

数値流体解析を用いた迎角を有する1:4角柱の空力特性の把握

○中央大学 学生員 栗林伶二 中央大学 正会員 平野廣和
中央大学 正会員 佐藤尚次

1. はじめに

耐風安定性を有する長大橋梁断面の開発において、断面辺長比 $B/D=4.0$ (B:桁幅, D:桁高) の矩形断面を組み合わせた構造が提案されている。この矩形断面は、迎角 $\alpha=0^\circ$ 時に前縁で剥離した流れが前縁から $2.8D$ 付近に再付着することが知られている。この断面を迎角 $\alpha=0^\circ$ から順次迎角を増すと、ある一定の迎角で流れの状態、圧力分布、挙動が大きく変化する。これは、流れが再付着型から完全剥離型へ移行することによる。よって、迎角を変更した際の流れの状態を把握することは橋梁断面開発において重要な点である。

そこで本研究では、断面辺長比 $B/D=4.0$ の矩形断面に着目し、数値流体解析(CFD:Computational Fluid Dynamics)により静的解析を行う。それにより、断面辺長比 $B/D=4.0$ の断面が迎角を有した場合のそれぞれの流れの状態を確認し、再付着型から完全剥離型への変化の空力特性の変化を把握することを目的とする。

2. 解析手法

本数値流体解析には丸岡ら¹⁾が提案しているIBTD/FS 有限要素法を適用する。乱流モデルには、LES(Large-Eddy-Simulation)のSGS Smagorinsky モデルを採用する。

(1)支配方程式と連続式

流れ場の支配方程式は、LESによりフィルターをかけた非圧縮性 Navier-Stokes 運動方程式を用いる。フィルターをかけた非圧縮性流れの運動方程式(1)と連続式(2)は、それぞれ次式のように表される。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\tau_{ij} + 2\nu \bar{D}_{ij}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (2)$$

(2)解析条件

断面辺長比 $B/D=4.0$ の断面形状を図-1に、座標系と解析領域を図-2に、解析諸元を表-1にそれぞれ示す。ここで、奥行き方向の軸方向長さは $3.2D$ とし、軸方向分割を 32 とし、軸方向幅を $0.1D$ としている。また、最小要素幅は $0.0005D$ である。境界条件に関しては、流入境界 Γ_1 で無次元流速である一様流速 1.0 、流出境界 Γ_2 では移流境界条件とする。また、側方 Γ_3 で slip 条件、物体表面 Γ_4 で no-slip 条件とし、断面軸方向の境界 Γ_5 では周期境界条件を用いている。解析を行う迎角は、静的な解析で迎角 $\alpha=0^\circ$ を中心として、迎角 1.0° ピッチで $\alpha=-10^\circ \sim 10^\circ$ まで変化させて行う。

3. 解析結果

(1)静的空気力係数

図-3に平均抗力係数 C_d 、平均揚力係数 C_l 、平均空力モーメント係数 C_m の迎角変化時の静的空気力解析結

果及び風洞実験結果を示す。なお、今回参考とした実験値²⁾のレイノルズ数 Re は $85,600$ である。

図-3(a)の C_d に着目すると、解析対象としたほぼ全迎角において、解析結果は実験値とほぼ妥当な値を示している。さらに、図-3(b)と図-3(c)の C_l と C_m に着目すると、負勾配を示している点に関しては、ギャロッピング振動の発現の可能性が考えられる。この発現の可能性は実験³⁾でも確認されている。

一方、図-3(b)の C_l では迎角 $\alpha=4^\circ \sim 8^\circ$ 時の剥離の影響が強くなる高迎角領域において、実験値とわずかな差を生じている。この領域は流れの状況が大きく変化する地点であるため、これが解析結果と実験結果に

表-1 解析諸元

時間増分 Δt	$0.05D/U$
対象断面 B/D	4.0
接点数	17816×33
要素数	17552×32
最小要素幅	$0.0005D$
Reynolds数	1.5×10^4
軸方向長さ	$3.2D$
軸方向分割	32
軸方向幅	$0.1D$
モデル定数 C_s	0.1



図-1 対象断面

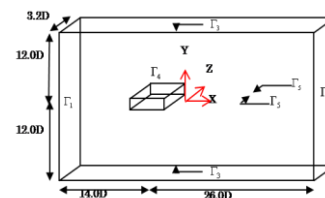
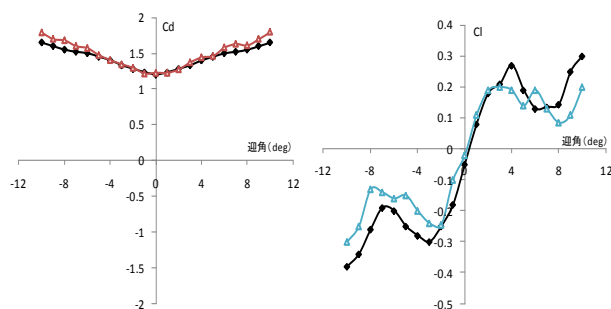
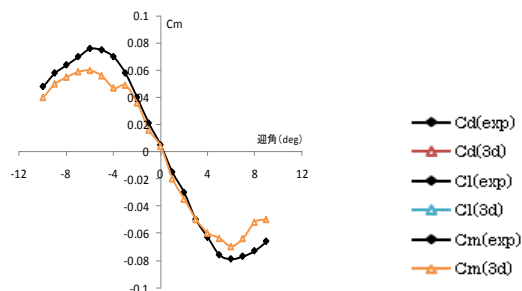


図-2 解析領域



(a) 抗力係数 C_d

(b) 揚力係数 C_l



(c) 空力モーメント係数 C_m

図-3 静的空気力係数の解析結果と実験結果

キーワード： 数値流体解析 静的空気力係数 流線 ストローハル数

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 tel. 03-3817-1816

fax. 03-3817-1803

わずかな差を生じたと考えられる．図-3(c)の C_m においても，迎角 $\alpha=4^\circ\sim 8^\circ$ の高迎角領域で実験値とのわずかな差が生じている．これは， C_m の数値そのものが小さいことにもよると考えられる．

(2) 流線図，圧力図による検証

図-4 に迎角変化時の時間平均流線図を，図-5 に変動揚力 1 周期分の平均圧力コンター図を示す．ここでは流れの状態が再付着型から完全剥離型へと変化すると考えられる迎角 $\alpha=3^\circ$ ， $\alpha=4^\circ$ に着目する．まず，図-4 の時間平均流線図に着目すると，迎角 $\alpha=3^\circ$ 時においては断面前縁で剥離した流れが断面側面に再付着している様子が確認できることから再付着型の流れであると言える．一方，迎角 $\alpha=4^\circ$ 時では，断面前縁で剥離した流れが再付着せずに流れる完全剥離型の流れであることが確認できる．これによると， $B/D=4.0$ の矩形断面では，迎角 $\alpha=3^\circ\sim 4^\circ$ において流れの状態が再付着型から完全剥離型へ変化する流れのスイッチングが起きていると考えられる．

次に，図-5 の迎角 $\alpha=3^\circ$ ， 4° における断面後端部分の平均圧力コンター図に着目する．これによると，両迎角において断面後端部分にかかる圧力に相違がみられる．迎角 $\alpha=4^\circ$ 時においては，断面後端にかかる圧力が小さくなっており，圧力が低減されている．つまり，断面前縁で剥離した流れが，断面に再付着せずに完全剥離型に変化したことにより，断面後端にかかる圧力が小さくなったと考えられる．一方，迎角 $\alpha=3^\circ$ においては，迎角 $\alpha=4^\circ$ 時にみられるような圧力低減が断面後端でなされていない．ここから，断面前縁で剥離した流れが断面後端で再付着している様子がうかがえ，迎角 $\alpha=3^\circ$ 時は再付着型であることが確認できる．よって，平均圧力コンター図からも，迎角 $\alpha=3^\circ\sim 4^\circ$ にかけて流れの状態が変化し，流れのスイッチングが起きていると考えられる．

(3) ストローハル数 St による検証

図-6 に迎角変化に伴う St の変化の状態を示す．既存の実験⁴⁾での St は 0.13 であることから，迎角 $\alpha=3^\circ$ では良好な精度であると考えられる．一方で，迎角が $\alpha=3^\circ$ から $\alpha=4^\circ$ に変化する点で， St が $St=0.14$ から $St=0.02$ へと大きく変化している． $B/D=2.0$ を超えるような角柱断面においては，角柱の流れが再付着型から完全剥離型へ変化する際に， St が急激に変化することが確認されている．よって， $B/D=4.0$ の矩形断面での迎角 $\alpha=3^\circ\sim 4^\circ$ における St の急激な変化は，角柱前縁で剥離した流れが物体表面に再付着していた再付着型の状態から，完全剥離型の状態に変化したことによって起きたものと言える．つまり，迎角 $\alpha=3^\circ\sim 4^\circ$ において流れのスイッチングが起きていることが確認できた．

4. おわりに

本研究では，断面辺長比 $B/D=4.0$ の矩形断面において，CFD を用いた静的空気力解析を行うことで迎角変化に伴う空力特性を把握した．これによると，流線図において流れ場の状態変化を可視的に再現できた．また，時間平均による空気力係数を算出することで矩形断面にかかる静的空気力を把握した．さらに，迎角変化時の流れでは時間平均流線図と St に着目することで， $B/D=4.0$ の矩形断面が再付着型から完全剥離型へと変

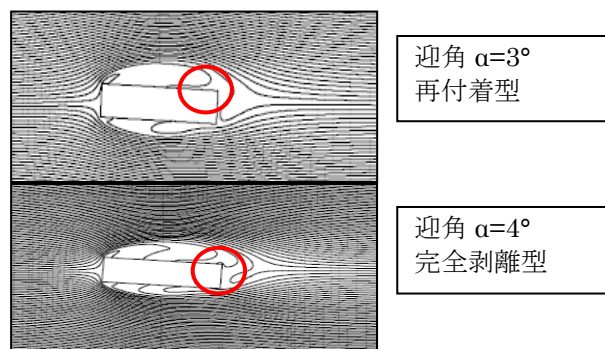


図-4 迎角変化時の時間平均流線図

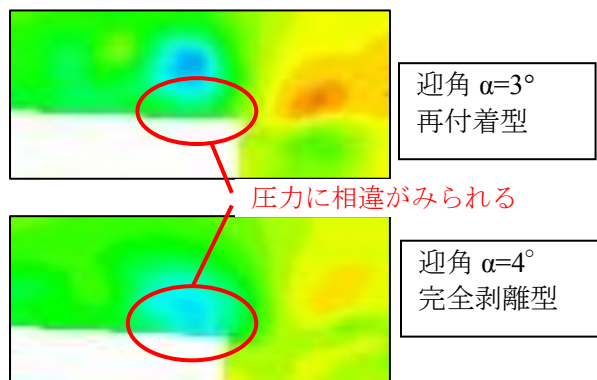


図-5 断面後端部の平均圧力コンター図

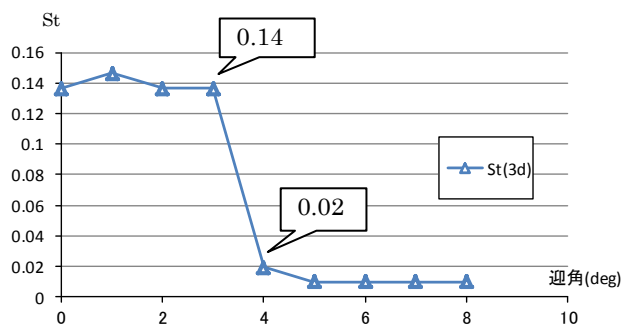


図-6 迎角と St 数の関係

化する迎角を確認し，流れのスイッチングを確認できた．

今後の展開として，対象とする断面を経済性に優れ，フラッター安定性が期待されている $B/D=4.0$ の矩形断面を組み合わせた二箱桁断面に変更し，同様に空力特性を検討していく．

参考文献

- 1) 丸岡晃，太田真二，平野廣和，川原陸人：同時補間を用いた陰的有限要素法による非圧縮性流れの解析，構造工学論文集，Vol.43A, pp.383-394, 1997.4.
- 2) 平野廣和，渡邊茂，丸岡晃：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，土木学会第55回年次学術講演会論文集，I-B003, 2000
- 3) 松本 勝，八木 知己，他：1:4 矩形断面の空力振動における渦に起因した干渉現象，第18回風工学シンポジウム論文集
- 4) 岡島，杉田，溝田：長方形断面柱のストローハル数と背圧係数（断面辺長比が1～9の場合），日本機械工学論文集（B編），50巻457号