

# 修正 Hsu モデルによるヘッドランド周辺の 最適安定海浜形状の計算法

芹沢 真澄\*・宇多 高明\*\*・三波 俊郎\*\*\*  
古池 鋼\*\*\*・神田 康嗣\*\*\*\*

## 1. ま え が き

岬や防波堤背後に形成される弓型の安定汀線形状を計算する方法としては、汀線変化モデルなど漂砂量公式と連続式とを連立させて数値的に解く方法があるが、これ以外に Hsu・Evans (1989) は極座標表示で 2 次のオーダーまでの回帰分析により直接的に汀線形状を求める計算法を示した。この方法は繰り返し計算を必要とせず、また計算が容易なために、現地海岸への適用に優れているが、ヘッドランドの諸元や養浜工の計画検討に用いようとすると土砂収支の概念が含まれていないため適用範囲が限られるという問題点があった。そこで宇多ら (1993) は漂砂の移動高を導入して土砂収支が成立するようモデルを改善した。その後、このモデルをヘッドランドの施設検討に適用しようとしたところ、この式はヘッドランドから離れた地点での汀線が入射波向と直交するという条件を満足していないことが判明した。そこで、本研究ではまずこの条件を満足するよう Hsu の式の修正を行い、次にヘッドランドの最適設計への応用を試み、これによりヘッドランド諸元の最適設計が可能なことを示す。

## 2. Hsu モデルの修正

図-1 に示すように、防波堤やヘッドランドのヘッド部などの不透水性構造物を考えたとき、その背後に形成される安定汀線を極座標で表示する。いま防波堤の先端に点 P、防波堤から十分離れた地点で、そこでの汀線の方が波峰線と平行である地点に点 Q を定める。そして角 SPQ を  $\beta$ 、PQ を  $R_0$  とし、さらに汀線上の任意点の座標を  $(R, \theta)$  としたとき、Hsu は安定汀線を与える式 (1) を導いた。

$$R/R_0 = C_0 + C_1(\beta/\theta) + C_2(\beta/\theta)^2 \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、係数  $C_0, C_1, C_2$  は  $\beta$  の関数である。

図-1 において点 Q では  $R=R_0, \theta=\beta$  であるから、

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1 \quad \cdots \cdots (2)$$

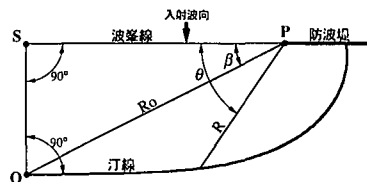


図-1 記号の定義と座標系

が成立する。また点 Q で汀線の方が波峰線と平行であるためには、点 Q において  $\theta$  をわざわざ変化させても  $SQ = R \sin \theta$  の長さが不変という条件から、 $R \sin \theta$  を  $\theta$  で微分して  $R = R_0, \theta = \beta$  と置いたものが 0 であるべきことより、

$$C_1 + 2C_2 = \beta / \tan \beta \quad \cdots \cdots (3)$$

が成立しなければならない。式 (2) (3) より  $C_0, C_1, C_2$  のいずれか一つが決まれば残りの 2 つは自動的に決定される。すなわち 3 つの係数は互いに従属関係にある。

ここで Hsu の式を調べたところ、式 (2) は満足するが式 (3) は満足しないことがわかった。そこで Hsu の式による汀線形の計算値を利用して係数値を修正した。ここではまず  $C_0$  を求めることとし、式 (2) (3) を用いて式 (1) の係数を  $C_0$  のみとしたあと、 $\beta$  を固定して  $\theta$  を変化させて Hsu の式で計算した汀線形のデータをもとに最小自乗法で  $C_0(\beta)$  の値を求めた。さらに実用の便利を図るために  $C_0$  を  $\beta$  の関数として表した。変域  $10^\circ \leq \beta \leq 80^\circ$  において  $C_0$  は次の多項式で表される。

$$C_0 = A_0 + A_1\beta + A_2\beta^2 + A_3\beta^3 + A_4\beta^4 \quad \cdots \cdots (4)$$

ここに  $A_0 = -0.0116, A_1 = 0.376, A_2 = -0.451, A_3 = 0.276, A_4 = -0.331$  であり、この場合の相関係数は 0.999 である。ただし、この式に使う  $\beta$  の単位は radian である。

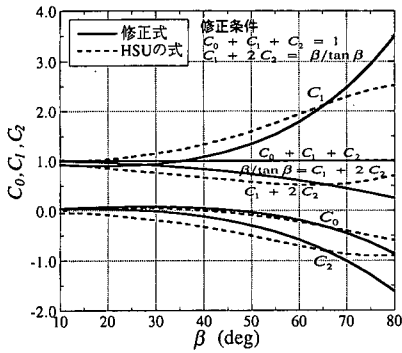
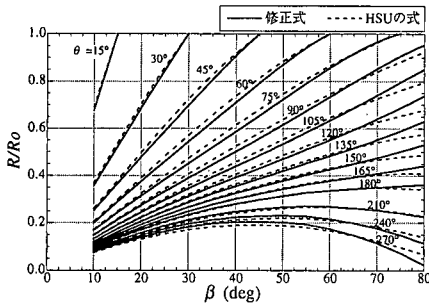
また  $C_1, C_2$  は式 (2) (3) より、次式で求められる。

$$C_1 = -2C_0 - \beta / \tan \beta + 2 \quad \cdots \cdots (5)$$

$$C_2 = C_0 + \beta / \tan \beta - 1 \quad \cdots \cdots (6)$$

図-2 には  $C_0, C_1, C_2$  と  $\beta$  の関係を示す。 $C_0, C_1, C_2$  とともに Hsu の値とかなりの違いが見られる。いずれの値も  $\beta = 65^\circ$  では Hsu の値と一致する。本研究の式は Hsu の式と同様、式 (2) を完全に満足する。しかし本研究の式で

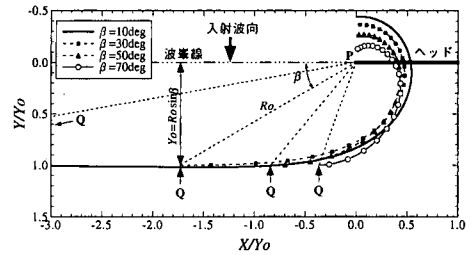
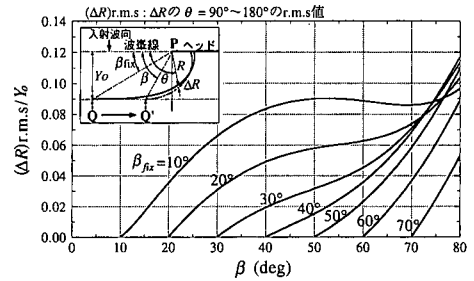
\* 正会員 海岸研究室(有)  
\*\* 正会員 工博 建設省土木研究所河川管理総括研究官  
\*\*\* 正会員 海岸研究室(有)  
\*\*\*\* 正会員 (株)エムエーシー 海洋調査部

図-2 Hsuの式の係数値  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  とそれらの修正値の比較図-3 Hsuの式とその修正式における  $R/R_0$  と  $\beta$  の関係

は式(3)をも完全に満足するが、Hsuの式では満足しない。図-3は  $R/R_0$  と  $\beta$  の関係図においてHsuの式と本研究の式を比較したものである。Hsuの式はQ点での汀線と波向との直交条件を満足しないため、例えばQ点に突堤を設置した場合やQ点を通して汀線に直交する線に対して対称にヘッドランドを配置しようとする場合の汀線形状予測に違いが出る。

### 3. 修正 Hsu モデルにおける汀線予測誤差

Hsuの式を用いて安定汀線を計算する際、図-1に示すQ点の設定法がしばしば問題となる。Q点は岬やヘッドランドより十分離れ、その付近の汀線が波の入射方向と直角となる位置に設置する必要があるが、実際には各種海岸構造物が存在することなどの理由から、ヘッドランドから十分離れた場所にQ点を設定できないこともある。このような場合には、Q点をヘッドランドに近づけた位置にせざるを得なくなる。このようにすると、ヘッドランド背後の汀線形状にはかなりの違いが現れる。このことから、以下ではQ点の変動がもたらすヘッドランド背後の汀線形状の変化について調べた。この場合でできるだけ普遍的な結論を得るために、ヘッド部離岸距離  $Y_0 = R_0 \sin \beta$  を基準長さとして無次元化を行った。まず図-4には、Q点の位置を4通り変化させた場合の安定

図-4 離岸距離  $Y_0 = R_0 \sin \beta$  で無次元化した安定汀線形状図-5 点  $Q(\beta)$  の変化に対する遮蔽域の汀線変化量の r.m.s 値

汀線形状を示す。Q点がP点に近づくにしたがい、ヘッドランド背後の曲率が大きくなることわかる。

図-5には、Q点よりヘッドランド側にある距離近づいた点Q'から安定汀線の計算を行った場合におけるヘッド部背後の波の遮蔽域内の汀線変動量の  $Y_0$  に対する比をまとめたものである。ここに、汀線変動量は極座標を用いているため、半径方向の変化量  $\Delta R$  とし、また、Q, Q'点はいずれも極座標表示として、 $\beta_{nx}$ ,  $\beta$  とする。この図によると、例えばQ点が  $\beta_{nx} = 10^\circ$  で与えられる場合にQ'点を  $\beta = 30^\circ$  とすれば、ヘッド部背後の遮蔽域内における  $\Delta R$  の自乗平均誤差は約  $0.07 Y_0$  となり、約7%の誤差が生じることになる。また、図-5によれば自乗平均誤差はQ点の極座標  $\beta_{nx}$  が  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  と小さな値をとるときは、最初比較的なだらかに誤差が増大したあとQ'点の極座標  $\beta$  にあまり依存せずになだらかに変化し、最後にヘッド部近傍で誤差が増大する傾向がある。一方、 $\beta_{nx}$  が大きな値を持つ場合は  $\beta$  とともにほぼ線形に増大する特徴を示す。

### 4. ヘッドランド周辺の最適安定海浜の計算法

ヘッドランドを建設する際にしばしば問題となるのは、ヘッドランドを計画しようとする海岸がもともと侵食性海岸であって前浜が狭いために、侵食対策としてある地点にヘッドランドを建設すると、隣接海岸の侵食を助長して護岸の被災や越波を招いてしまうことである(宇多・五十嵐, 1995)。このような場合には、ヘッドラ

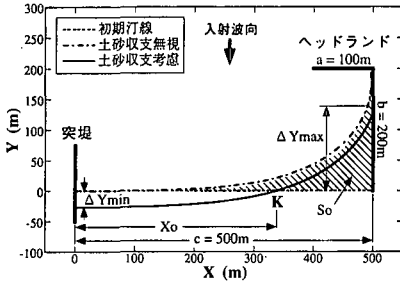
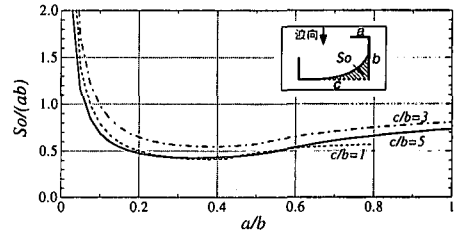
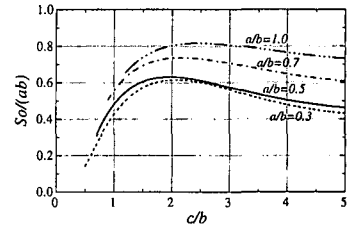


図-6 ヘッドランドと突堤間の安定汀線形状

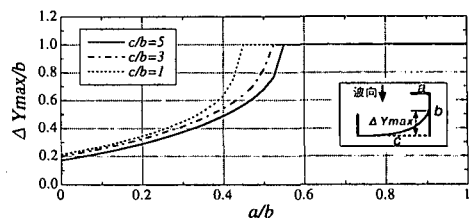
ンドの建設後、養浜により全体的に前浜を広げることが必要であるが、その場合の養浜土砂量と効果との関係は明らかにされていない。そこで、本研究では、この点について修正 Hsu 式により検討した。まず、図-6 には一例として、 $c=500$  m 離れた区域の左端に突堤を、右端にヘッドランド（ヘッド部半堤長： $a=100$  m、ヘッド部離岸距離： $b=200$  m）を設置した場合の計算汀線を示す。領域内での土砂収支を考えずに、 $x=0$  m で初期汀線に接する解を求めると、一点鎖線となる。一方、土砂収支を考慮した上で、侵食域と堆積域で移動高が同一とすれば、両者の面積は等しくなければならないから、実線で示すように  $X=0$  m では汀線は初期汀線より  $\Delta Y_{\min}$  だけ後退する。また、この点より右に  $X_0$  離れた点 K までの範囲で汀線は後退する。図-6 は、ある閉じた領域内でヘッドランドを建設すると、舌状砂州の形成と同時に必ず汀線の後退域が生じることを示す。したがって汀線の前退・後退の程度を予め予測して初めてヘッドランドと養浜の設計が可能となる。以下ではこのような点について検討する。

ヘッドランドを設計する場合、その背後に形成される舌状砂州の面積が最大となるための最適条件を明らかにすることは重要である。そこで、図-6 に斜線で示す舌状砂州の面積を  $S_0$  として、ヘッド部背後の矩形面積  $ab$  に対する相対的面积比  $S_0/(ab)$  をパラメータとして選んで、この値が  $a/b$  あるいは  $c/b$  によってどのように変化するかについて調べた。 $S_0/(ab)$  と  $a/b$  の関係を図-7 に示す。相対面積は、 $c/b$  の値にかかわらず、 $a/b$  が小さい時 1~2 と非常に大きな値を示すが、 $a/b$  の増大とともに急激に減少し、 $a/b=0.3$  付近でいったん 0.5 程度の値に収束する。さらに  $a/b$  が 0.4 以上になると  $a/b$  の増加とともに緩やかに増大して 0.5~0.8 程度の値を示している。 $a/b$  が小さなき、相対面積は大きな値をもつが、 $b$  が一定で  $a$  が小さくなれば  $S_0$  の絶対値は小さくなるので、工学的に見れば  $a/b$  の小さな値を選択することは意味がない。同様に、 $a/b$  をパラメータとして変化させた場合における、 $S_0/(ab)$  と  $c/b$  の関係を図-8 に示す。これによると、相対面積は  $c/b$  の値に応じて極大値を有してい

図-7 相対舌状砂州面積  $S_0/(ab)$  と  $a/b$  の関係図-8 相対舌状砂州面積  $S_0/(ab)$  と  $c/b$  の関係

る。極大値を取る  $c/b$  は  $a/b$  にも弱く依存するが、ほぼ 2~3 にある。このことは、ヘッド部背後の矩形面積  $ab$  を基準としたとき、ヘッドランド背後の舌状砂州の相対面積を最大にする  $c/b$  が存在していることを意味する。ところで、本研究で求めた修正式では、ヘッドランドから十分離れた場所に位置する突堤の付け根部分で汀線は初期汀線に接しているから、この突堤をとり外した上で、突堤位置を通る法線に対して左右対称な位置にヘッドランドがあると考えてもよい。このことから、ヘッドランド間の最適沿岸方向距離は  $(4\sim6)b$  で与えられる。

ヘッドランドを設計する際、ヘッド部離岸距離と半堤長の決め方は十分明らかにされていない。そこで、まず土砂収支は考慮しない場合に関して、ヘッドランド背後で汀線が最も前進した部分での最大汀線前進量を  $\Delta Y_{\max}$  とし、 $\Delta Y_{\max}/b$  と  $a/b$  の関係を調べることにによりこの点について検討した。図-9 に計算結果を示す。計算は、ヘッドランド～突堤間距離  $c$  と、ヘッド部離岸距離  $b$  の比  $(c/b)$  を 3 通り変えて行った。これによると、例えば  $c/b=5$  の場合、舌状砂州の最大汀線前進量は  $a/b$  の増加とともに増大し、 $a/b=0.55$  で  $\Delta Y_{\max}=b$  となって、汀線はヘッド部についてしまう。また、 $a/b$  が 0.4~0.6 の間

図-9  $\Delta Y_{\max}/b$  と  $a/b$  の関係

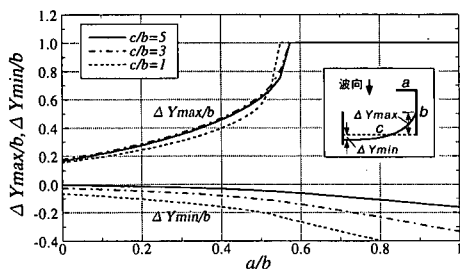


図-10 土砂収支を考慮した場合における  $\Delta Y_{\max}/b$ ,  $\Delta Y_{\min}/b$  と  $a/b$  の関係

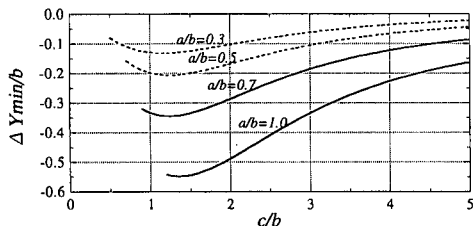


図-11 土砂収支を考慮した場合における  $\Delta Y_{\min}/b$  と  $c/b$  の関係

での  $\Delta Y_{\max}$  の増加は著しい。  $c/b$  が小さくなった場合、すなわちヘッドランド～突堤間距離が短くなった場合にも同様な傾向が見られるが、これらの場合は  $\Delta Y_{\max}$  の増大が早く起こる。以上の点は、ヘッドランド背後の舌状砂州の突出長さを大きくしたい場合、  $a/b$  を  $c/b$  に依存して 0.5～0.6 とするのが合理的であり、それ以上堤長を伸ばしても意味がないことを示す。また、  $a/b$  が 0.2 程度すなわち離岸距離の割に堤長の短いヘッドランドは舌状砂州の形成から見ると効果がないと言える。

実際のヘッドランドの設計では、養浜を併せて行うことが多いので、土砂収支を考慮した場合について同様な検討を行った。結果を図-10 に示す。なお、この場合にはヘッドランド背後における最大汀線前進量  $\Delta Y_{\max}$  だけでなく、突堤付け根における最大汀線後退量  $\Delta Y_{\min}$  も同時に求められるから、ヘッド部離岸距離  $b$  に対する相対汀線後退量も合わせて表示した。  $\Delta Y_{\max}/b$  については図-9 と似ているが、  $c/b=5$  の線にいずれの場合も近づいている。したがって  $\Delta Y_{\max}$  を最大にする  $a/b$  はほぼ 0.55 となる。同時に、汀線後退量を減少させるには、  $c/b$  をできるだけ大きくすべきことが分かる。図-11 には、  $a/b$  をパラメータとして  $\Delta Y_{\min}/b$  と  $c/b$  の関係を示す。  $\Delta Y_{\min}/b$  は  $c/b$  が 1～1.5 付近で絶対値最大となり、その後  $c/b$  が大きくなると単調に絶対値が小さくなる。このことは、土砂収支を考えた場合には、突堤の付け根での汀線後退量を小さくするには、  $c/b$  をできるだけ大きく取ることが必要であることを示す。

ヘッドランドの建設後、背後の前浜を前進させるため

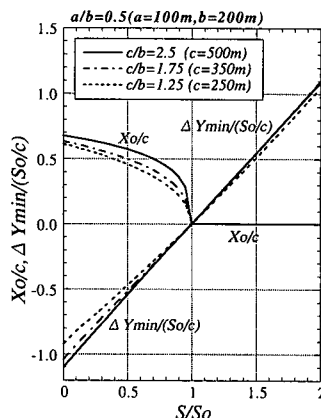


図-12  $X_0/c$ ,  $\Delta Y_{\min}/(S_0/c)$  と  $S/S_0$  の関係

に養浜を行うとする。この場合養浜土砂量に限りがあると、ヘッドランドから離れた部分での汀線後退を防止できないこともある。そこで、養浜土砂量と突堤基部での汀線後退量の関係について検討した。いま、図-6 のヘッドランドについて養浜を行ったとして、その養浜土砂量を移動高で割った換算平面積増加量を  $S$  としたとき、  $\Delta Y_{\min}/(S_0/c)$  と  $S/S_0$  の関係を調べたのが図-12 である。計算は  $c$  を 500 m, 350 m, 250 m と 3 通り変えて行った。いずれの場合もよく似た特徴が現れており、相対汀線後退量  $\Delta Y_{\min}/(S_0/c)$  は  $S/S_0$  と比例関係にあり、  $S=S_0$  であれば汀線は後退しないが、養浜を全く行わないと汀線は  $S_0/c$  程度生じることがわかる。逆に養浜量を  $S_0$  の 2 倍入れても汀線の前進量は  $S_0/c$  程度である。一方、汀線が前進より後退へ初めて変化する点 K までの突堤からの沿岸距離  $X_0$  の  $c$  に対する相対距離  $X_0/c$  は、  $S/S_0$  と非線形関係にあり、  $S/S_0$  がほぼ 0.5 より小さい時は単調に減少するが、1 近くでは減少度が大きい。このことは、汀線の後退域を造らぬようにするには、養浜量を増やさねばならないが、  $S_0$  に移動高を乗じた値に近い量を投入すると、汀線の後退域が急激に減少することが分かる。図-12 より  $\Delta Y_{\min}$  と  $S$ ,  $S_0$  の間には次の関係が成立する。

$$\Delta Y_{\min} = (S - S_0)/c \quad (7)$$

したがって汀線を最小でも  $\delta$  だけ前進させたい場合には、養浜土砂量は、次式で与えられる面積に移動高を乗じた値となる。

$$S = \delta \cdot c + S_0 \quad (8)$$

## 5. ヘッドランドの最適諸元の設定フロー

前節までの議論により、ヘッドランドの諸元の持つ特性が明らかになったので、それらを要約し、ヘッドランド背後の舌状砂州の面積を極大とするようなヘッドランドの最適諸元の設定フローとしてまとめると図-13 となる。以下では具体例として  $b=150$  m として諸元の計

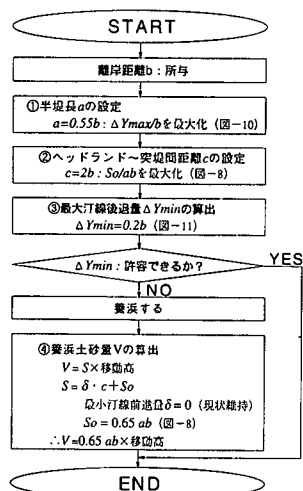


図-13 ヘッドランド背後の舌状砂州の面積を極大にする  
ヘッドランド最適諸元の設定フロー

算を行う。まず、図-10より土砂収支を考慮した計算で舌状砂州の最大汀線前進量を最大にする上で  $a/b=0.55$  が必要であるから、 $a$  は約 80 m となる。次に、舌状砂州の相対面積を最大にする上で、ヘッドランド～突堤間距離  $c$  とヘッド部離岸距離  $b$  の間には、図-8 に示したように  $c=(2\sim3)b$  の関係が成立するが、 $a/b$  を 0.55 に選んだから  $c$  は  $2b$  にほぼ等しく、したがって 300 m となる。一方、突堤基部の最大汀線後退量については、図-11 に示すように  $\Delta Y_{\min}=(0.1\sim0.2)b$  が成立するが、 $c=2b$  なので  $\Delta Y_{\min}=0.2b$  となり、 $\Delta Y_{\min}$  は 30 m となる。ここでヘッドランドを建設する前の汀線幅が 30 m であったとすると、汀線が最も後退する場所では前浜幅はゼロとなる。これでは護岸からの越波がひどくなることから、養浜してもとの 30 m 幅の前浜を創生したいと考える。この時の必要土砂量は、式(8)より  $\delta=0$  m として、 $S_0$  に移動高を乗じた値となる。この  $S_0$  の値は、図-8 より  $a/b=0.55$ 、 $c/b=2$  より  $S_0=0.65ab \approx 8000 \text{ m}^2$  となるから、結局この値に移動高を乗じたものが必要土砂量となる。このようにヘッドランド諸元と養浜土砂量が決定できる。ただし、ヘッドランド背後の堆砂効率を極大化することのみが目標とならない場合もあるので、個々の問題に応じて図-13 のフローを適当に修正することが必要である。

## 6. 結 論

本研究の主要な結論は次の通りである。

① Hsu の式は、ヘッドランドから十分離れた位置で汀線が波の入射方向と直交するという基本条件を満足しないことを指摘し、新たにこれらの条件を厳密に満足す

る回帰式を導いた。次にこれをヘッドランドの配置計画手法に適用した。この場合、土砂収支も計算に取り入れた。

② ヘッド部半堤長および離岸距離を  $a$ 、 $b$  としたとき、ヘッドランド背後の舌状砂州の相対面積  $S_0/ab$  は  $a/b$  に依存し、 $a/b$  が 0.2 より小さくなると急激に増大するが、ヘッドランド背後を静穏にする上で現実的に採用できる  $a/b$  の範囲では、 $a/b$  の増加とともに緩やかに増大し、 $S_0=(0.5\sim0.8)ab$  の大きさを示す。

③ ヘッドランド背後の舌状砂州の相対面積  $S_0/ab$  を最大にするヘッドランド～突堤間距離  $c$  が存在し、その長さは、 $a/b$  に依存して  $(2\sim3)b$  で与えられる。また、突堤位置で汀線は初期汀線に接しているために、突堤位置を境に汀線形状を折り返すと、舌状砂州の面積を極大にするに必要なヘッドランド間の距離は  $(4\sim6)b$  となる。

④ ヘッドランド背後の舌状砂州の最大汀線前進量を  $\Delta Y_{\max}$  としたとき  $\Delta Y_{\max}/b$  を最大にする  $a/b$  はほぼ 0.5 にあり、これ以上  $a/b$  を大きくしても汀線前進量は増加せず、逆に  $a/b$  を小さくすると  $\Delta Y_{\max}/b$  は急激な減少を示す。

⑤ 土砂収支を考慮した計算では  $\Delta Y_{\max}/b$  を最大にする  $a/b$  はほぼ 0.55 で与えられ、 $a/b$  がこれより小さくなると汀線前進量は急激に減少する。一方、突堤付け根における汀線後退量を  $\Delta Y_{\min}$  としたとき、 $\Delta Y_{\min}/b$  を小さくするには  $a/b$  が小さいほどよいが、 $\Delta Y_{\max}/b$  が最大となる  $a/b=0.55$  では、汀線後退量  $\Delta Y_{\min}$  は  $(0.1\sim0.2)b$  生じる。また  $c/b$  をできるだけ大きくすれば汀線後退量は減少する。

⑥ 舌状砂州の面積を  $S_0$  としたとき、養浜量がゼロであれば突堤の付け根部分での汀線後退量  $\Delta Y_{\min}$  はほぼ  $S_0/c$  に等しい。逆に  $S_0$  に移動高を乗じた量の 2 倍の土砂量を確保できれば、汀線はいずれの場所でも後退せず、最小汀線前進量はほぼ  $S_0/c$  となる。突堤付け根での汀線を後退させず、ある量  $(\delta)$  前進させたい場合には、養浜土砂量は  $\delta \cdot c + S_0$  に移動高を乗じた値となる。

⑦ 以上の結果を総合し、ヘッドランド背後の舌状砂州の面積を極大とするようなヘッドランドの最適諸元の設定フローを示し、具体的にヘッド部離岸距離が 150 m の場合の最適諸元を示した。

## 参 考 文 献

- 宇多高明・五十嵐龍行 (1995): 前浜の狭い海岸でのヘッドランド (人工岬) 建設に伴って生ずる問題とその解決法—島根県持石海岸を例として、海洋開発論文集, Vol. 11, pp. 79-84.
- 宇多高明・岩崎福久・加藤恒太郎 (1993): ポケットビーチ内の安定汀線の計算法—東播磨海岸の人工海浜への適用, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 401-405.
- Hsu, J. R. C. and C. Evans (1989): Parabolic bay shapes and applications, Proc. Intern. Civ. Engrs., Part 2, 87, pp. 557-570.