

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 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とある。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^{1),2)}。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。

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)を図-1のゲート上部に自由落下で充填した。充填時、大粒子が下側になるように充填した。これは本研究で対象とする分級現象の挙動を明確にするためである。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-2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。この流速分布は渋谷らの論文³⁾を参考に設定した。ま

た、事前解析から4.5m流下すれば分級現象が発生することを把握したため、本解析では先頭粒子が4.5m流下したら解析を終了した。

モデル底面の凹凸状態とそのパラメータの定義を図-3に示す。本研究では凹凸高さと凹凸間隔を変更し、合計6種の溪床面で解析を行った。

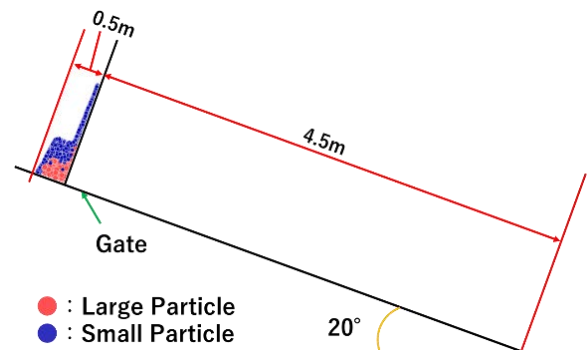


図-1 解析モデル

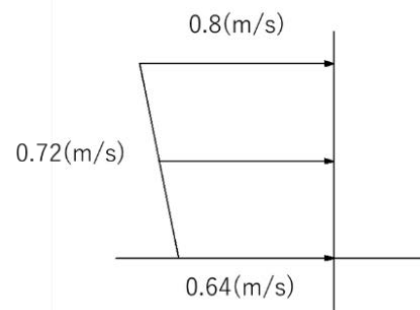


図-2 流速分布

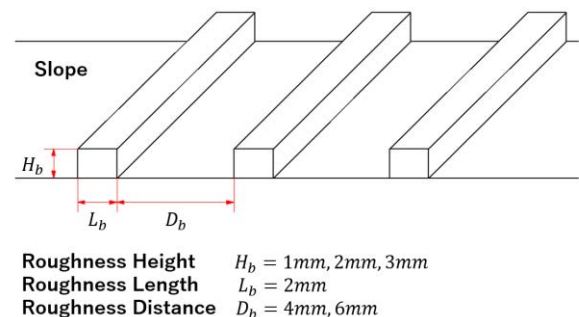


図-3 溪床面の凹凸状態とそのパラメータの定義

キーワード 土石流, 個別要素法, 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

表-1 解析パラメータ

密度(土粒子)	2650	kg/m^3
ヤング係数 (凹凸以外の斜面)	2.2×10^6	kN/m^2
ヤング係数 (土粒子, 凹凸)	1.0×10^6	kN/m^2
ポアソン比	0.3	
摩擦角 (凹凸以外の斜面)	14	°
摩擦角 (土粒子, 凹凸)	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

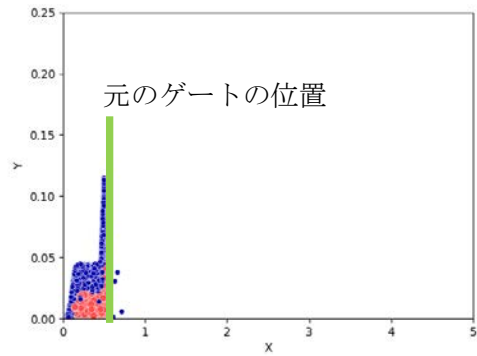
表-1 中の限界時間増分は限界時間増分 = $2 \times \sqrt{m/k}$ (ここで、 m は質量、 k はヤング係数) から算出され、計算の安定性を保証するための値である。本解析では、底面の凹凸のみを変化させ、土石流の挙動への影響を検討しているが、これはその他のパラメータの影響は小さく、底面の凹凸の及ぼす影響が大きいことが分かっているためである。そのため、解析のパラメータの内、ヤング係数およびダンピング係数、時間増分は解析の時間が膨大にならないようにし、ヤング係数には現実的な値に近い値を設定し、ダンピング係数は粒子が大きく跳ねないような値を設定した。また、土粒子密度は岡山県新見市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。

3. 土石流の大粒子挙動

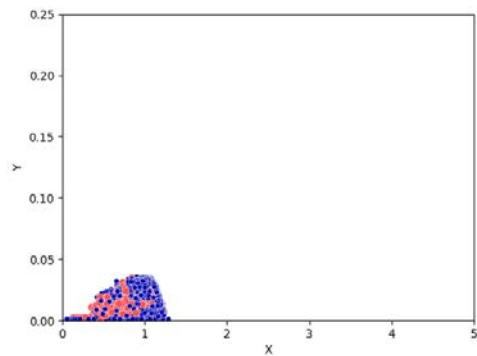
3.1 典型的な土石流

典型的な土石流として凹凸高さ $H_b = 2mm$ 、凹凸間隔 $D_b = 4mm$ 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、図(b)のようにある程度流下すると大粒子が上層への移動を始め、図(c)の際にはほとんどの大粒子が上層に移動し、図(d)では土石流前方部に多くの大粒子が集積していることが確認される。このようにしばらく流下することで、分級現象が発生していることが認められる。

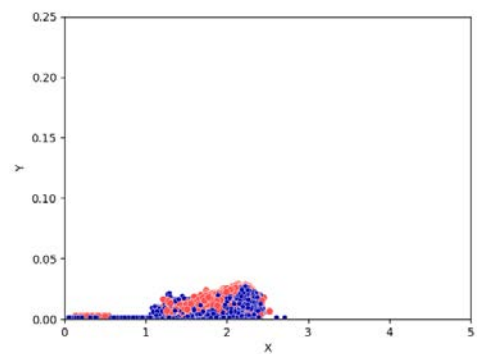
本解析に対する分析で用いた変数や座標軸を図-5 に示す。ここで、 X は斜面方向、 Y は斜面直角方向とし、斜面下端を原点とした。



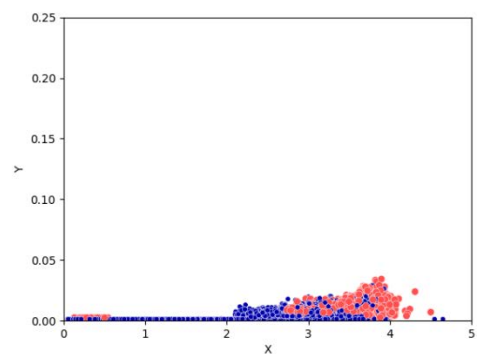
(a) ゲートを開けた直後(0.00s)



(b) ある程度流下した際(1.37s 後)



(c) 大粒子が上層に移動した際(3.02s 後)



(d) 大粒子が土塊前方に移動した際(5.37s 後)

図-4 $H_b = 2mm$ 、 $D_b = 4mm$ の場合の典型的な土石流の様子

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-5 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} を示す X' を中心に、 ± 5 個分の大粒子の範囲とした。

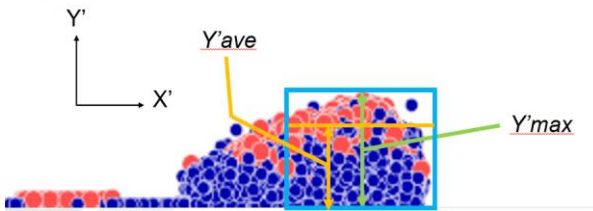


図-5 本解析に対する分析で用いた変数や座標軸

また、図-5、図-6 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 20% 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できる。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

底面の凹凸間隔が $D_b = 4\text{mm}$ の場合に凹凸高さ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。また、図-10、図-11 に相対的高さが最大のときの土石流の様子と 2-3m 流下し大粒子が前方に移

動した際の土石流の様子を示す。

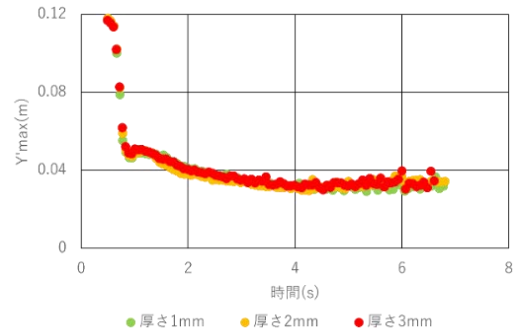


図-6 凹凸高さごとの時間と Y'_{max} の関係

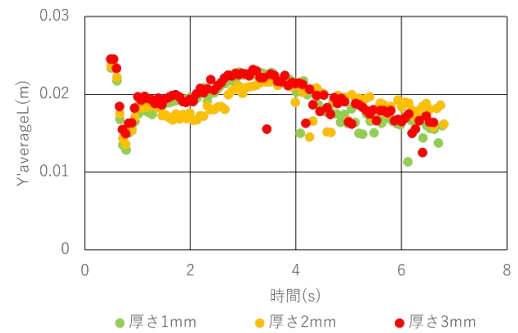


図-7 凹凸高さごとの時間と Y'_{ave} の関係

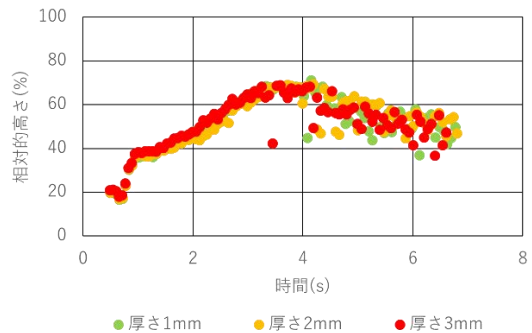


図-8 凹凸高さごとの時間と相対的高さの関係

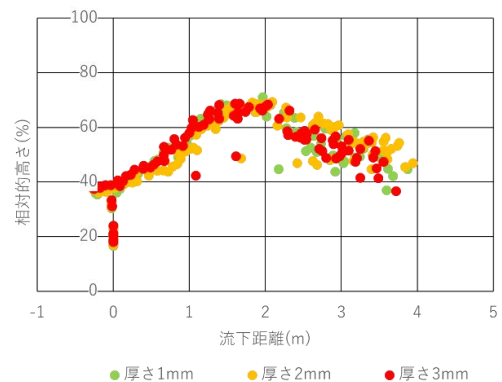


図-9 凹凸高さごとのゲートからの位置と相対的高さの関係 (凹凸間隔が $D_b = 4\text{mm}$ の場合)

図-9 から、1.5-2.0m 程度流下することにより相対的高さが最大となっている。これは図-10 に示される土石流の様子から、 Y'_{max} 付近に大粒子が集積しているため、 Y'_{ave} も最大となり、相対的高さも最大となったと考えられる。また、距離 2.0-4.0m で相対的高さが下がっているが、これは図-11 に示す通り、分級するとともに大粒子が土石流前方に移動しており、 Y'_{ave} が下がり始めたためである。

凹凸高さ H_b 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-12、凹凸間隔と相対的高さが 50%を超えた際のゲートからの位置の関係を図-13 に示す。図-12、図-13 から、凹凸高さ $H_b = 2mm$ の場合の相対的高さが 50%を超えた際のゲートからの位置が最も遠い位置で分級が発生している。また、凹凸間隔の場合、相対的高さが 50%を超えた際のゲートからの位置は $D_b = 4mm$ の方が少し近くなる傾向があり、 $H_b = 1mm$ ではほとんど変わらない。

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、土石流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、凹凸高さごとの分級現象が発生する距離、分級現象に対して凹凸間隔の影響は小さいことを把握した。

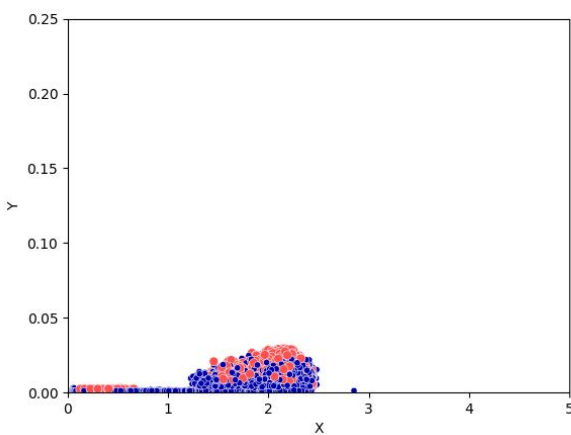


図-10 相対的高さが最大のときの土石流の様子 (凹凸間隔が $D_b = 4mm$ の場合)

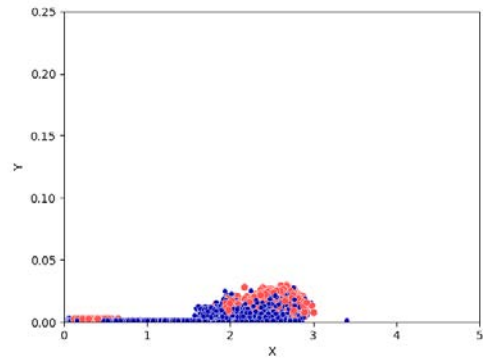


図-11 2-3m 流下した際の土石流の様子 (凹凸間隔が $D_b = 4mm$ の場合)

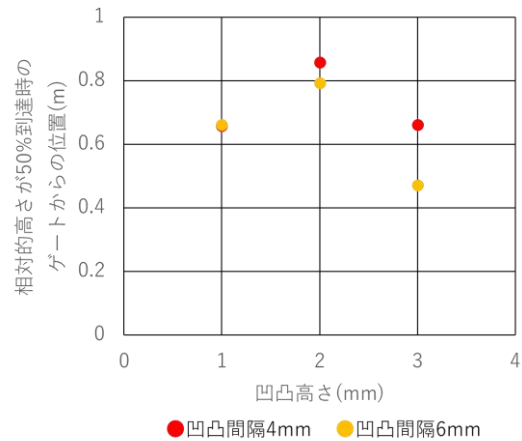


図-12 凹凸高さ H_b と相対的高さが 50%到達時のゲートからの位置の関係

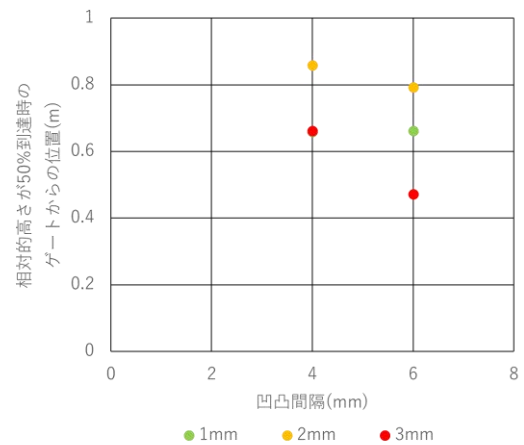


図-13 凹凸間隔 D_b と相対的高さが 50%到達時のゲートからの位置の関係

参考文献

- 1) 前田健一, 舘井恵, 福間雅俊, 砂防学会誌, Vol.64, No.4, pp.3-14, 2011.
- 2) 鯨吉樹, 中田幸男, 地盤と建設, Vol.39, No.1, pp.39~47, 2021.
- 3) 渋谷一, 香月智, 大隅久, 石川信隆, 砂防学会誌, 63 巻, 6 号, pp.13-22, 2011.