

基于 WMLES 方法的复式断面明渠三维紊流数值模拟

曾 诚¹, 丁少伟¹, 周 婕², 王玲玲¹, 陈 辰¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

摘要:针对基于雷诺时均 Navier-Stokes 方程的数值模型在精确模拟复式断面明渠三维水流结构方面存在困难和传统大涡模拟 (LES) 方法计算成本相对较高的问题, 采用壁面建模的大涡模拟 (WMLES) 方法建立三维数值模型, 对水深比 (滩地水深与主槽水深之比) 为 0.5 的复式断面明渠水流结构进行模拟计算。数值模拟计算结果与已有试验测量结果和 LES 模拟结果的对比表明, WMLES 方法能够准确地模拟时均速度、床面切应力、紊动强度、紊动能、雷诺应力分布、二次漩涡结构, 该方法在复式断面明渠水流三维模拟中是可靠的; 在保证计算精度的前提下, 与传统 LES 方法相比, 采用 WMLES 方法能够显著降低计算成本。

关键词: WMLES; 复式断面明渠; 数值模型; 二次流; 雷诺应力

中图分类号: TV131.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2020)06-0017-06

A three-dimensional numerical simulation based on WMLES for compound open-channel turbulent flows//ZENG Cheng¹, DING Shaowei¹, ZHOU Jie², WANG Lingling¹, CHEN Chen¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Because the facts that numerical models based on Reynolds averaged Navier-Stokes equations cannot accurately simulate the 3D flow structures of compound open-channel flows and the high computational cost of traditional large eddy simulation (LES) method, a three-dimensional numerical model with wall-modelled large eddy simulation (WMLES) was developed to simulate the flow structure in a compound open-channel flow with a depth ratio of 0.5 in the present study. The numerical model was verified against the detailed experimental data of Tominaga et al. and the existing results of LES. The results show that the model with WMLES is accurate in the simulation of mean velocities, bed shear stress, turbulence intensities, turbulent energy, Reynolds stresses and secondary currents. The model is reliable in 3D numerical simulations of compound open-channel flows. Comparing to the traditional LES method, the WMLES method is able to significantly reduce the computational cost.

Key words: WMLES; compound open-channel; numerical model; secondary current; Reynolds stresses

在平原地区,天然河道和人工渠道断面大多为复式结构,包括主槽和滩地。平时水流主要集中在主槽中流动,汛期水流漫过滩地,主槽和滩地共同过流,形成复式断面流动。由于主槽和滩地上水流之间较大的流速差异,导致在滩槽交界处出现较大的动量交换,使得内部水流结构体现出三维流动特征。在垂直于主流的横断面上,出现由紊流驱动的二次流,引起横向的物质运输、岸坡冲刷等问题。因此,研究复式断面明渠紊流的三维流动特征,对于河道行洪断面设计和加固具有重要意义。

许多学者对复式断面明渠滩槽交界处二次流和动量交换机理进行了试验和理论研究。Rajaratnam 等^[1]、Myers^[2]、Wormleaton 等^[3]、Tominaga 等^[4]、Shiono 等^[5]、Sanjou 等^[6]先后对复式断面明渠紊流进行了试验测量,对主槽和滩地间的动量交换机理进行了研究。他们的研究表明滩槽交界面上的切应力比固体边界上的平均剪切应力大许多倍,证明复式断面明渠流动中横向动量交换强于垂向动量交换,在流动中占据主导地位。

在复式断面明渠流的数值模拟研究方面,大量

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0405605);中央高校基本科研业务费专项(B200202116, B200204044);国家自然科学基金(51879086);江苏省高校科技创新团队资助项目

作者简介:曾诚(1981—),男,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:c.zeng@foxmail.com

通信作者:周婕(1981—),女,讲师,博士,主要从事流体力学研究。E-mail:zhoujie@hhu.edu.cn

成果均基于雷诺时均方程的涡黏性紊流模型。Sofialidis 等^[7]发现当相对水深比和雷诺数较小时,非线性 $k-\omega$ 模型比非线性 $k-\varepsilon$ 模型有更好的表现。林斌良等^[8]采用非线性 $k-\varepsilon$ 模型和雷诺应力模型 (Reynolds stress model, RSM) 对复式断面明渠紊流进行了模拟研究,结果表明两种模型均能较好地模拟复式断面明渠三维紊流结构,RSM 得出的主流速分布更接近试验结果,两种模型得出的雷诺应力分布趋势与试验结果一致,但在数值上偏大较多。梁爱国等^[9-11]采用 RSM 对复式断面弯道明渠三维流场结构进行了模拟研究,揭示了水深比和弯转角度对流场中漩涡结构的影响。Cater 等^[12-13]运用大涡模拟 (LES) 方法对非对称矩形复式断面明渠进行了模拟,得到了详细的流场信息,且精度较高。许栋等^[14]采用 LES 方法对复式断面明渠水流进行了数值模拟研究,揭示了水深比和雷诺数对其紊流结构的影响。

前人的研究结果^[12-14]表明,LES 方法对于复式断面明渠流动具有较好的模拟精度,但是在边界层内需要足够细密的网格来保证最小尺度的漩涡结构能够被捕捉到。同时,对于复式断面明渠流问题而言,由于垂直方向上存在两个边界层区域(滩地底面和主槽底面),导致利用 LES 方法对该类问题进行模拟研究的计算成本很高。Shur 等^[15]提出了一种壁面建模的大涡模拟 (wall-modeled LES, WMLES) 方法,克服了传统 LES 方法在模拟高雷诺数下近壁面紊流时要求非常精细网格尺度的问题。与传统 LES 方法相比,WMLES 无须加密边界层中的网格,可节约计算成本。目前,这种方法已经越来越多地应用于数值模拟中^[16-17]。本文采用 WMLES 方法对复式断面明渠流动进行模拟研究,并将计算得到的主流速、二次流、床面切应力、紊动强度、紊动能及雷诺应力与已有的试验测量值^[4]和 LES 模拟结果^[12-13]进行对比分析,以验证 WMLES 方法对于此类流动问题的适用性和可靠性。

1 数学模型

1.1 控制方程

连续方程和动量方程的过滤形式如下:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + g_i \quad (2)$$

式中: \bar{u}_i 、 \bar{u}_j ($i, j=1, 2, 3$) 为滤波后在 x_i 、 x_j 方向上的速度分量; τ_{ij} 为亚格子应力, $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$; ν 为分子运动黏性系数; ρ 为流体密度; t 为时间; \bar{p} 为滤波后

的压强; g_i 为重力加速度在 x_i 方向的分量。

由滤波造成的亚格子应力是未知的,须通过建模进行求解。本文采用 Boussinesq 假设对亚格子应力进行计算:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\rho \nu_t \bar{S}_{ij} \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad \bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

式中: δ_{ij} 为 Kronecker 三角张量,当 $i=j$ 时, $\delta_{ij}=1$,当 $i \neq j$ 时, $\delta_{ij}=0$; \bar{S}_{ij} 为滤波应变率张量; ν_t 为涡黏系数,采用混合长度尺度计算:

$$\nu_t = \min \left[(\kappa d_w)^2, (C_{smag} \Delta)^2 \right] \cdot \left\{ |S - \Omega| \left[1 - \exp \left[- (y^+ / 25)^3 \right] \right] \right\} \quad (4)$$

式中: d_w 为计算点与壁面间距; S 为应变速率; Ω 为涡量;参数 $\kappa=0.41$, $C_{smag}=0.2$; Δ 为滤波尺寸; y^+ 为垂直壁面的无量纲距离。传统 LES 方法中,滤波尺寸通常通过下式进行计算:

$$\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (5)$$

式中: Δx 、 Δy 、 Δz 分别为沿 x 、 y 、 z 轴方向的网格尺寸。这种计算方法适用于各项同性或者近似各向同性网格,导致计算网格在单元数量上过于密集,进而导致计算成本提高。与传统的 LES 方法相比,WMLES 方法在计算滤波尺寸时引入了壁面阻尼函数项(如式(6)所示),使得该方法适用于各项异性网格,从而降低网格数量,提高计算效率。

$$\Delta = \min \left[\max (C_w d_w, C_w h_{max}, h_{wn}), h_{max} \right] \quad (6)$$

式中: h_{wn} 为沿壁面法向的网格尺度; h_{max} 为壁面网格的最大尺度; C_w 为常数,取为 0.15。

1.2 数值方法与边界条件

为保证流场充分发展,选取 SST $k-\omega$ 计算的稳态场作为 WMLES 计算的初始流场。离散格式选取具有三阶精度的 QUICK 格式,压力场和速度场的解耦计算采用 PISO 算法。

在入口和出口边界上采用周期性边界条件,自由水面边界采用刚盖假定,固体壁面为无滑移边界。

2 计算域及网格划分

选取 Tominaga 等^[4]的物理模型试验测量数据进行模型验证和分析。试验在长为 12.5 m,主槽宽度 $b=0.2$ m,河道总宽度 $B=0.4$ m 的复式断面水槽中进行,采用激光多普勒测速仪测量流速。选取水深比 $h_t=0.5$ 的工况进行模拟($h_t=h/H$,其中 h 为滩地水深, H 为主槽水深),主槽水深和滩地水深分别为 0.08 m 和 0.04 m,平均流速 U_m 为 0.349 m/s,雷诺数为 54 500,摩阻流速为 0.0164 m/s。图 1 为数值模拟计算区域示意图, x 、 y 、 z 分别为流向、展向和

垂向坐标。数学模型的计算域大小为 $10H \times 5H \times H$ ($x \times y \times z$, 下同)。计算中为了便于结果处理与分析, 采用主槽水深 H 对坐标系无量纲化。水槽沿 x 向坡度 $S_0 = 6.397 \times 10^{-4}$ 。

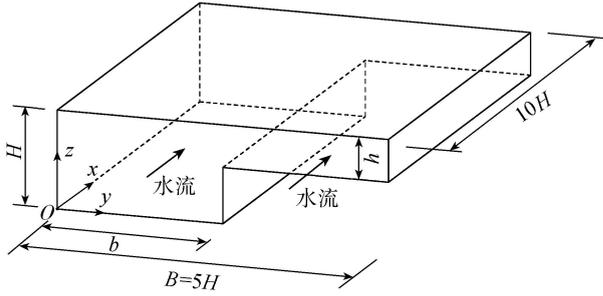


图1 计算区域和尺寸

采用六面体网格对计算区域进行剖分, 在 x, y, z 方向均采用均匀结构化正交网格, 未对边界层进行加密。网格划分与数值模拟的精度及计算结果的收敛性密切相关, 因此本文选取 3 组不同精度的网格进行网格无关性验证, 工况 C1、C2、C3 网格数量分别为 $128 \times 100 \times 64$ 、 $160 \times 200 \times 80$ 、 $200 \times 400 \times 100$ 。3 组不同网格精度工况的流向时均流速 U 沿横断面分布如图 2 所示, 图中以平均速度 U_m 对 U 进行无量纲化。由图 2 可知, 工况 C1 由于网格精度不足, 与另外两组工况计算结果差距较大。工况 C2 和 C3 流向时均流速 U 的分布基本一致, 误差在 5% 范围以内。说明更密的网格对模型的计算结果没有显著的影响, 但是工况 C3 的计算时间远远超过工况 C2 的计算时间。为了节约计算成本, 最终选取工况 C2 的网格划分方案 ($160 \times 200 \times 80$) 作为本次计算的网格方案。Cater 等^[12], Xie 等^[13] 也运用 LES 方法对 Tominaga 等^[4] 的物理模型试验工况进行验证分析, 他们采用的网格数量分别为 $500 \times 320 \times 128$ 和 $192 \times 384 \times 96$, 分别是本次模拟网格数的 8 倍和 2.7 倍。

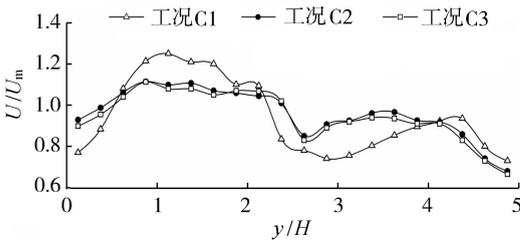


图2 不同网格精度下流向(x 方向)时均流速分布

3 计算结果与分析

计算约 60 个流动周期(一个流动周期 $T = 10H/U_m$)后流场达到充分发展状态, 开始统计流场的时均流动特性, 统计时间为 50 个流动周期。 U, V, W 分别为 x, y, z 方向的时均流速。为对 WMLES 方法在复式断面明渠流动模拟中的表现进行全面的评

价, 将模拟计算结果与 Tominaga 等^[4] 的试验测量数据, Xie 等^[13] 基于动态亚格子模型的大涡模拟结果和 Cater 等^[12] 基于 Smagorinsky 模型的大涡模拟结果进行比较。

3.1 主流速等值线

以最大主流速 U_{max} 对主流速进行无量纲化, 计算得到的主流速等值线分布如图 3(d) 所示。计算得到的最大主流速出现在主槽中心 $z/H = 0.67$ 附近。由图 3 可以看出 WMLES 计算结果与 Tominaga 等^[4] 的实测值吻合。在主槽与滩地交界处, 由于二次流的影响, 主流速等值线向主槽侧的自由水面凸起。同时可以观察到主流速在接近自由水面的位置速度减小的现象。在断面上由于强烈的二次流动, 涡体将动量较高的水体向水槽两边输运, 导致主流速等值线在拐角附近发生较大程度的弯曲。在自由水面附近靠近壁面处受壁面的影响, 主流速等值线也出现较大程度的弯曲。与 Cater 等^[12-13] 的模拟结果相比, WMLES 模拟的断面主流速在滩槽交界面处与实测值更接近。

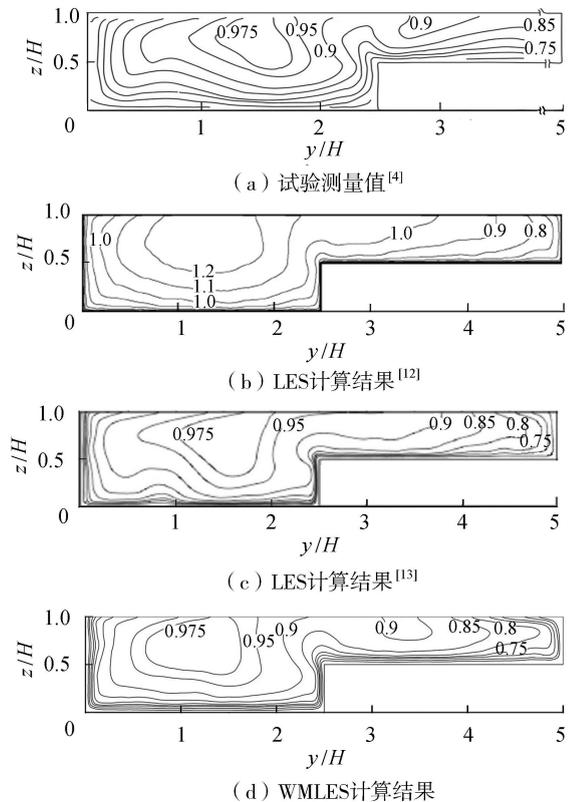


图3 横断面主流速 U/U_{max} 分布

3.2 二次流

图 4(d) 是通过 WMLES 计算得到的断面流速矢量图, 图中 V, W 已通过最大主流速 U_{max} 进行无量纲化。Prandtl 根据形成原因将二次流分为两类: 第一类 Prandtl 二次流常产生在弯曲河道中, 离心力的作用使水流偏离主流方向, 此类二次流强度较大; 第

二类 Prandtl 二次流常发生在复式断面河道边角附近,由于雷诺应力的各向异性导致水流偏离主流方向,此类二次流强度相对较小。与试验中观察到的现象一致,图 4 中可以看出在滩地与主槽交界处产生较强的二次流,存在一对旋转方向相反的涡延伸至自由水面,靠近主槽的涡称为深槽涡,靠近滩地的涡称为浅滩涡。另外,计算结果显示在主槽靠近壁面处有一漩涡,称为自由水面涡。自由水面涡的影响范围超过主槽宽度的一半,它将缓慢流动的流体从侧壁附近输送到水槽的中心部分,这也是主流速最大值出现在自由水面以下的原因之一。与试验测量结果^[4]和前人计算结果^[12-13]相比,WMLES 方法模拟计算得到的横断面漩涡结构在位置和方向上都较为一致。

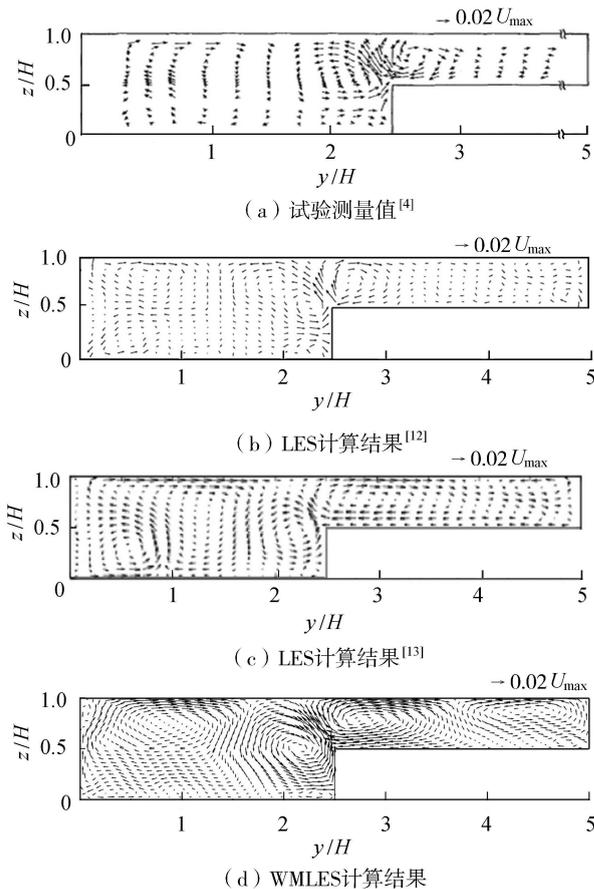


图 4 横断面流速矢量

定义二次流的合速度为 $V_s = \sqrt{V^2 + W^2}$,在滩槽交界处二次流合速度最大值 $V_{smax} = 0.042U_{max}$ 。Tominaga 等^[4]试验测量值、Cater 等^[12]和 Xie 等^[13]的模拟结果分别为 $0.04U_{max}$ 、 $0.037U_{max}$ 和 $0.04U_{max}$ 。WMLES 模拟结果精度与 Cater 等^[12-13]计算结果大致相当。

3.3 床面切应力

图 5 为横断面床面切应力分布,图中 τ 为床面切应力, $\bar{\tau}$ 为平均切应力。与试验测量值^[4]对比可知,床面切应力的计算值与测量值在趋势上吻合,在

主槽和靠壁面侧计算结果比测量值稍大。由于在复式河道滩槽交接近,水流动量交换剧烈,因此剪应力分布很不均匀。主槽内中间床面切应力较大,接近壁面时切应力迅速减小;滩地内床面切应力在靠近滩槽交界处增大。WMLES 计算值总体上与 Xie 等^[13]的模拟精度相当,比 Cater 等^[12]的模拟精度稍高。

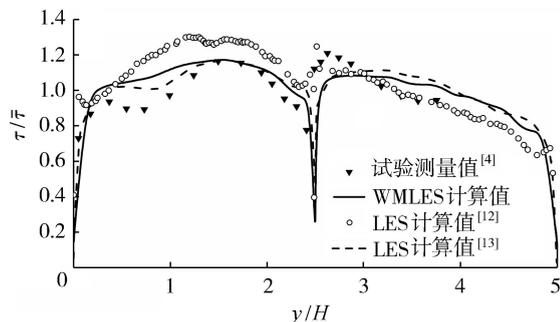


图 5 横断面床面切应力分布

3.4 紊动强度

水流流速的脉动强弱程度通常可以由紊动强度来反映,紊动强度用脉动流速的均方根来表示:

$$\sigma_i = \sqrt{(u'_i)^2} \quad (7)$$

式中: σ_i 为水流在 x_i 方向的紊动强度; u'_i 为 x_i 方向的脉动流速。综合考虑三维水体的紊动特性,用紊动能 k 来表示水流的紊动强弱:

$$k = (u_{rms}^2 + v_{rms}^2 + w_{rms}^2)/2 \quad (8)$$

式中: u_{rms} 、 v_{rms} 、 w_{rms} 分别为流向、展向和垂向紊动强度。

图 6~8 分别为断面流向、展向和垂向的紊动强度分布,紊动强度用平均摩阻流速 u_τ 进行无量纲化。图 9 为断面的紊动能分布,紊动能用平均摩阻流速的平方 u_τ^2 进行无量纲化。由图 6~9 可见,紊动强度和紊动能的分布与测量数据基本一致。流向紊动强度是 3 个方向中最大的,但是它对主槽与滩地间的动量交换影响最小。流向紊动强度在主槽和滩地的床面及靠近壁面处较大。垂向和展向的紊动强度在主槽与滩地交界处较大,说明在主槽与滩地

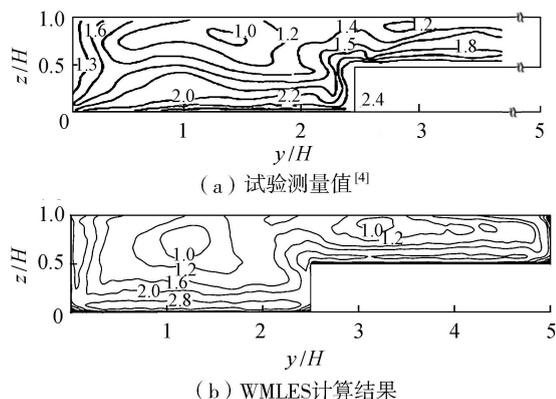


图 6 流向紊动强度 u_{rms}/u_τ 分布

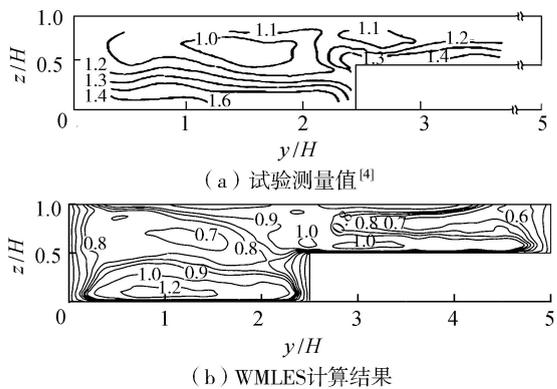


图7 展向紊动强度 v_{rms}/u_τ 分布

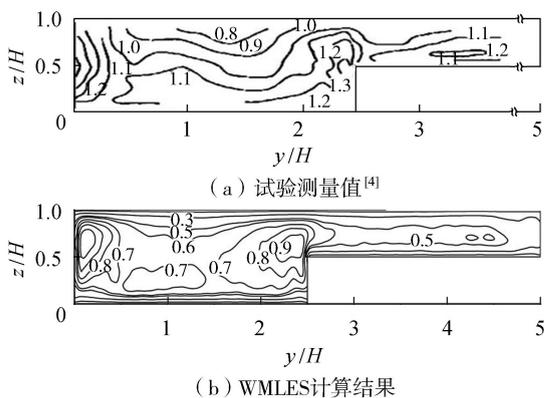


图8 垂向紊动强度 w_{rms}/u_τ 分布

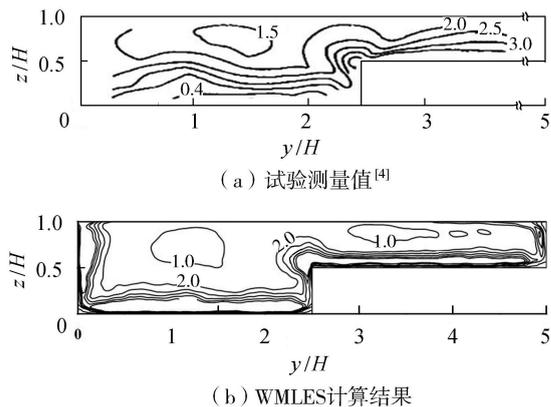


图9 紊动能 k/u_τ^2 分布

交界处水流紊动强烈。紊动能的分布与主流速的分布相似,但在床面和侧壁附近达到最大值,在自由水面以下位置出现最小值。在滩槽交界处,紊动能的等值线向外凸出,紊动强度增大。

3.5 雷诺应力

图10和图11分别为无量纲雷诺应力 $-\langle u'v' \rangle / u_\tau^2$ 和 $-\langle u'w' \rangle / u_\tau^2$ 的断面分布 (u' 、 v' 、 w' 分别为 x 、 y 、 z 方向的脉动流速),可以看出,断面内雷诺应力的分布规律与测量数据基本一致。

由图10可知, $-\langle u'v' \rangle$ 的值与速度梯度 $\partial U / \partial y$ 有关,代表了滩槽交界面处动量交换的强度。在主槽内 $-\langle u'v' \rangle$ 的绝对值出现最大值,同时可以发现在

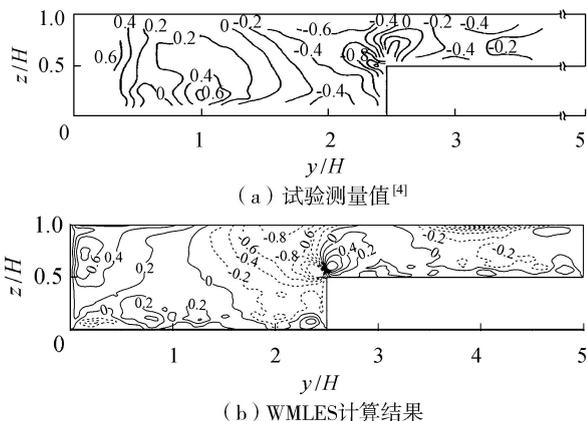


图10 雷诺应力 $-\langle u'v' \rangle / u_\tau^2$ 断面分布

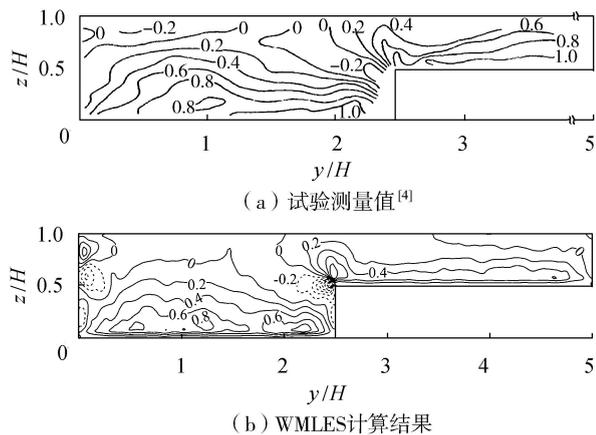


图11 雷诺应力 $-\langle u'w' \rangle / u_\tau^2$ 断面分布

滩槽交界的拐角处 $y/H > 2.5$ 的部分区域 $-\langle u'v' \rangle$ 的值为正值。表明动量交换在主槽内最强烈,水体在滩地靠近床面附近动量从主槽向滩地运输。在主槽靠近壁面侧 $-\langle u'v' \rangle$ 的值逐渐增大,这与该处存在自由表面涡有关。

由图11(b)可知,在主槽内靠近床面 $-\langle u'w' \rangle$ 的值逐渐增大,主槽与滩地交界处的左侧出现负值,这与试验结果是一致的。在滩地内 $-\langle u'w' \rangle$ 模拟值与试验测量值相比偏小,两者的变化规律一致。

4 结语

本文利用 WMLES 方法对水深比为 0.5 的复式断面明渠水流进行三维大涡模拟研究。与传统 LES 方法相比,WMLES 无须在边界层内对网格加密,很大程度上降低了计算成本。就本文算例而言,与 Cater 等^[12] 和 Xie 等^[13] 的 LES 数值模型相比,利用 WMLES 方法使得计算网格数量分别减少到其网格数量的 1/3 和 1/8。WMLES 计算结果与试验测量值^[4] 和 LES 计算结果^[12-13] 的比较表明,WMLES 能够准确模拟平均流速、床面切应力、紊动强度、紊动能和雷诺应力分布,并且能够准确模拟出断面内的二次漩涡结构。本文验证了 WMLES 方法对于复式

断面明渠流动模拟问题的适用性和可靠性,为后续研究打下基础。

参考文献:

- [1] RAJARATNAM N, AHMADI R. Hydraulics of channels with floodplains [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1981, 19(1): 43-60.
- [2] MYERS W R C. Momentum transfer in a compound channel [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1978, 16(2): 139-150.
- [3] WORMLEATON P R, ALLEN J, HADJIPANOS P. Discharge assessment in compound channel flow [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1982, 108(9): 975-994.
- [4] TOMINAGA A, NEZU I. Turbulent structure in compound open-channel flows [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1991, 117(1): 21-41.
- [5] SHIONO K, FENG T. Turbulence measurements of dye concentration and effects of secondary flow on distribution in open channel flows [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 129(5): 373-384.
- [6] SANJOU M, NEZU I. Turbulence structure and coherent motion in meandering compound open-channel flows [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2009, 47(5): 598-610.
- [7] SOFIALIDIS D, PRINOS P. Turbulent flow in open channels with smooth and rough flood plains [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1999, 37(5): 615-639.
- [8] 林斌良, SHIONO K. 复式断面明渠三维紊流的数值模拟 [J]. *水利学报*, 1995, 26(3): 52-61. (LIN Binliang, SHIONO K. Numerical simulation of three-dimensional turbulent flow in a compound open channel [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1995, 26(3): 52-61. (in Chinese))
- [9] 梁爱国, 槐文信. 复式断面明渠二次流的数值模拟 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2008, 16(2): 296-304. (LIANG Aiguo, HUAI Wenxin. Numerical simulation of secondary flow in compound open channel [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2008, 16(2): 296-304. (in Chinese))
- [10] 魏文礼, 洪云飞, 吕彬, 等. 复式断面明渠弯道水流三维雷诺应力模型数值模拟 [J]. *应用力学学报*, 2015, 32(4): 604-610. (WEI Wenli, HONG Yunfei, LYU Bin, et al. 3D numerical simulation of flow fields for compound open bend channel using Reynolds stress model [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2015, 32(4): 604-610. (in Chinese))
- [11] 石荣荣, 刘兴年, 杨克君. 复式河槽漫滩水流的三维数值计算 [J]. *水利水电科技进展*, 2006, 26(2): 13-16. (SHI Rongrong, LIU Xingnian, YANG Kejun. Three-dimensional numerical calculation of overbank flow in compound channel [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2006, 26(2): 13-16. (in Chinese))
- [12] CATER J E, WILLIAMS J J R. Large eddy simulation of a long asymmetric compound open channel [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2008, 46(4): 445-453.
- [13] XIE Zhihua, LIN Binliang, FALCONER R A. Large-eddy simulation of the turbulent structure in compound open-channel flows [J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 53(3): 66-75.
- [14] 许栋, 张炳昌, 徐彬, 等. 复式断面明渠浅滩水深及雷诺数对湍流结构影响的大涡模拟研究 [J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2020, 35(1): 74-83. (XU Dong, ZHANG Bingchang, XU Bin, et al. Investigation on the influence of floodplains depth and Reynolds number on the turbulence structure of flow in compound open-channels using large eddy simulation [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2020, 35(1): 74-83. (in Chinese))
- [15] SHUR M L, SPALART P R, STRELETS M K, et al. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008, 29(6): 1638-1649.
- [16] MOCKETT C, FUCHS M, THIELE F. Progress in DES for wall-modelled LES of complex internal flows [J]. *Computers & Fluids*, 2012, 65, 44-55.
- [17] HERRERA J, CORNEJO P, SEPULVEDA H H, et al. A novel approach to assess the hydrodynamic effects of a salmon farm in a Patagonian channel: coupling between regional ocean modeling and high resolution LES simulation [J]. *Aquaculture*, 2018, 495, 115-129. (收稿日期: 2020-05-20 编辑: 雷燕)

(上接第 10 页)

- [16] 黄草, 陈叶华, 李志威, 等. 洞庭湖区水系格局及连通性优化 [J]. *水科学进展*, 2019, 30(5): 661-672. (HUANG Cao, CHEN Yehua, LI Zhiwei, et al. Optimization of water system pattern and connectivity in the Dongting Lake Area [J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(5): 661-672. (in Chinese))
- [17] 张磊, 潘保柱, 蒋小明, 等. 基于水文连通分析的江湖关系研究进展 [J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(12): 2805-2816 (ZHANG Lei, PAN Baozhu, JIANG Xiaoming, et al. Research progress on the river-lake relation based on hydrological connectivity analysis [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(12): 2805-2816. (in Chinese))
- [18] 窦明, 张远东, 张亚洲, 等. 淮河流域水系连通状况评估 [J]. *中国水利*, 2013(9): 21-23. (DOU Ming, ZHANG Yuandong, ZHANG Yazhou, et al. Assessment on the water system interconnection degree of Huaihe River Basin [J]. *China Water Resources*, 2013(9): 21-23. (in Chinese))
- [19] 李普林, 陈菁, 孙炳香, 等. 基于连通性的城镇水系规划研究 [J]. *人民黄河*, 2018, 40(1): 31-35. (LI Pulin, CHEN Jing, SUN Bingxiang, et al. Research on urban water system planning based on connectivity [J]. *Yellow River*, 2018, 40(1): 31-35. (in Chinese))
- [20] 万杰, 王丽静. 湖南澧县河湖水网连通生态水利工程建设实践探讨 [J]. *中国水利*, 2018(13): 10-12. (WAN Jie, WANG Lijing. Practice of building ecological-friendly river-lake water network in Li County of Hunan Province [J]. *China Water Resources*, 2018(13): 10-12. (in Chinese)) (收稿日期: 2019-01-15 编辑: 郑孝宇)