

非線形 $k-\varepsilon$ モデルによる超長大吊橋断面の非定常圧力特性の推定

日立造船 正会員 白井秀治, 日立造船 正会員 植田利夫
日立造船 正会員 三河克己

1. まえがき

これまで筆者らは、橋梁断面や矩形断面を対象に2方程式 $k-\varepsilon$ モデルによる2次元計算を行い、非定常空気力の推定を試みてきた。渦粘性表現に基づく $k-\varepsilon$ モデルは、計算時間が非常に短かく、工学の分野でも広く利用されており、アンサンブル平均の概念から周期的変動を伴う流れに対して十分適用可能と考えられる。しかし、経済性・耐風安定性の面から近年注目されている分離箱桁やスタビライザーなど耐風対策を有する桁断面では、桁周りの流場が複雑化し、従来から指摘されている $k-\varepsilon$ モデルの問題点である、非等方乱流場や壁面乱流域での精度低下が際だつと予想される。そこで、本論文では、これまで使用してきた修正生成項 $k-\varepsilon$ モデルに代えて、非線形渦粘性表現に基づく $k-\varepsilon$ モデル¹⁾の導入を試みた。松本ら²⁾が風洞試験を行った並列矩形断面($B'/D=5, B'$:単体幅, D :高さ)を対象として行ったモデルの精度評価と、当社が提案する耐風安定性に優れた4車線偏平2箱桁断面を対象とした計算実施例を報告する。

2. 解析方法

本解析は、一般曲線座標系により記述した連続の式、運動量の輸送方程式、乱流エネルギー k の輸送方程式、乱流エネルギー散逸率 ε の輸送方程式を基礎式として有限体積法により離散化する。対流項の離散化には3次精度風上差分の MUSCL(Monotone Upwind Scheme for Conservative Law)を用い、その他、拡散項、圧力項に関しては、2次精度中心差分により離散化を行う。SIMPLE 法により運動方程式と連続の式のカップリングを行う。時間進行に関しては full-implicit であり、精度よりも計算安定性を重視した。物体の振動は、ALE 法により考慮し、物体の姿勢変化を格子変形により再現するもので、基礎式中の移流項を格子移動速度に対する相対速度とすることにより格子の移動影響を取り込む。レイノルズ応力の非線形表現とモデル定数は、Shih-Lumley¹⁾がテンソル解析に基づき導いた式(1)~(12)を用いた。

$$\rho \langle u'_i u'_j \rangle = \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - 2\mu_t S_{ij} + \rho \alpha_1 \frac{k^3}{\varepsilon^2} \left(S_{ik} S_{kj} - \frac{1}{3} S_{kl} S_{lk} \delta_{ij} \right) + \rho \alpha_2 \frac{k^3}{\varepsilon^2} (S_{ik} \Omega_{kj} + S_{jk} \Omega_{ki}) + \rho \alpha_3 \frac{k^3}{\varepsilon^2} \left(\Omega_{ik} \Omega_{kj} - \frac{1}{3} \Omega_{kl} \Omega_{lk} \delta_{ij} \right) \quad (1)$$

$$\mu_t = \rho \frac{C_\mu f_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (2) \quad C_\mu f_\mu = \frac{2/3}{A_1 + \eta + \alpha \xi} \quad (3) \quad \alpha_1 = \frac{C_1}{A_2 + \eta^3} \quad (4) \quad \alpha_2 = \frac{C_2}{A_2 + \eta^3} \quad (5) \quad \alpha_3 = \frac{C_3}{A_2 + \eta^3} \quad (6)$$

$$\eta = k S / \varepsilon \quad (7) \quad \xi = k \Omega / \varepsilon \quad (8) \quad S = (2 S_{ij} S_{ij})^{1/2} \quad (9) \quad \Omega = (2 \Omega_{ij} \Omega_{ij})^{1/2} \quad (10) \quad A_1 = 1.25 \quad A_2 = 1000$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \xi_l}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial \xi_l} + \frac{\partial \xi_l}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial \xi_l} \right) \quad (11) \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \xi_l}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial \xi_l} - \frac{\partial \xi_l}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial \xi_l} \right) \quad (12) \quad \alpha = 0.9 \quad C_1 = 7 \quad C_2 = -23 \quad C_3 = -15$$

ξ_i : 一般曲線座標 x_i : 物理空間座標 ρ : 密度 u_i : アンサンブル平均物理速度 u'_i : 変動速度

k : 乱流エネルギー ε : 乱流エネルギー散逸率 μ : 分子粘性係数 μ_t : 渦粘性係数 t : 時刻

境界条件は、最上流に位置する流入境界から一様流速、1%の乱れ強度を与える。最下流の流出境界は、自然流出条件を与え、上下境界には滑り条件を与えた。計算機負荷を軽減することにウエイトをおき、断面表面境界条件には、壁関数を使用した。解析モデルは、並列矩形断面(単体幅 $B'=0.15\text{m}$, 桁間隔 $2d=0.15\text{m}$, 全幅 $B=0.45\text{m}$, 桁高 $D=0.03\text{m}$)と当社提案の4車線偏平2箱桁断面の2種類とする。並列矩形断面は、実験値との比較を考慮し、松本ら²⁾の風洞試験模型のスケールと一致させた。たわみ及びねじれの加振振幅は、松本らの実験を参考に設定した。計算は、2種類の無次元風速 $Ur(=U/fB')=4.8, 14.5$ に対して実施した。

3. 解析結果及び考察

図-1 に並列矩形断面における、ねじれ加振時非定常圧力特性の計算結果と松本らの実験結果の比較を示す。

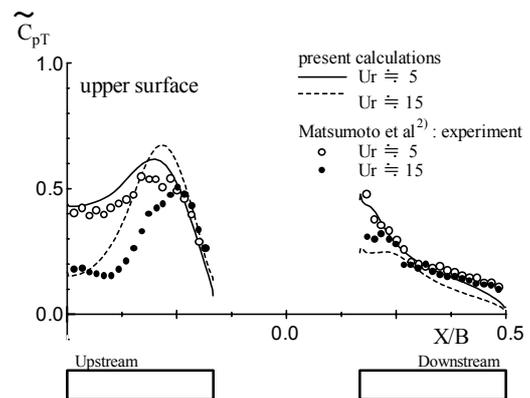
キーワード: 非線形 $k-\varepsilon$ モデル、超長大吊橋、非定常圧力特性

〒551-0022 大阪市大正区船町2丁目2番11号 日立造船(株) 技術研究所 Tel.06-6551-9239 Fax 06-6551-9841

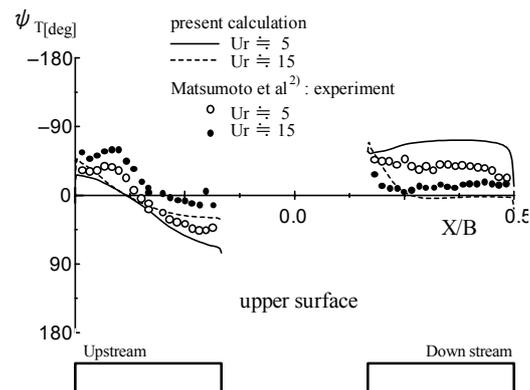
加振振動数成分の振幅を表す変動圧力振幅は、ピーク値が実験値より若干上下するが、ほぼ傾向は再現できている。変位に対する位相差は、上流桁では、ほぼ実験値の傾向を再現できているが、下流桁で、推定精度が低下する結果となった。図-2 に偏平 2 箱桁断面における、ねじれ加振時非定常圧力特性の計算結果の一例を示す。桁下面よりも上面の方が平均的に変動圧力振幅は小さい傾向にある。また、下流桁では、無次元風速 U_r の増加に伴って振幅は小さくなる。また、位相差は、無次元風速 U_r が変化しても大きく変わらない。図-3 に並列矩形断面と偏平 2 箱桁断面の、ねじれ振動頭上げ変位最大時流線を示す。並列矩形断面において推定精度が低下した下流桁では、上流桁後縁から放出された渦が衝突・干渉し、強い非定常場であると推定される。一方、偏平 2 箱桁では下流桁がスプリッタープレートの役割を果たし、鉛直スタビライザーによる剥離渦を安定に形成し、強い非定常性は見られない。

4. まとめ

(1) 並列矩形断面のモデル評価計算から、放出渦と物体の干渉領域で若干の精度低下が見られたが、非線形 $k-\epsilon$ モデルの有用性はおおむね確認できた。(2) 当社提案の偏平 2 箱桁断面の非定常圧力特性を明らかにした。桁を取り巻く流れの非定常性はそれほど強く無く、計算精度は比較的良好と推測される。

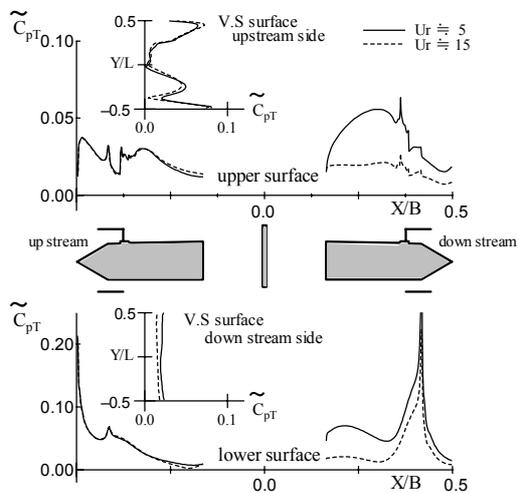


(a) 変動圧力振幅

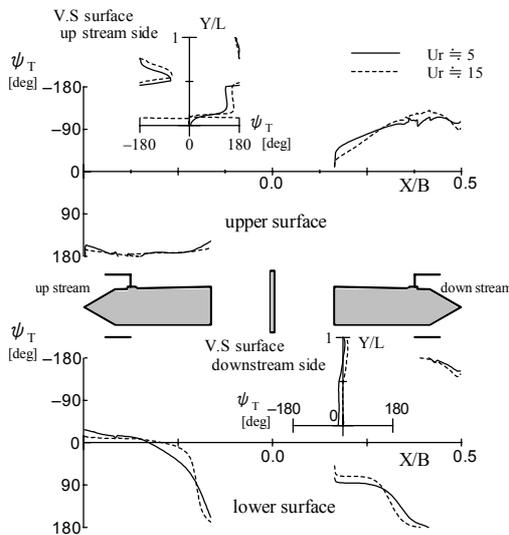


(b) 変動圧力の位相差

図-1 ねじれ加振時の非定常圧力特性

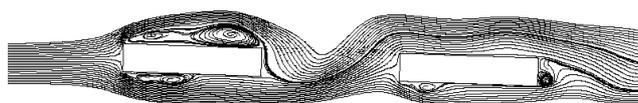


(a) 変動圧力振幅

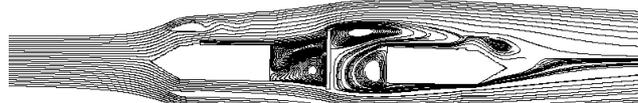


(b) 変動圧力位相差

図-2 ねじれ加振時の非定常圧力特性 (V.S:鉛直スタビライザー[長さL])



(a) 並列矩形断面



(b) 偏平 2 箱桁断面

図-3 流線 (ねじれ加振 頭上げ変位最大時)

参考文献 (1)Shih, T.H. and Lumley, J.L. , “A realizable Reynolds stress algebraic equation model”, NASA TM 105993 (1992) (2) Matsumoto, M. et al. , “Study on aerodynamic behavior of long-span bridge and its stabilization”, Technical Report BWKU Y96640 (1997), Department of Global Environment Engineering Kyoto University, Japan