単位河道モデルに透過型等の砂防堰堤を含む簡易モデルの開発（2）

京都大学名誉教授　水山高久，京都大学　藤田正治，宮田秀介，立命館大学　里深好文
（一財）砂防・地すべり技術センター　池田暁彦
日本工営株式会社　○山崎祐介，古谷智彦，長山孝彦，伊藤隆郭

1 はじめに

流域内の土砂動態におよぼす砂防堰堤群の効果を検討するためには，透過型堰堤の土砂流出調節機能の評価が重要である。著者らは，単位斜面および単位河道で構成される流域スケールを対象とした土砂動態解析モデル（山野井・藤田，2016）への堰堤機能の導入手法，堰堤機能のモデル化手法について検討を行っている。砂防堰堤群を有する流域における，流域スケールの土砂動態を評価していくうえで，透過型堰堤における土砂の貯留・流出のモデル化とその導入方法の検討が必要である。本研究は，透過型堰堤機能のモデル化において，堆砂領域の縦断形状に応じた摩擦速度に用いる勾配の評価を行い，その効果を検討するものである。

2 解析モデル

流域地形モデルは矩形斜面とその接続する河道によって構成される（江頭・松木，2000）。斜面における表面流および浸透流には，それぞれマニング則およびダルシー則を適用している。河道における流水および流砂については，それぞれマニング則および芦田・道上式を適用している（江頭・松木，2000）。

透過型堰堤における土砂の貯留・流出のモデル化において，水位せき上げによる土砂の貯留・流出効果は，水理模型実験によって，ある程度の定量的評価が可能になってきている（伊藤ら，2015，木佐ら，2022）。単位河道に設置された透過型堰堤の土砂の貯留・流出の算出は，これらの知見を用いて，掃流砂を対象とした流砂量式に与える勾配を次のように評価する。図 1 に堆砂状況と堆砂面の勾配の模式図を示す。ここに，x：水平に設定したx軸，H_s：スリット深さ，$\tan\theta_b$：単位河道の河床勾配，$\tan\theta_e$：流砂の最大堆積勾配角度，$\tan\theta_c$：堆砂領域の上端が単位河道上端に到達する勾配である。

堆砂の状態によって，堆砂面の勾配を次のように定める。

A：堰堤におけるせき上げの影響範囲であり，流砂が水平に堆積し，その上面がスリット深さH_sに到達するまでの領域。堆砂面の勾配は，$\tan\theta = 0$となる。

B：満砂後，堆砂領域上端が単位河道上端に到達するまでの領域。堆砂面の勾配は，$\tan\theta < \tan\theta_c$である。

C：Bよりも堆砂が進んでいる領域。堆砂面の勾配は，$\tan\theta < \tan\theta_e$である。

これらの状況で，$\tan\theta(t+\Delta t)$は次式で表される。

$$A：\quad \tan\theta(t+\Delta t) = \frac{H_s}{D_{zh} + \Delta l} \tag{1}$$

$$B：\quad \tan\theta(t+\Delta t) = \frac{D_{zv} + \Delta l \sin\theta_b}{D_{zh} + \Delta l \cos\theta_b} \tag{2}$$

$$C：\quad \tan\theta(t+\Delta t) = \frac{D_{zv} + \Delta l}{D_{zh}} \tag{3}$$

ここに，Δl：流砂量の差分により定まる変化量，D_{zh}・D_{zv}：tにおける堆砂面の水平・鉛直距離である。Aにおける堆積時には，堆砂量をせき上げ水深の関数とし，流砂量の差分により算出された堆砂量が，その堆砂量を下回っている時には，単位河道からの流砂量を 0 とする。

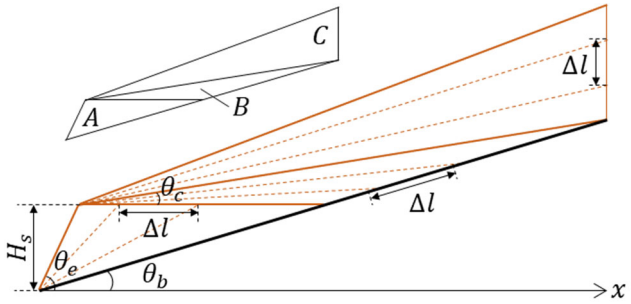

図 1　堆砂状況と堆砂面の勾配の模式図

3 計算条件

対象領域は上滝上流（流域面積：約 355 km²）であり，妙寿砂防堰堤（流域面積：115.2 km²，堰堤高：14.5 m，堤長：120.5 m，水通幅：54 m，スリット高さ×幅：8.5 m×7.5 m，三上ら，2013）において堰堤効果のモデル化を行い，その評価を行う。対象期間は 2004 年 7 月 17 日～18 日の降雨で，アメダス立山地点における，最大 24 時間雨量は 174 mm，最大時間雨量は 45 mm である（図 2）。流出解析（山崎ら，2022）によれば，妙寿砂防堰堤の流量は計画流量，約 2,000 m³/s の半分程度の規模である（図 2）。

給砂は，妙寿砂防堰堤を含む単位河道における初期勾配，川幅，および，流量に応じた流砂量（以降，平衡給砂という）を与えた。また，堰堤に堆積される土砂の量や，時間当たりの堆積量変化を増加させるために，平衡給砂の 2 倍および 5 倍の量を給砂し，堰堤における土砂の貯留・流出や，堆砂の状態（A，B，C）における堆砂勾配などの検討を行う。

給砂の粒度分布を表 1 に示す。斜面および河道における水理・水文設定を表 2 に示す。これらの設定は過年度検討（野呂ら，2020）に準じて行っている。

せき上げする流量は，現地観測等をもとに 100 m³/s に設定している。せき上げする流量よりも流量が小さい場合には，流砂の流下幅は河道幅と同じにしている。堆砂肩ができている場合には，水中での土砂層の安定勾配（約 20° ）に対応した摩擦速度や掃流力を与えている。

初期条件は，時間雨量 30 mm を一様に 24 時間供給後，24 時間の無降雨期間を設定している。

4 計算結果

妙寿砂防堰堤を含む単位河道における流入・流出土砂量の時間変化を図 3 に示す。ここに，実線：流入，破線：流出を示し，赤：平衡給砂，緑：平衡給砂の 2 倍，青：平衡給砂の 5 倍を与えたケースを示す。図 4 に河床変動量を示す。

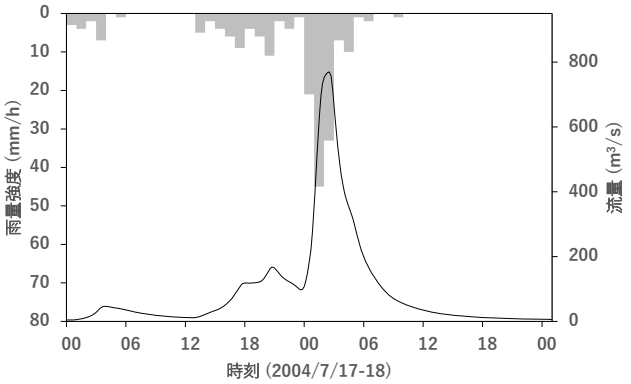

図 2　アメダス立山地点の雨量と
妙寿砂防堰堤における流量（山崎ら，2022）

表 1　代表粒径と含有率

粒径(mm)	含有率(%)	粒径(mm)	含有率(%)
1310	10	7.54	12
361	35	2.08	5
99.5	24	0.570	2
27.4	12		

表 2　水理・水文設定

項目：斜面	値	項目：河道	値
D_1, D_2(m)	0.1, 0.5	α	5
κ_1, κ_2(mm s^{-1})	3, 0.2	n	0.05
λ	0.467	E_m(m)	0.6
N	0.3	E_d(m)	0.6

添え字 1・2：土層上部・下部，D：土層厚，κ：飽和透水係数，λ：空隙率，N：等価粗度，α：レジーム係数，n：マニングの粗度係数，E_m・E_d：交換層厚・堆積層厚

平衡流砂量を与えたケースでは，流量がピーク時に堰堤からの土砂流出が始まる。その後は，堰堤に土砂を堆積させながら，洪水減水期には流入流砂量と同じ流砂量が堰堤から流出している。水位せき上げが外れると，堰堤からの土砂流出が現れるが，それ以降は堰堤堆砂域に土砂が堆積しながら土砂流出をする。平衡流砂量の 2 倍および 5 倍における土砂流出の傾向は，平衡流砂量の場合とほぼ同様となる。5 倍のケースでは，せき上げが外れると，堰堤からの土砂流出が大きく，堰堤堆砂域の河床位が 2 m 以上下がる。

5 おわりに

本検討では，堰堤に土砂が満砂するまでは，堰堤から流出する流砂量はゼロになり，その後,堰堤から水位せき上げが外れると土砂が流出される様子が再現されている。今後，シャッター作動による透過部の変化に伴う土砂の貯留・流出のモデル化や，流域スケールにおける土砂動態への堰堤群の効果の評価を行っていく予定である。

謝辞：国土交通省北陸地方整備局立山砂防事務所にデータの提供および助言をいただいた。本成果は，河川砂防技術研究開発公募　地域課題分野（砂防）常願寺川流域における砂防堰堤群等の機能的な活用による土砂管理手法（代表者：藤田正治）の成果の一部である。ここに謝意を表します。

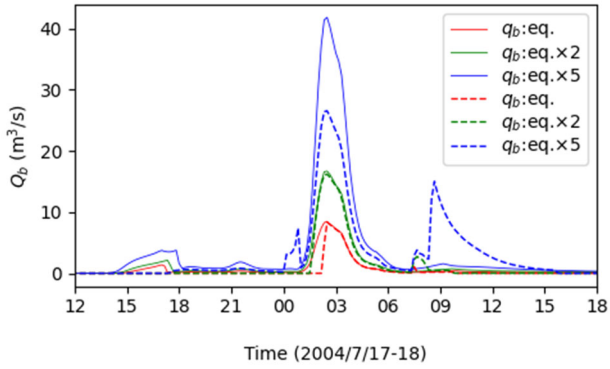

図 3　堰堤における流砂量（実線：流入，破線：流出）
赤：平衡給砂，緑：平衡×2，青：平衡×5

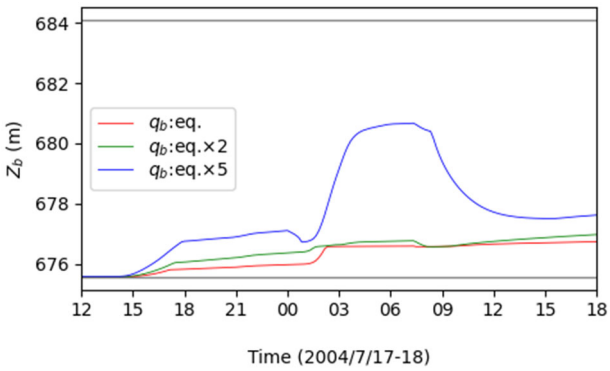

図 4　堰堤における河床高変化
灰色：スリット底盤・水通し天端標高

引用文献

山野・藤田：複合土砂災害シミュレータ SiMHiS を用いた山間地域における土砂災害の警戒避難情報の提供に関する一考察，砂防学会誌，69 巻，6 号，pp.15-23，2016
江頭・松木：河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法，水工学論文集，44 巻，pp. 735-740，2000
伊藤ら：種々の透過型砂防堰堤を対象とした土砂流出の制御と促進に関する模型実験，砂防学会誌，68 巻，2 号，p.23-34，2015
木佐ら，スリット砂防堰堤を対象とした土砂捕捉・流出に関する水路実験，2022 年度砂防学会研究発表会概要集，R4-13，2022
三上ら：常願寺川における可動式シャッター砂防堰堤の設置と運用について，砂防学会誌，66 巻，5 号，p.42-48，2013
山崎ら：単位河道モデルに透過型等の砂防堰堤を含む簡易モデルの開発, 2022 年度砂防学会研究発表会概要集, R1-1, 2022
野呂ら：常願寺川における単位河道モデルによる水・土砂流出解析と適用性に関する試行，2020 年度砂防学会研究発表会概要集，R1-035，2020