

II-108

波状跳水から表面渦を伴う跳水へ遷移について

日大・理工 正 後藤 浩

日大・理工 正 安田 陽一

日大・理工 正 大津 岩夫

まえがき

一般に射流から常流へ遷移する場合、射流のフルード数が1近くなると波状跳水が形成される(図1)。波状跳水は、跳水始端のフルード数 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)が大きくなると波状跳水の一波目山頂部で波状水面が breaking し表面渦を伴う跳水へと変化する。従来、波状跳水から表面渦を伴う跳水へ遷移する直前の跳水始端のフルード数 F_{1limit} については、複数の研究者によって理論的な検討が行われている^{1)~3)}。しかしながら、用いられた仮定は、実際の現象とは異なり検討の余地がある。

ここでは、波状跳水が定常的に形成されている状態($F_1 < F_{1limit}$)と波状跳水から表面渦を伴う跳水へ遷移する直前の状態($F_1 \approx F_{1limit}$)とで波状跳水一波目山頂部の流速特性にどのような違いがあるのかについて実験的検討を行った。

実験

実験は、長方形断面滑面水平水路(水路幅 $B=80\text{cm}$)において行った。流速の測定には、二次元電磁流速計および小型プロペラ流速計(プロペラ直径 3mm , 採取時間 60s , 採取間隔 40ms)を用いた。

波状跳水一波目山頂部の波の高さおよび流速特性

従来、Ippen & Harleman¹⁾、Iwasa²⁾、Hager & Hutter³⁾などによって F_{1limit} について理論的な検討が行われている。Ippen & Harleman は、波状跳水を静水中を進行する波(孤立波、クノイド波)と同様な現象として取り扱い一波目の波の高さを与え、 $F_1 \approx F_{1limit}$ のときには一波目山頂部における流速の値が zero となるものと仮定し $F_{1limit}=1.73$ を求めている。また、Iwasa、Hager & Hutter も、鉛直加速度を考慮した基礎式から波の高さを与え、 $F_1 \approx F_{1limit}$ のときには一波目山頂部における流速の値が zero となるという仮定を用いて $F_{1limit}=1.41 \sim 1.73$ を求めている。実験によると、実際の波状跳水の一波目の波の高さ h_{max}/h_1 は、 $F_1 \leq 1.2 \sim 1.3$ では波の理論との analogy で求められた波の高さと一致するものの、 $F_1 \geq 1.2 \sim 1.3$ では一致しなくなる[図2参照; h_{max} :一波目山頂部の波の高さ, δ :跳水始端での境界層厚さ(図3)]。また、breaking 直前($F_1 \approx F_{1limit}$)での一波目山頂部での流速分布については、図4に示されるように水面付近において一様な流速分布となり流速 u の値はほぼ限界流速 $v_c(=\sqrt{gh_c}$; h_c :限界水深)の値となっていることが認められる(u : $y=y$ における流下方向の流速)。なお、 $y/h_{max} \leq 0.6 \sim 0.8$ では u の値は、 v_c よりも常に小さな値を示す。一方、 $F_1 < F_{1limit}$ の場合には、図5に示されるように水面付近では u がほぼ v_c の大きさになっているが、 v_c の値より大きい流速が

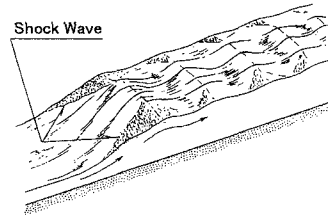


図1 波状跳水の形成

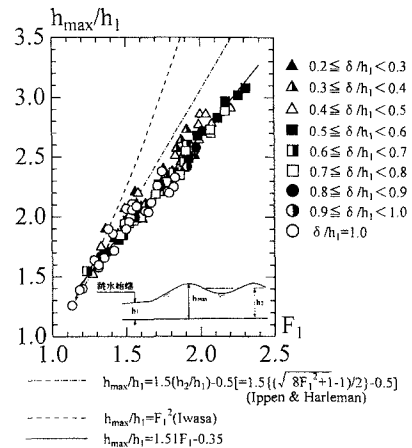


図2 波状跳水の波の高さと波の理論による波の高さとの比較

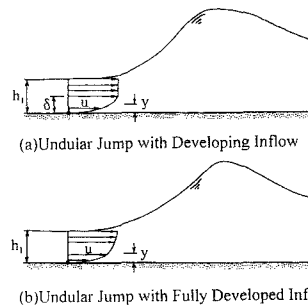


図3 跳水始端での乱流境界層の発達状態

キーワード：波状跳水、跳水、開水路流

連絡先：〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8 TEL.03-3259-0668 FAX.03-3259-0409

$y/h_{\max}=0.6\sim 0.8$ で生じている。なお、 $F_1 < F_{1\text{limit}}$ の場合の流速分布は、Becchi⁴⁾、森ら⁵⁾の実験と同様な分布を示す(図5)。また、図5の実線は、従来の理論的な研究で用いられた波の理論(孤立波)から求めた流速分布⁹⁾を示したものである。図に示されるように実際の波状跳水の流速の大きさと分布は異なり、波状跳水から表面渦を伴う跳水へ遷移する現象を波の理論との analogy から説明できないことが理解される。

なお、著者らは最近、波状跳水を支配する無次元量^{7)~11)}を考慮し、実際の波状跳水の波の高さや跳水始端での乱流境界層内の流速分布、 $F_1 \approx F_{1\text{limit}}$ のときの一波目山頂の水面での流速の大きさが限界流速 v_c となる実験的事実を用いて $F_{1\text{limit}}$ を求める式を導いた。その結果、 $F_{1\text{limit}}$ が跳水始端での乱流境界層の発達状態 δ/h_1 によって変化することを明らかにした^{10), 11)}。また、跳水始端において乱流境界層が十分に発達している場合に限り、 $F_{1\text{limit}}$ は従来から $F_{1\text{limit}}$ とされている $F_{1\text{limit}}=1.7\sim 1.8$ ¹²⁾ となることを示した。

まとめ

波状跳水から弱跳水へ遷移する直前の流れの特性について実験的に検討を行った結果、一波目山頂部の水面付近において流速はほぼ一様な分布を示し、その大きさが限界流速の値となることを示した。また、 $F_1 < F_{1\text{limit}}$ においては、水面付近の流速の大きさは限界流速の値となるものの速度勾配を有する分布となり、 $y/h_{\max}=0.6\sim 0.8$ 付近で限界流速の値よりも常に大きい値となることを示した。

参考文献

- 1) Ippen, A.T., and Harleman, D. R. F. (1954), Verification of theory for oblique standing waves, Transactions ASCE, Vol. 121, pp. 526-1-17.
- 2) Iwasa, Y. (1955), Undular jump and its limiting condition for existence, Proc. of the 5th Japan National Congress for Applied Mechanics, pp. 315-319.
- 3) Hager, W.H., and Hutter, K. (1984), On pseudo-uniform flow in open channel hydraulics, Acta Mechanica, Vol. 53, pp. 183-200.
- 4) Becchi, I. (1974), Alcune osservazioni sperimentali sull'influenza della turbolenza nel fenomeno del risalito ondolato, XIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, pp. I-4-1~I-4-15.
- 5) 森・板倉・森平・高田 (1992), 跳水と境界層の相互干渉 - 三次元波状跳水 -, 水工学論文集, 土木学会, 第36巻, pp. 367-372.
- 6) Laitone, E.V. (1961), The second approximation to cnoidal and solitary waves, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 9, pp. 430-444.
- 7) Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Gotoh, H. (1995), Characteristics of undular hydraulic jumps in rectangular channels, Proc. of the 26th IAHR Congress, IC14, London, UK.
- 8) Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Gotoh, H. (1996), Discussion of non-breaking undular hydraulic jumps, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 34, No. 2, pp. 567-572.
- 9) Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Gotoh, H. (1997), Discussion of characteristics of undular hydraulic jumps: experimental apparatus and flow patterns, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 2, pp. 161-162.
- 10) 大津・安田・後藤 (1998), 波状跳水の形成条件について, 水工学論文集, 土木学会, 42巻, pp. 673-678.
- 11) 後藤・安田・大津 (1999), 波状跳水の形成条件に対するレイノルズ数・アスペクト比の影響について, 水工学論文集, 土木学会, 第43巻, pp. 299-304.
- 12) Chow, V.T. (1959), Open channel hydraulics, Mc-Graw Hill International, New York, USA.

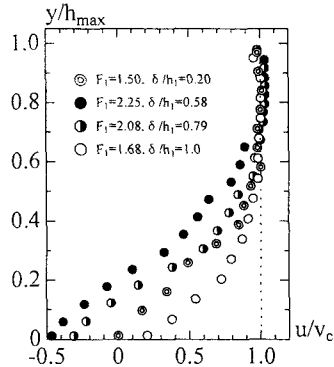


図4 一波目山頂部での流速分布($F_1 \approx F_{1\text{limit}}$)

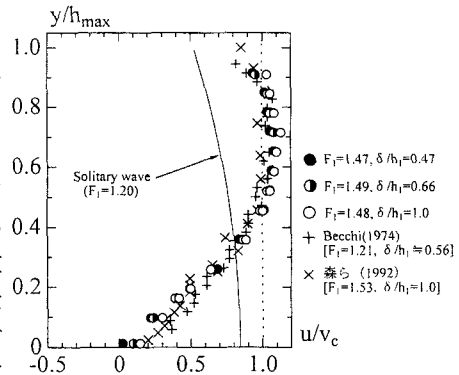


図5 一波目山頂部での流速分布($F_1 < F_{1\text{limit}}$)