

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

An Experimental Study on Local Scour of Bed
in front of Wall by Jet Flow and its Application to
Local Scour in front of Revetment in Bars Bed Channel

石井千万太郎*・板倉忠興**

By Chimataro ISHII and Tadaoki ITAKURA

Some experiments on the local scour of bed in front of the wall by jet flow were carried out in a laboratory flume as a simplified model for the one in front of the revetment in bars bed channel. Experimental results revealed some of its fundamental characteristics, and a model based on these which can predict the local scour depth and its position in front of the revetment was developed. In spite of bold simplifications and expansions, the results were practically satisfied.

Keywords: local scour, jet flow, bars bed, revetment

1. まえがき

単列交互砂州が形成されている河道の低水流量通水安定流況時の水衝部には、図-1に模式的に示したように、四半円球状の洗掘孔が観測される。著者の一人は当初、これを河川の湾曲部に見られるような二次流によるものとする解析を行なったが、実験で見られる洗掘を表現し得ないことが分かっている。¹⁾

本研究は、この形状が橋脚前面に見られる洗掘孔に極めて似ていることから、これを水流の衝突による局所洗掘とモデル化し、2.に示す「噴流の衝突による壁面底部の局所洗掘」の実験を行なっている。

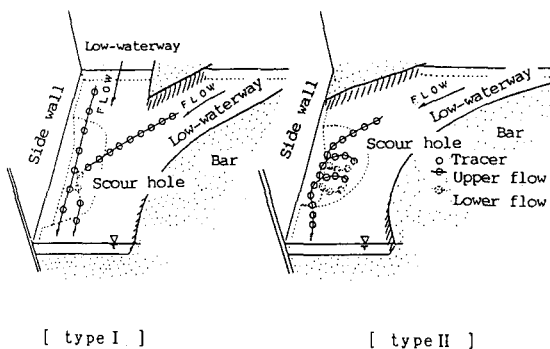


図-1 水衝部の流れと洗掘孔形状

* 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)

そして、水衝部の洗掘の計算について、まず二次元浅水流としての側壁に衝突する流れを求め、その後、この実験モデルによる洗掘孔を求める手順について検討している。

2. 噴流の衝突による壁面底部の局所洗掘に関する実験

2.1 流れと局所洗掘の定義

図-2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、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 が考えられ、橋脚前面の洗掘の場合にならい²⁾、次式の関係を想定している。

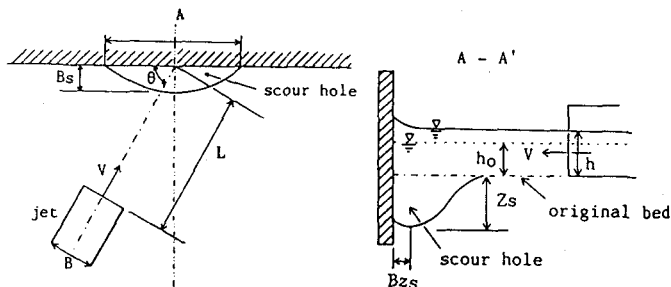


図-2 噴流の衝突による洗掘の模式図

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

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 : 側壁がない場合の水深、 $N_s = v/\sqrt{sgd}$: 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 は噴流出口での流速 v 、水深 h を用いて計算している。実験は (1) 式の無次元量をパラメータとして行なった。

2.2 実験装置および実験方法

実験は、著者の一人が単列交互砂州の形成と低水時の砂州の変形実験³⁾で用いた有効長 7m、幅 0.2m、深さ 0.3m の塗装合板製長方形断面水路を水平にし、その一部、0.2m × 2.5m を使用した。この水路に平均粒径 0.81mm (比重 2.65) の砂を水平に敷き均し、噴流を流さない状態の水深が 1.00cm になるように水路の長手方向の両端にゲートを設置している。噴流は、噴流流速分布が一様となるよう整流し、また、噴流装置底部と移動床の粗度が連続するように噴流装置底部に路床砂を貼り付けている。壁面がない場合の水深 h_0 は水路の長手方向に噴流を流出させた流出口位置の水深としたが、流速によらず $h_0 = 1.20$ cm の一定値であった。噴流の通水は洗掘孔形状が

安定するまで行なっている。また、噴流流出口付近の路床面が洗掘されないように給砂している。

2.3 実験結果

各無次元パラメータの影響の主な結果として、以下の事項が上げられる。

(a) N_s/N_{sc} の影響について

$\theta = 90^\circ$, $L/h_0 = 5.00$, $B/h_0 = 3.33$ の場合の N_s/N_{sc} の変化に対する Z_s/h の変化を表わしたのが図-3である。 $N_s/N_{sc} < 1$ の場合に生じる静的洗掘は、0.7 から生じ、 N_s/N_{sc} の増

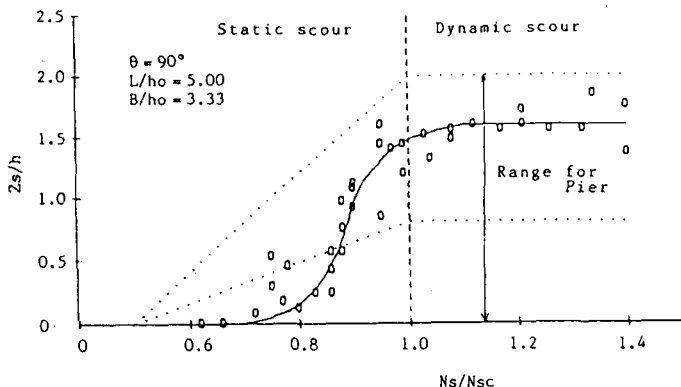


図-3 最大洗掘深に対する sediment 数の影響

加とともに最大洗掘深は増加し、 $N_s/N_{sc} = 1$ で $Z_s/h = 1.5$ となる。 $N_s/N_{sc} > 1$ の場合に生じる動的洗掘は、 $Z_s/h = 1.6 = \text{const.}$ である。図中の二本の破線は橋脚の場合の推定式で、橋脚幅を無限大として得られる次式の IAHR Task Force 型の式²⁾を表わす。

$$Z_{sd}/h = C \quad \cdots (2\cdot a) \quad , \quad Z_{ss}/h = (Z_{sd}/h) \cdot \{ 2 (N_s/N_{sc}) - 1 \} \quad \cdots (2\cdot b)$$

ここに、 Z_{sd}, Z_{ss} : 動的および静的平衡状態の最大洗掘深、 $C = 0.8 \sim 2.0$

本ケースの局所洗掘が同様の結果となっていることが分かる。

(b) θ の影響について

噴流入射角 θ の影響は、 $L/h_0 = 5.00$, $B/h_0 = 3.33$ の場合について検討した。図-4に示したように N_s/N_{sc} のレベルによって異なる結果となっており、 $N_s/N_{sc} = 1.52, 1.39, 1.23, 0.95, 0.92, 0.80, 0.73$ ついて、それぞれ実験値をほぼ満足するような滑らかな曲線を描いている。図中の K_a は、

$$K_a = (Z_s/h)/(Z_s/h)_{90} \quad \cdots (3)$$

ここに、 $(Z_s/h)_{90}$: $\theta = 90^\circ$ のときの Z_s/h

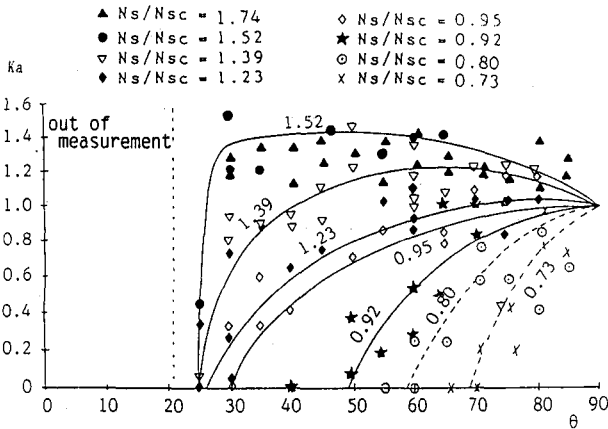


図-4 最大洗掘深に対する噴流入射角の影響

である。なお、 $N_s/N_{sc} = 0.73$ は図-3に示したようにほぼ洗掘限界に近く、これ以下では洗掘を生じない。また、 $N_s/N_{sc} > 1.52$ に対しては、図に示した $N_s/N_{sc} = 1.74$ のデータの分布から $N_s/N_{sc} = 1.52$ の曲線で代表させることができるであろう。

当初、入射角 θ の減少は、壁面に垂直な方向の作用力の減少による最大洗掘深 Z_s の減少と、分岐流れの非対称性による洗掘孔形状の変化をもたらすと考えられていた。しかしながら、実験では、 N_s/N_{sc} が比較的大きい場合は、 θ が 90° から減少すると K_a は一旦増加し、その後に減少している。 K_a の増加の要因

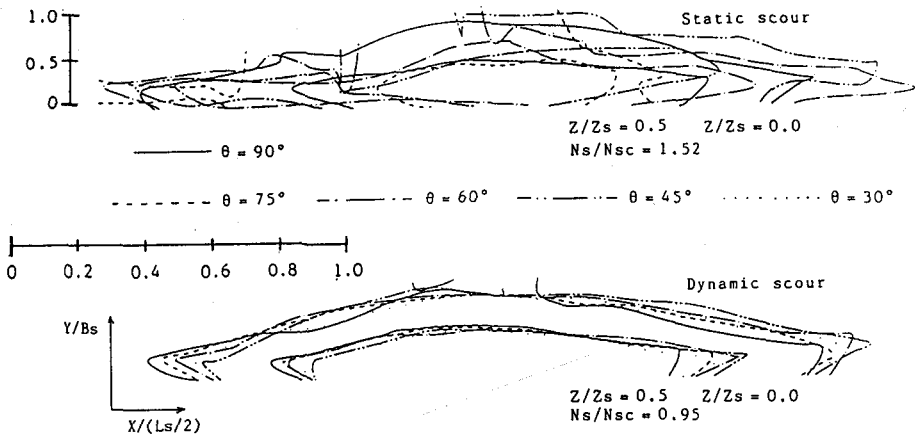


図-5 局所洗掘孔の形状に対する噴流入射角の影響

として、噴流口の側壁からの距離 L/h_0 の減少が考えられるが、次に述べる L/h_0 の影響を示す図-6によると、動的洗掘の場合、 L/h_0 の減少による K_a の増加はただか 2割程度であり、それを説明できない。この他に側壁と平行な軸を持つ二次流の発生などが推定されるが、その機構は明らかではない。一方、図-5は洗掘孔形状を示す側壁沿いの座標 x を $Ls/2$ で、側壁に垂直にとった y 座標を Bs で、深さ方向座標 Z を最大洗掘深 Zs で無次元化して示したものである。図が煩雑になるので $Z/Zs = 0$ と 0.5 の形状だけを示している。入射角 θ による形状の変化が予想されたが、静的洗掘の場合はやや相似性に欠けるが、動的洗掘の場合、相似性がかなりよいことが注目される。このことは本ケースの洗掘が極めて局所性の強い現象であることを意味しているであろう。

(c) L/h_0 の影響について

$\theta = 90^\circ$, $B/h_0 = 3.33$ で、動的洗掘と静的洗掘に対応する噴流の二つの流量に対して L/h_0 を変化させ実験を行い、そのときの Zs/h と $L/h_0 = 5.00$ のときの Zs/h との比の変化を求めた。その結果を図-6に示している。噴流流出口が側壁に近づくとその水深が増加するため、 Ns/Nsc 値は一定とならず、 $L/h_0 = 5.00$ のとき $Ns/Nsc = 1.52$ であったものが $1.41 \sim 1.17$ に、 $Ns/Nsc = 0.95$ であったものが $0.90 \sim 0.83$ に減少している。図は L/h_0 の減少により最大洗掘深は大きくなるが、局所洗掘孔に近い $L/h_0 = 3.7$ 付近から急激に減少することを示している。これは Ns/Nsc の減少効果と思われるが、その詳細は不明である。

(d) B/h_0 の影響について

$\theta = 90^\circ$, $L/h_0 = 5.00$ で、動的洗掘と静的洗掘に対応する噴流の二つの流量に対し、 B/h_0 を変化させた実験を行い、そのときの Zs/h と $B/h_0 = 3.33$ のときの Zs/h との比の変化を求めた。その結果を図-7に示している。図から B/h_0 の増加により Zs/h の増加が確認できる。

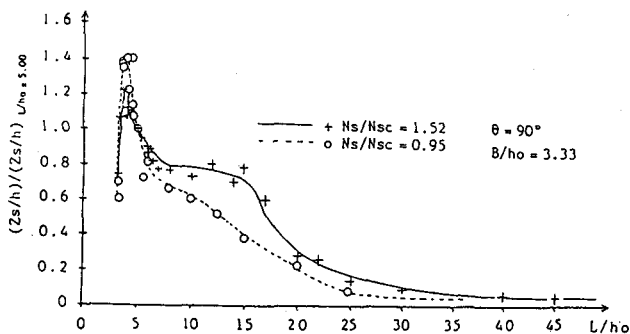


図-6 最大洗掘深に対する噴流孔距離の影響

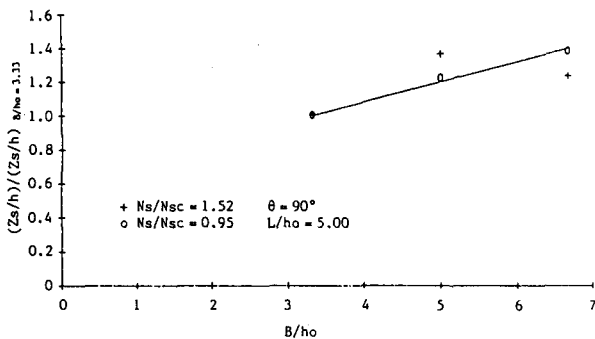


図-7 最大洗掘深に対する噴流幅の影響

3. 砂州河道水衝部への実験モデルの適用

3.1 適用方法

2.の噴流の側壁衝突の実験モデルで必要とする諸量は、適当な断面位置(L :断面位置距離)における流れの流向(噴流の入射角を与える) θ 、流速 v 、水深 h 、断面幅 B である。一方、流れの計算により求まるのは、流れの流向、流速、水深の平面的分布である。したがって、これに実験モデルを適用するためには次のような問題点がある。

- ① 実験モデルの噴流口位置に相当する水衝部の局所洗掘を支配する流れの断面位置をどのように設定するか、一般の複雑な断面に対して有効等価長方形断面の取り方をどうするか明確な基準を必要とする。

さらに、ここには示していないが、噴流口の断面平均流速が同じであっても流速分布が異なると、分布の最大流速が大きい方が最大洗掘深 Z_s が大きくなる実験結果を得ている。これは有効等価長方形断面での断面平均流速に対応する洗掘深は小さく算定されることに意味している。したがって、流速分布を考慮した取扱いが必要である。

- ② モデルの実験は半無限領域を想定した水平床で行なっている。噴流流出口から流れの幅が広がり、流速が減少するため、最大洗掘深 Z_s は噴流流出口距離 L が増加すると減少する。図-6は $L/h_0 = 5.0$ を基準として $L/h_0 \geq 3.33$ の範囲を示しているが、 L/h_0 の増加は洗掘深を急激に低下させている。一方、実験の低水流路による流れはかなり急こう配で流れの幅も限定され、流速の減少はそれほどではない。局所洗掘を支配する断面と水衝点との距離 L がかなり長く、図-6を用いた距離補正は過大となる。
- ③ 最大洗掘深 Z_s だけでなく、洗掘孔形状をモデル化するためには洗掘孔長 L_s や洗掘幅 B_s が上述の種々の無次元量に対してどのような変化を示すかさらに実験による検討を必要とする。
- ④ 砂州が形成された水路の水衝部は砂州前縁部の段落ち部を過ぎたところであるため、平坦床で行なった実験によるモデルには不安がある。したがって、段落ち流れとの組み合わせの実験も必要になるかも知れない。

以上のような問題点を考慮した上で、実験モデルで得られている結果に対して次のような大胆な仮定を行ない、低水流路の流れの水衝部の局所洗掘深を次のように試算した。

- ① 図-3の実線で示した N_s/N_{sc} と Z_s/h の関係は、 L/h_0 、 B/h_0 によらず一定とする。
- ② 図-4の N_s/N_{sc} をパラメータとする θ と K_a の関係を表わす曲線群は、 L/h_0 、 B/h_0 によらず一定とする。 $N_s/N_{sc} \geq 1.52$ に対しては $N_s/N_{sc} = 1.52$ に対する曲線関係が成立するとする。
- ③ 流れの各点における流速 v により N_s/N_{sc} 値を計算し、図-3を用いて Z_s/h を求める。
- ④ その流向 θ と N_s/N_{sc} 値から、流向補正係数 K_a を図-4を用いて求める。
- ⑤ その点の流れに対する側壁底部の最大洗掘は、その点の流向の延長線が側壁と交わる点に生じ、洗掘深 Z_s は③で求めた Z_s/h 値と④で求めた K_a 値、およびその点の水深 h の積とする。
- ⑥ 流れの各点において、③から⑤の手順で洗掘深 Z_s を求める。そして、側壁の同一位置において異なる点の流れから異なる洗掘深が得られる場合、その最大値をその側壁位置の洗掘深 Z_s とする。

3.2 適用の実例

前述の方法による試算は、著者の一人による低水流路形成実験³⁾の Run 3 と5の流れに対して行なっている。両実験の側壁底部で局所洗掘による深掘れを生じている流れを図-8に示した。流れは二次元浅水流として計算されているものを用いたが、Run 3 については、計算された流れが表面流速測定から推定される流れとかなり異なるため、実測の表面流速から推定した流れによっても試算している。その結果を図-9に示している。Run 3 の最大洗掘深は、計算された流れに対しては、 $x = 218\text{cm}$

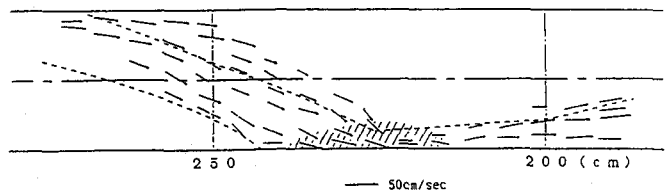


図-8-a 流速ベクトル (Run 3 実測表面流速)

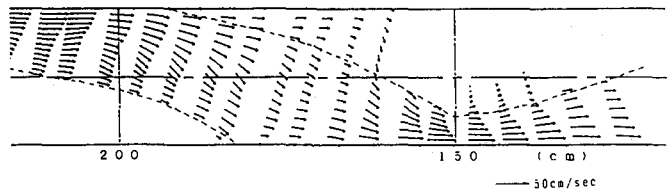


図-8-b 流速ベクトル (Run 5 計算平均流速)

に生じ、 $Z_s = 0.1\text{cm}$ であり、表面流速測定から推定される流れに対しては、 $x = 244\text{cm}$ に生じ、 $Z_s = 0.68\text{cm}$ である。図-10・a に Run 3 の実際の局所洗掘を生じている側壁地点の横断面を示した。局所洗掘孔の大きさが比較的小さく横断面図ではその形状がよく現されていないが、図-1に模式的に示したように比較的はっきりと判別できる。最大洗掘深は $x = 215.5\text{cm}$ に生じ、 $Z_s = 0.6\text{cm}$ である。表面流速測定から推定される流れに対する洗掘深はこれに近いが、その地点はかなり上流となっている。計算された流れに対するものは最大洗掘位置がほぼ一致しており、流れの計算結果が改善されると洗掘深も近い値を与えられると考えられる。

Run 5 の洗掘は、計算された流れに対して、 $x = 146\text{cm}$ から 182cm に生じ、最大洗掘深は $x = 173\text{cm}$ に生じ、 $Z_s = 0.22\text{cm}$ である。Run 5 の実際の局所洗掘は $x = 147.5\text{cm}$ の右側壁位置に生じ、最大洗掘深 $Z_s = 0.3\text{cm}$ である。図-10・b に局所洗掘地点 $x = 147.5\text{cm}$ の横断面を示した。(ただし、 $x = 164.5$ と 159cm の断面においてもその深さは判然としなが局所洗掘の傾向が見られている。) 前述したように、ここに示した手順は L/h_0 、 B/h_0 の影響を無視するという非常に大胆な仮定に基づく最大洗掘深 Z_s の試算法ではあるが、以上の結果は、実用的には十分満足の行く結果と言える。 L/h_0 の影響を無視したことは 3.1 の実験モデルと低水流路の違いの②を補正した処置であり、 B/h_0 の影響を考えず流れの流速分布を考慮して流れの各点の水理量で洗掘深を計算することが適当であることを意味しているのであろう。

4. おわりに

砂州河道水衝部における局所洗掘深を求めることを目的として、それを簡略化したモデルとした「噴流の衝突による壁面底部の局所洗掘」の実験を行ない、いくつか基本的特性を明らかにすることができている。その成果の応用にはいくつかの問題点があるが、本文で示した大胆な仮定や拡張による適用にも拘らず、その結果は、最大洗掘深の大きさやその発生位置に関してほぼ実用的に満足いく結果を与えている。

<参考文献>

- 1) 石井千万太郎・沓沢辰美：2次流モデルを導入した単列交互砂州上の流れの計算、土木学会第43回年次学術講演会講演概要集2、pp.268-9、1988。
- 2) 土木学会水理委員会編：「水理公式集(昭和60版)」、第3編河川編、8.4 構造物周辺の局所洗掘、土木学会、pp.272-281、1980。
- 3) 石井千万太郎・岸 力・黒木幹男・沓沢辰美：砂州河道における河岸侵食と低水流路、土木学会第33回水理講演会論文集、pp.379-84、1987。

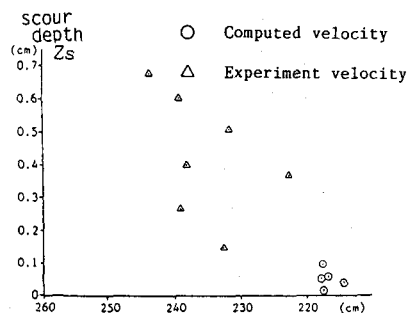


図-9・a 試算局所洗掘深 (Run 3)

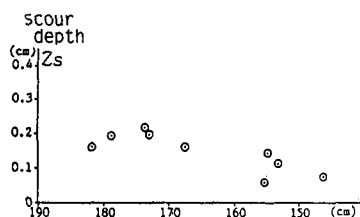


図-9・b 試算局所洗掘深 (Run 5)

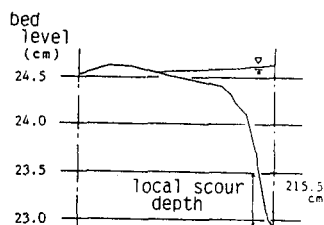


図-10・a 局所洗掘点横断面図 (Run 3)

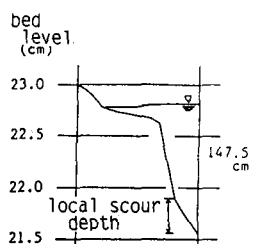


図-10・b 局所洗掘点横断面図 (Run 5)