導流工設置による水制工周辺の 流れ構造と洗掘抑制効果

FLOW STRUCTURE AND SCOUR-REPRESSION EFFECT AROUND GROYNE
BY USING TRAINING DIKE

富田 和希*・富永 晃宏**

Tomida KAZUKI and Akihiro TOMINAGA

*学生会員 名古屋工業大学大学院博士前期課程 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

**フェロー会員 工博 名古屋工業大学大学院教授 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

Since groynes are often used for various purposes recently, it is still important to repress local scour around groynes in river management. In this study, a training dike placed in front of groyne is employed as a scour-repression method and the effects of length and location interval were investigated experimentally. The maximum scour depth and scour volume are decreased by putting the training dike. The scour repression rate is increased as the location interval increases. The training dike weakens the deflecting flow at the edge of groyne, and generates the transverse vortex behind it. These two factors affect the scour mechanism around groyne including horse-shoe vortex. In the case of narrow interval, transverse vortex becomes strong, but the deflecting flow becomes weak. In the case of wide interval, the deflecting flow becomes larger again, but horse-shoe vortex in front of the groyne becomes weaker. As a result, local scour is repressed reasonably with an increase of location interval in the range of the present experimental condition.

Key Words : groyne, scour-repression, training dike, flow structure

1. 序論

河川環境の整備と保全を行うことは住民の質の高い生活や良好な環境を築くことにつながる。近年、河川の整備計画制度の見直しが行われ河川整備は進行しているが未だに不十分である。そのため、河川整備計画は長期的な運用により効率よく行われるべきである。

昨今、河川流域の開発や都市化の影響により、流域内の保水機能が失われ、従来に比べ河川に急激な出水をみたり、洪水流量が著しく増大したりする傾向が見られる。一方、各河川ではダムの建設や砂利採取が盛んに行われ、上流からの土砂供給量が減少した結果、河川全体に河床低下がもたらされていると共に、水理構造物周辺に局所的な深掘れの傾向が顕在化しており被害をもたらしている。これは水理構造物の長期的な運用を目指す際、障害となる課題の一つである。

水制には流速を低減したり、水流の方向を変化させたりする働きから、川岸の浸食あるいは護岸の保護、航路のための水深の確保など様々な目的に利用されているが、近年は河川環境に多様性を与えるとして注目されており、

多くの研究が行われている。水制周辺の流れ構造や局所洗掘について徐々に明らかにされ¹⁾²⁾³⁾、水制の設置角度や相対水制高といったパラメータの違いによる3次元的な流れ構造⁴⁾⁵⁾や最大洗掘深と水制の長さ、高さ、水深の関係⁶⁾について検討されている。また、Melville ら⁷⁾や、Nasrollahi ら⁸⁾により膨大な実験データに基づいた洗掘深予測式が作成されている。

洗掘防止に関する研究は、橋脚については以前から多く行われているが⁹⁾、水制に関するものは橋脚に比べると数少ない状況である。庄内川のかごマット水制に関する研究¹⁰⁾より、水制の上流に障害物を設置した場合、水制の洗掘を軽減する効果があることが実験的に明らかにされた。このことから、本研究では水制前面に置かれた本水制より高さの低い障害物が、水制工全体としての流れ構造の変化や洗掘に及ぼす影響を検討することを目的としている。ここではこの障害物を「導流工」と呼ぶこととする。導流工の長さや設置間隔が水制周辺の流れ構造や洗掘抑制効果にどのような影響があるのかを実験的に検討した。実験では導流工模型を水制上流に設置し、固定床実験において流れ構造を計測し、移動床実験において河床変動計測を行った。移動床実験から導流工が水

制周辺の局所洗掘を抑制する効果が示され、固定床における流れ構造から、導流工によって局所洗掘が抑制されるメカニズムを検討した。

2. 実験方法

実験に用いた水路は全長13m、幅0.6m、高さ0.3mの勾配可変型開水路である。流下方向にx軸、横断方向にy軸、鉛直上向きにz軸を取り、水制の上流面を $x=0\text{cm}$ 、右岸壁面を $y=0\text{cm}$ 、初期の河床面を $z=0\text{cm}$ とする。

移動床実験では水路上流側より4.5mから10.5mの6mを移動床区間とし、中央粒径 $D_{50}=0.950\text{mm}$ の砂を厚さ11cmに平らに敷き詰めた。固定床実験では移動床区間に鉄板を敷くことで平坦固定床とし、鉄板には砂を散布することで粗度を与えた。

水制の模型は、線径1.65mmの針金で作成した型枠に、金網を巻き付け、粒径3~4.76mmの細礫を詰めて作成した。導流工も同じ材料を用いて作成し、空隙率はいずれも体積比で約0.24である。水制は長さ10cm、幅5cm、河床からの高さを6cm、導流工は水制より抵抗が少なくなるように幅5cm、河床からの高さを3cmとし水制を移動床区間開始地点から300cm($x=0\text{cm}$)の右岸側に設置した。図-1に模型設置状況を示す。導流工を水制の上流側に設置し、水制と導流工の設置間隔 d は0,5,10,15cmの4ケース、導流工長 L を5, 10cmの2ケース、流量 Q は水制に対し非越流時を $0.0106\text{ m}^3/\text{s}$ 、越流時を $0.0168\text{ m}^3/\text{s}$ とし、水深 h が移動床区間の下流端で5.0cm, 7.0cmとした。設置間隔0cmのケースでは導流工が水制と密着しており、水制で発生する馬蹄渦が直接河床に届かない形状である。河床勾配は1/500とした。表-1に実験条件を示す。

移動床実験では、通水時間を目視において河床変動が殆ど見られなくなる90分とし、通水後の河床高をレーザー距離計(KEYENCE 社製)を用いて計測した。上流からの給砂は行っておらず静的洗掘としている。流速の計測には2タイプの2成分電磁流速計(東京計測社製)を用いた。水平方向の流速計測にはI型2成分電磁流速計、鉛直方向の流速計測にはL型2成分電磁流速計を使用した。計測

表-1 実験条件

表 1 実験条件

(a) 非越流時									
ケース名	caseA-0	caseA-1	caseA-2	caseA-3	caseA-4	caseA-5	caseA-6	caseA-7	caseA-8
導流工長 L [cm]	5				10				
設置間隔 d [cm]	0	5	10	15	0	5	10	15	
流量 Q [m^3/s]	0.0106								
水深 h [cm]	5.0								
(b) 越流時									
ケース名	caseB-0	caseB-1	caseB-2	caseB-3	caseB-4	caseB-5	caseB-6	caseB-7	caseB-8
導流工長 L [cm]	5				10				
設置間隔 d [cm]	0	5	10	15	0	5	10	15	
流量 Q [m^3/s]	0.0168								
水深 h [cm]	7.0

図-1 模型設置状況

条件はサンプリング周波数100Hz、サンプリング数4096で約41秒間計測している。また、水位の計測にはデジタルポイントゲージ(最小読取値0.01mm)を用いた。

今回は初めにケース全体における条件の違いから導流工設置による洗掘抑制効果の傾向を検討し、洗掘形状と流れ構造については caseB-0, caseB-5~8の5ケースについて検討を行った。

3. 実験結果とその考察

まず、移動床実験の実験結果から導流工設置による洗掘抑制効果を検討する。表-2に各ケースの最大洗掘深、最大洗掘位置、洗掘体積を示す。洗掘体積は通水後の河床高から $z<0$ の範囲における洗掘孔の体積を計算したものである。

(1) 洗掘軽減率の検討

図-2に最大洗掘深軽減率を示す。これは導流工を設置しないケースの最大洗掘深 e_0 と各ケースの最大洗掘深 e の差を e_0 に対する割合で表したものである。中央縦線より左側の導流工長5cmのケース、右側が10cmのケース

表-2 洗掘諸元

ケース名	導流工長 L [cm]	設置間隔 d [cm]	最大洗掘深 e [cm]	最大洗掘位置 [cm]			洗掘体積 V [cm^3]		
				x	y	全体	上流	下流	
caseA-0			7.0	1.0	11.5	850	346	505	
caseA-1	5	0	6.3	1.0	11	710	262	448	
caseA-2		5	5.6	-1.0	10.5	661	359	302	
caseA-3		10	4.7	-1.0	11	448	223	225	
caseA-4		15	4.8	-1.0	10	454	208	246	
caseA-5	10	0	5.5	-4.0	11	542	277	265	
caseA-6		5	4.0	-0.7	11.5	536	248	287	
caseA-7		10	3.3	0.0	11.5	309	164	145	
caseA-8		15	2.9	1.0	11.25	218	119	99	
caseB-0			9.9	0.0	11	2836	1395	1441	
caseB-1	5	0	8.5	-1.0	10	2226	800	1426	
caseB-2		5	8.2	-2.0	6.25	1663	865	797	
caseB-3		10	7.6	-1.0	6.5	1497	940	557	
caseB-4		15	7.0	-1.0	9	1353	818	535	
caseB-5	10	0	10.1	-5.0	11.5	2589	1405	1183	
caseB-6		5	8.6	-2.0	5.25	1719	1224	494	
caseB-7		10	7.4	-2.0	8	1486	1148	338	
caseB-8		15	6.2	-1.0	9.5	1277	901	377

図-2 最大洗掘深軽減率

であり、caseA は非越流時、caseB は越流時である。図-2 よりケース全体において導流工を設置することで最大洗掘深は軽減されていることがわかる。また、非越流、及び越流の両ケースとも設置間隔が広がるほど軽減率が大きくなっている。非越流時には同じ設置間隔で比べると、導流工長 5cm のケースより 10cm のケースの方が軽減率が大きい傾向にあるが、越流時には 10cm のケースで非越流に比べて軽減率が減少し、設置間隔が狭いケースでは 10cm の軽減率の方がむしろ小さくなっている。また、導流工長が 5cm では越流、非越流で大きな差はないが、流れ構造には違いが見られ、表-2 から分かるように最大洗掘位置は水制前面の側壁寄りに移動している。10cm でも同様の傾向であるが、越流時には流れ構造の変化が著しくなり、水制前面の洗掘が大きくなったと考えられる。ただし、最も洗掘軽減率が大きくなるのは導流工長 10cm で設置間隔が大きい場合であるから、これらのケースのうち特に洗掘深が大きくなる越流時において設置間隔の違いについて詳しく検討する。

(2) 設置間隔の効果

図-3 に caseB-0 および B-5～B-8 の河床高コンター図を示す。また、図-4 には最大洗掘深、洗掘体積の caseB-0 の値に対する割合 e/e_0 、 V/V_0 を示す。さらに、図-5 に洗掘体積を水制前面($x=0$ cm)で上流側と下流側に分けて示す。図-6 には最大洗掘の発生位置を示す。また、図-7 に $y=11$ cm における河床高の縦断面図、図-8 に各ケースの最大洗掘が発生した地点の河床高の横断面図を示す。ただし、caseB-0、B-5 についてはそれぞれ水制、導流工前面の値である。

図-3 河床高コンター図

水制単体では最大洗掘が水制斜め前方で発生し、水制上流側では側壁まで広く洗掘が発生しており、水制先端から下流にかけて洗掘域が広がっている。最大洗掘深は

図-4 最大洗掘深、洗掘体積

図-5 上流、下流側 洗掘体積

図-6 最大洗掘発生位置

図-7 河床高縦断面図 ($y=11$ cm)

図-8 河床高横断面図(最大地点)

図—9 水面形

9.9cm であり、洗掘体積は水制の下流側、上流側で同程度となっている。caseB-5 では最大洗掘が導流工斜め前方で発生し、最大洗掘深はむしろ大きくなっているが、洗掘体積は若干減少している。水制から上流と下流に分けてみた場合（図-5）、上流域はほとんど変化しておらず、下流の洗掘の減少が寄与しているが、その減少率は他のケースに比べて小さい。ここで、図-8 の河床高横断図をみると、caseB-5 では水制頭部より側壁側の洗掘が抑制されているが、水制頭部から中央側の形状は水制単体のときと類似している。

次に、導流工を水制と間隔を開けて設置した場合、水制、導流工ともに前面で洗掘が発生しているが、導流工の洗掘は水制単体の場合よりも小さい。Elawady ら⁹⁾の研究で相対水制高が小さいもののほど最大洗掘深が小さい傾向が得られている。導流工だけの移動床実験も行っており、最大洗掘深が6.6cm であった。caseB-5 ではこれを上回り、導流工の設置間隔が大きくなるほど導流工の洗掘深が小さくなっている。したがって、導流工と水制は互いに影響を及ぼしあっていることがわかる。結果として、図-4に示すように最大洗掘深は設置間隔が広いもののほど小さくなっており、洗掘体積も同様である。水制下流側においては設置間隔が大きくなるにつれて水制裏側の洗掘が小さくなっている。図-5、図-7から明らかなように水制上流側の洗掘よりも下流側の洗掘が大幅に抑制されている。堆積も水制単体のものと比べると水制の近くで小規模に発生している。また、図-6からわかるように、最大洗掘深の発生位置は水制単体のものより側壁近くに移動しており、設置間隔が狭くなるほど側壁に近づいている。また図-8を見ると、側壁近傍での洗掘深は設置間隔が狭いもののほど深くなっているが、最大洗掘から水路中央にかけての形状は設置間隔によらずどれも類似している。

(3) 流れ構造と洗掘機構に関する考察

導流工設置による洗掘抑制のメカニズムを明らかにするため、固定床実験による水深、流速計測の結果を検討した。固定床の流れではあるが、潜在的な洗掘の要因を把握することができる。

図—10 流速ベクトル
($z=1$ cm)

図—11 鉛直流速
($z=1$ cm)

図-9に caseB-0と caseB-8の水面形コンターと caseB-0, caseB-5～8の5ケースの $y=9\text{cm}$ における水面形縦断面図を示す。水面形は水制単体設置の場合、水制通過時に1.5cm程度減少しており、水制上下流で全体的に1cm程度の水位差が発生していた。導流工を設置した場合、水深は導流工越流時にいったん低下し、水制前面で再び上昇するが、設置間隔が広がるほど水制前後の水位差は減少している。この水位差は水制の抗力の大きさを相対的に示しており、導流工設置により水制自体の抗力は減少していると推定できる。

底面近傍 ($z=1\text{cm}$) の平面流速ベクトルを図-10に、鉛直方向流速コンター ($z=1\text{cm}$) を図-11に示す。図に示す流速は x 方向, y 方向ともに3cm 間隔で計測したものであるが、 $-3\text{cm} \leq x \leq 4\text{cm}$, $3\text{cm} \leq y \leq 15\text{cm}$ においては1cm 間隔で計測を行っている。また、底面せん断応力を次式により推定した。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho C_f}{2} U_b \sqrt{U_b^2 + V_b^2}, \tau_{by} = \frac{\rho C_f}{2} V_b \sqrt{U_b^2 + V_b^2} \quad (1)$$

ここに、 U_b , V_b は $z=1\text{cm}$ における流下方向及び横断方向の平均流速、 C_f は摩擦損失係数である。 C_f は摩擦速度との対応から見積もることができるが、これを全域で一定と仮定して $x = -45\text{cm}$ の平均値 $\bar{C}_{f0}$ で無次元化した流下方向および横断方向の底面せん断応力のコンターを図-12に示す。

水制単体では水制上流は堰上げ効果により流速が減少しており、水制前面で水はねが発生し、その周辺で流速が増大している。また、水制斜め前方では下降流が発生している。水制を越流しているため水制背後で流れが下降している。caseB-5では導流工が水制と密着しており、下降流が導流工斜め前方と水制先端で発生しており、水制先端付近で最大値を示している。流速ベクトルから水制先端では水はねが小さくほぼ流下方向に平行な流れとなっており、水制先端での下降流により水制先端から下流付近では流下方向流速が水制単体時よりも高い値を示している。

間隔を開けて導流工を設置した場合、導流工の水はねにより上流から流速が加速し、導流工上流側から堰上げ効果による流速減少が見られる。caseB-6では導流工を越流した後に水制前面で強い下降流が認められ、水制先端から根元まで幅広く発生している。導流工と水制の間では逆流が発生しており、横断方向軸を持つ渦構造が示唆される。caseB-7, caseB-8では導流工根本付近から下降流が発生し、水制先端につながっている。また、下降流の周りに上昇流が発生していることから、傾斜横断軸を持つ渦構造が示唆され、水制先端付近では馬蹄渦のように水制周りを回り込む渦が発生していると考えられる。設置間隔が狭いものほど上昇流、下降流の最大値が大き

図-12 無次元底面せん断応力コンター図

く、渦は強くなる傾向がある。また、図-12より水制と導流工の間では流下方向底面せん断応力は小さくなり、低い値の領域は水路中央側へ張り出している。水制先端付近では流下方向底面せん断応力が大きくなっている。横断方向底面せん断応力は caseB-5 では導流工先端で、caseB-6 では水制先端で水制単体時に比べて小さくなっているが、間隔が広い caseB-7, B-8 ではほぼ水制単体時と同程度になっている。

導流工を水制と間隔をあけて設置することで、導流工の越流により横断渦構造は強められるが、水はねによる掃流力が弱められるために洗掘が抑制されたものと考え

られる。また、設置間隔の違いによりこれらの寄与率が変化する。

水制工周辺の洗掘は、水制前面で下降する流れが形成する馬蹄渦と、水制先端で集中して水路中央へ向きを変える水はね流れの2つの要因により発生するものと考えられる。馬蹄渦の強さは下降流速で評価できると考えられることから下降流速を指標として検討する。水はねの大きさは水制周辺の底面せん断応力で評価する。図-13には各ケースの合成された無次元底面せん断応力 $\tau_s / \bar{\tau}_{bx}$ の $x=-3\sim 3\text{cm}$, $y=7\sim 13\text{cm}$ の範囲での平均値と、水制の前面から先端にかけての領域での $z=1\text{cm}$ の鉛直方向流速の平均値 W_s を示す。

caseB-5 では底面せん断応力はほぼ同程度で、下降流速は caseB-0 より小さくなっているが、最大洗掘深、洗掘体積はほとんど抑制されなかった。これは図-11 に示すように水制斜め前方付近で下降流速と底面せん断応力が増大しているため、潜在的に洗掘を拡大させる要因があるものと考えられる。また、実際の移動床では河床形状が変化し洗掘孔が拡大することにより導流工前面で馬蹄渦が拡大するため導流工斜め前方で最大洗掘が発生したと考えられる。

導流工の設置間隔 d/L が 0.5 となる caseB-6 では平均せん断応力が減少し、それに伴い洗掘が抑制されているが、下降流が増大していることから、導流工と水制の間の横断渦が強くなったため、ここでの洗掘が増大している。そのため、水制上流側の洗掘体積は下流側と比べて抑制されていない。設置間隔が広がると底面せん断応力は回復に向かうがこの範囲では caseB-0 より小さい値を保ち、加えて横断渦の効果が弱くなることから、最大洗掘発生位置が水制斜め前方に寄り、全体的には洗掘が抑制されたと考えられる。

4. 結論

本研究では設置された水制の上流側に障害物として導流工を設置した実験を行い、導流工による水制工周辺の洗掘抑制効果を検討した。得られた主な結果を次に示す。

- (1) 導流工を水制と一体化させ水制前面を階段状にした場合、前面における下降流は減少するが洗掘が進行すると導流工前面の相対的な面積が増大するため洗掘の抑制効果は大きくない。
- (2) 導流工を水制と間隔を開けて設置した場合、導流工で水はねが発生することで水制の水はね流速が減少し、全体で洗掘が抑制される。
- (3) 導流工を越流することにより導流工背後に横断渦が発生するため、設置間隔が狭いものほど水制前面の抑制効果が小さくなる。

図-13 無次元底面せん断応力、鉛直方向流速の平均

- (4) 導流工の設置間隔が広がると発生する横断渦は傾斜水制根元付近には到達しなくなることから、水制前面の馬蹄渦が弱まり、全体として洗掘は抑制される。以上より水制の上流側に水制より高さの低い障害物となる導流工を設置することにより水制周辺の局所洗掘は抑制され、設置間隔が広がるほどその効果は大きくなることが示された。しかし、本研究では設置間隔の違いによる洗掘抑制効果の最大地点を捉えることができていないため、今後検討する必要がある。

参考文献

- 1) 土屋照彦, 石崎勝義: 水制の洗掘, 水理講演会論文集, 第10巻, pp.65-70, 1966
- 2) 道上正規, 檜谷治: 水制周辺の平面2次元河床変動計算に関する研究, 水工学論文集, 第36巻, pp.61-66, 1992.
- 3) 富永晃宏, 中野義郎, 藤田亨良: 越流型水制域内の流れ構造の可視化解析, 水工学論文集, 第44巻, pp.1041-1046, 2000.
- 4) 富永晃宏, 田本典秀: 越流型連続水制周辺の流れ構造に及ぼす水制設置角度の効果, 水工学論文集, 第48巻, pp.805-810, 2004.
- 5) 富永晃宏, 中野義郎, 井嶋康二, 長坂剛: 越流型水制域内の流れ構造に及ぼす相対水制高の影響, 応用力学論文集, Vol.3, pp.805-812, 2000.
- 6) Elawady, E., Michiue, M., Hinokidani, O.: Movable bed scour around submerged spur-dikes, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.45, pp.373-378, 2001.
- 7) Melville, B.W.: Pier and abutment scour, Integrated approach, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.124, No.2, pp.125-136, 1997.
- 8) Nasrollahi, A., Ghodsian, M., Neyshabouri, S.A.A.S.: Local Scour at Permeable Spur Dikes, Journal of Applied Sciences, 8(19), pp.3398-3406, 2008.
- 9) 宇民正: 橋脚周辺の流れの機構と洗掘防止法に関する研究, 京都大学学位論文, 1975.
- 10) 富永晃宏, 榊卓也, 山本裕治: かごマットを用いた水制周辺の現地観測と河床変動特性, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010.

(2012.9.30受付)