

II-143 直立円柱周辺の局所洗掘に伴う流体場の変化に関する3次元解析

金沢大学大学院 学生員 ○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

海岸および河川構造物周辺の局所洗掘機構の解明は、構造物の安定性を検討する上で極めて重要である。しかしながら、局所洗掘の発達過程は、波動、渦や乱れを含む流れ、底質の特性、構造物の形状などの様々な要素と関連しており、その詳細なメカニズムに関しては未解明な点が多い。特に、河川橋脚に見られるような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。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構造の変化に関する知見は決して十分とは言えない。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ることにより、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様流場に関する詳細な数値解析を行い、底面近傍の流体場の内部構造を明らかにすると共に、底面形状の変化が底面せん断力に及ぼす影響について検討する。

2. 解析の手法

非圧縮性流体に対する Navier-Stokes 方程式を一般曲線座標系に変換し、円柱表面および底面に適合した境界適合格子を用いて流れ場の解析を行う。時間微分には1次精度の後退差分を、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、差分スキームを構築した¹⁾。

境界条件は、底面および円柱表面では、速度は滑り無しの条件、圧力は外挿により決定した。流入境界では、平板に沿う層流境界の流速分布を与え、流出境界では、速度および圧力を外挿で与えた。解析領域の上面は自由水面を含まないものとし、対称条件によって与えた。また、初期条件は静止流体場とした。

3. 解析結果および考察

一様流場中に設置された直立円柱周辺に、逆円錐形の局所洗掘が発生した場合の流体場の計算を行った。ここでは、局所洗掘の進行過程において、相似な洗掘形状が維持される場合を想定し、洗掘孔の傾斜角を約 31° に固定し、最大洗掘深をゼロから $2.4D$ (D : 円柱直径) の範囲で変化させて底面近傍の流況を解析した。最大洗掘深は、流れの強度、相対水深、底質の粒径や分布等の要素により大きく変化するが、今回の解析では、Melville²⁾ の実験結果に基づく予測式に従って、予測される最大の洗掘深 $2.4D$ までの解析を実施した。Reynolds 数を 2000 とし、無次元時間 $t=30$ までの計算を行い、 $t=25\sim 30$ の平均の流体場を検討した。

図1では、局所洗掘の無い平坦な底面の場合の、鉛直対称面および底面近くの水平面上 ($z/D=0.002$) の瞬間流線図を示す。水平面では、円柱表面から約 $1.8D$ 離れた所で流線が集中していることが分かるが、この位置で、主流域下の底面境界層内の流れがよどみ点から上流に向かう流れと衝突し、馬蹄形渦が形成される。一方、対称面において、円柱前面には下降流が、底面近傍では戻り流れおよび馬蹄形渦の発生が確認できる。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、渦の数は洗掘深とともに増加し、洗掘深が $0.3D$ の場合は3つ、 $1.2D$ の場合(図2)は4つとなる。図2の比較的大きな2つの渦(右側: R1, 左側: R2)は右向き、その渦の間の渦(L2)と円柱付近の渦(L1)は左向きである。下降流の流速が洗掘深とともに増加し、円柱表面に沿う境界層が剥離することにより、渦 L1 が形成される。次に、洗掘孔の上流の底面付近 ($x/D=-3$, $z/D=0.01$) を始点とする流跡線を示す。対称面付近の流線は、円柱付近の渦 R1 に、

キーワード: 局所洗掘, 馬蹄形渦, 後流渦, せん断応力, 円柱

〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20 金沢大学工学部土木建設工学科 Tel: 076-234-4609 Fax: 076-234-4632

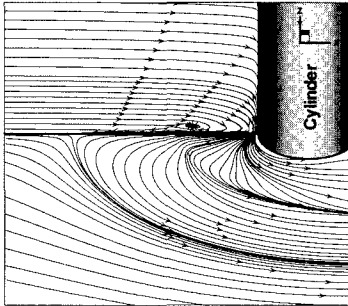


図1 底面近傍の流線（平坦地形）

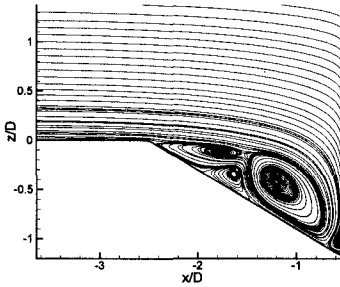


図2 対称面の流線（洗掘深 1.2D）

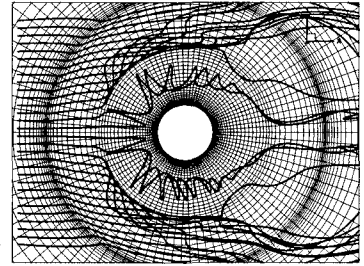


図3 円柱周辺の流線（洗掘深 1.2D）

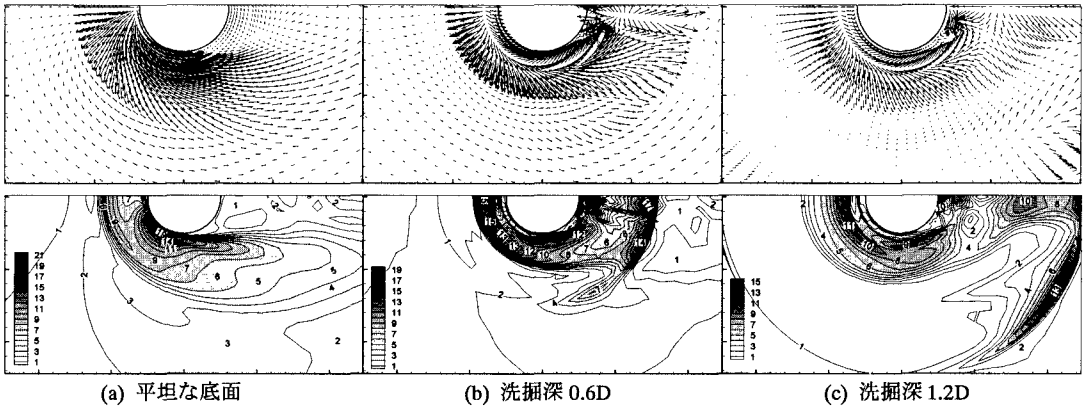


図4 底面せん断力のベクトルと大きさの底面地形による変化

その外側の流線は、渦 R2 に対応する馬蹄形渦のらせん運動の特徴を明確に示している。

流速分布に基づいて計算した底面せん断応力の分布を、図4に示す。せん断力の大きさは主流下のせん断力で基準化している。平坦な底面の場合、円柱側方の馬蹄形渦下で大きなせん断力が発生しており、最大値は、主流域下の約 19 倍に達する。一方、後流域では、主流と同程度の大きさに留まっている。洗掘深の増加とともに、上流域のせん断力は一旦増加するが、その後、減少することが認められた。例えば、最大せん断力は、平坦な底面で 19 倍、洗掘深 0.3D で 27 倍、洗掘深 0.6D で 15 倍、洗掘深 1.2D で 11 倍程度となる。洗掘深 1.2D の場合、洗掘孔の上流斜面の上部では、下部（渦 R1 下）と比較して、非常に小さなせん断力を示しているのが分かるが、これは、底質の侵食は円柱近傍で局所的に進行し、上部の底質は安息角に従って、洗掘孔の底部に供給されながら洗掘孔が拡大する過程を示唆するものである。

4. まとめ

逆円錐形の局所洗掘を伴う底面上に設置された直立円柱周辺の一様流場に関して、一般曲線座標系に変換した 3 次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式の数値解析を行った。解析結果は、底面近傍の馬蹄形渦や後流渦に代表される流れ場の 3 次元構造の詳細を良く捉えており、洗掘の進行過程で予想される円柱近傍の流況の変化や、底面付近の流れ構造の変化と底面せん断力との関連を明らかにすることができた。

今後の課題として、高 Reynolds 数領域へと対象を拡大するとともに、後流域での洗掘地形が流れ場および底面せん断力に及ぼす影響について検討する必要がある。また、流れ場の解析モデルに底質移動の評価式を組み込むことにより、柱体周辺流体場と底面地形変化の連成解析を試みたい。

- （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，pp731-735，1998
2) Melville：Pier and abutment scour：Integrated approach，J. Hydr. Engng.，ASCE，123(2)，pp125-136，1998