## 波状跳水の流況特性に対する水路勾配の影響

日本大学理工学部 正会員 〇後藤 浩 日本大学理工学部 正会員 安田 陽一 日本大学理工学部 フェロー会員 大津 岩夫

## はじめに

波状跳水は流入射流のフルード数の値が1近くで、波状 水面を伴いながら射流から常流へと遷移する現象である。 波状跳水は堰など落差を伴う構造物やゲートの下流側や、 勾配が緩勾配から急勾配へ変化する水路の接続部下流側 で観察される場合がある。

従来、著者らは滑面長方形断面水平水路の波状跳水に関 して実験的検討を行い、その形成条件を系統的に明らかに した<sup>1),2)</sup>。また、Chanson and Montes により傾斜水路にお ける波状跳水の形成条件について実験的検討が行われて いる<sup>3)</sup>。しかしながら、Chanson and Montes による実験で は流入射流が等流状態であるとともに、波状跳水の流況特 性に対するアスペクト比の影響は言及されていない。した がって、傾斜水路における波状跳水の流況および形成条件 については検討の余地がある。

本研究では、滑面長方形断面水路の波状跳水に対する水 路勾配およびアスペクト比の影響について実験的検討を 行い、傾斜水路上における波状跳水の形成条件を明らかに した。

**実験** 実験は、可変勾配式滑面長方形断面水路(水路長 18m、水路幅 B=40,80cm)を用いた。また、水路勾配 tan<sup>O</sup> は tan<sup>O</sup>=0~1/84 の範囲で変化させた。スルースゲート・ 堰を水路上流側に設置し射流を形成させた。すなわち、等 流ばかりではなく不等流の射流を形成させた。

跳水始端は圧力が静水圧分布すると定義した。また、波 状跳水の流況に対する乱流境界層の発達の影響があるこ とから、ここでは跳水始端で乱流境界層が十分に発達して いる波状跳水<sup>1)</sup>を対象とした(図-1 参照)。さらに、波状跳 水の形成に対しレイノルズ数の影響を無視できる条件 Re  $\geq 65000$ のもとで実験を行った<sup>2)</sup> (Re=v<sub>1</sub>h<sub>1</sub>/ $\nu$ ;h<sub>1</sub>:流入射流 の水深、v<sub>1</sub>:流入射流の断面平均流速、 $\nu$ :動粘性係数)。

<u>波状跳水の流況</u> 波状跳水の流況は流入射流のフルード 数  $F_1$ 、水路勾配  $tan\Theta$ 、アスペクト比  $B/h_1$ によって変化す る $(F_1=v_1/(gh_1)^{0.5}$ ; g:重力加速度)。流入射流のフルード数の 値が 1.2 よりも大きくなると、跳水始端付近の両側壁から 衝撃波が形成される<sup>1),2)</sup>。衝撃波が一波目山頂部より上流 側で交差しない場合、波状跳水の流況に対するアスペクト 比  $B/h_1$ の影響を無視することができる(この場合を "Case I"と呼ぶ(図-2(a)))。この場合、水路側壁付近を除い て二次元的な流れとなる。一方、衝撃波が一波目山頂部よ り上流側で交差するようになると、波状跳水の流況に対す るアスペクト比の影響を無視できない(この場合を"Case II"と呼ぶ(図-2(b)))。この場合、流況は三次元的となる。

以下に  $F_1$  および  $tan\Theta$  の変化に伴う流況の変化について 説明する。

<u>1.0<F<sub>1</sub><1.2 の場合</u> 衝撃波の形成は認められず、二次元 的な波状水面が形成される(Nonbreaking undular jump<sup>2</sup>);図 -3(a))。この場合、波状水面の凹凸は小さい。なお、水平 水路の場合、跳水の形成領域が短いため波状水面の形成は 1,2 波程度となる。



[傾斜水路]

図-1 傾斜水路上の波状跳水および流入条件



図-3 流況

キーワード:跳水、波状跳水、開水路流、水路勾配、アスペクト比 連絡先:〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8 TEL/FAX 03-3259-0409 2-136

<u>1.2≦F<sub>1</sub>≦F<sub>1limit</sub>の場合</u>顕著な波状水面が形成され、水面 の凹凸が下流側に続く(Nonbreaking undular jump;図-3(b))。 ここで、F<sub>1limit</sub>は Nonbreaking undular jump が形成されるフ ルード数の上限値を示す。

 $\underline{F_1 > F_{1 limit}}$ の場合 一波目山頂部に表面渦を伴う流況が形 成される(Breaking undular jump<sup>2)</sup>;図-3 (c))。なお、流入射流 のフルード数の値が Filimit 近くでは主流が水面に沿う流況 が形成されるが、流入射流のフルード数 F1 の値が大きく なるにつれ波状水面が形成されず自由跳水(図-3 (d))が形 成される。

## 波状跳水の形成領域

図-4(a),(b)は Case I の場合および Case II の場合の形成条 件を示したものである。ここで、横軸は与えられた水路勾 配  $tan\Theta$  を限界勾配  $tan\Theta_c$  で割った値、縦軸は流入射流のフ ルード数 F<sub>1</sub>を示す。また、図-4(a),(b)中の実線は F<sub>1limit</sub>を示 す。

水路勾配の影響 図-4(a)に示されるように、水路勾配が水 平から限界勾配までの範囲では、F<sub>1limit</sub>は水路勾配に影響さ れない。水路勾配が限界勾配より大きくなると、水路勾配 が大きくなるとともに F<sub>1limit</sub> の値は小さくなる。これは、 波状跳水の上流側・下流側の水面形の違いが影響している と考えられる。また、急勾配水路の場合、水路勾配が大き くなるにつれて一波目前面の流線の曲がりが大きくなり、 砕波しやすくなったものと考えられる。

水路勾配が限界勾配より大きくなると射流が等流状態 の波状跳水が形成される。本実験では、等流のフルード数 より小さな値を得るため、水路途中に厚みのある平板を設 置して S2 曲線の水面形を形成させる工夫をし、平板の設 置下流で圧力が静水圧に一致する最初の断面のフルード 数を求め、得られたフルード数の最小値を示した。図-4中 の破線は、与えられた tanΘ に対して平板の高さを様々変 化させたものである。図-4(a),(b)中の右下の実験値のない 領域の流況については今後検討する予定である。

アスペクト比の影響 図-4(a),(b)に示されるように、Case II の場合の F<sub>1limit</sub> の値は衝撃波が一波目山頂部より上流側で 交差するため、Case Iの場合の Filimitの値に比べて小さくな る。また、Case Ⅱの場合も Case I の場合と同様に、水路勾 配が限界勾配より大きくなると、水路勾配が大きくなると ともに F<sub>tlimit</sub> の値は小さくなる結果が得られた。なお、図 -4(b)に示されるように、本研究での実験結果は Chanson and Montes が行った実験結果<sup>3)</sup>と一致する。

**まとめ** 流入射流のフルード数、アスペクト比、水路勾配 による波状跳水の流況の変化を示した。

図-4(a),(b)において波状跳水の形成領域図を示した。また、 水路勾配が水平から限界勾配までの範囲では、F<sub>1limit</sub>は水路 勾配によらず、水路勾配が限界勾配より大きくなると、水 路勾配が大きくなるとともに Filimit の値は小さくなること を示した。

## 参考文献

- 1) Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Gotoh, H. (2001), Hydraulic Conditions for Undular-Jump formations, Journal of Hydraulic Research, IAHR, 39(2), pp.203~209.
- 2) Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Gotoh, H.(2003), Flow Condition of Undular Hydraulic Jumps in Horizontal Rectangular Channels, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE.129(12),pp.948~955.
- 3) Chanson, H. and Montes, J.S.: Characteristics of Undular Jump: Experimental Apparatus and Flow Patterns, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 121(2), pp.129~144, 19





1.0

限界勾配

0

叉-4

(b) Case II の場合

波状跳水の形成条件に対する水路勾配の影響