

球形要素を用いた個別要素法による回転円筒内分級現象解析

防衛大学校 学生会員 ○堀口俊行 長池 広樹 澁谷 一 正会員 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こととなっている。しかし、粒状体の分級により巨礫が浮かび上がり、土石流の先頭部に集中する現象についての生起条件などは未解明なままである。このため著者らは、円筒形の回転ドラムを用いた分級実験を行っている²⁾。

本研究は、土石流の流下状態を模した円筒形の回転ドラム実験装置による分級現象の再現実験を個別要素法によりシミュレーション解析するものである。

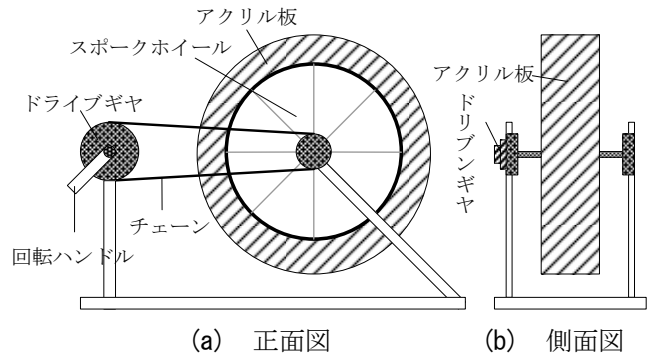


図-1 実験装置

2 実験の概要²⁾

図-1 に解析対象とする円筒形の回転ドラム実験装置について示す。この実験装置は、直径 92cm、幅 20cm の円筒形水路であり、全体はアクリル板で覆われた構造となっている。また、礫モデルには粒径 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。

実験では、25mm もしくは 8mm のいずれか 1 種類のみを用いた単粒径の実験と、これらを混合した 2 粒径混合の実験を行った。なお、実験の詳細については文献 2) で報告する。

3 解析手法

3.1 解析手法の概要

本解析は円柱形要素と球形要素による個別要素法³⁾を用いる。円筒形の実験装置は、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並べることによってモデル化した。なお、球形要素が漏出しないう側面には三角形平面要素を配置している。

3.2 回転円筒内解析モデル

解析においては、実験と同じ条件となるように、円筒モデルに 0.8m/s の回転速度を与える。また、ガラスビーズに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 とした。初期配置は、まず大粒径要素を円筒内に流し込んで配置し、その後、小粒径要素をその上部から落下法で配列した。

なお、表-1 に解析で用いたパラメータを示す。

表-1 解析条件

項目		値
要素	円柱形要素	360
	球形要素	4160
要素間ばね	法線方向ばね定数 K_n (N/m)	1.0×10^6
	接線方向ばね定数 K_s (N/m)	3.5×10^5
	減衰定数 h	0.2
	粘着力 c (N)	0
	摩擦係数 $\tan \phi_e$	0.364(20°)
計算条件	時間刻み Δt (s)	1.0×10^{-6}

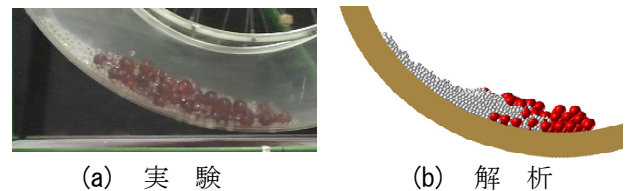


図-2 バランスポイントの一例

0.4m/s～1.4m/s では、粒状体全体としては図-2 に示すようにほぼ一定の位置にとどまるバランスポイントに達する。さらに早く回すとバランスポイントは失われ、個々の要素がばらばらに動きだしカスケードイングを起こす。図-3(a), (b) に、解析で得られた単粒径のバランスポイント状態の粒子の分布を示す。また、表-2 には分布領域を実験値と比較して示す。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、その中間の角度を θ_C で表している。実験と比較するとまず、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、概ね一致する結果を得ている。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ことも一致している。

図-4 に、図-3 に示した状態にある一要素の移動軌跡

4 回転円筒内分級現象解析

4.1 単粒径におけるバランスポイント

実験では、回転速度を徐々に大きくすると、0.2m/s 未満ではスティックスリップ現象⁴⁾が生じ、その後

キーワード 分級現象, 土石流, 個別要素法

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

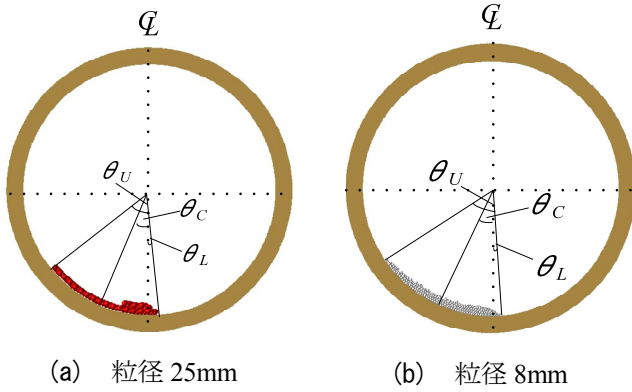


図-3 単粒径のバランスポイント

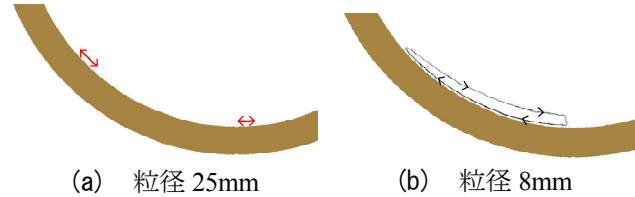


図-4 バランスポイントの粒子の移動軌跡

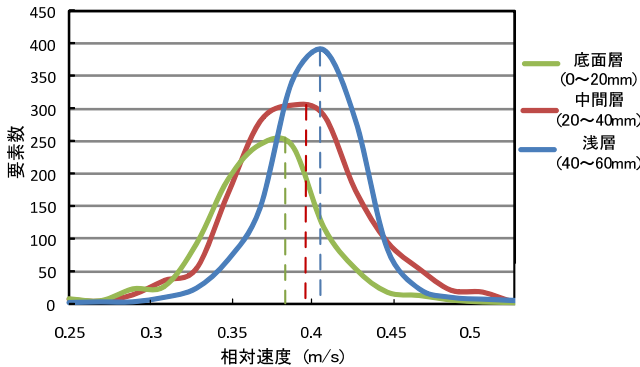


図-6 各領域における相対速度

を示す。図-4(a)では、先頭部と最後尾の要素の軌跡を示している。ともに前後に57mm程の間において往復しているが、ほぼ同じ位置にとどまっている。なお、この間要素は回転している。しかし、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、移動軌跡が回転ドラム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粒径混合状態のバランスポイント解析

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うと、実験と同様に図-5(a)に示すようにバランスポイントが得られる。二つの粒子群の運動を詳細にみると、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、前方にあることがわかる。また、粒径25mmの要素群の θ_C は、単粒径でのバランスポイントよりも前方に押し出されている。この点は、表-2の実験値の傾向と良く一致している。よって、図-2(a)の写真と同様に、まず、小粒径が大粒径の下に流れ込み浮き上がり現象を生じる。すなわち、分級現象を起こした後、浮き上が

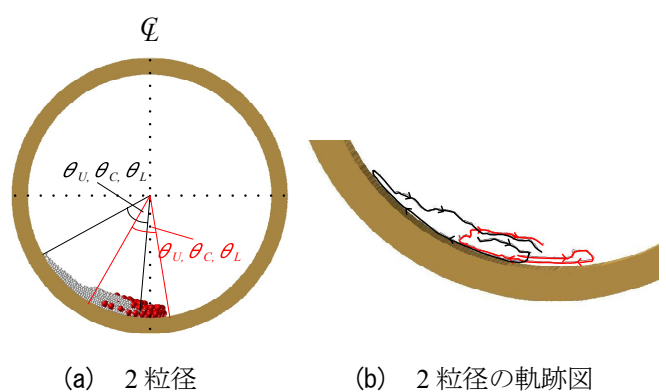


図-5 粒径のバランスポイントと軌跡図

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
	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

った大粒径のものが堆積物の上面を転がり先頭部に集まる状態となっている。

図-6 には、図-5(a)状態における粒子群を深さ方向に3層に区分し、底面層、中間層、浅層における粒子の底面との相対速度の分布を示したものである。底面層の最頻値は0.37m/sであるが、中間層は0.39m/s、浅層は0.41m/sとなり、その平均値は、それぞれ0.36, 0.38, 0.40m/sとなる。よって、図-5(b)に示すように、小粒径と大粒径のものによって移動域が前後に異なるが、それぞれは、図-4(b)に示したような時計回りの軌跡をたどる回転移動をすることになる。

5 結 言

本研究は、個別要素法を用いて、回転ドラム実験をモデル化し、大小異なる2粒径の要素による混合粒子群の分級現象の再現能力について検討した。その結果、粒径の大きい方が先頭部に集中し、小さい方が後尾部に集中する基本的な機構について分析できた。

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(発表予定)
- 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) 前田健一, 舘井恵, 福岡雅俊: 個別要素法を用いた粒子流れの構造と大粒径の浮き上がりのマイクロメカニクス, 砂防学会誌, Vol.64, No.4, pp.3-14, 2011.6