

混合砂による養浜時縦断形予測モデル

熊田 貴之*・宇多 高明**・芹沢 真澄***・小林 昭男****

粒径に応じた平衡勾配の概念を提案し、養浜砂の粒径に応じた海浜縦断形および粒径変化を予測可能なモデルを開発した。まず粒径分級の実例としてイギリス Cardiff の Pebble beach と Rossili Bay の礫浜における粒径分級の実例を示す。これらの海岸では、汀線付近に礫が堆積し、その沖には細砂の堆積が見られ両者は明瞭に区分される。前浜付近の勾配は粒径に大きく依存することを考慮し、上記現象に関する概念図を作成し、次にそれをモデル化した、開発されたモデルは仮想海岸と霞ヶ浦の湖浜変形に適用され、霞ヶ浦では実測断面変化と粒径の水深方向分布を高精度で予測できた。

1. はじめに

近年、海岸環境に対する関心が高まり、従来のように機能性・経済性のみ追及した海岸護岸と消波工を設置する方法から、環境や海岸利用にも配慮した海岸保全工法が重視されるようになった。その一つとして、養浜工が新たに法律上海岸保全施設に含められ、全国各地で養浜工の適用が行われつつある。しかし、海浜造成にあたっては、突堤などの補助施設の整備が不十分な場合や、自然状態より細かな粒径で養浜した場合、養浜砂の流出などが問題となる。わが国においては養浜材に限りがあることから、砂を安定化させることは重要な課題である。そこで、本研究ではこの種の問題の解決のために、新たに粒径に応じた平衡勾配の概念を提案し、養浜砂の粒径に応じた海浜縦断形および粒径変化を予測可能な実用モデルを開発した。

2. 粒径に応じた平衡勾配の概念

実海岸では岸沖漂砂による粒径分級が多く観察される。例えば英国の Cardiff 周辺の海岸で観察された礫浜では、干潮時汀線付近が細砂からなる緩勾配斜面となっており、礫浜との境界が非常にきれいに分かれている。Cardiff は大西洋につながる Bristol Channel に面した Wales 地方の中心都市である。写真-1 は、Pebble beach における粒径の分級例を示す。岸側は径約数 cm の円礫からなる急勾配の海浜が形成され、沖合は細砂からなる非常に緩勾配の海底面となっている。礫浜と細砂からなる海底面とは明瞭な境界線で分かれ、海浜材料は礫から細砂へと急激に変化し、両者の中間的粒径の材料が含まれていないのが特徴である。写真-2 は、Rossili Bay において南端の台地上から海岸線を北向きに撮影したものである。干潮時に撮影されたために海浜幅は非常に広い。



写真-1 Pebble beach における粒径の分級例



写真-2 Rossili Bay における粒径の分級例

丘陵地の海側斜面の基部にほぼ一定幅の礫浜が帯状に延びている。またそれと平行に砂浜があるが、dry beach の幅は礫浜とほぼ同じである。その沖には平坦な wet beach が広がる。海岸線に沿う礫浜と、その沖にある緩勾配の砂浜とはみごとな対照を示す。

以上の2海岸の特徴をまとめると、礫浜構成材料の d_{50} は 10^1 cm、沖合の緩勾配の海底面の構成土砂の d_{50} は 10^{-2} cm のオーダーであった。すなわち、両者は d_{50} において 10^3 オーダーの違いがある。一般に、前浜付近の勾配は粒径に大きく依存し、粒径が大きければ勾配が大きくなり、粒径が小さければ緩勾配となる。これを考慮すると観察結果は図-1 の概念図に要約される。縦断面で考え、粗粒砂および細砂の安定(平衡)勾配を $\tan \beta_1$, $\tan \beta_2$ としたとき、ある初期勾配 $\tan \theta$ の海浜断面内に両者の混合底質が置かれた場合、粗な粒径の勾配は $\tan \beta_1$ に、細砂の勾配は $\tan \beta_2$ になるべく岸向き・沖向きに移動する。この

* 学生会員 修(工) 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻

** 正会員 工 博 (財)土木研究センター審議役なごき総合研究室長

*** 正会員 海岸研究室(有)

**** 正会員 工 博 日本大学助教授 理工学部海洋建築工学科

時、岸側の地形変化の限界は波の遡上高 h_R で定まる。沖合では限界水深 h_c までの範囲で土砂が動かされ、それ以下では安息角 $\tan\gamma$ を保ちながら土砂が落ち込む。さらに縦断面内で土砂収支が成立する。結局、 10^3 オーダーも異なる粒径から構成された土砂が海浜材料となっていたため、それらの材料ごとに安定な勾配が大きく異なり、結果として見事な分級が行われたと考えられる。

3. モデルの基本構成

(1) 基礎方程式

a) 粒径毎の岸沖漂砂量式

粒径毎の平衡勾配および岸沖漂砂による粒径の分級過程を考慮するには、粒径毎の岸沖漂砂量の算定が水深毎に必要である。そこで本研究では、海浜縦断面形の安定化機構すなわち単粒径の場合における平衡勾配を考慮した芹沢ら (2002) の岸沖漂砂量式を拡張する。芹沢ら (2002) の式は、Bakker (1968) にならい、海浜の平衡勾配 $\tan\beta_c$ を考えた時、重力による斜面下方への作用と、波による斜面上方への作用が均衡している場合岸沖漂砂 q_z は 0 となる。しかし勾配が $\tan\beta_c$ より急な場合 q_z は冲向き、 $\tan\beta_c$ より緩ければ q_z は斜面上方へ向くという性質が組み込まれている。本モデルは、この単粒径における性質を応用し、複数の粒径を想定し粒径毎の平衡勾配 $\beta_c^{(K)}$ を設定することで粒径分級を考慮する。この概念は、図-1 に示したように便宜上 1 つの代表粒径に 1 つの平衡勾配が存在すると仮定している。さらに、同一波浪条件での粒径毎の漂砂量の違いはここでは沿岸漂砂量の場合と同様と仮定し、熊田ら (2002) の手法にならい Kamphuis (1986) の粒径に応じた漂砂量係数 ($K_z^{(K)} = A/\sqrt{d^{(K)}}$) を組み込む。

平衡勾配に戻ろうとする岸沖漂砂の強さは、海岸線単位幅あたりに作用する碎波点での波エネルギーフラックスの岸向き成分 F_y を、地形変化の生じる範囲の底面長 $S \cong (h_c + h_R)/\sin\bar{\beta}$ で割って、単位底面長あたりに換算したエネルギー逸散量 Φ に比例すると考える。 $\bar{\beta}$ はバーム高 h_R から地形変化の限界水深 h_c までの初期断面の平均勾配とする。さらに、 $1/(h_c + h_R)$ の部分を岸沖漂砂の強度分布関数 $\varepsilon_z(z)$ に置き換える。 $\varepsilon_z(z)$ は、芹沢ら (2002) と同様、宇多・河野 (1996) の沿岸漂砂量の水深方向分布 $\varepsilon_x(z)$ と等しくする。このとき図-2 に示すように、海水に接する海底面の面積の割合は、粒径毎 (N 粒径) の体積含有率 $\mu^{(K)}$; $K=1, 2, \dots, N$ に等しいと仮定すると、粒径毎 $d^{(1)}, d^{(2)}, \dots, d^{(N)}$ に作用する波エネルギー逸散量は、 $\Phi \cdot \mu^{(1)}, \Phi \cdot \mu^{(2)}, \dots, \Phi \cdot \mu^{(K)}$ となる。以上をまとめると、混合粒径砂中の粒径毎の岸沖漂砂量 $q_z^{(K)}$ は次式となる。

$$q_z^{(K)} = \mu^{(K)} \cdot \varepsilon_z(z) \cdot K_z^{(K)} \cdot F_y \sin\bar{\beta} \cdot \left(\frac{\cot\bar{\beta}}{\cot\beta_c^{(K)}} - 1 \right) \dots (1)$$

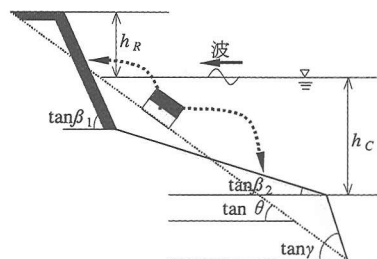


図-1 粒径に応じた平衡勾配の概念図

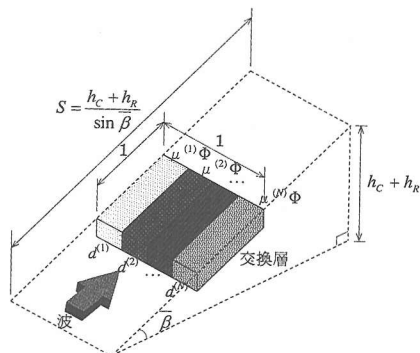


図-2 海底底面の単位長さあたりの波エネルギー逸散量 (Φ)

$$F_y = (EC_g)_{bs} \cos^2 \alpha_{bs} \dots (2)$$

$$K_z^{(K)} = \frac{A}{\sqrt{d^{(K)}}} \dots (3)$$

ここに、 A は海岸の変形過程に応じた未知数を示す。 β は水深毎の勾配、 $\beta_c^{(K)}$ は粒径毎の平衡勾配を示す。 α_{bs} は碎波点の波峰線が海岸線となす角である。

b) 粒径毎の土砂量保存則

粒径毎の断面変化量 $y^{(K)}$ は、各水深につき粒径毎の土砂量保存則 (連続式) により次式で算定する。

$$\frac{\partial y^{(K)}}{\partial t} = -\frac{\partial q_z^{(K)}}{\partial z}, K=1, 2, \dots, N \dots (4)$$

z は鉛直座標を示す。混合粒径 (全粒径) の断面変化量 Y は水深毎に合計して次式となる。

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \sum_{K=1}^N \frac{\partial y^{(K)}}{\partial t} \dots (5)$$

c) 粒径毎の含有率変化の計算式

波の作用により砂は混合され、粒度の変化はある厚みをもつ交換層内で生じるという、熊田ら (2002) の「交換層」の概念を用いた砂粒径の含有率変化の計算を参考にする。ここで、交換層幅 B は Kraus (1985) を参考に算出する。厳密には交換層の幅は水深毎に異なり、毎時刻変化すると考えられるが、本モデルにおいては全水深で交換層幅 B は一定とし、時間経過によらないとする。また沿岸方向には現象は一樣とし、沿岸方向の単位長さ

(1m) を考える。

海浜断面変化後、交換層 B 内の土砂が直ちに混合するが、混合状態は堆積時と侵食時で異なる。そこで、大小 2 粒径の砂を体積比 1:1 で混合した海浜断面に波を作用させたケースを想定し、図-3 に模式的に示すように、海浜縦断面を鉛直方向に細分化したいくつものセルに分割する。それぞれのセルは各等深線に対応させてある。この場合、図-3 に示す任意のセルを選択してそこでの変化について検討する。

堆積時の例として $-h_c$ 付近のセルを選び、1 ステップ後すなわち堆積時の単位深さあたりの混合を考え、そこでの新たな含有率 $\mu^{(K)}$ の算出例を示す (図-4 (a), (b), (c) 参照)。いま波作用後の小粒径成分に相当する断面積変化量が $\Delta y^{(1)} = 2 \text{ m}^2$ 、大粒径成分相当分が $\Delta y^{(2)} = -1 \text{ m}^2$ 、 $\Delta z = 1 \text{ m}$ 、 $B = 10 \text{ m}$ と仮定する。これらの値はいずれも任意に設定した値である。 $-h_c$ 付近では図-4 (b) に示すように、小粒径成分は緩勾配になろうとして沖向きに移動してくるので、新たに小粒径成分の面積は増加する。一方、大粒径成分は急勾配になろうとして岸向きに移動するため、大粒径成分相当の面積は減少する。混合層の仮定から、変化後の断面位置から岸側に幅 B の範囲で混合が起こるとするので、断面は全体として 1m 前進しつつ新たに大・小粒径が混合され、 B 内の岸端の面積 1 m^2 は混合されずにそのまま残る (図-4 (c))。この結果、変化後の断面面積は、それぞれ小粒径成分相当は 6.5 m^2 、大粒径成分相当は 3.5 m^2 となる。したがって小粒径成分の含有率は $\mu^{(1)} = 0.65$ 、大粒径成分の含有率は $\mu^{(2)} = 0.35$ となる。すなわち、 $-h_c$ 付近では小粒径成分が多くなり、平均粒径は細くなる。

同様に図-5 (a), (b), (c) は、侵食時の例として h_R 付近のセルを選んで、1 ステップ後すなわち侵食時の混合状態の概念図を示す。計算緒元は、前ケースと同様の値であり符号を逆転させてある。小粒径成分は沖向きに移動するため、小粒径成分相当の面積は -2 m^2 減少し、大粒径成分は岸向きに移動するため、新たに大粒径成分相当の面積が 1 m^2 増加する (図-5 (b))。全体で -1 m^2 減少するため、 B 内の岸端よりさらに岸側の面積 1 m^2 部分に混合域がくい込む (図-5 (c))。このくい込み分が新たに混合され、小粒径成分の含有率は $\mu^{(1)} = 0.35$ となり、大粒径成分の含有率は $\mu^{(2)} = 0.65$ となる。すなわち、 h_R 付近では小粒径成分が少なくなり、平均粒径は粗くなる。結局、 $-h_c$ 付近は細粒砂が堆積し緩勾配となり、 h_R 付近は粗粒砂が堆積し急勾配となる性質がこの概念により考慮できる。

以上の各時刻の断面変化による土砂流入・流出による交換層内での粒径毎の土砂収支を定式化し、層内での粒径毎の含有率 $\mu^{(K)}$ の算定を行う。式の誘導は、熊田ら

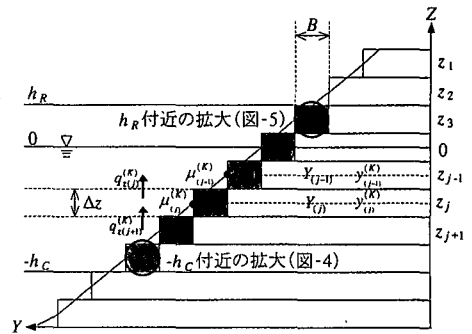


図-3 座標の定義図 (スタaggerドメッシュ)

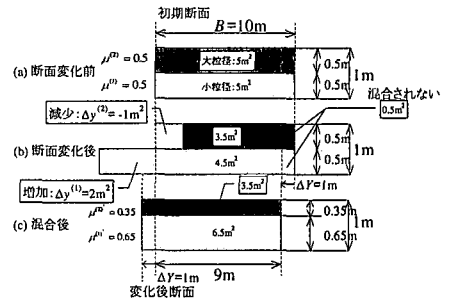


図-4 堆積時における断面変化と混合範囲 ($-h_c$ 付近の例)

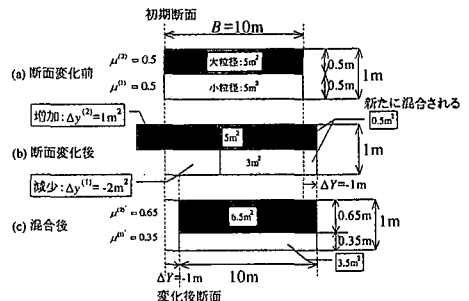


図-5 侵食時における断面変化と混合範囲 (h_R 付近の例)

(2002) に示したものと同様である。堆積時での新たな粒径毎の含有率の計算式は次式となる。

$$\frac{\partial \mu^{(K)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y^{(K)}}{\partial t} - \frac{\partial Y}{\partial t} \cdot \mu^{(K)} \right\}, K=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

侵食時での新たな粒径毎の含有率は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \mu^{(K)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y^{(K)}}{\partial t} - \frac{\partial Y}{\partial t} \cdot \mu_B^{(K)} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 $\mu_B^{(K)}$ は断面変化前の交換層より岸側位置の含有率を示す。堆積領域の粒径毎の含有率は、等ピッチで値を補充しながら記憶し、時間経過とともに侵食領域に転じた時に交換層より岸側の含有率の値として与えることができるようにしている。

(2) 基礎方程式の離散化

差分化にあたっては、式(1)、(4)の変数 $\{y\}$ 、 $\{\mu\}$ 、

$\{q_z\}$ の計算点をスタッガードメッシュ上で定義した。図-3 に示したように、 j 番目のセルに対応する断面位置、交換層内での粒径毎の含有率の計算点 $\{y_j, \mu_j\}$ と岸沖漂砂量の計算点 $\{q_z\}$ とを互いに $\Delta z/2$ だけ離れた位置で定義した。本モデルでは陽解法を採用した。式 (1) では、ある位置での粒径含有率を漂砂量式にそのまま適用すると計算上振動が起るため、漂砂上手側の含有率を使用する風上差分を適用した。計算領域端部の境界は、漂砂量を 0 として扱った。

(3) 重力による海浜断面の崩壊の扱い

バーム高より高い領域と限界水深以深の領域では、安息勾配を超えると土砂の落ち込みが生じる。これは、粒径毎の $\beta_0^{(K)}$ に安息角 β_0 を与えることで計算する。

土砂落ち込みは重力によるものであり、波による海浜変形に比べごく短時間で生じる。そこで、式 (1) の $\varepsilon_z(z) \cdot K_s^{(K)} \cdot F_s \sin \bar{\beta}$ には数値計算が発散しない範囲内でできるだけ大きな A_g を設定する。まず、岸沖漂砂を式 (8) とおき、式 (8) を式 (4), (5) に代入すると、1 次元の拡散方程式 (10) となる。このとき、 β_0 は粒径毎に設定せず、陸域・海域の安息勾配で与えた。すなわちこの計算においては、土砂落ち込みは粒径毎に重力で落ちるのではなく、粒径に依存せず塊の土砂として崩落すると仮定した。

$$q_z^{(K)} = \mu^{(K)} \cdot A_g \cdot \left(\frac{\cot \beta}{\cot \beta_0} - 1 \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial y^{(K)}}{\partial t} = \frac{\mu^{(K)} \cdot A_g}{\cot \beta_0} \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial z^2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \frac{A_g}{\cot \beta_0} \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial z^2} \quad (10)$$

この拡散方程式を差分法で計算するときの安定条件は式 (11) の R_s 値が 0.5 以下になることである。

$$R_s = \frac{A_g}{\cot \beta_0} \cdot \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} \leq 0.5 \quad (11)$$

式 (11) より、 A_g は式 (12) で表される。

$$A_g = R_s \cot \beta_0 \frac{(\Delta z)^2}{\Delta t} \quad (\beta > \beta_0) \quad (12)$$

この式に $R_s = 0.5$ を与えれば発散しないための A_g の上限値が計算できる。しかし、本計算では芹沢ら (2002) に従い 2.5 倍の安全率をとり $R_s = 0.5/0.2 = 0.2$ を与えることにし、 β が β_0 を越えたときに式 (12) で A_g を計算し式 (8) で $q_z^{(K)}$ を計算した。

さらに、土砂落ち込み領域での粒径変化は、波が作用しないため波作用で交換層内の砂が混合される概念は適用できない。実現象を考えた場合、 $-h_c$ 付近である粒径砂が堆積した結果、沖合にその堆積した粒径砂が落ち込むので、 $-h_c$ 以深においても $-h_c$ 付近の粒径で表層が覆われていると考えるのが自然である。そこで $-h_c$ より深

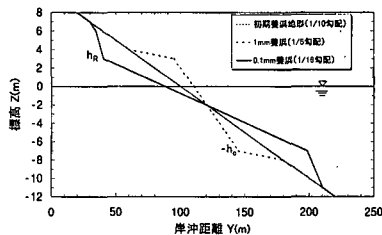


図-6 単粒径の計算ケース

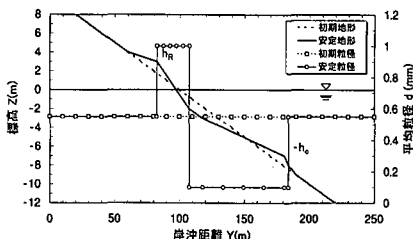


図-7 混合粒径の計算ケース

い領域 (土砂落ち込み領域) の粒径毎の含有率は、沖向きの土砂移動に対して風上の含有率を与えた。また、浜崖領域は、全粒径砂が同時に落ち込む、すなわち常に同量の粒径砂が流出するので、初期の粒度構成比が保たれると考えられる。したがって、本モデルでは浜崖領域は時間変化によらず初期の粒径毎の含有率を与えている。また、浜崖領域に関しては混合による交換層の概念をそのまま適用しても結果は同じとなる。

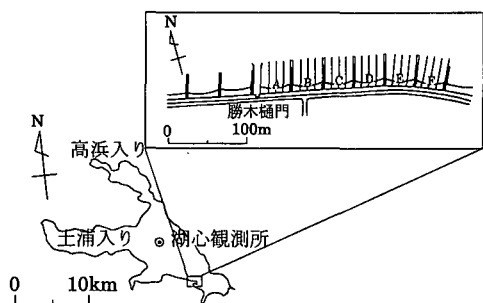
4. モデルの検証計算

(1) 仮想海岸への適用

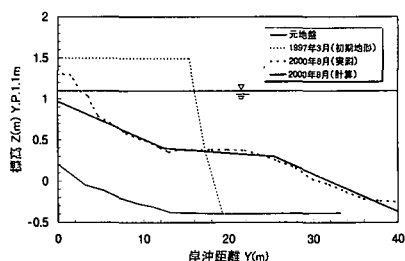
モデルの基本特性を確認するため異なる粒径で養浜した仮想海岸へ適用した。粒径 0.1 mm の砂で養浜した初期勾配 1/10 の海岸に $H_b = 2$ m の波を直角入射させた。0.1 mm の平衡勾配は 1/16 とした。また、粒径 1.0 mm の砂で養浜したケースも行い、平衡勾配は 1/5 とした。さらに各緒元は同じとし、この粒径を 1:1 で混合して養浜したケースも行った。全ケースとも陸上・水中での安息勾配はそれぞれ、1/2, 1/3 とした。

各ケースの海浜縦断形 (最終形) の計算結果を図-6 に示す。0.1 mm で養浜すると、この粒径に対応した平衡勾配に向かって変形し、緩勾配となって安定した。1 mm で養浜すると、1/5 の急勾配となり、粒径が海浜縦断形に大きく影響する現象が再現できた。平衡勾配が初期勾配とすれば、波がいくらか当たっても変形しないことも確認された。

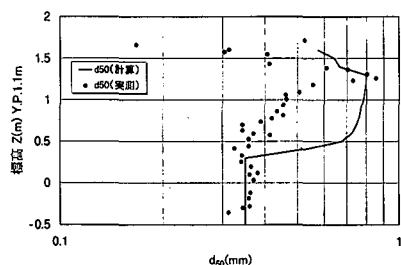
混合粒径のケースにおける縦断形・粒径変化を図-7 に示す。安定地形は、 h_R から -2 m までは急勾配 (1/5) となり、それ以深から $-h_c$ までは緩勾配 (1/16) となっ



図—8 霞ヶ浦の浮島地先の位置と養浜工の詳細図



図—9 湖浜縦断面の比較：実測と計算



図—10 粒径の水深方向分布の比較：実測と計算

ている。— h_c 以深は平衡勾配に依存せず水中での安息勾配で落ち込む。勾配変化点は、初期粒度構成比すなわち粒径毎の総土砂量比に依存していることが確認された。粒径は、地形に対応して $h_R \sim -2$ m では 1 mm, -2 m ~ -8 m では 0.1 mm となり岸沖漂砂による粒径分級がよく再現され、土砂落込み領域の粒径分布も再現された。

(2) 湖浜変形への適用

本モデルを霞ヶ浦湖岸に適用した。霞ヶ浦南東部に位置する浮島地区は最後まで残されていた湖水浴場であったが、湖浜が消失したことから当地区において霞ヶ浦の浚渫土砂を用いた養浜が計画され、計画は 1997 年から実施された。図—8 に示すように、勝木樋門東側の延長 240 m の区域において、間隔 40 m、長さ 30 m、幅 2 m で、板柵の間に土嚢を詰めた突堤を伸ばしその間で 1/2 の急勾配で養浜が行われた。しかし、養浜土砂は沿岸漂砂によって移動しつつ沖向きにも移動・堆積し、養浜粒径の平衡勾配となって安定した。すなわち、養浜砂に対する初期

勾配は急過ぎて、波作用後、緩勾配すなわち養浜粒径に応じた平衡勾配となった。

計算に使用した養浜粒径は 0.35 mm, 0.8 mm の代表 2 粒径とした。粒径毎の土砂量は不明なので精度の高い再現を重視し、急勾配と緩勾配の変化点が一致する粒度構成比を海浜に一樣に与えた。対象断面は、図—8 に示した区間 C における侵食も堆積もしない中立測線とした。養浜の初期勾配は計画時の 1/2 とし、粒径に応じた平衡勾配は測量結果に基づきそれぞれ 1/50, 1/20 とした。波浪は、 $H_b = 0.36$ m を直角入射させた。陸上・水中での安息勾配はそれぞれ、1/6, 1/20 とした。

縦断面の計算と実測結果を図—9 に示す。計算結果は、0.4 m の勾配変化点を境に、以浅は 1/20 勾配となり、0.4~0.3 m では 1/50 と平衡勾配となり、0.3 m 以深は安息勾配で土砂が落ち込むという測量結果を高精度で再現できた。粒径分布を図—10 に示す。計算は、平均汀線で約 0.8 mm と最大値を示し、勾配変化点以深は水深が深くなるにつれて粒径が細粒化し h_c 以深は約 0.35 mm となる測量結果がほぼ再現された。

5. おわりに

本研究では、粒径に応じた平衡勾配の概念を新たに提案し、養浜砂の粒径に応じた海浜縦断面および粒径変化を予測可能なモデルを開発した。本モデルを均一な混合砂を含む仮想海岸に適用した結果、粗粒砂は岸側に細粒砂は沖側に移動し粒径分級がよく再現され、最終的に粒径毎の平衡勾配で安定した。さらに、霞ヶ浦湖岸に適用した結果、粒径に応じた海浜縦断面と水深が深くなるにつれて粒径が細粒化する粒径分級がよく再現された。本モデルにより養浜時の粒径に応じた海浜縦断面・粒径の変化予測が可能となった。

参考文献

- 宇多高明・河野茂樹 (1996): 海浜変形予測のための等深線モデルの開発, 土木学会論文集, No. 539/II-35, pp. 121-139.
- 宇多高明・小菅 晋・林 義之・神田康嗣・渡邊貴裕 (2001): 霞ヶ浦における急勾配養浜時の湖浜変形と等深線変化モデルによる再現, 海洋開発論文集, 第 17 巻, pp. 529-534.
- 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・星上幸良・増田光一 (2002): 混合粒径砂の分級過程を考慮した海浜変形モデルの開発, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 476-480.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之 (2002): 海浜縦断面の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 496-500.
- Bakker, W. T. (1968): The dynamics of a coast with groyne system, Proc. 11th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 492-517.
- Kamphuis, J. W., M. H. Davies R. B. Narim and O. J. Sayao (1986): Calculation of littoral sand transport rate, Coastal Engineering, Vol. 10, pp. 1-12.
- Kraus, N. C. (1985): Field experiments on vertical mixing of sand in the surf zone, J. Sedimentary Petrology, Vol. 55, pp. 3-14.