

開水路側壁におかれた垂直平板背後のはく離領域の水理特性について

Hydraulic Characteristics of Separation Region Formed behind
a Vertical Plate on Side Wall of Open Channels

秋田大学土木工学科 正 員 石 井 千万太郎
北海道大学工学部 正 員 岸 力

1. はじめに

開水路の一方の側壁に垂直平板をおくと、その背後にはく離領域が形成される。その形状は、水路の幾何学的な形状のほかに、流れのいくつかの水理特性量によって変化する。本研究の目的は、室内実験による流れの詳細な測定を行ない、はく離領域の形状を支配する水理特性量を見出し、それらの関係を定量的に把握することにある。また、著者の一人が提案するモデル¹⁾によってはく離領域の形状の変化を説明するために、モデルに与えるべきパラメーターと流れの水理特性量との関係について検討を行なっている。本研究の流れは、フルード数が小さく、水深変化が比較的小さい常流遷移の流れである。

2. 従来の研究

本研究の対象とする流れは、Narayanan & Reynolds²⁾ (1968)が、「定常な流れが境界の急激な不連続部ではく離し、その下流に reattach する流れ」として分類した流れのグループ (leaf gate を過ぎる流れ、断面急拡部の流れ、水門流出部の潜り跳水などが含まれる。) に属する。Narayanan & Reynoldsは、このグループに属する個々の流れは、主流の外部境界の形状、自由水面の有無など異なっているが、エネルギー的に外部の流れによって閉じこめられているはく離領域内の流れが似かよっているとし、境界の不連続部の直下流のはく離領域の平均的性状として次のように述べている。

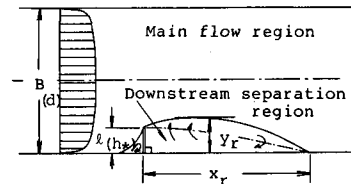


Fig. 1. Schematic diagram of flow configuration

- (1) はく離領域と主流の境界を示す境界流線はほぼ楕円形で、はく離領域の長さ x_r は、その高さ y_r の約6倍である。
- (2) はく離領域の上流端の境界の不連続部近くにはく離領域のほぼ1/3にわたって一様の圧力をもつ領域が存在する。
- (3) 最大の乱れの強度は、はく離点から拡がるせん断層内で発生し、reattachment point 付近では、大きな roller が視認できる。

さらに、Narayanan & Reynolds (1972)³⁾は、自由表面を持たない流れの垂直平板下流のはく離領域の長さ x_r について、それまでに得られたデータをまとめ、はく離領域の長さ x_r に影響を及ぼす流れの水理特性量について以下のように述べている。

- (1) はく離領域の長さ x_r と平板の高さ h_* との比は、平板の高さ h_* と流れの深さ d の比の増加に伴ない減少する。
- (2) 乱れの強度の増加は、はく離領域の長さ x_r を減少させる効果がある。
- (3) 平板前面の乱流境界層の厚さ δ の増加は、はく離領域の長さ x_r を減少させる。

ついで、Paramod, Rajendra & Manharan (1980)⁴⁾は、上述の(1)の x_r/h_* と h_*/d の関係についてNarayanan & Reynoldsが整理したものに、 $h_*/d < 0.2$ の比較的断面の深さが大きい場合の実験データを加え、Fig.2を得ている。そして、 x_r/h と h/d の定量的な関係として、図中の実線および破線で示される関係を提示してい

る。

以上の研究に対し、本研究の対象とする流れは、自由表面をもつ開水路流れであり、さらに平板による境界の急変部でも射流の流れを生じない常流遷移の流れである。この種の流れは単一非越流型直角水制の問題として研究されており、水制下流のはく離領域の形状について、次のような結果が得られている。吉川らの研究(1955)⁵⁾、秋草らの研究(1960)⁶⁾では、水路幅 B に比し水制長 ℓ がかなり短い $\ell/B=0.025\sim0.075$ の範囲の実験を行ない、はく離領域の相対長 x_r/ℓ が10～20の値を取り、平均的な値として14.5をとっている。また、フルード数が0.03～0.16の範囲内ではフルード

数によるはく離領域の形状が見られないと報告している。そして、その実験の範囲外の流れに対しては、フルード数と ℓ/B の増加により、断面縮小による水位低下および平板先端の流れの彎曲によるはく離領域内の水位低下量が大きくなり、境界流線がさらに平板側々壁に寄ると推測している。一方、椿の研究(1959)⁷⁾では、 x_r/ℓ については、常流遷移の場合、8から16.5の範囲にあり、水制下流等流水深と水制長の比 h_0/ℓ との相関が見られ、 $h_0/\ell \rightarrow 0$ に対し、 $h_0/\ell \rightarrow 17$ となるとしている。また、細井らの研究では、 $B/\ell=2.8$ と4.7に対して、それぞれ $x_r/\ell=10.5, 13.5$ を得ている。そして、 B/ℓ の各ケースについて、フルード数0.159と0.364で実験を行ない、フルード数によるはく離領域の形状の変化が見られない結果を得ている。

3. 実 験

2. の既往の研究成果から推測される、開水路流れを対象とした垂直平板下流のはく離領域の形状に関係する主な水理特性量についてまとめると、

- (1) 一般に開水路流れにおいてはフルード数による流れの変化が予測されるが、水面の変化が比較的小さい常流遷移の場合、フルード数によるはく離領域の形状の変化は見られない。
- (2) はく離領域の相対長 x_r/ℓ は、 ℓ/B の増加に伴ない減少する。
- (3) 側壁近くの非一様流部の厚さの増加は、はく離領域の長さ x_r を減少させる。
- (4) はく離領域の相対長 x_r/ℓ は、水深と平板長の比 h/ℓ の増加により減少する。
- (5) 乱れ強度の増加は、はく離領域の長さ x_r を減少させる。

となるのであろう。本研究で行なわれた実験は、上述のすでに得られている知見を検証することと、さきに著者の一人によって提案されている解析モデル¹⁾により、これら実際の流れの現象を定量的に説明することが可能であるかどうかを検討をするためのデータを得ることを目的として行なわれた。そして、従来の研究成果は、平板設置後の流れの水路横断方向の流速分布形が、水路中央部に一様流部をもち、左右対称である場合に対するものであると推測されるが、実際の開水路では特別に整流しない限り、水路全体で片寄った非一様な流速分布であることが多い。この流速分布の非一様性および非対称の影響がどの程度であるか実験によって確かめている。

3・1 実験装置

実験用開水路は有効水路長8 m、幅39.6 cm、高さ49.3 cmの循環式可変こう配水路である。水路の両側壁はガラスであるが、水路幅の縮小には木製の板を用いている。垂直平板は厚さ5 mmの亚克力板を用いており、先端部は直角形状とした。平板の長さは所定の ℓ/B 比が得られるように数種のものを用意した。流速分布の調製は水路の上流部で翼形の整流板を用いて行なわれている。そして、流れの場は流速と水深、流向などの

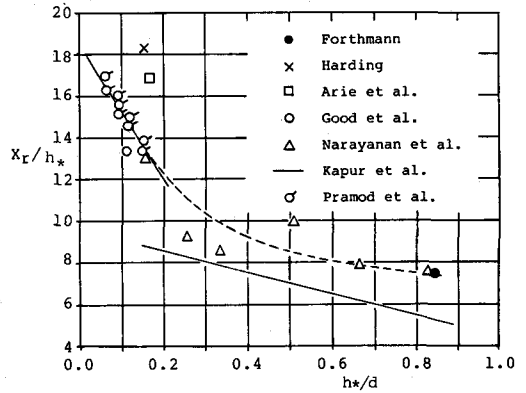


Fig. 2. Relative length of separation region versus relative height of plate

項目について測定が行なわれている。流速測定は超小型正逆プロペラ式流速計（篠塚製作所製、プロペラ径 $\phi = 3 \text{ mm}$ ）が用いられ、時間的に移動する流速の値が正または負の一方だけが観測される点では、カウンターで所定の時間・パルス数を読みとり、流速計方程式により時間平均流速に換算した。これに対し、平板背後のはく離領域内で正負両方にまたがる速度変動を示す点では、出力はアナログ出力とし、デジタルデータ記録装置（ケネック製）によりサンプリング間隔 1 sec で所定の時間サンプリングを行った。そして、その出力を正と負に別けて平均値を計算し、正と負のそれぞれの換算式により流速に換算し、その点の時間平均流速は、この正と負の流速をそれぞれの観測回数による重みをつけて平均して計算された。流速の測定時間は $30 \sim 120 \text{ sec}$ である。

3・2 流速分布と境界流線

流速分布は、平板の上下流に水路方向に直角にとられた横断面で水路方向の流速 u の分布が測定された。本研究の流れは水深方向（ x 方向）と水路横断方向（ y 方向）の二次元流れとして取扱われているので、流速 u は水深方向（ z 方向）で平均されたものである。水深方向の平均流速は三点法を用いて測定された。平板下流のはく離領域の形状を示す境界流線は、横断面毎の流速分布と水深分布から、次式を用いて η_1 または η_2 を計算し、横断面毎の η_1 または η_2 の点を連ねることによって得られる。

$$\int_0^{\eta_1} u h \, dy_1 = 0 \quad \text{or} \quad \int_0^{\eta_2} u h \, dy_2 = Q_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、式中の記号は Fig. 3 に説明されている。

しかしながら、境界流線をこの方法によって求めるにはかなりの測定を必要とするため、簡便法として染料の投入によって主流部の流れとはく離領域との色分けをし、目視によって境界流線を求める方法を併用した。この方法ではく離領域の下流部における大きな乱れの存在により、その形状が不正確にならざるを得ない。

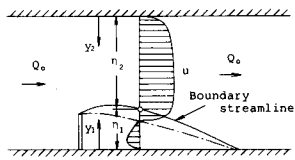


Fig. 3. Definition sketch

reattachment point については、水路側壁に沿って側壁に最も近い点（ $y_1 = 0.5 \text{ cm}$ ）の流速分布を求め、その決定に正確を期している。Fig. 4 には流速分布の例と 2 つの方法によって求められた境界流線が示されている。図に示されているように、一般的に流速分布から求められる境界流線は、染料の投入によって求められる境界流線より、はく離領域の下流部で振り出しが大きい傾向が見られるものの、ほぼ似た形状を得ることができた。

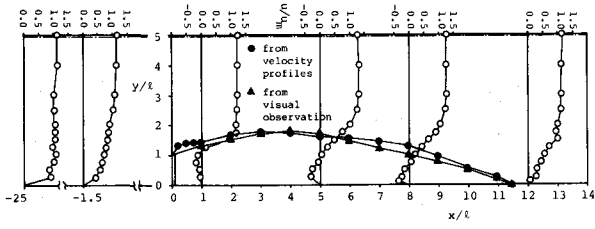


Fig. 4. Velocity profiles and boundary streamlines

3・3 実験結果

前述されている実験の目的にしたがい、いくつかのケースの実験が行なわれた。以下に、はく離領域の形状に影響を与えらると思われるいくつかの水理特性について検討し、次のような結果を得ている。

(a) フルード数の影響

Table 1 の case 1 ~ 4 の実験は、フルード数によるはく離領域の形状変化を調べる目的で行なわれた。Fig. 5 は平板設置前の水深 4 cm の等流状態での平板設置予定位置断面の流速分布である。これらの流れ $l = 4 \text{ cm}$ の平板を設置して、流速測定より得られた境界流線が Fig. 6 に示されている。この結果をみると、

case1は例外として、case 2～4の境界流線はほぼ一致し、フルード数は境界流線の形状にほとんど影響を及ぼさないと考えるであろう。

case	Q (l/s)	B (cm)	h (cm)	T ($^{\circ}C$)	u_m (cm/s)	Fr [$u_m/\sqrt{gh}$]	Re [$u_m h/\nu$]
1	1.251	39.6	4.00	20	7.9	0.126	3.13×10^3
2	2.576	39.6	4.00	15	16.3	0.260	5.62×10^3
3	3.672	39.6	4.00	20	23.2	0.370	9.18×10^3
4	4.982	39.6	4.00	20	31.4	0.502	12.46×10^3

(b) l/B の影響

Table 1に示されている case

2の平板設置前の流れで、他の水

理特性量を変化させずに l/B を変化させるために、 $l = 4\text{ cm}$ の一定長とし、木製の隔壁を用いて、水路の上流から流れを分流させて水路幅Bを変化させた。Fig. 7は l/B の変化によるはく離領域の形状の変化を示しているが、 l/B の増加により明らかにはく離領域が小さくなっている。また、はく離領域の形状の特徴として、境界流線の reattach 角が l/B の変化によらず約 15° の一定値と見ることができる。

(c) 非一様流部の流速分布の影響

前述されているように、自由表面を持たない流れでは、壁面近くの非一様流部は乱流境界層であり、その厚さ δ によって流速分布が定まることから、非一様流部の影響を表わす特性量を δ/l とすることができた。しかしながら、本研究の自由表面を持つ流れでは、たとえ非一様流部の厚さ δ が同じであっても、水路床と側壁の粗度の組合せや水深が異なることにより、その流速分布形が異なるため、本実験の Fig. 5で示されるような左右対称ではあるが水路全幅で非一様な流速分布形をもつ場合には、 δ によって非一様流部の特性を表わすことができない。そこで δ の代りに排除厚 δ_0 または運動量厚 θ を用いることが考えられるが、ここでは非一様流部の流速分布の特性を表わす特性量を δ_0 とし、 δ_0 の定義については別途考慮するものとする。これらのことから、非一様流部の流速分布の影響を検討するための実験として、Table 1の case 2の流れに対して、 l を変化させることにより δ_0/l を変化させ、 l/B を一定に保つために隔壁を移動させて流れを分流した。Fig. 8に δ_0/l の変化によるはく離領域の形状の変化を示している。図によると、 δ_0/l の増加によってはく離領域の上流部の形状はそれほど変化せず、下流部は δ_0/l の増加に伴ない、reattach 角が増加する形ではく離領域の相対長 x_r/l が減少している。

(d) 非対称流速分布の影響

これまでの実験で、平板下流のはく離領域の形状が求められているのは、平板設置前の平板位置断面の流速分布が水路中央部に一様流部、側壁近くに非一様流部をもつ流速分布か、あるいは Fig. 5 のように、一様流部を持たないが左右対称に近い分布形である。しかしながら、一般の開水路では特別に整流しない限り、流速分布は左右どちらかに片寄った非対称な分布形であるこ

Table 1. Experimental conditons

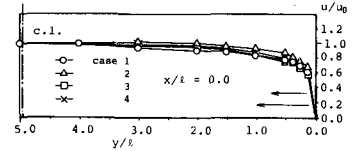


Fig. 5. Velocity profiles at section of $x/l = 0$

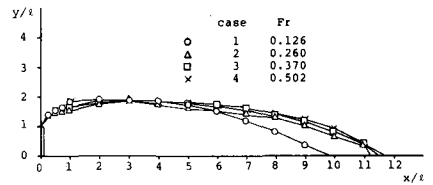


Fig. 6. Effect of Froude number on configuration of separation region

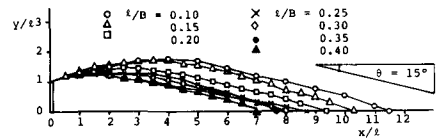


Fig. 7. Effect of l/B on configuration of separation region

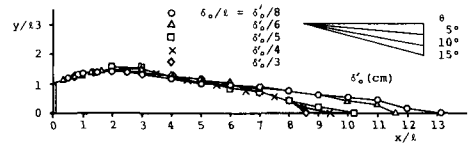


Fig. 8. Effect of δ_0/l on configuration of separation region

ことが多い。この流速分布の非対称性の影響を検討するため、Table 1 の case2 の対称流速分布の流れを、上流の整流板により非対称な流速分布に調製して case5 の流れとし、平板設置後、その下流のはく離領域の形状を実験により求めた。case 2 と case 5 の平板設置前の平板位置断面の流速分布と、平板設置後のはく離領域の形状を、それぞれ比較のため Fig. 9 に示している。

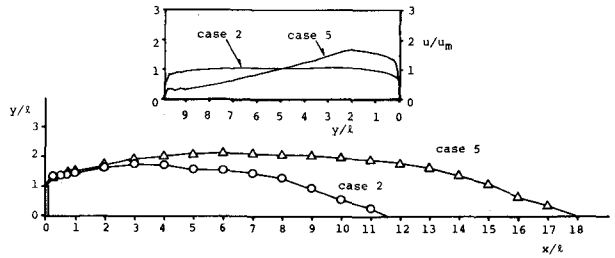


Fig. 9. Configurations of separation region of case 2 and 5

case 5 の流れは流れの流心が平板側々壁側に寄った流れで、そのはく離領域の相対長 x_r/l は case2 の対称流速分布の流れに対するものよりはるかに長く、case 2 の 11.5 に対し 18 の値をとり、流速分布の非対称性の影響の大きさを示している。

4. モデルの適用⁹⁾

ここでは、著者の一人が提案した Fig.10 のモデルによって上述の現象を説明するため、モデルのパラメーターと流れの水理特性量との関係づけが試みられている。モデルのパラメーターは l/B 、 θ_a 、 θ_b 、 λ 、 k の 5 個である。このうちの 1 個は解析から他のパラメーターから計算される。そこで $\lambda \rightarrow \infty$ に対する石原・志方のモデル⁹⁾では、 $\theta_b \rightarrow 0$ となり、 k が l/B と θ_a から決定されることから、流速係数 k は他の 4 個のパラメーターから決定されるものとする。また B/l は水路の幾何学的条件から決まってくるので、実際に任意にとり得るパラメーターは θ_a 、 θ_b 、 λ となる。さらに θ_a については染料の投入による平板先端の流向測定から $\theta_a = 55 \sim 60^\circ$ の値をとるが、 $\theta_a = 60^\circ$ の一定値と置くことができるものとする。以上から、 θ_b と λ を l/B を含む流れの水理特性量から決定されるパラメーターとする。

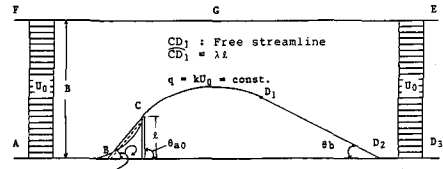


Fig. 10. Physical plane of model

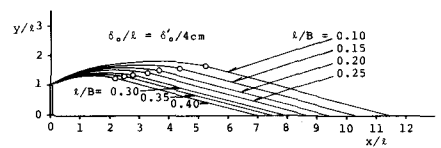


Fig. 11. Calculated boundary streamlines ; $\delta_0/l = \delta'_0/4 \text{ cm}$

3・3 の実験結果から、平板設置前の流速分布が左右対称な流れに対しては、平板設置後のはく離領域の形状を支配する水理特性量は l/B と δ_0/l と考えることができるであろう。そこで、まず l/B と δ_0/l によるはく離領域の形状の変化の本モデルによる説明を試みる。 l/B の変化に対し、Fig. 7 から $\theta_b = 15^\circ = \text{const.}$ とおくことができ、はく離領域の変化を δ の変化によるものと見ることができる。Fig. 11 は、 $\theta_b = 15^\circ$ とし、 l/B のそれぞれの値に対し、実測の x_r/l とモデルから得られる x_r/l の値が一致するように λ の値を選び、モデルの境界流線を計算したものである。Fig.12 はそれぞれの l/B に対する λ の値をプロットしたものである。Fig.14 の計算境界流線と Fig. 7 の実測境界は良好な対応が見られ、Fig.12 の λ と l/B との関係が妥当なものであるを示している。次に δ_0/l に対して、Fig. 8 の実測のはく離領域の形状の変化から、 δ_0/l の増加に対し θ_b が増加し、 δ の値は l/B の値だけによって定まる一定値であると仮定した。

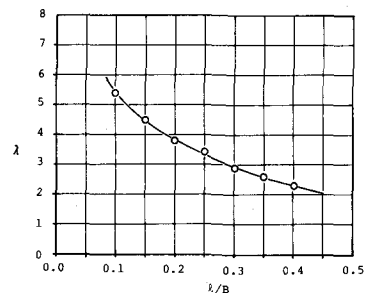


Fig. 12. λ versus relative height l/B

Fig. 13は、 $\ell/B = 0.20$ に対する $\lambda = 3.8$ の値を用い、 δ_0/ℓ のそれぞれの値に対し、 x/ℓ が一致するような θ_b の値を選び、モデルによって境界流線を計算したものである。Fig. 8の実測の境界流線と比較的よく対応していると思われる。そして、それぞれの δ_0/ℓ に対して用いられた θ_b の値がFig. 14にプロットされており、その変化は図中の実線で表わされているひとつの曲線で表わすことができる。

以上は、 ℓ/B と δ_0/ℓ の変化は、それぞれ λ と θ_b だけを変化させるとの仮定に基づいている。その仮定の妥当性を検討するために、水路幅を変えずに平板長 ℓ を変化させ、つまり B/ℓ と δ_0/ℓ を同時に変化させ、はく離領域の形状の変化を実験より求め、上述の仮定に基づいて計算される境界流線との対比を行なった。Fig. 15は $B = 40\text{ cm}$ の一定幅とし、平板 ℓ を変化させたときにはく離領域の変化を示している。Fig. 16は、実験の各ケースの ℓ/B と δ_0/ℓ に対応する λ と θ_b の値を、Fig. 12と14から求め、その値を用いて計算された境界流線を示している。なお、その際、Fig. 14の θ_b と δ_0/ℓ の関係で、実験により求められた範囲外での関係が必要となるが、図中に示されている破線の外そう曲線により求められている。Fig. 15と16を対比すると、はく離領域の上流部の形状と、reattachment pointの位置が少し異なっているが、全体的なはく離領域の変化の傾向は一致している。したがって、Fig. 12と14を用いることにより、本モデルによる実際の現象の説明が可能と思われる。

(謝辞) 本研究を行なうにあたって、有益なる御助言をいただいた秋田大学土木工学科 浅田 宏 教授と、実験に協力していただいた水工学の学生諸君に深甚なる謝意を表します。

参考文献 1) 石井：有限幅の開水路側壁におかれた垂直平板背後のはく離領域の形状について、第25回水理公演会論文集、1981. 2) Narayanan, R., and Reynold, A. J. : "Pressure Fluctuations in Reattaching Flow," ASCE, HY6, 1968. 3) Narayanan, R., and Reynold, A. J. : "Reattaching Flow downstream of Leaf Gate," ASCE, HY5, 1952. 4) Pramod, K. P., Rajendra, P., and Manharan, L. A. : "Flow past Fence in Turbulent Boundary Layer," ASCE, HY1, 1980. 5) 吉川・杉本・芦田：水制に関する研究、土木研究所報告、107号の6(昭和35.10) 7) 椿：水制の水理に関する実験的考察、土木学会第14回年講、(昭和34.6) 8) 細井・杉山・小沢：水制の水理に関する研究(Ⅱ)、土木学会第23回年講、(昭和43) 9) 石原・志方：開水路急縮部の水理学的性状に関する研究、土木学会論文報告集、第135号、(昭和41.4)

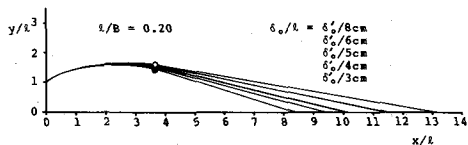


Fig. 13. Calculated boundary stream lines ; $\ell/B = 0.20$

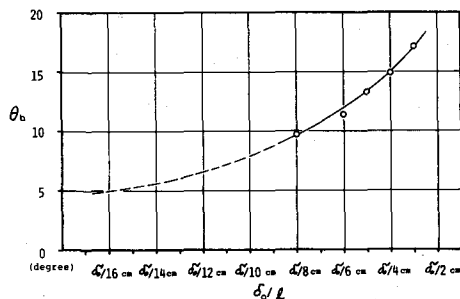


Fig. 14. θ_b versus δ_0/ℓ

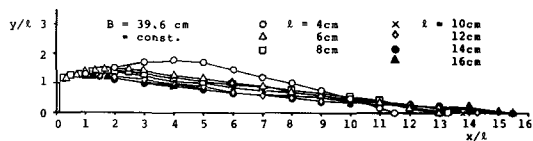


Fig. 15. Variation of configuration of separation region with length of plate ; $B = 39.6\text{ cm}$

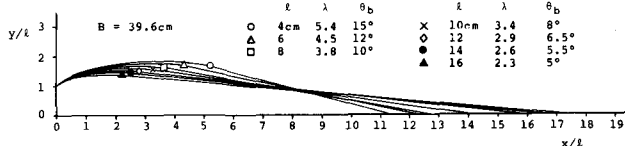


Fig. 16. Calculated boundary streamlines ; $B = 39.6\text{ cm}$