

II-70

混成防波堤マウンド被覆材の耐波安定性に関する実験的研究

北海道開発局開発土木研究所 正会員 須藤賢哉・木村克俊  
 北海道東海大学工学部 正会員 竹田英章

1. まえがき

我が国の主要な防波堤は、捨石あるいはコンクリートブロックで被覆された基礎捨石マウンド上にケーソンを据えた混成防波堤である。混成防波堤の耐波設計法のうち、ケーソン部の滑動安定性についてはほぼ確立した段階にある。一方、マウンド部に用いる被覆材の耐波安定性については未解明な点があり、近年の防波堤被災例においてもマウンド部の損傷を原因とした事例が多くなっている。

マウンド部に用いる被覆材は、設計波浪に対して十分な重量を有する必要がある。現在の標準的な設計法では、被覆材総数に対して被害率1%以内が安定重量の基準とされている。しかしながら防波堤としての機能に支障がない程度の変形を許容すれば、被覆材の安定重量を低減できる可能性がある。また近年需要が増えているスリットケーソンや、マウンド法面勾配および被覆層数の影響については、現在の設計法では考慮されていない。

本報告では、はじめに安定限界を越える波浪が作用する場合の被覆材の挙動を実験的に調べた上で、変形を許容したマウンド設計法の可能性について検討する。さらに、ケーソンやマウンドの構造条件が安定性におよぼす影響について実験的に検討する。

2. 安定重量算定の基本式

混成防波堤の標準断面を図-1に示す。マウンド被覆材の安定重量は、波の諸元とケーソンおよびマウンドの構造条件によって異なる。設計ではこれらを考慮した上で、被覆材の安定重量を式(1)で算定する。この式はHudson(1959)が捨石式傾斜堤被覆材の安定性の検討に際して示したもので、Brebner・Donnelly(1962)によって混成防波堤マウンド被覆材の安定重量算定の基本式として用いられて以来広く用いられている。

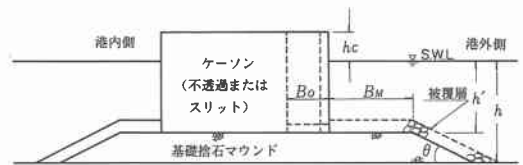


図-1 混成防波堤の標準断面

$$W = \frac{\gamma_r}{N_s(S_r - 1)^3} H_{1/3}^3 \quad (1)$$

ここに、 $W$ :被覆材の安定重量(tf)、 $\gamma_r$ :被覆材の空中単位体積重量(tf/m<sup>3</sup>)、 $S_r$ :被覆材の海水に対する比重、 $H_{1/3}$ :設計有義波高(m)、 $N_s$ :安定数である。ただし、 $N_s$ は波浪・構造条件を考慮して水理模型実験等により適切に定める必要がある。

谷本ら(1982)はおよそ500波の不規則波による系統的な実験に基づいて、直角入射波に対する $N_s$ を以下のように定式化した。

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

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

ここに、 $h'$ ：被覆層を除く基礎捨石マウンド天端上水深、 $L'$ ： $h'$ に対する波長、 $B_M$ ：マウンド前肩幅である。また、 $\max \{a, b\}$  はaまたはbのいずれか大の値である。

### 3. 実験の概要

実験は、不規則波発生装置を備えた長さ28.00m、深さ1.00m、幅0.80mの2次元ガラス水路に勾配1/50の海底を製作して行った。模型堤体は基礎捨石マウンド、木製のケーソンおよび碎石の被覆層により形成した。被覆層は1層または2層積とし、1層積の場合は基礎捨石の平均重量を4種類に変化させた。ケーソンの構造は、不透過壁および上床板のないスリット壁の2種類とした。実験波はBretschneider・光易型を目標スペクトルとする不規則波とし、1波群約130波を標準とした。

今回の実験条件を、表-1にまとめて示す。

表-1 実験条件

項目	記号	条件
海底勾配		1/50
堤体設置水深	$h$	24.0cm
マウンド天端上水深	$h'$	16.8cm
マウンド前肩幅	$B_M$	20.0, 30.0, 40.0, 50.0cm
マウンド法面勾配		1:2, 1:3, 1:5 (不透過壁で $B_M=20.0$ cmの場合のみ)
被覆石の平均重量	$W$	7.6, 15.1, 29.6gf (重量差 $\pm 20\%$ 以内, $\gamma_r=2.57$ gf/cm <sup>3</sup> )
基礎捨石の平均重量	$W'$	0.4, 1.6, 4.1, 4.9gf (1層被覆で $B_M=20.0$ cmの場合のみ)
ケーソンの天端高	$h_c$	7.2cm
スリット開口率	$\varepsilon$	0.4, $\varepsilon = s / (D + s)$ , 開口幅： $s=2.0$ cm, 部材幅： $D=3.0$ cm
遊水室幅	$B_0$	10.0, 20.0, 30.0cm
有義波周期	$T_{1/3}$	1.84s
有義波高	$H_{1/3}$	3.0~13.7cmの範囲で10種類

被覆石は7種類に色分けし、これを用いてマウンド部を幅10cmの帯状に分割した。被覆石の移動は目視により観測し、他の帯へ移動した場合を被害と定義した。

安定実験は波高条件を順次大きくしていく場合と、同一の波高条件の波群(約130波)を連続して30回作用させる場合の2種類について行った。いずれの場合も1波群を作用させた後の被覆石の並べ直しは行わず、被害数は累積した。被害率 $D$ (%)は式(4)により定義される。

$$D(\%) = (n/N) \times 100 \tag{4}$$

ここで、 $N$ は被覆石の総数、 $n$ はそれぞれの波高条件における累積被害個数である。

またマウンド法面勾配の影響に関する安定実験では、2成分電磁流速計によりマウンド近傍流速を測定した。流速計の測定レンジは0~100および0~200(cm/s)、時定数は0.05sを用い、検出部先端をマウンド表面から2.5cm離れた位置に設置した。

### 4. 移動状況と作用波数の影響

#### 4.1 被覆石の移動状況

図-2はマウンド前肩幅を $B_M=20.0$ cm、マウンド法面勾配を1:2とし、 $W=7.6$ gfの被覆石を2層に被覆したときの有義波高 $H_{1/3}$ (cm)と被害率 $D$ (%)の関係を示している。波高が大きくなるにしたがって被害率が大きくなっ

ている。被害率1%の波高を読みとれば、安定限界波高は $H_{1/3}=8.5\text{cm}$ となる。写真-1は波の作用前と $D=0.80$ および3.58%の移動状況を示している。被害が進行する場所はおもに法肩部分となっている。

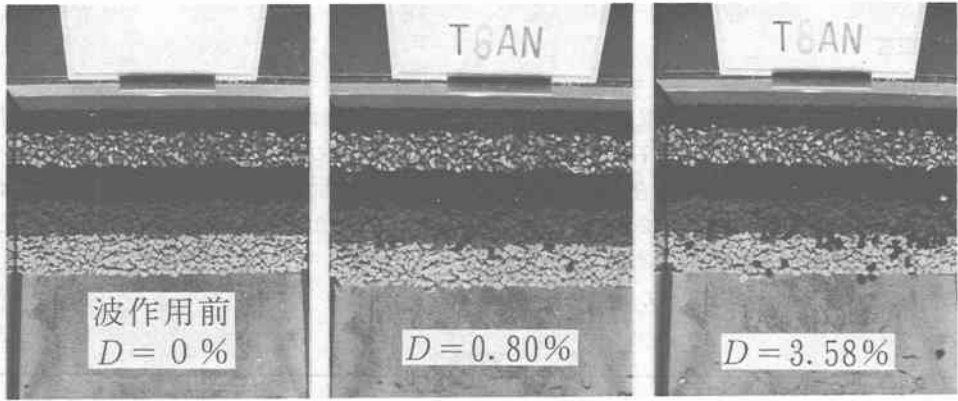


写真-1 被覆石の移動状況

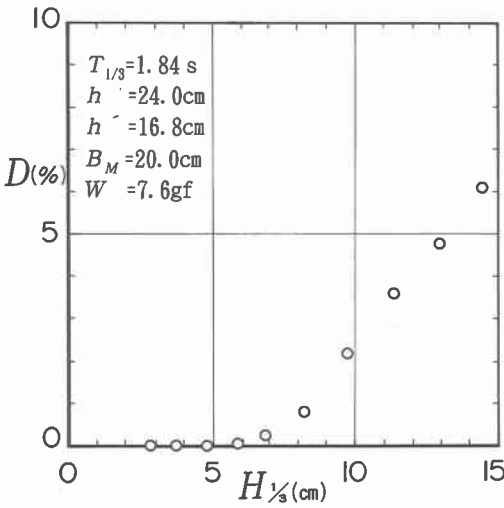


図-2 波高と被害率

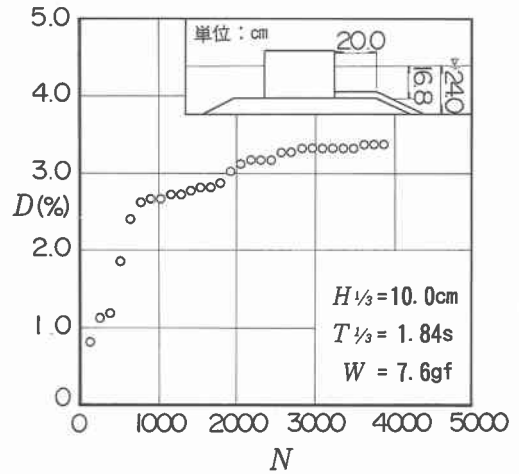


図-3 波数と被害率

図-3は、安定限界を越える有義波高 $H_{1/3}=10.0\text{cm}$ を約130波ごとに30回連続して作用させたときの、被害の進行状況を示している。波数が1000波を越えると被害率の伸びが緩やかになり、3000波以降ではほとんど被害が進行しない。また目視観察によると、法肩を中心に転落した被覆石はおもに法先部分に堆積し、マウンド法面勾配が緩やかになる傾向がある。このように断面形状が変化することにより、当該波浪条件に対して平衡状態を保つようになるため、最終的に被害の進行が止まると考えられる。

#### 4.2 作用波数の影響

図-4は、縦軸を被覆石の重量 $W(\text{gf})$ 、横軸を波数 $N$ とし、被害率 $D(\%)$ の変化を示したものである。被覆石の重量が小さいほど、また波数が大きくなるほど被害率が大きい。図中には被害率1~3%の傾向を実線で示している。また500波による被害率1%に対する被覆石の安定重量を式(1)~(3)を用いて算定し、○印でプロットしている。被害率1%の曲線は、○印と良く一致している。被害率が大きいほど安定重量 $W$ が小さくなることか

ら若干の被害率を許容することで、被覆石の安定重量を小さく抑えられることがわかる。ただし、これらの検討は  $h'/h = 0.70$  の比較的低マウンド条件を対象としたものである。高マウンド条件の場合は、被害が急速に進行するおそれがあるため別途検討が必要である。

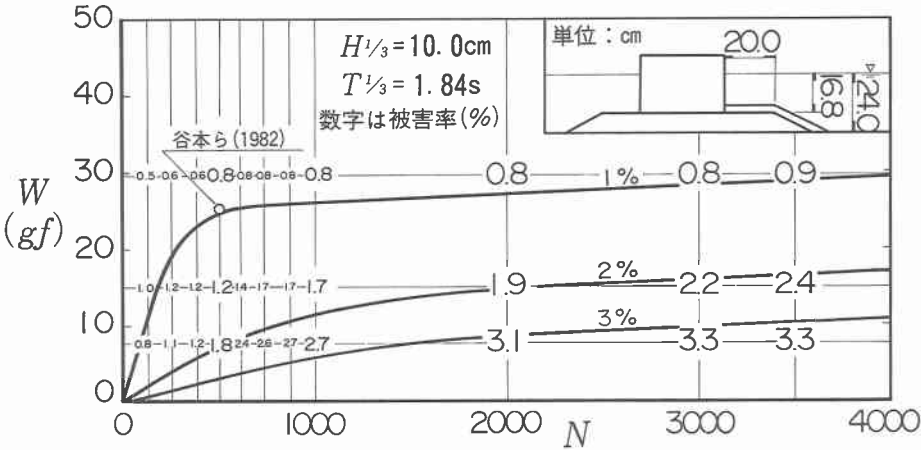


図-4 作用波数および被害率と安定重量

5. 構造条件の影響

5.1 堤体反射率の影響

図-5は、スリット壁および不透過壁の堤体を対象として、安定数  $N_s$  と無次元前肩幅  $B_M/L'$  の関係を示している。●印は不透過壁を示し、スリット壁については遊水室幅  $B_0$  を○印、△印、□印の3種類に変化させている。プロットの横の数字は反射率を示している。

$B_M/L'$  が0.1より大きい領域では、反射率の小さいスリット壁の  $N_s$  が不透過壁に比べて大きくなっている。これは堤体前面における重複波高が小さくなることの効果と考えられる。一方  $B_M/L' = 0.1$  付近では、スリット壁と不透過壁の  $N_s$  の差が小さくなっている。このようにマウンド前肩幅が狭い場合には、法肩部の被覆石にスリット周辺での流れの影響がおよぶため、安定性が悪くなると考えられる。

図中には不透過壁の堤体を対象とした式(2)、(3)による計算値が実線で示されている。実験値が計算値に比べて大きくなっているのは、計算において完全反射を仮定しているためである。

5.2 マウンド法面勾配の影響

図-6はマウンド前肩幅を  $B_M = 20.0$  cmで一定とし、マウンド法面勾配を1:2~1:5に変化させたときの波高と法肩部部分の近傍流速の関係を示している。流速は有義波

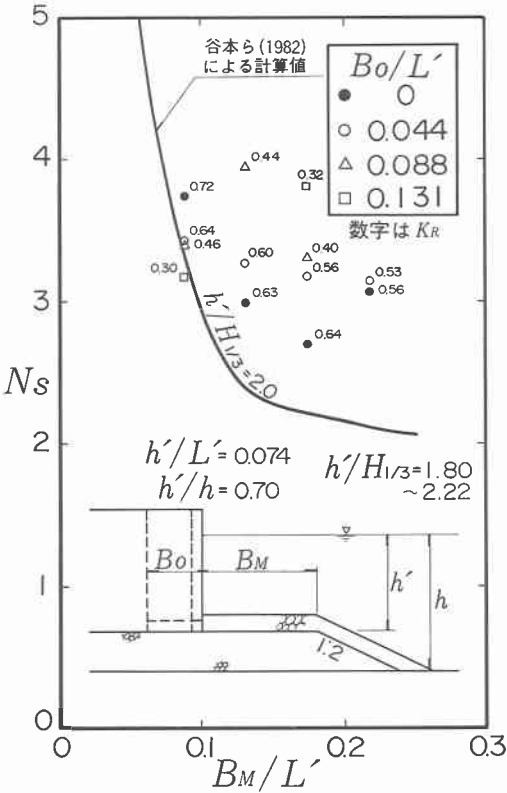


図-5 堤体反射率と安定数

高 $H_{1/3}$ の定義と同様に1/3最大水平流速 $U_{1/3}$ とし、正方向の値を採用した。流速の変化傾向を見るかぎり、法面勾配による違いは特に認められない。

図-7は、 $\tan \theta$ で表したマウンド法面勾配と安定数 $N_s$ の関係を示している。 $\tan \theta$ が小さいほど $N_s$ が大きい傾向がある。これは緩斜面上に被覆された石の方が静的に安定であり、流体力に対する抗力が大きくなるためであると考えられる。

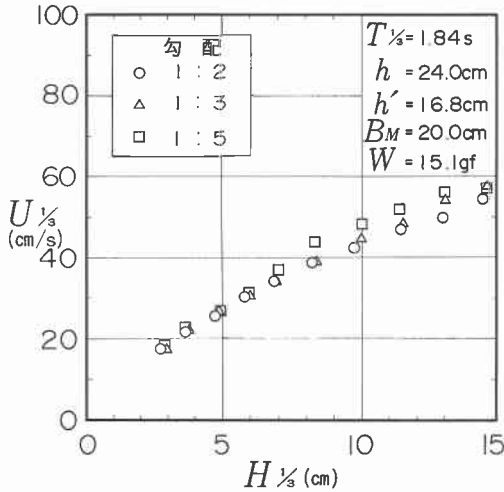


図-6 法面勾配とマウンド近傍流速

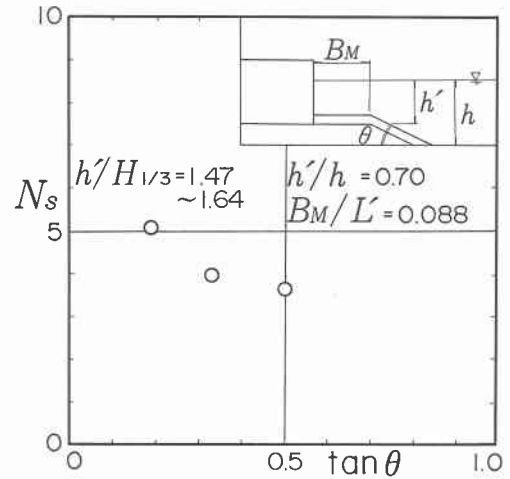


図-7 法面勾配と安定数

### 5.3 被覆層数の影響

図-8は $W=7.6\text{gf}$ の被覆石を用い、被覆層数を変化させた場合の波高と被害率の関係を示している。○印は2層被覆、△印は1層被覆で $W'=0.4\text{gf}$ の基礎捨石を用いた。ただし1層被覆の場合は、式(4)における被覆石総数 $N$ を2層被覆分に換算して被害率を算出している。

被害率1%での波高を比較すると、両者にほとんど差は見られない。しかし波高が大きくなるほど、2層に比べて1層の被害率が大きくなっている。このときの被害の進行状況を観察すると、被覆石が移動したあとの空隙部分からその周辺にかけて徐々に被害が拡大していく様子が見られる。続いて空隙部分の基礎捨石が、局所的な洗掘による吸い出しを受ける。これは安定限界を超える波高に対する被覆石の移動特性が、下層の石の重量に依存することを示している。

図-9は、1層目と2層目の石の重量比 $W/W'$ と $N_s$ の関係を示している。 $W/W'=1.0$ は通常の2層積に相当する。 $W/W'=1\sim 10$ 程度では $N_s$ がほぼ一定となっているが、それ以降 $W/W'$ が大きくなるにしたがって $N_s$ が小さくなる傾向が見られる。青木ら(1994)は、上下層の捨石の粒径比が大きいかほど外力に対して不安定であることを数値計算により示しているが、今回の実験でも同様の結果が得られた。

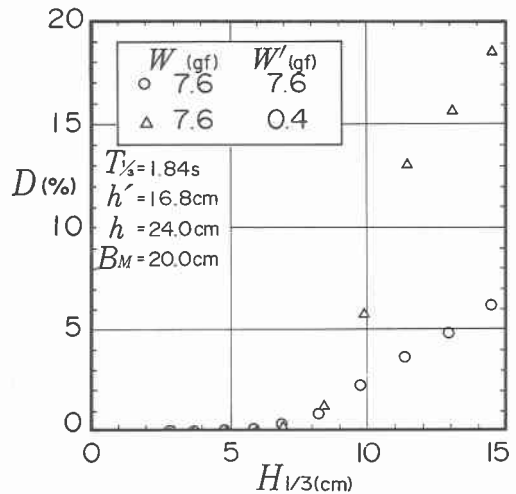


図-8 被覆層数と被害率

## 6. まとめ

本研究の結論をまとめると以下のようになる。

- ①比較的马ウンドが低い条件に対しては、基準となる被害率を大きくとることで、安定重量を小さくすることができる。また、作用波数と安定重量の関係を定量的に明らかにした。
- ②マウンド前肩幅が小さい場合にはスリット壁と不透透壁の  $N_s$  の差が小さくなる。比較的马ウンド前肩幅が大きい場合には、反射率が小さいスリット壁の  $N_s$  が大きい傾向がある。
- ③マウンド法面勾配が緩やかなほど、被覆材の安定性が高くなる傾向がある。
- ④1層被覆を対象として、下層の基礎捨石の平均重量が被覆材の安定性におよぼす影響を明らかにした。

なお実験の実施にあたっては北海道東海大学工学部海洋開発工学科学生 豊吉博樹、本間英敏、溝淵賢一の3氏の協力を、本論文のとりまとめに関しては開発土木研究所水工部水野雄三部長および港湾研究室笹島隆彦室長の指導を得た。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 青木伸一・榎木 亨・伊藤禎和(1994)：振動外力を受ける斜面上の捨石の挙動に関する数値的検討，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集，pp. 826-827.
- 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.
- Brebner, A. and D. Donnelly (1962)：Laboratory study of rubble foundation for vertical breakwater, *Proc. 8th Coastal Engg. Conf.*, New Mexico City, pp. 408-429.
- Hudson, R. Y. (1959)：Laboratory investigation of rubble mound breakwaters, *Proc. ASCE*, Vol. 85, No. WW3, pp. 93-121.

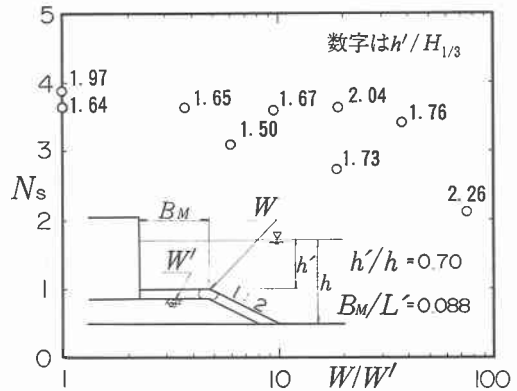


図-9 被覆層数と安定数