

1. はじめに

最近、海岸・港湾構造物においても効率的な維持補修計画の策定が必要とされ、作用外力による構造物の被災変形と性能変化との関係を明らかにすることが要件の一つとなっている。捨石や消波ブロックによる被覆工の被災変形と性能変化については、水理模型実験を主とした研究が行われているが、断面変形が実験ごとに異なることなどから、その結果の汎用性には疑問が残る。本研究では、変形に対して平均（標準）的な断面形状を与えることができれば、その断面を用いた実験や数値計算により性能変化を把握することにつながると考え、断面変形のモデル化を行う。具体的には、捨石護岸を対象として天端高、法面勾配などの条件を変えた一連の実験より、被覆層の変形過程に関する検討結果にもとづいて断面変形をモデル化する。ついで、モデル断面を用いた実験により護岸の消波性能に及ぼす断面変形の影響について検討する。

2. 断面変形計測実験

本研究で用いる断面変形に関する実験データは、吉木ら¹⁾によるものである。実験内容と結果の概要を以下に記す。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仕切って 10 基の造波水路を作成し、模型実験を行った。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。被覆層の砕石は、代表粒径 $D_{n50} = \sqrt[3]{M_{50}/\rho}$ が 2.81cm と 3.18cm 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。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 $T_{1/3}=1.2s$ として作成した信号により、有義波高 $H_{1/3}=11cm$ で造波した。1 回の造波時間は約 27 分間で作用波数は約 1400 であり、1 ケースの実験で 7 回繰り返して作用させた。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。

久保田ら²⁾は、消波ブロック被覆堤の被災事例から被覆工の被災形態として、①天端被災、②法面被災、③天端および法面被災に分類しているが、この実験では①の被災形態は見られず、変形が大きくなる③は法面勾配 1:1.5 の 2 層型で生じた。図-1 は、③の被災形態で最も変形が大きいケース ($h_c=10cm$, $D_{n50}=2.81cm$) の断面変化であり、鹿島ら³⁾ や久保田ら²⁾ 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っていることがわかる。

3. 断面形状のモデル化

本研究では、図-1 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、同一条件下の 4 回の実験データを用いて断面形状のモデル化を行った。侵食部のモデル化については、まず法面上での初期断面と変形断面の交点位置と、天端部分の法肩（天端海側）、天端中央、天端陸側の 3 点（図中の矢印）での、初期断面からの低下量 η を読み取った。この結果から、交点の平均（以下、中心点）の位置、および η を天端高 h_c で除したものと S との関係を表す以下の近似式が得られた。

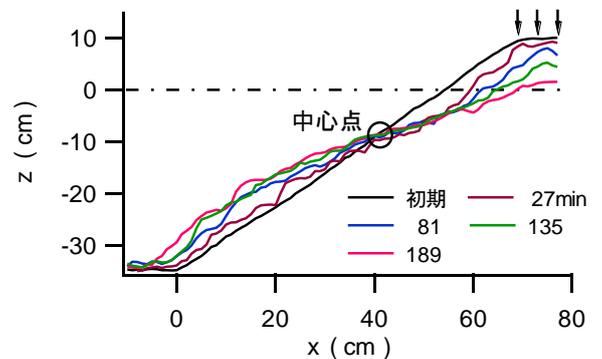


図-1 護岸断面の変化

$$\eta_s/h_c = 1.76 \times 10^{-3} S^{1.89} \quad (1)$$

$$\eta_c/h_c = 4.85 \times 10^{-4} S^{2.21} \quad (2)$$

$$\eta_l/h_c = 7.95 \times 10^{-5} S^{2.69} \quad (3)$$

ここに、 η_s 、 η_c 、 η_l は法肩、天端中央および天端陸側における低下量である。式(1)～(3)より、 S の値に対応する低下量を与えることができ、これらと中心点を用いて各点を結ぶ直線で侵食部のモデル断面を作成する。つぎに、侵食部の面積が S と D_{n50} で与えられる侵食面積と一致するように、静水面($z=0$)でのモデル断面の x 座標を決め、最終的に上記4点と合わせて直線で結び侵食部モデル断面とした。

堆積部のモデル化については、太田ら⁴⁾と同様に断面形状をsin曲線で近似する方法を用いた。すなわち、中心点と護岸法先の2点を基準とし、この2点間の距離を半波長とするsin曲線で堆積部の断面形状を表す。しかし、図-1に示したように断面変形が大きくなるにつれ法先が沖側へ移動することから、本研究ではこの変化も考慮する。実験データより変形断面の法先位置 x_t を読み取り、この結果から x_t と S との関係を表す以下の近似式を得た。

$$x_t = 0.321S \quad (4)$$

式(4)により、 S の値に対応して法先の位置が決まり、法先と中心点の距離が与えられる。つぎに、 S の値に対する侵食部面積と、中心点、初期断面法先および変形断面法先で決まる堆積部の面積が等しくなるようにsin曲線の振幅を求める。

以上の方法により与えられたモデル断面を図-2に示す。

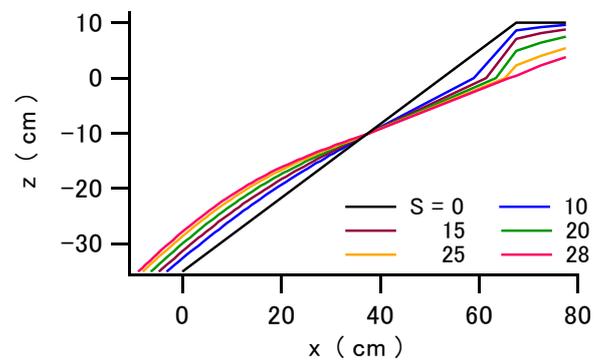


図-2 モデル断面

4. モデル断面を用いた実験

図-2のモデル断面を用い、反射率と越波流量を指標として、模型実験による性能評価に関する検討を行った。不規則造波水路(長さ29.0m、幅0.5m、高さ0.75m)の水平床上に、造波板から19.36mの位置を初期断面($S=0$)の法先として護岸模型を設置した。護岸背面に厚さ1cmのベニヤ板を止水板として置き、越波量計測時にはその背後に集水柵(幅37.5cm)を設けた。護岸模型は、3.に述べた実験条件に合わせて作成したもので、碎石層とコア部からなり、コア部の断面は上底10cm、下底62.5cm、高さ35cm、法面勾配が1:1.5になるように砂利を積んだ。砂利は、4.76mmのふるいを通り、9.50mmのふるいに残ったものであり、空隙率は約37%である。被覆層は、 $D_{n50}=2.81$ cmの碎石をコア部の上に積み、護岸全体の断面が上底10cm、下底77.5cm、高さ45cm、法面勾配が1:1.5となるようにした。碎石の空隙率は約41%である。また、沖側の一様水深部(水深35cm)に5本(W1～W5)の容量式波高計を設置して水位変動を測定した。図-3に実験装置の概要を示す(ただし、図中の護岸は初期断面の形状である)。なお、波の作用によって碎石が移動しないように護岸の天端と法面を金網で覆った。

反射率を測定するために規則波および不規則波を作用させた。規則波は、波高 $H=6$ cm、周期 $T=0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0$ sの7種類として造波し、造波開始時から100秒間の水位変動を記録した。不規則波は、修正Bretschneider-光易スペクトルを期待スペクトルとし、有義波高 $H_{1/3}=6$ cm、有義波周期 $T_{1/3}=1.6$ sとして造波した。造波開始の20秒後から550秒間の水位変動を記録した。反射率は波高計W1からW3の水位変動データを用いて、合田らによる入反射波分離法により算出した。

越波量を測定するための不規則波は、修正Bretschneider-光易スペクトルを用い、 $H_{1/3}=10$ cm、 $T_{1/3}=1.6$ sとして20分間造波した。上述の集水柵により20分間の越波量を計測し、越波流量(単位幅・単位時間当たりの越波量)を求めた。1つの護岸断面形状に対して不規則波を2回作用させ、越波流量の平均をとった。

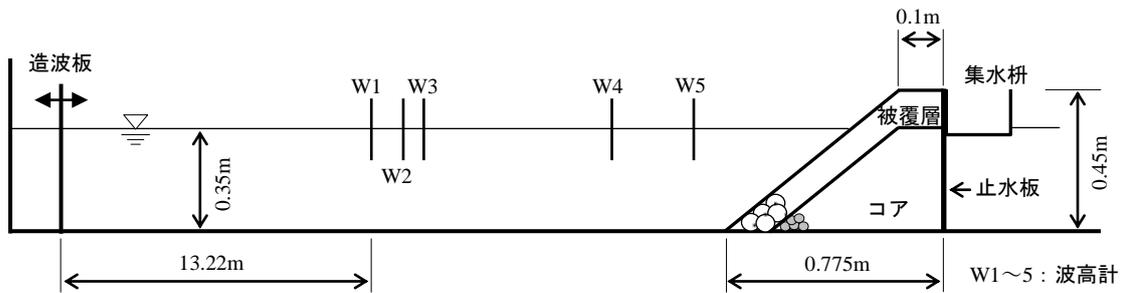


図-3 実験装置の概要

図-4, 5 に反射率 K_R , 越波流量 q_o' と変形量パラメータ S との関係を示す。ただし, q_o' は $S=0$ での越波流量で無次元化したものである。図-4 より, 反射率は断面変形の進行につれて減少傾向を示すものが多いが, $T=1.2s$ ではほぼ横ばいに推移している。越波流量は $S=20$ で最大となり, 初期断面での越波流量の約 2.6 倍まで増加している。断面変形の進行にともなって越波量が大きく増えることがわかる。 $S > 20$ で越波流量が減少することについては, 断面変形の進行によって, 天端高が減少して護岸背面の止水板によって越波が抑えられたことと, 法面の勾配が緩くなったことの影響であると考えられる。

5. おわりに

本研究では, 捨石護岸を対象として実験結果にもとづいて断面変形をモデル化し, モデル断面を用いた実験により反射率と越波流量を指標として変形にともなう性能変化の評価を行った。その結果, 断面変形の進行につれて, 反射率は減少傾向を示すこと, 越波量では 2 倍を超える増加が生じることがわかった。

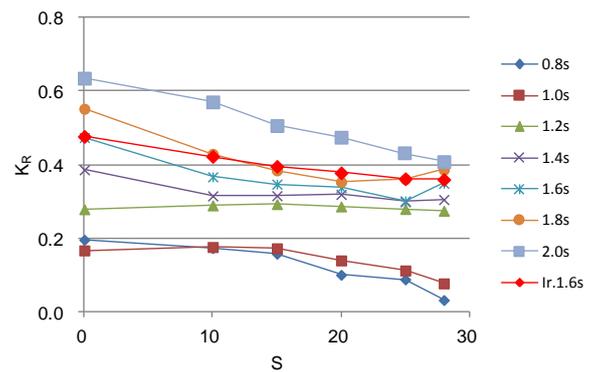


図-4 反射率の変化

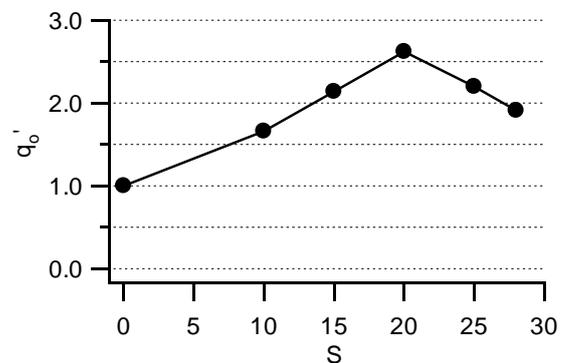


図-5 越波流量の変化

【参考文献】

- 1) 吉木弘軌・加藤展顕・太田隆夫・松見吉晴：傾斜護岸の断面変形過程の特性について, 第 63 回土木学会中国支部研究発表会概要集, II-33, 2011
- 2) 久保田真一・山本方人・松本 朗・半沢 稔：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, 海岸工学論文集, 第 56 巻, 906-910, 2009
- 3) 鹿島遼一・榊山 勉・松山昌史・関本恒浩・京谷 修：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, 1993
- 4) 太田隆夫・松見吉晴・時岡明範・木村 晃：傾斜護岸の断面変形のモデル化と性能評価, 土木学会論文集 B2(海岸工学) Vol. 66, No.1, 721-725, 2010