

「人工リーフの設計の手引き」とその留意点

山崎 丈夫*・宇多 高明**・衛門 久明***・小 俣 篤****

1. ま え が き

人工リーフは、サンゴ礁のもつ消波機能を模倣して越波の軽減や海浜の安定化を図ろうとする消波構造物であり、その天端は一般に海面下に位置するので景観を損なうことがないという利点をもつ。このため最近では離岸堤に代わって全国各地の海岸でその施工が進められるようになった。しかしながら、その設計法について系統立ってまとめられた資料がないために、現場では設計に苦勞するのが実状であった。そこで建設省では、人工リーフの効果と安定性に関する模型実験、現地観測、実態調査等の成果を体系的に整理し、現場における人工リーフの設計に役立つよう、「人工リーフの設計の手引き」を作成した。ここでは、人工リーフの設計上の留意点を中心として手引きの内容を紹介する。

2. 設計の基本方針

(1) 人工リーフの適用性

a) 越波対策

人工リーフは次の場合に特に優れた効果を発揮する。

①侵食により護岸前面の砂浜が消失して急深となった海岸における消波施設(図-1 参照)

②局所的に著しい越波の生じる海岸における消波施設

③景勝地における消波施設

ただし、人工リーフにより消波を図る場合には、リーフ上で平均水位が上昇すること、人工リーフ周辺では海浜流およびそれに応じた海浜地形変化が生ずること、そして流れの発生は海岸利用に影響を及ぼす場合があることなどに注意する必要がある。また、潮位変化の大きな海岸で、平均潮位を基準として設計された人工リーフでは、高潮位時に消波効果が低くなるので潮位変化の影響を十分考慮して設計を進める必要がある。

b) 海浜の安定化

海浜の安定化を目的とする場合の人工リーフの適用法

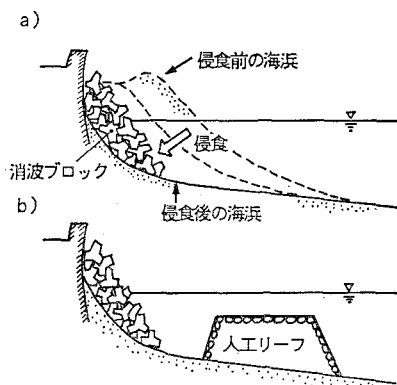


図-1 侵食されて急深となってしまった海岸への人工リーフの適用

には次の4つを挙げることができる。

①人工岬(ヘッドランド)や離岸堤に挟まれた海岸において、前浜幅が狭い箇所での汀線を前進させる(浜口ほか, 1988)。

②人工リーフ群により沿岸漂砂量を低減させる。

③高い消波効果を有する人工リーフにより安定海浜を形成させる。

④養浜砂の沖合への流出を防止する(宇多・坂野, 1990)。

c) 堤体の安定性

人工リーフは天端幅の広い没水型消波構造物であるから、急勾配海岸では堤脚位置が深くなり堤体断面も大きくなる。さらに、堤体表面に作用する波力も大きくなることから、安定性の面から見ると急勾配海岸への人工リーフの適用は不利である。人工リーフの設置が可能な海底勾配の条件としては、堤脚付近の海底勾配が $1/7 \sim 1/10$ より緩いことが望ましい。

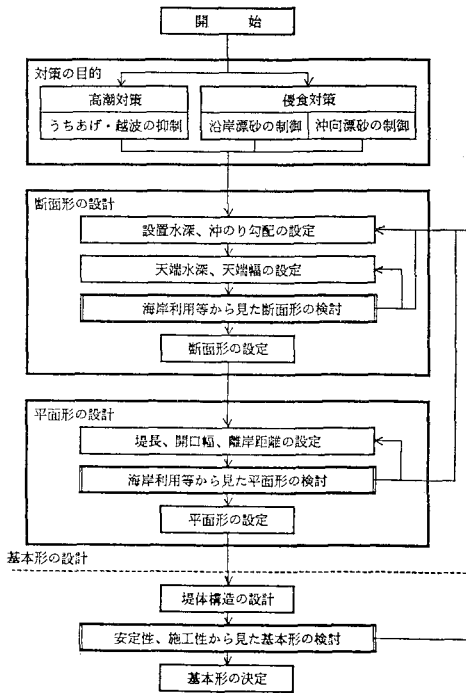
3. 基本形の設計

3.1 設計の手順

人工リーフの諸元を定める際には、各諸元間の相互関係に十分配慮し、全体として効率よく所要の機能が発揮できるようにする。設計フローを図-2に示す。ここで特に注意すべき点は、天端水深を小さくすることにより

* 正会員 工修 建設省河川局海岸課海洋開発官
 ** 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長補佐
 **** 正会員 建設省土木研究所海岸研究室

消波効果を高めると、被覆材の所要重量が一般に大きくなることである。したがって被覆材の所要重量があまり大きくなる場合には、基本形を修正する必要も出てくる。



図—2 人工リーフの設計フロー

3.2 断面形の設計

(1) 越波対策を目的とする場合

一般に、海岸堤防・護岸の越波量は沖波の諸元と海底勾配、海岸堤防等の条件により整理され、算定図等が提案されている。したがって、人工リーフを設置した場合の越波量は、宇多ほか(1988)より求める人工リーフの伝達波高を沖波に換算することにより推算される。この場合、人工リーフ上の伝達波の周期は沖波の周期より短くなることを考慮する(例えば、田中, 1976)。天然リーフ上の観測結果によると、天端水深 R と入射波の換算沖波波高 H_0' の比が $R/H_0' < 1.0$ の条件、および入射波の波形勾配が小さい条件で周期の減少が顕著になる(谷本・宇多, 1990)。また、越波量の推算に用いる人工リーフ背後の平均水位は、H. H. W. L. 等の基準水位に平均水位の増加分を考慮した水位とする。その場合、平均水位の上昇量を考慮する。ただし、現地海岸では平均水位の上昇により海浜流が発生するので、水路実験による平均水位の上昇量(宇多ほか, 1988)は実際より過大となる。現地観測(宇多ほか, 1991)や数値計算によると、流れを伴う場合の平均水位の上昇量は水路実験より求める値のおよそ $1/2$ となるので、推算に用いる

平均水位の増加分は水路実験より求める値の約 $1/2$ とすればよい。

(2) 海浜の安定化を目的とする場合

a) 沿岸漂砂の制御

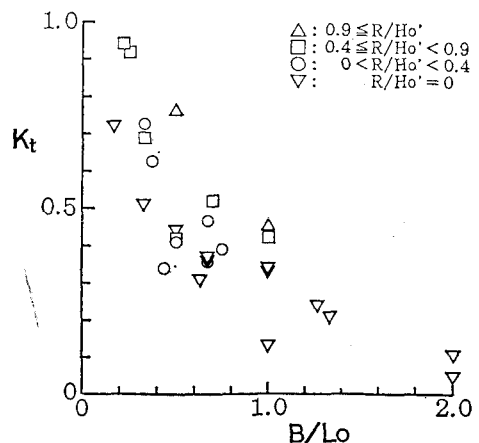
卓越した沿岸漂砂の存在下で生ずる侵食は、当該海岸の平均的な沿岸漂砂量 Q と供給土砂量 Q_i の不均衡により生じる。沿岸漂砂量は波高の $5/2$ 乗にほぼ比例するので、沿岸漂砂量を供給土砂量と釣り合わせるために必要とされる人工リーフの波高伝達率は $(Q_i/Q)^{2/5}$ を目安として設定し、平面形との組み合わせにより沿岸漂砂量の低減効果を検討する。また、人工リーフの設置位置は、堤体の沖合で地形変化が生じないように、当該海岸における地形変化の限界水深より人工リーフの堤脚水深が大きくなるようにすることが望ましい。

b) 冲向漂砂の制御

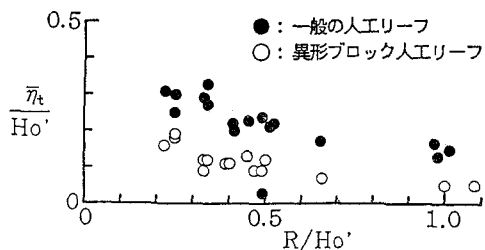
人工リーフは、越波対策上必要とされる海浜の維持や、人工海浜の安定化を図るために使用することができる。これらの目的のために人工リーフの所要効果を定める際には、当該海岸や近隣海岸での海浜地形変化と波浪条件との関係をもとに、冲向漂砂による前浜侵食の発生条件を調べておくことが望ましい。しかし、有効な資料がない場合には、現地資料から得られた武田・砂村(1983)、宇多ほか(1989a)等の方法により前浜の侵食条件を判別し、所要の波高伝達率を設定する。

(3) 異形ブロック人工リーフの消波効果

最近、海岸構造物の築造に必要とされる自然石の代わりに、根固工等より転用した異形ブロックを利用する手法が検討されている。この場合、異形ブロックではブロック間の間隙が大きいため、人工リーフの消波効果が十分発揮されない可能性がある。図—3 には異形ブロック人工リーフの波高伝達率 K_t と、天端幅 B と沖波波長 L_0 の比 B/L_0 の関係を示す。ここでは、異形ブロック



図—3 異形ブロック人工リーフの K_t と B/L_0 の関係

図-4 異形ブロック人工リーフの $\bar{\eta}_t/H_0'$ と R/H_0' の関係

人工リーフの天端面は異形ブロックが最も突出した部分を結ぶ面としている。一般の人工リーフの消波効果（宇多ほか，1988）と比較すると，異形ブロック人工リーフの K_t はかなり増加する。一方，異形ブロック人工リーフでは，波高伝達率が大きくなるのと逆に，その岸側端での平均水位の上昇量 $\bar{\eta}_t$ は一般の人工リーフに比べ著しく減少するという利点を有している。実験的に求めた異形ブロック人工リーフの $\bar{\eta}_t/H_0'$ と R/H_0' の関係を図-4 に示す。図より，異形ブロック人工リーフでは $\bar{\eta}_t/H_0'$ の絶対値が約 1/2 に減少することがわかる。

(4) 人工リーフの設置位置と沿岸砂州の関係

人工リーフは自然石等により構築される消波構造物であるため，設置海底面が大きく変形する場合，それに伴って堤体の変形する恐れがある。特に沿岸砂州のある海岸に人工リーフを設置する場合には，高波浪による沿岸砂州の変形により堤体の変形しないよう，次の点に注意して設置位置を検討する必要がある。

①沿岸砂州には，ほぼ恒常的に存在するものと，静穏波と高波浪の繰り返しにより変形するものとに分けられる。前者の場合には，沿岸砂州のもつ消波効果をさらに向上させるために，天端高は砂州の高さより高く，天端幅は砂州の幅よりも広くとることが望ましい（図-5a）。また，図-5b に示すように，沿岸砂州との一体化を図る方法もある。

②静穏波と高波浪の繰り返しにより変形する沿岸砂州では，沿岸砂州を構成する底質は静穏時に前浜付近に移動している。この時期に砂州と同規模の人工リーフを設置すれば，高波浪時の沿岸砂州の発生を抑制し，前浜を安定化させることができると考えられる（図-5c）。

③堤体の安定性を向上させるには，のり先が沿岸砂州の変動範囲内に位置しないようにするか，沿岸砂州の変形量を考慮してのり先を根入れする必要がある（図-6a）。

また，被覆工の下に最低 50 cm 程度の厚さで中詰工を設置して堤体の厚さを確保し，必要があれば海底の掘削を行う（図-6b）。

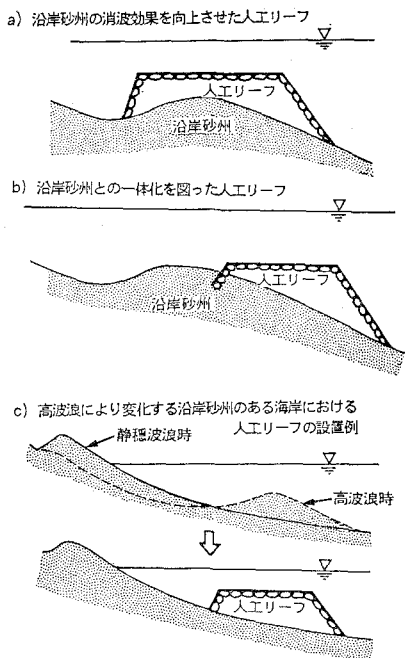


図-5 沿岸砂州のある海岸での人工リーフの設置例

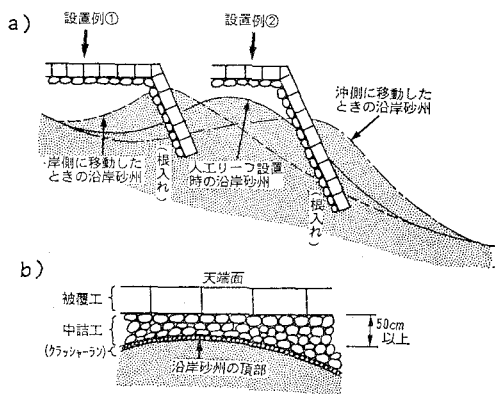


図-6 沿岸砂州のある海岸に設置する人工リーフの構造上の留意点

3.3 平面形的设计

(1) 越波対策を目的とする場合

越波対策のために人工リーフを設置する場合には，基本的には開口部を設けず連続的に設置して，沿岸方向に波高差を生じないようにする。開口部を設ける場合には，開口部背後で波高が高くなならないよう開口幅を十分狭くする等の措置が必要とされる。宇多ほか（1987）によると，人工リーフの岸側の流況は堤長 L_r ，開口幅 W_r および離岸距離 Y の関係により，ほぼ4つのパターンに分けられる（図-7）。開口部を部分的に設ける場合には，海浜流が発達して沿岸方向に波高差が生じない

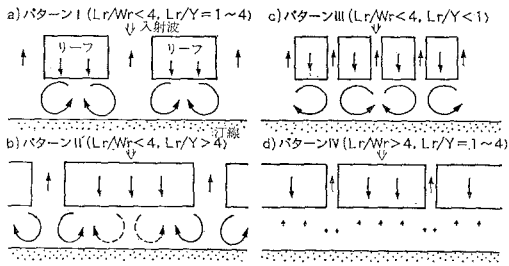


図-7 人工リーフ周辺に生ずる海浜流パターン

よう、パターンIVの流況とすべく、開口幅は $W_r < 0.25 L_r$ と狭くするとよい。

(2) 海浜の安定化を目的とする場合

①沿岸漂砂量の制御

人工リーフにより波浪が低減されても、それによって人工リーフの背後がただちに堆砂し易い状態になるとは限らない。なぜならば、入射波を強制碎波させる際、天端水深の小さな人工リーフでは堤体上で強い岸向き流れが発生し、その流れが人工リーフ背後の堆砂を抑制する場合があるからである。人工リーフ背後に堆砂を生じさせるためには、人工リーフの背後に一对の循環流を生じさせるとよい(宇多ほか, 1987)。また、循環流を生じさせる平面形とすることが沿岸漂砂を効果的に低減させる平面形にもなる。すなわち、開口幅は $W_r > 0.25 L_r$ 程度と広くし、堤長は $Y < L_r < 4 Y$ とする。また、離岸距離が短いと人工リーフ上の向岸流が汀線付近にまで達し、その背後で堆砂が生じにくくなることもある。一方、パターンIIの流況は循環流が端部に限られて形成されるものの、パターンIの流況と近いものとなる。したがって、越波対策や海岸利用の面から、パターンIの流況となる条件より長い堤長、あるいは狭い開口部とすることが望ましい場合には、パターンIIの流況となる諸元を採用するとよい。

②冲向漂砂の制御

越波対策上必要とされる前浜の維持、あるいは人工海浜の安定のために暴浪時の冲向漂砂を抑制しようとする場合には、越波対策の場合と同様に連続堤とすることを基本とする。ただし、連続堤では人工リーフ岸側で海浜循環流を生じることがあるため、リーフの天端を越えて土砂が冲向きに流出する可能性がある。こうした場合には、部分的に開口部を設けてパターンIVの流況とすることにより人工リーフ岸側での海浜循環流の発生を抑制するとともに、冲向流れの発生位置を固定すると良い。また、開口部を天端高の低い人工リーフとする方法も考えられる(宇多・坂野, 1990)。

4. 構造細目

人工リーフは強制碎波により消波効果を発揮するから、碎波に伴い沖側のり面や天端上ではかなり速い流速が生ずる。したがって人工リーフには被覆工を設け、のり面と天端面を被覆することにより中詰材の散乱を防ぐ必要がある。被覆材には、堤体の安定上必要とされる重量の自然石、あるいはコンクリートブロックを用いる。コンクリートブロックを用いる場合の留意点は次のようである。

①隣り合うブロック間には大きな間隙がないが、中詰材が抜け出ないほどの空隙を有し、揚圧力を受けにくい形状、構造を持つブロックが有利である。

③個々の被覆材が安定して設置されるよう中詰工との接合面の形状に注意する。

④中詰工と接合面の摩擦抵抗が小さい、あるいはのり勾配が急な場合には、被覆工が滑落する恐れがある。

被覆材の所要重量に関しては、被覆材の形状・かみ合わせ、堤体形状、碎波状況などの要因が複雑に関係するため、被覆材の種類および被覆工の構造に応じて水理模型実験により決定することが望ましい。ただし、被覆材形状、堤体形状、海底地形が単純な場合には、以下に示す算定法(宇多ほか, 1989b)を用いることもできる。

$$W = K_L \frac{\rho_s (R + \eta t)^3}{s^3 \cos^3 \phi} \quad (1)$$

$$K_L = S_n^3 f_u^6 K_V$$

ここに、 ρ_s : 被覆材の密度、 s : 被覆材の水中比重 ($= (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$)、 ϕ : 堤体表面上の最大流速発生地点の堤体表面と水平面のなす角度、 S_n : 安定係数、 f_u : 堤体表面上の最大流速の無次元係数、 K_V : 被覆材形状に関する係数である。また、 f_u は堤体表面上の最大流速の無次元係数であり、宇多ほか(1989b)に示された式が $H_0'/h = 0.4$ (h : 沖側の堤脚水深) 付近で過大となるのを修正した次式により与えられる。

$$\text{① } 0 < R/H_0' < 0.5$$

$$\text{イ) } 0 < H_0'/h \leq 0.3 \text{ の場合}$$

$$f_u = \left\{ 7.5 \exp \left(-0.80 - 2.5 \frac{R}{H_0'} \right) + 0.20 \right\} \cdot \left(2.5 \frac{H_0'}{h} \right)^{1.2} \quad (2)$$

$$\text{ロ) } 0.3 < H_0'/h < 0.4 \text{ の場合}$$

$$f_u = 10 (0.058 + C_1 + C_2) \left(\frac{H_0'}{h} - 0.30 \right) + C_3 \quad (3)$$

$$C_1 = 7.5 \exp \left(-2.5 \frac{R}{H_0'} \right) \cdot \{ \exp(-0.80 - C_4) - 0.32 \} \quad (4)$$

$$C_2 = 7.5 \left\{ \exp \left(-1.2 - 2.5 \frac{R}{H_0'} \right) \right\}$$

$$-\exp\left(-1.2-2.5\frac{R}{H_0'}-C_4\right)\} \dots\dots\dots(5)$$

$$C_3=0.71\left\{7.5\exp\left(-0.80-2.5\frac{R}{H_0'}\right)+0.20\right\}\dots\dots\dots(6)$$

$$C_4=\frac{H_0'}{R}-2.0 \dots\dots\dots(7)$$

ハ) $0.4 \leq H_0'/h < 0.6$ の場合

$$f_u=7.5\exp\left(-2.5\frac{R}{H_0'}-2.0\frac{H_0'}{h}-C_4\right)+0.20+C_2 \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 C_2 、 C_4 はそれぞれ式(4)、(6)により求める。

ニ) $0.6 \leq H_0'/h$ の場合

$$f_u=7.5\exp\left(-2.5\frac{R}{H_0'}-2.0\frac{H_0'}{h}\right)+0.20 \dots\dots\dots(9)$$

② $0.5 \leq R/H_0'$

イ) $0 < H_0'/h < 0.4$ の場合

式(2)による。

ロ) $0.4 \leq H_0'/h$ の場合

式(9)による。

自然石の被覆工に対しては、 $S_n=0.9$ 、 $K_r=0.5$ が与えられるから(宇多ほか, 1989b)、図-8 に例示する算定図を利用することができる。しかし、コンクリートブロックや形状の整った自然石を用いる場合の被覆材の所要重量は変化する。模型実験によると、コンクリートブ

ロックをかみ合わせ良く配置した場合には、式(2)～(9)より求まる重量より1オーダー近く軽量でも安定な場合もある。したがってコンクリートブロック等を被覆材に用いる場合には、該当する被覆材について行われた水理模型実験に基づく適切な算定方法により所要重量を求めることが望ましい。

5. あとがき

人工リーフに関する現状の技術的知見を集約した「人工リーフの設計の手引き」が取りまとめられた。しかしながら人工リーフの施工経験はいまだ浅いことを考慮すれば、各地の海岸での実験や経験をもとに人工リーフに関する工夫が今後さらに深められるよう、さらに今後も研究を進めていく必要がある。

参 考 文 献

- 宇多高明・小俣 篤・横山揚久(1987): 人工リーフ周辺に生ずる海浜流と地形変化, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 337-341.
- 宇多高明・小俣 篤・横山揚久(1988): 人工リーフの機能と設計法, 土木研究所資料, 第2696号, 79 p.
- 宇多高明・小俣 篤・竹渕 勉(1989a): 前浜地形変化の支配要因とバームの形成過程, 土木学会論文集, No. 411/II-12, pp. 227-236.
- 宇多高明・小俣 篤・横山揚久(1989b): 人工リーフの被覆材の所要重量算定法, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 648-652.
- 宇多高明・坂野 章(1990): 人工リーフによる養浜砂の安定化に関する実験的検討, 土木研究所資料, 第2880号, 79 p.
- 宇多高明・浅香恵則・湯田 寛(1991): 糸魚川海岸における人工リーフ周辺の波・流れ・漂砂の現地観測(2), 海岸工学論文集, 第38巻, p. 151-155.
- 建設局河川局海岸課監修(1992): 人工リーフの設計の手引き, (社)全国海岸協会, 94 p.
- 武田一郎・砂村継夫(1983): 砂浜海岸の堆積過程における地形変化, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 254-258.
- 田中則夫(1976): 天端幅の広い潜堤の波浪減殺および砂浜安定効果について, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 152-157.
- 谷本修志・宇多高明(1990): サンゴ礁海岸における波, 流れ, 地形変化に関する研究, 土木研究所報告, 第181号, pp. 85-182.
- 浜口達男・宇多高明・井上 力・五十嵐 晃・中山 修(1988): 人工リーフの波浪制御効果に関する現地実験, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 128-132.

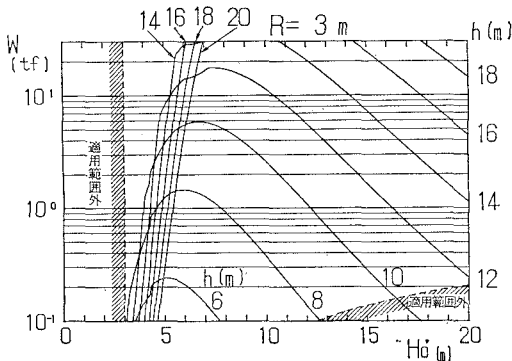


図-8 被覆材重量算定図の例(自然石, $R=3\text{m}$)