

(1) まえがき：橋脚の圓りの洗掘について多くの研究者によって行なわれているが、この報告は河床の侵食、いわゆる Regime の概念と適用する立場から安全洗掘深についての検討と提案である。

(2) 洗掘と損失水頭との関連性について。

局所的洗掘の分類は一般に流送土砂の有無、洗掘穴への流入・流出土砂量の相互関係から行なわれているが、洗掘と損失水頭との相互関係から検討する。

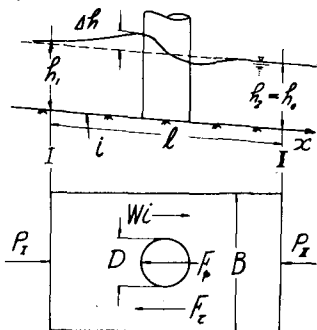


図-1

脚部の検査面に作用する力、 F は摩擦力である。

$$P_1 + W_i - P_2 - F_p - F_c = \frac{\beta W Q}{g} (v_2 - v_1) \quad (1)$$

次の仮定のもとに、損失水頭は(1)式より近似的に(2)式によって示される： $h_1 \approx h_2$, $W \approx W B h_2 l$, $i = h_2/l$, $F_p = C_D D (h_0 + \Delta h) \rho v_0^2 / 2$ ことに C_D は拍然係数, $F_c = l p_w \tau_0 = l p_w f \rho v_0^2 / 2$

$$\left. \begin{aligned} h_2 &= C_D \left(1 + \frac{\Delta h}{h_0}\right) \frac{D}{B} \frac{v_0^2}{2g} + f \frac{l}{R_0} \frac{v_0^2}{2g} \\ &= h_p + h_f \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

右に第1項は橋脚による損失で、橋脚の圓りの渦（馬蹄形渦、ウエーク）および表面摩擦によって生ずる、第2項は橋脚のない場合の l 間の摩擦による損失に相当する、さて河床の掃流力 $W R_0 h_2 / l = \tau_{cp}$ と境界掃流力 τ_0 との比較によって局所的洗掘を分類する。

a) $\tau_{cp} < \tau_0$ の場合：i) h_p に相当するエネルギーが橋脚の圓りの渦、橋脚の摩擦などによって完全に消費される場合は局所的洗掘が生じないので河床は安全であるが、ii) 完全に消費されない場合には、過剰のエ

ネルギーによって洗掘が生じ、それに平行して渦自身の形態も変り、最終的にはエネルギーの消費が完全に局所的渦、摩擦などに行きわたるまで、洗掘現象が暴走し、安定した洗掘穴が形成されるものと推論される、なお i), ii) の境界がいはいはゆる洗掘発生限界となる。

b) $\tau_{cp} > \tau_0$ の場合：流送土砂に伴う洗掘で、洗掘穴への土砂の流入・流出量の相互関係によって洗掘穴が暴走、安全が説明されるが、エネルギーの消費は a) の場合の外に、洗掘穴への流入する流送土砂の減速並みに流出する土砂の加速、あるいは減速・加速過程での砂粒を巻込んだ渦などにエネルギーが消費されるであろう、 $\tau_{cp} > \tau_0$ のときは最大洗掘深が振動する研究結果が述べられているが、洗掘穴での砂粒を食んだ水の流水に注目すると、砂粒は水の流水にとって一種の障害あるいは抵抗として働くから、砂粒の存在によって水の流況が変えられることが予想され、洗掘現象が非対称、振動の傾向が想像されることによって理解される、いずれにしても損失水頭と洗掘深との関係は a) の場合に比べ非常に複雑であることが推定されるので、以下 a) の場合を対象にして述べる。

3) Regime の概念からの安全洗掘深への提案。

a) Regime depth, h_r について。

安定な河川の深さが流量、砂水きの粒径などの項で示されるとき、それを Regime depth と呼ばれている、もし河川を幅の広い長方形断面と仮定すると h_r は Lacey, Blench によると次のように示される。

i) Lacey's eq.

$$h_r = 0.910 (Q^2 / f)^{1/3} \quad \text{ft-unit}$$

$$f = 8 \sqrt{d_m (\text{in})} = 1.59 \sqrt{d_m (\text{mm})} \quad (\text{ft/sec}^2) \quad (3)$$

$Q = Q/B$, f は Lacey の silt factor と呼ばれ、 d_m は砂水きの平均粒径である、(3)式において $1.59 \sqrt{d_m}$ は $8 \sqrt{d_m (\text{mm})} / 25.4$ によって示されるから、 8 は ft/sec^2 の単位をもち、 0.910 は無次元常数である。

ii) Blench's eq.

$$\left. \begin{aligned} h &= (q^2/f_b)^{1/3} \quad (\text{ft-unit}) \\ f_b &= 9.6(d_m(\text{in}) (1+0.012C)) \quad (\text{ft/sec}^2) \end{aligned} \right\} (4)$$

f_b は Blench の bed factor と呼ばれるもので、 C は土砂濃度である、 $C=0$ の場合の f_b の値は $1.2f$ であるから、 f と f_b とは余り差がないことが理解される。

b) 洗掘深に対する Regime の概念の適用。

2) の a) の項で述べたように、洗掘発生限界時と等流した洗掘穴が得られた時には、それを橋脚の周りの河床形状は違っているが、共に河床が等流していることに注目すると、図-2 の a) の等流状態と b) の半等流状態に近似的に置きかえられるならば、Regime の概念が適用されることが推論される。

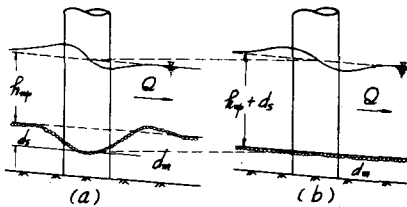


図-2

ただし、このような置きかえの想定は実験によって検討されるであろう。

Regime の概念の適用が許されるならば、最大洗掘深も洗掘発生限界の水深と共に、流量、河床砂の大きさなどの項によって与えられる、橋脚部の Regime depth の式によって表示されるだろう。

以上の想定のもとに、橋脚の周りの洗掘現象について検討を試みる。

c) 橋脚部の Regime depth について。

Lacey, Blench の Regime depth の式を用いて橋脚部の Regime depth, R , について考察する。

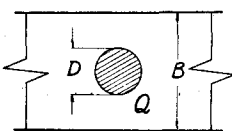


図-3

図-3 の橋脚設置断面の単位幅当りの流量

$$\begin{aligned} q_p &= Q/(B-D) \\ &= q/(1-K), \end{aligned}$$

$K=D/B$ によって示される、もし K が非常に小さく、流れを potential flow と仮定すると、橋脚の周りの最大流速は橋脚の影響のないところの流速の 2

倍になることに注目すると、橋脚部において予測される最大単位幅当りの流量は次のように示される。

$$q_{\max} = 2q/(1-K) \quad (5)$$

(3), (4) 式の q に $q_{\max}$ を代入することによって、橋脚部の Regime depth として (6), (7) 式がそれぞれ得られる

$$\left. \begin{aligned} h &= \frac{1.44}{\sqrt{f}} \left(\frac{q}{1-K} \right)^{2/3} \quad (\text{m-unit}) \\ f &= 2.44 \sqrt{d_m(\text{mm})/24.5} \end{aligned} \right\} (6)$$

$$\left. \begin{aligned} h &= \frac{1.59}{\sqrt{f_b}} \left(\frac{q}{1-K} \right)^{2/3} \quad (\text{m-unit}) \\ f_b &= 2.93 \sqrt{d_m(\text{mm})/24.5} (1+0.012C) \end{aligned} \right\} (7)$$

両式の妥当性は実験、実測などによって確認されるであろう、従来洗掘現象に K の因子が著者等を除いてお外視されていたが、その真に就いて現実面から本邦 49 橋について K の値を調べた結果図-4 が得られた、一方 (2) 式の C , h_p に思をはせると、 K を考慮することが、洗掘現象を論ずるには K の因子が当然入って来ることが妥当であると考ええる。

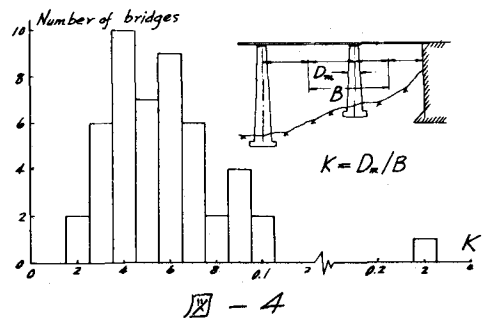


図-4

幅 20cm の長方形断面水路、 $K=0.1, 0.2, 0.25, d_m(\text{mm})$ 1.5, 2.5, 3.5 の条件で円形橋脚の周りの洗掘に関する実験を行なう、洗掘発生限界時に関する資料を (6) 式に従って整理、plot すると図-5 が得られた、また最大洗掘水深および洗掘発生限界時の資料を同時に (6) 式に従って plot すると図-6 が得られた、ただしこれらの資料は $C_{np} < 2$, $F_p = V_{np}/\sqrt{g h_p} < 0.5$ のいわゆる常流下の資料である。

これらの図より、図-5 においては (6) 式の傾向が理解され、図-6 の直線と下の直線の間に変態の違う 2 種類の資料が含まれ、その相互関係から図-2 の a) と b) に置きかえることの可能性が見られる。

Beginning of scouring action

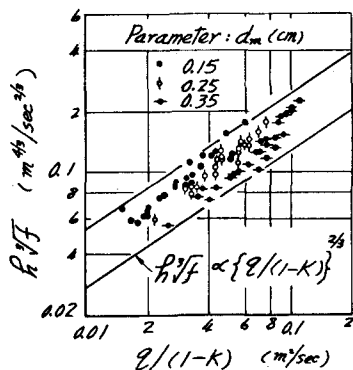


図 - 5

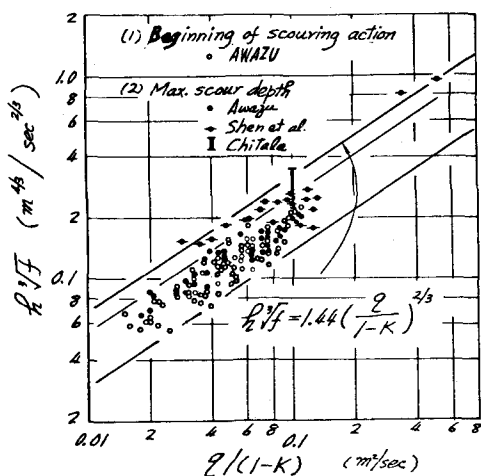


図 - 6

次に Shen, Schneider & Karaki, Chitale (模型は円形ではない) 等の実験資料と図-6にplotとした、なおこの図には示してはいるが、Neill の観測値を考慮すると、図-6より(6)式によって最大洗掘水深の予測が可能であることが見られる。

なお(7)式に従ってもこれらの資料は同様にplotされたことは、(6)、(7)式と比較することによって容易に理解されるので図を省略する。

d). 洗掘現象と損失水頭との関連性について。

洗掘発生限界並びに洗掘水深が(6)、(7)式によって示されることがわかったので、両式が背走されることを基礎として以下の二つについて述べる。

一般に河床物質、流量、二重配、水路幅、橋脚径などが与えられると、洗掘現象は次のように説明される、

ただし $h_0 < h_r$ の条件下で(6)式を用いると

$$h_0 \cong \frac{1.44}{f} \left(\frac{q}{1-K} \right)^{2/3} = h_r \quad (8)$$

h_0, h_r は等流水深と橋脚部の Regime depth である、この式は3通りの状態を示しているが、その内容は a) $h_0 > h_r$ の場合は洗掘を伴い、b) $h_0 = h_r$ の場合は洗掘発生限界を示し、c) $h_0 < h_r$ の場合は橋脚の圓りが洗掘されることを示す意味している。

次に橋脚設置に伴う局部的損失水頭は、洗掘発生限界時にあっては、前に述べたように橋脚の圓りの渦(馬蹄形渦、ウエーク)摩擦等によって消費される水頭に相当するものと考えられる、従ってその時の損失水頭は、近似的に $h_0/h_r \approx 0$ とした(2)式と(6)式より次のように表示される。

$$\begin{aligned} h_p &= C_D \frac{K}{2g} \frac{q^2}{h_r^2} \\ &= \frac{C_D K (1-K)^{4/3}}{1.44^2 \times 2g} (fq)^{2/3} \end{aligned} \quad (9)$$

または

$$\frac{h_p}{h_r} = \frac{C_D f K (1-K)^2}{6g} \quad (10)$$

一般に C_D は橋脚の形状によっても異なるので、(10)式は h_p/h_r の値が任意で橋脚形状、 dm, K によって一定値を持つことが示されているが、限界摩擦係数および K の増加を考慮すると理解されるであろう。

$h_0 < h_r$ の場合、図-2の(a)と(b)に置きかえることが可能であるとの想定のもとに、洗掘に寄与すべき有効水頭、 h_{sc} は近似的に次のように推定される。

$$\begin{aligned} h_{sc} &= \left\{ \frac{1}{h_0^2} - \frac{f^{2/3}}{1.44^2} \left(\frac{1-K}{q} \right)^{4/3} \right\} C_D K \frac{q^2}{2g} \\ &= \left(\frac{1}{h_0^2} - \frac{1}{h_r^2} \right) C_D K \frac{q^2}{2g} \end{aligned} \quad (11)$$

この式において $h_0 = h_r, h_{sc} = 0$ とおくと、洗掘の発達 h_0 が時間の経過に伴って h_r に近付き、最終的に $h_0 \rightarrow h_r$ に至って発達が停止すると解される。

以上橋脚の圓りの洗掘についての approach とし Regime の概念を適用することの可能性と、安全洗掘水深が洗掘発生限界の資料から予測できる可能性を示すと共に、洗掘現象の分類並びに洗掘とエネルギーとの関係と巨視的立場から説明することができた。