

早稲田大学 大学院 学生員 ○村重 宏
早稲田大学 理工学部 正員 吉川 秀夫
東洋大学 工学部 正員 福井 吉孝

1. はじめに

跳水現象は急変流においては、非常に興味深い現象として、今日に至るまで、数多くの研究がなされてきたが、跳水の内部機構に関しては、未だ未知の部分が多い。本稿では、境界層理論に基づいて、跳水の内部機構に関しての考察を行なってみた。

2. 実験方法

実験は、幅7cm、高さ60cm、長さ約2mのアクリル製水路において行なった。底面を滑面およびFig 3に示すような粗面にして、その上でFig 1, 2に示すような、一般的自由跳水および、水面変化のほとんど見られないもぐり跳水を発生させ、任意断面における流速分布を求めた。特に自由跳水については、境界層のはく離を考慮し、ゲート直後で跳水を発生せしめた。本実験の測定範囲内では、境界層のはく離は見られなかったことをここに明記しておく。流速測定はピトー管を用いて行なった。したがって、自由跳水では、水面近くのroller領域では泡が多く発生するため、この領域内での流速の測定は不可能であった。ピトー管を用いることにより、プレストンの方法で底面せん断応力の測定も可能となるが、これは滑面でしか使用できない。粗面上では、プレストンの方法を応用したHuang & Lauserの方法で測定した。また、自由跳水に関しては、後述する境界層方程式の関係で、同時に水深も測定した。

3. 実験結果

流速分布の概形は、Fig 4に示すようになる。任意断面の流速分布形においてFig 4のようにその断面の境界層厚さ δ と主流速 U を定める。 δ および U の分布をFig 5, 6, 7に示した。これは粗面1における自由跳水およびもぐり跳水の結果を用いたものであるが、これより明らかに、自由跳水の方がもぐり跳水よりも U の減衰が大きく、 δ の発達が大いことがわかる。このような結果は、本研究のすべてのRUNにおいて見られた。実験で得られたデータをもとに、境界層方程式から底面せん断応力の算定を行なったが、この計算については、次の項で述べることにする。

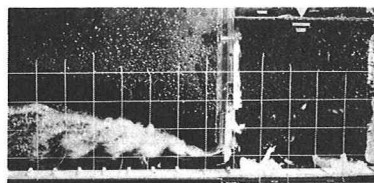


Fig 1 Free Jump

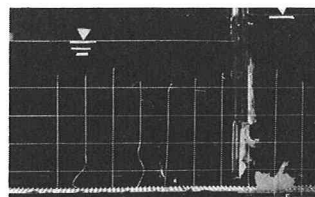


Fig 2 Deeply Submerged Jump

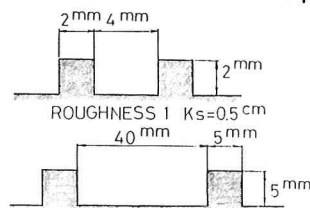


Fig 3 Roughness Details

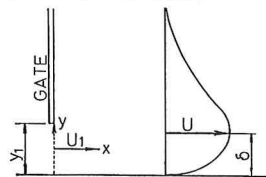


Fig 4 The Hydraulic Jump

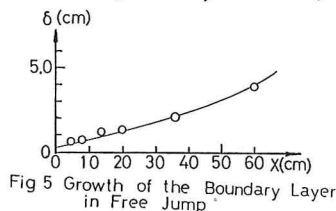


Fig 5 Growth of the Boundary Layer in Free Jump

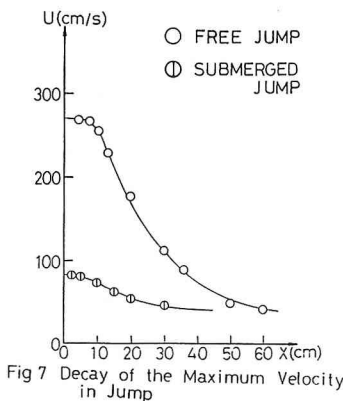


Fig 7 Decay of the Maximum Velocity in Jump

Fig 6 Growth of the Boundary Layer in Submerged Jump

4. 底面せん断応力算定の理論およびその結果

Karman-Prandtlの境界層方程式をもとに、Fig 8の如き仮定のもと、圧力項を水深 z におきかえ、さらに摩擦層厚および、排除厚を、境界層内での流速分布が乗則に従うと仮定のもとに δ で置き換えると、次のような式が導かれる。

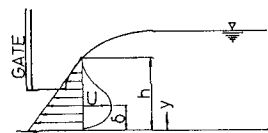


Fig 8 Hypothesis of Hydrostatic Pressure Profile in Hydraulic Jump

$$\frac{n}{(n+1)(n+2)} \frac{\partial}{\partial z} (U^2 \delta) - \frac{n}{(n+1)(n+2)} U \delta \frac{\partial U}{\partial z} - g \delta \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{\tau_0}{\rho}$$

また、もぐり跳水においては、 $\partial h / \partial z = 0$ として計算する。上式を差分化し、1cmごとのU、 δ (Fig 5, 6による)、および水面形のデータを入力すると、流下方向の τ_0 の分布がわかる。計算の一例として、粗面1の場合をFig 9, 10に示した。合わせて、 τ_0 の実験値を示したが、Fig 9, 10のように、比較的よく合致していることがわかる。

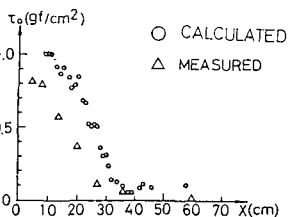


Fig 9 The Boundary Shear Stress τ_0 in Free Jump

5. 底面せん断応力算定の発展

Rajaratnamは、流下方向のU、 δ の分布はFig 4内の Y_1 および U_1 を用いた無次元量、 X/Y_1 、 δ/Y_1 、 U/U_1 によって1つの曲線に乗ることを述べている。本稿でもこれに準じた無次元化を行なったが、Uの減衰は、底面の粗度によることがわかった。そこで栈高K、相当粗度 K_s を用いた無次元量、 $(X/Y_1)(K/K_s)^{1/4}$ を用いると、Fig 11, 12のように1つの曲線に乗る。Rajaratnamが粗度に関して行なった実験データを調べると、Fig 12の如くこの曲線に乗っていることは非常に興味深い。Fig 13, 14に $X/Y_1 - \delta/Y_1$ のグラフを示した。これらのグラフから本実験のデータに関して次のような実験式を得る。

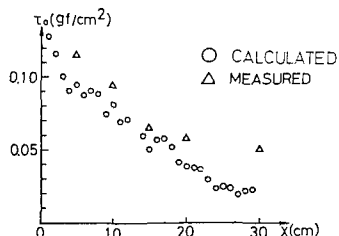


Fig 10 The Boundary Shear Stress τ_0 in Submerged Jump

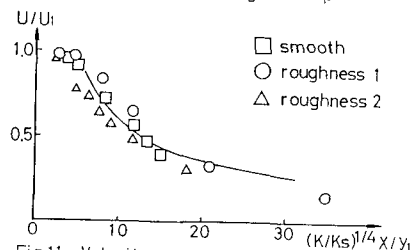


Fig 11 Velocity scale for Free Jump

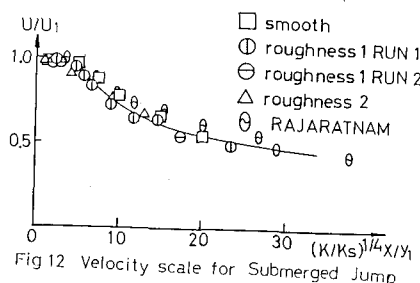


Fig 12 Velocity scale for Submerged Jump

もぐり跳水 $(\delta/Y_1) = 0.263 (X/Y_1)^{0.114}$

$(U/U_1) = 1.808 ((K/K_s)^{1/4} X/Y_1)^{-0.594}$

自由跳水 $(\delta/Y_1) = 0.148 (X/Y_1)^{0.668}$

$(U/U_1) = 3.303 ((K/K_s)^{1/4} X/Y_1)^{-0.708}$

もぐり跳水については、これを4の式に代入すれば、 τ_0 がXの関数として求められる。さらにこれは摩擦速度 U_* を用いて、 $U_*/U_1 = f(X/Y_1)$ の形で無次元表示が可能となってくるであろう。

6. 総括

本実験は2種類の粗面しか行なっていない。今後、さらにいくつかの粗面に関して実験を行ない、より正確な $X - \delta$ 、 $X - U$ の分布の無次元化と、その実験式を求め、より精度の高い τ_0 の算定を行う必要があると思われる。(参考文献) Rajaratnam: "Hydraulic Jumps", "Plane Turbulent Wall Jets on Rough Boundaries" e.t.c.

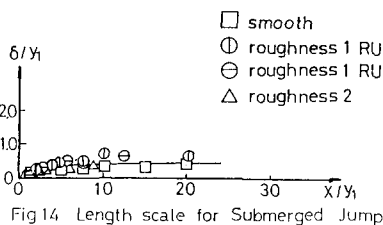


Fig 14 Length scale for Submerged Jump

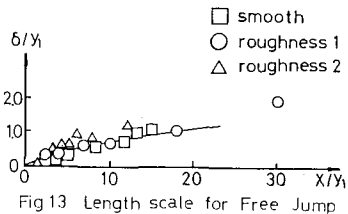


Fig 13 Length scale for Free Jump