

護岸上の傾斜棧による根固め工の無用化

Eviction of foot protection work in river by action
of slanting bar mounted on revetment

大同淳之

Atsuyuki DAIDO

1. はじめに

根固め工は、堤防護岸法尻の洗掘防止、流心を河道中央へ遷移させる、等の目的で施工されているが、主な目的は法尻の洗掘防止である。護岸足元の洗掘は、二次流が護岸に沿って下降し、護岸法尻から河心に向かって流れ、そのとき砂を河心側に運ぶが、法尻では砂の補給がないために生じているものである。これを防止する根固め工は、流れに逆らって、力で抵抗する対策のため、根固め工の損傷も大きく、河道の摩擦抵抗も増加する。

護岸上に、傾斜板を付けて洗掘を防止せんとした研究は、Uscategui ら¹⁾に始まり、著者ら^{2) 3)}、関根、吉川ら^{4) 5) 6)} および辻本ら⁷⁾ によつて行われている。護岸上に傾斜棧を付けると、護岸に沿って二次流が上昇し、河床面においても河の中央から法尻に向かって流れが生じ、結果として河心から法尻に向かって砂が移動し、一般に法尻付近の河床高さは河心より高く、根固め工は必要でないことを見出した。この方法は、流れ自身の力で洗掘を防止するものである。護岸はもともと表面近傍の流速を弱めるために、表面を粗にしている。この表面の突起の模様を傾斜棧に変えるだけで、根固め工をなくすることができる。

洗掘を防ぐだけでなく、根固め工を省略するためには、法尻に積極的に堆積を図るためには、主流と二次流の合速度の方向が、護岸側に向いていることを保証する条件をきめる必要がある。本文は、まだ解析的に決めていないが、実験結果はそれを十分保証するものであることを述べる。

2 曲線部における傾斜棧の効果

2. 1 曲線部の二次流

二次流は、曲線部で主流の z 方向の流速差による遠心力の差から生じる第1種二次流、また乱れの場所的変化から生じる第2種二次流からなる。第1種と第2種の二次流の大きさは第一種のほうが大きい。したがって、第1種二次流のときに洗掘が防げて洗掘防止用の根固め工が不要になると、第2種の場合には容易といえる。

2. 2 洗掘防止に必要な二次流の大きさ

洗掘を防止し、砂を堆積させる範囲を、法尻から水深程度とし、これに必要な上昇流を求めることにする。この範囲の洗掘を防止するためには、水深相当距離の範囲で底面での主流と二次流の合流速の方向が護岸側に向いておればよい。即ち二次流単独で砂を動かすのではなく、砂が主流方向に転動または跳躍しながら動くときに護岸側に砂を向かわせるだけの二次流の大きさがあればよい。

2. 3 傾斜棧による上昇流速

必要な棧の規模と最適な傾斜角を考察する。ここで用いる棧は、粗度として護岸を保護する程度で、できるだけ抵抗が小さく、必要な上昇流を起こすことができるもので良い。図1の棧前面の検査面に入出入りする流量から棧前面の上昇流速 w 、半径方向流速 v と棧表面の x 方向の流速 u との関係を運動量の関係から求める。棧の一番下の単位要素については添字1をつけると、連続式は、

l 方向の運動量の式は、

$$\rho u_1 \frac{b}{\sin \gamma} dz = \rho w_1 \frac{b^2}{\sin \alpha \sin \gamma} + \rho v_1 dz \frac{b}{\sin \alpha} \quad (1)$$

キーワード：洗掘防止、根固め、二次流、

立命館大学教授、理工学研究所 (525-77, 草津市野路東 1-1)

$$\begin{aligned} & \rho u_1^2 \frac{b}{\sin \gamma} dz \cos \alpha \sin \gamma f(\alpha) - \rho w_1^2 \frac{b^2}{\sin \gamma \sin \alpha} \sin \alpha \sin \gamma \\ &= \rho g \frac{b}{\sin \gamma} dz \cos \alpha \cos \gamma - \frac{\partial p}{\partial l} dl \frac{b^2}{\sin \gamma \sin \alpha} - \tau_0 \frac{b}{\sin \gamma} \frac{dz}{\sin \alpha} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに $f(\alpha)$ は、 x 方向から流入する運動量が l 方向に寄与する率とする。また、 y 方向の運動量式は、

$$\rho u_1^2 \left(\frac{b}{\sin \gamma} dz \right) f(\beta) - \rho v_1^2 \left(\frac{b}{\sin \alpha} dz \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} dy \frac{b}{\sin \gamma} dz - \tau_0 \frac{b}{\sin \gamma} \frac{dz}{\sin \alpha} \quad (3)$$

ここに $f(\beta)$ は、 x 方向から流入する運動量が y 方向に寄与する率とする。ここに $f(\alpha)$ は $\alpha = 0$ のとき $w=0$ 、 $\alpha = 90^\circ$ のとき $w=0$ を満たすように $f(\alpha) = k_1 \sin \alpha$ 、 k_1 は係数とする。(2)式において、右辺第1項と第2項は釣り合っているとして両者の和は0、 $\tau_0 = \rho \frac{f}{8} u^2$ 、式(3)の右辺第1項は小さいとして省略する。また $f(\beta)$ は $\alpha = 0$ のとき $f(\beta) = 0$ 、 $\alpha = 90^\circ$ のとき $f(\beta) = 1.0$ のもつべきことから $f(\beta) = k_2 \sin \alpha$ と表す。式(1)と式(2)より、 w_1 、 v_1 を u_1 の関数として、水路全体の摩擦速度で除してあらわすと、

$$\frac{w_1}{u_*} = \frac{u_1}{u_*} \sqrt{\frac{k_1 \cos \alpha}{1 - (f/8) \sin \gamma}} \quad (4) \quad \frac{v_1}{u_*} = \frac{u_1}{u_*} \sqrt{\frac{f(\beta) \sin \alpha - f/8}{\sin \gamma}} \quad (5)$$

式(5)中の $f(\beta)$ は、連続式を満たす条件より、

$$f(\beta) = \left\{ 1 - \frac{k_1 \sin \alpha \cos \alpha \sin \gamma}{1 - \frac{f}{8} \sin \alpha \sin^2 \gamma} \right\} \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} \right) \left(1 - \frac{f}{8} \frac{1}{\sin \gamma} \right) = k_2 \sin \alpha \quad (6)$$

となる。図2の上部の実線は護岸の傾斜角 α が 90° および 45° について x 方向より流入する運動量が l 方向に寄与する係数 k_1 を1として、式(4)を計算した結果を示す。棧の傾斜角 α が 45° で w/u の値が最大になることを示す。式(4)の検査と k_1 の値を決めるため、棧の厚さ b が 1 cm 及び 0.5 cm (相対棧厚さ $h/b = 7 \sim 15, 9$) について、底面から棧1つ分の高さで w と u を測定して、 k_1 を決めた結果は図2の下方に示すもので、護岸の傾斜 90° および 45° について、 $k_1 = 0, 0.7$ を用いると、理論値と一致する事が示された。棧の傾斜角は $45^\circ \sim 65^\circ$ の範囲では、その効果はあまり変化がないことが分かる。その結果、 $f(\beta)$ は、図3のようになる。図4は参考として直線水路で棧の厚さ $b = 0.5 \text{ cm}$ を用いて、 l 方向の w と u の測定値から k_1 を求めた結果で、図2の測定値と同じく底より棧と同じ高さの位置では、 $k_1 = 0.07$ であるが、それより下の隅角部では u が小さいため、 $k_1 = 0.18$ 程度と大きく、またそれより上方でも k_1 の値は漸増することを示す。また底面で、壁面方向に向かう v/u の測定値を示す。この値は壁面の w/u とほぼ等しく、壁面と底面とが一つの循環を形成していることを示す。

棧間の w の x 方向の流速分布は図5に示すように、ほぼ一様である。これは、棧が傾斜しているため、水平単位面積を通過する流れは、鉛直方向のどこかの高さで、傾斜棧の上昇効果を受けるためと考えられる。この測定値の k_1 はほぼ0.2と、図2の底から棧の高さで測定したものより大きい。

2.4 傾斜棧が曲線部二次流に及ぼす効果

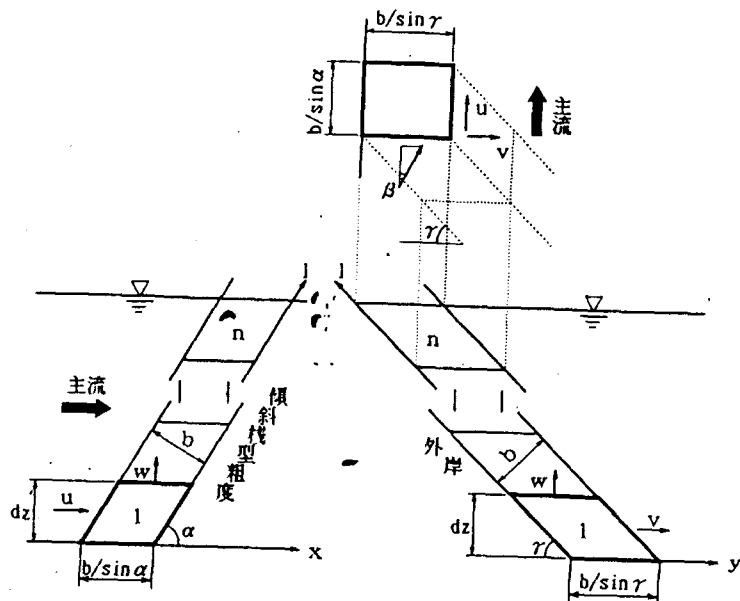
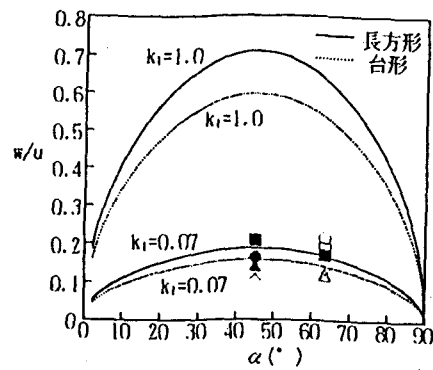


図1 傾斜棧の記号



	$h(\text{cm})$	横断面
●	7.0	長方形
■	9.0	
▲	11.5	
+	15.9	
○	8.0	台形
□	10.0	
△	12.0	
×	13.0	

図2 式(4)の計算値と実験値の比較

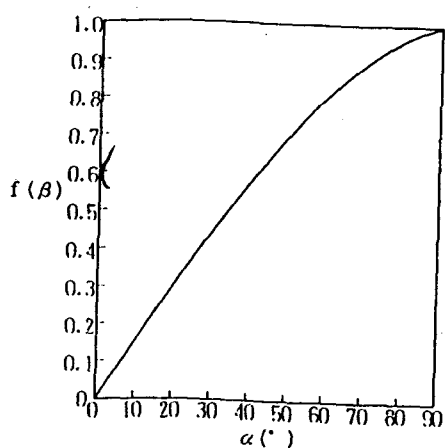


図3 式(6)による α と $f(\beta)$ の関係
($k_1 = 0.07$, $\gamma = 90^\circ$)

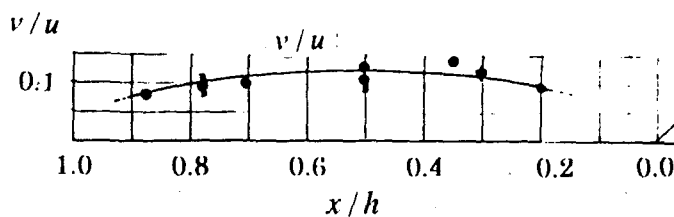


図4 台形断面における w/u と v/u の分布

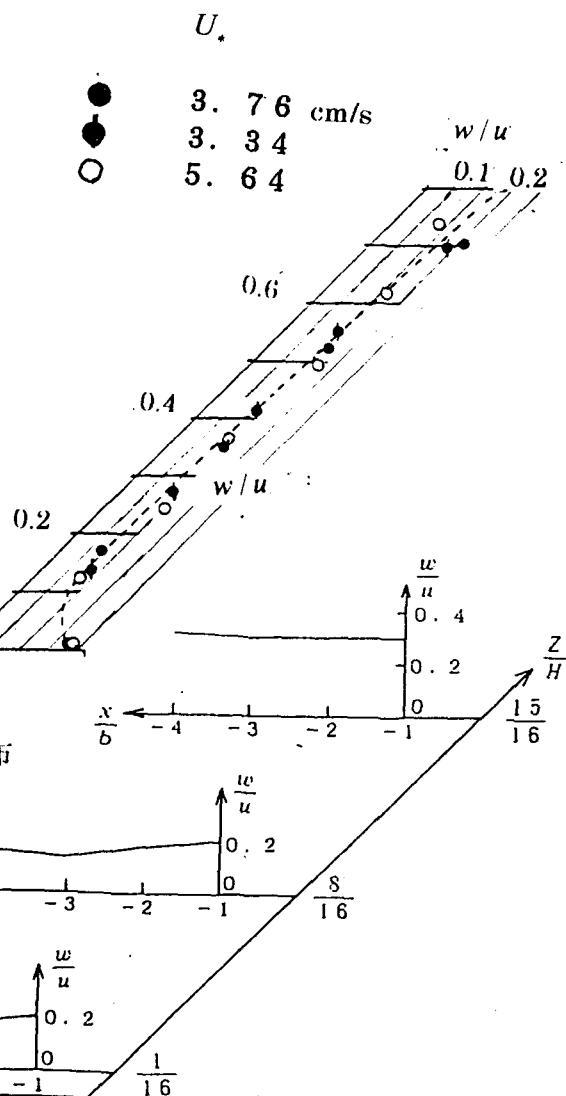


図5 傾斜棧型粗度間の上昇流速 w の測定値
(傾斜棧型粗度(1:1)、 $H = 16\text{cm}$)

曲線部において、 θ 方向の主流速度 u の z 方向の流速分布から生じる 2 次流は、吉川、池田ら⁸⁾によつて、

$$V = \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad (7) \quad W = \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R} \quad (8)$$

で表して、長方形断面のとき、

$$\frac{\partial^4 \Psi}{\partial R^4} + 2 \frac{\partial^4 \Psi}{\partial R^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4 \Psi}{\partial z^4} = -\frac{2}{\epsilon} u \frac{\partial u}{\partial z} \quad (9)$$

と表された。右辺の項が二次流を起こす力である。湾曲部外縁側で傾斜槽をつけて、そこで、 $w = c_r$ の速度を生せしめたときの断面内の二次流の大きさは、つぎの境界条件によって式 (9) をとくことによって得られる。

$$\begin{aligned} R = R_0 \text{ で } \Psi_R' &= C_r & R = R_1 \text{ で } \Psi &= 0 \\ z = h \text{ で } \Psi &= 0 & z = 0 \text{ で } \Psi &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{この場合の解を,} \quad \Psi = \Psi_1 + \Psi_2 \quad (11)$$

とおく。 Ψ_1 については、 $\nabla^4 \Psi_1 = 0$

$$\begin{aligned} R = R_0 \text{ で } \Psi_1 &= C_r & R = R_1 \text{ で } \Psi_1 &= 0 \\ z = h \text{ で } \Psi_1 &= 0 & z = 0 \text{ で } \Psi_1 &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

をみたすものとし、鉛直方向の条件を満たす解として、

$$\Psi_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \Psi_r \sin \frac{n\pi z}{h} \quad (13)$$

となる。ここに Ψ_r は半径方向の関数で、つぎの式をみたす。

$$\frac{d^4 \Psi_r}{dR^4} - 2 \frac{n^2 \pi^2}{h^2} \frac{d^2 \Psi_r}{dR^2} + \frac{n^4 \pi^4}{h^4} \Psi_r = 0 \quad (14)$$

したがって、

$$\Psi_r = (C_1 + C_2 R) \exp\left(-\frac{n\pi R}{h}\right) \quad (15)$$

Ψ_1 の R の原点を外縁側にとり、 $R = 0$ で $\partial \Psi_1 / \partial R = C_r$ 、 $R = B$ で $\Psi_1 = 0$ とすると

$$\Psi_1 = \sum_{n=1}^{\infty} C_r (R - B) \left(1 + \frac{n\pi B}{h}\right)^{-1} \exp\left(1 - \frac{n\pi R}{h}\right) \sin \frac{n\pi z}{h} \quad (16)$$

この Ψ_1 は傾斜粗度によって誘発された上昇流による 2 次流を示す。

Ψ_2 については、吉川、池田⁸⁾ らによって、

$$R = R_0 \text{ で } \Psi_2 = 0 \quad R = R_1 \text{ で } \Psi_2 = 0 \quad (17)$$

の条件で、つぎの解がえられている。

$$\Psi_2 = \sum_{l,m=1}^{\infty} A_{lm} \sin \frac{l\pi z}{h} \sin \frac{m\pi \zeta}{B}$$

ここに ζ は内壁からの半径方向への距離である。また A_{lm} は

$$A_{lm} = -\frac{8}{\epsilon} \frac{1}{hB\pi^4} \times \frac{\int_0^B \int_0^H U \frac{\partial U}{\partial Z} \sin \frac{lmZ}{h} \sin \frac{m\pi \zeta}{B} dZ d\zeta}{\left\{\left(\frac{l}{h}\right)^2 + \left(\frac{m}{B}\right)^2\right\}^2} \quad (18)$$

この式は、 x 方向の流れの速度差から生じる二次流の大きさを表す。 Ψ_1 と流れの方向は逆である。

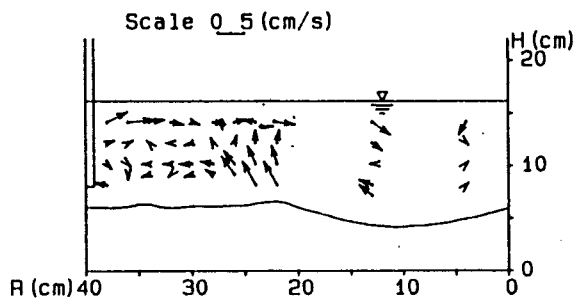


図6 二次流流速・流向の測定値
(RUN S・12, $Q=9.5 \text{ l/s}$,
Scale 0.5 (cm/s))

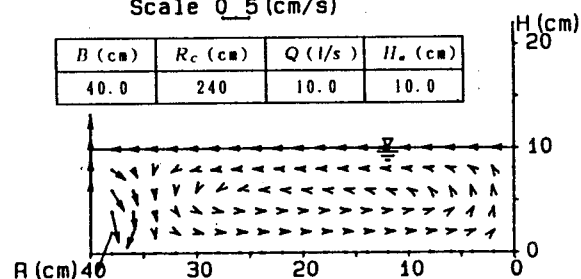


図7 二次流の流速・流向の計算結果

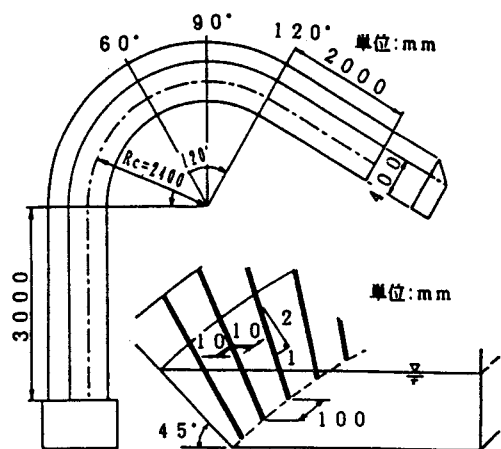


図8 傾斜棧粗度 (1:2の例)
実験水路

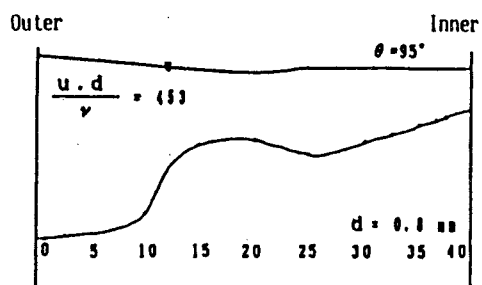


図9 模型粗度を付けていないときの
河床の平衡横断形

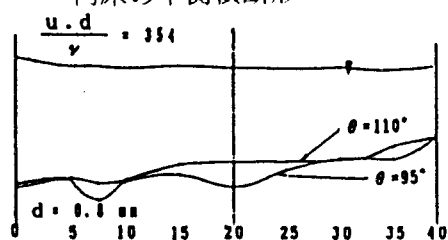


図10 模型粗度の下端を砂面の上部に
とどめたときの河床の平衡横断形

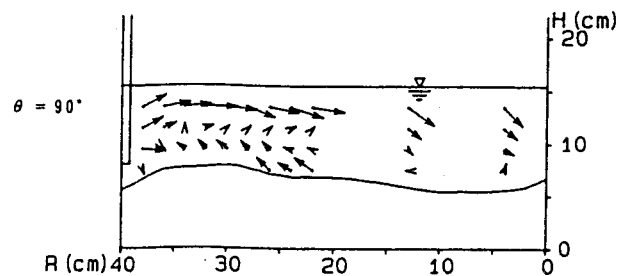


図11A 二次流の流速・流向と横断河床形状
(傾斜模型粗度 (1:1))

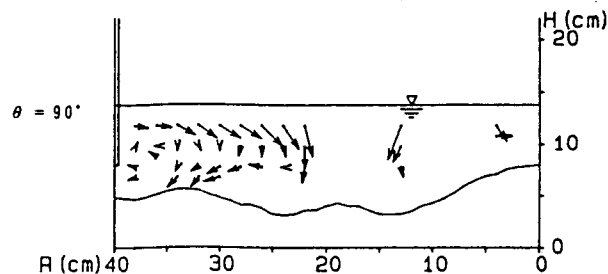


図11B 二次流の流速・流向と横断河床形状
(傾斜棧型粗度 (1:1, 5mm角))

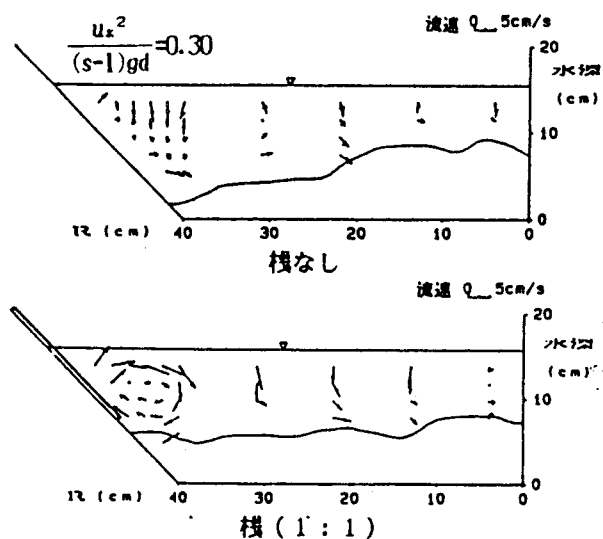


図12 模型粗度の違いによる二次流・河床形状の比較
($\theta = 60^\circ$, $Q = 10.1 \text{ l/s}$, $d = 0.4 \text{ mm}$)

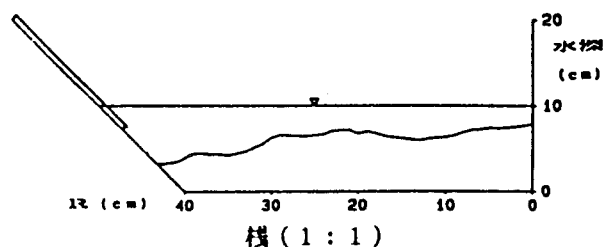


図13 水深が浅い場合の河床形状
($\theta = 60^\circ$, $Q = 6.3 \text{ l/s}$, $d = 0.4 \text{ mm}$)

式(11)の検査のため、実験に即した条件のもとに式(11)の数値計算を行った。図6は、中心半径24 m、幅0.4 mの水路の外縁側に高さ1.0 cmの傾斜棧を $\alpha = 45^\circ$ 、 $s/b = 10$ でつけて水深 $h = 10.6$ cmで、河床の状況および二次流の流速分布を測定した結果を示す。(水路の次元は2.5に述べる)外縁近くで、時計廻りにまわる棧によって引き起こされた流れがあって、そのために外縁部は洗掘されていないが、中央部から内側に洗掘が移っている。図7はこの実験のときに得られた棧近傍の上昇流速の平均値 $w = 10$ cm/secを式(11)に入れて、同じ水深、流量について固定床として計算した結果で、棧による影響の範囲は、法尻から0.6 hとなり、実験にくらべて、計算値のほうの若干小さめに表れている。この差は、棧による逆方向の二次流により、主流の流速分布が一様化する結果、主流による遠心力が減少し、 Ψ_2 の値が小さくなると考えられるのに対して、計算はそれをしていないためと考えられる。

2. 5 傾斜棧による法尻堆積効果の実験

a) 実験の概要 実験水路および模型棧の概略図を図8に示す。実験水路は幅40 cm、高さ35 cm、中心半径240 cm、角度 120° の湾曲水路である。断面形は長方形および台形で、台形断面は外壁に傾けたものである。河床勾配は $1/500$ で、上流側に3 m、下流側に2 mの直線部を接続している。流速の計測には3 mmプロペラ流速計と三次元電磁流速計を使用し、プロペラ流速計での流速の測定はサンプリング間隔0.1 sで5 s間の平均値を用いた。測定は湾曲開始から 60° ・ 90° ・ 120° の3断面でおこなった。模型粗度には1 cm角または0.5 cm角の角棒を用い、上部を下流側に1:2または1:1の傾きをつけて10 cm間隔で外壁斜面に張り付けた。棧粗度なしの場合は平均粒径0.08 mmのサンドペーパーを側面に貼付したものである。移動床に用いた砂の平均粒径は0.4 mmと0.8 mmの2種類である。図

b) 長方形断面での効果 外縁側に傾斜粗度をつけていないときの洗掘状況を図9に示す。通常見られるように外側に洗掘が生じている。図10は外縁側に傾斜棧 $\alpha = 45^\circ$ 、 $s/b = 10$ で堆積状況を調べたもので、河床はほぼ平坦である。この実験では棧の下端は砂の面より棧の大きさ b の2倍上にとどめている。これは棧のまわりに局所洗掘が生じ、堆積を阻害するため、 b の2倍程度上げても棧による流れの上昇効果には無関係である。しかし、上げすぎると効果は減じる。図11は傾斜棧を入れている場合の河床の状況と二次流の流向とその大きさを示す。図11は局所洗掘の影響をさけるため、棧の位置を砂面から上2 cmに止めたもので、傾斜粗度の効果が二次流の制御のみに作用している場合で、河床はほぼ平坦を示す。しかし、これより上に棧を上げると傾斜粗度の効果が減じ、二次流の制御が難しいことが実験で示された。

c) 台形断面での効果 移動床での実験結果の一例を図12に示す。傾斜棧なしの場合では外縁部底部の二次流流速は内縁部に向かい、局所洗掘が確認できる。傾斜棧を施した場合は、傾きが1:1、1:2のどちらの場合も外縁部での二次流流向が逆転し、結果として洗掘を防止している。どちらの横断面形状でも二次流・河床形状に同様の傾向がみられる。また、どちらの粒径でも同様の効果が現れている。 h/B が小さい場合の実験結果を図13に示す。これらの図から、 h/B が小さいときでも傾斜粗度が洗掘防止に十分な効果を出していることがわかる。良好な結果が得られた原因として、 h/B が小さいときには傾斜粗度の効果は減少するが、それだけ遠心力による二次流の強さも減少しており、結果として洗掘が生じていないと考えるからである。ただ棧の下端が上がりすぎている場合は効果は減少する。全実験を通して、傾斜粗度を施した場合は、外縁部から水深と同程度までの範囲の水路床で洗掘軽減効果があることを確認した。

3、直線部における傾斜棧の効果

3. 1 直線河道における二次流

直線河道における二次流については、例えば、吉川、池田⁹⁾によると、式(9)と同じ形式で

$$\frac{\partial^4 \Psi}{\partial R^4} - 2 \frac{\partial^4 \Psi}{\partial R^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4 \Psi}{\partial z^4} = \frac{1}{\varepsilon_{yz}} \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} (\overline{v^2} - \overline{w^2}) \quad (19)$$

と表されている。しかし、壁面の近傍における $\frac{\partial^2}{\partial y \partial z} (\overline{v^2} - \overline{w^2})$ の値については、現在その特性が測定

され始めた段階で、これを一般的にモデル化はされていない。したがって、ここでは主として傾斜棧による上昇流に伴う移動床面の傾向によって、その効果を見る。

3. 2 河床形から見た傾斜棧の効果

図14は幅0.3m、長さ1.2mの水路で勾配0.0043、 $d_{50}=0.075$ mmの砂を用いて、側壁にはサンドペーパーのみで棧をつけていないときの横断形で、河床波の波高は測定が難しいほど小さい場合である。側壁の足元が洗掘されて、砂が水路中央に堆積している。流向の測定結果は必ずしも系統的ではないが、底面沿いに側壁足元より水路中央に向かう流れがあり、これが側壁足元の砂を水路中央へ運んでいるものと見られる。

図15は同じ水理条件で、側壁に0.5cm角の棧を、 $s/b=10$ 、 $\alpha=45^\circ$ で取り付けただけの場合である。棧の高さを b とすると、 $b/h=30$ で、棧の高さ b とその間隔 s との比、 $s/b=10$ 、棧の下端は砂の面から $2b$ 上に止めている。底面の二次流の流向は棧のない場合とは逆に水路中央より壁面に向かい、この流れが砂を水路中央に運んでいる。

図12、13の実験は、 B/h が2.3で、従来の研究より二次流の循環の横距に近く、上昇二次流の効果が顕著にでている恐れがあったので、幅7.2cmの水路で、 $B/h=12.8$ 、 $B/2b=7.2$ の条件で行ったものが図16で、棧を付けていないときは側壁足元は洗掘がみられるが、つけているときは中央部より堆積がみられ、側壁近傍の洗掘防止については期待した効果がみられる。

3. 3 法尻に堆積させるために必要な底面の法尻方向流速

二次流の v 、 w は簡単に求める形では表せてないので、洗掘を防止するために必要な底面の y 方向流速を、砂の外岸側に動かすに必要な大きさから見積もる。砂を側壁側に引き寄せられるためには、 y 方向の河床勾配 γ が0のときに側壁側に向けての v_s を生じるだけの v がある。砂が側壁上がり勾配 γ が生じ、砂が勾配 γ 上を外岸と平行して流れる状態である。後者の方が大きな v を要求される。後者を対象にして、 x 方向の流速 u との比の形で、 v を表すことにする。

斜面上を移動する砂に作用する力は、堆積した y 方向の勾配 γ は小さいとして、図17の記号を用いて、

$$\begin{aligned} x: & D \cos \Phi - F \cos \Psi + W \sin I_0 = 0 \\ y: & D \sin \Phi - F \sin \Psi - W \cos I_0 \cdot \sin \gamma_0 = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{ここに、} D = \frac{\rho}{2} C_D \frac{\pi}{4} d^2 \left\{ (u - u_s)^2 + (v - v_s)^2 \right\}$$

$$F = \mu W \cos I_0 \cdot \cos \gamma, \quad W = (\pi/6) s g d^3$$

式(14)を v_s/u_s について黒木、岸¹⁰⁾が解いた式は、

$$\frac{v_s}{u_s} = \frac{v}{u} - \frac{\cos I_0 \cdot \sin \gamma_0}{\sqrt{\frac{3C_D}{4sgd} u^2 (\mu \cos I_0 \cdot \cos \gamma_0 + \sin I_0)}} \quad (15)$$

である。勾配 γ のよる砂の y 方向の質量力の分力が、 v による抗力と y 方向の摩擦力によって釣り合って、 $v_s=0$ になったとき、

$$\frac{v}{u} = \frac{\cos I_0 \cdot \sin \gamma_0}{\sqrt{\frac{3C_D}{4sgd} u^2 (\mu \cos I_0 \cdot \cos \gamma_0 + \sin I_0)}} = \frac{\cos I_0 \cdot \sin \gamma_0}{\sqrt{\frac{3C_D}{4} \frac{u_*^2}{sgd} \frac{u^2}{u_*^2} (\mu \cos I_0 \cdot \cos \gamma_0 + \sin I_0)}} \quad (16)$$

となる。底面から d の高さの u/u_* を8.5、 C_D は0.4、 $\tau_* = 0.07$ を与えて $\sin \gamma_0 = 0.089$ 、 $\sin \gamma_0 = 0.052$ に対して、 $I_0 = 0.01 \sim 0.001$ の範囲で、 v/u はそれぞれ0.06および0.04となる。棧によって生じる上昇流が w/u は0.1~0.07程度で、底面の v/u は w/u とほぼ見合う量が発生しているので、護岸の前面に、半径が $h/2$ の循環があり、砂を動かしているとみなせる。

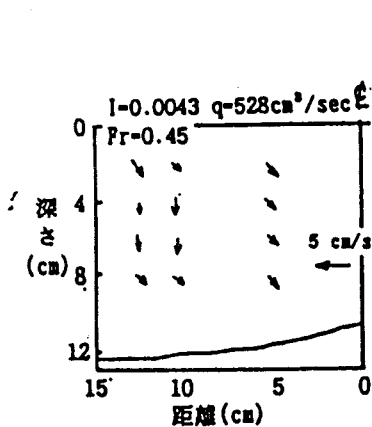


図14 傾斜棧がない場合の二次流の流向の大きさ

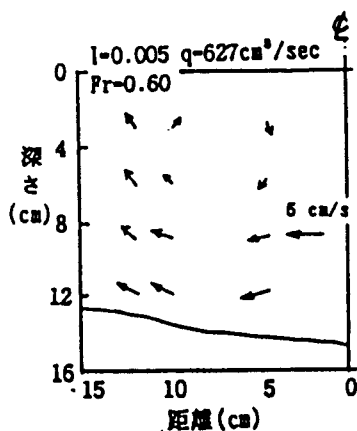


図15 傾斜棧をつけた場合の二次流の流向と大きさ

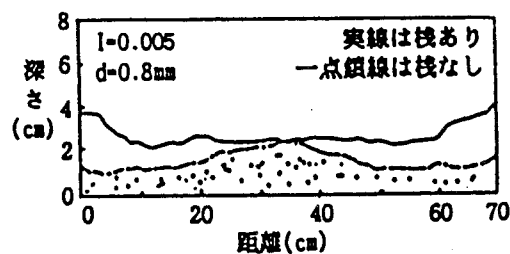


図16 傾斜棧の有無による河床形の比較

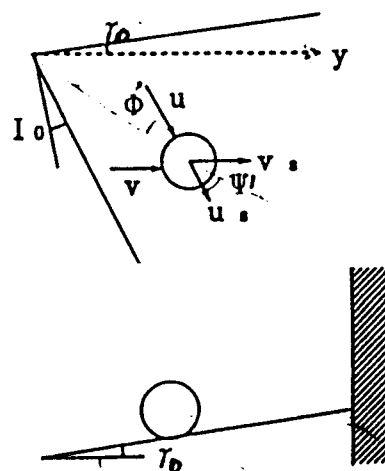


図17 砂の移動軌跡方向

4. むすび

傾斜棧による流れの上昇効果を利用して、積極的に法尻から水深相当距離に堆積をはかり、結果として根固め工を省略するために、傾斜棧によつて誘起された二次流の循環によつて、底面での二次流と主流の合流速の流向が護岸側に向いておればよい。

河道に生じる二次流の大きさは、曲線部のほうが直線部に比較して大きい。曲線部で傾斜棧が機能するならば、直線部では十分である。

水路の隅角部は断面形に関わらず、二次流はモデル化されていないので、解析的にその限界を決めることは難しいが、実験の結果は、根固め工を設け無くとも十分、砂の堆積をはかることが可能であることを示した。

参考文献

- 1) Uscategui, G., Ikeda, S. and Ishizuka, T.: Rivir Bend Bank Protection by Side Vanes Installed at the Outer Wall. 第40回年次学術講演会概要集, pp. 405-406, 1985
- 2) 大同淳之: 護岸粗度の制御による局所洗掘の制御, 水工学論文集, 第35巻, pp. 495-500, 1991
- 3) 大同淳之, 小澤和弘: 二次流の制御による河川曲線外縁部の局所洗掘防止, 水工学論文集, 第37巻, pp. 555-562, 1993
- 4) 沖村 学, 高松 諭, 福井吉孝, 吉川秀夫: 河川護岸の設計に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第37巻, pp. 569-574, 1993
- 5) 関根正人, 井田泰蔵: 斜め棧粗度を用いた局所洗掘抑制に関する研究, 水工学論文集, 第39巻, pp. 709-714, 1995
- 6) 関根正人, 吉川秀夫, 井田泰蔵, 高松 諭, 沖村 学: 斜め棧粗度による河川湾曲部の二次流制御に関する研究, 土木学会論文集, No. 558, pp. 61-70, 1997
- 7) 辻本哲朗, 宮垣圭吾, 森田優子: 棧粗度の斜め配置による開水路流れの制御, 水工学論文集, 第36巻, pp. 259-264, 1992
- 8) Kikkawa, H., Ikeda, S., Ohkawa, H. and Kawamura, Y.: Secondary flow in a bend of turbulent stream. Proc. of JSCE, no. 219, Nov. 1973
- 9) Ikeda, S.: Self-formed straight channels in sandy beds. Journal of ASCE, HY4, pp. 389-404, 1981
- 10) 黒木幹男, 岸力: 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文報告集, pp. 87-97, 第342号, 1984