

泥流(乱流)型土石流の発生条件に関する基礎的検討

名城大学理工学部 正会員 新井 宗之

1. はじめに 土石流の発生条件については、河道の土砂堆積層上の表流水を外力とする静的な安定条件に基づく石礫型土石流を念頭に置いたモデルにより研究され、広く実際の対策に適應されている。しかしながら桜島の野尻川で観測されるような泥流(乱流)型土石流の土石流には必ずしも十分適應できないようである。そして、このタイプの土石流発生条件についてはまだ十分明らかにされているとは言えないと思われる。野尻川等で観測された土石流の特徴の一つは、短時間の間に複数のサージ状の土石流が流下していることである¹⁾。周期的に流下する多数の土石流サージ現象については、中国で観測される粘性土石流が代表的なものである。この発生については流れの不安定性に基づく考えでよく説明される^{2), 3)}。本研究では、泥流(乱流)型土石流の発生条件を流れの不安定性に基づいて理論的に検討したものである。

2. 発生条件および考察 流れの不安定性による転波列の発生、波長特性についての研究は、石原・岩垣・岩佐⁴⁾を始め多くの研究がある。著者らは摩擦損失係数 f を用いて運動方程式を用い、基礎方程式として次式をもちいる^{2), 3)}。

$$(U-c)\frac{\partial A}{\partial H}\frac{\partial H}{\partial \xi}+A\frac{\partial U}{\partial \xi}=0 \quad (1), \quad c\frac{\partial U}{\partial \xi}-\beta U\frac{\partial U}{\partial \xi}+c(1-\beta)\frac{U}{A}\frac{\partial A}{\partial H}\frac{\partial H}{\partial \xi}=-g\sin\theta+g\cos\theta\frac{\partial H}{\partial \xi}+\frac{f'U^2}{2R} \quad (2)$$

ここに、 $v(x,t)=U(x-ct)=U(\xi)$ (3), $h(x,t)=H(x-ct)=H(\xi)$ (4), $\xi=x-ct$ (5), v : 断面平均流速, A : 流積, g : 重力加速度, β : 運動量補正係数, θ : 水路勾配, R : 径深, h : 水深, f' : 摩擦損失係数, c : 波速。また、 $(c-U)H=K$ (6) の関係があり、 K は進行流量と呼ばれ一定である。上式の関係より水面形を表す(7)式を得る。

$$\frac{dH}{d\xi}=-\frac{A\left\{g\sin\theta-\frac{f'}{2R}\frac{(cA-K)^2}{A^2}\right\}}{\left\{\beta\left(\frac{K}{A}\right)^2+c^2(1-\beta)\right\}\frac{dA}{dH}-gA\cos\theta}=-\frac{f_1(H)}{f_2(H)} \quad (7), \quad \lim_{H\rightarrow H_0}\frac{dH}{d\xi}=\lim_{H\rightarrow H_0}-\frac{df_1/d\xi}{df_2/d\xi}\geq 0 \quad (8)$$

流の不安定性による転波列の発生条件は式(8)であることが示されている⁴⁾。さらに、式(8)は式(7)の関係から次式の(9)式ようになることが導かれる^{3), 4)}。

$$\frac{mU_0}{2c}\left\{1+\frac{2}{m}-\frac{R}{f'}\left(\frac{df'}{dR}\right)_0\right\}\geq 1 \quad (9) \quad \text{ここに、} m=1-R\frac{ds}{dA}, \quad s: \text{潤辺}, A: \text{流積}, \text{添え字 } 0 \text{ は支配}$$

断面における値。 U_0 と c の関係は次のように得られる^{2), 4)}。

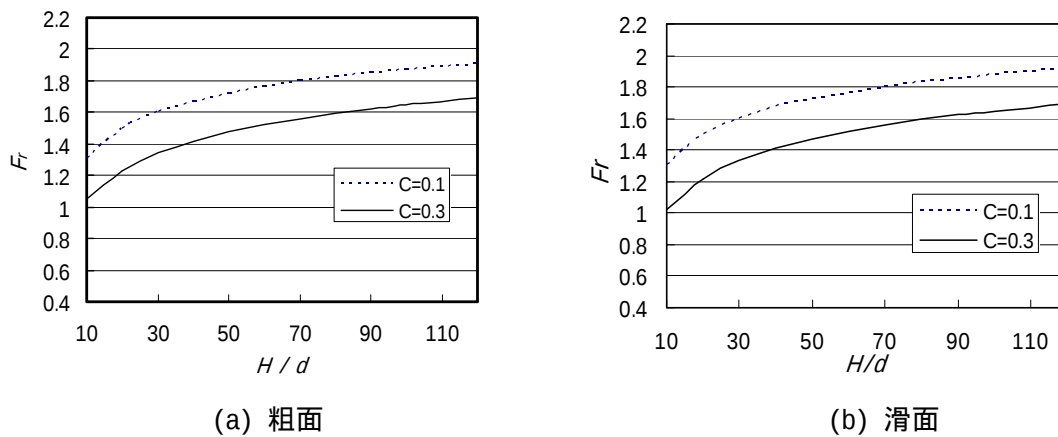
$$U_0=\frac{\beta\frac{dA}{dH}-\sqrt{\beta(\beta-1)\left(\frac{dA}{dH}\right)^2+\frac{s}{F_r^2}\frac{dA}{dH}}}{\beta\frac{dA}{dH}-\frac{s}{F_r^2}}c \quad (10) \quad \text{ここに、} F_r=U/\sqrt{gR\cos\theta}: \text{フルード数}, \beta: \text{運動量補}$$

正係数。抵抗項 f には、次式の新井・高橋の泥流(乱流)型土石流の抵抗則⁵⁾を用いる。ただし、ここでの展開のため若干式を変形している。

$$\frac{U}{U_*}=\frac{1}{\kappa}\left[\sinh^{-1}\left\{\frac{1}{\phi_0}\left(\frac{H}{d}\right)\right\}-\sinh^{-1}\left\{\frac{1}{\phi_0}\left(\frac{y_0}{d}\right)\right\}-\sqrt{1+\phi_0^2\left(\frac{d}{H}\right)^2}+\phi_0\left(\frac{d}{H}\right)\right] \quad (11)$$

キーワード：泥流型土石流，発生条件，転波列，不安定性，理論

連絡先：〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口一丁目 501 番地 名城大学理工学部建設システム工学科

図-1 水深粒径比 H/d とフルード数 F_r の関係

ここに, $\phi_0^2 = \lambda^2 \left(\frac{a_i \sin \alpha}{\kappa^2} \right) \left(\frac{\sigma}{\rho_m} \right)$, $\lambda = \left\{ \left(\frac{C_*}{C} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right\}^{-1}$: 線濃度, $a_i \sin \alpha$: バグノルドのダイラタント流体モデル

における定数(0.042), H : 水深, U^* : 摩擦速度, κ : カルマン定数, σ : 粒子密度, ρ_m : 断面平均密度, C_* : 固体粒子の最充填濃度, C : 固体粒子の容積濃度, d : 粒径, y_0 は滑面の場合: $y_0 = a \nu / U^*$, $a = 1/9.025$, d : 粒径, ν : 水の動粘性係数, 粗面の場合: $y_0 = b k_s$, k_s : 粗度高さ, $b = 1/30$.

水路条件として, 水路幅 B が水深 H に比して大きく, 矩形断面水路とすると, $A = B \cdot H$, $B \gg H$, $s \ll B$, また径深 R は $R \approx H$ とすることができる. これらから, (9)式より次式を得る.

$$F_r \geq \frac{1}{\sqrt{\left(\Phi + \frac{3}{2} - \beta \right)^2 - \beta(\beta - 1)}} \quad (12)$$

$$\text{ここに, } \Phi = \left[\sinh^{-1} \left(\frac{1}{\phi_0} \frac{H}{d} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{1}{\phi_0} \frac{y_0}{d} \right) - \sqrt{1 + \phi_0^2 \left(\frac{d}{H} \right)^2} + \phi_0 \frac{d}{H} \right]^{-1} \times \left[\sqrt{1 + \phi_0^2 \left(\frac{d}{H} \right)^2} - \phi_0 \frac{d}{H} \right] \quad (13)$$

ここで, 粒子密度を $\sigma = 2.65 \text{ g/cm}^3$, カルマン定数 $\kappa = 0.4$, バグノルド定数 $a_i \sin \alpha = 0.042$, 河床粗度高さを粒径と同じとして $k_s/d = 1.0$, 粒子の最充填濃度 $C_* = 0.6$, 運動量補正係数 $\beta = 1.1$ とし, 粗面の条件におけるフルード数 F_r と水深粒径比 H/d の関係を図-1(a)に示す. 図中の破線および実線は, 式(12)による濃度 $C = 0.1$, $C = 0.3$ のそれぞれの計算結果を示している. それぞれの線の上領域が式(12)で示す不安定領域である. 図から分かるように, 水深粒径比 H/d が大きくなると F_r は大きくなる. これは, 水深に比して含有粒径が小さいほど不安定になり難く転波列が発生し難いことを意味している. 逆に水深に比して粒径が大きくなる程流れは不安定になり易く転波列が発生し易くなることを意味している. また, 図中には容積濃度 $C = 0.1$ と $C = 0.3$ の場合がそれぞれ示してあるが, 同じ水深粒径比 H/d で, 濃度 $C = 0.3$ の方が $C = 0.1$ よりも小さなフルード数 F_r になっており, 濃度が高いほど不安定になり易くサージが発生し易いことを示している. 図-1(b)は滑面の場合の結果であるが, F_r 数は粗面より若干小さな値となるが粗面の場合と同様な傾向を示している.

3. まとめ 泥流(乱流)型土石流のサージ発生について, 流れの不安定性条件の考えに基づいて発生条件を導いた. この結果によると, 水深に比して含有粒径が大きいほど, また濃度が高いほど流れが不安定になり易く土石流サージが発生し易いことを示した.

参考文献 1) 疋田等: 土木学会, 第29回水理講演会論文集 vol.29, pp.543-548, 1985.2, 2) 新井等: 土木学会, 応用力学論文集 vol.7, pp.813-820, 2004.8., 3) 新井等: 土木学会, 応用力学論文集, vol.10, pp.523-532, 2007.8., 4) 石原等: 土木学会論文集, vol.19, pp.46-57, 1954.4., 5) 新井・高橋: 土木学会, 論文報告集, No.375, pp.69-77, 1983.