長方形断面水平水路における自由跳水の流況特性

Flow characteristics of hydraulic jumps in horizontal rectangular channel

日本大学大学院理工学研究科	学生会員	持田	俊
日本大学理工学部土木工学科	正会員	安田陸	易—
日本大学理工学部土木工学科	フェロー会員	大津岩	岢夫

<u>はじめに</u>

長方形断面水平水路に形成される跳水の流況は跳水始端のフルード数F1によって変化することが一般的に知られている¹⁾。従来,Bradley and Peterka(USBR)によって,跳水始端のフルード数F1とレイノルズ数Re が1.72 F1 19.6,6.0×10⁴ Re 6.6×10⁵の範囲で跳水の流況について検討がなされ,跳水の流況は波状跳水・弱跳水・ 動揺跳水・定常跳水・強跳水に区分されている¹⁾。しかしながら,定義された流況の特徴が必ずしも明確ではない。 最近の著者らの研究によると,跳水の流況は跳水始端のフルード数F1ばかりではなく,レイノルズ数Reおよび跳水 始端での乱流境界層の発達状態によって変化することが明らかにされた^{2),3),4})。跳水の各流況が形成されるため の水理条件を知ることはダムや堰の減勢工の水理設計ばかりでなく,小規模水路の水理設計,流水美デザインなど を行う上で重要である。ここでは,跳水の流況を特徴づけ,各流況の形成条件を明らかにした。

表1 実験条件

$F_1 = V_1 / \sqrt{gh_1}$	$\frac{\mathbf{Re}}{=\mathbf{V}_{\mathbf{i}}\mathbf{h}_{\mathbf{i}}/\nu}$	B/h1	乱流境界層の発達状態
1.6 F ₁ 1.9	55,000 Re 100,000	12.00 B/h1 18.90	Fully developed inflow
2.0 F ₁ 5.5	55,000 Re 120,000	11.16 B/h ₁ 39.44	Fully developed inflow
$F_1 = 7.0$	55,000 Re 65,000	42.10 B/h1 43.31	Fully developed inflow

<u>実験</u>

跳水の流況について検討するため,水 路幅B=80cm水路長L=14.0mの長方形 断面水平水路を用いた。また,跳水の始 端の水深および跳水の位置については 上・下流側のゲートを用いて調節を行っ た。さらに,跳水の流況を検討するため デジタルビデオカメラで流況を記録し た。実験条件を表1に示す。表1におい て,h1は跳水始端での平均水深,V1は 跳水始端での断面平均流速,は動粘性 係数である。

乱流境界層が十分に発達した断面(Fully developed inflow) に跳水始端を位置させるため,縮流部から限界点(乱流境界層が水面に達したばかりの断面)までの距離を $x_{cp} \ge 0^{5}$,縮流部から $2x_{cp}$ の位置に跳水始端を設定した。

<u>Re 60,000 跳水の流兄の説明</u>

 乱流境界層が十分に発達した位置に跳水始端がある場合(Fully developed inflow),跳水の流況は跳水始端のフルード数F1およびレイノルズ数Reによって変化する^{2),3),4)}。図1は跳水の流況区分を示したものである。実験によるとRe 60,000の場合,跳水の流況区分に対するレイノルズ数Reの影響は無視できる

程小さい。ここでは,Re 60,000の場合を対象に各流況の特徴を以下に説明にする。

)F1 1.7 波状跳水 Nonbreaking undular jum	p	
)1.7 < F1 2.1 砕波した波状跳水 Breaking undular jump		
)2.1 < F1 2.5 弱跳水 Weak calssial jump		
)2.5 < F ₁ 4.5 動揺跳水 Oscillating jump		
) F1 > 4.5 定常跳水 Steady jump		左右の側壁近くの流 れが不定期変化する
図 1 65,000 Re 120,000 における跳水の流況		

(Fully developed inflow の場合 1.6 F₁ 7.0)

キーワード:跳水,レイノルズ数,乱流境界層,フルードの相似則

連絡先:〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14; Tel.&Fax.: 03-3259-0409;E-mail:yokyas@civil.cst.nihon-u.ac.jp

<u>F1</u><u>1.7</u>の場合,</u>流況は定常的でスムーズな波状水面を有し,砕波することはない。すなわち波状跳水 (Nonbreaking undular jump)が形成される⁴⁾。

<u>1.7 < F₁ 2.1 の場合</u>, 定常的な波状水面が形成されるが, 波状水面の第1波目中央部で小規模な表面渦が形成される。すなわち, Breaking undular jump(砕波した波状跳水)⁴⁾が形成される。

<u>2.1 < F1</u> 2.5 の場合, 跳水始端でのフルード数が F1 > 2.1 になると, 波状水面の凹凸は小さくなり, 水路中央で 小規模な表面渦が形成される。すなわち, 弱跳水(Weak jump)が形成される。USBR によると, 1.7 < F1 2.5 の 範囲で弱跳水が形成されると記述されているが, 1.7 < F1 2.1 の範囲では Breaking undular jump が形成される。

<u>2.5 < F1</u> 4.5 の場合, 表面渦を伴った跳水が形成されるが, 水路の両側壁側近くで跳水に流入した主流の向きが時間の経過に伴い交互に不規則に変化する。すなわち, 動揺跳水(Oscillating jump)が形成される。USBR によると, $2.5 < F_1$ 4.5 の範囲で形成される跳水が動揺跳水(Oscillating jump)と呼ばれているのは, 両側壁側近くでの主流の向きの不安定さによるものと考えられる。

<u>F1>4.5(本実験では F1 8.0 を対象)の場合,</u>主流の不安定さは見られず,安定した表面渦が形成される跳水となる。このように表面渦の形成が安定した跳水となることから,従来,定常跳水(Steady jump)と呼ばれたものと考えられる。すなわち従来 USBR によって定常跳水と呼ばれている流況であるものと考えられる。

なお ,Re < 55,000~60,000 の場合 ,跳水の形成に対するレイノルズ数 Re の影響が無視できなくなり ,Re 60,000 の場合と異なる流況が実験によって確認されていることから^{2),3),4)} ,Re < 55,000~60,000 の跳水の流況について今後検討する必要がある。

<u>跳水の各流況が形成されるための水理条件</u> 各流況の形成範囲を図2に示す。 図中,一点鎖線は第一波目の山頂部 の高さhcとBélanger equationより算定 した常流の対応水深h2との差が5% 程度になるフルード数の境界を示す。

ここでは $\frac{h_c - h_2}{h_c \ge 5\%}$ を Breaking

undular jump と定義している⁴。す なわち,この境界よりもフルード数 F_1 が小さい場合,第一波目の波の高 さが大きく波の凹凸は大きくなり, Breaking undular jump が形成され る。図に示されるように,Re 60,000 の場合,各流況の境界はレイノルズ 数 Re の影響を受けず,フルード数 F_1 のみによって定まる。なお,Weak jump と Oscillating jump との境界, Steady jump の形成領域の下限を示 すフルード数は USBR¹⁾によって提 示された結果と同様な結果を示す。



<u>まとめ</u>

長方形断面水平水路における跳水の流況について表1に示す実験条件のもとで検討したところ,跳水の流況は 波状跳水(Nonbreaking undular jump),砕波した波状跳水(Breaking undular jump),弱跳水(Weak jump), 動揺跳水(Oscillating jump),定常跳水(Steady jump)に分けられ(図1),流況の観察に基づき,各流況の特徴を示 すことができた。また,各流況の形成条件を図2のように示すことができた。 参考文献

1)Bradley, J.N. and Peterka, A.J., The hydraulic design of stilling basins: hydraulic jumps on a horizontal apron (Basin I), paper1401, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol.83, no.HY5, pp.1-24, October, 1957.

2) 赤田, 大津: 長所浙面水路における跳水の流研術以交付るレイリルス数の影響 第63回年次学株講演会, 第2部門, 土木学会, 2008年, CD-ROM. 3) Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Takahasi, M. Discussion of Particle Image Velocity Measurements of Undular and Hydraulic Jumps, ASCE, Vol.135, No.5, 2009, (to be published).

4)Ohtsu,I., Yasuda,Y., and Gotoh,H., Flow conditions of Undular hydraulic jumps in horizontal rectangular channels, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.129, N0.12, 2003, pp.948-955.

50htsu, I. and Yasuda, Y., Characteristics of supercritical flow below sluice gate, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.120,No.3,1994,pp.332-346.