

津波襲来時における港湾周辺の地形変化に関する 3 次元数値計算

(株)日本港湾コンサルタント 正会員 ○大谷 直寛

鳥取大学大学院 正会員 梶川 勇樹

鳥取大学大学院 正会員 黒岩 正光

1. はじめに

津波による地形変化の数値計算の多くでは非線形長波理論による平面 2 次元モデルが使用されている。しかし、平面 2 次元モデルでは、構造物周辺等の 3 次元流況の発生する領域では現象を精度よく再現することが出来ない。構造物周辺の地形変化を高精度に予測するためには、3 次元モデルの適用が必要である。そこで、本研究では、非静水圧 3 次元流れによる地形変化モデルの開発を行い模型実験の再現を試みた。

2. 数値計算モデル

本数値計算モデルでは、座標系に等間隔長方形メッシュのデカルト座標系を採用した。また、港湾および地形変化等の複雑境界形状を表現するため、基礎方程式に FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation method) 法¹⁾を導入した。また、渦動粘性係数の評価には標準型 $k-\epsilon$ モデルを採用した。数値計算法としては、牛島ら²⁾が提案しているコロケート格子法における HSMAC 法に Fractional step 法を導入した。移流項の差分化に 5 次精度 WENO 法を、時間積分に 2 次精度 Adams-Bashforth 法を適用した。掃流砂量式には、河川流を対象に実績の高い芦田・道上式³⁾を用いた。また、浮遊砂量式には、Itakura and Kishi の式⁴⁾を用いた。

3. モデルの妥当性の検証

藤井ら (2009) の実験⁵⁾を対象に本数値計算モデルの妥当性の検証を行った。藤井らの実験水槽を図-1 に示す。また、表-1 に実験条件を、表-2 に計算条件をそれぞれ示す。

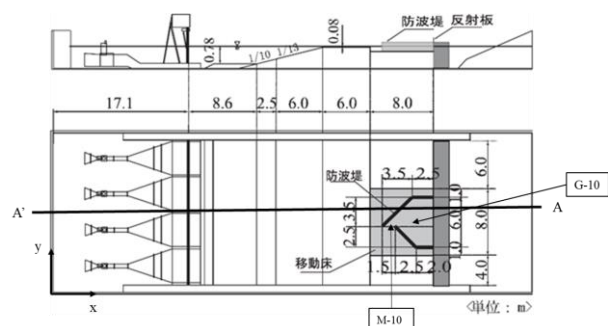


図-1 藤井らの実験水槽の概要

表-1 実験条件

実験の諸条件	
防波堤厚さ(m)	0.15
防波堤高さ(m)	1.3
初期水深(m)	0.8
周期(s)	30
片振幅(m)	0.06

表-2 計算条件

計算条件	
計算時間t(s)	100
計算時間間隔Δt(s)	0.0025
岸沖方向格子間隔Δx(m)	0.100
横断方向格子間隔Δy(m)	0.100
鉛直方向格子間隔Δz(m)	0.02
x方向メッシュ数	420
y方向メッシュ数	182
z方向メッシュ数	60
マンニングの粗度係数n	0.012

1) 流況ベクトルの比較

図-2 は (a) 藤井らの実験結果、(b) 本数値計算モデルの押し波時 (造波開始から 30 秒後) および引き波時 (造波開始から 50 秒後) の水深平均流速を示している。押し波時の港口部の防波堤先端部に発生する剥離流の発生する様子、港内に時計回りに発生する渦が再現できている。また、引き波時の港内から港外へ発生する剥離流、港内で渦流が発生し渦の中心の位置が再現できている。

キーワード 津波, 地形変化, 3 次元モデル

連絡先 〒680-8850 鳥取市湖山町南 4 丁目 101 鳥取大学大学院工学研究科

TEL 0857-31-5300

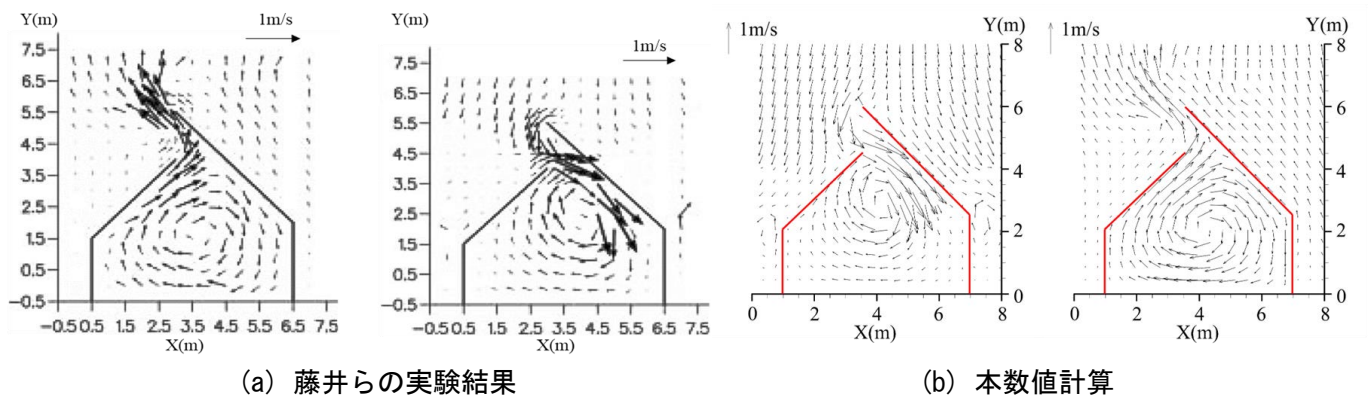


図-2 流速ベクトルの比較 (左図：押し波時，右図：引き波時)

2) 水位・流速の比較

図-3 は図-1 に示す(a)M-10 (港内入口)，(b)G-10 (港内) における藤井らの実験結果と本数値計算での水位変動，岸沖方向流速 u (岸方向を正) および横断方向流速 v (岸から沖を見て右手側が正) を示している。まず，図-3(a)を見ると，水位変動量については再現できている。岸沖方向流速 u を見ると，time=30s における流速の増加傾向，time=60s 以降の負の流速傾向は再現できている。しかしながら time=30~40s において流速を最大で 0.5m/s の過小評価をしている。横断方向流速 v を見ると，time=30s 付近での増加傾向を再現できている。しかしながら，time=30~40s において最大で 0.5m/s の過大評価をしている。次に図-3(b)を見ていく。水位変動量については再現できている。岸沖方向流速 u を見ると，time=30~40s の増加傾向は再現できているが，time=50s 以降で負の流速を過大評価している。横断方向流速 v について見ると，流速の傾向は再現できている。しかしながら，time=35~40s で 0.1m/s 程度の過大評価している。実験値と計算値との間には以上のような差が見られるが，全体的には良好に再現できている。

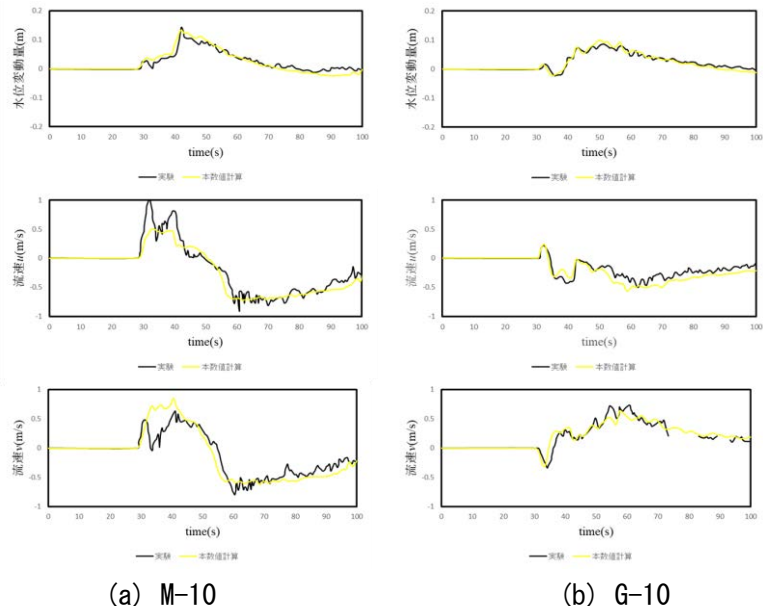


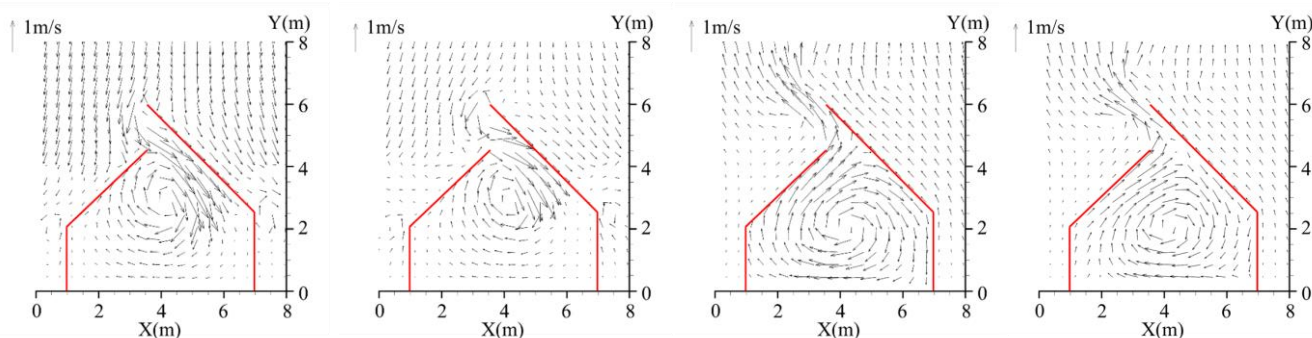
図-3 水位・流速の比較

(上：水位，中央：岸沖方向流速，下：横断方向流速)

4. 港湾内流況の考察

図-4 および図-5 は本数値計算での押し波時 (造波開始から 30 秒後) および引き波時 (造波開始から 50 秒後) における (a) 水面近傍および (b) 底面近傍における流速ベクトルを示している。まず，図-4 を見ていく。防波堤先端を見ると，剥離流が水面近傍よりも底面近傍のほうで強く現れている。それに伴い，港内に流入する流速ベクトルが水面と底面で異なっており，底面近傍では堤防に向かって流入している様子が分かる。また，港内で発生している循環流にも違いが現れている。水面近傍に比べて底面近傍での循環流は規模が小さい。次に，図-5 を見ると，港内から港外へ流出する際の流速ベクトルの方向が異なっていることが確認できる。また押し波時と同様に渦の大きさは水面近傍と底面近傍で異なっており，底面近傍では水面近傍に比べて港内中央に集中するような渦流が形成されている。図-6 は，図-1 に示される AA' における防波堤の交点付近における x - z 断面の引き波時の流速ベクトルを示したものである。防波堤前面で鉛直方向の渦流が発生していること

が分かる．このように津波襲来時の港湾内部では複雑な3次元的流況が発生していることが分かる．また、港内と港外では水位が0.1m異なることも確認できた．よって、エクマン層が発達していると考えられる．



(a) 水面近傍

(b) 底面近傍

図-4 押し波時の流速ベクトル

(a) 水面近傍

(b) 底面近傍

図-5 引き波時の流速ベクトル

5. 港湾周辺の地形変化に関する考察

図-7 は M-10 における浮遊砂濃度の鉛直分布を示している．time=35s と time=40s を見ると底面付近では高さが0.02m変化すると浮遊砂濃度は10000～15000mg/l変化することが確認できる．しかしながら，time=50s では鉛直方向に様な分布を示している．浮遊砂の鉛直分布は時間によって大きく異なることが確認できる．

図-8 および図-9 は，浮遊砂濃度および地形変化の時間変化を示している．津波が押し寄せることで防波堤先端に剥離流が発生する．その剥離流によって港口部で洗堀が発生し砂が巻き上げられる．港口部で発生した浮遊砂は流れによって港内の渦へ流れ込む．渦中心近傍では浮遊砂が高濃度になっているが，渦中心では低濃度となっている．そして，港内から港外へ発生する流れとともに港外へ流れている．港内では，渦中心付近に浮遊砂が堆積していることが確認できた．

図-10 は(a)藤井らの実験結果，(b)本数値計算における初期地形から最終地形の変化量を示している．まず，港内全体を見ると堆積域および侵食域を再現できている．次に港内中央の堆積域を見ると，藤井らの実験と本数値計算ともに0.5～1.0cmの堆積となっている．また，港口部の侵食域においても藤井らの実験と本数値計算ともに2cm以上の侵食が発生していることが分かる．

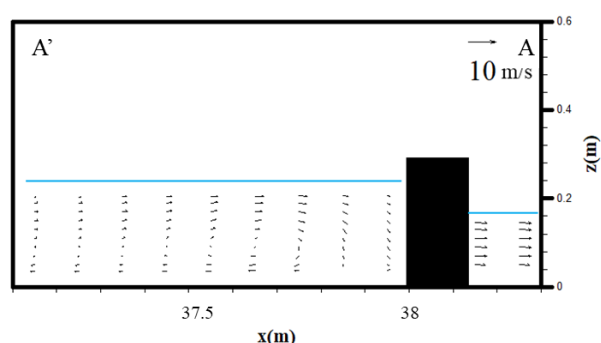


図-6 x-z断面の引き波時の流速ベクトル

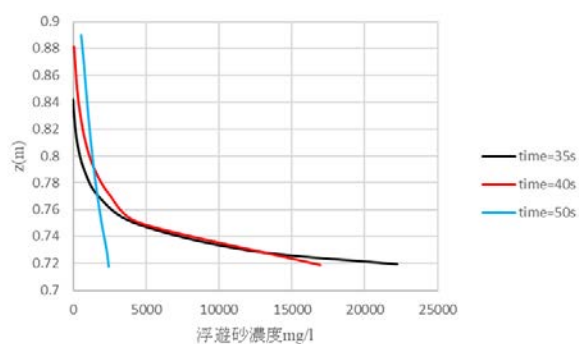
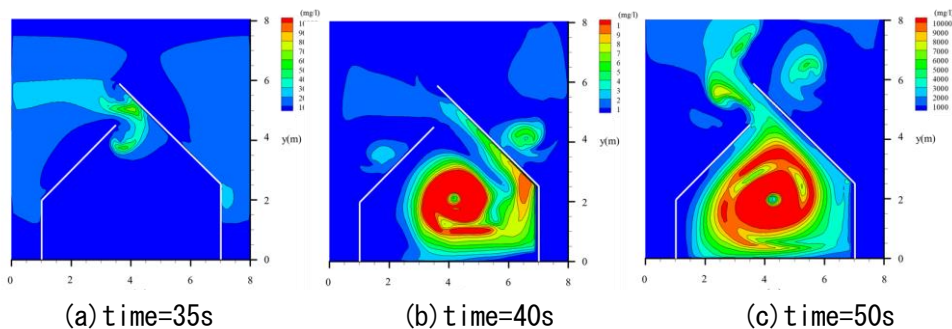


図-7 浮遊砂濃度の鉛直分布



(a) time=35s

(b) time=40s

(c) time=50s

図-8 浮遊砂濃度の時間変化

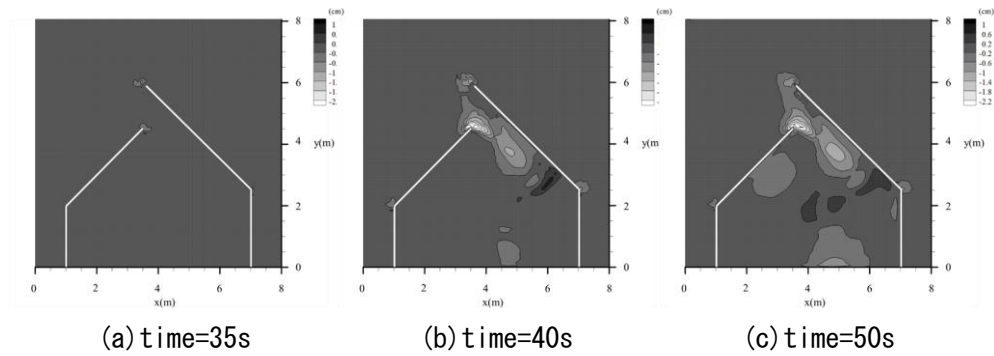


図-9 地形変化の時間変化

7. まとめ

本数値計算モデルは津波の押し波時および引き波時における平面的な流況を定性的に再現できることが分かった。また、浮遊砂濃度の鉛直分布の時間変化より、浮遊砂濃度は時間とともに大きく変化していることが確認できた。本数値計算モデルは、地形変化を再現することができた。今後の課題として、浮遊砂量式に Itakura and Kishi の式を用いているが、津波の地形変動での適用例が少ないため、式の妥当性をさらに確認する必要があると考える。また、他の浮遊砂量式との比較、検証を行っていく必要があると考えられる。

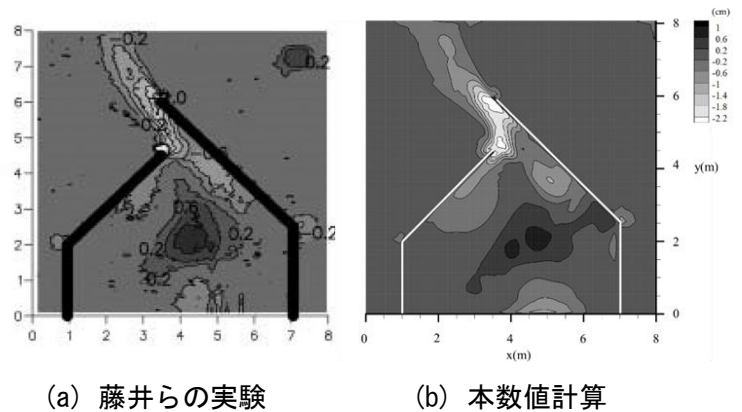


図-10 最終地形の比較

参考文献

- 1) Hirt, C. W. and Sicilian, J. M.: A porosity Technique for the Definition Obstacles in Rectangular Cell Meshes, Proc. 4th Int. Conf. *Ship Hydro*, 1985.
- 2) 牛島省, 禰津家久: 移動一般座標系を用いたコロケート格子による自由水面流れの数値解析手法, 土木学会論文集, No.698/II-58, pp.11-19, 2002.
- 3) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集 206 号, pp56-69, 1972.
- 4) Itakura, T. and Kishi, T. : Open channel Flow with Suspended Sediments, Proc. Of ASCE, HY8, pp1325-1343, 1980.
- 5) 藤井直樹, 池野正明, 榊山勉, 松山昌史, 高尾誠, 向原健: 津波による港湾内の流況と地形変化に関する実験およびその数値計算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 65 巻, 1 号, pp.291-295, 2009.