

II-232 橋脚周辺における洗掘深の発達について

日大大学院理工 学生員 小田 晃
日大理工 正 員 栗津 清蔵

1、まえがき 橋脚周辺の局所洗掘に関する、洗掘深の時間的発達を扱った研究の多くは、粒径や橋脚径、フルード数などが重要な因子となっている。本研究では、変数として、それらの因子が含まれていると考えられる洗掘発生限界時の normal flow の水深 h_{n*} を用いる。そして、この h_{n*} から、平衡洗掘深 h_{se} が推定できるとする栗津の研究¹⁾に基づいて、洗掘深の発達に関する近似解を求め、その解と実験値とを比較検討するものである。

2、実験装置及び実験条件 実験用水路は長さ 620 cm、幅 40 cm の長方形断面水路であり、水路中央部に、長さ 135 cm、厚さ 14 cm の一様粒径の移動床を形成した。移動床の前後は、板に砂礫を貼りつけた固定床を、移動床の高さに一致させた。使用した橋脚は、直径 $d_b = 2, 4, 8$ cm の円柱橋脚で、それぞれ単独に移動床部に設置し、砂礫は平均粒径 $d_m = 0.171, 0.242, 0.342$ cm の 3 種類を用いた。

3、理論的考察 洗掘深は、与えられた橋脚、砂礫、流量のもとで、時間とともに発達する。この現象を、Clear Water Scour の条件で、流砂の連続式を用いて解析を行う。仮定として、洗掘孔体積 V と砂礫の通過幅 L は、最大洗掘深を h_s として、 $V = a h_s^3$ 、 $L = b h_s$ で表わされるものとする。単位幅当たりの流砂量 g_s は、洗掘孔が平衡状態のとき、摩擦速度 U_{mn} が砂礫の限界摩擦速度 U_{mc} に等しく、 $g_s = 0$ であることを考慮して、Kalinske・Brown 型の式を用いて次のように仮定する。

$$\frac{g_s}{U_{mn} d_m} = \beta \varphi_c \left\{ \left(\frac{U_{mn}}{U_{mc}} \right)^2 - 1 \right\}, \quad \varphi_c = \frac{U_{mc}^2}{(\beta/p - 1) g d_m} \quad (1)$$

ここに β は定数である。橋脚設置予定断面における normal flow の摩擦速度 U_{mn} は、対数則を指数式に近似して次式のように表わす。

$$\frac{U_{mn}}{U_{mc}} = 6.0 + 5.75 \log \frac{h}{d_m} = c \left(\frac{h}{d_m} \right)^n \quad (2)$$

表 $h/d_m \sim C, n$

h/d_m	$10 \sim 10^2$	$10^2 \sim 10^3$	$10^3 \sim 10^4$
C	7.24	9.93	12.0
n	0.192	0.123	0.096

U_{mn} は平均流速、 $h = h_n + h_s$ で h_n は normal flow の水深、 C ,

n は、表に示される定数である。ここで、洗掘孔内の平均摩擦速度 U_{ms} は U_{mn} に比例するとすれば、 $U_{ms} = \alpha U_{mn}$ と置き、洗掘発生限界時 $U_{ms} = U_{mc}$ であることを考えて(2)式を用いると、 U_{ms} は次のように表わされる。

$$U_{ms} = U_{mc} \left(\frac{h_{n*}}{h_n + h_s} \right)^p, \quad p = n + 1 \quad (3)$$

ただし、 h_s が h_{se} の時は、栗津の研究¹⁾より $h_n + h_{se} \doteq h_{n*}$ となるので(3)式は、平衡時にも $U_{ms} = U_{mc}$ となる。また、(3)式の U_{ms} を U_{mn} の代わりに(1)式に用いることにより、洗掘孔内からの流砂量が得られる。

次に、流砂の連続式 $L g_s dt = (1 - \lambda) dV$ から洗掘深と時間の関係を求める。まず、無次元洗掘深を H 、洗掘開始時の H を H_0 、無次元時間を T として次式で表わす。

$$H = \frac{h_n + h_s}{h_{n*}}, \quad H_0 = \frac{h_n}{h_{n*}}, \quad T = \frac{U_{mc} t}{h_{n*}} \quad (4)$$

(1), (3), (4)式を用いて連続式を整理すると、無次元連続式として次式が導かれる。

$$\frac{dT}{dH} = \frac{3a(1-\lambda)}{b\beta\varphi_c} \frac{h_n}{d_m} \frac{H-H_0}{1-H^{2p}} \frac{H^{3p}}{H_0} \quad (5)$$

ここに、 λ は空隙率である。(5)式を積分すると、

$$T = \frac{3\alpha(1-\lambda)}{b\beta\varphi_c} \frac{h_n}{dm} \left(\frac{H-H_0}{1-H^{2p}} \frac{H^{2p}}{H_0} \right) dH + C \quad (6)$$

上式の積分部分について級数展開を行い高次の項を無視して近似解を求める。ただし、 $H=H_0$ のとき $T=0$ より積分定数 C は 0 である。ここで近似解を $F(H, H_0, p)$ と置き、 H の代わりに $N=(1-H_0)/(1-H)$ を用いて変数を N に置き換えると、(6)式は次のようになる。

$$T = \frac{3\alpha(1-\lambda)}{b\beta\varphi_c} \frac{h_n}{dm} F(N, H_0, p) \quad (7)$$

次に、平衡時の N と T について考える。まず、変数 H を粒径に関する誤差を含むものとして $H = \{h_n + h_s(1-dm/h_{se})\}/h_{n*}$ とするならば、平衡時は、 $H_e = 1 - H_0 dm/h_n$ となる。この H_e を N の式に代入すれば、平衡時の $N = N_e$ は次式のように表わされる。

$$N_e = \frac{1-H_0}{1-H_e} = \frac{h_n}{dm} \frac{1-H_0}{H_0} \quad (8)$$

また、(8)式を(7)式に代入することにより T_e が求まる。この T_e と N_e を用

いて、洗掘深と時間の相対的な変化を見る。ここで、実験範囲が $10 \leq h_n/dm \leq 100$ であるので表より $\eta = 0.192$ ($p = 1.192$) とし、(8)式中の h_n/dm を 100 として数値計算を行った。その結果、 $F(N, H_0, p)/F(N_e, H_0, p) = T/T_e$ と $N/N_e = (1-H)/(1-H_e)$ の関係は、 $T/T_e \geq 0.1$ の範囲において、(9)式のように得られた。

$$1 - \frac{T}{T_e} = F\left(\ln \frac{1-H}{1-H_e}\right) \quad (9)$$

4. 実験結果と考察 $F(N, H_0, p)/F(N_e, H_0, p) \sim N/N_e$ の関係で実験値を整理したところ、図-1 が得られ、数値計算による曲線とほぼ一致した。しかし、平衡洗掘深に近づくにつれて、粒径に関する誤差の影響により、曲線と実験値が一致しなくなる傾向が見られる。

次に(9)式の関係で実験値を整理したものが、図-2、3 である。洗掘開始時 ($1-T/T_e=0$) 付近では、洗掘深を発達させるために流量を変

化させている。このため流れは不定流であり、洗掘開始付近の実験値は、他の部分と比べて傾向が異なっているが、その部分を除けば(9)式は、ほぼ成立すると考えられる。

5. ま と め 洗掘深の時間的な発達は、 $F(N, H_0, p)/F(N_e, H_0, p) \sim N/N_e$ の関係による数値計算により、ある程度正確に表わされ、また、数値計算から得られた(9)式の関係もほぼ成立することが実験より示された。今後の課題としては、仮定や近似等に検討を加えてより精度の高い解を導くことであり、また、円柱橋脚以外の構造物に対しても、実験解析を行い、(9)式の関係が成立するかを調べることである。

参考文献 1)東津：「局所洗掘発生限界の工学的意義」林学年報 昭53 2)小田・東津：「橋脚周辺の洗掘深の発達に関する一考察」土木学会年報 昭59

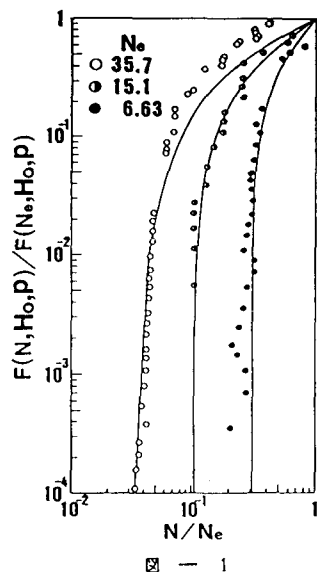


図 - 1

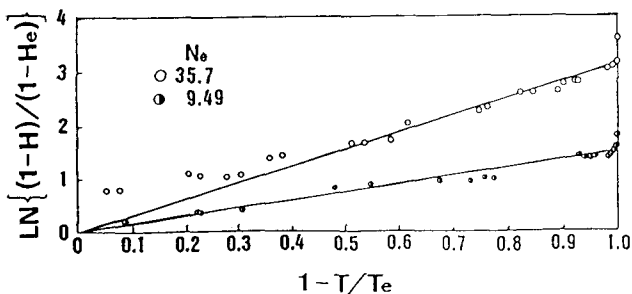


図 - 2

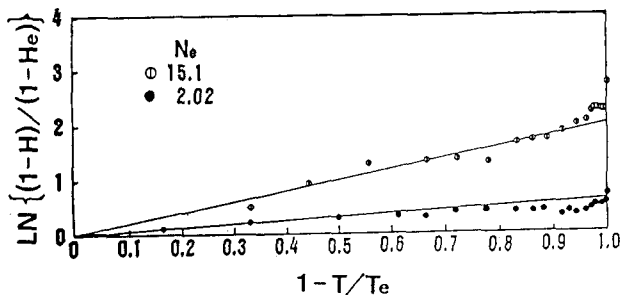


図 - 3