

横浜国立大学 正員 宮田 利雄
 横浜国立大学 正員 山田 均
 住友重機械工業 正員 宮崎 正男

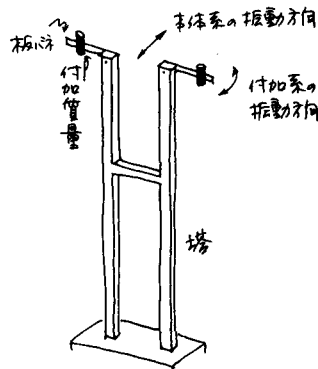
1. まるがき 元腹したにふい形状の塔、橋桁に見られる風による揺動振、パフエインク現象を低減する目的から、構造系の剛性や減衰性を増大させる機械的対策、形状改変による空力的対策など種々の方法が提案されている。本報では、構造系本体にある大きさの質量を付加することによって期待される減衰率の増大によって振動を制振するいくつかの方法について、吊橋の主塔、斜張橋の塔を念頭にふいた塔系について行った検討、考察を述べるものである。

2. 付加質量を用いた制振法 塔構造にある大きさの質量を付加して系本体の減衰を増大させる方法には次のようなものがある。 (1) 付加質量をバネ、ダンパーを介して本体にやりつける、いわゆる質量ダンパー、調律(Tuned)質量ダンパー、または動吸振器と呼ばれる方法。これは塔上部に装置を取りつけることを意味する。この意味では、周囲に相当の固定点がない場合などに適している。しかし、調律が難しい。付加質量そのものの振動処理に問題が残る。 (1') 質量ダンパーの亜流として、付加すべき質量、バネに代るものとして本体に相当のササをもったケーブールを付加する、付加ケーブール法とも名づけられる方法。これは水平な系には相応の効果があるようであるが、付加ケーブールが(1)の付加質量と同様、振動する。塔系には抵抗があるかもしれない。 (2) スライディング・ブロック方式と呼ばれる方法。これはケーブールを介して塔に接続されるブロックを滑り面その間に生じるクーロン摩擦力による方法であるが、付加質量を用いるという意味からここに並列した。この方法は、実際的には摩擦係数値の設定に信頼性がないう点があるといわれている。 (3) 適当な大きさの付加質量をワイヤを介して本体に取りつけるか、半周期の間は振動系に結合し、続く半周期には無関係とする工夫を設ける方法。半(Semi)質量ダンパーとも名づけられる方法で、アタミヤ橋の揺動振問題検証のための風洞実験に際し試みられ、効果が確認されている。新しい方法として本報でもその原理を検証、考察してみたものである。この他、(4) 本来のダンパーをケーブールを介して塔に接続する方法を含め、種々の創意、工夫が考えられようが、ここにはこれらの対比は意図していない。

3. 模型実験、解析、および考察 ここでは、(1)、(3)の方法について実験、解析による検証、考察に考察した結果を述べる。

3.1 調律質量ダンパー(1)の検討 原理的には教科書に詳しいのでここでは省略する。実験では左図のような塔系(本体の対数減衰率 $\zeta = 0.007 \sim 8$)の塔頂に板バネを介して付加質量を振り系としてやりつけ、このやりつけ位置を変化させて調律、すなわち本体系の振動数に対する付加系の振動数の比を変化させた。付加質量を本体の1%とした解析によると、付加系固有の減衰率が相当値であるとき、例えば $\zeta = 0.04$ 程度のとき、合成系では $\zeta = 0.02 \sim 0.03$ となる。実験においても付加系の減衰率が上記程度であったので、振動数比が $0.99 \sim 1.02$ であるとき解析値に近しい値が得られている。つまり、本体質量の1%という小さくない付加質量を用いてもそれほど大きな減衰は期待できそうにない。模型実験から、合成系の近接した2つの固有モード間に付加質量が転移し合

図1 調律質量ダンパー系



う不安定土，振子系の有限長のバネの非線形挙動や固有の減衰の与え方などに解決すべき問題点が考えられる。

3.2 半質量ダンパー (3) の検討 下図 2(a) のように，前項 3.1 と同じ塔系にケーブルを介して付加質量を取りつける。この付加質量は合成系の振動中，ある半周期の間は全体の振動系に参与し，続く半周期には無関係となるように，つり合い点以下の下降運動を止め，遂に上昇運動がスムーズになるよう，例えば「コロ」の上にのせるように設置する。見かけ上，スライディング・ブロック方式 (2) と同じようであるけれども，その本質的に原理は全く異なるものである。もちろん，コロ上を運動する間には必ずしもフーロン摩擦が働き，この寄与分による減衰力を実際には期待できる。

図 2 半質量ダンパー系

±2. この方法の原理を簡単のために左図 2(b) のようなモデルで考えこみる。つり合い点を原点とした変位 u について自由振動の運動方程式を考えこむ，

$$u > 0 : \quad M\ddot{u} + Ku = 0 \quad (1)$$

$$u < 0 : \quad (M+m)\ddot{u} + Ku - mg = 0 \quad (2)$$

と書ける。式 (2) において，付加質量 m は重力 mg とし，慣性力 $-m\ddot{u}$ とし，2 種の働きをしよう。本体系の固有円振動数を $\omega_0 = \sqrt{K/M}$ ，さらに $a = mg/K = (m/M)g/\omega_0^2$ とおくと，

$$u > 0 : \quad \ddot{u} + \omega_0^2 u = 0 \quad (1')$$

$$u < 0 : \quad \ddot{u} + \omega_0^2 \frac{1}{1+m/M} (u-a) = 0 \quad (2')$$

となる。この振動を位相平面 ($u, \dot{u}/\omega_0$) 上では示こみることにすると，式 (1') から

$$(\dot{u}/\omega_0)^2 + u^2 = \text{const.} \quad (3)$$

$$\text{式 (2') から} \quad (\dot{u}/\omega_0)^2 + \frac{1}{1+m/M} (u-a)^2 = \text{const.} \quad (4)$$

が導かれる。

式 (3) は $(0, 0)$ を中心とする円，式 (4) は $(a, 0)$ を中心とし， u 軸を長軸とする楕円である。これらの関係式から，付加質量の重力 mg とし，2 種の働きにより，1 周期ごとに a ずつ等差級数的に減衰し，慣性力としての働きにより，1 周期ごとに $1/(1+m/M)$ ずつ等比級数的に減衰するといかかわる。

このダンパーの効果を実証するために，高さ $H = 150 \text{ m}$ ，固有振動数 0.2 Hz 程度の塔を対象に，上述の塔系について模型 (縮尺 $1/61$ ，振動数縮尺 $1/9$) 実験を行った。付加質量として塔質量の $0.8 \sim 1.5\%$ 程度を考えた。なお，ケーブルの傾き，コロが動く滑り面の傾斜角によって効果が減殺されるけれども，上述の解説モデルにおいて $m/M = 0.5 \sim 1.0\%$ とおきようにしてある。フーロン減衰的の等差級数的な減衰は振幅 A が小さくなるにつれて大きくなるので，振幅として塔高 H の 0.8% 程度以下について対象とした。解析によると， $A/H = 1 \rightarrow 0.5\%$ について， $m/M = 1\%$ のとき $\delta = 0.05 \rightarrow 0.10$ ， $m/M = 0.5\%$ のとき $\delta = 0.025 \rightarrow 0.05$ とおける。これに対し，模型実験では $A/H = 0.5\%$ 相当のとき $\delta = 0.05 \sim 0.06$ 程度で，解析結果に近いものが得られこる。実験ではこの値にコロ部分のフーロン摩擦による寄与分が加わって，全体として $\delta = 0.1$ 以上であった。

以上のように，半質量ダンパーとして 1% 弱の付加質量を用いるといこはあり， $\delta = 0.05$ 程度の減衰率が得られるといこ知られる。こよお信頼性に欠けるといこれるスライディング・ブロック方式にはない，臨実な効果がある。もちろん，減衰の程度は a に比例，すなわち ω_0^2 に逆比例するといこに注意が必要である。この方法の適用に当たっては，付加質量の大きさ，コロやストッパー機構，ケーブルの伝達力特性などの検討が必要といこらる。模型実験では相対的に質量の小さいケーブルを用いたが，半周期ごとに重力効果が加わる瞬間の衝撃を緩和するといこも含め，相応の結果が得られこたといこ考えられる。

