

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  
出雲市役所 正員 香川 章

### 1. はじめに

河床低下河川においては、河床低下の防止・軽減の目的で河川を横断して床固めが設置されることが多いが、全体的な河床低下に加えてその直下流部の著しい局所洗掘のために、床固め基礎の安全性が脅かされている事例も少なくない。天端を現河床面と一致させた床固め直下流部の局所洗掘現象は、水門下流部の局所洗掘現と類似はしているが、水門からの水平噴流と堰を越す流れでは流況がかなり異なること、床固め上下流での水深差が大きくないこと、また、洗掘初期では上流からかなりの流入砂がありこれが、河床全体の低下と共に変化してくることなどの点で違いが見られる。本研究では、床固め直下流部の局所洗掘現象の内部機構を実験的にまず明らかにし、それらの知見の解析的説明を試みようとするものである。

### 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、水門下流部と同様に洗掘機構の違いにより、初期、中期、終期と概略的に大別できる。以下、それらの過程の特性を定性的に述べる。

i) 初期洗掘過程：床固め上で流れが射流となって、もぐり噴流に移行するまでのものであり、写真-1に示すようにほぼ河床面に沿う流れによって洗掘される過程である。

ii) 中期洗掘過程：初期洗掘の進行に伴って床固め上で射流が生じるようになり、床固めを通過した流れは下向きに弯曲し、波状跳水を起こすが、その後、写真-2に示すように流れはもぐり噴流に移行し、深さ方向の洗掘が卓越する過程である。また、この過程は洗掘深もそれ程大きくない時に起こり、噴流の主流水脈もあまり拡散されず掃流力が大きいので、急激な洗掘が生じるとともに、洗掘砂は下流へ流送される。

iii) 終期洗掘過程：中期洗掘の進行に伴って、洗掘孔下流側斜面の傾斜が増大するとともに、主流水脈も拡散し洗掘した砂を下流へ流送する能力も弱まるため、洗掘孔下流側に堆砂部が生じ通水を阻害するようになる。通水を阻害されると床固めを通過した流れは下向きのもぐり噴流から、急激に上向きの流れとなり水面付近を再び波状になって流下するがこのとき河床付近にローラーが生じこれによって洗掘孔は埋め戻しが始まる。その後は、写真-3および写真-4に示すように、洗掘と埋め戻しが交互に繰り返される。一般に、波状跳水からもぐり噴流に急変する時は、洗掘孔内に生じる強いローラーによって形成された埋め戻し部先端が、洗掘孔上流側斜面に接続する時であり、逆にもぐり噴流から波状跳水に急変するのは、洗掘された砂の下流部の堆積部が洗掘孔へ崩壊するのと同時に起こることが観察された。

### 3. モデルによる解析

ここでは、先に述べた、i) 初期および ii) 中期洗掘過程のみについて考

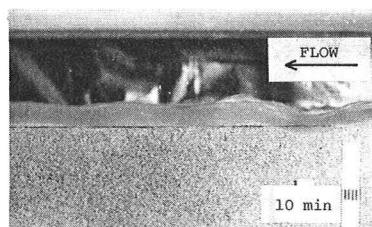


写真-1 初期洗掘過程

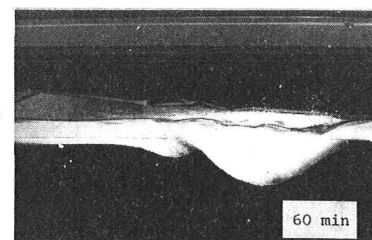


写真-2 中期洗掘過程

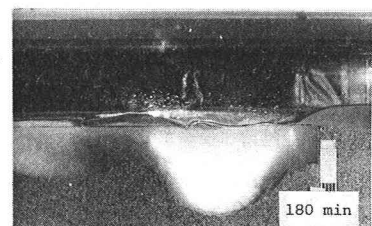


写真-3 終期洗掘過程 (洗掘)

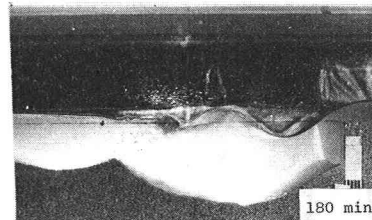


写真-4 終期洗掘過程 (埋め戻し)

案を行なう。

①流れのモデル化：洗掘の初期においては河床変動量がごく小さく流れはほぼ河床に沿っているが、床固め下流において少しでも河床低下が起こると床固め下流側エッジで流れは剥離する。剥離した流れは少し下流側で再び河床に接触するがこの reattachment point から図-1 に示すように厚さ  $\delta(x)$  の境界層が発達するものとし、ここで、粗い平板上発達する乱流境界層についての従来の研究成果がこの場合も適用できると考え、抵抗に関する Manning-Stickler の関係式、および境界層厚  $\delta$  を、それぞれ、

$$(U_k/U_0)^2 = 0.025 (k_s/\delta)^{1/3} \quad (1)$$

$$\delta = 0.248 x (k_s/x)^{1/4} \quad (2)$$

で表わせば、reattachment point を原点として流下方向距離  $x$  の位置での摩擦速度  $U_k$  は、

$$U_k = 0.141 U_0 (x/k_s)^{-1/8} \quad (3)$$

と書ける。ここに、 $k_s$  は相当粗度、 $U_0$  は境界層外縁の流速であり、ここでは断面平均流速を与える。中期洗掘過程における流れは、図-2 のように床固めを越流した射流水脈が自由落下する噴流のような形で、洗掘孔底部に当たり下流側の洗掘孔底面に沿って流れ、この reattachment point を原点とする乱流境界層が洗掘孔下流面で発達していくものとする。reattachment point の位置は越流水脈が自由落下噴流の形をしているので越流水脈が標準型越流ナップ形状 (Randolph 曲線) で近似できるものとする、その曲線と河床面との交点によって与える。

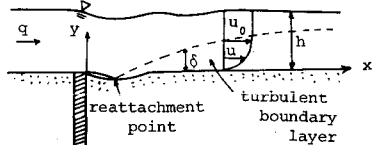


図-1 初期洗掘過程

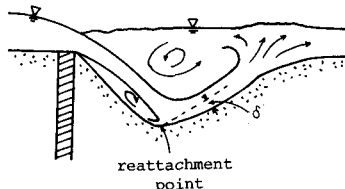


図-2 中期洗掘過程

2) 河床変動の基礎式：床固め直下流部では床固め地点より上流からの流入砂がごくわずかであるので、いわゆる流砂が非平衡状態におかれている。すなわち、各地点の摩擦速度  $U_k$  が式(3)で与えられてもその  $U_k$  を用いて平衡状態の流砂量式で計算される程の流砂量が各地点ではない。このような非平衡な流砂状態での河床変動の基礎式は、土屋<sup>2)</sup> 斎藤<sup>2)</sup> と同様な考え方で、 $P_s(x)$  を地点  $x$  における砂の pick up rate,  $\bar{q}_{s0}$  を平衡状態での流砂量とすると、

$$\partial z(x,t)/\partial t = 1/(1-\lambda) \cdot (1/L) \left\{ \bar{q}_{s0}(x) - \int_0^x \bar{q}_{s0}(x-\xi) \cdot f_\lambda(\xi) d\xi \right\} \quad (4)$$

で示される。ただし、 $z$  は河床高、 $t$  は時間、 $\lambda$  は空隙率、 $f_\lambda(\xi)$  は移動砂の step length の確率密度関数であって平均的な step length を  $L$  として、 $f_\lambda(\xi) = (1/L) \exp(-\xi/L)$  で示されることか実験的に報告されている。

3) 洗掘進行の数値計算と結果の考察：平衡状態の流砂量式として、洗掘進行に伴う洗掘孔下流側斜面勾配  $\theta$  を考慮して修正した芦田道正式、

$$\bar{q}_{s0}/\sqrt{g d^3} = (P/\sin \theta + \mu_4 \cos \theta) T_{se}^{3/2} \left\{ 1 - (U_{kc}/U_k)^2 \right\} \left\{ 1 - U_{kc}/U_k \right\} \quad (5)$$

$P=8.5$ ,  $\mu_4$ : 砂粒子の動摩擦係数 (0.4~0.5), を用いて式(4)を数値計算した。図-3 は洗掘孔形状の時間的变化を示したものであるが、モデル解析結果 (図中実線) は点線と示される実測結果のような滑らかな曲線を十分には説明し得ないか、全体的に傾向は捉み得ているようである。図-4 は最大洗掘深の時間的变化を示しているが、計算結果は比較的よく中期洗掘過程の洗掘進行特性を表わすものとする。(参考文献)

1) 斎藤隆: 土木学会論文報告集 第282号 2) Tsuchiya, Y.: 12th Hyd. Conf. 1967

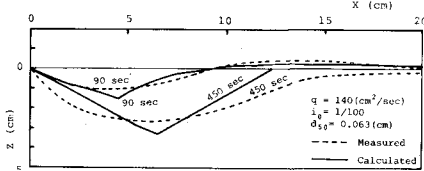


図-3 洗掘孔形状の時間的变化

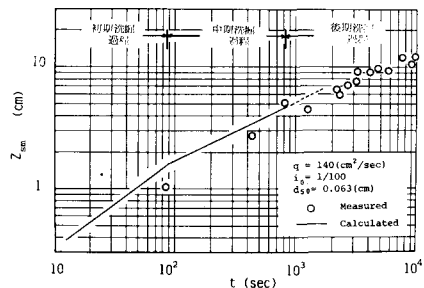


図-4 最大洗掘深の時間的变化