

粒径別浮遊・掃流漂砂モデルを用いた混合粒径砂 大型岸沖海浜変形実験の再現

池野正明*・清水隆夫**・小林英次***

本研究では、粒径別浮遊・掃流漂砂量をモデル化し、海底混合砂の分級履歴を考慮した海浜変形予測モデルを開発した。混合粒径砂大型岸沖海浜変形実験結果と比較した結果、侵食性・堆積性波浪による波高分布、粒径別全漂砂量や輸送方向、定常流速・粒径別浮遊砂濃度の鉛直分布を再現でき、海底地形変化と分級過程を概ね再現できることがわかった。混合砂の地形変化計算の際、砂の空隙率が混合率に応じて空間的に変化する特性および新堆積域では空隙率が大きくなる特性を考慮することにより、再現性が向上することもわかった。

1. はじめに

養浜対策等に資するため、混合粒径砂の海浜変形を適切に予測できる数値モデルの開発が必要である。これまで、シートフロー漂砂量式を用いた混合砂岸沖海浜変形予測モデルが提案されている。しかしながら、この数値モデルでは、浮遊漂砂が卓越するような侵食性波浪時の碎波帯内の混合砂漂砂量や細砂の巻き上げを過小評価することが報告されている(田中ら, 2000b; 2001)。そこで、本研究では、細砂と粗砂による2粒径混合砂大型岸沖海浜変形実験に基づき、粒径別浮遊・掃流漂砂量をモデル化し、海底混合砂の分級履歴を考慮した海浜変形予測モデルを開発し、実験結果の再現を試みる。

2. 混合粒径砂に対する海浜変形予測モデルの開発

(1) 波・流れ

まず、波・流れ計算部では、波浪外力の非線形性を考慮するため、前報(池野ら, 2001)と同様に、修正ブシネスク方程式(Madsen et al., 1991)に波列碎波による運動量拡散項(佐藤・Kabiling, 1994)を付加した式を用いて波浪場を計算する。得られた水深断面平均流速を任意の鉛直座標における水平流速に変換し(Nwogu, 1993)、さらに、渦粘性モデルに基づき,Ikeno・Shimizu(1998)による碎波による戻り流れの鉛直分布算定式を付加する。上記の戻り流れ算定式は、もともと不規則波大型海浜変形実験に基づき提案されたものであるが、規則波に対しても適用可能なことがわかっている。これに対し、最近、柴山・Rattanapitikon(2001)は、広範囲な実験データに基づき改良した実用的な戻り流れの算定式を提案している。本研究では、上記算定式も比較のために用いた。

(2) 粒径別浮遊漂砂量

a) 粒径別巻上量(粒径別基準点濃度)

まず、粒径別巻上量 $\bar{p}_i$ (粒径別基準点濃度 $\bar{c}_{0i}$) は、大型造波水路実験結果に基づき、次式のように表現する。

$$\bar{c}_{0i} = \bar{p}_i / w_{si} = P_i \cdot A' \cdot \rho_w \frac{\max(\psi_i - 0.05, 0)^{1.5} \gamma}{100 d_i \sqrt{(\rho_s / \rho_w - 1) g d_i}} \cdot r_i (d_i / d_m) \quad (1)$$

ここに、 d_i は i 番目の砂の粒径、 w_{si} は粒径 d_i の砂の沈降速度、 ρ_s は砂の密度、 ρ_w は水の密度、 P_i は粒径 d_i の砂の海底砂表層混合層内の鉛直平均存在確率(平均混合率)で、以下のようである。

$$P_i(x, y) = \frac{1}{\Delta} \int_{z_b-d}^{z_b} P_i'(x, y, z) dz \quad (2)$$

ここに、 x, y, z は岸沖、沿岸、鉛直座標、 z_b は海底砂面高、 Δ は表層混合層厚、 $P_i'(x, y, z)$ は混合率の空間分布である。 g は重力加速度、 ν は水の動粘性係数、 ψ_i は粒径 d_i の砂のシールズ数、 A' は無次元係数(=3.0)である。 d_m は混合砂の平均粒径であり、次式で定義される。

$$d_m = \sum_{i=1}^n P_i \cdot d_i \quad (3)$$

ここに、 n は混合砂を構成する砂の粒径の総数、 r_i は混合砂の異粒径底質間の干渉により、巻上量や漂砂量が一樣粒径時より変化する効果(分級効果)を表す係数である。

佐藤ら(2000)によれば、例えば、粒径0.2mmの細砂と粒径0.8mmの粗砂が5:5に一樣混合された混合砂中の細砂は、アーミング効果により、一樣細砂の場合よりも移動しにくくなる(巻き上がりにくくなる、あるいは底質の存在確率に比べて漂砂量が減少する)。これに対し、混合砂中の粗砂は、一樣粗砂の場合よりも移動しやすくなる(巻き上がりやすくなる、あるいは底質の存在確率に比べて漂砂量が増加する)ことが報告されている。

混合粒径砂の漂砂移動を扱う場合には、これらの特徴を漂砂モデルに反映させる必要がある。本研究では、 r_i にこの効果を反映させることとし、佐藤ら(2000)や田中ら(2000b)の研究を参考に次式で表現する。

$$r_i(d_i / d_m) = (d_i / d_m)^{k_1}; k_1 = 0.5 \quad (4)$$

上記の r_i は、注目すべき粒径 d_i が混合砂の平均粒径 d_m に対して、どれくらい小さいか(大きい)かを表す指標 d_i / d_m の関数であり、 d_i が d_m より小さい場合には、そ

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所我孫子研究所環境科学部
** 正会員 工修 (財)電力中央研究所我孫子研究所環境科学部
*** 正会員 工修 (株)開発計算センターエンジニアリング事業部

の度合いに応じて、巻上量や漂砂量を小さくする（アーミング効果； $r_1 < 1$ ）、 d_m より大きい場合には、巻上量や漂砂量を大きくする（ $r_1 > 1$ ）働きを担うものである。

b) 粒徑別浮遊砂濃度

粒徑別浮遊砂濃度 $\bar{c}_i(z)$ は、既往の検討結果（池野ら，2000；池野ら，2001）に基づき、次式で表現する。

$$\bar{c}_i(z) = \bar{c}_{0i} \left[\left(\frac{1}{1 - \frac{\varepsilon_{si}}{w_{si} L_{si}}} \right) \exp\left\{ -(z+h)/L_{si} \right\} + \left(1 - \frac{1}{1 - \frac{\varepsilon_{si}}{w_{si} L_{si}}} \right) \exp\left\{ -w_{si}(z+h)/\varepsilon_{si} \right\} \right] \quad (5)$$

ここに、 h は静水深、 z は静水面上向き正の鉛直座標、 ε_{si} と L_{si} は粒徑 d_i の砂の拡散係数と鉛直移流スケール長であり、Nielsen (1992) の算定式を援用する。

c) 粒徑別浮遊漂砂量

粒徑別浮遊漂砂量 $\bar{q}_{sxi}$ 、 $\bar{q}_{syi}$ は次式により算定される。

$$\bar{q}_{sxi} = \frac{1}{\rho_s} \int_{-h}^0 \bar{c}_i(z) \bar{u}(z) dz, \quad \bar{q}_{syi} = \frac{1}{\rho_s} \int_{-h}^0 \bar{c}_i(z) \bar{v}(z) dz \quad (6)$$

ここに、 $\bar{u}(z)$ 、 $\bar{v}(z)$ は碎波による戻り流れを付加した定常流速の鉛直分布である。

(3) 粒徑別掃流漂砂量

粒徑別掃流漂砂量 $\bar{q}_{bxi}$ 、 $\bar{q}_{byi}$ は、池野ら (2001) による一様粒徑砂の掃流砂量式を改良した次式を用いる。

$$\begin{aligned} \bar{q}_{bxi} &= r_1(d_i/d_m) \cdot P_i \cdot a_b \cdot A_i \cdot \{ B_i^{1.5} \cdot f_{wi}^{0.5} \cdot S_a^3 \cdot \text{avet}(u_b^3) \\ &\quad + B_i^{1.5} \cdot f_{wi}^{1.5} \cdot S_a^2 \cdot \text{avet}(u_b v_b) \\ &\quad - B_i^{0.5} \cdot f_{wi}^{0.5} \cdot \phi_{bci} \cdot \text{avet}(u_b) \} \quad (7) \\ \bar{q}_{byi} &= r_1(d_i/d_m) \cdot P_i \cdot a_b \cdot A_i \cdot \{ B_i^{1.5} \cdot f_{wi}^{0.5} \cdot S_a^3 \cdot \text{avet}(v_b^3) \\ &\quad + B_i^{1.5} \cdot f_{wi}^{1.5} \cdot S_a^2 \cdot \text{avet}(v_b u_b) \\ &\quad - B_i^{0.5} \cdot f_{wi}^{0.5} \cdot \phi_{bci} \cdot \text{avet}(v_b) \} \quad (8) \end{aligned}$$

ここに、 ϕ_{bci} は掃流限界シールズ数 (=0.0)、 f_{wi} は摩擦係数、 a_b は無次元係数 (=1.0)、 $\text{avet}()$ は底面流速諸量の時間平均を表す。ただし、戻り流れ寄与分は含まない。 A_i 、 B_i は以下に示す係数である。

$$A_i = \sqrt{(\rho_s/\rho_w - 1)gd_i^3}, \quad B_i = \frac{1}{2(\rho_s/\rho_w - 1)gd_i} \quad (9)$$

S_a は係数であり、規則波の場合 1.3、不規則波の場合 2.0 の値である。

(4) 粒徑別全漂砂量 $\bar{q}_{xi}$ 、 $\bar{q}_{yi}$

粒徑別全漂砂量 $\bar{q}_{xi}$ 、 $\bar{q}_{yi}$ は次式で算定される。

$$\bar{q}_{xi} = \bar{q}_{sxi} + \bar{q}_{bxi}, \quad \bar{q}_{yi} = \bar{q}_{syi} + \bar{q}_{byi} \quad (10)$$

静水汀線よりも陸上の遡上領域では、Sunamura (1984) の式により前浜勾配を求め、Hunt の式により遡上高を求めて、前述の方法で求めた粒徑別全漂砂量の最も岸側での計算点の値を線形外挿する。

(5) 海底地形変化の連続式

a) 粒徑別海底地形変化の連続式

まず、図-1 のように、田中ら (2001) にならい、混合層厚 Δ 内が仮想的な粒徑別の層から成るとみなして、粒徑 d_i (2 粒徑の場合、粗砂 d_c 、細砂 d_f) の砂の仮想層厚 h_i を以下のように設定する。

$$h_i(x, y) = \Delta \cdot P_i(x, y) \quad (11)$$

ここに、 $P_i(x, y)$ は前出の粒徑 d_i の砂の混合層内の鉛直平均混合率である。

粒徑 d_i の砂に対する海底地形変化の連続式を以下のように表す。

$$\frac{\partial h_i}{\partial t} = \frac{\partial z_{bi}}{\partial t} = \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \bar{q}_{xi} - \varepsilon_b |\bar{q}_{xi}| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right\} - \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \bar{q}_{yi} - \varepsilon_b |\bar{q}_{yi}| \frac{\partial z_b}{\partial y} \right\} \right] \cdot \frac{1}{1 - \lambda'(x, y)} \quad (12)$$

ここに、 ε_b は局所的な海底勾配の影響を表す係数 (=10.0)、 $\lambda'(x, y)$ は混合層内の鉛直平均空隙率である。

b) 海底地形と海底表層混合率の更新

図-2 のように海底砂面を定義して、新しい海底地形 $z_b^{t+\Delta t}$ を次式により計算する。

$$z_b^{t+\Delta t} = z_b^t + \Delta z_b = z_b^t + \Delta h = z_b^t + \sum_{i=1}^n \Delta h_i \quad (13)$$

ここに、 $z_b^{t+\Delta t}$ は求めたい砂面高、 z_b^t は砂面高の既知量、 Δz_b は砂面総変動分、 Δh は仮想層厚総変動分、 Δh_i は粒徑 d_i の砂の仮想層厚変動分である。

つぎに、新しい海底表層部分（地形更新部分）の混合率 $P_i^{t+\Delta t}$ を次式により計算する。

$$P_i^{t+\Delta t}(x, y, z) = (h_i^t + \Delta h_i) / (z_b^{t+\Delta t} - (z_b^t - \Delta)) ; (z_b^t - \Delta) \leq z \leq z_b^{t+\Delta t} \quad (14)$$

c) 海底砂の空隙率

2 粒徑混合砂の大型岸沖海浜変形実験結果（田中ら，2000a）から、海底砂の空隙率 $\lambda(x, y, z)$ は、粗砂の混合率に応じて変化することがわかっている。これは、砂の空隙率が混合率の関数となることを意味することから、 $\lambda(x, y, z)$ が空間的に変化することになる。また、実験結果によれば、新堆積域では、2 割程度砂の空隙率が増加する傾向があることもわかっている。

そこで、本研究では、実験結果に基づき、上記の粒徑別海底地形変化の連続式中に用いる、混合層内の鉛直平均空隙率を以下のように設定する。

$$\lambda'(x, y) = \lambda'_1 \cdot \lambda'_2 \quad (15)$$

ここに、 λ'_1 、 λ'_2 は混合砂の分級効果、新堆積効果を考慮した係数であり、以下のようである。

$$\lambda'_1 = 0.27 \cdot P_c^2(x, y) - 0.26 \cdot P_c(x, y) + 0.41 \quad (16)$$

$$\lambda'_2 = 1.2 \text{ (新堆積域)}, \lambda'_2 = 1.0 \text{ (新堆積域以外)} \quad (17)$$

ここに、 $P_c(x, y)$ は粗砂の混合層内鉛直平均混合率であ

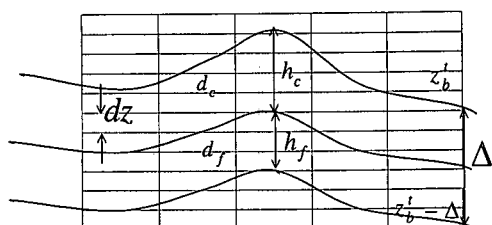


図-1 海底表層混合層と粒径別仮想砂層厚の定義図

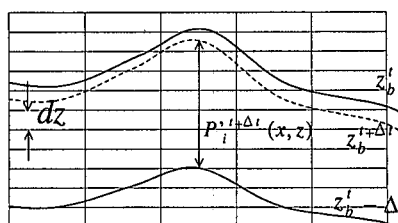


図-2 海底表層混合率の更新説明図

る。

3. 2 粒径混合砂大型岸沖海浜変形実験との比較

(1) 実験ケースと計算条件

長さ 205 m, 幅 3.4 m, 深さ 6 m の大型造波水路に, 粒径 0.27 mm の細砂と粒径 0.84 mm の粗砂を 7 : 3 の割合 (初期混合率) で一様に混合した砂を初期勾配 1/30 で敷き詰め, まず, 堆積性波浪として波高 0.34 m 周期 3.5 s の規則波 CASE 1 を 38 hr 作用させ, つぎに海底地形を整形せずに, 侵食性波浪として波高 1 m 周期 3.5 s の規則波 CASE 2 を 20 hr 作用させた (田中ら, 2000a; 池野

ら, 2000)。本研究では, 上記の堆積性・侵食性波浪による波浪変形, 粒径別浮遊砂濃度・定常流速・全漂砂量・地形変化・粗砂混合率の空間変化について, 本海浜変形モデルによる再現を試みた。

波浪変形・地形変化計算の空間格子分割は水平方向 25 cm, 海底砂混合率計算の空間格子分割は水平方向 50 cm, 海底砂面下鉛直方向 5 mm である。海底表層混合層厚 Δ は, 田中ら (2001) にならい, シールズ数が 1 相当の粗砂の移動層厚 2 cm に設定した。波・流れの更新時間間隔は, 0.5~1 hr (CASE 1), 0.5 hr (CASE 2), 粒径別漂砂量・地形変化・混合率の更新時間間隔は, 3.5 s である。

(2) 実験結果の再現

図-3 に, CASE 1, CASE 2 における波高分布の比較代表例を示す。図-3 によれば, 本計算値と実験値との対応は良好である。図-4 に, CASE 1 による海底面上 0.1 m の高さにおける粒径別浮遊砂濃度, 定常流速の岸沖分布の比較を示す。流速は沖向きが正值である。図-4 によれば, 本計算値は, 碎波点に対応する $X=15$ m 付近の濃度, 沖向き戻り流れを過小評価しているが, 概して粗砂, 細砂の岸沖分布特性を再現している。

図-5, 図-6 に, CASE 2 における粒径別浮遊砂濃度, 碎波帯内戻り流れの鉛直分布の比較を示す。図-6 中には, 2 種類の戻り流れ算定式 (cal. 1: Ikeno・Shimizu, 1998; cal. 2: 柴山・Rattanapitikon, 2001) を用いた計算値を併記した。この場合の図中の係数値 (詳しくは, 柴山・Rattanapitikon (2001) を参照) は, 碎波開始点, 段波形成点を $X=50$ m, 40 m として設定している。図-6 によれば, 2 種類の戻り流れ算定式による実験結果の

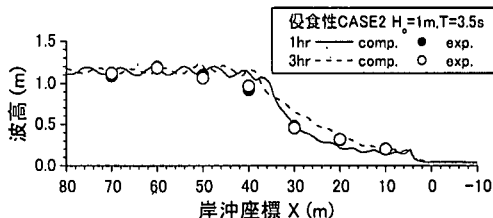
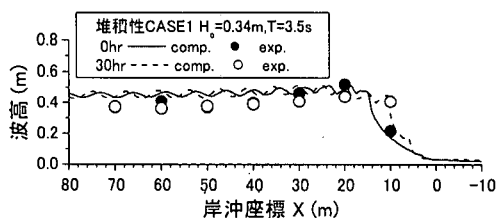


図-3 波高分布の比較

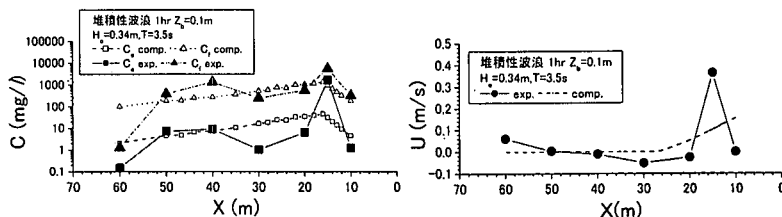


図-4 粒径別浮遊砂濃度, 定常流速の岸沖分布の再現性 (堆積性 CASE 1, 1 hr)

再現性は良好である。2種類の算定式による計算値同士を比較すると、cal.2による計算値がcal.1による計算値よりも若干過大になる傾向がある。図-5～図-6によれば、本計算値は、砕波点に対応する $X=46.75\text{ m}$ 付近、砕波帯内の粗砂、細砂の浮遊砂濃度、戻り流れの鉛直分布特性を再現している。

図-7に、CASE 1, CASE 2に対する粒径別全漂砂量の比較例を示す。図-8～図-9に、CASE 1, CASE 2に対する粗砂混合率の空間変化の比較例を示す。

本モデルでは、砕波帯において、浮遊漂砂は戻り流れの効果により沖向きとなり、掃流漂砂は波の非線形効果により岸向きとなる。この掃流・浮遊漂砂量の割合により、全漂砂量の輸送方向が変化する。図-7によれば、堆積性波浪 CASE 1 では、砕波帯内における粗砂の浮遊漂砂量が少なく、海底混合砂のアーミング効果により、細砂の巻上量や掃流漂砂量が底質の存在確率に比べて減少し、粗砂の掃流漂砂量が底質の存在確率以上に増加する。その結果、全漂砂量は、粗砂が岸向き、細砂が沖向

きとなる。これに対し、侵食性波浪 CASE 2 では、砕波帯において、沖向きの浮遊漂砂量が卓越し、粗砂も細砂も底質の存在確率に対応した巻上量や漂砂量が生じる。本モデルは、上記の実験結果を再現している。最後に、図-8～図-9によれば、CASE 2 における沖のバー形成具合が過小評価気味であるが、海底地形変化と分級過程を概ね再現している。

4. おわりに

混合粒径砂大型岸沖海浜変形実験に基づき、海底混合砂の分級履歴を考慮した海浜変形予測モデルを開発した。実験による波高分布、定常流速、粒径別浮遊砂濃度、全漂砂量、地形変化、分級過程を概ね再現できることを示した。

参考文献

池野正明・宇野善之・後藤宏志・田中正博・森 信人・片山裕之・岡安章夫 (2000): 混合粒径砂を用いた大型海浜実験による

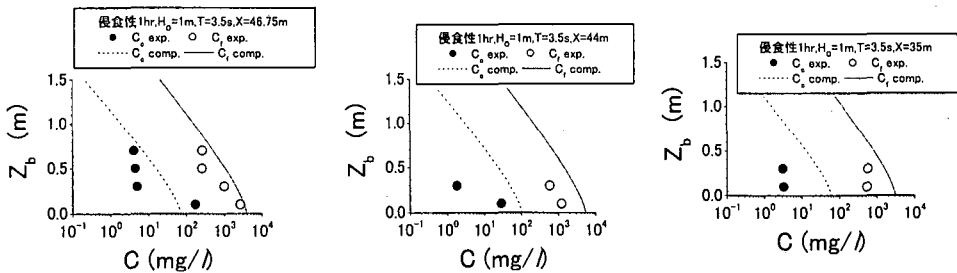


図-5 粒径別浮遊砂濃度の鉛直分布の再現性 (侵食性 CASE 2, 1 hr)

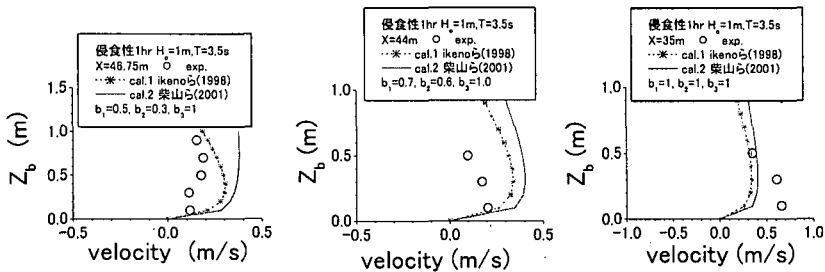


図-6 砕波帯内定常流速の再現性 (侵食性 CASE 2, 1 hr)

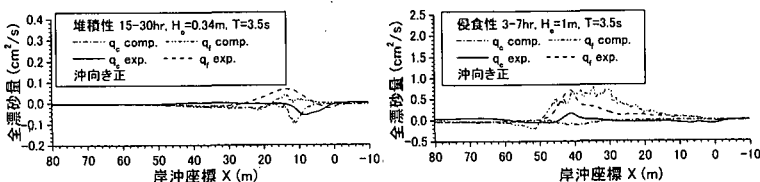
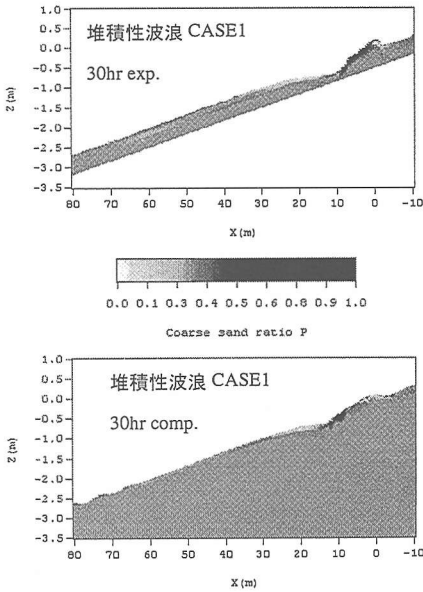
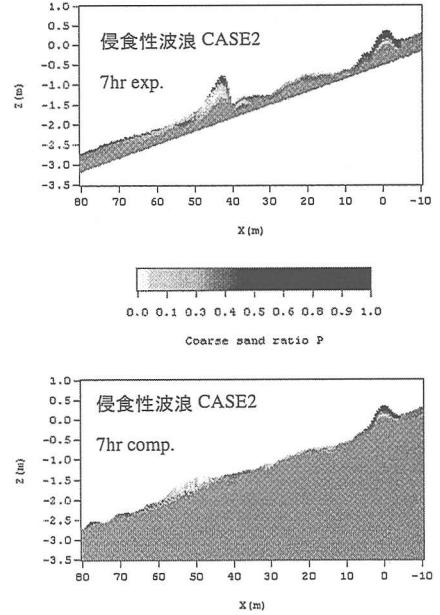


図-7 粒径別全漂砂量の比較 (CASE 1, CASE 2)



図—8 粗砂混合率の空間変化の比較 (CASE 1)



図—9 粗砂混合率の空間変化の比較 (CASE 2)

粒径別浮遊砂フラックスとモデル化, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 556-560.

池野正明・清水隆夫・小林英次・石井敏雅・斉藤知秀 (2001): 露岩域を有する砂浜海岸に港湾を建設する場合の 3 次元海浜変形数値予測モデルの適用, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 561-565.

佐藤慎司・M. B. Kabiling (1994): 波打ち帯を含む三次元海浜変形の数値モデル, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 401-405.

佐藤慎司・田中正博・樋川直樹・渡辺 晃・磯部雅彦 (2000): 混合砂の移動機構に基づくシートフロー漂砂量算定式の提案, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 486-490.

柴山知也・W. Rattanapitikon (2001): 砕波帯内戻り流れ (undertow) の推定方法, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 111-115.

田中正博・井上 亮・佐藤慎司・磯部雅彦・渡辺 晃・池野正明・清水隆夫 (2000a): 2 粒径混合砂を用いた大型海浜断面実験と粒径別漂砂量の算出, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 551-555.

田中正博・佐藤慎司・磯部雅彦・渡辺 晃・小林 博 (2000b): 2 粒径混合砂海浜変形モデルを用いた大型海浜断面実験の再現, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 591-595.

田中正博・小林 博・佐藤慎司・渡辺 晃・磯部雅彦 (2001): 断

面地形表層粗細混合率を考慮した海浜変化計算, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 506-510.

Ikeno, M. and T. Shimizu (1998): Characteristics of suspended sediment transport in the surf zone of irregular waves and their reproduction by a cross-shore beach deformation model, Proc. 26 th Int. Conf. on the Coastal Eng., ASCE, pp. 2317-2330.

Madsen, P. A., R. Murrar and O. R. Sørensen (1991): A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, Coastal Eng., Vol. 15, pp. 371-388.

Nielsen, P. (1992): Coastal bottom boundary layers and sediment transport, Advance Series on Ocean Engineering, Vol. 4, World Scientific, pp. 201-262.

Nwogu, O. (1993): Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation, J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 119, No. 6, pp. 618-628.

Sunamura, T. (1984): Quantitative predictions of beach-face slopes, Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 95, pp. 242-245.