

個別要素法を用いた粗粒材の回転円筒内実験シミュレーション

防衛大学校 ○堀口俊行, 香月 智

1 緒言

現行の砂防堰堤は、開口部を有する透過型を原則としており¹⁾、通常時は砂を流し、土石流時にのみ先頭部に集中する巨礫を詰まらせて捕捉するものとされている。これは、土石流が流下時に段波を形成し、分級現象を生じることにより巨礫が浮かび上がり、前に押し出されるといわれているためである。しかし、土石流の中には、段波を形成せずに、巨礫が前方に集中しないままに流下することや、流下途中で巨礫だけがとどまる現象も確認されている。すなわち、土石流の先頭部に集中する現象についての生起条件は未解明なままである。

このため著者らは、回転円筒実験装置を用いて、異粒径のガラスビーズを用いた2粒径混合状態の分級現象実験を行っている²⁾。そこで本研究は、この分級現象実験を個別要素法により再現解析し、そのメカニズムについて考察したものである。

2 実験の概要²⁾

図-1 に、解析対象とする回転円筒実験装置を示す。この実験装置は、直径 92cm、幅 20cm の円筒形底面を有する矩形路であり、底面と側面がアクリル板で作られている。礫モデルは、粒径 25mm および 8mm、比重 2.6 のガラスビーズを用いた。このガラスビーズを円筒内に置き、一定速度で円筒を回転させたときのガラスビーズの挙動を考察した。

2.1 単粒径群の挙動

底面速度を徐々に増すと、0.2m/s 未満では粒状体全体として一つの塊が前後に往復する。その後 0.2m/s～3.0m/s の間は、粒状体全体として図-2(a)に示すように、ほぼ一定の位置にとどまる平衡塊を形成する。さらに早く回し、3.0m/s を超えると平衡塊は失われ、個々の要素がばらばらに運動するカスケードニングを起こす。

2.2 2 粒径混合状態の挙動

0.2m/s 未満では、それぞれのガラスビーズの配列は変化が小さく、大粒径と大粒径の周辺にある小粒径だけが徐々に動き、大粒径が浮き上がっているように見受けられ、ブラジルナッツ効果でいうところの対流の効果⁴⁾が生じている。次に、0.2m/s～3.0m/s では平衡塊が形成され、塊の中で分級現象が生じる。すなわち、明瞭に大粒径が浮き上がり、小粒径塊の前方に位置する。さらに、3.0m/s と速度を増すと、分級現象が発生せずに各要素がランダムな運動をする。

3 解析手法

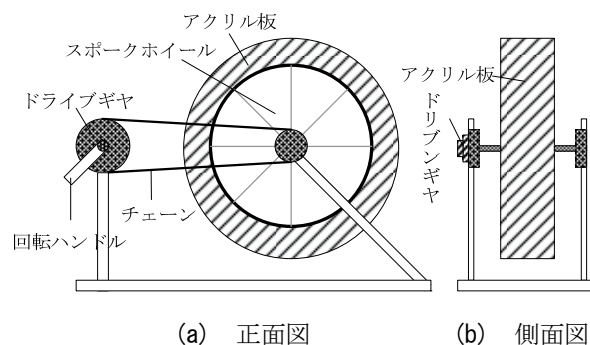
3.1 解析手法の概要³⁾

図-1 実験装置

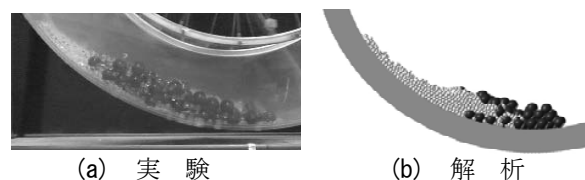


図-2 平衡塊の一例 (2 粒径混合状態)

本解析では、実験装置をモデル化するため 360 個の円柱形要素を半径の 0.3% 分ずつずらして重ね合わせて配列した。なお、球形要素が漏出しないよう側面には平面要素を配置している。そのうえで、実験と同じ条件となるように、円筒モデルに 1.0m/s の回転速度を与える。

また、ガラスビーズは球形要素を用いて、実験と同条件である粒径 25mm と 8mm、比重は 2.6 となるようにモデル化した。初期配置は、静止した円筒内に大粒径要素を自重で落下法により配置し、その後、小粒径要素を同様の要領で配置し、そのうえで円筒を回転させた。

4 回転円筒内分級現象解析

4.1 単粒径群の解析

図-3(a), (b) に、解析で得られた単粒径群の平衡塊の粒子分布を示す。表-2 に、その分布領域と実験値との比較を示す。ここでは、礫の先頭部、後尾部の角度をそれぞれ、 θ_L , θ_U とし、その平均値を平衡角 θ_C として表している。まず、粒径 25mm では、実験が $\theta_L=50^\circ$, $\theta_C=23^\circ$, $\theta_U=5^\circ$ であるのに対して、解析は $\theta_L=50^\circ$, $\theta_C=23^\circ$, $\theta_U=5^\circ$ となっており、良く一致している。粒径 8mm では、実験が $\theta_L=54^\circ$, $\theta_C=24^\circ$, $\theta_U=7^\circ$ に対して、解析は、 $\theta_L=55^\circ$, $\theta_C=25^\circ$, $\theta_U=3^\circ$ であり、これも概ね一致している。また、実験と同様に解析も大粒径の θ_C が、小粒径のものよりもやや小さくなる点も一致している。

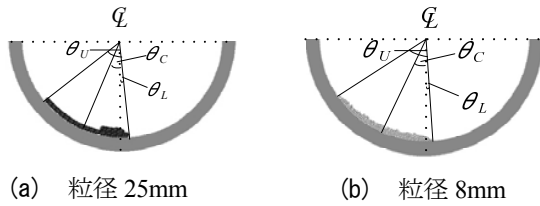


図-3 単粒径の平衡塊

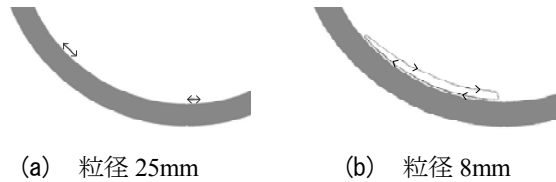


図-4 平衡塊中の粒子の移動軌跡

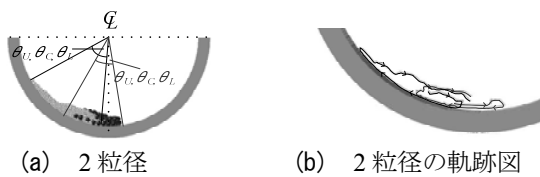


図-5 2粒径混合状態の平衡角と軌跡図

図-4に、図-3に示した平衡塊中における個別の要素の移動軌跡を示す。図-4(a)の粒径 15mm では、先頭部と最後尾の要素の軌跡を示している。これらは前後に57mm程の間において往復しながら、ほぼ同じ位置にとどまっている。次に、図-4(b)の粒径 8mm の場合には、要素は底面沿いに後ろに登った後に上層部に浮き上がると、一気に先頭部へ下る。つまり、移動軌跡が回転円筒内と同じ回転方向の長楕円形の回転となり循環している。

4.2 2粒径混合解析

2種類の粒径(25mm : 160個, 8mm : 4000個)を用いて、混合状態の解析を行った。実験と同様に図-5(a)に示すように平衡塊が得られる。この平衡塊内の二つの粒子群の運動を分析すると、粒径 25mm の要素群は、 $\theta_C=11^\circ$ であり、粒径 8mm の要素群の $\theta_C=25^\circ$ に対して、前方に位置していることがわかる。参考までに、粒径 25mm の要素群の θ_C は、その単粒径群での平衡角が 23° であったのに対して、前方に押し出されていることがわかる。このことは、表-2の実験値の傾向と良く一致している。これは、図-2(a)の実験と同様に、小粒径が大粒径の下に流れ込み底面を逆に登っていき大粒径粒子が浮き上がる現象を生じるためである。図-5(a), (b)には、大小粒径の代表的要素の移動軌跡を示す。小粒径要素と大粒径要素は、ともに時計回りの移動軌跡を描き、中間点付近で堆積している。すなわち、この θ_C 付近で、大粒径要素にブラジルナッツ効果のような浮き上がりが生じている。図-6には、接触力分布図を示す。ここでは、粒子サイズを 1/5 としており、接触力

表-2 計測結果

実験条件	項目	バランスポイント(解析/実験)		
		$\theta_L(^\circ)$	$\theta_C(^\circ)$	$\theta_U(^\circ)$
単粒径	25mm	50/50	23/23	-5/-5
単粒径	8mm	55/54	25/23	-3/-2
2粒径混合	混合	59/54	25/24	-10/-7
	25mm	30/35	11/15	-8/-5
	8mm	59/54	25/24	0/-7

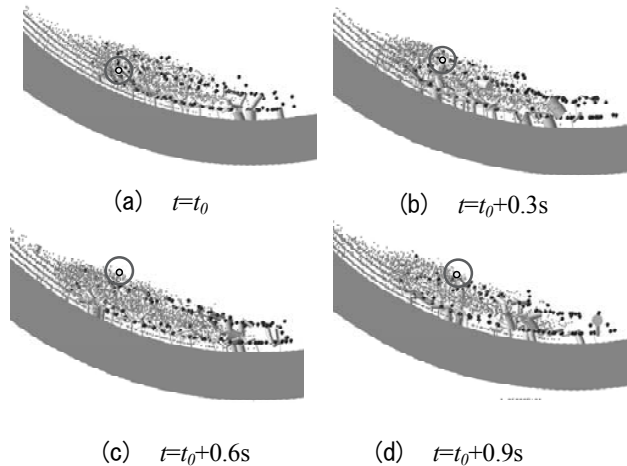


図-6 分級現象

は2つの粒子の中心点を結ぶ線の長さを固定し、接触力の大きさによってその太さを変えている。まず、先頭部においては、頻繁に底面から大粒径要素が斜め後方へ突き上げる力が生じている。すなわち、制動力が生じている。また、 $t=t_0+0.3s$, $t_0+0.9s$ の様子を見ると、 θ_L から θ_C の領域において、十数本の強い制動力が大粒径要素に生じている。これが、ブラジルナッツ効果を生じている一つの原因となっていると思われる。

5 結言

本研究では、得られた知見は以下になる。

- (1)粒状体の集合体の挙動は、一粒子の挙動と異なる平衡塊メカニズムを生じる。
- (2)分級現象は、2粒径混合状態において粒径比における影響が多きく、大粒径の方が粒状体群内で浮き上がり、先頭部に押し出され集中する。

参考文献

- 1) 田畑茂清, 守山浩史: 鋼製透過型えん堤工法・設計法の変遷と課題, 砂防学会誌, Vol.64, No.6, pp.47-51, 2010.3
- 2) 長池広樹, 堀口俊行, 香月智: 回転円筒を用いた粗粒材の分級現象に関する実験的検討, 第39回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, 2012.3
- 3) 澁谷一, 堀口俊行, 香月智, 大隅久, 石川信隆: 円柱形集合体要素を用いた個別要素法による根付き流木の捕捉シミュレーション, 土木学会論文 A2(応用力学), Vol.67, No.2, pp.I_323-I_334, 2011.8
- 4) J. Duran 著, 中西 秀, 奥村剛訳: 粉粒体の物理学, 2002.6