# 乱流応答からの非定常空気力係数推定に関する研究

日本工営株式会社 正会員 〇森谷 謙一 横浜国立大学 正会員 山田 均 横浜国立大学 正会員 勝地 弘 横浜国立大学 正会員 西尾 真由子

## 1. 目的

明石海峡大橋や現在設計照査中の Messina 海峡大橋など、橋梁の超長大化が進んでいる. そのため、固有振動数の低下に伴う風による振動問題が顕著となり、高精度の非定常空気力係数(以下「ADs」)の推定を行った上で信頼性の高い空力弾性解析が求められている. 従来、それは一様流を対象とした風洞実験結果に、システム同定手法を適用することで行われてきた. しかしながら、信頼性の高い空力弾性解析の実施のためには、実際の橋梁の挙動を把握する必要があり、自然風(乱流)中での定常ランダム振動波形からの係数推定を行うことがより望ましいといえる. そのため、確率論に基づいたシステム同定法の中でも有望でありながら検証事例の少ない CBHM 法<sup>1)</sup>に着目し、乱流応答からの非定常空気力係数推定への適用性について検討した. さらに、一様流中の応答から推定したものと比較し差異が生じるかについても検討を行った. 加えて、CBHM 法の拡張として新たに CBHM/DC 法を提案し、適用性について検討を行った.

## 2. 非定常空気力のモデル化とシステム同定手法

## 2. 1 非定常空気力のモデル化

本研究では、下に示す Scanlan により提案された非定常空気力を採用する.

$$L_{ae} = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left( K H_1^* \frac{\dot{h}}{U} + K H_2^* \frac{B \dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^* \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{R} \right)$$
(2.1)

$$M_{ae} = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left( K A_1^* \frac{\dot{h}}{U} + K A_2^* \frac{B \dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^* \alpha + K^2 A_4^* \frac{h}{B} \right)$$
(2.2)

非連成非定常空気力係数は、CBHM 法により振動系の固有振動数と減衰比を同定することで推定する.連成非定常空気力係数の推定に関しては、従来用いられてきた岡内の式を適用する.

### 2. 2 CBHM 法、CBHM/DC 法の基礎理論

CBHM(Covariance Block Hankel Matrix)法で対象とする状態空間方程式を以下に示す. 観測値 y に雑音  $\nu$  が含まれた形で定式化されている点が従来の方法とは大きく異なる特徴といえる.

$$\dot{x}(t) = A x(t) + Bp(t) \tag{2.3}$$

$$y(t) = Cx(t) + v(t) \tag{2.4}$$

CBHM 法は、観測値 y の共分散により Hankel 行列を構築し、特異値分解と再構築により状態行列 A を求め、その固有値解析により振動系の固有振動数と減衰比を同定するというアルゴリズムをとっている.

本研究では、CBHM 法の拡張として CBHM/DC(Data Correlation)法を提案した。本手法は、以下に示すように Hankel 行列の掛け算により得られた可観測性行列を用いて、離散化した状態行列 F を定式化している.

$$HH^T = V_r D V_r^T (2.5)$$

$$F = [V_p^{\ 0}]^+ V_p^{\ 1} \tag{2.6}$$

#### 3. 数値シミュレーションによる乱流応答波形の作成

本研究では、数値シミュレーションにより乱流応答波形の作成を行った.ここでは、図1に示す既知であ

キーワード フラッター,非定常空気力係数,システム同定,CBHM法

連絡先 〒102-8539 東京都千代田区麹町5丁目4番地 日本工営株式会社 TEL03-3238-8030

る明石海峡大橋の ADs を外力として入力した。表 1 に本シミュレーションの条件を示す。また、図 2 に、鉛 直曲 が振動の数値シミュレーション結果の一例を示す。

### 4. 非定常空気力係数の推定結果

前章の乱流応答波形から CBHM法により ADs の推定を行った. 採用した Hankel 行列の大きさは3000×600, 採用ランクは 14(非連成)と 6(連成)とした. また、研究を進めていく中で、振動波形の採用範囲よって推定結果が大きく異なることが判明したため、全 5 万データの内 2 万データを採用し、5000 データずつ変動させ全推定結果をプロットした. 推定結果の一例を図 3 に示す. 非常に精度よく係数の推定ができ、全ての係数で同様の傾向が確認できた. また、複数の検討を行い Hankel 行列の大きさには最適解を与える最適値が存在すること、ロバスト性が高いことなどが明らかとなった. さらに、図 4 に一様流中の振動波形から推定した ADsと比較をすると、多くの係数で両者は一致しているが、高換算風速域で若干一様流中の推定結果の方が小さな値をとる可能性が明らかとなった. 加えて、本研究で提案した CBHM/DC 法の結果を図 5 に示す. CBHM 法では精度のよい推定結果を与える乱流応答の採用範囲が存在するが、CBHM/DC 法では波形のより多くの範囲において推定結果のばらつきが小さくなっており、今後推定精度が向上していけば、有力な同定手法となりえる可能性が明らかとなった.

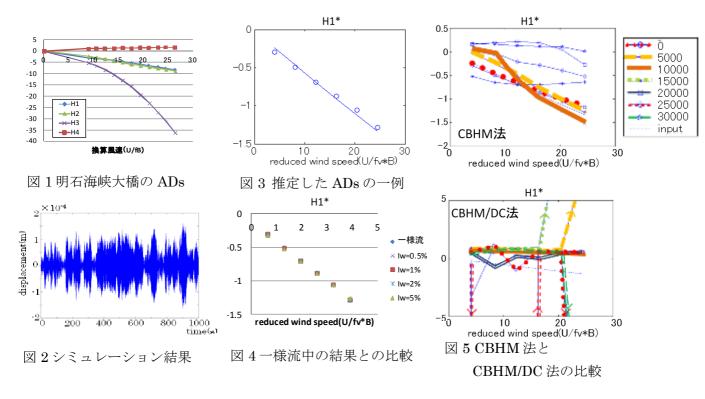


表1 数値シミュレーションの諸条件

	固有振動数(Hz)	減衰比(%)	質量	桁幅B(m)	解析時間(s)	微小時間(s)	β
曲げ振動 寄与分	1.15	2.8	5.48	0.355	1000	0.02	1/6
ねじれ振動 寄与分	2.51	1.7	0.124				

#### 5. 総括

乱流応答から CBHM 法により非定常空気力係数を推定し、精度のよい推定が可能であることが明らかとなった。また、高換算風速域では一様流中からの推定結果の方が僅かに推定結果が小さくなった。さらに、精度の向上が行われれば、本研究で提案した CDHM/DC は有力な同定法となりえる可能性を示した。

# 参考文献

1) J.M. W.Brownjohn and J.Bogunovic Jakobsen: Strategies for aerodynamic parameter identification from bridge deck free vibration data, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.89, pp1113-1136, 2001