

土石流内部に生起する巨礫の浮き上がりメカニズムの基礎検討

防衛大学校 正会員 ○堀口俊行

1 緒言

土石流は、広範囲の粒径にわたる砂・礫が混合し、水と共に流れてくる現象であり、様々な流下形態が存在する。その中で高濃度の土石流は、段波形状を有しながら巨礫が先頭部に集中する特性があり、この巨礫により大きな破壊力を生じることが知られている。例えば、写真-1に巨礫の捕捉例を示しており、先頭部に集中することで、後続土砂も含めた土石流を捕捉している。そこで、橋本ら¹⁾は大粒径が集中する機構として大小2種類の砂礫粒子の混合材料を用いて土石流実験を行い、土石流先端部の大粒子の集中機構として検討している。土石流の流動層における逆グレイディング現象が、小粒径が多い場合には大粒径の上昇により、逆の場合は小粒径の下降により、生起することを示している。さらに、勾配による影響や粒径差が大きいほど先頭部に大粒径が集中しやすいことを整理している。また、前田ら²⁾は個別要素法を用いた粒子の流れの構造と大粒径の浮き上がりを応力鎖の形成メカニズムによって、大粒径が浮き上がる現象を検討している。さらに、土石流には大粒径粒子の浮き上がる現象がある特定の条件が必要であり、浮き上がる現象が集合運搬時に限られ、勾配が緩すぎても急すぎてもこのような現象が生起しないことを示している。これは、限られた条件で生起することを示唆している。このように、土石流が先頭部に集中する現象には、未だに主要因となる原因が不明確である。

ここで、土石流が先頭に集中する現象として大きく二つに分けると、①巨礫が逆グレイディング現象のように表層に浮き上がること、②巨礫が多くの小さい礫や砂を追い越して先頭部までたどり着くことである。そのため、この2つの現象を分けて基礎的な問題として検討することが必要である。そのため筆者ら³⁾は、回転円筒装置を用いて2粒径混合状態の偏析現象の生起条件を検討している。そこでは、定点観測できる回転円筒を利用して大粒径が先頭部に集中する現象を個別要素法で解析することで、内部のメカニズムを粒子間の接触力図や速度ベクトル図によって考察している。しかし、現象に対する考察から浮き上がるときの原因はわかるが、力学的な主要因に対して不十分である。

そこで本研究は、古典的な問題として大粒径粒子の浮き上がり現象として知られているブラジルナッツ効果を個別要素法で再現解析を行い、そこで生起している現象を検討する。次に、回転円筒内で大粒径粒子の浮き上がり現象を再現している解析との比較を行い、浮き上がりのメカニズムについて解析的に検討するものである。

2 大粒径粒子の浮き上がり解析

2.1 2粒径混合状態における回転円筒内再現解析³⁾

文献3)では、大粒径粒子が浮き上がる生起条件について整理している。その中で大粒径粒子が浮き上がる25mm粒子(160個)と8mm粒子(4000個)との2粒径混合状態の解析を基に浮き上がり現象について示して



写真-1 巨礫の捕捉状況

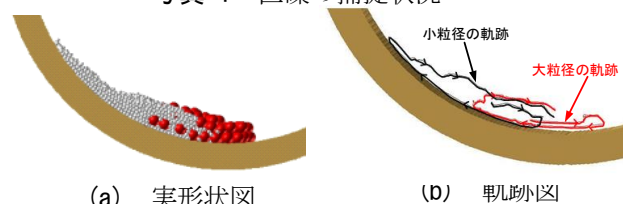


図-1 回転円筒内の大粒径の集中機構

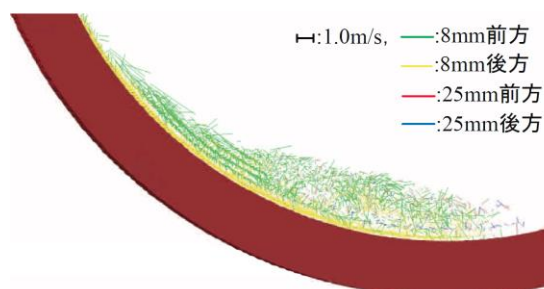


図-2 大粒径の集中機構時の速度ベクトル図

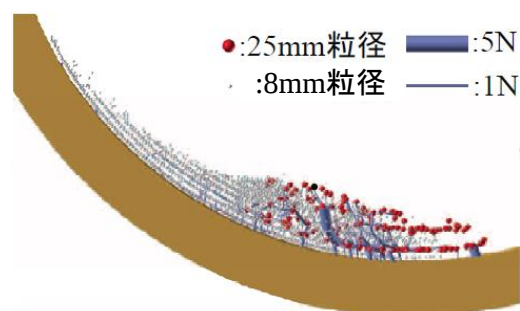


図-3 大粒径の集中時の接触力図

いる。まず、図-1に2粒径混合状態における偏析時とその時の代表的な要素の軌跡図を示している。軌跡図を見ると大粒径粒子は先頭部で循環し、小粒径粒子はその後方を循環しているため大粒径粒子が前方に集中している。図-2に、速度ベクトル図を示している。なお、粒子は重心点のみ表示している。最下層では、黄線もしくは青線が多く現れ、底面の回転と同方向に粒子が移動している。一方、上層部では緑線や赤線が多く、長い線が多いことから、前方へ向かって早く移動していることがわかる。なお、大粒径粒子と小粒径粒子が混合している領域では上層部または中層部の速度はあまり大きくない。さらに、平衡角(粒子塊の中央)の領域では大粒径粒子の速度ベクトルが上向きのものがあり、小粒径粒子は下

キーワード 土石流、個別要素法、ブラジルナッツ効果、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

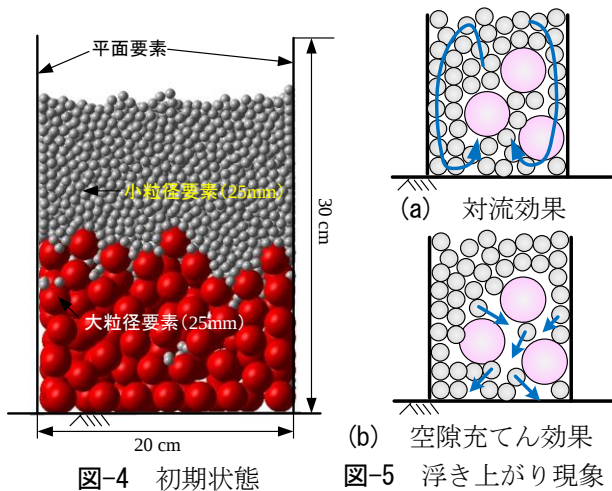


図-5 浮き上がり現象

向きもしくは、後方のものが混在する。すなわち、平衡角周辺で小粒径粒子がせめぎ合って、その中で大粒径粒子が浮き上がることがわかる。図-3に、接触力図を示している。なお、粒子のサイズを1/5にしている。紫色で示した接触力は2つの粒子の中心点を結ぶ線で方向を示し、接触力の大きさに応じて太くしている。まず、先頭部において大粒径粒子を底面が斜め後方へ突き上げる力が頻繁に生じ、粒子の前方への移動を制動する。

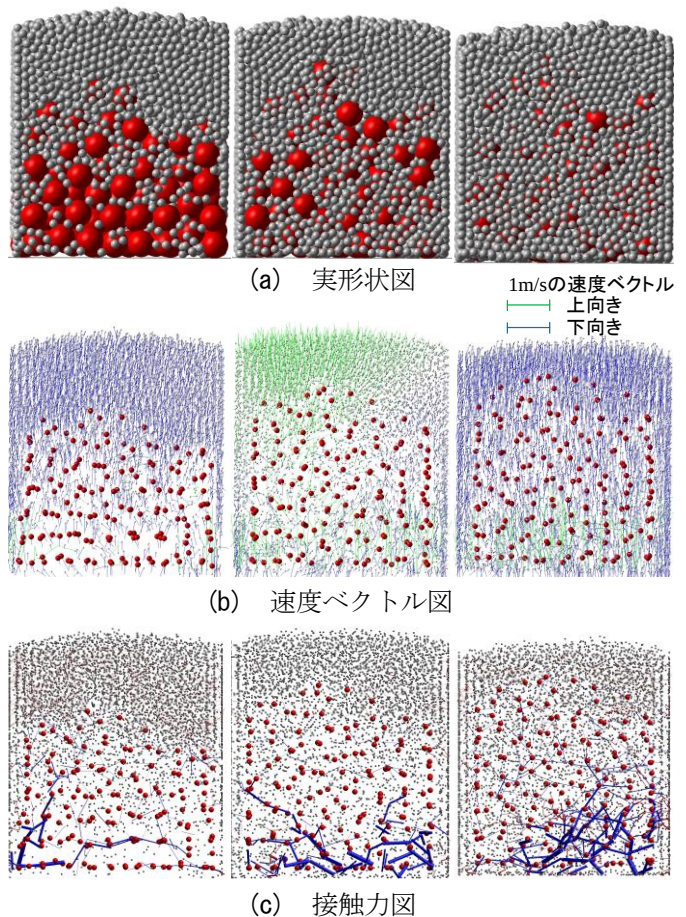
このことから平衡角周辺では、底面からの摩擦力が効いて制動することで接触力が生じ、それぞれの粒子の速度ベクトル分布に乱れることで、大粒径粒子が上層に浮き上がると解釈できる。

2.2 ブラジルナッツ効果再現解析

ここで、大粒径が浮き上がる現象としてブラジルナッツ効果の再現解析を行った。解析の初期条件として奥行き10 cm、正面20 cmの枠の中に大粒径粒子(25 mm:160個)を自由落下で堆積させ、その上に小粒径粒子(8 mm要素:4000個)を堆積させた。なお、使用した粒子数は回転円筒解析時と同じにした。図-4に、安定状態における初期状態を示している。この解析において上下振動を起こさせるために、底面を0.01 sごとに1.0 cm(小粒径粒子と同等の径を上下)上下振動させ、大粒径粒子の浮き上がりについて再現する。さらに、図-5にはブラジルナッツ効果において大粒径粒子の浮き上がりで示されている仮説として、対流効果と空隙充てん効果を示している。この現象と比較して、図-6に示している解析結果は、実形状において左の図から $t=3s, 6s, 9s$ と比較すると大粒径粒子が上に登っていることがわかる。速度ベクトル図において、最初は空隙充てん効果によって空隙に小粒径粒子が入り込み、時間が経過すると対流の効果が生じている。ここでは、浮き上がる粒子と沈み込む粒子が入り混じり、小粒径粒子は常に下に沈み、大粒径粒子は浮き上がっているように見える。その間の接触力図をみると接触力が顕著に大きくなり、多くの小粒径粒子が大粒径粒子と接触し、押し出しているように見える。

2.3 大粒径粒子の浮き上がり

大粒径粒子の浮き上がりにおいてブラジルナッツ効果の対流効果や空隙充てん効果が時間経過によって常に起きていることを確認できた。ここで、浮き上がりの観点でそれぞれを比較すると図-6における接触図や速度ベクトル図では、大粒径粒子の浮き上がりにおいて定



性的であるが回転円筒内の流れの中(平衡角付近)で起きている現象に近いように見える。よって、多くの小粒径粒子が接触することで大粒径粒子を浮き上がらせており、回転円筒内においても生起していると考えられる。

3 結論

本研究は、土石流の浮き上がり現象の基礎的段階として、回転円筒内の2粒径混合状態における大粒径粒子の浮き上がり、ブラジルナッツ効果における大粒径粒子の浮き上がりの内部メカニズムの類似性について検討した。

- (1) 回転円筒内再現解析において、平衡角周辺で大粒径粒子が浮き上がることを示した。
- (2) ブラジルナッツ効果再現解析では、小粒径粒子が大粒径粒子間の空隙を埋め尽くし、対流効果で徐々に浮き上がらせていることを確認した。
- (3) 解析の内部メカニズムでは、小粒径粒子が大粒径粒子を浮き上がらせるのに、小粒径粒子の上下方向の乱れた速度ベクトルや接触力によって行われていると考えられる。

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) 前田健一, 舘井恵, 福間雅俊: 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
- 3) 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, pp.41-56, 2013.9