

回転円筒内における流水中流木挙動の個別要素法解析

防衛大学校 学生会員 ○立石 龍平 嶋川 理 堀口 俊行 正会員 香月 智

1 緒言

平成 25 年の伊豆大島で発生した災害では、土石流中の巨礫は少なく、土砂とともに大量の流木が流下して被害が生じた。現地には、透過型砂防堰堤が建設されており、先頭部に集中した流木が捕捉されることで、後続する土砂を捕捉し減災に貢献した。しかし、中には沿岸部にまで流木や土砂が少なからず到達しており、流木が偏析していたのかについては不明確である。

著者ら<sup>1)</sup>は、回転円筒実験装置を用いた実験において粒状体の偏析現象を検討しており、底面速度や粒径差が偏析の生起に影響することを明らかにした。しかし、流木混じり土石流内における偏析現象の生起条件や、そのメカニズムは不明確である。

そこで本研究は、回転円筒実験装置で水のみと流木混じりの実験を行い、流水および流木の挙動を整理する。次に、流木混じりにおける偏析現象を個別要素法で再現することで偏析時に生じる流木の挙動を検討するものである。

2 擬水滴要素<sup>2)</sup>

個別要素法は、剛体要素をモデル化して解いており、接触した要素で得られた接触力をもとに動的な解析を行う。本研究では、混相流モデルの再現のために、擬水滴要素と固体要素を混合した解析を行う。擬水滴要素は、抗力係数を基に固体要素の間隙の形状にかかわらず、擬水滴要素がすり抜ける運動をする。減衰管理は、礫要素との相対速度に基づく力を及ぼす。また、個々の要素ごとに、接触している要素全体による体積収縮を求め、対応する内圧を求めることで異方性のない圧力を周囲に与えるように工夫している。

3 回転円筒実験<sup>3)</sup>

3.1 実験要領

写真-1 に、回転円筒実験装置を示す。実験装置は電動機により回転する。側面および底面は、透明の亚克力板であり、側面および底面からの観察が可能である。なお、本研究では底面粗度は設けていない。表-1 に、各実験の水深および底面速度の条件を示す。実験結果は、図-1 に示す代表角度を計測し、段波形成および流下時の流木の運動形態を観測することで整理した。

3.2 清水のみの実験結果

図-1 に、清水のみの条件における水面形状を、図-2 に実験結果を示す。実験によると、水深が浅く、底面速度が速いほど段波を形成しやすくなることがわかる。すなわち、清水のみに限っては、水深と流速が段波形成に影響を与えることがわかる。また、段波発生時、

流水内は、図-1 (b) に示すように水が循環している。

3.3 流木混じりの実験結果

表-2 に、流木混じりの実験における流木の挙動を整理した。円筒内の流木は 4 種類の運動形態となる。それぞれ、A 浮遊状態、B 偏析状態（配置変換あり）、

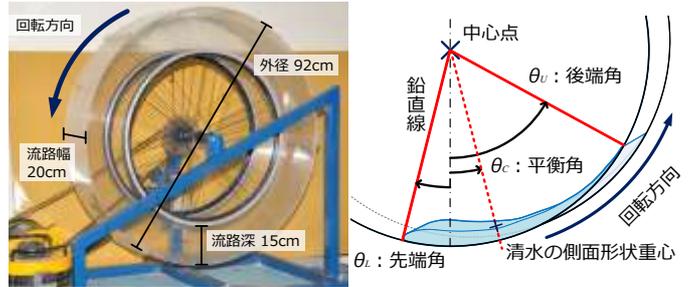
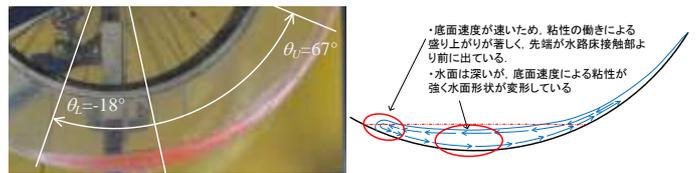


写真-1 回転円筒実験装置

図-1 代表角度

表-1 実験ケース

シリーズ	水深 h (mm)	底面速度 v (m/s)	流木長 l (mm)	流木本数 n
清水のみ	40	0~3.0		
流木混じり	50	(0.5m/s 刻み)	60 120	50 100



(a) 水面形状

(b) 実験における水の挙動

図-1 清水のみの水面形状

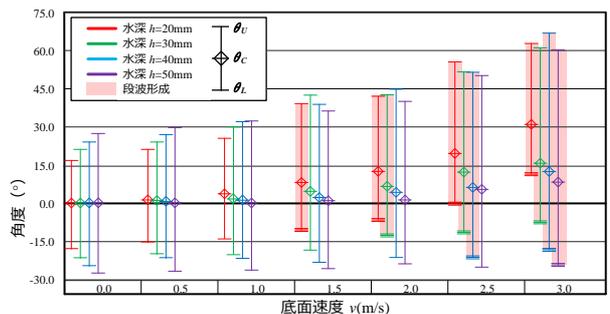


図-2 清水のみの実験における 代表角度～速度関係

表-2 流木混じりの実験における流木の挙動

水深 h (mm)	流木長 l (mm)	流木数 n	底面速度 v (m/s)						状態
			0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	
40	60	50	A	A	A	A	A	A	A 浮遊状態 B 偏析状態 C 偏析状態 D 清水・流木塊分離状態
		100	A	A	A	A	A	B	
	120	50	A	A	B	B	B	B	
		100	A	C	C	C	C	C	
50	60	50	A	A	A	A	A	A	A 浮遊状態 B 偏析状態 C 偏析状態 D 清水・流木塊分離状態
		100	A	A	A	A	A	B	
	120	50	A	A	A	B	B	B	
		100	A	C	C	C	C	C	

キーワード 個別要素法, 流木混じり土石流, 回転円筒実験, 偏析

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

C 偏析状態 (配置変換なし), D 流水・流木塊分離状態である. 流木混じりにおいて, 偏析現象は, 底面速度や流木長によって影響を受ける. また, 偏析が生じた時においても, 配置変換が生じる場合と生じない場合があり概して流木長によって影響を受けている.

4 個別要素法解析

4.1 実験要領

本研究では, 段波形成時の実験を対象とし, 水深 50 mm, 底面速度 3.0 m/s, 流木長 120 mm, 流木本数 50 本の条件に対する再現解析を行う.

4.2 解析条件

文献 1)を参考に, 円柱形要素を円状に配置することで回転円筒実験装置を再現した. 擬水滴要素は, 球形で直径を 1cm とした. 流木は, 円柱形要素を用いてモデル化した. 解析基本値を表-3 に示す.

4.3 解析結果

(1) 流水のみの解析

図-3 に, 清水のみににおける時系列の解析結果を示す. 水面形状は, 実験と同様に先端部が切り立つとともに盛り上がる特徴を有する段波形状となっている. また, 赤マーカー要素は図-3 (d)に示すように, 表層を流れ下った後, 底層に潜り, 底面に達すると後方に遡り, 後端付近で, 表層に浮き上がり, 円筒内を循環している. これは, 図-1 (b)の実験の目視観察と一致している.

(2) 流木混じりの解析

図-4 に, 流木混じりにおける実験結果と解析結果の時系列の比較を示す. 実験では, 流木は先端に偏析し, 流木塊を形成する. 流木塊は平衡状態を維持するとともに, 流木塊内の流木は, 塊内で循環している. 一方, 解析でも段波が形成されており, 流木は当初流水全体に分布しているが, 時間が経過すると, 浅層の擬水滴

要素の流れにより, 流木が先端に集まり, 偏析している. また, 先端に到達した流木は, 底層に至るとともに, 一旦後方に逆流するが, 循環流の途中で浮力によって浮上し, 表層を急速に下る. つまり, 流水分布域の前方部分に生起する流木の循環が再現できている. なお, この流木挙動は, 円筒内における擬水滴要素の循環による流体力を受けたためである.

5 結言

本研究は, 回転円筒実験装置で水のみと流木混じりの実験を行い, 流水および流木の挙動を整理した. この基礎情報をもとに, 個別要素法を応用した擬水滴要素の再現解析への適用性を検討した.

- 1) 実験により, 偏析の生起条件は, 流速や水深によって定まることを示した. この傾向は, 流木が混じった実験においても同様の傾向が見受けられる.
- 2) 水のみ解析において, 段波形状が再現可能であることがわかった. その際, 水は段波内で循環している.
- 3) 流木混じりの解析において, 段波形成と流木の偏析現象を再現できた. そのメカニズムは水の循環運動に支配されている. 今後は水と流木混じりの回転円筒解析を行い偏析現象の生起条件や挙動の解明を行う.

参考文献

- 1) 堀口俊行, 香月智, 長池広樹: 回転円筒による混合球形粒子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.69, No.1, 41-56, 2013
- 2) 堀口俊行, 香月智: 底面水抜きスクリーン実験に対する水と礫の分離挙動シミュレーション, 土木学会論文集 A2 分冊 (応用力学) 特集号, Vol.17, 2015.2.
- 3) 立石龍平, 堀口俊行, 香月智: 回転円筒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, 2015.3.

表-3 解析初期値

項目		値	
回転円筒モデル	円柱形要素	360	
	平面要素	2	
流木モデル	円柱形要素	100	
	擬水滴要素		
	要素数 (直径 $r_w=1.0$ )	2800	
	比重 $\rho_w$ ( $\text{kg/m}^3$ )	1910	
要素間ばね	ばね定数	法線方向 $K_n$ (N/m)	$1.0 \times 10^6$
		接線方向 $K_t$ (N/m)	$3.5 \times 10^5$
	要素間摩擦係数 $\tan \phi_e$		0.5774
	減衰定数 $h$		0.2
	粘着力 $C$ (N)		0
計算条件	時間刻み $\Delta t$ (s)		$1.0 \times 10^{-6}$

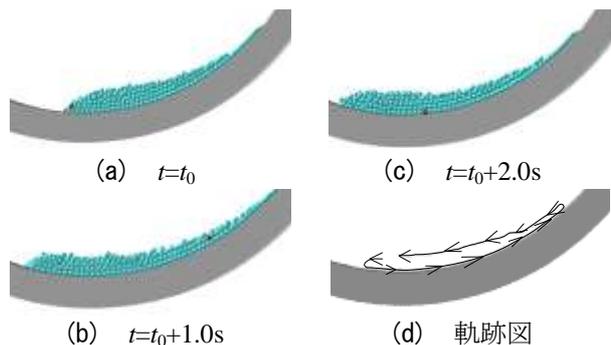


図-3 水のみ回転円筒解析

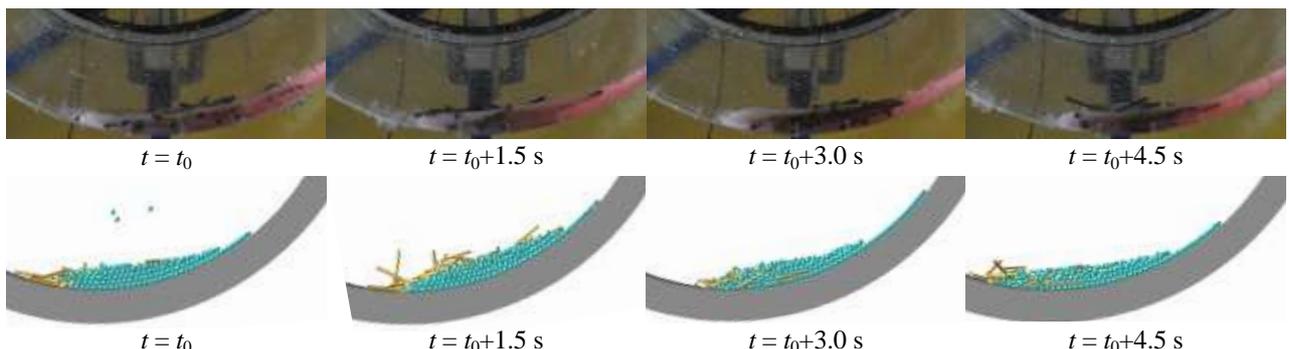


図-4 流木混じり土石流の回転円筒解析