

光滑壁面明渠非均匀流水力特性

何建京,王惠民

(河海大学环境科学与工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:在分析激光测速试验资料的基础上,对比了明渠均匀紊流和非均匀紊流在紊流分区结构、流速分布、紊流强度和壁面切应力等方面的水力特性,指出两种流态流速分布公式存在差异,非均匀流的脉动流速、壁面切应力都较均匀流为小,并给出了用新的无量纲参数表达的适用于均匀流和非均匀流的统一的流速公式以及垂线平均流速及其位置的计算公式。

关键词:明渠水流;紊流;光滑壁面;水力特性;非均匀流

中图分类号:TV131.2⁺1

文献标识码:A

文章编号:1000-1980(2003)05-0513-05

河道、渠道中的流动都为明渠水流,而且都为紊流。近 30 多年来,热膜、氢泡技术特别是激光测速技术在明渠紊流和边界层研究领域得到广泛应用^[1],许多学者^[1~5]对明渠均匀紊流做了详细的研究,但工程中遇到的大多为非均匀流问题。非均匀流的水深、能坡等要素与均匀流不同,其流动特性和阻力特性与均匀流不同。因此,非均匀紊流的水力特性有可能与均匀紊流有一定差异。对此,还鲜有研究成果面世。本文使用激光测速仪对明渠均匀紊流和非均匀紊流(M_1 型渐变流)进行了精细的量测,研究了包括紧靠床面的紊流分区结构、流速分布、壁面切应力、粘性底层厚度和紊流度等水力特性,为进一步研究明渠水流和进行水力计算提供了一些有价值的结论。

1 试验装置与方法

本试验研究在可变坡的水槽中进行,水槽长 8 m,宽 0.3 m,高 0.4 m。水槽底板为经过加工和油漆的钢板,两侧壁为玻璃,试验中水面量测使用精度为 0.1 mm 的测针,使用孔板流量计测量流量。

流速的量测使用一维偏振差动式激光测速系统。该系统包括光学探头系统、信号处理系统(差动前置放大器、高低通滤波器、光电转换接口以及计算机)、精密机械调整系统 3 部分。

由于非均匀流水深沿程变化,因此很难确定具有代表性的断面。本文以非均匀流水深 h 与相应均匀流水深 h_0 的比值(称为相对水深)作为变化参数,讨论各种水深条件下非均匀流的水力特性。

试验中将水槽调为正坡,针对每一种流量,分别将水槽中水流调为均匀流和 M_1 型渐变流。 M_1 型水面曲线是缓坡上水深大于均匀流正常水深的壅水曲线。对平原地区河流来说,当下游水位受到控制或受到某种因素的影响而抬高后,上游会形成该种水面曲线,其影响的距离往往很长。对建有水工建筑物的河流来说,这种情况极为常见。因此,研究 M_1 型渐变流有重要的实际意义。

在距水槽进水口 3.4 m 处,用激光测速仪量测断面中心垂线上的流速值。该断面满足 $Re_x > 10^6$ 的条件,处于充分发展紊流区域^[2]。

本试验水槽底坡为 0.25%,水流条件见表 1。非均匀流 5 的量测断面位于非均匀流 4 量测断面下游 50 cm 处,用以比较同一水流条件下不同断面非均匀流特性。

2 试验结果与分析

2.1 紊流的分区结构

根据笔者的试验数据,明渠的均匀流和非均匀流均存在明显的分区结构,可分为粘性底层、过渡层和紊

流区.紊流区的时均流速分布符合对数律,其范围可一直延续到水面,此结果与文献[3,4]的均匀流试验结果一致.图1为垂线流速分布图.其中 $u^+ = u/u_*$, $y^+ = yu_*/\nu$.为便于观察和分析,图中每组试验曲线的纵坐标依次增加4.由图1可知,当 $\lg y^+$ ($y^+ = yu_*/\nu$) 大于1.3后,均匀流和非均匀流的试验数据均符合对数律.

表1 试验水流条件

Table 1 Experimental hydraulic conditions

序号	h/mm	$Q/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$	B/h	h/h_0	Re	Fr	流态
1	40.0	6.27	7.50	1.00	19614	0.83	均匀流1
2	62.0	6.27	4.84	1.55	17579	0.43	非均匀流1
3	52.1	10.00	5.76	1.00	30771	0.89	均匀流2
4	77.3	10.00	3.88	1.48	27360	0.49	非均匀流2
5	88.5	10.00	3.39	1.70	26075	0.40	非均匀流3
6	60.5	7.91	4.96	1.30	15547	0.56	非均匀流4
7	63.0	7.91	4.76	1.35	15365	0.53	非均匀流5

注: $Re = VR/\nu$, $Fr = V/\sqrt{gh}$, V 为断面平均流速, R 为水力半径, h 为水深.

Nezu 等^[1]根据自己的试验资料,认为当 $y/h > 0.6$ 后,流速分布将偏离对数律,可以用 Coles 提出的尾流函数进行修正.但从图1可以看出,笔者的试验数据并没有显示出流速分布具有这样的特性.

图2所示为靠近壁面区域测得的时均流速分布.由图2可知,近壁面处存在一流速线性分布区域,称为粘性底层,此区域内, $u^+ = y^+$. 均匀流和非均匀流均存在粘性底层,其范围为 $y^+ < 12$. 相对水深较大的非均匀流,其粘性底层的范围较均匀流大,如非均匀流3, y^+ 可达13.3.

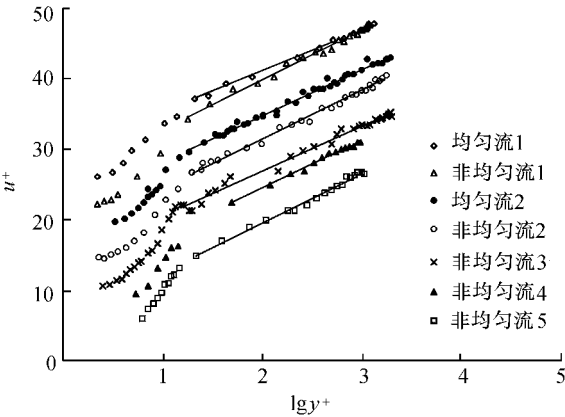


图1 流速分布

Fig.1 Velocity distribution

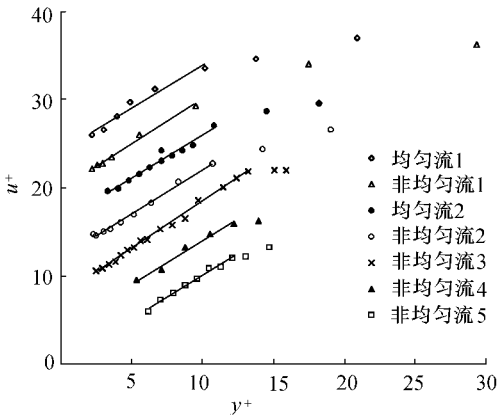


图2 近壁区流速分布

Fig.2 Velocity distribution in near-wall region

粘性底层与紊流区之间,即 $12 \leq y^+ \leq 20$ 区域,为过渡层.本文得到的过渡层范围与文献[1]的 $5 \leq y^+ \leq 30$ 及文献[3]的 $10 \leq y^+ \leq 22$ 基本吻合.从本文给出的试验数据可以看出,随着非均匀流相对水深的增加,过渡层厚度会逐渐变薄.

2.2 流速分布

紊流区流速分布符合对数律,可写为 $u^+ = A \lg y^+ + B$.研究表明,明渠水流十分复杂,用对数公式表达的流速分布式中的 A , B 并不为常数,有一定的变化范围.笔者得到的 A , B 和卡门常数 κ 列于表2.试验数据表明,非均匀流的 κ 值较均匀流小, B 值较均匀流大.从现有数据还难以发现非均匀流本身是否存在这些参数的某种变化规律.

表2 流速公式参数统计

Table 2 Statistics of parameters for velocity equation

项目	A	B	κ	项目	A	B	κ
均匀流1	5.89	5.21	0.390	非均匀流4	6.71	7.10	0.343
非均匀流1	7.04	5.77	0.327	非均匀流5	7.03	5.48	0.327
均匀流2	6.52	5.70	0.353	平均值	6.63	5.88	0.347
非均匀流2	6.85	5.76	0.336	均匀流平均值	6.20	5.45	0.371
非均匀流3	6.36	6.17	0.362	非均匀流平均值	6.80	6.06	0.338

根据表 2 结果, 均匀流流速公式可写为

$$u^+ = 6.2 \lg y^+ + 5.45 \tag{1}$$

非均匀流流速公式可写为

$$u^+ = 6.8 \lg y^+ + 6.06 \tag{2}$$

为了寻求流速分布的统一表达式, 笔者用 $u/\bar{u}$ 作为无量纲流速, y/h 作为无量纲的 y 坐标, 拟合了一新的公式, 即

$$\frac{u}{\bar{u}} = 0.2736 \lg \frac{1000y}{h} + 0.31 \tag{3}$$

式 (3) 中没有出现 u_* , 这样便于公式的应用, 因为对于非均匀流, u_* 很难确定.

图 3 表明, $\frac{u}{\bar{u}}$ 与 $\lg \frac{1000y}{h}$ 具有很好的线性关系, 且均匀流数据与非均匀流数据均符合这一线性关系. 图 4 为相对流速 $u/\bar{u}$ 对相对坐标 y/h 的流速分布, 显然, 均匀流和非均匀流的试验数据均可用式 (3) 描述. 式 (3) 适用于紊流区.

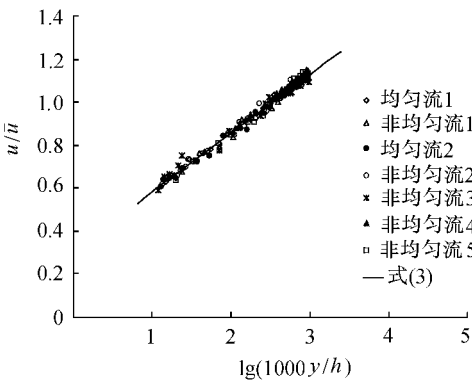


图 3 式 (3) 表示的流速分布

Fig.3 Velocity distribution expressed by equation(3)

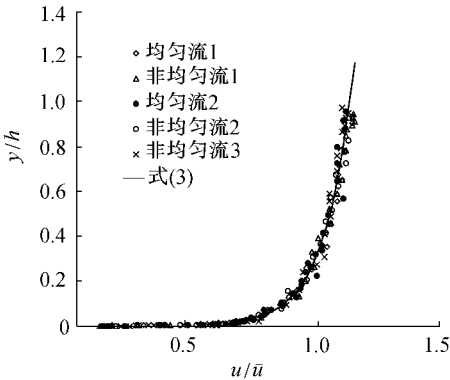


图 4 相对流速分布

Fig.4 Relative velocity distribution

2.3 粘性底层厚度

根据粘性底层的定义, 从图 2 可知, $y^+ < 12$ 的区域属粘性底层的范围. 图 3(a) 显示, 在本文试验条件下, 均匀流粘性底层的绝对厚度为 0.3 mm 左右, 非均匀流则为 0.5 ~ 0.7 mm. 这表明, 随着水深的增加, 粘性底层的厚度也随之增加. 图 3(b) 显示, 明渠水流粘性底层的相对厚度 δ/h 受水温的影响 (非均匀流 4 和 5 试验时水温为 11 ℃, 其他组次试验时水温为 30 ℃左右), 非均匀流 4 和 5 粘性底层的相对厚度明显大于其他组次, 为 0.012; 其他组次粘性底层的相对厚度 δ/h 为 0.007 左右, 均匀流和非均匀流之间无明显差别.

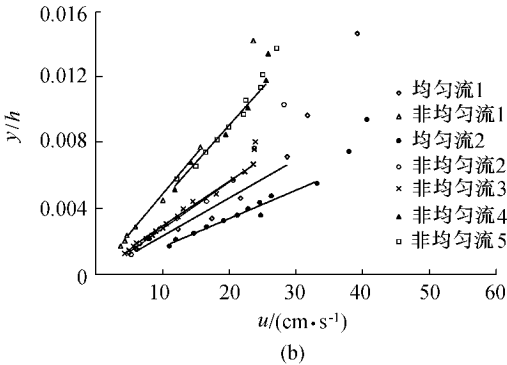
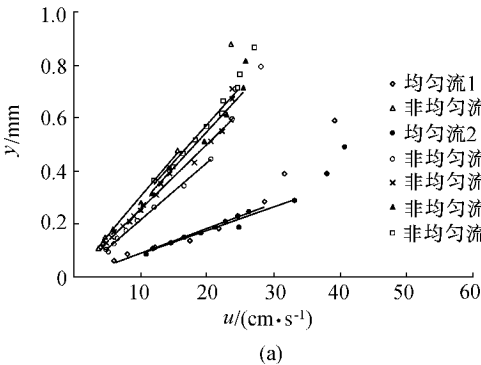


图 5 近壁区流速分布

Fig.5 Velocity distribution in near-wall region

2.4 过渡层范围

在粘性底层与紊流核心区之间存在过渡层, 其流速分布不同于粘性底层和紊流核心区. 本文试验中, 过

渡层的范围为 $12 \leq y^+ \leq 20$ 绝对厚度范围为 $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$.

2.5 紊流度

紊流度的大小可以表明流速脉动的强弱程度. 定义紊流度为

$$N = \frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{u}}$$

(4)

从垂线紊流度的分布可以得到紊动沿垂线的变化规律. 由图 6、图 7 可见, 紊流度最大值范围为 $12 < y^+ < 18$, 最大紊流度约为 0.14. 这一结果表明, 在过渡层范围, 流速的脉动最剧烈. 进入紊流核心区以后, 紊流度逐渐减小. 由图还可看出, 均匀流和非均匀流的紊流度特性基本相同. 本文试验中, 由于均匀流的平均流速大于非均匀流, 因此, 均匀流的脉动流速大于非均匀流.

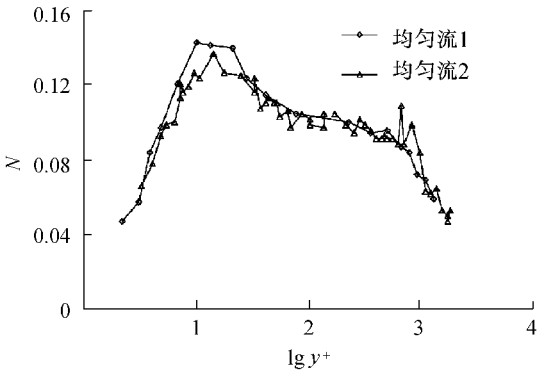


图 6 均匀流紊流度分布

Fig.6 N distribution of uniform flow

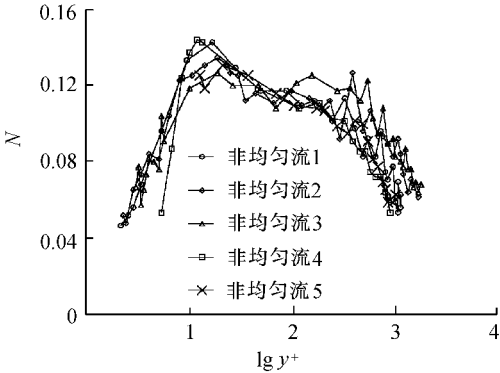


图 7 非均匀流紊流度分布

Fig.7 N distribution of non-uniform flow

由图 6、图 7 可知, $y^+ < 12$ 时, 紊流度随 y 的增加而增大. 这表明, 粘性底层中仍有紊动存在. 因此, 粘性底层的流动不能视为层流.

2.6 壁面切应力

由于激光测速仪可以精确地量测粘性底层的流速分布, 因此采用测粘性底层流速分布的方法确定壁面切应力 τ_0 . 对于二维均匀紊流, 有

$$\tau_0 = \mu \left. \frac{du}{dy} \right|_{y=0}$$

(5)

对于水深沿程变化不大的渐变流, 仍可用式(5)计算 τ_0 .

表 3 列出了试验得到的壁面切应力值. 本文试验中, 同一流量下非均匀流的 τ_0 值明显小于均匀流时的数值; 对于非均匀流, 有壁面切应力随相对水深增加而减小的趋势. 这表明, 随着水深的增加, 壁面摩阻力将会减小.

2.7 垂线平均流速

由紊流各区的流速公式, 沿垂线积分, 可得到垂线平均流速的计算公式

$$\frac{\bar{u}}{u_{*c}} = A \lg \frac{hu_{*c}}{\nu} + B - \frac{A}{2.3}$$

(6)

式中 A, B 为相应对数公式中的常数.

由式(3), 即以 $u/\bar{u}$ 和 y/h 为无量纲数的流速分布公式, 可得到垂线上 $u = \bar{u}$ 那一点的 y 坐标的表达式

$$y \Big|_{u=\bar{u}} = 0.3327h$$

(7)

表 3 试验得到的壁面切应力

Table 3 Experimental shear stress along the wall			
流量组次	均匀流	非均匀流	
	切应力/Pa	切应力/Pa	h/h_0
1	0.90	0.28(非均匀流 1)	1.55
2	0.90	0.37(非均匀流 2)	1.48
		0.29(非均匀流 3)	1.70
3		0.45(非均匀流 4)	1.30
		0.42(非均匀流 5)	1.35

3 结 论

根据激光测速仪对光滑壁面紊流所得的资料,分析和比较了均匀流和非均匀流(M_1 型渐变流)水力特性,并得到如下结论:

- a. 非均匀流与均匀流一样,具有分区结构,并可划分为粘性底层、过渡层和紊流区.
- b. 粘性底层的范围为 $0 < y^+ < 12$, 相对厚度 δ/h 随水温的降低而增大,过渡层的范围为 $12 \leq y^+ \leq 20$, 过渡层厚度有随水深增加而减小的趋势,紊流区的范围为 $y^+ > 20$.
- c. 粘性底层的流速分布为 $u^+ = y^+$. 紊流区的流速分布符合对数律,均匀流时为 $u^+ = 6.2 \lg y^+ + 5.45$ ($\kappa = 0.371$),非均匀流时为 $u^+ = 6.8 \lg y^+ + 6.06$ ($\kappa = 0.338$). 均匀流和非均匀流都符合的公式为 $\frac{u}{\bar{u}} = 0.2736 \lg \frac{1000y}{h} + 0.31$.
- d. 非均匀流与均匀流的紊流度特性基本一致,最大紊流度出现在过渡层,最大值范围为 $12 < y^+ < 20$, 最大值为 0.14. 非均匀流 $\sqrt{u'^2}$ 值小于均匀流.
- e. 垂线平均流速计算公式可写为

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = A \lg \frac{hu_*}{\nu} + B - \frac{A}{2.3}$$

式中 A, B 为相应对数流速公式中常数,平均流速的位置可由式 $y \Big|_{u=\bar{u}} = 0.3327h$ 确定.

- f. 当发生 M_1 型非均匀流时,壁面切应力小于相应的均匀流.

参考文献:

[1] NEZU I ,RODI W. Open channel flow measurements with a laser doppler anemometer[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE ,1986 , 112(5): 335—353.

[2] 董曾南,陈长植,李新宇. 明槽均匀紊流的水力特性[J]. 水动力学研究与进展(A 辑),1994, 9(1): 8—21.

[3] 董曾南,丁元. 光滑壁面明渠均匀紊流水力特性[J]. 中国科学(A 辑),1989(11): 1208—1218.

[4] CARDOSO A H ,GRAF W H ,GUST G. Uniform flow in a smooth open channel[J]. Journal of Hydraulic Research ,1989, 27(5): 603—615.

[5] STEFFLER P M ,RAJARATNAM N ,PETERSON A W. LDA measurements in open channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE , 1985, 111(1): 119—129.

Turbulence characteristics of non-uniform flow in a smooth open channel

HE Jian-jing , WANG Hui-min

(College of Environmental Science and Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract Based on the experimental data measured with an LDA system , the turbulence structure , velocity profile , turbulence intensity , and shear stress along the wall are compared for non-uniform and uniform flows. The velocity profile of the non-uniform flow is different from that of the uniform flow. The turbulence fluctuation and shear stress along the wall of the non-uniform flow are smaller than those of the uniform flow. Finally , a unified formula for calculation of velocity distribution for both the uniform and non-uniform flows , expressed with new dimensionless parameters , is also presented.

Key words open channel flow ; turbulence ; smooth wall ; hydraulic characteristics ; non-uniform flow