

個別要素法を用いた底面の凹凸に着目した土石流の大粒子の分級現象

山口大学大学院 学生会員 ○鯨吉 樹
正会員 中田幸男

1.背景と目的

近年、短時間の降雨による土石流が多発している。短時間の降雨による災害の場合、通行止めや避難などのソフト対策では間に合わない可能性があるため、ハード対策が必要である。数多い危険溪流に対するハード対策として、透過型の対策構造物の設置が進んでいる。この場合でも、土石流による衝突荷重を正しく推定し、安全かつ効果的な構造物を設計する必要がある。

土石流では大粒子が上部に移動する分級現象が実験や解析により確認されている。透過型の対策構造物が十分な減災効果を得るためには土石流中の大粒子挙動の検討が重要である。

そのため、土石流中の礫のような大粒子の挙動に注目した研究が増えている。その中の多くの実験的や解析的な検討で、土石流時の大粒子挙動に与える溪床粗度の影響が指摘されている。しかし、多種多様な溪床面の凹凸を対象にすることで、分級現象の程度との関連性や、発生の有無に関して議論された検討はない。

著者らは、これまで、個別要素法を用いて土砂流動時の挙動について検討してきた。本研究では、個別要素法を用いて流体の作用を考慮して土石流中の大粒子挙動の分級現象に与える溪床面の凹凸の影響の検討を行った。

2.個別要素法

本解析では2つの異なる大きさの粒子(直径5.0mmの赤い粒子が2000個、直径2.5mmの青い粒子が16000個)の混合物を図-1のゲート上部に自由落下で充填した。そして、ゲートを開けることで粒子を流下させた。その際、各粒子には自重を作用させることに加え、図-1のような水の流速を与えて、それによる浮力と流体力を作用させ流下させた。

キーワード 土石流, 個別要素法, 底面の凹凸

連絡先 〒755-0039 山口県宇部市東梶返1丁目8-19 メゾン 21 207号

TEL 080-6334-3237

モデル底面の凹凸状態とそのパラメータの定義を図-2に示す。図-2の黒塗りの部分は底面の凹凸であり、中心間距離は流下方向における底面の凹凸間の距離である。図-2(a)の底面の凹凸は球から形成されており、 d_b は底面に張り付けた粒子の直径、 d_b/n_b は底面の凹凸高さである。間隔 l_b は底面に張り付けた粒子の間にある粒子の個数である。図-2(b)の凹凸は四角柱で形成されており、 L_b は流下方向の凹凸の長さ、 H_b は凹凸高さである。

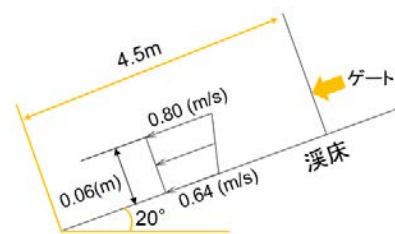
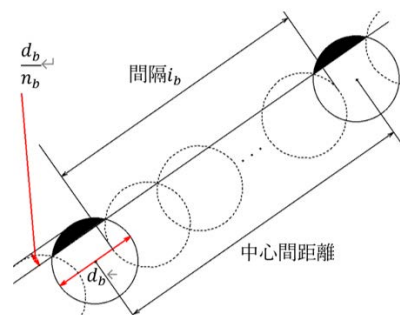
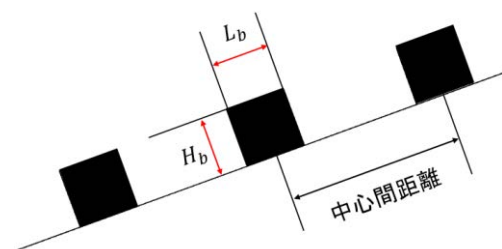


図-1 解析モデルと流速分布



(a) 凹凸が球の場合



(b) 凹凸が四角柱の場合

図-2 モデル底面の凹凸状態とそのパラメータの定義

また、斜面下端からゲート方向を見た際の図を図-3とする。この解析では周期境界を用いたが、周期境界は図-3の両端の粒子の中心を通り、斜面に直角である面的な境界のことである。解析時、図-3のように幅25mm(両端の粒子の中心を通るように境界があるため)の斜面に見えるが、実際には左右を周期境界とした。これは左境界と右境界が解析上つながっていると考えるものである。

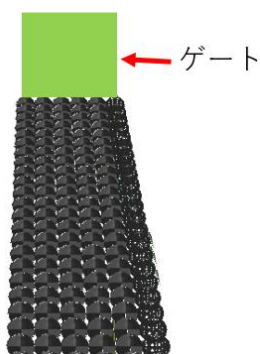


図-3 溪床面の様子と周期境界

解析に用いた個別要素法に必要な入力パラメータについては表-1に示す。

表-1 解析に用いたパラメータ

密度(土粒子)	2650	kg/m^3
ヤング係数 (斜面)	2.2×10^6	kN/m^2
ヤング係数 (土粒子)	1.0×10^6	kN/m^2
ポアソン比	0.3	
摩擦角(斜面)	14	°
摩擦角(土粒子)	26.6	°
ダンピング係数	0.7	
時間増分	$0.4 \times$ 限界時間増分	s

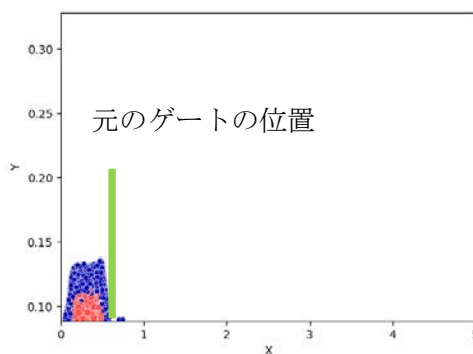
表-1中の限界時間増分は限界時間増分 $= 2 \times \sqrt{m/k}$ (ここで、 m は質量、 k はヤング係数)から算出され、計算の安定性を保証するための値である。本解析では、底面の凹凸のみを変化させ、土石流の挙動への影響を検討しているが、これはその他のパラメータの影響は小さく、底面の凹凸の及ぼす影響が大きいことが分かっているためである。そのため、解析のパラメータの内、ヤング係数およびダンピング係数、時間

増分は解析の時間が膨大にならないようにし、ヤング係数には現実的な値に近い値を設定し、ダンピング係数は粒子が大きく跳ねないような値を設定した。また、土粒子密度は岡山県新見市で発生した土石流の現場で採取した土の密度を測定した値を用いており、摩擦角は参考文献を参考に設定し、ポアソン比は一般的な砂の値を用いて設定した。また、本解析は流動層が十分な厚みを有していない場合、分級現象の評価が難しくなることが考えられたため、流動層の厚さの最大値が大粒子3個分よりも小さくなると解析を終了した。

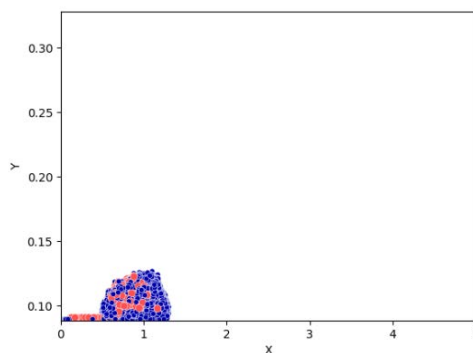
3. 土石流の大粒子挙動

3.1 典型的な土石流

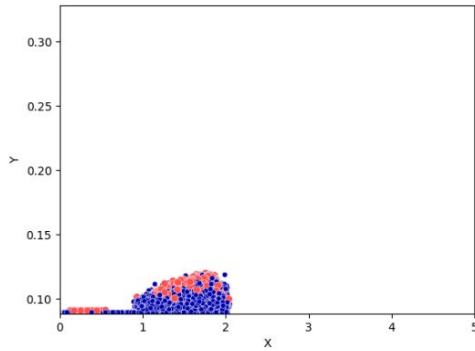
典型的な土石流として底面の凹凸が $d_b/n_b = 5.0/1$ 、間隔2の場合の土石流の様子を図-4に示す。図-4に示すように、ゲートを開けた直後は赤色粒子(大粒子)が土石流下層にあるものの、しばらく流下することで、土石流上層へ入れ替わりが進んでいることが認められる。



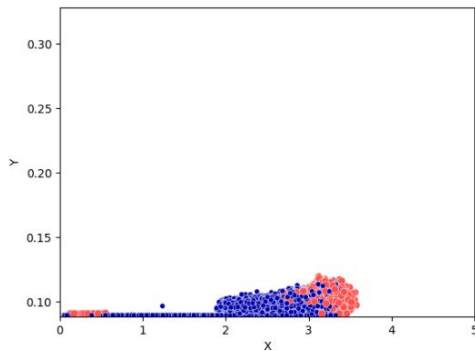
(a) ゲートを開けた直後(0s)



(b) ある程度流下した際(1.21s 後)



(c)大粒子が上層に移動した際(2.24s 後)



(d)大粒子が土塊前方に移動した際(4.50s 後)

図-4 $d_b/n_b = 5.0/1$, 間隔 2 の場合の典型的な土石流の様子

本解析に対する分析で用いた変数や座標軸を図-5に示す. ここで, X' は斜面方向, Y' は斜面直角方向とし, 斜面下端を原点とした. また Y'_{max} を全粒子の中で最も大きい Y' の座標と定義した. この Y'_{max} を含む面は最も厚さを有する面となるため, Y'_{max} に着目した検査空間を設定した. 図-7の検査空間は水色の枠で囲った領域である. この検査空間は, Y'_{max} を中心に, ± 5 個分の大粒子の範囲とした.

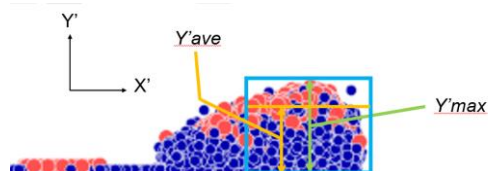


図-5 本解析に対する分析で用いた変数や座標軸

また, 図-4, 図-5 は斜面勾配がないように見えているが, 実際は斜面勾配が 20° の斜面を流下している様子を回転させたものである. 分級現象を把握しやすくするため, このような処理を施した.

そして, この検査空間に含まれる大粒子のみの Y' の

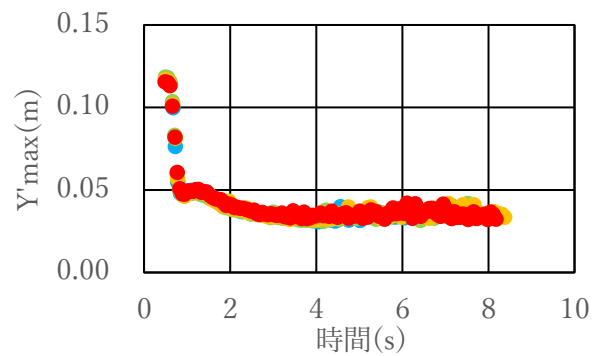
座標の平均値を Y'_{ave} とした. この Y'_{ave} を Y'_{max} で除し, 百分率で表したものを, 流動層の厚さに対する大粒子の相対的高さとする.

$$\text{相対的高さ(\%)} = \frac{Y'_{ave}}{Y'_{max}} \times 100 \quad (1)$$

この相対的高さは, 大粒子を下層に充填するため, 流動直後は 30%である. この相対的高さは, 流動が進むと 50%を超える. これは, 下側に充填した大粒子と上側に充填した小粒子の上下が逆転し, 大粒子が小粒子よりも流動層上層に移動したと捉えることが出来る. また, 今回は流動層の厚さが大粒子 3 個分以上ある場合で考察を行っている. 十分に厚さがある状態であるため, 分級現象の評価の指標になると考え, この相対的高さを指標として用いることにした.

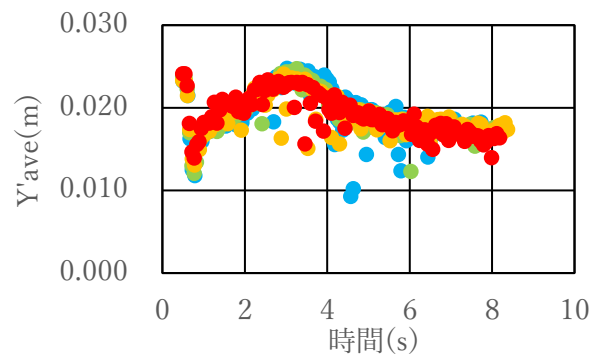
3.2 分級現象

底面の凹凸が $d_b/n_b = 5.0/1$ の場合に間隔を変化させた際の時間と Y'_{max} の関係を図-6に, 時間と Y'_{ave} の関係を図-7に, 時間と相対的高さの関係を図-8に, ゲートからの位置と相対的高さの関係を図-9に示す.



● 間隔12 ● 間隔9 ● 間隔6 ● 間隔3

図-6 間隔ごとの時間と Y'_{max} の関係



● 間隔12 ● 間隔9 ● 間隔6 ● 間隔3

図-7 間隔ごとの時間と Y'_{ave} の関係

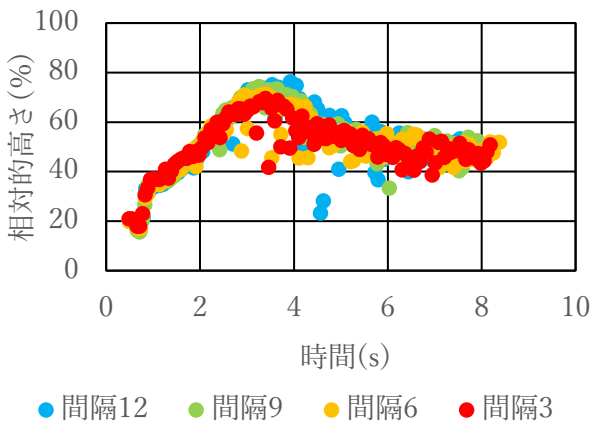


図-8 間隔ごとの時間と相対的高さの関係

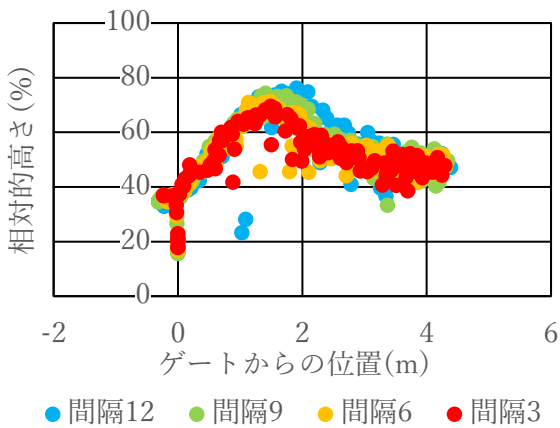


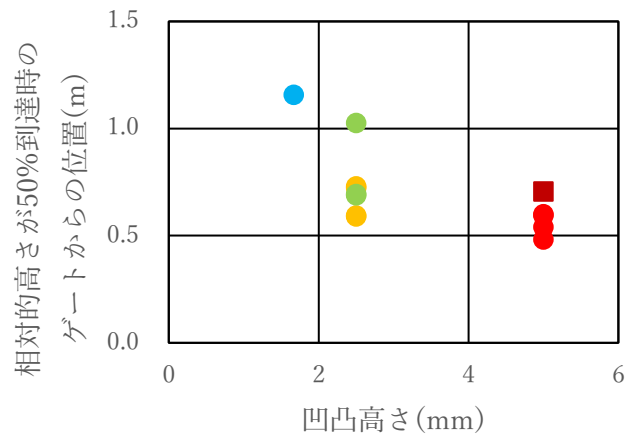
図-9 間隔ごとの時間と相対的高さの関係

底面の凹凸高さと相対的高さが 50%を超えた際のゲートからの位置の関係を図-10, 凹凸の中心間距離と相対的高さが 50%を超えた際のゲートからの位置の関係を図-11 に示す. 図-10, 図-11 では底面の凹凸を変化させた際の結果も追加する. このとき, 凹凸高さが等しいケースがあるが, それぞれ凹凸の形状や底面に張り付けた粒子の直径が異なるため, 凡例を分けて記載している. 図-10 から, 凹凸高さが高くなると, 相対的高さが 50%を超えた際のゲートからの位置が短くなり, 短い流下距離で分級現象が発生することが分かった. 図-11 から, 凹凸の中心間距離にあまり関係なく約 0.7m 流下すると分級現象が発生することが分かった.

4.結論

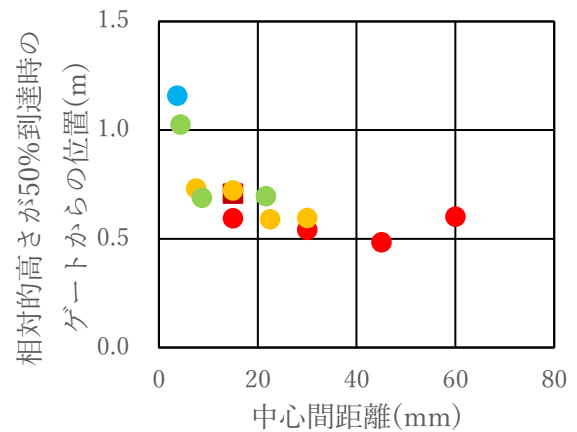
本研究では, 個別要素法を用いて土石流中の大粒子挙動の分級現象に与える溪床面の凹凸の影響の検討を行った. その結果, 土塊が最も厚さを持つ空間で

の相対的高さを評価することで, 底面の凹凸高さが高いほど短い距離で分級現象が発生すること, 凹凸の中心間距離の影響は小さいことを把握した.



凡例	■	●	●	●	●
	square	ball_L	ball_s	d2	d3
凹凸高さ (mm)	5.0	5.0	2.5	2.5	1.67

図-10 凹凸高さと相対的高さが 50%到達時のゲートからの位置の関係



凡例	■	●	●	●	●
	square	ball_L	ball_s	d2	d3
凹凸高さ (mm)	5.0	5.0	2.5	2.5	1.67

図-11 凹凸の中心間距離と相対的高さが 50%到達時のゲートからの位置の関係

参考文献

1) 鯨吉樹, 中田幸男, ……地盤と建設, ……2021.