

円柱橋脚周辺の洗掘過程

鳥取大学 工学部 正員 鈴木 幸一
(株)竹中土木 正員 西垣 実

1、はじめに 橋脚は本来、風、流れ、波ときには地盤の変位の影響下でも、大きな沈下なしに死荷重および活荷重を支持しなければならぬが、周辺河床の局所洗掘によってその基礎が不安定となると、上からの荷重を支え切れずに崩壊する場合がある。このために洗掘の防止には大きな関心が払われてきたが、局所洗掘機構の説明が不十分であったので有効な洗掘防止工法が確立されているとはいえない。したがって、本研究においては、洗掘のモデル化に容易な、円柱橋脚模型を使用して静的洗掘(clear water scour)の実験を行なうとともに、そのデータに基づく洗掘深の時間変化特性の理論的解析を行なう。

2、洗掘進行特性 洗掘の初期の段階においては橋脚の流れ方向に対して、直角部分(円柱側面)のごく近傍の洗掘が卓越しており、それ以外の部分の河床は、洗掘進行が遅れている。したがって、ある程度時間が経過した後は、洗掘孔は上流へ広がって行き、洗掘孔形状は橋脚を中心にそつ逆円錐形に似てくる。この時、橋脚中心より上流側の円柱前面領域では、側面より洗掘が進んで行くが、円柱橋脚模型より少し離れた部分での砂の動きは、あまり活発ではない。洗掘孔斜面上では、砂の水中静止摩擦角(約45°)の斜面を形成するように砂が滑落するのみで、直接その斜面上の地点での砂が流れによって掃流されることはない。したがって、円柱中心つまり逆円錐の先端周辺では、水平軸を有する下降流および掃流によって砂が下流方向へ掃流される掃流領域が形成される。この掃流領域が洗掘を低下すると、その外側の水中静止摩擦角で斜面を保っていた部分の砂が掃流領域へ滑落していく。このような洗掘、滑落、堆積の繰り返しによって洗掘孔は徐々に広がって行く。

3、モデルによる解析 洗掘孔は、橋脚径Dにほぼ比例する掃流領域と、洗掘の進行に伴って砂の斜面勾配が水中静止摩擦角を保つことによっておこる砂の滑落する斜面部分(掃流領域の外側)とに分けられる。(図-2参照) 幾何学的関係より、斜面を滑落して掃流領域にdt時間に流入する砂の量は、

$$Q_s dt = \frac{1-\lambda}{\cos \psi} (r_0^2 - r_v^2) \frac{d\theta}{2} (dz_s \cos \psi) \quad (1)$$

と表わせる。ここに、 r_v : 掃流領域外縁までの距離、 r_0 : 洗掘孔外縁までの距離、 Q_s : 滑落した砂の単位時間当りの量、 ψ : 砂の水中静止摩擦角、 λ : 砂の空隙率、 θ : 一樣流向から右回りの偏角、 z_s : 鉛直方向の洗掘深、 r_a : 円柱の半径である。また q_s を掃流領域での円周に沿う方向の単位幅流砂量とすると、図-2の斜線部の流砂の連続の関係は、

$$\frac{1}{1-\lambda} \left\{ \int_{r_a}^{r_v} \left(q_s + \frac{\partial q_s}{\partial \theta} r d\theta - q_s \right) dr - Q_s \right\} dt = (r_v^2 - r_a^2) \frac{d\theta}{2} dz_s \quad (2)$$

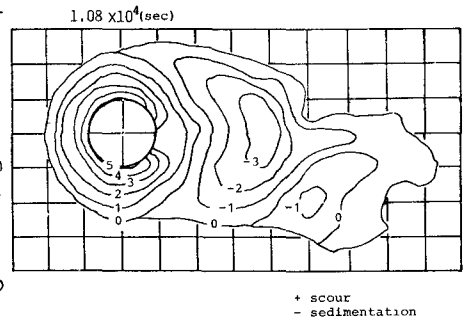


図-1 洗掘孔形状

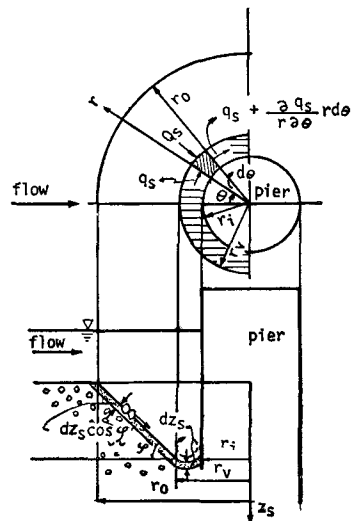


図-2 洗掘孔形状のモデル化

であり、(1)式および(2)式より河床変動の基礎式は、次のようになる。

$$\frac{1}{2}(r_0^2 - r_i^2) \frac{\partial z_s}{\partial t} - \frac{1}{1-\lambda} (r_v - r_i) \frac{\partial g_s}{\partial \theta} = 0 \quad (3)$$

渦流の規模が洗掘進行後と不変であると考えると、 $r_i = \frac{D}{2}$, $r_v = (1+k_1) \frac{D}{2}$, $r_0 = (1+k_1) \frac{D}{2} + z_s / \tan \varphi$ となる。

r_i および r_v は、時間や場所の変数を含まないが、 r_0 は z_s を含んでいるために時間と場所の関数である。

局所洗掘現象の流砂は、いわゆる非平衡状態にあるために、その場所の水利条件では g_s が決定できず上流側の条件によって決定される。非平衡状態の流砂量の従来の研究より、河床砂の移動確率の概念を適用すると、

$$\frac{\partial g_s}{\partial \theta} = A d \left\{ P_s(r_0) - \int_0^{r_0} P_s(r_0 - \xi) \cdot \frac{1}{L} \exp\left(-\frac{\xi}{L}\right) d\xi \right\} \quad (4)$$

ここに、 P_s ：河床砂の移動確率、 L ：平均的なstep length、 A ：砂の形状の定数、 d ：砂の粒径である。したがって、(3)式より、

$$\frac{\partial z_s^*}{\partial t^*} = \frac{K^*}{G^*(z_s^*)} \left\{ q_{s0}^*(r_0^*, t^*) - \int_0^{r_0^*} q_{s0}^*(r_0^* - \xi^*, t^*) \cdot \frac{1}{L^*} \exp\left(-\frac{\xi^*}{L^*}\right) \cdot d\xi^* \right\} \quad (5)$$

となる。ここに $K^* = \frac{(2+k_1) \cdot k_1}{4L^*(1-\lambda)}$, $G^*(z_s^*) = \frac{k_1}{2} \left(1 + \frac{k_1}{2}\right) + (1+k_1) \frac{z_s^*}{\tan \varphi} + \left(\frac{z_s^*}{\tan \varphi}\right)^2$
 $z_s^* = \frac{z_s}{D}$, $t^* = \frac{U_b t}{D}$, $L^* = \lambda \frac{d}{D}$, $q_{s0}^* = \frac{q_{s0}}{U_b D}$, $r^* = \frac{r}{D}$, $\xi^* = \frac{\xi}{D}$ である。

各地点における掃流力に対応する平衡状態の流砂量 q_{s0} が求まれば、 z_s が決まる。 q_{s0} としては、ガリに Meyer-Peter & Müller 型の流砂量式、

$$\frac{q_{s0}}{\sqrt{sgd^3}} = C (\tau_x - \tau_{xc})^m \quad (6)$$

を用いる。ここに、 q_{s0} ：平衡状態の流砂量、 $S = \varphi/\theta - 1$, g ：重力加速度

$\tau_x = \frac{U_b^2}{sgd}$, $\tau_{xc} = \frac{U_{bc}^2}{sgd}$, U_b ：摩擦速度、 U_{bc} ：砂の限界摩擦速度である。

(6)式の流砂量式より q_{s0} を求めるためには摩擦速度 U_b を知る必要がある。

そのためにいくつかの実験の事実より U_b の評価を行うと、

$$U_b = \left\{ 2.2 + 13.7 \sin^4 \theta \cdot \left(\frac{h_0}{h_0 + z_s} \right)^4 \right\}^{1/4} \quad (7)$$

となる。すなわち洗掘領域 r_0 での平均的摩擦速度は、一様流での平均速度 U_b 、水深 h_0 および流速係数 θ とその場所での局所洗掘深 z_s および θ の関数で表わされる。さて(6)式の τ_{xc} は、砂が掃流される洗掘孔底部の掃流域は平坦ではなく、円周方向に勾配をもっているため砂の移動のし易さが、各点で異なっている

ので河床勾配 α による補正を行ない
 $\frac{\tau_{xc}(\alpha)}{\tau_{xc}(0)} = \cos \alpha - \frac{\sin \alpha}{\tan \varphi} \quad (8)$

と表わす。ここに、 $\tau_{xc}(0)$ は $\alpha = 0$ の限界掃流力である。

4. 数値計算結果 基礎式(4)は直接解析解を求めることができないので差分化して、数値計算によって洗掘深 z_s を求める。すなわち、 U_b を求め、次に q_{s0} として、(5)式より z_s を計算する。計算域は、円柱上流端から側面までを円周に沿って4区間に分割して与えた。また、流砂量式中の諸定数 C , m また $\tau_{xc}(0)$ は、洗掘進行が実験と計算とで比較的良好に一致するように試行錯誤的に求めた。図-4に示す掃流領域の洗掘深の時間的変化の計算値は、実験値の特性と同じように最大洗掘深が側面から前面へと徐々に移っている。また図-5に示す計算値と実験値の比較では、計算値が比較的良好に実験値と同じような洗掘進行特性を示している。したがって、以上の方法で、橋脚周辺の静穏洗掘における洗掘深 z_s を数値計算によってシミュレートすることが、ある程度可能だと考えられる。

参考文献 1) 鈴木 幸一；土木学会論文報告集，第272号，1978
 2) 斎藤 隆；土木学会論文報告集，第282号，1979

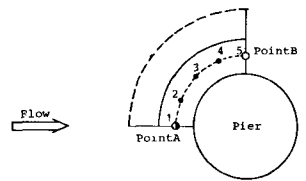


図-3 計算ポイント

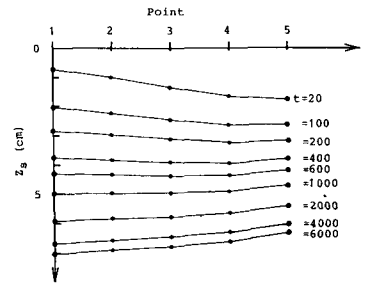


図-4 計算値の時間的变化

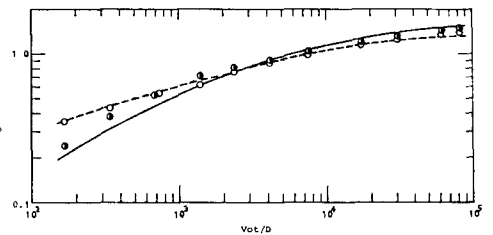


図-5 洗掘深の時間的变化