

# 有理関数近似空気力を用いた明石海峡大橋対風応答解析

株式会社ドーコン 正会員 ○千賀 規宏

横浜国立大学 フェロー 山田 均

横浜国立大学 正会員 勝地 弘

本四連絡高速道路 正会員 楠原 栄樹

## 1. 序論

現在世界最大の長大橋である明石海峡大橋は、これまでの長大橋の集大成として、また今後のさらなる長大橋のパイロットとして、今後も解析対象として興味を引き続けられると思われる。明石海峡大橋では開通以来、動態観測が実施されており、特に台風時の応答に強い非定常性が認められている。このような状況を解析的に再現するためには、従来の周波数領域での解析に代えて、時間領域での解析が必要となる。

このような背景をもとに、本研究では、明石海峡大橋を対象として、非定常空気力を有理関数近似し、時刻歴対風応答解析を行い、有理関数近似モデル空気力の適用性を検討した。

## 2. 解析法の定式化

### 2.1 有限次数近似モデル空気力

風速 $U$ の条件下で、3自由度振動する橋梁の非定常揚力 $L$ 、空力モーメント $M$ 、抗力 $D$ についての有理関数近似空気力は以下で示される。

$$C_f = \begin{bmatrix} L/\frac{1}{2}\rho U^2 B \\ M/\frac{1}{2}\rho U^2 B^2 \\ D/\frac{1}{2}\rho U^2 B \end{bmatrix} = \left(\frac{B}{U}\right) A_1 \begin{bmatrix} \dot{y}/B \\ \dot{\theta} \\ \dot{x}/B \end{bmatrix} + A_0 \begin{bmatrix} y/B \\ \theta \\ x/B \end{bmatrix} + \sum_{l=1}^{n_l} \begin{bmatrix} X_{2l-1} \\ X_{2l} \\ X_{2l+1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\left(\frac{B}{U}\right) \begin{bmatrix} \dot{X}_{2l-1} \\ \dot{X}_{2l} \\ \dot{X}_{2l+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_l & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda_l & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{2l-1} \\ X_{2l} \\ X_{2l+1} \end{bmatrix} + A_{l+1} \begin{bmatrix} y/B \\ \theta \\ x/B \end{bmatrix} \quad (l=1, \dots, n_l) \quad (2)$$

$y$  : 鉛直変位、 $\theta$  : ねじれ変位、 $x$  : 水平変位

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt}, \quad \dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}, \quad \dot{x} = \frac{dx}{dt}$$

$B$  : 桁幅、 $\rho$  : 空気密度、 $U$  : 平均風速

このモデルにおいて、 $\lambda_1, \dots, \lambda_{n_l}$ と、係数行列 $A_0, \dots, A_{n_l+1}$ が未知のパラメータとなる。これら係数は、非定常空気力測定結果を有理関数近似し、最小2乗法を用いて決定した。

### 2.2 状態方程式

有限次数近似モデル空気力を用いた運動方程式は

$$M\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \gamma \left\{ \left(\frac{B}{U}\right) \mathbf{A}_1 \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{A}_0 \mathbf{q} + \sum_{l=1}^{n_l} \mathbf{x}_l \right\} + \mathbf{Q}_b \quad (3)$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} h(t)/B \\ \alpha(t) \\ p(t)/B \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q}_b = \begin{bmatrix} L_b \\ M_b \\ D_b \end{bmatrix}, \quad \gamma = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2$$

であり、基準座標 $\xi$ によりモード座標系における多自由度運動方程式に書き直すと、

$$\mathbf{I}\ddot{\xi} + \mathbf{A}\dot{\xi} + \mathbf{B}\xi - \mathbf{C} = \mathbf{Q}_b \quad (4)$$

となる。この式を状態方程式表示すると

$$\dot{\mathbf{Y}}(t) = \mathbf{P}\mathbf{Y}(t) + \mathbf{Q}_b, \quad \mathbf{Y}(t) = [\xi(t), \dot{\xi}(t), \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{n_l}]^T \quad (5)$$

となる。これを直接積分法で解き基準座標 $\xi$ を求める。橋梁の実変位として鉛直変位 $h(x,t)$ 、ねじれ変位 $\alpha(x,t)$ 、水平変位は $p(x,t)$ 、基準座標 $\xi$ と固有振動モードベクトルの積によって求める。

$$h(x,t) = \sum_i^m h_i(x) B \xi_i(t), \quad \alpha(x,t) = \sum_i^m \alpha_i(x) \xi_i(t),$$

$$p(x,t) = \sum_i^m p_i(x) B \xi_i(t) \quad (6)$$

## 3. 明石海峡大橋の対風応答解析

### 3.1 解析の概要

明石海峡大橋は、主径間1991mの3径間2ヒンジ補剛トラス橋である(図1)。

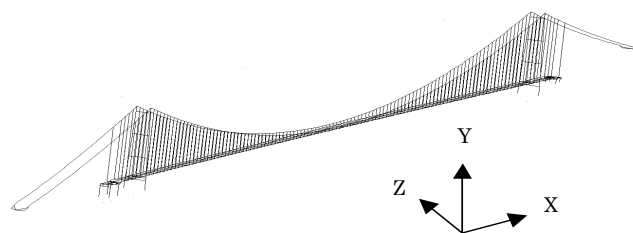


図1 明石海峡大橋の全体系モデル

キーワード：明石海峡大橋、時刻歴対風応答解析、非定常空気力、有限次数近似

連絡先：〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4番1号 株式会社ドーコン(構造部) tel.011-801-1540

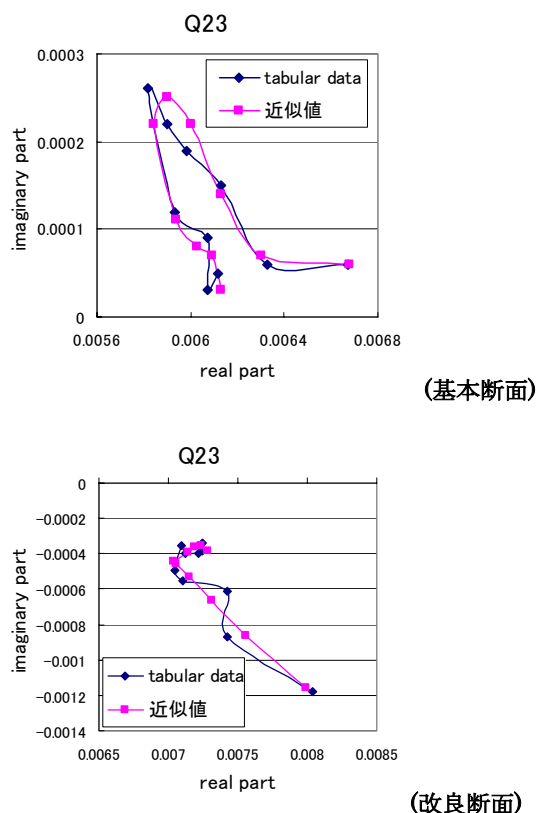


図2 有限次数近似の結果

解析には、風洞試験により測定された2種類の断面における非定常空気力係数を用いた。図2に有理関数近似の結果を示す。ここでは、非定常空気力係数を考慮した場合と無視した場合の解析を実施した。また、ガスト空気力 $Q_b$ は、別途シミュレートした変動風速により算定した。

### 3.2 時刻歴解析の結果

本研究で実施した時刻歴解析結果を示す。図3は基本断面で、風速40m/sで変位が時間と共に増幅し、発散していく結果となった。一方、改良断面では90m/sでも発散現象は見られなかった。別途実施したフラッター解析での、フラッター限界風速とも概ね一致する傾向となった。

図4、5は改良断面における結果で、非定常空気力を考慮した場合としない場合の解析結果である。ここで、ねじれ変位では考慮した場合のほうが応答が大きくなっていることが判る。これは、非定常空気力の作用がうまく解析に取り込めたものと考えられる。

なお、本解析では有理関数近似における近似次数を7としたが、次数の低い場合には、解析結果が不安定になるなど、近似次数の違いが敏感に解析結果に影響を及ぼすことが判った。

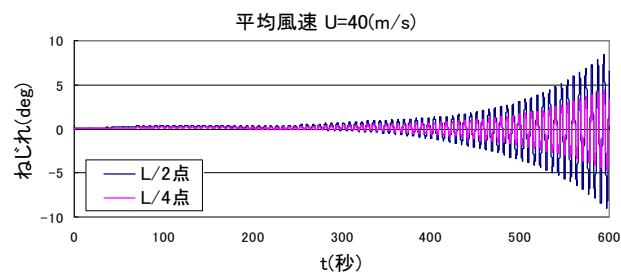


図3 基本断面における応答

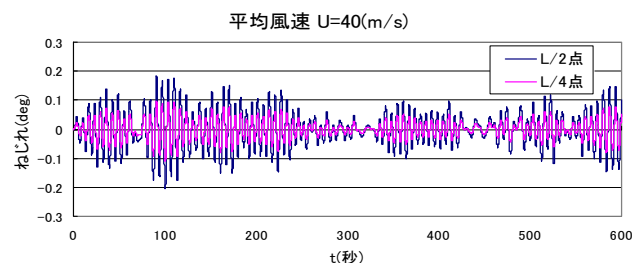


図4 改良断面における応答

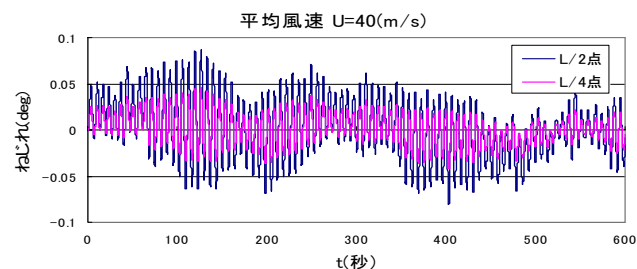


図5 非定常空気力を考慮しない場合

## 4. 結論

本研究では、明石海峡大橋を対象として有理関数近似モデル空気力を用いた時刻歴応答解析を行い、明石海峡大橋の挙動を推定し、既往研究との比較検討を行うことで、有限次数近似モデル空気力の適用性を検討した。

得られた結果を以下に述べる。

- 1) 研究での有理関数近似モデル空気力によって、非定常空気力の作用を時刻歴対風応答解析に適切に取り込むことができた。
- 2) 非定常空気力係数の有理関数近似の精度が、高風速域での応答に大きく影響するため、近似の精度に注意が必要である。
- 3) 本手法を拡張し、実風速記録に対する応答解析を行うことで、観測された対風応答と比較検討も可能となる。

### [参考文献]

増川、藤野；「箱桁に作用する非定常空気力の有限次数近似モデル」第49回年次学術講演会、1994