

II-85

下流水位の変化に対する跳水位置の移動

日大 理工 正員 大津 岩夫
日大 理工 正員 安田 陽一
日大 理工 学生員 〇原 雅人

水平水路においてゲート下流側に形成される跳水の位置は下流水位の変化に対して大きく移動する。この跳水の移動特性を知ることは水平水たたきの設計上必要である。従来、Willson and Turner¹⁾は、射流の水面形および境界層の発達状態を層流境界層として解析し、これに基づき跳水の移動特性を検討した。しかしながら実際の流れにおいては乱流境界層が発達している。ここでは、スルース・ゲート下流側で乱流境界層が発達する流れにおいて、下流水位の変化に対する跳水の移動特性について検討を加えた。

Developing Flow

図-1 に示される乱流境界層外側の流れにおいて

Bernoulliの式および連続の式より

$$U_0^2/2g+h_0=U^2/2g+h \quad \cdots (1) \quad U_0 h_0=U(h-\delta_*) \quad \cdots (2)$$

境界層内の流速分布は 1/7乗則で近似されるものとすれば
($U/U_0=(y/\delta)^{1/7}$)、排除厚さ δ_* 、運動量厚さ θ は、

$$\delta_*=\delta/8 \quad \cdots (3) \quad \theta=7\delta/72 \quad \cdots (4)$$

$J=U_0/U$ を用いて、式(1)を無次元化すると $h/h_0=Fo^2(1-1/J^2)/2+1$ ----- (5)

式(2),(3),(5)より、 $\delta/h_0=8(Fo^2(1-1/J^2)/2+1-J)$ ----- (6)

境界層内の運動方程式は次式で示される²⁾³⁾。

$$\frac{d\theta}{dx} + \frac{(2\theta+\delta_*)}{U} \frac{dU}{dx} = C_f' \quad \cdots (7)$$

ここに C_f' :局所摩擦係数($=\tau_w/(\rho U^2/2)$)である。

式(3),(4),(6)より式(7)は次式で示される。

$$dx = \frac{2}{C_f'} \left\{ -\frac{37}{18} \frac{U}{g} + \frac{23}{9} (h_0 + \frac{U_0^2}{2g}) \frac{1}{U} - \frac{16}{9} \frac{h_0 U_0}{U^2} \right\} du \quad \cdots (8)$$

C_f' については、smooth flat plate における Blasiusの式²⁾で示されるものと考えられる。

$$C_f' = 0.0592 (Ux/\nu)^{-1/2} \quad \cdots (9)$$

式(8)に式(9)を代入し、 $x=0, U=U_0$ の条件を適用すると次式が得られる。

$$\frac{x}{h_0} = 194 Re^{1/4} \left\{ \frac{37}{99} Fo^2 (1-J^{-1/5}) + \frac{23}{9} (2+Fo^2) (J^{-1/5}-1) - \frac{8}{9} (1-J^{4/5}) \right\}^{5/4} \quad \cdots (10)$$

ここに Re :レイノルズ数($=U_0 h_0/\nu=q/\nu$; q :単位幅流量)である。

以上からdeveloping flow における射流の水面形状の表示(11)が式(5),(10)から求められ、境界層の発達状態の表示(12)が式(6),(10)から求められる。また縮流部から境界層が水面に達する限界点までの距離 X_{cp} の表示(13)が式(5),(6),(10)から求められる。

$$h/h_0=f(x/h_0, Fo, Re) \quad \cdots (11) \quad \delta/h_0=f(x/h_0, Fo, Re) \quad \cdots (12) \quad X_{cp}/h_0=f(Fo, Re) \quad \cdots (13)$$

Fully Developed Flow

水平水路におけるfully developed flowの基礎式は次式で示される。

$$\frac{dh}{dx} = \frac{-(f/4)(q^2/2g)\{(2h+B)/B\}}{1-\alpha U^2/(gA^3)} = \frac{-(f/4)(q^2/2g)\{(2h+B)/B\}}{h^3-hc^3} \quad \cdots (14)$$

ここに壁面摩擦係数 $f=(\tau_w/(\rho V^2/8))$ であり、Knightによる式(15)⁴⁾によって表示されるものと考えられる。

$$1/\sqrt{f} = 1.81 \log_{10}(4VR/\nu\sqrt{f}) - 0.35 \quad \cdots (15)$$

アスペクト比 B/h が $B/h \geq 10$ の場合、次式で近似される。

$$1/\sqrt{f} = 1.81 \log_{10}(4Re\sqrt{f}) - 0.35 \quad \cdots (16)$$

水平水路において $B/H \geq 10$ の場合、式(14)に $R \approx h$ を代入し、 $X=X_{cp}$ で $h=h_{cp}$ の条件を適用すると次式が得られる。

$$\frac{x}{h_0} = \frac{8}{f Fo^2} \left[Fo^2 \left(\frac{h}{h_0} - \frac{h_{cp}}{h_0} \right) + \frac{1}{4} \left(\frac{h_{cp}}{h_0} \right)^4 - \frac{1}{4} \left(\frac{h}{h_0} \right)^4 \right] + \frac{X_{cp}}{h_0} \quad \cdots (17)$$

以上からdeveloped flowにおける射流の水面形状の表示(18)が式(16),(17)から求められる。

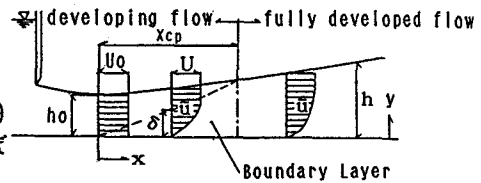


図-1

$$h/h_o = f(x/h_o, Fo, Re) \quad \text{---- (18)}$$

跳水の移動特性

水平水路における跳水上・下流端の水深間の関係については、底面摩擦を考慮した運動量方程式(19)による方が Belanger equation ($h_2/h = (\sqrt{8F^2 + 1} - 1)/2$) によるよりも正確な値を示すことが報告されている (Rajaratnam 1965, Ohtsu 1990)。

$$(h_2/h)^3 - \{2F^2 + 1 - S_f\} (h_2/h) + 2F^2 = 0 \quad \text{---- (19)}$$

ここに、 F :断面 $x=x$ でのフルード数、 S_f は跳水部の底面摩擦力($S_f = \int_0^L \tau_o dx / (wh^2/2)$); τ_o :底面せん断力、 L :跳水長、 w :水の単位重量)、 h_2 :与えられた F に対する h (跳水始端水深)の対応水深(跳水終端水深)である。

S_f については式(20)で近似される⁵⁾。

$$S_f = 0.13(F-1)^2 \quad (3 \leq F \leq 10) \quad \text{---- (20)}$$

跳水始端が縮流部($x=0$)に位置したときの跳水終端水深を h_{2o} とする。 h_{2o} から h_2 に変化したとき、跳水始端 $x=x$ の位置に移動する(図-2)。このときの跳水終端水深の変化量 $\Delta h (=h_{2o} - h_2)$ を h_o で無次元化する。

$$\Delta h/h_o = h_{2o}/h_o - h/h_o \cdot h_2/h \quad \text{---- (21)}$$

下流水位の変化 $\Delta h/h_o$ と跳水の移動距離 x/h_o との関係(22)が、developing flowの場合、式(5)、(10)、(19)、(20)、(21)、fully developed flowの場合、式(16)、(17)、(19)、(20)、(21)から求められる。

$$\Delta h/h_o = f(x/h_o, Fo, Re) \quad \text{---- (22)}$$

跳水の移動特性(22)の関係を図-3、4に示す。図中、実線は developing flowの場合を示し、破線は fully developed flowの場合を示す。図-3に示されるように、与えられた Fo に対し、 Re が小さくなるにつれて、同一の $\Delta h/h_o$ を得るための跳水の移動距離 x/h_o が短くなることが認められる。また図-4に示される

ように、与えられた Re に対し Fo が大きくなるにつれて、同一の $\Delta h/h_o$ を得るための跳水の移動距離 x/h_o が短くなることが認められる。また図-4から実験値は実線および破線を満足している。なお跳水終端断面は $L_j = 5.5h_2$ によって定められた⁵⁾。

記号

U_o : 縮流部での流速、 h_o : 縮流部での射流水深、 h : $x=x$ 断面での射流水深、 U : $x=x$ 断面での境界層外縁の流速、 δ : 排除厚さ($= \int_0^\delta (1 - u/U) dy$)、 $\bar{u}$: 境界層内の $y=y$ での時間平均された流速、 δ : 境界層厚さ、 θ : 運動量厚さ($= \int_0^\delta \bar{u}/U(1 - \bar{u}/U) dy$)、 Fo : 縮流部でのFroude数、 C_f : 局所摩擦係数($= \tau_o / (\rho U^2/2)$)、 v : 平均流速($= q/h$)、 Re : Reynolds数($= U_o h_o / \nu = q/\nu$; q : 単位幅流量)、 B : 水路幅、 h : 任意な断面での水深、 ν : 動粘性係数、 h_c : 限界水深、 Q : 流量、 R : 径深($= Bh/(2h+B)$)、 α : エネルギー補正係数(この場合、 $\alpha=1$)、 T : 水面幅($T=B$)、 A : 流積($A=Bh$)

参考文献

1. Willson and Turner(1972), J. Hydr. Div, ASCE 98(7)
2. Schlichting(1979) "Boundary Layer Theory", McGRAW-HILL
3. Iwasa(1957), Memoirs of Fac. of Eng., Kyoto Univ 19(3)
4. Knight, Demetriou and Hamed(1984), J. Hydr. Div, ASCE 98(7)
5. Ohtsu, Yasuda and Awazu(1990), Report of the Research Institute of Science and Technology, Nihon Univ, No. 35

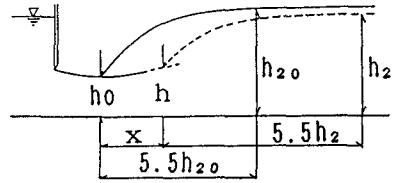


図-2

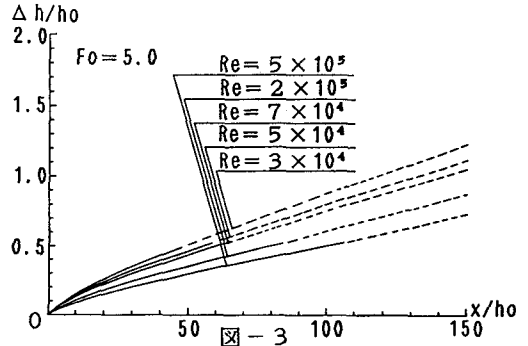


図-3

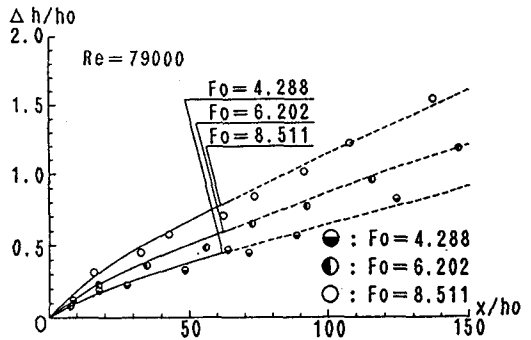


図-4