

京都大学 工学部 正員 中川 博次
 京都大学 工学部 正員 鈴木 幸一
 清水建設 矢部 徹

1. ま え が き 水門下流部の洗掘あるいは上流側から土砂の供給のない場合の橋脚周辺部における洗掘のようにいわゆる clear water scour においては、洗掘深が特に経過時間に支配されることから、模型実験とする場合、特に時間スケールが問題となる。局所洗掘においても一般の河床変動と同様、水流および流砂の運動方程式および連続式の原型と模型における相似条件が満たされる必要があるが、開水路一次元流水における流砂および水流の相似律についても流水抵抗や流砂量の相似条件に問題が多く、まして水流や流砂の運動方程式を確立することが困難な局所洗掘を厳密な相似律に基づいて再現することは不可能に近い現状である。

本報告では、局所洗掘の実験結果を流水および流砂に関する単純な基礎理論に基づいて解析し、洗掘深の経時変化を模型実験から推定する試みを示す。

2. 基準時間スケール

橋脚周辺部における局所洗掘の時間スケールは、砂の輸送と洗掘孔内での流れのパターンを考慮して評価されなければならないが、流れが局所的にしかも時間的に変化するため、実際には要った縮尺の模型実験によって求められるべきではない。いま、単純に円柱周りで二次元ポテンシャル流を仮定し、接近流の平均流速 U_0 、平均砂粒径 d なる砂の移動限界での U_0 を U_c とすると、円柱側面での流速は $2U_0$ であるから、この点での移動速度は $(2U_0 - U_c)$ に支配される。円柱径 D 、砂粒径および水理量を幅広く変化した実験で、 z_s/d と $(2U_0 - U_c)t/D$ との関係の一例が図1, 2, 3 に示されている。両対数紙上で、 z_s/d と $(2U_0 - U_c)t/D$ との関係は途中で勾配の変化する直線関係にあることが実験的に認められる。すなわち、ある時間 t_1 までは、その勾配はほぼ 1:0.34、 $t > t_1$ ではほぼ 1:0.14 で一定している。したがって、 $z_s/d = 1$ つまり洗掘深が円柱径に等しくなるに要する時間を t_1 および t_2 とすると(図-4参照)、

$$t \leq t_1 : \frac{z_s/D}{1} = \left[\frac{(2U_0 - U_c)t/D}{(2U_0 - U_c)t_1/D} \right]^{0.34} = \left(\frac{t}{t_1} \right)^{0.34} \quad (1)$$

$$t > t_1 : \frac{z_s/D}{1} = \left[\frac{(2U_0 - U_c)t/D}{(2U_0 - U_c)t_2/D} \right]^{0.14} = \left(\frac{t}{t_2} \right)^{0.14} \quad (2)$$

となり、この関係は流れの状態、幾何学的条件にほぼ独立であることが認められた。したがって、 t_1 , t_2 , t_0 が流れおよび幾何学的条件の変化に対して決定できれば、洗掘深の時間的変化が(1)式および(2)式によって決定できる。

3. t_1 および t_2 に関する考察

原型と模型との縮率を n で表す。局所洗掘を伴う橋脚周辺部の流れのように、3次元の、しかも非定常な流れについて厳密な意味

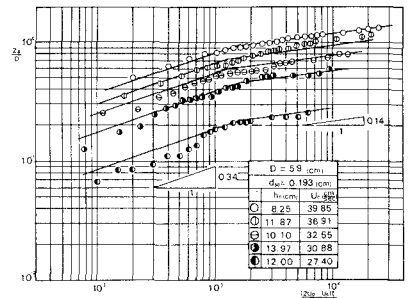


図-1 洗掘深の時間変化

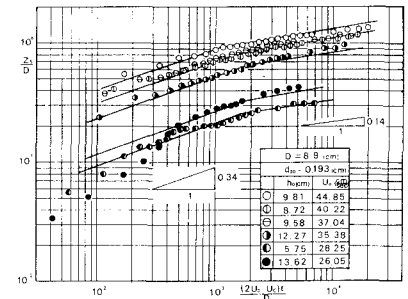


図-2 洗掘深の時間変化

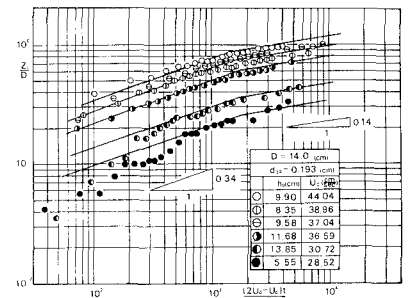


図-3 洗掘深の時間変化

での相似条件は得がたいし、また十分な理論的根拠なしにいたすに複雑な流れを考へても意味がないと思ふので、流れに関する相似条件として円柱側面でのポテンシャル流の最大流速 $2U_0$ を相似させることとする。流砂の連続式は、

$$\frac{\partial z_s}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \cdot \frac{\partial g_B}{\partial x} \quad (3)$$

また、流砂の運動を表わす式としては次式で示される流砂量式を用いる。¹⁾

$$\frac{g_B}{\sqrt{sgd^3}} = K \left(\frac{U_*}{\sqrt{sgd}} - \frac{U_{*c}}{\sqrt{sgd}} \right)^m \quad (4)$$

ここで、 g_B : 単位中流砂量 (総体積), λ : 空隙率, x : 流向, $\sigma = (\frac{\rho}{\rho_s} - 1)$ (ρ : 砂の密度, ρ_s : 流体の密度), g : 重力加速度, U_*, U_{*c} : 摩擦速度および限界摩擦速度, m : 実験定数 (≈ 4) である。1) 昔, 流注係数 ϕ と $\phi = 2U_0/U_* = U_c/U_{*c}$ として, (3)式および(4)式の相似条件はそれぞれ、

$$n_{gs} = n_{(1-\lambda)}^{-1} \cdot n_{gB} \cdot n_x^{-1} \cdot n_t \quad (5)$$

$$n_{gB} = n_K \cdot n_s^{\frac{1-m}{2}} \cdot n_g^{\frac{1-m}{2}} \cdot n_d^{\frac{3-m}{2}} \cdot n_\phi^{-m} \cdot n_{(2U_0/U_c)}^m \quad (6)$$

と仮定し、一般に、 $n_K = n_s = n_g = n_\phi = 1$ とし、また $n_{(1-\lambda)} \approx 1$, $n_x = n_D$ とし、(6)式を(5)式に代入して、円柱径 D で無次元化すると、

$$n_{z/d} = n_{(2U_0/U_c)}^{\frac{m-1}{2}} \cdot n_{(2U_0/U_c)} \cdot n_D \cdot n_d^{-1} \quad (7)$$

となり、 $z/d=1$ とするときの時間 $t=t_1$ において、(7)式は、

$n_{z/d}=1$ であるから、

$$n_{(2U_0/U_c)} t_1 = 1 \cdot n_{(2U_0/U_c)}^{\frac{1-m}{2}} \cdot n_D \cdot n_d^{-1} \quad (8)$$

となる。いま、 $(2U_0/U_c)t_1/D \sim (2U_0/U_c)/\sqrt{sgd}$ の関係を図-1, 2, 3

より求めると図-5aのようになり、同一の D/d に対しては、 $(2U_0/U_c)t_1/D \sim \{(2U_0/U_c)/\sqrt{sgd}\}^{-3}$ の関係が認められ、(8)式を考慮すると、 $m=4$ となる。一方、 D/d と $(2U_0/U_c)t_1/D$ の関係は図-5の同一の $(2U_0/U_c)/\sqrt{sgd}$ に対する $(2U_0/U_c)t_1/D$ の比と、 D/d の比によって求められ、 $n_{D/d}^{1.30} \sim n_{(2U_0/U_c)t_1/D}$ が得られ、 $n_{D/d}$ の乗数は1.30程度であり理論式(8)での1.0より大きくになっている。以上より、(8)式は実験によると、

$$n_{(2U_0/U_c)t_1} = n_{(2U_0/U_c)}^{-3.0} \cdot n_D^{1.30} \cdot n_d^{-1} \quad (9)$$

と修正される。(9)式より求められる t_1 を(1)式に代入することによって洗掘深の経時変化が得られる。

次に、 t_2 に関して、図-6が得られ、実験的に、

$$n_{(2U_0/U_c)t_2} = n_{(2U_0/U_c)}^{-8.0} \cdot n_D^{2.70} \cdot n_d^{-1} \quad (10)$$

となり、(8)式と比較すると乗数が全く異なっており、 $t > t_1$ の場合は流体の相似条件として単に $2U_0$ のみを考えたのでは不十分である。事実、洗掘がある程度進むと洗掘を支配しているのは側面ではなく、前面の流れであるため $2U_0$ の相似条件が意味を失う。すなわち、 $t > t_1$ では円柱側面での流れのパターンはポテンシャル流のそれでは代表され得るが $t > t_1$ では洗掘孔の底の流れが著しく変わることとを意味している。その物理的意味は流れのパターンが変化し洗掘速度が急に小さくなる時間であるが実験的には $(2U_0/U_c)t_2/D = (1 \sim 2) \times 10^3$ 程度の値である。

<参考文献>

1) H.W. Breusers: Time Scale of Two Dimensional Local Scour, Proc. 12th Congress, I.A.H.R., Vol. 3, pp.275-282

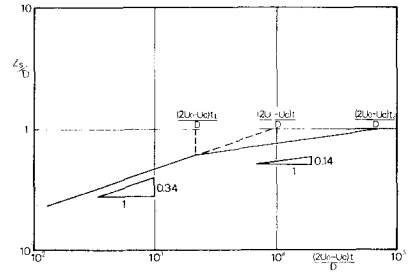


図-4 洗掘深の時間変化の概略図

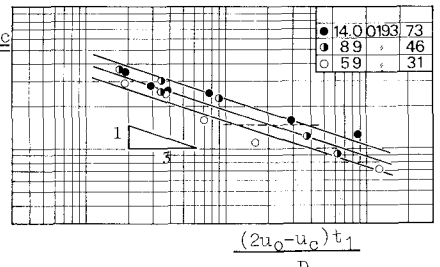


図-5 $(2U_0/U_c)/\sqrt{sgd} \sim (2U_0/U_c)t_1/D$

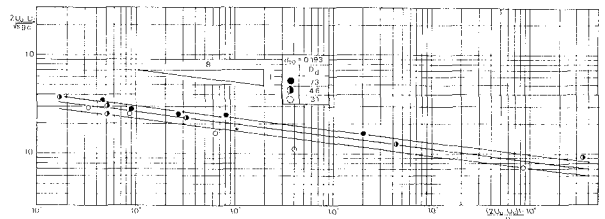


図-6 $(2U_0/U_c)/\sqrt{sgd} \sim (2U_0/U_c)t_2/D$