

混合粒径下における波打ち帯の 漂砂移動特性

宮武 誠¹・成田郁史²・木村克俊³・越智聖志⁴・佐々真志⁵・白水 元⁶

¹ 正会員 函館工業高等専門学校准教授 社会基盤工学科 (〒042-8501 函館市戸倉町14番1号)
E-mail:miyatake@hakodate-ct.ac.jp

² 学生員 函館工業高等専門学校専攻科 環境システム工学専攻 (〒042-8501 函館市戸倉町14番1号)
E-mail:narita@gmail.com

³ フェロー会員 室蘭工業大学大学院教授 暮らし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水本町27番1号)
E-mail:kimura@mmm.muroran-it.ac.jp

⁴ 正会員 日本データサービス株式会社 (〒065-0016 札幌市東区北16東19丁目1番14号)
E-mail:m-ochi@ndsinc.co.jp

⁵ 正会員 (国研)海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 動土質研究グループ長
(〒239-0826 横須賀市長瀬3丁目1番1号)

⁶ 正会員 山口大学大学院助教 社会建設工学分野 (〒755-0097 山口県宇部市常盤台2丁目16番1号)
E-mail:shiro@yamaguchi-u.ac.jp

砂浜斜面の飽和度に応じた混合粒径下における波打ち帯の漂砂移動を模型実験及び数値解析の両面から検討した。模型実験では、孤立波作用下の前浜斜面に敷設した色相の異なる混合粒径による蛍光砂にブラックライトを照射し、波打ち帯の漂砂移動を可視化した。その結果、飽和斜面の蛍光砂量は不飽和斜面に比して常に高く推移し、特に流出する細かい粒径分の増加が著しくなり、底質の粗粒化及び前浜勾配の急峻化がより一層進行することを示した。また、それらに及ぼす前浜浸透流の影響について考察した。更に遡上波変形と飽和-不飽和浸透流の結合数値解析モデルならびに、粒径別の透過斜面に対する無次元掃流力モデルによる数値解析を行った結果、混合粒径下における波打ち帯の漂砂移動の傾向を定性的ではあるが、概ね良好に評価できることを示した。

Key Words : mixed grain size, swash sediment transport, saturation, coarse granulation of sediment

1. はじめに

荒天時波浪による砂浜斜面底質の粗粒化に伴う前浜勾配の急峻化や浜崖の形成といった汀線付近の海岸侵食現象を解明するためには、混合粒径を考慮に入れた波打ち帯の漂砂移動特性の把握が不可欠である。混合粒径を取り扱った既往の研究は、シートフロー漂砂の鉛直分級過程を主体に議論され、これまでに数多くの有用な漂砂量式や海浜変形モデルが提案されてきた¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。近年では画像解析によって、混合粒径下での浮遊砂粒度を評価する試みも行われている⁵⁾。しかし、波打ち帯の漂砂移動は、遡上波水塊の水深が非常に希薄であることに加え、波の遡上・流下に伴い発生する砂層表面の浸透・滲出流の影響を受けるため、底質を混合粒径で取り扱った研究は、遡上域の底質の分級過程を実時間で計測した研究⁶⁾を除き、現象の複雑さや測定の高難さ等の理由から活発

に行われているとは言えない。

一方、著者ら⁷⁾は単一粒径に限定されるが、段波作用下における波打ち帯の漂砂移動に関し、蛍光砂を用いた可視化実験を行うとともに、越智ら⁸⁾による遡上波変形と飽和-不飽和浸透流を結合させた数値解析モデル及び透過斜面の無次元掃流力モデル⁹⁾から、実験結果の再現性を検証し、波打ち帯の漂砂移動を定性的ではあるが、その傾向を評価できることを明らかにしている。

本研究は、粒径毎に異なる色相の蛍光砂を敷設した混合粒径下の砂浜斜面に孤立波を作用させた模型実験を実施するとともに、混合粒径に対応させた遡上波変形と飽和-不飽和浸透流の結合数値解析モデル及び粒径別に推定した無次元掃流力モデルを通じて、砂浜斜面の飽和度に応じた混合粒径下での波打ち帯の漂砂移動特性を明らかにする。また、それに伴う底質の粗粒化や縦断地形変化に及ぼす影響にも言及する。

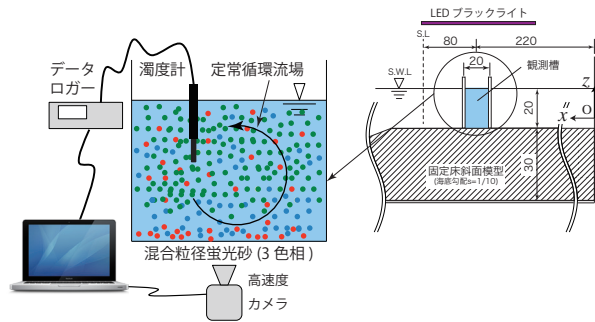


図-1 定常循環流実験の概要図 (単位: cm)

表-1 底質材料の諸元

粒径 $d(\text{mm})$	蛍光砂 (色)	混合粒径の 割合 (%)
0.12	緑 (G)	53.4
0.28	青 (B)	33.3
0.42	赤 (R)	13.3

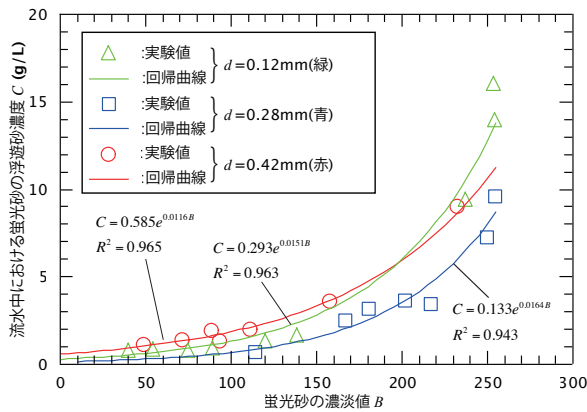


図-2 各粒径 (色相) の濃度変換曲線

2. 定常循環流場における浮遊砂濃度に関する実験

(1) 単一粒径下での実験方法

後出する図-5に示す2次元造波水路内に設置した固定床斜面模型水平床部に図-1のような観測槽を設け、暗転した実験水路にLEDブラックライトを照射し、表-1に示す色相の異なる3粒径階の蛍光砂をそれぞれ所定の量で順次、定常循環流場を形成した観測槽に投入した。投入した蛍光砂の全てが強制的に浮遊し、濁度計による浮遊砂濃度がほぼ均一になることを確認後、各粒径 (色相) に対する浮遊砂濃度を計測するとともに、蛍光砂の輝度を観測槽側面に設置した高速カメラにより撮影した。濁度計による浮遊砂濃度の値は、粒径に対する光学的な応答特性による影響を受けることが知られている。本実験においても投入した蛍光砂量から浮遊砂濃度との整合性を検証した結果、その影響を受けることを確認しているが、この点については今後の課題としたい。各粒径に対する蛍光砂の輝度を撮影した動画は、DIB形式のRGB画像で1/150秒毎に抽出した後、予め定めた各粒径の蛍光砂に相当する色相 (それぞれ緑色、青色、

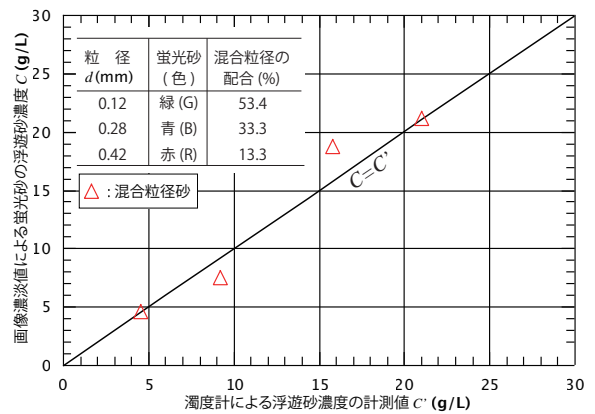


図-3 画像濃淡値と計測値による浮遊砂濃度の比較

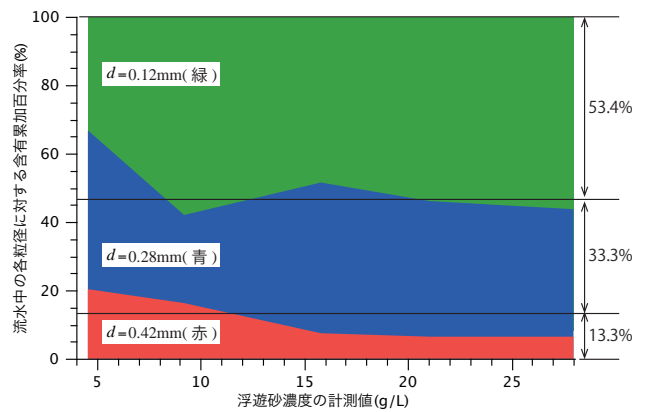


図-4 混合粒径下の各粒径に対する含有累加百分率

赤色) の閾値で分離し、それぞれ256階調白黒濃淡画像に変換後、画像濃淡値をその閾値が標準偏差で10以下の精度で抽出した。

(2) 単一粒径に対する濃度変換曲線の導出

図-2は、各粒径 (色相) における蛍光砂の画像濃淡値と流水中の浮遊砂濃度の関係を示し、図中の実線は各粒径において指数関数で回帰させた曲線を表示する。いずれの回帰式においても高い相関を示すことが認められる。画像濃淡値は各粒径において異なる浮遊砂濃度で上限値に達していることから、後述する混合粒径下での実験では、各粒径において画像濃淡値の上限を超過しないように留意するとともに、濃度変換曲線の適用外となる標準偏差10以上の微小な画像濃淡値は除外して行うこととする。

(3) 混合粒径下での実験方法

単一粒径下における粒径毎の濃度変換曲線の適用範囲を踏まえ、混合粒径下で前述の単一粒径と同じ実験を行った。混合粒径を構成する蛍光砂は、前述の実験で使用した色相の異なる3種の粒径を使用し、表-1に示す割合で配合した。水槽側面から撮影して得られる混合粒径におけるRGB形式の画像から、それぞれ蛍光砂の色相の閾値に相当する緑色、青色、赤色の成分を抽出し

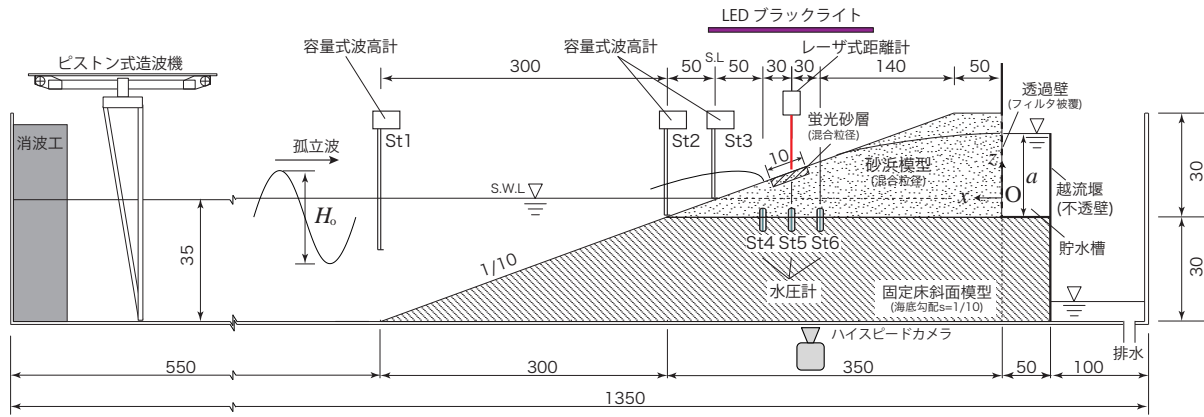


図-5 実験装置の概要 (単位: cm)

表-2 実験条件

ケース	波高 H_0 (cm)	周期 T_0 (s)	貯水槽の水深 a (cm)	遡上斜面の保湿度
Run1	8.0	4.50	30.0	飽和
Run2	8.0	4.50	5.0	不飽和

た後、前述と同様に 256 階調白黒濃淡画像に変換した。この画像から得られる標準偏差 10 以下の閾値を有する各色相に対する画像濃淡値は、前出の図-2 に示す濃度変換曲線により、各粒径に対する流水中の浮遊砂濃度に変換した後、それらの合計を持って混合粒径下の蛍光砂に対する浮遊砂濃度とした。

(4) 混合粒径下における流水中の浮遊砂濃度の評価

図-3 は、画像濃淡値による混合粒径下の蛍光砂の浮遊砂濃度と濁度計により同期計測した流水中の浮遊砂濃度の比較を示す。画像の各色相から濃度変換曲線により粒径別に求めた蛍光砂の浮遊砂濃度の合計値は、混合粒径下での浮遊砂濃度の計測値を概ね妥当な精度で評価できることが認められる。

図-4 は、各浮遊砂濃度における各粒径の含有累加百分率を示す。投入した混合粒径の蛍光砂は、定常循環流によって全て浮遊した状態にも関わらず、浮遊砂濃度が低い領域で含有累加百分率にやや変動が散見される。しかし、浮遊砂濃度が高くなるに従い、投入した混合粒径の配合割合にはほぼ一致することから、混合粒径下の浮遊砂中に含まれる各粒径の割合も概ね良好な結果で評価できることを確認した。

3. 混合粒径下の飽和・不飽和斜面における波打ち帯の漂砂に関する可視化実験

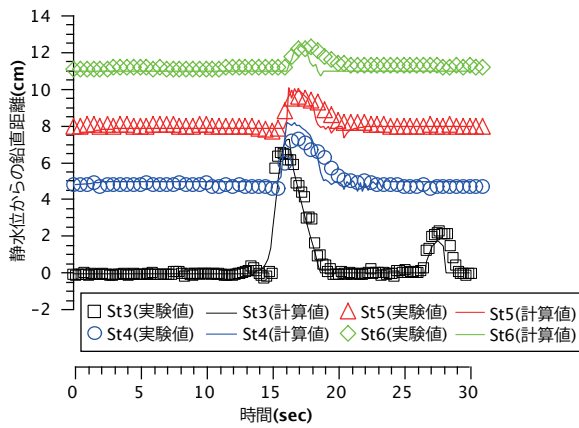
(1) 実験方法

実験は、図-5 に示す 2 次元造波水路内に海底勾配 1/10 の塩化ビニール製固定床斜面模型を設置し、その上部の水平床に長さ 3.5 m、高さ 30 cm、後浜天端 50 cm を

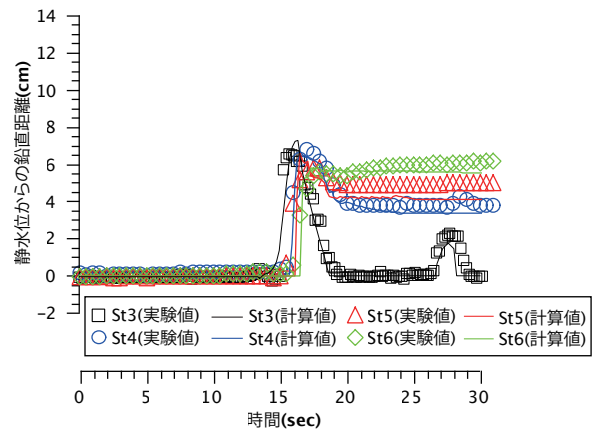
有する海底勾配 1/10 の砂浜模型を製作して行った。砂浜模型を構成する底質は、前出した表-1 と同配合の混合粒径珪砂である。この水路には図中の O 点を原点とし、静水位面上の岸沖方向に x 軸、鉛直方向に z 軸を設定し、水位は静水位からの鉛直距離として定義する。また、遡上波の流体運動は、砕波に伴う乱れや先行波による戻り流れとの干渉などの複雑な水理現象を呈している。そのため、本研究は底質の飽和度に応じた混合粒径下での波打ち帯の漂砂移動特性を把握するにあたり、現象を単純化させるため、入射波には孤立波を用いた。静止水深 35 cm のもと模型斜面後浜側には貯水槽を設け、その水深 (図中の a) を表-2 に示す 30 cm 及び 5 cm とし、砂浜斜面を飽和及び不飽和状態にした上で、遡上波を砂浜模型の法肩まで到達させるため、沖側から表中に示す諸元を有する孤立波を 2 分間隔で 10 波作用させた。原点より 220 cm 沖側の砂層表面には、厚さ 1 cm、岸沖方向に 10 cm、水路横断方向一様に底質と同配合の蛍光珪砂を敷設し、暗転した実験室内でブラックライトを照射することで、遡上波による蛍光砂の移動を水槽側面から高速カメラにより撮影した。その後、得られた画像は前章と同じ画像計測法により遡上波流水中に含まれる蛍光砂量を求めた。斜面上の遡上波変形及び砂層内の地下水位は、図中に示す 3 本の容量式波高計及び 3 本の水圧計によりそれぞれ計測した。実験終了時にはレーザー式距離計により地形変化量を測定した後、蛍光砂層部から地形変化後の底質を採取して粒度試験を行った。

(2) 飽和・不飽和斜面による前浜地下水位の変動特性

図-6(a) 及び (b) は、後浜貯水槽の水深 a を 30 cm 及び 5 cm としてそれぞれ砂浜斜面を飽和及び不飽和とした場合における孤立波 1 波目の遡上波水位と地下水位の経時変化を示す。図中の□印は St 3 の遡上波水位、○、△及び◇印はそれぞれ、St 4、St 5 及び St 6 における地下水位の実験値を示す。飽和斜面の地下水位は、遡上波水位の上昇に追従して沖側から岸側の順で順次、やや遅れて応答し上昇するが、上昇後は全ての地下水位において初期

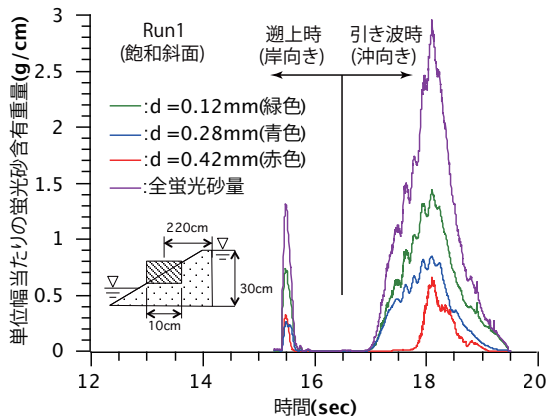


(a) 飽和斜面の場合

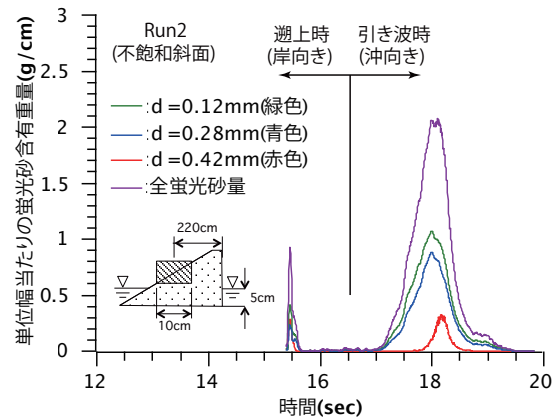


(b) 不飽和斜面の場合

図-6 遡上波水位及び地下水位の経時変化 (第1波目)



(a) 飽和斜面の場合



(b) 不飽和斜面の場合

図-7 蛍光砂量の経時変化 (第1波目)

地下水位まで速やかに低下している。このことから飽和斜面の場合、遡上時に浸透した水のほとんどは引き波時の滲出流となって、速やかに前浜砂層外に流出したものと考えられる。一方、不飽和斜面の地下水位は、飽和斜面と同様に上昇するが、上昇後の過程は飽和斜面と異なり、いずれの地下水位も初期地下水位よりも高い水位を維持し、その高さは後浜になるに従い高く分布する。これより不飽和斜面の場合、遡上時の浸透水のほとんどは砂層内に貯留され、その貯留量は後浜になるに従い大きくなるものと考えられる。

(3) 混合粒径下の飽和・不飽和斜面における波打ち帯の漂砂移動特性

図-7(a)及び(b)は、砂浜斜面を飽和及び不飽和とした場合における孤立波1波目の画像濃淡値から求めた単位幅あたりの遡上波流水中に含まれる蛍光砂量の経時変化を示す。飽和斜面の蛍光砂量は不飽和斜面に比較して、遡上時及び引き波時とともに高く推移し、特に蛍光砂層の底質から流出する細かい粒径分の増加が著しい。一方、引き波時に着目すると、蛍光砂量は斜面の飽和及び不飽和に関わらず、遡上時よりも引き波時の方が大きくなっているが、その傾向は飽和斜面において顕著となる。こ

れらの飽和・不飽和斜面の蛍光砂量で見られた違いは、飽和斜面において初期地下水位が静水位よりも高い状態にあるため、実験開始時から恒常的に発生する冲向きの定常飽和浸透流及び引き波時に生じる滲出流による揚力効果が加ったことによるものと推察される。

(4) 波打ち帯の漂砂移動に伴う遡上斜面の粒度分布変化及び縦断地形変化

図-8は実験開始時及び孤立波10波作用後の飽和・不飽和斜面の蛍光砂層区間から採取した底質の粒度分布を示す。飽和及び不飽和斜面でともに、蛍光砂層底質からの細かい粒径分の流出が進行し、底質の粗粒化が進んでいることが認められる。特に、遡上時及び引き波時とともに細かい粒径分の流出が著しい飽和斜面においては、底質の粗粒化がより一層進んでいる。

図-9は、孤立波10波作用後の飽和及び不飽和斜面における縦断地形変化を示す。図中の矢印はそれぞれ、遡上波最大到達高及び侵食限界高を表示する。飽和斜面の最終地形は不飽和斜面に比較して、後浜の更に高い位置から侵食が始まり、その地点から蛍光砂層区間に渡る前浜域でより大きな侵食が発生する。この結果、飽和斜面の前浜域では斜面勾配の急峻化が、底質の粗粒化とともに

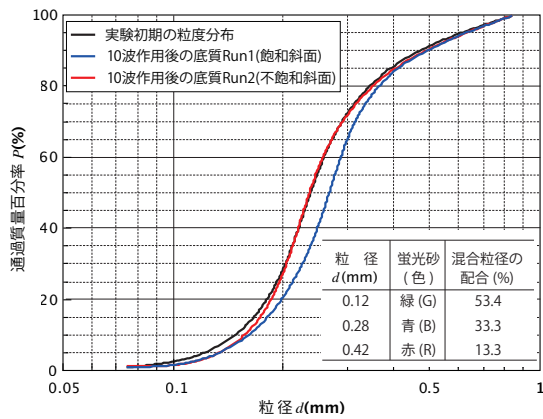


図-8 蛍光砂層部における底質の粒度分布

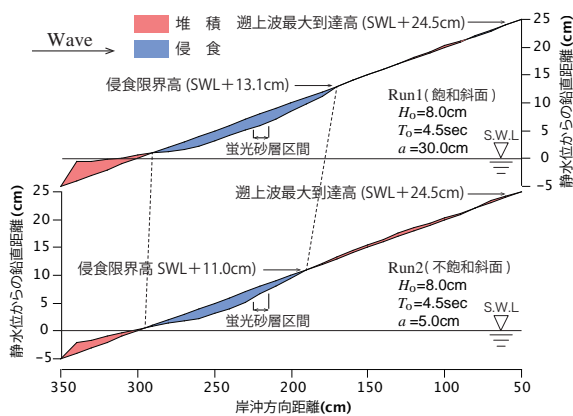


図-9 孤立波 10 波作用後の縦断地形変化

により一層進行する。これに対し、不飽和斜面では飽和斜面とは異なり、侵食限界高よりも更に高い後浜域で堆積が認められる。これは、不飽和斜面では後浜になる従い飽和度の低下に伴い、底質のサクシオンが増加するため、後浜域の遡上斜面で浸透効果が高まった結果、遡上波流水中の漂砂の一部が捕捉されたものと推定される。

4. 数値解析モデルによる実験結果の検証

(1) 数値解析モデル

計算は、孤立波を入射波とした模型実験における遡上波内流速及びそれに伴う前浜砂層域での浸透・滲出流速を対象とし、越智ら⁸⁾による遡上波変形と飽和-不飽和浸透流を結合させた数値解析モデルを改良して行った。改良点としては、波打ち帯まで拡張させた遡上波変形モデルに、柴山ら¹⁰⁾に倣い流速値に波動運動の位相を基準とした位相平均値を用いた Reynolds 方程式ならびに 2 方程式を準用したことである。この遡上波変形モデルと前浜砂層域の飽和-不飽和特性を反映させた Bear の浸透流モデルは自然座標系に変換した後、差分法により計算し、砂浜斜面上の境界で水頭を介して接続される。なお、浸透流モデルで考慮される不飽和土壌パラメータや透水係数の値は、混合粒径を構成する各粒径に対する値を配合した割合に応じ按分して与え、その他の条件につ

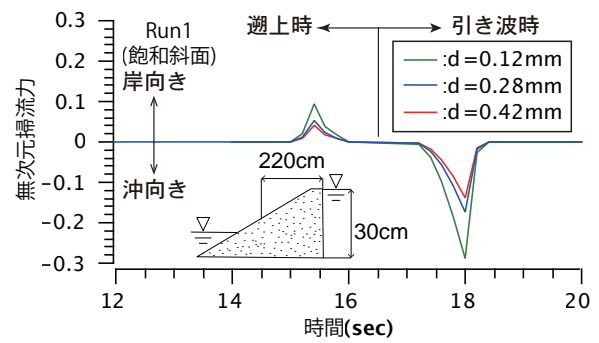


図-10 飽和斜面における透過斜面の無次元掃流力

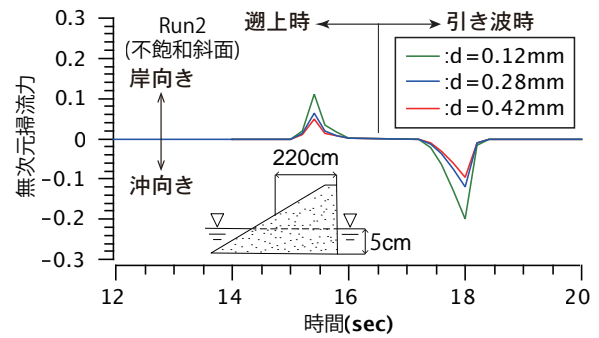


図-11 不飽和斜面における透過斜面の無次元掃流力

いては、模型実験と同一にして計算を行った。

この結合数値解析で得られた砂層表面における遡上波底面流速及び飽和-不飽和斜面の浸透・滲出流速を用いて、粒径別に透過斜面の無次元掃流力を計算した。計算モデルには、宮武ら⁹⁾による飽和・不飽和特性を考慮した Turner・Masselink¹¹⁾の透過斜面に対するシーイズ数を用いた。実験で得た蛍光砂量は、掃流砂に加えて浮遊砂を多く含んでいるため、数値解析から求まる粒径別の透過斜面に対する無次元掃流力のみで評価できるものではないが、実験で得た蛍光砂量の傾向と比較した。

(2) 粒径別透過斜面の無次元掃流力による評価

前出した図-6(a)及び(b)中の実線は、遡上波変形と飽和-不飽和浸透流の結合数値解析モデルにより実験と同位置で得た遡上波水位及び地下水位の計算値を示す。計算値は多少の乱れが見られるものの、遡上波水位及び地下水位ともに実験値を概ね妥当な精度で予測する。

図-10及び11は、それぞれ飽和及び不飽和斜面に対する透過斜面の無次元掃流力を粒径別に算出した結果を示す。透過斜面の無次元掃流力は、模型実験において混合粒径の蛍光砂を配置した岸沖方向 220 cm 地点の値を表示する。各粒径の無次元掃流力は飽和及び不飽和斜面に関わらず、その絶対値が遡上時よりも引き波時で小さくなっていることが認められる。また、飽和斜面の無次元掃流力は不飽和斜面と比較して、その絶対値が遡上時及び引き波時でともに大きくなり、特に細かい粒径に対する増加が顕著となっている。この結果、実験で得た蛍光砂量と直接比較できるものではないが、粒径別に求め

た透過斜面の無次元掃流力は、実験で得られた各粒径に対する蛍光砂量の傾向を定性的ではあるが、概ね良好な結果で評価できることがわかる。

5. 結論

本研究で得た結論を要約すると以下のとおりである。

(1) 定常循環流場において、色相の異なる単一粒径下の画像濃淡値と浮遊砂濃度の関係から濃度変換曲線を導出し、混合粒径下の浮遊砂濃度を評価した結果、各色相の画像濃淡値から求めた浮遊砂濃度の合計値は、計測値にほぼ一致し、画像計測法の妥当性を示した。

(2) 飽和斜面の蛍光砂量は、不飽和斜面に比して常に高く推移し、特に底質からの細かい粒径分の流出が著しい。この結果、底質の粗粒化及び前浜勾配の急峻化がより一層進行する。また、飽和・不飽和斜面の蛍光砂量で見られた違いは、飽和斜面において恒常的に発生する沖向きの定常飽和浸透流及び引き波時の滲出流による揚力効果が加ったことによるものと推定される。

(3) 粒径別に推定した飽和及び不飽和斜面における透過斜面の無次元掃流力は、実験で得た掃流砂に加えて浮遊砂成分が含まれる蛍光砂量と直接比較できるものではないが、実験で得た蛍光砂量の傾向を定性的ではあるが、概ね良好な結果で評価できる。

今後は、粒度分布を変化させた混合粒径砂を用いた漂砂移動の可視化実験を行い、飽和度に応じた波打ち帯の漂砂移動特性及び、底質の粒度分布や縦断地形変化に及ぼす影響を考察する所存である。

謝辞: 本研究は学術研究助成基金助成金 基盤研究 (c) (課題番号 16K06521) の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 酒井哲郎, 後藤仁志, 沖 和哉, 高橋智洋: 混合粒径シートフロー漂砂の鉛直分級過程の可視化実験, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp.516-520, 1999.
- 2) Mohammad Dibajnia, 稲村嘉之, 喜岡 渉: 混合粒径漂砂量算定式の新たな提案, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.501-505, 2001.
- 3) 本田隆英, 佐藤慎司, 渡辺 晃, 磯部雅彦: 遡上域を含む混合粒径底質海浜の三次元海浜変形モデル, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.511-515, 2003.
- 4) 福濱方哉, 山本幸次, 宇多高明, 芹沢真澄, 石川仁憲: 混合粒径砂を用いた大型水路実験による縦断形変化の再現と予測, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.446-450, 2006.
- 5) 柿木哲哉, 辻本剛三: 画像解析を用いた混合粒径の浮遊砂粒度計測, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.376-380, 2005.
- 6) 柿木哲哉, 辻本剛三, 酒井大樹: 遡上域における底質の分級過程のリアルタイム計測, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 68, No.1, pp.521-525, 2009.
- 7) 宮武 誠, 阿部翔太, 木村克俊, 越智聖志: 底質粒径による飽和・不飽和浸透流が波打ち帯の漂砂移動に及ぼす影響, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69, No.2, I_076-I_080, 2013.
- 8) 越智聖志, 宮武 誠, 木村克俊: 段波の遡上に伴う前浜浸透流の流動特性, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 67, No.2, I_111-I_115, 2011.
- 9) 宮武 誠, 木村克俊, 越智聖志: 不飽和特性を考慮した前浜浸透流が波打ち帯の漂砂移動に及ぼす影響, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 68, No.2, I_086-I_090, 2012.
- 10) 柴山知也, Nguyen The Duy: 碎波帯内乱流モデルの波打ち帯 (Swash Zone) への拡張, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.451-455, 2005.
- 11) Tuner, I. L., Masselink G.: Swash infiltration-exfiltration and sediment transport, *J. Geophys. Res.*, Vol. 103, pp.30813-30824, 1998.

(2017.3.15 受付)

CHARACTERISTICS OF SEDIMENT TRANSPORT IN THE SWASH ZONE UNDER MIXED GRAIN SIZE

Makoto MIYATAKE, Ikumi NARITA, Katsutoshi KIMURA, Masashi OCHI,
Shinji SASSA and Hajime SHIROZU

The characteristics of sediment transport according to saturation of the sand slope under mixed grain size are investigated experimentally and numerically. The movement of fluorescent sands with different colors for each grain size are measured in solitary wave experiments. As the result, in the case of saturated condition, the sediment transport becomes larger constantly due to uplift force of the seepage flow. In particular, increasing of the fine sand components is significantly. This phenomenon leads to coarse granulation of bottom sediment and steepening of the foreshore gradient accelerates even further. A numerical approach of tractive force for respective grain sizes of sand mixtures is presented, that is quantified through a permeable Shields parameter. The results of prediction are in good qualitative agreement with those of experiments.