

排砂水路底面の磨耗進展機構の実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY ON THE DEVELOPMENT MECHANISM OF ABRASION
IN A CONCRETE CHANNEL INVERT DUE TO FLUSHING SEDIMENT-LADEN FLOW

福岡捷二¹・篠原康寛²・正木丈也³・重村一馬⁴・藤堂正樹⁵・岡田将治⁶・斉藤一正⁷

Shoji FUKUOKA, Yasuhiro SHINOHARA, Joya MASAKI, Kazuma SHIGEMURA
Masaki TODO, Shoji OKADA and Kazumasa SAITO

¹フェロー会員 Ph. D 工博 広島大学大学院 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)

²学生会員 広島大学大学院 工学研究科 博士課程前期 社会環境システム専攻 (同上)

³正会員 西松建設(株)横浜支店地下鉄富士見ヶ丘出張所 (〒224-0066 神奈川県横浜市都筑区見花山3-70)

⁴学生会員 広島大学大学院 工学研究科 博士課程前期 社会環境システム専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

⁵正会員 工修 広島大学大学院 工学研究科 博士課程後期 社会環境システム専攻 (同上)

⁶正会員 工博 中央大学 助手 理工学部 土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

⁷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 invert of concrete channels for removing deposited sediment in a reservoir receives severe abrasion from flowing gravels and boulders. Therefore, it is important to reveal abrasion mechanism. In this paper, abrasion by supplying gravels and boulders in an experimental channel and motion of gravel are studied by two large flumes. Result of surveying abrasion depth for every section which is different from the rate of coarse aggregate to total aggregate reveals the relation between the rate of coarse aggregate to total aggregate and abrasion resistance of the invert. Wavy bed is formed on the concrete invert and the wave length is approximately equal to step length of gravels that have average particle diameter of supplying gravels. By supplying gravels and boulders, roughness coefficient of the channel increases about forty percent compared to non-sediment laden flow.

Key Words: *sediment flushing channel, abrasion, the rate of coarse aggregate to total aggregate, roughness coefficient, motion form of gravel*

1. 序論

ダム貯水池は、利水や治水の面で人々に大きな効用をもたらしてきた。近年、ダムが自然環境や生態系等へ悪影響をもたらす理由から、ダム建設が困難な状況が生じているが、国土が狭く大半が山地の日本では、治水や水資源確保の面でダムは必要不可欠なものである。ダムが抱える問題の一つに堆砂問題がある。堆砂は、ダムの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、貯水池内の濁水長期化等の様々な問題を引き起こす。この堆砂問題の対策として、排砂施設の設置が検討されている。排砂施設は、コンクリートを用いて建造されることが多いが、多量の土砂の流下によってコンクリート底面が侵食を受け、その機能とともに維持管理といった問題が生じる。排砂施設の設計や維持管理を適切に行うためには、砂礫の流下によるコンクリート製水路底面の侵食機構を解明する必要がある。

これまで、コンクリートの磨耗・侵食についての研究は数多く行われてきたが^{1)~3)}、実際のコンクリート水路において

発生す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なっていない。そこで、福岡ら⁴⁾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の調査を行い、侵食発生機構を考察し、また今後の研究課題を示した。福岡・小林ら⁵⁾は、温井ダム湛水池内に建造した実際の排砂水路を想定したコンクリート製実験水路を用い、多量の流下砂礫を流下させ、底面の侵食・蛇行の機構の評価を試みた。

本研究では、排砂水路を想定したコンクリート製水路を用い、水路底面の侵食機構を検討することを目的とし、実験を2種類行なった。第一は、温井ダム湛水池内に建造したコンクリート製水路を用いて、文献5)の実験を引き続き行い(以下、温井実験と呼ぶ)、水路底面の侵食形態及び水深がかなり小さい時の固液二相流れを検討する。第二は、排砂水路の設計条件の資料を得るために灰塚ダム湛水池内に建造したコンクリート製水路を用いた実験である(以下、灰塚実験と呼ぶ)。ここでは、水路底面の侵食機構に及ぼす諸因子の影響を検討する。また、この実験条件における流下砂礫の運動形態を調査し、水路底面の侵食機構を検討する。

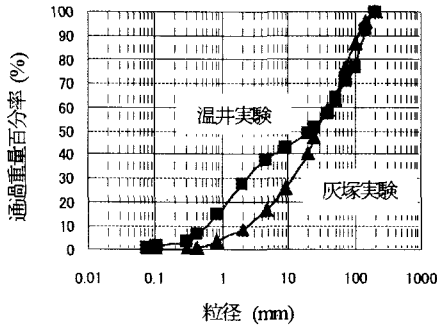


図-1 供給砂礫粒度分布

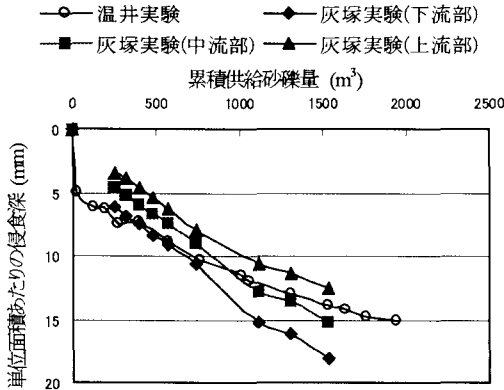


図-2 単位面積あたりの侵食深と累積供給砂礫量

表-1 水路コンクリートの配合

	粗骨材率	水セメント比	圧縮強度	粗骨材の粒度構成			
				15-5mm	20-15mm	40-20mm	
温井実験	56.0%	65%	28.3N/mm ²	20%	30%	50%	
灰塚実験	下流部(15m)	55.0%	57%	32.7N/mm ²	20%	30%	50%
	中流部(15m)	57.5%	57%	34.3N/mm ²	5%	40%	55%
	上流部(15m)	60.0%	57%	29.6N/mm ²	5%	40%	55%

表-2 実験条件

	温井実験		灰塚実験	
	0~9時間	9~92時間	0~20.5時間	20.5~38.5時間
累積供給砂礫量	0~124m ³	124~2129m ³	0~600m ³	600~1535m ³
流量	0.15m ³ /s	0.15m ³ /s	0.25m ³ /s	0.50m ³ /s
砂礫供給速度	0.21m ³ /min	0.41m ³ /min	0.50m ³ /min	0.88m ³ /min
砂礫体積濃度	2.30%	4.60%	3.30%	2.90%

表-3 実験の水量測定結果

	温井実験		灰塚実験	
	通水初期	通水92時間後	通水初期	通水38時間後
流量	0.15m ³ /s	0.15m ³ /s	0.25m ³ /s	0.50m ³ /s
砂礫供給速度	0.21m ³ /min	0.41m ³ /min	0.50m ³ /min	0.88m ³ /min
平均水深	砂礫供給なし	4.15cm	5.38cm	12.40cm
	砂礫供給あり	4.66cm	6.15cm	14.20cm
水路中央部の平均表面流速	砂礫供給なし	3.47m/s	2.95m/s	3.98m/s
	砂礫供給あり	3.22m/s	2.45m/s	3.29m/s

2. 温井水路実験

(1) 実験施設と実験方法

1999年度に行った実験⁵⁾に引き続き、同じ水路を用いて実験を行った。実験水路は、水路長32.8m、水路幅1.0m、水路勾配1/20で、水路横断面形状は矩形断面である。表-1に水路コンクリートの配合を示す。コンクリートの配合は標準的なものとし、水路全体に一様である。

水路上流端より水と多量の砂礫を流下させることによって、コンクリート水路底面に発生する侵食・蛇行、粗骨材の露出状況及び流下砂礫周囲の流れ場を調査した。供給砂礫には滝山川の高水敷河床材料を用いた。図-1に供給砂礫の粒度分布を示す。平均粒径は約45mm、最大粒径は約200mmである。表-2に実験条件を示す。実験は通水92時間で累積供給砂礫量2129m³まで行った。水路底面の侵食深及び粗骨材の露出状況の経時変化の測定は一定時間通水を行った後に水を止めて行い、この過程を繰り返すことにより、多量の流送砂礫によるコンクリート製水路底面の侵食・蛇行の機構を明らかにする。

表-3に水量測定結果を示す。通水初期と92時間後で水深・流速が変化したのは、水路底面が侵食を受け凹凸形状が顕著になり、それが抵抗として流れに影響を与えたためである。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%変化する。

(2) 水路底面の侵食深と粗骨材の露出状況

図-2に単位面積あたりの侵食深と累積供給砂礫量の関係を示す。写真-1に下流端から18mの左岸近傍における累積供給砂礫量567m³、1008m³、2129m³時点の水路底面状態を示す。図-2より、累積供給砂礫量が約1400m³を超えると、単位供給砂礫量あたりの侵食深(mm/m³)が変化し、その後ほぼ一定で推移する。この時、累積供給砂礫量1008m³、2129m³時点の水路底面写真を見ると、水路底面の粗骨材の露出状況がそれほど変わらない。よって、水路底面の粗骨材の露出状況が変化しなくなると、単位供給砂礫量あたりの侵食深が一定に推移することが分かる。

(3) 水路底面の形状変化

図-4に累積供給砂礫量566m³、2129m³時点の侵食深コンターを示す。これより、水路底面の組成がほぼ変わらないコンクリート底面では、侵食は最初水路上流側から進行し、徐々に下流側に伝播することが分かる。そして、通水を重ね、累積供給砂礫量2129m³時点では、上流部と下流部の侵食深がほぼ同じになる。これは、上流部は水路底面上に粗骨材が露出するのが早く、粗骨材が抵抗として作用し、侵食の進行が遅くなったためであると考えられる。

図-4より、水路底面が深く侵食されている箇所とあまり侵食されていない箇所が縦断的に交互に存在しており、波打ち形状が見られる。この形状は、経時的に変化しておらず、この波状侵食の波長は1.2~2.0mである。また、水路底面上に波長7~8mの水平方向の蛇行形状が見られた。これは、水深がかなり小さいため、大きい礫がつくる背後渦の発生により、礫の横断方向の移動量が大きくなるためである。

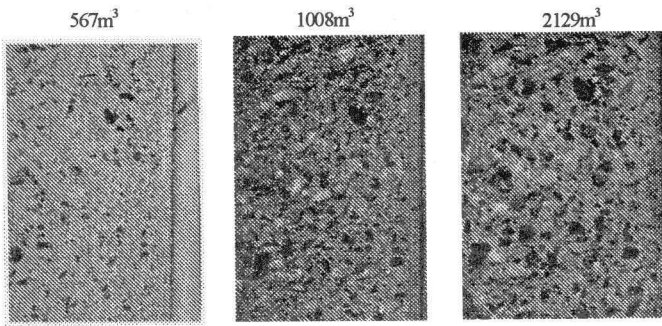


写真-1 水路底面の状態変化
(温井実験, 下流からの距離 18m 左岸近傍)

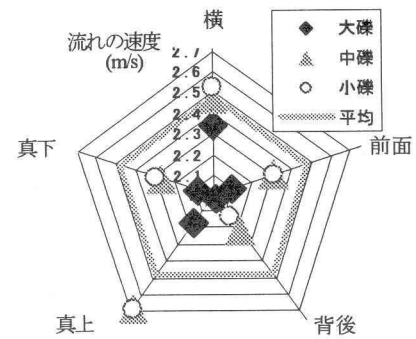


図-3 砂礫周辺の流速場

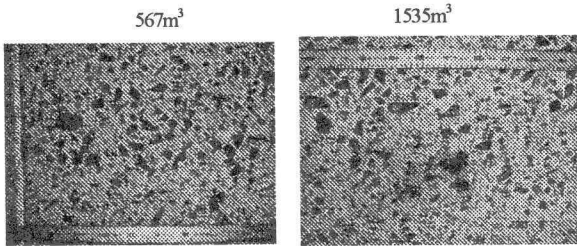


写真-2 水路底面の状態変化
(灰塚実験, 下流からの距離 10m 水路中央)

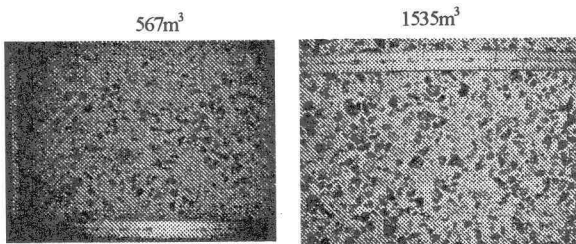


写真-3 水路底面の状態変化
(灰塚実験, 下流からの距離 31m 水路中央)

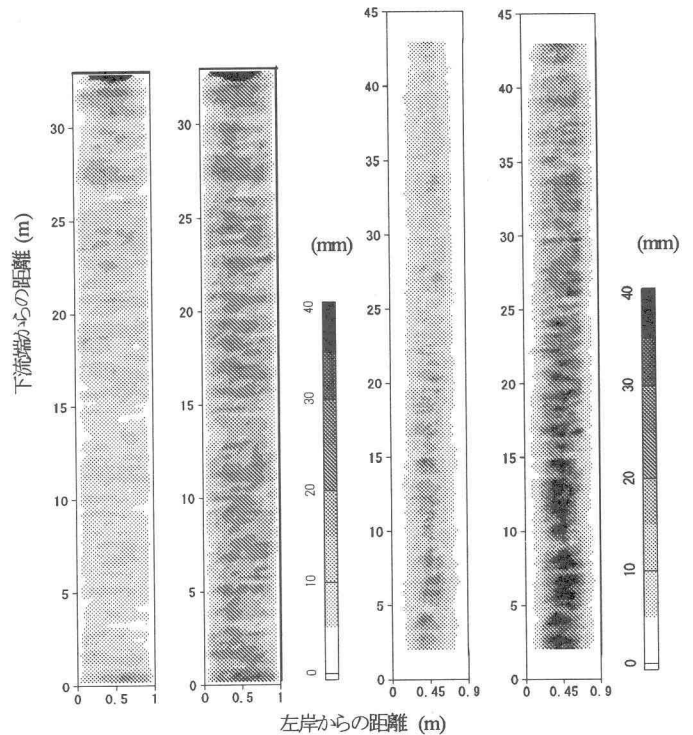


図-4 底面侵食深コンター
(温井実験)

図-5 底面侵食深コンター
(灰塚実験)

(4) 流下砂礫周囲の流れ

固液二相流れを解明する基礎として、砂礫周囲の流れを検討する。多量の砂礫を流送する流れ場の水の挙動を、比重 1.0 程度のトレーサーを用いて、ビデオ撮影により調べた。測定区間距離は 2m であるが、最大 3m/s、最小 1.5m/s であり、砂礫供給による流速の変動幅は非常に大きい。

礫周囲の位置(礫の真上、背後等)で流れの流速がどのように異なるかを図-3 に示し、礫が周囲の流れに与える影響を考察する。礫の粒径の大きさによって、周囲の流れに与える影響が異なることから、粒径を 3 通りに分類した。小礫群は 50mm 程度、中礫群は 50mm~100mm 程度、大礫群は 100mm 以上の粒径である。礫の粒径の増大に伴い周囲の流れの流速が小さくなるのがわかる。礫の横を通過する流れは、礫の粒径の増大に伴う減速が比較的小さい。これは断面面積の減少による加速のためである。礫の真下及び背後においては最も減速が大きくなる。礫の真上については、大礫の場合、流れがよどむため大きな減速が見られるが、粒径が中礫以下の場合、上流からの慣性力のためにその影響を受ける前に通過する。

3. 灰塚水路実験

(1) 実験施設と実験方法

2002 年度から灰塚ダム湛水池内に建造したコンクリート製大型水路を用いて同様の実験を行った。図-6 に灰塚実験の実験施設の概略及び水路諸元を示す。水路下流端に貯水池を設置し、水を循環利用する。水路上流端に砂礫供給用のホッパーを、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を設置した。実験の狙いは、現在の仮排水路トンネルを排砂トンネルとしても用いるために必要な設計条件を明らかにすることであり、このため仮排水路トンネルを想定し、水路横断面形状を馬蹄形断面とした。図-1 と表-1~3 に灰塚実験の諸条件を併記する。コンクリートの配合、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 ずつ 3 区間で、異なる配合の

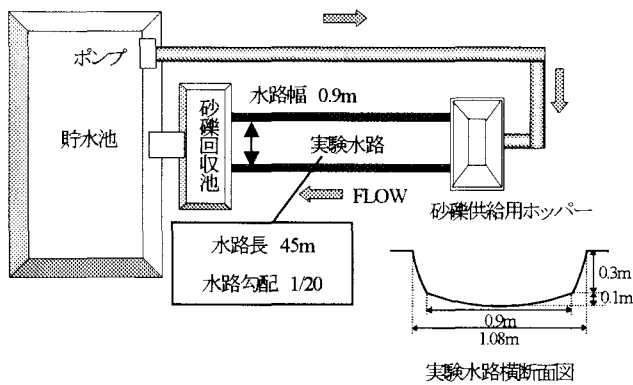


図-6 実験施設の平面図

コンクリートを打設した。水路の上流部は粗骨材率が最も大きく、下流部は最も小さい配合である。下流部は温井実験とほぼ同じ配合である。粗骨材の粒度構成は下流部を標準的な配合としたが、中流部と上流部は粒径の小さい粗骨材量を少なくした。これは、粒径の小さい粗骨材の割合を小さくすることによって、コンクリートの磨耗強度の増大が期待できるためである。供給砂礫には上下川の高水敷河床材料を用いた。粒度分布は温井実験と小粒径の割合が多少異なるが、侵食への影響が大きいと考えられる大粒径の分布がほぼ同じであるため、同一のものを使用したと考える事ができる。実験は通水 38 時間半で累積供給砂礫量 1535m^3 である。流量と砂礫供給速度を 20.5 時間以降大きくしたのは、水深を大きくすることで、実際の排砂水路の流れに近づけること、また同量の砂礫を供給する際、砂礫体積濃度及び砂礫移動速度の違いによって底面の侵食がどのように変化するかを検査するためである。

水路底面の侵食深と粗骨材の露出状況の測定は温井実験と同様に行い、水路諸元や骨材配合等の諸因子の違いが水路底面の侵食機構に及ぼす影響を検討する。また、流下砂礫の運動形態と水路底面の侵食の関係を検討する。

(2) 水路底面の侵食深とコンクリートの粗骨材率

コンクリートの粗骨材率によって水路底面の侵食量がどのように異なるかを検討した。図-2 より、水路底面の侵食深は粗骨材率の最も小さい下流部で最も大きく、粗骨材率が大きくなる中流部、上流部にいくほど、侵食深は小さくなる。この事により、コンクリートの粗骨材率を大きくするほど、コンクリート底面の磨耗に対する抵抗が大きくなる事がわかる。

水路底面をモルタルが大部分を占める段階(A)と粗骨材が露出し水路底面状態がそれほど変化しなくなった段階(B)における単位供給砂礫量あたりの侵食深の違いを検討する。下流部は A 段階では $0.025\text{mm}/\text{m}^3$ 、B 段階では $0.012\text{mm}/\text{m}^3$ であり、減少割合は約 50% である。一方、上流部は A 段階では $0.014\text{mm}/\text{m}^3$ 、B 段階では $0.005\text{mm}/\text{m}^3$ であり、減少割合は約 65% となり、下流部より減少割合が大きい。この事について水路底面状態の変化から検討する。写真-2、3 に下流端から 10m 付近(下流部)、31m 付近(上流部)における累

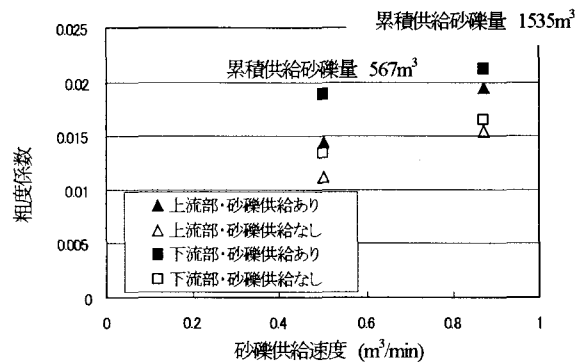


図-7 砂礫供給速度と粗度係数

積供給砂礫量 567m^3 、 1535m^3 時点の水路底面の状態を示す。累積供給砂礫量 1535m^3 時点の水路底面を見ると、上流部の方が粒径の大きい粗骨材が多く見られる。よって、粗骨材率が大きいと粒径の大きい粗骨材が多くなるため侵食に対する抵抗が大きくなり、侵食の進行が遅くなる。

(3) 水路底面の形状変化

図-5 に累積供給砂礫量 567m^3 、 1535m^3 の時点の侵食深カウンターを示す。これより、温井実験で見られたと同様に縦断方向に波打つ形状が見られる。この形状は経時的にはほとんど変化しなく、この波状侵食の波長は $1.2\text{m} \sim 2.0\text{m}$ である。しかし、蛇行形状はほとんど見られなかった。

(4) 粗度係数

図-7 に上流部と下流部における砂礫供給速度と粗度係数の関係を示す。水理量には、累積供給砂礫量 567m^3 、 1535m^3 の時の値を用いた。砂礫供給なしの場合の砂礫供給速度には、砂礫供給ありの場合の値を用いて図に示した。一般的に知られているコンクリート水路の粗度係数は $0.011 \sim 0.015$ である。砂礫供給なしの上流部と下流部を比較すると、累積供給砂礫量 567m^3 の時には下流部は上流部より 2 割程度増加し、 1535m^3 の時には 1 割程度増加する。これは、写真-2、3 を見ても分かるように、水路底面上の粗骨材の占有割合の違いがあり、累積供給砂礫量 567m^3 の時は 1535m^3 の時に比べて粗骨材の占有割合の差が大きく、底面粗度の増加割合が大きくなったと考えられる。次に、砂礫供給ありとなしの場合を比較すると、砂礫供給ありの方が砂礫供給なしより 3~4 割程度増加する。これは、上記で述べた底面粗度の影響より増加割合がはるかに大きい。これは、大量の砂礫が水路底面付近を流れ、水と礫の相対速度が大きく、砂礫の抵抗が大きき効いているためである。

4. 灰塚水路実験と温井水路実験の比較

(1) 砂礫群の流下形態

灰塚実験と温井実験の水理量で大きく違うのは、水深である。温井実験では、水深が $4.5 \sim 6.0\text{cm}$ 程度とかなり低く、その中を大小の礫が混在し流れている。この水路では、平

表-4 流下砂礫の跳躍運動のビデオ分析結果

粒径 (mm)	平均移動速度 (m/s)	平均衝突回数 (回/m)	跳躍時間 T(s)	跳躍距離 L(m)
100	2.45	1.20	0.34	0.83
50	2.64	0.97	0.39	1.03
30	2.80	0.67	0.53	1.50

均粒径以上の礫の上面が水面より露出して跳躍または転動しながら流れており、礫の背後に強い渦が生じ、その影響で大小の礫が横断方向にも活発に移動する。一方、灰塚実験では流量 $0.25\text{m}^3/\text{s}$ の場合、水深が約 14cm と比較的大きかったため、礫のほとんどは水中を移動し、背後の渦はそれほど強いものにならない。また、水路は馬蹄形断面であるため砂礫が水路中央部に集中することにより、礫の横断方向の移動量は少ない。灰塚実験の流量 $0.50\text{m}^3/\text{s}$ の場合は、水深が供給砂礫の最大粒径より大きい約 21.5cm である。この場合、重量(粒径)の大きい礫は水路底面付近を流れ、重量(粒径)の小さい礫は大きい礫との衝突で巻き上げられることにより水面付近を流れ、粒径ごとに流下位置が異なる流れとなる。ここで、流量 $0.25\text{m}^3/\text{s}$ と $0.50\text{m}^3/\text{s}$ の流れの粗度係数の違いについて図-7 を用いて検討する。砂礫供給ありの砂礫供給速度 $0.50\text{m}^3/\text{min}$ と $0.88\text{m}^3/\text{min}$ の時の粗度係数を比較すると、底面粗度にあまり変化がない下流部で後者は前者より 1 割程度増加する。これは、水路底面付近を多くの礫が衝突しあつて、しかも流体に相対速度を持って流れるため、抵抗がより大きくなると考えられる。

(2) 水路底面の侵食深と粗骨材の露出状況

粗骨材率がほぼ同じである温井実験と灰塚実験の下流部を比較すると、図-2 より侵食深がほぼ同じである。温井実験は累積供給砂礫量が約 1400m^3 を超えると、水路底面状態がそれほど変化しなく、単位供給砂礫量あたりの侵食深は一定に推移する。一方、灰塚実験は水路底面状態がそれほど変化しない段階に至っているが、単位供給砂礫量あたりの侵食深が一定に推移するとは判断できない。それは、累積供給砂礫量 600m^3 を境に流量・砂礫供給速度を増加させたため、単位供給砂礫量あたりの侵食深は大きくなり、どの段階で一定に推移し始めたかが判断できないからである。

(3) 水路底面の形状変化

温井実験では、水路底面の侵食は最初水路上流側から進行し、徐々に下流側に伝播する形態であった。一方、灰塚実験ではコンクリートの粗骨材率の影響が大きく、上記のように上流から侵食が進行しない。

縦断的な波打ち形状は、温井実験、灰塚実験共に発生し、この波状侵食の波長は共に $1.2\sim 2.0\text{m}$ であった。流量・砂礫移動速度が大きくなると、流下砂礫の跳躍距離が大きくなり波状侵食の周期が変化すると予想されたが、差は生じていない。これは、灰塚実験の流量 $0.25\text{m}^3/\text{s}$ では、水中で広範囲の礫が混在した流れであり、水路底面付近での粒子間の

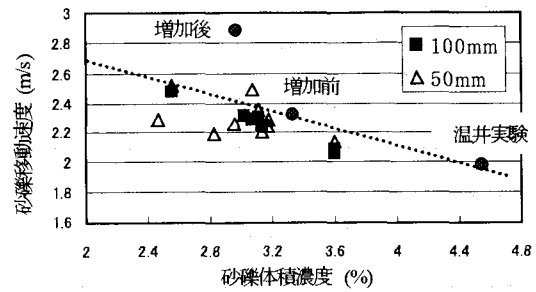


図-8 砂礫体積濃度と砂礫移動速度

衝突回数が多くなり、流下砂礫の跳躍距離があまり変化しなかったと考えられる。

蛇行形状は、温井実験では見られたが、灰塚実験では見られなかった。これは、灰塚実験では、水深の影響による礫がつくる背後渦の発生がほとんどなく、また水路が馬蹄形断面であることで、礫の横断方向の移動が小さいためである。

5. 流下砂礫の運動と水路底面の侵食状況

本章では、以下に示す実験条件の検討範囲内における流下砂礫の運動と水路底面の侵食状況の関係を検討する。

実験条件：水路勾配 $1/20$ 、底面の粗度係数 $0.01\sim 0.02$ 、砂礫体積濃度 $3\sim 5\%$ 、径深 $0.04\sim 0.15\text{m}$ 、流下砂礫の平均粒径 45mm 、最大粒径 200mm

(1) 流下砂礫の跳躍運動調査結果

流下砂礫の運動を調査するために、灰塚実験(流量 $0.25\text{m}^3/\text{s}$)において、粒径 $100, 50, 30\text{mm}$ の礫を追跡撮影した。3種類の粒径の礫は跳躍運動しながら流下することから、ビデオ画像解析により、礫の平均移動速度、水路底面との平均衝突回数を調べ、跳躍時間、跳躍距離を求めた。表-4 に調査結果を示す。粒径の大きい礫の方が跳躍時間、跳躍距離ともに短い。ここで、水路底面の縦断的な波状侵食の周期 $1.2\sim 2.0\text{m}$ と比較すると、粒径 30mm の礫の跳躍距離と一致しており、粒径 50mm の礫ともあまり違ってはいない。供給砂礫の平均粒径が 45mm であることより、水路底面の縦断的な波状侵食の周期は、平均粒径付近の礫の跳躍距離でほぼ決まると考えられるが、今後詳細に観測し検討する。

(2) 砂礫体積濃度と砂礫移動速度

本節では、灰塚実験の流量 $0.25\text{m}^3/\text{s}$ における砂礫体積濃度と砂礫移動速度の関係を検討する。調査方法は、砂礫供給ホッパーを撮影した画像から 1 秒間に供給された砂礫量を求め、またその砂礫群内のある礫が砂礫供給ホッパーから 21m 離れた地点に到達するまでの砂礫平均移動速度を計測する。図-8 に 1 秒間に供給された砂礫量から算出した砂礫体積濃度とその濃度の中で流下する砂礫移動速度の関係を示す。粒径 100mm の礫は、砂礫体積濃度が大きいほど、砂礫移動速度が小さくなるという線形関係が成り立つ。一方、粒径 50mm の礫は、同様の線形関係がほぼ成り立つ

表-5 実験条件・砂礫移動速度の比較

	温井実験	灰塚実験	
		流量・砂礫供給速度増加前	流量・砂礫供給速度増加後
流量	0.15m ³ /s	0.25m ³ /s	0.50m ³ /s
砂礫供給速度	0.41m ³ /min	0.50m ³ /min	0.87m ³ /min
砂礫体積濃度	4.60%	3.30%	2.90%
砂礫移動速度 (粒径50mm)	2m/s	2.35m/s	2.87m/s

が、粒径 100mm の礫に比してばらつきがみられる。これは、粒径が小さいほど周囲に流れる砂礫群の影響を受けやすくなるためである。水路底面の縦断的な波状侵食の波長は、周囲に流れる砂礫群の影響を受けやすい平均粒径(約 45mm)付近の礫の跳躍距離で決まることを踏まえ、流下砂礫群の挙動を把握することは重要である。つまり、粒径ごとの礫の干渉の程度、水深方向の砂礫体積濃度と粒度構成の分布等を定量的に調査し明らかにする必要がある。

(3) 砂礫体積濃度、砂礫移動速度と侵食深の関係

本節では、同量の砂礫を供給する際、砂礫体積濃度及び砂礫移動速度によって水路底面の侵食がどのように変化するかを検討する。灰塚実験は累積供給砂礫量 600m³を境に流量と砂礫供給速度を増加させた。表-5 に温井実験、灰塚実験の流量・砂礫供給速度増加前後(以下、増加前・増加後と呼ぶ)の状況を示す。砂礫移動速度には、礫が水面下を流下し、また平均粒径とほぼ同じ粒径 50mm の値を用いる。

図-2 より累積供給砂礫量 700m³までは、温井実験と灰塚実験の下流部で単位供給砂礫量あたりの侵食深がほぼ同じであるが、それ以降、灰塚実験の下流部の方が単位供給砂礫量あたりの侵食深が約 2 倍になる。これは、水深と砂礫供給速度を増加させたことによって、砂礫群の流下形態が変化したためと考えられる。そこで、各条件下の砂礫体積濃度と砂礫移動速度の関係を、図-8 を用いて検討する。底面の単位供給砂礫量あたりの侵食深がほぼ同じである温井実験と増加前の砂礫体積濃度と砂礫移動速度の関係は、(2)で明らかとなった線形関係をほぼ満たしている。一方、温井実験より単位供給砂礫量あたりの侵食深が大きい増加後は、線形関係を示す線より大きく上に外れる。以上の結果より、各条件下での砂礫体積濃度と砂礫移動速度の関係が、(2)で明らかとなった線形関係を満たす時、単位供給砂礫量あたりの侵食深がほぼ同じになるといえる。

(4) 本検討の問題点と今後の調査の方向性

本章では、最初に示した検討範囲内における流下砂礫の運動と水路底面の侵食状況の関係を検討した。しかし、実験条件が変われば、砂礫群の流下形態、砂礫体積濃度と砂礫移動速度の関係も異なる。よって、今後、本研究で得られた知見が適用可能な実験条件の範囲を検討し、また、適用できない時の流下砂礫の運動を調査し、水路底面の侵食状況との関係を検討することが重要である。

6. 結論と課題

本研究では、砂礫の流下形態が異なる2つの水路実験を行い、コンクリート底面の侵食機構について検討した。また、砂礫の運動形態を調べ、これと底面の侵食の関係を検討した。以下に本実験の検討範囲内で得られた知見を示す。

- 水路底面は縦断方向に波打つ侵食形状をとる。この侵食の波長は、1.2m～2.0m であり、この波長は供給砂礫の平均粒径付近の跳躍距離とほぼ等しい。
- コンクリートの磨耗に対する抵抗は、粗骨材率が大きくなるほど大きくなる。
- 水深が礫の粒径に対して比較的大きく、砂礫体積濃度が約 3%の流下では、大量の砂礫が底面付近を流れ、礫を含まない場合に比して、粗度係数は約 3～4 割増加する。
- 粒径の大きい礫の流下速度は砂礫体積濃度で決まるが、粒径の小さい礫は、砂礫体積濃度だけでなく周囲に流れる砂礫群の影響を受けやすい。
- 砂礫体積濃度と砂礫流下速度の間に線形関係あり、各条件下での砂礫体積濃度と砂礫流下速度の関係が、この線形関係を満たす時、水路底面の単位供給砂礫量あたりの侵食深はほぼ同じである。

灰塚実験は累積供給砂礫量約 1500m³までしか行っており、排砂水路の侵食を考える上で重要な粗骨材の抜け落ちを介して進行する侵食段階を調査するに至っていない。このため、今後も実験を継続し、水路底面の侵食と水路底面状態の関係を調査する必要がある。また、本研究の検討範囲内で流下砂礫の運動と水路底面の侵食機構について検討を行ったが、5 章で示したように、流下砂礫群の濃度場、礫間及び固液間の干渉等のさらに詳細な調査を行うことが重要である。そして、その調査に基づき、排砂水路における固液二相流れについて数値解析を用いて解明し、水路底面の侵食機構を定量的に評価する必要がある。

参考文献

- 杉田英明, 永松武教, 大和竹史: 小水力ダムコンクリートの耐摩耗性評価に関する一考察, 第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 885-888, 1986
- 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.
- 奥田徹: ダムコンクリートのすりへり・洗屈損傷, コンクリート工学, Vol.17, No.11, pp. 40-43, 1979.
- 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バートの侵食蛇行, 河川技術に関する論文集, 第 5 巻, 1999 年 6 月
- 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, 2000 年 6 月

(2003. 9. 30 受付)