

段上りを有する跳水の水理特性に関する研究

九州工業大学工学部 学生員 ○木内大介
 九州工業大学工学部 正会員 鬼東幸樹 秋山壽一郎
 九州工業大学大学院 学生員 伊瀬知栄人

1. はじめに

水平な平坦河床の上の跳水の跳水長はsmetanaによって定式化されている。しかし、段上りを有する流れの跳水長は現在不明である。本研究では、水平で段上りを有する流れにおいて、流入フルード数および相対段上がり高さを系統的に変化させ、そこに発生する跳水の跳水長を解明した。

2. 実験装置および実験条件

実験に用いた水路は長さ20m、幅0.2m、高さ0.6mの水平な循環式水路である。水路上流端から15m下流側にスルースゲートを設け、その下流側に段上がり部を設けた。実験条件を表-1に示す。添字は、跳水始端を1、ローラー終端を2、最大水深点をhmax、平衡状態に漸近する点を3とした。 $Fr_1 = U_{m1} / \sqrt{gh_1}$ は流入フルード数、 $\Delta y / h_1$ は相対段上がり高さ、 h は水深、 U_m は断面平均流速、 g は重力加速度である。段上がり高さ Δy を0.01m~0.05mの9種類、流入水深 h_1 を0.0035m~0.0443mの30種類で組み合わせ、合計133ケースの実験を行った。表中の数字は計測したケース数である。△印は実験装置の制約により再現できなかったもの、×印は理論的に存在しないものである。

流下方向に x 軸、鉛直上向きに y 軸をとり、それぞれの瞬間流速を $\vec{u} = U + u$ 、 $\vec{v} = V + v$ 、時間平均流速を U 、 V 、変動成分を u 、 v 、乱れ強度を u' 、 v' とした。計測項目は水深測定と流速測定である。ポイントゲージを用いて水路中央断面における水面形の計測を行った。続いて、I型およびL型の電磁流速計をそれぞれ用いることで、水路中央断面における流速 \vec{u} および \vec{v} を計測した。計測点は流下方向に0.05cm刻み、鉛直上向きに0.01m刻みとし、計測時間は51.2sで計測間隔は0.05sとした。

3. 実験結果および考察

(1) 跳水の形態と流れの概要

図-1に水面形および跳水開始点における断面平均流速 U_{m1} で無次元化された流速ベクトル(U 、 V)を示す。ローラー終端の x_2 の位置は、気泡の挙動の観察に基づき判断したが、流速計測によって明らかにされたローラー終端とほぼ一致しており、目視によるローラー終端の判定が妥当であることを示している。ローラーの下流側で最大水深が発生するが、これは判定が容易である。さらに、段上りの下流側で流れが平衡状態に漸近し、流速分布および乱れ強度分

表-1 実験条件

| $Fr_1 \backslash \Delta y/h_1$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------------------|---|---|---|---|---|
| 4 | 8 | × | × | × | × |
| 5 | 5 | 8 | × | × | × |
| 6 | 3 | 8 | 7 | × | × |
| 7 | 2 | 6 | 8 | × | × |
| 8 | 2 | 6 | 7 | 7 | 3 |
| 9 | 2 | 4 | 6 | 7 | 6 |
| 10 | 1 | 3 | 4 | 7 | 7 |
| 11 | △ | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 12 | △ | △ | △ | △ | 1 |

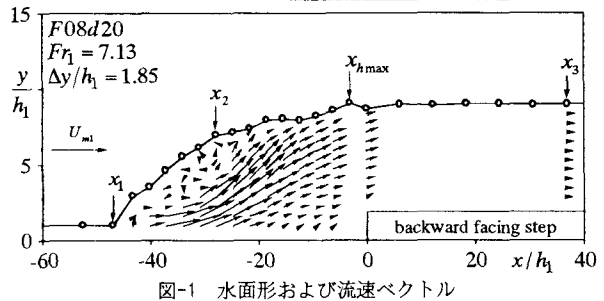


図-1 水面形および流速ベクトル

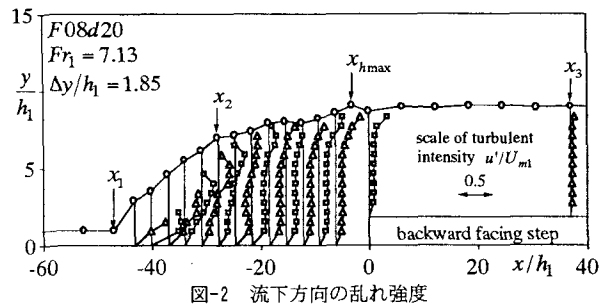


図-2 流下方向の乱れ強度

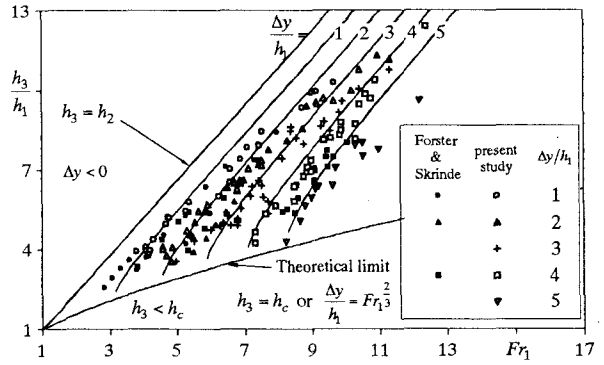


図-3 流入フルード数 Fr_1 と水深比 h_3/h_1 の関係

布が等流の分布に漸近すると考えられるが、この判定は容易ではない。

図-2に対数則から求めた摩擦速度 U_* で無次元化された流下方向の乱れ強度 u'/U_* を示す。ローラー内部で極めて乱れ強度が強くなっている様子がわかる。特に x_1 から x_2 までの区間の水面付近において、乱れ強度が顕著に強くなっている。図-1と比較すると、ローラーによって流れが水面付近で逆流する領域と一致していることがわかる。したがって、ローラーによって水面および流速が変動することで水面付近の乱れが発生したと解釈される。

(2) 水深の関係

段上りの上流側壁面における圧力が静水圧分布と仮定すると、水深の関係式は式(1)となる¹⁾。

$$\left(\frac{h_3}{h_1}\right)^2 = 1 + 2Fr_1^2 \left(1 - \frac{h_1}{h_3}\right) - 2\frac{\Delta y}{h_1} \frac{h_2}{h_1} + \left(\frac{\Delta y}{h_1}\right)^2 \quad (1)$$

図-3に水深比 h_3/h_1 に及ぼす流入フルード数 Fr_1 および相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ の影響を示す。同図には式(1)の理論式を曲線で、Forster & Skrinde²⁾のデータを黒塗りのプロットで示している。彼らは相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が2以下の時はすべての流入フルード数 Fr_1 で理論式(1)が成立し、相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が3以上の時に水深比 h_3/h_1 が理論値よりも小さくなることを指摘した。本研究においても、相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が2以下の条件において、彼らの測定した流入フルード数程度の範囲で、実験値は理論値とほぼ同様な値を示している。ところが、相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が2以下でも彼らが実験した流入フルード数よりも高い場合では、実験値が理論値よりも小さくなる傾向がある。さらに、相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が3以上で実験値が理論値よりも小さくなる傾向が相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ の増加に伴い顕著となることが示された。

(3) 跳水長の定式化

図-4に各相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ ごとの、跳水長比 $L_r/(h_2-h_1)$ と流入フルード数 Fr_1 との関係を示す。流入フルード数 Fr_1 の増加に伴い、跳水長比 $L_r/(h_2-h_1)$ の低下が観察され、その関係がおおよそ直線的になっていることがわかる。そこで、各相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ ごとの流入フルード数 Fr_1 と跳水長比 $L_r/(h_2-h_1)$ との関係を直線回帰で求め、式(2)を得た。

$$L_r/(h_2-h_1) = aFr_1 + b \quad (2)$$

図-5に式(2)の傾き a および切片 b と相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ との関係を示す。両者とも多少のばらつきがあるものの、ほぼ線形的に変化していることがわかる。そこで、傾き a および切片 b と相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ との関係を直線回帰で求め、式(3)および式(4)を得た。

$$a = -0.075\Delta y/h_1 \quad (1 \leq \Delta y/h_1 \leq 5, 3.5 \leq Fr_1 \leq 12.5) \quad (3) \quad b = \Delta y/h_1 + 2.5 \quad (1 \leq \Delta y/h_1 \leq 5, 3.5 \leq Fr_1 \leq 12.5) \quad (4)$$

4. おわりに

(1) Forster & Skrinde²⁾は相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が2以下の場合は、水深の関係を示す理論式(1)が成立し、相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が3以上の場合は理論式が成立しないと述べたが、相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が2以下の場合でも、流入フルード数 Fr_1 の増加に伴い理論が成立しなくなることが実験的に明らかにされた。

(2) ローラー長 L_r は、流入フルード数 Fr_1 および相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ との関係が顕著にみられ、式(2)~(4)のように定式化された。

参考文献

1) 水理公式集, 平成11年度版, pp.268-276.

2) Forster, J.W. and Skrinde, R.A.: Control of the hydraulic jump by sills, *Transactions of ASCE*, Vol.115, pp.973-1022, 1949.

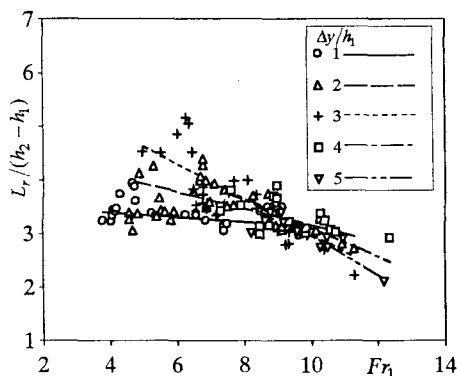


図-4 無次元ローリング長 $L_r/(h_2-h_1)$ と Fr_1 の関係

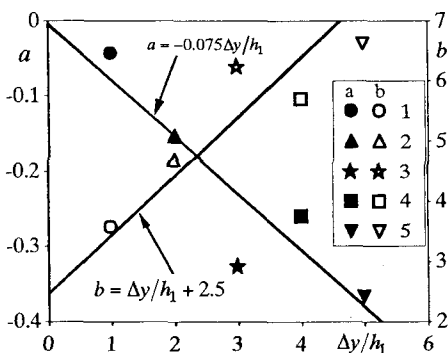


図-5 傾き a , 切片 b と $\Delta y/h_1$ の関係