

越波による護岸背後の砕石マウンドの変形特性について

Deformation Characteristics of Rubble Mound Beds behind Seawalls Due to Wave Overtopping

室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院 教授
室蘭工業大学大学院

○学生員 橋田 雅也 (Masaya Hashida)
フェロー 木村 克俊 (Katsutoshi Kimura)
学生員 越智 聖志 (Masashi Ochi)

1. まえがき

海岸鉄道においては、高波浪時の越波によって道床の石材が洗掘される事例が少なくない。平野ら¹⁾は、越波水による鉄道線路の道床洗掘被害に対して、防波フェンスを用いた対策を検討している。また、橋田ら²⁾は、護岸の直背後に位置した海岸鉄道において、越波が直接線路に打ち込むことによる道床の洗掘被害を明らかにし、さらに道床部分にナイロン製のネットを被覆した対策を検討している。これらの対策に加え、道床洗掘被害は、石材の粒径を大きくすることによって低減できることが推測される。

本研究では、段波を用いた水流を石材粒径が異なる砕石マウンドに作用させ、その変形特性を明らかにする。さらに、マウンド用石材の安定性を把握するとともに、安定質量の算定法について検討する。

2. 実験方法

平野ら³⁾は、縮尺 1/40 の傾斜護岸における越波による水流を、縮尺 1/4 の段波実験で近似できることを明らかにしている。本実験では、図 - 1 (a) に示す実験水路において、ゲートを急開して発生させた段波を用いて、護岸背後における越波水の状況を再現した。水路端に設けた貯留部の幅は 600mm で一定とし、貯留水深 h を 10, 15, 20, 25, 30 および 35cm の 6 種類に変化させた。予め砕石マウンドを設置しない無堤時において、図中に示す位置での流速 u および水脈厚 η を計測した。

砕石マウンドは、鉄道線路の一般的な断面に基づいて、図 - 1 (b) に示す形状とした。マウンドに使用する石材の質量および粒径を計測し、中央粒径 d_{50} が 1, 3, 4, および 5cm になるように選別した。図 - 2 にこれらの石材の粒径加積曲線を示す。段波による水流を砕石マウンドに作用させた際の変形状況は、水路側面に設置したデジタルビデオカメラを用いて解析した。

3. 流速および水脈厚の経時変化

貯留水深 $h=30\text{cm}$ の条件に対して、無堤時の段波水流の特性を調べた。図 - 3 (a) に段波水流の空間波形を示す。なお、図中の点線は砕石マウンドの位置を示している。ゲート急開時を $t=0.0\text{s}$ とすると、水流は $t=0.7\text{s}$ で法先部に達し、

$t=1.0\text{s}$ でマウンド背面を通過している。図 - 4 に、砕石マウンド法先部での無堤時における流速および水脈厚の時間変化を示す。薄くて速い段波先端部が通過することによって、流速は瞬時に最大となり、時間とともに減少している。一方、水脈厚は、やや遅れて最大となり、その後緩やかに減少していくことがわかる。

図 - 5 に貯留水深 $h=10\sim35\text{cm}$ に対する、最大流速 $u_{\max}$ と最大水脈厚 $\eta_{\max}$ の関係を示す。貯留水深が大きくなるにつれて、 $u_{\max}$ と $\eta_{\max}$ は比例的に増大している。

4. 砕石マウンドの変形特性

貯留水深 $h=30\text{cm}$ の条件に対して、段波の作用による砕石マウンドの変形状況を調べた。中央粒径 $d_{50}=5\text{cm}$ の場合は図 - 3 (b) に示すように、水流は砕石マウンドの法先部で打ち上がり、その後落水して上面を流れているが、石材の移動は生じなかった。 $d_{50}=1\text{cm}$ の場合は図 - 3 (c) に示すように、砕石マウンドは打ち上がった段波に連行され、石材が上部に堆積し、その後の落水によっても天端上で洗掘が生じている。また、マウンド背後においても法肩洗掘が発生し、石材が流出している。

これらの被害状況について、マウンド断面積に対する石

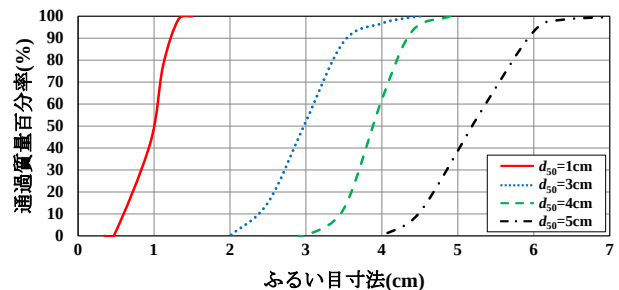
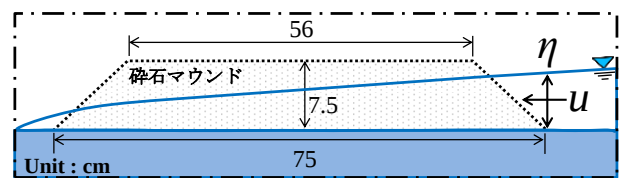
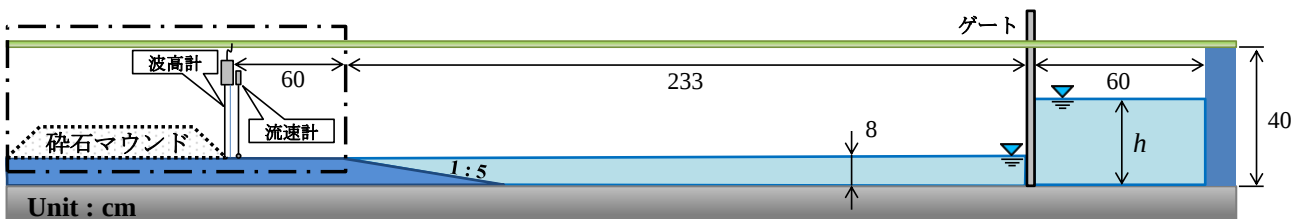


図 - 2 使用石材の粒径加積曲線



(b) 砕石マウンドの形状



(a) 水路全体図

図 - 1 実験水路および砕石マウンドの形状

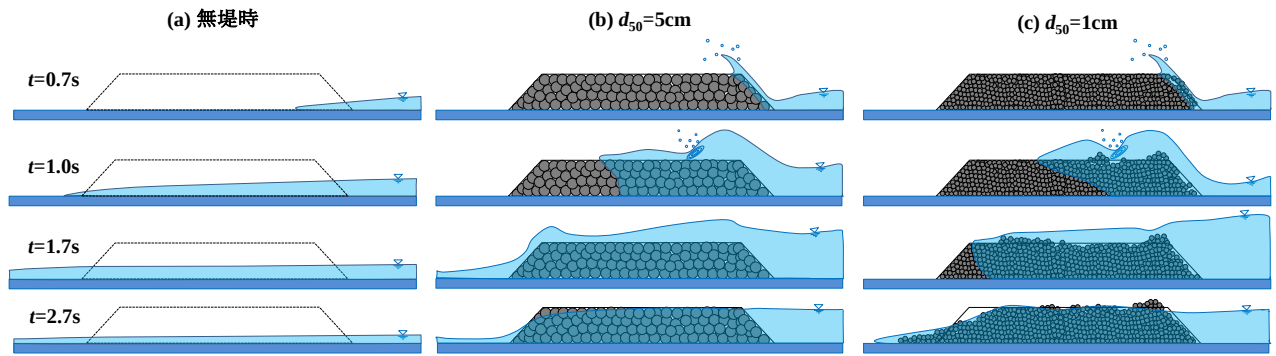


図-3 段波の作用によるマウンドの変形状況($h=30\text{cm}$)

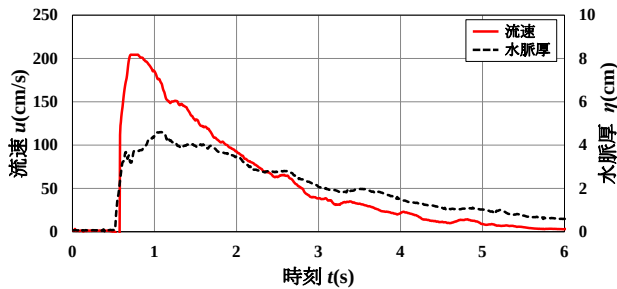


図-4 流速および水脈厚の経時変化($h=30\text{cm}$)

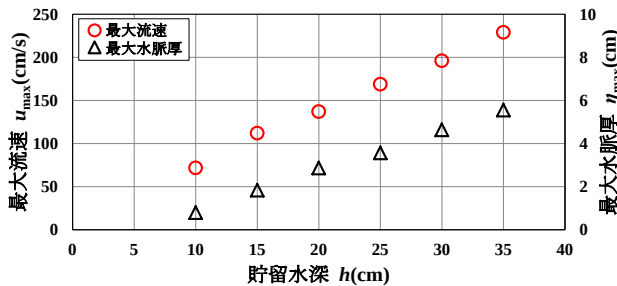


図-5 貯留水深と最大流速の関係

材の流出面積をマウンド被害率 D と定義した。図-6 に最大流速とマウンド被害率の関係を示す。なお、図中に示すように、 $d_{50}=1\text{cm}$ の砕石マウンドに $u_{\max}=196\text{ cm/s}$ の段波が作用する場合には $D=4.5\%$ となる。最大流速が大きくなるとともにマウンド被害率の増大は顕著となっている。また、石材粒径を大きくすることにより、マウンド被害率は減少する傾向があり、 $d_{50}=5\text{cm}$ では被害が発生しなかった。

5. マウンド用石材の安定限界質量

$D=0\%$ に着目して各石材に対する安定限界最大流速を求めた。図-7 に最大流速 $u_{\max}$ とマウンド用石材の安定限界質量 M の関係を示す。実線は、以下に示す CERC⁴⁾ の式による計算値を表している。

$$M = \frac{\pi \rho_r u_{\max}^6}{48 y^6 g^3 (\rho_r / \rho_o - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \quad (1)$$

ここで、 M は石材の安定限界質量、 $u_{\max}$ は最大流速、 y は石材の安定状況を示す定数（イスパッシュ数）、 ρ_r は石材の密度、 ρ_o は流体の密度、 θ はマウンド傾斜角である。

イスパッシュ数 y は埋め込み石で 1.20、露出石で 0.86 が一般的であるが、ここでは $y=4.20$ としている。これは、CERC の式は、水深が深い場所で適用されるのに対し、本実験では薄い水流がマウンドに作用しており、石材がより動きにくい条件となっているためと考えられる。しかしな

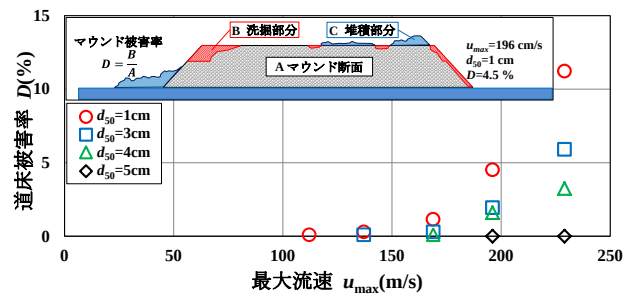


図-6 最大流速とマウンド被害率の関係

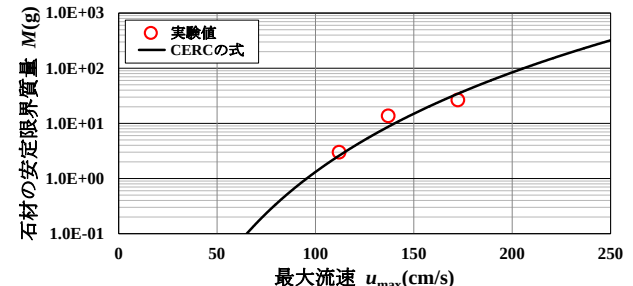


図-7 マウンド用石材の安定限界質量

がら、実験値においてもマウンド用石材の安定限界質量は、流速の 6 乗に比例しており、CERC の式を用いることによって定性的に評価できることが明らかとなった。

6. まとめ

本研究で得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 段波を用いた越波水流が石材粒径の異なる砕石マウンドに作用した際の変形特性を示した。
- 2) 最大流速に対するマウンド用石材の安定限界質量は、流速の 6 乗に比例し、CERC の式でイスパッシュ数 $y=4.20$ とすることで評価できることを明らかにした。

参考文献

- 1) 平野夕焼, 木村克俊, 越智聖志ほか: 海岸鉄道の高波による運行障害事例とその対策に関する検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.69, No.2, pp.688-693, 2013.
- 2) 橋田雅也, 木村克俊, 越智聖志ほか: 越波水の打ち込みによる海岸鉄道の道床被害とその対策の検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.71, No.2, pp.688-693, 2015.
- 3) 平野夕焼, 木村克俊, 清水敏明, 袖野宏樹: 越波に連行された流木が海岸鉄道に及ぼす影響に関する検討, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 69 号, B-50, 2012.
- 4) Coastal Engineering Research Center: Shore Protection Manual, Vol. II, 1997, pp.7~215.