

段落ち直下流部の平衡洗掘深について

愛媛大学工学部 正 員 鈴木幸一
 愛媛大学工学部 正 員 清水義彦
 愛媛県 正 員 藤田 賢

1. はじめに

河床高の制御や取水などのため河川を横断して低い堰や床固め工が設置されることがある。これらの河川構造物は、その下流側がいわゆる段落ち部となっており段落ち直下流部では流水を局所的に変化せしめるために時として、その直下流部には大規模な洗掘が発生することがある。そのため現在、洪水時に全体的河床低下と局所洗掘のため、床固めが倒壊する例が数多く報告されている。そこで、本研究では段落ち直下流部で生じる平衡最大洗掘深特性を実験的に検討するが、特に流況(潜り噴流か波状跳水か)によって大きく変化することを示すとともに各流況の平衡最大洗掘深と水理量との関係を明らかにする。

2. 実験の概要

実験は平衡最大洗掘深の測定を中心に行ったが、用いた水路は幅 30 cm、全長 3.7 m であり水路中央部に段落ち部を設定し上流側を固定床、下流側をほぼ均一の粒径 0.185 cm の砂の移動床とした。段落ち高さ W は 3 cm, 5 cm, 7 cm, 10 cm および 12 cm の 5 通りとし各段落ち高さに対して流量 Q あるいは下流端水深 Y_t を 9 通り変化させて合計 45 ケースについて実験した。なお、全てのケースで段落ち頂部付近で限界水深が生じるように Y_t を設定した。

3. 洗掘の進行特性と平衡洗掘深

上下流の水位差 (ΔH) 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 図-1 で示す潜り噴流 (Submerged Jet) が発生し、逆に水位差がある程度より小さくなると、主流水脈が水面に移り 図-2 で示す波状跳水 (Wave Jump) が発生する。潜り噴流から波状跳水、あるいは波状跳水から潜り噴流に移行する遷移領域では、潜り噴流と波状跳水が交互に発生する。潜り噴おおよび遷移領域の各流況の最大洗掘深の時間的変化を 図-3 および 4 に示す。移動床(砂)などの直下流部の局所洗掘現象は、主に潜り噴流によって引き起こされ、洗掘の進行に伴って洗掘孔内から砂が運び出され砂堆が形成される。また波状跳水時には洗掘孔内の流れは逆流ローラーとなり、砂堆は崩壊し洗掘孔内へ埋めもどされる。洗掘はいつまでも進み厳密には平衡状態に至らないが本実験においては $\sqrt{g/hc \cdot t}$ の値が 10^5 のとき十分平衡状態になっているとみなしこのときの最大洗掘深を平衡最大洗掘深 (Z_{smf}) と定義する。

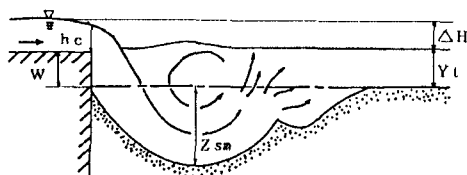


図-1 潜り噴流 (Submerged Jet)

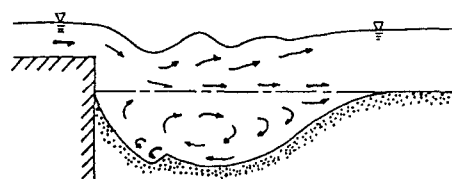


図-2 波状跳水 (Wave Jump)

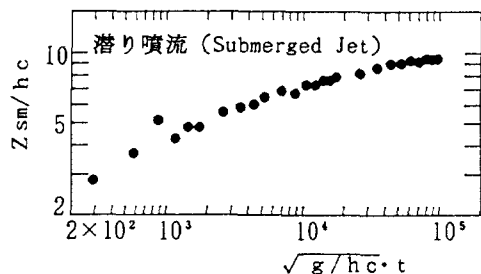


図-3 最大洗掘深の時間的変化

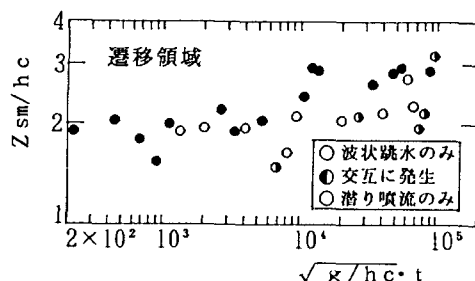


図-4 最大洗掘深の時間的変化

4. 流況の境界

流況(潜り噴流か波状跳水か)によって平衡最大洗掘深は大きく変わってくるが、どのような条件で潜り噴流になるのか、波状跳水になるのかを明らかにしなければならない。流況を支配する要因として段落ち部での全エネルギー損失(ΔE)に着目して解析をおこなった。図-1のI, II断面にベルヌイの定理を適用し、下流での速度水頭は非常に微小であるため無視して ΔE を求め、そしてこれを hc で無次元化すると $\Delta E/hc = 3/2 + (W - Yt)/hc$ が得られる。 $\Delta E/hc$ の値は、段落ち高さ(W)と下流水深(Yt)の差によってほぼ決まる。図-5に $\Delta E/hc$ と下流でのフルード数(Fr)との関係を示している。本実験において流況の境界を決定すると、潜り噴流から潜り噴流と波状跳水が交互に発生する場合、あるいは潜り噴流と波状跳水が交互に発生する場合から潜り噴流への境界は、 $\Delta E/hc$ が2付近となり

$$\left. \begin{array}{l} \Delta E/hc \geq 2 \cdots \text{潜り噴流が発生} \\ \Delta E/hc < 2 \cdots \text{潜り噴流以外が発生} \end{array} \right\} (1)$$

と区別できる。

5. 平衡最大洗掘深の推定

平衡最大洗掘深の推定式として Jaeger 式は $hs/hc = 3.35 (Yt/d)^{1/3} (\Delta H/hc)^{1/4}$ (2) と表され、ここに $hs = Z_{smf} + Yt$ であり、この(2)式の妥当性を検討したものが図-6である。図中の破線で示される Jaeger の式は全データを包絡するよう特に流況が変化する場合には洗掘深を過大評価していることがわかる。段落ち直下流部で発生する平衡最大洗掘深(Z_{smf})の大きさは、発生する流況によって大きく変化する。そこで各流況における平衡最大洗掘深を流量、段落ち高さ、下流水深、エネルギー損失などの関数であると考え、次元解析を行い種々の無次元量の組み合わせを考えて実験データを整理したところ、図-7のように Z_{smf}/hc と $(\Delta E/hc)(hc/Yt)^{1/2}$ とはほぼ一義的な関係が認められた。すなわち、

$$\left. \begin{array}{l} \text{潜り噴流の場合} \\ Z_{smf}/hc = 2.0(\Delta E/hc)(hc/Yt)^{1/2} + 4.2 \\ \text{ただし } 0.9 \leq (\Delta E/hc)(hc/Yt)^{1/2} \leq 4.1 \\ \text{潜り噴流以外の場合} \\ Z_{smf}/hc = 4.1(\Delta E/hc)(hc/Yt)^{1/2} + 0.2 \\ \text{ただし } 0.3 \leq (\Delta E/hc)(hc/Yt)^{1/2} \leq 1.2 \end{array} \right\} (3)$$

6. おわりに

本研究の実験において以下の結論を得た。

- (1) 段落ち直下流部の平衡最大洗掘深は、段落ち直下流部で発生する流況に大きく左右される。
- (2) 流況の境界は主に全エネルギー損失(ΔE)と深くかかわっており、(1)式の結果が得られた。
- (3) 段落ち直下流部の平衡最大洗掘深は、(1)式より流況を判定し、(3)式を用いて推定することができる。

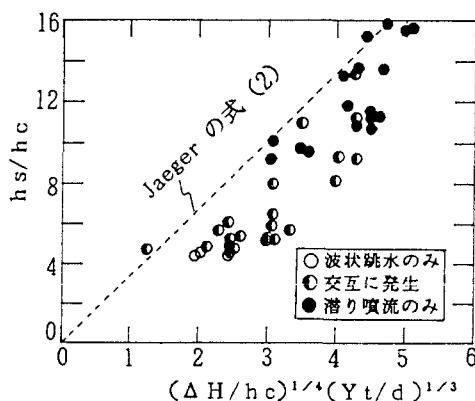


図-5 Jaeger 式の検討

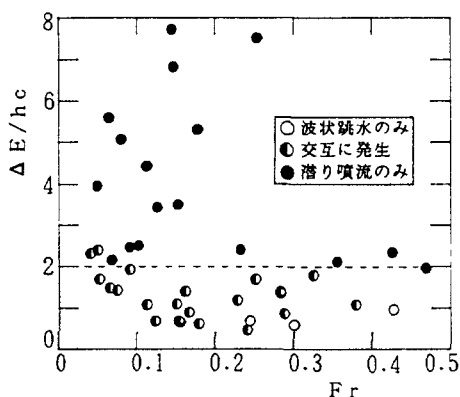


図-6 流況の境界

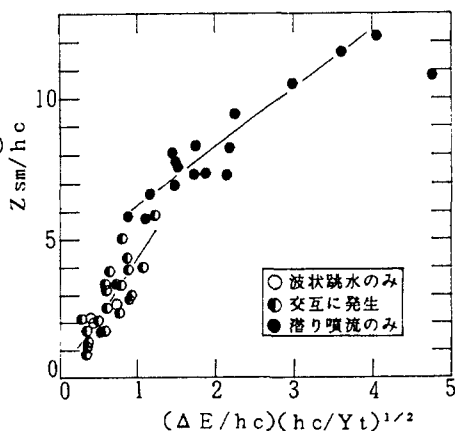


図-7 平衡最大洗掘深の推定