

[討議・回答]

岩本政巳 共著
藤野陽三

「有限次数近似モデルに基づく橋桁の非定常空気力 同定の定式化」への討議・回答

(土木学会論文集, No. 647 / I-51, pp. 205-216 2000年4月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

頭井 洋 (摂南大学)

Hiroshi ZUI

本来、無次元振動数(その逆数としての換算風速)の関数である非定常空気力を、断面形状のみに依存する定数パラメータを用いて、直接風速で表示できる有限次数近似モデルは、連成フラッタ解析の有効な手段になると考えられる。その実用化のための問題点を整理し、一般振動下での適用性を数値シミュレーションにより検討された研究は、これまで無次元振動数をパラメータとして変化させる必要があった3次元連成フラッタ解析の労力を大幅に低減できる可能性があり、非常に興味深い。

本手法の適用性は、同定に用いる評価関数や有限次数近似モデルの採用次数にも依存すると考えられる。提案された手法を適用するうえで、注意を払うべき項目に関して以下の質問に対する著者らの見解を伺いたい。

1) 無次元振動数の関数として非定常空気力を整理すれば、鉛直たわみ振動とねじれ振動の2自由度モデルの場合で、一つの無次元振動数に対する係数パラメータは、8個になるので無次元振動数を少ない5個としても合計40個になる。有限次数近似モデルの精度は近似次数に依存するが、非定常空気力係数から有限次数近似モデルの係数パラメータを同定する著者らの前論文¹⁾では、偏平箱桁で2次、トラス断面で3次まで採用すれば精度よく空気力を同定できると報告されている。係数パラメータは2次まで採用した場合計18個ですみ、近似次数を3次まで採用したとしても、係数パラメータは計23個になり、かなり少ない。従来の3次元連成フラッタ解析では、無風時の実固有値解析より得られる振動モードでフラッタモードを表現したモード解析や3次元有限要素モデルの節点外力に直接空気力を作用させて複素固有値解析を行う直接解法などがあるが、いずれの場合も無次元振動数をパラメータとして変化させた解析を行う必要がある。非定常空気力に平板空気力を用いるとして、計18個ないし計23個の係数パラメータで有限次数近似し、風速

のみを変化させて3次元連成フラッタ解析を行った場合、無次元振動数の関数としての理論空気力を用いる従来法と同精度の結果が得られると考えてよいのでしょうか。

2) 同定に用いる観測データセット群として、関連する同定パラメータに対応した鉛直たわみとねじれおよび連成モードがバランスよく含まれているのが望ましいと思われるが、実験結果によっては得られる振動モードに偏りがある場合も考えられる。無次元振動数が必要な範囲をカバーしていれば、観測データセット群の振動モードの中に連成モードが複数個以上含まれていれば、原理的に同定可能と考えられる。精度のよい同定を行うため、誤差の少ない測定データを採用するのは当然として、鉛直たわみとねじれおよび連成モードのそれぞれが含まれていれば採用モードの組み合わせは任意でかまわないと考えてよいのでしょうか。

3) 評価関数 J_1 を用いた場合、同定された非定常空気力の有限次数近似した係数パラメータの推定値の中に大きな変動があるにもかかわらず、変動誤差を含む同定した結果から再現したモード情報(図-8, 9)や調和振動状態の非定常空気力(図-10, 11)のうちフラッタ特性に対する高い影響感度の係数の精度は良好である。このことから、評価関数 J_1 を用いて同定された有限次数近似の非定常空気力係数により連成フラッタ解析を行う場合でも、評価関数 J_2 を用いて同定された非定常空気力係数によりフラッタ解析を行う場合とほとんど等しい発振風速が得られると考えてよいのでしょうか。

参考文献

- 1) Wilde, K., Fujino, Y. and Masukawa, J.: Time domain modeling of bridge deck flutter, 土木学会論文集, No. 543 / I-36, pp. 19-30, 1996.

(2000.8.25 受付)

1. はじめに

原論文は、自由振動法による風洞実験結果から有限次数近似モデルに基づく非定常空気を直接同定する手法について、その定式化を示すとともに、数値シミュレーションによる適用性の検討を行ったものである。有限次数近似モデルは、風速や振動数に依存しない有限個の係数パラメータによって特徴づけられた、一般振動下の非定常空気力モデルである。そのため本手法では、自由振動法に基づく空気力同定に関して議論されてきた、同定一意性の問題は理論的に起こり得ない。また、高風速時の鉛直たわみモード分枝等の大減衰の振動データに対しても、整合性のある空気力同定が行える。

ただし、無次元風速 (振動数) の関数としての非定常空気力係数を1点ずつ求める従来の方法とは基本的に異なるため、本手法を風洞実験結果に対して適用し、さらにその結果からフラッター解析を行うに当たっては、いくつかの点で注意を払う必要がある。そうした適用上の注意点についての質問事項に対して、ここに回答し補足説明を行う。

2. 討議について

(1) 有限次数近似モデルを用いたフラッター解析の精度について

有限次数近似モデルに基づく非定常空気力を用いてフラッター解析を行う際には、2つの点に注意する必要がある。

まず第1に、有効な無次元風速域に関するものである。有限次数近似モデルのもとでは、非定常空気力係数は無次元風速の陽な関数として表される。そのため、空気力同定に使用したデータセット群を越えた無次元風速域に対しても、非定常空気力係数値を与えることができる。しかし、そうした領域での精度は当然ながら保証されない。よって、本手法により得られた係数パラメータを使って応答解析を行う際には、有効な無次元風速域を逸脱しないよう注意する必要がある。

第2に、有限次数近似モデルの精度評価に関するものである。同モデルのような一般振動下の空気力は、高減衰領域において従来の調和振動を前提とする空気力とは異なる解析結果を与える¹⁾。有限次数近似モデルの近似誤差をフラッター解析結果の比較を通じて行

うのであれば、このことを考慮する必要がある。

これらを念頭に置いて、多モードフラッター解析結果例²⁾を見てみる。中央径間2500mの吊橋設計案をもとに立体骨組モデルを構築し、平板翼空気力を用いて解析を行ったものである。有限次数近似モデルの次数は2とし、著者の一人らの非線形最適化手法³⁾⁴⁾による推定値を用いている。解析においては、この推定値における有効な無次元風速域を逸脱しないよう留意した。比較のため、調和振動下の空気力を用いた振動数領域の解析をあわせて行った。解析ケースは表-1に示す3ケースである。ケース1は鉛直たわみ、ねじれの基本2モードによる解析、ケース2は40次までの多モード解析である。またケース3は、ケース2の発振時にその振動成分の割合が大きかった、主要6モードで解析を行ったものである。

ケース1におけるフラッターモード分枝の風速-減衰曲線を図-1に示す。風速が上昇し、フラッターモード分枝の空力減衰が大きくなるにつれ、近似モデル、振動数領域の解析結果の差異は増大する。これは主に、空気力および運動方程式の定式化において前提としている振動状態が異なることに起因している。有限次数近似モデルの近似誤差による影響は、文献1)で論じているように非常に小さい。

調和振動状態にあるフラッター発振時には振動状態の差異は解消される。よって、発振風速については振

表-1 解析ケースとフラッター発振風速

ケース	考慮するモード	発振風速 [m/s]	
		近似モデル	振動数領域
1	基本2モード	58.0	58.0
2	1~40	61.5	61.4
3	基本6モード	61.4	61.3

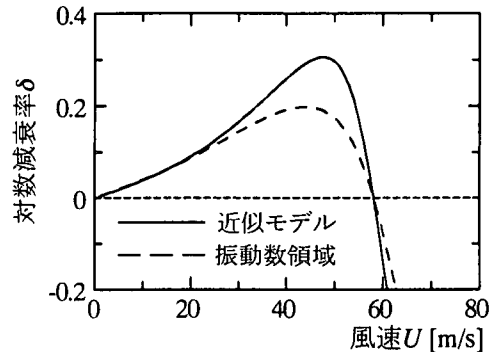


図-1 風速-減衰曲線 (ケース1)

動数領域の解析結果が厳密解となるが、表-1に示されるとおり、すべてのケースにおいて近似モデルもほぼ一致した結果を与えている。

以上のように、その係数パラメータが適切に決定された有限次数近似モデルは、平板翼空気力に関してかなり高い精度の空気力を与える。フラッター解析の精度も、その自由度数を問わず高かった。ただし、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、調和振動下の空気力を用いた従来法とは高減衰領域で異なる結果を与えることには注意を払う必要がある。

(2) 同定における採用モードの選択方法について

風洞実験結果からの空気力同定⁵⁾を例に挙げながら、モードデータの選択について述べる。

本実験は、ある偏平箱桁模型（桁幅 $B=0.293\text{ m}$ ）を対象に行ったものである。表-2に示すように、模型の質量と極慣性を変化させた4ケースについて、実験を行っている。

採用するモードデータの選択は、図-2に示す例のようにデータセット群をケースごとにグラフ表示しながら行った。図に示しているのは、振動数および減衰を表すラプラス変換パラメータ s の実部および虚部の

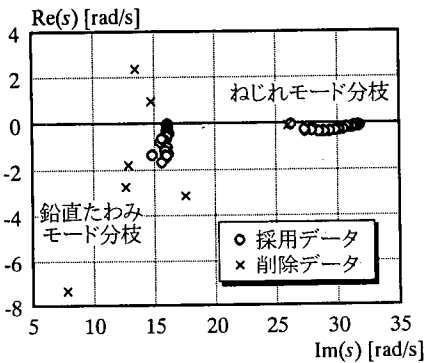


図-2 データチェック状況例（ケース4）

プロット例である。また、図中の×印は不採用の削除データを示している。

この選択作業で基準としたのは、データの連続性のみである。1回の計測から得られた鉛直たわみ、ねじれモード分枝に関するデータセットは独立のものとして取り扱っており、その片方だけを採用するケースも多々あった。これに起因して、各モード分枝間で採用データセット数に偏りが生じる可能性もあったが、その点については特に注意を払わなかった。表-2には採用した各モード分枝のデータセット数とその比を合わせて示してあるが、その傾向はケースごとにかなりばらついていることが分かる。

こうして得られた4ケースのデータセット群から、2種類の評価関数を用いて空気力の同定を行ったが、採用データセット数に起因するような問題は特に生じていない。よって、鉛直たわみ、ねじれ各モード分枝のデータセット数や無次元風速域が極端に偏ることがない限り、採用モードの選択はかなり自由に行つてよいと考えられる。

(3) 評価関数の差異がフラッター解析結果に及ぼす影響について

フラッター解析結果に及ぼす影響を考える前に、原論文および文献5)で用いた2つの評価関数の特徴を整理しておきたい。

評価関数 J_1 は、すべてのデータセットが運動方程式を満たすことを利用したものであり、未知パラメータに関する陽な関数として与えられる。よって、数学的な扱いは比較的簡潔である。評価の対象がモード情報の混在する非線形関数となるため、推定誤差の物理的意味が不明瞭とはなるが、評価関数内の各項の次元は同一であり、そのオーダーもおおのずとほぼ一定のレベルに落ち着く。同定の自由度が低くなる代わりに、重み係数に特別の注意を払う必要がないという利点もある。ただし、係数パラメータ同定値のばらつきが大

表-2 風洞実験ケース

		ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
質量 [kg/m]		3.35	4.19	4.82	4.19
極慣性 [kg·m ² /m]		0.0338	0.0423	0.0486	0.0612
固有振動数 [Hz]	たわみ	2.58	2.57	2.82	2.55
	ねじれ	5.22	5.13	5.23	5.06
対数減衰率	たわみ	0.0217	0.0306	0.0100	0.0172
	ねじれ	0.0235	0.0303	0.0187	0.0182
発振風速 [m/s]		15.5	17.6	18.9	19.5
同定に使用したデータセット数	たわみ	11	28	28	28
	ねじれ	15	39	31	34
	たわみ/ねじれ	0.73	0.72	0.90	0.82

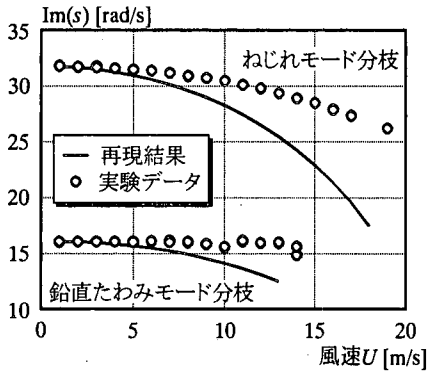


図-3 誤差の大きい再現結果例 (ケース4)

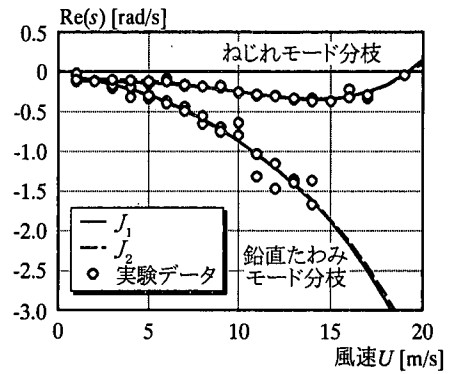


図-4 実験データの再現結果例 (ケース4)

さい、場合によっては係数パラメータ λ の推定値が近接するなど、同定の安定性は比較的低い。

一方評価関数 J_2 のもとでは、実験によって得られたモード情報そのものに関する2乗誤差を最小とすることとなる。同定の意味は明快であり、各モード情報の重要度や信頼度に応じて重み係数を変化させるといった、自由度の高い同定も可能となる。しかし、 J_2 内部には次元の異なるモード情報に関する項が混在しており、そのオーダーも異なる。そのため、重み係数の設定をある程度適切に行わないと、比較的大きな再現誤差が生じる可能性もある。

事実、前項でも述べた文献5)の風洞実験データについての同定では、原論文の数値シミュレーションと同じ重み係数を用いると、図-3に示すラプラス変換パラメータ s の虚部(振動数)の例のように、かなり大きな再現誤差が生じた。そのため、 J_2 の重み係数を最尤法の考え方に基いて再設定した上で、同定を行っている。これにより、図-4に示す s の実部(減衰)の例のように、 J_1 と同様の良好な再現結果が得られた。

著者らが行った数値シミュレーションおよび実験結果からの同定ではいずれも、同定の入力となるデータセット群がカバーする範囲内におけるモード情報の再現性は良好であり、評価関数による差異も小さかった。このことから基本的には、同定空気力を用いた解析でフラッターが起こると想定される無次元風速域において、同定結果がモード情報を精度よく再現できていれば、その領域でのフラッター特性および発振風速は評価関数を問わずよい一致を見せると考えられる。ただし、評価関数にはそれぞれ異なる特徴があり、評価関数および重み係数によってモード情報や非定常空

気力係数の再現性の傾向にも差異が生じうることは、念頭に置いておく必要がある。

3. おわりに

本稿では、自由振動法による風洞実験結果から有限次数近似モデルに基づく非定常空気力を直接同定する手法について、討議者の質問への回答と補足説明を行った。この討議を通じ、本手法を適用する際の注意点について整理し、理解を深めることができたと考えられる。有意義な問題提起をいただいた討議者に対し、ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岩本政巳, 藤野陽三: 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. 598/1-44, pp. 311-322, 1998.
- 2) 岩本政巳, 川瀬弘靖, 藤野陽三, 前田研一: 非定常空気力の有限次数近似モデルを用いた超長大吊橋の多モードフラッター解析, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集, 1-(B), pp. 102-103, 1997.
- 3) 増川淳二: 様々な橋梁断面に作用する非定常空気力の有限次数近似モデルとその応用, 東京大学修士論文, 1994.
- 4) Wilde, K., Fujino, Y. and Masukawa, J.: Time domain modeling of bridge deck flutter, 土木学会論文集, No. 543/1-36, pp. 19-30, 1996.
- 5) 岩本政巳, 藤野陽三: 有限次数近似モデルに基づく偏平箱桁の非定常空気力の同定, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, 1-(B), pp. 98-99, 2000.

(2001.1.10 受付)