

遡上津波による陸上構造物周辺の局所洗掘に関する研究

Local Scour around a Square Structure due to a Runup Tsunami

中村友昭¹・倉光泰樹²・水谷法美³

Tomoaki NAKAMURA, Yasuki KURAMITSU and Norimi MIZUTANI

The 2004 Indian Ocean tsunami caused large-scale sediment transport, resulting in substantial scour around a huge number of structures. In this study, tsunami-induced local scour around a land-based structure with a rectangular cross-section on a sand foundation was investigated with a series of hydraulic model experiments and numerical simulations. It was, as a result, revealed that local scour around the seaward corner of the structure could be evaluated with not only flow velocities on the sand foundation but effective stresses near the surface of the sand substrate, that is, flow velocities with a large Shields number resulted in a scour hole around the seaward corner of the structure during restricting force between sand particles fell down due to a decrease in effective stresses inside the sand substrate.

1. 緒 言

2004 年 12 月にスマトラ島沖で発生した巨大地震に伴う大津波により陸上構造物の周囲に大規模な洗掘が生じた事例が報告されている (Borrero ら, 2005)。このような津波による洗掘に関して、現在までに西村・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) は水理実験により透水性斜面上に設置した円柱周辺の洗掘に対する検討を行っている。また, 中村ら (2006a) は作用津波として孤立波を用いた陸上構造物周辺の洗掘を水理実験と数値計算により検討し, 流速変動だけでなく砂地盤内部の応力変動も影響を与える可能性を示している。これに関連して, Sumer ら (2007) は波浪による構造物周辺の洗掘に関する水理実験を行い, 液状化と締固めが完了した後に洗掘が生じ始める現象を明らかにしている。しかし、局所洗掘に及ぼす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おり、それと洗掘の時間発展との関係を明らかに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、孤立波と比較して作用時間の長い長周期波を入射津波として採用し、形状の単純な矩形の陸上構造物の周囲に生じる局所洗掘を水理模型実験と数値計算により検討し、特に洗掘の時間発展と砂地盤内部の応力変動の観点から考究することを目的とする。

2. 水理実験

名古屋大学の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 3.0 cm, 高さ 15.0 cm, 表面勾配 1/0.2), 砂地盤（長さ 100.0 cm, 高さ 15.0 cm), 矩形構造物を設置して水理実験を行った(図-1)。構造物は中村ら (2006a) と同様に護岸背後から 28.0 cm 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。

入射波は津波を模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(43.0, 45.5 cm), 造波板を押し出す時間 T (以下、周期と称す)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 に応じて 1 ~ 6 種類(波高水深比 $H_0/h_0 \approx 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14$)ずつ変化させた。それに加えて、構造物の幅 B を 2 種類(10.0, 14.0 cm), 珪砂の中央粒径 d_{50} を 2 種類(0.020, 0.045 cm)変化させ、計 93 ケースの実験を行った。図-1 に示す位置の水位変動と水圧変動をそれぞれ電気容量式水位計 (KENEK 製 CHT6-40) 5 台と間隙水圧計 (共和電業製 BP-500GRS, BPR-A-50KPS) 8 台により計測するとともに、津波作用後の構造物周辺の最終洗掘深 z_{sf} を接触型砂面計

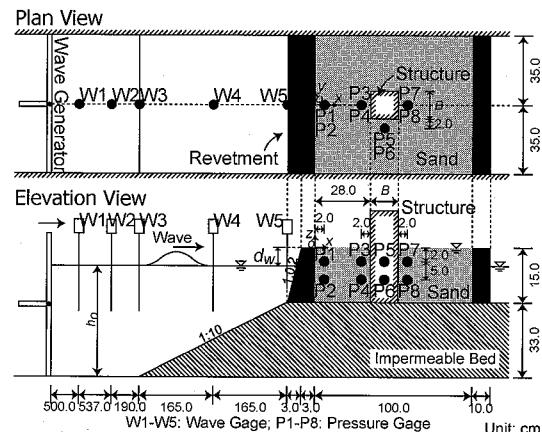


図-1 実験装置の概略図と計測装置の設置位置

1 学生会員 修(工) 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学
専攻 日本学術振興会特別研究員 DC

2 正会員 修(工) 西日本電信電話株式会社

3 正会員 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻

(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 則を探用した。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 (Borrego 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。同写真的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

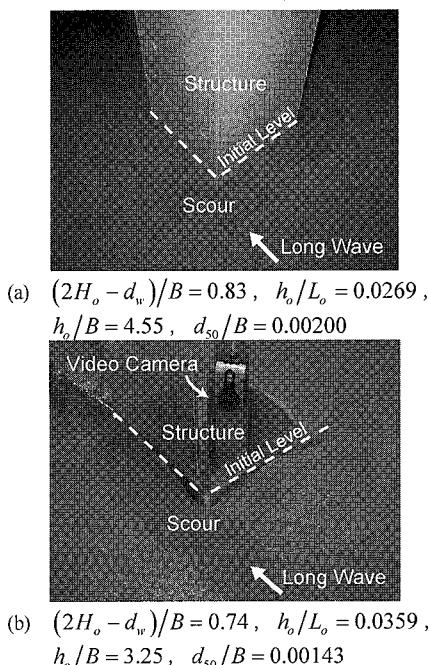


写真-1 構造物周辺に生じた局所洗掘の様子

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

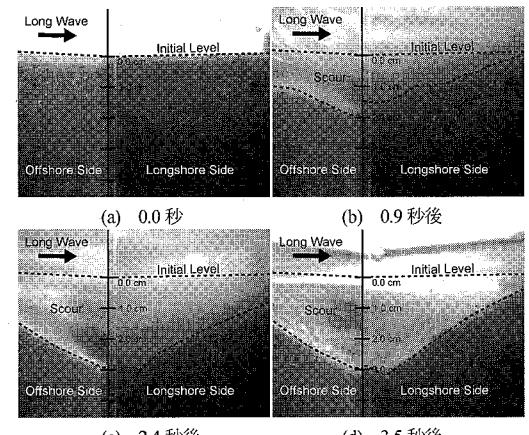


写真-2 構造物内部から撮影した洗掘の時間変化の一例
(($2H_o - d_w$)/ B = 0.55, h_o/L_o = 0.0349, h_o/B = 3.07, d_{50}/B = 0.00321))

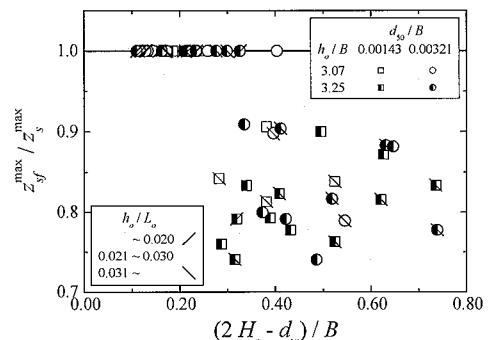


図-2 最大洗掘深 z_s^{\max} と最大最終洗掘深 z_{sf}^{\max}

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形変化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

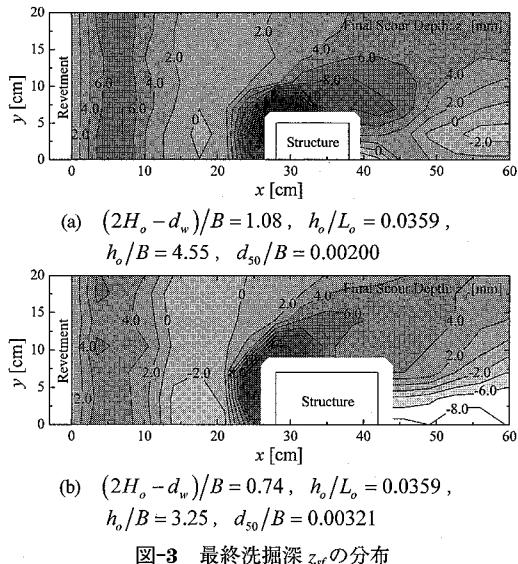


図-3 最終洗掘深 z_{sf} の分布

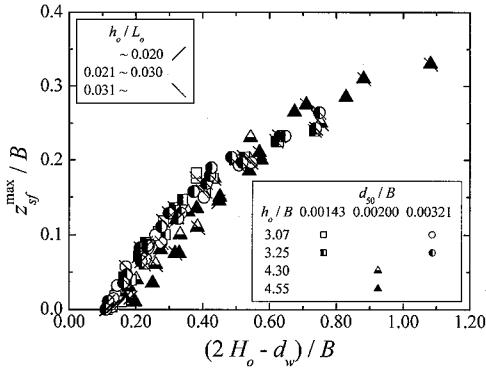
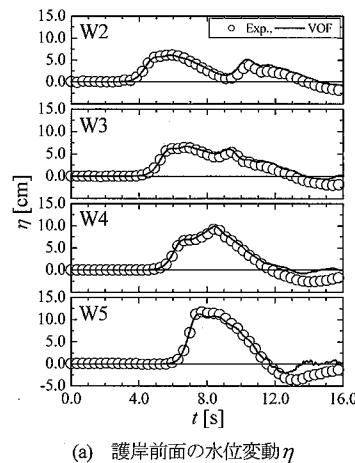


図-4 最大最終洗掘深 z_{sf}^{\max}

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 η 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 η

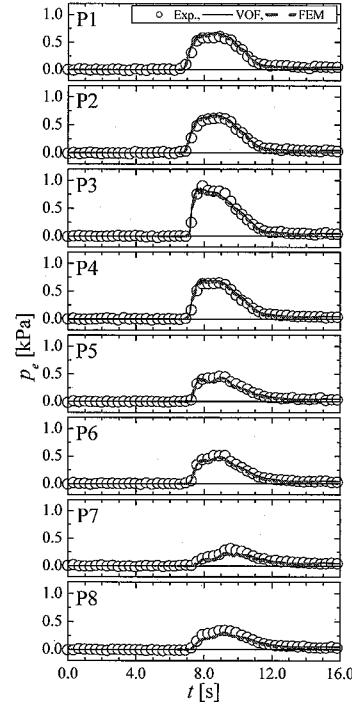


図-5 実験値と計算値の比較 ($(2H_o - d_w)/B=0.74$, $h_o/L_o=0.0359$, $h_o/B=3.25$, $d_{50}/B=0.00143$)

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 θ^{\max} を図-6 に示す。同図より、構造物岸側に θ^{\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 θ^{\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^{sum} を示す。

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

ここで、 v_t は砂地盤表面の接線流速、 Δt 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、 $RMESR = 1 - \sigma'_m / \sigma'_{m0}$ (σ'_m : 平均有効応力; σ'_{m0} : 初期 σ'_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

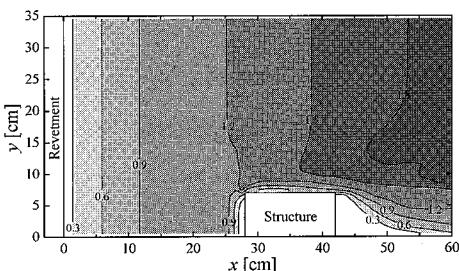
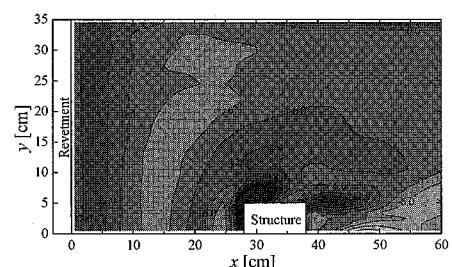
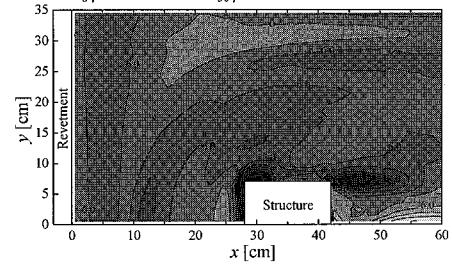


図-6 最大 Shields 数 θ^{\max} ($(2H_o - d_w)/B = 0.74$,
 $h_o/L_o = 0.0359$, $h_o/B = 3.25$, $d_{50}/B = 0.00143$)

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 (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



$$(a) \quad (2H_o - d_w)/B = 0.83, \quad h_o/L_o = 0.0269, \\ h_o/B = 4.55, \quad d_{50}/B = 0.00200$$



$$(b) \quad (2H_o - d_w)/B = 0.74, \quad h_o/L_o = 0.0359, \\ h_o/B = 3.25, \quad d_{50}/B = 0.00143$$

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

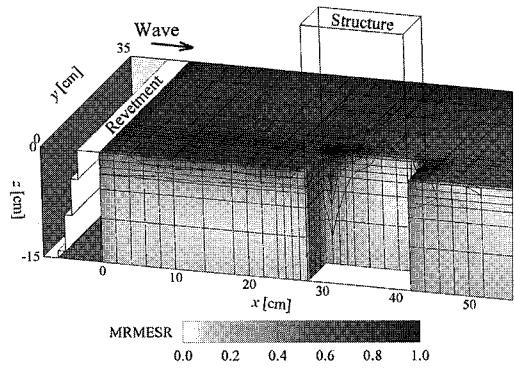


図-8 最大相対平均有効応力比 (MRMESR ;
 $(2H_o - d_w) / B = 0.74$, $h_o / L_o = 0.0359$, $h_o / B = 3.25$,
 $d_{50} / B = 0.00143$)

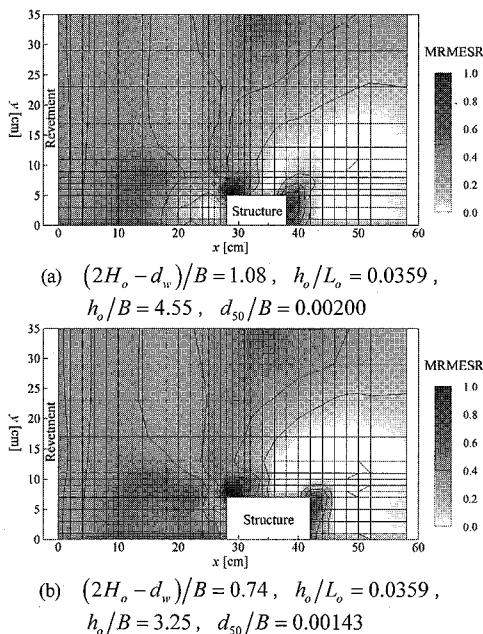


図-9 砂地盤表面の最大相対平均有効応力比 (MRMESR)

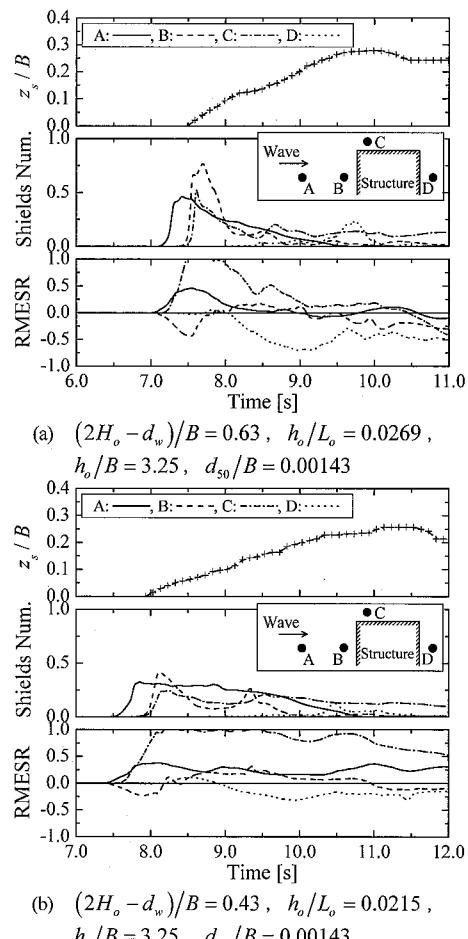
たために大規模な洗掘に到ったと考えられる。一方、洗掘が生じなかった構造物岸側 D では、波到達前に RMESR が最大値に到っているが、その後 RMESR が負値すなわち砂粒子間の拘束力が初期状態と比べて強まったために、構造物岸側隅角部では流速変動が作用したにも関わらず洗掘には到らなかったと考えられる。

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 数を有する週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的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、謝意を表する。

参考文献

- 宇多高明・小保篤・横山揚久(1987)：津波週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)：週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)：陸上週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)：陸上週上津波による

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

矩形構造物周辺の流动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)：週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)：津波週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. Wtwy 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.