

日本工営株式会社

○倉岡千郎、

筑波大学大学院システム情報工学研究科 杉山文乃、川村洋平

1. はじめに

DEM (個別要素法) により鋼製格子やスリット部における粒子の閉塞機構の解析が行われている^{1),2),3),4)}。しかし、DEMでは水と固体粒子が攪拌された混合体として互いに力を及ぼしあいながら、流れる機構を連成問題として解くことは難しい。水の影響は実験結果などを元にDEM粒子集合を一定の速度で移動させるための推力として与えており、解析して求めているわけではない。したがってDEMは土砂の運搬や堆積現象を解明するのが目的ではなく、スリット部に運搬されてきた固体粒子が摩擦や粒子間の接触力により閉塞するかどうかを検討するための一手法と考えられる。

また、DEMは基礎的な機構を検討するための数値実験としての利用方法も考えられる。既往の解析例⁴⁾では大きな粒子が上方に移動すれば、その粒子が先頭に移動しやすいことが示唆されている。DEMでは水と固体粒子の連成問題は解いていないが、巨石が先頭に集合する傾向が得られるということは、そこに実現象と共通する機構が働いている可能性もあると考えられる。本稿では、DEMを数値実験と位置づけ、大きな粒子が上昇する機構について検討した。

2. 解析モデルおよび解析条件

解析は2次元とした。2次元とした理由は、簡略化することで単一粒子の詳細な挙動を追跡しやすくするためである。ただし、粒子は球である。

粒子の半径は大小2種類(大=500mm、小=256mm)とした。流下する底面は、一様勾配モデル(1/14)とした。初期状態として図1のように水路上に小粒子はランダムとするが大粒子は発生領域を5分割した領域に均等に配置した。粒子は重力下で堆積させた。

土石密度は、同半径・厚さ 300mm・密度 2650kg/m³の円柱の、水中での重さと同等になるよう設定した。この理由は次の通りである。大粒子が少粒子に比べて上方に移動するのは、大粒子が少粒子から受ける力を足し合わせると上向きになっていることが一因と考えられる。ところが、二次元解析で球としての重さをそのまま設定すると、大粒子の下面にある少粒子の数が実際よりも少ないので、小粒子に与える荷重が実際よ

りも大きくなるからである(表1)。ただし、大粒子が先頭に集まる傾向は、3次元解析⁴⁾でも表れており、2次元でないと表れないわけではない。

表1 入力パラメータ

バネ定数 N/m (垂直方向とせん断方向を 同じとする)		1.0×10 ⁶
土石密度 (kg/m ³)	大	743
	小	1401
反発係数		0.2
抗力係数		1.0

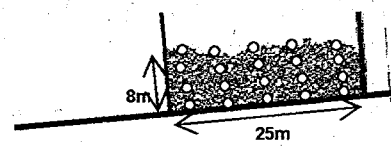


図1 粒子のパッキング後の状態

本検討では以下の条件を満たすために、流下方向に一定の水の流速(17m/sec)を与えた。

- 粒子がバラバラにならず集合体として流下する
- 粒子群が一定の厚みをもって移動する
- 速度は加速・減速せずある一定速度に収束する

3. 底面周辺粒子の速度停滞と回転の影響

既往の解析⁴⁾より、底面摩擦を0とすると大粒子は上方に移動せず先頭に集まらない。よって、摩擦によって速度が停滞する領域が底面周辺にあると、上層の粒子が底面の粒子を乗り越えようとし、その際に粒子に上方の力が作用する機構が考えられる。この仮説を検討するために、表2に示す解析を行った。大粒子の移動傾向は、全粒子数の1/5の数を求め、先頭部1/5個の領域に含まれる大粒子の数で表した(図2)。

case3は、全粒子と底面間に1.0の摩擦を付加したもので、大粒子が先頭部に集まる傾向が得られた。case6, 10, 14では、全粒子と底面間の摩擦を0.0とした。Case6では底面から高さ0.3mの範囲にある粒子(底面周辺粒子と呼ぶ)に与える水の流れ速度を20%低減させた。その結果、底面に速度停滞があるだけでは、大粒子が先頭に集まらない。次に底面周辺粒子に流下方向に対して反時計回りの回転(25rad/sec)を与えると大粒子が先頭に集まる傾向が示され、粒子の回転の影響が大きいと考えられる。なお、この回転速度は、case3に

おける底面周辺粒子の回転速度の平均値であり、底面摩擦によって粒子が回転するものである。

表2 解析ケース：底面粒子の流速と回転速度の影響
(粒子数：大=20個, 小=600個)

	底面摩擦	底面部の流速の低減率	底面部の粒子に与える回転 rad/sec
case3	1.0	0.0	設定せず
case6	0.0	0.2	設定せず
case10	0.0	0.2	25
case14	0.0	0.0	25

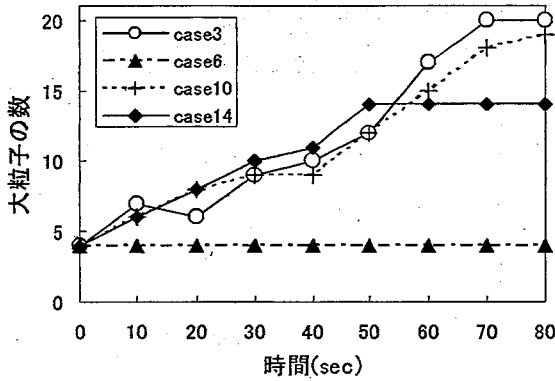


図2 先頭部20%に含まれる大粒子個数

4. 大粒子に作用する荷重

底面周辺粒子の回転が上層の粒子に上向きの力を与えている可能性が示唆された。ただし、上層の粒子が下層粒子の前方にあれば、底面周辺粒子の回転は下向きのせん断力を加えるはずである。しかし、大粒子は上方に移動する傾向がある。よって大粒子は、下向きのせん断力が作用しても下降しにくい機構が働いていると考えられる。この機構は次のように推定される。まず深い位置ほど粒子間の荷重は大きく粒子がより密に接触しているので、いったん上方に変位した粒子は下方に移動しにくいことが考えられる。一方、小粒子は周囲の粒子と同じ大きさであるため、小粒子の上と下部から受ける荷重に大粒子ほどの違いがないと考えられる。また、大粒子が下方に移動するには小粒子を押しのけなければならないが、小粒子はそのような抵抗が大粒子に比べて小さい。

一例として、任意の時間における大粒子に作用する接触力(粒子間の圧縮荷重)を出力した(図3及び図4)。大粒子の重心より下部の位置で発生する接触力と上部で発生する接触力に分けて出力すると、概ね下部に位置する粒子から受ける力のほうが大きく、このような状態においては、粒子は上方へ移動しやすいことが

示唆される。この時の大粒子に作用する鉛直方向の合力(重力も含める)を求めると上向きになっており粒子が上昇することが示されている(図5)。

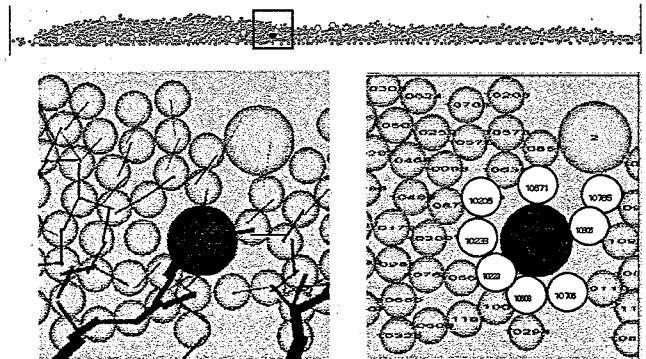


図3 粒子間の力の方向(左)および図4の粒子番号(右)

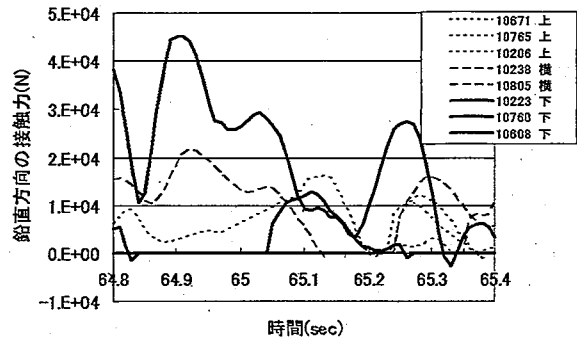


図4 小粒子と大粒子に作用する鉛直方向荷重

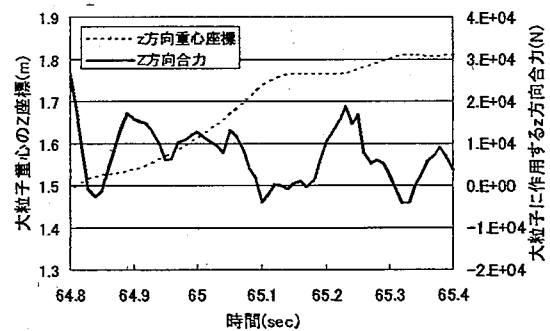


図5 大粒子に作用する合力と移動傾向

参考文献

- 1) 牧野孝久ら: 個別要素法を用いたスリット砂防ダムの土砂捕捉に関する検討, 砂防学会研究発表会, p.144, 2005
- 2) 深和岳人ら: 3次元個別要素法によるオープン型鋼製砂防堰堤の土石流捕捉効果解析, 土木学会論文集, No.738/I-64, 2003
- 3) 水野秀明ら: 個別要素法を用いた鋼管製透過型砂防ダムの土石流捕捉効果に関するシミュレーション解析, 砂防学会誌, Vol.52, No.6, 2000
- 4) 牧野孝久ら: 土石流の巨礫集積機構に関する個別要素法シミュレーション, 砂防学会研究発表会, p.416, 2006
- 5) 高橋 保: 地質・砂防・土木技術者/研究者のための土石流の機構と対策, 近未来社, p.183