

消波ブロックの耐波安定性に及ぼす被覆層厚と 中詰め材の影響に関する研究

久保田真一*・小林茂高**・松本 朗*
半沢 稔*・松岡道男***

消波ブロック被覆堤の消波被覆構造として、全断面被覆形式と、表層のみに必要質量のブロックを使用し下層部には小型のブロックや石材を中詰め材として用いる層被覆形式について、被覆構造がブロックの耐波安定性に及ぼす影響を検討した。層厚が薄く、中詰め材の透水性が低くなると、消波ブロックの安定性が低下することがわかった。この差異は、中詰め材の透水性が低い場合には、被覆層内外での流下速度の差により斜面下向きに転動する作用をより大きく受けること、また、層厚が薄くなると、表層ブロックの変位可能量が大きくなり、結果として抵抗力が低下することにより説明可能なことがわかった。

1. はじめに

直立壁前面に消波工を有する消波ブロック被覆堤は、わが国の主要な防波堤構造のひとつである。消波工構造としては、施工性に優れた全断面に同一のブロックを用いるタイプの実績が多いが、表層のみに必要質量のブロックを用い、下層（あんこ）部には小型のブロックや石材を使用する中詰めタイプも、経済性他の点から今後は更に適用事例が増えてくることが想定される。Hudson (1959) や van der Meer (1987) の傾斜堤を対象とした研究によれば、中詰め材を有しその表層を被覆する被覆石の安定性は、被覆層厚および中詰め材の透水性の影響を受けるとされている。消波ブロック被覆堤における層被覆形式の消波ブロックの安定性も、被覆層厚および中詰め材の影響を受けるものと考えられる。このような中詰め材と消波ブロック被覆堤の消波ブロックの安定性との関係については、鹿島ら (1994) が中詰め材の天端高さを変えた研究を行っているが、安定実験結果の提示にとどまっており、ブロックへ作用する外力や外力に対する抵抗と関連させた系統的な研究はなされていない。

そこで、消波ブロック被覆堤を対象として、全断面被覆形式と層被覆形式の消波ブロックの耐波安定性の差異を検討するとともに、作用外力および消波ブロックの抵抗力の観点からその耐波安定性の差異に及ぼす要因を明らかにすることを目的として研究を行った。

2. 消波ブロックの耐波安定性

2.1 実験方法

実験は二次元造波水路(長さ 55 m, 幅 1.2 m, 高さ 1.5 m)を用いて行った。水路内の勾配 1/30 のモルタル床上に、消波ブロック被覆堤模型を設置した。消波ブロックとしてドロス(図-1)を使用した。実験に用いたドロス被覆堤の基本断面を図-2 に、実験条件を表-1 に示す。

検討断面は、ケーソン前面の全断面にドロスを設置した全断面被覆形式および中詰め材を有し表層にドロスを設置した層被覆形式である。層被覆形式については、ドロスの被覆層厚をドロス高さ (h) の 1.2 倍 (1.2h) および 1.8 倍 (1.8h) の 2 種類とし、それぞれに対して、中詰め材をテトラポッドおよび石材とした断面を検討対象とした。これら計 5 断面に対して安定実験を行った。

実験では、ドロス被覆堤模型に不規則波を作用させ、ドロスの挙動を観察した。ドロスの移動が生じないような小さな波から作用させ、順次波高を増加させた。同一波高レベルでの波の作用は 1000 波を標準とした。波高を増加させる際、ドロスの積み直しは行わず、被害個数はそれまでの被害個数に当該波高条件で新たに発生した被害個数を加えた累計数とした。本実験では、転落(ブロックの大きさの 1 個以上移動)および移動(45 度以上回転、ブロックの大きさの半分以上移動)したドロスを被災ブロックとして計上した。

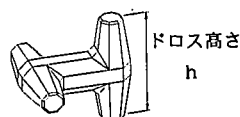


図-1 ドロス形状図

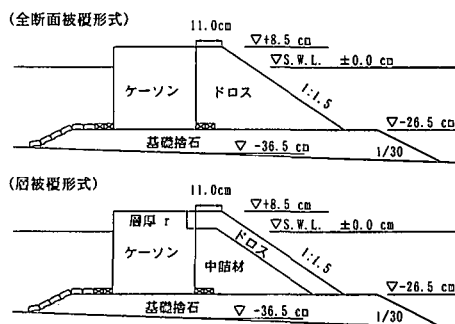


図-2 実験断面図

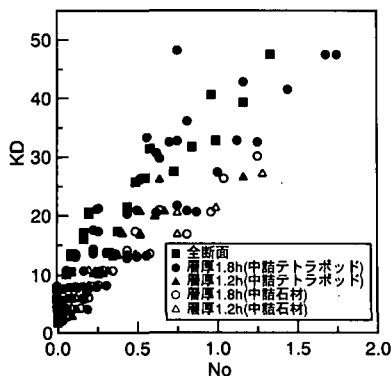
* 正会員 工修 (株)テトラ テトラ総合技術研究所
** 正会員 (株)テトラ テトラ総合技術研究所
*** 正会員 工博 (株)テトラ テトラ総合技術研究所 所長

表-1 実験条件

天端幅 B	11.0 cm
天端高 h_c	8.5 cm
斜面勾配	1 : 1.5
消波ブロック	ドロス (50 t 型 1/85) 質量 M 83.7 g 密度 ρ 2.35 g/cm ³ 高さ h 6.1 cm
不規則波 周期 $T_{1/3}$ 波高 $H_{1/3}$	修正 Bretschneider-光型型スペクトル 1.63 s 6 cm~18 cm
検討断面	・全断面被覆形式 ・層被覆形式 層厚 τ 1.8 h, 1.2 h 中詰め材 テトラポッド・石材

2.2 実験結果

図-3 に安定実験より得られた被災度 N_0 と安定数 KD の関係を示す。被災度 N_0 は、防波堤法線方向の幅 $D_n (= (M/\rho)^{1/3})$ の断面内で被災したブロックの個数である。全断面被覆形式のドロスの安定性が高いことがわかる。ドロスの層厚が 1.8 h で中詰め材をテトラポッドとした層被覆形式のドロスは、全断面被覆形式とほぼ同等の安定性を確保している。層厚が薄い場合や中詰め材に石材を用いた場合は、ドロスの安定性が低下することがわかる。このように、消波工構造の違いにより、表層のドロスの安定性に差異が生じることが分かった。その要因のひとつとしては、van der Meer (1987) が傾斜堤を対象とした研究で指摘しているように、中詰め材の透水性の低下に伴う表層ブロックの安定性の低下が挙げられる。ドロス (空隙率 57.5%) やテトラポッド (空隙率 50.0%) といった空隙率の高い消波ブロックの透水性と比較して、空隙率の低い石材 (空隙率約 40%) の透水性は低下する。そのため、中詰め材に石材を使用した場合の表層のドロスの安定性は低下するものと考えられる。被覆層厚が薄くなると消波ブロックの安定性が低下する

図-3 被災度 N_0 と安定数 KD の関係

傾向については、Hudson (1959) が指摘しているものの、その要因についてはふれられていない。そこで、安定性の差異の要因を明らかにするために以下の検討を行った。

3. 防波堤近傍の流体場の特性

3.1 実験方法

安定実験で用いた 5 つの断面を対象として、ケーソン前面の水位変動・被覆層近傍流速・遡上波形 (被覆層内および被覆層外) の計測を行い、各断面における防波堤近傍の流体場の特性を把握することを試みた。ケーソン前面の水位変動および遡上波形の計測は不規則波を用いて行い、被覆層近傍流速の計測は規則波 (周期 1.63 s, 波高 5 cm~10 cm) を用いて行った。その他の条件は表-1 に示すとおりである。機器の設置状況を図-4 に示す。

ケーソンの沖側壁前面に沿って波高計を設置し、消波工内の水位変動を計測した。また、被覆層外縁から 3.0 cm の位置 (表層より 0.5 h 上側) で静水面下 7.0 cm の位置に電磁流速計を設置して、消波工斜面に沿って発生する流速を計測した。流速は斜面上向き方向を正とし、斜面向下向き方向を負とした。遡上波形は、被覆層外部 3.0 cm の位置 (表層より 0.5 h 上側) および被覆層内部 2.7 cm の位置 (表層より 0.45 h 内側) に消波工斜面に沿って遡上計を設置して計測した。被覆層内部に設置した場合も、容量線が消波ブロックの干渉を受けることがないように、遡上計は榊山・斉藤 (1988) を参考として容量式波高計の容量線まわりに直径 3.0 cm のステンレス製のサポーターを設けて使用した。

3.2 実験結果

a) ケーソン前面の水位変動

ケーソン前面の水位変動の測定結果を図-5 に示す。縦軸には、押し波時の最大水位と引き波時の最低水位を示してある。横軸は波高である。中詰め材の違いにより、引き波時のケーソン前面の最低水位に差が生じていることがわかる。最低水位は、全断面被覆および中詰め材をテトラポッドとした場合が最も低くなり、その値はほぼ同一である。中詰め材に透水性の低い石材を用いた場合は、他条件と比較して、最低水位が高い。この傾向は、

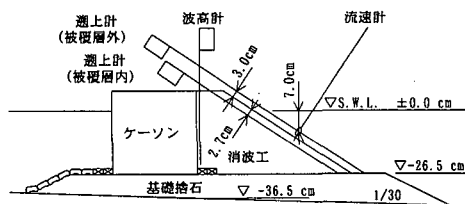


図-4 測定機器の設置状況

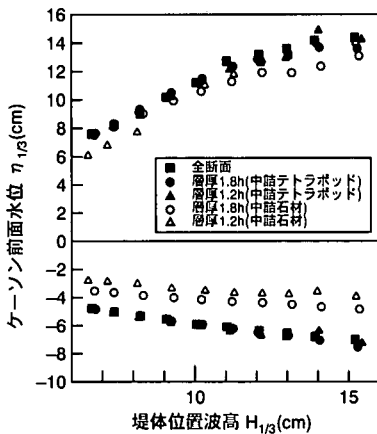


図-5 ケーソン前面の水位変動

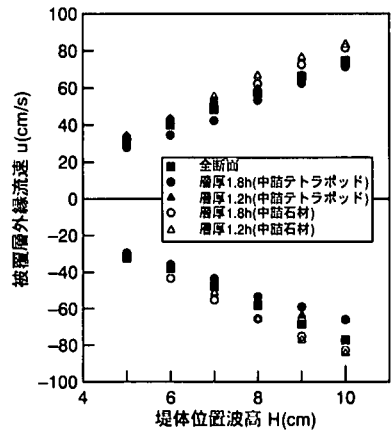


図-6 被覆層外縁の流速

堤体内部に過剰ヘッドを引き起こし、被覆材の安定性を低下させる要因となることが指摘されており (Bruun・Johannesson, 1976; Bruun・Günbak, 1977), すでに述べた中詰め材に石材を用いた場合の表層のドロスの安定性の低下傾向と一致する。

b) 被覆層外縁における流速

被覆層外縁において計測された流速を図-6に示す。被覆層厚による流速の変化は明瞭ではない一方、中詰め材の違いにより流速に差異が生じていることが分かる。中詰め材として石材を用いた方が、流速値が大きくなっており、中詰め材の透水性の低下にともなう、表層のブロックに作用する抗力が増加するものと推察される。

この中詰め材の種類が流速に及ぼす影響を検証するために数値波動水路 (磯部ら, 1999) により計算を行った。結果を図-7に示す。ここで u は波進行方向, w は鉛直上向きを正とし、水深は全域で 36.5 cm とした。石材の諸量は空隙率 0.44, 抵抗係数 1.00, 慣性力係数 1.20 とした。消波ブロックは空隙率がドロスが 0.575, テトラポッドが 0.5 とし、抵抗係数および慣性力係数は両者ともに 0.9, 1.5 とした。図から、計算結果からも中詰め材の透水性が小さいと斜面に沿う流速も大きくなることがわかる。また被覆層の外側へ向かう流速が中詰め材の透水性が小さいほど大きくなる。

c) 被覆層内外の遡上波形

計測した遡上波形を時間微分することで遡上波の先端速度を求めた。この先端速度は、波の遡上および流下時の平均的な流速と考えられる。図-8に被覆層外の遡上波先端速度を示す。被覆層外においては、中詰め材として石材を用いた場合がテトラポッドを用いた場合より遡上速度および流下速度ともに大きな値をとることがわかる。この傾向は図-6に示した被覆層外縁の流速と同様であり、中詰め材の透水性が低下すると、表層ブロック

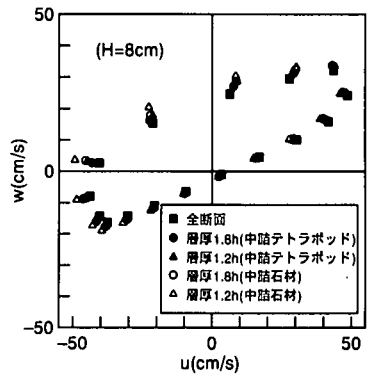


図-7 被覆層外縁における水平・鉛直流速 (計算値)

に作用する抗力が大きくなると考えられる。この作用外力の増大が安定性を低下させる要因として挙げられる。

図-9に被覆層内の遡上波先端速度を示す。被覆層内の遡上速度については、被覆層外におけるような明瞭な関係は見られない。流下速度は、被覆層外における傾向と異なり透水性の低下に伴い小さくなる。以上の a), b), c) の解析結果を基にした、中詰め材の違いによる被覆層内外における流れの模式図を図-10に示す。

以上より、被覆層内外の流下速度の差に着目して検討した。被覆層内外の流下速度の差を図-11に示す。縦軸は被覆層外の流下速度より被覆層内の流下速度を引くことで得られる値を示している。この流下速度の差は、表層ブロックの転がりやすさを示す指標と考えられる。流下速度差が負値をとる場合には、被覆層内の流下速度の方が大きい、正値をとる場合には被覆層外の流下速度の方が大きくなり、表層のブロックが斜面を下向きに転がる作用をより大きく受けることが類推される (図-12参照)。図-11より、流下速度差は中詰め材の透水性が大きい場合には負値をとり、透水性が小さい場合は正値を

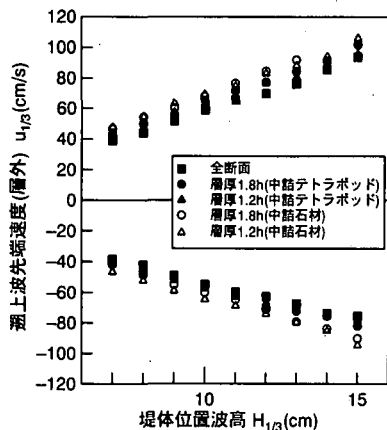


図-8 被覆層外の遡上波先端速度

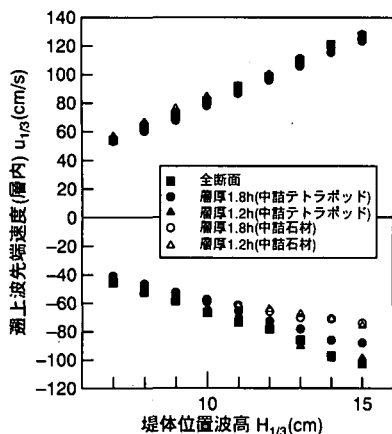


図-9 被覆層内の遡上波先端速度

とることがわかる。中詰め材の透水性が小さくなることで表層のブロックは、斜面を下向きに転がる作用を受けるため、安定性が低下すると考えられる。

以上より、中詰め材の透水性が小さくなれば表層のブロックに作用する抗力が増大し、流下時においては斜面を下向きに転がる作用を大きく受けることで安定性が低下すると考えられる。

4. 外力に対する消波ブロックの抵抗力の評価

4.1 実験方法

測定箱内に全断面被覆形式および層被覆形式に対応する各層のドロス被覆層を形成し、表層に位置するドロスの変位可能量の測定を行い、その大小によってブロックの移動に対する抵抗力の評価を試みた。

測定箱を図-13に示す。脚端中心をマーキングしたドロス模型を用いて、測定箱内にドロス被覆層を形成した。形成後に振動装置にて測定箱に約50回の振動を加え、積

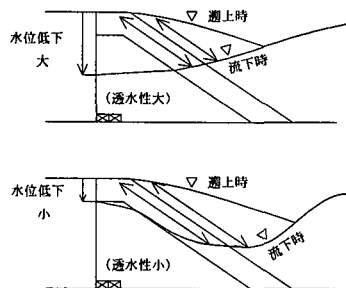


図-10 被覆層内外における流れの様相

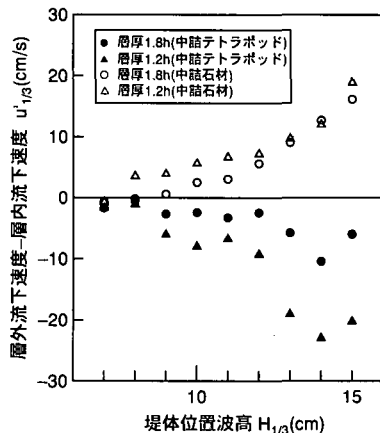


図-11 被覆層内外の流下速度差

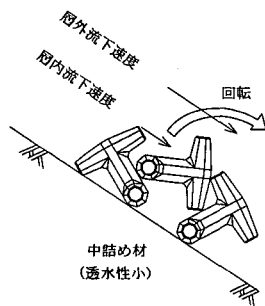


図-12 表層ブロックの転がりやすさ

み方のばらつきの影響を取り除くものとした。測定箱の天端面は7cm×5cmの格子状に区切られており、計30点の格子点の真下に位置する表層のブロックを測定対象とした。測定対象ブロックを振動を加えた方向と同一の隣接するブロックまでの変位可能量(図-14参照)を測定した。

4.2 実験結果

実験結果を図-15に示す。同一の外力に対して被覆層が不安定となるのは、一定レベルの閾値以下の抵抗力和なるブロックの多寡によるものと考えられるため超過確

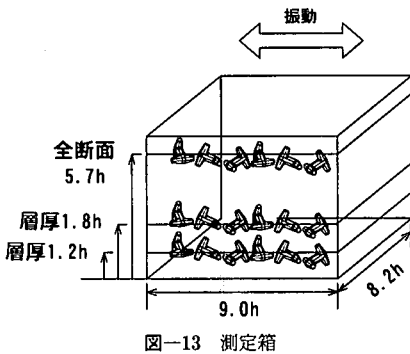


図-13 測定箱

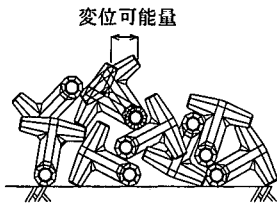


図-14 表層ブロックの変位可能量

率として整理した。図より全断面被覆形式の変位可能量が最も小さく、層被覆形式は層厚が薄くなるにつれて変位可能量が大きくなるのがわかる。この結果より、層厚が薄くなるにつれて抵抗力としてのかみ合わせの効果が小さくなるものと考えられる。

5. 結 語

ドロス被覆堤を対象として、全断面被覆形式と被覆層厚および中詰め材を変化させた層被覆形式のドロスの耐波安定性の検討を行い、以下の結論を得た。

① 全断面被覆形式の場合が最も安定性が高い。層被覆形式で中詰め材をテトラポッドとしドロスの被覆層厚を1.8hとした場合にはほぼ全断面被覆形式と同等の安定性が確保できるが、層厚を薄く、あるいは中詰め材を透水性の小さな石とすると安定性が低下する。

② 中詰め材の透水性が低下すると、表層のブロックに作用する流速が大きくなる。また、被覆層内外の流下速度の差より、表層のブロックは斜面を下向きに転がる作用をより大きく受けることが類推される。これらが外力による安定性低下の要因であると考えられる。

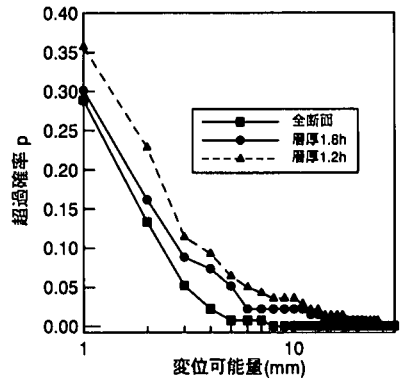


図-15 表層ドロスの変位可能量と超過確率

③ 被覆層厚が薄くなると、表層のドロスの変位可能量が大きくなることから、ブロックの外力に対する抵抗力が低下し、安定性が低下するものと考えられる。

④ 以上より全断面被覆形式と層被覆形式のドロスの耐波安定性の差異が作用外力および抵抗力より説明されることが分かった。

謝辞：研究にあたっては、デラウェア大学小林信久教授に貴重なご助言を賜りました。深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・高橋重雄・余 錫平・榊山 勉・藤間功司・川崎浩司・蔭 勤・秋山 実・大山洋志 (1999): 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究—VOF法基本プログラムの作成—, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 321-326.
- 鹿島遼一・榊山 勉・清水琢三・関本恒浩・窪 泰浩 (1994): 消波工の変形量の時間変化の予測と変形に及ぼすコアの影響, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 771-775.
- 榊山 勉・斎藤昭三 (1988): 消波ブロック被覆堤の反射率と迎上波特性, 電力中央研究所報告, No. U-88023.
- Bruun, P. and P. Johannesson (1976): Parameter affecting stability of rubble mounds, Proc. ASCE, Vol. 102, WW2, pp. 141-164.
- Bruun, P. and A. R. Günbak (1977): Stability of sloping structures in relation to $\xi = \tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$ risk criteria in design, Coastal Engineering, Vol. 1, pp. 287-332.
- Hudson, R. Y. (1959): Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters, Proc. ASCE, Vol. 85, WW3, pp. 93-121.
- Van der Meer, J. W. (1987): Stability of breakwater armour layer design formulae, Coastal Engineering, Vol. 11, pp. 219-239.