

開水路側壁におかれた平板背後のはく離領域の二・三の特性について

Some Characteristics of Separation Region behind a Flat Plate
on Side Wall of Open Channels

秋田大学土木工学科 正員 石井 千万太郎

秋田大学土木工学科 正員 浅田 宏

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からある角度で平板を突出させると、その背後にはく離領域が形成される。主流域とはく離領域の境界を示す境界流線は、はく離領域の形状を示すとともに、その境界に発達するせん断層の中心軸であり、平板周辺の速度場の決定に重要である。はく離領域の形状は、水路の幾何形状、平板の突出長と突出角、そしていくつかの流れの水理特性量によって変化することが知られている。¹⁾ 本研究では、これらのうち平板の突出角と水路床粗度のはく離領域の形状に及ぼす影響が、室内水路実験により検討されている。また、さらに、著者の一人により提案されているモデルによりそれらの影響によるはく離領域の形状の変化の説明が試みられている。

2. 実験装置および実験

対象とする流れの状況を模式的に示すと、Fig. 1 となる。室内実験に用いられた水路は、有効長 8 m、幅 0.8 m、深さ 0.20 m のアクリル樹脂製の長方形断面水路である。平板設置前の流れは、Fr 数 = 0.17 ($Q = 9.40 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$) で、水深 $h = 0.08 \text{ m}$ の等流状態となるよう、水路こう配と水路下流端の tail gate の高さが調節されている。また、水路横断方向の流速分布が Fig. 1 に示されているように左右対象形となるよう、水路上流端におかれた翼形の整流板により流れが調製された。

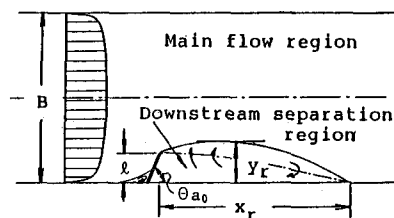


Fig. 1. Definition sketch

平板の突出角 θ_{ao} によるはく離領域の形状の変化は、 θ_{ao} を 30° から 150° まで 15° 刻みに変化させ調べられている。その際、 θ_{ao} によって突出長 l が変化しないよう、 $l = 0.08 \text{ m}$ ($l/B = 0.10$) の一定値となるように平板長 l_o が決められ、また平板先端部の切り口断面は水路方向と平行とされている。はく離領域の形状は、染料の投入により主流部とはく離領域を色分けし、目視によって決定されている。主流部とはく離領域の境界をなす境界流線の reattachment point は、正確を期すため水路側壁に最も近い位置（側壁から約 0.005 m）の側壁に沿って流速分布を超小型正逆プロベラ流速計（篠塚製作所製）により測定し、順流と逆流の境界点として求められている。後述されるように、平板下流のはく離領域の形状は平板前面に形成される coner eddy の影響を受けることが既往の研究結果から知られており、 θ_{ao} の各ケースに対して、平板前面 coner eddy についても染料の注入によりその形状と内部の流れが詳細に観測された。

一方、水路床粗度によるはく離領域の形状の変化は、滑面のアクリル樹脂製床板と、砂礫径 d が $d = (2.5 \sim 5.0) \times 10^{-3} \text{ m}$ と $d = (5.0 \sim 10.0) \times 10^{-3} \text{ m}$ の砂礫をそれぞれ河床に密に敷きならべた 2 つの粗面（前者を粗面 A、後者を粗面 B と呼ぶ。）で実験を行ない検討されている。当初、粗度の増加は流れの乱れの強度の増加を伴うと予想されていたので、熱線流速計（日本科学工業製）による乱れの強度の測定が行なわれている。

3. 実験結果およびその検討

(a) 平板の突出角 θ_{a0} の影響

平板下流のはく離領域の形状は、平板先端部の接近流の方向の影響を受ける。局所的には接近流の方向は、主流方向に対し平板の突出角 θ_{a0} で表わされるが、平板前面には corner eddy が形成されるのでその影響を考慮した接近流の方向としなければならないであろう。したがって、平板の突出角 θ_{a0} による平板下流の形状変化の検討の前に、平板前面の corner eddy の形状と、その内部の流れについての検討を行なう。

平板前面の corner eddy はきわめて三次元的であり、時間的にもかなり変動しているが、Fig. 2 は各突出角 θ_{a0} に対し、水表面と水路側壁とで観測された形状を時間平均的にスケッチしたものである。この図から、水表面の corner eddy の形状は、水深方向の平均の corner eddy の形状に対し大きく観測されることがわかる。また図中の矢印は流れの方向を示しているが、corner eddy 内部の複雑な動きが見られる。平板の突出角 θ_{a0} に対しては、 $\theta_{a0} < 30^\circ$ では corner eddy は形成されず、 $\theta_{a0} \leq 30^\circ$ で現われる corner eddy は θ_{a0} が増すにしたがって大きくなって行く。しかしながら、 $\theta_{a0} \leq 90^\circ$ では corner eddy 全体の大きさは大きくなるが、平板の先端を通る断面 ($x = 0$) の上流の主流部と corner eddy の境界流線の変化はわずかであり、ほぼ同じと見ることができる。この結果は、細井らの実験結果²⁾ とほぼ同じであるが、細井らが $\theta_{a0} > 105^\circ \sim 110^\circ$ で平板上流で側壁からはく離した流線が平板先端に再付着する結果を得ているのに対して、本実験では Fig. 2・(d)、(e) に見られるように平板上に再付着している点が異なっている。

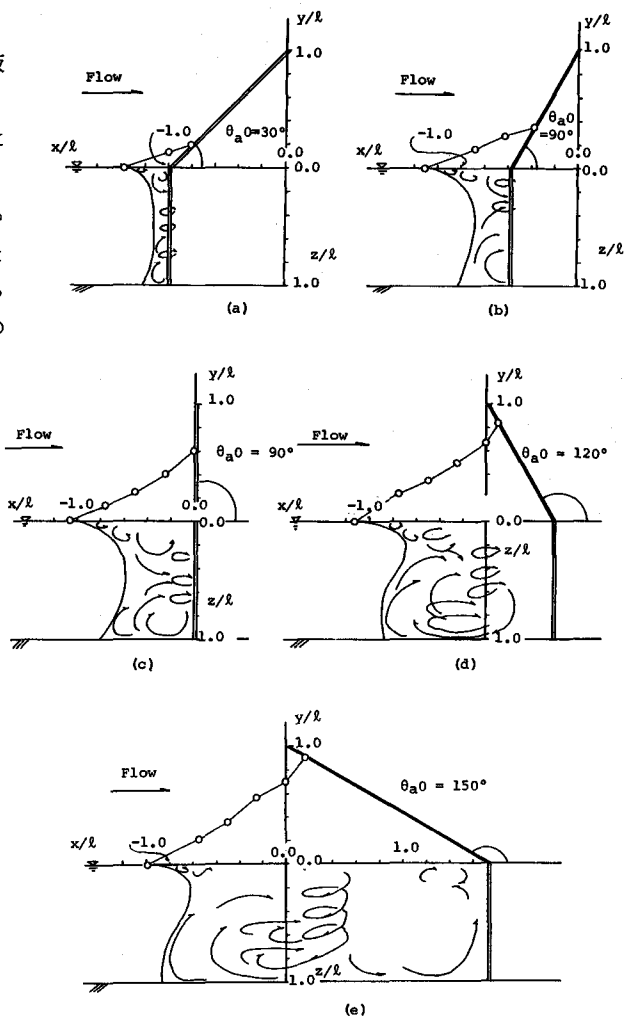


Fig. 2. Corner eddy

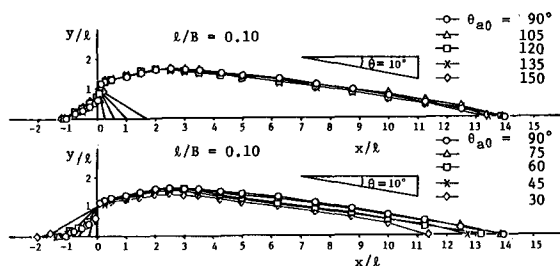


Fig. 3. Variation of shape of separation region with θ_{a0}

Fig.3は平板の突出角 θ_{ao} による平板下流のはく離領域の形状の変化を示している。 $\theta_{ao} < 90^\circ$ の場合、 θ_{ao} の減少に伴い、はく離領域の長さ x_r 、幅 y_r ともに減少している。 $\theta_{ao} \geq 90^\circ$ では θ_{ao} の増加に伴い、 x_r がわずかに減少しているものの形状はほとんど変化しておらず、前述の平板上流のcorner eddyと主流域の境界流線の変化の状況と対応している。また、任意の θ_{ao} に対し、reattach角 θ_b は約 10° の一定値と見ることができる。

(b) 水路床粗度の影響

二次元管路流れでの実験結果から、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ことが知られている。³⁾当初、開水路流れの乱れの強度は水路床粗度によって変え得るものと考え、前述の3種の水路床粗度(滑面、粗面A、粗面B)に対する乱れの強度とはく離領域形状を実験により求め、比較された。水路床粗度を変化させると水路横断方向の流速分布が変化することが予想されたが、Fig.5に示されているように、本実験の範囲内では、ほぼ同一の分布形であり、非一樣流部の流速分布の影響は含まれないと言える。(非一樣流の変化はreattach角 θ_b を変化させる。¹⁾)

Fig.4は水路床粗度によるはく離領域の形状の変化を示しているが、粗度の増加によりはく離領域の長さ x_r がreattach角 θ_b が増加する形で減少し、幅 y_r が若干増大の傾向にある。一方、乱れの強度は平板設置前の等流流れの平板設置断面 $x=0$ の $y=\ell$ と $y=B/2$ (水路中央)とで測定された。Fig.6は測定位置での水深方向の乱れの強度分布を示しているが、粗度によっての乱れの強度の変化がそれ程見られず、かつ系統的变化も示されていない。(U_m = Q/Bh)これらの結果から、開水路流れでは平板背後のはく離領域の形状を支配する水理特性量として、乱れの強度とは別に水路床粗度を取り上げる必要があるであろう。

4. モデルの適用

ここでは、著者の一人によって提案されているFig.7のモデル⁴⁾によって3の実験結果を説明するため、とりあげられた特性量とモデルのパラメーターとの関連づけが試みられている。

(a) 平板の突出角 θ_{ao}

Fig.3の平板の突出角 θ_{ao} による平板下流のはく離領域の形状の変化の状況は、上流部の形状もそれほど変化しておらず、境界流線のreattach角もほぼ一定と見なすことができるので、平板の突出角 θ_{ao} はモデルのパラメーター θ_a だけに関係するとされた。3.の平板前面のcorner eddyに関する実験結果から、平板下流のはく離領域の形状に影響する接近流の方向が、 $\theta_{ao} < 30^\circ$ ではcorener eddyが形成されず平板の方向

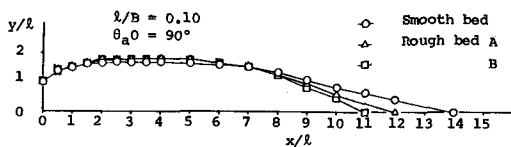


Fig. 4. Variation of shape of separation region with channel bed roughness

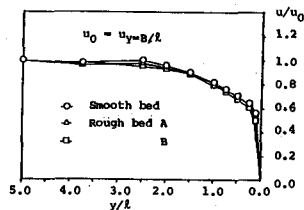


Fig. 5. Velocity profiles at section $x/l = 0$

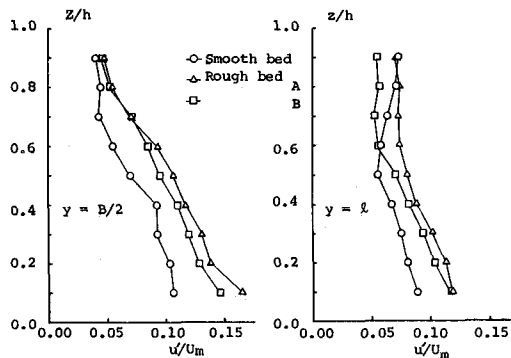


Fig. 6. Distribution of turbulent intensity

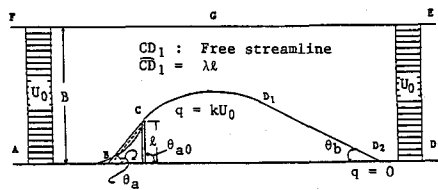


Fig. 7. Analytical model

と一致すること、 $\theta_{a0} \geq 90^\circ$ では平板上流の境界流線がほとんど変化せず一定と見なされることから、Fig.8の θ_a と θ_{a0} の関係が仮定された。Fig.9はFig.8を用いてモデルにより計算された境界流線である。(λおよび θ_b は、それぞれ4.3と 10° の一定値が用いられている。)

Fig.3との対応がきわめて良く、Fig.8の θ_b と θ_{a0} の関係の妥当性が確かめられている。

(b) 水路床粗度

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、 k は他の4個のパラメーターから求められ、 ℓ/B は水路と平板の幾何学的条件と

して決められるので、水路床粗度との関係を検討しなければならないパラメーターは、 θ_a 、 θ_b 、 λ である。さらにこのうち、 θ_a については、水路床粗度による平板上流の corner

eddyの形状変化は無視されるものであることが実験により確かめられているので、除かれる。境界流線のreattach角 θ_b については、

Fig.3で明かなように水路床粗度に関する。

一方、 λ については、解析モデルでは $\lambda \ell$ が $q = k U_0 = \text{const.}$ の速度をもつ自由流線の長さとして求めているので、各水路床粗度に対して境界流線上の速度 q を測定し、流線に沿う分布を求め、 λ の変化の判定材料とした。(Fig.10) Fig.10から各水路床粗度に対する λ の値を確定することはできないが、粗度の増加により λ の値が増加すると判定してもよいであろう。

したがって、水路床粗度による離領域の形状変化を本モデルにより説明するためには、水路床粗度が θ_b と λ の両方に関するものが合理的である。

本研究の滑面水路床実験では、既報の実験¹⁾と同様に、 ℓ/B と δ_0/ℓ (δ_0 : 側壁近くの非一様流部の特性長)を変化させ、離領域の形状変化として、Fig.11、12の結果を得ている。Fig.13の λ と ℓ/B の関係、Fig.14の θ_b と δ_0/ℓ の関係は、これらの関係を用いてモデルにより計算された境界流線が対応するFig.11、12のはく離領域の形状と一致するよう試行錯誤により求められたものである。Fig.13、14には既報の実験に対する関係も示されているが、既報の実験は水路床と側壁はそれぞれ塗装合板とガラスであり、本研究の亚克力樹脂製滑面水路に比し粗度が大いものと考えられている。したがって、Fig.13、14は、それぞれ粗度の変化による λ と ℓ/B の関係と θ_b と δ_0/ℓ の関係の変化を示すものと考えることができる。

Fig.11、12の結果を得ている。Fig.13の λ と ℓ/B の関係、Fig.14の θ_b と δ_0/ℓ の関係は、これらの関係を用いてモデルにより計算された境界流線が対応するFig.11、12のはく離領域の形状と一致するよう試行錯誤により求められたものである。Fig.13、14には既報の実験に対する関係も示されているが、既報の実験は水路床と側壁はそれぞれ塗装合板とガラスであり、本研究の亚克力樹脂製滑面水路に比し粗度が大いものと考えられている。したがって、Fig.13、14は、それぞれ粗度の変化による λ と ℓ/B の関係と θ_b と δ_0/ℓ の関係の変化を示すものと考えることができる。

を用いてモデルにより計算された境界流線が対応するFig.11、12のはく離領域の形状と一致するよう試行錯誤により求められたものである。Fig.13、14には既報の実験に対する関係も示されているが、既報の実験は水路床と側壁はそれぞれ塗装合板とガラスであり、本研究の亚克力樹脂製滑面水路に比し粗度が大いものと考えられている。したがって、Fig.13、14は、それぞれ粗度の変化による λ と ℓ/B の関係と θ_b と δ_0/ℓ の関係の変化を示すものと考えることができる。

5. 結 論

平板の突出角 θ_{a0} による平板前後に形成されるcorner eddyとはく離領域の形状の変化、および水路床粗

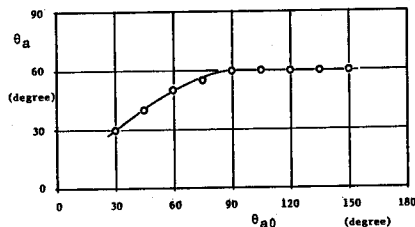


Fig. 8. Relation of model parameter θ_a to θ_{a0}

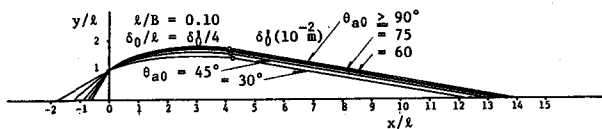


Fig. 9. Calculated boundary streamlines

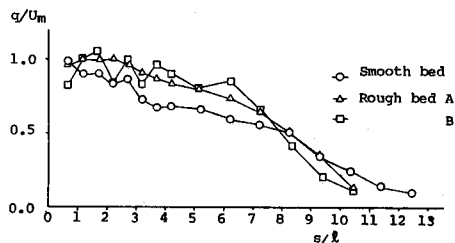


Fig. 10. Velocity on boundary streamline

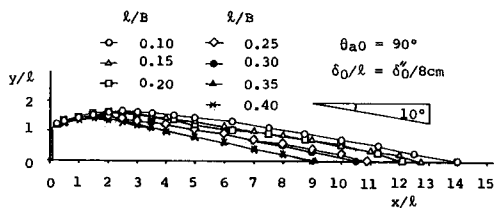


Fig. 11. Variation of shape of separation region with ℓ/B

度によるはく離領域の形状変化が室内実験により検討され、次の結果が得られた。

- (1) $\theta_a < 30^\circ$ では corner eddy は形成されず、平板先端付近の接近流の方向は平板の方向と一致する。 $30^\circ \leq \theta_{a0} \leq 90^\circ$ では θ_{a0} の増加に伴い corner eddy は成長し、接近流はその影響をうけて接近流の方向は平板の突出角より小さくなる。 $\theta_{a0} \leq 90^\circ$ では、corner eddy と主流域の境界流線の形状はほとんど変化せず、接近流の方向は一定と見なすことができる。
 - (2) $\theta_{a0} \leq 90^\circ$ では θ_{a0} の減少に伴いく離領域の大きさが減少する。一方、 $\theta_{a0} \leq 90^\circ$ ではなくく離領域の形状は変化しない。そして、境界流線のreattach角 θ_b は θ_{a0} に関係せず一定である。
 - (3) 水路床粗度の増加は、境界流線のreattach角 θ_b が増大する形ではなくく離領域の長さ x_r を減少させる。
- また、著者の一人が提案しているモデルによる上述の実験結果の説明が試みられたが、モデルのパラメーターと、平板の突出角 θ_{a0} と水路床粗度の関係を次のように仮定することにより可能である。
- (4) パラメーター θ_a は平板の突出角 θ_{a0} だけに関係し、Fig. 3 の関係にある。
 - (5) 水路床粗度は、パラメーター λ と θ_b の両方に関係し、粗度の増加は λ と θ_b の両方を増加させる。

(謝 辞)

本研究を行なうにあたって、実験およびデータ整理に協力していただいた秋田大学土木工学科水工学講座の学生諸君（佐々木良輔・京極敏幸〔昭57〕、和田真・星尚克・石井弘則〔昭58〕）に深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 石井・岸：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、第26回水理講演会文集，1982。
- 2) 細井・杉山・小沢：水制の水理に関する研究、土木学会第23回年講（昭和43）。
- 3) Narayanan, R., and Reynolds, A. J. : "Reattaching Flow downstream of Leaf Gate, " ASCE, HY 6, 1952.
- 4) 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26回水理講演会論文集、1981。

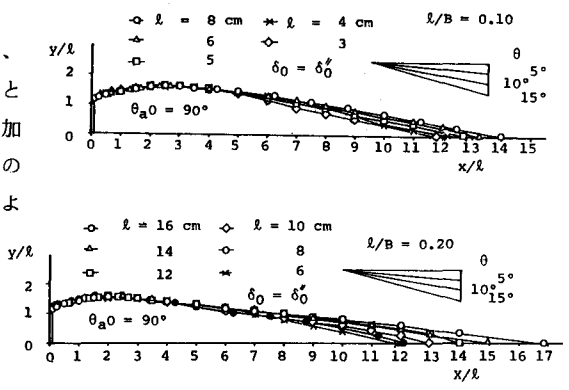


Fig. 12. Variation of shape of separation region with δ_0/l

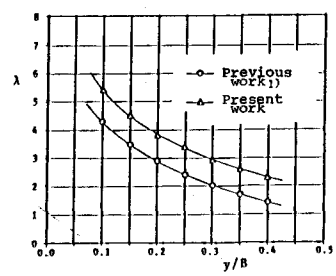


Fig. 13. Relation of model parameter θ_a to θ_{a0}

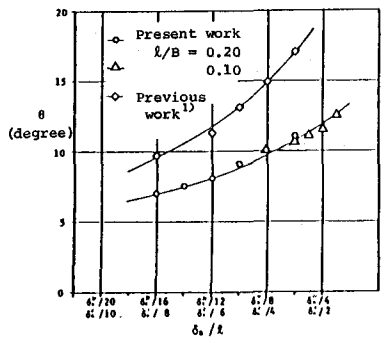


Fig. 14. Relation of model parameter θ_b to δ_0/l