

土石流の堆積侵食過程の二層流モデルによる解析とその検討

岐阜大学工学部 正会員 高濱淳一郎
 岐阜大学工学部 正会員 藤田裕一郎
 岐阜大学大学院 学生員 近藤 康弘
 岐阜大学大学院 学生員 蜂谷 圭

1. はじめに 本研究では、幅広い条件下において土石流の堆積侵食現象を合理的且つ統一的な方法で予測評価することを目的として、まず、掃流状集合流動の水流層と砂礫移動層とのinterfaceの取り扱いに留意した各層の支配方程式を誘導して、土石流から掃流状集合流動への流れの遷移、及び堆積侵食に関する解析を行った。ついで、実験結果と比較して、その妥当性を検討した。

2. 二層流モデルの支配方程式¹⁾ 土石流から掃流状集合流動への遷移、及びその逆の遷移において水流層が出現、喪失する。したがって、図-1

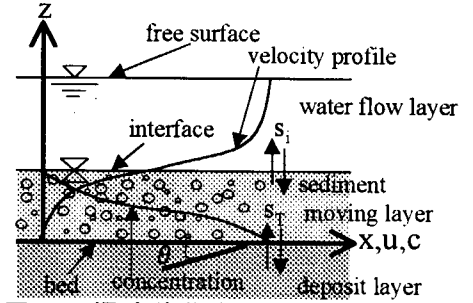


図-1 掃流状集合流動の模式図

に示すように土石流、掃流状集合流動では interface を通じての質量と体積のフラックスが介在するとともに、interface の速度に対応した運動量の交換を伴う。水流層が interface を通して単位時間あたりに獲得する体積量を s_i とすれば、水流層と砂礫移動層の連続式、運動方程式は以下ようになる。

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} + \frac{\partial(v_w h_w)}{\partial x} = s_i \quad (1) \quad \frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial(v_s h_s)}{\partial x} = s_T - s_i \quad (2) \quad \frac{\partial(c_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(c_s v_s h_s)}{\partial x} = c^* s_T \quad (3) \quad \frac{\partial z_b}{\partial t} = -s_T \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_w v_w h_w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_w \beta_w v_w^2 h_w)}{\partial x} - \rho_w s_i u_i \quad (5) \quad \frac{\partial(\rho_s v_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s \beta_s v_s^2 h_s)}{\partial x} + \rho_w s_i u_i \quad (6)$$

$$= \rho_w g h_w \sin \theta - \frac{\partial P_w}{\partial x} - \tau_w \quad = \rho_s g h_s \sin \theta - \frac{\partial P_s}{\partial x} + \tau_w - \tau_b$$

ここに、 h_w は水流層厚、 h_s は砂礫移動層厚、 v_w は水流層の平均流速、 v_s は砂礫層の平均流速、 c_s は砂礫移動層内の平均体積濃度、 c^* は堆積層濃度、 z_b は河床高、 s_T は侵食速度である。また、 ρ_s は砂礫層の平均密度、 ρ_w は水流層の密度、 u_i は interface における x 方向の流速、 P_w は水流層に作用する圧力、 P_s は砂礫層に作用する圧力、 τ_w は interface に作用するせん断応力、 τ_b は河床面せん断応力である。 β_w 、 β_s は運動量補正係数であるが、以下の解析では、一定値 ($\beta_w = \beta_s = 1$) として取り扱っている。

上式における s_i は掃流状集合流動領域で砂礫移動層濃度を一定値 ($c = c^*/2$) とすることにより計算している。また、このようにして計算される砂礫層厚が全流動層厚より大きくなるときは、土石流として取り扱っている。

各せん断応力 τ_w, τ_s は、江頭らの構成則²⁾を一樣濃度に適用して、それぞれ次式のように与える。

$$\tau_w = \rho_w f_w |v_w - u_i| (v_w - u_i) \quad (7) \quad \tau_b = (\rho_s - \rho_w) g h_s \frac{1}{1 + \alpha} \cos \theta \tan \phi + \rho_w f_s |v_s| v_s \quad (8)$$

ここに、 u_i は、interface の速度であり、砂礫層の流速分布形を用いて、平均流速との比から計算する。侵食速度は江頭らによる侵食速度式³⁾を二層流に拡張して評価する。

$$s_T = v_t \tan(\theta - \theta_e) \quad (9)$$

ここに、 v_t は二層流全体の平均流速、 θ_e は全層平均濃度 c_t に対応する平衡勾配であり、次式のような。

$$v_t = v_s \frac{h_s}{h_t} + v_w \frac{h_w}{h_t} \quad (10)$$

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)c_t}{(\sigma/\rho - 1)c_t + 1} \tan \phi \quad (11)$$

$$c_t = c_s \frac{h_s}{h_t} \quad (12)$$

キーワード：土石流、掃流状集合流動、二層流モデル、堆積侵食過程

連絡先（〒501-1193岐阜県岐阜市柳戸1番1 TEL058(293)2476 FAX058(230)1891）

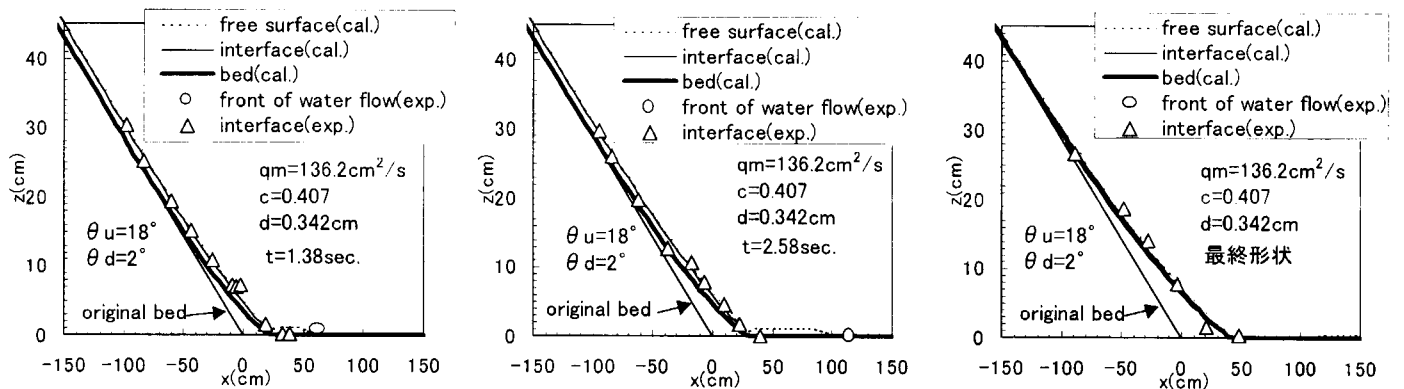


図-2 計算値と実験値との比較（下流側勾配 2°）

3. 解析結果の検討

上述の解析法の妥当性を検討するために、勾配変化点を有する幅 10cm の矩形水路を用いて、定常給水、定常給砂のもとで実験を行い、計算と比較した。実験砂の粒径は $d=0.342\text{cm}$ である。まず、上流側勾配を 18° 、下流勾配を 2° とし、供給濃度を約 40% と

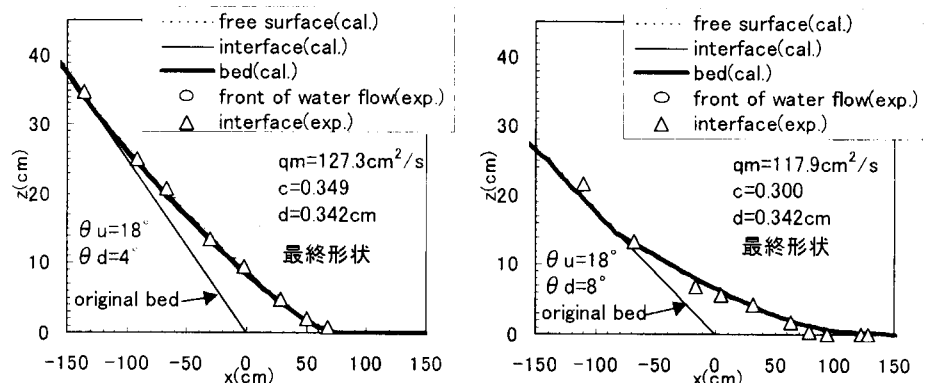


図-3 計算値と実験値との比較（左図：下流勾配 4°，右図：8°）

として、堆積が生じやすく、砂礫層が流下しにくい条件下での実験、及び後順次、下流勾配を大きくするとともに、供給濃度を低くして、相対的に堆積が生じにくい条件下での実験を行い、計算結果と比較した。比較図には上流側勾配 (θ_u)、下流側勾配 (θ_d)、混合物の供給量 (q_m)、供給濃度 (c)、及び土石流の勾配変化点到達時からの時刻 (t) を示している。また、実験値として interface、及び水流層の先端部位置が示されている。図-2 には下流側勾配を 2° とした場合の結果が示されている。実験、計算ともに土石流の堆積に伴って水流層が出現し、水流層が流れの先端部を形成しており、計算によって interface と水流層の先端部位置、及び最終堆積形状が再現できている。図-3 は下流勾配をそれぞれ 4° 、 8° とした場合の最終堆積形状を示している。図から分かるように、勾配や、供給濃度の変化に対しても、本モデルは実験結果をよく説明して

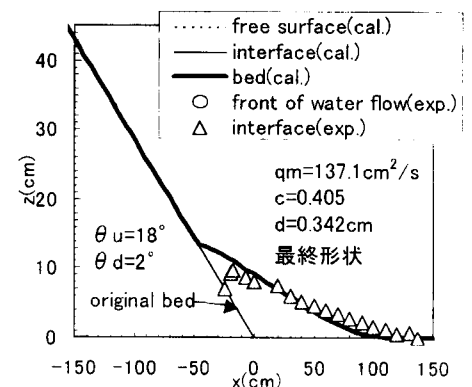


図-4 堆積土砂の再侵食現象に関する計算値と実験との比較

いる。次に、定常給水、定常給砂を一定時間継続した後、水の供給は継続させ、土砂の供給だけを停止して、堆積物を再侵食させる実験を行い、計算結果と比較した。図-4 に最終堆積形状を示す。計算では、再侵食による土砂移動が実験よりも遅くなる傾向があったが、最終堆積形状は概ね一致している。以上の結果は、このような簡潔なモデルであっても、幅広い条件に対して合理的な評価ができることを示唆している。

4. おわりに 提案した二層流モデルの妥当性を実験と比較して検討し、その有効性が確かめられた。今後、モデルに導入した近似、仮定を吟味しつつ、現場への適用を図っていきたい。

参考文献(1)高濱ら：土石流から掃流状集合流動に遷移する流れの解析法に関する研究，水工学論文集，第 44 巻，pp.683-686，2000。(2)江頭ら：掃流砂量に関する力学的解釈：水工学論文集，第 41 巻，789-794，1997。(3)江頭ら：土石流の流動機構，第 32 回水理講演会論文集，pp.485-490，1988