

人工リーフによる波浪と漂砂の制御

宇多高明*・田中茂信**・筒井保博***

1. ま え が き

我国では近年侵食傾向を持つ海岸が多くなり、その対策として離岸堤や突堤などの海岸構造物が築かれてきた。とくに離岸堤は昭和 45 年頃より盛んに用いられており、現在では 2500 基を越え、海岸侵食対策の重要な一翼を担っている。しかしながら離岸堤は侵食防止効果はあるものの、汀線近くに設置した場合景観を損なうきらいがある。このため海中に没したままで景観を損なうことなしに侵食防止効果を持つ構造物の開発が検討されている。その中に例えば兵庫県の慶野松原海岸における人工リーフ計画¹⁾がある。

人工リーフはサンゴ礁をもとに考案されたもので、碎波点付近を捨石等で浅くし、高波浪を強制的に碎波させることにより人工リーフ背後の波高及びうちあげ高を低減させるとともに、侵食を防ごうとするものである。人工リーフで保護された砂浜は防災機能を有するのみでなく、リクリエーション等にも安全に利用できるものであることが理想である。

人工リーフに関する従来の研究^{2),3)}は、波浪変形問題が主であり、人工リーフによるうちあげ高の減少や侵食防止について検討したものはない。本研究は人工リーフの波浪減衰機能と侵食防止機能を実験的に調べたものである。研究の結果、人工リーフ工法がうちあげ高の減少や海浜の侵食防止に有効なことがわかった。

2. 実験方法

本研究では 2 次元の固定床、移動床実験及び移動床平面実験を行った。2 次元固定床実験では人工リーフの波浪減衰機能と人工リーフを設置したことによる wave set-up の変化を調べた。2 次元移動床実験では人工リーフの侵食防止効果と、人工リーフ沖側の洗掘を重点的に調べた。また人工リーフ周辺の波浪変形、海浜流の流況及び海底地形の変化を調べるために移動床平面実験を行った。

2 次元実験では 図-1 に示す長さ 33m、幅 0.6m、高さ 0.8m のフラップ型造波水路を用いた。固定床実験では 1/20 勾配にモルタル仕上げした海浜と、中央粒径 0.28mm の砂を用いた海浜に、沖波波高 6.0cm、周期 1.13 秒の波を 30 時間作用させたとき形成された海浜をモルタルで固定したものとを用いた。人工リーフの模型は 8g 程度の碎石を用いて 図-1 に示すように製作した。水路には入射波高、反射率測定用の容量式波高計、人工リーフ周辺の波高分布を測定するために自走台車に載せた波高計、及び平均水位測定用の 20 本の水位計を設置した。入射波高、反射率及び波高分布は 50msec 間隔で AD 変換した水面波形データを用いて求めた。なお反射率は 0.4m 離れた 2 地点の水面波形より入射波と反射波の振幅を求め、その比より求めた。波高分布測定に用いた自走台車の移動速度は 5cm/sec である。また水位測定においては、マノメータにおける水位の変動を極力抑えるため、水位計先端のガラス管を底面上近傍に設置した。さらに 1/20 勾配海浜のうちあげ高を測定する際には、水深 1.5cm の位置に 1/5 勾配の斜面を設置して波の遡上高を求めた。測定は造波開始後波が安定してから行った。2 次元固定床実験の実験条件としては、表-1 に示すように沖波波高を 4cm から 8cm まで 5 種類、波形勾配を 0.02 より 0.04 まで 5 種類変え、全体で 25 種類の波浪条件を選択した。また模型形状は 図-2 に示すように、リーフ無しの場合も含めて全体で 7 つを対象とした。

2 次元移動床実験では中央粒径 0.28mm の砂で 1/20 勾配の海浜を造り、表-1 において ● 印で示した 4 組の波浪を 10 時間作用させて人工リーフ背後の砂浜の安定性及び人工リーフ沖側の洗掘を調べた。海浜形状は自走

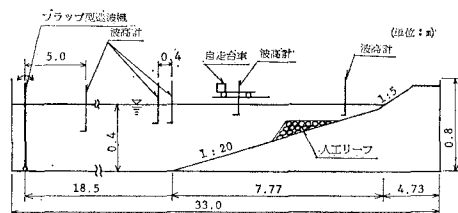


図-1 実験装置

* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長

** 正会員 工修 建設省河川局海岸課技術第 1 係長

*** 建設省土木研究所海岸研究室

表-1 2次元実験の波浪条件

H_0 (cm)	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
H_0/L_0					
0.020	○	○	○	○	●
0.025	○	○	○	○	○
0.030	○	○	●	○	○
0.035	○	○	○	○	○
0.040	●	○	○	○	●

注: ●印は移動床実験の条件

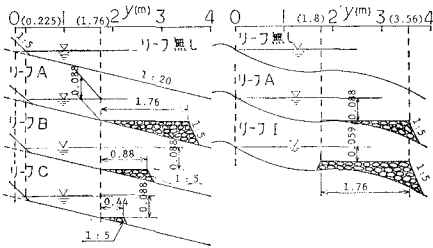


図-2 人工リーフの種類

台車に連続式砂面計を取り付けて1cm間隔で測定した。測定は造波後0, 1, 3, 6, 10時間に行った。人工リーフの形状は図-2に示したタイプA, Bである。ただし比較のためにリーフ無しの場合も実験した。

移動床平面実験では2次元実験で比較的良好な結果が得られた人工リーフ(タイプA)について、人工リーフ周辺の流況、波高分布及び海底地形の変化を調べた。用いた平面水槽は長さ21m, 幅16mのものであるが、水槽の中央部で仕切り、幅8mとして用いた。人工リーフは、初期勾配1/20の海浜上に8g程度の砕石でタイプAの形に製作した。リーフの沿岸方向の長さは2mである。波浪条件としては、沖波波高を6.0cm, 周期を1.13秒とした。実験ではこの波を10時間作用させ、造波後0, 3, 10時間に入射波高, 砕波波高, 平均水位分布, 波峰線形状, 流況, 海浜形状及びうちあげ高を測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 2次元固定床実験

2次元固定床実験では主に人工リーフの波浪減衰機能と平均水位の変化について調べている。まず最初に図-3はタイプAの人工リーフ周辺の波高分布を示している。リーフの天端水深は、沖波波高 $H_0=6$ cmの波が1/20勾配の斜面に入射したときの砕波水深に等しい。図-3より明らかなように、リーフ上で砕波が生じない $H_0=4.3$ cm及び $H_0=4.9$ cmの場合、リーフによる波高の変化は顕著ではない。沖波波高が6.0cmより大きいときはリーフによって波高が減衰しており、リーフ背後での波高分布は $H_0=6.0$ cmのものとはほぼ等しい。人工リーフによって波が強制的に砕波させられる場合、砕波点はリーフの沖側の肩の部分より少し岸側となる。こ

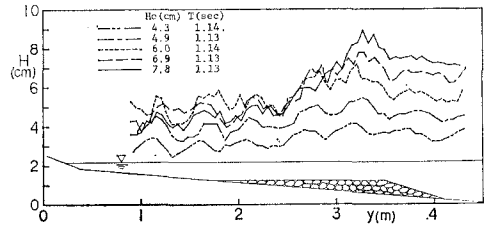


図-3 波高分布図(リーフA)

こには示していないが、リーフの天端幅が異なる場合もほぼ同様な結果が得られた。

図-4はタイプA, B, C及びリーフ無しのケースについて平均水位の分布を比較したものである。なお図にはリーフの形状も合わせて示してある。図-4より wave set-down から wave set-up に転ずる位置は各リーフの沖側の肩よりわずかに岸側となっていることがわかる。またリーフ無しの場合の wave set-up 量及び汀線近傍の平均水位勾配は、リーフ有りの場合よりも大きい。さらにリーフ有りの場合、リーフ幅の短いリーフC, B, Aの順に wave set-up 量及び平均水位勾配が小さくなっている。リーフ上の平均水位については、リーフAの方がリーフ無しの場合よりもほぼ $0.05H_0$ 高く、逆に汀線付近では約 $0.05H_0$ 低くなっている。以上の点より、沿岸方向に有限な長さを持った人工リーフにおいては、沿岸方向に相当大きな平均水位変化が生じることがわかる。これはまた人工リーフ周辺の循環流の発生を示唆している。

図-5はリーフA, B及びリーフ無しの場合のうちあげ高を比較したものである。横軸は波形勾配と沖波波高であり、縦軸は沖波波高に対するうちあげ高の比 R/H_0 である。なお、横軸の一つに次元量である沖波波高を用いているため、結果は普遍性に欠けるきらいがある。これを解決するには H_0 の代りに天端水深 d によって無次元化されたパラメータなどを用いて図示する必要がある。しかしながらここでは天端水深を多数変えることができなかったため、沖波波高をそのまま独立変数に選んだ。図-5によると、波形勾配が小さい場合 R/H_0 が大きくなるが、ここではリーフの効果も大きく現われている。波形勾配が大きくなるとリーフの有無によるうちあ

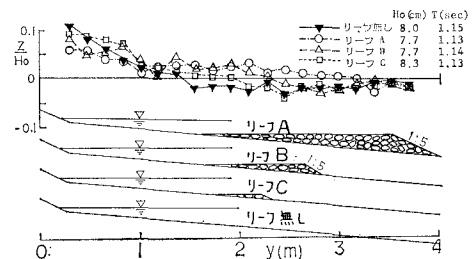


図-4 平均水位の分布

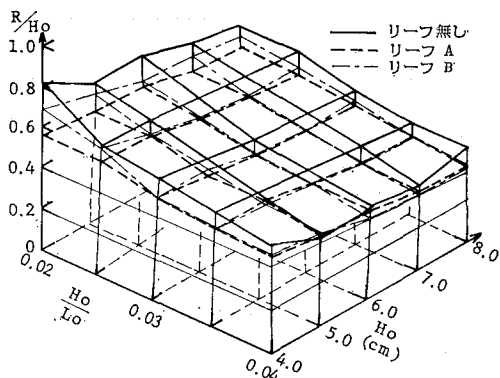


図-5 相対うち上げ高(一定勾配海浜)

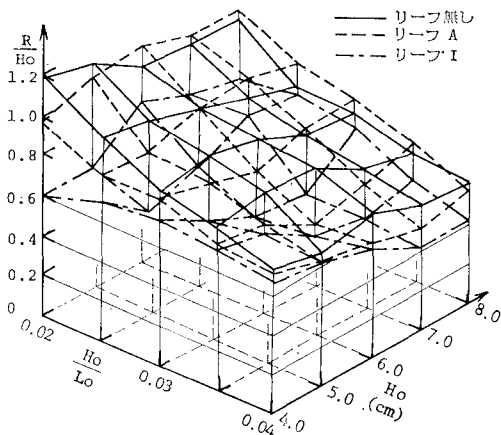


図-6 相対うち上げ高(移動床固定海浜)

げ高の差は認められるが、リーフの形状の違いによる差は小さい。

図-6 は移動床に波を作用させたあとの形状をモルタルで固定した海浜に、タイプ A と I のリーフを設置した場合のうちあげ高と、リーフ無しのうちあげ高を図-5 と同様に整理したものである。図-6 によると、まず波形勾配が大きく沖波波高の小さい領域では人工リーフの効果が見られない。これはリーフ上で砕波が生じなくなるためである。また、波形勾配と沖波波高が共に小さい部分と、共に大きい部分とを結ぶ対角線上(これはほぼ周期一定に対応する)で A, I 両タイプとも効果が現われている。一方波形勾配が小さくかつ沖波波高が大きい部分では天端水深の小さいリーフ I のみ効果を持ち、リーフ A では逆効果となっている。また全般的に天端水深の小さいリーフ Iの方がリーフ A よりも効果が大きい。

3.2 2次元移動床実験

2次元移動床実験では人工リーフの侵食防止効果を調べた。実験は表-1 に黒丸印で示す4ケースの波浪条件のもとで行ったが、ここでは代表例について説明する。

図-7 は沖波波高 6.0 cm, 周期 1.13 秒の波を10時間

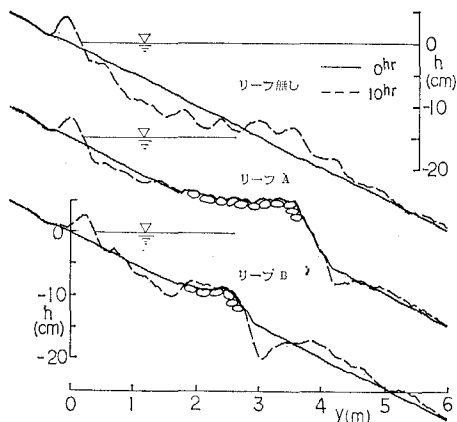


図-7 海浜形状の比較(リーフ無し, リーフ A, リーフ B)

作用させたあとの海浜形状を、リーフ無し、リーフ A 及びリーフ B について比較したものである。ただし海浜形状を定める際には、微小な変動を除去するために、7 データを用いて移動平均を行った。リーフ無しの場合 II 型の海浜変形が生じており、 $0.2\text{ m} \leq y \leq 2.8\text{ m}$ の範囲が侵食され、大部分の底質は沖方向へ移動した。天端幅の短いリーフ B の場合、海浜形状は III 型に変わっているが、リーフ沖側に顕著な洗掘が見られる。またリーフ岸側の底質がリーフ上に運ばれている。天端幅の長いリーフ A の場合も海浜形状は III 型となっているが、リーフ B に比較してリーフより岸側の地形変化と、リーフ沖側の洗掘が小さくなっている。またリーフ上には底質が流出した形跡はない。

以上のようにリーフを設置すると岸沖方向漂砂を相当良好に制御できること、またリーフ岸側の底質がリーフ上へ流れ出さないようにするにはある程度の長さのリーフを必要とすることがわかる。なお、10 時間波を作用させたあとの反射率はリーフ無しが 0.05, リーフ A が 0.014, リーフ B が 0.078 であり、リーフ A の場合反射率が極めて低いことがわかる。

3.3 移動床平面実験

前節までに議論したように、2次元実験の結果によると人工リーフは波浪や漂砂の制御に相当有効と言える。しかしながらこれは無限に長いリーフを考えているのであって、このような人工リーフを現地海岸に造る場合、リーフは当然有限長とならざるを得ないことに注意すべきである。有限長の人工リーフの場合、リーフの周辺とくに端部の流れや漂砂について調べておく必要がある。このため本研究では移動床平面実験を行った。

移動床平面実験では2次元実験において良い結果の得られたリーフ A について、人工リーフ周辺の波峰線形状、平均水位、海浜流の流況及び海底地形の変化を調べ

た. 人工リーフは 1/20 勾配斜面上に重量約 8g の砕石を用いて造り, 岸沖方向の幅は 1.76m, 長さは 2m とした. また沖側および両側面は 1/5 勾配とし, 1/20 勾配斜面に接続させた. 波浪条件としては沖波波高が 6.0 cm, 周期 1.11 秒の波を選んだ.

図-8 は波を 10 時間作用させたあとのリーフ周辺の波峰線形状と砕波位置を示す. 横軸は沿岸方向距離で水槽両側の導波板は $x=0\text{m}$, 8.0m にある. 縦軸 y は岸沖方向距離で初期汀線を 0m として沖向きにとっている. $y \geq 3.0\text{m}$ では波峰線は比較的直線状であるが, $y \leq 2.0\text{m}$ では人工リーフ端部 ($x=2.5\text{m}$ と $x=5.5\text{m}$) において他の部分に比べて波峰線が岸側に寄っている. これは後に 図-10 で説明するように, 端部近くに水深の大きい所があるためである. 砕波位置は, リーフ上ではリーフの沖側の肩の部分であり, リーフの無い部分と比較するとずっと沖合にある. さらに 図-8 では実験開始直後 (0 時間) と 10 時間後の砕波位置の比較を行っているが, リーフ上の砕波位置はほぼ一定している. 一方リーフの無い部分では時間の経過とともに砕波位置が岸方向へ移動している. これは砕波点付近が侵食され深くなったためである.

図-9 は造波後 10 時間における平均水位の分布を示す. 平均水位分布はリーフ中央を境にしてほぼ左右対称となると考えられるので, 左半平面のみ詳しい測定を行った. リーフ中央の $x=4\text{m}$ 断面ではリーフの沖側の肩の部分で wave set-down が見られる. またそれより岸側では wave set-up が生じている. リーフ外の $x=1.5\text{m}$ 断面では $y \geq 2.5\text{m}$ の範囲において wave set-down が生じている. またそれより岸側では急激な wave set-up が生じ, 汀線での水位上昇量はリーフ背後よりずっと高い. このような特徴は, 図-4 に示した 2次元実験におけるリーフ A とリーフ無しの水位分布特性と良く一致する. さらに 図-9 において汀線付近の水位分布を調べると, $x=1.5\text{m}$ 付近より $x=2.5\text{m}$ まで水位上昇量が減じ, さらに x が大きくなると再び水位上昇量が増加することがわかる. このような水位分布の場合, $x=2.5\text{m}$

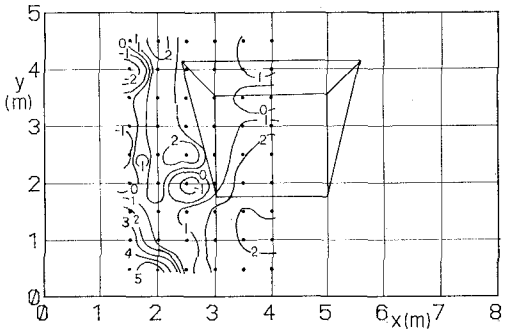


図-9 リーフ周辺の平均水位分布 (10 時間後)

付近では両方向からの流れが集まって離岸流が形成され易いと考えられる.

図-10 は 10 時間造波後の海底地形とフロートを追跡して得られた流跡線を示す. 図の上方の大きな矢印は波の入射方向を表わす. 図よりリーフの両側に, リーフ岸側の端部から水深の比較的大きい部分が存在することがわかる. 海浜流の特徴としてまずリーフ上では岸方向流れが発達している. この流れはリーフの隅で方向を変え, 深いトラフの縁に沿って離岸方向へ流れる. 全体としてはリーフの端部に 1 対の循環流が形成される. また 図-10 では明らかではないが, 観察によると $0\text{m} \leq x \leq 2\text{m}$ の汀線近くには反時計回りの循環流が, また $6\text{m} \leq x \leq 8\text{m}$ の汀線近くでは時計回りの循環流が見られた.

図-10 の流況と 図-9 の平均水位分布とを比較すると, リーフ上の岸向き流れが離岸流となって流出する位置まで平均水位勾配が見られ, 流れと水位分布とが良く対応していることがわかる.

図-11 はリーフの無い $x=0.5\text{m}$ 断面とリーフ上の $x=3.5\text{m}$ 断面の比較を行ったものである. リーフの影響の少ないと考えられる $x=0.5\text{m}$ の断面では I 型の海浜変形が生じており, 砕波帯が掘られて底質が沖へ流出している. 既に明らかにした 図-10 ではリーフの両側

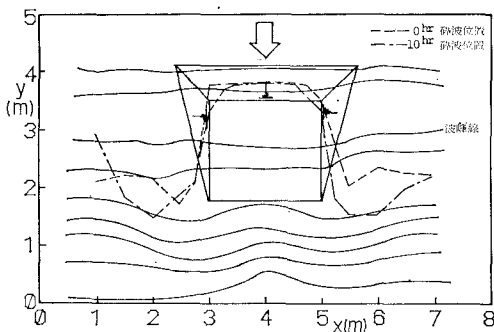


図-8 リーフ周辺の砕波位置と波峰線分布

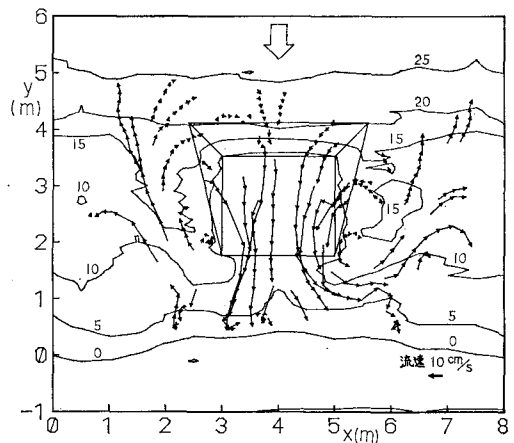


図-10 流況と等深線図 (10 時間後)

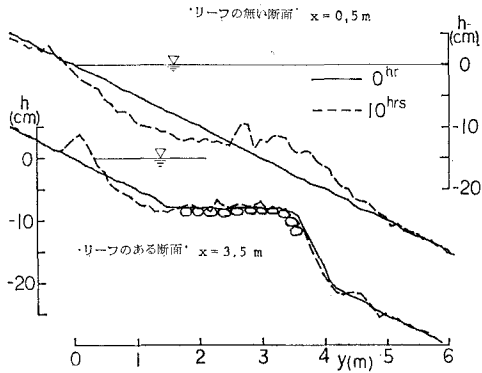


図-11 海浜断面形状の比較 ($x=0.5\text{ m}$, $x=3.5\text{ m}$)

に深いトラフが存在したが、これはその部分が流れによって洗掘されたのではなく、リーフより離れた部分で図-11に示したように冲向き漂砂が生じ、一方リーフ両端近くではこのような漂砂があまり生じなかったため海底地形の相違が生じたのである。

一方、リーフ上の $x=3.5\text{ m}$ 断面ではⅢ型の海浜変形が生じ、汀線付近に土砂が堆積している。以上のように人工リーフは侵食性の海浜を堆積性の海浜に変えており、侵食対策工法として有効であることがわかる。またこの場合、リーフ沖側の洗掘は2次元実験の場合ほど大きくないことも明らかである。

4. ま と め

本研究では人工リーフの波浪減衰機能及び侵食防止効果について、2次元固定床、移動床実験及び移動床平面実験を行い、人工リーフが波浪制御および侵食防止に有効であることを明らかにした。最後に得られた主要な要点をまとめておく。

(1) 人工リーフの天端水深で規定される限界波高より大きい波高の波はリーフ上で砕波し、リーフ通過時には

ほぼ限界波高となる。

(2) 1/20 勾配斜面上にリーフを設置した場合、リーフ無しの場合に比べてうちあげ高が低下する。リーフの効果は波形勾配が小さいとき顕著に現われ、リーフの天端幅が長くなるほどうちあげ高低減効果が大きい。一方波を作用させたあとの移動床海浜をモルタルで固定した海浜にリーフを設置する場合、与えられたリーフ形状に対してうちあげ高を最も効果的に低下させる周期があるようである。

(3) 一様勾配斜面において沖波波高 H_0 に対する砕波水深を h_b 、砕波帯幅を X_b としたとき、天端水深を h_b とする人工リーフの天端幅が X_b 程度あれば人工リーフによる侵食防止効果が期待できる。

(4) 人工リーフの反射率はリーフ無しの場合の反射率よりも小さく、かつうちあげ高も低いので、人工リーフは波浪エネルギーを良好に減衰できる。

以上、人工リーフ工法が波浪減衰、うちあげ高低減及びリーフ背後の侵食防止に有効であることがわかったが、リーフ両端付近の離岸流はリーフ周辺海域の利用に際し問題となると考えられる。またここでは人工リーフの沿岸方向の長さの決め方について詳しい検討を行うことができなかった。さらに波が斜めに入射する場合の人工リーフ周辺の流れや漂砂についても調べる必要がある。今後これらの問題についても移動床平面実験によって検討を加えて行きたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 梅田千秋・芝原 平：慶野松原海岸人工リーフに関する二次元模型実験，海岸，第23号，pp. 145~155, 1983.
- 2) 高山知司・神山 豊・菊地 治：リーフ上の波の変形に関する研究，港湾技術研究所資料，No. 278, 32 p., 1977.
- 3) 寺尾 健・長谷川 正・奥村研一・山本正光：リーフにおける波浪変形について，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 133~137, 1981.