

I-B338 有限次数近似モデルに基づく橋桁の非定常空気力の同定

名古屋工業大学 正員 岩本政巳 東京大学 フェロー 藤野陽三

1 はじめに

自由振動法に基づく橋桁の非定常空気力の同定では、振動数の関数である空気力係数の一意性¹⁾、空気力モデルにおける調和振動仮定^{2),3)}の問題があった。本研究では、その係数パラメータが振動数に依存しない一般振動下の空気力モデルである、有限次数近似モデルを基礎とする非定常空気力の同定手法⁴⁾について、その定式化と2種類の評価関数を示すとともに、その適用性を数値シミュレーションにより検討する。

2 非定常空気力および運動方程式

風速 U の気流中で桁幅 B の2次元橋桁が鉛直たわみ z 、ねじれ θ の2自由度で自由振動しているときの運動方程式は、非定常空気力の有限次数近似モデルを用いて次式で表される。

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = \gamma \left(A_0 q + \frac{B}{U} A_1 \dot{q} + \sum_{\ell=1}^{n_\ell} X_\ell \right), \quad \frac{B}{U} \dot{X}_\ell = -\lambda_\ell X_\ell + A_{\ell+1} q, \quad \gamma = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2, \quad \ell = 1, \dots, n_\ell \quad (1a-c)$$

ここに、 $q = \{z/B \quad \theta\}^T$ は無次元変位ベクトル、 M 、 C および K は各々一般化質量、減衰および剛性マトリクス、 ρ は空気密度、 A_0 、 A_1 、 $A_{\ell+1}$ および λ_ℓ は非定常空気力マトリクスおよびパラメータ、 X_ℓ は補助変数ベクトル、 n_ℓ は近似モデルの次数である。式(1)の解は $q = q_0 e^{st}$ (q_0 : 複素振幅の初期値、 s : ラプラス変換パラメータ、 t : 時刻) で表されるから、これを式(1)に代入し整理すると次式を得る。

$$F \cdot q_0 = 0, \quad F = \left(s^2 M + sC + K \right) - \gamma \left(A_0 + \bar{s} A_1 + \sum_{\ell=1}^{n_\ell} \frac{1}{\lambda_\ell + \bar{s}} A_{\ell+1} \right), \quad \bar{s} = \frac{Bs}{U} \quad (2a-c)$$

3 係数パラメータの同定と評価関数

本手法は基本的には文献4)と同一であり、文献1)とも同様の手順で実施する。まず第1段階として、風洞実験結果である自由振動波形からモード特性 s 、 q_0 を抽出する。次に第2段階として、得られたモードデータ群から有限次数近似モデルの係数パラメータ A_0 、 A_1 、 $A_{\ell+1}$ および λ_ℓ を同定する。これらはモードデータに依存しない定数パラメータであるから、データ群全体から一括同定することとなる。指針となる評価関数として、本研究では次の2つを用いた。

$$J_1 = \sum_{j=1}^n w_j \|F_j \cdot q_{0,j}\|^2, \quad J_2 = \sum_{j=1}^n \left(w_{s,j} |s_j - s_{M,j}|^2 + w_{\phi,j} |\phi_j - \phi_{M,j}|^2 \right), \quad \phi = \begin{cases} B\theta_0/z_0 & (\text{鉛直たわみモード}) \\ z_0/B\theta_0 & (\text{ねじれモード}) \end{cases} \quad (3,4a,b)$$

ここに、 ϕ は複素モード形 q_0 の鉛直たわみ、ねじれ各成分の比、 w は重み係数、 n はモードデータの数である。また、添え字の M は仮定した未知パラメータによって得られるモデル出力を表す。評価関数 J_1 は文献4)と同様すべてのモードデータが式(2)を満たすことを利用したもの、 J_2 は得られたモードデータ群に対し直接最小2乗法を適用したものである。

有限次数近似モデルは一般振動下の空気力モデルであり、その係数パラメータは振動数、減衰といった振動状態や風速に依存しない。したがって、空気力係数同定における一意性の問題は発生せず、高風速時の鉛直たわみモードといった減衰の大きい自由振動波形に適用しても整合性は保たれる。また、鉛直たわみ、ねじれ各モードデータ数が異なってもよい、モードデータ群を無次元風速(無次元振動数)ごとに再整理する必要がないといった、計算作業上の利点も有している。

表1 シミュレーション諸元⁵⁾

空気密度 ρ	1.2 [kg/m ³]
桁幅 B	0.2927 [m]
単位長さ質量	4.82 [kg/m]
単位長さ極慣性	0.0486 [kg·m ² /m]
鉛直たわみ振動数	2.82 [Hz]
ねじれ振動数	5.23 [Hz]
鉛直たわみ対数減衰率	0.0100
ねじれ対数減衰率	0.0187
フラッター発振風速	19.4 [m/s]
無次元発振風速	16.9

キーワード: 橋桁, 同定, 非定常空気力, 有限次数近似モデル

連絡先: 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町 TEL/FAX 052-735-5495

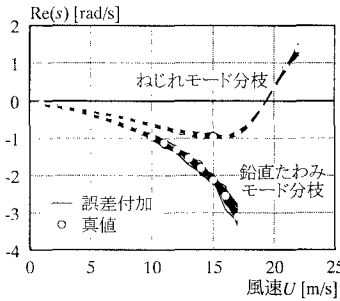


図1 シミュレートした s の実部

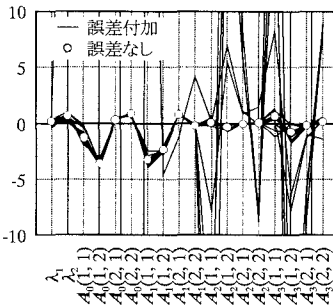


図2 係数パラメータ同定値 (J_1)

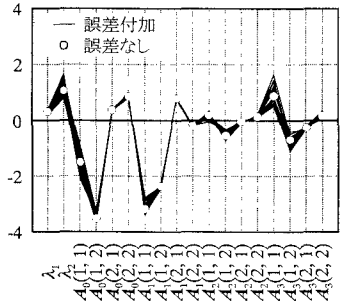


図3 係数パラメータ同定値 (J_2)

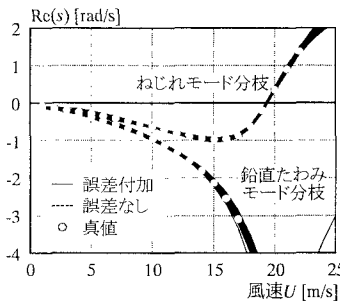


図4 再現した s の実部 (J_1)

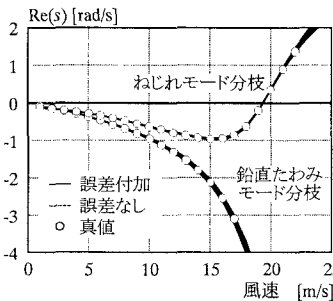


図5 再現した s の実部 (J_2)

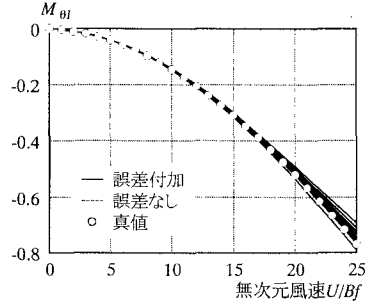


図6 再現した空気力係数例 (J_2)

4 数値シミュレーション

平板翼空気力の作用する2次元橋桁を対象に、数値シミュレーションを行った。ここでは第2段階のみを対象とし、数値的に作成したモードデータ群を観測データとして係数パラメータを同定した。橋桁(模型)の構造諸元は文献 5) を参考に表1のとおりとした。モードデータは一般 Theodorsen 関数²⁾を用いて作成した。風速の刻みは 1m/s とし、鉛直たわみ、ねじれのデータ数は各々 17, 22, 計 $n=39$ と定めた。無次元風速 $\bar{U} = U/Bf$ (f : 振動数) の上限は、両モードともに 20 程度である。この基本データに観測誤差を付加したデータを 20 組作成し、それぞれについて修正 Levenberg-Marquardt 法により同定を行った。観測誤差は、その標準偏差が各データ値の 5% (s の虚部は 0.5%) となる正規乱数で与えた。また、同定時のモデル次数は $n_t = 2$ とした。 s の実部(減衰)について、20 組のデータ群をまとめて図1に示す。評価関数 J_1 においては q_0 の代わりに ϕ を用い、重みは特に与えていない。 J_2 における重み係数は、次元の異なる各項のオーダーをそろえるため、4つの項それぞれに対しその観測値の逆数の2乗で与えた。

係数パラメータ同定値を図2, 3に示す。 J_1 を用いた結果(図2)にはかなりばらつきがあることが分かる。同定の安定性も比較的低く、 $\lambda_1 (< \lambda_2)$ が負となるもの、 λ_1 と λ_2 の値が近接したものもあった。これらの係数同定値から式(1)を用いて再現した s の実部(減衰)を図4, 5に示す。モード情報に関しては、評価関数によらず良好な再現性があることが分かる。図に示していない他のモード情報についても同様の結果が得られている。ただし、 J_1 を用いた再現値においては、観測領域を越える高無次元風速域で物理的に意味のない振動モード(複素固有値解)が現れるケースがいくつかあった。図6 (M_{BI} , 調和振動)に示すように、非定常空気力係数についても概ね良好な再現結果が得られた。

5 おわりに

有限次数近似モデルを用いた非定常空気力の同定には、係数同定の一意性問題が発生しない、一般減衰振動を考慮するといった利点があることが確認できた。評価関数については、 J_2 の方がやや優位性が高いと考えられる。

参考文献 1) 山田ほか: 送風時の振動モード情報を利用した非定常空気力推定法の開発, 土木学会論文集, No.537/I-35, 1996.

2) 岩本, 藤野: 一般振動下の非定常空気力を用いた橋桁のフラッター解析, 土木学会論文集, No.598/I-44, 1998.

3) 佐伯ほか: 一般化非定常空気力測定のためのアクティブ制御応用に関する基礎研究, 土木学会第51回年次講演会, 1-(A), 1996.

4) Xie: CVR method for identification of nonsteady aerodynamic model, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **29**, 1988.

5) 岩本ほか: 2つのモードからなる自由振動波形を用いた橋桁の非定常空気力係数の同定, 第12回風工学シンポジウム論文集, 1992.