

粘性土石流の転波列特性に関する研究

名城大学理工学部 正会員 新井宗之
 愛知県瀬戸市役所 正会員 堀江 渉
 名城大学大学院 学生会員 田口彰久

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の広い範囲で発生し、観測されている。この土石流の大きな特徴の一つは、サージ状の土石流が間欠的、周期的に多数流下することである。約1.5~3分周期で100波程度流下することは珍しくない。著者等は、このような現象は流れの不安定性に基づくものと考えている¹⁾。流れの不安定性に基づく周期的な不連続面を有する水深変動は転波列と呼ばれ、古くから研究されている。日本では、石原・岩垣・岩佐の薄層流の転波列に関する優れた研究がある²⁾。

しかし、粘性土石流のような、高粘性の流体に固体粒子を含有した流れにおける転波列(サージ)の特性に関する研究はほとんどされていない。本研究では、基礎方程式の抵抗項に粘性土石流の抵抗則を導入し、転波列特性の一つの波長を求め、実験結果との関係を明らかにするものである。

2. 転波列特性

清水の薄層流における転波列の発生とその特性に関しては、石原・岩垣・岩佐の優れた研究がある²⁾。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¹⁾。次のような移動速度 c の移動座標系に変換する。

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

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

$$\text{ここに, } \xi = x - ct \quad (3)$$

この関係を用いた連続式、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。

ここで水路断面を矩形として $A = BH$, $B \gg H$ とする。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。運動方程式の抵抗項に高橋等³⁾の次式の粘性土石流の抵抗則を用いる。

$$\frac{v}{u_*} = \frac{1}{3} \frac{\rho u_*}{\mu} \left(1 - \frac{\bar{c}}{c_*} \right)^{1.82} (1 + \varepsilon \bar{c}) h \quad (7)$$

ここに, ρ : 流体の密度, μ : 流体の粘性係数, \bar{c} : 断面平均粒子濃度, c_* : 粒子の最充填濃度, $\varepsilon = (\sigma/\rho - 1)$, σ : 粒子密度, u_* : 摩擦速度
 この抵抗則の運動量補正係数は $\beta = 6/5$ である。これらの関係から、水面形方程式を求め、不連続な水深変化をする最大水深を H_b 、最小水深を H_f として、その周期的な変化の長さ、波長 λ を得る。

$$\lambda = \frac{1}{\sin \theta} \left[\frac{H_A^2 \cos \theta + \frac{6}{5} \left(\frac{K}{H_0} \right)^2 \frac{H_A}{g} + \frac{6}{5} \frac{K^2}{g H_0} \ln \left(\frac{H_b - H_A}{H_f - H_A} \right)}{H_A - H_b} - \frac{H_b^2 \cos \theta + \frac{6}{5} \left(\frac{K}{H_0} \right)^2 \frac{H_b}{g} + \frac{6}{5} \frac{K^2}{g H_0} \ln \left(\frac{H_b - H_b}{H_f - H_b} \right) + (H_b - H_f) \cos \theta}{H_A - H_b} \right] \quad (8)$$

ただし,

$$H_A = \left[\frac{9}{20} + \sqrt{\frac{6}{25} + \frac{3I_R}{\left(1 - \frac{\bar{c}}{c_*} \right)^{1.82} (1 + \varepsilon \bar{c})}} - \frac{1}{2} \right] H_0$$

キーワード: 粘性土石流, 高粘性流体, 転波列, 波長, 理論, 実験

連絡先: 468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口 1-501 Tel 052-832-1151 Fax 052-832-1178

$$H_B = \left[\sqrt{\frac{9}{20} + \sqrt{\frac{6}{25} + \frac{3I_R}{\left(1 - \frac{c}{c_*}\right)^{1.82} (1 + \varepsilon c)}}} + \frac{1}{2} \right] H_0$$

$$I_R = \frac{1}{\tan \theta \cdot R_{e0}}, \quad R_{e0} = \frac{U_0 H_0}{\nu} \quad (9)$$

ここに、 H_0 ：支配断面における水深（等流水深）， U_0 ：支配断面における流速（等流流速），式(8)は石原らが導いた式と同形である．ただし式(9)で示すように、 H_A 、 H_B 等の式は異なる．

3. 実験の概要

実験水路は、長さ 17.5m、幅 10cm、高さ 15cm で両側面透明塩化ビニールで、水路床はスチール製でペンキ塗布した滑面状であり、水路勾配は 3.4° である．実験条件は、表 - 1 に示すようである．流体は東亜合成（株）製の増粘剤(T40)を水の約 50 倍程度の粘性にして用いた．固体粒子は密度 $\sigma = 1.3\text{g/cm}^3$ で、直径 5mm、厚さ 3mm の円盤状の硬質塩化ビニールである．密度が流体に近いことで中立浮遊子状で流下するようにしている．実験方法は、水路上流端に 300ℓの容器に流体と固体粒子を入れ、攪拌し、容器下部より水路へ供給するものである．また、供給用容器は内部圧力を一定にするようにして、流出量を一定にしている．

4. 考察

清水の 50 倍程度の流体及びそれに固体粒子を含有した流れの転波列の波長について、式(8)と実験結果との関係を図 1 に示す．横軸は式(8)を無次元波長 $\lambda' = (g \sin \theta / c^2) \lambda$ にした値で、縦軸は実験結果による無次元波長 λ' である．ばらつきはあるものの式(8)と実験結果は比較的よい対応をしていると考えられる．

ところで、式(8)において最大水深 H_b と最小水深 H_f を未知量として解く場合には、連続式の他にもう一つの独立した関係式を必要とする．石原等は、清水の場合、転波列における不連続に変化する水深の前後の運動量保存の関係式を用いて解き、良好な結果を得ている．ここでも同じようにサージ先端部の不連続水深の部分の運動量保存の関係は次式のように、石原等の結果と同じである．

表 - 1 実験条件

No.	粘性係数 (mPa/s)	平均水深 (cm)	断面平均流速 (cm/s)	固体粒子		備考
				濃度(%)	密度(g/cm ³)	
高粘性流体	48 ~ 54	1.5 ~ 2.0	46.7 ~ 59.8	0		
	40 ~ 51	2.0 ~ 2.8	77.6 ~ 110.1	0.3 ~ 1.0	1.3	硬質塩化ビニール

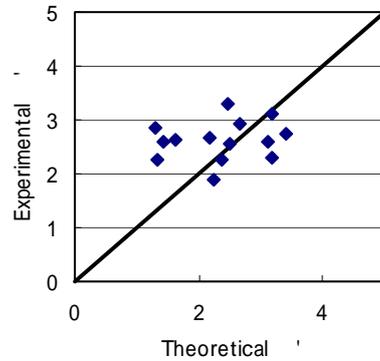


図 - 1 波長 λ'

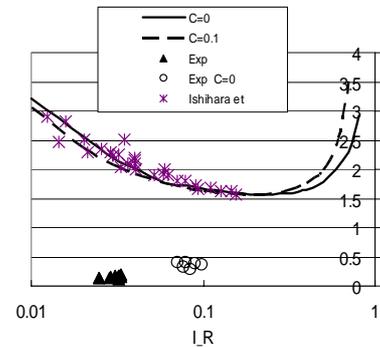


図 - 2 無次元波長 λ' と I_R の関係

$$H_f = \frac{1}{2} \left[\left\{ H_b^2 + \frac{8K^2}{g \cos \theta H_b} \right\}^{\frac{1}{2}} - H_b \right] \quad (10)$$

式(8)、(10)および連続式より数値解として解くことが可能で、 λ' と I_R の関係を図 2 に示す．実験結果は解析解よりも小さな値を示している．これは式(10)で示す不連続水深での取り扱いが適切でないことによるものと考えられる．

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) 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.
- 3) 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-2,1998