

京都大学防災研究所 正員 今本 博 健  
 京都大学防災研究所 正員 ○大年 邦 雄

1. はじめに：新たに橋脚を設計する場合あるいは現在の橋脚を補強するような場合には、荷重を支える強度を別にすると、まず第一にどの程度の洗掘が見込まれるかを評価することが重要な問題となる。その際、何らかの信頼しうる予測式を用いて最大洗掘深を求めるのも一法である。しかし、このような評価法により求められる洗掘深はかなり大きい。例えば、最大洗掘深（従来の知見より移動限界の条件下で生起する平衡洗掘深とする。図-1参照）が  $(Z_s/D)_{\max}=2.5$  とすると、 $D=2$  m で  $Z_{s\max}=5$  m、 $D=3$  m では  $Z_{s\max}=7.5$  m となる。このような評価法は安全ではあるが合理的であるとは考えにくい。すなわち、上述の評価法では最大洗掘深を与える水理量が定常的に長時間（平衡状態に達するまで）続くことを前提としているが、現実問題としてはそのようなことは極めて稀であろう。実際河川の洪水を考えると、継続時間は有限であり、しかも洗掘現象の支配水理量は時間的に変化している。

本研究では、既報の洗掘モデル<sup>1)</sup>を用いて洪水の増水期における洗掘深の応答を検討するとともに工学的に合理的な洗掘深の評価について考察する。

2. 非定常場における洗掘深の応答：円柱橋脚において、ある時刻  $t$  での局所洗掘深の時間的変化（洗掘速度）は、その時点での接近流の水理量とその時点での洗掘深によって規定され、次式のように表される。

$$\frac{\Delta(Z_s/D)}{\Delta(u_{x0}t/D)} = F(\tau_{x0}, \frac{h}{d}, \frac{D}{d}, \frac{Z_s}{D})$$

ここに  $u_{x0}$ ,  $\tau_{x0}$ ,  $h$  は接近流の摩擦速度、無次元掃流力、水深であり、 $d$  は砂粒径、 $D$  は円柱径、 $Z_s$  は洗掘深である。上式は既報において、定常流に対して誘導されており、本報ではこれを非定常場（洪水の増水期）に拡張して用いる。その際、1) 水面勾配は水理量の変化に依らず一定、2) 水理量の変化と流砂量の変化には遅れがない、と仮定する。1) より、 $\tau_{x0}$  と  $h/d$  とは一次の比例関係にある。2) より、 $\tau_{x0}$  と  $h/d$  を時々刻々における値に設定すれば非定常場に対

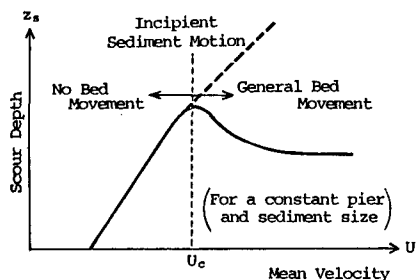


図-1：接近流の平均流速と洗掘深との関係

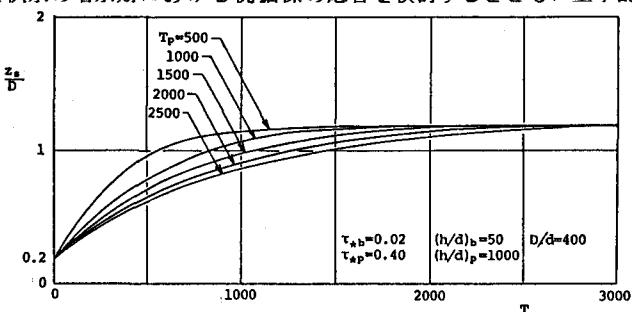


図-2：洗掘深の応答に及ぼす増水時間  $T_p$  の影響

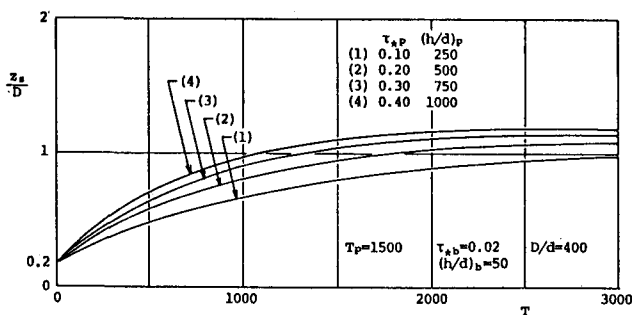


図-3：洗掘深の応答に及ぼすピーク水理量の影響

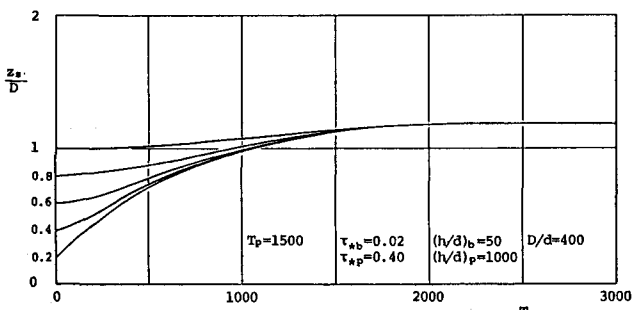


図-4：洗掘深の応答に及ぼす初期洗掘深の影響

しても適用可能となる。以上より、 $D/d$  を一定として次のような非定常場を設定する。 $T_{*c}$  base flow の状態から増水開始となる時点をも  $t=0$  とし peak flow の状態に達する時点をも  $t=tp$  として、その間  $T_{*c}$  は  $T_{*c0b}$  から  $T_{*c0p}$  まで時間とともに直線的に増大する。よって、 $h/d$  も同様に  $(h/d)_b$  から  $(h/d)_p$  まで時間とともに増大する。 $t > tp$  においては peak flow の状態が継続するとして扱う。なお、洗掘時間  $t$  は  $T = \sqrt{(0.79 - 1)gd} t/D$  と無次元化する。よって、 $tp=1 \sim 5$  時間、 $d=1.0 \text{ mm}$ 、 $D=1.0 \text{ m}$  とすると peak flow に到達するまでの無次元洗掘時間は  $Tp=460 \sim 2300$  程度である。図-2は、ピーク水理量と初期洗掘深をそれぞれ一定に保ち  $Tp$  のみを種々変化させた場合の洗掘深の応答に関するシミュレーション結果を示している。洗掘現象は水理量の急激な変化に敏感に反応し、緩慢な変化に対する反応は鈍いことがわかったとともに、各曲線について  $T=Tp$  での洗掘深を比較すると  $Tp$  の大きいほど大きな洗掘深を呈することがわかる。したがって、ピーク水理量が同一ならばピークに達するまでの時間の長い洪水ほど洗掘は進行する。次に、 $Tp$  と初期洗掘深を一定に保ちピーク水理量のみを変化させた場合を図-3に示す。当然ながらピーク水理量が軽微なほど洗掘深は小さい。最後に、 $Tp$  とピーク水理量を一定に保ち初期洗掘深のみを変化させた場合を図-4に示す。同図より、初期洗掘深の相違による影響はピーク時にはほぼ消失していることがわかる。すなわち、初期洗掘深が洪水履歴を意味すると考えられることより、洪水履歴の影響は橋脚の局所洗掘には顕著に波及しないとみなすことができる。

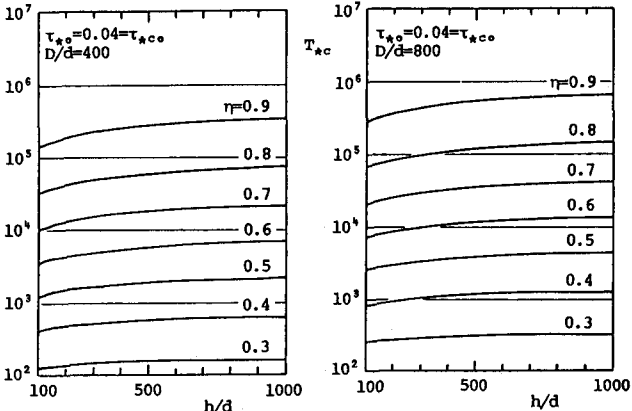


図-5：平衡洗掘深の  $\eta$  倍に達するまでの無次元洗掘時間（移動限界状態）

表-1： $\eta = 0.9$  に対する洗掘時間

D/d	d (cm)	D (cm)	$u_{*co}$ (cm/s)	$T_{*c}$	t (hour)	N
400	0.1	40	2.54	$10^5 \sim 5 \times 10^5$	437 ~ 2187	87 ~ 437
	0.2	80	3.60		617 ~ 3086	123 ~ 617
	0.3	120	4.40		758 ~ 3789	152 ~ 748
800	0.1	80	2.54	$4 \times 10^5 \sim 8 \times 10^5$	3500 ~ 7000	700 ~ 1400
	0.2	160	3.60		4938 ~ 9877	988 ~ 1975
	0.3	240	4.40		6060 ~ 12121	1212 ~ 2424

比較すると  $Tp$  の大きいほど大きな洗掘深を呈することがわかる。したがって、ピーク水理量が同一ならばピークに達するまでの時間の長い洪水ほど洗掘は進行する。次に、 $Tp$  と初期洗掘深を一定に保ちピーク水理量のみを変化させた場合を図-3に示す。当然ながらピーク水理量が軽微なほど洗掘深は小さい。最後に、 $Tp$  とピーク水理量を一定に保ち初期洗掘深のみを変化させた場合を図-4に示す。同図より、初期洗掘深の相違による影響はピーク時にはほぼ消失していることがわかる。すなわち、初期洗掘深が洪水履歴を意味すると考えられることより、洪水履歴の影響は橋脚の局所洗掘には顕著に波及しないとみなすことができる。

3. 考察：以上に示したシミュレーション結果を工学的観点より考察すると、ピーク水理量下における最大洗掘深を適切に評価することが合理的であり、流れの非定常性の影響は安全側であることが示唆される。この点に関してさらに検討する。いま、ピーク水理量が移動限界状態に対応している洗掘場を想定し、その水理量が長時間継続する場合の洗掘深の時間変化に着目する。このとき、本洗掘モデルを用いて、洗掘深が平衡洗掘深の  $\eta$  倍 ( $Z_s = \eta Z_{se}$ ) に到達するまでの洗掘時間  $T_{*c} = u_{*co} t/D$  を種々の  $\eta$  ( $= 0.3 \sim 0.9$ ) に対して求めると図-5が得られる。ただし初期洗掘深は0としている。ここで  $\eta = 0.9$  に着目すると、同図より表-1が得られる。表におけるNは、一回の出水で移動限界の状態が5時間継続すると仮定した場合に  $Z_s = 0.9Z_{se}$  に達するまでの出水の回数を表わす。同表より次の事項が指摘できる。

- 1) 設計上考慮すべき洗掘深を移動限界に対応する条件下での平衡洗掘深とするか、それともピーク水理量下における最大洗掘深とするかは当該河川の出水特性に依存する。
- 2) 移動限界状態を越える出水がある程度の頻度で期待できる河川では、移動限界以下の出水が連続して生起していてもその途中で一回でも移動限界を越える出水があれば、短時間で洗掘あるいは埋戻しが進行しそれまでの出水履歴は消失するから、ピーク水理量下における洗掘深の変動を考慮した最大洗掘深に着目するのが工学的に合理的であるといえる。

なお、橋脚上流部にアーマコートが形成されていたり砂州が固定されている場合などのように、橋脚周辺の砂粒に対しては移動限界以上であっても洗掘孔への土砂供給が見込まれないような場合には相当大きな洗掘深となることが予想され（図-1の破線）、clear water scour としての取扱いをすることが重要となる。

参考文献 1) 今本・大年：砂堆河床における円柱橋脚周辺の局所洗掘特性について、昭61年度関西支部年講