

自由越流する粒子によるダム水叩き部への衝突に関する実験

一般財団法人電力中央研究所 ○太田一行 佐藤隆宏
株式会社セレス 竹内康生

1. はじめに

ダム堆砂が進行し、河床位がダム洪水吐き天端付近まで達すると、洪水吐きから土砂が流下し、ダムの摩耗・損傷を引き起こす。流砂によるダム設備の摩耗については、排砂設備における流砂の運動特性が石橋(1983)により検討されている。しかし、洪水吐きを自由越流する流砂運動については知見がほとんどなく、洪水吐きおよび水叩き部にどのような外力をもたらすか不明である。本研究では、高速度カメラを用いた水理実験により、自由越流する流砂の運動特性を検討する。

2. 実験方法

実験では、幅 15cm の水路を用いて、越流水頭 5cm とした標準越流頂断面を用いた。越流部と水叩き部は円弧形状(半径 5cm)で接続した。上流部からガラスビーズ(比重 2.5)を 1 粒ずつ供給し、掃流運動を経て自由越流する挙動を高速度カメラ(1/500fps)で撮影した(図 1a)。ビーズの粒径 $d=2\text{mm}$, 5mm , 10mm の 3 種類を用いた。流量 Q は、設計水深の 0.5~1.2 倍に相当する 1.5, 2.5, 4.0, 5.0, 6.0L/s を用いた。粒径と流量の組み合わせで、計 12 通りの条件下で実験を行った。実験結果のバラツキを

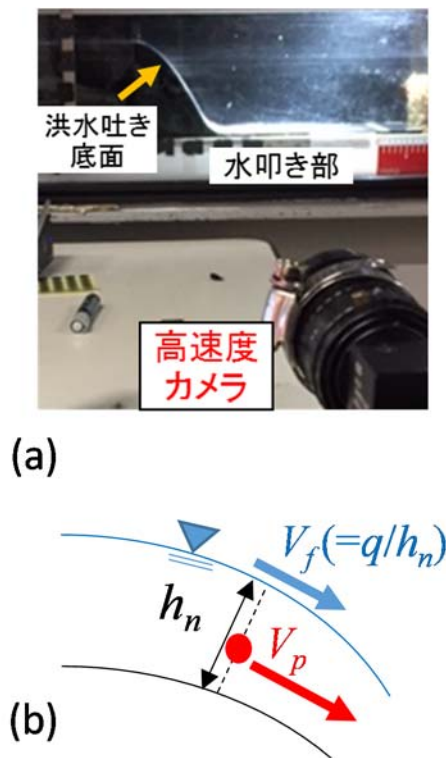


図 1 (a)実験の様子, (b)水理量の定義

考慮して、1 条件の実験を 15 回繰り返した。得られた連続画像を分析し、鉛直断面二次元における粒子位置および粒子速度を算出した。また、各流量における水面形状を計測し、断面平均流速を評価した。

3. 実験結果および考察

図 2 は、 $Q=4\text{ L/s}$ および 6 L/s で粒径 $d=10\text{mm}$ を用いた条件下における実験の各 15 回分の移動軌跡を重ね合わせたものである。いずれの条件においても、越流前の粒子は転動しながら堰に接近したが、越流の過程で底面から浮上した。また、反復実験において、粒子の一部が水面から飛び出る現象が複数回見られた。これらの粒子挙動は、越流に伴って粒子に遠心力が働くために生じる。 4 L/s と 6 L/s では、水叩き部始点($x=0$)における移動の特性が異なる。 4 L/s のときは、越流時の底面からの浮上距離が短いため、水叩き部に衝突した後の跳

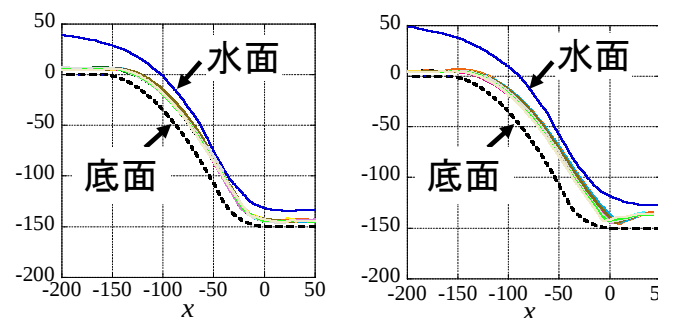


図 2 $d=10\text{mm}$ における 15 回分の粒子の移動軌跡 (単位:mm) (左) 流量 4 L/s , (右) 流量 6 L/s

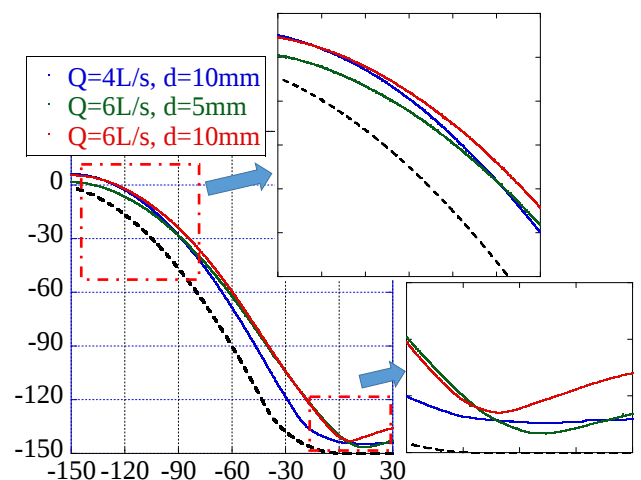


図 3 平均化した粒子の移動軌跡の比較(単位:mm)

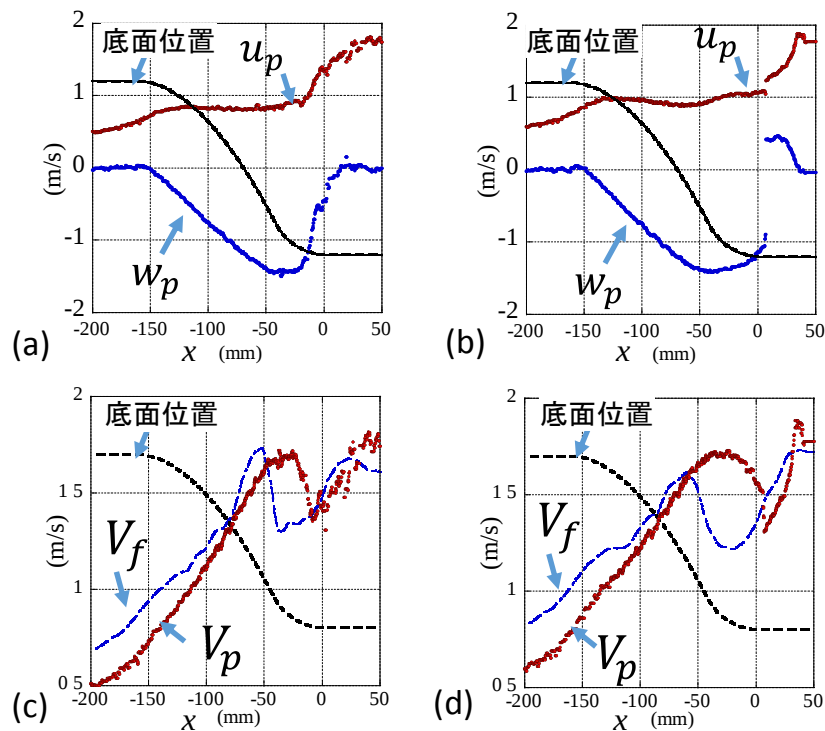


図4 $d=10\text{mm}$ における粒子速度(水平方向 u_p , 鉛直方向 w_p , 合成 V_p)および流下方向流速 V_f の比較.
(a): 4L/s の u_p, w_p , (b): 6L/s の u_p, w_p , (c): 4L/s の V_p, V_f , (d): 6L/s の V_p, V_f

ね返りが小さい. これとは逆に, 6L/s のときは水叩き部の始端に勢い良く衝突するため跳ね返りも大きい. 図3は15回の粒子の時系列の平均値であり, 図2の2ケースに加えて, $Q=6\text{ L/s}$, $d=5\text{mm}$ の結果が示されている. 流量が大きいほど, 粒子がより遠くに運ばれている様子が確認できる. 越流の始まりと終わりを拡大して示しているが, これらの範囲において粒径の影響が見られる. 一方, 始まりと終わりを除く越流過程においては $d=5\text{mm}$ と 10mm による粒子軌跡の違いは小さく, $Q=6\text{L/s}$ の2つの線は重なっている.

粒子速度と流速を比較するため, 底面法線方向の水深 h_n と単位幅流量を用いて, 流下方向の断面平均流速 V_f を算出した (図1b 参照). また, 法線方向の位置における粒子速度の水平方向成分 u_p , 鉛直方向成分 w_p , 2速度成分の合成 V_p を粒子位置の画像解析により算出した. 図4に $Q=4, 6\text{L/s}$ で $d=10\text{mm}$ のときの粒子速度および流速を整理した. 図4(a)(b)は, それぞれ $Q=4, 6\text{L/s}$ における粒子速度成分 u_p, w_p である (w_p は上向きが正). まず w_p に着目すると, 水叩き部始点の $x=0$ 付近において4L/s では $w_p=0$ に近づくが, 6L/s では w_p は負から正に急変しており, 衝突の影響が見て取れる. 水叩き部始点の上流 ($x < 0$) では, u_p は6L/s の方が大きく, 流量が大きいほど水平方向に加速している. 一方, $x > 0$ では u_p は4L/s の方が大きい. この理由は, 6L/s では底面に激しく衝突し, 運動量が減少したためと考えられる. 図4(c)(d)は粒子の合成速度 V_p と流下方向流速 V_f の比較で

ある. いずれも $x < -50$ では流速 V_f の方が大きい, 底面形状が円弧状の領域になると流速 V_f は減衰し, 粒子速度 V_p が上回る. 4L/s では水叩き部始点より少し手前で V_f と V_p が概ね一致し, $x=0$ では粒子が水流に追隨していることが分かる. 一方, 6L/s では $x=0$ 付近においても $V_p > V_f$ の関係が保たれており, 粒子が水流に追隨できないことから底面に激しく衝突したことが考えられる. このような粒子運動によって, 洪水時に水叩き部始点付近が摩耗・損傷することが示唆される. また, 石橋(1983)のダム排砂設備の評価式では掃流砂の跳躍運動を前提としているが, ダム洪水吐きでは粒子は水面付近まで浮上し, 水叩き部始点において流速より大きな速度を持って衝突する. ダム洪水吐きの衝突力あるいは摩耗量を推定する上で, 上記の粒子運動を考慮することの重要性が本研究により示された.

4. 結論

本研究では, ダムを自由越流する粒子の移動特性について検討した. これらの知見を活かし, 粒子の衝突力の推定手法の立案につなげていきたい.

参考文献

石橋毅. (1983). ダム排砂設備の流下砂礫による摩耗・損傷に関する水理学的研究. 土木学会論文報告集, 1983(334), 103-112