

偏平矩形断面の非定常空気力に関する数値流体解析

八戸高専 正員 丸岡 晃 三井造船 正員 渡邊 茂
中央大学 正員 平野 廣和

1. はじめに 近年、数値流体解析を用いて橋梁断面のたわみおよびねじれの強制振動解析により非定常空気力を算出する計算例が多く見られる。DNS や LES による 3 次元解析の信頼性が重要視されながらも、ことに非定常空気力の算出に関しては、振動問題を扱うことによる莫大な計算負荷などの面から、RANS による 2 次元解析を用いるケースが多い。しかしながら、近年のコンピュータ性能の急激な発展を考慮すれば、3 次元解析の困難さは、さほど問題にならないと思われる。そこで、本報では、LES による 3 次元解析によって、種々の断面辺長比 B/D (B は弦長、 D は見附幅) での偏平矩形断面の非定常空気力を算出し、実験値や平板の理論値との比較により解析結果の整合性の評価を行った。

2. 解析手法 解析は、Smagorinsky SGS モデルに基づく LES による 3 次元解析である。解析手法は、有限要素法による IBTD/FS 法¹⁾を用い、動的解析には、メッシュを变形させず領域全体を剛体的に振動させる方法を用いる²⁾。

図-1 に 2 次元平面の解析領域、表-1 に解析諸元を示す。断面辺長比は $B/D = 20, 10, 5$ の 3 種類であり、松本ら⁴⁾によって実験が行われている。また、 $B/D = 20$ の結果は先に文献³⁾により報告したものである。2 次元平面の解析領域は動的解析の取り扱いによる境界条件の影響を考慮し、従来の物体まわりの流れの解析例と比べ大きめにとっている。要素分割は $B/D = 20, 10, 5$ に対して、それぞれ、 $320 \times 120 \times 32, 280 \times 120 \times 32, 200 \times 120 \times 32$ としている。軸方向長さ l および分割幅 Δz は文献³⁾による検討結果から妥当と思われる値を用いている。Reynolds 数は風速によらず一定値としている。動的解析はたわみおよびねじれ 1 自由度の強制振動解析であり、加振振幅は松本らの実験⁴⁾と同様である。非定常空気力係数の定義は Scanlan による次式を用いる。

$$L = \frac{1}{2}\rho(2b)U^2 \left\{ kH_1^* \frac{\dot{\eta}}{U} + kH_2^* \frac{b\dot{\phi}}{U} + k^2 H_3^* \phi + k^2 H_4^* \frac{\eta}{b} \right\}, \quad M = \frac{1}{2}\rho(2b^2)U^2 \left\{ kA_1^* \frac{\dot{\eta}}{U} + kA_2^* \frac{b\dot{\phi}}{U} + k^2 A_3^* \phi + k^2 A_4^* \frac{\eta}{b} \right\}$$

ここで、 L, M は揚力 (下向き正)、モーメント (頭上げ正)、 η, ϕ はたわみ変位 (下向き正)、ねじれ変位 (頭上げ正)、 ρ は流体密度、 b は半弦長 $B/2$ 、 k は換算振動数 $b\omega/U$ (ω は角振動数)、 $H_1^* \sim H_4^*, A_1^* \sim A_4^*$ は非定常空気力係数である。

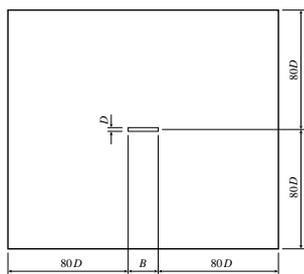


図-1 2次元平面の解析領域

表-1 解析諸元

断面辺長比	$B/D = 20, 10, 5$
Reynolds 数	$Re_D = 1.0 \times 10^4$
閉塞率	0.625%
軸方向長	$l = 6.4D$
軸方向分割幅	$\Delta z = 0.2D$
時間増分	$\Delta t = 0.05D/U$
Smagorinsky 定数	$C_s = 0.1$
加振振幅	$\eta_0 = 0.025B, \phi_0 = 2^\circ$
換算風速	$U/(fB) = 5, 10, 20$

表-2 迎角 $\alpha = 2^\circ$ の静的空気力係数 (揚力係数 C_L 、モーメント係数 C_M)

断面辺長比	C_L	C_M
$B/D = 20$	0.261	0.0646
$B/D = 10$	0.327	0.0557
$B/D = 5$	0.377	-0.0152
平板の理論値	0.219	0.0548

3. 解析結果と考察 動的解析の初期条件の作成のため迎角を $\alpha = 0^\circ, 2^\circ$ とした予備的な静的解析を行っている。迎角 $\alpha = 2^\circ$ のときの静的空気力係数 (揚力係数 C_L 、モーメント係数 C_M) を表-2 に示す。断面辺長比が小さくなると C_L は大きくなり、 C_M は小さくなる傾向を示す。 C_L は平板の理論値より全ての B/D で大きく、 C_M は $B/D = 20$ が平板の理論値より大きく、 $B/D = 10$ が平板の理論値に非常に近い値を示し、 $B/D = 5$ が負値となる。

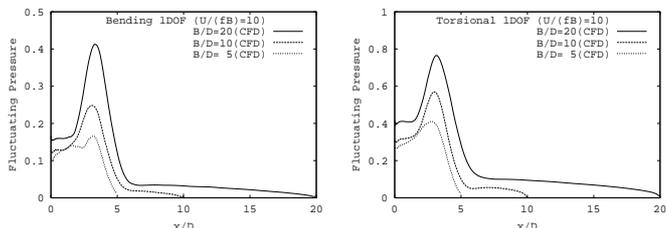
図-2,3 に換算風速 $U/(fB) = 10$ のときの変動圧力係数 \tilde{C}_p および変位と変動圧力の位相差 ψ を示す。たわみおよびねじれのどの断面辺長比に対しても \tilde{C}_p が最大となる位置は前縁から約 $3D$ の位置で変わらない。この位置は、本解析による流れの可視化によれば剥離せん断層が再付着する位置である。 \tilde{C}_p の最大値の値 $\tilde{C}_{p_{\max}}$ は断面辺長比に対しては依存性があり、断面辺長比が小さくなると $\tilde{C}_{p_{\max}}$ は小さくなる。変位と変動圧力の位相差 ψ もまた、たわみおよびねじれとも同様の分布特性を示す。たわみとねじれの位相が 90° ずれているのは、たわみ変位最大時よりも 90° 早く相対迎角 ($\alpha = \eta_0\omega/U$) が最大となることを表している。これらの結果は、松本ら⁴⁾の指摘どおり、非定常圧力特性が相対迎角によって決まるということに対応している。図-4 に相対迎角 α と変動圧力の最大値 $\tilde{C}_{p_{\max}}$ の解析結果と実験結果⁴⁾との比較を示す。図中の直線は最小二乗法による近似である。 $B/D = 20$ では、解析結果は実験結果とよく対応した線形関係を示しているが、 $B/D = 5$ では、解析結果の勾配の方が小さい。これは、 $B/D = 5, U/(fB) = 5$ の場合、図中には示

Key Words: 偏平矩形断面, 数値流体解析, 非定常空気力, LES

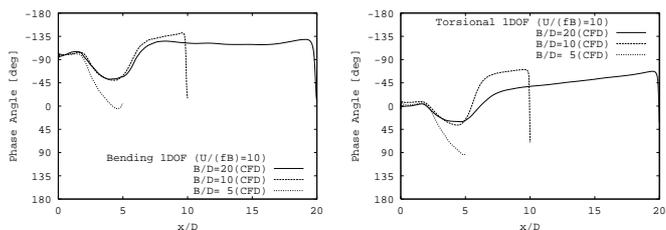
〒039-1192 青森県八戸市田面木字上野平 16-1, TEL:0178-27-7304, FAX:0178-27-7316

していないが、たわみおよびねじれとも、 $\widetilde{C}_{p_{max}}$ となる位置が前縁から約 $2D$ にあり、図-2 に示す $U/(fB) = 10$ の場合の位置より前方になったからである。また、 $\widetilde{C}_{p_{max}}$ も小さめの値を示していた。よって、断面辺長比も換算風速小さく、さらに、相対迎角が大きくなってしまいう場合に関しては、この線形関係とならないことも考えられる。

図-5 に非定常空気力係数の解析結果と実験結果⁴⁾との比較を示す。図中の実線は Theodorsen による平板の理論値である。 $H_1^* \sim H_4^*$ については、実験結果や理論値より解析結果の絶対値が若干大きめの値を示しているものの、ほぼ同様の傾向を示している。 $A_1^* \sim A_4^*$ については、 $B/D = 20$ の平板の理論値と同符号の関係および $B/D = 5$ の平板の理論値と符号が反転する関係、また、 $B/D = 10$ の A_1^*, A_3^* における平板の理論値と同符号の関係は定性的に再現できた。しかしながら、 A_2^*, A_4^* における平板の理論値と符号が反転する関係のみ再現できていない。ただし、松本らの指摘にあるたわみ振動とねじれ振動は相対迎角の観点から見れば本質的に同じであるということから生ずる非定常空気力の従属関係⁴⁾は満たしていると思われる (H_3^* と H_1^*, H_2^* と H_4^* , A_3^* と A_1^*, A_2^* と A_4^* の関係)。また、 $B/D = 10$ に関しては、 $B/D = 10$ の $A_1^* \sim A_4^*$ が平板の理論値にほぼ一致している。ちょうど $\alpha = 2^\circ$ のモーメント係数 C_M が平板の理論値にほぼ一致したことに関連するものと思われる。このことは、従属関係を用いることによって得られる静的空気力係数勾配と等価 Theodorsen 関数から得られる非定常空気力係数の関係を本解析が満足しているということに対応している。



たわみ 1 自由度振動 ねじれ 1 自由度振動
 図-2 換算風速 $U/(fB) = 10$ の変動圧力係数 \widetilde{C}_p



たわみ 1 自由度振動 ねじれ 1 自由度振動
 図-3 換算風速 $U/(fB) = 10$ の変位と変動圧力の位相差 ψ

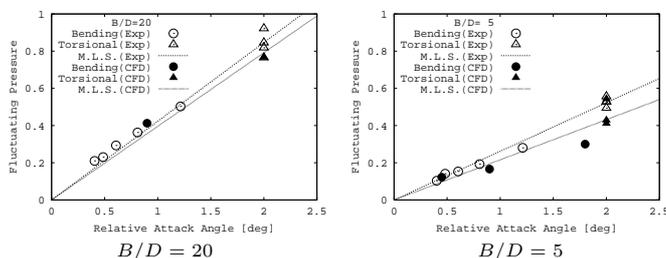


図-4 相対迎角 α と変動圧力の最大値 $\widetilde{C}_{p_{max}}$

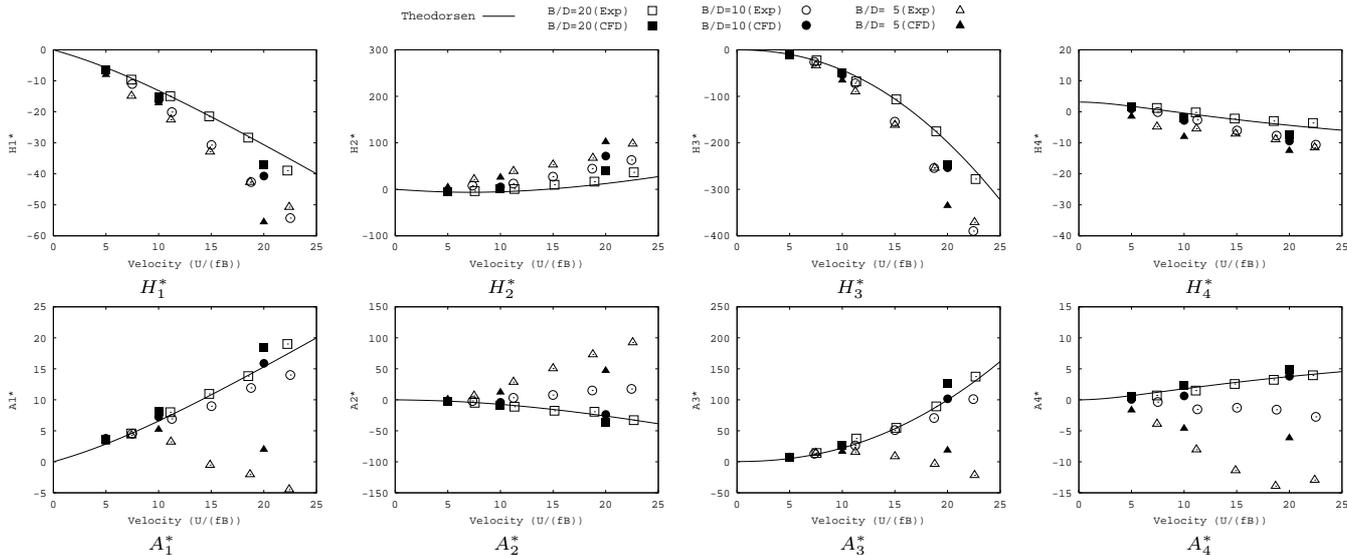


図-5 非定常空気力係数の解析結果と実験結果⁴⁾との比較

4. おわりに LES による 3 次元解析によって偏平矩形断面の非定常空気力の算出を試みた。その結果、実験結果と定性的な一致を得ることができ、非定常圧力特性が相対迎角によって支配的であること、非定常空気力係数の従属関係、さらに、静的空気力係数勾配と非定常空気力係数の関係を数値流体解析により再現することができた。本研究の一部は、(財)鹿島学術振興財団の研究助成の給付を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 丸岡, 太田, 平野, 川原: 同次補間を用いた陰的有限要素法による非圧縮粘性流れの解析, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.383-394, 1997.3
- 2) 丸岡, 平野: 数値流体解析による非定常空気力の算出について, 応用力学論文集, Vol.3, pp.707-712, 2000.8
- 3) 渡邊, 丸岡, 平野: 数値流体解析による偏平矩形断面の非定常空気力係数算出に関して, 第 55 回 土木学会年次学術講演会概要集, I-B009, 2000.9
- 4) 松本, 新原, 小林: 構造基本断面のフラッタ 発生機構に関する研究, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.1019-1024, 1994.3
- 5) 嶋田, 石原: $k - \epsilon$ モデルによる偏平矩形断面の非定常空気力評価, 第 50 回 理論応用力学講演会概要集, pp.97-98, 2001.3