

波状跳水の形成に対する粘性の影響

日本大学理工学部 正会員 ○後藤 浩
 日本大学理工学部 正会員 安田 陽一
 日本大学理工学部 正会員 大津 岩夫

波状跳水は、射流のフルード数の値が1近くで形成され、波状水面を伴いながら射流から常流へ遷移する現象である。波状跳水は、一般河川では堰などの低落差構造物の下流側で観察されることが多い。流れを景観として利用した親水公園の水路においても波状跳水の形成がしばしば観察される¹⁾。このように、波状跳水は水深の規模がさまざま異なる状況で形成されている。特に、水深の規模が小さい親水公園などの施設において流水表情に富む流れに波状跳水の形成を取り入れて水路の設計を行うためには、粘性の影響が無視できない場合の波状跳水の流況および形成条件を知る必要がある。また、水工設計上、模型実験を行う場合にどの程度の規模で実験を行えば粘性の影響が認められなくなり、実験結果が実際の水工構造物の設計に適用できるのかを知ることは必要なことである。しかしながら、粘性の影響がある場合の波状跳水の流況、形成条件については十分明らかにされていない。

ここでは、長方形断面水平水路における波状跳水の流況および形成条件に対する粘性（レイノルズ数）の影響について広範囲な実験条件のもとで検討を加え明らかにした。

実験 実験は、滑面長方形断面水平水路（ $B=10.5, 15.5, 20, 40, 80\text{cm}$; B :水路幅）を用いて行った。また、実験値は乱流境界層が十分に発達した領域（図-1）に跳水始端が位置した場合の流況を対象に整理した。

流況 $F_1 \geq 1.2$ で波状跳水が形成されると、跳水始端付近の両側壁から衝撃波が形成される（図-2）^{2)~4)} [$F_1 = v_1 / (gh_1)^{1/2}$; v_1 :跳水始端の断面平均流速, g :重力加速度, h_1 :跳水始端水深]。衝撃波が一波目山頂部より上流側で交差する場合、水路中央部の流れが水路側壁の影響を大きく受けるようになり、波状跳水の流れは三次元的となる。すなわち、この場合、波状跳水の流況はアスペクト比 B/h_1 の値によって変化する（この場合を Case II と呼ぶ）³⁾。一方、衝撃波が一波目山頂部より下流側で交差する場合、水路中央部の流れは水路側壁の影響を受けず、波状跳水の流況は B/h_1 によらない（この場合を Case I と呼ぶ）³⁾。

レイノルズ数 Re の値が $Re < 6.5 \times 10^4$ となると波状跳水の流況に対する粘性の影響が認められるようになる ($Re = v_1 h_1 / \nu$; ν :動粘性係数)。以下に、波状跳水の流況に対する Re の影響について説明を加える。なお、 $F_{1\text{limit}}$ および F_{1u} は、Non-breaking undular jump^{3)~5)}（図-3参照）および Breaking undular jump³⁾（図-4参照）が形成されるそれぞれの流入射流のフルード数の上限値を示す。

1.2 ≤ $F_1 < F_{1\text{limit}}$ [Non-breaking undular jump]

Case I $Re \geq 6.5 \times 10^4$ の場合、水路側壁付近を除いて二次元的な波状水面が形成され水面の凹凸が下流側遠方まで続く。なお、水路側壁に沿った水面の凹凸は時間的に不規則で小さい（図-3(a)）³⁾。一方、 $Re < 6.5 \times 10^4$ の場合、流況の形成に対する粘性の影響が大きくなり、一波目の水路側壁付近では水面および底面近くで流速が非常に小さくなる（図-3(b)）。また、 $Re \geq 6.5 \times 10^4$ の場合に比べて山が尖り山の前後で圧力勾配が大きくなるため一波目の底面付近では時間的に逆流が観察される（図-3(b)）。

Case II $Re \geq 6.5 \times 10^4$ の場合、跳水始端付近の両側壁から形成される衝撃波が一波目山頂部より上流側で交差するため、流れは三次元的になる。特に、 $B/h_1 < 4$ になると、水路側壁に沿っても水路中央部と同様な波状水面

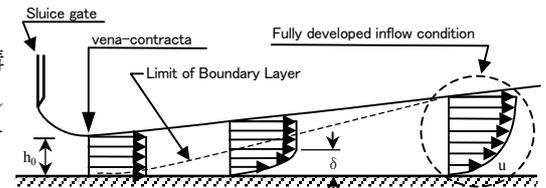


図-1 跳水始端での乱流境界層の発達状態

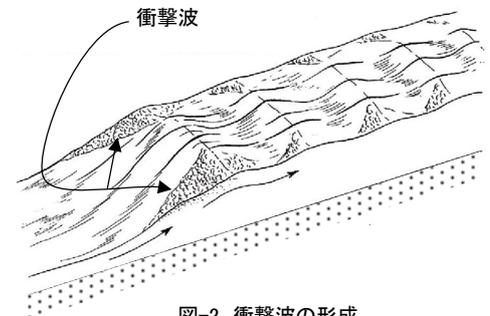


図-2 衝撃波の形成

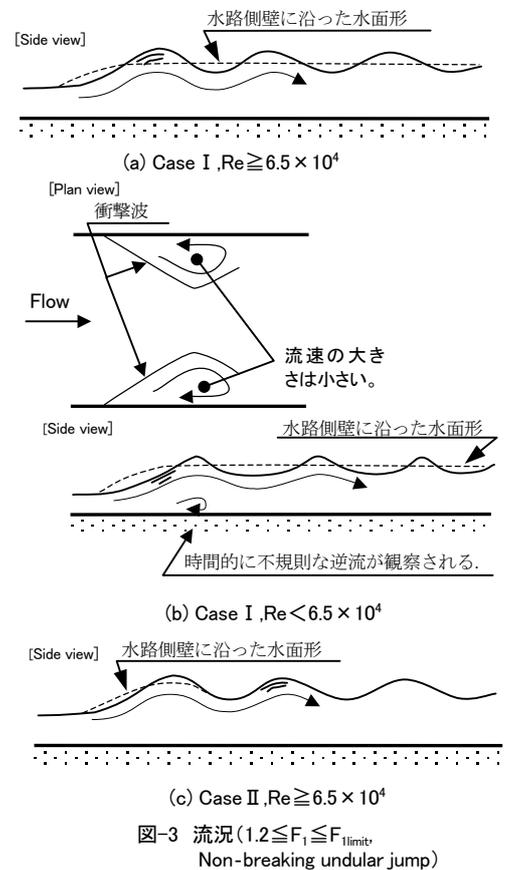


図-3 流況 ($1.2 \leq F_1 \leq F_{1\text{limit}}$, Non-breaking undular jump)

キーワード:開水路流、跳水、波状跳水、レイノルズ数、親水

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

が形成されるようになる（図-3(c)）³⁾。一方、 $Re < 6.5 \times 10^4$ の場合、 $Re \geq 6.5 \times 10^4$ の場合と比べて流況の形成に対する粘性の影響が大きくなり、水路中央に比べ水路側壁近くの流速が小さくなるため水路側壁に沿った水面の凹凸も小さくなる。

$F_{1limit} < F_1 < F_{1u}$ [Breaking undular jump]

Case I $Re \geq 6.5 \times 10^4$ の場合、一波目が碎波し表面渦が形成されるものの定期的な波状水面が形成される³⁾（図-4(a)）。この場合、 F_1 の値が F_{1u} よりも大きくなると自由跳水が形成される。一方、 $Re \leq 5.0 - 6.5 \times 10^4$ の場合、主流が粘性の影響により左岸・右岸に偏向するため非対称な流況が形成される（図-4(b)）。

Case II $Re \geq 6.5 \times 10^4$ の場合、一波目が碎波し表面渦が形成されるものの定期的な波状水面が形成される。一方、 $Re < 6.5 \times 10^4$ の場合、Case I の場合と異なりアスペクト比 B/h_1 が小さいので主流が右岸・左岸に偏向しにくくなるため非対称な流況は形成されない。この場合、 F_1 の値が F_{1u} よりも大きくなると自由跳水が形成される。

形成条件 波状跳水 Case I の形成条件を図-5に、Case II の形成条件を図-6に示す。図-5,6 中の実線および二点鎖線は、それぞれ F_{1limit} および F_{1u} を示している。

Case I $Re \geq 6.5 \times 10^4$ の場合、 F_{1limit} および F_{1u} の値は Re および B/h_1 によらず、 F_{1limit} の値として 1.79、 F_{1u} の値として 2.1 を示す（図-5）^{3), 4)}。一方、 $Re < 6.5 \times 10^4$ の場合、 Re の値が小さくなるに伴って粘性の影響が大きくなるため一波目が碎波しにくくなり F_{1limit} の値が大きくなる（図-5）。例えば、 Re の値が 2.0×10^4 の場合には F_1 の値が 2.4 まで Non-breaking undular jump が形成される。なお、 $Re \leq 5.0 - 6.5 \times 10^4$ の場合、 F_1 の値が F_{1limit} よりも大きくなると非対称な流況が形成される。

Case II 図-6 に示されるように $Re \geq 6.5 \times 10^4$ の場合、 F_{1limit} および F_{1u} の値は、衝撃波が一波目山頂部より上流側で交差し水路側壁の影響が水路中央部に及び一波目が碎波しやすくなるため Case I の場合より小さくなる。また、 B/h_1 が小さくなるに伴って F_{1limit} および F_{1u} の値は小さな値となる。 $Re < 6.5 \times 10^4$ になると Re の値が小さくなるに伴って粘性の影響により一波目が碎波しにくくなるため F_{1limit} および F_{1u} の値は大きくなる。なお、図-6 に示されるように他の研究者^{5), 6)} の実験値は、本実験結果から示した境界を満足する。

謝辞 本研究は平成13年度日本大学学術助成金による援助のもとに行ったものである。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 技報堂出版(2000), 水環境ウォッチング「第3章 水環境と河川構造物」(安田・大津著)
- 2) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Gotoh, H. (1995), Characteristics of Undular Jumps in Rectangular Channels, *Proc. of the 26th IAHR Congress*, 1C14, London, UK.
- 3) 後藤、安田、大津 (2001), 波状跳水の流況特性, 水工学論文集, 土木学会, 第45巻, pp.439~444.
- 4) Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Gotoh, H. (2001), Hydraulic Condition for Undular-Jump formation, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 39(2), pp.203~209.
- 5) Reinauer, R., and Hager, W.H. (1995), Non-breaking Undular Hydraulic Jumps, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 33(5), pp.1~16.
- 6) Chanson, H., and Montes, J.S. (1995), Characteristics of Undular Hydraulic Jump: Experimental Apparatus and Flow Patterns, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 121(2), pp.129~144.

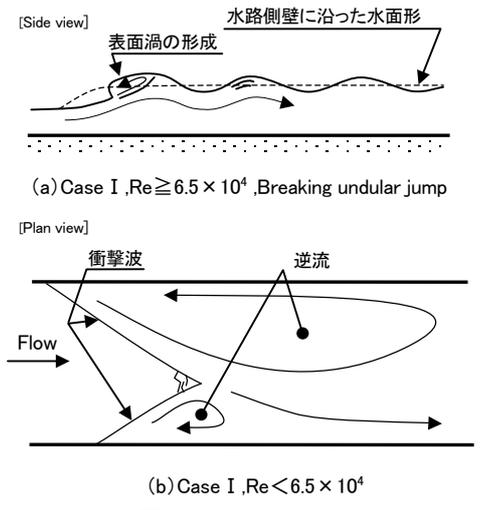


図-4 流況 ($F_{1limit} < F_1 < F_{1u}$)

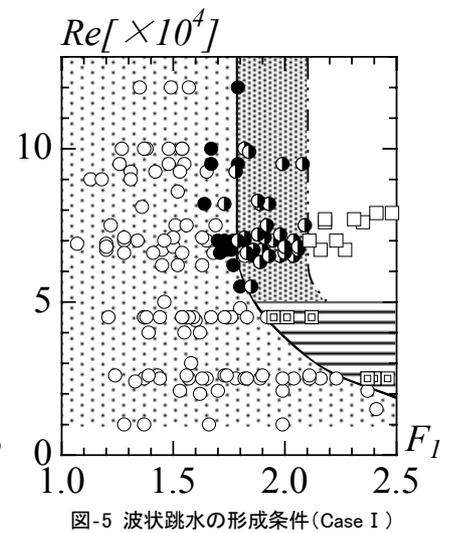
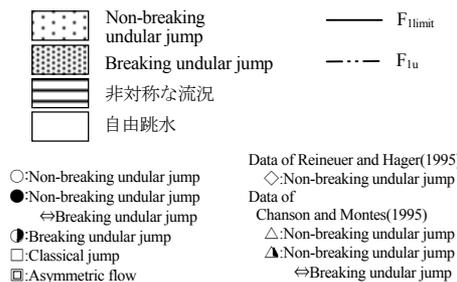


図-5 波状跳水の形成条件 (Case I)

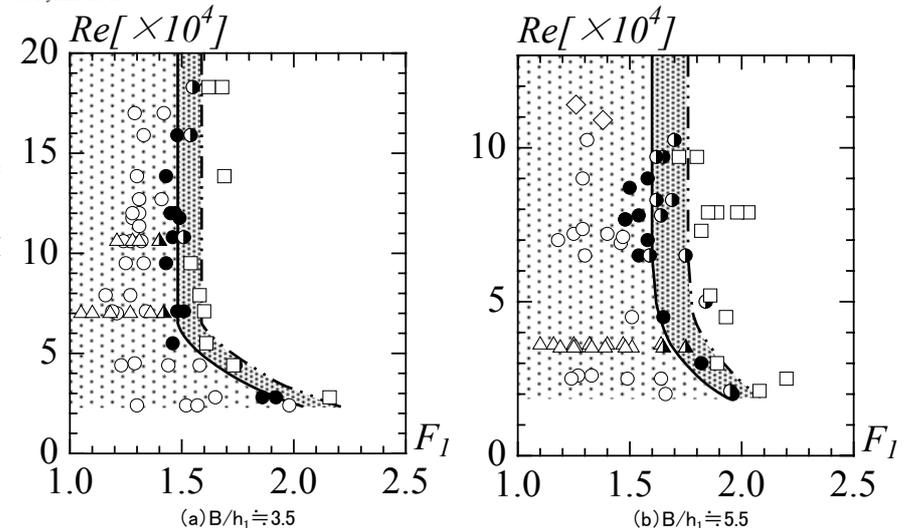


図-6 波状跳水の形成条件 (Case II)