

護岸粗度の制御による局所洗掘の防止

Control of Local Scour in Bend Channel
by Roughness on Embankment

大同 淳之 *

By Atuyuki DAIDO

The report treats with the control of the local Kscour in the out side of the bend channel. When the skewed rectangular roughness elements placed on the embankment, the local scour decrease and the bed profiles in the cross section change nearly plan. The upper direction flow induced by the skewed rectangular roughness elements reverse the direction of the secondary current near the bed. The mechanism of the scour decrease is discussed as the velocity V_s is in uniform and the center-frugal effect decrease.

Keyword: curved flow, local scour, secondary flow,
scour protection

1. はしがき

河道曲線部外縁部の局所洗掘を防ぐ方法に種々のものがあるが、著者は、護岸粗度の制御による洗掘の防止を考えた。実験による試行によって、対称形の粗度をいくら粗くしても、洗掘を防ぐことはできないが、頭部を下流側に傾けた棧型粗度をつけたとき、外縁側の局所洗掘深が小さくなることを見いだした。その原因として、傾斜棧型粗度をつけたときは、底面付近の流速 V_r が、水路内側から外側に向かって流れ、粗度をつけていないときの逆になることを測定した。この底面付近の外側に向かって流れる V_r によって砂が内側から外側に運ばれ、洗掘が防止されるとみられる。

底面付近の流速の逆転の原因として、傾斜棧型粗度が、通常、護岸に沿って下降していた二次流を鉛直上方に転流させるため上下層の混合が大きくなり、流速分布が一様となり、遠心力効果を減じ、結果として流速 V_r 成分が小さくなって洗掘が緩和されるという考え方を述べる。

2. 粗度の配置形式による洗掘防止効果の実験

2.1 洗掘防止に役立つ粗度の配置形式

* 正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科
(〒603 京都市北区等持院北町56-1)

局所洗掘を防ぐため、図1に示す4種の粗度を、幅0.3m、深さ0.4m、曲率中心半径 $r_0=2.2m$ の長方形断面の外縁側の鉛直側面に取り付けて、河床の終局の形状を調べた。粗度は摩擦効果が一番大きい L/K あるいは A/S が10（ここに L : 棧の間隔, K : 棧高さ(1cm), A : 1個の突起粗度が支配する床面積, S : 突起粗度の露出面積(1cm²)) になるように、また斜め粗度の6:1は粗度近傍の Vz/V_0 が0.16であることから選んだ。粗度末端の深さ方向の位置は、砂面より少し下がった点で止めている。実験の範囲は、 τ_b が0.06~0.16である。河床が平衡に達したときの河床横断面を図2に示す。粗度形式a,bでは、外縁部側の局所洗掘の形、深さは、粗度をつけていないときとは変わらない。しかし、c~dの形式のときは、河床は断面の中央部が少し低くなる凹型で、外縁部の局所洗掘は生じていない。この傾向は実験の範囲では同じ結果を得ている。最大洗掘深が粗度c,dで少ないことを平均水深との比で表すと図3のようになる。

2.2 外縁部に洗掘が生じない理由

図4は、移動床において、外縁部にdの粗度の着、不着による r, z 方向流速の合成速度を示す。図の結果によると、粗度がないときは、外縁側護岸に沿って下降した流れが底面に沿って流れるため、河床洗掘が生じるが、傾斜した棧型粗度を付けたとき、流向が逆転して底面付近では、内側から外側に向かって流れが生じている。この底面付近の流れによって、内側から外側に砂が供給されて、外縁部の洗掘が防げていると考えられる。

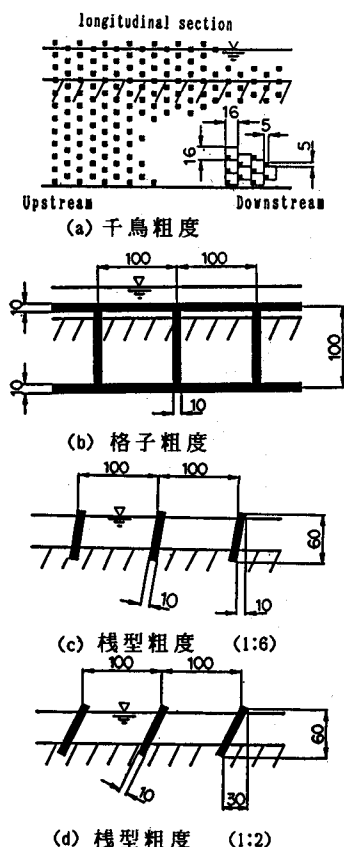


図1. 粗度の形式

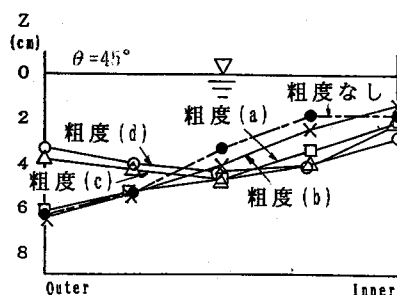


図2. 平衡河床形状

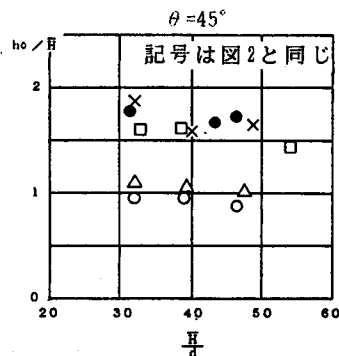


図3. 相対洗掘深

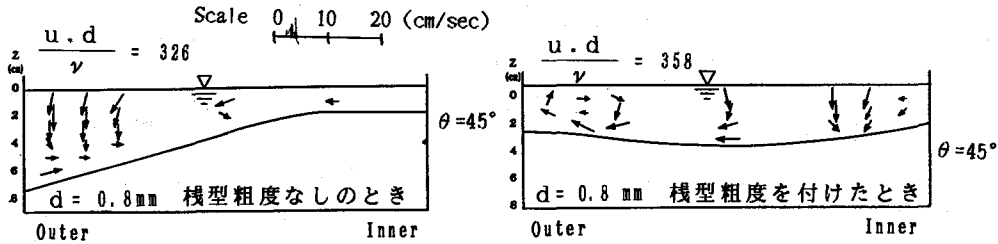


図4. 二次流の大きさと流向

2.3 傾斜棧型粗度をつけた場合の流速分布

先に行った水路は、Aspect ratio h/B が0.3 程度で、流路幅が水深に比して小さく、側壁効果が顕著に現れる恐れがあったので、水路幅を0.4mに広げて実験を行った。用いた水路は、図5に示すように中心半径2.4 m, 角度 120° , 幅0.4 m の曲線水路で、上流側に4m, 下流側に2mの直線部をつけている。

図6-1は、側壁および底面が滑面のケースで、二次流の大きさおよび主流 V_r の流速分布を示す。通常示されるように、二次流は表面近くで内側から外側で、底面近くでは、外側から内側へ流れている。

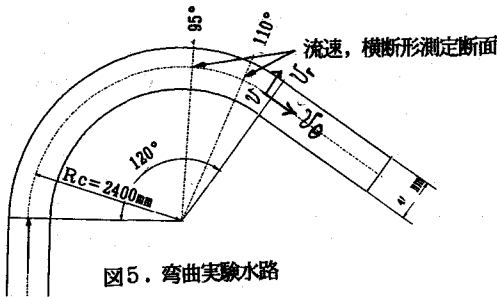


図5. 弯曲実験水路

二次流の計測は、直径2cmの球を持つ3次元電磁流速計で三次元流速を測定した。主流 V_r は直径3mmのプロベラ型流速計でも測定した。電磁流速計は、磁束、流速の分布が流速計のまわりで一定でなければ、電圧 E が流速に比例しなくなるので、壁面および水面近くでは、電圧 E が流速に比例しなくなる恐れがある。影響の範囲は、メーカーの検定では、壁面および水面から1.5倍としている。ここにあげた測定結果は、壁面および水面からの影響を持つ範囲のものも含まれている。ただ、主流 V_r について、側面および底面から2.5cmの点での両流速計の測定値はほぼ一致した。水面から1.5cmの点での流速は、電磁流速計の値のほうがプロベラ型より10%大きい値を示した。

移動床の場合その洗掘状況を図7に示す。通常示されるように外側に洗掘が生じる傾向を示す。図8は両側壁および底面に砂粒粗度の場合の二次流を示す。この場合も滑面の場合とほぼ同じである。図9-1は、内側側面および底面は滑面で、外側側壁に傾斜1:2の棧型粗度をつけたときの二次流の大きさを、図9-2に主流 V_r の流速分布を示す。底面近くの V_r の方向は、傾斜粗度をつけていない場合の逆に内側から外側に向かっている。その範囲は、流路幅いっぱいに広がっている。主流 V_r の流速分布は最大流速の位置が外側粗度によって内側に押しやられている。この主流の偏倚が、二次流に大きく寄与しているといえる。

移動床の場合その洗掘状況を図7に示す。通常示されるように外側に洗掘が生じる傾向を示す。

図8は両側壁および底面に砂粒粗度の場合の二次流を示す。この場合も滑面の場合とほぼ同じである。

図9-1は、内側側面および底面は滑面で、外側側壁に傾斜1:2の棧型粗度をつけたときの二次流の大きさを、図9-2に主流 V_r の流速分布を示す。底面近くの V_r の方向は、傾斜粗度をつけていない場合の逆に内側から外側に向かっている。その範囲は、流路幅いっぱいに広がっている。主流 V_r の流速分布は最大流速の位置が外側粗度によって内側に押しやられている。この主流の偏倚が、二次流に大きく寄与しているといえる。

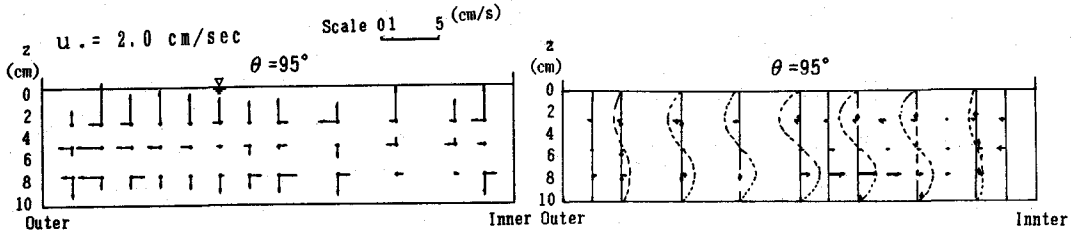


図6-1. 棧型粗度をつけていないときの二次流

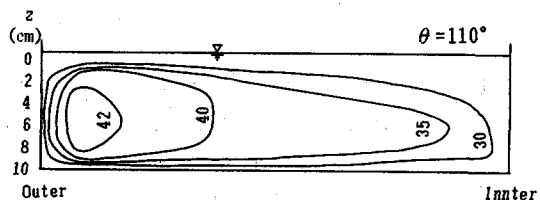
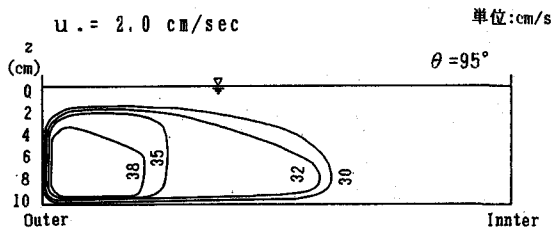


図 6-2. 棧型粗度を付けていないときの
主流 u の等流速線 (滑面)

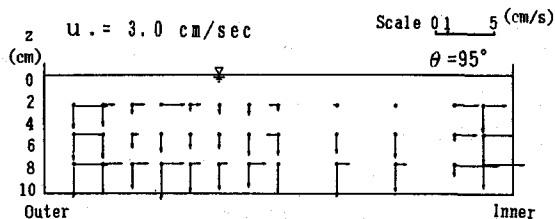


図 8. 棧型粗度を付けていないときの
二次流 (粗面)

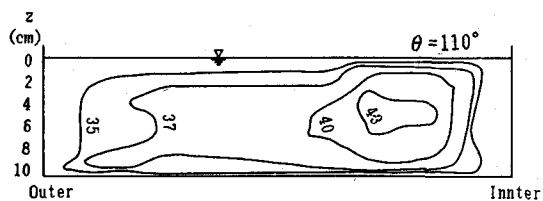
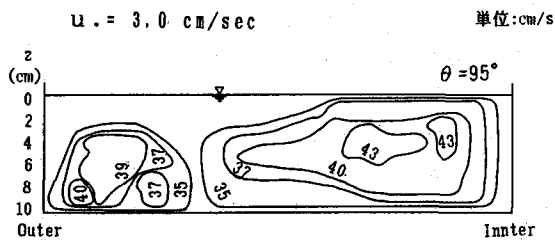


図 9-2. 棧型粗度を付けたときの
主流 u の等流速線 (粗面)

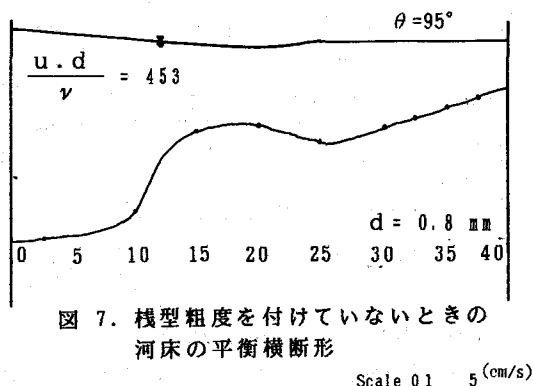


図 7. 棧型粗度を付けていないときの
河床の平衡横断形

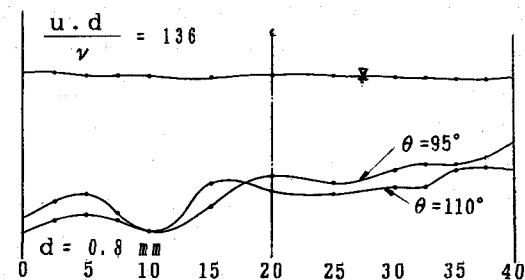
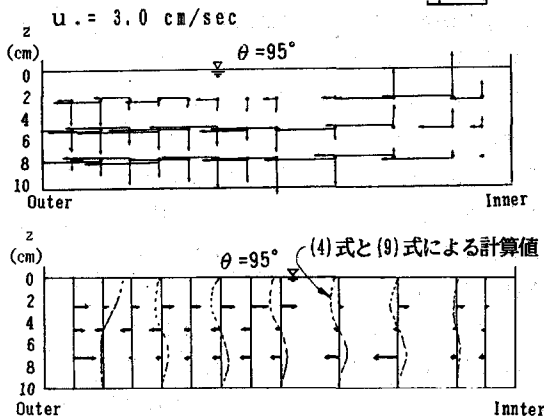


図 10. 棧型粗度の下端を砂面より十分
深くしたときの河床の平衡横断形

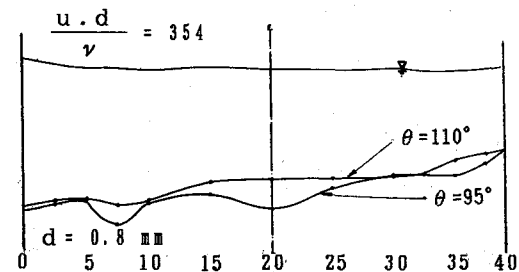


図 11. 棧型粗度の下端を砂面の上部に
とどめたときの河床の平衡横断形

より2cm程度、上の位置に止めた場合であって局所洗掘は生じていない。

ただ水路幅が0.3mの場合と0.4mの場合を比較したとき、幅0.4mのときは少し洗掘が大きく現れている。これは棧粗度の効果が作用する範囲に限界があることを示す。

3. 底面近傍の流速が、流向を変える機構

3.1 外縁部隅角部の底面流れの流向を変える要因

外縁隅角部の洗掘がなくなる原因は、この付近の V_r の方向が外側より内側に流れるためである。流れの方向を変える要因として、次のものが考えられる。

1) 粗度近傍の水面の盛り上がりによる質量効果、2) 粗度の傾斜により惹起した上向き流れによる二次流の減少と乱れの変化、3) 主流の流速分布の均一化による二次流の減少、4) 側壁の抵抗の増加による隅角底面部のせん断力の減少。このうち1)については、実験時の観察で、ポイントゲージの測定誤差の範囲であった。3)は2)に付随して生じる二次効果である。そこで、次節において2)の効果について考察する。

3.2 二次流の基礎式

曲線流れ場の半径方向および z 方向の運動方程式および連続式につぎのものをを用いる。

$$-\frac{V_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

流速 V_r, V_z を連続式よりつぎのように表す。

$$V_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial z} \quad V_z = \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial r} \quad (4)$$

式(1)、(2)を式(3)を用いて整理すると、

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{V_\theta^2}{r} \right) = -\frac{\nu}{r} \left(\frac{\partial^4 F}{\partial r^4} + 2 \frac{\partial^4 F}{\partial r^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4 F}{\partial z^4} \right) = -\frac{\nu}{r} \nabla^4 F, \quad \nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial r^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial r^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4}{\partial z^4} \quad (5)$$

$$\nabla^2 F = \frac{\partial^2 F}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} = \phi \quad \text{とおくと} \quad \nabla^2 \phi = \nabla^4 F \quad (6)$$

とおけるので、式(5)は次のように書き直せる。

$$2V_\theta \frac{\partial V_\theta}{\partial z} = \nu \nabla^2 \phi \quad (7)$$

式(7)の左辺は、 r に無関係であるから、水路の中央断面における式(7)の値を F_0 とし、

$$\nabla^4 (F - F_0) = \nabla^2 \phi = 0 \quad (8)$$

とし、欠損流速 $V_r' = V_r - V_{r0}$ 、 $V_z' = V_z - V_{z0}$ として式(8)を計算する。境界条件として

$$\text{水面、底辺で } V_z' = 0 \quad \text{より} \quad F = 0 \quad \frac{\partial V_r}{\partial z} = 0 \quad \text{より} \quad \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} = 0$$

$$\text{同様に} \quad \phi = 0 \quad \frac{\partial V_r}{\partial z} = 0 \quad \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

$$\text{中央断面で、} V_r' = 0 \quad \text{より} \quad F = 0 \quad V_z' = 0 \quad \text{より} \quad \frac{\partial F}{\partial r} = 0 \quad (9)$$

$$\text{同様に} \quad \phi = 0 \quad V_z' = 0 \quad \frac{\partial \phi}{\partial r} = 0$$

側面で、 $Vr=0$ より $Vr'=-Vr_0$, F , $\frac{\partial Vz}{\partial r}=0$ より $\frac{\partial^2 F}{\partial r^2}=0$

同様に $\phi=\frac{\partial Vz}{\partial r}$ $\frac{\partial Vz}{\partial r}=0$ $\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2}=0$

とする。

中央断面の Vr_0 は、式(1)より

$$-\frac{V_0^2}{r} + gI_r = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial Vr}{\partial z} \right) \quad (10)$$

に V_0 として、Boussinesq-Bazan型の流速式を用いる。

$$V_0 = V_{0max} - m\sqrt{hI_0} (1-\eta)^2 \quad (11)$$

ここに V_{0max} は表面流速、 m は流速係数、 $\eta=z/h$ である。

また、 I_r には、 $I_r=V_0/g$ より V_0 に同じく式(10)を用いると、次のようになる。

$$I_r = \int \frac{V_0}{gh} d\eta = \left(1 + \frac{4}{45} \frac{m^2}{c^2} \right) \frac{V_{0p}^2}{gr} \quad (12)$$

式(11)、(12)を式(10)に代入して、 Vr は、

$$Vr = \frac{1}{3} V_{cp} \frac{h}{r} \frac{m^2}{g} \left\{ 1 - 0.067 \frac{m}{c} \right\} \left\{ (2\eta - \eta^2)^2 - \frac{8}{15} \right\} \quad (13)$$

を用いた。以上の解析は、側壁部で上向きの流速 Vz を与えて、それが二次流に及ぼす効果を調べたことに相当する。水路の中央断面で式(11)が成り立つとして、実験の規模に相当する水理条件で水路の外縁側の半断面について Vr, Vz を求めた結果を図12に示す。底面に沿って中央から外縁部の流れを求めることができる。

側壁上である流れを与える効果は、当然のことながら、その影響範囲は限られる。図9-2の流速分布からみると、ほぼ深さと等しい横断方向の領域で1つの循環を起こしていると見ることができる。二次流の方向を見ると、この循環によって、水路内に3つの循環をひき起こして、おおよその形として底面付近の流速は外側に向かう。これを明らかにするためには、粗度によってひき起こされた Vr, Vz が乱れにどのような効果を与えるかを考察する必要がある。

3.3 鉛直方向の流速の一樣化による二次流の減少

傾斜棧型粗度により、上下層の混合は、流速分布が一樣化し、その結果遠心力の分布が一樣化し、結果として、 V_0 成分が小さくなる。図9-2にみられるように鉛直方向の流速分布が一樣化している横断方向の幅はかなり大きいので、傾斜粗度の効果は、遠心力の効果とほぼ等しい。遠心力効果を相殺する粗度の効果の量的表現については今後の課題とする。

4. むすび

傾斜棧型粗度を設けたとき、曲線部外縁部の局所洗掘が低減されることを実験的に見出した。その原因は、棧型粗度の効果によって底面付近の二次流の流速が逆転していること、これによって内側より砂が運ばれるので、洗掘が生じないことを見出した。解析として、質量力に相当するものとして、粗度表面上向きの流速を与え、それによって誘起された鉛直方向の流速分布の一樣化が、二次流を減少させるという考えを述べた。洗掘防止策に新しい見地をもたらすものと思う。

参考文献

- 1) Kikkawa, H., Ikeda, S., Ohkawa, H. and Kawamura, Y; Secondary flow in a bend of turbulent stream, Proc. of JSCE, No.219, Nov. 1973
- 2) 森明巨, 岸力, 吉岡正人; 河道弯曲部における二次流の構造, 第27回水理講演会論文集 2, 1983
- 3) I.L Rozovskii/ Flow of Water in Bends of Open Channels Israel Program for Scientific Trans

1961

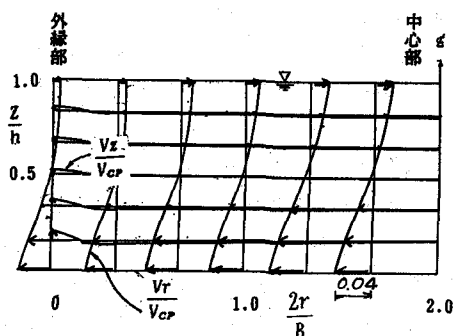


図12. 二次流 Vr, Vz の値