

日本鋼管 正会員 ○加 納 勇
日本鋼管 正会員 辻 松 雄

1 まえがき 架設途中の吊橋主塔は、風による渦励振動を起すことがあり、架設作業上あるいは構造強度上さきめて有害となる。防振対策としては、スライディングブロック(SB)方式の適用実績が多く、その他にカルマン渦の発生を抑制するために主塔の空力性状を変える方式等が提案されている。

筆者らは、SB方式に代表される索と減衰器を組合せた各種の制振方式について、模型加振実験及び理論解析を行い各方式の制振効果あるいは構成要素の制振効果への影響を調査した。本報告は、比較した中で最も良い結果を得たダンパー・重錘(DW)方式を中心に、制振装置の特性について述べたものである。

2 解析理論 主塔は、1自由度振動系に置換し、渦励振力は、等価集中力 $P_w e^{2n\pi i t}$ としてこの模型に作用させる。索は、多くのKelvin型粘弾性要素のピン結合構造に置換した。(図-1) 定常応答を求めるため、索要素ならびに減衰器の非線形減衰抵抗力は、等価な線形抵抗力($F=C_d \dot{u}$)に置換し、収束計算によって真の値に近ずける。加振振動数 n (Hz) を与えて、その応答を求めることを繰り返し、共振曲線を得る。解析上の要点を以下に示す。

①索の剛性 材料伸び剛度 EA_c (Kg) と、初期張力 T_0 (Kg) により決定される。振動中の剛度変化は考えない。②索の減衰 索はヒステリシス減衰をもつ。ひずみ振中 $\Delta \varepsilon$ の1サイクル中に消費されるエネルギーを D_2 とし、これを次式のように定義する。 α , β は索の種類により決定される定数で、材料実験から求める。

$$D_2 = EA_c l_c \propto \Delta \varepsilon^\beta \quad (\text{Kg cm}) \quad (1)$$

一方、粘性係数 C_c もひずみ長さ l_c の要素がひずみ振中 $\Delta \varepsilon$ 、振動数 n の1サイクル中に消費されるエネルギー D_1 は、次式のようになる。

$$D_1 = 2\pi^2 n C_c l_c^2 \Delta \varepsilon^2 \quad (\text{Kg cm}) \quad (2)$$

したがって、等価粘性係数は、 $D_1=D_2$ から次式で表わされる。

$$C_c = \frac{\alpha}{2\pi^2 n} \frac{EA_c}{l_c} \Delta \varepsilon^{\beta-2} \quad (\text{Kg S/cm}) \quad (3)$$

③減衰器の減衰 減衰器は、一般に線形な抵抗力を発生するものは少なく、油圧ダンパー・造渦係数 C_2 (kg S/cm) をもち、その発生力は、 $F=C_2 \dot{u}_0 \dot{u}_0$ となる。この場合の等価粘性係数は次式で表わされる。 U_0 はヒストンの変位振中 (= 重錘の変位振中) である。

$$C_1 = (16/3) U_0 n C_2 \quad (\text{Kg S/cm}) \quad (4)$$

以上の線形化により、運動方程式は、式(5)のようになる。尚、ベクトルは複素数である。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\} \quad (5)$$

特に $[C]$ は、節点変位 $\{u\}$ の関数(式(3),(4))で表現される非線形要素 C_c, C_1 を含む減衰マトリックスである。初期値として $\Delta \varepsilon=0$, $U_0=0$ を与えて収束させる。

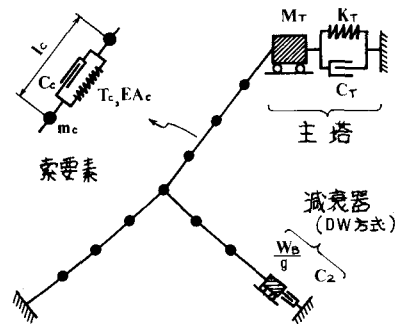


図-1 解析モデル

表-1 模型の特性

塔	ばね	塔柱	K_0	kg/cm	30.0
	外力ばね	K_s	kg/cm	3.2	
	定数	合計 $K_T=K_0+K_s$	kg/cm	33.2	
	固有振動数	n_0	Hz	1.04	
	等価質量	M_T	kg ³ /cm	0.781	
索	減衰係数	C_T	kg s/cm	0.0377	
	呼称索径	ϕ	mm	0.9	2.0
	剛度	EA_c	kg	3500	14900
	単位重量	W_c	g/m	79	217

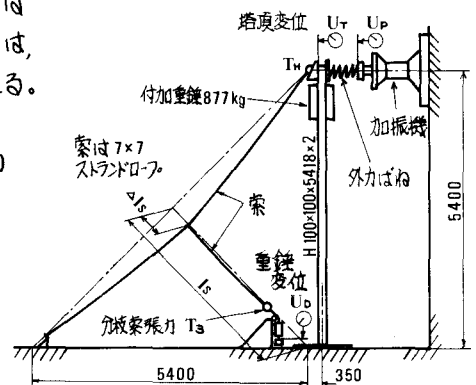


図-2 実験装置(側面図)

3 模型加振実験 解析モデルの検証、索および減衰器の特性の制振効果への影響及びDW方式等の新方式の実現性を把握するために、塔高5.40mの模型による加振実験を行なった。図-2に実験装置を示す。模型塔は、高さ約135mの吊橋主塔と以下の相似率で縮小したものである。長さ $\frac{1}{25}$ 、時間 $\frac{1}{5}$ 、力 $\frac{1}{1000}$ 。表-1に模型塔及び索の特性を示す。周期外力として塔頂と外力ばねを介して変位制御の油圧式加振機で加振した。表-2に実験で比較した方式と変化したパラメーターを示す。図-3にDW方式の模型を示す。実験は、外力振巾を一定に保って、共振曲線を求めた。

4 実験結果と考察 実験及びパラメーター解析から得られた制振装置の特性について述べる。

①図-4は共振曲線の実験値と解析値である。GUY方式は、塔頂変位振巾を $\frac{1}{2}$ 程度に抑えるが、他方式に比べ索張力が非常に大きい。又共振振動数は1割程度高くなるが、共振風速を高速域へ追いつける程ではない。尚、解析上の索の減衰は、 $\alpha = 0.0042$ 、 $\beta = 1.4$ とした。②図-5は、DW方式において C_2 の変化による共振振巾の変化を示したもので、さらに W_0 を変化させた時に画かれる塔頂変位振巾(共振時)のコンタが図-6(実験値)である。タンパーの C_2 には最適値 C_{2opt} がある。この最適値は、SB方式等の減衰器でも、同様に存在する。 C_2 が低くなると制振装置なし状態に漸近する。 C_2 が高くなるとGUY方式に漸近し、索の減衰が応答に影響を与えるようになる。重錘重量は大きいほど良いが、ある限度を越せば効果はあまり増えない。③図-5で中0.9の索径の最適状態の塔頂変位は中2.0に比べはるかに大きい。即ち、ある限度以上の張力が導入された索は、その径中が制振効果に大きく影響する。④索の張り方は、直接式に比べ分岐式の方が重錘重量を軽くできる。

⑤DW方式は、現実的な索径、重錘重量で、塔頂変位振巾を $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{15}$ に減らすことができる。動的索張力は、初期張力の1割程度である。⑥ C_{2opt} は近似的に、解析モデルを線形の2自由度系にし、 $\omega_{U_2}/\omega_n = 0$ 、 $\omega_{U_2}/\omega_{c_1} = 0$ で得た C_{2opt} から導いても、実用上十分な精度を有する。

5 あとがき 数値の関係でSB方式、DS方式等の資料は発表できなかった。今回行なった研究の中では、DW方式が減衰力の安定度、制振効果について良い結果を示した。SB方式は、最適減衰抵抗力を一定値に保持することが難しい。今後の課題として、索の減衰の評価等が挙げられる。

参考文献

- 坂田、育藤、鈴木、高山；長大つり橋主塔架設時の耐風安定性、三菱重工技報、Vol.14, No.3, 1977-5
- 辻、加納、渡辺；吊橋主塔架設時の耐風制振法、日本鋼管技報、No.82, 1979-7

表-2 実験で比較した方式とパラメーター

方式	索径 ϕ mm	T_{30} and W_0 kg	引込率 $\Delta l_s/l_s$	減衰器
索単独 (GUY)方式	2.0	$T_{30}=11.4$	0.2	—
スライディング (SB)方式	2.0	$W_0=6.6$ ~ 25.9	0.2	すり面 2種 台傾斜角 45°
タンパー-重錘 (DW)方式	2.0 (0.9)	$W_0=5.8$ ~ 20.7	0.2	C_2 11種
タンパー-スクリュー (DS)方式	2.0 (0.9)	$T_{30}=7.9$ ~ 20.4	$(\frac{0.1}{0.2})$ $(\frac{0.2}{0.3})$	C_2 8種 ばね Ko 4種

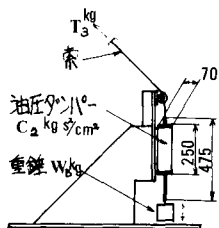


図-3 DW方式実験模型

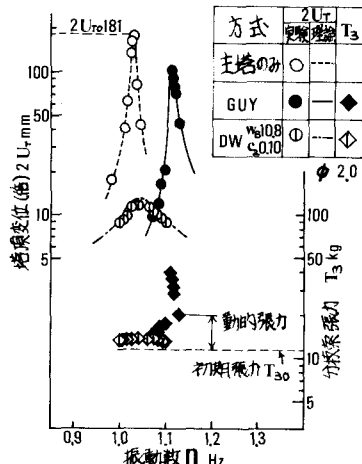


図-4 共振曲線

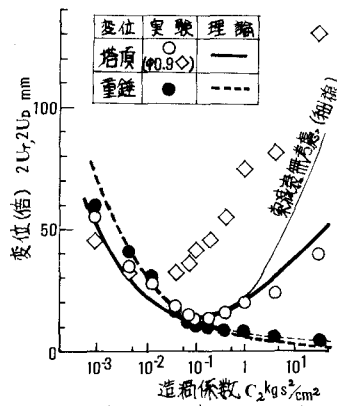


図-5 DW方式の共振時の応答 ($W_0=5.8$ kg, $\phi=2.0$ mm)

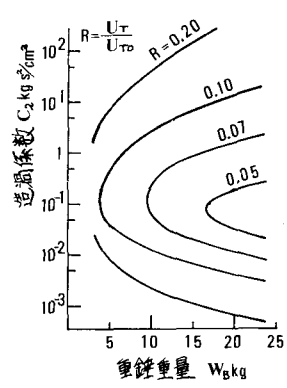


図-6 DW方式の特性 ($\phi=2.0$ mm)