

東京大学大学院 学生員 横山 晴生

横浜国立大学 正員 宮田 利雄

住友重機械工業 正員 宮崎 正男

1. まぎき

長大吊橋、斜張橋にせよらず、橋梁はふつう架設中にその変形性状が完成系よりも握みやすくなると共に、季形に際し、特にその振動に際し、各変位モードの達成、即ち、握み振動、鉛直たわみ振動、そして構たわみ振動の達成が顕著に認められることがある。架設中の吊橋の場合、その全橋模型を用いた風洞実験により観測できるのであるが、例えば、握みフラッタの安定性を検討しようとする場合に模型に握み振動を与える、補剛桁に構たわみ振動、鉛直たわみ振動が達成して現われ、ケーブに橋軸垂直面内の回転振動が生じたりすることがある。言うまでもなく、構造物の耐風安定性を問題にするときその振動特性が重要な因子となるが、上述のような達成振動が無視し得ないとき、作用空流力の振動変位に応じて定まる自励力である特性を考えると、この達成性が作用空流力、ひいては全体系の対風挙動にどのような効果をもたらすことになるのか検討しておくべきであると考えらるのである。本報告は、以上のような観点から、架設中の吊橋の達成固有振動解析、特に握み振動が卓越する振動モードを考慮する場合に構たわみ振動やケーブの程度達成するかを調べる解析をし、この達成性を握みフラッタなどの耐風性を検討するにあたってどのように評価すべきかについて考察した結果を述べるものである。

2. 架設中の吊橋の達成固有振動解析

例題として、上述した風洞実験に用いた全橋模型を対象に、いくつかの架設系を選んで達成固有振動解析を行なった。対象吊橋は連続補剛桁をもつ長大吊橋で、二つの主塔からそれぞれ小側径内側、中央径内側へ補剛桁が延進した左右対称の架設系を想定している。振動解析法は従来から吊橋の固有振動解析に用いられている立体骨組多節点モデル法によることをし、補剛桁については吊材とりつけ点、およびそのレベル上の中間に節点をおいている。実際の補剛桁においてはその重にせせん断中に位置が異なり、しかもこれらの点がいずれも吊材とりつけ点レベルにはないのがふつうであり、この結果、達成振動特性はより複雑になると考えられたが、今回は上述のような簡便法にしたがい、おおよその傾向を見ることにした。

その結果、握み振動、鉛直たわみ振動、および構たわみ振動の達成が顕著に現われる場合のあることが理論的にも確認された。このうち、補剛桁の握み振動が卓越していると判断される場合で、構たわみ振動やケーブの達成が著しい例を図示する、図1、2のようになる。図1は一つの架設系(E)の握み逆対称1次モードの場合、図2は異なる架設系(D)の握み対称1次モードの場合であるが、前者では補剛桁の構たわみ振動が、後者ではケーブの構たわみ振動が特に大きく達成していることが分る。これらの図で、振動モードの縦距は、補剛桁の握み振動に対応して吊材とりつけ点に現われる鉛直たわみ振動の最大変位

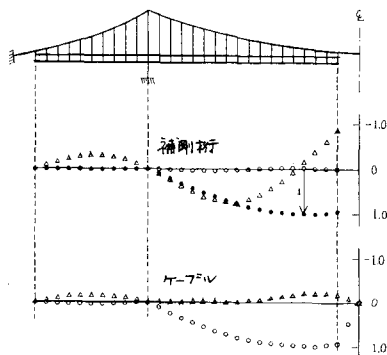


図1 架設E系(握み逆対称1次モード)

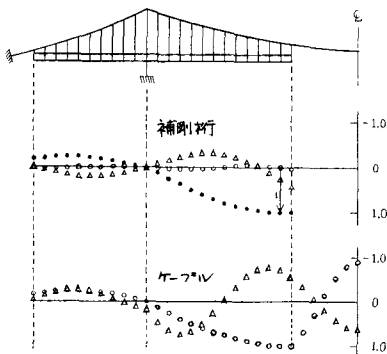


図2 架設D系(握み対称1次モード)

● 握み ▲ 構たわみ ○ 鉛直たわみ

び正規化したものである。図中のケーブルの鉛直たわみ振動は一方のものを示したが、他方のものは補剛桁の鉛直たわみの二倍値の大きさの差がある。図示した例では、補剛桁の鉛直たわみ、橋軸方向変位の達成は小さい。

いずれにせよ、橋小振動が主として卓越する振動モードである場合には、種たわみ振動の達成が著しいことが確認される。この達成固有振動解析結果を、ふつうに行われる橋小振動モードのみを解析した結果と比較してみると、橋小振動モード形、橋小の固有振動数ともに2~3%の差に過ぎず、単にこれらを求める目的であれば、達成解析は必要はない。しかしながら、前述したように、耐風安定性、作用空気を問題にするのであれば、顕著な達成性、特にその影響は正しく評価しておくべきものと考えられる。

3. 耐風性におよびる達成振動の効果

空力の挙動にかかある空力は振動変位によって定まる物体周囲の気流特性に大きく支配される事実を考慮すれば、振動の達成性が全体系の対風挙動、作用空気に影響をおよびることは容易に想像できる。架設中の吊橋の場合、例えば、鉛直たわみの渦励振動が必ず発生する箱断面において、橋梁形式が曲線橋であるとき、これにともなう橋小、構たわみ、鉛直たわみの各振動の本質的な達成が生れる。このとき、達成性が鉛直たわみ振動のみをする場合の作用空気を変化させるように働くかもしれないし、量なる挙動が全体系に生いたと考える方が適切であろうことになるかもしれない。いずれにしても、達成振動によって作用空気が変化するといった効果は、一般的には、より正しくモデル化した風洞実験によってのみその確認が可能であろう。架設中の吊橋の場合、主として橋小振動が卓越する際に構たわみ振動の達成が著しいのだが、仮りに補剛桁(架設時の)断面が橋小フラッタについて不安定であるとして、構たわみ振動、即ち風向方向の振動の達成がどのようなふうなる無いたることになるのだろうか。

ここでは、遂に、橋小フラッタについて安定な断面の場合ということにして、ある振動変位方向の空力はその変位に依存はするが、他の達成変位の影響は小さく、しかも全体系の挙動については各変位方向の空力の効果も単純に重ね合わせることによって記述できるという状況を考えてみよう。いま、作用空気をし、ケーブルのものはとりあえず無視し、補剛桁について振動速度に比例する成分のみを考えることにすると、達成振動する全体系の空力減衰定数は

$$\gamma_a = - \frac{M_g^2 \int_{L_1+L_2}^L (\overline{q}_g^2) dx + D_g^2 \int_{L_1+L_2}^L (\overline{q}_g^2) dx + L_g^2 \int_{L_1+L_2}^L (\overline{q}_g^2) dx}{2W \text{MEQ}} \quad (1)$$

$$\text{のように導かれる。ここで、} \quad \text{MEQ} = \int_L m^2 (\overline{q}_g^2 + (\overline{q}_v^2)) dx + \int_{L_1+L_2}^L \theta^2 (\overline{q}_g^2) dx + \int_{L_1+L_2}^L m^2 (\overline{q}_g^2 + (\overline{q}_v^2)) dx \quad (2)$$

である。ただし、 $\overline{q}$ は達成固有振動モード形で、上添字 g は補剛桁、 c はケーブル、下添字 g は橋小、 v は構たわみ、 v は鉛直たわみ振動を表わし、 m は質量、 θ は極慣性モーメント、 ω は固有円振動数、 M 、 D 、 L はそれぞれ非定常空力係数である。両式の積分範囲 L は吊橋全長、 L_1+L_2 は架設時の補剛桁長を表わす。

上式から、固有振動の達成性と全体系の耐風性の関連を見てみると、達成がはいった橋小振動モードのみを考える場合($\overline{q}_g = \overline{q}_v = 0$ 、 $\overline{q}_g$ は達成する場合と大差はない)に対して、達成する場合($\overline{q}_g$ に対し、 $\overline{q}_v$ は有意だが、 $\overline{q}_v$ は無視できる)は達成振動モード形の二乗の積の効果がさらに付与されるということであることが分る。先に図示した例について、 $\int_{L_1+L_2}^L (\overline{q}_g^2) dx$ と $\int_{L_1+L_2}^L (\overline{q}_v^2) dx$ の比を求めてみると、図1のE系では1:0.52、図2のD系では1:0.12 となり、無視できる大きさではない。達成性の耐風性への効果を定量的に求めようとするとき、式(1)では各非定常空力係数を求める必要があるが、空力モーメント係数 M_g^2 はふつう行われる部分模型実験の結果から算出すればよい。抗力係数 D_g^2 については、準定常的に与えることは可能で、このとき $D_g^2 = -\rho \times C_D U$ とする。ただし、 ρ は空気密度、 U は風速、 C_D および U は定常抗力係数、代表長である。いずれにしても、この場合の達成固有振動性は全体系の空力減衰を増大させる効果をもたらしたと考えられる。