

段 落 ち 部 の 流 況 特 性
Flow properties downstream of a sill

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
鳥取大学工学部 正員 桧 谷 治
ジョモケニアアッタ農工大学 M. S. Ibrahim

1. ま え が き

床固めあるいは落差工などの下流部においては、河床の洗掘等によって落差が変化してくるが、この段落下や流量あるいは下流側水位の条件によって段落ち部の流況は著しく変化することが知られている。すなわち、段落ち部での上流側と下流側との水位差がある程度より大きくなると、主流水脈が鉛直下向きにわん曲していわゆる潜り噴流状態となり、逆に水位差が小さいと主流水脈は水面に移り波状跳水状態となる。床固め直下流部の局所洗掘現象は、主に上記の潜り噴流によって引き起こされるが、洗掘現象の解明は流況的確な把握が前提となる。下流側水位を十分大きくしたような、水槽中への二次元噴流の流況に関しては、主にわん曲噴流について、Sawyer^{1,2}, Rajaratnam³, 齊藤⁴らが実験的にその現象を明らかにするとともに、水平噴流から従来得られている知見を利用して理論的考察を試みている。また、床固め下流部のように自由水面をもつ水脈が下流側で潜り噴流となったり波状跳水となるような本研究で対象としている現象については、Naib⁵や Rajaratnam⁶が実験的検討を加えているが、流況がどのような条件で変化するかなどの基本的な問題が明らかにされていない。

本研究では、詳細な実験により段落ち部直下流部の流況の変化条件について検討を加えるとともに、潜り噴流および波状跳水それぞれの主流水脈の流速分布および渦域の規模、連行流量など、流況特性を実験的に明らかにする。

2 実 験 の 概 要

実験は長さ11 m、高さ30 cm、幅30 cmの水路のほぼ中央部に、図-1に示すように長さ1.5 m、高さW(5 cm, 10 cm, 15 cmおよび20 cm)の堰を設け、堰上で支配断面が発生するような条件で行なった。下流側水深 h_t は水路下流端の堰で調節する。実験は大きくわけて、1)流況の移行条件、2)渦流の規模、および、3)流速分布に関するものの3つである。表-1に示すように、段落ちの高さWは4通り、単位幅流量 q は100 cm²/s ~ 400 cm²/sの間で10通り変化させ、その結果下流側のフルード数 Fr_t は0.05 ~ 0.44の範囲で実験を行なった。1)の流況の移行条件は、潜り噴流の状態から徐々に下流水深 h_t を増してゆき流れが波状跳水状態に移行する条件を見出すことと、逆に波状跳水の状態から h_t を徐々に下げて潜り噴流に移行する点を見出すことによって決定する。また、2)の渦流の規模は、外径2 mmの真ちゅうパイプから過マンガン酸カリウム水溶液を渦流の各所に注入することによって目視によって見出す。3)の流速分布は鉛直面内の二次元流が測定できる電磁流速計を用いて測定したが、河床付近(3 mm以下)は流速計の特性から不正確であったため必要に応じて、内径1 mmのピトー管を補助的に用いた。

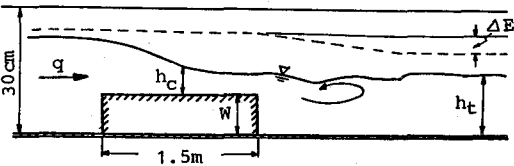


図-1 実験水路と記号

表-1 実 験 条 件

height of sill W (cm)	5, 10, 15, 20
discharge per unit width q (cm ² /s)	100 ~ 400
Froude number Fr_t	0.05 ~ 0.44

3. 流況の移行

潜り噴流状態では水面付近に発生するローラーによってエネルギー損失が大きいが、波状跳水状態では水路床近くでのローラーが比較的緩やかであってエネルギー損失は少ない。すなわち、流れが潜り噴流から波状跳水に変わるとエネルギー損失が急激に小さくなり、逆に波状跳水から潜り噴流に移行すると損失エネルギーが急激に増加する。したがって、流れの移行条件を決める一つの大きな要素として段落ち上下流部でのエネルギー水頭の差 ΔE が考えられる。図-1に示す記号を用いると、 $\Delta E = \{W + (3/2)h_c\} - \{h_t + (q/h_t)^2/2g\}$ であるから、 $q^2 = gh_c^3$ および $F_{rt} = (q/h_t)/\sqrt{gh_t}$ を考慮して h_t で無次元化すると、

$$\Delta E/h_t = W/h_t - 1 + (3/2)F_{rt}^{(2/3)} - (1/2)F_{rt}^2 \quad (1)$$

となる。段落ち上流側で支配断面が生じる限界条件は、(1)式において $\Delta E/h_t = 0$ とおいたものに近いことが若田⁷⁾によって示されている。本研究では支配断面が生じる流況を対象としており $\Delta E/h_t$ は比較的大きい。図-3の実線は、(1)式で示される関係を段落ち高さ w と下流側水深 h_t の比 w/h_t をパラメーターとし横軸に下流側のフルード数 F_{rt} 、縦軸に損失水頭と下流水深との比 $\Delta E/h_t$ をとって示したものであり、丸印で示すデータが流況の移行限界を示している。すなわち、●印は波状跳水から潜り噴流への移行を、○印は逆に潜り噴流から波状跳水への移行限界を表わす実測値であり、破線 ($w \rightarrow s$) 曲線および ($s \rightarrow w$) 曲線) はこれらのデータの傾向を示す実験曲線である。($w \rightarrow s$) 曲線より上の領域では流況は常に潜り噴流となっており、エネルギー損失は大きい。一方、($s \rightarrow w$) 曲線より下の領域は常に波状跳水の領域であってエネルギーの損失は比較的小さい。この両曲線で挟まれる領域は、流況の移行方向によって潜り噴流 (潜り噴流側から ($s \rightarrow w$) 曲線に近づく場合) であったり波状跳水 (波状跳水側から ($w \rightarrow s$) 曲線へ近づく場合) であったりするいわば移行領域である。また、($w \rightarrow s$) 曲線と ($s \rightarrow w$) 曲線とが交わっているところ付近では流況は不安定であって、少しの条件の変化で流況が容易に変化する。この図から ($w \rightarrow s$) 曲線と ($s \rightarrow w$) 曲線に挟まれる領域を除いて、一般的には潜り噴流が生じていればエネルギー損失が大きく、逆に波状跳水状態でのエネルギー損失は少ないといえる。また、下流側の水理条件と段落ちの高さがわかればどのような流況になるかがわかる。たとえば、 $w/h_t > \sim 1.1$ のような段落ち下流部では流れは常に潜り噴流となっている。

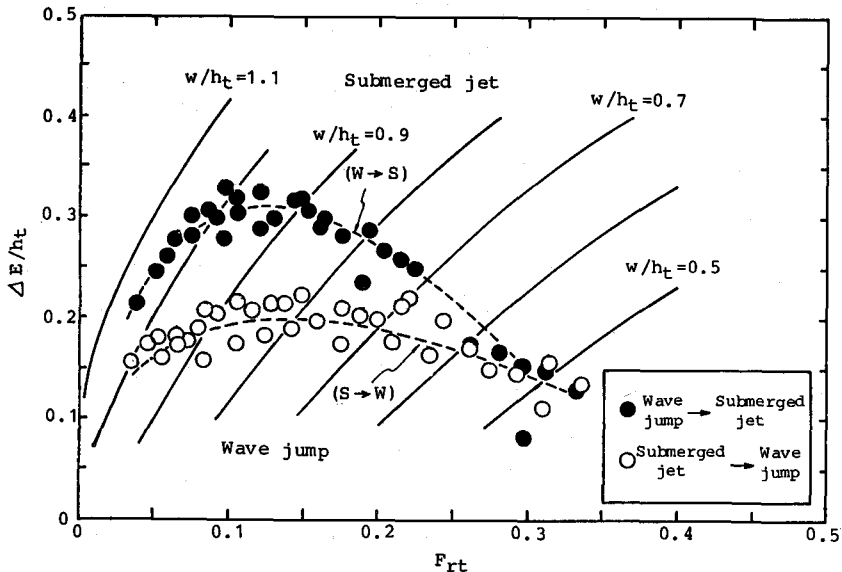


図-2 段落ち部のエネルギー損失と流況の移行限界

4. 潜り噴流時の流況特性

4.1 流況の概要

図-3は段落ち直下流部における潜り噴流時の流況を模式的に表わしたものである。主流は段落ち部から下方にわん曲し水路床を流れて下流で拡散しており、この主流水脈と水面との間に大きなローラーが形成される。また、主流水脈と段落ちとの間には渦(eddy)領域が形成される。段落ちからの射流の流速分布は比較的一様であるが、ローラーの上流端(L_{r1})の間では水脈の下方でのみ水を行きながら流速分布が変形する。 L_{r1} より下流では主流水脈の上面でも水を行きローラーを形成しながら下流し、主流水脈の水路床への再接触点より下流では水路床付近ではいわゆる壁面噴流の特性を示しながら下流側で拡散していく。

図-4は図-3の L_r で示されるローラーの水面での長さを下流側水深で無次元化した L_r/h_t を下流側でのフルード数 F_{rt} との関係で示したものである。全体的にみるとローラーの長さ L_r は下流水深 h_t の5倍以上は大きくならなくて、段落ち高さ W が比較的大きければ、ほぼ3.5倍から5倍の間にある。また、 W が比較的小さく F_{rt} が大きい場合は L_r/h_t は F_{rt} の増加とともに減少し $F_{rt} \approx 0.4$ で $L_r/h_t \approx 2$ までになる。流量別に個々にみると、 L_r/h_t は F_{rt} の増加とともに一度大きくなった後に減少する傾向が認められる。

図-5は図-3の L_e で示される渦の大きさと下流水深との比 L_e/h_t と段落ち高さ W と下流水深との比 W/h_t の関係を示したものである。 $W/h_t > \sim 0.7$ では L_e/h_t は W/h_t の増加とともに減少していく傾向があり、 W/h_t が大きいと主流水脈のわん曲が大きく、渦領域が小さくなるものと考えられる。一方、 $W/h_t < \sim 0.7$ では、 L_e は W には関係しない。いずれにせよ、渦領域の水平方向距離は下流水深の2倍を越すことはないといえよう。

4.2 流速分布

図-3にみられるように主流水脈は段落ち下流端から水脈下面で渦領域と接しせん断層が発達するが、水流水脈上面はそれより少し下流でローラーと接し流速分布は変形していく。主流水脈が潜り噴流となっているこの現象は、二次元自由噴流の変形したものともみなせる再接触点(R)までと壁面噴流の特性を持つそれより下流側の領域とにわけられる。自由噴流においては、ポランシャルコアが残っている発達領域と流れが十分発達した確立領域とにわけられる。図-6は主流水脈の中心線に沿う方向(x' 方向)の流速分布(正の部分のみ)の再接触点付近までの一例を示したものである。 x' の原点は段落ち下流端での水脈の中心点であって、

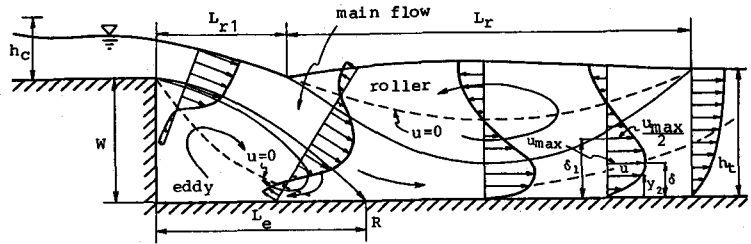


図-3 潜り噴流時の流況の模式図

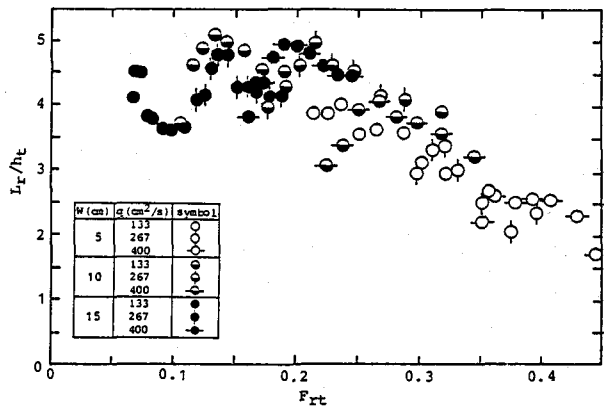


図-4 rollerの規模(潜り噴流)

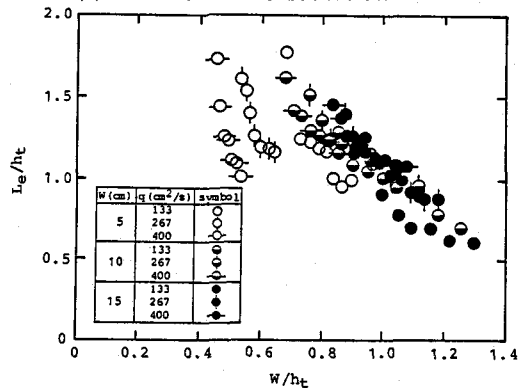


図-5 eddyの規模(潜り噴流)

主流水脈が水路床に再接触する点は、この場合は $x'/h_c \approx 9$ である。 $x'/h_c < \sim 4$ の領域では自由噴流におけるポテンシャルコアに相当する部分が残っており、流速分布は発達領域の特性を示している。図中の曲線は二次元噴流での確立領域についての Görtler の式⁸⁾、

$$\frac{u}{u_{\max}} = 1 - \tanh^2 \eta_1 \quad (2)$$

である。ただし、 $\eta_1 = \sigma(y_1/x')$ であって、 y_1 は x' に垂直方向の座標軸、 u は $y_1 = y_1'$ での流速、 $u_{\max}$ は $y_1 = 0$ での流速、 $\sigma = 7.67$ である。 $x'/h > \sim 4.5$ の領域がほぼ流れの確立領域に対応しているようであるが、自由噴流の場合と違って、噴流の方向が斜めで流れが拡散する場が対称でないことや、流れの場が境界をもっておりしかも主流水脈が再接触点(R)に近づく渦(eddy)領域側の境界が水脈に極端に近づくなどのため、流速分布は詳細にみると自由噴流の場合とはかなり異なってくる。ただ、巨視的にみると、(2)式で示されるような流速分布の特性は、このような自由水面をもつ段落ち直下流部の潜り噴流においても同様に保持しているようである。段落ちの高さや水量が変化しても同様なことがいえるかどうかを示したものが図-7であって、確立領域内にあると考えられる相対同一断面($x'/h_c \approx 4.5$)における流速分布を示している。図中の曲線は(2)式であるが、実測データはこの式とほぼ同じ分布特性を示していることが認められる。ただ、 $|\eta_1|$ が大きいところで境界を有する影響、すなわちローラーや eddy 領域の形成の影響で流速が急激に小さくなるようなデータがあり、 $|\eta_1| > \sim 1$ では $u/u_{\max}$ は(2)式で表わされるものよりやや小さくなる傾向がある。

一方、再接触点(R)より下流側では、著者ら⁹⁾がすでに述べているように、水路床に沿う主流水脈は二次元壁面噴流の様相を呈する。すなわち、図-8にみられるように、主流水脈の水路床近傍の流速分布は、二次元壁面噴流で得られた Vorhoff の実験式⁸⁾、

$$\frac{u}{u_{\max}} = 1.48 \eta_2^{1/7} [1 - \operatorname{erf}(0.68 \eta_2)] \quad (3)$$

でほぼ近似できるといえよう。ただし、 $\eta_2 = y_2/\delta_1$ であって、 y_2 は図中に示すように水路床からの距離、 δ_1 は $u = u_{\max}/2$ で $\partial u/\partial y_2 < 0$ の点の y_2 の値である。各断面の最大流速で無次元化した流速の分布形は各断面毎にほぼ相似形を保っているという壁面噴流の特性は、とくに $y_2/\delta_1 < \sim 1.0$ の領域で認められる。しかし、 $y_2/\delta_1 > \sim 1.0$ では水面近くでのローラーの影響で実測流速が(3)式より小さくなっている。

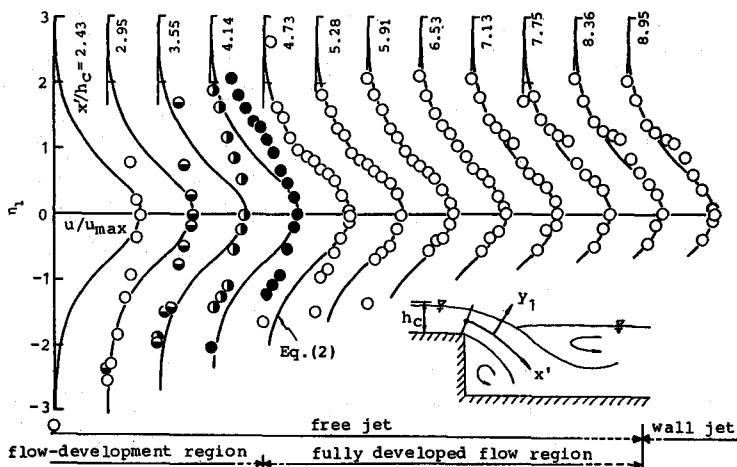


図-6 再接触点までの流速分布の流下方向変化

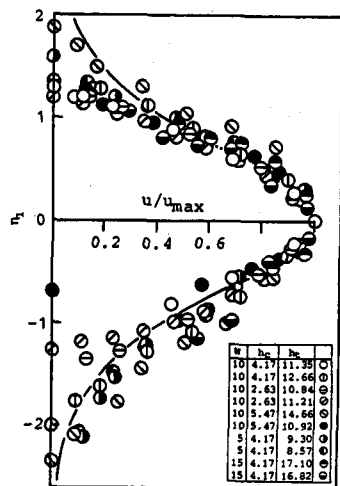


図-7 確立領域の流速分布

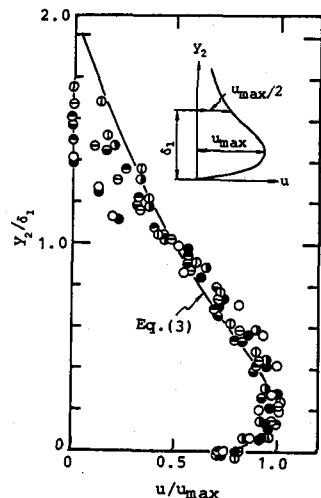


図-8 再接触点より下流の流速分布

4.3 連行流量

主流水脈の流速分布を積分することによって得られた流量と通水流量との差から主流水脈の連行流量，すなわち，ローラーや eddy 内の各断面の連行流量が計算できる。各断面での連行流量 Δq のうちの最大のもの $\Delta q_{\max}$ と流量 q との比 $\Delta q_{\max}/q$ と下流側のフルード数 F_{rt} との関係が図-9 に示されている。白丸印はローラー部，黒丸印は eddy 部のものであるが，ローラーと eddy とで顕著な差は認められなくて， F_{rt} が小さいほど $\Delta q_{\max}/q$ は大きくなり， $F_{rt} \approx 0.1$ では連行流量が通水流量の 6 割近くになる場合も認められる。

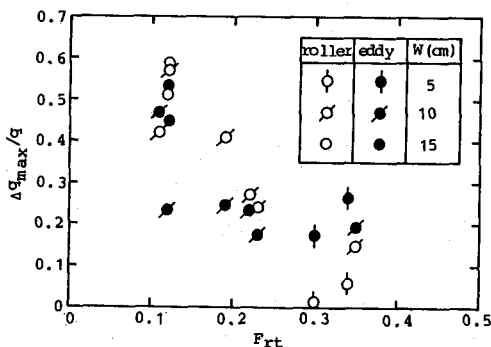


図-9 ローラーと eddy の連行流量(潜り噴流)

5. 波状跳水時の流況特性

5.1 流況の概要

図-10は波状跳水時の流況を模式的に表わしたものである。主流は段落ち部でやや鉛直下方に向うがすぐに上向きとなって水面を流れる。このように主流水脈は波状を呈して水面近くを流下するが，その主流水脈と水路床との間にローラーが形成される。波状主流水脈の幅は，下流に行くにつれて拡がっていき，ついには水深までになる。主流のローラー部への拡散は連行流量を伴う形で行なわれ，流速分布はせん断層の発達過程が逆流ローラーでめめられた場合の流速分布と考えられる。ローラーの規模として流下方向の長さ(図-10の L_r)をとり，下流水深との比 L_r/h_t と下流でのフルード数 F_{rt} との関係を示したものが図-11である。本実験の範囲では， L_r/h_t は 2.5から7.5程度まで5を中心に比較的広範な値をとるが， F_{rt} の増加に伴ってやや減少する傾向が認められる。水面の波形は，段落ちに近い場所で波高が大きくなっているが，最上流の波高は流れが潜り噴流に移行する直前ではかなり大きくなる。図-12は流況が移行する直前の波高 h_{wc} およびその波の波高・波長比(St_c)と F_{rt} との関係を示している。通常の波のステープネスは小さいが，流れが移行限界に近づくときステープネスは 0.2~0.3程度までになり，それ以上になると潜り噴流へ移行する。

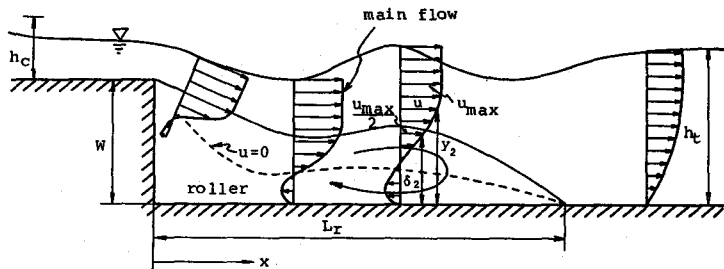


図-10 波状跳水時の流況の模式図

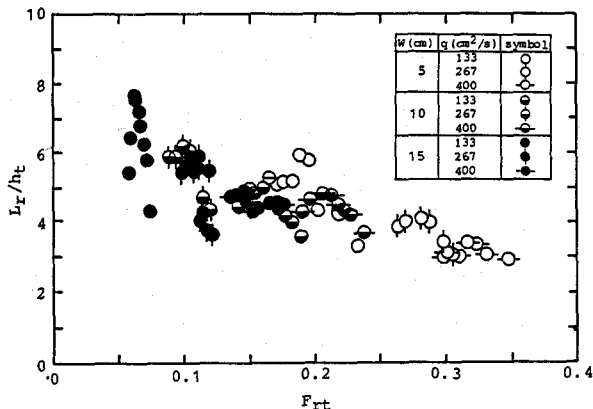


図-11 ローラーの規模(波状跳水)

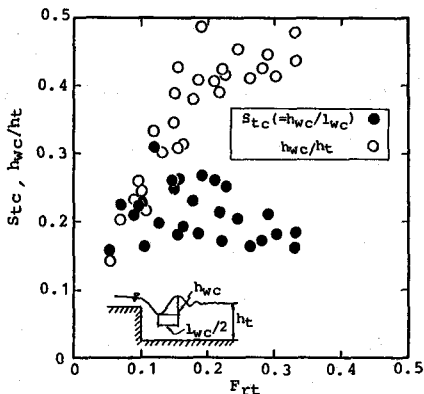


図-12 流況の移行直前の波高と波高・波長比

5.2 流速分布

図-13は段落ち下流端からローラーの下流端までの間の各断面の流速の鉛直方向分布を示したものであり、水路床からの鉛直方向距離 y を $u = u_{\max}/2$ で $\partial u/\partial y < 0$ の点の水路床からの距離 δ_2 で無次元化した y/δ_2 を縦軸に、各断面最大流速 $u_{\max}$ で無次元化した流速 $u/u_{\max}$ を横軸にとっている。すなわち、 $y/\delta_2 = 1$ で $u/u_{\max} = 0.5$ の点に各断面の流速分布を一致させて流速分布の相似性をみたものであるが、 $x'/h_c > 7$ の範囲では流速分布はほぼ相似形を保っているものの $x'/h_c < 7$ では逆流速の領域がかなり大きく流速分布は $x'/h_c > 7$ のものとはかなり異なっている。逆流速の最大はその断面の最大流速の約2~3割程度となっている。また最大流速はほぼ水面付近で生じている。一般に、半無限の段落ち部に半無限の流れのいわゆる二次元せん断層流では、流速分布は相似形を保っている⁸⁾が、水路床という境界を有する場合は強いローラーの形成から特に段落ちに近い部分で相似形が保たれていない。

5.3 連行流量

図-14は底面ローラーの最大連行流量 $\Delta q_{\max}$ を通水流量 q で無次元化した $\Delta q_{\max}/q$ と下流側フルード数 F_{rt} との関係を示したものである。 F_{rt} の範囲は0.1から0.3までであるが、 F_{rt} が大きくなるにつれて $\Delta q_{\max}/q$ は小さくなる傾向にあり、図-11で示す roller の規模の特性にやや似ている。ただ減少率は $\Delta q_{\max}/q$ の方が大きく、 $F_{rt} = 0.1$ で $\Delta q_{\max}/q \approx 0.5$ とかなり大きいのが $F_{rt} = 0.3$ ではその1/10程度となっている。

6 あとがき

河川において通常、段落ち部下流部において生じているであろう流況特性について、現象論的に述べてきた。潜り噴流と波状跳水という特徴的な流況の発生条件、およびそれぞれの流況における流速分布と渦流特性の一部を明らかにすることができたが、今後これらの現象の力学的説明が必要である。

参考文献

- 1) Sawyer, R.A.: The flow due to a two-dimensional jet issuing to a flat pate, Jour. Fluid Mech., Vol.9, 1960.
- 2) Sawyer, R.A.: Two-dimensional reattaching jet flows including the effects of curvature on entrainment, Jour. Fluid Mech., Vol.17, 1963.
- 3) Rajaratnam, N. & Subramanya, K.: Plane turbulent reattached wall jets, Proc. ASCE, HY1, 1968.
- 4) 齊藤 隆: 境界の影響を受ける二次元噴流の特性, 土木学会論文報告集, 第164号, 1964.
- 5) Rajaratnam, N. & Ortiz, N.V.: Hydraulic jumps and waves at abrupt drops, Proc. ASCE, HY4, 1977.
- 6) Naib, S.K.A.: Surface motion of a plane liquid jet, La Houille Blanche, No.6, 1980.
- 7) 芦田和男: 開水路断面急拡部の水理に関する研究(2), 段落部の水理, 建設省土木研究所報告, No 105, 1961.
- 8) Rajaratnam, N.: Turbulent jets, Elsevier Scientific Publication Company, 1976.
- 9) 鈴木・道上・川津: 床固め直下流部の流れと局所洗掘について, 第26回水理講演会論文集, 1982.

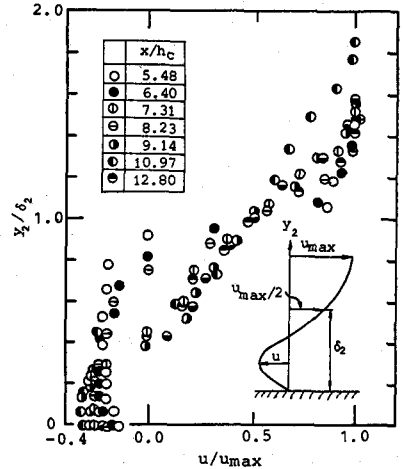


図-13 流速分布(波状跳水時)

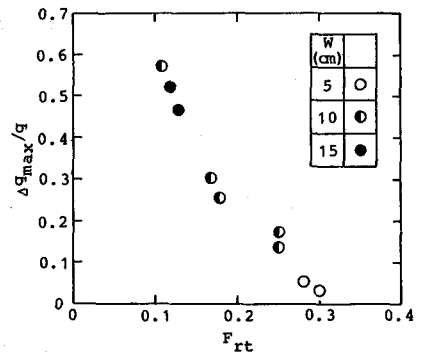


図-14 ローラーの連行流量(波状跳水時)