

加长型环形水槽水流特性的数值模拟

韩龙喜¹,WAI Wing-hong²

(1.河海大学环境科学与工程学院,江苏 南京 210098 ;2.香港理工大学土木系,香港 九龙)

摘要 :由直槽及半环形水槽组成的加长型环形水槽被用来研究水流的三维水力特性.水流由位于水面的运动固体盖拖曳而产生运动.采用 ADV 测速仪对水流动力学特性进行物理观测,并采用美国 Fluent 公司的标准化 CFD 计算软件对水流进行了三维数值模拟.研究表明,在弯段有明显的二次流,水槽外侧流速大于内侧,且由于对流作用,弯段下游的直段水槽内水流也呈类似分布,但随着流程的增加,流速沿横向分布趋于均匀.与单一环形水槽相比,加长型环形水槽由于直段内水流结构相对简单,可以更好地用于泥沙动力学研究.

关键词 环形水槽 水力特性 物理试验 数值模拟

中图分类号 :O315.2 ;TV131.66 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X(2003)06-0639-05

由于影响泥沙侵蚀、沉降、输运等动力学特性的物理过程及化学过程十分复杂,目前关于泥沙输运机理的研究成果仍不十分令人满意.室内水槽被应用于泥沙及影响泥沙运动的水流特性的机理研究.在这些水槽中,直槽由于必须连续供水及连续加入悬浮的泥沙,具有以下缺点:加入的泥沙容易改变水流结构,影响水流稳定性;连续不断加入泥沙,泥沙用量较大,沙源稳定性也难以保证,增加了操作困难等.这些因素大大制约了直槽在试验中的应用.而环形水槽,由于其水流运动的封闭性,没有出流、入流的物理边界,可克服直槽的上述缺点,因而被广泛用来研究泥沙输运的动力学特性^[1~3].但是,由于环形水槽固有的强烈二次流及流速沿径向分布不均等水动力学特性,使得泥沙运动机理研究变得更加复杂.为了减小二次流影响及槽底切力沿径向分布变化对泥沙动力学研究带来的干扰,ZHAO Qing-yang 等研究者设计了使内侧槽壁与外侧槽壁运动方向互为相反的环形水槽^[4],以使内外壁产生的二次流达到部分互相抵消.但仍然不能从根本上消除上述干扰.为此,笔者研究包含两充分长直段水槽的加长型环形水槽.在距离环形水槽出口足够远的直段,可有效减小二次流强度,同时由于动量的横向紊动扩散作用,流速沿横向分布也趋于均匀,可以较好地减轻泥沙动力学特性研究遇到的上述干扰因素.本文在对加长型环形水槽的水流特性进行室内物理试验研究的基础上,主要采用三维数学模型模拟水动力学特性,分析研究直段及环段内的水流结构.

1 物理模型

如图 1 所示,加长型环形水槽由两个半圆环形水槽及两个直段水槽组合而成.半环形水槽内壁半径 $R_1=0.2\text{ m}$,外壁 $R_2=0.4\text{ m}$.直段水槽长 3 m ,与环形水槽平滑连接.槽内水深可以调节,水面有一固体盖与水面相切,盖的垂直位置可以人为控制.其宽度约为 20 cm 相当于槽的宽度.固体盖由调速电机提供动力,其运动速度可人为调节.盖的运动方向可以根据需要选择逆时针或顺时针.在距离环形水槽出口断面下游直段 2 m 处分别布设有一个测速断面.在测速断面的外侧边壁布设若干测速孔,可供 ADV 测速仪探头进入.

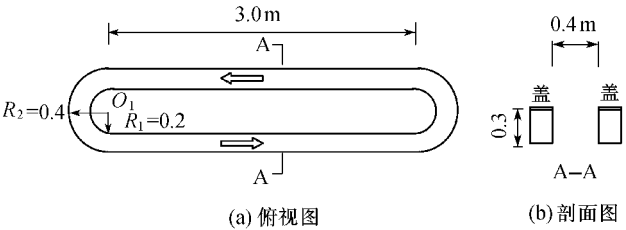


图 1 水槽形状示意图

Fig.1 Sketch of a complex annular flume

2 数学模型

由于环形水槽具有强烈的三维水流运动特征,故三维紊流模型是模拟其水动力学特性的最合宜的数学模型.本文采用标准 $K-\epsilon$ 紊流模型描述不可压缩粘性流体的三维水动力学特性^[5].

2.1 边界条件

选取 z 轴垂直向上, x 轴水平向右,水面采用固壁边界条件.假定盖运动方向为逆时针方向,对水面采用固体边界条件,给定固壁的运动速度

南部直槽
北部直槽
西部环形槽
东部环形槽

$$\left. \begin{aligned} u &= u_c & v &= 0 & w &= 0 \\ u &= -u_c & v &= 0 & w &= 0 \\ V_\tau &= \Omega \cdot r \\ V_\tau &= \Omega \cdot r \end{aligned} \right\}$$

(1)

$$\Omega = 2u_c/(R_1 + R_2)$$

(2)

式中: u_c ——盖在直段的运动速度; V_τ ——固体盖在环段任意一点的切向速度; r ——相应的几何半径(可表示为坐标 x, y 的函数); Ω ——盖的运动角速度.对于水槽侧壁及底壁,各方向速度分量为零,即 $u = v = w = 0$.对于固体壁面,无论是固体盖、侧壁及底壁,采用如下流速分布公式计算近壁网格点速度:

$$\frac{u_\tau}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(E \frac{\rho u^* y_p}{\mu} \right) - \Delta B$$

$$u_n = 0 \qquad u^* = C_\mu^{1/4} / k^{1/2}$$

(3)

式中: κ ——卡门常数,取 0.4; E ——固壁的粗糙系数,标准值取为 9.0; u_τ ——平行于固体壁面的流速分量; u_n ——法向分量; μ ——动力粘性系数; ρ ——流体的密度; y_p ——计算点至固体边壁的距离; u^* ——摩阻流速,被证实其与无因次粗糙高度 K_s^+ 有很好的相关关系,

$$K_s^+ = \rho K_s u^* / \mu$$

其中 K_s 为边壁的物理粗糙高度; ΔB 根据无因次粗糙高度的大小取不同的数值,可由 Cebeci 和 Bradshaw 基于 Nikurades 试验数据提出的公式,按 3 个不同分区分别计算得到^[7],在水力光滑区($K_s^+ < 2.25$),有 $\Delta B = 0$,对过渡区($2.25 < K_s^+ < 90$),有

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa} \ln(1 + C_{Ks} K_s^+) \sin[0.425 \kappa (\ln K_s^+ - 0.811)]$$

其中 C_{Ks} 为粗糙常数,一般取为 0.5.在完全粗糙区($K_s^+ > 90$),有

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa} \ln(1 + C_{Ks} K_s^+)$$

对于给定的粗糙参数,可采用相应公式估算 $\Delta B(K_s^+)$,然后计算近壁点的切向流速.

2.2 方程的求解

采用三维正交曲线网格剖分计算区域.在水平方向采用正交曲线网格,图 2(a)为水平方向的局部网格示意图,其中,沿流向直段网格长度为 2cm,弯段为 2cm 左右,沿横向网格均匀分布,长度为 1cm.垂直方向采用水平分层,计算水体被分成互相平行的若干层,图 2(b)为横断面网格分布示意图.经过坐标变换,再应用有限体积法离散方程,得到关于节点 P 的离散方程:

$$a_P \varphi_P = a_E \varphi_E + a_W \varphi_W + a_N \varphi_N + a_S \varphi_S +$$
$$a_T \varphi_T + a_B \varphi_B + b$$

(4)

对每个节点可得到形如式(4)的差分方程,对连续方程进行离散可得到压力矫正方程,考虑边界条件可得到以流速、压力为变量的封闭方程组,采用 SIMPLE 类算法求解,经过迭代计算,可解得各个节点的流速分量与动水压力等物理量,完成一次恒定问题的模拟.经过反复调试参数,分别得到槽底、侧壁及固体盖上的粗糙度的率定值.

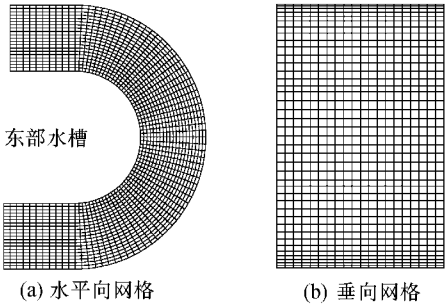


图 2 加长型环形水槽网格分布
Fig.2 Grids of the elongated annular flume

3 试验及数值模拟分析

试验时,水深为 30 cm,固体盖的运动速度为 1 m/s,运动方向为逆时针方向.数值模拟时将计算区域剖分为沿主流向 421 个、横向 21 个、垂向 41 个网格.在进行垂向剖分时,考虑到水面、槽底流速梯度较大,且兼顾到后续泥沙动力学研究的需要,将靠近水面及槽底的网格进行了加密处理(见图 2(b)).数值模拟时,流速分量、紊动能、动能耗散率等物理量取零初始值,给定迭代收敛判据,约经过 2 800 次迭代得到收敛解.

3.1 直段部分

在距离环形段入口处上游 1 m 处布设一对呈对称分布的观测断面,显然两断面水流也应呈对称分布,此特征为试验及数值模拟结果验证.采用 ADV 测速仪分别在距槽底 14 cm、16 cm、18 cm、23 cm 及 25.5 cm 等位置观测流速沿横向的分布.

观测及模拟结果显示(图 3),由于直段水流受到环段水流的影响,流速沿横向仍然呈现出非均匀的特征,从水面到槽底主流逐渐从水槽外侧向水槽内侧过渡.观测及计算同时显示接近固体盖处,由于水流更多受到固体盖的均匀拖曳影响,流速沿横向变幅较小,而远离水面处水流受对流作用影响相对加大,流速沿横向变幅较大.但总的流速分布呈外侧大于内侧的特征.同一断面沿垂直方向,合速度从上到下呈递减趋势,计算结果显示,在水面及槽底由于固体边界的影响,流速梯度最大.

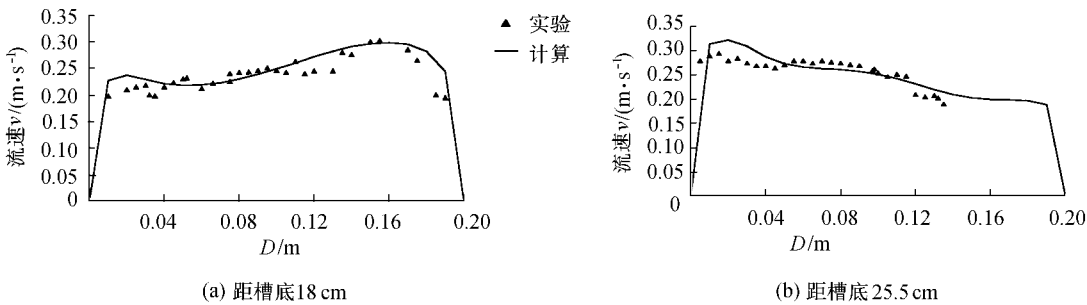


图 3 距弯段入口 1 m 处流速横向分布曲线

Fig.3 Lateral velocity distribution at the section 1 m away for circular inlet

图 4(a)显示,即使距弯段上游入口 1 m 处仍然存在二次流,但强度较弱,平面方向的流速分量最大值约为 0.03 m/s.横向流速最大值出现在水面处水槽外侧区域,而垂向流速最大值出现在水槽外侧贴近固体壁面区域.图 4(b)显示,除了水面外,槽底环流影响也较为强烈.

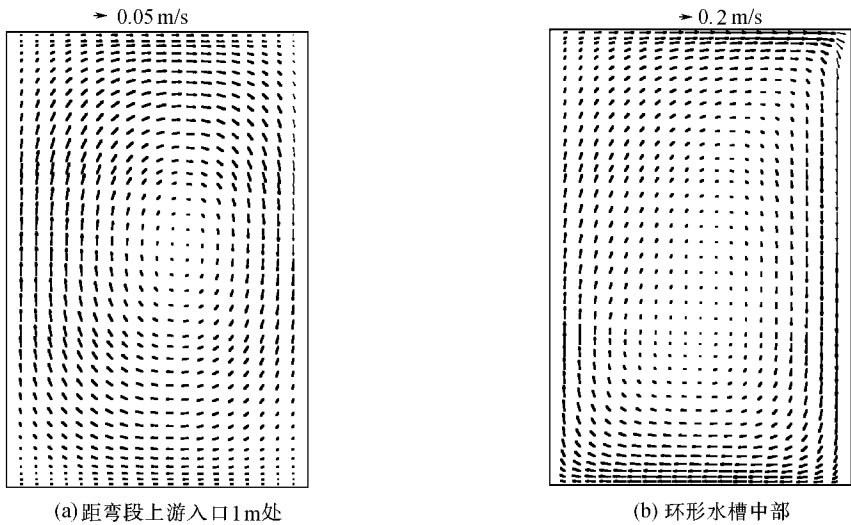


图 4 直段流速矢量分布

Fig.4 Flow velocity vector distribution for straight section

3.2 环道部分

环道部分水流呈强烈的三维运动特征.无论沿横向或垂向,水流动力学特性存在急剧变化,在水平截面上环道外侧流速显著大于内侧(见图5),与单一环形水槽水流有一定的相似性^[6].比较图5(a)(b),可以看出,接近水面处由于水流绝对速度较大,水质点运动方向偏离径向最大,环流现象也最为明显.

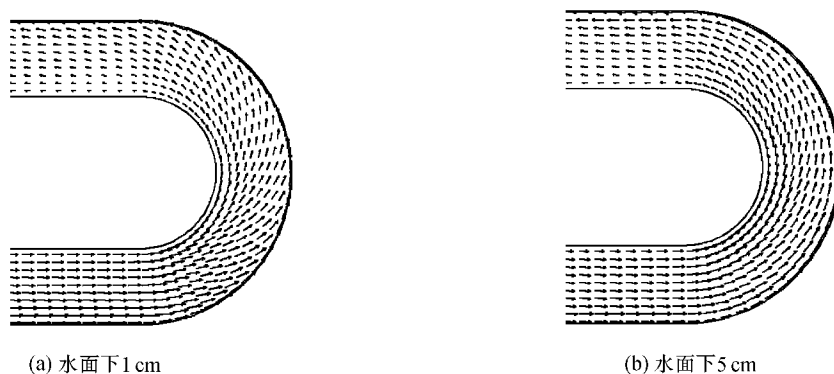


图5 环道平面流速矢量分布

Fig.5 Plan flow velocity vector distribution for curved section

比较直段、弯段水流特征,从分布上看,环段水流在顶部和槽底环流作用明显,直段水流在顶部环流相对显著,从强度上看,直段环流作用大大弱于环段,且流速分布也较为均匀.所以,与单一环形水槽相比,由于加长型环形水槽的直道部分环流作用大幅减小,流速分布相对均匀,水流情况变得相对简单,从而更有利于研究泥沙与水流动力学之间的相互作用.

4 结 论

采用 Fluent 公司的标准化流体力学计算软件,建立了加长环形水槽的三维水动力学紊流模型,对模型水力参数进行了率定,对加长环形水槽内的水流进行了数值模拟,量测结果与模型预测结果之间较为吻合.在试验及观测的基础上对水流现象进行了分析,据此建立的数学模型可用于预测不同边界条件下的水槽各种水动力学特性,并可以进一步为泥沙侵蚀及其它扩散质的输运提供水动力学依据.数学模拟结果显示,在两端的环形水槽内产生强烈的二次流,水流呈明显的三维运动特性.由于环形水槽外侧固体盖的运动速度大于内侧,及弯道水流运动的固有特性的影响,流速从环形水槽内侧到外侧沿径向呈逐步增加的趋势.且由于对流作用,环形水槽下游的部分直道水流,流速也呈类似的分布.但随着流程的增加,由于横向紊动扩散效应,流速沿横向趋于均匀,但仍存在环流,不过与单一环形水槽相比,由于加长型环形水槽的直道部分环流作用大幅减小,水流情况变得相对简单.类似地,水槽底部切应力也应有相同的分布特征,从而为研究泥沙与水流动力学之间的相互作用带来了方便.

参考文献:

- [1] JAMES P W, JONES T E R. Numerical and experimental studies of annular flume flow[J]. Appl Math Modeling, 1996, 20: 225—231.
- [2] GRAHAM D I, JAMES P W, JONES T E R. Measurement and prediction of surface shear stress in annular flume[J]. J of Hydraulic Eng, 1992, 118: 1270—1286.
- [3] PETERSON, KRISHNAPPAN B G. Measurement and analysis of flow characteristics in a rotating circular flume[J]. J Hydraulic Res, 1994, 32: 483—494.
- [4] ZHAO Yang-qing. Numerical modeling of flow characteristics in a rotating annular flume[J]. Dynamics of Atmosphere and Oceans, 2000, 31: 271—294.
- [5] HAN Long-xi. 3-D numerical simulation of turbulent flow affected by Three Gorge Project under construction[J]. J Hydrodynamics, 2002, 31(3): 113—116.
- [6] CEBECI T, BRADSHAW P. Momentum transfer in boundary layers[M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1977. 103—105.

Numerical simulation of flow characteristics in elongated annular flume

HAN Long-xi¹, WAI Wing-hong²

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

2. Department of Civil and Structural Engineering, Hongkong Polytechnic University, Hongkong, China)

Abstract :A complex annular flume , consisting of 2 straight flumes and 2 semi-circular flumes , is built for invastigation of the hydrodynamic characteristics of water flow driven by a moving lid on the water surface. The CFD software developed by Fluent Inc. is used for simulation of 3-D hydrodynamic characteristics of water flow in the flume , and the simulated result is in good agreement with that observed by ADV. The research shows that in the curved section of the flume , there exists a strong secondary flow , and the velocity tends to increase significantly in the radial direction from the inside to the outside , and that in the straight section near the outlet of the curved section , the velocity distribution has the same characteristics as that in the curved section due to the effect of convection , but , with the increase of flow distance , the velocity in the transversal direction tends to be uniform. Owing to the simple flow structure in the straight section near the outlet of the curved section , the elongated flume can be effectively used for investigation of the interaction between sediment motion and water hydrodynamics as compared with the simple annular flume.

Key words :annular flume ; hydrodynamic characteristics ; physical test ; numerical simulation

欢迎订阅
欢迎投稿

全国水利系统优秀期刊 中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊
中国期刊全文数据库收录期刊 中国核心期刊(遴选)数据库统计源期刊
万方数据——数字化期刊群入网期刊 中文科技期刊数据库收录期刊



水利经济

双月刊 A4 开本 彩色封面 64 页 2004 年全年定价 36.00 元 全国各地邮局均可订阅

(也可直接汇款至编辑部订阅
另加收 6.00 元邮资费)

中国标准连 : ISSN 1003—9511
续出版物号 : CN 32—1165/F
国 外 发 行 : 北京 782 信箱
(中国出版对外贸易总公司)
国内邮发代号 : 28—252

编辑部地址 : 210098 南京市西康路 1 号
联系电话 : (025) 83786350
电子信箱 : jj@hhu.edu.cn
银行账号 : 南京工行宁海路分理处
4301011409001024513