

压力梯度区空化特性试验研究^①

(5)
36-40.51

胡明龙

(河海大学水利水电科学研究所 南京 210098)

TV131.32

摘要 选择二元反弧明流,对压力梯度变幅大、水流结构复杂的反弧段及其下游的水流进行了空化研究。结果表明,随紊流边界层的发展,下切点和水平段连结处,局部绕流速度增大,压力大幅降落,水流紊动加剧,边界层中心附近紊流强度和切应力均达最大,空化数最小,因而,是空化易发部位。

关键词 水工水力学 紊流 压力梯度区 空化 气蚀

长期以来,许多研究者致力于泄水建筑物的空化和空蚀研究。但用常规量测手段,极易扰动水流结构,且数据亦不精确。本课程采用激光测速仪,可以不扰动流场,取得明显效果。

泄水建筑物的水流多数为紊流,由于结构体型与线流不能吻合,使流场呈不稳定状态,水流紊动加剧,紊流边界层得以充分发展。前人研究发现,在紊流边界层的中心附近最易产生空化,其机率均大于外流区和近壁区^[1]。

在反弧段,由于水流受离心力作用,压力梯度变化最为明显,紊流边界层的发展非常典型。近年来,国内一些学者采用二维激光测速仪量测紊流结构,得到紊流边界层的一些基本特征^[2~4]。本文借鉴前人方法,用激光测速仪测定反弧段水流的紊动强度,亦取得较好成果,用以研究压力梯度区的空化特性。

1 试验布置与使用仪器

试验布置见图1。模型采用单圆弧反弧溢流模型,高度120 cm,槽宽20 cm,设计水头24 cm,水头与模型高度比为1:5。堰顶为椭圆曲线,下接WES标准曲线,斜坡坡比为

1:0.75,反弧半径为60 cm,平直段长100 cm。试验水头20 cm,最小流量40 L/s。

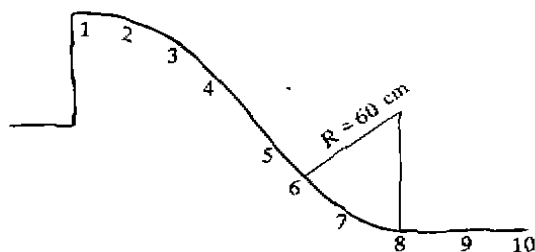


图1 试验布置图

二维激光测速系统由激光器,测速光路系统,光纤传输器,光导探头,频谱信号分析仪及微机等组成。用信号处理器将激光测速仪接收端输出的X、Y方向的信号送入跟踪器,经处理后的模拟信号输入数据处理机,有选择地输出二维分速度的采样值、时均值、瞬时值、分速方差、紊流强度、功率谱和自相关函数等数据,然后进行分析处理。

2 压力梯度区水流紊动结构特征

2.1 沿程流速和压强分布

根据结构体型特征和流程变化特点,可以分成斜坡、反弧、平直段三个流区。从水流在溢流面上的变化可知,边界层逐步由层流向紊流发展,各段流速分布极不相同,受外力影响较大。各特征断面流速分布见图2。

① 水利水电科学基金资助项目,编号:11618907。

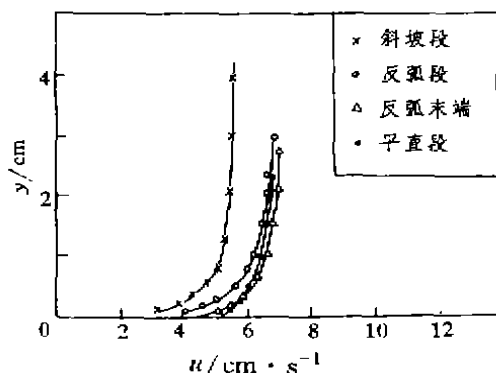


图2 特征断面流速分布

试验结果表明,反弧上的水流,断面压强分布明显高于斜坡和平直段,由于反弧末端边界出现突变,流线失去连续性,压力梯度急剧下降,出现局部低压区,其范围随水头和反弧曲率半径而定,水头愈高,半径愈小,压力愈低。在流速相同条件下,压力值随水深或单宽流量而变,水深越小,压力值越低。

2.2 边界层的流动特性

由曲线段、斜坡、反弧和平直段组成的溢流面,边界层发展受重力、离心力、边壁形状、糙率和沿程阻力等影响,流态复杂。自堰顶到斜坡起点为层流边界层,逐渐向紊流边界层过渡,最后在斜坡中心形成。到反弧中心,因受离心力作用,边界层发展很快。在反弧末端,边界层变薄,全断面水流处在紊动状态中,下切点下游形成二次边界层,并在一定距离,逐步恢复到平板边界层。

由于边界层流动状态对空化生成和发展有显著作用,下面从边界层厚度和分区进一步研究水流结构。

2.2.1 边界层厚度的确定

根据文献[4]的资料,边界层厚度可由如下半经验公式求得:

$$\left. \begin{aligned} \text{对平板绕流 } \delta_1 &= AK^{0.125} S_1^{0.875} \\ \text{对凹曲壁面 } \delta_2 &= \frac{\delta_1}{r} (2 + H) m S_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $A = 0.013$; $K = 0.014$; r 为曲率半径; $H = (2 + n)$, n 为流速分布指数,有机玻璃取 8,混凝土取 5; $m = 0.3$,为曲率影响系数; S_1 和 S_2 分别表示计算边界层起点及曲线起点到计算断面的长度。根据比较,计算值和实测值较为接近,见图 3。

从边界层沿程发展可以看出:

a. 堰顶段为层流边界层,随流量变化不明显。

b. 转捩点在斜坡上,其厚度及其后的紊流边界层均比层流边界层厚。

c. 因受正压力梯度影响,上切点上游紊流边界层充分发展,并开始增厚;末端压力陡降,边界层减薄,在下切点附近最薄,形成二次边界层。

d. 在下切点下游,全断面水流处于强紊状态,压力降达到最低点,对空化形成影响最大。

e. 小流量时,平直段边界层很快发展到水面。

2.2.2 紊流边界层分区

试验表明,紊流边界层有明显分区,分内区和外区,内区又分粘性底层、过渡层和紊流层。这种自然形成的边界层分区,对研究水流运动很重要,因为,空化多发生在内区的紊流层,对边壁的危害也最大。紊流边界层分

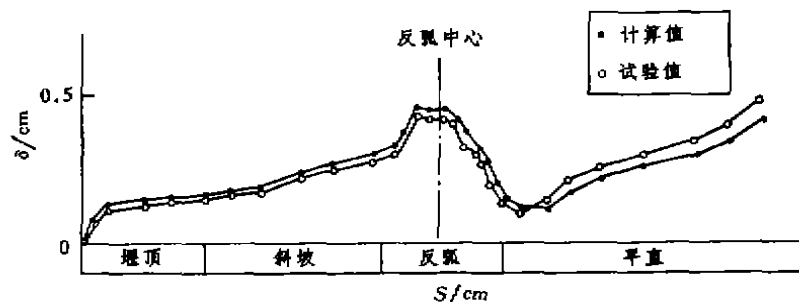


图3 计算值和实测值比较

区见图4^[3]。

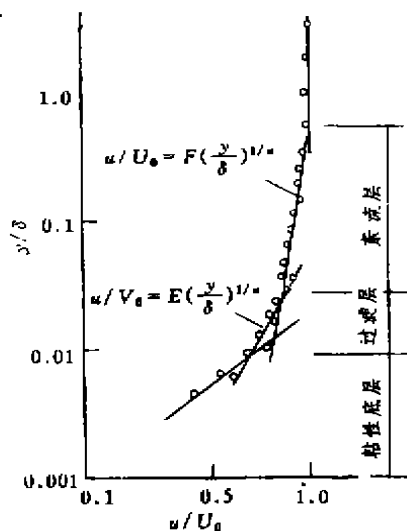


图4 紊流边界层分区

2.3 紊流强度分布及其特点

紊流强度是描述紊流结构的重要参数,也是表述空化数的重要特征值。试验资料表明,在反弧段,受凹壁影响,紊流强度明显增大,在内区 $\sqrt{u'^2}/U_0$ 最大值在粘性底层与过渡层交界附近处;在外区和外流区,沿流方向和法向上的 $\sqrt{u'^2}/U_0$ 值变化较大,脉动呈现由边界层向势流区扩散趋势,见图5。

从Y方向 $\sqrt{v'^2}/U_0$ 分布看出,流体微团混掺加剧,脉动增强,在 $y/\delta > 0.4$ 附近增幅最大,且沿程不断发展,受凹曲壁影响,流

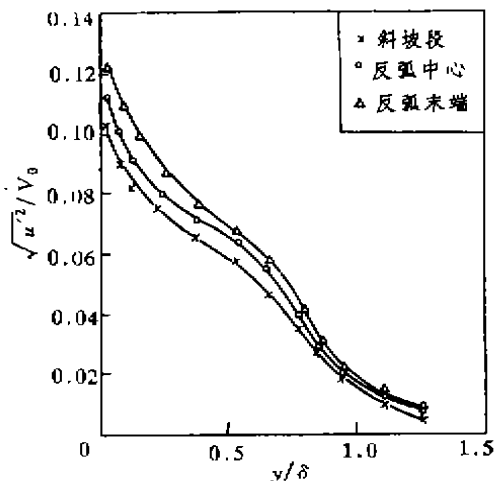


图5 X向紊流强度分布

体微团沿径向掺混加剧,增大了Y方向的紊流强度,见图6。由于沿流向和沿法向的紊动增强,特别是流体微团混掺加剧,引起气核随流上下移动,一部分小气核被吸入边界层内区,带到下游低压区,生长成大气泡,形成空化;一部分逸出边界层,带到外流区。

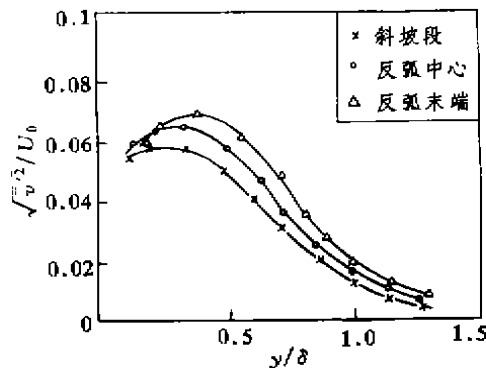


图6 Y向紊流强度分布

根据二元紊流边界层方程解,得知瞬时压力及其梯度与Y方向的紊动分量有关,最小值在 $\sqrt{v'^2}$ 最大处,约在 $y/\delta = 0.2 \sim 0.6$ 处^[5]。这说明该处是边界层水流紊动引起局部压力及脉动压力最小处,由此认为最小压力值应在紊流边界层中。

2.4 紊动切应力特性

根据试验资料整理,反弧各断面紊动切应力分布如图7所示。由图可见,反弧段水流紊动切应力有以下特点:

a. 在斜坡,紊动切应力峰值在粘性底层

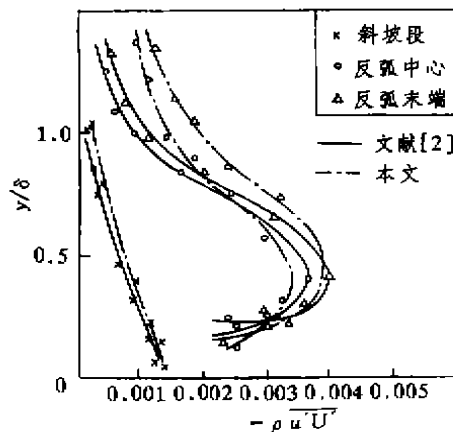


图7 反弧各断面紊动切应力分布

与过渡层交界附近,与 $\sqrt{u'^2}/U_0$ 分布一致。

b. 在反弧,入弧后紊动切应力增大,反弧中心附近比斜坡高近3倍,大致在 $y/\delta > 0.4$ 附近,与 $\sqrt{u'^2}/U_0$ 分布一致。因边界层中部紊动及混掺加强,使较多的时均动能转化为紊动动能,一部分为粘性损耗,一部分在 $y/\delta = 0.4$ 处,向上下方向传递,从而增加边界层内的紊动动能 $\overline{u'^2}$ 和 $\overline{v'^2}$,在反弧末端紊动切应力很快接近峰值。

c. 在平直段,紊流结构由于受壁面的影响极为敏感,水流离弧后,这种影响不能立即消失,故在平直段上要经较长距离才能恢复平板边界层的紊动切应力分布。

综上所述,反弧边界层内的时均和紊动特性会因混掺加剧而产生较大变化,且由于 $-\rho u'v'$ 扩散通量与 u' 和 v' 的特性有关,除对压力梯度有直接影响,促使 v' 增强外, u' 对离心力变化还会间接影响 v' ,因此,压力梯度、离心力和紊动流速的相互作用,促使水流的紊动动量传递。从紊流边界层方程可知,紊动切应力既与边界层厚度有关,又与绕流速度和沿程压力梯度变化有关。而在反弧下切点具有绕流速度大,边界层厚度小和压力梯度变化大的特点,使局部紊动切应力达到最大值。这说明壁面几何形状对水流结构和空化形成具有重要作用。

3 紊流边界层中空化特性

在反弧段水流中,公认有三种效应:①流线变化所产生的压力梯度效应;②凹壁上曲线流动产生的离心压力场效应;③有漩流产生的脉动效应。这三种效应是构成反弧水流的主要特征,因此,研究反弧段边界层中的空化现象必须以此为依据。

空化数是固壁处水流最小压力部位发生空化的判据,因此,判定空化是发生在水流中还是在边壁上,只有确定最小压力值和确切部位才能得知,一般说,出现在靠近壁面水流中的空化最具危害性。

下面将讨论反弧紊流边界层中的泡动力学和水流脉动引起的空化问题。

3.1 紊流边界层泡动力学

Arndt 和 Ippen 对紊流边界层中的气泡群摄像观察表明,气核分布及其变化是边界层相对厚度的函数^[6]。图8是典型的紊流边界层中气核初始分布及其膨胀的曲线,从中可以看出,气核起始分布于整个边界层之中,随流场变化和边界层发展,气核膨胀成气泡,多数集中于边界层中心附近,说明该处气核的生长与边界层发展关系密切,出现空化的机率高于边壁和其它位置。

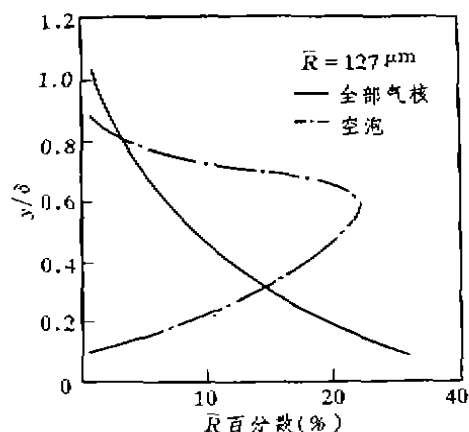


图8 边界层中气核和空泡分布

3.2 脉动流场中空化特性

紊流中各点动水压力、流速和水深等均具有脉动特性,见图9。反弧水流的这种特性更强烈,更具有代表性,有时脉动压力可能低于时均压力,其负值使瞬时压力大为降低,因而,空化的可能性增大。

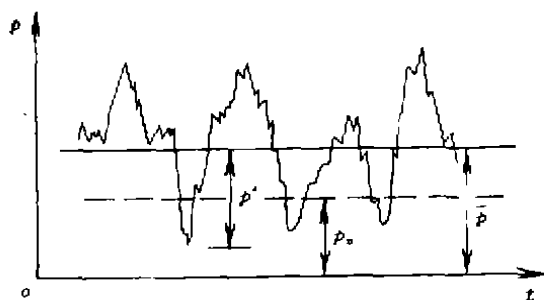


图9 紊流特征值脉动特性

众所周知,水流压力低于饱和蒸汽压力时,气核开始增长,而压力呈现周期脉动时,也会使气核增长。这种生长机理与周期性脉动引起气核半径的非线性效应有关,因为,随脉动压力周期性变化,气核中空气浓度也在不断变化。如平衡状态的气核半径为 R_0 ,则处于脉动正半周的气核半径 $R_1 < R_0$,而处于负半周的半径 $R_2 > R_0$ 。位于正半周,气核呈压缩状态,位于负半周,呈膨胀状态;压缩时泡内气体缩小,膨胀时泡内气体增大。但这两种状态的泡内气体浓度变化是不等量的,由于气体的扩散量与气泡的表面积成正比,在非线形脉动作用下,从气泡外部进入的气体量大于由内向外的扩散量。同时,受气体质量的影响,膨胀时气体总量大于压缩时气体总量,每一循环周期的气体增量促使气泡半径增长,这种现象称为气泡整流扩散作用。

如上所述,紊流非线性脉动引起泡内气体扩散作用,促使气核增长,这就是紊流脉动对空化的效应。

3.3 计入脉动的空化数

由于水流脉动的影响不能忽视,在脉压负峰低于时均压力时空化即已开始,所以,应将其估算进去。

理论上通过雷诺方程分析,反弧水流的紊动项起主要作用,表明在紊流边界层中,局部压力及其梯度均与 y 方向紊动分量有关,同时,最小压力值在 $\overline{v'^2}$ 最大处。

在实验上,前人已作总结,根据 Daily 和 Johnson 所做的二元光滑边壁剪力紊动区内初生空化研究,在减压情况下,观察到空化发生在靠近边界层中心部位。Arndt 和 Ippen 采用同样方法,对二元粗糙边壁所做的紊流边界层内初生空化研究,也得到同样结果。因此,结论是:紊流边界层内剪力流产生的局部最小压力,不论平均值或瞬时值均低于边壁^[7],结果与本文一致。

作者曾经提出^[8],用紊流强度 $\sqrt{\overline{v'^2}}/U_0$ 来表达空化数,这样就可由激光测速仪量出紊流强度,很容易得出空化数,于是,得到:

$$\sigma = \bar{\sigma} - 4(\sqrt{\overline{v'^2}}/U_0)^2 \quad (2)$$

$$\bar{\sigma} = \sigma + 4(\sqrt{\overline{v'^2}}/U_0)^2 \quad (3)$$

式(2)为瞬时空化数,式(3)为时均空化数,以便于工程设计者应用。公式推导详见文[8]。

4 算 例

以刘家峡泄洪洞为例(资料取自水利水电科学研究院模型试验和《坝工建设技术经验汇编》),1972年泄洪时数为314.5h,水库最高水位1720.65m,闸门开度3.5m,上游水位至反弧末端落差104.5m,泄流量580m³/s,水深1.16m,单宽流量44.615m³·s⁻¹·m⁻¹,局部平均流速38.46m/s。由此得出时均空化数为0.23,紊流强度 $\sqrt{\overline{v'^2}}/U_0 = 0.087$ 时,瞬时空化数为0.20,加上反弧末有高为1.2cm弧形横向接缝和5个高3~6cm的钢筋头,因此,空蚀破坏时的瞬时空化数远小于0.20,表明严重破坏是不可避免的。

本次实验所得结果见附表。

附表 瞬时空化数与时均空化数比较

断面 序号	堰顶段			斜坡段		反弧段			平直段	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
σ	3.96	1.54	1.08	0.43	0.31	0.29	0.28	0.25	0.21	0.26
$\bar{\sigma}$	4.12	1.60	1.13	0.46	0.37	0.35	0.33	0.28	0.25	0.24

5 结 语

通过对二元反弧明渠水流结构的研究,可以清楚地看到在压力梯度变化区,水流是十分复杂的,其空化特性亦最为典型,可得如下结论:

a. 受凹壁影响,边界层内出现纵向和法向不同紊流强度分布, $\sqrt{\overline{u'^2}}/U_0$ 最大值在粘性底层和过渡层交界处; $\sqrt{\overline{v'^2}}/U_0$ 最大值在边界层中心, $y/\delta > 0.4$ 处增幅最大。

b. 反弧水流紊动切应力与边界层厚度有关,末端势流速度大,压力梯度大,边界层厚度小,故切应力最大,空化的机率非常大。

(下转第51页)

试样和陶土板间保持良好的水力联系。

测定时,调节排水管垂直向下的长度,向土工织物施加吸力。此时土工织物开始排水,直至稳定后,排水完全停止。观测施加的吸力和排水量,也可直接测定土工织物的含水率。排出水量即为该组孔隙的总体积。由式(2)计算出孔隙的直径。吸力由小至大逐步增加,孔隙由大到小逐级排空,这样即可获得各组孔隙的孔径和含量。

2.2 承压时的孔隙分布测定

测定步骤和方法与上述基本相同,只是在测定前向橡胶袋内加压缩空气,土工织物承压后产生压缩变形并开始排水,此时的排水量即为土工织物的压缩量。待压缩变形稳定后,再进行孔隙分布的测定。

一次试验完成后,把试样烘干,重新测定一次,可获得在缩水后土工织物的孔隙分布以及孔隙分布的缩水变化。

3 测定范围

试验结果表明,土工织物受压变形后,孔隙明显减小。特别是大孔隙减小甚为显著,而细微孔隙反而增加,这是由于大孔隙压缩成小孔隙的结果。

测定中发现,土工织物的缩水性较大。为模拟野外的工作条件,第一次测定后,应把试样烘干后重新测定。第二次测定结果较第一次有明显的改变。这些资料对设计人员是重要的。随着土工织物在工作条件下使用年限的延长,它的渗透性有减小的趋势,除了孔隙被泥沙颗粒淤堵以外,土工织物的缩水性也是其中一个重要原因。

本方法所用仪器可以测定任一厚度的无纺型土工织物,以厚型的效果较好。测定孔径范围为 $1 \sim 0.001 \text{ mm}$ 。土工织物承受的土压力范围为 $0 \sim 500 \text{ kPa}$ 。该仪器也可用于其它多孔介质孔隙分布的测定。本方法已获国家实用新型专利(专利号:86210123.9)。

参考文献

- 1 刘才良,舒世馨.土工织物孔隙分布的测定方法.岩土工程学报,1987(7):53~58
- 2 刘才良,舒世馨.受压土工织物孔隙分布的测定方法.水利水电技术,1990(7):48~54
- 3 Stugt L C P M. Drainage envelope research in the Netherlands. In: The Corrugated Plastic Tubing Association of US and Canada ed. Proceedings 2nd International Drainage Workshop, Washington D C USA 1982. 106~123

(收稿日期:1995-06-15)

(上接第40页)

c. 因凹壁作用,紊动长度积分尺度大于平板边界层,峰值在边界层中部附近。

d. 反弧末端低压区与水深或流量有关,浅水深或小流量易发生空化,故工程运行和设计应特别注意。

e. 水流脉动对空化的发生和发展不可忽视,在工程设计中必须考虑其影响,维持长时间低空化数会造成空蚀破坏,为便于设计者运用,给出了两种空化数判别式。

参考文献

- 1 Arndt R E A, Daily J W. Cavitation phenomena in turbulent boundary layer. Cavitation State of Knowledge, 1969
- 2 董曾南,陈长植,赵建民.溢流坝反弧段水流的紊

动特性.水利学报,1990(12):9~17

- 3 陶晓峰,董曾南.光滑溢流坝面水流边界层特性试验研究.水利学报,1984(6):1~9
- 4 翁情达等.溢流坝面紊流边界层的发展及其应用.水利学报,1984(6):10~18
- 5 Daily J W, Johnson V E. Turbulence and boundary layer effects on cavitation from gas nuclei. Trans. ASME. 1956, 78(8):1695~1706
- 6 Arndt R E A, Ippen. Rough surface effects on cavitation inception. J Basic Eng, 1968, 90(2): 249~261
- 7 Knapp R T, Daily J W, Hammitt F G. Cavitation. McGraw-Hill Book company, 1970: 59~86
- 8 胡明龙.泄洪洞反弧段下游空化特性分析.水利学报,1983(3):14~21

(收稿日期:1995-06-06)