Ｂ－４１　　平成20年度　土木学会北海道支部　論文報告集　第65号

水制設置角度の影響による水制間の河床変動

Effects of inclination angle on sediment transport around spur-dikes

北海道大学工学部　○ 学生員　菜畑辰文(Tatsuya Nabatake)
北海道大学大学院工学研究科　正　員　清水康行(Yasuyuki Shimizu)
北海道大学大学院工学研究科　正　員　木村一郎　(Ichiro Kimura)
北海道大学大学院工学研究科　正　員　川村里実(Satomi Kawamura)

1.　はじめに

水制は河岸侵食を防ぐために治水構造物として利用される他，河岸を単調化させてしまう護岸被覆工法の代替として利用されている．近年では水制が創生する独特の河川景観や水生生物の生息環境など河川環境に及ぼす多様性が評価され，このような河川環境を創造するために，水制間への土砂堆積を促したり，瀬と淵の造成を目的に使用されたりしている．

良好な河川環境の創出を目指すためには，水制に関する水理的問題として挙げてられている河岸付近の減速効果の把握と抵抗の評価および水制設置による局所洗掘と河道全体の河床変動に対する影響が課題となる．このため、水制周辺の流れと河床変動について実験的・数値解析的研究など数多く行われている．だが，その多くは固定床において水制群による河岸付近の減速効果の把握と抵抗の評価や，水制周辺の流れ構造の解明に焦点が当てられた研究である．最近では水制の形状や水制の設置間隔や設置角度の効果などについて詳細な検討がされてきているが，水制の設計項目は数多くあるため，その組み合わせは無限に存在する．最適な設置方法を考えるために，模型実験をそれぞれの組み合わせで実施していては，労力と費用がかかってしまう．そこで数値解析モデルを用いた数値実験が有力な手段となるが，水制周辺の 3 次元的な流れや河床変動を十分な精度で予測できるモデルの開発はされていない．

良好な河川環境創出において重要な要素の 1 つとして水制間の土砂堆積があげられる．既存の研究によると、水制間の土砂堆積の傾向は水制設置角度が異なれば堆積傾向が大きく異なることが報告されている[1)]．松本らは設置角度の異なる水制を対象に水理模型実験を用い，堆積洗掘特性の相違を検討している．この実験を検証ケースとし，本研究では 3 次元的な流れと河床変動のモデルを組み合わせた数値モデルを用いて，再現計算を行い，モデルの適用性について検証する．

2.　数値解析法

2.1　流れの基礎式

水面と河床面に適合した 3 次元移動一般曲線座標系を用いると流れの基礎式は以下のように表される．

[連続式]

$$\frac{1}{\sqrt{g}}\frac{\partial V^{\alpha}\sqrt{g}}{\partial \xi^{\alpha}} = 0 \tag{1}$$

[運動方程式]

$$\begin{aligned}&\frac{\partial V^i}{\partial t}+\nabla_j\left[V^i(V^j-W^j)\right]\\&+V^i\nabla_jW^j+V^j\nabla_jW^i\\&=F^i-\frac{1}{\rho}g^{ij}\nabla_jp+\nabla_j\left[-\overline{v^iv^j}\right]+2\nu\nabla_je^{ij}\end{aligned} \tag{2}$$

[k-方程式]

$$\begin{aligned}&\frac{\partial k}{\partial t}+\nabla_j\left[k(V^j-W^j)\right]+k\nabla_jW^j\\&\quad=-g_{il}\overline{v^lv^j}\nabla_jV^i-\varepsilon\\&+\nabla_j\left\{\left(\frac{D_t}{\sigma_k}+\nu\right)g^{ij}\nabla_ik\right\}\end{aligned} \tag{3}$$

[ε-方程式]

$$\begin{aligned}&\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+\nabla_j\left[\varepsilon(V^j-W^j)\right]+\varepsilon\nabla_jW^j\\&=-C_{\varepsilon1}\frac{\varepsilon}{k}g_{il}\overline{v^lv^j}\nabla_jV^i\\&-C_{\varepsilon2}\frac{\varepsilon^2}{k}+\nabla_j\left\{\left(\frac{D_t}{\sigma_k}+\nu\right)g^{ij}\nabla_i\varepsilon\right\}\end{aligned} \tag{4}$$

ここに，ξ^j：計算空間の空間座標，t：時間，V^j：流速ベクトルの反変成分，W^j：格子移動速度ベクトルの反変成分，v^j：乱れ速度ベクトルの反変成分，p：圧力，ν：動粘性係数，ρ：流体の密度，k：乱れエネルギー，ε：乱れエネルギー散逸率，F^j：重力ベクトルの反変成分をそれぞれ表す． g_{ij}，g^{ij}は計量テンソルの共変成分及び反変成分であり，次のような関係がある．

$$g_{ij}=\frac{\partial x^k}{\partial \xi^i}\frac{\partial x^l}{\partial \xi^j}\delta_{kl},\ g^{ij}\frac{\partial \xi^k}{\partial x^i}\frac{\partial \xi^l}{\partial x^j}\delta_{kl}\ \ g_{iji}g^{jk}=\delta_i^k \tag{5}$$

ここに，x^jはデカルト座標系を表す．また、

$$g=\det\left\lfloor g_{ij}\right\rfloor \tag{6}$$

である．さらに，∇jは共変微分を表し，例えば，あるベクトルの反変成分A^kに関しては，次のようになる．

$$\nabla_i A^k = \frac{\partial A^k}{\partial \xi^i} + A^j \Gamma^k_{ij} \tag{7}$$

ここに，$\Gamma^k{}_{ij}$はクリストッフェルの記号(接続の係数)であり，次式で計算される．

$$\Gamma^k_{ij} = \left\{ \begin{matrix} k \\ i \quad j \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} g^{km} \left(\frac{\partial g_{jm}}{\partial \xi^i} + \frac{\partial g_{im}}{\partial \xi^j} - \frac{\partial g_{ij}}{\partial \xi^m} \right)$$
$$= \frac{\partial \xi^k}{\partial x^p} \frac{\partial^2 x^p}{\partial \xi^i \xi^j} \tag{8}$$

なお，流速ベクトルの反変成分(Ｖ^k)と直交成分(Ｕ^k)は次の関係(chain rule)により変換される．

$$V^i = \frac{\partial \xi^i}{\partial x^j} U^j, \quad U^i = \frac{\partial x^i}{\partial \xi^j} V^j \tag{9}$$

2.2　乱流モデル

本研究では非線形k－εモデルを用いており，その構成則は次のように表される[3]．

$$-\overline{v'^i v'^j} = D_t S^{ij} - \frac{2}{3} k \delta^i_s g^{sj}$$
$$-\frac{k}{\varepsilon} D_t \left[\alpha_1 Q_1 + \alpha_2 Q_2 + \alpha_3 Q_3 \right] \tag{10}$$

$$D_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{11}$$

$$Q_1 = S^{i\alpha} g_{\alpha l} \Omega^{lj} + S^{j\beta} g_{\beta l} \Omega^{li} \tag{12}$$

$$Q_2 = S^{i\alpha} g_{\alpha l} S^{lj} - \frac{1}{3} S^{k\alpha} g_{\alpha m} S^{m\beta} g_{\beta k} \delta^i_l g^{lj} \tag{13}$$

$$Q_3 = \Omega^{i\alpha} g_{\alpha l} \Omega^{lj} - \frac{1}{3} \Omega^{k\alpha} g_{\alpha m} \Omega^{m\beta} g_{\beta k} \delta^i_l g^{lj} \tag{14}$$

$$S^{ij} = g^{j\alpha} \nabla_\alpha V^i + g^{i\alpha} \nabla_\alpha V^j \tag{15}$$

$$\Omega^{ij} = g^{j\alpha} \nabla_\alpha V^i - g^{i\alpha} \nabla_\alpha V^j$$

(16)　モデル係数は，ストレインパラメータＳと，ローテイションパラメータΩの次のような関数で与える．

$$\alpha_1 = -0.1325 f_M, \quad \alpha_2 = 0.0675 f_M, \quad \alpha_3 = -0.0675 f_M \tag{17}$$

$$f_M = \frac{1}{1 + 0.02 M^2} \tag{18}$$

$$C_\mu = \min \left[0.09 \quad \frac{0.3}{1 + 0.09 M^2} \right] \tag{19}$$

$$S = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} S^{i\alpha} g_{\alpha j} S^{j\beta} g_{\beta i}} \tag{20}$$

$$\Omega = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \Omega^{i\alpha} g_{\alpha j} \Omega^{j\beta} g_{\beta i}} \tag{21}$$

これらのモデル関数について文献[3]を参考されたい．

2.3　河床変動モデル

河床変動のモデルとして平衡流砂モデルを用いて河床変動を評価する．評価式として，流線方向の流砂量に芦田・道上式(22)を用いて次のように評価する．次に，長谷川式(23)から横断方向流砂量を計算する．得られた流砂量フラックスを一般座標系に変換し，式(24)より河床の時間的変化を計算する．なお，3 次元計算であるため(22)式では長谷川式の 2 次流の項を省略している．

$$q_{Bs} = \mathrm{K} \left(\tau^* \right)^{3/2} \left(1 - \sqrt{\frac{\tau^*_c}{\tau^*}} \right) \left(1 - \frac{\tau^*_c}{\tau^*} \right) \tag{22}$$

$$q_{Bn} = q_{Bs} \left(-\frac{\partial z_b}{\partial n} \sqrt{\frac{\tau^*_c}{\mu_s \mu_k \tau^*}} \right) \tag{23}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{z_b}{J} \right) + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q^\xi_B}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{q^\eta_B}{J} \right) \right) = 0 \tag{24}$$

ここで，K=17(定数)，$\mu_s \mu_k$：砂の静止及び動摩擦係数(μ_s=0.7，μ_k=0.5)である．

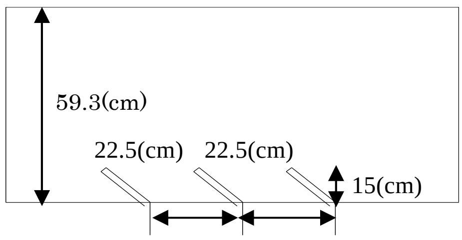
3.　水制設置角度の影響による比較検討

3.1　対象とする実験

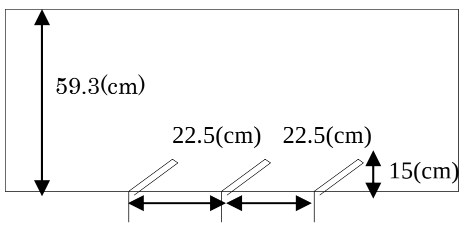
河床変動の数値解析結果の比較対象として，名古屋工業大学で行われた実験をとりあげる[1]．実験では水路長 13m，水路幅B=59.3cm，深さ 30cmの直線水路に 3 基を 1 群としている．水制模型は幅b=1.8cm, 高さは 4cm, 長さlgは横断方向に水路幅の約 4 分の 1 である 15cmであり，水制間隔は水制長の 1.5 倍の 22.5cmである．また，移動床実験は水流が安定する 4.5mから 10.5mの 6mを移動床区間とし，平均粒径 0.04cmの砂を厚さ 11cmに平らに敷き詰めている．水理条件は表-1 に示す．通水後 1 時間後の時点でほぼ安定した状態の河床形状が測定されている．

3.2　流れの検討

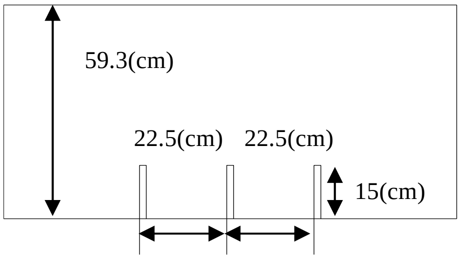
本 3 次元解の水制周辺の流れ場の再現性についてはある程度検証されている[2]．本研究で得られた流れ場の特徴を次に述べる．



(a)上向き水制



(b)下向き水制



(c)直角水制

図-1　実験水路模式図

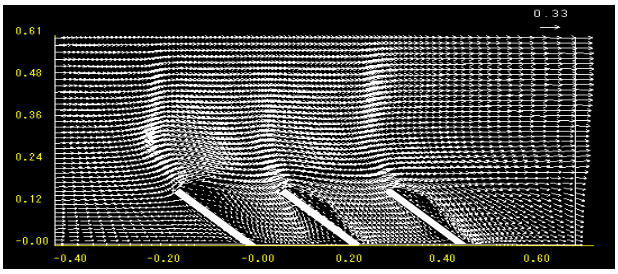


図-2　上向き水制平面図

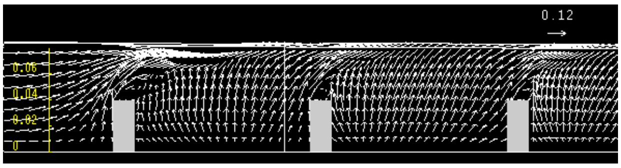


図-3　上向き水制断面図

表-1　水理条件

流量 Q(lit/s)	水深 h(cm)	水路幅 B(cm)	勾配 Ie	平均流速 V(cm/s)
12.5	8.0	59.3	0.00038	23.4
横断方向 水制長 (cm)	水制幅 b(cm)	水制高 (cm)	フルード数 Fr	レイノルズ数 Re
15	1.8	4.0	0.265	14400

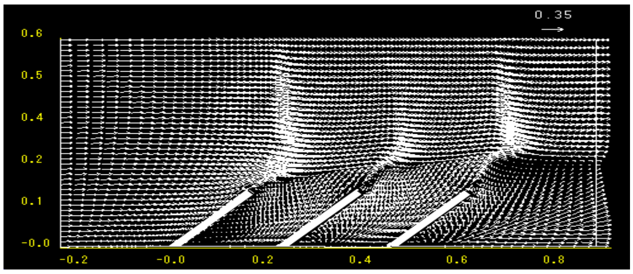


図-4　下向き水制平面図

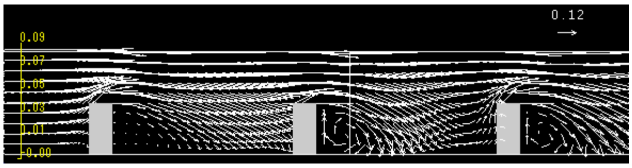


図-5　下向き水制断面図

1)　上向き水制

図-2 より，第 2 水制と第 3 水制の先端の裏側には渦構造がはっきりと確認できる．また，第 1・2 水制間と第 2・3 水制間共に水制間へ流入する流れが顕著にみられる．また，水制根元付近断面図(図-3)より水制を越流する流れが確認でき，水制間で上昇流が発生している．

2)　下向き水制

図-3 より，第 1・2 水制間と第 2・3 水制間共に上向き水制とは逆の水制間から流出する流れが確認できる。また，断面図より，水制前面で下降流が発生しており，第 1・2 水制間と第 2・3 水制間共に水制間で循環流が発生している．

3.3　河床変動の検討

水制の設置角度の影響による水制間の河床変動の違いを定性的に評価する．また，水制間の河床変動を実験と比較することにより，数値解析モデルの適用性を確認する．なお，実験結果は通水後 1 時間における計測結果であるのに対して，今回示す計算結果は t=100(sec)の時点のものである．従って，定量的な比較はできないが，定性的な堆積挙動についてのみ実験と比較し考察する．

1)　上向き水制

上向き水制では，図-6 より第 1 水制先端での広範囲での局所洗掘が特徴的な現象であり，また水制間に土砂が堆積するのが特徴と考えられる．数値解析では，第 1 水制先端の局所洗掘が再現できていない．また，第 2 水制と第 3 水制先端の局所洗掘も発生場所が実験よりも下流側にずれて再現されている．水制間の堆積は，堆積する傾向は再現されてはいるが，発生場所が実験よりも水制先端側へずれて再現されている．

2)　下向き水制

下向き水制では，図 7 より第 1 水制前面ではほとんど洗掘が見られず，第 2 水制と第 3 水制の根元付近で最大となる洗掘が発生している．また，第 2 水制と第 3 水制の先端で堆積が発生しているのが特徴である．数値解析では，水制間の洗掘傾向は再現できているが，洗掘場所が実験とは異なっている．また，水制先端での堆積傾向も堆積する傾向は出ているものの，堆積場所が水制根元側にずれて再現されている．

3)　直角水制

直角水制では，図-8 より第 1 水制の先端を中心とする円状の最大洗掘が発生している．第 2・第 3 水制となるにつれて，先端の洗掘は小さくなり，前面の洗掘はほとんど見られない．水制間において水制間中央付近に堆積する傾向が見られる．数値解析では，水制先端の局所洗掘は発生しているが，規模が異なり，実験のような水制の順に洗掘が小さくなる傾向は再現されてない．また，水制間の土砂堆積も再現できてない．

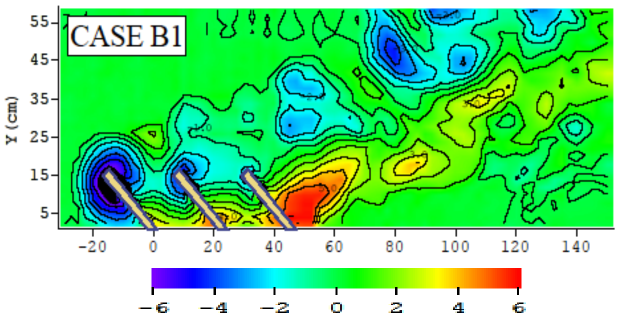


図-6　上向き水制(実験結果)

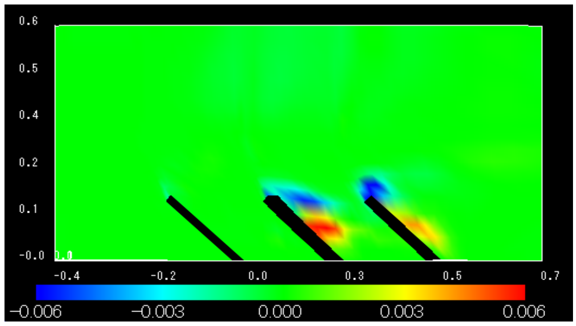


図-9 上向き水制(数値解析結果)

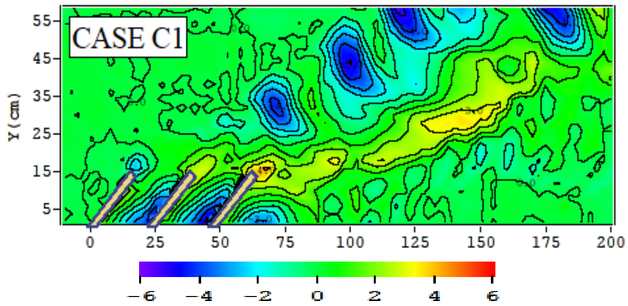


図-7　下向き水制(実験結果)

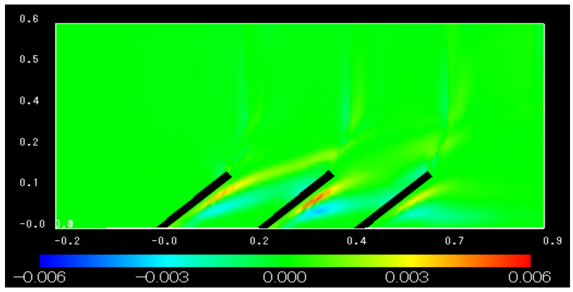


図-10　下向き水制(数値解析結果)

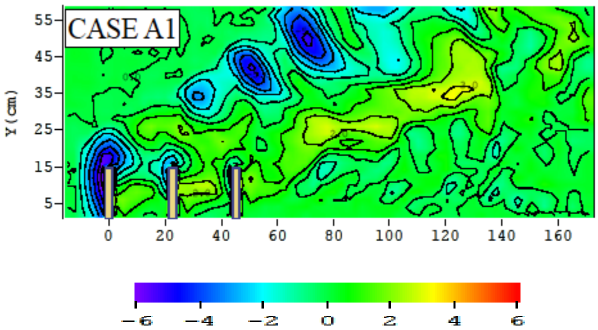


図-8　直角水制(実験結果)

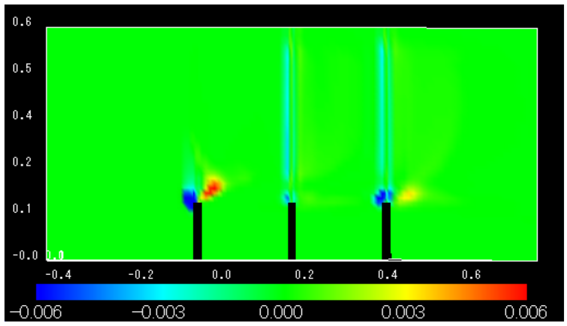


図-11　直角水制(数値解析結果)

4.　おわりに

水制の設置角度の変化により水制周辺の流れ特性は大きく異なっており，上向き水制では水制間に流入する流れが顕著であるため，水制間に堆積する傾向があると考えられる。また，下向き水制は水制間から流れ出る流れにより水制根元付近が洗掘されると考えられる．現段階では，数値解析結果はあまり実験との一致は見られなかった．今後は実験と同じ時間スケールのシミュレーションが必要となる．また，本研究で用いた芦田・道上は主流方向の河床勾配の影響が反映されていないため，従来から局所洗掘が再現され難いと報告されている．よって，モデルの適用性を高めるために河床勾配の影響を反映したモデルや非平衡の流砂モデルを検討していく必要がある．

参考文献

1)松本大三・冨永晃宏：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 vol.50，1009-1014，2006.

2)木村一郎，細田尚，音田慎一郎，冨永晃宏，武田誠：不透過越流型水制周辺の三次元乱流構造に及ぼす水制設置角度の影響，四日市大学環境情報論集，第 6 巻第 1 号，45-76，2002.

3)Ali，M.　S.，Hosoda，T.，Kimura，I. &Onda，S：Approximate solution of an axisymmetric Swirling jet using non-linear k-ε model with consideration of realizability．Journal of Applied Mechanics，JSCE 9：821-832．2006.