

固体粒子を含有した高粘性流体の転波列の特性に関する研究

名城大学大学院 学生会員 田口彰久
 名城大学理工学部 正会員 新井宗之
 名城大学大学院 学生会員 堀江 渉

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流動特性については必ずしも十分明らかにされておらず、とりわけこの流れの間欠的な特性については不明な点が多い。これまでに土石流の発生は流れの不安定性によるものであることを著者らはほぼ明らかにしているが¹⁾、周期的に流下するこの土石流サージの波速、波長、周期などの特性については十分明らかでない。

本研究ではこれらのサージの特性を明らかにすることを目的として、高粘性流体、高粘性流体に固体粒子を含有する転波列(サージ)について検討した。

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⁾。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ャーの C 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。

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

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

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

この関係を用いた連続式、運動方程式は次のようになる。

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

$$c \frac{\partial U}{\partial \xi} - \beta U \frac{\partial U}{\partial \xi} + c(1 - \beta) \frac{U}{A} \frac{\partial A}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial \xi} = -g \sin \theta +$$

$$g \cos \theta \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{f' U^2}{2 R} \cdots (5)$$

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，

$$(c - U)H = K \cdots (6)$$

の関係があり， K は進行流量と呼ばれ一定である。抵抗則として高橋ら³⁾の次式に示す粘性土石流の関係式を用いる。

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

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を波長 λ とすると次式を得る。

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

・・・(8) ただし，

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

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

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

ここに、 H_0 ：等流水深（平均水深）、 U_0 ：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 で両側面透明アクリルで、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。固体粒子は密度が密度 1.3g/cm^3 で、直径 5mm、厚さ 3mm の円盤型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態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体の波速は理論値と比較的一致する。しかし、転波列の波長 λ の理論値と実験結果はあまりによく対応していない。図-1は $\bar{c}=0$ とした場合の石原らの理論値を実線で示し、無次元波長 $\lambda' = (g \sin \theta / c^2) \lambda$ と I_R の関係で示している。実験結果は理論値よりも小さな傾向を示している。波長 λ について式(8)の右辺の H_b 、 H_f 等に実験結果を用いて得た波長 λ と実験結果の波長との関係を図-2に示す。これによるとばらつきがあるものの、式(8)による理論値と実験結果は比較的对応しているものと考えられる。図-1の理論値は、波長 λ 、最大水深 H_b 、最小水深 H_f を未知数とするため、連続式および、 H_b と H_f の関係を不連続式の前後の運動量保存による次式から得る。

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

上式は、跳水における跳水前後の水深の関係と同じである。式(10)を実験結果との関係で示すと図-3のようである。これによると実験結果は式(10)による値よりも小さな値となっている。これより清水の 50 倍以上の粘性で粒子を含む流体における転波列

の特性が従来の特性の理論値で適切に表すことができていないのは最大水深、最小水深の関係を適切に表すことができていないことによるものと考えられる。今後、この関係を明らかにしていきたい。

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	—	
粒子含有	40~51	2.0~2.8	77.6~110.1	0.3~1.0	1.3	硬質塩化ビニール

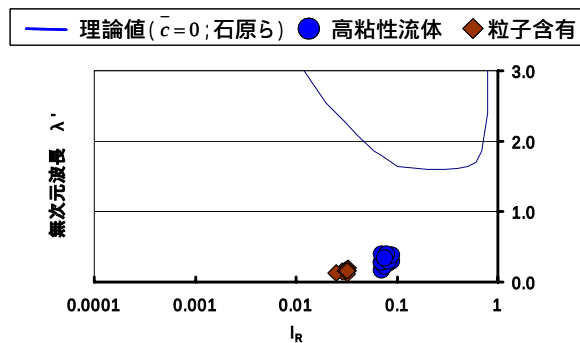


図-1 無次元波長 λ' と I_R の関係

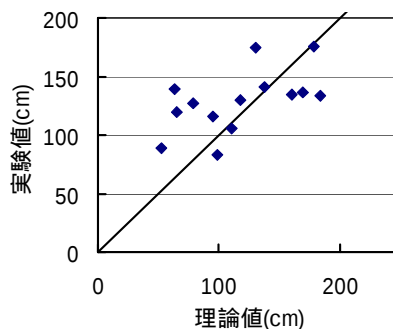


図-2 波長 λ

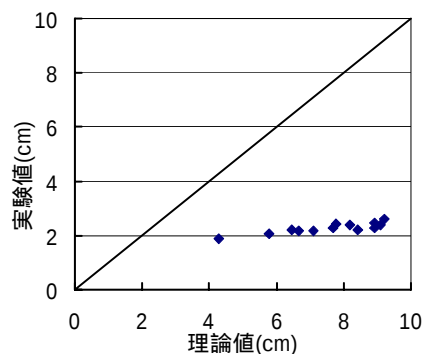


図-3 最小水深 H_f

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)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