

水門下流部における洗堀 - 間欠的洗堀 -

齋藤 隆*・大成 博文**・赤司 信義***・亀田 芳満*

The local scour from flows at downstream of an outlet
—Intermittent scour—

Takashi SAITOU, Hirofumi OHNARI,
Nobuyoshi AKASHI, Yoshimitsu KAMEDA

Abstract

In previous investigation which is concerned with the local scour in case of the water depth downstream of an outlet was deep sufficiently, it becomes clear that the shape of scoured fall and an increasing rate of maximum scoured depth almost coincide quantitatively theoretical curve based on scour model have been proposed by the author. In practical case, there are not a little instance of shallow water depth downstream of an outlet, and under such circumstance we often find the phenomenon that in the process of scour direction of issuing flows turn to upward (separated flow) from downward (reattached flow). The authors called this phenomenon 'intermittent scour' downstream of an outlet.

This time we make an experiment of scour from flows downstream of an outlet with systematic change of water depth downstream, and attempt to explain the intermittent scour phenomenon in relation to the properties of curved jets which reattached to flat plate stepped down, and it has been become clear experimentally that the maximum scoured depth at constant non-dimensional time was so decrease as to shallow the water depth downstream.

1. 緒 言

治水および利水を目的として、水門やカルバートなどの水理構造物が数多く設置されているが、これら構造物からの放流水は、渦および副流を伴い、強烈なる洗堀作用をもつ流れである。これら構造物の下流部における局所的河床変動は、一般にそれらの水理機能をそこない、我々の設置目的を阻害するものである。

水門下流部における洗堀は局所洗堀に関する基礎的な問題として多くの研究^{1)~5)}が行なわれてきた。著者⁶⁾はこれらの研究において考慮されていなかった噴出流の湾曲を導入して洗堀機構について考察し、洗堀形状および最大洗堀深さの時間的な変化などをかなりの程度まで計算によって量的に評価できることを前報において報告した。しかしながら、これらの研究のほとんどは下流水深が十分深い場合⁷⁾について行なわれてい

て、実際の水門下流における水深は下流の条件によって規定され、浅い場合が少なくない。下流水深が浅い場合^{8)~10)}、水門下流部における洗堀をみると、洗堀の途中で下向き噴流 (**Reattached flow**) が上向きの流れ (**Separated flow**) に変わって洗堀穴が埋めもどされていき、洗堀穴がある程度まで浅くなると再び流れが下向き噴流となって急激に洗堀され、以後埋めもどしと洗堀とが間欠的に繰り返されていく現象がみられる。

間欠的洗堀は河床の複雑な変動と流れの湾曲方向の急変とが、密接に関連した複雑な現象であり、間欠的洗堀の発現には下流水深が大きな役割を果たしているものとみられることより、下流水深を系統的に変えた洗堀実験を行ない、間欠的洗堀の発生限界および噴出流の偏流方向の間欠的な変化などについて若干の考察を行なった。

* 土木工学科

** 徳山工業高等専門学校土木建築科

*** 西日本工業大学土木工学科

2. 実験装置と実験方法

実験に使用した水槽は図-1に示してある両面有機ガラス張りの鉄枠製のもので、上流端には噴出厚が調節できる噴流発生装置を、下流端には水槽内水深を調節する可動堰が設置されている。

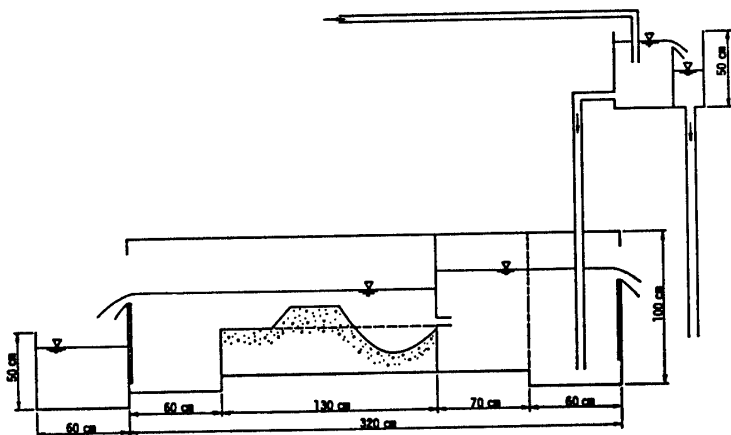


Fig-1 Experimental apparatus

実験砂は図-2に粒度加積曲線を示したほぼ均一とみなせる砂で、その特性を図の下方に表として掲げている。ここに d は中央粒径(50%粒径), w_0 はRubeyの式によって求めた中央粒径砂の洗降速度, U_{*co} はほぼ水平な砂面上にある砂粒の限界摩擦速度で岩垣の式でもって計算した値である。

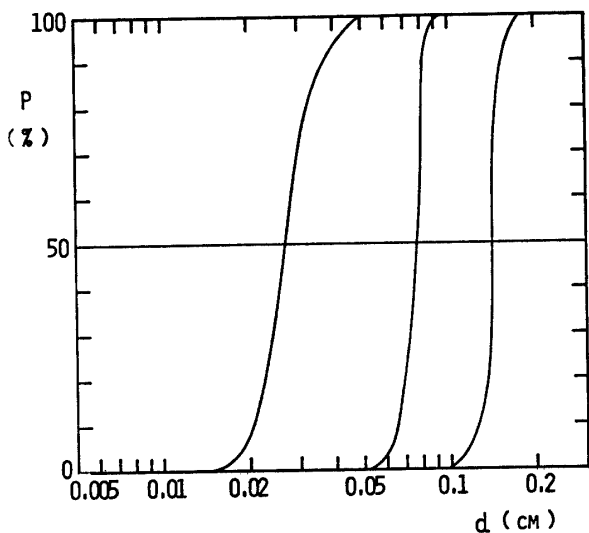


Fig-2 Particle-size accumulation curves of aggregate

洗堀形状および最大洗堀深さの時間的変化はモータードライブを装備したカメラでもって側面より撮影し、実寸の1/2の大きさに投影して読み取った。実験開始より中期洗堀までは1/4秒の時間間隔でもって連続撮影をし、それ以後は対数時間間隔(対数目盛上で同間隔になる)で撮影した。洗堀と埋めもどしとが交互に繰返す間欠的洗堀においては、上述の撮影時間の前後において洗堀の状態(下向き噴流)から埋めもどし(上向き噴流)が始まる直前および埋めもどしの状態から洗堀が始まる直前における洗堀形状を撮影した。

間欠的洗堀において、下向き噴流から上向き噴流に、および上向き噴流から下向き噴流に変わる時間を知るために、すなわち、洗堀状態および埋めもどしの状態にある時間を知るために、噴出孔の直ぐ下流断面における水位の時間的変化を静圧管-差圧計-ペン書き記録計でもって

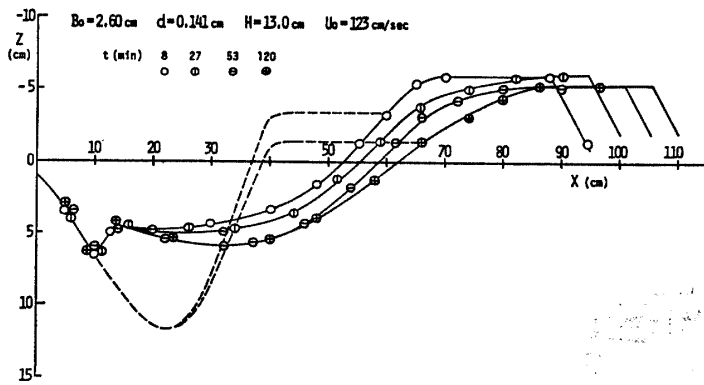
記録した。

3. 実験結果および考察

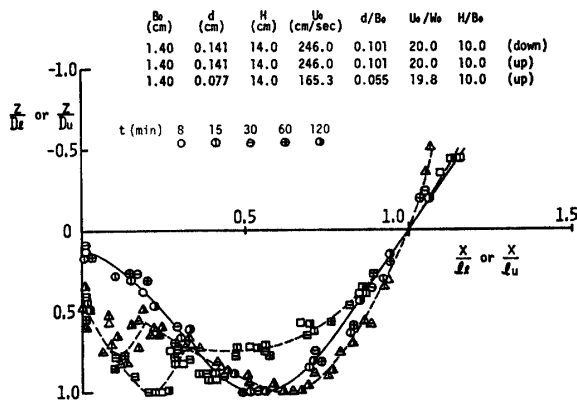
3-1 洗堀形状

洗堀の進行状態を明らかにするために、洗堀の状態から埋めもどしが始まる直前、および埋めもどしから洗堀が始まる直前における洗堀形状を図-3に示す。図中に破線で示してある埋めもどしが始まる直前における洗堀形状は、実験時間によってあまり大きく変化していないが、洗堀が始まる直前における洗堀形状をみると、洗堀深さ(埋めもどし深さ)はあまり変化していないが、洗堀長は実験時間とともに長くなっていき、洗堀穴下流の堆積部はその堆積高さを減少し堆積長を増大しながら下流に移動している。

洗堀形状を最大洗堀深さ D および洗堀長 l でもって無次元化したものが、図-4である。図中の基準長について添字 u および l は洗堀が始まる直前および埋めもどしが始まる直前におけるものを表わす(図-7を参照)。図中に○印で示してある埋めもどしが始まる直前における洗堀形状は、その平均曲線を実線でもって示してあるが、前報で報告した水深が十分深い場合における洗堀形状と一致する。このことより、洗堀状態にある洗堀穴内における流れおよび砂移動の状態は前報において、モデル化したものとあまり違わず、その付近における水深の影響は大きくないものと



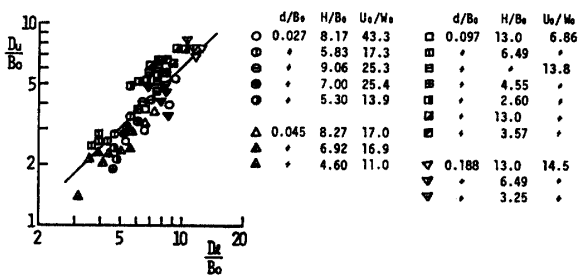
Fig— 3 Shape of scour hole



Fig— 4 Shape of scour hole with non-dimensional measure

推測される。一方、洗堀が始まる直前における洗堀形状をみると、最大洗堀深断面が埋めもどしされている断面である(△印の描点)ときと、埋めもどされていない断面である(□印の描点)ときとによって無次元洗堀形状は大きく違っている。これは洗堀穴の埋めもどされ方が噴出流速 u_0 、河床砂 d および下流水深 H による微妙な違いによるものと考えられる。

段落境界面に再接触する湾曲噴流の偏流方向は境界面の性質にはほとんど関係せず、境界面までの距離によって決まるので、噴出流の湾曲方向が変わる直前、すなわち洗堀および埋めもどしが、始まる直前にお

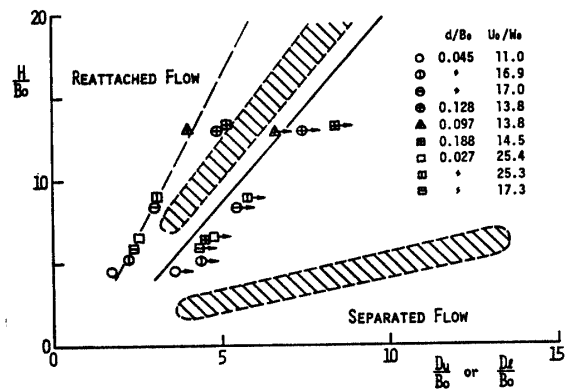


Fig— 5 Relation between D_u/B_0 and D_f/B_0

る最大洗堀深さ D_u と D_f との関係調べたのが、図— 5 である。測定が瞬間的であり、かつ急激に変化する現象であることによる測定誤差があるので、実験描点はかなり散乱しているが、大雑東にみて $D_u/D_f \approx 0.6$ の関係があるとみられる。段落境界面による実験におけるこの値 0.25 に較べかなり大きいのが、境界面形状の違いによるものであろう。

3・2 間欠的洗堀の発生限界

最初の埋めもどしが始まる直前の最大洗堀深さ D_f/B_0 (間欠性洗堀の発生) およびその直後の洗堀が始まる直前の最大洗堀深さ D_u/B_0 と十分下流における水深(堆積部の影響がない地点) H/B_0 との関係は湾曲噴流の偏流限界と較べたものが図— 6 である。図中の斜線部分が、段落境界面による実験描点の範囲で、矢印付の描点が埋めもどしが始まる直前、すなわち流れが下向き (Reattached flow) から上向き (Separated flow) へ変るときの最大洗堀深さ D_u/B_0 である。埋めもどしの状態から洗堀が始まる直前における洗堀形状は、図— 3 でみられるように、洗堀長が洗堀深さの 10 倍程度と大きいので、Separated flow より Reattached flow への変流限界は段落固定床 (図の上方斜線図) の場合と洗堀実験の場合とはあまり変わらず、また間欠的洗堀長が洗堀深さに対して相対的に大きくなっていき、図— 6 の Separated flow より Reattached flow への変流限界の実験描点は右側に移動して、段落固定床による実験結果に一致していく。一方、最初の下向き流れ (Reattached flow) から上向き流れ (Separated flow) へ変る D_u/B_0 と H/B_0 との関係は段落境界面への偏流限界と著しく違っている。このことは洗堀形状が段落境界面と著しく違うことによるもので、洗堀砂面に沿って噴き上げる流れによって噴出流の上部に明瞭な



Fig— 6 Criterion for occurrence of intermittent scour

る Roller がみられ、Roller 内の圧力低下が偏流方向の変化に大きく影響しているからである。

間欠的洗堀の繰返しによって、両偏流限界の実験描点はわずかつつ右側に移動していく、すなわち実験時間の経過によって D_u/B_0 および D_l/B_0 が大きくなっていく。一定の下流水深 H/B_0 に対して、 D_l/B_0 および D_u/B_0 が大きくなっていくことと、噴出流の湾曲方向が境界面の幾何学的関係でもって決まることとの矛盾は次のように説明される。下流水深 H/B_0 は河床変動の影響を受けない下流において測定され、一定値であるが、洗堀穴下流の堆積部は実験経過時間とともに長くなっていき、この区間における損失水頭の増加分だけ洗堀穴付近における水位が上昇し、この水位上昇量に対応して D_l/B_0 および D_u/B_0 が大きくなっていくのである。

3.3 間欠的洗堀の周期

間欠的洗堀において、洗堀（埋めもどし）が始まってから、次の洗堀（埋めもどし）が始まるまでの時間 T を周期と呼ぶことにし、次元解析的手法によって周期 T を規定するパラメーターについて検討する。

下向き噴流（再接触流）による洗堀はきわめて急激に行なわれて、比較的短時間で終り、Separated flow の連行流の補給のために生ずる逆流流れによる砂移動での埋めもどしは緩慢なる現象であって、周期 T の大部分の時間が埋めもどしの時間であるので、周期 T を埋めもどしに要する時間であるとみなすことにする。

図-7に示した、一周期間に洗堀穴が埋めもどされる砂量 ΔV は図-5および図-6の関係を用いて次のように書ける。

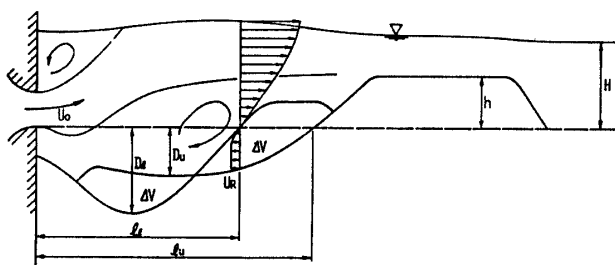


Fig. 7 Definition sketch of the scour phenomenon

$$\Delta V \propto (D_l - D_u) l_t \propto H \cdot l_u \quad (1)$$

一周期間において時間的・場所的に平均した逆流流れによる流砂量を q_B 、これに対応する砂面上の逆流流速を U_R として、流砂関数を Brown 式形でもって与えることにする。

$$\frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} \propto \left(\frac{u_*^2}{sgd} \right)^n = \left(\frac{u_0}{\sqrt{sgd}} \cdot \frac{u_R}{u_0} \cdot \frac{u_*}{u_R} \right)^{2n} \quad (2)$$

時間平均した流砂量が q_B であるような断面位置は、埋めもどし砂粒の平均移動距離が l_u に比例したものであることより、噴出孔より l_u に比例した距離にあるものと考えてよいであろう。この断面における砂面上の逆流流速 u_R は、その断面の水表面流速（噴出流の断面内最大流速）に比例したものであろう。したがって、前報で実験的に調べた段落境界面に沿うて拡散する湾曲噴流による壁面噴流の最大流速の変化を用いると、

$$\frac{u_R}{u_0} = \frac{u_R}{u_m} \cdot \frac{u_m}{u_0} \propto \left(\frac{l_u}{B_0} \right)^{-1/2} \quad (3)$$

が期待される。

u_R/u_* は砂面上の境界層内流速分布によって規定されるが、ここでは周期 T を規定するパラメーターを推定することを目的としているので、簡単に

$$\frac{u_R}{u_*} = \varphi = \text{const} \quad (4)$$

とおくことにする。

砂量に関する連続の条件

$$\Delta V = q_B \cdot T$$

に式(1)~(4)の関係を代入し、整理すると次式が得られる。

$$\left(\frac{u_0^2}{sgd} \right)^n \cdot \frac{\sqrt{sgd^3} \cdot T}{B_0} \propto \frac{H}{B_0} \left(\frac{l_u}{B_0} \right)^{n+1} \quad (5)$$

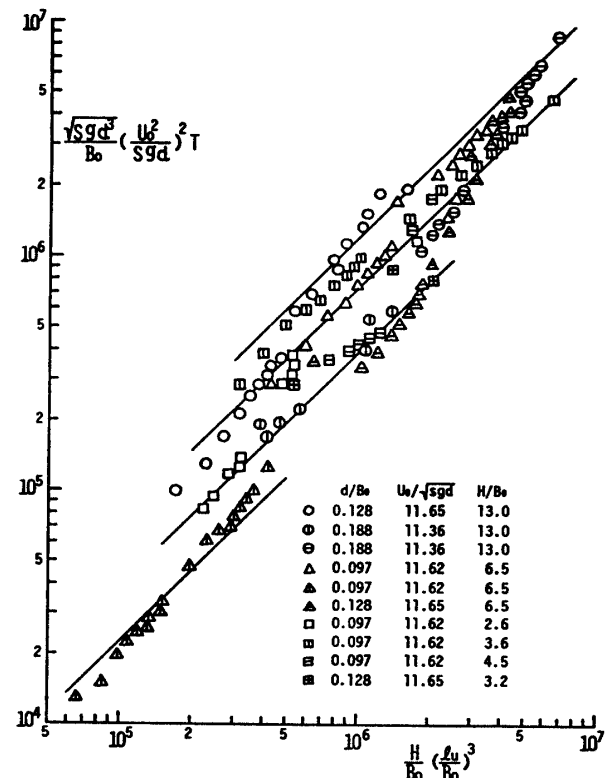


Fig. 8 Cycle of intermittent Scour

逆流流れによる砂移動は掃流形式で、式(2)の指数は $n=3/2$ が適当であるとされているが、現象をみると流砂強度は小さく、また式(2)において限界掃流力による補正項を省略しているため、これらを考慮して $n=2$ とおいて(5)の関係でもって実測した周期 T を図示したものが図-8である。図中の直線は式(5)の関係を表わすものであり、一実験の描点はほぼこの直線に平行となっている。実験描点が多数の直線群にわかれていて、砂粒の限界掃流力や一周期間における洗堀時間（あるいは洗堀強さ）などの要素が関連するものと考えられ、これらについてはより詳細で組織的な実験と詳細な考察が必要である。

3.4 最大洗堀深さ

水深が十分深い場合の洗堀と間欠的洗堀とでの最大洗堀深さの時間的変化を比較したものが図-9である。図中の曲線は前報で提案した流れおよび砂移動のモデルによって行なった洗堀計算の結果である。図をみると、間欠的洗堀現象がみられるまでの最大洗堀深さの時間的変化は下流水深に関係せず、計算結果との合致も良好である。一方洗堀が進行して、間欠的洗堀現象が現われると、最大洗堀深さの増加する割合は急激に小さくなっている。埋めもどしが始まる直前における洗堀穴の形状（図-4）が下流水深に関係なく下

流水深が十分深い場合におけるものと同じであること、および間欠的洗堀が現われるまでの最大洗堀深さの時間的変化が変わらないことから、本実験を行なった下流水深の範囲では、下流水深の下向き噴流による洗堀に与える影響はほとんどないものとみられる。

図-9 でみられるように、一定の実験時間後における最大洗堀深さ D_c は下流水深が十分深い場合のものより小さく、間欠的洗堀の発現する洗堀深さが、下流水深によって規定されることより、無次元時間 $\tau = \sqrt{sgd}/u_0 \cdot u_0 \cdot t/B_0$ に非定常状態の流砂強度 $\phi = q_B/\sqrt{sgds}$ を規定する主要なパラメーターである

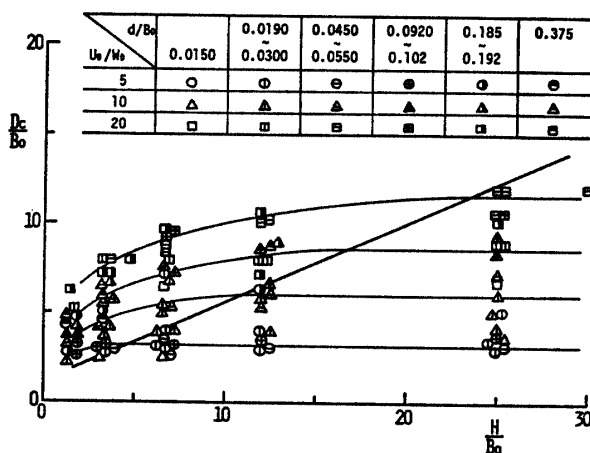


Fig-10 Relation between D_c/B_0 and H at $\tau = (u_0^2/g \cdot B_0) \cdot (U_0 \cdot t/B_0)$

$(u_0^2/sgd)^{3/2}$ および d/B_0 を結合させた無次元時間 $\tau = u_0^2/gB_0 \cdot u_0 \cdot t/B_0 = 10^6$ での最大洗堀深さを下流水深に対して描いたものが図-10である。図中の直線は図-6に直線で示した間欠的洗堀の発生限界であり、曲線は下流水深 H/B_0 以外の実験条件は、全て同じにしたときの実験描点の平均曲線である。図をみると、間欠的洗堀の発生限界より、右側の領域においては間欠的洗堀現象はみられず、一定の無次元時間での最大洗堀深さは下流水深に関係なくほぼ一定値である。なほ、間欠的洗堀の発生現界を実験式化すると次式となる。

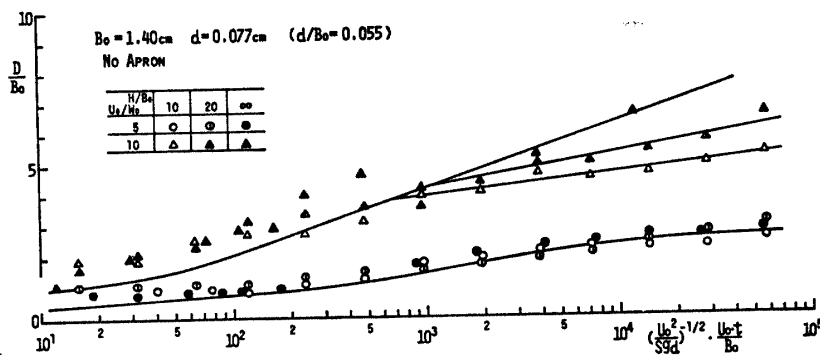


Fig-9 (a) Variation in maximum depth of scour hole with time

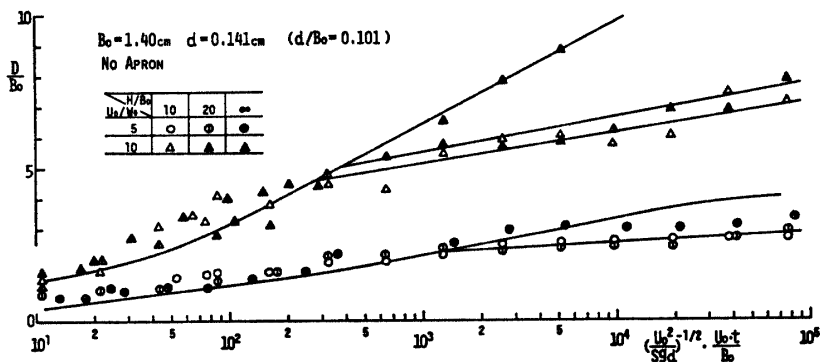


Fig-9 (b) Variation in maximum depth of scour hole with time

$$\frac{D_c}{B_0} = 1.0 + 0.45 \frac{H}{B_0} \quad (6)$$

水門やカルバートなどの下流部における洗堀を軽減あるいは防止するために、水たたきや減勢工がしばしば用いられている。前報において、水門下流部における洗堀を完全に防止することを目的として、水たたき下流部における洗堀限界について実験を行ない、若干の検討を加えたが、ある程度の洗堀が容認されるならば、今回実験的に検討した間欠的洗堀の特性を利用して、洗堀を軽減することが可能と考える。すなわち、噴出孔を下流水面なるべく近づけて設置し、同時に噴出孔下流に段落境界面を設けることは、噴出流の流れの状態を上向き噴流 (Separated flow) の状態に拘束して噴出流の運動エネルギーを水表面に集中させることになるので、水門下流部における洗堀の軽減、ひいては防止に対する有力な一手段となりうるであろう。洗堀の軽減に対してもっとも有効である噴出孔の設置位置については、今後十分に検討することが必要である。

4. 結 語

水門下流部における間欠的洗堀について実験を行ない、水平噴流による洗堀および湾曲噴流の特性と関連させて、実験結果について若干の考察を行なった本文を要約すれば次のようになる。

- 1) 間欠的洗堀現象は洗堀形状を考慮することによって、湾曲噴流の偏流限界条件より定性的によく説明することができる。
- 2) 間欠的洗堀の発生は下流水深によって規定され、発生限界の最大洗堀深さは式(6)で与えられる。
- 3) 間欠的洗堀においても、再接触流による洗堀は下流水深の影響はなく、前報の下流水深が十分深い場合における洗堀機構が適用できる。
- 4) 間欠的洗堀になると、図-9のように最大洗堀深さの増加する割合が極端に小さくなり、一定無次元時間で最大洗堀深さは図-10のように減少する。
- 5) 間欠的洗堀の周期は式(5)の関係で大要が与えら

れるが、これは洗堀穴下流に形成される砂堆部の形状および規模に影響されるとみられる。

6) 水門下流部における洗堀を軽減するのに、噴出孔を下流水面近くに設置し、段落境界面を設けて噴出流を上向き噴流流れに拘束することが有力な一手段となることが考えられる。

以上が本実験によって得られた結果の大要である。

謝辞；本研究の遂行にあたり、終始御指導を賜わった九州大学 椿 東一郎教授に深く感謝する。また実験および資料整理に多大なる協力をいただいた林 建二郎、松尾真治、前田和雄、松下浩之、楠元巖の諸氏に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Laursen, E.M: Observation on the nature of scour, Proc. 5th Hyd Conf, State Univ of Iowa, Bull. 34, 1952
- 2) 岩田雄一, 土屋義人, 今村正孝: 水門下流部における局所洗堀に関する研究(II), 京都大学防災研究所年報, 第8号, (1965)
- 3) Tsuchiya, Y: On the mechanism of local scour from flows at downstream of an outlet, Proc. 12th cong of the I.A.H.R, Vol No. 3, (1957)
- 4) 石原藤次郎: 応用水理学中 I, (1958) P 88
- 5) 椿東一郎, 齋藤隆: 突堤による河床の洗堀について, 山口大学工学部学報, 13, No. 1 (1963)
- 6) 齋藤隆: 水平噴流による洗堀に関する研究, 土木学会論文集へ投稿中,
- 7) 齋藤隆, 玄場康政, 稲田正文: 水門下流部の洗堀, 土木学会中国四国支部第29回学術講演概要集, (1977)
- 8) 齋藤隆: 境界の影響を受ける水平噴流の特性, 土木学会第23回年次学術講演概要集, 第II部門, (1968)
- 9) 荻原国宏, 清水哲, 一瀬貞一: 床固め工下流部洗堀防止工の効果についての実験, 土木学会第23回年次学術講演概要集, 第II部門, (1968)
- 10) 齋藤隆: 水平噴流による洗堀について, 土木学会中国四国支部第23回学術講演概要集, (1971)
- 11) 齋藤隆, 林建二郎: 境界の影響を受ける水平噴流の特性, 土木学会中国四国支部第25回学術講演概要集, (1973)

(昭和52年10月14日受理)