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

Development of a Q3D Nearshore Current Model with Volume Fluxes due to Waves and Surface Rollers

田島芳満1

Yoshimitsu TAJIMA

This paper develops a quasi-three-dimensional neasrshore current model that accounts for volume fluxes due to waves and surface rollers. While the present model follows the concept of depth-integrated 2DH mass and momentum conservation equations, the model splits the water column at the wave trough level and has 2DH equations respectively in two layers. Decomposing velocity fields into multiple components due to different phenomena, such as waves, surface rollers and slowly varying mean current, and time-averaging over the wave period, the model expresses the influence of additional volume fluxes and momentum forces in explicit formulae. The model showed excellent predictive skills both in undertow and longshore currents on the long straight beach and more complex circulation currents behind the submerged breakwater.

1. はじめに

海岸法の改正とともに沿岸域では防護・利用・環境の バランスに配慮した管理・開発が求められるようにな り、海浜安定化工法においても没水型構造物による漂砂 制御技術や、養浜、サンドバイパスなど、多様な対策事 例が見られるようになった.しかしながら、これらの工 法では漂砂の移動機構がより複雑になる.例えば潜堤上 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;

1 正会員 Ph.D. 東京大学准教授 工学系研究科社会基盤 学専攻

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 (以下, SR) 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.

2. モデルの構築

(1) モデルの概要

本研究で構築する準三次元海浜流モデルの概念を図-1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.

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



図-1 モデルの概念図

度, v_T は渦動粘性係数である.式(1)より,水平せん断応力成分 $\tau_{c_{z,i}}$ が定まれば,後述する v_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,下層に比べて層の厚さが小さく,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($U_s = U(z = h_r), V_s = V(z = h_r)$)で代表させて近似した.

任意高さにおける水平せん断応力成分 τ_{exi} 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 τ_{exi} を,波谷および底面における水平せ ん断応力成分 τ_{exi} 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, τ_{cs},は次式で表すことができる.

$$\tau_{cs,i} = F_{shn,i} + F_{sv,i} + F_{sr,i} + F_{sv,i} + F_{sv,i} + F_{sv,i} + F_{sv,i} \cdots (2)$$

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.同様にして τ_{thi}は次式で表すことができる.

$$\begin{aligned} \tau_{cb,i} &+ \rho \frac{\partial q_i}{\partial t} \\ &= F_{bhp,i} + F_{bw,i} + F_{sr,i} + F_{bc,i} + F_{bwc,i} + F_{src,i} + F_{bv,i} \end{aligned}$$
(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)を参 照されたい.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.

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 = δ) における平均流速 U_s 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_{wy}) を用いて,連続式は次のように表される.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(q_x + q_{wx} + q_{srx} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(q_y + q_{wx} + q_{srx} \right) \quad \cdots (5)$$

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_{gxx} 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.

(2) 計算手順

田島・Madsen (2005)のモデルを準三次元海浜流場に 拡張した本モデルの数値計算方法を以下に整理する.

- a) 初期条件として, 平均水位 η, および平均流成分をゼ ロとする.
- b)式(3)における波およびSRによる応力項をゼロから時間経過とともに徐々に真値に漸近させながら、新しい時間ステップにおける線流量qxおよびqyを求める。
- c)得られた線流量を式(5)に代入し、新しい時間ステ ップにおける平均水位を算定する.



図-2 モデルおよび実験実測値(規則波)による,波高, setup, 戻り流れ,沿岸流の鉛直分布,断面平均沿岸流の比較



図-4 応力項を取捨選択した場合における断面平均沿岸流の比較 (規則波:1.波による応力項のみ;2.1+渦動粘性項;3. 1+SR;4.3+渦動粘性項;5.平均流による移流項以外の全 て;6.全て)

- d)得られた線流量を,式(1)を積分して得られる線流量に代入し,対応する底面せん断応力を算定する.
- e)新たに算定した平均水位ηおよび底面せん断応力を用いてb)に戻り、全ての応力項と底面せん断応力が釣り合うまで繰り返し計算を行う.

2. モデルの適用

(1) 平行等深線地形上の戻り流れおよび沿岸流

ここでは、モデルを平行等深線海岸に規則波および単 一方向不規則波をそれぞれ入射させた場合におけるモデ ルの適用性と、積分した運動方程式における各応力項の 役割について分析する.比較検証の対象には、USACEの 大型水槽(LSTF)において実施された、固定床一様勾配 斜面に規則波および不規則波を斜め入射させた場合の実 験データ(Hamilton・Ebersole, 2001)を用いた.LSTF では側方境界にポンプを設置し、水槽中央部でリアルタ イムで計測した沿岸流に合わせて、流入出させることに よって、平行等深線海岸における沿岸流場の再現を試み



図-3 モデルおよび実験実測値(不規則波)による,波高, setup, 戻り流れ,沿岸流の鉛直分布,断面平均沿岸流の比較



図-5 応力項を取捨選択した場合における断面平均沿岸流の比較 (不規則波:1.波による応力項のみ;2.1+渦動粘性項;3. 1+SR;4.3+渦動粘性項;5.平均流による移流項以外の全 て;6.全て)

ている.ここで,図-2および図-3には,規則波および不 規則波をそれぞれ入射させた場合における波高,setup, 戻り流れおよび沿岸流の鉛直方向分布,さらに,断面平 均沿岸流の実測値と本モデルによる計算結果とを比較し ている.また図-3の破線は,同じエネルギー平均波高の 規則波を入射させた場合の計算結果を表しており,田 島・Madsen (2005)によるエネルギー平衡方程式に基づ く波浪モデルが,準三次元海浜流モデルに妥当な入力値 を与えていることがわかる.

次に図-4および図-5には、同じ実験条件に対する再現 計算において、式(2)および(3)における応力項を取 捨選択した場合の、断面平均流速の計算結果を比較した. 図に見られるように、SRは沿岸流のピークを岸側に大き くシフトさせること、渦動粘性係数による影響は相対的 に小さいこと、また波と流れ、あるいはSRと流れの干 渉項が平均流速分布の再現結果に及ぼす影響(4から5へ の変化)は、Svendsen・Putrevu(1994)らが導入した流 れによる移流項による影響(5から6への変化)とほぼ同 等に重要であることがわかる.

図-6には、Visser (1991) による異なる粗度をもつ固 定床 (コンクリート床および礫床)を, 別々に用いた場 合における沿岸流の計測結果に対し、本モデルを適用し てその再現計算結果を比較した.既に述べたように,本 モデルでは、渦動粘性モデルと底面境界層モデルに基づ き、任意の粗度が与えられれば、経験係数を用いること なく底面せん断応力および相応する流れ場の予測が可能 である.再現計算では、粗度の違いによる沿岸流予測計 算結果の感度を確認する目的で、それぞれの固定床で想 定される粗度の周辺で値を変えた場合の計算結果を比較 している.図に見られるように、たとえば粗度が0.5mm から5mmへと10倍のオーダーで変化すると、計算され たピーク沿岸流が半分程度まで低減しているのがわか る.一方,倍半分程度の粗度の違いであれば、流速の計 算結果に及ぼす影響は比較的小さく、想定される粗度の オーダーが正しく把握できていれば、本モデルによって 沿岸流速を妥当に再現可能であることが分かった.

(2) 潜堤背後における循環流場への適用

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する.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Radiation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 に同様の潜堤周辺での適用性が確かめられた田島ら (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



図-6 粗度の異なる固定床上における断面平均流速の実測値 (Visser, 1991;白丸はコンクリート床,黒丸は礫床)と 予測値との比較.

ら(2009)と同様に次式を用いて数値的に算定した.

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および水位変動を*用いて次式で算定した.

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_wを計算した.

$$\frac{\partial E_{sr}}{\partial t} + \frac{\partial E_{sr} C n_i}{\partial x_i} = -\frac{K_{sr}}{h} E_{sr} C + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu_B \frac{\partial P_i}{\partial x_i} \right) P_i \dots (8)$$

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-7).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.

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-8).条件 は田島ら(2006)の実験ケース2(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



図-7 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.

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(図中のBSQ)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Radiation応力を導入し、潜堤周辺における海浜流 場を計算した結果を合わせて示した(図中の2DH).た だし計算結果は全て断面平均流速であり、縦軸の基点は 静水時の汀線位置である.図より、Boussinesq方程式お よび平面2次元海浜流モデルでは、潜堤上での激しい砕 波減衰に伴う強い岸向きのRadiation応力によって潜堤上 で強い岸向き流れが生じ、結果として潜堤背後における 循環流が過剰に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くても潜堤背後 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.

3.おわりに

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.

本研究は科研費(若手研究(B),課題番号20760322, 研究代表者:田島芳満)の助成を受けました.記して深 甚なる謝意を表します.

参考文献

岡安章夫・瀬尾貴之・柴山知也(1993):砕波による運動量を 考慮した海浜流の準三次元数値モデル,海工論文集,第 40巻, pp.251-255.



図-8 異なるモデル (BSQ, Q3D, 2DH) 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.

- 黒岩正光・野田英明・芳地康征 (1997) : 準3次元海浜流場の 数値シミュレーションに関する研究,海工論文集,第44 巻, pp.151-155.
- 田島芳満・石指裕章・佐藤愼司(2009):沿岸域地形急変部周辺 における長周期変動を伴う波・流れ場の局所集中機構,土 木学会論文集(海岸工学), B2-65, pp.211-215.
- 田島芳満・佐藤愼司・鈴木淳也・下園武範・磯部雅彦(2006): 潜堤周辺の砕波・乱流特性を考慮した海浜流場予測モデル に関する一考察,海工論文集,第53巻, pp.106-110.
- 田島芳満・Madsen, O.S. (2005): Surface Rollerによる影響を 考慮した戻り流れの鉛直分布のモデリング,土木学会論 文集, No.803/II-73, pp.133-144.
- 渡辺 晃・丸山康樹 (1984):屈折・回折・砕波減衰を含む波浪 場の数値解析法,第31回海工論文集, pp.103-107.
- Cox, D.T. and N. Kobayashi (1996): Undertow profiles in the bottom boundary layer under breaking waves, Proc. 25th Int. Conf. on Coast. Eng., pp.3194-3206.
- Hamilton, D. G. and Ebersole, B. A. (2001): Establishing uniform longshore currents in a large-scale laboratory facility, Coastal Eng., 42, pp.199-218.
- Madsen, O. S. (1994): Spectral wave-current bottom boundary layer flows, Proc. 24th Int. Conf. on Coast. Eng., pp.384-398.
- Putrevu, U., and Svendsen, I. A. (1992). "A mixing mechanism in the nearshore region." Proc. 23rd Int. Conf. on Coast. Eng., ASCE, Reston, Va., 2758-2771
- Sanchez-Arcilla, A., Collado, F., and A. Rodriguez (1992): Vertically varying velocity field in Q-3D nearshore circulation, Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng. pp.2811-2824.
- Svendsen, I.A. and U. Putrevu (1994): Nearshore mixing and dispersion, Proc. Math. and Phys. Sciences, vol.445, pp.561-576.
- Tajima, Y. (2004) : Waves, currents, and sediment transport in the surf zone along long, straight beaches, Doctoral thesis in Massachusetts Institute of Technology, 313p.
- Visser P. J. (1991): Laboratory measurements of uniform longshore currents, Coast. Eng., 15, pp.563-593.