

安定海浜の形成：その理論形状と適用性

土屋 義人*・陳 活雄**・和田 宙司***

1. 緒 言

自然の砂浜の中には、その両端を岬で囲まれた美しい弧状の砂浜が存在する。これは砂浜の両端にある岬が境界条件となって、その変形を規制し、ある一定の汀線形状を持つ安定な砂浜へと変化するように作用していると考えられる。このような砂浜に注目して、岬（ヘッドランド）を効果的に設置して安定な砂浜を形成させて海岸侵食を制御しようという工法、headland controlがSilvester (1976) によって提唱されたが、その後、土屋、Silvester、芝野 (1979)、Silvester、土屋、芝野 (1980) の共同研究から静的および動的に安定な砂浜に拡張され、研究された安定海浜工法であり、最近ではポスト離岸堤工法のひとつとして現地海岸に適用され始めた。自然に調和した砂浜海浜が形成されるため、砂浜自体の利用価値も極めて高く、海水浴場、海浜公園等のレクリエーション施設への利用のみならず、新たな自然美を持つ海岸環境の創造としても有効となる。

本研究では、最初に Tsuchiya・Refaat (1993) (または Refaat, 1990) による安定海浜の存在とその形状に関する理論に基づいて、その理論形状を若干修正し、その特性について述べたあと、天の橋立海岸に形成されている安定と思われる砂浜群の形状と現地の来襲波浪の特性を用いて計算し理論形状とを比較して、理論の適用性を調べる。こうして、自然において沿岸漂砂量が一定であるような砂浜の存在が理論的に確認されると、それは土屋 (1990) (Tsuchiya・Refaat, 1993) による安定な砂浜群を形成させて海岸侵食を制御し砂浜の安定化を図ろうとする安定海浜工法の基礎を与えるものである。

2. 安定海浜の理論形状

(1) 海浜変形の基礎方程式

従来、汀線変化の予測モデルにおいては、海浜変形の連続方程式と沿岸漂砂量式の2つを基礎方程式として用いたものが使われてきた。この場合、沿岸漂砂量の分布

は沿岸方向の波浪特性の効果としてのみ考慮される。Refaat・Tsuchiya (1991) は、このような沿岸漂砂量の不等流性が陽わに導入されていない方程式系からでは、沿岸漂砂が一定であるような安定海浜の存在を確かめることはできないし、またその理論形状を求めることも不可能であると考えた。そこで、沿岸漂砂量が沿岸流速に比例することを示し、不等流沿岸流の理論を展開して、これらより不等流沿岸漂砂量則の一般表示を得た。それを海浜変形の連続方程式と連立させて、次式のような海浜変形の基礎方程式を導いた。

$$\frac{a_1}{k} \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{a_2}{k^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x}{h_b} \right)^2 = f(x) - \frac{a_3}{k} \frac{\gamma C_f \sqrt{g}}{\pi} \frac{Q_x}{h_b^{1/2}} \quad (1)$$

ここに、

$$f(x) = \frac{\gamma^2}{16} g h_b^2 \left\{ \sin 2a_b - 2 \cos^2 a_b \frac{\partial y_b}{\partial x} - (5\beta_1 - 6\beta_2 + 6\beta_3 \sin^2 a_b) \frac{\partial h_b}{\partial x} - 2\beta_3 h_b \sin 2a_b \frac{\partial a_b}{\partial x} \right\} \quad (2)$$

これは沿岸漂砂に関する運動方程式であり、 y_b は碎波帯の幅、 h_b は碎波水深、 a_b は碎波角、 Q_x は沿岸漂砂量、 k は沿岸漂砂量と沿岸流速との関係における比例定数である。また a_i , β_i ($i=1, 2, 3$) は不等流沿岸流の方程式を求める際の流速分布から運動量、エネルギー、および水深などの平均操作における係数であり、実用上定数として取り扱える。一方、沿岸漂砂による海浜変形を対象とするときの連続方程式は、次式で与えられる。

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)h_k} \frac{\partial Q_x}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

ここに、 h_k は漂砂の移動限界水深で、実際には海浜変形の限界水深であり、 λ は底質の空隙率である。したがって、式(1)および(3)が海浜変形の基礎方程式を構成する。

(2) 安定海浜の存在とその理論解

式(1)および(3)において、定常状態で沿岸漂砂量が一定であるような海浜の存在を確かめ、その理論形状を求めるために $\partial/\partial t=0$, $\partial Q_x/\partial x=0$ として海浜形状を表わす方程式を誘導した (Refaat, 1990, Refaat・Tsu-

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

** 正会員 (株)ニュージェック水工部長

*** 正会員 東北電力(株) 土木部

chiya, 1991) が, 若干計算に不十分な点があったので, 沿岸漂砂の不等流性を直接導入するために, 式(1)の第2項 $\partial(Q_x/h_b)^2/\partial x$ となることを考慮すると, 次式が得られる.

$$\frac{d^2 y_0}{dx^2} + \bar{d}_1 \frac{dy_0}{dx} = \bar{d}_2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに,

$$\left. \begin{aligned} \bar{d}_1 &= \frac{2mA}{h_b \sin 2a_b} \left\{ 1 - \left(\frac{h_c}{h_b} \right)^5 \right\} \\ \bar{d}_2 &= \frac{2m}{h_b} \left\{ 1 - \left(\frac{h_0}{h_b} \right)^{\frac{5}{2}} \right\} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{1}{2}(4 + \cos^2 a_b) \\ h_c^5 &= \frac{32a_2 m}{Ak^2 \gamma^2} \left(\frac{Q_x^2}{g} \right), \quad h_0^{\frac{5}{2}} = \frac{16a_3 C_f}{\pi k \gamma \sin 2a_b} \left(\frac{Q_x}{\sqrt{g}} \right) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

であり, m は海浜の平均勾配, γ は碎波高水深比, C_f は海底摩擦係数, および g は重力の加速度である. この方程式は不等流状態において, 沿岸漂砂が一定である場合の海浜形状を示す2階常微分方程式であり, 沿岸漂砂の上手および下手の海浜変形に対する境界条件によって, その解が確定することを示している. 2つの境界条件として, $x=0$ および L において $y_0=0$ とし, 式(4)中における $\bar{d}_1$ および $\bar{d}_2$ は沿岸方向に変化する x の関数であるが, 近似的にこれらが定数, すなわち海浜変形前の値であるとすれば, その解は次式で表される.

$$\frac{y_0}{L} = \frac{\bar{d}_2}{\bar{d}_1} \left\{ \left(\frac{x}{L} \right) - \frac{\left(\exp(-\bar{d}_1 L(x/L)) - 1 \right)}{\exp(-\bar{d}_1 L) - 1} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに,

$$\left. \begin{aligned} \bar{d}_1 L &= \frac{2mA}{\sin 2a_b} \left(\frac{L}{h_b} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{h_c}{h_b} \right)^5 \right\} \\ \frac{\bar{d}_2}{\bar{d}_1} &= \frac{\sin 2a_b [1 - \bar{Q}_x]}{A \left\{ 1 - \left(\frac{h_c}{h_b} \right)^5 \right\}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

であり, $\bar{Q}$ は安定海浜に沿う沿岸漂砂量とそれが形成される前の直線状海浜における沿岸漂砂量との比である. この式は砂浜の両端に海浜変形を規制する境界条件が存在した場合, そこに形成される安定海浜の理論形状を表すが, その形状は2つのパラメータ $\bar{d}_2/\bar{d}_1$ および $\bar{d}_1 L$ によって規定されることがわかる.

(3) 理論安定海浜形状の特性

ここでは, それぞれのパラメータが安定海浜の理論形状におよぼす影響を調べる. $\bar{Q}_x$ —一定($a_b=25^\circ$)として, $d_1 L$ を変化させたときの理論形状を図-1に示す. これは $\bar{Q}_x=0$, すなわち静的に安定な海浜形状を表すが, 次の点が特記される. 第1には, 沿岸漂砂量が存在しない

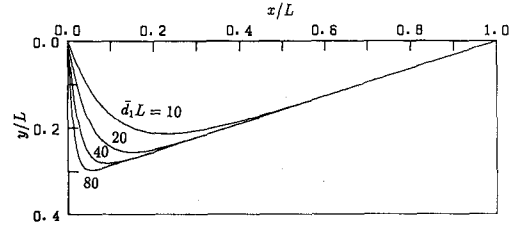


図-1 $\bar{Q}_x$ を一定として $d_1 L$ を変化させたときの理論形状

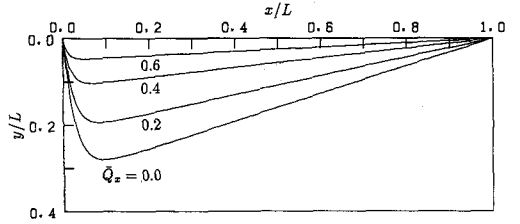


図-2 $\bar{Q}_x$ を変化させたときの理論形状 ($L/h_b=150$)

静的に安定な海浜形状までが理論的に存在するということであり, 第2に $\bar{d}_1 L$ の値が大きくなるほど沿岸漂砂の上手側に傾いた形状を示すことである. いいかえれば, $\bar{d}_1 L$ の値が大きい最大湾入率を示す位置が沿岸漂砂の上手側に生じるような形状を示す. また, $\bar{d}_1 L$ の表示によれば, 海底勾配 m および碎波角 a_b が一定であれば, 境界条件の間隔と碎波水深の比 L/h_b が大きくなるほど湾入率が增大することになる.

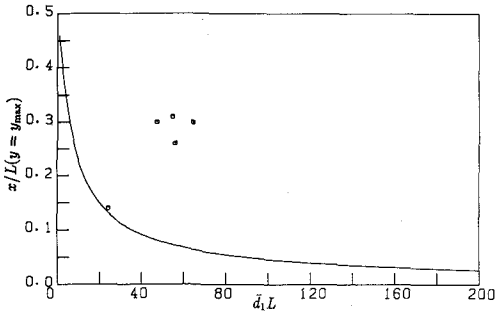
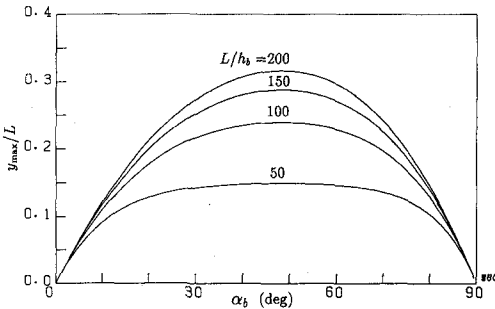
また, 図-2には $L/h_b=150$ とし, さらに $\tan a_b$ を一定として, パラメータ中に含まれる $\bar{Q}_x$ を変化させたときの理論形状を示す. これはいわゆる動的に安定な海浜の場合に対応するが, このうち $\bar{Q}_x=0$ の場合は静的に安定な海浜形状で, $\bar{Q}_x$ の増大とともに安定海浜形状が偏平となり, 最大湾入率を示す位置は上手側に近づくことがわかる. これによれば上手側からの沿岸漂砂が増加した場合, 漂砂は最大湾入率を示す位置より下手側から堆積することになる.

次に, 最大湾入率を示す位置 $(x/L)_{y_{\max}}$ は, $\bar{d}_1 L$ だけの関数として, 次式で表される.

$$\left(\frac{x}{L} \right)_{y=y_{\max}} = \frac{1}{\bar{d}_1 L} \ln \left\{ \frac{\bar{d}_1 L}{1 - \exp(-\bar{d}_1 L)} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

この関係を図-3に示すが, $(x/L)_{y_{\max}}$ は $\bar{d}_1 L$ が0に近づくとき0.5に収束するが, $\bar{d}_1 L > 40$ となると, その影響をほとんど受けず, 単調に減少する. 現地海岸においては, ほとんどの場合 $d_1 L > 40$ となるので, 理論では湾入率は0.05~1.0程度となる.

次に, 静的に安定な海浜で $m=1/75$ とした場合, $y_{\max}/L$ と a_b の関係を図-4に示す. この関係によると, $y_{\max}/L$ ははじめ a_b が増加すると大きくなるが, 45° あた

図-3 最大湾入率を示す位置と d_1/L との関係図-4 静的に安定な海浜の最大湾入率と α_b との関係

りで最大となったあと 90° に近づくにつれて 0 に収束する。これは等流状態では沿岸漂砂量が $\sin 2\alpha_b$ に比例するため、 $\alpha_b = 45^\circ$ で最大となり 90° で 0 となることに対応しているともと思われる。また、 L/h_b が大きくなれば、 $y_{\max}/L$ も大きくなり、安定海浜の規模が大きいほど最大湾入率が增大することがわかる。

最後に、静的に安定な海浜の場合を対象とし、 $m=1/25$ および $L/h_b=150$ としたとき、 α_b を変化させたときの海浜の理論形状を図-5 に示す。図中の印は最大湾入位置を表わし、 α_b が増加とともに直線上を往復しており、最大湾入率を示す位置 $(x/L)_{y_{\max}}$ も α_b に対して、最大湾入率 $y_{\max}/L$ と同様の傾向を示すことがわかる。

3. 天の橋立海岸における砂浜群への適用

(1) 砂浜の形成を支配する波浪条件

この砂嘴海岸には図-6 に示すように、サンドパイパ

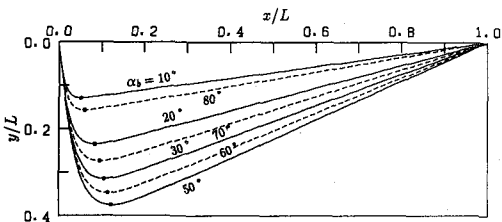


図-5 静的に安定な海浜の理論形状

ス工法が適用されてから、突堤間に砂浜群が形成されている。宮津湾の湾口が狭く、その方向が北北東を向いており、極めて限られた wave window を持つため、この海岸にはかなり限定された波浪が来襲する。この海岸に形成されている砂浜群の形状を前述した安定海浜の理論形状と比較するためには、砂浜の形成を支配する波浪条件を知らなければならない。そこで、wave window の両限から、若狭湾沖の波浪条件として、波向きを N から $N48E$ までは対象とし、宮津湾に進入する波浪の屈折図を作り、来襲波浪の可能性を考察した。その結果、天の橋立海岸の砂浜の形成に支配的に影響すると考えられる波浪は、屈折による波高減少の少ない宮津湾の wave window の範囲内から進入するもとであり、具体的には湾口から石川県沖に至る吹送距離は約 140 km 程度の海域で発生する波浪であると推定された。その波浪を観測風を考慮して追算すると、有義波周期 $T_{1/3}=8$ s、および有義波高 $H_{1/3}=4$ m 程度となり、wave window の範囲内からの周期 8 s の波浪は、若狭湾の沖波波高に対して天の橋立海岸沖での波高は $1/10$ 程度になるが、宮津湾でもさらに発達して波高が増大するものと考えられるので、 $N48E$ のときの波向きで天の橋立海岸沖（水深 20 m）における波高を 100 cm として碎波角及び碎波水深を求めることにした。この場合、波向き線法を用いて屈折計算を実施したが、波の周期が短く、また水深 3 m 以浅の範囲が問題になるので、広域の屈折計算に続いて、狭域のそれは高精度の計算ができるようにメッシュ間隔を配慮した。うねりを撮影した航空写真から波向きを求めた結果と比較して、この計算法の精度が十分であることを確かめた。

(2) 理論海浜形状との比較

前述した理論形状と実際の形状の比較を図-7 に示す。ただし、破線は理論形状、実線は実際の砂浜の汀線形状であり、突堤（ヘッドランド）の番号は図-6 に示した通りである。これからわかることは、沿岸漂砂の上手側付近では、この安定海浜の理論においてはヘッドランドによる波の回折の効果を導入していないので、理論形状は実測形状に一致しないが、全体的な砂浜の汀線形状は両者ともよく対応している。

つぎに、安定海浜の理論形状は前述したように 2 つのパラメータ $\bar{d}_1/L$ 、 $\bar{d}_2/\bar{d}$ によって規定されるので、これらのパラメータのうち d_1/L の形状特性に及ぼす影響について考察する。まず、砂浜の形状特性として、最大湾入率を示す位置 $(x/L)_{y_{\max}}$ と d_1/L との関係を図-8 に示す。ここに、図中の理論曲線は式(9)で表されるものである。理論では、この値は $d_1/L > 40$ となると、その影響をほとんど受けず約 0.1 のとなるが、天の橋立海岸の砂浜では d_1/L が 50 前後で、0.3 程度となって最大湾入率を取る位

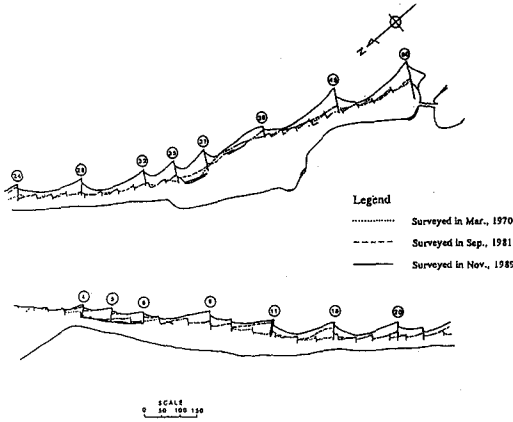
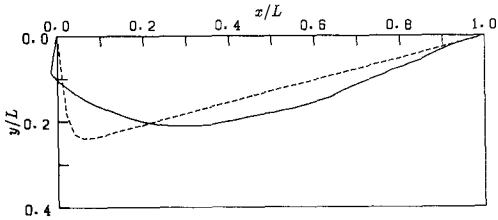
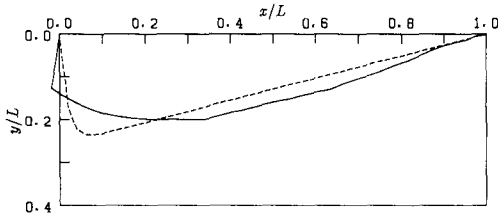


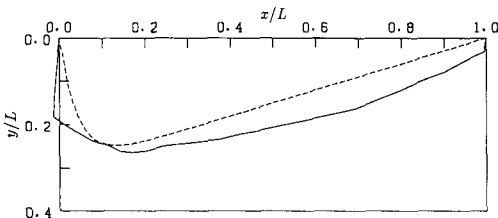
図-6 天の橋立海岸の砂嘴形状とヘッドランドの番号



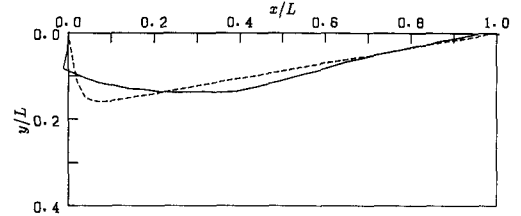
(a) No. 15-11 のヘッドランド間



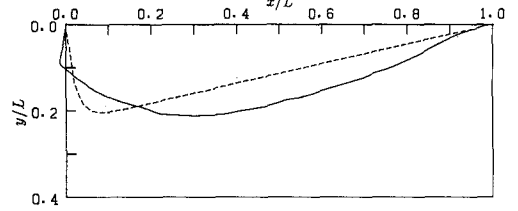
(b) No. 20-15 のヘッドランド間



(c) No. 35-32 のヘッドランド間



(d) No. 37-39 のヘッドランド間



(e) No. 50-45 のヘッドランド間

図-7 天の橋立海岸に形成された安定海浜形状と理論形状との比較

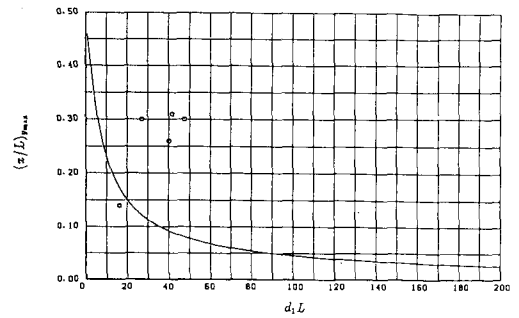


図-8 最大湾入率を示す位置と d_1/L との関係

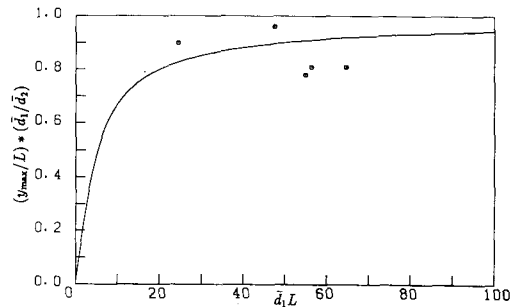


図-9 最大湾入率と d_1/L との関係

置が浜の中央に寄っていることがわかる。これらのことは前述したように、ヘッドランドによる波の回折効果が導入されていないため、実際の海浜より理論形状の方が上手側に傾いていることによるものである。

次に最大湾入率 $y_{\max}/L$ と d_1/L の関係を図-9に示す。図中の理論曲線は式(9)に式(7)を代入して、両辺に d_1/d_2 をかけることにより碎波角 α_b および無次元沿岸

漂砂量 $\bar{Q}$ に関係なく1つの曲線で表される。これによれば理論による最大湾入率は実測値にかなりよい一致を示すことがわかる。このことは理論形状における湾入部分の面積は実際のそれに近く、両者の平面的な形状特性がよく一致しているといえる。

以上の比較から理論形状と実際の形状とは全体的によ

く対応していると考えられ、この理論の適用性を確かめることができたと言ってよいであろう。

4. 結 語

以上、安定海浜の存在と形状に関する理論において、沿岸漂砂量の方程式から沿岸漂砂の不等流性を直接とり入れて安定海浜の理論形状を表す方程式を誘導し、安定海浜形状を表わす理論解を求め、その特性を明らかにした。

ついで、天の橋立海岸に形成されている動的に安定と思われる砂浜の平面形状と理論形状とを比較した。その場合、砂浜の形成を支配する波浪条件を検討し、碎波高、碎波角を計算して理論形状の適用に用いたが、ヘッドランドによる波の回折効果が直接理論には導入されていないので、その近傍における砂浜の形状は若干相違するが、全体的には両者はよく対応しており、特に最大湾入率は非常によく一致することがわかった。

このことから、安定海浜の形成には沿岸漂砂の不等流性が大きく寄与していることがわかり、またこの比較か

ら、この理論の適用性を確かめることができたので、安定海浜工法の理論的基礎が確立できたと言える。

参 考 文 献

- Refaat, H. El-din A.A. (1990): The formation and reduction processes of river deltas and their control, Doctor Thesis, Kyoto University, p. 227.
- Refaat, H. El-din A.A and Y. Tsuchiya (1991): Formation and reduction processes of river deltas; theory and experiments, Bulletin Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 41, pp. 177-224.
- Silvester, R., Y. Tsuchiya and T. Shibano (1980): Zeta bays, pocket beaches and headland control, Proc. 17th ICCE, ASCE, pp. 1306-1319.
- Tsuchiya, Y. and H.E.A.A. Refaat (under review): Formation of stable sandy beaches; Theory and application, Jour. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE.
- 土屋義人・R. Silvester・芝野照夫 (1979): 安定海浜工法による海岸侵食制御について, 第26回海岸工学講演論文集, pp. 191-194.
- 土屋義人 (1990): 安定海浜の形成と海岸侵食制御について—安定海浜工法とは?—, 第22回海岸講習会講義集, (社)全国海岸協会, pp. 11-26.