

越流・浸透流を考慮した捨石マウンドの安定重量の計算

九州大学工学部 学生会員 ○ 井上 翔太 九州大学大学院工学研究院 正会員 笠間 清伸
正会員 平澤 充成 正会員 善 功企 正会員 古川 全太郎 正会員 八尋 裕一

1. 背景および目的

平成 23 年東北地方太平洋沖地震による津波により、東北地方各地の防波堤が被災し甚大な被害が生じた。津波による防波堤の被災要因は大きく分けて 3 つあり、越流による捨石マウンドの洗掘、防波堤の背面と前面の水位差と津波波力によるケーソンへの水平力、捨石マウンド内に発生する浸透流による支持力低下が挙げられる。本文では、防波堤の越流ならびに捨石マウンド内に発生する浸透流を考慮して、捨石の安定重量を算出し、その特徴について述べる。

2. 捨石マウンドの安定重量の計算式

港内側の捨石の安定条件について Hudson 式の誘導を参考にしながら再検討する。捨石 1 個に働く波力 F_w と捨石の自重による抵抗力 F_b との関係を図-1、2 に示す。捨石の代表長は、波長に比べて小さいので、越流により防波堤斜面方向に作用する波力 F_w は次式で表すことができる。

$$F_w = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} C_D A u |u| + \frac{\gamma}{g} C_M V \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

上式の右辺第 1 項は、抗力、第 2 項は慣性力である。また、 C_D : 抗力係数、 C_M : 慣性力係数、 u : 捨石周辺の流速[m/s]、 $\partial u / \partial t$: 捨石周辺の流体の加速度[m/s²]、 A : 流速 u に垂直な面への捨石の投影面積[m²]、 V : 捨石の体積[m³]、 g : 重力加速度[m/s²]、 γ_w : 流体の単位体積重量[kN/m³]である。

一方、1つの捨石が受ける上向きの浸透力は、

$$F_L = \gamma_s V (1+e) i$$

で表されるため、捨石の抵抗力 F_b は次式で与えられる。

$$F_b = f_r \{ W' \cos \theta - \gamma_s V (1+e) i \} - W' \sin \theta \quad (2)$$

ここに、 f_r : 捨石間のかみ合わせおよび摩擦係数、 W' : 捨石の水中重量[kN]、 γ_s : 捨石の単位体積重量[kN/m³]、 e : 捨石の間隙比である。式(2)右辺第 1 項は、捨石の水中自重によるかみ合わせと摩擦力、第 2 項は水中自重の斜面方向成分である。

捨石の安定限界は、波力 F_w と抵抗力 F_b がバランスした瞬間で与えられるので、 $F_w = F_b$ として式(1)と式(2)を代入すると式(3)を得る。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} C_D A u |u| + \frac{\gamma}{g} C_M V \frac{\partial u}{\partial t} \\ & = f_r \{ W' \cos \theta - \gamma_s V (1+e) i \} - W' \sin \theta \end{aligned} \quad (3)$$

さらに、 $W' = \gamma_w V (G_s - 1)$ 、 $G_s = \gamma_s / \gamma_w$ を用いて捨石の形状特性、即ち、捨石 1 個の体積 V 、投影面積 A についてまとめると式(4)を得る。

$$\frac{V}{A} = \frac{\frac{1}{2} C_D u |u|}{\left\{ f_r \left(\cos \theta - \frac{1+e}{G_s - 1} i \right) - \sin \theta \right\} (G_s - 1) g - C_M \frac{\partial u}{\partial t}} \quad (4)$$

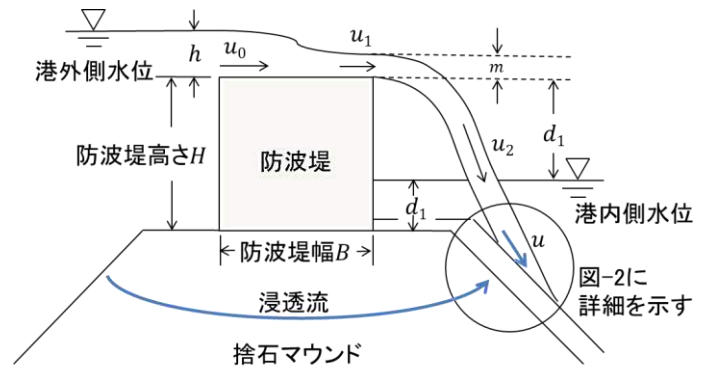


図-1 津波作用時の防波堤まわりの越流・浸透流

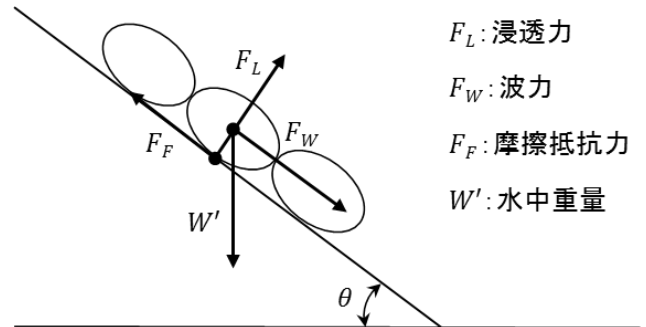


図-2 捨石マウンドに作用する外力の模式図

ここで、体積 V 、投影面積 A を式(5)のように表す。

$$V = k_v q^3 \quad A = k_a q^2 \quad (5)$$

k_v 、 k_a はそれぞれ捨石の形状より決まる体積係数、面積係数である。また、 q は捨石の代表長さを表し、捨石の自重 W を用いて式(6)のように表される。

$$W = \gamma_s V = \gamma_s k_v q^3 \quad \therefore q = \left(\frac{W}{\gamma_s k_v} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

よって、式(4)は式(6)より、式(7)のように変形できる。

$$\begin{aligned} \frac{V}{A} &= \frac{k_v q^3}{k_a q^2} = \frac{k_v}{k_a} \left(\frac{W}{\gamma_s k_v} \right)^{\frac{1}{3}} \\ &= \frac{\frac{1}{2} C_D u |u|}{\left\{ f_r \left(\cos \theta - \frac{1+e}{G_s - 1} i \right) - \sin \theta \right\} (G_s - 1) g - C_M \frac{\partial u}{\partial t}} \end{aligned} \quad (7)$$

さらに、両辺を3乗し、捨石の自重 W について解くと式(8)を得る。

$$W = \frac{k_a^3 \gamma_s C_D^3 (u \cdot |u|)^3}{8k_v^2 \left[\left\{ f_r (\cos \theta - \frac{1+e}{G_s-1} i) - \sin \theta \right\} (G_s - 1) g - C_M \frac{\partial u}{\partial t} \right]^3} \quad (8)$$

津波越流時は、定常状態であるとし、慣性力は無視すると、式(8)は次のようになる。

$$W = \frac{k_a^3 \gamma_s C_D u^6}{8k_v^2 g^3 \left[\left\{ f_r (\cos \theta - \frac{1+e}{G_s-1} i) - \sin \theta \right\} (G_{Sr} - 1) \right]^3} \quad (9)$$

マウンド突入時の流速 u の算出方法については、文献²⁾を参考にされたい。

入力定数は、表-1に示す通りとした。捨石を球と仮定した場合は、式(5)、(6)より計算し、 $k_v = \pi/6$ 、 $k_a = \pi$ とした。楕円体と仮定した場合は、長軸と短軸の比を5:8として計算して $k_v = 0.21$ 、 $k_a = 1.57$ とした。

また、イスバッシュ式については、次式を用いた。

$$W = \frac{\pi \gamma_s u^6}{48g^3 (y_d)^6 (G_s - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \quad (10)$$

ここで、イスバッシュ定数 $y_d = 1.2$ とした。

3. 考察

図-3は釜石港湾口防波堤の被災前の条件における動水勾配と安定重量の関係を、本文で提案した式(9)と従来のイスバッシュ式で算出したものを示す。この図より、今回提案した式は、動水勾配の影響を大きく受け、逆に、従来の安定重量算出の式であるイスバッシュ式は動水勾配に依存しないことがわかる。このことは、提案式が浸透力の効果を考慮した、より精度の高い安定重量を算出していると考えられる。

図-4に、図-3と同じ材料定数のもとで、越流水深を変化させて安定重量を算出したグラフを示す。被災時の釜石港湾口防波堤の捨石の重量は約3000～7900[kN/個]であったことから、越流水深が3.8～5.2mの際に安定限界となり、被災したということがわかる。同じ条件でイスバッシュ式を用いると、3.8～5.5mの際に被災しているとわかることから、マウンドの安定性を過大に評価していることがわかる。これは、図-3でみたように、浸透流の効果によるものである。

以上より、今回、本文で提案した捨石の安定重量算出式は、越流・浸透流を考慮することにより、従来用いられてきた式よりも、精度の高い結果を求めることができ、実際の防波堤の設計や改良の際に用いることができると考えられる。

表-1 計算に用いた条件

名称	抗力係数	単位体積重量	摩擦係数	マウンド勾配
記号	C_D	γ_s	f_r	θ
単位	—	kN/m ³	—	rad
設定値	0.1	22.54	0.7002	0.4637

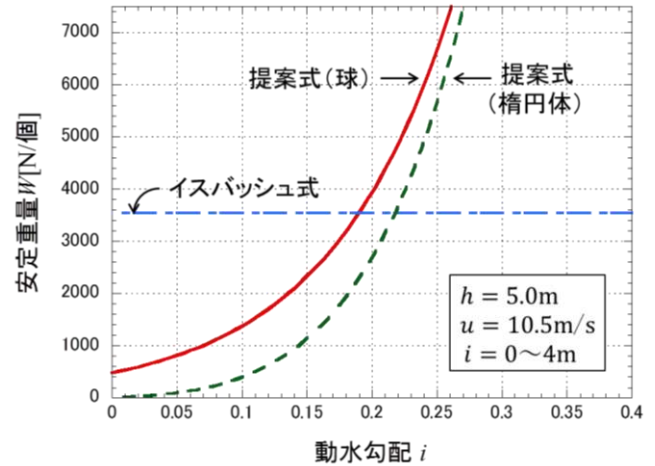


図-3 動水勾配の変化に伴う安定重量の変化

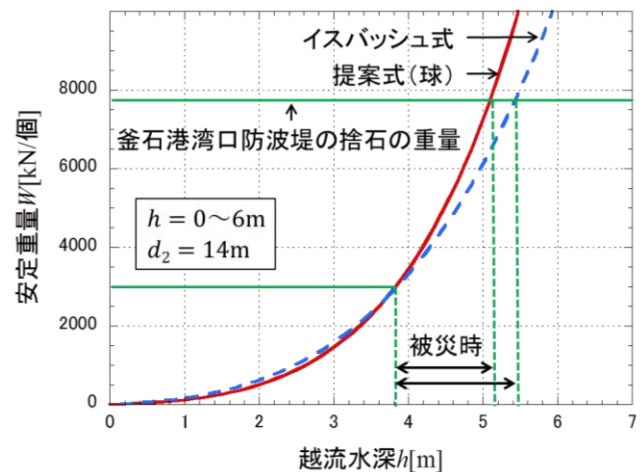


図-4 釜石港湾口防波堤における越流水深と安定重量の関係

謝辞：本研究は科学研究費補助金基盤研究(B)：研究課題 25289149「浚渫土防災ブロックを活用した新形式津波防波堤の開発研究」(研究代表者：笠間清伸)の成果の一部である。

〈参考文献〉

- 1) 財団法人 電力中央研究所：消波ブロックに作用する波力に関する実験スケール効果，1989
- 2) 仙台港湾空港技術調査事務所 寺崎賢次，三上洋史：八戸港防波堤の津波越流による港内側マウンドの洗掘と対策