

砂防堰堤の礫捕捉確率に関する検討

防衛大学校 ○学生会員 片出 亮 正会員 香月 智

1. 緒言

近年、通常時の流砂は下流に流すが、土石流時には巨礫によって開口部を閉塞して災害を防ぐ性能を期待する写真-1のような鋼製透過型砂防堰堤が数多く建設されている。土石流流木対策設計技術指針¹⁾では、この格子間隔と最大礫径 D_{95} との比によって設計を制約しているが、その信頼性評価の手法は未だ検討されていない。そこで本研究は、礫捕捉性能評価への確率的アプローチを試みるものである。



写真-1 鋼製透過型砂防堰堤

2. 評価手法と基本式

図-1に示すように、幅 w 、高さ h の一格子に土石流中の巨礫が近づいて順次に格子にほぼ平均的な時間間隔で到達するものとし、その格子が一旦「閉塞される (E_s)」と、以後の土石流は堰き止められるとする。このとき、 i 番目の礫の到達後に堰き止めが完成する確率 $P(E_i)$ は、幾何分布に従うことになる。

$$P(E_i) = (1 - P_s)^{i-1} P_s \quad (1)$$

ここで、 P_s : i 番目からの数個の巨礫の組み合わせによって閉塞が成功する確率（格子閉塞確率）であり、図-2に示すような $n=1\sim 7$ 個までの閉塞パターンのいずれかが完成するものとした。すなわち、

$$P_s = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot P_{sn} \quad (2)$$

ここで、 P_{sn} : 対数正規確率分布に従う球形礫の連続する n 個が図-2に示す閉塞パターンを満足する確率（閉塞必要条件達成確率）、 α_n : P_{sn} が成立した条件下において、実際の閉塞が成功する確率（閉塞成功確率）。

α_n は、連続する巨礫の到着タイミングや位置などに支配される経験的なパラメータであるため、現地調査等により決定することができるが、本研究では閉塞個数の増加に伴い減少するものと考え、次式によりモデル化した。

$$\alpha_n = n^b \quad (3)$$

ここで、 b : 負の係数であり、図-3のようになる。

P_{sn} については、図-2に示す幾何学的条件を数式として整理する。例えば、 $n=1, 2$ では次式のようにになる。

$$E_1 = 2r_1 \geq \min(w, h) \quad (4)$$

$$E_2 = r_1 + r_2 \geq \sqrt{(w - r_1 - r_2)^2 + (h - r_1 - r_2)^2} \quad (5)$$

ここで、 r_1, r_2 : 閉塞に携わる礫の半径。なお、事象 E_2 の中には、事象 E_1 を満足する場合も含まれるため次式のようにになる。

$$P_{s1} = P(E_1) \quad (6)$$

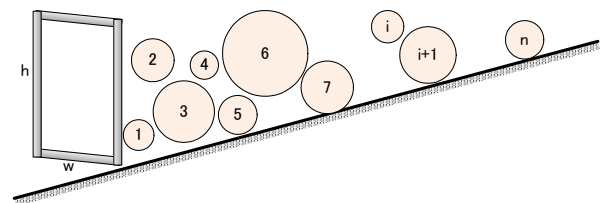


図-1 礫の到達順位モデル

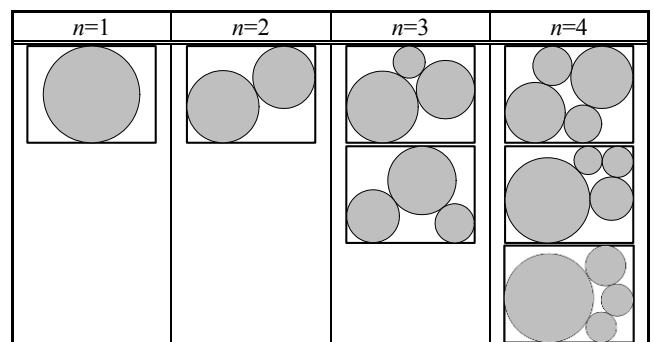
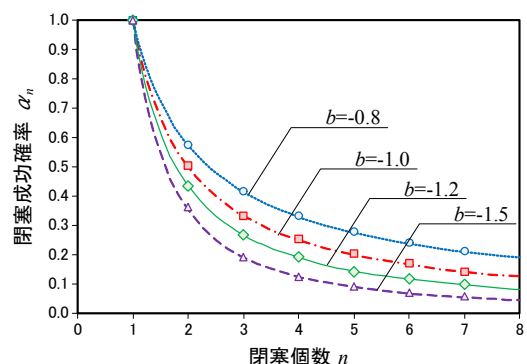


図-2 格子閉塞必要条件

図-3 閉塞成功確率 α_n

$$P_{s2} = P(E_2 \cap \bar{E}_1) \quad (7)$$

ここで、 $\bar{E}_1$: E_1 の余事象。 P_{sn} の計算についてはモンテカルロ法を用いた。

3. 計算例

いま、土石流中の巨礫の直径のばらつきが対数正規確率分布に従い、変動係数が一定 (100%) であるもの

キーワード：鋼製透過型砂防堰堤、土石流、礫捕捉確率

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校 建設環境工学科 TEL: 046-841-3810 FAX: 046-844-5913

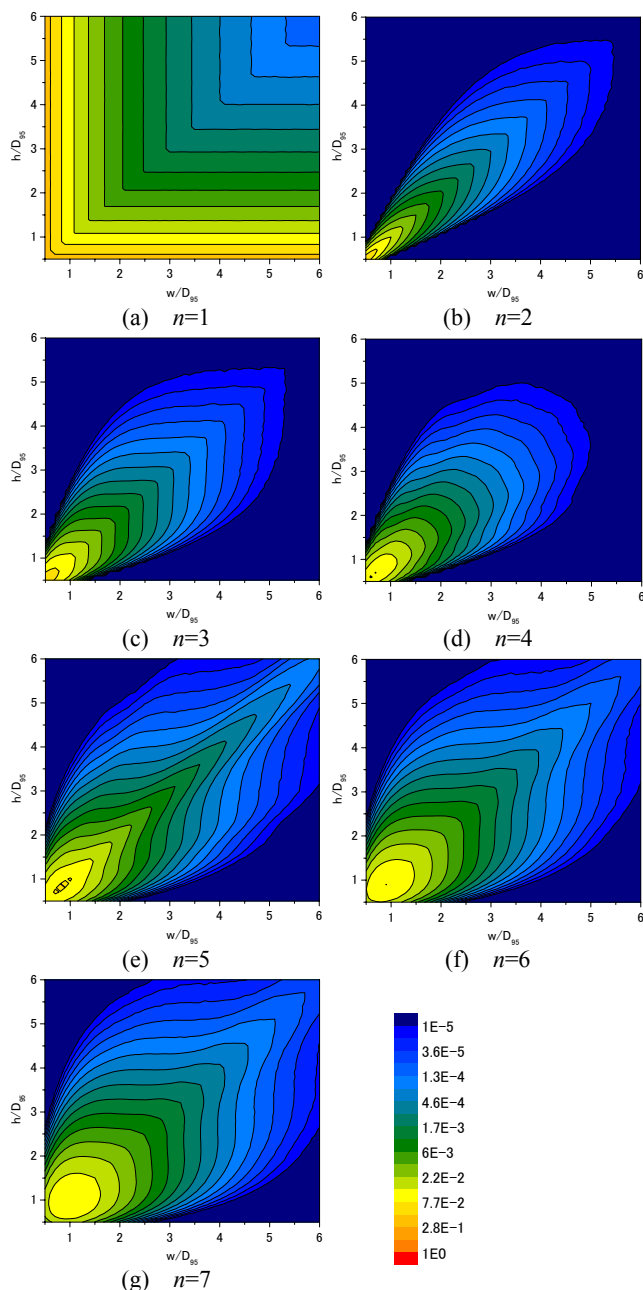


図-4 閉塞必要条件達成確率の分布図

した場合の P_{sn} を w と h を変化させて求めると図-4 のようになる。これに式(3)の b を-1.0 としたうえで P_s を求めると図-5 のようになる。当然のことながら、 w/D_{95} と h/D_{95} が小さい領域では P_s は大きく、かつ w/D_{95} と h/D_{95} に関して 45° 線を挟んで軸対象となる。また、

図-5 の P_s の回帰式を求めると次式となる。

$$P_c = \exp[A(\ln X)^2 + B \ln X + C] \quad (8-a)$$

$$X = (h/D_{95} + w/D_{95})/\sqrt{2} \quad (8-b)$$

$$Y = |h/D_{95} - w/D_{95}|/\sqrt{2} \quad (8-c)$$

$$A = 0.07Y^4 - 0.31Y^3 + 0.63Y^2 + 0.07Y - 0.97 \quad (8-d)$$

$$B = -0.25Y^4 + 1.19Y^3 - 2.77Y^2 + 0.18Y - 1.56 \quad (8-e)$$

$$C = 0.25Y^4 - 1.36Y^3 + 3.79Y^2 - 1.07Y - 1.32 \quad (8-f)$$

なお、この曲面は図-6 であり重相関係数は 0.99 であることから、式(8)を用いることにより P_s を再現できるこ

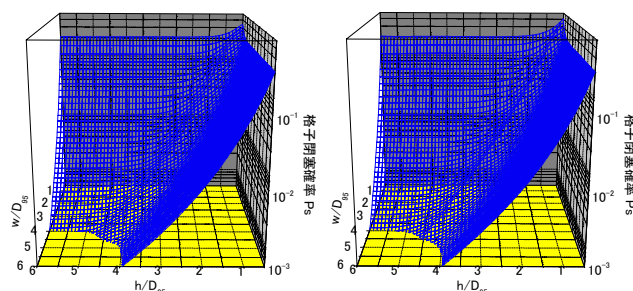
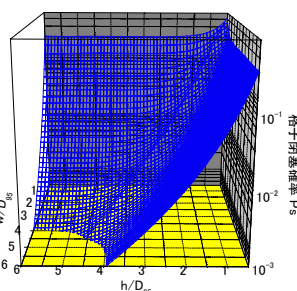
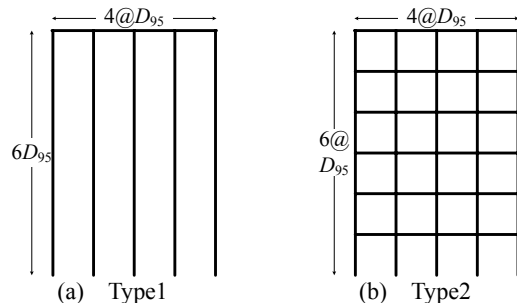
図-5 P_s の分布図図-6 P_s の近似曲面

図-7 検討構造形状

表-1 計算結果

Type	w/D_{95}	h/D_{95}	格子数	通過期待値	標準偏差
1	1.0	6.0	4	395.1	86.2
2	1.0	1.0	24	149.4	32.9

とがわかる。

以上の結果を用いて図-7 に示すような 2 つの格子形状を保有した砂防堰堤を対象として、礫の通過個数の平均値と標準偏差を次式により求める。

$$\bar{n}_p = m(1 - P_s)/P_s \quad (9)$$

$$\sigma_{n_p}^2 = m(1 - P_s)/P_s^2 \quad (10)$$

ここで、 $\bar{n}_p$: 礫通過個数の期待値、 $\sigma_{n_p}^2$: 礫通過個数の標準偏差、 m : 格子数。

表-1 より、一格子高さが Type2 の格子の 6 倍である Type1 の堰堤では、通過期待値が 395.1 個と Type2 の 149.4 個に比して 2.6 倍も大きくなることから、細かい格子の堰堤を設置することにより、礫の捕捉確率向上させることが可能となることがわかる。

4. 結 言

本研究は、鋼製透過型砂防堰堤における礫捕捉性能評価への確率的アプローチを試みた。この際、一格子の閉塞確率に対する近似式を導出したうえで、構造形状による捕捉確率の影響を考察した。その結果、格子を細かくすることによる捕捉確率の向上を説明できることを示した。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所：土石流・流木対策設計技術指針及び同解説，社団法人 全国治水砂防協会，2007，11。