

岐阜大学工業短期大学部 正員 藤田 一部

岐阜大学工学部 正員 河村 三部

1. まえがき

移動床合流部では掃流力の急激な増大により河床が著しく洗掘され極めて複雑な流況を呈する。そのため、合流に伴うエネルギー損失の特性、或いは合流部下流での強い非平衡性を伴う流砂運動の特性等に関しては不明確な点が多い。本研究ではこれらの問題点のうち、合流に伴うエネルギー損失に注目し特に、流量比、フルード数の影響に関して実験的・理論的検討を行った。

2. 理論的検討

本研究では理論の単純化のため平均河床面のみを対象とし、図-1に示すように合流部で段落ちを仮定した。支配断面を図-2のようにとりこの区間の流水の重力成分・摩擦成分を無視すれば運動量方程式は次のようになる。

$$\rho Q_3 \alpha_3 U_3 - \rho Q_1 \alpha_1 U_1 - \rho Q_2 \alpha_2 U_2 \cos \theta = P_1 + P_2 \cos \theta - P_3 - R \sin \theta \quad (1)$$

ここに、 ρ : 流体密度、 Q : 流量、 α : 運動量補正係数、 U : 断面平均流速、 θ : 合流角、 P : 圧力成分、 R : 支川壁からの反力成分、添字 1, 2, 3 はそれぞれ検査断面における本川上流、支川、本川下流の諸量を表す。ここに圧力 P は静水圧を仮定し、反力 R は断面 2'-3', 2-2' の水位が等しいとすると

$$P_1 = \rho g (H_1 + Z_1 - Z_3)^2 B / 2 \quad (2) \quad P_2 = \rho g (H_2 + Z_2 - Z_3)^2 B_2 / 2 \quad (3)$$

$$P_3 = \rho g H_3^2 B / 2 \quad (4) \quad R = \rho g (H_2 + Z_2 - Z_3)^2 B_2 \cot \theta / 2 \quad (5)$$

となる。また、合流点直上流における本川、支川の水位はほぼ等しいとみなせることから

$$Z_1 + H_1 = Z_2 + H_2 \quad (6)$$

と仮定できる。(1) ~ (6) を水深比 H_1/H_3 についてまとめると次式が得られる。

$$(H_1/H_3)^4 + A(H_1/H_3)^3 + B(H_1/H_3)^2 + C(H_1/H_3) + D = 0 \quad (7)$$

ここに、

$$A = 2 \Delta Z_3 / H_3 + \Delta Z_2 / H_3, \quad B = (\Delta Z_3 / H_3)^2 + 2(\Delta Z_2 / H_3)(\Delta Z_3 / H_3) - G$$

$$C = (\Delta Z_2 / H_3)(\Delta Z_3 / H_3)^2 + E + F - G(\Delta Z_2 / H_3), \quad D = E \Delta Z_2 / H_3, \quad E = 2 \alpha_1 F r_3^2 (1 - Q_r)^2$$

$$F = 2 \alpha_2 F r_3^2 Q_r^2 \cos \theta / B_r, \quad G = 1 + 2 F r_3^2 \alpha_3, \quad \Delta Z_2 = Z_1 - Z_2, \quad \Delta Z_3 = Z_1 - Z_3, \quad Q_r = Q_2 / Q_3$$

$$B_r = B_2 / B, \quad F r_3 = U_3 / (g H_3)^{1/2}$$

である。式(7)の解析解のうち有意な解を示せば次のようである。

$$H_1/H_3 = [(t-p)^{1/2} + \{(t-p) - 4q_1\}^{1/2}] / 2 \quad (8)$$

ここに、

$$t = -a/3 + 2s_1^{1/2} \sin(\pi/2 - s/3), \quad p = B - 3/8A^2, \quad q = C - AB/2 + A^3/8$$

$$r = D - AC/4 + A^2B/16 - 3A^4/256, \quad a = -p, \quad b = -4r, \quad c = 4pr - q^2, \quad q_1 = t/2 + q/(2(t-p)^{1/2})$$

$$s = \tan^{-1} \{(-t_1^2 - 4s_1^3)/(-t_1)\}, \quad s_1 = b/3 - a^2/9, \quad t_1 = 2a^3/27 - ab/3 + c$$

一方、合流部におけるエネルギー損失水頭を H_L とおき、図-2の本川断面 1, 3 についてエネルギー方程式

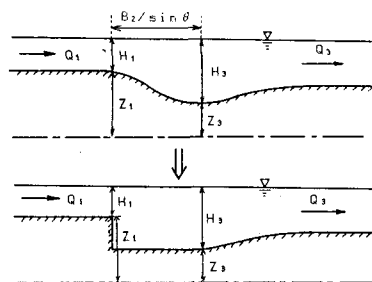


図-1 河床形状の仮定

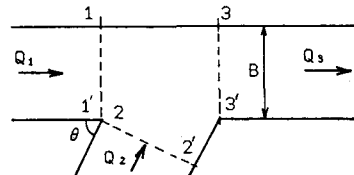


図-2 支配断面

を立てると次のようである。

$$H_1 + Z_1 + U_1^2 / 2g = H_2 + Z_2 + U_2^2 / 2g + H_L \cdots (9)$$

これを水深 H_2 を用いてまとめると次式が得られる。

$$H_L / H_2 = H_1 / H_2 + \Delta Z_2 / H_2 - 1 + Fr_2^2 \{ (1 - Q_r)^2 (H_3 / H_1)^2 - 1 \} / 2 \cdots (10)$$

よって、合流部上・下流及び、支川の平均河床高並びに、合流部直下流の水深 H_3 が与えられれば式(6)(8)(10)により、水深 H_1 、 H_2 及びエネルギー損失 H_L が求まる。

3. 実験装置並びに実験方法

実験には本川水路幅 $B = 30 \text{ cm}$ 、支川水路幅 $B_2 = 20 \text{ cm}$ 、本川水路長 8 m 、支川長 2.5 m のアクリル水路を用いた。使用砂の平均粒径は 6.74 mm であり、初期河床勾配は本川水路を $1/500$ 、支川水路を $1/200$ とした。流量比は $Q_r = 0.1, 0.2, 0.3$ の3通りとし、合流角は 90° とした。上流端での給砂は行っていない。

通水後 $10, 20, 40, 80, 160, 320$ 分後の河床形状、水面形、流速分布を測定した。但し流速分布は河床形状の変動を停止するために下流端水位を 2 cm 上昇させた後に測定した。

4. 考察及び結論

合流部下流側水深 H_2 を与えた場合の上流側水深 H_1 の理論値と実験値の比較を図-3に示す。河床形状をかなり単純化したモデルを用いたにもかかわらず実験値との対応は良好といえる。但し、本解析では本川上流・支川の運動量補正係数を $\alpha_1 = \alpha_2 = 1.1$ 、本川下流での値を $Q_r = 0.1, 0.2, 0.3$ に対し、それぞれ $\alpha_3 = 1.15, 1.2, 1.3$ とした。合流角等他のパラメータによる α_3 の値への影響については今後の検討を要する。また、エネルギー損失の予測に関しても比較的良好な結果が得られた(図-4)。エネルギー損失に対する流量比及びフルード数の影響を図-5、図-6に示す。フルード数の増大に伴って損失は増大し、

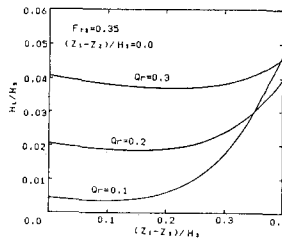


図-5 Q_r の影響

流量比についてもある相対的河床高差までは流量比の増大に伴い損失も増大することがわかる。但し、本実験では本川上流及び支川の河床変動量がわずかであったため図-5、6の理論曲線は $Z_1 = Z_2$ の場合についてのみ示した。一方、流速分布特性は固定床の場合とは異なって合流角が 90° と大きいにもかかわらず逆流領域はほとんどみられず、逆に河床付近の流速の方が大きくなっ

ていることがわかる(図-7)。これは流れが合流部洗掘孔を流下する際、流水断面が縮小するために流速が河床付近で加速されることと合流部で生じる二次流の影響と思われる。河床変動に対する合流角等のパラメータによる影響については今後詳細に検討する。

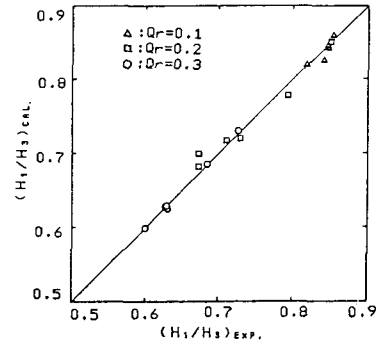


図-3 上流水深の予測

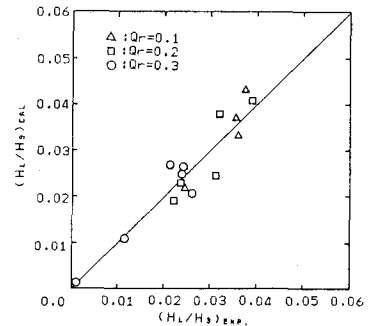


図-4 損失水頭の予測

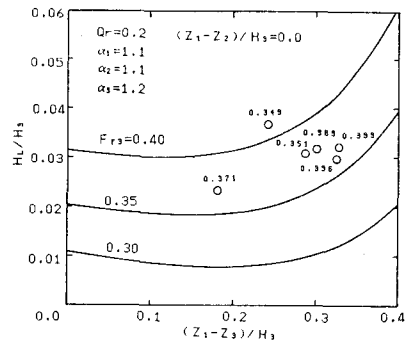


図-6 Fr_2 の影響

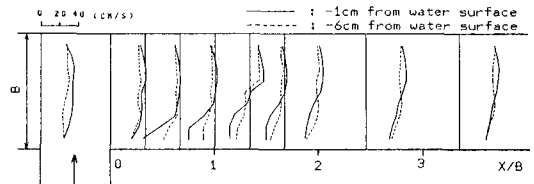


図-7 流速分布特性 ($Q_r = 0.2; 10 \text{ min}$)