

東京大学 学生員 延藤 遼 川田工業(株) 正 員 米田 昌弘
 東京大学 正 員 伊藤 学 東京大学 正 員 藤野 陽三

1. まえがき 大島大橋の建設を契機として、わが国でも関心の高まっている流線型箱桁補剛形式の吊橋では、水平風のもとで発生が予想される連成フラッターで動的な耐風安定性が支配される場合が多い。連成フラッターの振動力は一般に非常に強いことから、その発現風速を向上させるにあたっては、空気力学的な対策方法を第一に考える必要がある。しかしながら、対象とした吊橋が超長径間で固有振動数が非常に低く、実用的な空気力学的対策を施しても発現風速が規定風速を下回るような場合には、構造力学的対策の併用についても検討する必要があると考えられる。そこで、ここでは、一つの試みとして、T. M. D (TUNED MASS DAMPER) に着目し、数値解析と風洞実験を実施して連成フラッターの発現風速に及ぼす効果について検討したので、その結果を報告する。

2. 数値解析手法 流線形箱桁断面に作用する非定常空気力としてTheodorsenの空気力を適用すると、図-1のような二自由度系にモデル化した主構造系にT. M. Dを設置した場合の運動方程式は、次式で表される。

$$[M][\ddot{Y}] + [C][\dot{Y}] + [K][Y] = [0] \quad \text{----- (1)}$$

ここで、 $[M]$ は質量マトリクス、 $[C]$ は空力減衰マトリクス、 $[K]$ は空力剛性を含めた剛性マトリクス、 $[Y]$ は変位ベクトルであり、それぞれ具体的には次式で表示される。

$$[Y] = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ \Psi_1 \end{bmatrix} \quad [M] = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 \\ M_2 & M_2 & 0 & -M_2 X/B \\ M_2 & 0 & M_2 & M_2 X/B \\ 0 & 0 & 0 & I_1 \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{z1} + 2\pi\rho UBF & -C_{z2} & -C_{z2} & \pi\rho B^2 U(1+F+2G/S) \\ 0 & C_{z2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{z2} & 0 \\ -\pi\rho UB^2 F & 0 & 0 & C_{\Psi 1} + \pi\rho B^2 U/2(1-F-2G/S) \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{z1} & K_{z2} & K_{z2} & \pi\rho BU^2(2F-SG) \\ 0 & K_{z2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{z2} & 0 \\ 0 & XBK_{z2} & XBK_{z2} & K_{\Psi 1} - \pi\rho U^2 B^2(F-SG/2) \end{bmatrix}$$

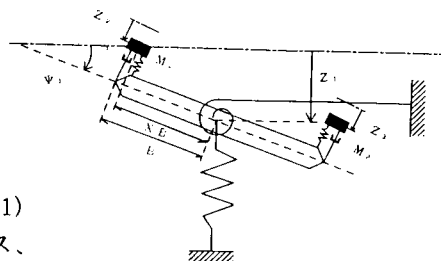


図-1 T. M. Dを設置したモデル

表-1 採用した数値の算定

橋長	2	38.8
振動性モーメント I_1 $\text{t}\cdot\text{m}^2/\text{m}$	0.78.5	
半弦長	2	46.0
空気密度 ρ $\text{t}\cdot\text{m}^3/\text{m}^3$	1.25	1.0
風速U	たわみ w_1 rad/s	0.355
	ねじれ ψ_1 rad/s	1.268
減衰係数		3.572
剛性係数	たわみ K_z	0.02
	ねじれ K_Ψ	0.02
ばね定数	たわみ K_{z1} $\text{t}/\text{m}/\text{m}$	0.499
	ねじれ $K_{\Psi 1}$ $\text{t}/\text{rad}/\text{m}$	1412.4

ここに、 M_1 、 I_1 はそれぞれ主構造系の質量と極慣性モーメント、 K_z 、 K_Ψ はそれぞれ主構造系の鉛直方向とねじれ方向のばね定数、 C_z 、 C_Ψ はそれぞれ主構造系の鉛直方向とねじれ方向の減衰係数であり、添字ではT. M. Dの諸元であることを表す。また、 B は半弦長、 X はT. M. Dの取付位置を表すパラメーター、 ρ は空気密度、 U は風速、 F 、 G はそれぞれTheodorsen関数の実数部と虚数部で変数 $S = \omega B/U$ による関数である。

連成フラッターの発現風速は具体的には以下のようにして求められる。すなわち、まず、風速 U と円振動数 ω を仮定し、複素固有振動解析で得られた固有値の虚部が最初に仮定した円振動数 ω と等しくなるまで繰り返し計算を実施する。そして、得られた固有値の実部がゼロであれば、最初に仮定した U が連成フラッターの発現風速となる。なお、固有値の実部がゼロでなければ、風速 U を再度仮定し、実部がゼロになるまで繰り返し計算して発現風速を算定することになる。

3. 対象とした吊橋 対象とした吊橋は中央支間長が1980mの超長大吊橋である。解析に必要な諸元を表-1に示す。この諸元を用いて、T.M.Dを設置する前の連成

フラッター発現風速を計算したところ、78.4m/sであった。

4. 数値解析結果 T.M.Dと吊橋の重量比を1%に設定し、複素固有振動解析を実施して連成フラッターの発現風速に及ぼすT.M.Dの効果を検討した。X=1.0なる条件のもとでT.M.Dの固有円振動数と、対数減衰率をそれぞれ変化させた場合の結果を図-2に、T.M.Dの固有円振動数と対数減衰率がそれぞれ0.760 rad/s、0.60 なる条件のもとで、T.M.Dの取り付け位置Xを変化させた場合の結果を図-3に示す。

図-2より、T.M.Dの最適固有円振動数は、対数減衰率の大きさによって若干変化しているが、いずれの場合にも吊橋の鉛直方向とねじれ方向の固有円振動数を平均した値である0.8115 rad/sよりも小さいことがわかる。また、T.M.Dの対数減衰率を大きくするにしたがい、連成フラッターの発現風速は一般に上昇し、 $\delta z=0.50$ では85.5m/s程度までに達するが、これ以上の対数減衰率を与えると、発現風速は逆に低下する傾向を示すことが判る。さらに、図-3より、T.M.Dの取り付け位置は桁端付近が最適であり、桁の中央付近にT.M.Dを設置する場合にはほとんどその効果が認められないことも判る。

5. 風洞実験結果 上述したように、数値解析上は、T.M.Dが連成フラッター発現風速の上昇に対して有意な効果を示すことが判った。そこで、次に、ばね支持模型風洞実験を実施して、T.M.Dによる効果を実際に検証することにした。吊橋模型とT.M.D模型の諸元をそれぞれ表-2、-3に示す。また、風洞実験結果を数値解析結果とも比較して表-4に示す。表-4より、風洞実験上からも、T.M.Dが連成フラッター発現風速の上昇に対して有意な効果を示すことが判る。

6. あとがき 本研究は、数値解析と風洞実験を実施して、連成フラッターの発現風速にT.M.Dの効果を検討したものである。その結果、経済性や設置場所など実用上の課題は残されているものの、T.M.Dが連成フラッター発現風速の上昇に対しても有意な効果を示すことが判った。但し不確定要素のある連成フラッターの振動数にT.M.Dの振動数を同調させなければならないので、実橋への適用という点についてはまだ問題が多い。振動数同調に効果が敏感でないT.M.Dもしくはそれに代わる受動式ダンパーの開発が望まれる。

表-2 吊橋模型の諸元

1/2桁幅 B (m)	0.261
質量 M_1 (t・m ² ・s ⁻²)	4.082・10 ⁻⁴
弾性係数 I_1 (t・m・s ² /m)	1.80208・10 ⁻⁶
固有円振動数	たわみ ωz_1 9.817
ねじれ $\omega \psi_1$ 18.408	
構造対数減衰率	たわみ δz_1 0.005
ねじれ $\delta \psi_1$ 0.005	

表-3 T.M.D模型の諸量

質量 M_2 (t・m ² ・s ⁻²)	9.18・10 ⁻⁶
T.M.Dの取り付け場所を表す変数 : X	0.67
固有円振動数	14.727
構造対数減衰率	0.30

表-4 風洞実験結果

	発現風速 (m/s)		フラッター振動数 (Hz)	
	実験値	計算値	実験値	計算値
T.M.D無し	10.5	11.08	2.539	2.408
T.M.D有り	11.9	12.08	2.246	2.102

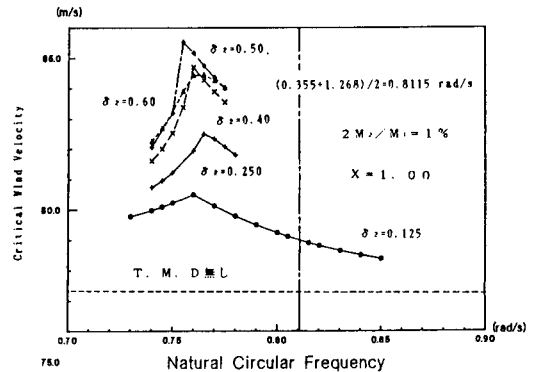


図-2 T.M.Dの固有振動数と対数減衰率が及ぼす影響

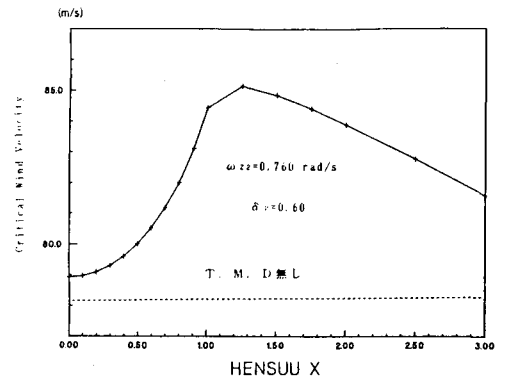


図-3 T.M.Dの取り付け位置が及ぼす影響