

東京大学 学生員 金崎智樹
東京大学 正 員 宮田利雄

1. ま え か き Tacoma Narrows 橋の崩壊に導いたねじれフラッター現象を代表とする各種の不安定振動は、構造物の耐風性を論ずる上で非常に大きな問題となっている。一例としてねじれフラッター現象を上げれば、空力減衰定数 μ_n がねじれ振幅 ϕ によって変化する非線形性のために起こると考えられる。この不安定振動が自然風のように乱れた気流中で発生すると、その振動応答軌跡は定常的ではなく、不規則に変化する時系列をなす。このような応答軌跡から、その現象を記述する特性値、すなわち空力減衰定数を求めるということは、振幅に対する非線形性、風速の非定常性との関連において容易ではない。定常時系列で線形の場合であれば、パワースペクトルにより減衰定数を推定できるが、この方法では比較的長い時系列データが必要とされ、上のような問題に適用するのは困難であろう。

ところで、時系列解析の分野で開発された自己回帰移動平均 (ARMA) モデルを用いれば、比較的短いデータ長で減衰定数を推定できるということがわかってきた。本報告は、シミュレーションによる乱れた気流中でのねじれフラッターの応答軌跡に ARMA モデルを適用して、空力減衰定数とねじれ振幅との関係を推定し、その手法に検討を加えたものである。推定結果がシミュレーションにおける設定値により近づけば、良い方法と判断できるであろう。なお、シミュレーションでは、固有周期: $T_0 = 5.0 \text{ sec}$ 、サンプリング間隔: $\Delta t = 0.2 \text{ sec}$ とし、空カアドミッタンスは周波数応答関数の形で与えた。

2. 解析手法 一自由度の線形な振動方程式を満足する離散時間時系列データは、次の様な [2, 2] 次の ARMA モデルで表わされる。

$$\phi_i = F_1 \phi_{i-1} + F_2 \phi_{i-2} + G_1 u_{i-1} + G_2 u_{i-2}$$

ただし、 ϕ : 応答出力、 u : 変動風速、 $[F_1, F_2, G_1, G_2]$: 定数

そこで、このモデルに実際測定可能な変動風速 u とねじれ振幅 ϕ の時系列データをあてはめ、係数 $[F_1, F_2, G_1, G_2]$ を決める。これには、最小二乗法により初期値を求め、補助変数法により改善していく方法を取った。これらの係数を振動方程式の各係数に変換することにより減衰定数が求められ、設定値と比較検討することができる。

さて、この手法を非線形な振動方程式の特性パラメータ推定に用いるために、非線形系の応答出力でも、データ長もある程度短かく取れば、その間は線形な出力とみなせると仮定する。ところが、データ長をあまり短かくすると推定誤差が大きくなることから予想されるので、次の様に三段階にかけて、この手法の非線形系の減衰定数推定への適用性を検討していくことにした。

- i) パラメータが一定である線形系の減衰定数を長さの異なるデータで推定し、設定値と比較して固有周期の何倍程度のデータ長で有意な推定が可能であるかということを確認する。(表-1.)

表-1. 線形系の減衰定数の推定値と設定値との比較
() : 推定誤差の標準偏差 ($\times 10^{-4}$)

$N \times L$	0.001	0.003	0.005	0.01	0.02	0.04
16	0.0009 (5)	0.0029 (5)	0.0048 (5)	0.0098 (7)	0.0196 (8)	0.0390 (13)
8	0.0008 (12)	0.0027 (10)	0.0046 (12)	0.0095 (12)	0.0193 (14)	0.0388 (24)
5	0.0009 (20)	0.0029 (17)	0.0048 (22)	0.0103 (30)	0.0194 (24)	0.0380 (32)
3	0.0012 (30)	0.0029 (25)	0.0051 (30)	0.0105 (33)	0.0199 (38)	0.0387 (54)
2	-0.0002 (58)	0.0020 (39)	0.0033 (57)	0.0095 (45)	0.0197 (51)	0.0349 (102)

ii) i)の結果をもとに、簡単な非線形系の例として、減衰定数と応答振幅とが直線的な関係にある場合の推定を行なう。(図-1.)

iii) ねじれフラッター現象のモデルとして一般に用いられている減衰定数とねじれ振幅とが二次曲線の関係にある非線形系の推定を行なう。(図-2.)

3. 結果および考察

i)の結果から、次の二つのことがわかった。

- ・推定値のばらつきの指標である標準偏差は、データ長に反比例する。
- ・一般に、パワースペクトルによる推定では減衰定数が小さくなるに従って推定誤差が大きくなると言われているが、この方法ではそのような傾向は見られな。

これらのことから、固有周期の3倍程度のデータ長で減衰定数を推定できるとであろうという結論に達した。

ii)の結果からは、次の二つのことがわかった。

- ・ARMAモデルのあてはめによる減衰定数推定の特徴として、応答波形が発散状態にある時には設定値よりも小さく、減衰状態にある時には大きく推定される傾向が見られる。
- ・非線形モデルの減衰定数推定においては、線形モデルの時に比べ推定誤差の標準偏差が半減した。これは、発生している不安定振動の振幅変化が比較的小さいためと考えられる。このことを確かめるために設定値の直線の傾きを変化させたところ、直線の傾きが大きくなるに従って推定誤差は小さくなった。

以上のことから、その振幅変化が比較的小さいねじれフラッターを対象とする場合、減衰定数とねじれ振幅との関係を推定するには、データ長が固有周期の3倍程度でも可能と思われる。iii)の結果である図-2.を見れば、前述の仮定による推定がかなりうまく行なわれたことがわかる。

ここでは、非線形系の減衰定数を推定するといっても一定な平均風速のもとで不安定振動を行なう場合だけを取り扱った。今後は、非定常な風速変化をもともなう場合についても検討していくつもりである。

《参考文献》 本州四国連絡橋公団・川崎重工：風の乱れによる吊橋の応答解析，その3・4 (1975)

岡内功・伊藤孝・宮田利雄：耐風構造，丸善出版 (1977)

