

河口砂州高を低減させるための人工リーフ を用いた河口処理法の検討

RIVER MOUTH IMPROVEMENT USING AN ARTIFICIAL REEF TO REDUCE BERM HEIGHT OF RIVER MOUTH BAR

宇多高明¹・片山靖浩²・森 伸生²・高橋 功³・古池 鋼⁴・芹沢真澄⁵

Takaaki UDA, Yasuhiro KATAYAMA, Nobuo MORI, Isao TAKAHASHI, Kou FURUIKE
and Masumi SERIZAWA

¹ 正会員 工博 (財) 土木研究センター理事なぎさ総合研究室長 (〒 110-0016 台東区台東 1-6-4 タカラビル)

² 三重県紀南県民局 (〒 519-4300 三重県熊野市井戸町 371)

³ 正会員 (財) 土木研究センター (〒 110-0016 台東区台東 1-6-4 タカラビル)

⁴ 海岸研究室 (有) (〒 160-0011 東京都新宿区若葉 1-22 ローヤル若葉 301)

⁵ 正会員 海岸研究室 (有) (〒 160-0011 東京都新宿区若葉 1-22 ローヤル若葉 301)

The contour line change model was applied to predict the beach changes around artificial reefs built on the Shichiri-Mihama coast composed of coarse materials and facing the Pacific Ocean. The formation of a salient behind an artificial reef was reproduced well. On the basis of this numerical simulation, the model was further applied to the investigation of the improvement of the mouth of the Shihara River flowing into the same coast. In front of the mouth, an artificial reef is built to reduce the berm height. The appropriateness of this method in the reduction of the berm height, which is necessary for creation of a floodway, was confirmed by numerical simulation, if parallel jetties are further built to the shoreline to obstruct longshore sand transport on the shore face.

Key Words : Improvement of river mouth, artificial reef, Shihara River, contour line change model

1. まえがき

熊野灘に面した延長約20kmの砂礫海岸である七里御浜海岸は、熊野灘からの高波浪の作用のため砂州高が約4.5mとわが国で最も高いという特徴を有している (Takeda, 2003)。一方、海岸線に沿って発達した砂丘地の背後には低地が広がるため、七里御浜海岸への流入河川にあっては、いずれも河口閉塞が大きな問題となってきた。例えば、図-1は1996年当時の志原川河口の完全閉塞状況を示す。志原川では近年の台風0416号来襲時にも河口が閉塞し、流域で大きな浸水被害が発生した。こうした状況より抜本的意味からの河口処理が求められている。

一般に、河口処理では導流堤方式が多く採用されている。しかし、急深な七里御浜海岸では長大な導流堤の建設は施設規模が大きくなり、また耐波安定性の確保が難しく、かつ周辺海岸へ及ぼす影響が懸念される。そこで、河口部に人工リーフを設置して砂州高を抑え、同時に陸上部にのみ小規模な導流堤を伸ばして洪水流の流下を容易にする策を考えた。人工リーフを利用し



図 - 1 志原川河口部の閉塞状況 (1996 年)

た河口処理については、山口県の橋本川を対象とした検討 (宇多ら, 1994a) が行われ、また新潟県の荒川河口に隣接する乙大日川河口では実際に人工リーフが建設され、その効果が実測された (宇多ら, 2000)。また本研究で対象とする志原川河口にあっては、暗渠と人工リーフの併用案に関する実験的検討が行われた (宇多ら, 1996) が、実現にまでには至っていない。

人工リーフによる河口処理は、河口前面での砂州形成は許すものの、その砂州高を人工リーフの消波効果

により低下させることを主眼とするものである。一般に、離岸堤など波の遮蔽構造物が造られると、構造物背後では波高低下と同時に砂が周辺域から集められ、舌状砂州が形成される。このような舌状砂州が河口前面にあると洪水流下の障害となる。とくに、中小河川にあっては砂州自体の存在よりも、むしろ波の作用で形成される砂州高が高まり、これが河川流を塞ぎ止めることにより洪水が起こる。したがって、河口前面に砂州の存在は許しても、砂州高を低減させることが洪水対策上有効であるといえる。このようなことから、本研究では人工リーフにより砂州高を低下させる手法について検討した。まず、志原川河口の南5kmに位置する阿田和地区に建設された人工リーフ周辺の地形変化を等深線変化モデルにより再現し、その上で当モデルを用いて志原川の河口対策について検討した。

2. 海浜変形モデル

芹沢ら（2002）のモデルに、宇多ら（1994b）の実験結果に基づくバリアー形成時の砂州侵入距離を組み合わせることで、河口部の砂州形成を含む海浜変形モデルを構築した。計算に際しては、まず人工リーフなどの構造物を配置した条件で波浪場を計算し、次いで等深線変化モデルによる海浜変形計算を行った。このモデルは、任意形状の施設が存在する条件下での海浜変形予測が可能である。単純な人工リーフ設置条件でのモデルの適用については、鳥居ら（2003）にも示されているが、基礎式は式(1)～(6)で与えられる。

$$q_x = \varepsilon_x(z) \cdot K_x \cdot (EC_g)_b \cos \alpha_b \left\{ \sin \alpha_b - \frac{1}{\tan \beta_c} \frac{K_2}{K_x} \frac{\partial H_b}{\partial x} \right\} \quad (1)$$

$$q_z = \varepsilon_z(z) \cdot K_z \cdot (EC_g)_b \cos^2 \alpha_b \sin \beta_c \cdot \left(\frac{\cot \beta}{\cot \beta_c} - 1 \right) \quad (2)$$

$$\cot \beta = -\frac{\partial Y}{\partial z} \quad (3)$$

$$\varepsilon_z(z) = \varepsilon_x(z) = \varepsilon(z) / \int_{-h_c}^{h_R} \varepsilon_z(z) dz \quad (4)$$

$$\varepsilon(z) = \begin{cases} = \frac{2}{h_c^3} \left(\frac{h_c}{2} - z \right) (z + h_c)^2 \dots (-h_c \leq z \leq h_R) \\ = 0 \dots (z < -h_c, h_R < z) \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (6)$$

ここに、 x は沿岸座標、 z は地盤高、 t は時間、 Y は等深線位置、 $(EC_g)_b$ は碎波点のエネルギーフラックス、 α_b は碎波波向、 $\varepsilon_x(z)$ 、 $\varepsilon_z(z)$ は沿岸および岸沖漂砂量の水深方向分布であり、宇多・河野（1996）による式(4)および式(5)で与える。 K_x 、 K_z は沿岸・岸沖漂砂量係数、 K_2 は小笹・ブランプトン項の係数、 h_c は波による地形変化の限界水深、 h_R は砂州高である。平衡勾配 $\tan \beta_c$ には初期勾配を与える。計算にはスタッガードメッシュを

用いた陽形式の差分法を用い、碎波波高は後述のKomar・Gaughan（1972）による式より求める。等深線上の各点での沿岸、岸沖漂砂量 q_x 、 q_z を式(1)、(2)で与え、これより x - z 空間の2次元の連続式を解けば等深線変化量が算出される。

人工リーフ背後においては、方向分散法（酒井ら、2003）により回折係数 K_d と回折波向を求め、人工リーフなしの場合の碎波波高に K_d を乗じて波高を算定する。さらに、波向には回折波向を用いる。また、 h_c は K_d を乗じて低減させる。同様に、 h_R についても K_d を乗じて低減させる。また、浜崖形成や限界水深以深への土砂の落ち込みの処理法、および構造物周辺の境界の処理法は芹沢ら（2002）と同一である。

砂州高の算定には、武田・砂村（1982）によるバーム高算定式（式(7)）に、碎波波高の式としてKomar・Gaughan（1972）による式(8)を代入して使用した。

$$B_h = 0.125 H_b^{5/8} (gT^2)^{3/8} \quad (7)$$

$$H_b = 0.563 (H_o'/L_o)^{-1/5} H_o' \quad (8)$$

式(7)に式(8)を代入すると式(9)が得られる。

$$B_h = 0.17 \sqrt{H_o' L_o} \quad (9)$$

ここに、 B_h は静水面上の砂州高、 H_b は碎波波高、 H_o' は換算沖波波高、 T は周期、 g は重力加速度である。 H_o' と T が与えられれば、式(9)から B_h が得られ、その値に潮位を加えれば砂州標高 Z_b となる。さらに、人工リーフの背後では、伝達波高 H_t と伝達波周期から決まる換算沖波波長 $(L_o)t$ を用い、式(9)において $H_o' \equiv H_t$ 、 $L_o \equiv (L_o)t$ として砂州高 B_h を求め、潮位とともに水位上昇量 η_t を加えて砂州標高 Z_b を算出する手順である。

人工リーフの諸特性は、波浪条件と人工リーフの天端水深および天端幅より、「人工リーフの設計の手引き」（国土交通省海岸室、2004）の算定図表から読み取った。なお、水位上昇量は沿岸流による低減を考慮して算出値の1/2とした。

以上は人工リーフの堤長が無限長の場合である。しかし、人工リーフの堤体長は一般に有限であり、端部からも回折波が侵入する。このため砂州高も各点の波高に応じて変化することになる。この評価には、人工リーフの K_t を与えて方向分散法（酒井ら、2003）により人工リーフ背後の各点の回折係数 K_D^* を計算し、この結果をもとに各点の砂州高 Z_b^* を次式によって算出した。

$$Z_b^* = H.W.L. + B_{ho} (K_D^*)^a \quad (10)$$

$$a = \ln \left\{ \frac{Z_b - H.W.L.}{B_{ho}} \right\} / \ln K_t \quad (11)$$

ここに、 B_{ho} は人工リーフがない場合の砂州高である。 Z_b は前述の堤長が無限長の場合に対する人工リーフ背後の砂州標高である。計算では B_{ho} 、 K_t 、 Z_b を入力条件と

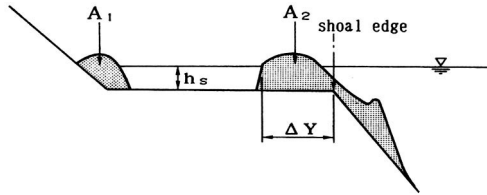


図-2 移動床実験による砂州侵入距離の下限値

して与える．式(11)によれば， K_d^* が人工リーフ設置時の K_l に等しい地点では，式(8)で求められた砂州高に一致する．さらに，波高が高くなると砂州高が高くなり，波高低減の全くない地点では，波が直接入射する場合の砂州高 B_{ho} に一致するという性質を有する．

河道奥への砂州侵入距離について，宇多ら（1994b）は，移動床実験に基づきバリアー形成時の砂州侵入距離と入射波高との関係を示した．これより，図-2中に示されているA2のようなバリアー形成時の砂州侵入距離の下限値 ΔY は実験的に次式が示され，砂州は作用波高の約20倍の距離まで侵入する．これを河道内の砂州形成の岸側限界位置として用いた．

$$\Delta Y = 20 \cdot H'_o \quad (12)$$

3. 阿田和地先の人工リーフ周辺の海浜変形の再現

(1) 阿田和地区の実測汀線変化と現地状況

まず，1985年5月（人工リーフ建設前），1996年12月（建設途中）および2003年（建設後）の3時期の空中写真を用いて，それぞれの汀線位置を写真上から計測し，その変化を調べた．結果を図-3に示す．人工リーフの建設に伴い舌状砂州が形成され，汀線が前進している．また2,3号リーフに比べ相対的に規模の小さい4号リーフ背後では汀線の前進量が小さくなっている．人工リーフ背後での汀線の前進に伴って両側では汀線が後退しているが，汀線の前進量と比べ後退量は10m程度と小さい．これは砂州を形成した土砂が人工リーフ両側の海岸から薄く広く集められたためである．

2005年1月6日，阿田和地先の人工リーフ背後に形成された舌状砂州の現地踏査を行った．現地踏査は3基の人工リーフのうち，中央に位置する3号リーフを選んで行った．図-4は，舌状砂州の標高の最も高いバーム上

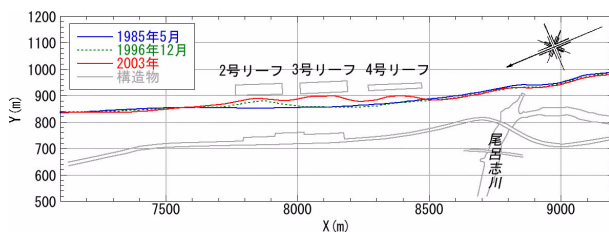


図-3 人工リーフ設置前後の汀線変化（阿田和地区）



図-4 3号リーフ背後の舌状砂州（阿田和地区）



図-5 バームの陸側に形成された斜面（阿田和地区）

より南向きに砂州状況を撮影したものである．バームは数段形成され，作用波浪の履歴が残されていた．ポールを用いた簡易測量によれば，バームの標高は観察時刻（1月6日午前9時，中潮のほぼ平均潮位時）の海面上約3mであった．また，2段にわたるバームを平均して測った前浜勾配は約1/4であった．また，バーム頂の陸側では図-5のように前浜勾配より緩やかな勾配の斜面が形成されていた．河口にあってはこのように高いバームが閉塞の原因となることが容易に推定できる．

(2) 阿田和地区の人工リーフ周辺の海浜変形予測

1987年から人工リーフの建設が始まり2003年までに3基が完成したので，再現計算ではこの間の海浜変形を再現対象とした．計算条件を表-1に示す．波浪条件は，高いバームを有する砂州形成がかなり高いエネルギー

表-1 計算条件

計算ケース	現況再現：阿田和地区人工リーフ区間（1985-2003年） 現況再現：阿田和地区人工リーフ区間（1985-1996年） 将来1：対策無し：既設導流堤（河口掘削のみ） 将来2：現計画：人工リーフ（B=40m, L=100m）、左岸導流堤 40m 延伸 将来3：将来2+人工リーフ堤長 20m 延伸（B=40m, L=120m） 将来4：将来2+人工リーフ堤長 20m 縮小（B=40m, L=80m） 将来5：将来2+人工リーフ天端幅 10m 縮小（B=30m, L=100m）
入射波条件	年数回波： $H_o=3.7m$, $T=9.2sec$, （砕波波高 $H_b=5.7m$, 砕波波向 $\alpha_b=0^\circ$ ）
潮位条件	H.W.L. = T.P. + 0.59m
境界水深・バーム高	地形変化の境界水深 $h_b=-10m$ バーム高 $h_b=+4.4m$ （人工リーフなし）（武田らの算定式） 人工リーフ背後は回折係数に応じて低減
漂砂量係数	沿岸漂砂量係数 $K_a=0.2$, 岸沖漂砂量係数 $K_s=0.2K_a$ 小波・プランプトン項の係数 $K_b=0.2K_a$
沿岸・岸沖漂砂の水深分布	宇多・河野（1996）の3次式
平衡勾配	$\tan\beta=1/7$
土砂落ち込みの境界勾配	1) 陸上：1/2, 水中：1/3
計算等深線範囲	$z=-6m \sim -14m$
計算メッシュ	沿岸方向AX=10m, 鉛直方向AZ=0.5m
計算時間間隔 Δt	$\Delta t=0.025hr$
計算ステップ数	100000steps
境界条件	左右端 $q_a=0$, 岸沖端： $q_s=0$
人工リーフの波高伝達率	$K_r=0.54$ （志原）， $K_r=0.45$ （阿田和2号・3号）， $K_r=0.60$ （阿田和4号）
波浪計算法	方向分散法（酒井ら、2002） $S_{max}=10$

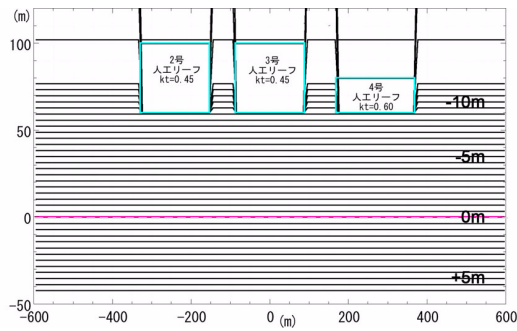


図-6 初期地形（阿田和地区）

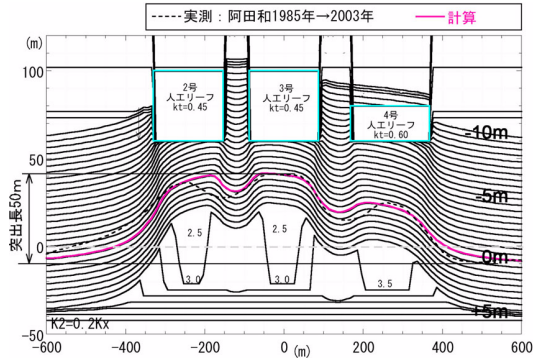


図-7 再現計算結果（阿田和地区）

レベルの波に依存すると考え、当海岸の年数回波（波高 $H_o'=3.7\text{m}$ ，周期 $T=9.2\text{s}$ ）を考え、1987年の深浅図をもとに図-6のように直線平行等深線地形にモデル化した地形条件で計算を行った。人工リーフは複断面形（天端水深：岸側2m，沖側6m以深）であるが，年数回波に対して沖側堤体は波高減衰にほとんど寄与しないのでこれを無視した。また，人工リーフの K_t としては，2，3号リーフは0.45，4号リーフは0.60と設定した。再現計算では，小笹・プランプトン項の漂砂量係数を変化させた試行計算を行ったところ，人工リーフ背後の舌状砂州の突出量から最も再現性が良いのは $K_2/K_x=0.2$ の条件であった。

再現計算結果を実測汀線とともに図-7に示す。実測汀線（破線）と予測汀線（実線）とは十分な精度を持ってよい対応を示している。それにとどまらず，人工リーフ背後において舌状砂州が3次元的に形成される状況がうまく計算できている。注目すべきは，各人工リーフ背後には舌状砂州が形成されたものの，人工リーフ中央では端部と比較して相対的にバーム高が低くなっていること，またその効果は天端幅の広い2，3号リーフで顕著に見られ，天端幅の狭い4号リーフでは効果が低減していることである。このような特性は人工リーフの消波効果と開口部からの回折波の作用によって生じたものであり，これこそが河口処理工として利用したい特性である。このように阿田和の人工リーフを対象とした再現計算では実用上ほぼ満足できる結果が得られた。

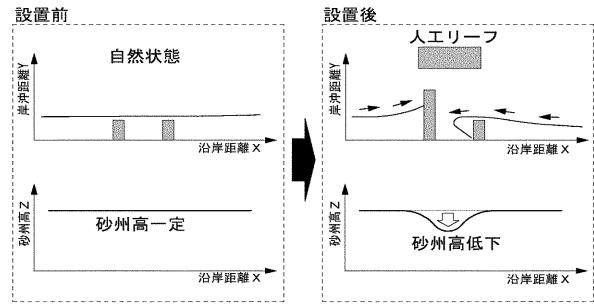


図-8 人工リーフを用いた河口処理の考え方

4. 等深線変化モデルによる河口処理法の検討

(1) 基本的考え方

阿田和地先の人工リーフ背後で得られた海浜変形特性を基礎にした河口処理の基本的考え方は図-8のようになる。人工リーフ背後には舌状砂州が形成されるが，この舌状砂州にあっては人工リーフの中心部ではバーム高が相対的に低くなる。これを利用して水路を確保するのが，本研究の基本的な考え方である。これと同時に，先端が汀線近傍までの導流堤（陸上施工のため建設は容易）を設置すれば，両側から背後へと集まる沿岸漂砂をこれにより阻止できると考えられる。図の例では，右岸導流堤の長さが短いためその先端を回り込んで前浜上を移動する漂砂が河口内へと入り込むが，人工リーフの背後ではその砂州高は相対的に低くなる。また左岸導流堤は長いので沿岸漂砂の回り込みを大きく阻止できる。結局，この方式では汀線に沿っていずれの場所でもバームが形成されるものの，人工リーフの背後でバーム高を局所的に下げることが可能と考えられる。

具体的検討においては，まず現場状況を考慮して人工リーフの天端高をT.P.-2.5m，天端幅を40mと固定し，武田・砂村（1982）の式により河口での砂州高を算定した。これによれば，人工リーフの設置により砂州高を低減し，年数回波であれば砂州高は別途治水上から定められた限界砂州高T.P.+3.0m以下に抑えることができる。

過去の空中写真の比較から，志原川河口部汀線は約10m程度の汀線変化はあるものの，概ね安定状態にあった。一方，2005年測量の深浅図より，汀線を重ねて縦断形比較を行ったものが図-9である。この海岸では，汀線付近から水深11mまでの海底勾配がほぼ1/7と急であるが，11m以深ではほぼ1/50と緩くなる。

(2) 等深線変化モデルによる検討

前節の考え方に従い，等深線モデルによる海浜変形計算を実施し，志原川河口砂州の高さを抑制する人工リーフの諸元について検討した。表-2には各ケースの構造物条件をまとめて示す。ケース1は河口掘削のみ行

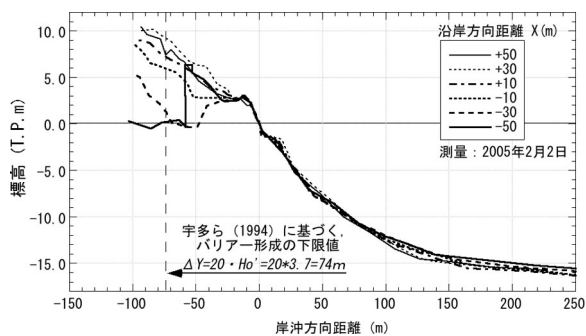


図-9 志原川河口部周辺の海浜縦断面形

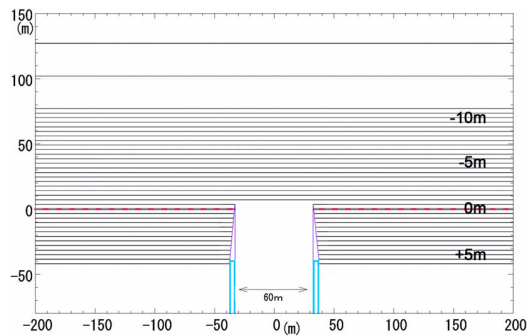


図-10 初期地形（志原川河口部）

表-2 海浜変形計算の検討ケース

ケース1	対策無し：既設導流堤＋河口掘削のみ
ケース2	人工リーフ設置（B=40m、L=100m）、左岸導流堤 40m 延伸
ケース3	ケース2＋人工リーフ堤長 20m 延伸（B=40m、L=120m）
ケース4	ケース2＋人工リーフ堤長 20m 縮小（B=40m、L=80m）
ケース5	ケース2＋人工リーフ天端幅 10m 縮小（B=30m、L=100m）

う基本ケースである。ケース2は、左岸導流堤を40m延伸するとともに天端幅40m、堤体長100mの人工リーフを設置した場合である。ケース3は天端幅40mを保って堤体長を120mとした場合、ケース4は堤体長を80mと短くした場合、ケース5は堤体長120mとした上で、天端幅を30mと短くした場合である。

波浪条件は、阿田和地先と同様、年数回来襲波（ $H_o'=3.7\text{m}$ 、 $T=9.2\text{s}$ ）の直角入射条件とする。初期地形は2005年2月の深浅図をもとに、図-10のように直線平行等深線を有するモデル地形とする。いずれのケースにおいても人工リーフの天端高はT.P.-2.5mとし、この時の K_r はケース2,3,4で0.56、ケース5では0.52とした。予測計算は、2006年を基準として安定形に達するまで実施した。

(3) 予測結果

予測計算の結果を図-11に示す。図-11(a)に示す河口掘削のみのケース1では、河口両側から漂砂が流入し、砂州高4.4mの砂州が形成され河口は完全閉塞となった。ケース2（図-11(b)）でも河口両側から漂砂が流入し、人工リーフ背後では汀線および等深線が沖に張り出して舌状砂州が形成された。河口には砂州が形成されたものの、左岸導流堤近傍にはT.P.+3.0m以下の滞筋が残され、洪水時の流下は可能である。人工リーフの堤長を120mとしたケース3では、ケース2に比べT.P.+3.0m以下の滞筋が河口やや中央部へとずれた。堤長が80mと短いケース4（図-11(c)）と、堤長は120mと長い为天端幅が30mと狭いケース5では、河口両側から漂砂が流入して砂州が形成された結果、T.P.+3.0m以上の砂州が一様に形成され、河川水は流下不可能となった。以上を総括すれば、ケース1では目標砂州高T.P.+3.0mを超える砂州高となったため、対策案として

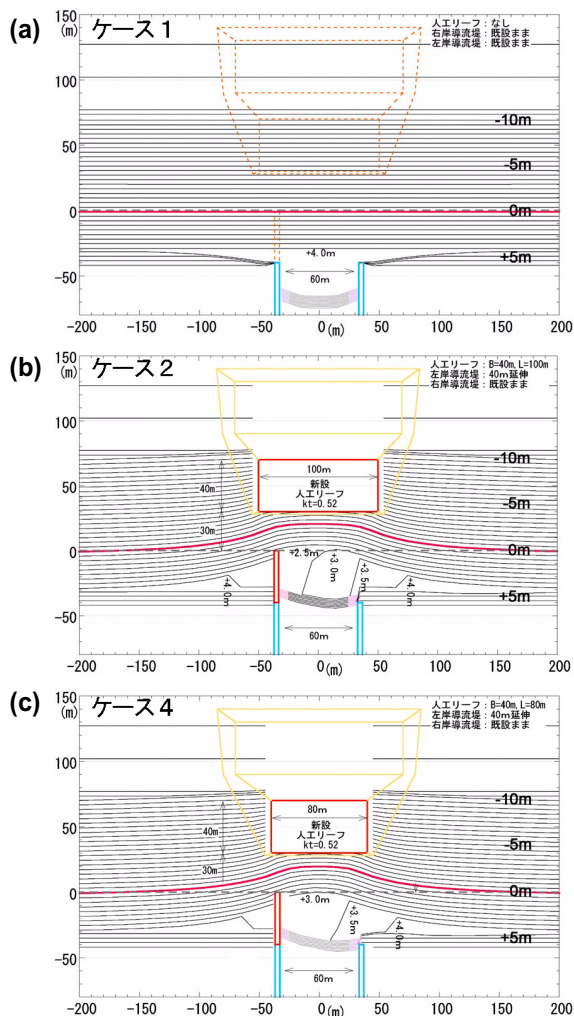


図-11 予測計算結果（志原川河口部）

は不適當である。一方、ケース2およびケース3では漂砂が流入し砂州が形成されるものの、河口内にT.P.+3.0m以下の部分があり、洪水時には河川水は流下可能であって対策案として有効なことが分かった。さらに、ケース2、ケース3およびケース4の予測結果の比較より、基本計画での人工リーフ諸元（天端幅40m、堤体長100m）は概ね妥當であることも分かった。

(4) 入射波の波向を変えた場合の地形変化予測

新宮川河口東方約50km沖の地点を対象として、気象

片がスペクトル法によって実施した波浪推算の結果を利用すると、沖波波向はNNE～SSWの範囲にある。その中で、年数回波の4.0m以上の高波の沖波波向は、ENE～SSWの範囲にあった。一方、志原川河口での海岸線直角方向はN114°Eであり、これに対しENE～SSWは-46.5°～+88.5°となる。計算に使用する屈折後の入射波条件としては、人工リーフよりも岸側の海浜変形を対象とするので、屈折後の入射波浪は人工リーフ岸側のり尻位置（T.P.-2.59m）で評価した。この結果、上記特性を有する沖波は、屈折により-14.4°～+20.1°の範囲となることから、-15°と+20°を入射波の波向条件とした。年数回波の波高3.7mは、T.P.-5.59m地点の波高であるため、屈折後の水深2.59m地点での波高は、両地点の屈折係数比に応じて低減する。屈折による波高低減率は、ENE方向では0.98、SSW方向では0.96となる。以上より、波向を変えた海浜変形予測で使用する波浪条件は、年数回来襲波に対し北側に15°（波高低減率：0.98）と、南側に20°（波高低減率：0.96）傾いた条件とし、初期地形はケース2の人工リーフ設置後、年数回波を海岸線に対し直角入射させて十分安定化した地形とした。

波向を変えた場合の計算結果を図-12に示す。入射波向が-15°の場合、人工リーフ背後に突出していた汀線は北側へ偏向した。一方、入射波向が+20°の場合には逆となった。いずれのケースにおいても、汀線が偏向するものの、左岸導流堤近傍にT.P.+3.0m以下の滞筋が形成され、洪水時の河川水の流下は可能である。よって入射波向が変化した場合においても、基本計画の人工リーフ（天端幅40m、堤体長100m）は所定の性能を有することが分かった。

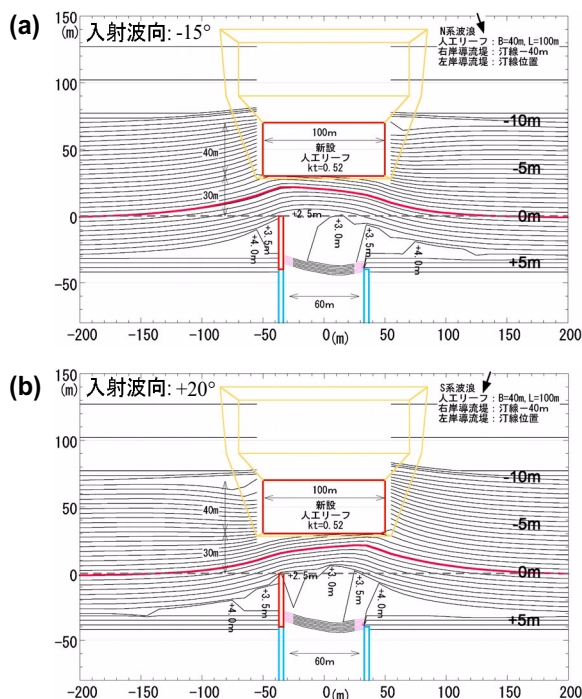


図-12 入射波向を変えた場合の予測計算結果

5. まとめ

人工リーフと、その先端が汀線付近となる導流堤を建設することにより、急勾配海岸における新しい河口処理方式を提案した。まず、河口処理を行う予定の海岸に設置された人工リーフ周辺の海浜地形変化、とくにバームを含む前浜地形変化を、等深線変化モデルを用いて定量的意味から再現した。その上で、人工リーフの背後では舌状砂州は発達するものの、バーム高が低下するという原理に基づいて人工リーフ背後に水路を形成させる手法の妥当性を数値モデルにより明らかにした。なお、現在この人工リーフは施工中なのでその結果については別の機会に報告したい。

参考文献

- 1) 宇多高明・高橋 晃・水魔嘉幸・高木利光：人工リーフを用いた河口処理工の検討，海岸工学論文集，第41巻，pp. 506-510, 1994a.
- 2) 宇多高明・山本幸次・永瀬恭一・五十嵐竜行：バリアー形成過程に関する実験的検討，海岸工学論文集，第41巻，pp. 551-555, 1994b.
- 3) 宇多高明・河野茂樹：海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発，土木学会論文集，No.539/II-35，pp. 121-139, 1996.
- 4) 宇多高明・竹内正幸・筒井胤雄：暗渠と人工リーフを併用した新しい河口処理工に関する実験的検討，海岸工学論文集，第43巻，pp. 611-615, 1996.
- 5) 宇多高明・秋本 修・小池康雄・柿市勝重・黒木利幸・中村利行：河口処理を目的とした人工リーフの波浪減衰および閉塞防止効果の現地観測，海岸工学論文集，第47巻，pp. 531-535, 2000.
- 6) 国土交通省海岸室監修：「人工リーフの設計の手引き（改訂版）」，全国海岸協会，pp. 16-18, 2004.
- 7) 酒井和也・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之：波の遮蔽構造物を有する海岸における3次元静的安定海浜形状の簡易予測モデル，海岸工学論文集，第50巻，pp. 496-500, 2003.
- 8) 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之：海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル，海岸工学論文集，第49巻，pp. 496-500, 2002.
- 9) 武田一郎・砂村継夫：バームの形成条件と高さ，地形，第3巻，pp. 145-157, 1982.
- 10) 鳥居謙一・福濱方哉・人見 寿・宇多高明・芹沢真澄：等深線変化モデルによる人工リーフ周辺の海浜変形予測，第50巻，pp. 491-495, 2003.
- 11) Komar, P. D. and M. K. Gaughan : Airly Wave Theory and Breaker Height Prediction, Proc. 13th ICCE, pp. 405-418, 1972.
- 12) Takeda, I. : Stability and Height of the Landward Limit of the Backshore at Japanese Beaches, Journal of Coastal Research, Vol. 19, No. 4, pp. 1082-1093, 2003.

(2006.9.30 受付)