

ヘッドランド周辺の海浜流と安定海浜の形成について

安田 孝志*・片山 章仁**・土屋 義人***

1. 緒 言

安定海浜工法 (Headland defence) は、自然海浜の優れた機能を生かした海岸保全工法であり、その要諦はヘッドランドの築造によってその背後に安定な湾曲海浜を形成する点にあるため、その形成機構や形成のための条件を明らかにし、この工法による海浜変形の予測法を確立しなければならない。

本研究では、そのための第1歩として、ヘッドランド周辺の海浜流の計算法の確立を試みて、種々の海浜および入射波条件下で系統的な計算を行い、その特性から安定海浜形成の機構および条件を明らかにする。

2. ヘッドランド周辺の波の平面的変形の計算

ヘッドランド周辺の海浜流の計算には、それが傾斜海浜上の構造物であるため、水深変化に伴う浅水変形、屈折および砕波のみならず、構造物の存在による回折および反射の影響を同時に評価できる波高・波向分布の計算法が必須となる。ここでは、これらの影響、特に斜面上の回折効果がこの場合の波高・波向分布に最も重要であるとの立場から、入射波に及ぼす海浜流の影響は無視し、伊藤らの数値波動解析法^{1),2)}を若干修正して波の変形計算を行い、その適用性を水理実験によって検証する。

(1) 基礎方程式と保存則との関係

平均水面に座標原点を置き、鉛直上向きに z 軸を定め、水深変化は緩やかでその影響は非線形項のそれと同程度に小さいとすれば、このときの波動場は速度ポテンシャル

$$\phi(x, y, z, t) = a(x, y, t) \cosh k(h+z) \dots\dots\dots (1)$$

によって表され、また流体力学の基礎方程式は次式のように書き換えられる。

$$\left. \begin{aligned} \partial Q_x / \partial t &= -c^2 \partial \eta / \partial x, \\ \partial Q_y / \partial t &= -c^2 \partial \eta / \partial y, \\ \partial \eta / \partial t &= -\partial Q_x / \partial x - \partial Q_y / \partial y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 k ; 波数、 h ; 水深、 Q_x ; $\int_{-h}^0 \phi_x dz$ で定義され

る x 方向の線流量²⁾、 Q_y ; $\int_{-h}^0 \phi_y dz$ で定義される y 方向の線流量、および c ; $\sqrt{(g/k) \tanh kh}$ で表される波速である。

まず、波数の保存則との関係を検討するため、式 (2) の解である式 (1) の a に対して、次の関係を仮定する。

$$a = a_0 \exp(i\chi), \quad \chi = \int k \cos \theta dx + \int k \sin \theta dy - \sigma t \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 a_0 は定数とし、 θ ; 波の入射角および σ ; 角周波数である。前述の水深変化に対する仮定から、

$$\left. \begin{aligned} \partial a / \partial x &\approx i a \partial \chi / \partial x = i k a \cos \theta, \\ \partial a / \partial y &\approx i a \partial \chi / \partial y = i k a \sin \theta, \\ \partial a / \partial t &\approx i a \partial \chi / \partial t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

が導かれ、波数ベクトル $\mathbf{k}$ および σ は次式で表される。

$$\mathbf{k} = \nabla \chi = \nabla a / a i, \quad \sigma = -\partial \chi / \partial t = -(\partial a / \partial t) / i a \dots\dots (5)$$

これより、 a すなわち ϕ は波数の保存則を確かに満足するので、 ϕ と同一の位相関係にある η 、 Q_x および Q_y も波数の保存則を満足することになる。したがって、波向は

$$Q_x = (\sinh kh/k) \partial a / \partial x, \quad Q_y = (\sinh kh/k) \partial a / \partial y \dots\dots\dots (6)$$

および式 (4) を用いれば、次式で与えられる。

$$\theta = \tan^{-1} (Q_y / Q_x) \dots\dots\dots (7)$$

ついで、質量および運動量の保存則との関係においては、式 (2) がこれらと等価であるため、無条件にこれらの保存則が満足されることになる。

さらに、エネルギーの保存則との関係について検討する。いま、一次元の波動場を考え、式 (1)、(2) および (3) の関係を用いて平均操作を行えば、次式が導かれる。

$$\partial (\rho g \bar{\eta}^2 / 2) / \partial t + c \partial (\rho g \bar{\eta}^2 / 2) / \partial x = 0 \dots\dots\dots (8)$$

これは、位置エネルギー $\rho g \bar{\eta}^2 / 2$ が波速で輸送されることを示し、エネルギーの保存則に矛盾している。このため、伊藤らは、エネルギーの保存則が満足されるように、砕波帯外の波に対して補正係数¹⁾を掛けて計算している。また、砕波帯内の波に対しては、エネルギーは保存されないが、波高は水深に比例して変化するものとし、さらに伊藤らに習い、式 (8) の関係を基にしてこのときの補

* 正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 日本テトラポッド(株)

*** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

正係数 f を導けば,

$$f_i = (c_i/c_b)^{1/2} (h_i/h_b), \quad h_i \leq h_b \dots\dots\dots (9)$$

となる。ここに、添字 b および i は、それぞれ岸沖方向の座標上の砕波点および所定の点の位置を示す。ここでは、砕波帯外の波に対しては前述の伊藤らの補正係数を、また砕波帯内の波に対しては式(9)をそれぞれ用いて、実質的にエネルギーの保存則を満足させて計算を行う。

(2) 境界条件

図-1のように座標を定め、ヘッドランドに対して格子間隔に一致した幅を持つ階段形状で近似し、IからVの5種類の境界を設定する。Iは汀線であり、水深がゼロとなるが、計算上は無反射境界とする。IIはヘッドランドであり、前面および背面で異なった任意の反射率を与えられる境界とする。IIIは下手側仮想境界であり、無反射境界となる。IVおよびVは上手側および沖測仮想境界であり、沖側からの透過波が存在する無反射境界となる。I、IIおよびIIIについては、谷本ら²⁾の手法を用いる。IVおよびVに対しては、以下のように行う。

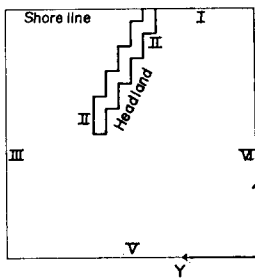


図-1 計算領域および境界条件

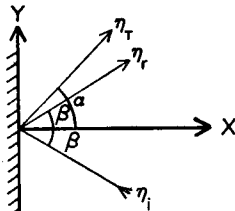


図-2 透過波のある境界上の透過、散乱および反射波

図-2のように反射率 K_R の境界面が y 軸に一致し、波の位相は反射によって変化しないものとすれば、前面における波 η_F は、ヘッドランドからの反射波 η_R 、境界面での反射波 η_R および沖側からの入射波 η_T の合成波として次式のように表されたとする。

$$\left. \begin{aligned} \eta_F &= \eta_I + \eta_R + \eta_T, \\ \eta_I &= -K_H a_0 \sin(-kx \sin \beta + ky \cos \beta - \sigma t), \\ \eta_R &= -K_R K_H a_0 \sin(kx \sin \beta + ky \cos \beta - \sigma t), \\ \eta_T &= -a_0 \sin(kx \sin \theta + ky \cos \theta - \sigma t + \delta) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 a_0 ：入射波の振幅、 α ：入射波の入射角および K_H ：ヘッドランドの反射率である。なお、 δ は位相のズレを示し、 β とともに数値計算上の都合で決定する。式(10)を式(2)に代入し、谷本ら²⁾と同様の考え方を用いると、

$$Q_0^t = (A/B) Q_1^{t+t_0-t_1} \dots\dots\dots (11)$$

を得る。ここに、 $K_R=0$ の場合を示せば、

$$\left. \begin{aligned} \sigma t_0 &= \tan^{-1} \{ \sin \delta / (K_H - \cos \delta) \}, \\ \sigma t_1 &= \tan^{-1} \{ [K_H \cos \gamma - \cos(\gamma + \delta)] / [K_H \sin \gamma - \sin(\gamma + \delta)] \}, \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} A &= B = (K_H^2 + 1 - 2K_H \cos \delta)^{1/2} a c \sin \alpha, \\ \gamma &= k \Delta x \sin \alpha \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

式(11)は、境界上の線流量 Q_0^t が格子間隔 Δx だけ離れた点の $(t+t_0-t_1)$ での線流量 Q_1 によって与えられるとき、境界の反射率は K_R となることを示す。

3) 数値計算法

伊藤ら¹⁾と同様の staggered scheme を用いて式(2)の差分化を行い、式(1)に対応した初期波を、水深変化の影響を評価して境界IVおよびV上で与えて計算する。計算領域については、沖波波長 L_0 を基準とし、岸沖方向に $6L_0$ および沿岸方向に $12L_0$ とする。差分の格子間隔については正方格子とし、次式のようにする。

$$\Delta x = \Delta y = L_0/10, \quad \Delta t = \Delta x \sqrt{\pi/2g L_0} \dots\dots\dots (13)$$

4) 水理実験結果との比較

前述の数値計算法のヘッドランド周辺の波の変形計算への適用性を検証するため、図-3に示す京大防災研究所附属宇治川水理実験所の平面水槽を用い、ヘッドランド周辺の散乱波に関する実験を行った。図-4は、ヘッドランドの長さ l の変化による背面の波高変化を比較した結果であるが、砕波後の波の回折波の重要性が明らかとなっている。

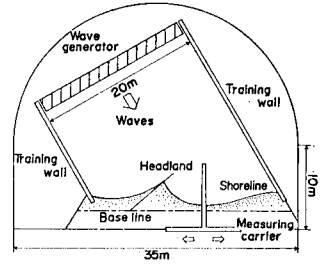


図-3 平面水槽と実験装置の概略

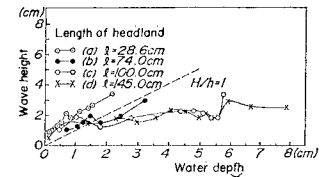


図-4 ヘッドランド背面に沿う波高変化

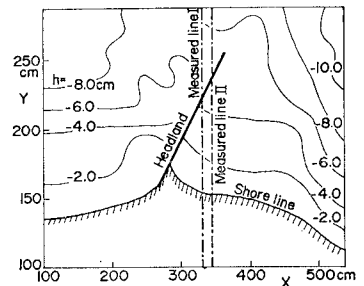


図-5 模型海浜の平面形状と測線位置
と考えられるので、図-5に示す測線IおよびII上での波高分布を比較することとし、図-6にその結果を示す。実験値は砕波、反射波およびヘッドランドのしゃへい効果によって測線上で大きく変動しているが、数値解はへ

ッドランドの前面および背面を通じてこれとよく対応しており、この数値波動解析法がこの種の波の変形計算に対して十分な適用性を持っているものと判断される。

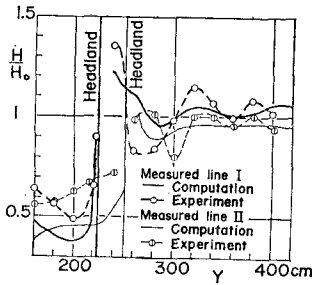


図-6 測線上での実験結果と計算結果との比較

3. ヘッドランド

周辺の海浜流の計算

ここでは、前述の手法によってヘッドランド周辺の波高・波向分布を計算し、radiation stress 分布を求め、これに直接支配される強制状態の海浜流を取扱う。

(1) 数値計算法

座標を図-7のように定め、radiation stress 項、平均水位項および底面摩擦項に支配される強制状態の海浜流を与え、

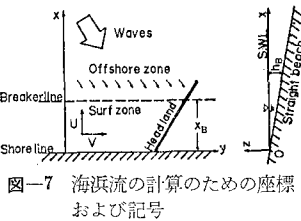


図-7 海浜流の計算のための座標および記号

輸送流れ関数 ψ を導入すれば、平均流に関する基礎方程式は、容易に数値計算に都合のよい次式に書き換えられる。

$$\nabla^2 \psi + A_1 \phi_x + A_2 \phi_y = A_3 \dots (14)$$

ここに、 $A_1 = (\partial u_0 / \partial x) / u_0$ 、 $A_2 = (\partial u_0 / \partial y) / u_0$ 、 $A_3 = -(1/\rho C_f u_0) [\partial \{ (\partial S_{xx} / \partial x + \partial S_{xy} / \partial y) \} / h] / \partial y - \partial \{ (\partial S_{yx} / \partial x + \partial S_{yy} / \partial y) / h \} / \partial x$ であり、 u_0 は $2H/Th^2 \sinh kh$ で表され、入射波の水粒子の底面での軌道速度の振幅と $1/h^2$ との積、 C_f は底面摩擦係数、および S_{xx} は次式で与えられる radiation stress tensor である。

$$\left. \begin{aligned} S_{xx} &= S_{11} \cos^2 \theta + S_{22} \sin^2 \theta, \\ S_{yy} &= S_{11} \sin^2 \theta + S_{22} \cos^2 \theta, \\ S_{xy} &= S_{yx} = S_{22} \sin 2\theta, \\ S_{11} &= (\rho g H^2 / 8) \{ 2(c_g / c) - 1/2 \}, \\ S_{22} &= (\rho g H^2 / 8) \{ (c_g / c) - 1/2 \}, \\ c_g / c &= 1/2 + kh / \sinh 2kh \end{aligned} \right\} \dots (15)$$

ここに、 θ ；格子点上の入射角である。

数値計算は、 $C_f = 0.01$ とし、前述の数値波動解析法の格子に一致させた正方格子を用い、加速定数を 1.3 とした SOR 法によった。この場合、全周の境界値が必要となり、汀線およびヘッドランド周辺においては $\psi = 0$ とできるが、側方および沖側境界値は未知となっている。そこで、数値計算を簡略化する立場から、計算

領域を十分に広くとり、Noda³⁾ による周期性境界条件の外に、側方および沖側境界ではそれぞれ沿岸および岸沖方向に一様になるとする一様性条件を用い、境界条件の相違による流況への影響について検討を行った。その結果、radiation stress 分布に直接支配される強制状態の海浜流を考えていることもあって、ヘッドランド周辺においては、境界条件の影響はほとんど現れず、ヘッドランド周辺の流況特性を考察する限りでは、いずれの境界条件を用いてもよいことがわかったが、以下では従来通りの周期性条件を用いて計算する。

4. ヘッドランド周辺の海浜流の流況特性と安定海浜形成機構との関係

ここでは、前述した手法によって、斜面勾配 1/50 の一様海浜上に築造されたヘッドランド周辺の海浜流の計算を系統的に行い、流況特性と入射波条件との関係について検討し、流況特性と安定海浜の形成条件を明らかにする。

(1) 流況特性と入射波条件との関係

図-8 は、 $H_0/L_0 = 0.02$ の条件において入射角の影響を考察するため、 $\theta_0 = 5^\circ$ および 30° の波に対して計算した波高・波向分布を示し、図-9 はこれに対応した流況図である。入射角が大きくなるに従って、海浜流の沿岸方向成分が卓越し、同時に、ヘッドランド背後の回折波領域が大きくなり、それに伴って循環流の沿岸方向のスケールも大きくなっている。また、 $\theta_0 = 30^\circ$ の場合に顕著になっている波高の沿岸方向の周期的変化は、1 種の 'standing edge waves' によるものであり、その発生原因は下手側無反射境界からの数値計算上の誤差による反射

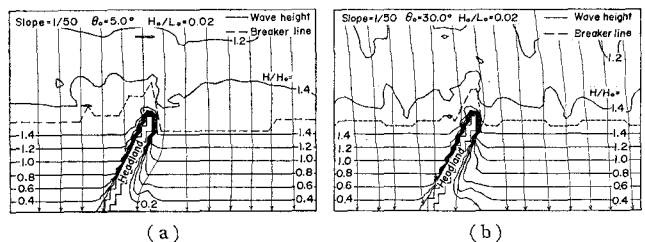


図-8 ヘッドランド周辺の波高・波向分布に及ぼす入射角の影響

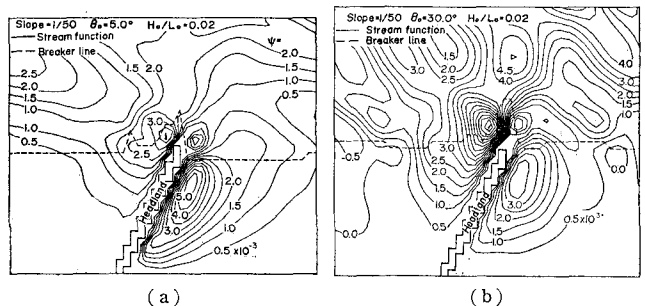


図-9 ヘッドランド周辺の海浜流に及ぼす入射角の影響

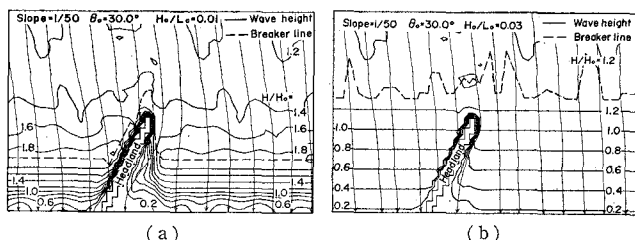


図-10 ヘッドランド周辺の波高・波向分布に及ぼす沖波波形勾配の影響

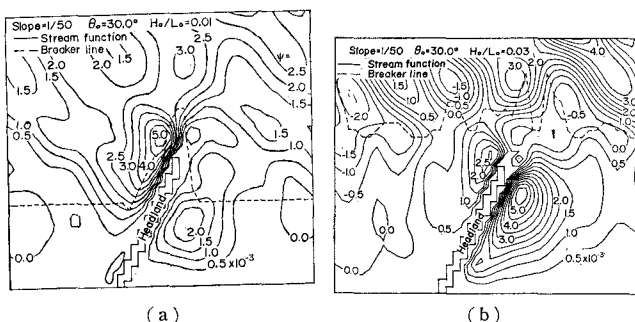


図-11 ヘッドランド周辺の海浜流に及ぼす沖波波形勾配の影響

波にあると考えられる。しかし、これによって碎波帯外での海浜流に蛇行性が現れるものの、ヘッドランド周辺の流況が変わることではないため、この影響は無視する。

図-10 は、 $\theta_0 = 30^\circ$ の条件において、前述の図-11 と併せて碎波線位置の流況に及ぼす影響を考察するため、 $H_0/L_0 = 0.01$ および 0.03 の波に対して計算した波高・波向分布を示し、図-11 はこれに対応した流況図である。これからも前述した図-9 と同様な傾向が見られ、循環流のスケールは碎波帯の幅とヘッドランド先端の汀線からの距離に支配されることがわかる。

(2) 安定海浜形成のための海浜流とその条件

前述した平面水槽による実験において、ヘッドランド前面を通過する海浜流がヘッドランド背後の循環流と接続する場合には、上手側の漂砂はヘッドランド背後に輸送され、それがヘッドランドの基部付近に堆積して湾曲海浜が形成されることを観察している。前述したいずれの流況図においても、ヘッドランド背後の回折波によって循環流が生じているが、これがヘッドランド前面の海浜流と接続するのは、ヘッドランド先端が碎波帯内に位置する場合に限られていた。ただし、碎波線がヘッドランド先端よりもかなり沖側に移ると、前述の図-11 の $H_0/L_0 = 0.03$ の場合に見られるように、海浜流がヘッドランド背後の循環流に卓越してしまうため、海浜流の主要部分はヘッドランド背後に回り込まず、ヘッドランド

下手側に流下することになる。したがって、上手側の海浜流がそのままヘッドランド背後に回り込むには、ヘッドランド前面の海浜流の流速が背後に形成される循環流と均衡し、両者が一体となることが必要であり、このとき上手側漂砂がヘッドランド背後に運び込まれるものと考えられる。図-9 の $H_0/L_0 = 0.02$ の場合の結果はこのような場合に相当しているものであり、ヘッドランドの碎波線に対する位置は安定海浜の形成において極めて重要であり、離岸堤工法の場合と同様、碎波線付近にヘッドランド先端が位置する場合が安定海浜の形成には最も有効と推察される。

5. 結 語

以上、本研究では、安定海浜工法による湾曲海浜の形成機構および形成のための条件をヘッドランド周辺の海浜流の流況特性から究明するため、数値波動解析法と保存則との関係を明らかにすると同時に、水理実験結果との比較によ

ってこの種の波の変形計算への数値波動解析法の適用性を見出し、さらに、この結果を基にして実施したヘッドランド周辺の強制状態の海浜流の数値シミュレーションによって、以下のことが推察された。

すなわち、ヘッドランド先端が碎波線近傍に位置するような海浜および入射波条件においては、ヘッドランド前面の海浜流と主として回折波によって形成される背面の循環流とが接続し、このとき、上手側漂砂がヘッドランド背後に堆積することが可能となることから、湾曲海浜は海浜流のこうした流況下に最も活発に形成され、このときの海浜および入射波条件が安定海浜形成のための条件となるものと推察された。

なお、本研究は昭和57年度文部省試験研究(代表・京大土屋教授)による研究成果の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 伊藤喜行・谷本勝利: 波向線交差領域での波の回折——数値波動解析法の応用(2)——, 第19回海岸工学講演会論文集, pp. 325~329, 1972.
- 2) 谷本勝利・小舟浩治・小松和彦: 数値波動解析法による港内波高分布の計算, 港研報告, 第14巻, 第3号, pp. 36~58, 1975.
- 3) Noda, E. K.: Nearshore circulations under sea breeze condition and wave-current interactions in the surf zone, Tetra Tech. Rep., TC-149-4, pp. 41~140, 1974.