、併用ダンパー方式の減衰評価手法と設計上の留意点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技術者にとって有用な技術資料になることを心より願う次第である。

参考文献

- 1) 米田昌弘：斜張橋ケーブルの風による振動とその制御，土木学会・第2回振動制御コロキウム (PART A, 構造物の振動制御(2))，pp.21-41，1993年8月。
- 2) 烏野 清，堤 一，麻生稔彦，吉村 健，井上朝登，田中千秋，佐々木伸幸，中谷真二：荒津大橋の振動特性とケーブルダンパーの制振効果，九州技報，pp.23-30，1989年6月。
- 3) 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。
- 4) Nakamura, A., Kasuga, A, and H. Arai: The Effects of Mechanical Dampers on Stay Cables with High-damping Rubber, *Proc. of 10th U.S.-Japan Bridge Engineering Workshop*, Nevada, May, 1994.
- 5) 藤原 亨，植田利夫，小林義和：斜張橋ケーブルの角折れ緩衝材による制振効果，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集，I-247，pp.670-671，1992年9月。
- 6) 松本 勝，北沢正彦，石崎 浩，小川一志，斎藤 通，下土居秀樹：東神戸大橋の耐風設計，橋梁と基礎，Vol. 25, No. 5, pp.33-43，1991年5月。
- 7) 下里哲弘，岡田昌澄，村上琢哉：鶴見航路橋(仮称)のケーブル振動実験，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集，I-605，pp.1208-1209，1994年9月。
- 8) 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。
- 9) 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。
- 10) 米田昌弘，下田郁夫：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，土木学会論文集，第480号/VI-21, pp. 77-86，1993年12月。
- 11) H. Yamaguchi and Fujino, Y.: Modal damping of Flexural oscillation in Suspended Cables, *Proc. of JSSC*, No. 386/I-8, pp.197-205, October, 1987.

(1994.9.8 受付)

ON THE SIMPLIFIED METHOD FOR ESTIMATING MODAL DAMPING IN STAY CABLE WITH TWO TYPES OF DAMPERS AND ITS APPLICATION TO VIBRATION CONTROL DESIGN

Masahiro YONEDA, Hideyuki MOCHIZUKI and Hideki SETOUCHI

In recent years, wind-induced cable vibrations of cable-stayed bridge have been observed, and phenomena of these have become a major problem in wind engineering. This paper deals with the vibration control of stay cable by installation of two types of dampers. The authors have derived a practical estimation method for the modal damping in stay cable with dampers. Several examples demonstrating the application of the proposed method are also presented for the cable model with the length of 100m and 250m. From these results, some useful informations for the vibration control of stay cable by installation of two types of dampers are obtained.