

1. はじめに

近年、海岸・港湾構造物に対しても性能設計法の導入が図られている。この設計法では、供用期間中の性能保持に関する検討も要求されることから、海岸・港湾構造物への適用においては、波の作用による被災変形とそれがもたらす性能変化の評価が必要になる。捨石や消波ブロックによる消波工の断面変形については、構造物と作用波の相対的な大きさの関係により被災形態が異なること、すなわち、消波工の天端高と入射波高との比が大きければ、前法面を中心とした変形、小さければ天端を含めた変形となることが指摘されている(久保田ら(2009))。本研究は、捨石で構築される傾斜護岸を対象に、護岸天端高、法面勾配、被覆捨石(碎石)などの条件を変えた一連の水理模型実験を行い、被覆層の断面変形過程の特性について検討するとともに、断面形状のモデル化を試みたものである。

2. 水理模型実験

本研究では、多数の断面変形データを収集するために、サーペント型の多方向不規則波造波装置を造波板ごとによりベニヤ板(高さ 60cm)で仕切って、10 基の造波水路を作成し、各水路内に護岸模型を設置した。図-1 に 1 つの水路の断面図を示す。護岸の形状については、初期断面の法面勾配を 1:1.5 と 1:2、天端高 h_c を 5, 10, 15cm とした。被覆層の碎石は、密度 $\rho = 2.77 \text{ g/cm}^3$ 、質量の中央値 $M_{50} = 60.9 \text{ g}$ 、代表粒径 $D_{n50} = \sqrt[3]{M_{50}/\rho} = 2.81 \text{ cm}$ のものと、 $\rho = 2.75 \text{ g/cm}^3$ 、 $M_{50} = 87.6 \text{ g}$ 、 $D_{n50} = 3.18 \text{ cm}$ の 2 種類、護岸を被覆層のみの 1 層型とコア部・被覆層からなる 2 層型とし、計 20 通りの条件を設定した。同一条件の実験をそれぞれ 4 回ずつ計 80 ケースの実験を行った。なお、すべての碎石の質量は 50~70g ($D_{n50} = 2.81 \text{ cm}$) と 70~100g ($D_{n50} = 3.18 \text{ cm}$) の間にあり、コア部には中央質量 3.75g の砂利を用いた。作用させた不規則波は、期待スペクトルとして JONSWAP スペクトル(先鋭度パラメータ $\gamma = 3.3$)を用い、有義波周期 $T_{1/3} = 1.2 \text{ s}$ 、サンプリング間隔 0.05s、データ数 32768(造波時間約 27 分)として作成した信号により、有義波高 $H_{1/3} \approx 11 \text{ cm}$ として造波した。1 回の造波での作用波数は約 1400 であり、1 ケースの実験で 7 回繰り返して作用させた。水位の計測は、一様水深部(水深 35cm)に設置した各水路 2 本の波高計(間隔 25cm)により行い、水位変動データから反射率を推定した。護岸断面の計測にはレーザー変位センサを使用し、1 水路あたり岸沖方向の 3 測線(間隔 15cm)で、27 分間波を作用させるごとに断面形状を計測した。3 測線での断面データの平均をとって断面形とし、初期断面を基準として変形量を表すパラメータ $S = A_e/D_{n50}^2$ (A_e : 侵食面積)を求めた。

3. 実験結果

久保田ら(2009)は、消波ブロック被覆堤の被災事例から、消波工の被災形態として、①天端被災、②法面被

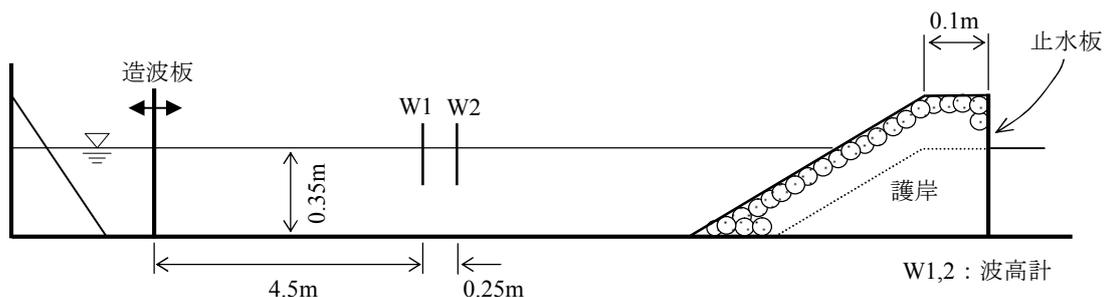


図-1 実験装置の概要

災, ③天端および法面被災に分類している. 表-1 に各実験条件での被災形態を示すが, 本研究では①の天端被災の断面形状は見られなかった. 変形が大きくなる③は, 法面勾配 1:1.5, コア有の条件で生じている. なお, 表中の 0 は, 断面変形が僅かであることを表している. 図-2 は, コアの有無による変形量の違いを示したもので, 法面勾配 1:1.5, $D_{n50} = 2.81\text{cm}$ の場合である. 累積作用波数 N が増えるにつれて全体的に S も増加傾向を示しているが, コア有のほうが大きな変形量となっていることがわかる. 他のケースでも, 図-2 に比べて差は小さいが同様の結果であった. 図-3 は, ③の被災形態で最も変形が大きいケース ($h_c=10\text{cm}$, $D_{n50} = 2.81\text{cm}$) の断面変化であり, 鹿島ら(1992, 1993)や久保田ら(2009)の実験結果と同様に, 変形が大きい場合には特に侵食部の形状が直線的になることがわかる. また, 反射率については, これまでの実験結果(たとえば, 太田ら(2010))と同様に, 変形量の増加につれてわずかに減少する傾向が見られた.

表-1 実験条件と被災形態

コア	法面勾配	h_c (cm)	D_{n50} (cm)	被災形態
有	1:1.5	10	2.81	③
			3.18	③
		15	2.81	③
	1:2	10	2.81	②
			3.18	②
		15	2.81	②
無	1:1.5	5	2.81	②
			3.18	②
		10	2.81	②
			3.18	②
		15	2.81	②
			3.18	②
	1:2	5	2.81	②
			3.18	②(or 0)
		10	2.81	②
			3.18	②(or 0)
		15	2.81	②(or 0)
			3.81	②(or 0)

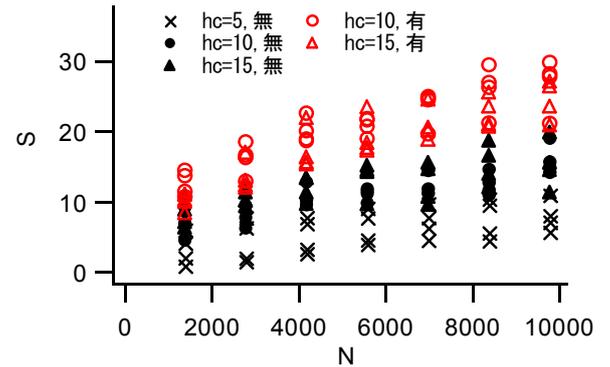


図-2 変形量に及ぼすコアの影響

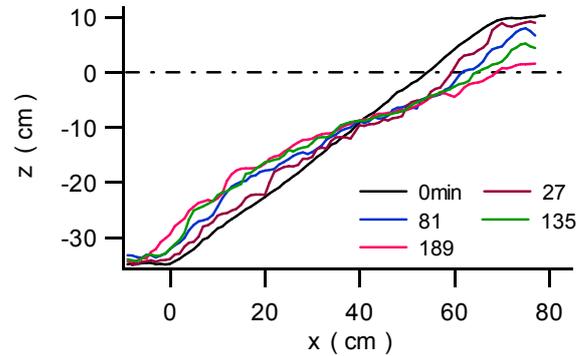


図-3 護岸断面の変化

4. 断面変形過程の特性と断面形状のモデル化

本研究では, 図-3 に示したような, ③天端および法面被災の場合を対象として, 侵食部の変形過程の特性と断面形状のモデル化について検討した. まず, 天端部分の変形については, 法肩(天端海側), 天端中央, 天端陸側の3点での, 初期断面からの沈下量 η を読み取った. 図-4~6 は, 図-3 に示したのと同じ条件の実験における, η を h_c で除したものと S との関係を示している. ただし, 沈下量が $D_n/2$ 以下であるデータを除いている. 図中の実線と式は, データに対する近似曲線および近似式で, 本研究では累乗型とした. 近似式により, S の値に対応する沈下量を与えることができる. つぎに, 久保田ら(2009)にならって, ③の実験結果より水平減衰率 l_e/l_0 を求めた. ここに, l_e は変形断面における静水面での水平方向の被覆層厚減少量, l_0 は初期断面での被覆層厚である. 図-7 は, 図 4~6 と同じデータから求めた l_e/l_0 と S との関係を表したもので, 図中に示した累乗型の近似式が得られた. これらの結果にもとづいて, 以下のように侵食部断面のモデル化を行った. まず, 与えられた S の値に対応して, 上述の近似式により天端3点の沈下量を求め, これらを直線で結んで天端部分の断面形状とする. つぎに S との関係性が見られた l_e を与えることで, 静水面とモデル断面の交点を決め,

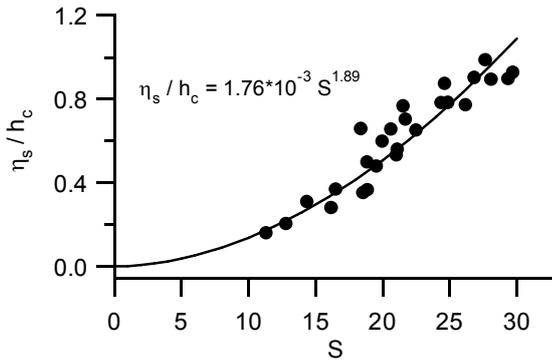


図-4 天端沈下量と S との関係（海側）

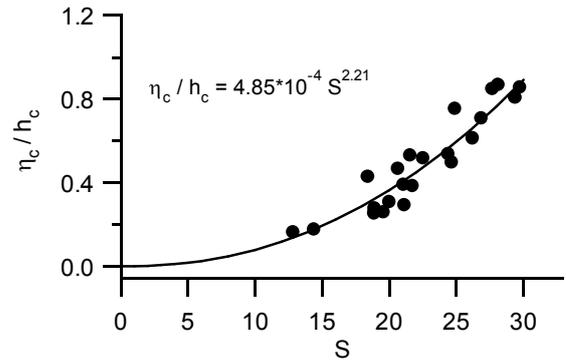


図-5 天端沈下量と S との関係（中央）

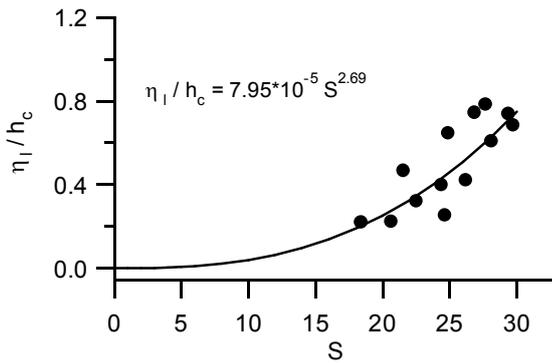


図-6 天端沈下量と S との関係（陸側）

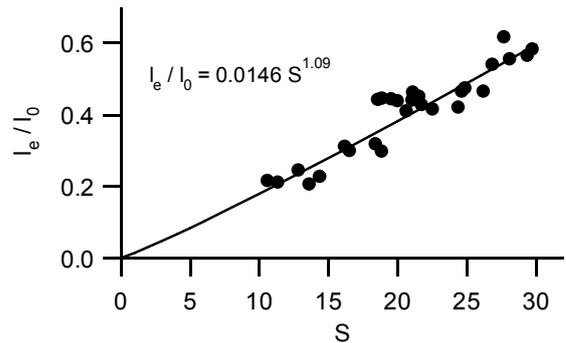


図-7 水平減衰率と S との関係

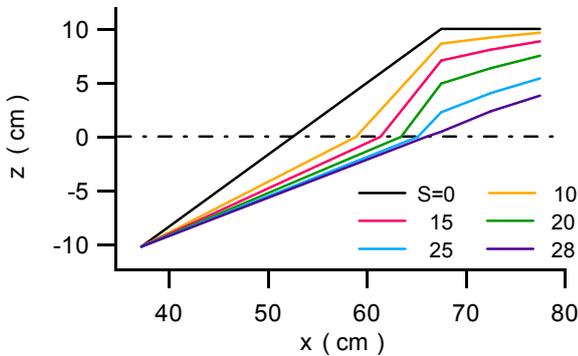


図-8 侵食部のモデル断面

さらに、初期断面と変形断面の交点の位置を実験データから読み取り、その平均をとって侵食部の下端とする。 l_e は上述の近似式で与えることもできるが、モデル断面においては、侵食部の面積と与えられた S に対応する A_e とが一致するように l_e を決めた。天端部分の形状に加えて、法面上の 2 点を直線で結び、侵食部の断面とした。図-8 には図-3～6 と同じ条件に対するモデル断面を示すが、 S の増加に対応して天端沈下量・侵食面積の増加、および断面形状が直線的になっていく傾向を表している。

5. おわりに

本研究では、傾斜護岸を対象として、被覆層の断面変形過程の特性および断面形状のモデル化について、水理模型実験により検討を行った。被覆層の被災形態のうち、変形量が大きくなる「天端および法面被災」について、天端沈下量・水平減衰率と変形量パラメータとの関係性を見出し、それにもとづいて侵食部のモデル断面を得ることができた。今後は、さらに断面変形のデータを蓄積するとともに、モデル断面を用いた実験およ

び数値計算により，変形が性能に及ぼす影響の定量的評価を行う予定である。

【参考文献】

- 太田隆夫・松見吉晴・山口秀樹・木村 晃(2010)：捨石護岸の断面変形量の統計的特性について，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. B2-66, No.1, 871-875
- 鹿島遼一・榊山 勉・松山昌史・関本恒浩・京谷 修(1992)：安定限界を越える波浪に対する消波工の変形と防波機能の変化について，海岸工学論文集，第 39 巻，671-675
- 鹿島遼一・榊山 勉・松山昌史・関本恒浩・京谷 修(1993)：安定限界を越える不規則波に対する人工島防波護岸の耐波安定性と越波特性，海岸工学論文集，第 40 巻，686-690
- 久保田真一・山本方人・松本 朗・半沢 稔(2009)：消波ブロック被覆堤における消波工の変形過程に関する実験的検討，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. B2-65, No.1, 906-910