海岸堤防を越流する津波と裏法尻の洗掘に関する数値解析

中村 友昭¹・水谷 法美²

¹正会員 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: tnakamura@nagoya-u.jp

²フェロー 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

E-mail: mizutani@civil.nagoya-u.ac.jp

海岸堤防を越流した津波による裏法尻の洗掘現象を対象に、津波と地形変化の相互作用が解析できる数値計算モデルによる再現計算を行い、海岸堤防の粘り強さの効果を定量的に評価する際に有用と考えられる数値解析技術の確立に向けた検討を行った。その結果、堤防の法面を階段状に近似した影響を受け、裏法での水位を過大評価し、流速を過小評価する傾向が現れることを確認し、直交格子を用いて数値計算を行う際における斜面のモデル化の重要性を示した。また、津波越流時に基礎工の周辺には滲出流が生じていたことを踏まえ、浸透滲出流の影響を考慮した漂砂計算手法を用いた計算を行った結果、漂砂計算に浸透滲出流の影響を考慮することで津波作用後の地形の再現性が向上することが判明し、本現象を検討する際における浸透滲出流の重要性を示した。

Key Words : tsunami overflow, coastal dike, scour, numerical model, infiltration/exfiltration

1. 緒言

海岸保全施設は、津波・高潮・高波等による災害から海岸を防護し、国土を保全するために必要な施設であるものの、東日本大震災ではこれまでの想定をはるかに超えた巨大な津波により甚大な被害が発生した。このうち三面張構造の海岸堤防では、被覆工の剥離や裏法尻の洗掘により損壊に到った事例が報告されている¹⁾。このような海岸堤防の被災は、被覆工の表面に作用する津波力に加えて、高流速の流れ、法尻の洗掘、堤体内部の水圧・空気圧など複合的な要因によって生じたと推定される。一方、来たるべき東海・東南海・南海地震等に伴う津波による被害を軽減するためには、設計対象の津波高を超えた場合でも海岸堤防の効果を粘り強く発揮できる構造が求められている。この粘り強い海岸堤防の整備に向けては、海岸堤防が被災する際の具体的な条件やメカニズムの解明が不可欠であると考えられるものの、津波・被覆工の挙動・洗掘等の地形変化・基礎地盤の応答の4者間の相互作用を解析できるツールがなく、水理実験による検討^{2) 3)}に留まっていることから、粘り強さの効果を定量的に評価できる段階には到っていない。

本研究では、その評価の際に有用と考えられる数値解

析技術の確立に向けた取り組みとして、津波・被覆工・地形変化・地盤の相互作用の解析を目指して開発が進められている中村・水谷⁴⁾による数値計算モデルに着目する。そして、海岸堤防を越流した津波による裏法尻の洗掘現象に関する鳩貝ら³⁾の水理実験に同モデルを適用し、津波の越流現象とそれに伴う洗掘現象を解析する際の課題を把握し、その課題への対応策の評価を行うとともに、本現象の特性を検討することを目的とする。

2. 数値計算モデルの概要

3次元流体・構造・地形変化・地盤連成数値計算モデル⁴⁾は、メインソルバーと4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連続式とNavier-Stokes方程式に基づくLES (Large-Eddy Simulation) である。そのメインソルバーには、気液界面を追跡するMARS (Multi-Interface Advection and Reconstruction Solver) に基づくVOF (Volume of Fluid) モジュール、掃流砂・浮遊砂輸送による地形変化の計算と浮遊砂濃度分

布の解析を行う底質輸送モジュール等が組み込まれている。このうち、メインソルバーでは空隙率 m の時間変化が十分に小さい($\partial m / \partial t = 0$; t : 時間)と仮定して導いたNavier-Stokes方程式を用いていたが、ここではより実現象に即した解析を行うために、次式に示すように $\partial m / \partial t \neq 0$ として左辺第1項を修正した。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\{m + C_A(1-m)\} \bar{v}_i \right] + \frac{\partial (m \bar{v}_i \bar{v}_j)}{\partial x_j} \\ = -\frac{m}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + m g_i + \frac{m}{\rho} (f_i^s + R_i + f_i^{ob}) \\ + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (2m \hat{\mu} D_{ij}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-m \tau_{ij}^a) + Q_i + m \beta_i \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{v}_i$ は流速のGrid Scale成分、 C_A は付加質量係数である。他の変数の説明は中村・水谷⁵⁾を参照されたい。また、底質輸送モジュールでは崩壊基準を超えた斜面は瞬間的に崩壊すると仮定していたが、上記と同様により実現象に即した解析を行うために、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

鳩貝ら²⁾による縮尺1/25の構造物水路実験のうち、裏法尻洗掘実験をモデル化した図-1の計算領域を用いて解析を行った。なお、上述した数値計算モデルは3次元モデルであるが、後述するように地形変化が沿岸方向にはほぼ一様であることが水理実験結果から確認できていることから、ここでは計算負荷の軽減のために単位奥行きでの断面2次元計算を行った。図-1に示すように、比高0.36 m、天端幅0.12 m、表法勾配2割、裏法勾配2割または3割の不透過な海岸堤防、0.04 m角の不透過な基礎工、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0.04, 0.08, 0.12, 0.24 mとなる流量 Q を沖側境界から流入させた。ただし、水理実験において 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

図-1 計算領域の概略図

H の時間変化しか計測されていないことから、完全越流時の単位奥行きの広頂堰に対する式⁹⁾

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

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。また、上式の導出に際して接近速度水頭の影響が無視されており、また表法勾配が上式の適用範囲外であることから導入した係数が C_Q であり、水理実験で水位と流速がともに計測されている裏法尻での流量が同程度になるように試行錯誤し、裏法勾配2割の場合は、 $H_{\max}=0.04$ mのとき $C_Q=1.1$, $H_{\max}=0.08$ mのとき $C_Q=1.8$, $H_{\max}=0.12$, 0.24 mのとき $C_Q=1.4$, 裏法勾配3割の場合は $H_{\max}$ に関わらず $C_Q=1.4$ とした。座標軸は、裏法勾配2割のときの裏法尻を原点とする岸向きを x 軸、移動床表面を原点とする鉛直上向きを z 軸とした。

計算格子は、基礎工の周辺に10 mm×5 mmの等間隔直交格子を用い、それ以外の領域には計算負荷のさらなる軽減のために格子幅を徐々に広げた不等間隔直交格子を用いた。流速と圧力の境界条件として、沖側境界は水面より下側から Q に対応する流速を流入させる流入境界とし、海岸堤防を含む固定床の表面にはSlip条件を、岸側境界には勾配ゼロの条件を、上側境界には圧力一定の条件を用いた。VOF関数 F の境界条件として、岸側境界には水の流入を防ぐために $F=0$ の条件を、それ以外の境界には勾配ゼロの条件を課した。掃流砂の境界条件として、移動床の沖側端と岸側端からの掃流砂の供給がゼロの条件を用い、浮遊砂の境界条件として、沖側境界と岸側境界からの浮遊砂の供給がゼロの条件を用いた。

移動床のパラメータとして、密度は水理実験と同値の 2.70×10^3 kg/m³とした。中央粒径 d_{50} は水理実験での移動床の代表粒径 $d_{50}=0.30$ mmより若干小さい0.25 mmとした。空隙率 m は水理実験では得られていないことから、0.4と仮定した。また、静止摩擦角 θ_s 、動摩擦角 θ_d 、水中安息角 θ_w 、斜面崩壊開始基準 θ^* 、斜面崩壊完了基準 θ^+ についても得られていないことから、まず θ はRoulundら¹⁰⁾に倣って32.2°とした。そして、簡単のために $\theta + \theta^*$ を θ と同値つまり $\theta^* = 0.0^\circ$ とし、 $\theta + \theta^+$ を θ より若干小さい $\theta - 0.01^\circ$ つまり $\theta^+ = -0.01^\circ$ とした上で、 $\theta \leq \theta$, $\theta + \theta^* \leq \theta$, $\theta \leq \theta + \theta^+$ の範囲内で試行計算を行い、 $\theta = 19.99^\circ$, $\theta = 20.0^\circ$ とした。一方、漂砂計算に用いる摩擦速度は、中村ら⁹⁾に倣って、移動床の表面近傍での z 軸方向の格子幅5 mmの1.5倍として、移動床の表面から7.5 mm上方での接線方向流速を用いてvan Driest型減衰関数により求めた。ここで、等価砂粗度 k_s は $2.5d_{50}$ とした。また、底質巻き上げ係数 C_p は、 θ_s や θ_d の場合と同様に試行計算を行い、定常流に対する値0.00033の5倍、つまり $C_p = 0.00165$ とした。その他のパラメータは中村・水谷^{4,5)}を参照されたい。

図-2 水位および流速の比較（裏法勾配2割）：(a) $H_{\max}=0.08$ m, (b) $H_{\max}=0.24$ m

4. 計算結果および考察

(1) 越流現象の再現性

水位と堤防表面から20 mm上方での流速の時間変化に関して、水理実験結果との比較を図-2に例示する。ここで、Pt1は裏法肩での値、Pt2は比高の2/3の高さにおける裏法上での値、Pt3は比高の1/3の高さにおける裏法上での値である。また、黒線は水理実験結果、青線は数値計算結果であり、流速の数値計算結果には気相の値も含んでいる。なお、赤線の説明は後述する。

図-2の黒線と青線の比較より、裏法肩Pt1では水位を過大評価、流速を過小評価する傾向が認められるものの、流量は上述したように同程度であることを確認している。ただし、写真-1に例示するように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る状況下にある裏法では、上述した傾向は岸側ほど大きくなり、Pt3では流速を1 m/s以上も過小評価している。この理由として、数値計算では法面を階段状に近似しており、階段の水平部分に乗った水塊には斜面下方向の力が作用しないこと、また階段状としたことで粗度が水理実験より大きかったことが考えられる。なお、写真-1は数値計算と一致させるために左右反転して示した。

この流速の過小評価が地形変化に与える影響は無視できないと考えられることから、裏法上の水塊を斜面に沿って落下させるために、CADMAS-SURF¹⁰⁾に倣って、裏法上の水塊には水平方向岸向きに $g \sin \theta$ (θ : 裏法勾配)

写真-1 水理実験の様子（裏法勾配2割， $H_{\max}=0.08$ m）⁹⁾

の加速度を作用させた。その結果を図-2の赤線に示す。

図-2の赤線と青線の比較より、加速度を作用させたことで裏法Pt2、Pt3での水位が低下し、逆に流速が上昇したことが分かる。ただし、粗度が水理実験より大きい階段状の近似は変わらないことから、依然として流速を0.5 m/s程度過小評価しているものの、黒線で示した水理実験結果に近づいたことが分かる。また、この影響を受けて裏法肩Pt1でも水位の低下と流速の上昇が生じ、水理実験結果を概ね再現できるようになった。

これに関連して、本研究の基礎工周辺と同程度の計算格子を用いて、被覆ブロック斜面傾斜堤の越流現象の計算を行っている榊山・松山¹¹⁾によっても、越流時の裏法での流速の再現が難しいことが確認されていることから、特に越流現象に関しては、直交格子を用いて数値計算を行う際の斜面のモデル化の重要性が示唆される。

以上より、加速度を作用させた場合でも流速を過小評価しており、水理実験結果との差は依然としてあるものの、水位、流速ともに時間変化の傾向は捉えられている

図-3 津波作用後の地形の比較：(a) 裏法勾配2割， $H_{\max}=0.08$ m，(b) 裏法勾配2割， $H_{\max}=0.24$ m，(c) 裏法勾配3割， $H_{\max}=0.08$ m，(d) 裏法勾配3割， $H_{\max}=0.24$ m

図-4 洗掘進展時の流動場の様子（裏法勾配3割， $H_{\max}=0.24$ m）

ことから、以下、洗掘に対する検討を行う。

(2) 洗掘の再現性

津波作用後の地形の比較を図-3に例示する。ここで、□△○印は水理実験結果、赤線は数値計算結果であり、水理実験結果は計測されていた3測線すべての結果を示した。なお、青線の説明は後述する。

図-3の赤線より、最大洗掘深は概ね再現できているものの、水理実験結果と比較して洗掘が沖側の狭い範囲で生じており、また最大洗掘深の位置が沖側にずれている。この原因として、上述したように流速を過小評価していること、さらにそのために裏法尻での流速の向きが異なっていたことが考えられる。図-4に洗掘進展時の流動場の様子を例示する。ここで、 P は圧力変動である。図-4より、基礎工の周辺には流れの剥離とそれに伴う渦が形

成されており、移動床の表面の方が内部よりも圧力が低くなる現象が確認できる。この影響により基礎工の周辺には上向きの滲出流が生じており、底質の移動が助長される現象が生じていたと推測される。そのために、図-3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たと考えられる。その一方で、数値計算では底質の移動が助長される効果は考慮されていないことから、基礎工の周辺に洗掘は生じなかったと考えられる。

そこで、浸透滲出流の影響を考慮した漂砂計算手法⁹⁾を用いて計算を行った。なお、簡単のために浸透滲出流の遮蔽係数 α_{w} は1.0とし、浸透滲出流の影響を考慮すると底質の移動が全体的に生じやすくなる傾向が確認できたことから、底質巻き上げ係数 C_{pl} は0.00165の1/100とした。この計算による津波作用後の地形の比較を図-3の青線に、流動場の様子の比較を図-5に示す。なお、比較のために、

図-5 漂砂計算に浸透滲出流の影響を考慮したときの洗掘進展時の流動場の様子の比較(左図: 数値計算結果, 右図: 水理実験結果⁹⁾; 裏法勾配2割, $H_{\max}=0.08$ m): (a) 計算開始20秒後, (b) 40秒後, (c) 60秒後, (d) 80秒後

写真-1を図-5(b)の水理実験結果として再掲した。

図-5(a)と(b)より, 基礎工の周辺は越流開始直後には射流状態であったものの, 計算開始40秒後には洗掘が発生し始めた影響を受けて冲向きの小規模な碎波が生じており, 気泡による白濁が生じている水理実験結果との対応が確認できる。その後, 図-5(c)と(d)より, 堤防の天端に現れる限界水深よりも移動床岸側の一樣水深部での水深の方が若干大きいことから考えると, 跳水が基礎工の周辺に生じていると判断できる。このとき, 水理実験結果からは高濃度の浮遊砂のために移動床の表面の位置が視認できないものの, 数値計算結果からは洗掘が少しずつ進展している様子が確認できる。また, 基礎工の周辺には小規模な洗掘が発生していることも確認できる。この小規模な洗掘は, 図-3(a)より, 崩壊基準を超える斜面が現れ, それが崩壊したことから津波作用後には消えてしまっている。しかし, 図-3より, 漂砂計算に浸透滲出流の影響を考慮したことで洗掘の発生範囲が岸側に

広がるとともに, 最大洗掘深の位置が岸側に移動したことから, 水理実験結果に近づいたことが分かる。

以上より, 漂砂計算に浸透滲出流の影響を考慮することで洗掘の再現性が向上することが確認できたことから, 本研究で対象とした現象を検討する際における浸透滲出流の重要性が示唆される。ただし, 洗掘形状の再現性のさらなる向上のためには, 流速の再現性の向上が不可欠であると言える。また, 移動床に関するパラメータが上述したように数多くあることから, それらの値が得られないときの同定手法には課題を残している。

5. 結論

本研究では, 海岸堤防を越流した津波による裏法尻の洗掘現象に関する水理実験⁹⁾の再現計算を行い, 海岸堤防の粘り強さの効果を定量的に評価する際に有用と考え

られる数値解析技術の確立に向けた検討を行った。その結果、得られた主要な結論を以下にまとめる。

1. 数値計算において堤防の法面を階段状に近似した影響を受け、裏法での水位を過大評価し、流速を過小評価する傾向があることが判明するとともに、直交格子を用いて数値計算を行う際における斜面のモデル化の重要性を示した。
2. 基礎工の周辺には流れの剥離とそれに伴う渦が形成され、移動床の表面の方が内部よりも圧力が低くなる現象を確認した。また、この影響により基礎工の周辺には浸透流出が生じており、底質の移動が助長される現象の発生を示唆した。
3. 以上の結果を踏まえて浸透流出の影響を考慮した漂砂計算手法を用いた計算を行った結果、浸透流出の影響を考慮することで津波作用後の地形の再現性が向上することが判明するとともに、本研究で対象とした現象を検討する際における浸透流出の重要性を示した。

謝辞：水理実験のデータを国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室より提供を受けた。ここに記して、感謝の意を表する。また、本研究の一部は平成25年度河川砂防技術研究開発（代表者：水谷法美）と科学研究費補助金若手研究(B)（代表者：中村友昭）の補助を受けたことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 加藤史訓, 野口賢二, 諏訪義雄, 木村 晃, 河合雅史, 高木利光, 小俣雅志: 東北地方太平洋沖地震津波による仙台平野南部での海岸堤防被災・洗掘に関する調査, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_1396-I_1400, 2012.

- 2) 鳩貝 聡, 諏訪義雄, 加藤史訓: 津波の越流による海岸堤防の裏法尻の洗掘に関する水理模型実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_406-I_410, 2012.
- 3) 小竹康夫, 磯部雅彦: 津波の越流時に海岸堤防の法面に作用する圧力特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_891-I_895, 2012.
- 4) 中村友昭, 水谷法美: 地形変化の影響を考慮した地盤解析手法の開発とその適用, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I_1026-I_1030, 2013.
- 5) 中村友昭, 水谷法美: 3次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデルを用いた海上を浮遊するコンテナの風による漂流挙動に関する数値シミュレーション, 第26回数値流体力学シンポジウム, E07-1, 10 p., 2012.
- 6) 土木学会 水理委員会 水理公式集改訂小委員会: 水理公式集 平成11年版, 713 p.
- 7) Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsøe, J., and Michelsen, J.: Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile, *J. Fluid Mech.*, Vol. 534, pp. 351-401, 2005.
- 8) 中村友昭, Solomon C. Yim, 水谷法美: 三次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデルの開発と没水物体周辺の洗掘現象への適用, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 66, No. 1, pp. 406-410, 2010.
- 9) 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室: [2] 津波・高潮 2. 粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討 (オンライン), http://www.nilim.go.jp/lab/fcg/lab0/02_02.html, 2013-12-1 参照.
- 10) 財団法人沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路 (CADMAS-SURF) の研究・開発, 沿岸開発技術ライブラリーNo. 12, p. 88, 2001.
- 11) 榊山 勉, 松山昌史: 津波に対する傾斜堤消波ブロックの安定性に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 67, No. 2, pp. I_791-I_795, 2011.

NUMERICAL ANALYSIS OF TSUNAMI OVERFLOW OVER A COASTAL DIKE AND LOCAL SCOURING AT THE TOE OF ITS LANDWARD SLOPE

Tomoaki NAKAMURA and Norimi MIZUTANI

To establish numerical analysis technology for quantifying the tenacity of coastal dikes, tsunami overflow over a coastal dike and local scouring at the toe of its landward slope are simulated and analyzed using a numerical model applicable to tsunami-scour interaction. Numerical results show that the approximation of the slope as a stepped profile causes the overestimation of water surface elevation and the underestimation of flow velocity over the landward slope, suggesting that it is essential to consistently model the smoothness of the slope for numerical analysis with rectangular numerical cells. Furthermore, it is found that the predictive capability of the model can be improved in terms of the final scour profile by taking into account the effect of infiltration/exfiltration in the sediment transport calculation, suggesting that the infiltration/exfiltration is of importance in analyzing local scouring due to tsunami overflow.