

数値流体解析による扁平矩形断面の非定常空気力係数算出に関して

三井造船 (株) 正 員 渡邊 茂 八戸高専 正 員 丸岡 晃
中央大学 正 員 平野 廣和

1. はじめに 土木工学の分野においても構造物に及ぼす風の作用を数値流体力学 (CFD) を用いて評価しようとする試みが従来より行われている。その数値解析結果の妥当性の検討に際して、基本断面や実橋断面で行われた風洞試験結果との比較が主に行われてきている。しかし、その比較は、既に結果が存在する風洞試験結果との一致に主眼を置いたものが多く、解くべき問題に対し適用した数値解析手法の妥当性に関して検討される例は少ない。一例として、非定常空気力の比較について述べると、風洞試験より得られた非定常空気力係数と解析値との比較は行われるが、数値解析により得られた物体表面圧力分布形状やそれに対応した流れ場の様相等の議論が行われることが少ないのが現状である。

以上の様な背景より、解析対象として、剥離・再付着型断面である断面辺長比 20 の矩形断面を選択し、LES による静的および動的な 3 次元流体解析を行った。具体的には、まず、断面の軸方向長さをパラメータとして、物体を強制振動時のねじれ最大変位で静止させた解析を行い、軸方向長さの違いが表面圧力に与える影響を検討し、動的解析を行う際の軸方向長さを選定した。次に、静的解析時の検討で妥当と思われた軸方向長さで、1 自由度のたわみおよびねじれ強制振動解析を行い、非定常空気力を算出した。さらに、既存の風洞試験結果や平板翼の理論値と比較を行うと共に、数値解析により得られた瞬間の流れ場と表面圧力分布の対応を検討した。

2. 解析方法 基礎方程式には、Smagorinsky 型 LES 乱流モデルによる空間的なフィルタリング操作を施した非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を用いた。時間方向の離散化に Crank-Nicolson 法を適用した。空間方向の離散化には有限要素法の解析手法である IBTD 法¹⁾を適用した。表-1 に解析条件を示す。ここで、 D , B は見附幅および弦長, U は主流方向の流入流速である。静的 ($\alpha: +2^\circ$) および動的解析において、解析領域に対してメッシュを变形させない方法を用いた。よって、境界条件に関しては、平面解析領域の流入・上下端で物体変位に対して相対的に角度をもった流入流速を与え、流出端では移流型境界条件を与えた。また、軸方向の端部境界には周期境界条件を適用した。

3. 結果と考察 B/D が 20 のような扁平な断面用いて解析を行う場合、妥当な軸方向長さに関しては未知な部分が多い。そこで、動的解析時に用いる軸方向長さの選定のため、軸方向長さ ((a)3.2D, (b)6.4D, (c)12.8D) をパラメータとして、強制振動解析時のねじれ最大変位 ($\alpha: +2^\circ$) での静的解析を行った。軸方向の層分割幅を一定 ($\Delta z = 0.2D$) とし、積層数を変えて軸方向長さを変化させた。(b) の層数は 32 層となり、有限要素の構成は $320 \times 120 \times 32$ となる。

図-1(A),(B) に、上面および下面での各ケースの変動表面圧力分布 (標準偏差) を示す。ここで、図の横軸 (x/D) は主流方向の物体中心 (0) からの位置を表す。図-1(B) に示すように、下面での表面圧力分布では、軸方向長さが短くなるに伴い前縁および後縁での表面圧力変動が若干大きくなる傾向があるものの、3 者の間で顕著な相違は見られなかった。一方、図-1(A) に示す上面の分布では、(a) の x/D が -5 付近の表面圧力の変動が、(b),(c) に比べ大きくなる結果が得られた。これは、軸方向長さが比較的短い (a) の場合、流れ場の 2 次元性が強くなり²⁾、上側前縁および後縁で形成される剥離渦が強めに評価され、そのまま表面圧力の変動の大きさに反映されていると考えられる。

以上の検討より、(b) と (c) の変動表面圧力において顕著な相違が見られなかったため、動的解析を行う際の軸方向長さには、(b) の 6.4D を用いることとした。動的解析では、表-2 に示す解析条件で、1 自由度のたわみおよびねじれ強制振動解析を行った。ここで、非定常空気力係数を式 (1),(2) で定義する。

表-1 解析条件

断面辺長比	$B/D = 20$
Reynolds 数	$Re = 1.0 \times 10^4$
時間増分	$\Delta t = 0.05 D/U$
平面解析領域	$\pm 90D \times \pm 80D$
軸方向分割幅	$\Delta z = 0.2D$
閉塞率	0.625%
モデル定数	$C_s = 0.1$

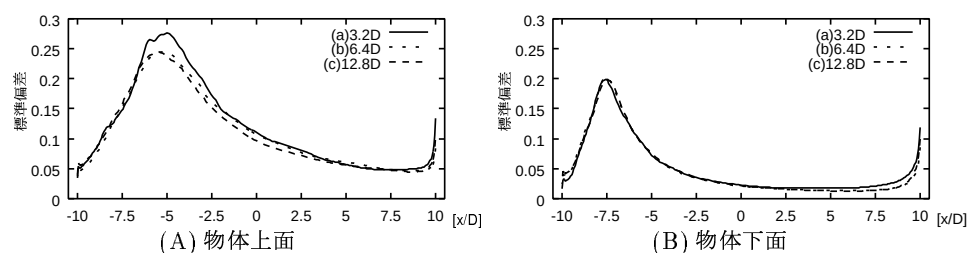


図-1 軸方向長さに対する変動表面圧力の比較

Key Words: 矩形断面, LES, 軸方向長さ, 非定常空気力係数

〒196-0012 昭島市つつじが丘 1-1-50, TEL:042-545-3114, FAX:042-546-3570

$$L = \pi \rho B^3 \omega^2 \left(C_{LH} \frac{h}{B} + C_{LA} \alpha \right) \dots\dots\dots (1) \quad M = \pi \rho B^4 \omega^2 \left(C_{MH} \frac{h}{B} + C_{MA} \alpha \right) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ρ は流体密度、 ω は角振動数であり、 h 、 α は各々たわみ変位(上向き正)、ねじれ変位(頭上げ正)である。なお、 L 、 M の座標系は上向きおよび頭上げを正とした。

図-2に、数値解析により得られた非定常空気力係数と平板翼の理論値および圧力積分法により求められた試験結果³⁾との比較図を示す。図-2より、数値解析結果と試験結果³⁾とで定量的な一致をみることは難しいものの、流れの3次元性が顕著にでる比較的高い換算風速領域でも、物体に作用する非定常な空気力を定性的に評価できていると考えられる。解析より得られた換算風速が5.0の係数は平板の理論値とほぼ一致しているが、換算風速が10.0、20.0と高くなるに従い、解析結果と理論値とで差が生じてくる。その比較的高い換算風速での空気力の実数部と虚数部の組合せごとで、理論値との差に着目すると、実数部と虚数部は、ほぼ同じ比率で理論値と差が生じる結果が得られている。よって、変位に対する空気力の位相差は平板とほぼ同じ特性を持ち、変動振幅が比較的大きくなる傾向が得られている。

図-3に、換算風速が10.0における、ねじれ変位最大時の瞬間の圧力コンター図を示す。図-3より、上面前縁から剥がれたせん断層沿いに渦列が並び、物体上面(前縁から3~4D付近)に再付着し、下面では上面よりも比較的手前で再付着している。その時の瞬間の表面圧力分布が図-4である。上面での圧力分布は、剥離領域内ではほぼ様な負圧分布になるのに対し、下面では渦が接している部分で負圧が強くなり、剥離領域は上面に比べかなり狭くなる。ねじれ変位に対して揚力は若干の位相遅れがあるものの、この様に上下面での圧力差が大きくなった時に揚力の振幅がほぼピークを示す結果となる。

4. おわりに 本報では、軸方向長さをパラメータとして静的解析を行った結果を踏まえ、断面辺長比20の矩形断面の動的解析を6.4Dの軸方向長さを用いて行った。その解析結果より、構造物の耐風安定性を照査する上で問題となることが多い換算風速の高い領域でも、物体に作用する非定常な空気力を定性的に再現できたと考えられる。今後の課題としては、ここで用いた解析手法の妥当性を違った角度から検証すると共に、流れ場と物体に作用する空気力の対応を検討し、非定常な空気力の発生機構を考察して行く予定である。

表-2 強制振動解析の解析条件

換算風速	$U/(fB) = 5.0, 10.0, 20.0$	加振振幅(片振幅)	たわみ: $h_0 = 0.025B$, ねじれ: $\alpha_0 = 2.0^\circ$
------	----------------------------	-----------	---

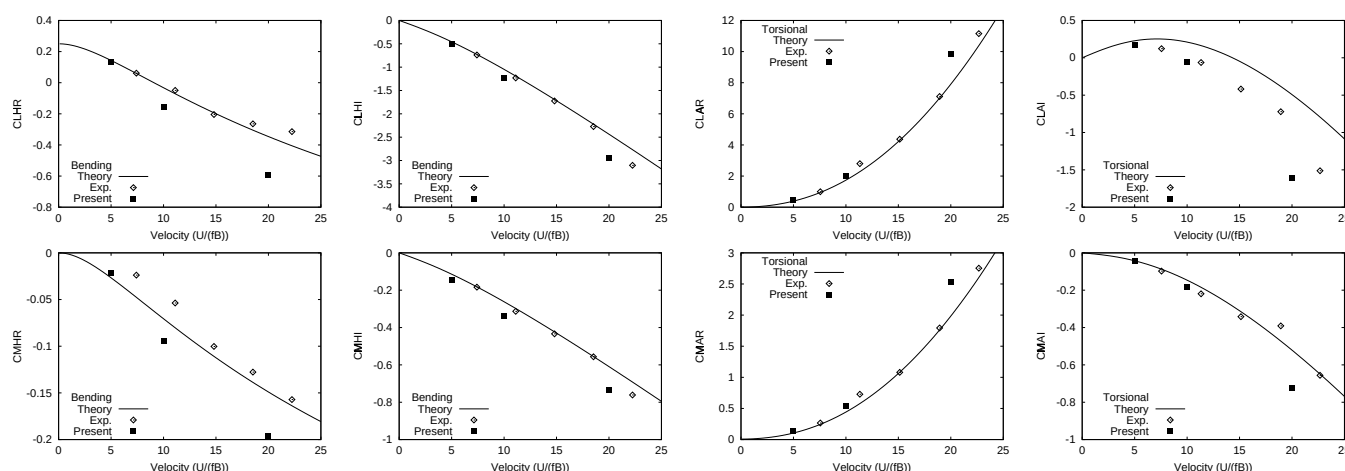


図-2 非定常空気力係数の解析結果と理論値・試験結果³⁾との比較

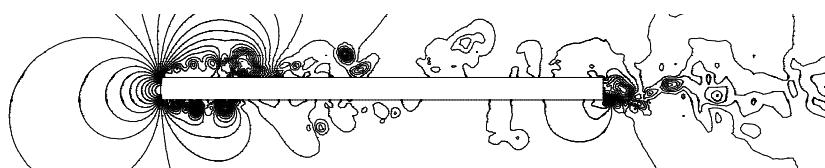


図-3 ねじれ変位最大時の瞬間圧力コンター図

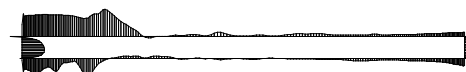


図-4 ねじれ変位最大時の瞬間表面圧力分布図

参考文献

- 1) 丸岡晃, 太田真二, 平野廣和, 川原睦人: 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.43A, pp.383-394, 1997.
- 2) 平野廣和, 丸岡晃, 渡邊茂, 佐野健一: 3次元数値流体解析における軸方向長さの検討, 土木学会論文集, Vol.640, 2000.
- 3) 松本勝, 新原雄二, 小林裕輔: 構造基本断面のフラッター発生機構に関する研究, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.1019-1024, 1994.