

透過堤内および周辺を対象にした非定常地形変化解析 モデルの構築とその適用性について

熊谷隆宏*・窪 泰浩**・藤田和浩**・植木一浩***

傾斜堤と透過防止工の間の空間を利用して、浚渫土を海域還元させる手法について、その有効性を評価するために、数値波動水路 (CADMAS-SURF) と地形変化解析モデルを連成させた非定常地形変化解析モデルを構築した。水理模型実験および現地調査を実施し、防波堤を利用する海域還元手法の還元メカニズムを明らかにするとともに、構築した数値解析モデルの検証を行った。数値モデルを用いて、実験で計測された透過堤背後における水位および流速を再現できることを確認した。また、地形変化解析の適用性について、断面地形変化に着目すると、局所的に再現できない部分があるものの、概ね、良い再現性があることが分かった。さらに、侵食量を用いて定量的に評価した場合にも、十分に再現性があることが分かった。

1. はじめに

外洋に面した砂浜海岸に立地された発電所専用港湾では、航路維持と安定取水を目的として、維持浚渫が実施されている。港湾浚渫土砂の処分方法としては、陸揚げし、敷地内に処分する方法が一般的であるが、この方法は、将来、限界を迎えることが予測される。一方で、近年、海底砂の減少に伴う砂浜の後退が多く見られることから、浚渫土砂を陸揚げするのではなく、元の海域に還元する「海域還元」の考え方に基づく処分方法の適用が重要と考えられる。

本研究では、傾斜堤と透過防止工の間の空間を利用した海域還元手法について、その有効性を評価するために、数値解析モデルを構築した。この海域還元手法は、透過堤とその背後に設置された透過防止工の間に浚渫土砂を投入し、高波浪時の波の作用によって土砂を海域に還元させるものである。

通常、透過堤内および周辺の波動場を解析するためには、数値波動水路 (磯部ら, 1999) が有効であるが、数値波動水路は固定床を対象にしているため、従来、地形変化を扱うことができなかった。数値波動水路を用いた漂砂の検討に関して、鈴木ら (2003) は、混成堤前面におけるブロックの沈下や法先洗掘を漂砂によるものとして捉え、数値波動水路で波浪場を解析した結果を用いて、透過構造物である捨石、消波ブロックの下部における漂砂量の評価を行っている。

本研究では、数値波動水路と地形変化解析モデルを連成した非定常地形変化解析モデルを構築した。さらに、水理模型実験および現地調査を実施し、今回の浚渫土の海域還元手法における還元メカニズムを明確にするとともに、構築した数値解析モデルの適用性に関する検討を行った。

2. 非定常地形変化解析モデル

傾斜堤と透過防止工の間に土砂を投入した後において、傾斜堤内および周辺の波・流れ場は、傾斜堤の透過波、越波、投入砂面への遡上波、滞留水塊の流下に伴う戻り流れ等が存在するため、複雑な場となっている。透過堤背後に投入した砂は、このような波・流れによって防波堤を透過し、堤外に流出する。このような複雑な波・流れ場における地形変化を評価するために、数値波動水路 (CADMAS-SURF) と地形変化解析モデルを連成した非定常地形変化解析モデルを構築した。

図-1 に解析のフローチャートを示す。次の①から③のステップの繰り返しによって、非定常地形変化解析が行われる。①数値波動水路によって波浪解析を行い、求められた底面流速より、底面せん断力を評価する。②評価された底面せん断力を地形変化解析モデルに入力し、漂砂量フラックスおよび地形変化を解析する。③地形変化解析結果を踏まえ、数値波動水路の入力条件 (海底地盤高に関する境界条件) を更新し、リスタートする。ここで、数値波動水路に関して、計算開始後に、海底地盤を表現する「障害物」の形状の変更が可能となるようモデルの改良を行った。また、漂砂量モデルとして、適用

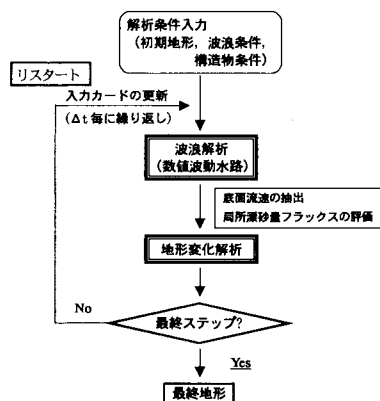


図-1 解析フローチャート

* 正会員 Ph.D. 五洋建設(株) 技術研究所
** 正会員 東京電力(株)
*** 正会員 工 修 東電設計(株) 第二土木本部 港湾海岸部

することが容易であるパワーモデルが、実務上、一般に使用されている。本解析では、パワーモデルに基づく漂砂量モデルとして、各瞬間の漂砂量を評価できる佐藤・Kabiling (1994) モデルを適用した。

$$q_t = q_b + q_s \dots\dots\dots (1)$$

$$q_b(t)/\sqrt{(\rho_s/\rho-1)gd^3} \\ = \alpha_b |\Psi(t)|^{0.5} \max(\Psi(t) - \Psi_c, 0) u_b(t)/|u_b(t)| \\ \dots\dots\dots (2)$$

$$q_s(t)/w_s d = \alpha_s \max(\Psi(t) - \Psi_c, 0) u_b(t)/|u_b(t)| \\ \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 q_t :単位幅あたりの漂砂量、 q_b :掃流砂成分、 q_s :浮遊砂成分、 $\Psi(t) = f_w u_b(t)^2 / [2\rho_s(\rho-1)gd]$:瞬間シールズ数、 Ψ_c :移動限界シールズ数、 u_b :底面流速、 $\alpha_b (=1.0)$:掃流砂の係数、 $\alpha_s (=3.5)$:浮遊砂の係数である。

さらに、海底勾配の影響を考慮するため、底面勾配を用いて、上式より求められる漂砂量を補正する。

$$q' = q_t - \varepsilon |q_t| \partial Z_b / \partial x \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 q' :補正された漂砂量、 Z_b :海底地盤高、 ε :経験係数である。

3. 水理模型実験

(1) 実験概要

本研究では、傾斜堤周辺の水位、流速変動を測定し、波浪場の特性を把握することを目的とした固定床実験を行った後に、傾斜堤背後に土砂を投入し、地形変化特性を調査する移動床実験を実施した。図-2に、実験断面図を示す。本実験では、1/50勾配の斜面に接続された高さ20 cmの水平床上に、堤体を設置した。固定床実験では、容量式波高計5基および電磁流速計2基により、水位および流速変動を測定した。ここで、電磁流速計は、静水深の1/2の深度に設置した。移動床実験では、堤体背後に土砂を投入する制約上、堤体背後では水位変動のみを測定した。図-3に、消波ブロック、ガンマエル、捨石より構成される堤体の概要を示すと同時に、規則波を用いた実験条件を表-1に示す。実験では、フルードの相似則に基づく模型縮尺を1/15に設定した。また、移動床実験には、粒径0.1 mmの砂を用いた。

(2) 実験結果および数値モデルの検証

固定床水理実験で得られた水位・流速変動計測結果を

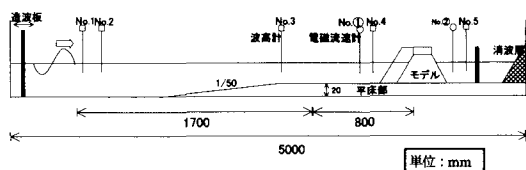


図-2 実験断面

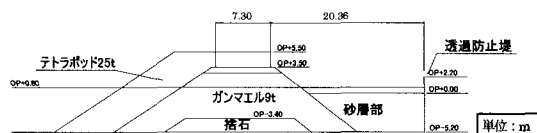


図-3 堤体概要

表-1 実験条件

	堤体位置 有義波高	周期	水深	底面条件
CASE 1	9.3 cm (1.4 m)	3.16 s (10 s)	40.0 cm (6.0 m)	固定床
CASE 2	18.7 cm (2.8 m)	3.32 s (11 s)	40.0 cm (6.0 m)	固定床
CASE 3	23.0 cm (3.5 m)	3.44 s (12 s)	40.0 cm (6.0 m)	固定床
CASE 4	23.0 cm (3.5 m)	3.44 s (12 s)	40.0 cm (6.0 m)	移動床

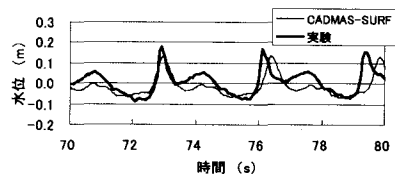
() 内は現地スケール

検証データとして、数値解析モデルの適用性を検討する。

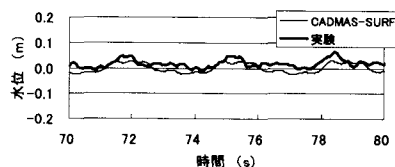
数値波動水路を用いて、波浪場解析を実施するにあたり、傾斜堤に用いられる材料の空隙率、抗力係数、慣性力係数を表-2に示すように設定した。固定床実験におけるCASE 1～CASE 3に対して、数値解析を行った。図-4と図-5に、CASE 3を対象とした水位および流速の変動に関する実測値と解析結果の比較を示す。波の非線形性が強くなると、堤体前面において、数値解析結果が若干小さくなる傾向にあるものの、土砂を投入する堤体背後域においては、水位および流速の変動を十分な精度で再現できることを確認した。また、入射波高に対する堤体背後の波高比で定義した透過率に関して、実験と

表-2 パラメータの設定値

	空隙率 n	抗力係数 C_D	慣性力係数 C_M
消波ブロック	0.43	1.0	1.2
巴ブロック	0.50	1.0	1.2
捨石	0.43	1.0	1.2



(1) 透過堤前面 (波高計 ch4)



(2) 透過堤前面 (波高計 ch5)

図-4 透過堤前面における水位変動 (CASE 3)

数値解析結果の比較を図-6に示す。さらに、透過堤背後地点において計測された平均流速と解析結果の比較を図-7に示す。これらの結果より、透過堤背後域における波高および流速を精度良く評価できることが分かる。以上の結果より、今回使用する波浪場解析モデルは、十分な適用性があることが確認された。

次に、CADMAS-SURFと漂砂モデルを連成させた非定常地形変化モデルによる地形変化解析の妥当性の検証を行う。表-1に示すCASE4の実験条件で得られた移動高については、現地スケールで表示した。傾斜堤内および傾斜堤背後の初期地形の作成方法に関して、まず始めに仮地形を与え、地形が安定するまで一定時間(30時間程度：実験スケール)、対象とする波浪を作用させた。そして、得られた安定地形に、所定の高さまで土砂を投

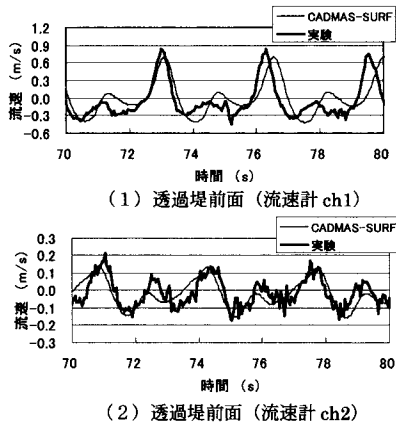


図-5 透過堤前面における流速変動 (CASE3)

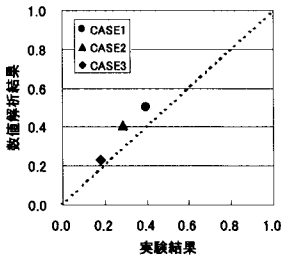


図-6 透過率に関する実験と数値解析結果の比較

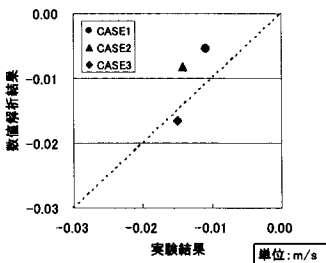
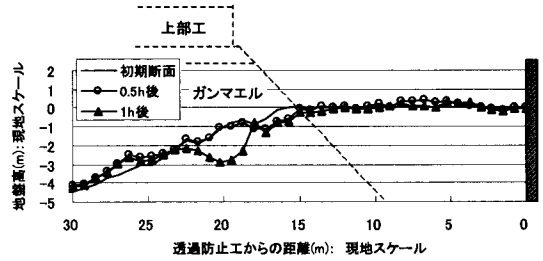
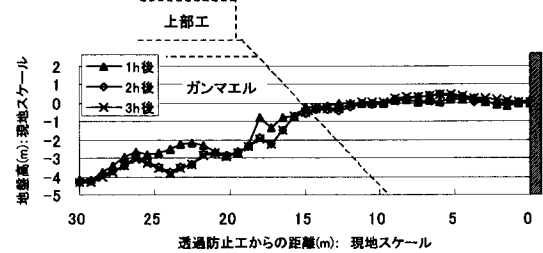


図-7 透過堤背面における平均流速



(1) 初期断面～1時間後



(2) 1時間後～3時間後

図-8 実測地形変化 (CASE4)

入したものを移動床実験の初期地形とした。

図-8に示す実験結果より、波浪作用後、傾斜堤境界部より侵食が始まり、傾斜堤内部に侵食が広がる傾向があることが分かる。また、地形変化速度としては、波浪作用後2時間の間に大きな地形変化が現れ、その後は、地形変化速度が非常に小さくなることが分かる。本実験結果を数値解析モデルの検証データとして用いる。

地形変化解析を実施するにあたり、透過堤内および透過堤設置境界部の近傍における流体の運動に関して、構造物や砂れんの影響により、流れの剥離に伴う渦や乱れが形成されることが考えられる。このとき、底面から浮遊砂が巻き上げられ、浮遊状態で移動する砂の量が増大する。特に、流れ場にとって変化が大きい構造物の設置境界部近傍では、乱れが顕著になると考えられる。本研究では、このような、透過構造物内および近傍において、渦や乱れによって底質の移動量が増大する現象を、摩擦係数を増大させることで近似的に表現する手法を用いる。本研究で設定した摩擦係数の値を表-3に示す。

以上の手法を用い、まず、漂砂量フラックスの解析を行った。図-9に示す最大漂砂量フラックスの解析結果において、透過堤の境界部近傍で、強い冲向き漂砂が発生することが評価されている。また、図-9における透過堤境界部近傍の代表点 Pt1 および Pt2 に対し、漂砂量フラックスの時間変動を求めた結果を図-10に示す。この結果より、透過堤境界部近傍では、波の1周期の平均で考えると、冲向きの漂砂が卓越する傾向にあることが分かる。また、図-11に示す波浪場解析結果例より、引

表-3 摩擦係数の設定値

	透過堤内部	透過堤境界部近傍	透過堤外
摩擦係数	0.05	0.075	0.015

き波時において、底面の斜面部と水平部が接続する傾斜堤設置境界の近傍では、下向き水面勾配の形成に伴う強い沖向き底面流速が発生することが分かる。このような強い沖向き底面流速によって、沖に向かう漂砂が卓越し、傾斜堤背後に投入した土砂が沖に流出すると考えられる。

図-12に、CASE 4の移動床実験結果の再現計算結果を示す。数値解析により、透過堤の境界部近傍から透過堤内に侵食域が広がる傾向を再現できることが分かる。数値解析では、透過堤内部で侵食域が現れるのが若干遅い傾向になっているものの、図-13に示す侵食量(断面

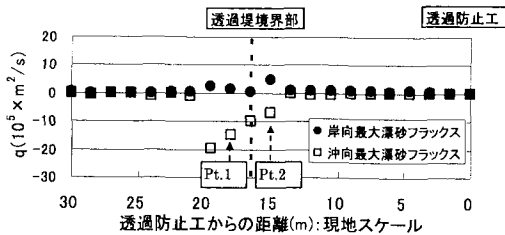


図-9 最大漂砂フラックスの空間分布

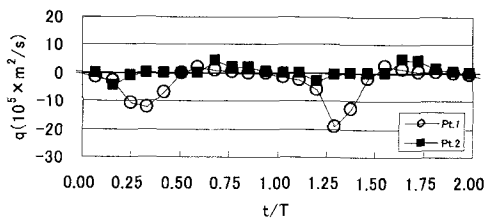
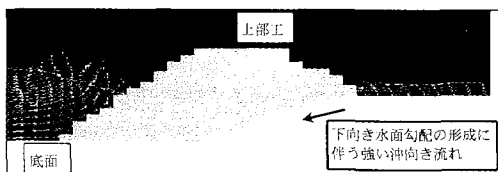


図-10 漂砂フラックスの時間変動

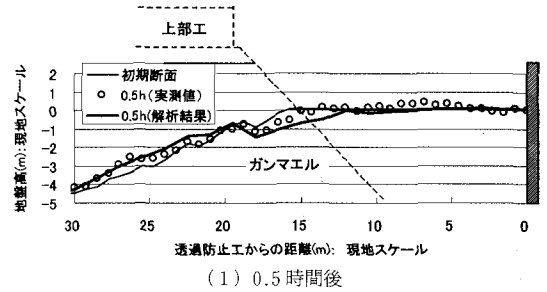


(1) 押し波時

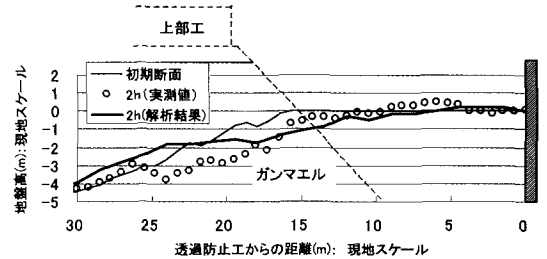


(2) 引き波時

図-11 波浪場解析結果例 (CASE 4)



(1) 0.5時間後



(2) 1時間後

図-12 数値解析による再現計算結果 (CASE 4)

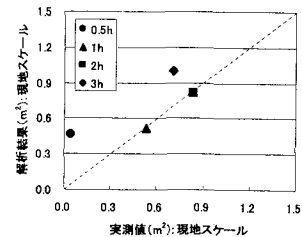


図-13 侵食量に関する実測値と解析結果の比較

積)で比較すると、十分な再現性を持つと考えられる。

4. 非定常地形変化解析モデル

2003年1月(第1回調査)と2004年1月(第2回調査)の2回にわたり、電磁流速計付き波高計を海底面に設置し、波浪・流況観測を実施した。また、第1回調査時には、傾斜堤と透過防止工の間に土砂を投入するとともに、土砂投入後の地形変化調査を行った。

図-14に、波浪・流況観測および土砂投入位置を示すと同時に、図-15と図-16に、波浪・流況の観測結果を示す。ここで、流速については、20分間平均値を用いて分析した。この結果、第1回、第2回調査ともに、高波浪の来襲時、傾斜堤から透過防止工の間において、沖向き流れが顕著に現れることが分かる。また、防波堤に対して、波が直角に入射する傾向にある第1回調査の観測地点、斜めに入射する傾向にある第2回調査の観測地点とともに、流向と波向は防波堤法線の直角方向に向く傾向であった。投入土砂は、高波浪時に発生する防波堤直角方向の戻り流れによって、海域に還元されると考えられ

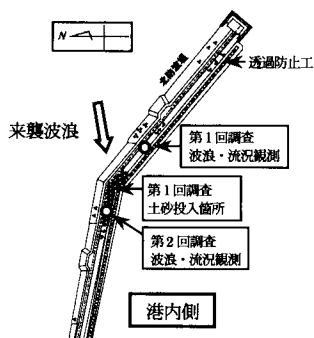


図-14 現地観測地点概要

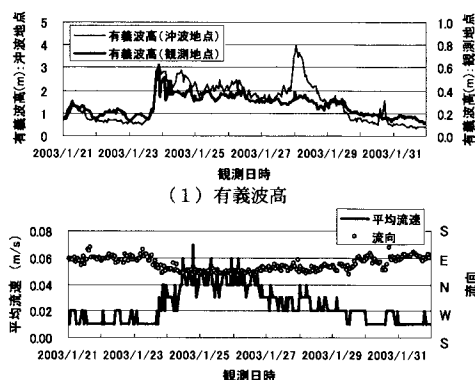


図-15 第1回波浪・流況観測結果

る。この結果より、構築した断面2次元の地形変化解析モデルは、構造物前面における波の斜め入射の効果を考慮するだけで、現地の波の斜め入射条件における地形変化を評価できると判断できる。

2003年1月11日から17日にかけて、傾斜堤から透過防止工の間に8,590 m³の土砂を投入し、その後、1月20日および1月30日に地盤高測量を実施した。この間に生じた地形変化は、図-15に示す1/23～1/28の期間に来襲した高波浪に起因すると考えられる。1/23から1/28の高波浪来襲期間において、沖波のエネルギー平均波は、 $H_0=2.17$ 、 $T_0=10.6$ 、波向Eと算定された。この結果を用いて、対象地点前面の換算沖波を算定し、非定常地形変化モデルによる解析を行った。

数値解析によって評価された1日後の地形と、現地において1日後に換算される地形を比較すると(図-17)、数値解析の方が、傾斜堤背後において侵食量の大きい場所が一部発生するが、傾斜堤から透過防止工内において1日あたりの侵食速度(断面積変化速度)を比較すると、現地では約2.6 m³/m/dayであるのに対し、数値解析は約2.8 m³/m/dayと良好な再現性を示す。

以上の結果より、構築した数値解析モデルの現地適用



(1) 有義波高

(2) 流向および流速

図-16 第2回波浪・流況観測結果

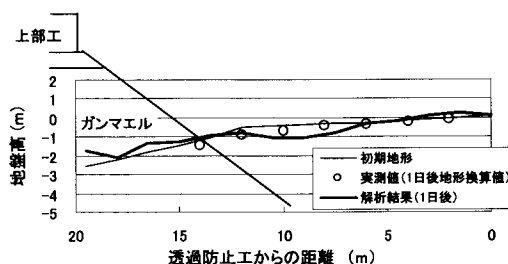


図-17 現地調査結果と数値解析結果の比較

性が確認された。

5. 結 語

本研究では、数値波動水路と地形変化解析モデルを連成した非定常地形変化解析モデルを構築した。さらに、水理模型実験および現地調査を実施し、防波堤を利用した浚渫土砂の海域還元手法の還元メカニズムを明らかにするとともに、数値解析モデルの適用性に関する検討を行った。その結果、断面地形変化に関して、局所的に、再現できない部分があるものの、概ね、良い再現性があることが分かった。また、侵食量を用いて定量的に評価した場合にも、十分に再現性があることが分かった。

謝辞：本研究を進めるにあたり、貴重なご意見を頂いた東京電力(株)大津仁氏、東電設計(株)大森政則氏、また、解析を実施するにあたり、ご協力を頂いた五洋建設(株)池野勝哉氏に深甚なる感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・余 錫平・梅村幸一郎・高橋重雄 (1999): 数値波動水路の開発に関する研究: 海工論文集, 第46巻, pp. 36-40.
- 佐藤慎司・Kabiling, M. (1994): 波打ち帯を含む三次元海浜変形の数値モデル, 海工論文集, 第41巻, pp. 401-405.
- 鈴木高二郎・大寄菜々子・山本泰司 (2003): 防波堤基礎での洗掘量の推定について, 海工論文集, 第50巻, pp. 886-890.