I -313 鉛直たわみモードガスト応答の簡単な推定式

建設省土木研究所　正員　成田　信之
建設省土木研究所　正員　佐藤　弘史
建設省土木研究所　　　　湯沢　聡

1. まえがき

筆者らは以前，3次元構造物の鉛直たわみおよびねじれモードのガスト応答について，周波数軸および時間軸で推定する方法を示した[1,2]が，これらの手法はいずれもプログラムを組み，電算機で計算する必要がある。もちろん，ガスト応答をより正確に推定するためには，この過程は不可欠であるが，設計の初期の段階でガスト応答の大きさの概略をつかみたい場合には，多少精度が低くても，より簡単な電卓で計算できる程度の推定式があれば非常に有益であると考えられる。このような考えに従い，ここでは鉛直たわみモードガスト応答の簡単な推定式を提案し，あわせてその根拠も説明する。

2. 鉛直たわみモードガスト応答の簡単な推定式

対称1次モードが卓越するような長大橋梁の鉛直たわみモードガスト応答の，中央径間½点における標準偏差は近似的に次式により推定できる。

$$\sigma_\eta(x)\Big|_{x=L/2} = \mathrm{const.}\cdot\frac{dC_F}{d\alpha}\cdot I_w\cdot \bar{U}^2\cdot B^{1/2}\cdot f_1^{-2}\cdot L^{-1/3}\cdot(mg)^{-1} \qquad (1)$$

ここに，σ_η；鉛直たわみガスト応答標準偏差（cm），$\frac{dC_F}{d\alpha}$；構造軸に関する迎角0°での揚力勾配，ただし$\frac{dC_F}{d\alpha}$は正とする，I_w；鉛直方向変動風速の乱れ強さ，$I_w=\sigma_w/\bar{U}$，$\bar{U}$；橋軸直角方向水平成分の平均風速（m/s），B；橋桁幅員（m），f_1；対称1次モードに対応する固有振動数（Hz），L；中央径間長（m），mg；単位長さあたりの橋桁重量（t/m）

なお定数の値としては，上記の単位で各数値を代入した場合には，0.03～0.06が適当と考えられる。

3. 推定式の根拠

(1)式を求めるにあたっては，まず鉛直たわみモードガスト応答に関連する因子を挙げ，その影響度の大小を検討し関数の形を定め，既往の実験値および実測値より定数の値を決める，という方法をとった。なお因子およびその影響度を考える際にはHolmesのガスト応答計算方法[3]を参考にした。Holmesの方法は，鉛直たわみ1次のモードのみを考慮したものであり，空力アドミッタンスおよび空間相関係数は橋軸直角方向水平風速(u)および鉛直方向風速(w)に対して同じものを用いる，あるいは空力減衰は準定常理論より求めたものにある係数を乗じたものを用いる，などして鉛直たわみモードガスト応答を近似的に推定するものであるが，上述の主旨に基づいた近似式を求めるために参考とするには充分な精度をもつと考えられる。Holmesの方法を再録すると以下のとおりである。

$$\sigma_\eta(x)^2 = \frac{\Phi_1(x)^2}{(2\pi f_1)^4\{\int_0^L m\,\Phi_1(x)^2dx\}^2}\left[\,S(f_1)\frac{\pi f_1}{4\zeta} + \int_0^{f_1} S(f)\,df\,\right] \qquad (2)$$

$$S(f) = (\rho B\bar{U})^2\,\chi(f)^2\left[\,C_F^2\,S_u(f) + \left(\frac{1}{2}\frac{dC_F}{d\alpha}\right)^2 S_w(f)\right]\int_0^L\!\!\int_0^L \Phi_1(x)\,\Phi_1(y)\,R(x,y,f)\,dx\,dy \qquad (3)$$

$$\zeta = \zeta_s + \frac{\frac{dC_F}{d\alpha}\rho\bar{U}B}{8\pi m f_1}\gamma \qquad (4)$$

(1)式で説明した記号以外のものの意味は次のとおり。x；橋軸方向の座標，Φ_1；1次の鉛直たわみ振動モード，

S；パワースペクトル密度関数（$0<f<\infty$），ρ；空気密度，χ；空力アドミッタンス，R；空間相関係数，δ_s；構造減衰定数，γ；定数

3.1. 鉛直たわみモードガスト応答に関連する因子

(2)式～(4)式より鉛直たわみモードガスト応答に関連する因子として次のものが挙げられる。

構造系；振動モード，固有振動数，単位長さあたりの橋桁質量，中央径間長，構造減衰定数，橋桁幅員

自然風；空気密度，橋軸直角方向水平成分の平均風速，変動風速のパワースペクトル，空間相関係数

空力特性；空力アドミッタンス，構造軸に関する揚力係数および揚力勾配，空力減衰

3.2. 各因子の影響度の検討

多くの長大橋梁の橋桁で見られるような，迎角0°付近では構造軸に関する揚力勾配は揚力係数に比べて大きいという関係を用いると，(2)式および(3)式より近似的に次の比例関係が得られる。

$$\sigma_\eta(x) \propto \frac{dC_F}{d\alpha}\cdot I_w \cdot U^2 \cdot f_1^{-2} \cdot m^{-1} \qquad (5)$$

さらに，(2)式および(3)式から直ちにはその影響度を把握できない因子についてこれを調べるために，また(5)式に示された関係を確めるために，数値計算を行った。これより各因子の影響度は次のように評価される。

振動モード；両端ピンの場合と両端固定の場合とでσ_ηは高々10%程度の差である。

固有振動数； $\sigma_\eta \propto f_1^{-2.0}$

単位長さあたりの橋桁質量； $\sigma_\eta \propto m^{-0.8\sim-0.9}$

中央径間長； $\sigma_\eta \propto L^{-0.3}$

構造減衰定数；橋桁断面の空力減衰を実際の断面として考えられる範囲で小さく設定した場合，δ_sを0.003から0.03まで変化させたときのσ_ηの変化は高々10%程度である。

橋桁幅員； $\sigma_\eta \propto B^{0.6}$

空気密度；架橋現場における空気密度の変化は小さいと考えられるので無視する。

橋軸直角方向水平成分の平均風速； $\sigma_\eta \propto U^{2.1\sim2.3}$

変動風速のパワースペクトル；パワースペクトルの大きさとして乱れ強さを，形状としてはPanofsky&McCormick, Busch&Panofsky, Singer, Busch&Frizzolaらの式を考えたが[4]，I_uとI_wを一定の比のもとで変化させたときは，$\sigma_\eta \propto I_w^{1.0}$，また形状がおよぼす影響は高々10%程度であることが明らかとなった。

空間相関係数および空力アドミッタンス；両者とも適切に設定することが困難であり，しかもとくに空力アドミッタンスがσ_ηに与える影響は小さくない。ここではこれらは定数を決めるときにその影響を考慮した。

揚力勾配； $\sigma_\eta \propto \left(\frac{dC_F}{d\alpha}\right)^{0.8\sim0.9}$

空力減衰；橋桁断面の非定常空気力係数の測定値と(4)式とを比較すると，多くの測定値はγ=0.5～1.0の間にあるが，δ_s=0.003においてγ=0.5～1.0の間で変化させたときσ_ηの変化は10～20%であった。

以上の結果から，べき指数を丸め影響の小さな因子を無視することにより式(1)の関数形が定まる。

3.3 定数の設定

関門橋，末広大橋および平戸大橋において観測されたデータ，およびWest Gate橋において3次元実験により得られたデータ[3]を(1)式に代入し，(1)式の定数の値を逆に求めると，関門橋の場合0.047，末広大橋の場合0.032，平戸大橋の場合0.039，West Gate橋の実験値の場合0.026～0.059となり，定数の値としては0.03～0.06が適当と考えられる。なお関門橋および末広大橋のデータは，I_w=0.10付近のものを$\sigma_\eta \propto U^2$と仮定して求めた近似式の形で用いており，平戸大橋のデータは観測されたデータの内Uが最大のものを用いた。

参考文献　1)成田・佐藤；第5回構造物の耐風性に関するシンポジウム，2)成田・佐藤；土木学会第34回年次学術講演会，3)J. D. Holmes；Proc. 4th Int. Conf. on Wind Effects on Bldgs. and Sts.，4)岡内・伊藤・宮田；耐風構造