

## 波状跳水の形成条件について

|      |    |    |    |
|------|----|----|----|
| 日大理工 | 正員 | 後藤 | 浩  |
| 日大理工 | 正員 | 安田 | 陽一 |
| 日大理工 | 正員 | 大津 | 岩夫 |

まえがき

一般に、射流から常流に移移する場合、射流のフルード数 $F_1 (=v_1/\sqrt{gh_1}; v_1$ :跳水始端での平均流速、 $g$ :重力加速度、 $h_1$ :跳水始端水深)が1近くで波状跳水が形成される。従来、長方形断面の水平水路において形成される波状跳水と弱跳水との境界を示すフルード数 $F_{1limit}$ はほぼ1.7であるとされている<sup>1)</sup>。しかしながら、最近著者らによって、長方形断面水平水路における波状跳水の形成条件は、跳水始端のフルード数 $F_1$ だけでなく跳水始端での乱流境界層の発達状態を示す無次元量 $\delta/h_1$  ( $\delta$ :境界層厚さ) (図1)によっても変化することを明らかにした<sup>2)~5)</sup>。

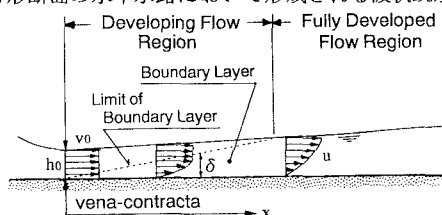
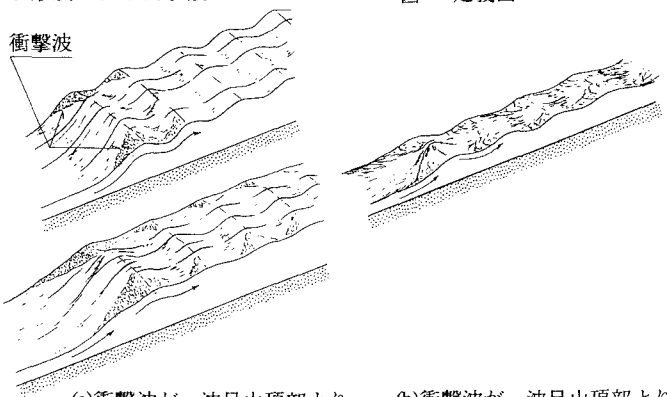


図1 定義図

ここでは、波状跳水の跳水始端近くから形成される衝撃波（図2）が一波目山頂部より上流側で交差する場合、波状跳水が、 $F_1$ および $\delta/h_1$ だけでなくアスペクト比 $B/h_1$ （ $B$ :水路幅）の値によっても変化することを示し、その形成条件を明らかにした。

### 波状跳水の形成条件

波状跳水の形成条件は、衝撃波が一波目山頂部より上流側で交差しない場合（図2(a)）と交差する場合（図2(b)）とで異なる。以下に、それぞれの場合における波状跳水の形成条件について説明を加える。なお、レイノルズ数 $Re$ が $Re < 65000$ の場合、波状跳水の波の高さや波長などに影響が認められるので<sup>2)~4)</sup>、ここでは $Re \geq 65000$ の場合の条件のもとで検討を行った（ $Re = q/\nu$ ； $q$ ：単位幅流量， $\nu$ ：動粘性係数）。



(a) 衝撃波が一波目山頂部より上流側で交差しない場合      (b) 衝撃波が一波目山頂部より上流側で交差する場合

衝撃波が一波目山頂部より上流側で交差しない場合

この場合、波状跳水和弱跳水和との境界のフルード数  $F_{\text{limit}}^{\text{⑤}}$  は、跳水始端での乱流境界層の発達状態  $\delta/h_1$  によって変化する。この場合の  $F_{\text{limit}}$  を  $F_{\text{limit}} = f(\delta/h_1)$  (図中実線) の関係で整理したものを図 3 に示す。図 3 に示されるように、 $\delta/h_1$  によって  $F_1$  が 1.7 以上であっても波状跳水が形成されたり、 $F_1$  が 1.7 以下であっても弱跳水が形成されたりすることが理解される。

また、 $F_{\text{limit}} = f(\delta/h_1)$  の関係を Bernoulli の定理および境界層方程式から求められた関係式  $\delta/h_1 = f(F_0, x/h_0, \text{Re})$  と連続の式  $F_{\text{limit}} = F_0(h_0/h_1)^{3/2}$  を用いて整理すると  $F_{\text{limit}} = f(x/h_0, \text{Re})$  の表示が得られる [  $F_0$ : 境界層が発達し始める断面 (以下、縮流部) のフルード数  $= (v_0/\sqrt{g h_0})$ ;  $v_0 \cdot h_0$ : 縮流部での平均流速・水深  $\times$  縮流部から跳水始端までの

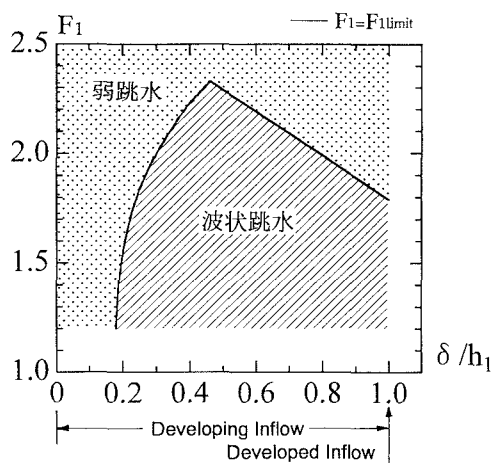


図3 波状跳水の形成条件（衝撃波が一波目山頂部より上流側で交差しない場合）

キーワード：開水路流、跳水、波状跳水、河川環境

〒101-8308 東京都千代田区袖田駿河台1-8 TEL.03-3259-0668 FAX.03-3259-0409

距離（図1）]。この関係で整理したものを図4に示す。この図から縮流部から跳水始端までの相対距離 $x/h_0$ によって波状跳水が形成されるための跳水始端のフルード数 $F_1$ の範囲が決定される。なお、図に示されるように与えられた $x/h_0$ に対して $F_{limit}$ は $Re$ によって異なるがその変化は小さい。

#### 衝撃波が一波目山頂部より上流側で交差する場合

この場合、衝撃波および水路幅の影響により流れが二次元的でなくなるため、 $F_{limit}$ は $\delta/h_1$ だけでなくアスペクト比 $B/h_1$ によっても異なるようになる。図5は、与えられた $\delta/h_1$ に対して $F_{limit}=f(B/h_1)$ の関係で整理した一例である（図中実線、一点鎖線）。図5に示されるように、 $F_{limit}$ の値は $\delta/h_1$ によって異なるが $B/h_1$ が概ね10～15以上であれば衝撃波が一波目山頂部より上流側で交差しなくなるため $B/h_1$ にかかわらず一定となる。一方、 $B/h_1$ が小さくなるに伴って衝撃波が一波目山頂部より上流側で交差することから、 $F_{limit}$ の値が小さくなり $B/h_1$ によっては $F_1$ が1.7以下であっても弱跳水が形成されることが認められる。特に、 $B/h_1 \leq 3 \sim 4$ の場合、図5に示されるように、 $F_{limit}$ の変化については $\delta/h_1=0.5$ と $\delta/h_1=1.0$ の場合との違いが顕著に見られなくなる。これは、アスペクト比 $B/h_1$ が小さくなると流れが3次元的になり射流の乱流境界層が二次元流れより早く発達するため、二次元的に境界層が発達するものとして計算した $\delta/h_1=0.5$ の場合の断面においても実際には、Fully Developed Flow（図1）となっているためと考えられる。

#### まとめ

長方形断面の水平水路において形成される波状跳水について $Re \geq 65000$ の条件のもとで、波状跳水の形成条件を明らかにした。

特に、波状跳水と弱跳水との境界となるフルード数 $F_{limit}$ が、跳水始端での乱流境界層の発達状態 $\delta/h_1$ とアスペクト比 $B/h_1$ によって変化し、1.7より大きい場合でも波状跳水が形成されたり、1.7より小さい場合でも弱跳水が形成される場合があることを示した。

#### 参考文献

- 1) Chow, V.T. Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill International, New York, USA, 1959.
- 2) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Gotoh, H., Characteristics of Undular Jumps in Rectangular Channels, Proc. of the 26th IAHR Congress, IC14, London, UK, 1995.
- 3) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Gotoh, H., Discussion of Non-breaking Undular Hydraulic Jumps, J. of Hydr. Res., IAHR, 34(2), pp.567-572, 1996.
- 4) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Gotoh, H., Discussion of Characteristics of Undular Hydraulic Jumps: Experimental Apparatus and Flow Patterns, J. of Hydr. Engrg., ASCE, 124(2), pp.161-162, 1997.
- 5) 大津、安田、後藤、波状跳水の形成条件について、水工学論文集第42巻、土木学会、pp.673-678, 1998.
- 6) Ohtsu, I., and Yasuda, Y., Characteristics of Supercritical Flow below Sluice Gate, J. of Hydr. Engrg., ASCE, 120(3), pp.332-346.

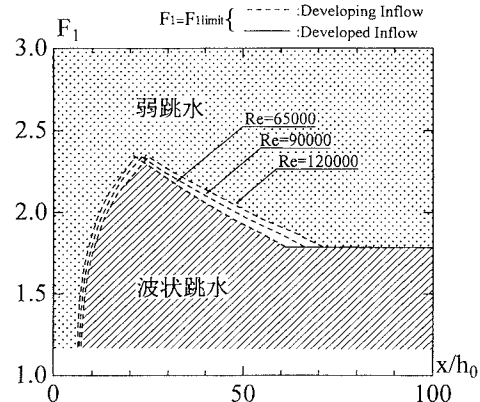


図4 波状跳水の形成条件（衝撃波が一波目山頂部より上流側で交差ししない場合）

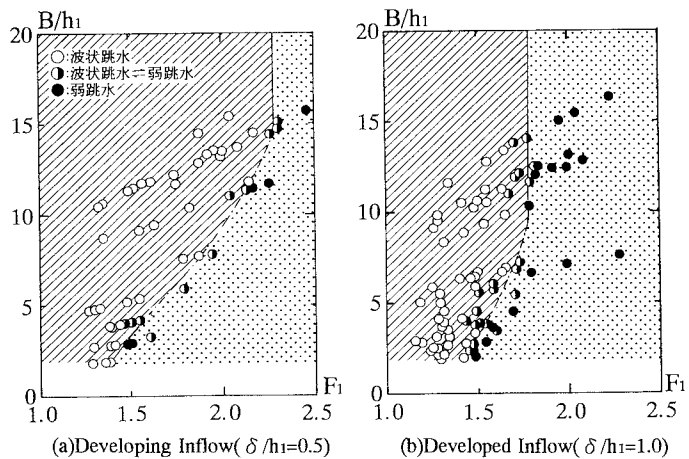


図5 波状跳水の形成条件（衝撃波が一波目山頂部より上流側で交差する場合）