

粘性土石流の間欠性に関する研究

名城大学大学院 学生会員 ○劉 雪蘭

名城大学理工学部 正会員 新井宗之

1. 緒論

粘性土石流は中国山地で発生している典型的な土石流である。その体積濃度 70%以上、数十、または 100 波程度以上の間欠流として、高速流れで緩勾配の河道を流下するという特徴がある。その流動機構について、高橋ら¹⁾はニュートン流体の流速分布、濃度分布と抵抗則、堆積機構から上流における天然ダムの崩壊モデルにより間欠性を説明している。一方、傾斜水路に流下した流れで重力項の影響を受けて、転波列が発生するという不安定性の議論は幾つかある。D.J. Needham ら²⁾は慣性項と重力項の比であるフルード数と流れの安定性から検討し、Ko-fei Liu ら³⁾は高含砂水流がビンカンム流体として転波列の発生を理論的に議論した。著者ら⁴⁾は実際に発生した粘性土石流の表面流速分布、また表面に現れる粒子の挙動について解析し、粘性土石流の流動機構は複雑であることを明らかにするとともにビンカンム流体の特徴である“栓流”が存在していないことが明らかにした。本研究ではニュートン流体が急勾配の水路を流下する場合の不安定性について、実験的に検討するとともに、実際の土石流における間欠性の機構についてすでに明らかにされているモデルとの関係について比較検討した。

2. モデル⁵⁾

粘性土石流の流下は表面先端速度が対数分布、後続で放物線分布であることから、後続部ではニュートン流体として取り扱う。流速分布は近似二次放物線分布 $u = 3\bar{u}(\frac{y}{h} - \frac{y^2}{2h^2})$ である。ここで、水深方向の平均流速は高橋らのモデルを使って、 $\bar{u} = \frac{1}{2} \frac{\rho g h^2 \sin \theta}{\nu} (1 + \frac{\sigma - \rho}{\rho} \bar{c})$ である。ここに、 ρ は間隙流体密度、 σ は粗粒子の密度、 g は重力加速度、 h は水深、 ν は動粘性係数、 $\bar{c}$ は断面平均濃度である。従って、流れの連続式および運動量式は次のように表している⁵⁾。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}h}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{u}h}{\partial t} + \frac{6}{5} \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}^2 h) = -\frac{h \cos \theta}{Fr^2} \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{h \sin \theta}{Fr^2} - \frac{3\bar{u}}{Rh} \quad (3)$$

ここに、 $Fr = u/\sqrt{gh}$ はフルード数、 $R = uh/\nu$ はレイノルズ数である。移動座標を $\xi = x - t$ と設定し、また、最末端で流れが止まることを仮定し、式(2)と(3)を積分して、代表波速と波高は

$$U = \left\{ \frac{75 \nu g \cos^2 \theta (1 - q)}{\sin \theta (6q^2 - 1)^2} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

$$H = \frac{(6q^2 - 1)}{5g \cos \beta} U^2 \quad (5)$$

である。ここで相対移動座標に対して流量は $q = H(\xi)[1 - \bar{u}(\xi)]$ である。また、衝撃波の質量と運動量の保存則によって、波の長さは $\xi(h_2) - \xi(h_1) \equiv \lambda(\alpha, q, h_1, h_2)$ である。

3. 実験方法および結果

実験水路は長さ 8m、幅は 10cm で両側壁透明アクリル製、勾配 16° である。水路床はペンキ仕上げの滑面である。実験方法は、水路全体に土砂を約 3cm の厚さに敷き土砂を湿潤状態にしたあと、平均密度約 1.87g/cm³ の混合物（粘土、8 号砂、6 号砂、4 号砂、レキと水）を上流端の給水槽から供給、流下させた。下流側約 7m の位置で、水路の側面よりフレーム速度 1/30 s のビデオカメラで、流下状況を記録し、解析に

供した。

実験は二回を行った。一回目は約 10kg の土砂混合物を上流に供給し、流れの水深変化は図-1 のようである。転波列は見られない。このサージの先端平均流速は約 7.2cm/s である。レイノルズ数は $Re \approx 300$ 、フルード数は $Fr \approx 0.3$ である。

二回目は約 14.7kg の土砂混合物を上流より供給した。水深変化は図-2 に示している。流れは不安定で転波列が幾つも出現していることが示されている。このサージの先端流速は約 143cm/s である。レイノルズ数は $Re \approx 2 \times 10^4$ 、フルード数は $Fr = 2.7$ である。

これらの結果より、転波列が発生するには、慣性項と粘性項の比であるレイノルズ数以外に、慣性項と重力項の比であるフルード数も関連して、流れを支配していて、フルード数が 2 より大きい場合、このような土砂含有する流れにおいても、流れの不安定性が生じることが示された。

4. モデルの適用

先述のモデルを適用し、転波列の発生した実験のフルード数を使って、代表波速度と波高をそれぞれ計算すると：

$$U = 158 \text{ cm/s} \quad H = 3.4 \text{ cm}$$

である。これは実験結果より少し大きい値を示している。と

ところで、中国雲南省蔣家溝で観測された土石流では、平均密度約 2.2 g/cm^3 のもので、勾配約 5° の河床で、先端速度約 11m/s、水深約 2.5m の観測データを得ているが、このフルード数は約 2.2 であることから、転波列発生条件を満足していることと考えられる。この代表波速度と代表波高さを計算すると：

$$U = 17.9 \text{ m/s} \quad H = 6.7 \text{ m}$$

である。これは実際の観測値よりも大きい値である。これは規模の大きな流れの場合、混合効果が無視できないことによるものと考えられる。

5. 結語

本研究では、粘性土石流の高速、間欠性流動について実験的な検討をした。また、実際の粘性土石流観測結果と実験結果について、ニュートン粘性流体モデルを適用し、代表波速度と水深について検討したが、そのようなモデルではかなり大きな値となることが分かった。今後、流れの混合効果についてさらに検討したい。

「参考文献」：

- 1) 高橋 保・中川 一・里深好文・緒方正隆：粘性土石流の流動機構に関する研究(3) ——土石流サージの形成と伝播——、京都大学防災研究所年報 第 41 号 B-2、pp265-275、1998
- 2) D.J. Needham and J.H. Merkin, "On roll waves down an open inclined channel", Proc. R.Soc.Lond. A 394, pp 259-278, 1984
- 3) Ko-fei Liu, and Chiang C. Mei, "Roll waves on a layer of a muddy fluid flowing down a gentle slope---A Bingham model", Phys. Fluids 6(8), pp2577-2590, 1994
- 4) 新井宗之・劉 雪蘭・高橋保：粘性土石流の表面流速解析による流動機構の考察、水工学論文集、第 44 巻、pp617-621, 2000
- 5) S.P.Lin and C.Y. Wang, "Modeling wavy film flow", Encyclopedia of Fluid Mechanics, edited by N.P. Chermisinoff (Gulf, Houston, TX, 1986), Chap.28.

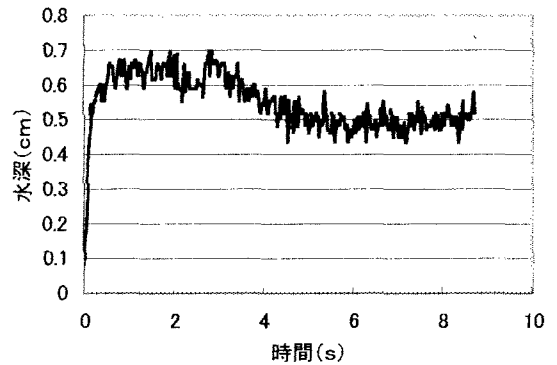


図-1 流れの水深変化 (1 回目)

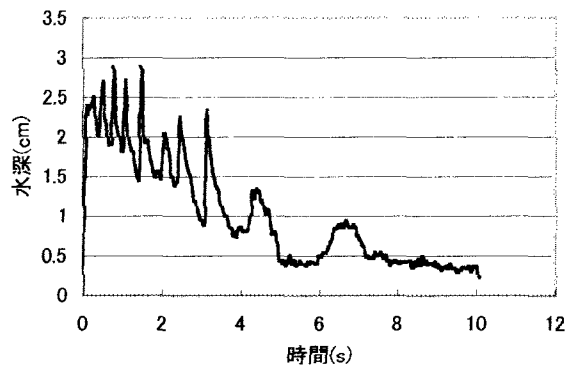


図-2 流れの水深変化 (2 回目)