

局所洗掘に伴う直立円柱周辺の流体場の変化に関する数値解析

金沢大学工学部 正会員 ○ 榎田真也
金沢大学工学部 正会員 石田 啓
金沢大学工学部 正会員 由比政年

1. はじめに

海岸や河川構造物周辺の洗掘現象は、底面付近の流体運動と底質などの要素が影響し合う非常に複雑なものであり、そのメカニズムの詳細は未解明な点が多い。特に、小口径の柱状構造物を対象とした場合、その周辺の局所洗掘メカニズムを考究する上で基本となるのは、底面近傍に発達する馬蹄形渦や後流渦などに代表される3次元性の強い流体場の構造を正確に把握することである(図1)。このような流体場の内部構造に関する従来の研究は、その大部分が平坦な底面地形を対象としたものであり、局所洗掘の発達に伴う流れの変化に関する知見は十分とは言えない。そこで、本研究では、3次元一般曲線座標系 Navier-Stokes 方程式の解析モデルを用いて、局所洗掘の発生した底面上に設置された直立円柱周辺の一樣流場の数値解析を行い、流体場の内部構造および底面せん断力に及ぼす底面形状の効果を明らかにする。

2. 解析の手法

解析に用いた基礎方程式は、3次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式および連続式を無次元化したものである。この基礎方程式系に対して、MAC 法による数値解析を行う。底面上に設置された直立円柱周辺の流れ場を解析するには、底面上に発達する境界層および円柱表面での渦の生成・放出過程を精度良く解析することが基本となる。そこで、基礎方程式を一般曲線座標系に変換して、円柱表面および底面に沿った境界適合格子を用いて解析を行う。離散化には差分法を用い、時間微分には陰的な Euler スキームを、空間微分には対流項に3次精度の風上差分を、それ以外の項には2次精度の中心差分を用いて解析モデルを構築した¹⁾。

3. 解析結果および考察

一樣流中に設置された直立円柱周辺に、図2に示すような逆円錐形の局所洗掘が発生した場合の流体場の解析を行った。ここでは、相似な底面形状が維持されながら発達する洗掘地形を想定し、洗掘孔の傾斜角 α を約 31° に固定し、最大洗掘深 S をゼロから $1.2D$ (D :円柱直径)の範囲で変化させて解析を行った。円柱直径に基づく Reynolds 数は2000である。また、 (x,y,z) の直交座標系に対して、円柱中心軸を z 軸、流れ方向に x 軸をとる(図1)。初期条件は静止流体場とし、円柱表面から周期的な渦放出が見られ、流れ場が十分発達する、無次元時間 $t=50$ までの計算を行った。ここでは、 $t=45\sim 50$ の時間平均の流体場の解析結果に基づいて検討を行う。

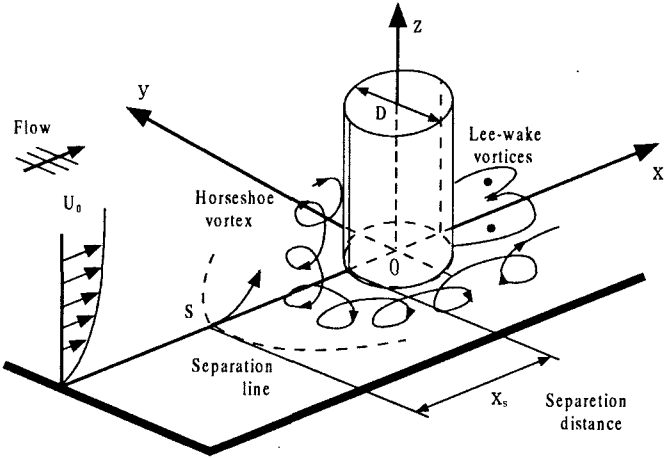


図1 直立円柱周辺の流れの基本構造

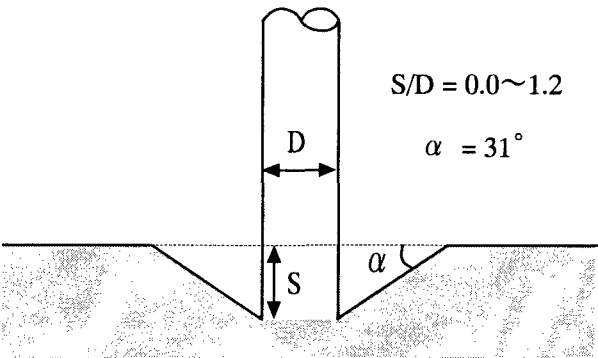


図2 洗掘地形のモデル形状

図3(a)および(b)は、平坦な底面および洗掘された底面 ($S/D=0.6$) の場合の、円柱上流側の鉛直対称面 ($y=0$) の流線を示す。各図の右端に円柱表面が位置する。主流の向きは右から左である。円柱表面に沿う下降流が、底面近傍では戻り流れとなり、馬蹄形渦を形成しているのが分かる。図は馬蹄形渦の構造に対する底面形状の効果を良く捉えており、平坦な地形では、馬蹄形渦は1つの渦から構成されているが、洗掘された地形では4つとなる。その他の洗掘深の場合の解析結果より、 S/D が増加するにつれて、馬蹄形渦が大きくなることが確認された。図3(b)の比較的大きな2つの渦は時計回り、その間の底面近傍の渦と円柱付近の渦は反時計回りである。対応する渦度の計算結果から、 $S/D=0.6$ の場合の円柱から2番目の渦 V1 の渦度が最も強いことが分かった。

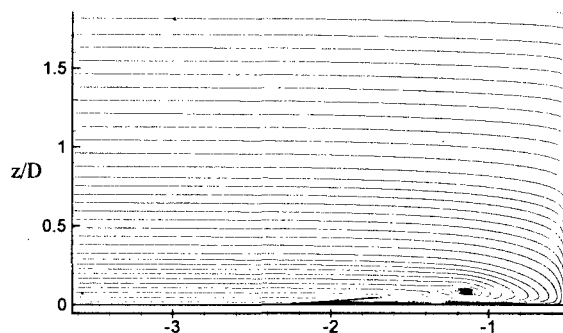
次に、流速分布に基づいて計算した底面せん断力の大きさについて検討した。図4に、それぞれの洗掘深に対する円柱上流側の x 軸上のせん断力を示す。各せん断力の値 τ は、主流下のせん断力値 τ_0 で基準化したものを表す。 $x/D=0.5$ が円柱上流のよどみ点である。馬蹄形渦の下でせん断力が増加し、時計回りの渦の下で負、円柱付近の反時計回りの渦の下で正のせん断力が発生する。円柱周辺の底面せん断力の分布を図5に示す。主流の向きは左から右である。平坦な底面の場合、最大せん断力が円柱の側方に位置し、従来の実験観測と一致する²⁾。 $S/D=0.6$ の場合、円柱上流の馬蹄形渦の下で最大せん断力が発生する。さらに洗掘深が増加すると ($S/D=1.2$)、円柱後方の洗掘孔の外縁部においてせん断力が最大となる。

4. まとめ

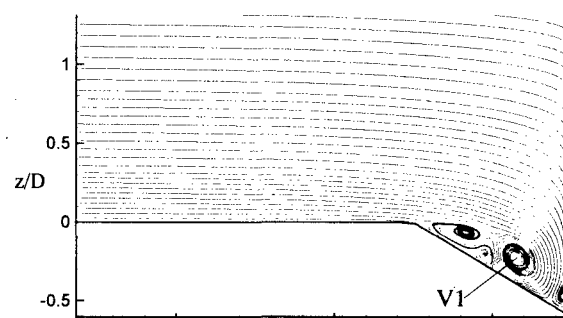
逆円錐形のモデル洗掘地形上に設置された直立円柱周辺の一樣流場に関して、一般曲線座標形に変換した Navier-Stokes 方程式の数値解析を行った。解析結果は底面近傍に形成される馬蹄形渦および後流渦の構造を詳細に捉え、局所洗掘の発達過程における流れ場の内部構造の変化に関する基礎的な知見が得られた。また、今後の課題として、乱流モデルを組み込むことにより、高 Reynolds 数領域へと対象を拡大するとともに、底質移動のモデル化を行い流体場と底面地形変化の連成解析を行う予定である。

参考文献

- 1) 石田ら：局所洗掘を伴う直立円柱周辺の3次元流体場の数値解析，海岸工学論文集，45，pp731-735，1998
- 2) Niedoroda, A.W. and C. Dalton：A review of the fluid mechanics of ocean scour, Ocean Eng., 9(2), pp159-170, 1982



(a) 平坦な底面



(b) 洗掘された底面 ($S/D=0.6$)

図3 鉛直対称面 ($y=0$) の流線

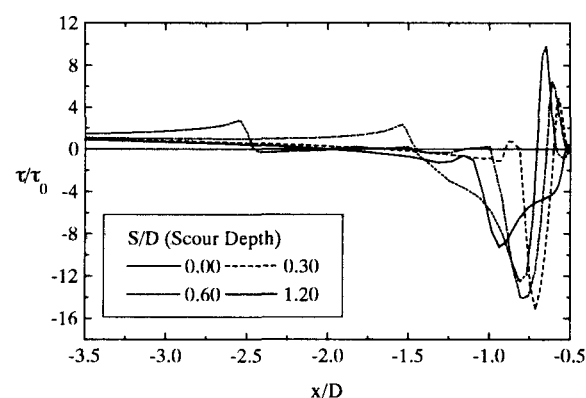


図4 x 軸上のせん断力

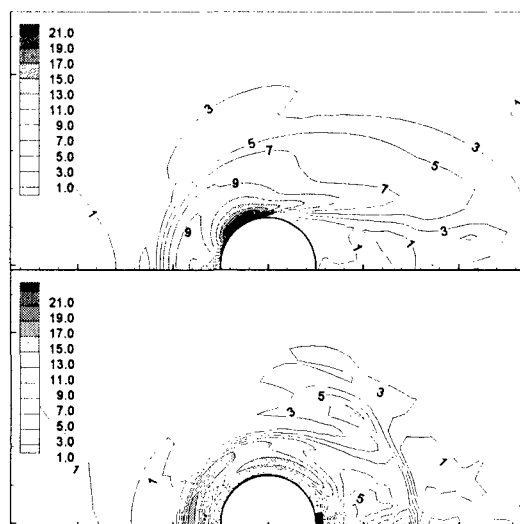


図5 底面せん断力の分布

(上段：平坦な底面，下段： $S/D=0.6$)