

回転円筒実験による水・砂・流木の混合土石流の偏析に関する実験的検討

防衛大学校 学生会員 ○立石龍平 正会員 香月 智

1 緒言

土石流対策の一つとして、鋼製透過型砂防堰堤があり、巨礫を含む土石流に対して土砂捕捉効果を期待されている。しかし、平成25年の伊豆大島土石流災害では、透過型砂防堰堤において、大量の流木に後続する巨礫を含まない土砂を捕捉した¹⁾。今後、透過型砂防堰堤において、流木混じり土石流の捕捉を期待するためには、土石流中の流木が土石流先端に偏析する機構を明らかにする必要がある。

そこで本研究は、回転円筒実験装置を用いて、水・砂・流木混合状態において段波を発生させ、混合流体の運動形態および流木の偏析現象の生起条件について実験的に検討するものである。

2 実験要領

2.1 回転円筒実験装置

本実験で用いた実験装置を写真-1に示す。幅30 cm、直径235 cm、流路深30 cmの円筒水路を電動機で回転させるものである。底面は平滑なステンレス板である。特徴は、流路長に制約がなく、流体運動を定点で観測でき、条件が整えば、定常平衡状態を作り出すことができることである²⁾。

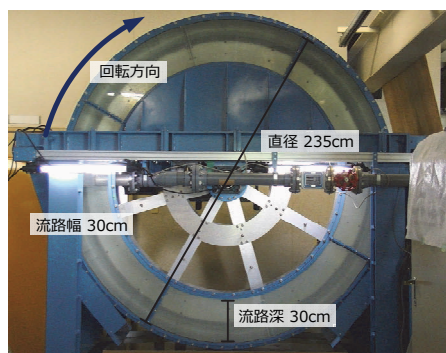


写真-1 回転円筒実験装置

2.2 流木モデル

写真-2に、使用した流木モデルを示す。流木モデルは、120 mmと180 mmの2種類の長さとした、幹のみを再現したモデルと、120 mmの長さの円柱の端部に、加工した網目状のポリエチレン製ネットを接着し、根付き流木として再現したモデルの計3種類を使用した。

2.3 土砂モデル

実験で用いた土砂は、ほぼ均一な粒度分布を持つ平均粒径 $d_{50}=0.44$ mm、比重2.56の珪砂5号を用いた。

2.4 実験条件

実験は、円筒水路内に清水、砂および流木モデルを混合して入れ、代表角度の計測および段波の有無の判定を行った。実験は、水と砂の体積や混合比、流木モデル、底面速度を変化させ144ケースについて行った。

3 実験結果および考察

3.1 水・砂混合実験

水・砂混合状態の運動形態は、水先行&水・砂分離状態(S_{ws})と水・砂混合状態(M_{ws})の2種類となった。水先行&水・砂分離状態では、段波が生じない、流体全体が循環せずに土砂

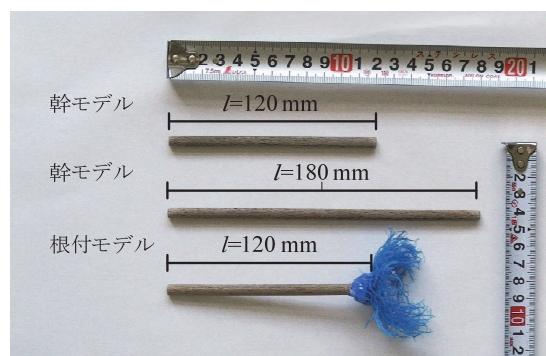


写真-2 流木モデル

表-1 水・砂・流木混合状態における運動形態生起条件区分

水深	種 類	水砂混合比		流木 タイプ	流木長	底面速度 v (m/s)														
						1.0			2.0			3.0			4.0			5.0		
						水+砂	流木	段波	水+砂	流木	段波	水+砂	流木	段波	水+砂	流木	段波	水+砂	流木	段波
h	—	—	$V(0)$	—	l	水+砂	流木	段波	水+砂	流木	段波	水+砂	流木	段波	水+砂	流木	段波			
100	水+砂	2:1	(6.6L:13.3L)	—	—	S_{WS}	—	×	S_{WS}	—	×	M_{WS}	—	○	M_{WS}	—	○	M_{WS}	—	○
		1:1	(10L:10L)	—	—	S_{WS}	—	×	S_{WS}	—	×	M_{WS}	—	○	M_{WS}	—	○	M_{WS}	—	○
	水+砂+流木	2:1	(6.6L:13.3L)	幹のみ	120	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○
					180	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○
			根付流木	120	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○	
				120	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○	
		1:1	(10L:10L)	幹のみ	120	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○
					180	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○
			根付流木	120	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○	
				120	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○	
120	水+砂	2:1	(10L:20L)	—	—	S_{WS}	—	×	S_{WS}	—	×	S_{WS}	—	×	M_{WS}	—	○	M_{WS}	—	○
		1:1	(15L:15L)	—	—	S_{WS}	—	×	S_{WS}	—	×	S_{WS}	—	×	M_{WS}	—	○	M_{WS}	—	○
	水+砂+流木	2:1	(10L:20L)	幹のみ	120	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○
					180	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○
			根付流木	120	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○	
				120	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○	
		1:1	(15L:15L)	幹のみ	120	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○
					180	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○
			根付流木	120	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○	
				120	S_{WS}	F	×	S_{WS}	F	×	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○	M_{WS}	S_{se}	○	

凡 例

水+砂運動形態

S_{WS} : 水先行+水・砂分離状態
 M_{WS} : 水・砂混合状態

流木運動状態

F : 浮遊状態
 S_{se} : 偏析状態 [流動化]
 S_{se} : 偏析状態 [固化]
 D_{se} : 散乱状態

運動形態

S_{WS} F : 水先行+流木浮遊状態
 M_{WS} S_{se} : 水・砂混合+流木流動偏析状態
 M_{WS} S_{se} : 水・砂混合+流木固化偏析状態

段 波

○ : 形成
× : 形成せず

凡 例

S_{ws} : 水+砂運動形態	F : 浮遊状態	$S_{ws}-F$: 水先行&流木浮遊状態	○ : 形 成
M_{ws} : 水・砂混合状態	S_{se} : 偏析状態 [流動化]	$M_{ws}-S_{se}$: 水・砂混合&流木流動偏析状態	×
	S_{se} : 偏析状態 [固化]	$M_{ws}-S_{se}$: 水・砂混合&流木固化偏析状態	
	D_{se} : 散乱状態		

キーワード 流木混じり土石流、段波、偏析、回転円筒実験装置

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 TEL046-841-3810

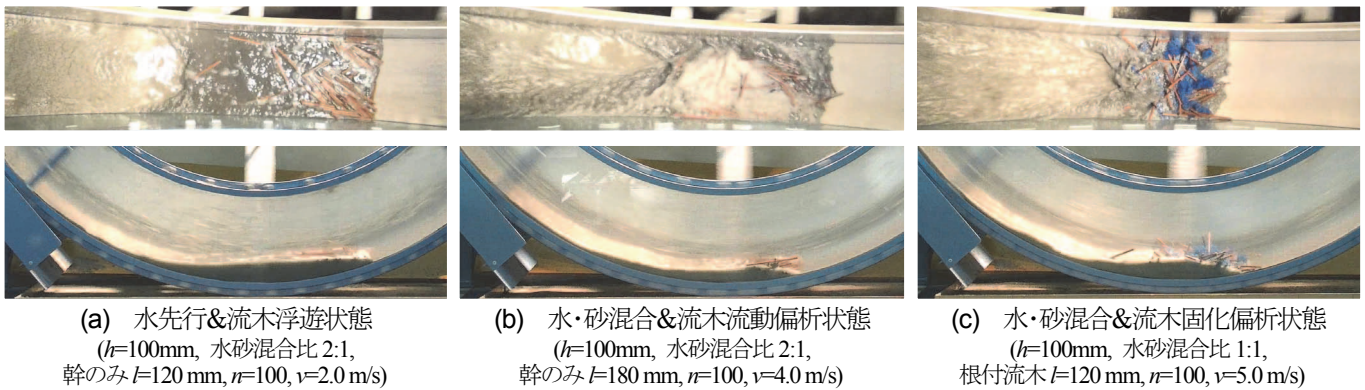


写真-3 水・流木混合状態における運動形態

の沈下・堆積を促す、緩い流れの場合に生じる。水・砂混合状態は、段波形成時に生じており、流水全体を循環するような流れにより、水と砂の攪乱が促進され生起するものである。

3.2 水・砂・流木混合実験

水・砂・流木混合状態の運動形態は、水先行&流木浮遊状態 (S_{WS-F})、水・砂混合&流木流動偏析状態 ($M_{WS-S_{fc}}$)、水・砂混合&流木固化偏析状態 ($M_{WS-S_{sc}}$) の3種類に分類できた。表-1に、水・砂・流木混合状態の運動形態の分類を示す。

写真-3(a)に水先行&流木浮遊状態を示す。水先行&流木浮遊状態は、底面速度が遅く、砂に対して水の量が多い場合に生起する。段波が生じないため、水と砂の運動形態は、水先行&水・砂分離状態となり、流木は前方に流れ出した清水域に広く分散して浮いている。これは、流木は一旦清水中に現れると、浮き上がり、再び砂の中に戻ることはないため、流木が浮遊した状態に収束するためである。

写真-3(b)に水・砂混合&流木流動偏析状態を示す。水・砂混合&流木流動偏析状態は、底面速度が速く、幹のみの流木を混合させるとともに段波が生じる条件において生起する。段波が生じるため、水と砂の運動形態は、水・砂混合状態となる。このとき、流木は先端において流動化しながら、相互に重なり合って流木塊を形成する。流木塊は、流体先端に留まり流れに抵抗しながら、平衡状態を維持する。

写真-3(c)に水・砂混合&流木固化偏析状態を示す。水・砂混合&流木固化偏析状態は、底面速度が速く、根付流木を混合させた条件において生起する。水・砂混合&流木流動偏析状態と同様に水と砂の運動形態は、水・砂混合状態となり、流木は、先端に偏析する。しかし、根付き流木は絡まりやすいため、流木は流動化せず固化する。

3.3 流木の偏析機構

以上の観察より、水・砂混合状態において段波時の流木が偏析する機構は、図-1に示すようになる。

- 水路床付近の下層部では、底面摩擦による粘性により、後退する流体の流れが生じ、水面付近の上層部では、先端への流れが生じ、流体は循環している。
- 流体内の土砂は沈降するが、流体の循環により攪乱され、混合する。しかし、緩やかな勾配に変化する地点では、流速が変化し、土砂の沈降が進み、段波先端部では、水の量が砂の量よりやや多くなっている。
- 流体の上層に浮かんだ流木は、上層の水流に乗って先端に流出するが、段波先端に達すると清水の流れの影響により下層に沈み、後端へ流れ出す。
- 流木が底面に接すると摩擦が生ずるため、流木が後端へ

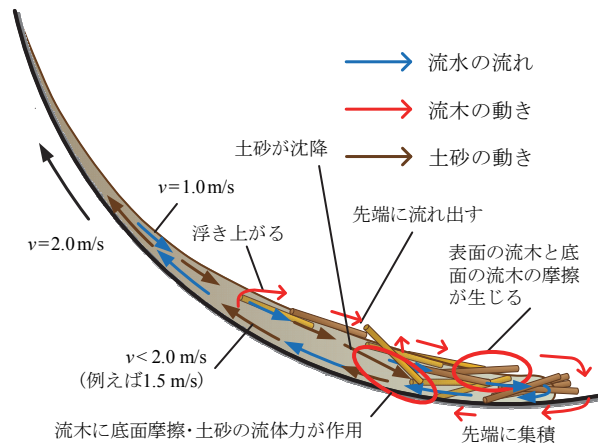


図-1 流木偏析の模式図

流れ出す。しかし、緩やかな勾配に変化する地点では、先端に向かいながら沈降する土砂による流体力が強く働くとともに、流木間で摩擦や制動が働き、絡み合う。結果、流木が集積され、偏析状態となる。

4 結 言

本研究で、得られた成果を以下に示す。

- 1) 水と砂の混合状態は、2つの運動形態に区分できる。
- 2) 水と砂の混合状態において、水・砂混合状態となる条件と段波が生じる条件は、概ね一致している。
- 3) 水・砂・流木混合状態における運動形態は、3つの運動形態に区分できる。
- 4) 水・砂・流木混合状態において、流木が偏析する条件と段波が生じる条件は概ね一致している。段波形成時に、流体内の循環が生じるためであることを示している。
- 5) 先端部に偏析した流木に樹根が伴うと、絡まり合って互いの位置関係が固定化された固化状態となる。

参考文献

- 1) 石川芳治, 池田暁彦, 柏原佳明, 牛山素行, 林真一郎, 森田耕司, 飛岡啓之, 小野寺智久, 宮田直樹, 西尾陽介・小川洋, 鈴木崇, 岩佐直人, 青木規, 池田武穂: 2011年10月16日台風26号による伊豆大島土砂災害, 砂防学会誌, Vol.66, No.5, pp.61-72, 2014.1
- 2) 立石龍平, 堀口俊行, 香月智: 回転円筒実験における流木混じり土石流の段波形成に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.926-934, 2015.3