

京都大学防災研究所

正会員

芦田和男

〇高橋 保

1. 砂防ダムの調節効果 砂防ダムは土砂を貯留する効果に加えて、滞砂後も、流出土砂量の多い洪水時に堆砂勾配を急にし、その後流出させることにより、流下土砂量を調節する効果を持つ。ということが指摘され、砂防基本計画にも取り入れられている。しかし、この調節効果は極めて重要な問題であるにもかかわらず、一般にどのような条件が満足される場合に発揮されるのか、その調節量ほどの程度であるかといった定量的な関係はほとんど明らかにされていない。著者らは、こうした問題を明らかにするためには、水理学的な検討が必要であると考へ、本研究に着手した。

水理学的な手法によってこの問題を取り扱うためには、次の2点が解明されなければならない。

(1) 砂防ダム堆砂域へ流下する流量と流砂量の関係ならぬに粒度分布の推定法。

(2) 移動床の抵抗則、流砂量式、水みち幅の推定法ならぬにこれらにもとづく河床変動の算定法。

(1)については現在までの所ほとんど解明を見ていない。(2)については、水みち幅と河道幅が等しい場合について、従来より多くの研究がなされているが、その適合性は必ずしも十分ではない。とくに勾配が急で、粒度分布が広く、かつ水路幅が流下方向にかなり変化するような複雑な条件を持つ砂防ダムについての研究は比較的少ない。

ここで(1)の問題を取りあげ、芦田・道上によって最近提案された移動床の抵抗則ならぬに掃流砂量式を用いて、砂防ダム上流の平衡勾配の算定式を求め、実験によってその検証を行なう。本論では水みち幅の推定法に因ってはふれていないが、こうした問題を取り扱って行く上で非常に重要であるので、今後検討して行きたい。

砂防ダムが設けられるような渓流では、一般に平常は大転石あるいは岩盤が露出し、その地先の河床材料から洪水時の流送土砂量を推定することはできず、土砂の生産地(山腹崩壊地あるいは渓流における砂礫の貯留領域)の水理量を用いて算定しなければならない。生産地における砂礫の輸送形態は掃流、浮流、土石流に大別され、ダムに堆積する場合には掃流あるいは土石流の形式をとるであろう。土石流についてはどのような条件で発生し、どのような運動方程式によって記述されるかは未だ明らかでないで、これによる砂防ダム上流の堆砂勾配を議論することは現状では困難である。一方、浮流砂が卓越する場合には、流量と流砂量の関係はほぼ $Q_b \sim Q^2$ のようになるようであり、掃流砂が卓越する場合には、近似的に $Q_b \sim Q I_b^{1/2} (u_{*c})$ のように書けるので、 u_{*c} が u_{*c} に比して大きい場合、ほぼ $Q_b \sim Q$ のような関係が得られる。ただし、一般の渓流では u_{*c} は決して無視はできず、 Q_b と Q の関係は今後明らかにして行ななければならない。しかし、掃流あるいは浮流形式で輸送されてきた砂礫が堆積する場合には、 Q_b と Q とが独立変数として与えられるものとするれば、堆積勾配を定めることができる。渓流での洪水の継続時間は短かく、定常とは考えられないが、調節容量を考へるという面からは定常状態に対する解が参考となる。したがって、ここでは Q_b と Q および河道条件が与えられた場合の動的および静的平衡勾配を考へることとする。

2. 砂防ダムの堆砂勾配に関する理論

(1) 動的平衡勾配 砂防ダムが築造される以前の渓流が一定勾配と一様な断面形状を持っているものとし、砂防ダム堆砂による河道幅の増大に伴う堆砂勾配を考えよう。河道幅が甚だり、堆砂によって勾配が緩くなるような領域では、限界摩擦速度はその地点の摩擦速度に比して無視することはできないので、これを考慮に入れた解析を行なう。

図-1を参照して、通常用いられている記号を用いて、水流の運動方程式を書くと、

$$-i_0 + \frac{dz}{dx} + \frac{dh}{dx} + \frac{d}{dx}\left(\frac{U_*^2}{2g}\right) + \frac{U_*^2}{gR} = 0 \quad \dots\dots (1)$$

であり、連続式は、 $Q = \bar{u}B = \text{const.} \quad \dots\dots (2)$

である。一方、芦田・道上によつて提案された流砂量式は

$$\frac{\bar{q}_B}{u_{*c}d} = 17 \tau_{*c} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \quad \dots\dots (3)$$

である。ただし、 u_{*c} は砂粒に働く有効摩擦速度である。また、流砂の連続式および抵抗則は

$$Q_B = \bar{q}_B B = \text{const.} \quad \dots\dots (4)$$

$$\frac{U}{u_*} = \varphi\left(\frac{R}{d}, \tau_*\right) \quad \dots\dots (5)$$

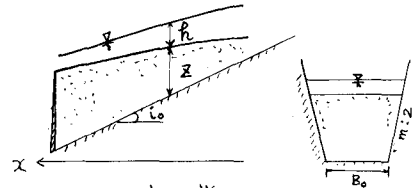


図-1 記号説明図

のように書ける。したがって、問題(1)~(5)式を用いて $\frac{dz}{dx}$ の値を求めることに帰着する。ただし、流砂は混合粒径であるが、動的平衡状態が満足されている場合には、流入するすべての粒子は移動状態にあり、流砂量および限界掃流力は平均粒径に等しい均一砂に対するものに等しいと考えてもよいであろう。

$\bar{q}_B = U \bar{h}$ であるから、(3)式を用いて、 $\bar{h} = Q / (u_* \varphi B)$ となる。これを x で微分して(4)式を用いると

$$\left(1 + \frac{Q}{u_* \varphi^2 B} \frac{\partial \varphi}{\partial R}\right) \frac{d\bar{h}}{dx} = - \frac{Q}{u_*^2 \varphi^2 B^2} \left(\varphi B \frac{du_*}{dx} + u_* B \frac{\partial \varphi}{\partial \tau_*} \frac{d\tau_*}{dx} + u_* \varphi \frac{dB}{dx} \right) \quad \dots\dots (6)$$

を得る。一方、(3)式を考慮して(4)式を x で微分することにより、

$$\frac{dB}{dx} \left\{ \frac{u_{*c}^2}{u_*^2} \left(1 - \frac{u_{*c}^2}{u_*^2}\right) + 3B \frac{u_{*c}}{u_*} \left(1 - \frac{u_{*c}^2}{u_*^2}\right) \frac{du_{*c}}{dx} + B \frac{du_{*c}}{dx} \left\{ 2 \frac{u_{*c}^2}{u_*^2} \frac{u_{*c}}{u_*} + u_{*c}^2 \left(1 + \frac{u_{*c}}{u_*}\right) \frac{u_{*c}}{u_*^2} \right\} \right\} = 0$$

となる。いま、 $u_{*c} = k u_*$ とおくと、

と書けるものとすれば、上式より

$$\frac{du_*}{dx} = - \frac{k^2 u_{*c} (1 - u_{*c}^2 / u_*^2)}{B \{ 3k^2 + k^2 / u_* + (1 - k^2) u_{*c}^2 / u_*^2 \}} \frac{dB}{dx} \quad \dots\dots (8)$$

となる。(8)式を(6)式に入れれば $\frac{d\bar{h}}{dx}$ を求めることができる。同様にして、 $\frac{d}{dx}\left(\frac{U_*^2}{2g}\right)$, $\frac{U_*^2}{gR}$ を多少の近似を含めて計算し、図-1に示したような台形断面として

$$\frac{dB}{dx} = B_0 m \frac{dz}{dx} \quad \dots\dots (9)$$

を用い、 $a = u_{*c} / u_*$ とおくと、

のように書くことにすれば、(1)式より、

$$\frac{dz}{dx} \left[(1+B_0(mz+1)) \frac{\frac{Q}{u_* \varphi B} \left\{ (1 + \frac{2.5}{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial k}) \frac{k^2(1-a^2)}{3k^2+a+(1-k^2)a^2} - 1 \right\}}{1 + \frac{Q}{u_* \varphi B} \frac{\partial \varphi}{\partial R}} + B_0(mz+1) \frac{\varphi u_*^2}{gB} \left\{ \frac{k^2(1-a^2)}{3k^2+a+(1-k^2)a^2} (-\varphi \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\partial \varphi}{\partial R} \frac{Q}{u_* \varphi B} \frac{1}{1 + \frac{Q}{u_* \varphi B} \frac{\partial \varphi}{\partial R}} < 1 + \frac{2.5}{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial k} > -2 \frac{\partial \varphi}{\partial k} \right\} - \frac{\partial \varphi}{\partial R} \frac{Q}{u_* \varphi B} \frac{1}{1 + \frac{Q}{u_* \varphi B} \frac{\partial \varphi}{\partial R}} \right] \\ = i_0 - \frac{u_*^3 \varphi B}{gQ} \quad \dots \dots \dots (11)$$

を得る。砂防ダムが築造されるような溪流では upper flow regime に属する場合が多いものと考えられるので、ここではそのような場合を対象として、(11)式の関係に基いて、道上的勾配を

$$\varphi = \frac{V}{u_*} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R}{d(1+2\tau_*)} \quad \dots \dots (12)$$

$$\text{を用いることにし、} \quad G = (1-a^2)(1-a) \quad \dots \dots (13)$$

とあり、upper flow regime では $k \approx 1$ であることに着目すれば、(11)式より

$$\frac{dz}{dx} = \frac{i_0 - \frac{(1-k^2)\varphi}{17G} \frac{QB}{Q}}{1 + \frac{mQ^{2/3}}{\left\{ \frac{(1-k^2)\varphi}{17G} \frac{QB}{Q} \right\}^{1/3} \varphi B_0^{2/3} (1+mz)^{2/3}} \left[\frac{(1 - \frac{2.5}{\varphi} \frac{5}{1+2\tau_*}) \frac{1-a^2}{3+a} - 1}{1 + \frac{2.5}{\varphi}} + \frac{\varphi^2(1-k^2)}{17G} \frac{QB}{Q} \left\{ \frac{1-a^2}{3+a} (-\varphi + \frac{2.5}{1 + \frac{2.5}{\varphi} < 1 - \frac{2.5}{\varphi} \frac{5}{1+2\tau_*} > + \frac{10\tau_*}{1+2\tau_*}) - \frac{2.5}{1 + \frac{2.5}{\varphi}} \right\} \right]} \quad \dots \dots (14)$$

が得られる。ただし、 τ_* および G は (13) 式より求められる。

(14) 式は積分を遂行することができないが、次のようにして数値計算ができる。

① 堰地長 $(mz+1)$ の値に対して、② φ を仮定する、③ $u_*^2 G = (1-k^2) g B_0 / 17 G B_0 (1+mz)$ を満足する u_* を求める、④ $Q = \varphi u_* B_0 (1+mz)$ より Q を求める、⑤ (13) 式により、 τ_* を求める、⑥ ④で求めた φ が②の φ に一致するまで繰返す、⑦ (14) 式から dz/dx を求める、⑧ つぎの $(mz+1)$ の値へ前進して計算を繰返す。

(2) 静的平衡勾配 動的平衡勾配が形成されている状態から給砂が停止されると、河床低下が起り armouring 現象が生じて、 du_{*x} が移動限界状態となるような勾配とな、この静的平衡状態となるものと考えられる。 du_{*x} に対する移動限界掃流力 τ_{cmax} は Egiagaroff の式で与えられるものとする。

$$\frac{\tau_{cmax}}{\tau_c} = \left\{ \frac{\log_{10} 19}{\log_{10} (19 du_{*x}/d)} \right\}^2 \frac{du_{*x}}{d} \quad \dots \dots (15)$$

抵抗則としては、最大抵抗が重要な役割を演ずるものと考えて、

$$\varphi = \frac{V}{u_*} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R}{du_{*x}} \quad \dots \dots (16)$$

が成立するものとする。以下、動的平衡の場合と同様に

$$\frac{dz}{dx} = \frac{i_0 - u_*^3 \varphi B_0 (1+mz) / gQ}{\left\{ 1 - \frac{mQ}{(1 + \frac{2.5}{\varphi}) u_* \varphi B_0 (1+mz)^2} - \frac{u_*^3 \varphi m}{g(1+mz)} \frac{2.5}{1 + \frac{2.5}{\varphi}} \right\}} \quad \dots \dots (17)$$

が得られる。(16) 式を (14) 式同様数値計算を行なう。すなわち、① (15) 式より u_{*x} を求める、② $(mz+1)$ を求める、③ φ を仮定する、④ $Q = \varphi u_* B_0 (1+mz)$ より Q を求める、⑤ (16) 式より φ を求める、⑥ ④で求めた φ が③の φ に等しくなるまで繰返す、⑦ (17) 式より dz/dx を求める。

3. 実験 以上の結果の検証と平衡勾配の特性を明らかにする目的で、長さ 15m、平均勾配 0.05

、底幅7.7cm、上幅27.3cm、高さ19.4cmの台形断面水路で実験を行なった。ただし、水路は相当に洗んでいて、堆砂のある部分の平均勾配は $i_0 = 0.042$ である。使用砂は $d_m = 0.148\text{cm}$ 、 $\sqrt{d_{90}/d_{16}} = 2.64$ である。図-2は $Q_B/Q = 0.0038$ の一定値を保持して行なう場合の平衡形状を示しているが、この場合、流量が増加するほど堆砂勾配が緩くなる傾向があることに注意を要する。すなわち、流砂量と流量に比例する場合には調節効果はあらわれず、かえって流

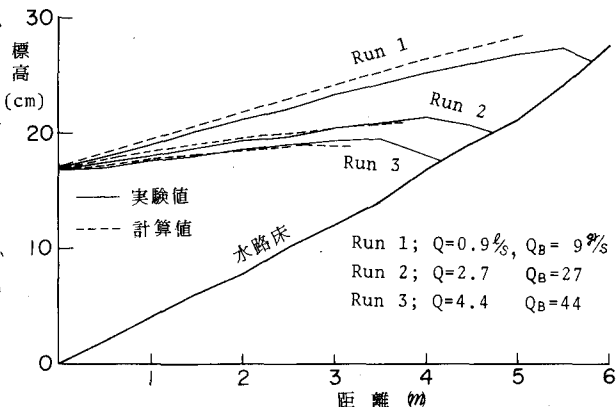


図-2 動的平衡勾配 ($Q_B/Q = \text{const.}$)

下土砂量が多くなる。このRun 2, Run 3では実験値と計算値と比較的よくあっているがRun 1では少し違っている。これはRun 1では水深がほぼ最大粒径程度で小さく、このような場合には流砂量式(2)の適用性に疑問があることを示している。図-3はRun 3の状態を初期条件としてRun 4からRun 5へ徐々に流量を増加させて静的平衡状態を作ったもので、Run 4ではRun 3の動的平衡勾配がすでにRun 4に相当する平衡勾配よりも緩くなっているため、runwayは起るが河床の低下は起らない。Run 5およびRun 6では d_{max} として d_{95} をとって計算した結果が実験値と比較的よく説明している。

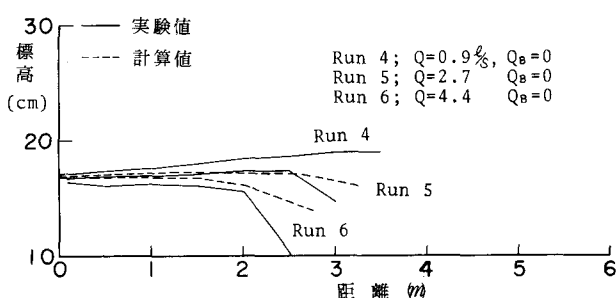


図-3 静的平衡勾配 (初期河床はRun 3によるもの)

以上には水通しのない坊主堰堤の場合であるが、堰の中央部に幅10cm、深さ5cmの長方形の水

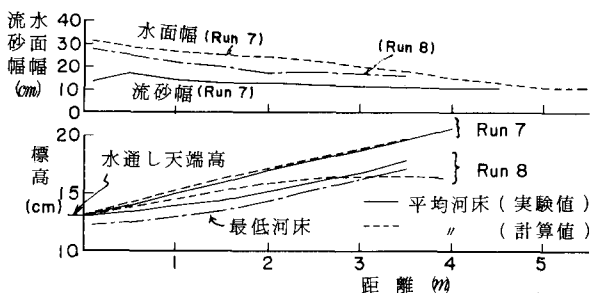


図-4 水通しのある場合の平衡勾配と流砂・水面幅

る。ただし、Run 7はRun 1と同じ流量および給砂条件で行なったもので、Run 8はRun 4と同じ条件である。Run 7では坊主堰堤の場合と同様に、水路幅全体が有効であるとして計算した結果が実験値とよくあっている。しかし、Run 8の静的平衡の場合には、水路幅全体が有効であるとした計算値は河床勾配の傾向を説明できていない。これは、堆積区間への流入幅と堰の流出幅によって規定されるであろうある幅のみが有効断面となって洗掘を受け、新しい水みちが形成されることによるものである。水みち形成の傾向は動的平衡のRun 7でも流砂幅と水流の幅が異なる状態となっておりあわれている。

以上、いわゆる各個運搬の形態での流出砂量の堆積勾配をここで導いた平衡勾配の式によって比較的よく説明されることがわかったが、水みち幅がどうしてきまるのか、水深が最大粒径と同程度である場合の流砂量式はどうか、さらには山地において流量と流砂量の関係はどうか、といった問題を究明しなければ調節機能を十分に説明することができないので、今後研究を推進したい。