

水中における斜面崩落数値実験による粒子群の鉛直分級機構の研究

中央大学大学院 学生会員 ○田所 弾
中央大学研究開発機構 正会員 福田 朝生
中央大学研究開発機構 フェロー 福岡 捷二

1. 序論

石礫河川の河床は、大粒径から小粒径までの広い粒度分布により構成されている。洪水時には小粒径粒子は大量に移動し、河床にある大粒径粒子が露出し、その大粒径粒子が核となって広い粒径集団が一体となって河床を安定させる¹⁾。また河床表層において、大きい粒子ほど河床の高い位置に移動しやすく河床表層で分級することで、河床が流れに対して安定した構造になる²⁾。土砂移動を説明する上で、分級機構の理解は重要である。既往の粒子の鉛直分級に関する研究では、漂砂の鉛直分級に関する実験やシミュレーション³⁾、土石流の逆グレイディング機構⁴⁾等に関する多くの研究がある。本稿では、球と石礫の8粒径混合粒子群の水中での粒子群の斜面崩落数値実験における鉛直分級に及ぼす粒子形状と粒子径の影響を考察する。

2. 斜面崩落実験と水中安息角

図-1に示す8粒径からなる粒度分布を有する球粒子と石礫粒子を用いて斜面崩落数値実験を行い、分級機構を検討する。石礫粒子群は、福田ら⁵⁾と同様の5粒径(40 mm, 50 mm, 70 mm, 90 mm, 120 mm)の各粒径に対して図-2の1~4に示す4種類の粒子形状が均等な数となるように設定した。さらに球群と石礫群ともに小さい球粒子(10 mm, 20 mm, 30 mm)を混入し数値実験を行った。石礫粒子の粒子径は同一体積の球の直径として定義している。本稿では平均粒径51mmと比較し、十分に細かい10-30 mmを細粒子、同程度の40-70 mmを小粒径粒子、十分に大きい90-120 mmを大粒径粒子と定義する。水路の端から1mの範囲に壁を立て、その間に高さ0.7mとなるように粒子群を敷き詰め、水深1.5mの条件の下、瞬時に壁を取り除き粒子群を崩落させた。粒子群を敷き詰めた時の水路(0.5m地点)の縦横断0.6m四方の体積割合の鉛直分布(図-3)は球、石礫ともに0.8程度の値を示している。本研究の数値解法は、福田ら⁵⁾と同様に、流れの解析では粒子を密度の異なる液体として全体を非圧縮流れとしてEuler的に解析し、流れ場の解析から直接粒子に働く流体力を評価する。粒子の運動は、剛体として並進と回転の運動方程式によりLagrange的に解析し、粒子の接触力を個別要素法を用いて解析する。次に流れの解析で固相の位置と流速を修正する。計算法の詳細は文献⁵⁾を参照されたい。

3. 実験結果

図-4に水中での粒子群崩落過程の時間経過を示す。図-4に示す粒子群崩落時の形状を見ると、球は壁がなくなると上部から下部まで一度に崩れ落ち、水平方向に大きな速度を持ち斜面を形成するのにに対し、石礫は

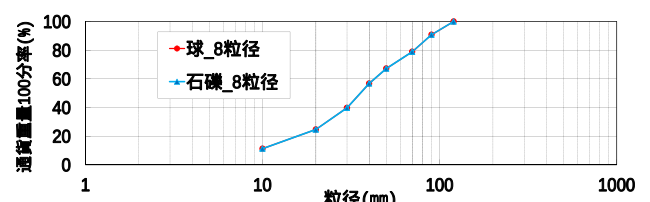


図-1 実験に用いた粒子の粒度分布



図-2 実験に用いた粒子の形状

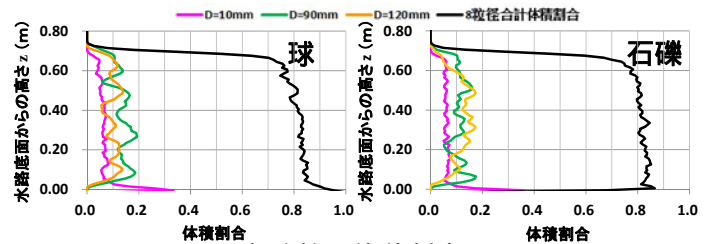


図-3 実験前の体積割合(x=0.5m)

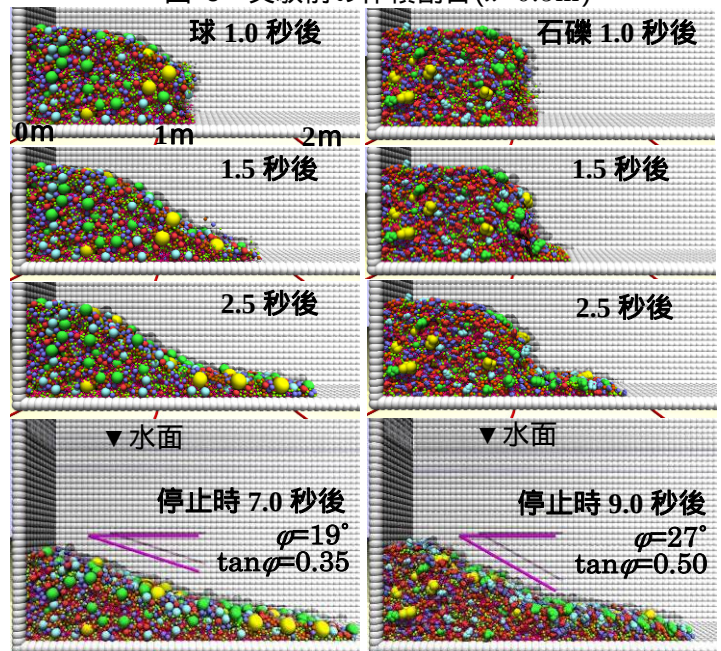


図-4 粒子群崩落過程の時間経過(水路中央断面図)

キーワード 斜面崩落 水中安息角 鉛直分級 粒度分布 粒子形状 かみ合わせ効果

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27-31214 中央大学研究開発機構 TEL 03-3817-1611

鉛直方向の力を大きく受ける低部から徐々に崩落していき、石礫の不規則な粒子形状によるかみ合わせ効果⁶⁾により、上部は形状を維持したまま、緩やかに落下する。粒子群が停止するまでの時間は球7秒、石礫9秒となり、球の方が速い。粒子群停止時の形状を見ると、石礫は球に比べ先端粒子群の厚みが大きく、先端粒子群の移動距離が小さいことがわかる。これは石礫のかみ合わせ効果によって、先端粒子群が球に比べ強くかみ合うことで、球よりも大きな力に抵抗して停止することができるためである。球の水中安息角 φ は 19° ($\tan\varphi=0.35$)、石礫の水中安息角は 27° ($\tan\varphi=0.50$)となった。水路中央部で切った断面図(図-4参照)から、分級の結果、大きい粒子は上層に、小さい粒子は下層にあることがわかる。図-5に実験での粒度分布の変化を示す。球では投入した粒度分布(平均粒径 $d_m=51\text{mm}$ で無次元化した標準偏差 $\sigma/d_m=0.64$)に比べ、崩落後の表層粒度分布($d_m=64\text{mm}$, $\sigma/d_m=0.48$)では、平均粒径が大きくなり、ばらつきが小さくなっている。石礫も投入した粒度分布($d_m=51\text{mm}$, $\sigma/d_m=0.64$)、崩落後の表層($d_m=59\text{mm}$, $\sigma/d_m=0.48$)と同様の傾向が見られる。次に崩落時(球:2-6、石礫:2.5-7.5秒間)の粒子群の移動軌跡をとったものを図-6に示す。これより石礫の細粒子と大粒径粒子は落下に近い状況となっており、崩落時にどちらも水路低部まで下がっていく傾向が見られる。それに対し球の細粒子は石礫に比べ相対的に、水平方向に大きく動きながら水路低部まで下がっていくが、球の大粒径粒子は $x=1\text{m}$ 付近において、ある程度の高さまで下がると、水路と平行向きの移動をし始め表層に現れる。粒子が動いてできた隙間に小さい粒子が落ち込むことで、小さい粒子と比較し大きい粒子は相対的に上部を移動したと考えられる。 $x=1.5\text{m}$ 付近では、球と石礫どちらの大粒径粒子、細粒子も水路底面の影響を受けて水路と平行して移動することがわかる。図-7に粒子群崩落後の体積割合の鉛直分布を示す。 $x=1.0\text{m}$ 地点では、球は崩落時の鉛直方向の分級が大きいのに対し、石礫は分級が相対的に小さい。しかし $x=1.5\text{m}$ 地点では粒子層が薄くなり底面の影響が大きくなるため、粒子群の体積割合の鉛直分布は球と石礫どちらも同じように生じている。

4. 結論

崩落数値実験において、崩落時に大粒径粒子は水路底部と平行に移動し表層に、細粒子は水路底部に移動し、鉛直分級する。これより球と石礫どちらも表層の平均粒径は大きくなり、表層の粒度分布のばらつきが小さくなることを示した。今回の斜面崩落実験の規模では、粒径に対し解析領域がやや小さく、石礫では落下に近い状況となっている。今後は大量に粒子群が移動する大規模な斜面崩落実験を行い、球と不規則な形状を持つ石礫の粒子群運動に及ぼす形の効果を検討していくことを考えている。

参考文献 1)福岡捷二：石礫河川の移動床水理の諸問題と解決への道筋，水工学に関する夏期研修会，Aコース，Vol.44，pp.A-1-A25，2008。2)福田朝生，福岡捷二：石礫粒子群の運動および河床構造に及ぼす粒子衝突の効果，土木学会論文集B1（水工学），Vol.70，No.4，I_967-I_972，2014。3)後藤仁志，原田英治，酒井哲郎：混合粒径シートフローの鉛直分級過程，土木学会論文集，No.691，-57，133-142，2001。4)椿東一郎，橋本晴行：，土木学会論文報告集，第336号，1983。5)福田朝生，福岡捷二，内田龍彦：移動床数値実験水路を流下する石礫粒子群の三次元運動，土木学会論文集B1（水工学），Vol.69，No.4，pp.I_1051-I_1056，2013。6)田所弾，福田朝生，福岡捷二：等価な粒度分布を有する球と石礫で構成される二つの数値移動床の粒子運動の比較検討，土木学会論文集B1（水工学），Vol.70，No.4，pp.I_961-I_966，2014。

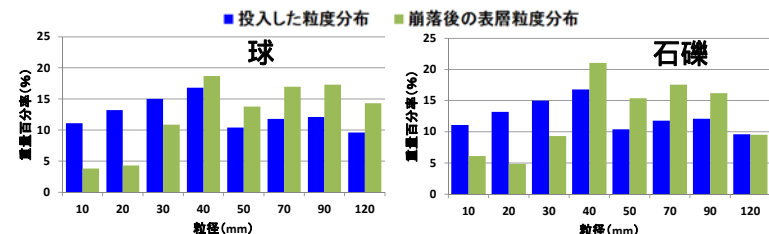


図-5 実験での粒度分布の変化

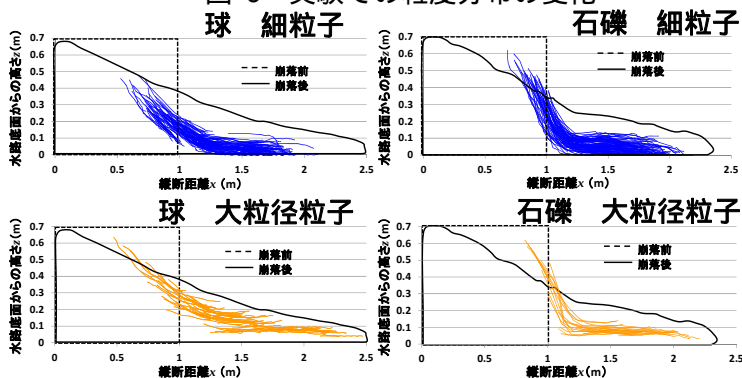


図-6 移動粒子群の軌跡

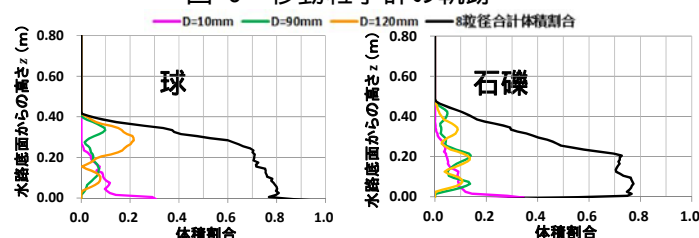


図-7-1 実験後の体積割合($x=1.0\text{m}$)

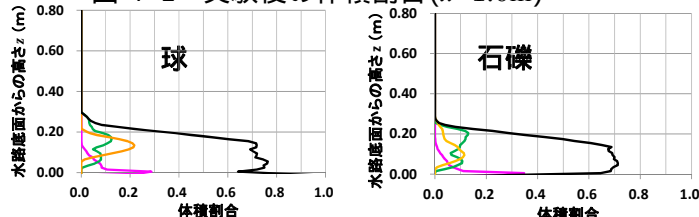


図-7-2 実験後の体積割合($x=1.5\text{m}$)