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 ○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、堰などの落差を伴う構造物やゲートなどの下流側で観察されることが多い。水工設計上･河川管理上、波状跳水の特性を知ることは意義がある。従来、著者らは長方形断面の水平水路上に形成される波状跳水に関し検討を行い、その特性を系統的に明らかにした[1)~5)]。(図 - 1)。

ここでは、長方形断面水路に形成される波状跳水の水理特性に対する勾配の影響について実験的検討を加えた。すなわち、急勾配水路の場合と水平水路の場合との間で波状跳水の流況･形成条件･波の振幅や波長などの特性について比較を行い勾配の影響を示した。

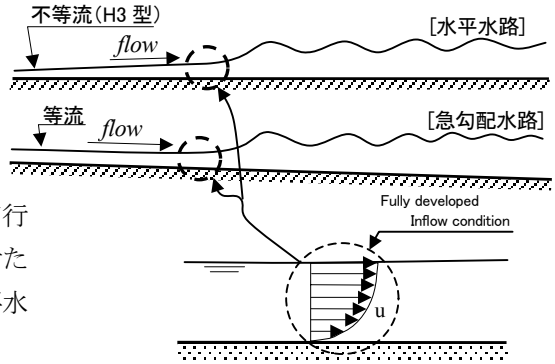

図-1 水平水路および急勾配水路での波状跳水の形成

実験　実験は、可変勾配式長方形断面水路(B=80cm; B:水路幅)を用いて行った。急勾配水路の場合、水路勾配を i=1/80～1/330 の範囲で変化させた（図 - 1)。この場合、流入射流は等流状態となっている。また、水平水路の場合、スルースゲートを用いて射流を形成させた。

波状跳水の水面形を把握するために、サーボ式波高計を台車に載せ一定速度(=0.114m/s)で牽引し測定した[4)]。

ここでは、跳水始端で乱流境界層が十分発達した波状跳水[4)]を対象とし、波状跳水の形成に対して水路幅(アスペクト比)の影響および粘性の影響が無視できる条件(B/h_1≧10,Re≧6.5×10^4)のもと実験を行った[2),3)]($Re=v_1h_1/\nu$; v_1:跳水始端の断面平均流速, h_1:跳水始端水深, ν :動粘性係数)。

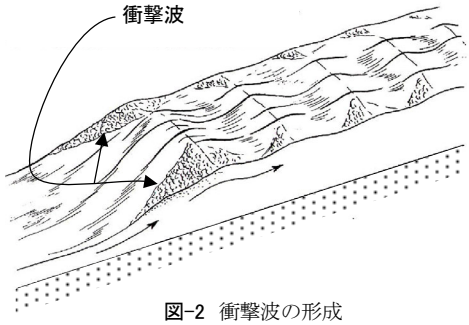

図-2 衝撃波の形成

流況　波状跳水の流況は、流入射流のフルード数 F_1 および水路勾配よって次のように特徴付けることができる[$F_1=v_1/(gh_1)^{1/2}$; g:重力加速度]。

$1<F_1<1.2$ の場合　二次元的な波状水面が形成される（Nonbreaking undular jump;図-3(a)）。この場合、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。

$1.2\leq F_1\leq F_{1limit}$ の場合　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)）。定常的な波状水面が形成されている領域においては、水平水路の場合、一定の波長を有する波状水面が形成される。一方、急勾配水路の場合、下流に進むにつれて波長は徐々に短くなる。

$F_{1limit}\leq F_1\leq F_{1u}$ の場合　一波目が砕波するものの、流れが水面に沿うため水面の凹凸が下流側に続く（Breaking undular jump; 図 - 3(c)）。水平水路と急勾配水路との違いは Nonbreaking undular jump と同様に波長の変化として見られる。

$F_1>F_{1u}$ の場合　典型的な跳水（Classical jump）が形成される（図 - 3(d)）。この場合、急勾配水路の場合と水平水路の場合とで大きな違いは認められない。

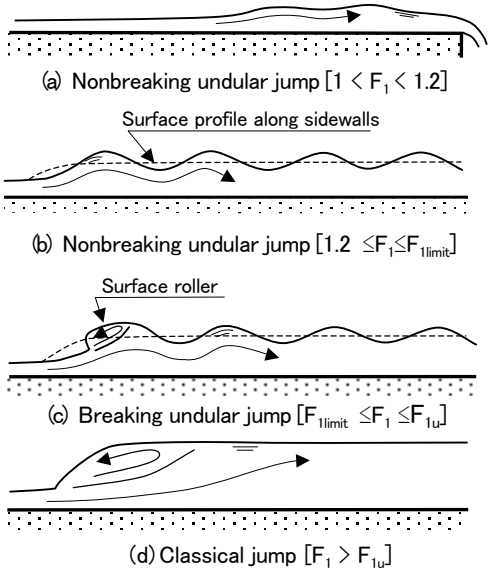

図-3 流況

波状跳水の形成条件　水平水路の場合、F_{1limit} の値は 1.78 となり[4),5)]、F_{1u} の値は 2.1 となる[5)]。急勾配水路の場合、流入射流を等流とした実験では、F_{1limit} の値は 1.5～1.6 となり、F_{1u} の値は 2 近くとなる。すなわち、水平水

キーワード：跳水, 波状跳水, 開水路流, 河川環境, 急勾配水路
連絡先：〒101-8308　東京都千代田区神田駿河台 1-8　FAX. 03-3259-0409

路の場合に比べて急勾配水路の場合の方がF_{1limit}およびF_{1u}の値は小さくなる。図 - 4 は、水平水路の場合と急勾配水路の場合の一波目前方の水面形を比較した一例である。図 - 4 に示されるように、$F_1 \fallingdotseq F_{1limit}$のもとで比較すると急勾配水路の場合(図中実線)と水平水路の場合(図中破線)とで一波目山頂付近の水面勾配はほぼ同じとなっている。また、図 - 4 に示されるように流入射流のフルード数を同一にして（F_1=1.52）水平水路の場合(図中一点鎖線)と急勾配水路の場合(図中破線)とを比較してみると、急勾配水路の方が水平水路の場合に比べて一波目山頂付近の水面勾配が大きい。すなわち、流入射流のフルード数が同じであったとしても急勾配水路の方が水平水路の場合に比べて一波目前方の水面勾配が大きくなるため一波目が砕波し易くなり、急勾配水路の場合のF_{1limit}の値は水平水路の場合の値よりも小さくなったものと推論される(h_s:衝撃波始端の水深, x_1:衝撃波始端から水路床に沿った流下方向への長さ, L_w:衝撃波始端から一波目山頂部までの長さ, h_{m1}:一波目山頂部での水深, h:x_1=x_1での水深)。

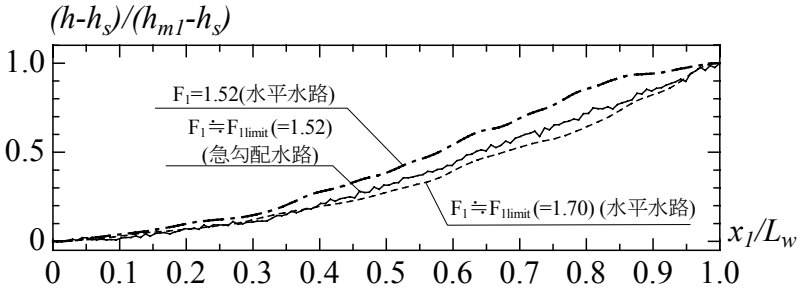

図-4 一波目前面の水面形の比較

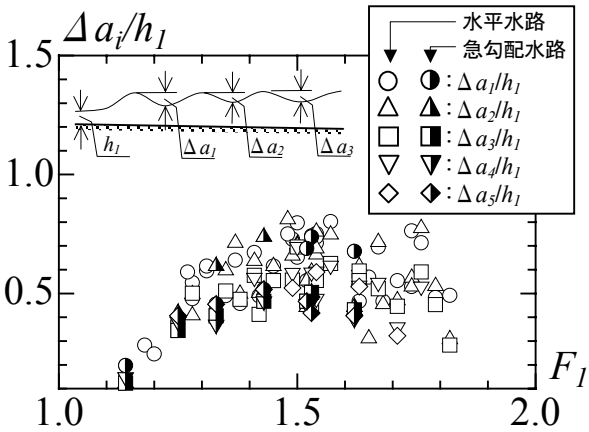

図-5 振幅の流下方向へ変化

波の振幅・波長　図 - 5、6 は流入射流のフルード数F_1による波状跳水の波の振幅および波長の変化を示したものである。振幅の無次元量$\Delta a_i/h_1$は、図 - 5 に示されるように、F_1の変化に対してピーク値を有する変化を示す(i=1～5)。また、水路勾配による$\Delta a_i/h_1$の違いは小さく、水深方向の水理量に対して勾配の影響は小さいものと推定される。波長L_i/h_2については、図 - 6 に示されるように、F_1の増加に伴いL_i/h_2の値が小さくなる[ここに、$h_2=h_1\{(8F_1^2+1)^{0.5}-1\}/2$である]。また、同一な$F_1$に対して水平水路の場合に比べて急勾配水路の場合、$L_i/h_2$の値は小さくなる傾向を示す。特に、下流側に進むにつれて波長が小さくなる。このことは、急勾配水路の場合と水平水路の場合の流下方向の水面形を表した図 - 7 からも理解される(x_2:跳水始端から水路床に沿った流下方向への長さ, h:x_2=x_2での水深)。これは、急勾配水路の場合、流下方向に対して波の平均水深(山と谷での水深の平均値)が徐々に大きくなるため、水平水路の場合に比べて水面勾配が大きくなり波長が短くなったものと考えられる。なお、6～7 波目以降については水平水路の場合と同様に水面の凹凸は生じているが、その凹凸は小さく時間的に不規則である。

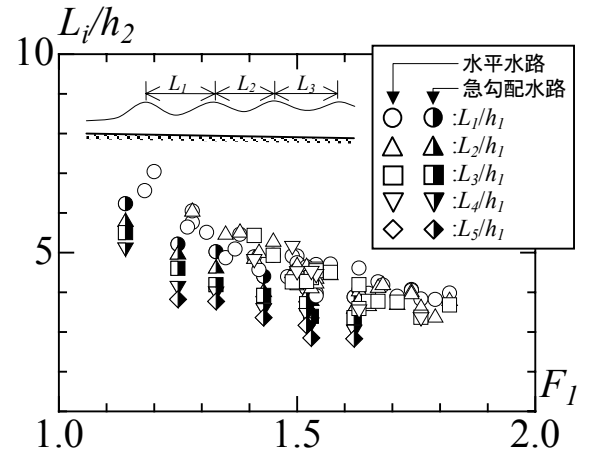

図-6 波長の流下方向への変化

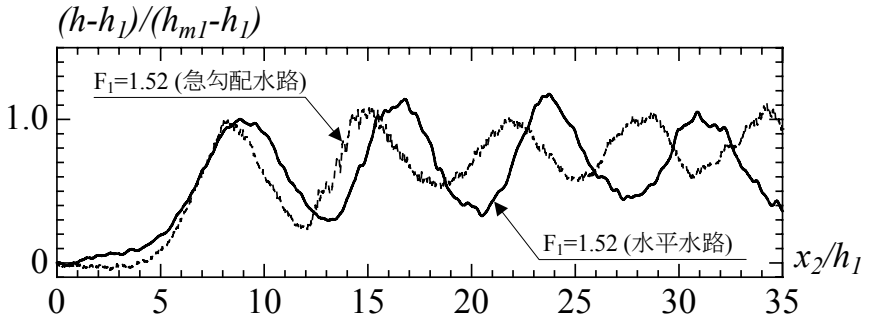

図-7 波状跳水の水面形の一例

参考文献

1) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Gotoh, H. (1995), Characteristics of Undular Jumps in Rectangular Channels, *Proc. of the 26th IAHR Congress*, 1C14, London, UK.

2) 後藤, 安田, 大津 (1998), 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, 水工学論文集, 土木学会, 第 43 巻, pp.299～304.

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 formations, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 39(2), pp.203～209.

5) Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Gotoh, H.（2002）, Reply to the discussion of “Hydraulic Condition for Undular-jump Formations” by Chanson, H., *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 40(3), pp.382～384.