

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

京都大学防災研究所 正員 今本博健
同 上 正員 ○大年邦雄

1. はじめに：移動床に設置された橋脚では，移動する河床形態に対応して洗掘深が時間的に変動し，変動の平均値で定義される平衡洗掘深に関して数多くの実験式が提案されている。本研究は，砂堆河床における円柱橋脚を対象として局所洗掘機構をモデル化し，上述の変動特性を検討しようとするものである。

2. 洗掘機構のモデリング

2.1 洗掘孔における砂量のバランス；角度 θ を微小とし，円柱中心を通る上流側縦断面の河床形状を図-1のように模式化する。平均河床高から洗掘孔底部までを洗掘深 Z_s とする。斜面長 $\overline{PQ}$ は砂堆の進行とともに変化する。砂堆が一波長分移動するのに要する時間を T_s と表わし，時刻 $t=0$ の時に砂堆がRSUであり， $t=t(<T_s)$ の時に $RS'U'$ に移動したとする。このとき，斜面長 $\overline{PQ}$ および洗掘孔への流入砂量 δ_{in} の時刻 t における値は次のようになる。

$\overline{PQ} = \{Z_s + H(0.5 - t/T_s)\} / \sin\varphi$ ， $\delta_{in} = (1-\lambda)HL(1-t/T_s)/T_s$ ，ここに λ は砂粒の突隙率， H および L はそれぞれ砂堆の波高および波長である。 δ_b を洗掘孔底部から単位時間・単位面積当りに流出する砂量とし， Δt 時間に洗掘深が ΔZ_s 増大したとすると次式が成り立つ。

$$\{-\delta_{in} \cdot b_{in} / (1-\lambda) + \delta_b \cdot A_b / (1-\lambda)\} \cdot \Delta t = (A_s + A_b) \cdot \Delta Z_s$$
，ここに $b_{in} = (\overline{PQ} \cos\varphi + k_1 D + D/2) \cdot \theta$
 $A_b = 0.5 k_1 (k_1 + 1) D^2 \theta$ ， $A_s = 0.5 M \{M + (2k_1 + 1) D\} \theta$ ， $M = \{Z_s + H(0.5 - t/T_s)\} / \tan\varphi$

2.2 洗掘孔内の掃流力と洗掘孔からの流出砂量； u_{*0} ， τ_{*0} ， ϕ を接近流の摩擦速度，無次元掃流力および流速係数， ϕ_r を馬蹄渦外縁速度に基づく流速係数とすると，洗掘孔底部における摩擦速度 u_* ，無次元掃流力 τ_* ，および洗掘孔底部からの流出砂量 δ_b は次のように表わされる¹⁾。

$$u_* = \frac{\alpha}{4\pi} \cdot \frac{\phi}{\phi_r} \cdot \frac{u_{*0}}{k_0 + C_r Z_s/D} \quad , \quad \tau_* = \left(\frac{\alpha}{4\pi} \right)^2 \left(\frac{\phi}{\phi_r} \right)^2 \cdot \frac{\tau_{*0}}{(k_0 + C_r Z_s/D)^2}$$

$$\delta_b = \frac{1}{k_1 D} C_1 u_* d \left\{ j_* - \frac{1}{a} \ln(1 + a j_*) \right\}$$

ここに， $j_* = \frac{\tau_*}{\tau_{*c}} - 1$ ， $a = C_2 \sqrt{\tau_{*c}}$ ， $\tau_{*c} = \frac{2A_2 \tan\varphi}{\varepsilon A_2 (C_0 + C_1 \tan\varphi) \cdot \phi_r^2}$
 流速係数 ϕ は次式より評価する²⁾。

$$\phi = 2.4 (h/d)^{1/6} \tau_{*0}^{-1/3} \quad , \quad h \text{ は水深，} d \text{ は砂粒径である。}$$

2.3 洗掘孔への流入砂量；円柱中心より上流向きに x 座標をとり（図-2）， $x=\infty$ における流砂量を Q_0 と表わし流砂の非平衡性を考慮して次式を仮定する³⁾。

$$\frac{\partial Q}{\partial x_*} = \frac{D}{S} (Q_0 - Q) \quad , \quad \text{ここに } x_* = x/D, S = \Delta d \text{ (step length)}$$

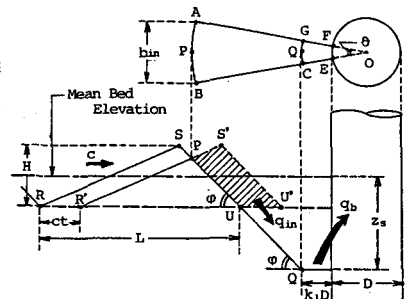


図-1 円柱中心を通る上流側縦断面の河床形状

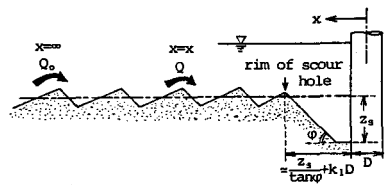


図-2 説明図

前式を $\alpha_k=0.5$ で $Q=0$ の条件下で解き、洗掘孔外縁 $\alpha_{kr} \approx (z_b/d)/\tan\varphi + k_1$ における流砂量を求めると $Q_r=Q_0 \cdot E$, $E=1-\exp\{-\frac{D}{\lambda d} \alpha_{kr}\}$ 上式を考慮して前述の δ_{im} を次のように修正する。 $\delta_{im}=(1-\lambda)LH(1-t/T_s)/T_s \cdot E$

2.4 砂堆の形状と移動速度；従来の研究より、次式が良い近似を与える⁴⁾。

$$H=m_1(1-T_{xco}/T_{x0}) \cdot h, \quad L=m_2 h$$

ここに m_1, m_2 は定数, T_{xco} は接近流における砂粒の限界無次元掃流力である。 T_s は砂堆一個の体積を平均流砂量で運ぶのに要する時間と解釈できるから, $T_s=\frac{1}{2}LH(1-\lambda)/Q_0$ Q_0 には芦田・道上式⁵⁾を用いる。

2.5 洗掘速度；以上の諸式を用いると、洗掘速度が定式化でき、次のように表わされる。 $\frac{\Delta(z_b/d)}{\Delta(u_{*0}t/d)} = F_m(T_{x0}, h/d, D/d, z_b/d, t/T_s)$ 上式の t/T_s は洗掘孔外縁に対する砂堆の位置(位相)を意味する。

3. 砂堆の移動に伴う洗掘深の変動：初期洗掘深 $(z_b/d)_{t=0}=0.2$ とし、洗掘深の変動特性に及ぼす T_{x0} , h/d および D/d の影響を検討した(図-3)。同図は、1)クレストの通過時に洗掘孔が急激に埋戻され、次第に洗掘されて次のクレスト通過で再び埋戻されるという変動機構を良く説明するとともに、2)その変動振幅には h/d と D/d が顕著な影響を及ぼすことを示している。図-4は、変動の振幅 z_{sf} と砂堆の波高 H との比 z_{sf}/H を $(D/d, h/d)$ 平面上の等値線で表わしたものであり、Shenら⁶⁾の指摘する $z_{sf}/H \approx 1.0$ が概ね妥当であることを裏付けている。

参考文献 1)今本・大年：京大防災研年報，

No.28B-2,1985. 2)岸・黒木：北大工学部研究報告，No.67,1973. 3)赤司・齊藤：土木学会論文集，第298号,1980. 4)Yalin: Proc. A E, Vol.90, HY5, 1964. 5)芦田・道上：土木学会論文集，第206号,1972. 6)Shen et al.: Proc. ASCE, Vol.95, HY6, 1969.

*本モデルの計算に用いた定数： $A_2=\pi/4$, $A_3=\pi/6$, $C_1=0.635$, $C_2=1.66$, $C_p=0.4$, $C_i=0.34$, $C_r=0.1$, $k_0=0.15$, $k_1=0.25$, $m_1=0.25$, $m_2=5.0$, $\alpha=2.8$, $E=0.4$, $\lambda=1000$, $T_{xco}=0.04$, $\varphi=35^\circ$, $\phi_0=1/90$

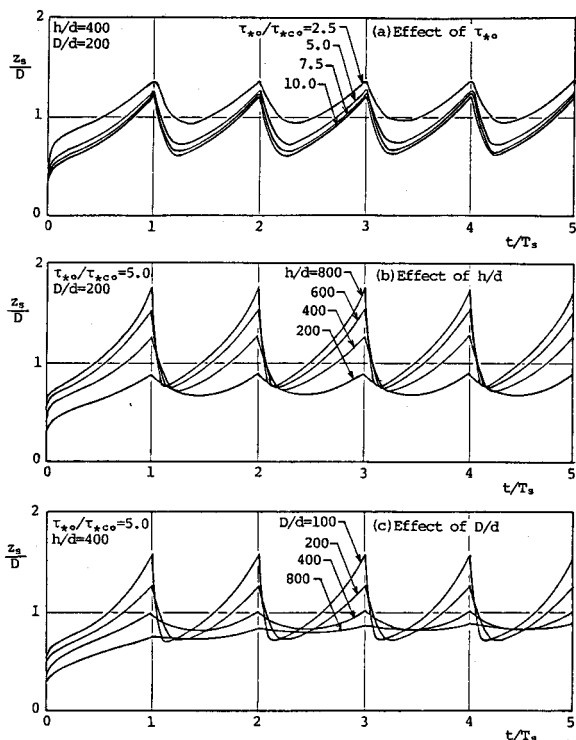


図-3 洗掘深の時間的变化

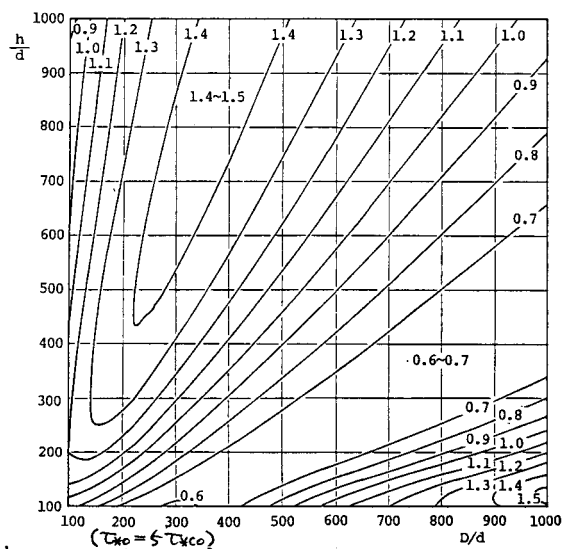


図-4 洗掘深の変動振幅と砂堆波高, z_{sf}/H