

越流・浸透流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

九州大学 学生会員 ○井上 翔太 正会員 笠間 清伸
平澤 光成 善 功企 古川 全太郎 八尋 裕一

1. 背景と目的

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、1)越流による捨石マウンドの洗掘、2)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、3)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。しかし、既存の安定重量算出式であるハドソン式やイスバッシュ式等では、これらの要因が複合的にとらえられていない¹⁾。そこで本研究では、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することを目的とし、その妥当性を水理模型実験により検証した。

2. 内容

2.1 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、津波の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。

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

ここに、 C_D : 抗力係数、 C_M : 慣性力係数、 $\partial u/\partial t$: 捨石周辺の流体の加速度[m/s²]、 A : 流速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。上式の右边第 1, 2 項はそれぞれ、抗力、慣性力である。一方、1つの捨石が受ける上向きの浸透力は、

$$F_L = \gamma_w V (1+e) i \quad (2)$$

で表されるため、抵抗力 F_b は次式で与えられる。

$$F_b = f_r \{W' \cos \theta - \gamma_w V (1+e) i\} - W' \sin \theta \quad (3)$$

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]、 e : 捨石の間隙比である。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(3)を代入する。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 $V = k_v q^3$ 、投影面積 $A = k_a q^2$ を用いて捨石の自重 W について解くと式(4)を得る。 k_v 、 k_a はそれぞれ捨石の形状より決まる体積係数、面積係数であり、 q は捨石の代表長、 γ_s : 捨石の単位体積重量[kN/m³]を表す。

$$W = \frac{k_a^3 \gamma_s C_D u^6}{8k_v^2 g^3 \left[\left\{ f_r \left(\cos \theta - \frac{1+e}{G_s - 1} i \right) - \sin \theta \right\} (G_s - 1) \right]^3} \quad (4)$$

ここで、津波越流時は、樫木ら²⁾の仮定にもとづいて定常状態であるとし、慣性力は無視した。

この式(4)を本研究における提案式とし、実際に計算を行った。入力定数は、釜石港湾口防波堤の被災前の条件で、抗力係数 C_D 、捨石の単体積重 γ_s 、摩擦係数 f_r 、マウンド勾配 θ をそれぞれ 0.1, 22.54, 0.7002, 0.4637[rad]と

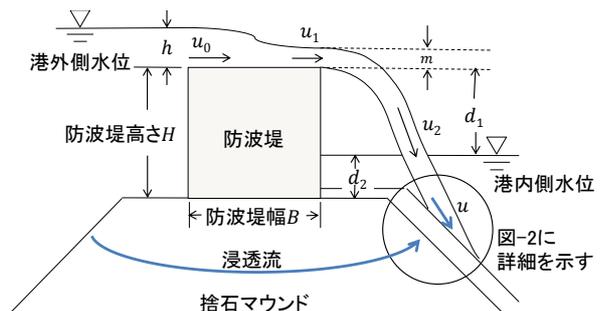


図-1 津波作用時の防波堤まわりの越流・浸透流

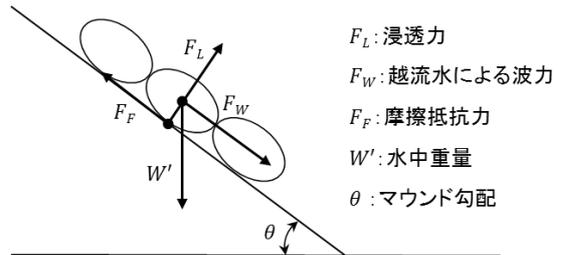


図-2 捨石マウンドに作用する外力の模式図

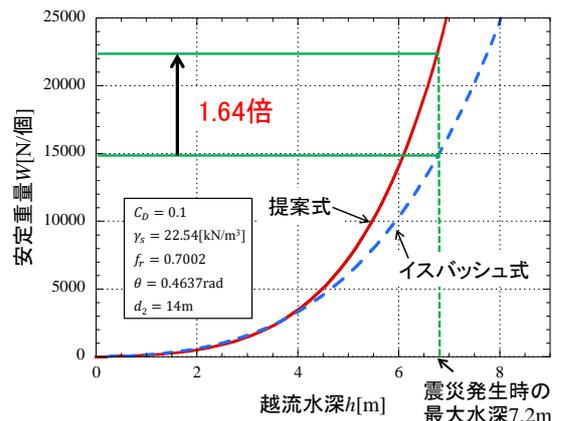


図-3 釜石港湾口防波堤における越流水深と安定重量の関係

キーワード 防波堤, 越流, 浸透, 捨石, 安定重量, 釜石港湾口防波堤

連絡先 〒819-0385 福岡市西区元岡 744 ウェスト 2 号館 1110 号室 TEL 092-802-2999

し、図-3 を作成した。捨石を球と仮定した場合は、 $k_v = \pi/6$, $k_a = \pi$ とした。楕円体の場合は、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。図-3 に越流水深を変化させて算出した安定重量を示す。震災時の釜石港防波堤における最大の越流水深は 7.2m であったことから、提案式とイスバッシュ式の安定重量では最大約 7000N/個の差があることから、イスバッシュ式は大水深時にマウンドの安定性を過大に評価しているといえる。

2.2 釜石港湾口防波堤を対象とした水理模型実験

図-5 に実験装置の概略と計測器の配置図を示す。釜石湾口防波堤南堤をモデルとし、縮尺は 1/100 とした。捨石マウンドは、粒径 2mm~4.75mm, 重量 0.002~0.005[N/個] (Case1) と粒径 2mm~19mm, 重量 0.004~0.027[N/個] (Case2)の碎石を用いた。津波を模擬するために、循環流により防波堤の前後に 0, 40, 80, 145, 185mm の水位差を発生させた。Case1 では、水位差が 145mm の時点で浸透破壊 (ポップアウト) が発生した。越流が発生していないため、式 (4) を用いることはできなかった。Case2 では、水位差が 185mm の時点で越流と浸透流による破壊が発生した。Case2 の結果に対して式 (4) を用いたものが図-5 である。捨石の平均重量 0.024[N/個] と式 (4) から、破壊が始まるのは越流水深が 1.3cm のときであると計算されるが、実際に防波堤が崩壊したのは越流水深が 3.5cm のときであった。これは、越流水深が 1.3cm を超えてから破壊が進行し、3.5cm で限界を迎えたためであると考えられる。また、Case1, 2 それぞれの破壊時の安全率を示したものが図-6 である。Case1 では、安全率が最も低くなっている部分とポップアウトが発生した位置が同じであることが確認された。Case2 では、港内側マウンド表面で全体的に安全率の低下が確認されたが、一部では低下していない。これは、この部分でポップアウトが先行して発生し、式 (4) では表現できないためである。

3. 結論

- 1) 越流・浸透流を考慮した安定重量の算出式を提案した。
- 2) 既存の式では浸透流を考慮できていないことから、捨石の安定性を過大に評価する可能性があることを示した。たとえば、越流水深 7.2m のときの釜石港湾口防波堤では提案式で求めた安定重量はイスバッシュ式と比べて 1.64 倍になっていた。
- 3) 釜石湾口防波堤南堤をモデルとする水理模型実験を行い、その安定性を提案式を用いて評価した。その結果、粒径が 2mm~4.75mm である Case1 では浸透流のみで崩壊し、粒径が 2mm~19mm である Case2 では越流水深 3.5cm (実スケールでは 3.5m) で崩壊していることがわかった。提案式が安定重量を過小評価した要因としては、破壊点における動水勾配を算出することが難しいことや、一つの捨石が動いても直ちに崩壊とはならないことなどが考えられ、これらを考慮していくことを今後の課題としたい。

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) 榎木 亨・柳 青魯・大西 明德：捨石防波堤斜面上の共振現象による破壊機構, 1982.

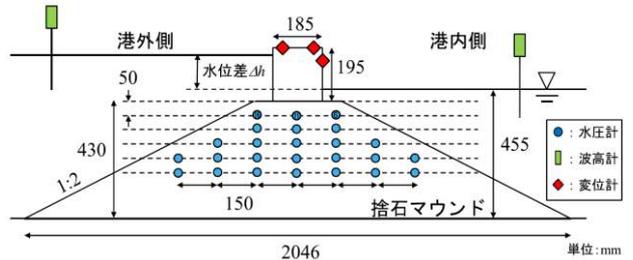


図-4 実験装置の概要と計測器の配置図

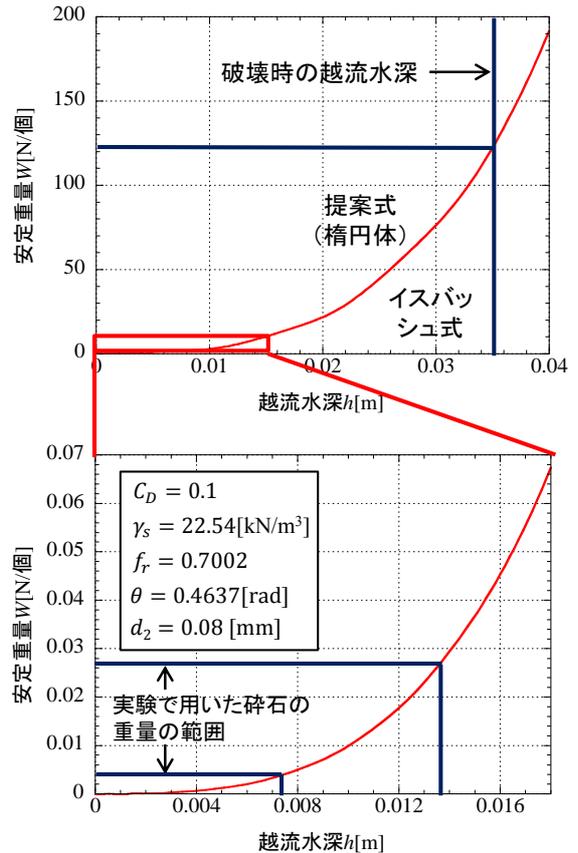


図-5 実験結果

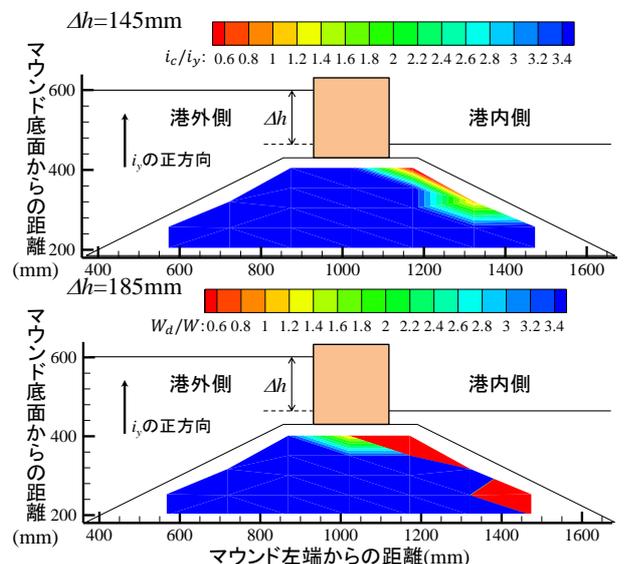


図-6 Case1(上)とCase2(下)の破壊時における安全率