

1. はじめに

砂防ダム及び床固工の基礎根入れ深は、前庭部の局所洗掘深を予測し、この洗掘深より深く計画すれば安全である。予測される洗掘深に対して十分な根入れ深が確保できない場合は、副ダム、水叩き、護床工などの前庭保護工が必要となり、この場合も副ダムや水叩きの下流の局所洗掘深を予測して、副ダムや垂直壁の基礎の根入を決めることが重要である。砂防ダムからの落下水による前庭部の局所洗掘に関する研究は、林¹⁾によるものがある。林は粒度の分布を表わす標準偏差 ($\epsilon = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$) の小さい一様砂に近い河床材料を条件として、洗掘深を求める式を提案しているが、現地への適用を図る場合に標準偏差の大きい混合粒砂を条件とする局所洗掘深についても考察しておく必要がある。鈴木²⁾は、限界流に近い床固工の水叩き上の流れを対象に、水叩き下流の洗掘深を求める式を提案しているが、既設流路工における水叩き上のフルード数の設計値は2~3程度が多い現実からも射流の流れを条件とする場合の水叩き下流の局所洗掘深についての検討が必要である。

筆者は、粒度分布を変化させた水理実験により、床固工天端からの落下水による局所洗掘深を林の式によって考察した。また、流路工を計画するような急勾配河川での床固工を対象に、水叩き下流の局所洗掘を実験的に考察し、いくつかの知見を得たのでここに報告する。

2. 自由落下水脈による床固工前庭部の局所洗掘

2.1 実験の概要

実験は、幅 0.5m と 0.2m の水路を使用し、河床材料は図-1 に示す平均粒径 $d_m = 1.7\text{mm}$ と 5.0mm の砂を用いた。河床勾配は、1/150 で、給砂は行っていない。単位幅流量は、5~20 l/s/m 床固水通し天端と床固直下流の初期河床高の差 H (以後、落下高と呼ぶ) は 5cm と 10cm とした。

2.2 最大洗掘深

林は、洗掘平衡説の考え方の基に最大洗掘深 h を求める次式を提案している。

$$\frac{h}{d \sin \theta} = C \left\{ \frac{1}{(\sigma / \rho - 1) \tan \psi} \left(\frac{qV}{gd^2} \right) \left(\frac{D}{d} \right)^\alpha \right\}^\beta \dots (1)$$

ここに、 h : 初期河床からの最大洗掘深+下流水深、 d : 砂礫の代表粒径、 θ : 水面貫入後の水脈の進入角、 σ : 砂礫の密度、 ρ : 水の密度、 ψ : 砂礫の静止摩擦角、 q : 単位幅流量、 V : 落水脈の貫入流速、 g : 重力加速度、 D : 貫入ナップ厚、 C 、 α 、 β : 均一砂、混合砂によって変わる係数である。式(1)を用いて

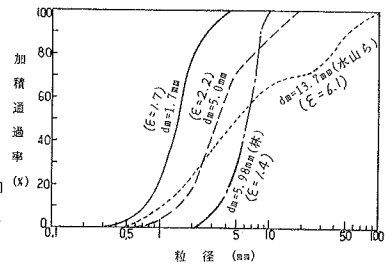


図-1 粒度分布図

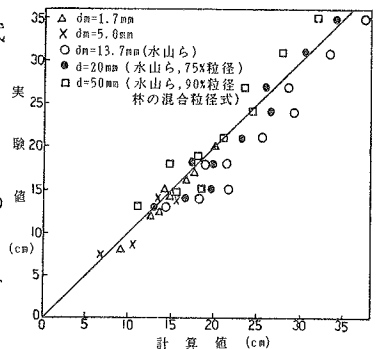


図-2 実験値と計算値の比較(最大洗掘深)

計算した最大洗掘深 h と実験値の関係を砂礫の代表粒径をパラメータに用いて図-2 に示している。式(1) による洗掘深の計算条件として θ と D は実験値、 $\tan \phi = 0.933$ 、 $\sigma / \rho = 2.65$ とし、 V は $\sqrt{2gH_E}$ (H_E ; 有効落差) で与え、均一粒径砂の場合に $\alpha = \beta = 0.5$ 、 $C = 4.0$ 、混合粒径砂の場合に $D/d < 2$ のときの $\alpha = 4/5$ 、 $\beta = 1/2$ 、 $C = 5.0$ の係数を用いた。均一粒径砂の条件での計算値は、 $d_m = 1.7\text{mm}$ ($\varepsilon = 1.68$) と $d_m = 5.0\text{mm}$

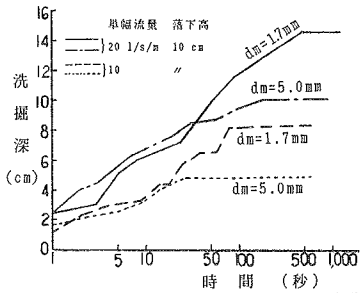


図-3 洗掘深の時間的変化

($\varepsilon = 2.24$) の場合の実験値に比較的うまく一致するが、 $d_m = 13.7\text{mm}$ 標準偏差 $\varepsilon = 6.12$ の広い粒度分布での水山らの実験値に対しては、計算値の方が実験値より少し大きい。また、林が提案した 90% 粒径を用いた混合粒径砂の条件での計算値は、実験値に比べて少し小さくなる傾向がみられ、75% 粒径を用いた均一粒径砂の計算条件での計算値の方がより実験値との適合性がよい。平衡状態における最大洗掘深は、本実験のように標準偏差が $\varepsilon = 1.7 \sim 6.1$ の範囲であれば砂礫の代表粒径を 70~75% として、式(1) の均一粒径砂の条件を適用して求めることができるが、より式の実用化を図るためには種々の粒度分布をもつ河床材料を用いて、標準偏差と代表粒径との関係を明らかにすることが大切であると考えられる。

流量と河床材料の平均粒径を変えて洗掘深の時間的変化を調べて図-3 に示した。図-3 より、平均粒径が異なっても同じ流量のもとでは、通水前期の洗掘深の時間的変化の傾向はほぼ同じである。また、粒径が同じであれば流量の多い方が、平衡状態に達するまでの時間を長く要し、同じ流量であっても平均粒径の大きい方が短時間で平衡状態に達していることがわかる。一般に床固工などの基礎根入深は、ピーク流量に対する平衡状態での最大洗掘深を予測して決める例が多い。しかし、実際の洪水波形におけるピーク流量の継続時間は短いので洗掘深が過大に評価される恐れがあり、洗掘深の時間的変化を予測する手法を検討する必要がある。

3. 水叩き下流の洗掘

3.1 実験の概要

実験は、幅 0.9m と 1.5m の幅の水路を使用して行なった。河床材料は、図-1 に示す平均粒径 $d_m = 1.7\text{mm}$ の砂を用いた。河床勾配は 1/150 で、給砂は行なっていない。流量は、10~25 l/s、床固水通し天端と水叩き天端の差 w (以後、落差と呼ぶ) は 5~25cm の範囲で変化させた。水叩き上のフルード数 Fr は 2.7 から 7.4 である。

3.2 水叩き下流の最大洗掘深に関する実験結果と考察

水叩き下流の局所洗掘深 Z は、式(2) によって示され、さらに次元解析的に示せば式(3) のようになる。

$$Z = f(w, h, q, g, \sigma, \rho, d_m) \dots (2)$$

$$\frac{Z}{h_1} = f\left(\frac{q^2}{g \cdot w^3}, \frac{\sigma}{\rho}, Fr, \frac{d_m}{h_1}\right) \dots (3)$$

ここに、 w : 床固工の落差、 h : 水叩き上の水深

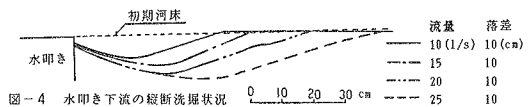


図-4 水叩き下流の縦断洗掘状況

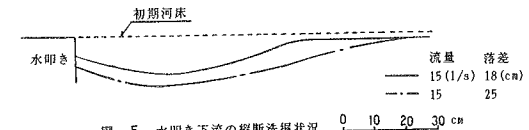


図-5 水叩き下流の縦断洗掘状況

dm : 代表粒径である。平衡状態に達したときの水叩き下流の洗掘状況の例を示すと図-4、図-5のようになる。図-4は、落差wが一定で流量を変化させた場合の洗掘状況を示し、図-5は、流量が一定で落差wを変化させた場合の洗掘形状を比較して示している。図-4より、流量が多くなるほど最大洗掘深と洗掘長が増加し、図-5より落差が大きいほど洗掘深が深くなるのが分かる。最大洗掘深Zsと流量及び落差の関係を示すと図-6、図-7のようになる。洗掘状況の進行過程を示すと以下の通りである。通水初期には、洗掘深は浅く流下方向に長い形状をしており主流水脈は比較的水平に近い。時間の経過と共に洗掘が進み洗掘深が増大すると、水叩き下流部の主流水脈は急に向下き(鉛直方向)に潜り込み深さ方向に洗掘が進む。しかし、ときおり主流水脈が水平下流方向となり河床面近傍の逆流で洗掘部が埋め戻され、以後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。

これは、鈴木ら²⁾が述べている傾向と一致する。鈴木らは、床固工天端と移動床とを一致させた限界流に近い条件で実験を行なって、最大洗掘深は図-8に示す関係より式(4)のように表わされ、時間のほぼ1/3乗に比例することを得ている。

$$Zs / hc = \alpha (\sqrt{g / hc} \cdot t)^{1/3} \quad \text{..... (4)}$$

ここに、Zs : 最大洗掘深、hc : 限界水深、α : 係数(0.04~0.05)、t : 時間である。図-8に、落差をパラメータとした本実験値を鈴木らの実験値と比較して示した。鈴木らはdm=0.6mmの砂を用いているのに対し、本実験では1.7mmの砂を使用しているがいずれのケースも本実験の方が最大洗掘深が大きく、落差wが大きいほど最大洗掘深が大きいのが分かる。鈴木らの実験値も用いて、式(3)より水叩き面上のフルード数FrとZs dm(σ/ρ-1)/h₁²の関係をdm/h₁=0.02~0.23の範囲で行なった実験値を用いて整理すると図-9のように示され、最大洗掘深は式(5)で表わされる。

$$\frac{Zs \, dm (\sigma / \rho - 1)}{h_1^2} = 0.05 Fr^{2.35} \quad \text{..... (5)}$$

本実験で得られた水叩き上の水深h₁は、高段落からの自由落下水脈の現象を示すランドの式で求めた計算値に近似する。そこで、水叩き上のフルード数Frを流量と水深で表わし、水叩き上の水深

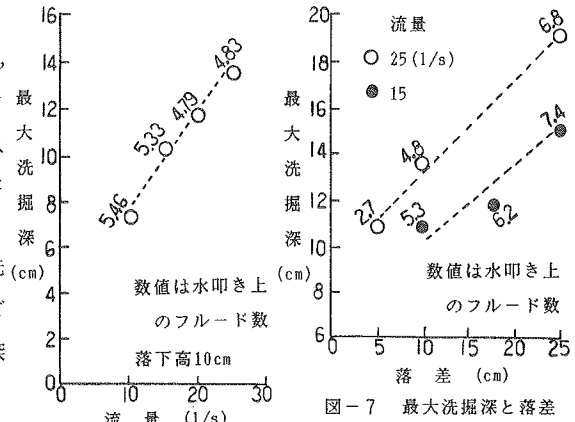


図-6 最大洗掘深と流量

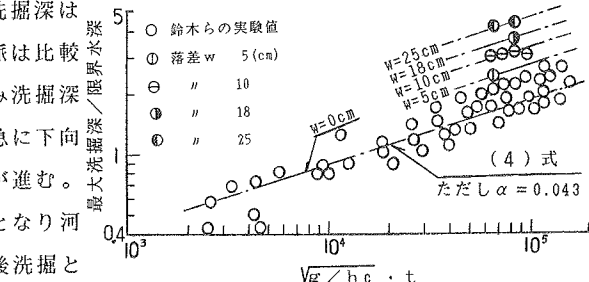


図-7 最大洗掘深と落差

図-8 最大洗掘深の時間的变化

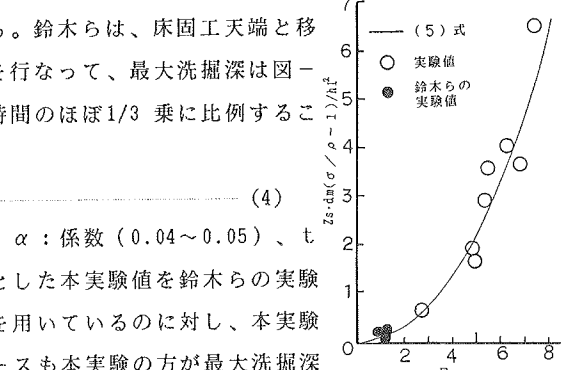


図-9 水叩き下流の局所洗掘深と水叩き上のフルード数の関係

h_1 をランドの式を用いて整理すると、平衡状態に達した場合の最大洗掘深 Z_s を求める次式が得られる。

$$Z_s = 0.155 \frac{q \sqrt{w}}{\sqrt{g} \cdot d_m (\sigma / \rho - 1)} \dots \dots \dots (6)$$

式(6)の計算値と本実験値を比較すると図-10のようになる。流量の多いところで計算値が若干大きいものがあるが、式(6)はほぼ実験値を説明していると考えられる。なお、式(6)は水叩き上の水深 h_1 を落差 w の関数として求めており、床固工の天端から自由落下する水脈が水叩きに衝突して下流に流出する条件の場合に適用できる。

3.3 水叩き下流の洗掘長

水叩き下流の前庭保護工或は護岸基礎の根入れ深を考慮する場合、水叩き下流における局所洗掘形状の流下方向の長さを知っておく必要がある。水叩き下流端から一様勾配とみなせる下流河床の上流端までの長さ L (以後洗掘長と呼ぶ) を洗掘深 Z_s に対して示すと図-11のようになり、両者の関係は近似的に

$$L = 6 \cdot Z_s \dots \dots \dots (7)$$

式(7)のように表わされる。

4. まとめと今後の課題

床固工の天端からの落下水による平衡状態に達したときの床固工前庭部の最大洗掘深は、標準偏差の大きい混合粒径砂の場合でも林の均一粒径の式を用いて求めることができ、代表粒径を70%~75%粒径とする場合に計算値と実験値との相関が高い。代表粒径を90%粒径として林が提案している混合粒径砂の式を用いた計算値は、実験値に比べて小さくなる傾向にあり、代表粒径の選定方法を明確にしておく必要がある。床固工の水叩き下流の局所洗掘深と洗掘長を実験的に考察したが、式の実用化に当たっては、床固工前庭部の局所洗掘と同様に標準偏差の大きい混合粒径砂を用いた検討が必要である。また、実際の洪水流を想定して洗掘深の時間的変化を予測する手法を検討する必要がある。これら残された課題に対する研究を進め、より実地的な現地への適用を目指したい。

参考文献

- 1) 林 拙郎；砂防ダムの機能評価に関する研究，自然災害特別研究成果報告書，昭和61年
- 2) 鈴木幸一他；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
- 3) 水山高久他；大礫の散在する河床の流砂量と河床変動，土研砂防事業調査費報告，昭和61年

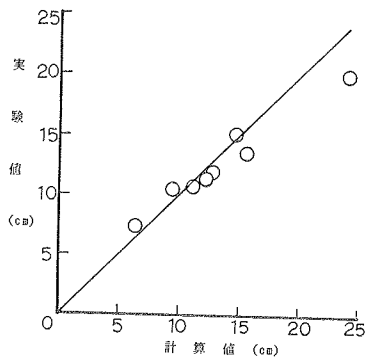


図-10 計算値と実験値の比較
(水叩き下流の局所洗掘深)

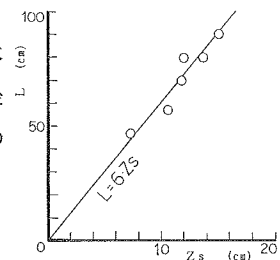


図-11 洗掘長と最大洗掘深の関係