

水流と石礫粒子群の混合場における粒子の移動機構と応力分布

中央大学大学院 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
 中央大学研究開発機構 正会員 内田 龍彦

1. 序論

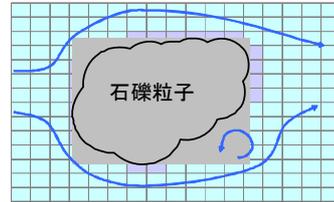
水流中を石礫粒子群が流下する場を対象とした実験は、現象スケールの制約から実施することが難しく、石礫粒子群と流体の相互干渉に不明な点が多いことが石礫河道の現象解析のネックになっていた。福岡ら¹⁾は大型実験水路に多量の石礫粒子群を流下させ、水流中の石礫粒子群の移動の軌跡を画像解析手法により調べた(以降大型水路実験¹⁾と呼ぶ)。著者ら²⁾は、石礫粒子群の抵抗を抗力係数等の経験的な係数を用いることなく、石礫粒子群と水流の相互干渉を直接運動方程式で考慮できる三次元数値解析モデルを構築し、水流と石礫粒子群の相互干渉場に対する妥当性を大型水路実験¹⁾の結果を用いて検証した。本研究では、水流中を石礫粒子群が流下する場において、流体や石礫粒子群に作用する応力など実験による計測が困難な情報を数値解析結果から抽出し、水流中の石礫粒子群の挙動と流れと粒子群の相互作用を力学的に解明することを目的としている。

2. 数値解析²⁾の概要

本解析法では液相(水流)をオイラー的、固相(石礫群)をラグランジュ的に解く。液相の計算における固相の影響は、固相部分を密度の異なる流体として取扱い混相流場の一流体モデルを用いることで評価する(図-1参照)。固相は剛体として取り扱い、剛体の並進、回転運動の方程式を用いて解く。流体力は、流体計算における石礫の領域が受ける力として評価する。石礫は球体連結モデルを用いることで任意形状の評価を可能としている²⁾。流体の基礎式を式(1)、式(2)に、石礫粒子の運動に関する基礎式および流体力の評価を式(3)~(6)に示す。石礫に加わる衝突力 F_c 、 N_c は球体連結モデル評価される石礫を構成する球それぞれにおいて個別要素法により評価する。

3. 大型水路実験結果を対象とした解析および石礫粒子群の運動の特性

図-2に水路諸元、図-3に水路横断形状を示す。投入した石礫の粒度分布を図-4に示す。流体計算セルの大きさは $dx=dy=dz=0.01m$ とした。以降では、実験において軌跡を可視化している区間(図-2参照)の石礫の状況について説明する。図-5に解析において検討区間を流下する石礫粒子群の瞬間像を示す。図-6に実験と解析の石礫速度および流速の鉛直分布



固相の影響は、固相部分を密度の異なる流体として取り扱い、混相流体場の固相部分が液相部分に及ぼす応力として評価

流体計算セルの色の違いは密度の差を示す

図-1 流体解析における石礫粒子の評価方法の概念図

【流体の基礎式】

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + (v + \nu_i) \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) \tag{2}$$

u_i : 密度で重み付け計算した流体計算セル内の i 方向平均流速

ν_i : 渦動粘性係数であり、スマゴリンスキーモデルで評価

【石礫粒子の運動の基礎式】

$$M\ddot{r}_G = Mg + F_f + F_c \tag{3}$$

$$\dot{\omega}_r = I_r^{-1} (R^{-1} N - \omega_r \times I_r \omega_r) \quad , \quad N = N_f + N_c \tag{4}$$

r_G : 石礫粒子の重心, ω : 石礫粒子の角速度, 下付 f , c は、流体力および衝突力を下付 r は、剛体に固定された座標系の値を示す。

R : 空間座標系から剛体に固定された座標系への座標変換のテンソル, I : 慣性テンソル,

【流体力の評価】

$$F_{f,i} = \int_{\Omega_s} \left\{ -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho(v + \nu_i) \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) \right\} d\Omega \tag{5}$$

$$N_{f,i} = \int_{\Omega_s} \varepsilon_{ijk} r_{f,j} \left\{ -\frac{\partial P}{\partial x_k} + \rho(v + \nu_i) \left(\frac{\partial^2 u_k}{\partial x_l \partial x_l} \right) \right\} d\Omega \tag{6}$$

$r_{f,i}$: 石礫粒子重心から力の作用点に向かう位置ベクトル,

Ω_s : 石礫粒子の領域

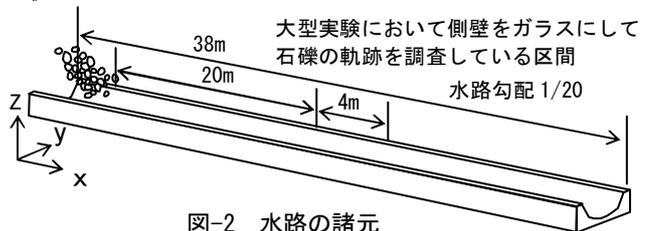


図-2 水路の諸元

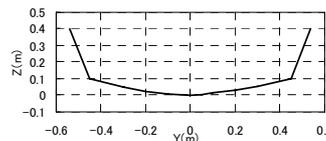


図-3 水路形状

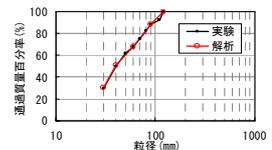


図-4 粒度分布

キーワード 応力分布, 軌跡, 三次元数値解析モデル, 石礫形状, 混相流

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

を示す。解析結果は、石礫速度は z 方向にほぼ一様になる状況や石礫の速度について実験結果をよく捉えている。

この解析結果を用い、水流と石礫粒子群混合場の構造を調べる。まず、石礫粒子に作用する力と流下時の運動形態を検討する。図-7に体積濃度の鉛直分布、図-8に単位体積当たりに加わる水中重量に対する石礫に加わる x 方向および z 方向の力を示す。図-8の x 方向および z 方向ともに水深の中間付近で力の向きが逆転しており、水路底面付近では、上流かつ鉛直上方の力を受け、跳躍して水路上部に位置する時は下流かつ鉛直下向きの力を受けていることになる。このような力の分布を受ける際の特徴的な石礫の軌跡を図-9に示す。図-9は石礫粒子群の平均的な速度(2.65m/s)で移動する視点から見た相対的な軌跡である。平均速度で流下する視点から見た石礫の軌跡は、左斜め上に跳躍して右下に落下し、これを繰り返す軌跡となる。

次に、水流および石礫粒子群の混合場の運動の力学機構を調べる。図-10に x 方向および z 方向の力の鉛直分布を示す。衝突力については、個別要素法により算定する式(3)における F_c を1流体計算セル当たりの力として算定した。 x 方向成分では、底面付近で衝突力が卓越し、水路中央部で石礫による運動量交換が卓越している。混合場の応力分布を調べるため、 x 方向の応力の変化量を小さいと仮定し、図-10の力を水面から積分し算出したせん断応力成分と直応力の鉛直分布を図-11に示す。このような方法で算出した応力分布における石礫の影響は、直応力に対し、せん断応力に大きく出ており、石礫の体積濃度が約3%程度であるのに対し、底面付近の全せん断応力の70%近くを石礫の衝突又は石礫の移動による運動量が担っている。このように直応力に対してせん断応力の方が石礫の影響が顕著に表れる要因としては、図-8に示すように石礫に加わる x 方向の力は、重力の x 方向成分に対し遙かに大きい流体力を受けており、この流体力と重力の合力に対して底面が抵抗しなければならないためである。図-9の軌跡にも表れているように、石礫は底面から鉛直方向よりも上流向き of 力を受けることとなるため、石礫の影響は直応力の増加に対し、せん断応力の増加が卓越すると考えられる。

4. 結論

本稿では、三次元数値解析モデルを用い、計測が困難な水流及び石礫粒子群の相互干渉場において、石礫粒子群が受ける力と石礫粒子の移動形態の関係と、また、水流および石礫粒子群混合場における応力の分布形状について検討した。今後は、応力分布、速度分布、体積濃度分布の相互関係について更なる検討を進め、石礫河床における流砂の力学解明につなげたいと考えている。

参考文献

1)福岡捷二, 渡邊明英, 篠原康寛, 山下翔, 斉藤一正: 高速で多量に流下する礫群の運動機構と床面摩耗量の推算, 河川技術論文集, 第11巻, pp.291-296, 2005., 2) 福田朝生, 福岡捷二, 内田龍彦: 水流による石礫粒子群の移動機構とそのモデル化, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.68, No.4, 937-942, 2012

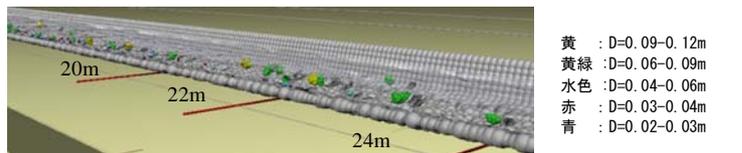


図-5 石礫粒子群の移動の瞬間像

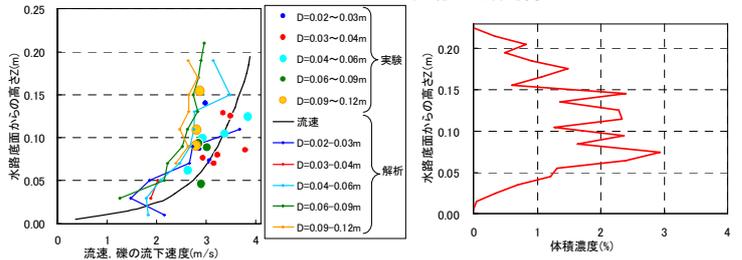


図-6 石礫粒子群の流下速度

図-7 体積濃度の鉛直分布

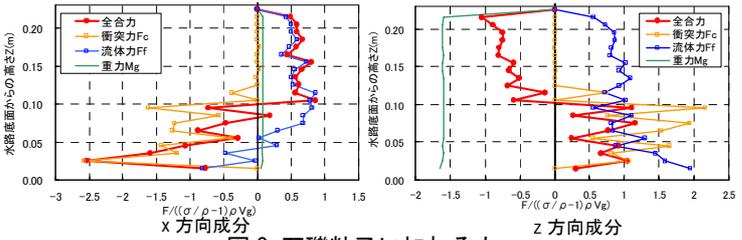


図-8 石礫粒子に加わる力

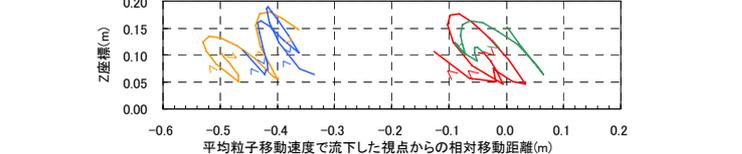


図-9 平均粒子速度で流下する視点からの相対軌跡

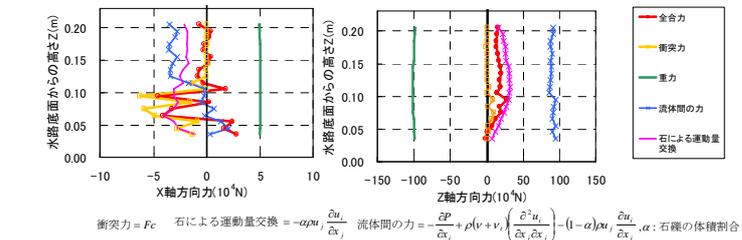


図-10 水流石礫粒子群混合場の力

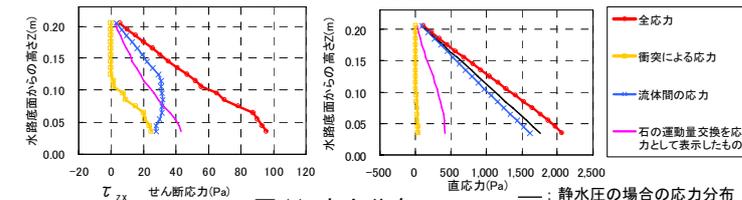


図-11 応力分布

図-8,図-10,図-11 について: 石礫粒子に加わる力は重心で評価しており、水路底面付近の粒子に加わる力は石礫の半径に相当する高さ以上からの評価となるため、水路底面付近は表示していない。