

本州四国連絡橋公団 正会員 田 中 淳 之
 三菱重工業株式会社 正会員 ○ 江 草 拓
 三菱重工業株式会社 正会員 高 崎 勝 明

1. まえがき 架設途中の吊橋主塔などは渦励振振動を起すことが風洞実験および過去の実例などで報告されている。この制振対策として通常、塔頂から地上に向けてワイヤーロープを張り、ワイヤーロープの先端に滑動ブロックまたはオイルダンパを設ける方式が採用されている。ところが大鳴門橋の3P主塔の場合、海上に建設されるために適当なアンカー地点が得られず、そのためワイヤーロープ長が330m（水平長）と非常に長くなった。本報告は制振装置のワイヤーロープが長径間の場合に生じる問題点の解明を目的として実施した相似模型による振動実験などの一連の検討結果について述べたものである。

2. 模型実験 対象実機主塔とその制振装置を1/38に縮小して弾性相似模型を製作した。実機における油圧ダンパは模型では電磁ダンパを用い、制御回路によりダンパ特性を速度に比例、または速度の自乗に比例させ、さらにストロークの片側のみ有効な場合と往復とも有効な場合とに切り換えられるようにした。加振方法は加振機により行い、測定は加振機の急停止による自由減衰波形、および定常振動時におけるダンパ部と主塔頂部のロープ取付部の変位と張力のリサージュ図形により振動系全体の対数減衰率を測定した。さらにロープが不安定現象を起す限界の主塔振巾を求め、ロープの不安定現象が主塔制振効果に及ぼす影響を調べた。そしてロープの不安定現象を防止するためにどのような防止装置が有効かを種々の方法と諸元を変えて測定した。模型のケースとして8段、11段、13段（全高）架設時に対応するものを製作し、それぞれにおいて曲げ振動（一次）と振り振動（二次）の場合を検討した。

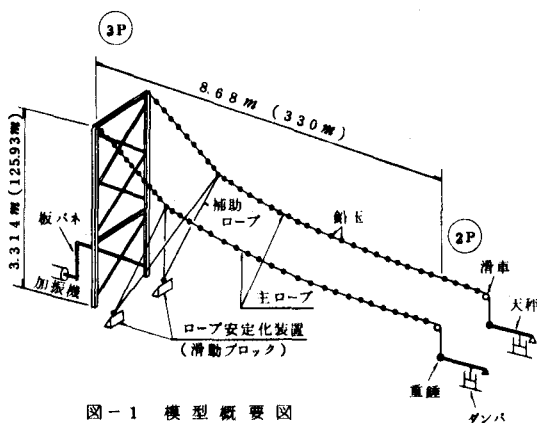


図-1 模型概要図
 () は実機寸法

3. 解析モデルの検討 解析として図-2のような2質点の複素ばね-マス系を想定した。長径間ロープの場合サグが大きいいため見掛けのロープの伸び縮みバネ定数は静的には非常に小さな値となるが、本諸元

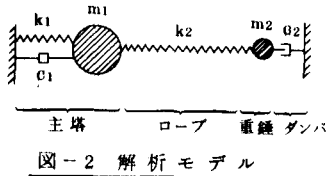


図-2 解析モデル

のごとき動的現象の場合はロープのサグを考慮せず、ロープ自体の伸び縮みバネ定数（ $ERAR/L$ …… $ERAR$ はロープ剛性）のみにて図-2の k_2 を評価すべきことが実験と照合の結果判明した。そしてこ

のような解析方法により系全体の減衰率を計算した結果は、その1例を図-3に示すように実験値と十分な精度で対応していることが確認された。なお以上はロープが次頁で述べる不安定現象を起さない領域においてであり、不安定現象が起れば制振装置の効果はほとんど期待できない。またロープが少しでも揺れる状態では理論計算にて得られた制振効果にある低減率を乗じて評価する必要がある。

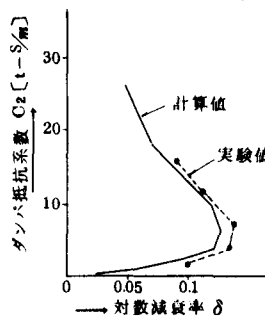


図-3 制振装置の効果(例)

13段（全高）架設時振り振動

4. ロープの不安定現象 主塔振動が大きくなると制振ロープは不安定現象を生じる。この原因は主塔振動時にロープに生じる張力変動のため、ある条件下でロープが弦としての自励振動を発生するためである。ロープの弦振動に対する運動方程式は両端固定で張力が変動する場合次のようになる。（ただし、ロープ自体の構造減衰を無視した場合）

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \frac{T_0}{\rho} (1 - \gamma \cos \omega t) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad (\gamma < 1)$$

$$y = Z(t) \sin \beta x$$

ここに y : 弦振動振巾 ω : 張力変動の円振動数

T_0 : 初期張力 ω_0 : ロープの弦振動固有円振動数

ρ : ロープの単位長重量 γT_0 : 変動張力の振巾

$\beta = n\pi / l$ (n : 振動次数 l : ロープ長)

この式は周知の係数励振型の方程式で、図-4の実線のごとく弦振動の固有振動数と張力変動の振動数比および初期張力と変動張力の比によって安定領域、不安定領域が決り、張力変動の振動数（すなわち主塔の固有振動数）がロープの弦振動固有振動数の2倍に近いと最も不安定になりやすい。一方、ロープが弦振動に対して減衰性を持つ場合は図-4の破線のごとくその減衰の程度に応じて安定領域が広がるのが数値解析の結果確認された。したがってロープの弦振動に対する減衰を付加するために図-1に示すようにロープの途中から分岐ロープを張りその先端に滑動ブロックを設けて実験を行った。その結果、図-5に示すように本来の塔の制振効果に影響を与えずにロープの弦振動に対する安定領域を拡げ得ることが確認された。本滑動ブロックは主塔の制振は目的とせず単にロープの安定領域を拡げるためだけのものである。

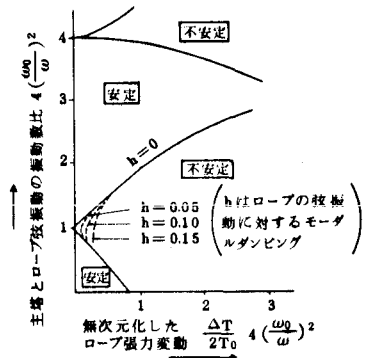


図-4 安定判別図（計算値）

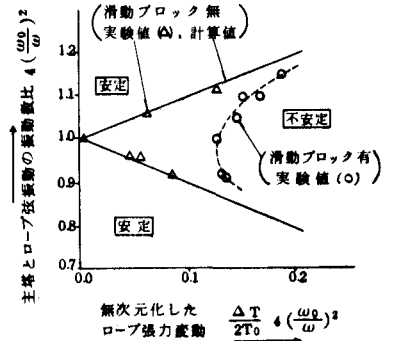


図-5 ロープ安定限界の実験結果(例)

5. 結論 以上の実験および理論計算の結果より下記結論が導かれた。

- (1) 制振装置の効果の理論計算は主塔と重錘からなる2質点の複素ばね-マス系にて十分の精度を有する。
- (2) ロープの伸び縮みバネ剛性は振動状態の場合ロープのサグの影響を受けない。
- (3) ロープは塔の振巾が増大するとある条件下で突然不安定となるが、分岐ロープを張り滑動ブロックのような不安定化防止装置を設けることにより実用領域まで安定領域を拡げ得る。
- (4) ロープが不安定とならなくてもロープの弦振動の影響により実験値が理論値を下まわる振動数領域があるので理論計算値にはある安全率を見込む必要がある。

以上が主要な結論であるがその他に判明したことは

- (1) 長径間ロープの場合主塔制振用としてダンバのかわりに滑動ブロックを採用すると、小振巾時は滑動ブロックは有効に作動せず、振巾が増えるとロープは不安定となりやすいので制振効果は悪い。
- (2) ダンバはロープの安定性にも寄与するのでダンバ抵抗特性は大きすぎても小さすぎても良くない。
- (3) ダンバは速度比例特性とし往復ストロークに有効とするのが実用上すぐれ理論計算上も取り扱いよい。

なお、以上述べた方式の制振装置は風洞実験の結果などとも合せ検討され、大鳴門橋3P主塔の制振装置として採用され期待通りの効果が実機にても確認された。

(謝辞) 本研究実施に当り御指導頂いた土木学会・本州四国連絡橋耐風研究小委員会幹事会の諸先生に、深く感謝致します。