

复式河槽漫滩水流的三维数值计算

石荣荣,刘兴年,杨克君

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,四川 成都 610065)

摘要:采用紊流模型中的雷诺应力模型(RSM)对非对称复式河槽水流的三维紊流进行了数值模拟。数值模拟计算结果与试验结果的比较表明,RSM能够很好地模拟滩槽交互区内的二次流、主流速分布和床面剪切力,此模型模拟复式河槽是可靠的。最后用RSM模拟了对称复式河槽在不同水深下的流速场及床面剪切力分布,得出当水深增加时,滩槽交互区二次流动纵向涡增强,而浅滩主流速及床面剪切力迅速增大的结论。

关键词:复式河槽;雷诺应力模型;三维数值模拟;二次流;流速分布;床面剪切力

中图分类号:TV135.3 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2006)02-0013-04

Three-dimensional numerical calculation of overbank flow in compound channel//SHI Rong-rong, LIU Xing-nian, YANG Ke-jun(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)
Abstract: The Reynolds stress model (RSM) was adopted to simulate the turbulent flow in asymmetric open channel. The comparison of the simulated result with experimental data shows that RSM is reliable for simulation of the secondary current, the primary mean velocity and bed shear stress in the junction region of the main channel and the flood plain. Then, RSM was used for simulation of the flow field and bed shear stress distribution in symmetric compound channel at different water depths. It is concluded that, with the increase of the water depth, the longitudinal vortex of the secondary current in the junction region is intensified, and the main flow velocity and bed shear stress increase rapidly.

Key words: compound channel; Reynolds stress model; 3-D numerical model; secondary current; flow velocity distribution; bed shear stress

天然河流中,许多河道都是具有深槽和滩地的复式河道,其水沙运动与单一河道的明显不同。当水流由主槽漫入滩地后,由于断面形状的变化和滩槽阻力的差异,水流现象复杂。近年来,许多研究者对此进行了研究,其中 Knight 等^[1]得到了复式河槽三维流动特性的示意图(图 1)。图 1 中,主槽水流快速流动和浅滩较慢流动作用产生了横向的剪切层,剪切层影响着纵向的紊动结构和涡的发展。由于紊流的各向异性,滩槽交互区存在着较强的二次流,而在主槽和浅滩垂向交接面上,有着垂向的涡流和横向的滩槽动量交换,二次流对于动量交换和床面剪切力有着重大影响。

对于复式河槽,已有很多数值模拟研究成果。Shiono 等将二维的 N-S 方程沿水深方向积分,简化后求出横断面上的平均流速和壁面剪切力分布^[1,2]。复式河槽漫滩水流的横向动量交换和二次流意味着其流场是复杂的三维流动。三维计算,雷

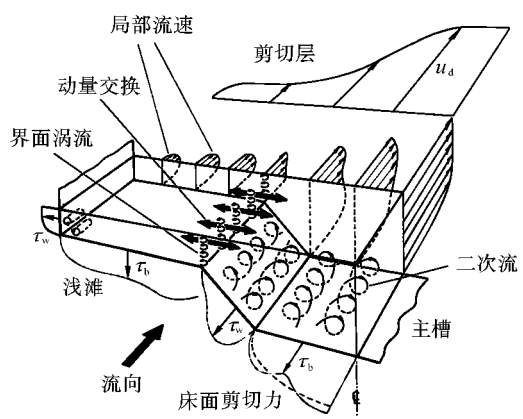


图 1 复式河槽水流结构

诺方程是不封闭的,需要引入紊流模型。Krishnapan 等^[3]使用 Thatchell 提出的代数应力模型,Kawahara 等^[4]采用 Launder 等提出的代数应力模型,Noat 等^[5]应用 Noat-Rodi 代数应力模型,Shiono 等^[6]及 Pezzinga^[7]采用 Speziale 提出的非线性的 $k-\epsilon$ 模型分别计算了复式河槽漫滩水流。林斌良等^[8]、陈文学^[9]

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50279024)
作者简介:石荣荣(1979—),女,湖北钟祥人,硕士研究生,从事水力学及河流动力学研究。E-mail: ss9rong@163.com

及 Kearney^[10]应用代数应力模型和非线性的 $k-\epsilon$ 模型模拟了复式河槽漫滩水流,他们均得出代数应力模型能够较好地模拟复式河槽漫滩水流。然而代数应力模型是简化的雷诺应力模式,代数应力模型假定雷诺应力局部平衡,忽略了雷诺应力沿流线的变化和扩散项,应用雷诺应力模式计算应该能得出更好的模拟结果。因此,本文将使用 FLUNT 流体计算软件提供的雷诺应力模型(RSM)计算复式河槽漫滩水流,并对 Tominaga 等^[11]的试验资料进行了计算,并与试验结果及文献[8]中的代数应力模型的计算结果进行了分析比较。

1 模型的建立

1.1 数学模型

RSM 通过求解雷诺应力输运方程和耗散率方程使雷诺时均方程得以封闭,包括 1 个连续方程、3 个动量方程(雷诺方程)、6 个雷诺输运方程和 1 个紊动能的耗散方程。

连续方程

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

雷诺方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{v}_i \bar{v}_j)}{\partial x_j} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \\ & \nu \nabla^2 \bar{v}_i - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{v_i' v_j'}) + F_i \end{aligned} \tag{2}$$

式中: $\bar{v}_i$ 为 x_i 方向的时均流速, $i=1,2,3$; ρ 为水的密度; $\bar{p}$ 为压强; ν 为运动黏性系数; F_i 为单位质量流体所受的质量力。

雷诺应力的输运方程^[13]为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{v_i' v_j'}}{\partial t} + \nu \frac{\partial \overline{v_i' v_j'}}{\partial x_l} = & \frac{\partial}{\partial x_l} \left[\nu \frac{\partial \overline{v_i' v_j'}}{\partial x_l} + c_s \frac{k^2}{\epsilon} \frac{\partial \overline{v_i' v_j'}}{\partial x_l} \right] + \\ & P_{ij} - c_1 \frac{\epsilon}{k} \left| \overline{v_i' v_j'} - \frac{2k}{3} \delta_{ij} \right| - \\ & c_2 \frac{\epsilon}{k} \left| P_{ij} - \frac{2}{3} P \delta_{ij} \right| + \pi_{ij} - \frac{2}{3} \epsilon \delta_{ij} \end{aligned} \tag{3}$$

其中

$$P_{ij} = -\overline{v_i' v_l'} \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_l} - \overline{v_j' v_l'} \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_l} \tag{4}$$

$$\pi_{ij} = \frac{P}{\rho} \left| \frac{\partial v_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j'}{\partial x_i} \right| \tag{5}$$

式中: $k = \overline{v_i' v_i'}/2$ 为紊动能; $\epsilon = \nu \frac{\partial \overline{v_i' \partial v_i'}}{\partial x_j \partial x_j}$ 为紊动能的耗散项; P_{ij} 为紊动能产生项; $P = -\overline{v_i' v_j'} \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j}$; 常数项

$$c_s = 0.09, c_1 = 2.8, c_2 = 0.47.$$

紊动能的耗散方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_i \epsilon)}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + \\ & c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P - c_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \tag{6}$$

式中: μ 为动力黏性系数; $\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$; 常数项 $c_\mu = 0.09$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $c_{1\epsilon} = 1.44$, $c_{2\epsilon} = 1.92$ 。

1.2 计算方法

控制方程使用有限体积法进行离散,速度和压力的耦合采用 SIMPLE 算法处理,各参数的离散均采用一阶精度的迎风格式。

1.3 边界条件

本文模拟复式河槽的均匀流,要定义的边界条件有水流进口、出口、自由水面和壁面条件。进口条件采用速度入口,以所用试验资料的平均流速作为进口流速,速度方向垂直于进口断面。出口采用压力出流。它们的 k 和 ϵ 值用经验公式计算。自由水面条件按照对称面处理,等价于自由滑移的壁面。壁面条件采用壁函数法。水流过流面为固定边界,定为无滑移边界,对于黏性底层采用壁函数来处理。

1.4 网格划分

网格划分采用六面体结构化正交网格。滩槽交互区是复式河槽水流研究的重点,因此在滩槽交互区进行网格加密。本文以文献[11]中的试验模型进行计算,试验水槽长 12.5 m,为顺直河道,横断面形状及大小如图 2 所示。对此模型进行网格划分,共生成 120 000 个网格,见图 3。

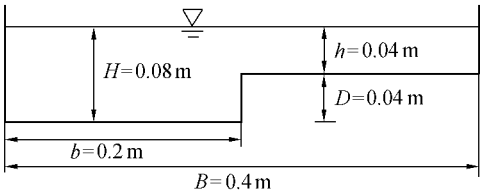


图 2 模型断面

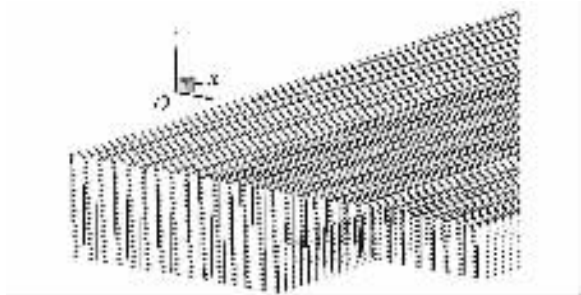


图 3 模型进口附近三维网格

2 计算与实验结果的对比分析

2.1 二次流

二次流决定了横向的动量交换,它是复式河槽很重要的水力现象。实测和模型计算的横断面的二次流(v, w)矢量图如图 4 所示,图中 $u_{\max}$ 是最大流速。RSM 计算结果中,滩槽交接面上产生了很强的向左上方倾斜的二次流,其方向和大小与试验结果吻合很好,试验结果最大和速度 v_s ($v_s = \sqrt{v^2 + w^2}$) 为纵向最大流速的 4%,与计算值 3.8% 很接近。在左倾的上升流左右有两个纵向涡,涡的横向和纵向尺寸以及涡的位置与试验值基本一致。RSM 可以很好地反映复式河槽的滩槽交互区内的二次流,而代数应力模型计算滩槽交界面的向左上方倾斜二次流的方向偏小,流速值偏大。图 4(c) 中观察到,在横断面两端存在两个明显的涡流,这种现象在矩形明渠中会出现^[14]。

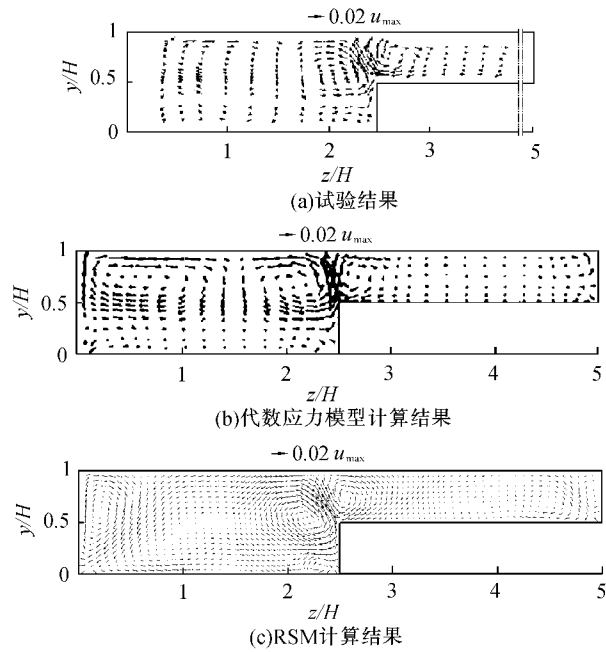


图 4 横断面的二次流速分布

2.2 主流流速分布

图 5 为横断面的主流流速的等值线分布图。在滩槽交接处,由于二次流将固壁附近流速较慢的流体向流道内部输运,等流速线沿着二次流的方向向斜上方凸起,RSM 计算的倾斜方向和弯曲形状与实测结果很接近,而代数应力模型计算的凸起的倾斜角度偏小。同时看到,RSM 计算的自由水面附近的流速分布与试验结果相差较大,这是因为在建立模型时对自由水面条件按照对称面处理。

2.3 床面剪切力分布

床面剪切力影响着泥沙的运动,因而它在水力学和河流工程中显得很重要。图 6 给出了复式河槽

断面的床面剪切力分布。在滩槽交互区,由于滩槽动量交换,床面剪切力分布很不均匀,主槽一侧的床面剪切力在接近浅滩时迅速减小,最终在交界处达到最小值,而由于主槽内较快流速的流体被运送到浅滩,浅滩一侧的床面剪切力在接近主槽时迅速增加。两种计算模型均反映了这一现象,但从数值来看,RSM 模拟得更为准确。而在主槽的左侧,两种模型计算值误差均偏大。

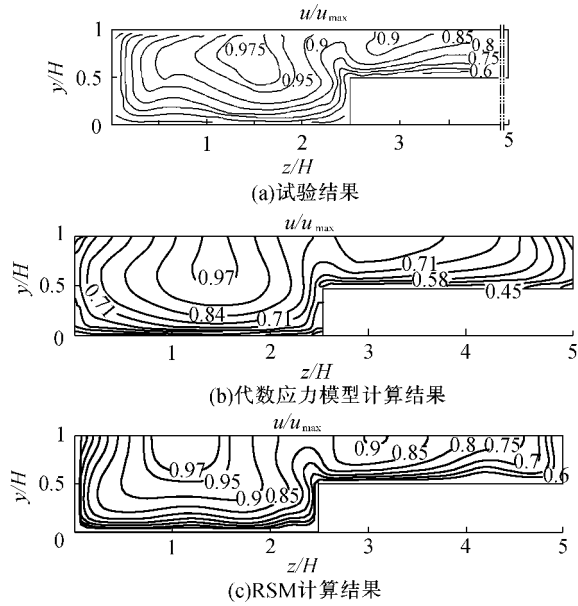


图 5 横断面的主流流速等值线

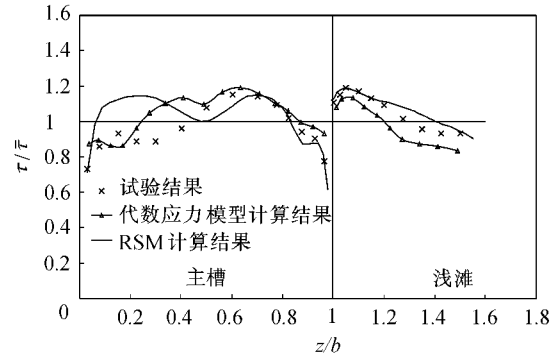


图 6 横断面滩槽床面剪切力分布

3 数值模拟应用

通过计算结果与试验结果的对比,表明用 RSM 计算复式河槽滩槽交互区水流运动是可靠的。因此将 RSM 运用于复式河槽水深对断面流速及滩槽床面剪切力影响的研究中。选取了文献 12 中的试验水槽,试验水槽为顺直的对称复式矩形水槽,长 30 m,主槽宽 0.3 m,滩地宽 0.7 m,滩槽床面高差 0.06 m。计算了 3 组水深, $H = 0.0777$ m, 0.1025 m, 0.1272 m 对应的流量分别为 0.01143 m³/s, 0.02346 m³/s, 0.03569 m³/s。由于横断面的对称性,计算区域选取整个断面的一半。

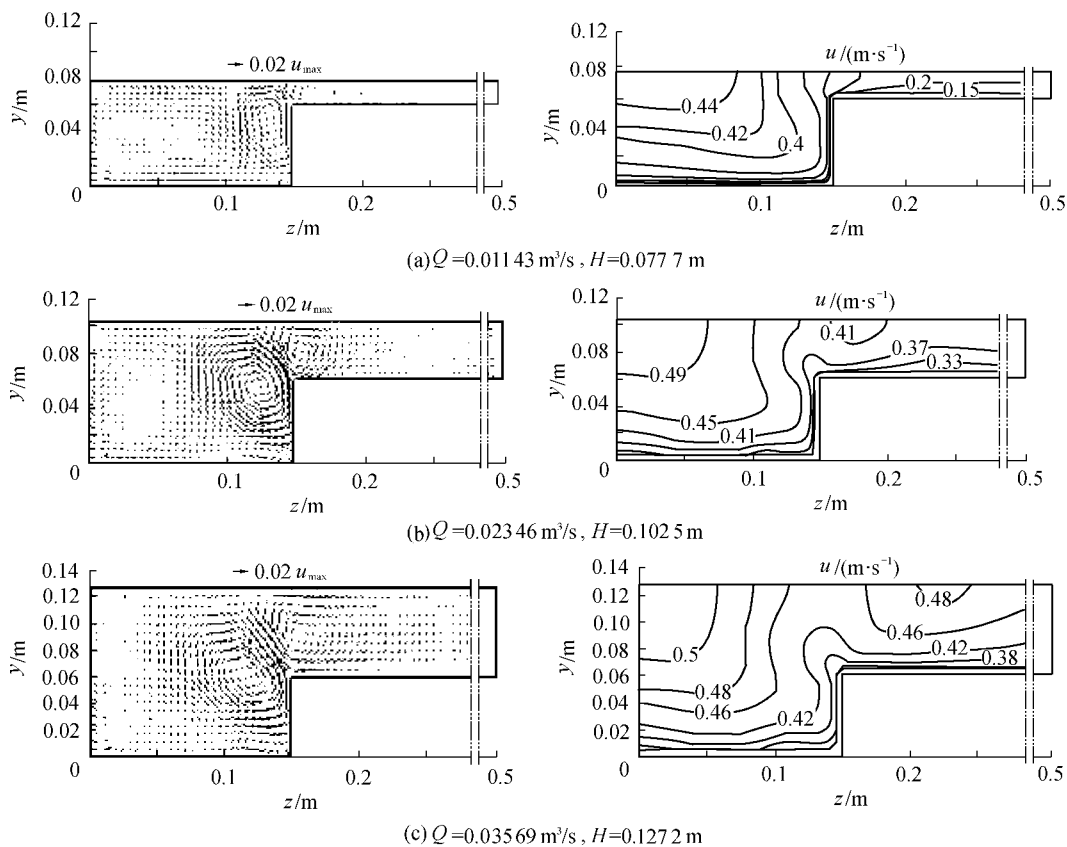


图 7 不同水深时横断面流速

图 7 为 3 种水深下的横断面二次流速矢量图和主流速等值线图,在 3 种水深下滩槽交界面上均产生了左倾的上升流,但随着滩地水深的增加,交互区二次流的纵向涡变大,滩槽水流动量交换所影响的区域增大。同时随着水深的增加,滩地水流结构发生变化,流速很快增加。在 $H = 0.0777\text{ m}$ 时,水流刚漫滩,在滩槽交互区主流速等值线并没有向斜上方凸起,而在 $H = 0.1025\text{ m}$ 和 $H = 0.1272\text{ m}$ 时,等值线凸起并随着水深增加凸起现象越来越明显。

水深对滩槽床面剪切力的影响见图 8。水流刚漫滩时,滩槽床面剪切力相差较大,而随着水深增加,滩槽水流动量交换加强,滩槽剪切力增加,相比下主槽剪切力增加较少,滩槽平均床面剪切力逐渐均匀化。

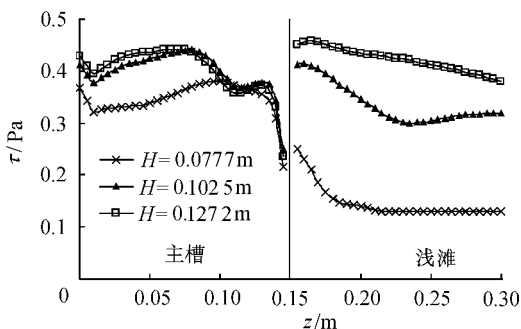


图 8 不同水深下横断面滩槽床面剪切力分布

4 结 论

a. 本文使用 RSM 模拟复式河槽的三维流动,数值模型计算的滩槽交界附近的二次流、主流速分布和床面剪切力与试验结果一致。

b. RSM 是各向异性的模型,能够较好地预测复式河槽滩槽交界面附近的复杂紊流,因此应用 RSM 研究了水深对复式河槽水流特性的影响。当水深增加时,滩槽交互区二次流的纵向涡增强,而浅滩主流速及床面剪切力迅速增大。

c. 自由水面附近的计算结果偏差较大,模型也应该考虑自由水面对流动的影响,有待于改进。

参考文献：

- [1] KNIGHT D W, SHIONO K. Turbulence measurements in a shear layer region of a compound channel[J]. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 1990, 28(2): 175-196.
- [2] SHIONO K, KNIGHT D W. Turbulent open channel flows with variable depth across the channel[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991, 222: 617-646.
- [3] KRISHNAPPAN B G, LAU Y. Turbulence modeling of flood plain flow[J]. J. of Hydraulic Engineering, ASCE, 1986, 112(4): 251-264.

(下转第 25 页)

补偿流量、补偿洪水、恢复河流易变性特征以及恢复生态学等理论研究上还不成熟,尚未形成较为一致的认识^[14,15]。文中所举数例仅是国内外的部分实践,其恢复效果在短时间内难以衡量。因此,还需加强对河流横向、纵向、垂向重要的生物或非生物过程的研究,建立实施有效的河流和流域生态系统健康评价指标体系,以迅速评价筑坝、堤防工程和各种恢复措施对河流生态系统的影响和效果。这是目前河流生态系统研究的热点问题之一。

文中一些重要观点得到中国水利水电科学研究院刘树坤教授的启发和指导,谨致谢忱!

参考文献:

[1] 刘树坤. 21 世纪的中国大水利建设[J]. 水利水电科技进展, 2000, 20(2): 6-9.

[2] MARK B B, AMY L H, DANIEL P L. Aquatic ecosystem protection and restoration: advances in methods for assessment and evaluation[J]. Environmental Science & Policy, 2000, 3(9): 89-98.

[3] 中国电力企业联合会科技工作部. 大坝工程环境问题[R]. 北京: 中国电力企业联合会科技工作部, 1992.

[4] BOON P J, CALOW P, PETTS G E. River conservation and management[M]. London: John Wiley & Sons, 1991: 122.

[5] 谭炳卿, 孔令金, 尚化庄. 河流保护与管理综述[J]. 水资源保护, 2002, 15(3): 53-57.

[6] WARD J V. The four-dimensional nature of lotic ecosystems[J]. Journal of the North American Benthological Society, 1989

(8): 2-8.

[7] BECK L. A review of farm waste pollution[J]. Journal of the Institution of Water and Environmental Management, 1989(3): 467-477.

[8] 刘树坤. 中国水利现代化和新水利理论的形成[J]. 水资源保护, 2003, 19(2): 1-5.

[9] DECAMPS H, JOACHIM J, LAUGA J. The importance for birds of the riparian woodlands with the alluvial corridor of the River Garonne[J]. Regulated Rivers: Research and Management, 1987, 1(4): 301-316.

[10] SCHROPP M H I. Principles of designing secondary channels along the river rhine for the benefit of ecological restoration[J]. Water Science and Technology, 1995, 31(8): 379-382.

[11] ROSENBERG R, ELMGREN R, FLEISCHER S, et al. Marine eutrophication case studies in Sweden[J]. Ambio, 1990(19): 123-125.

[12] ASHLEY A W, WAYNE D E. A practical scientific approach to riparian vegetation rehabilitation in Australia[J]. Journal of Environmental Management, 2003, 68(4): 329-341.

[13] POLLARD P, DEVLIN M, HOLLOWAY D. Managing a complex river catchment: a case study on the River Almond[J]. The Science of the Total Environment, 2001, 265(1): 343-357.

[14] GLASS S. Rebirth of a river[J]. Restoration and Management Notes, 1987, 5(3): 6-14.

[15] PALMER M A. Standards for ecologically successful river restoration[J]. Journal of Applied Ecology, 2005, 42(4): 208.

(收稿日期 2005-01-19 编辑 骆超)

(上接第 16 页)

[4] KAMAHAWA Y, TAMI N. Numerical calculation of turbulent flow in compound channels with an algebraic stress turbulence mode[C]//IWASA Y, TAMAI N, WADA A. 3rd International Symposium on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements. Tokyo: ASCE Press, 1988: 9-17.

[5] NAOT D, NEZU I, NAKAGAWA H. Hydrodynamic behaviour of compound rectangular open channels[J]. J of Hydraulic Engineering, ASCE, 1993, 119(3): 390-408.

[6] SHIONO K, LIN B. Three dimensional numerical models for two stage open channel flows[C]//Hydrocomp '92 International Conference of Computational Methods and Measurements in Hydraulics and Hydrology. Maksimovic Dayer, 1992: 123-130.

[7] PEZZINGA G. Velocity distribution in compound channel flows by numerical modeling[J]. J of Hydraulic Engineering, ASCE, 1994, 120(10): 1176-1198.

[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(3): 52-61.

[9] 陈文学. 应力驱动二次流和轴对称绕流体流场的数值模拟[D]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1997.

[10] KEARNEY D J. Turbulence diffusion in channel of complex geometry[D]. Tokyo: Loughbough University, 2000.

[11] TOMINAGA A, NEZU I. Turbulent structure in compound open-channel flows[J]. J of Hydraulic Engineering, ASCE, 1991, 117(1): 21-41.

[12] 胡春宏, 吉祖稳. 复式断面剪切应力分布规律研究[J]. 泥沙研究, 1999(6): 52-55.

[13] 陈丽星, 姚朝晖, 博托尼, 舞理厨夫. 模拟热分层流场的湍流模型比较及优化[J]. 原子能科学技术, 2003(5): 389-394.

[14] 林斌良, SHIONO K. 矩形明渠三维紊流的数值模拟[J]. 水利学报, 1994(3): 47-56.

(收稿日期 2005-04-22 编辑 骆超)

