

突堤群による掃流砂収支の数値検討

中村聡志¹

突堤構造物周辺の掃流砂量を波と流れ場によって生じる外力をもとに計算し, 突堤群による漂砂遮断効果や突堤周辺の土砂収支が数値検討された. 突堤周りの 4 つの領域 (漂砂上手突堤内, 上手突堤外, 下手突堤内, 下手突堤外) で突堤長による土砂の収支が計算され, 突堤端が碎波開始点を越えると下手突堤内の土砂収支がマイナスに転じ, 漂砂遮断による下手側の侵食が始まることが示された. また, 突堤による沿岸掃流砂の阻止率や沖への流出量が定量的に示された. 計算は限定された底質・地形・波浪条件で行われており, 結果の適用においては, 異なる条件での検討による一般化が必要である.

1. はじめに

海浜安定化施設や人工海浜は, 海岸保全施設として砂浜の有する消波機能を維持するために, 大規模な突堤群を用いて, 養浜砂を囲み土砂収支の閉じた系として管理する手法がとられることが多い. この場合, 巨大な突堤状構造物は, 沿岸漂砂を遮断することによって, 周辺との土砂収支に不均衡をもたらす. その結果, 新たな問題を周辺海岸に生じさせることになる. したがって, 海岸保全の観点からは, できるだけ短い突堤を設置し, 沿岸漂砂を遮断せず, かつ, 養浜砂あるいは堆積した砂を十分捕捉しておく突堤を計画する必要がある. しかしながら, 突堤群の内外, 漂砂の上手下手の土砂収支を評価する手法は確立されておらず, 予め最適な設計を行うには至っていない. また, 海岸構造物周辺の底質移動機構に基づく合理的な計算予測モデルの開発が薦められる一方で, 簡便な 1-line モデル等の海岸線変化予測計算による海岸構造物の性能照査などは今後も行われるであろう. 本研究では, 沿岸漂砂が生じる海岸に設置された突堤群地形を対象とした, 波浪・流況変化, 底質移動に関する掃流砂計算を行い, 突堤長をパラメータとした土砂収支の数値検討を行う.

2. 掃流砂計算モデル

波の変形や碎波, 海浜流の発達には相互に関連し合い, 複雑な外力場を作り出し, 底質移動および地形変化予測を難しくしている. 使用する計算モデルは, 波の伝播・変形計算, 平均水面・海浜流計算, 漂砂量・地形変化計算の 3 つの数値計算モデルとこれらに関連付ける波による流れの励起式, および, 波と流れによる底質移動量の経験式で構成される. こうした基本的なモデルを相互に関連させつつ, 計算することにより複雑な地形や構造物設置による波と流れの場の変化に起因する地形変化を求めらるものである.

(1) 波と流れのモデル

波の変形伝播と流れの発達は, Nakamura (2004) の碎波を考慮した非定常緩勾配方程式に波と流れの干渉項を追加した式 (1) を時間発展的に解き, その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計算し, その空間勾配を駆動力とする非線形長波方程式 (2), (3) を逐次解くことによって, 波と流れを相互に干渉させつつ, 求解した.

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(d \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(d \bar{u}_\alpha + \frac{1}{2} g d^2 \delta_{i\alpha} \right) = -F_i - \tau_i + g d \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad \dots\dots (3)$$

ここで, ϕ : 水表面ポテンシャル, $\bar{\eta}$: 平均水面変動, h : 初期水深, $U = (\bar{u}_i, \bar{v}_i) = (\bar{u}, \bar{v})$: 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 : 碎波減衰係数 (ここでは波高水深比の碎波限界値を与値とし, 過剰な水表面ポテンシャルを減じた), 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. 底面振動流 $(\bar{u}_b(t), \bar{v}_b(t))$ は ϕ の空間微分から得られる表面波動流速を微小振幅波の鉛直分布式を用いて底面での値に変換した.

(2) 掃流砂のモデル

掃流砂量 (q_{bx}, q_{by}) は, 佐藤・Kabiling (1994) の掃流砂量式を用い, 波と流れのモデルから計算される海浜流と波の底面振動流との合成流速 $(u, v) = (\bar{u} + \bar{u}_b(t), \bar{v} + \bar{v}_b(t))$ を用いて計算される局所掃流砂量の瞬時値 $q_b(t)$ を波の一周期で積分して求めた.

$$\frac{q_b(t)}{\sqrt{(s-1)gd_s^3}} = A(\phi(t)^{0.5}(\phi(t) - \phi_{cr})) \left| \frac{(u, v)}{(u, v)} \right| \quad \dots\dots (4)$$

ここで、 A ：掃流砂量係数、 ϕ_{cr} ：移動限界シールズ数であり、シールズ数の瞬時値 $\phi(t)$ は、次式で計算した。

$$\phi(t) = \frac{\tau/\rho}{(s-1)gd_s}, \quad \tau = \frac{\rho}{2} f_w(u, v)^2 \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 τ ：底面せん断力、 s ：底質の比重、 d_s ：底質の粒径、 ρ ：流体密度、 f_w ：海底摩擦係数。

3. 突堤群地形における掃流砂量計算

代表的な海岸構造物である突堤周辺で生じる漂砂現象を計算し、単突堤による影響を検討することが必要であるが、数値計算では、波や流れ、漂砂量に関する境界条件の設定が困難であるので、沿岸方向に同じ地形と構造物が繰り返し連続する境界を沿岸方向に設定し、沿岸方向に無限に続く一様勾配斜面上にある突堤群の計算を行った。また、沖側境界からの入射波は、規則波とし入射角度を沖側境界で波長の整数倍の位相が生じる角度とすることによって入射波分布を一様にした。また、海岸地形あるいは構造物によって反射し、沖側境界から出て行く波については、沖側境界外に減衰計算領域を設けることにより、沖側境界での再反射の低減を図った。計算は、静止状態から波を入射し、海浜流速がほぼ定常になるまで行った。この間の地形変化量については考慮せず、初期地形での波や流れの計算と掃流砂量の計算とした。

計算結果は、突堤端を基点とした4つの領域に分け、漂砂上手突堤内、漂砂上手突堤外、漂砂下手突堤内、漂砂下手突堤外として土砂収支を整理した(図-1)。また、領域の境界を横切る掃流砂移動量を岸冲上手掃流砂量、岸冲下手掃流砂量、通過掃流砂量とした。突堤長を表すパラメータとして、樫木・出口(1982)と同様に突堤端

から遡上端(ここでは波による平均汀線の移動位置)までの有効突堤長 l_e と、砕波開始位置から遡上端までの砕波帯幅 l_b との比を用いて、計算結果を整理した。

(1) 計算条件

計算領域は、沿岸方向に1,000 m、岸冲方向に1,000 m(冲向きを正とする)、格子間隔5 m、斜面勾配1/60、沖側境界付近は水深12 mの一様水深とした。入射波は、波高1 m 周期9 s、波向10°, 32°, 60°の3種を用いた。突堤無しの場合と突堤端水深が0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m、2.5 m、3.0 m、4.0 mまでの7条件で計算を行った。その他の条件を表-1に示す。

表-1 計算で用いた諸条件

砕波限界波高水深比	0.65
遡上位置計算最小水深(m)	0.001
海底摩擦係数	0.01
移動限界シールズ数	0.07
底質粒径(m)	0.0002
底質比重	2.65
掃流砂量係数	1.0

(2) 計算結果

樫木・出口(1982)は、模型実験における地形変化の解析から、汀線変化(1-line)モデルが仮定している海浜断面積の変化量と汀線変動量との比例関係が、漂砂上手では離岸する流れによって、漂砂下手では波浪特性の変化によって、成立しないと述べている。しかしながら、影響を受ける範囲や離岸する流れによる漂砂量や突堤で捕捉される漂砂量についての定量的な把握まではなされていない。そこで、波と流れ、掃流砂量の計算結果の一例として、以下に波向10°(図面斜め上向きに入射)の波を入射させた場合の突堤無しと突堤端水深2.0 mの突堤を設置した場合の波高分布、海浜流速分布、底面せん断力分布、掃流砂量分布を示し、それぞれの分布に対する突堤の影響範囲を考察する。

図-2は、波向10°で突堤無し(左図)の波高分布(水面動のrms値から計算：単位m)と突堤端水深2.0 mの突堤有り(右図)の波高分布を比較したものである。突堤無しの場合、砕波開始位置は340 m地点、遡上端は195 m地点であった。突堤端水深2.0 mの場合、砕波開始位置と突堤端の位置はほぼ同じで、有効突堤長/砕波帯幅(l_e/l_b)は0.93である。突堤端近傍で反射と回折による波高増大が生じている。突堤の遮蔽域となる下手側の波高減衰や突堤による沿い波が生じる上手側の波高増大がわずかに生じている。この波高分布変化の傾向は、突堤端水深を深くする(突堤端が砕波帯を超える)と砕波帯内外の突堤周辺で顕著に現れる。突堤端水深が4.0 m($l_e/l_b=1.76$)の場合上手側で最大波高

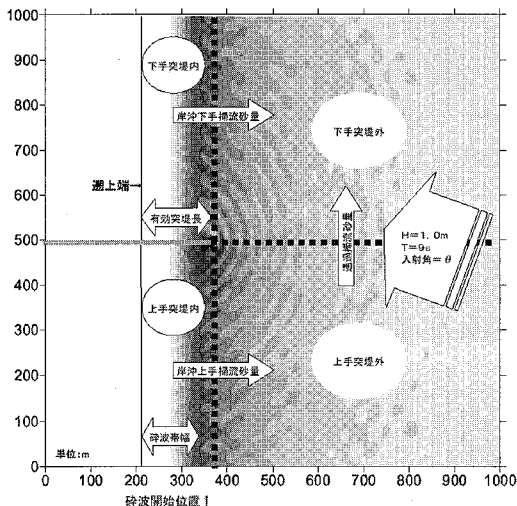


図-1 計算領域と変数の定義

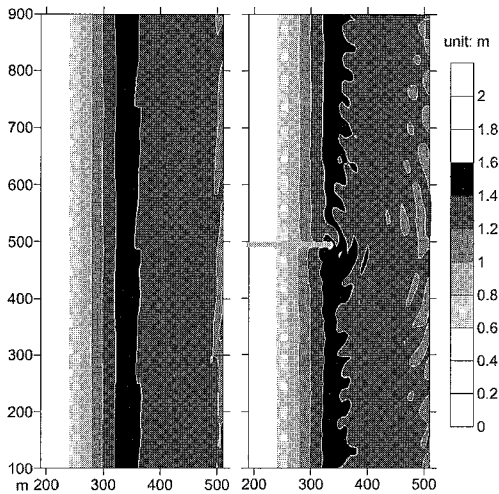


図-2 波高分布比較 (左: 突堤なし, 右: 突堤あり)

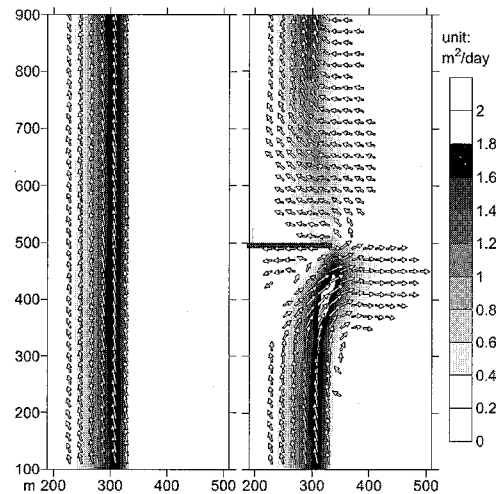


図-5 掃流砂量比較 (左: 突堤なし, 右: 突堤あり)

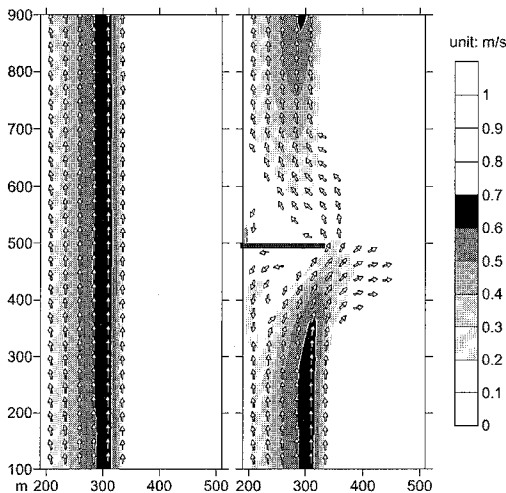


図-3 海浜流比較 (左: 突堤なし, 右: 突堤あり)

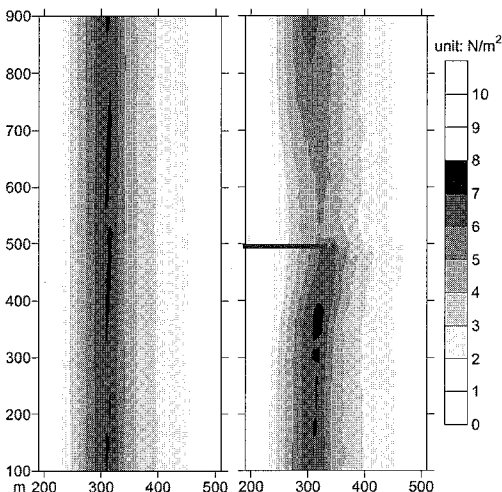


図-4 底面せん断力比較 (左: 突堤なし, 右: 突堤あり)

が15%増加し, 下手側で6%減少する。波高の変化に伴って, 碎波開始位置もわずかに岸沖に移動する。

図-3は, 波向 10° で突堤無し(左図)の海浜流分布と突堤端水深2.0mの突堤有り(右図)の海浜流分布を比較したものである。図中色塗りは流速値(m/s), 矢印は流向を表す。突堤無しの場合, 海浜流は碎波帯内で生じ, わずかに岸向きの沿岸流となっている。突堤ありの場合, 突堤上手の沿い波によって汀線付近の上手への流れ(l_b 程度の範囲)が生じており, 離岸する海浜流との間に流れの緩い場所が突堤端から上手汀線方向に帯状に生じている。突堤下手では遮蔽域(l_b の2倍程度の範囲)で緩流域が生じている。

図-4は, 波向 10° で突堤無し(左図)の波と流れによる底面せん断力分布(N/m^2)と突堤端水深2.0mの突堤有り(右図)の同分布を比較したものである。底面せん断力については, 波と流れの両方の影響を受けることから, 漂砂上手側では, 波の重複域での波高増大による底面せん断力の増加と突堤端を回り込み通過する流れの減少による底面せん断力の減少が同時に生じている。漂砂下手側では, 流速の減少が強く影響している。

図-5は, 波向 10° で突堤無し(左図)の掃流砂量分布と突堤端水深2.0mの突堤有り(右図)の同分布を比較したものである。図中色塗りは掃流砂量(m^2/day), 矢印はその向きを表す。掃流砂量については, 碎波波高が大きく, 離岸する海浜流の速い上手側で多量の沖向き掃流砂が発生しおり, その量が沖に向かってすぐに減少することから, 沖出しされた掃流砂はそこで堆積する。また, 突堤に沿って汀線域へ還流する掃流砂が生じている。下手側については広範囲に岸へ向かう掃流砂が発生しており, その量が流れとともに増加することから, 広く薄く侵食が生じていると推察される。

計算結果から波高分布, 海浜流分布, 底面せん断力分布, 掃流砂量分布に対する突堤による影響範囲は, 漂砂上手側で有効突堤長 l_e あるいは碎波帯幅 l_b 程度の範囲, 漂砂下手側で l_e の2~3 倍の範囲と考えられる。

次に, 突堤による沿岸掃流砂捕捉率について考察する。図-5 で示したように, 突堤による海浜流の離岸によって沖向きの掃流砂が生じるため, 突堤がない場合の全沿岸漂砂量から突堤端を通過する沿岸漂砂量を引いた量と突堤がない場合の全沿岸漂砂量との比を捕捉率とするのは適切ではないので, 単に, 非通過率(阻止率)とすることとした。

図-6 は, 非通過率を計算するとき基準となる突堤の無い海岸での岸沖の断面で積分して求めた全沿岸掃流砂量(単位: m^3/day)を異なる波の入射角について計算したものである。これらの掃流砂量は, それぞれの碎波波高と碎波波向を用いて計算される CERC 公式による沿岸漂砂量とオーダー的に合致している。

図-7 は, 突堤による沿岸掃流砂の非通過率を求めたものである。有効突堤長/碎波帯幅 (l_e/l_b) = 0.31 付近で非通過率がわずかにマイナス値になっているが, これは短い突堤の前面を通過する掃流砂量が増えたためである。入射角がいずれの場合も $l_e/l_b = 1.0$ 周辺で非通過率が急増しており, 榎木・出口 (1982) による全沿岸漂砂の突堤捕捉率と同様の結果となっている。また, 入射角による非通過率の差異は見られない。以下, 波の入射角 10° の場合について, l_e/l_b による沖への流出掃流砂量と土砂収支について示す。

図-8 は, 突堤端沖を通過する沿岸掃流砂量 (m^3/day)と漂砂上手側および下手側の突堤端位置を基点とする沿岸方向断面を横切る岸沖掃流砂量 (m^3/day)の突堤長による変化を示したものである(図-1 参照)。突堤端が碎波開始位置に近づくにつれ, 漂砂上手側で沖への掃流砂の流出が激しくなっていることが分かる。このとき突堤端を通過する掃流砂はほとんど無く, 突堤で囲まれた内部の土砂が突堤によって生じた離岸する沿岸流に動かされ, 沖へ運び出されていることが分かる。碎波開始位置を超えて突堤端が伸びた場合に漂砂上手側での沖への流出が少なくなるのは, 突堤端位置では, もはや掃流砂は生じず, 突堤内部に限定された底質の移動になるためである。

図-9 は, 突堤端を基点とする4つの領域の収支を計算したものである(図-1 参照)。 $l_e/l_b = 0.7$ 程度までの場合には漂砂上手・下手側の突堤内ともにプラス収支(堆積)が生じているが, 突堤端が碎波位置に近づくると上手側突堤内部がマイナス収支(侵食), 下手側突堤内部も減少傾向になる。一方で, 上手側突堤外部がプラス収支(堆積)が生じていることが分かる。また, 突堤端

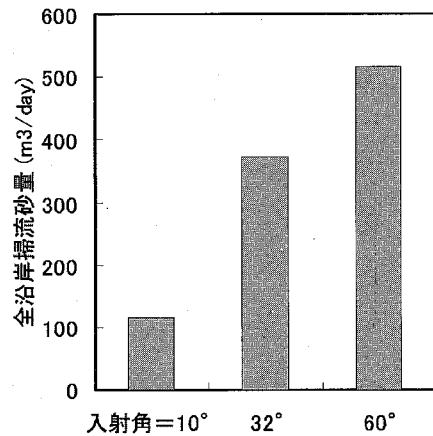


図-6 入射角と全沿岸掃流砂量

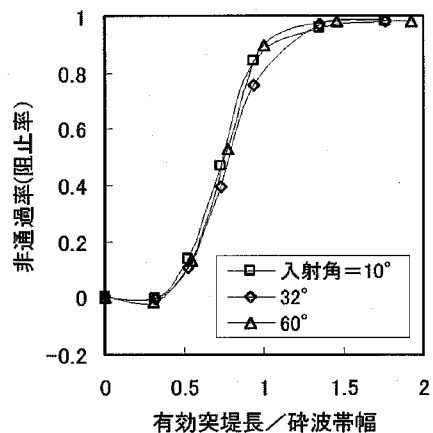


図-7 突堤長による沿岸掃流砂非通過率(阻止率)

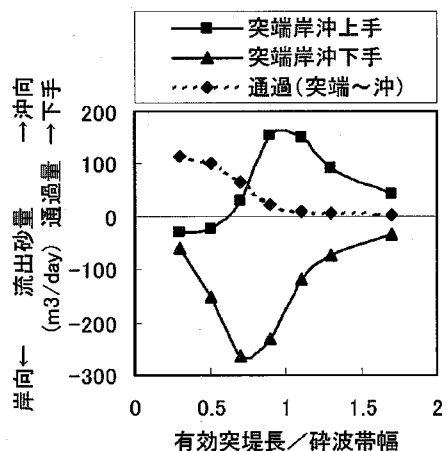


図-8 沖への流出量と突堤端通過量

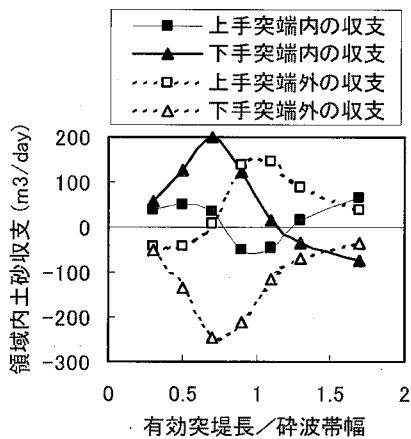


図-9 突堤長による領域内収支

が碎波点を越えると、下手突堤内の収支がマイナスに転じ、漂砂遮断による下手側の侵食が始まることが分かる。また、下手側突堤外部は、どの場合でもマイナス収支（侵食）となっており、無限に連続する突堤群においては、下手突堤外の土砂が、供給源となっていることが分かる。

4. おわりに

突堤群による漂砂遮断効果や突堤周辺の土砂収支を波

と流れによる掃流砂量の数値計算によって示した。突堤周りの4つの領域（漂砂上手突堤内、漂砂上手突堤外、漂砂下手突堤内、漂砂下手突堤外）毎に突堤長による土砂収支を示すことにより、大規模突堤群による突堤群内の土砂安定と、突堤下手側の侵食を定量的に示した。しかしながら、本計算は、初期地形での掃流砂量と土砂収支を計算したものであり、漂砂による地形変化が波や流れの場を変化させ、その結果、掃流砂量が徐々に変化する過程や、安定した地形となるまで過程や安定時の掃流砂量を計算したものではない。また、波高と周期を一つの条件で行っているの、波と流れによる地形変化のすべてが把握されたものではない。今後の課題として、これら課題を解決するとともに、碎波と浮遊砂移動についての同様の検討や必要である。

参 考 文 献

- 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.
- 榎木亨・出口一郎 (1982) : 突堤の沿岸漂砂捕捉機能に関する研究, 海岸工学論文集, 第29巻, pp. 279-283.
- Nakamura, S (2004) : A numerical model for low-frequency harbor oscillation induced by wave group deformation, Proc. of 6th intl. conf. on hydrodynamics, pp. 262-266.