

局所洗掘による直立円柱周辺の 3 次元流体場の 変動特性に関する数値解析

榎田 真也*・由比政年**・石田 啓***

1. 序 論

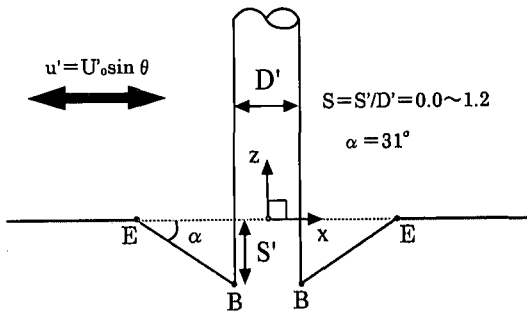
海岸・海洋構造物の設置に伴う基礎部周辺の洗掘現象を正確に予測することは、工学的に重要な課題である。従来、洗掘地形や洗掘深などの現象論的な知見が蓄積されてきた (Whitehouse, 1998) が、洗掘地形の精度の高い予測および適切な防止対策を検討する上で、底面付近の流体場の内部構造を解明することが不可欠である。

小口径の柱状構造物の場合、底面近傍に形成される馬蹄形渦および後流渦が局所洗掘の支配的な要因であるため、それらの渦の基本特性に関する研究が広く進められてきた (Niedoroda・Dalton, 1982; Sumer ら, 1997)。著者らも、平坦な底面上に設置された直立円柱周辺の 3 次元振動流場に対する数値解析を行い、KC 数の変化による渦放出パターンの変化および底面せん断力の増幅率を詳細に検討してきた (Yuhi ら, 1999)。こうした研究を発展させ、局所洗掘の発達過程を明らかにするためには、底面形状の変化に伴う底面付近の渦構造の変動特性を究明することが必要である。しかし、従来の研究は平坦な底面地形上の流体場を対象とするものが大部分で、底面形状の変化を考慮した研究例は極めて少ない。波動場における平衡洗掘地形を対象とした研究は、Kobayashi (1992) によって報告されているが、局所洗掘の発達過程における渦構造の変動特性については未解明な点が多い。

そこで、本研究では、モデル洗掘地形上に設置された直立円柱周辺の振動流場に関する詳細な数値解析および PIV を用いた速度場の計測実験を行う。以下では、解析モデルの有効性を検証すると共に、洗掘深および KC 数の変化に対する馬蹄形渦・後流渦の 3 次元構造および底面せん断力の変動特性を明らかにする。

2. 解析手法および条件

局所洗掘を伴う直立円柱の底面付近の流体場を解析する場合、底面および円柱形状を正確に表現し、物体壁面



図一 直立円柱周辺の洗掘形状の断面図

近傍で形成される境界層流れと剝離点を精度良く捉えることが重要となる。そこで、洗掘形状や円柱表面に適合した座標系を用いることとし、3 次元非圧縮性の Navier-Stokes 方程式を一般曲線座標系に変換して数値解析を行った。解析モデルの詳細は、平坦な底面地形上の振動流場を対象とした Yuhi ら (1999) と同様である。

洗掘地形は、図一に示すような円柱と同一の中心軸を持つ逆円錐形状のものである。ここでは、洗掘孔の傾斜角を 31 度に固定し、最大洗掘深を 0 から 1.2 の範囲で変化させた。S=0 は平坦な底面形状に対応する。さらに、振動流の支配パラメータとして、KC 数を 2.5~20 の間で変化させて系統的に解析を行った。この時、KC 数と Reynolds 数の比 $\beta (=Re/KC)$ は 775 とした。(x, y, z) の直交座標系に対して平坦な底面上の円柱中心に原点をとり、円柱中心軸を z 軸、振動流方向を x 軸とした。以下では、座標および流速はそれぞれ円柱直径 D' および最大振動流速 U' で基準化した値で表記する。

3. 解析結果および考察

3.1 数値解析と PIV 実験の速度場の比較

数値解析と実験測定の速度場を比較し、本解析モデルの信頼性を検討するために、造波水槽において洗掘深 S=0.6 の場合の模型実験を行った。ただし、実験では重複波の節位置において形成される振動流中に円柱模型を設置した。速度場の計測には PIV (粒子画像流速計測法) を用いた。PIV 解析の手法および実験条件は前報 (石田

* 正会員 工修 金沢大学助手 工学部土木建設工学科
** 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科
*** 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科

ら, 2000) を参照されたい。流速計測は、円柱周辺の水平断面 ($z=0.1$) および円柱前面の鉛直対称断面 ($y=0$) で行った。図-2 は、 $KC=10$ で、主流速が左向き最大となる位相の流速分布について数値解析 (左図) と PIV 実験の結果 (右図) を比較したものである。上図 (a) は水平断面流速を、下図 (b) は鉛直断面流速を示す。下図の実験結果は左図中の破線領域に対応し、各図の右端 $x=-0.5$ が円柱表面である。水平断面において、円柱左側に形成された後流渦の配置および周辺の流速分布が計算値と実験値で良く一致する。鉛直断面においても、円柱前面に沿う上昇流および洗掘孔から左上方への流れの特徴が良好に一致する。また、流速分布の時間変化の比較より、後流渦の生成・放出パターンも良く一致することが確認され、本計算手法による流況解析の有効性が検証できた。

3.2 底面地形の違いによる渦構造の変化

底面上のせん断流中に形成される馬蹄形渦および後流渦の領域を特定するために、ここでは“vortex core”を用いる。vortex core は渦管によって構成される整構造を表現するもので、速度の歪みテンソルと渦度テンソルの2乗和に対する固有値の中央値が負となる領域で定義される (Jeong・Hussan, 1995)。この手法により、相対的な渦度の大きさに依存せず渦の整構造を抽出することが可能で、例えば、碎波過程における大規模渦構造の可視化に利用され、その有効性が示されている (渡部ら, 2000)。ここでは、底面付近の後流渦および馬蹄形渦の3次元構造を可視化するために、vortex core を算定し、底面形状の相違による渦構造の変化を検討する。

図-3 は、 $KC=20$ の場合の平坦な底面および洗掘深

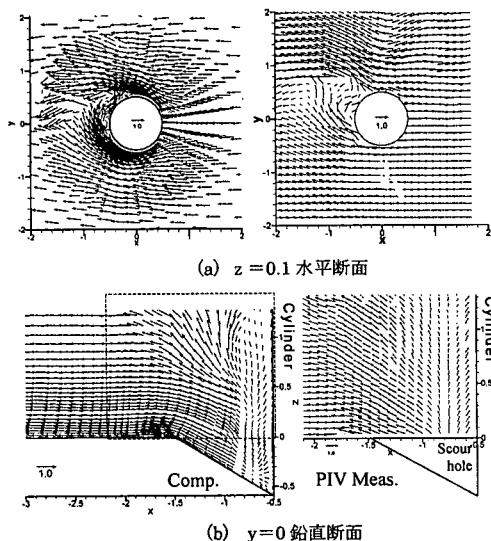


図-2 数値解析と PIV 実験の流速分布の比較 ($\theta=270^\circ$)

$S=0.6$ の洗掘地形上における vortex core の時間変化を示す。平坦な底面地形の場合、主流が右向きに加速する位相 (a) $\theta=45^\circ$ では、先の半周期に生成された後流渦の一部が主流の反転に伴って円柱前面に再接近するため、底面付近に水平軸を持つ渦管群 (VC1) が集中する。一方、底面近傍の vortex core の戻りは遅く、底面に沿う非常に薄い vortex core (VC2) は円柱上流域に留まる。その後、この vortex core は、主流に従って円柱方向に移流し、右向き最大流速時 (b) $\theta=90^\circ$ には、円柱側方に分布する。後流域では、円柱軸方向に一樣な複数の渦管が円柱表面に沿って形成され、その外側には、放出される後流渦を表す比較的大きな2組の渦管 (VC3, VC4) が存在する。主流の減速段階 (c) $\theta=135^\circ$ では、後流域は非常に複雑な渦管群 (VC5) で構成され、底面付近の渦管は流れ方向に傾斜した軸を持つ。一方、円柱上流域には、底面付近に U 字型の渦管が見られ、馬蹄形渦の特徴的な形状が vortex core (VC6) によって良く表現されることが分かる。その後、主流速がゼロ (d) $\theta=180^\circ$ となると、馬蹄形渦は消滅する。また、後流域では斜め軸を持つ渦管も消滅し、底面付近と円柱近傍に鉛直軸および水平軸を持つ vortex core が残存する。次の半周期においても、馬蹄形渦および後流渦の発生・消滅過程が同様に繰り返される。

洗掘地形の場合、底面付近の接近流が円柱前面で洗掘孔内へ流れ込む時に、洗掘孔の外縁部 (図-1 の点 E) で底面境界層が剝離し、水平軸を持つ剝離渦が生成される。渦は洗掘地形に沿って周方向に発達するため、洗掘孔外縁周りに vortex core (VC7) が分布する。また、円柱表面では強い下降流が発生し、最大洗掘深付近 (図-1 の点 B) では逆向きの渦が形成される。したがって、洗掘孔内部では、洗掘孔外縁で発生する剝離渦と円柱表面の下降流によって引き起こされる渦によって馬蹄形渦が構成される。特に $\theta=90^\circ$ から 135° の間に、円柱前面の洗掘孔内で馬蹄形渦が大規模になる。その後、馬蹄形渦は急速に減衰して、 $\theta=180^\circ$ では、非常に小さな vortex core 群へと変化する。このような洗掘孔内で馬蹄形渦が大きく発達する現象は、従来の洗掘実験で観測されている洗掘進行中の渦流れの特徴と整合する (例えば、Niedoroda・Dalton, 1982)。一方、洗掘孔周辺の後流渦は、円柱軸方向に3次元性の強い構造特性を示す。図-3 (b) 中の VC8 と VC9 で示した比較的大きな vortex core の分布より、洗掘孔付近では渦径が減少し、後流渦の生成・放出が抑制される様子が分かる。ただし、底面から円柱直径の1.5~2倍以上離れた領域では、後流渦は軸方向に2次元のとなり、平坦な底面上の後流渦の生成・放出パターンと同じとなる。

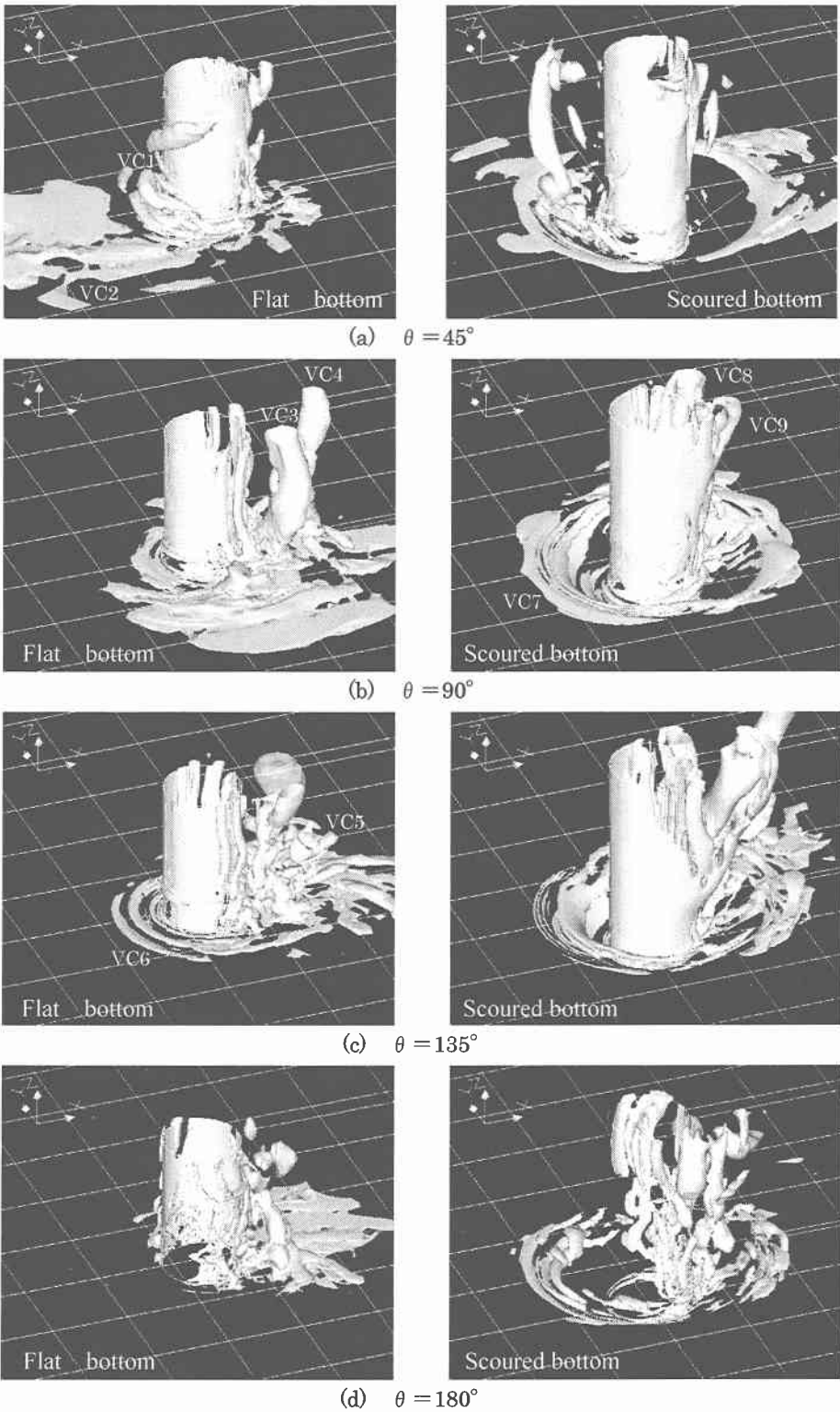


図-3 平坦な底面および $S=0.6$ の洗掘地形上の vortex core 分布の時間変化

3.3 最大流速および底面せん断力の特徴

図-4および図-5は、 $z=0.04$ 平面内の流速の水平方向成分および鉛直方向成分の1周期中の最大値を示すものである。平坦な底面地形の場合は、円柱側方から後流渦の放出方向にかけて水平流速が増大し、円柱近傍で鉛直流速が増大する傾向が見られる。一方、洗掘地形の場合、水平流速は平坦な底面地形に比べて全体的に減少するのに対して、鉛直方向流速は洗掘領域内で増大し、特

によどみ点付近で発生する鉛直流速は主流の約1.0~1.9倍に達する。 $z=0.04$ 平面の水平流速の空間的な最大値は、底面地形の変化によって主流速の2.8倍から2倍へと減少するが、 $z>1.5\sim 2.0$ においては、地形変化による影響は非常に小さくなることが確認された。洗掘地形の場合、底面付近の水平方向流速が減少し、円柱表面上の境界層の剝離が抑制されるために、洗掘孔内の後流渦の幅や長さは底面に接近するにつれて減少する。

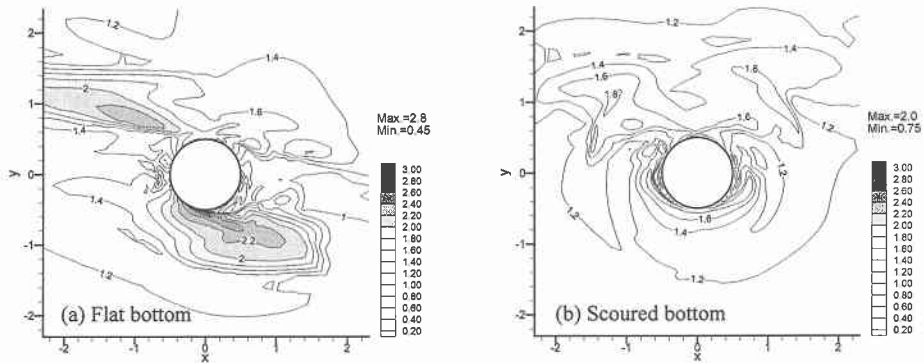


図-4 平坦な底面および洗掘地形上の水平方向流速の最大値 ($KC=20$, $z=0.04$ 平面)

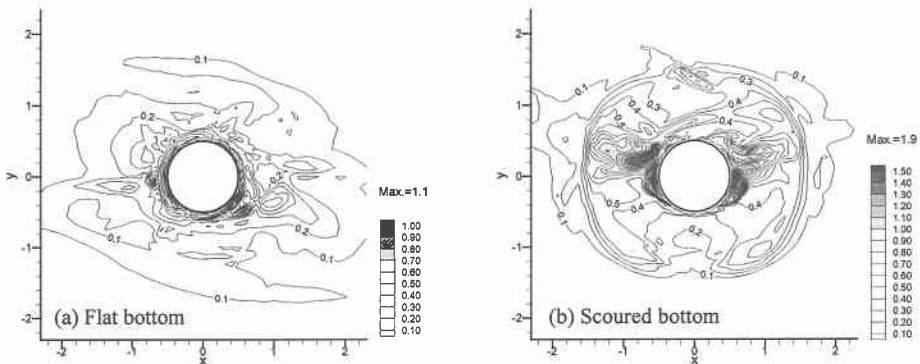


図-5 平坦な底面および洗掘地形上の鉛直方向流速の最大値 ($KC=20$, $z=0.04$ 平面)

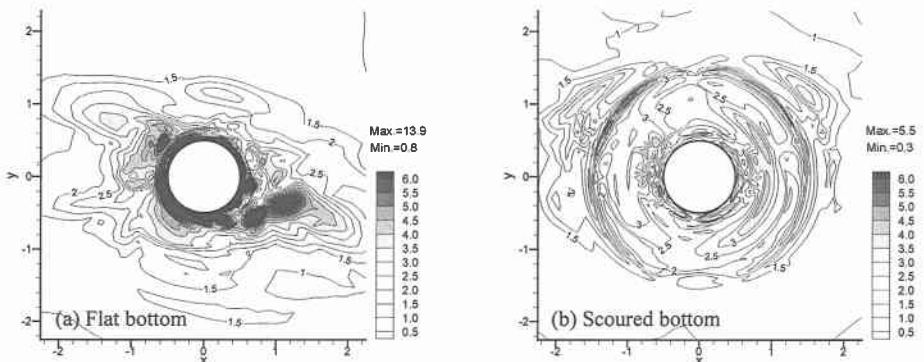


図-6 平坦な底面および洗掘地形上の底面せん断力の増幅率 ($KC=20$)

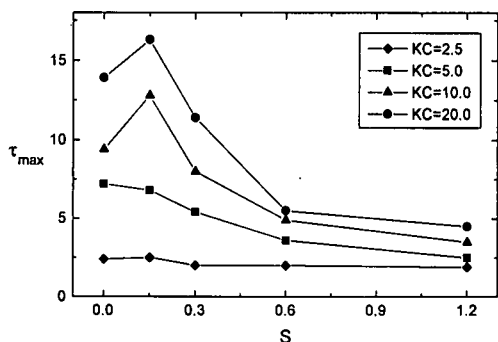


図-7 洗掘深に対する底面せん断力の最大値の変化

その結果、底面付近の後流渦は図-3(c)に示すような複雑な3次元構造を示すが、底面から円柱直径の約2倍以上離れると円柱軸方向に一樣な2次元形状を示す。

図-6は、底面に作用するせん断力の増幅率(主流域下の底面せん断力値で基準化)の時間的な最大値の分布を示したものである。平坦な底面の場合、円柱近傍から後流渦の放出方向に強い底面せん断力が発生し、図-5(a)の鉛直方向の最大流速分布との強い相関が見られる。一方、洗掘地形的場合は洗掘孔外縁部のせん断力は増大するが、洗掘孔の内部ではせん断力値は全体的に減少傾向を示す。これは、洗掘孔外縁部では底面境界層の剝離に伴う水平渦が形成されることと、洗掘孔内で生成される後流渦は平坦な底面地形的場合ほど成長しないことに起因する。次に、図-6に示した底面せん断力の増幅率の空間的な最大値 τ_{max} と洗掘深 S および KC 数との関係を図-7に示す。横軸 $S=0$ が平坦な底面地形を表す。底面せん断力の最大値は KC 数に比例する。洗掘深の増加に対して、 $KC=2.5$ と 5 の場合のせん断力は単調に減少するが、 $KC=10$ と 20 の場合は、比較的浅い洗掘深 $S=0.15$ でピークをとった後、急激に減少する。このせん断力のピーク値は、主流速度が最大となる位相で発生し、洗掘孔の外縁部に作用する。洗掘深が $S=0.6 \sim 1.2$ の値は KC 数ごとにほぼ一定となることから、洗掘深がさらに増加すると、底面せん断力の最大値は KC 数ごとに一定値に漸近すると予想される。

4. 結 論

一般曲線座標系に変換された Navier-Stokes 方程式の数値解析を行い、洗掘地形上に設置された直立円柱周辺の3次元流体場および底面せん断力の特性について検討した。洗掘深および KC 数を変化させて解析した結果から得られた主要な結論は、次のようにまとめられる。

(1) 解析より得られた円柱周辺の後流渦や馬蹄形渦などの大規模な渦流れは、PIV 実験の計測結果と良好に一致し、本手法による流況解析の有効性が検証された。

(2) 底面付近の渦構造を vortex core を用いて可視化し、洗掘孔周辺における馬蹄形渦および後流渦の3次元内的内部構造を捉えることに成功した。

(3) 洗掘孔内部における馬蹄形渦は、洗掘孔外縁部の底面境界層の剝離に伴う渦と円柱前面で発生する下降流による渦から構成される。一方、後流渦は、底面に接近するにつれて渦径が小さくなるため、洗掘孔内で3次元内的渦構造を呈する。

(4) 底面地形の違いによる最大流速の変化を解析し、洗掘地形によって水平方向流速は減少し、鉛直方向流速は増加することが分かった。平坦な底面地形的場合と比較して、水平流速の減少率は約0.6、鉛直流速の増大率は約2に達する。

(5) 底面せん断力の増幅率を算定し、洗掘深の変化に対するせん断力分布および最大増幅率の変動特性について検討した。洗掘深の増加に従って、最大増幅率は全般的に減少するが、高 KC 数 ($KC=10, 20$) の場合は、洗掘深 $S=0.15$ でピークをとることが分かった。

なお、本研究では、一定勾配の比較的簡単な逆円錐形状の局所洗掘を対象としたが、本解析モデルは、より複雑な洗掘形状および底面地形が時間的に変化する場合にも適用可能である。

謝辞：高浜雄作氏（五洋建設）、越崎亮氏（金沢市）および本田将博氏（金沢大学大学院）には、金沢大学在学中に PIV 実験およびデータ解析にあたり多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 石田 啓・由比政年・樺田真也 (2000): 波動場における直立円柱周辺の渦構造に関する PIV 計測, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 771-775.
- 渡部靖憲・安原幹雄・佐伯 浩 (2000): 砕波後の大規模渦の整構造に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 146-150.
- Jeong, J. and F. Hussain (1995): On the identification of a vortex, J. Fluid Mech., Vol. 285, pp. 69-94.
- Kobayashi, T. (1992): Three-dimensional analysis of flow around a vertical cylinder on scoured bed, Proc. 23th Coastal Eng. Conf., pp. 3482-3495.
- Niedoroda, A. W. and C. Dalton (1982): A review of the fluid mechanics of ocean scour, Ocean Eng., Vol. 9, No. 2, pp. 159-170.
- Sumer, B. M., N. Christiansen and J. Fredsoe (1997): The horseshoe vortex and vortex shedding around a vertical wall-mounted cylinder exposed to waves, J. Fluid Mech., Vol. 332, pp. 41-70.
- Yuhi, M., H. Ishida and S. Umeda (1999): A numerical study of three-dimensional flow fields around a vertical cylinder mounted on a bed, Proc. of the 3rd Conf. of Coastal Structures, ASCE, pp. 783-792.
- Yuhi, M., H. Ishida and S. Umeda (1999): A numerical study of sinusoidal oscillatory flows around a vertical wall-mounted cylinder, CEJ, Vol. 41, No. 3 & 4, pp. 225-246.
- Whitehouse, R. (1998): Scour at marine structures-A manual for practical applications, Thomas Telford, London, pp. 198.