

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.01.003

矩形明渠中矩形边墩周围紊动强度和雷诺应力分布特性试验

郭维东¹ 魏 爽¹ 孙红梅²

(1. 沈阳农业大学水利学院 辽宁 沈阳 110161 ; 2. 沈阳市热力工程设计研究院 辽宁 沈阳 110014)

摘要 利用声学多普勒流速仪 (ADV) 测量矩形断面明渠中矩形边墩周围不同垂线、不同测点的瞬时流速, 计算出水质点的三维相对紊动强度和雷诺应力, 分析其变化特征。试验表明, 紊动强度和雷诺应力在边墩周围明显增大且具有相类似的分布特征。该研究可为水流的紊动结构、丁坝与桥梁矩形边墩的水流紊动特性和冲刷机理提供验证资料。

关键词 矩形边墩 紊动强度 雷诺应力

中图分类号 :TV131.2⁺1 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2010)01-0014-05

Experimental study on turbulence intensity and Reynolds stress around rectangular cross-section cylinders in rectangular open channels // GUO Wei-dong¹, WEI Shuang¹, SUN Hong-mei² (1. College of Hydraulic Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; 2. Shenyang Thermal Engineering Design and Research Institute, Shenyang 110014, China)

Abstract : The acoustic Doppler velocimeter (ADV) was employed to measure the instantaneous velocities of different vertical lines and measuring points around a rectangular cross-section cylinder in a rectangular open channel. The three-dimensional relative turbulence intensity and Reynolds stress of water particles were calculated, and their variation characteristics were analyzed. The experimental results indicate that the turbulence intensity and Reynolds stress obviously increase near the cylinder and their distribution characteristics are similar. The present study may provide test data for the turbulent structure of flows and the turbulence characteristics and scour mechanism of rectangular cross-section cylinders such as bridges and spur dikes.

Key words : rectangular cross-section cylinder ; turbulence intensity ; Reynolds stress

紊流运动是自然界中最为普遍同时又是最为复杂的流动状态, 其运动规律至今尚未被人们了解和掌握, 河道中的水流一般都是紊流。许多工程中的流体力学问题要用紊流理论进行求解。刘月琴等^[1]通过对弯道水流紊动特性进行试验研究, 讨论了弯道水流的紊动机理和紊动特性。高学平等^[2]通过对抽水蓄能电站上库进水口的模型试验, 得出了各流速分量的摆动频率和脉动频率。褚克坚等^[3]通过物理模型试验对 45° 弯段明渠剪切分层流的稳定性进行研究, 说明弯道的存在加剧了分层流的垂向掺混。王凯等^[4]对矩形水槽中梯形边墩周围三维流速进行了测量与研究, 说明了边墩对水流的影响。在过去的几年里, 尽管水流的紊动特性被广泛研究, 但对于矩形断面明渠中矩形边墩周围紊动强度和雷诺应力分布的问题, 有关研究成果的介绍较少, 尚未形成系统的理论研究, 所以很有必要进一步研究。赵升伟等^[5]应用水深平均模型和紊流模型建立了二维数值模型, 模拟了明渠交汇口的基本流动特征。傅春

等^[6]通过将明渠横断面上微元体在水流方向的纳维-斯托克斯控制方程沿水深积分, 得出描绘垂线平均流速和边界剪切应力横向分布的模型。目前, 由于很多复杂现象受到研究条件的制约, 仅仅依靠理论分析与数学模型等方法所得的结果难以令人满意。因此, 物理模拟就成为最直接、最有效的研究方法。本文利用美国 Sontek 公司生产的声学多普勒流速仪 (ADV) 测量矩形边墩周围各测点的流速, 进而计算出紊动强度和雷诺应力的分布形式并进行初步的理论分析, 为诸如桥墩、防洪堤和丁坝等水工建筑物周围的冲刷机理及防护研究提供参考。

1 试验设备及测试方法

1.1 试验设备

该试验在沈阳农业大学水利学院水工大厅内完成。试验水槽长 15 m, 宽 0.60 m, 深 0.40 m, 断面为矩形。水槽和矩形边墩均由有机玻璃制成。为保证均匀流条件与流态的稳定, 矩形边墩放置在水槽入

水口下游 8 m 处,用玻璃胶垂直贴附在明槽右岸边壁上,并使矩形边墩的侧面及底面与水槽保持严格的密封,水流在水槽底部垂直方向保持静止。水槽进口布置消能栅和压波排使水面波动迅速衰减。矩形桥墩长度 $b = 0.16\text{ m}$,宽度 $l = 0.08\text{ m}$,高 $h = 0.40\text{ m}$ (图 1)。

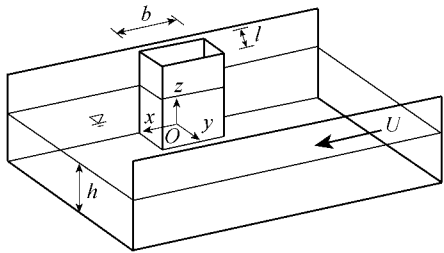


图 1 矩形边墩贴附在水槽边壁上的示意图和坐标系

1.2 测点布置

采用美国 Sontek 公司生产的 ADV 进行测量,该仪器为非接触式流速仪,可以直接测量三维流速,对测点干扰很小,测量精度高、操作简便、无需率定,为分析水流的紊动特征提供了方便。根据对称性原则,自矩形边墩中垂线至边壁布设 6 个测速断面 A、B、C、D、E、F(图 2)。每个测速断面沿水平及铅直方向分别布置 10 个测速点(测速边界 0 和 11 不做测量分析),测点分布参照国际标准 ISO1088 和 JJG 835《速度-面积法》计量检测规程有关规定^[7]。每个测点流速样本不低于 8 个。 x, y 方向的测点距离边墩分别为 2 mm、5 mm、10 mm、20 mm、40 mm、70 mm、110 mm、160 mm、210 mm、260 mm, z 方向的测点距离底部的距离分别为 2 mm、5 mm、10 mm、20 mm、30 mm、40 mm、60 mm、90 mm、130 mm、180 mm,在靠近矩形边墩和水槽边壁处采用侧视探头,其他位置采用俯视探头^[8]。

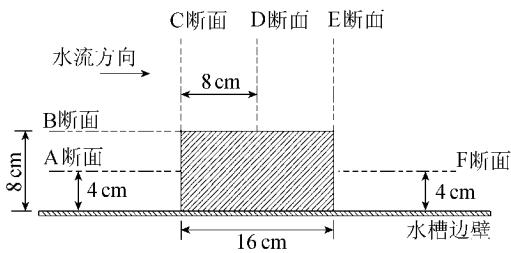


图 2 矩形边墩周围各测量断面的平面示意图

1.3 试验控制条件

ADV 测速的条件如下:试验流量按 $Q_m = 0.03\text{ m}^3/\text{s}$ 控制,通过三角形薄壁堰量测,水流深度取 $h = 0.21\text{ m}$,通过出水口的尾门调节。根据矩形桥墩上游 2 m 处行近流速的垂向分布计算可得水流的时均流速 $U = 0.234\text{ m/s}$ 。试验为恒定流且水流保持紊流状态。弗劳德数 $Fr = 0.205$,试验水温 $T = 14\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。由于 ADV 的使用限制,自由水面以下深 5 cm

范围内的区域,使用 ADV 的向下探头是不能测量的,因此,该水域不在本文的研究与讨论范围之内。

紊流流场中每个测点的速度都是随时间变化的,但是在一段较长的时间内,其时均值是一个相对稳定值。测量时间越长,得到的数值越能反映该点的真实值。但由于时间和成本的限制,经过研究和探索,确定该次试验对每个测点测量 180 s 比较适合。

在笛卡尔三维坐标系(x, y, z)中,紊动强度 3 个方向的分量分别用(u^*, v^*, w^*)表示。分别用矩形边墩的横向长度 l 和时均流速 U 对线性尺度和各紊动强度分量进行无量纲化,则不同垂直断面上紊动强度分布在 $\hat{x}\hat{z}$ 和 $\hat{y}\hat{z}$ 面上显示,其中 $\hat{x} = x/l, \hat{y} = y/l, \hat{z} = z/l$ 。

数据处理的基本公式:

$$\text{平均值} \quad \bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad (1)$$

$$\text{均方值} \quad \bar{u'^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2 \quad (2)$$

式中: u_i 为纵向瞬时流速; N 为统计样本的个数。其他 2 个方向的计算公式与之类似。

2 试验结果分析

2.1 紊动强度

脉动流速是水流紊动的重要特性之一。脉动流速有大小和正负之分^[9],为了比较不同点水流脉动的强弱,常常采用脉动流速的均方根来表示其脉动强度或称紊动强度,水流的脉动结构主要是指紊动强度的分布。紊流的紊动规律比较复杂,特别是绕墩紊流。水流中某一点的紊动强度用脉动流速的均方根表示如下:

$$u^* = \sqrt{\bar{u'^2}} \quad (3)$$

$$v^* = \sqrt{\bar{v'^2}} \quad (4)$$

$$w^* = \sqrt{\bar{w'^2}} \quad (5)$$

式中: u^* 为纵向紊动强度; u' 为纵向脉动流速; v^* 为横向紊动强度; v' 为横向脉动流速; w^* 为垂向紊动强度; w' 为垂向脉动流速。

现有的研究表明,紊动强度沿垂线一般遵循如下规律:自水面向下紊动强度沿垂线逐步增加,在近壁处达到最大值,然后逐渐减小^[10]。该试验根据 ADV 测得水流的三维流速,然后利用 ADV 专用后处理软件 WinADV 进行计算处理,直接获得水流的三维脉动流速。

图 3 给出了无量纲化后的纵向紊动强度 u^+ 沿垂线在各断面上的分布(文中无量纲化后的紊动强度均简称为紊动强度)。从图 3 中可以看出,

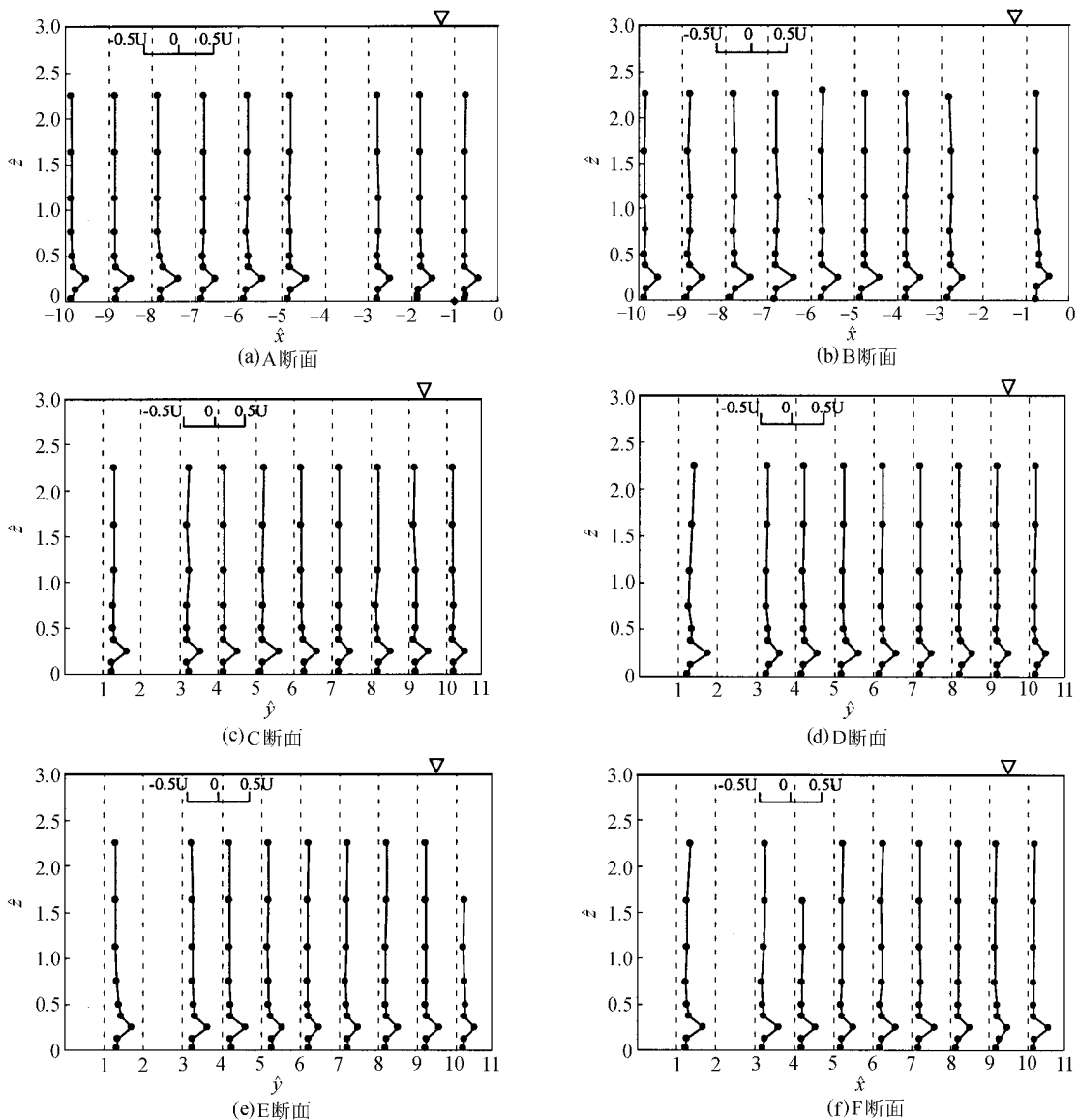


图3 垂直边墩各断面无量纲化后的纵向紊动强度 u^+ 的垂向分布

u^+ ($u^+ = u^*/U$) 在 $z > 0.3l$ 的区域内, 自水面随着相对水深的不断增加, u^+ 变化很小且具有近似的线性分布规律。说明此区域水体动量交换稳定。在 $z < 0.3l$ 的区域内, 由于受槽底和边墩边壁的影响, u^+ 沿垂线变化剧烈, 水体动量交换加剧。在 $z = 0.3l$ 处附近, u^+ 出现最大值, 说明在此部位的动量交换最为剧烈。在靠近槽底附近, u^+ 明显减小, 这是因为在槽底和墩壁交界附近, 水流流速梯度最大、紊动最强烈, 但该处的紊动又受到底壁的限制, 使得紊动强度分量难以维系, 故该处以下接近槽底附近 u^+ 迅速减小。

在边墩上游 (A 和 B 断面), 由于行进水流受到边墩的影响, 局部形成回流区, 所以在边墩附近的水流紊动要剧烈些; 反之则较小。另一方面, 在收缩断面处 (C、D 和 E 断面) 靠近矩形边墩附近, 由于矩形边墩存在, 使槽体断面收缩、行进水流在边墩处产生

分离现象, 紊动强度变化剧烈, u^+ 增大显著, 而在远离边墩处, 紊动强度相对稳定。在下游 (F 断面), 由于断面突然增大, 行进水流形成反向回流区, 在边墩附近的 u^+ 增加剧烈而水流速度减慢; 在远离边墩的区域, 随着流体内部黏性作用和槽底对水流作用的加强, u^+ 逐渐降低。无量纲化后的横向紊动强度 v^+ ($v^+ = v^*/U$) 沿垂线在各断面上的分布与 u^+ 分布类似, 所以 v^+ 与 u^+ 的分布特性类似。限于篇幅, 不再赘述。

图4给出了无量纲化后的垂向紊动强度 w^+ ($w^+ = w^*/U$) 沿垂线在各断面上的分布。 w^+ 的分布特征与 u^+ 和 v^+ 的分布特征有明显不同。在各断面上的紊动强度始终比纵、横向紊动强度略小些。 w^+ 在远离边墩的区域很小, 接近于零; 反之则略有增加。 w^+ 沿整个水深的分布较均匀, 基本成线性规律。通过比较三向紊动强度的分布规律也说明了矩

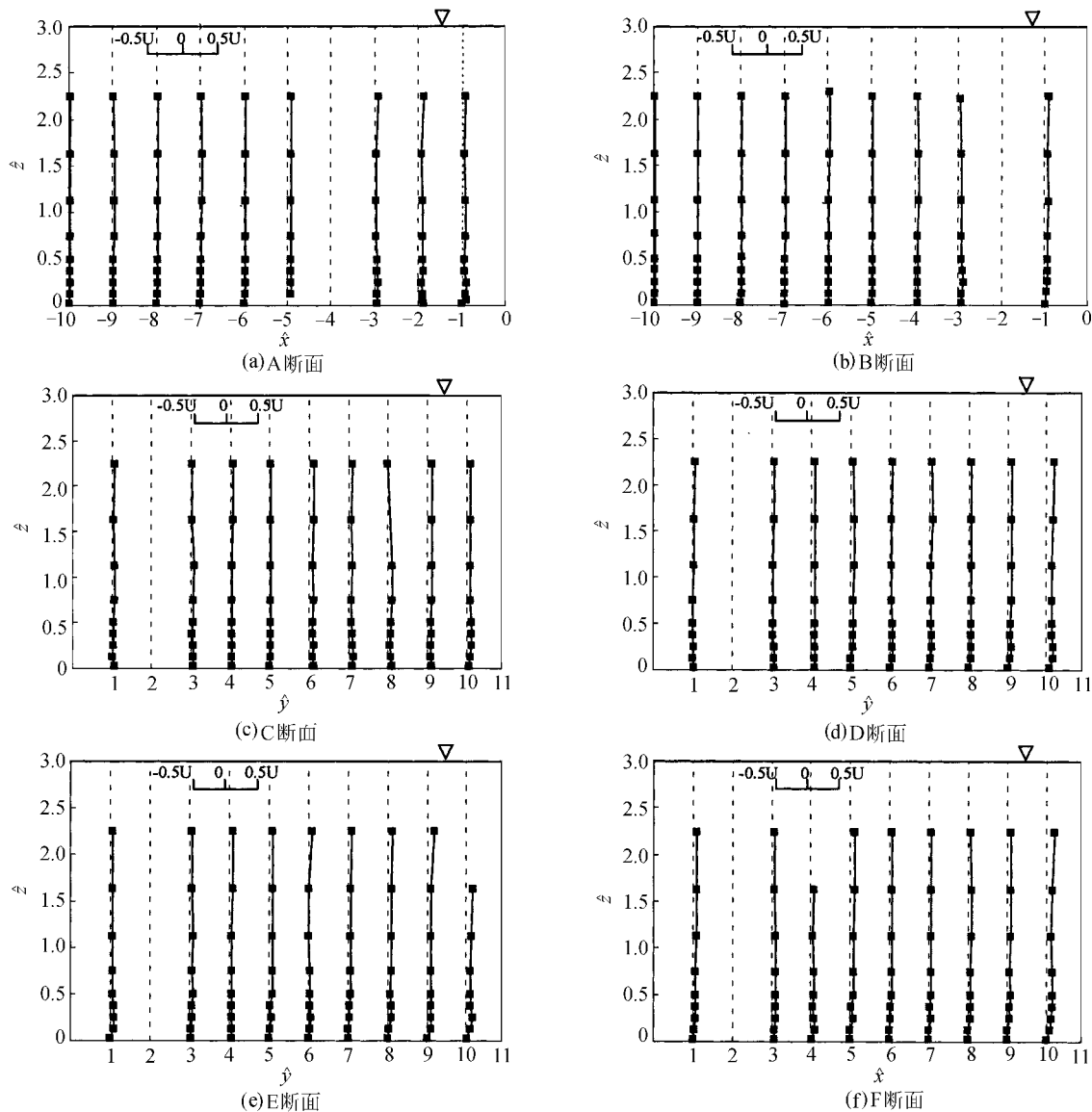


图4 垂直边墩各断面无量纲化后的垂向紊动强度 w^+ 的垂向分布

形水槽中矩形边墩水流的紊流具有各向异性的特点。

2.2 雷诺应力

雷诺应力 $T_{ij} = \rho \overline{u_i u_j}$ 是由紊动水团的交换在流层之间产生的剪切力^[11], 即通过垂直于 i 向平面的单位面积流体的 j 向动量, T_{ij} 则为由于紊动引起的平均动量流。本文由于有了垂线各点的三向脉动流速资料, 可以直接计算出雷诺应力的各个分量, 将雷诺应力无量纲化并对无量纲化的雷诺应力 $R = T_{ij} / (\rho u_*^2)$ (其中 u_* 为摩阻流速) 进行分析。

图5和图6给出了矩形边墩各断面上无量纲化后的雷诺应力 $uw^+ = -\overline{u'w'} / u_*^2$ 和 $wv^+ = -\overline{w'v'} / u_*^2$ 沿垂线的分布情况。从图中可以看出, 在A~D断面位置, 雷诺应力在水深中上区域基本成线性分布, 说明在此区域水流的切变流速稳定, 但越靠近边墩处变化越明显; 在接近边墩底部处雷诺应力变化

显著。另一方面, 在下游区域(E和F断面)由于水流的分离和漩涡的存在, uw^+ 与 wv^+ 分布规律不一致, 但增长速度均很明显; 在边墩附近处, uw^+ 变化显著, wv^+ 波动剧烈, 说明此处水体存在强烈的剪切。雷诺应力 $wv^+ = -\overline{w'v'} / u_*^2$ 与 $uw^+ = -\overline{u'w'} / u_*^2$ 沿垂线的分布情况类似, 故不再赘举。总体而言, 远离边墩的区域, 雷诺应力较小甚至为零; 靠近边墩附近, 雷诺应力变化剧烈, 变幅较大。

3 结 语

a. 利用 ADV 在矩形断面水槽中对矩形边墩周围进行三维流速测量, 进而计算出紊动强度和雷诺应力, 阐述了不同断面处紊动强度和雷诺应力的大小和分布情况。试验结果揭示了矩形边墩周围水流结构的复杂性, 表明由于边墩的影响, 使水流结构发生了变化, 导致紊动强度和雷诺应力分布的特殊性。

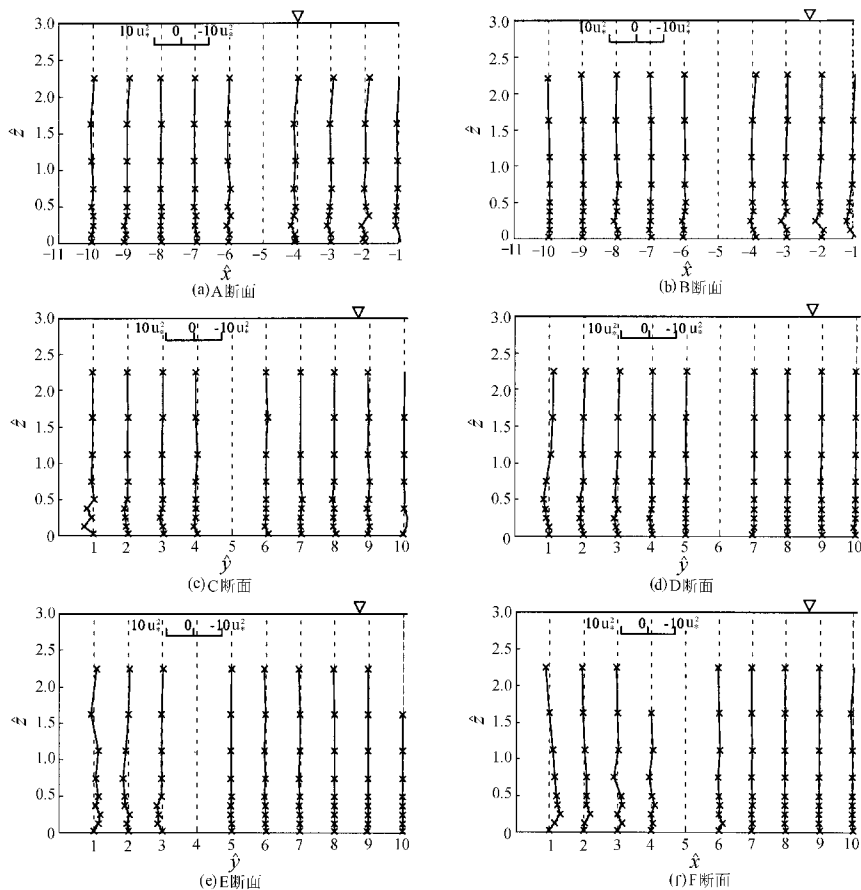


图 5 垂直边墩各断面无量纲化后的雷诺应力 uw^+ 的垂向分布

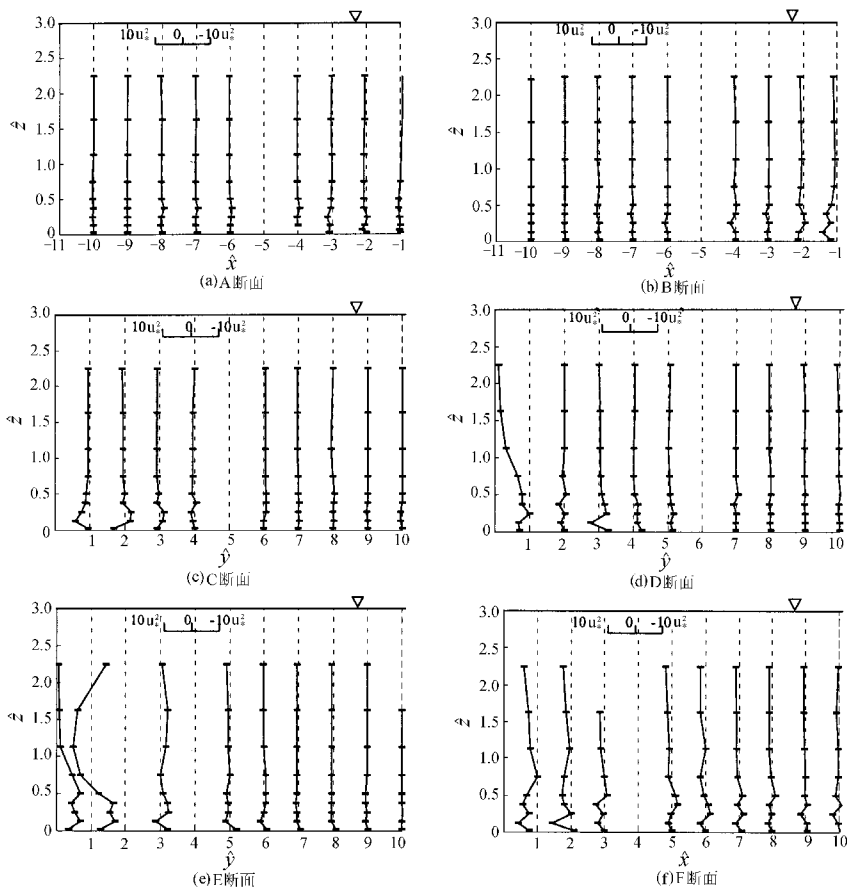


图 6 垂直边墩各断面无量纲化后的雷诺应力 wv^+ 的垂向分布

(下转第 39 页)

蓄方案紧密结合,可以更有效地指导大连市雨洪资源利用,增加区域水资源的可利用量。

河谷型和岩溶型地下储水空间雨洪资源利用模式的主要区别在于,前者在丰水区和平水区重点是通过人工抽取地下水形成降落漏斗,腾出足够的空间储存汛期雨洪,一般不会引起环境地质问题。但岩溶型地下储水空间常伴有海水入侵现象,因此要严格控制地下水位,尽量多存少取,防治地质灾害。

丰水区、平水区、贫水区地下储水空间雨洪资源利用模式的区别主要表现在:丰水区雨洪利用重点在引渗、拦蓄工程,即尽量加长雨洪水和地下储水空间的作用时间。而平水区、贫水区地下储水空间雨洪利用的重点是有效利用储水空间,即尽可能利用人工渗坑或自然低洼地等将水储存起来。

参考文献:

[1] 汤喜春.雨洪资源利用的必要性及其措施探讨[J].湖南水利水电,2005(5):71-73.
[2] 王茂军,张学霞,盖美,等.21世纪大连市水资源供需保障与解决途径研究[J].地域研究与开发,2001,3(20):65-68.
[3] 赵天石,杨绍南.建设地下水库是大连市开发水资源的重要途径[J].水文地质工程地质,2000,27(4):37-39.

(上接第18页)

b. 纵向紊动强度和横向紊动强度的分布规律类似,自水面向下随着水深的增加,紊动强度变化较小,具有近似的线性分布规律;在接近槽底处出现峰值,峰值的产生主要源于附近水体的分流现象,还源于在边墩上、下游近壁处漩涡的产生。试验还表明,由于矩形边墩的存在使紊动强度增大,靠近边墩周围则增幅较大,反之则较小。垂向紊动强度略有变化但不明显。雷诺应力的变化趋势与紊动强度的变化趋势大体相似。

参考文献:

[1] 刘月琴,万艳春.弯道水流紊动强度[J].华南理工大学学报:自然科学版,2003,31(12):89-93.
[2] 高学平,宋慧芳,赵耀南.淹没扩散出流不稳定现象研究[J].水力发电学报,2006,25(4):29-33.
[3] 褚克坚,华祖林,王惠民,等.45°弯段明渠剪切分层流稳定性分析试验研究[J].河海大学学报:自然科学版,2004,33(6):640-643.
[4] 王凯,郭维东,那荣越,等.矩形水槽中梯形边墩周围流速分布的试验研究[J].水动力学研究与进展:A辑,2008,23(1):55-60.
[5] 赵升伟,茅泽育,罗昂,等.等宽明渠交汇水流数值计算[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(5):494-499.

[4] 迟宝明,易树平,李治军,等.大连地区水资源人工调控研究[J].吉林大学学报:地球科学版,2005,35(5):632-635,640.
[5] 陈娟,强桂芬.呼和浩特市雨洪资源利用前景[J].内蒙古水利,2004(1):112-113,119.
[6] 赵天石.关于地下水库几个问题的探讨[J].水文地质工程地质,2002,29(5):65-67.
[7] 杜汉学,常国纯,张乔生,等.利用地下水库蓄水的初步认识[J].水科学进展,2002,13(5):618-622.
[8] 赵天石.地下水库——辽宁省21世纪可持续发展战略的重要选择[J].中国地质,2000(2):26-28.
[9] LEE L E, LAWRENCE D L, PRICE M. Analysis of water-level response to rainfall and implications for recharge pathways in the chalk aquifer, SE England[J]. Journal of Hydrology, 2006, 330(3/4):604-620.
[10] 黄大英.开发雨洪资源 缓和北京水资源危机[J].北京水利,2000(3):35-36.
[11] SHAHBAZ M, DAVID D, HONG Lin, et al. An assessment of collective action for pond management in Zhanghe Irrigation System[J]. Agricultural Systems, 2007, 93(1/3):140-156.
[12] 李文合.浅述利用地下储水空间蓄水[J].农田水利与小水电,1993(5):8-10.
[13] 陈凯.深圳市雨洪资源开发利用方式探讨[J].中国农村水利水电,2000(7):25-26.

(收稿日期 2009-04-24 编辑:方宇彤)

[6] 傅春,张念强,曹志先.明渠断面水流流速与边界剪切应力横向分布模型[J].水利水电科技进展,2006,26(4):12-14.
[7] 严军,王二平,孙东坡,等.矩形断面明渠流速分布特性的试验研究[J].武汉大学学报:工学版,2005,38(5):57-62.
[8] 徐惠芬,赵振兴,韩璐.有植被河道的水力特性研究[J].水利水电科技进展,2006,26(6):24-27.
[9] 郭维东,周阳,梁岳,等.丁坝对弯道水流紊动强度影响的试验研究[J].水电能源科学,2005,23(5):70-72.
[10] 邓安军,陈立,林鹏,等.紊动强度沿垂线分布规律的分析[J].泥沙研究,2001(5):33-36.
[11] 卢金友,徐海涛,姚仕明.天然感潮河道水流紊动特性分析[J].海洋工程,2005,23(3):70-77.

(收稿日期 2009-03-26 编辑:方宇彤)

