

岸壁に作用する局所流による三次元洗掘予測手法の開発と 対策工に関する研究

Three-Dimensional Numerical Analysis on Local Scour in Front of Quay Wall due to Jet Flow and its Countermeasures

中村友昭¹・水谷法美²・篠田陽介³・小山裕文⁴

Tomoaki NAKAMURA, Norimi MIZUTANI, Yosuke SHINODA and Hirofumi KOYAMA

Local scour in front of a quay wall due to a jet flow is investigated using a three-dimensional two-way coupled fluid-sediment interaction model (FSM). Numerical results computed using FSM are analyzed and compared with experimental data measured in hydraulic tests. A model parameter involving the sediment transport and the boundary condition of the wall are determined in such a way that the root mean square error of the final seabed profile is minimized for a reference case. The predictive capability of FSM is validated against experimental data in terms of average flow velocity along the jet flow, excess pore-water pressure in the seabed, and final seabed profiles. The effectiveness of filter units against local scour and resulting instability of the wall is demonstrated in terms of excess pore-water pressure predicted using FSM.

1. 緒言

港湾の効率的な運用には船舶の入出港時間の短縮が欠かせないことから、大型船舶の船首下部には回頭性の向上による離着岸の効率化のためにバウスラスタが備え付けられている。しかし、その使用時に周囲と比較して非常に速い流速（以下、ジェット水流と称する）が発生することから、岸壁に作用して放射状に広がったジェット水流に伴う底質の移動により局所洗掘が生じ、岸壁の安定性の観点から極めて重大な課題となっている（Sumer・Fredsoe, 2002）。そこで、Hamillら（1999）は岸壁に垂直に作用したジェット水流に伴う局所洗掘に関する水理実験を行い、岸壁の有無や岸壁とプロペラの距離が最大洗掘深などの洗掘の諸元に及ぼす影響を明らかにしている。また、洗掘の防止には捨石層、蛇籠、袋詰めコンクリート、コンクリート板などの設置が考えられるもの（Sumer・Fredsoe, 2002）、その有効性に関する検討はほとんど行われていない。そこで、水谷ら（2008）は対策工としての捨石と袋型被覆材（フィルターユニット、以下FUと略す）の効果に関する水理実験を行い、洗掘量や間隙水圧の観点からFUの有効性を明らかにしている。しかし、水理実験で計測が困難な洗掘の発達過程に対する検討は行われておらず、またFUの設置が間隙水圧

に及ぼす影響について定量的な評価がなされていない点にも課題を残している。本研究では、水谷ら（2008）によるジェット水流の作用に伴う岸壁前面の局所洗掘に関する水理実験を取り上げ、流動場と地形変化の相互作用を解析できる3次元数値計算モデル（中村・Yim, 2009）により再現計算を行うとともに、その妥当性を確認する。そして、ジェット水流の作用に伴う洗掘の発達過程を検討するとともに、間隙水圧の観点から対策工としてのFUの効果을明らかにする。

2. 3次元数値計算モデル

流動場と地形変化の相互作用を考慮した3次元数値計算モデル（中村・Yim, 2009；Three-Dimensional Two-Way Coupled Fluid-Sediment Interaction Model, 以下FSMと称する）を用いて検討を行った。ここに、FSMはメインソルバーと2つのモジュールから構成されている。メインソルバーは、透過性材料の間隙内部の流体を含めた全気液相に適用できるよう一般化したNavier-Stokes (NS) 方程式を用いたLES (Large-Eddy Simulation) に基づいており、GNS (Generalized NS Solver) と称される。そのGNSには、気液界面を追跡するVOF (Volume of Fluid) 法 (Hirt・Nichols, 1981) を改良したMARS (Multi-Interface Advection and Reconstruction Solver; 刀功, 1997) に基づくモジュール (VOF Module, 以下VOFと称する) が組み込まれており、さらにRoulundら（2005）を参考に構築した掃流砂移動に伴う地形変化を追跡する底質輸送モジュール (Sediment Transport Module, 以下STMと称する) がTwo-Wayカップリング手法により組み込まれている。図-1にFSMの計算領域とFSMを構成するGNS,

1 正会員 博(工) 名古屋大学特任講師 高等研究院
2 正会員 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会
基盤工学専攻
3 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工
学専攻
4 非会員 工修 (株) 不動産環境商品部長ブロック
環境事業本部

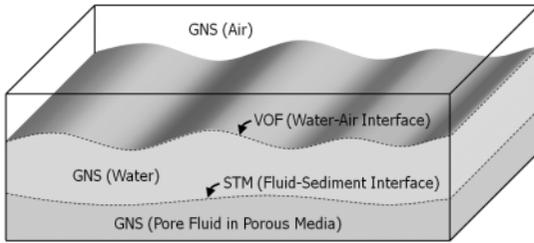


図-1 FSMの計算領域とGNS, VOF, STMの適用範囲

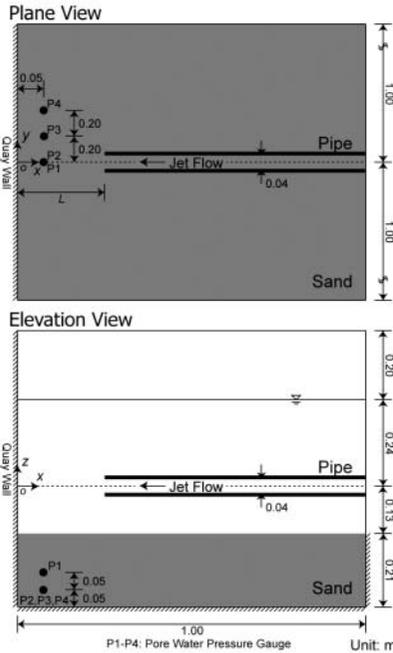


図-2 計算領域の概略図と過剰間隙水圧の比較位置

VOF, STMの適用範囲を示す。同図に示すように、GNSは透過性材料の間隙内部を含む全気液相の流体運動の解析に、VOFは気液界面の追跡に、STMは地形変化の追跡に適用される。詳細は中村・Yim (2009) を参照されたい。

3. 計算条件

水谷ら (2008) の実験装置をモデル化した図-2の計算領域を用いて解析を行った。すなわち、図-2に示すように、岸壁 ($x=0.0\text{m}$) の前面に長さ1.0m、幅2.0m、高さ0.21mの砂地盤 (中央粒径0.1mm、比重2.65、空隙率0.40) とその表面から0.13m上方に内径40mmのパイプを設定した。静水深は0.37mとし、船舶の離着岸を想定したジェット水流の作用時間 T を60, 180sの2種類、船舶の位置を想定した岸壁とパイプ先端の距離 L を0.15, 0.45mの2種類、パイプからのジェット水流の流速 V を2.0, 2.5, 3.0m/sの3種類変化させ、さらにFUの有無も変化させた

表-1 計算条件

ケース	T [s]	L [m]	V [m/s]	FU
Case 1 (基準ケース)	60	0.15	2.5	なし
Case 2	60	0.15	3.0	
Case 3	60	0.15	2.0	
Case 4	60	0.45	2.5	
Case 5	180	0.15	2.5	
Case 6	60	0.15	2.5	あり
Case 7	60	0.15	3.0	
Case 8	60	0.15	2.0	

(表-1). 本稿では、Case1 ($T=60\text{s}$, $L=0.15\text{m}$, $V=2.5\text{m/s}$, FUなし) を基準ケースと称する。

FSMを構成するGNS・VOFにおいて、原点近傍では4mm角の等間隔格子を採用し、計算時間の短縮のために原点から離れるにしたがって水平方向に約15%、鉛直方向に約5%ずつ広げた不等間隔格子を用いた。流速と圧力の境界条件として、不透過面 (底面, 岸壁表面, 砂地盤側面) にはSlip条件またはNo Slip条件 (詳細は後述する) を、上面には圧力一定条件を、その他の面には勾配ゼロの条件を用いた。また、VOF関数の境界条件には、全境界に対して勾配ゼロの条件を課した。

一方、FSMを構成するSTMでは、砂地盤表面を上述のGNS・VOFと同じ大きさに分割し、GNS・VOFから得られた流速を補間して求めた砂地盤表面から0.01m上方での流速を用いて摩擦速度の評価を行った。境界条件として、岸壁表面に対して不透過条件を、その他の面に対して漂砂の供給がゼロの条件を課した。

本論では、中村・Yim (2009) に倣って、摩擦速度の係数を700、底質の静止摩擦角と動摩擦角を23度とした。また、その他のパラメータは、重力加速度を 9.81m/s^2 、水の密度を $9.97 \times 10^3\text{kg/m}^3$ 、空気密度を 1.18kg/m^3 、水の動粘性係数を $8.93 \times 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$ 、空気の動粘性係数を $1.54 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ 、表面張力係数を $7.20 \times 10^{-2}\text{N/m}$ 、付加質量係数を -0.04 、非線形抵抗力係数を0.45、線形抵抗力係数を25.0、限界Shields数を0.05と設定した。

なお、FUの効果を検討したCase6からCase8では、水理実験で実際にFUを設置した位置を参考に、砂地盤の一部を中央粒径10mmの礫に置き換えることでFUのモデル化を行った。ただし、水理実験においてFUの設置により地形変化が小さくなることが確認されており (水谷ら, 2008), またSTMでは混合底質の漂砂移動は取り扱えないことから (中村・Yim, 2009), STMによる地形変化の影響は考慮しなかった。

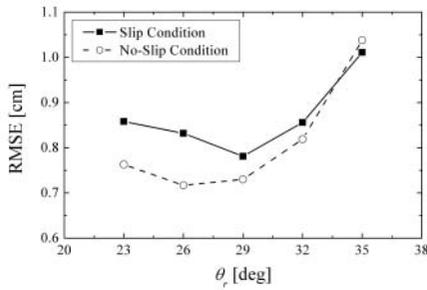


図-3 地形変化のRMSE に与える底質の安息角 θ_r と不透過面の境界条件の影響 (基準ケース)

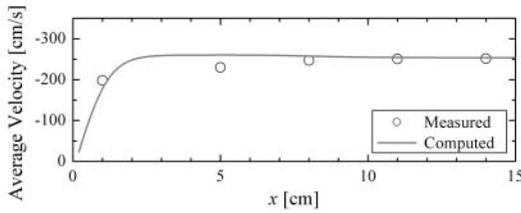


図-4 パイプ中央軸上での平均流速の比較 (基準ケース)

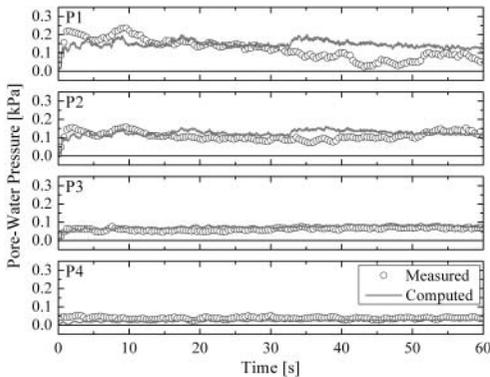


図-5 過剰間隙水圧の比較 (基準ケース)

4. 結果及び考察

(1) FSMの妥当性の検証

a) 底質の安息角と不透過面の境界条件の影響

水谷ら (2008) で説明されているように, 水理実験では岸壁に平行な4測線上 ($x=5, 8, 11, 14\text{mm}$) でのジェット水流作用後の地形変化が計測されている. そこで, 図-3に示すように, 4測線上でのジェット水流作用後の地形変化のRMSE (Root Mean Square Error) に着目し, 基準ケース (Case1) において底質の安息角 θ_r (23, 26, 29, 32, 35度) と不透過面の境界条件 (Slip条件, No Slip条件) がRMSEに与える影響をまず検討した. 同図より, 境界条件に関わらず, θ_r の増加とともにRMSEが減少する傾向が認められるものの, その後急激に増加することが分かる. また, θ_r が最も大きい35度のケースを

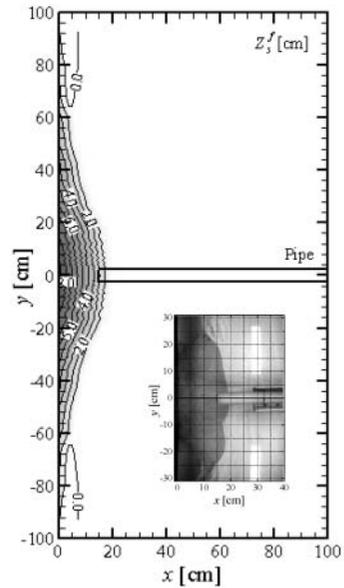


図-6 最終洗掘深 z_f^s の分布と水理実験でのジェット水流作用後の洗掘の様子 (基準ケース)

除いて, Slip条件よりもNo Slip条件の方がRMSEが小さくなることが確認できる. 本論では, 図-3のキャリブレーション結果に基づいて, θ_r を26度, 不透過面の境界条件をNo Slip条件として, 以下検討を進める.

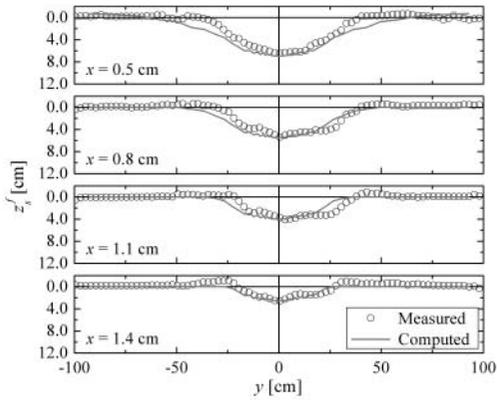
b) 平均流速および過剰間隙水圧の比較

図-4にパイプ中央軸上 (x 軸上; 図-2参照) での平均流速の比較を示す. ここで, 実線は計算結果を, \circ 印は実験結果を表す. 同図において, 計算結果は作用時間 T の最後の10秒間の流速を, 実験結果は地形変化が十分小さくなった後の10秒間の流速を平均して求めている. 図-4より, 計算結果, 実験結果ともに, 岸壁近くの $x=1.0\text{cm}$ で平均流速が若干減少する傾向が認められることが分かる. また, 水理実験では計測されていないものの, さらに岸壁に近づくにしたがって平均流速が急激に減少することも計算結果から確認できる.

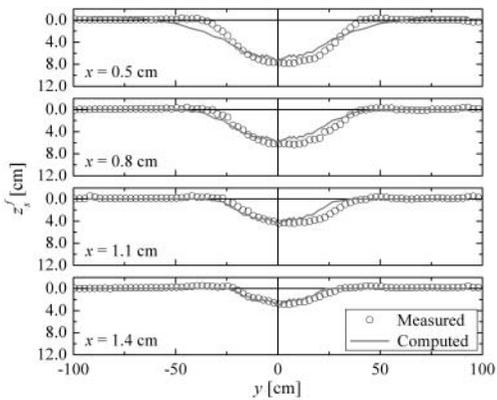
図-5にP1からP4の計測点 (図-2参照) での過剰間隙水圧の比較 (実線: 計算結果; \circ 印: 実験結果) を例示する. 同図より, 計算値はP1における33~52sでの値を若干過大評価しているものの, ジェット水流の発生とともに急激に上昇し, その後安定する傾向を示していることが分かる. また, その大きさも計算結果と実験結果ではほぼ一致していることが確認できる. したがって, 本モデルFSMは平均流速と過剰間隙水圧の観点から水理実験を再現できていることが示された.

c) 最終洗掘深の比較

図-6に, 最終洗掘深 z_f^s の計算結果と水理実験で撮影したジェット水流作用後の洗掘の様子を例示する. ここで,



(a) 基準ケース (Case 1)

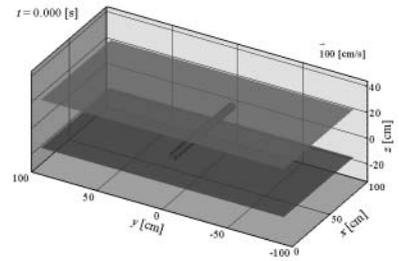


(b) Case 4

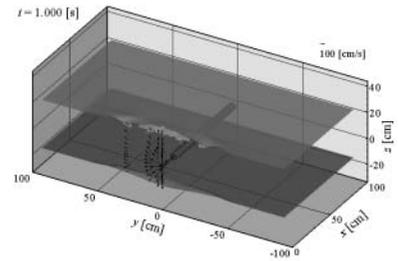
図-7 最終洗掘深 z_s^f の比較

z_s^f が正のときは洗掘を、 z_s^f が負のときは堆積を表す。同図より、計算結果、実験結果ともに、洗掘がパイプの下まで達するほど広がっていることが分かる。また、位置が若干異なっているものの、数値計算では $y=15\text{cm}$ 付近にはほぼ x 軸と平行に、水理実験では $x=0\text{cm}$, $y=15\text{cm}$ から $x=10\text{cm}$, $y=25\text{cm}$ にかけて洗掘の形状が不連続になっていると思われる部分が確認できる。

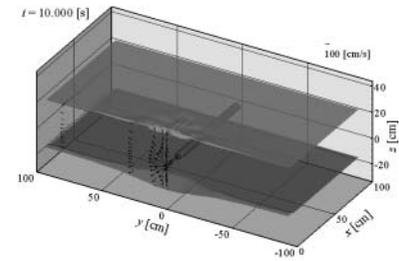
図-7に、岸壁に平行な4測線上 ($x=5, 8, 11, 14\text{mm}$)での最終洗掘深 z_s^f の比較 (実線: 計算結果; ○印: 実験結果)を示す。同図より、特に $x=5\text{mm}$ における $25 < y < 50\text{cm}$ での z_s^f を若干過大評価していることが分かる。これは、長さ28m、幅11mの平面波浪水槽 (水谷ら, 2008)の一部をモデル化した計算領域 (図-2参照)を用いたことから、岸壁表面 ($x=0.0\text{m}$)に加えて領域側面 ($y=1.0\text{m}$, $x=1.0\text{m}$)での流速の境界条件の影響も受けたためと考えられる。しかし、図-7より、最大深さや形状を良く再現できていることが確認できる。なお、上述したように、図-7 (a) から求めたRMSEを用いて底質の安息角 θ と不



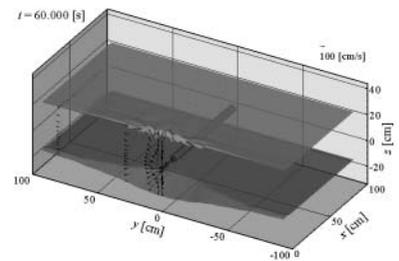
(a) ジェット水流発生前 ($t=0.0\text{s}$)



(b) ジェット水流発生から1.0s後 ($t=1.0\text{s}$)



(c) ジェット水流発生から10.0s後 ($t=10.0\text{s}$)



(d) ジェット水流作用後 ($t=60.0\text{s}$)

図-8 洗掘の発達過程 (基準ケース)

透過面の境界条件のキャリブレーションを行った。

以上より、ジェット水流の作用に伴う局所洗掘に対する本モデルFSMの妥当性が示された。

d) 洗掘の発達過程

図-8にジェット水流の作用に伴う洗掘の発達過程を例示する。同図より、ジェット水流の発生に伴いまず岸壁に沿う方向 (y 軸方向)に洗掘が発達し始め (図-8 (b)), 時間の経過とともにパイプの方向 (x 軸正方向)にも拡大する様子 (図-8 (c))が確認できる。そして、図-8 (d)

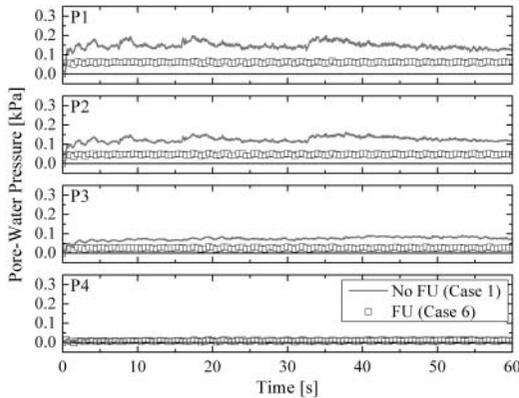


図-9 FUの有無による過剰間隙水圧の比較

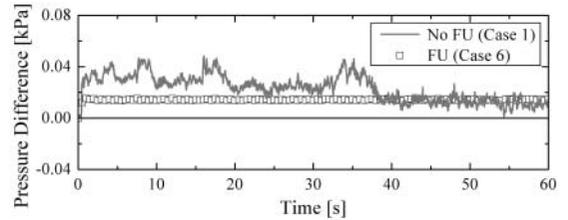
に示すように、最終的に大きな洗掘が生じたことが分かる。このように、水理実験において定量的な評価が困難な洗掘の発達過程を、本モデルFSMを用いることで詳細に評価できることを示した。

(2) FUの設置の効果

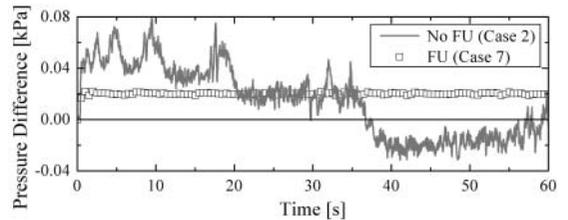
図-9にFUの有無による過剰間隙水圧の比較(実線: FUなし(基準ケースCase1); □印: FUあり(Case6))を示す。同図より、FUの設置に伴い圧力の上昇が小さくなるとともに、変動が非常に小さく安定した値を示していることが分かる。図-10に、FUの有無によるP1・P2点間の水圧差の比較(実線: FUなし; □印: FUあり)を示す。ここで、水圧差が正のときはP1(上側)が大きい場合を、負のときはP2(下側)が大きい場合を表す。同図より、図-9と同様に、FUの設置により安定した圧力差になることが分かる。また、35s辺りまではFUなしの圧力差の方がFUありの場合と比較して大きいものの、その後はFUありの場合を下回り、特に図-10(b)では圧力差が負、つまり下側(P2)の方が圧力が大きくなっていることが分かる。したがって、FUがない場合は圧力差が負になることでP1・P2間の砂粒子が不安定化し、液状化発生の可能性が高まったことから、底質の移動が助長されて大規模な洗掘に到ったと考えられる。同様の現象は、遡上津波による構造物周辺の局所洗掘(Nakamuraら, 2008)でも確認されている。一方、FUを設置した場合は圧力差が常に正、つまり上側(P1)の方が大きく、また変動も小さいことから、底質の移動とそれに伴う洗掘の発生が抑えられたと考えられる。以上より、対策工としてのFUの有効性を過剰間隙水圧の観点から確認できた。

5. 結論

本論では、ジェット水流の作用に伴う岸壁前面の局所洗掘を取り上げ、流動場と地形変化の相互作用を解析できる3次元数値計算モデル(FSM)により再現計算を行



(a) $T=60s, L=0.15m, V=2.5m/s$



(b) $T=60s, L=0.15m, V=3.0m/s$

図-10 FUの有無によるP1・P2点間の水圧差の比較

った。その結果、水理実験で計測された平均流速、過剰間隙水圧、最終洗掘深を再現できることを確認し、FSMの妥当性を明らかにした。また、洗掘の発達過程に対する検討を行うとともに、FUの効果を過剰間隙水圧の観点から明らかにした。

謝辞: 本研究は、(独)日本学術振興会科学研究費補助金特別研究員奨励費(課題番号: 07J00623)の下で行われたことを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 功刀資彰(1997): 自由界面を含む多相流の直接数値解析法, 機械学会論文集B編, 第63巻, 第609号, pp.1576-1584.
- 中村友昭・Solomon C. Yim(2009): 波浪場と地形変化の相互作用を考慮した3次元数値モデルの開発と侵食・洗掘現象への適用, 海洋開発論文集, 第25巻, pp. 1227-1232.
- 水谷法美・篠田陽介・小山裕文(2008): バウスラスタによる岸壁前面の局所洗掘と袋型被覆材による対策に関する研究, 海洋開発論文集, 第24巻, pp. 1219-1224.
- Hamill, G. A., H. T. Johnston and D. P. Stewart (1999): Propeller wash scour near quay walls, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, ASCE, Vol. 125, No. 4, pp. 170-175.
- Hirt, C. W. and B. D. Nichols (1981): Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries, *J. Comp. Phys.*, Vol. 39, pp. 201-225.
- Nakamura, T., Y. Kuramitsu and N. Mizutani (2008): Tsunami scour around a square structure, *Coastal Eng. J., JSCE*, Vol. 50, No. 2, pp. 209-246.
- Roulund, A., B. M. Sumer, J. Fredsøe and J. Michelsen (2005): Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile, *J. Fluid Mech.*, Vol. 534, pp. 351-401.
- Sumer, B. M. and J. Fredsøe (2002): *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*, Advanced Series on Ocean Eng., Vol. 17, World Scientific, 550 p.