

# 低天端離岸堤の被覆ブロック被災機構に関する研究

福島雅紀\*・山本幸次\*\*・佐藤慎司\*\*\*・山本吉道\*\*\*\*

## 1. はじめに

離岸堤の消波機能を十分に発揮させるため、その天端高を平均水面よりも十分高く設定する必要がある(全国海岸協会, 1987)。しかし、このような構造物は海岸景観を悪化させたり漁業活動を阻害したりすることが指摘されており、その天端高を低く設定することが海岸利用の面から望まれている。一方、人工リーフや潜堤などの海面下に設置されるタイプの消波構造物は海岸景観の点では優れているが、天端水深を確保しつつ十分な消波効果を得るためには、天端幅を十分に広く設定しなければならない。その結果、建設コストが増加するといった問題が生じる。さらに、太平洋側の台風時や日本海側の冬季風浪時には平均水位が上昇し天端水深が大きくなるため、所定の消波効果を得られない場合がある。

これらの背景の中で、中間的な構造物として、低天端離岸堤、高天端人工リーフなどの新しいタイプの構造物が模索されている。既に、北海道胆振海岸、茨城県大野鹿島海岸、山形県温海海岸、新潟県新潟海岸などにおいては、天端高と計画高潮位がほぼ等しい沖合構造物が建設され始めている。これらの低天端構造物は、捨石の周囲を平型ブロックで被覆した不透透形式とされることが多いが、未だ建設事例が少なく、消波効果や安定性などの点で未解明な部分が多い。離岸堤、潜堤および人工リーフを建設する際には、その平面配置、断面形状と同時に、構造細目として被覆ブロックの所要質量を決定する必要がある。従来、ハドソン公式や人工リーフの設計の手引き(建設省河川局海岸課, 1992)が使われてきたが、これらの指針は天端高と平均水位が等しい構造物を想定して作られたものではない。また、近年建設される構造物の被覆ブロックは異形ブロックから平型ブロックへと変遷しており、ブロック同士のかみ合わせの効果をほとんど期待できない点でも異なる。

本研究では、天端高と平均水位がほぼ等しい構造物として低天端離岸堤に注目し、被覆ブロックの散乱機構を

水理模型実験により調べた。特に、堤体断面の中で最も被災が生じやすい位置の被覆ブロックに分力計を設置し、流体力と被災状況の関連について考察した。

## 2. 実験装置

長さ 150 m、高さ 1.5 m、幅 0.6 m の水槽に勾配 1/30 の木製固定床を造り、その斜面上に離岸堤模型を製作した。堤脚位置は、水槽底面からの水位を 100 cm としたときの汀線位置から 4.5 m 沖側とした。模型は、表のり勾配 1/3、裏のり勾配 1/2、天端ブロック 3 列並びの断面形状を有する(図-1 参照)。模型縮尺を 1/30 程度とし、表-1 に示す 4 種類の平型ブロックを被覆ブロックとして用いた。ブロック A は矩形体で表から裏へ貫通した大きな穴を持ち、揚力を低減する工夫が施されている。ブロック B<sub>0</sub>、B<sub>u</sub> は矩形体で片側表面に突起を持つ形状をしており、その突起を表面にした時をブロック B<sub>0</sub>、裏面にした時をブロック B<sub>u</sub> とした。ブロック C は直棒を交差した形状であり、同じ質量の他のブロックと比較して広範囲を被覆できるように設計されている。K<sub>D</sub> 値、N<sub>s</sub> 値は各ブロッケーメーカーにより示されている値である。実験に際して、水槽実験であるために生じるセットアップを堤体岸側の水を堤体沖側へと循環することにより抑制し、過度のセットアップが実験に与える影響を軽減した。

沖波条件としては、波高を 6~18 cm の中で 2 cm 間隔で、周期を 1.5~3.5 s の中で 0.5 s 間隔で変化させ、それらを組み合わせた合計 35 種類の規則波を各堤体模型に作用させた。ここで規則波を用いたのは、碎波位置、碎

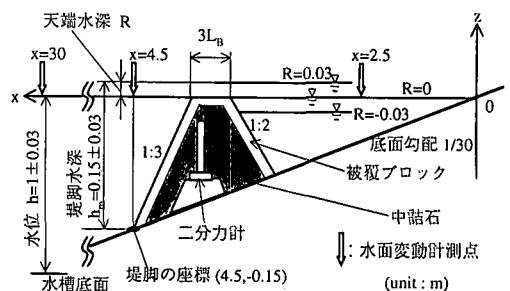


図-1 実験装置

\* 正会員 工博 建設省土木研究所河川部海岸研究室研究員  
\*\* 正会員 建設省土木研究所河川部海岸研究室研究員  
\*\*\* 正会員 工博 東京大学大学院助教授 工学系研究科  
\*\*\*\* 正会員 工博 (株)アイ・エヌ・エー海岸部長

表一 ブロックの諸元

ブロック	A	Bo	Bu	C
質量 (g) : $M$	113	123	123	130
縦 (cm) : $L_B$	5	6.5	6.5	6.4
横 (cm) : $W_B$	5	4.4	4.4	6.4
高さ (cm) : $D_B$	2.6	2.5	2.5	2.3
$K_D$ 値	25	10-15	10-15	10-15
$N_s$ 値	—	2-4.6	2-4.6	2-3

波形態などが被災状況に与える影響を容易に理解するためである。実験では、図一1の矢印部分で水面変動を、堤体上の岸冲方向3点で水面変動、水平・鉛直流速を測定した。流速の測定は電磁流速計で行い、ブロック表面から2cm離れた位置の流速を検出した。また、予備実験により確認した被災状況に応じて天端沖側もしくは岸側の被覆ブロックに二分力計を取り付け、ブロックに作用する流体力を測定した。二分力計の本体は、流体運動を乱さないように配慮して離岸堤模型内部に設置した。各測定は、造波開始後に堤体沖側の水面が変動し始めると同時に開始し、計測時間を1分間、サンプリング間隔を0.05sとした。以上の実験を、水位97, 100, 103cm(天端水深-3, 0, 3cmに対応)の各々の場合について行った。実験ケースは不規則波条件も含めて合計492ケースであった。

### 3. 低天端離岸堤の基本特性

#### 3.1 低天端離岸堤の消波特性

本研究は被覆ブロックの安定性を検討したものであるが、消波特性について簡単に述べておく。図一2は本実験で対象とした条件における天端幅と透過率との関係を示す。ここでの透過率は、堤体を設置したときの堤体岸側での波高を堤体を設置しないときの堤体岸側での波高で無次元化した値で定義される。また、天端幅 $B$ は沖波波

長 $L$ で無次元化されている。

天端水深が小さくなる程、また沖波波長に対して天端幅が広がる程、消波機能が高くなることが確認できる。ただし、実用的な低天端離岸堤として十分な消波効果を得るためには、天端幅をさらに広め取る必要がある。ここで、天端水深が-3cmの場合には上述した消波機能とは多少傾向が異なるが、沖波の波形勾配の影響と考えられる。反射率は天端水深や沖波周期により多少異なるが、ほぼ3割以下と一般的な離岸堤の1/2程度であった。

#### 3.2 安定係数の比較

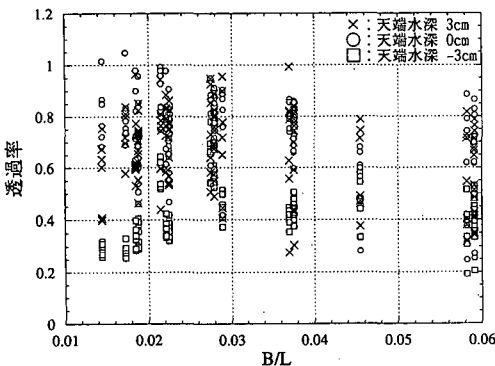
図一3は、規則波実験の砕波状況および被災状況を示す。被災状況は、「飛散」、「動揺」、「微動」、「なし」の4段階に分類され、「飛散」はブロックがもとの位置から完全に移動してしまった場合、「動揺」はもとの位置にはあるが姿勢が完全に変わってしまった場合、もしくはブロックの裏面が見える程度に波力を受けた場合を示す。「微動」は多少の振動は見られてもブロック自体の移動が確認できない場合であり、「なし」はそのような振動すら確認できなかった場合である。これらの分類の中で、飛散と動揺が被災に相当すると考えた。砕波状況は、ほとんどのケースについて堤体沖側で砕波しており、その形態は巻き波砕波であった。

実験では天端ブロックが被災しても、表のり面および裏のり面のブロックが被災を受けることはほとんどなかった。そこで、実験結果に基づいて、天端ブロックに適用できるBrebner-Donnellyの式(1)を用いて安定係数を算出する。ここで、 $M$ はブロックの所要質量、 $\rho_s$ はブロックの密度、 $H$ は堤体作用波高、 $N_s$ は安定係数、 $S_r$ はブロックの比重である。

$$M = \frac{\rho_s \cdot H^3}{N_s^2 \cdot (S_r - 1)^3} \dots\dots\dots (1)$$

表一2は、沖波波高および堤脚上の波高を堤体作用波高として算出した安定係数を示す。表一1の安定係数と比較すると、本実験の方が低い値となる場合があり、これらのブロックを低天端離岸堤の被覆ブロックとして使用した場合には危険側となることがわかる。宇多ら(1990)は碎石を用いた人工リーフの実験からその所要質量算定式を求めており、天端水深がゼロ付近でその所要質量が最大となることを示している。

ところで、表一2の安定係数に幅があるのは、作用波の波高が同じ場合でも、周期によってブロックの安定性が大きく異なったためである。安定係数が周期依存性を有することはこれまでに指摘されており(樫木, 1991)、堤体への遡上と戻り流れの周期が波浪のそれと共振する時に不安定になると考えられている。このことは、水理模型実験によってブロックの所要質量を決定する際に設計



図一2 低天端離岸堤の消波特性

波の周期のみを考慮するだけでは適切な所要質量を決定することができない可能性があることを示唆する。本実験結果を現地換算すると、周期が13.7~16.4sの波浪を

受けたときが最も危険であった。

表-2 各ブロックの安定係数

ブロック	A	Bo	Bu	C
$N_s$ (沖波)	1.2-3.7	3.6以上	1.2-2.5	1.4-2.4
$N_s$ (堤体前)	1.0-2.9	3.0以上	1.3-3.0	1.4-3.1

#### 4. 被覆ブロックの安定性に影響する因子

従来の離岸堤では斜面に置かれたブロックの安定性が議論され、沖波波高、のり面勾配がブロックの所要質量を決定する主要因とされてきた。潜堤、人工リーフでは、天端上の水塊の移動速度が被覆ブロックの所要質量を決定する主要因とされてきた。本実験において波浪諸元とブロックに作用する流体力との相関を調べた結果、堤体に作用する波高および天端上水平流速と流体力との相関が大きくなった。以下では本実験で観察された被災状況を最初に説明し、その後で沖波と流体力、流体力と被災状況の関係について考察を加える。

##### 4.1 被災状況

図-4および表-3は図-3に示したブロックの被災状況を再整理したものである。表-3の各欄には主な被災箇所が示されており、括弧内には被災状況が図-4に従って示されている。天端水深が大きくなるに従って天端岸側が被災を受けやすくなること、およびブロックAは天端岸側が被災を受けやすいことがわかる。断面諸元が同じであるにもかかわらず、被災状況がこのように異なる理由を以下では考える。

##### 4.2 堤体周りの流れ

各ブロックに作用する流体力は、ブロック形状による差異を無視すれば、堤体周りの流れによって決定されると考えられる。そこで、沖波と天端上流速との関係につ

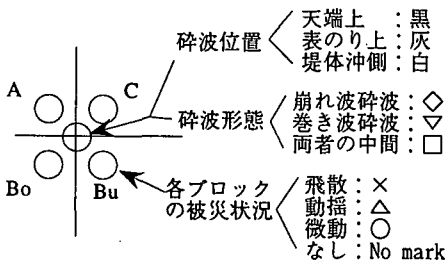
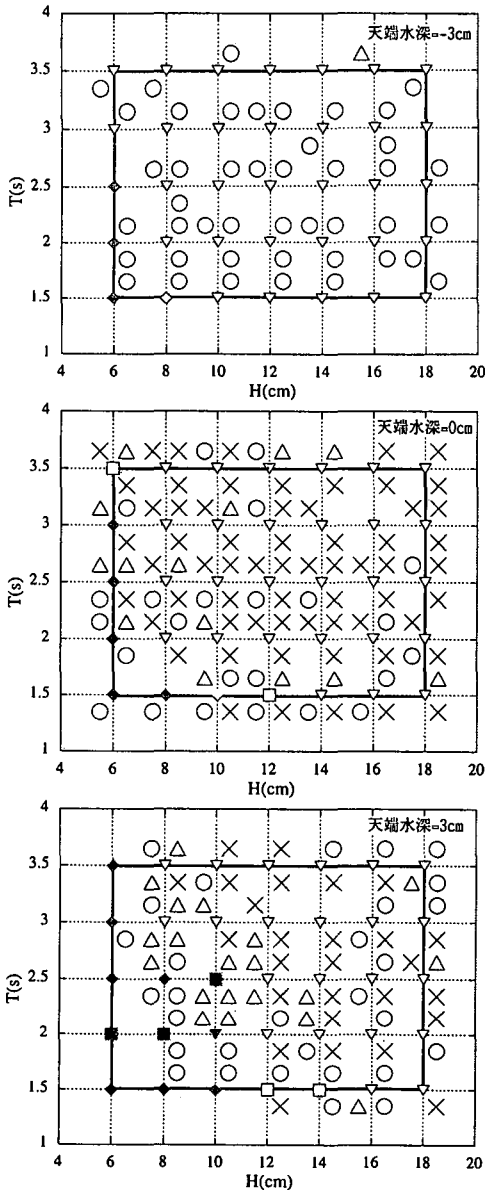


図-3 砕波状況および被災状況

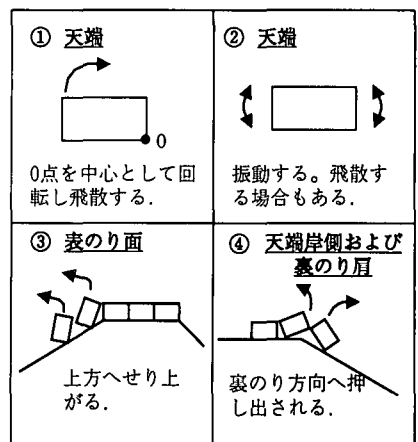


図-4 被災形態

表-3 被災状況

R (cm)	-3	0	3
A	飛散なし	天端岸側 (①)	天端岸側 (①, ②)
Bo	飛散なし	飛散なし	飛散なし (②)
Bu	飛散なし	天端沖側 (①)	天端沖側 (①) 天端岸側 (④)
C	飛散なし	天端沖側 (①) 表のり肩近傍 (③)	天端沖側 (①) 天端岸側 (④)

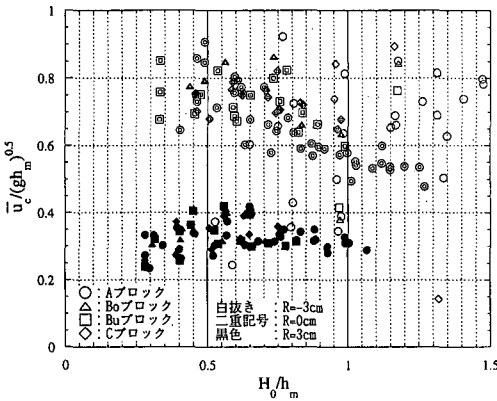


図-5 沖波と天端上水平方向平均流速との関係

いて整理する。図-5は、沖波波高と天端上水平方向平均流速との関係を表す。ここでの天端上水平方向平均流速の算出には、天端沖側ブロック上で測定された流速データを用いた。天端水深が大きくなる程、天端上水平方向平均流速は小さくなり、天端水深が3cmの場合には天端水深が-3cmおよび0cmに比べて約半分の流速値となっている。しかし、ブロック別に流速値を比較すると、その値には大きな相違が見られない。すなわち、ブロック形状の多少の違いは堤体周辺の流体運動に大きな影響を及ぼさないことがわかる。

### 4.3 天端水深の影響

図-6は、岸向最大抗力  $F_{xmax}$  および最大揚力  $F_{zmax}$  を整理した結果である。ここでの岸向最大抗力および最大揚力はそれぞれ、波が堤体に作用した時に生じる岸向抗力の最大値および揚力の最大値を個々の波毎に算出し、その平均値を求めたものである。天端水深が小さな場合には揚力が卓越し、天端水深が大きくなるに従って、揚力よりもむしろ抗力が支配的となることがわかる。図-7は堤体上で測定された水平方向平均流速の岸沖分布の一例を示すが、天端水深が-3cmおよび0cmの場合には表のり面と天端上での流速差が大きく、天端水深が3cmの場合にはそれほど顕著でない。この流速差は天端上での圧力低下、すなわちブロックへの揚力上昇を生じさせると考えられ、天端水深が小さくなるほど揚力が卓

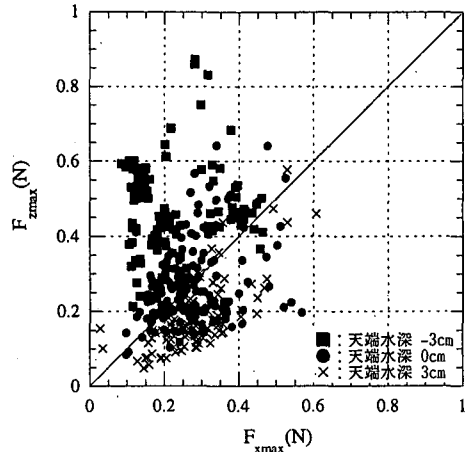


図-6 天端水深による流体力の違い

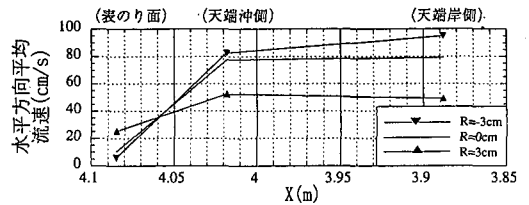


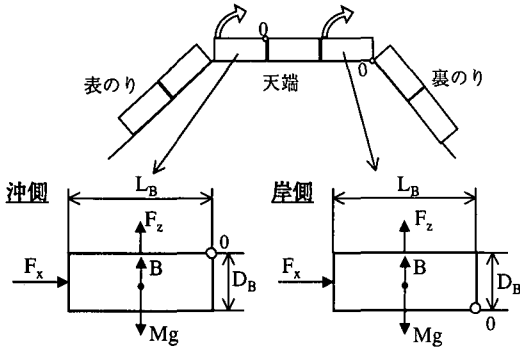
図-7 水平方向平均流速の岸沖分布 (ブロック Bu, 波高: 12 cm, 周期: 2.5 s)

越することと整合する。ただし、天端水深が-3cmの場合の揚力には浮力も含まれている。

続いて、天端水深が大きく抗力が支配的となるときに天端岸側が被災を受けやすくなる理由を検討する。図-8は天端沖側および岸側のブロックについて、流体力によって発生するモーメントのつり合いを整理し、ブロックが回転するための条件を導いたものである。その際、天端沖側と岸側では回転運動の支点が異なることに注意した。図-8によると、天端沖側では揚力はブロックを回転させる方向に作用するが、抗力はブロックを安定させる方向に作用する。一方、天端岸側では抗力、揚力ともにブロックを回転させる方向に作用する。このことは、抗力が支配的になると天端沖側が被災しにくくなることを意味する。また、天端岸側では抗力と揚力の卓越特性がブロックの安定性にそれほど影響しないが、揚力に加え抗力も増加した際に、被災が生じたと考えられた。

### 4.4 ブロック形状の影響

ブロック形状による被災箇所の相違について考える。図-8を参照すると、天端沖側のブロックはその厚さが厚いほど回転しにくいことがわかる。実験で使用したブロックの中で比較的厚いブロック A は天端沖側が被災することはなかった。このことから、ブロックの厚さが



$$F_x \cdot \frac{L_B}{2} > (Mg - B) \cdot \frac{L_B}{2} + F_z \cdot \frac{D_B}{2} \quad F_x \cdot \frac{D_B}{2} + F_z \cdot \frac{L_B}{2} > (Mg - B) \cdot \frac{L_B}{2}$$

( $F_x$ : 抗力,  $F_z$ : 揚力,  $B$ : 浮力,  $M$ : 質量,  $g$ : 重力加速度)

図-8 ブロックに働く力のつり合い

被災箇所に大きく影響するものと判断される。

一方、厚さ以外の要素、例えば穴開き形状かどうか、突起形状はあるか、などにより各ブロックに作用する流体力が異なることも予想されたが、本実験でそのような効果は顕著ではなかった。ただし、ブロック Bo に比べブロック Bu は被災しやすかった。ブロック Bo は突起を表に向けて配置されており、堤体表面近傍ではそれほど大きな流速が発生しないため、大きな揚力も生じないと推測できる。それに対して、ブロック Bu の表面は平坦であり、大きな流速が発生すると考えられる。さらに、ブロック A、C の表面も多少の凹凸はあるので、ブロック Bu は本実験で使用したブロックの中で最も揚力を受けやすい形状であったと言える。

4.5 断面整形精度の影響

模型整形の微妙な違いにより、被災状況が大きく異なるケースがあった。ブロック Bu で堤体を製作した場合には、標準の断面より表のり面の高さを数 mm 高くしただけで、被災が全く生じなくなった。図-9(a)は、横軸に標準の断面で実験を行ったときの岸向最大抗力を、縦軸に表のり面を数 mm 高くして実験を行ったときの岸向最大抗力を表す。図-9(b)は、最大揚力について図-9(a)と同様に整理したものである。抗力は表のり面の影響をほとんど受けないが、揚力は大きく低下する。

表のり面を高くした場合に天端沖側ブロックへの揚力

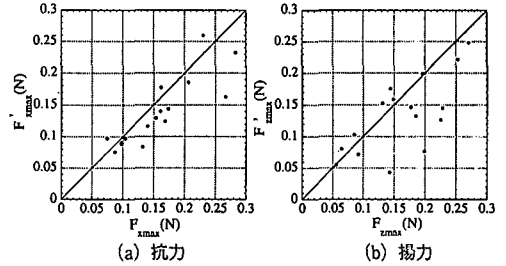


図-9 表のり面高さによる流体力の違い

が減少する理由としては、表のり面に沿った流れが天端まで到達したときに生じる剝離渦の大きさが影響していると考えられる。表のり面の高さが高くなればなる程、剝離渦の直径が大きくなり、天端ブロックを下向に押しさえつける力として作用する。結局、Buのように主に揚力を受けやすい形状のブロックでは、表のり面を高くした方がより安定した構造物になることを示している。

5. おわりに

主要な結論は以下のようにまとめられる。

1. 天端水深およびブロック形状による被災状況の違いは、天端水深による抗力・揚力の卓越特性と被覆ブロックにかかるモーメントのつり合いで説明される。
2. 天端沖側には比較的厚く揚力を受けにくい形状を有するブロックを配置することで、低天端離岸堤の安定性を確保できる。
3. 天端沖側ブロックが被災するタイプのブロックを用いて堤体を製作する場合、その表のり面の高さが天端沖側ブロックの安定性に大きく影響する。これは現地において、表のり面の施工管理の重要性を示唆するものである。

参考文献

宇多高明・小俣 篤・齋藤友伸 (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.  
 建設省河川局海岸課 (1992): 人工リーフの設計の手引き, 94 p.  
 榎木 亨 (1991): 波と漂砂と構造物, 技報堂出版, 482 p.  
 全国海岸協会 (1987): 海岸保全施設築造基準解説, 東光整版, 269 p.