

除石による砂防ダムの土石流調節機能の回復

鳥取大学農学部 正会員 ○ 本田 尚正
鳥取大学農学部 正会員 奥村 武信

1. はじめに

砂防ダム堆砂域の除石にあたっては、工事用進入路や工事ヤードの確保、除石材料の再利用地や処分地の確保、以上のような工事空間の確保による近隣的生活環境への影響など、事業実施上の困難性に直面することが多い。そのため、これまで積極的に実施されることは少なく、満砂した砂防ダムの機能は別途に新たな砂防ダムを建設することによって永らく代替されてきた。しかし今日、新規砂防ダムの適地は地形・地質的にも限られており、自然環境保全に対する市民の関心の高まりや既存社会資本ストックの有効活用といった観点からも、今後、砂防ダムは積極的な除石の実施によってその土砂流出の調節機能の回復を図る時期に来ている^{1), 2)}。

さらに、従来から砂防ダムの調節効果はもっぱら貯砂容量で議論され、そこには時間の概念が欠落している。砂防ダムの効果の量質は、流下する土砂量、溪床勾配、流砂を構成する材料の粒度分布等の諸要素によっておのずと異なる。ましてや、長い年月を経て堆砂状態の異なった複数の砂防ダムを有する溪流では、砂防ダムによる土砂流出調節効果は個々のダムによる調節効果の単純総和とはならず、時々刻々と変化する土砂流出状況に対して、砂防ダム群としての一群の効果をもって評価する必要がある。本研究では、土石流発生域・流下域・堆積域の別に砂防ダムの除石に関するシナリオを想定し、それに基づいて複数の満砂の砂防ダムを有するモデル溪流において土石流の流動シミュレーションを実施し、除石による砂防ダムの機能回復について考察する。

2. 満砂ダムにおける溪床勾配、流入濃度、貯砂量の関係

図-1に示す満砂ダムの溪床勾配 θ 、土石流の流入濃度 c 、堆砂勾配による貯砂量 V_e の三者の関係は定性的には、

- ・ θ が同じ時、 c が大(平衡勾配 θ_e が大)ほど V_e は大、
- ・ c が同じ(平衡勾配 θ_e が同じ)時、 θ が小ほど V_e は大。

今、図-1で流路幅一定とすると、堆砂勾配が水平時の砂防ダム満砂量 V と V_e との関係は次式で表される。

$$\frac{V_e}{V} = \frac{\cos\theta \sin\theta_e}{\sin(\theta - \theta_e)} \quad (1) \quad \theta_e = \tan^{-1} \left\{ \frac{(\sigma/\rho - 1)c}{(\sigma/\rho - 1)c + 1} \tan\phi_s \right\} \quad (2)$$

ここに σ は砂礫粒子の密度、 ρ は泥水の密度、 ϕ_s は砂礫粒子の内部摩擦角である。図-2は横軸を θ として式(1)を図示している。実溪流では流路幅や堆砂域の幅が不規則に変化しており、一概にはいえないが、同図は先に定性的に述べた θ 、 c 、 V_e の三者の関係を端的に示している。

3. 砂防ダムの除石に関するシナリオ

式(1)、図-2と、溪流の土石流発生域・流下域・堆積域の土砂流出特性を勘案すれば、各区域に存在する満砂の砂防ダムの除石に関して表-1のようなシナリオが想定される。

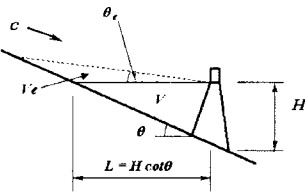


図-1 満砂の砂防ダムの模式図

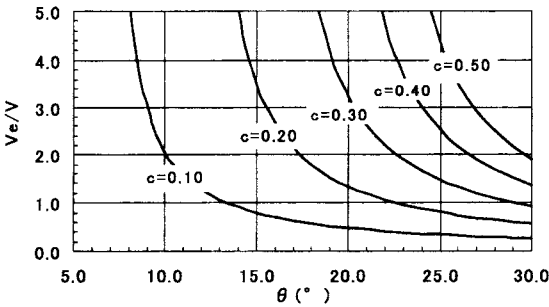


図-2 θ 、 c 、 V_e/V の関係（流路幅一定の場合）

表-1 砂防ダムの除石に関するシナリオ

区域区分	土石流発生域（概ね溪流の上流域）⇒	土石流流下域（概ね溪流の中流域）⇒	土石流堆積域（概ね溪流の下流域）
区域特性	・ 元来、砂防ダムの貯砂規模は小さく、除石の費用は割高となる。 ・ 土石流が高濃度の場合には、堆砂勾配による貯砂が期待できる。 ・ 貯砂に伴い、越流水によって砂防ダム直下流の溪床が侵食される恐れがある。	・ 主目的は土石流の捕捉と減勢にある。流下過程での土石流の大規模化を防ぐ。 ・ 土石流の濃度が小さくなると、堆砂勾配による貯砂量は少なくなる。 ・ 堆砂域の掘削形状（掘削勾配等）は、下流への土砂流出に影響を及ぼす。	・ 流下域で減勢された土石流を停止、堆積させ、あるいは流路を固定して安定的に下流に流下させる。 ・ 堆積域において、大規模砂防ダムの新設による貯砂は、自然環境保全および生活環境保全の両面から困難な現状にある。
除石の方針	・ 積極的な除石よりも、満砂を許容する。 ⇒ 貯砂機能よりも、縦侵食防止や溪岸侵食防止の効果を期待する。	・ 除石の実行と方法については、土砂流出の時間的变化の状況によって慎重に判断する必要がある。	・ 積極的に除石を行い、容量を確保する。 ⇒ 遊砂地や流路工との適切な組合せに留意する。

4. 土石流の流動シミュレーションによる検証

次に、複数の満砂の砂防ダムを有するモデル渓流を対象として、除石による砂防ダムの機能回復を数値計算によって検証する。モデル渓流は図-3の太線のとおり、流路延長 $L=920\text{m}$ (水平距離では 900m) で、溪床勾配は最上流端から 300m ごとに 18° , 12° , 6° である。溪床勾配の変化点 No.1~No.3 には砂防ダムがあり、ダム高は No.1 ダムが 3.0m , No.2 ダムが 4.0m , No.3 ダムが 5.0m であるが、すべて堆砂勾配 3° で満砂状態である。流路幅は全延長にわたって $B=20\text{m}$ であり、溪床は全延長にわたって $D=2.0\text{m}$ の厚さの堆積物で覆われている。このモデル渓流に最上流端から $Q_{in}=0.1\text{m}^3/\text{sec}$, $c_{in}=5\%$ の水を定常的に与え、溪床堆積物の侵食によって発生する土石流を一次元支配方程式に基づく数値シミュレーション^{3)~5)}により追跡した。その他の計算条件は表-2のとおりである。

数値計算の結果であるが、まず、図-3の細線は、通水開始 300 秒後の河床縦断形状を示しており、3基の満砂ダムの各上流で堆砂勾配の変化によって貯砂が進行している状況が表現されている。次に、図-4および図-5は、各砂防ダムの上下流地点における土砂体積濃度(断面平均濃度) c および流砂量 Q_s の時間変化を示している。両図において、各砂防ダムの上下流における c および Q_s のピーク値の差(ピークカット量)を個々の砂防ダムの土砂流出調節効果、モデル渓流の最下流端 $x=900\text{m}$ におけるピーク土砂体積濃度、ピーク流砂量および総流砂量 ΣQ_s を砂防ダム群による土砂流出調節効果とみることができる。

そこで、砂防ダムの貯砂状態を種々変化させて数値計算を行い、各計算ケースにおける土砂流出調節効果を比較すると、表-3のようになる。同表において、No.1 ダムの堆砂域を除石するケースでは、流出土砂を土石流発生域

で捕捉・貯砂して、結果的に最下流端での ΣQ_s は小さい。その一方、No.1 ダム上下流で Q_s のピークカット量がマイナスとなっているのは、ダム下流で溪床の再侵食が発生しているためである。No.2 ダムの堆砂域を除石するケースでは、堆砂域の掘削形状によって逆に溪床侵食が進行し、結果的に砂防ダム群としての土砂流出調節効果は低下している。そのため、単独に No.2 を除石する Case.2 では、No.2 が満砂状態の Case.1 よりも ΣQ_s は大きい。同様に、Case.7の方がCase.5よりも ΣQ_s が大きい。総合的には、最下流のNo.3ダムの堆砂域を除石するのが最も効率的といえる。

5. おわりに

複数の満砂の砂防ダムを有する渓流において堆砂域の除石を計画するにあたり、土石流の流動シミュレーションを援用することによって除石による砂防ダムの機能回復を土砂流出の時間的変化を考慮した形で数値的に示した。除石を実施する上での社会的な困難性はそれとして、少なくとも現代では大型建設機械による大規模施工が十分に可能であり、今後、除石の積極的な実施が強く望まれる。

なお、本研究で用いた流動シミュレーションは流動幅や溪床勾配が不規則に変化する実渓流でも適用が可能である。その際、土石流発生源の崩土の状況、溪床堆積物の条件(堆積厚、粒度分布)、水の供給条件といった計算条件は、とくに慎重に取扱う必要がある。

参考文献 1), 2) たとえば、水山高久: わかりやすい砂防技術(5), (6), 砂防と治水, Vol. 36. No.4, No.5, 2003.
3), 4) 江頭進治: 土石流の停止・堆積のメカニズム(1), (2), 新砂防, Vol. 46. No.1, No.2, 1993.
5) 江頭・本田・伊藤・有村: 土石流による河床侵食に関する実験的研究, 水工学論文集第42巻, 1999.

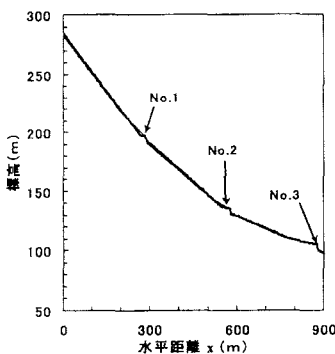


図-3 河床縦断形状

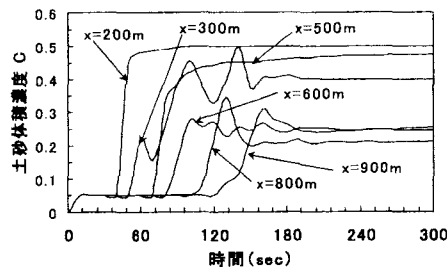


図-4 土砂体積濃度の時間

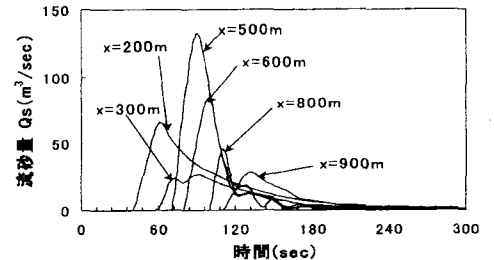


図-5 流砂量の時間変化

表-3 砂防ダムの土砂流出調節効果(数値計算結果)

Case.	堆砂域の条件			個々の砂防ダムの土砂流出調節効果			砂防ダム群としての土砂流出調節効果				
	No.1 ダム	No.2 ダム	No.3 ダム	ピーク カット量	No.1ダム 上下流	No.2ダム 上下流	No.3ダム 上下流	C_{max}	$Q_s \text{ max}$ (m^3/s)	$\Sigma Q_s (\text{m}^3)$	Case 1と の比
(現況)	満砂	満砂	満砂	c	0.02	0.22	0.04	0.31	27.85	1430.23	1.00
				$Q_s (\text{m}^3/\text{s})$	38.56	48.43	17.56				
1	満砂	満砂	空	c	0.02	0.22	0.15	0.23	20.05	965.97	0.68
				$Q_s (\text{m}^3/\text{s})$	38.56	48.66	76.67				
2	満砂	空	満砂	c	0.02	0.17	0.00	0.28	27.76	1496.26	1.05
				$Q_s (\text{m}^3/\text{s})$	27.60	46.43	20.68				
3	空	満砂	満砂	c	0.00	0.22	-0.11	0.31	20.95	1040.40	0.73
				$Q_s (\text{m}^3/\text{s})$	-45.31	58.67	38.40				
4	空	空	満砂	c	0.00	0.22	0.03	0.25	22.98	1025.73	0.72
				$Q_s (\text{m}^3/\text{s})$	-21.52	55.19	18.41				
5	空	満砂	空	c	0.00	0.22	0.04	0.26	13.14	594.55	0.42
				$Q_s (\text{m}^3/\text{s})$	-45.31	58.88	88.82				
6	満砂	空	空	c	0.02	0.17	0.08	0.24	26.74	1174.12	0.82
				$Q_s (\text{m}^3/\text{s})$	27.60	46.57	61.40				
7	空	空	空	c	0.00	0.22	0.05	0.29	11.51	662.89	0.46
				$Q_s (\text{m}^3/\text{s})$	-21.52	55.37	73.99				

表-2 数値計算の条件

泥水の密度	$\rho=1.00 \text{ g/cm}^3$
砂礫粒子の密度	$\sigma=2.65 \text{ g/cm}^3$
砂礫粒子の内部摩擦角	$\phi_s=38.0^\circ$
堆積物の静止堆積濃度	$c_s=0.50$
堆積物の代表粒径	$d=10\text{cm}$
差分条件	$\Delta t=0.02\text{sec}$, $\Delta x=2.0\text{m}$