

流速場に基づく混成堤マウンド被覆材の高度設計法

松 本 朗*・高 橋 重 雄**

1. はじめに

捨石マウンドの被覆材は、海域構造物においては最も重要な部分の一つであり、古くから実験的な研究が進められ、基本的な設計法は確立された段階にある。すなわち、 K_d 値を用いたハドソン式 (Hudson, 1959)、あるいはそのより一般的な式である安定数 N_s を用いたハドソン式によって所要質量を算定している (港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上), 1999)。ハドソン式は、被覆材の安定性の本質を的確に捉えた式であり、実用的であるが、その精度など問題点も数多く指摘されている。近年は海域施設の設計法は性能設計など、より高度な設計法に移行しつつあるが、被覆材の設計法についても高度な設計が不可欠となっている。

本研究は、混成堤マウンド被覆材を対象に、新たな設計法を提案することを最終的な目標としている。すなわち、「数値計算による流速場に基づいた被覆材所要質量の算定法」を検討しており、本報告では、その基本的な考え方を示し、その妥当性を規則波による水理模型実験と数値波動水路による流速場の再現計算との比較によって検討する。ただし、実用上重要な不規則波への適用については、次のステップにおける検討課題としている。

2. 被覆材の高度設計法の提案

(1) ハドソン式による設計とその問題点

一般化されたハドソン式は次のとおりである。

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

ここで、 M は被覆石の所要質量、 ρ_r は被覆石の密度、 S_r は被覆石の水に対する比重である。 H は設計に用いる波高であり、通常は有義波高が使用される。 N_s は被覆石の形状、被害率等によって定まる定数であり安定数と呼ばれる。

安定数 N_s は、谷本ら (1982) による不規則波を用いた系統的な水理模型実験の結果により定式化されており、波数 500、被害率 1% で、波浪が堤体に直角に入射する場

合には以下の式で算定される。

$$N_s = \max \left\{ 1.8, 1.3 \frac{1-\kappa}{\kappa^{1/3}} \frac{h'}{H_{1/3}} + 1.8 \cdot \exp \left[-1.5 \frac{(1-\kappa)^2}{\kappa^{1/3}} \frac{h'}{H_{1/3}} \right] \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\kappa = \frac{4\pi h' / L'}{\sinh(4\pi h' / L')} \sin^2(2\pi B_M / L') \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 h' はマウンドの天端上水深、 L' は水深 h' での設計有義波周期に対する波長、 B_M はマウンド肩幅、 $H_{1/3}$ は設計有義波高であり、 $\max\{a, b\}$ は a と b のいずれか大きい方の値を意味する。

この谷本らの安定数を用いた算定法は、実施例が数多く十分な妥当性を持つものであるが、以下の課題が指摘されている。

- ①構造上最も弱点となるマウンド法肩近傍の被覆石の安定性から実験定数を定めて導かれたものであるため、相対的に耐波安定性が高いと考えられるマウンド法面やマウンド天端に対しては過大な質量を与える。
- ②実験には矩形ケーソンが用いられており、また、その天端高はほとんどのケースで波高の 0.6 倍となっている。これは、混成堤の標準的な設計条件を考慮して設定されたものである。近年では直立消波ケーソン堤や半没水式上部斜面堤など、様々な新形式の防波堤や護岸が実用に供されてきている。また、天端高さについても標準的な場合でないケースもある。こうした条件では、マウンド被覆石の所要質量は谷本らによる安定数を用いて算定された値と多少異なるものと考えられる。

(2) 流速場に基づく設計法

本報告では、これらの課題を解決し、さらに精度の良い被覆材の所要質量の算定法として、流速場に基づく算定法を提案する。すなわち、そこでの流速場を数値計算で求め、その流速場に基づいて所要質量を算定する。ここでは被覆材位置での流速場の数値計算法として、数値波動水路 (CADMAS-SURF) を用い、被覆材の所要質量の算定には以下に示す CERC の式 (たとえば Department of the Army, Corps of Engineers, 1977) を用いることを考えている。

* 正会員 工修 株式会社テトラ 環境事業本部
** 正会員 工博 (独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部長

$$M = \frac{\pi \rho_r U^6}{48 g^3 y^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 U は捨石上面における流速、 g は重力の加速度、 θ は法面の傾斜角である。 y はイスバッシュ定数と呼ばれ、通常は埋め込まれた石に対して1.20、露出した石に対して0.86とされている。このCERCの式は、斜面上の球体に働く流れによる抗力と摩擦抵抗のつり合いから導かれたものであり、潮流等による洗掘を防止するための捨石質量を求めるために提案された。

CERCの式を用いて海域施設の被覆材の安定性を論じた研究としては、岩崎ら(1984)の津波防波堤の潜堤被覆ブロックへの適用例や、谷本ら(1988)の釜石湾口防波堤のマウンド被覆石への適用例が挙げられる。いずれも津波を対象としており、通常の波を対象として検討した事例はまだない。ただし、石材のように波のスケールに比べて被覆材の直径が相対的にかなり小さい場合には、通常の波に対しても抗力が支配的であり、慣性力の効果を省略することも可能であると考えられ、CERCの式の適用性は高いと思われる。

- なお、この新しい設計法では以下の効果が期待される。
- ①マウンドやケーソンの形状、あるいは波の条件の違いを的確に考慮することができる。特にスリットケーソンなど本體工が全く異なる場合にも適用可能である。
 - ②マウンドの位置(水平部法肩や堤脚部、斜面部浅部や深部など)による所要質量の違いを表すことができる。特に水深の大きな防波堤の深い部分では、そこでの質量がかなり小さくなり経済的にできると考えられている。
 - ③碎波などの非線形性が強い場合にも適用できる。

この新しい設計法の妥当性を検証するために水理模型実験を実施しており、数値波動水路による流速場の再現性や流速を用いたCERCの式の適用性について次章以降で検討する。

3. 水理模型実験

(1) 実験条件と方法

実験は図-1に示す長さ29.0 m、幅0.5 m、高さ1.0 mの二次元造波水路を用いて行った。海底模型はモルタル床とし、模型前面は一樣水深とした。図-2は、模型堤体を示すものであり、基礎捨石マウンド上に木製ケーソンを設置している。マウンド被覆材は平均的な層厚4.0 cmで2層の被覆石とした。模型堤体は矩形ケーソンを基本とし、比較のために越波を許さない高天端ケーソンおよび、反射波を低減するスリットケーソン模型も用いた。図-3は、スリットケーソンの断面図を示しており、その開口率 ε は0.25である。

前掲図-2には計測器の配置も示している。St.1~3で

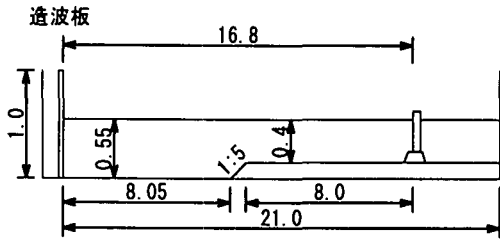


図-1 実験水路 (単位: m)

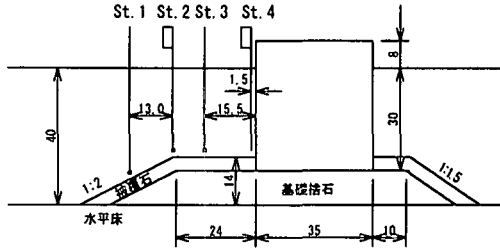


図-2 防波堤断面図 ($h_c=8.0$ cmの断面, 単位: cm)

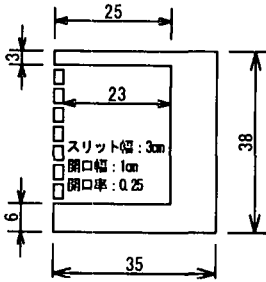


図-3 スリットケーソン断面図 (単位: cm)

表-1 実験条件

項 目	条 件
海底勾配	一樣水深
水深 h	40 cm
基礎捨石天端上水深 h'	30 cm
被覆石天端上水深 d	26 cm
マウンド肩幅 B_M	24 cm
被覆石の質量 M	平均 19.8 g (19.0~21.0 g)
被覆石の密度 ρ_r	2.59 g/cm ³
被覆石の個数 N	699
周期 T	1.3, 1.5, 1.7 s
波高 H	8~18 cm
ケーソン	矩形およびスリットケーソン
静水面上天端高 h_c	8 cm, ∞

水平流速を測定しており、St.2では鉛直流速も測定している。水位の測定はSt.2,4で実施した。流速測定点は被覆石の表面から上方へ2 cmの位置である。以下では水平流速 u は岸向き、鉛直流速 w は鉛直上向きを正とし、

水位 η の原点は静水面に取って示している。主な実験条件は表-1 のとおりである。

実験では水路内に設置した防波堤模型に規則波を作用させ、被覆石の挙動を観察した。被覆石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。波高を変更する際、被覆石の並べ換えは行わず、被害石の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個数を加えた累計数とした。作用波数は使用水路の制約から 10 波程度とした。

使用した被覆石は平均質量 19.8 g、標準偏差 0.60 g であり、変動係数 3.0% の極めて一様な粒径のものを用いた。本来、被覆石の質量分布は確率変数として取り扱われるべきであり、現地の被覆石の質量のばらつきは今回の実験で使用した被覆石のばらつきよりも大きいものと考えられる。加えて、質量のばらつきの程度が被覆石の耐波安定性に影響することが予想されるが、本報告では新しい設計法の基本的な考え方の妥当性の検討に重点が置かれているため、上述したような一様な質量分布の被覆石を用いた。各種の確率変数を考慮した検討は今後の課題としたい。

被害の判定は石のほぼ 1 個分以上移動したものを被害とし、被害率 D (%) を次の式で定義した。

$$D(\%) = (n/N) \times 100 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 N は被覆石の総数、 n は当該波高条件での累積被害個数である。

(2) 実験結果

被覆石の初期移動は、押し波時に吸い出されようとした法肩付近の石が、引き波時に法先方向へ運ばれるという形で発生していた。図-4 は $h_c = 8.0$ cm の矩形ケーソンに $T = 1.3$ s の波を作用させた時の入射波高とマウンドの領域毎の被害率を示したものである。被害は、主としてマウンド法肩近傍の領域に集中しており、隣接する部分がこれに続いている。マウンド天端の中間よりもケーソン側 (A) および沖側の深部 (E) では被害は見られなかった。この空間的な被害率の差異は、マウンド近傍流速の場所的な違いによるものであると考えられる。

入射波高とマウンド全体の被覆石に対する被害率との関係をケース毎に図-5 に示す。波高とともに被害率が大きくなっているが、周期の影響が明瞭に認められ、短周期の波ほど同一の波高に対して大きな被害率を与えることがわかる。これは、短周期の波ほど重複波の節の位置がマウンドの法肩に近づくためである。実際、マウンドの肩幅 B_M とマウンド天端上水深における波長 L' との比は $T = 1.7$ s で 0.089、 $T = 1.3$ s で 0.122 となっている。言うまでもなく、節の位置では流速が大きい。

また、同一の周期の波に対しては、高天端で非越波とした場合の方が同一の波高に対する被害率が大きく、被

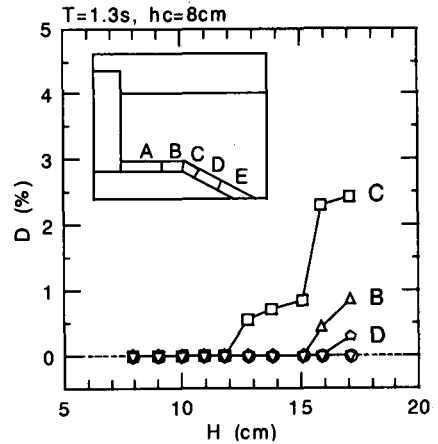


図-4 入射波高と領域毎の被害率の関係

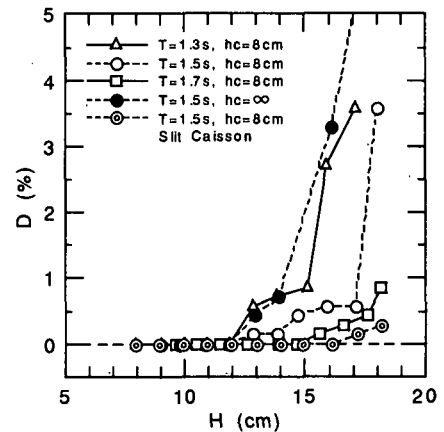


図-5 入射波高と被害率の関係

害の進行も著しい。これは、越波がある場合には入射波のエネルギーの一部が港内の伝達波へと変換されてしまうが、非越波とした場合には入射波のエネルギーのほぼ全体が反射されるためであり、その結果、流速が大きくなるからであると考えられる。

さらに、スリットケーソンでは、通常の矩形ケーソンに比べて被害が著しく小さい。これは、反射波が低減されるためマウンド近傍流速が減少するためであると考えられる。

図-6 は流速場の違いを確認するために、入射波高と法肩の冲向き水平流速との関係を調べたものである。波高を一定とすると、法肩における冲向き水平流速は短周期の波ほど大きいこと、同一の波高、周期の波が作用した場合には天端高が高いほど流速が大きくなること、スリットケーソンとした場合には流速が低減することが測定値から確認された。すなわち、被覆石の初期移動や、被害が法肩に集中する初期の段階における被害の進行の

程度が、法肩の冲向き水平流速によって説明できることが示唆されている。

図-7は法肩の冲向き水平流速と被害率の関係を検討したものであり、図-6の流速を用いて式(4)から逆算したイスパッシュ定数と被害率の関係をまとめたものである。ここに、 θ は斜面勾配1:2に対するものを用いた。波の条件やケーソンの条件にかかわらず、被害率はイスパッシュ定数の関数としてほぼ1本の線でまとまっており、流速場に基づく被覆材設計法の基本的な考え方の妥当性が確認できる。今回の実験の範囲内ではイスパッシュ定数は、初期移動に対して約0.75、被害率1%に対して0.85~0.9の値となった。

4. 数値波動水路による再現計算

(1) 計算条件

計算の基礎方程式は、櫛山ら(1990)のポラスモデル

ルに基づいて修正された2次元非圧縮性流体の連続式およびNavier-Stokes方程式である。計算方法の詳細は、磯部ら(1999)を参照されたい。計算領域全体にわたって $h=0.4\text{ m}$ の一樣水深とし、計算格子間隔は堤体周辺では水平方向1.0 cm、鉛直方向0.5 cm(スリットケーソンは0.25 cm)とし、それ以外の領域では粗い格子を用いた。捨石マウンドは透過性とし、空隙率0.44、抵抗係数1.00、慣性力係数1.20とした。スリットケーソンを対象とした計算では、小竹ら(2001)が提案した縮流係数 C_c を考慮した実質開口率を用い、その値は $C_c=0.6$ とした。流速の計算位置は、水理実験と同様に被覆石の表面から上方へ2.0 cmの位置である。

(2) 流速の計算結果

図-8は水位と流速の時系列の比較例を示すものであり、スリットケーソンを対象とした実験と計算の結果である。St.1とSt.3の流速振幅が実験値よりもやや小さめであるが、各測点ともに計算値は実験値とよく一致している。スリットケーソンでは透過壁の直前面は複雑な流況を呈するが、計算では越波水位も概ね再現されていることがわかる。

図-9は、実験と計算によるマウンド近傍における水平流速の正負のピーク値の空間分布例を示したものであ

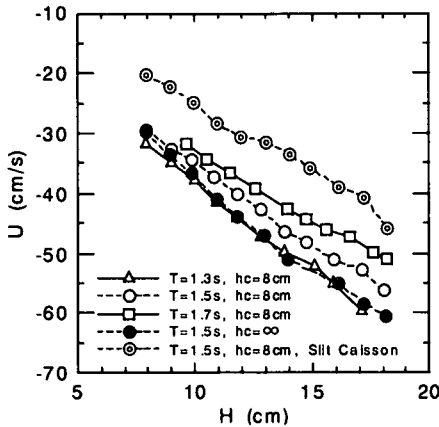


図-6 入射波高と法肩の冲向流速の関係

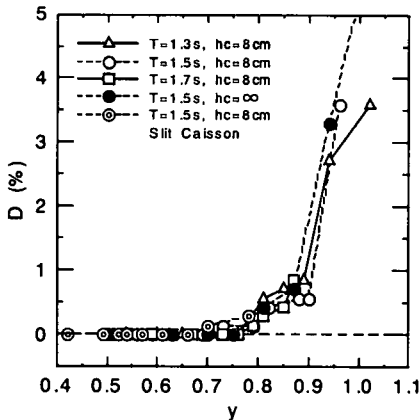


図-7 法肩の冲向流速から求めたイスパッシュ定数と被害率の関係

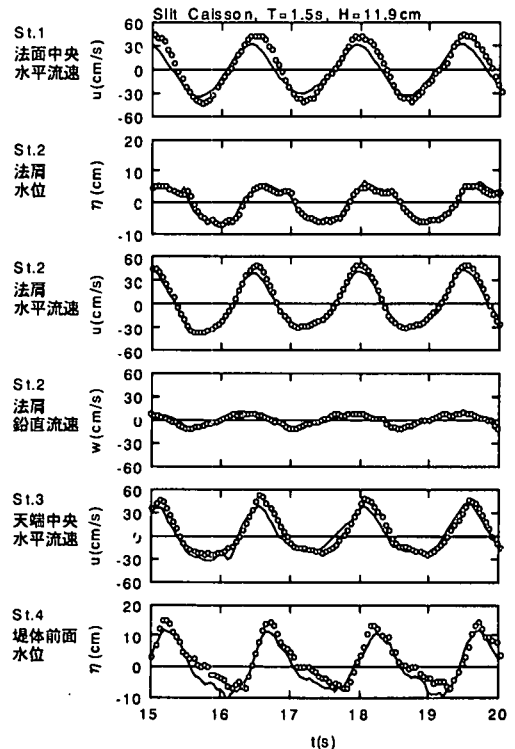


図-8 実験と計算による時系列の比較 (○:実験値, —:計算値)

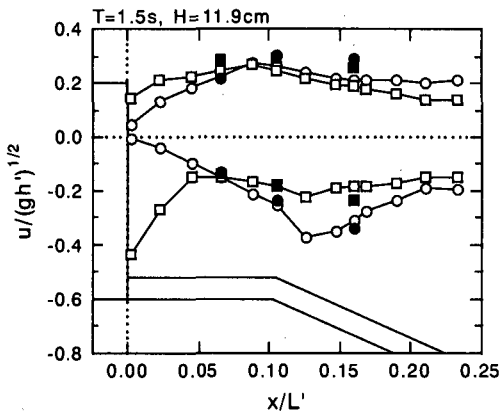


図-9 マウンド近傍の水平流速ピーク値の空間分布

○：計算値(矩形ケーソン)，□：計算値(スリットケーソン)
●：実験値(矩形ケーソン)，■：実験値(スリットケーソン)

り、通常の矩形ケーソンとスリットケーソンについて示している。この周期の波では、通常の矩形ケーソンでは、岸向流速のピークは法肩のややケーソン側で、冲向流速のピークは法肩のやや沖側で発生し、ケーソン前面でゼロにすりつく分布となる。岸向流速の空間的な変化は緩やかであるが、冲向流速の変化は著しく、流速の絶対値も冲向流速の方が大きい。この冲向流速の空間的な分布形状は、先に示した被害率の場所的な差異と一致している。

堤体をスリットケーソンとした場合には、反射波の低減のためマウンド天端の中央より沖側では、冲向および岸向き流速は通常の矩形ケーソンに対する値よりも小さくなっている。特に、法肩付近の冲向流速が低減しており、これが被覆材の安定性の向上に寄与していると考えられる。ただし、マウンド天端の中間付近よりもケーソン側では、遊水室内の波動運動に対応した流速値が計算されている。その値はかなり大きく、通常の矩形ケーソン堤に対する法肩付近の冲向最大流速よりも大きいことに留意する必要がある。

なお、法肩における冲向流速（ピーク値）の実験値と計算値を比較するとほとんどのケースでほぼ一致しており、波高が大きいところで計算値が実験値を上回るケースがあるが、その場合でも10%以内の精度である。

5. 結 語

本研究の結果をまとめると以下のとおりである。

①被覆石の被害はマウンド法肩近傍に集中しており、マ

ウンド近傍流速の場所的な違いとよく対応していた。

②被覆石の被害率は、波の条件やケーソンの条件にかかわらず、法肩の冲向き水平流速から計算されるイスバッシュ定数で説明できることが明らかとなった。今回の実験の範囲内では、イスバッシュ定数は被覆石の初期移動に対して約0.75、被害率1%に対して0.85～0.9の値となった。

③数値波動水路から算定される流速場と、水理模型実験による流速場はよく一致した。マウンド法肩の冲向き水平流速は±10%以内の精度で再現された。

④以上より、数値波動水路から算定される流速場をCERCの式に適用して、被覆石の耐波安定性を判定することの可能性が強く示唆された。

⑤実設計への適用に際して今後解決すべき課題として、イスバッシュ定数への波数の効果の組み込み、各種の確率変数の考慮、不規則波への拡張等が挙げられる。

謝辞：本研究の一部は「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」（代表：東京大学磯部教授）の活動の一環として行われました。ここに記して、関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・高橋重雄・余 錫平・礪山 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.
- 岩崎敏夫・真野 明・中村武弘・堀越伸幸 (1984): 潜堤のマウンド材およびプレバックド堤に作用する定常流体力に関する実験的研究, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 527-531.
- 小竹康夫・松村章子・藤原隆一・高橋重雄・磯部雅彦 (2001): 直立消波ケーソン堤の反射率算定に対するVOF法の適用性, 海岸工学論文集, 第48巻, 印刷中.
- 礪山 勉・阿部宜行・鹿島遼一 (1990): ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 554-558.
- 谷本勝利・柳生忠彦・村永 努・柴田鋼三・合田良実 (1982): 不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する研究, 港湾技術研究所報告第21巻第3号, pp. 3-42.
- 谷本勝利・木村克俊・宮崎啓司 (1988): 津波防波堤開口部潜堤の安定性に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告第27巻第4号, pp. 93-121.
- 日本港湾協会 (編) (1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上), pp. 157.
- Hudson, R. Y. (1959): Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters, Proc. ASCE, Vol. 85, WW3, pp. 93-121.
- U. S. Army Coastal Engineering Research Center (1977): Shore Protection Manual, Vol. II, pp. 7-215.