

遡上津波による構造物周辺の地盤の応力変動と局所洗掘に関する一考察

名古屋大学大学院 学生会員 ○ 倉光 泰樹

名古屋大学大学院 学生会員 中村 友昭

名古屋大学大学院 正 会 員 水谷 法美

1. 緒言：津波の来襲に伴う底質の移動に関して、西村・堀川（1979）、宇多ら（1987）、野口ら（1997）、後藤ら（2002）は水理実験や数値計算により護岸の法先や背後に生じる洗掘を検討しており、Kobayashi ら（2004）は正または負の孤立波による透水性斜面の地形変化を水理実験により調べている。また、Tonkin ら（2003）は透水性斜面上に設置した円柱周辺の洗掘に関する水理実験を行い、引き波の最終段階で生じる円柱背後の急激な砂の洗掘は底面近傍の圧力勾配により説明できることなどを明らかにしている。しかし、港湾建築物などの陸上構造物周辺の陸上遡上津波による洗掘を検討した研究は著者らの知る限り見受けられない。そこで本研究では、陸上遡上津波の作用に伴う矩形構造物周辺の洗掘を水理実験と数値計算により検討する。

2. 水理実験：名古屋大学の最大振幅 150 cm のピストン型造波装置を備えた二次元造波水路に護岸（天端幅 3.0 cm、高さ 15.0 cm、表法面勾配 1/0.2）、矩形構造物（幅 $B=14.0$ cm）、珪砂（中央粒径 $d_{50}=0.2$ mm）を設置して水理実験を行った（図-1）。構造物は $x=2B$ の位置に深さ d だけ根入れして設置し、移動しないように構造物の上部を水路に固定した。入射波は孤立波 1 波とし、沖波波高 H_o （ $H_o/h_o=0.2\sim0.7$ ）、静水深 h_o （ $h_o=26.5\sim31.5$ cm）、構造物の根入れ深さ d （ $d=0.0\sim3.0$ cm）を変化させ、計 54 ケースの実験を行った。津波の作用時に図-1 に示す位置の水位と水圧を計測するとともに、最終洗掘深 z_s を接触型砂面形により計測した。

3. 数値計算手法：波動場に対して、透過性構造物と表面張力の影響を考慮した著者ら（2006）の手法に、新たにダイナミック混合モデル（DMM）による LES を導入した手法を適用した。すなわち、支配方程式は

$$\frac{\partial(mF)}{\partial t} + \frac{\partial(mv_j F)}{\partial x_j} = Fq^*, \quad \frac{\partial(mv_j)}{\partial x_j} = q^*, \quad \left(1 + C_A \frac{1-m}{m}\right) \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial(v_i v_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\hat{\rho}} \frac{\partial p}{\partial x_i} - g_i + \frac{f_i^s}{\hat{\rho}} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\tau_{ij} + 2\hat{\nu} D_{ij}) - R_i + Q_i - \beta_{ij} v_i$$

と書かれ、 v_i は実流速、 p は圧力、 F は VOF 関数、 x_i は位置、 t は時間、 g_i は重力加速度、 $\hat{\rho} = F\rho_w + (1-F)\rho_a$ は流体の密度、 $\hat{\nu} = F\nu_w + (1-F)\nu_a$ は流体の動粘性係数、 m は空隙率、 $q^* = q(y, z; t)/\Delta x_s$ 、 $q(y, z; t)$ は 3 次精度孤立波（Fenton, 1972）に基づく造波位置でのわき出し強さ、 Δx_s は造波位置での x 軸方向の格子幅、 C_A は付加質量係数、 f_i^s は表面張力、 τ_{ij} は DMM に基づく応力、 D_{ij} はひずみ速度テンソル、 R_i は抵抗力項、 Q_i は造波ソース項、 β_{ij} は減衰係数であり、下付きの w と a はそれぞれ液相と気相での値を表している。

一方、地盤に対しては、 $u-p$ 形式の Biot の式に基づく 2 次元有限要素法（著者ら, 2006）を 3 次元化した手法を適用した。ただし、構成方程式として Hooke 則を、土粒子の変位 $\mathbf{u}$ と間隙水圧 p の形状関数としてそれぞれ 20 節点と 8 節点アイソパラメトリック要素を採用し、連立一次方程式は CGSTAB 法により解いた。

4. 結果及び考察：写真-1 に例示するように、写真-2 と極めて類似した構造物近傍の洗掘を水理実験で再現することができた。洗掘深 z_s を示した図-2 より、洗掘は護岸の背後と構造物の沖側隅角部から横側にかけて生じ、最大洗掘深 $z_s^{\max}$ は構造物の沖側隅角部周辺に生じることが確認できる。図-3 に最大洗掘深 $z_s^{\max}$ と作用津波の関係を示す。ここで、 d_w は護岸天端と静水面の高低差であり、越波形態は野口ら（1997）に依った。同図より、 H_o/d_w の増加に伴い $z_s^{\max}/B$ も増加するものの、 H_o/d_w が 2.0 を超えると $z_s^{\max}/B$ の増加が小さくなる傾向が確認できる。また、本研究の範囲では、 d/d_{50} の増加に伴う $z_s^{\max}/B$ の増加も認められる。

図-4 に水位 η と水圧変動 p_e に関する実験値（○印）と計算値（実線）の比較を例示する。同図より、計算値は実験値と非常に良く一致していることから、本手法により以下検討を進める。図-5 は Tonkin ら（2003）に倣って Hoffmans・Verheij（1997）の算定式により求めた地盤表面での Shields 数の最大値 $\theta_{\max}$ を示す。同図

キーワード 陸上遡上津波、矩形構造物、局所洗掘、応力変動、Shields 数、3 次元数値波動水路

連絡先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 Tel 052-789-4630

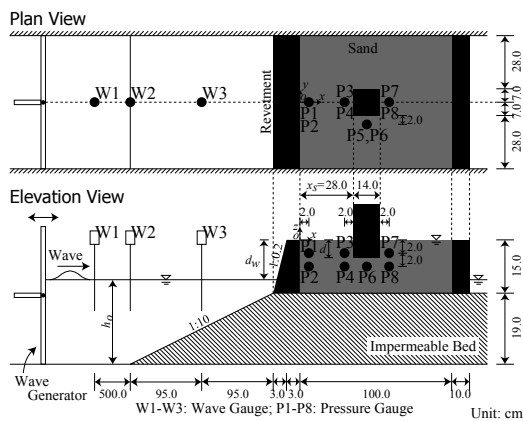


図-1 実験装置の概略図

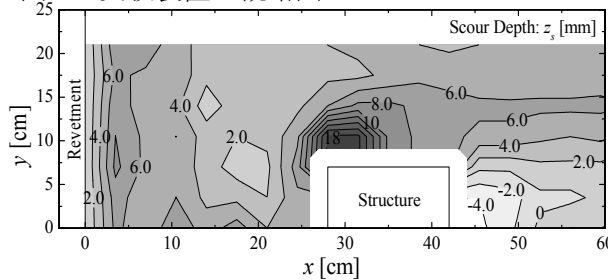
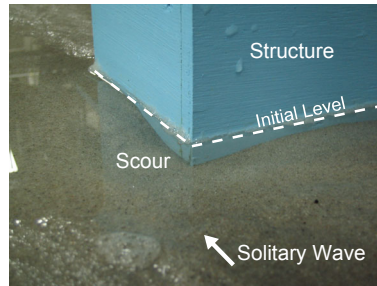
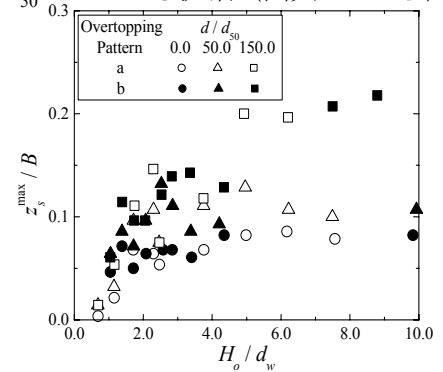
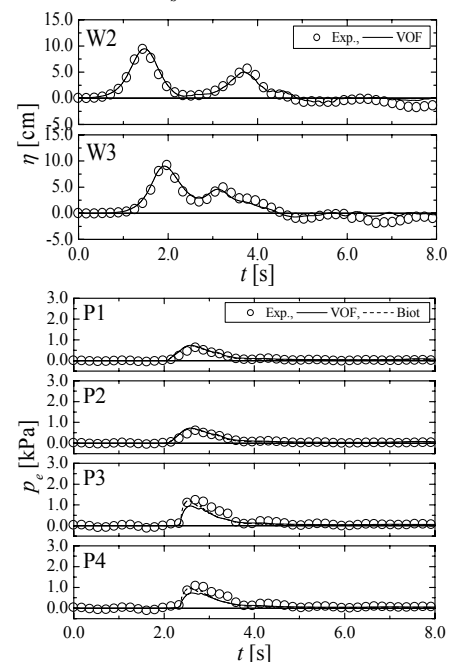
図-2 洗掘深 z_s の分布 ($H_o/h_o = 0.70$, $d/d_{50} = 150.0$)写真-1 構造物周辺の洗掘の一例 ($H_o/h_o = 0.70$, $d/d_{50} = 150.0$)

写真-2 スマトラ島沖地震津波による洗掘（出典：Yeh ら）

図-3 最大洗掘深 $z_s^{\max}$ と作用津波の関係図-4 実験値と計算値の比較 ($H_o/h_o = 0.30$, $d/d_{50} = 0.0$)

より、構造物の横側に生じている比較的大きな $\theta_{\max}$ は図-2 との相関が認められるが、Tonkin ら (2003) と同様に構造物の沖側隅角部の洗掘は Shields 数では十分に評価できないことが分かる。そこで、護岸の背後 A、構造物の沖側 B、構造物の沖側隅角部 C、構造物の岸側 D の各地点に生じる Shields 数と相対有効応力比 (R.E.S.R.) の時系列を図-6 に示す。図-6 より、C 点での最大 Shields 数は A 点や B 点と比較して小さいが、C 点の最大 R.E.S.R. は A 点や B 点よりも大きく、液状化状態 (R.E.S.R. = 1.0) に近づいていることが分かる。以上より、構造物の沖側隅角部では R.E.S.R. が増加することで砂粒子間の拘束力が減少し、その影響を受けて比較的小さな Shields 数でも深い洗掘が生じたと推測される。

5. 結論：本論では、陸上遡上津波による矩形構造物周辺の洗掘を水理実験と数値計算により考究した。その結果、地盤表面の流速だけでなく地盤内部の応力状態も洗掘に影響を与えている可能性が明らかになった。今後は、これらの影響を定量的に検討していく所存である。

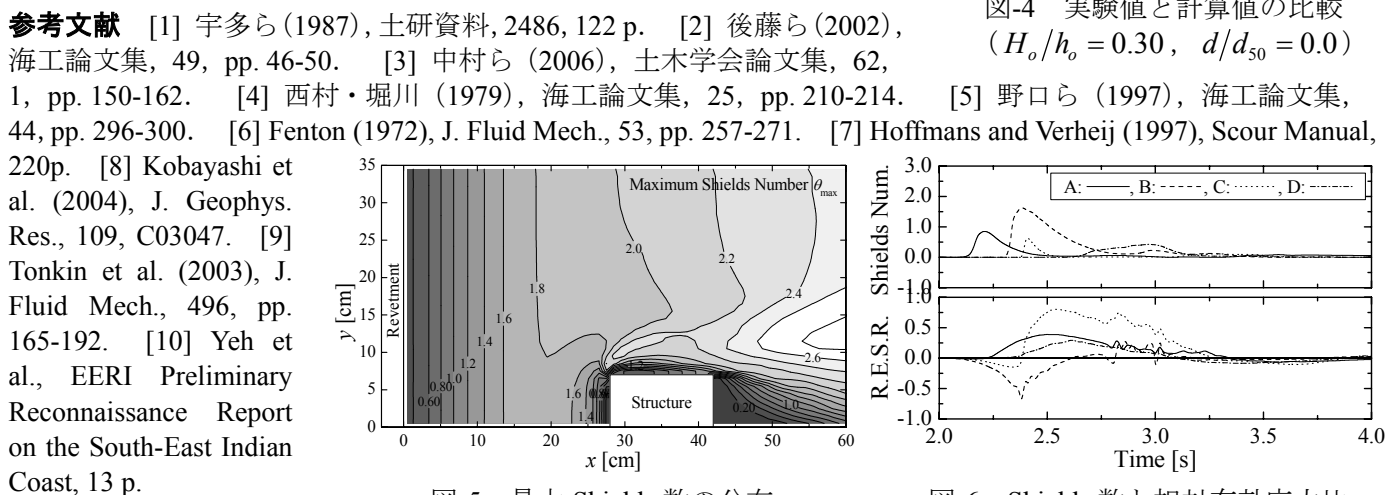


図-5 最大 Shields 数の分布

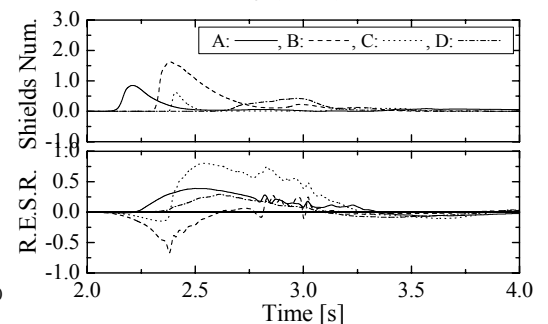


図-6 Shields 数と相対有効応力比

参考文献 [1] 宇多ら (1987), 土研資料, 2486, 122 p. [2] 後藤ら (2002), 海工論文集, 49, pp. 46-50. [3] 中村ら (2006), 土木学会論文集, 62, 1, pp. 150-162. [4] 西村・堀川 (1979), 海工論文集, 25, pp. 210-214. [5] 野口ら (1997), 海工論文集, 44, pp. 296-300. [6] Fenton (1972), J. Fluid Mech., 53, pp. 257-271. [7] Hoffmans and Verheij (1997), Scour Manual, 220p. [8] Kobayashi et al. (2004), J. Geophys. Res., 109, C03047. [9] Tonkin et al. (2003), J. Fluid Mech., 496, pp. 165-192. [10] Yeh et al., EERI Preliminary Reconnaissance Report on the South-East Indian Coast, 13 p.