

波型粗度上に形成される波状跳水の流況特性

日本大学大学院理工学研究科 学生員○寺田 直弘、日本大学大学院理工学研究科 学生員 須藤 友仁
日本大学理工学部 正会員 後藤 浩 安田陽一、日本大学理工学部 フェロー会員 大津 岩夫

波状跳水は、波状水面を伴いながら流入射流のフルード数の値が1近くで射流から常流へ遷移する現象である。

従来、Marchi and Becchi¹⁾は1本の栈粗度を波状跳水の跳水始端から一波目山頂部の中間に設置し、その影響により滑面水路の場合に比べて水面形の凹凸が小さくなることを示した。しかしながら、波状跳水の流況特性に対する粗度の影響についての系統的な検討がされたわけではない。

最近、著者らは滑面長方形断面水平水路に形成される波状跳水に関し検討を行い、流況特性および波状跳水の形成条件を系統的に明らかにした^{2,3)}。

この報告では、波型粗度（図-1）上で波状跳水を形成させた場合を対象に流入射流のフルード数の変化に伴う流況、波の高さ、および波長の変化について実験的に検討を行い、滑面水路の場合との比較から波型粗度ブロック設置の影響を示した。また、粗度上で波状跳水が形成される場合、波状跳水が形成されるフルード数の上限値が滑面水路の場合に比べ大きくなることを明らかにした。

実験 実験は、長方形断面水路（水路長18m、水路幅 $B=80\text{cm}$ ）を用いた。また、図-1に示す溝深さ $k=5.5\text{mm}$ を有する波型粗度を設置し、流入射流の水深を変化させることによって相対粗度 k/h_1 を変化させた。さらに、粗度が設置されている領域の先端と衝撃波先端とを一致させ流入射流のフルード数を変化させた（ $F_1=v_1/(gh_1)^{0.5}$ ； v_1 :流入射流の断面平均流速、 h_1 :流入射流の水深、 g :重力加速度）。

なお、跳水始端で乱流境界層が十分に発達している波状跳水^{2,3)}を対象とした（図-1参照）。また、跳水始端近くの両側壁から形成される衝撃波^{2,3)}が、一波目山頂部上流側で交差するようになると流況に対するアスペクト比 B/h_1 の影響が無視できないため、衝撃波が一波目山頂部より上流側で交差しない場合の流況を対象に検討を行った。さらに、レイノルズ数 Re の値が 6.5×10^4 よりも小さくなると波状跳水の形成に対する Re の影響が無視できない^{2,3)}ため $Re \geq 6.5 \times 10^4$ の条件のもとで実験を行った（ $Re = v_1 h_1 / \nu$ ； ν :動粘性係数）。

流況の説明 波型粗度上に形成される波状跳水の流況は流入射流のフルード数 F_1 および相対粗度高さ k/h_1 によって変化する。与えられた k/h_1 に対して F_1 の変化に伴う流況の変化を以下に説明する。

流入射流のフルード数が $1.2 \leq F_1 \leq 1.7 \sim 1.8$ の範囲では、滑面水路において形成される波状跳水（（図-2 [Case A]）: Nonbreaking undular jump²⁾）と同様な流況が形成される。 $1.7 \sim 1.8 \leq F_1 \leq F_{1\text{limit}}$ の場合、溝型粗度上の流況は滑面水路の場合と異なる図-2[Case B]に示されるような波状跳水の形成が認められる。この場合、二

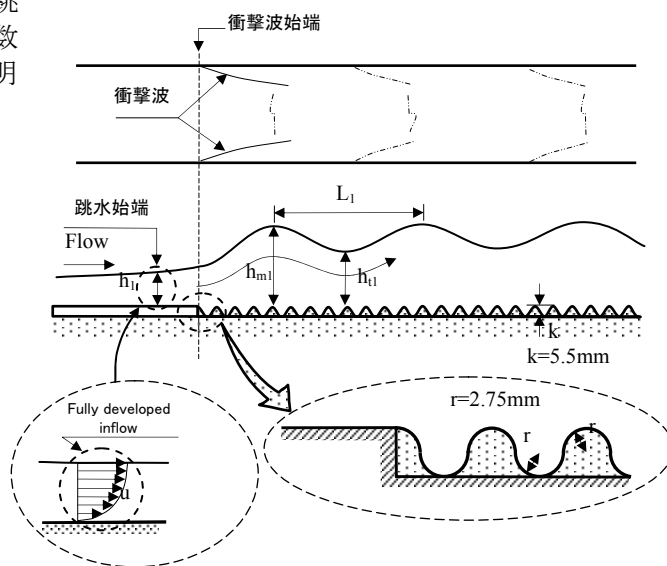


図-1 定義図

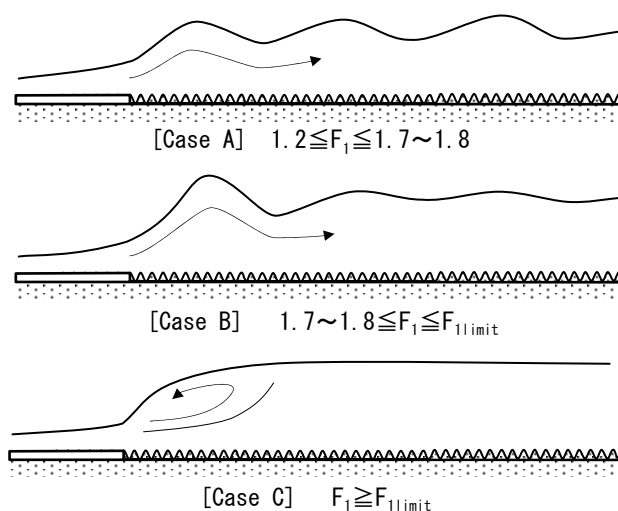


図-2 流入射流の変化に伴う波状跳水の流況の変化

キーワード：跳水、波状跳水、開水路流、波型粗度、洪水流

連絡先：〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8 TEL/FAX 03-3259-0409

波目以降の波の凹凸が F_1 の増加に伴い小さくなる。特に、 $k/h_1 \approx 0.1$ で F_1 の値が $F_{1\text{limit}}$ 近くでは一つの定常的な波が形成される流況となる。

Case B の状態から流入射流のフルード数の値がさらに大きくなると、ある段階 ($F_1 = F_{1\text{limit}}$) で一波目が碎波するようになり、滑面水路における **Breaking undular jump**²⁾ と同様な流況は形成されず、図-2[Case C]に示される表面渦を伴った跳水が形成される。

波状跳水の形成条件 図-3 は k/h_1 の変化に伴う波状跳水が形成されるフルード数の上限値 $F_{1\text{limit}}$ の変化を示したものである。図-3 に示されるように k/h_1 の値が大きくなるに伴って $F_{1\text{limit}}$ の値は大きくなる。このことについて以下に考察を行う。 F_1 の値が大きくなるに伴って常流の対応水深が大きくなり一波目に接近する流線の曲がりが大きくなる。滑面水路の場合は、流線の曲がりが大きくなると一波目山頂部の流れが限界流となって一波目が碎波する³⁾。一方、波型粗度設置の場合は、 $F_{1\text{limit}}$ 近くでも滑面水路の場合とは異なり一波目山頂の流速が限界流速よりも大きくなる。この状態から F_1 が大きくなるとある段階で一波目に接近する流線の曲がりが増えてなくなり、一波目が碎波するものと推論される。このように、 $F_{1\text{limit}}$ が滑面水路の場合と比べて大きくなったことから、碎波するメカニズムが波型粗度の設置によって異なったものと考察される。なお、波型粗度上の波状跳水の碎波のメカニズムに対する粗度の影響については今後さらに検討が必要である。

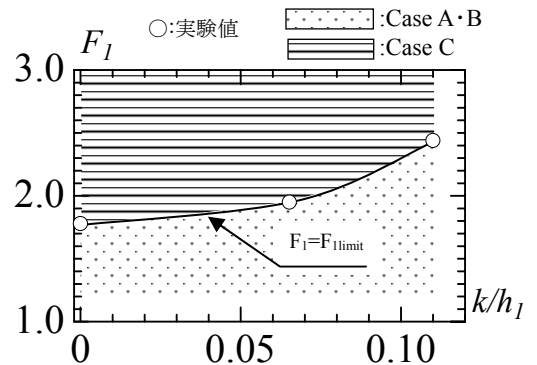


図-3 波状跳水の形成条件

波の高さおよび波長の特性

図-4、5 は波状跳水の一波目山頂および谷の水深 h_{m1}/h_1 、 h_{t1}/h_1 、および一波目の波長 L_1/h_2 について整理したものである。ここに $h_2 = h_1((8F_1^2 + 1)^{0.5} - 1)/2$ である。

図-4、5 に示されるように、 $1.2 \leq F_1 \leq 1.7 \sim 1.8$ (Case A) の場合、滑面の場合と同様な傾向が得られる。ただし、谷の水深については $F_1 = 1.4 \sim 1.5$ 付近で滑面水路の場合より大きい値を示し、これに対応して波長が滑面水路の場合よりも長くなっている (図-5)。図-4、5 に $1.7 \sim 1.8 \leq F_1 \leq 2.4 \sim 2.5$ (Case B) の一波目山頂の水深、谷の水深、および波長について実験値に加えて傾向線を示す。

h_{m1}/h_1 h_{t1}/h_1
 ○ □ : Nonbreaking undular jump (滑面水路の場合)
 ● ■ : Breaking undular jump (滑面水路の場合)
 △ ▽ : Nonbreaking undular jump (波型粗度 (k/h₁=0.09~0.1)の場合)

○ : Nonbreaking undular jump (滑面水路の場合)
 ● : Breaking undular jump²⁾ (滑面水路の場合)
 □ : Nonbreaking undular jump (波型粗度 (k/h₁=0.09~0.1)の場合)

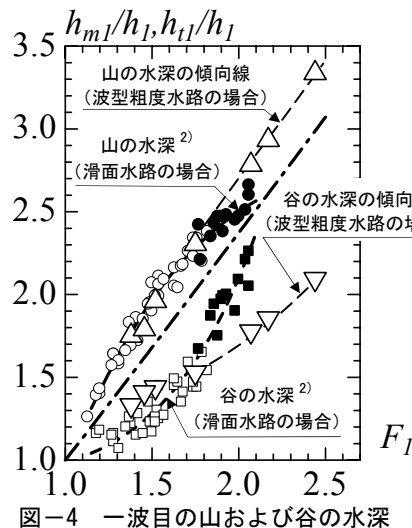


図-4 一波目の山および谷の水深

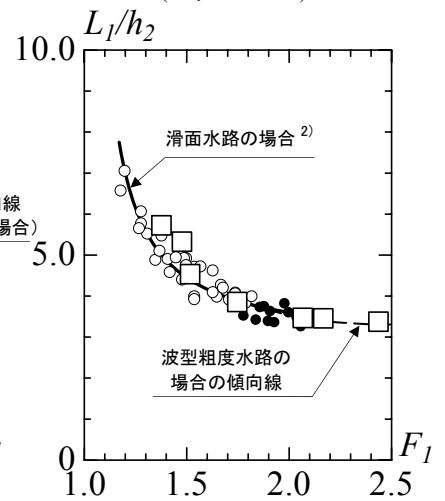


図-5 一波目の波長

参考文献

- 1) Marchi, E. and Becchi, I. (1973), Bed-Load Influence on the Undular Jump, *Proc. of the 15th IAHR Congress*, A5-1~A5-7, Istanbul.
- 2) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Gotoh, H. (2003), Flow Conditions of Undular Hydraulic Jumps in Horizontal Rectangular Channels., *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 129(12), pp.948-955.
- 3) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Gotoh, H. (2001), Hydraulic Conditions for Undular-Jump Formations., *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 39(2), pp.203-209.