

高速で多量に流下する礫群の運動機構と 床面磨耗量の推算

MOVEMENT MECHANISM FOR A MASS OF GRAVEL FLOW WITH HIGH SPEED
AND ESTIMATION OF CHANNEL BED ABRASION

福岡捷二¹・渡邊明英²・篠原康寛³・山下翔⁴・斉藤一正⁵

Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE, Yasuhiro SHINOHARA, Sho YAMASHITA, and Kazumasa SAITO

¹フェロー会員 Ph.D 工博 中央大学研究開発機構 教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²正会員 博(工) 広島大学大学院助教授 工学研究科社会環境システム専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

³正会員 修(工) 清水建設(株) (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3 シーバンスS館)

⁴正会員 (株)東京建設コンサルタント (〒171-0014 東京都豊島区池袋2-43-1)

⁵正会員 国土交通省中国地方整備局 江の川総合開発工事事務所 (〒727-0021 広島県庄原市三日市町667-1)

The concrete channel invert for removing sediment deposited in a reservoir receives severe abrasion from moving gravels and boulders. Therefore, it is important to reveal abrasion mechanism. In this paper, abrasion mechanism by supplying gravels and boulders in a large experimental channel and three-dimensional motions of gravels for abrasion are studied. Experimental results show that the rate of coarse aggregate to total aggregate of the concrete bed plays an important role on progress speed of abrasion. Movement mechanism of gravel flowing down in an experimental channel is clarified through images of the digital video cameras. By using three dimensional DEM and vertical two-dimensional flow models considering the interaction between solid and liquid phase, the movement mechanism of gravel was quantitatively evaluated. Finally, the loss of kinetic energy of gravel on the bed is related to abrasion rate of channel invert by using numerical analysis.

Key Words : *sediment flushing channel, abrasion, aggregate, motion of gravels, DEM*

1. 序論

緊急な解決を要するダム貯水池問題の一つに堆砂がある。堆砂は、貯水能力の低下や貯水池上流域の河床上昇、下流域の河床低下等の問題を引き起こす。この堆砂量を減ずるための対策として、排砂バイパストンネルの設置¹⁾が検討されている。排砂バイパストンネルは、経済性や施工性の点から、コンクリートを用いて建造されることも考えられ、この場合、多量の流下土砂によるコンクリートの磨耗が懸念される。本研究は、ダム本体建設期間に用いられる仮排水路トンネルを、ダム完成後も排砂バイパストンネルとして再活用するという考えの下に、機能や維持管理について検討を進めているものである。このためには、まず砂礫群の流下によるコンクリート製水路底面の侵食機構と侵食速度を解明する必要がある。

これまで、コンクリート壁の磨耗に関する研究は数多く行われてきたが²⁾、実際のコンクリート水路における流下砂礫による底面の侵食については十分に明らかにされていない。福岡ら³⁾は温井ダムの仮排水路トンネルにおいて、水路底面の侵食実態調査を行い、侵食発生機構

を考察し、今後の研究課題を示した。福岡・小林ら⁴⁾、福岡・篠原ら⁵⁾は、それぞれ、温井ダム、灰塚ダム湛水池内に建造されたコンクリート製大型実験水路に多量の砂礫を流下させ、水路底面の磨耗進展機構について検討した(以下、温井実験、灰塚実験と呼ぶ)。これらより、侵食初期段階の土砂供給量と磨耗量の関係は明らかとなった。しかし、長期にわたる磨耗量を推算するに当たって重要となる水路底面状態安定後の磨耗進展については明らかにされていない。磨耗の原因となる礫群の運動機構について十分議論されていないため、具体的な設計を行うには、力学的な考察が不十分である。

本研究では以下の検討を行った。1) 灰塚実験により、初期侵食後の磨耗量と土砂供給量や水路底面粗骨材の露出状況の関係を検討し、コンクリート粗骨材の配合に着目して、排砂水路設計の基礎資料を提示する。2) 高速で多量に流下する礫群運動の実態を詳細に測定し、礫群の運動特性を明らかにする。3) その結果を基に、礫群の運動をモデル化・数値解析を行い、礫群の運動を力学的に検討する。4) 磨耗の力学的破壊機構が明瞭でないため、礫群の運動と水路底面磨耗量との関係を、礫群と底面の衝突によるエネルギー損失の観点から評価する。

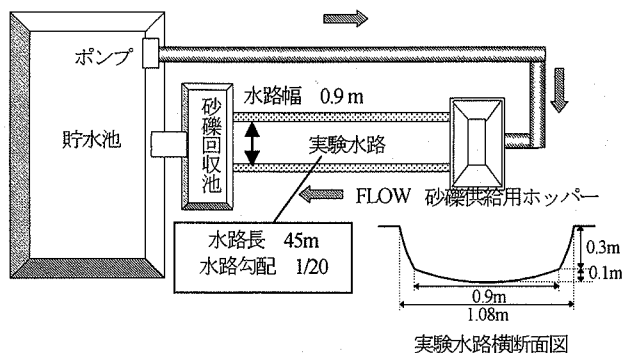


図-1 実験施設の平面図

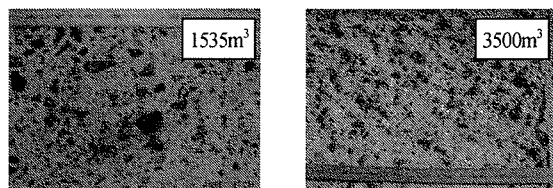


写真-1 水路底面の状態変化
(下流端からの距離10m水路中央部)

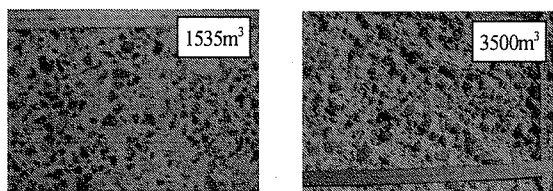


写真-2 水路底面の状態変化
(下流端からの距離1m水路中央部)

2. 多量の流下砂礫による排砂水路底面の磨耗実験

(1) 実験施設及び実験方法

本実験は灰塚ダム湛水池内に建造されたコンクリート製大型水路を用いて行われた。図-1に灰塚実験の実験施設及び水路諸元を示す。水路上流端に砂礫供給用のホッパーが、水路下流端には流下した砂礫を回収するための砂礫回収池が設置されている。水路横断面形状は仮排砂水路トンネルを想定した馬蹄形断面となっている。表-1に水路コンクリートの(粗)骨材配合を示す。コンクリートの骨材配合、特に粗骨材率の違いによる水路底面の侵食深の変化を検討するために、水路の15mづつ3区間で、異なる骨材配合のコンクリートが打設されている。水路底面全体が様な骨材配合のコンクリートで打設されていた温井実験では、水路上流側から侵食が進行していた。このため、磨耗抵抗が最も大きくなると想定される粗骨材率の最も大きい配合を水路上流部に設け、下流部を最も小さくした。供給砂礫の代表粒径 d_{60} は約45mm、最大粒径は約200mmであり、粒度分布は温井実験とほぼ同じである。表-2に実験条件を示す。通水全80時間で累積供給砂礫量3500m³である。流量と砂礫供給速度が20.5時間以降大きいのは、水深を大きくし、実際の排砂水路内の流れに近づけるためである。水路底面の侵食深及び粗骨材の露出状況の測定は一定時間通水を行っ

表-1 水路コンクリートの(粗)骨材配合

	粗骨材率	粗骨材の粒度構成		
		15-5mm	20-15mm	40-20mm
下流部(15m)	55.0%	20%	30%	50%
中流部(15m)	57.5%	5%	40%	55%
上流部(15m)	60.0%	5%	40%	55%

表-2 実験条件

通水時間	0~20.5時間	20.5~80時間
累積供給砂礫量	0~600m ³	600~3500m ³
流量	0.25m ³ /s	0.50m ³ /s
砂礫供給速度	0.50m ³ /min	0.82m ³ /min
砂礫体積濃度	3.3%	2.7%

表-3 実験時の水理量

		通水初期	通水38時間後	通水80時間後
流量		0.25m ³ /s	0.50m ³ /s	
砂礫供給速度		0.50m ³ /min	0.82m ³ /min	
平均水深	砂礫供給なし	12.40cm	19.33cm	20.6cm
	砂礫供給あり	14.20cm	21.60cm	23.23cm
水路中央部の	砂礫供給なし	3.98m/s	4.69m/s	4.60m/s
平均表面流速	砂礫供給あり	3.29m/s	4.26m/s	3.80m/s

- 平均侵食深(下流部)
- 最大侵食深(下流部)
- 平均侵食深(中流部)
- 最大侵食深(中流部)
- ▲ 平均侵食深(上流部)
- △ 最大侵食深(上流部)

累積供給砂礫量 (m³)

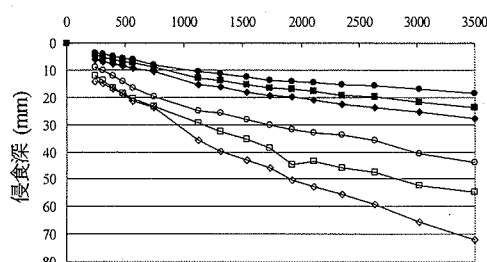


図-2 平均侵食深、最大侵食深と累積供給砂礫

た後に水を止めて行った。これより、多量の流下砂礫によるコンクリート製水路底面の磨耗進展機構を検討する。

表-3に実験時の水理量を示す。砂礫を供給した場合は供給しない場合に比して、砂礫が抵抗として作用し水深・流速とも約15%変化している。通水38時間後と80時間後で水深・流速が変化しているのは、水路底面が侵食を受け凹凸形状が顕著になり(写真-1, 2)、それが抵抗として流れに影響を与えたためであると考えられる。

(2) 水路底面の侵食深とコンクリートの粗骨材率

図-2に平均侵食深、最大侵食深と累積供給砂礫量の関係を示す。コンクリートの粗骨材率が大きいほど、コンクリート底面の磨耗量が小さくなる。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、単位供給砂礫量あたりの平均侵食深の変化が小さくなる。この傾向は、粗骨材率の大きい上流部の最大侵食深の変化についても成り立つが、粗骨材率の小さい下流部では単位供給砂礫量あたりの侵食深の減少はほとんど見られない。図-3に水路底面の侵食深の横断分布を示す。これより、粗骨材率が小さいほど水路中央部の侵食深が大きくなっている。すなわち、横断面形状に見られるように、

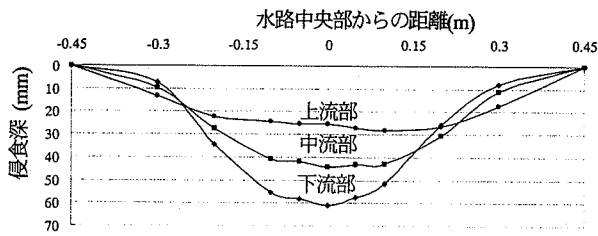


図-3 各区間の侵食深横断分布

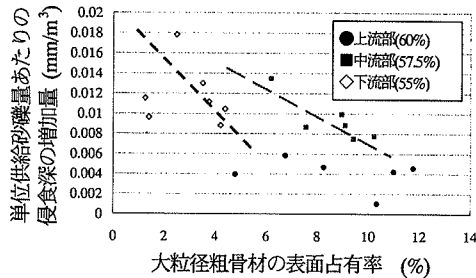


図-4 大粒径粗骨材の表面占有率と最大侵食深増加量

粗骨材率の小さい下流部では礫が水路中央部に集中したことで、水路底面の侵食速度の減少が見られなかったと考えられる。一方、側壁近傍の侵食深は同程度である。

表面モルタルが剥がれ、粗骨材が露出して侵食速度が安定した後の単位供給砂礫量あたりの最大侵食深増加量は以下のようなものである。粗骨材率55%の下流部では $0.0157 \text{ mm}^3/\text{m}^3$ 、粗骨材率57.5%の中流部では $0.0096 \text{ mm}^3/\text{m}^3$ 、粗骨材率60%の上流部では $0.0073 \text{ mm}^3/\text{m}^3$ である。

(3) 水路底面に露出する粗骨材の磨耗抵抗特性

コンクリート製排砂水路を設計する上で、粗骨材の配合から水路底面の磨耗抵抗を推定する必要がある。既往の研究⁹⁾より、供給砂礫量あたりの侵食深の増加量は、大粒径粗骨材(粒径40-20mm)の表面占有率に大きく関係している。そこで、大粒径粗骨材の表面占有率を視点に、大粒径粗骨材の初期割合と水路底面の磨耗抵抗の関係を検討する。コンクリート1 m³中の大粒径粗骨材の占める割合と各区間6断面(計18断面)で調査した累積供給砂礫量3,500m³時点における大粒径粗骨材表面占有率の関係を述べる。粗骨材率55%で、表面占有率が1.2-4.4%、粗骨材率57.5%で6.2-10.2%、粗骨材率60%で4.8-11.8%であり、粗骨材の表面占有率は初期の配合に対応したものとなる。上流部において値にばらつきが見られるのは、水路底面状態がまだ安定していない箇所を含むためである。

図-4に、累積供給砂礫量3,500m³時点の大粒径粗骨材の表面占有率と単位供給砂礫量あたりの侵食深増加量の関係を示す。粗骨材の表面占有率が大きい上流部と中流部において、磨耗されにくいことが明らかとなった。各区間によって関係が異なるのは、外力である礫群の運動状況が異なるためである。この結果より、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倍大きいのは、大粒径粗骨材の配合割合が0.9倍であ

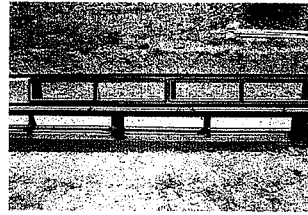


写真-3 撮影区間

表-4 礫群の粒度構成

粒径(mm)	配合割合(%)
20-30	30
30-40	20
40-60	18
60-90	21
90-120	11

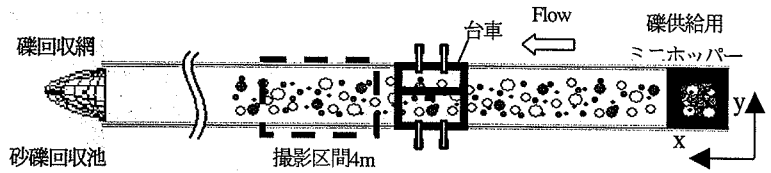


図-5 実験水路の概略図

表-5 各ケースの水量と相当粗度

	Case1	Case2	Case3
礫体積濃度(%)	単粒子	3.6	5.7
平均水深(cm)	20.6	22.9	24.4
断面平均流速(m/s)	3.71	3.28	2.9
相当粗度(cm)	0.31	0.88	2.11

ることから、大粒径粗骨材の表面占有率が約1/3となることが一つの要因であると推定できる。

3. 高速で多量に流下する礫群の運動調査実験

(1) 実験施設及び実験方法

磨耗実験と同一水路での既往の礫群運動調査実験⁹⁾では、磨耗を考える上で重要な要素である鉛直運動について十分明らかにされていない。そこで、下流端から距離20 mの位置から長さ4 mの水路側面を透明なアクリル面(写真-3)に改造することで側面からの観察を可能にし、礫群の運動を3次的に追跡した。礫の粒径は20 mm-120 mmであり、粒度構成は、磨耗実験に準じて、表-4の様に設定されている。運動中の礫を識別し易くするため、礫群を粒径毎に5つのグループに分け、それぞれに着色する。図-5に実験水路の概略図を示す。水路上流端の礫供給用ミニホッパーから投入された礫群の水路内における運動を水路上面と水路側面に設置した9台のデジタルビデオカメラで追跡撮影する。流下した礫群を水路下流端に設置した網で回収し、循環利用することで、礫の条件を常に一定に保った。流量0.5 m³/sの条件下で、礫を1個のみ流下させる場合(以下、単粒子)、礫群を体積濃度3.6%、5.7%の条件で流下させる場合の計3ケースの実験が行われた。ビデオカメラで得られたデジタル画像より、礫群の軌跡を求め、運動特性を明らかにする。

(2) 水深上昇量と相当粗度

表-5に各ケースの水量及び相当粗度を示す。礫群を流水中に投入することにより、水深はCase 2で2.3 cm、Case 3で3.8 cm上昇する。水深上昇の原因が礫の投入による体積増加のみであると考え、Case 2で約0.5 cm、

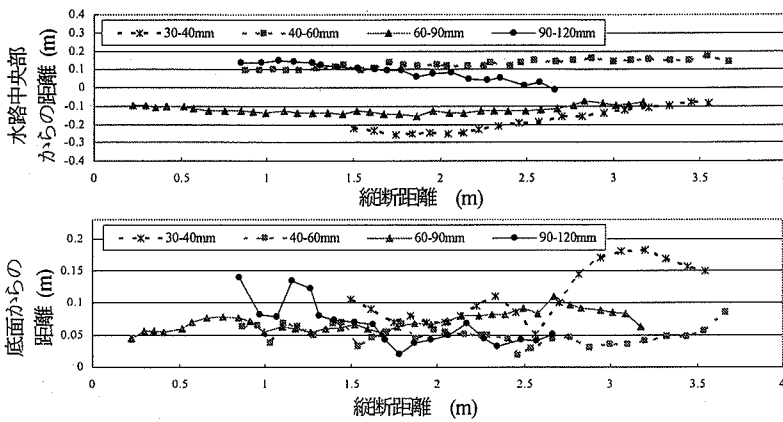


図-6 礫運動の軌跡(上図: xy平面, 下図: xz平面)

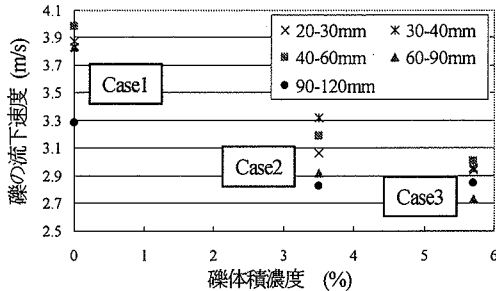


図-7 礫の流下速度と礫体積濃度

Case 3で約0.8 cm上昇する。実験値はその約5倍であり、この増加分が、礫群が流水に及ぼした抵抗であると考えられる。礫群が流水に及ぼす抵抗を、相当粗度 k を用いて評価すると、相当粗度はCase 1に比して、Case 2で約2.8倍、Case 3で約6.8倍になる。ここで用いた相当粗度は断面平均対数型流速分布式より算出している。

(3) 礫の軌跡と流下速度

図-6にCase 3における典型的な礫の軌跡を示す。縦断方向の移動距離に比べて横断方向への移動量は小さい。鉛直方向の運動の変化は大きく、転動と跳躍が混在した運動をする。観察から粒径の大きい礫は変動が小さく他の粒子の影響が小さいという結果が得られた。一方、粒径の小さい礫は、不規則な運動をしている。これは、粒径の大きい礫が流れに対して支配的となり、粒径の小さい礫はその影響を大きく受けながら流下するためであると考えられる。

図-7に各ケースにおける時空間平均した礫の流下速度と礫体積濃度の関係を示す。礫体積濃度が増加すると礫の流下速度は減少する。Case 2とCase 3の結果を比較すると、粒径の大きい礫の流下速度はほとんど変化しないが、粒径の小さい礫は大きく減少し、粒径の大きい礫とほぼ同速度になる。これは、礫群の運動は粒径の大きい礫が支配的となり、粒径の小さい礫はこれに大きく影響されるためである。図-8にCase 2とCase 3における礫の流下速度の鉛直分布を示す。Case 2の場合、底面からの距離が大きくなるにつれて礫の流下速度にばらつきが見られる。これは、底面付近には大量に礫が存在するが、底面からの距離が大きくなるに従って存在する礫の個数

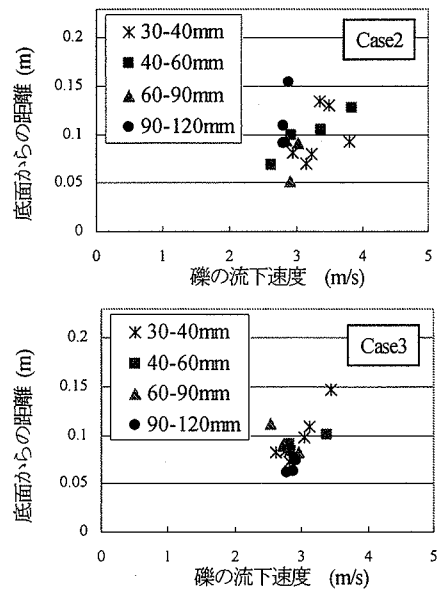


図-8 礫の流下速度の鉛直分布

が減少し、礫の運動の自由度が大きくなるためだと考えられる。Case 3の場合、底面からの距離に依存せず、礫の流下速度はほぼ一定である。これはCase 2に比べ礫の量が増加し、群を成して運動する領域が大きくなるためだと考えられる。以上より、礫群を流下させた場合、礫の速度がほぼ等しくなる礫群の層が存在し、その厚さは礫体積濃度が増加するに従い、大きくなること分かる。

4. 高速で多量に流下する礫群の運動解析

(1) 解析方法

本研究で対象とする礫群は、実験から粒径毎に挙動が異なり、水路中央部の底面付近に礫が集中し、礫同士の衝突が頻繁に発生している。水路底面の磨耗を力学的に評価するには、礫と底面の衝突を解析モデルの中に力学的に取り込む必要がある。本解析では、礫の運動モデルとして粒子の運動過程を個別に扱い、粒子間衝突を考慮できる既存の個別要素法(DEM)⁶⁾を用いる。水路横断方向に対する礫の集中度の違いが、底面磨耗量に大きく影響することから、礫群の運動は3次元的に解析する。

粒子の x_i 方向($i=1\sim 3$)の並進及び y 軸(x_2)方向の回転の運動方程式は式(1),(2)で表され、それらを逐次数値積分することで、礫の運動を追跡する。

$$\begin{aligned} & \rho(s+C_M) \frac{\pi d_p^3}{6} \frac{\partial u_{pi}}{\partial t} \\ &= -\frac{\pi d_p^3}{6} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho(s-1) \frac{\pi d_p^3}{6} g \delta_{21} + \frac{1}{2} \rho C_D \frac{\pi d_p^2}{4} u'_{ri} |u'_{rj}| \\ &+ \frac{1}{2} \rho C_L \frac{\pi d_p^2}{4} u'_{rk} |u'_{rj}| + \rho \frac{\pi d_p^2}{4} u'_{rk} \frac{d}{2} \omega_{p2} + \sum_m \{F_{iINT}\}_m \end{aligned} \quad \dots (1)$$

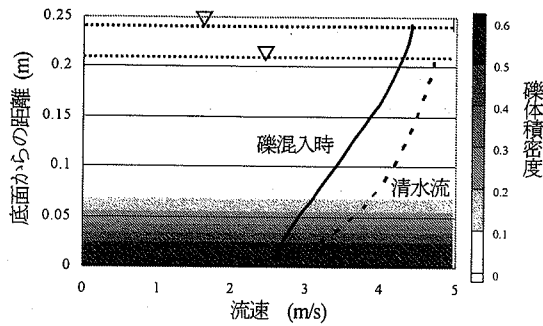


図-9 流速分布と礫の体積密度分布

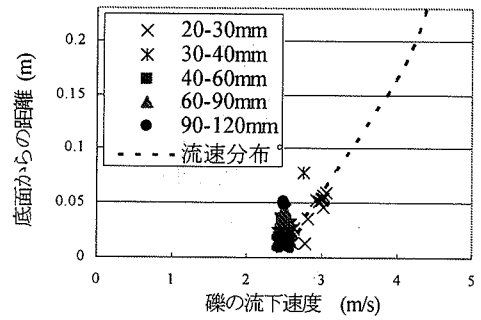


図-10 礫の流下速度の鉛直分布(計算結果)

$$\frac{s\pi d_p^5}{60} \frac{\partial \omega_{p2}}{\partial t} = -\frac{1}{2} C_T \rho \left(\frac{d_p}{2}\right)^5 |\omega_{p2}| \omega_{p2} + \frac{d_p}{2} \sum_m \{F_{sINT}\}_m \dots (2)$$

ここに、 $x_1, x_2, x_3 = x, y, z$, s : 粒子の比重(=2.65), C_M : 付加質量係数(=0.5), δ_{ij} : クロネッカーのデルタ, P : 流体圧力, C_D : 抗力係数(=0.4), C_L : 揚力係数(=0.2), C_T : 粒子の回転に対する粘性抵抗係数(=1.0), u_{ni} : 流体と粒子の x_i 方向の相対速度(= $u_i - u_{pi}$), u_{nj} : 流体と粒子の絶対相対速度(= $\sqrt{\sum u_{ni}^2}$)であり, $i \neq k$ である。

礫同士および底面との衝突力は、各粒子の接点の法線(n)及び接線(s)方向に弾性スプリング(バネ定数 k_m, k_s)及び粘性ダッシュポット(粘性定数 η_m, η_s)を配置して、相互作用を表現する。非粘性材料を対象とすることから、法線方向には粒子間の引張抗力を認めないジョイントと接線方向には一定の限界を超える力が作用すると滑動するジョイントをそれぞれ配置する⁹⁾。

流体は、礫群が混入することで、流れの構造が変化するため、粒子・流体間の相互作用を考慮する必要がある。本研究では砂礫の大きさ(体積)のみを考慮し、礫の形状を形状抵抗項として考える、内田ら⁷⁾のモデルを用いる。ここで、底面磨耗を考える上では、礫群が集中する水路中央部のみを考えれば良い為、横断方向の流れの変化は小さいと仮定し、流体解析を鉛直2次元面内で行う。

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。

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

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

ここに、

$$F_i = \frac{1}{V_{CV}} \sum_m \left[\left(\frac{1}{2} C_D \frac{\pi d^2}{4} u'_{ri} |u'_{rj}| + \frac{1}{2} C_L \frac{\pi d^2}{4} u'_{rk} |u'_{rj}| \right) \cdot s_k \right]$$

であり、 $x_1, x_3 = x, z$, V' : 流体の体積占有率, A'_i : x_i 面における流体の面積占有率, V_{CV} : 格子体積, s_k : 計算セル内

に含まれる粒子 k 番目の占有率である。解析モデルの詳細については、既報の論文⁷⁾と同様であるので、ここでは省略する。スマゴリンスキー定数 C_s は0.3とする。

簡便のために、まず流れに対して相対的に固定された混入砂礫がある流れ場を計算し、次にその流れ場を所与として粒子群の追跡計算を行った。このため、動的な相互干渉まで考慮した解析にはまだ至っていない。実験の礫体積平均濃度3.6%の場合を計算対象とした。水路横断幅は実験水路中央部40cmとし、横断面形状は実験水路の撮影区間の平均的な形状を縦断方向に一樣に与える。実際の水路底面は粗骨材の露出により複雑な凹凸形状をしているが、本解析では水路底面に粒径40mmの礫を横断方向20mm間隔に敷き詰めた一樣な状態とした。

(2) 解析結果

図-9に清水流時と礫混入時の流速分布、礫の体積密度分布を示す。ほとんどの礫が存在する水路底面付近で大きく変化し、流速がほぼ一樣となっている。この流速が一樣化する層の厚さは約4cmで、その領域における局所的な礫体積濃度は30%以上である。

図-10に礫の流下速度の鉛直分布を示す。ほとんどの礫が存在する水路底面付近では礫の運動の自由度が小さくなるため、底面付近では流下速度が粒径に依存せず、ほぼ一樣になる。その領域での流体との相対速度差は0.2~0.3m/sであり、層の厚さは流速分布が一樣化する層の厚さにはほぼ等しい。

5. 流下砂礫群の運動と水路底面の磨耗量

(1) 解析方法

流下砂礫群の運動と水路底面の磨耗の関係を力学的に定量評価することが望ましいが、コンクリートの磨耗に関する力学的破壊機構は未だ明瞭でない。

本磨耗実験より、水路横断面形状が水路底面の侵食速度に大きく影響していることが明らかとなった。本研究では水路横断面形状の違いによる礫群の水路中央部への

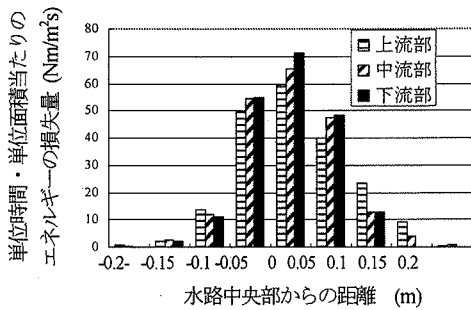


図-11 底面との衝突によるエネルギー損失量の横断分布

集中状況を評価し、礫群が底面との衝突の際に失ったエネルギー量と水路底面の磨耗量との関連性について考察を行った。

水路横断面形状には、累積供給砂礫量 3,500m³時における実験水路の上流・中流・下流の各区間の縦断平均水路形状をそれぞれに一樣に与える。流下させる礫の粒径は磨耗に影響する15 mm-200 mmとする。ただし、礫群全体量の1/3を占めている15 mm以下の礫の流体への影響を考慮するため、流体の混合が見かけ上大きくなるように、スマゴリンスキー定数Csを0.30から0.35に変更して計算を行った。

(2) 礫群の底面に与えるエネルギーと底面磨耗量

礫群が底面との衝突で失うエネルギー量は、礫群が底面と衝突するとき生じる力による仕事率を衝突時間で積分することによって求める。

図-11に礫の単位時間・単位面積あたりのエネルギー損失量の横断分布を示す。水路中央部の侵食深が大きい下流部ほど、礫群が水路中央部に集中し、底面との衝突によって失うエネルギー量が大きくなる。磨耗実験において、下流区間が上流区間より侵食安定後に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、底面との衝突で礫群が失うエネルギー量が約1.15倍になることが一つの要因であると考えられる。

6. 結論と課題

本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- 異なる粗骨材率の底面に対する磨耗実験より、侵食安定後の単位供給砂礫量あたりの最大侵食深増加量を求めた。コンクリートの粒径粗骨材の表面占有率が大きくなると、底面の磨耗抵抗が大きくなる。
- デジタルビデオカメラを用いて礫群の運動を3次元的に測定し、礫群の運動特性を明らかにした。礫群は跳躍と転動が混在した鉛直運動を行っており、横断方向への移動は小さい。また、礫群は水路底層を

集団となって流下するものが多く、粒径の大きな礫がこの集団の運動に対して支配的である。

- 礫群の体積密度と形状抵抗を考慮した流体モデルと個別要素法による礫運動モデルを用いて、礫群の運動解析を行い、礫群の運動機構を明らかにした。解析より、礫群と底面の衝突によるエネルギー損失を見積もり、底面磨耗量との関係を考察した。下流部での磨耗量が大きい原因として、コンクリート粗骨材の他に、磨耗部の集中に伴う流れ及び流下砂礫群の集中の影響があったと考えられる。

本研究では、流下砂礫群の運動と水路底面の磨耗量の関係を直接評価するに至っていない。本研究では流下砂礫群の運動と底面磨耗量の関連について、エネルギー損失量を用いて評価した。磨耗量を推算する上で重要となるのは、衝撃力及び磨耗力であると考えられる。しかし、衝撃力及び磨耗力がそれぞれ底面に及ぼす影響は明らかにされていないため、水路底面に粗骨材が露出した時の水路底面の磨耗抵抗をコンクリートの強度試験等の結果を用いて、定量的に評価する必要がある。

本研究で得られた高速で多量に流下する礫の運動機構の知見および磨耗実験の結果は排砂水路設計の方向を示すもので貴重なものとする。今後上記に示すような検討を行うことで、本研究の磨耗実験を定量的に評価することにより、排砂水路設計技術の進展に寄与できるものとする。

参考文献

- 橋本徳昭：ダムにおける新たな土砂管理・環境保全技術 ダムと自然の共生：旭ダムバイパス放流設備の運用，土木学会誌，第86巻5号，pp59-61，2001。
- 例えば、石橋毅：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第 334 号，1983。
- 福岡捷二，森田義則，藤原博昭，萬矢敦啓：大量砂礫を伴う洪水流による仮排水路トンネルインパートの侵食蛇行，河川技術に関する論文集，第5巻，pp183-188，1999。
- 福岡捷二，渡邊高士，小林正幸，名尾耕司：多量の流送砂礫によるコンクリート製排砂水路底面の侵食，蛇行に関する実験的研究，河川技術に関する論文集，第6巻，pp363-368，2000。
- 福岡捷二，篠原康寛，正木文也，重村一馬，藤堂正樹，岡田将治，齊藤一正：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，pp1135-1140，2004。
- 例えば、後藤仁志，Abbas Yeganeh-Bakhtiyari，酒井哲郎：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，pp17-26，2000。
- 内田龍彦，福岡捷二：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。

(2005. 4. 7 受付)