

# 潜堤被覆材の所要重量算定に関する実験的研究

朝倉良介\*・池谷 毅\*\*・岩瀬浩二\*\*\*

## 1. はじめに

近年, 海浜へ来襲する波浪を低減するために景観に配慮した潜堤(人工リーフ)が注目されている。

潜堤とは, 天端が静水面下にあり, 天端上で碎波させることにより, 堤体背後での波高(伝達波高)を低減させることを目的としたものである。また波高の低減により, 海浜部での侵食が減少し土砂等が堆積することになり, 海浜地形の安定のためにも優れた構造物と言える。

一般に潜堤は捨石と被覆ブロックによって構成されているが, 被覆ブロックの所要重量を算定する設計法は確立されていない。現在までのところ, 港湾構造物の被覆ブロックの所要重量を算定するにはハドソン式(Hudson, 1959)が広く用いられている。しかし, ハドソン式は傾斜防波堤等堤体が静水面上にある構造物に対して適用できるものであり, 厳密には用いることはできない。また, 西欧では van der Meer (1988) が提案している捨石傾斜堤被覆石に関する設計公式が主流になっているが, 潜堤の場合には適用できない。そこで, 本研究では潜堤被覆材に消波ブロックを用いた場合の所要重量を算定することを目的として実験的に検討を行った。

## 2. 実験方法

実験は, 鹿島技術研究所の中型水路を用いて行った。水路の諸元は, 幅 0.7 m × 深さ 1.5 m × 長さ 60 m であり, 一端に電動フラップ型の不規則波造波装置が設置され, 任意の不規則時系列波形が造波可能である。

勾配 1/30 の鋼製斜面を設置し, 潜堤は捨石マウンドが法面勾配 1:1, 被覆ブロックは法面勾配 1:1.5 になるように設置した。実験のセットアップを図-1 に示す。

また, 天端水深  $R$  は 3.0, 0, -3.0, -6.0 cm の 4 ケースとした。水路の一樣水深部は 1.0 m として換算沖波波高 = 13.0 ~ 19.0 cm, 周期  $T_0 = 1.70 \sim 2.56$  sec の 16 種類の不規則波を 1000 秒間作用させて実験を行った。波数と被害率の関係を詳細に調べるために, 1 つのケースにつ

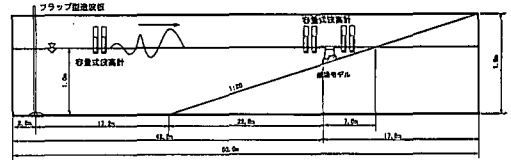


図-1 実験水路

いてのみ最大 128 分間波を作用させた。

また周波数スペクトルはプレットシュナイダー・光易型を用いた。水路の片面はガラス窓となっており被覆ブロックの挙動, 伝達波高等の現象が観察できるようになっている。

波高の計測には容量式波高計を用い, 一樣水深部, 潜堤直前, 潜堤天端, 潜堤背後での波高を 20 Hz で計測した。さらに潜堤近傍での波高伝達率を詳細に計測するために波高計を 30 cm 間隔で配置した。安定性の実験には捨石マウンドの材料として 5 mm ~ 10 mm (代表粒径 8 mm) と 15 mm ~ 20 mm (同, 18 mm) の 2 種類の碎石を用いた。

また被覆ブロックの材料として 7 種類 (92 g ~ 471 g, モルタル製, 比重 2.3 のテトラポッド) の消波ブロックを, 2 層積で用いた。被害の測定は実験終了毎に行い, 水を抜いて目視で観察した。

## 3. 実験結果

### 3.1 波高伝達率と水位上昇率

潜堤近傍での波高変化と水位変化の一例を図-2 に示す。計測により取得したデータを統計解析するための波高と周期の定義方法としてはゼロアップクロス法, ゼロダウンクロス法等がある。ゼロアップクロス法を用いると, 1 つの波を 2 つの波として判別してしまい, 有義周期が短くなる傾向がある。これに対してゼロダウンクロス法を用いると, 同じく 1 つの波が 2 つの波に別れてしまうが, 小さい方の波は有義周期には影響されず, 現象を良く再現できる(合田, 1990)。以上より, 本実験の内, 伝達波の統計解析手法にはゼロダウンクロス法を用いることとした。縦軸は各計測地点における波高伝達率およ

\* 正会員 工修 鹿島技術研究所 研究員  
\*\* 正会員 工博 鹿島技術研究所 グループ長  
\*\*\* 正会員 鹿島技術研究所 主任研究員

び水位上昇率である。波高伝達率とは、換算沖波波高に対する各計測地点での有義波高の比であり、水位上昇率とは換算沖波波高に対する各計測地点での平均水位上昇量の比である。法面で入射波の波高が最大になりその後変形・砕波し、沖側法肩付近で砕波することがわかる。さらに入射波が天端上を通過するとき波高が大きく低減し、潜堤を通過後はほぼ一定となった。さらに汀線近くになると波高はさらに低下して零に収束した。また図-2中の①(潜堤の前面)と②(潜堤の背後)での波高の時系列を図-3に示す。①では浅水変形のため非線形性が卓越しているのに対して、②はセットアップが起きており波形がクノイド波のようにになっている。図-4は田中(1976)による幅広潜堤の波高伝達率の算定図である。

図-5は本実験の波高伝達率を同様に  $R/H_0$  に対して示したものである。なお伝達波高 ( $H_t$ ) は図-2中の②地点の値を用いた。実験値は0.4程度となり田中の算定式と良く一致している。また、潜堤背後での水位上昇率は0.15程度となった。

3.2 被覆材の被害状況

実験状況の目視に基づき、被覆材の被害状況を効率的に把握するために、被害の状態を4通りに分類した。図-6に被害状態の模式図を示す。(a)移動距離がブロック1個以上、(b)移動距離がブロック1個未満または一度移動するが再び元の位置に戻る、(c)動揺または回転するがその場に留まる、(d)全く動揺しない。今回は、(a)と(b)の合計を被害数として被害率を求めた。被害率とは、有効被覆ブロック数に対する被害のあった被覆ブロック数の比である。有効被覆ブロック数とは全被覆ブロック数から水路の両側の2列ずつを側壁と消波ブロックの摩擦による影響を考慮して取り除いた数である。CASE-(a)は特に天端上で発生し、CASE-(b)は法面で

6に被害状態の模式図を示す。(a)移動距離がブロック1個以上、(b)移動距離がブロック1個未満または一度移動するが再び元の位置に戻る、(c)動揺または回転するがその場に留まる、(d)全く動揺しない。今回は、(a)と(b)の合計を被害数として被害率を求めた。被害率とは、有効被覆ブロック数に対する被害のあった被覆ブロック数の比である。有効被覆ブロック数とは全被覆ブロック数から水路の両側の2列ずつを側壁と消波ブロックの摩擦による影響を考慮して取り除いた数である。CASE-(a)は特に天端上で発生し、CASE-(b)は法面で

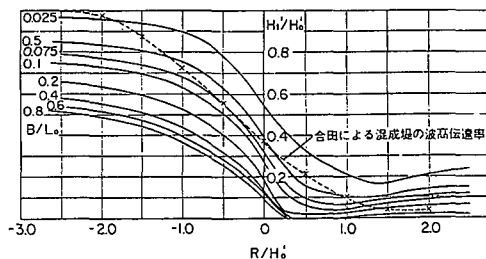


図-4  $R/H_0$  と波高伝達率の関係

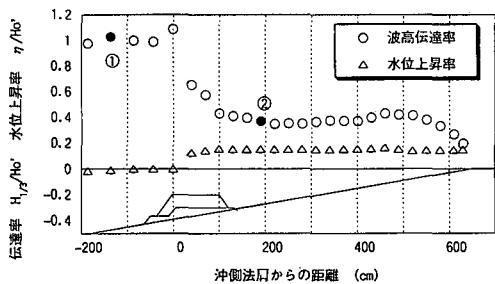


図-2 波高伝達率と水位上昇率

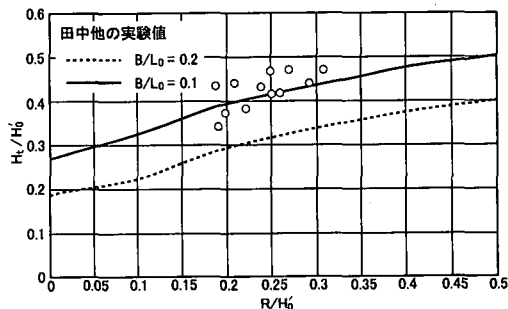


図-5 波高伝達率と既往実験値との比較

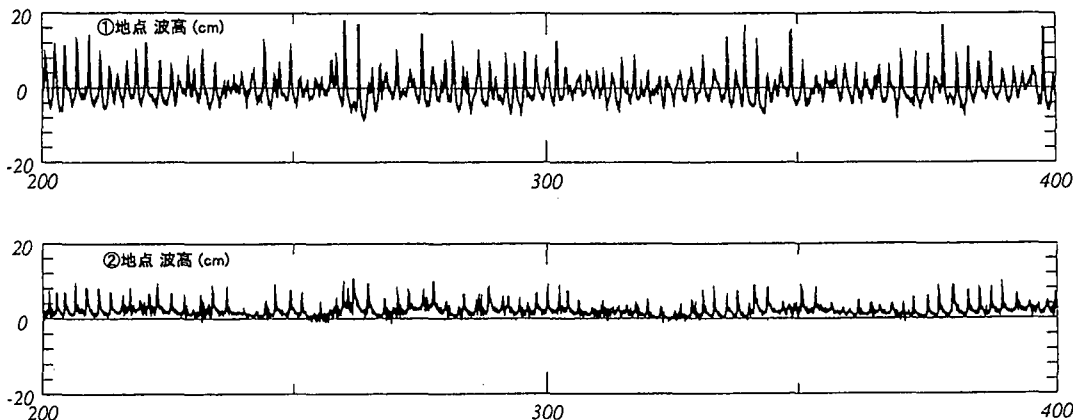


図-3 潜堤前面、背後での波高時系列

良く発生した。一例として、実験終了後の被覆材の被害状況を図-7に示す。

被害は沖側法肩にのみ集中しており、その他の場所ではほとんど被害を受けていない。これは、潜堤を設置した場合、法面で入射波が変形・砕波し、沖側法肩付近に砕波による流体力が大きく作用するためである。

4. 所要重量の算定法

宇多ら (1988, 1989, 1990) に基づいて人工リーフの設計の手引き (全国海岸協会, 1992) が作成されている。また河野ら (1991), 水谷ら (1991), 浅川ら (1992) に見られるように、潜堤被覆材の所要重量の研究が盛んになっている。人工リーフの設計の手引きは捨石に関する実験から潜堤を捨石で構築する場合の所要重量の算定法

を示している。しかし、消波ブロックを使った実験は行われておらず標準的な算定式が存在しない。また捨石と仮定して算出すると所要重量が過大に算出されてしまうこともある。このような背景から潜堤に消波ブロックを用いた実験を行い所要重量を算定することを試みた。

所要重量の算定に当たっては被害数を考慮した van der Meer (1988) の式をモデルとした。van der Meer (1988) によれば、巻波型砕波波浪に対する被覆石の重量は以下の式 (1) のように表わされる。

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \cdot \sqrt{\xi} = 6.2 P^{0.18} \left( \frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $H_s$ : 有義波高,  $\Delta = S_r - 1$ ,  $S_r = r_r / r_w$ :  $r_r$ : 被覆材の空中単位体積重量,  $r_w$ : 海水の単位体積重量,  $D_{n50}$ : 被覆材の代表径,  $P$ : 被覆層の透水性パラメータ (2層積の場合は0.5),  $S$ : 被害水準指標 (2~17) で無被害のときは  $S=2$ , 被覆層に穴が開いてフィルター層が見えるのが  $S=8$ ,  $N$ : 波数,  $\xi$ : 砕波相似性パラメータ (surf similarity parameter) であって、次のように有義波高と平均周期で定義する。

$$\xi = \tan \theta / \sqrt{2\pi H_s / g T^2} \dots\dots\dots (2)$$

これによると被害水準指標  $S$  と波数 (波浪継続時間)  $N$  の平方根は比例している。しかし  $S$  の定義が曖昧で、一定の評価を行うのが難しい。そこで今回は被害の程度を表すのに被害率  $D$  を用いて実験結果を整理した。波数と被害率の関係を図-8に示す。実験は60, 120, 240, 480, 960, 1920, 3840 波目にそれぞれ造波板を停止させて被害率を観察した。被害率が5%程度までは波数の平方根に比例することが分かる。その後被害率が急激に増大するのは、1層目が投げ出された後に2層目が被害に遭ったためである。また、被害率と被害水準指標の関係を図-9に示す。図より被害率と被害水準指標は比例しており、被害率を被害水準指標として使用できることが分かった。

続いて、式 (1) を展開して有義波高と被覆材の重量の形で表わす。

式 (1) の両辺を3乗すると

$$\frac{H_s^3}{\Delta^3 D_{n50}^3} \cdot \xi^{1.5} = 238.328 P^{0.54} \left( \frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0.6} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\Delta = S_r - 1$ ,  $S_r = r_r / r_w$  を用いて式 (3) を書き換え、次式を得る。

$$\frac{H_s^3}{r_r D_{n50}^3} \cdot \xi^{1.5} = \frac{238.328 P^{0.54}}{r_w} \frac{(S_r - 1)}{S_r} \left( \frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0.6} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、代表径  $D_{n50}$  を用いて被覆材の質量  $W$  とし、式 (4) をそれぞれ以下のように置きかえると式

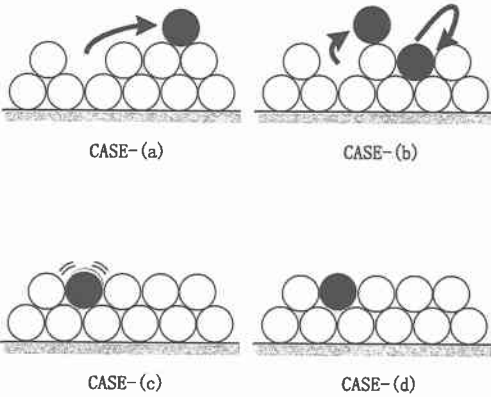
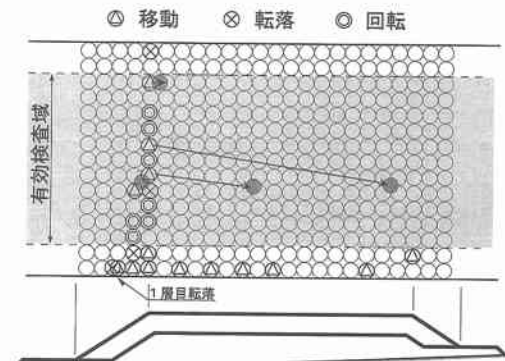


図-6 被害状態の模式図



有効 (全体)			
移動	5個 (15個)	総個数	704個
転落	1個 (4個)	有効個数	514個
回転	7個 (7個)		
被災個数	6個	被害率	$6 \div 514 \times 100 = 1.17\%$

図-7 被害状況の確認

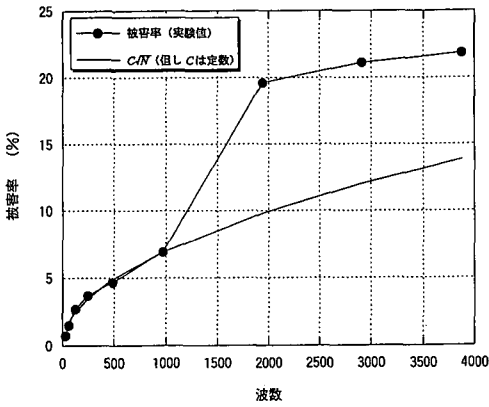


図-8 波数と被害率の関係

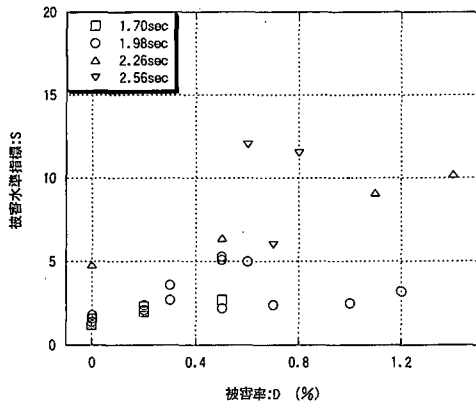


図-9 被害率と被害水準指標の関係

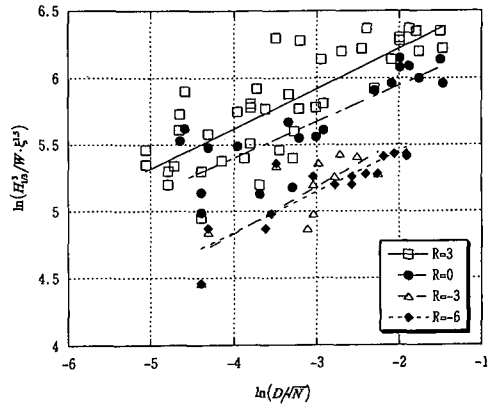


図-10  $\ln\left(\frac{H_{1/3}^3}{W} \xi^{1.5}\right)$  と  $\ln\left(\frac{D}{N}\right)$  の傾向

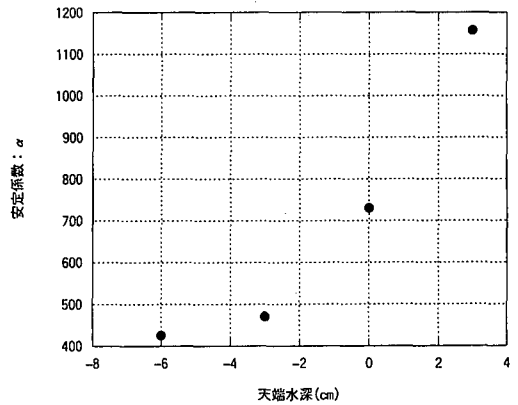


図-11 天端水深と安定係数の関係

(5) が得られる。

$$\begin{aligned}
 H_{1/3} &= H_s \\
 f(S_r) &= \frac{(S_r - 1)^3}{S_r} \\
 D &= C \cdot S \quad (\text{但し, } C \text{ は比例定数}) \\
 \alpha &= \frac{238.328 F^{0.54}}{\gamma_w} \cdot C^\beta \\
 \ln\left(\frac{H_{1/3}^3}{W} \cdot \xi^{1.5}\right) &= \alpha \cdot f(S_r) \left(\frac{D}{N}\right)^\beta \dots\dots\dots (5)
 \end{aligned}$$

van der Meer (1988) は被覆材に捨石を使用しているが、本実験では消波ブロックを使用しているため波数と被害率の影響も考慮に入れ、改めて変数  $\beta$  を用いた。

式 (5) の両辺の対数をとると、式 (6) を得る。

$$\ln\left(\frac{H_{1/3}^3}{W} \cdot \xi^{1.5}\right) = \beta \cdot \ln\left(\frac{D}{N}\right) + \ln \alpha + \ln f(S_r) \dots\dots\dots (6)$$

各実験ケースについて天端水深別にプロットしたものを図-10 に示す。図中の直線は天端水深別のプロットを最小 2 乗法で結んだものである。

また図-11 に図-10 より求めた天端水深と安定係数の関係を示す。 $\alpha$  は天端水深によって異なり、天端水深が大きくなるにつれて大きくなる。一方、天端水深が負のとき(天端が静水面より上にあるとき)はほぼ一定となる。図-10 より  $\beta$  は、ほぼ一定となり  $\beta=0.33$  となる。van der Meer 式においては  $\beta=0.6$  となる。これは van der Meer (1988) が被覆材として捨石を使用しているのに対して、今回の実験では消波ブロックを使用した事によるブロックの消波能力および噛み合わせ等の効果の表れと言える。

このことから潜堤の被覆ブロックの重量は、天端水深が大きくなると堤体が水面上にある場合と比べてかなり軽減できることが分かった。

### 5. 結 論

今回、消波ブロックで被覆された潜堤を対象として、主に消波ブロックの所要重量を算定することを目的として、実験的な研究を行った。その結果、以下の知見が得

られた。

- 1) 潜堤近傍での波高は斜面沖側法肩で最大となり、潜堤背後での波高伝達率は0.4程度となり田中の算定図と良く一致した。
- 2) 潜堤背後での水位上昇率は0.15程度となった。
- 3) 被覆材の被害は沖側法肩に集中しており他の場所はほとんど無被害となった。
- 4) 潜堤被覆材の安定性の検討では van der Meer 式の被害水準指標の代わりに被害率を使用できることが明らかになった。
- 5) 同一波浪条件において、天端水深が大きいほど被覆材の重量を軽減できることが分かった。
- 6) van der Meer 式をモデルとし、今回の実験結果に基づいて潜堤の被覆材の所要重量算定法を提案した。

#### 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・横山揚久 (1989): 人工リーフ被覆材の所要重量算定法, 海岸工学論文集, 第 36 巻, p. 648-652.

宇多高明・小俣 篤・斎藤友信 (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.

合田良賢 (1990): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会

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, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp.586-590.

田中則男 (1976): 天端幅の広い潜堤の波浪減殺及び砂浜安定効果について, 海岸工学論文集, 第 23 巻, pp.152-157.

水谷法美・岩田好一朗・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, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp.591-595.

社団法人 全国海岸協会 (1992): 人工リーフの設計の手引き

Hudson, R. Y. (1959): Laboratory investigation of rubble mound breakwater, Proc of ASCE, Vol.85, No. WW 3

Van der Meer, J. W. (1988): Rock Slopes and Gravel Beaches under Wave Attack : Doctoral thesis approved by Delft University.