

地盤内部の応力変動の影響を考慮した 漂砂量式を用いた遡上津波による 地形変化シミュレーション

SIMULATION ON TSUNAMI-INDUCED TOPOGRAPHIC CHANGE
USING SEDIMENT TRANSPORT FORMULA
WITH DYNAMIC EFFECTIVE STRESS INSIDE SAND BED

中村友昭¹・水谷法美²

Tomoaki NAKAMURA and Norimi MIZUTANI

¹正会員 博(工) 日本学術振興会特別研究員 PD 名古屋大学大学院(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻(同上)

A sediment transport formula coupled with dynamic effective stress inside a sand bed was proposed and incorporated into an existing topographic change model so that local scour could be reproduced under severe wave action such as run-up tsunamis, and topographic change simulation on tsunami-induced local scour around a square structure was performed to verify the applicability of the proposed model. Compared with hydraulic model experiments, the present model improved the computational accuracy of not only the initial stage of local scour at the seaward corner of the structure but also the maximum depth of a scour hole after tsunami wave action; hence, the present model was very useful in predicting deposition and erosion patterns under a strong influence of effective stress inside a sand bed.

Key Words : *Sediment transport, effective stress, run-up tsunami, local scour, bed load transport, suspended load transport, relative mean effective stress ratio*

1. 緒言

1960年5月に発生したチリ地震に伴う大津波により宮城県気仙沼湾を始めとする多くの浅海域で大規模な地形変化が生じた事例が報告されている¹⁾。このような津波に伴う地形変化に関して、気仙沼湾での観測により津波による漂砂では侵食と比較して堆積が生じにくいという傾向が確認されていることから、高橋ら^{2),3)}は気仙沼湾での地形変化を再現するために浮遊砂を考慮した地形変化モデルの提案を行っている。また、小林ら⁴⁾は津波を想定した非定常流下での固定床および移動床に対する水理模型実験を行い、粗面乱流に対する対数則により求めた摩擦速度を局所漂砂量則に代入することで津波による漂砂量を概ね再現できることを明らかにしている。

これに対して、藤井ら⁵⁾は流況が空間的に急激に変化する場所では非平衡性が卓越することから前述の局所漂砂量則だけでは現象を十分に再現できないと指摘し、強い圧力勾配下にも適用できる log-wake 則と指数関数型の浮遊砂濃度分布を仮定した局所フラックス・移流拡散混合モデルを提案している。これとは別に、Takahashi ら⁶⁾は掃流砂と浮遊砂を独立に取り

扱うことで非平衡性の問題に対処し、掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発を行っている。一方、西畑ら^{7),8)}は津波伝播シミュレーションに底面勾配の影響を考慮した掃流砂量式に基づく地形変化モデルを組み込み、1960年チリ地震津波による気仙沼湾および2004年スマトラ島沖地震津波によるスリランカ・キリンダ湾の再現計算を行っている。また、木原・松山⁹⁾は浮遊砂の供給が局所的に変化する状況下ではその濃度分布を例えば藤井ら⁵⁾の指数関数のように仮定することは困難であると指摘し、津波の伝播、浮遊砂の移流拡散および底質の移動に伴う地形変化を解析できる静水圧近似の仮定に基づく3次元数値モデルの開発を行っている。しかしながら、1960年チリ地震津波時に気仙沼湾で実測された堆積量と侵食量の比0.28¹⁾を依然として過大評価する傾向^{5),6),8)}が認められることから、上記のような様々な検討にも関わらずその適用には課題を残しているのも事実である。

一方、Nakamura ら¹⁰⁾は遡上津波による地形変化の発生メカニズムを検討するために、港湾構造物をモデル化した形状の単純な矩形の陸上構造物を取り扱い、その周囲に生じる局所洗掘現象について水理模

型実験と数値計算の両面から検討を行っている。一般に、水理模型実験で構造物周辺の流速の水平方向成分の測定を行った際にその値が小さいにも関わらず局所的な洗掘が生じるのは、構造物の周囲に生じる渦の効果が大きく、流動場の3次元性の影響を強く受けることから、上記のような構造物周辺の局所洗掘現象については渦の影響が支配的であることが指摘されている(例えば辻本・水上¹¹⁾)。そこで中村ら¹²⁾は、数値計算により求めた構造物周辺の渦構造を λ_2 定義^{13),14)}、すなわち $\lambda_2 = -0.01$ の等値面により可視化し、構造物の沖側表面から側面にかけての砂地盤表面近傍に形成される渦芯が局所洗掘現象に影響を与える可能性があることを明らかにしている。それに加えて、Nakamuraら¹⁰⁾は砂地盤の内部に生じる応力変動が局所洗掘現象に及ぼす影響についても検討を加え、津波による土砂の移動現象は液状化に到る有効応力の低下に伴う砂粒子間の拘束力の減少とその状態の砂地盤に作用する流速変動の影響をとともに受けることを明らかにしている。しかしながら、液状化に代表される地盤内部の応力変動が漂砂量に与える影響については津波に限らずほとんど検討例がなく¹⁵⁾、地盤の表面に生じる浸透浸出流の影響を加味した漂砂量式がNielsen¹⁶⁾やTurner・Masselink¹⁷⁾により提案されているのみである。

本研究では、まずNielsen¹⁶⁾を参考に地盤の内部に生じる応力変動の影響を考慮した新たな漂砂量式を提案し、Takahashiら⁶⁾による既存のモデルに組み込むことにより地形変化シミュレーションの構築を行った。そして、Nakamuraら¹⁰⁾による遡上津波に伴う矩形構造物周辺の局所洗掘現象を取り上げ、Takahashiら⁶⁾による津波移動床モデルおよびNielsen¹⁶⁾による漂砂量式を組み込んだ同モデルとの比較を行うとともに、本論で提案した数値モデルの適用性を考究した。以下では、まず新たに構築した地形変化モデルの詳細を説明し、続いてNakamuraら¹⁰⁾による水理模型実験の概要を述べる。その後、同提案モデルによる数値計算結果とそれに対する考察を行い、最後に本稿のまとめとして結論を述べる。

2. 地形変化モデル

(1) 支配方程式及び数値計算スキーム

Takahashiら⁶⁾は漂砂現象を底質の移動形態に基づいて掃流砂層と浮遊砂層に分けて取り扱い、巻き上げ砂量と沈降砂量の差で定義される掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮することで非平衡な浮遊砂濃度条件にも適用できる津波移動床モデルの開発を行っている。ここで、掃流砂層と浮遊砂層はそれぞれ砂粒が掃流形態と浮遊形態で移動する領域と定義した砂粒の移動形態の相違に基づく概念的な区分であり、その定式化の際に必要な掃流砂量および交換砂量のモデル係数については津波を想定した一

方向流による固定床および移動床に対する水理模型実験を基に評価を行っている。

このモデルに基づいて、浅水理論の使用を前提とした線流量を断面平均流速 \bar{v}_i に書き換えると、本論で支配方程式として採用した掃流砂層および浮遊砂層に対する漂砂の連続式はそれぞれ

$$\frac{\partial z_s}{\partial t} + \frac{1}{1-m} \left(\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + w_e \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \bar{v}_i \frac{\partial C}{\partial x_i} - \frac{w_e}{\eta} = 0 \quad (2)$$

となる。ただし、 z_s は基準面からの地盤の高さ、 C は断面平均浮遊砂濃度、 x_i は位置ベクトル、 t は時間、 m は空隙率、 q_i は掃流砂量、 w_e は掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量、 η は地盤上の水位であり、下付きの i はEinsteinの総和規約に従う。ここで、限界Shields数 τ_{*c} の影響を考慮すると、 q_i と w_e は

$$q_i = a_q \sqrt{sgd^3} (\tau_{*i} - \tau_{*c})^{1.5} \quad (3)$$

$$w_e = a_w \sqrt{sgd} (\tau_* - \tau_{*c})^{2.0} - w_0 C \quad (4)$$

と定式化される⁶⁾。ただし、 a_q と a_w は無次元係数、 $s = \rho_s / \rho_w - 1$ は底質粒子の水中比重、 ρ_s と ρ_w はそれぞれ底質粒子と水の密度、 g は重力加速度、 d は底質粒子の粒径、 τ_{*i} は i 方向のShields数、 $\tau_* = \sqrt{\tau_{*i} \tau_{*i}}$ 、 w_0 は底質粒子の沈降速度である。

本論では、支配方程式(1)と(2)の数値解法に有限差分法を適用し、同式の時間発展計算には1次精度前進差分法を、移流項には1次精度風上差分と2次精度中央差分を組み合わせた手法を採用した。また、計算の進行に伴い地盤の勾配が局所的に安息角 ϕ を上回る可能性があることから、大谷¹⁸⁾による斜面崩壊モデルを本手法に組み込むことで急勾配の発生を抑えた。ただし、簡単のために洗掘穴の下流側で崩壊砂が浮遊砂として連行される効果については省略した。本稿では、無次元係数 a_q 、 a_w として、一方向流に対する漂砂量実験の検討結果であるが、Takahashiら⁶⁾による $a_q = 21.0$ と $a_w = 0.012$ を採用し、その他のパラメータは $m = 0.4$ 、 $\rho_s = 2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\rho_w = 9.97 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$ 、 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 、 $\tau_{*c} = 0.05$ 、 $\phi = 30.0^\circ$ とした。また、底質粒子の無次元粒径を $d_* = sgd^3 / \nu_w^2$ 、水の分子動粘性係数を $\nu_w = 8.93 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ としたとき、 w_0 は以下のRubeyの式¹⁹⁾により推算した。

$$w_0 = \sqrt{sgd} \left(\sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36}{d_*}} - \sqrt{\frac{36}{d_*}} \right) \quad (5)$$

ただし、式(2)は $\eta = 0$ のとき発散することから、 η の最小値を1.0mmとして計算を行った。

(2) 応力変動の影響を考慮した漂砂量式

浸透浸出流は底質粒子の有効重量と地盤表面の境界層厚に影響を与え、浸透流により底質粒子が重くなることで漂砂量が減少し、また浸透流により境界層が薄くなることで漂砂量が逆に増加する傾向があることが知られている²⁰⁾。Nielsen¹⁶⁾はこの相反する

二つの効果を考慮した次に示す修正 Shields 数 τ_* を提案している.

$$\tau_* = \frac{u_*^2 (1 - \alpha w / u_*)}{gd (s - \beta w / k_s)} \quad (6)$$

ただし, α と β はそれぞれ境界層厚と有効重量への影響を表す無次元パラメータ, w は浸出流速, u_* は摩擦速度, k_s は透水係数である. ここで, Nielsen ら²¹⁾は Conley²²⁾の実験結果を基に $\alpha = 16$ ($-0.05 < w / u_{*0} < 0.025$; u_{*0} : $w = 0.0$ 時の摩擦速度) と推定しており, さらに地盤内部の底質粒子に対しては $\beta = 1.0$ であるが, 地盤表面近傍では 1.0 よりもかなり小さな値を有すると指摘している. また, Martin・Aral²³⁾は斜面崩壊実験を行い, β の範囲を $0.35 < \beta < 0.4$ と決定している.

Nakamura ら¹⁰⁾は, 津波による地盤内部の有効応力の減少とそれに伴う液状化の発生は波浪の周期と比較しても短い時間スケールで生じ, 有効応力の低下に伴う砂粒子間の拘束力の減少とその状態の砂地盤に作用する流速変動が津波による土砂の移動現象に影響を及ぼすことを明らかにしている. そこで, 津波による応力変動の時間スケールは波浪と同程度であることが確認されていることから, ここでは波浪に対して提案された式 (6) の修正 Shields 数を参考に地盤内部の応力変動の影響を考慮した新たな漂砂量式を提案する. まず地盤外部の現象である境界層の厚薄については地盤近傍の流速場の影響を強く受けると考えられることから, 漂砂量が浸透浸出流に依存する Nielsen の定式化 (式 (6) の分子) を採用した. 一方, 底質粒子の有効重量に関しては浸透浸出流だけでなく地盤表層に作用する有効応力の影響も受けると考え, 地盤の有効応力状態を代表する相対平均有効応力比 γ を用いて底質粒子の水中比重 s を再評価した. すなわち, γ の増加に伴って見かけの水中比重 s' が減少すると仮定すると, 式 (3), (4), (6) は次のように書き直せる.

$$q_i = a_q \sqrt{s'gd^3} (\tau_{*i} - \tau_{*c})^{1.5} \quad (7)$$

$$w_e = a_w \sqrt{s'gd} (\tau_* - \tau_{*c})^{2.0} - w_0 C \quad (8)$$

$$\tau_* = \frac{u_*^2 (1 - \alpha w / u_*)}{s'gd} \quad (9)$$

$$s' = s (1 - \beta' \gamma) \quad (10)$$

$$\gamma = 1.0 - \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m0}} \quad (11)$$

ここで, σ'_m は地盤表面近傍の平均有効応力, σ'_{m0} は σ'_m の初期値であり, β' は $s, s' > 0.0$ かつ $\gamma \leq 1.0$ より $0.0 \leq \beta' < 1.0$ なる無次元パラメータである.

本研究では, 試行計算での結果を基に $\alpha = 5.0$, $\beta = 0.35$, $\beta' = 0.992$ とした. また, 洗掘現象に及ぼす γ の減少の影響は確認できていない¹⁰⁾ことから s' の最大値を s とし, 式 (6) に示す Nielsen¹⁶⁾の修正 Shields 数を用いる際には $s - \beta w / k_s$ の最小値を 0.01 と設定した. 一方, 地形変化の再現計算で極めて重要と考えられる流速場と応力場に関しては, 既に精度検証

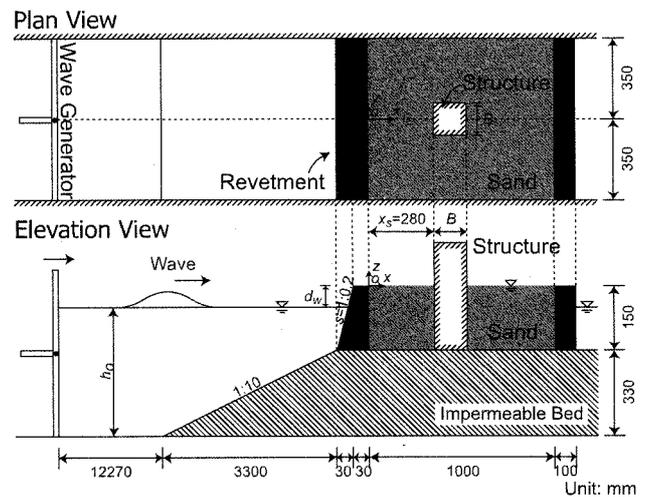


図-1 数値波動水路の概略図

が行われている Nakamura ら¹⁰⁾による 3 次元直接数値計算によるシミュレーション結果を採用した. ここで, Nakamura ら¹⁰⁾は流速場と応力場のシミュレーションに際して, サブグリッドスケールの応力の非等方成分 τ'_{ij} が修正 Leonard 応力 L'_{ij} とひずみ速度テンソル D_{ij} に比例すると仮定し, それぞれの比例係数をグリッドスケールの流速からダイナミックに評価するダイナミック二変数混合モデル (Dynamic Two-parameter mixed Model; DTM)²⁴⁾を採用し, DTM に基づく LES (Large Eddy Simulation) を導入した MARS (Multi-interface Advection and Reconstruction Solver)²⁵⁾に基づく 3 次元数値波動水槽と, 引張に抵抗しない No tension 材料の Hooke 則を採用した u - p 形式の Biot 式に基づく 3 次元有限要素法を Mizutani らの手法²⁶⁾によりカップリングした手法を用いている. 摩擦速度 u_* については等価砂粗度を d とした対数則により算出し, その算出に際しては地盤上 5 mm での流速を用いた. また, 平均有効応力 σ'_m には地盤表面下 5 mm での値を用い, 透水係数 k_s の算定には次に示す Kozeny-Carman の式²⁷⁾を採用した.

$$k_s = \frac{1}{180} \frac{m^3}{(1-m)^2} \frac{gd^2}{\nu_w} \quad (12)$$

3. 水理模型実験の概要

名古屋大学のピストン型造波装置 (最大ストローク: 1.5 m) を備えた二次元鋼製造波水路 (長さ 30.0 m, 幅 0.7 m, 高さ 0.9 m) に海岸護岸 (天端幅 0.03 m, 高さ 0.15 m, 表法面勾配 1/0.2), 砂地盤 (長さ 1.00 m, 高さ 0.15 m), 矩形構造物を設置して水理実験を行った (図-1). 構造物は護岸背面から 0.28 m の位置に設置し, 移動防止のために不透過床に直接固定した.

入射波は津波をモデル化した押し波のみの長周期波 1 波とし, 静水深 h_0 を 2 種類 (0.430, 0.455 m), 造波板を押し出す時間 T を h_0 に応じて 4~5 種類 (6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 14.0 s), 沖波波高 H_0 を h_0 と T に応

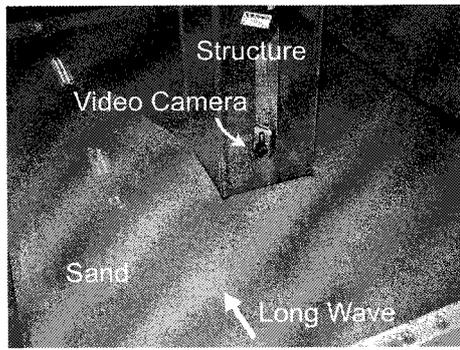


写真-1 小型カメラの設置状況

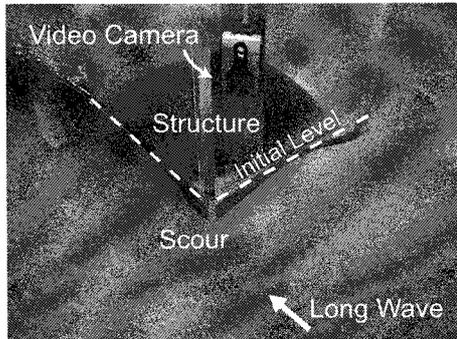


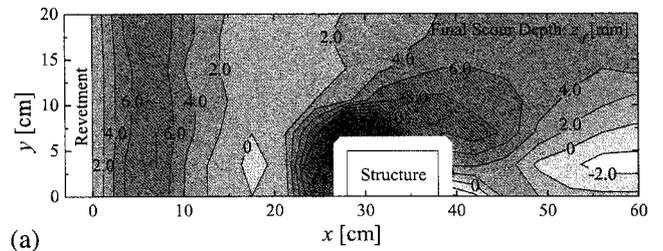
写真-2 局所洗掘の一例

じて1~6種類(波高水深比 $H_o/h_o \approx 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14$) 変化させた. また, 構造物の幅 B を2種類(0.10, 0.14 m), 珪砂の粒径 d を2種類(0.20, 0.45 mm) 変化させ, 計93ケースの実験を行った. 津波作用後の最終洗掘深 z_{sf} を接触型砂面計(KENEK製 WHT-60)により計測するとともに, 写真-1に示すように構造物の内部に小型カメラ(DIGITAL COWBOY製 DC-NCIRC2)を設置して構造物沖側隅角部の洗掘状況の撮影を行った. 写真-2に局所洗掘の一例を示す. 実験装置, 実験条件および実験結果の詳細は Nakamura ら¹⁰⁾を参照されたい.

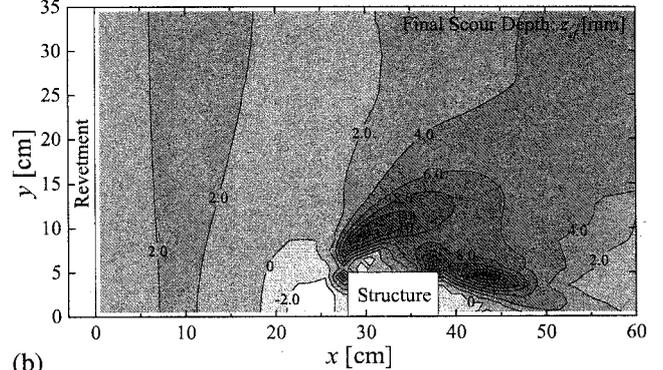
4. 計算結果及び考察

図-2と図-3に最終洗掘深 z_{sf} の比較を示す. ここで, d_w は護岸の余裕高(図-1), $L_o = T\sqrt{gh_o}$ は沖波波長相当量であり, 正および負の z_{sf} はそれぞれ侵食と堆積を表す. また, 本提案モデルによる計算結果は他と比較して等高線が粗いが, 計算機のメモリ容量の制限から相対平均有効応力比 γ の計算に用いたアインパラメトリック要素として流速計算時のスタッガード格子よりも粗いものを用いた¹⁰⁾ためである.

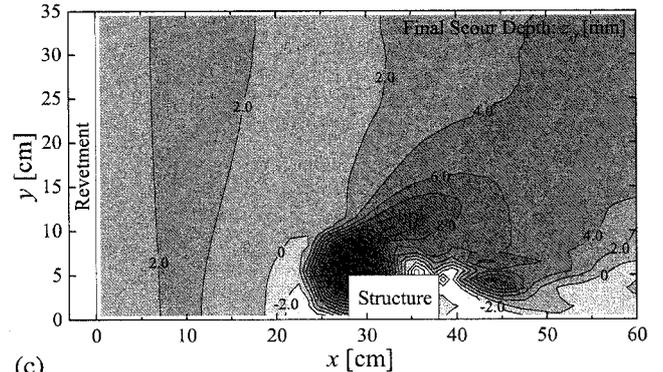
同図より, 護岸背後 ($0.0 < x < 15.0$ cm) の侵食は実験結果と計算結果で良く一致していることが確認できる. また, $B = 0.10$ m の図-2に関しては, 構造物岸側 ($x > 50.0$ cm) の堆積・侵食パターンについても良好な一致が認められることが分かる. しかしながら, Takahashi ら⁶⁾のモデルによる計算結果(図-2(b), 図-3(b))は構造物の沖側隅角部に生じた洗掘穴を再



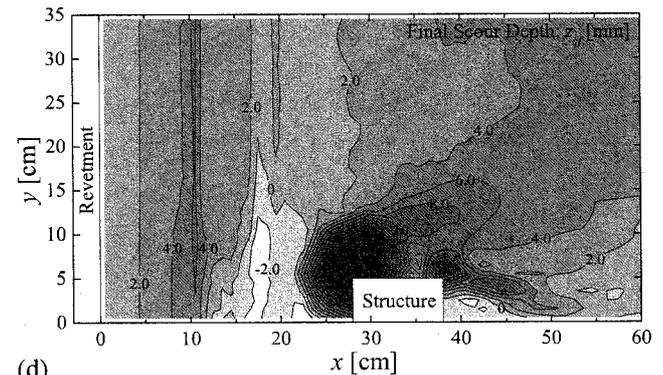
(a)



(b)



(c)



(d)

図-2 最終洗掘深 z_{sf} の比較 ($(2H_o - d_w)/B = 1.08, h_o/L_o = 0.0359, h_o/B = 4.55, d/B = 2.00 \times 10^{-3}$): (a) 水理実験結果; (b) Takahashi ら⁶⁾のモデルによる計算結果; (c) 式(6)に示す Nielsen¹⁶⁾の修正 Shields 数を組み込んだ Takahashi ら⁶⁾のモデルによる計算結果; (d) 本提案モデルによる計算結果

現できておらず, 図-3では Nielsen¹⁶⁾の修正 Shields 数を組み込んだモデル(図-3(c))でも局所洗掘を計算できていないことが確認できる. 一方, 地盤表層の有効応力を考慮した本モデルでは, 計算された洗掘穴が実験結果と良く一致していることが認められ, また図-2(d)に示すように構造物沖側 ($15.0 < x < 20.0$ cm) における堆積・侵食パターンについても良好に再現

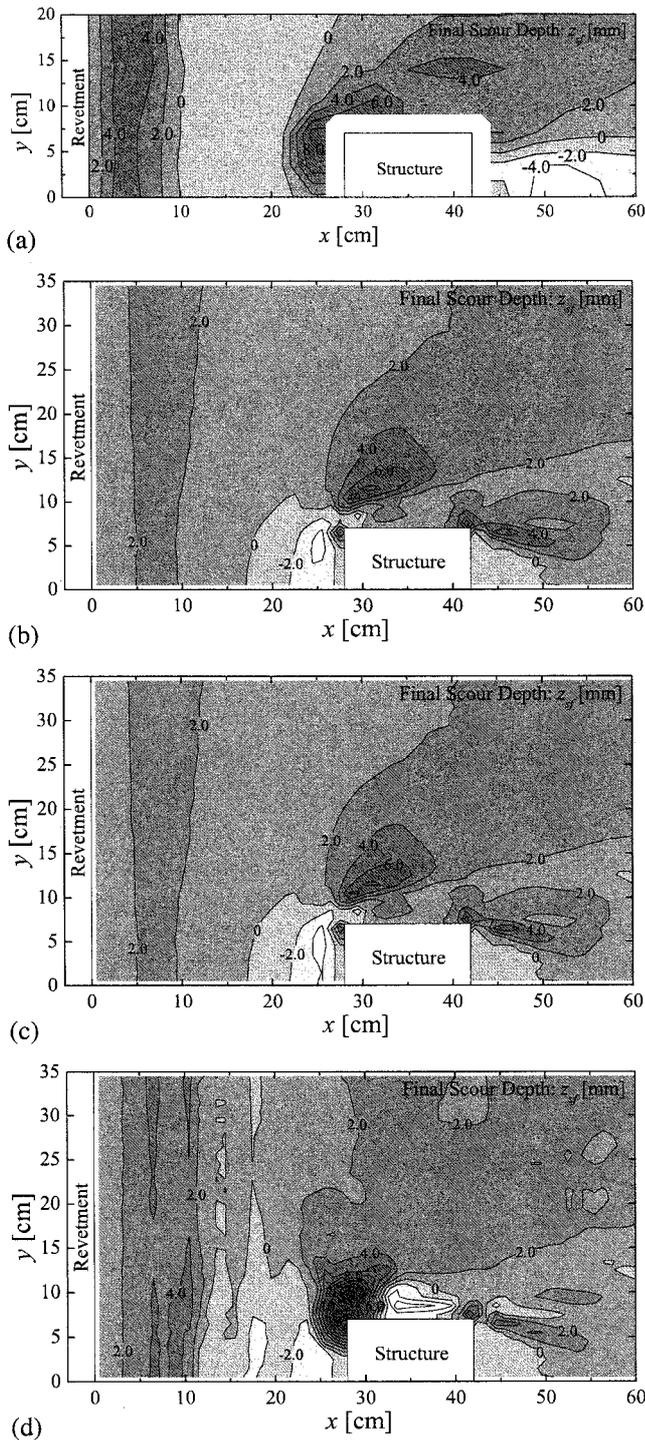


図-3 最終洗掘深 z_{sf} の比較 ($(2H_o - d_w)/B = 0.55$, $h_o/L_o = 0.0349$, $h_o/B = 3.07$, $d_{50}/B = 3.21 \times 10^{-3}$): (a) 水理実験結果; (b) Takahashi ら⁶⁾のモデルによる計算結果; (c) 式(6)に示す Nielsen¹⁶⁾の修正 Shields 数を組み込んだ Takahashi ら⁶⁾のモデルによる計算結果; (d) 本提案モデルによる計算結果

できていることが確認できる。

そこで、図-4 に構造物沖側隅角部に生じた無次元最大洗掘深 z_s^{\max}/B の比較を示す。ここで、構造物に接する地盤表面で最深の点を z_s^{\max} と定義し、水理実験による z_s^{\max} は構造物内部に設置した小型カメラによる撮影画像から読み取った。また、数値計算の開始時刻を 0.0 s と定義し、遡上津波が構造物に触れた

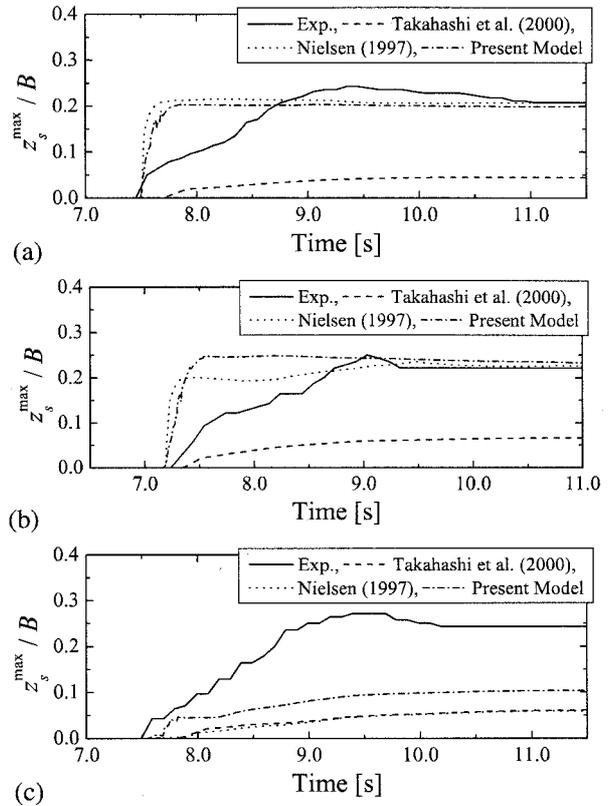


図-4 構造物沖側隅角部に生じた無次元最大洗掘深 z_s^{\max}/B の比較: (a) $(2H_o - d_w)/B = 0.52$, $h_o/L_o = 0.0349$, $h_o/B = 3.07$, $d/B = 1.43 \times 10^{-3}$; (b) $(2H_o - d_w)/B = 0.74$, $h_o/L_o = 0.0359$, $h_o/B = 3.25$, $d/B = 1.43 \times 10^{-3}$; (c) $(2H_o - d_w)/B = 0.65$, $h_o/L_o = 0.0269$, $h_o/B = 3.25$, $d/B = 3.21 \times 10^{-3}$

時刻を基準に実験結果と計算結果の位相を合わせた。

図-4(a), (b) より、Takahashi ら⁶⁾のモデルによる計算結果(破線)は局所洗掘が生じ始める時刻が実験値(実線)と比較して遅く、最終的な z_s^{\max}/B も過小評価していることが確認できる。その一方で、本提案モデル(一点鎖線)と Nielsen¹⁶⁾の修正 Shields 数を組み込んだモデル(点線)では局所洗掘の開始時刻と津波作用後の最終洗掘深を適切に評価できており、その計算精度が大幅に向上することが明らかとなった。また、図-4(c)に示す $d/B = 3.21 \times 10^{-3}$ の場合は、式(6)の修正 Shields 数を組み込んでいのか否かで計算結果にあまり差が認められないが、本提案モデルは過小評価ではあるものの若干ながら計算精度が改善することも同図から確認できる。

5. 結論

本論では、地盤の内部に生じる応力変動の影響を考慮した新たな漂砂量式を提案し、既存の地形変化モデルに組み込むことで地形変化シミュレーションの構築を行うとともに、遡上津波による矩形構造物周辺の局所洗掘現象を対象に構築したモデルの適用性を検討した。その結果、構造物の沖側隅角部に生

じる局所洗掘の開始時刻と津波作用後の最終洗掘深を適切に評価できることが確認でき、その計算精度が既存のモデルと比較して向上することを明らかにした。ただし、一方向流に対する既存の検討結果を採用した掃流砂量および交換砂量のモデル係数の評価に加えて、使用した地形変化モデルに関わらず構造物の岸側隅角部にも若干の侵食穴が認められることから、構造物の岸側に掃流または浮遊してきた漂砂の堆積量と剥離渦発生領域としての流速場および応力場の評価について、また底質粒子の無次元粒径 d/B に関わらず無次元最大洗掘深 $z_s^{\max}/B > 0.1$ での洗掘速度を若干過大評価している傾向があることから、洗掘がある程度進行した状況での漂砂量に与える有効応力の評価について課題を残している。

謝辞：本研究は独立行政法人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：19000623）の下で行われたことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) Kawamura, B. and Mogi, T. (1961): On the deformation of the sea bottom in some harbors in the Sanriku coast due to the Chile Tsunami, *Report on the Chilean Tsunami of May 24, 1960, as Observed along the Coast of Japan*, ed. Committee for Field Investigation of the Chilean Tsunami of 1960, Maruzen Co., Ltd., Tokyo, pp. 57–66.
- 2) 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫 (1992)：土砂移動を伴う津波計算法の開発，海岸工学論文集，第 39 巻，pp. 231–235.
- 3) 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫 (1993)：津波移動モデルの適用性と再現性の検討，海岸工学論文集，第 40 巻，pp. 171–175.
- 4) 小林昭男・織田幸伸・東江隆夫・高尾 誠・藤井直樹 (1996)：津波による砂移動に関する研究，海岸工学論文集，第 43 巻，pp. 691–695.
- 5) 藤井直樹・大森政則・高尾 誠・金山 進・大谷英夫 (1998)：津波による海底地形変化に関する研究，海岸工学論文集，第 45 巻，pp. 376–380.
- 6) Takahashi, T., Shuto, N., Imamura, F. and Asai, D. (2000): Modeling sediment transport due to tsunamis with exchange rate between bed load layer and suspended load layer, *Proc., 27th Int. Conf. Coastal Eng.*, ASCE, pp. 1508–1519.
- 7) 西畑 剛・田島芳満・森屋陽一・関本恒浩 (2005)：津波による地形変化の検証－2004 年スマトラ沖地震津波スリランカ・キリンダ港－，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 1386–1390.
- 8) 西畑 剛・佐貫 宏・森屋陽一・後藤和久 (2007)：津波による地形変化モデルに関する研究，海岸工学論文集，第 54 巻，pp. 521–525.
- 9) 木原直人・松山昌史 (2007)：静水圧 3 次元数値モデルを用いた津波による地形変化の数値計算，海岸工学論文集，第 54 巻，pp. 516–520.

- 10) Nakamura, T., Kuramitsu, Y. and Mizutani, N. (2008): Tsunami scour around a square structure, *Coastal Eng. J.*, JSCE, Vol. 50, No. 2, pp. 209–246.
- 11) 辻本哲郎・水上敏昭 (1985)：円柱橋脚前面での局所洗掘機構のモデル化，第 29 回水理講演会論文集，pp. 591–596.
- 12) 中村友昭・倉光泰樹・水谷法美 (2006)：陸上遡上津波による矩形構造物周辺の流動場と洗掘に関する数値シミュレーション，第 20 回数値流体力学シンポジウム，F5–3，8 p.
- 13) Jeong, J., and Hussain, F. (1995): On the identification of a vortex, *J. Fluid Mech.*, Vol. 285, pp. 69–94.
- 14) Jeong, J., Hussain, F., Schoppa, W. and Kim, J. (1997): Coherent structures near the wall in a turbulent channel flow, *J. Fluid Mech.*, Vol. 332, pp. 185–214.
- 15) 酒井哲郎・後藤仁志・原田英治・羽間義晃・井元康文 (2001)：波浪による海底地盤の液状化が漂砂量に及ぼす影響，海岸工学論文集，第 48 巻，pp. 981–985.
- 16) Nielsen, P. (1992): *Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport*, World Scientific, Singapore, 324 p.
- 17) Turner, I. L. and Masselink, G. (1998): Swash infiltration–exfiltration and sediment transport, *J. Geophys. R.*, Vol. 103, No. C13, pp. 30,813–30,824.
- 18) 大谷英夫 (2005)：各種空間スケールにおける急変流下の高精度局所地形変動解析に関する研究，京都大学学位論文，179 p.
- 19) Rubey, W. W. (1933): Settling velocities of gravel, sand and silt particles, *Amer. J. Sci.*, Vol. 25, pp. 325–338.
- 20) Butt, T., Russell, P. and Turner, I. L. (2001): The influence of swash infiltration–exfiltration on beach face sediment transport: onshore or offshore?, *Coastal Eng.*, Elsevier, No. 42, pp. 35–52.
- 21) Nielsen, P., Robert, S., Christiansen, B. M. and Oliva, P. (2001): Infiltration effects on sediment mobility under waves, *Coastal Eng.*, Elsevier, Vol. 42, pp. 105–114.
- 22) Conley, D. C. (1993): *Ventilated Oscillatory Boundary Layers*, Ph.D. thesis, University of California, San Diego, 74 p.
- 23) Martin, C. S. and Aral, M. M. (1971): Seepage force on interfacial bed particles, *J. Hydraul. Div., Proc.*, ASCE, Vol. 7, pp. 1081–1100.
- 24) Salvetti, M. V. and Banerjee, S. (1995): A priori tests of a new dynamic subgrid–scale model for finite difference large–eddy simulations, *Phys. Fluids*, Vol. 7, No. 11, pp. 2831–2847.
- 25) Kunugi, T. (2000): MARS for multiphase calculation, *CFD J.*, Vol. 9, No. 1, IX–563.
- 26) Mizutani, N., Mostafa, A. M. and Iwata, K. (1998): Non-linear regular wave, submerged breakwater and seabed dynamic interaction, *Coastal Eng.*, Elsevier, Vol. 33, pp. 177–202.
- 27) Bear, J. (1972): *Dynamics of Fluids in Porous Media*, American Elsevier Pub. Co., New York, 764 p.