

人工リーフの水理特性及び被覆材の安定に関する実験的研究

中山 哲 敏*

1. はじめに

近年、周辺海岸、漁場、生態系への配慮、景観保全並びに海洋性レクリエーションの場の創出等の種々の要請から、構造物を海面上に出さないで波浪を制御する人工リーフや潜堤などの構造物を整備あるいは再整備する海岸が増えている。

人工リーフを設計するに際しては、人工リーフを通過した伝達波の波高、周期の変化、砕波現象に伴う急激な水位上昇等水理特性を定量的に明らかにした上で、人工リーフ背後の利用条件を満足させなければならない。また、人工リーフを構成する素材は、石、ブロックなどであるが、波浪という外力に対して安定でなければならない。この重量を決定する方法は、幾つかあるが、それぞれの手法が与える重量にかなりの差があることも課題であろう。こうした問題点を踏まえ、人工リーフ背後及び周辺の水理特性、構成材の安定性についての基本的知見を得るため、人工リーフの2次元模型実験を行ったのでその結果について報告する。

2. 実験装置及び実験諸元について

実験は、二次元造波水路（長さ100 m、幅1 m、高さ1.5 m）で、入射波実験、水理特性及び安定実験に分けて行った。入射波実験は、人工リーフのない状態で、本実験で使用する不規則波を作用させ、進行波としての諸量を把握するために行った。水理特性・安定実験は、図-1に示すように人工リーフを水平床上に設置し、不規則

波を作用させ、堤体周辺および堤体上に容量式波高計（計13台）、堤体上に電磁流速計（3台）を設置し、水面変動及び流速変動を計測した。計測方法は、計測器の出力をデジタル変換し、データ処理した。さらに人工リーフを構成する石、ブロックの挙動を、目視、パノラマ写真及びビデオカメラで観測した。

人工リーフの諸元、作用波および被覆材の重量を表-

表-1 実験諸元

斜面勾配 1/30		
	実 物 大	模 型
法先水深 h	6.0, 4.0 m	20.0, 13.3 cm
天端水深 d	2.0, 1.0, 0.0 m	6.7, 3.3, 0.0 cm
天端幅 B	30, 50, * 100 m *法先水深 4 mのときなし	1.0, 1.67, * 3.3 m *法先水深 13.3 cmのときなし
法勾配	1/3	1/3
被覆材重量 W	1.6, 2.6, 5.2 t	61, 95, 192 g
斜面勾配 1/15		
	実 物 大	模 型
法先水深 h	6.0 m	20.0 cm
天端水深 d	2.0, 1.0, 0.0 m	6.7, 3.3, 0.0 cm
天端幅 B	30, 50 m	1.0, 1.67 m
法勾配	1/3	1/3
被覆材重量 W	1.35, 2.7, 5.4 t	50, 100, 200 g

実験波浪：不規則波で各水深毎に
周期 $T_{1/3}=1.2\text{ s}, 1.7\text{ s}, 2.5\text{ s}$
波高 $(H_{1/3})=\text{約} 5\text{ cm}, * 10\text{ cm}, 13\text{ cm}, 18\text{ cm}$ 程度
* $T=1.2$ のときはこの2種のみのみ

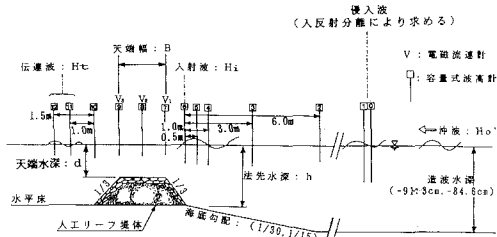


図-1 人工リーフ模型

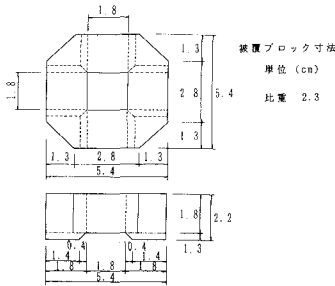


図-2 被覆ブロック模型

* 正会員 工修 水産庁水産工学研究所

1に示す。被覆材は、海底勾配1/30では碎石およびブロック、1/15では碎石のみを用いた。使用したブロックを図-2に示す。人工リーフの設置水深 h は、海底勾配1/30で、20 cm, 13.3 cmの2種類、海底勾配1/15では、20 cmの1種類であり、天端水深 h は、海底勾配にかかわらず、6.7, 3.3, 0.0 cmである。天端幅 B は、海底勾配1/30で100, 167, 333 cm、海底勾配1/15で100, 167 cmである。それぞれの形状について人工リーフの実験に使用した波は、周期約1.2秒で2種類の波高、1.5秒, 2.5秒で各4種類の波高、計10種類の波である。さらに碎石の人工リーフでは、天端上で碎波しない場合について周期1.2, 1.6, 2.5秒、波高1.5~4.0 cmの波を作用させて実験を行った。

3. 実験結果

(1) 波高分布及び伝達率

図-3は、各チャンネルの有義波高の変化の一例を示している。波高が大きい場合では、既に沖合で碎波し、波高が減衰しているが、人工リーフ上での波高減衰は、かなり大きい。

これらのデータから、人工リーフの波高伝達率 K_t を次のように定義して、整理した。

$$K_t = \frac{(\text{人工リーフ背後の平均波高 } H_t)}{(\text{人工リーフ先端での進行波の波高 } H_i)} \cdots (1)$$

ここで、 H_t は、人工リーフ背後の2台の波高計による有義波高の平均であり、 H_i は、人工リーフを設置していない場合と同じ沖波を与えた際の人工リーフ先端での進行波としての有義波高であり、入射波実験の結果を用いて推定したものである。

図-4に沖及び人工リーフ上で碎波する場合の H_i と設置水深 h の比 h/H_i に対する K_t の変化を示す。同図では、特に周期による区別をしていないのは、 K_t が周期によって大きく変化することがなく、入射波高によって変化しているためである。同図から、天端水深 d の減少並びに天端幅 B の増大に伴い K_t が減少することがわかる。図-5に、人工リーフ上で碎波しない場合の K_t を示す。

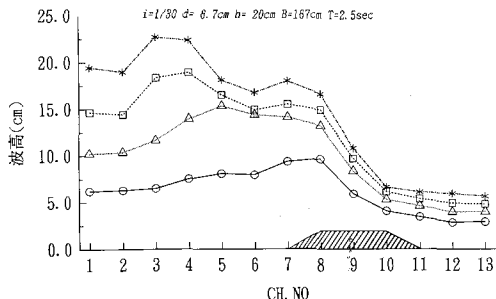


図-3 人工リーフ周辺の波高変化

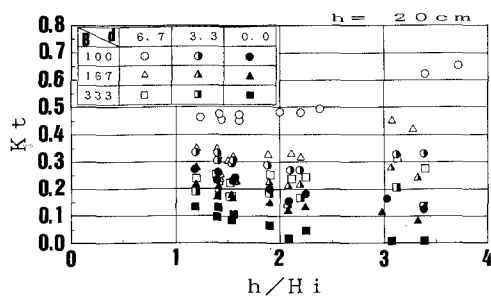


図-4 波高伝達率

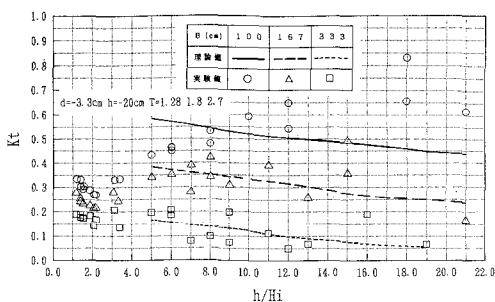


図-5 波高伝達率 ($h/H_i > 4.0$ 非碎波)

す。この図から伝達率は、碎波しない場合でも1より小さく、天端幅が最も小さい場合を除いて、 h/H_i が大きくなると K_t は減少する傾向がある。また、天端幅が長いほど K_t が小さいこともわかる。この原因としては、人工リーフ内の透水層による減衰、人工リーフ表面の摩擦による減衰が考えられる。出口ら(1988)は透水層による波の減衰機構を理論的に求めている。今回、この理論の適用を試みた。出口らが求めた無次元透水係数を用いて透水層厚を人工リーフの高さとして減衰係数 β を求め、減衰率を計算した。同図にその結果を実線、点線、波線で示す。最も天端幅の短い場合 $d=3.3$ cm, $B=100$ cm(図-5中の○印と実線)を除き、全体的に伝達係数の傾向をよく表していると考えられる。このことから、天端上で碎波しない場合の波高減衰は、人工リーフ内の透水現象が主な要因であると考えられる。

(2) 周期の変化

これまでの研究から人工リーフ通過後の波の周期は、短くなることが示されている。図-6に入射波の有義周期に対する各チャンネルにおける有義周期の比(周期比)の変化の一例を示す。この図から、周期比は、人工リーフ前面まで(1~8 ch)、ほとんど変化しないが、リーフ上、背後で急速に周期比が減少し、その後ほぼ一定値となることがわかる。

周期の減少は、人工リーフ天端上で波の分裂によるものであることが目視によって確認されている。波の分

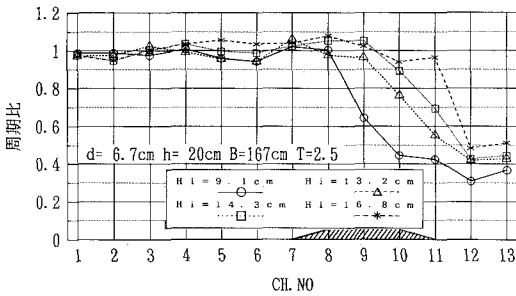


図-6 人工リーフ周辺の周期比の変化

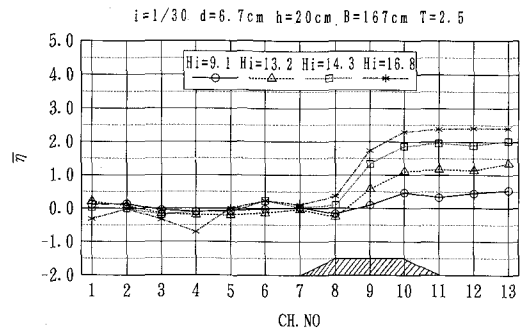


図-8 人工リーフ周辺の平均水位の変化

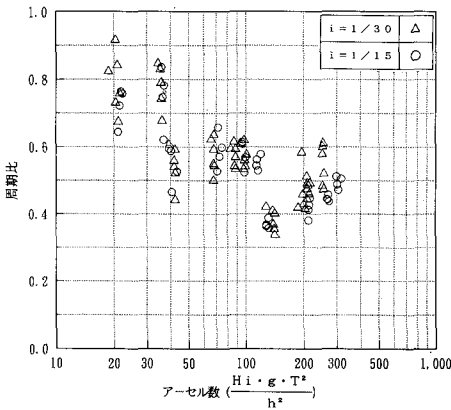


図-7 周期比とアースル数

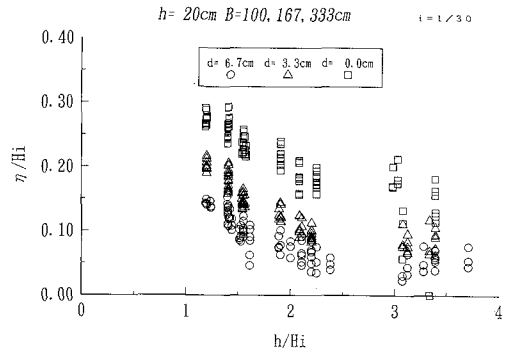


図-9 水位上昇量

裂は、人工リーフに入射する波の非線形性と関係があると考えられる。図-7 は横軸をアースル数、縦軸を周期比としたものである。この図から、バラツキはあるものの周期比は、入射波のアースル数の増加に伴い減少していることがわかる。なお、周期比の減少は、0.3～0.9 の範囲である。

(3) 平均水位の上昇

図-8 に各チャンネルの平均水位の変化の一例を示す。これから、沖から人工リーフ先端までの区間 (1～8 ch) では、ほとんど平均水位の変化はないが、リーフ上で急激に水位が上昇し、人工リーフ背後でほぼ一定になっていることがわかる。リーフ背後の水位上昇量 η と入射波高 H_i の比 η/H_i と h/H_i の関係を図-9 に示す。この図から、 η/H_i は、設置水深 h 、天端水深 d 、 H_i に依存しており、周期や天端幅 B の影響は顕著でない。この図から、天端水深 d が大きいほど、 h/H_i が大きいほど、 η/H_i が小さくなる傾向がある。

(4) 被覆石の安定について

人工リーフを被覆している被覆材の安定性は、目視を基本とした。被覆材の動きが多い場合パノラマ写真等により判別した。その結果、人工リーフ前部すなわち法先

から天端前部までの区間で被覆材が動く場合がほとんどであった。これは、リーフ先端から天端前部で波が激しく碎波し、流れ及び水位変動が最も激しい部分であるからであろう。被覆材が動く場合の波、流れの状況は、戻り流れの強いとき冲向きに動く、強い波の打ち込みによって岸向きに動くという2つのパターンに分けられた。この様な被覆石やブロックの安定性は、ハドソンの K_d 値及びプレプナー・ドネリー安定係数 K_s によって検討されている。人工リーフの場合法面勾配が小さいことおよび天端上での移動が比較的多いこと等を考慮し、法面勾配の効果を含まないプレプナー・ドネリーの算定式により検討する。基本式は次のようである。

$$W = \frac{\gamma_r * H_i^3}{(N_s * (S_r - 1))^3} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、式中の記号は次の通りである。

- W ; 被覆石、ブロックの安定重量
- γ_r ; 被覆石、ブロックの空中単位体積重量 (t/m³)
- S_r ; 被覆石、ブロックの比重
- K_d ; 定数 N_s ; 定数 α ; 法面の傾斜角度

尚、ハドソンの K_d 値、プレプナー・ドネリーの N_s 値の関係は、次の通りである。

$$K_d * \text{Cot}(\alpha) = N_s^3 \dots\dots\dots (3)$$

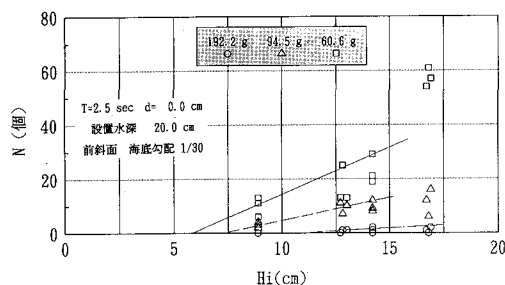


図-10 入射波高と被覆石の安定性

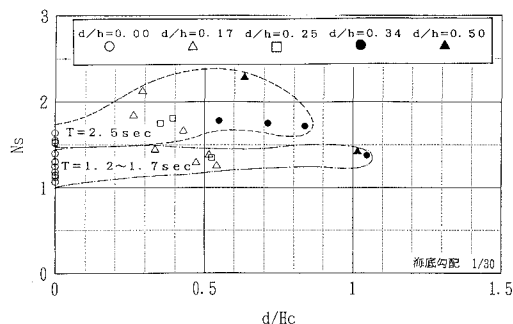
図-11 安定係数 N_s と d/H_c (被覆石)

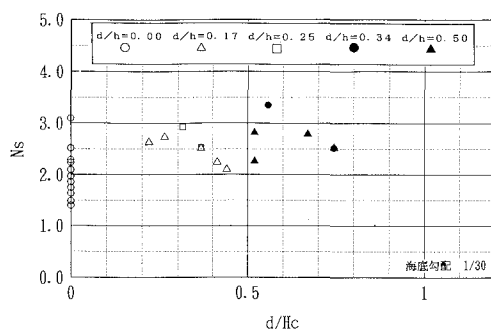
図-10 は、入射波高に対する移動・転落した被覆材の個数の一例を示す。入射波高と被覆石の安定性の相関が高いことがわかる。この図から、被覆石が不安定になる限界入射波高 H_c を、同図から内挿または外挿して推定し、これを H_c とすると、 N_s は、次の式から求められる。

$$N_s = \frac{(\gamma_r/W)^{1/3} \cdot H_c}{(S_r - 1)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

図-11 に N_s と d/H_c (天端水深と限界入射波高) の関係を示す。この図から、 N_s は、1 から 2 程度であることがわかる。また、 d/h (天端水深と設置水深の比) の増加にともない、 N_s も増加する傾向にあるようである。

同図に周期による領域分けがされているが、周期の長い方が N_s が大きくなっている。このことは、被覆石の重量が同じ場合、長い周期 ($T=2.8$ 秒) の限界波高の方が短い周期 ($T=1.2, 1.7$ 秒) の限界波高よりも大きくなることを示している。すなわち、安定係数 N_s が周期によって変化することになる。この理由は明確ではないが、捨石防波堤の安定性で問題となる斜面上の共振現象と類似の現象が人工リーフ前部で発生している可能性を示していると考えられる。このことは、前述した被覆石が移動、転落する際の波と戻り流れの状況からも推察される。

図-12 にブロックの場合の安定係数を示す。被覆石の場合と異なり、周期による明確な差異は出なかった。これはブロックが被覆石と比べて互いに接触面が多く、滑動、移動抵抗が大きいためであると考えられる。

図-12 安定係数 N_s と d/H_c (被覆ブロック)

4. 結 語

以上実験結果と考察を述べてきた。これらをまとめるのと次のようなことが言える。

(1) 波高伝達率 K_t は、設置水深 h 、天端水深 d 、天端幅 B 、入射波 H_i に依存する。また、天端上で碎波しない場合でも、波は減衰し、その原因は人工リーフ内の透水層であると考えられる。

(2) 伝達波の周期は、天端上での波の分裂により、入射波周期より減少する。入射波のアーセル数が増加すると伝達波の周期の減少は大きくなると考えられる。

(3) リーフ背後の平均水位の上昇量は、設置水深 h 、天端水深 d 、入射波 H_i に依存し、天端幅 B の影響は顕著でない。水位上昇量は、入射波高の 0~0.3 倍程度である。

(4) プレブナー・ドネリーの式で、被覆石の安定性を検討したところ、 N_s は、 d/H_i に依存すると考えられるが、そのほかに周期 (波長) が影響していると考えられる。被覆ブロックは周期による明確な差異は見られなかった。

なお、本稿を執筆するに当たり、漁港水利研究室の研究員山本潤氏、田村恵美子さん、埴信子さん、越川幸子さんに資料整理、グラフ作成などで助力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 中村 充・白石英彦・佐々木泰男 (1966): 潜堤による消波について, 第 13 回海講演集, pp. 76-79.
- 田中則男 (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 回海講演集, pp. 152-157.
- 永井荘七郎・倉田克彦・長谷川恵一 (1977): 潜堤の消波効果におよぼす天端幅の影響, 第 24 回海講演集, pp. 303-307.
- 高山知司・永井紀彦・関口忠志 (1985): 広天端幅潜堤の波浪低減効果に関する不規則波実験, 第 32 回海講演集, pp. 545-549.
- 高山知司・池田直太・永井紀彦・高山 優 (1988): 広天端幅潜堤の越波低減効果に関する不規則波実験, 第 35 回海講演集, pp. 587-591.
- 出口一郎・榎木 亨・白谷宏司 (1988): 透水層上の波浪変形に

- 対する非線形非定常 Darcy 則の適用性について, 第 35 回海
講論文集, pp. 487-491.
- 樫木 亨・出口一郎・岡原義典 (1989): 幅広潜堤の波浪減衰効
果とその縮尺効果について, 第 36 回海講論文集, pp. 633-
637.
- 谷野賢二・水野雄三・渡邊康玄・平沢充成 (1989): 人工リーフ
による波の変形について, 第 36 回海講論文集, pp. 628-632.
- 宇多高明・小俣 篤・斎藤友伸 (1990): 人工リーフ被覆材の所
要重量算定法, 土木研究所資料, No. 2893. 48 p.
- 河野二夫・高野重利 (1991): 捨石潜堤の安定性に関する基礎的
研究, 第 38 回海講論文集, pp. 586-590.
- 水谷法美・岩田好一郎・Teofilo Monge Rufin, Jr.・倉田克彦
(1991): 幅広潜堤上の被覆材に作用する波力の特性と移動
限界に関する実験的研究, 第 38 回海講論文集, pp. 591-595.
-