

狭窄拡幅部を通過する土石流に関する実験と数値計算

京都府立大学大学院 ○高濱淳一郎

岐阜大学流域圏科学研究センター 藤田裕一郎

国土交通省北陸地方整備局立山砂防事務所 新谷 紘平

中央コンサルタンツ株式会社 高平 祐介

1.はじめに 渓谷に見られる狭窄部のような地形が急激に変化する場所では、土石流の流動の変化が大きくなることが予測される。しかし、このような領域における土石流の挙動を詳細に調べられた事例はあまりない。また、土石流の侵食堆積現象の評価は運動方程式中の重力項と河床面せん断応力（降伏応力）の大小関係で議論されることが多く、このような流路の急変部を対象にした議論には至っていない。そこで、ここでは、著者らによって行われた狭窄部を通過する土石流による不等流状態に関する実験結果¹⁾を紹介し、侵食堆積現象の評価に流れの急変部の効果を導入した解析法とその適用結果¹⁾について示す。

2.水路実験の概要 水路実験は長さ 6m、幅 10cm の直線水路を用いて行った。水路の途中に狭窄拡幅部を設けて、全区間を飽和移動床としたうえで、土砂と水を定常供給して実験を実施した。本報で示す実験の条件は水路勾配 15 度、供給水量は 531cm³/s、供給土砂量は 235cm³/s、供給濃度は 0.31 である。

3.圧力項を付加した平衡勾配と侵食堆積速度式 まず、著者らが提案した二層流モデル²⁾による二層の運動方程式を足し合わせて全層に対する運動方程式とすると次式のようにになる。

$$\frac{\partial(\rho_w v_w h_w + \gamma_d \rho_s v_s h_s)}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial(\rho_w \beta_w B v_w^2 h_w + \rho_s \beta_s B v_s^2 h_s)}{\partial x} = \rho_w g h_w \sin \theta + \rho_s g h_s \sin \theta - \frac{\partial P_w}{\partial x} - \frac{\partial P_s}{\partial x} - \tau_b \quad (1)$$

ここに、添え字の s, w はそれぞれ砂礫移動層と水流層の量を表す。 B は流路幅、 h は各層の流動層厚、 v は各層の平均流速、 θ は河床勾配、 ρ は各層の平均密度である。 g は重力加速度、 P は各層の側方に作用する圧力、 τ_b は河床面せん断応力³⁾である。式中の β_w, β_s は各層の運動量補正係数、 γ_d は濃度と流速の相関に関する形状係数である。ここではこれらの係数をすべて 1 としている。また、ここでは河床面の曲率に伴って発生する項は省略している。

侵食速度 s_T は江頭らの侵食速度式³⁾を二層流に拡張して²⁾次式のように評価する。

$$s_T = v_t \tan(\theta - \theta_e) \quad (2)$$

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、全流動層厚を h_t とおけばそれぞれ以下のように与えられる。

$$v_t = v_s \frac{h_s}{h_t} + v_w \frac{h_w}{h_t} \quad (3) \quad \tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho_w - 1)c_t}{(\sigma/\rho_w - 1)c_t + 1} \tan \phi \quad (4) \quad c_t = c_s \frac{h_s}{h_t} \quad (5)$$

ここに、 c_s は砂礫移動層内の平均体積濃度、 ϕ は内部摩擦角である。ここで、運動方程式(1)の圧力項を付加し、このときの平衡勾配を θ_{ep} とすると次式のようにになる。

$$\{(\sigma - \rho_w)c_t + \rho_w\} g h_t \sin \theta_{ep} - \cos \theta_{ep} \frac{\partial(P_{w0} + P_{s0})}{\partial x} - (\sigma - \rho_w)c_t g h_t \cos \theta_{ep} \tan \phi = 0 \quad (6)$$

ここに、 $h_t = h_s + h_w$ 、 $P_{w0} = P_w / \cos \theta_{ep}$ 、 $P_{s0} = P_s / \cos \theta_{ep}$ である。この θ_{ep} を式(2)に示した侵食堆積速度式に導入することによって流路の狭窄・拡幅による影響を侵食堆積現象の評価に導入する。このとき、圧力勾配を考慮した平衡勾配 θ_{ep} は θ_e を用いて次式のように表される。

$$\tan \theta_{ep} = \tan \theta_e + \frac{1}{\{(\sigma/\rho_w - 1)c_t + 1\}} \frac{\partial(P_{w0} + P_{s0})}{\partial x} \quad (7)$$

式(7)より θ_{ep} は土石流フロント部のような水面勾配がある領域では、 θ_e よりも小さくなり、侵食されやすい領域となり、逆の場合では、侵食が抑制され、条件によっては堆積する。

図-1に狭窄部を流動する土石流に関する実験値と式(7)を平衡勾配として侵食堆積速度を評価した数値計算結果を示す。図のx軸は初期河床に平行に設定してある。図の最上段には流路幅の縦断図が示してある。実験では、河床が黒丸(●)で示されており、狭窄部で河床低下が生じている。計算(太実線)によってもそのことが表現されている。しかしながら、計算による自由表面は直線状となっており、実験値を表現できていない。この移動床における圧力項導入の効果は以下のように考えられる。狭窄部へ進入した土石流は漸縮区間で側壁の作用を受け、高さ方向に逃げるため狭窄区間手前から狭窄区間では狭窄部へ侵入する土石流よりも流動深が厚くなる。そのため、流動深が薄い狭窄部より上流の土石流と流動深が厚くなった狭窄区間との土石流の間に圧力差が生じ、しかも、その圧力の向きは上流側方向となる。つまりこの間、下流側方向に重力(河床面せん断応力)、上流側方向に降伏応力と圧力が働いており、その釣り合いからこの区間の平衡勾配を求めると、狭窄部ではない区間の平衡勾配より大きくなる。逆に、狭窄区間を抜けた流動深の厚い土石流は、漸拡区間で側壁の作用から開放され逃げ場が広がるため、土石流の流動深が薄くなる。そのため、土石流と流動深が厚くなった狭窄区間と流動深が薄い狭窄部の間に圧力差が生じ、しかも、その圧力の向きは下流側方向となる。つまりこの間、下流側方向に重力(河床面せん断応力)と圧力、上流側方向に降伏応力が作用し、その釣り合いから平衡勾配を求めると狭窄部ではない区間の平衡勾配より小さくなる。ゆえに狭窄部内の平衡勾配が他の区間より大きく、また小さくなるために、このような下に凸の形状を表現できるようになった。

4. おわりに 流路の急変部における土石流の流動状況を水路実験により紹介し、流路急変による影響を流れの圧力勾配を平衡勾配に導入することで考慮する方法について説明し、水路実験に適用した結果を示した。実験は、固定床上でも実施しており興味深い結果が得られている。これについては、発表会当日に紹介する予定である。

参考文献 1)新谷紘平：土石流の発生と流下に関する実験的研究，岐阜大学大学院修士論文，2006.2)高濱淳一郎・藤田裕一郎・近藤康弘：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，683-686，2000.3)江頭進治・宮本邦明・伊藤隆郭：掃流砂量に関する力学的解釈，水工学論文集，第41巻，789-794，1997.4)江頭進治・本田尚正・安東容輔：地すべり堆積土砂の二次侵食による土砂流出，水工学論文集，第40巻，863-868，1996.

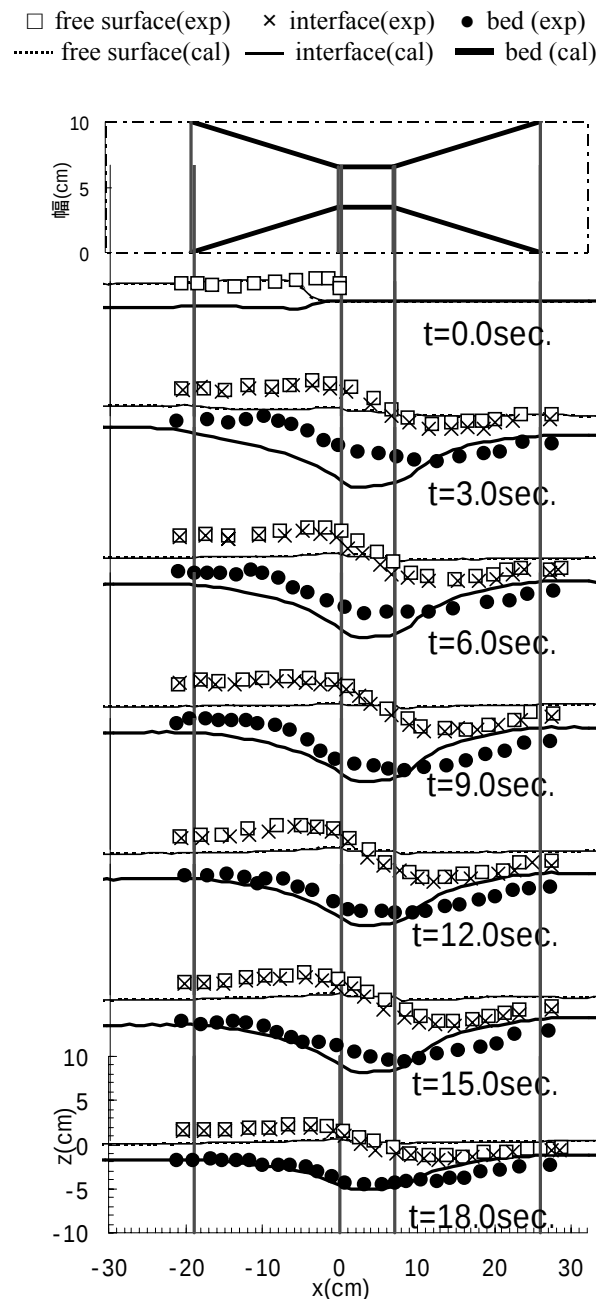


図-1 狭窄部における土石流流動実験結果と圧力勾配を導入した計算結果との比較(移動床)