

マウンド付き直積ブロック式護岸の水理特性

Hydraulic characteristics on wave absorbing block type seawalls with rubble mound foundation

室蘭工業大学大学院 博士前期課程
室蘭工業大学大学院 教授
(独) 土木研究所寒地土木研究所

○学生員 金谷 実 (Minoru Kanaya)
フェロー 木村克俊 (Katsutoshi Kimura)
正員 上久保勝美 (Katsumi Kamikubo)

1. はじめに

近年、直積ブロックを用いた護岸(以下、直積護岸と呼ぶ)の施工事例が増加している。直積護岸の水理特性については、過去の研究^{1),2)}により明らかにされており、現地における越波低減効果も確認されている³⁾。しかしながら、写真-1のようにブロック下部が大きく削られる被害が報告されている。これは直径数十cmの石が波により移動し、ブロックと接触を繰り返すことによって起こる摩擦が原因である。こうした被害は、直積ブロックを基礎マウンド上に設置することで回避できると考えられる。本研究の目的は、マウンドを設置した護岸の反射特性、越波特性およびマウンド材の安定性について明らかにすることである。

2. 実験の内容

実験は、2次元造波水路(長さ 25.0m, 高さ 1.0m, 幅 0.6m)内に縮尺 1/35 の模型を設置して行った。海底勾配は $i=1/30$ の一様斜面であり、実験水路断面を図-1に示す。以下、模型実験の諸元は現地換算値で表す。護岸前面の水深は $h=1.4\text{m}$ で一定とした。実験はすべて不規則波を用い、実験波数を 150 波とした。周期は $T_{1/3}=13.0\text{s}$ 、換算沖波波高は $H_o'=0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0\text{m}$ の 9 ケースとした。

実験で用いた堤体は、図-2に示す直立護岸、直積護岸、消波ブロック護岸、直積マウンド護岸の 4 種類である。直積マウンド護岸は一段目を不透過構造とし、天端幅 4.2m のマウンドを設置した。マウンド材はすべて砕

石を用い、平均質量が 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4t となる 5 種類を用意した。消波ブロックは 4t 型を用い、天端幅を 4.2m とした。

3. 反射特性

図-3 は周期 $T_{1/3}=13.0\text{s}$ の条件に対して、波形勾配 H_o'/L_o と反射率 K_R の関係を示したものである。比較的波高が小さい条件では、直立護岸と直積護岸の反射率はほぼ等しい。一方これらと比較して消波ブロック護岸と直積マウンド護岸では、反射率が小さくなっている。

消波ブロック護岸は砕波効果が優れており、反射波の低減に繋がっている。直積護岸は遊水部の幅が狭いため反射波の低減に限界があると考えられる。しかし直積護岸とマウンドを組み合わせることで、消波ブロック護岸とほぼ同程度の反射率を実現できることが明らかとなった。



写真-1 直積ブロックの摩耗被害

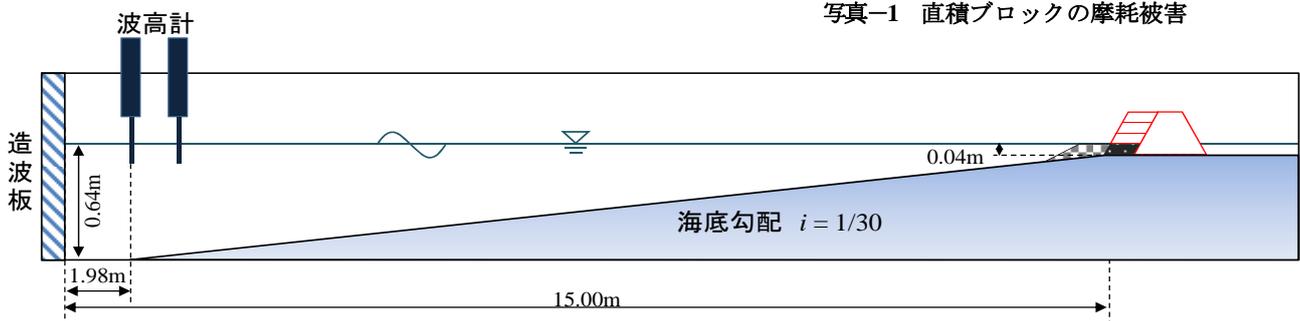


図-1 実験水路断面図

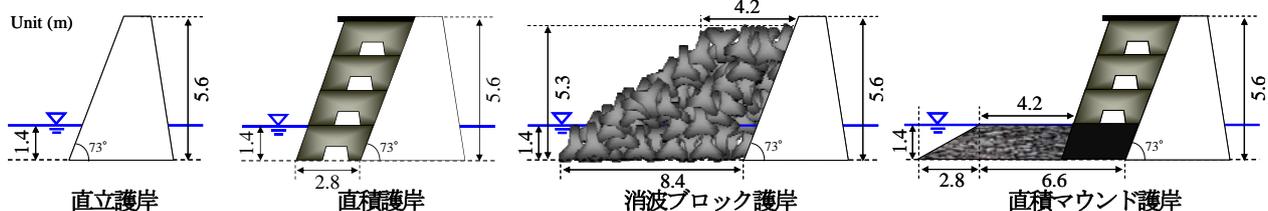


図-2 設置模型断面図

4. 越波特性

(1) 越波流量

図-4 は沖波波高 H_0' と越波流量 q の関係を示している。 $H_0' = 2.0\text{m}$ に着目すると、直立護岸における q は $2.20 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m/s}$ であるのに対し、消波ブロック護岸では $3.76 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m/s}$ 、直積護岸では $3.14 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m/s}$ 、直積マウンド護岸では $6.27 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{m/s}$ である。この傾向はすべての波高条件において当てはまる。

ここで最も波高が大きい条件である $H_0' = 8.0\text{m}$ に着目すると、直積マウンド護岸の越波流量は4つの構造形式の中で最も小さく $q = 2.82 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m/s}$ となっている。護岸背後地に道路を設置する場合には $10^{-4} \text{ m}^3/\text{m/s}$ 程度が許容越波流量の目安となるため、設計波高が大きい海岸に道路を設置するには直積マウンド護岸が推奨される。

(2) 越波飛沫の打ち上げ高さ

越波飛沫の飛散特性を調べるためビデオ撮影を実施し、一波ごとの飛沫の打ち上げ高さを目視により読み取った。写真-2 に各構造形式の越波飛沫の状況を示す。直立護岸の場合は水塊が斜面に沿って陸側へそのまま打ち上げられている。これに対し、直積護岸では波がブロックに当たって砕け、飛沫が沖側へ飛散している。消波ブロック護岸では、ブロックの法面で波が砕ける際に飛沫が打ち上げられている。直積マウンド護岸においては消波効果が高く、飛沫はほとんど打ち上げられていないことがわかる。

ここでは静水面を基準とした越波飛沫の最大到達高さを R_S とし、飛沫高さの 1/10 最大値である $R_{S1/10}$ を求めた。図-5 には各構造形式の $R_{S1/10}$ を示している。直立護岸ではすべての波高条件において $R_{S1/10}$ が最も大きい。これに対し直積護岸および消波ブロック護岸では、 $R_{S1/10}$ は直立護岸のおよそ半分となっている。直積マウンド護岸では $R_{S1/10}$ が最も小さく、 $H_0' = 8.0\text{m}$ においても $R_{S1/10} = 4.7\text{m}$ となっている。

本保・木村ら²⁾が提案した越波飛沫の算定式を 1/10 最大値に適用して、飛沫の初速度 $v_{S1/10}$ と打ち上げ高さ $R_{S1/10}$ を以下のように定義した。

$$v_{S1/10} = k_D \cdot k_b \sqrt{gH_{1/10}} \quad (-0.5 \leq h/H_0' \leq 4.0) \quad \dots\dots(1)$$

$$R_{S1/10} = v_{S1/10}^2 \sin^2 \beta / 2g \quad \dots\dots(2)$$

$$k_D = 5.8 \exp\{-0.2(h/H_0')\} \quad (-0.5 \leq h/H_0' \leq 4.0) \quad \dots\dots(3)$$

$$\beta = 0.545\theta + 40.95 \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 β は打ち出し角度、 θ が法面勾配である。 k_D は水深係数、 k_b は構造係数である。前出の図-5 にはこれらの計算値が点線で示されている。直立護岸では $k_b = 1$ 、直積護岸では $k_b = 0.67$ とすることで実験値と計算値がほぼ一致することが分かる。

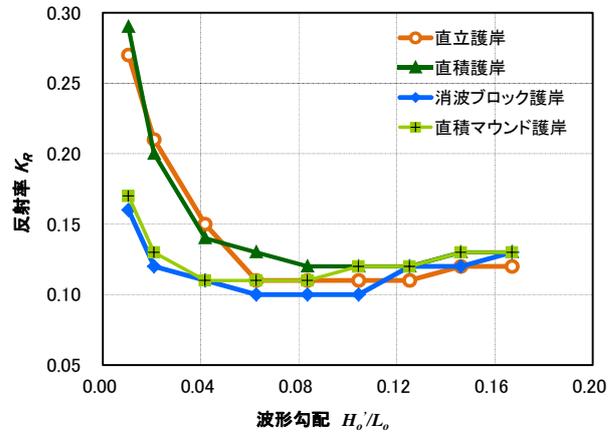


図-3 反射率と波形勾配の関係

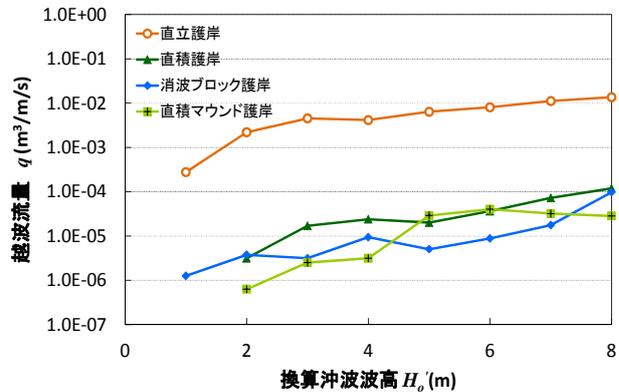


図-4 越波流量

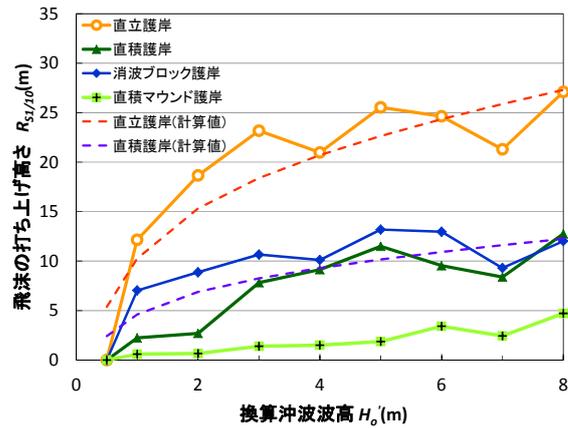


図-5 越波飛沫高さ



直立護岸

直積護岸

消波ブロック護岸

直積マウンド護岸

写真-2 越波飛沫の打ち上げ高さ ($H_0' = 5.0\text{m}$)

5. マウンド材の安定性

(1) 安定実験の方法

直立護岸および直積護岸を対象として、マウンドを設置した場合のマウンド材の安定性を検討した。実験では $H_o' = 0.5 \sim 8.0\text{m}$ の不規則波 150 波を作用させ、マウンド材の移動特性を調べた。波の作用前と作用後の状況を写真撮影し、移動した碎石の個数を計測した。計測はすべて目視で行い、波高レベルを変更する際にはマウンド材の並び替えを行った。被害率 D (%) は、表面から 2 層分の碎石の個数と移動した碎石の個数の比で定義した。写真-3 は平均質量 1.6 t の碎石における波の作用前、被害率 $D = 1\%$ および 3% の状況をそれぞれ表したものである。

(2) マウンド材の必要安定質量

図-6 は直立マウンド護岸と直積マウンド護岸における換算沖波波高 H_o' と被害率 D の関係を示したものである。6.4t の碎石を用いた場合、直立マウンド護岸では $H_o' = 8.0\text{m}$ で被害率 D が 5% に達している。それに対して直積マウンド護岸では $H_o' = 8.0\text{m}$ においても被害は見られなかった。

設計波高が $H_o' = 4.0\text{m}$ の条件に対して、3% のマウンド被害を許容した場合、直立マウンド護岸では 3.2t の碎石が必要となる。これに対し直積マウンド護岸では 1.6t の碎石で済む。同様に設計波高が $H_o' = 6.0\text{m}$ の条件では、直立マウンド護岸では 6.4t、直積マウンド護岸では 3.2t となる。このように直積マウンド護岸のマウンド材の必要安定質量は、直立マウンド護岸の場合の 1/2 程度になることが明らかになった。

(3) 必要安定質量の基本式

マウンド材の必要安定質量 M (t)、以下の式より算定できる。

$$M = \frac{\rho_r H_{1/3}^3}{N_s (S_r - 1)^3} \quad \dots\dots(5)$$

ここに ρ_r (t/m^3) はマウンド材の密度、 S_r はマウンド材の海水に対する比重、 $H_{1/3}$ (m) は有義波高である。 N_s は安定数を表しており、谷本ら⁴⁾により以下の式が示されている。

$$N_s = A \frac{1-\kappa}{\kappa^{1/3}} \frac{h'}{H_{1/3}} + N_{s0} \exp \left[-B \frac{(1-\kappa)^2}{\kappa^{1/3}} \frac{h'}{H_{1/3}} \right] \quad \dots\dots(6)$$

$$\kappa = \kappa_1 (\kappa_2)_0 \quad \dots\dots(7)$$

$$\kappa_1 = \frac{2kh'}{\sinh 2kh'} \quad \dots\dots(8)$$

$$(\kappa_2)_0 = \sin^2 k B_m \quad \dots\dots(9)$$

ここに、 h' はマウンドの天端水深、 L' は h' での設計有義周期に対する波長、 B_m はマウンドの天端幅、 k は波数であり $2\pi/L'$ とする。また N_{s0} は N_s の極小値であり、 A および B は正の未定係数で実験結果に当てはめて決定し、 $N_s > 1.8 = N_{s0}$ となるような $h'/H_{1/3}$ が十分大きい条件

では $A=1.3$, $B=1.5$ となることが示されている。しかしながら本実験のようなマウンド天端水深 h' が小さい条件に対する適用性は確認されていない。そのため係数の補正が必要であり、以下において検討を行う。

(4) 安定数の提案

直立マウンド護岸と直積マウンド護岸に対して、実験より得られた安定質量 M から、式(5)を用いて安定数 N_s を求めた。ここで得られた N_s とマウンド水深波高比 $h'/H_{1/3}$ の関係を図-7 に示している。 $h'/H_{1/3}$ が最少となる条件に着目すると、直立マウンド護岸に対しては $N_{s0} = 0.735$ 、直積マウンド護岸に対しては $N_{s0} = 0.977$ となる。図中の近似曲線を、式(6)の N_s の形式に合わせるためには $A = 5.2$, $B = 6.0$ とする必要がある。これらの値



写真-3 マウンド材の移動状況

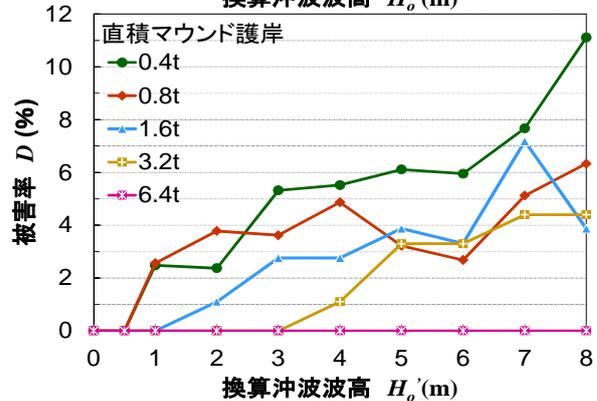
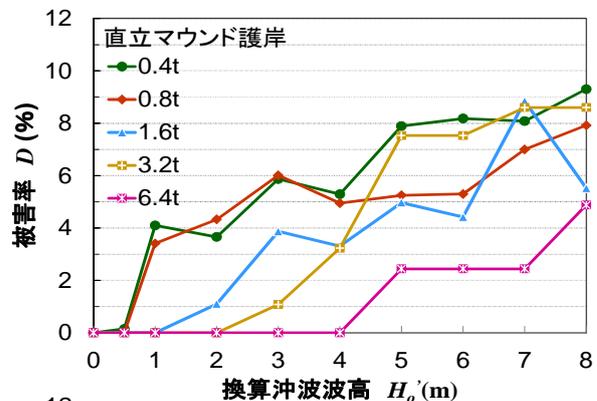


図-6 被害の発生状況

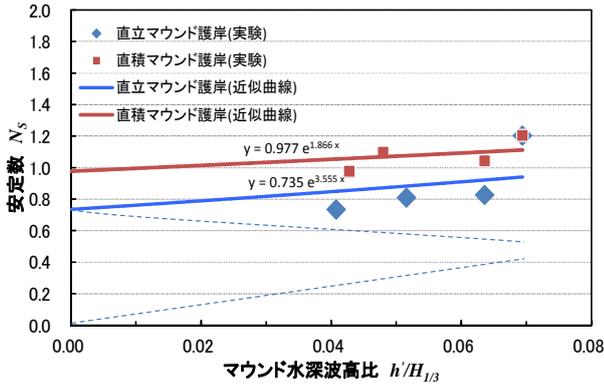


図-7 安定実験より求めた安定数とその近似曲線

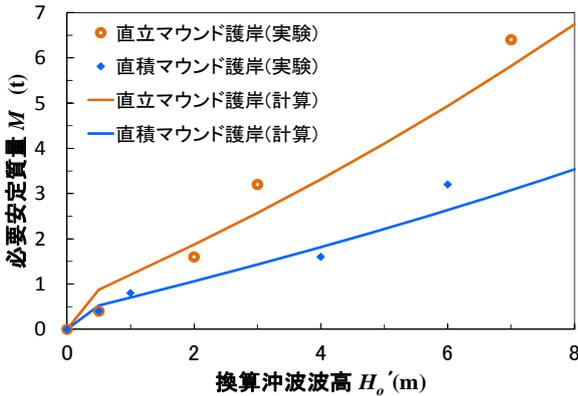


図-8 必要安定質量の実験値と計算値

は谷本らの実験条件における $A = 1.3$, $B = 1.5$ の4倍となった。これより $h/H_{1/3} = 0 \sim 0.1$ の条件に対して、直立マウンド護岸および直積マウンド護岸の安定数 N_s の算定式を以下のように提案する。

$$N_s = 5.2 \frac{1-\kappa}{\kappa^{1/3}} \frac{h'}{H_{1/3}} + 0.735 \exp \left[-6.0 \frac{(1-\kappa)^2}{\kappa^{1/3}} \frac{h'}{H_{1/3}} \right] \quad \dots\dots(10)$$

$$N_s = 5.2 \frac{1-\kappa}{\kappa^{1/3}} \frac{h'}{H_{1/3}} + 0.977 \exp \left[-6.0 \frac{(1-\kappa)^2}{\kappa^{1/3}} \frac{h'}{H_{1/3}} \right] \quad \dots\dots(11)$$

これらの算定式を用いて求めた必要安定質量 M の計算値と実験値を図-8 に示す。両者は概ね一致しており、提案式の妥当性が確認された。

6. まとめ

本研究で得られた結論を要約すると下記の通りである。

- (1) 各構造形式の反射特性を明らかにし、直積護岸の前面に設置されたマウンドによる反射低減効果を示した。
- (2) 各構造形式における越波流量を明らかにした。また飛沫の打ち上げ高さを求め、算定式との比較を行った。
- (3) 直立マウンド護岸と直積マウンド護岸を対象として、実験からマウンド材の必要安定質量を求めるとともに、 $h/H_{1/3} = 0 \sim 0.1$ の条件に対する安定数 N_s の算定法を提案した。

本研究の実施にあたり、株式会社ドーコン防災保全部の名越隆雄氏の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 金谷実・木村克俊・上久保勝美：直積みブロックを用いた道路護岸に関する水理模型実験，土木学会北海道支部論文報告集，第68号，CD-ROM，2012。
- 2) 本保隆之・木村克俊・山内章・西村修一・岡田真依子：直積みブロック式護岸における超波飛沫の打ち上げ特性について，土木学会北海道支部論文報告集，第62号，CD-ROM，2006。
- 3) 武田大樹・山内章・柴田修：一般国道336号(黄金道路)における超波による交通障害の発生状況について，第49回(平成17年度)北海道開発技術研究発表会講演集，安全分野，No.30，2006。
- 4) 谷本勝利・柳生忠彦・村永努・柴田鋼三・合田良実：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.3-42，1982。