

# 消波ブロックを用いた人工リーフの 機能・安定性に関する実験的研究

半 沢 稔\*・周 遠強\*\*・杉 浦 淳\*\*\*・佐 藤 弘 和\*\*\*\*

## 1. ま え が き

近年、景観や海水交換に配慮した構造物として、人工リーフの施工例が増えつつある。人工リーフについては宇多ら(1988, 1990)が捨石を対象とし規則波による系統的な実験を行い、人工リーフ堤体上の流速を考慮した安定重量算定式を提案しており、それらの成果を踏まえて人工リーフの設計の手引き(全国海岸協会, 1992)に設計法がとりまとめられている。竹田ら(1994)は不規則波による実験から捨石に対してハドソン式をベースに $K_D$ 値の算定式を提案している。中山(1994)も不規則波の実験からプレブナードネリー式によって $N_s$ を求めている。人工リーフでは石の重量不足を補う意味から、その被覆層として混成堤のマウンド被覆に使用されるような、一層被覆ブロックを被覆材として用いる場合もある。これらブロックについても研究が行われており、例えば、浅川ら(1992)はエックスブロックを対象にして被覆材の安定性、伝達波、堤体背後の水位上昇等について実験的な研究を行っている。

また、最近では、既存の離岸堤や護岸の消波工として使われてきた消波ブロックを、人工リーフとして転用する事例や、施工性の良さから消波ブロックを乱積み形式で用いて人工リーフを構築することも考えられている。従来、消波ブロックはハドソン式による設計が行われてきているが、人工リーフのような潜堤形式については安定性の傾向が異なるため別途検討が必要である。本研究は、テトラポッドを例にとり、消波ブロックを人工リーフとして使用した場合の水理機能、安定性についての検討を目的として、不規則波を用いた系統的な実験を実施し解析を行ったものである。

## 2. 実験方法

実験には2次元造波水路(長さ50m, 幅1.0m, 深さ1.3m)を用い、1/30の一樣勾配斜面上に消波ブロック(テトラポッド)を全断面乱積みとして人工リーフを形成

して実験を実施した。実験上の想定縮尺は1/50とした。

実験で対象とした人工リーフ断面を図-1に示す。また、堤体の各諸元について表-1に示す。人工リーフの天端幅は100cm(現地相当50m)で一定とした。人工リーフの法面勾配は、沖側、岸側ともに1:2とした。設置水深(人工リーフ天端沖側端部の水深で定義)は8~20cm(4~10m)、天端上水深は0~12cm(0~6m)である。両者の組み合わせから、人工リーフ高さは8~16cm(4~8m)とした。

実験に用いたテトラポッド模型は46gと73g(5.75t, 9.13t)の2種類である。

実験はプレットシュナイダー・光易型の周波数スペクトルを持つ不規則波を用いて行った。波浪諸元他は表-2に示すとおりであり、周期は $T_{1/3}=1.1, 1.5, 2.0$ sec, 堤体位置の波高は、 $H_{1/3}=1.2\sim 16.5$ cmで実験を実施した。主な測定項目は、

- ①人工リーフ背後の伝達波高
- ②人工リーフ背後の水位上昇量

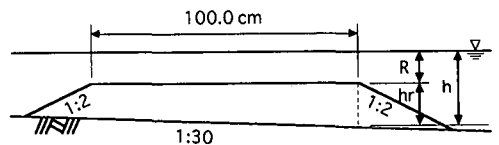


図-1 堤体断面図

表-1 堤体条件

| 人工リーフの高さ<br>$h_r$<br>( $=h-R$ ) | 天 端 上 水 深 $R$  |               |               |               |
|---------------------------------|----------------|---------------|---------------|---------------|
|                                 | 0.0<br>(0.0)   | 4.0<br>(2.0)  | 8.0<br>(4.0)  | 12.0<br>(6.0) |
| 設                               | 8.0<br>(4.0)   | 8.0<br>(4.0)  | —             | —             |
| 置                               | 12.0<br>(6.0)  | 12.0<br>(6.0) | 8.0<br>(4.0)  | —             |
| 水                               | 16.0<br>(8.0)  | 16.0<br>(8.0) | 12.0<br>(6.0) | 8.0<br>(4.0)  |
| 深                               | 20.0<br>(10.0) | —             | 16.0<br>(8.0) | 12.0<br>(6.0) |
| $h$                             | —              | 16.0<br>(8.0) | 12.0<br>(6.0) | 8.0<br>(4.0)  |

単位 上段: 模型量 (cm)

下段: 現地量 (m)

\* 正会員 工修 株式会社テトラ応用水理研究所  
 \*\* 正会員 工博 株式会社テトラ応用水理研究所  
 \*\*\* 正会員 株式会社テトラ技術部  
 \*\*\*\* 正会員 株式会社テトラ東京支店

表-2 波浪条件

| 周 期<br>$T_{1/3}$<br>(sec) | 入射波高<br>$H_{i1/3}$<br>(cm)<br>(m) | 相対天端上<br>水 深<br>$R/H_{i1/3}$ | 相対天端幅<br>$B/L_0$ |
|---------------------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------|
| 1.1<br>(7.8)              | 1.2~11.4<br>(0.6~5.7)             | 0.0~5.0                      | 0.529            |
| 1.5<br>(10.6)             | 2.0~15.8<br>(1.0~7.9)             | 0.0~3.2                      | 0.285            |
| 2.0<br>(14.1)             | 1.7~16.5<br>(0.9~8.3)             | 0.0~3.5                      | 0.160            |

単位 上段：模型量  
下段：現地量

③消波ブロックの安定性

である。

3. 実験結果および考察

3.1 伝 達 波 高

(1) 波高伝達率

図-2 は人工リーフ堤体背後の波高について、次式で定義される波高伝達率  $K_t$  として実験結果を整理したものである。

$$K_t = \frac{H_{t1/3}}{H_{i1/3}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $H_{i1/3}$  は堤体先位置での入射波高 (有義波高)、 $H_{t1/3}$  は堤体背後の伝達波高 (有義波高) である。横軸は  $H_{i1/3}$  に対する天端上水深  $R$  の比である。図中のパラメータは沖波波長  $L_0$  に対する人工リーフ天端幅  $B$  の比率である。波高伝達率は、相対天端上水深が小さいほど、また、相対天端幅が広い程小さくなる。これは、天端上での碎波および、堤体を構成するブロックの空隙内での乱れによって入射エネルギーが減衰するためである。図を見ると、 $R/H_{i1/3}$  が 1.0 前後で伝達率の変化傾向が変わっており、1.0 以下では天端上水深の減少による伝達率の減少割合が大きいことがわかる。図には示していないが  $R/H_{i1/3}$  が 2.5 よりも大きい範囲では波高伝達率が 1.0 前後となってしまう人工リーフの波浪減殺効果がみられなくなる。また、例えば、波高伝達率を 0.6 以下とするためには、 $B/L_0$  の値によって  $R/H_{i1/3}$  を 0.8~1.0 以下とする必要があることがわかる。

実験結果から、波高伝達率は相対天端幅  $B/L_0$  と、相対天端上水深  $R/H_{i1/3}$  で表現できるものと考えられる。そこで、その 2 つを変数として求めたのが以下の実験式であり、図中にも示してある。

$0 \leq R/H_{i1/3} < 1.0$  で、

$$K_t = -0.26 \frac{B}{L_0} + 0.44 \frac{R}{H_{i1/3}} + 0.32 \dots\dots\dots (2)$$

$1.0 \leq R/H_{i1/3} < 2.5$  で、

$$K_t = -0.28 \frac{B}{L_0} + 0.20 \frac{R}{H_{i1/3}} + 0.56 \dots\dots\dots (3)$$

図-3 は上記実験式による推定値と実験値の関係を見たものである。比較的簡単式であるにもかかわらず、実験結果との整合性は高い。若干のばらつきはあるものの、実用上はこの程度の精度であれば問題ないものと考えられ、(2) および、(3) 式は堤体背後の波高の推定式として設計上使用可能なものと考えられる。

(2) 影響係数

高山ら (1988) は広天端幅潜堤に対して、潜堤背後の波高変化を、潜堤設置前後の波高の比率として定義される影響係数  $K_H$  で表すことを提案している。

$$K_H = \frac{H_{t1/3}}{H_{t01/3}} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $H_{t1/3}$  は堤体設置後の堤体背後の伝達波高、 $H_{t01/3}$  は堤体設置前の堤体背後の入射波高 (どちらも有義波高)

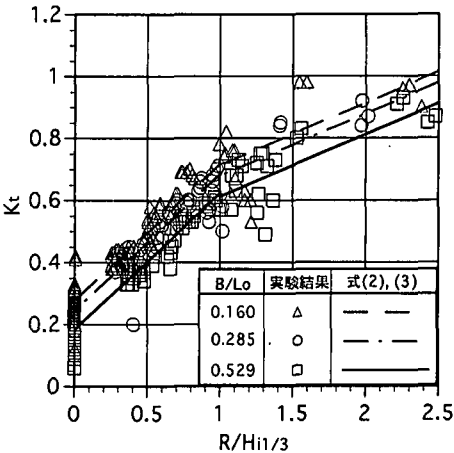


図-2  $K_t$  と  $R/H_{i1/3}$  の関係

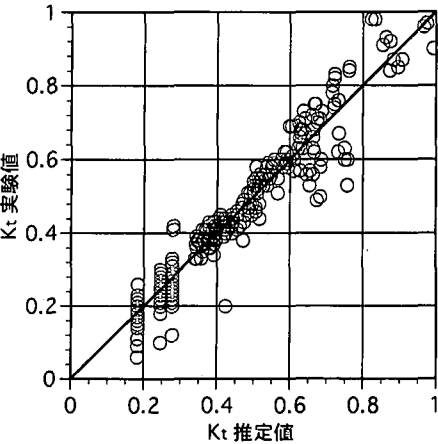


図-3 実験値と推定値 ((2), (3) 式) の関係

である。

高山らは、相対天端幅  $B/L_0$ 、換算沖波波高  $H'_0$  に対する相対天端水深  $R/H'_0$  および、換算沖波の波形勾配  $H_0/L_0$  をパラメータとして、不規則波による実験結果から以下の式を提案している。

$$K_H = -0.92 \frac{B}{L_0} + 0.42 \frac{R}{H'_0} + 3.8 \frac{H_0}{L_0} + 0.51 \quad \cdots (5)$$

図-4 は本実験結果の内、 $B/L_0=0.285$  を例としてその結果を (5) 式による推定式と併せて図示したものである。実験データはかなりばらついているが、(5) 式によって傾向は表されるようである。高山らは人工リーフの高さを一定として実験しているのに対し、本実験では高さを4種類変えて実施しているため、この条件の違い等がデータのばらつきに影響しているものと考えられる。

図-5 は他のケースも含めて (5) 式による推定値と実

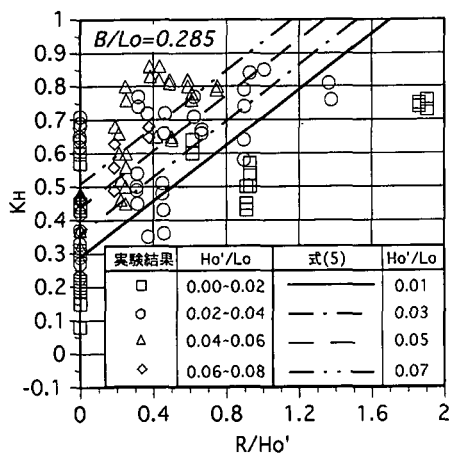


図-4  $K_H$  と  $R/H'_0$  の関係

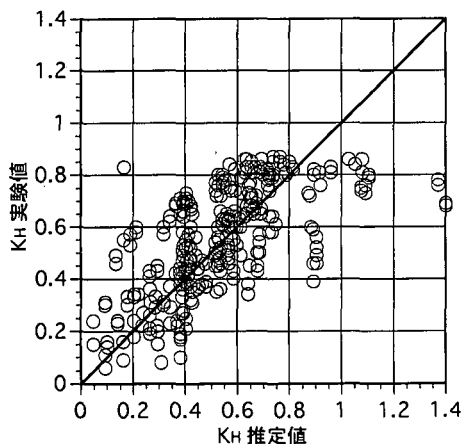


図-5 実験値と推定値 ((5) 式) の関係

験結果の関係をみたものである。波高伝達率に対する (2), (3) 式による場合に比べてばらつきが大きいものの、(5) 式によっても今回の実験結果の平均的な傾向は推定できていることがわかる。 $K_H$  の推定値が 0.8 以上の範囲で実験値との差が大きくなっているが、これは、高山らの式が  $R/H'_0$  が 1.0 以下の実験結果から求められているためと考えられ、図-4 でわかるとおり  $R/H'_0$  が 1.0 以上では潜堤としての波浪減殺効果が下がり  $K_H$  の実験値は一定値に近づく傾向があるためである。

### 3.2 水位上昇量

図-6 は入射波高で無次元化した堤体背後の水位上昇量  $\eta/H_{1/3}$  を、相対天端水深  $R/H_{1/3}$  を横軸にとり、相対天端幅  $B/L_0$  をパラメータとして整理したものである。 $R/H_{1/3}$  がゼロの場合にばらつきが大きいものの、全体的には相対天端幅によらずほぼ  $R/H_{1/3}$  によって水位上昇量は整理できるものと考えられる。また、図を見ると、 $R/H_{1/3}$  が 0.75 前後よりも小さくなると水位上昇の変化は大きく、それよりも  $R/H_{1/3}$  が大きいと水位上昇量の変化は小さくなり、波高伝達率と同様に  $R/H_{1/3}$  が 2.5 以上では堤体の影響は見られなくなる。

図中には実験結果から、 $R/H_{1/3}$  を変数として求められた以下の実験式もあわせて示してある。

$0 \leq R/H_{1/3} < 0.75$  で、

$$\frac{\eta}{H_{1/3}} = -0.3 \frac{R}{H_{1/3}} + 0.25 \quad \cdots (6)$$

$0.75 \leq R/H_{1/3} < 2.5$  で、

$$\frac{\eta}{H_{1/3}} = -0.014 \frac{R}{H_{1/3}} + 0.036 \quad \cdots (7)$$

図-7 は上記実験式による推定値と実験値の関係をみたものである。ばらつきはあるものの、(6), (7) 式は実用上は使用可能なものと考えられる。

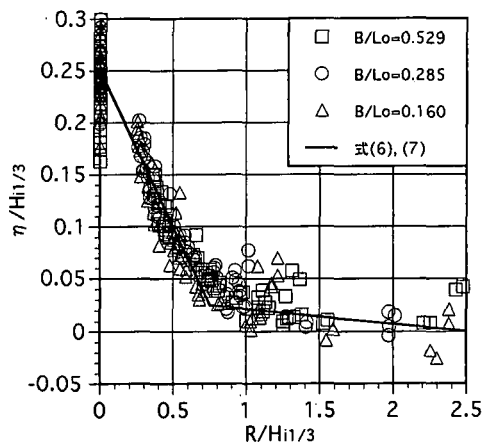


図-6  $\eta/H_{1/3}$  と  $R/H_{1/3}$  の関係

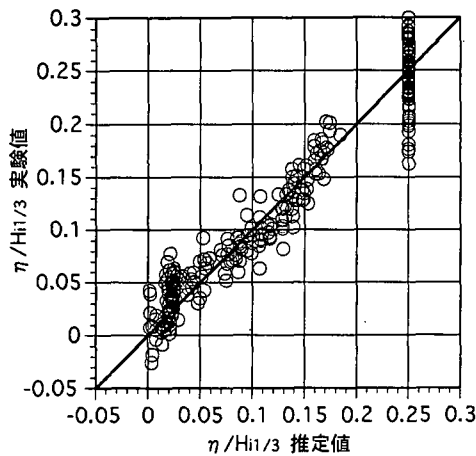


図-7 実験値と推定値 ((6), (7) 式) の関係

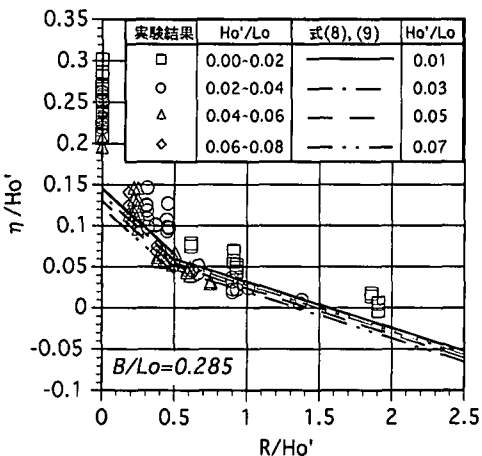


図-8 η/H\_0' と R/H\_0' の関係

高山ら (1988) は換算沖波波高  $H_0'$  で無次元化した水位上昇量  $\eta/H_0'$  を、影響係数と同様のパラメータを用いて算定する以下の式を提案している。

$0 < R/H_0' < 0.5$  で

$$\frac{\eta}{H_0'} = 0.085 \frac{B}{L_0} - 0.16 \frac{R}{H_0'} - 0.38 \frac{H_0'}{L_0} + 0.125 \dots\dots\dots (8)$$

$0.5 < R/H_0'$  で

$$\frac{\eta}{H_0'} = 0.048 \frac{B}{L_0} - 0.056 \frac{R}{H_0'} - 0.21 \frac{H_0'}{L_0} + 0.076 \dots\dots\dots (9)$$

図-8 は本実験の  $B/L_0=0.285$  のデータについて整理したものであり、図-9 は他のケースを含めて高山らの推定式と実験結果を比較したものである。図-8 からは高山らが指摘するように換算沖波で整理した場合には  $R/H_0'$  が 0.5 前後で水位上昇量の変化傾向に差があることが読み取れる。また、 $H_0'/L_0$  が小さい方が水位上昇量が大きくなる傾向も合致している。図-9 を見ると、本実験結果は高山らの推定値よりも大きめのものが多いが、これは、高山らの実験で使用した消波ブロック模型が、本実験に比べて相対的に大きいため、個々の空隙の大きさが影響したのではないかと推察される。

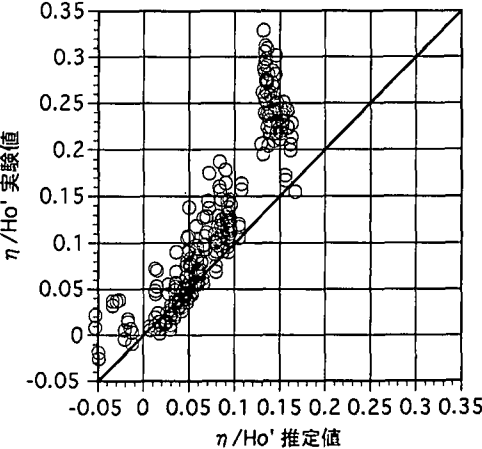


図-9 実験値と推定値 ((8), (9) 式) の関係

高ランクを変えて (上げて) 行く場合には堤体の積替えを行わず、被害率は累積値として算定した。

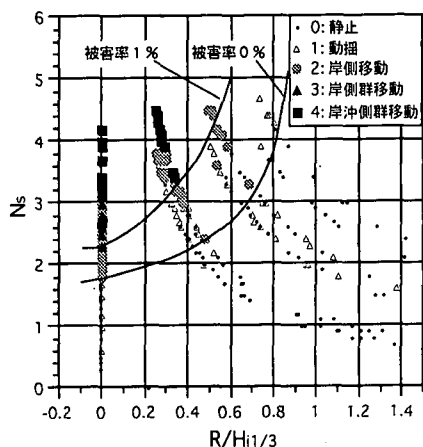
宇多ら (1988, 1990) や、人工リーフの設計の手引き (1992) は、石を対象とし天端上の流速を考慮した人工リーフ被覆材の安定重量算定式を示している。テトラポッドを用いた本実験においては天端上流速から、ブロックの安定性を評価することが困難であったため、実務上の簡便さ等を考慮し、以下のプレブナー・ドネリー (1962) による安定数  $N_s$  を用いる式形により整理した。

$$W = \frac{\gamma_s H_{1/3}^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $W$ : ブロック所要重量、 $H_{1/3}$ : 設計有義波高、

表-3 安定状況の目安

| 被災度 | 0  | 1  | 2    | 3     | 4      |
|-----|----|----|------|-------|--------|
| 状 況 | 静止 | 助揺 | 岸側移動 | 岸側群移動 | 岸沖側群移動 |

図-10  $N_s$  と  $R/H_{1/3}$  の関係

$\gamma_s$ : ブロックの空中単位体積重量,  $S_r$ : 海水に対するブロックの比重である。

図-10 は横軸に相対天端上水深  $R/H_{1/3}$  をとって安定定数  $N_s$  を整理したものである。図には先に表-3 で分類したブロックの被災状況を示している。また、被害率が 0 および 1% となる限界を表す傾向線も併せて示してある。天端上水深がゼロの場合の  $N_s$  は被害率 0% に対しては 1.8, 1% に対しては 2.3 程度である。天端上水深が大きくなると安定性が急激に増し,  $R/H_{1/3}$  が 0.4 の  $N_s$  は被害率 0% に対しては 2.2, 1% に対しては 3.5 程度まで大きくなることわかる。

一層被覆ブロックの場合には、わずかなブロックの被災から、中詰め石材の逸散につながるため、ブロックの移動限界に相当する被害率 0% を想定して設計を行うのが通例と考えられる。しかし、本実験で対象としたような消波ブロックの場合には、わずかなブロックの移動が即座に堤体全体の機能を失わせるほどの被害にはつながらないこと、混成堤被覆として消波ブロックが使われる場合にも 1% 程度の被害を考慮する事例が多いことから、人工リーフとしての消波ブロックの設計上は、被害率 1% に対応する  $N_s$  を用いて設計することも可能と考えられる。ただし、天端上水深に対する  $N_s$  の変化が大きい点に注意すべきである。

#### 4. おわりに

テトラポッドを用いた人工リーフに対する不規則波による系統的な実験を実施し以下のような結果を得た。

- ①人工リーフ堤体背後の波高算定にあたり、天端上水深の大きい範囲までを含めて、入射波高による波高伝達率で考える場合には本実験から得られた (2), (3) 式によることができる。また、高山らによる、堤体設置前後の波高変化で定義される影響係数 ((5) 式) を用いても堤体背後の波高を算定できる。
- ②堤体背後の水位上昇量について、入射波諸元を用いる場合には本実験で得られた (6), (7) 式が使える。また、換算沖波諸元を用いた高山らによる (8), (9) 式は実験値より若干小さめの値を与える。
- ③人工リーフとして用いる消波ブロックの安定重量算定にはプレブナー・ドネリータイプの  $N_s$  を用いることができ、算定図として図-10 を得た。

以上消波ブロックを用いた人工リーフに対して設計上必要不可欠なデータを得ることができた。今後は被害の大きさと機能の変化等、より詳細な検討を行っていきたいと考えている。

#### 参考文献

- 浅川 勉・佐藤弘和・ロノ町誠・野口正昭 (1992): 人工リーフ被覆材の安定性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 656-660.
- 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, 71 p.
- 宇多高明・小俣 篤・斉藤友伸 (1990): 人工リーフ被覆材の所要重量算定法, 土木研究所資料, 第 2893 号, 48 p.
- 全国海岸協会 (1992): 人工リーフの設計の手引き, 94p.
- 高山知司・池田直太 (1988): 広天端幅潜堤による波浪変形と隠岸越波流量の低減効果, 港研報告, 第 27 巻, 第 4 号, pp. 63-92.
- 竹田英章・菊地聡一・木村克俊・笹島隆彦・水野雄三 (1993): 不規則波による潜堤被覆材の安定性に関する研究(第 2 報), 海洋開発論文集, 第 9 巻, pp. 325-329.
- 中山哲蔵 (1994): 人工リーフの水理特性及び被覆材の安定性に関する実験的研究(その 2), 水工研技報(水産土木), 第 16 号, pp. 35-45.
- Brebner, A. and Donnelly, P. (1962): Laboratory Study of Rubble Foundations for Vertical Breakwaters, Proc. 8th ICCE, pp. 408-429.