

# 矩形断面の揚力係数曲線に関する数値流体解析と風洞実験結果との比較

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

## 1. はじめに

耐風安定性の照査に関しては、風洞試験による検討は多く行われているが、実際に設計される橋梁断面等が主であり、その照査項目の一つである揚力係数曲線の負勾配現象自体の発生機構も未解明な部分が多い。一方、数値流体解析の進歩の過程において、解析結果と風洞試験結果とを比較することによって、解析手法の妥当性の検討が多く行われている。その一環として、対象断面に実際の橋梁基本断面を採用し、数値流体解析を用いた静的三分力試験の再現が試みられている<sup>1)</sup>。しかし、再付着型断面に限っては、定性的には揚力係数曲線の負勾配の再現はできたものの、定量的な一致という観点からは未だ改善の余地を残している。

一方、著者らは、再付着型の充腹断面の基本断面である断面辺長比  $B/D=4.0$  の矩形断面を用いて、小型煙風洞を用いた簡易的な静的三分力試験を行い、ここで得られた風洞試験結果と数値流体結果との比較を試みてきた<sup>2)</sup>。しかし、小型煙風洞での実験結果では、揚力係数曲線の負勾配は定性的には再現できたものの、数値流体解析結果ならびに既存の風洞試験結果と比較すると、三分力係数曲線の揚力勾配のピーク値である迎角  $4^\circ$  付近で低い値を示す結果となり、小型煙風洞での実験の限界を示すに至った。その結果、数値流体解析結果との十分な比較・検討を行うことができなかった。

よって、本報では、数値流体解析結果の妥当性の検証を目的として、構造物用低速風洞で比較的大きな模型を用いた静的三分力試験を実施し、さらに数種類の迎角の数値流体解析を追加して、それら両者の結果より、数値流体解析の定量的な評価を試みた。さらに、断面の表面圧力の変動も計測し、時間平均値のみではなく時間変動量の評価を行うことも併せて実施した。これにより、現状での数値流体解析に残された検討項目を明らかにする。

## 2. 解析手法と解析条件

基礎方程式は非圧縮の Navier-Stokes 方程式である。時間方向の離散化には、運動方程式には Crank-Nicolson 法を適用し、連続の式には完全陰的を適用する。空間方向の離散化には、IBTD/FS 有限要素法<sup>3)</sup>を用いる。

解析は、著者らが従来行った解析<sup>2)</sup>の迎角  $0^\circ$ 、 $+4^\circ$ 、 $+8^\circ$  に加えて、迎角  $+2^\circ$ 、 $+6^\circ$ 、 $+10^\circ$ 、 $+12^\circ$  の 4 ケースの解析を実施した。解析条件は、従来の解析<sup>2)</sup>と同一である。なお、解析領域での閉塞率は、迎角  $0^\circ$  において、5%としている。解析におけるレイノルズ数は、 $Re=3,000$  である。

## 3. 風洞実験の条件

風洞実験は、三井造船(株)昭島研究所所有の構造物用大型風洞にて実施した。表-1 に模型諸元等を示す。風洞風速は、 $10\text{m/s}$  であり、この時のレイノルズ数は、 $Re=93,600$  である。矩形断面の変動表面圧力計測は、圧力測定点として軸方向中心断面において前・後面で 5 点ずつ、上・下面で 21 点ずつの計 52 点で計測を行った。1 回の計測で 9 点まで行い、それ以降は圧力チューブの盛り換えを行うことで計測を行った。計測した迎角は、 $0^\circ$ 、 $+4^\circ$ 、 $+6^\circ$ 、 $+8^\circ$ 、 $+12^\circ$  の 5 状態である。

## 4. 解析結果と考察

図-1 に大型風洞で風洞実験から得られた静的空気力と数値流体解析(以下 CFD とする)から得られた結果とを併せて示す。揚力係数曲線は、両者とも迎角  $4^\circ$  で揚力の極大値を示している。ただし、CFD の方が高い揚力値を示してい

表-1 風洞模型諸元

模型	長さ [mm]	備考
高さ (D)	125	閉塞率 4.2%
幅 (B)	500	断面辺長比: $B/D = 4.0$
長さ (L)	1600	端板込み, アスペクト比 $L/B = 4.2$

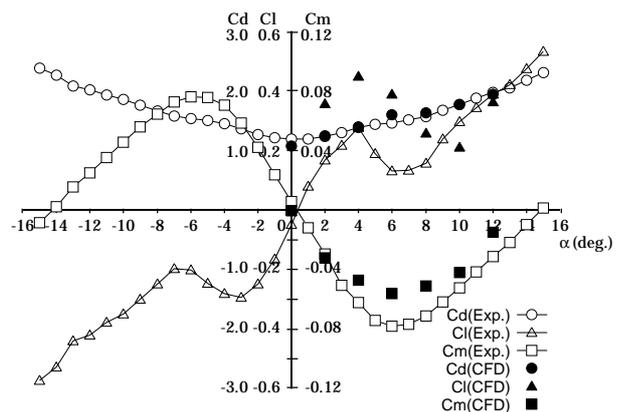


図-1 静的空気力係数

る．これを境いに負勾配となり，風洞実験では迎角  $8^\circ$  で，CFD では迎角  $10^\circ$  で揚力の極小値を示している．それより迎角が大きくなるにつれて，両者ともに正勾配を示している．

迎角  $0^\circ$  においては空気力は両者ともにほぼ一致しているが，迎角が大きくなるに従い，揚力・モーメントに差が生じる．この原因を考察するために，図-2 に時間平均の表面圧力係数分布（上側）と変動（標準偏差）表面圧力係数分布（下側）を示す．前面・後面・断面上側の平均圧力係数分布ならびに変動圧力分布は，両者ともほぼ一致した分布を示しており，定量的にも一致していると考えられる範囲である．

しかし，断面下側に関しては，迎角が大きくなるに従って，両者の間に徐々に差が生じている．これは，断面下面側の再付着点が，CFD の方が風洞実験より後方へずれていることにより生じていると考えられる．これにより，図-1 に示す揚力係数で，迎角が大きくなるに従って両者に差が生じたと考えられる．この原因としては，風洞実験と CFD の間での次の条件の差が考えられる．(A) レイノルズ数の違い (B) 閉塞率の違い (C) 流入部分の乱れ (D) 軸方向長さの違い 等である．まず，(A) に関しては，矩形柱断面は一般的にレイノルズ数依存性が少ないと言われているが，定量的な評価を行うためには両者のレイノルズ数をできる限り近づける必要がある可能性が高い．高レイノルズ数解析のためには，より微細な分割や LES 等の乱流モデルの導入である．次に (B) であるが，風洞実験は 4.2%，CFD は 5% であるので，迎角が大きくなるに従いこの差が顕著に影響を及ぼし，断面下側面の再付着点を後方へ移動させた可能性が考えられる．解析領域の検討である．(C) に関しては，風洞実験の場合，一樣流と言っても必ず乱れを含んでおり，本実験に利用した風洞でも 0.1% 程度の乱れを含んでいる．これに対して CFD は乱れを 0% としているので，この差が影響していることも考えられる．入力風の乱れの発生を解析条件として与えることである．(D) に関しては既に文献<sup>4)</sup> で検討しその指針を示した．

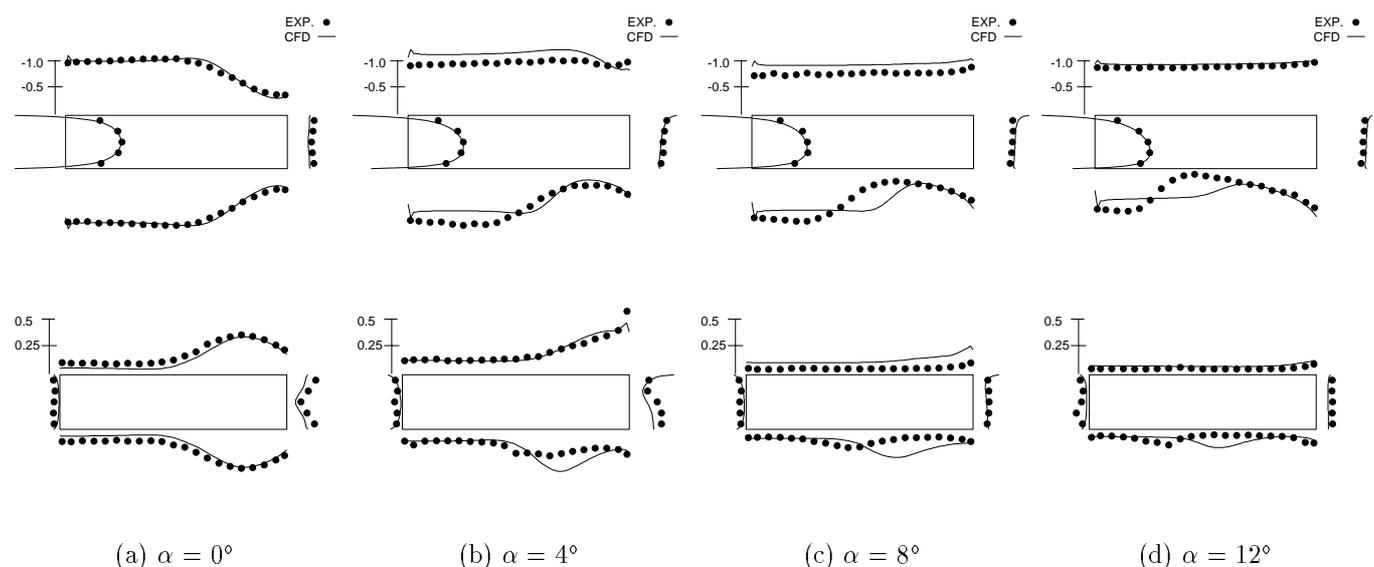


図-2 表面圧力係数分布 (上側:時間平均, 下側:標準偏差)

## 5. おわりに

CFD の結果と風洞実験結果とを比較し，定量的な評価を実施した．表面圧力係数分布に関しては，平均・変動量ともに定量的に一致していると判断できる．特に迎角  $0^\circ$  の場合は，CFD で風洞実験結果をほぼ再現できたと言っても過言ではない．一方，基本断面である矩形断面に限っても CFD が風洞実験に置き換わるまでには，さらに検討しなくてはならない項目が残されていることもわかった．上記の (A) ~ (C) の項目である．しかしながら，これらの検討項目は，今後早急に，解決する必要がある．最後に，本研究の一部は，文部省科学技術研究費・基盤研究 (C) の研究助成の給付を受けたことを付記する．

## 参考文献

- 1) 枝元, 丸岡, 米田: 偏平箱桁断面の静的空気力特性に対する 2 次元および 3 次元数値流体解析とその適用性評価まわりの流れ解析, 土木学会論文集, No.619, 1999.
- 2) 渡邊, 池ノ内, 平野, 丸岡: 迎角変化に伴う再付着矩形断面における流れの状態, 第 15 回風工学シンポジウム, 1998.
- 3) 平野, 丸岡, 渡邊: 断面辺長比 4 の矩形断面の空力特性に関する 2 次元・3 次元数値流体解析, 土木学会論文集, Vol.591, 1998.
- 4) 平野, 渡邊, 丸岡, 佐野: 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.