

水門下流部における局所洗掘に関する研究（1）

岩 垣 雄 一・土 屋 義 人・今 村 正 孝

STUDIES ON THE LOCAL SCOUR FROM FLOWS DOWNSTREAM OF AN OUTLET (1)

By Yuichi IWAGAKI, Yoshito TSUCHIYA and Masataka IMAMURA

Synopsis

In order to prevent the scour resulting from flows downstream of an outlet, it is necessary to establish the mechanics of the scour. A series of experimental investigations on the local scour from wall jets issuing from a submerged outlet has been performed by using small and large experimental water tanks and sediments of eight kinds of size.

As a first report, general considerations on the nature of scour, such as profiles of scour holes, variations of maximum depth of scour with time, influence of tail water depth on the scour, periodicity of scour and similitude in the phenomena of scour, are described based on the experimental results, and moreover, a theoretical approach to disclose the mechanism of the scour for an initial step of scour is presented.

1. 緒 言

人類が河川を制御しようと試み始めたのは古い昔のことである。文明の進歩は流水とのたたかひの所産であるといえるほど、その歴史は古く、その関係は密接である。

治水を行なう場合、われわれは流水のもつ自然の動態を変化せしめるような行為を、しばしばあて行なう。水理構造物の設置はその最も代表的なものの1つであり、その例は流水を横断して設けられるダム、水門など多くのものがあげられる。局所洗掘現象は、もっぱら流水の動態の変化の結果として生ずる比較的短期間の所産であるとも考えられ、一般にわれわれの行為の達成を阻害するものである。

局所洗掘の軽減防止に関する調査研究は、ずいぶん古くより行なわれ、たとえば Bligh¹⁾ の業績は現在においても高く評価されてよく、またこの現象に対する模型実験も数多く実施されてきた²⁾。最近米国をはじめ各国において種々の洗掘現象がとりあげられ、詳細な模型実験が活発に実施されて、多くの興味ある水理学上の結論や実際問題への適用に際して有用な諸結果がえられてきている。しかしながら、洗掘現象が一般にきわめて複雑であることや、通常その測定が、その内部機構を解明するのに十分なほど適確に実施されていないなどの理由から、洗掘現象を統一的に説明しようような結論に達するには、まだかなりの距離があるといつてよいようである。

1940年、Rouse³⁾ が鉛直なもぐり噴流による局所洗掘を、水流と砂礫の特性にもとづく無次元表示によって表わし、洗掘現象の統一的説明を試みた業績は高く評価されてよい。鉛直噴流による洗掘に関する研究は、

その後 Albertson ら⁴⁾およびコロラド州立大学^{5,6)}などにおいて、きわめて活発に実施されてきた。これに対して水平噴流による局所洗掘の解明が、1953年 Laursen⁷⁾ によって、洗掘に関する連続の方程式をもととして試みられた。いうまでもなく、これらの問題は水理構造物による局所洗掘現象としては、最も単純なものであり、またそのことから最も基本的なものである。とくに、両者の実験において共通していることは、局所洗掘を問題としている範囲外では、砂礫が移動しない場合を対象としていることであるが、その洗掘現象に対する考え方には、大きな相違点がある。すなわち、前者は前述した無次元表示にもとづいて実験結果を整理し、その結果、洗掘深さは経過時間の対数に比例して増加し、終局的な洗掘状態は存在しないとしたのに対して、後者は終局的状態の存在を肯定し、理論の展開にこの考えを導入して、実験結果を整理し、その妥当性を確かめている。

わが国においても、近年洗掘に関する研究はかなり実施され、噴流による洗掘、水制周辺における洗掘やその防止工法などについて多くの成果があげられてきたが、なかでも水制周辺の洗掘を、連続の方程式に流れの特性を巧みに導入して解明した椿ら⁸⁾の研究はとくに興味深い。

この研究でとりあげる水門下流部における局所洗掘の問題は、上述のような洗掘現象の基本的なものの1つとして考えられるばかりでなく、水たたき下流部における洗掘防止と関連してきわめて重要なものといえてよい。わが国において、水たたき下流部の局所洗掘が大きな問題となった典型的な例は、大河津第2えん堤の現状にみることができる。

局所洗掘の現象は、いうまでもなく流水による砂礫の移動にもとづくものである。この現象は各断面を通過する砂礫の移動量の場所的な変化にもとづくものと考えられるけれども、この場合とくに注目すべきことは、一般に現象の進行にともなって、その付近の流れが大きく変化し、それによって洗掘されるというように、両者がきわめて密接に関連していることである。したがって、洗掘機構を考察する場合には、以上のように洗掘の進行にともなって、流れの性質が変化することを適確に表現することが必要である。

著者らは水門下流部における局所洗掘現象を解明する第1歩として、水門から噴出する流れを1つの wall jet として解析し、その結果を適用して水たたきの下流部における洗掘限界を理論的に解明して、かなりの成果をおさめてきた⁹⁾。引き続き水たたきの下流部における局所洗掘現象に関する実験を、大小2つの実験水槽を用いて進めてきたが^{10,11)}、その第1報として洗掘現象の一般的特性の概略と、洗掘の初期を対象として考察した理論の結果について述べよう。

2. 局所洗掘に関する実験

局所洗掘現象は流れの特性に大きく支配されることはいうまでもなく、とくに局所的に発達する複雑な流れのために、その取扱いはきわめて困難である。したがって、模型実験を行なって実験的に現象を解明しようとする場合には、できるだけ系統的に行なって、現象の本質を抽出するよう心がけるべきであり、縮尺効果 (scale effect) の問題はとくに重要である。この理由から、われわれは洗掘実験を行なうにあたって、縮尺比が2:1である大小2つの実験水槽と、中央粒径および粒度分布を適当に変えた8種類の実験砂を用い、下流に砂礫が移動しないという条件で考えられる種々の洗掘現象を対象として実験を進めた。

(1) 実験装置および実験方法

a) 実験水槽：大水槽は Fig. 1 に示すように、幅 50 cm、最大深さ 1.8 m、長さ 10 m の片面ガラス張り鋼製のもので、8"パイプで上下流端が連絡され、7.5 HP のポンプで水が循環するようになっている。水槽の上流端には、出口における流速分布が一樣になるように設計した水平噴流 (模型水門) 発生装置が設けられ、またその下流には、適当な長さの水たたきを取り付けられるようになっている。流量はパイプラインの途中にあるワマック・ベンチュリー管によって測定され、また下流水深は簡単なゲートによって調節され

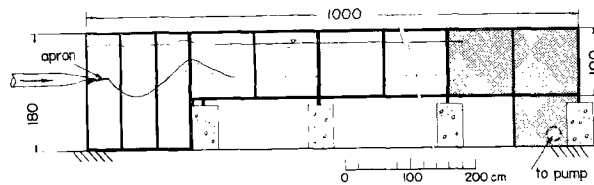


Fig. 1 Large water tank used for experiments.

Table 1 Properties of sand and gravel used in large water tank.

Median diameter d_{50} cm	Standard deviation $(d_{84}/d_{16})^{1/2}$	Porosity divided by 100 λ	Specific gravity σ/ρ
0.055	1.45	0.420	2.588
0.375	≈ 1	0.444	2.596
0.750	≈ 1	0.459	2.609

る。水門出口の大きさは 1 cm および 2 cm の 2 種類である。

小実験水槽は前者のおよそ(1/2)の大きさで、幅 25 cm、最大深さ 0.7 m、長さ 3 m の片面ガラス張り鋼製のものである。水門出口の大きさは 0.5 cm、1 cm の 2 種類であって、模型実験の縮尺効果を検討するため、水たたきの長さなどとともに、縮尺が大水槽の(1/2)にしてある。

b) 実験に用いた砂礫の特性：大水槽において用いた砂礫の特性を一括して Table 1 に示した。表中 d_{16} および d_{84} は重量通過百分率においてそれぞれ 16% および 84% に対応した粒径で、 $(d_{84}/d_{16})^{1/2}$ は標準偏差をあらわし、また d_{50} は中央粒径である。中央粒径 0.055 cm の砂礫の粒度分布は Fig. 2 に示すとおりであり、また 0.375 cm および 0.75 cm のものはそれぞれ 0.25 cm と 0.5 cm、および 0.5 cm と 1.0 cm のふるいを用いてふるい分けした礫であって、その粒度分布はほぼ一様であると考えられる。

Table 2 は小実験水槽において用いた砂礫の特性を示したものである。また Fig. 2 には、中央粒径 0.022 cm、0.035 cm、0.055 cm、0.066 cm および 0.078 cm の砂礫の粒度分布を示した。なお、中央粒径 0.185 cm の砂は 0.12 cm と 0.25 cm のふるいを用いてふるい分けしたほとんど一様と考えられるものである。

c) 測定装置：洗掘形状および洗掘深さの時間的变化は、モータードライブ方式のカメラに簡単な自動シャッター装置をとりつけ、それを電接時計に連結したものをを用い、適当な時間々隔で測定した。水門出口の流速はベンチュリー管によるほか、すべての場合ピトー管を用いて測定した。そのほか、洗掘孔における流れの様子を知るために、ストロボ装置を用いて流速、流線および砂礫の移動状況を撮影した。

d) 実験方法：前述したように、洗掘形状を側面からカメラで撮影する方法をとったが、これはいうまでもなく、この場合の洗掘現象の二次元性を仮定したものであって、もし実験水槽の側壁がこの現象に対して

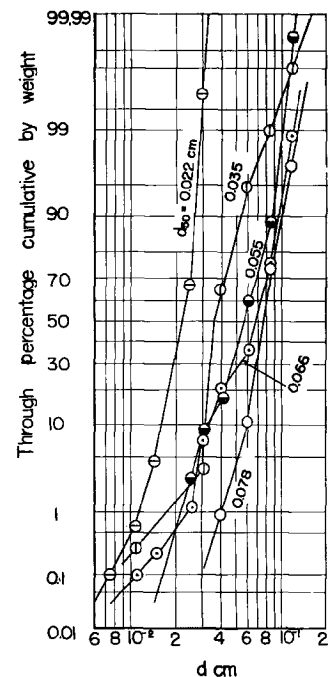


Fig. 2 Sieve analysis curves of sand and gravel used.

Table 2 Properties of sand gravel used in small water tank.

Median diameter d_{50} cm	Standard deviation $(d_{84}/d_{16})^{1/2}$	Porosity divided by 100 λ	Specific gravity σ/ρ
0.022	1.18	0.408	2.585
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	≈ 1	0.450	2.608

大きな影響を及ぼすような場合には、この方法は不適當である。幸いに、われわれの使用した撮影装置では、洗掘床面付近を十分明るくすべく考慮したため、壁面近傍の洗掘状況のほかに、洗掘床面が水槽中央部で盛り上った場合には、その形状をも同時に撮影することができたので、洗掘床面が二次元的であるかどうかを十分判断することができた。

大実験水槽では、長さ 16 cm および 25 cm の 2 種類の水たたきを、そして小実験水槽では長さ 4 cm, 8 cm, 16 cm および 25 cm の 4 種類の水たたきを使用し、Tables 1 および 2 に示した 8 種類の砂礫を用いて、適当な実験条件のもとに種々の実験を行なった。

(2) 実験結果とその考察

以上の方法によってえられた実験結果をもとにして、水門下流部における局所洗掘の現象を考察すれば、つぎのようである。

a) 洗掘に関する一般的考察：局所洗掘の機構を数学的に表示することは、一般にきわめて困難であるが、なんらかの方法によって、その現象を支配する諸要素のうちから、主原因たる二、三の確かな要因を抽出し、その特性を把握することができれば、洗掘機構を一般的に表示する上はかなり役立つであろうし、また洗掘理論の確立の足がかりとなるであろう。したがって、ここでは水門下流部における洗掘の現象を実験的に考察するために、まず次元解析の方法で進めよう。

いまこの現象を支配する水理量として、つぎの13コをとりあげることとする。すなわち、 z ：洗掘深さで水たたきの面から下向きを正とする、 x ：水たたきの面に沿って水平に下流方向にとった座標、 t ：時間、 D ：水門（噴流）出口の大きさ、 U ：水門出口における流速、 L ：水たたきの長さ、 h_0 ：下流水深、 d ：砂礫の代表的な大きさ、たとえば中央粒径、 σ_0 ：砂礫の大きさの一様性をあらわす指標、たとえば標準偏差、 σ ：砂礫の密度、 ρ ：水の密度、 ν ：水の動粘性係数、および g ：重力の加速度、である。

以上の水理量で構成される無次元量の関係として、

$$f_0(z/d, x/d, Ut/d, U^2/gd, UD/\nu, L/D, D/d, h_0/d, \sigma/\rho, \sigma_0) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

がえられる。いま 3 において述べるように、水門下流部における wall jet の特性から、(1) 式中の U を水たたきの先端における virtual maximum velocity $\bar{u}_0$ を用い、さらに $V_s^2 = (\sigma/\rho - 1)gd$ で定義される 1 つの砂礫の特性を導入して (1) 式をかきかえれば、つぎの関係がえられる。

$$f_1(z/d, x/d, \bar{u}_0 t/d, \bar{u}_0/V_s, \bar{u}_0 D/\nu, L/D, D/d, h_0/d, \sigma/\rho, \sigma_0) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

水門下流部における洗掘現象に及ぼす上式中の各無次元量について実験的に検討していくことにする。

b) 洗掘形状：水門下流部における洗掘形状は、下流側に砂礫が流送されない場合には、一般に洗掘孔の下流側に砂堆を形成する。Laursen⁷⁾ は水たたきを設けない場合の噴流による局所洗掘を考察するにあたって、噴流出口から砂堆までの距離を基準長として用い、洗掘形状を無次元表示して、つぎの結論をえている。この表示法によると、洗掘の初期を除いて、洗掘形状を統一的にあらわすことができる。このことはわれわれが対象としている洗掘形状に対しても適用されるわけであって、洗掘形状がある 1 つの基準長に対し

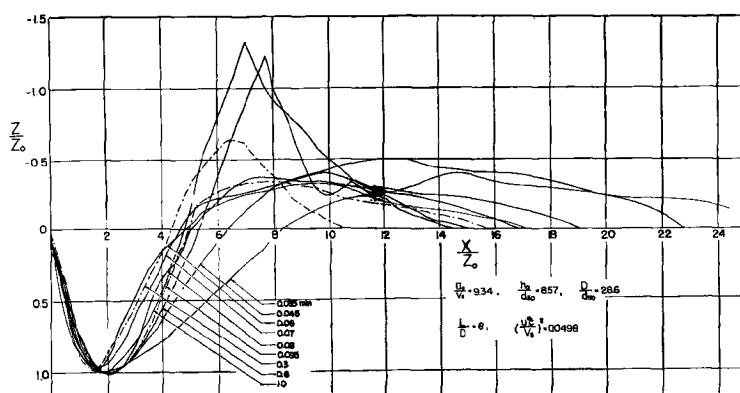


Fig. 3 Dimensionless profiles of scour (1).

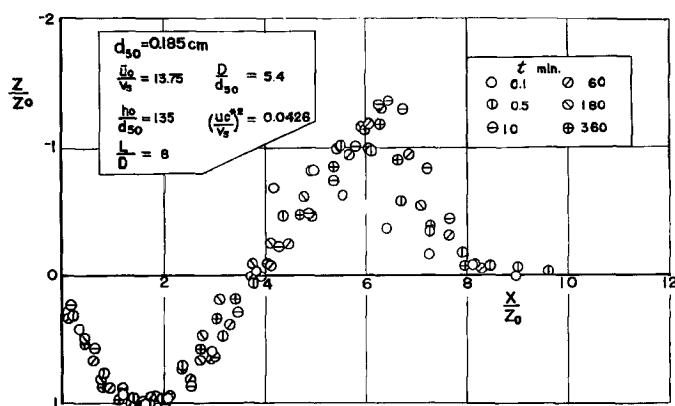


Fig. 4 Dimensionless profiles of scour (2).

て相似的であるということにほかならない。

Figs. 3 および **4** は、基準長として最大洗掘深さ z_0 を採用して実験結果を整理したものの一例である。もっとも、**Figs. 3** および **4** に示した結果は下流水深が十分大きく、洗掘現象に対してほとんど影響を及ぼさない場合のものである。このことはわれわれの wall jet による洗掘限界に関するさきの研究から⁹⁾、そのような領域が存在することは考えられるが、詳細は洗掘に及ぼす下流水深の影響のところまで考察するつもりである。

これらの結果によると、洗掘孔が十分発達した場合、洗掘形状はこの無次元表示によって統一的に表わすことができ、確かに Laursen⁷⁾ の主張を再現することができる。そして、砂堆の上流側の水平となす角度は砂礫の大きさなどに関係せず約 30° であるが、下流側の形状は細かい砂の場合には、浮遊の状態で下流へ運ばれるために、その勾配はかなりゆるやかになる。

これに反して、洗掘の初期においては、**Fig. 3** にみられるように、洗掘形状はきわめて複雑であって、適当な無次元表示を見出すことはできないようである。また下流水深が小さくなってある限界をこえると、洗掘形状は前述した方法によっては表示することができなくなり、下流水深の影響がきわめて複雑にあらわれてくるようである。

c) 最大洗掘深さの時間的変化: 前述したように, 洗掘形状は洗掘の初期を除けば, 相似的な形状として無次元表示することができることがわかったので, 洗掘深さの時間的変化を考察するにあたっては, 主として最大洗掘深さについて検討する。このような取扱いによれば, (2) 式であらわされる次元解析の結果は, つぎのようにかきかえることができると考えてよい。

$$f_2(z_0/d, \bar{u}_0 t/d, \bar{u}_0/V_s, \bar{u}_0 D/\nu, L/D, D/d, h_0/d, \sigma/\rho, \sigma_0) = 0, \dots\dots\dots (3)$$

ここに, z_0 は最大洗掘深さである。

上式にもとづいて, いま最大洗掘深さの時間的変化を z_0/d と $\bar{u}_0 t/d$ との関係で, 両対数紙上に図示したものの一例が Fig. 5 であるが, このほか多くの実験結果にもとづいて, つぎの事実が見出された。まず洗掘の初期においては, 最大洗掘深さは時間とともに直線的に変化し, また最終洗掘深さ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であって, 最大洗掘深さは, この状態に近づく過程では, Fig. 5 に示した表示法において直線的に増加する。そして, これら2つの過程の間には遷移領域があって, ここでは洗掘深さの時間的変化はきわめて複雑である。洗掘初期においては, 洗掘によって流れの状態があまり変化せず, たとえば wall jet の特性を適用することによって評価できるようであり, 砂礫が掃流形式で流送されて洗掘が進むものと考えられる。

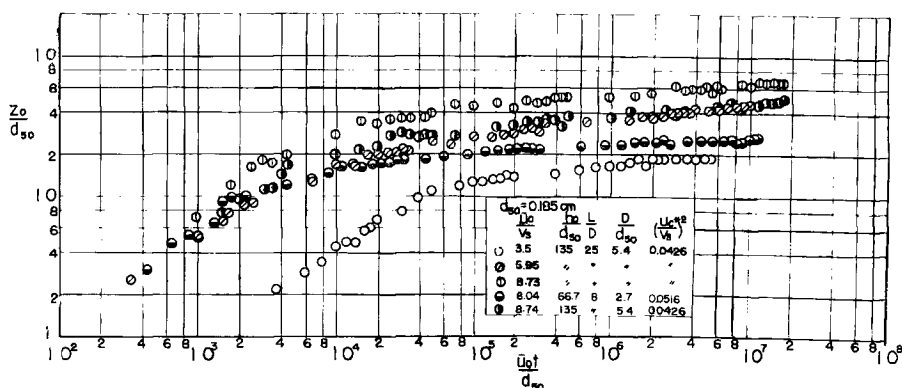


Fig. 5 Variations of maximum depth of scour with time.

さきの研究で明らかにしたように^{10,11)}, 一般にこうした局所洗掘においては, 洗掘孔に水平軸をもつ局所的な渦 (roller) が発生し, これが洗掘の進行に大きく関係して, 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, このような渦 (roller) と流れの両者にもとづいて洗掘が進むようであって, これは最大洗掘深さが時間の指数関数としてあらわされる第3の領域と考えられる。第2の領域は以上2つの領域の遷移過程であると考えてよいであろう。以上のように洗掘の進行過程を考察すると, Figs. 3 および 4 における関係として, つぎの事実を認めることができよう。すなわち, 洗掘の初期いいかえれば第1の領域においては, 流水の作用によって水たたき下流付近の砂礫が流送されて洗掘が進むことから, もっぱら水たたき下流端における流れの特性に支配される。これに反して, 第2および第3の領域では, 洗掘孔に発生した渦 (roller) の作用が洗掘に大きく関係し, また渦 (roller) そのものが洗掘孔に応じて発達することから, 両者関連して相対的な洗掘形状を形成するものと考えられる。

Rouse³⁾ らは洗掘深さは経過時間の対数に比例して増加することを認めているが, 比較のために Fig. 5 に示した結果の一部を半対数紙上に図示し直したものが, Fig. 6 である。これから明らかにように, 一般に Rouse らの結論を認めることはできない。むしろこうした時間的変化はきわめて複雑であることから, 現

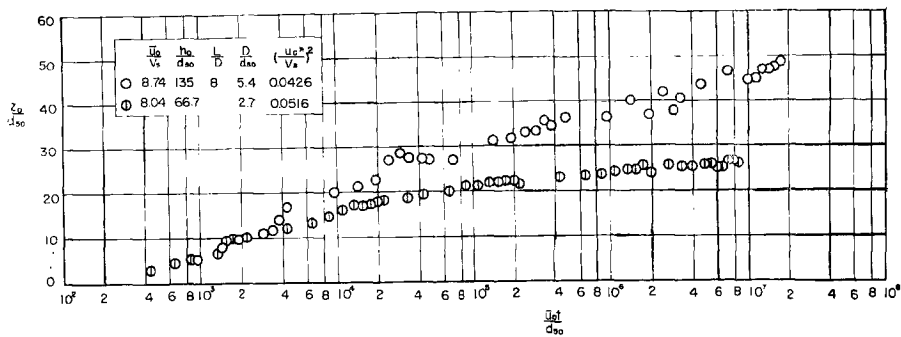


Fig. 6 Variations of maximum depth of scour with time (2).

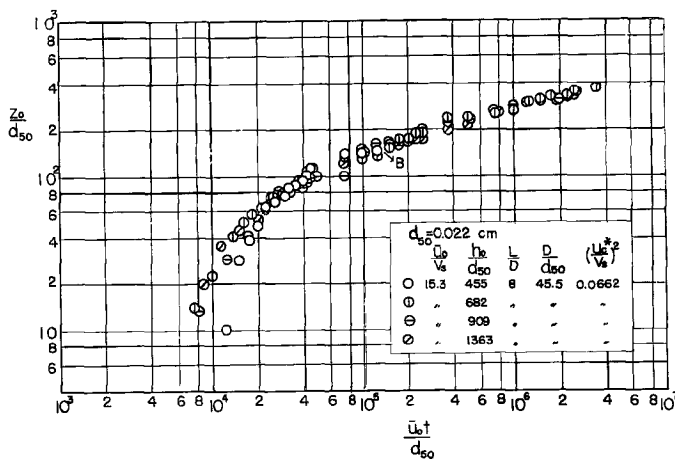


Fig. 7 Variations of maximum depth of scour with time (3).

象の認識とともに、その変化の有様を解釈すべきであろう。

以上の考察は主として下流水深が十分大きくて、洗掘深さが単調に増加する場合であるが、下流水深などの影響によって、洗掘現象に周期性が現われる場合があるので、つぎにそれらについて簡単に考察しておこう。まず下流水深が最大洗掘深さの時間的変化にどのように影響するかを調べたものの一例を Fig. 7 に示す。これらの結果によれば、下流水深が十分大きい場合には、wall jet の特性からも期待されるように、下流水深の影響はほとんどなく、洗掘深さの時間的変化は一つの関係であらわされるようにみうけられるが、下流水深をさらに小さくすると、洗掘の状態はきわめて複雑に変化する。その有様を実験的に示される最終最大洗掘深さ z_0 について検討した結果が Fig. 8 である。この図の横軸は (3) 式中に示されている h_0/d の代りに、wall jet の特性⁹⁾との関連から h_0/L によってあらわしているが、この結果からつぎのことがわかるであろう。確かに、 h_0/L の値が大きくなると、 z_0/d の値は一定値に近づく傾向を示すようであるが、wall jet の場合とは相違して、すべての場合に共通した下流水深の影響が現われなくなる h_0/L の限界値は存在しないようである。これはいうまでもなく、下流水深に対応した砂堆頂部の維持条件の相違と、下流への砂礫の流送などに関係するためであろう。

なお、Figs. 7 および 8 に B と示してあるのは、前者の場合はこのときより洗掘に周期性が現われた場合を、また後者においては周期性が現われた実験結果であることを示している。周期性が現われるのは、前述

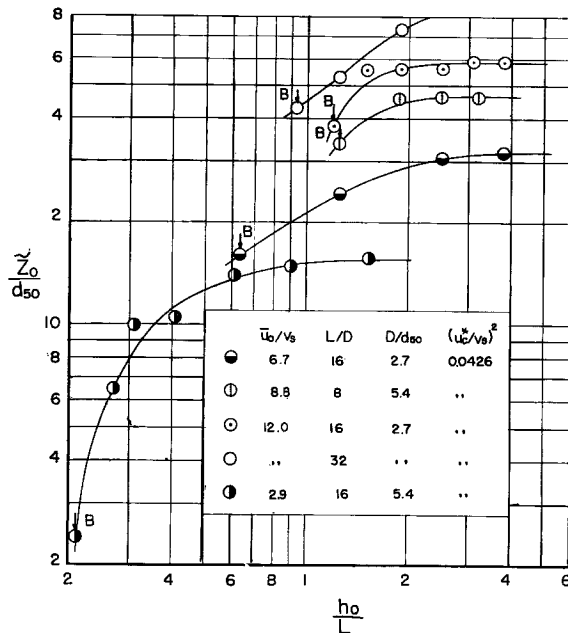


Fig. 8 Influence of tail water depth on final maximum depth of scour.

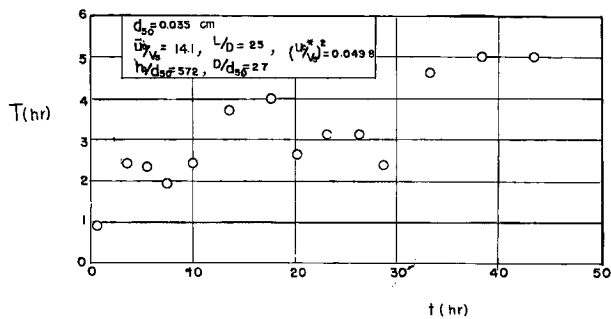


Fig. 9 An example of variations of period of scour with time.

した渦 (roller) のほかに、その下流側に回転方向の違ったもう1つの渦 (roller) が発達した場合であって、上流側の渦 (roller) の作用で洗掘されて形成した砂堆の前面を、下流側の渦 (roller) の作用でけずりとして洗掘孔を埋めもどすというような過程を経て、洗掘の進行とともに、上下流の渦 (roller) が交互に発達するためと考えられる。そしてその周期は、一例を Fig. 9 に示すように、複雑に変化するようであるが、一方砂堆はこのような経過とともに、下流方向へわずかずつ移動する。こうした洗掘の周期性は下流水深に大きく関係するようであり、またそのような場合には、洗掘形状を Fig. 4 に示したように相似的にあらわすことはできない。

d) 洗掘実験の相似性に関する考察：以上述べたように、洗掘現象はきわめて複雑であって、すべての現象を認識し、その機構を解明することはむしろ不可能であると考えられるが、いま単純な場合を対象とすることにして、下流水深が十分大きく、洗掘の周期性が現れない場合をとりあげ、(3) 式中の無次元量をもとに洗掘現象の相似性について、実験的に検討した結果を説明しよう。

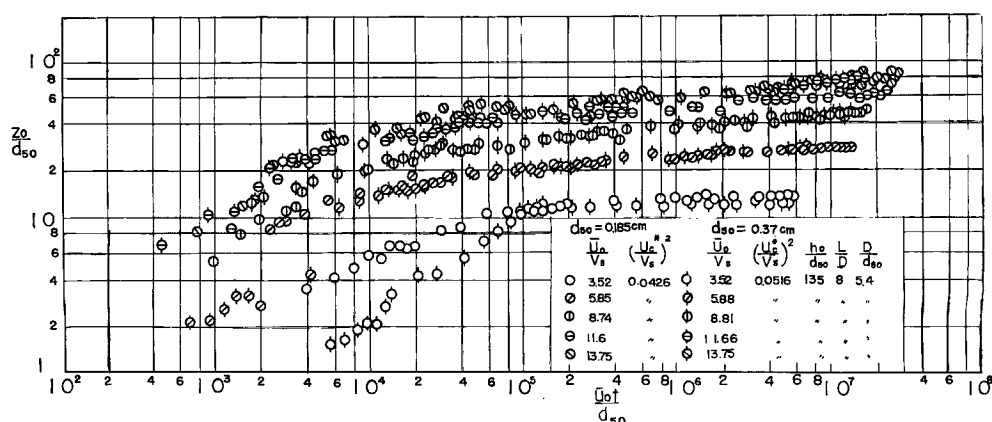


Fig. 10 An example of experimental results for simulative scour phenomena.

Fig. 10 は大小2つの実験水槽において、(3)式中の $\bar{u}_0 D/\nu$ の影響を省略することにし、無次元量 L/D , D/d , h_0/d を一定とし、各種の $\bar{u}_0/V_s$ に対して実験を行ない、最大洗掘深さの時間的変化を比較したものの一例である。 $\bar{u}_0/V_s$ の値が小さい場合の洗掘の初期を除いて、大小両水槽による実験結果はきわめてよく一致していることが認められるが、これからつぎのことが結論されよう。すなわち、少なくとも洗掘現象に対する下流水深の直接的な影響、たとえば前述したような洗掘の周期性などの問題がない場合には、(3)式中の6つの無次元量によって相良性を保つことができ、したがって模型を歪めないときには、 $\bar{u}_0/V_s$ の値を一定にすることが必要であって、Reynolds 数 $\bar{u}_0 D/\nu$ の影響は十分無視できる。

なお、以上の実験結果には、最終最大洗掘深さに関係すると考えられる無次元量として、限界掃流力に関する岩垣公式から求められる限界摩擦速度 u^*_c を用いて u^*_c/V_s の値を示しておいたが、一般的にいうて $\bar{u}_0/V_s$ の値が小さい場合、洗掘の初期において縮尺の相違する両者の実験結果が一致しない理由を、つぎのように説明することができるであろう。 $\bar{u}_0/V_s$ の値が小さくて渦 (roller) の発達がおそく、前述した洗掘の第1の領域が比較的長い場合には、次章で説明するように wall jet の特性から、洗掘機構に Reynolds 数 $\bar{u}_0 D/\nu$ が影響するためと考えられる。またこれらの実験に用いた砂礫は Tables 1 および 2 から明らかなように、ほとんど均一で、比重もほとんど同一であるから、(3)式中にあらわれている σ_0 および σ/ρ の直接的な影響を見出すことはできない。

以上水門下流部における局所洗掘現象の特性について、全般的な説明を行なって種々の興味ある結果を示したが、その水理学的機構ははなはだ複雑であって、統一的な数式化は困難である。次章においては、以上の実験的事実の一部を説明しようとした著者らの考察を述べるが、洗掘機構の全ぼうとくに洗掘現象に及ぼす下流水深の影響や最大洗掘深さなどに関する考察は次報にゆずりたいと思う。

3. 局所洗掘機構に関する考察

水門下流部における局所洗掘の現象は、前述したように一般に局所的な大きな乱れのために、その水理学的機構を明確に解析することはきわめて困難といわねばならない。しかしながら、前章において洗掘現象の一般的な特性について考察した結果によれば、下流水深が十分大きい場合には、この洗掘過程には典型的な3つの段階があって、それらは洗掘孔に発達する渦 (roller) によって特徴づけられる。第1の領域では、洗掘は水たたき下流端の流れの作用によって、その付近の砂礫が流送されるためによって起こり、時間とともに急激に進行する。そしてこの領域は渦 (roller) の発生に寄与すべき洗掘孔の形成へと移行する。渦 (roller) は洗掘孔の形成にしたがって発達していくが、渦 (roller) が発達すればするほど、洗掘はその渦

によって支配され、流れはむしろ渦 (roller) の発達を育成する役割をしているかにみえるようになる。これが第3の領域であるが、洗掘の周期性が現われる場合には渦 (roller) の発達と消滅がくり返され、現象はさらに複雑になる。下流に砂礫が流送されないならば、一般に最終的な洗掘の状態、すなわち時間的に洗掘形状が変化しない状態が存在するものと考えられ、洗掘はそこまで進行するが、下流に砂礫が流送される場合には、水門出口から砂礫が流出する条件を考慮して改めて考察すべきであることはいうまでもない。

洗掘機構を論ずる場合には、少なくとも前述した3つの領域について考察すべきであるが、ここでは洗掘の初期についてのみ述べることにし、渦 (roller) の発生を考慮した第3の領域に対する考察は第2報として発表することにする。

(1) 局所洗掘に関する基礎的關係

いま Fig. 11 に示すように、座標をとることにすれば、洗掘に対する連続の方程式は、つぎのようあらわされる。

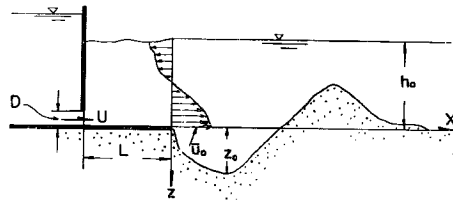


Fig. 11 Schematic diagram for coordinate system.

$$\frac{\partial z}{\partial t} - \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0, \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 z : 洗掘深さ、 x : 水たたき先端より下流方向にとった距離、 t : 時間、 λ : 砂礫の空隙率を100で割った値であり、また q_s は距離 x を通過する砂礫の移動量である。洗掘現象の進行にともなう流れの変化をあらわす関係、すなわち水流の運動方程式に立脚した砂礫の移動量 q_s の一般的表示ができれば、(4)式から洗掘深さの時間的変化のみならず洗掘形状までも求められることになる。いうまでもなく、この場合は洗掘の進行にともなう水流の特性を数式的に表示し、さらにそれにもとづく砂礫の移動量を表わす関係を見出さなければならない。

これに反して、洗掘形状がある基準長に対して相似的に表示される場合には、(4)式はつぎのようあらわされる。すなわち、基準長として最大洗掘深さ z_0 を用いて、洗掘形状が経過時間や砂礫の特性などに関係なく、

$$f(z/z_0, x/z_0) = 0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

であらわされると仮定する。 $\eta = z/z_0$, $\zeta = x/z_0$ および $\zeta_l = l/z_0$ として、(4)式を水たたきの先端 $x=0$ から $x=l$ まで積分すれば、洗掘に対する連続の方程式として、つぎの表示がえられる。

$$\frac{\partial z_0}{\partial t} \left\{ \zeta_l \left(\frac{1}{2} \right) \right\} \eta d\zeta = \frac{1}{(1-\lambda)} \{ q_s(\zeta_l) - q_s(0) \}, \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 $q_s(\zeta_l)$ および $q_s(0)$ はそれぞれ $\zeta = \zeta_l$ および $\zeta = 0$ の断面を通過する砂礫の移動量であり、また左辺に含まれる積分は(5)式の関係によって一般には定数であるが、 ζ_l としてどの断面を採用するかにあたってはつぎの点を考慮すべきである。すなわち、洗掘現象の範囲であって上記の積分値が確定でき、さらにその断面を通過する砂礫の移動量が適確に計算できなければならない。 $q_s(0)$ は水たたきの上流部からの砂礫の流入量であって、前述したわれわれの実験の場合には、 $q_s(0) = 0$ である。(6)式は Laursen の洗掘の方程式および椿らが用いたものと同じく、砂礫の移動量の連続性をあらわしたものにほかならない。

洗掘深さの時間的変化を考察する場合に、(4) および (6) 式のいずれの関係を適用すべきかは、前述した説明からつぎのように結論されるであろう。洗掘の進行にともなう洗掘孔の各断面を通過する砂礫の移動量が適確に計算される場合には、(4) 式を適用することによって、洗掘深さの時間的変化と洗掘形状を理論的に求めることができる。しかしながら、洗掘の進行にともなう流れの特性の変化は、一般にきわめて複雑であるから、特別の場合を除いて、その適用範囲はかなり限られるであろう。これに反して (6) 式の場合には、砂礫の移動量を計算する断面をかなり任意に選択することができるので、極端な場合には洗掘孔内の流れの状態が全く不明である場合でも適用することができよう。

(2) 洗掘初期（第1の領域）における洗掘機構

前述したように、水門下流部における局所洗掘現象のうち、その初期すなわち第1の領域においては、洗掘深さは時間とともに直線的に増加するようであり、またこの領域では渦 (roller) はあらわに発生しておらず、流れの状態もあまり変化していないものと考えられる。したがって、洗掘機構は wall jet の特性を適用し、(4) 式にもとづいて考察できるように思われる。しかしながら、水たたき先端付近における砂礫の移動機構はいわば非平衡状態における流砂問題であって、その取扱いは明確でなく、われわれはなんらかの流砂法則を仮定しなければならない。

a) Wall jet の特性：水門下流部に水平な滑面の水たたきを設けた場合の wall jet の特性は、土屋の研究⁹⁾にもとづいて、つぎのように要約されるであろう。まず wall jet の最大流速 $\bar{u}_0$ は、さきに示した記号を用いることによって、

$$\xi \leq 2\alpha^2 \text{ (zone of flow establishment) に対して, } \bar{u}_0/U=1, \dots\dots\dots(7)$$

$$\xi \geq 2\alpha^2 \text{ (zone of established flow) に対して, } \bar{u}_0/U=\sqrt{2\alpha/\sqrt{\xi}} \dots\dots\dots(8)$$

であらわされる。ここに、 $\xi=x/D$ 、および α ：実験定数であって、2.28である。またこれらの関係式は下流水深の影響をうけて、その適用範囲が制約されるが、土屋の実験結果によれば、その範囲は $x/h_0 < 0.288$ である。

つぎに、水たたき床面上の摩擦速度 u^* の分布は、乱流境界層の場合、近似的につぎのようにあらわされる。

$\xi \leq 2\alpha^2$ に対して、

$$\left(\frac{u^*}{U}\right)^2 \left(\frac{UD}{\nu}\right)^{2n/(3n+1)} = \lambda \left\{ \frac{\lambda(2n+1)(3n+1)}{n} \right\}^{-2n/(3n+1)} \xi^{-2n/(3n+1)}, \dots\dots\dots(9)$$

$\xi \geq 2\alpha^2$ に対して、

$$\left(\frac{u^*}{U}\right)^2 \left(\frac{UD}{\nu}\right)^{2n_1/(3n_1+1)} \approx (2)^{-2n_1/(3n_1+1)} \lambda_1 \left\{ \frac{\lambda_1(2n_1+1)(3n_1+1)}{4n_1+1} \right\}^{-2n_1/(3n_1+1)} \\ (2\alpha^2)^{(2n_1+1)/(3n_1+1)} \xi^{-(4n_1+1)/(3n_1+1)}, \dots\dots\dots(10)$$

ここに、 n および n_1 ：境界層内における流速分席として指数法則を仮定した場合の指数であり、それぞれ $\xi \leq 2\alpha^2$ および $\xi \geq 2\alpha^2$ の領域に対応し、実験によれば、 $n=1/7$ (Blasius の法則) および $n_1=1/12$ 、また λ および λ_1 ：抵抗法則に含まれる実験定数であって、それぞれ n および n_1 に対応し、 $\lambda=0.0225$ および $\lambda_1=0.0206$ 、である。

b) 洗掘深さの時間的変化：(4) 式にもとづいて洗掘深さの時間的変化を計算するためには、a) で述べた流れの特性と水たたきの下流端付近における砂礫の移動量に関する法則を知らなければならない。水たたきの上流から砂礫の供給がない場合には、水たたき下流部における砂礫の移動現象は、いわば地面浸食現象における土砂のはく離に相当し¹²⁾、それが現象の大部分を占めるものと考えられる、いわゆる非平衡状態における流砂法則を見出さなければならないことになる。現在著者らはそうした状態を含む流砂理論の確立を試みているが、ここではむしろ平衡状態における流砂法則を適用した場合の実験結果との比較における相違

点を見出すことを目的としよう。したがって、非平衡状態における流砂問題として考察すべき洗掘理論の確立は、つぎの機会に述べることにする。

以上の点を考慮して、さしあたりわれわれは平衡状態の流砂法則として、通常よく用いられるつぎの Kalinske-Brown の公式を適用することにする。

$$q_s/u_*^*d = K[(u_*^*/V_s)^2 - (u_{*c}^*/V_s)^2]^m, \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここに、 q_s : 砂礫の移動量、 d : 砂礫の大きさであって、前述した場合と同様に中央粒径を用いる、 u_*^* : 限界摩擦速度、 K および m : 実験定数であって、Kalinske-Brown によれば、 $K=10$ および $m=2$, である。

(11) 式を (4) 式に代入して、 $t=0$ において $z=0$ の条件のもとに積分すれば、摩擦速度として (9) および (10) 式を用いた 2 つの領域のそれぞれに対して、つぎの関係がえられる。

$\xi \leq 2a^2$ に対して、

$$\begin{aligned} (1-\lambda)\left(\frac{z}{d}\right)\left(\frac{D}{d}\right)^2\left(\frac{\bar{u}_0 D}{\nu}\right)^{n/(3n+1)}\left(\frac{\bar{u}_0 t}{d}\right)^{-1} &= K\sqrt{A}\left(\frac{n}{3n+1}\right)(\xi_0 + \xi)^{-(4n+1)/(3n+1)} \\ &\left\{A\left(\frac{\bar{u}_0}{V_s}\right)^2\left(\frac{\bar{u}_0 D}{\nu}\right)^{-2n/(3n+1)}(\xi_0 + \xi)^{-2n/(3n+1)} - \left(\frac{u_{*c}^*}{V_s}\right)^2\right\}^{m-1} \\ &\left\{(2m+1)A\left(\frac{\bar{u}_0}{V_s}\right)^2\left(\frac{\bar{u}_0 D}{\nu}\right)^{-2n/(3n+1)}(\xi_0 + \xi)^{-2n/(3n+1)} - \left(\frac{u_{*c}^*}{V_s}\right)^2\right\}, \quad \dots\dots\dots(12) \end{aligned}$$

$\xi \geq 2a^2$ に対して、

$$\begin{aligned} (1-\lambda)\left(\frac{z}{d}\right)\left(\frac{D}{d}\right)^2\left(\frac{\bar{u}_0 D}{\nu}\right)^{n_1/(3n_1+1)}\left(\frac{\bar{u}_0 t}{d}\right)^{-1} &= K\sqrt{B}\left(\frac{4n_1+1}{2(3n_1+1)}\right)\xi_0^{(2n_1+1)/2(3n_1+1)} \\ &(\xi_0 + \xi)^{-(10n_1+3)/2(3n_1+1)}\left\{B\left(\frac{\bar{u}_0}{V_s}\right)^2\left(\frac{\bar{u}_0 D}{\nu}\right)^{-2n_1/(3n_1+1)}\xi_0^{(2n_1+1)/(3n_1+1)}\right. \\ &\left.(\xi_0 + \xi)^{-(4n_1+1)/(3n_1+1)} - \left(\frac{u_{*c}^*}{V_s}\right)^2\right\}^{m-1}\left\{(2m+1)B\left(\frac{\bar{u}_0}{V_s}\right)^2\left(\frac{\bar{u}_0 D}{\nu}\right)^{-2n_1/(3n_1+1)}\right. \\ &\left.\xi_0^{(2n_1+1)/(3n_1+1)}(\xi_0 + \xi)^{-(4n_1+1)/(3n_1+1)} - \left(\frac{u_{*c}^*}{V_s}\right)^2\right\}, \quad \dots\dots\dots(13) \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned} A &= \lambda\{(2n+1)(3n+1)/n\}^{-2n/(3n+1)}, \\ B &= (2)^{-2n_1/(3n_1+1)}\lambda_1\{\lambda_1(2n_1+1)(3n_1+1)/(4n_1+1)\}, \quad \left. \begin{aligned} &\dots\dots\dots(14) \end{aligned} \right\} \end{aligned}$$

であり、また $\xi_0 = L/D$, $\xi = x/D$, および $\bar{u}_0$: 水たき先端における wall jet 最大流速, である。

(12) および (13) 式は、前述したように平衡状態における流砂法則にもとづいているわけであるから、当然 $\xi=0$ において最大洗掘深さを示す。したがって、 $\xi=0$ としてあらわされる最大洗掘深さを示す関係は、つぎのようになる。

$\xi \leq 2a^2$ に対して、

$$\begin{aligned} (1-\lambda)\left(\frac{z_0}{d}\right)\left(\frac{D}{d}\right)^2\left(\frac{L}{D}\right)^{(4n+1)/(3n+1)}\left(\frac{\bar{u}_0 D}{\nu}\right)^{n/(3n+1)}\left(\frac{\bar{u}_0 t}{d}\right)^{-1} &= K\sqrt{A}\left(\frac{n}{3n+1}\right) \\ &\left\{A\left(\frac{\bar{u}_0}{V_s}\right)^2\left(\frac{\bar{u}_0 D}{\nu}\right)^{-2n/(3n+1)}\left(\frac{L}{D}\right)^{-2n/(3n+1)} - \left(\frac{u_{*c}^*}{V_s}\right)^2\right\}^{m-1} \\ &\left\{(2m+1)A\left(\frac{\bar{u}_0}{V_s}\right)^2\left(\frac{\bar{u}_0 D}{\nu}\right)^{-2n/(3n+1)}\left(\frac{L}{D}\right)^{-2n/(3n+1)} - \left(\frac{u_{*c}^*}{V_s}\right)^2\right\}, \quad \dots\dots\dots(15) \end{aligned}$$

$\xi \geq 2a^2$ に対して、

$$\begin{aligned} (1-\lambda)\left(\frac{z_0}{d}\right)\left(\frac{D}{d}\right)^2\left(\frac{L}{D}\right)^{(4n_1+1)/(3n_1+1)}\left(\frac{\bar{u}_0 D}{\nu}\right)^{n_1/(3n_1+1)}\left(\frac{\bar{u}_0 t}{d}\right)^{-1} &= K\sqrt{B}\left(\frac{4n_1+1}{2(3n_1+1)}\right) \\ &\left\{B\left(\frac{\bar{u}_0}{V_s}\right)^2\left(\frac{\bar{u}_0 D}{\nu}\right)^{-2n_1/(3n_1+1)}\left(\frac{L}{D}\right)^{-2n_1/(3n_1+1)} - \left(\frac{u_{*c}^*}{V_s}\right)^2\right\}^{m-1} \\ &\left\{(2m+1)B\left(\frac{\bar{u}_0}{V_s}\right)^2\left(\frac{\bar{u}_0 D}{\nu}\right)^{-2n_1/(3n_1+1)}\left(\frac{L}{D}\right)^{-2n_1/(3n_1+1)} - \left(\frac{u_{*c}^*}{V_s}\right)^2\right\}, \quad \dots\dots\dots(16) \end{aligned}$$

なお、以上の諸式に含まれる無次元表示された限界掃流力 $(u_*^*/V_s)^2$ の値は、水門下流部における洗掘限界に関する土屋の研究⁹⁾によれば、Reynolds 数 u_*^*d/ν の値が大きくなると、一樣流れの限界掃流力の場合に比べてかなり小さくなるがわっている。したがって、一般的にいて、砂礫が大きいときには、この場合の限界掃流力に対して、ある程度の修正を必要とするであろう。

（３） 実験結果との比較および考察

洗掘初期における現象の進行を正確に測定することは、水門から噴出する流れの定常性を確保すべきこととあいまって、きわめて困難であるが、Fig. 5 に示される実験結果から、いちおう洗掘深さが時間とともに直線的に変化する洗掘初期の関係を求めることができる。

Fig. 12 はこうした実験結果を整理し、最大洗掘深さが (15) および (16) 式であらわされ则认为、理論曲線と比較したものである。ただし、図中に示した理論曲線は、wall jet の特性を考慮して、 $n_1=1/12$, $\lambda_1=0.0206$ の値を用い、さらに実際の床面は粗面であることなどを考えて、実験結果に一致するように K の値を定め、 $K=7$ をえたが、これは平衡状態における Kalinske-Brown による値 $K=10$ より若干小さ

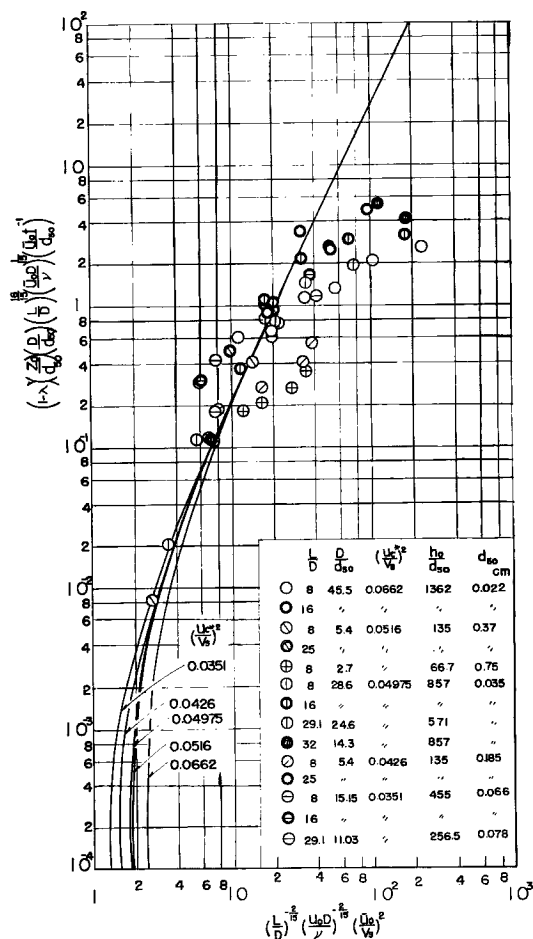


Fig. 12 A comparison between theoretical relationship and experimental results of local scour for initial stage of scour development.

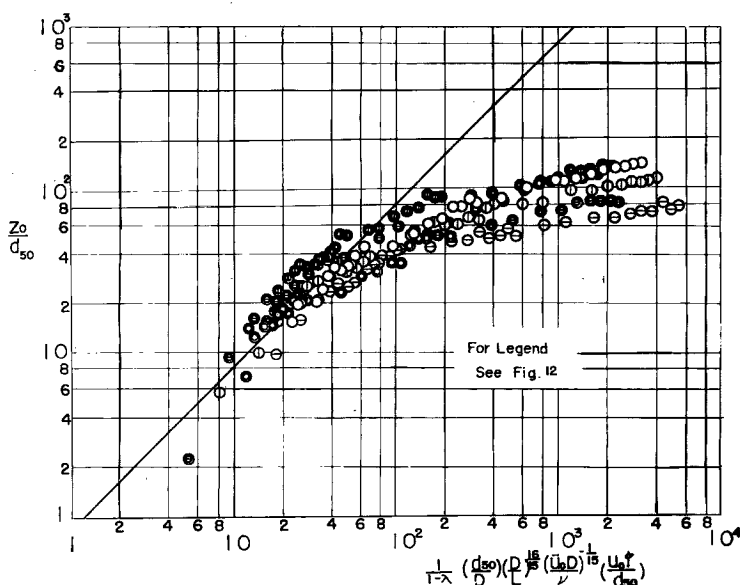


Fig. 13 A comparison between theoretical relationship and experimental results for variations of maximum depth of scour with time for case when $(L/D)^{-2/15}(\bar{u}_0 D/\nu)^{-2/15}(\bar{u}_0/V_s)^2 \approx 20$.

い。実験結果は非常に散乱しているが、いちおう理論的に求められた関係を裏付けていることがわかる。

また Fig. 13 は Fig. 12 において、実験値が最も集中していると考えられる $(L/D)^{-2/15}(\bar{u}_0 D/\nu)^{-2/15}(\bar{u}_0/V_s)^2 \approx 20$ 付近における実験値について、洗掘深さの時間変化をあらわしたものであり、図中の直線は理論結果である。非常に散乱している実験値は、洗掘の初期においてはほぼ理論結果と同じく直線的な傾向を示し、次第に第2の領域へと変化していくことがわかる。なお、(13)あるいは(14)式によって計算される洗掘形状は、もちろん実験結果とは一致しない。

以上の考察は前述したように、平衡状態における流砂法則を仮定していることから、洗掘初期における機構を十分説明するとはいいがたいが、(3)式において示した各無次元量の有意性あるいは Fig. 10 に示した模型実験の相似性などとの関連は、(15)および(16)式あるいは Fig. 12 および13 から、ある程度明らかにされるといってよいであろう。さらに詳しい考察は、当然非平衡状態における砂礫の移動の法則を明らかにしなければならない。

4. 結 語

以上水門下流部における局所洗掘に関する著者らの研究の一部を述べ、洗掘現象の一般的な特性を概括的に説明し、いくつかの興味ある実験事実を示した。洗掘現象の水理学的機構はかなり複雑であって、その適確な表示は、洗掘の進行にともなって発生する渦 (roller) に着目することによって可能と考えられるので、つぎの機会にそれらの結果を報告するつもりである。

最後に、実験や資料整理に助力していただいた海岸災害研究室の諸氏に謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) Bligh, W.G. : Dams and weirs, Amer. Tech. Soci., Chicago, 1918, p. 194.
- 2) Jaeger, C. : Technische Hydraulik, Verlag Birkhäuser Basel, 1949, pp. 447~460.
- 3) Rouse, H. : Criteria for similarity in the transportation of sediment, Proc. Hydr. Conf., Univ. of Iowa, Bull. 20, 1940, pp. 33~49.
- 4) Doddiah, D., Albertson, M.L. and Thomas, R. : Scour from jets, Proc. Minnesota Int. Hyd. Conv., I.A.H.R., 1953, pp. 161~169.
- 5) Iwagaki, Y., Smith G.L. and Albertson, M.L. : Analytical study of the mechanics of scour for three-dimensional jet, Colorado State Univ. Research Foundation, Presented at A.S.C.E. Hydraulic Conference, August 1958.
- 6) Duckstein, L., Iwagaki Y. and Albertson M.L. : Analytical study of the mechanics of scour for two dimensional jet, Prepared for U.S. Bureau of Public Roads under Contract CPR11 5504, April 1960.
- 7) Laursen, E.M. : Observations on the nature of scour, Proc. 5th Hyd. Conf., State Univ. of Iowa, Bull. 34, 1952, pp. 179~197.
- 8) 椿東一郎, 齊藤隆 : 突堤による河床の洗掘について, 山口大学工学部紀要, 昭36, pp. 71~80.
- 9) 土屋義人 : 水門下流部における洗掘限界に関する研究, 土木学会論文集, 第82号, 昭37, pp. 21~51.
- 10) 岩垣雄一, 土屋義人, 今村正孝 : 水平噴流による洗掘に関する二, 三の実験, 第6回水理研究会講演概要, 昭36, pp. 11~14.
- 11) 岩垣雄一, 土屋義人, 今村正孝 : 水門下流部における局所洗掘に関する研究, 第8回土木学会年次学術講演会講演概要, 昭38, pp. 77~80.
- 12) 岩垣雄一, 土屋義人 : 雨水流による土砂の剝離と輸送について, 土木学会論文集, 第51号, 昭32, pp. 34~40.