強風・高波浪時の海浜流底面流速場および広域漂砂量の 平面分布の推算式

馬場 康之*・山下 隆男**・Abbas Yeqaneh-Bakhtiary***・五歩一隆重****

本研究は、強風・高波浪来襲時の荒天時に発達する広域海浜流の流速場、および汀線付近での冲向き漂砂、砕波帯外での沿岸漂砂を考慮した広域漂砂系を表現する推算式を、冬季日本海沿岸で実施された現地観測結果に基づく経験式として検討したものである。広域海浜流場について、砕波帯近傍で観測される冲向き流れは、波浪条件に依存した波高・水深比の関数として表現し、沿岸方向の流速は、海上風速および白波砕波によるせん断力より推算できる式とした。これら流速分布より得られる広域海浜流場および波浪場の平面分布から、Baillard モデルを適用して広域漂砂を再現できるモデルの作成、ならびに N-line 海浜変形モデルへの適用時のシステム構成について検討した。

1. 緒 言

冬季日本海沿岸における現地観測により、強風・高波浪来襲時には海上風に対応した沿岸方向の流動場が広範囲に形成されること、および高波浪の来襲より砕波帯近傍ではトラフレベル以下において強い冲向きの流れが発生することが指摘されている(山下ら, 1998)。これら荒天時に形成される流動場は、短時間ではあっても非常に強い物質輸送をもたらすため、沿岸海域環境へのインパクトは大きく、特に荒天時に海岸地形が急激に侵食される現象の主要因である。

強風・高波浪来襲時の海浜変形予測を行う上においては、海上風の影響を受けて発達する吹送流場としての沿岸方向流動に伴う広域漂砂系と、高波浪の来襲により発生する冲向き漂砂に起因する侵食機構を同時に考慮することが大切である。特に、長期・中期海浜変形予測の場合には、海上風と波浪の条件より、砕波帯での沖方向漂砂、砕波帯外での沿岸方向漂砂を考慮した広域漂砂系を再現することが重要であり、広域漂砂量の推算式へのニーズは高いと考えられる。

本研究では、強風・高波浪来襲時の海浜流底面流速場および広域漂砂量の平面分布を推算する経験式について、以下の方法により検討した。まず、冬季日本海において実施された波浪場、広域海浜流場の観測結果より、荒天時に砕波帯とその近傍で発生する冲向き流れ(底引き流れ)と海上風による吹送流(沿岸流)のそれぞれに対する広域海浜流の底面流速場の定式化を行う。次に、沿岸、岸沖方向の流速分布式から広域海浜流の空間分布を求め、これと波浪場の条件(波高, 周期, 波向きの分布)から広域漂砂系を再現するモデルを作成する。さらに、得られた広域漂砂系モデルを n-line 海浜変形モデルに適用する場合のシステム構成についても検討する。

2. 広域海浜流場の定式化

1998 年 12 月初旬から 1999 年 3 月初旬にかけて、上越海岸から大湊海岸の海域を対象に行われた現地観測は、観測範囲が沿岸方向に約 10 km, 岸沖方向に約 3 km におよぶ広範囲において、5 測線 13 測点での観測が実施された(図-1)。観測結果より、強風・高波浪来襲時には、砕波帯内において強い冲向き流れの発生、沿岸方向に関しては海上風の影響を強く受け、その影響は砕波帯近傍から沖までの広い範囲に及んでいることが明らかとなった(馬場, 2000)。以下に、沿岸、岸沖方向それぞれについて、荒天時の海底面近傍での流速場の定式化を行った。

2.1 岸沖方向成分

荒天時における冲向き流れの発生は、砕波帯内の計測点のみに限られており、その流速は有義波高、海上風の岸向き成分と強い相関を持つことが明らかとなっている。図-2 は、水深 10 m 以浅の測点で計測された海底面近傍の冲向き流速と波高・水深比 (H/h) の関係を示したものである。なお、ここでは荒天時を対象としているため、風速 8 m/s 以下のデータは除いている。図-2 において、測線 II, III, IV に位置する測点 4~8 については、冲向き流速が波高・水深比の増大に応じて増加する傾向が見られ、ある大きさ以上の波高・水深比において強い冲向き流れが発生していることが確認できる。特に、測点 7, 8 では、非常に強い冲向き流れが発生している。逆に、測線 V に位置する測点 12 では、流速と波高・水深比の関連が弱く、冲向き流速の発達の度合いも少ない。この冲向き流速の波浪応答特性の相違については、測線 II ~ IV にかけては、潜堤などの海岸構造物により保護されている海岸であるのに対し、測線 V は海岸構造物の設置されていない自然海浜であることに起因するものと考えている。また、測線 IV においては、離岸流が強調されている位置であると思われる(測線 IV では、地形の影響によると考えられる離岸流が目視で観測されている)。このように、砕波帯とその近傍での海底面における沖方向の流れの発生には、明確な沿岸方向変化特性が存在してお

* 正 会 員 博(工) 京都大学助手 防災研究所

** 正 会 員 博(工) 京都大学助教授 防災研究所

*** 博(工) 西オーストラリア大学研究員

**** 学生会員 京都大学大学院

図-1 現地観測実施地点

図-2 沖向き流速と波高・水深比の関係

り、その変化特性は海岸構造物の有無、離岸流の発生機構により規定されているものと思われる。

図-3は、無次元化された沖向き流速と波高・水深比の関係を示したものである。本研究では、観測結果より沖向き流れの発生範囲が荒天時の碎波帯内に限られていることから、沖向き流れの発生を規定する代表水深 (h_b) を 10 m とし、流速の無次元化を行った。図より、無次元流速は、ある波高・水深比の閾値 ($\gamma_{\min}$) を超えると、波高・水深比の指数関数として増加していることがわかる。最大の波高・水深比 ($\gamma_{\max}$) は完全碎波状態に対応し

図-3 無次元流速と波高・水深比の関係

ていると考えられ、($\gamma_{\min} \sim \gamma_{\max}$) の範囲内では沖向き流速は H/h により表現されると仮定した。これらの関係より推算式 (1)～(4) を得た。

$$V = \left[\sqrt{gh_b} \cdot \exp \left\{ V_{\min}^* + A(x) \cdot B(y) \cdot \left(\frac{H}{h} - \gamma_{\min} \right) \right\} \right] \cdot C(y) \quad (1)$$

$$A(x) = a + b \cdot \cos \left(\frac{2\pi x}{L_c} \right) \quad (2)$$

$$B(y) = \left[1 - \tanh \left\{ c \cdot \left(\frac{y}{y_b} - 1 \right) \right\} \right] \quad (3)$$

$$C(y) = \frac{1}{2} \left[1 - \tanh \left(\frac{y}{d} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

ここで、式 (2) の $A(x)$ ($a=5.3$ and $b=1.3$) は、碎波帯およびその近傍での海底面付近における沖方向流速の沿岸方向分布特性を考慮するための関数である。自然海浜における離岸流間隔、トラフ地形の間隔 L_c を波長と

図-4 計算対象地形

図-5 流速および波高・水深比の比較

する正弦関数で強弱が表現できるとすれば、式(2)のようになる。式(3) $B(y)$, $c=1.8$ は無次元流速と波高・水深比の関係を最もよく表現する沖向き流速の岸沖分布、式(4)の $C(y)$ は十分沖では沖向き流速がゼロに漸近することを示している。ここで得られた岸沖分布を規定する関数 $B(y)$, $C(y)$ には、沖側境界でゼロに漸近する条件が入っているが、岸での境界条件は考慮していない。実際には、swash zone でのモデルと接合して遡上点で流速がゼロになるような定式化が必要であるが、現時点では岸側境界水深 3m を仮定して、これより沖方向の定式化を行っている。

図-6 広域海浜流の平面分布

2.2 沿岸方向成分

沿岸方向流速成分については、観測結果の解析より海上風の影響が大きいことが明らかとなっている。海上風の風速値より沿岸流の流速値を推測する際に、従来のバルク公式（流速が風速の2乗に比例する）を用いた場合には、通常よりもかなり大きな海面摩擦係数 C_D が必要であることが指摘されている（馬場ら, 2000）。これは、海上風の影響のみならず、波浪の影響も考慮する必要があることを示唆するものであり、本研究では海上風によるせん断応力に白波砕波せん断応力を加えた形で定式化された流速分布式を用いた（山下ら, 2001）。

$$U = \sqrt{\frac{\tau_s}{\rho f(h)}} + U_{br} \left(\frac{y}{y_{br}} \right) \cdot u_0 \dots \dots \dots (5)$$

$$\tau_s = \rho_a C_D W^2 + \rho A B g H \sin \theta \dots \dots \dots (6)$$

この式は、水平2次元・定常状態を仮定して求められたものである。現地観測結果との比較から、強風の吹き始めに対応する流速をよく表現できることが確認されており、この式により荒天時に発生する流動の概略を把握す

図-7 広域漂砂の平面分布

ることができる。しかしながら、強風の吹送時間と流速変化との関係に関して、検討の余地を残している。

2.3 広域海浜流の平面分布

以上の岸沖・沿岸方向流速の推算式 (式 (1), (5)) を図-4 に示すモデル地形に適用した。このモデル地形は、現地観測が実施された大湊海岸を模式化した地形であり、トラフとバーが繰り返す特徴を模擬している。図-5 は、上記モデル地形に沖波条件として、有義波高 5 m、周期 8 s の波が作用した場合の流速ベクトル図、および有義波高 2 m、5 m の場合のモデル地形内のトラフとバーの部分 (Line A&B) における流速と波高・水深比の岸沖分布を示したものである。この外力条件下では、海上風の影響はほとんどなく (風速 1 m/s)、水深に規定される砕波により発生する沖向きの流れが、トラフ部分で強く、バーにおいては弱い結果となっている。これは、現地においてトラフに位置すると考えられる測点 7、8 (測線IV) における流速の大きいことと対応しており、沿

岸方向の地形の変化が、沖向き流れの発生に影響していることがわかる。

図-6 は、有義波高 5 m の沖波条件で、汀線に対して 2 度の波向を与えた場合の広域海浜流場の計算結果である。海上風の条件は 10 m/s であり、波向との関係により汀線近くの沖向き流れの流向に違いが生じている。波向と風向が同じ場合は、沖向き流れも風下側へ向く傾向が強いが、波向と風向が逆の場合には、沖向き流れはほぼ汀線に直角となり、流速もやや小さくなる。

3. 広域漂砂系モデル

ここでは、前述した広域海浜流場と波浪の条件から、Bailard モデル (1981) を漂砂モデルとして使用し、広域漂砂量分布の推算を行う。Bailard モデルは、Bagnold のパワーモデルを基本としており、底面流速を用いて掃流砂と浮遊砂の和として漂砂量を算出するモデルである (式 (7))。

$$\langle \vec{u}_i \rangle = \rho C_f \frac{\epsilon_B}{\tan \phi} \left[\langle |\vec{u}_i|^2 \vec{u}_i \rangle - \frac{\tan \beta}{\tan \phi} \langle |\vec{u}_i|^3 \rangle \hat{i} \right] \\ \rho C_f \frac{\epsilon_S}{W} \left[\langle |\vec{u}_i|^3 \vec{u}_i \rangle - \frac{\epsilon_S}{W} \tan \beta \langle |\vec{u}_i|^5 \rangle \hat{i} \right] \dots \dots (7)$$

ここに、 ϕ : 水中内部摩擦角、 $\tan \beta$: 海底勾配、 W : 沈降速度、 ϵ_B : 掃流砂の係数 (=0.025)、 ϵ_S : 浮遊砂の係数 (=0.21) である。このモデルでは、水粒子速度の時間変動を用いて漂砂量を算出することができるので、流れの効果などを取り込むことができ、波浪流速場の非対称性による岸方向漂砂、高波浪時の砕波帯での沖方向漂砂、吹送流および波浪流による沿岸方向漂砂を考慮した漂砂量が算定できる。

図-7 は、図-5 において計算された波浪場、流速場の結果から、算出された漂砂量ベクトルである。流速ベクトルに対応した漂砂系が計算されており、汀線付近では沖向き流れに対応した沖向き漂砂、沖向き漂砂が弱まった沖側では沿岸方向の漂砂が確認できる。波向と風向が逆の場合には、沿岸方向の漂砂が見られなくなっているものの、荒天時の海浜変形予測に重要となる汀線近くでの沖向き漂砂による侵食機構と、沖側の沿岸漂砂の機構を考慮できている。

本研究により得られた漂砂モデルは、波浪場と流速場の算定のために、海上風と波浪条件を入力することで、広域の漂砂系を推算することができる。次に、この広域漂砂系モデルの、N-line 海浜変形モデル (Hansen et al., 2000) への適用について考察する。N-line モデルでは、岸沖、沿岸方向ともに、砕波点における波高から全体の漂砂量を算出した後、平衡海浜断面の仮定を用いた slope function、および vertical distribution function により各水深における漂砂量を算出している (式 (8))、

(9)).

$$q_{xi,j} = \zeta_{xi,j} Q_{yi,j} \text{ (Longshore) } \dots\dots\dots (8)$$

$$q_{yi,j} = \zeta_{yi,j} \xi_{yi,j} Q_{yi,j} \text{ (Cross-shore) } \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 Q_x , Q_y : 沿岸、岸沖方向の全漂砂量, ζ_x , ζ_y : 水深に規定される漂砂量の分布関数 (vertical distribution function), ξ_y : 平衡海浜断面に対する勾配の大きさを示す関数 (slope function) である。

このようにして算定された漂砂量は、砕波点の波高から算出されており、主に砕波帯近傍のみを対象とすることになる。しかしながら、現地観測結果より砕波帯沖側での強い流動、ひいては沿岸方向の広域漂砂機構を考慮する必要性が指摘されている。そこで、漂砂量推定の部分に本研究で得られた漂砂モデルを適用することにより、波浪・海上風の影響により計算された流動場の平面分布から砕波帯内外を含めた広域における漂砂量を算出することができるようになる。本研究の漂砂モデルの使用には、対象海域における流速場、波浪場の条件を要するため、入力条件としては、海上風速・風向 (代表値) および来襲波浪 (波高, 波向, 周期) の時間変化、底質の特性が必要であり、平面的な波浪場の条件を得るための波浪変形計算が同時に必要となる。

本研究で得られた漂砂モデルを適用することにより、岸沖漂砂において平衡海浜断面の仮定が不要となること、さらに平面的な波浪場、流速場から漂砂量が推定される。従って、砕波帯内外を含めた広域漂砂系を推算することができ、海底地形変化予測を通じて、N-line モデルの適用性の検討を行っている。

4. 結 言

本研究では、冬季日本海沿岸で行われた現地観測結果に基づき、荒天時に発達する広域海浜流の流速場を、岸沖・沿岸の両方向について、波浪および海上風の影響を考慮した形の経験式を求めた。また、海水流動に伴う広域漂砂についても、掃流砂、浮遊砂の和として漂砂量を算定する Bailard モデルを用いて、経験式より得られた流速変動から、その平面分布を推定した。得られた主な結果は次のようである。

(1) 荒天時に発生する沖向き流れは、来襲する高波浪の波高・水深比の増大に応じて、その流速が増加する

傾向を持つことが認められた。本研究では、現地観測結果に対応する沖向き流速の岸沖分布式を経験的に求めるとともに、沿岸方向の地形変化の影響などを考慮できる定式化を行った。

(2) 沿岸方向流速については、海上風速に基づくせん断応力と白波砕波せん断応力を合わせた形のせん断応力から推算しており、波浪の存在により流速場が強化される状況が再現できるようにした。この定式化では、強風の吹き始めに対応する流速値が得られ、荒天時に発生する沿岸方向の流動場を概ね表現していると考えられるが、強風の連続により実際の流速が徐々に増加する状況など考慮の余地を残している。

(3) 波浪場、流速場の条件より、Bailard モデルを用いて、荒天時における広域漂砂の平面分布の推定を行った。汀線近くの沖向き漂砂と砕波帯沖側での沿岸漂砂の発生を再現することができ、砕波帯を含めた広域での漂砂を取り扱うことができた。この漂砂モデルを海浜変形モデル (N-line モデル) に適用することにより、沿岸、岸沖方向の漂砂量分布を仮定することなく、波浪・海上風を入力として広域漂砂量から海浜変形量を予測することができる。

なお、本研究は京都大学防災研究所特定共同研究 12 P-1 (代表者: 今本博健) および科学研究費補助金 (奨励研究 A, 課題番号: 13750488) の補助を受けた。

参 考 文 献

- 馬場康之 (2000): 湾域の潮流場および外海に面した沿岸域の海水流動に関する研究, 京都大学学位論文, pp. 50-81.
- 馬場康之・今本博健・山下隆男・加藤 茂 (2000): 浅海域における風域場と吹送流場の時間応答特性について—波崎海岸における共同観測結果より—, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 446-450.
- 山下隆男・加藤 茂・木原直人 (2001): 広域海浜流, 広域漂砂の岸沖分布, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 656-660.
- 山下隆男・加藤 茂・路 明・安田孝志・飯野智彦 (1998): ADCP により長期連続観測した海浜流の鉛直分布とその強風、波浪応答特性, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 201-205.
- Bailard, J. A. and D. L. Inman (1981): An energetic bedload transport model for plane sloping beach; local transport, J. Geophys. Res., 86., pp. 2035-2043.
- Hanson, H. and Larson, M. (2000): Simulating Coastal Evolution Using a New Type of N-line Model, Proc. 27 th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 2808-2821.