

数値波動水槽と3次元海浜変形モデルを用いた 港内堆砂予測

片山 裕之¹・石井 敏雅²・藤田 純一³・古川園 健朗⁴・緒方 ゆり⁵

¹正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail:Hiroyuki.Katayama@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 東京電力ホールディングス株式会社 (〒100-8560 千代田区内幸町1-1-3)

E-mail: ishii.toshimasa@tepcoco.jp

³東京電力ホールディングス株式会社 (〒100-8560 千代田区内幸町1-1-3)

E-mail: fujita.junichi@tepcoco.jp

⁴正会員 東京電力ホールディングス株式会社 (〒100-8560 千代田区内幸町1-1-3)

E-mail: zono.ken@tepcoco.jp

⁵正会員 東電設計株式会社 土木本部 社会基盤推進部 (〒135-0062 東京都江東区東雲一丁目7-12)

E-mail:dyuri@tepsco.co.jp

東北地方太平洋沖地震津波で被災した取水港湾の傾斜堤において、消波ブロックによる補修がされているものの、内部を通過し港内に流入する透過砂により港内堆積が進行しつつある。このため、将来的な堆積の進行によっては取水や港内の船舶航行など港湾利用に支障をきたす恐れがある。

本研究は、補修した傾斜堤内の砂の透過状況等が不明な状態において、港内堆砂状況から2次元数値波動水槽による検討を行い、傾斜堤内透過砂モデルを提案し、3次元海浜変形モデルと組み合わせることにより、新たに構築した港内堆砂予測モデルについて報告するものである。

Key Words : rubble mound breakwater, prediction for harbor sedimentation, transmitted waves, transmitted sand, damaged section, numerical wave tank, 3-D beach evolution model

1. はじめに

太平洋に面する発電所専用港湾の中には、汀線に平行な傾斜堤を有する地点がある(図-1)。このような地点の傾斜堤は、東北地方太平洋沖地震津波により大きな津波波力を受けて被災した。傾斜堤本体は消波ブロックにより補修されているが、傾斜堤内部を透過して港内に流入する砂を防止する設備(以下、透過防止工)は、津波で港内に移動して水没した消波ブロック等の影響により補修されていないことから被災後も港内堆砂が進行している。将来的な港内堆砂対策の必要性等を見極めるためには、堆砂の将来予測が必要不可欠である。

傾斜堤からの透過砂を対象とした研究としては、榊山ら¹⁾は2次元断面においてポーラスモデルを用いた傾斜堤周辺波動場解析結果から透過砂の濃度評価を行っている。また板井ら²⁾は、実験から求めた傾斜堤を透過、越波する漂砂量算定式を3次元海浜変形モデルに導入し、港内堆砂予測を行っている。ただし港口部に比較的近い傾斜堤を対象としており、港奥のような港口からの波浪の影響が少なく透過波が主な外力場となる地形変化を対

象とした検討は、例えば中山ら³⁾があるものの少ない。

本研究は、補修した傾斜堤内の砂の透過状況等が不明な状態において、港内堆砂状況からモデル化した堤体断面に対して、港内堆積量が検証データとなることを勘案して2次元数値波動水槽による検討から傾斜堤内透過砂モデルを提案し、傾斜堤を透過した砂の港内における平面的な挙動を評価するため3次元海浜変形モデルと組み合わせることにより、新たに構築した港内堆砂予測モデルについて報告するものである。

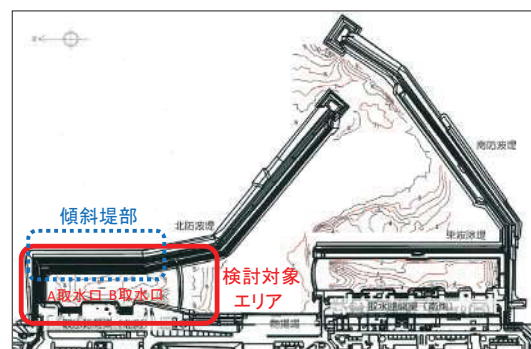


図-1 対象港湾と検討位置

2. 2次元数値波動水槽による傾斜堤透過砂の検討

(1) 現地の透過砂による港内堆積状況

港内堆積の状況を把握するために、震災後の2012年7月、2015年10月、2018年7月に実施された深浅測量結果を示した(図-2)。現地の被災状況や傾斜堤内の堆積までは評価できないこともあり測量できる範囲の概算ではあるが、2012年から2018年の6年間で約13,000 m³の堆積量が生じていた。また透過砂の多くは傾斜堤岸側背後直近の港内に堆積していた。堆積量の実績としては、上記結果から年間2000~3000 m³と推定された。

(2) 透過砂量の算定方法

傾斜堤からの透過砂量を評価するために、2次元数値波動水槽(CADMAS-SURF)⁹⁾を用いた解析を実施した。数値波動水槽から算定される流速分布を用い、堤体前面の底質が巻き上り、浮遊砂となり、移流・拡散しながら堤体岸側に輸送されていくものとして解析を行った。浮遊砂については、Nishihata et al.⁹⁾の手法に倣い、傾斜堤延長方向に一様な現象であると考え、波浪流速計算と同様に鉛直2次元での検討とした。

透過砂濃度Cの移流解析には、CADMAS-SURFにおけるスカラー量の移流方程式である次式を用いた。

$$\gamma_v \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x u C)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z w C)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

ここで、 u, w は前述の波浪流速計算による水平、鉛直方向の流速(m/s)、空隙率 γ および水平、鉛直方向の面積透

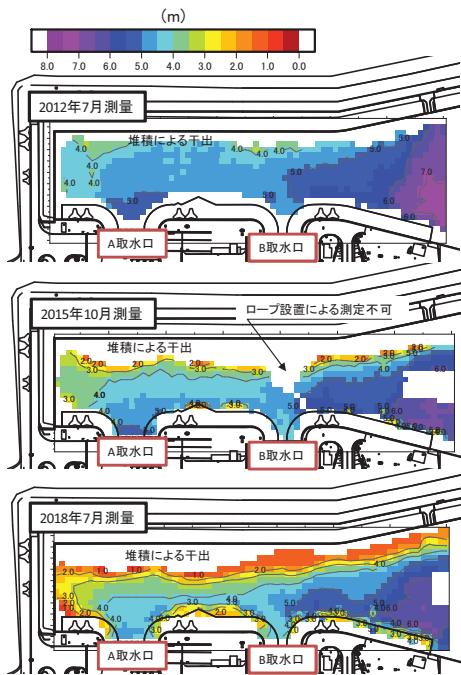


図-2 深浅測量結果 (TP基準)

過率 γ_x, γ_z は波浪流速計算時と同じ値に設定している。

流速場は、CADMAS-SURFによって算定された波浪流速場の1周期分を0.05 s間隔で出力した結果を繰り返し用い、波浪条件毎に防波堤延長1 m、1時間あたりの健全時透過防止工位置を通過する透過砂量を算定した。

浮遊砂の発生は防波堤前面海底からに限定し、次式で表されるHermann&Madsen(2007)による巻き上り率を与え、健全時の透過防止工ラインを通過した浮遊砂を透過砂量と定義した。

$$p = 0.0022 w_f (\tau_b / \tau_{cr,\beta} - 1) \quad (2)$$

ここで、 p は巻き上げ率(単位時間、単位面積あたりに発生する地山換算土量)、 w_f は砂粒子の沈降速度、 τ_b は底面せん断応力、 $\tau_{cr,\beta}$ は限界掃流力である。

砂粒子の沈降速度 w_f は、粒径 d を0.2 mm、土粒子の水比重 s を1.65としてJimenez & Madsen(2003)による次式で算定した。 g は重力加速度である。

$$w_f = \sqrt{sgd} / \left(5.12 / \left(\frac{d}{4v} \sqrt{sgd} \right) + 0.654 \right) \quad (3)$$

限界掃流力 $\tau_{cr,\beta}$ は次式によって算定した。

$$\tau_{cr,\beta} = \rho sgd \times 0.085 \left(\frac{d}{4v} \sqrt{sgd} \right)^{-2/7} \quad : \frac{d}{4v} \sqrt{sgd} < 1.8$$

$$\tau_{cr,\beta} = \rho sgd \times 0.095 \left(\frac{d}{4v} \sqrt{sgd} \right)^{-2/3} + 0.056 \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{d}{4v} \sqrt{sgd} \right)^{-3/4} / 20 \right) \right) \quad : \frac{d}{4v} \sqrt{sgd} \geq 1.8 \quad (4)$$

底面せん断応力 τ_b は、海底面上の流速値 U から対数則に基づく次式により逐次算定した。

$$\sqrt{\tau_b / \rho} = \kappa |U| / \left(\ln \left(\frac{h}{z_0} \right) - 1 \right) \quad (5)$$

ここで、 ρ は海水の密度、 u は摩擦速度、 κ はカルマン定数(=0.4)、 h は水深、 z_0 は粗度高さであり、相当粗度 k_N から次式によって算定した。

$$Z_0 = k_N / 30 \quad (6)$$

ただし、相当粗度 k_N はHermann&Madsen(2007)に倣って、次式のようにシールズ数 ψ に依存させた。

$$k_N = 2d + 4.5(\psi - \psi_{cr})d \quad (7)$$

シールス数 ψ は以下のように定義され、限界シールス数 ψ_{cr} は式(8)を摩擦速度に換算して算定した。

$$\psi_{cr} = u_{*b}^2 / \{(\rho_s/\rho - 1)gd\} \quad (8)$$

このように算定した透過量に対して、傾斜堤の延長距離と近隣の波浪観測データから求めた各波浪ランク別の出現頻度を乗じ、積分することにより1年間の傾斜堤からの透過砂量を評価した。

(3) 2次元数値波動水槽による解析

傾斜堤内部および津波による港内への消波ブロック移動範囲は正確な測量ができないが、震災前の傾斜堤と透過防止工間の堆砂状況の写真や、現在の港内堆積状況から傾斜堤内に堆積している可能性が高い。

そこで堆積程度をパラメタとして、図-3に示すように全部で7ケースの堤内堆積地形に対して、表-1に示す現地近隣の観測波浪から設定した11ランクの波浪条件で解析を行った。解析で用いた対象範囲の水深データを図-4に、解析条件を表-1に示した。



写真-1 震災前の傾斜堤と透過防止工間の堆積状況

表-1 透過砂検討の解析条件

項目	緒元
格子	$\Delta x = \Delta z = 0.8m$
潮位	H.W.L. (=T.P.+0.973m)
波浪条件 (波高, 周期)	(0.75m,10s) (1.25m,10s) (1.75m,10s) (2.25m,10s) (2.75m,10s) (3.5m,10s) (4.5m,12s) (5.5m,14s) (6.5m,16s) (7.5m,16s) (8.5m,16s)
海底勾配	1/100
底質粒径	0.2 mm
構造物 (γ :空隙率) (α β :係数)	捨石: $\gamma=0.43, \alpha=1500, \beta=3.6$ 巴ブロック: $\gamma=0.5, \alpha=2100, \beta=2.2$ 消波ブロック: $\gamma=0.8, \alpha=1500, \beta=3.6$



図-3 被災傾斜堤断面のモデル化

解析結果による波・流れおよび浮遊砂濃度分布の一例を図-5に示す。砕波に伴い、傾斜堤前面海底から巻き上げられた砂が高濃度で傾斜堤に進入するが、堤体内では流れに対する抵抗が大きく、更に空隙の小さい巴ブロックと抵抗で透過砂は濃度を急激に減少させながら堤体後方に伝播していく様子が見られる。

図-6には各ケースの年間堆積量を示した。透過防止工位置から一定勾配の堤内堆積地形を仮定したCase1~5では、堆積量が $1000m^3$ と実績に比べかなり少ない結果となった。一方、堤内堆積天端部を拡大したCase6やCase7にすると、堆積天端部の通水面積減少に伴う流速増大に

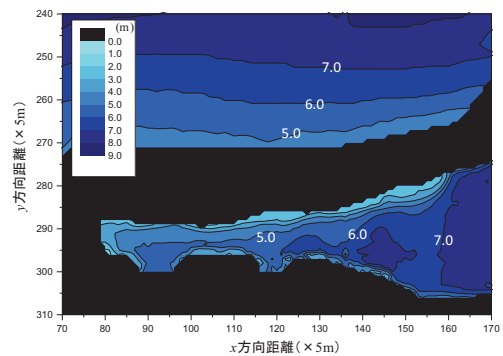
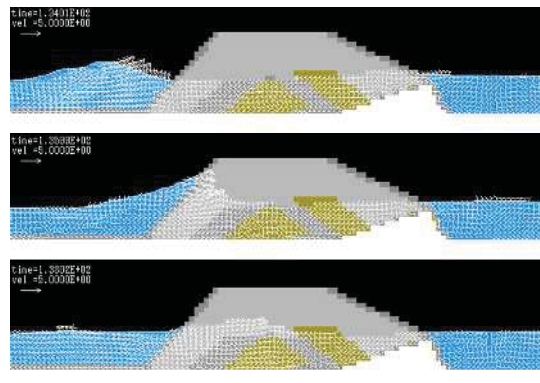
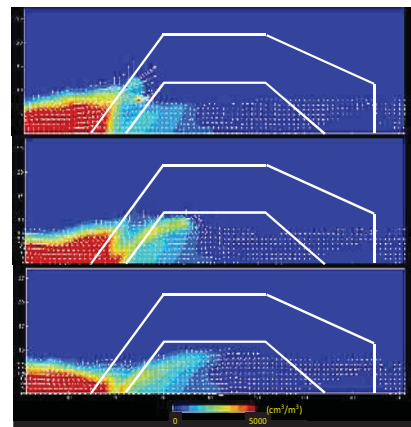


図-4 港内水深 (2018年7月測量)



(1) 波浪・流速場



(2) 浮遊砂濃度場

図-5 解析結果の一例 (Case1, 波高4.5m, 周期12s)

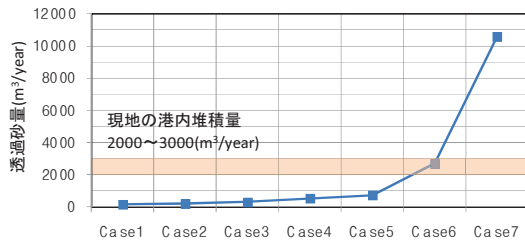


図-6 各ケースの透過砂量

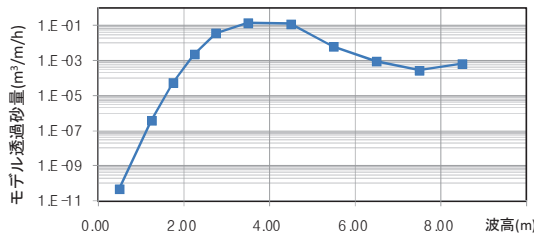


図-7 傾斜堤からの波高ランク別モデル透過砂量

より堆積量が大きく増える結果となり、Case6が実績堆積量である2000~3000 m³と最も整合した。

Case6の各波高ランク別の透過砂量を図-7に示した。3次元海浜変形解析においては、各波高ランク別の時化モデルを作用させるため、この透過砂量を傾斜堤からの年間モデル透過砂量として導入することにした。

3. 3次元海浜変形解析による地形変化

(1) 地形変化解析の概要

傾斜堤からのモデル透過砂量を導入した3次元海浜変形解析を、対象港湾の港外からの海域を対象範囲として、深浅測量結果との検証を行ったモデルを用い、将来予測解析を実施した。

エネルギー平衡方程式による波浪場解析において、傾斜堤前面到達波高に応じ下記に示す沼田⁹⁾による透過率を乗じた透過波を与えることにより透過境界とし、港口からの回折波を同時に解き、合成波浪場を求めた。

$$(K_T)_{thru} = 1/[1 + K(H_I/L)^{0.5}]^2 \quad (9)$$

$$K = 1.135(B_{swl}/D)^{0.65} \quad (10)$$

ここに、 $(K_T)_{thru}$ ：堤体内部通過波の伝達率、 B_{swl} ：水面における堤体幅、 D ：ブロックの高さ、 H_I ：有義波高、 L ：波長である。

次に、合成波浪場に対して海浜流場の解析を行うが、傾斜堤部は不透過境界とし、波浪場・海浜流場を港内地形変化の外力場とした。港内地形変化解析では2章で設

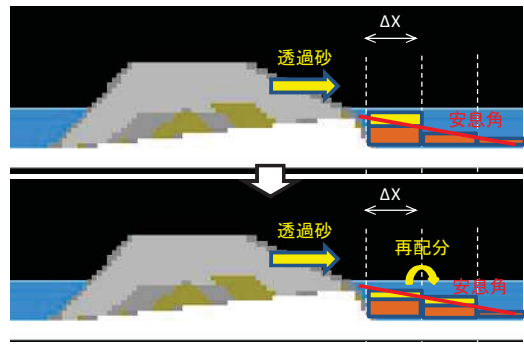


図-8 堆砂地形の静的な崩壊過程のモデル化

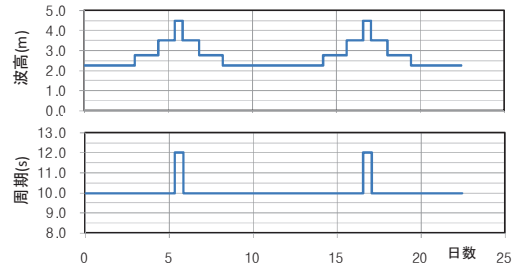


図-9 設定した時化モデル

表-2 3次元海浜変形解析条件

解析	項目	緒元
波浪場	計算範囲	岸沖381格子×沿岸442格子 (岸沖1900m×沿岸2205m)
	計算格子	$\Delta x = \Delta y = 5m$ (共通)
	潮位	H.W.L.(=T.P.+0.973m)
	波浪	時化モデルによる
海浜流	方向集中度	$S_{max} = 25$
	Δt	0.2s
地形変化	港内取水	A取水口:0.79m³/s, B取水口:0.5m³/s
	底質粒径	0.2mm

定した傾斜堤からの透過砂モデルを導入し、設定した時化モデルの各波高ランクに応じた透過砂量を傾斜堤港内側背後に一度堆積させ、港内の波浪、海浜流、取水流の外力作用により移動させた。また作用外力が小さい低波浪時にも、傾斜堤港内側の透過砂による堆積法面が安息角を越えると静的に港内側に崩壊して堆積域が平面的に拡大していく過程をモデル化し導入した(図-8)。なお透過砂は、実際には傾斜堤港内側の堆積状況によっては堤体内部に残置される量が増えるなど前面波浪以外の影響が考えられるが、本解析では港内側堆積状況に関わらず、モデル化した透過砂量を各波高ランクの地形変化解析時毎に与えることとした。

時化モデルは、近隣の波浪観測データ(2014~2017年)を用い、波高ランク毎に年平均のエネルギー平均波高・周期と来襲時間を整理したものを採用した。時化モデルは通常、年間の作用波浪を模擬するが、本検討においては傾斜堤からの透過砂が優位に生じる波高2.5m~4.5m

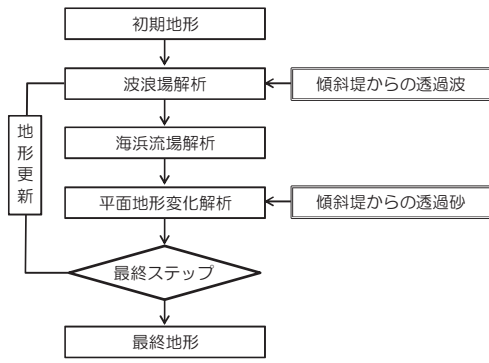


図-10 解析フロー

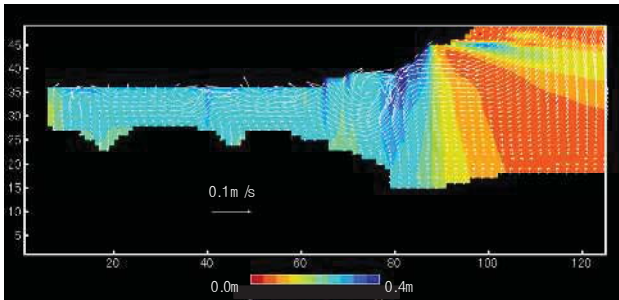


図-11 港内の波高分布・流速ベクトル図
(波高4.5m, 周期12s)

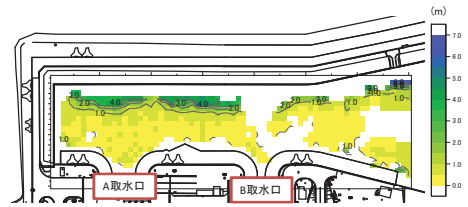
の波高ランク以外では港内の堆積が進行しないと考え、この波高ランクのみの時化モデルを2回にわけて作用させた(図-9)。また波向については、傾斜堤前面到達波が傾斜堤延長上で大きく波向き分布が生じないと考えられることと、傾斜堤からの透過砂モデルを2次元数値波動水槽解析から設定したこととの整合をとるため、全てのケースで直入射とした。3次元海浜変形解析の条件を表-2に、解析フローを図-10に整理した。

(2) 現況再現解析

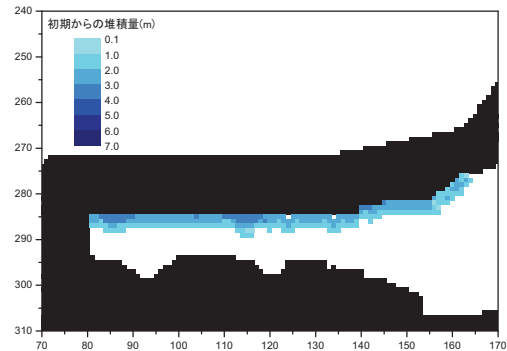
深浅測量結果のうち、2012年7月を初期地形として2015年10月の地形を検証データとして3年間の現況再現解析を行った。なお、現場の被災状況等のため測量が十分にできていない範囲もあるため、定性的な比較とした。

解析結果のうち、波高4.5m、周期12sの波浪ランク時の港内波高分布と流速ベクトル図を図-11に示した。対象となる取水口前面は港の最奥であるため港口からの伝播波浪は小さく、傾斜堤からの透過波が主要な波浪となるため波高としてはかなり小さくなる。一方、流速分布をみると、波高分布には大きく影響されず、AおよびBそれぞれの取水口前面において取水流によると思われる流れが生じている。ただし、流速値としては0.1 m/s以下であり、傾斜堤から透過してきた砂を動かす外力としては小さいことがわかった。

次に、再現解析結果のうち、初期地形から3年後まで



(1) 2012年7月から2015年10月までの堆積量分布



(2) 3年後の堆積量分布

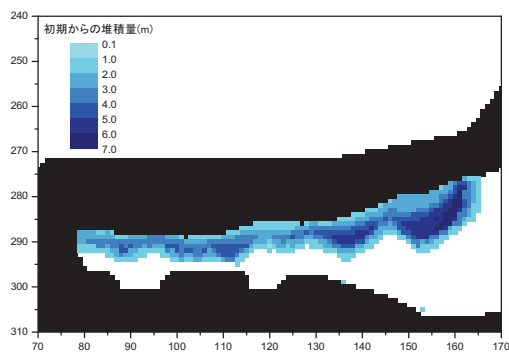
図-12 提案モデルによる再現解析結果

の堆積量分布を図-12に示した。なお、深浅測量結果の傾斜堤背後部分は、堆積が著しく進行して浅すぎるため測量が除外された範囲である。再現解析の結果、傾斜堤背後港内側は、取水を含めた波・流れ場の外力が小さいことから、堆砂の進行拡大は静的な崩壊モードが支配的である結果となった。深浅測量結果と比べると、透過砂が徐々に港内側に進行・拡大していく様子や、傾斜堤背後側に堆積する傾向などが概ね再現されており、モデルの妥当性が確認された。

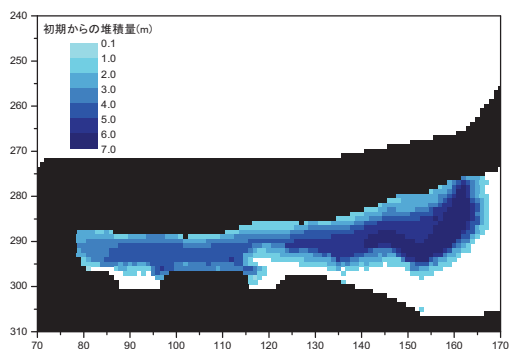
(3) 将来予測解析

次に、提案したモデルを用いて2018年7月を初期地形とした10年後までの将来予測解析を実施した。将来予測を行うと、静的崩壊よりも透過砂流入量の方が大きい場所では干出して陸地化してしまう現象が生じた。実際には、干出地形も高潮位時や高波浪時には削られて水面下に移動していくと考えられることと、干出地形の侵食は本解析モデルでは再現できないことから、ここでは設定した港内最低水深より浅くなると強制的に平面的に等再配分をさせ、干出を生じさせないようにした。

将来予測解析の結果のうち、5年後と10年後の堆積量分布を図-13に示した。結果をみると、堆砂は徐々に進行・拡大して行き、港口側の水深の深い方への堆砂進行がより促進される結果となった。これは水深が深い側の方が海底勾配が大きく、透過砂の進行・拡大に伴い、安息角に達するのが早いと考えられる。また、10年後の将来予測結果では、取水口は埋没しないが、港内の広



(1) 5年後



(2) 10年後

図-13 将来予測解析結果

い範囲まで堆砂が進行する結果となった。

7. おわりに

2次元数値波動水槽解析でモデル化した補修傾斜堤からの透過砂を導入した3次元海浜解析により港内堆砂解析を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 内部の被災状況や堆砂状況が不明な傾斜堤からの透過砂予測モデルを、傾斜堤内の堆積を考慮した2次元解析から構築した。この透過砂モデルと港内の静的崩壊による地形変化モードを導入した3次元海浜変形モデルを提案し、現況の港内地形変化特性の再現性を確認した。

- (2) 同モデルにより港内堆砂の将来予測を行った結果、堆砂の進行は水深の深い側に促進されながら進行拡大し、10年後には取水口は埋没しないが、港内の広い範囲まで堆砂が進行する結果となった。

参考文献

- 1) 榊山勉・鹿島遼一・阿部宣行：傾斜堤周辺の波動場解析へのポーラスモデルの適用，海岸工学論文集，第38巻，pp.546-550，1991
- 2) 榊山勉・伊藤裕・小林正典・板井雅之・小林英次：傾斜堤を透過する浮遊砂の濃度評価への数値計算モデルの適用，海岸工学論文集，第51巻，pp.456-460，2004.
- 3) 板井雅之・伊藤裕・小林正典・池野正明・清水隆夫・榊山勉：捨石式傾斜堤からの越波・透過漂砂量を考慮した港内堆砂予測手法について，海洋開発論文集，pp.491-496，2004.
- 4) 中山哲巖・牧野弘幸・新井雅之・大村智宏・小林学・田村仁・灘岡和夫・佐藤勝弘：港内埋没対策技術と地形変化予測モデルの開発，海岸工学論文集，第53巻，pp.526-530，2006.
- 5) 沿岸開発技術研究センター編：数値波動水路(CADMAS-SURF)の研究・開発，沿岸開発技術ライブラリー，No.12，296p.，2001.
- 6) 沼田淳：ブロック堤の消波効果に関する実験的研究，海岸工学講演会論文集，第22巻，pp.501-505，1975.
- 7) Takeshi, N., Hiroshi, S., Yoichi, M. and K. GOTO : Study on numerical model of topography change due to tsunami, Proc. of 4th Int. Conf. of Score and Erosion, pp.689-694, 2008.
- 8) Herrman, M. and O.S.Madsen : Effect of stratification due to suspended on velocity and concentration distribution in unidirectional flows, J. Geophys. Res., Vol.112, 13p., 2007.
- 9) Jimenez, J.A. and O.S.Madsen : A simple formula to estimate setting velocity of natural sediments, Journal of Waterway, Port Coastal and Ocean Engineering, 129(2), pp.70-78, 2003.

(2019.3.13 受付)

PREDICTION FOR HARBOR SEDIMENTATION BY NUMERICAL WAVE TANK AND THREE-DIMENSIONAL BEACH EVOLUTION MODEL

Hiroyuki KATAYAMA, Toshimasa ISHI, Junichi FUJITA, Kenro FURUKAWAZONO and Yuri OGATA

In rubble mound breakwater of the intake port stricken by Tohoku Pacific Earthquake Tsunami, although repair by the wave-dissipating concrete block is carried out, deposition is advancing with the sand which passes rubble mound breakwater. For this reason, which has a possibility of causing trouble depending on advance of prospective deposition in port use of intake, a vessel cruise, etc. This research proposes the penetration sand model in rubble mound breakwater in 2-dimensional numerical wave tank from deposition in port, although the situation of the sand which penetrates the inside of repaired rubble mound breakwater is unknown. Furthermore, this was combined with the 3-dimensional beach evolution model, and the deposition prediction model in port was built.