

鋼製透過型砂防堰堤の捕捉過程並びに閉塞モデルに関する検討

京都大学大学院農学研究科 ○中谷加奈・楠田夏子

広島大学大学院総合科学研究科（前所属 京都大学防災研究所） 長谷川祐治

立命館大学理工学部 里深好文

政策研究大学院大学 水山高久

1. 研究背景と目的

土石流による被害の防止軽減には砂防堰堤などのハード対策が有効である。土石流シミュレータ KANAKO¹⁾では鋼製透過型砂防堰堤の巨礫による閉塞が里深・水山のモデル²⁾で計算される。しかし、このモデルは縦材と横材で構成される格子型が対象で、縦材のみや横材のみの形状は十分検討されていない。また、鋼製透過型砂防堰堤の既往検討は勾配 15 度以上を対象としたものが多く、それよりも緩い勾配を対象とした実験的な検討^{3),4)}はあるが、閉塞モデルとの比較検証は行われていない。

本検討は異なる形状の鋼製透過型砂防堰堤について実験を行い、閉塞モデルの計算結果と比較した。計算では、分級を考慮する混合粒径モデルの導入⁵⁾や、粒径や計算点間隔などの設定方法を検討した上で、閉塞モデルの適用範囲や課題を把握して、モデル改良への知見を得ることを目的とした。なお、本稿では 15 度を対象として堰堤形状の違いに着目した検討を報告する。

2. 実験と計算の概要

勾配 15 度に設定した直線水路の上流に実験砂を敷き、下端に堰堤模型を設置した（図-1 左）。上流から水を定常供給（0.75L/s、15 秒）して土石流を発生させ、次式のように捕捉率を求めた。

捕捉率[%] = (捕捉土砂量/供給土砂量) × 100

堰堤は 3 種類の透過部形状（格子、縦、横：図-1 中央）を使用して、部材の透過間隔は D_{95} の 1.0 倍（格子、横堰堤では最下段のみ 1.5 倍）に設定した。実験は混合砂（密度：2.62g/cm³、空隙率：0.40、粒度分布：図-1 右、 $D_{95}=10.35\text{mm}$ ）を使用した。再現性の確認のため、各 3 回実施した。

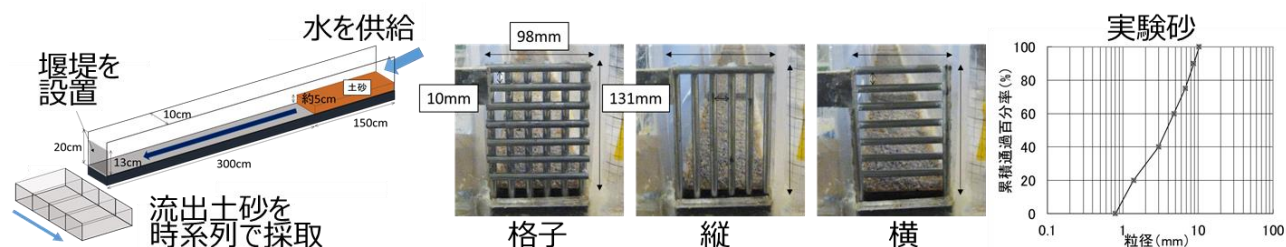


図-1 実験概要（左）、堰堤模型の形状（中央）、実験砂（右）

閉塞モデル²⁾は、柱に衝突し回転する礫と後続の礫とのアーチの形成（図 2 左）に加えて、横桁と堆積河床位との距離（図-2 右）から求まる閉塞係数 a_1, a_2, a_3 と、閉塞確率 a_4 から閉塞が評価される。

実験と同じ条件で計算を行い（計算点間隔 5cm、計算時間間隔 0.002s）、実験砂を基に 5 粒径階とした。本検討で用いた混合粒径モデルの計算では最大径 d_{Max} のみが閉塞に寄与することから、 d_{Max} は中央値の 9.39mm と D_{95} の 10.35mm の二種類で検討した。

結果の捕捉率（実験は 3 回の平均値）を図-3 に示す。実験では全て 97%以上と高く、計算は格子や縦（ $d_{Max}=10.35\text{mm}$ のみ）で実験に対応する高い捕捉率を示した。

$$a_1 = f_5 + f_6 \times \log_{10} C$$

$$a_2 = (z_h - z_d)/h$$

$$a_3 = b \times (f_7 + f_8 \times \log_{10} C)$$

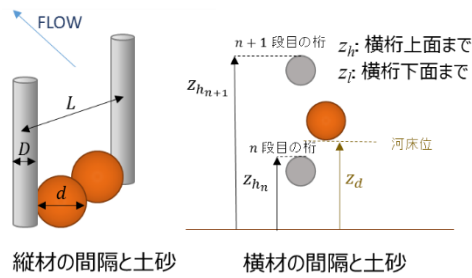
$$a_4 = a_1 + a_2 + a_3$$

$$f_5, f_6 \propto (L - D/d_{Max})$$

$$f_7, f_8: (D/L) \text{ の 2 次関数 } D: \text{柱の直径}$$

$$C: \text{大粒径の土砂濃度 } d_{Max}: \text{最大径}$$

$$h: \text{流動深 } b: \text{係数, } z_d: \text{河床位}$$



縦材の間隔と土砂

横材の間隔と土砂

図-2 縦材と横材による閉塞イメージ

一方、既往検討⁶⁾は $(L-D)/d_{Max} < 1.5$ で閉塞すると報告され、縦($d_{Max}=9.39\text{mm}$)は条件を満たし、実験でも高い捕捉率を示したが、計算結果は小さい。

また、横堰堤は実験では高い捕捉率を示したのに対して、計算は全く閉塞しなかった。以降は、縦堰堤と横堰堤の閉塞を表現するための手法を検討する。

3. 計算手法の検討

(1) 縦堰堤

閉塞モデルの中で、縦堰堤では柱間の距離($L-D$)と最大径 d_{Max} の比が閉塞に影響する。閉塞が発生しないと報告される $(L-D)/d_{Max} > 2.0$ までの条件(6.67mm以上)で d_{Max} の感度分析を行うと、10mm(本検討 $(L-D)$ に相当)を境界にして10mm以上では捕捉率が上昇したことから、 $(L-D) > d_{Max}$ で縦材の閉塞が過少評価だと考えられる。

縦材の閉塞に影響する a_3 は縦材に衝突した粒子の堆積を示す式で、係数 b (初期設定0)を調整することで閉塞が変化すると推測されたため、図-4のように b を変化させると $b=0.5$ 以上で捕捉率が格子型と同程度にまで上昇し、閉塞が表現された。

(2) 横堰堤

原田ら⁷⁾は横桁に衝突して下方に回転する礫と、後続の礫がアーチを形成して閉塞する現象を報告し、本実験でも同様の傾向を確認している。しかし、閉塞モデルでは a_2 により横桁と河床位との距離が d_{Max} より小さい場合のみ閉塞することから、そのような現象が反映されない。そこで、横桁の閉塞に横桁への衝突を考慮するために、既往検討や実験観察を基に、横桁の直径 D 、最大径 d_{Max} 、大粒径の土砂濃度 C 、水深 h を変数とした新たな閉塞係数 a_{10} を導入した。ここで z_l は河床 z_d の直上に位置する横桁の下面までを示す。

$$a_{10} = 0.33 \times D/h + 0.039 \times d_{Max}/(z_l - z_d) + 0.18 \times C$$

また、原田ら⁷⁾は(横桁の間隔 $d_{Max} \geq 1.5$)では横桁と衝突した礫がアーチを形成できずに落下すると示しており、最下段の横桁間隔15mm、 $d_{Max}=9.39\text{mm}$ は1.6で形成条件外であることから、 $d_{Max}=10.35\text{mm}$ の計算結果を図-5に示す。導入により捕捉率が64.4%まで上昇した。図-6に、横堰堤の閉塞に伴う堆積過程を実験結果と a_{10} を導入した計算結果について示す。閉塞開始から上流側に堆積が進む様子が対応することが確認された。なお、本検討では a_{10} の設定に感度分析によって実験と対応がよい係数を設定し、各変数を独立に加えた。この検討は、横桁の閉塞を表現するための試みの一つであり、今後も閉塞過程を考慮したモデル検討を進める予定である。

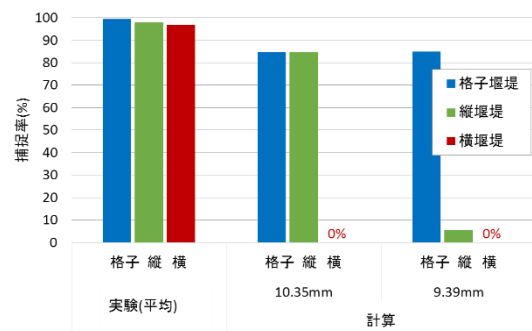


図-3 実験結果と計算結果

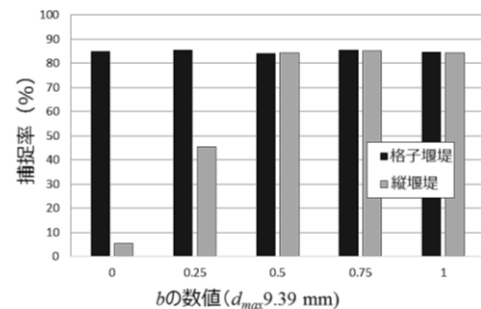


図-4 計算結果 (b の設定)

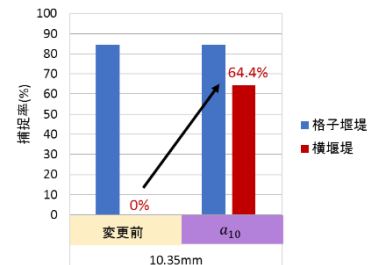


図-5 計算結果 (a_{10} 導入)

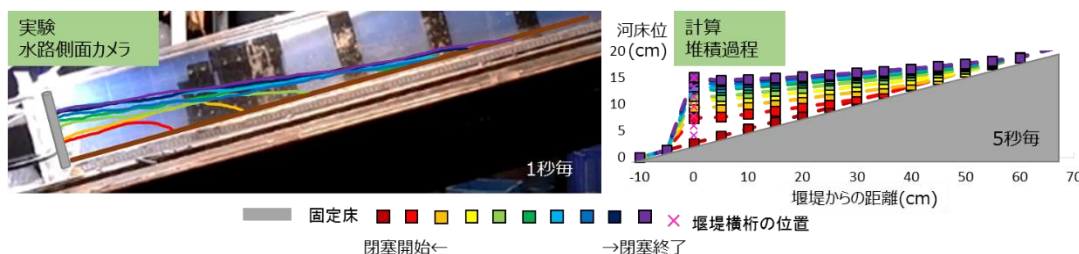


図-6 横堰堤の堆積過程

謝辞：本研究は京都大学防災研究所治川オープンラボラトリーの実験施設を利用しました。

参考文献 1)中谷ら, 砂防学会誌 61(2), 2008. 2)里深・水山, 砂防学会誌 57(6), 2005. 3)Hiura et al, International Journal of Erosion Control Engineering, 10(3), 2017. 4)古谷ら, 平成 28 年度砂防学会研究発表会概要集, 2016. 5)松本ら, 砂防学会誌 65 (3), 2012. 6)芦田ら, 京都大学防災研究所年報 23, 1980. 7)原田ら, 水工学論文集 60, 2016.