

土石流の侵食堆積に関する移動床実験とその検討

日本ミクニヤ(株) 正会員 近藤 康弘 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 蜂谷 圭
 (株)大増コンサルタンツ 坂本 麻矢

1. はじめに 本研究では、まず、勾配変化点を有する飽和移動床水路を用いた土石流の侵食堆積実験を行い、固定床での実験結果と比較する。ついで、流れの非定常効果を導入した侵食堆積速度式を用いて、移動床での土石流の侵食堆積過程を解析し、実験結果と比較検討した。

2. 本研究で用いる支配方程式と構成則 解析には次式に示す内部境界を考慮した二層流モデル¹⁾を用いる。

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

$$\frac{\partial(\rho_w v_w h_w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_w \beta_w v_w^2 h_w)}{\partial x} - \rho_w s_i u_i = \rho_w g h_w \sin \theta - \frac{\partial P_w}{\partial x} - \tau_w \quad (5) \quad \frac{\partial(\rho_s v_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s \beta_s v_s^2 h_s)}{\partial x} + \rho_w s_i u_i = \rho_s g h_s \sin \theta - \frac{\partial P_s}{\partial x} + \tau_w - \tau_b \quad (6)$$

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 は水流層の平均流速、 u_i は interface における流速、 c_s は砂礫移動層内の平均体積濃度、 c_* は堆積層濃度、 s_T は侵食速度、 s_i は interface を通じた水の体積フラックス、 ρ_s は砂礫層の平均密度、 ρ_w は水流層の密度である。また、 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、本研究では $\beta_w = \beta_s = 1$ としている。 τ_w と τ_s については、江頭ら²⁾の構成則を一樣濃度に適用して、以下の式で与える。

$$\tau_w = \rho_w f_w |v_w - u_i| (v_w - u_i) \quad (7)$$

$$\tau_b = (\rho_s - \rho_w) g h_s \left(\frac{c}{c_*} \right)^{1/n} \cos \theta \tan \phi + \rho_w f_s |v_s| v_s \quad (8)$$

ここに、 $n=5$ である。 s_T は江頭らの侵食堆積速度式³⁾を二層流に拡張して次式のように評価する。

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

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 に対する平衡勾配であり、以下のように与える。

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

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

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

3. 堆積侵食現象における非定常効果の導入 侵食堆積に及ぼす流れの非定常効果を検討するために、運動方程式の圧力項、慣性項を導入して解析を行う。式(11)の平衡勾配は平衡状態における河床面での力の釣り合いから導かれている。ここで、釣り合い式に運動方程式の圧力項を導入した場合の平衡勾配を θ_{ep} とすると、非定常効果を導入しない場合の平衡勾配 θ_{e0} として次式のように書ける。

$$\tan \theta_{ep} = \tan \theta_{e0} + \frac{\partial(P_{w0} + P_{s0})}{\partial x} \frac{1}{\rho \{(\sigma/\rho - 1) c_t + 1\} g h_t} \quad (12)$$

ここに、 $P_{w0} = P_w / \cos \theta_{ep}$ 、 $P_{s0} = P_s / \cos \theta_{ep}$ である。式(12)より、土石流フロント部のような水面勾配を持つ領域では侵食されやすい領域になり、逆の場合では勾配が抑制され、条件によっては堆積が生じる。さて、式(9)の侵食堆積速度式の形式では直接慣性項を導入することはできないが、ここでは便宜上、式(11)に圧力項と慣性項を付加して平衡勾配を求め、この平衡勾配を θ_{et} とおくと θ_{ep} を用いて次式で表される。

$$\theta_{et} = \theta_{ep} + \arcsin \left\{ D / \left(\rho g h_t \sqrt{A} \right) \right\} \quad (13)$$

$$\text{ここに、} D = \frac{\partial(\rho_s v_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s v_s^2 h_s)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_w v_w h_w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_w v_w^2 h_w)}{\partial x}, \quad A = \{(\sigma/\rho - 1) c_t + 1\}^2 + \left\{ (\sigma/\rho - 1) c_t \tan \phi + \frac{1}{\rho g h_t} \frac{\partial(P_{w0} + P_{s0})}{\partial x} \right\}^2$$

キーワード：土石流 侵食堆積 移動床 連絡先：〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1 TEL058-293-2476 FAX058-230-1891

4. 実験と計算結果との比較 幅 10cm の勾配変化点を有する水路を用いて土石流を定常供給して実験を行い、計算と比較した。実験砂の粒径は $d = 0.342\text{cm}$ である。水路は上流側勾配を 18° 、下流側勾配を 4° 、土石流の供給濃度は約 30% とした。図-1 は上流側河床を固定床、下流側河床を飽和移動床とした場合の実験結果と平衡勾配を θ_{e0} とした計算結果とを比較したものである。実験では堆積の初期過程で堆積区間の上流側で河床面、interface 及び水流層表面に折れ曲がりが見られる。この折れ曲がり形状は堆積遡上とともに目立たなくなり、最終的には河床面は直線状を呈する。実験での砂粒子を追跡すると、勾配変化点到達直後は、粒子は下流区間の元河床面に沿って移動し、堆積開始後、粒子流線には河床面に見られるような折れ曲がりが見られた。図-2 には図-1 の条件で、上流側に厚さ 4cm の飽和移動床を設けて、全区間を移動床とした実験結果と平衡勾配を θ_{e0} とした計算結果との比較図が示されている。実験では上流側を固定床とした場合に見られた河床面や interface の折れ曲がりが見られない。また、実験での砂粒子は、堆積の初期過程では上流側の河床に沿って直線的に流下して停止する。その後も、上流側を固定床とした場合に見られるような顕著な折れ曲がりは見られない。実験での流動層厚が計算値より厚くなっているが、実験での上流側河床における最終侵食量が計算値より多かったため、その分下流側への供給量が多くなったことも原因の一つと考えられる。図-3 には図-2 の実験結果と平衡勾配を θ_{ep} とした計算結果との比較図が示されている。平衡勾配に圧力勾配を導入すると、堆積区間上端部の遡上速度が再現できるようになり、両者の流動層厚の差も小さくなり、計算結果が改善されている。図-4 には実験結果と平衡勾配を θ_{et} とした場合における計算結果との比較図が示されている。圧力項に加えて慣性項を導入すると、interface の位置には両者に有意な差は見られないものの、計算において堆積が過小に評価され、最終堆積時においても流速の小さい厚い流動層が計算された。計算値では侵食過程で土石流フロント部において停止堆積層濃度に近い高濃度領域が形成されていた。したがって、このような領域での堆積計算では慣性項を導入すると堆積速度を過小に評価してしまう。

5. おわりに 上流側河床の固定床、移動床の違いによる実験結果の違いが明らかになり、また本研究において行った数値計算と実験との比較より、本実験で採用した条件では、江頭らの侵食速度式における平衡勾配に圧力勾配を導入することで移動床上の土石流堆積過程をよりよく説明できるが、慣性項までを導入すると堆積を過小に評価することがわかった。

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, pp.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

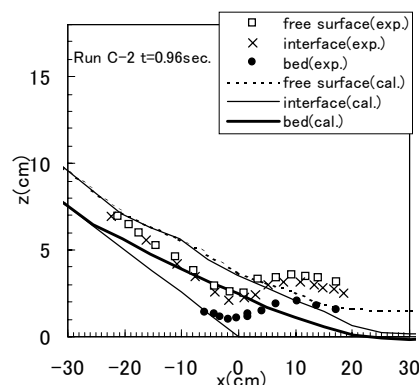


図-1 上流側区間を固定床とした実験結果

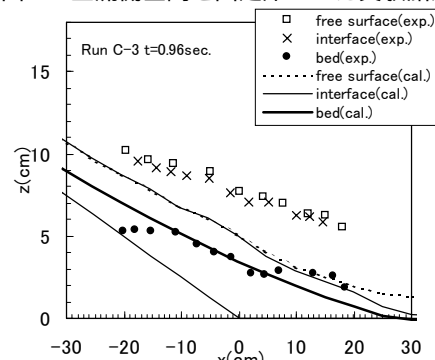


図-2 上下流区間を移動床とした実験結果

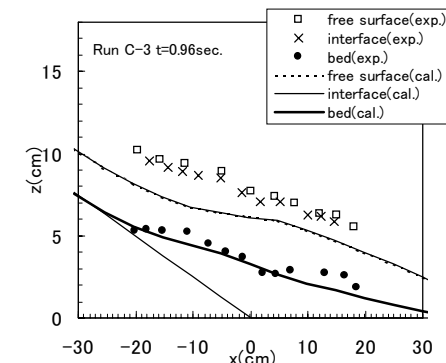


図-3 上下流区間とも移動床とした実験結果と圧力勾配を導入した計算結果

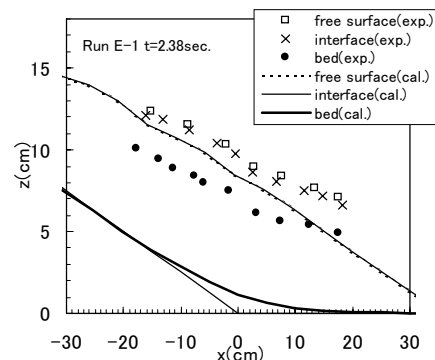


図-4 上下流区間とも移動床とした実験結果と圧力勾配・慣性項を導入した計算結果