砕波乱れによる底質の浮遊を考慮した2DH地形変化予測モデルの開発

Development of topography change model for adding sediment suspension by the wave breaking

中村聡志¹

Satoshi NAKAMURA

The topography change model that considered the sediment suspension by the wave breaking attenuation was developed. This model has following features: The average surface elevation in an initial shoreline and the height of wave run-up are a little large compared with an existing empirical equation. The sediment suspension in the run-up region is considered. It is necessary to adjust the relation coefficient between wave breaking attenuation and sediment suspension by using the experiment or the field observation result.

1. はじめに

海浜地形の変化は、波と流れの不規則性に応じて変化する底質の移動、特に、砕波時の乱れによる間欠的な底質の巻き上がりや砕波帯内の流れによる大量な底質移動によって生じる。こうした不規則で間欠的な現象の長期にわたる累積と底質移動量の空間的な分布の結果として地形変化が生じるため、地形変化予測においては、時間と空間の高解像度と長期間で広範囲の計算が求められる。

砕波による底質の巻き上げを考慮した計算モデルとして、佐藤・浅野 (1992) では斜面上で砕波する際の流速変動をもとに底面摩擦力を求め、波の半周期ごとに底質の巻き上げ量を評価した。また、柴山・Duy (1995) は乱流方程式をもとに底面摩擦力を求め、砕波時に連続する巻き上げ量を評価した。合田 (2010) は、段階的砕波モデルで得られた波の砕波減衰エネルギーフラックスと底質の浮遊巻き上げを保持するための仕事率とを結びつけ、砕波による底質の巻き上げを評価した。

本論文では、波の砕波時の乱れによって砂が浮遊する機構として、波形の伝播変形計算中の砕波減衰ポテンシャルの一部が乱れとして底面に直接作用すると仮定し、底面摩擦力による巻き上げ量を求め、浮遊砂を移流させる地形変化モデルを開発した。

2. 地形変化予測モデルの概要

砕波乱れによる底質移動を考慮した地形変化予測モデルは、流れの底面せん断力による底質移動量の計算に加えて、波の変形伝播モデルから得られる波の砕波減衰量を用いた底質浮遊と、波のラジエーション応力変動による流動モデルから得られる平均水位の変動と海浜流動に

よる浮遊砂の移流拡散と沈降による底質移動量を考慮して、地盤高変化を計算する。波と流れの計算、および、波と流れの底面せん断力による掃流漂砂量計算については、中村・合田 (2007) で用いたサブモデルを用い、砕波条件式の変更、および、砕波乱れによる底質移動計算サブモデルの追加を行った。

(1) 波と流れの計算モデル

波の変形伝播と流れの発達、砕波による波の減衰と流れとの干渉を考慮した非定常緩勾配方程式 (1) を時間発展的に解き、波動の計算結果を波の一周期毎に積分することによってラジエーション応力を求め、その空間勾配を駆動力とする非線形長波方程式 (2), (3) を解いた。一波毎に平均水面と海浜流場を計算し、新たな水面形と流速場上で波の伝播計算を行うことによって、汀線位置の変動に伴う遡上・流下流と遡上域での砕波減衰量を求めた。

$$\frac{D^2\phi}{Dt^2} + (\nabla \cdot U) \frac{D\phi}{Dt} = \nabla \cdot (cc_g \nabla \phi) - k^2 c^2 (1-n) \phi - f_D \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(d) + \frac{\partial}{\partial x_a}(d\bar{u}_a) = 0, \quad d = h + \eta \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(d\bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_a} \left(d\bar{u}_i^2 + \frac{1}{2} g d^2 \delta_{ia} \right) \\ = -F_i - \tau_i + g d \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここで、 ϕ : 水表面速度ポテンシャル、 d : 全水深、 η : 平均水面、 h : 水深、 $U=(\bar{u}_i, \bar{u}_j)=(\bar{u}, \bar{v})$: 海浜流ベクトル、 c, c_g : 波速と群速度、 n : 群速度波速比、 k : 波数、 f_D : 砕波減衰係数、 g : 重力加速度、 F_i, τ_i : ラジエーション応力による起流力と底面摩擦抵抗を表す。

(2) 碎波乱れによる底質移動

波の伝播変形計算過程における碎波減衰量の一部分が底面での底質の巻き上げに関与する乱れになると仮定して、碎波乱れによるシルズ数を次式で定義した。

$$\psi_{wb}(t) = \frac{A_b \cdot w_b \cdot \phi / T}{(s-1)gd_s} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 A_b は碎波乱れの関与係数（計算では0.1とした）、 w_b は碎波による水表面速度ポテンシャルの減衰割合、 ϕ は水表面速度ポテンシャル、 T は波の周期、 s は底質の比重、 d_s は底質の中央粒径。碎波による減衰割合 w_b は、波高水深比 γ が碎波限界値 γ_b を超える波に対して、その超過量に応じて水表面ポテンシャルを減じる割合とした。波高水深比 γ が碎波限界値 γ_b より小さい場合には、碎波が生じていないとして $w_b=0$ とした。

$$w_b = (1 - \gamma_b / \gamma), \quad f_D = w_b / T \quad \dots\dots\dots (5)$$

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 を用いたMiche型の次式を用いた。

$$\gamma_b = \left(\frac{H}{d} \right)_b = \gamma_0 \frac{\tanh(kd)}{kd}, \quad \gamma_0 = 0.80 \quad \dots\dots\dots (6)$$

碎波乱れによって海底面から水塊に巻き上げられた底質は、水塊中で一様に分布すると仮定する。式(7a)の底質の巻き上げ速度については、碎波乱れによるシルズ数に比例し、底面せん断力による底質初期移動限界シルズ数を準用して、初期移動限界値を設定した。式(7c)の堆積速度については、巻き上げられた浮遊砂が自由沈降し、水塊平均濃度に比例して堆積すると仮定した。式(7b)の局所的な巻き上げ量と自由沈降堆積量の差が浮遊砂濃度の増分となる。

$$\begin{cases} \text{pickup} = A_p (\psi_{wb}(t) - \psi_c) w_s & \text{a)} \\ \Delta c \cdot d = \text{pickup} - \text{deposit} & \text{b)} \\ \text{deposit} = c \cdot w_s & \text{c)} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 A_p は係数（計算では0.01とした）、 ψ_c は底質の初期移動限界シルズ数、 w_s は底質の沈降速度、 c は浮遊砂濃度、 Δ は増加分を表す。

水深方向に一様な濃度の浮遊砂は海浜流（断面平均流）と波による振動流との合成流 (u, v) によって移流するとした。拡散については、計算セルサイズが $d \Delta x \Delta y$ と小さく、波の計算における時間間隔も短いので、拡散項による計算は行っていない。ただし、微小時間間隔で式(7)の平均化操作と式(8)の移流操作を行っているため、数値拡散は生じている。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(cu)}{\partial x} + \frac{\partial(cv)}{\partial y} = \Delta c \quad \dots\dots\dots (8)$$

(3) 波と流れの底面せん断力による底質移動

底面せん断力は海浜流と波による底面振動流との合成流 (u, v) によって海底面に生じると仮定し、佐藤・Kabiling (1994)の掃流漂砂量式を準用した式(9)によ

って底質移動量を求めた。

$$\frac{q_b(t)}{\sqrt{(s-1)gd_s^3}} = A_{BL} (\psi(t)^{0.5} (\psi(t) - \psi_{cr})) \left| \frac{(u, v)}{|(u, v)|} \right| \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 A_{BL} は漂砂量係数、 ψ_{cr} は移動限界シルズ数である。漂砂量係数の値については、中村・合田(2007)で用いた $A_{BL}=47$ とした。底面での合成流によるシルズ数の瞬時値 $\psi(t)$ は、次式で計算した。

$$\psi(t) = \frac{\tau / \rho}{(s-1)gd_s}, \quad \tau = \rho C_b (u, v)^2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 τ は波と流れによる底面せん断力、 ρ は流体密度、 C_b は海底摩擦係数。海底摩擦係数は、粗度 $k_s=0.3d_s$ 、海底面から外縁流れまでの距離 $y_p=3d_s$ として、壁法則によって与えた。

(4) 計算条件

計算領域は、沿岸方向に500m、岸沖方向に1000m（沖向きを正とする）、格子間隔1m、斜面勾配1/15, 1/30, 1/50沖側境界付近は水深15mの一樣水深とした。入射波は、沖波有義波高4m、周期6s、波向13°の波高変動波を用いた。波高変動波は波高の出現確率がレーリー分布に従うよう不規則な波高を順次与える波群である。図-1に波高変動波の波高の入射順を示す。計算領域の沿岸方向の側方境界は計算領域の側方両端が連続する周期境界とした。

図-1 有義波高4mの波高変動波の入射波群

3. 波による平均水面と潮上端変動，地形変化

図-2に斜面勾配1/50に沖波有義波高4mの波を入射し、200波目の波高と平均水面の岸沖分布を示す。沖から伝播した波の波高の高い場所（岸沖距離450m）での平均水面の低下と、岸沖距離250m付近の碎波位置での平均水面の低下が生じている。そこから陸に向かって平均水面が上昇し、初期汀線位置（岸沖距離0m）から約0.5mの高さまで汀線位置が移動している。

波高の空間分布と砕波位置の変化によって、平均水面および海浜流分布は常に変動する。そこで、101波目から200波目までの100波中の平均水面の最大上昇位置と低下位置、100波平均水位を求め、図-3に表す。100波平均水位で見ると岸沖距離265m付近で最大水位低下0.066mが生じていること、また、平均水位は $\pm 0.3\text{m}$ ほど変動していること、波による水位上昇後の汀線位置は約0.5mの地盤高さに移動していることがわかる。

図-2 200波目入射時の波高と平均水位の岸沖分布 (1/50)

図-3 100波群中の平均水面とその変動幅 (1/50)

図-4に静水時汀線位置から岸側を拡大した、初期地形断面と200波後の地形断面、100波平均水位の分布、遡上端到達率を示す。ここで遡上端到達率は、100波の期間中に水中に没している割合を示したものである。遡上端到達率100%の岸側端は-22m位置にあり、100波中3波であるが最大遡上端が-28m位置にある。この間を遡上端が波によって移動している。遡上端到達率50%を平均汀線位置と定義すると-23.5m位置となる。静水時汀線位置では0.39mの水位上昇が生じており、沖波波高の約10%程

図-4 遡上端到達率と地形変化 (1/50)

図-5 遡上端到達率と地形変化 (1/30)

図-6 遡上端到達率と地形変化 (1/15)

度である。平均汀線位置付近の陸側で堆積、岸側で侵食が生じている。

図-5に斜面勾配を1/30とした時の200波後の地形と100波平均水位の分布、遡上端到達率を示す。初期汀線位置の水位上昇は約0.37mであり、1/50の場合と比べて小さ

くなっている。水位上昇して移動した後の汀線位置付近で侵食が生じている。また、遡上端も-19m位置までと小さくなっている。

図-6に斜面勾配を1/15とした時の200波後の地形と100波平均水位の分布、遡上端到達率を示す。初期汀線位置の水位上昇は約0.42mであり、1/50、1/30の場合と比べて大きくなっている。水位上昇して移動した後の汀線位置沖側で激しい侵食が生じている。また、遡上端も-13m位置までと遡上が小さくなっていると同時に、変動幅も小さい。

4. 碎波率と浮遊砂濃度、碎波浮遊による地形変化

図-7に斜面勾配が1/50の場合の平均浮遊砂濃度と波の碎波率の岸沖分布を示す。ここで平均浮遊砂濃度は100波の間の浮遊砂濃度の平均値である。碎波率は同じく100波の間の碎波している割合を求めた。岸沖距離150mで碎波率はほぼ1となり常に碎波が生じ底質の巻き上げが生じている状態となっている。一方、浮遊砂濃度のピークは汀線際と碎波率0.5となる200m地点の2か所にある。また、移流によって碎波の少ない沖側においても浮遊砂があることがわかる。2つのピークの間ではわずかなのであるが、碎波率が1を下回る範囲があり、碎波しない波が通過するときに底質の巻き上げがなくなり、浮遊砂濃度の谷ができていく。

図-8に斜面勾配が1/30のときの浮遊砂濃度と碎波率の分布を示す。1/50の場合と比して、汀線際の浮遊砂濃度は小さくなり、また、浮遊砂の沖への移流も少ない。碎波が岸に向かって連続的に生じるため底質巻き上げの減少域が少ない。

図-9に斜面勾配が1/15のときの浮遊砂濃度と碎波率の分布を示す。他の斜面勾配のときと比べて、汀線際の浮遊砂のピークはなくなり、碎波率が上昇する狭い幅で浮遊砂が生じている。汀線付近では碎波が連続して生じているので、浮遊砂濃度の谷はほとんど表れていない。

図-10は斜面勾配1/50の場合の底面せん断力によって生じる200波後の地形変化量と碎波浮遊によって生じる地形変化量を比較したものである。底面せん断力による地形変化量に比して、碎波浮遊による地形変化が1オーダー小さな値となっている。これは、式(7a)中の碎波巻き上げ係数 A_p を大きくすることによって、調整することはできるが、浮遊砂濃度分布と合わせて検討する必要がある。

図-11は斜面勾配1/30の場合、図-12は斜面勾配1/15の場合の底面せん断力による地形変化と碎波浮遊による地形変化の比較である。どちらの場合も斜面勾配1/50の場合と同様に碎波浮遊による地形変化は1オーダー小さな値

図-7 碎波率と浮遊砂濃度 (1/50)

図-8 碎波率と浮遊砂濃度 (1/30)

図-9 碎波率と浮遊砂濃度 (1/15)

となっているが、底面せん断力による地形変化と碎波浮遊による地形変化の侵食と堆積が逆になっている部分があり、碎波巻き上げ係数の大きさによっては、地形変化の傾向が変わることも考えられる。

図-10 底面せん断力と砕波浮遊による地形変化 (1/50)

図-11 底面せん断力と砕波浮遊による地形変化 (1/30)

図-12 底面せん断力と砕波浮遊による地形変化 (1/15)

5. 考察

波の砕波減衰量を陽に考慮した底質の巻き上げ浮遊による地形変化モデルを開発した。波の砕波による底質移動モデルには、式(4)中の水表面ポテンシャルの砕波減衰量から底質浮遊乱れを求める係数 A_b 、および、式(7a)中の浮遊砂係数 A_p がある。これら値については、実験値あるいは経験値を用いる必要がある。佐藤・浅野(1992)では底面摩擦力と巻き上げ量を関連付ける係数として浮遊砂濃度の測定結果から、 $\alpha_s=0.006$ としている。また、柴山・Duy(1995)では、同様の係数を 3.3×10^{-4} としている。合田(2010)では、浮遊砂の巻き上げ係数 β_s をさまざまな実験データセットをもとに $\beta_s=0.0004 \sim 0.028$ の範囲としている。本論文の係数 A_b 、 A_p で巻き上げ係数 β_s を表すと、 $\beta_s=A_b \cdot A_p$ であり、 $A_b \cdot A_p=0.001$ と範囲内の値となっている。

6. おわりに

護岸や突堤、離岸堤に囲まれた砂浜が高波浪時に侵食され消失してしまうかどうかの予測を行うためには、構造物周辺の波の変形と流れの発生、これら波と流れによる底面せん断力を外力とする砂の移動計算に加え、波の砕波時の乱れによって砂が浮遊する機構と砂浜への大規模な波の遡上と流下による砂の運搬機構を考慮した地形変化予測計算が必要になる。本論文で開発した地形変化予測モデルは、できるだけ簡便で一般的な波や流れの方程式を用いて、砕波による乱れの算定や汀線近傍の遡上流下流の計算を行い、砕波による底質の巻き上げと移流の機構を取り込んだモデルとなっている。各モデルの係数値について現地観測結果を用いて調整を行うことにより、汎用性の高い予測モデルになると考える。

参考文献

- 合田良実(2010)：大波高データに基づく砕波帯内の浮遊砂巻き上げ率の定量評価，海岸工学論文集B2，Vol.66，No.1，pp.421-425。
- 佐藤慎司・浅野学(1992)：不規則波砕波帯における浮遊砂フラックス，海岸工学論文集，第39巻，pp.281-285。
- 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。
- 柴山知也・Nguyen The Duy (1995)：乱流下の移流拡散方程式を用いた砕波帯内浮遊砂濃度の予測数値モデル，海岸工学論文集，第42巻，pp.441-445。
- 中村聡志・合田良実(2007)：波の不規則性と波候統計を考慮した突堤構造物の沿岸掃流砂阻止機能の定量的評価，土木学会論文集B，Vol.63，No.4，pp.272-281。