

# 堤防小段の機能に関する基礎的研究 Fundamental Study on The Function of Berm of Levee

早稲田大学大学院 学生員 小池 裕之 Hiroyuki KOIKE  
早稲田大学理工学部 学生員 佐藤 岳晴 Takeharu SATO  
早稲田大学理工学部 学生員 松本 健 Takeshi MATSUMOTO  
早稲田大学大学院 学生員 長谷部進一 Shinichi HASEBE  
早稲田大学理工学部 正 員 吉川 秀夫 Hideo KIKKAWA

A convex or concave boundary of the flow cross section causes a three-dimensional flow. Such a three-dimensional flow has an effect on flow structure which is very difficult to deal with. As the first step to study, a flow characteristic of variation due to the shape of cross section and Reynolds number is clarified experimentally. Furthermore, in consideration of its practical application to rivers, the hydraulic characteristic of compound channel with floodplane or berm of levee is studied.

Keywords: berm of levee, compound channel, shear stress

## 1. はじめに

一般に流れの境界のつくる角は、流れの場に突き出した外向きの角（以下凸部）と流れが入り込む内向きの角（以下凹部）とに大別されるが、実際の流れではこの両者が同時に存在することが多く、またその付近の流れは各々が単独に存在する場合よりも複雑になり、本質的には三次元流れとなるため取扱いがたいへん困難になる。しかしながら、この三次元流れに起因する速度及び、乱れの分布、あるいは、壁面せん断力などを適切に見積ることは、防災上大変に重要なことである。

本論文は、このような、凸部と凹部が近接して存在する壁面形状の場合の流れの基本的特徴を明らかにするため、図1のような断面を持つ流れに対して平均流速分布、及び、壁面せん断応力分布などについて実験的に検討を加えたものである。

この流れを考察する際に、実際の河川の流れへの適用についても考慮し、この断面の基本的な特徴を示す高水数（堤防小段）を持った複断面流れについての性質をもあわせて考えてゆく。特に、外国では、あまり見かけられないが、日本では、中小規模河川でよく用いられる堤防小段の機能については、重点をおいて考察することを目的とする。

## 2. 実験概要

開水路と管路の流れの内部構造は、かなり違うことが報告されているが、今回の実験では、二次流れの影響が重要であると考えられるため、まず実験の第一段階として、比較的、測定値の精度が得られやすい風洞を用いることにした。実験に用いた風洞は、全長約11mであり図1のように30cm×50cmの長方形断面の中に、アクリル製の板を用いて、低水路底面の長さ及び、高水数（小段）の長さが調節できるような複断面形を作製した。その際、断面の対称性は、z軸方向に10cmずつの4つの断面をとり、ピトー管と差圧計を用い主流方向の流速を測定しほぼ対称になることを確かめた。測定は上流端からx=7.5m

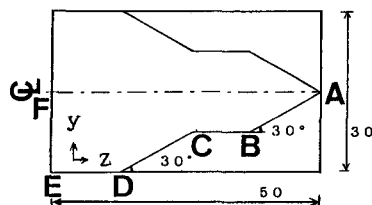


図1. 風洞断面図

表1. 実験条件

| Run | $U_{max}$<br>(m/s) | $U_{mean}$<br>(m/s) | $U_{rms}$<br>(cm/s) | Re数<br>$\times 10^4$ | BC(BC/DE)  | 断面積<br>(cm <sup>2</sup> ) | 径深<br>(cm) |
|-----|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|------------|---------------------------|------------|
| 1   | 4.62               | 3.70                | 10.43               | 2.11                 | 10 (0.769) | 465.0                     | 6.84       |
| 2   | 9.74               | 7.86                | 28.63               | 4.96                 | 10 (0.769) | 465.0                     | 6.84       |
| 3   | 15.27              |                     | 42.98               | 6.96                 | 10 (0.769) | 465.0                     | 6.84       |
| 4   | 19.49              |                     | 62.73               | 8.89                 | 10 (0.769) | 465.0                     | 6.84       |
| 5   | 26.03              | 21.90               | 83.72               | 11.87                | 10 (0.769) | 465.0                     | 6.84       |
| 6   | 10.40              | 8.81                | 31.92               | 4.74                 | 0 (0.000)  | 540.0                     | 7.94       |
| 7   | 9.94               | 8.27                | 31.17               | 4.53                 | 5 (0.278)  | 502.5                     | 7.39       |

但し、Re数= $U_{max} \cdot \rho / \eta$

の位置において行ない、流れに垂直な断面について十分に境界層が発達したことを確認した上で、二次流及び平均流速を計測した。

実験条件は、表1に示す通りですが、測定方法は、流速成分及び乱れ成分について、x型ホットワイヤー流速計を用い、壁面せん断応力には、プレストンの手法を用いることにした。

### 3. 実験結果とその考察

#### 3. 1. レイノルズ数の変化による特性

BCの長さを10 cmとした断面で、最大流速を5 m/s ( $Re = 21100$ ) から5 m/sきざみで25 m/s ( $Re = 118700$ ) までの5通りに変化させて行なった実験について考察する。

##### (1). 二次流構造

図2に断面内の二次流ベクトル図を示す。

この図でまず特徴的なことは、複断面特有な上昇流がC点において鉛直方向に存在し、この効果によりCD斜面上に上昇流が誘起されて、低水路では、一つの渦が形成される。その際、D点へのコーナー流がC点からの上昇流が強いために消失してしまう。また、 $Re$ 数の変化によっては、その構造はきわだった変化がないことがわかる。

##### (2). 主流速分布

図3に最大流速で無次元化した主流速の等値線図をあらわす。また、図4に中心線上及び、AB中程の横断分布図を示した。図3においては、C点で減速がおり、等値線図が上に凸となる等の二次流に対応するような全体的な特徴は変化しないが図4の横断分布図を見ると、 $Re$ 数が変化してもDE上の最大流速の位置はほぼ一致しているのに比べ、C点付近の流速の極小値の位置及びBC上の極大値の位置がA側へ移り、CDEF内の影響がABC内へと広がって行くのがわかる。従って、BC上の最大流速の値からみて、C点付近で働くいわゆる見かけのせん断力は、 $Re$ 数が大きいほど小さくなり、その結果円滑な混合が行なわれるために複断面効果が弱まり、流れ易くなる。

##### (3). レイノルズ応力

図5に最大流速で無次元化したレイノルズ応力を示した。

図5. 1の $-\rho \overline{u'v'}$ においては、どのケースにおいてもC点で正の極大値をとっているが、その極大値は、 $Re$ 数が大きくなるほど小さくなる。図5. 2の $-\rho \overline{u'w'}$ は、BC上で負の領域が現われ、C点付近で負の極大値をとり、CD上のC点側で正の極大値をとる。このCD上のD点付近で、最大流速が5 m/s ( $Re = 21100$ ) の時に、もうひとつの極大値をとる。また、図5. 3で示した主流方向の乱れエネルギーの大きさは平均流速の等値線に対応してあまり顕著ではないがC点付近で極大値をとっている。以上から、小段

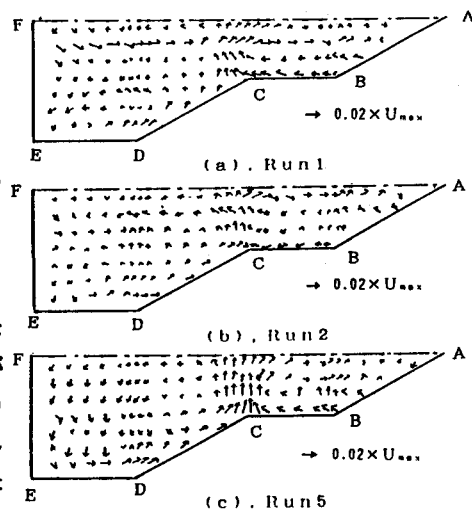


図2. 二次流ベクトル図

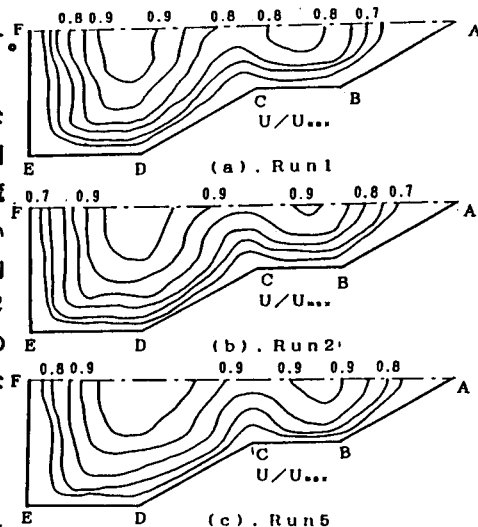


図3. 主流速分布

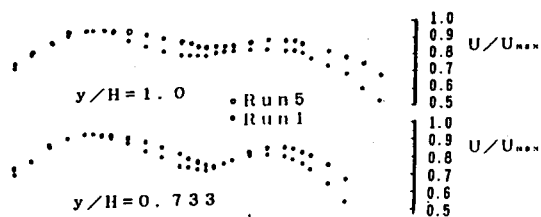


図4. 主流速の横断分布図

BCの存在によって、接合部付近において生じた乱れによって流れ場に大きな影響を及ぼしていると考えられる。

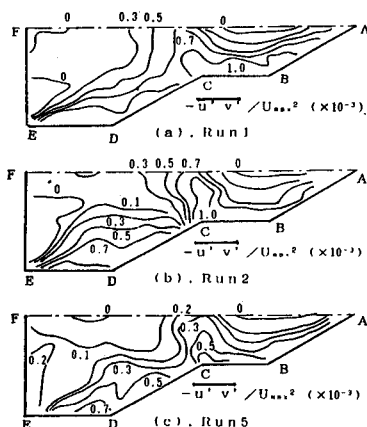


図5・1. Reynolds応力分布  
( $-u'v'$ )

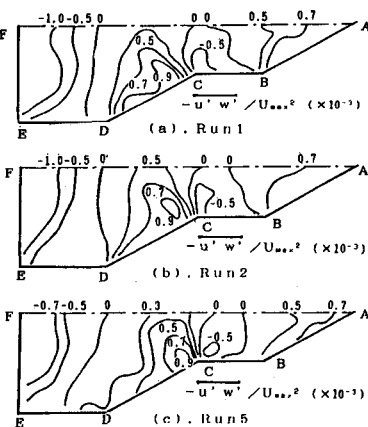


図5・2. Reynolds応力分布  
( $-u'w'$ )

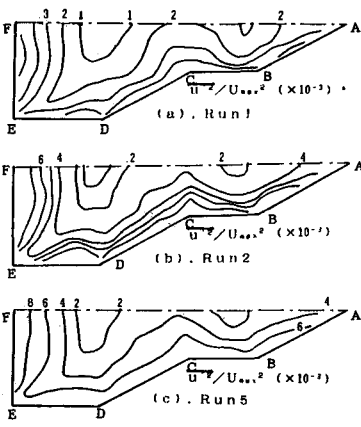


図5・3. Reynolds応力分布  
( $u'^2$ )

#### (4). せん断力分布

図6は、各々の壁面についての平均せん断力で無次元化されたせん断力分布図である。

どのケースについても相対的にC点でせん断力が小さくなるのが特徴的である。また、特にRe数の変化によってプロットがばらつくのは、ABとCD上である。AB上では、Re数が大きくなるにつれて、極大値と極小値の差が減少し、一様な分布となって行く。また、CD上では、Re数が大きくなるにつれて、極大値の位置がC点へと移って行く。これらは、今まで述べてきたように、CDEF内の影響がABC内へ入り込んで行くためと考えられる。

#### 3. 2. 断面形状特性

最大流速を10m/s (Re数=49600) に一定とさせたうえで、BC/DEを0, 0.278, 0.769の3パターンに変化させて、断面形状の効果について考察する。その際、(b)のBC/DE=0.769は、3.1で述べた通りであり、(d)のBC/DE=0は、台形断面であるため、特に、(e)のBC/DE=0.278の場合について重点をおき考察する。

#### (1). 二次流構造

図7に二次流ベクトル図を示す。

(e)のケースにおいては複断面特有の鉛直上昇流が、(b)の場合に比べてC点よりも若干D点側から発生し、そこから、CD上の中程に下降して行く一つの渦の存在と、CD上の中程

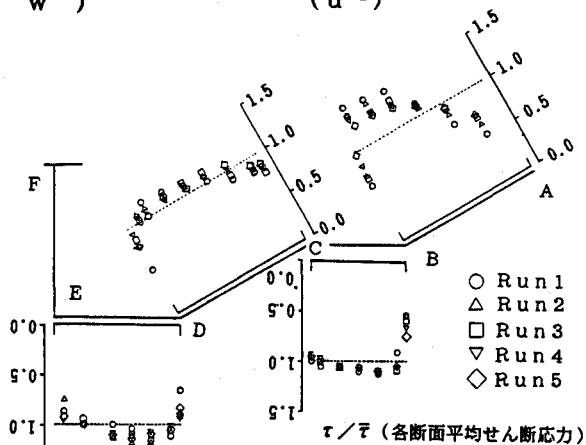


図6. せん断応力分布

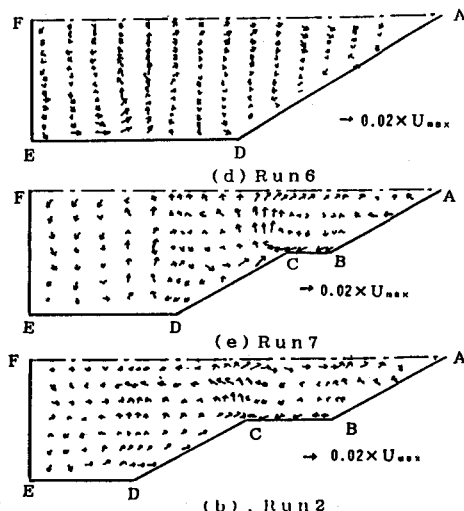


図7. 二次流ベクトル図

からDへと斜壁に沿って下降し、Dをわずかに越えたあたりで上昇流となるもう1つの渦の存在が特徴的である。前者の渦は(b)の場合に比べ、BCが狭いために、ABCとCDEFの混合する領域がC点よりもCDEF内にはいりこむために、(d)の場合に形成される台形側壁渦が複断面効果とあいまって発達したものと見れる。また、後者の渦は、今回の実験の傾斜角が $3.0^\circ$ という比較的小さい角度で行なわれたために、C点付近で発生する鉛直上昇流に左右されたためだと考えられる。

## (2) . 主流速分布

図8に最大流速で無次元化した主流速の等値線をしめす。

二次流の効果によってC点側でD側で減速が生じるために、BC上及びCD上では加速されているのがわかる。しかしながら、 $BC/DE=0.769$ の場合に比べ、効果が弱くなり、中心線上AFでは、(d)の場合のような単断面の流速の横断分布のように、極大値がBC及びDE上で生じるとはなくなる。

## (3) . レイノルズ応力

図9に、最大流速で無次元化したレイノルズ応力の分布を示す。

図9. 1の $-\rho \overline{u'v'}$ においてはC点の接合部における極大値はほぼ一致しているが、BC上、CD上、あるいは、AF(中心線)への影響力は、かなり弱まっている。また、図9. 2の $-\rho \overline{u'w'}$ では、(b)の場合に比べ(e)の場合には、C点付近、D点付近で負の領域が現われ、C点付近の負の領域がAF(中心線)まで広がっていない。そして、CD上の正の範囲も狭まり、極大値も落ちる。図9. 3の乱れエネルギーを見ると(e)の場合の高乱れ領域がC点付近のD側へと若干ずれて極大値をとるが、その乱れの強さは弱く、その範囲も狭まって行くことがわかる。

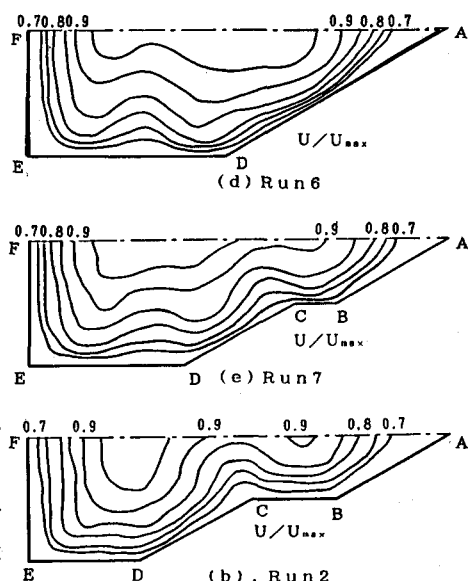


図8. 主流速分布

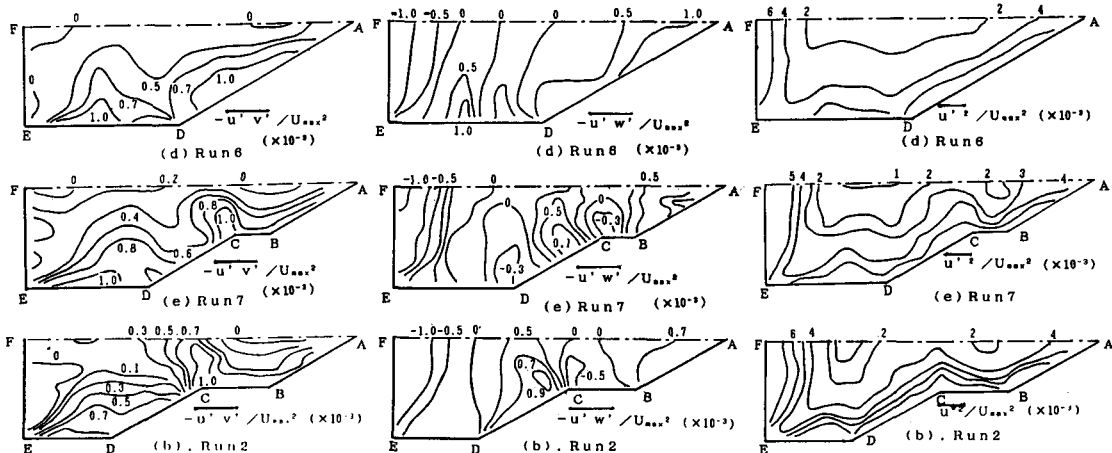


図9・1. Reynolds応力分布  
( $-\overline{u'v'}$ )

図9・2. Reynolds応力分布  
( $-\overline{u'w'}$ )

図9・3. Reynolds応力分布  
( $\overline{u'^2}$ )

## (4) . セン断力分布

全断面平均せん断力で無次元化したせん断力分布を図10に示す。

(b)の場合にはC点においてせん断力が減少していたが、この図を見ると(e)の場合には鉛直上昇流がC点よりも若干D点側で発生しているために、ABあるいはBC上で逆に等値線が壁面に近ずいてしまう

ためにAB上のC側およびBC上の中程より下の部分で断面平均せん断力を大きくしてしまうことになり、BCの中程より上の部分でせん断力を減少させている。また、特に興味あることは、小段BCが存在するために断面平均せん断力において、AB、BC上の値が、CD、DE上よりも大きくなることである。これは、乱れによる運動量輸送だけでは、考えられないものである。

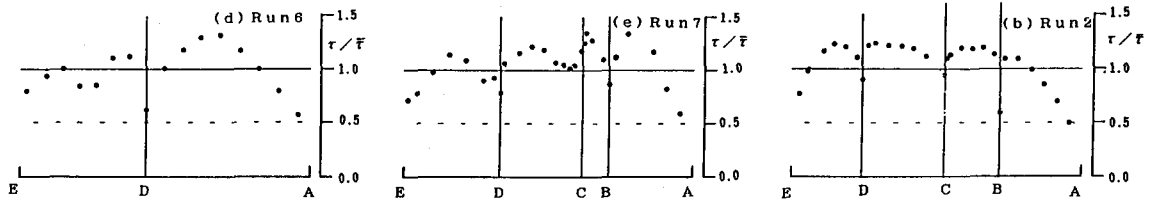


図10. せん断応力

#### 4. 二次流の果たす役割

以上、3の実験結果より得られるせん断応力の分布から、小段BCが存在しているためにAB、BC上のせん断力が、その流れの深さから考えて単断面の場合よりも増加し、CD上のせん断力が減少しているのがわかる。これは、当然、乱れによる運動量輸送によって生じる力以外に、二次流の果たす役割がかなりの部分をしめていると考えられる。従って、二次流による運動量輸送を考慮した、流れに平行な鉛直面に働く見かけのせん断力 $\tau_0$ を考える必要がある。

ここで、この見かけのせん断応力は、一般に次のようになる。

$$\tau_0 / \rho = (1/H) \int_0^H (-\overline{u'w'}) dy + (1/H) \int_0^H (-UW) dy \quad (1)$$

(Hは、底面から断面中心線までの距離を示し、右辺の第一項は乱れの運動量輸送による項で、第二項は二次流による運動量輸送による項である)

実験から得た結果を用いて求めた各項の分布を図11に示す。(d)の台形断面の場合には、乱れの項、二次流の項ともほぼ、同じような傾向を持ち、その大きさも大差ないのに比べ、小段BCを持つ場合は、特に接合部付近で両者が逆のピークを持ちながら、二次流の項が卓越していることに特徴がある。また、(e)の台形断面の場合、AB上で二次流の項が卓越することが顕著に現われている。一方、 $\tau_0$ の接合部付近のピークの値は、平均せん断応力とほぼ等しくなり、富永らのおこなった矩形複断面の実験の結果と同様の結果が得られる。

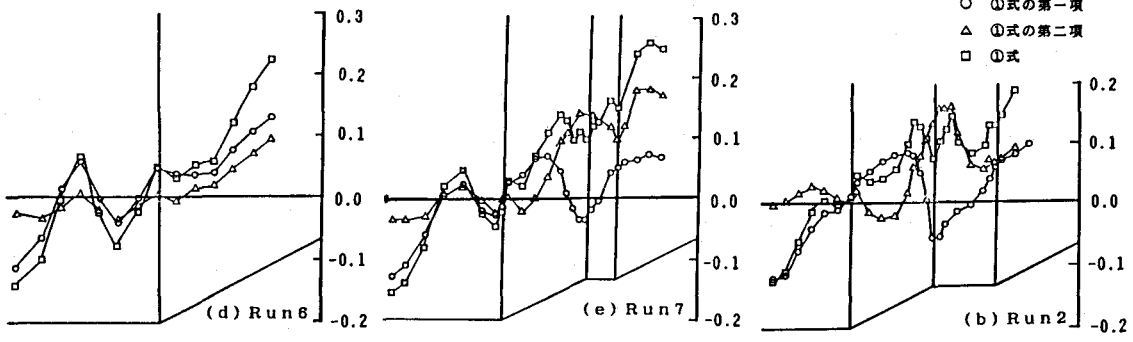


図11. 見かけのせん断応力

#### 5. 凹面のせん断力の相似性

凸面、凹面が隣接して存在する流れ場の評価方法を考察する第一段階として、今回の実験と並行して、凹面のみが存在する場合の流れ場に関する実験も行なった。この実験は、図12のような直角三角形断面開水路を用い、表2の実験条件のもとでプレストンの手法を用いて、壁面セ

ん断力を測定した。

図13は、平均主流速と平均せん断力の平方根の関係であるが、この両者の間には、ほぼ比例関係が認められ、今回の実験条件下においては、Euler相似が成立しているものと思われる。このことから、壁面せん断応力を無次元化するために、平均壁面せん断力を用い、その分布を図14に示す。なお、横軸は、y軸上潤辺を無次元化したものである。この図からわかるように今回の無次元化に対する妥当性が得られた。

表2. 実験条件

| 急勾配 1/30 |      |         | 緩勾配 1/440 |      |         |
|----------|------|---------|-----------|------|---------|
| Run      | H cm | Q l/sec | Run       | H cm | Q l/sec |
| 1        | 5.8  | 4.5     | 5         | 7.5  | 2.6     |
| 2        | 9.0  | 11.0    | 6         | 10.0 | 4.9     |
| 3        | 10.6 | 18.7    | 7         | 16.6 | 18.9    |
| 4        | 13.0 | 28.3    | 8         | 20.0 | 36.0    |

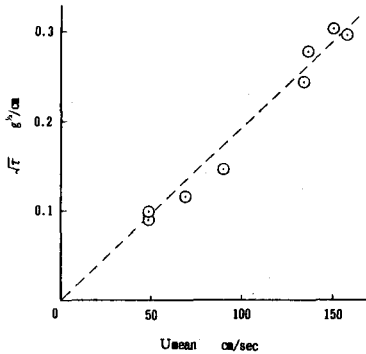


図13. 平均主流速と平均壁面せん断力の関係

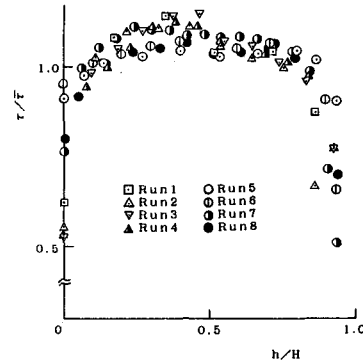


図14. 壁面せん断力分布図

## 6. 結論

本実験は、堤防小段の機能を解明するための第一段階として凸面と凹面が隣接して存在する流れ場を二次流の影響を比較的精度よく測定できる風洞を用いて実験的に検討してきたものであり、得られた結果を整理すると以下の通りである。

- 1). Re数を大きくするとCDEF(低水路)内の影響がABC(高水数)内へと入り込み、ABC、CDEFの両断面内の最大流速の差が減少し、円滑な混合が行なわれ、いわゆる、見かけのせん断力が減り複断面効果を弱めることになる。
- 2). 今回のようにBCの幅を狭めて断面の形状を変えた場合、複断面の効果を弱らせ、その影響範囲をも狭めてしまう。しかしながら、AB上、BC上(高水数)の各断面の平均せん断力を増加させるとともに、CD上(低水路)の平均せん断力を減少させる。

以上のように、いくつかの興味ある結果が得られたが、今後においては、実際に水流において検討した上で、この凸面と凹面が隣接して存在する流れ場の評価方法を検討して行きたい。

## 7. 参考文献

- 1). 今本、久下：複断面流れの水力特性に関する基礎的研究、京都大学防災研究所年報第17号B、昭49、10
- 2). 富永、江崎、中村：複断面開水路流の三次元乱流構造、第42回年次学術講演会、昭62、9
- 3). R.R.Wright and M.R.Carstens: Linear-Momentum Flux to Overbank Sections, Proc. ASCE 1970