

イスバッシュ式の導出過程について

株式会社不動テトラ 正会員 三井 順
 株式会社不動テトラ 正会員 ○松本 朗
 株式会社不動テトラ 正会員 半沢 稔

1. はじめに

防波堤の耐津波設計においては、津波の越流に対してマウンド被覆材の安定性を確保することが重要である。津波の越流に対する被覆材の所要質量の算定方法として、以下に示すCERC(1977)¹⁾のいわゆるイスバッシュ式が防波堤の耐津波設計ガイドライン²⁾に記載されている。

$$M = \frac{\pi \rho_r U^6}{48 g^3 y^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \quad (1)$$

ここに、 M : 石の質量、 ρ_r : 石の密度、 U : 流速、 y : イスバッシュ数、 S_r : 石の水に対する比重、 θ : 斜面勾配である。この式では所要質量は流速の6乗に比例するため、被覆材近傍の流速を精度良く算定することが重要であるが、流速の取り方にあいまいな部分がある。また津波越流による局所的に速い流れが被覆材に作用するような状況は、本来イスバッシュ式が対象とする現象とは異なる。イスバッシュ式の成り立ちを明確にし、その適用性を精査することは防波堤の耐津波設計において重要であると考えられる。そこで本報ではIsbashの原論文のレビューを行い、イスバッシュ式の導出過程等について記述する。

2. イスバッシュ式の導出過程

イスバッシュ式に関するIsbashによる文献として主に引用されているものは、1932年のIsbashによる著書³⁾と1936年の第2回国際大ダム会議における論文⁴⁾の2つである。これらは、水面から石を投入して河川を締切り、ダムを建設する際のダムの寸法・形状を予測する方法を述べており、その中で流速と石の質量の関係について導出した式がイスバッシュ式である。Isbashはダム建設時の石の堆積形状の変化(図-1)における第一段階と第三段階に対して力のつり合い式を立てた。第一段階が「露出した石」の状態であり、第三段階が「埋め込まれた石」の状態である。第一段階については、

ある石に対して滑動に対する力のつり合い式(式(2))と回転に対するモーメントのつり合い式(式(3))を立てている。

$$k_1 ab \Delta_w \frac{V_1^2}{2g} = f abc (\Delta_s - \Delta_w) \quad (2)$$

$$k_1 ab \Delta_w \frac{V_1'^2}{2g} \frac{a}{2} = abc (\Delta_s - \Delta_w) \frac{c}{2} \quad (3)$$

ここに、 k_1 : 形状係数、 a, b, c : 石の高さ、幅、長さ、 Δ_s, Δ_w : 石、水の単位体積重量、 V_1, V_1' : 滑動・回転に対する限界流速、 f : 摩擦係数である。両者の限界流速を比較すると、石の移動限界は滑動で決まることとなり、式

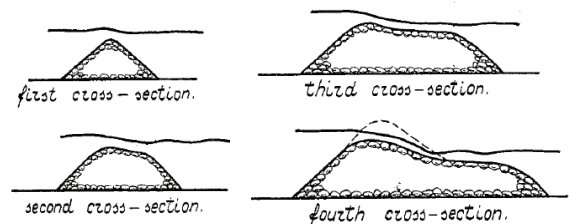


図-1 ダム建設時の石の堆積形状 (Isbash, 1936⁴⁾)

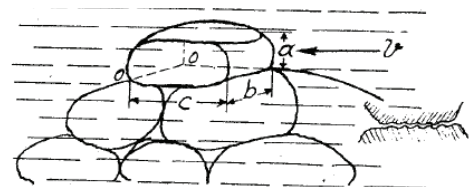


図-2 第一段階の力のつり合いの模式図 (Isbash, 1932³⁾)

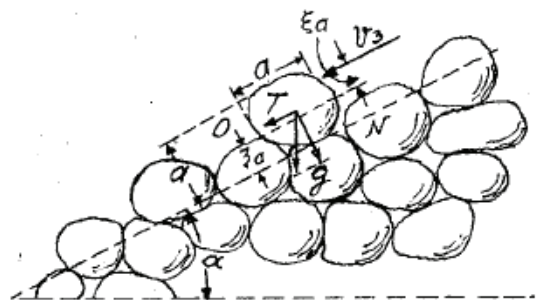


図-3 第三段階の力のつり合いの模式図 (Isbash, 1932³⁾)

キーワード イスバッシュ式, イスバッシュ数, 津波, 越流, 防波堤, 所要質量

連絡先 〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町 2-7 (株)不動テトラ総合技術研究所 TEL:029-831-7411

(2)を変形すると式(4)のようになる。

$$V_1 = Y_1 \sqrt{2g \frac{\Delta_s - \Delta_w}{\Delta_w} \sqrt{c}}, \quad Y_1 = \sqrt{\frac{f}{k_1}} \quad (4)$$

ここで Y_1 が露出した石に対するイスバッシュ数に相当し、実験により $Y_1 = 0.86$ であるとしている。一方、第三段階については、図-3 に示すように斜面上の石に作用するモーメントの釣り合い式(式(5))を立てている。

$$k_3 \Delta_w \frac{V_3^2}{2g} a^2 \xi a + (\Delta_s - \Delta_w) a^3 \sin \alpha \left(\frac{a}{2} - \zeta a \right) = (\Delta_s - \Delta_w) a^3 \cos \alpha \frac{a}{2} \quad (5)$$

ここに、 k_3 : 形状係数、 a : 石の径、 V_3 : 回転に対する限界流速、 ξ : 回転軸から流体力の作用位置までのアーム長を a で除した値、 ζ : 斜面表面から法線方向に測った回転軸の高さを a で除した値、 α : 斜面の角度である。これを整理すると式(6)のようになる。

$$V_3 = \sqrt{\frac{1}{2\xi k_3}} \sqrt{2g \frac{\Delta_s - \Delta_w}{\Delta_w} \sqrt{a} \sqrt{\cos \alpha - (1 - 2\xi) \sin \alpha}} \quad (6)$$

ここで、施工時の状態を考えると ξ は平均的には 0.5 であると仮定しており、式(7)が得られる。

$$V_3 = Y_3 \sqrt{2g \frac{\Delta_s - \Delta_w}{\Delta_w} \sqrt{a} \sqrt{\cos \alpha}}, \quad Y_3 = \sqrt{\frac{1}{2\xi k_3}} \quad (7)$$

式(7)中の Y_3 が埋め込まれた石に対するイスバッシュ数に相当し、実験により $Y_3 = 1.20$ であるとしている。石の形状を直径 a の球と仮定すると式(8)が得られる。

$$M = \frac{\pi \rho_r U^6}{48g^3 Y^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta)^3} \quad (8)$$

ここでCERC(1977)の式におけるイスバッシュ数 y と区別するため、イスバッシュ数を Y と表記している。

3. 斜面勾配の影響

Isbash(1932)の式(式(8))とCERC(1977)の式(式(1))は斜面勾配の影響の部分が異なっている。これは回転軸の高さ ζ をどのように仮定するかによる違いである。前者では $\zeta = 0.5$ としており、後者は $\zeta = 0$ としたものに相当する。2つの式を用いて、斜面上と水平床上での所要質量の比を求めると図-4のようになり、CERC(1977)の式を用いると斜面勾配が急になるにつれて所要質量はかなり大きくなるのがわかる。著者らが行った検討⁵⁾では、コンクリートブロックに対してはCERC(1977)の式よりもIsbash(1932)の式の方が斜面勾配の影響を適切に取り込んでいた。これはコンクリートブロックの場合、回転軸の高さは $\zeta = 0.5$ の方が実現象に近いためであ

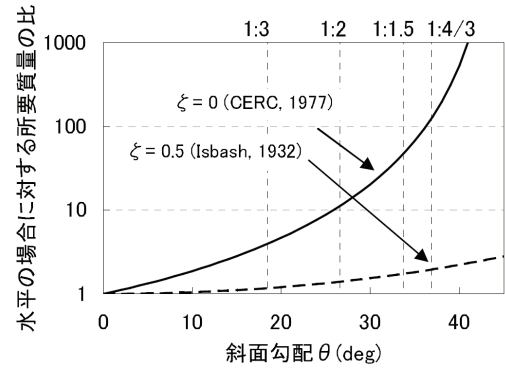


図-4 CERC(1977)の式とIsbash(1932)の式の斜面勾配の影響の比較

ると考えられる。

4. 流速の定義(方向・測定位置)について

石のイスバッシュ数の決定に用いた流速は、図-3より斜面に沿う方向の流速であると読み取れる。また流速の測定位置については、流量から求めた断面平均流速やピトー管により数箇所で測定した流速から、総合的な判断によりイスバッシュ数を決定しており、明確な測定位置は決まっていない。ただし、設計計算においては断面平均流速を用いている。

5. まとめ

本報ではIsbashによる原論文をレビューし、イスバッシュ式の導出過程を示した。主要な結論を以下に示す。

- イスバッシュ式は斜面上の石に作用するモーメントの釣り合いから導かれたものである。
- Isbash(1932)により示された式は、現在用いられているCERC(1977)の式とは斜面勾配の影響の部分が異なっている。ブロックの場合、前者の式の方が斜面勾配の影響を適切に取り込んでいる。

参考文献

- 1) Coastal Engineering Research Center (1977) : Shore Protection Manual, U.S.Army Corps of Engrs., U.S.Govt. Printing Office, Vol. II, pp.7_213-7_216.
- 2) 国土交通省港湾局 (2013) : 防波堤の耐津波設計ガイドライン, 平成 25 年 9 月.
- 3) Isbash, S. V. (1932): Construction of Dams by Dumping Stones into Flowing Water, Sci. Res. Inst. Hydrotech. Leningrad, Translated by A. Dovjikov, U.S.Army Corps of Engineers, 1935.
- 4) Isbash, S. V. (1936): Construction of dams by depositing rock in running water, *Second Congress on Large Dams*, Washington, D.C., Communication No. 3.
- 5) 三井順, 松本朗, 半沢稔, 瀧岡和夫 (2014) : 数値解析に基づくケーソン背後の津波越流の再現と被覆材の安定性の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp. I_921-I_925.