

京大防災研 正員 芦田和男 京大防災研 正員 村本嘉雄
京大大学院 学生員 田中修市 京大大学院 学生員 藤田裕一郎

流路の変動過程を考える場合に、流路の安定形状を明らかにすることが重要であって、これまで主に側岸固定水路について静的平衡あるいは動的平衡の観点から縦断形状の検討がなされている。しかし、側岸侵食性流路については、側岸の侵食機構が明らかでないために流路の安定条件の設定が難しく、静的平衡状態の安定形状の関係が示されているにすぎない。本研究では、側岸侵食性流路の実験で観察される上流部の静的平衡区間に注目してその安定形状を従来の静的平衡理論と比較し、その相異点を明らかにする。また、流路の拡幅と河床変動の関係について一次元的な解析を行ない、実験値と比較することにより安定流路の形成過程について若干の検討を行なう。

1. 流路の安定形状の検討：流路の横断形状は図-1に示すように拡幅が停止したのち、側岸から中央へ静的平衡状態に移行していく。河床砂の粒度分布の横断変化も顕著であって、最終時点での中央部の d_{50} は初期のその約6倍になっている。著者らの実験では、全長110~130 mのうち上流40~50 mにわたってこうした安定流路が形成されたが、拡幅と河床上昇が顕著な断面の粒度構成は中央部が最初に細粒化したのち図-1のように粗粒化する。図-2は安定横断形状に関するLaneの式と実験値とを比較したもので、 h_0 は平衡断面の最大水深である。河床砂の静止摩擦角は実測によると $36^\circ \sim 39^\circ$ であって、理論曲線より実測の横断形が扁平なことがわかる。この理由として上述の静的平衡への移行過程と混合砂の影響が考えられる。後者の影響を検討するために、一様砂を用いた他の研究者の実験値について、Laneの流路幅(B)と河床こう配(i)の関係式と比較すると図-3のようになる。Stebbinsは本実験と同様な静的平衡、AckersとWolman & Brushは動的平衡を対象としているが、いずれの実験値も理論式より i に対応するBが大きくなり、平衡状態の相異による変化も顕著でない。また、断面積と流路幅の関係についても同様の比較を行なったが、Laneの式は実験値より大きい断面積を与える結果を得た。このことから、拡幅後に形成される安定断面は水位および水面こう配一定の条件で決まる静的平衡断面と異なり、その形成過程を考える必要があることがわかる。

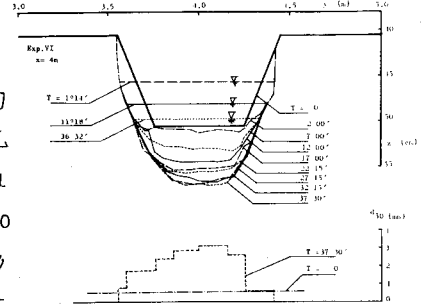


図-1 横断形状と中央粒径の変化

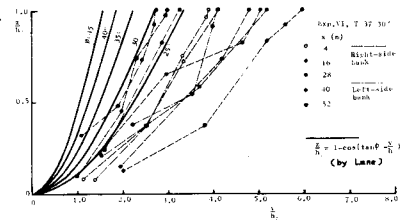


図-2 安定横断形状

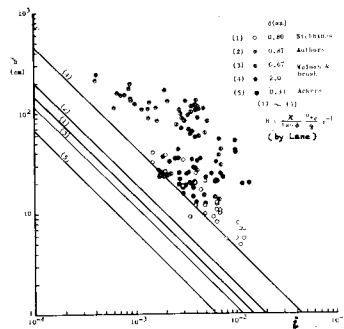


図-3 流路幅と河床こう配の関係

2. 流路の拡幅と河床変動： 図-4に示すような座標系と広幅の長方形断面近似を用いると、側岸侵食を伴う河床変動の基本式はつぎのように与えられる。

$$B \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial Q_B}{\partial x} = q_s \dots (1) \quad q_s = \frac{1-\lambda_b}{1-\lambda} \frac{\partial B}{\partial t} (D-z) \dots (2)$$

$$\frac{U_*^3}{g h} = I_e = -\left(1 - \frac{B U_*^3}{g h}\right) \frac{\partial h}{\partial x} + I_0 - \frac{\partial z}{\partial x} + \beta \frac{U_*^3}{g B} \frac{\partial B}{\partial x} \dots (3)$$

$$Q = C B h U_* \dots (4) \quad Q_B = M B U_* (U_*^2 - U_{*c}^2)^m, \quad M = M_1 \{(\varphi_p - 1) g\}^{1-m} d_m^{1-m} \dots (5)$$

ここで q_s は側岸からの供給土砂量, λ, λ_b はそれぞれ河床と側岸の間隙率 ($\times 100$), C, M_1, m は定数, 他は慣用記号を用いてある。(1)に(3)~(5)を代入し, 拡散型の式に変形するとつぎのようになる

$$\frac{\partial z}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + L \right) + \frac{q_s}{B} \dots (6) \quad K = M g C^{1-2m} a^m (1 + \frac{2m}{a}) Q \frac{2m-1}{B} \frac{1-2m}{h} \frac{2(1-m)}{3(1-\lambda)} \dots (7)$$

$$L = (1-\beta F_1) \frac{\partial h}{\partial x} - 3\beta F_1 \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 - (2 + \frac{2m}{2m+a}) \frac{I_e}{B} \frac{\partial B}{\partial x} - \beta F_2 \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + 3\beta F_1 \frac{1}{B} \left(\frac{\partial B}{\partial x} \right)^2 \dots (8) \quad \text{ただし } a = 1 - \frac{U_*^3}{U_{*c}^3}, F_1 = \frac{U}{\sqrt{g h}}, F_2 = \frac{U}{\sqrt{g B}}$$

つぎに, q_s の条件式を求めるためにスケールの異なる実験の一樣拡幅時の測定値にもとづいて, $\frac{\partial B}{\partial t} \sim f_n(U_* - U_{*c})$ と $(D-z) \frac{\partial B}{\partial t} \sim f_n(U_* - U_{*c})$ の関係を検討した。その結果, 後者の関係が妥当であることがわかり, q_s としてつぎの表示を仮定した。

$$q_s = \frac{1-\lambda_b}{1-\lambda} N (U_*^2 - U_{*c}^2)^n U_{*c}, \quad N = N_1 \{(\varphi_p - 1) g\} d^{1-n} \dots (9)$$

以上より, (3), (4), (6)~(9) 式を用いて河床変動の解析が可能となる。(6)式で $L=0$, (3)式が $\frac{U_*^3}{g h} = I_e = I_0 - \frac{\partial z}{\partial x}$ (3)' と近似できる場合を考え, また, 実験値より $m=1, n=2$ とし, $\eta = \frac{D-z}{D}$, $b = \frac{B_0}{B}$, $i = \frac{I_e}{I_0}$, $\alpha = \frac{1-\lambda_b}{1-\lambda}$, $\gamma_0 = \left(\frac{U_*}{U_{*c}}\right)^2$ を用いると, 基礎式はつぎのようになる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{K_0}{1-\gamma_0} \frac{1-\gamma_0 b^2 i^{-\gamma}}{b} \frac{\partial \eta}{\partial x^2} - \alpha \frac{\eta}{b} \frac{\partial b}{\partial t} \dots (10)$$

$$\frac{\partial b}{\partial t} = \frac{\gamma_0}{\alpha B_0 D (1-\gamma_0)} b^{\frac{5}{2}} i^{\frac{5}{2}} (1-\gamma_0 b^2 i^{\frac{5}{2}})^2 \eta^{-1} \dots (11) \quad i = 1 + D \frac{\partial \eta}{\partial x} \dots (12)$$

ただし, $K_0 = M_1 Q (1-\gamma_0) / (1-\lambda) (\varphi_p - 1) C B_0$, $q_{s0} = \alpha N_1 U_{*c}^3 (1-\gamma_0) / (\varphi_p - 1) g d$, であって添字(0)は初期値を表す。(10)~(12)式を差分計算によって解く。差分は安定条件 $\Delta t \leq (2\alpha F / 2K_0)$ より, $\Delta t = 100$ sec, $\Delta x = 2m$ とした。つぎの2ケースについて計算し, 計算値と実験値との比較を図-5, 6に示す。

(1) Exp. IV; ($t=0; \eta=1, b=1, i=1$), ($x=0; i=i_k=0.4, b=b_k=1$), ($x=110^m; \eta=1$), $Q=15 \frac{m^3}{sec}$, $I_0=1/200$, $B_0=70^m$, $D=10^m$, $C=13$, $\lambda=0.40$, $\lambda_b=0.45$, $d_m=0.88^{mm}$; $M_1=10$, $N_1=20$

(2) Exp. VI; $x=0 \sim 60^m$: $I_0=1/200$, $C=14$, $x=60 \sim 110^m$: $I_0=1/500$, $C=12$ であって他は Exp. IV と同じであるが $x=60^m$ において η と $\frac{\partial \eta}{\partial x}$ が上下流で接続する条件を付加している。

計算値と実験値の全体的な傾向は対応しているが, 安定流路を予測するにはさらに上流部の粗粒化と断面形の関係および下流部の蛇行条件を加味する必要がある。

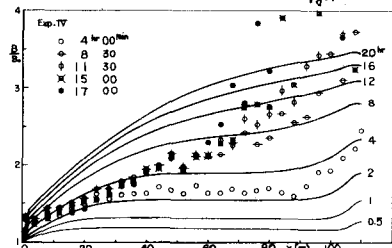
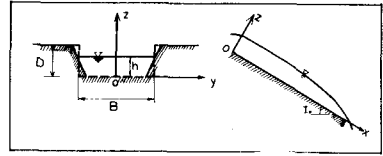


図5-1 流路幅の計算値と実験値 (Exp. IV)

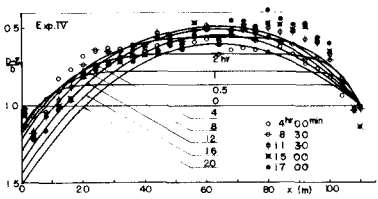


図5-2 河床高の計算値と実験値 (Exp. IV)

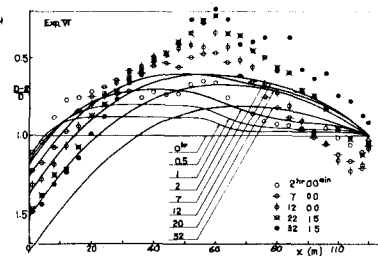


図6-1 流路幅の計算値と実験値 (Exp. VI)

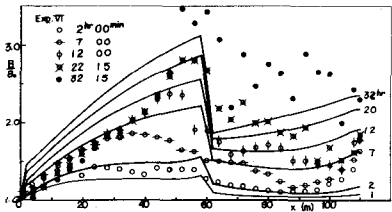


図6-2 河床高の計算値と実験値 (Exp. VI)