

粒子を含有する高粘性流体の不安定性に関する検討

名城大学大学院 学生会員 ○大谷 哲司
 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 劉 雪蘭
 名城大学理工学部 田原 伸彦

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しばしば発生し雲南省でよく観測されている。その土石流の特徴は、間欠的にサージが発生し100波程度発生することは珍しくなく、その現象が数時間から十数時間にも及ぶ。また流下する河床勾配は3~5°という緩勾配で、容積濃度は70%もある。このタイプの土石流の機構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性については不明な点が多い。本研究では粘性土石流の流れを粒子が含有する高粘性の流れであるとして、流れの不安定性、転波列の発生について検討したものである。

2. 実験の概要

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の循環式で両側壁透明アクリル製、水路勾配8°で、水路床はペンキ仕上げの滑面である。実験に用いた流体は、高分子増粘剤（東亜合成製、T40）を水で希釈したもので温度24℃において、B型粘度計を用いた粘度の測定値は99mPa・sである。

これは通常の水の約 10^2 倍程度の粘性である。この流体の密度は $\rho_f=1.26\text{g/cm}^3$ である。また、密度 $\rho_s=2.50\text{g/cm}^3$ 、粒径 $d_{50}=0.1\text{mm}$ のガラスビーズを容積濃度1.3%含有している。流速分布測定は、図-2に示すような長さ4.6cm、幅1.6cmの六角形のアクリル製透明容器をポイントゲージの先端に取り付け、その底部の流れを高速度CCDカメラで撮影し、流体中の粒子運動を解析することにより行った。水深方向の測定位置は約1mm間隔で撮影し解析に供した。

3. 流れの不安定条件

清水の不安定性、特に転波列の発生に関して石原・岩垣ら^{1),2)}の優れた研究があり、理論と現象がよく一致することが知られている。しかし、ここで取り扱っているような固体粒子を含有する高粘性流れに対してどのように適応するのか十分に明らかにされていない。石原・岩垣らは、転波列の発生条件の誘導の過程で、不定流の抵抗項にシェジのCを用いている。しかしながら、抵抗項に摩擦損失係数 f' を用いて導いた結果によると層流、乱流の場合、それぞれ次式のようなになる³⁾。

$$\frac{2m\left(\frac{dA}{dH}\right)_0}{\left\{(\beta-1)\left(\frac{dA}{dH}\right)_0 + \sqrt{\beta(\beta-1)\left(\frac{dA}{dH}\right)_0^2 + \left(\frac{dA}{dH}\right)_0 \frac{s}{Fr^2}}\right\}} \geq 1 \quad (1)$$

$$\frac{m\left(\frac{1}{2}+a\right)\left(\frac{dA}{dH}\right)_0}{\left\{(\beta-1)\left(\frac{dA}{dH}\right)_0 + \sqrt{\beta(\beta-1)\left(\frac{dA}{dH}\right)_0^2 + \left(\frac{dA}{dH}\right)_0 \frac{s}{Fr^2}}\right\}} \geq 1 \quad (2)$$

ここに、 $m=1-R\frac{ds}{dA}$ 、 $\beta=\frac{1}{A}\int_A\left(\frac{u}{v}\right)^2 dA=\frac{6}{5}$ ：運動量補正係数、 v ：断面平均流速、 A ：流積、 s ：潤辺、

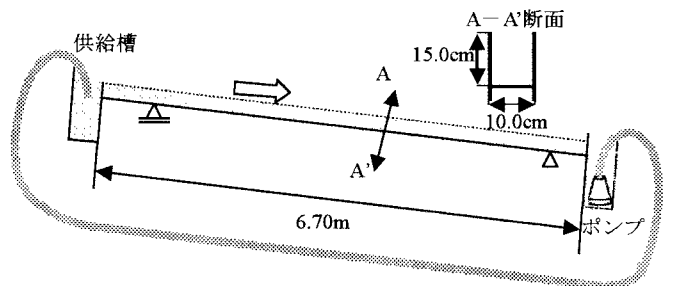


図-1 実験装置

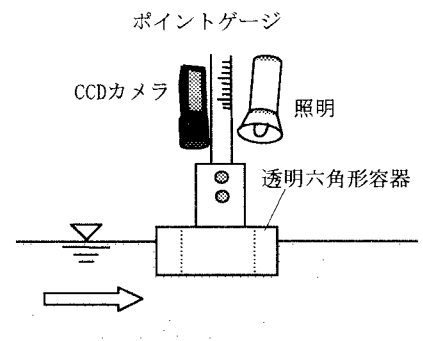


図-2 流速分布測定方法

R : 径深, h : 水深, a : 定数, $Fr = \frac{v}{\sqrt{gh \cos \theta}}$: フルード数

ここで, 幅が水深に比して広い矩形断面では, 式(1), (2)はそれぞれ次式のように近似できる.

$$\frac{2}{(\beta-1) + \sqrt{\beta(\beta-1) + \frac{1}{Fr^2}}} \geq 1 \quad (3) \quad \frac{\frac{1}{2} + a}{(\beta-1) + \sqrt{\beta(\beta-1) + \frac{1}{Fr^2}}} \geq 1 \quad (4)$$

さらに層流の場合, 運動量補正係数は $\beta=6/5$, 乱流の場合抵抗則に Manning 式を用いると, 式(3), (4)はそれぞれ次式のようになる.

$$Fr \geq \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (5) \quad Fr \geq \frac{3}{\sqrt{25-21\beta}} \quad (6)$$

上式(5), (6)は石原・岩垣らが導いた結果と同じである. 式(1)~(4)からわかるように, 流れの不安定性はフルード数 Fr とともに運動量補正係数 β 等に影響されることがわかる.

4. 実験結果および考察

図-3 は, 上流から 6.13m の位置での水深変化を示した図である. この図から水深が周期的に変動し, 転波列が生じていることがわかる. この周期的な水深変動はこの実験水路の場合, 上流から 3m くらいまで発生せず, 4m 以降で顕著に認められるものであった. この実験での平均流速は, 29.4cm/sec, 平均水深 1.05cm, レイノルズ数 415, フルード数 0.85 である. 図-4, 5 は上流からそれぞれ 2.94m, 6.13m の位置での流速分布を示したものである. 横軸に最大流速比, 縦軸に相対水深を示している. 図-4 は上流から 2.94m の位置で転波列は生じておらず, 転波列が発生する直前の位置の流速分布を示している. 図-5 は上流から 6.13m の位置で, 図-3 の水深変動の結果からもわかるように, 転波列が流下する位置での流速分布である. 図-4 の位置での流速分布はほぼ直線的で, 直線で近似するならば $\beta=4/3=1.33$ である. また, 図-5 の流速分布型を二次放物線とすると $\beta=6/5=1.2$ である. したがって, 転波列の発生する前後で運動量補正係数の減少のあることがわかる. これは, 理論的な結果と一致している.

5. おわりに

固体粒子を含有する高粘性流体においても転波列の発生することを実験的に明らかにした. また, 定常状態の開水路流れにおける流速分布測定から, 転波列が発生するのは運動量補正係数の減少によるものであることを示した.

参考文献

- 1) 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—薄層流に関する研究 (第 5 報) 一, 土木学会論文集第 19 号 (昭和 29, 4), pp.46-57
- 2) 岩垣雄一・岩佐義朗; 転波列の水理学特性について—薄層流に関する研究 (第 7 報) 一, 土木学会誌 40-1 (昭和 30, 1), pp.5-12
- 3) Muneyuki ARAI, Xuelan LIU : An Experimental and Theoretical Study on Roll Waves in Viscous Debris Flow, Proc. of XXX IAHR Congress, 2003 (投稿中)

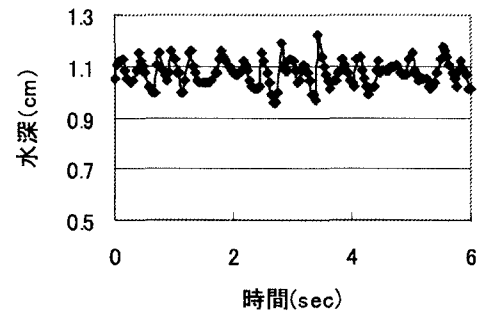


図-3 水深変化 (x=6.13m)

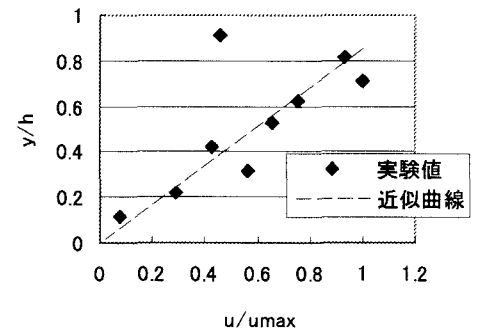


図-4 流速分布 (x=2.94m)

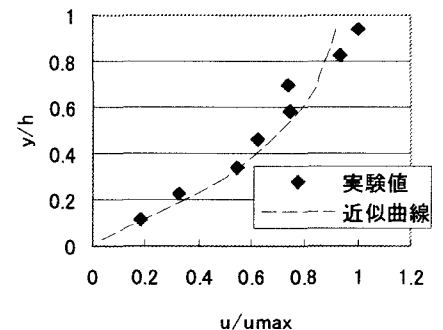


図-5 流速分布 (x=6.13m)