

流れの剝離をともなう現象は水工設計上重要な役割を果たすが、その理論的表示は現在のところ明確ではない。跳水現象は流れの剝離をともなう典型的な現象であり、跳水領域の大きさについても、従来、理論的根拠が乏しいままに資料を整理して実験式を提示している状態であり、各種の形状水路の跳水領域の大きさを示す一般的表示も得られない状態である。ここでは、跳水の長さについて、その物理的意味を考察し、資料の解析を試み、各種の断面形状水路における自由跳水と潜り跳水、傾斜水路の跳水、シルによる強制跳水など、すべての水路形状の跳水領域の長さ L_d が式(1)の関係で統一的に表示されることを明らかにしている。

$$f(L_d/H_L, H_2/H_1, \text{Shape}) = 0 \quad (1)$$

ここに、 Shape は水路の形状(断面形状、縦断形状)や特性を示す無次元量、 H_L は跳水による損失水頭、 H_2/H_1 は跳水による相対エネルギー損失を示す。

跳水領域の長さ L_d (二次元水平水路の自由跳水の場合) 跳水始端断面を $x=0$ 、跳水終端断面($x=L_d$) を各断面の流速分布の測定値から最大流速 U_m が流下方向にほとんど変化しなくなる最初の断面とし、 L_d を跳水の長さ、 $x=L_d$ での水深を h_2 と定める(図-7)。 U_m は $x < L_d$ で急速に減衰し、 $x \geq L_d$ では流下方向にほとんど変化しない。なお、 $x=L_d$ は水面がレベルとなり、水面における逆流のまったく観察されなくなった最初の断面と一致している(図-7 矢印は表面流の方向を示す)。また、水面において常に逆流の観察される終端断面($x=L_t$) をローラーの終端、 L_t をローラーの長さとし、 L_t と L_d とを区別する。なお L_t は剝離領域の大きさを示す。さらに、流速分布が一般開水路流の流速分布とほぼ一致する最初の断面を $x=L_0$ とし、 L_0 を遷移領域の長さということにする。 L_d/h_2 , L_t/h_2 , L_0/h_2 と F_1 との関係を図-2に示す。

跳水の長さの物理的解釈(二次元水平水路の自由跳水の場合) 平均流のエネルギー方程式を跳水部($0 \leq x \leq L_d$) に適用する。ただし、平均流の粘性能力に関する項と Control Surface における Reynolds 能力による仕事は無視され、 $x=0$, L_d では $\alpha=1$, $\alpha=1$ とおくことができる。

$$\frac{U_1^2}{2g} + h_1 = \frac{U_2^2}{2g} + h_2 + \left[-\frac{1}{\omega Q} \int_0^{L_d} \int_0^{h_1} \left[\rho(\bar{u}^2 - \bar{v}^2) \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \rho \bar{u} \bar{v} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \right] dy dx \right] \quad (2)$$

変動流のエネルギー方程式は式(3)で示される。ただし、diffusion 項や圧力変動項は他項に比べて無視している。

$$P_{ra} = D_{is} + C_{on}$$

$$\text{ここに、} P_{ra} \equiv \text{式(2)の右辺第三項、} D_{is} \equiv \frac{1}{\omega Q} \int_0^{L_d} \int_0^{h_1} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} dy dx, \quad C_{on} \equiv \frac{1}{\omega Q} \int_0^{L_d} \rho \frac{\bar{u}^2}{2} dy \quad (3)$$

式(2)の右辺第三項は平均流から乱流(変動)に伝達されたエネルギーの合計(turbulence Production (略 P_{ra}))を示し、エネルギー損失そのものの大きさはこの項によって決まる。Rouse et al. の実験から、 L_d は跳水によるエネルギー損失を得るための turbulence Production の完了する長さであると解釈される。また、 $x=L_d$ では式(3)における右辺第二項(Convection (略 C_{on}))は小さく、 $P_{ra} \approx C_{on}$ であることが示され、 L_d 内で変動の大部分が粘性によつて消失しているものと解釈される。

式(2)は式(4)のように示され、さらに $\bar{u} \bar{v} / U_1^2$, $(\bar{u}^2 - \bar{v}^2) / U_1^2$, $\bar{u} / U_1$, $\bar{v} / U_1 = f(\gamma_{h1}, \eta_{h1}, F_1)$, 跳水の水面形状は、 $\eta_{h1} = f(\gamma_{h1}, F_1)$ と示されるから式(5)が得られる。

$$H_L = \int_0^{L_d} \int_0^{h_1} (-F_1^2) \left[\frac{\bar{u}^2 - \bar{v}^2}{U_1^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\bar{u}}{U_1} \right) + \frac{\bar{u} \bar{v}}{U_1^2} \left\{ \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\bar{u}}{U_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\bar{v}}{U_1} \right) \right\} \right] dy dx \quad (4)$$

$$H_L = f(F_1, L_d, h_1) \quad (5)$$

上式に基づき、独立な無次元量の組合せを求めると式(6), (7)が求まる。

$$f(L/H_L, F_1) = 0 \quad \text{--- (6)}_1, \quad f(L/H_L, H_L/H_1) = 0 \quad \text{--- (6)}_2$$

$$f(L/h_1, F_1) = 0 \quad \text{--- (7)}_1, \quad f(L/h_2, F_1) = 0 \quad \text{--- (7)}_2$$

また、 L_j , L_t は割離領域の長さ L に比例するものと推定され、次式が得られる。

$$f(L/H_L, F_1) = 0 \quad (8)_1, \quad f(L/H_L, F_1) = 0 \quad (8)_2$$

$$f(L/H_L, H_L/H_1) = 0 \quad (9)_1, \quad f(L/H_L, H_L/H_1) = 0 \quad (9)_2$$

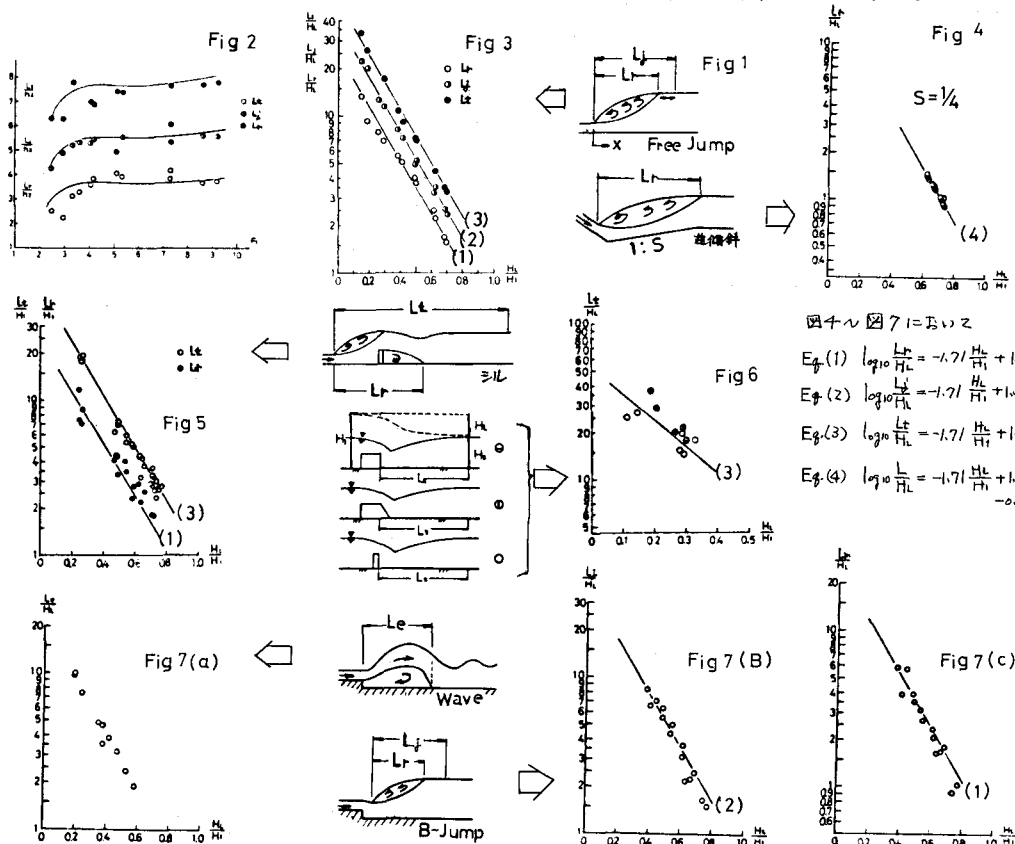
式(7)₂, (8)を図示すると図2, 式(6)₂, (9)を図示すると図3が得られる。

種々の水路における跳水領域の長さ 各種の水路形状の場合も同様な考察によつて式(10), (11)が推論される。

$$f(L/H_L, H_L/H_1 \text{ or } F_1, \text{Shape}) = 0 \quad (10)$$

$$f(L/h_1 \text{ or } L/h_2, F_1, \text{Shape}) = 0 \quad (11)$$

ここに、 L は L_j , L_t , L_r or L_g を示し、Shape は水路の形状を示す無次元量である。式(10)によつて資料を整理すると実験値のはらつきが小さく良い相関は得られない。式(11)の関係に基づき資料を整理すると、種々の水路形状の自由跳水および潜り跳水、あるいは、順、逆傾斜水路の跳水(図4)、鉛直シルによる強制跳水(図5)、低段路水路の跳水(図7(a))、急流水路の潜り跳水等すべての水路形状に対して良い相関が得られる。



(記号) suffix 1: 跳水始端断面の諸量, suffix 2: 跳水終端断面の諸量, L_j : 跳水の長さ, L_r : ローラーの長さ, L_g : 遷移領域の長さ, H_1 : 跳水領域の水路床最低部を水平基準面としたときの跳水始端の全水深, H_L : 跳水による損失水深, h : 水深, V : 平均流速, F_1 : 跳水始端のフルード数, $V = \sqrt{V + V'} = (\bar{V} + \bar{V}')/2 + (\bar{V} + \bar{V}')/2 + (\bar{V} + \bar{V}')/2$, U_m : 各断面の U の最大値, $g = \sqrt{U^2 + V'^2 + W'^2}$, α : エルツキー係数, β : 圧力分布修正係数

(文献)

- 1) H. Rouse, T. T. Siao, S. Nagarathnam; Proc. A.S.C.E. Hy 1 Feb. 1968
- 2) 大津: 土木学会論文集 1976.2, 東京北條 藤原; 土木学会論文集(32回) II-150, II-159
- 3) 栗津, 大津, 藤原; 土木学会論文集(34回) II-382, 1977
- 4) 岡田, 安芸; 電研所報 5巻6号, 1955
- 5) N. Rajaratnam, M. V. Ortiz; Proc. A.S.C.E. Hy 4 Apr. 1977