応力変動の影響を考慮した遡上津波による地形変化シミュレーションに関する一考察

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：津波の作用に伴う地形変化予測モデルが藤井ら（1998），高橋ら（1999），西畑ら（2005）などにより提案され，1960 年チリ地震津波来襲時の宮城県気仙沼湾を対象にその妥当性が検討されている．一方，中村ら（2007）は遡上津波による矩形構造物周辺の局所洗掘を取り扱い，砂地盤内部の応力変動が局所洗掘に及ぼす影響を明らかにしているが，砂地盤内部に生じる応力状態と漂砂量の関係はほとんど検討されておらず（例えば酒井ら，2001），浸透浸出流の影響を加味した漂砂量式が Nielsen（1992）や Turner・Masselink（1998）により提案されているのみである．そこで本稿では，有効応力変動の影響を考慮した漂砂量式を提案し既存のモデル（高橋ら，1999）に組み込むとともに，遡上津波による局所洗掘現象（中村ら，2007）に適用することにより，その有効性を検討することを目的とする．

2. 地形変化モデル：高橋ら（1999）は掃流砂層と浮遊砂層間の交換砂量 w_e を考慮した次に示す掃流砂層および浮遊砂層の連続式を支配方程式とする津波移動床モデルの開発を行っている．

$$\frac{\partial z_s}{\partial t}+\frac{1}{1-m}\left(\frac{\partial q_i}{\partial x_i}+w_e\right)=0,\quad \frac{\partial C}{\partial t}+\bar{v}_i\frac{\partial C}{\partial x_i}-\frac{w_e}{\eta}=0,\quad q_i=a_q\sqrt{sgd_{50}^3}\left(\tau_{*i}-\tau_{*C}\right)^{1.5},\quad w_e=a_w\sqrt{sgd_{50}}\left(\tau_*-\tau_{*C}\right)^{2.0}-w_0C$$

ここで，z_s は地盤高，C は断面平均浮遊砂濃度，q_i は掃流砂量，w_e は掃流砂層と浮遊砂層間の交換砂量，τ_{*i} と τ_* は Shields 数，$\bar{v}_i$ は断面平均流速，η は水位，m は空隙率，s は珪砂の水中比重，d_{50} は珪砂の中央粒径，w_0 は珪砂の沈降速度，g は重力加速度，τ_{*C} は限界 Shields 数である．

Nielsen（1992）は浸透浸出流の影響を考慮した次に示す修正 Shields 数 τ_* を提案している．

$$\tau_*=\frac{u_*^2\left(1-\alpha\, w/u_*\right)}{gd_{50}\left(s-\beta\, w/k_s\right)}$$

ここで，u_* は摩擦速度，w は浸透浸出流速（浸出を正とする），k_s は透水係数である．本研究では，Nielsen（1992）による上式を参考に，砂地盤内部の応力変動の影響を考慮した q_i と w_e を次のように設定した．

$$q_i=a_q\sqrt{s'gd_{50}^3}\left(\tau_{*i}-\tau_{*C}\right)^{1.5},\quad w_e=a_w\sqrt{s'gd_{50}}\left(\tau_*-\tau_{*C}\right)^{2.0}-w_0C,\quad \tau_*=\frac{u_*^2\left(1-\alpha\, w/u_*\right)}{s'gd_{50}},\quad s'=s\left(1-\beta'\gamma\right)$$

ただし，γ は砂地盤内部の相対平均有効応力比であり，$0.0\le\beta'<1.0$ である．

本論では，u_*，w，$\bar{v}_i$，η，γ として中村ら(2007)の計算結果を用い，また $\alpha=5.0$，$\beta=0.35$，$\beta'=0.992$ と設定した．

3. 水理実験の概要：名古屋大学の二次元造波水路（長さ 30.0 m，幅 0.7 m，高さ 0.9 m）に護岸，砂地盤，矩形構造物を設置して水理模型実験を行った（図-1）．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_o，周期 T，沖波波高 H_o，構造物の幅 B，珪砂の中央粒径 d_{50} を数種類ずつ変えた計 93 ケースの実験を行った．各実験ケースで，津波作用後の構造物周辺の最

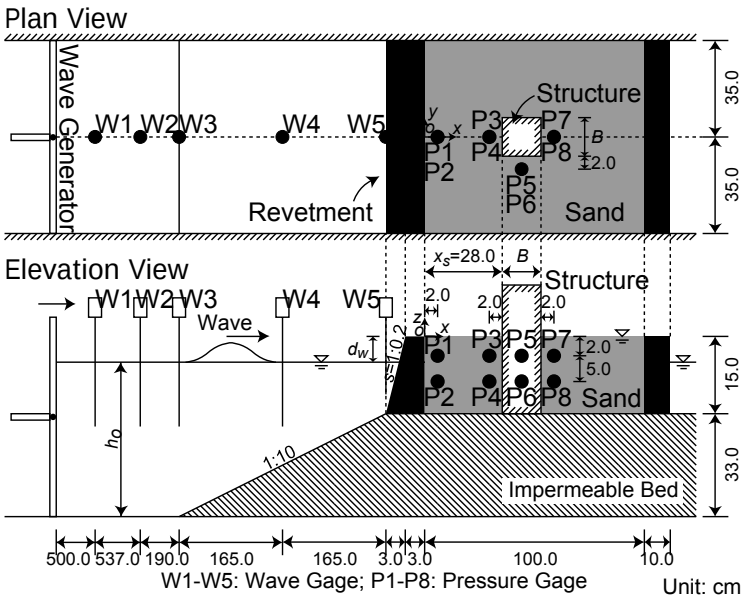
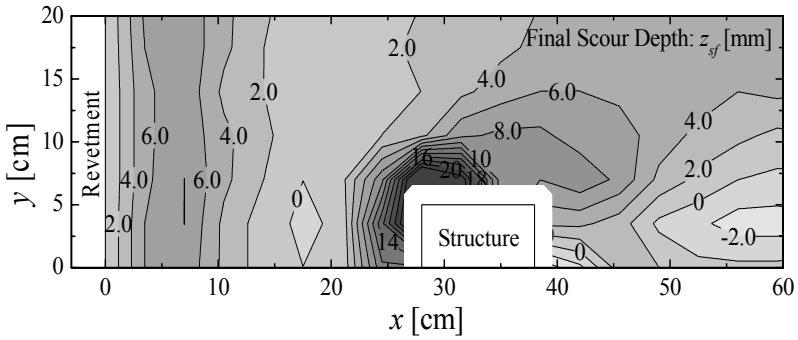


図-1　実験装置の概略図

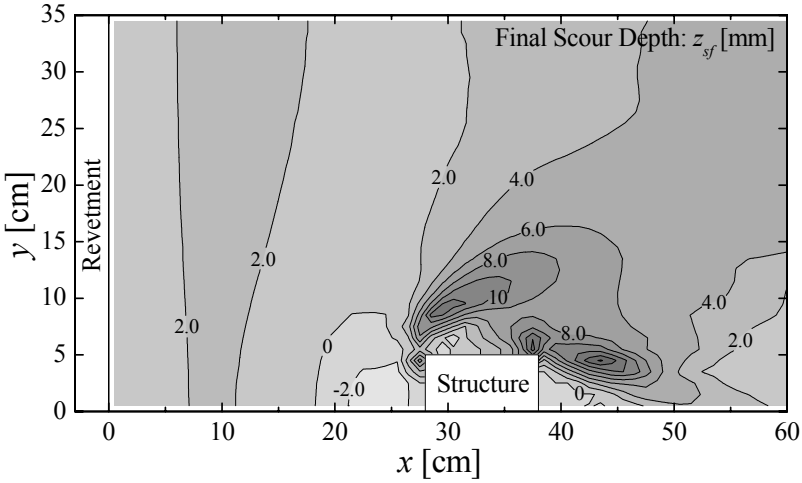
終洗掘深 z_{sf} を接触型砂面計（KENEK 製 WHT-60）で計測した．詳細は中村ら（2007）を参照されたい．

4. 計算結果及び考察：遡上津波による構造物周辺の最終洗掘深 z_{sf}（侵食を正とする）の分布を図-2 に例示する．ここで，図-2(b)は高橋ら（1999）のモデルによる計算結果，図-2(c)は本論で提案した手法に基づく計算結果を表す．同図より，護岸背後の侵食（$0.0<x<15.0$cm）と構造物岸側の堆積（$x>50.0$cm）に関しては両モデルとも実験結果とそのパターンが一致しているものの，高橋ら（1999）のモデルでは構造物沖側隅角部の局所洗掘を再現できないことが分かる．その一方で，砂地盤内部の応力変動を考慮した本モデルでは構造物沖側隅角部の局所洗掘を再現できていることが確認できる．これは，構造物沖側隅角部周辺の砂地盤内部に生じる相対平均有効応力比 γ が遡上津波の作用により増加し，さらに遡上津波，陸上構造物，砂地盤の条件によっては部分的に液状化（$\gamma=1.0$）に到ることから（中村ら，2007），本モデルではその影響を強く受けて構造物沖側隅角部周辺の q_i と w_e が一時的に増加したためと考えられる．また，矩形構造物の沖側（$15.0<x<20.0$cm）に見られる堆積に関しても有効応力を考慮することにより再現性が向上することも確認できる．

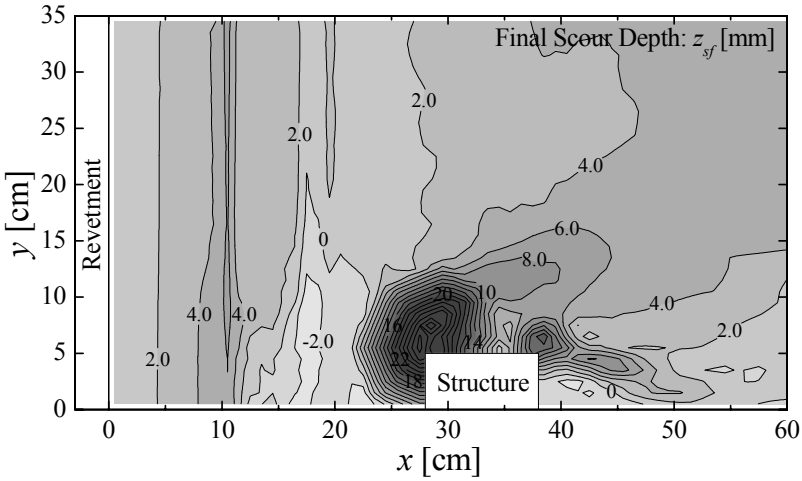
5. 結論：本研究では，砂地盤内部の応力変動を考慮した地形変化モデルを新たに提案し，遡上津波による矩形構造物周辺の局所洗掘現象（中村ら，2007）に適用した．その結果，従来のモデルでは再現できなかった構造物沖側隅角部周辺に生じる局所洗掘を本モデルでは再現できることが明らかとなった．紙面の都合上，一部の結果のみしか示せなかったが，詳細は講演時に発表する．



(a) 水理実験結果（中村ら，2007）



(b) 高橋ら（1999）の手法による計算結果



(c) 本モデルによる応力変動を考慮した計算結果

図-2 遡上津波による構造物周辺の最終洗掘深 z_{sf} の分布の一例（$(2H_o-d_w)/B=1.08$，$d_{50}/B=2.00\times10^{-3}$）

参考文献：[1] 酒井ら（2001），海岸工学論文集，第 48 巻，pp. 981-985. [2] 高橋ら(1999)，海岸工学論文集，第 46 巻，pp. 606-610. [3] 中村ら（2007)，海岸工学論文集，第 54 巻，pp. 856-860. [4] 西畑ら（2005)，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 1386-1390. [5] 藤井ら（1998)，海岸工学論文集，第 45 巻，pp. 376-380. [6] Nielsen, P. (1992), *Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport*, World Scientific, 324 p. [7] Turner, I. L. and Masselink, G. (1998), *J. Geophys. R.*, Vol. 103, No. C13, pp. 30,813-30,824.