

吊橋立体振動におけるダンパーの制振効果

Three-dimensional Dynamic Behavior of Suspension Bridges with Dampers

三品吉彦*
Yoshihiko MISHINA
前田研一**
Ken-ichi MAEDA

1. まえがき

タコマ・ナロウズ橋の事故以来、吊橋の耐風安定性状は橋梁工学における重要なテーマの一つである。

現在、航空工学の分野で発展した空気力学の知識を導入し、特に負減衰作用によるネジレを伴う自励振動に注目して、耐風性に優れた補剛桁形状および、剛性パラメーターの研究が行なわれ、ある程度までの成果をあげて至っている。しかしながら、風による外力の評価が理論的にはほとんど不可能であるため、模型を用いた風洞実験に頼らざるを得ず、しかも、相似律を完全に満たすことが困難であることから、実橋における空気力は必ずしも明確でないのが現状である。そして、この点が実橋の動的挙動の実際的な把握の上で、大きな障害となっている。

さて、一方、風による振動といえども、一般の力学問題と同様に、外力エネルギーが構造物に蓄積される現象である以上、このエネルギーを消費してやることによって振動を抑制するという立場も考えられるべきであると思われる。すなわち、振動学的に言えば、何らかの方法によって対象とする構造物に正の減衰力を付加することであり、具体的に表わされる形は多様であっても、要するに、エネルギーを消費する機構を付加することによって制振を計ることを考えるのである。なぜなら、この制振機構の付加が実用上可能であるならば、実橋における減衰作用を実際的に把握することは容易であり、耐風安定性への寄与の度合を明確に知ることができるはずだからである。

本文はこのような観点から、オイル・ダンパーを用いる制振機構を設置することによって長大吊橋の耐風安定性をより確実にする場合を想定し、風洞模型実験の結果を参考にして決定される所要の対数減衰率を確保するために、オイル・ダンパーの最適設置位置、および、所要個数を算定する方法をエネルギー法により提案するものである。さらに、この方法を適用した計算例から、実

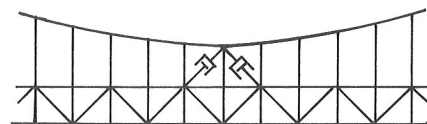
際のオイル・ダンパーの性能を考慮して、実用上の可能性を検討し、具体的な設置案を提起することを試みるものである。

2. エネルギー法による

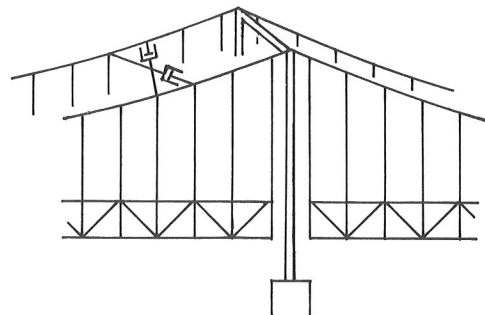
ダンパーの最適設置位置、所要個数の算定法

2-1 ダンパーの設置位置のタイプ

制振機構となるオイル・ダンパーの設置位置としては図-1に示すように、センター・ダイアゴナル・ステイ、クロス・ケーブル・ステイ、ケーブル・ステイ、および、タワー・ステイの4種のタイプが一般に考えられ、検討の対象となっている。



center diagonal stay



cross cable stay

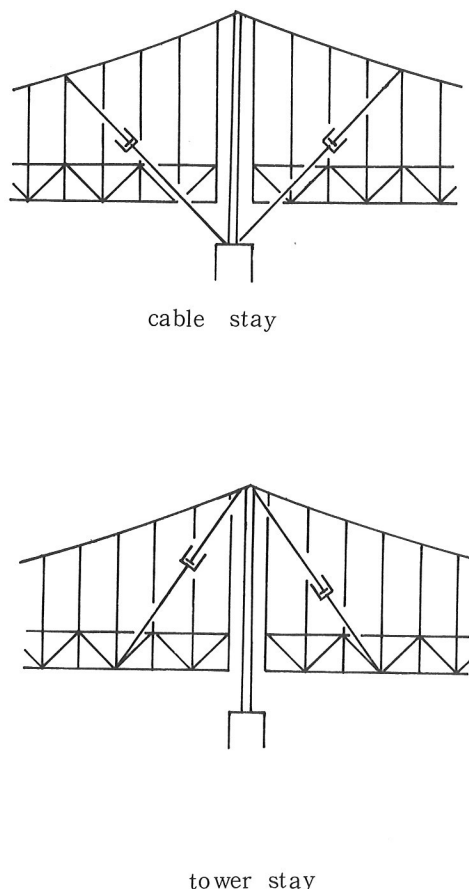


図-1 オイルダンパーの設置位置

2-2 全体構造系の対数減衰率と

ダンパーの減衰係数の総量との関係式

オイル・ダンパー設置による固有振動性状の変化の影響を無視することができると仮定すれば、エネルギー法によって、全体構造系の対数減衰率と各設置位置のダンパーの減衰係数の総量との関係式は次のように求められる。

まず、仮定に従って、エネルギー理論から、対数減衰率 δ が、

$$\delta \doteq \frac{\Delta W}{2W} \quad (1)$$

なる式で表わされる。ここに、 W 、 ΔW は 最大運動エネルギー、および、ダンパー設置に伴う減衰作用によ

る一周期間の消失エネルギーである。

最大運動エネルギー W は 離散的な解析モデルにおいて質量 M_i が各節点に集中しているとすれば、固有円振動数を ω 、総自由度数 n の各変位の振幅を η_i とすれば

$$W = \max \left(\frac{1}{2} \frac{\omega^2}{g} \sin^2 \omega t \sum_{i=1}^n M_i \eta_i^2 \right) = \frac{1}{2} \frac{\omega^2}{g} \sum_{i=1}^n M_i \eta_i^2 \quad (2)$$

なる式で与えられる。一方、消失エネルギー ΔW は ダンパーを設置した両節点間の距離の変動量の振幅を ϕ_j として、

$$\Delta W = \omega^2 \sum_{j=1}^k C_j \cdot \phi_j^2 \int_0^{2\pi} \sin^2 \omega t \cdot dt = \omega \pi \sum_{j=1}^k C_j \cdot \phi_j^2 \quad (3)$$

なる式で与えられる。ここに、 k 、 C_j が ダンパーの設置位置の種類の数、および、各位置のダンパーの減衰係数の総量である。

ゆえに、式(2)、式(3)を式(1)に代入すれば、求める対数減衰率 δ とダンパーの減衰係数の総量 C_j との関係式が得られることになる。

$$\delta = \frac{\omega \pi \sum_{j=1}^k C_j \cdot \phi_j^2}{\frac{\omega^2}{g} \sum_{i=1}^n M_i \cdot \eta_i^2} \quad (4)$$

なお、上式における固有円振動数 ω 、および、振幅 η_i 、 ϕ_j が 吊橋主ケーブルの初期張力を考慮して、有限変位理論による立体骨組構造物を対象としたマトリックス表示の固有値問題から計算されることは言うまでもない。また、 η_i 、および ϕ_j は絶対量ではなく相対量として与えられるが、上式の分子、分母がそれぞれの2次の項であるため、問題がないことも明らかである。

2-3 対数減衰率の所要値の決定と

ダンパーの最適設置位置、所要個数の算定

全体構造系の対数減衰率 δ とダンパーの減衰係数の総量 C_j との関係式である式(4)に基づいてオイル・ダンパーの最適設置位置、所要個数を算定するためには、まず、 δ の所要値を決定しなければならないが、この値は風洞模型実験の結果を適用することにより容易に決定できる。すなわち、例えば、図-2に示すような実験結果が得られていれば、設計風速および、迎角の範囲内で負の減衰力を生じさせない無風時 ($V = 0 \text{ m/sec}$) の対数減衰率の値をはば確実に推定することができ、それをそのまま δ の所要値とすればよいのである。

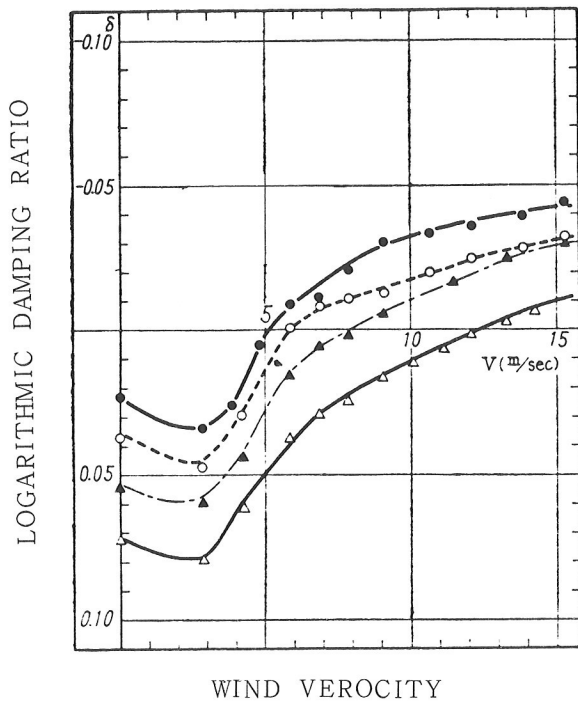


図-2 風洞模型実験結果の一例

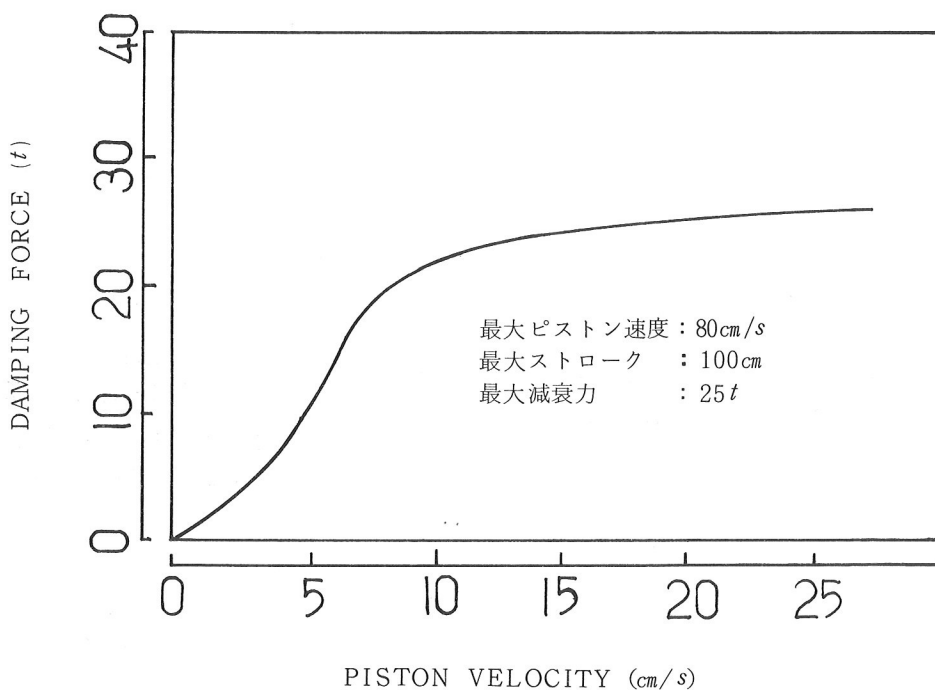


図-3 市販オイル・ダンパーの最大性能と特性

そして、対数減衰率 δ の所要値が決定されれば、式(4)から、各設置位置のダンパーの所要減衰係数の総量 C_j を算定できる。したがって、その値からダンパーの所要個数を算定するわけであるが、市販オイル・ダンパーの最大性能と特性は図-3のようであり、まず、最大ピストン速度、および、最大ストローク

$$\left. \begin{aligned} (\text{最大速度})_j &= \max(\omega \phi_j \sin \omega t) = \omega \phi_j \\ (\text{最大ストローク})_j &= \max(2 \phi_j \cos \omega t) = 2 \phi_j \end{aligned} \right\} (5)$$

を検討した後、所要減衰力の総量

$$(\text{所要減衰力の総量})_j = \omega C_j \cdot \phi_j \quad (6)$$

をダンパーの最大減衰力で除することによって与えられる。また、そのような過程の中で、ダンパーの最適設置位置も合理的に選択できることになる。ただし、 ϕ_j は前述したように相対的な量であり、注目する変形の最大量を適当に指定することによって絶対量としなければならない。

3. ダンパー設置案の検討例

図-4に示すような単径間吊橋を解析モデルとして、ダンパー設置案の検討を試みた。なお、ここでは便宜上、注目する変形としてネジレのみを考え、図-5、6に示

す対称、逆対称一次ネジレ振動モード（5、6次固有振動モード）、および、それらの固有円振動数を適用している。また、全体構造系の対数減衰率の所要値としては、図-2を参照し安全例を考えて、0.10を採っている。そして、表が その対数減衰率の所要値を各設置位置

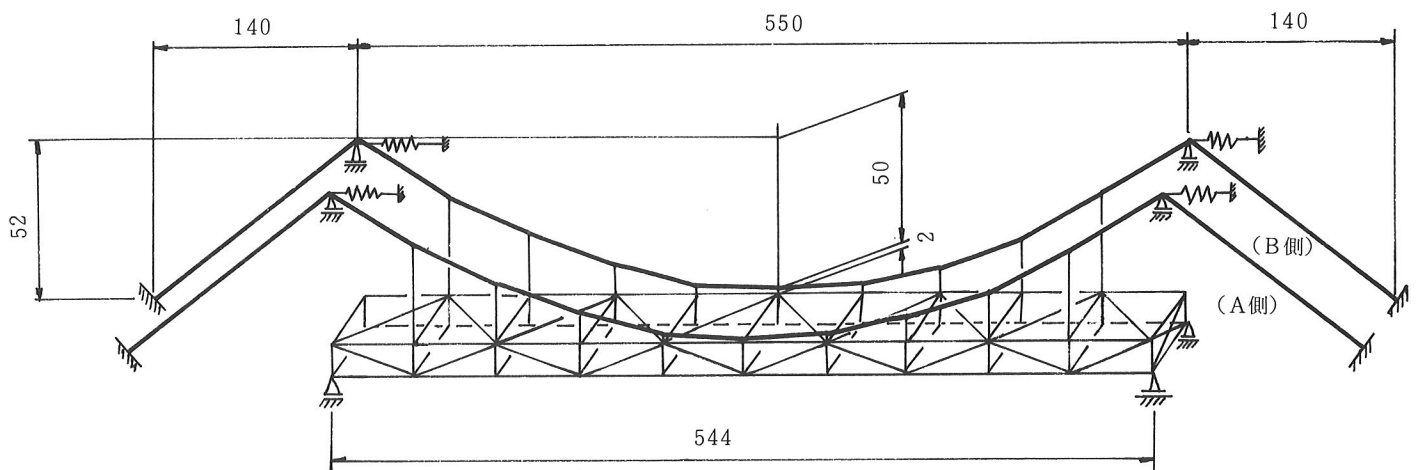


図-4 解析モデル

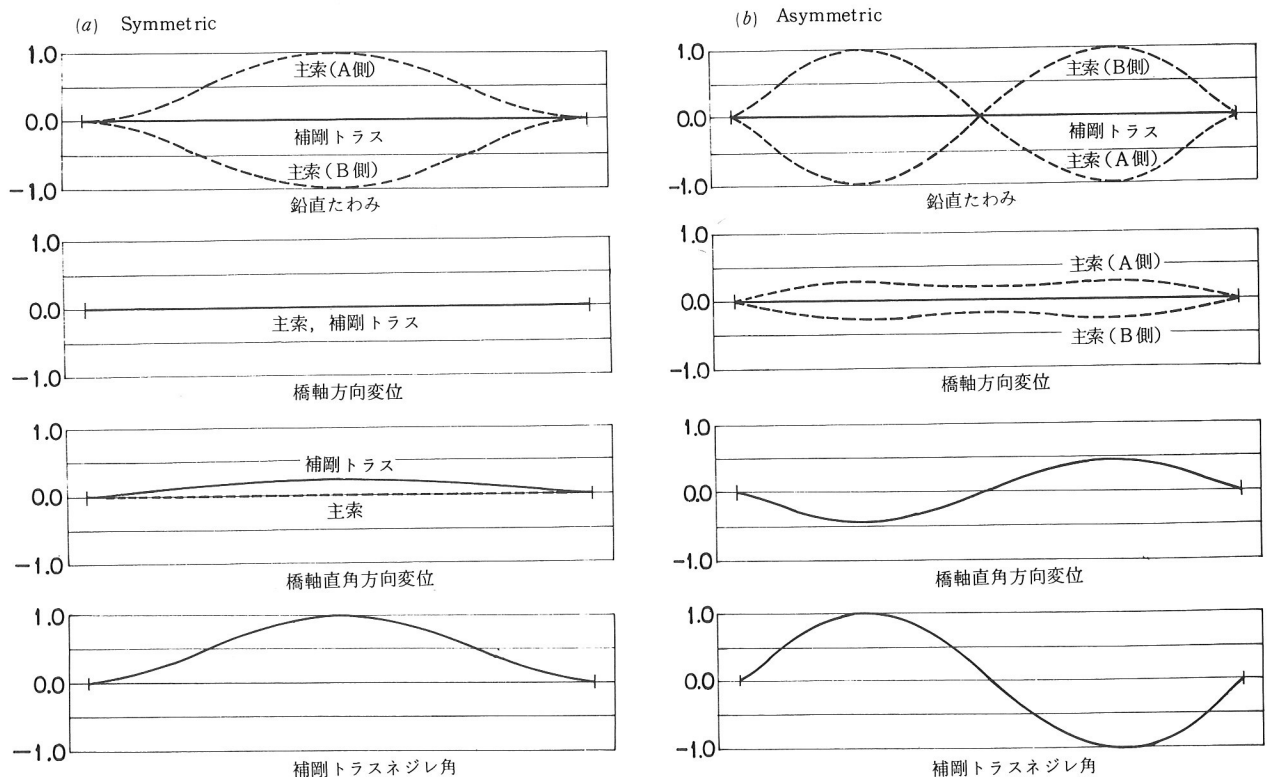


図-5 対称、逆対称一次ネジレ振動モード（5次、6次固有振動モード）

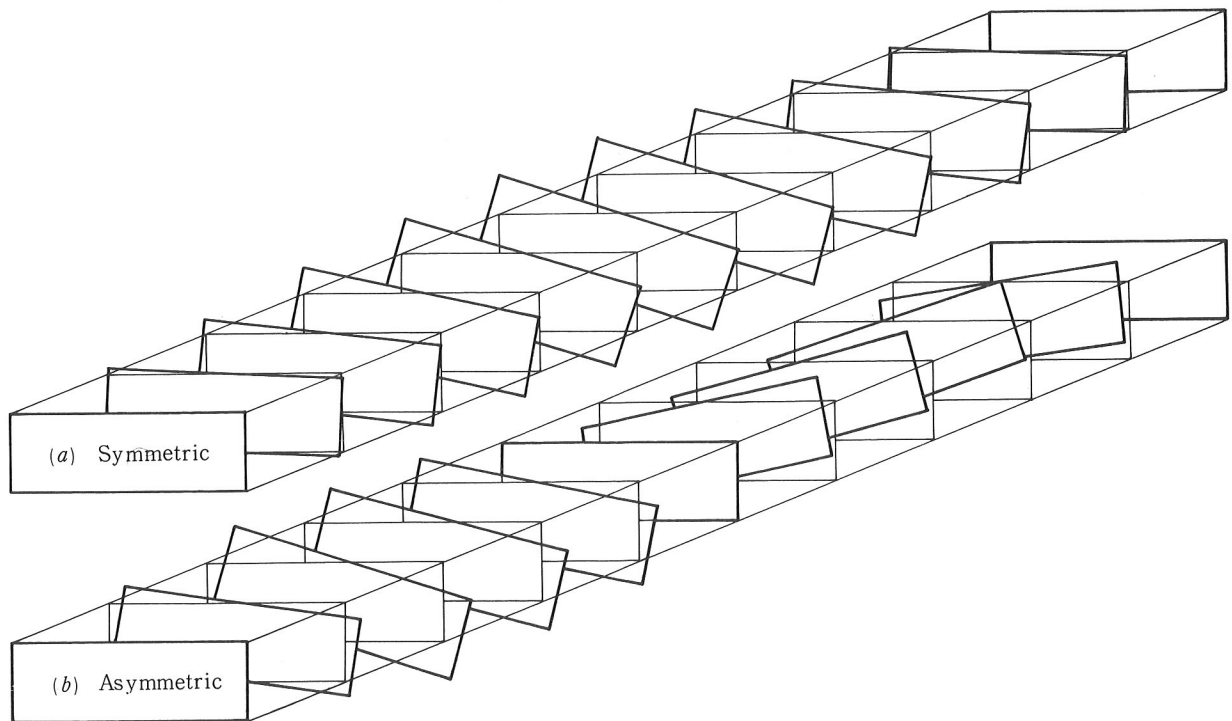


図-6 対称、逆対称一次ネジレ振動モードの立体図

のダンパーのみで単独に確保するとした場合での、それぞれの所要減衰係数、所要減衰力の総量を算定したものである。ただし、注目するネジレ変形の最大ネジレ角は 5° としている。また、参考のために、この表には、最大ピストン速度、および、最大ストロークの値も併記した。

表 所要の対数減衰率と所要減衰係数、所要減衰力の総量

振動モード	所要の対数減衰率	最大ネジレ角	固有円振動数	オイル・ダンパーの設置位置	所要減衰係数の総量 ($t/cm/sec$)	最大ピストン速度 (cm/sec)	最大ストローク (cm)	所要減衰力の総量 (t)
Symmetric	0.10	5°	2.002	center d. stay	—	0.5	0.2×2	—
				cross c. stay	13.8	25.5	12.8×2	351.9
				cable stay	57.6	12.5	6.2×2	720.0
				tower stay	43.9	14.3	7.1×2	627.8
Asymmetric	0.10	5°	2.063	center d. stay	13.0	36.1	17.5×2	469.3
				cross c. stay	20.3	28.9	14.0×2	586.7
				cable stay	2.2	88.6	43.0×2	194.9
				tower stay	4.4	62.4	30.0×2	274.6

この表からは，図-3を参照して，対称，逆対称一次ネジレ振動の両者を制振させるためには，センター・ダイアゴナル・ステイ，および，クロス・ケーブル・ステイの両設置位置にダンパーを同時に設置することが最適であると判断してもよいと思われる。また，所要個数もそれぞれに，10個程度で充分であると思われる。

4. あとがき

本文は 長大吊橋が所要の対数減衰率を確保し耐風性をより確実にするために，制振機構としてのオイル・ダンパーの最適設置位置，所要個数を算定する方法をエネルギー法により提案したものである。

ダンパー設置案の検討例からは この算定法が妥当であること，および，風洞模型実験の結果の一例，実際のオイル・ダンパーの性能，特性などを考慮して，ダンパーによる制振機構の設置が実用上十分に有効かつ可能であることが確認できた。

なお，本文は理論解析に重点を置いたものであるが，今後，ダンパー設置を前提とした実施設計上の検討，および，ダンパーを設置した模型の風洞実験による照査が急務であると考えられる。