

石かご水制下流域の河床形状変化に関する研究

STUDY ON THE CHANGE OF RIVER-BED CONFIGURATION CAUSED BY A PERMEABLE GROIN OF STONE GABIONS

村岡一志¹・森本 稔²・門田章宏³・鈴木幸一⁴

Hitoshi MURAOKA, Minoru MORIMOTO, Akihiro KADOTA and Koichi SUZUKI

¹正会員 愛媛大学大学院 理工学研究科博士後期課程 生産環境工学専攻

²学生員 愛媛大学大学院 理工学研究科博士前期課程 生産環境工学専攻

³正会員 工博 愛媛大学大学院理工学研究科講師 生産環境工学専攻

⁴フェロー会員 工博 愛媛大学大学院理工学研究科教授 生産環境工学専攻
(〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

This paper shows the experimental results on the river-bed configuration caused by a single permeable groin made of stone gabions. The local scour around the permeable groin is proved to be very small, whereas the bed-configuration of the downstream region far from the groin largely changes forming sand waves. The characteristics of the bed configuration downstream of a single permeable groin are experimentally revealed to be influenced by the permeability and the scale of the groin of stone gabions as well as the flow conditions such as submerged or emerged flow over the groin.

Key Words : stone gabion, permeable groin, bed configuration, sand waves

1. はじめに

河床全体では砂の移動のない静的河床の水理条件下でも、水制より下流域での流れ場の変化によって河床の一部が動的状態となることによって、河床波の発生など河床形状の変化が生じる。すなわち、水制周辺の局所洗掘や水制による流れ場の変化によって生じた河床変動が水制下流域一帯に広がっていく。このように周辺の局所洗掘以外に水制による影響は下流側へ水制長の数十倍に対岸まで及ぶにもかかわらず、その河床形状特性に注目した研究は少ない。富永ら¹⁾の水制背後の透過流による影響の研究や、福岡ら²⁾の透過型水制を用いた研究で示されている程度である。

不透水水制ではその先端部付近の局所洗掘が特に問題となり^{3,4,5)}、下流域全体の河床形状は工学的にあまり問題がないと見なされていたと考える。一方、最近環境を考慮した水制ということで、道奥ら⁶⁾、李ら⁷⁾の研究に見られるような石かご(蛇籠)などの透水性のある材料で造られた水制が用いられることが考えられる。この場合は水制周辺での局所洗掘は小さくなく、むしろ水制下流域の河床形状の変化が対岸まで及ぶなどその特性を把

握しておく必要が生じている。

写真-1は石かごによる水制を河川湾曲部に連続的に配置した例である(愛媛県松山市内川)。従来あまり使用してこなかった石かごを水制として用いる場合、その水制としての機能の他に環境機能が期待される。石かごの空隙を生物の生息空間として利用できること、石の表面に生息する微生物により水質浄化機能が期待できること、石の間に土砂を保有することによる植物の繁茂、景観の向上等である。

本研究では、石かごを単独水制として設置することによって、周辺および下流域の局所河床変動や河床形状変化がどのように起こるかを実験的に検討する。



写真-1 湾曲部に石かご水制を連続的に設置した例

2. 実験の概要

実験は、図-1に示す長さ20m、幅0.5m、高さ0.5m、勾配1/400の循環式直線水路を用いて行った。水路の上流部に設置した三角堰によって流量を調整し、水路の下流端に設置した可動堰で水深を調整できる。流下した水はポンプアップして上流端へ戻す。水路中央部の2m区間を移動床として平均粒径0.3mmの砂を厚さ10cm敷き詰めて、この部分に単独水制を設置した。なお、今回の実験は静的洗掘条件であるため、下流域の影響範囲としては、水制長の10～15倍程度で十分であると考えた。

水制の模型としては、金網製のかごに石としてビー玉を詰めた直方体水制である。水制の流下方向幅 W_g は7.5cm、高さ H_g は5cmと一定として、水路横断方向の水制長 L_g を5cm,10cm,15cmの3通り変化させた（写真-2）。各石かごの中に詰めたビー玉はほぼ均一粒径でその直径 D_g は14mm,16mm,25mmの3通り変化させた。また、水理条件としては、接近流の流速 v_o を一定とし、接近流の水深 h_o を変化させ、水制を越流する状態と越流しない状態について、無給砂、静的洗掘条件にて実験を行った。これらの実験条件は表-1のとおりである。

Run1では、石かご水制周辺の河床形状の経時変化を見るために、通水開始後10分,30分,60分,90分,120分後の河床の凹凸を測定した。測定方法としては、所定の時間経過後に水を抜いて凹凸を測定し、再度 $t=0$ から通水を開始した。その都度写真を撮って再現性を確認した。

Run2,Run3では越流、非越流の条件のもとで水制長を変化させ、Run4,Run5では越流、非越流のもとでビー玉直径を変化させ、それぞれ通水60分後に凹凸を測定した。

河床形状測定については、平面位置(x, y)を光センサー（キーエンス製、型式VP-90）で計測し、河床高(z)はレーザー変位計（キーエンス製、型式LB-300）で計測した（写真-3）。また、 x 成分および y 成分の流速を2次元電磁流速計（ケネック製、本体部型式VP1200、検出部型式VPT2-200-08PS）で測定した。座標の原点は、砂上面右岸上流端である。

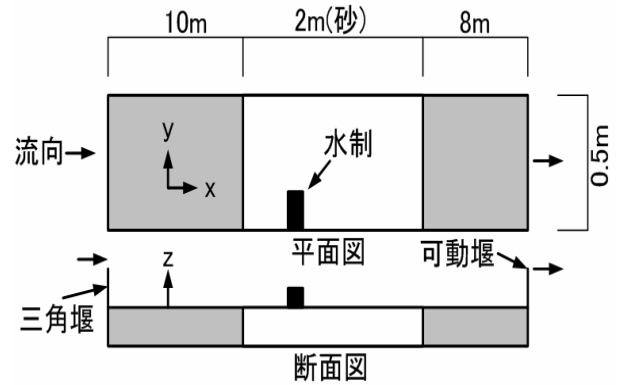


図-1 実験装置平面断面図



写真-2 石かご水制模型

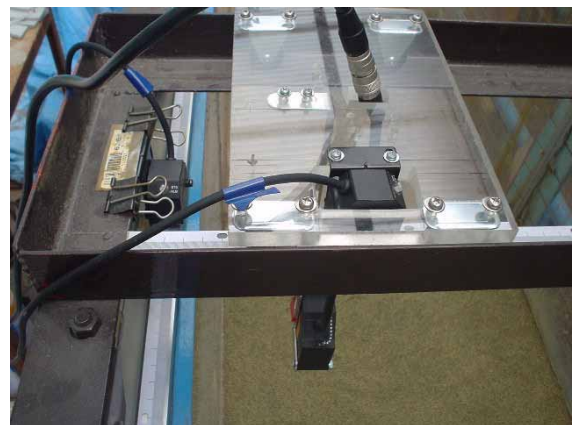


写真-3 自動計測装置

表-1 実験条件

Run No.	1	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3	5-1	5-2	5-3
水制長 L_g (cm)	10	5	10	15	5	10	15	10	10	10	10	10	10
接近流速 v_o (cm/s)	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
接近水深 h_o (cm)	5	10	10	10	5	5	5	10	10	10	5	5	5
ビー玉直径 D_g (mm)	16	16	16	16	16	16	16	25	16	14	25	16	14
無次元掃流力 τ^*	0.031	0.026			0.031			0.026			0.031		
フルード数 Fr	0.30	0.21			0.30			0.21			0.30		
越流・非越流	非越流	越流			非越流			越流			非越流		

3. 実験結果

(1) 河床形状の時間変化

図-2は実験Run 1について石かご水制周辺の河床形状の経時変化を示したものである。図は上から通水後10分、30分、60分、90分、120分後のものであり、流水は図の左側から右側に向かって流れている。水制の水路横断方向長さ $L_g=10\text{cm}$ の水制が $x=30\text{cm}$ のところに設置されている。従来の研究によると不透水水制では水制先端部の局所洗

掘が卓越するが、この研究で対象とする石かご水制の場合、水制先端部($x=30, y=10$)での局所洗掘はわずかで、水制からかなり離れた下流域($40 \leq x \leq 150, 10 \leq y \leq 50$)での河床形状の変化が顕著となっている。図-2より、通水後10分で比較的小さな河床波が水制下流域に発達しているが、90分後までは時間の経過とともに河床波のサイズが大きく成長し、その影響を受ける下流域の範囲も、より下流側へ広がっている。120分後には大きなサイズの河床波が壊れて小さい河床波が多数見られる複雑な形をしている。

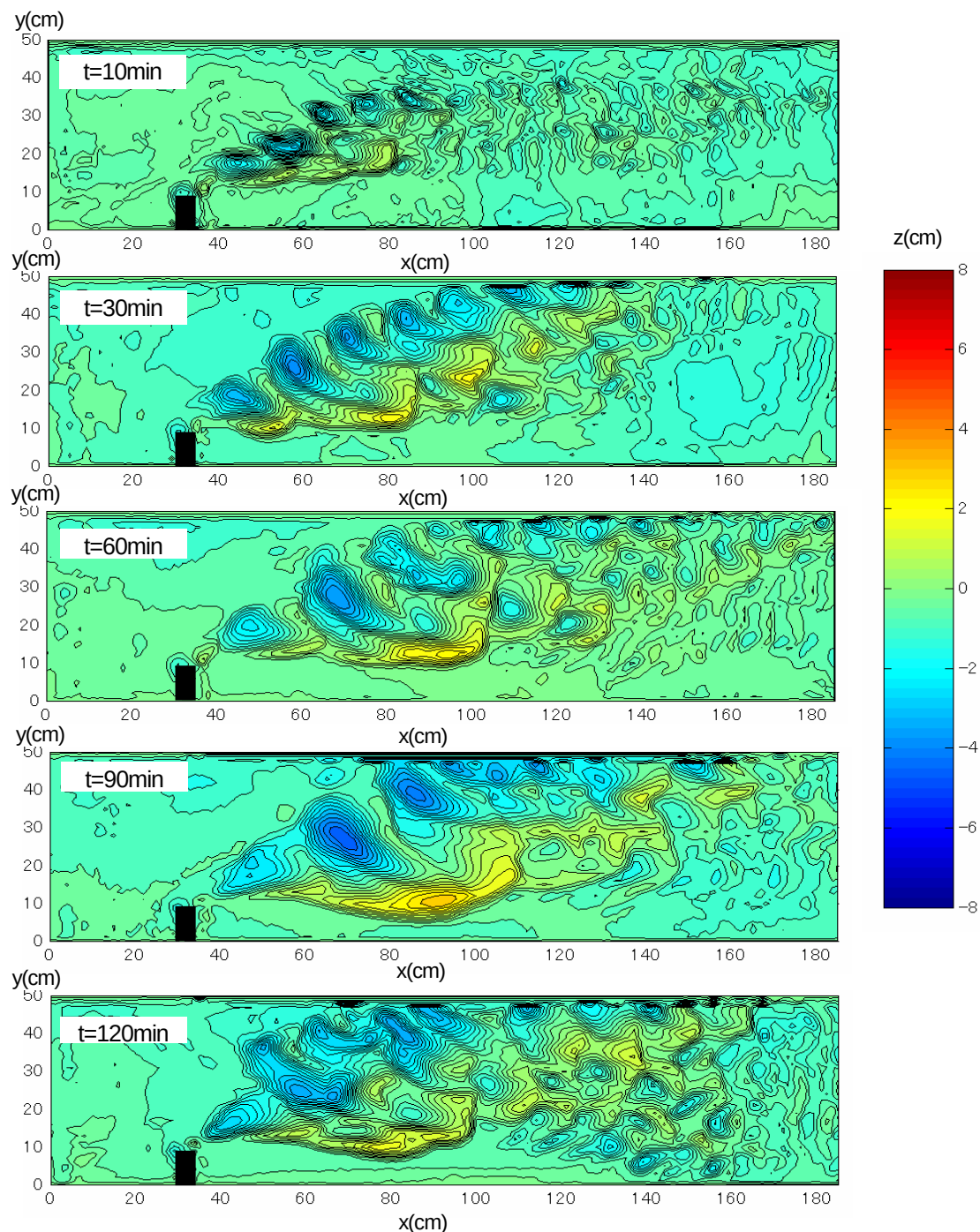


図-2 石かご水制周辺の河床形状の時間変化

(2) 水制長 L_g を変化させた場合の河床形状変化

河床形状の変化が緩慢になった(図-6の Z_s/L_g の時間的変化より)通水後60分の河床について以下検討する。

図-3(a), 図-3(b)に水制長を5cm, 10cm, 15cmと変化させた場合の河床形状変化を示す。(a)は接近水深を10cmとして流水が水制の上部を越流する場合であり, (b)は接近水深を5cmとして流水が水制の上部を越流しない場合である。両者とも接近流速は同じ21cm/sである。

図-3(a)より, 水制長5cmでは河床の形態変化がほとんどなく, 水制長が長くなるにしたがって河床形状変化が大きくなり, 水制長が15cmでは河床波が対岸まで達している。

図-3(b)でも同様の傾向がみられるが, 越流する場合と越流しない場合を比較すると, 越流しない場合のほうが河床変動の規模が大きくなっており(規模の大小は, 図の中央部に見られる凹凸の大きい部分の面積を視覚的に判断した), 掃流力が大きいことが伺える。

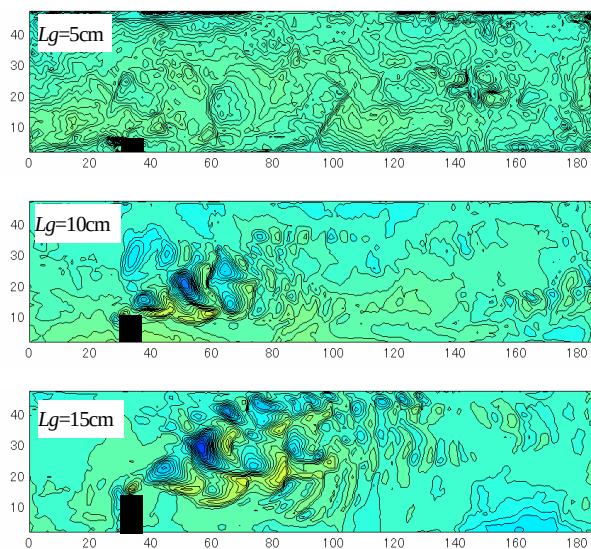


図-3(a) 水制長 L_g を変えた場合の河床形態変化 (越流)
(図の各軸およびコンター色は図-2と同じ)

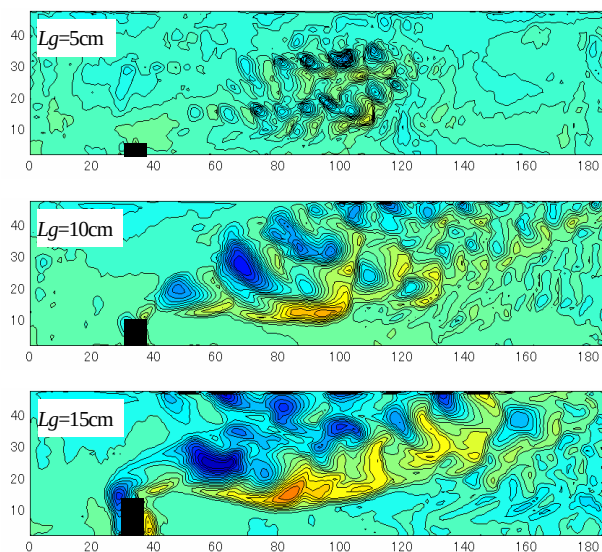


図-3(b) 水制長 L_g を変えた場合の河床形態変化 (非越流)
(図の各軸およびコンター色は図-2と同じ)

(3) 透水性 (ビー玉の粒径 D_g) を変化させた場合の河床形状変化

図-4(a), 図-4(b)に水制の透水性を変化させた場合の河床形状変化を示す。ここでは透水性を代表するものとして石かごに詰めたビー玉の粒径を25mm, 16mm, 14mmと変化させた。なお, 図-4(b)の実験は本報の一連の実験の中で最初に行ったもので, 水制の設置位置を $x=60$ cmのところとしている。また, 河床形状測定は自動計測ではなくポイントゲージとスケールによる手動測定である。

図-4(a)より, 流水が水制の上部を越流する場合には, 透水性の大きい25mmの場合には凹凸の小さい河床波が比較的広範囲に広がっているが, 透水性が小さくなるにしたがって凹凸が大きくなり, 変化の影響範囲が比較的狭くなっている。流水が水制を越流しない図-4(b)の場合には, 16mmの場合に水制から約60cm下流から凹凸が激しくなっている。これは石かごの特徴の1つであるが, 微妙な実験なので再現性は必ずしも高くない。

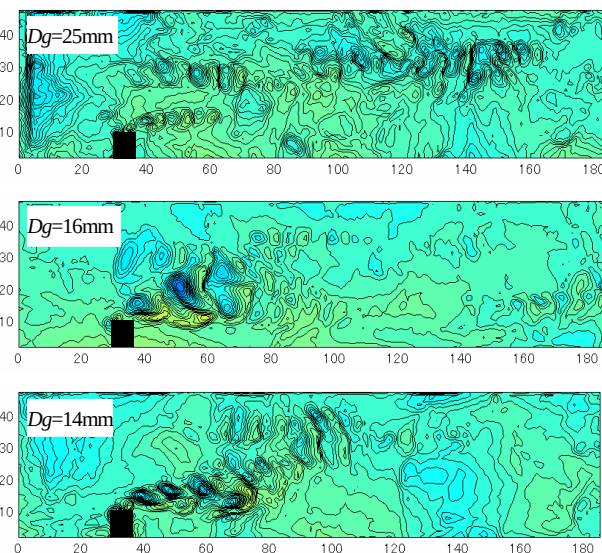


図-4(a) ビー玉径 D_g を変えた場合の河床形態変化 (越流)
(図の各軸およびコンター色は図-2と同じ)

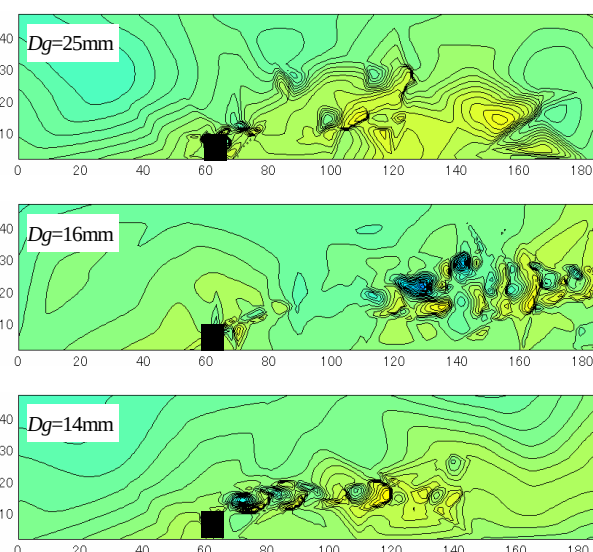


図-4(b) ビー玉径 D_g を変えた場合の河床形態変化 (非越流)
(図の各軸およびコンター色は図-2と同じ)

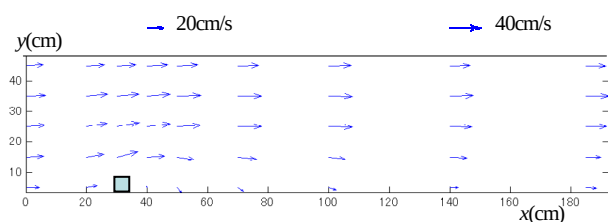


図-5 流速分布の一例 (Run3-2)

(4) 石かご過水制を設置した場合の流速分布

図-5に石かご水制を設置した場合の流速分布の一例としてRun3-2の結果を示す。実験条件は水制長10cm, 接近流速21cm/s, 接近水深5cm, ビー玉直径16mmの非越流タイプである。水制設置部で縮流が起っており, 対岸(左岸)に沿う部分の流向流速はほとんど変化していない。流下方向の流速は $y=35\text{cm}$ 付近で最大であり, 水制下流右岸に沿う部分の流速は10cm/s以下に減速しており, 水制の下流河岸洗掘防止効果が明らかである。ただし, 非越流の不透過水制の場合⁸⁾と比べると流れ場の変化は小さい。

4. 考察

(1) 最大局所洗掘深特性

最大局所洗掘深 $Z_s(t)$ とその位置 $(x_s(t), y_s(t))$ に関すると考えられる要素は, 接近流速 v_o , 接近水深 h_o , 通水経過時間 t , 重力加速度 g , 河床砂の粒径 d , 水の密度 ρ , 砂の密度 σ , 水の粘性係数 μ , 水制長 Lg , 水制高 Hg , 水制幅 Wg , 水路幅 B , 石かご充填石の直径 Dg などである。基本量を v_o , Lg および μ の3つとして次元解析を行い本実験で変化させていない量や影響が小さいと考えられるものを除くと,

$$Z_s(t)/Lg = f(x_s/Lg, y_s/Lg, v_o t/Lg, B/Lg, Dg/Lg) \quad (1)$$

となる。

図-6はRun1で得られた最大局所洗掘深 Z_s およびその位置 (X_s, Y_s) の時間変化を無次元化して示したものである。図より, 最大局所洗掘深は時間とともに $v_o t/Lg = 1.1 \times 10^4$ までは増加しているが, $v_o t/Lg = 1.5 \times 10^4$ で減少している。これは図-2の90分後と120分後のコンター図を比較すると, 120分後には大きなサイズの河床波が壊れて小さい河床波が多数見られる複雑な形をしていることと符号しており, 一般的には, 最大局所洗掘深は時間とともに増加していき, やがてある限界値に達するのではないかと予想されるものの, 必ずしもそうならない複雑な現象が生じている可能性を示唆している。また, 最大局所洗掘深の位置は x_s および y_s ともに時間の経過に従って増加しており, 水制設置位置からより下流側へ, かつより対岸側へ移動している。

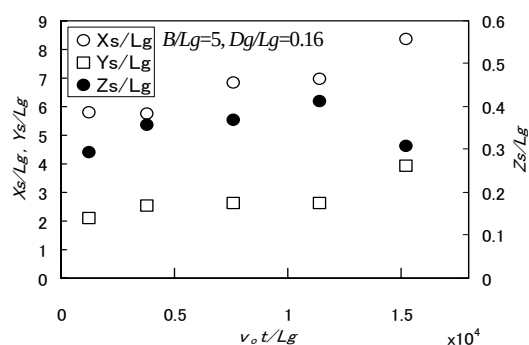


図-6 最大局所洗掘深および位置の経時変化

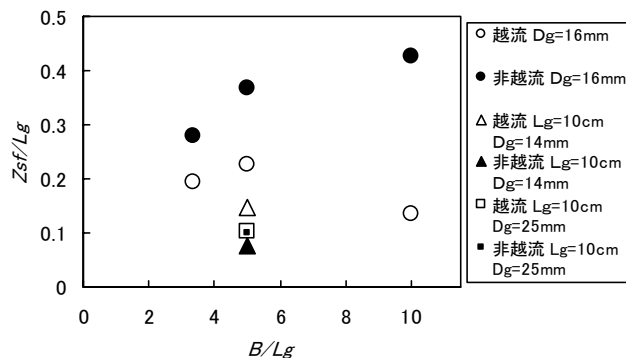


図-7 最大局所洗掘深と水制長との関係

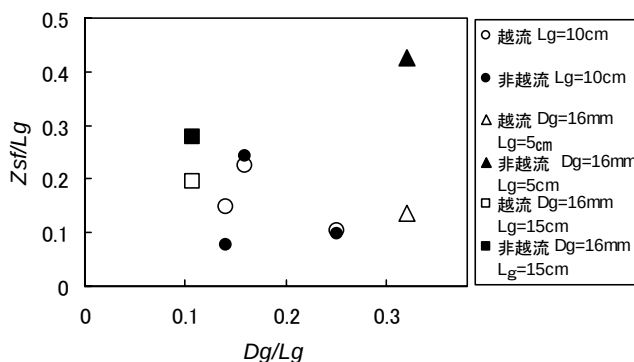


図-8 最大局所洗掘深とビー玉径との関係

図-7は通水後60分の河床における最大局所洗掘深を Z_{sf} とし, Z_{sf}/Lg と水制による水路幅収縮比 B/Lg との関係を示している。図-7より, $Dg=16\text{mm}$ において, 非越流の場合には $Z_{sf}/Lg=0.4$ 程度, 越流の場合には $Z_{sf}/Lg=0.2$ 程度であり, 他の粒径では $Z_{sf}/Lg=0.1$ 程度となっている。

また, 図-8は通水後60分の河床における最大局所洗掘深 Z_{sf} のビー玉直径 Dg による変化特性を無次元化して示している。これは水制の透水性を表しており, 現場での透水性を考える場合に, 水制の単位長さあたりに何個の石が入るかを表している。図-8より, 最大局所洗掘深とビー玉径との関係は必ずしも明確ではないが, $Lg=10\text{cm}$ の場合には, 越流, 非越流にかかわらず同様の傾向を示している。

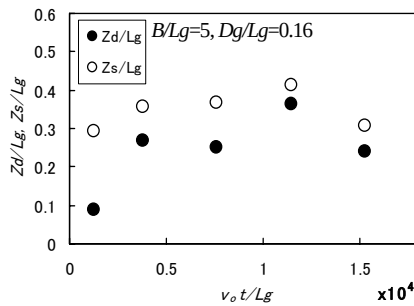


図-9 下流域での堆積状況の経時変化

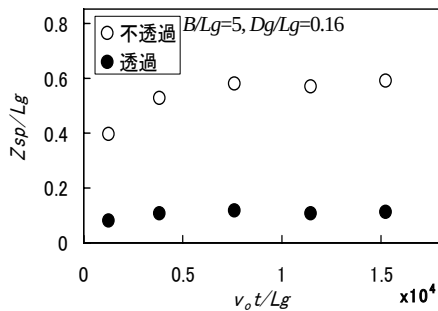


図-10 水制先端部での洗掘状況の経時変化

(2) 水制下流域での堆砂特性

図-9にRun1における水制下流域での最大堆積砂高 Z_d と最大洗掘深 Z_s の経時変化を示す。最大堆積砂高は最大洗掘深よりも小さい値となっているが、両者の経時変化のパターンは同様な傾向を示している。

(3) 石かご水制と不透過水制との水制先端部の局所洗掘の比較

図-10に石かご水制と不透過水制の水制先端部の局所洗掘深 Z_{sp} の経時変化を示す。石かご水制のデータはRun1のものであり、不透過水制のデータは本研究に用いた水路を使って得たもの⁸⁾で、水制長10cm、接近流速20cm/s、接近水深10cmの非越流タイプである。図より、不透過水制では通水開始とともに水制先端部での局所洗掘が始まり、洗掘深が時間とともに急速に深くなり $v_o t / L_g = 0.76 \times 10^4$ (60分後) にはほぼ安定している。これに対して石かご水制では通水開始後120分まで水制先端部での局所洗掘はほとんど生じていない。これが石かご水制の大きな特徴であり、今後石かご水制の河川への適用を考える上で重要なポイントになると考えられる。

(4) 河床形状特性

芦田・道上による小規模河床波の領域区分によるとフルード数 $Fr < 0.8$ 、砂粒レイノルズ数 $u_* d / \nu \leq 8$ で lower regime の領域であり砂れんが形成されていると考えられる。本研究では $Fr = 0.21$ 、砂粒レイノルズ数 $3.4 \sim 3.8$ であり、水制周辺のわずかな局所洗掘が砂れんの発生を促し、下流域河床に発達伝播していることがわかる。図-11にRun1における主要な3連続の砂れんの平均波長

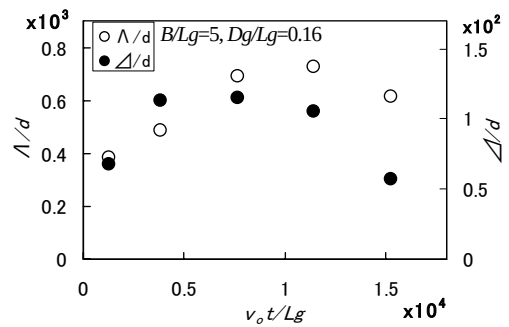


図-11 砂れんの波長、波高の経時変化

Λ および平均波高 Δ の経時変化を示す。図より波長と波高でピークの位置が異なっているが、これらの変化メカニズムに関しては今後詳細な調査が必要である。

5. おわりに

本研究では透水性である石かご水制を単独設置した場合の水制周辺および下流域の河床形状変化がどのように起こるかを実験的に検討した。その結果、不透過水制では水制先端部の局所洗掘が卓越するが、石かご水制の場合水制先端部での局所洗掘はわずかで、水制からかなり離れた下流域での河床形状変化が顕著となっていることが判明した。また、水制の水路横断方向長や透水性が河床形状変化に大きく影響しており、水深が水制高より高いか低いかわず、すなわち、越流か非越流かによっても河床形状変化に大きく影響することがわかった。

参考文献

- 1) 富永晃宏, 長尾正志, 長坂剛: 水制背後の流れ構造に及ぼす透過流の影響, 水工学論文集, 第44巻, pp.1035-1040, 2000.
- 2) 福岡捷二, 渡邊明英, 川口広司: 透過型水制工が設置された直線流路における流れと河床変動, 水工学論文集, 第44巻, pp.1047-1052, 2000.
- 3) RAHMAN, M.M. and MURAMOTO, Y.: Prediction Of Maximum Scour Depth Around Spur-Dike-Like Structures, 水工学論文集, 第43巻, pp.623-628, 1999.
- 4) ELAWADY, E., MICHIEUE, M. and HINOKIDANI, O.: Movable Bed Scour Around Submerged Spur-Dikes, 水工学論文集, 第45巻, pp.373-378, 2001.
- 5) 音田慎一郎, 細田尚, 木村一郎, 岩田道明: 平衡・非平衡流砂モデルによる水制周辺の局所洗掘に関する数値解析, 水工学論文集, 第51巻, pp.943-948, 2007.
- 6) 道奥康治, 石垣泰輔, 前野詩朗, 南條雅志, 池松健: 透過型水制の周辺・内部の流れに関する実験と解析, 水工学論文集, 第48巻, pp.799-804, 2004.
- 7) 李最森, 道奥康治, 前野詩朗, 和中隆志: 捨石透過水制を配した開水路における流れと河床変動, 水工学論文集, 第51巻, pp.817-822, 2007.
- 8) 森本稔, 村岡一志, 門田章宏: 水制周辺の局所洗掘に起因する下流域の河床変動特性, 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集 pp.327-328, 2007. (2008. 9. 30受付)