

平衡断面条件を導入した海浜縦断面変化モデル

小野 信幸*・緒方 菊**・山口 洋***・入江 功****

海岸侵食問題に対し適切な対策を図るには、海浜断面の変形を精度よく評価する数値予測モデルが不可欠である。しかしながら、従来提案されている予測モデルの多くは、断面変形過程の最も基本的な性質の一つである「同一特性の波が長時間作用すると海浜断面は平衡断面へ近づく」というプロセスが考慮されていないため、長期的な予測が困難な場合が多い。本研究では、海浜断面変化予測モデルに局所海底勾配が平衡勾配に達すると岸沖漂砂量がゼロとなる条件を導入した。モデルの検証として、入射波特性の変化に対する断面変化の応答や、著者らが海岸侵食対策として提案している DRIM (歪み砂れんマット) を適用した場合を計算し、良好な再現性を確認した。

1. はじめに

海岸侵食問題は全国的に発生し、また将来的には地球温暖化に伴う海面上昇により更に深刻化することが懸念されている。これに対し、著者ら(2001, 2002)は DRIM (歪み砂れんマット) の適用を提案してきた。DRIM は波動下で底層流を一方方向に制御するブロックであり、これまでの検討では、図-1 のように DRIM を沖浜帯の一部に設置することで砂の沖合流出を阻止し、その岸側に元の断面を前進させた安定断面を形成することを実験的に確認してきた。しかし、養浜砂の流出阻止工法や海面上昇対策などに対して、DRIM の設置位置などを具体的に検討するには、DRIM の漂砂制御機能を評価可能で、かつ長期的に海浜断面が安定していくプロセスが再現可能な海浜変形モデルが必要である。しかしながら、これまで提案されている海浜変形予測モデルの多くは、断面変形過程の最も基本的な性質の一つである「同一特性の波を長時間作用させると海浜断面は平衡断面へ近づく」というプロセスが再現されないため、長期的な予測が困難な場合が多い。

本研究では DRIM 設置の影響を評価するために開発された OM-プロセスモデル(小野, 2003)をベースに、海浜断面が平衡断面に近づくプロセスを導入した。また、DRIM の効果を調べた一連の実験結果を検証データとし、入射波特性の変化に対する断面変化の応答特性や DRIM により海浜が安定化する状況の再現性を検討した。

2. モデルの概要

DRIM の形状は、図-2 に示すように、通常沖浜帯の海底に形成される砂れんの形状を、岸沖方向に歪みを持つように成型したものである。DRIM は、波動下において DRIM の峰の沖側と岸側に形成される渦の規模の非対

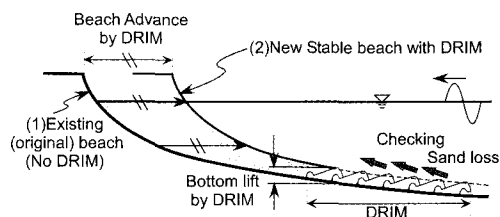


図-1 DRIM による安定断面形成の概念図

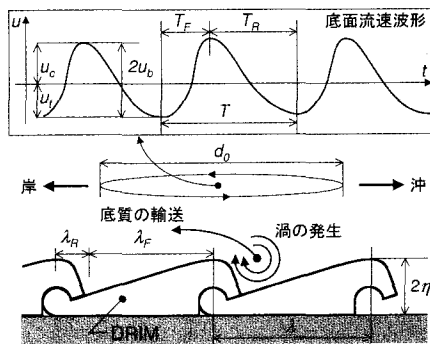


図-2 DRIM の形状と漂砂制御機能の模式図

称性を利用して、底面付近の流れと底質移動を制御する。砂れん近傍に発生する渦の規模は、底面流速波形の非対称性と砂れんの歪みにより変化するため、DRIM の影響を評価するには、これらを岸沖漂砂量の算定に取り入れる必要がある。小野(2003)は、砂れん周辺の底質移動をベースとした海浜変形モデルを構築した。モデルの計算フローは図-3 に示す通りである。モデルは主に、波浪変形モデル、岸沖漂砂量算定モデル、地形変化量算定モデル(底質の分散移動モデル)の3つのサブモデルにより構成されている。以下に本モデルの特徴を述べる。

(1) 波浪変形計算モデル

波浪変形計算は、本モデルの漂砂量算定に流速波形の非対称性の影響を考慮する必要があるため、Boussinesq 方程式系のモデル(Schäfer・Madsen, 1995)を用いた。

* 正会員 博(工) 九州大学助手 大学院工学研究院環境都市部門

** 正会員 修(工) 福岡市

*** 正会員 博(工) 若築建設(株) 技術研究所

**** 正会員 工 博 九州大学名誉教授

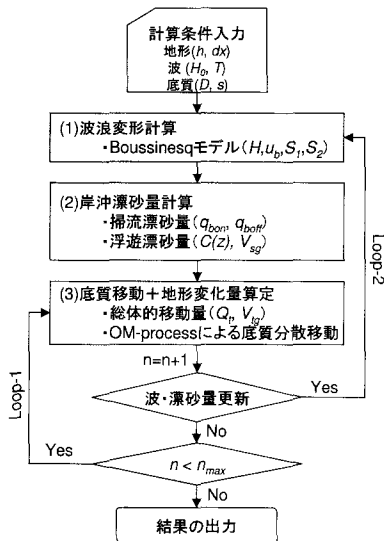


図-3 海浜断面変化計算のフローチャート

(2) 岸沖漂砂量計算モデル

1つの砂れんに着目すると、波により砂れんの峰付近をせん断された砂は、そのまま下流側の海底に落ちる分(掃流移動分)と、砂れん後流渦に巻き込まれて流れの反転とともに水中に放出され移動する分(浮遊移動分)の2つの移動機構に分類されるため、まず、これらを分けて考える。図-4は、一周期の波の作用下で砂れん一波長分の領域から生じる岸向き・沖向き掃流砂量と浮遊砂量を模式的に示したものである。掃流移動分については、Sleath(1978)の半周期平均掃流砂量式より、半周期毎に岸向き・沖向きの掃流砂量を、流速波形の非対称性を考慮して算定する。このとき、巻き込み率 r で砂れんの渦に巻き込まれる分は浮遊移動分に寄与するとして差し引き、残りの $(1-r)$ を実質の掃流砂量分として、一周間に生じる掃流砂の体積 Q_b とその平均移動速度 V_{bg} を求める。浮遊移動分については、柴山(1993)の浮遊砂濃度分布を鉛直積分したものを一周期間の移動に寄与する浮遊砂の体積 Q_s とし、それが移動速度 V_{sg} で移動するものとする。ここで、 V_{sg} については、砂れん後流渦の非対称性に関連して現象が複雑であるので、著者らが固定床砂れんに置かれた砂の移動速度の測定結果を整理した次の実験式により評価する。

$$\frac{V_{sg}}{\sqrt{(s-1)gd}} = A_v \left(\frac{D}{d_0} \right)^{-2.04} \left[\max \left(\frac{1.7\lambda}{d_0}, 1 \right) \right]^{-2.86} \cdot (\psi - \psi_c)^{1.71} \times F_d(S_{1u}, S_{2u}, S_3) \quad (1)$$

ここで、 A_v は係数、 s は底質の比重、 g は重力加速度、 D は底質の中央粒径、 d_0 は底面軌道全径、 λ は砂れん波長、 ψ はシールズ数、 ψ_c は移動限界シールズ数である。また、 F_d は移動方向に寄与する関数であり、次式で表される。

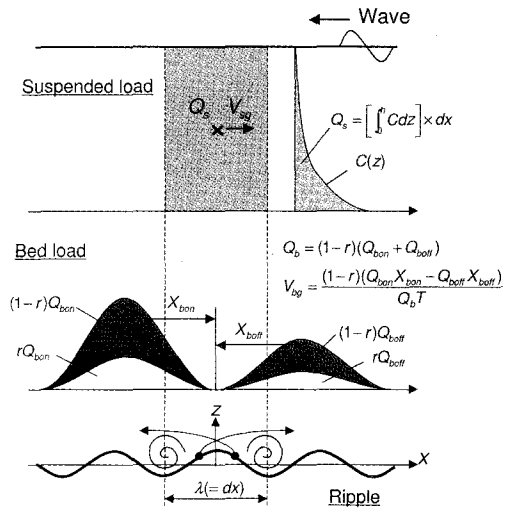


図-4 掃流移動分と浮遊移動分の算定法

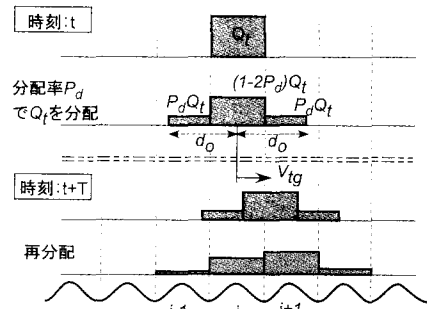


図-5 底質の分散移動モデル (OM-Process)

$$F_d = -12.415 S_{1u} + 4.9786 S_{2u} - 4.5386 S_3 \quad (2)$$

ここで、 S_{1u} , S_{2u} は底面流速波形の上下非対称度と前後非対称度、 S_3 は砂れん形状の歪み度であり、図-2の表記を用いて $S_{1u} = (u_c - u_t)/2u_b$, $S_{2u} = (T_R - T_F)/T$, $S_3 = (\lambda_R - \lambda_F)/\lambda$ で表される。また、 V_{sg} は岸向きを正としている。

(3) 底質の分散移動モデル (OM-プロセス)

本モデルでは、底面高の変化の計算に以下の手法を用いる。まず、前節のように算定される掃流移動分(Q_b , V_{bg})と浮遊移動分(Q_s , V_{sg})より、総体としての移動に寄与する砂の体積 Q_t とその移動速度 V_{tg} を次式で求める。

$$Q_t = Q_b + Q_s \quad (3)$$

$$V_{tg} = \frac{Q_b V_{bg} + Q_s V_{sg}}{Q_t} \quad (4)$$

この Q_t と V_{tg} を用いて、図-5に示すように、まず、時刻 t において格子 i における Q_t が分配率 P_d で岸沖方向に d_0 の範囲に分散するものとする。これが形を変化させずに移動速度 V_{tg} で移動するとし、一周期後 $t+T$ に

各格子に再分配される。このプロセスが生起する格子点を乱数を用いて選択し、計算領域の全格子に対して重複することなく施して波の一周分計算とする。この一連のプロセスをOM-プロセス (Oscillatory Movement Process) と呼び、これは底質の平均的な移動と隣り合う格子間での底質の交換過程を再現することを可能とするものである。

また、 Q_t と V_{tg} を用いて漂砂量 Flux の形で表せば、

$$q_w = \left(\frac{Q_t}{dx} \right) V_{tg} \dots \dots \dots (5)$$

となる。ここで、 q_w は岸沖漂砂量 Flux、 dx は格子間隔である。また、以下に述べる計算では、モデル中の定数として $r=0.4$ 、 $P_d=0.2$ を用いている。

3. 平衡断面条件の導入

本研究では、上記のモデルに対し、断面が平衡断面に近づくプロセスを再現するため、以下の方法で平衡断面条件を導入した。

(1) 海底勾配係数 J の導入

海浜縦断面地形変化を予測するための基礎式は以下に示す漂砂の連続式である。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda_b} \frac{\partial q}{\partial x} \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 t は時間、 h は水深、 x は岸沖方向の座標、 q は岸沖漂砂量、 λ_b は底質の空隙率である。現在広く使用されている渡辺ら (1984) のモデルでは、これに海底勾配の効果を考慮して q を次式で表示する。

$$q = q_w - J|q_w| \frac{\partial h}{\partial x} = q_w - J|q_w| \tan \beta \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 q_w は波による漂砂量、 $\tan \beta$ は海底勾配、 J は海底勾配係数 (渡辺モデルでは定数) であり、現実の地形変化に合うように定める。ここで、断面が平衡状態であり、断面の全ての場所で岸沖漂砂量がゼロとなる ($q=0$) と仮定すれば、式 (7) より、

$$J = \frac{q_w}{|q_w|} \frac{1}{\tan \beta_e} \approx \frac{1}{\tan \beta_e} \dots \dots \dots (8)$$

が得られる。 $\tan \beta_e$ は平衡断面における局所海底勾配で

ある。

従来より、平衡断面形状の表示式としては、Dean タイプの $h = Ax^{2/3}$ が提案されており、Kriebel ら (1991) は、これを一部修正して、図-6 中に示す式で表している。図中の記号は、 m は前浜勾配、 A は底質の沈降速度 w より決まる定数、 x_0 は Dean の平衡断面形の開始点、 h_r は勾配変化点の水深、 H_0 は沖波波高、 T は周期、 g は重力加速度である。このような Kriebel らの平衡断面形状の表示式を用いれば、式 (8) は、

$$J = \frac{1}{\tan \beta_e} = \frac{3}{2} A^{-3/2} h^{1/2} \dots \dots \dots (9)$$

と表せる。また、式 (5) を式 (7) に適用すると、OM-プロセスモデルにおける漂砂量 Flux は次式で表される。

$$q = \left(\frac{Q_t}{dx} \right) (V_{tg} - J|V_{tg}| \tan \beta) \dots \dots \dots (10)$$

(2) 海底勾配係数 J の設定と検証

J の値を具体的に定めるため、小野ら (2002) の移動床実験結果を用いてモデルの検証をおこなった。移動床実験は 2 次元造波水路の一端に、軽量物質のメラミン砂 ($D=0.2$ mm, $s=1.5$) を用いて作成された初期勾配 1/15 の模型海浜上でおこなわれている。斜面沖側端部の水深は 35 cm であり、入射波は、A-wave ($H_{1/3}=4$ cm, $T_{1/3}=2.0$ s) と E-wave ($H_{1/3}=7$ cm, $T_{1/3}=1.2$ s) の 2 種類の不規則波で、それぞれ 20 時間作用させた場合の地形変化が測定されている。

まず、移動床実験で得られた準平衡断面と Kriebel らの平衡断面形状を比較したところ、砕波点より岸側の地形でのみ一致度が良好であった。そこで、海底勾配係数 J は図-7 に示すように砕波の突っ込み点 (P.P) の岸側は Dean の平衡断面形状に基づく式 (9) で算定し、砕波点 (B.P) の沖側は J を一定値 ($=J_{off}$) のパラメータとして与え、B.P-P.P 間は滑らかに接続した。

図-8 は A-wave を 20 時間作用させた後の地形と、E-wave を 8 時間作用させた後の地形について、 J_{off} を数種類変えた場合の計算により得られた地形を比較したものである。図より、 J_{off} によって計算結果の地形が異なる

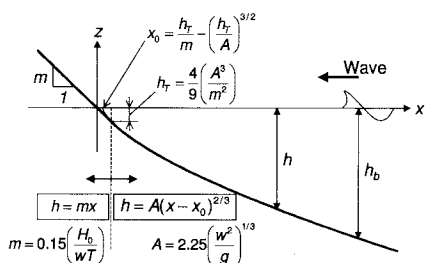


図-6 Kriebel ら (1991) の平衡断面形状の表示式

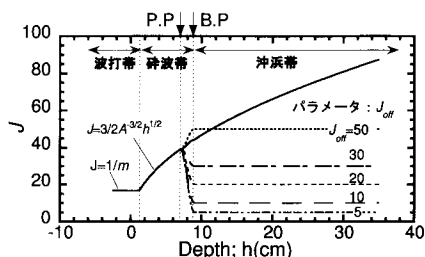
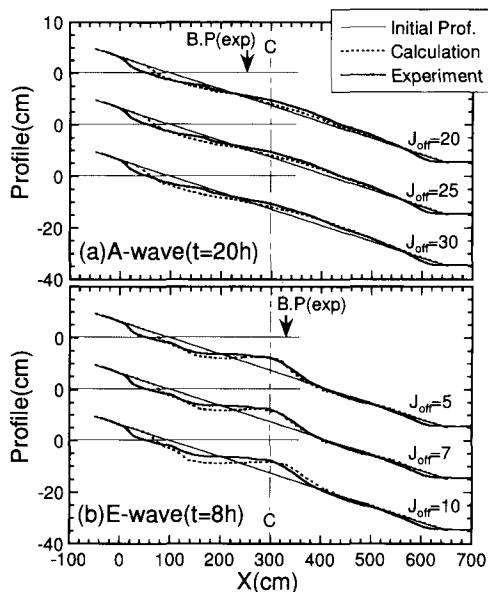
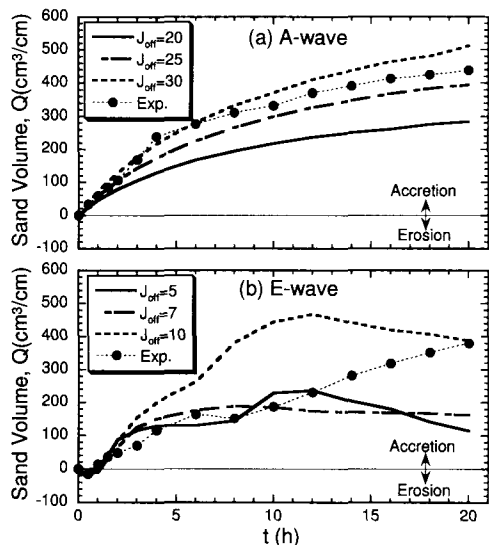


図-7 海底勾配係数 J の設定法の一例

図-8 J_{off} の変化に対する断面形状の計算結果の比較図-9 C断面 ($X=300$ cm) の沖側に堆積した土量の時間変化

様子がわかる。また、いずれの計算結果も汀線付近での一致度は十分でないものの、その他の領域ではA-waveで $J_{off}=25$ 、E-waveで $J_{off}=7$ とした場合に実験の地形とほぼ一致している。

図-9は、図-8のC断面 ($X=300$ cm) の沖側に堆積した土量 Q の時間変化を実験値と計算値で比較したものである。図-9(a)のA-waveの場合、 Q の値は J_{off} により異なっているが、その変化傾向は、実験値にみられるような、時間の経過とともに平衡状態に落ち着いていく

過程が再現されている。また、図-9(b)のE-waveの場合、実験値は8時間後に一旦平衡状態に落ち着いた後、再度堆積量の増加が生じているが、 $J_{off}=7$ とした計算値は、8時間後までの変化過程をよく再現している。

4. 入射波の変化と DRIM 設置の影響

ここでは、前章で用いた2種類の波を交互に作用させた場合の断面変化と、沖浜帯の一部にDRIMを設置した場合についての計算をおこない、その再現性を検証した。図-10に示すように、入射波は、A-waveとE-waveをそれぞれ3.5時間と0.5時間作用させて1サイクルとし、全20時間(5サイクル)作用させ、DRIMを設置しない場合と設置した場合の比較をおこなった。なお、実験で用いたDRIMの緒言は、波長 $\lambda=4.5$ cm、波高 $\eta=0.8$ cm、歪み度 $S_3=-0.5$ である。

モデル中で、DRIMの効果は式(10)の速度の項を修正する形で与えた。ここでは、DRIMの効果は主に浮遊砂に寄与することを考慮し、DRIMを設置している場所での漂砂量 Flux を次式で与えた。

$$q = \left(\frac{Q_t}{dx} \right) \left(V_{tg} - J |V_{tg}| \tan \beta + a_d \frac{Q_s}{Q_t} (V_{sgd} - V_{sg}) \right) \dots (11)$$

ここで、 V_{sgd} はDRIM上の浮遊砂輸送速度、 V_{sg} はDRIMがない場合の輸送速度とともに式(1)より評価される。また、 a_d はDRIM上の砂量に応じて0~1の範

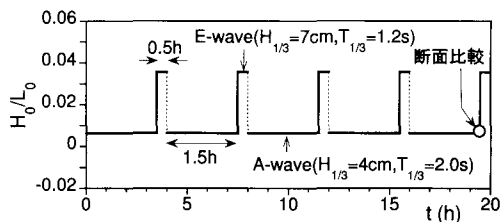


図-10 入射波の時間変化

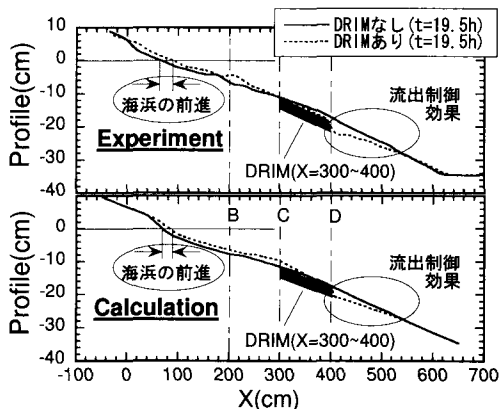


図-11 DRIMの有無に対する断面形状比較

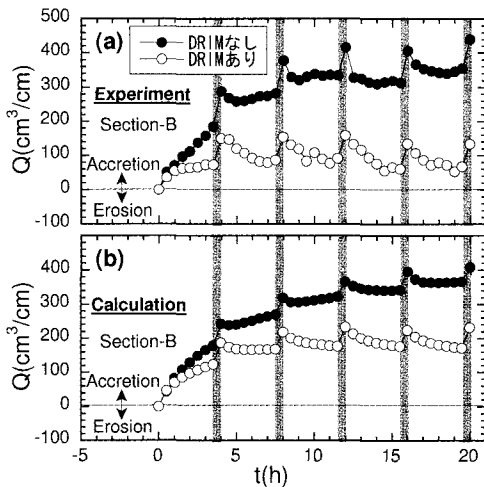


図-12 B断面の沖側に堆積した土量の時間変化

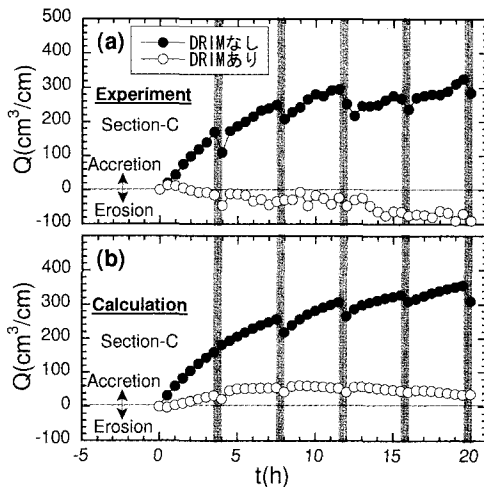


図-13 C断面の沖側に堆積した土量の時間変化

図で変化する係数であり、DRIM が砂で十分埋没してしまった場合は0となり、このとき式 (11) は式 (10) に一致する。

図-11 は最終サイクルにおける A-wave 作用後 (19.5 h 後) の断面を、DRIM ありの場合と DRIM なしの場合とで比較したものであり、上段が実験結果、下段が計算結果である。本計算では、海底勾配係数 J_{off} は前章の検証で一致度が高かった、A-wave で 25、E-wave で 7 をそのまま用いている。実験結果と計算結果を比較すると、DRIM を設置した場合に、DRIM の沖側では、土砂の堆積が全くみられない様子、また、DRIM の岸側では、DRIM なしの場合の断面が沖側へ前進するという図-1 に模式的に示した効果がよく再現されている。

図-12 は図-11 中に示す B 断面 ($X=200$ cm) の沖側に堆積した土量、図-13 は C 断面 ($X=300$ cm) の沖側

に堆積した土量の時間変化である。どちらも上段は実験結果、下段は計算結果であり、図中の灰色でハッチされた部分は E-wave が作用した時間帯を示す。図-12, 13 における Q の変化を実験値と計算値で比較すると、入射波の変化に応じた変動や、変動しつつも時間の経過とともに平均的に一定値に近づく (断面が平衡状態へ漸近する) 傾向がよく再現されている。また、DRIM ありの場合は、B, C どちらの地点においても、 Q の値が DRIM なしの場合と比較して小さく、かつ平衡状態への到達が早まっている様子が再現されている。しかし、実験結果では、DRIM ありの場合に C 断面の沖側は若干の侵食傾向であり、岸向きの漂砂が生じたことを示しているのに対し、計算結果ではわずかではあるが堆積傾向であった。これは、計算での DRIM の効果が若干過小評価であったためと考えられる。

5. 結 語

DRIM 設置の影響を評価するために開発された OM-プロセスモデルに海浜断面が平衡断面に近づくプロセスを再現するための海底勾配係数 J を導入した。入射波に対して適切に J を定めることにより、海浜断面が平衡断面に近づく過程が再現され、また、入射波の変化や漂砂制御構造物 DRIM を設置した影響に対する地形の応答特性も精度よく再現された。しかしながら、現在のところ、 J (特に、 J_{off}) は実験結果と比較して定めねばならず、入射波特性と対応した普遍的な表示式を得るまでには至っていない。このことと、 J に対する物理的理解を深めることが今後の課題といえる。

参 考 文 献

- 小野信幸・入江 功・横田雅紀 (2001): 至み砂れんによる海浜断面安定化工法に研究, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 676-680.
- 小野信幸・入江 功・緒方 菊・山口 洋 (2002): ビーチサイクルを考慮した養浜断面の安定化に関する研究, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 626-630.
- 小野信幸 (2003): 岸沖漂砂制御による海浜の安定化に関する研究, 九州大学学位論文, 148 p.
- 柴山知也・Rattanaipitikon, Winyu (1993): 砕波帯を含む浮遊砂濃度の鉛直分布の評価, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 306-310.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉 (1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410.
- Kriebel, D. L., N. C. Kraus, and M. Larson (1991): Engineering methods for predicting beach profile response, Coastal Sediments '91, ASCE, New York, pp. 557-571.
- Nielsen, P. (1992): Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport, Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 4, World Scientific, 120 p.
- Schäfer, H. A., and P. A. Madsen (1995): Further enhancements of Boussinesq-type equations, Coastal Engineering 26, Elsevier Science, pp. 1-14.
- Sleath, J. F. A. (1978): Measurements of bed-load in oscillatory flow, Proc. ASCE, vol. 104, No WW4, pp. 291-307.