

波状跳水の特性について

日大院・理工 学 後藤 浩
日 大・理工 正 安田 陽一
日 大・理工 正 大津 岩夫

射流から常流に移移する場合、射流のフルード数が1近くで、波状跳水が形成される。従来、波状跳水の特長(波の高さ、波長など)が理論的に示されているが^{(3)~(4)}、実際の現象と仮定との間で異なる点が多く、現象ならびに実験結果を十分に説明するものではない。ここでは、広範囲な実験条件のもとで長方形断面の水平水路における波状跳水について検討を加え、波状跳水を支配する水理量を明確にし、水理量間の関係を提示した。また、流況の分類を行った。

流況の分類 長方形断面水平水路で形成される波状跳水の流況は、跳水始端のフルード数 $F_1(=v_1/\sqrt{gh_1})$ 、跳水始端での平均流速 g 、重力加速度 h_1 、跳水始端水深、跳水始端での乱流境界層の発達状態⁵⁾ (inflow condition: 乱流境界層が発達中の領域に跳水始端が位置した場合をdeveloping inflow、乱流境界層が十分に発達した領域に跳水始端が位置した場合をdeveloped inflowと呼ぶことにする; (図-1))、レイノルズ数 $Re(=v_1h_1/\nu=q/\nu)$ 、 q 単位幅流量、 ν ：動粘性係数、衝撃波の影響が含まれた水路の幅を示す無次元量 $L_s/L_w(L_w$ ：跳水始端付近の側壁から生じる衝撃波始端から一波目山頂部までの水平長さ、 $L_s=B/(2\tan\theta)$ 、 θ ：衝撃波と水路側壁とのなす角、 B ：水路幅; (図-2))によって変化する。 $Re\geq 65000$ 、 $L_s/L_w\geq 1.0$ の場合、波状跳水の流況に対する衝撃波および Re の影響は認められず、 F_1 、inflow conditionによって変化する。図-3のように分類される。

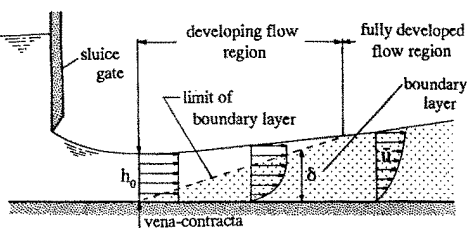


図-1 境界層の発達状態

$$1.2 \leq F_1 \leq 1.7$$

DEVELOPING INFLOW 顕著な波状水面が形成され、下流側遠方まで水面の凹凸が続く。この場合側壁に沿っても顕著な波状水面が形成され、流れの流況は二次元的となる（図-3(A)）。

DEVELOPED INFLOW 顕著な波状水面が形成され、下流側遠方まで水面の凹凸が続く。この場合、developing inflowの場合とは異なり、側壁に沿って波状水面は、ほとんど形成されない(図-3(B))。

$$1.8 \leq F_1 \leq 2.3$$

DEVELOPING INFLOW 一つの大きな定常的なwaveが形成される。このwaveの底面付近では逆流が常に観察され、waveの下流側では短区間で安定した流れとなる（図-3(C)）。

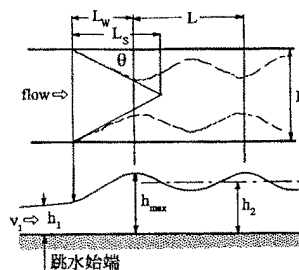


図-2 定義図

DEVELOPED INFLOW 一波目山頂部が breaking し、常に表面渦を伴う流況が形成される。すなわち、弱跳水¹⁾が形成される。この場合、主流が水面に沿うため下流側遠方で水面の動揺が続く(図-3(D))。

波状跳水を支配する水量間関係 波状跳水の一波目の波の高さ h_{m1}/h_1 、波長 L/h_2 、衝撃波始端から一波目山頂部までの水平長さ L_w/h_1 、衝撃波と水路側壁とのなす角 θ は、次元解析的な考察から次式の関係で示されるものと推論される。

$$h_{\max}/h_1, L/h_2, L_w/h_1, \theta = f(F_1, \delta/h_1 \text{ or inflow condition, Re, } L_s/L_w) \quad (1)$$

ここに、 $h_{\max}$ は一波目山頂部での波の高さ、 L は一波目山頂部から二波目山頂部までの水平長さ（波長）、 δ は跳水始端での境界層厚

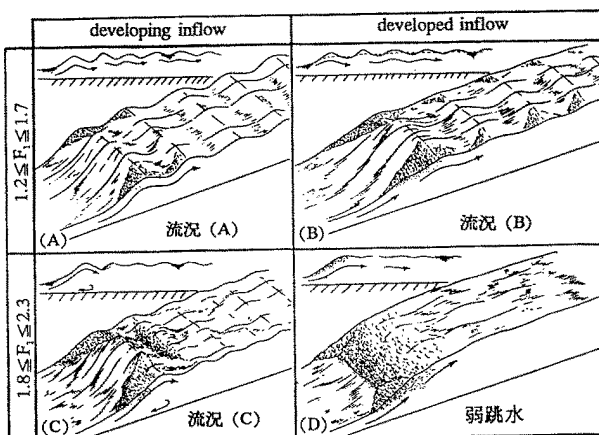


図-3 流況の分類図

さ、 $h_2=0.5h_1(\sqrt{8F_1^2+1}-1)$ である（図-1,2）。

$L_g/L_w \geq 1.0$ で $Re \geq 65000$ の場合、与えられた F_1 のもとで h_{max}/h_1 は、図-4に示されるようにinflow conditionによらず F_1 のみによって変化し、実験的に次のように示される（図-4: 図中実線）。

$$\frac{h_{max}}{h_1} = 1.51F_1 - 0.35 \quad (2)$$

L/h_2 、 L_w/h_1 については、 F_1 およびinflow conditionによって変化し、それぞれ場合について実験的に次のように示される（図-5,6:developing inflow; 図中二点鎖線, developed inflow; 図中実線）。

developing inflow

$$[1.2 \leq F_1 \leq 2.3, Re \geq 65000, L_g/L_w \geq 1.0]$$

$$\frac{L}{h_2} = \frac{1.14}{F_1 - 1} + 1.86 \quad (3a)$$

$$\frac{L_w}{h_1} = 2.86F_1 - 0.90 \quad (3b)$$

developed inflow

$$[1.2 \leq F_1 \leq 1.7, Re \geq 65000, L_g/L_w \geq 1.0]$$

$$\frac{L}{h_2} = \frac{0.90}{F_1 - 1} + 2.75 \quad (4a)$$

$$\frac{L_w}{h_1} = 1.30F_1 + 2.56 \quad (4b)$$

従来、Andersen, Iwasaによって h_{max}/h_1 、 L/h_2 に関する理論式^{3)~4)}が提案されているが、 $F_1 \geq 1.2 \sim 1.3$ では実験値と計算値との一致が認められない（図-4~5: Andersen; 図中一点鎖線、Iwasa; 図中破線）。

また、 θ については、 $Re \geq 65000$ の場合、 L_g/L_w 、inflow conditionにもよらず、 F_1 のみによって変化し次のように示される（図-7: 図中実線）。

$$\theta = 30.6F_1^{0.65}$$

$$[1.2 \leq F_1 \leq 2.3, Re \geq 65000] \quad (5)$$

なお、 θ に関するChansonらの実験式²⁾（図-7: 図中破線）は、 $Re < 65000$ の場合に対応する。

以上のように $Re < 65000$ 、 $L_g/L_w < 1.0$ の場合、波状跳水の各特性量に対する Re と L_g/L_w の影響が認められる。すなわち、波状跳水を支配する水理量として、 F_1 のほかにinflow condition、 Re 、 L_g/L_w が導入されなければ波状跳水の特性を明確に表現することができないことが明らかにされた。

参考文献

- 1) Chow, V.T. (1959), "Open Channel Hydraulics", McGraw-Hill Book Company, New York.
- 2) Chanson, H. and Montes, J.S. (1995), "Characteristics of Undular Hydraulic Jumps: Experimental Apparatus and Flow Patterns", J. of Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 121, No. 2, pp. 129-144.
- 3) Andersen, V.M. (1978), "Undular Hydraulic Jump", J. of Hydr. Div., ASCE, Vol. 104, No. HY8, pp. 1185-1188.
- 4) Iwasa, Y. (1955), "Undular Jump and Its Limiting Condition for Existence", Proc. 5th Japan National Congress for App. Mech. paper II - 14, pp. 315-319.
- 5) Ohtsu, L. and Yasuda, Y. (1994), "Characteristics of Supercritical Flow below Sluice Gate", J. of Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 120, No. 3, pp. 332-346.

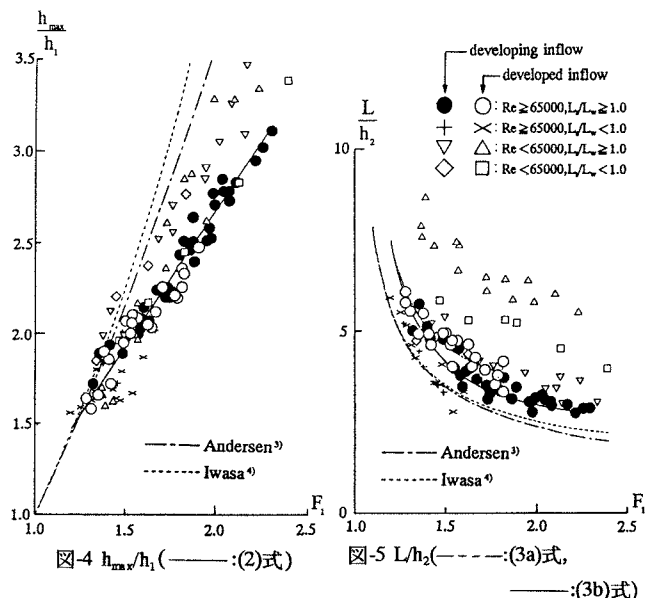


図-4 h_{max}/h_1 (—: (2)式)

図-5 L/h_2 (—: (3a)式, —: (3b)式)

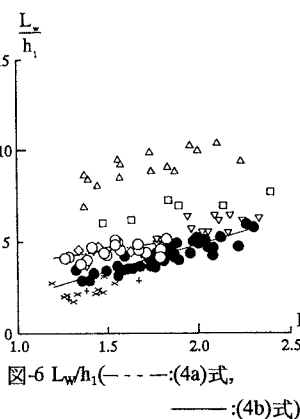


図-6 L_w/h_1 (—: (4a)式, —: (4b)式)

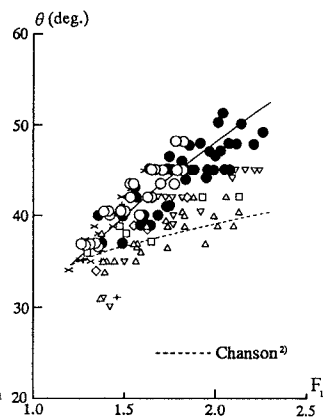


図-7 θ (—: (5)式)