

水制周りの水平剥離渦の構造に関する実験的研究

Experimental Study on Horizontal Separation Eddies in Open-Channel Flow with Groins

陳 飛勇* 池田駿介**

By Fei-Yong CHEN and Syunsuke IKEDA

Shallow open-channel flow with groins is a very important subject to be studied in hydraulics and river engineering as well as in fluid mechanics. In this kind of flow, horizontal separation eddies induced by the groins influence strongly the recirculating flow, the reattachment of separation flow, the transport of momentum and sediment, and so on. It is therefore necessary to understand the nature of the eddies. In this paper, an experimental study was conducted to investigate the properties of the eddies, including the period and phase velocity of vortex, reattachment of separation flow, etc. It is found that the scale of vortices is increased while they move downstream. The phase velocity of eddies is found to be kept to be constant. The characteristics of open channel flow with two-groins is also studied. The mass and momentum exchange velocities, the contour of the root mean-square of water surface fluctuation, etc., have been presented.

Keyword: groin, horizontal separation eddy, mass and momentum exchange, phase-velocity of vortex, shallow open-channel flow

1・はじめに

水制工などの河川構造物が流れや河床に及ぼす影響を評価することは河川計画に重要な課題である。又、近年河川環境面からの要請により、川の中に特殊な構造物（引き込み護岸など）を設置することも多くなっている。これらの河川構造物から発生する剥離渦はその構造が複雑であり、例えば水制背後の流れや水平剥離渦の再付着、あるいは水制群の間の質量と運動量の交換の把握は困難なものとなっている。従来から不透過水制近傍の時間平均流れの実験的研究や数値計算モデルの開発は行われているが、水平剥離渦の発生や伝播などのメカニズムについて研究はあまり行われていない。この問題を解決するために渦の発生周期や伝播速度などを詳細に計測し、これに基づいて、水制近傍の大規模乱流構造を明らかにする必要がある。さらに水制群を含む開水路流れでは、主流域と水制水域間の物質と運動量の交換は重要な課題であり、解明する必要がある。

本研究では、水制周りの水平剥離渦の発生、伝播について調べ、更に水面変動や物質と運動量の輸送などの特性を実験により明らかにする。

2・実験方法

実験には東京工業大学水工学実験室の長さ14m、幅120cmの循環式可変勾配水路を用いた。不透過水制は長さ30cm、高さ30cm、厚さ1cmを持つアクリル板を作成して、水路左側の上流端から約7mの所に設置した。

水制を一個設置した場合の実験条件はTable 1 の Run A-C に示すとおりである。Table 1 において、S.D : 不透過水制 (Spur-Dike) の略称、 t_b : 路床勾配、 h : 断面平均水深、 U : 断面平均流速、 c_f : 河床底面粗度による摩擦損失係数、 u_* : 摩擦速度である。流速の測定では、小型電磁流速計 (KENEK社製: VMT2-200-PS08) を用いて主流方向流速と横方向流速測定を同時に行った。さらに、容量式波高計 (KENEK社製: CHT4-30) を用いて水面変動を測定した。各計測器からの出力は周波数20Hzで512個サンプリングし、A/D変換器を通して取得した。

水制が二個設置された場合では、流入条件を固定し (Table 1 の Run B と同じ)、水制の間隔を30cm～300cmの範囲で変化させ、七つのケースについて上記と同様な測定を行った (Table 1 の Run D1-D7)。

* 学生員 工修 東京工業大学 大学院生

** 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

(〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

Table 1 Experimental condition

Run	A	B	C	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
i_b (10^{-3})	1.01	0.51	0.72	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
h (cm)	4.05	5.20	5.17	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20
U (cm/s)	31.27	17.36	30.89	17.36	17.36	17.36	17.36	17.36	17.36	17.36
c_f (10^{-3})	4.11	8.63	3.79	8.63	8.63	8.63	8.63	8.63	8.63	8.63
u_* (cm/s)	2.01	1.07	1.90	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
Number of S.D.	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
Distance of S.D. (cm)				30	60	100	150	200	250	300

3・水制を一個設置した場合の流れについて

3・1 時間平均流速ベクトル

流れ場全般の特性を把握するために、一つの水平面(底面から2.2cmの高さ)の時間平均流速ベクトルを測定した結果をに**Fig. 1**示す。Schmidt ら¹⁾は、水制周りの流れ場について、主流域、剪断層、逆流域、再付着域の四つの区域を定義している。不透水水制の影響によって水制先端から水路右岸側(流れ方向より)までの領域の水は加速されるので、この区域は主流域となる。水制背後には死水的な領域が形成され、主流域と速度差があるので、不安定な剪断層が生まれる。水制先端から剥離した水流は、一定距離を経て水路の左岸側に再付着する。水制から再付着点までの水制背後の領域では逆流が存在するので、逆流域と呼ばれる。**Fig. 1**中に示すように $x \approx 180\text{cm}$ に逆流域の中心がある。Schmidt らは再付着点が時間的に上・下流へ約水制5倍以上長さの距離で移動していることを指摘した。本実験では再付着点の移動距離は水制長さの6倍($x = 340\text{cm}$ から $x = 520\text{cm}$ まで)であり、その周期は13.5秒程度であった。中川ら²⁾は、開水路河床波クレストから剥離した水流の時間平均再付着点は、Reynolds 数が大きいとき($> 10^4$)流速に依存しないことを見出している。本実験でも、流入条件を変化させても、時間平均再付着点は $x = 420\text{cm}$ 、すなわち水制の14倍の長さ、となり変化しなかった。

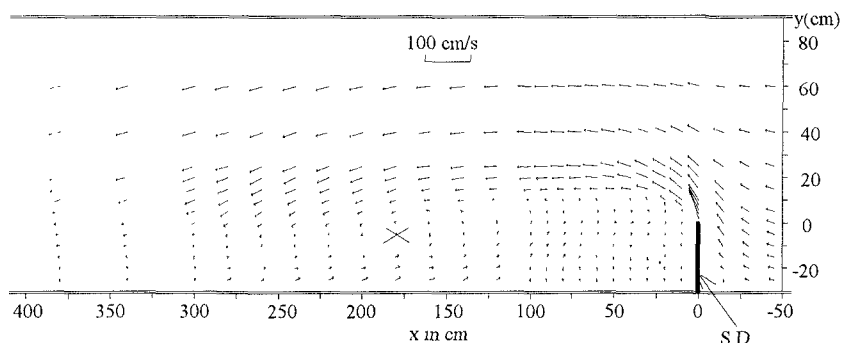


Fig 1 Time-averaged flow field (Run B for open-channel flow with one groin)

3・2 水面変動の性質

池田ら³⁾は、側岸部植生帯を含む開水路流れについて水平組織渦の発生のメカニズムを検討している。植生帯中に水制を設置した場合にはより大きい水面変動を伴いながら水制先端から渦が周期的に放出されることを指摘した。

本研究では、この剥離渦の特性を解明するために、まず水面変動を考察する。同じ横断面で横断方向に位置を変えた2台の波高計による同時計測を行い、そのときの水面変動の時系列(h'/h_{ms} と標準化してある、 h_{ms} :水面変動の平均二乗根、 h' :水面変動である)の例を**Fig. 2**に示す。

この図より、水面変動は低周波で規則正しく、横断方向に同位相であることがわかる。**Fig. 3**は流下方向各断面における水面変動の平均二乗根の横断方向分布を示したものである。水面変動の一番大きい点が渦の中心であると考えられる。剥離流の軌跡の観察から、横断面中の最大水面変動の位置は時間的に変化していることが分かった。

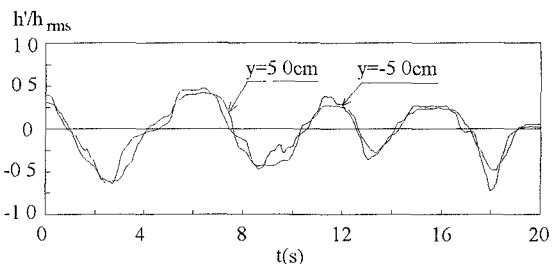
Fig 2 Time series of water-surface fluctuation (Run B, at $x=260\text{cm}$)

Fig. 4には、水制の上・下流各点の時間平均水深と縦断方向の距離の関係を示している。Fig. 4中 $h_r = \bar{h} - \bar{h}$: 相対水深、 $\bar{h}$: ある地点の時間平均水深、 $\bar{h}$: $x = 300\text{cm}$ における時間平均された横断面平均水深である。不透水水制の影響により、平均水深は水制上流では上昇し、水制下流の逆流域では下がっている。同図に示すように、Run Bについて水制の上・下流の最大水深差は5cm程度である。

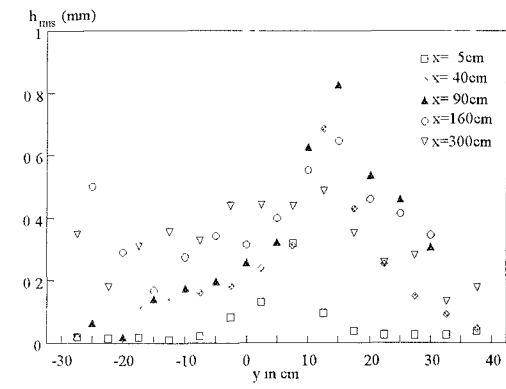


Fig 3 Distribution of root mean-square of water surface fluctuation (Run B).

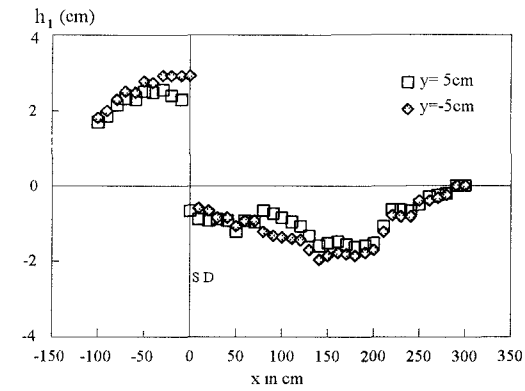


Fig 4 Variation of relative water depth (Run B)

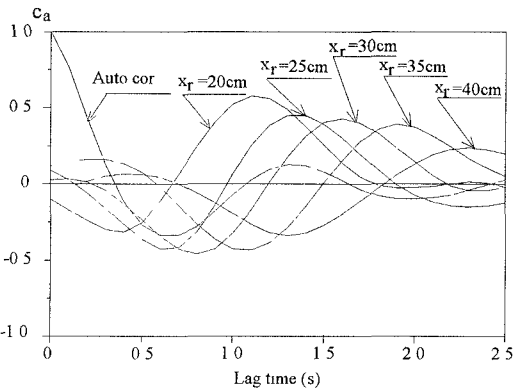


Fig 5 Variation of correlation coefficients of water surface fluctuation (Run B, at $x_0 = 30\text{cm}$).

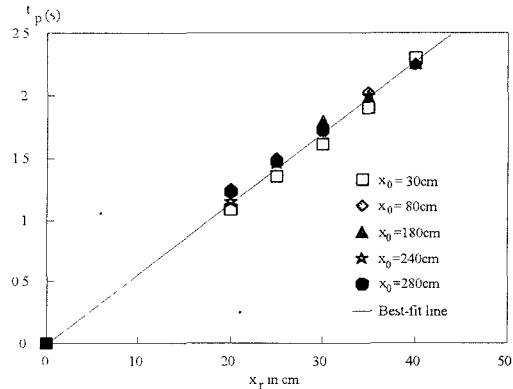


Fig 6 Determination of phase velocity of separation eddies (Run B).

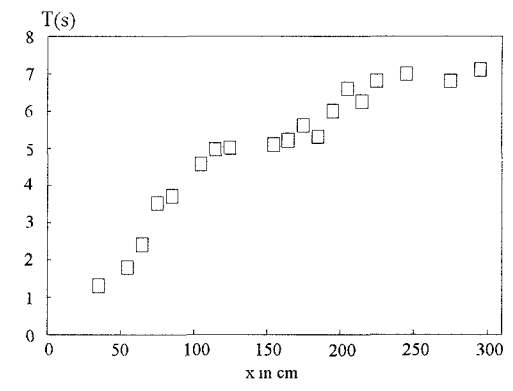


Fig 7 Development of period of separation eddies (Run B).

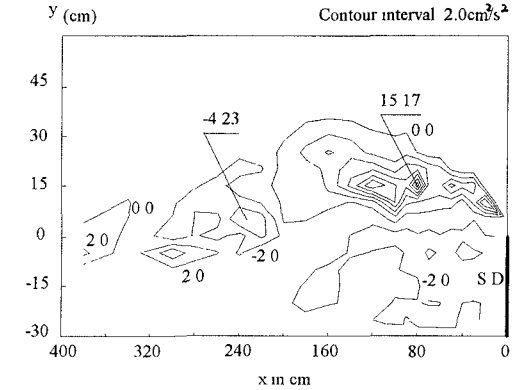


Fig 8 Contour lines of Reynolds Stress (Run B).

3・3 水平剥離渦

水制先端部からは、平均流速と特徴スケールに応じてほぼ一定の周期で水平剥離渦が放出される⁴⁾。この渦の特性を解明するために、まず渦の卓越周期や移流速度などを測定した。渦の移流速度を測定するときには、横断方向の位置は同じにして、縦断方向に6台の波高計を位置を変えてほぼ渦の中心線上に設置して同時に水面変動を計測した。測定位置の縦断距離は、最上流側の波高計の位置(x_0 で示す)より相対距離 x_r で表示する。測定した各地点の水面変動については、上流側 x_0 点の水面変動に対しての相互相関係数(x_0 点では自己相関係数である)をFFT法を用いて求める。Fig. 5はそれに基づいて得られた $x_0 = 30\text{cm}$ の場合の相関係数の計算値を示している。図中の c_r は相関係数である。この図から、測定位置の流れ方向の間隔(x_r)によって、相互相関係数のピークが現れる遅れ時間(t_p 、自己相関係数のピークに対する時刻)を調べ、移流速度($c = x_r / t_p$)を求めた。Fig. 6には、 x_0 を変化させ五つのケースについて測定した x_r と t_p の関係を示している。実験データよりBest-fit線形関数を作成し、水制先端から放出された水平渦の下流への進行速度($c = 17.6\text{cm/s}$)を求めた。これから渦の移流速度は断面平均流速(17.36cm/s)よりわずかに大きく、流下方向に変化しないということがわかった。Fig. 7に、水制から下流への流下距離による渦の周期の変化を示す。この図より渦が水制下流へ進行するとともに周期が段階的に増加することがわかる。この理由は、水制から発生した水平渦は下流方向へ進行するとともに合体してスケールが大きくなって行くためであると考えられる。

3・4 Reynolds応力のコンター図

電磁流速計で測定した水平二次元流速の時系列値から、求められたReynolds応力のコンターをFig. 8に示す。Reynolds応力の大きい箇所は渦中心の軌跡に沿うと思われる。水制背後の水域は、逆流の影響を受け、Reynolds応力が負になっている。 $x = 200\text{cm}$ より下流では、強い逆流があり、渦のスケールも大きいので、応力コンターはぼやけているが、それでもせん断域が存在していることがわかった。

4・水制を二個設置した場合の流れについて

4・1 水制先端を結ぶ境界面の横方向速度分布と水面変動

水制間先端を結ぶ境界面($y=0$)上の各点で速度の水深方向分布を測定した。このとき速度が水深平均速度の大きさを持つ高さは、底面からほぼ $0.4h$ の位置であることを確認した。この高さで測定した境界面横方向の時間平均速度分布をFig. 9に示す。図中 l ：水制長さ、 d ：水制間隔である。同図より上流の水制先端から放出された渦の存在により時間平均な境界面からの流出入は交互に反転することが分かる。水制間に横断方向速度の正負が反転した回数は、水制間隔の増大とともに増加する。間隔 d が小さい場合は($d \leq 100\text{cm}$)、Fig. 9aに示すように横断方向速度の正負が一回変化しただけであるが、 $d = 150\text{cm}, 300\text{cm}$ の場合はそれぞれ2回、3回である。正負の反転回数を支配する原因は渦のスケールであると思われる。この渦スケールは前述のように流下方向に増大するので、水制間隔が増大すればそれに比例して個数が増えて行くという線形関係にはない。

この渦によって水制間の領域へ質量と運動量の流出入が起こり、水面を変動していた。Fig. 10に、水面変動の平均二乗根のコンターを示す。Fig. 10より水制間隔 $d = 60\text{cm}$ のとき h_{ms} の大きい区域が二箇所存在する。その一つは上流($x/d = 0.2$)にスケールの小さい渦があり、もう一つは下流($x/d = 0.8$)へ移動する渦が下流側水制先端に突き当たり、水面変動が大きくなっている。 $d = 200\text{cm}, 300\text{cm}$ の場合は水平剥離渦が水制間の逆流の影響を受け、渦の形ははっきり出なかった。しかしながら、この後者の二つのケース共に、約 $x = 90\text{cm}$ のところに h_{ms} の最大値が見られた。Fig. 8中の同じ位置に、Reynolds応力の最大値が見られる。

Fig. 9aに対応している流れ場の速度ベクトルをFig. 11に示す。この図より、境界面で横断方向速度の正負が一回変化していることに対応して水制間には一個渦がある。

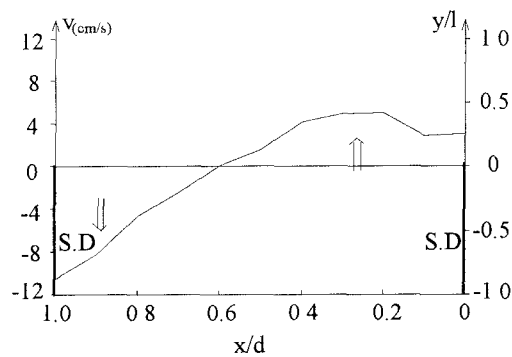
水制間隔を増大させた場合に、上流側水制後背部($x = 15\text{cm}, y = -15\text{cm}$)の場所において測定した水制間隔の変化に伴う水面変動の平均二乗根の変化をFig. 12に示している。同図より水制間隔が $d = 250\text{cm}$ のところにピークが存在することがわかる。

4・2 質量と運動量の交換速度

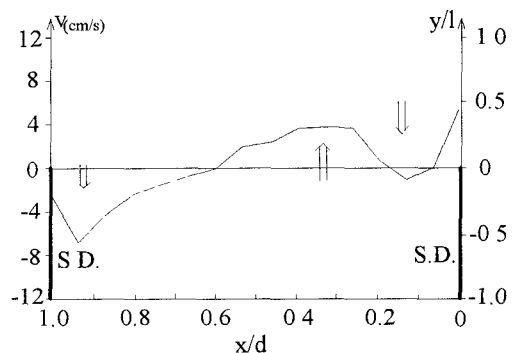
水制先端間の境界面($y=0$)では横断方向流速は正負に変化し、それとともに水制域への質量と運動量の流出入も変化する。水制先端間の境界面で流出する流量は流入する流量と時間平均をとれば質量保存則から等しい。この境界面における水深平均した質量交換の絶対値の総量は、次の式で現れる。

$$\int_0^d |v| dx = -2 \int_- v dx = 2 \int_+ v dx$$

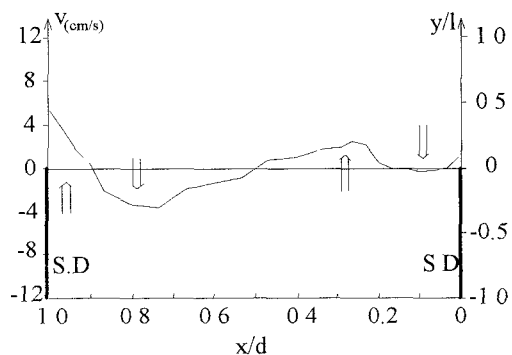
ここで、 v ：境界面上の横断方向の水深平均速度、 $\int_- \int_+$ はそれぞれこの境界面上の横断方向流速 v が正・負の領域で積分することを表している。境界面の運動量交換総量は $\int_0^d \sqrt{u^2 + v^2} |v| dx$ で計算する。木村ら⁵⁾の論



(a) $d=100\text{cm}$

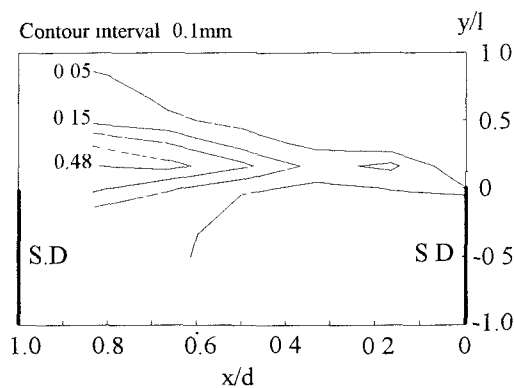


(b) $d=150\text{cm}$

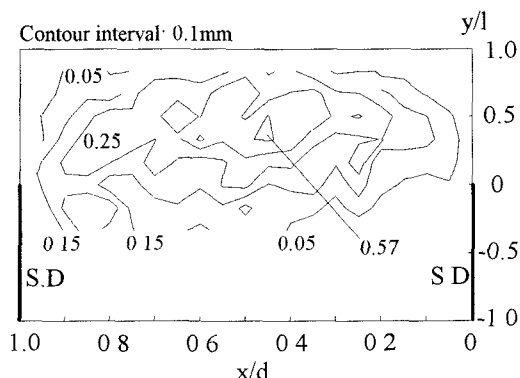


(c) $d=300\text{cm}$

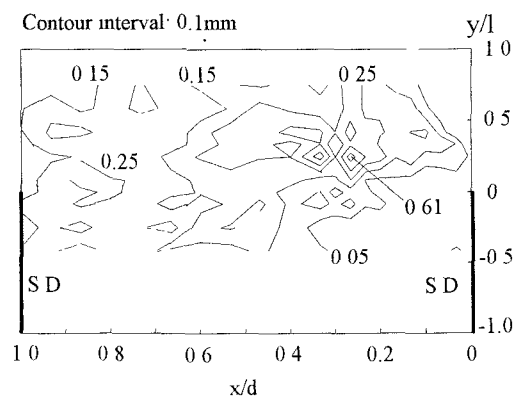
Fig. 9 Lateral velocity distribution at the boundary of main stream and groom region.



(a) $d=60\text{cm}$



(b) $d=200\text{cm}$



(c) $d=300\text{cm}$

Fig. 10 Contour of root mean-square of water surface fluctuation.

文を参考にして水制先端境界面における質量と運動量の交換総量をそれぞれ次のように断面平均流速 U 及び水制間隔 d で無次元化して表す。この無次元した交換総量 k' 、 θ は次のように表され、それぞれ質量と運動量の交換速度と呼ばれる。

$$k' = \frac{1}{Ud} \int_0^d |v| dx ; \quad \theta = \frac{1}{U^2 d} \int_0^d \sqrt{u^2 + v^2} |v| dx$$

ここで u は水制間先端境界面上にある点の流れ方向の水深平均速度である。上式を用いて得た k' 及び θ と水制間隔の関係をそれぞれ Fig. 13、Fig. 14 に示す。同図より水制間隔 d が小さいとき交換速度 k' と θ は d の増大とともに増加する傾向があり、水制間隔 100cm で最大値をとる。 $d \geq 100\text{cm}$ のときでは、 k' と θ はともに減少したが、 $d = 250\text{cm}$ のところには再びサブピークが見られる。この現象を支配する主要要素は、

渦のスケールと水制間隔の比であり、Fig. 9にも示したように渦が水制間隔にうまく整数個存在する場合 ($d = 100\text{cm}$ の場合1個、 $d = 250\text{cm}$ の場合2個)に水面変動が大きくなると考えられる。木村らは水平面の死水域について運動量交換速度 θ は質量交換速度 k' に比例することを指摘したが、本研究では同じ結果は得られなかった。

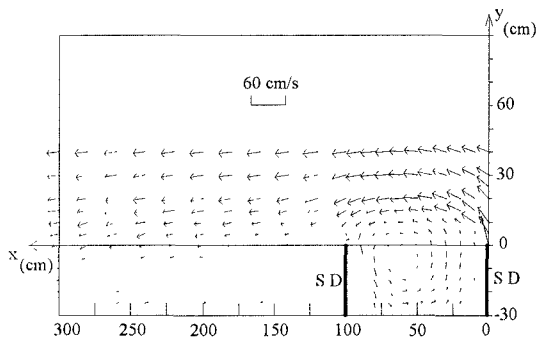


Fig. 11 Time-averaged velocity vector for Run D3.

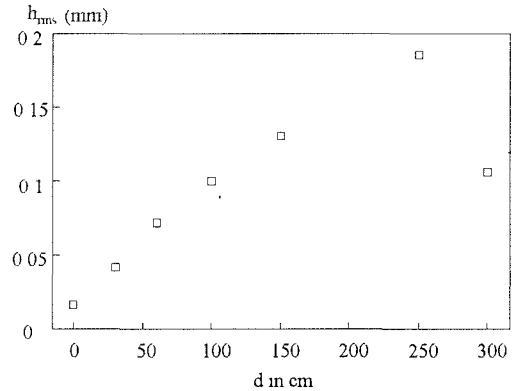


Fig. 12 Root mean-square of water surface fluctuation at a fixed point ($x = 1.5\text{cm}$, $y = -15\text{cm}$)

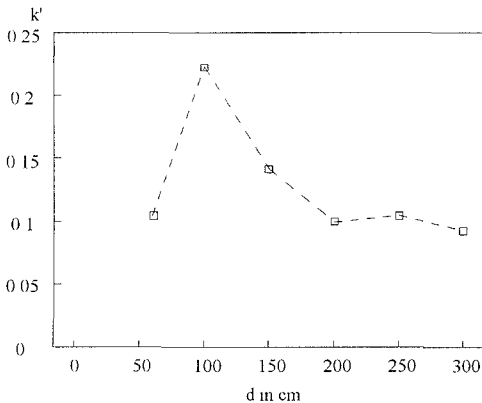


Fig. 13 Relationship of mass-exchange-rate with distance between two groins.

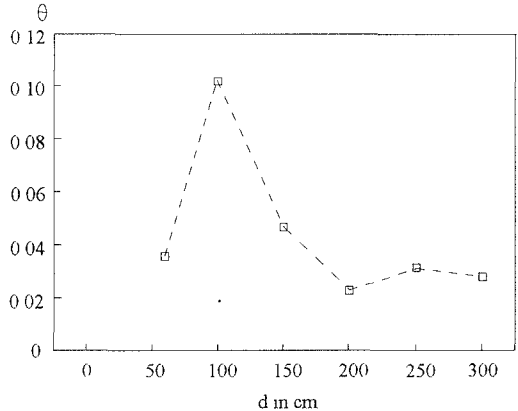


Fig. 14 Relationship of momentum-exchange-rate with distance between two groins

5・結論

不透過水制を一個設置した場合の開水路流れにおける水平剥離渦の発生や伝播などについて実験的に考察した。水平剥離渦が下流へ進行するとき、移流速度は変化しないが、渦のスケール(周期)は恐らく合体によって段階的に大きくなる。水制先端からの剥離流の再付着点の時間平均位置は、上流側の流入条件が変化しても、変化しないことが確認された。

更に、水制を二個設置した場合について水制間の領域と主流間の物質と運動量交換現象と水面変動特性も検討した。Froude数を一定にした本実験では、水制間隔と渦スケールの比が重要なパラメータであり、本実験の範囲では二つのピークが現れることが分かった。

参考文献

- 1) Schmidt, J C, Rubin, D M, and Ikeda, H Flume Simulation of Recirculating Flow and Sedimentation, Water Resources Research, Vol 29, No 8, pp.2925-2939, Aug. 1991
- 2) 中川博次・棚津家久・松本利典・金沢文彦：開水路河床波上の乱流構造と組織渦に関する研究、第33回水理講演会論文集、pp.475-480、Feb 1989
- 3) 池田駿介・太田賢一・長谷川洋：側岸部植生帯が流れ及び粒子態物質の輸送に及ぼす影響、土木学会論文集、No 447/II-19, pp 25-34, May 1992
- 4) 松岡保正：大規模水制群内の水平渦、第39回水理講演会論文集、pp 773-778、Feb 1995.
- 5) 木村一郎・細田尚・村本義雄・安永良：開水路流れにおける死水域内流体振動に及ぼす水理パラメータの効果、第39回水理講演会論文集、pp 779-784、Feb 1995.