

形の異なる移動床粒子群の水中安息角に及ぼす粒度分布の効果

中央大学理工学部 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、河床近傍の石礫粒子の運動を観測することは容易ではなく、粒子形状や粒度分布の違いによる流送土砂量や河床変化の予測手法はいまだ十分確立されていない。石礫粒子群の粒子運動を解明するために、福田ら¹⁾は粒度分布

(図-1, 5 粒径)と石礫粒子の形状(図-2)を考慮した数値移動床水路を構築し、それを用いて石礫粒子群の粒子運動を解析している。また著者ら²⁾は数値移動床水路を用いて粒子運動や河床構造に及ぼす粒子形状の効果を示している。しかしこれらの検討は大きな粒径集団が中心で、そこには細かい粒子が含まれておらず、広い粒径集団からなる河川とは必ずしも同じ状況を呈していないと考えられる。そこで本研究では福田ら¹⁾著者ら²⁾が用いた粗い粒度分布をもとに作成した細かな粒子を含んだ球粒子群、石礫粒子群(図-1, 8 粒径)を用いて、粒度分布の違い、特に細かい粒子の存在が他粒子集団に及ぼす効果を水中安息角の違いで検討する。

2. 球群と石礫群での水中安息角の比較

図-1 に示す 5 粒径からなる粒度分布を有する球と、石礫粒子の水中安息角を計測した。石礫粒子群は、福田ら¹⁾と同様に、5 粒径(40 mm 青色, 50 mm 赤色, 70 mm 水色, 90 mm 緑色, 120 mm 黄色)の各粒径に対して図-2 の 1~4 で示す 4 種類の粒子形状が均等な数となるように設定した。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 10-30 mm を細粒子, 40-70 mm を小粒径粒子, 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 70cm 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空隙率(図-3)は球、石礫ともに 0.3 程度の値を示している。本研究の数値解法は、福田ら¹⁾と同様に、粒子群を密度の異なる液体として全体を非圧縮性流れとして解く。流れを Euler 的に、粒子は形状を維持しながら移動する剛体として Lagrange 的に解析する。計算法の詳細は文献¹⁾を参照されたい。図-4 に 5 粒径の水中安息角

キーワード 水中安息角, 静止摩擦係数, 粒度分布, 形の効果, 細粒子

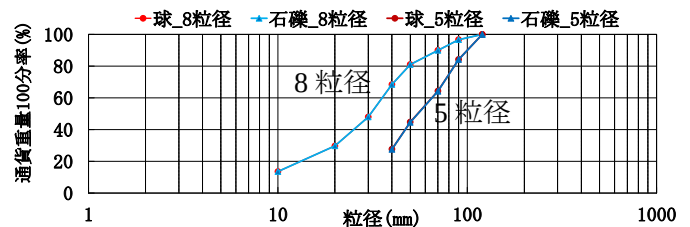


図-1 実験に用いた粒度分布

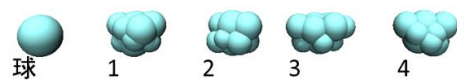


図-2 実験に用いた粒子の形状

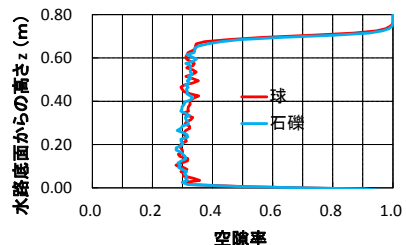


図-3 空隙率の鉛直分布(5 粒径)

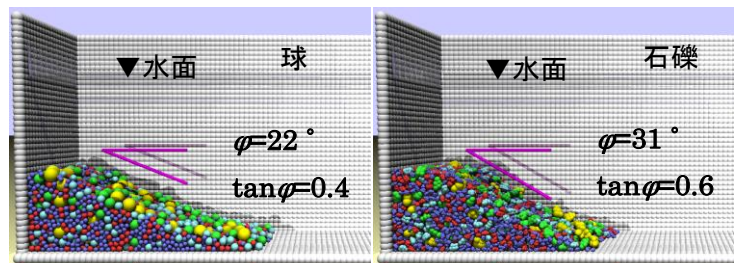


図-4 水中安息角 (5 粒径)

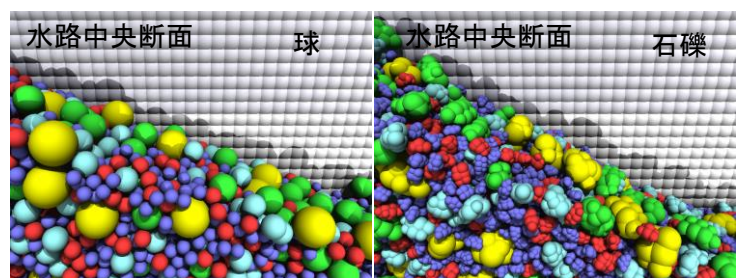


図-5 水中安息角の近景 (5 粒径)

の算定結果を示す。球の水中安息角 ϕ は 22° ($\tan\phi=0.40$)、石礫の水中安息角は 31° ($\tan\phi=0.60$) となった。形の効果により静止摩擦係数は石礫では、球に対して 1.5 倍 ($0.6/0.4$) も大きくなることが確認された。図-5 に水中安息角の算定結果の水路中央部の断面で切った近景を示す。図-5 では、石礫は球とは異なり、他の粒子と平らな面を共有するように接触していることがわかる。接触面を共有する石礫粒子が移動する際は、必然的に 2 つの粒子が接触面を共有しながら一体的に回転する傾向を有することになる。これより石礫粒子は、内部の粒子も一体的に表層の粒子の転動に抵抗する。逆に球粒子は、隣接する粒子とは点接触となるため、お互いが回転を拘束する効果は石礫粒子と比較して小さい。以降ではこのような効果を「かみ合わせ効果」と呼ぶ。図-1 に示す 5 粒径の石礫では細かい粒子が組み込まれていないため、石礫粒子同士の「かみ合わせ効果」が強く働いたために、静止摩擦係数が大きくなったと考えられる。

次に細粒子の効果を調べるため、図-1 に示す 8 粒径の分布を有する球と石礫の水中安息角を検討する。球群と石礫群ともに小さい球粒子 (10 mm 紫色, 20 mm 黄緑色, 30 mm 橙色) を混入し実験を行った。計算条件は前述の 5 粒径と同じである。8 粒径空隙率 (図-6) は 5 粒径の粒度分布に比べて小さくなり、球、石礫ともに 0.2 程度の値を示している。

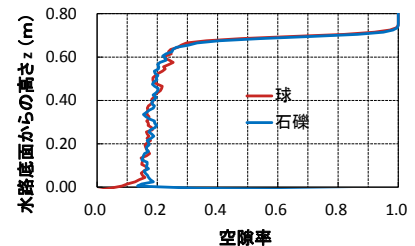


図-6 空隙率の鉛直分布 (8 粒径)

図-7 に 8 粒径の水中安息角の算定結果を示す。球の水中安息角 ϕ は 19° ($\tan\phi=0.35$)、石礫の水中安息角は 27° ($\tan\phi=0.50$) となった。5 粒径と同じように、形の効果により静止摩擦係数は石礫では、球に対して 1.4 倍 ($0.50/0.35$) も大きくなる。また 5 粒径と比較すると球と石礫どちらも水中安息角が小さくなる。

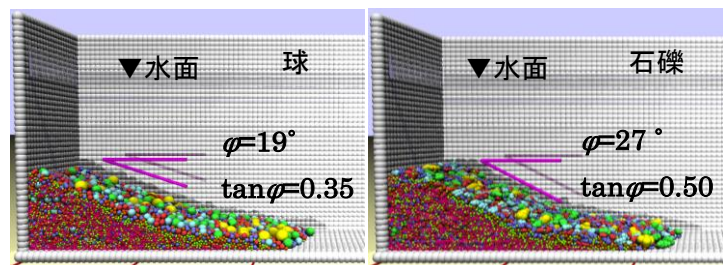


図-7 水中安息角 (8 粒径)

図-8 に水中安息角の算定結果の水路中央部の断面で切った近景を示す。空隙率 (図-6) と図-8 から大粒径粒子と小粒径粒子の周りに多くの細粒子が存在している。これら細粒子がころの働きをすることにより、大粒径粒子と小粒径粒子が運ばれやすくなり、静止摩擦係数が低下したと考えられる。また 5 粒径と 8 粒径では、球の静止摩擦係数の下げ幅が 0.9 倍 ($0.35/0.4$) に対し、石礫は 0.8 倍 ($0.5/0.6$) となり、

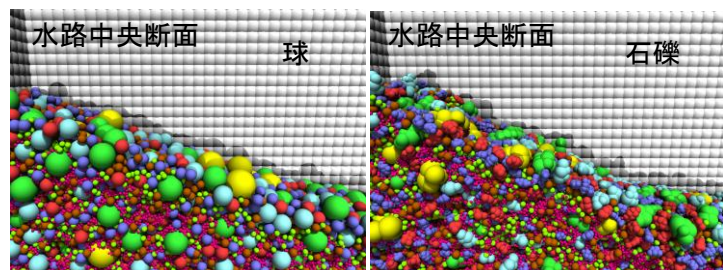


図-8 水中安息角の近景 (8 粒径)

球に比べ石礫の方が静止摩擦係数の下げ幅が大きい。これは石礫粒子群の間に入った細粒子の存在によって、2 つの石礫粒子同士が平らな面を共有するように接触することが難しくなる。これより石礫粒子同士は接触面を共有しながら一体的に回転することが困難になり、お互いが回転を拘束する効果が小さくなったと考えられる。5 粒径の石礫で効いていた「かみ合わせ効果」は、細かい粒子の存在により効きにくくなり、静止摩擦係数が小さくなる。

3. 結論

かみ合わせの違いによる形の効果に大きな差が見られるが、細粒子を組み込むことによって大粒径、小粒径粒子のみでは効いていた「かみ合わせ効果」が効きにくくなることがわかった。粒子形状と粒度分布により水中安息角の値に違いがでることから、安息角の違いが石や砂の移動機構、流砂量、河床波の振幅や波長等に、どれほど影響するかについて、数値移動床実験において細粒子を組み込み、水流における粒子運動、土砂輸送、河岸浸食等の面から検討することを考えている。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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上の粒子運動の比較検討, 土木学会論文集 B1 (水工学) 2014. (投稿中)