

粒子を含有する高粘性流の転波列発生条件における粗粒子濃度分布の影響

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 粘性土石流と呼ばれるタイプの土石流が中国でよく発生し、観測されている。このタイプの土石流は、体積濃度が 70%もある高濃度な流れであり、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ことについては、流れ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)}。ここでは、この転波列発生条件において、固体粒子の粗粒子濃度分布の影響が、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 清水の薄層流に関する流の不安定性に基づく転波列の発生について、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ューの式を用いている。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。そこで、波速 c の移動座標系に変換した連続式、運動方程式を表せば次式のようなものである。

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

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。上式より水面形を表す方程式は式(7)のようである。

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

流の不安定性による転波列の発生条件は、支配断面の水深を H_0 とすると、式(8)であることが示されている³⁾。ここで抵抗項 f に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式(9)、式(10)のようである。

$$\frac{u}{u_*}=\frac{1}{3}\frac{\rho u_* h}{\mu}\left(1-\frac{c}{c_*}\right)^{1.82}(1+\varepsilon)\left\{\left(\frac{z}{h}\right)-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{h}\right)^2\right\} \quad (9), \quad \frac{v}{u_*}=\frac{1}{3}\frac{\rho u_*}{\mu}\left(1-\frac{c}{c_*}\right)^{1.82}(1+\varepsilon)h \quad (10)$$

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, 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、転波列発生条件は式(11)のようになる²⁾。

$$F_r \geq \frac{1}{\sqrt{9-5\beta}} \quad (11), \quad \frac{v_a}{v_{cl}} = \frac{1+\frac{1}{2}a^2(3a-1)(\phi_c-1)}{\phi_c} \quad (12), \quad \text{ここに, } \phi_c = \left(1-\frac{c}{c_*}\right)^{1.82}(1+\varepsilon) \quad (13)$$

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。図中の○は実験結果の非発生、●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。ここで、水深方向に固体粒子が一樣でなく水路床から $z/h=a$ の位置まで一樣な粗粒子濃度 C 、それより上部では粗粒子濃度 0 の場合について検討する。

キーワード：粘性土石流、発生条件、濃度分布、高粘性流、転波列

連絡先：〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口 1-501 名城大学理工学部建設システム工学科 TEL 052-838-2364

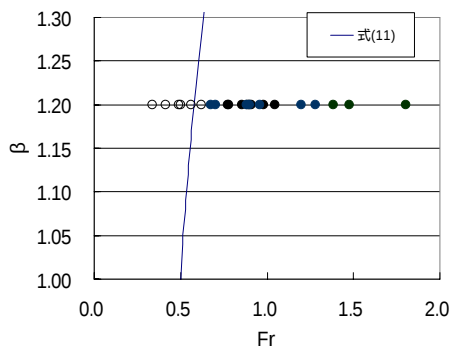
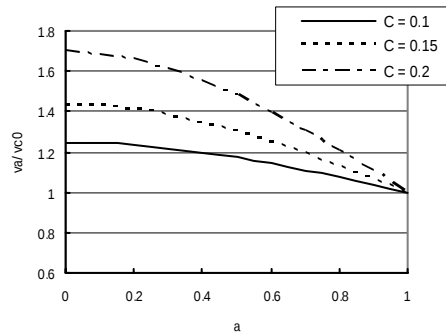
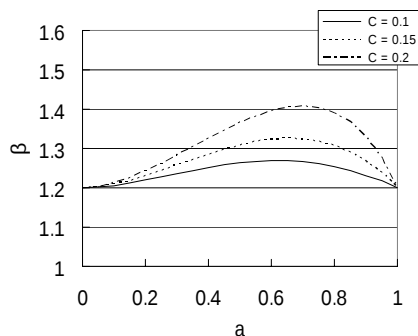
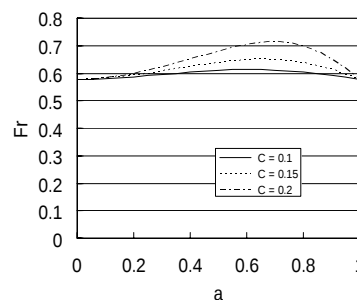


図 - 1 転波列発生条件

図 - 2 a と v_a/v_{c1} との関係図 - 3 β と a の関係図 - 4 F_r と a の関係

$$\beta = \frac{1}{\phi_A^2} \left[\frac{2}{15} + \frac{1}{20} a^3 \left\{ \left(a - \frac{5}{2} \right)^2 + \frac{5}{12} \right\} (\phi_c^2 - 1) \right] \quad (14), \quad \text{ここに, } \phi_A = \frac{1}{6} \{ 2 + a^2 (3a - 1) (\phi_c - 1) \} \quad (15)$$

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. $a=1$ の断面平均流速 v_{c1} と $0 \leq a < 1$ の場合における断面平均流速を v_a とすると a と v_a/v_{c1} との関係は式(12)のようである. $C=0.10, 0.15, 0.20$ の場合について図-2に示している. $a=0$ で $C=0.1, 0.15, 0.2$ の順に v_a/v_{c1} の値が大きくなっているのは濃度が高いほど流速が小さいことによる. また, a の変化による運動量補正係数 β は(14)式のようなものである. 式(14)の a と β の関係を図-3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, 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している. これは転波列の発生条件からみれば, 粗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(14)と式(11)の関係で示せば図-4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 $F_r = 0.577$ 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 粘性土石流に代表される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, 粗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)新井宗之等:土木学会 応用力学論文集 vol.7 pp.813-820,2004.8. 2)新井宗之等:土木学会 応用力学論文集 vol.10 pp.523-532, 2007.8. 3)石原藤次郎等:土木学会論文集, vol.19, pp.46-57, 1954.4. 4)高橋保等:京都大学防災研究所年報,第 41号 B-2,1998