

津波の越流による海岸堤防背後の洗掘の再現計算について

名古屋大学高等研究院 正会員 ○ 中村 友昭
名古屋大学大学院工学研究科 フェロー 水谷 法美

1. 緒言: 2011年東北地方太平洋沖地震津波を受けて海岸堤防の機能を粘り強く発揮できる構造の検討が求められていることから、これまでに鳩貝ら(2012)などにより堤防背後の洗掘や被覆工の安定性に対する検討が水理実験の観点から行われている。しかし、堤防の安定性と粘り強さの効果を定量的に評価できる段階には到っておらず、それらの評価に有用と考えられる津波・被覆工・洗掘・地盤支持力の相互作用を考慮した数値解析技術が求められている。そこで、堤防の安定性を評価できる数値解析技術の開発に向けて、本研究では、鳩貝ら(2012)の水理実験に流体・構造・地形変化・地盤の相互作用を解析できる中村・水谷(2013)の数値計算モデルを適用し、水理実験結果との比較により同モデルの再現性の検討を行う。

2. 数値計算手法の概要: 数値計算モデル(中村・水谷, 2013)は、地盤の間隙内部の流体を含む非圧縮性粘性流体からなる全気液相の流体運動を可動構造物の運動と地形の変化を考慮して解析するLES, 気液界面の追跡を行うVOFモジュール, 可動構造物の解析を行うIBモジュール, 浮遊砂の濃度分布と掃流砂・浮遊砂輸送に伴う地形変化の計算を行う底質輸送モジュール, 地盤の波浪応答の解析を行う有限要素法解析モジュールから構成されている。このうち、LESでは空隙率 m の時間変化が十分に小さい($\partial m/\partial t = 0$)と仮定していたが、ここでは $\partial m/\partial t \neq 0$ としたNavier-Stokes方程式を用いた。また、底質輸送モジュールでは安息角を超えた斜面は瞬間的に崩壊するとしていたが、ここでは時間の経過とともに徐々に崩壊するように改良した。

3. 計算条件: 図-1に鳩貝ら(2012)による裏法尻洗掘実験(縮尺1/25)をモデル化した計算領域を示す。同図に示すように、比高0.36 m, 天端幅0.12 m, 法面勾配2割の不透過な海岸堤防, 0.04 m角の基礎工, 中央粒径0.25 mmの飽和状態の移動床を設置した。そして、表法尻での越流水深の最大値 H_{max} が0.24 mとなる流れを沖側境界から流入させた。ただし、水理実験においてバルブからの流入流量 Q の計測が行われておらず、堤防の沖側では表法尻での越流水深 H しか計測されて

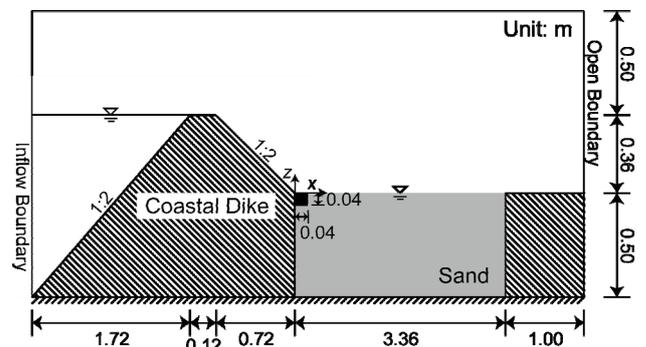


図-1 計算領域の概略図(左側が沖)

いなかったことから、完全越流時の単位奥行きでの頂堰に対する式(土木学会, 1999)

$$Q = CH\sqrt{2gH}, \quad C = C_0(0.31 + 0.23H/H_d) \quad (1)$$

により Q を推定した。ここで、 g は重力加速度、 H_d は堰の高さ(=0.86 m)である。ただし、上式の導出に際して接近速度水頭の影響が無視されていることから係数 C_0 を導入し、試行錯誤により $C_0 = 1.4$ とした。

4. 結果及び考察: 越流現象の再現性を確認するために、まず地形変化が生じない状態とした計算を行った。図-2に水位の比較を、図-3に堤防表面から0.02 m上方での流速の比較を示す。なお、図-3の計算結果には気相の値も含んでいる。図-2(a)と図-3(a)より、水位が上昇し、下がり始めてしばらくまでは、式(1)により求めた流量を流入させることで裏法尻での水位と流速を概ね再現できている。しかし、裏法では水位を過大評価、逆に流速は過小評価している。これは、数値計算では法面を階段状に近似していることから、水理実験よりも粗度が高かったためと考えられる。また、水理実験の様子を撮影した写真-1に示すように、裏法では空中に設置した計測装置に越流してきた水塊が当たり大きく跳ね上がっていることから、正確に計測できていなかった可能性も考えられる。ただし、越流時の裏法での流動場に差が認められる現象は榊山・松山(2011)

によっても確認されていることから、この現象の再現性の向上は数値解析に共通する課題であると考えられる。このように水理実験との差はあるものの、水位、流速ともに時間変化の傾向は捉えられていることから、以下、洗掘に対する検討を行う。

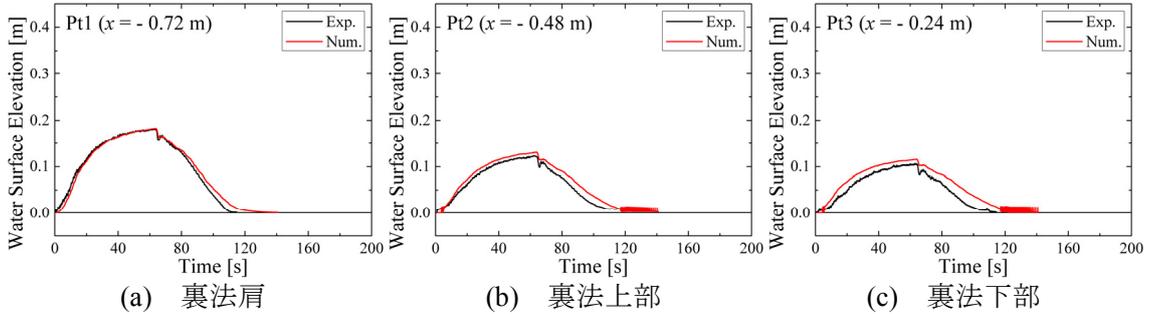


図-2 水位の比較 (地形変化なし, $H_{max} = 0.24$ m)

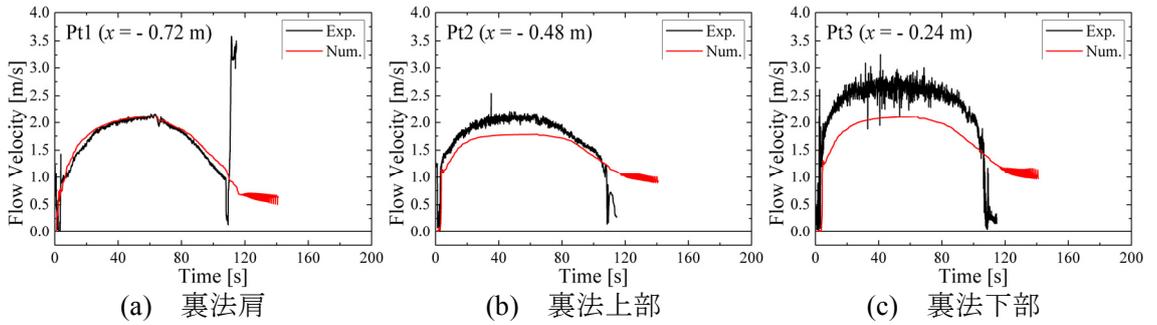
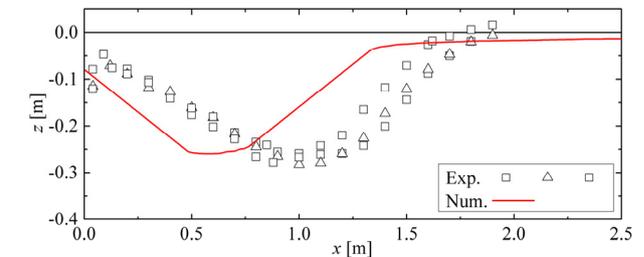
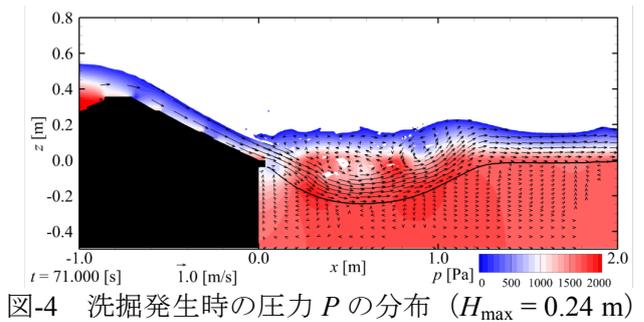


図-3 流速の比較 (地形変化なし, $H_{max} = 0.24$ m)

洗掘発生時の圧力 P の分布を図-4 に、津波作用後の地形の比較を図-5 に示す。図-4 より、水位上昇時の P は移動床表面の方が高く、内部に入るとつれて低下する傾向があるものの、基礎工周辺では内部よりも移動床表面の方が低くなっていることが分かる。これは、基礎工岸側での流れの剥離のために圧力の上昇が抑えられていたためである。このように移動床表面の方が内部よりも P が低い状態は、地盤に作用する有効応力の低下を示唆していることから、有効応力の低下に伴って砂粒子間の拘束力が弱まり、それにより底質の移動が助長される現象が生じていたものと推測される。そのために、図-5 に示すように、水理実験では基礎工の周辺に小規模な洗掘が生じていたものの、数値計算では漂砂計算に P の影響を考慮していなかったことから、その洗掘が現れなかったと考えられる。また、洗掘の範囲は水理実験結果と比較して狭く、洗掘の最大深さについては過小評価、その位置も沖側にずれていることが分かる。これは、上述したように流速を過小評価していたためであるが、洗掘の形状については基礎工の周辺を除いて水理実験結果とのある程度の相関が確認できる。なお、圧力 P の上昇が抑えられている現象は裏法肩周辺でも確認できる。以上より、洗掘を計算する際における流速の再現の重要性を示すとともに、基礎工周辺の洗掘にとっては漂砂計算へ移動床内部の状態を考慮することの重要性が示唆される。



写真-1 水理実験の様子 ($H_{max} = 0.08$ m; 国総研, 2013)



謝辞: 本研究は、河川砂防技術研究開発 (代表者: 水谷法美) の補助を受けたことを付記し、謝意を表す。
参考文献: [1] 土木学会, 水理公式集 平成 11 年版, 713 p., 1999. [2] 国総研河川研究部海岸研究室ウェブページ, http://www.nilim.go.jp/lab/fcg/lab0/02_02.html, 2013-12-1 参照. [3] 榎山・松山, 土木学会論文集 B3 (海岸工学), 67(2), I_791-I_795, 2011. [4] 中村・水谷, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 69(2), I_1026-I_1030, 2013. [5] 嶋貝ら, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 68(2), I_406-I_410, 2012.