

波状流による水叩き部下流の局所洗掘の研究

Local Scour Downstream of Apron by the Wave Type Flow

川越信清*・工藤 明**・佐藤文彦***

By Nobukiyo KAWAGOSHI, Akira KUDO and Fumihiko SATO

This experimental study treats the local scour at downstream reaches of apron and drop channels under the wave type flow with a large-scale stationary wave.

Firstly, the occurrence conditions and flow configuration of the wave type flow are clarified. Next, the characteristics of the longitudinal and plane profiles of scour holes and maximum scour depth are discussed. In addition, the characteristics of velocity distribution in scour holes are discussed.

Keywords: local scour, apron, wave type flow, hydraulic jump

1. はしがき

頭首工などの水理構造物からの射流の減勢は、一般に水叩き部上で跳水を発生させて行うが、上下流の水理条件および下流河川の河床低下によって水叩き部を射流のまま流下し、水叩き部下流に多大な局所洗掘を引き起こし、水理構造物の安全性を脅かすことになる。水叩き部を射流で流下する場合、大規模な定常波をもつ波状流が粗度の急変および水叩き部とその下流部の水位差による下流側からのback pressureによって水叩き末端部に発生することがある。水叩き下流部の洗掘対策を検討するには、種々の流況について考慮しなければならないが、これまでの局所洗掘の研究は、もぐり噴流および限界流に近い流況で行われていて、波状流による洗掘特性は明らかにされていない。また限界流に近い流況での局所洗掘では、種々の流況が繰り返されていて、その流況の一つに波状流があり、洗掘の埋め戻し過程として作用していることが観察され考究されているが¹⁾、大規模な定常波のもつ波状流のみによる洗掘はこれまで取り扱われていない。

本研究は、水叩き下流部に段落ち水路の無い場合と有する場合に発生する大規模な定常波をもつ波状流に

* 正会員 博士(農学) 弘前大学教授 農学部農業システム工学科

(〒036 青森県弘前市文京町3)

** 正会員 弘前大学講師 農学部農業システム工学科

(〒036 青森県弘前市文京町3)

*** 宮城県、石巻土地改良事務所

(〒986 宮城県石巻市東中里一丁目4-32)

よる洗掘特性を実験的に明らかにする。また、水叩き部上に跳水先端を持ち、跳水表面渦の終了点の水叩き末端部にある跳水(A跳水とする)および跳水先端が段落ち水路にある跳水(B_{min} 跳水とする)による洗掘との比較検討を行う。さらに波状流によって洗掘されている洗掘穴内の流速分布特性についても考究する。

2. 実験装置と方法

実験に用いた水路は、幅68.5cm、高さ70cm、長さ23mの長方形断面水路で、洗掘実験はその水路の上流9m区間で行った。実験装置および流況の概要は図-1に示す。(a)図は段落ち水路の無い場合で、A跳水と波状流による洗掘実験を行った([A実験]とする)。水路上流端から2m区間は滑面水叩き部(アクリル板使用)で、水路底から30cmの高さに水平に設置されている。移動床区間は水叩き末端から4.0mで、移動床面は水平にした。移動床部末端から下流2.7mの位置に水位調節の傾斜堰が設置されている。水路上流端には、射流発生のためのスルースゲートが設置されている。(b)図は水叩き部下流に段落ち水路を有する場合で、水叩き底面から高さ5cmの段差(s)の水平段落ち水路を設置し、 B_{min} 跳水と波状流による洗掘実験を行った([B実験]とする)。その段落ち水路部の長さ(L)は30cm~150cmの範囲で6種類を用いた。移動床部の高さは、段落ち水路底面と同一にした。

両実験のスルースゲートの開度は5cmとし、用いた流量の範囲は37(l/sec)~86(l/sec)で、水叩き部の射流フルード数(Fr_1 数)は2.6~6.0である。実験に用いた移動床材料は中砂と細礫の2種類で、それぞれの中央粒径(d_{50})は、中砂で0.40mm、細礫で3.85mmである。

各実験は移動床材料が流水によって移動しないようにあらかじめ移動床上面に薄いビニールシートまたは金網を敷いておき、任意の射流を流し、下流水位調節により実験流況を作った後にビニールシートまたは金網を取り除き、洗掘実験の開始とした。実験中、上流からは砂礫の供給は行っていない。任意の実験流況を保つために実験中でも下流水位の調節を行った。

経過時間(t)ごとの最大洗掘深および洗掘形状の測定は、水路中心線上とガラス面の側面から行い、水路中心線上での測定には砂面測定器(計測技研)を用いた。カメラとビデオ撮影も行い、洗掘状況の考察に利用した。洗掘がほぼ平衡状態に達した通水5時間の洗掘を最終洗掘とした。

洗掘穴内の流速測定は外径6mmの電磁流速計(アレックス電子)で、通水3~4時間後に水路中心線上で行った。通水5時間後に通水を止め、水を排水した後に洗掘形状の平面測定を5cm間隔の格子点で行い、平面洗掘形状を求めた。

なお、水叩き部下流部の移動床が洗掘、移動されない状態での波状流発生条件の実験は、移動床材料として細礫を用い、その細礫が洗掘および移動しないように細礫上全面に金網を固定して行った。

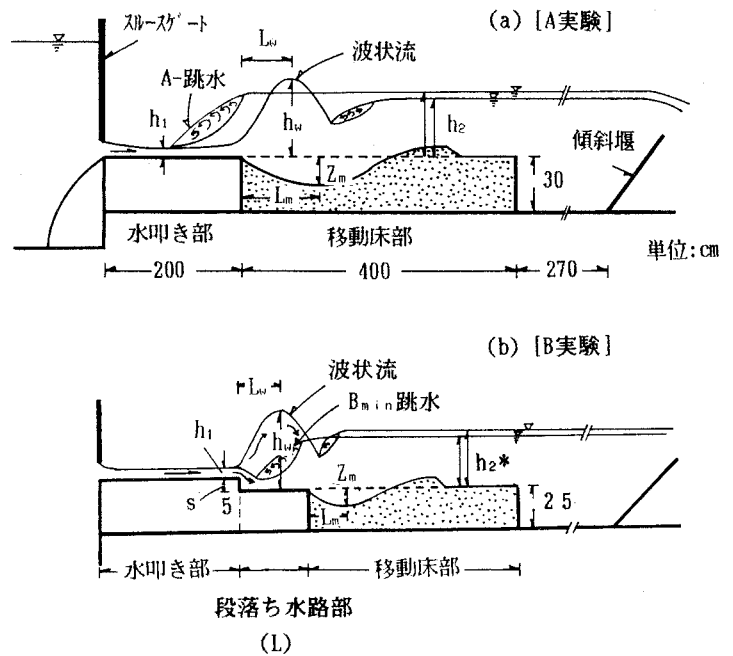


図-1 実験装置と流況

3. 実験結果と考察

3. 1 波状流の発生と水面特性

水叩き下流の移動床部が透水性のある砂、砂礫からなっている場合、水叩き末端部で段落ち部の要素と粗度急変の要素が作用して、大規模な定常波を有する波状流が発生する。洗掘進行中でも、洗掘穴が段落ち部と類似した状況で作用して、波状流が持続する。図-2は波状流発生時の h_2/h_1 および h_2^*/h_1 (h_2 :水叩き部の床面を基準、 h_2^* :段落ち水路底面を基準)と射流 Fr_1 数との関係である。図中の●印は移動床部を洗掘させない場合の実験値であり、 h_2/h_1 と Fr_1 数との間にほぼ比例関係があり、(1)式の関係が求められた。

$$\frac{h_2}{h_1} = 1.375Fr_1 - 0.65 \quad \cdots \cdots (1)$$

図中の太い縦実線は洗掘時の波状流の発生範囲である。洗掘開始時では(1)式で示した下流水深(h_2)で波状流が発生しているが、洗掘の進行とともに h_2 を小さくすることによって波状流を維持することでき、実験開始1時間後には、太い縦実線の下限值で波状流を安定維持することができた。この下限値の実験式として(2)式が得られた。

$$\frac{h_2}{h_1} = 0.98Fr_1 + 0.22 \quad \cdots \cdots (2)$$

水叩き部下流に洗掘が生じているとき、下流水位が(1)式と(2)式の範囲内であれば水叩き末端部に大規模な波状流が発生することになる。

一方、段落ち水路部の有する[B実験]での波状流の発生は、図-2に○、□、△印で示した。この場合の下流水深には h_2^* を用いている。実験値はKawagoshi and Hager²⁾の求めた段落ち部の波状流発生条件式(図中の一点鎖線)にほぼ一致している。ただし段落ち水路長(L)が50cm以下の場合(○印)は、洗掘進行とともに h_2^* の値が小さくなっていくが、これは波状流の段落ち水路床に衝突する位置が段落ち水路外になるためである。

図-3は波状流の無次元化した水面形状の代表例である。縦軸の水深($h-h_1$)は波状流の最高高さ(h_w-h_1)で無次元化しており、横軸の流下距離(x)は水叩き末端から最高高さまでの水平距離(L_w)で無次元化してある。

段落ち水路の有無、洗掘の有無および流入 Fr_1 数の変化に関わらず、各波状流の水面形状は相似形を示している、(3)式の関係が得られた。

$$\frac{(h-h_1)}{(h_w-h_1)} = \left[\frac{x}{L_w} \exp\left(1 - \frac{x}{L_w}\right) \right]^{4.5} \quad \cdots \cdots (3)$$

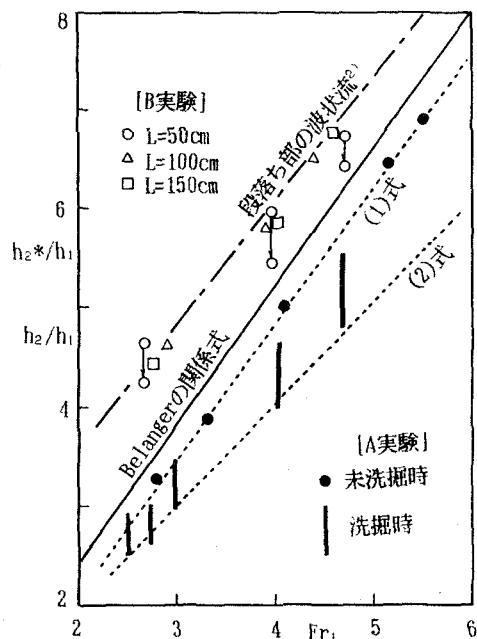


図-2 波状流の発生条件

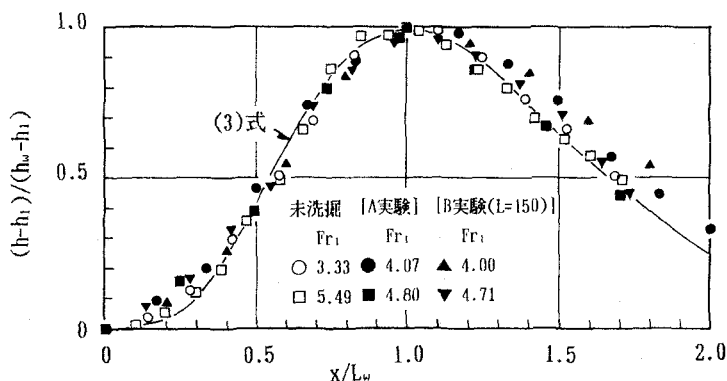


図-3 波状流の水面形状

また、波状流の最高高さの位置(h_w, L_w)は、急段落ち部の波状流で求めた(4)式および(5)式の関係²⁾とほぼ一致していた。

$$\frac{h_w}{f} = 1.7 \cdot F_d^{-3.6} \quad \dots\dots(4)$$

$$\frac{L_w}{f} = 1.75 \cdot F_d^{-3.6} \quad \dots\dots(5)$$

ここで、 $F_d = V_1 / [g(h_2 - s)]^{1/2} = [h_1 / (h_2 - s)]^{1/2} \cdot Fr_1$ 、 $f = (V_1^2 / 2g)(h_2 / h_1) = (h_2 / 2) \cdot Fr_1^2$ である。

3. 2 波状流の洗掘状況

[A実験]の波状流による洗掘は、水脈が下流水面に突入し移動床面に衝突している地点から発生している。砂礫はその衝突点の上流側では波状流内の回転流によって巻き上げられ、衝突点の下流側では主として掃流形式で下流に移動し、洗掘は水脈の衝突点を中心に進行していく(初期洗掘過程)。波状流内の回転流で洗掘が進行し、上流側に運ばれていく砂礫は、移動床上流端での上昇水脈と回転流で巻き上げられ、衝突点付近に戻され、回転流によって再び洗掘上流斜面へ移動していく。回転流で上流に運ばれる砂礫量が上昇水脈で巻き上げられる砂礫量より多くなると、移動床上流端から砂堆の形成が開始され、この砂堆は時間の経過とともに発達し、洗掘も同時に進行していく(中期洗掘過程)。この砂堆形成が波状流洗掘の特色であり、洗掘される量と回転流で上流部に運ばれる量および下流部へ流下していく量の砂礫移動収支のバランスがとれると、上流部の砂礫堆の進行はとまり、一定の形状になり、ほぼ定常な回転流で洗掘が進行していく(後期洗掘過程)。

図-4は、[A実験]の波状流による後期洗掘の水路中心線上の縦断形状図、平面形状図(Fr_1 数=4.8のみ)および最大洗掘深位置での横断図の一例であり、洗掘穴上流部に砂堆が形成されている。射流 Fr_1 数の4.07より4.80の方が縦断図の最大洗掘深が小さくなっているが、これは平面図と横断図に示すように、 Fr_1 数4.8では水路中央部より側壁部に最大洗掘深が発生していて平面洗掘状況の違いによるものである。

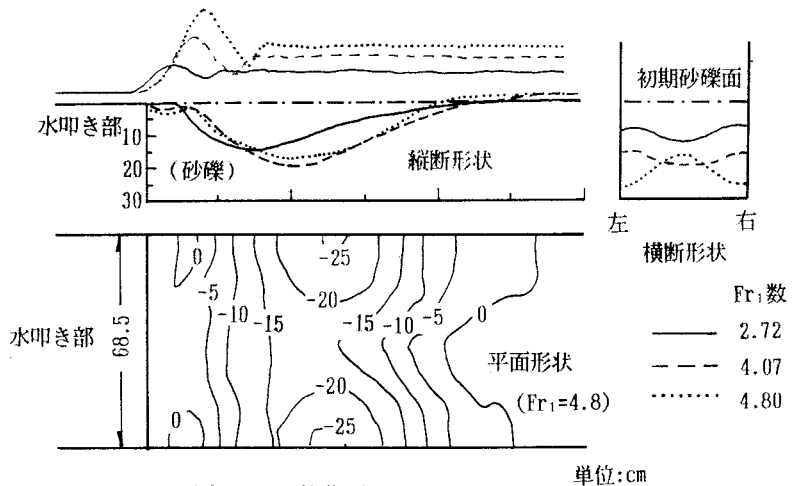


図-4 後期洗掘形状

のである。この平面洗掘形状の違いは $Fr_1=4 \sim 5$ を境界にして生じ、移動床面に衝突後の流れに影響されている。 Fr_1 数の4以下の波状流では、移動床面に衝突した流れに強い二次流の発生がなく、水路中央部に最大洗掘が生じている。一方、 Fr_1 数4以上の波状流では、落水水脈流が移動床面に衝突後、移動床面の中央から両側壁部に向かう強い二次流が発生していて、中央部より両側壁部の洗掘深を大きくしていた。

3. 3 最大洗掘深の時間的变化

各流況による最大洗掘深(Z_m)の時間的变化は鈴木ら¹⁾の求めた(6)式の関係で表わすことができた。

$$\frac{Z_m}{h_c} = \alpha \left(\sqrt{\frac{g}{h_c}} \cdot t \right)^\beta \quad \dots\dots(6)$$

ここで、 h_c は限界水深、 g ; 重力の加速度、 α 、 β ; 実験係数、 t ; 経過時間

鈴木らは後期洗掘過程で $\alpha=0.04\sim0.05$ 、 $\beta=1/3$ を求めているが(平均粒径 0.64mm の砂で)、今回の[A実験]のA跳水と波状流での α と β の値(水路中心線上)は表-1である。 α および β 値は移動床材料、流況、射流 Fr_1 数によって変化して、 α 値はA跳水より波状流の方が大きく、 β 値は粒径が大きくなると小さくなっている。また細礫の波状流の α 、 β 値は、 $\sqrt{g/hc}\cdot t=7\times 10^4$ 付近以降の値であり、それ以前での β 値は約 $1/3$ になっていた。この変化は洗掘穴上流部に砂堆の形成が開始された(中期洗掘過程に移行)時期とほぼ一致していた。

表-1 α 、 β の値

一方、[B実験]の波状流と B_{min} 跳水については、表-1に示されていないが、 β の値は[A実験]のA跳水の場合とほぼ一致し、 α の値は段落ち水路部が長くなるにつれて小さくなっていた。

3.4 最終洗掘時の洗掘形状

図-5は各流況による最終洗掘時の水路中心線上の洗掘形状を最大洗掘深(Z_m)で無次元化した代表例である。これまでの研究では、移動床材料の粒径にかかわらず後期洗掘過程ではほぼ相似形になることが知られている。[A実験]の波状流を除く洗掘穴上流面での洗掘形状に相似性が見られるが、洗掘穴下流面では流況による違いがあり、下流水位および洗掘穴内の流れの影響を受けている。[A実験]の波状流の場合には、前述したように洗掘上流部に砂堆部が $x/Z_m=2$ の範囲で現れている。また最大洗掘の生じている水平距離の位置は $x/Z_m=5\sim 6$ にあり、従来の結果の $x/Z_m=4\sim 4.5$ より長くなっている。

3.5 最大洗掘深(Z_{max})

波状流内の回転流が洗掘進行に強く関与していることを洗掘状況で明らかにした。この回転流は波状流の規模、すなわち射流 Fr_1 数に關係しているため、最大洗掘深(Z_{max})を次元解析の手法と実験値の結果から図-6のように示し、(7)式の関係で表わした。

$$\left(\frac{Z_{max}}{h_1}\right)\left(\frac{\sigma}{\rho}-1\right)\left(\frac{d_{50}}{h_1}\right)^{1/3}=a\cdot Fr_1^b \quad (7)$$

ここで、 σ ;砂礫の密度、 ρ ;水の密度、 d_{50} ;砂礫の中央粒径、 a, b ;係数

図中の●印、▲印は細礫および中砂の波状流([A実験])の実験値である。中砂の射流 Fr_1 数3以上の場合、最終洗掘に達する以前に、最大洗掘深が水路底面に達したので図中には示されていない。+印は松下³⁾による波状流の実験値であり、今回の実験結果とほぼ一致している。□印はスル

移動床材料	流況	α	β
中砂 ($d_{50}=0.40\text{mm}$)	A跳水	0.03~0.04	1/3
	波状流	0.05~0.09	1/3
細礫 ($d_{50}=3.85\text{mm}$)	A跳水	0.07~0.08	1/5
	波状流	0.22~0.28	1/7

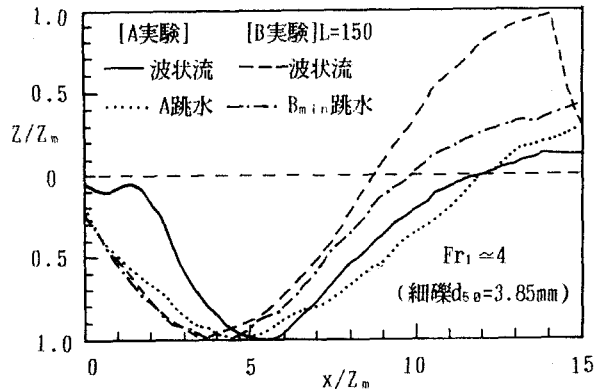


図-5 最終洗掘時の洗掘形状

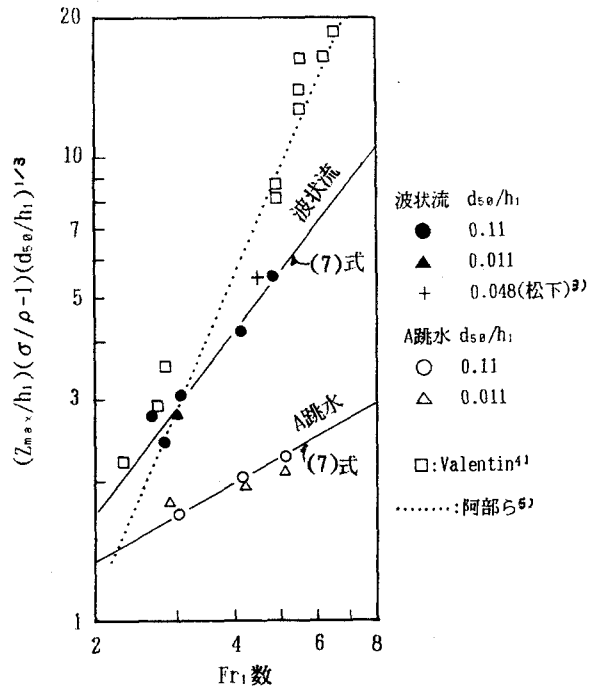


図-6 最大洗掘深(Z_{max})と水叩き下流端の Fr_1 数との関係

ースゲートからの洗掘実験で、移動床上流端で跳水を起こさせたValentin⁴⁾の値である。点線は阿部ら⁵⁾が水叩き下流の跳水で行った実験式から求めたもので($d_{50}/h_1=0.11$ として計算)ある。いずれも波状流による最大洗掘深より大きくなっている。

また、図中の○印、△印はA跳水による最大洗掘深の実験値であり、(7)式で表わすことができるが、 Fr_1 数の影響は波状流に比べて小さくなっている。これはA跳水での洗掘は跳水面渦終了地点の底面流速が洗掘に関係していて、この地点に至るまで流入流速は減速され、射流 Fr_1 数の影響をそれほど大きく受けないことによる。

実験値から(7)式の実験係数aおよびbを求めると、波状流の場合、 $a=0.68$ 、 $b=1.33$ で、A跳水の場合 $a=0.89$ 、 $b=0.58$ となる。

[B実験]での最大洗掘深は、波状流の水脈が水路底面に衝突する距離が段落ち水路長より長い場合と B_{min} 跳水の跳水面渦長が段落ち水路長より短い場合には、A跳水の最大洗掘深より大きくなっていた。

3. 6 段落ち水路長と洗掘深の関係

図-7は細礫を用いた[B実験]の各流況の最大洗掘深(Z_{max})と段落ち水路長(L)との関係である。A跳水の最大洗掘深と比較するため、縦軸の最大洗掘深は(7)式によるA跳水の最大洗掘深(Z_{amax})で無次元化にしてあり、横軸の段落ち水路長は滑面水平水路のHagerら⁶⁾の実験式による跳水面渦長(L_r)で無次元化してある。

波状流の $L/L_r=0$ での Z_{max}/Z_{amax} の値は段落ち水路のない[A実験]の実験値である。

L/L_r が1以下では、波状流による最大洗掘深は B_{min} 跳水より大きくなっている。これは段落ち水路長が波状流の床面衝突点距離より短いためである。 L/L_r が1以上になると B_{min} 跳水よりむしろ小さくなっている。これは波状流による流水減勢効果が B_{min} 跳水より良好であることを示している。

段落ち部の波状流による最大洗掘深をA跳水と同規模内($Z_{max}/Z_{amax}=1$)にするには、段落ち水路の長さは L_r の約1.3倍にする必要がある。また、段落ち水路下流で波状流および B_{min} 跳水によって洗掘を発生させないためには、 L_r の3.5～4倍の段落ち水路長を必要とする。

3. 7 洗掘穴内の流速分布特性

図-8は[A実験]の波状流(移動床材料; 細礫、 Fr_1 数=4.80)による後期洗掘時の水路中心線上の水面形と洗掘穴内の流速分布例である。

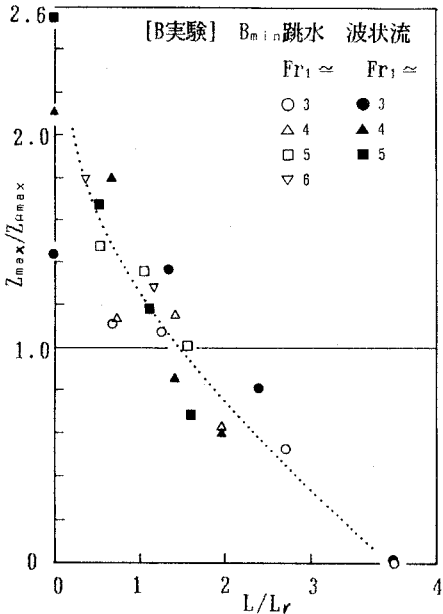


図-7 最大洗掘深(Z_{max})と段落ち水路長(L)との関係

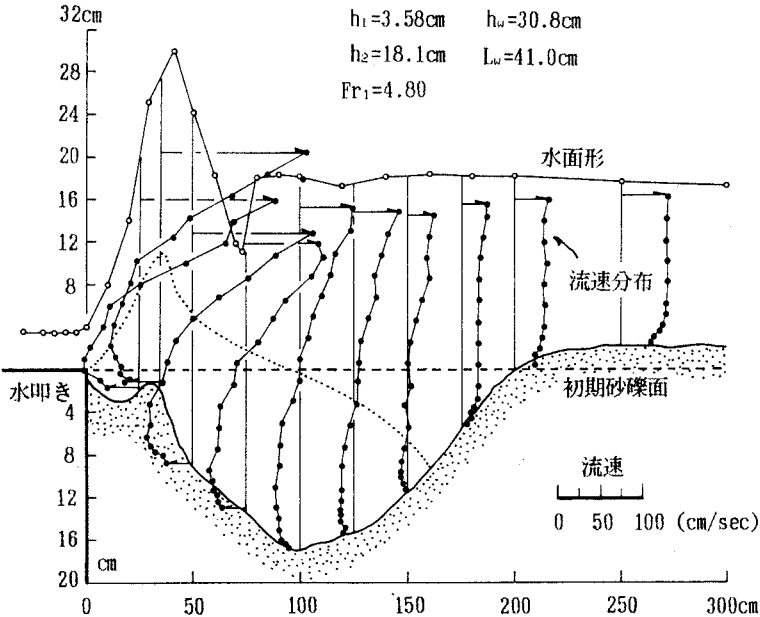


図-8 波状流による洗掘穴内の流速分布例

る。図中の点線は逆流域の境界を示していて、順流と逆流の分岐点は最大洗掘深の位置よりかなり下流側にあり、洗掘穴内に大規模な回転流が生じている。射流 Fr_1 数の4以下の波状流では、逆流域の規模は図に示したものと異なり、逆流域は最大洗掘深のわずかに下流の地点から洗掘面上2~4cmの範囲で洗掘穴上流面に発生していて、射流 Fr_1 数4.8の波状流に比べてかなり小さくなっていて、このように射流 Fr_1 数が4~5を境にして平面的な洗掘状況の異なる原因が、波状流内の回転流規模および流速分布の影響によることが観察された。

図-9は波状流内の最大流速速減を示したもので、黒塗り印は[A実験]の値、白抜き印は[B実験]の値(段落ち水路長 $L=150\text{cm}$)である。最大流速(U_m)は水叩き部末端から上流20cmでの射流の最大流速(U_m')で無次元化してある。[A実験]値の矢印は最大洗掘深の位置を示してある。 Fr_1 数の大きいほど最大流速の速減は大きくなっていて、洗掘穴での波状流と段落ち水路上の波状流に違いが見られない。

しかし[A実験]の $Fr_1=4.8$ の場合、波状水脈が下流水面に突入している下流での速減が大きくなっていて、回転流の逆流部が水路中央部に存在している影響が現れている。

図-10は[A実験]の洗掘砂礫面から高さ5mmでの流速($u_{0.5}$)と流下距離(x)との関係である。横軸は最大洗掘深までの水平距離(L_m)で無次元化しており、縦軸は限界摩擦速度 u^* で無次元化してある。 u^* の値は岩垣による関係式から求めた($u^*=5.58\text{cm/s}$)。

A跳水での逆流は Fr_1 数の変化に関わらず洗掘上流部近辺にのみ発生していて、底面の流れは洗掘砂礫面を流下方向に一定加速で流下している。一方、 Fr_1 数4以下の波状流では、最大洗掘位置付近から上流洗掘斜面にそれほど大きくない逆流が存在しているが、 Fr_1 数4.80では $x/L_m=1.5$ 付近に流れの分岐点があり、上流方向の逆流は大きく加速している。流下方向の順流の底面流速は、 Fr_1 数の違いが生じていなく、A跳水より大きくなっている。

4. まとめ

射流が水理構造物下流の水叩き部を流下した場合、大規模な波状流が水叩き末端部で発生する。本研究では、その大規模な定常波をもつ波状流の発生条件、洗掘特性および洗掘穴内の流速特性分布を明らかにし、水叩き上でのA跳水および段落ち水路上の波状流、B_{min}跳水による洗掘との比較検討も行った。

まず、波状流の発生は洗掘進行中でも持続されること、その水面特性は急段落ち部での波状流とほぼ同様であることを明らかにした。

波状流による洗掘形状の特色は、洗掘穴上流部に最大洗掘深の約2~3倍の範囲で波状流内の回転流で砂礫の堆積が生じ、最大洗掘深の生じる水平距離の位置が遠くなることである。

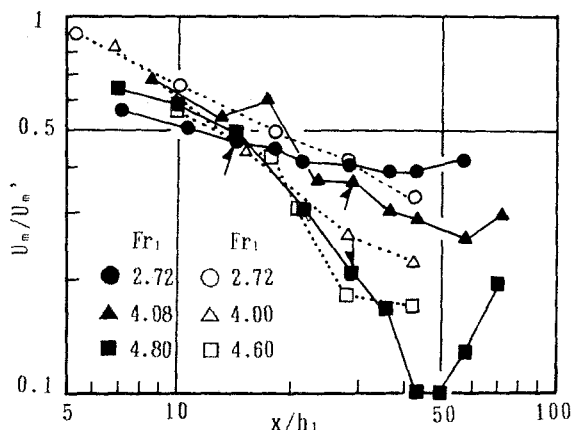


図-9 波状流内の最大流速の速減

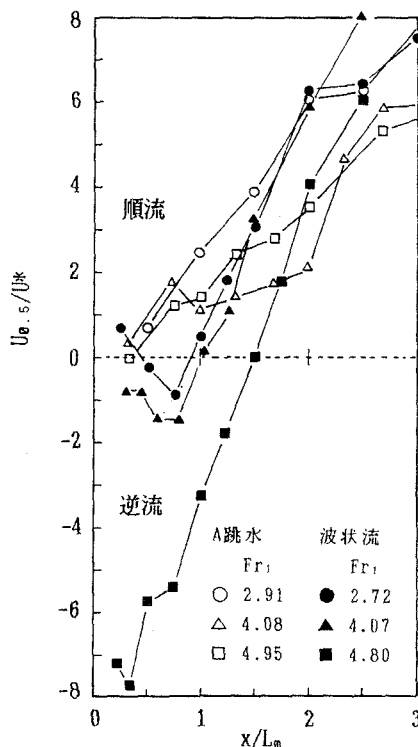


図-10 洗掘砂礫面近傍の流速変化

また最大洗掘深も小さくなり、射流が水叩き上を流下する場合、波状流を水叩き末端で積極的に発生させることによって、水叩き直下流の洗掘軽減に有効と思われる。

さらに、洗掘の平面的形状は Fr_1 数の4~5を境にして変化し、特に Fr_1 数4~5以上では移動床面の衝突後の流れに強い二次流が発生し、その影響で側壁部での洗掘深が増大することも明らかにした。このことは水叩き部下流に接続されている側壁部の洗掘対策の大切さを示している。今回の実験的研究は限られた条件内の結果であり、幅広い条件での研究を今後進めていく必要がある。

なお、本研究は平成5・6年度科文部省科学研究費・総合研究(A)「水利環境の計画・設計と管理の総合化に関する水理学的研究」(代表:田中雅史、課題番号05302059)の研究成果の一部である。

参考文献

- 1) 鈴木幸一・道上正規・川津幸治: 床固め直下流の流れと局所洗掘について、第26回水理講演会論文集、pp.75-80、1982.
- 2) Kawagoshi, N. and Hager, H.W.: Wave type flow at abrupt drops 1. Flow geometry, J. of Hyd. Res., IAHR, 28, 2, pp. 235-252, 1990.
- 3) 松下 玄: 急な低段落ち部跳水の洗掘特性、農土論集、135、pp.113-122、1988.
- 4) Valentin, F.: Consideration Concerning Scour in the Case of Flow under Gates, Proc. of the 12th Congress of the IAHR, Vol. 3, pp. 92-96, 1967.
- 5) 阿部宋平・下東久巳・福本晃久: 床固工水叩き下流の局所洗掘と護床工の形状、土木技術資料、29、5、pp.33-38、1987.
- 6) Hager, H.W., Bremen, R. and Kawagoshi, N.: Classical hydraulic jump: length of roller, J. of Hyd. Res., IAHR, 28, 5, pp. 591-608, 1990.