

粘性土石流の抵抗則を考慮した土石流発生条件に関する研究

名城大学理工学部 正会員 新井宗之
名城大学大学院 学生会員 ○田原伸彦

1. はじめに

粘性土石流と呼ばれるタイプの土石流が中国でよく観測されている¹⁾²⁾. このタイプの土石流発生機構について、著者らは高粘性の流体を用いた研究を行っており、サージ発生が流れの不安定性によるものであることを得ている³⁾. このことを基に、粘性土石流の抵抗則から流れの不安定性を検討した.

2. 流れの不安定条件

流れの不安定性については石原・岩垣・岩佐⁴⁾⁵⁾の優れた研究がある. 石原らは層流の場合、運動方程式において、運動量補正係数 β を $\beta=6/5$ とし、抵抗項に層流の抵抗則を用いている. また乱流の場合には、抵抗項に Chezy の C を用いて解いている. しかし、ここではより一般的な表現として抵抗項に摩擦損失係数 f' を用いた運動方程式により流れの不安定条件を導く. 一次元の一般断面において、横流入が無い場合、連続式、運動方程式は流下方向に x 軸をとれば次のようである.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(vA)}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \beta v \frac{\partial v}{\partial x} + (1-\beta) \frac{v}{A} \frac{\partial A}{\partial t} = g \sin \theta - g \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{f' v^2}{2 R} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 v : 断面平均流速, A : 流積, g : 重力加速度, θ : 水路勾配, R : 径深, h : 水深, β : 運動量補正係数 f' : 径深での摩擦損失係数($f'=4/f$), f : 摩擦損失係数式(1)(2)を波速 c の移動座標系で表し不安定条件を導くと次式のようにになる.

$$\frac{m U_0}{2 c} \left\{ 1 + \frac{2}{m} - \frac{R}{f'} \left(\frac{df'}{dR} \right)_0 \right\} \geq 1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{ここに、 } U_0 = \frac{\beta \frac{dA}{dH} - \sqrt{\beta(\beta-1) \left(\frac{dA}{dH} \right)^2 + \frac{s}{F_r^2} \left(\frac{dA}{dH} \right)}}{\beta \frac{dA}{dH} - \frac{s}{F_r^2}} \cdot c \quad \dots\dots\dots (4)$$

$m=1-R \frac{ds}{dA}$, $F_r=U/\sqrt{gR \cos \theta}$: フルード数, s : 潤辺

添え字0は支配断面における値.

また、摩擦損失係数 f' と流速の関係は次式である.

$$U_0 = \sqrt{\frac{2}{f'}} U_* \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $U_* = \sqrt{gR \sin \theta}$: 摩擦速度.

ここで、平均流速式を、Vedernikovが使用し、石原らも採用した次式を用いるものとする.

$$U^a = r R^{(1+b)} \sin \theta \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 r : 係数, a, b : 定数.

したがって式(4), (5), (6)より、式(3)を表せば、流れの不安定性の条件は水路幅 B が水深 h に比べて広い一様な矩形断面水路の場合次式のようにになる.

$$\frac{(1+b)}{a \left\{ (\beta-1) + \sqrt{\beta(\beta-1) + \frac{1}{Fr^2}} \right\}} \geq 1 \quad \dots\dots\dots (7)$$

粘性土石流が発生するような条件では、流れは層流状態であると考えられるから、一様な矩形断面における条件の式(7)における a, b はそれぞれ、 $a=1, b=1$ である. したがって式(7)は次式のようにになる.

$$\frac{2}{(\beta-1) + \sqrt{\beta(\beta-1) + \frac{1}{Fr^2}}} \geq 1 \quad \dots\dots\dots (8)$$

3. 高粘性流体の転波列発生を検討

実験水路は水路長6.70m, 幅10.0cm, 深さ15.0cm, 両側壁透明アクリル製, 水路床はペンキ塗布仕上げの滑面, 循環式で水路勾配は可変式である. 実験に用いた流体は、高分子増粘剤(東亜合成製)を水で希釈したもので、通常の水の約30~120倍(31~127mPa・s)の粘性があり、密度は1.21~1.26g/cm³である. 流速分布・水深変化の測定は、水路横方向から高速度CCDカメラを用いて撮影・記録し画像解析することにより得た.

図-1はフルード数 F_r と転波列発生の関係を示した図である. ここでは層流としているので $\beta=6/5$ 上の関係で実験結果をプロットしている. 図中の○●印は転波列の発生・非発生を表している. また図中の実線は式(8)の関係を示している. 実験結果とよく一致していると言える. 以上のことから、高粘性流の層流であっても流れの不安定性から転波列が発生することを示した.

4. 粘性土石流の抵抗則からの考察

高橋⁶⁾はPhillipsらの層流中の中立浮遊粒子の相対運動における分散圧力の考察を基にして、重い粒子が分散

して流れる機構を検討し、粘性土石流の抵抗則を次のように表している。

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{3} \frac{\rho U_*}{\mu} \left(1 - \frac{\bar{C}}{C_*}\right)^{1.82} (1 + \varepsilon \bar{C}) h \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 μ ：間隙流体の粘度、 ρ ：間隙流体の密度、 $\bar{C}$ ：断面平均濃度、 C_* ：粒子の充填濃度、 $\varepsilon = (\sigma/\rho - 1)$ 。
上式は、 $R \approx h$ とすると式(6)の関係で表せば、 $a=1, b=1$ であり、均質な流体の層流と同じであることを示している。また、高橋による流速分布は次式のような⁶⁾。ただし、ここでの説明のために、若干式を変形している。

$$\frac{u}{U_*} = \frac{\rho U_* h}{\mu} \left(1 - \frac{\bar{C}}{C_*}\right)^{1.82} (1 + \varepsilon \bar{C}) \left\{ \left(\frac{z}{h}\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{z}{h}\right)^2 \right\} \dots\dots (10)$$

ここに、 $\bar{C}$ は断面平均濃度である。ここで、流れの濃度分布が一様であると仮定すると、運動量補正係数 β

$$\beta = \frac{1}{h} \int_0^h \left(\frac{u}{U}\right)^2 dz = \int_0^1 \left(\frac{u}{U}\right)^2 d\left(\frac{z}{h}\right)$$

に式(9)、(10)の関係を代入して求めると

$$\beta = \frac{6}{5} \dots\dots\dots (11)$$

となる。これは、均質流体の層流の運動量補正係数と同じであり、層流状の流れで固体粒子が一様に分散している場合には、固体粒子の濃度や粒径には影響されず、流れの不安定性により転波列が発生することを示していると言える。写真1-(a)～(c)は中国・雲南省の蒋家溝における1997年7月の粘性土石流の発生状況のビデオ撮影画像の一部である。(a)の画像の3秒後の画像が(b)で、さらにその10秒後の画像が(c)である。これは、サージが発生する過程の画像で、ここで述べているような流れの不安定性によるものであると考えられることを示していると言える。

5. まとめ

基礎方程式において運動方程式に摩擦損失係数 f' を用い、流れの不安定条件、転波列の発生条件を f' を用いて示した。清水の $10^2 \sim 10^3$ 倍程度の高粘性の流れであっても、またそれに固体粒子が含有する場合であっても、層流では式(8)の関係がよく適応することを示した。このことから、粘性土石流のサージの発生は、流れの不安定性によるものであると考えられる。

参考文献

1) DPRI, Kyoto University and IMHU, Chinese Academy of Sciences, "Japan-China Joint Research on the Prevention From Debris Flow Hazards", 195p, 1994.
2) DPRI, Kyoto University and IMHU, Chinese Academy of Sciences, "Japan-China Joint Research on the Mechanism and the

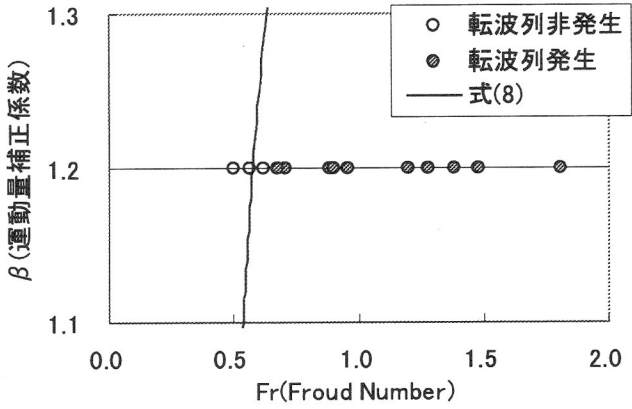
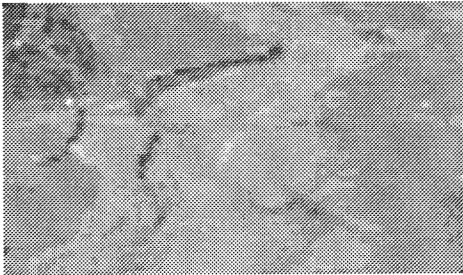
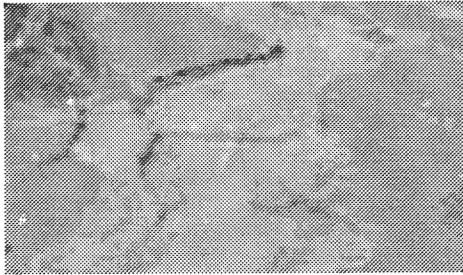


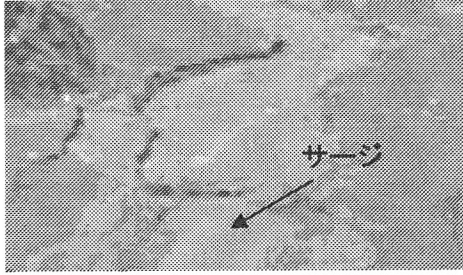
図-1 層流での転波列発生限界



(a) t=0sec



(b) t=3sec



(c) t=13sec

写真-1 中国・蒋家溝

countermeasures for the Viscous Debris Flow", 206p, 1999.
3) 新井宗之・劉雪蘭・田原伸彦：粘性土石流の発生機構に関する検討、応用力学論文集，土木学会，vol. 7, pp. 813-820, 2004.
4) 石原藤次郎・岩垣雄一・岩佐義朗：急斜面上の層流における転波列の理論——薄層流に関する研究（第5報）——土木学会論文集中第19号(昭和29.4) pp46-57.
5) 岩垣雄一・岩佐義朗：転波列の水理学的特性について——薄層流に関する研究（第7報）——土木学会誌 40-1(昭和30-1) pp5-12.
6) 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.