

斜め入射波の作用下における非対称配置人工岬周辺の海浜変形

宇多高明*・五十嵐竜行**

1. まえがき

近年、沿岸漂砂が卓越する海岸における侵食対策として、各地で人工岬（ヘッドランド）工法が採用されるようになった。また、失われた砂浜の復活方法として、人工岬やT字突堤などにより囲まれた海域での養浜もしばしば行われている。これらの場合には、波が斜め入射する条件下で人工岬や突堤が造られる訳であるが、例えば人工岬を例に取ってみると、デザイン上から見てその形状は必ずしも左右対称形である必要はないにもかかわらず、実際にはほとんどが左右対称形状とされている。しかしながら天然のポケットビーチの両端を区切る岬の形状はしばしば非対称であることを考慮すると、より自然に近い形の人工岬として非対称形のものもあってもよいはずである。

こうした非対称な人工岬の設計法について考えてみると、実際には汀線変化モデルや3次元海浜変形モデルを用いた数値計算により岬間の海浜変形の予測を行う必要に迫られ、簡便な設計法は示されていないのが現状である。そこで、筆者の一人はこうした場合の汀線変化について概念的な説明を加えた（宇多，1993）が、この研究では実験データは十分ではなかった。こうした点を考慮して、本研究では移動床模型実験によりこの問題について検討しようとするものである。

2. 非対称配置人工岬周辺の汀線変化

波が斜め入射する場合における人工岬形状の非対称性と周辺の汀線変化の関係は、図-1のように表わされる。図中の太い矢印は卓越波の入射方向である。(a)は左右対称形の人工岬、(b)、(c)は人工岬の規模が左右で異なり、右側または左側の人工岬の長さが短い場合である。これら様々な条件のもとでの人工海浜内の汀線形状は次の特徴を持つ。波が斜め入射する(a)では汀線は左右非対称となり、中央よりやや右側が一番凹み、左側の人工岬背後の汀線が大きく前進する。この場合、図に示すように砂浜幅（汀線と護岸の間の幅）が狭いと、護岸に波

が直接うちあたったり、あるいは侵食時に前浜勾配が非常に急になり、海浜利用に支障を来すことになる。人工岬の形が非対称で波が斜め入射する(b)では、汀線の非対称度が最も強く、中央より右側部分の汀線が大きく後退する。斜め入射波がaの場合よりも作用し易くなるため、汀線の後退量は3ケースのうちで最大となる。(c)では入射波の非対称性と人工岬の非対称性が相互に打ち消す方向で影響し合うため、汀線の後退量は(a)、(b)に比較して小さくて済む。

以上を要約すると、卓越波が斜め入射する条件において、(a)、(b)は開口部の汀線後退量が大きいため、護岸前面の前浜幅に十分に注意する必要がある。(b)は養浜砂の流出防止用として左側の長い人工岬は役立つが、波の遮蔽効果はあまり出ない。これに対し(c)では長い人工岬の遮蔽効果は非常に高いため、人工岬背後の静穏域が広く取れるという特徴がある。

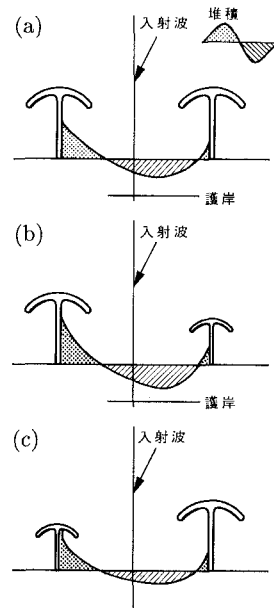


図-1 人工岬の非対称性と海浜変形の概念図

* 正会員 工博 建設省土木研究所河川研究室長

** 正会員 (株)アイ・エヌ・エー海岸環境部

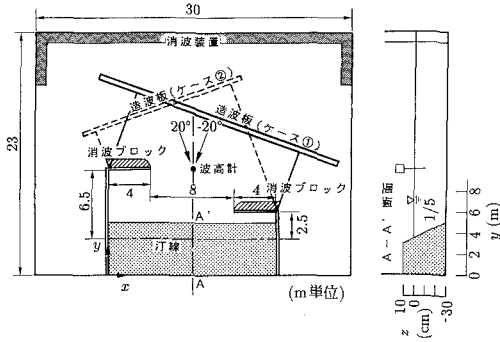


図-2 実験装置

3. 実験方法

ここでは、図-1に示した汀線変化に関する概念的な説明の、水理模型実験による検証を試みる。実験は、幅30m、長さ23mの平面水槽を用いて行った。図-2に示すように、平面水槽内に幅16mの実験区間を設け、その左端には初期汀線より長さ6.5mの人工岬を、右端には2.5mの人工岬を設置した。人工岬のヘッド部の堤長はともに4mとし、ヘッド部の沖側には消波ブロックを設置して反射波の発生を抑えた。人工岬間には $d_{50}=0.28$ mmの砂により、初期勾配1/5の沿岸方向に一樣な模型海浜を造った。人工岬は左右非対称であるが、波の入射方向は中心線に対し時計回り、反時計回りの方向に 20° と左右対称の入射条件となるよう造波板の位置と方向を調整した。実験水深は30cmの一定とし、 $H_b=7.0$ cm、 $T=1.2$ sの入射条件を設定した。実験波は、 $d_{50}=0.28$ mmの砂を用いたとき、侵食域において顕著な地形変化の見られなくなる限界の水深（地形変化の限界水深）が、全水深の約1/2となるように予備実験データをもとに選定した。また、図-2に示すように、以下の解析の便を考え模型海浜の左端に原点Oをとり、ここより沿岸方向にx軸、これと直角方向にy軸を定めた。ところで、実際には波の入射方向は一定のまま、人工岬の配置が中心線を境に逆になったと考えた方が実験結果の理解が容易である。このことから、波が時計回りの方向より入射するケース①の場合では座標(x,y)をそのまま用い、ケース②の場合には中心線 $x=8$ mを通してy軸に平行な線を境に線対称に折り返した座標系を用いることとした。

4. 実験結果

(1) 碎波波高分布と碎波点における入射角の分布

図-3には汀線に沿う碎波波高の分布を示す。斜め入射波に対し人工岬間により多くの波のエネルギーが侵入できる状態にあるケース①では、 $3\text{m} \leq x \leq 11\text{m}$ の間で

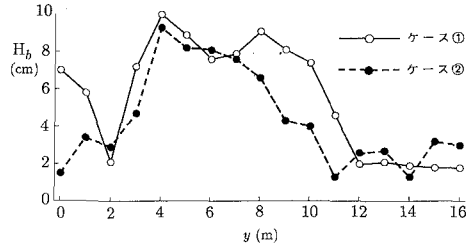


図-3 碎波波高 (H_b) の沿岸方向分布

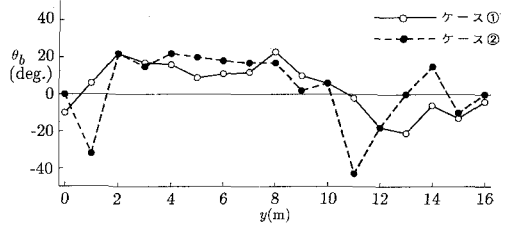


図-4 碎波点における入射角 (θ_b) の沿岸方向分布

高波高が現われている。これに対しケース②ではピーク付近の波高の絶対値は変わらないものの、高波高の範囲が $3\text{m} \leq x \leq 8\text{m}$ と狭くなった。ケース②ではヘッド部の離岸距離の長い人工岬が右側に設置されているため、人工岬の背後に広い遮蔽域が形成されたのに対し、ケース①は右側の人工岬のヘッド部の離岸距離が短く、遮蔽域が狭かったことが波高分布の相違をもたらした原因である。

図-4には碎波点における入射角の分布を示す。ここに、入射角はy軸に対し時計回りに測った角を正とする。入射角は沿岸方向に大きな変動を示すが、図-3において碎波波高が高い範囲、すなわちケース①においては $3\text{m} \leq x \leq 11\text{m}$ 、ケース②においては $3\text{m} \leq x \leq 8\text{m}$ の区間での入射角はケース①、②ともほぼ一定であり、ケース①では平均 11° 、ケース②では平均 18° である。一方、碎波波高が高い区間の、平均汀線への法線とy軸とがなす角は、両ケースとも約 10° であった。したがってこの区間における平均碎波角はケース①で 1° 、ケース②で 8° となる。これらのことは、 $t=12$ hrにおける沿岸漂砂は両ケースとも左向きであり、その量はケース②のほうが大きいことを示している。一方、図-4では人工岬の遮蔽域で極端に絶対値の大きな入射角が出現しているが、この区域では元々碎波波高が非常に低いから、沿岸漂砂量としてはそれほど大きくならないと考えられる。

(2) 深浅図の比較

2基の非対称配置人工岬の背後に平行等深線をもった初期海浜を整形し、波を12時間斜め入射させたときの海浜形状を図-5に示す。図中、2基の人工岬のヘッド部の

先端より波の入射方向と平行線を引き、それぞれを線分 AA', BB' とする。また、これら 2 本の平行線と平行で、両線分間の距離を 2 等分する線分を CC' とする。まず、右ヘッド部の背後では、ヘッド部の離岸距離が短いため 図-3 に示したように静穏度が高く、したがって大部分の等深線は原形を保っている。また、明らかに等深線に変化が生じたと思われる水深が、汀線に近づくほど人工岬のヘッド部による遮蔽域内の奥深くへ移動している。線分 BB' と汀線との交点を Q とすると、Q 点の両側で広く侵食され、陸上には浜崖が形成され、侵食域の沖合の -16 cm ~ -4 cm の間には広い侵食緩斜面が形成された。これと対照的に CC' と汀線との交点 R より左側では砂が堆積して等深線が前進した。特に左ヘッド部の右端より延びる AA' と汀線との交点 P 付近では大量の砂が堆積し、前浜上には広い平坦面が形成され、海面下には急斜面が形成された。全体的な海浜変形の特徴としては、波が斜め入射したことによって、PR 間で等深線が前進したことがあげられる。AA', BB' が突堤状の不透過構造物であったとすれば、そこを横切る漂砂は存在しないので、BB' より右側での侵食や AA' より左側での堆積は生じないが、実際にはこれらの位置には不透過の壁はないので、漂砂は自由に透過し、したがって BB' の右側領域や、AA' の左側領域でも地形変化が生じた。一方、PQ 間では突堤間の海浜変形と同様に、汀線が波の入射方向とほぼ直角になるよう変形したことがわかる。

同様に、ケース②の造波後 12 時間の海浜形状を 図-6 に示す。既に 図-2 に示したように、実験では左ヘッド部の離岸距離を長くした条件のままで、波を反時計回りの方向より入射させたが、ケース①との比較を容易にするために、波は時計回りの方向より入射する条件になるよう、平面座標を y 軸に関して線対称に折り返した形で表示してある。 図-6 の場合も 図-5 と同様に AA', BB', CC' および点 P, Q, R を定める。 図-6 に表われた特徴は、点 R より右側で侵食が、左側で堆積が生じた点において、 図-5 の場合と非常によく似ている。しかし明らかに相違する点として次の点が指摘できる。

- ① 右ヘッド部の離岸距離が大きく、したがってヘッド部背後の波の遮蔽域が広いいため、AA', BB' 間の距離が短いこと。
- ② 逆に左ヘッド部の離岸距離が短いため、その背後の静穏度が向上し、舌状砂州が著しく発達したこと。

(3) 海浜断面形の比較

生じた海浜変形の相違を断面形の比較より調べてみる。いま、ケース①において著しい侵食の生じた断面の代表として x=9m 断面を選び、2 ケースの断面形をまとめると 図-7 となる。図には、ケース①, ②の結果を示すが、各ケースとも初期形状、造波後 12 時間および 28 時

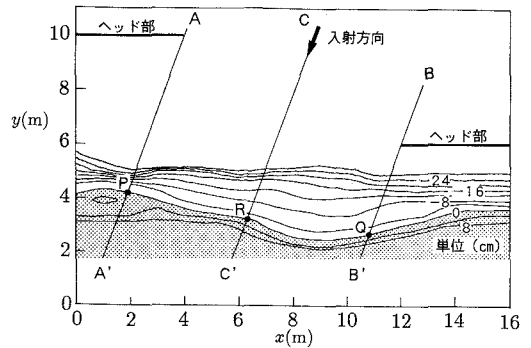


図-5 造波後 12 時間の海浜形状 (ケース①)

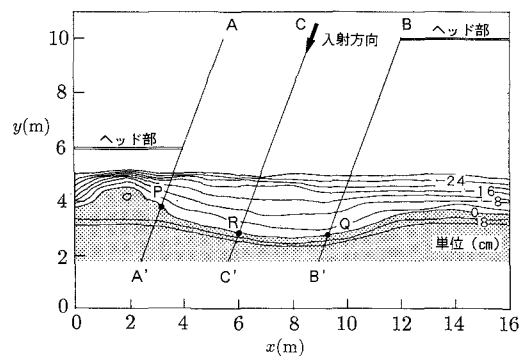


図-6 造波後 12 時間の海浜形状 (ケース②)

間の断面形を示す。ケース①においては -13 cm 以浅で大きく侵食され、かなりの量の砂が沖方向へも移動した。また、12 時間の造波ではまだ安定状態に達しておらず、量はわずかであるが、12~28 時間でも変形が見られる。また、初期~12 時間の間では侵食断面積 2054 cm² に対し、堆積断面積は 400 cm² とその割合は 0.19 と小さかったが、12~28 時間では相対割合が 0.86 と大きくなったことが特徴として指摘される。同じく 図-7 に示されるケース②の場合には、沖方向への土砂移動はほとんどみられず、-15 cm 以浅でのみ侵食が生じている。この 2 ケースでは侵食域の沖合限界を定める水深がほぼ等しく、平均 14 cm であった。

侵食域の沖合限界を定める水深がほぼ 14 cm で与えられることから、ケース①, ②の侵食域において、-14 cm 以浅の領域において各測線ごとに侵食断面積 ΔA_e と汀線変化量 Δy を求め、ケース①, ②ごとに両者の相関係数を調べると、相関係数 R=0.991 (ケース①), R=0.986 (ケース②) において次式が成立する。

$$\Delta A_e = 18.8 \Delta y + 125 \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta A_e = 17.3 \Delta y + 75 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、ΔA_e, Δy の単位はそれぞれ cm² と cm である。

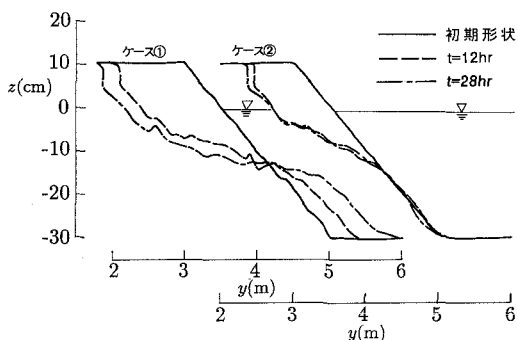


図-7 海浜断面形の比較 (侵食断面)

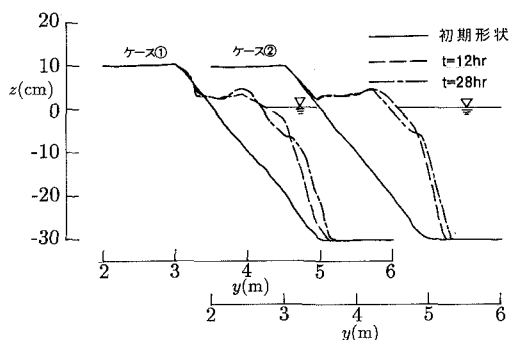


図-8 海浜断面形の比較 (堆積断面)

ΔA_e と Δy の回帰係数は、侵食域における漂砂の移動高を与えるので、ケース①、②の移動高は式(1)、(2)よりそれぞれ $h_1=18.8\text{ cm}$, $h_2=17.3\text{ cm}$ となる。すなわち、両者の移動高はほぼ等しく、平均で $h=18.1\text{ cm}$ となる。

次に、堆積域における断面変化として図-8には $x=2\text{ m}$ 断面の変化を示す。ケース①、②ともに堆積域では陸上部にほぼ平坦面が、海面下に急斜面を形成させつつ砂が堆積した。また堆積量はケース①よりもケース②の方が大きい。これは図-5、6の比較により明らかのように、ケース①では突出した舌状砂州は形成されずになだらかに堆積したのに対し、ケース②ではヘッド部の離岸距離が短く、波の遮蔽効果が著しかったため、著しく突出した舌状砂州が形成されたことによる。

5. 考 察

波が斜め入射する場において、人工岬を非対称に配置すると、これらの構造物の岸側では特徴的な海浜変形が見られた。その状況は図-9のように要約される。図の(a)は実験のケース①に、(b)はケース②に対応する。(a)の配置では斜め入射波に対し人工岬の開口部が広く、(b)に比較してより多くの波のエネルギーが汀線へ

と侵入する。(b)では右ヘッド部背後の遮蔽域が非常に広いため、汀線への侵入エネルギー量は小さい。

いま、図示するようにヘッド部の先端を通して波の入射方向に平行線 AA' , BB' を引いたとき、2本の平行線の間隔を l とする。また、総侵食量を V_e とおき、安定後の汀線が入射方向とほぼ直角になるとする。さらに波の入射角を θ とおくと、 V_e は次式により近似される。

$$V_e = \frac{1}{8} l^2 h \tan \theta \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 h は漂砂の移動高である。波の入射条件が同一で、人工岬の配置が異なる場合、もし漂砂の移動高があまり変わらなかったとすれば、式(3)により示されるように主として線分 AA' , BB' 間の距離 l の2乗に比例して侵食量が増加することになる。

本研究のケース①、②の場合について考えてみると、図-5、6の点Rにおける $t=0\text{ hr}$ での碎波波高や碎波点における入射角が両者でほぼ等しかったことから、点Rを通過する沿岸漂砂量の初期値はほぼ同一と考えられる。そこでこの初期沿岸漂砂量を Q とおく。いま、ケース①、②の海浜変形が平衡状態に達するのに要する時間をそれぞれ t_1 , t_2 とおくと、

$$t_1 \propto V_1/Q, \quad t_2 \propto V_2/Q \dots \dots \dots (4)$$

の関係が成立する。 V_1 , V_2 は式(3)で与えられるので、

$$t_1/t_2 \propto (h_1/h_2)^2 \dots \dots \dots (5)$$

が得られる。すでに図-7に示したように、侵食域の断面はケース②では12時間の波の作用でほぼ安定状態に達していたが、ケース①では少なくとも12時間では依然として安定状態には達していなかった。図-5、6より h_1

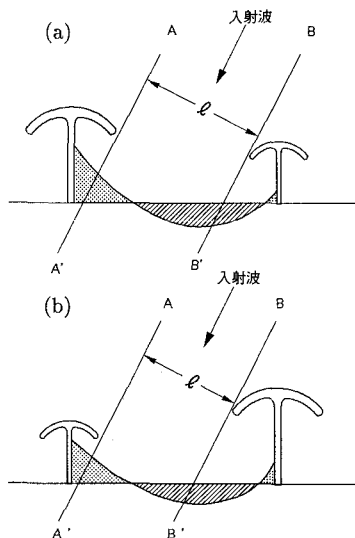


図-9 人工岬間の海浜変形のモデル化

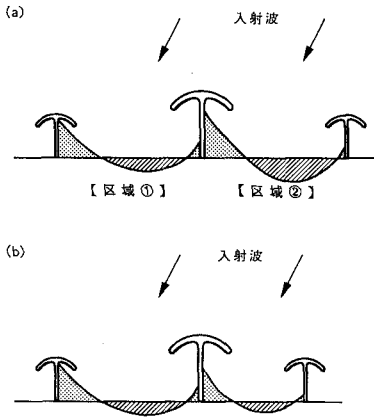


図-10 人工岬間の配置例

l_2 を求めて $(l_1/l_2)^2$ を計算すると約2倍となる。このことより海浜が安定状態に達するまでの時間がケース①ではケース②よりも約2倍も長いことが分かる。結局、斜め入射波の条件で両ヘッド部間より波の入射が著しい場合、汀線後退量が大きいだけでなく、海浜が安定に達するまでの時間も長くなることが特徴として指摘される。

以上に述べたように、卓越波が斜め入射する海岸では、波の入射側に位置する人工岬のヘッド部の離岸距離を長くし、背後の静穏域を広げることが海浜の安定性を高める上で有効である。しかし、一連の人工岬の配置を考え

る場合、その隣では図-10(a)に示すように本実験のケース①と同様な条件となり、区域②での波の静穏度が低下し、海浜変形が著しく大きくなってしまふ恐れがある。これを防止するには、人工岬間の間隔を狭めて変形を小さくすればよいことから、図-10(b)に示すように人工岬を不等間隔で配置する方法がよいと考える。

6. 結 論

本研究の主要な要点は以下の通りである。

① 波が斜め入射する条件下での、非対称形に配置された人工岬背後の汀線変化を3つのパターンに分類し、それぞれの海浜変形を図-1のように要約した。

② 最も典型的なケースとして、非対称形に配置された2組の人工岬背後の海浜変形を移動床平面実験により調べた。これにより、人工岬間における侵食量は人工岬のヘッド部を通って波の入射方向に延びる線分の間隔の2乗に比例すること、また、汀線の最大後退量は間隔に正比例することを明らかにした。さらに、波が斜め入射する条件では海浜変形を小さくする上で、波の入射側にある人工岬のヘッド部の離岸距離を長くすること、そして波の入射側にある人工岬の離岸距離が短い場合には人工岬の間隔を短くすべきことを示した。

参 考 文 献

- 宇多高明 (1993): 現場に役立つ海岸工学 (その4) —人工岬工法について—, 海岸, Vol. 33, No. 1, pp. 68-75.