

跳水後の流況を知ることが、減勢池の床止工の問題等に必要である。ここでは、跳水後の平均流速と変動流速について検討を加えている。また、シルの設置により、水叩きの長さの短縮、跳水の常流側水深の減少が可能である。ここでは、シルに作用する抗力についても検討を加えている。

跳水終端の定義 跳水の終端断面($x=L_d$)を水面における逆流の観察されなくなった断面と定義し、 L_d を跳水の長さとする。なお、水面において常に逆流の観察される終端断面($x=L_d$)をローラーの終端とし、 L_d と L_r とを区別する(図-1参照、 $\leftrightarrow$ 印は水路方向の振動範囲を示す)。

跳水終端の流速分布 $x=L_d$ における $\bar{u}$ の測定結果によると F が小的时候の方が水路床近くの $\frac{\bar{u}}{U_2}$ の値は大きく、洗掘に対して危険となるものと考えられる。また、跳水始端がゲート直下の場合(Case a)の方が射流境界層が発達している場合(Case b)よりも水路床近くの $\frac{\bar{u}}{U_2}$ は大きく、シルに作用する抗力も異なるものと推定される。

跳水内部の最大流速の減衰状況 各断面の最大流速の減衰状況は(Case a), (Case b)共に式(1)で示される。⁽¹⁾

$$(U_m - U_2)/U_1 = 0.0855 - 1.114 \log_{10}(x/L_d) \quad 0.2 \leq x/L_d \leq 1.0 \quad (1)$$

共役水深 一様な水平勾配開水路の跳水部にControl volumeを選ぶと、平均流の運動量方程式は(2)となる。 $x=0, L_d$ で静水圧分布、 $\beta_1=\beta_2=1$ 、壁面摩擦とRe応力を無視と仮定すると周知の一次元関係式(3)が得られる。

$$\rho \int_S \bar{u}(\bar{m}_0 \bar{u}) ds = \int_S \bar{m}_2 \bar{p} ds - \left\{ \int_S \bar{M} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} ds + \rho \int_S \bar{u}^2 (\bar{m}_0 \cdot \bar{u}) ds \right\} \quad (2) \quad h_2/h_1 = (\sqrt{8F^2 + 1} - 1)/2 \quad (3)$$

なお、 $x=L_d=5h_2$ におけるRe応力はRouse et al.の実験($F=6$) (air model) ⁽²⁾によると $\frac{1}{2\bar{u}^2 h_1} \int_0^{h_2} \bar{u}^2 dy = 0.02$, Resch and Leuthesserの実験 ⁽³⁾ ($F=6$)によると(Case a)のとき0.045, (Case b)のとき0.08となっている。式(3)は実験値を満足している ⁽⁴⁾ので巨視的には式(3)の関係でよい。

跳水によるエネルギー損失 平均流のエネルギー方程式を跳水部に適用すると式(4) (平均流の粘性応力に関する項とControl surfaceにおけるRe応力による仕事を無視)、変動流のエネルギー方程式は式(5) (diffusion項や圧力変動項は無視)で示される。⁽²⁾⁽⁵⁾

$$\alpha_1 U_1^2/2g + \lambda_1 h_1 = \alpha_2 U_2^2/2g + \lambda_2 h_2 + \left\{ -\frac{1}{w\alpha} \int_0^{L_d} \int_0^{h_1} (\rho(\bar{u}^2 - \bar{v}^2) \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \rho \bar{u} \bar{v} (\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x})) dy dx \right\} \quad (4)$$

$$Pr. = Dis. + Con. \quad (5)$$

ここに、 $Pr. \equiv$ (4)式右辺第三項, $Dis. \equiv \frac{1}{w\alpha} \int_0^{L_d} \int_0^{h_1} \bar{M} (\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}) \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} dy dx$, $Con. \equiv \frac{1}{w\alpha} \int_0^{h_2} \rho \frac{\bar{u}^2}{2} dy$ Rouse et al.の実験によると $x=L_d$ においてCon.は小さく無視できる程度であり、一般に $x=L_d$ においては $Pr. \div Dis.$ であると推定される(図-2)。すなわち、跳水によるエネルギー損失を H_L とすると式(4)は式(6)となる(ただし、 $\alpha_1=\alpha_2=1$, $\lambda_1=\lambda_2=1$)。さらに、式(6)は式(7)となる。式(7)は実験値を満足する((Case a), (Case b)共に)ので、⁽⁴⁾巨視的には L_d を跳水によるエネルギー損失の達成される長さとして解釈できる。

$$U_1^2/2g + h_1 = U_2^2/2g + h_2 + H_L \quad (6) \quad H_L/H_1 = \left\{ 2(1 - \frac{h_2}{h_1}) + [1 - 1/(\frac{h_2}{h_1})^2] F^2 \right\} / (2 + F^2) \quad (7)$$

跳水の長さ L_d をこのように解釈すると式(8)が推論され、無次元化すると式(9)となる。式(9)に基づき資料を整理すると良い相関が得られ、実験式(10)が得られた。なお、式(10)と式(11)とは、ほぼ一致する L_d を与える。

$$L_d = f(H_1, H_L) \quad (8) \quad L_d/H_L = f(H_L/H_1) \quad (9)$$

$$\log_{10}(L_d/H_L) = -1.71(H_L/H_1) + 1.58 \quad (10) \quad L_d/h_2 = (5 \sim 6) \quad 3 \leq F \leq 10 \quad (11)$$

跳水後の平均流速分布と乱れ 巨視的には一次元の関係式(3), (7), (11)を満足するが $x=L_d$ における平均流速分布は一般の開水路流れの分布に一致しておらず、さらに $x \geq L_d$ において跳水による乱れが残っているため、この点についても検討が必要である。 $x \geq L_d$ における $\bar{u}$ の測定結果によると、一般の開水路流れと一致するのは跳水終端から $(2 \sim 3)L_d$ 下流であることが示されている。⁽⁶⁾ また、各研究者によって測定された $x \geq L_d$ における $\sqrt{u'^2}$ の測定値をまとめると図-3、瞬間最大流速 U_m' の測定結果は図-4のように示される。図-3, 4より、

流速分布と乱れという観点からは $X=(2\sim 3)L_i$ の河床保護が必要であると考えられる。さらに $X \geq L_i$ における圧力変動と水面変動の測定結果、あるいは砂粒の移動限界による乱れの大きさの推定結果からも同様の結論が得られる。なお、 $X \leq L_i$ における最大乱れ強さは $F_i=6$ のとき $\sqrt{u'^2}/u_2 = 2.1 \sim 2.6$ である。

シルに作用する抗力 $X \leq L_i$ にシルを設置すると抗力 P が作用するため $h_c < h_s < h_2$ となる。ここでは連続バッフルについて実験的検討を加えた(図-5)。次元解析によると式(12)が得られる。

$$C_d = f(F_i, S/h_1, h_s/h_1, X'/L_i) \quad \text{ここに} \quad C_d = P/\frac{1}{2}\rho u^2 BS \quad (12)$$

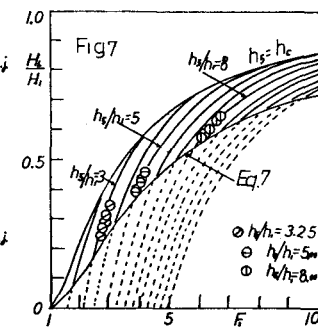
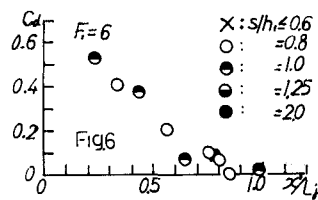
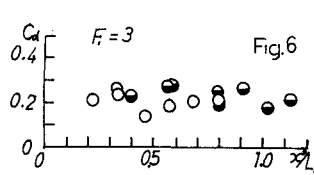
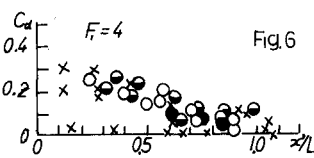
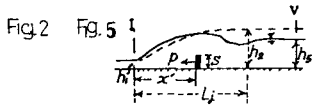
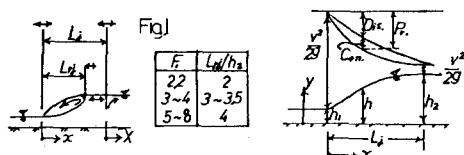
なお、 C_d は圧力計等により直接測定せず式(13)によって求めた。式(13)は I 断面と V 断面(水面がレベルとなり流線の乱れや曲率の影響が小さく静水圧分布しているとみなせる最初の断面)間の流体を control volume に選び(I, V 断面で静水圧分布, $\beta=1$ と仮定), X 方向の運動量方程式より求まる。

$$C_d = (h_s/h_1 - 1) \{ 2F_i^2 - (h_s/h_1)(1 + h_s/h_1) \} / F_i^2 (S/h_1)(h_s/h_1) \quad (13)$$

実験結果(Case B)を図-6に示す。これより $0.6 < X/L_i < 1.0$ の場合, $F_i=3$ のときの方が $F_i=6$ のときよりも C_d は大きく, F_i が小のときの方がシルの効果は大きい。このことは, $X=L_i$ の流速分布からも推定がつく。また, シル高 S については $S/h_1 \approx 1$ 位が有効なようである。

強制跳水によるエネルギー損失 I, V 断面($\alpha=1$ と仮定)にベルヌーイの定理を適用すると式(14)が得られる。 $h_s=h_2$ (式(17)のとき) および $h_s=h_c$ の場合も含めて図-7に示してあり, 与えられた F_i に対して, 自由跳水の場合よりも大きい H_L/H_1 が得られる。また, 与えられた F_i に対して, h_s/h_1 の範囲は限定される。

$$H_L/H_1 = 1 - \{ 2(\frac{h_s}{h_1}) + F_i^2/(\frac{h_s}{h_1})^2 \} / (2 + F_i^2) \quad (14)$$



(記号)

Suffix 1: 跳水始端断面の諸量 Suffix 2: 跳水終端断面の諸量 h : 水深

$\bar{v}$: 平均流速 $F = \bar{v}/\sqrt{gh}$ $\bar{W} = \bar{W} + \bar{w} = (\bar{u} + \bar{u}')\bar{i} + (\bar{v} + \bar{v}')\bar{j} + (\bar{w} + \bar{w}')\bar{k}$ U_m : 各断面の U の最大値 S : ユニトロ-ルサーズ m_0 : S に垂直外向きの単位ベクトル m_z : S に垂直内向きの単位ベクトル n_z : S から m_z 方向の長さ $H = \bar{v}^2/2g + h$ H_L : 損失水頭 $Q' = \sqrt{u'^2 + v'^2 + w'^2}$ β : 運動量係数 α : エネルギー係数 λ : 圧力分布補正係数 B : 水路幅

(文献)

- (1) 大津 JSCE 1976.2.
- (2) Rouse et al. Turbulence Characteristics of the Hydraulic Jump 1958 Feb. ASCE Hy.
- (3) Resch and Lauthusser Mesures des Tensions de Reynolds dans le Ressaut Hydraulique 1972 (4) Jour. of Hydraulic Res.
- (4) 栗津大津吉田 跳水内流遷への射流境界層の効果 1974 耳環
- (5) Rouse Work Energy Equation for the stream line 1970.5. ASCE. Hy.
- (6) Lauthusser et al. Effect of Inflow Condition on Hydraulic Jump 1972. Aug. ASCE. Hy.
- (7) E. Rögvan Resultat de l'Etude du Mouvement Macro-turbulent en aval du Ressaut Hydraulique 1967. IAHR
- (8) J. Kalis Diminution de la Turbulence derriere le Ressaut
- (9) Lipay and Pustvoct On the vanishing of intensive macro-turbulence in open channel below Hydraulic outlet Structure IAHR. 1967.
- (10) F. Hartung et al. The Scouring Energy of the Macro-turbulent Flow downstream of a Hydraulic Jump 1967 IAHR