

25 二層流モデルによる土石流堆積シミュレーション

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

1. はじめに

本研究は、幅広い条件下における土石流の堆積侵食現象を予測評価するため、合理的且つ統一的な解析法を構築することを目的としている。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、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. 支配方程式の分離¹⁾

図-1に示すように、掃流状集合流動を「上層の水流層と下層の砂礫移動層とからなる二層流」として取り扱えば、土石流は両層の interface が自由表面に達した流れ、掃流砂は水流層厚が卓越した流れとなり、掃流状集合流動はその遷移領域となる。土石流の堆積侵食現象を予測評価する際に、このような二層流の領域を取り扱うことは稀ではない。また、平成11年6月末の広島災害にみられたように、上流部にかなりの土砂が堆積したとしても、土砂から分離した水流（濁流）による流木輸送など下流域への影響を予測評価する必要がある。水流層、砂礫移動層の流れは各層の構成則を反映したものとなるが、各層の構成則は本質的に異なるものである。したがって、土石流と掃流砂との間の遷移、及び土砂の堆積侵食過程を予測評価するためには、各層毎の連続式、運動方程式に基づいた解析が有効である。

流れが土石流から掃流状集合流動に遷移するとき、砂礫移動層上部に水流層が現れる。このとき、砂礫移動層上面を通して上方への水のフラックスが存在する。逆に、掃流状集合流動から土石流に遷移するときは、二層の interface を通して水流層から砂礫移動層へ水が流入する。つまり、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。また、このような interface を通じた質量交換は interface の速度に対応した運動量の交換を伴う。そこで、interface を通じての質量と運動量の交換を導入して、支配方程式を水流層と砂礫移動層とに分離する。interface を通じての体積フラックスによって水流層が単位時間あたりに獲得する体積量を s_i とおけば、各層の連続式、河床位方程式、および運動方程式は次式のようになる。

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

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

$$= \rho_w g h_w \sin \theta - \frac{\partial P_w}{\partial x} - \tau_w \quad (5) \quad = \rho_s g h_s \sin \theta - \frac{\partial P_s}{\partial x} + \tau_w - \tau_b \quad (6)$$

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り、以下の解析では一定値 ($\beta_w = \beta_s = 1$) としている。支配方程式中の s_i に関する項が二層間の質量と運動量の交換を表している。支配方程式を二層に分離することで、全層が砂礫層である流れから全層が水流層となる流れに対して、各層の体積・運動量変化を各層の構成則に基づいて連続的に取り扱うことができる。

3. 解析に用いた構成則と堆積侵食速度²⁾

上述の支配方程式による解析にあたって、式中の各項を次のように評価している。砂礫層濃度は一様濃度とし、掃流状集合流動領域で一定値 ($c_s = c_*/2$) としている。これにより、上式における s_i が計算される。ここで、計算による砂礫層厚が全流動層厚より大きくなる場合は、土石流として取り扱っている。各せん断応力 τ_w 、 τ_b は、江頭らの構成則³⁾を一様濃度に適用して与えている。また、 u_i は砂礫層の流速分布形を計算して、平均流速との比から評価している。侵食速度は江頭らによる侵食速度式³⁾における土石流の流速に二層流全体の平均流速を与え、全層厚で平均した濃度で平衡勾配を与えることで、二層流に拡張している。

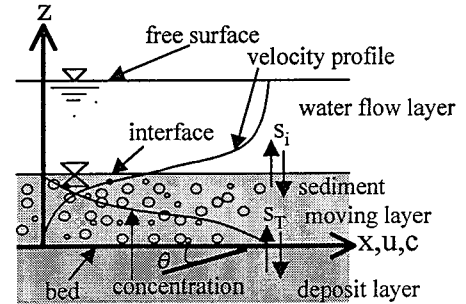


図-1 掃流状集合流動の模式図

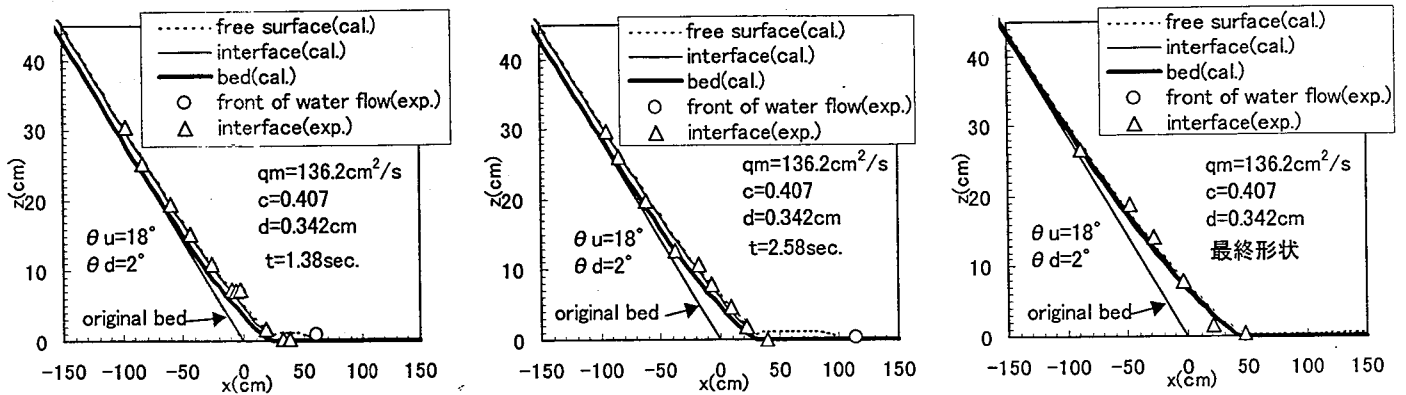


図-2 堆積現象に関する計算値と実験値との比較（下流側勾配2°）

4. 解析結果の検討

二層流モデルによる解析の妥当性を検討するために、水路実験を行い、計算結果と比較した。実験には勾配変化点を有する幅10cmの矩形水路を用い、定常給水、定常給砂のもとで行った。実験砂の粒径は $d=0.342\text{cm}$ である。まず、相対的に堆積が生じやすい条件と生じにくい条件を設定して実験を行った。すなわち、上流側勾配を 18° 、下流側勾配を 2° とし、土砂供給濃度を約40%とすることで、堆積が生じやすく、砂礫層が下流へと流下しにくい条件での実験を行い、

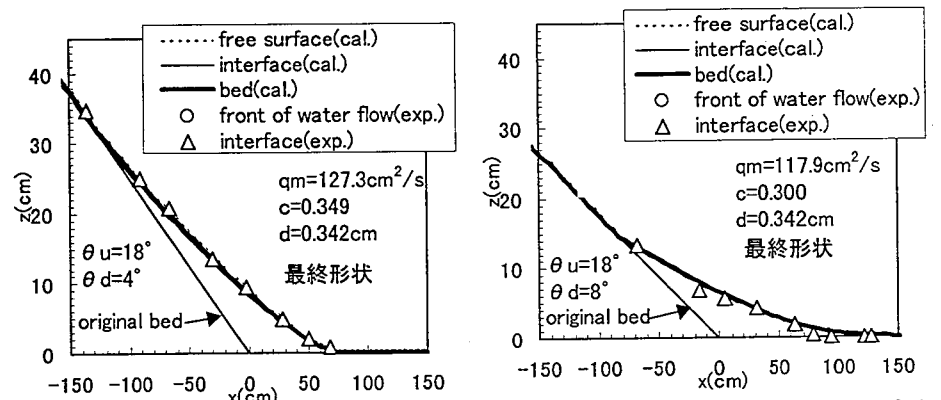


図-3 堆積現象に関する計算値と実験値との比較（左図：下流勾配4°，右図：8°）

ついで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く、砂礫層が下流へと流下しやすい条件下での実験を行った。図-2は下流側勾配を 2° とした場合の実験値と計算値とを比較したものである。各図の縦軸は下流側水路に沿って設定されており、縦軸は下流側水路軸に対して直角方向に設定されている。また、図中には上流側勾配(θ_u)、下流側勾配(θ_d)、混合物の供給量(q_m)、土砂供給濃度(c)、及び土石流の勾配変化点到達時からの時刻(t)、あるいは最終形状であることが示されている。計算値として河床面(bed)、 $interface$ 、及び水流層表面($free\ surface$)が、実験値については $interface$ (Δ 印)、及び水流層の先端部位置 (\circ 印)がそれぞれ示されている。実験では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、計算でも同じ傾向を示しており、本モデルによって実験での $interface$ 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、供給濃度を約35%、30%とした場合の最終堆積形状に関する実験値と計算値を比較したものである。図からわかるように、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たまま、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の実験条件は図-2に示す実験条件において後続流として清水を供給した場合の堆積形状変化を調べるために実施したものであり、図には最終堆積形状に関する実験値と計算値が示されている。計算では、再侵食過程において土砂移動が実験よりも遅くなる傾向が見られたものの、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予測評価が行えることを示唆している。

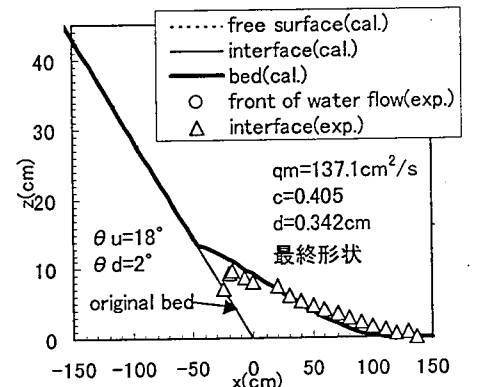


図-4 堆積土砂の再侵食現象に関する計算値と実験値との比較

5. 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、二次元氾濫をも含めた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