

高濃度の泥流サージ生成に関わる濃度分布の影響

名城大学理工学部 正会員 新井宗之

1 まえがき

鹿児島県桜島の野尻川や長谷川で観測されるような火山灰を主成分とするような非粘着性固体粒子を高濃度に含有する土石流サージの生成機構についてはあまり明らかにされていない。この野尻川や長谷川で観測される泥流タイプの土石流は、焼岳で観測されるような急勾配の河道を先端部に巨礫が集中して流下するものとは異なり、中国の雲南省・蒋家溝で観測される粘性土石流と同様に緩勾配の河道で生成・流下し、短時間の間に複数の土石流が流下する現象を有している。この土石流の桜島の土石流の流下特性については足田等の研究がある。ここでは高濃度泥流が緩勾配で発生・流下し、短時間の間に周期的な流下があることから、泥流型の土石流の生成機構について流れの不安定性理論に基づく検討を行うもので、特に流動層の濃度分布が一様でない場合、転波列サージ生成にどのように影響するかを検討する。

2 転波列サージ生成条件及び考察

一次元流れで、横流入を伴わない急激な水面変動を有する流れの運動方程式、連続式は次式のように表される。

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

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(Av)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

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' ：摩擦損失係数。

波速 c により、 $v(x, t) = U(x - ct) = U(\xi)$ 、 $h(x, t) = H(x - ct) = H(\xi)$ 、 $\xi = x - ct$ を用いて式 (1)、(2) を変換すると次式ようになる。

$$c \frac{\partial U}{\partial \xi} - \beta U \frac{\partial U}{\partial \xi} + c(1-\beta) \frac{U}{A} \frac{\partial A}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial \xi} = -g \sin \theta + g \cos \theta \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{f'}{2} \frac{U^2}{R} \quad (3)$$

$$(U - c) \frac{\partial A}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial \xi} + A \frac{\partial U}{\partial \xi} = 0 \quad (4)$$

上式の式 (3)、(4) を用いると、水面形の方程式は、進行流量 $K_A = (c - U)A$ を用いれば次式のようになる。

$$\frac{\partial H}{\partial \xi} = \frac{-A \left\{ g \sin \theta - \frac{f'}{2} \frac{1}{R} \frac{(cA - K_A)^2}{A^2} \right\}}{\left\{ \beta \left(\frac{K_A}{A} \right)^2 + (1-\beta)c^2 \right\} \frac{\partial A}{\partial H} - gA \cos \theta} = -\frac{f_1(H)}{f_2(H)} \quad (5)$$

上述の水面形の方程式で、支配断面での水深を H_0 とすると、転波列が発生する流れの不安定条件は、

$$\lim_{H \rightarrow H_0} \frac{dH}{d\xi} = \lim_{H \rightarrow H_0} -\frac{df_1/d\xi}{df_2/d\xi} \geq 0 \quad (6)$$

であることが示されている。

流積 A が矩形断面のように水深 H の線形関数で表される場合、式 (5) の $f_1(H)$ より式 (6) は次式の関係となる。

$$\frac{m}{2} \frac{U_0}{c} \left\{ 1 + \frac{2}{m} - \frac{R}{f'} \left(\frac{df'}{dR} \right)_0 \right\} \geq 1 \quad (7)$$

ここに、 $m = 1 - R \frac{ds}{dA}$ 、添え字 0 は支配断面における値であり、 $U_0 = \sqrt{\frac{2}{f'}} U_*$ 、 $U_* = \sqrt{gR \sin \theta}$ ：摩擦速度。

高濃度泥流の抵抗則は、新井・高橋の次式を用いる¹⁾。

流速分布式：

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{Y}{\phi} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{Y_0}{\phi} \right) \right\} \quad (8)$$

平均流速式：

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{1}{\phi} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{Y_0}{\phi} \right) - \sqrt{1 + \phi^2 + \phi} \right\} \quad (9)$$

ここに、 $Y = \frac{y}{h}$ 、 y ：水深方向の水路床からの高さ、

$$Y_0 = \frac{y_0}{h} \begin{cases} \text{滑面の場合：} y_0 = \frac{a v_0}{U_*}, a = \frac{1}{9.025} \\ \text{粗面の場合：} y_0 = b k_s, b = \frac{1}{30}, k_s: \text{相当粗度} \end{cases} \quad (10)$$

$$\phi^2 = \lambda^2 \left(\frac{a_i \sin \alpha}{\kappa^2} \right) \left(\frac{\sigma}{\rho_m} \right) \left(\frac{d}{h} \right)^2 \quad (11)$$

$$\lambda = \left\{ \left(\frac{C_*}{C} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right\}^{-1} \quad (12)$$

運動量補正係数 β は、 $\beta = \frac{1}{h} \int_0^h \left(\frac{u}{U} \right)^2 dy$ として定義される。

$Y = \frac{y}{h}$ より、 β を無次元量 Y で表す。

また、濃度分布の影響の検討を単純なモデルとして、図 1 のように河床 $y = 0$ から $y = h_\ell$ までの濃度を C_ℓ 、 $y = h_\ell$ から水面 $y = h$ までの濃度を C_u とする流れとする。つまり、流れの下層部分の深さ h_ℓ の粒子濃度が C_ℓ 、その上層部分に

Keyword: 高濃度泥流, 土石流サージ生成条件, 転波列, 濃度分布
〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口 1-501 Tel: 052-832-1151

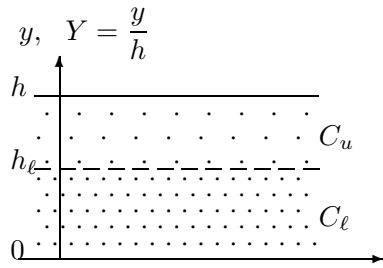


図1 濃度分布概念図

深さ $h_u = h - h_l$ の濃度 C_u とする流れである。また、濃度は $C_l \geq C_u$ の関係があるものとする。運動量補正係数 β を求めるに際し、近似的に上記の抵抗則を $Y = 0$ から $Y = \frac{h_l}{h}$ を濃度 C_l の流れとし、 $Y = \frac{h_l}{h}$ から $Y = 1$ を濃度 C_u として次式のように分割して積分して求めるものとする。ただし、 $a = \frac{h_l}{h}$ とする。

$$\beta = \int_0^1 \left(\frac{u}{U}\right)^2 dY = \int_0^a \left(\frac{u(C_l)}{U}\right)^2 dY + \int_a^1 \left(\frac{u(C_u)}{U}\right)^2 dY \quad (13)$$

上記の関係で運動量補正係数 β を求めると次式のようにある。

$$\begin{aligned} \beta = & \left[a \left\{ 2 + \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{Y_0}{\phi_l} \right) \right\}^2 \right\} \right. \\ & - 2 \sinh^{-1} \left(\frac{Y_0}{\phi_l} \right) \phi_l \\ & + 2 \sinh^{-1} \left(\frac{Y_0}{\phi_l} \right) \sqrt{\phi_l^2 + a^2} \\ & - 2 \left\{ a \sinh^{-1} \left(\frac{Y_0}{\phi_l} \right) + \sqrt{\phi_l^2 + a^2} \right\} \cdot \sinh^{-1} \left(\frac{a}{\phi_l} \right) \\ & + a \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{a}{\phi_l} \right) \right\}^2 \\ & + 2 + \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{Y_0}{\phi_u} \right) \right\}^2 \\ & - a \left\{ 2 + \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{Y_0}{\phi_u} \right) \right\}^2 \right\} \\ & + 2 \sinh^{-1} \left(\frac{Y_0}{\phi_u} \right) \sqrt{\phi_u^2 + 1} \\ & - 2 \sinh^{-1} \left(\frac{Y_0}{\phi_u} \right) \sqrt{\phi_u^2 + a^2} \\ & - 2 \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{Y_0}{\phi_u} \right) + \sqrt{\phi_u^2 + 1} \right\} \cdot \sinh^{-1} \left(\frac{1}{\phi_u} \right) \\ & + \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{1}{\phi_u} \right) \right\}^2 \\ & + 2 \left\{ a \sinh^{-1} \left(\frac{Y_0}{\phi_u} \right) + \sqrt{\phi_u^2 + a^2} \right\} \cdot \sinh^{-1} \left(\frac{a}{\phi_u} \right) \\ & - a \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{a}{\phi_u} \right) \right\}^2 \left. \right] \\ & \times \left[\sinh^{-1} \left(\frac{1}{\phi_m} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{Y_0}{\phi_m} \right) \right. \\ & \left. - \sqrt{1 + \phi_m^2 + \phi_m} \right]^{-2} \quad (14) \end{aligned}$$

添え字 l, u, m はそれぞれ、下層部の流れ、上層部の流れ、断面平均を表している。これらより、サージ(転波列)を生

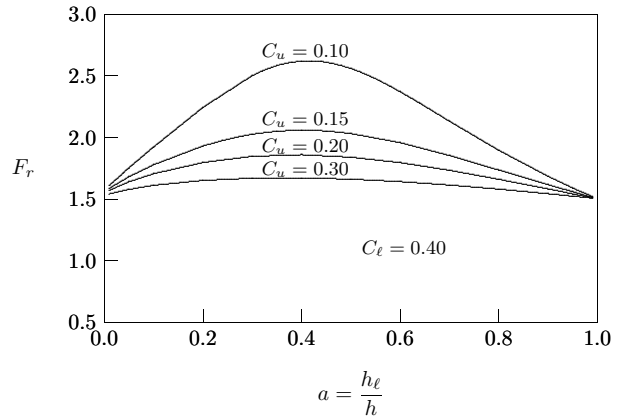


図2 $a = h_l/h$ と F_r の関係

成する条件は次式のようなのである。

$$F_r \geq \frac{1}{\sqrt{\left\{ \Phi + \left(\frac{3}{2} - \beta \right) \right\}^2 - \beta(\beta - 1)}} \quad (15)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \Phi = & \left[\sqrt{1 + \phi_m^2 - \phi_u} \right] \times \left[\sinh^{-1} \left\{ \frac{1}{\phi_m} \right\} - \sinh^{-1} \left\{ \frac{1}{\phi_u} \right\} \right. \\ & \left. - \sqrt{1 + \phi_m^2 + \phi_m} \right]^{-1} \quad (16) \end{aligned}$$

ここで、水深粒径比 $h/d = 100$ 、粗度の大きさは $k_s/d = 1$ 、流体密度 $\rho = 1.0\text{g/cm}^3$ 、粒子の密度 $\sigma = 2.65\text{g/cm}^3$ 、カルマン定数 $\kappa = 0.4$ 、バゲノルドの定数 $a_i \sin \alpha = 0.022$ 等としている。下層部の濃度が $C_l = 0.4$ で上層部の濃度が $C_u = 0.10, 0.15, 0.20, 0.30$ の場合を図2に示す。図2は横軸に2層の境界面の位置 $a = \frac{h_l}{h}$ を示し、縦軸にフルード数 F_r を示している。図中の実線は式(15)の関係を示しており、実線上側が転波列生成の領域である。いずれも a が $a = 0.4$ 程度で極大値を有するような関数関係を示しており、流動層内に固体粒子が一樣でなく河床方向に濃度が高くなるような場合には濃度分布が一樣の場合よりも転波列が生成し難いことを示している。また、その濃度差が大きいほど転波列が生成し難いことを示している。

3 まとめ

高濃度泥流の転波列サージ生成における濃度分の影響について、基礎式からの転波列生成条件について検討した。濃度分布は単純化した2層の流れで濃度が異なるとするモデルでの検討である。この結果によると濃度が水深方向に一樣な場合よりも濃度差がある場合の方が転波列の生成をし難く、さらに濃度差が大きいほど転波列の生成をし難いことを明らかにした。

参考文献

[1] 新井宗之、高橋保：泥流型土石流の流動機構，論文報告集，土木学会，II, No.375, pp.69-77, 1986.11.