

I-A 178 空気力の非定常性と空間相関を考慮したガスト時刻歴応答解析

京都大学工学部 正会員 陳 新中
京都大学工学部 正会員 松本 勝

1. まえがき 長大橋のガスト応答特性を解析的に検討する際に、空気力の非定常性及び空間相関特性を考慮する必要がある。周波数領域解析法では、それらを非定常空気力係数と空力アドミッタンス関数及び空間修正関数で表すが、従来の時刻歴応答解析法では、空気力を準定常理論で評価し、その空間相関を考慮しないことが多い[1]。そこで、本研究は空気力の非定常性と空間相関を考慮したガスト時刻歴応答解析法を提案し、それを用いて長大吊橋を対象に解析を行い、周波数領域解析の結果と比較し、その有効性を考察する。

2. 解析手法 ピッチングモーメントの定式化を例とする。橋軸方向座標 x にある単位長さの断面に作用する周期振動による自励空気力 $M_{se}(x, t)$ と、周期変動風速による強制空気力 $M_b(x, t)$ は次のように表される。

$$M_{se}(x, t) = \frac{1}{2} \rho U^2 (2b^2) \left[-k A_1^* \frac{\dot{h}}{U} + k A_2^* \frac{b \dot{\alpha}}{U} + k^2 A_3^* \alpha - k^2 A_4^* \frac{h}{b} + k A_5^* \frac{\dot{p}}{U} + k^2 A_6^* \frac{p}{b} \right] \quad (1)$$

$$M_b(x, t) = \rho U^2 (2b) \left[C_M X_{Mu} \frac{u(x, t)}{U} + \frac{1}{2} \frac{dC_M}{d\alpha} X_{Mw} \frac{w(x, t)}{U} \right] \quad (2)$$

そして、ある長さの要素に作用するピッチングモーメント $M_{sei}(t)$, $M_{bi}(t)$ は、要素内の空気力の空間相関を考慮して、要素中心に作用した単位長さの空気力 $M_{se}(x_i, t)$, $M_b(x_i, t)$ で次のように与えられる。

$$M_{sei}(t) = J_{sei}(ik) M_{se}(x_i, t) \quad M_{bi}(t) = J_{bi}(ik) M_b(x_i, t) \quad (3)$$

ここに、 ρ : 空気密度、 U : 平均風速、 $B = 2b$: 桁幅、 $k = \omega b/U$: 無次元振動数、 ω : 円振動数、 $A_i^*(i = 1 \sim 6)$: 非定常空気力係数、 $h, p, \alpha, \dot{h}, \dot{p}, \dot{\alpha}$: 断面の鉛直変位と水平変位とねじれ変位及び相応した速度、 C_L, C_D, C_M : 静的空気力係数、 $u(x, t), w(x, t)$: 主流方向と主流鉛直方向の変動風速、 X_{Mu}, X_{Mw} : 空力アドミッタンス関数、 J_{sei}, J_{bi} : 空間修正関数。

単位長さの自励空気力と強制空気力は、それぞれ構造系応答と変動風速をあるシステムを通した出力として捉えられる。これらのシステムの周波数応答関数はそれぞれ非定常空気力係数と空力アドミッタンス関数で定義される。また、要素に作用した空気力も、要素中心に作用した単位長さの空気力を、空間修正関数で定義した周波数応答関数を持つシステムを通した出力として考えられる。さらに、これらの周波数応答関数 $H(ik)$ は次のような有理関数近似式の形で表示できる[2]。

$$H(ik) = Q_1 + Q_2(ik) + \sum_{j=1}^m \frac{Q_{j+2} ik}{ik + R_j} \quad (4)$$

ここに、 $Q_1, Q_2, Q_{j+2}, R_j (R_j \geq 0; j = 1 \sim m)$: 定数。それらの値は式(4)の計算値と $H(ik)$ の実測値とは最も一致するように最小自乗法で決定される。

そこで、例えば、任意振動 $\alpha(x, t)$ による $M_{se\alpha}(x, t)$ は、次のようになる。

$$M_{se\alpha}(x, t) = \frac{1}{2} \rho U^2 (2b^2) \left(Q_1 \alpha(x, t) + Q_2 \frac{b}{U} \dot{\alpha}(x, t) + \sum_{j=1}^m Z_j(x, t) \right) \quad (5)$$

$$\dot{Z}_j(x, t) = -R_j \frac{U}{b} Z_j(x, t) + Q_{j+2} \dot{\alpha}(x, t) \quad (j = 1 \sim m) \quad (6)$$

ここに、 $Z_j(x, t) (j = 1 \sim m)$: 補助変数、 $H(ik) = k^2 (A_3^* + i A_2^*)$

同様に、他の自励空気力と強制空気力成分も相応した構造系応答と変動風速から与えられる。本解析では、変動風速の時刻歴をそのパワースペクトルと空間相関特性に基づいて、多次元 AR モデルでシミュレートする。そして、構造系時刻歴応答を求めるには自励空気力時刻歴とのフィードバックが必要である。

本研究が提案した方法では、無次元振動数に依存した空気力の非定常特性を式(4)に示した有理関数式で表示することはポイントである。Fig.1 と Fig.2 は非定常空気力係数 A_2^* と空力アドミッタンス関数の有理関数近

似の一例である。有理関数の項数は $m=2$ とする。 $B/D=5$ と $B/D=20$ の矩形断面の A_2^* の実測値は風洞実験より求めたものである [3]。式 (4) に示した有理関数式は鈍い橋桁断面にも適用できることが確認できた。

3. 解析結果 中央径間 2000m 級の長大吊橋を例とする。変動風速のパワースペクトルとコヒーレンスはそれぞれ Von Karman 式と Karman 型指数関数で与える。橋桁部分の空気力のみを考慮し、静的ねじれ変位による橋軸方向の空気力特性の変化を無視する。15 次固有モードまで考慮したフラッター解析の結果より平均風速 69.3m/s から連成フラッターが生じる [4]。平均風速 60m/s における中央径間 $L/2$ 点の変動風速と空気力及びガスト応答の時刻歴の一例を Fig.3 ~ Fig.6 に示す。また、平均風速 70m/s 時の応答の一例を Fig.7 に示す。周波数領域解析と時刻歴解析による中央径間 $L/2$ 点のねじれ変位 RMS 値の比較を Fig.8 に示し、両者の結果はかなり一致していることがわかる。

4. 結論 本研究は、換算振動数に依存した空気力の非定常性及び空間相関特性を有理関数近似式で表示し、従来の周波数領域解析法と同様に空気力の非定常性と空間相関を考慮できるガスト時刻歴応答解析法を新たに提案した。本研究が提案した解析法は、準定常空気力を用いた従来の解析よりは、実構造物の挙動を精度良く予測できることが期待できる。

謝辞 本研究に御協力を頂いた京都大学工学部助手白土博通氏に感謝する。

参考文献： [1] G. Diana, F. Cheli, S. Bruni, G. Larose, Apsowe3 Symposium, Hong Kong, 1993

[2] Karpel, M., Journal of Aircraft, Vol.19, No.3, 1982

[3] 松本 勝, 新原雄二, 小林裕輔, 構造工学論文集, 1994 年

[4] 松本 勝, 陳 新中, 白石成人, 第 13 回風工学シンポジウム論文集, 1994 年

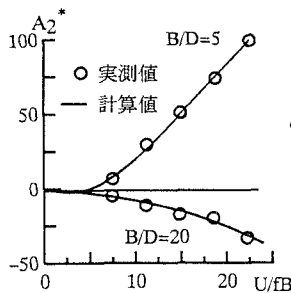


Fig.1 A_2^* の有理関数近似

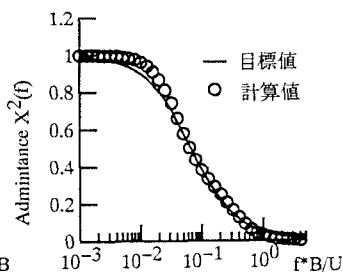


Fig.2 Sears関数の有理関数近似

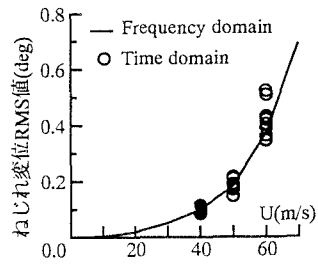


Fig.8 異なる解析法の比較

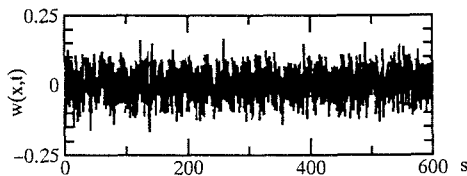


Fig.3 主流鉛直方向変動風速 $w(x,t)$ ($U=60\text{m/s}$)

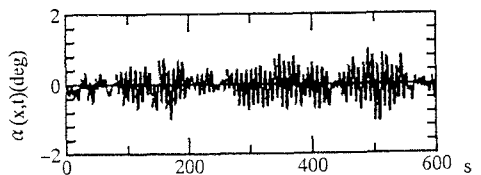


Fig.6 ねじれ変位時刻歴 ($U=60\text{m/s}$)

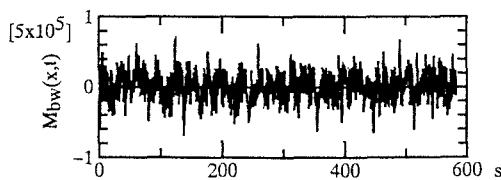


Fig.4 $w(x,t)$ による強制モーメント ($U=60\text{m/s}$)

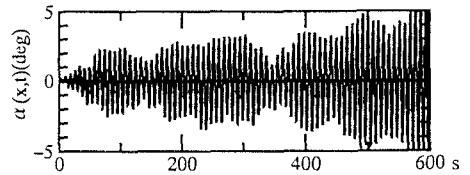


Fig.7 ねじれ変位時刻歴 ($U=70\text{m/s}$)

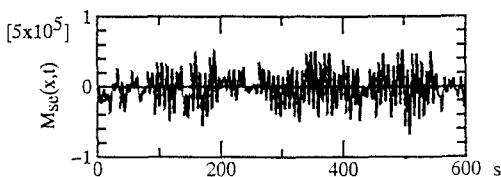


Fig.5 非定常自励モーメント ($U=60\text{m/s}$)