

岐阜大学工学部 正員 増田重臣
岐阜大学工学部 正員 *河村三郎

河川や水路が構造物によって縮流されると縮流部分の河床は洗掘され、そして粗くなる。この研究は縮流部分の平衡洗掘水深に関して動的平衡理論および静的平衡理論を使用して解析したものであり、この研究結果の一部は河村が Proc. ASCE, HY1, 1963⁽¹⁾ に発表した。

(1) 動的平衡理論⁽²⁾による解析: Fig. 1 のごとく縮流される場合に与えられた流量 Q について河床が動的平衡状態に達したとき、流水の連続式は $Q = b_1 h_1 u_1 = b_2 h_2 u_2 = \text{const.} \dots (1)$

ここに、添字 1 は非縮流部分, 2 は縮流部分を示している。 b : 河川中, h : 水深, u : 平均流速。流水に関する抵抗法則として次式を使用する。

$$\frac{u}{u_*} = E \left(\frac{R}{k_s} \right)^8 \dots (2)$$

$$\frac{k_s}{d_s} = K \left[\frac{u_*^2}{\{(\%)-1\} g d_s} \right]^m \dots (3)$$

流砂量公式として Brown の式を使用する。

$$\frac{q_s}{u_* d_s} = a_s \left[\frac{u_*^2}{\{(\%)-1\} g d_s} \right]^p \dots (4)$$

ここに、 q_s : 浮遊流砂も含めた単位中、単位時間当りの流砂量, a_s : ある常数, p : ある指数, (Brown の式では $a_s = 10, p = 2$)。一方、流砂の連続式は

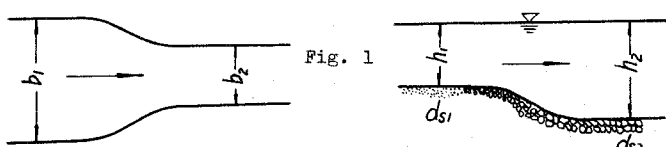
$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{b(1-\lambda)} \frac{\partial (q_s \cdot b)}{\partial x} = 0 \dots (5)$$

ここに、 z : ある基準面からの河床高, t : 時間, x : 流下方向にとった距離, λ : 空隙率, λ を近似的に常数として扱い、流砂があっても河床が時間的に変動しない、すなわち動的平衡状態にあるならば $\partial z / \partial t = 0$ であるから (5) 式の連続式は $Q_s = q_{s1} b_1 = q_{s2} b_2 = \text{const.} \dots (6)$

ここに、 Q_s : 全流砂量。

$$\left. \begin{aligned} q_{s1} &= u_{*1}^{(1+2p)} d_{s1}^{(1-p)} a_{s1} \{(\%)-1\}_1^{-p} g_1^{-p} \\ q_{s2} &= u_{*2}^{(1+2p)} d_{s2}^{(1-p)} a_{s2} \{(\%)-1\}_2^{-p} g_2^{-p} \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

(7) 式を (6) 式に代入して $a_{s1} = a_{s2}$, $\{(\%)-1\}_1 = \{(\%)-1\}_2$, $g_1 = g_2$ であるから (8) 式をうる。



ここに、 u_* : 摩擦速度, R : 径深, k_s : 相当粗度, d_s : 平均粒径, g : 重力の加速度, ϕ : 砂の密度, ρ : 水の密度, E と K はある常数, q と m はある指数, ($q \approx 1/6, m = 0 \sim 3$)

$$\frac{u_{*1}}{u_{*2}} = \left(\frac{b_2}{b_1} \right)^{\frac{1}{(1+2p)}} \left(\frac{d_{s2}}{d_{s1}} \right)^{\frac{(1-p)}{(1+2p)}} \dots (8)$$

(2) 式と (3) 式より u_1 と u_2 を求めると、

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= u_{*1}^{(1-2mq)} E_1 R_1^q K_1^{-q} d_{s1}^{(m-1)q} \{(\%)-1\}_1^{mq} g_1^{mq} \\ u_2 &= u_{*2}^{(1-2mq)} E_2 R_2^q K_2^{-q} d_{s2}^{(m-1)q} \{(\%)-1\}_2^{mq} g_2^{mq} \end{aligned} \right\} \dots (9)$$

(9) 式を (1) 式に代入して、 $E_1 = E_2$, $K_1 = K_2$, $\{(\%)-1\}_1 = \{(\%)-1\}_2$, $g_1 = g_2$, $(R_2/R_1) = (h_2/h_1)$ であるから

$$\frac{u_{*1}}{u_{*2}} = \left(\frac{b_2}{b_1} \right)^{\frac{1}{(1+2p)}} \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{\frac{(1+q)}{(1-2mq)}} \left(\frac{d_{s2}}{d_{s1}} \right)^{\frac{(mq-q)}{(1-2mq)}} \dots (10)$$

(8) 式と (10) 式より u_{*1}/u_{*2} を消去して、 h_2/h_1 について解くと次式をうる。

$$\left(\frac{h_2}{h_1} \right) = \left(\frac{b_1}{b_2} \right)^k \left(\frac{d_{s1}}{d_{s2}} \right)^j \dots (11)$$

$$k = \frac{(2mq+2p)}{(1+2p)(1+q)}, \quad j = \frac{(3mq-2p(1-q)+p-1)}{(1+2p)(1+q)}$$

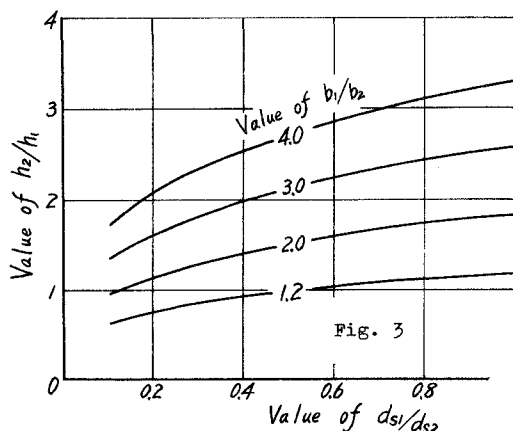
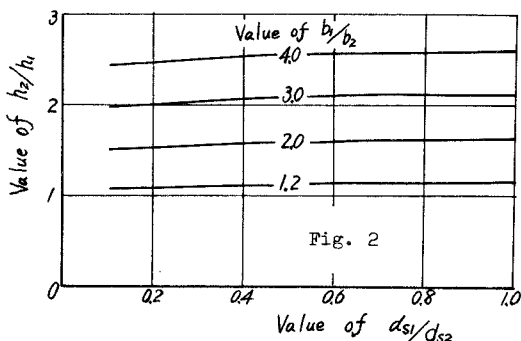
$p = 2$ と $q = 1/6$ を代入すると $k = (2m+24)/35$, $j = (3m+1)/35$; $m = 2$ のとき $k = 4/5$, $j = 1/5$; $m = 0$ のとき $k = 24/35$, $j = 1/35$ となる。

*この講演は増田が行はう予定であったが、4月より琉球大学へ出張のため河村が行う。

したがって $m = 0$ の場合は

$$\left(\frac{h_2}{h_1}\right) = \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{0.686} \left(\frac{ds_1}{ds_2}\right)^{0.029} \dots\dots\dots (12)$$

(12) 式の関係を $(b_1/b_2) = 1.2, 2.0, 3.0, 4.0$ について示したのが Fig. 2 である。Fig. 2 から、 ds_1/ds_2 は省略しうることが知られる。したがって (12) 式は $\left(\frac{h_2}{h_1}\right) = \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{0.686} \dots\dots\dots (13)$



この結果から、平衡洗掘水深 h_2 は非縮流部分の水深 h_1 と縮流形状 (b_1/b_2) に支配されることが知られる。

(2) 静的平衡理論による解析：流砂がほとんどないような河川に構造物が作られた場合、縮流部分は掃流力が増加するためにこの部分の細い粒径の土砂は流送されて粗くなり最後には静的平衡の状態になると考えられる。このような特殊な場合について解析してみよう。

限界掃流公式として岩垣公式⁽⁵⁾を使用すると
$$\frac{U_{*c}^2}{[(\rho/\rho_s)-1]g d_s} = a_c \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 U_{*c} ：限界摩擦速度、 a_c ：ある常数、静的平衡状態においては、

$$\frac{\tau_{c1}}{\tau_{c2}} = \frac{\rho_1 U_{*c1}^2}{\rho_2 U_{*c2}^2} = \frac{\rho_1 U_{*1}^2}{\rho_2 U_{*2}^2} = \frac{\rho_1 a_{c1} [(\rho/\rho_s)-1]_1 g_1 d_{s1}}{\rho_2 a_{c2} [(\rho/\rho_s)-1]_2 g_2 d_{s2}} \dots\dots\dots (15)$$

$\rho_1 = \rho_2, g_1 = g_2, [(\rho/\rho_s)-1]_1 = [(\rho/\rho_s)-1]_2$ であるから
$$\left(\frac{U_{*1}}{U_{*2}}\right)^2 = \left(\frac{a_{c1}}{a_{c2}}\right) \left(\frac{d_{s1}}{d_{s2}}\right) \dots\dots\dots (16)$$

(10) 式と (16) 式から U_{*1}/U_{*2} を消去して (h_2/h_1) について解くと

$$\left(\frac{h_2}{h_1}\right) = \left(\frac{a_{c1}}{a_{c2}}\right)^f \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^r \left(\frac{d_{s1}}{d_{s2}}\right)^s \dots\dots\dots (17)$$

ここに $f = \frac{(1-2m)g}{2(1+g)}, r = \frac{1}{(1+g)}, s = \frac{(1-2g)}{2(1+g)}$

$g = 1/6$ を代入すると $f = (3-m)/7, r = 6/7, s = 2/7$ となる。 (a_{c1}/a_{c2}) は近似的に 1 に近い値であるから省略しうる。したがって (17) 式は

$$\left(\frac{h_2}{h_1}\right) = \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{2/7} \left(\frac{d_{s1}}{d_{s2}}\right)^{2/7} = \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{0.287} \left(\frac{d_{s1}}{d_{s2}}\right)^{0.286} \dots\dots\dots (18)$$

(18) 式の関係を $(b_1/b_2) = 1.2, 2.0, 3.0, 4.0$ について示したのが Fig. 3 である。なお (11) 式と (18) 式の指数が一致する m の値は $m=3$ である。

文献

- (1) Komura, S., Discussion of "Sediment Transportation Mechanics: Erosion of Sediment," by the Task Committee on Preparation of Sedimentation Manual, Proc. ASCE, Vol. 89, No. HY1, January, 1963, pp. 269-276.
- (2) Komura, S., Discussion of "Sediment Transportation Mechanics: Introduction and Properties of Sediment," by the Task Committee on Preparation of Sedimentation Manual, Proc. ASCE, Vol. 89, No. HY1, January, 1963, pp. 263-266.

(3) 増田, 河村; 流砂ある河川における平衡分配について, 土木学会論文集 70号, 1960, pp. 8~16.

(4) 増田, 河村; 河川の静的平衡分配について, 土木学会論文集, 70号, 1960, pp. 17~25.

(5) 岩垣雄一; 限界掃流力に関する基礎的研究, 土木学会論文集 41号, 1956, p. 15.