66 平坦及び曲面路床での円柱周りの 流れ場構造

大同工業大学 久保田稔[○]、建設省中部地方建設局 九津見生哲
福井高専 前島正彦、中日本建設コンサル(株) 豊田敏文

Flow Field Characteristics around a Horizontal Circular Cylinder
placed at Flat and Curved Bed

Minoru Kubota^{*1}, Takanori Kutsumi^{*2}, Masahiko Maejima^{*3}, Toshifumi Toyoda^{*4}

There are many papers concerned with flow visualization around a circular cylinder, but most of them reported the flow that flow boundary did not affect the flow pattern around a circular cylinder. Now since offshore structures have been or will be built, it is necessary to investigate the flow field around a horizontal circular cylinder suffered from bed boundary effects. In this paper, changing the clearance, e , between cylinder and bed. We report the results of flow visualization around a horizontal circular cylinder placed at flat and curved bed.

1. はじめに

本研究では、2種類の路床形状上での円柱(直径 D)周りの流れ場の可視化実験より、速度ベクトル、流れ関数、渦度分布および圧力分布を求め、 e/D (e は路床と円柱との距離)とこれら特性量との関係に検討を加えている。すなわち、円柱が平坦路床上の流れ場中にある場合と円柱が曲面路床(洗掘・堆積過程が終了した平衡路床形状)上にある場合について、流れ関数、渦度分布および圧力分布が e/D によってどの様に変化するかを検討している(流れ関数については紙数の関係で割愛した)。

2. 可視化実験方法

可視化実験の光源としては、250wのスライドプロジェクターまたは4Wのアルゴンレーザーを使用して、幅約5mmの光シートを円柱に直角に当て、比重1.07、平均直径0.57mmのアクリルの微粉末をトレーサ粒子として用い、流れ場を可視化した。

トレーサ粒子追跡法として、著者らは円柱後方の複雑な流れ場を精度良く再現するために、煩雑ではあるが、 $\Delta t = 0.03$ 秒間隔の3画面の各粒子の対応づけを目視によって行った。

図-1は、画像処理を行った平坦路床での2種類の画面の大きさであり、A、B2画面を画像処理の対象とした。つまり同じ無次元距離 e/D の流れに対して、撮影時刻は異な

*1 Department of Construction, Daido Institute of Technology, Nagoya-shi, Aichi
*2 Chubu Regional Construction Bureau Ministry Construction, Nagoya-shi, Aichi
*3 Fukui National College of Technology, Sabae-shi, Fukui
*4 Nakanihon Kensetu Consultants Co., Ltd., Nagoya-shi, Aichi

るが、円柱近傍の流れの特徴を詳細に検討するためのA画面と円柱周辺を含む全体的な流れの特徴を把握するためのB画面の2画面とした。また、画像処理を行った曲面路床（C画面）の大きさは、 $X_1 = 23.9\text{cm}$ 、 $Y_1 = 12.1\text{cm}$ である。なお、円柱周辺の流れの連続的な変化を把握するために、A、B、C各画面について、それぞれ円柱上方（主流側）の渦の動きが有意な場合（添え字Uを付す）と円柱下方（路床側）の渦の動きが有意な場合（添え字Dを付す）の2種類を画像処理した。

3. 格子点上の速度ベクトル及び速度ベクトルの補正結果

格子点上の速度ベクトルはA、C画面では円柱周辺の流れ場を詳細に検討する必要上、多くの計算時間を必要とするImaichiらの手法を用い、B画面では全体的な流れの状況を把握するのが目的であるので、少ない計算時間で速度ベクトルが求まるDickersonの手法を用いた。

図-2は、 $e/D = 1.0$ のA_D画面の補正前・後の無次元連続方程式 $\text{div}^* (= \text{div}(\mathbf{v})D/U_0)$ の値である。ここに U_0 は断面平均流速であり、速度ベクトルの補正にはMASCONEモデルを用いた。同図より、補正前の div^* の値は ± 2 程度の大きさであり、特に円柱周りと円柱直後方の速度ベクトルに誤差が集中している。一方、補正後の div^* の値は、ほぼ全領域に渡って $0 \sim -10^{-4}$ の範囲にあり、特に円柱周りの誤差が著しく減少している。なおC画面では、 ± 1.5 程度の補正前の div^* の値が、補正後にほぼ全領域に渡って $\pm 10^{-4}$ の範囲にあった。すなわち、平坦路床及び曲面路床とも、この程度の誤差ならば、連続方程式がほぼ満たされていると考えられる。

4. 各特性値の計算結果

4.1 渦度分布

図-3は、 $e/D = 1.0$ のA_U画面の無次元渦度分布 $\omega^* (= \omega D/U_0)$ であり、反時計回りを正（実線）としており、同図中には流れ関数の凹凸部の円柱からの距離も示してある。同図より、円柱から離脱した正・負の渦が交互に下流方向へ輸送されている。また流れ関数の凸型部分に相当する位置では負の渦度分布が、凹型部分に相当する位置では正の渦度分布が現れており、渦度分布と流れ関数が共に良い精度で得られたと考えられる。図-4は $e/D = 0.5$ のA_U画面である。同図より、円柱の路床側から発生したと考えられる円柱後方の正の渦度は、図-3と比較して、円柱後方中央部に

Fig.1 Geometry of the visualized frame

Fig.2 Contours of dimensionless continuity equation

Fig.3 Dimensionless vorticity contours

余り侵入しておらず、また円柱後方上部の負の渦度は円柱下方から発生したと考えられる正の渦度にさえぎられている様に観察される。この事実は、渦度の拡散様式が e/D の値によって異なることを示唆していると考えられる。

図-5は、 C_u と C_D 画面の ω_* である。同図の C_u と C_D 画面とでは、円柱下方から離脱したと考えられる正の渦度の分布状態が大きく異なっている。つまり C_u 画面（流れ関数の凸部が不明瞭）では、円柱下方から上方へ大きく正の渦度が侵入しているが、 C_D 画面では正の渦度が円柱下方の路床付近に限定されている。また、円柱直下の路床部分で渦度の最小値が現れており、平坦路床の場合と大いに異なる傾向を見せている。

図-6は、 $e/D = 0$ のB画面である。同図より、円柱上流側の路床に正の渦度の最大値が及び円柱後方の路床附近にも正の渦度分布が発生しており、強い逆流域の発生を示している。さらに、路床附近の正の渦度が消失して流れ場の渦度がすべて負になる距離は、円柱の中心からほぼ $6.8D$ であり、流れ関数の分布形状（図示していない）から推測した剥離域の大きさと同じであった。

4. 2 圧力分布

著者らは、非定常N-S方程式から圧力分布を求めることを試みた。なお圧力分布は、円柱前方よどみ点の圧力（ $p_{\theta=0}$ ）を基準圧力として $p_* = (p - p_{\theta=0}) / (0.5 \rho_f U_0^2)$ と無次元化している。

図-7は、 $e/D = 1.0$ で疑似定常流と仮定した圧力分布である。同図には、円柱表面から外側をマイナス軸とした円柱表面圧力と路床上の圧力分布及び流れ関数の凹凸部の円柱からの距離も示されている。

さて、「流線曲率の定理」を用いて同図を検討すると、 A_u 画面の場合には流れ関数の凸部に対応すると考えられる位置に圧力低下点が存在せず、また A_D 画面の場合には凹部に対応すると考えられる位置に圧力低下点が見あたらない。著者らが測定した円柱周り及び路床上の時間平均圧力係数の値（図示していない）を同図と比較検討すると、図-7の圧力係数の値は時間平均値のほぼ1割程度であり、現実的な圧力分布ではない様であり、上記の様な傾向は他の全ての疑似定常流れについても観察された。すなわち、円柱周りの流れ場を疑似定常流れと仮定することは困難であると考えられる。

Fig.4 Dimensionless vorticity contours

Fig.5 Dimensionless vorticity contours

Fig.6 Dimensionless vorticity contours

図-8は、図-7に対応した非定常N-S方程式からの圧力分布であり、 p^* の値は時間平均での値と同程度であった。同図より、 A_0 画面の場合に、円柱後方の路床近くに高い圧力が存在しており、円柱後流の低圧部分へ流体が流れ込んでいることを示唆している。なおこの高い圧力の為に、路床と円柱間の流れが阻害されている様である。一方、 A_0 画面の場合には、円柱下方から離脱した渦によって、路床と円柱間の流れが促進されている様に観察される。さらに路床上の圧力分布を観察すると、路床近くの流れの状況が渦の離脱位置の違いによって大きく異なっていると考えられる。なお、上述の圧力分布の特徴は、 $e/D=0.5$ の場合にも同様であった。

図-9は曲面路床上での非定常流の圧力分布である。同図より、 C_0 画面の円柱表面に正の圧力が出現しており、円柱表面圧力に若干の疑問が残るものの、曲面路床上の圧力分布は平坦路床の場合と際だった相違を見せてる。すなわち C_0 画面では、円柱と路床との間の流れは、円柱前方の路床付近で加速されているのに対し、 C_0 画面では円柱後方の高い圧力分布のために、流れが減速されている。

Fig.7 Quasi-steady pressure contours

Fig.8 Unsteady pressure contours

Fig.9 Unsteady pressure contours

5. おわりに

2種類の路床形状上での円柱周りの流れ場を可視化して、 e/D の大小、円柱からの渦の離脱位置及び路床形状の違いによって、渦度の分布形状が大きく異なることが観察された。なお、圧力分布については、疑似定常流れと仮定することは困難であると結論した。