

T型・L型水制に起因する河床形状変化特性

CHARACTERISTICS OF BED FORM CHANGE CAUSED BY T-TYPE AND L-TYPE GROYNES

鈴木幸一¹・門田章宏²・重松和恵³・田中健治⁴
Koichi SUZUKI, Akihiro KADOTA, Kazue SHIGEMASTU and Kenji TANAKA

¹フェロー会員 工博 愛媛大学大学院教授 理工学研究科生産環境工学専攻 (〒790-0577愛媛県松山市文京町3)

²正会員 博(工) 愛媛大学大学院准教授 理工学研究科生産環境工学専攻

³正会員 愛媛大学工学部技術職員 環境建設工学科

⁴学生員 愛媛大学工学部 環境建設工学科

Groynes are widely used for protecting the river bank, and the local scour depth in the vicinity of the groynes has been widely studied especially for a strait (I-type) groyne. However, for other type of groynes such as T-type or L-type which were used to be constructed, little information exists on bed form changes caused by the T or L-type groynes. In this study, the characteristics of bed form changes due to T and L-type groynes are experimentally revealed together with the simulation of flow fields around the groynes, comparing with the experimental results of I-type groynes. Experimental results show that the maximum scour depth changes greatly with the groyne types and the score depth for the L-type groyne becomes much smaller than that of I-type groyne, although the difference of bed form downstream of the groyne is not so large among the groynes types.

Key Words : T and L-Type groynes, bed form change, local scour, sand waves

1. はじめに

従来、護岸を目的として多用されていた水制工は、利根川において見られるように昭和45年以降は使われなくなり、堤防を直接補強する護岸工が主流となった¹⁾。しかし、近年多自然型川づくりという観点から水制工の持つ環境機能が見直されつつある。水制工によるワンドの形成²⁾³⁾や、魚を中心とする生物にとって好ましい環境が作り出されること⁴⁾がその代表例である。

水制工の造り出す河床形状変化に関する研究として、松本らは、水制の設置角度の影響や、透過性の影響を三次元数値シミュレーションにより検討している⁵⁾⁶⁾。また、福岡らは水制のアスペクト比や設置角度、透過性の影響を三次元数値モデルにより検討している⁷⁾⁸⁾。また、李らは透過型水制に着目し、水制の設置角度の変化による移動床モデルを構築した⁹⁾。また、著者らは横断方向長、粗度、流況変化などの要因により透過型水制が河床変動へもたらす影響を明らかにした¹⁰⁾。

水制には多様な形状があり、丁出、鎌出など古くから

様々な形状の水制が使用されてきた¹¹⁾。I型水制は曲出と呼ばれ、河岸から河川の中心に突き出すように設置される基本となる水制であり、長さや角度を変えて設置されている。T型水制は丁出と呼ばれ、明治時代初期にオランダ人技師によるケレップ水制もこの形状の水制である。L型水制は17世紀頃、愛媛県重信川の改修工事において「鎌出」として考案され¹²⁾、明治・大正時代までの重信川の河川改修に広く利用されていた。このように様々な形状の水制が古くから利用されているが、その設計は主に経験に基づいているのが現状である。

水制を設置する目的の一つとして水制により造り出される多様な河床形状を期待しているにもかかわらず、河床形状変化に関する研究はI型に関するものが中心で各種水制形状に関する研究はなく、その水理機能は明らかになっていない。

そこで本研究では、水制形状の違いによる周辺の三次元流速場を数値シミュレーションにより明らかにするとともに、各種形状の水制設置に起因する周辺河床形状の変化特性を実験的に明らかにする。

2. 各種形状水制周辺の流況解析

図-1にI型, T型およびL型の定義を示す. L_g を水制長, L_f を流下方向長とするが, 頭部の位置によってT型, L(上流)型, L(下流)型とし, また, 頭部が無いものをI型とする. 水制を設置すると, 水制周辺で流れ場が変化し, それによって局所洗掘や河床波の形成などの河床変動が生じる. ここではまず, 固定床における各種形状の水制周辺の流況解析を行ったが, 計算には, Olsenによって開発されたSSIIM¹³⁾ (三次元解析プログラム) を用いた. この方法では, 圧力解法であるSIMPLE法と標準型 $k-\varepsilon$ 乱流モデルを導入して, 三次元Navier-Stokes方程式

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P\delta_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) \quad (1)$$

を解くことにより流れ場を計算する. ここで, U_j ($j=1,2,3$) は流速, P は圧力, $-\overline{\rho u_i u_j}$ はレイノルズ応力, x_j

($j=1,2,3$) は座標軸, t は時間, δ_{ij} ($i=j$ で1, $i \neq j$ で0) はクロネッカーのデルタである. 計算領域は流下方向 (x 方向) に4m, 水路幅方向 (y 方向) 0.5mであり, こ

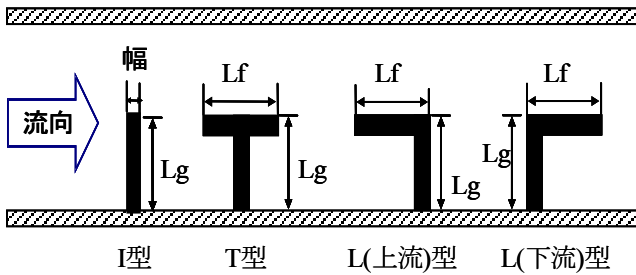


図-1 各種形状水制の定義

の領域を $\Delta x=1\text{cm}$, $\Delta y=1\text{cm}$ のメッシュで区切った. 水深方向 (z 方向) には河床付近が細かくなるように7段階で任意の適合計算格子とした. 上流から2.3m地点に水制を設置した状態で, 計算条件として, 幅 $B=0.5\text{m}$ の水路 上流端で流量 $Q=10\text{/s}$, 下流端で水深 $h=10\text{cm}$ を与え, 河床面と水路壁面ではnon-slip条件を, 水面では圧力場に基づいた自由水面でslip条件とした. いずれの形状も $L_g=10\text{cm}$, $L_f=10\text{cm}$, 水制高さ $L_h=20\text{cm}$ で行い, I型, T型, L(上流)型, L(下流)型について流速場の計算を行った.

図-2に示す河床から6割 ($z=0.6h$) の流速の鉛直成分では, 全ての形状において水制上流側で大きな下降流が発生している. とくに, T型とL(上流)型においては, 頭部上流部と脚部に囲まれた角の部分と, 頭部上流先端部の2ヶ所で大きな下降流が発生している. この下降流は角の部分で最も大きくなっており, 頭部上流先端部の下降流はI型, L(下流)型と比較して弱くなっている.

図-3に, 水深 $z=0.6h$ と $z=0.05h$ の2つの位置での各種形状での水平二次元 (x,y) 流速分布を示している. $z=0.6h$ の水平成分では, 全ての水制において水制先端部で対岸方向へ向かう流れが大きくなっており, 水制による縮流状態がよくわかる. 水制のない場合の流速が 20cm/s に対して, 流速の最大は 27.5cm/s 程度まで認められる. T型, L(上流)型においては上流側の空間で逆流が発生していることがわかる. ただ, 逆流の流速は小さい. $z=0.05h$ の水平成分では, $z=0.6h$ と比較して流速はやや遅くなっているが, どの形状水制も水制上流側でより対岸方向へ向かって流れており, 逆流流速は, $z=0.6h$ より大きくなっていることが認められる. $z=0.05h$ の流速が河床砂の移動を促すことから, とくにT型, L(上流)型での上流側の逆流流速が大きいことが注目される. また, 横断方向 $y=5\text{cm}$ 付近までは全ての形状水制において, 水制上流側で逆流となっている.

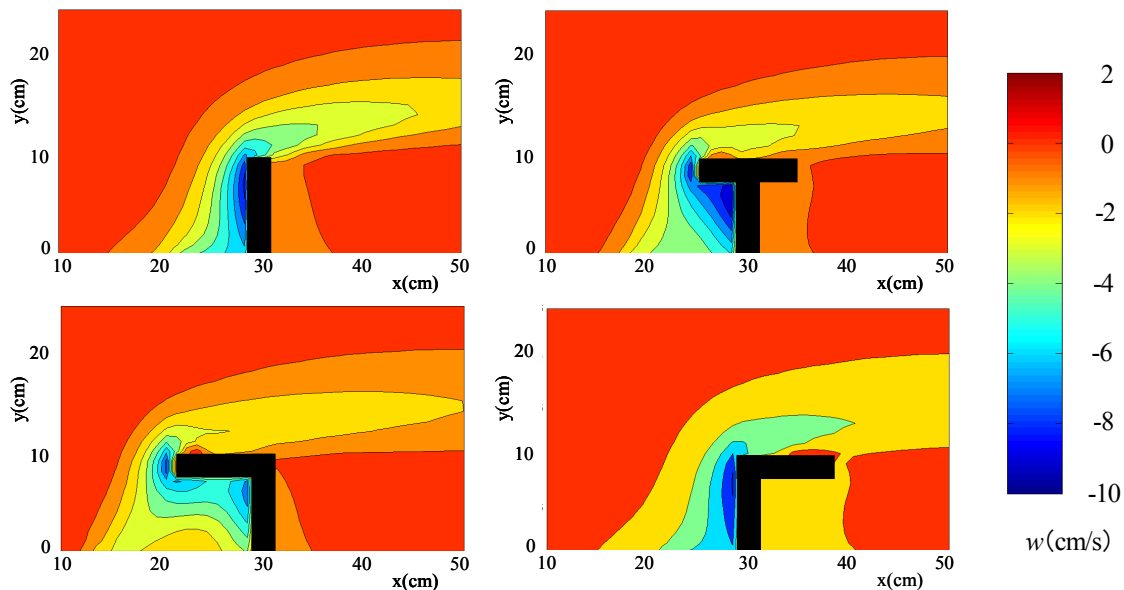


図-2 鉛直方向流速成分 w ($z=0.6h$)

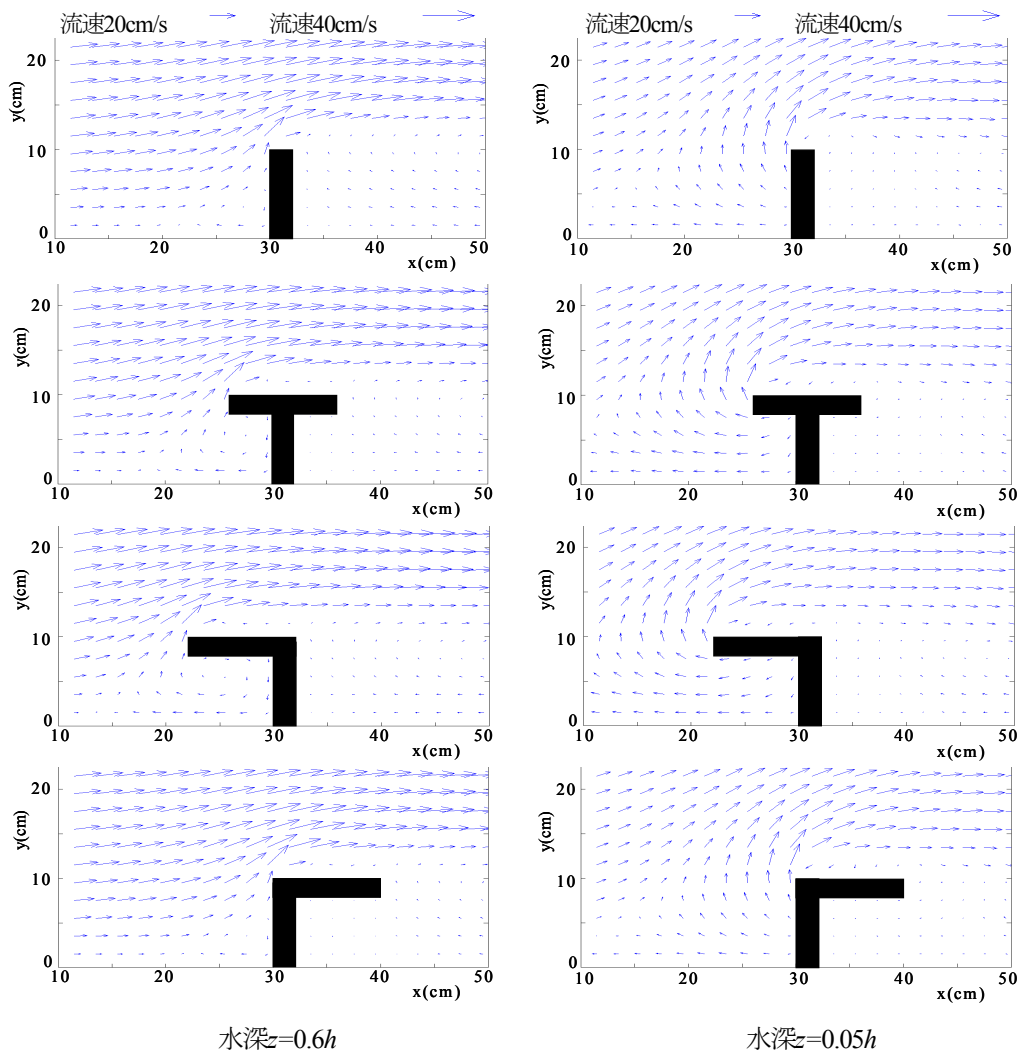


図3 水深 $z=0.6h$ (左図) と $z=0.05h$ (右図) の水平方向流速成分

3. 各種形状水制による河床形状変化に関する実験

(1) 実験概要

実験は、水路長20m、水路幅0.5m、水路勾配1/400の循環式水路を用いて行った。この水路は上流部に流量が調節できる三角堰が、下流端には水深を調節できる可変式の水堰が設けてある。図4に示すように、水路中央部に2mのサンドボックスを設置し、この区間を移動床とし、平均粒径 $d_m=0.03\text{cm}$ の均一砂を厚さ10cm敷き詰めた。この移動床の上流から30cmの右岸側に水制を設置した。水制の模型として、厚さ1cmの塩化ビニール板製で水制長 $L_g=10\text{cm}$ のI型、水制長（横断方向長） $L_g=10\text{cm}$ 、流下方向長 $L_f=10\text{cm}$ のT型、L(上流)型、L(下流)型の4種類の非越流型不透水水制を用いた。なお、通水時間はそれぞれ10分、30分、60分、90分、120分に設定し20ケースの実験を行った。また、砂の供給がある動的河床においては、水制および水制周辺の局所洗掘に起因する河床波以外の河床変動が発生した場合に区別が困難であるため、砂の供給のない静的洗掘状態で実験を行った。また、本研究では、各種形状の水制による河床形態の形成過程に着目したため、流量 $Q=10\text{L/s}$ 、水深 $h=10\text{cm}$ の一定にした。

実験手順としてはまず水制を設置した後、ポンプから

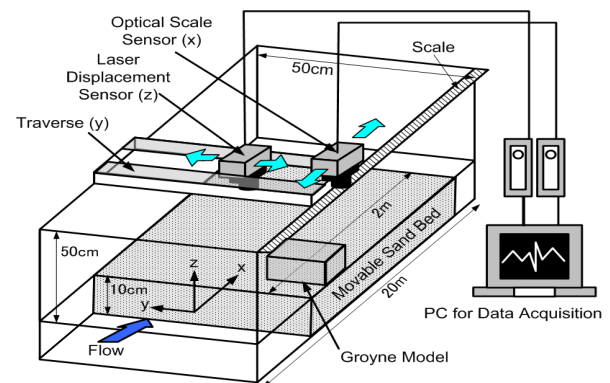


図4 実験水路の概要

水路に給水し、上流の三角堰で流量を、下流の水堰で水深を調整する。次に移動床の砂を平坦に敷きならし、初期平坦河床を形成後、実験を開始する。一定時間通水した後、給水を止め実験を終了する。完全に排水し終わった後、河床形状を計測する。

河床形状計測は、平面位置 (x,y) を水路壁及び測定台車に設置したスケールと光センサー（キーエンス製、形式VP-90）で計測し、河床高 (z) をレーザー変位センサー（キーエンス製、形式LB-300）で計測した(写真-1)。座標原点は砂上面右岸上流端とした。

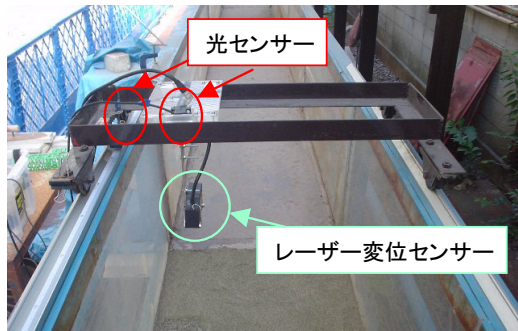


写真-1 河床形状の自動計測装置

(2)局所洗掘堆積特性

水制を設置すると、水制近傍に下降流が発生し、土砂が浮遊し局所洗掘が生じる。その後安息角まで達すると周辺の土砂が崩れ、一定の河床形状を形成するといったプロセスをたどり洗掘孔を形成する。

図-5に自動計測した河床形状のコンター図を示す。また、図-6に通水時間と最大洗掘深の関係を、図-7に通水時間と最大堆積高の関係を示す。ここでは、LUをL(上流)型、LDをL(下流)型とする。

図-5より、水制先端部の洗掘孔は最大洗掘深に比例して大きくなり、ほぼ同心円状に広がっていることがわかる。しかし、時間が経過するにつれてT型は洗掘孔が上流側に拡大し、L(上流)型は水制付近に堆積が見られる。また、これらの水制上流側先端部付近の大きな流速差に伴うせん断応力の影響で大規模な組織渦が発生していると推測される。このことからこの付近の洗掘形状が決定されるなどと考えられる。これらの流れの詳細は今後検討の余地がある。

図-6より、L(下流)型が最も最大洗掘深が大きく、続いてT型、I型、L(上流)型の順に小さくなる傾向がある。またT型以外の形状において60分を経過したあたりから最大洗掘深は安定している。

図-6,7より、全ての形状において時間経過とともに最大洗掘深が大きくなれば最大堆積高も大きく、最大洗掘深が小さくなれば最大堆積高も小さくなる傾向がある。

(3)水制下流域の河床形状特性

水制下流域では、局所洗掘によって浮遊された河床砂が輸送され、水制の背後付近に砂が堆積し、局所堆積が現れる。その後、洗掘と堆積が繰り返され河床波が形成される。

図-8に最大堆積高の出現位置を示す。なお、丸で囲んだ点は通水時間120分後の最大堆積位置である。局所堆積における最大堆積高の出現位置は流下方向に着目すると上流側に突き出しがあるT型、L(上流)型はI型、L(下流)型と比較して一定時間経過した後も、上流側に堆積していることがわかる。また、横断方向に着目すると通水開始直後では全ての形状で $y=10\text{cm}$ 付近に堆積しているが、下流側に突き出しがあるT型、L(下流)型は最終的に $y=6\text{cm}$ 付近の右岸側に堆積している。

図-9に通水時間60分における河床波の水平面での発達方向を示す。河床波は河床が連続して凹となっている場所を読み取ったものである。河床波の水路壁に対しての発達方向を見ると、L(下流)型は比較的I型に近い角度で発達しているが、T型、L(上流)型はI型に比べ横断方向に短く流下方向に長く発達している。

(4)考察

局所洗掘において、T型の洗掘孔が上流側に拡がって見られるのは図-3で見られる河床付近の逆流がI型、L(下流)型と比較して大きいことが起因している。L(上流)型についても同様に逆流が発生してはいるがT型と同様の洗掘傾向が見られないのは、L(上流)型の水制根本付近に堆積が見られること、また、T型に比べ上流方向長が長いために水制内に大きなよどみが発生していることが観察されたことから、これらの要因が影響している。

図-6より、L(上流)型の水制が最も最大洗掘深が小さくなっているが、これは図-2を見ると、I型に比べて水制先端付近の下降流が小さいため、浮遊される砂が少なくなったためと思われる。最大洗掘深が一定時間経過した後には安定するのは洗掘には安息角があり、それを超えると周りの土砂が崩壊し洗掘孔を埋めてしまうからだと考えられる。T型に関してその傾向が見られないのは他の形状に比べ図-2で見られるように水制上流の下降流の領域が大きいため、水制先端部の下降流が小さいにもかかわらず洗掘孔が大きくなるため、通水時間120分では安息角に達していなかったことが影響している。また、T型は全体的には洗掘される土砂が多くなることからこれらの変化を形成している。最大洗掘深(図-6)と最大堆積高(図-7)に比例関係が見られるのは、洗掘孔が深くなると潜り込んだ流れが鉛直方向の流れを卓越させるが、洗掘孔が一部埋め戻され浅くなると潜り込みも少なくなり流下方向の流れを卓越させるために堆積砂へ対する抵抗が大きくなり崩壊に至るのではないかと考えられる。L(上流)型の通水時間30分から60分に至るところでこの比例関係の傾向が見られないのは、洗掘と堆積が絶えず繰り返される中で洗掘と堆積には多少の時間差があるため洗掘はしたがそこで発生した鉛直流による堆積がまだ発達していない段階であったと考えられる。

図-8より、上流側に突き出しがあるタイプで水制付近に堆積が見られるのは逆流の発生により水制付近の流下方向の流れが小さくなるためである。また、下流側に突き出しがあるタイプで右岸側に堆積が見られるのは下流側に突き出しがないタイプに比べ巻き込み流が大きくなることが影響している。また図-9より、河床波の発達方向がI型、L(下流)型に比べT型、L(上流)型が流下方向に卓越しているのは、図-3で見られるように水制により堰き止められた流れがI型、L(下流)型では横断方向に勿ねているのに対し、T型、L(上流)型では横断方向に勿ねることができないためである。

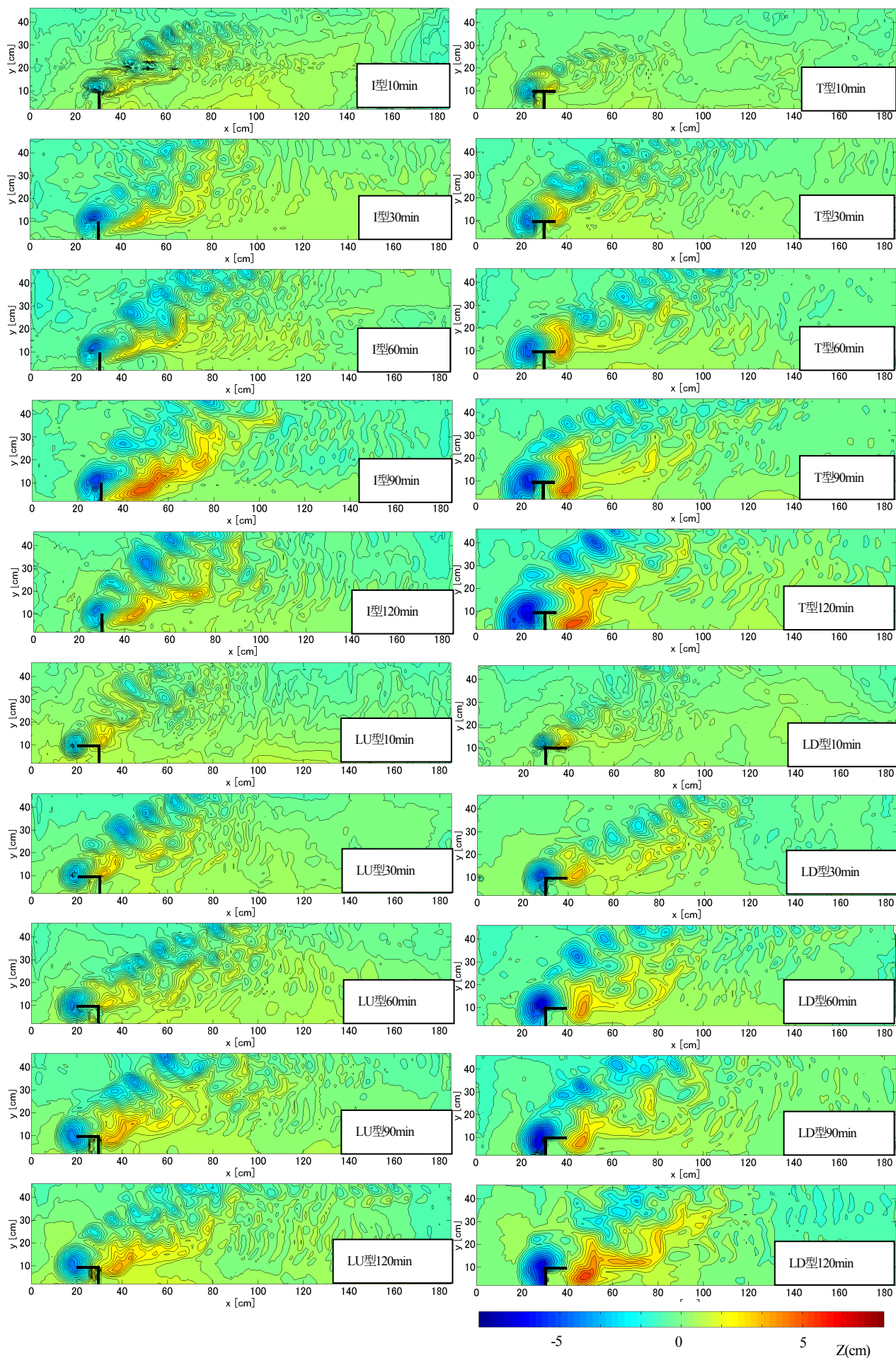


図-5 河床形状のコンター図

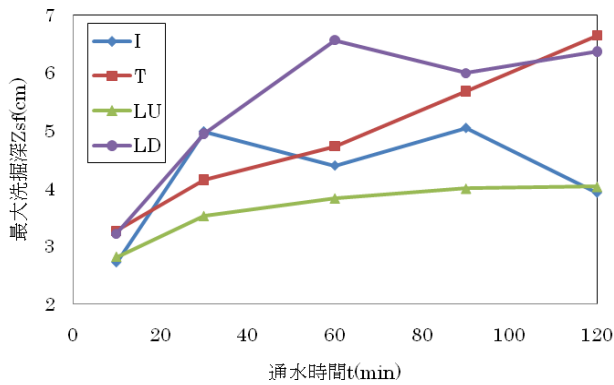


図-6 通水時間と最大洗掘深の関係

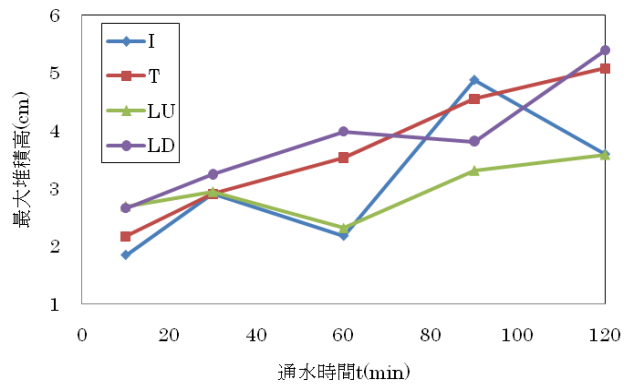


図-7 通水時間と最大堆積高の関係

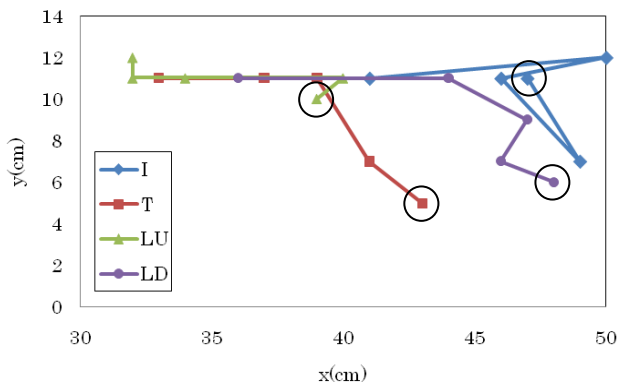


図-8 最大堆積高の出現位置

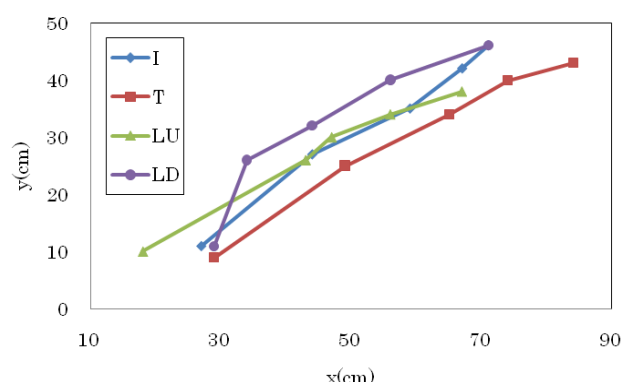


図-9 通水時間60分の河床波の発達方向

4. おわりに

本研究では、各種形状水制の水制周辺の三次元流速場を解析するとともに、水制頭部周辺の局所洗掘ならびに水制下流域での局所堆積や河床波の発達などの河床形状変化特性を実験的に検討した。その結果、下流側に突き出しがある場合は、局所洗掘が大きくなり局所堆積が右岸側に現れることが明らかになった。また、上流に突き出しがある場合は、洗掘孔の形状に変化が見られ、河床波がより右岸側に発達することが明らかになった。

今後は、数値シミュレーションを用いた河床変動の再現や異なる水理条件での河床変動を解明する必要がある。

参考文献

- 1) 山本晃一：日本の水制，第1章 水制技術のあゆみ，三海堂，1996。
- 2) 武藤裕則・中川一：水制の形状が砂州地形の擾乱に及ぼす影響に関する実験的検討，水工学論文集，第50巻，pp.847-852，2006。
- 3) 椿涼太・古畑寿・辻本哲郎：水制群を含む木曽川下流域の出水時の流れ構造とワンド地形の変遷，水工学論文集，第52巻，pp.691-696，2008。
- 4) 高水克哉・栗原朋之・青木宗之・内山文哉・福井吉孝：杭水制内外の流れと魚の挙動，水工学論文集，第51巻，pp.1273-1278，2007。

- 5) 松本大三・富永晃宏：越流型水制群を用いた河床変動創出に及ぼす水制設置角度の影響，水工学論文集，第50巻，pp.1009-1014，2006。
- 6) 松本大三・富永晃宏・石川光雄：越流型水制群を用いた河床変動創出に及ぼす透過性の影響，水工学論文集，第52巻，pp.637-642，2008。
- 7) 福岡捷二・西村達也・岡信昌利・川口広司：越流型水制周辺の流れと河床変動，水工学論文集，第42巻，pp.997-1002，1998。
- 8) 福岡捷二・渡邊明英・川口広司・安竹悠：透過型水制工が設置された直線水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。
- 9) 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。
- 10) 村岡一志・森本稔・門田章宏・鈴木幸一：石かご水制下流域の河床形状変化に関する研究，水工学論文集，第52巻，pp.631-636，2008。
- 11) 宮本武之輔：治水工学，第5編 高水工事，修教社書院，1936。
- 12) 山崎吉晴：四国開発の先覚者とその偉業，四経連，11月号，pp.31-33，2006。
- 13) Nils Reidar B. Olsen：A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with multiblock option Version 1.1 and 2.0 for OS/2 and Windows User's Manual，2005。

(2009. 9. 30受付)