

平成 22 年 6 月 7 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760322
 研究課題名（和文） 沿岸漂砂の連続性と河口閉塞対策を両立する新しい漂砂制御技術の開発
 研究課題名（英文） Study on sedimentation-control system around the river mouth
 研究代表者
 田島 芳満（TAJIMA YOSHIMITSU）
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授
 研究者番号：20420242

研究成果の概要（和文）：本研究では河口部などの沿岸漂砂の遮断地点を対象に、砕波や河川流、潮汐流などの自然営力を有効活用しながら沿岸漂砂の連続性を維持し、かつ、出水時の排水効率を減退させない漂砂制御技術を開発することを最終目的とし、現地観測、室内実験、数値解析を通じて、このような浅瀬を有する波・流れ共存場における循環流場の生成メカニズムを解明し、このような現象を再現可能なモデルの構築を行った。

研究成果の概要（英文）：Ultimate goal of this study is to developed a sediment-control system that makes use of natural forces such as breaking and broken waves, currents and tides. In addition to field survey, this study performed laboratory experiments using artificial shoals and, coupled with numerical models, investigated physical mechanisms of development of circulation current behind the shoal.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：海岸工学

科研費の分科・細目：若手研究 B

キーワード：河口閉塞、浅瀬、砕波、循環流、漂砂制御

1. 研究開始当初の背景

中小河川河口部などの比較的小規模な沿岸漂砂の遮断地点を対象とし、砕波や河川流、潮汐流などの自然営力を有効活用しながら沿岸漂砂の連続性を維持し、かつ、出水時の排水効率を減退させない漂砂制御技術を開発することを最終目的とする。

海岸線に離岸堤や人工リーフを設置して海浜流場を制御し、背後域の堆砂を促進させる事例は多く、その最適設計に資するための研究も多くみられるが、河口域のように導流堤や河川流が沿岸海浜流と直角に交差する場で、波・流れ場を制御して沿岸漂砂の連続性の確保を試みる研究例は少ない。具体的に

は、従来一次的に扱われることが多かった河道内の漂砂移動を三次元的に捉え、砕波位置や河川流、潮汐流を制御することによって河道横断方向に非一様な漂砂量分布を作り出して漂砂制御を試みる。

このような新しい制御技術の設計・評価を行うためには、海浜循環流の鉛直構造も考慮した高精度数値モデルの構築が必要となる。そこで本研究では、馬込川における現地調査や室内実験を行い、新しい漂砂制御技術に関わる物理量の特性を把握し、かつ、データに基づきこのような高精度数値モデルの構築・開発を試みる。

2. 研究の目的

上記に示した浅瀬上での砕波を伴う岸向き質量輸送や、潜堤開口部に集中する強い戻り流れなどの様に、鉛直方向に水平流速が大きく変化する現象は、従来の鉛直積分型の平面2次元の海浜流モデルによる再現が困難である。

最近では時間発展型非線形分散波モデルを直接用いることによって、波と流れを同時に算定しようとする研究もなされているが、計算負荷の制約に加え、砕波減衰と海浜循環流の統一的な再現は難しく、実用化には至っていない(たとえば、田島ら、2006)。一方、鉛直積分型海浜流モデルの効率性を生かし、かつ、流れ場の鉛直方向分布を算定可能なモデルとして、準三次元海浜流モデルの開発も進められてきた。これらの中には、静水圧近似に基づき任意高さにおける水平流速を直接算定するもの(たとえば、黒岩ら、1997)もあるが、多くは水平流速の鉛直分布形をモデル化して運動方程式に代入し、さらに得られた式を鉛直積分して平面2次元の運動方程式に帰着させることによって計算負荷の低減を図ったもの(たとえば、岡安ら、1993; Svendsen・Putrevu、1994; Sanchezら、1992)である。

また平面2次元の海浜流モデルと同様に、これらのモデルの多くは海浜流の起因力として、波による Radiation 応力項を陽に組み込み、さらに砕波帯内で滑らかに変化する海浜流場を再現する目的で、経験的な係数に基づく水平拡散項を導入している。これに対して、Svendsen・Putrevu(1994)は、海浜流の鉛直方向分布を考慮することによって新たに生じる移流項成分が、平行等深浅海岸では、水平拡散応力項と同等の役割を果たしていることを示し、彼らのモデル(SHORECIRC)に導入している。しかしながら、この水平混合を規定する海浜流速の鉛直分布には、簡便な2次関数が用いられており、これらの応力項と整合していない。また断面2次元の戻り流れを再現する際に良く用いられる Surface Roller による影響が一部考慮されていない。

本研究では田島・Madsen(2005)の戻り流れモデルを任意の3次元地形条件に拡張し、経験的な定数を可能な限り排除したモデルの構築を試み、実験データへの適用を通じて、その妥当性を検証する。

3. 研究の方法

浅瀬上における質量輸送を伴う砕波とそれによる海浜流場の発達特性を観察することを目的とし、これらの現象に特に焦点をあて、他の現象を出来る限り単純化した条件として、図-1に示したような導波板に挟まれた領域の片側のみに潜堤を用いた条件で実験を実施した。この実験条件は、導波板の鏡境界とした沿岸方向に一定間隔で無限に潜堤が並べられた平行等深線海岸に、波を直入射させる条件と同等になる。

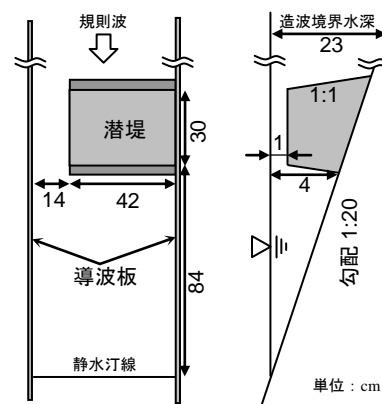


図-1 平面実験における地形条件

このような地形・構造物条件に対して、異なる実験ケースとして入射波の周期を変えながら、プラスチック球をトレーサーとして用いた PTV 法、電磁流速計、容量式波高計を用いて潜堤周辺および背後域における水位変動や流れ場を計測した。

次にここで観察された諸現象を再現可能な準三次元海浜流モデルの構築を試みた。

本研究で構築する準三次元海浜流モデルの概念を図-2に示す。図に示すように、本モデルでは水深を波谷高さで分割し、常時水中に位置する波谷から下の層(下層)において、水平方向流速の鉛直方向分布を次式で算定する。

$$\rho \nu_T \frac{\partial U_i}{\partial z} = \tau_{cs,i} = \tau_{cb,i} + \frac{\tau_{cs,i} - \tau_{cb,i}}{h_{tr}} z \quad (1)$$

ここで $U_i (i=1,2)$ は x_i 軸方向の流速成分、 ρ は流体の密度、 ν_T は渦動粘性係数である。式(1)より、水平せん断応力成分 $\tau_{cs,i}$ が定まれば、後述する ν_T を用いて水平流速成分 U_i の鉛直方向分布を算定することができる。また波谷高さから上の層(上層)における平均流速成分については、下層に比べて上層では厚さが小

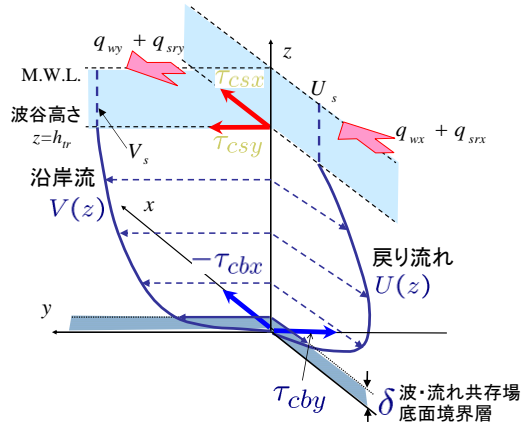


図-2 モデルの概念図

さく、流速の鉛直方向勾配に伴う流速値の変化が相対的に小さいと考えられることから式(1)から得られる波谷高さの流速($U_s=U(z=h_{tr})$, $V_s=V(z=h_{tr})$)で代表させて近似した。

次に、任意高さにおける水平せん断応力成分 $\tau_{cs,i}$ は、水平方向の運動方程式を自由水面から任意の高さまで積分し、周期平均をとることによって定義できる。しかし、海浜流に比べて波やSRによる応力が卓越的で、かつ、線形長波理論が適用可能な範囲内では、水平せん断応力は水深方向に線形に変化するため、本モデルでは、式(1)に示したように $\tau_{cs,i}$ を、波谷および底面における水平せん断応力成分 $\tau_{cs,i}$ および $\tau_{cb,i}$ の線形関数として近似した。この線形近似と後述する渦動粘性係数との組み合わせにより、水平方向流速成分の鉛直分布を解析解として表すことができ、計算効率が大幅に向上する。

運動方程式を自由水面から波谷高さまで積分して周期平均をとると、 $\tau_{cs,i}$ は次式で表すことができる。

$$\tau_{cs,i} = F_{shp,i} + F_{sw,i} + F_{sr,i} + F_{sc,i} + F_{swc,i} + F_{src,i} + F_{sv,i} \quad (2)$$

ここで式(2)の右辺の7項はそれぞれ、静水圧、波、SR、流れ(平均流)による応力項、さらに波と流れ、波とSRの干渉による応力項、そして、水平方向の渦動粘性応力項である。Svendsen・Putrevu(1994)のモデルには、第3、5、6項が考慮されていない。また、波およびSRによる応力項については、田島・Madsen(2005)と同様に、それぞれ波およびSRのエネルギーの関数として定義される。そのため、本モデルの入力値を算定する際に必要となる波およびSRの情報については、多くの場合は位相平均型のエネルギー平衡方程式を用いればよく、計算効率や汎用性の観点でも優れている。同様に $\tau_{cb,i}$ は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \tau_{cb,i} + \rho \frac{\partial q_i}{\partial t} &= F_{bhp,i} + F_{bw,i} + F_{sr,i} + F_{bc,i} \\ &+ F_{bwc,i} + F_{src,i} + F_{bv,i} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで右辺の応力項の寄与成分は式(2)と同様である。また左辺第二項 q_i は、全水深で積分した x_i 軸方向の平均流速成分による線流量の時間変化である。本研究で構築した数値モデルでは、ゆっくりと変動する平均流速成分による時間微分項を残し、後で整理する非定常計算を行うことによって定常解を算出した。式(2)および(3)における各応力項の詳細については、Tajima(2004)に記載されている。たとえば、式(3)における圧力項は平均水位 η を用いて次式で表される。

$$F_{bhp,i} = -\rho g(h + \eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (4)$$

次に渦動粘性係数については、田島・Madsen(2005)の戻り流れモデルと同様に、底面せん断応力と対数則に基づく渦動粘性係数と、砕波による乱れ、さらに、水深方向に線形に変化する水平せん断応力に伴うせん断速度の増減を加味した渦動粘性モデルを用いた。さらに、波と流れが共存する底面境界層内における底面せん断応力と平均流速成分の関係については、Madsen(1994)の底面境界層モデルに基づき、田島・Madsen(2005)と同様の方法で算定した。このモデルでは、波による底面軌道流速の振幅および周期、海浜流成分に対応する平均底面せん断応力、さらに、底質粒径に代表される底面での相当粗度が与えられれば、底面境界層厚 δ と境界層外縁($z=\delta$)における平均流速 U_δ が算定される。

以上の渦動粘性モデルおよび底面境界層モデルを式(1)に適用することにより、海浜流成分の鉛直分布が底面および波谷におけるせん断応力 τ_{csi} 、 τ_{cbi} の関数として定義される。一方、これらのせん断応力は式(2)および(3)を通じて海浜流成分の関数として求められるため、これらの式を連立すれば、流速およびせん断応力が算定できるように見える。しかしながら、式(3)では平均水位 η がまだ未知変数として残されており、さらにあと一組の条件式が必要となる。ここで、連続式を鉛直方向に積分し、周期平均をとると、波谷上における波およびSRによる質量輸送量成分、 (q_{wx}, q_{wy}) 、および、 (q_{srx}, q_{sry}) を用いて、連続式は次のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x} (q_x + q_{wx} + q_{srx}) \\ &- \frac{\partial}{\partial y} (q_y + q_{wy} + q_{sry}) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで q_x および q_y は平均流成分を全水深積

分して得られる平均線流量成分である。

田島・Madsen(2005)の戻り流れモデルでは、予め定常状態を仮定して、基礎式中の時間微分項を消去し、さらに、y 軸方向(沿岸方向)に全ての変数が一様であるという仮定の下、式(5)右辺の第二項を消去することによって、 q_x を既知の q_{wx} および q_{srx} から直接算定した。さらに得られた q_x を式(1)に代入すると τ_{cbx} が求められ、最後に式(3)に τ_{cbx} を代入することによってこれらの応力項と釣り合う平均水位の勾配が算定できた。一方、本研究ではモデルを任意の3次元地形条件に拡張するため、次項に整理する非定常解法を用いて、海浜流場を算定した。

4. 研究成果

準三次元場に拡張したモデルを潜堤背後における循環流場の再現計算に適用した。ここで、平面波浪場の計算では、潜堤周辺の急激な水深変化による反射波やそれによる部分重複波が重合する場におけるラディエーション応力や質量輸送量を推定する必要がある。そのため、ここではエネルギー平衡方程式の代わりに、渡辺・丸山(1984)の非定常緩勾配方程式を用い、砕波減衰項の算定には、既に同様の潜堤周辺における適用事例のある田島ら(2006)のモデルを用いた。さらに、任意の線形波が重合する場における Radiation 応力テンソルの算定には、田島ら(2009)にならう次式で、各地点におけるテンソルを数値的に算定した。

$$S'_{ij} = \frac{1}{2} \zeta^2 \delta_{ij} + \int_{-h}^0 u_i u_j - w^2 \delta_{ij} dz \quad (6)$$

また同様に、波による質量輸送量についても次式に基づき時々刻々の線流量 P_i および水位変動 ζ を用いて次式で算定した。

$$q_{wi} = \overline{\int_0^{\zeta} u_{si} dz} = \overline{P_i \zeta} \frac{k}{\tanh kh} \quad (7)$$

ここで u_{si} は平均水面における波による流速成分である。

また、SR については田島・Madsen(2005)と同じエネルギー平衡方程式に基づくが、生成項については非定常緩勾配方程式における時々刻々の砕波減衰項を導入し、さらに非定常項を付加することによって時々刻々の SR エネルギー E_{sr} を計算した。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial E_{sr}}{\partial t} + \frac{\partial E_{sr} C n_i}{\partial x_i} \\ &= -\frac{K_{sr}}{h} E_{sr} C + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(v_B \frac{\partial P_i}{\partial x_i} \right) P_i \end{aligned} \quad (8)$$

ここで n_i は単位波向ベクトルの x_i 軸方向成分、 K_{sr} はエネルギー減衰係数、 v_B は拡散型砕波減衰項の拡散係数である。このようにして算定

した砕波減衰波高、波および SR による質量輸送量を Cox・Kobayashi(1996)の実験データと比較した(図-3)。図に見られるように、SR による質量輸送量を考慮することにより、モデルは波による質量輸送のみでは説明できない砕波帯内での戻り流れ流量を妥当に再現できている。

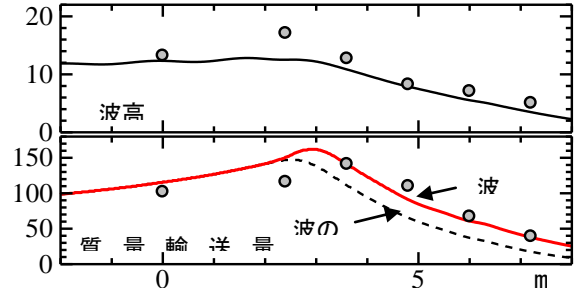


図-3 非定常緩勾配方程式による砕波減衰とそれに基づく SR の生成伝播過程の再現計算結果。

最後に、得られた波や SR による質量輸送量や応力項を入力値として、準三次元海浜流モデルに導入し、潜堤周辺における循環流の再現計算を実施した(図-4)。条件は入射波高 3cm、周期 0.8s を対象とした。このケースでは、潜堤の背後に循環流が形成されたが、田島ら(2006)の修正ブシネスク方程式に基づく再現計算において、最も再現性が低かったケースである。また比較のために、通常の平面二次元の海浜流モデルに非定常緩勾配方程式に基づくラディエーション応力を導入し、潜堤周辺における海浜流場を計算した結果

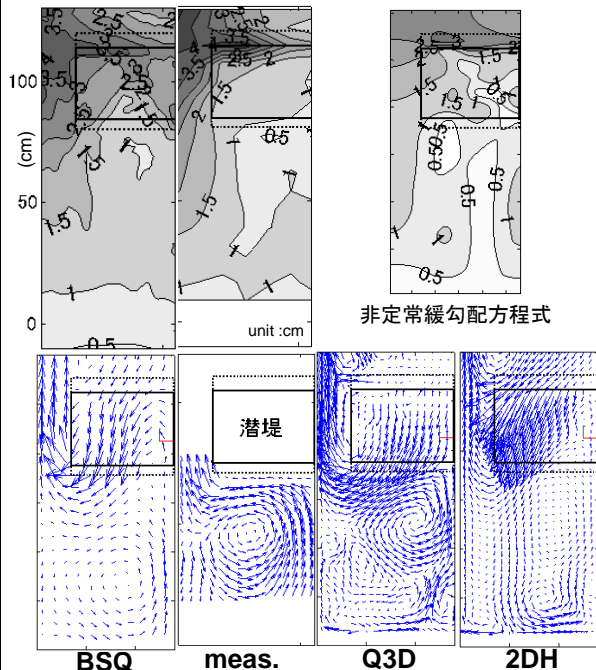


図-4 異なるモデルによる潜堤周辺での波高・海浜流の再現計算結果と実測値との比較。

を合わせて図示した。図に見られるように、全水深積分型の Boussinesq 方程式および平面 2 次元海浜流モデルに基づく計算結果では、いずれのケースにおいても、潜堤上での激しい砕波減衰に伴う強い岸向きの Radiation 応力により、潜堤上で強い岸向き流れが生じ、結果として潜堤背後における循環流が岸側に押し込まれている。

これに対し、準 3 次元海浜流による計算結果に着目すると、潜堤上で岸向きの流れが生じてはいるものの、その大きさは他の計算結果ほどではなく、結果として循環流が背後で形成されている。これは、実際には表層付近では波や SR による岸向きの質量輸送が生じており、下層における岸向流速がそれほど大きくなっても潜堤背後側には水が運ばれ、十分な水位上昇が起きていることによると考えられる。

以上より、田島・Madsen(2005)の戻り流れモデルを準 3 次元海浜流モデルへと拡張し、その妥当性を検証した。渦動粘性モデルに基づく鉛直方向の流速分布を考慮することにより、沿岸流の混合過程を妥当に再現し、また、波や SR による表層付近での質量輸送量を考慮することにより、潜堤背後で卓越する循環流場を妥当に再現できることが分かった。

5. 主な発表論文等

上記の主な研究成果に記載した、潜堤周辺における波・流れ場の詳細実験と、新たに構築した準 3 次元海浜流モデルの適用・再現については、2010 年 11 月に発行される土木学会論文集(海岸工学)に投稿・採択された。またこの実験に加え、断面二次元水槽に砂を敷き詰めて形成した移動床上に、サンドバッグを投入し、形成した浅瀬上を伝播する砕波およびそれに伴う浮遊砂の移動状況を、新たに改良した画像計測技術に基づき、高解像度・高頻度計測する実験研究も合わせて実施した。ここで得られたデータも、モデルの構築に用いられており、その成果についても 2010 年 11 月発行予定の土木学会論文集(海岸工学)に掲載予定(採択済み)である。

[雑誌論文] (計 2 件)

田島芳満：波および Surface Roller による質量輸送を考慮した準三次元海浜流モデルの構築、土木学会論文集(海岸工学)、B2-66、2010(採択済)。

富田沙希・田島芳満：サンドバッグによる海浜安定化機能の検証、土木学会論文集(海岸工学)、B2-66、2010(採択済)。

[学会発表] (計 2 件)

田島芳満：波および Surface Roller による質量輸送を考慮した準三次元海浜流モデル

の構築、第 57 回海岸工学講演会、2010 年 11 月。
富田沙希・田島芳満：サンドバッグによる海浜安定化機能の検証、第 57 回海岸工学講演会、2010 年 11 月。

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田島芳満 (TAJIMA YOSHIMITSU)

研究者番号：20420242

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし