

急斜面に続くリーフ上の護岸における消波ブロックの変状分析

Stability of concrete blocks due to storm waves for seawalls on steep foreshore conditions

室蘭工業大学大学院 博士前期課程	学生会員	○小島 万実 (Takami Kojima)
室蘭工業大学大学院もの創造系領域	フェロー	木村 克俊 (Katsutoshi Kimura)
北海道科学大学社会基盤工学科	正会員	山本 泰司 (Yasuji Yamamoto)
(一財)北海道道路管理技術センター	正会員	名越 隆雄 (Takao Nakoshi)
八千代エンジニアリング株式会社	正会員	阿部 翔太 (Shota Abe)

1. はじめに

我が国の海岸および港湾施設の技術基準においては、海底勾配が 1/10 よりも緩やかな条件に対して設計法が提示されている。しかしながら、リーフ地形に代表されるような急峻な地形では、護岸前面の海底勾配が 1/10 よりも急な場合が多いが、こうした条件に適用可能な設計法が確立していないため、護岸やその背後施設において、多くの被災が発生している。

本研究では、海底勾配 1/2 に続くリーフ地形上の消波護岸を対象として、現地における被災状況を分析するとともに、数値波動解析および水理模型実験を行い、消波ブロックの被災メカニズムを明らかにし、必要質量の算定法について検討する。

2. 現地における消波護岸の被災状況

国道 229 号大森覆道では 2004 年 9 月 8 日に台風 18 号によって発生した高波($T_0=12\text{ s}$, $H_0=7.0\text{ m}$)により、写真-1 に示すようにリーフ幅が短い箇所では消波ブロック (8t 型) が消失した。被災の詳細については、木村らが報告している。写真-2 のように、前面の消波護岸を A~D の 4 区間に分け、消波ブロックの被害率とリーフ幅 D を沖波波長 L で無次元化した相対リーフ幅 D/L との関係を図-1 に示す。 $D/L=0.0\sim 0.2$ の範囲では、被害率が 100%となる。

写真-3 に、大森覆道に隣接している道の駅「オスコイ! かもえない」前面の消波ブロックの被災状況を示す。現地では 8t の消波ブロックが設置されていたが、リーフ幅が短い箇所での流出が確認できる。



写真-1 大森覆道の被災前後の消波ブロックの状況

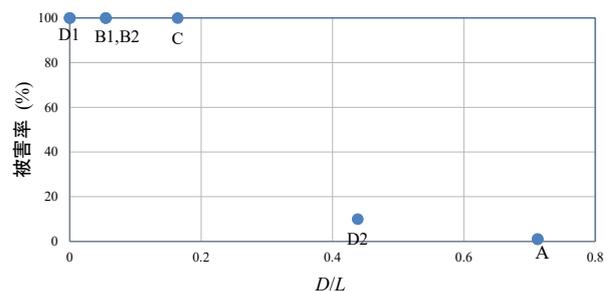


図-1 相対リーフ幅と被害率の関係



写真-3 道の駅前面の消波ブロック被災状況

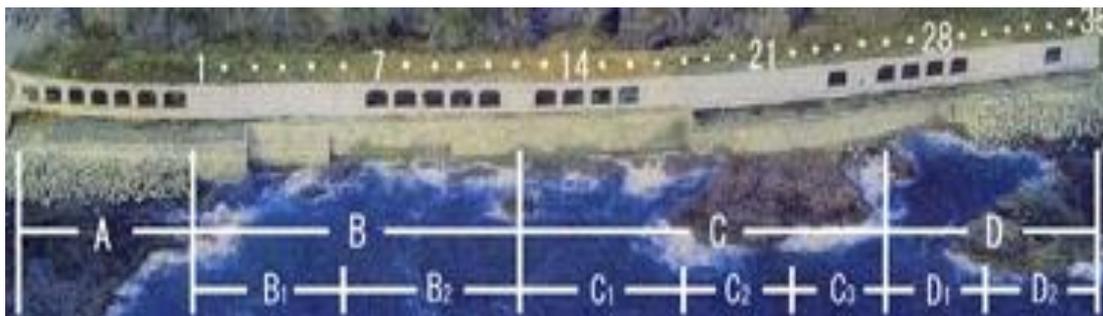


写真-2 消波ブロック流出後の大森覆道前面の被災状況

3. CADMAS-SURF/2D による数値解析

図-2 に示す勾配 1/2 の斜面に続くリーフ上の消波護岸を対象として、数値波動解析ソフト CADMAS-SURF/2D²⁾ を用いた検討を行った。リーフ幅 D は 0~40m の範囲に 5m 刻みで 9 パターンに変化させ、消波工法先における波高および引き波時の流速の時系列データを求めた。計算では規則波を用い、周期 $T=12s$ 、波高 $H=7.0m$ で一定とし、波形が安定する 6 波目からの 3 波を解析対象とした。

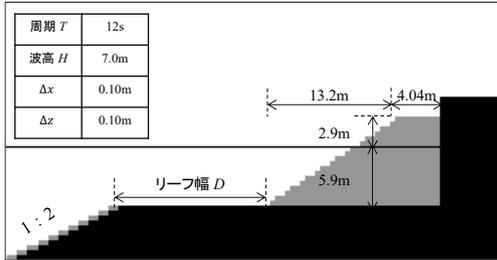


図-2 数値解析に用いた護岸の断面形状

図-3 の上段には、横軸に D/L 、縦軸に引き波流速 u およびリーフ上の通過波高 H を示している。引き波流速は $D/L=0.0$ で $u=10m/s$ となり、 D/L が大きくなるほどその値は減少する。ただし、 $D/L=0.16$ において、引き波流速がいったん大きくなる傾向がある。同図の下段には、引き波流速を無次元化した値 u/\sqrt{gH} を示している。 $D/L=0.16$ では、波高は減少するものの、引き波流速は上昇するため、相対的に u/\sqrt{gH} は大きくなる。 $D/L=0.16$ の条件では巻波砕波による進行波と護岸からの反射波が干渉し、強い戻り流れが生じたと考えられる。これより、急勾配リーフ地形上において、図-1 に示したような顕著な消波ブロックの被害が生じたものと考えられる。

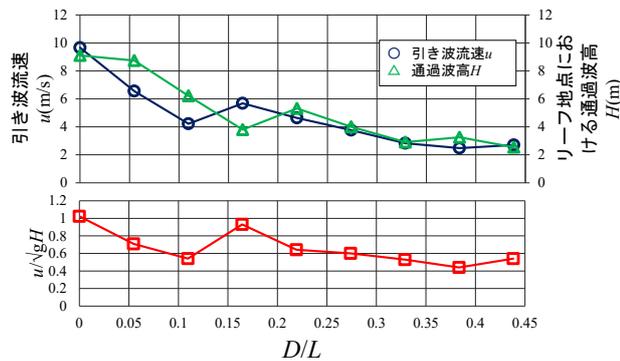


図-3 相対リーフ幅と無次元流速の関係

4. 消波ブロックの安定性

4.1 実験の方法

2次元造波水路(長さ 24m, 幅 0.6m, 高さ 1.0m)内に勾配 1/2 の海底地形を作成し、図-4 に示す消波護岸を縮尺 1/50 で再現した。以下すべて現地量で示す。波浪条件は $T_0=12s$ で一定とし、換算沖波波高 H_0' は 1m 間隔で 1~9m に変化させた。すべての実験は不規則波を用いて、1 波群 150 波を 20 回、合計 3000 波を作用させた。

消波ブロックの安定実験では、リーフ幅 D を 3 種類(0, 15, 30m)とし、護岸模型を設置しない状態でリーフ上の 3 地点において、通過波の有義波高 $H_{1/3}$ の計測を行った。消波ブロックは K_D 値 8.3 の模型を使用し、質量を 10 種類(3.75, 7.50, 12.0, 15.0, 22.5, 27.5, 37.5, 47.5, 62.5, 75.0t) 変化させた。消波ブロックの被災度 N_0 は、造波終了後の移動個数を消波ブロックの列数で除したものとし、 $N_0=0.3$ を基準として安定質量を求めた。

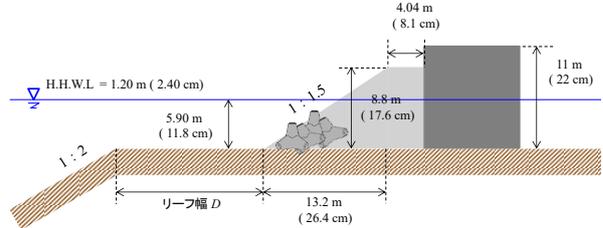


図-4 水理模型実験に用いた断面形状

4.2 リーフ上における波高変化

図-5 に、換算沖波波高と有義波高の関係を示す。換算沖波波高が 5m 以上となると、リーフ上においては砕波による波高減衰が生じる。図中の実線は合田の砕波指標³⁾を用いて、海底勾配 1/2 の一様斜面に対して求めた計算値を示している。1/2 勾配における合田の計算値は、実験値のような砕波減衰が見られなかった。合田の砕波指標は海底勾配が 1/10 までを適用範囲としており、略算式に海底勾配 1/2 を代入することは適切でないことが示された。以下の解析における入射波高は実験値を用いることにする。

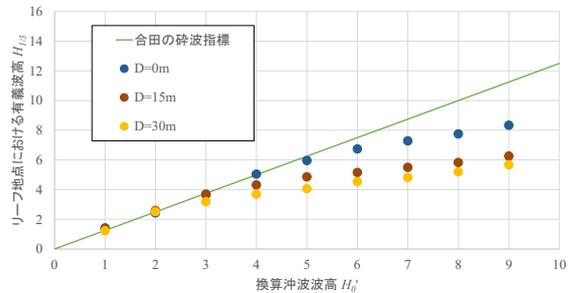


図-5 換算沖波波高と有義波高の関係

4.3 消波ブロックの移動パターン

(1) リーフ上における消波ブロックの転落

図-6 に、リーフ幅 $D=0m$ において、 $H_0'=8.0m$ の不規則波群中の最大波が作用した時の消波ブロック(62.5t)の移動パターンを示す。押し波時には、斜面上で砕波した巻き波が消波ブロックに作用するが、移動は生じない。引き波時には、底面に沿って強い戻り流れが生じ、法先の消波ブロックが不安定となる。その後の波の作用によって消波ブロックは連鎖的に斜面上に転落する傾向が確認された。

$D=15m$ および $30m$ の場合には、消波ブロックはリーフ上を沖側に滑動するが、斜面上への転落は生じない。

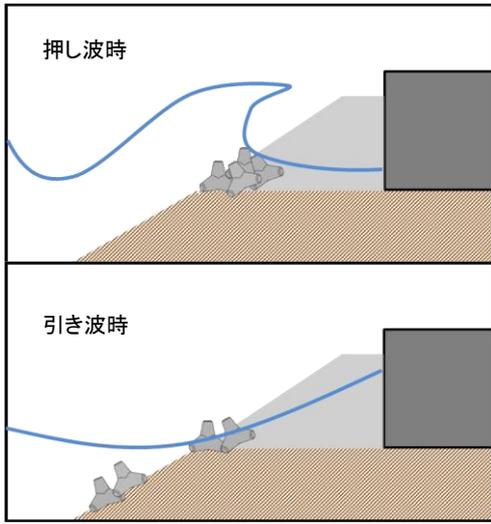


図-6 消波ブロックの移動パターン (D=0m)

(2) 波数と被災度の関係

一般的な消波ブロック被覆堤に対して、安定数 N_s は高橋ら⁴⁾によって以下のように定式化されている。

$$N_s = C_H \left[2.32 \left(N_o / N^{0.5} \right)^{0.2} + 1.33 \right] \quad (1)$$

ここで、 N_o は被災度、 N は波数、 C_H は碎波効果係数であり、一般に波数 $N=1000$ で被災度 $N_o=0.3$ を基準としている。式(1)を用いて被災度 N_o を以下のように表す。

$$N_o = \left(\frac{N_s}{2.32 C_H} - 0.57 \right)^5 N^{0.5} \quad (2)$$

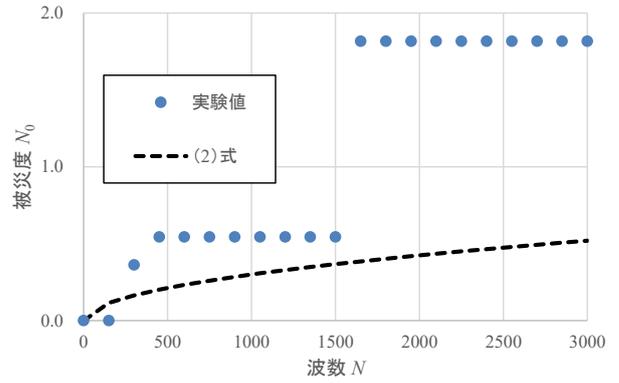
図-7 に、リーフ幅 $D=0, 15, 30\text{m}$ に対して、消波ブロックの質量がそれぞれ $62.5\text{t}, 37.5\text{t}, 7.5\text{t}$ のときの、作用波数と被災度の関係を示す。 $D=0\text{m}$ においては 1500 波以降の被災度が急激に増加するのは、消波ブロックの海底斜面上への転落が生じたためである。これに対して $D=15\text{m}$ および 30m においては、消波ブロックの移動はリーフ上のみで生じるため、被災度は波数とともに一定の割合で増加している。急斜面地形で発生する巻波碎波による消波ブロックの被災において、 1000 波以降も被災度が上昇することから、佐藤ら⁵⁾の手法を引用し、波数 $N=3000$ で被災度 $N_o=1.0$ を基準とした。

4.4 消波ブロックの安定質量

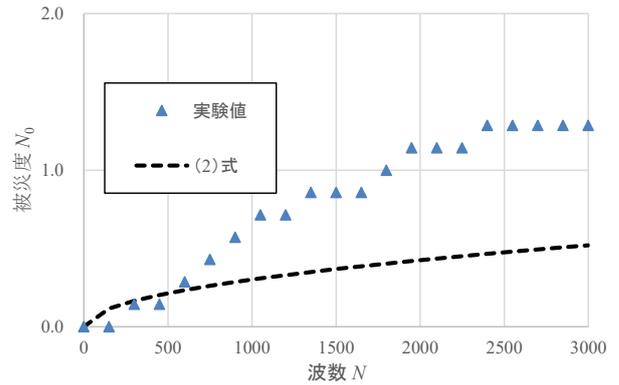
消波ブロックの安定質量の算定において、佐藤ら⁵⁾と同様にリーフ幅の影響を考慮するため、ハドソン式に補正係数 x を用いた以下の式を適用する。

$$M = \frac{\rho_r \cdot x \cdot (H_{1/3})^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \quad (3)$$

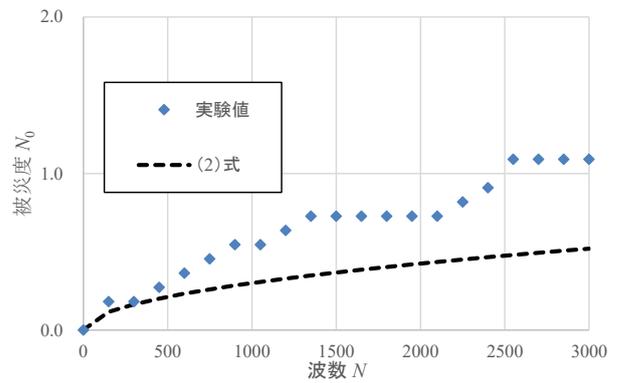
ここに、 ρ_r は消波ブロックの密度 (2.30kg/m^3)、 N_s は消波ブロックの安定数、 S_r は消波ブロックの海水に対する比重である。



(1) $D=0\text{m}$ $M=62.5\text{t}$



(2) $D=15\text{m}$ $M=37.5\text{t}$

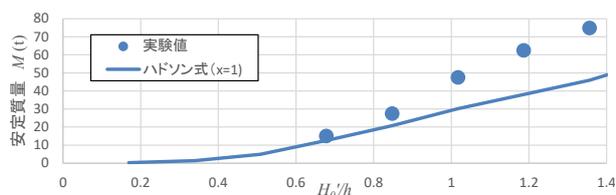


(3) $D=30\text{m}$ $M=7.5\text{t}$

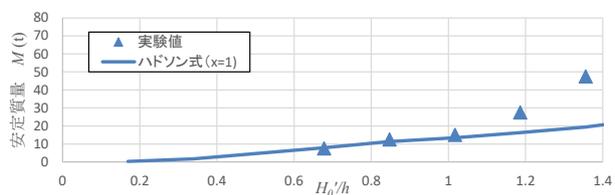
図-7 波数と被災度の関係

図-8 は $D=0, 15, 30\text{m}$ に変化させて、波高水深比に対する安定質量の関係を示している。 $D=0\text{m}$ においては、 $H_o'/h=0.8$ よりも大きな条件で安定質量の実験値がハドソン式による計算曲線上回っており、 $D=15\text{m}$ においては、 $H_o'/h=1.2$ から実験値が上回っている。 $D=30\text{m}$ は実験値とハドソン式がほぼ一致している。

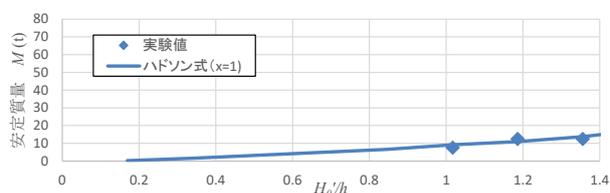
図-9 に、波高水深比と補正係数 x の関係を示す。 $D=0\text{m}$ は $H_o'/h=1.0$ 以降ある程度頭打ちとなるが、 $D=15\text{m}$ は補正係数が急激に上昇し、 $D=0\text{m}$ を上回る値となった。 $D=15\text{m}$ は図-3 に示した $D/L=0.16$ の条件となり、波高に対して引き波流速が大きくなるため、補正係数が増加したものと考えられる。



(1) $D=0\text{m}$ における安定質量



(2) $D=15\text{m}$ における安定質量



(3) $D=30\text{m}$ における安定質量

図-8 波高水深比と安定質量の関係

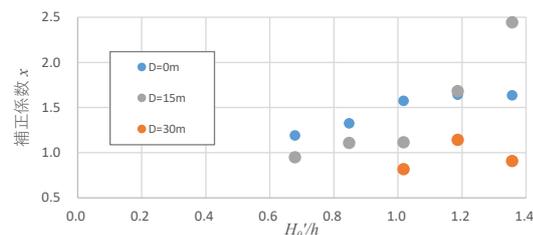


図-9 波高水深比と補正係数の関係

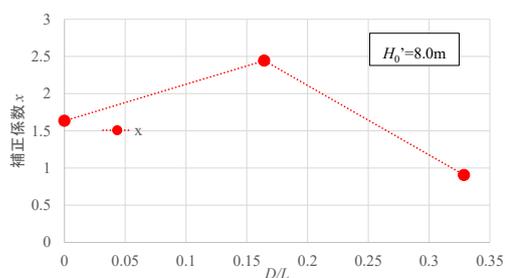


図-10 大森海岸における相対リーフ幅と補正係数



写真-4 高波作用後の消波護岸の状況

- (2) 数値解析の結果、リーフ上での沖向き流速は $D/L=0.016$ で極大となった。
- (3) リーフ上の消波ブロックは作用波数が 1000 波以降でも被災度が増加し、安定限界として 3000 波で被災度 1.0 を基準とする必要がある。
- (4) $D=15\text{m}$ では $D/L=0.16$ の条件となり、波高に対して引き波流速が大きくなるため、ハドソン式の補正係数 x は最大となる。
- (5) 被災護岸の改良においては消波ブロックの必要質量が 15t となった。改良後に設計波相当の波浪が来襲したが消波ブロックに被害が生じていないことを確認した。

参考文献

- 1) 木村克俊, 古川諭, 山本泰司, 吉野大仁: 海岸覆道用防波板の高波による被災特性とその再現実験, 海岸工学論文集 第 53 巻, pp. 871-875, 2006.
- 2) (財)沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路の研究・開発, 沿岸開発技術ライブラリー, No.12, 2001.
- 3) 合田良実: 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告 第 14 巻 第 3 号, 1975.
- 4) 高橋重雄, 半沢稔, 佐藤弘和, 五明美智男, 下迫健一郎, 寺内潔, 高山知司, 谷本勝利: 期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量—消波ブロック被覆堤の設計法の再検討, 第 1 報—, 港湾技術研究所報告, 第 37 巻 第 1 号, pp.3-28, 1998.
- 5) 佐藤涼祐, 木村克俊, 横道立樹, 名越隆雄: 急斜面に続くリーフ上の消波護岸の高波被害事例の分析, 海洋開発論文集第 74 巻第 2 号, pp. 31-36, 2018.

5. 現地における護岸改良

図-10 に、国道 229 号大森海岸道の駅前面の消波護岸の設計波高 8.0m に対して、相対リーフ幅 D/L と補正係数 x との関係を示す。被災箇所のリーフ幅は 25m であり、 $D/L=0.27$ の条件となる。その場合の補正係数は $x=1.2$ となり、これを補正したハドソン式に代入することにより、必要質量は 15t となる。当該消波護岸は、2006 年に改良工事を行われ、護岸天端高を 4.3m かさ上げし、16t 型の消波ブロックが設置された。

改良後の護岸には、2015 年 3 月 11 日に波高 8.0m の波浪が来襲した。こうした設計波に相当する波浪の作用後の当該護岸の状況を写真-4 に示す。護岸前面においては消波ブロックの流出は確認されなかった。

6. まとめ

- (1) 現地においてはリーフ幅が狭い箇所では消波ブロックが被災した。