

## 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 ○田原 伸彦  
 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

### 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一連の現象で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ことも珍しくない。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. 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<sup>1),2)</sup>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体の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 $f'$ を用いて石原らと同様の方法で導くと層流の場合、次式のようになる<sup>3)</sup>。

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

ここに、 $m=1-R\frac{ds}{dA}$ 、 $\beta=\frac{1}{A}\int_A\left(\frac{u}{v}\right)^2 dA$ ：運動

量補正係数、 $v$ ：断面平均流速、 $u$ ：流速、 $A$ ：流積、 $s$ ：潤辺、 $R$ ：径深、 $H$ ：水深、 $Fr$ ：フルード数である。ここで、幅が水深に比して十分に広い矩

キーワード：粘性土石流、流れの不安定性、転波列

形断面では、式(1)は次式のように近似できる。

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

式(2)は石原・岩垣らが導いた結果と同じである。式(1)、(2)からわかるように、流れの不安定性はフルード数 $Fr$ とともに水路の断面変化や運動量補正係数 $\beta$ にも影響されることがわかる。

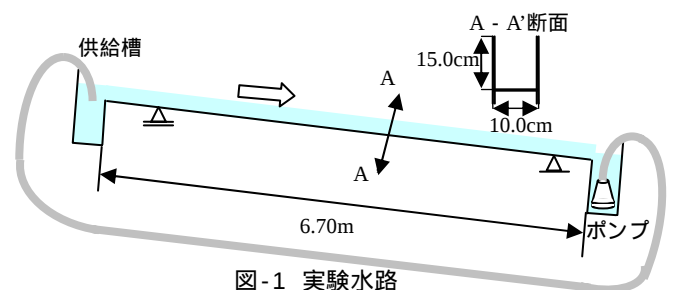


図-1 実験水路

ポイントゲージ

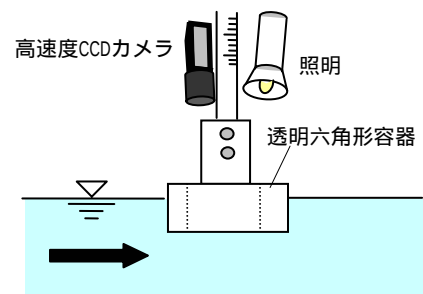


図-2 流速分布測定

### 3. 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、循環式で両側壁透明アクリル製、水路勾配0°~17°の可動式で、水路床はペンキ塗布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、通常の水の約 $10^2$ 倍の粘性（99.0mPa・s）がある。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の六角形の筒

連絡先：〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501

TEL 052-832-1151

FAX 052-832-1178

状の亚克力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、記録し、流体中の粒子運動を解析することにより行った 水深方向の測定は約 1mm 間隔である。

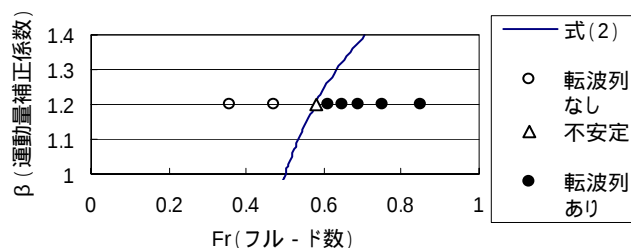


図-3 層流での転波列発生限界

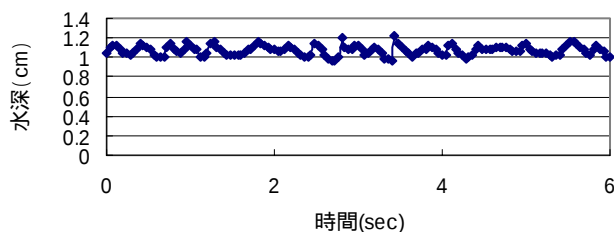


図-4 水深の時間変化(x=6.13m)

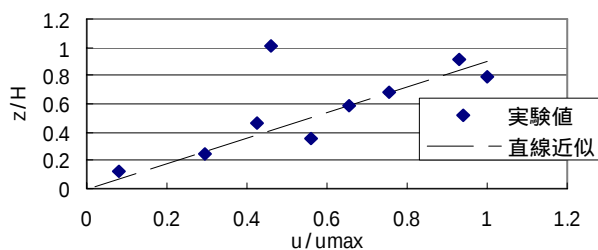


図-5 流速分布(x=2.94m)

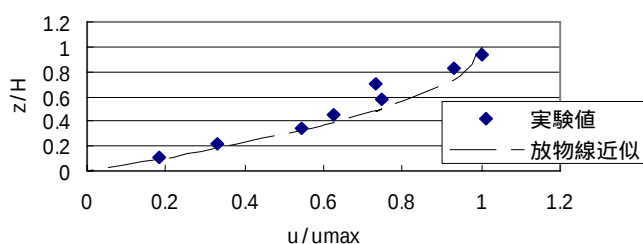


図-6 流速分布(x=6.13m)

#### 4. 実験結果および考察

図-3は層流での転波列発生限界の理論値と実験結果を示したものである。図中の実線は式(2)の下限を表したもので、層流の場合の転波列発生限界であり、実線の右側で転波列が発生する領域である。○, △, ●で示したものは実験結果で転波列発生の有無を区別して示している。また実験結果のβは1.2としている。層流の場合β=6/5であるから、式(2)のFrの下限値は $Fr=1/\sqrt{3}=0.577$ となる。図-3からわかるように転波列の発生はこのような固体粒子を含む高粘性の流れでも理論値とよく一致した。図-4は、水路上流

端から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くらいまで生じず、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、23.1cm/sec、平均水深1.15cm、フルード数0.69である。図-5, 6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。流速分布測定は前節で述べたように幅1.6cmの六角形の容器の底部の粒子(トレーサー)の速度を測定することから、容器壁面の影響を受けるため速度は小さくなる。しかし、流速分布形は水深方向に相似形を保っていると仮定して、最大流速との比で表している。開水路の層流では次式のようになる。

$$\frac{u}{u_{\max}} = 2 \cdot \left\{ \left( \frac{z}{H} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{z}{H} \right)^2 \right\} \quad \dots(3)$$

図-5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-6は上流から6.13mの位置で、図-4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-5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-6の流速分布型は式(3)を破線で示しているが、実験結果とよく一致しており $\beta=6/5=1.2$ であると考えられる。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、理論的な結果とよく対応している。

#### 5. おわりに

固体粒子を含有する高粘性流体における層流においても転波列が発生することを実験的に明らかにし、転波列の発生条件は理論的結果とよく一致することを明らかにした。また、定常流の開水路流れにおける流速分布測定から、流れは流下過程で流速分布形が変化し運動量補正係数が減少することにより、その流れが不安定となることを明らかにした。

参考文献 1) 石原藤次郎・岩垣雄一・岩佐義朗；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；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