

鳥取大学 工学部 正 員 ○鈴木幸一

鳥取大学 大学院 学生員 片岡幸三

(株)竹中土木 正 員 西垣 実

1. はじめに

橋脚周辺部の局所洗掘現象の内部機構を明らかにすることは、橋脚の根入れ深さの決定あるいは洗掘の防止軽減をはかる上で重要である。本研究は、円柱橋脚周辺部における clear water scour (静的洗掘とよぶ) 状態での洗掘深の場所的・時間的变化を解析的に説明しようとするものである。橋脚周辺の局所洗掘現象は三次元流によって惹起される現象であり、この流れの特性自体にも未だ明らかにされていない点も多く、その流れに依存する局所河床形状を純粋に理論解析することは現段階では困難である。したがって、ここでは、従来の橋脚周辺の流れおよび局所洗掘に関する研究で明らかにされた実験事実に基づきいくつかの仮定のもとにモデル解析を試みる。

2. 基礎式

図-1は円柱橋脚周辺の局所洗掘孔を模式的に示したものであって、 r_0 は円柱の半径、 r_r は渦流等によって実際に河床が洗掘されている領域外縁までの円柱中心からの距離、 r_i は橋脚中心から洗掘孔外縁までの距離である。 $(r_0 - r_i)$ の領域(以下、掃流領域とよぶ)の砂が局所流れによって移動し、この掃流領域の河床が低下すると、 $(r_0 - r_r)$ の領域(洗掘孔斜面)の砂が、斜面勾配を砂の水中静止摩擦角 ϕ に保つように洗掘孔底部の掃流域へ滑落することによって洗掘が進行してゆく¹⁾。いま、図-1の記号を用いて、斜線で示す掃流領域での土砂の連続式を考える。すなわち、掃流領域の河床が dt 時間に dz_s だけ低下したときに、斜面から掃流域に滑落する砂の量 $Q_s dt$ は、 λ を砂の空隙率とすると、

$$Q_s dt = (1 - \lambda)(r_0^2 - r_r^2) d\alpha dz_s \quad (1)$$

である。また、 q_s を掃流領域での円周に沿う方向の単位橋流砂量とすると、図-1の斜線部における流砂の連続の関係は、

$$\frac{1}{1 - \lambda} \int_{r_i}^{r_0} (q_s + \frac{\partial q_s}{\partial \alpha} r d\alpha - q_s) dt = (r_0^2 - r_i^2) \frac{d\alpha}{2} dz_s \quad (2)$$

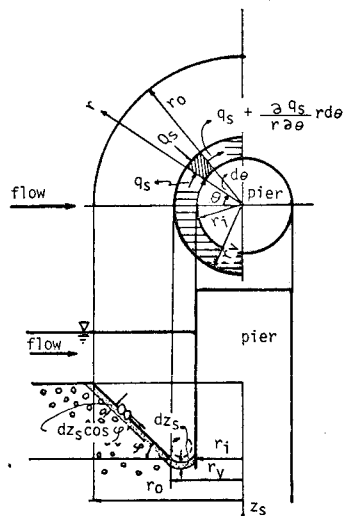


図-1 洗掘孔の模式記号図

と表わされるから、この(2)式に(1)式を代入し、 q_s の $r_i < r < r_r$ での平均を $\bar{q}_s$ とすると(以後は $r_i < r < r_r$ での平均を示す)、
$$\frac{1}{2} (r_0^2 - r_i^2) \frac{\partial \bar{q}_s}{\partial t} - \frac{1}{(1 - \lambda)} (r_0 - r_i) \frac{\partial \bar{q}_s}{\partial \alpha} = 0 \quad (3)$$

で示される河床変動に関する基礎式が得られる。局所的な河床変動が生じていないときの馬蹄型渦流の半径方向の規模は水理量によらず円柱径 D によってほぼ決まり、 $r_r \approx (1 + k_1) D / 2$ ($k_1 \approx 0.5$)で示されるが、実験によって観察されるように渦流の規模が洗掘進行後もほぼ不変であると仮定すると、

$$r_i = D / 2, \quad r_r = (1 + k_1) D / 2, \quad r_0 = (1 + k_1) D / 2 + z_s / \tan \phi \quad (4)$$

で示される。 r_i , r_r は時間的にも場所的にも変化しないが、 r_0 は z_s の関数であるから、時間 (t) および場所 (F) によって変化する。掃流領域における r 方向に平均した単位橋流砂量 $\bar{q}_s$ は、局所洗掘状態においては場所的にも掃流力が異なることと、上流からの土砂供給がないために、非平衡状態の流砂量である。非平衡状態の流砂量に関する考察がTsuchiya²⁾や青藤³⁾によって局所洗掘現象の説明に導入され、また、中川・辻本によって議論さ

れているが、同様な考え方をここに適用すると、(3)式中の $(1/F) \partial \bar{z}_s / \partial \alpha$ は、図-2に示す記号を用いて、

$$\frac{\partial \bar{z}_s}{\partial \alpha} = A d \left\{ p_s(\bar{F}\alpha) - \int_0^{\bar{F}\alpha} p_s(\bar{F}\alpha - \xi) f(\xi) d\xi \right\} \quad (5)$$

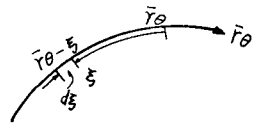


図-2 記号図

で示される。ここに、 $p_s(F\alpha)$ および $p_s(F\alpha - \xi)$ はそれぞれ、移動床がはじまる原点からの流下方向距離 $F\alpha$ および $F\alpha - \xi$ 地点における単位時間当りの河床砂の移動確率、 $f(\xi)$ は砂の距離距離の確率密度関数であって、 $f(\xi) = (1/L) \exp(-\xi/L)$ で示されるとする⁴⁾。また、 d は砂粒径、 A は砂の形状に特有な定数である。(4)式および(5)式を(3)式に代入して、無次元化すると、

$$\frac{\partial \bar{z}_s^*}{\partial t^*} = \frac{K^*}{G^*(Z_s^*)} \left\{ \bar{p}_s^*(\bar{F}^*\alpha^*, t^*) - \int_0^{\bar{F}^*\alpha^*} \bar{p}_s^*(\bar{F}^*\alpha^* - \xi^*, t^*) \frac{1}{L^*} \exp\left(-\frac{\xi^*}{L^*}\right) d\xi^* \right\} \quad (6)$$

ただし、 $K^* = (2 + k_1) k_1 / \{4L^*(1 - \lambda)\}$ 、 $G^*(Z_s^*) = (k_1/2)(1 + \frac{1}{2}) + (1 + k_1)(Z_s^*/\tan\varphi) + (Z_s^*/\tan\varphi)^2$ 、 $Z_s^* = Z_s/D$ 、 $t^* = v_0 t/D$ 、 $L^* = \lambda d/D$ 、 $\bar{F}^* = F/D$ 、 $\xi^* = \xi/D$ 、で示される Z_s^* と t^* および $\bar{F}^*\alpha$ の関係式が得られる。

3. 掃流領域の各場所での掃流力

洗掘が進行する以前の掃流領域に作用する河床面せん断力 $\bar{\tau}$ を図-3のように、渦流による半径方向のせん断力 $\bar{\tau}_r$ と円周方向の流れによる円周に沿う方向のせん断力 $\bar{\tau}_\theta$ とにわけろ。

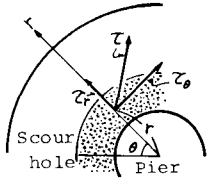


図-3 掃流力の記号図

$\bar{\tau}_\theta$ に関しては、 $r = D/2$ でのポテンシャル流速 $v_\theta \approx 2v_0 \sin\alpha$ に、また洗掘深が Z_s になったときには、 $v_\theta \approx 2v_0 \sin\alpha \cdot R_0 / (R_0 + Z_s)$ に対応する河床面せん断力を考え、 $\bar{p}_s$ を流速係数として、

$$\bar{\tau}_\theta (= p_s v_\theta^2) = 4p_s \sin^2\alpha \cdot (R_0 / (R_0 + Z_s))^2 v_0^2 \quad (7)$$

で与える。また、 $\bar{\tau}_r$ については、 $\bar{\tau}_r$ が洗掘進行後もほぼ $p v_0^2$ に比例すること⁵⁾ がわかっているから、

$$\bar{\tau}_r = p v_0^2 \quad (8)$$

として与えると、 $\bar{\tau} = \sqrt{\bar{\tau}_\theta^2 + \bar{\tau}_r^2}$ によって、掃流領域の円周に沿う各場所における掃流力 $\bar{\tau}$ が求まる。

4. 計算結果と実測値との比較

計算は、(3)式あるいは(4)式中の平衡状態の流動量式としては、単純な形の Meyer-Peter & Müller 型の $\bar{q}_{s0} / \sqrt{5g d^3} = C(\tau_* - \tau_{*c})^m$ を用い、無次元限界掃流力 τ_{*c} は河床の局所的勾配によって補正した。(6)式を数値計算した一例が図-4および5に示されている。図-4は、洗掘孔内各点における洗掘深の時間的变化を、図-5は洗掘孔掃流域の $F\alpha$ に沿う河床形状を示している。図-6は円柱上流端と円柱側面における洗掘深の実測値と計算値とを比較したものであるが、洗掘初期に円柱側面での洗掘(○印)が速く進行するが、時間の経過とともに円柱上流端での洗掘(●印)が追いつき追い越す。このような特性が計算結果と実測結果とで比較的良好に一致していることが認められる。

(参考文献) 1) 川・鈴木; 京大防災研究所年報 第17号B, 1974. 2) Tsuchiya Y.; Proc. 12th Congress I.A.H.R., Vol. 3, 1967. 3) 藤藤; 林学論文報告集 第20号, 1979. 4) 矢野・堀江; 京大防災研究所年報 第11号B, 1968. 5) 鈴木; 林学論文報告集 第272号, 1978.

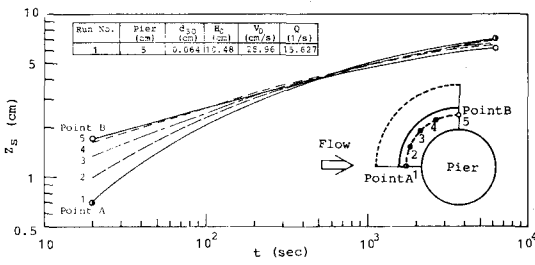


図-4 各場所での洗掘深の時間変化(計算例)

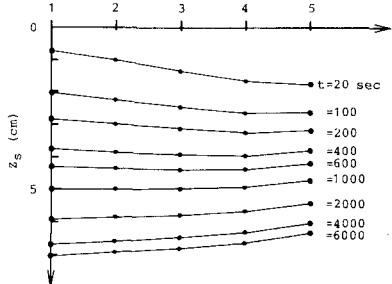


図-5 円周に沿う洗掘孔底形状(計算例)

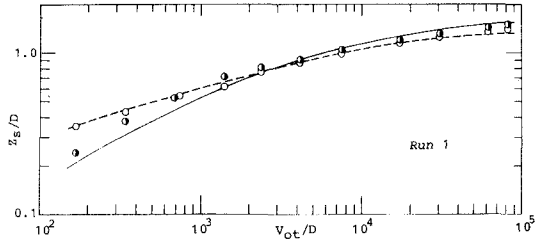


図-6 洗掘深の時間変化(計算と実測との比較)