

波高と潮位の出現頻度を考慮した沿岸掃流漂砂量の鉛直分布関数の算定

Depth Distribution of Longshore Bedload Transport in Consideration of Occurrence Rate of Wave and Tide

中村聡志¹

Satoshi NAKAMURA

Depth distribution of expected longshore bedload transport was shown by easy function of beach slope and wave parameter at the wave breaking point. It was calculated from the bedload transport based on physical calculation of regular wave and flow, by the probability operation using the occurrence rate of wave height and tide level. Moreover, the variances of the depth distribution of longshore bedload transport by tidal range, mean wave height, wave period and wave direction were shown. For use of actual prediction, it is necessary to use the depth distribution after consideration of the seasonal or monthly occurrence rate of wave height and wave direction.

1. はじめに

我が国で全国的に生じている海岸侵食の問題は、沿岸域に造られた構造物によって沿岸漂砂の連続性が絶たれたことによる漂砂下手側の侵食や、河川からの流出土砂の減少による河口周辺の侵食など、沿岸漂砂量の場所的不均衡によって生じるものであり、侵食速度は緩やかではあるが、長期的に確実に侵食が進んでいくものである。こうした侵食問題に対して、より確からしい海浜変形の長期的な変化予測を行うことは、工学的に重要な課題である。実務で多く用いられる海岸地形の長期的変化予測の手法としては、汀線の岸沖移動で地形変化を代表させた汀線変化モデルや、汀線変化モデルを拡張し、沿岸漂砂量の水深分布と複数の等深線の岸沖移動によって縦断面形状の変化を表現する等深線変化モデルがある。等深線変化モデルを用いた地形変化計算は、短時間で海浜の縦断面形状の変化を予測できる利点を有するが、沿岸漂砂量の水深分布関数の設定に際して、移動床水理模型実験や現地観測による地形変化結果を用いた経験的水深分布を求める必要がある。こうした沿岸漂砂量の経験的水深分布関数は、限られた実験条件や海浜条件のもとで得られた分布形であるため、汎用的に用いることは注意を要する。さまざまな海浜形状や海象条件において用いることができる沿岸漂砂量の水深分布関数、および、沿岸漂砂量の水深分布形を算定する手法についての研究は少なく、実務においてもこうした成果が必要とされている。そこで、本研究では、規則波による波と流れ、掃流漂砂の平面 2 次元計算から得られる沿岸掃流漂砂量の岸沖分

布をもとに、波高の出現確率分布および潮位の出現確率分布を用いて積分計算を行うことにより、長期地形変化計算に用いることのできる期待沿岸掃流漂砂量の水深分布を算定する。

2. 研究の内容

(1) 規則波による沿岸掃流漂砂量分布の算定

さまざまな海浜形状や海象条件のもとでの沿岸掃流漂砂量分布の算定に対応するため、中村 (2006) と同様に、波と流れの平面 2 次元計算による底面せん断応力分布を求め、局所掃流漂砂量式によって、沿岸掃流漂砂量分布を求めることとした。これによって、現地深浅データ等の解析によらず、波の変形と海浜流などの力学計算から沿岸掃流漂砂量の分布を算定でき、また、養浜後の人工地形や沿岸砂洲を有する地形などの海浜においても算定が可能である。ただし、本論文では、海浜地形を無限に続く平行等深線一様勾配斜面に単純化して計算を行う。

波と流れの平面 2 次元計算では、碎波減衰と流れの場を考慮した非定常緩勾配方程式を用いて海浜に斜め入射する規則波の伝播を求め、波の一周期ごとに計算されるラジエーション応力の空間勾配を起流力として、非線形長波方程式を用いて海浜流を計算した。波の計算の中で碎波減衰については、波高水深比の碎波限界値を超える波の変位に対して、その超過量に応じて水表面ポテンシャルを減じる計算を行った。波高水深比の碎波限界値 γ_b については、局所的な水深波長比 kd_b を用いた Miche 型の碎波限界式に、Goda (1975) の底面勾配 $\tan \beta$ の影響を付加した次式を用いた。

$$\gamma_b = \frac{H_b}{d_b} = \gamma_0 (1 + 15 \tan^{4/3} \beta) \frac{\tan h(kd_b)}{kd_b},$$
$$\gamma_0 = 0.80 \dots \dots \dots (1)$$

流れの計算では、波による水位上昇と平均汀線の移動を考慮した海浜流の計算を行った。掃流漂砂量の計算では、定常状態に達した海浜流と水面ポテンシャルを微小振幅波理論を用いて底面での流速に換算した振動流とを合成した流れの瞬時値から底面せん断応力を求め、それによって生じる局所掃流漂砂量を一波当たりで平均した。底面せん断応力の瞬時値による局所掃流漂砂量は、佐藤・Kabiling (1994) の掃流漂砂量式を準用し、掃流漂砂係数は、Watanabe (1992) による総漂砂量係数との対比から、値を 47 とした。また、底質は粒径 0.2 mm の砂質を想定し、移動限界シルズ数を 0.01 とした。数値計算は、沿岸方向 1 km、岸沖方向 1 km、格子間隔 5 m、沿岸方向の境界は連続繰り返し境界、沖側の境界は消波境界、沖側の最大水深 12 m の計算領域で行った。

図-1 は、斜面勾配 1/60 の海浜に、沖波波高 $H=0.5$ m ~ 3.0 m までの波 (波の周期 9 s, 沖波入射角 10.1°) を入射させた場合の沿岸掃流漂砂量の水深分布である。縦軸は地盤高 Z で陸上が正值、横軸が沿岸掃流漂砂量 q_{by} である。入射波の波高の増加とともに沿岸掃流漂砂量が増加し、その水深分布形状は相似的に拡大している。図-2 は、斜面勾配 1/60 の海浜に、沖波波高 $H=1.0$ m の波 (波の周期 9 s, 沖波入射角 10.1°) の条件で潮位 $L=0$ m ~ 3 m で変化させた場合の沿岸掃流漂砂量の水深分布である。一様勾配斜面上では、潮位に対する沿岸掃流漂砂量の水深分布形状の変化は小さく、潮位に伴ってその発生位置が上下に移動する。同様に、周期と入射角の変化に対する沿岸掃流漂砂量、斜面勾配が異なる海浜での沿岸掃流漂砂量についても条件を変えて計算を行った。

次に、一様勾配斜面上における規則波による沿岸掃流漂砂の水深分布の一般化を行った。鉛直地盤高 Z については、潮位 L と碎波水深 h_b を用いて、 $(Z-L)/h_b$ の無次元化を行い、沿岸掃流漂砂量については、式 (2) で表される碎波開始位置での沿岸掃流漂砂量 q^* を用いて無次元化を行った。

$$q^* = \frac{K}{s-1} \frac{\gamma_b}{4} \tan \beta H_b \sqrt{gh_b} \cos \alpha_b \sin \alpha_b \cdots (2)$$

ただし、係数 $K=0.77$ 、底質の比重 $s=2.65$ 、 g は重力加速度、 γ_b は碎波開始位置での波高水深比、 H_b は碎波開始位置での波高、 h_b は碎波開始位置での水深、 α_b は碎波開始位置での海岸に対する波向を表す。なお、 H_b 、 h_b 、 α_b については、沖波の条件 (H_0 , T , α_0) と斜面勾配を用いて有限振幅波と碎波限界条件、Snell の法則から計算する。

図-3 に無次元表示した沿岸掃流漂砂量の水深分布を示す。波高・潮位の違いによらず、一様勾配斜面での規

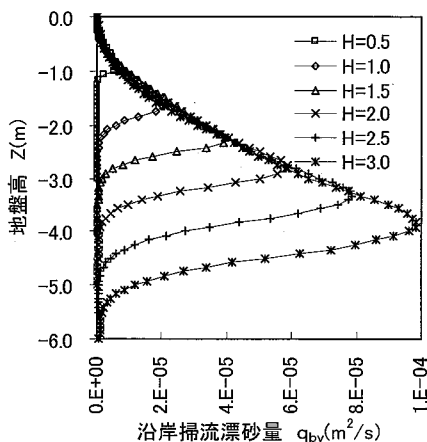


図-1 入射波高による沿岸掃流漂砂量水深分布の変化

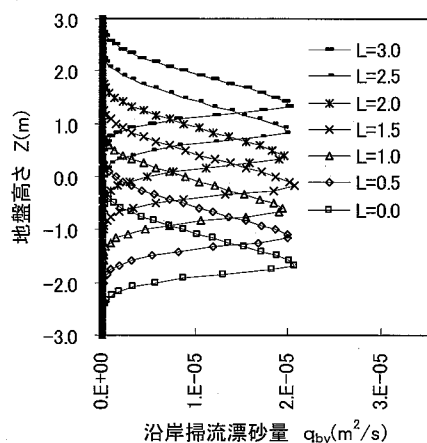


図-2 潮位変化による沿岸掃流漂砂量水深分布の変化

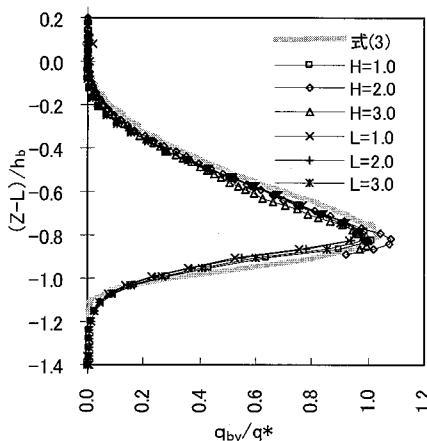


図-3 無次元化された沿岸掃流漂砂量の水深分布

則波に対する沿岸掃流漂砂量の水深分布が一つの分布形で表されることがわかる。波向の違いに対しては同様の分布形で表されるが、周期の違いに対しては、周期が長いほど上下対称な分布に近づくこと、斜面勾配の違いに対しては、勾配が急であるほど上下対称な分布に近づくことが分かった。

次に、次節での確率積分演算のために、無次元表示した沿岸掃流漂砂量の水深分布に対して関数形のあてはめを行った。沿岸掃流漂砂量の分布形は、式(3)の関数形で近似される。図-3中に式(3)を重ねて示す。

$$q_{by}(x) = q^* \cdot 2x^2 \exp(-2x^{10}) \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 $x = (Z-L)/h_b$ 、 Z は地盤高さ(m)。

さまざまな条件で沿岸掃流漂砂量の計算を行い、波高・周期・波向・潮位階級別の沿岸掃流漂砂量の水深分布が数表として得られていれば、波高・周期・波向の出現確率、潮位の出現確率を用いて重み付き合計を行うことによって、波高と潮位の変動を考慮した期待沿岸掃流漂砂量の水深分布を求めることは可能であるが、式(3)によって、期待沿岸掃流漂砂量を簡便に求めることができる。

(2) 期待沿岸掃流漂砂量の水深分布の算定

長期地形変化計算に用いるための沿岸掃流漂砂量の水深分布を求めるためには、波の不規則性(波高と周期、波向の出現確率密度)と潮位変化(潮位の出現確率密度)、波の季節変化、波候の年変動などの変動特性を考慮した期待値を算定する必要がある。本論文では、沖波波高の出現確率密度と潮位の出現確率密度を考慮した期待値算定を行う。沖波の周期と波向についての変動特性は考慮せず、ある周期とある波向の波が来襲した場合の期待沿岸掃流漂砂量を求める。

沖波波高の出現確率密度関数 $p(H)dH$ は、Rayleigh分布を用いた。図-4に平均波高が2m場合の波高 H の出現確率の例を示す。潮位の出現確率密度 $f(L)dL$ は、河合ら(1997)が行った全国96地点を対象とした主要4分潮による潮位の発生確率分布の類型をもとにモデル化した分布形(基本水準面(CDL)と朔望平均満潮位(HWL)で出現確率0、平均海面(MWL)の1.2倍の位置に出現確率のピークを持つ)を用いた。図-5に潮位差(HWL-CDL)が2mの場合の潮位 L の出現確率を示す。

規則波による沿岸掃流漂砂の水深分布関数 q_{by} (式(3))と沖波波高の出現確率密度関数 $p(H)dH$ 、潮位の確率密度関数 $f(L)dL$ を用いて、次式の積分演算を行い、期待沿岸掃流漂砂量の水深分布を求めた。

$$\bar{q}_{by}(Z) = \int_{CDL}^{HWL} \int_0^{\infty} q_{by}(Z, L, H, T, \alpha, \tan \beta) p(H) f(L) dH dL \dots \dots \dots (4)$$

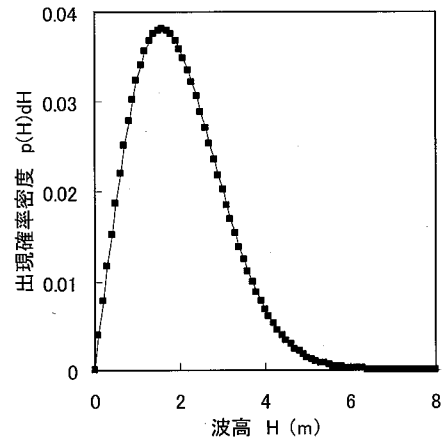


図-4 波高の出現確率密度

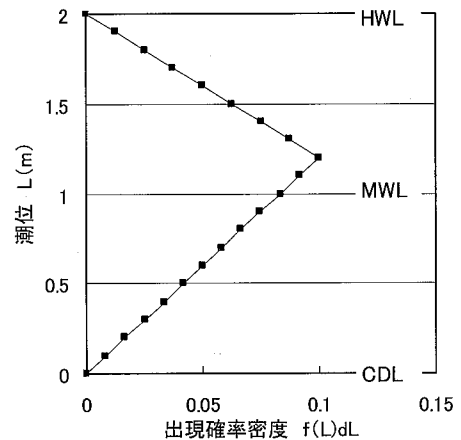


図-5 潮位の出現確率密度

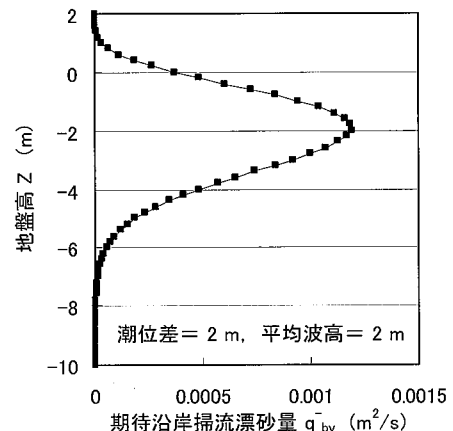


図-6 波高と潮位の出現確率を考慮した沿岸掃流漂砂量の水深分布

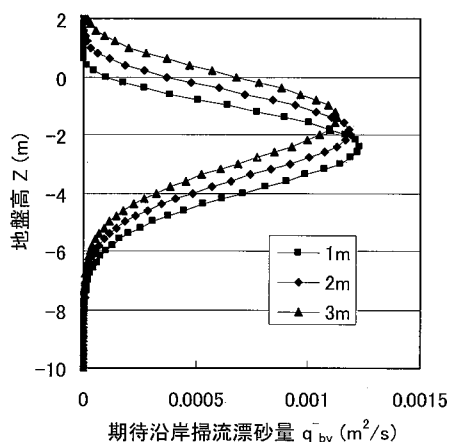


図-7 潮位差の違いによる期待沿岸掃流漂砂量分布の変化

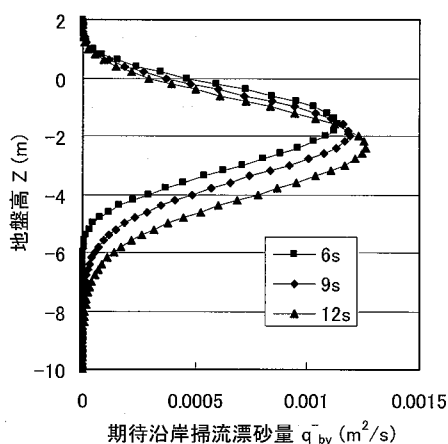


図-9 周期の違いによる期待沿岸掃流漂砂量分布の変化

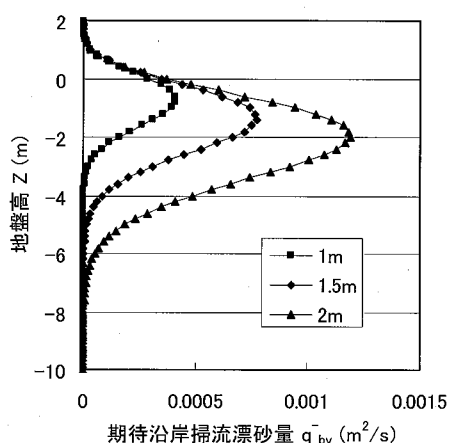


図-8 平均波高の違いによる期待沿岸掃流漂砂量分布の変化

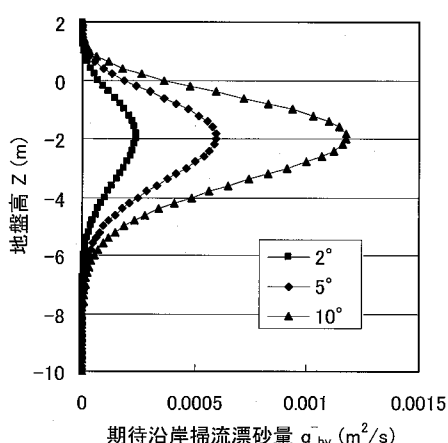


図-10 波向の違いによる期待沿岸掃流漂砂量分布の変化

ここで、 T は波の周期、 α は汀線に対する沖波の波向、潮位の数値積分は刻み幅 $\Delta L=0.2\text{ m}$ 、波高の数値積分は刻み幅 $\Delta H=0.1\text{ m}$ 、最大波高 10 m までの範囲で計算を行った。

図-6は潮位差 2 m 、沖波平均波高 2 m 、周期 9 s 、汀線に対する沖波の波向 10.1° の条件で、期待沿岸掃流漂砂量の水深分布を計算したものである。期待沿岸掃流漂砂量の分布は、およそ平均波高程度の水深位置にピークを持ち、陸上方向へは HWL まで、深さ方向には平均波高の4倍程度の深さまで、ほぼ上下対称な形状となっている。

次に、図-6の計算条件から、潮位差、平均波高、周期、波向のそれぞれの条件を変えた場合の分布形状を示す。

図-7は潮位差を変えた場合の期待沿岸掃流漂砂量の水深分布である。沿岸掃流漂砂の開始水深は、ほぼ変わ

らず、潮位差が大きくなる分、水深分布が広がり、沿岸掃流漂砂量の最大値が小さくなる。図-8は平均波高を変えた場合の期待沿岸掃流漂砂量の水深分布である。平均波高の増大とともに深い水深で高い波が碎波し、水深の深い位置で大きな沿岸掃流漂砂が生じるために、分布形は水深方向へ広がり、沿岸掃流漂砂の最大値も大きくなる。図-9は周期を変えた場合の期待沿岸掃流漂砂量の水深分布である。周期が短いほど沿岸掃流漂砂の開始水深が浅くなり、最大値が小さくなる。図-10は波向を変えた場合の期待沿岸掃流漂砂量の水深分布である。波向の変化は沿岸掃流漂砂の分布形状は変化させないが、その最大値は大きく変わる。

3. 結 論

波高と潮位と出現確率密度関数を用いて、規則波による沿岸掃流漂砂量の水深分布を波高の不規則性と潮位変

化を考慮した期待沿岸掃流漂砂量に拡張する手法を示した。この手法は、波の場と流れの場の計算によって得られた底面せん断応力による掃流漂砂の計算に基づいており、物理式と統計演算から導き出された期待沿岸掃流漂砂量であるので、さまざまな海浜断面形状における期待沿岸掃流漂砂量の水深分布を算定することが可能である。さらに、一様勾配斜面における沿岸掃流漂砂量の水深分布形を、規則波による沿岸掃流漂砂量の水深分布を波の碎波時の諸元および斜面勾配を用いて無次元化することによって、簡単な関数で表した。これにより、波高の出現確率密度関数と潮位の出現確率密度関数とを用いた確率演算による期待沿岸掃流漂砂量の算定が容易になった。また、平均波高、波向の変化による期待沿岸掃流漂砂量の水深分布形状の変化は大きいことを示した。

4. 今後の課題

波と流れの物理過程にもとづいた規則波による掃流漂砂量を波高と潮位の統計演算を行うことにより、長期断面形状変化に用いることが可能な期待沿岸掃流漂砂量の水深分布を算定することができた。この方法の中で、周期の変動性と、波向の出現特性については考慮せず計算を行った。周期の変動性が期待沿岸掃流漂砂量の水深分布に及ぼす影響は小さいが、波向の出現特性については影響が大きいため、実務で用いるためには、季節ごとあるいは月ごとの波高・波向別出現頻度表などを用いて、期待沿岸掃流漂砂量の水深分布の重ね合わせを行った上で用いる必要がある。また、本論文の期待沿岸掃流漂砂量の水深分布と現在実務で多く用いられている沿岸漂砂

の水深分布、例えば、宇多・河野（1996）による養浜地形の侵食変化が生じる陸上限界高さと水中の移動限界水深の間を3次の多項式で近似したものとを比較すると、本論文の水深分布は地盤高0mから陸上側の沿岸漂砂量が少なく算定されている。養浜によって汀線が突出し、激しい侵食が生じた海浜の地形変化量から算定した沿岸漂砂の分布形と本論文の一様勾配斜面上での沿岸漂砂量を直接比較し、評価することは難しいが、地形変化予測を行うためには、本論文で算定した沿岸漂砂量だけでなく、岸沖漂砂量についても同様の手法でその期待値を算定することが必要である。

参考文献

- 宇多高明・河野茂樹(1996): 海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発, 土木学会論文集, No. 539, II-35, pp. 121-139.
- 河合弘泰・高山知司・鈴木康正・平石哲也(1997): 潮位変化を考慮した防波堤停滞の被災遭遇確率, 港湾技術研究所報告, 第36巻, 第4号, pp. 3-41.
- 佐藤慎司・Kabiling, M. B.(1994): 波打ち帯を含む三次元海浜変形の数値モデル, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 401-405.
- 中村聡志(2006): 突堤群による掃流砂収支の数値検討, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 541-545.
- Goda, Y.(1975): Irregular wave deformation in the surfzone, Coastal Engineering in Japan, JSCE, Vol. 18, pp. 13-26.
- Watanabe, A.(1992): Total rate and distribution of longshore sand transport, Proc. 23rd Coastal Engineering Conference, Vol. 3, pp. 2528-2541.