

防波堤被覆ブロックの最適な形状に関する一考察

九州大学大学院 学生会員 ○ 井上 翔太 九州大学大学院 正会員 笠間 清伸
九州大学大学院 正会員 平澤 充成 九州大学大学院 正会員 善 功企
九州大学大学院 正会員 古川 全太郎 九州大学大学院 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ことから、津波越流時における防波堤の安定性に関する研究が必要とされている。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。なかでも浸透流による港内側マウンドの洗掘については研究がなされてこなかった。そこで著者らは本研究の先行研究において、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、港内側マウンドを形成する捨石の安定重量を算出する式(1)を提案した¹⁾。安定重量とは、津波を受ける物体が安定であるために必要な最低の重量であり、これが小さい物体ほど、耐津波性能が高く、経済的であるといえる。

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

ここで、 W : 安定重量 [kg/個], k_v : 体積係数, k_a : 面積係数, γ_s : 単位体積重量 [kg/m³], C_D : 抗力係数, f_r : 摩擦係数, θ : マウンド角度 [rad], G_s : コンクリートの比重, e : 間隙比, i : 動水勾配である。

港内側マウンドの洗掘を防止するためには、浸透流を逃がしつつ、越流に耐えうる被覆ブロックを港内側に設置することが有効だと考えられる。そこで本文では、図-1のような内孔をもつ立方体形状の被覆ブロックを提案し、式(1)を用いて最適な形状を検討する。

2. 体積係数・面積係数の計算

被覆ブロックの体積 V ・投影面積 A は体積係数 k_v ・面積係数 k_a を用いて、それぞれ次のように表される。

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

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

ここで、 q は被覆ブロックの代表長さである。

図-1に表されるような被覆ブロックに対して、代表長さを L とし、それぞれ計算を行う。

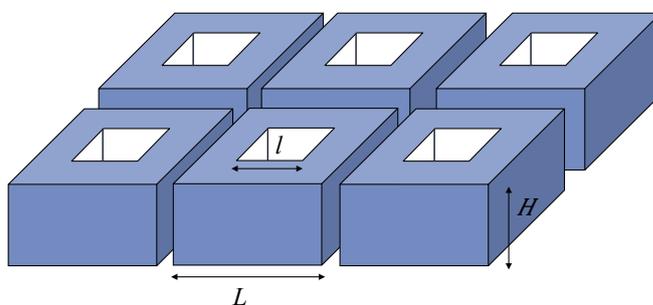


図-1 被覆ブロックの概略図

式(2)より

$$k_v = \frac{H}{L} \left(1 - \left(\frac{l}{L} \right)^2 \right) \quad (4)$$

式(3)より

$$k_a = 1 - \left(\frac{l}{L} \right)^2 \quad (5)$$

ここで、提案式を参考にすると体積係数・面積係数がその他のパラメータに影響を及ぼさないと仮定すると、式(4)、(5)より次式を得る。

$$W \propto \frac{k_a^3}{k_v^2} = \left(\frac{H}{L} \right)^2 \left(1 - \left(\frac{l}{L} \right)^2 \right) \quad (6)$$

これより、安定重量を小さくするためには、基本的に被覆ブロックの高さ H を小さく、内孔の辺の長さ l を大きくするのが有効であるといえる。

3. 最適な形状の推定

図-1の被覆ブロックに対して、 L を一定とし、間隙比を計算する。隣り合う被覆ブロックの間に空隙がないと仮定すると、間隙比はブロックの体積と穴の体積の比で表されるため、次のようになる。

$$e = \frac{HL^2}{HL^2 - Hl^2} = \frac{\left(\frac{l}{L}\right)^2}{1 - \left(\frac{l}{L}\right)^2}$$

これを用いて、安定重量を求める式(1)は次式で表される。

$$W = \frac{\gamma_s C_D u^6}{8 \left[g f_r \left\{ (G_s - 1) - \frac{i}{1 - (l/L)^2} \right\} \right]^3} \left(\frac{H}{L} \right)^2 \left\{ 1 - \left(\frac{l}{L} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

ここで、直方体であるこの被覆ブロックにおいては、積み上げた際に傾斜が $\theta=0^\circ$ とみなすことができるとした。

被覆ブロックの代表長さ L が定数であるとし、 H と l についてそれぞれ偏微分する。 H について

$$\frac{\partial W}{\partial H} = \frac{\gamma_s C_D u^6}{4 \left[g f_r \left\{ (G_s - 1) - \frac{i}{1 - (l/L)^2} \right\} \right]^3} \frac{H}{L^2} \left\{ 1 - \left(\frac{l}{L} \right)^2 \right\} \quad (8)$$

式(8)は常に正であるので、ある一定の被覆ブロックの代表長さ L と内孔の辺の長さ l の条件のもとでは、被覆ブロックの高さ H が増加するにつれて定重量 W は常に増加するといえる。

$$\frac{\partial W}{\partial l} = \frac{\gamma_s C_D u^6 H^2 l}{4 L^3 g^3 f_r^3 \left\{ (G_s - 1) + \frac{i}{(l/L)^2 - 1} \right\}^3} \left[1 + \frac{3i}{\left\{ (l/L)^2 - 1 \right\}^3 \left\{ (G_s - 1) + \frac{i}{(l/L)^2 - 1} \right\}^3} \right] \quad (9)$$

式(2)が0となるときの、 W の極値を与える内孔の辺の長さ l を計算すると、次の解 l_0 が求められる。

$$l_0 = \sqrt{1 - 3 \sqrt{\frac{4i}{G_s - 1}}} L \quad (10)$$

式(10)を満たすような内孔の辺の長さ l と代表長さ L の比を持つ被覆ブロックは安定重量の極値を与えるが、最小値であるとは限らない。そこで、 $l=0$ 、 l_0 としたときの安定重量 W の比をとり、 $l=l_0$ としたときが最小であることを確認する。

$$\frac{W_{l=0}}{W_{l=l_0}} = \frac{\left\{ \frac{3}{4} (G_s - 1) \right\}^3}{\left\{ (G_s - 1) - i \right\}^3 \cdot \frac{4i}{G_s - 1}} \quad (11)$$

コンクリートの一般的な比重 G_s は2.3であることを用いて、式(11)を動水勾配 i の関数として図-2に表現する。

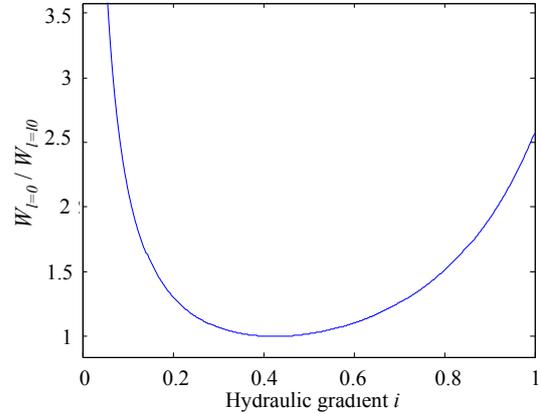


図-2 $l=0$ 、 l_0 とした安定重量 W の比

図-2より明らかなように、動水勾配を変化させても比が1を下回ることがない。これは、常に極値である $l=l_0$ における W の方が $l=0$ におけるそれよりも小さいことを意味し、 W は l に関する極値が一つの連続関数であるため、これは最小値である。したがって、 W を l の関数であると見た場合、 $l=l_0$ が最小の安定重量を与える解であるといえる。

4. 結論

本文では、防波堤の耐津波性能を向上させるための新型被覆ブロックの最適な形状を決定する手法を理論的に提案した。これまでに提案した安定重量を算出する式(1)をもとに、必要な安定重量を最小にするような被覆ブロックの外辺の長さ L と内孔の長さ l の比を与える式(10)を導いた。また、式(7)から明らかなように、他の変数を一定とすれば W は被覆ブロックの高さ H の2乗に比例する。これらより、理論上は、式(10)の比を満たすような l を保ちつつ、 H が小さくなるように被覆ブロックを設計することで、安定重量を小さくすることができる結論づけられる。

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。また、本研究は、一般財団法人港湾空港総合技術センターの研究開発助成を受けた。記して、関係者各位には深甚の謝意を表したい。
(参考文献)

1) 井上翔太・笠間清伸・平澤充成・善功企・古川全太郎・八尋裕一. 越流・浸透を考慮した捨石マウンドの安定重量に関する水理模型実験, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) Vol.71(2015)No.2p.1, 2015.