

個別要素法による底面の凹凸の変化が土砂流動に与える影響

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、中国地方では降雨による土石流が多発している 1)。このような土石流に対して道路の通行止めなどのソフト対策が取られることがある。しかし、短時間の局所豪雨が誘因となる場合、ソフト対策では安全を確保できないこともある。また、高速道路などの高規格幹線道路では復旧車両の通行のため被災範囲や程度を最小限に留める必要もある。そのため、土石流に対して事前に施すことの出来る安全でかつ経済的なハード対策が必要となる。

土石流のような土砂流動時では大きい粒子が浮き上がり、より前方に移動することがわかっている 2),3)。近年、設置が進んでいるフェンス状捕捉構造物による適切な減災効果を得るためには、大きい粒子の浮き上がり現象を含む流動特性に与える溪床の影響の把握が必要である。

そこで、本研究では個別要素法解析を用いた土砂流動のシミュレーションの手法を確立し、その手法における土砂流動中の大きな粒子の浮き上がり現象に与える底面の凹凸の影響を検討することを目的とする。

2.個別要素法

本解析では図 1 のような解析模型を用いて、2つの異なる大きさの粒子(直径が 5.0mm の赤い粒子が 2000 個、直径が 2.5mm の青い粒子が 16000 個)を混合し、斜面を重力のみで流下させた。

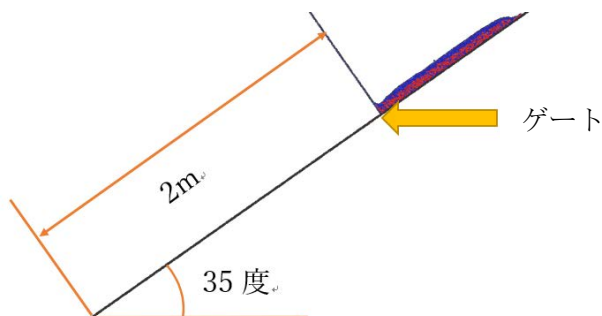


図1 解析模型

この斜面には、事前の予備解析の結果から、スムーズな土砂流動が発生するように 35° の傾斜を持たせている。斜面の底面は、凹凸を変化させ、土砂流動に与える影響を検討できるようにした。

この底面の凹凸の様子については図 2 に示す。図 2 の黒塗りの部分は底面の凹凸として底面から突き出ている部分である。ここで d_b は底面に張り付けた粒子の直径、 $\frac{d_b}{n_b}$ は底面から突き出ている粒子の高さで、直径 d_b の n_b 分の 1 が底面から突き出ていると表現している。間隔 i_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。

つまり、破線で示したように隙間なく凹凸を与えたときの凹凸の個数ということになる。そして、中心間距離は底面に張り付けた粒子が流下方向に隣り合う粒子との中心間の距離である。

また、この解析では周期境界を用いた。これを用いることで、図 1 でゲートと斜面に直角な方向に斜面が無限にあるように考えることが出来る。

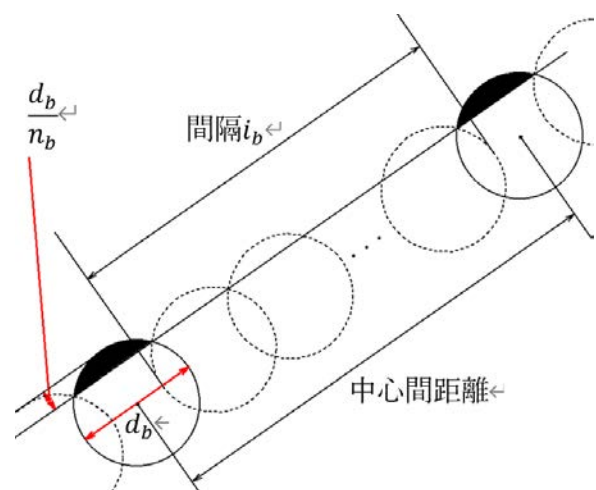


図2 底面の凹凸の様子

キーワード 土砂流動、個別要素法、底面の凹凸、大粒子の浮き上がり、流動速度

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

そして、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)	2.2e6	kN/m^2
ヤング係数(土粒子)	1.0e6	kN/m^2
ポアソン比	0.3	
摩擦角(斜面)	14	°
摩擦角(土粒子)	26.565051	°

ここで、粒子の動きを見るために底面の凹凸が $\frac{d_b}{n_b} = \frac{5.0}{2}$ 、間隔 0 の場合の土砂流動の様子を図 3 に示す。解析では、ゲート背後に大粒子および小粒子の順に堆積させた後、ゲートを開けて土砂流動を誘発させる。ここでは、赤色粒子は大粒子、青色粒子は小粒子となるように描画している。最初は、赤色粒子(大粒子)が土塊下方にあるものの、しばらく土砂流動することで、土塊上方へ入れ替わりが進んでいることが認められる。

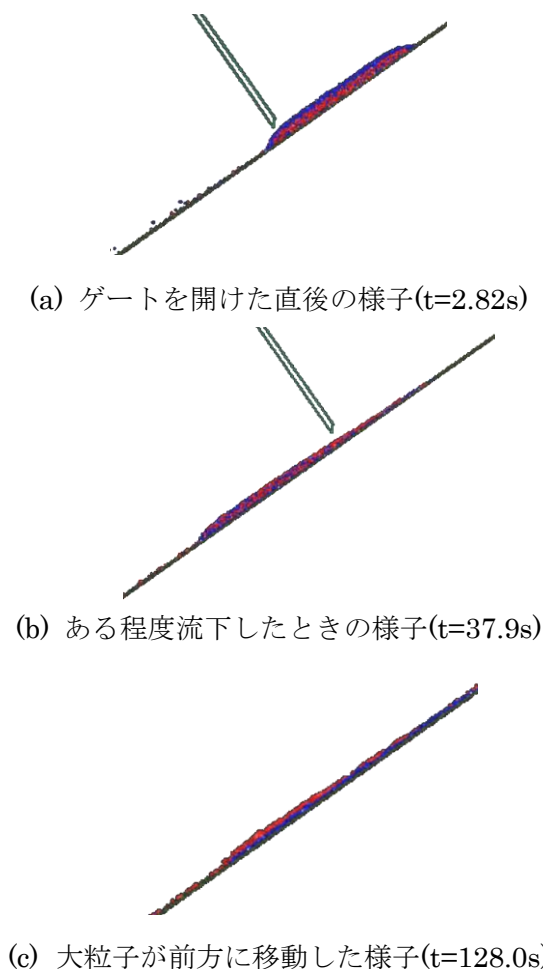


図 3 土砂流動の様子($\frac{d_b}{n_b} = \frac{5.0}{2}$ 、間隔 0 の場合)

底面の凹凸が $\frac{d_b}{n_b} = \frac{5.0}{2}$ 、間隔 19 の場合に大粒子が前方に移動した際の土砂流動の様子を図 4 に示す。

図 4 大粒子が前方に移動した際の土砂流動の様子

($\frac{d_b}{n_b} = \frac{5.0}{2}$ 、間隔 19 の場合)(t=66.5s)

図 3 と図 4 を比較すると、間隔 0 の場合は土塊の前方に行った大粒子の速度が落ち、大粒子が土塊とともに流下することが確認できるが、間隔 19 の場合は土塊の前方に行った大粒子の速度が落ちず、土塊よりも速く進んでいる。

3.底面の凹凸の変化が土砂流動に与える影響

本解析に対する分析で用いた座標や変数を図 4 に示す。

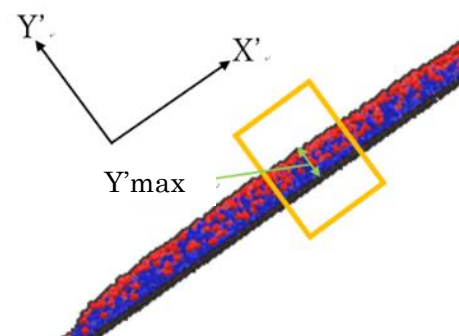


図 4 解析に用いた座標と変数

ここで、 X' は斜面方向、 Y' は斜面直角方向、ゲート下端を原点とした。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 $Y'max$ を含む面はに最も高いエネルギーを持つ面となるため、 $Y'max$ に着目した検査空間を設定した。図 4 は、その検査空間をオレンジ色の枠で囲った領域である。そして、この検査空間に含まれる大きい粒子のみの Y' の座標の平均値を $Y'averageL$ とした。

この $Y'averageL$ を $Y'max$ で除し、百分率で表したものを割合とする。

$$\text{割合}(\%) = \frac{Y'averageL}{Y'max} \times 100 \quad (1)$$

この割合が 50%を超えることは大きい粒子と小さい粒子の上下が逆転したと捉えることが出来る。

次に、底面の凹凸が $\frac{d_b}{n_b} = \frac{5.0}{2}$ の場合に間隔 i_b を変化

させた際と底面の凹凸がない際の流下距離と Y'_{max} の関係を図 5、流下距離と $Y'_{averageL}$ を図 6、流下距離と割合の関係を図 7 に示す。流下距離が増えると、割合が増加する。この増加の割合は、間隔が少ないものが高いことが分かる。

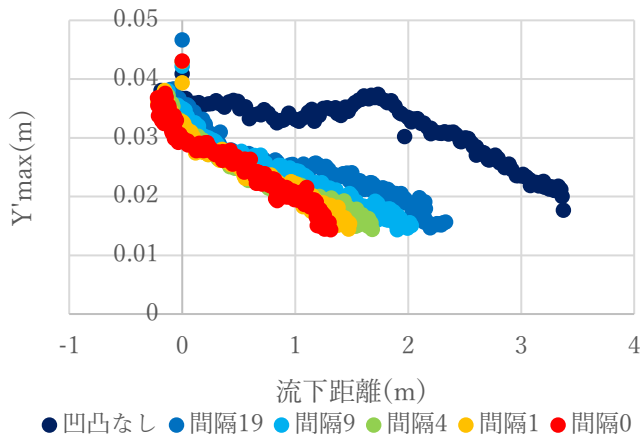


図 5 流下距離と Y'_{max} の関係

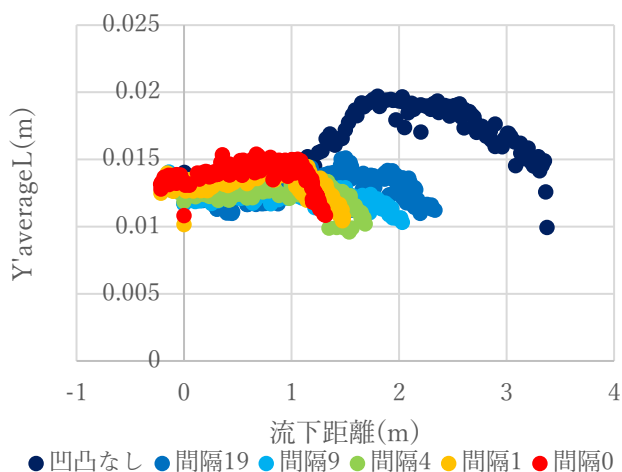


図 6 流下距離と $Y'_{averageL}$ の関係

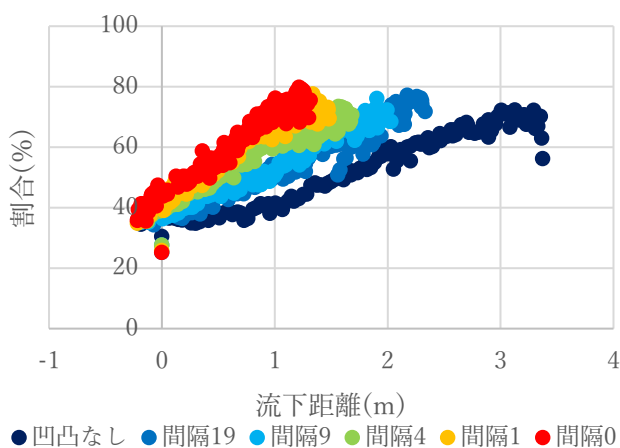
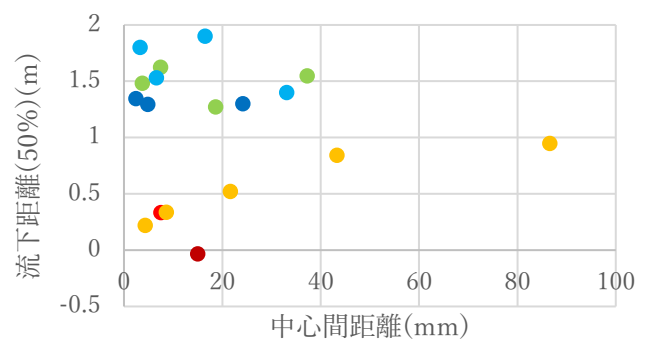


図 7 流下距離と割合の関係

底面に張り付けた粒子の中心間距離と割合が 50%を超えた際の流下距離の関係を図 8 に示す。



	● ball_L	● ball_s	● d2	● d3	● d4	● d8
$\frac{d_b}{n_b}$	$\frac{5.0}{1}$	$\frac{2.5}{1}$	$\frac{5.0}{2}$	$\frac{5.0}{3}$	$\frac{5.0}{4}$	$\frac{5.0}{8}$

図 8 中心間距離と流下距離の関係

図 8 から、まず d2 の場合を見ると、中心間距離が長くなると、割合が 50%を超えるまでの流下距離も長くなっている。次に d3、d4、d8 の場合を見ると、中心間距離に関わらず、流下距離が 1.5m 付近で割合が 50%を超えている。最後に底面の凹凸について見ると、底面の凹凸が大きくなると、割合が 50%を超えるまでの流下距離が短くなっている。なお、底面の凹凸が $\frac{d_b}{n_b} = \frac{5.0}{2}$ の場合で間隔 0 の場合、割合が 50%に達する流下距離は 0.22m であった。

底面の凹凸が $\frac{d_b}{n_b} = \frac{5.0}{2}$ の場合で間隔 0 の場合の流下距離と土塊速度の関係を図 9 に示す。ここで、土塊速度は次式で求める。この土塊速度は図 4 で設定した検査空間が動いた時の速度を示す。

$$\text{土塊速度}(i+1) = \frac{X'(Y' = Y'_{max})_{i+1} - X'(Y' = Y'_{max})_i}{t_{i+1} - t_i}$$

t_i : 時間

$X'(Y' = Y'_{max})_i : t_i$ に $Y' = Y'_{max}$ となる粒子の X'

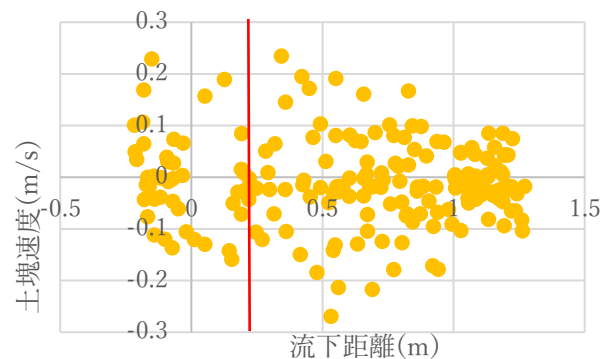


図 9 流下距離と土塊速度の関係

土塊速度は、0.4m/s のばらつきを持ちながら、流下距離の増加とともに、マイナスに増加している。この条件の場合、割合が 50%に達する流下距離は 0.22m(図 9 で赤線で示した)であったことから、土塊速度の平均的な値は-0.02m/s 程度であった。

底面の凹凸が $\frac{d_b}{n_b} = \frac{5.0}{2}$ の場合で間隔 0 の場合の検査

空間(オレンジ色の枠)内の割合が 50%を超えた際の大粒子の X'方向の速度と Y'の関係を図 10 に示す。つまり、大粒子と小粒子とが検査空間内に均一に分散している状態での、大粒子の X'方向速度の深さ分布である。大粒子の速度はばらつきがあるものの、深さ方向に直線的に変化している。さらに、検査空間上部の大粒子の速度は、0.025m/s 以上であり、土塊速度をやや超えていることが分かる。

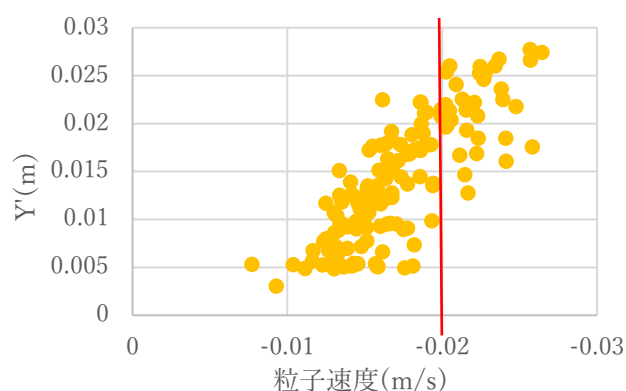


図 10 大粒子の速度分布(割合=50%)

底面の凹凸の変化による中心間距離と速度差の平均値の関係を図 11 に示す。ここで、速度差は検査空間内で割合が 50%を超えた際の Y'が大きい方から 30 個の粒子の速度と土塊速度の差から求める。そのため、速度差が正の際は土塊速度の方が速く、負の場合は粒子速度の方が速いことを示す。

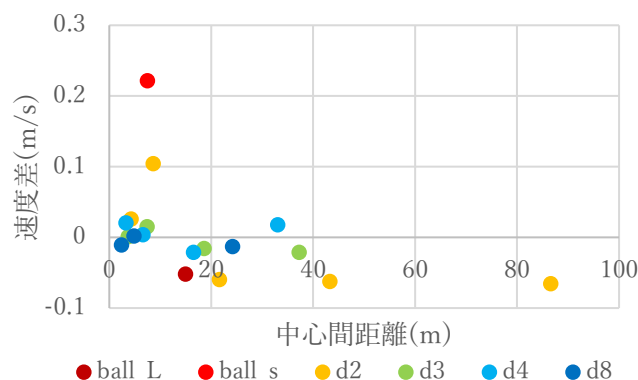


図 11 底面の凹凸の変化による
中心間距離と速度差の関係(割合=50%)

図 11 から、中心間距離が長くなると速度差が負になっている。これは中心間距離が長くなると、底面の凹凸による抵抗が小さくなるため、粒子の速度が落ちにくいためであると考えられる。また、中心間距離が短い際に底面の凹凸が大きくなると速度差が正になる傾向がある。これは底面の凹凸が大きい場合、凹凸による抵抗が大きいため、粒子の速度が落ちるためと考えられる。このとき、土塊速度が粒子速度よりも速いため、土塊の前方に行った粒子は土塊に追いつかれ、土塊と共に流下する。そして、底面の凹凸が小さい場合は速度差の絶対値が小さくなっている。これは底面の凹凸が小さくなると、凹凸による抵抗が小さくなり、土塊速度が大きくなるためと考えられる。

4. 結論

本解析では土砂流動に対するシミュレーションを行い、流動性の高い空間での粒子構成割合を評価することで大きい粒子の浮き上がりに与える底面の凹凸と流下距離の影響を把握し、また、底面の凹凸が粒子の速度と土塊速度の差に対しても大きな影響を及ぼすことが判明した。

5. 参考文献

- 1) 山本彰、山本修一、鳥井原誠、平間邦興：砂防ダムに作用する土石流の衝撃力に関する研究
- 2) 松村健太郎、堀口俊行、香月智：直線水路実験と回転円筒実験における礫分級現象の比較
- 3) 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