

複断面流れの水理特性に関する基礎的研究

今本博健・久下俊夫

ON THE BASIC CHARACTERISTICS OF AN OPEN CHANNEL FLOW IN COMPLEX CROSS SECTION

By *Hirotake* IMAMOTO and *Toshio* KUGE

Synopsis

This paper deals with the water flow in a smooth open channel of complex cross section consisted of two parts, one is a deep channel and the other a shallow one over flood plains placed along both sides of levees. The shape of cross section can be varied by changing the width and the height of the flood plain.

The experimental results show that the resistance factor evaluated by the ratio of mean to shear velocity reaches the maximum at a certain width ratio of shallow to deep parts under the condition of constant Reynolds number. From the measured distribution characteristics of local mean and turbulent velocity under different conditions of flow, it is concluded that the region characterized by low mean velocity, high intensity of turbulence and strong Reynolds stress is expanded around the edge of flood plains, and several kinds of secondary motions may exist in the shallow and deep parts.

1. はじめに

複断面水路における流れは、単断面水路におけるものと異なり、高水敷の存在のためかなり複雑な性状を呈する。たとえば、低水路部と高水敷部との境界面近傍には、すでに Zheleznyakov¹⁾, Sellin²⁾ らによって指摘されているように、強いせん断力が存在し、通常の断面分割法による流量算定においては低水路部流量の過大評価ならびに高水敷部流量の過小評価の傾向が見られ、全体として流量の過大評価につながる可能性がある³⁾。このような境界面近傍におけるせん断力は水理条件によって複雑に変化し、その一般的特性を見出すことが困難なため、実用上において重要な流量解析すら満足に行なわれる状態に達していないのが現状である。

本研究は、複断面水路における流れの水理特性を解明するための第一段階として、高水敷高および高水敷幅の異なる種々の複断面形状を対象とし、流れの抵抗特性と断面形状との関係について実験的に検討するとともに、ホットフィルム流速計による乱れ計測を行ない、平均および乱れ速度分布ならびに Reynolds 応力分布の特性を明らかにしようとするものであって、いくつかの興味ある結果が得られている。

2. 複断面流れに関する実験

2.1 実験装置および方法

2.1.1 実験装置

本研究に用いた実験水路は、幅 40 cm、深さ 20 cm、長さ 13 m のアクリル樹脂製滑面直線水路であって、路床勾配は 1/500 に設定されている。実験水路の横断面形状は長方形単断面であるため、幅 4 cm、高さ 1.6 cm、長さ 2 m のアクリル樹脂板を組み合わせた幅および高さの異なる種々の大きさの高水敷を、実験水路の両側壁に沿い水路下流端より約 10 m にわたって敷設することにより、複断面水路として用いられるようになっている。

流量の計測は台形ぜきにより行なわれたが、台形ぜきの越流水深と流量との関係は流量ますを用いた検定曲線によって与えられている。なお、流量がきわめて小さい場合には流量ますによる計測が併用されている。

水深の計測には 1/10 mm 読みのポイントゲージを用い、水路下流端部における低下背水の影響を避けるため、下流端より約 4.5 m 上流側の計測断面近傍において水深計測を数回繰り返し、その平均値が水深計測値として採用されている。

流速の計測には、現在、室内実験水路用乱れ計測器としてもっともよく用いられているホットフィルム流速計を使用した。その原理ならびに応答特性については 2.2 において後述する。ホットフィルム流速計の使用に際しては、流水の温度変化ならびに流水中に含まれる微細粒子のプロープへの付着がきわめて重要な問題となるが、これらの影響を極力除去するよう細心の注意を払うとともに、速度計測時の水温は 1/100°C 読みの水温計により適宜計測されている。

なお、ホットフィルム流速計により得られたデータの処理は、流速計の出力を一旦データレコーダに記録し、A-D 変換器により数値化したのち電子計算機により行なったが、数値化におけるサンプリング周波数は 20 Hz、データ数は400個を基準とし、必要に応じて数回の繰り返し解析を行ない、それらの平均値を計測値として採用することにした。

2.1.2 実験方法

本研究は複断面水路における定常等流状態の流れを対象としたため、実験に先立ち、アクリル樹脂板の組合せによってつくられた種々の形状の複断面水路における流れが等流状態となっているかについての検討を行なった。すなわち、種々の流量のもとで流れの縦断方向の水面形を綿密に計測した結果、複断面部への流入遷移領域および水路下流端部における低下背水領域の大きさは、本実験条件のもとでは、いずれも 2 m 程度であって、水路下流端より約 4.5 m 上流側の計測断面ではほぼ等流状態となっていることが確かめられた。

このように本研究に用いた複断面水路における流れは計測断面近傍においてほぼ等流状態とみなされることを確かめたのち、複断面水路における流れの概略的特性を知るため、高水敷幅および高水敷高の異なる種々の形状の複断面水路のそれぞれについて、流量をほぼ20段階にわたって変化させたときの等流水深を計測することにより水深と流量との関係を調べた。

つぎに、複断面水路における流れの平均および乱れ速度分布を知るためホットフィルム流速計による乱れ計測を行なったが、ホットフィルムプロープとしては2成分用V型プロープおよび1成分用円錐型プロープの2種を用いた。前者は、V形にきられたプロープの先端に独立した2個の円柱型センサーをプロープ軸に45°の傾きをもち対称に設置することにより、流れ方向およびそれに垂直な速度成分を同時に計測しようとするものであって、プロープを水平あるいは鉛直面に沿って設置することにより、流れ方向と横方向あるいは鉛直方向の3方向の速度成分の計測が可能となる。また、後者は、センサーの設置されたプロープの先端部を円錐状にし流水中に含まれる微細粒子の付着を少なくしたもので、他の型のプロープに比しとくに高周波数成分の乱れ速度に対する応答特性は若干悪くなるが、流れ方向の速度成分のみを対象とする場合には微細粒子の付着に伴う計測誤差が少なく有効である。

計測断面における速度の計測点は複断面流れとしての効果が顕著に現われると予測される高水敷先端部近傍を密に、複断面水路形状に応じ、約50~130点とし、つぎの手順にしたがって各計測点における速度計測を行なった。すなわち、流速計の路床面からの高さを一定に保ち、横断方向に移動させつつそれぞれの計測点において速度計測を行なったのち、高水敷から低水路側へ0.5 cm離れた鉛直線、側岸面から0.5 cm離れた鉛直線ならびに水路中央における鉛直線上に流速計を移動させ、これらの鉛直線上の計測点における速度計測を繰り返し、流水の温度変化あるいは流水中に含まれる微細粒子の付着に伴う計測誤差の補正が可能となるようにした。なお、各計測点における計測時間は1成分用円錐型プロープについては約30秒、2成分用V型プロープについては約70秒とされている。

2.2 ホットフィルム流速計

2.2.1 計測の原理

気流における乱れ計測器としてホットワイア流速計が種々の分野で有効に使用され、乱流構造の解明に役立てられてきているが、この流速計を水中で使用する場合、水の電気分解による気泡の発生などの支障が生じ、安定した計測を行なうことができない。このため受感部を石英などでコーティングしたホットフィルム流速計が水流用として開発され、すでに多くの研究者により使用されるようになってきている。

ホットフィルム流速計の原理はホットワイア流速計と同じであって簡単に説明するとつぎのようである⁴⁾。すなわち、ホットワイアあるいはホットフィルムの受感部から流体への放熱量は受感部の温度、形状および大きさと流体の速度、温度、圧力、密度、比熱および熱伝導度などによって決定される。したがって流体速度以外の量が一定に保たれている場合、放熱量より速度が知れることになる。受感部からの放熱量を電気的に検出する方式としては、通常、定電流型および定温度型の2種の方式が用いられる。定電流型は受感部に一定電流を流し、流体運動による受感部の冷却状況を電気的抵抗変化としてとらえることにより流速を検出しようとするものであり、定温度型は受感部を一定温度に保つために要する電気エネルギーの量より流速を検出しようとするものである。一般に、流体の温度計測には定電流型が用いられ、速度計測には定温度型が用いられるが、本研究においては速度計測を対象としているため、定温度作動方式を採用することにした。

ホットフィルム流速計の使用にさいしもっとも問題となる事項は、すでに述べたように、流水の温度変化ならびに流水中に含まれる微細粒子のプロープへの付着に伴い流速計の応答特性が変化するということであるが、本研究においては、計測に先立ち数時間にわたって実験水路に水を循環させることにより計測時の水温を一定化するとともに、実験水路ならびにその他の循環系統を清浄に保ち、さらに水路下流端において実験水を布で濾過することにより流水中に含まれる微細粒子の除去に努めた。

2.2.2 応答特性の検定

ホットフィルム流速計の応答特性、ならびに流水の温度変化あるいは流水中に含まれる微細粒子のプロープへの付着に伴う応答特性の変化を明らかにするため、静水中でプロープを移動させた場合の移動速度と流速計の出力電圧との関係についての検定を行なった。

検定水路は、幅および深さ 30 cm、長さ 4 m の直線水路であって、Fig. 2-1 に示されるように、水路上を検定台車が移動されるようになっている。台車の駆動には無段変速モーターが用いられ、移動速度は検定水路

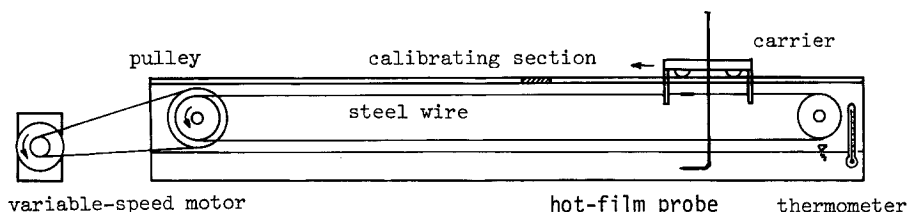


Fig. 2-1 Calibration channel of hot-film flowmeter.

中央部に設けられた計測区間 (16.27 cm) の台車通過時間を 10^{-5} 秒読みカウンターで計測することにより求められる。流速計の出力電圧はペン書きレコーダに記録され、 10^{-2} ボルトまで読み取られる。なお、プロープの温度設定はあらかじめ求められている温度・抵抗検定曲線を用いて行なわれ、水温は水温計により 10^{-2}°C まで測定されている。

温度効果：ホットフィルムプローブとしていずれも1成分用のファイバー型プローブ (DISA 55R11)、くさび型プローブ (DISA 55R23) および円錐型プローブ (DISA 55R42) の3種のものについて、種々のセンサー・水温差 T における流速 U と出力電圧 E との関係を示すと Fig. 2-2 のようになり、 E は U および T の関

数となることが知れる。いま、 T が一定の場合の E と U との関係に対し、円柱からの放熱特性より得られる関係式、すなわち、

$$E^2 = A + B\sqrt{U} \quad (T: \text{const.}) \dots\dots\dots(2.1)$$

の適用性について調べると **Fig. 2-3** のようになり、ファイバー型およびくさび型については(2.1)式がほぼ適用されるが、円錐型については適用されないことが知れる。なお、(2.1)式における係数 A および B はいずれも T の関数である。

さらに、 U が一定の場合の E と T との関係を調べると **Fig. 2-4** のようになり、ファイバー型、くさび型および円錐型のいずれについても、近似的につきの関係式の成立することが知れる。

$$E = \alpha + \beta\sqrt{T} \quad (U: \text{const.}) \dots\dots\dots(2.2)$$

ここに、係数 α および β は U の関数である。(2.2)式により、ファイバー型およびくさび型については、

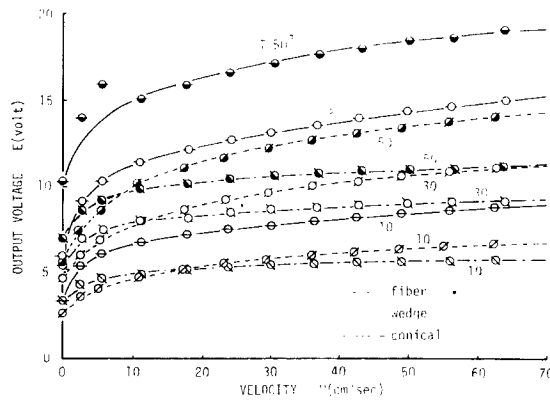


Fig. 2-2 Relation between fluid velocity and out-put voltage of hot-film flowmeter (temperature difference between sensor and fluid T : variable).

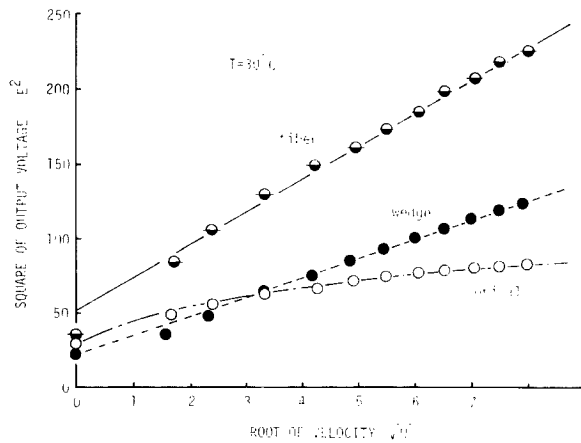


Fig. 2-3 Relation between fluid velocity and out-put voltage of hot-film flowmeter (Examination of the validity of relation $E^2 = A + B\sqrt{U}$).

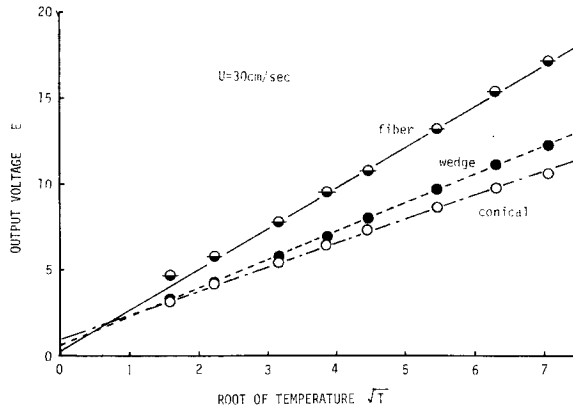


Fig. 2-4 Relation between temperature difference and out-put voltage of hot-film flowmeter (Fluid velocity U : constant).

(2.1)式における係数 A および B は \sqrt{T} の 2 次式で近似されることが推測され、つぎのように表わされる。

$$A = A_0 + A_1\sqrt{T} + A_2T \quad \text{および} \quad B = B_0 + B_1\sqrt{T} + B_2T \dots\dots\dots(2.3)$$

ここに、係数 A_0, A_1, \dots, B_2 は U あるいは T に関係しないプローブ固有の定数であって、これらの係数が決定されるとくさび型プローブについての温度効果が知れることになる。

なお、円錐型プローブについては、Fig. 2-2 あるいは Fig. 2-3 より知れるように、 U と E との関係を少なくとも一般の 4 次式で表わす必要があるため、5 個の係数のそれぞれについて T との関係を示す必要があり、温度効果の評価はかなり複雑となる。

温度効果の一例として、真の平均速度 $U=30$ cm/sec の流れにおいて、センサー・水温差 $T=30^\circ\text{C}$ の設定のもとでの温度変化 $\Delta T=1^\circ\text{C}$ に対する平均速度および時定数を 10 秒とした乱れ速度の計測誤差を示すと Table 2-1 のようになる。この表より明らかなように、温度変化に伴う平均速度の計測誤差はかなり大きく、とくに円錐型プローブでは 20% 近くにまで達しているのに対し、乱れ速度の計測誤差はいずれの型のプローブについても小さく 1% 以下となっている。

Table 2-1 Measurement errors resulted from the variation of temperature difference and the deposit of contamination ($T=30^\circ\text{C}$, $U=30$ cm/sec).

Type	Thermal Change		Deposit of Contamination	
	$\Delta U/U$	$\Delta u'/u'$	$\Delta U/U$	$\Delta u'/u'$
Fiber	9.56 %	0.53 %	- 4.69 %	≈ 0 %
Wedge	8.63	0.48	-10.74	≈ 0
Conical	18.83	0.46	- 0.01	≈ 0

粒子付着効果：ホットフィルム流速計は、本来、清水中で使用されるべきものであるが、室内実験においてすら流水の清浄性を十分に保持することはきわめて困難であり、流水中に含まれる微細粒子のプローブへの付着に関する考慮が必要となる。このようなプローブ汚染の効果を明らかにするため、通常の水道水を約 1 週間放置してかなり濁った状態の実験水を用い、室内実験水路において $T=30^\circ\text{C}$ としてホットフィルム流速計を

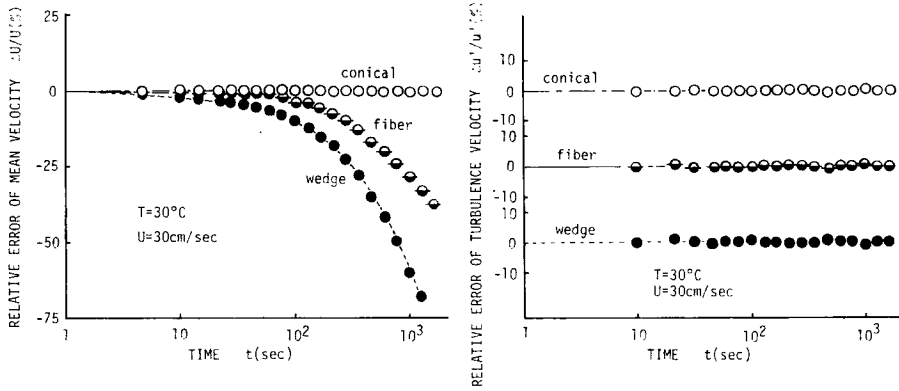


Fig. 2-5 Effect of the deposit of contamination (Changes in the flow sensitivity of sensors with increasing measurement duration time).

作動させた場合の平均速度および乱れ速度の計測誤差と計測継続時間との関係の一例を Fig. 2-5 に示す。この図より明らかなように、流水中に含まれる微細粒子のプローブへの付着に伴う平均速度の計測誤差はくさび型のものについてがもっとも大きく、数10秒程度の計測継続時間ですでにかかりの誤差の発生が認められるのに対し、円錐型については長時間にわたってほとんど誤差は認められず、ファイバー型は両者の中間であることが知れる。一方、乱れ速度の計測誤差はいずれの型のプローブについてもほとんど無視されるほど小さく、流速計の出力電圧 E と流速 U との関係式においてある一定の U に対する $\partial E/\partial U$ はプローブが汚染されてもほとんど変化しないと考えられる。

なお、Table 2-1 に計測継続時間を100秒とした場合のプローブへの粒子付着効果による平均および乱れ速度の計測誤差の一例を示したが、同表に併記されている温度効果による計測誤差との関係より、平均速度計測において温度変化が比較的大きい場合にはファイバー型あるいはくさび型プローブが、また粒子付着効果が問題となる長時間計測の場合には円錐型プローブが適していることが知れる。一方、乱れ速度計測については、ここで用いた3種のホットフィルムプローブに共通して、いずれの効果に対してもその計測誤差は小さく、ホットフィルム流速計の乱れ計測に対する有用性が確かめられる。

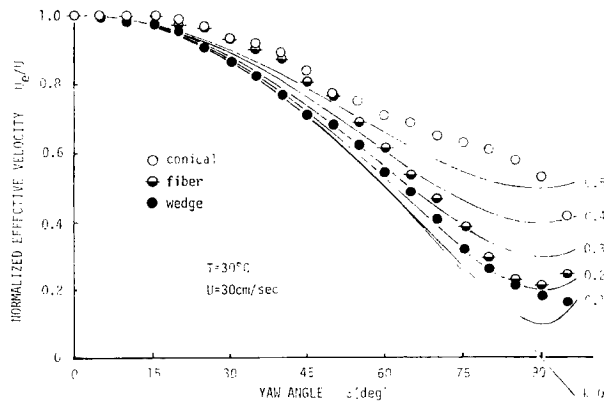


Fig. 2-6 Directional characteristics of three kinds of hot-film probes ($T=30^\circ\text{C}$, $U=30\text{ cm/sec}$).

流向応答特性：ファイバー型およびくさび型プローブのセンサーはいずれもプローブ軸に垂直に設置されているため流速と有効流速とが一致するが、プローブ軸が流れ方向に一致しない場合、すなわち、流速がセンサーに垂直に作用しない場合、有効流速は流向によって異なることになる。このような流向に対する応答特性を明らかにするため、プローブ軸と流向との間の角度 ϕ と有効流速と U_e の関係について検定すると Fig. 2-6 の結果が得られた。図に示された実線は、 U_e と U との関係式として一般に用いられているつぎの関係式、すなわち、

$$U_e^2 = U^2(\cos^2 \phi + k^2 \sin^2 \phi) \dots \dots \dots (2.4)$$

において、補正係数 k を変化させた場合を示したものであるが、検定値との比較により、ファイバー型およびくさび型については $k=0 \sim 0.3$ 程度と見込まれ、(2.4)式の右辺における補正項はほとんど無視しうることが知れる。したがって、2個のファイバー型あるいはくさび型を組み合わせた2成分用X型あるいはV型プローブの使用により、流れ方向とそれに垂直な2方向の速度成分の同時計測が可能となることが知れる。これに対し、円錐型については $\phi=15^\circ$ 以下での流向に対する応答性はほとんど認められず、流れ方向の速度成分が卓越した流れにおける流れ方向の速度成分の計測のみが可能であって、流れ方向以外の速度成分の計測には用いられない。

3. 複断面流れの水力特性

3.1 複断面水路の表面抵抗

3.1.1 流量・水深曲線

複断面水路における流れの概略的な抵抗特性を知るため、まず最初に、高水敷高 h を一定に保ち高水敷幅 b を変化させた場合の流量 Q と水深 H との関係について検討したが、 $h=3.2 \text{ cm}$ の場合についての実験結果を

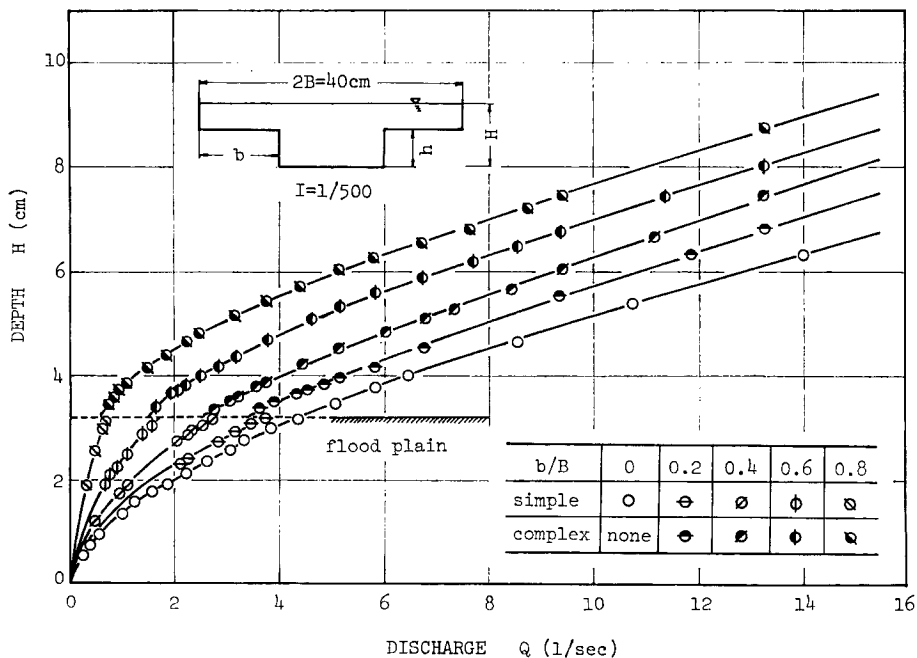


Fig. 3-1 Relation between discharge and depth of deep channel.

示すと Fig. 3-1 のようになる。なお、実験水路の水路幅 $2B=40$ cm, 路床勾配 $I=1/500$ であって、水深は低水路部路床面を基準に測定されている。

Fig. 3-1 より知れるように、複断面水路における流量と水深との関係は、当然のことながら、流量が増加するにしたがって水深も増加するという傾向を有するが、流れが低水路部内に限定されている場合と高水敷上にまで及んだ場合とで増加傾向は異なり、とくに流れが高水敷上に及ぶ遷移時では流量・水深曲線に不連続性が認められる。このような特性は、流れが高水敷上に及ぶと高水敷面の表面抵抗のためそこでの流速は遅くなり、その影響が低水路部にまで広がり全体としての平均流速を小さくするとともに水深を増加させることになると説明される。また、高水敷幅の効果について見ると、Fig. 3-1 では高水敷幅が大きいものほど先に述べた遷移時の特性が顕著に現われているが、高水敷幅が十分に大きく水路幅全体にまで広がる場合には複断面水路としての特性を失い単断面水路としての取扱いが必要であるため、流量と低水路部路床面を基準とした水深との関係のみによって複断面効果の程度を知ることはできない。

3.1.2 断面形状と抵抗特性

いま、重力の加速度 g , 径深 R およびエネルギー勾配 I_e より、次式、すなわち、

$$U_f = \sqrt{gRI_e} \dots\dots\dots(3.1)$$

によって定義される摩擦速度 U_f を用い、流量を流水断面積で割って得られる断面平均速度と摩擦速度との比 U_m/U_f と摩擦速度および径深によって定義される Reynolds 数 $U_f R/\nu$ との関係として Fig. 3-1 の実測値を整理しなおし、高水敷幅の変化に伴う複断面効果について検討すると Fig. 3-2 のようになる。なお、 ν は動粘性係数であり、定常等流状態の流れが対象とされる場合、(3.1)式における I_e は路床勾配 I に等しいとして差し支えない。Fig. 3-2 に見られるように、実測値にはかなりのばらつきがあるが、高水敷の存在しない場合 ($b=0$) あるいは高水敷が存在しても低水路部内に流れが限定されている場合、すなわち、単断面水路の場合には、対数より導かれる関係式

$$\frac{U_m}{U_f} = A_s - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{U_f R}{\nu} \dots\dots\dots(3.2)$$

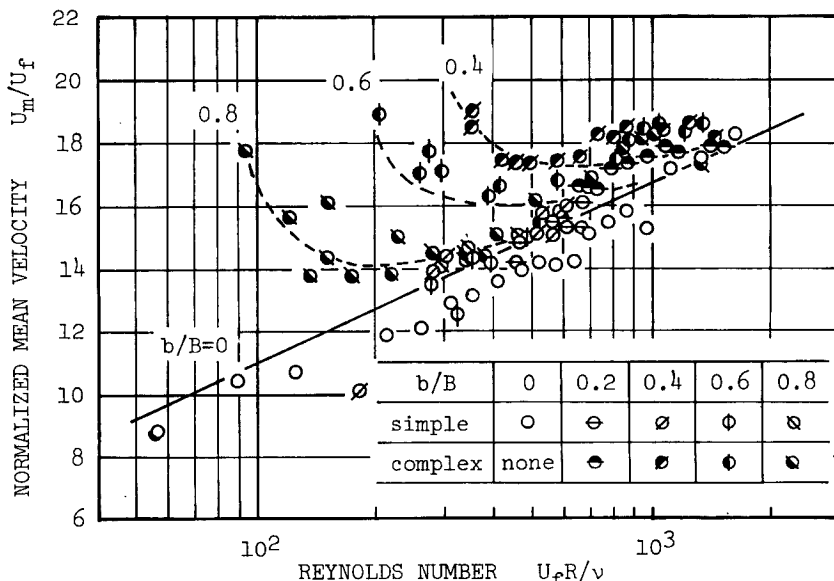


Fig. 3-2 Relation between normalized discharge velocity U_m/U_f and Reynolds number $U_f R/\nu$

が適用されることが知れる。ただし、(3.2)式における定数 A_s および Kármán 定数 κ のうち、 κ については U_m/U_f と $\log U_f R/\nu$ との関係の勾配より $\kappa=0.4$ という通常用いられる値の妥当性が確かめられるが、 A_s については滑面管路に対してよく用いられる $A_s=5.5$ に比しかなり小さくなっている。本実験における A_s がこのように小さく現われた原因としては、開水路流れの特性として岩垣⁵⁾によって指摘されている Froude 数の効果によるもののほかに、摩擦速度算定における勾配評価の誤差あるいは径深のみによる水路幅有限効果の評価誤差などが挙げられ、より詳細な検討が必要と考えられる。

一方、流れが高水敷上にまで及ぶと複断面水路としての特性が現われ、とくに流れが低水路部のみに限定された状態から高水敷上に及ぶ遷移時においては、流水断面積の増加に比し潤辺の増加がより著しいため、径深が不連続的に急減し、結局、 U_m/U_f が大きくなるのに対し $U_f R/\nu$ は減少することになり、単断面水路における両者間の関係が適用されなくなる。また、流量が大きく高水敷上の水深が十分に大きい場合、高水敷存在の効果は流水断面全体にまで及ばず単断面水路としての取り扱いが可能になると考えられる。Fig. 3-2 に示された U_m/U_f と $U_f R/\nu$ との関係はこのような複断面流れの特性をよく表わしているが、もう一つの特性として流れが高水敷上にまで及んだのちの U_m/U_f は $U_f R/\nu$ の増加に伴い一旦減少する傾向が認められる。これは水深が増加するにしたがって流水断面積および径深が著しく増大することによるものであって、さらに流量が大きくなると U_m/U_f は増加するようになり、先に述べたように、高水敷上の水深が十分大きくなった状態では複断面水路としての特性を失い、単断面の場合の関係に近づくことになる。

このような複断面流れの特性は複断面形状によって現われ方が異なり、高水敷幅 b と水路の半幅 B との比が 0 と 1 との間のある値のときもっとも顕著に現われるようになると推測されるが、Fig. 3-2 の実測値により検討すると、流量がそれほど小さくなく b/B がかなり小さなものについても高水敷上にまで流れが及ぶ場合、 $U_f R/\nu$ の一定値に対する U_m/U_f がもっとも大きくなるのは $b/B \approx 0.4$ のときであることが知れる。すなわち、流量があまり小さくなく b/B が小さなものについての流れが低水路部に限定されている場合、複断面流れとしての特性は b/B が大きなものについてのみ現われるが、ある程度以上流量が大きく b/B が小さくても高水敷上にまで流れが及ぶような場合について比較すると、 $b/B \approx 0.4$ のとき複断面流れとしての特性はもっとも顕著となる。

以上は複断面流れにおける形状効果を高水敷幅のみを変化させて検討したものであるが、より一般的には水路幅あるいは高水敷高についての検討も必要であり、本実験結果のみによって複断面流れの効果の出現程度を評価することはできない。なお、複断面流れにおける形状効果については、3.2 において平均および乱れ速度分布の観点より再検討を行なう。

3.2 平均および乱れ速度分布

前節は複断面水路における流れの抵抗特性を断面平均的観点より把握しようとしたものであるが、以下においては、2成分用V型プローブおよび1成分用円錐型プローブを用いたホットフィルム流速計による平均および乱れ速度の計測結果に基づき、複断面水路における流れの内部機構についての検討を行なう。

3.2.1 速度ベクトル

複断面流れの内部機構に関する従来の取扱いは、主として、流れ方向の平均速度分布特性の解明に重点が置かれており、乱れ速度については Townsend⁶⁾ による検討が見られるのみである。このため本研究においては流れ方向のみでなく横方向および鉛直方向を含めた3方向の平均および乱れ速度の計測を行ない、その分布特性について検討する。

計測結果の一例として、高水敷高 $h=3.2$ cm、高水敷幅 $b=12$ cm の複断面水路に流量 $Q=5.68$ l/sec の水を流し、低水路部の水深 $H=5.6$ cm とした場合について示すと、Fig. 3-3 から Fig. 3-6 のようになる。なお、これらの図において速度の大きさは径深にもとづく摩擦速度 U_f によって基準化されている。

Fig. 3-3 は平均速度分布を示したものであって、流れ方向の平均速度 U については等速度線による表示が用いられ、横方向および鉛直方向の平均速度 V および W については小さな黒丸で示された計測点ごとに矢印

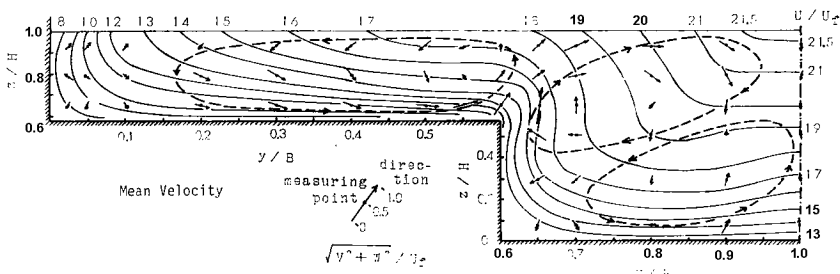


Fig. 3-3 Distribution of mean velocity of longitudinal, lateral and vertical components.

による合成ベクトル表示が用いられている。 U の等速度線によると、高水敷先端近傍において低水路側に低速度の領域の広がりとともに、高水敷部自由表面近傍において低水路側からの高速度領域の広がり認められる。このような流れ方向の平均速度の分布特性は従来の実験結果^{2), 9), 6), 7)} とよく一致しており、複断面流れの一般的特性を示すものと考えられる。また、 V および W の合成ベクトルによると、高水敷先端近傍から低水路側自由表面に向かう顕著な斜昇流とともに、高水敷部自由表面近傍における接岸流および高水敷面近傍における離岸流、ならびに低水路部における高水敷との隅角部に向かう斜降流および中央部路床面近傍における上昇流の存在が認められ、図に破線で示されるようならせん流の存在が類推される。ただし、合成ベクトルと摩擦速度との比についてみると、高水敷先端近傍では 2.3 以上とかなり大きい、それ以外の領域では 1 以下となっており、計測誤差を考慮すると、高水敷先端近傍の斜昇流以外についてその存在を断定することは早急のようである。

一方、乱れ速度の大きさを 3 方向の合成量により等速度線として表わすと **Fig. 3-4** のようになり、とくに高水敷先端近傍で高い乱れエネルギーを有する領域が舌状に広がるのが知れ、**Fig. 3-3** に示された低平均速度領域との対応性より、複断面水路における流れを特性づけるものとして注目される。なお、3 方向の乱れ

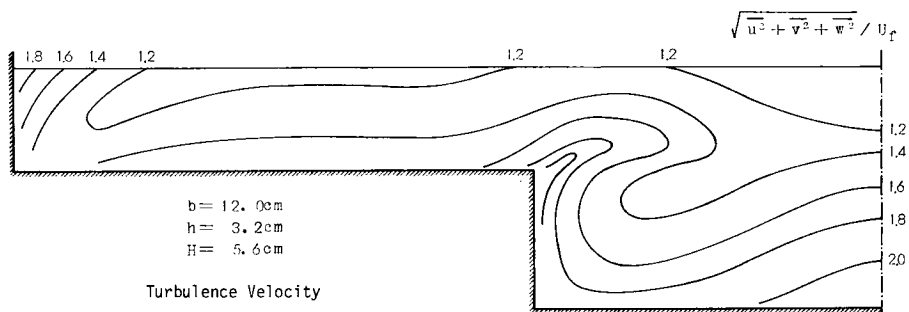
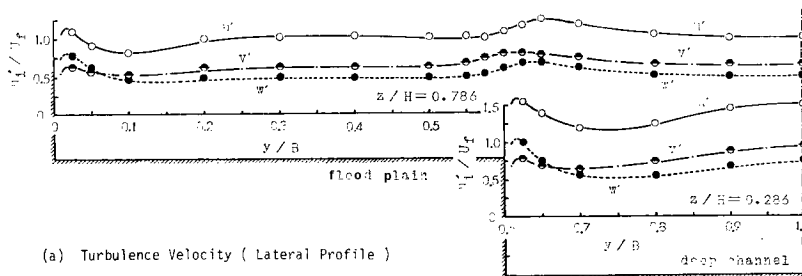


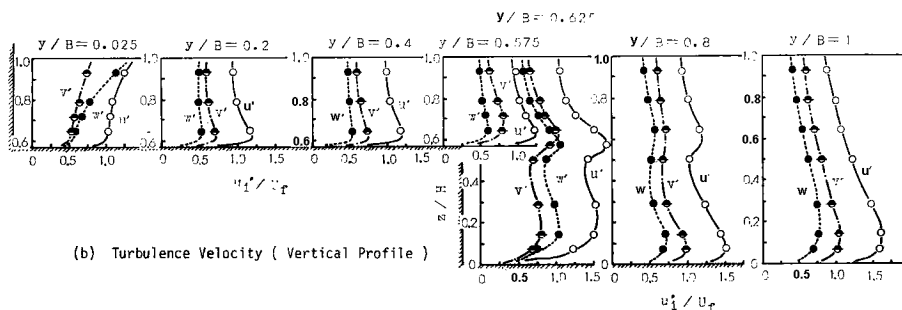
Fig. 3-4 Iso-velocity line of turbulent velocity $\sqrt{u^2 + v^2 + w^2} / U_f$.

速度ごとの分布について検討すると、流れ方向、横方向および鉛直方向の乱れ速度 u' 、 v' および w' のそれぞれの横方向および鉛直方向分布を示した **Fig. 3-5a** および **Fig. 3-5b** より知れるように、高水敷高より高い鉛直位置 ($Z/H=0.786$) における横方向の分布は、 u' 、 v' および w' のいずれについても低水路部と高水敷部との境界面近傍において極大となっているが、 u' および w' の極大値発生箇所はほとんど一致し、 v' についてはそれより若干高水敷側に寄った低水路部内となっている。また、側壁面近傍においても乱れ速度の極大がみられるが、他の領域で $u' > v' > w'$ となっているのと異なり、 $u' > w' > v'$ となることが知れる。このような側壁面近傍の特性は、横方向の流体運動は側壁面の存在により拘束されることによるものと理解される。また、



(a) Turbulence Velocity (Lateral Profile)

Fig. 3-5a Lateral distribution of longitudinal, lateral and vertical turbulent velocity.

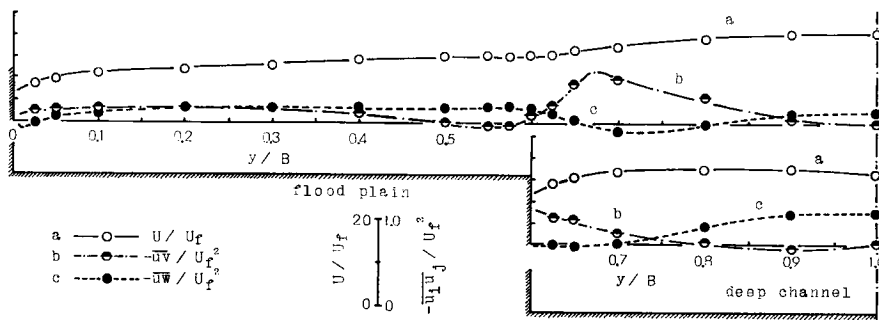


(b) Turbulence Velocity (Vertical Profile)

Fig. 3-5b Vertical distribution of longitudinal, lateral and vertical turbulent velocity.

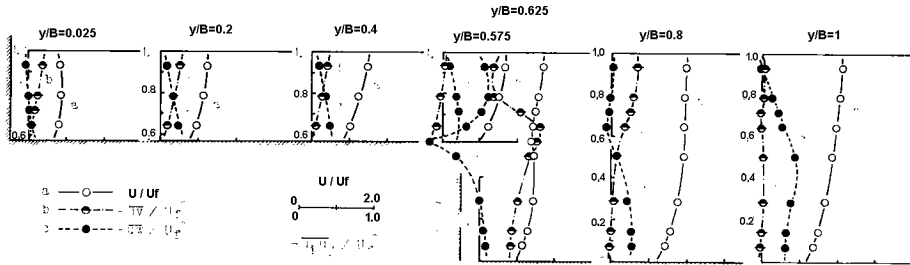
高水敷高より低い鉛直位置 ($z/H=0.286$) での低水路部における横方向の分布は、低水路壁面近傍で極大となり、低水路壁面から離れるにしたがって乱れ速度は一旦小さくなり、低水路中央部に近づくとき再び大きくなる傾向が見られる。3方向の乱れ速度の大きさについては、高水敷高より高い鉛直位置の場合と同様に、側壁面近傍では鉛直方向成分に比し横方向成分が小さくなっている。さらに、**Fig. 3-5b** に示された乱れ速度の鉛直分布について見ると、低水路部および高水敷の中央近傍においては路床面あるいは高水敷面近傍で極大となり自由表面側ほど小さくなっているが、高水敷先端から低水路側にかけては高水敷高と同程度あるいはそれより若干高い位置において乱れ速度の大きな領域の存在することが認められ、平均速度分布における極小値の発生と対照的な特性を有することが知れる。

以上は流れ方向、横方向および鉛直方向の3方向の平均および乱れ速度分布特性について述べたものである



(a) Mean Velocity and Reynolds Stress (Lateral Profile)

Fig. 3-6a Lateral distribution of longitudinal mean velocity and Reynolds stresses.



(b) Mean Velocity and Reynolds Stress (Vertical Profile)

Fig. 3-6b Vertical distribution of longitudinal mean velocity and Reynolds stresses.

が、流れ方向およびそれに垂直な 2 方向の乱れ速度間の相関すなわち Reynolds 応力分布の計測結果を示すと Fig. 3-6a および Fig. 3-6b ようである。まず Fig. 3-6a に示された流れ方向および横方向の乱れ速度間の相関の横方向分布について見ると、高水敷高より高い位置 ($z/H=0.786$) での Reynolds 応力 $-\overline{uw}/U_f^2$ は、高水敷中央部ではほぼ一定値を示し、高水敷先端に近づくにしたがって徐々に減少し 0 あるいは負の極小値を示したのち、低水路部に入ると急激に増大し大きな正の極大値を示し、さらに低水路中央部に近づくと再び減少して 0 に近づいている。このような Reynolds 応力分布の特性と同図に示された流れ方向の平均速度 U の横方向分布との関係について見ると、Reynolds 応力の大きさは速度勾配によく対応しており、高水敷高より低い鉛直位置 ($z/H=0.286$) についても同様であって、複断面水路での流れの取扱いにおける乱れ特性の解明の重要性が理解される。また Fig. 3-6b に示された流れ方向および鉛直方向の速度間の相関の鉛直方向分布によると、高水敷中央部 ($y/B=0.300$) では自由表面から高水敷面に近づくにしたがって Reynolds 応力 $-\overline{uw}/U_f^2$ は直線的に増加しているが、このような傾向は他の位置では認められず、とくに低水路中央部 ($y/B=0$) においても Reynolds 応力と深さとの直線関係が満足されるのは高水敷高より高い鉛直位置においてのみであって、2 次元流れとの差異が顕著に現われている。また、高水敷に近い低水路部 ($y/B=0.625$) においては高水敷高と同程度の高さと大きな負の極小値が認められ、流れ方向の平均速度の鉛直分布における極小値の発生とよく一致しており、流れ方向の平均速度の鉛直分布特性は流れ方向および鉛直方向の乱れ速度間の相関分布特性によって説明され、Reynolds 応力分布特性の重要性が再確認される。

3.2.2 断面形状と速度分布

複断面水路における流れは、その速度分布特性より明らかなように、高水敷先端近傍に舌状に広がる低平均・強乱れ速度の領域が存在し、この領域では Reynolds 応力も大きく、流体は激しく混合されるとともに、かなり顕著なせん流の発生が見られるという特性を有するが、以下においてはこれらの特性のうち低平均・高乱れ速度の領域に着目し、その広がりや断面形状との関係について検討する。

複断面水路の形状は、高水敷幅 b 、高水敷高 h 、水路半幅 B および低水路水深 H によって定められるが、本実験水路においては $B=40$ cm と一定であるため、断面形状の変化として b 、 h および H の 3 量の変化したものを対象とした。すなわち、これらの 3 量のうち 2 量を一定に保ち、残りの 1 量を変化させた場合の速度分布特性についての検討を行なったが、ここでは $h=3.2$ cm について b および H を変化させたものについてのみ述べることにする。なお、速度としては流れ方向のもののみを取り上げ、ホットフィルムプローブとしては円錐型が用いられている。

Table 3-1 は断面形状と速度分布との関係について検討するために行なわれた実験に関する水理条件をまとめたものであるが、高水敷幅を変化させた場合の平均および乱れ速度分布を示すと Fig. 3-7 のようになる。まず最初に等平均速度線についてみると、 $b=0$ cm の単断面水路の場合、水路中央部での等平均速度線はほぼ路面に平行となっており 2 次元流れとしての取扱いが可能となることを示しているが、側壁近傍では逆

Table 3-1 Hydraulic conditions in velocity measurement.

Case	Width of Flood Plain b (cm)	Height of Flood Plain h (cm)	Depth H (cm)	Discharge Velocity U_m (cm/sec)	Friction Velocity U_f (cm/sec)	Water Temperature T (°C)
A	1	0	4.8	50.5	2.75	14.0
	2	4	4.8	48.4	2.56	14.8
	3	8	4.8	40.7	2.26	14.8
	4	12	4.8	36.7	2.13	14.0
	5	16	3.2	29.4	1.88	14.6
	6	20	3.2	4.8	24.8	1.59
B	7	12	4.0	33.9	1.84	14.1
	8	12	4.8	36.7	2.13	14.8
	9	12	6.4	43.4	2.58	15.6
	10	12	8.0	53.7	2.92	14.8

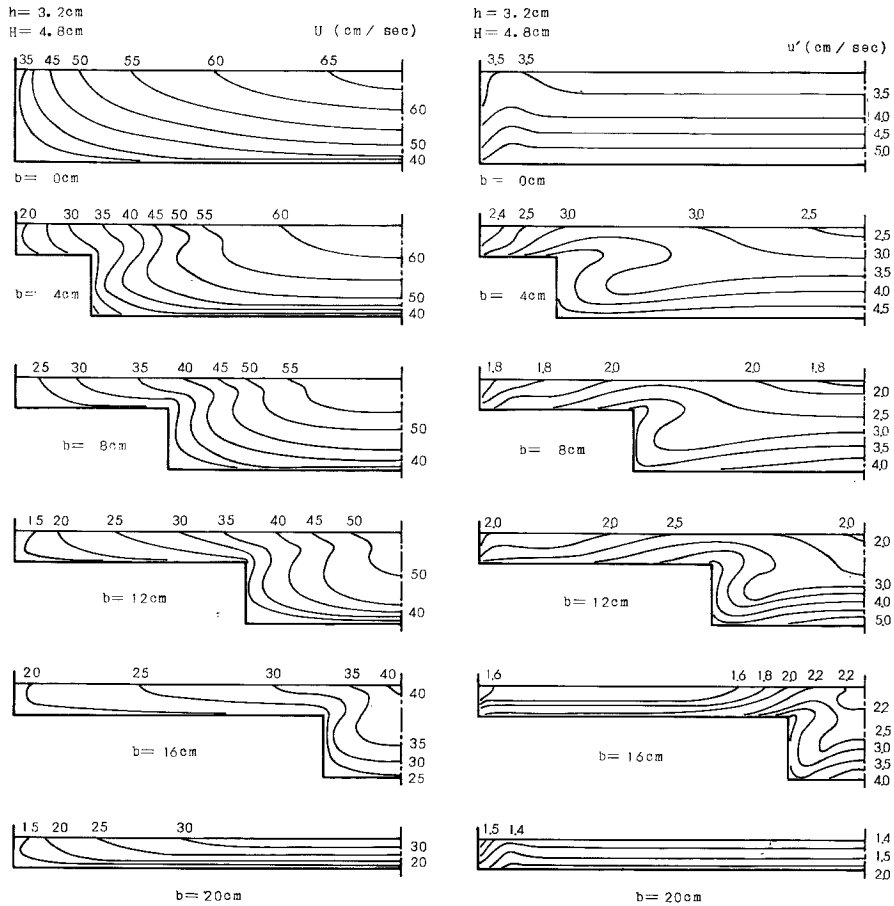


Fig. 3-7 Effect of the width variation of flood plain on the velocity distribution.

に側壁面に平行となる傾向が見られて2次元流れと異なってくる。 $b=4\text{ cm}$ の複断面水路になると高水敷先端から低水路側に低平均速度の領域の広がることが明瞭に確かめられるが、その影響は水路中央部にまでは及んでいない。 b が大きくなるにしたがって低平均速度の領域は広がり、 $b=8\text{ cm}$ および 12 cm の場合、水路中央部まで影響が及ぶが、さらに b が大きくなって対岸側の高水敷の存在により一方の高水敷の影響が水路中央部を越えることは許されず、高水敷上の流れが2次元流れに近づくため、結局、全体としては複断面流れの特性が薄れることになる。同様のことは等乱れ速度線によっても確かめられるが、高水敷先端近傍で平均速度は小さくなるのに対し乱れ速度は大きくなり、また、高水敷存在の影響は高水敷先端より舌状に広がることが知れ、複断面流れの特性がより明瞭となる。さらに、複断面流れにおける速度の大きさを単断面流れと比較すると、同一水深のもとでの平均速度は高水敷上では大きくなるが、低水路部では小さくなるとともに、乱れ速度については高水敷上では平均速度と同様に大きくなるが、低水路部内では舌状領域との関係により一概にいえず、水路中央部では若干小さくなるが知れる。以上の特性は、本実験においては低水路水深を一定に保つよう流量が変化させられているため、一般的特性として論ずることはできず、平均および乱れ速度を何らかの方法によって基準化して比較する必要がある。

一方、 $b=12\text{ cm}$ 、 $h=3.6\text{ cm}$ の一定の大きさの高水敷をもつ複断面水路において、流量を変化させることにより水深を変化させた場合の平均および乱れ速度分布を示すと Fig. 3-8 のようになり、高水敷上の水深が増加するにしたがって低平均速度および高乱れ速度を有する舌状領域は自由表面側に広がるが、水深がきわめて大きくなると側壁面の影響が卓越するなどかなり複雑な性状を呈するようになることが知れる。

以上のように、複断面流れの速度分布特性は断面形状に関係し、高水敷幅変化に伴う複断面効果の変化状況については 3.1.2 においてなされた断面平均的抵抗特性に関する検討結果とよく一致するが、水深変化の効果については側壁面の効果などが関連し、速度分布特性のみから判定することは困難である。

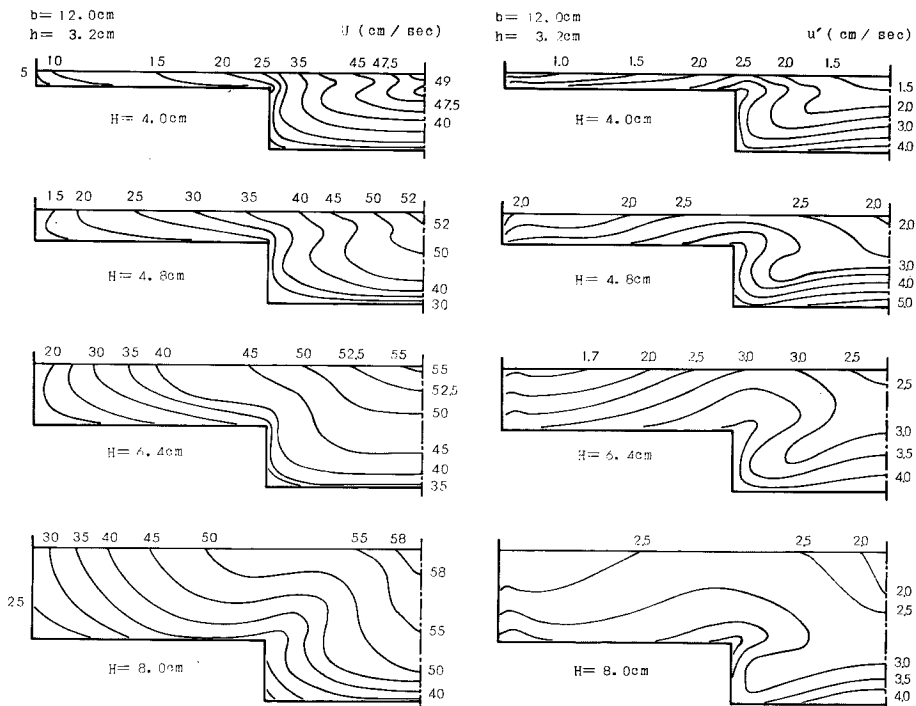


Fig. 3-8 Effect of the depth variation on the velocity distribution.

4. 結 論

本研究は複断面水路における流れの水利学的特性を解明するための第一段階として、複断面水路の表面抵抗特性ならびに平均および乱れ速度分布特性について実験的に検討したものであって、得られた結果を列挙するとつぎのようである。

1) 複断面水路の表面抵抗特性を平均・摩擦速度比 U_m/U_f と Reynolds 数 $U_f R/\nu$ との関係より検討すると、高水敷上の水深が小さいとき単断面水路の場合に比し U_m/U_f はかなり大きくなるが、水深が大きくなるにしたがって単断面水路の場合と同様の傾向に近づく。

2) 上に述べた複断面流れの効果は高水敷幅・水路半幅比 b/B によって度合いが異なり、 $b/B \approx 0.4$ のときもっとも顕著となる。

3) 複断面流れの平均および乱れ速度分布は高水敷先端近傍より舌状に広がる低平均・高乱れ速度の存在によって特性づけられるが、その広がりには断面形状によって異なり、 b/B が小さい場合には b/B が大きくなるにしたがって広がりも大きくなるが、 b/B が 1 に近づくると対岸側の高水敷の効果により水路中央部を越えることはできない。

4) 横方向および鉛直方向の平均速度の計測結果によると、高水敷先端近傍から低水路側自由表面に向かう斜昇流、高水敷部自由表面近傍における接岸流および高水敷面近傍における離岸流、ならびに低水路部における高水敷との隅角部に向かう斜降流および中央部路床面近傍における上昇流の存在が認められ、3種のらせん流の存在が類推される。

5) 高水敷先端より舌状に広がる低平均・高乱れ速度の領域では Reynolds 応力もきわめて大きくなっており、流体は激しく混合し運動量輸送が活発となっていることが確かめられる。

6) 流れ方向の平均速度の横方向分布は流れ方向および横方向の乱れ速度間の相関に、また鉛直方向分布は流れ方向および鉛直方向の乱れ速度間の相関によってよく説明され、複断面流れの取扱いにおける乱れ特性解明の重要性が確かめられる。

以上のように、本研究により複断面流れの基本的特性についていくつかの興味ある結果が得られたが、今後においてはさらに乱流構造の解明へと研究を進め、複断面水路における流れの水利特性の解明に役立てたい。

最後に、本研究の遂行にさいし実験ならびにデータ解析に協力された京都大学大学院生浅野富夫氏に対し深甚なる謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Zheleznyakov, G. V.: *Gidravlicheshoe obosnovanie metodov rechnoi gidrometrii*, Izdatelstvo Akademii Nauk, SSSR, Moskva-Leningrad, 1950.
- 2) Sellin, R. J. H.: A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain, *La Houille Blanche*, No. 7, 1964, pp. 793~802.
- 3) 高橋 保：河道における洪水流の特性に関する研究，京都大学学位論文，昭46.10.
- 4) DISA Probe Manual, DISA Elektronik A/S, Denmark, 1970.
- 5) 岩垣雄一：滑面開水路における乱流の抵抗法則について，土木学会論文集，第16号，昭28.4，pp. 22~28.
- 6) Townsend, D. R.: An investigation of turbulence characteristics in a river model of complex cross section, *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, Vol. 40, 1968, pp. 155~175.
- 7) Wright, R. R. and M. R. Carstens: Linear-momentum flux to overbank sections, *Jour. Hydr. Div., Proc. ASCE*, Vol. 96, HY9, 1970, pp. 1781~1793.