

京都大学防災研究所 正員 ○村本嘉雄
京都大学 大学院 学生員 吉村知司

1 まえがき

開水路弯曲部における局所洗掘は断面急変部あるいは水理構造物周辺などの局所洗掘現象と同様に局所的に急激なエネルギー損失を誘起する方向に進行すると考えられる。しかし、通常の弯曲部における断面平均のエネルギー損失量が小さいことを反映して、洗掘の進行にともなう断面平均の河床高、水位、粗度係数の変化量は極くわずかであって、流下方向一次元的な解析による平均洗掘量の評価とその実験的検証は難しい。とくに、実際問題で重要な最大洗掘深などを論ずるためには当然横方向の変化を重視した二次元的な取り扱いを必要とする。

われわれはこれまで弯曲部における洗掘の進行過程に着目して実験的検討を行なうとともに、通水初期における横断方向の河床形状の変化について解析を行なってきた^(1,2)。しかし、洗掘進行後の流水および流砂の特性が明らかでなかったために、最終状態にいたる全過程を定量的に論ずるに至っていない。

本文では、弯曲部における洗掘の進行過程の特徴と洗掘進行後の流況、流向分布、変化を実験結果にもとずいて述べる。

2 局所洗掘の進行過程

弯曲部における河床の時間的变化は外岸（凹岸）をのり洗掘過程によって支配されるが、その過程は洗掘形状がひとみつきのような段階に分けられる。

- (1) 弯曲部終点付近の洗掘が上流へ波及する過程
- (2) 外岸をのりに一様な洗掘が進行する過程
- (3) 洗掘凹所が分離して洗掘穴が発達し、最終状態にいたる過程

また、弯曲部の外岸における平均的な洗掘量の時間的变化を $\bar{z}_2/\bar{h}_2 \sim 80t/\bar{h}_2 R_2$ の無次元量で表示すると、(1)、(2)の過程は 10^{-1} 、(3)は $80t/\bar{h}_2 R_2 > 10^1$ で生ずることが実験的に明らかになっている。ただし、 $\bar{z}_2$, $\bar{h}_2$ は外岸をのりの平均的な洗掘深および水深、 R_2 は外岸の曲率半径、 t : 通水時間、 Q_0 : 単位巾流砂量である。

洗掘の最終状態における河床形状の一例を特徴的に示すと図-1 のようである。図-1 には、初期河床を基準とした洗掘堆積の境界線および内岸、外岸をのりの河床高、弯曲部で発生する砂堆の前後線が記してある。

外岸をのりの洗掘形状は洗掘、堆積の境界線にはほぼ対応し

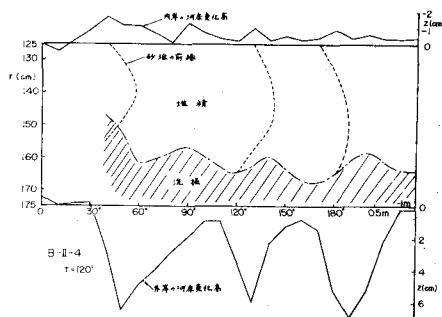


図-1 最終状態における河床形状

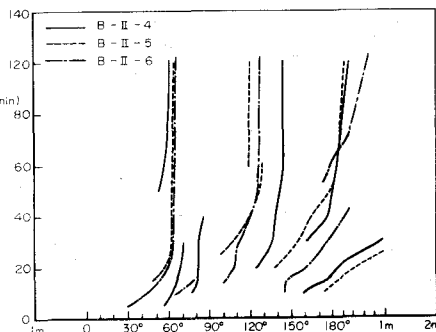


図-2 砂堆の走時曲線

たモードとし、最大洗掘深は砂堆前縁線と外岸との交差付近で発生している。弯曲部における砂堆は図のように一方向に偏するが、その発生移動状況を砂堆先端の定時曲線によすと図-3のようである。ただし、各ケースの実験条件は下表のとおりである。

水路中 50cm		弯曲偏角 180°	平均砂粒径 $d_m = 1.74\text{mm}$		
中心曲率半径 150cm		初期こう配 1/200	標準偏差 $S = 1.42$		
実験番号	流量 (%)	平均水深 (cm)	Fr 数	粗度係数 n	単位中流砂量 (cm^3/sec)
B-II-4	6	3.61	0.552	0.0223	0.0155
-5	8	4.37	0.558	0.0219	0.0385
-6	10	5.06	0.561	0.0222	0.0708

図-3にみるように $t < 40'$ では砂堆の移動が顕著であるが、次第に緩和し、 $t < 70'$ では弯曲部終点付近に発生する砂堆を除いて弯曲部内の移動は停止する。こうした砂堆の移動性は砂堆より掃流砂と弯曲部固有の二次流との相互関係によって定まり、弯曲部内では砂堆の前縁に滑り落ちる流砂量と水面二次流によって内壁へ掃流される流砂量と平衡する位置で停止する。弯曲部終点付近では、前者が卓越して砂堆の発生、移動、下流への伝播の過程が繰り返される。また、最終状態における外壁側の洗掘深もこれに対応して、弯曲部内では安定しているが、終点付近では周期的に変化する。

(3). 洗掘の進行による流速、流向分布の変化

上述のように弯曲部の洗掘の進行過程(1)~(3)には砂堆の作用が加わる。こうした洗掘の過程とその機構を把握するために洗掘の各段階において河床を固定して流速、流向分布測定を行なった。現在、(1)~(2)の段階の河床形状についての測定結果が得ていないが、実測値にみえる特徴的な特性を述べる。

実験は上表のB-II-4のケースで $t=0, 5', 40', 20'$ 後の河床状態について行なった。河床の固定には水系ビニール壁塗料を用い、河床粗度が変化しないように留意した。流速測定は標準型ピトー管(φ1mm)、流向測定には円柱ピトー管およびベーン(φ6mm, 長さ16mm)型流向計を用いた。

前報で述べたように弯曲部の洗掘現象は流砂の連続式をもとにして考えると河床のせん断応力の絶対値とともにその方向の分布が問題となる。すなわち、円筒座標表示による流砂の連続式

$$\frac{\partial Z}{\partial t} - \frac{1}{(1-\lambda)} \left\{ \frac{\partial \theta_{00}}{r \partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (g_r r) \right\} = 0 \quad (1)$$

で $g_r = g_{00} \tan \varphi$, $g_{00}(u_{\theta 0})$ とすると,

$$\frac{\partial Z}{\partial t} - \frac{1}{(1-\lambda)} \left\{ \left(\frac{\partial u_{\theta 0}}{r \partial \theta} + \tan \varphi \frac{\partial u_{\theta 0}}{\partial r} \right) \frac{d g_{00}}{d u_{\theta 0}} + \left(\frac{\tan \varphi}{r} + \frac{\partial}{\partial r} \tan \varphi \right) g_{00} \right\} = 0 \quad (2)$$

と表わされるが、上式でとくに外岸近くの洗掘には $\frac{\partial}{\partial r} (\tan \varphi) g_{00}$ の項が支配的となる。したがって、ここでは断面付近における $\tan \varphi$ の半径方向の分布について検討を行なう。

図-3は初期河床($t=0$)の150°断面で $Z=0.5\text{cm}$ の点における $\tan \varphi$ の分布を3種の流量について検討したものである。図-3の

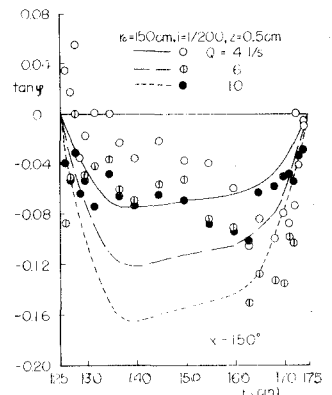


図-3 $\tan \varphi$ の分布 ($t=0$)

曲線は Rozovskii の式²⁾を側壁付近で補正した次式を示している。

$$\tan\varphi = f(r) \frac{1}{K^2} \frac{R}{r} \frac{F_1(z') - \frac{\sqrt{g}}{KC} [F_2(z') + 0.8(1+\ln z')]}{1 + \frac{\sqrt{g}}{KC} (1+\ln z')}, \quad F_1(z') = \int \frac{z' \ln z'}{z'-1} dz', \quad F_2(z') = \int \frac{\ln z'}{z'-1} dz' \quad (3)$$

ここで、 $f(r)$ は前報で述べた側壁付近(15cm)における補正関数(=次式)、 K は Kármán 定数(=0.5)
 C は Chézy 係数、 g は重力加速度、 $z' = z/h$ である。

$\tan\varphi$ の实测値は流量(水深)の増加にともなう大きくなる傾向は(3)式と対応しているが、水路中央部の分布形が全く異なっている。また、側壁の影響域が流量の増加とともに若干広くなるのが認められる。本実験ケースでは、水路中央部で

$\partial \tan\varphi / \partial r < 0$ となるのは $\alpha = 30^\circ$ だけで
 $\alpha = 60^\circ \sim 180^\circ$ の範囲ですべて $\partial \tan\varphi / \partial r > 0$
 の傾向を示した。これは内岸付近では、外岸付近に比して主流の鉛直方向流速分布が弯曲部後半で一樣化される傾向が強くなり、(3)式の K が半径方向一定とならないことによると考えられる。

つぎに、初期河床と洗掘進行後の二段階における $\tan\varphi$ の変化を $\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ の各断面について示すと図-4のようである。これらの図がいつきのことがいえる。

(1) 洗掘の進行にともなう内岸より(堆積域)で $\tan\varphi < 0$ から $\tan\varphi > 0$ に変化し、外岸よりで $\tan\varphi (< 0)$ の値が増加する。しかし、 $t = 5'40''$ に比して $t = 20'$ の値は小さく、すでに内岸への流向は限界値に達しているようである。

(2) $\alpha = 60^\circ \sim 180^\circ$ では、 $\frac{\partial}{\partial r}(\tan\varphi) > 0$ の領域が洗掘の進行とともに $t = 0$ のときよりさらに外岸近傍に狭くなり、 $\frac{\partial}{\partial r}(\tan\varphi) < 0$ の領域が広くなる。すなわち、洗掘域が外岸近くに集中することを示している。

(3) $\alpha = 30^\circ$ では、 $t = 5'40''$ ですでに明確な砂堆が発生しており、砂堆の前縁(rare)を境にして流向は急激な変化を示し、内岸よりでは $\tan\varphi \geq 0$ 、外岸よりでは $\tan\varphi < 0$ となる。

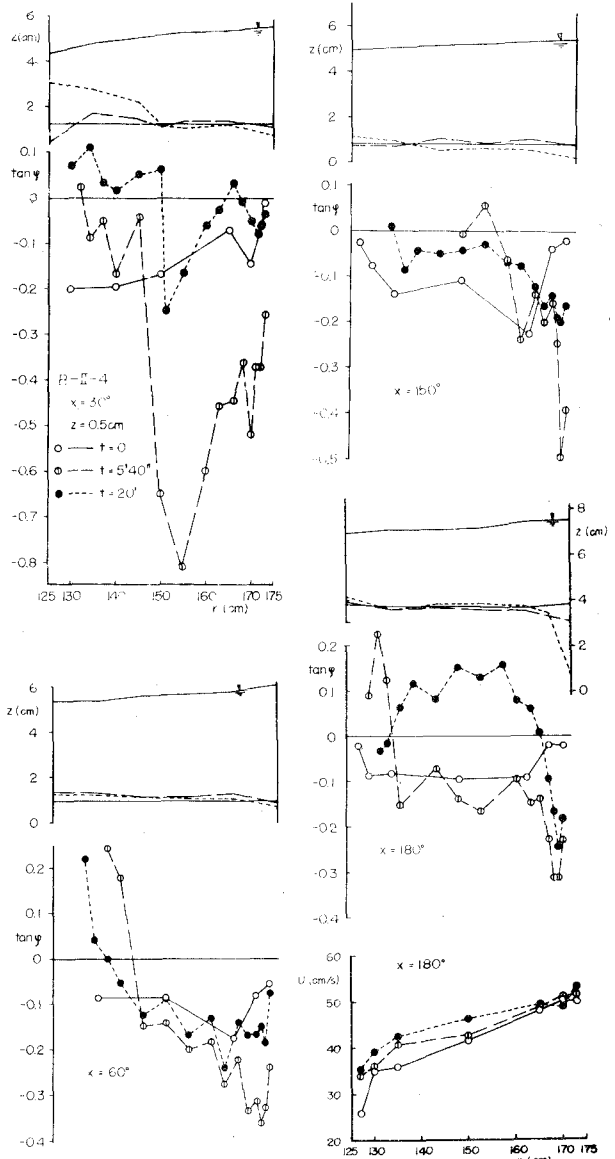


図-4 $\tan\varphi$ の分布 ($\alpha = 30^\circ \sim 180^\circ$) および U 分布 ($\alpha = 180^\circ$)

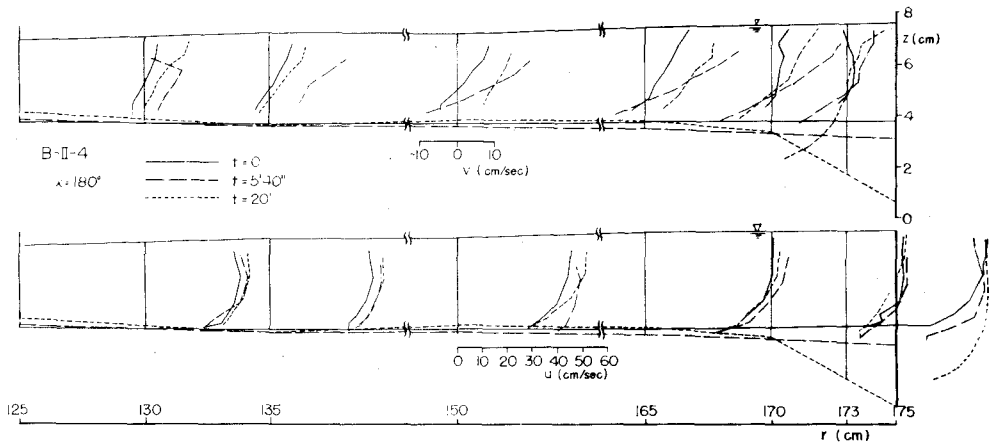


図-5 主流，二次流の流速分布

図-5は $x=180^\circ$ の断面内における主流，二次流の流速 (u , v) 分布を示したもので， v の鉛直分布も洗掘の進行とともに内岸よりで外方成分だけになり，全体として外岸よりに偏した循環流になることがわかる。

一方，主流の流速成分は $t=20'$ までの洗掘段階では二次流ほど顕著な変化が認められない。図-4に $x=180^\circ$ の断面について鉛直方向の平均流速 u の分布が示されているが，外岸付近では $t=0 \sim 20'$ の測定値がほぼ一定値をとり，内岸よりで若干小さくなる。 $x=60^\circ \sim 150^\circ$ の断面でも $\partial u / \partial r > 0$ で 180° と同様な傾向が認められた。

以上のように， $t=0 \sim 20'$ の初期洗掘段階では，従来いわれているような外岸側における二次流の減衰，流速の増大の傾向は認められなく，むしろ二次流は増大し，流速はほぼ一定の傾向を示す。なお現在，(2)～(3)の洗掘段階についての測定を進めており，局所洗掘機構に関する検討は講演時に述べる予定である。

- 1) 芦田，村本，坂本；弯曲水路における河床変動に関する研究，第2回年次学術講演集，(1967)
- 2) 村本，坂本，音村；弯曲水路の河床変動に関する研究，京大防災研究所年報，第11号 (1968)
- 3) Rozovskii, I.L.; Flow of Water in Banks of Open channels, Acad. of Sci. of Ukrainian SSR, (1957)