

排砂水路における砂礫群の運動解析と床面磨耗量の推算

清水建設(株)

正会員 ○篠原康寛

中央大学

フェロー会員 福岡捷二

広島大学大学院

正会員 渡邊明英

(株)東京建設コンサルタント

正会員 山下翔

国土交通省江の川総合開発工事事務所 正会員 斉藤一正

1. 序論

ダムの堆砂問題の解決策として検討されている排砂水路は、多量の流下砂礫により底面が侵食される。このため、底面の磨耗機構を明らかにする必要がある。既往の研究¹⁾では、初期段階の水路底面の侵食進行形態が検討されており、本研究では、初期侵食後の安定状態の段階の磨耗進展機構を明らかにする。磨耗の原因となる礫群の運動について、同時に行われている礫群の運動調査実験²⁾を基に礫群の運動をモデル化し、数値解析を行うことで、礫群の運動機構を明らかにする。そして、最後に砂礫群の運動と水路底面の磨耗量の関係を評価する。

2. 多量の流下砂礫による排砂水路底面の磨耗実験

(1) 実験方法

灰塚ダム湛水池内に設けられた大型水路(図-1)に多量の砂礫を流下させ、底面磨耗量と土砂供給量、水路底面の粗骨材の露出状況の関係を検討する。水路の15mずつ3区間で、コンクリートの粗骨材率を変えている。水路横断面形状は馬蹄形である。供給砂礫の代表粒径 d_{60} は約45mm、最大粒径は約200mmである。通水80時間、累積供給砂礫量3500m³まで行った。

(2) 水路底面の侵食深

図-2に各区間の最大侵食深と累積供給砂礫量の関係を示す。粗骨材率が大きいほど、コンクリート底面の磨耗抵抗は大きくなる。侵食安定後の単位供給砂礫量あたりの最大侵食深の増加量は、図に示す通りである。

累積供給砂礫量が大きくなると、水路底面に粗骨材が露出することで、粗骨材率の大きい上流部で単位供給砂礫量あたりの最大侵食深の増加量が小さくなるが、粗骨材率の小さい下流部では侵食速度の減少はほとんど見られない。これは、図-3に見られるように粗骨材率が小さいほど水路中央部の侵食深が大きく、礫が中央部に一層集中したためであると考えられる。

(3) 水路底面に露出する粗骨材の磨耗抵抗特性

図-4に侵食がほぼ安定した累積供給砂礫量3500m³時の大粒径粗骨材(粒径40-20mm)の表面占有率と単位供給砂礫量あたりの侵食深の増加量の関係を示す。この図より、大粒径粗骨材の表面占有率が大きくなるほど、磨耗されにくいという関係が明らかとなった。各区間で関係が異なっているのは、礫群の挙動が異なるためであると考えられる。下流部が中流部より単位供給砂礫量あたりの最大侵食深の増加量が1.6倍大きくなるのは、大粒径粗骨材の表面占有率が約1/3となっていることが大きな要因であると考えられる。

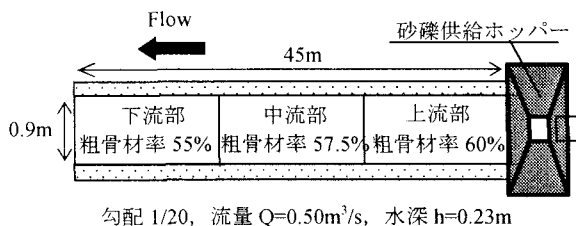


図-1 実験水路と水理条件

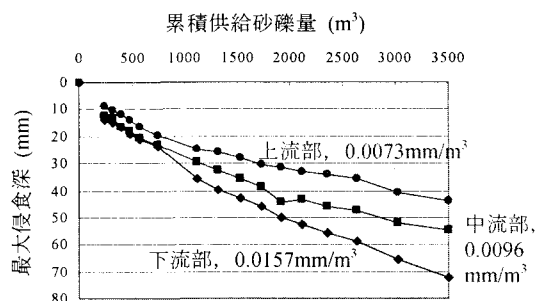


図-2 最大侵食深と累積供給砂礫量

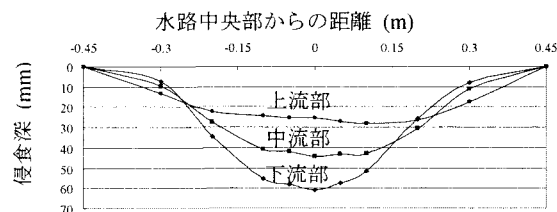


図-3 各区間の侵食深横断分布

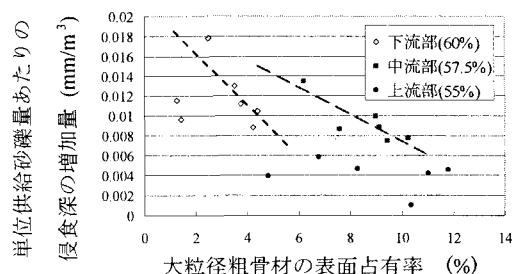


図-4 大粒径粗骨材の表面占有率と最大侵食深増加量

3. 高速で多量に流下する礫群の運動解析

(1) 解析方法

本解析では礫群の運動モデルに、粒子をLagrange的に考え、多重衝突を考慮できる個別要素法³⁾を用いる。粒子の x_i 方向($i=1\sim3$)の並進及び y 軸方向(x_2)の回転の運動方程式は式(1),(2)で表される。流体には、礫の大きさ(体積)のみを考慮し、礫の形状を形状抵抗項として考えた鉛直2次元モデル⁴⁾を用いる。流体の x_i 方向($i=1,3$)の基礎方程式は式(3),(4)で表され、これを σ 座標系に変換して解く。乱流モデルにはスマゴリンスキーモデルを用いる。礫が混入したことによる流れ場の変化を計算し、次にその結果を与えて粒子の追跡計算を行う。

(2) 解析結果

図-5に清水流時と礫混入時の流速分布、礫の体積密度分布、礫の流下速度の鉛直分布を示す。礫の存在する水路底面付近で流速が大きく変化している。この流速が一様化する層の厚さは約4cmで、その領域の礫体積濃度は30%以上である。また、礫が多く存在する底面付近では礫の運動の自由度が小さくなるため、流下速度が粒径によらず一様になる。

$$\rho(s+C_M)\frac{\pi d_p^3}{6}\frac{\partial u_{pi}}{\partial t}=f_{pi}+f_{gri}+f_{Di}+f_{Li}+f_{RLi}+f_{INTi} \quad (1)$$

$$\frac{s\pi d_p^5}{60}\frac{\partial \omega_{p2}}{\partial t}=f_{Ti}+\frac{d_p}{2}F_{sINTi} \quad (2)$$

f_{pi} : 流体の圧力勾配による力, f_{gri} : 重力・浮力, f_{Di} : 抗力, f_{Li} : 揚力, f_{RLi} : 回転揚力, f_{INTi} : 底面及び礫同士の衝突力, f_{Ti} : 粒子の回転運動に対する粘性抵抗トルク, f_{sINTi} : 底面及び礫同士の接線方向の衝突力

$$\frac{\partial u_j}{\partial t} + \frac{\partial A'_j u_i u_j}{V' \partial x_j} = -g\delta_{2i} - \frac{F_i}{\rho V'} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial A'_j u'_i u'_j}{V' \partial x_j} \quad (3)$$

$$\frac{\partial V'}{\partial t} + \frac{\partial A'_j u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (4)$$

V' , A'_i : $\Delta x \Delta y \Delta z$ の領域内, x_i 方向境界断面における流体占有率, F_i : 粒子の形状抵抗

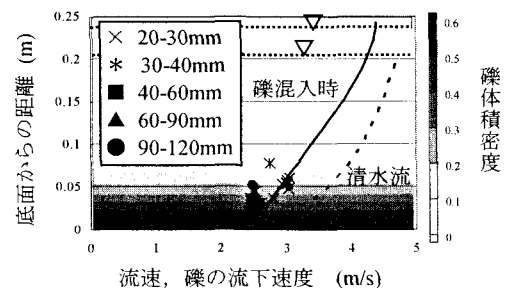


図-5 流速分布と礫の体積密度分布、
礫の流下速度の鉛直分布

4. 流下砂礫群の運動と水路底面の磨耗量

(1) 解析方法

磨耗実験を対象に解析を行い、2章で示した水路横断面形状の違いが水路底面の侵食速度に与える影響を礫群が底面との衝突で失うエネルギー量を用いて検討する。

(2) 礫群の底面に与えるエネルギーと底面磨耗量

図-6に礫が単位時間・単位面積あたりに底面との衝突で失うエネルギーの横断分布を示す。水路中央部の侵食深が大きい下流部ほど、礫群が底面との衝突によって失うエネルギー量が大きくなる。下流部が上流部より侵食安定後の単位供給砂礫量あたりの最大侵食深の増加量が約2.1倍になるのは、水路横断面形状の違いによって、礫群が底面との衝突で失うエネルギー量が約1.15倍になることがひとつの要因である。

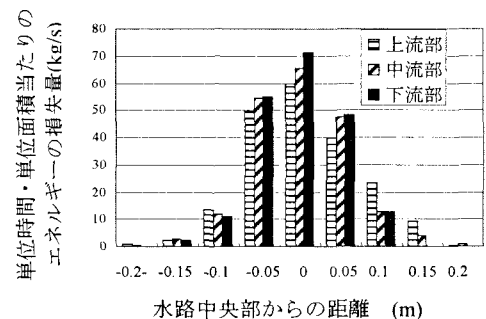


図-6 礫のエネルギーの損失量の横断分布

5. 結論

- ・ 粗骨材率が小さいほど水路中央部の侵食深が大きくなる。礫が断面内の中央部に集中することで、粗骨材の露出に伴う侵食速度の減少はほとんど期待できない。
- ・ 礫群の体積密度と形状抵抗を考慮した流体モデルと多粒子運動に対する個別要素法を用いた数値解析より、礫群が底面に与えるエネルギーを見積もり、水路横断面形状が底面磨耗量に与える影響を評価した。

参考文献

- 1) 福岡捷二他：排砂水路底面の磨耗進展機構の実験的検討，水工学論文集第48巻，2004。
- 2) 山下翔他：高速で多量に流下する礫の運動機構，第60回土木学会年次学術講演会講演概要集第2部，2005(投稿中)。
- 3) 後藤仁志他：混相流モデルと個別要素法の融合による高濃度掃流層の数値解析，土木学会論文集No649，2000。
- 4) 内田龍彦他：流れによる護床ブロック群の変形・破壊の解析，水工学論文集第49巻，2005。