

# 大量の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浸食蛇行

## EROSION AND MEANDERS ON THE INVERT OF A BYPASS TUNNEL BY THE FLOOD CARRING SEDIMENTS

福岡捷二<sup>1</sup>・森田義則<sup>2</sup>・藤原博昭<sup>3</sup>・萬矢敦啓<sup>4</sup>

Shoji FUKUOKA, Yoshinori MORITA, Hiroaki FUJIWARA and Atsuhiko YOROZUYA

<sup>1</sup>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 東広島市鏡山 1-4-1)

<sup>2</sup>正会員 建設省中国地建河川情報管理官 (〒730-0012 広島市中区上八丁堀 6-30)

<sup>3</sup>正会員 温井ダム工事事務所工事課長 (〒731-35 広島県山県郡加計町大字加計 4390)

<sup>4</sup>正会員 工修 広島大学助手 工学部地域環境工学講座 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

This study aims at developing techniques for the establishment of the Comprehensive Sediment Management in the river basin. Removing sediment from dam reservoir using the proper facilities creates the catchment area landscape which is desired from both flood control and river environment. For the purpose, this paper investigates the development process of erosion and meanders on the invert due to the movement of large amount of gravel and boulders through a bypass tunnel in Nukui dam, the Ota river. Revealing erosion characteristics of the bypass tunnel will be essential to establish the techniques for the design of hydraulic structures carrying a large volume of sediments. Finally, we suggest the direction and subjects of investigation necessary for the safe design and maintenance of the sediment diversion facilities.

**Key Words :** *Bypass tunnel, Dam reservoir, Flood, Erosion, Meandering, Sediment transport*

### 1.はじめに

太田川支流滝山川に建設中の温井ダムには延長560m、トンネル部勾配1/68、満管流量450m<sup>3</sup>/sの規模をもつコンクリートでつくられた仮排水路トンネルがある。仮排水路トンネルはダムの建設工事のために河川を一時的に付け替え、河川水及び砂礫を下流に流すことを目的とした施設であり、この水路に平成2年末から平成11年までの8年間に200 m<sup>3</sup>/s以上の洪水が23回流下した。

洪水のたびごとに大量の砂礫が水と共に仮排水路トンネル内を流れるため、トンネル底部のインバート部分に砂礫が衝突し、磨耗、洗掘により、流下方向に周期的な浸食と蛇行が形成された。(写真-1)。このような、流送砂礫によるインバートの浸食は仮排水路トンネルでは一般的にみられるものであるが、施設が仮排水路であり、工

事中にその機能を果たせばよいことから、浸食の実態については国内外においてほとんど明らかにされてきていない。しかし、土砂生産量及び流出量の多い水系においては、ダムが土砂の流下を長年にわたり阻害することによって、下流河道や海岸域に対し、治水上、環境上の問題を起こしている。このため流域全体でみた総合的な土砂管理、特にダムからの排砂による河川・海岸環境の改善が強く求められている。このような対策の一環として幾つかのダムでは既に排砂管、バイパス水路等による排砂が試みられているが、これらの排砂施設においても大量の砂礫の通過による磨耗、浸食が深刻な問題となることが十分に予想されている。排砂管やバイパス水路の砂礫による磨耗浸食は、仮排水路トンネルの磨耗浸食と同じ機構で生じる。大量の土砂を通過させるバイパス水路等の施設設計や維持管理を適切に行うためには、仮排水

路トンネルで起こっている現象を十分理解し、ここで得られた結果を技術的に検討し、設計等に生かしていくことが重要となる。本研究はこのような問題背景のもとに、最初にコンクリートで造られた水理施設の砂礫による磨耗や衝突による浸食の調査研究の現況を概観し本研究の位置づけを明確にする。つぎに、温井ダム仮排水路トンネルにおいて発生している浸食によるインバート部の縦・横断形状の変化の特性を明らかにする。最後に、通過洪水流量、砂礫量からトンネルインバートの浸食、蛇行がどのようにして発生したのかを検討し、排砂施設設計のための技術の基礎情報を得るとともに今後の調査研究方法のあり方課題に言及している。

## 2. 仮排水路トンネルに関連する調査・研究の現況

仮排砂水路トンネルに関する調査・研究課題は次の二つに大別される。一つは洪水流が運ぶ土砂がトンネル内に堆積することにより、異常な圧力変動が発生する問題である。第2は、大量の砂礫がトンネル内を流れることにより発生するトンネルインバートの磨耗浸食の問題である。前者に関して、原田ら<sup>1)</sup>は実験および数値シミュレーションによって検討している。すなわち土砂が急激にトンネル内に流入した場合、負圧を伴う大きな圧力変動が比較的ゆっくりした周期でトンネル内に発生すること、また移動床抵抗則、掃流砂量式及び河床変動式等を適切に組み合わせたシミュレーションモデルによって、このような特異な圧力変動現象を再現することが可能であることを示した。後者のコンクリートの磨耗浸食に関する研究はさらに3つの課題に分類される。1)室内実験によるコンクリートの衝突磨耗試験、2)実験から得られた磨耗量などの知見と砂礫の挙動をベースとした、理論解析より提案された磨耗量の計算方法と、実現象に対する適用、3)磨耗により損傷を受けたダムを観察報告があげられる。以下に3つの課題で明らかになったことを示す。

1)の室内におけるコンクリートの磨耗試験は、掃流式と打撃式の2種類に大別され、コンクリート容器内に水・砂、礫を入れ回転させることで、供試体の損傷量を調べている。藤堂<sup>2)</sup>、松尾ら<sup>3)</sup>、杉田ら<sup>4)</sup>はコンクリートの種類、骨材の量、混和剤の種類を変えたときの影響を考察している。コンクリートの圧縮強度と磨耗深さに強い相関関係があり、コンクリートの磨耗量は、全体的に圧縮強度が大きくなると小さくなる傾向があることを示した。国外においては、W.Glenn Smoak<sup>5)</sup>は磨耗浸食を補修するために適したコンクリートの種類を、室内実験より考察し、ポリマーコンクリートとシリカフェームコン



写真-1 仮排水路トンネルインバートの浸食蛇行

クリート(SFC)が磨耗対策に適した素材であることを証明した。Tony C. Liu<sup>6)</sup>はコンクリートの磨耗浸食に及ぼす、水セメント比、コンクリートの圧縮比、骨材、脱気工程、表面加工の影響を評価した。その結果、水セメント比の減少、圧縮強度の増加がコンクリート磨耗に対する抵抗を大きくすること、表面加工も効果があることを示した。

2)について、石橋<sup>7)</sup>は砂礫をコンクリート水路床に落下させる室内実験を行い、流砂礫の衝突力を実験的に検討した。また流下砂礫の運動について理論解析を行い、室内実験から得られた衝撃力の測定値から、固定床水路を流下する礫の跳びあがり高さ、飛距離、衝突角度などを推算した。これに基づいて、衝撃力による排砂設備の損傷量と摩擦力による磨耗量を求めるための計算手法を提案している。

豊田ら<sup>8)</sup>は、土砂輸送が著しい黒部川の宇奈月ダムを例にとり、排砂設備の寿命には跳躍磨耗が卓越すると考え、砂礫をコンクリートに落下させ衝突させる跳躍磨耗損傷実験を行った。これにより、磨耗量は砂礫の落下エネルギーに比例すると結論づけた。また宇奈月ダムの排砂設備壁面磨耗損傷に影響を与える砂礫の量は、年間、単位面積当たり、3000t程度であり、コンクリートの磨耗量を400mm/年と推定した。

3)の磨耗により損傷を受けたダムの観察報告に関しては、D.L.Vischerら<sup>9)</sup>はスイスの5つのダム施設を例にとり、排砂トンネルが貯水ダムの堆砂の軽減に著しく有効であることを示した。排砂水路の主な問題はインバートの磨耗であること、特に堆積物が石英を含んでいるとき、磨耗対策には特別な考慮が必要であるとしている。ASIの210委員会報告<sup>10) 11)</sup>は、水理構造物のコンクリート浸

食と題して、水理構造物に特有の劣化を、キャビテーション、磨耗及び化学的浸食に分類し、その劣化メカニズム、補修及び劣化対策について具体的に示している。磨耗による損傷の度合いは、流れの状況、流速、砂利の量、大きさ、形状、硬さならびにコンクリートの品質に左右されると報告している。奥田<sup>12)</sup>は、磨り減りをうけたコンクリート面を詳細に観察し、コンクリートの磨り減る現象を考察している。また排砂水路の張石表面には、波のうねりのような形をしているものが発生することを報告している。M.D.Lutherら<sup>13)</sup>はアメリカのKinzia DamとLos Angeles Riverのコンクリート構造物の磨耗及びキャビテーションによる浸食対策として、SFCが有効であることを報告している。

コンクリートでつくられた水理構造物は、砂礫の衝突や輸送による局所的な損傷が、その後大きな損傷浸食を受けると考えられる。温井ダムでは、トンネルインバートの洗掘が、周期的な浸食と蛇行形状を呈する形で生じており、インバート内の鉄筋を露出させるほど浸食が進行している。この周期的な機構についてはこれまでの研究では説明できないと考えられる。

このようなインバートに起こっている周期的な浸食と蛇行は自然界においてもよく見られる水理現象である。たとえば、河川の水際に植生がある河岸の浸食形状は縦断方向に周期的に変動する傾向があり<sup>14)</sup>、自然河川の蛇行の発達、氷河地形での蛇行の発達も形態からみると類似の現象と考えられる<sup>15)</sup>。仮排水路トンネルインバートの浸食蛇行は上述の課題 1)、2)、3)の結果や河川、氷河において生じている流路の変動の知見を参考にして検討することから始めるのが筋道と考える。

### 3. 滝山川流域の特性と温井ダム仮排水路トンネル

温井ダムは、太田川支流滝山川に建設中の堤高 156m のアーチ式コンクリートダムであり、洪水調節・流水の正常な機能の維持・水道用水の新規開発及び発電を目的とした多目的ダムである。

ダムサイトは、中国脊梁山地に近い広島県北西部に位置し、集水面積は 253 km<sup>2</sup> を有している。この地域には、浸食平坦面の名残りと考えられる中国脊梁面(標高 1,000~1,200m)、八幡高原面(標高 750~800m)、吉備高原面(標高 300~500m)と呼ばれている 3 段階の緩傾斜平坦面が発達している。滝山川流域の地形は、温井ダムの約 10 km 程上流にある王泊ダム貯水池を境にして南北両側で大きく異なる。地質は、古いものから、吉舎安山岩類、高田流紋岩類、花崗岩類に分類されている。仮排水路トンネルは図-1 に示すように、呑口はダム上流約 600

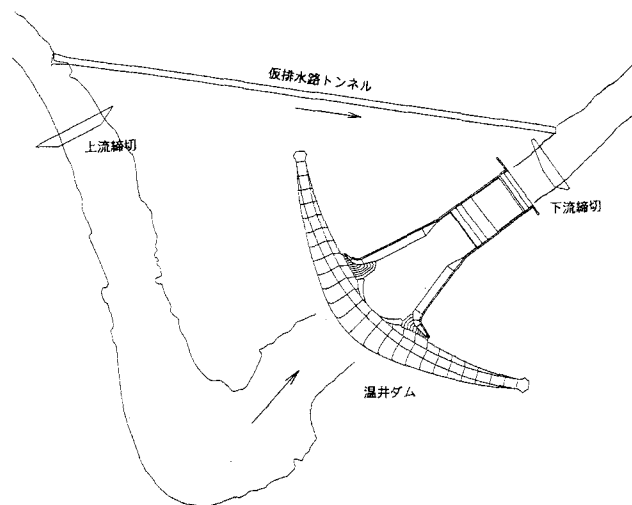
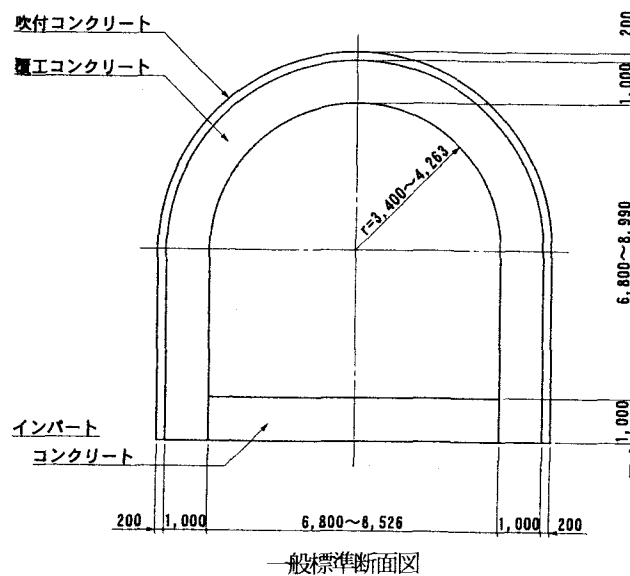


図-1 温井ダムと仮排水路トンネル  
呑口部標準断面図



一般標準断面図

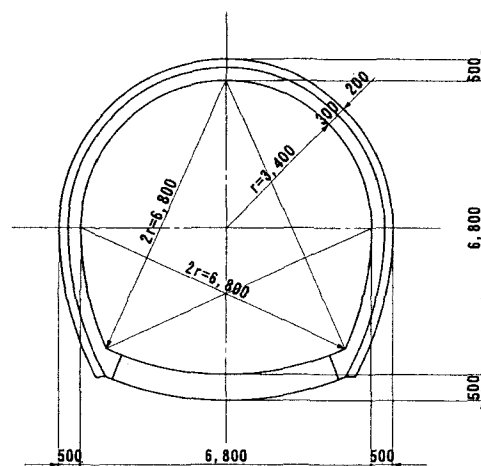


図-2 仮排水路トンネル断面図

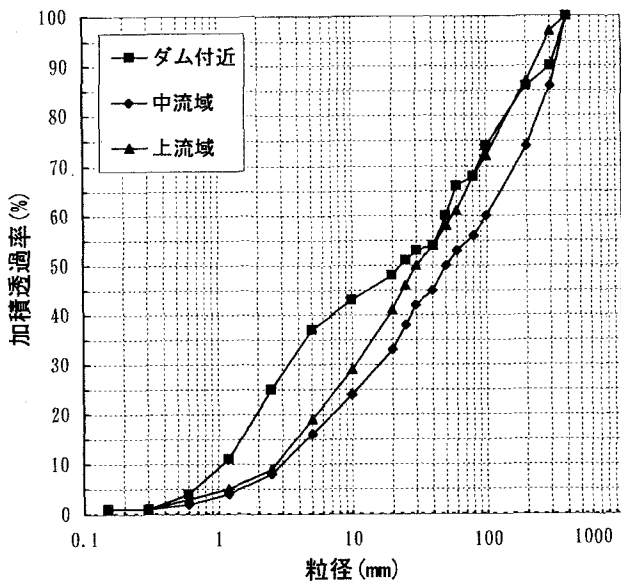


図-3 河床材料粒度分布

mの位置に、吐口はダム下流約240mの位置にあり、延長約560m、トンネル径6.8m、計画流量420m<sup>3</sup>/s(1/1.5年確率)、トンネル勾配1/68(呑口部1/2.1)である。なお、仮排水路トンネル直上流の河川勾配は1.5/100程度であり、トンネル内の勾配とほぼ同じである。

トンネルは平成2年に完了し、平成2年末には仮排水路トンネルへの転流を行った。以来平成11年1月に二次転流を行うまで8年間の出水期を経験し、その役目を終えた。

#### 4. 滝山川河床材料と洪水流

##### (1) 河床材料

滝山川上流、中流、温井ダム付近の砂礫を採取し粒径分布を調べるにより、仮排水路内を通過する砂礫の特性を推定する。図-3に粒径加積曲線を示す。ダム付近の河床材料の平均粒径は約8cm、上流域は11cm、河道は平均的には9cm程度の粗い河床材料からなる。移動する河床の礫の最大粒径は40cm程度である。滝山川には仮排水路トンネルの上流10kmに発電用の王泊ダムが存在する。王泊ダムの上流域からの流送土砂のほとんどは王泊ダムに捕捉されている。したがって温井ダム仮排水路に流入する土砂は温井ダム上流8.5km右岸から流入する大佐川流域と王泊ダム下流の滝山川からのものが大部分を占める。王泊ダム貯水池の堆砂調査結果から流入土砂の90%以上がウオッシュロードで粒径2.0mm以上の掃流砂成分は僅か2%程度である。温井ダム流域の大半を占める大佐川流域はその地形、地質が王泊ダム流域と似かよってお

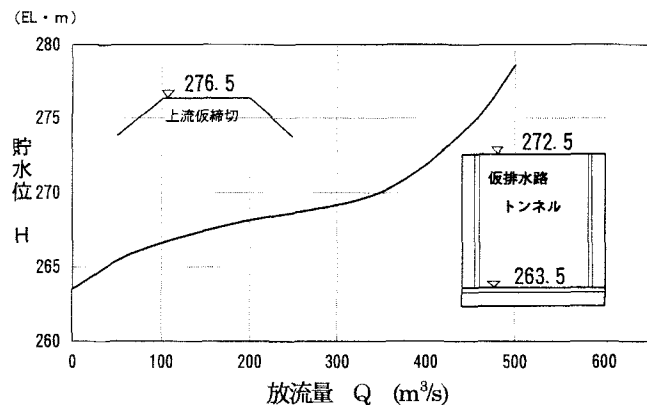


図-4 仮排水路トンネルH-Q曲線

表-1 仮排水路トンネル通過流量200m<sup>3</sup>/s以上の実績

(平成3~10年)

年度	発生日	ピーク流量(m <sup>3</sup> /s)	
平成3年	7月5日	204	
	9月27日	331	
平成4年	8月8日	209	
	6月29日	484	
平成5年	7月27日	731	
	8月10日	284	
	8月15日	225	
	8月17日	253	
	9月4日	210	
	平成6年	該当無し	
	平成7年	7月3日	283
7月22日		224	
平成8年	8月31日	384	
	9月24日	268	
	6月20日	225	
	平成9年	5月14日	502
		6月28日	391
	平成10年	7月8日	219
		7月12日	400
7月27日		555	
7月29日		254	
8月5日		471	
	8月9日	893	
	10月17日	423	

り有意な差は認められない。しかし、王泊ダム下流の滝山川の斜面は、黒雲母花崗岩で覆われている。斜面勾配がきわめて急で、各地に崩壊が認められ大粒径の崖錐が存在する。これより仮排水路トンネル付近の河床材料にみられる、粗粒分は王泊ダム下流の滝山川河岸から生産されたものとみなすことができる。

##### (2) 洪水の規模と流送土砂特性

仮排水路トンネル呑口上流の川幅は平均的に60m程度であり、河床材料が大玉石中心であることから、粗度係数

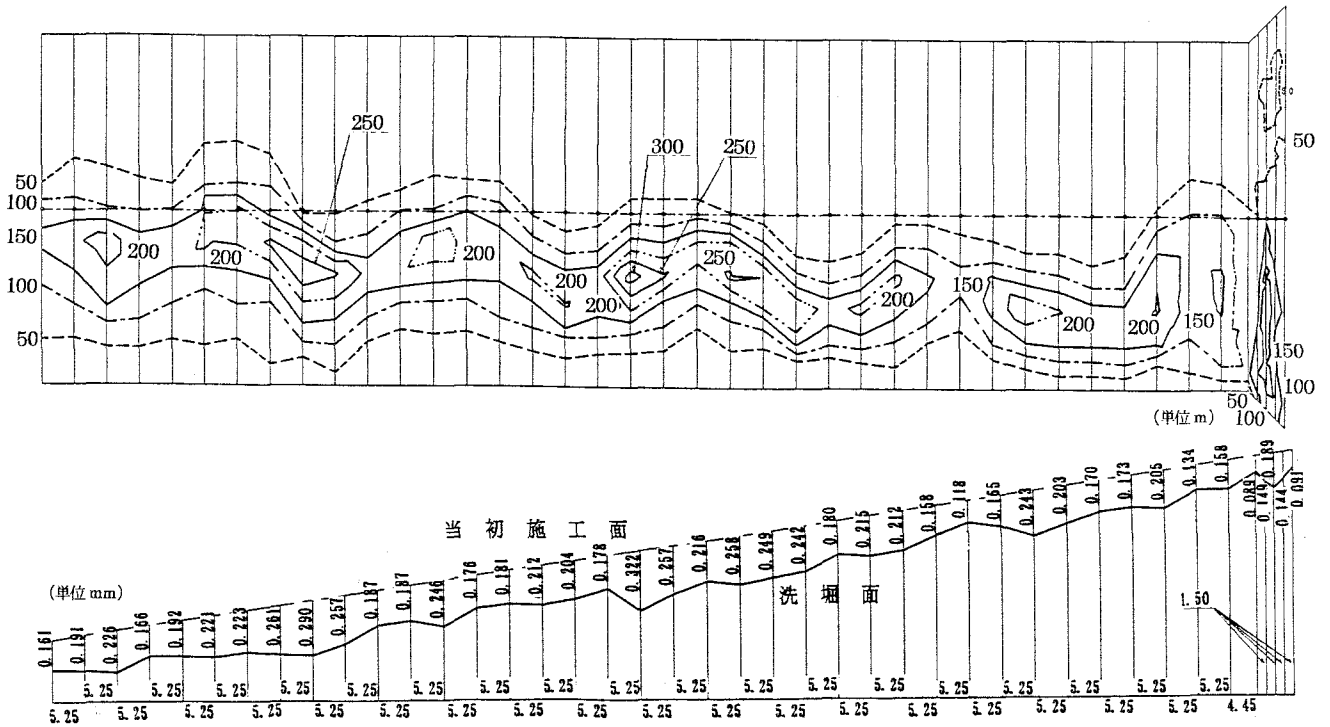


図5 仮排水路トンネル浸食平面図，縦断面

は  $n=0.045$  程度であると推定される。仮排水路トンネルの設計に用いた  $H-Q$  曲線を図-4 に示す。表-1 は黒滝観測所で観測された洪水のうち、計画流量  $420\text{m}^3/\text{s}$  の約  $1/2$  規模に当たる  $200\text{m}^3/\text{s}$  以上の規模の洪水をまとめて示している。仮排水路トンネル通水期間は小雨傾向にあり  $200\text{m}^3/\text{s}$  以上の洪水は 8 年間で 23 回の発生に留まっている。トンネルが満管となる流量  $420\text{m}^3/\text{s}$  以上の洪水は 7 回発生し、このうち 2 回は上流仮締切り工を越流し、ダムサイト内を洪水流が流下する大洪水となった。満管で流れているとき、 $v=10\text{m}/\text{s}$  以上の大きな平均流速が発生していたと考えられる。つぎに発生した洪水流によってどのような大きさの砂礫が仮排水路トンネルを通過したかを検討する。十分なデータが存在しないために流れについては、等流近似、限界掃流力は岩垣公式を用いて概算する。最大洪水流量  $Q_{\text{max}}=893\text{m}^3/\text{s}$  では  $40\sim 50\text{cm}$  までの粒径の玉石が掃流され、 $Q_{\text{max}}=400\text{m}^3/\text{s}$  では  $30\text{cm}$  程度までの玉石が流れたと考えられる。 $Q=893\text{m}^3/\text{s}$  および  $Q=400\text{m}^3/\text{s}$  の流量に対して、平均粒径  $d_m=9\text{cm}$  の代表粒径集団が流送されていたと仮定し芦田、道上式で流砂量を求めると、それぞれ、 $Q_B=0.2\text{m}^3/\text{s}$ 、 $Q_B=0.002\text{m}^3/\text{s}$  となる。実際には、洪水ハイドログラフに対応して通過土砂の量と質を見積もることが必要であるが測定精度、計算精度などからみて、この段階ではこれ以上の計算はそれほど意味をもたないと考えられる。今後通過流砂量の質と量についてさらに検討を加える必要がある。

### 5. 仮排水路インバートの浸食蛇行とその発生機構の推定

仮排水路トンネルに用いたインバートと覆工部のコンクリートの圧縮強度はそれぞれ  $210\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $180\text{kg}/\text{cm}^2$  であり、セメントは高炉セメントを用いている。インバートは  $0.5\text{m}$  の厚さを持ち、呑口部から約  $30\text{m}$  区間のインバートには  $\phi=22\text{mm}$  の鉄筋が晒筋されている。そこでの鉄筋のカブリは  $0.1\text{m}$  である。4.(1)(2)において大きな玉石を含む大量の砂礫がトンネルを流れたことが明らかとなった。これによって生じたインバートの浸食、蛇行の縦断面図と平面図を図-5 に示す。浸食部はトンネル全長にわたり中心線から左岸寄りにほぼ周期的に現れている。これは滝山川の洪水流入角度が仮排水路呑口に対して、左岸寄りのためである。浸食深はインバートの当初の施工面から、最大  $0.40\text{m}$ 、平均  $0.22\text{m}$  であり、最大浸食の発生箇所の縦断面間隔は約  $20\text{m}$  である。トンネルインバートの横断面形はトンネル中心軸を対称面とした放物線形をなすため、水深、流速は中心で最も大きくなる。このため、横浸食によって生じる蛇行振幅はトンネル中心寄りでは明瞭となりその波長は約  $40\text{m}$  である。鉄筋のカブリ厚さが  $10\text{cm}$  であるためインバートの浸食により鉄筋が露出している。

図-5 の洗掘深コンターで注目すべきことは、最大深掘れ部分が下流へ広がっている方向とその周辺の等コンタ

一線が描く横断方向への洗掘形状がほぼ同位相をなし蛇行していることである。これは洗掘域の最大深掘れ部の形と深掘れ部がほぼ周期性をもつことに関係がある。すなわちインバートの最大深掘れの発生が横断方向の洗掘域の拡がり、すなわち蛇行形状を強く規定しているようにみえる。このような浸食、蛇行が出現する機構についてさらに考えてみる。

インバートに対する砂礫の衝突転動によりインバートの施工の弱点箇所または砂礫の集中衝突箇所付近に損傷が現れる。コンクリート表面は非常に硬いため、初期損傷の現れられている箇所以外では損傷は相対的に小さいと考えてよい。損傷箇所に流送砂礫が集中すると鉛直方向への浸食深は除々に増大する。ある浸食深に達するとその凹部を通過する砂礫は転動から跳躍へ変化するようになり跳躍砂礫が再びインバートに衝突するところで損傷を起こすことになる。このプロセスの繰り返しによってインバートの損傷が次第に下流に伝播する。損傷が大きく深くなるほど砂礫の跳躍高さや距離が増大し、浸食の発生箇所は縦断方向に一定間隔になっていき、損傷は横断方向にも拡がり蛇行に発達していくものと考えられる。

## 6. 今後の課題

砂礫による仮排水路トンネルインバートの磨耗浸食蛇行の特性を十分調べ、定量的な理解が出来れば今後重要性が増す排砂設備について磨耗浸食対策を考慮に入れた設計技術の構築が可能になると考えられている。そのような考え方のもとに調査研究の方向づけを試みたが、以下に示す課題の検討の必要性が明確になった。

- (1) 全国で稼働中の仮排水路トンネルインバートの浸食資料を収集し、これと洪水流、河床材料、土砂輸送量等の外的要因を関係づけ、浸食の実態を明らかにする。
- (2) コンクリート構造物の磨耗浸食の機構、材料の強度特性等を考慮に入れ、外的要因に対する浸食量の定量的な評価を行えるようにする。このとき、コンクリート技術者との共同研究による検討が必要である。
- (3) 新しく建設する仮排水路トンネルには、磨耗浸食量のほかに、土砂通過量など解析に不可欠なデータを自動的に観測できる装置を開発設置し、予測精度の向上をはかる。
- (4) 現地に大型排砂バイパス水路等の実験施設をつくり、十分に制御された条件での外的要因を与え、磨耗浸食の機構と量を詳細に測定し、上の(1),(2),(3)の結果と併せて、排砂バイパス水路の磨耗対策技術の基礎資料を得る。

## 参考文献

- 1) 原田稔, 小久保鉄也, 出野尚: 貯水池のバイパス排砂システムにおけるトンネル内土砂水理特性, 土木学会論文集 No. 600/II-44, pp. 69-84, 1998.
- 2) 藤堂勝也: モルタル・コンクリートの室内磨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: コンクリートの耐磨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) 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磨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.
- 5) Glenn Smoak, W.: Repairing Abrasion - Erosion Damage to Hydraulic Concrete Structures, Concrete International, pp. 22-26, V.13, No. 6, 1991.
- 6) Tony C. Liu: Abrasion Resistance of Concrete, ACI JOURNAL/September-October, pp. 341-350, 1981.
- 7) 石橋毅: ダム排砂設備の流下砂礫による磨耗・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.
- 8) 豊田高司, 高須修二: 排砂水路の磨耗対策, 大ダム No. 138, pp. 61-66, 1991.
- 9) Vischer, D.L., Hager, W.H., Casanova, C., Joos, B., Lier, P. and Martini, O.: Bypass Tunnels to Prevent Reservoir Sedimentation, Commission Internationale des Grands Barrages, pp. 605-624, 1997.
- 10) ACI Committee 210: Erosion of Concrete in Hydraulic Structures, ACI Materials Journal/March-April, pp. 136-157, 1987.
- 11) 谷口秀明: ダムコンクリートの劣化と補修技術, コンクリート工学, Vol. 35, No. 4, pp. 31-34, 1997.
- 12) 奥田徹: ダムコンクリートのすりへり・洗掘損傷, コンクリート工学, Vol. 17, No. 11, pp. 40-43, 1979.
- 13) Luther, M.D. and Halczak, W.: Long-Term Performance of Silica Fume Concretes in the USA Exposed to Abrasion - Erosion or Cavitation - with 10-Year Results for Kinzua Dam and Los Angeles River, Milwaukee Conference, pp. 863-884.
- 14) 福岡捷二, 渡辺明英, 柏木幸則, 山縣聡: ヨシで覆われた河岸の洪水流による浸食と流路の変動過程, 第 4 回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, pp. 83-88, 1998.
- 15) 例えば吉川秀夫編著: 流砂の水理学, 丸善株式会社, 1985.

(1999. 4. 26 受付)