

回転円筒装置による分級実験への底面粗度の影響

防衛大学校 学生会員 ○齋藤和樹, 松村健太郎 正会員 香月智, 堀口俊行

1. 緒言

近年、豪雨や大型台風により土砂災害が頻発しており、平成30年の西日本大豪雨では、堰堤の捕捉効果や耐力を越えた土石流が発生し、大きな被害を生じさせた。そのため、土石流対策構造物の整備が求められている。対策構造物の一つに、写真-1に示すような透過型砂防堰堤は、流下する土石流の先端部に巨礫などが集中する分級現象を前提として設計されている。しかし、土石流が分級せずに流下している事例もあることなど、設計情報として未解明な点が多い。

そのため、土石流の分級現象を検討している研究は多くある¹⁾。筆者ら²⁾は、水路内で生じる現象を定点で観測する回転円筒実験装置を用いて偏析現象について検討しているが、回転円筒の水と礫の混合実験における段波形成条件、分級生起機構については明らかになっていない。

そこで本研究は、土石流の流下時に生起する分級現象について解明するために、回転円筒装置を用いて水と礫の混合流体を用いて、段波形成条件、運動形態および分級現象について検討するものである。その際、回転円筒装置内に底面粗度を設置して、底面粗度が段波形成や分級に及ぼす影響について整理する。

2. 実験の概要

2.1 回転円筒装置

写真-2に、回転円筒実験装置を示す。実験装置は、外径235 cm、水路深30 cm、水路幅30 cmの円筒型水路を電動機で回転させるものである。さらに、側面から内部の挙動を確認することが出来る。この装置の特性は、流路長に制限がなく、観測位置をほぼ固定して流体運動を観測出来ることにある。つまり、条件が整えば定常平衡状態となり、定点で観測出来る。

2.2 底面粗度

写真-3に示す底面粗度は、粗度高さ $k=3$ mmの亚克力製角柱で、純間隔 $b=26$ mmとして回転水路底面に取り付けた。

2.3 礫供試体

写真-4に、3種類の礫モデル（以下、モデルA～Cと呼称する。）を示す。これらの材質は、固化石灰炭であり、A～Cの平均粒径 $\phi=8$ mm, 15 mm および 20 mm であり、比重は1.9である。

2.4 実験要領

表-1に、実験ケースを示す。実験は、回転円筒内に水、礫モデルをそれぞれ入れ、装置を回転させた。また、底面粗度を与える場合と与えない場合の2種類を比較する。そのうえで、段波の有無の判定および運動形態の



写真-1 鋼製透過型砂防堰堤

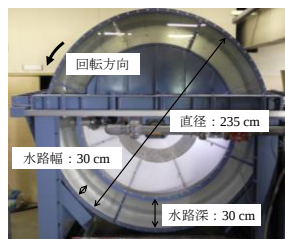


写真-2 回転円筒装置

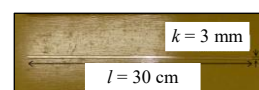


写真-3 底面粗度



写真-4 礫モデル

表-1 実験ケース

底面粗度	水	礫	ケース名	底面速度(-case名)
無	有(20L)	無	SM-w100-none-	
		A($\phi=8$ mm, 1.5L)	SM-w100- $\phi 8$ -	
	有(18.5L)	B($\phi=15$ mm, 1.5L)	SM-w100- $\phi 15$ -	
		C($\phi=20$ mm, 1.5L)	SM-w100- $\phi 20$ -	
		A,B,C混合(各0.5L)	SM-w100-Mix-	
	無	A($\phi=8$ mm, 1.5L)	SM- w0 - $\phi 8$ -	0.0(-v0)
		B($\phi=15$ mm, 1.5L)	SM- w0 - $\phi 15$ -	1.0(-v1)
		C($\phi=20$ mm, 1.5L)	SM- w0 - $\phi 20$ -	2.0(-v2)
		A,B,C混合(各0.5L)	SM-w0-Mix-	3.0(-v3)
				4.0(-v4)
有	有(20L)	無	RF-w100-none-	5.0(-v5)
	有(18.5L)	A($\phi=8$ mm, 1.5L)	RF-w100- $\phi 8$ -	
		B($\phi=15$ mm, 1.5L)	RF-w100- $\phi 15$ -	
		C($\phi=20$ mm, 1.5L)	RF-w100- $\phi 20$ -	
		A,B,C混合(各0.5L)	RF-w100-Mix-	
	無	A($\phi=8$ mm, 1.5L)	RF- w0 - $\phi 8$ -	
		B($\phi=15$ mm, 1.5L)	RF- w0 - $\phi 15$ -	
		C($\phi=20$ mm, 1.5L)	RF- w0 - $\phi 20$ -	
		A,B,C混合(各0.5L)	RF-w0-Mix-	

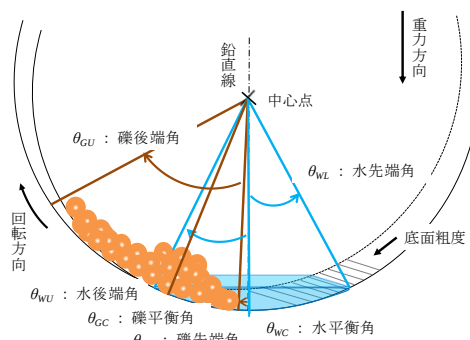
表示例: RF-w100- $\phi 15$ -v3

図-1 平衡状態における代表角度

観測を行った。礫モデルの種類、底面速度を変化させて実験を行った。また、図-1は代表角の計測要領を示しており、土石流内の運動形態を整理した。

3. 実験結果および考察

ここでは、水と礫(混合粒径)の実験における底面粗度の有無の実験結果について示す。

キーワード 土石流 段波 分級 回転円筒 水と礫

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20 防衛大学校 建設環境工学科 TEL:046-841-3810 FAX:046-844-5913

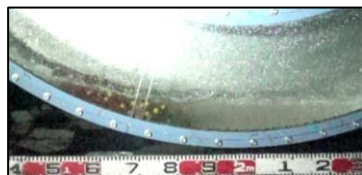
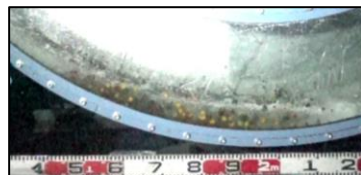
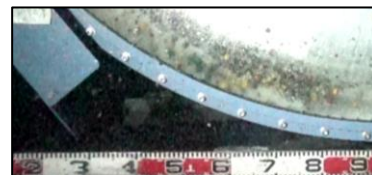
(a) 水・礫分離状態 ($v = 1.0 \text{ m/s}$)(b) 水・礫混合状態 ($v = 2.0 \text{ m/s}$)(c) 気化状態 ($v = 4.0 \text{ m/s}$)

写真-5 水・礫混合(Mix: 底面粗度有)における運動形態

表-2 水と礫 (Mix) の混合実験における段波形成区分および運動形態区分と分級生起区分

ケース名	礫モデル	底面粗度	底面速度 $v(\text{m/s})$											
			1.0			2.0			3.0			4.0		
w100-Mix-	Mix	無	×	I	◎	×	I	○	○	I	○	○	II	△
	Mix	有	×	I	○	○	II	○	○	III	△	○	IV	×

※1 段波 ○: 段波形成, ×: 段波なし ※2 分級区分 ◎: 明瞭に分級, ○: 分級あり, △: 判別困難, ×: 気化

3.1 水と礫 (混合粒径) の運動形態

底面粗度有における水と礫の運動形態を 3 つに区分した。写真-5(a)に示すように、底面速度が $v = 1.0 \text{ m/s}$ に発生する水・礫分離状態、写真-5(b)に示すように、底面速度が $v = 2.0 \text{ m/s}$ に発生する水・礫混合状態、写真-5(c)に示すように、底面速度が $v = 3.0 \sim 5.0 \text{ m/s}$ に発生する水と礫が混合している一方で、先端部の礫が底面粗度に強く衝突し、跳ね上がる状態 (水・礫混合 + 先端部気化状態) である。

3.2 水と礫 (混合粒径) の運動形態の区分と分級

表-2 は、水と礫 (混合粒径) の実験における運動形態の区分を示す。段波を形成していない場合には、底面粗度の有無に関わらず水と礫が分離して、それぞれ平衡状態となる。底面粗度無 ($v \geq 4.0 \text{ m/s}$) では、段波が形成されて礫が流体内に均一に拡散する水・礫混合状態となる。一方、底面粗度有では、 $v = 2.0 \text{ m/s}$ において、粗度無 ($v \geq 4.0 \text{ m/s}$) と同じ区分となり、粗度の影響で低速域において粗度無と同様の効果を発揮することがわかる。

分級は、底面粗度の有無に関係なく、 $v \leq 2.0 \text{ m/s}$ において、分級が生起しており、底面粗度無の $v = 1.0 \text{ m/s}$ においては、明瞭に生起している。 $v \geq 3.0 \text{ m/s}$ からは、底面粗度無の場合は、水と礫が礫径に関係なく混合し、分級自体が不明瞭になる。一方で、底面粗度有は、徐々に流体が気化状態となり分級しなくなる。以上のことから、分級は、低速の領域で生起しやすいことがわかる。これらをまとめると次のようになる。

- 1) 水のみの実験は、段波は粗度の有無に関わらず底面速度が大きくなると形成される。また、底面粗度有は、底面粗度無に比べて、小さい速度で段波を形成する。その際、底面粗度無よりも底面粗度有の方が水は後退する。
- 2) 礫のみの実験では、底面粗度無の運動形態は、低速では平衡状態であるが、速度が増すとスティックスリップ状態となる。一方、底面粗度有では、スティックスリップは生起せず、低速で平衡状態、速度を増すと気化状態となる。
- 3) 水と礫の混合実験の段波形成条件は、底面粗度の有無に関わらず水のみと同じものとなった。
- 4) 水と礫の混合実験は、底面粗度有の条件において、流体先端の位置は、水のみの実験と比べて、水と礫の混合実験の方が後退する。中でも、礫の粒径が大きい方が

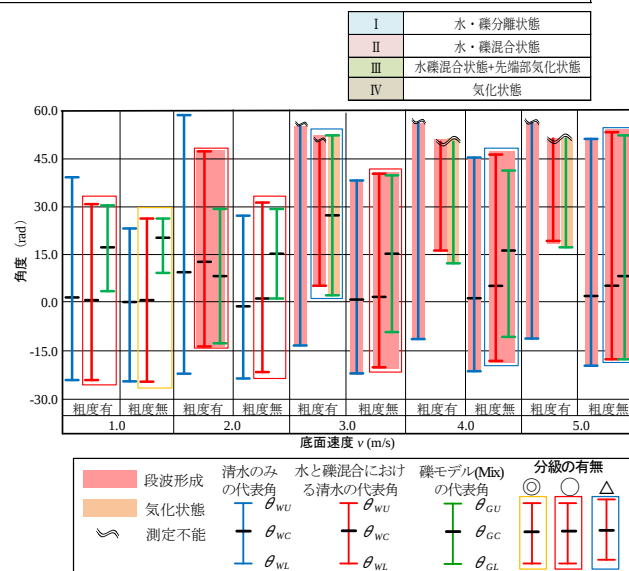


図-2 水と礫(Mix)の代表角～底面速度関係

流体先端は後退する。

- 5) 水と礫の混合実験で底面粗度無の運動形態は、水・礫分離状態、水・礫混合状態の2種類となった。一方、底面粗度有では、運動形態は、水・礫分離状態、水・礫混合状態、水・礫混合状態+先端部気化状態、気化状態の4種類となる。

- 6) 水と混合礫を混合した場合に、底面粗度無では 5 m/s までの全ての条件で分級が観察されたが、底面粗度を与えると、流体全体が気化状態とならない $v \leq 3.0 \text{ m/s}$ の場合において分級が生ずる。

4. 結 言

本研究は、回転円筒実験装置を用いて水のみ、礫のみおよび水と礫混合の段波形成条件、運動形態および分級生起機構を実験的に検討したものである。この際、底面粗度の有無の影響による段波の形成過程、運動形態、および分級現象について明らかにした。

参考文献

- 1) 橋本晴行, 椿東一郎: 土石流における逆グレイディング機構, 土木学会論文報告集, No.336, pp.75-84, 1983.8
- 2) 堀口俊行, 香月智, 小川あずさ: 回転円筒による2粒径混合粗粒材の偏析実験と個別要素法解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.72, No.1, pp.1-20, 2016.4