

〇安養寺信夫
 建設省多治見工事事務所 池谷 浩
 建設省土木研究所 水山 高久

はじめに

砂防ではこれまで砂防ダムの効果，河道内の土砂堆積その他ほとんどの問題について浮遊砂を無視する傾向が強かった。それは、浮遊砂＝細粒土砂＝無害土砂という連想が定着しすぎていたためと考えられる。しかし、急勾配の流れの中では浮遊砂として運搬されるが、緩勾配になると掃流状態で移動し、掃流力の低下によってついに停止するものも大きな出水では多いと考えられる。砂防計画で取り扱う大洪水時には、山腹から多くの土砂生産が想定されており、これらには細粒土砂が多く含まれていて、計画基準点下流へ多くの細粒土砂が流送される。本報告は、細粒土砂も考慮した流出土砂量の推定と、洪水氾濫区域上流端に設定したトラブルスポットにおける河床変動と被害の想定手法について簡便なモデルを検討してその適用を試みたものである。

1. 土砂流出・堆積・氾濫モデルの概要

今回の検討では、土砂生産過程などの詳細な吟味は行わないで、砂防計画に用いられている生産土砂量を与えるものとした。洪水の氾濫危険地点をトラブルスポットと呼んで図-1に示すように想定洪水氾濫区域の上流端で、かつ勾配の変化点となる地点を1箇所選定した。トラブルスポットにおける河床変動は勾配変化による土砂輸送能力の差で表現することにし、河床上昇は洪水時系列にあわせて進行するものとした。堆砂勾配 I_s は上下流の平均河床勾配 I_u 、 I_a の平均として、

$$I_s = \frac{I_u + I_a}{2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

で与えた。そして、堆砂高に応じてトラブルスポットの洪水水位が上昇し、水位が氾濫水位高を越えると水と浮遊砂の氾濫が生じ、さらに堆砂が進行して堆砂高が氾濫水位高を越えると掃流砂の氾濫が開始すると考えた(図-2)。なお、今回は破堤は考えない。

2. 流出土砂量のハイドログラフ

トラブルスポットにおける河床上昇を時系列で表現するため、つぎのような手法で洪水ハイドログラフに対する流出土砂量のハイドログラフを作成する。

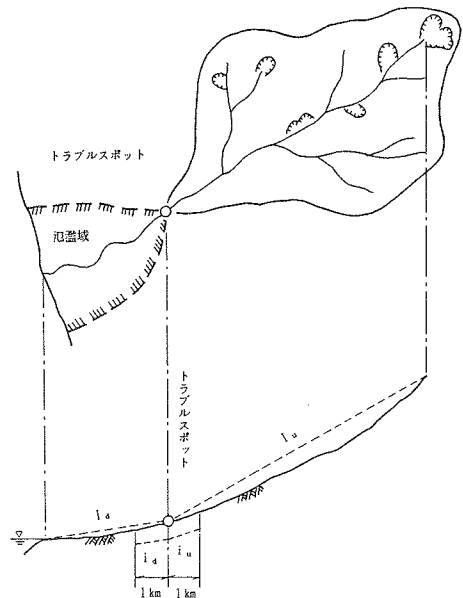


図-1 トラブルスポットの概念

2.1 浮遊砂・・・上流勾配 I_u , ピーク流量 Q_p による摩擦速度 U_{*u} に対して(2)式を満足する沈降速度 w_0 を有する砂礫径を浮遊限界粒径 d_{cu} とする。

$$w_0 < a_* U_{*u} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 a_* は定数で、芦田・道上による基準点濃度の考えかたをもとに試算して求めた。

また、 w_0 は Rubey の式より求める。

$$w_0 = \sqrt{s g d} \cdot F(d)$$

$$F(d) = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36 \nu^2}{s g d^3}} - \sqrt{\frac{36 \nu^2}{s g d^3}} \quad (3)$$

ここで、 $s = \sigma / \rho - 1$, σ , ρ ; 砂礫と水の密度、 g ; 重力加速度、 d ; 粒径、 ν ; 動粘性係数(2) , (3)式で得られた浮遊限界粒径 d_{cu} と山腹土砂の粒径加積曲線より d_{cu} 以下の粒径の占める割合 P_{*u} を得る (図-3) 。上流山地域における生産土砂量合計 V_{ST} に対して、トラブルスポットへ流出してくる一洪水の浮遊砂量合計 V_{su} は、

$$V_{su} = P_{*u} \cdot V_{ST} \quad \dots\dots\dots (4)$$

トラブルスポット下流の浮遊砂量は下流河床勾配 I_d とピーク流量で計算される摩擦速度 U_{*d} によって浮遊限界粒径 d_{cd} を得、下流勾配で流下しうる浮遊砂量合計 V_{sd} は、

$$V_{sd} = P_{*d} \cdot V_{ST} \quad \dots\dots\dots (5)$$

で計算される。つぎに、浮遊砂のハイドログラフは、浮遊砂量の経験式 $Q_s = \alpha Q^2$ より一洪水の総土砂量として、(6)式で表される。

$$V_s = \frac{1}{1-\lambda} \int_0^t \alpha Q(t)^2 dt \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 t ; 洪水継続時間、 λ ; 堆積土砂の空隙率である。トラブルスポットへ流入する土砂量は(4)式と(6)式が等しいとすると、係数 α が(7)式で求められるので、浮遊砂のハイドログラフは、(8)式のようになる。

$$\alpha_u = \frac{V_{su} (1-\lambda)}{\int_0^t Q(t)^2 dt} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$Q_{su}(t) = \alpha_u Q(t)^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

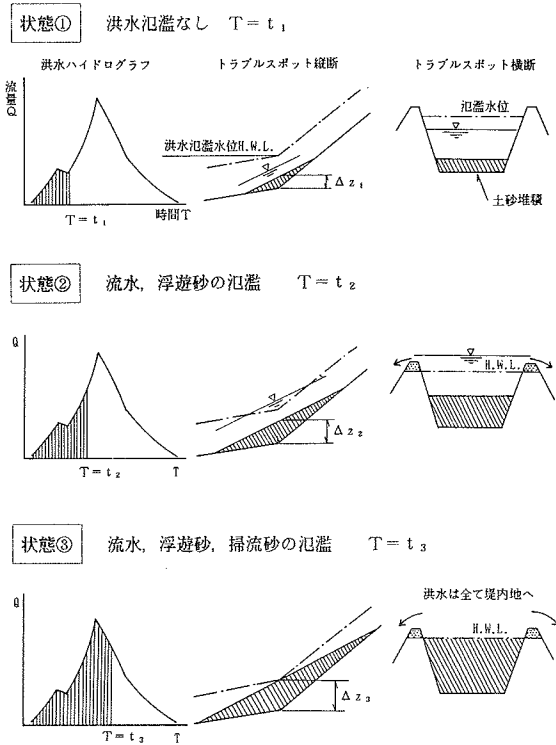


図-2 洪水・土砂の氾濫モデル

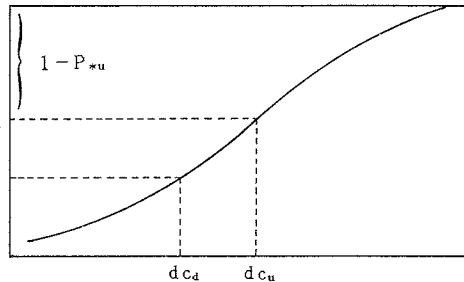


図-3 粒径加積曲線における概念

トラブルスポット下流側も(5)式と(6)式が等しい条件のもとで同様に α_d 、 $Q_{sd}(t)$ が得られる。

2.2 掃流砂・・・トラブルスポット上流の掃流砂成分は図-3より、浮遊限界粒径 d_{cu} 以上の割合 $(1 - P_{*u})$ で表される。掃流砂量はこの $(1 - P_{*u})$ の粒径百分率で評価される砂礫の平均粒径 d_{mu} を用いて、次の芦田・高橋・水山の掃流砂量式によって $Q(t)$ に対して計算する。

$$\frac{q_B}{\sqrt{s g d_{mu}^3}} = 12 \tau_*^{1.5} \left(1 - 0.85 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - 0.92 \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 q_B ；単位幅あたりの掃流砂量、 τ_* ；無次元掃流力、 τ_{*c} ；限界掃流力(=0.045)である。また、ここでは浮遊砂量 Q_{su} の増加による水のみかけの密度 ρ' の増加を考慮して(9)式で計算する。

$$\rho' = \frac{Q \rho + Q_{su} \sigma}{Q + Q_{su}} \dots\dots\dots (10)$$

掃流砂量 Q_B は流量と比例して、 $Q_B = \beta Q$ で表されるものとする、トラブルスポット直上流の勾配 i_u で輸送されうる一洪水の掃流砂量合計 V_{Bu} は、(11)式のとおりとなる。

$$V_{Bu} = \frac{1}{1 - \lambda} \int_0^t \beta Q(t) dt \dots\dots\dots (11)$$

$V_{Bu} = V_{sT} \cdot (1 - P_{*u})$ で表されるので、トラブルスポット上流における係数 β_u は次式で示される。

$$\beta_u = \frac{V_{sT} \cdot (1 - P_{*u})}{\int_0^t Q(t) dt} \cdot (1 - \lambda) \dots\dots\dots (12)$$

掃流砂量計算では河床勾配はトラブルスポット上下流1km区間の平均勾配として i_u 、 i_d を用いる。(9)式より i_u による一洪水掃流砂量 Q_{B1} を求め、 $Q_{B2} = \beta_u Q$ を上限値として、 $Q_{B1} \leq Q_{B2}$ の条件のもとで掃流砂量を算出する。トラブルスポット下流についても i_d による計算を同様にして求める。

3. 洪水と土砂の氾濫と被害想定手法

トラブルスポットに流入する土砂量 $\{Q_{su}(t), Q_{Bu}(t)\}$ と下流河床勾配での輸送能力によって下流河道へ流出する土砂量 $\{Q_{sd}(t), Q_{Bd}(t)\}$ の差が、トラブルスポットの勾配変化点に堆積する土砂量 $\Delta v(t)$ で(13)式で表される。

$$\Delta v(t) = \frac{1}{1 - \lambda} \int_0^t \{ Q_{su}(t) + Q_{Bu}(t) - Q_{sd}(t) - Q_{Bd}(t) - Q_{sH}(t) - Q_{BH}(t) \} dt \dots\dots\dots (13)$$

ここで、添字はそれぞれS;浮遊砂, B;掃流砂, u;上流側, d;下流側, H;氾濫土砂量を示す。勾配変化点の堆砂高 $\Delta z(t)$ は河道断面を矩形として、(14)式で求める。

$$\Delta z(t) = \sqrt{\frac{\Delta v(t) \cdot (I_u - I_d)}{2 B}} \dots\dots\dots (14)$$

ただし、 B ；トラブルスポットの平均河道幅である。

氾濫区域はほぼ標高に沿ったブロックに区分し、区域内における氾濫水位 H_{Bi} と氾濫土砂堆積面積 A_{vi} は(14)、(15)式のように求める。

$$H_{Bi} = (n \cdot Q_{HP} / B_{Bi} / I_{Bi}^{0.5})^{0.6} \dots\dots\dots (15)$$

$$A_{vi} = \frac{1}{h_m} \int_0^t \{ Q_{sH}(t) + Q_{BH}(t) \} dt \dots\dots\dots (16)$$

ここで B_{Bi} ; i ブロックにおける平均幅, I_{Bi} ; i ブロックの平均勾配, n ; 氾濫域の粗度係数でここでは $n = 0.1$ とした。 Q_{HF} ; 氾濫ピーク流量で氾濫流量 Q_H ((16) 式) の最大となるものを与える。

$$Q_H = Q - B (H_d - \Delta z)^{5/3} \sqrt{I_s} \quad \dots\dots\dots (17)$$

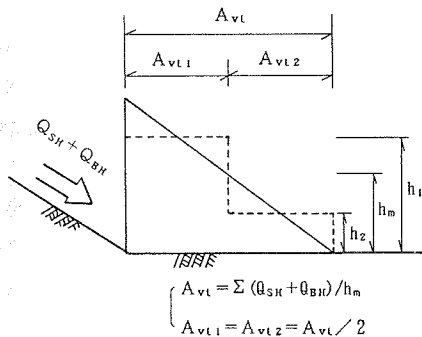
h_m ; 氾濫土砂の堆積深で図-4のように与える。

洪水・土砂氾濫による被害額は想定氾濫区域の資産調査に基づき、氾濫水位、土砂堆積深ごとの被害率を乗じることによって算定する。

4. 適用事例

以上の手法を実際河川の砂防計画における被害想定に適用した。対象とした J 川は計画基準点上流の流域面積 347 ㎢ の急流荒廃河川で下流には扇状地が形成され、この範囲が想定氾濫区域である。トラブルスポットは過去の洪水氾濫地点を参考に扇頂部に設定した。計画生産土砂量は $34,350 \times 10^3 \text{ m}^3$ 、計画流出土砂量は $19,000 \times 10^3 \text{ m}^3$ (150 年確率規模) と設定されている。

縦断面より勾配 I_u, I_d, i_u, i_d を求め、山腹土砂の粒径分布図より、 $d_{cu} = 4.5 \text{ mm}$ 、 $P_{*u} = 43.7\%$ 、 $d_{cd} = 1.6 \text{ mm}$ 、 $P_{*d} = 33.1\%$ を得る。計算の結果は図-5 に示すとおりである。上流が無施設状態では、流出土砂量は浮遊砂量 $V_{su} = 15 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、掃流砂量 $V_{bu} = 5.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、合計 $20.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ となり、計画流出土砂量にほぼ等しい値が得られた。氾濫量は総氾濫洪水量 $\Sigma Q_H = 1.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、総氾濫土砂量 $\Sigma (Q_{SH} + Q_{BH}) = 15.35 \times 10^6 \text{ m}^3$ となり、氾濫区域内の資産調査による被害額は、家屋、家財、農作物、公共土木施設などの被害総額 2,700 億円 (単価は昭和50年度デフレート) が見込まれた。



ここで、 A_{vt} ; 土砂氾濫面積
 A_{vt1} ; 土砂堆積深 $h_1 = 0.75\text{m}$ の氾濫面積
 A_{vt2} ; 土砂堆積深 $h_2 = 0.25\text{m}$ の氾濫面積
 Q_{SH} ; 氾濫浮遊砂量
 Q_{BH} ; 氾濫掃流砂量
 h_m ; 平均土砂堆積深 (0.5m)

図-4 氾濫土砂堆積モデル

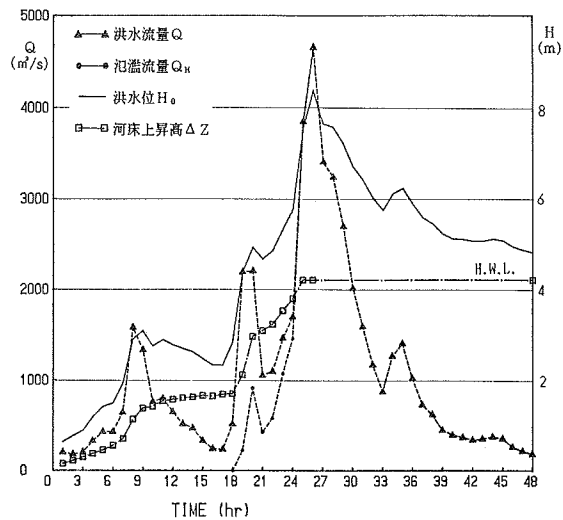


図-5 洪水時の各ハイドログラフ