

床固め直下流部の流れと局所洗掘について

Study on the Local Scour and Flow downstream of a Consolidation Work

鳥取大学工学部 正 員 鈴木 幸 一
鳥取大学工学部 正 員 道上 正 規
鳥取大学大学院 学生員 川 津 幸 治

1. は じ め に

河床低下の防止・軽減のための床固め工や取水堰など天端が現河床とほとんど変わらない河川構造物が河道を横断して数多く設置されているが、最近全体的な河床低下に加えて直下流部の局所洗掘のために、これら構造物の基礎の安全性が脅かされている例がかなり報告されている。天端を現河床面と一致させた床固めの直下流部の局所洗掘現象は水門下流部の局所洗掘現象¹⁾と類似はしているものの、水門からの水平噴流と床固めのような低い堰を越す流れとでは流況が大きく異なることや、床固めの場合その上流水位と下流水位との水位差があまり大きくないなどの点で水門下流部とは違っている。本報告は、床固め直下流部の局所洗掘現象を実験的に明らかにするとともに、その現象を解析する上で必要な局所流に関する情報を得るため、洗掘孔内での流況特性および洗掘状態のモデルとしての段落下流部における流況特性を実験的に明らかにしようとしたものである。

2. 床固め直下流部の局所洗掘特性

2.1 実験の概要

実験は幅40cmの水路を用いて行なったが、水路中央部5m区間を床固めとしその下流部5m区間を平均粒径0.64mmのほぼ均一な砂の移動床として、初期状態では床固めの天端と移動床高とを一致させている。河床勾配は1/200とし、表-1に示す条件で実験を行なった。表中 h_c は限界水深、 h_o は下流側移動床部の等流水深、 u_o は等流の平均流速である。

2.2 洗掘過程

床固め直下流部の局所洗掘過程を実験によって観察すると、洗掘初期には写真-1に示すように洗掘孔が浅く、流れは局所的に著しくは曲がっていない状態で流下方向に比較的広範囲に洗掘が進行する。このように通水初期より後述するような潜り噴流により急激な洗掘が起こるまでの洗掘過程を初期洗掘過程と名付ける。洗掘が進み、洗掘深が増大すると床固め直下流部の流れは潜り噴流となり、主流水脈はあまり拡散されず下向きに河床に沿うように潜り込むためこの強い掃流力によって深さ方向に卓越した洗掘が生じその下流部洗掘孔内に砂堆部が形成される(写真-2)。この潜り噴流による洗掘が進行して洗掘孔下流部の砂堆が大きくなると流れは急激に上向きとなり、主流水脈は水面近くに移行し波状跳水状態となる。この時河床面近くに形成されたローラーによる逆流によって洗掘孔内に形成された砂堆が徐々にけずり取られて、その上流部の深い洗掘孔を埋め戻す(写真-3)。この埋め

表-1 実験条件

Run	h_c (cm)	h_o (cm)	u_o (cm/s)
1	2.80	3.10	45.16
2	3.67	4.01	52.37
3	4.45	4.83	57.97
4	4.86	5.27	60.72
5	4.65	5.07	59.41
6	4.12	4.49	55.68
7	3.55	3.89	51.41
8	2.24	2.51	39.84

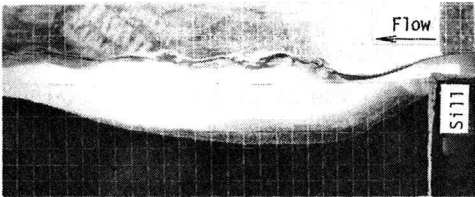


写真-1 初期洗掘過程

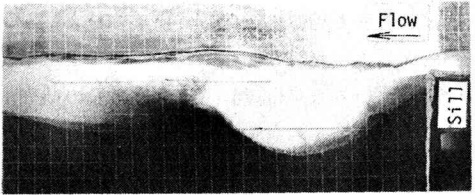


写真-2 後期洗掘過程 (潜り噴流)

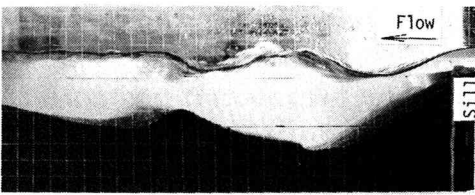


写真-3 後期洗掘過程 (埋め戻し)

戻しが進行し、砂堆部が平たくなりながら徐々に上流に移動しその先端が洗掘孔の上流側斜面にほぼ達すると流れは再び潜り噴流となり激しい洗掘が生じる。以後このような洗掘と埋め戻しを繰り返しながら洗掘が徐々に進行するがこのような状態を後期洗掘過程と呼ぶことにする。

2.3 最大洗掘深の時間変化

図-1に示す最大洗掘深 Z_{sm} を限界水深 h_c で無次元化した Z_{sm}/h_c の時間的変化を両対数紙上で示したものが図-2である。 Z_{sm}/h_c は、各実験ごとに差異はあるもののほぼ $\sqrt{g/h_c} \cdot t \approx 3 \times 10^4$ までは単調に増加する(初期洗掘過程)が、それ以降は増加と減少すなわち洗掘と埋め戻しを繰り返しながら結果的には徐々に大きくなる(後期洗掘過程)ことが認められる。なお、初期洗掘の通水直後のデータを除けば後期洗掘過程の间歇的な洗掘現象をも含めて巨視的に、

$$Z_{sm}/h_c = \alpha (\sqrt{g/h_c} \cdot t)^{1/3} \quad (1)$$

の関係、すなわち最大洗掘深が時間のほぼ $1/3$ 乗に比例することが認められる。ここに、 α は主に砂粒径 d によって変化すると考えられるが、本実験の場合 ($d = 0.64 \text{ mm}$) $\alpha = 0.04 \sim 0.05$ 程度である。

2.4 洗掘孔形状

図-3は、最大洗掘深 Z_{sm} で無次元化した洗掘孔形状を Run 6 について示したものであるが、流量が比較的少なく初期洗掘過程がごく短い Run 1 および Run 8 を除いた他の実験ケースにおける洗掘孔形状特性は Run 6 とほとんど同じであった。Run 6 では $t \approx 40$ 分で後期洗掘過程に移行したが、初期洗掘過程の $t = 10$ 分および 30 分においては比較的浅く流下方向に長い洗掘孔形状を呈しているが、後期洗掘過程の $t = 60$ 分、90 分、120 分および 150 分では潜り噴流によって鉛直方向の洗掘が卓越してくることが認められる。また、初期洗掘過程と後期洗掘過程とはそれぞれ異なった形状ではあるが、巨視的には洗掘孔形状はほぼ時間的にいわゆる相似性を保っていると言えよう。

図-4および図-5は、それぞれ図-1に示す最大洗掘深の生じている水平位置 L_1 と洗掘孔長 L_2 の時間的変化特性を示したものである。データはかなりのばらつきがあるが、 L_1/Z_{sm} は平均的には時間的に大きくは変化しないようであり、 $L_1/Z_{sm} \approx 4$ 程度である。また、この値は h_c/d の大きさには影響されないようである。次に、 L_2/Z_{sm} については初期洗掘過程で L_2/Z_{sm} は時間とともにやや減少するが、後期の潜り噴流過程に入った所で急激に減少し、以後若干の増減はあるもののほぼ一定の値をとるようである。また、流量の少ない Run 1 および Run 8 の場合は初期洗掘過程が短かくすぐに後期の潜り噴流による洗掘が生じるが、 L_2/Z_{sm}

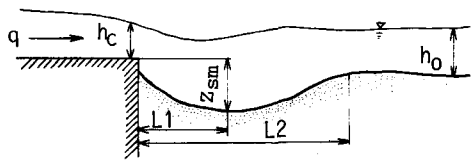


図-1 記号図

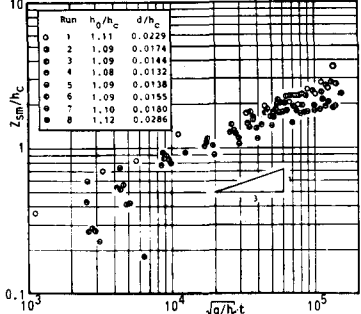


図-2 最大洗掘深の時間変化

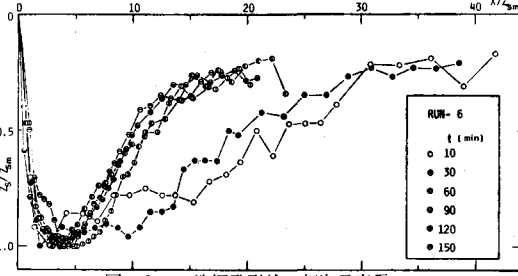


図-3 洗掘孔形状の無次元表示

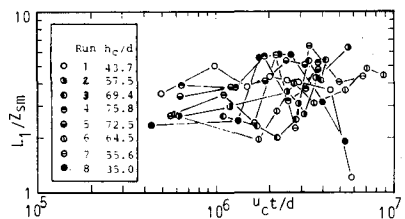


図-4 最大洗掘深の水平位置 L_1 の時間変化

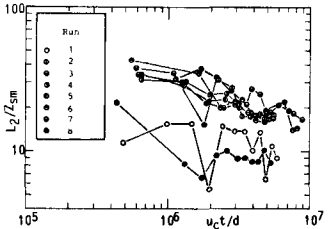


図-5 洗掘孔長 L_2 の時間変化

はかなり変動しているものの洗掘のごく初期を除いては時間的にほぼ一定であると言える。

3. 床面直下流部の流れ

洗掘孔内における各洗掘過程の流速分布特性を Run 1 について示したのが図-6である。流速の測定は、各洗掘過程において通水をやめた後ニスによって河床を固定した状態で5孔球形ピトー管によって行なった。初期洗掘過程においては、主流は床面直下流端で剥離し下流(図の例では $x \approx 20\text{ cm}$)で河床に再接触するが、水脈はほぼ水平に近い。また、床面直下と再接触点間の河床近くに弱い逆流域が形成される。最大流速点は水面近くにあるが、再接触点よりやや下流では河床近くの流速が比較的大きくなっている。後期洗掘過程の潜り噴流時には、主流水脈は洗掘孔河床に沿って流れており河床に大きな掃流力を加えていることがわかる。潜り噴流となった主流水脈上にローラーが発生し、水面では逆流となっている。ローラーの中心と水面との距離は最大洗掘深の1/2程度となっており、ローラーとなっている部分の逆流量は $x = 15\text{ cm}$ の断面の流速分布から推定すると、 $35 \sim 40\text{ cm}^2/\text{s}$ となり上流からの流量の1/4程度に達している。また、この主流水脈は洗掘孔内に砂堆を形成しその頂部付近で剥離した後やや下流で河床に再接触している。砂堆下流部で流れが剥離するまでは、最大流速は河床に近い所にあることが認められる。一方、後期洗掘過程の埋め戻し時には、主流水脈は再び水面付近にもどり、洗掘孔底部にローラーが形成されかなり強い逆流が生じている。図-7および図-8はそれぞれ、後期洗掘過程における潜り噴流時および埋め戻し時の流速 u を各断面の最大流速 $u_{\max}$ で無次元化した $u/u_{\max}$ と y/δ_1 あるいは y/δ_2 との関係を示したものである。ここで、 y は河床からの高さ、 δ_1 は $u = u_{\max}/2$ で $\partial u/\partial y < 0$ である点の y であり、 δ_2 は $u = u_{\max}/2$ で $\partial u/\partial y > 0$ である点の y である。潜り噴流時には図-7に示すように洗掘孔底面付近の流速分布は各断面についてほぼ同一であることが認められる。一方、埋め戻し時においても $u/u_{\max}$ と y/δ_2 の関係は逆流域を含めて相似性がかかなり保たれていることがわかる。これらの特性はRajaratnam らによって明らかにされている再接触壁面噴流の特性²⁾とかなり似かよっている。図-9、

10および図-11はそれぞれ $u_{\max}$ 、 δ_1 および δ_2 の流下方向(x)の変化を示したものである。 $u_{\max}$ は床面直下流部で最大値をとりその後減少するが、砂堆頂部あるいは再接触点付近でやや大きくなった後再び減少する。 δ_1 は流下方向に徐々に増加し境

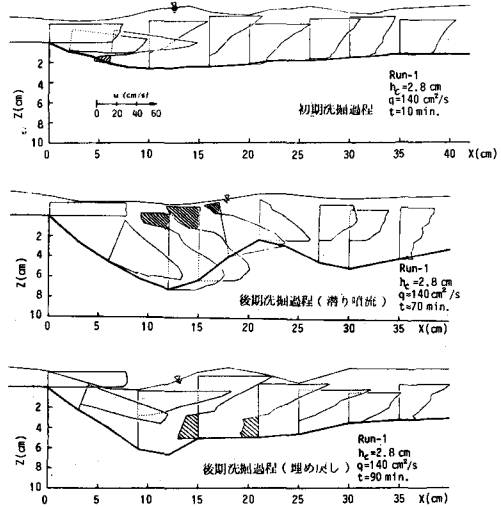


図-6 各洗掘過程における洗掘孔内の流速分布

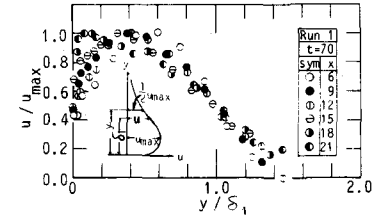


図-7 流速分布の無次元表示(潜り噴流)

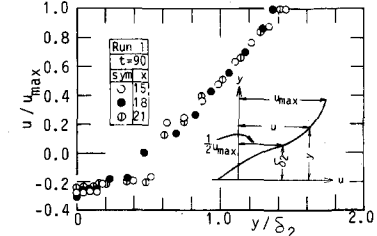


図-8 流速分布の無次元表示(埋め戻し)

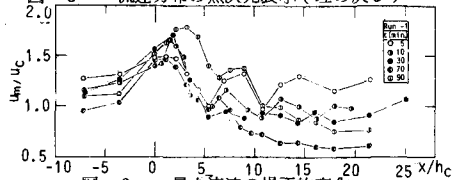


図-9 最大流速の場所の変化

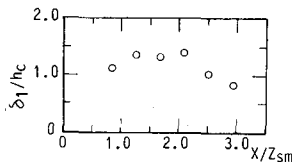


図-10 δ_1/h_c と x/Z_{sm} の関係

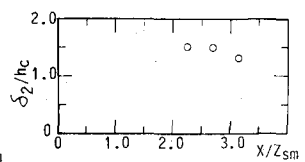


図-11 δ_2/h_c と x/Z_{sm} の関係

界層の発達過程と類似した特性を示す。 δ_2 は流下方向にはほとんど変化しないことが図-11より認められるが、一般には下流側の水深によって変化することが予想される。

4. 段落ち部の流れ

床固め下流部の洗掘孔内の複雑な流れの特性を明らかにする目的で、その基本特性を変えない形状の単純な段落ち部の流れ特性を詳細に測定した。実験は幅30cm水路に図-12に示すような段落ち部を設けて行なった。実験条件は表-2に示しているが、段落ちの高さを3通り、流量を10通り変化させる計30Runである。

4.1 潜り噴流と波状跳水の移行条件

後期洗掘過程においては潜り噴流と波状跳水(埋め戻し)が交互に発生するが、この移行条件を段落ち部の流れを用いて検討した。波状跳水から潜り噴流への移行条件は、下流側水位を徐々に下げて流れが移行する限界の下流水深 y_t を測定することによって決定した。一方、潜り噴流から波状跳水への移行条件は逆に下流水位を徐々に上げることによって決定した。図-13は、移行限界状態の床固め上での水深 h_c と下流水深 y_t および段落ちの高さ h との関係を示したものである。○印は波状跳水から潜り噴流への移行限界を示す実測値であり、●印は逆に潜り噴流から波状跳水への移行限界を示している。すなわち、○印より上側は波状跳水の領域であり、●印より下側は潜り噴流の領域である。○印と●印の間は不安定な領域で下流側水位が上昇する場合と下降する場合によって波状跳水となったり潜り噴流となったりする。図-13より、実験的に、

波状跳水から潜り噴流への移行条件：

$$y_t/h_c \leq 0.87(h/h_c) + 1 \quad (2)$$

潜り噴流から波状跳水への移行条件：

$$y_t/h_c \geq 0.90(h/h_c) + 1 \quad (3)$$

であることがわかる。

4.2 流速分布

流速分布特性は、潜り噴流時と波状跳水時とで著しく異なっているのでそれぞれについてその特徴を述べる。

潜り噴流：主流水脈は床固め下流端で剥離するがその水脈幅を保ったまま鉛直下向きにわん曲し水路底に衝突し壁面噴流の特性を示しながら下流へ拡散していく。このとき水面付近に逆流ローラーが生じるが水面形状は比較的平坦である。図-14は主流水脈が河床に再接触する点から下流側の各断面での水深 y 方向の無次元流速分布である。図中の δ_1 は $u = u_{\max}/2$ で $\partial u/\partial y < 0$ の点の水底からの距離である。この図にみられるように、各断面での最大流速 $u_{\max}$ で無次元化した流速 $u/u_{\max}$ の分布形は各断面毎にもまた異なった水量に対してもほぼ相似形を保っていることがわかる。このことから再接触点から下流側の噴流の

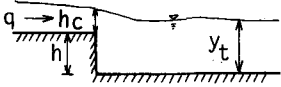


図-12 記号図

表-2 実験条件

Run	A	B	C	y_t (unit: cm, sec)					
				Submerged Jet			Wave Jump		
h	4.5	8.5	11.5	A	B	C	A	B	C
1	1.35	36.76	—	—	—	—	—	—	—
2	2.17	46.08	—	—	—	—	—	—	—
3	2.84	52.82	—	6.51	10.08	11.05	8.08	11.24	13.07
4	3.44	58.14	—	6.95	10.13	11.69	8.63	11.88	13.13
5	3.99	62.66	—	8.26	10.85	12.17	9.13	12.85	14.80
6	4.51	66.52	—	8.88	11.38	14.20	9.90	12.93	14.90
7	5.00	70.00	—	9.40	11.95	14.05	10.33	12.95	15.50
8	5.47	73.13	—	10.60	12.11	14.67	11.40	13.90	16.46
9	5.91	76.14	—	10.26	12.95	14.98	11.55	14.35	17.04
10	6.34	78.86	—	11.23	13.75	15.80	12.57	14.92	17.52

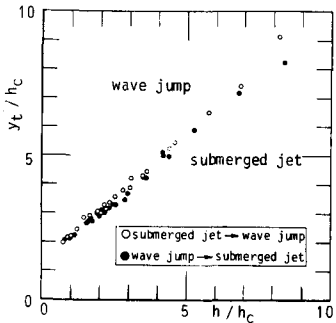


図-13 潜り噴流と波状跳水の移行条件

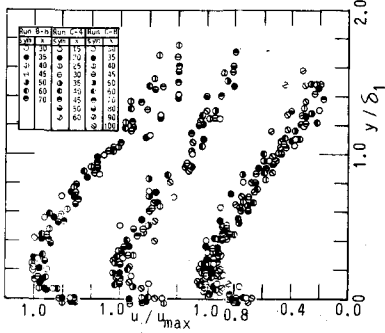


図-14 流速分布の無次元表示(潜り噴流)

無次元流速分布は段落ちの高さ h ，流下方向の距離 x に関係なく一つの分布形で表わされることがわかる。潜り噴流時のこのような流速分布特性は，Rajaratnam³⁾が指摘しているように壁面噴流の特徴である。図-15は δ_1 の場所的变化を示したもので図中の x は再接触点からの流下方向距離である。 δ_1 は距離とともに増加していくが，これは水路床に衝突した水脈がしだいに拡散していくことを示しており，境界層が流下方向に発達していく様子と似ている。図-16は潜り噴流時の最大流速 u_{max} の場所的变化を示したものである。平均的には， u_{max} の変化は床固め直下流で最大となり，その大きさは $1.3 \sim 1.4 u_c$ ($u_c = q/hc$ ， q : 単位幅流量) 程度でその後は徐々に減少して行き最終的には一定となる。ただ主流水脈が水路床に再接触した直後に水路床面近くの流速が加速され u_{max} が一度増加して再び減少する特性が認められる場合もある。

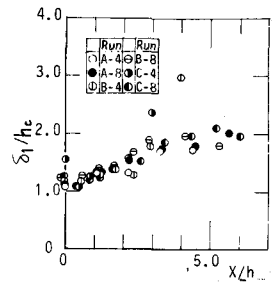


図-15 δ_1/h_c と x/h の関係

波状跳水：床固め下流端で剥離した主流水脈は水面付近で波状状態で流れているが，主流水脈下流端は床固め部から約 10° の角度で水路床に向かっていく。床固めから段落ちの高さの約 $5 \sim 7$ 倍程度の範囲の河床と主流水脈の間にはローラーが存在しているが，図-17は床固め下流端からローラーの下流端までの間の各断面の鉛直方向流速分布を無次元表示したものである。図中の δ_2 は $u = u_{max}/2$ で $\partial u / \partial y < 0$ の点の水路床からの距離である。流速分布形は潜り噴流時とは形状は全く異なるもののやはり各断面ごとにもまた異なった水理量に対してもほぼ相似形を保っていることが認められる。逆流流の最大はその断面の最大流速の約 $2 \sim 3$ 割程度となっており，逆流は水路床から $0.6 \delta_2$ 程度の高さまでは一様に流れている。また， y が $0.6 \delta_2$ 以上では流速はほぼ直線的に増加して水面付近で最大流速となっている。図-18は δ_2 と下流側水深 y_t との関係を示したものであるが， δ_2 は y_t の増加にともなって大きくなりローラーの水深方向の大きさが増していることを示している。また， δ_2 は多少のばらつきはあるものの流下方向にはほとんど変化しないことが認められた。図-19は波状跳水状態における u_{max} の流下方向変化を示したものである。潜り噴流時と同様に床固め直下流部で最大となって以後減少するが，その減衰の割合は噴流時に比して小さい。

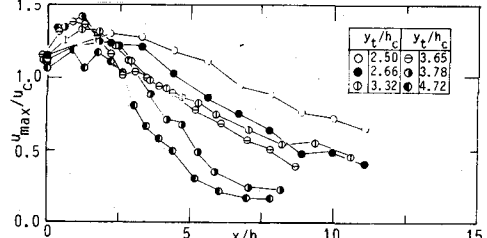


図-16 最大流速の場所的变化

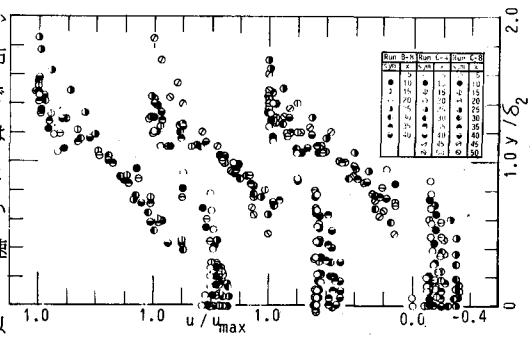


図-17 流速分布の無次元表示 (波状跳水)

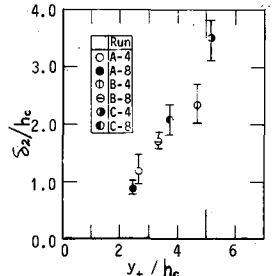


図-18 δ_2/h_c と y_t/h_c の関係

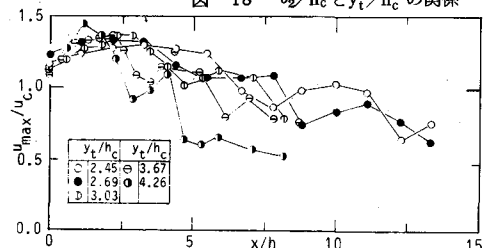


図-19 断面最大流速の場所的变化

4.3 河床面せん断力分布

段落ち下流部における河床面のせん断力分布を推定するためにプレストン管⁴⁾を用いて河床面での流速を測定した。図-20は潜り噴流時の河床面せん断力分布の無次元表示であるが，図中 τ_0 は河床面せん断力， τ_{0max} は最大河床面せん断力であり， θ_1 は $\tau_0 = \tau_{0max}/2$ で $\partial \tau_0 / \partial x < 0$ の断面の床固めからの距離である。この図から各水理量におけるせん断力分布が互いに比較的良好な相似性を示していること

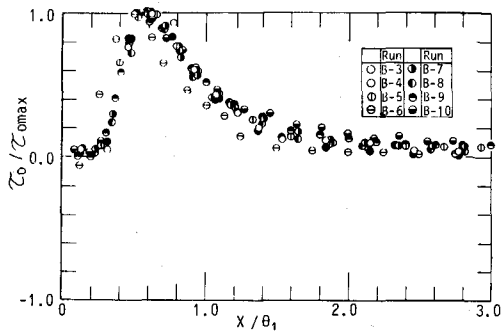


図-20 河床面せん断力の場所的变化(潜り噴流)

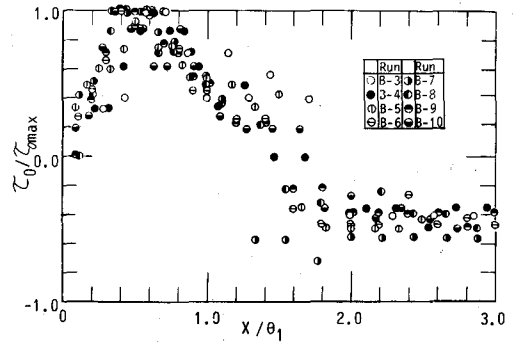


図-21 河床面せん断力の場所的变化(波状跳水)

が認められる。このことは河床面せん断力の分布形についても1つの関数形で与えることができることを示している。潜り噴流水脈の再接触点は $x/\theta_1 = 0.4$ 付近に見られ河床面せん断力の最大はその点よりも若干下流側に生じていることから流れが水路床に衝突してから加速されていることが推測できる。それより下流側では河床面せん断力は急激に減少してゆき、ついには流速が対数分布則に従っている下流の領域に至ってほぼ一定となる。図-21は波状跳水時の河床面せん断力の流下方向分布を無次元表示したものである。図中 τ_{0max} は逆流による上流方向の河床面せん断力の最大値を示しており、縦軸の正の領域は逆流による河床面せん断力を示し、負の領域は順流による河床面せん断力を示している。潜り噴流時に比べると水量によって分布形はか

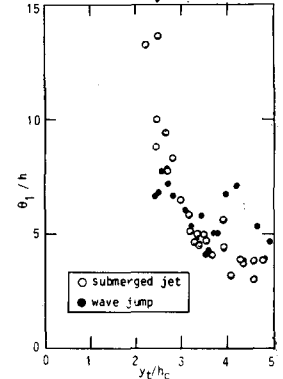


図-22 θ_1/h と y_t/h_c との関係

なり異なっているものの巨視的にみればやはりかなりの相似性は保たれていると言えよう。最大の河床面せん断力は床固めからそれほど遠くなくほぼ $x/\theta_1 = 0.5$ の位置にある。逆流域での河床面せん断力は最大値の位置から流下方向に急激に減少するが、順流域ではその大きさは流下方向にほとんど変化しない。図-22は θ_1/h と y_t/h_c の関係を示したものであるが、潜り噴流時においても波状跳水時においても同様な傾向を示

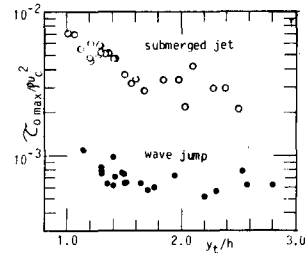


図-23 最大河床面せん断力と下流水深との関係

し y_t/h_c の増加とともに θ_1/h は急激に減少する。図-23は潜り噴流時の最大河床面せん断力 τ_{0max} と波状跳水時の逆流による上流向きの最大河床面せん断力 τ_{0max} を床固め上での平均流速 u_c と水の密度 ρ で無次元化した $\tau_{0max}/\rho u_c^2$ と y_t/h の関係を示したものである。 $\tau_{0max}/\rho u_c^2$ は潜り噴流のものが波状跳水に比べて5~8倍程度大きくっており、 y_t/h の増加とともにゆるやかに減少することが認められる。

5. おわりに

床固め直下流部の局所洗掘現象の大きな特徴である潜り噴流による洗掘過程と波状跳水時の埋め戻し過程における局所流特性を実験的に明らかにしたが、これらの実験結果は、今後、床固め直下流部の局所洗掘の時間変化を解析的に取り扱う上で有用であると考えられる。

参考文献

- (1) 土屋義人：水門下流部における局所洗掘に関する研究(1)，京都大学防災研究所年報，第8号，1965。
- (2) Nallamuthu Rajaratnam：Plane turbulent reattached wall jets，Proc. of ASCE，HY1，1968
- (3) Nallamuthu Rajaratnam：Turbulent jets，Elsevier Scientific Publishing Company，1976。
- (4) V.C. Patel：Calibration of the Preston tube and limitations on its use in pressure gradients，Jour. of Fluid Mech.，1965。