

高粘性流体の転波列の特性に関する実験的検討

名城大学大学院 学生会員 田原伸彦
名城大学理工学部 正会員 新井宗之

1. はじめに

粘性土石流の間欠性については不明な点が多い。本研究はこのような粘性土石流の流動特性を明らかにすることを目的として、単純な高粘性の流れについて、その流れの不安定性による転波列について検討した。

2. 実験概要

実験水路は図-1 に示すように水路長 6.70m、幅 10.0cm、深さ 15.0cm、両側壁透明アクリル製、水路床はペンキ塗布仕上げの滑面、循環式で水路勾配は可動式である。実験に用いた流体は、高分子増粘剤（東亜合成製）を水で希釈したもので、通常の水の約 30 ~ 120 倍 (31 ~ 127mPa・s) の粘性があり、密度は 1.21, 1.26g/cm³ である。流速分布測定は、アルミ製のスリットを水路にとりつけ照明を水路上部から照らし、流体には光を反射しやすいトレーサーを混入して水路横方向から高速度 CCD カメラを用いて 2000frame/sec で撮影、記録し、トレーサーの挙動を解析することにより得た。

3. 実験結果及び考察

流れの不安定性、転波列の発生については石原・岩垣・岩佐¹⁾の優れた研究があり、転波列の発生特性について広く用いられている。石原らの支配方程式は、Dressler²⁾の理論を基にしているが、層流の場合次式のように表している。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{6}{5}u \frac{\partial u}{\partial x} + g \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{5} \frac{u}{h} \frac{\partial h}{\partial t} = g \sin \theta - \frac{3\nu u}{h^2} \dots (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) = 0 \dots (2)$$

ここに、 u ；断面平均流速、 h ；水深、 θ ；水路勾配、 g ；重力加速度、 ν ；水の動粘性係数

式(1)の左辺第2項の6/5、第4項の-1/5は断面平均流速 u で表す場合の運動量補正係数に基づく係数である。また左辺第4項は、断面における水深の時間変化率を表す項で、急激な水深変化がない漸変流では一

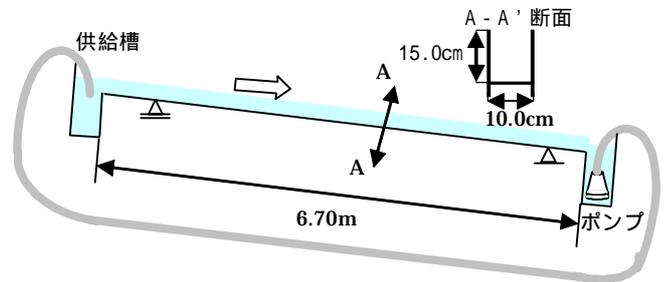


図-1 実験水路

表-1 実験条件一覧

No.	水路勾配 DEG.	平均水深 h (cm)	断面平均流速 U cm/s	粘性係数 μ mPa・s	密度 g/cm ³
1	5.54	1.29	23.9	34.0	1.21
2	6.22	0.77	31.6	33.0	1.21
3	7.65	0.77	31.6	33.0	1.21
4	8.91	0.84	38.7	33.5	1.21
5	9.57	0.67	32.3	31.0	1.21
6	10.65	0.48	25.8	31.0	1.21
7	12.13	0.45	19.2	31.0	1.21
8	7.00	0.92	41.4	88.0	1.26
9	8.12	1.19	61.3	127.5	1.26

般に無視される。石原らは、上式を波速 c による移動座標系に変換した基礎方程式を用いて流れの不安定性を論じた。このことから層流の転波列の発生条件として次式を導いている。

$$Fr \geq 1/\sqrt{3} \dots (3) \text{ここに } Fr : \text{フルード数}(=u/\sqrt{gh \cos \theta})$$

流れの不安定条件により転波列の発生は、固体粒子を含む高粘性の流れであっても成り立っていることを明らかにしているが³⁾、転波列の特性については明らかではない。石原らは衝撃条件と不連続解

$$\lim \frac{dH}{d\zeta} \geq 0 \text{ の条件で発生する転波列の特性を明}$$

らかにしている。転波列の無次元波速を c'

$$c' = \left(\frac{1}{gq_0} \cos \theta \right)^{\frac{1}{3}} c \dots (4)$$

ここに q_0 ：時間平均単位幅流量、 c ：波速

として、理論的な無次元波速は次のようである。ただし、石原らの論文には明らかにされていないが、関係式から次式が導かれる。

キーワード 流れの不安定性、転波列、実験、粘性土石流

連絡先 〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口一丁目 501 番地 名城大学 TEL 052-832-1151 FAX 052-832-1178

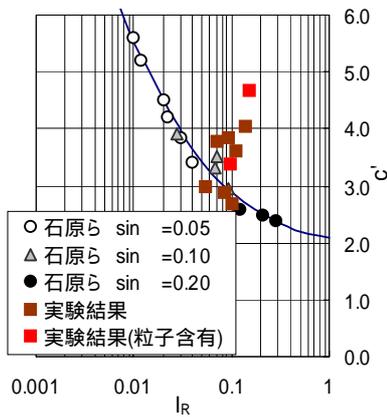


図-2 無次元流速 c' と I_R

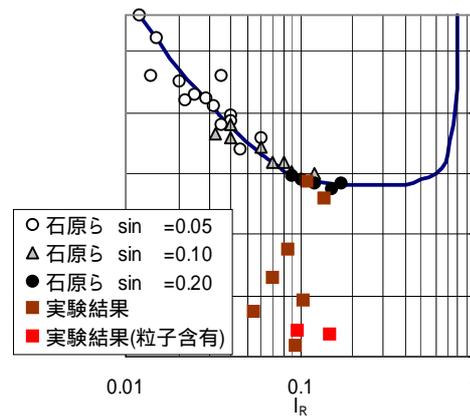


図-3 無次元波長 λ' と I_R

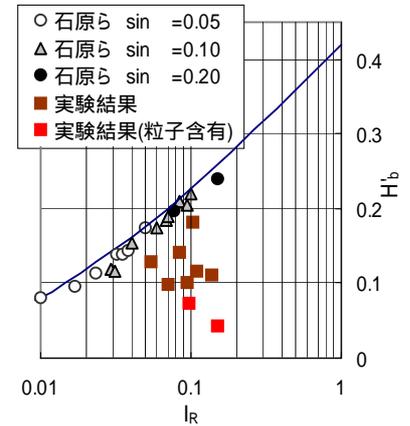


図-4 無次元最大波高 H_b' と I_R

$$c' = \left\{ \left(\frac{1}{5} + \sqrt{\frac{6}{25} + 3I_R} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot 3I_R \cdot \frac{\left(\frac{6}{5} - \sqrt{\frac{6}{25} + 3I_R} \right)^2}{\left(\frac{6}{5} - 3I_R \right)} \cdot \left[1 - \frac{\left(\frac{6}{5} - \sqrt{\frac{6}{25} + 3I_R} \right)}{\left(\frac{6}{5} - 3I_R \right)} \right] \right\}^{\frac{1}{3}}$$

ここに、 $I_R = \frac{1}{\tan \theta \cdot R_{e0}}$, $R_{e0} = \frac{U_0 H_0}{\nu}$... (6)

ただし、 U_0 ：断面平均流速、 H_0 ：等流水深、

ν ：流体の動粘性係数。

また、無次元波長 λ' と無次元最大水深 H_b' を理論値として求めるのは少し複雑であるため省略するが、 I_R の関数として解を得ることができる。¹⁾

図-2 は無次元流速 c' と I_R の関係を示している。図中の実線は式(5)による理論値を示し、 \circ が石原らの実験結果であり、 \square がここでの実験結果である。実験結果には少しばらつきがあるものの、全体的には理論値より大きな値となっている。図-3 は無次元波長 λ' と I_R の関係を示し、図-4 は無次元最大波高 H_b' と I_R の関係を示している。同様に図中の実線は理論値を示し、石原らの実験結果とともにここでの実験結果を示している。この結果によると転波列の無次元波長 λ' は理論値よりも小さく、波長が短いことを示している。また無次元最大波高 H_b' は理論値より小さな値で、波高が低いことを示している。したがって高粘性で一部固体粒子の含まれる流れでは清水のような流れよりも、波速が速く、波長や波高は小さい傾向のあることを示している。しかしこの流れが理論の基になっている層流状態が保たれているのかどうか調べるために流速分布を測定した。図-5 は水路上流端から下流へ 4.2m の位置で典型的な転波列を流れの水深変化と流速分布型を示している。図-5a)の図中の $t=1.75, 1.85, 2.16, 2.24$ sec での流速分布型を図-6b)の a~d に対応して示

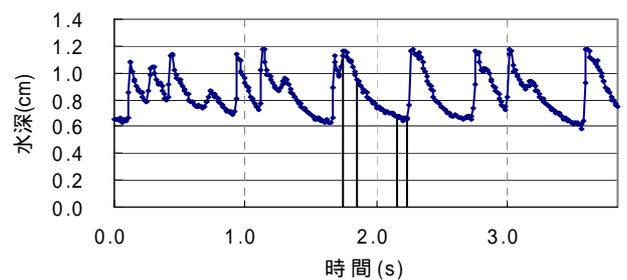


図-5 a) 水深変化

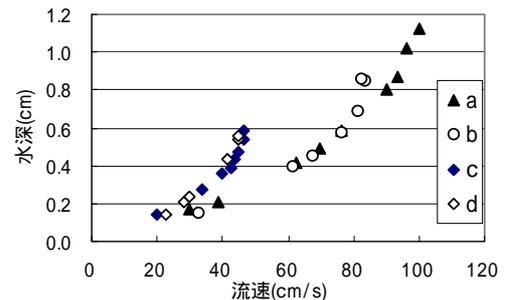


図-5 b) 流速分布型

している。いずれもほぼ放物型をしており、層流状態が保たれていると考えられる。また、この転波列の発生はほぼ水路中央部から生じるため転波列の発達過程にあることによることも考えられるが、詳細な検討は行っていない。

4. おわりに

以上、水の 30 ~ 100 倍程度の粘性を有する転波列の特性について検討した。この結果清水よりも波速は速く、波長、最大波高は小さい傾向のあることがわかった。これが粘性流特有のものであるかどうか今後さらに検討を進めたい。

参考文献

1)石原藤次郎, 岩垣雄一, 岩佐義明; 土木論文集第 19号, p.46-57, 昭29.4 2)R.K.Dressler; Communication on Pure and Applied Mathematics, vol. ,No.2/3,1949. 3)Arai M, Liu X ; Proceeding of XXX Congress IAHR, Theme C vol.2, pp79-86, 2003