

1. はじめに 河川改修にできるだけ自然的要素を加えることは、河川整備計画の重要なテーマのひとつである。そのためには自然河川の直線部と湾曲部、河岸の形状、植生の有無等様々な形態の影響を検討する必要がある。特に直線河川に比べて圧力勾配による力や遠心力による影響を受ける湾曲部では、2次流による乱流構造の複雑化や湾曲特有の洗掘・堆積傾向を示す。これらの多種多様な条件の影響を把握するためには、数値計算による予測が有効な手段となる。そこで、本研究では比較的簡易なゼロ方程式モデルを用いた3次元数値計算に水面変化を考慮したことによる数値計算法の適用性を検討し、また、乱流モデルに  $k-\varepsilon$  モデルを用いた計算との比較により、ゼロ方程式モデルの有効性について検討した。また、3次元数値計算のパラメーターを用いて2次元による河床変動計算も行いその適用性について検討した。

2. 実験方法および実験条件 実験水路は水路幅90cm、深さ30cm、長さ17.2mの長方形断面水路で、上流端から10.8mの位置に湾曲角60°の単一湾曲部を設置し、その下流に4.5mの直線部を接続させたものである。湾曲部の中心曲率半径は  $R=2.7\text{m}$  で曲率半径・水路幅比  $R/B=3.0$ 、河床勾配は  $1/2000$  である。

実験条件は表-1に示すように設定した。水深は各実験における湾曲開始点上流90cmの水深の平均値である。樹木群を模擬した円柱粗度としては、直径5mm、長さ18cmの木材の棒を用い、流下方向、横断方向に5cm間隔で格子状に配置し、湾曲入口  $=0^\circ$  から湾曲出口  $=60^\circ$  の外岸側に5列、幅22.5cmにわたって設置した。円柱群高さが水深の  $1/4, 2/4, 3/4$  の水没型及び非水没型、円柱粗度の設置していないケースについて、固定床及び移動床実験を行った。

表-1 実験条件

ケース名	河床状態	円柱高さ(cm)	水深(mm)	流量(lit/s)
Vh-04	固定床	-	158.96	37.17
Vh-14		3.75	149.1	44.64
Vh-24		7.5	150.93	34.69
Vh-34		11.25	149.24	44.65
Vh-44		18	150.47	34.41
Kh-04	移動床	-	129.42	37.96
Kh-14		3.75	149.51	44.56
Kh-24		7.5	150.77	42.95
Kh-34		11.25	150.66	43.64
Kh-44		18	150.88	40.3

河床には平均粒径0.05cmの珪砂を湾曲上流180cmから湾曲下流の200cmまで厚さ11.5cmで敷き詰めた。固定床実験は河床変動の初期状態を検討する目的で、河床を平坦にならしセメントで固め計測を行った。移動床実験は河床変動について検討する目的で、対象は静的洗掘のみで、上流からの給砂は行わず、通水5時間後に計測を行った。

### 3. 湾曲部流れの三次元数値計算

3.1 基礎方程式 開水路湾曲部では遠心力と圧力勾配により生じる2次流が流れや河床形状を支配する要因として重要視されている。円柱群高さの違いが流れ構造に及ぼす効果を予測する手段として三次元数値解析における検討を行った。基礎方程式として曲線座標系におけるレイノルズ方程式を用いる。

$$\frac{R}{R+y} \frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} + \frac{\partial UW}{\partial z} + \frac{2UV}{R+y} \quad (1)$$

$$= -g \frac{R}{R+y} \frac{\partial H}{\partial x} - F_x + \frac{1}{\rho} \frac{R}{R+y} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}$$

$$\frac{R}{R+y} \frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial VV}{\partial y} + \frac{\partial WV}{\partial z} - \frac{(U^2 - V^2)}{R+y} \quad (2)$$

$$= -g \frac{\partial H}{\partial y} - F_y + \frac{1}{\rho} \frac{R}{R+y} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}$$

$$\frac{R}{R+y} \frac{\partial UW}{\partial x} + \frac{\partial VW}{\partial y} + \frac{\partial WW}{\partial z} + \frac{VW}{R+y} \quad (3)$$

$$= -g \frac{\partial H}{\partial z} - F_z + \frac{1}{\rho} \frac{R}{R+y} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}$$

$$\frac{R}{R+y} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{V}{R+y} = 0 \quad (4)$$

ここに、 $R$ は水路内岸の曲率半径であり、 $U, V, W$ はそれぞれの流下方向 $x$ 、横断方向 $y$  ( $y=0$ が内岸)及び鉛直方向 $z$ の平均流速、 $H$ は水位、 $\rho$ は水の密度、 $g$ は重力加速度である。 $F_x, F_y, F_z$ は円柱群の形状抵抗による流下方向、横断方向及び鉛直方向の抗力を表し、次式で与えた。

$$F_x = \frac{1}{2} C_D \lambda U \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \quad (5)$$

$$F_y = \frac{1}{2} C_D \lambda V \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \quad (6)$$

$C_D$ は円柱群の形状抵抗係数、 $\lambda$ は円柱群密度パラメーターである。ここで、 $W$ は他の流速に比べて非常に小さいことより  $F_z=0$  とした。また、 $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ はレイノルズ応力の成分である。

3.2 乱流モデルと境界条件 乱流モデルにはゼロ方程式モデルと  $k-\varepsilon$  モデルを用いる。

<ゼロ方程式モデル> レイノルズ応力成分について

では、渦動粘性モデルを用いて次式で表す。

$$\begin{aligned}\frac{\tau_{xx}}{\rho} &= 2\nu_t \left( \frac{R}{R+y} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{V}{R+y} \right), \quad \frac{\tau_{yy}}{\rho} = 2\nu_t \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right), \quad \frac{\tau_{zz}}{\rho} = 2\nu_t \left( \frac{\partial W}{\partial z} \right) \\ \frac{\tau_{xy}}{\rho} &= \nu_t \left( \frac{\partial U}{\partial y} - \frac{U}{R+y} + \frac{R}{R+y} \frac{\partial V}{\partial x} \right), \quad \frac{\tau_{yz}}{\rho} = \nu_t \left( \frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z} \right) \\ \frac{\tau_{xz}}{\rho} &= \nu_t \left( \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{R}{R+y} \frac{\partial W}{\partial x} \right)\end{aligned}\quad (5)$$

$\nu_t$  は渦動粘性係数であり、対数則分布を仮定して次式のように与えた。

$$\begin{aligned}0 \leq \frac{z}{h} \leq 0.8 & : \nu_t = \kappa U_* z \left( 1 - \frac{z}{h} \right) \\ 0.8 \leq \frac{z}{h} & : \nu_t = 0.16 \kappa U_* h\end{aligned}\quad (6)$$

ただし、 $U_*$  は摩擦速度、 $h$  は水深、 $\kappa$  はカルマン定数である。2次流の計算を安定させるため  $z/h > 0.8$  において  $\nu_t$  を一定としている。

壁面における境界条件としては、壁面に垂直な流速はゼロとし、平行な流速は壁法則により与えた。壁面に最近点の壁からの距離とその点の流速を用いて対数則から摩擦速度を算出する。入口の境界条件としては、流量  $Q$  を与え、 $U$  を流量が一致するように対数則分布で与え  $V=0, W=0$  とする。

<  $k-\varepsilon$  モデル > レイノルズ応力成分については、せん断応力成分はゼロ方程式モデルと同様であり、垂直成分については次式で与える。

$$\begin{aligned}\frac{\tau_{xx}}{\rho} &= 2\nu_t \left( \frac{R}{R+y} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{V}{R+y} \right) - \frac{2}{3} k, \quad \frac{\tau_{yy}}{\rho} = 2\nu_t \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} k \\ \frac{\tau_{zz}}{\rho} &= 2\nu_t \left( \frac{\partial W}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} k\end{aligned}\quad (7)$$

渦動粘性係数は次式で与える。

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}\quad (8)$$

ここで、 $k, \varepsilon$  は乱れエネルギーとその逸散率、 $C_\mu (= 0.09)$  は数値パラメーターで  $k-\varepsilon$  モデルの標準値を与える。 $k, \varepsilon$  については、次の輸送方程式から算出する。

$$\begin{aligned}U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} + W \frac{\partial k}{\partial z} &= P_k - \varepsilon + C_{fk} (F_x U + F_y V) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right\} \quad (9) \\ U \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + W \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} &= \frac{\varepsilon}{k} [C_1 \{ P_k - \varepsilon + C_{fk} (F_x U + F_y V) \} - C_2 \varepsilon] \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right\} \quad (10) \\ P_k &= \nu_t \left[ 2 \left\{ \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 \right\} \right. \\ &\quad \left. + \left[ \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right]^2 + \left[ \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right]^2 + \left[ \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right]^2 \right] \quad (11)\end{aligned}$$

ここに、 $C_1 (= 1.44), C_2 (= 1.92), \sigma_k (= 1.0), \sigma_\varepsilon (= 1.3)$  と与える。 $C_{fk}, C_{f\varepsilon}$  は実験的に与えられ、本研究では

変形を無視できる粗度として取扱い  $C_{fk} = 1.0, C_{f\varepsilon} = 1.3$  と与える。式(9),(10)における  $[F_x U + F_y V]$  は、植生によって与えられる乱れエネルギーや逸散への影響を考慮したものである。

壁面の境界条件としては、対数則が成立するものとし乱流エネルギー  $k$  を用いて与える。また、 $k, \varepsilon$  の輸送方程式における底面境界では、ソース項に含まれる乱れエネルギーの生成項や逸散率を決めるために、速度勾配項を対数則、乱れの局所平衡に基づいて決定した。入口の境界条件としてはゼロ方程式モデルと同様に与えた。

3.3 計算方法 ここでは三次元的な効果について水面変化を考慮した移動境界座標系を用いたゼロ方程式モデルにより検討した。同時に移動境界座標系を用いたゼロ方程式モデルの有効性を検討するために、流れの履歴による乱れ特性の変化を考慮した  $k-\varepsilon$  モデルによる数値シミュレーションも行った。これらの式は有限体積法により離散化され、SIMPLE 法によって解かれた。

### 3.4 計算結果と実験結果の比較

(1) 2次流構造の考察 図-1は2次流構造を比較したものである。水面変化を考慮したことで底面付近の内岸方向流速がより強くなり、渦の中心が  $k-\varepsilon$  モデルよりも高く外岸寄りになっている。実験でみられる逆回転の外岸渦は、今回のモデルでは再現されていない。図-2は横断方向流速の鉛直分布を示す。図には水面変化を考慮しない場合とした場合のゼロ方程式モデルと  $k-\varepsilon$  モデルにする計算結果を示している。水面変化を考慮したことで水面付近の流速は、外岸の逆流を除いて良好に再現されている。底面付近の流速については  $\approx 60^\circ$  で過小評価されているが、 $k-\varepsilon$  モデルよりも再現性がよい。

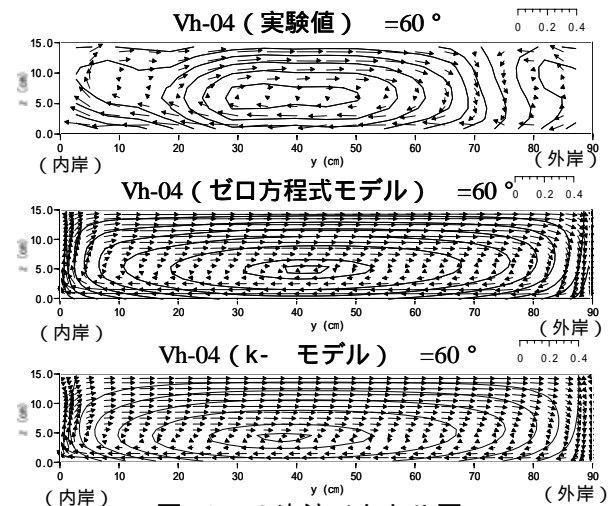


図-1 2次流ベクトル図

(2)円柱群高さの効果 図-3に外岸に円柱群がある場合の湾曲出口における横断方向流速の鉛直分布を示す．水面変化を考慮することで考慮しない場合に比べて鉛直方向の速度勾配が緩やかになっている． $k-\varepsilon$ モデルでは，Vh-34において実験と同様に直線的な分布をしており，全体的に2次流強度が過小評価される傾向にあるが，底面付近の流速は良好に再現されている．ゼロ方程式モデルでは，2次流強度が過大評価される傾向にあるが，円柱群高さが高くなるほど内岸側での再現性が良好である． $k-\varepsilon$ モデルでは円柱群の効果を検討した乱流モデルにより，円柱群高さによる2次流の発達減衰過程を再現している．

#### UU4．湾曲部の河床変動に関する数値計算

4.1 河床変動計算方法 河床変動計算は，2次元数値計算を用いて行った．基礎方程式は式(1)～(4)を水深平均した平面流方程式を用いる．2次元計算では主流及び2次流による分散効果を与える必要がある．本研究では特に湾曲流れにおいて大きな値となる $\overline{U'V'}$ ， $\overline{V'V'}$ について3次元計算により得られた値を2次元計算に直接与えた． $U'$ ， $V'$ は流下方向及び横断方向の水深平均値からのずれであり，オーバーバーは水深平均値を意味する．また，底面せん断応力と底面における速度偏角 $v_b/u_b$ についても同様に3次元計算により与えた．

河床変動計算における流砂量式としては，流下方向についてはMeyer-Peter-Müllerの式で与え，横断方向については河床横断斜面の効果を検討した長谷川の式で与えた．また河床高計算には流砂の連続式を用い，流下方向では後進差分，横断方向では中央差分，時間微分には前進差分を行う．

#### 4.2 計算結果と実験結果の比較

(1)分散項の比較 図-4に円柱群高さが水深の1/4であるVh-14における分散項の3次元計算値と実験値の比較を示す． $\overline{U'V'}$ 分布は円柱群境界で最大をとり，内岸に負の領域がみられる． $\overline{U'V'}$ は2次流による運動量輸送を表す項であり，正の領域は内岸から外岸への輸送を意味する．計算値は実験値の傾向をよく再現している．また， $\overline{V'V'}$ のピーク位置は2次流強度の発達減衰過程に対応している．計算値は実験値よりもやや内岸でピークをとる．また，計算値では外岸渦が再現されないため，外岸の負の領域が現されていない．

(2)底面せん断応力分布の比較 図-5に底面せん断応力分布を示す．上流90cmにおける底面せん断応力

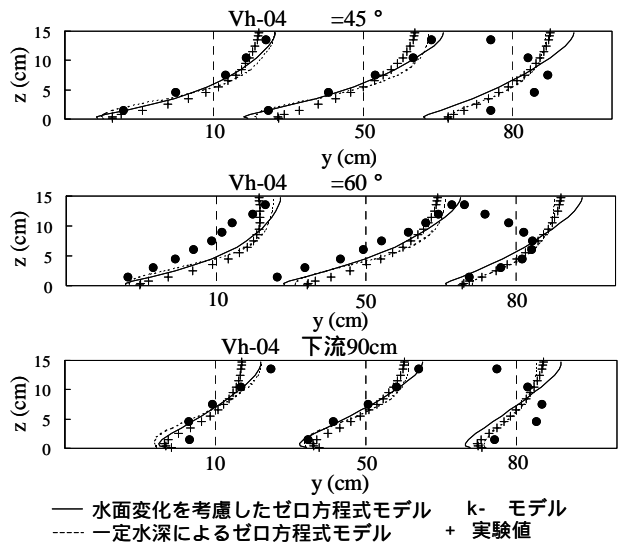


図-2 横断方向流速の鉛直分布 (ケース Vh-04)

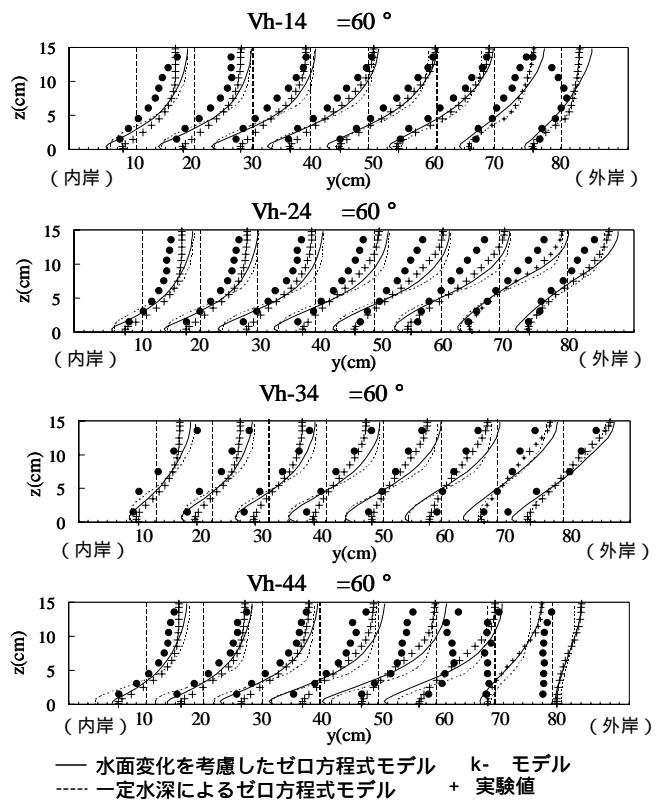


図-3 横断方向の鉛直分布

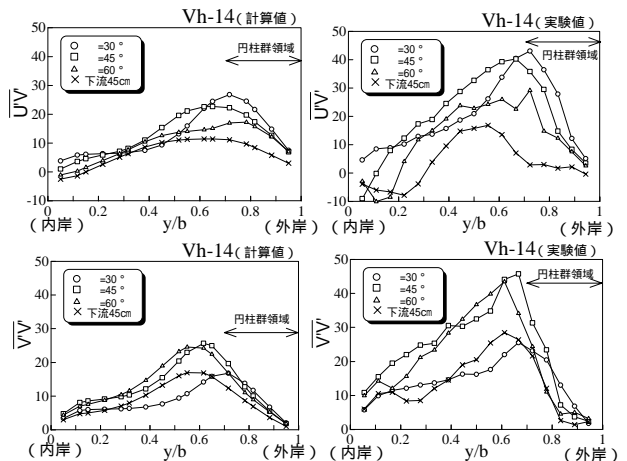


図-4 分散項の横断方向分布

力の平均値で無次元化している。円柱群内では計算、実験ともに底面せん断応力が小さい値になっている。湾曲内の内岸側に生じる値が大きい領域では、Vh-14 は計算値が実験値よりも下流寄りであるが、Vh-34 は良好に再現されている。下流直線区間の外岸側では、Vh-14 は底面せん断応力の大きな領域となり、Vh-34 は円柱群後方から小さい値の領域となる実験値の傾向を計算値はよく再現している。

(3)河床変動の比較 河床高計算は、流れ構造の再現性から、円柱群を設置しないケースでは水面変化を考慮したゼロ方程式モデル、設置したケースでは  $k-\varepsilon$  モデルによる3次元計算結果の値を用いて行った。図-6は計算による河床高コンターを示す。円柱群を設置しないKh-04では、実験は  $\theta=0^\circ$  の内岸壁から下流直線区間の外岸壁にかけて水路断面の半分程度の洗掘が生じ、堆積は内岸の  $\theta=30^\circ$  付近から下流の水路中央にかけてみられた。本計算においてもこれらの洗掘堆積の傾向を再現している。円柱群を設置したケースでは、円柱群が高くなるに従い下流直線区間の外岸側に生じる洗掘は小さくなる傾向がみられる。 $\theta=15^\circ$  から下流にかけては水路中央に洗掘がみられる。これらの傾向は実験結果とよく一致している。また、実験は  $\theta=30^\circ$  の内岸壁から下流直線区間の水路中央に向かって堆積がみられた。計算では下流直線区間で内岸寄りの洗掘が生じている。

5. おわりに 3次元計算において移動境界座標系を用い水面変化を考慮することで、横断方向流速の速度勾配や水面付近の流速に変化がみられ、2次流構造に再現性がみられた。円柱群を設置したケース

では、円柱群の効果を  $k-\varepsilon$  モデルの方がより適切な値を与える。河床変動については、3次元計算によって得られた値を2次元計算に用いることで、河床変動形態を再現することができた。ただし、高精度かつ効率的な計算を行うためには、今後3次元計算による河床変動計算を検討していく必要がある。

指導教官 富永 晃宏 教授

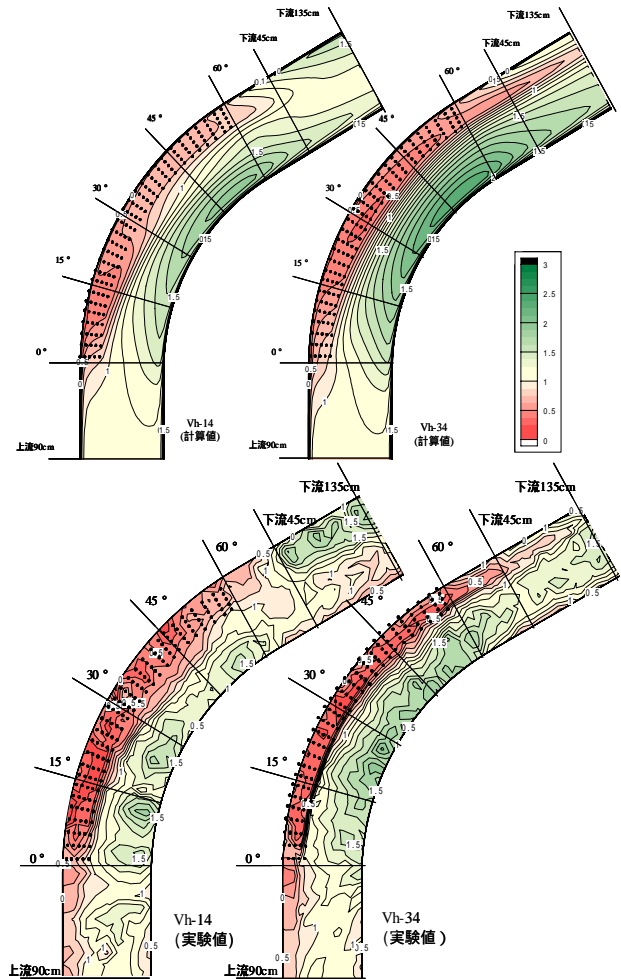


図-5 底面せん断応力コンター

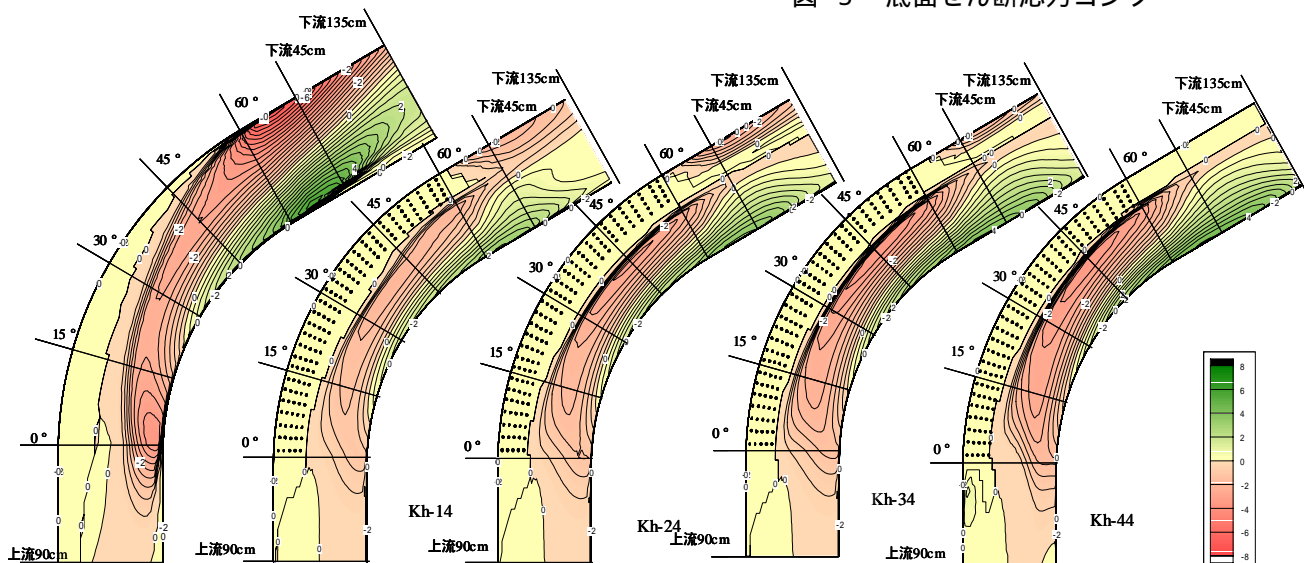


図-6 計算による河床高コンター