

千葉県 正員 的場 純一
 東京大学 正員 宮田 利雄

1. まえがき 可塑性に富む構造物は不規則な乱れた気流の自然風中におかれると種々の空力弾性振動を示すが、これらの応答観測結果から空力特性を求めることはこの種の問題を理解する上できくめて有意義なことであろう。本報は空力弾性振動の応答時系列から空力特性を求めようとする際の振動現象のモデル化に適用すべき解析法の適用性について論じようとしたものである。

ところで、今日、構造工学の分野における構造特性を解析する手法としての時系列解析は、主として、定常現象に關するものである。これは時系列を周波数領域で解析しようとする限り、避けられない制約条件であると考えねばならず、最近用いられている非定常スペクトル解析等もこの制約条件を免れ得ない。しかし、自然風中の空力弾性振動に限ってみても、自励振動的挙動が見られる応答、あるいは風速変動でさえも詳細にみればその時系列は非定常性が顕著である。この意味で、任意の時系列について時間軸上に於いて解析でき、しかもそれと周波数軸上との対応がつけらるならば、より適用範囲の広い手法となるであろう。このような視点に立って、情報処理の分野で開発された線形システム理論を用いて、乱れた自然風中の空力弾性振動現象をモデル化し、その特性を推定、考察することとする。

2. モデル化と解析法 対象とする空力弾性振動としては、本州四国連絡橋公団による部分実験橋計画における取得データ^{*}の中から、種々わめ振動と揺れ振動（揺れフラッタ）のほぼ定常状態にある場合と散散している場合）を用いることとした。これらの振動を表わすモデルとして、振動変位による自励力と変動風速による強制力が作用するもの従来の考え方にしたが、このうち、強制成分は周波数に依存する量であるとして、時間軸上ではインパルス応答関数を用いた、たたみ込み積分で表わしてみた。すなわち、

$$\ddot{Y} + J\dot{Y} + KY = L_1 \int_0^{T_1} h_1(\tau) u(t-\tau) d\tau + L_2 \int_0^{T_2} h_2(\tau) w(t-\tau) d\tau \quad (1)$$

ここで、 u , w は変動風速の水平、鉛直方向成分、 $h(\tau)$ はインパルス応答関数、 J , K は振動変位による自励力成分を含む係数、 L は定数である。このとき、変動風速から力への変換関数である周波数軸上の空力アドミタンスが $h(\tau)$ をフーリエ変換することにより求められる。ところで、左辺の係数 J , K 、特に J は定常振動を示すか、あるいは自励振動が散散する過程にあるような非定常振動を示すかによって本質的に複雑化、すなわち、換算風速、振動振幅に依存する特性を持つているが、ここではとりあえず定数として扱っている。

このようにモデル化した振動方程式を、システムの内部記述表示としての離散時間状態方程式で表わし、最小次元実現条件を考慮して正準型から最終的に自己回帰移動平均モデル（ARMAモデル）に変換する。すなわち、

$$y_k = p_1 y_{k-1} + p_2 y_{k-2} + p_3 u_{k-1} + \cdots + p_{M+4} u_{k-M-2} + p_{M+5} w_{k-1} + \cdots + p_{2M+6} w_{k-M-2} \quad (2)$$

観測された時系列にこのARMAモデルをあてはめ、そのパラメータ p_i を求めることにするが、パラメータの同定手法としては、最小二乗法推定、この欠点である不偏性を満足する補助変数法（I.V.法）推定、カルマン・フィルタによる推定法を用いる。最後のカルマン・フィルタ法はサンプリング間隔 Δt にパラメータが推定されるので、時間変化するパラメータの場合には有効であることが期待された。それゆえの推定法によって推定されたパラメータから応答をシミュレートすることができ、もとの波形との比較から推定された特性、あるいはその時間変化の妥当性が確認できることになる。

3. 実データ解析とその考察

解析対象データとしては、前述のように、減衰項、および固有円振動

数にかかわるパラメータがほぼ一定であろうと推測される場合として、橋たわみ振動(1)と橋めフラックがほぼ一定常状態にある振れ振動(2)の2ケース、さらに、減衰項が振幅依存性により変化するため時間変化パラメータの場合と考える、振れフラックが共振状態にある振れ振動(3)の計3ケースを選んでみる。

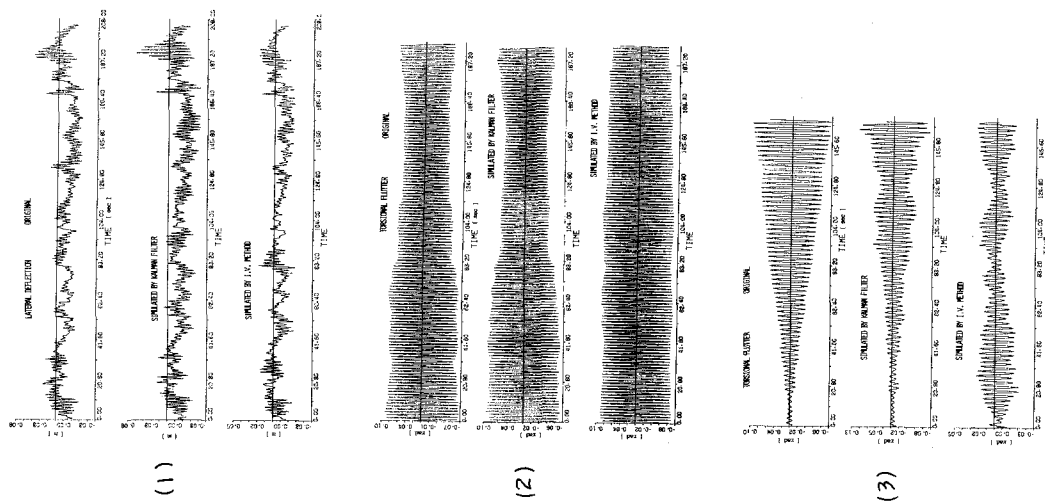
橋たわみ振動の解析結果(1)は、シミュレートされた波形を見ると、補助変数法とカルマン・フィルタによる推定結果ともにその波形と近似しており、これから、減衰項等のパラメータの時間変化は確かに少ないと考えられる。空カアドミッタンスについてみると、最小二乗法による値は固有振動数を越える範囲までほぼ一定(0.7)であったが、カルマン・フィルタ法による値はこれより小さく、各時間ごとに変化する結果が得られた。

橋めフラックをおこなっているケース(2)においても、補助変数法とカルマン・フィルタ法の結果はほぼその波形と近似していた。これは橋めフラックの応答振幅がすでに built-up しており、ほぼ一定常状態を呈しているためであろうと推測される。実データでは変動風速によるものと考えられる、波形にうねりが見られるが、補助変数法による波形にはその影響が見られないのに対し、カルマン・フィルタ法による波形にははっきりと現れられており、この点で前者の方が有意と云い得る。

上の2ケースに比べ、共振状態にあるデータ(3)の解析では、当初予想したように、補助変数法による推定結果は現象を近似せず、これに対し、カルマン・フィルタによる推定結果は、一応、実データを近似する結果が得られた。このとき、カルマン・フィルタによる減衰項の推定結果には確かに時間変化が見られ、パラメータが振幅に依存して変化していると考えられたが、値そのものは正であった。他方、空カアドミッタンスの時間変化も前の2ケース以上に激しく、共振状態におけるパラメータ同位において、自励力成分と強制力成分の各々の寄与の判別が正しく行ない得ていないのが疑問が持たれた。

4. おわりに

以上の解析結果から非定常時系列に対する同定法としてのカルマン・フィルタ法が、振幅依存の非線形性にもめつ場合をも含む時間変化パラメータの推定に有効であることが期待されるが、当初意図した推定の完全自動化という適用性については、(3)のケースの結果をみるに成功しているとは言えない。これには、現象のモデル化、すなわち、振幅依存の非線形性、非定常変動をする風速依存性などの定式化、あるいは同定手法自体の減衰項の推定精度がきわめて敏感であることなどに問題があるためと考えられる。今後、いっそうの研究が必要である。



* 土木学会・本州四国連絡橋公団耐風研究小委員会：本州四国連絡橋の耐風実験橋に関する調査研究報告書
(その1) 昭和52年3月；(その2) 昭和53年3月。