

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

EROSION PROCESSES ON THE INVERT OF
CONCRETE CHANNEL FOR SEDIMENT FLUSHING

福岡捷二¹・渡邊高士²・小林正幸³・名尾耕司⁴

Shoji FUKUOKA, Takashi WATANABE, Masayuki KOBAYASHI and Koji NAO

¹フェロー会員 工博 Ph.D. 広島大学教授 工学部地域環境工学講座(〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 建設省中国地方建設局 温井ダム工事事務所長(〒731-3501 山県郡加計町大字加計4930)

³正会員 神戸市消防局(〒650-8570 神戸市中央区加納町6-5-1)

⁴正会員 工修 三井共同建設コンサルタント(169-0075 東京都新宿区高田馬場1-4-15)

This paper studies about erosion and meandering at the bed of a concrete channel caused by the flood carrying large amount of gravels and boulders. We investigated the relationship between transportation amount of gravels and erosion rate of concrete bed of the channel carrying a large amount of gravel and boulders and the development process of erosion and meandering on the invert of the concrete channel. The following results are observed from the experiment. The average of erosion depth is 1.2cm for gravel supply of 800m³/45hour. Wavy bed and meandering are formed on the concrete invert.

Key Words : *Sediment flushing channel, gravel transport, erosion and meander*

1. まえがき

ダム貯水池は，治水，利水の面で人々の生活に大きな効用を与えている．その反面，土砂の自然流下を阻害し，ダム貯水池の堆砂問題を引き起こしてきた．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，下流域の河床低下や海岸侵食，貯水池内及び下流域の濁水長期化など様々な問題を引き起こしている．ダム堆砂の対策として，排砂トンネル，排砂水路のような施設が考えられている．排砂施設は，施工性，経済性といった面からコンクリートを用いて作られることが考えられるが，多量の砂礫によるコンクリート底面の磨耗，侵食という厳しい問題に直面する．このような，砂礫流下によるコンクリート底面の侵食，蛇行の発生を十分理解し，それを設計に反映する必要がある．福岡らは¹⁾温井ダムの仮排水路トンネルにおいて，インバートが洪水時の流送砂礫によって侵食され，蛇行が発生する状況を調査している．写真-1は温井ダム仮排水路トンネルの侵食状況を示す．侵食部はトンネル全長にわたり周期的な蛇行形状を呈している．侵食深は最大40cm，平均22cmであり，縦断方向にほぼ20m間隔で深く侵食を受けている個所が見られる．また，横断方向の蛇行の波長は約40mである．

福岡らは，インバートの最大侵食の発生が横断方向

への侵食，すなわち蛇行形状を規定していることを明らかにし，トンネルインバートの侵食，蛇行の発生機構について考察している．これまでコンクリートの侵食，磨耗についての研究はかなりの数行われている^{2)~5)}．しかし実際のコンクリート水路の底面にどのように侵食，蛇行が発生，発達するかについては，明らかにされていない．

本研究ではコンクリート製水路に実現象に近い条件で砂礫を多量に流下させた実験を行うことにより，コ



写真-1 インバート部の侵食状況 (温井ダム)

コンクリート水路底面に起こる侵食，蛇行を定量的に評価する．この結果を用いて温井ダム仮排水路トンネルで起こった侵食，蛇行の実態を説明し，コンクリート製排砂施設設計のための基礎資料を得ることを目的としている．

2. 排砂水路の水理模型実験

(1) 実験施設と水路諸元

実験は温井ダム湛水池中に建造したコンクリート製の大型水路を用いて行った．実験施設の概略を図-1に示す．水路上流端に河川水を貯える貯水タンクを設置し，ここからポンプにより給水を行う．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と，濁水と砂礫をそのまま河川に流出させないために沈砂池を設けている．水路上流端には図-2に示す砂礫供給用のホッパーを設けており，ホッパーの落とし口の大きさを変えることにより砂礫供給量を調節する．ホッパーには振動型フィーダーが取り付けられており，これにより一定量の砂礫を連続的に供給することができる．水路底面から砂礫供給口までの高さは約30cmである．

実験水路は幅1.0m，水路長32.8m，勾配1/20の矩形断面直線水路である．実験水路に使われているコンクリートの圧縮強度は16N/mm²である．水路勾配，流量は砂礫が水路内に停止することなく流下できるように設定された．

(2) 実験条件・実験方法

実験条件を表-1に示す．実験は，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底面に発生する侵食，蛇行，侵食量および礫の挙動を測定している．供給砂礫は現地の河床材料を用いている．図-3に実験水路下流端において採取した流下砂礫の粒度分布を示す．平均粒径は5cmで最大粒径は20cm程度である．砂礫供給用ホッパーより供給され流下した砂礫は水路下流端の砂礫回収池に貯められ，砂礫量の計測が行われる．これを再び砂礫供給用ホッパーに戻すことにより砂礫を循環利用している．流下砂礫量は通水開始から9時間後までは約0.1m³/minであり，9時間後から45時間後までは0.4m³/minである．累積流下砂礫量は通水45時間において約800m³である．一定時間通水を行った後，水をとめ水路床の形状等を測定し洗堀の経時変化を調べる．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排砂水路底面の侵食，蛇行の機構を明らかにする．

3. 実験結果及び考察

(1) 水路底面の侵食深の経時変化

図-4に左岸からの距離10cm，30cm，50cm，70cm，

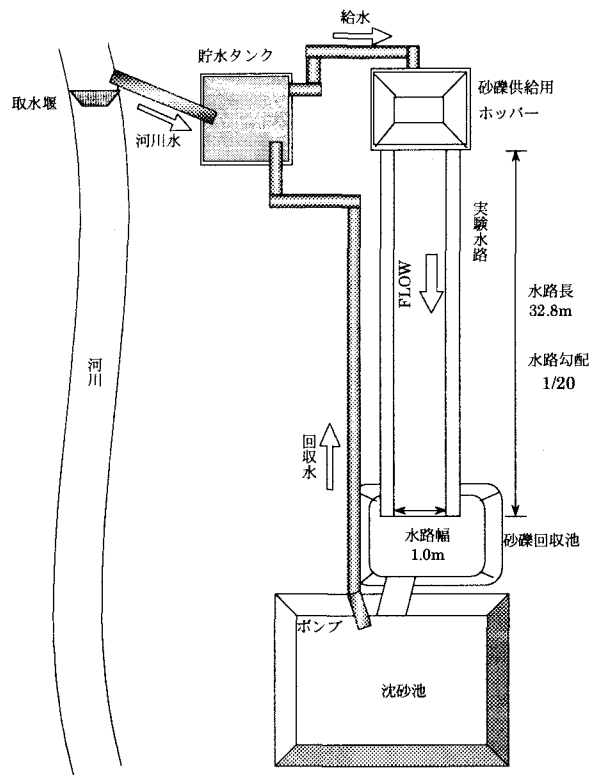


図-1 実験施設概略

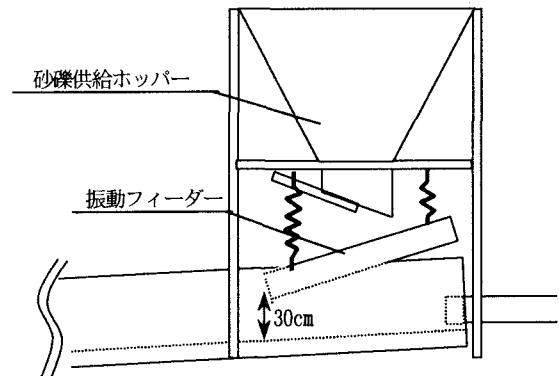


図-2 砂礫供給用ホッパー

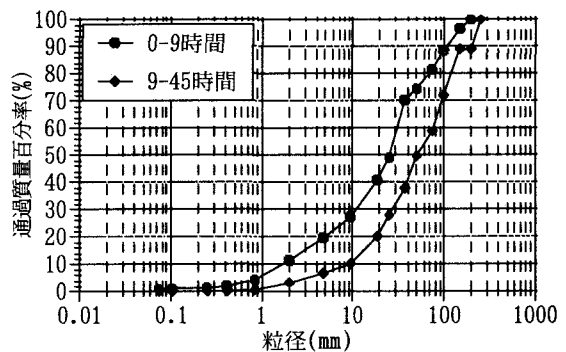


図-3 流下砂礫の粒度分布

90cmでの侵食深を縦断平均した平均侵食深と累積流下砂礫量の時間変化を示す．通水開始から2時間までの間に水路のどの断面においても侵食が急速に進んでいることがわかる．これは，通水初期にはコンクリートの

表-1 実験条件

流量	150l/s
平均流速 (砂礫供給なし)	3.50m/s
(砂礫供給あり)	3.20m/s
平均水深 (砂礫供給なし)	4.20cm
(砂礫供給あり)	4.66cm
水面勾配	1/50

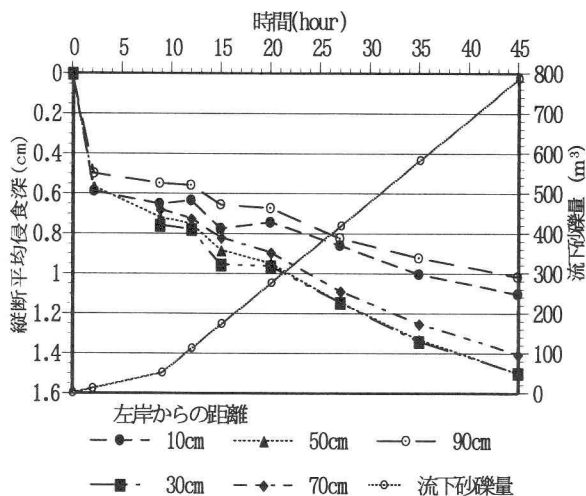


図-4 侵食深経時変化と流下砂礫量

表面のモルタルが削られたためである。2時間以降は、侵食速度は遅くなり、多少のばらつきはあるもののほぼ一定の速度で進んでいる。通水20時間以降は、侵食速度が徐々に遅くなっている。この理由はコンクリート水路の表面モルタルが削られ、粗骨材が露出してきたためである。粗骨材は摩耗抵抗が強いため、侵食は主に粗骨材をとり囲むモルタル部分が削られることにより進んでいく。そのために露出する粗骨材が多くなるにつれ、侵食速度が遅くなる。

露出した粗骨材は、周りのモルタル部が削られることによりやがて流出する。通水45時間では、粒径の小さな粗骨材は流下しているものの、粒径の大きな粗骨材の流出はほとんど起きていない。大粒径の粗骨材が流出し始めたとき、侵食速度がどのように変化するか工学的には重要な課題であり、検証する必要がある。

流下砂礫量と侵食量の関係は通水45時間後において、累積流下砂礫量約800m³に対して平均侵食深は1.2cm、最大侵食深は1.5cmである。

また、断面毎に侵食の速度を比較すると、水路側壁付近の2断面に比べ、水路中央側の3断面の方が侵食速度が大きい。砂礫による摩擦や、砂礫の衝突により侵食が進行することを考えると、侵食速度の違いは、主に流下砂礫の通過量が水路側壁付近と水路中央で違っていることから起こっていると考えられる。図-5に流下砂礫の横断分布と、通水45時間後における横断形状を示す。いずれの断面においても、水路中央寄りの3断

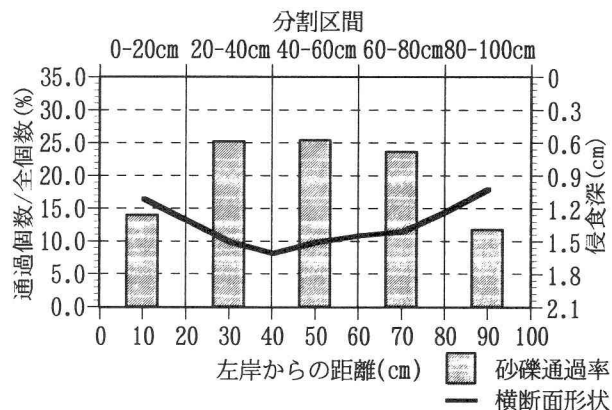


図-5 砂礫の断面通過率と水路底面の横断面形状

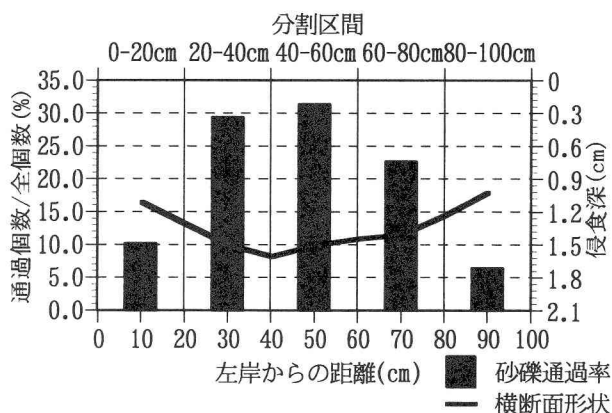


図-6 砂礫の断面通過率 (粒径15cm以上)

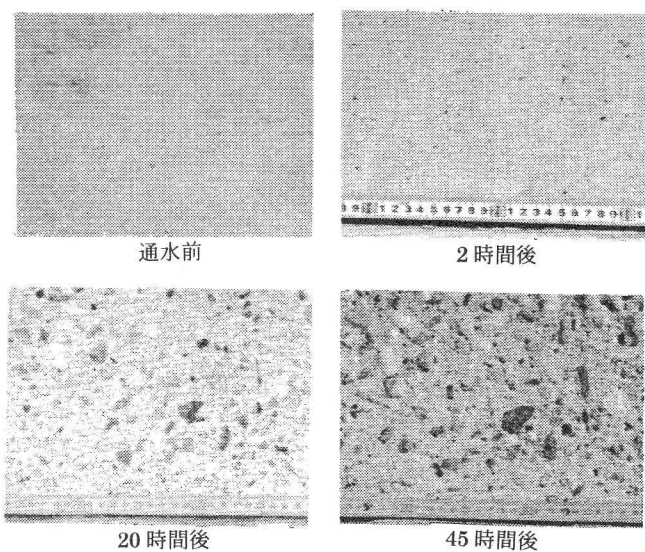


写真-2 コンクリート表面の経時変化

面を流下する礫の割合が高いことがわかる。この事実により、水路中央部の侵食が速く進むことが説明できる。図-6は、粒径15cm以上の砂礫の通過割合の横断分布である。粒径の大きな礫のほとんどは水路中央寄りを流下している。粒径の大きな礫ほど大きな摩擦と強い衝撃力を及ぼすことを考えると、水路中央での侵食速度が速くなるということが説明できる。

このような洗掘により水路の横断形状は、水路中心線を最大深さとする放物線形状を呈している。今後水

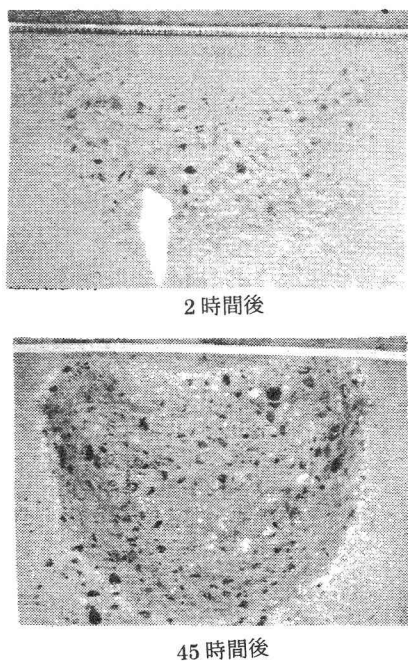


写真-3 砂礫供給口直下の侵食状況

路中央への砂礫の集中が進行し、水路中央での侵食が進むことが予想される。

(2) コンクリート表面の侵食の経時変化

写真-2は下流端からの距離18mにおける通水前、通水開始から2時間後、20時間後、45時間後の水路底面の侵食の状況を示す。通水前のコンクリート表面は、かなごて仕上げにより滑らかに密実に仕上げられ、表面には、骨材は露出してない。しかし、2時間後には、コンクリート表面に骨材がみられ、表面モルタルが削られたことがわかる。20時間後には粗骨材がその形がわかるほど表面に露出しており、表面がかなり粗くなっている。45時間後には、さらに多くの骨材が表面に露出しており、粗骨材が流出した跡も見られる。しかし、確認できる限りでは、流出した粗骨材は粒径1cm程度のものであり、それより大きな粒径の粗骨材の流出は起こっていない。

(3) 砂礫供給口直下の侵食

砂礫供給口直下では、砂礫を供給用ホッパーから水中に落下させ供給しているため、砂礫の落下による衝撃で大きく侵食されている。砂礫供給口と水路底面間の距離は約30cmであり、ここでの水深は約4cmである。

砂礫供給口直下の侵食の状況を写真-3に示す。砂礫の落下・衝突による侵食は、破壊力が著しく大きく水路底面の侵食とは明らかに異なる。通水開始から2時間後において粗骨材が流出するほどの侵食を受けており、その後も侵食が急速に進んでいく。通水45時間後においては、底版コンクリートの表面から15cmの深さに入れてあった鉄筋が露出するほど激しく侵食を受けている。図-7は砂礫供給口直下における流下砂礫量と平均

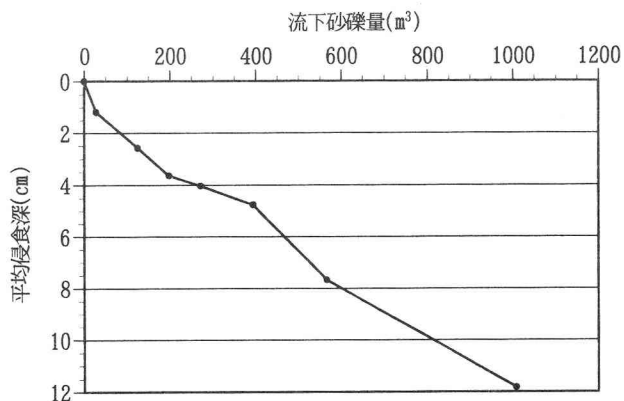


図-7 砂礫供給口直下の侵食深と流下砂礫量の関係

侵食深の関係を示す。これより供給砂礫量と平均侵食深は、ほぼ比例の関係にあるといえる。平均侵食深は、流下砂礫量800m³に対し12cmである。この値は、水流による砂礫輸送に伴う水路底面の平均侵食深の約10倍の値である。同様な大きな侵食が、温井ダム仮排水路の呑口部において生じている。すなわち多量の砂礫が角度をもって流入することが原因となって呑口部インバートで大きな侵食が生じている。

(4) 水路底面の形状変化

写真-4は通水開始から1時間後における水路最上流部の初期損傷の状態である。この損傷は砂礫供給口から落下した砂礫が転動の移動形態をとり横断方向への移動を伴いながら流下したために発生したもので、蛇行を呈している。写真-5は12時間後、35時間後における水路底面の深掘れの様子である。通水1時間後において見られた損傷箇所の上に深掘れが現れており、ここから緩やかな蛇行が下流端からの距離20m付近までに見られる。通水12時間後と35時間後では深掘れはほとんど変化していない。このことから水路底面の蛇行は初期損傷がきっかけとなり、下流に伝播していく。また初期の段階で形成された底面の蛇行形状は、経時的に大きくは変化しないことがわかる。

図-8は通水2時間後、12時間後、45時間後における水路底面の侵食深コンターである。通水2時間後は、測点が少ないため、水路底面の侵食深を正確に表しているとは言い難いが、水路底面が全体的にほぼ同程度の侵食を受けている。しかし通水12時間後においては、水路の上流側と下流側において侵食量が明らかに異なり、上流側の侵食がより深く起きている。45時間後においてもこの傾向はみられるが、上流側と下流側の侵食量の差が小さくなっている。このことから、侵食は上流側から進行し、徐々に下流に伝わっていくことがわかる。

侵食を受けた底面の形状は、12時間後、45時間後ともに、深く侵食されている箇所とあまり侵食を受けて

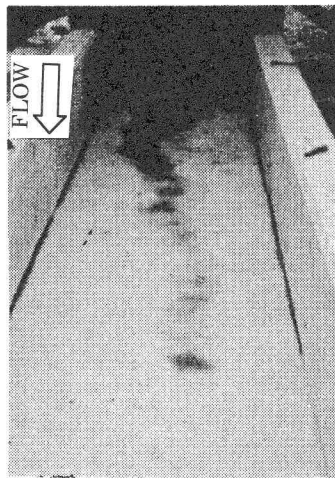
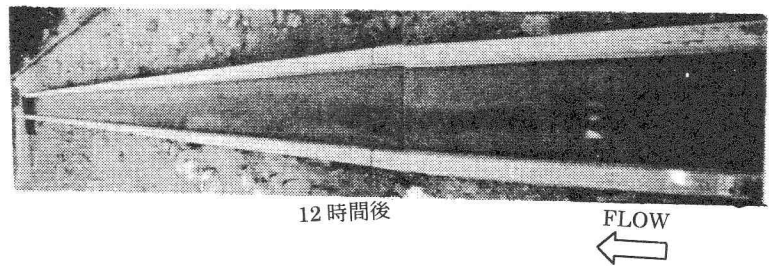
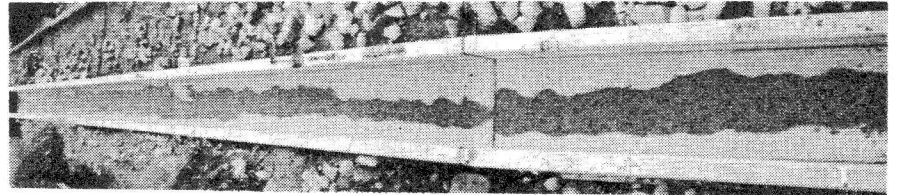


写真-4 初期損傷部からの蛇行の発達



12 時間後



35 時間後

写真-5 水路底面の侵食と蛇行

いない箇所が交互に現れており、縦断方向に波打つ底面形状がみられる。また、深く侵食されている箇所の平面的な位置は、経時的にほとんど変化していない。45時間後を見ると、上流側では深く侵食されている箇所が流下方向に拡がり、最大侵食箇所がつながるように侵食が進んでいく。

以上のことから、侵食、蛇行が進行する過程は次のように説明できる。流れ及び砂礫の集中箇所や、コンクリートの施工上の弱点箇所など他の場所より侵食を受けやすい箇所から侵食が始まり、縦断方向、横断方向に波打つ底面形状が形成される。初期に侵食を受けた箇所は、砂礫輸送量が集中することによってさらに侵食が進み、侵食深は徐々に増大するが蛇行の形状は大きく変化しない。このような過程が上流側より生じ、侵食が徐々に下流に進行していく。

(5) 礫を混入した流れの表面流速分布

図-9は砂礫の連続供給時と供給なし時における流れの表面流速の横断分布を示す。礫が連続的に供給されているとき、水路中央に礫が集中し流れの抵抗を増大させる。このため、水路中央の流速の減少が他の場所に比して大きい。砂礫供給なし時の平均流速は3.5m/s、砂礫の連続供給時の平均流速は3.2m/sである。

(6) 礫の移動速度と粒径、形状の関係

図-10は、多量の礫が供給されている時の流れと供給されていない時の流れの中に、異なる大きさ、形状のマーカ-礫（着色礫）が投入され、その移動速度の測定値を示す。平均粒径は長径、短径、高さを測定し、平均したものである。礫の形状は球形状、平形状、角形状の3つに大別している。礫の移動速度は、粒径が大きくなるほど減少しているが、礫形状の違いによる影響はほとんど現れておらず、いずれの形状においても礫の大きさの増大とともに移動速度は減じていることがわかる。

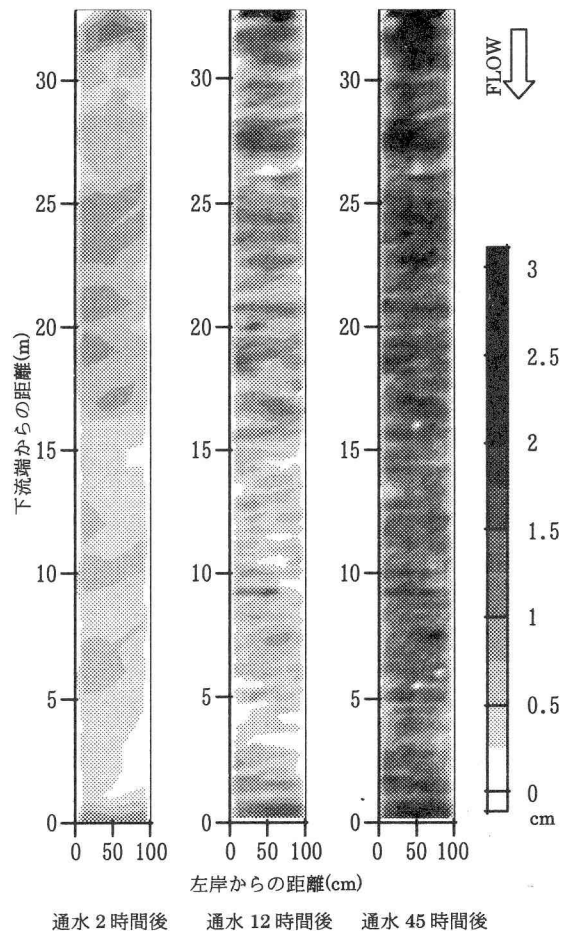


図-8 底面侵食深コンターの時間変化

多量の砂礫が流送されているときには、個々の礫は他の移動砂礫の影響を受け移動速度が小さくなる。特に、平均粒径よりも小さい礫の移動速度は、大きい礫の移動の影響を受け、その減少量は0.5m/sにも達することがわかる。

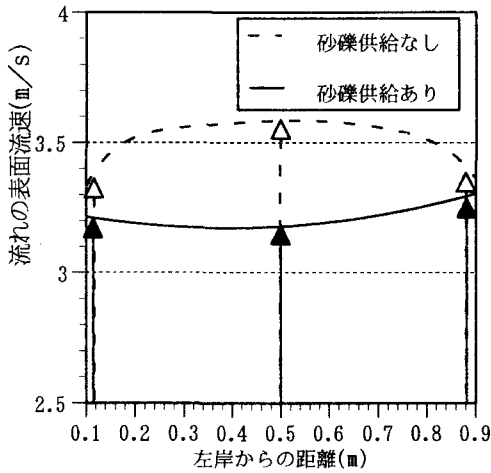


図-9 礫の混入、非混入時の流れの流速分布

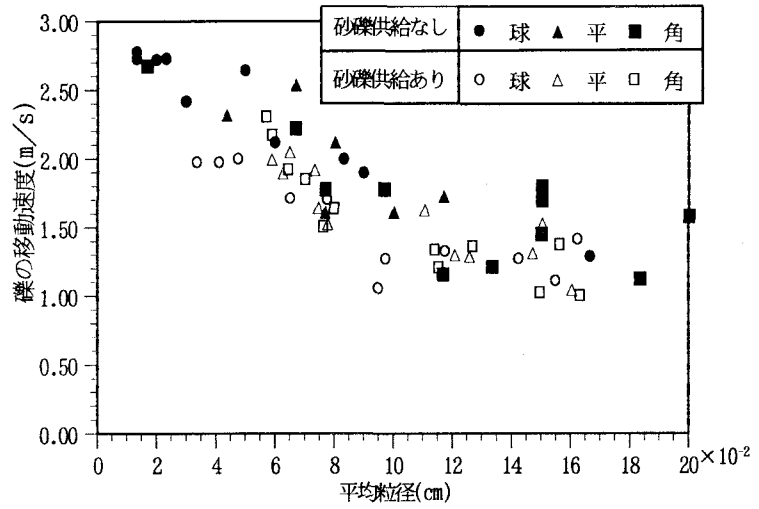


図-10 礫の移動速度

4. 温井ダム仮排水路トンネルの平均侵食深と実験結果の比較

表-2に温井ダム仮排水路トンネルと実験水路での累積通水時間、総流下砂礫量、侵食深、水理量などを比較して示す。ここで、仮排水路トンネルでの各値は以下の方法で算定している¹⁾。

- a) 累積通水時間は、砂礫の移動に関係する流量が200m³/sを越える洪水を対象とし、洪水継続時間を12時間と仮定する。
- b) 流送砂礫量は芦田・道上の式から概算された掃流砂量 $Q_b=0.002m^3/s$ (洪水流量 $Q=400m^3/s$)と累積通水時間から求める。
- c) 流量は、ピーク流量が200m³/sを越える洪水の平均流量である。

実験水路の侵食深は図-4に示すように通水時間に比例すると考える。実験水路で見出された通水時間45時間で平均侵食深1.2cmを用いると、累積通水時間550時間では、平均侵食深15cmとなる。これは、仮排水路トンネルにおける実測平均侵食深20cmと大きくは異なる。

5. 結論

本研究では底面の侵食及び蛇行の発生、発達機構について検討した結果、次の主要な結論が得られた。

- a) 通水時間45時間、流下砂礫量800m³に対して水路底面の平均侵食深は約1.2cmであり、砂礫供給口直下の平均侵食深は約12cmである。
- b) 水路底面の侵食は摩耗抵抗の小さい表面モルタルから始まり、摩耗抵抗の大きな粗骨材が表面に現れるまで急速に進む。粗骨材が露出した後、侵食はほぼ一定の速度で進む。

表-2 仮排水路トンネルと実験水路の比較

	仮排水路トンネル	実験
累積通水時間	550hour	45hour
流砂礫量	0.002m ³ /s	0.3m ³ /s
累積流下砂礫量	4000m ³	800m ³
平均侵食深	22cm	1.2cm
最大侵食深	40cm	1.5cm
流量	350m ³ /s(平均)	0.15m ³ /s
流速	10m/s以上	3.5m/s
コンクリートの圧縮強度	21N/mm ²	16N/mm ²

- c) 侵食は上流側から下流に伝わっていくが、平面的な底面形状はほとんど変化せず、深く侵食を受ける箇所的位置もほとんど変わらない。
- d) 移動速度は、小さい砂礫ほど大きな砂礫の影響を受け、減速量が大きくなる。しかし、礫の形状の影響はほとんどみられない。

参考文献

- 1) 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, pp.183-188, 1999.
- 2) 藤堂勝也: モルタル・コンクリートの室内摩耗試験結果について, R&D News Kansai, pp.12-13, 1996.3.
- 3) 松尾久幸, 丸山武彦, 村上俊夫, 多田東臣: コンクリートの耐摩耗特性におよぼす各種要因の検討, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.15, No.1, pp.835-840, 1993.
- 4) 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, pp. 103-112, 1983.
- 5) 豊田高司, 高須修二: 排砂水路の摩耗対策, 大ダム No.138, pp.61-66, 1991.

(2000.4.17受付)