

図-1 実験装置の概略図と計測装置の設置位置

(KENEK 製 WHT-60) により測定した。また、幅  $B$  が 14.0 cm の構造物はアクリルで製作し、その内部に小型カメラ (DIGITAL COWBOY 製 DC-NCIRC2) を設置して洗掘の時間変化の撮影を行った。

### 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に基づく LES を導入した中村ら (2006b) の手法を適用した。一方、砂地盤に対しては、波動場との流速と圧力の連続性を考慮した  $u-p$  形式の Biot の式に基づく有限要素法 (中村ら, 2006a) を適用した。なお、構成式には引張に抵抗しない no tension 材料の Hooke 則を採用した。詳細は中村ら (2006a, 2006b) を参照されたい。

### 4. 実験結果及び考察

写真-1 に例示した写真より、津波通過後に構造物の周囲が大規模に洗掘された様子が確認でき、現地 (Borero ら, 2005) と類似する局所洗掘を水理実験で再現できた。ここで、 $d_w$  は護岸の余裕高 (図-1 参照)、 $L_o = T\sqrt{gh_o}$  は波長、 $g$  は重力加速度であり、 $(2H_o - d_w)/B$  (以下、無次元越波高と称す)、 $h_o/L_o$ 、 $h_o/B$ 、 $d_{50}/B$  は次元解析により得られた無次元パラメータである。

構造物内部から撮影した構造物沖側隅角部での洗掘の様子を写真-2 に例示する。同写真の実線は構造物の沖側隅角部を、点線は津波作用前および洗掘後の砂地盤表面を表す。写真-2 より、洗掘は構造物沖側隅角部から生じ

始め (写真-2(b))、洗掘穴の内部に形成された渦により洗掘が急激に発達することで最深となり (写真-2(c))、その後の埋め戻しにより最終形態に到る様子 (写真-2(d)) が確認できる。本稿では示さないが、他の多くのケースでも同様の現象が認められた。これと類似のプロセスは Tonkin ら (2003) の研究においても確認されている。

そこで、上述の洗掘プロセスで現れた最大洗掘深  $z_s^{\max}$  と最終形態での最大洗掘深  $z_{sf}^{\max}$  (以下、最大最終洗掘深と称す) の関係を図-2 に示す。同図より、無次元越波高  $(2H_o - d_w)/B$  が 0.4 を上回る条件では  $z_{sf}^{\max}/z_s^{\max}$  が 0.75 ~ 0.90 の値を有することが分かる。以上より、津波による洗掘の時間変化の予測の困難さを考えると実用的には最大最終洗掘深  $z_{sf}^{\max}$  での評価が簡便であるが、最大最終洗掘深  $z_{sf}^{\max}$  では洗掘の過程で現れる最大洗掘深  $z_s^{\max}$  を過小評価する可能性があり、最大最終洗掘深  $z_{sf}^{\max}$  を設計などの評価に用いる際には細心の注意が必要と考えられる。

図-2 に示した最大洗掘深  $z_s^{\max}$  と最大最終洗掘深  $z_{sf}^{\max}$  の関係を念頭に置いて、以下では最終洗掘深  $z_{sf}$  を用いて検討を進める。図-3 に津波作用後の最終洗掘深  $z_{sf}$  の

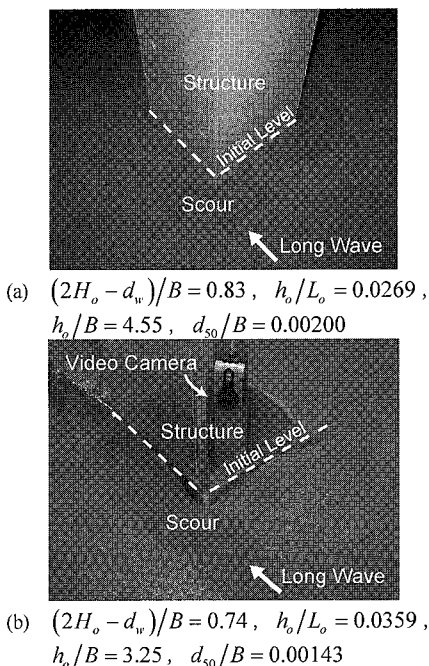


写真-1 構造物周辺に生じた局所洗掘の様子

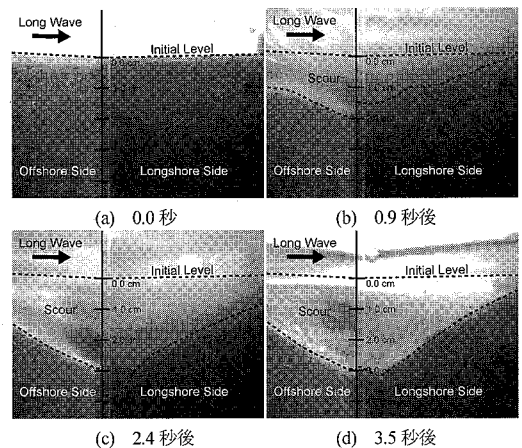
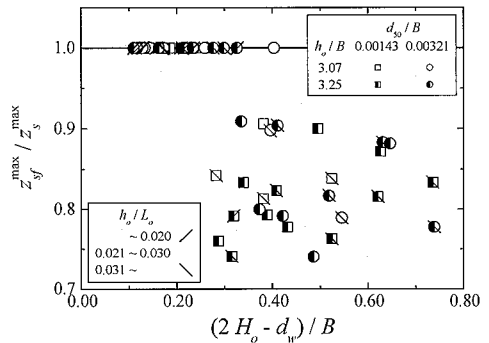


写真-2 構造物内部から撮影した洗掘の時間変化の一例 ( $(2H_o - d_w)/B = 0.55$ ,  $h_o/L_o = 0.0349$ ,  $h_o/B = 3.07$ ,  $d_{50}/B = 0.00321$ )

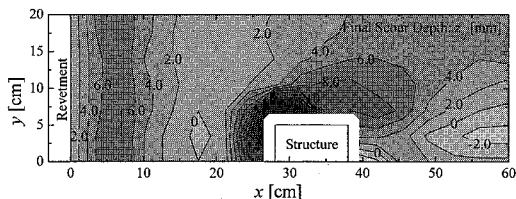


分布を示す。同図より、洗掘は護岸背後と構造物沖側隅角部に生じ、逆に構造物岸側には堆積が生じたことが分かる。また、孤立波の場合は構造物沖側隅角部の側面側に洗掘が集中したが(中村ら, 2006a), 長周期波は作用時間が孤立波と比較して長いために構造物沖側隅角部の沖側に洗掘が集中していることも図-3から確認できる。

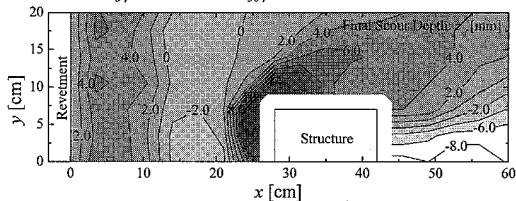
最後に、最大最終洗掘深  $z_{sf}^{max}$  に対する各無次元パラメータの影響を図-4に示す。同図より、 $(2H_o - d_w)/B$  の増加に伴い  $z_{sf}^{max}/B$  も増加する傾向が認められる。しかし、上述したように  $(2H_o - d_w)/B$  が0.4を上回ると  $z_{sf}^{max}$  を過小評価する傾向が現れることから、 $z_{sf}^{max}/B$  の増加割合は  $(2H_o - d_w)/B$  の増加とともに減少する傾向も図-4から確認できる。なお、他のパラメータ  $h_o/L_o$ ,  $h_o/B$ ,  $d_{50}/B$  の影響は本研究の範囲では認められなかった。

### 5. 計算結果及び考察

水理実験において波変形や洗掘深分布などの現象がほぼ対称であることが確認できたことから、計算負荷軽減



(a)  $(2H_o - d_w)/B = 1.08$ ,  $h_o/L_o = 0.0359$ ,  
 $h_o/B = 4.55$ ,  $d_{50}/B = 0.00200$



(b)  $(2H_o - d_w)/B = 0.74$ ,  $h_o/L_o = 0.0359$ ,  
 $h_o/B = 3.25$ ,  $d_{50}/B = 0.00321$

図-3 最終洗掘深  $z_{sf}$  の分布

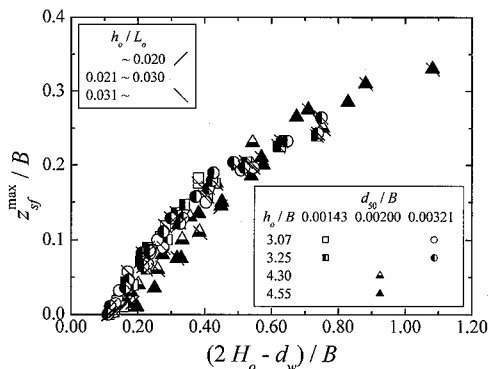
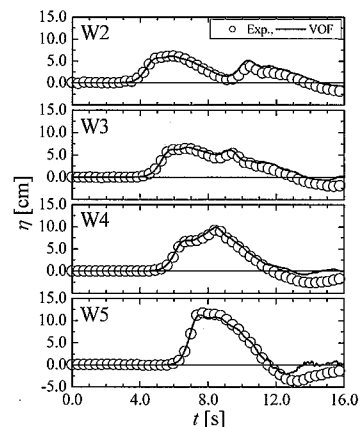


図-4 最大最終洗掘深  $z_{sf}^{max}$

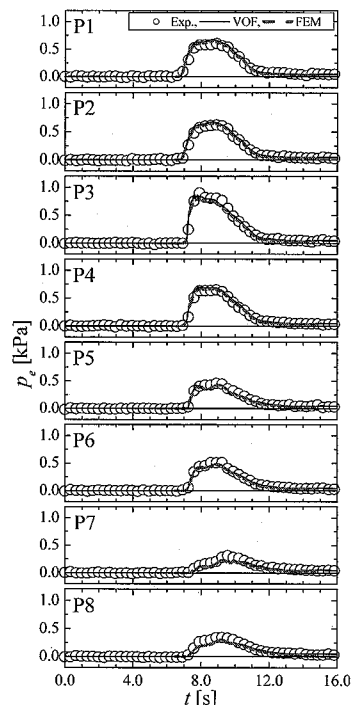
を考慮して  $y \geq 0$  の片側のみを解析対象とした。パラメータ等の詳細は中村ら(2006a, 2006b)を参照されたい。

#### (1) 数値計算手法の妥当性の検証

図-5に護岸前面の水位変動  $\eta$  と砂地盤内部の水圧変動  $p_e$  に関する実験値と計算値の比較を例示する。ここで、○印は実験値を、実線 (VOF) は波動場に対するVOF法による計算結果を、図-5(b)に示す破線 (FEM) は実線とはほぼ重なっているが砂地盤に対する有限要素法の計算結果を表す。図-5(a)より、引き波に伴う水位低下を若干過小評価していることが確認できるが、計算値



(a) 護岸前面の水位変動  $\eta$



(b) 砂地盤内部の水圧変動  $p_e$

図-5 実験値と計算値の比較 ( $(2H_o - d_w)/B = 0.74$ ,  $h_o/L_o = 0.0359$ ,  $h_o/B = 3.25$ ,  $d_{50}/B = 0.00143$ )

は実験結果を非常に良く再現できていることが確認され、本実験に対する数値計算手法の妥当性が検証できた。

## (2) 局所洗掘に及ぼす流速変動及び応力変動の影響

まず, Tonkin ら (2003) に倣って Hoffmans・Verheij (1997) の算定式にシミュレーション結果を代入して求めた砂地盤表面の Shields 数の最大値  $\theta^{\max}$  を図-6 に示す。同図より, 構造物岸側に  $\theta^{\max}$  の小さな領域が広がっており実験結果 (図-3) との若干の相関が認められるが, Tonkin ら (2003) や中村ら (2006a) と同様に Shields 数だけでは構造物沖側隅角部の局所洗掘を十分に評価できない。

また, 図-6 より  $\theta^{\max}$  の等高線が構造物沖側隅角部に集中していることから, この付近で接線流速の空間勾配が大きくなっているものと推測される。そこで, 図-7 に次式により求めた接線流速勾配の時間積分値  $v_{t,i}^{\text{sum}}$  を示す。

$$v_{t,i}^{\text{sum}} = \sum_{\text{time}} \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \Delta t \dots \dots \dots (1)$$

ここで,  $v_i$  は砂地盤表面の接線流速,  $\Delta t$  は数値計算で用いた時間増分である。また, 漂砂量が流速の関数であることを考慮すると,  $v_{t,i}^{\text{sum}} > 0$ ,  $v_{t,i}^{\text{sum}} < 0$  はそれぞれ侵食, 堆積を表す。図-7 より, 護岸背後や構造物沖側隅角部に侵食 ( $v_{t,i}^{\text{sum}} > 0$ ) が, 構造物岸側に堆積 ( $v_{t,i}^{\text{sum}} < 0$ ) が広がっており図-3 に例示した実験結果との対応が認められるが, 構造物岸側隅角部にも侵食 ( $v_{t,i}^{\text{sum}} > 0$ ) の領域が確認できることから, 大きな Shields 数を有する津波の場合は砂地盤表面の流速だけでは構造物沖側隅角部に洗掘が集中する原因を評価できないことが明らかとなった。

そこで, 砂地盤内部の応力変動の影響を検討するため, 図-8, 図-9 に砂地盤内部および砂地盤表面の相対平均有効応力比 RMESR の最大値 MRMESR の分布を示す。ここで,  $\text{RMESR} = 1 - \sigma'_m / \sigma'_{m0}$  ( $\sigma'_m$ : 平均有効応力;  $\sigma'_{m0}$ : 初期  $\sigma'_m$ ) であり, 1.0 時に液状化を表す。同図より, 構造物沖側隅角部では他の領域と比較して MRMESR が大きく, また大きな MRMESR が深くまで広がっていることが確認できる。しかし, 構造物岸側にも MRMESR の比較的大きな領域が広がっていることから, その発生時刻を検討するために, 図-10 に水理実

験による沖側隅角部での洗掘深  $z_s$ , 数値計算による砂地盤表面での Shields 数および RMESR の時間変化を示す。ここで, 点 A は護岸背後 ( $x=5.5 \text{ cm}$ ,  $y=3.5 \text{ cm}$ ), 点 B は構造物沖側 ( $x=23.5 \text{ cm}$ ,  $y=3.5 \text{ cm}$ ), 点 C は構造物沖側隅角部 ( $x=28.5 \text{ cm}$ ,  $y=7.5 \text{ cm}$ ), 点 D は構造物岸側 ( $x=46.5 \text{ cm}$ ,  $y=3.5 \text{ cm}$ ) である。Sumer ら (2007) は液状化と締固めの完了後に洗掘が生じ始めることを確認しているが, 図-10 より, 構造物沖側隅角部 C では Shields 数の増加前に RMESR の増加が認められ, さらにケースによっては液状化 ( $\text{RMESR} = 1.0$ ) に到り, その後有効応力の減少に伴い砂粒子間の拘束力が弱まったところに大きな Shields 数を有する流速変動が作用し

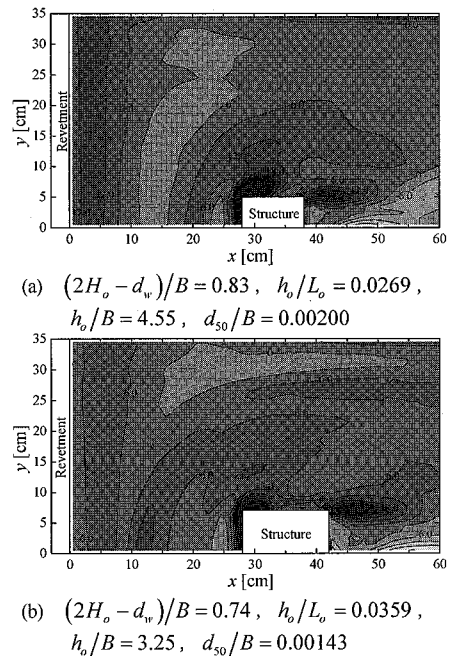


図-7 接線流速勾配の時間積分値  $v_{t,i}^{\text{sum}}$

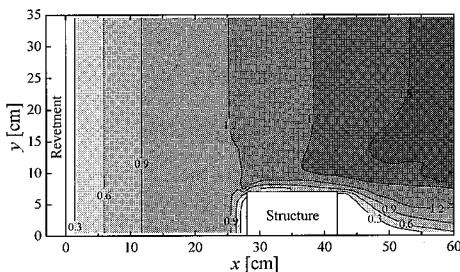


図-6 最大 Shields 数  $\theta^{\max}$  ( $(2H_o - d_w)/B=0.74$ ,  $h_o/L_o=0.0359$ ,  $h_o/B=3.25$ ,  $d_{50}/B=0.00143$ )

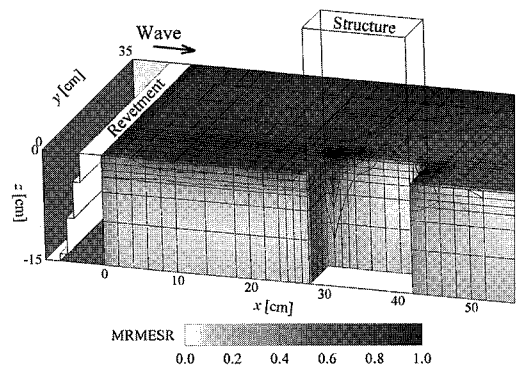


図-8 最大相対平均有効応力比 (MRMESR ;  $(2H_o - d_w)/B=0.74$ ,  $h_o/L_o=0.0359$ ,  $h_o/B=3.25$ ,  $d_{50}/B=0.00143$ )

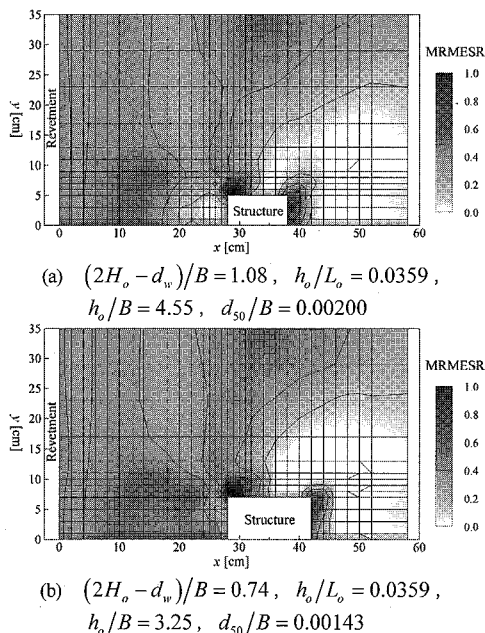


図-9 砂地盤表面の最大相対平均有効応力比 (MRMESR)

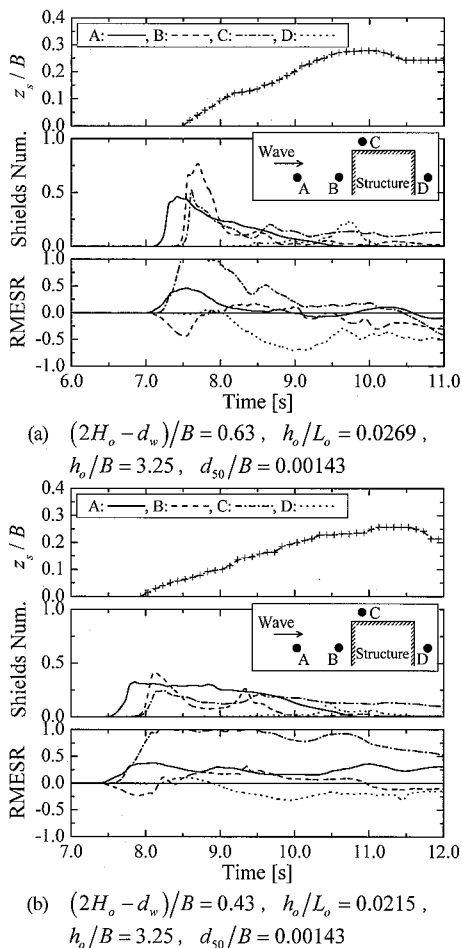
たために大規模な洗掘に到ったと考えられる。一方、洗掘が生じなかった構造物岸側 D では、波到達前に RMESR が最大値に到っているが、その後 RMESR が負値すなわち砂粒子間の拘束力が初期状態と比べて強まったために、構造物岸側隅角部では流速変動が作用したにも関わらず洗掘には到らなかったと考えられる。

## 6. 結 論

本論では、津波を模した押し波のみの長周期波による陸上矩形構造物周辺の局所洗掘を水理実験と数値計算の両面から考究した。その結果、大きな Shields 数を有する遡上津波の条件下では、液状化に到る有効応力の低下に伴う構造物沖側隅角部での砂粒子間の拘束力の減少とその状態に作用する流速変動によって構造物沖側隅角部周辺が大規模な洗掘に到ったことが明らかとなった。なお、本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金特別研究員奨励費の下で行われたことを付記し、謝意を表す。

### 参 考 文 献

- 宇多高明・小俣 篤・横山揚久(1987): 津波遡上に関する実験報告書-構造物の効果を中心として-, 土木研究所資料, 第 2486 号, 122p.
- 後藤仁志・酒井哲郎・林 稔・織田晃治・五十里洋行(2002): 遡上津波の戻り流れによる護岸法先洗掘のグリッドレス解析, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 46-50.
- 中村友昭・倉光泰樹・水谷法美(2006a): 陸上遡上津波による矩形構造物周辺の洗掘と地盤の応力変動に関する研究, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 521-525.
- 中村友昭・倉光泰樹・水谷法美(2006b): 陸上遡上津波による

図-10 水理実験による構造物沖側隅角部の洗掘深  $z_o$  と数値計算による Shields 数及び相対平均有効応力比 (RMESR)

- 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.
- 西村仁嗣・堀川清司(1979): 遡上津波の戻り流れによる護岸法先の洗掘, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 210-214.
- 野口賢二・佐藤慎司・田中茂信(1997): 津波遡上による護岸越波および前面洗掘の大規模模型実験, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 296-300.
- Borrero, J., H. Yeh, C. Peterson, R. K. Chadha, G. Latha and T. Katada (2005): Learning from earthquakes: the great Sumatra earthquake and Indian Ocean tsunami of December 26, 2004, EERI Special Earthquake Report, March 2005.
- Hoffmans, G. J. C. M. and H. J. Verheij(1997): Scour Manual, A. A. Balkema, Rotterdam, 220p.
- Sumer, B. M., F. Hatipoglu and J. Fredsøe(2007): Wave scour around a pile in sand, medium dense, and dense silt, J. Wtvy Port Coastal Ocean Eng., ASCE, Vol. 133, No. 1, pp. 14-27.
- Tonkin, S., H. Yeh, F. Kato and S. Sato(2003): Tsunami scour around a cylinder, J. Fluid Mech., Vol. 496, pp. 165-192.