

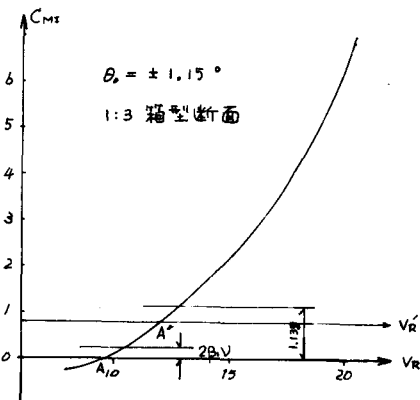
東京大学	正	伊藤 学
○建設省	正	西田穂積
川田工業	正	三品吉彦

1. はじめに

前回の報告⁽¹⁾では、ジャイロ制振装置を設置した模型吊橋について、ジャイロの諸数値を变化させた場合の発振風速を計算し、前々回の報告⁽²⁾と比較してこの方法が実際の現象を解析し得ることを確認した。その結果により数値実験を多数行い、耐風制振に効果と及ぼす重要なパラメータを示した。今回は、空力弾性模型による実験を行って、非定常空気力とジャイロの効果とは重ね合わせが可能であることを確認するとともに、ジャイロ系を含む吊橋のフラッター方程式の特殊性を考察し、実用規模のジャイロが効果的な減衰器として動作すること示す。

2. 模型実験

実験は、数値解析に用いるための強制振動法による非定常空気力の測定と、バネ吊りによる接れ1自由度空力弾性模型によるフラッター試験とを行った。模型の断面は文献(2)に示されている全橋模型と同じく、1:3の箱型とした。測定された非定常空気力のうち、フラッターに直接関係する虚数部の係数を、投算風速 $V_R (= V/Nb)$ に対して描いた図を右に示した。ジャイロの効果を含んだ空気力は、この曲線と平行に移動するが、図中に示したように座標軸 V_R と上方に移動すればよい。これはジャイロ杆の減衰定数が橋体のそれよりも大きいことと前提としている。振動数の変化を表わす空気力の実部は、振動数比の大小により、座標軸の移動は上下いずれの方向とも取り得る。フラッター試験の結果は、ジャイロにより発振風速を高めることができるが、ほど度フラッターが始まるとその振中はむしろ急激に成長する。その原因は右図において、A点よりもA'点に於て勾配が急であること、および実験に用いたジャイロの杆の減衰機構が主としてマサツに依っており、そのために振中の増大とともに減衰定数が低下するためであると考えられる。たゞし、実際の現象は空気力の非線型性にも依存している。



3. 振動方程式の考察

ジャイロ振動系をも自由度として含む吊橋の運動方程式は、次のように書くことができる。

$$M\ddot{\Theta} + C\dot{\Theta} + K\Theta = F, \quad C = \begin{bmatrix} C_s & H \\ -H^T & C_g \end{bmatrix}, \quad \begin{array}{l} C_s: \text{吊橋系構造減衰係数} \\ C_g: \text{ジャイロ杆} \\ H: \text{ジャイロ角運動量} \end{array} \quad (1)$$

上式の右辺を0と置いた自由振動の方程式は、前回報告したように、複素数領域での固有値問題として解くことができるが、(1)式のように、本質的に対称でない行列の固有ベクトルは、一般に直交系を構成しないので、通常の意味でのモード解析はできない。すなわち、正規化された固有ベクトルで構成された行列の重を用いて、

$$\Theta = \Phi \phi, \quad F = (\Phi^T)^{-1} Q \quad (2)$$

なる変換を施すことは、(2)式の前者が平行四辺形則に従う正変変換であり、後者が座標軸に主線を降す共変変換であることから、物理的にはエネルギーを固有ベクトル方向に分解することを意味しており、斜交系では分解後

も互に独立な量とはなり得ない。ここで、(2)式の後者が

$$F = \Phi Q$$

(3)

なる変換と置きかえることができれば、(1)式は次のような変換となって互に独立な n 個の方程式と得る。

$$\Phi^T M \Phi \ddot{\Phi} + \Phi^T C \Phi \dot{\Phi} + \Phi^T K \Phi \Phi = Q \quad (4)$$

ところで、非定常空気力の特性として、実際に生じている振動の振動数と同じ周波数成分を有する空気力のみが卓越するとすれば⁽³⁾、(2)式で示される n 々の振動のうち、フラッター状態にある特定の1個だけが、右辺に0でない力があるとしてよいから、このときは(4)式がエネルギー的に見ても意味をもつことになる。

(1)式の各項に左から変位の行ベクトルと乗じれば、 H を含む部分が消失することから、シャイロのローターが有する角運動量は、系全体のエネルギーに何ら関係せず、吊橋-シャイロ系の振動特性を直交系から斜交系に変換する。このことは $H=0$ として得られる直交モードの間に連成が生ずることを意味し、振動数と減衰性を表す固有値の和が一定であることから固有値間に値の授受が行われるわけである。パラメータ解析によると、吊橋-シャイロ系の共振曲線は H の存在によってすべてのピークの大きさが平滑化される傾向にあり、従って、減衰の小さい低次振動に対し、シャイロ枠および高次振動から減衰力が附与されることがわかる。

4. フラッター条件と実用算定式

非定常空気力の表示を、揺れ θ の自由度の場合について次のように行う。

$$\pi \rho b^4 E \{ \omega^2 C_{MR} \theta + \omega C_{MI} \dot{\theta} \}; \quad \rho: \text{空気密度}, b: \text{補剛片半幅}, E: \text{単位行列}$$

ここで、 C_{MR} 、 C_{MI} は V_R の関数である。重を用いて一般化し、フラッター状態にある振動に適用し、 $\dot{\theta}$ の係数を0と置けば、フラッター条件として次の式が得られる。

$$C_{MI} = 2\beta V (\omega_n / \omega), \quad V = \theta / \pi \rho b^4 \quad (5)$$

ただし、 β は減衰定数(%), ω は振動数(rad/s), θ は吊橋の単位長当りの慣性モーメントであり、添字 n は固有の値であることを示す。

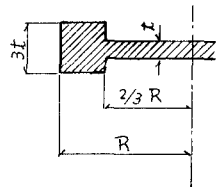
一方、構造減衰により消費されるエネルギーと、空気力によって供給されるエネルギーと、1周期について計算し、両者を等しいと置けば、やはり(5)式が得られることから、 H の存在によって振動型が殆んど変化しないとの仮定のもとに、シャイロによる減衰を構造減衰に加えた値を用いて、次のフラッター条件が得られる。ただしシャイロの変位 θ_g は、吊橋の変位による強制変位応答と考えて求めた。

$$C_{MI} = 2\beta V \left\{ 1 + 2 \frac{\beta_g I_g \omega_g}{\beta \omega E} \left(\frac{\theta_g}{\theta_{max}} \right)^2 \right\}, \quad \theta_g = \frac{H}{I_g \omega_g} \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\beta_g r)^2}} \cdot \theta, \quad r = \frac{\omega_n}{\omega_g} \quad (6)$$

ただし、 θ は吊橋の変位であり、 I は慣性モーメントであって添字 g はシャイロ枠に属するものであることを示す。なお、空気力による振動数の変化は小さいと考えると $\omega = \omega_n$ としてある。

5. 数値計算例

シャイロの回転体を右図のように形成するものとし、実用的規模を考慮してローターの半径を $R=1.16$ m とする。スパン長1600 m、幅34 mの吊橋を考慮し、スパン長の2/6、3/6および4/6の点にそれぞれシャイロを設置する。ローターの回転数を2400 RPMとすると、 $H=226.2$ t・m/sが得られる。 $I_g=2$ t・m²に設定し、1次モードの構造減衰を $\beta=0.502\%$ 、シャイロ枠について $\beta_g=35.5\%$ とすれば、 $V=22.6$ を用いて(6)式より $C_{MI}=2\beta V \times 3.40=0.773$ となる。(1)式による結果は $C_{MI}=1.139$ であって、前ヤ-シの図より、もとの共振風速53.2 m/sに対し、およそ24%の上昇となる。



(1) シャイロによる吊橋の耐風制振効果；伊藤肇，西田穂積，三吊吉彦；(第2報)第28回年次構造学会(S.48)

(2) 同上；伊藤肇，村田正信；第26回年次学術構造学会(S.46)

(3) 空気力の非線型性を考慮した構造物の空力弾性振動；森光，伊藤，宮田；土木学会論文報告集 No.219