

捨石透過水制を配した開水路 における流れと河床変動

FLOW AND BED DEFORMATION IN AN OPEN CHANNEL
WITH A PERMEABLE RUBBLE MOUND GROYNE

李最森¹・道奥康治²・前野詩朗³・和中隆志⁴
Zuisen LI, Kohji MICHIOKU, Shiro MAENO and Takashi WANAKA

¹学生会員 工修 神戸大学大学院 自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²フェロー会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³正会員 工博 岡山大学助教授 環境理工学部 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

⁴学生会員 岡山大学大学院 環境学研究科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

In this study, a numerical analysis and a laboratory experiment were carried out in respect to an open channel flow field with a movable bed in which a permeable groyne was installed. By comparing the agreement between the analysis and the experiment, the influence of the permeable groyne to the open channel flow and movable bed erosion were discussed. The numerical method was expected to provide knowledge to the design of river structure such as permeable rubble mound groyne.

Key Words : permeable groyne, two-dimensional analysis, movable bed, bed load, suspended load, and scour depth

1. 序論

治水・利水機能に重点をおく施策から環境重視を内部目的化した改正河川法に基づく河川整備・管理の方向が大きく変わり、河川構造物の型式にも変化が見られる。近代的な河川管理が行われる以前には、河川の自然営力を損ねるようなコンクリートなどの建設資材が使われることはなく、石礫、土砂、木材など自然材料を使った空隙の大きな透過性構造物によって水流を制御する方法が主流であった。自然環境を重視した河川整備が実施されている現在、伝統工法を含む透過性構造物を使った工法が見直され、河川改修は河川の自然環境機能を回復する方向に進む傾向にある。

著者らは、捨石や粗粒など透過性の自然材料で構築された堰¹⁾・護岸²⁾・水制^{3) 4) 5)}などの河川構造物の流れへの影響を検討してきた。これらは主に固定床における流れの特性を水理実験と数値解析で検証したものである。本研究では、捨石水制の河川土砂収支への影響及び水制周辺の洗掘状況を調べるために、捨石水制を設置した移動床の水理模型実験を実施し、捨石構造物周辺の土砂動態を再現し得る移動床モデルを構築した。実験と解析を比

較し、解析モデルの有用性あるいは今後解決すべき課題を検討する。経験的な技能技術で自然材料を用いた河川構造物が設計・施工されるだけではなく、構造物の流れや水質・生態系への影響を水理学的に評価し、実務の水工設計・施工に供するための水工学的知見を得ることが重要であり、これを本研究の目的とする。

長田ら⁶⁾は、円柱周りの流れと局所洗掘現象を三次元の数値解析を行い、局所の洗掘を精密に解明した。大谷ら⁷⁾は、局所流れの特性を考慮した平面二次元河床変動解析により河川仮締切工の局所洗掘現象を良好に再現した。また、Zhang⁸⁾らは、不透過水制周辺の局所洗掘の三次元解析を実施した。

以上の移動床解析においては、局所流の三次元特性が何らかの形で考慮されているが、いずれも不透過の構造物を対象とした研究である。本研究では捨石構造物の透過性が流れや土砂動態におよぼす影響に着目しているが、これを考慮できる既往の解析モデルはない。構造物周辺の流れの三次元性が洗掘現象におよぼす影響に留意しながらも、ここでは、構造物の透過性に重点を置くこととし、構造物内外の平面二次元流況を再現できる著者らの解析モデルを改良して流況と土砂動態を解析する。

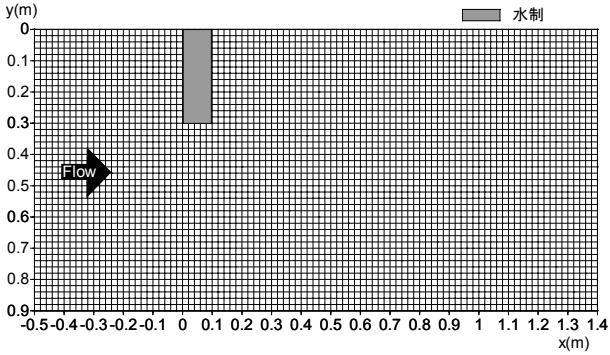


図-1 解析格子

2. 透過性構造物を設置した開水路流のモデル化

本研究に用いる数値解析モデルは、捨石水制などの構造物が設置された移動床開水路流を対象とした二次元二層流モデルである。これは著者らが提案した固定床の数値モデル⁴⁾を基本として、これに河床変動モデルを組み込んだものとする。

(1) 二次元二層流モデル

捨石構造物が設置された二次元開水路（水深 h ）の流れを対象とする。捨石構造物内外の質量・運動量交換を考慮するとともに、捨石構造物内の流れは捨石粒径と間隙率を考慮した抵抗則によって運動量保存式が記述される。詳細は、参考文献4)に記載されている。

(2) 移動床のモデル化

上記の固定床モデルに移動床モデルを組み込む。河床変動の記述には、清水(2001)の手法⁹⁾を用いる。河床高を計算する際には、あるメッシュとその隣のメッシュとの河床高の差が大きくなり過ぎないように、全てのメッシュについて安息角を補正する。また、透過水制の場合には、初期条件として開水路の河床平面と同じレベルの地形を水制内にも与える。水制内の砂の動態については、水制内の実流速に見合う砂の移動量を計算し、水制内の河床地形を解析する。

一般座標系 (ζ, η) における掃流砂の連続式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial(Z_B/J)}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{\partial \sum_i (q_{Bi}^\xi / J)}{\partial \zeta} + \frac{\partial \sum_i (q_{Bi}^\eta / J)}{\partial \eta} \right] = 0 \quad (1)$$

$$+ \frac{1}{1-\lambda} \left[\sum_i (q_{sui} / J - w_{fi} c_{bi} / J) \right] = 0$$

ここに、 J ：直交座標系から一般座標系への変換ヤコビアン、 Z_B ：河床高さ、 λ ：河床砂の間隙率、 q_{Bi}^ξ, q_{Bi}^η ：粒径別掃流砂量の反変成分、 q_{sui} ：粒径別浮遊砂の単位面積当たりの河床からの浮上量、 w_{fi} ：粒径別浮遊砂の沈降速度、 c_{bi} ：河床付近の粒径別浮遊砂濃度を示している。

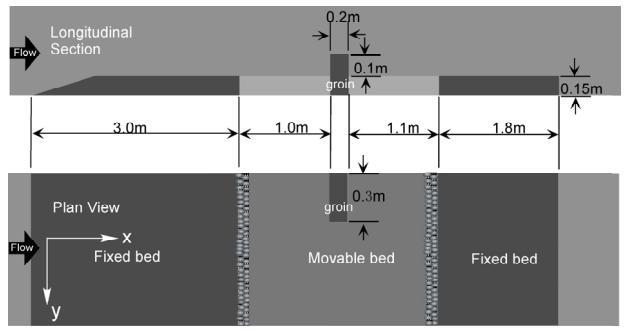


図-2 実験装置の諸元

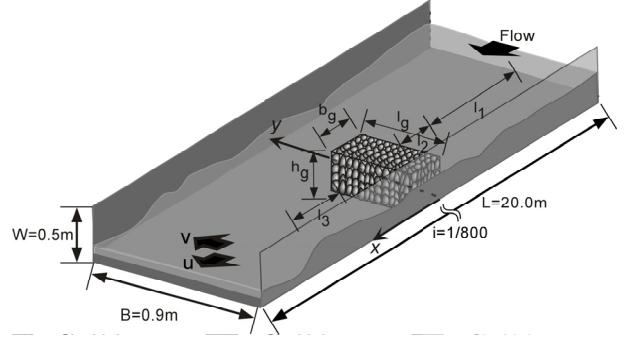


図-3 流れの模式図

a) 掃流砂量

掃流砂量は、主流速 ($v_s = \sqrt{U^2 + V^2}$) 方向の粒径別流砂量 q_{Bi} を芦田・道上の式¹⁰⁾で与えられ、 (ζ, η) 方向成分 q_{Bi}^ξ, q_{Bi}^η に変換される。

b) 浮遊砂量

浮遊砂量の算定には、板倉・岸の式¹⁰⁾を用いる。

c) 浮遊砂の連続式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h c_i}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\frac{h U c_i}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{h V c_i}{J} \right) = \frac{1}{J} (q_{sui} - w_{fi} c_{bi}) \quad (2)$$

$$c_i = \frac{c_{bi}}{b_i} (1 - e^{(-b_i)}) \quad (3)$$

$$b_i = \frac{w_{fi} h}{D_h} \quad (4)$$

ここで、 h ：水深、 U, V ： (ζ, η) 方向の平均流速成分、 D_h ：鉛直方向の浮遊砂の拡散係数（ここでは簡単のため、動粘性係数と同一の値を用いる）、 c_i ：河床から距離 i における粒径 d_i の粒子の濃度。

(3) 数値解析の概要

解析対象領域は、幅 $B=0.9m$ の開水路流における流下方向長さ $1.9m$ の移動床部である。差分時間間隔は $\Delta t=3.0 \times 10^{-3}(sec)$ 、空間間隔は $\Delta x=\Delta y=2.0 \times 10^{-2}(m)$ である。上流端境界において流量、下流端境界において水位が与えられる。初期条件は、実験と同様に平坦な河床面を与える。図-1には、解析に用いられた計算格子を示す。

表-1 実験条件

Case	Case-1	Case-2	Case -3	Case -4
水制形状	不透過型	透過型 (捨石)		
長さ l_a (m)	0.30			
幅 b_a (m)	0.20			
高さ h_a (m)	0.10			
粒径 d_m (mm)	0.02			
間隙率 n'	0.38			
流れの型	非越流			
流量 Q (m^3/s)	0.0132			
平均粒径 d_m (mm)	0.2			
間隙率 n'	0.294			
水制個数	1			
設置角度	直角	直角	上向き	下向き
水路幅 B (m)	0.90			
水路勾配 i	1/800			
堰上げ	あり			

3. 水理実験の概要

(1) 実験装置

水理実験は、神戸大学工学部環境水理実験室で実施された。実験水路は、長さ20.0(m)×幅0.9(m)×高さ0.5(m)、水路勾配1/20000～1/20の可変勾配水路である。図-2及び図-3に示すように、計測部より上流側は河床面に合わせて長さ $l_1=3.0$ (m)×幅 $W=0.9$ (m)×高さ $H=0.15$ (m)の平板をおいた固定床とする。その下流側に豊浦標準砂（平均粒径： $d_m=0.2$ (mm)、単位体積重量：1.52(kg/L)、間隙率： $\lambda=29.6\%$ ）を水制の上流側には $l_2=1.0$ (m)、下流側には $l_3=1.1$ (m)の厚さだけ敷いた。固定床と移動床の境界には、砂表層に金網を敷いて遷移帶とした。

捨石（透過性）水制は、長さ0.30(m)×幅0.20(m)×高さ0.25(m)である。流れに対して直角、上向き（流下方向となす角度70°）、下向き（流下方向となす角度110°）の水制模型を左岸に設置した。

(2) 実験条件と実験方法

本実験においては、水面が水制天端よりも低い（非越流）の場合を対象とし、流れは水制を越流しない。水制が不透過の場合と透過（捨石）の場合の流れと河床変動特性を検討した。実験条件を表-1に要約する。

実験開始後5分、10分、30分において流れを停止し、河床高の変化量 ΔZ_B を計測した。また、150分後には流速 u 、 v (m/s)を計測した。本実験は静的洗掘条件で実施され、上流側からは給砂されない。

4. 流速の分布特性

(1) 直角水制の場合 (Case-1, 2)

図-4には、直角水制周辺の流速の平面分布（計算値）を示す。流れは水制の上流側で右岸方向に刎ねられ、そのまま流下する。不透過水制の場合には、流れが水制に衝突後、水制先端部に集中する様子が確認される。捨石水制の場合には、流れが水制内を透過するため、不透過

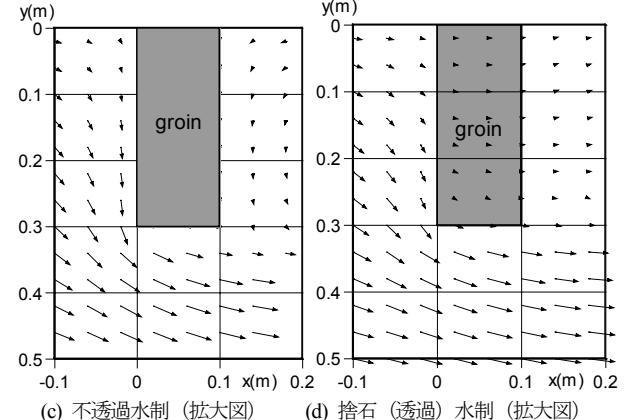
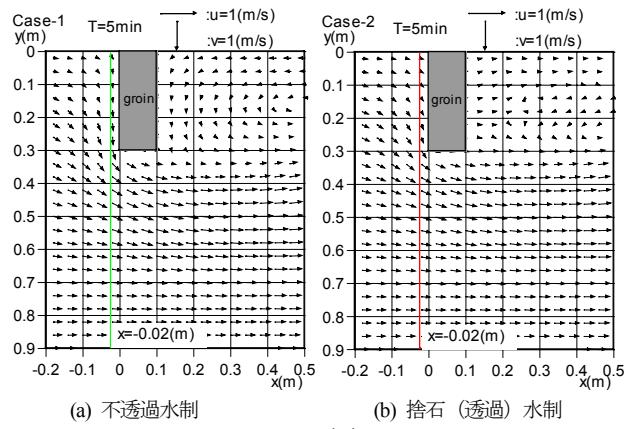
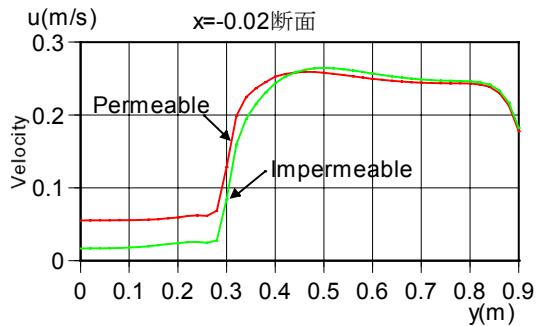
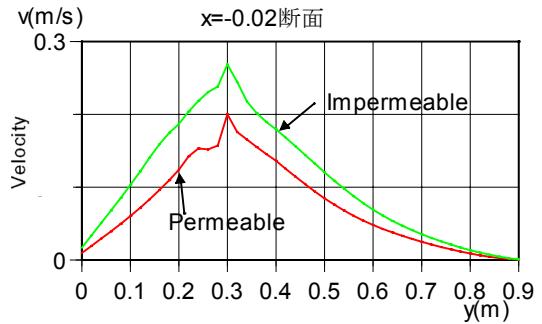


図-4 直角水制の流速ベクトル

(x,y方向共に1/2削減、下同)



(a) 平均流速の流下方向成分 u

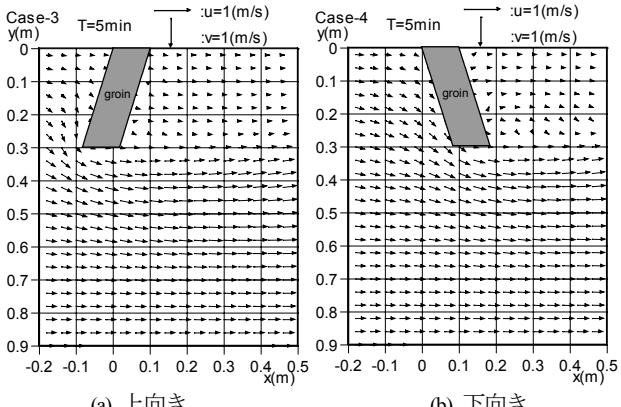


(b) 平均流速の横断方向成分 v

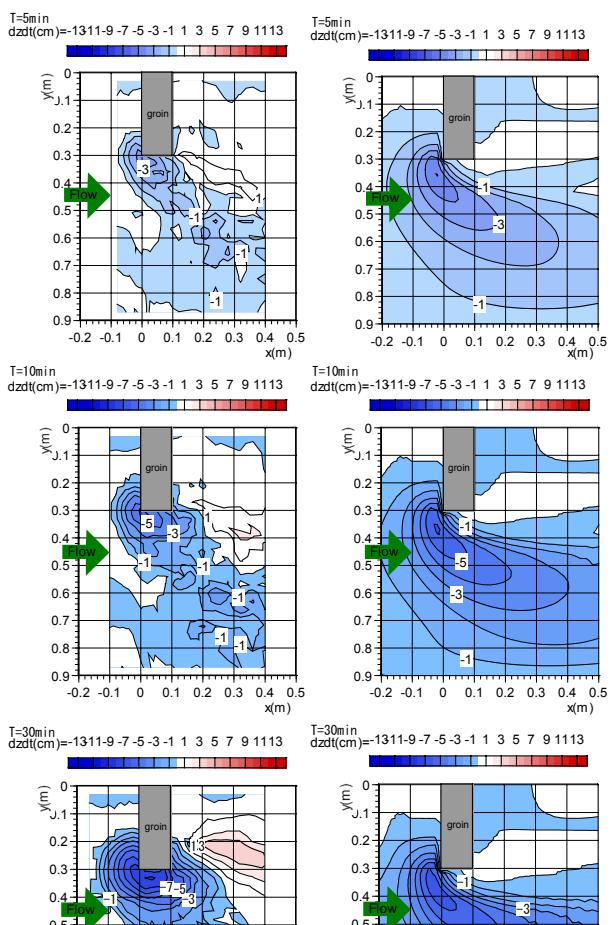
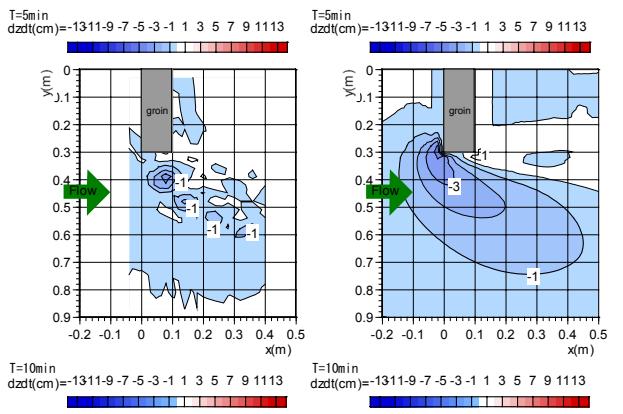
(水制の根元から先端に向かう方向が正)

図-5 横断流速成分の分布

水制に見られたような流れの水制先端部への集中は軽減される。水制直上流側の横断面（y方向）における平均流速の x , y 方向成分(u , v)について、不透過水制と透過（捨石）水制の比較を図-5に示す。 u を見ると（図-

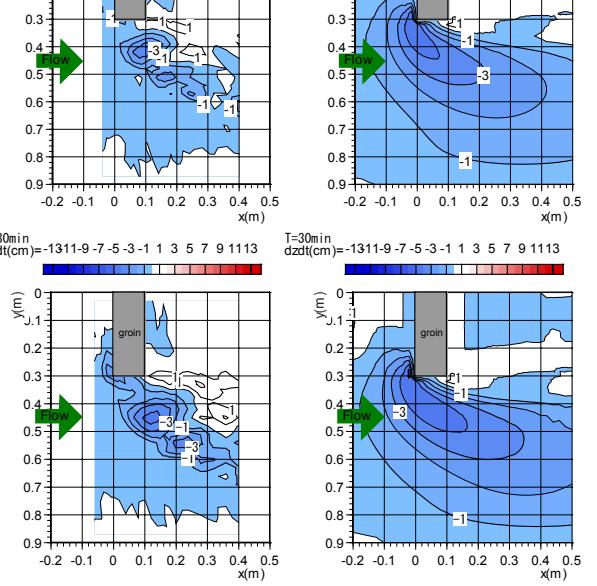


(a) 上向き
(b) 下向き
図-6 上向き・下向き水制の流速ベクトル



(a) 実験値
(b) 計算値
図-7 不透過水制の洗掘状況

5(a)) 水制の水流制御効果により横断面内に流速差が生じていることがわかるが、捨石水制の方が不透過の場合よりも u 方向変化が小さく、捨石水制の透過性によって流れがより柔軟に制御されていることがわかる。また、水制の根元から先端へ向かう y 方向の流速成分 v を見ると(図-5(b))、不透過水制の方が透過(捨石)水制より



(a) 実験値
(b) 計算値
図-8 透過(捨石)水制の洗掘状況

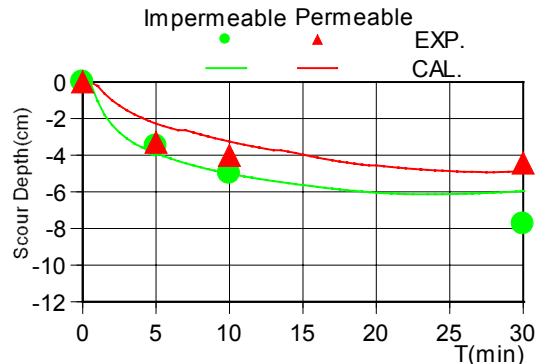
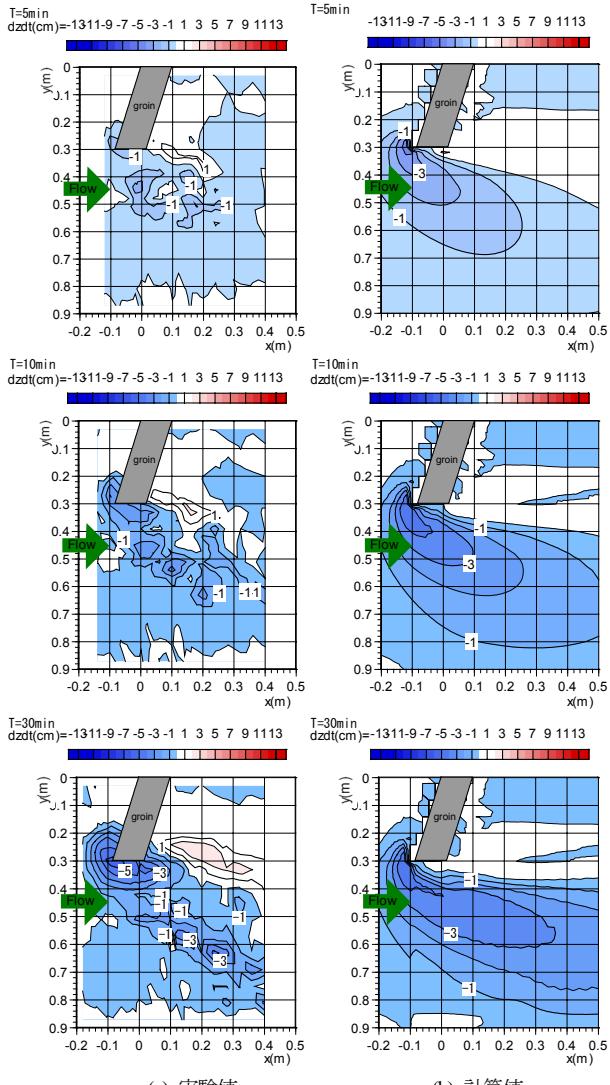


図-9 直角水制先端部の洗掘深の時間変化

も水制背面に沿って強い流れが発生しており、水制が不透過構造の場合には流れが先端に集中しやすく、局所洗掘を促進しやすいことが確認される。

(2) 上向き・下向きの水制の場合(Case-3, 4)

捨石水制を上向きまたは下向きに配置した場合の流速ベクトルを図-6に示す。水制を上向きに配置した場合には水制根元の左岸側へ流れを呼び込む傾向にあり、下向



(a) 実験値

(b) 計算値

図-10 上向き透過程水制の洗掘状況

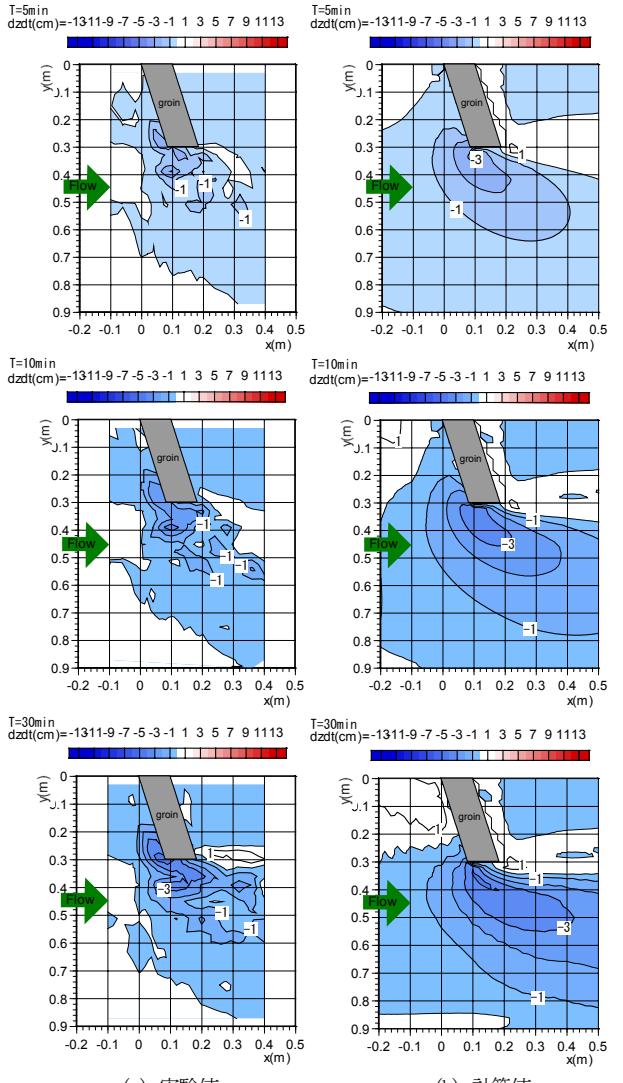
きに配置すると流れは右岸側へスムーズに刎ねられる。

5. 河床形状の変化

(1) 直角水制

図-7と図-8には、直角水制が不透過構造と捨石構造の場合の河床地形の経時変化を比較している。不透過水制の場合には実験・計算の双方において、水制先端の上流側において最も洗掘されやすいことがわかる。数値計算は実験結果を概ね再現してはいるが、解析の方が洗掘範囲をより大きく評価しており、実験よりも細長い洗掘形状を示している。局所洗掘に対しては構造物直近の三次元的な流れ構造が土砂輸送に影響するため、平面二次元に基づく本解析で局所洗掘現象を十分再現できていない可能性はある。

透過性を有する捨石水制の場合には、最大洗掘深の発生箇所がやや下流側へ偏る。不透過水制と比較して洗掘



(a) 実験値

(b) 計算値

図-11 下向き透過程水制の洗掘状況

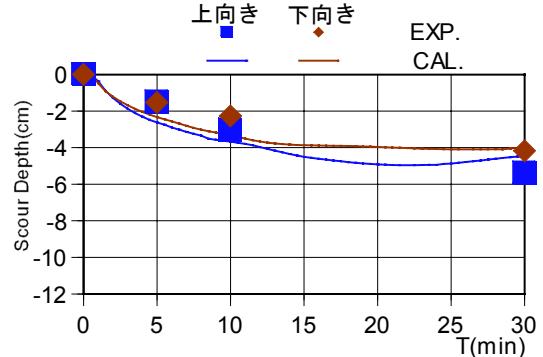


図-12 上向き・下向き水制先端部の洗掘深の時間変化

が抑制されるという実験での傾向などは数値解析によっても定性的には再現されているが、二次元解析による洗掘形状の再現には限界があるようである。図-9には、水制先端部($x=0.0, y=0.36$)における洗掘深を透過水制・不透過水制について比較する。捨石水制の方が不透過水制の場合より洗掘を抑制できることが実験と解析の両方から確認される。

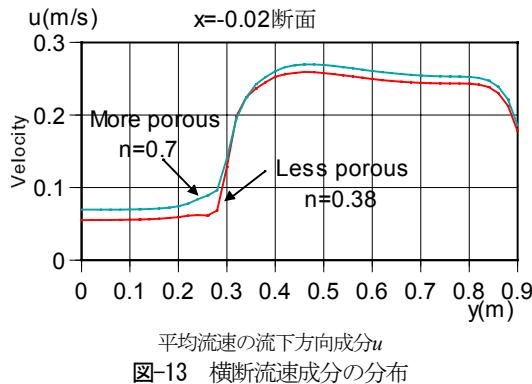


図-13 横断流速成分の分布

(2) 上向き・下向き水制

同様にして上向き透過水制と下向き透過水制の場合の河床形状変化を図-10と図-11に示す。上向き・下向き水制先端部（それぞれ $x=-0.06, y=0.36$ と $x=0.1, y=0.36$ ）における洗掘深の時間変化を図-12に示す。上向き水制の方が下向き水制よりもやや大きな洗掘をもたらしている傾向が実験と数値解析の両方にあらわれている。

6. 構造物の間隙率の影響

自然石材料を用いた場合には、水制の間隙率が自ずとある範囲に制約されるが、木材や異形ブロックなどを用いた場合には間隙率をある程度変化させ、流れへの影響を軽減した構造物設計が可能となる。そこで、捨石を用いた場合の間隙率 $\lambda=0.38$ (Case-2, Less porousと記す)とより大きな間隙率($\lambda=0.7$)を有する仮想的な透過水制を直角に設置した場合(間隙率を除く、その他の条件がCase-2と同じ、More porousと記す)の流速と河床変動を図-13, 14に比較する。図には、水制直上流側($x=0.02$ 断面)での平均流速の流下成分と水制の直上流側先端部($x=0.0, y=0.36$)での河床変動を示している。両図から、 $\lambda=0.7$ の方が $\lambda=0.38$ (捨石)よりも流れを柔らかく制御し、局所洗掘量がわずかであるが減少させる傾向が確認される。

7. 結論

不透過水制と捨石水制の流れ及び土砂収支への影響を調べるために、移動床における水理模型実験と数値解析を実施した。本研究で得られた結果と今後の課題を以下のように要約する。

- (1) 水理実験と数値解析を実施し、実験での流況と河床形状変化を再現した。
- (2) 不透過直角水制>透過直角水制>上向き透過水制>下向き水制、の順に局所洗掘量が減少する傾向が実験と数値解析の両方において確認された。
- (3) 本モデルは、二次元解析であるために、三次元性の

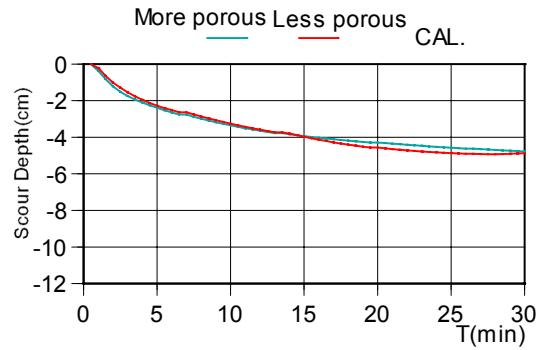


図-14 仮想水制・捨石水制先端部の洗掘深の時間変化

強い局所洗掘現象を再現するには限界がある。構造物周辺の局所流特性を取り入れた準三次元的取り扱いを工夫し、再現精度を向上することが今後の課題である。

謝辞：水理実験を実施する際、神戸大学大学院修士課程学生藤井淳氏のご協力を頂いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 道奥康治・前野詩朗・古澤孝明・羽根田正則：捨石堰の「水利一流量」特性を規定する水理量、水工学論文集、第46巻、pp.487-492, 2002.
- 2) 道奥康治・李最森・熊田清敬：捨石護岸を有する開水路流の解析 神戸大学大学院自然科学研究科紀要 24-B pp.25-30, 2006.
- 3) 道奥康治・石垣泰輔・前野詩朗・南条雅志・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、2004.
- 4) 道奥康治・南條雅志・石垣泰輔・前野詩朗：捨石水制が冠水した開水路流の二次元二層流モデル、土木学会論文集、No. 782/I-70, pp.31-50, 2005.
- 5) 李最森・道奥康治・前野詩朗・牛田高裕・藤井淳 捨石水制群の水理特性について、応用力学論文集 Vol.8, pp.773-782, 2005.
- 6) 長田信寿、細田尚、中藤達昭、村本嘉雄：円柱周りの流れと局所洗掘現象の3次元数値解析、水工学論文集、第45巻、pp. 427-432, 2001.
- 7) 大谷英夫、東江隆夫：河川仮締切工の局所洗掘特性とその数値計算への応用、水工学論文集、第50巻、pp. 823-828, 2006.
- 8) Hao ZHANG, Hajime NAKAGAWA, Taisuke ISHIGAKI, Yasunori MUTO, Yasuyuki BABA: THREE-DIMENSIONAL MATHEMATICAL MODELING OF LOCAL SCOUR, 応用力学論文集, Vol. 8, pp.803-812, 2005.
- 9) 清水康行：河床に固定物があるときの河床変動の計算、水工学論文集、第45巻、pp.763-768, 2001.
- 10) 土木学会 水理公式集 平成11年版

(2006.9.30受付)