

自由跳水の流況形成に対するレイノルズ数の影響

日大院理工 学生会員 ○持田 俊 日大理工 正会員 安田 陽一
 日大理工 正会員 高橋 正行 日大理工 フェロー 大津 岩夫

はじめに

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 F_1 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 F_1 とレイノルズ数 Re が $1.72 \leq F_1 \leq 19.6$, $6.0 \times 10^4 \leq Re \leq 6.6 \times 10^5$ 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⁾。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 F_1 ばかりではなく,レイノルズ数 Re ,跳水始端での乱流境界層の発達状態,および跳水始端のアスペクト比 B/h_1 によって変化することが明らかにされた^{2)~5)}。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模型実験ばかりでなく,小規模水路の水理設計,流水美デザインの設計などに役立つものと考えられる。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。さらに,フルードの相似則の成立範囲を示した。

表1 実験条件

$F_1 = V_1 / \sqrt{gh_1}$	$Re = V_1 h_1 / \nu$	B/h_1	乱流境界層の発達状態
$1.1 \leq F_1 \leq 7.0$	$25,000 \leq Re \leq 120,000$	$10 \leq B/h_1 \leq 30$	Fully developed inflow

実験

跳水の流況について検討するため,水路幅 $B = 80\text{cm}$,水路長 $L = 14.0\text{m}$ および水路幅 $B = 40\text{cm}$,水路長 $L = 17.0\text{m}$ の長方形断面水平水路を用いた。また,跳水始端の水深と位置については上・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, h_1 は跳水始端での平均水深, V_1 は跳水始端での断面平均流速, ν 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 x_{cp} を算定し⁶⁾,縮流部から $2x_{cp}$ の断面に跳水始端を位置させた。

跳水の流況

乱流境界層が十分に発達した断面に跳水始端がある場合(Fully developed inflow),跳水の流況は図1のように示される。

波状跳水(Non-breaking undular jump)(図1 i),流況は定常的でスムーズな波状水面を有し,波状水面の第一波目で碎波することはない。また, $F_1 > 1.2$ では lateral shock wave⁵⁾の形成も認められる。

碎波した波状跳水(Breaking undular jump)(図1 ii),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。また,lateral shock waveの形成も認められる。なお,こ

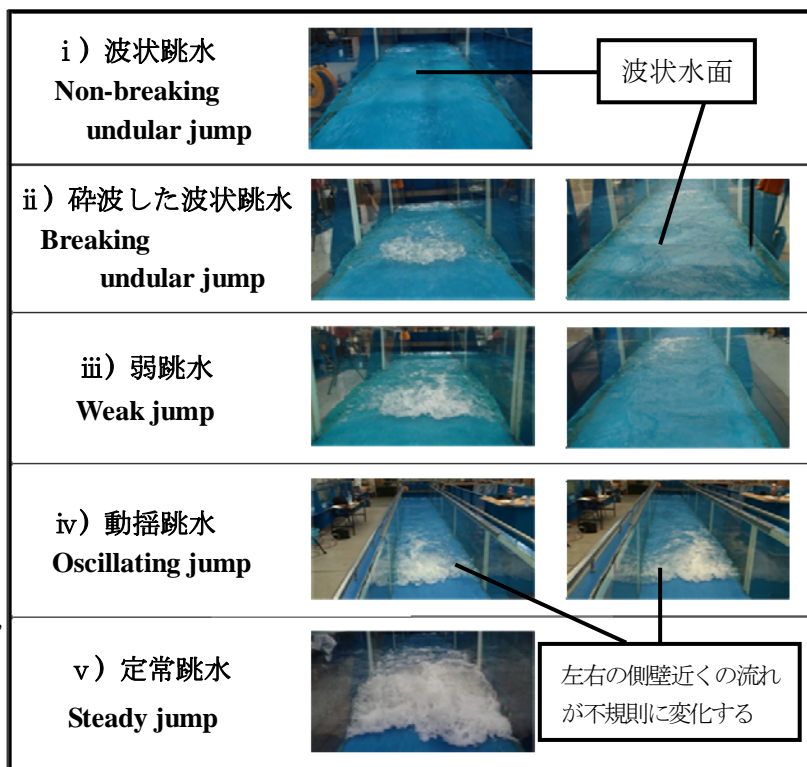


図1 Fully developed inflow における跳水の流況
 ii), iii) 右図: 下流側から撮影

キーワード: 跳水,フルード数,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

では第一波目の山頂部の高さ h_{we} と Bélanger equation より算定した常流の対応水深 h_2 が $(h_{we} \cdot h_2)/h_2 \geq 5\%$ を満足する範囲を **Breaking undular jump** と定義している⁵⁾。

弱跳水(Weak jump) (図 1 iii), 碎波した波状跳水(Breaking undular jump)に比べ, 水面の凹凸は小さく $(h_{we} \cdot h_2)/h_2 < 5\%$, 水路中央で小規模な表面渦が形成される。なお, レイノルズ数 Re が大きくなるほど下流側の水面の凹凸は小さくなる。USBR の実験 $(8.5 \times 10^4 \leq Re \leq 1.8 \times 10^5)$ ¹⁾ によると, 弱跳水 (Weak jump) は $1.7 < F_1 \leq 2.5$ の範囲で形成され, 下流側の水面はスムーズであると記述されている。

動揺跳水(Oscillating jump)(図 1 iv), 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において, 跳水に流入したばかりの流れの向きが時間の経過に伴い不規則に変化する。USBR の文献¹⁾において, $2.5 < F_1 \leq 4.5$ の範囲で形成される跳水を動揺跳水(Oscillating jump)としているのは, 両側壁側近くにおける流れの向きの不安定さによるものと考えられる。

定常跳水(Steady jump) (図 1 v), 動揺跳水のように, 両側壁面近くにおける跳水に流入した流れの不安定さは見られず, 流れの向きは安定し, 表面渦を伴う跳水が形成される。また, 跳水は安定し, よく均衡が保たれており, 下流水面は穏やかである。

各流況が形成されるための水理条件

レイノルズ数 Re を大きく変化させた系統的实验によると, 跳水の各流況の形成範囲は図 2 のように示される。

$Re \geq 60,000$ の場合

各流況の境界はレイノルズ数 Re の影響を受けず, フルド数 F_1 のみによって定まる。この場合, Non-breaking undular jump の形成領域の上限, Weak jump と Oscillating jump との境界および Steady jump の形成領域の下限を示すフルード数 F_1 は USBR¹⁾ によって提示された結果と同様な結果を示す。

$Re < 60,000$ の場合

図 2 に示されるように, レイノルズ数 Re の減少に伴い, 各流況の境界を示すフルード数 F_1 の値が大きくなる。これは, 各流況形成に対して粘性の影響が大きくなったためと考えられる。すなわち, 跳水始端のフルード数 F_1 が同一であっても, レイノルズ数 Re の変化によって流況が種々変化する領域である。また, $Re < 60,000$ での模型実験では, フルドの相似則によって大規模な実現象を把握するには無理がある。

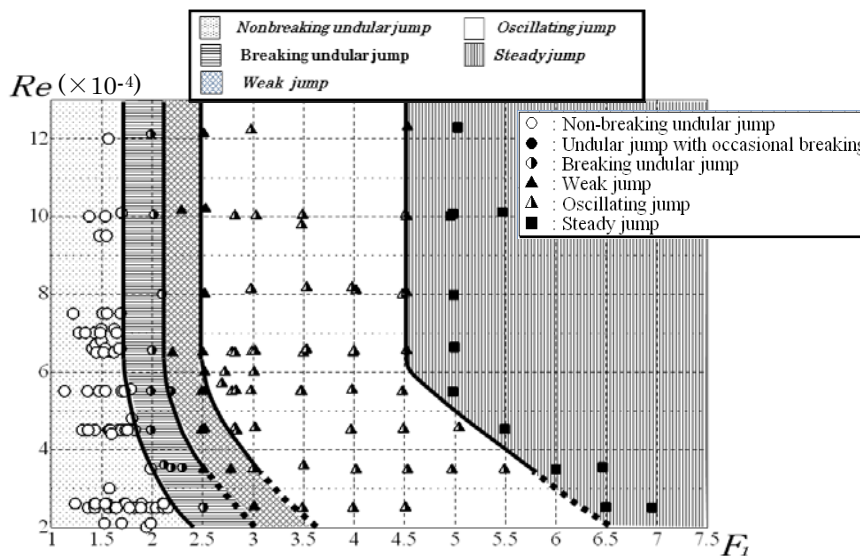


図 2 跳水の各流況の形成領域(Fully developed inflow)

まとめ

長方形断面水平水路において, 乱流境界層が十分に発達した断面に跳水始端がある場合 (Fully developed inflow), 跳水の流況は波状跳水(Non-breaking undular jump), 碎波した波状跳水(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), 各流況の特徴を示すことができた。さらに, 跳水の各流況の形成条件を図 2 のように示すことができ, フルドの相似則の成立範囲は $Re \geq 60,000$ であることを示した。

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)持田, 安田, 大津: 長方形断面水路における跳水の流況形成に対するレイノルズ数の影響 第 63 回年次学術講演会, 第 2 部門, 土木学会, 2008 年, CD-ROM.
- 3)Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Takahashi, M., Discussion of Particle Image Velocity Measurements of Undular and Hydraulic Jumps, ASCE, Vol.135, No.5, 2009., pp.434-436.
- 4)Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Gotoh, H., Reply to the discussion of Hydraulic Condition for Undular-Jump Formations, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.40, No.3, 2002, pp.382-384.
- 5)Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Gotoh, H., Flow conditions of Undular hydraulic jumps in horizontal rectangular channels, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.129, No.12, 2003, pp.948-955.
- 6) Ohtsu, I. and Yasuda, Y., Characteristics of supercritical flow below sluice gate, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.120, No.3, 1994, pp.332-346.