

細粒土砂の浮遊が天然ダムの越流侵食過程に与える影響に関する実験的研究

静岡大学 農学部 ○高山翔揮・今泉文寿

静岡県交通基盤部 池田幸誠

1. はじめに

天然ダム材料は、一般的に幅広い粒度分布をもつ (Casagli et al., 2003) . 例えば, トルコの Torum 川に形成された天然ダムは, $1.4 \times 10^{-4} - 2.5 \times 10^3$ mm の粒径の粒子から構成され, 細砂, シルト, 粘土といった細粒土砂を含む (Duman et al., 2009) . 細粒土砂が流れの中を浮遊すると, 流れの間隙流体密度が上昇し, 粗粒土砂の堆積が抑制される (e.g., Uchida et al., 2021) . そのため, 天然ダムの越流決壊時には, 越流水中を浮遊可能な土砂の割合の違いが, 越流侵食過程と洪水流出過程に大きな影響を与える可能性がある. 本研究では, これらの浮遊土砂の影響を小規模な水路実験により調べた.

2. 方法

全長 360 cm, 幅 10 cm の矩形断面水路を使用した (図-1a) . 実験水路に高さ 15 cm, 天端幅 15 cm, 上流法面勾配 30° , 下流法面勾配 20° の台形の天然ダムを作製した (図-1b) . ダム天端には, 水路側岸に沿って深さ 2 cm の切欠きを設けた (図-1c) . ダム材料には, 乾燥した非粘着性の珪砂を用いて

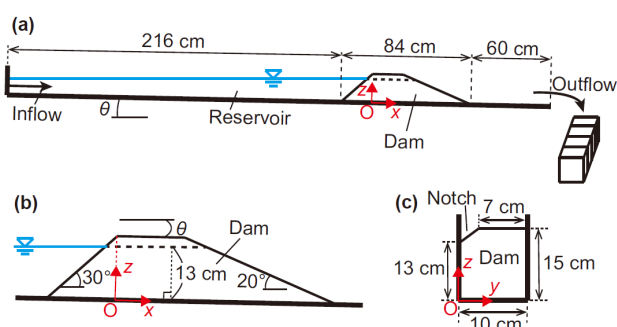


図-1 (a) 実験水路 (b) ダム縦断面図 (c) 横断面図

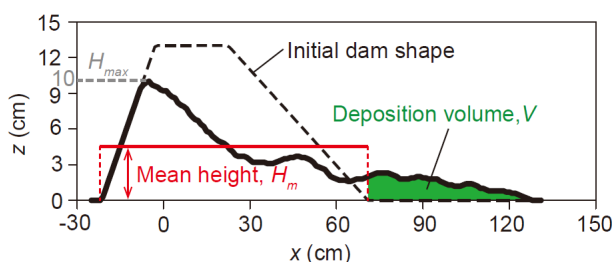


図-3 決壊中のダム縦断面形状を代表する指数

おり, 平均粒径 2.4 mm の粗粒土砂と平均粒径 0.5 mm の細粒土砂の 2 種類の土砂を使用した (図-2) .

水路上流に一定流量の水を供給し, 越流侵食により天然ダムを決壊させた. その決壊過程はビデオカメラにより記録した. 最大ダム高 (H_{max}) が 10 cm まで低下したときに大きな洪水流量が発生する傾向にあったため, この時点の平均ダム高 (H_m) , 堆積土砂量 (V) , ダム下流法肩部の決壊流路幅 (B) を計測し, 決壊中のダム形状を代表する指数として用いた (図-3) . 水路下流端から流出する洪水流は, 複数の容器により採取し, 流量, 流砂量, 輸送土砂濃度の時間変化を計測し, それらのピーク流量 (Q_p) , ピーク流砂量 (QS_p) , 最大輸送土砂濃度 (C_{max}) を算出した.

流れの摩擦速度 (u_*) が粒子の沈降速度 (w_0) を上回るとき, 粒子は流れの中を浮遊可能と仮定し (Inman, 1949) , ダム決壊時において最小の (常に) 浮遊可能な土砂の割合 (FS_{min}) を算出した. ダム決壊時における最小の流量は流入流量 (Q_{in}) であり, 最小の勾配は水路勾配 (θ) であることか

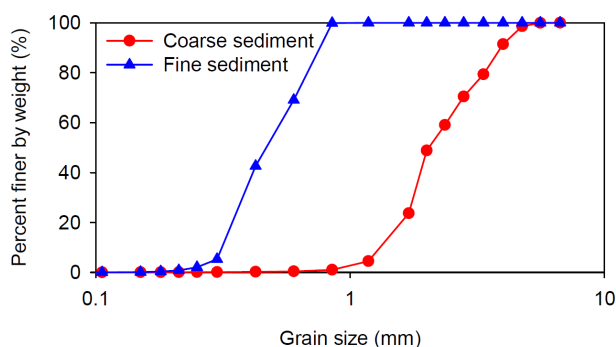


図-2 ダム材料の粒度分布

表-1 実験ケース

Case ^a	FF^b (-)	θ^c ($^\circ$)	Q_{in}^d ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)
1-25	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9	1, 3, 5, 7, 9	100
26-33	0.5, 0.9	3	50, 150, 200, 250
34-37	0.5	7	50, 150, 200, 250

^aRepeated three times in each case, ^bFraction of fine sediment, ^cFlume gradient, ^dInflow discharge

ら、最小の摩擦速度 (u_{*min}) はマニング則とレジーム則を用いれば次式で表される。

$$u_{*min} = \sqrt{g} (n_m \alpha^{-1} \sqrt{Q_{in}})^{\frac{3}{10}} (\sin \theta)^{\frac{7}{20}} \quad (1)$$

ここに、 g は重力加速度、 n_m はマニング係数、 α はレジーム則の係数 (= 5) である。粒子の沈降速度 (w_0) は Rubey の沈降速度式である次式で算出した。

$$w_0 = \sqrt{sgd} \left[\sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{sgd^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{sgd^3}} \right] \quad (2)$$

ここに、 s は水中比重、 d は粒径、 v は動粘性係数である。式 (1)、(2) を用いて $u_{*min} = w_0$ を d について解くことで、浮遊可能な粒子の粒径の下限値が求まり、天然ダムの粒度分布が与えられれば FS_{min} を算出できる。 FS_{min} は、常に浮遊可能な土砂の割合であり、洪水流量が大きくなり、河床勾配が急になれば、より多くの土砂が浮遊可能になると考えられるが、本研究では決壊時の浮遊可能な土砂の割合を代表する指標として使用した。

本研究では、 FS_{min} に影響を与える要素である細粒土砂の割合 (FF)、水路勾配 (θ)、流入流量 (Q_{in}) が異なる 37 ケースの実験を 3 回ずつ繰り返した (表-1)。

3. 結果と考察

最小の浮遊可能な土砂の割合 (FS_{min}) と平均ダム高 (H_m)、堆積土砂量 (V) との間には強い負の相関があった (図-4a, 4b)。 FS_{min} と決壊流路幅 (B) との間には、弱い負の相関があった (図-4c)。 FS_{min} とピーク流量 (Q_p)、ピーク流砂量 (QS_p) との間にはほぼ相関はなかった (図 4d, 4e)。 FS_{min} と最大輸送土砂濃度 (C_{max}) との間には弱い正の相関があった (図-4f)。

FS_{min} と H_m , V との間に強い負の相関があり、 FS_{min} と C_{max} との間に弱い正の相関があったことは、越流水中を浮遊する土砂が間隙流体密度を上昇させ、ダム下流での堆積を抑制させるという考えと整合的であり、ダム縦断形状の変化を予測する上では細粒土砂の浮遊を適切にモデル化する必要があることを示唆する。一方で、 FS_{min} と Q_p , QS_p との間にはほぼ相関はなく、 FF , θ , Q_{in} の変化への FS_{min} の応答よりも他の Q_p , QS_p に影響を与える要素 (侵食速度、湛水量) の応答の方が非常に敏感であると考えられ、決壊に伴うピーク流量、ピーク流砂量を予測する上では細粒土砂の浮遊は無視できる可能性がある。

参考文献

Casagli et al., 2003, Eng Geol, 69, 83–97; Duman, 2009, Eng Geol, 104, 66–79.; Inman, 1949, J Sediment Res, 19, 51–70.; Uchida et al., 2021, Can Geotech J, 58, 23–34.

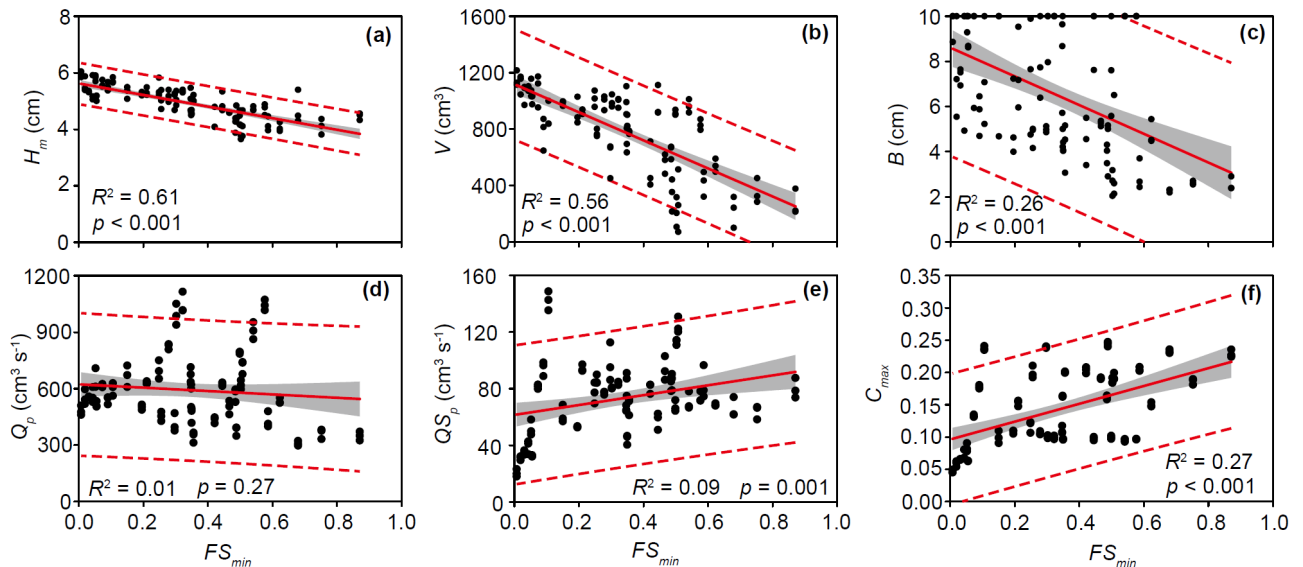


図-4 浮遊土砂の割合が越流侵食過程と洪水流出過程に与える影響 (赤い実線：回帰直線，赤い破線：95%予測区間，灰色のエリア：95%信頼区間， FS_{min} ：最小の浮遊可能な土砂の割合， H_m ：平均ダム高， V ：堆積土砂量， B ：決壊流路幅， Q_p ：ピーク流量， QS_p ：ピーク流砂量， C_{max} ：最大輸送土砂濃度)