

百間川二の荒手分流堰周辺部の 局所洗掘に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON LOCAL SCOUR AROUND THE NINOARATE WEIR IN THE HYAKKEN RIVER

前野詩朗¹・神田佳一²・檜谷治³・矢島啓⁴・古川博一⁵・吉田大⁶

Shiro MAENO, Keiichi KANDA, Osamu HINOKIDANI,
Hiroshi YAJIMA, Hirokazu FURUKAWA and Hiroshi YOSHIDA

- 1 正会員 工博 岡山大学助教授 環境理工学部環境デザイン学科
2 正会員 博(工) 明石工業高等専門学校助教授 都市システム工学科
3 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科
4 正会員 博(工) 鳥取大学助手 工学部土木工学科
5 正会員 水資源開発公団 関西支社副支社長
6 正会員 国土交通省中国地方整備局 企画部企画課課長補佐

The Ninoarate weir is constructed at a junction between the Asahi River and the beginning of the Hyakken River in Okayama City. This weir was severely damaged due to local scour under flood flows on October 18th, 1998. The purpose of this study is to clarify the mechanism of the local scour that occurred downstream of the Ninoarate, which has a broad crest and three culverts in the low water course. The surveying of bed morphology and the boring investigation around the weir were carried out to estimate the local scour depth. Also, the scour profiles caused by the flow of water over the weir and water jets from the culverts were measured using the hydraulic channel model. As a result of the experiments, it was found that the scour depth is governed by the discharge from the culverts. The flow over the weir makes the position of the maximum scour depth shift to downstream of the channel. Furthermore, reasonable dimensions of bed protection works were proposed to reduce the local scour at downstream of the weir.

Key Words : Local scour, broad crested weir, culvert, maximum scour depth, bed morphology

1. はじめに

地形的・気象学的に洪水災害が頻発する条件にある我が国では、遠く古来より人命や財産、農作物などを水害から守るために堤防や護岸工事など様々な治水事業が行われている。特に、戦国時代から江戸時代にかけて治水技術の進歩はめざましく、現在でもその機能を失わずに残されている河川構造物も少なくない。これらの多くは、樹木や石材など自然の材料を多用した伝統工法と呼ばれるものであって、歴史的遺構としての価値に加えて、産業革命以後急速に破壊された自然環境の保全と再生を図るための多自然型川づくり思想

の高まりとともに、それらの機能を維持し保全していくことが強く求められている。その代表的事例として旭川放水路(百間川)がある。

岡山県中央部を流れる旭川は、中国山地の朝鍋鷲ヶ山を水源とし、小島湾に注ぐ幹線長 142km、流域面積 1810km²、流域年平均雨量 1590mm の一級河川である。その下流部は、古くから中国地方の文化・経済の中心として栄えた岡山市街地の中央部を縦断しており、出水時には甚大な洪水被害を及ぼしてきた。特に、1654 年の大洪水では、岡山城下に壊滅的な被害が生じたと記録されている。これを契機として、旭川の洪水流量を緩和するために、岡山藩の郡代津田永忠によ

って造られた放水路が百間川である。1686 年に完成した後、数度の改修を経て図-1 に示すような現在の流路となっている。分流部には、分流流量調節のために一の荒手堰堤（旭川 12.2km 地点、堰高 1.8m、堰長 132m）及びその約 1km 下流に二の荒手堰堤（堰高 1.8m、堰長 110m）の二つの越流堤が設置されている（図-2）。分流地点から百間川河口までの平均河床勾配は約 1/2550 である。

表-1 は近年における旭川及び百間川の主要洪水流量を示したものである。現在の河道計画は、旭川下牧地点の計画高水流量 6000m³/s に対し、その内の 2000m³/s を百間川に流すというものである。1998 年の洪水では、百間川への分流流量は計画流量の 1/2 以下であったが、一の荒手堰堤及び二の荒手堰堤の一部が決壊・破堤するなどの河道被害が発生している。これらは、いずれも越流水の作用によって堰堤背面及び下流部に生じた局所洗掘に起因するものと考えられている。また、近年の市街地の拡大とともに増大する洪水流量に対応するために、百間川の疎通能力を向上させることが求められており、低水路の整備とともに、堰堤最適形状の選定及び周辺部の局所洗掘を防止・軽減するための対策を講じることが工学上緊急かつ重要な課題となっている。

土木学会水理委員会では、河川懇談会共同研究「河川構造物周辺の局所洗掘実測と予測精度向上」を 2001 年度より開始している。すなわち、百間川の疎通能力を向上させつつ分流堰の機能維持を図るための施策立案の基礎資料を得ることを目的として、現地調査、模型実験及び数値解析により構造物周辺の流れと河床変動特性について考察するものであり、その研究課題は以下のようなものである。

- 1) 分流堰周辺部の現況及び甚大な河道被害をもたらした 1998 年の出水時における被災状況と災害復旧状況について、現地での測量と流況観測及び資料収集を行う。また、洪水時における分流状況や局所洗掘の発生状況について調査する。
- 2) 計画高水時における分流部を含む旭川・百間川大臣直轄区間での流れと河床変動を平面二次元モデルにより予測する。
- 3) 一の荒手堰堤及び二の荒手堰堤周辺部の局所的な流れと河床変動に関して、詳細な模型実験により洗掘の発達過程を明らかにするとともに、鉛直二次元及び三次元の数値解析モデルを用いて洗掘穴内の流況と洗掘形状の予測を行う。
- 4) 以上の成果を総合し、分流堰周辺部の局所洗掘機構を解明して、その予測精度の向上を図るとともに、最適な分流構造及び洗掘を軽減するための

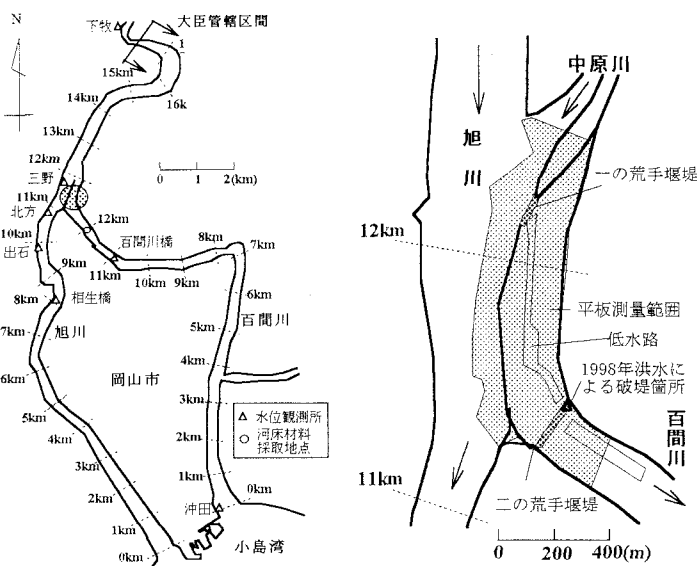


図-1 旭川及び百間川下流域 図-2 分流部詳細図

表-1 旭川・百間川の主要洪水流量 (単位 m³/s)

年月日	旭川			計画流量
	下牧 (19km)	出石 (10km)	中島 (11km)	
1936.9.21	6000			
1945.9.18	4800			
1965.7.23	3090			
1971.7.1	3180			1966.4～
1972.7.10	3700	3198	502	下牧：5000
1976.9.10	1988	1909	79	出石：3800
1979.10.19	2548	2277	271	中島：1200
1980.8.31	2568	2509	61	1992.4～
1995.7.10	2195	2042	153	下牧：6000
1997.8.5	1767	1679	88	出石：4000
1998.10.18	4406	3532	874	中島：2000

合理的な河床保護工の設置方法を提案する。

本研究は、これらの共同研究の一環としてこれまでの研究成果をまとめたものである。すなわち、河道の現況を把握するため、二の荒手堰堤周辺部において詳細な現地測量を実施し、平水時の流況と河道の断面形状及び河床材料に関する詳細な調査を行うとともに、洪水時の流況や洗掘深を実測するための準備を進めてきた。一方、実験水路において河道の 1/16 の縮尺模型を作成し、二の荒手堰堤周辺部の流れとそれに伴う局所洗掘の発達過程を実験的に考察するとともに、洗掘軽減対策として必要な河床保護工の設置方法についても検討した。

2. 局所洗掘に関する現地調査

(1)分流堰周辺の細部測量

現地調査では、まず、分流堰周辺の河道形状について詳細な平板及び水準測量を行い、現況の河道特性を把握する一方、河床材料の採取・分析を行った。百間川 12.0km 地点の流心部で採取した河床材料の代表的粒度分布を図-3 に示す。測量範囲は、図-2 に示すように、一の荒手堰堤の上流 500m 地点から二の荒手堰堤の下流約 300m までの区間において、旭川本川の一部を含む総面積 0.46km² の区域である。これまでに、二の荒手堰堤周辺部の測量を終えている。その結果を図-4 に示す。

(2)1998 年洪水による二の荒手の被災状況と復旧断面

百間川は旭川の洪水対策用放水路としての機能上、通常は僅か 1m³/s の維持流量しか通水されない。このため、二の荒手地点では、幅 20m 程度の低水路がほぼ左岸堤防に沿って掘削されているが、1998 年の洪水では、写真-1 に示すように、二の荒手堰堤の低水路部分が長さ 20m にわたって完全に決壊・流失した。このときの流量ハイドログラフを図-5 に示す。最大流量は 874m³/s で、100m³/s を超える流量の継続時間は約 8 時間である。

その後の復旧工事により、決壊部分は写真-2 及び図-6 に示すような形状に復元された。復旧部分は、堰高及び堰頂幅ともに現存する二の荒手堰堤断面より小さく、堰堤表面及びその上・下流 5m 区間では蛇籠工が敷設されている。堰堤の下部には、平水時の水位の上昇を抑えるための直径 1m の水抜きカルバートが設置されており、通常水はこの管を通して下流に流れている。一方、洪水時には、カルバートから流出する流れと堰堤を越流する流れが共存する複雑な流れ場となり、下流部で大きな局所洗掘が生じることが予測される。

(3)二の荒手堰堤下流部の局所洗掘量調査

復旧部堰堤の下流部における局所洗掘深を測定することを目的として、河床に直径 10cm の穴を 4m の深さで掘削し、着色砂を埋設することとしている。埋設地点は、図-6 に示すような低水路の中心線上の 4 点で、堰堤下流の蛇籠護床工の下流端からの距離は、 $L=1, 4, 8$ 及び 12m である。これらの選定にあたっては、護床工下流部の洗掘に関する筆者らの研究成果^{1), 2)}及び次章で述べる実験結果に基づいて洪水時の局所洗掘形状を予測し、4m 程度の最大洗掘深が生じるであろうと考えられる地点とした。また、洪水期間中の水位及び河床位の連続計測手法³⁾についても、現在検討中である。

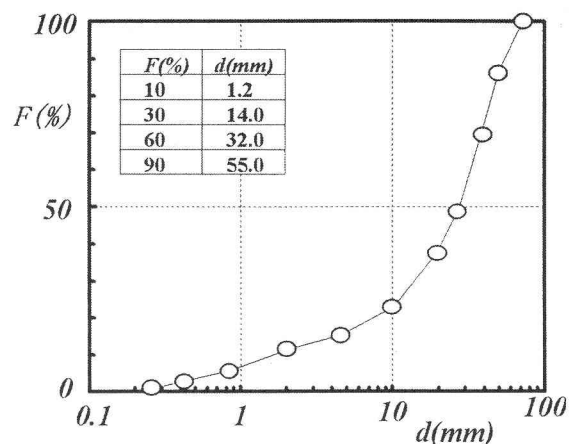


図-3 河床材料の代表的粒度分布

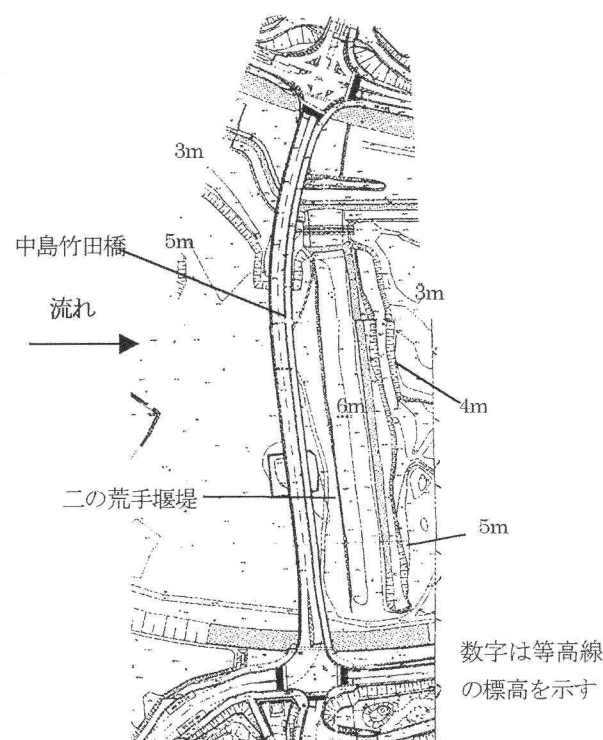


図-4 二の荒手堰堤周辺部の測量結果



写真-1 決壊した二の荒手堰堤 (1998 年 10 月)

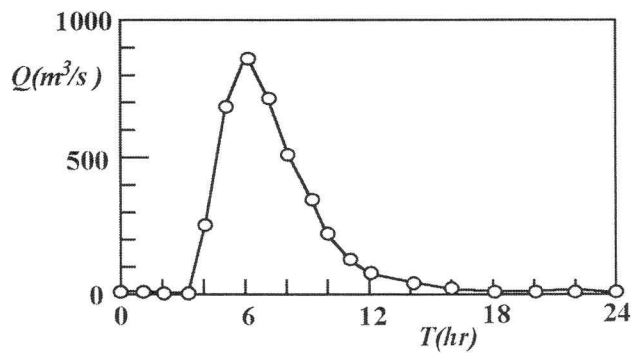


図-5 1998年10月18日洪水の流量ハイドログラフ



写真-2 復旧された低水路部の二の荒手堰堤

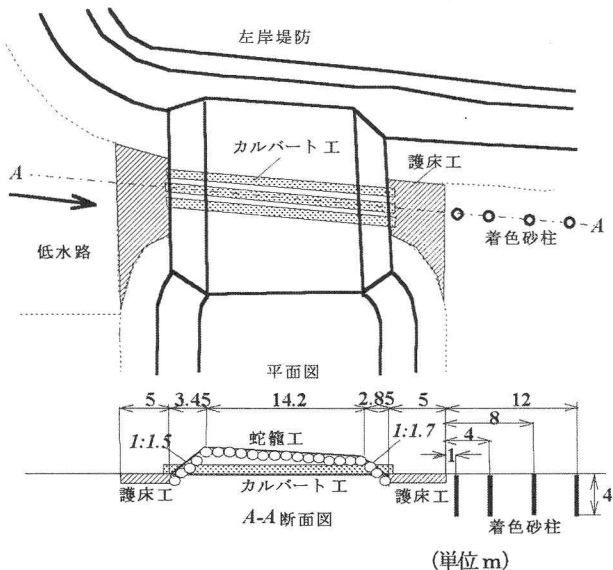


図-6 二の荒手堰堤復旧部の詳細と着色砂の埋設位置

3. 二の荒手堰堤下流の局所洗掘に関する実験

(1) 実験の概要

実験は、水抜きカルバートを有する二の荒手復旧部周辺の局所洗掘特性を明らかにし、その軽減法について検討するものである。

実験には、平均粒径 $d_1=1.8\text{mm}$ の河床砂を 11cm の厚さで敷き均した幅 1m、長さ 10.8m の長方形断面水

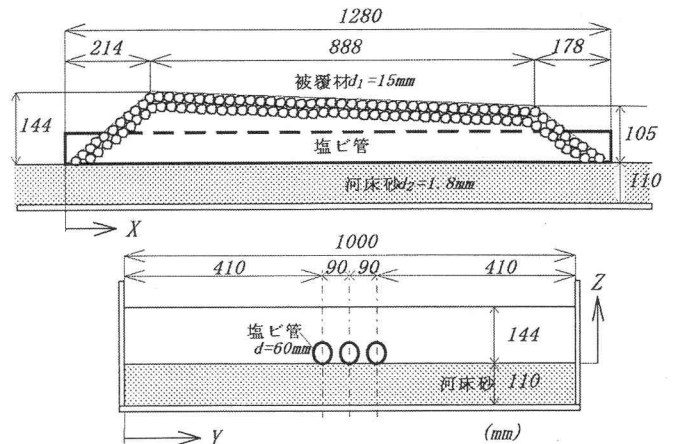


図-7 堰堤模型

表-2 実験条件

実験番号	流量 $Q(\text{l/s})$	上流水深 $h_0(\text{cm})$	下流水深 $h_3(\text{cm})$	越流条件
Run1	8.0	12.0	3.8	非越流
Run2	13.0	15.8	4.8	越流
Run3	18.0	17.0	5.8	越流
Run4	24.5	18.5	7.5	越流

路を用い、その中央部に図-7 に示す堰堤模型を設置した。堰堤の表面は $d_2=15\text{mm}$ の玉石で被覆し、下部には内径 6cm の塩ビ管を 9cm の間隔で 3 本埋設している。水路勾配は 1/2000 とした。これらは、百間川二の荒手低水路部の断面(図-6)を縮尺 1/16 で可能な限り忠実にモデル化したものである。結果の整理に必要な水路の座標系を図中に示す。実験条件は表-2 に示す通りで、堰堤下部の管からのみ水が流出する非越流条件と堰を越える流れを伴う越流条件で実験を行い、堰堤周辺部の流れと河床変動量を測定した。通水時間は 2 時間である。また、洗掘軽減策として蛇籠及び捨石模型による護床工を設置し、その機能と有効性について検討した。

(2) 管の流出流量と堰の越流流量

図-8 は、埋設管流出口の流速から求めた管の流出流量 Q_2 及び堰の越流流量 Q_1 と管中心及び堰頂からの越流水深 h_2 、 h_1 (図-9) との関係を示したものである。 Q_1 、 Q_2 (m^3/s) は、それぞれ水深 h_1 、 h_2 (m) のべき関数で表わされ、つぎの回帰式が得られた。

$$Q_1 = 28.3h_1^{3/2} \quad (1)$$

$$Q_2 = 0.089h_2^{1/2} \quad (2)$$

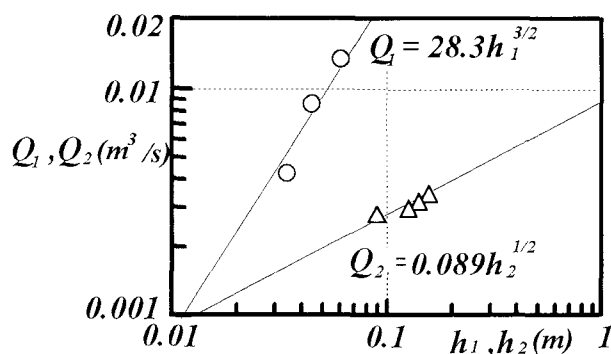


図-8 管の流出流量と堰の越流流量

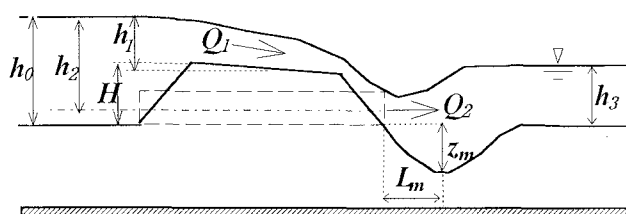


図-9 流れの模式図

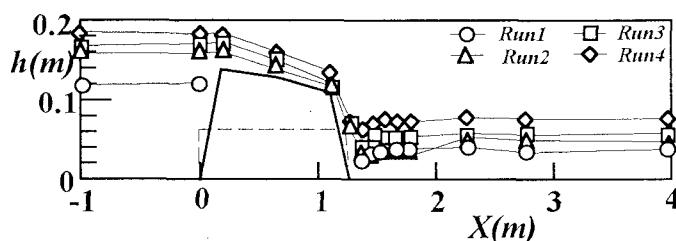


図-10 管の流出流量と堰の越流流量

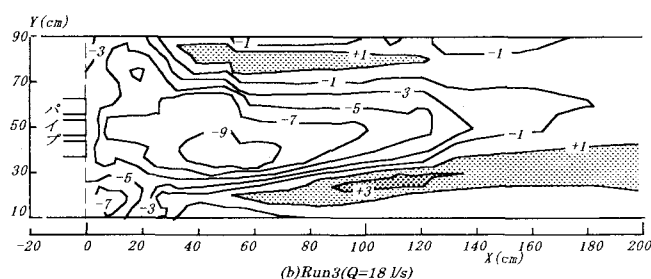
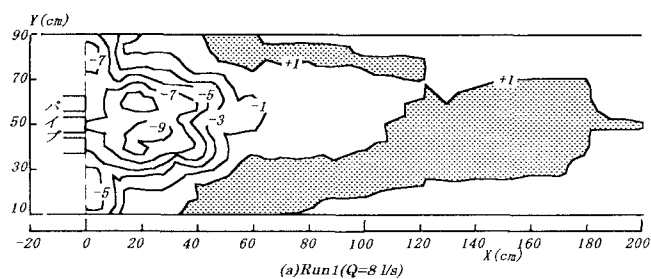


図-11 堰下流の河床変動量

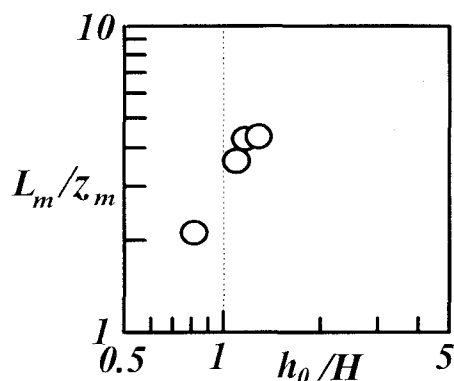


図-12 堰堤下流端から最大洗掘位置までの距離

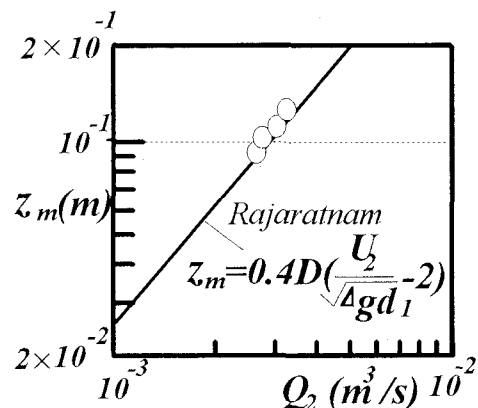


図-13 管の流出流量と最大洗掘深

(3) 堰下流の洗掘特性

図-10 は、各実験について通水初期の水面形を示したものである。堰堤下流部の流れは、Run1 では壁面噴流、Run2～4 では完全越流の形態である。

図-11 は、Run1 及び Run3 の場合について通水 2 時間後の河床変動量のコンター図を示したものである。非越流条件 (Run1) では、埋設管の直下流で大きな洗掘穴が形成されている。その深さは最大 $z_m = 9\text{ cm}$ で、その背後に側岸から水路中央に向かって堆積域がみられる。一方、越流条件 (Run3) では、堰下流斜面に沿う越流水の影響によって洗掘穴は下流側にシフトしており、洗掘範囲も流下方向に広がっている。最大洗掘が生じる堰下流端からの距離 L_m は、Run1 では z_m の 2 倍、Run2～4 では 4 倍程度である (図-12)。

図-13 は、各実験における最大洗掘深 z_m と管の流出流量との関係を示したものである。図には、円管から流出する流れによる洗掘深に関する Rajaratnam・Berry⁴⁾ の実験式

$$z_m = 0.4D \left(\frac{U_2^2}{\sqrt{\Delta g d_1}} - 2 \right) \quad (3)$$

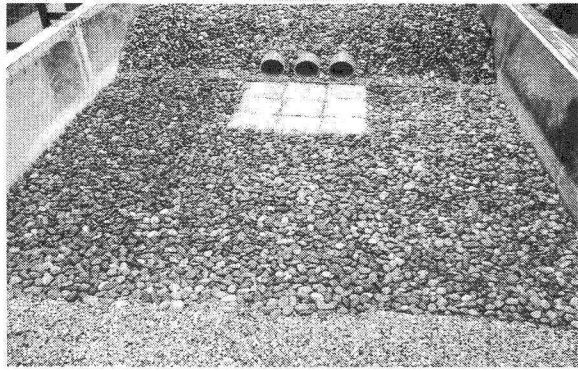


写真-3 護床工模型の設置状況 (Run6)

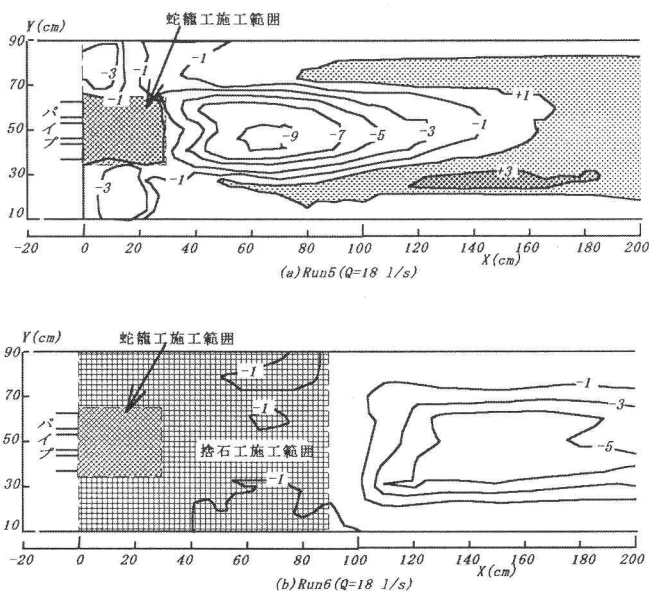


図-14 護床工下流の河床変動量

も示している。ここで、 D は管の内径、 U_2 は管出口の流速、 Δ は砂の相対密度である。 z_m は越流条件においても、(3)式の値を僅かに超える程度であって、越流水深が堰堤高さよりも小さい本実験条件の範囲では、越流水により洗掘穴は下流に移動するものの、最大洗掘深は管出口の流速に支配されるものと考えられる。

(4)洗掘の軽減法に関する検討

堰下流の局所洗掘を軽減するため、Run3と同じ流量条件において、管の出口近傍の $X=0\sim30\text{cm}$ 、 $Y=40\sim60\text{cm}$ の範囲で蛇籠工（ファイバーユニット）を設置したもの（Run5）、さらにその周辺部に捨石工を模した直径15mmの玉石を敷設したもの（Run6、写真-3）について同様の実験を行った。

図-14はそれらの結果を示したもので、護床工の蛇籠のみを設置した場合では、洗掘穴は下流にシフトす

るものの、洗掘深、洗掘範囲ともに軽減されず、その機能を果たしていない。Run6では、捨石の一部は流失しているが、下流の洗掘は、約1/2程度に軽減されている。これより、局所洗掘を軽減するための護床工の施工範囲としては、予測される最大洗掘深の10倍程度の長さが必要であると考えられる。

4. おわりに

本研究では、百間川二の荒手堰堤周辺部の局所洗掘に関して、詳細な現地測量を実施して洪水時の流況や洗掘深を実測するための準備を行うとともに、水抜き管を有する広頂堰下流の洗掘特性を1/16の縮尺模型を用いて実験的に明らかにし、必要な護床工の施工範囲について検討した。

今後、洪水時の流況及び河床変動に関する現地観測や室内実験を継続するとともに、それらの結果をもとに堰堤周辺の流れ場に対して二次元及び三次元の数値計算モデル⁵⁾を構築し、局所洗掘量の予測とその精度向上を図る予定である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、国土交通省中国地方整備局岡山河川工事事務所より現地観測に関する資料を、前田工織(株)より実験用資材を提供して頂いた。また、吉川文人（明石高専専攻科）並びに三宅啓太（神戸市）の両氏には、実験に際して多大のご協力を頂いた。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 神田佳一・村本嘉雄・藤田裕一郎：護床工下流部における局所洗掘とその軽減法に関する研究，土木学会論文集，No.551，II-37，pp.21-36，1996.
- 2) 神田佳一・藤田裕一郎・森田佳宏：高水敷からの帰還流による階段状多自然型護岸工の被災に関する実験，水工学論文集，第42巻，pp.463-468，1998.
- 3) 岡本芳美：電波を用いた空中からの非接触による河川水深の測定，土木学会第56回年次学術講演会講演概要集，第2部，pp.312-313，2001.
- 4) Rajaratnam, N. & B. Berry：Erosion by circular turbulent wall jets, Journal of Hydraulic Research, IAHR, 15(3), pp.277-289, 1977.
- 5) 中本英利・道上正規・檜谷治：射流部を含む段落ち流れの数値解析，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，第2部，pp.334-335，2000.

(2002. 4. 15 受付)