

河道水衝部の局所流と洗掘に及ぼす護岸こう配効果に関する実験的研究

An Experimental Study on Effects of Revetment Slope on Local Flow and Scour at a Flow Convergent Part in River Channels

石井千万太郎*・板倉忠興**・黒木幹男***

By Chimatáro ISHII, Tadaoki ITAKURA and Mikio KUROKI

Some model experiments were carried out in a laboratory flume in order to investigate the formation process of local flow and and scour and their mechanism in a steady condition at flow convergent parts along revetments in river channels, and effects of the revetment slope on these process and mechanism.

Experimental results revealed the flow in a local scour hole and its surroundings consists of a surface flow, a vortex flow at a flow convergent point, two spiral flows at its both side and a base flow, and that these flows contribute to the formation of a local scour respectively in correspondence with its strength.

Keywords: flow convergent point, local flow, local scour, revetment slope

1. まえがき

河道水衝部には主として側方侵食である河岸侵食防止のため護岸が施工されているが、その前面では水流の衝突により下方侵食の局所洗掘孔を生じる。この局所洗掘孔は水衝部護岸の破壊をもたらす恐れがあるので、その位置と形状、特に最大洗掘深を正確に把握する必要がある。著者らはすでにこの護岸前面の局所洗掘を「噴流の衝突による壁面底部の局所洗掘」とモデル化して垂直壁面の場合について実験を行ない、局所洗掘孔の諸元の水理特性について定量化している。¹⁾ これに対し本研究は、数値あるいは物理モデルを確立することを目的として、局所洗掘過程と水衝部の流れの構造との定性的な関連を明らかにするとともに、実際の護岸は傾斜護岸であることを考慮し、その護岸こう配の効果をモデル実験により検討している。実験では水衝部周辺の流れと路床変動の観測を行ない、垂直護岸と異なる機構を明らかにするとともに、局所洗掘孔の最大洗掘深と形状の測定を行ない、護岸こう配効果を定量化している。

* 正会員 工博 秋田大学助教授 鉱山学部土木環境工学科
(〒010 秋田市手形学園町 1-1)

** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

*** 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

2. 流れと局所洗掘の定義

本実験は図-1の模式図に示すように、噴流の衝突によって生じる壁面底部の局所洗掘孔の最大洗掘深 Z_s とその形状 ($L_s, B_s, B_{zs}, \dots$) を、壁面角 ϕ 、噴流流速 v 、噴流衝突角 θ 、噴流口距離 L 、噴流幅 B をパラメータとして実験的に求め、その変化特性について検討している。この他にこの現象を支配する水理量として路床砂粒径 d 、噴流の水深 h をとり、次式の関係を想定している。

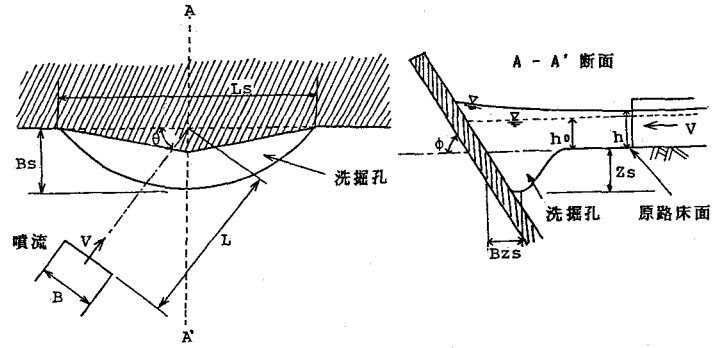


図-1 噴流の衝突による洗掘の模式図

$$Z_s/h, L_s/h, B_s/h, B_{zs}/h, \dots = F(\phi, N_s/N_{sc}, \theta, L/h_0, B/h_0) \dots (1)$$

ここに、 L_s : 洗掘孔長、 B_s : 洗掘孔幅、 B_{zs} : 最大洗掘深点の側壁からの距離、 h : 噴流出口での水深、 h_0 : 静水時の水槽の水深、 $N_s = v / \sqrt{sgd}$: sediment数、 s : 路床砂の水中比重、 g : 重力加速度、 N_{sc} : 移動限界sediment数

N_s は噴流流出時の流出口での流速 v 、水深 h を用いて計算している。

3. 実験および結果

実験水槽は、幅 1.6m、長さ 0.71m、深さ 0.15mの合板製水槽で、噴流を当てる壁面は回転できるようにした可変こう配壁面としている。水槽中には 0.1m の厚さに水平に平均粒径 $d = 0.81\text{mm}$ の砂を敷き均している。水槽水深 $h_0 = 1.0\text{cm}$ とし、幅 $B = 5\text{cm}$ の整流した噴流により実験を行なっている。¹⁾

3.1 洗掘の過程と流れの機構

噴流の水衝部の流れを染料の注入で可視化して観測するとともに、実験開始の平坦床からの路床の変化を観測している。動的洗掘の場合 ($N_s/N_{sc}=1.23$) の状況を A ($\phi=90^\circ, \theta=90^\circ$)、B ($\phi=45^\circ, \theta=90^\circ$)、C ($\phi=90^\circ, \theta=45^\circ$)、D ($\phi=45^\circ, \theta=45^\circ$) の4ケースについて図-2に模式的に示した。また、図-3はこれら各ケースの局所洗掘が平衡に達したときの流れの模式図である。これらの図から、水衝部の流れは、①表層流、②水衝点の表層流下の渦、③水衝点の左右の壁面沿いに形成される螺旋流、④壁面に達せず左右に分かれて③の螺旋流の末流と合流する底層流から構成されていると言える。以下に各ケースの洗掘の過程と流れの機構を説明する。

(1) Aケース：初期の段階では、表層流は水衝点の両側に左右対称に分かれて流れるが、その下層の壁面底部の隅角部にはそれぞれ上部で壁面に、下部でその反対方向に向かう螺旋流をなし、壁面下部の砂を巻き上げ、その斜め前面に堆積させている。その洗掘孔は水衝点に小さな、その左右に螺旋流に対応した長い洗掘孔ができるが、洗掘孔の成長により一つとなり、当初は洗掘が小さかった水衝点でも渦による洗掘が進行して、最終段階の平衡状態では最大洗掘深を示す。

(2) Bケース：壁面を直角から傾けたことにより、傾斜壁面へ這い上った後、左右に分流する表面流層がAケースより厚くなり、相対的にその下層の中心軸が壁面と路床面の境界上に位置する螺旋流層は薄くなる。この螺旋流の流下速度はAケースより速くなり、その長さも長くなっているが、これには壁面沿いの表面流

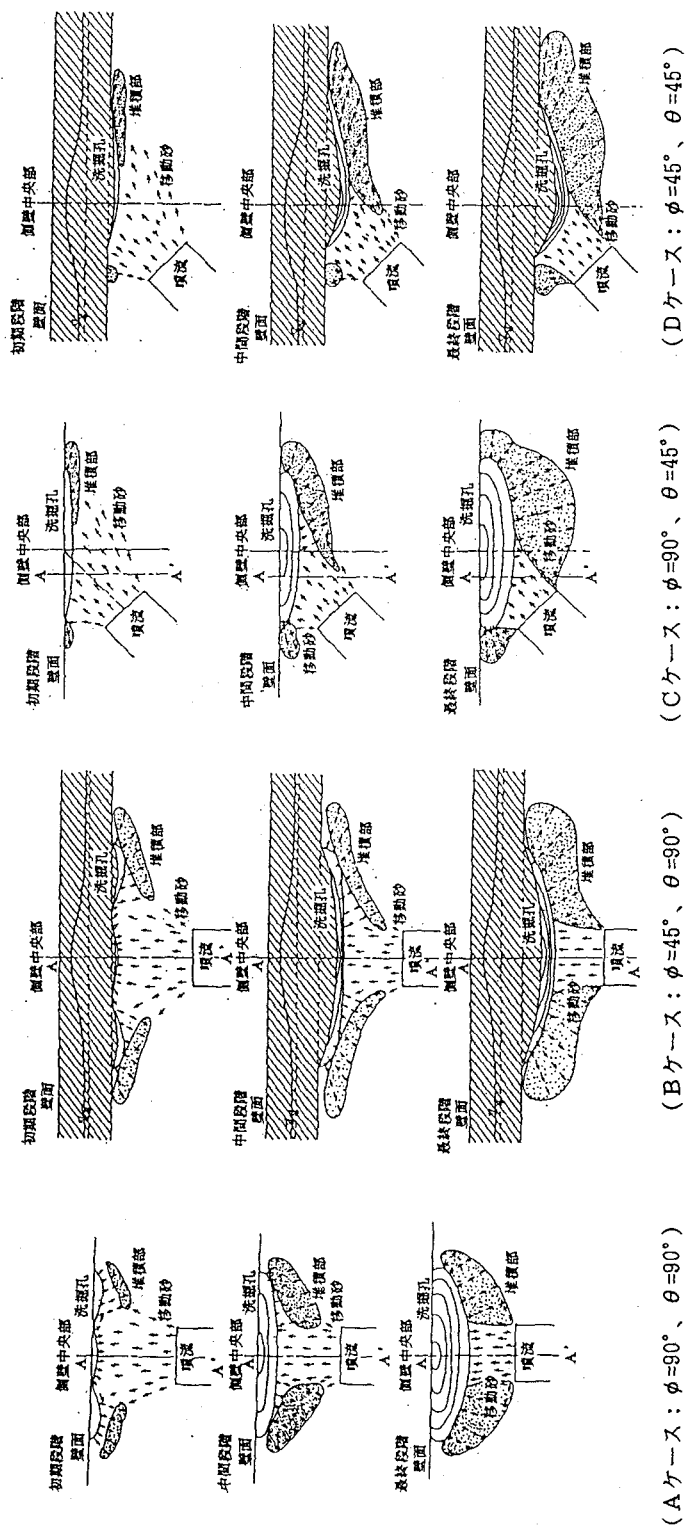
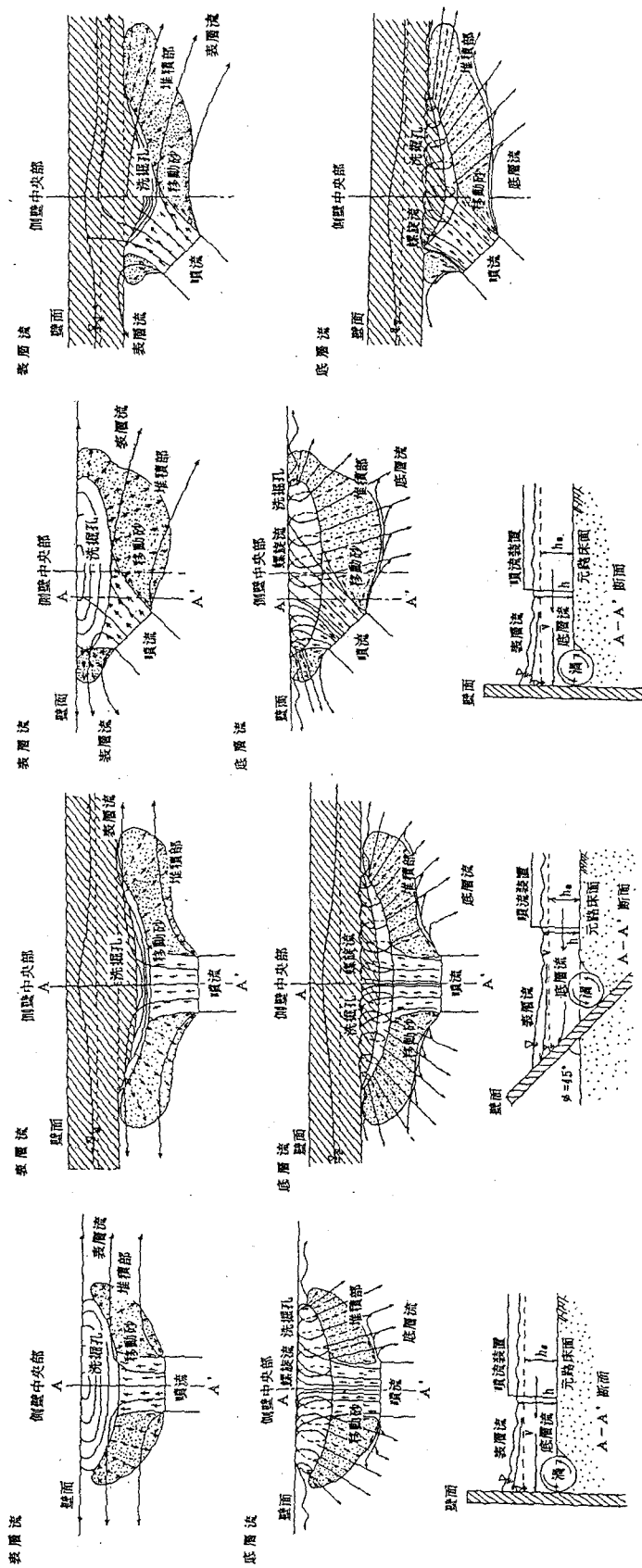


図-2 洗掘過程



(Aケース： $\phi=90^\circ$ 、 $\theta=90^\circ$)

(Bケース： $\phi=45^\circ$ 、 $\theta=90^\circ$)

(Cケース： $\phi=90^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$)

(Dケース： $\phi=45^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$)

図-3 流れの機構

の増大が寄与しているものと思われる。一方、洗掘孔と堆積部の形成過程はAケースと同じであるが、螺旋流の大きさが小さくなったため洗掘深と洗掘幅は小さくなったが、螺旋流の長さや左右への流下速度が増大したことに伴って、洗掘砂の移動は壁面沿いの方向成分が多くなり、洗掘孔は左右に長くなっている。これに対応して堆積部は壁面に近くなりその長さも長くなっている。

(3) Cケース：噴流の入射を傾けたことにより、水衝点の位置が側壁中央部から移動し、水衝点の左右に分流する表層流と底層流の分流量と、これに対応して水衝点左右の螺旋流の大きさが偏る。壁面前面に細長い洗掘孔が形成されるが、最大洗掘は水衝点の渦によるものではなく、分流量が多く偏った方の螺旋流により生じる。

(4) Dケース：噴流の入射角を直角から傾けると、左右への分流量が異なるようになるが、傾斜壁面へ這い上がった後流下してくる表面流はそれを加速している。 $\theta=45^\circ$ の場合、螺旋流は分流量が大きい方にだけあり、その螺旋流の方向に伸びた洗掘孔が形成されている。その最大洗掘深は水衝点の渦によるものではなくこの片方へ集中した螺旋流によるものである。堆積部は洗掘孔の前面に形成されるが、水衝点の反対側に噴流によって運ばれた砂が堆積した小さな堆積部を生じている。

3.2 最大洗掘深

図-4は噴流が壁面に直角に衝突する場合($\theta=90^\circ$)で、壁面こう配を垂直から減少させたときの最大洗掘深の変化を示したものである。図の Z_{sc90} は壁面が垂直の場合の最大洗掘深である。ほぼ $\phi=45^\circ$ までの壁面こう配の減少は、動的洗掘($Ns \geq 1$)と静的洗掘($Ns < 1$)は一致して直線的に垂直壁面の場合のほぼ2割まで最大洗掘深を減少させる。しかしながら、 45° 以下の緩こう配では静的洗掘ではそのまま直線的に減少してほぼ $\phi=30^\circ$ でゼロとなるのに対し、動的洗掘では流れの壁面と移動床面の不連続部としての洗掘を生じるため、 Z_s/Z_{sc90} はゼロとはならず0.1程度に漸近している。

3.3 噴流入射角による最大洗掘深の変化

垂直壁面の場合、噴流入射角 θ による最大洗掘深 Z_s の変化はsediment数 Ns (掃流力)によって異なることが知られている。¹⁾ 図-5に示したように Ns が小さい場合、噴流の入射角 θ が減少すると最大洗掘深 Z_s が減少するが、 Ns が増加するにつれ減少の仕方が緩慢になり、ついには最大洗掘深が増大し、その後減少する

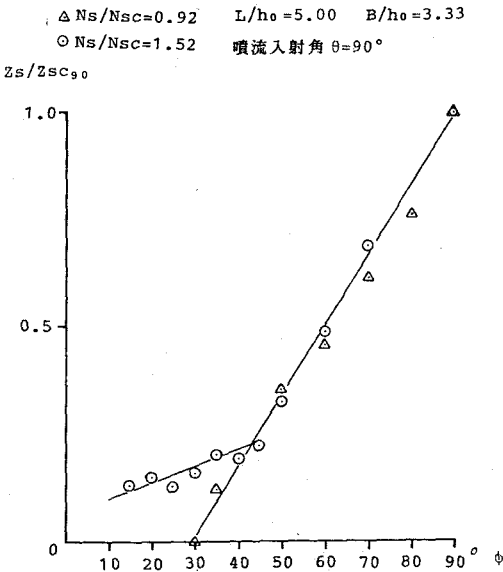


図-4 最大洗掘深に対する壁面傾斜角の効果

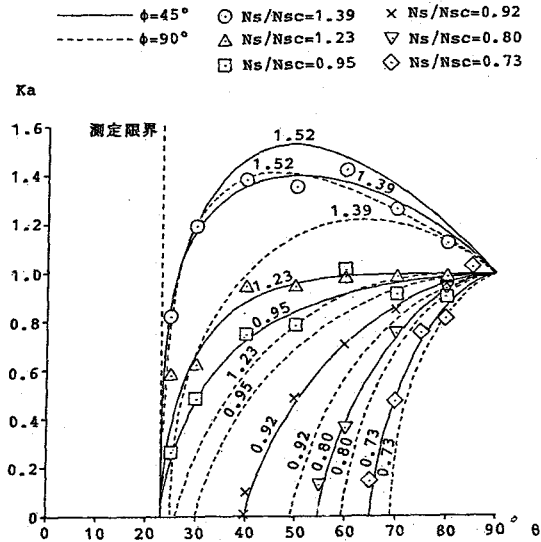


図-5 最大洗掘深に対する噴流入射角の影響

変化を示す。図中の K_a は $(Zs/h)/(Zs/h)_{90}$ であり、 $(Zs/h)_{90}$ は $\theta = 90^\circ$ の Zs/h である。ときのこれらの現象は 3.1 に記述した局所流と洗掘の過程からつぎのように説明できるであろう。洗掘は、水衝点から左右に分離する螺旋流によるものと極めて局所的な水衝点の渦によるものとからなる。噴流入射角が減少すると前者は一方の螺旋流の強度の増大のため増大するが、後者は水衝点水位上昇量の減少による渦の強度減少のため減少する。流れが速い (Ns が大きい) 場合、後者が噴流の入射角が減少しても変わらない一方、前者が大きくなるため、最大洗掘深が増大するのであろう。本研究では、 $\phi=45^\circ$ の傾斜壁面について実験を行ない、その結果も図-5 に示している。垂直壁面の結果と対比すると、いずれの Ns に対しても大きな数値を与えている。これは 3.1 に記述したように、傾斜壁面へ這い上がった後流下してくる表面流が一方への螺旋流の片寄りを大きくしている効果と考えられる。

3.4 洗掘孔形状

図-6 は噴流入射角 θ が 90° で動的洗掘 ($Ns/Nsc = 1.39$) の場合の壁面傾斜角 ϕ による洗掘孔の形状を示す $Z/Zs=0.0$ と 0.5 の線を壁面方向 X を洗掘孔長 Ls 、壁面に垂直方向 Y を洗掘幅 Bs で規準化して示している。大まかではあるが、ほぼ相似形を保っていると言える。なお、 $\phi=90^\circ$ では最大洗掘深の Y 方向位置は傾斜壁面と洗掘路床面の境界にある。図-7 は壁面傾斜角 ϕ が 45° で動的洗掘 ($Ns/Nsc = 1.52$) と静的洗掘 ($Ns/Nsc = 0.95$) の場合について噴流入射角 θ を変化させたときの洗掘孔形状を示す $Z/Zs=0.0$ の変化を示している。垂直壁面の場合は動的、静的洗掘ともに左右対称な相似形を示し、その洗掘が水衝点付近の局所性の強い現象であることを示していたが¹⁾、 $\phi=45^\circ$ では、静的洗掘の場合には同様な傾向を示すが、動的洗掘の場合には分流量が多い方向に偏った形状となる。これは 3.1 に記述した D ケースの螺旋流の卓越と図-4 の入射角による最大洗掘深の増加現象を裏付けるものである。

4. おわりに

本研究の流れは表層流とその下層の水衝点の渦流、水衝点から両側に流れる螺旋流、底層流とから構成されている。今後、これらの流れを組み合わせた水衝部の局所洗掘機構のモデル化を行ない、洗掘深の予測手法の確立に努めたい。

<謝辞>

実験とデータ整理に当って、秋田大学鉱山学部卒業論文生 渋谷靖久氏 (平成3年度) と佐藤義明氏 (平成4年度)、堀井克則氏 (平成5年度) にご協力いただいたことをここに記し、感謝の意を表する。

<参考文献>

- 1) 石井千万太郎・板倉忠興：噴流の衝突による壁面底部の局所洗掘に関する実験的研究と砂州河道における護岸前面の局所洗掘への応用、水工学論文集、第36巻、1992年 2月。

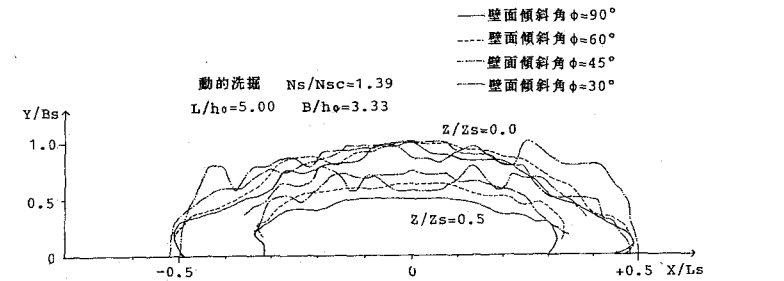


図-6 局所洗掘孔の形状に対する壁面こう配の効果

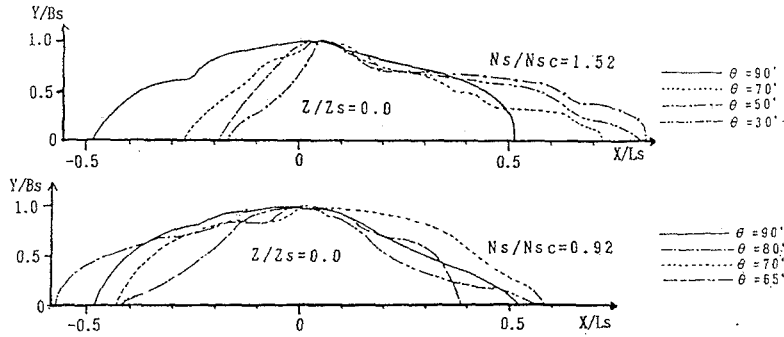


図-7 傾斜壁面の場合の局所洗掘孔の形状に対する噴流入射角の影響