陸上遡上津波による矩形構造物周辺の局所洗掘と砂地盤内部の応力変動に関する一考察

名古屋大学大学院	学生会員	○ 中村	友昭
NTT 西日本	正 会 員	倉光	泰樹
名古屋大学大学院	正 会 員	水谷	法美

1. 緒言:津波による海岸構造物周辺の局所洗掘に関して,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,Tonkinら(2003) は透水性斜面上に設置した円柱周辺の局所洗掘に関する水理模型実験より底質表面近傍で生じる圧力勾配が 洗掘を助長する現象を明らかにしている.また,中村ら(2006)は津波を模した孤立波による陸上構造物周辺 の局所洗掘を取り扱い,砂地盤内部の応力変動が洗掘に与える影響を示している.しかし,局所洗掘に対する 砂地盤内部の有効応力の影響を直接評価した研究は限られているのが実状である.本研究では,入射津波とし て作用時間の長い長周期波を採用し,水理模型実験と数値解析により陸上遡上津波による構造物周辺の局所洗 掘を,特に砂地盤内部の応力変動の観点から考究する. Dian View

2. 水理実験: ピストン型造波装置(最大ストローク150 cm)を備えた二次元造波水路に海岸護岸(高さ15.0 cm, 表法面勾配1.0/0.2),矩形構造物(幅 B = 10.0, 14.0 cm), 砂地盤(砂の中央粒径 d₅₀ = 0.020, 0.045 cm)を設置して水理模型実験を行った(図-1).入射波は津波を模した押し波のみの長周期波1波とし,静水深h_o(43.0, 45.5 cm), 周期T(6.0~14.0 s),沖波波高H_o(H_o/h_o = 0.04~0.14)を数種類ずつ変化させ,計93ケースの実験を行った.図-1に示す位置の水位と水圧を電気容量式水位計と間隙水圧計でそれぞれ計測するとともに,矩形構造物周辺の最終洗掘深z_{st}を接触型砂面計により測定した.



3. 数値計算手法:本稿では,波動場に対して,ダイナ

ミック二変数混合モデル(DTM)による LES を導入した次に示す連続式,運動方程式,VOF 関数 F の移流方 程式を支配方程式とし,移流方程式の解法に MARS(功刀,1997)を用いた手法を適用した.

$$\frac{\partial \left(mv_{j}\right)}{\partial x_{j}} = q^{*}, \quad \left(1 + C_{A}\frac{1 - m}{m}\right)\frac{\partial v_{i}}{\partial t} + \frac{\partial \left(v_{i}v_{j}\right)}{\partial x_{j}} = -\frac{1}{\hat{\rho}}\frac{\partial p}{\partial x_{i}} - g_{i} + \frac{f_{i}^{s}}{\hat{\rho}} + \frac{\partial}{\partial x_{j}}\left(-\tau_{ij} + 2\hat{v}S_{ij}\right) - R_{i} + Q_{i} - \beta_{ij}v_{j}, \quad \frac{\partial \left(mF\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(mv_{j}F\right)}{\partial x_{j}} = Fq^{*}$$

ここで、 v_i は実流速、pは圧力、 g_i は重力加速度、 $\hat{\rho} = F\rho_w + (1-F)\rho_a$ は流体の密度、 $\hat{v} = Fv_w + (1-F)v_a$ 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DTMに基づく応力、 S_{ij} はひずみ速度、 R_i は抵力項、 Q_i は造波ソース項、 β_{ij} は減衰係数であり、下付きの $w \ge a$ はそれぞれ液相と気相での値を表す.

一方,地盤に対しては,波動場との圧力と流速の連続性を考慮した *u-p* 形式の Biot の式に基づく 3 次元有限 要素法(中村ら,2006)を適用した.構成式として引張に抵抗しない No tension 材料の Hooke 則を採用した.

4. 結果及び考察:写真-1 に例示する構造物周辺の局所洗掘を水理実験で確認した.図-2 に示した最終洗掘 深 z_{sf} の分布より,洗掘は護岸背後と構造物側面で発生し,構造物沖側隅角部で最深となることが確認できる. 他のケースでも同様であった.次に図-3 に z_{sf}^{max} と無次元越波高 $(2H_o - d_w)/B$ の関係を示す (d_w :護岸余裕高; 図-1).ここで $L_o = T\sqrt{gh_o}$ である.同図より, $(2H_o - d_w)/B$ の増加に伴い z_{sf}^{max}/B も増加するが, z_{sf}^{max}/B の増加

キーワード 陸上遡上津波,局所洗掘,陸上構造物,応力変動,流速勾配,土~水連成解析 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 割合は $(2H_{o} - d_{w})/B$ の増加とともに小さくなる傾向が確認できる.

図-4 に水位変動 η と水圧変動 p_e に関する実験値(〇印)と計算値(実線: VOF 法;破線: FEM)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 に接線流速の空間勾配の時間積分値 $v_{i,i}^{sum} < 0$:侵食; $v_{i,i}^{sum} < 0$:堆積)の分布を示す.同図より,構造物岸側と沖側隅角部において図-2 に示した侵食堆積傾向との相関が認められる.しかし,構造物岸側隅角部においても $v_{i,i}^{sum} > 0$ となっており,流速勾配のみでは構造物沖側隅角部に洗掘が集中したメカニズムを説明できない.そ

こで、図-6に相対平均有効応力比(RESR = $1 - \sigma'_m / \sigma_{m0}$; σ'_m : ²⁰ 平均有効応力, σ'_{m0} :初期平均有効応力)の最大値 MRESR ¹⁵ が 0.7 の等深線分布を示す.ここで、RESR = 1.0 は液状化を ¹⁶ 表す.同図より、構造物岸側隅角部では MRESR = 0.7 の領 ^{20,5} 域が小さいが、沖側隅角部では岸側と比較して MRESR = 0.7 の領 切領域が広く、また非常に深い位置まで MRESR = 0.7 の領 域が広がっていることが確認できる.以上より、構造物沖側 隅角部では RESR の増加すなわち有効応力の低下に伴って 砂粒子間の拘束力が減少し、そこに流速変動が作用すること で沖側隅角部に大規模な局所洗掘が生じたと考えられる.

5. 結論:本論では,陸上遡上津波による矩形構造物周辺の 洗掘発生メカニズムを水理実験と数値計算により考究した. その結果,構造物沖側隅角部の局所洗掘は,遡上波通過時の 有効応力の低下により土粒子間の拘束力が弱まったところ に流速変動が作用することで生じることが明らかとなった.

参考文献 [1] 宇多ら (1987), 土研資料, 2486, 122 p. [2] 功刀ら (1997), 機論 B, 63, pp. 1576-1584. [3] 後藤ら (2002), 海工論, 49, pp. 46-50. [4] 中村ら (2006), 海工論, 53, pp. 521-525. [5] 西村・堀川 (1979), 海工論, 25, pp. 210-214. [6] 野口ら (1997), 海工論, 44, pp. 296-300. [7] Tonkin et al. (2003), *J. Fluid Mech.*, 496, pp. 165-192.







写真-1 実験で見られた洗掘の一例 ($(2H_a - d_w)/B = 0.83$, $h_a/L = 0.0269$)



図-6 RESR の最大値(MRESR = 0.7 の等深線; $(2H_o - d_w)/B = 0.74, h_o/L = 0.0359$)