

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

Effect of Reynolds number on jump formation in rectangular channel

日本大学理工学部 学生会員 ○持田 俊

日本大学理工学部 正会員 安田陽一

日本大学理工学部 フェロー会員 大津岩夫

はじめに

長方形断面水路に形成される跳水の流況は跳水始端のフルード数によって図1のように変化することが一般的に知られている¹⁾。特に跳水始端のフルード数が小さい場合は表面渦が形成されず波状水面を呈することが示されているが²⁾、最近の研究^{3),4)}では波状跳水の形成条件は、跳水始端のフルード数ばかりでなくアスペクト比、跳水始端での乱流境界層の発達状態、およびレイノルズ数によって変化することが明らかにされている。また、表面渦の形成を伴う跳水(Classical jump)については、跳水始端の乱流境界層の発達状態によって跳水内部の流速特性に違いがあることが示されている⁵⁾。しかしながら、表面渦の形成を伴う跳水の流況がレイノルズ数によってどのように変化するか不明である。ここでは、動揺跳水(Oscillating jump)が形成されると一般に言われているフルード数の範囲($2.5 \leq F_1 \leq 4.5$)¹⁾を対象に、長方形断水平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について実験的に検討した結果を示す。

実験

跳水の流況について検討するため、水路幅 $B = 40\text{cm}$ および 80cm の長方形断面水平水路を用いた。また、跳水上・下流側の射流・常流水深は上・下流側のゲートを用いて調節を行った。さらに、跳水の流況をデジタルカメラで記録した。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である。

表1 実験条件

F_1 $= V_1 / \sqrt{gh_1}$	Re $= V_1 h_1 / \nu$	乱流境界層の 発達状態	B/h_1
2.86～ 3.08	9,900～ 150,000	Undeveloped inflow Fully developed inflow	6.21～ 38.5
3.87～ 4.11	9,900～ 150,000	Undeveloped inflow Fully developed inflow	7.62～ 76.9

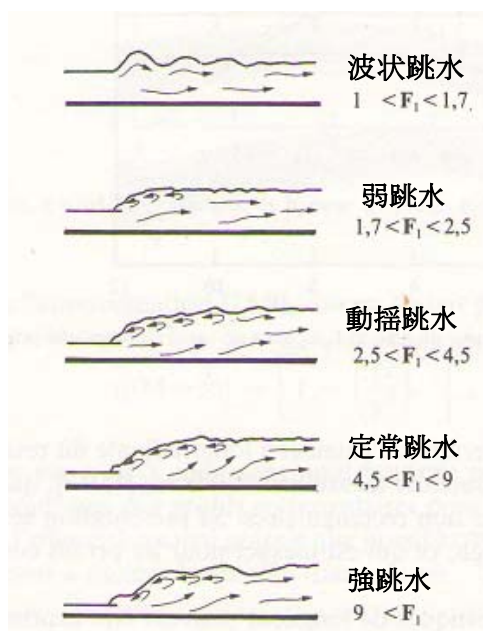


図1 跳水の流況分類
(CHOW(1959) "Open Channel hydraulics"
より転載)

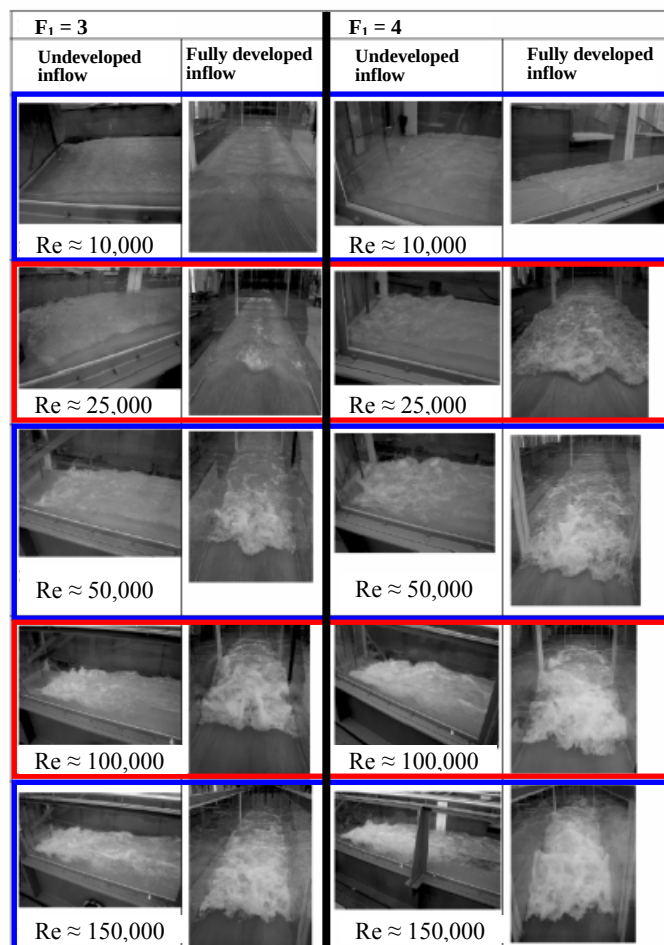


写真1 $F_1 = 3.4$ における跳水の流況

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; Tel.&Fax.: 03-3259-0409; E-mail: yokyas@civil.cst.nihon-u.ac.jp

跳水始端が縮流部に位置した場合 (Undeveloped inflow), および乱流境界層が十分に発達した断面に位置した場合⁶⁾ (Fully developed inflow)について, 与えられたフルード数 $F_1=3, 4$ に対して, レイノルズ数 Re を 10,000 から 150,000 まで変化させ, 流況がどのように変化していくのか実験的に検討を行った。

流況の説明

従来, 跳水の流況は図 1 に示されるように分類されている¹⁾。すなわち, $F_1 = 1 \sim 1.7$ では波状跳水(Undular jump), $F_1 = 1.7 \sim 2.5$ では弱跳水(Weak jump), $F_1 = 2.5 \sim 4.5$ では動揺跳水(Oscillating jump), $F_1 = 4.5 \sim 9$ では定常跳水(Stabilized jump), $F_1 = 9$ 以上では強跳水 (Strong jump)が形成されることが一般に示されている。ここでは, 動揺跳水が形成されると言われているフルード数 $F_1=3, 4$ の跳水を対象として, 跳水の流況のレイノルズ数 Re による変化を検討している。

$F_1 = 3, 4$ における跳水の流況を写真 1 に示す。写真 1 に示されるように, 跳水の流況はレイノルズ数 Re および乱流境界層の発達状態によって変化している。一般にフルード数 F_1 が $F_1 = 2.5 \sim 4.5$ では動揺跳水が形成されるものとされているが, 本実験によると, レイノルズ数 Re および乱流境界層の発達状態 (Undeveloped inflow, Fully developed inflow) によって, 動揺跳水ばかりでなく, 碎破した波状跳水, 弱跳水および定常跳水と判定できる流況が観察される。

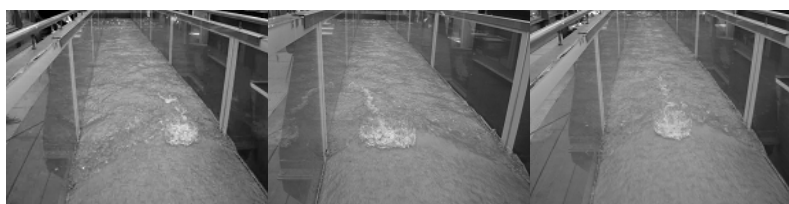


写真 2 Breaking Undular jump
($F_1=3$, $Re=25,000$, Fully developed inflow) 非
対称流況, 対称流況のどちらにもなり得る

跳水の流況形成に対するレイノルズ数の影響 レイノルズ数 $Re < 50,000$ の場合, 与えられた跳水始端のフルード数に対して Re によって流況が変化する。すなわち, 跳水の流況が粘性の影響を受けている。表面渦の形成を伴う跳水現象については, Re が減少するにつれて気泡の混入量が減少している。また, Re によって碎破した波状跳水, 弱跳水, 動揺跳水, 定常跳水の形成が確認される。一方, $Re > 50,000$ の場合, Re による流況の違いはほとんどない。また, 跳水部の気泡混入量が多く, 定常跳水が形成される。

跳水始端での乱流境界層が十分に発達した場合(Fully developed inflow), $Re = 10,000 \sim 25,000$ では, $F_1 = 3$ で碎破した波状跳水(Breaking Undular jump)が形成され, 非対称流況になることもある (写真 2)。 $F_1 = 4$ では弱跳水が形成される。 $Re = 25,000 \sim 50,000$ では $F_1 = 3, 4$ 共に Re の増加に伴い弱跳水, 動揺跳水, 定常跳水へ遷移する流況が見られ, $Re = 100,000, 150,000$ では定常跳水が形成される。

跳水始端での乱流境界層が発達していない場合 (Undeveloped inflow の場合), $F_1 = 3, 4$ 共に非対称な流況は形成されず $Re = 10,000 \sim 50,000$ では弱跳水が形成され, $Re = 50,000 \sim 150,000$ では定常跳水が形成される。

まとめ

長方形断面水平水路上に跳水を形成させ, $F_1=3, 4$ を対象に跳水の流況に対するレイノルズ数および乱流境界層の発達状態の影響を検討した結果, $F_1=2.5 \sim 4.5$ では動揺跳水ばかりでなく碎波した波状跳水(Breaking Undular jump), 弱跳水, 定常跳水などレイノルズ数および跳水始端での乱流境界層の発達状態によって流況が異なることを明らかにした。

参考文献

- 1) Chow, V.T., Open channel hydraulics, McGraw-Hill Book Company, New York, 1959.
- 2) 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.
- 3) Ohtsu, I. and Yasuda, Y. and Takahashi, M., Discussion of "Hydraulics of skimming flow over stepped spillways," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.126, No.11, 2000, pp.869-871.
- 4) Ohtsu, I. and Yasuda, Y. and Takahashi, M., Discussion of "Hydraulics of skimming flow on Modeled stepped spillways," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.126, No.12, 2000, pp.950-951.
- 5) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Awazu, S., Free and submerged jumps in rectangular channels, Report of Research Institute of Science and Technology, Nihon University, No.35, 1990, pp.1-50,
- 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.