

粒子含有高粘性流の転波列発生条件における固体粒子濃度分布の影響に関する一考察

名城大学理工学部

正会員 新井宗之

クリーンワールド(株)

正会員 劉 雪蘭

1. はじめに

中国では粘性土石流と呼ばれるタイプの土石流が発生し、観測されている。このタイプの土石流の特徴は体積濃度が70%もある高濃度な流れである。また、間欠的に不連続面を有する段波状のサージ流が多数発生し、緩勾配の流路を流下することである。この段波状のサージ流の発生が100波を超えることも珍しくなく、発生から一連の現象が終結するまで5時間を超えることも珍しくない。なぜこのような間欠的で周期的に多数の段波状のサージが発生するかについては、流の不安定性に基づく転波列の発生であると考えられる^{1), 2)}。

本研究では、この転波列発生条件において、固体粒子の濃度分布の影響が、このような転波列の発生条件にどのように関係するかを検討した。

2. 転波列発生条件および考察

流の不安定性に基づく転波列の発生に関して、清水の薄層流に関する石原・岩垣・岩佐の優れた研究がある³⁾。石原らは運動方程式を層流と乱流に分けて表し、乱流の場合には抵抗項にシェジエの式を用いている。著者らはより一般的な形として摩擦損失係数 f' を用いて表している。次式のような波速 c の移動座標系に変換する。

$$v(x, t) = U(x - ct) = U(\xi) \quad (1)$$

$$h(x, t) = H(x - ct) = H(\xi) \quad (2)$$

$$\xi = x - ct \quad (3)$$

この関係を用いると連続式、運動方程式は次のようになる。

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

$$c \frac{\partial U}{\partial \xi} - \beta U \frac{\partial U}{\partial \xi} + c(1 - \beta) \frac{U}{A} \frac{\partial A}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial \xi} = -g \sin \theta + g \cos \theta \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{f' U^2}{2 R} \quad (5)$$

ここに 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

$$\text{また, } (c - U)H = K \quad (6)$$

の関係があり， K は進行流量と呼ばれ一定である。上の関係から水面形を表す次式が得られる。

$$\frac{dH}{d\xi} = - \frac{A \left\{ g \sin \theta - \frac{f' U}{2 R} \frac{(cA - K)^2}{A^2} \right\}}{\left\{ \beta \left(\frac{K}{A} \right)^2 + c^2 (1 - \beta) \right\} \frac{dA}{dH} - g A \cos \theta} \quad (7)$$

$$= - \frac{f_1(H)}{f_2(H)}$$

支配断面の水深を H_0 とすると、転波列の発生条件

$$\text{は, } \lim_{H \rightarrow H_0} \frac{dH}{d\xi} = \lim_{H \rightarrow H_0} - \frac{df_1/d\xi}{df_2/d\xi} \geq 0 \quad (8)$$

であることが示されている³⁾。ここで粘性土石流の抵抗則として高橋ら⁴⁾の式を用いる。流速分布式および断面平均流速式は次のようである。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{3} \frac{\rho u_* h}{\mu} \left(1 - \frac{\bar{c}}{c_*} \right)^{1.82} (1 + \varepsilon \bar{c}) \left\{ \left(\frac{z}{h} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{z}{h} \right)^2 \right\}$$

$$(9), \quad \frac{v}{u_*} = \frac{1}{3} \frac{\rho u_*}{\mu} \left(1 - \frac{\bar{c}}{c_*} \right)^{1.82} (1 + \varepsilon \bar{c}) h \quad (10)$$

ここに， z ：水路床を0とする水深方向の位置， u ： z における流速， ρ ：流体の密度， μ ：流体の粘性係数， $\bar{c}$ ：粒子濃度， c_* ：粒子の最充填濃度， $\varepsilon = (\sigma/\rho - 1)$ ， σ ：粒子密度， u_* ：摩擦速度。これらの関係を用いて、幅の広い矩形断面とし $B \gg h$ の断面形状とすると、転波列発生条件は次式のようなものである²⁾。

$$F_r \geq \frac{1}{\sqrt{9 - 5\beta}} \quad (11)$$

さらに、高橋らの抵抗則で濃度分布が水深方向に一樣であると β は $\beta=6/5$ となる。図-1は式(11)との関係を示したものである。図中の実線の右側が発生領域である。実験結果の○は非発生，●は発生を示しており、式(11)は $\beta=6/5$ で実験結果と良く一致している。しかしながら水深方向に固体粒子が一樣でなく水路床から $z/h=a$ の位置まで一樣な濃度 C 、それより上部では濃度0の場合について検討する。

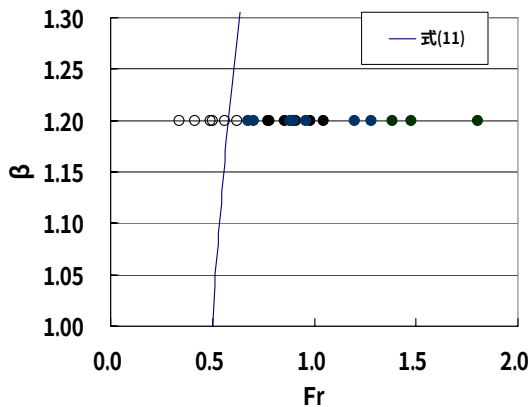
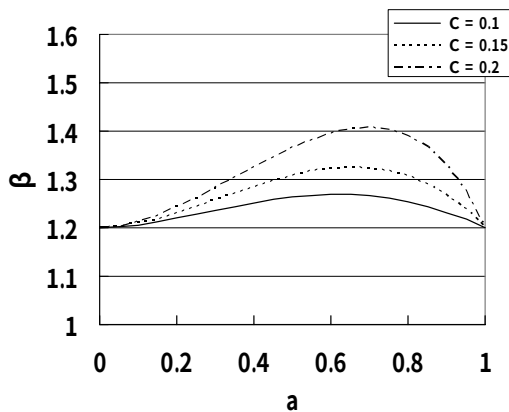


図-1 転波列発生条件

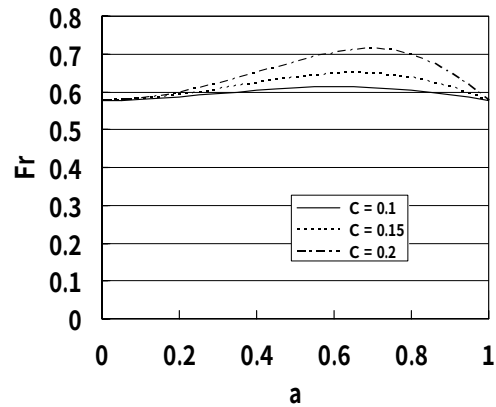
図-2 β と a の関係

流速分布は水路床から $z/h = a$ まで ($0 \leq z/h \leq a$) は濃度が C で一様とし, $z/h = a$ から水面まで ($a < z/h \leq 1$) は濃度 0 として, 式(9)の流速分布式を適用するものとする. a の変化による運動量補正係数 β は次式のようなものである.

$$\beta = \frac{1}{\phi_A^2} \left[\frac{2}{15} + \frac{1}{20} a^3 \left\{ \left(a - \frac{5}{2} \right)^2 + \frac{5}{12} \right\} (\phi_c^2 - 1) \right] \quad (12)$$

$$\text{ここに, } \phi_A = \frac{1}{6} \{ 2 + a^2 (3a - 1) (\phi_c - 1) \} \quad (13)$$

上式の a と β の関係を図-2に示す. 図中には $C=0.1, 0.15, 0.2$ の場合を示している. $a=1$ と $a=0$ の場合に $\beta = 6/5 = 1.2$ で, 粒子が一様に水深方向に分散している場合は運動量補正係数は同じ $\beta = 6/5$ となり, a が水路床から離れるにしたがって β は大きくなり, 極大値を有した後, 水面になるにしたがって β は減少し, 水面で β はまた $\beta = 6/5$ となることを表している. また濃度 C が高くなるにしたがって β の極大値が大きくなることも示

図-3 F_r と a の関係

している. これは転波列の発生条件からみれば, 固体粒子が水深方向に一様に分散しているよりも流れの中の一部の層で粒子が分散して流れる方が転波列を発生し難いことを意味している.

さらに, フルード数 F_r と a との関係を式(12)と式(11)の関係で示せば図-3のようである. $a=0$ および $a=1$ で $\beta = 6/5$ であることから, フルード数 F_r はいずれも $F_r = 0.5778$ である. しかし, a が $0 \sim 1$ の間で極大値をとるような関係で F_r が増加する. 図中には $C = 0.1, 0.15, 0.2$ の場合が示してあるが, 濃度が高くなるにしたがって, F_r の極大値は大きくなる. これは濃度が高い場合には, F_r 数がより大きな値で転波列が発生することを意味している.

3. まとめ

粘性土石流のような高粘性の流れに固体粒子を含有する場合の流れの不安定性による転波列発生条件に関して, 固体粒子濃度が一様でない場合について検討した. その結果, 水深方向に濃度が一様でなく一部層状で流れる場合の方が転波列を発生し難い傾向になることを明らかにした.

参考文献

- 1) 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, 土木学会, 応用力学論文集 vol.7, pp.813-820, 2004.8.
- 2) 新井宗之・堀江渉・秋江三根男: 粘性土石流の抵抗則を考慮した転波列発生条件に関する研究, 土木学会, 応用力学論文集, vol.10, pp.523-532, 2007.8.
- 3) 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, 土木学会論文集, vol.19, pp.46-57, 1954.4.
- 4) 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)ー土石流サージの形成と伝播ー, 京都大学防災研究所年報, 第41号 B-2, 1998