津波の作用と洗掘の発生に伴う陸上構造物の移動とその対策法に関する研究

中村 友昭¹・根笹 裕太²・水谷 法美³

¹正会員 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: tnakamura@nagoya-u.jp

²正会員 東邦ガス株式会社 供給管理部 (〒456-8511 名古屋市熱田区桜田町19番18号)

E-mail: yuta.nezasa@gmail.com

³フェロー 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: mizutani@civil.nagoya-u.ac.jp

津波の作用と基礎地盤の洗掘による陸上構造物の移動現象に関する水理実験に津波・構造物・地形変化間の相互作用を解析できる3次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデルを適用し、構造物の移動とその対策法についての検討を行った。その結果、水理実験の条件に適合した砂地盤のパラメータを用いることで、最終洗掘深の分布と構造物の挙動の再現性が向上することを確認した。また、構造物が砂地盤から受ける反力は、波だけではなく洗掘の影響も受けることから、構造物の安定性を評価する際に洗掘の影響を考慮することの重要性を明らかにした。さらに、構造物の沖側に矢板を設置する対策には構造物の安定性を向上させる効果が期待できないが、構造物の側面側に矢板を設置する対策と構造物の隅角部を斜めにする対策には効果が期待できることが判明した。

Key Words : tsunami, local scouring, inland structure, fluid-structure-sediment interaction

1. 緒言

2004年スマトラ島沖地震津波、2010年チリ地震津波、2011年東北地方太平洋沖地震津波において、陸上に設置されていた構造物が基礎地盤の洗掘により被災した事例が報告されている¹⁾²⁾³⁾。このように構造物に移動が生じる状況を対象に、津波の作用と基礎地盤の洗掘によって構造物に変位が生じる現象を検討した研究は、これまでに水理実験²⁾と数値計算⁴⁾の両面から行われている。しかし、中村ら²⁾の水理実験による研究では計測項目が限られており詳細な検討までは行えておらず、また中村ら⁴⁾による数値計算による研究では洗掘の形状や構造物の挙動の再現性に課題を残していることから、構造物の移動現象に対する検討が十分に行われているとは言えない。

本研究では、中村ら⁴⁾と同様に、津波・構造物・地形変化の3者間の相互作用を解析できる3次元数値計算モデル⁵⁾を用いて上述の水理実験²⁾の再現計算を行う。その際、より水理実験の条件に適合した砂地盤のパラメータを用い、まずそれによる再現性の向上を検証する。そして、陸上構造物に対する粘り強い構造の開発に資することを

目的として、津波の作用と基礎地盤の洗掘による構造物の移動とその対策法についての検討を行う。

2. 数値計算モデルの概要

3次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデル⁵⁾は、メインソルバーと3つのモジュールから構成されている。メインソルバーは、透過性材料の間隙内部の流体を含む非圧縮性粘性流体からなる全気液相の流体運動を可動構造物の運動と地形の変化を考慮して解析する連続式とNavier-Stokes方程式に基づくLES (Large-Eddy Simulation) である。そのメインソルバーには、気液界面を追跡するMARS (Multi-Interface Advection and Reconstruction Solver) に基づくVOF (Volume of Fluid) モジュール、可動構造物を取り扱う体積力型IB (Immersed Boundary) 法に基づくIBモジュール、掃流砂・浮遊砂輸送による地形変化の計算と浮遊砂濃度分布の解析を行う底質輸送モジュールがTwo-Wayカップリング手法により組み込まれている。詳細は中村・水谷⁵⁾を参照されたい。

3. 計算条件

中村ら⁴⁾と同様に、水理実験²⁾をモデル化した図-1の計算領域を用いて解析を行った。具体的には、1/10勾配の不透過斜面を有する高さ0.51 mの不透過水平床上に、不透過護岸（天端幅0.03 m、高さ0.15 m、表面法勾配1/0.2）、砂地盤（長さ0.80 m、高さ0.15 m、中央粒径 $d_{50} = 0.20$ mm、空隙率0.4、密度 $\rho_s = 2.65 \times 10^3$ kg/m³）、不透過水平床（長さ1.0 m、高さ0.15 m）を設置した。そして、護岸背後から0.28 mの位置の砂地盤上に、0.14 m角の立方体のコンクリート製不透過構造物（密度 2.30×10^3 kg/m³）を根入れ深さ0 mmで設置した。また、砂地盤の岸側端の $x = 0.80$ mに十分な高さを有する胸壁を設置することで、戻り流れの影響がある状況も対象とした。そして、津波をモデル化したW1での津波高が H_0 の押し波のみの長周期波1波（正弦波半周期分、造波板ストローク1.40 m、継続時間8.0 s、静水深0.635 m）を作用させた。

砂地盤のパラメータとして、中村ら⁴⁾はRoulundら⁹⁾に倣って静止摩擦角 θ を32.2°、動摩擦角 θ_i を27.0°、水中安息角 θ を30.0°、斜面崩壊開始基準 θ^* を+2.0°、斜面崩壊完了基準 θ^- を-2.0°としていたが、水理実験の条件が異なるRoulundら⁹⁾の値をそのまま使用していたことから、後述するように洗掘の形状や構造物の挙動の再現性は十分ではなかった。その一方で、水理実験での実測値は得られていないことから、本研究では、簡単のために $\theta + \theta^*$ を θ と同値つまり $\theta^* = 0.0^\circ$ とし、また $\theta + \theta^-$ を θ より若干小さい $\theta - 0.01^\circ$ つまり $\theta^- = -0.01^\circ$ とした上で、 $\theta_i \leq \theta$ 、 $\theta + \theta^* \leq \theta$ 、 $\theta_i \leq \theta + \theta^-$ の範囲内で試行計算を行い、 $\theta = 32.2^\circ$ 、 $\theta_i = 28.0^\circ$ 、 $\theta^- = 32.0^\circ$ とした。その他のパラメータ、計算格子、境界条件は中村ら⁴⁾と同じとした。

4. 計算結果および考察

(1) 波動場、地形変化、構造物の挙動の再現性

護岸前面のW1からW4（図-1参照）における水位変動 η の比較を図-2に示す。ここで、 t は時刻である。水理実験では造波装置により、数値計算では造波境界により造

図-1 計算領域と水位計測位置（W1～W4）の概略図

波を行っており両者で異なっていることから、時間の経過とともに波形や位相に若干の差が生じているものの、胸壁の有無に関わらず、水理実験結果との一致が確認できる。なお、上述した水理実験結果との差は時間の経過とともに広がる事が確認できたことから、ここでは2波目がほぼ作用し終えた $t = 25.0$ sまでの解析を行った。

構造物周辺の最終洗掘深 z_{fl} に関して、本研究の数値計算結果、中村ら⁴⁾の数値計算結果、水理実験結果²⁾の比較を図-3と図-4に示す。ここで、正の z_{fl} は侵食を、負の z_{fl} は堆積を表す。胸壁がない場合を示した図-3より、12 mm以下の等高線の差は、本研究の数値計算結果（図-3(a)）と中村ら⁴⁾の数値計算結果（図-3(b)）で顕著には認められない。その一方で、16 mm以上の等高線に着目すると、中村ら⁴⁾の数値計算結果では岸側に長く延びているのに対して、本研究の数値計算結果はそれと比較して狭くなっており、より水理実験結果（図-3(c)）に類似する結果が得られている。また、胸壁がある場合を示した図-4より、本研究の数値計算結果（図-4(a)）では8 mmの等高線が沖側隅角部周辺と岸側隅角部周辺で繋がっているものの、中村ら⁴⁾の数値計算結果（図-4(b)）との顕著な差は認められない。ただし、本研究の数値計算結果の方が岸側隅角部周辺の洗掘が若干深くなっており、12 mmの等高線が現れていることから、水理実験結果（図-4(c)）との対応が若干向上したと考えられる。

図-2 護岸前面での水位変動 η の比較：(a) 胸壁がない場合、(b) 胸壁がある場合

図-3 最終洗掘深 z_{sf} の分布の比較 (胸壁なし) : (a) 本研究の数値計算結果, (b) 中村ら⁴⁾の数値計算結果, (c) 水理実験結果²⁾

図-5 構造物の z 軸方向の重心位置 c_z と y 軸回りの角度 α_y の時間変化の数値計算結果 (胸壁なし)

図-4 最終洗掘深 z_{sf} の分布の比較 (胸壁あり) : (a) 本研究の数値計算結果, (b) 中村ら⁴⁾の数値計算結果, (c) 水理実験結果²⁾

図-6 構造物の z 軸方向の重心位置 c_z と y 軸回りの角度 α_y の時間変化の数値計算結果 (胸壁あり)

図-5と図-6に、構造物の z 軸方向の重心位置 c_z と重心位置での y 軸回りの角度 α_y の時間変化を示す。中村ら⁴⁾の数値計算結果では胸壁がある場合のみに構造物に移動が生じていたが、本研究では、胸壁がない場合を示した図-5より、 $t=9.0$ s付近から徐々に前傾し始め、続いて沈降もし始めた一方で、胸壁がある場合を示した図-6より、 $t=9.0$ s付近に微小な沈降と前傾が確認できるものの、大きな変位は生じていないことが分かる。水理実験²⁾では、胸壁がない場合のみに構造物が沖側に若干傾く現象が確認されていたことから、構造物の挙動に関してもより水理実験結果に対応する結果が得られたと判断できる。

以上より、波動場の再現性が検証できるとともに、最終洗掘深と構造物の挙動に関して、中村ら⁴⁾の数値計算結果と比較して再現性が向上したことが確認できた。ただし、護岸岸側の帯状の侵食を4 mmほど過小評価しているなど水理実験結果との差異が依然としてみられることから、再現性のさらなる向上には課題を残している。

(2) 構造物の挙動

胸壁なしの条件に関して、構造物が砂地盤から受ける反力 F_r と、構造物と砂地盤の接触面積 A_c の時間変化を図-7に示す。ただし、 ρ_b は構造物の密度、 g は重力加速度、

V_{ob} は構造物の体積、 A_0 は A_c の初期値である。また、そのときの構造物周辺の流動場の様子を図-8に、構造物周辺の洗掘深 z_b の分布を図-9に示す。なお、図-8には、 A_c の算出に用いた構造物と砂地盤の接触が生じている計算格子の位置も赤色の球にて同時に示した。また、図-9において、正の z_b は侵食を、負の z_b は堆積を表す。

図-7より、構造物への津波の作用とともに没水体積が増加したことから(図-8(a))、 $F_r / \rho_b g V_{ob}$ が低下し始めたことが分かる。その後、構造物の沖側隅角部周辺の砂地盤が洗掘され始め(図-9(a))、構造物の沖側隅角部が砂地盤と接触しなくなり(図-8(b))、 A_c / A_0 も減少し始めた。それに伴い、構造物が不安定になったと推測され、そのために上述したように構造物が前傾、沈降し始めたと考えられる。その後も構造物が変位し続けており、不安定な状況が続いていたと考えられることから、 $F_r / \rho_b g V_{ob}$ と A_c / A_0 に振動が確認できる。ただし、 $t=13$ s付近から $t=15$ s付近にかけては、図-8(c)に示すように第1波が引いた状態であったことから、構造物の変位が一旦小さくなるとともに(図-5)、 A_c / A_0 の振動が一時的に収まっている。しかし、第2波の作用と洗掘の進展に伴い、構造物の変位と $F_r / \rho_b g V_{ob}$ および A_c / A_0 の振動が再び発生し始めた。このとき、構造物の沈下は没水体積の増加を

図-7 構造物が砂地盤から受ける反力 F_r と構造物と地盤の接触面積 A_c の時間変化 (胸壁なし)

図-8 構造物と砂地盤の接触点の様子 (胸壁なし; 右側が沖): (a) $t=6.53$ s (第1波作用直後), (b) $t=9.33$ s (浸水深増加時), (c) $t=13.80$ s (第1波引き波時), (d) $t=18.72$ s (浸水深増加時)

図-9 洗掘深 z_s の分布 (胸壁なし): (a) $t=9.33$ s (浸水深増加時), (b) $t=18.72$ s (浸水深増加時)

意味していることから、 $F_r / \rho_0 g V_{ob}$ は主に1.0より小さい状態で振動していることが確認できる。

続いて、胸壁ありの条件に関して、 $F_r / \rho_0 g V_{ob}$ と A_c / A_0 の時間変化を図-10に、構造物周辺の波動場の様子を構造物と砂地盤の接触点とともに図-11に、構造物周辺の洗掘深 z_s の分布を図-12に示す。

図-10より、胸壁なしの場合と同様に、構造物への津波の作用に伴い没水体積が増加し始めた (図-11(a)) ことで $F_r / \rho_0 g V_{ob}$ が低下し始め、さらに洗掘が発生し始めた (図-12(a)) ことで A_c / A_0 が減少し始めたことが分かる。このとき、構造物が若干不安定になったと推測され、そのために上述したように構造物に微小な沈降と前傾が生じたと考えられる。しかし、このときの洗掘の規模は胸壁なしの場合 (図-9(a)) と比較して小さかったことから、 $F_r / \rho_0 g V_{ob}$ の振動と A_c / A_0 の減少はすぐに収まっている。その後、構造物周辺の浸水深が増加した (図-

図-10 構造物が砂地盤から受ける反力 F_r と構造物と地盤の接触面積 A_c の時間変化 (胸壁あり)

図-11 構造物と砂地盤の接触点の様子 (胸壁あり; 右側が沖): (a) $t=6.53$ s (第1波作用直後), (b) $t=9.33$ s (浸水深増加時), (c) $t=14.07$ s (第1波引き波時), (d) $t=19.04$ s (浸水深増加時)

図-12 洗掘深 z_s の分布 (胸壁あり): (a) $t=9.33$ s (浸水深増加時), (b) $t=19.04$ s (浸水深増加時)

11(b)) のに合わせて $F_r / \rho_0 g V_{ob}$ が極小になったものの、その波が引いた (図-11(c)) のに合わせて $F_r / \rho_0 g V_{ob}$ が1.0近くまで戻ったことが分かる。その後、第2波の作用 (図-11(d)) とともに $F_r / \rho_0 g V_{ob}$ と A_c / A_0 が再び減少し始めたものの、胸壁なしの場合と比較して洗掘の規模が小さく (図-12(b))、 A_c / A_0 が依然として大きい状態であった。そのため、構造物は比較的安定した状態にあり、変位は生じなかったと考えられる。

以上より、構造物を支える反力は、周辺の流動場だけではなく洗掘の発生に伴う接触面積の減少の影響も受けることから、構造物の安定性を評価する際に洗掘の影響を考慮することの重要性が示唆された。

(3) 対策法とその効果

構造物に移動が生じた胸壁がない場合を対象に、構造物の移動を抑える対策法の効果を検証する数値実験を行

図-13 対策法の概略図：(a) 構造物の隅角部を斜めに變更，(b) 構造物の沖側の地盤内に矢板を設置，(c) 構造物の側面側の地盤内に矢板を設置

図-14 構造物の隅角部を斜めに切り取った効果：(a) 最終洗掘深 z_g の分布，(b) 構造物の z 軸方向の重心位置 c_{oz} と y 軸回りの角度 α_{oy} の時間変化，(c) 構造物が砂地盤から受ける反力 F_r と構造物と地盤の接触面積 A_c の時間変化

った。具体的には，図-13に示すように，津波による洗掘の発生に大きな影響を与えている渦⁷⁾の発生を抑えるために，構造物の隅角部を斜めに切り取る対策と，洗掘が発生した場合でも構造物と砂地盤の接触面積の減少を抑えるために，構造物の沖側または側面側の砂地盤内に深さ50mmの矢板を設置する対策を取り扱った。

構造物の隅角部を斜めに切り取った対策に関して，最終洗掘深 z_g の分布， c_{oz} と α_{oy} の時間変化， $F_r / \rho_{ob} g V_{ob}$ と A_c / A_0 の時間変化を図-14に示す。図-14(a)より，構造物の隅角部を斜めに切り取ったことで，洗掘が若干深くなるとともに，その範囲も広がったことが分かる。それに伴い，構造物の下部における洗掘の範囲も若干広がったものの，図-14(b)より構造物の移動は若干前傾する程度に抑えられたことが分かる。これは，隅角部を斜めとしたことで砂地盤との初期の接触面積 A_0 が小さくなったことから，

(a)

(b)

図-15 構造物の沖側の地盤内に矢板を設置した効果：(a) 最終洗掘深 z_g の分布，(b) 構造物の z 軸方向の重心位置 c_{oz} と y 軸回りの角度 α_{oy} の時間変化

(a)

(b)

(c)

(d)

図-16 構造物の側面側の地盤内に矢板を設置した効果：(a) 最終洗掘深 z_g の分布，(b) 構造物と砂地盤の接触点の様子（右側が沖；浸水深増加時），(c) 構造物が砂地盤から受ける反力 F_r と構造物と地盤の接触面積 A_c の時間変化，(d) 構造物の z 軸方向の重心位置 c_{oz} と y 軸回りの角度 α_{oy} の時間変化

図-14(c)に示すように A_c / A_0 の減少が対策前と比較して小さく抑えられていたためであると考えられる。

構造物の沖側の砂地盤内に矢板を設置したときの最終洗掘深 z_g の分布と c_{oz} および α_{oy} の時間変化を図-15に示す。

図-15(a)より、構造物の側面側の $x > 0.42$ m, $y > 0.07$ mにおける12 mm以下の等高線の範囲を狭くする効果はあるものの、16 mm以上の洗掘の範囲は広がっており、その最大深さも28 mmと深くなっていることが分かる。その影響を受けて構造物の下部でも洗掘が進み、0 mmの等高線の範囲が対策前と比較して狭くなった。そのため、図-15(b)に示すように、構造物は2回ある引き波時に急激に沈下、前傾したと考えられる。

最後に、構造物の側面側の砂地盤内に矢板を設置したときの最終洗掘深 z_f の分布、構造物と砂地盤の接触点の様子、 $F_r / \rho_{sg} V_{ob}$ と A_c / A_0 の時間変化、 c_{α} と α_y の時間変化を図-16に示す。図-16(a)より、16 mm以上の等高線の範囲は広がったものの、矢板によって構造物の下側の砂が抜け出しにくくなったと推測され、そのために構造物の下部の洗掘が抑えられたことが分かる。そのため、接触点の減少(図-16(b))とそれに伴う A_c / A_0 の低下(図-16(c))が抑えられたことから、図-16(d)に示すように構造物の変位が抑えられたと考えられる。

以上より、構造物の移動を抑える対策法として、構造物の側面側の砂地盤内に矢板を設置する対策には効果が認められ、また構造物の隅角部を斜めに切り取る対策にも若干の効果が確認できた。ただし、いずれの対策にも洗掘の範囲や深さを抑える効果は確認できなかったことから、洗掘の防止対策には課題を残している。

4. 結論

本研究では、津波の作用と基礎地盤の洗掘による構造物の移動現象に関する水理実験²⁾に津波・構造物・地形変化間の相互作用を解析できる3次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデル³⁾を適用し、構造物の移動とその対策法に対する検討を行った。その結果、より水理実験の条件に適合した砂地盤のパラメータを用いることで、最終洗掘深の分布と構造物の挙動の再現性が向上することを示した。また、構造物が砂地盤から受ける反力は、

波だけではなく洗掘の影響も受けることから、構造物の安定性を評価する際に洗掘の影響を考慮することの重要性を明らかにした。さらに、構造物の沖側の砂地盤内に矢板を設置する対策には構造物の安定性を向上させる効果が確認できなかったものの、構造物の側面側の砂地盤内に矢板を設置する対策と、構造物の隅角部を斜めに切り取る対策には効果が期待できることが判明した。

謝辞：本研究の一部は、河川砂防技術研究開発(代表者：水谷法美)と科研費補助金若手研究(B)(代表者：中村友昭)の補助によることを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) Yeh, H., Francis, M., Peterson, C., Katada, T., Latha, G., Chadha, R. K., Singh, J. P., and Raghuraman, G.: Effects of the 2004 Great Sumatra Tsunami: Southeast Indian Coast, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, ASCE, Vol. 133, No. 6, pp. 382–400, 2007.
- 2) 中村友昭, 田邊 卓, 水谷法美: 遡上津波による戻り流れを考慮した非固定陸上構造物周辺の局所洗掘に関する実験的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 67, No. 2, pp. I_559–I_564, 2011.
- 3) 東京大学生産技術研究所: 平成 23 年度建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書(その2), 2011.
- 4) 中村友昭, 根笹裕太, 水谷法美: 遡上津波による非固定陸上構造物周辺の洗掘現象への流体・構造・地形変化連成数値計算モデルの適用, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2, pp. I_503–I_508, 2013.
- 5) 中村友昭, 水谷法美: 3次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデルを用いた海上を浮遊するコンテナの風による漂流挙動に関する数値シミュレーション, 数値流体力学シンポジウム, E07-1, 10 p., 2012.
- 6) Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsøe, J., and Michelsen, J.: Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile, *J. Fluid Mech.*, Vol. 534, pp. 351–401, 2005.
- 7) 榊山 勉, 松山昌史, 吉井 匠: 津波による港湾内の海底地形変化に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.506–510, 2007.

STUDY ON DISPLACEMENT OF AN INLAND STRUCTURE DUE TO TSUNAMIS AND LOCAL SCOURING AND ITS COUNTERMEASURES

Tomoaki NAKAMURA, Yuta NEZASA and Norimi MIZUTANI

The displacement of an inland movable structure induced by run-up tsunamis and local scouring is investigated using a three-dimensional coupled fluid-structure-sediment interaction model. Numerical results show that appropriate parameters of the sand substrate can improve the predictive capability of the model in terms of the distribution of the final topographic change and the behavior of the structure. Furthermore, it is revealed that reaction force acting on the structure is affected by not only the tsunamis but also the local scouring, suggesting that it is essential to take into account the effects of local scouring when evaluating the stability of movable structures. In addition, it is found that sheet piles in the sand substrate at the longshore side of the structure would be effective to improve the stability of the structure.