

光滑壁面明渠底壁切应力试验研究

陈小芳, 何建京

(河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 在分析 Preston 管量测试验资料的基础上, 对比了明渠均匀流和非均匀流的底壁切应力在不同水力条件下的规律, 指出断面中心处底壁切应力、平均底壁切应力和切应力的分布等几个切应力公式在均匀流时适用, 在非均匀流时不全适用。均匀流时, 切应力在同一坡度下随流量的增加而增大, 在同一流速下随坡度的增加而增大。非均匀流时, 在相对水深相同时, 其相对底壁切应力大致相同。

关键词: 明渠; Preston 管; 底壁切应力; 非均匀流

中图分类号: TV133 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2007)06-0704-05

明渠水流边界切应力是一个十分重要的参数, 许多学者都对这方面做了研究。1969 年 Rajaratnam 等^[1]进行了一系列试验, 试验研究成果表明, 边界切应力的相对值仅为宽深比的函数, 而与弗劳德数无关。边界切应力分布主要决定于过水断面形式。Knight 等^[2]通过试验, 研究了矩形明渠流边壁及底壁平均切应力随宽深比的变化规律。杨树清^[3]根据糙率沿湿周均匀分布与沿湿周变化 2 种情况分别给出了边壁及底壁平均切应力公式。结果得出矩形明渠流中, 边壁最大切应力应位于水面附近, 底壁最大切应力位于中心线附近。2002 年胡旭跃等^[4]在分析水体能量消耗物理模式的基础上, 提出了面积分割的补充关系。对于河床和岸壁糙率相同的情况, 利用静力平衡条件和水流连续方程, 推得水流槽底、岸壁切应力的计算关系式。

前人的研究多为通过理论分析得到壁面切应力的计算公式, 采用试验方法研究的只有少数几个, 这方面的试验资料很有限。对于明渠存在均匀流及非均匀流的不同流动类型, 大多数研究都没有分开讨论。非均匀流的水深、能坡等要素均与均匀流不同, 其流动特性和阻力特性与均匀流也不同。因此, 非均匀流的切应力情况有可能与均匀流有一定差异。笔者采用 Preston 管对光滑壁面明渠的底壁切应力进行了量测, 分析比较了均匀流及非均匀流 2 种流动类型下的不同规律, 为进一步研究壁面切应力提供参考。

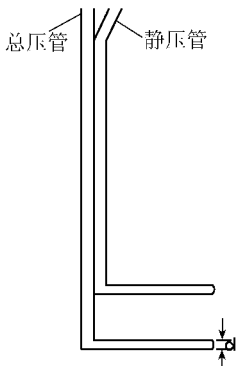


图 1 Preston 管简图

Fig.1 Sketch of Preston tube

1 壁面切应力的测量方法

本试验采用自制的 Preston 管(图 1)量测壁面切应力。Preston 管量测法为将 Preston 管固定在产生了紊流边界层的壁面上量测壁面切应力的方法。把 Preston 管(总压管)和静压管连在一起, 对于渐变流可认为沿垂直方向的压强符合静水压强分布规律, 故静压孔的测压管水头即近似等于量测点(总压管进水孔处)的测压管水头。试验时, 将 2 个管测得的压差代入率定曲线即可求得切应力。文献 5-6 对各种自制的 Preston 管进行了率定和校验, 结果发现它们与 Preston^[7]提出的率定曲线能够很好地吻合, 并且还指出头部形状和尺寸对 Preston 管的率定影响很小。这一结论允许直接使用自制的 Preston 管来量测切应力。

2 试验方法和内容

2.1 试验装置与量测过程

试验在长 8.0 m、宽 0.3 m、高 0.4 m 的矩形水槽中进行。水槽底壁为钢板, 两侧壁为玻璃。水深用精度为

0.1 mm 的测针量测. 试验用到的 Preston 管外径为 0.22 cm 和 0.20 cm 2 种, 将它们分别固定在距水槽进口 2.3 m 和 3.9 m 的位置量测.

本试验主要量测的是水槽底壁的切应力, 分 2 个阶段进行. 第 1 阶段量测断面中心处的底壁切应力, 第 2 阶段, 在同一过水断面, 从边壁到断面中心, 分别取几个点量测底壁切应力. 每个阶段都先给定一个坡度, 在 同一流量下, 通过调节下游尾门来量测不同水位下的切应力, 一个坡度选取几个不同的流量分别量测. 坡度 分为缓坡和陡坡 2 种.

2.2 试验方法和数据

试验中均匀流需通过尾门控制下游水位的调节, 使水槽中分别出现壅水和降水曲线来形成. 经多次反复 调节下游水位后, 在 2 种水面曲线转换过程中, 可调出水深沿程不变的均匀流. 非均匀流试验中, 调节尾门抬 高下游水位即可形成不同水深的非均匀流.

在明渠均匀流中, 切应力 $\tau_0 = \gamma R J$, 其中 $\gamma = \rho g$, ρ 为水的密度, g 为重力加速度, R 为水力半径, J 为水 力坡度. 笔者测量时的试验水力条件见表 1 和表 2.

表 1 均匀流试验水力条件

Table 1 Hydraulic test condition of uniform flow							
底坡	水深/m	宽深比	流量/ (L·s ⁻¹)	切应 力/Pa	雷诺数 <i>Re</i>	弗劳 德数 <i>Fr</i>	坡型
0.001 25	0.047 0	6.383	5.590	0.480	17 094	0.58	缓坡
0.002 5	0.036 5	8.219	5.590	0.738	16 308	0.85	缓坡
0.002 5	0.046 5	6.452	7.906	0.873	23 976	0.84	缓坡
0.002 5	0.054 0	5.556	9.682	0.892	28 285	0.82	缓坡
0.002 5	0.056 8	5.282	11.180	1.016	30 823	0.88	缓坡
0.002 5	0.064 0	4.688	12.550	1.038	35 559	0.82	缓坡
0.005	0.028 5	10.526	5.755	1.148	18 383	1.27	陡坡
0.005	0.034 5	8.696	7.906	1.500	24 429	1.31	陡坡
0.005	0.039 7	7.557	9.682	1.646	29 100	1.30	陡坡
0.005	0.043 8	6.849	11.124	1.664	32 726	1.29	陡坡
0.005	0.047 0	6.383	12.550	1.792	36 320	1.31	陡坡
0.005	0.0510	5.882	13.693	1.918	38 840	1.27	陡坡

表 2 部分非均匀流试验水力条件

Table 2 Partial hydraulic test conditions of non-uniform flow									
底坡	水深/ m	相对水深 <i>h/h</i> ₀	宽深比	流量/ (L·s ⁻¹)	切应 力/Pa	雷诺数 <i>Re</i>	弗劳德 数 <i>Fr</i>	坡型	
0.002 5	0.074 6	2.044	4.021	5.590	0.213	13 542	0.29	缓坡	
0.002 5	0.057 8	1.243	5.190	7.906	0.582	22 673	0.61	缓坡	
0.002 5	0.072 0	1.333	4.167	9.682	0.461	26 446	0.53	缓坡	
0.002 5	0.079 6	1.474	3.769	9.682	0.400	25 571	0.46	缓坡	
0.002 5	0.092 4	1.711	3.247	9.682	0.294	24 220	0.37	缓坡	
0.002 5	0.072 3	1.130	4.149	12.550	0.792	34 232	0.69	缓坡	
0.002 5	0.083 2	1.300	3.606	12.550	0.559	32 632	0.56	缓坡	
0.002 5	0.090 2	1.409	3.326	12.550	0.479	31 681	0.49	缓坡	
0.002 5	0.099 0	1.547	3.030	12.550	0.439	30 561	0.43	缓坡	
0.005	0.029 8	1.046	10.067	5.755	1.154	17 823	1.19	陡坡	
0.005	0.059 5	1.725	5.042	7.906	0.569	21 514	0.58	陡坡	
0.005	0.068 2	1.977	4.399	7.906	0.448	20 656	0.47	陡坡	
0.005	0.123 7	3.586	2.425	7.906	0.232	16 468	0.19	陡坡	
0.005	0.074 6	1.879	4.021	9.682	0.424	25 122	0.51	陡坡	
0.005	0.045 8	1.046	6.550	11.124	1.577	32 008	1.21	陡坡	
0.005	0.077 8	1.776	3.856	11.124	0.531	27 512	0.55	陡坡	
0.005	0.051 8	1.102	5.792	12.550	1.586	36 081	1.13	陡坡	

注: *h* 为量测时水深; *h*₀ 为底坡流量均相同时均匀流对应的水深.

3 试验结果与分析

3.1 试验资料的可靠性

为了验证此试验所采用的 Preston 管量测数据的 可靠性, 在表 1 各水力条件下, 把 Preston 管量测 的切应力和均匀流基本公式 $\tau_0 = \gamma R J$ 求得的切应力相比较, 结果得其相对误差小于 10%. 由此, 可以认为本 试验采用自制的 Preston 管量测的结果能作为分析讨论问题的依据. 造成 10% 误差的原因可能是试验所用水 槽槽长略显不足, 所形成的均匀流并不是严格意义上的均匀流, 只能是近似的均匀流.

3.2 明渠断面中心处的底壁切应力

1984 年 Knight 等^[2]通过适配自己的试验资料得出计算明渠断面中心处的底壁切应力公式为

$$\frac{\tau_{b中}}{\gamma h J} = a \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{b}{3h} \right)^{0.85} \right] \right\}$$

(1)

式中: *b*——明渠宽度; *h*——水深; *a*——根据试验资料拟合的系数, 取 1.025.

笔者根据试验资料绘制了图 2. 根据数据配得的曲线系数 *a* 在图 2(a)(b)(c)(e)中为 0.95, 略小于 1.025, 而在图 2(d)中为 0.75, 在图 2(f)中为 0.8.

由图 2 分析可以看出, 断面中心处的底壁切应力随着断面宽深比的增加而增加. 对于均匀流, 不管是陡 坡还是缓坡, 试验值和由式(1)计算出的值比较接近, 可见公式(1)适用于均匀流. 就非均匀渐变流而言: 在陡 坡 *S*₂ 型(相对水深 1.04~1.1)和缓坡 *M*₂ 型(相对水深 0.95~0.99)降水曲线下, 试验值比较符合公式(1)的 规律, 只是拟合的系数较公式(1)小; 在陡坡 *S*₁ 型(相对水深 1.5~4.2)和缓坡 *M*₁ 型(相对水深 1.2~3.0)壅 水曲线下, 试验数据点比较分散, 虽然它本身也具有一定的规律, 但却和公式(1)相差较大. 由此可以看出, *S*₂

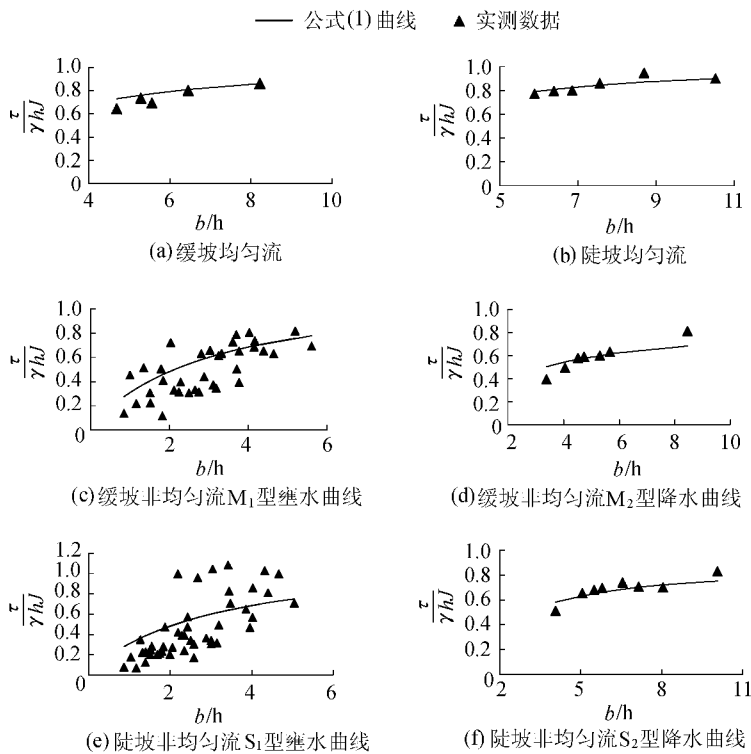


图 2 断面中心处底壁切应力比较

Fig.2 Comparison of bed shear stress along center-line of cross-section

型和 M_2 型降水曲线所测数据和公式 (1) 比较接近, 可能是因为相对水深较接近于 1, 即较接近于均匀流, 因而变化不大, 而 S_1 型和 M_1 型壅水曲线相对水深变化较大, 实际水流与均匀流相差较大. 公式 (1) 是在均匀流基本方程 $\tau_0 = \gamma R J$ 的基础上推导而得的, 因此, 将均匀流基本方程应用于非均匀流情况时, 应考虑其适用性.

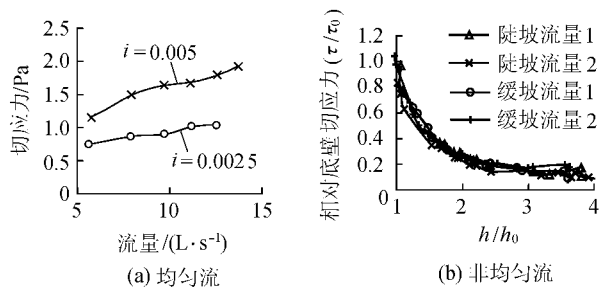


图 3 底壁切应力比较

Fig.3 Comparison of bed shear stress

变化(流量 1 为 7.906 L/s, 流量 2 为 9.682 L/s). 由图 3(b) 可以看出, 随着相对水深的增大, 相对底壁切应力逐渐减小, 非均匀流在相对水深相同时, 其相对底壁切应力大致相同.

3.3 底壁平均切应力

Knight 等^[2]通过试验分析得出的计算底壁平均切应力公式为

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\gamma R J} = (1 - 0.01 e^{\alpha}) \left(1 + \frac{2h}{b} \right) \tag{2}$$

其中

$$\alpha = -3.230 \lg \left(\frac{b}{h} + 3 \right) + 6.146$$

文献[3]假定, 在三维流动中, 流场中任一处所具有的机械能总是沿到边界最接近的方向向边界传递, 并依此假定给出了计算平均切应力的公式

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\gamma RJ} = \begin{cases} \left(1 - \frac{h}{b}\right) \left(\frac{2h}{b} + 1\right) & \frac{b}{h} > 2 \\ \frac{1}{4} \frac{b}{h} \left(\frac{2h}{b} + 1\right) & \frac{b}{h} \leq 2 \end{cases} \quad (3)$$

胡旭跃等^[4]通过对资料及研究成果的分析,得出了另一个计算底壁平均切应力的公式

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\gamma RJ} = \begin{cases} \left(1 - 1.25 \frac{h}{b}\right) \left(\frac{2h}{b} + 1\right) & \frac{b}{h} > 2.5 \\ 0.2 \frac{b}{h} \left(\frac{2h}{b} + 1\right) & \frac{b}{h} \leq 2.5 \end{cases} \quad (4)$$

根据式(2)~(4)及本试验数据绘制成图4.图中所示平均切应力是根据沿宽度选取几个不同点所测得的切应力加权平均所得,故能减小因测量位置不同而带来的误差.由图4(a)可以看出,均匀流时试验测得的平均切应力略低于几个公式的计算值,但从总体看,试验数据还是和几个公式的规律比较接近的.

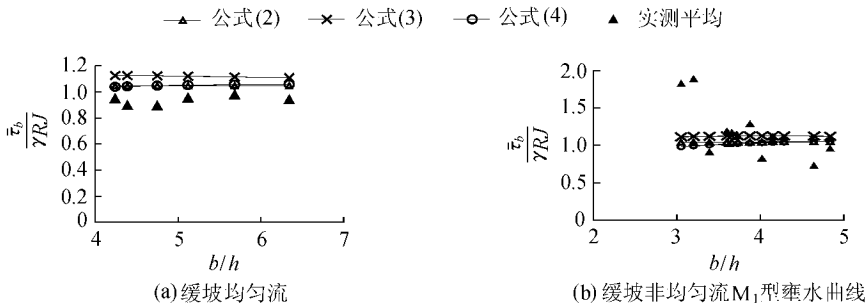


图4 底壁平均切应力比较

Fig.4 Comparison of mean bed shear stress

从图4(b)所显示的规律可以看出,在缓坡非均匀流 M_1 型壅水曲线时,非均匀流底壁平均切应力很复杂,并不和理论值所要求的规律相同.因此,式(2)~(4)在明渠缓坡非均匀流 M_1 型壅水曲线时并不适用.

3.4 底壁切应力的分布规律

切应力沿边界的分布规律是一个非常重要的课题,是研究水流结构及水流阻力的主要因素.在圆管流和平板流中,切应力沿边界是均匀分布的,并可直接通过力的平衡关系推导而得,但对于矩形或其他形状的明渠或管流来说,其边界切应力分布是不均匀的.特别是对于矩形明渠,随着明渠边壁糙率和宽深比的变化,边界切应力分布将发生变化.

图5显示了切应力沿宽度的分布, z 方向为沿断面从边壁到中心再到另外一边的方向.由图5可以看出,切应力以中心线为中心,两边基本上呈对称分布.但2个不同的宽深比的切应力均存在一个问题,即中间切应力略小,而两边切应力相对较大,这和文献[3]提出的底壁最大切应力位于中心线附近的观点不符.不过,文献[8]也出现了与本文研究相类似的情况,并认为除了二次流的影响外,边壁对水流的影响也是原因之一.笔者认为,试验中的水流不是严格意义上的二维流动,水流的三维性质引起流速沿断面分布不均匀,从而造成试验结果所显示的切应力沿宽度分布不均匀.关于这方面的研究目前还不成熟,还有待进一步开展.

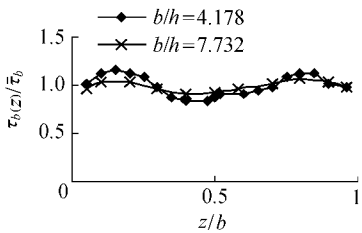


图5 切应力沿宽度分布

Fig.5 Shear stress distribution along width of cross-section of open channel

4 结 论

a. 对一指定明渠,均匀流在同一坡度下,流量增加,底壁切应力增大,在同一流量下,坡度增加,底壁切应力增大;非均匀流在相对水深相同时,相对底壁切应力大致相同,随着相对水深的增大,相对底壁切应力减小.

b. 断面中心处的底壁切应力:对于均匀流,式(1)适用;对于非均匀渐变流,使用式(1)时需考虑其是否适用,当相对水深较大时,式(1)不适用.

c. 底壁平均切应力随着断面宽深比的增大而增大,式(2)~(4)对均匀流适用,对缓坡非均匀流 M_1 型壅

水曲线并不适用。

d. 将均匀流基本方程 $\tau_0 = \gamma R J$ 应用于非均匀流情况, 必须考虑其适用性。

e. 底壁切应力沿宽度的分布在边壁附近大, 在中间相对较小, 这和之前的底壁最大切应力位于中心线附近的概念不符, 其原因为试验中的水流不是严格意义上的二维流动, 它的三维性质引起的流速沿断面分布不均匀造成了试验结果所显示的切应力沿宽度分布不均匀。

参考文献:

- [1] RAJARTNAM N, MURALIDHAR D. Boundary shear stress distribution in rectangular open channels[J]. La Houille Blanche, 1969, 24(6): 603-609.
- [2] KNIGHT D W, DEMETRIOU J D, HOMED M E. Boundary shear in smooth rectangular channels[J]. Agric Water Manage, 1984, 110(4): 405-422.
- [3] 杨树清. 论矩形明渠流边界切应力分布规律[J]. 泥沙研究, 1993(3): 95-103.
- [4] 胡旭跃, 曾光明. 矩形明渠边界平均剪切应力变化规律研究[J]. 泥沙研究, 2003(4): 42-47.
- [5] PATEL V C. Calibration of Preston tube and limitations on its use in pressure gradient[J]. Fluid Mechanics, 1965, 23: 185-208.
- [6] 郭子中. 自制普林斯顿管的率定及其应用[J]. 华东水利学院学报, 1985, 13(4): 58-63.
- [7] PRESTON J H. The determination of turbulent skin friction by means of pitot tubes[J]. Royal Aeronautical Society, 1954, 58(1): 109-121.
- [8] DONG Zeng-nan, DING Yuan. Turbulence characteristics in smooth open channels flow[J]. Science in China Series A, 1990, 33(2): 63-66.
- [9] 黄纪忠. 明渠断面流速与边壁切应力相关的实验研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1998, 31(5): 12-16.

Experimental study on bed shear stress in smooth open channels

CHEN Xiao-fang, HE Jian-jing

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

Abstract: Based on experimental data measured with a Preston tube, bed shear stresses in uniform and non-uniform flows in open channels were compared under different hydraulic conditions. It is concluded that the formulas for bed shear stress along the center-line, the mean bed shear stress and the bed shear stress distribution are applicable in uniform flow, but not all of the formulas are applicable in non-uniform flow. For uniform flow, the shear stress increases with the discharge at the same slope, and it increases with the slope at the same discharge, while the bed shear stresses in non-uniform flow are almost the same at the same relative water depth.

Key words: open channel; Preston tube; bed shear stress; non-uniform flow