

長方形断面水路下流端付近の水面形に関する検討

Experimental investigation on water surface profiles near rectangular channel end

日本大学理工学部土木工学科 正会員 安田陽一
 日本大学理工学部土木工学科 学生会員 清野恒陽
 日本大学理工学部土木工学科 学生会員 ○宮代由生

1. はじめに

一様な矩形断面を有する水平水路および緩勾配水路において、水路下流端が自由放流となっている場合、水路では H2 曲線または M2 曲線が形成される。一般的な一次元の漸変流の基礎式(Gradually Varied Flow Equation)から H2 曲線または M2 曲線の水面形を推定すると、限界水深から上流に向けた常流区間の水面形を推定することとなり、限界水深 h_c から水路下流端の水深 (Brink Depth^{2),3),4),5),6): h_b) までの水面形は推定することができない。また、Brink Depth から限界水深までの距離については Rouse によって検討され¹⁾、限界水深の 3.5 倍前後になることが報告されている。一方で、水路勾配や Reynolds 数などの条件によって、Brink Depth から限界水深までの距離が異なることが実験により確かめられている。ここでは、H2 曲線または M2 曲線の漸変流が形成される場合を対象として、Brink Depth から限界水深が生じるまでの距離について、水路勾配、流量規模を変化させて実験的な検討を行った。検討の結果、Brink Depth から限界水深が生じるまでの距離は水路勾配が大きくなるにつれて大きくなり、同一の勾配においては流量規模が小さい方が大きくなることが確認された。Brink Depth から限界水深までの距離を限界水深で無次元化した無次元量は水路勾配、Reynolds 数によって変化することを定量的に示し、その変化特性について考察を行った。}

2. 実験方法

実験は、水路幅 $B=0.40\text{m}$ 、長さ 17m 、高さ 0.60m を有する長方形断面水路を用いて、表 1 の実験条件のもとで水路下流端の水面形について検討した。水深については、ポイントゲージを用いて限界流の条件より求めた限界水深となるまで 10cm 間隔で測定し、流量の測定は水路下流端に設置された全幅堰を用いた。

表 1 実験条件

	流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$	Reynolds 数 $Re(-)$	水路勾配 $i(-)$
Case1	4.14×10^{-2}	1.2×10^5	0
Case2			$1/820$
Case3			$1/432$
Case4			$1/342$
Case5	1.86×10^{-2}	5.5×10^4	0
Case6			$1/820$
Case7			$1/432$
Case8			$1/328$

3. Brink Depth から限界水深までの相対距離

Brink Depth から限界水深までの距離 L を限界水深 h_c で無次元化した相対距離 L/h_c について、 $L/h_c=f(i, Re)$ の関係で整理したものを図 1 に示す。ここで、 i は水路勾配、 Re はレイノルズ数($Re=q/v$, q = 単位幅流量, v = 動粘性係数)である。図 1 に示されるように、 L/h_c は水路勾配 i が大きくなるにつれて大きくなり、同一の勾配においては Re が小さい方が L/h_c が大きくなる。すなわち、Brink Depth から限界水深までの相対距離 L/h_c は Reynolds 数および水路勾配によって変化することが確認された。

水深 h を限界水深 h_c で無次元化し、Brink Depth から上流側に向かっての距離 x' を限界水深までの距離 L で無次元化し、表 1 に示す実験条件で計測した水面形を図 2 に示す。

$$\frac{h}{h_c} = 1.0 - 0.3 \text{EXP} \left(-3.5 \frac{x'}{L} \right) \quad (1)$$

図 2 に示されるように、Brink Depth から限界水深が生じるまでの区間について、 $h/h_c=f(x'/L)$ の関係で整理すると、 i, Re に関わらず、相似な水面形となることが分かった。この無次元化した水面形を(1)式で近似する。

4. $L/h_c=f(i, Re)$ についての考察

図 1 に示されるように、Brink Depth から限界水深までの相対距離 L/h_c が水路勾配 i および Reynolds 数 Re によって変化することについて、Brink Depth から限界水深が生じるまでの流体を検査部を選び、水路床に沿った方

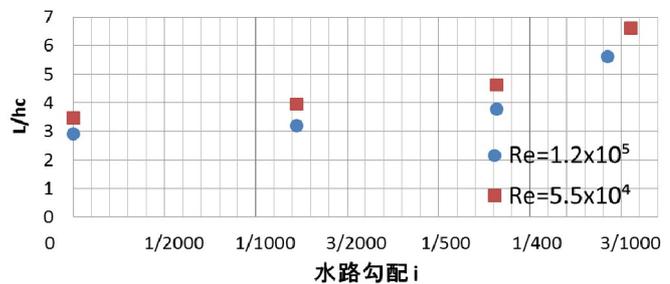


図 1 水路勾配および Reynolds 数による相対距離の変化

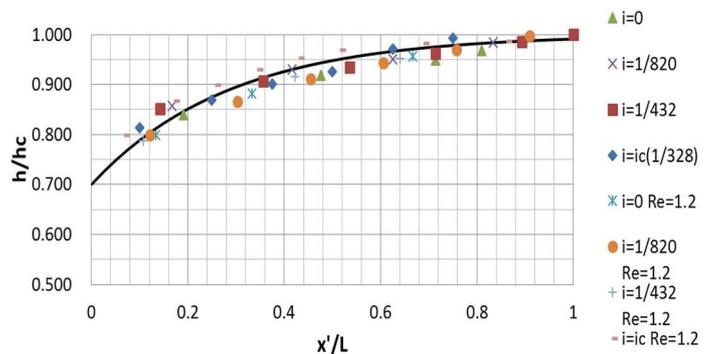


図 2 水路下流端直上流側の無次元化した水面形

キーワード：漸変流, 自由越流, 水面形, Brink Depth, 支配断面

連絡先：〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8, E-mail: yokyas@civil.cst.nihon-u.ac.jp

向に運動量方程式を適用することによって以下のように考察する.

適用した運動量方程式は(2)式のように示される.

$$\rho \int_0^{h_b} \bar{u}^2 B dy - \rho \int_0^{h_c} \bar{u}^2 B dy = \rho g \sin \theta \int_0^L h B dx' - \int_0^{h_b} \bar{p} \cos(x, n_o) B dy + \int_0^{h_c} \bar{p} \cos(x, n_o) B dy - \int_0^L \tau_o B dx' - \rho \int_0^{h_b} \bar{u}'^2 B dy + \rho \int_0^{h_c} \bar{u}'^2 B dy \quad (2)$$

(2)式において, B は水路幅, \bar{u} は x 方向の時間平均流速, h は任意な地点での水深, \bar{p} は時間平均された圧力, \bar{u}'^2 は x 方向の乱れ強さ, θ は水路床と水平面のなす角度, τ_o は壁面せん断応力である.

(2)式を限界水深および限界流速によって表示した運動量 $\rho V_c^2 B h c$ で無次元化し, Brink Depth が生じる断面の項を左辺に移項し, その他を右辺に移項したものを(3)式で示す.

$$\int_0^{\frac{h_b}{V_c}} \frac{\bar{u}^2}{V_c^2} dY + \int_0^{\frac{h_b}{V_c}} \frac{\bar{p}}{\rho V_c^2} \cos(x, n_o) dY + \int_0^{\frac{h_b}{V_c}} \frac{\bar{u}'^2}{V_c^2} dY = \int_0^1 \frac{\bar{u}^2}{V_c^2} dY + \sin \theta \frac{L}{h_c} \int_0^1 H dX' + \int_0^1 (1 - Y) \cos \theta dY - \frac{L}{h_c} \int_0^1 \frac{\tau_o}{\rho V_c^2} dX' + \int_0^1 \frac{\bar{u}'^2}{V_c^2} dY \quad (3)$$

ここで, 使用した水路は滑面であったため摩擦抵抗係数は乱流滑面の場合を用いることとし, 検査部の水圧は静水圧と仮定する. また, 検査部の平均流速は(4)式のように近似され⁷⁾, 限界流断面での流下方向の乱れ強さは(5)式のように表現されるものとする⁸⁾.

$$\bar{u} = U_c \left(\frac{y}{h_c} \right)^{\frac{1}{N}} \equiv U_c Y^{\frac{1}{N}}, U_c = \frac{N+1}{N} V_c, V_c = \frac{Q}{B h_c} \quad (4) \quad \frac{\sqrt{\bar{u}'^2}}{V_*} = \frac{2.3}{\text{EXP} \left(\frac{y}{h_c} \right)} \equiv \frac{2.3}{\text{EXPY}} \quad (5)$$

上記の仮説が正しければ, (4), (5)式を考慮した(3)式が満足することになる. そこで, (3)式の右辺に(1), (4), (5)式および実験結果を代入し, 同一の水路勾配において Reynolds 数の異なる (Re=120000, 55000) (3)式の右辺の値の差異を表 2 に示す. 表 2 に示されるように, 同一の水路勾配において, 右辺の差異は最大でも約 0.0004 となり, 右辺の値(約 1.02) に比べて 0.04%であり, Reynolds 数による違いがないことが確認できる. すなわち, 図 1 に示されるように, 相対距離 L/hc が Reynolds 数によって変化することに矛盾がないものと考えられる.

相対距離 L/hc が水路勾配 i によって変化することについては, 水路勾配が大きくなるにつれて検査部内の流体の重さの流下方向成分が増加するため, 検査部区間の相対距離 L/hc が増加したのと考えられる.

表 2 Re による式(3)の右辺の違い

i	Δ
0	0.0004
1/820	0.0003
1/432	-0.0001
1/342	-0.0004

5. まとめ

H2 曲線または M2 曲線の漸変流が形成される場合を対象として, 表 1 に示す実験条件のもとで Brink Depth から限界水深が生じるまでの距離について実験的な検討を行った. 検討の結果, Brink Depth から限界水深が生じるまでの相対距離 L/hc は水路勾配 i が大きくなるにつれて大きくなり, 同一の勾配においては Reynolds 数 Re が小さくなるほど L/hc が大きくなることを確認された. また, 運動量方程式を用いて実験結果の妥当性について考察を行った. その結果, 異なる Reynolds 数を用いても Brink Depth が生じる断面の運動量, 全水圧, 乱れ強さを総和した無次元項の差異はなく, 相対距離 L/hc が Reynolds 数によって変化することに矛盾がないことがわかった.

参考文献

- 1) H. Rouse, Discussion of "Energy Loss at The Base of A Free Overfall", Transactions, ASCE, Vol. 108, 1943, pp.1383-1387.
- 2) N. Rajaratnam M.ASCE & D. Muralidhar, Characteristics of The Rectangular Free Overfall, Journal of Hydraulic Research, 1968, pp.233-258.
- 3) M.V. Jagannadha Rao, N.S. Lakshmana Rao, K. Seetharamaiah, Brink Depth Method for Estimation in Rectangular Channels, 4th Australian Conference on Hydraulic Fluid Mechanics, 1971, pp. 458-465.
- 4) Seyed Vahid Nabavi, Flow Measurement in Rectangular Channels, Bulletin of Environment, Pharmacology Life and Sciences, Vol. 4, 2015, pp. 457-467.
- 5) Sonali Swetapadma, S.K. Mittal, M.K. Choudhary, Brink Depth at Free Overfall-A Review International Journal of Engineering Research, Vol. 3, No. 10, 2014, pp. 594-601.
- 6) Sonali Swetapadma, S.K. Mittal, M.K. Choudhary, Experimental Analysis of Bring Depth in A Smooth Rectangular Chanel, International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, Vol. 2, 2015, pp. 639-646.
- 7) Cheng, Nian-Sheng, Power-Law Index for Velocity Profiles in Open Channel Flows, Advances in Water Resources, Vol. 30, No. 8, 2007, pp.1775-1784.
- 8) 柗津家久, 開水路乱流の乱れ強度に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 261 号, 1977, pp.67-76.