

混合粒径砂による離岸堤周辺の海浜変形の実験と計算

酒井和也*・熊田貴之**・小林昭男***
宇多高明****・芹沢真澄*****・野志保人*****

生態系を含む海岸環境への各種開発の影響予測においては、海浜変形だけではなく底質の分級効果を含む粒径変化を予測可能なモデルが必要である。熊田ら(2002)は混合砂の分級過程を考慮した丁繰変化モデルを開発し、離岸堤周辺での海浜変形に適用した。しかし検証に用いた東条海岸のデータは構造物条件が複雑なためモデルの検証は十分ではなかった。本研究では混合粒径砂からなる海浜に離岸堤が設置された場合を対象として移動床平面実験を行い、粒径の分級機構を実験的に調べた。次に熊田らのモデルにおける標砂量式に小笹・Bramptonの項を導入し、波の遮蔽域での丁繰変化と粒径変化をより合理的に予測可能な数値計算モデルを開発した。

1. はじめに

生態系を含む海岸環境への各種開発の影響予測においては、海浜変形だけではなく底質の分級効果を含む粒径変化を予測可能なモデルが必要とされる。これには従来の均一粒径を仮定した漂砂機構ではなく、混合粒径での漂砂機構の解明が必要である。この種の研究の多くは2次元実験による漂砂量算定、およびそのモデル化が主流であったが、沿岸漂砂の卓越した実海岸での海浜変形は3次元的に起こるため、混合粒径の分級（漂砂）機構も3次元的に解明する必要がある。このような考え方のもとで、最近熊田ら（2002）は混合砂の分級過程を考慮した汀線変化モデルを開発し、離岸堤周辺での海浜変形にモデルを適用して、従来不可能であった粒径の沿岸方向分布の予測可能性を示した。しかし検証に用いた千葉県東条海岸のデータは海岸の構造物条件が複雑なため、モデルの検証は必ずしも十分ではなかった。そこで、本研究では新たに混合粒径砂からなる海浜に離岸堤が設置するという、現象をできる限り単純化した場合を対象として移動床平面実験を行い、離岸堤設置条件下における粒径の分級機構を実験的に調べた。次に、熊田ら（2002）のモデルにおける漂砂量式に小笹・Brampton項を導入し、波の遮蔽域での汀線変化と粒径変化をより合理的に予測可能な数値モデルに拡張し、実験と計算との比較によりその有効性を確認した。

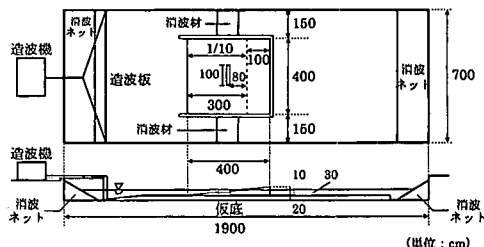
2. 実験概要

本研究では平面水槽により細砂・粗砂の2粒径を用いた移動床平面実験を行い、細砂・粗砂で構成される海浜

* 学生会員	日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻
** 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	日本大学助教授 理工学部海洋建築工学科
**** 正 会 員 工 博	(財)土木研究センター審議役なぎさ総合研究室長
***** 正 会 員	海岸研究室(有)
*****	日本大学理工学部海洋建築工学科

の変形と、粒径の分級機構を解明する。具体的には図一に示すように、幅 7 m、長さ 19 m の平面水槽の中央部に 4 m 四方の実験区間を設け、その中に細砂・粗砂の 2 粒径からなる混合粒径砂を敷き詰めた。海浜砂は中央粒径 (d_{50}) が 0.2 mm と 2 mm の砂を体積比 1 : 1 で混合したものであり、砂の混合は手作業で行った。また $d_{50}=0.2$ mm と 2 mm の砂は色彩を大きく変えてあり、細粒分は白く粗粒分は黒い。これは粒径の分級現象を色彩面から明瞭に観察するためである。初期海浜は 1/10 の一様海浜とした。模型海浜の縮尺は 1/50 であり、模型海浜の中央に堤長 100 cm の完全不透過離岸堤を初期汀線より 80 cm 沖合の初期水深 8 cm の位置に設置した。離岸堤の沖側には碎石を敷き並べ反射波の発生を防いだ。実験の波浪条件は $H_0=4$ cm、 $T=0.8$ s の規則波とし、初期汀線に対し波を直角入射させた。波浪は海浜が安定形に至るまで 10 時間作用させた。実験で選定した波浪条件は、細粒の $d_{50}=0.2$ mm の砂に対して佐藤・田中 (1962) の完全移動限界式で計算した限界水深が離岸堤の設置水深程度となるようにすると同時に、表面張力の作用が及ばない限界の実験周期が 0.8 s であることを考慮して選定した。事実、上述の佐藤・田中式によれば限界水深は 6 cm となる。

計測項目は、海浜形状、海浜底質粒度組成分析、砕波波高および砕波点における入射角の分布である。海浜形状は沿岸方向に 50 cm、岸沖方向に 20 cm 間隔、離岸堤背後においては沿岸方向 25 cm、岸沖方向 20 cm 間隔で初



図一1 移動床平面実験の装置

期, 3, 10 時間後に測定した。海浜底質は実験開始前と 10 時間後の 2 回採取し, 粒度構成を調べた。底質採取は侵食域, 堆積域の代表的測線と, 離岸堤端部を通る測線上, 合わせて 3 測線を選定し, 表層の砂を採取した。採取した砂は篩い分け分析により粒度構成を調べた。碎波の入射角は写真撮影およびビデオ撮影により行った。

3. 実験結果

(1) 海浜変形

図-2 に初期海浜と, 造波開始から 3 時間および 10 時間後の平面海浜形状を示す。初期汀線は $Y=80$ cm に, 離岸堤は $Y=160$ cm に位置する。1/10 勾配に設定された初期海浜 (図-2(a)) と比較すると, 3 時間後の海浜形状 (図-2(b)) において既に離岸堤背後で汀線が前進して舌状砂州が形成され始めている。これと対照的に離岸堤の両側では汀線が後退して凹状になりつつある。最も著しい変化が現れている等深線は汀線であるが, +2 cm から -2 cm の等深線には汀線と連動した動きが見られる。また離岸堤の両側では -6 cm と -4 cm の等深線の間隔が初期と比較して広がっていることから, この部分からも土砂が削り取られたことが分かる。

図-2(c) に示す 10 時間後の海浜形状では, 3 時間後の海浜形状と比較して地形変化がより顕著となった。3 時間後では離岸堤中心に関して汀線形状が左右非対称であったが, 10 時間後では汀線はほぼ対称形となった。離岸堤背後では三角形に大きく汀線が前進し, 舌状砂州が発達した。これと対照的に, 離岸堤の両側では等深線が後退し凹状の窪地が形成された。離岸堤中央部では陸域の 4 cm 以上では波が打ち上がらないために地形変化はなく, 標高 2 cm より海側に堆積が生じている。離岸堤直近では両側から集められてきた砂が堆積するために海底勾配が急になっている。写真-1 は 10 時間の波作用後の海浜を側面から撮影したものである。離岸堤背後における三角形の舌状砂州の形成と, 離岸堤両側での凹状の汀線が見てとれる。写真で注目されるのは, 後に詳細に明らかにするように, 離岸堤背後において細砂である白い砂が汀線を中心として堆積していることである。

以上に述べた離岸堤背後の海浜変形より, 初期形状を基準として 3 時間後および 10 時間後の海浜地形変動量を算出し, その平面分布を描いたのが図-3(a), (b) である。時間経過とともに離岸堤の両側で削り取られた土砂が離岸堤背後へと運び込まれている状況がきれいに出てくる。また地形変動量の分布は離岸堤の中心線に対しほぼ左右対称である。

(2) 粒径変化

海浜変形については前節で述べたとおりであるが, ここで海浜縦断面の変化と, 海浜材料の粒径の変化を結び

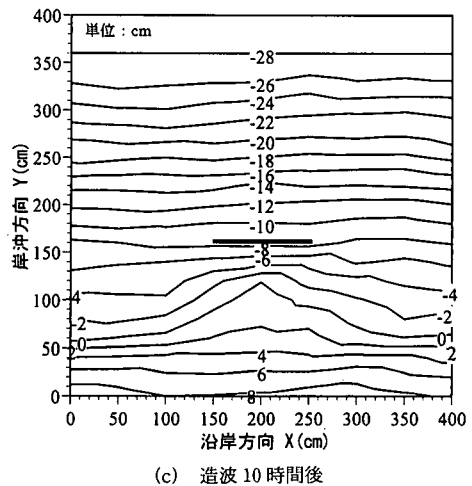
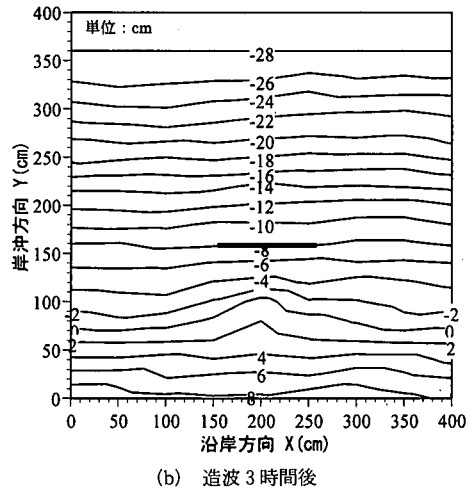
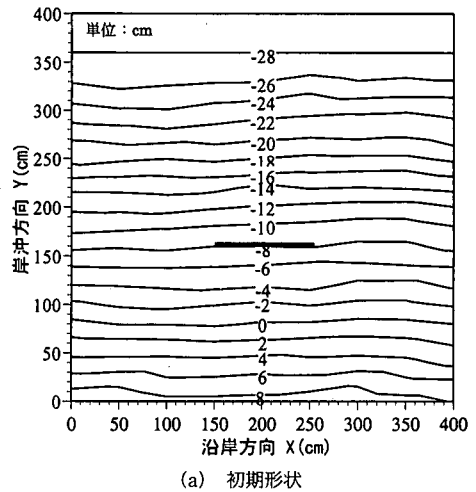


図-2 海浜形状



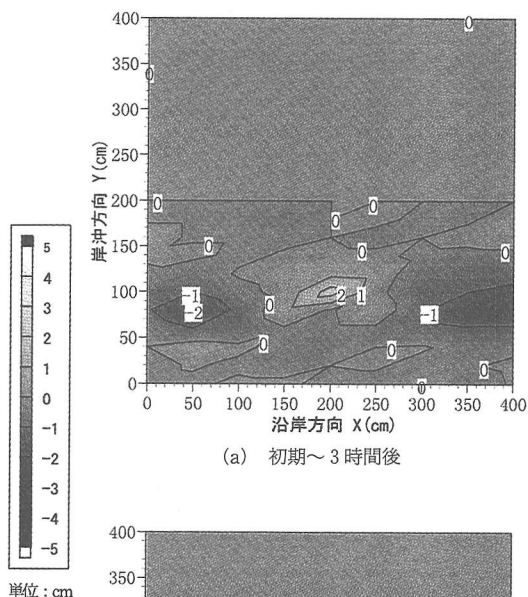
写真-1 離岸堤背後の舌状砂州の形成状況

付けてみる。図-4は離岸堤横の侵食が著しい $X=350$ cm 断面と、離岸堤の中心線上の $X=200$ cm 断面、および離岸堤端部の $X=250$ cm 断面における初期と10時間後の海浜縦断面形を表すとともに、初期と10時間後の d_{50} の岸沖分布を示す。

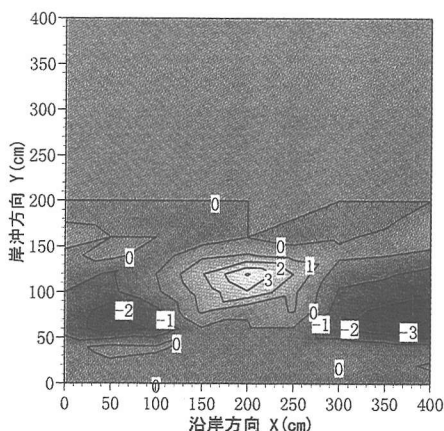
図-4(a)に示す $X=350$ cm 断面では、陸域の+4 cm から水面下の-5 cm の範囲で土砂が削り取られている。 d_{50} については、波の作用が及ばない $Y=50$ cm より岸側では粒径変化が起きず初期の粒径が保たれている。土砂が流出した箇所では d_{50} が1.4 mm となり、大きく粗粒化したことが分かる。侵食断面では沿岸漂砂によって土砂が削り取られたが、その場合細粒の土砂が選択的に流出し、粗砂が海底面を覆ったことが分かる。

一方、離岸堤の中央に位置する $X=200$ cm 断面(図-4(b))では土砂が大きく堆積している。土砂堆積とともに標高2 cm のバームが形成され、汀線より高い場所まで砂が堆積している。また水面下では-5 cm まで堆積が見られる。 d_{50} については、初期状態の測定値に大きなバラツキが見られる。しかし、初期にバラツキを有していた d_{50} の分布は、10時間後には非常にきれいな分布形となり、土砂が堆積した場所では d_{50} が0.2~0.4 mm の範囲の値を示す。このことは、離岸堤背後では細粒分が選択的に堆積していることを意味する。

離岸堤端部の $X=250$ cm 断面(図-4(c))では+1.5 cm~-5 cm でほぼ一様な堆積が見られる。 d_{50} については、初期状態の測定値に $X=200$ cm 断面と同様にバラツキが見られる。しかし10時間後には、土砂が堆積した



(a) 初期～3時間後



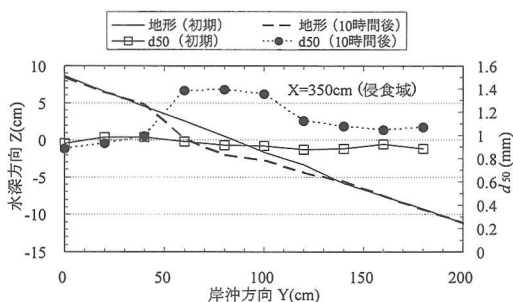
(b) 初期～10時間後

図-3 地形変化量の平面分布

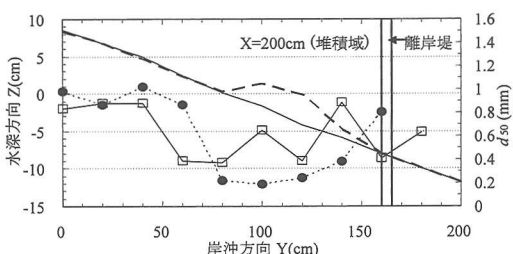
場所では一様に細粒化し、 d_{50} は0.2~0.3 mm の範囲の値を示した。

図-5には、特に粒径変化が著しい $X=350$ cm と $X=200$ cm 断面上の汀線位置における、初期と10時間後の海浜材料の粒径加積曲線を示す。両地点とも初期においてはほぼ同様の分布を示しており、細砂と粗砂がほぼ50%ずつであった。しかし海浜が安定に至った10時間後には侵食域では全質量の90%以上が粒径0.85 mm 以上の粗砂、堆積域では80%以上が0.25 mm 以下の細砂となり侵食域での粗粒化、堆積域での細粒化の傾向が強く現れた。

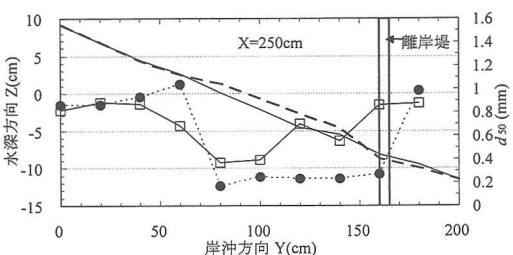
写真-2, 3は侵食域と堆積域の汀線位置で採取した海浜材料の写真である。各図とも(a)は初期、(b)は10時間後に採取したものである。細砂、粗砂の色彩を分けたことにより、写真からも粒径変化が明瞭にみとれる。写真-2, 3の比較によれば初期の混合粒径砂はほぼ一様で



(a) X=350 cm 断面



(b) X=200 cm 断面



(c) X=250 cm 断面

図-4 海浜縦断面形と d_{50} の分布

あったことが分かる。このような初期の海浜に対し、波の作用の結果、写真-2、3の(b)に示すように侵食域にある $X=350$ cm 断面では粗砂のみから構成され、逆に離岸堤背後の堆積域にある $X=200$ cm 断面では細砂のみが堆積したことが分かる。

4. 予測モデルと計算結果

(1) 計算モデル

熊田ら (2002) の粒径毎の沿岸漂砂量式は、CERC 型であるため波の遮蔽域内での回折に伴う碎波波高変化を考慮した漂砂量が計算できない。したがって、離岸堤構造物を有する本実験の再現は難しい。そこで、碎波波高の沿岸方向変化を考慮できる小笹・Brampton の漂砂量式を適用し、熊田ら (2002) にならない底質粒径が考慮できるよう Kamphuis (1986) の関数を与え、次式として括

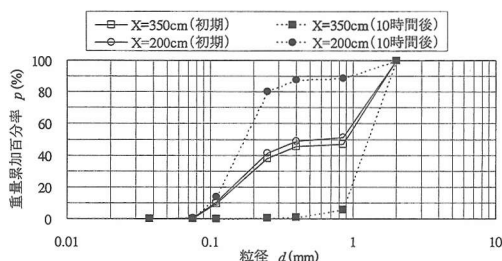


図-5 汀線材料の重量累加百分率の変化

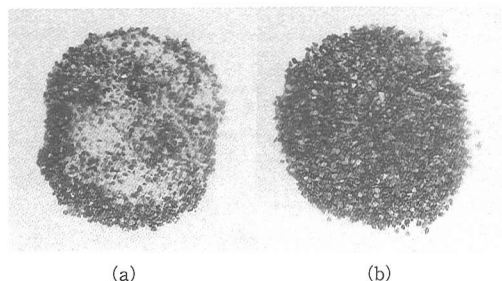


写真-2 侵食域の汀線における粒径変化 (X=350 cm 断面)

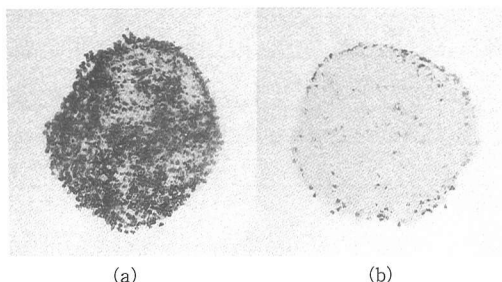


写真-3 堆積域の汀線における粒径変化 (X=200 cm 断面)

張した。

$$Q^{(K)} = \mu^{(K)} \cdot K_1^{(K)} \cdot (EC_g)_b \cdot \left(\cos \alpha_{bs} \sin \alpha_{bs} - \xi \frac{1}{\tan \beta} \cdot \cos \alpha_{bs} \cdot \frac{\partial H_b}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$K_1^{(K)} = \frac{A}{\sqrt{d^{(K)}}} \quad (2)$$

ここに、 $Q^{(K)}$: 粒径毎 (N 粒径) の沿岸漂砂量 ($K=1, 2, \dots, N$)、 $\mu^{(K)}$: 交換層内の粒径毎の含有率、 $K_1^{(K)}$: 粒径毎の漂砂量係数、 $d^{(K)}$: 底質粒径である。式 (2) の A は未知数とし、対象海岸の変形過程に応じて設定できるようにした。また $\xi = K_2^{(K)} / K_1^{(K)}$ とし ξ も A と同様に対象海岸の変形過程に応じて設定する定数とした。すなわち、 $K_2^{(K)}$ は、 $K_1^{(K)}$ の関数となる。混合粒径砂の汀線変化量および交換層内での粒径毎の含有率の算定式は、熊田ら

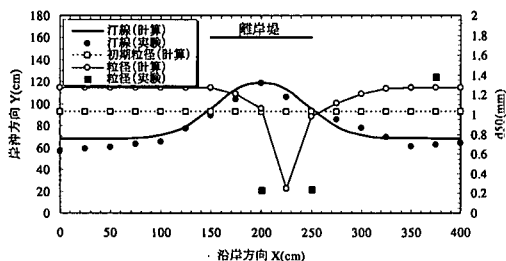


図-6 混合粒径砂からなる海浜に設置された離岸堤周辺の汀線変化と d_{50} の変化

(2002) に従った。

(2) 計算モデルの検証

計算諸元として初期粒径は、初期にサンプリングした砂の平均値を沿岸方向に与えた。同様に碎波波高・波向も実験での計測値を与えた。式(2)の A は 2.8 とし、交換層幅は Kraus(1985)をもとに 3 mm とした。図-6 に、計算と実験の汀線形状および d_{50} の沿岸分布を示す。汀線形状の計算結果は、実験結果を高精度で再現していることが分かる。粒径の実験結果は、沿岸方向に 3 点しかないが、計算は実験値付近に分布しており、侵食域での粗粒化・堆積域での細粒化が再現できた。

5. ま と め

本研究では混合粒径砂からなる海浜に離岸堤が設置された場合を対象として移動床平面実験を行い、離岸堤の

設置された条件下における粒径の分級機構を実験的に調べた。実験では沿岸方向の粒径の分級現象が顕著に表れ、離岸堤背後に比較的細かい粒径が堆積し、波の遮蔽域外の侵食域では粒径が粗くなり、実海岸の特徴とよく一致した。さらに熊田ら(2002)の漂砂量式に小笹・Bramptonの項を導入し、波の遮蔽域内での汀線変化と粒径変化をより合理的に予測可能な数値モデルに拡張した。数値モデルと実験結果との検証では、高い精度で汀線変化および粒径の分級現象が再現できた。

謝辞：本研究の実験では、海浜整形などに非常に多くの人手を要したが、これには日本大学小林研究室の多くの卒業研究生に手伝っていただいた。ここに記して諸氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 熊田貢之・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予測モデルの開発, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 476-480.
- 佐藤昭二・田中則男 (1962): 水平床における波による砂移動について, 第 9 回海岸工学講演会講演集, 土木学会, pp. 95-100.
- Kamphuis, J. W., M. H., Davies, R. B., Narim and Sayano, O. J. (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.