

## II - 38 水門下流部における局所洗掘に関する研究

京都大学防災研究所 正員 岩垣 雄一  
 同 正員 土屋 義人  
 西松建設土木設計部 正員 今村 正寿

### 1. 緒言

水理構造物周辺の局所洗掘の機構を解明することは、構造物の合理的な設計を行なう上に極めて重要である。従来よりこれに関連した研究が数多く行なわれてきたが、いずれの場合もまだ適確な結論がえられていない。現象があまりにも複雑であるために、系統的な研究を行つたことが困難なためである。水門下流部における局所洗掘の問題も局所洗掘現象の代表的なものである。その実験的研究も古くより行なわれてきた。1952年、Laursen は水たたきのない水門下流部の局所洗掘の問題をとりあげ、その機構の解明を行なつてかなり興味深い結果をえている。

著者らも、これまで水理構造物周辺の局所洗掘や落下水束による洗掘の問題を研究してきたが、本研究はとくに水門下流部における局所洗掘を取り扱つたもので、さきに著者ら加発表した水門下流部における洗掘限界に関する研究や、水平噴流による局所洗掘に関する研究の続報である。本研究では、こうした局所洗掘における洗掘深さの時間的変化や洗掘形状などが、局所洗掘にともなう水流特性の変化とどのような関係にあり、その機構を支配する主たる要因がなんであるかなどを大小二つの実験水槽による実験の結果に基づいて考察し、局所洗掘機構を解明するための基礎としたいと思う。

### 2. 実験装置および実験方法

(1) 実験水槽：実験水槽は最大深さ1.8m、幅0.2m、長さ10mの大水槽と、深さ0.70m、幅0.25m、長さ3.0mの小水槽の二つであつて、ともに片面ガラス張りの銅製水槽である。水槽への流入口には滑面の水平な水たたきが設けられ、その長さや水門出口の大きさは、それぞれ2:1の割合にし、相似律の検討を行なうように考慮した。

(2) 実験に用いた砂礫の特性：大小二つの実験水槽において使用した砂礫の特性を一括表示すべく、表-1のとおりである。

表-1 実験に用いた砂礫の特性

実験水槽	中央粒径	$(d_{80}/d_{10})^{1/2}$	空隙率 $\lambda$	比重 $\rho$
大	0.055 cm	1.45	0.420	2.588
〃	0.370	$\approx 1$	0.444	2.596
〃	0.750	$\approx 1$	0.459	2.609
小	0.022	1.18	0.408	2.555
〃	0.035	1.45	0.387	2.533
〃	0.066	1.49	0.405	2.594
〃	0.078	1.22	0.395	2.592
〃	0.185	$\approx 1$	0.450	2.608

(3) 実験方法：洗掘形状、洗掘深さの時間的変化、下流水深および水たたきの長さの影響、縮尺効果、洗掘現象の周期性などに関する考察を行なうために、適否な条件のもとに進めたが、洗掘形状の測定は自動写真撮影装置によつて、一定時間ごとに行なつた。

### 3. 実験結果に対する一般的考察

写真-1は洗掘形状の一例である。洗掘形状の意次元表示はLaurson が示したように、水たたき先端より砂粒までの距離 $x$ を、また着床から示したように最大洗掘深 $z$ と $z_0$ を基準長にとることによって可能であるが、今回の実験結果によれば、これらの示定は洗掘がかなり進んでからに於いてであり、洗掘の初期や下流水深がかなり小さい場合には、

これらの表示法は適用されないのである。

図-1は最大洗掘深 $z$ の時間的変化の一例であるが、この他の多くの実験結果に基づいて、つぎの事実が見出された。まず洗掘の初期においては、最大洗掘深 $z$ は時間とともに直線的に変化し、また最終洗掘深 $z_0$ は下流に砂礫が流送されない場合には一般に存在するようになって、この状態に近づく過程では、図-1に示した表示法においては最大洗掘深 $z$ は直線的に増加する。そしてこれら二つの過程の間には遷移領域があって、ここでは洗掘深 $z$ の時間的変化は極めて複雑である。まず洗掘初期においては、

洗掘によって流れの状態はあまり変化せず、たとえば wall jet として流れの特性を詳細にするようであり、掃流形式で洗掘されるものと考えられる。さきの研究で明らかにしたように、一般にこうした局所洗掘の進行にとりなると、流水の状態は変化し、局所的な渦(roller)が発生して洗掘を助長し、局所的な渦(roller)が発生して洗掘を助長するようである。

洗掘がかなり進んで洗掘孔が形成されると、この渦と流水の両者に基いて洗掘が進むようであり、これは洗掘深 $z$ の時間的指数関数としてあらわされるもの領域と考えられる。その領域は以上二つの領域の遷移領域として考えられるものである。つぎに図-2は最終最大洗掘深 $z_0$ に及ぼす下流水深の影響を検討した結果であって、下流水深と水たたきの長さの比 $h_0/L$ がある値以上になると、洗掘深 $z_0$ は変わらなくなるが、一般には洗掘の周期性と関連して複雑な変化を示すようである。

#### 4. 局所洗掘機構に関する理論的考察

以上述べたように、水門下流部における局所

写真-1 洗掘形状の一例

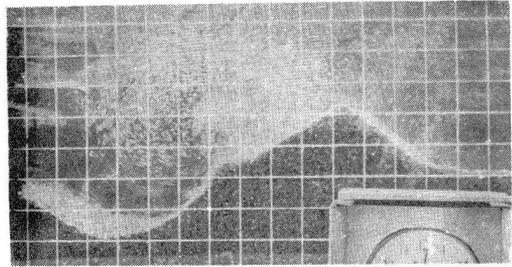


図-1 最大洗掘深 $z$ の時間的変化の一例

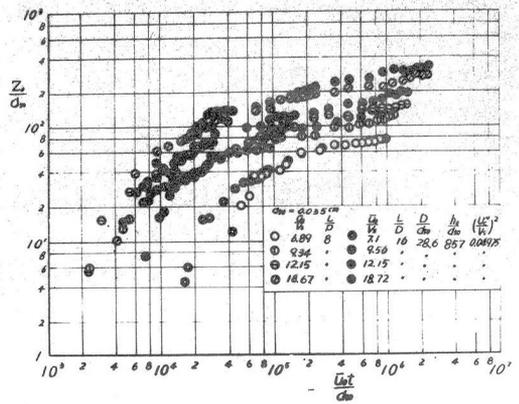
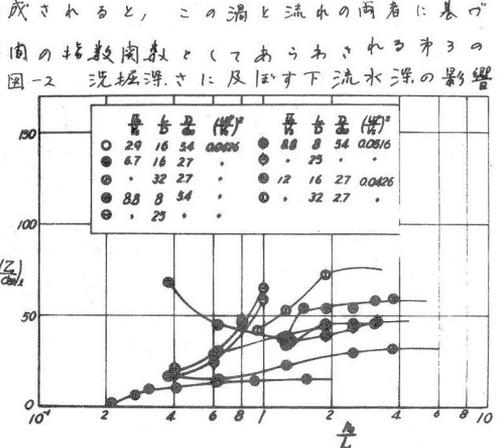


図-2 洗掘深 $z_0$ に及ぼす下流水深の影響



洗掘の機構は極めて複雑である。これは前述した 図-3 洗掘初期における洗掘深さの時間的変化の無次元表示

よりに、洗掘の進行とともに流氷の特性が変化する。このためである。局所洗掘機構の解明が進まぬ限り、原因はこのためと考えられる。そこで前述の三つの領域のうち、 $\alpha_1$ および $\alpha_3$ の領域に対して考察した

一つの理論的考察の結果について説明しよう。また $\alpha_1$ の領域に対しては、wall jetの結果が適用されるものとして、洗掘に関する連続の方程式から、最大洗掘深さの時間的変化とあらわす関係は次式によってあらわされる。

$$(1-\alpha)(z_0/d)(D/d)(\bar{u}_0 D/\nu) \left( \frac{\bar{u}_0 t/d}{L/D} \right)^{-1} = KB(L/D) \left\{ B' \left( \frac{\bar{u}_0}{V_s} \right) \left( \frac{\bar{u}_0 D/\nu}{L/D} \right)^{-2n/(3n+1)} \left( \frac{\bar{u}_0 t/d}{L/D} \right)^{-2n/(3n+1)} \right\}^{m-1} \left\{ (2m+1) B' \left( \frac{\bar{u}_0}{V_s} \right)^2 \left( \frac{\bar{u}_0 D/\nu}{L/D} \right)^{-2n/(3n+1)} \left( \frac{\bar{u}_0 t/d}{L/D} \right)^{-2n/(3n+1)} - \left( \frac{u_c^*}{V_s} \right)^2 \right\} \dots (1)$$

ここに、 $D$ : 水門出口の大きさ、 $\bar{u}_0$ : 水たまり先端における wall jet の最大流速、 $V_s = (\rho_p - 1)gd$ 、 $u_c^*$ : 限界摩擦速度、 $n$ : 境界層内の流速分布における指数、 $K, m$ : Kalinske - Brown の流砂量公式における定数、 $B, B'$ :  $m$  および抵抗係数の関数である。(1)式は  $L/D \geq 2.2^2$  (Zone of established flow) の領域に対して考察した結果であるが、その他

図-4 洗掘初期を対象とした最大洗掘深さの時間的変化の一例

の領域については関係式は省略する。図-3は(1)式であらわされる関係と実験結果とを比較したものである。実験の開始をできるだけ注意深く行なっても、こうした洗掘初期における実験の精度は十分でなく、実験値は非常にばらばらであるが、一応理論的考察の結果を裏付けているようである。また図-4は(1)式の関係をかき直して時間的変化としてあらわしたものの一例である。図中の直線は(1)式に基づく理論結果であるが、これから確かに洗掘の初期においては、最大洗掘深さは時間とともに直線的に増加することがわかる。

$\alpha_3$ の領域における最大洗掘深さの時間的変化を考察した結果について述べる。この領域においては、さきに発表した研究において述べたように、洗掘は渦の発生に大きく関係するようであるから、こうした洗掘の進行にともなう渦の特性を究明する必要がある。このために、ストロボ装置を用いて洗掘面付近の流速を測定し、渦の特性を明らかにしようとした。図-5はその結果の一例である。これは洗掘面における流速  $u_m$  と  $\bar{u}_0$  との比

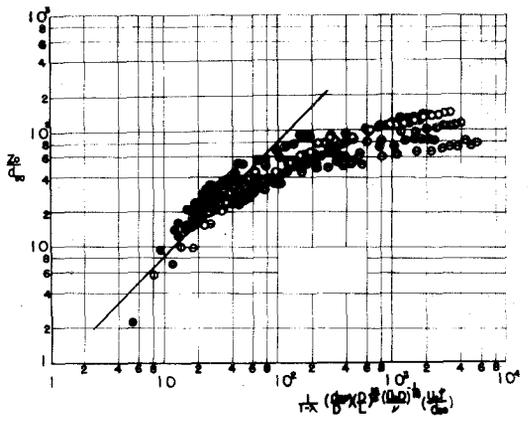
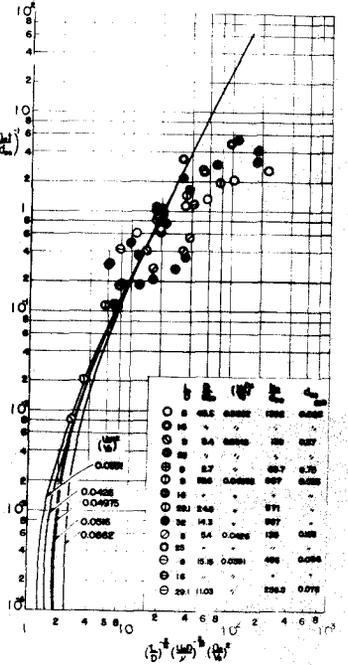
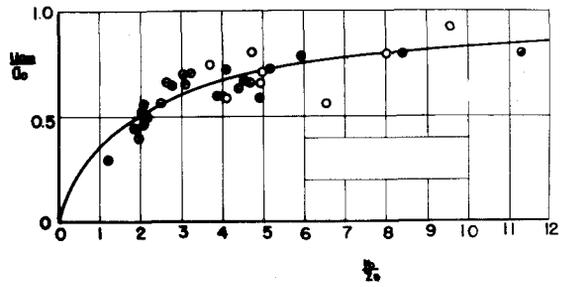


図-5 洗掘面における流速と渦の中心との関係



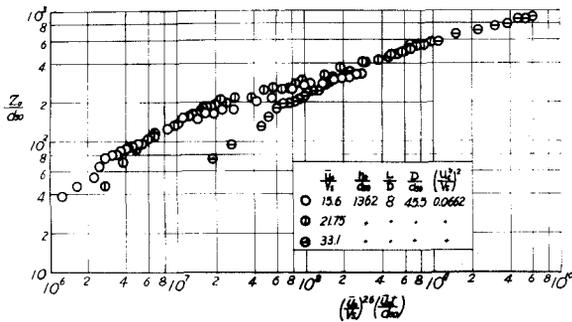
渦の中心から洗掘面までの距離  $z_0$  と  $z$  との関係としてあらわしたものである。一方、渦の特性に関する実験結果によると、 $z_0/z \approx k_0/z_0$  であらわされるようであり、

また洗掘面近くの流速は渦の中心からの距離に比例するこゝろがあつた。したがつて、これらの結果をもとにして、種々の仮定を導入し、以上の渦の特性を全面的に適用して、洗掘深さの時間的変化や洗掘形状に対して、前と同様な方法で理論的に考察した結果、つぎのこゝろがあつた。また洗掘深さおよび形状の時間的変化は、

$$\frac{(2m+1)}{(1-\alpha)} \left(\frac{u_0}{V_0}\right)^{2m} \left(\frac{u_0 t}{d}\right) \left(\frac{z}{z_0 + \xi}\right)^{2m+1} = F\{\gamma', \xi', S', m\} \dots (2) \quad m$$

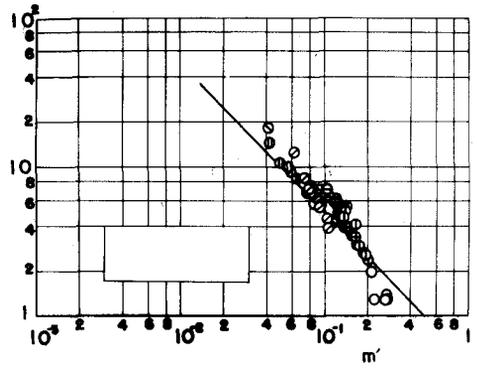
であらわされる。ここに、 $\gamma' = \gamma/z_0$ 、 $\xi' = \xi/z_0$ 、 $S' = S_0/z_0$ 、 $\gamma = z/d$ 、 $z_0 = z_0/d$ 、 $\xi = \xi/d$  である。したがつて、(2)式において渦の中心をあらわす  $S'$  があまり影響しないのは、洗掘形状は着着うかさきを示したように、最大洗掘深さ  $Z_0$  で無次元表示されるものと考えられる。つぎに、(2)式に

図-7 オの領域を対象とした最大洗掘深さの時間的変化の無次元表示



るようであり、図-7はそれらの結果と上記の理論的考察に基づいて実験結果と整理したものの一例である。この結果によると、洗掘の初期および遷移領域は近と除いて、かなり実験結果が整理されるようである。なお、以上述べた洗掘機構に対する考察では、前述したような種々の現象を説明することはできず、今後に残された問題も少なくないが、下洗掘深の影響や最終最大洗掘深さに対する考察とともに、洗掘の周期性を解明し、こうした問題の相似律を確立して行きたいと考えている。

図-6 m と m' との関係



に基づいて、最大洗掘深さの時間的変化を近似的にあらわすと、

$$Z_0 \propto (u_0/u_s) (u_0 t/d)^{1/2} m' \dots (3)$$

とすることがわかつた。図-6は図-1のように両対数紙上であらわした洗掘深さの時間的変化の勾配  $m'$  と  $m$  との関係を示したものであり、図中の直線は上記の理論的考察の結果からえられたものである。一方、 $m$  の値はこうした領域において定数でなく、 $u_0 d/\nu$  の関数としてあらわされる