

# 淹没丁坝三维水流数值模拟研究

魏文礼, 蔡亚希

(西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 采用两相流混合模型,并选取 Realizable  $k - \varepsilon$  湍流模型封闭两相流时均方程,对梯型断面明渠淹没丁坝绕流水力特性进行三维数值模拟。速度与压力耦合方程组求解时使用半隐式 SIMPLE (Semi - Implicit Method for Pressure - Linked Equations) 算法,模拟自由水面采用了 VOF (Volume of Fluid) 法。通过模拟得到了水面线、流速等水力参数的分布规律。模拟结果与实测资料的对比表明:两者吻合较好,VOF 方法和 Realizable  $k - \varepsilon$  模型的耦合求解能够很好地模拟明渠淹没丁坝绕流的水力特性,为丁坝的设计、布置与施工提供理论基础支持。

**关键词:** 丁坝绕流; 湍流; 水力特性; 数值模拟

中图分类号: TV131.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)03-0043-05

## Research on 3D numerical simulation of flow on submerged spur dike

WEI Wenli, CAI Yaxi

(Faculty of Water Resources and Hydraulic Power, Xian University of Technology, Xian 710048, China)

**Abstract:** The paper used two-phase gas-liquid model and 3D Realizable  $k - \varepsilon$  turbulence model to numerically simulate the hydraulic characteristics of flow for submerged spur dike. The SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) algorithm was used for the solution of velocity and pressure. The VOF (Volume of Fluid) method was used to simulate the free surface. The distribution law of hydraulic factors such as water surface profile and flow velocity was obtained by simulation. The comparison of the simulation result with the measured data shows a good agreement. The research indicates that the coupled solution of VOF method and 3D Realizable  $k - \varepsilon$  turbulence model can well simulate the hydraulic characteristics of flow around submerged spur dike on open channel, which can provide theoretical support for the design, layout and construction of similar spur dikes.

**Key words:** spur dike flow; turbulence; hydraulic characteristics; numerical simulation

丁坝是水利工程中被广泛应用的一种水工建筑物,在航道整治、防洪护岸、促淤保滩等工程中发挥着重要的作用。修建丁坝后,它可以束窄河床、调整水流,使局部水流结构发生剧烈的改变,从而打破了原有的水沙平衡,引起河床冲刷。因此对坝后下游形成的漩涡区的大小、水流对河床底的冲刷程度、丁坝上游壅水高度、丁坝附近流态、丁坝附近动水压力特性、丁坝局部水头损失以及丁坝附近流场和自由水面等影响的研究是非常重要的。

以往对丁坝的研究,主要是依靠水槽试验和河工模型试验,对丁坝的回流尺度、流场特性的确定提出了很多概括的理论方法。随着计算机技术的发展,数值模拟已经成为研究丁坝附近水流的重要手

段。到目前为止,国内外的许多学者做了很多研究,包括实验、理论和数值模拟。例如辛永政等<sup>[1]</sup>采用3种不同的紊流数学模型:标准  $k - \varepsilon$  模型、 $k - \omega$  模型、Reynolds - Stress 模型 (RSM 模型),以 VOF 方法来处理自由表面,数值模拟了明渠中丁坝水流的流动,并且在5个不同的断面上与实验资料进行了比较,算出了它们各自的误差,得到标准  $k - \varepsilon$  模型可以比较准确地模拟明渠中丁坝绕流情况的结论。刘玉玲等<sup>[2]</sup>应用高精度 WENO (Weighted Essentially Non - oscillatory Schemes) 格式结合有限体积法建立了河道丁坝群二维水流的数学模型,并对实际天然河道丁坝群水流进行了数值模拟。结果表明:此类格式能够有效地计算复杂边界天然河道丁

收稿日期:2013-12-09; 修回日期:2014-01-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51178391); 陕西省科学研究计划项目(2014K15-03-05); 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室开放基金(106-221223); 中央财政支持地方高校发展专项资金特色重点学科项目资助(106-00X101)

作者简介:魏文礼(1969-),男,陕西大荔人,博士,教授,主要从事环境水力学、水污染控制理论与技术研究。

坝群二维水流水力特性问题。黄文典等<sup>[3]</sup>对淹没丁坝水流进行模拟研究,从平面二维水动力学方程组出发,根据有限元 Galerkin 加权余量法离散模型方程组,并利用 Newton - Raphson 迭代法求解,研究了淹没丁坝的水深平均的平面二维水流数学模型;李志勤等<sup>[4]</sup>则应用 VOF 方法和标准  $k - \varepsilon$  模型耦合求解模拟丁坝附近自由水面和流场;Mayerle 等<sup>[5]</sup>和 Jia 等<sup>[6]</sup>模拟研究了丁坝水流的三维水力特性;彭静等<sup>[7]</sup>将非线性紊流模型用于丁坝的水流模拟,并与线性模型进行了比较,研究表明,标准  $k - \varepsilon$  模型在模拟障碍物绕流问题时,对回流区尺寸这一重要水流参数的预报值偏小。蒋昌波等<sup>[8]</sup>将大涡模拟法 (LES) 简化为二维形式,建立了非淹没群丁坝绕流的平面二维数学模型。应强<sup>[9]</sup>以水槽试验为基础,对淹没丁坝附近的水流现象进行了定性描述,采用量纲分析的方法,结合实验资料提出了过坝流量的计算公式以及坝前最大壅水值的计算公式。白静等<sup>[10]</sup>采用动态亚格子模式和浸没边界法,对宽浅槽道中的丁坝群绕流的水动力学特性进行了三维模拟研究。李冰冻等<sup>[11]</sup>进行了丁坝绕流水槽试验,基于有限体积法,采用  $k - \varepsilon$  湍流模型,数值模拟了丁坝附近水流的三维流动过程。崔占峰等<sup>[12]</sup>采用三维 RNG  $k - \varepsilon$  紊流模型,结合壁面函数法,利用 VOF 方法精细模拟了丁坝附近的流场,模型准确的反映了丁坝局部流态、冲刷的过程和特征。TANG Xuelin 等<sup>[13]</sup>利用有限体积法离散方程,研究了二次流及丁坝后的沉淀现象。邓绍云等<sup>[14]</sup>通过应用非线性三维紊流数值模型,并采用有限体积法对模型控制方程进行离散,对非淹没丁坝绕流进行数值模拟仿真分析;戎贵文等<sup>[15]</sup>采用压力隐式算子分割法 (PI-SO) 求解雷诺时均方程和 RNG  $k - \varepsilon$  紊流模型,建立了描述涌潮作用下丁坝附近水流运动规律的数学模型。

本文使用 VOF 方法和 Realizable  $k - \varepsilon$  模型耦合求解,对文献<sup>[3]</sup>中水槽试验淹没丁坝水力特性进行模拟,计算结果与实测数据的对比表明两者吻合良好,说明用 VOF 方法和 Realizable  $k - \varepsilon$  模型耦合求解,来模拟淹没丁坝的三维紊流是可行、合理的。

## 1 数学模型

### 1.1 控制方程

描述水流的时均控制方程如下<sup>[16]</sup>:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u_i' u_j'}) + \rho g_i \quad (2)$$

$$- \rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

式中:  $t$  是时间,  $x_i$  是沿  $i$  方向的空间坐标 ( $i = 1, 2, 3$ ),  $\mu_i$  是沿  $i$  方向的速度分量,  $\mu_t$  为湍动粘度,  $\rho$  和  $\mu$  分别为流体密度和分子粘性系数,  $p$  为压强,  $g_i$  为  $i$  方向的重力加速度。

采用 Realizable  $k - \varepsilon$  两方程来封闭上述方程组,其形式为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} \quad (5)$$

其中:方程(4)为紊动动能方程, $k$ 为紊动动能,方程(5)为紊动动能耗散率方程, $\varepsilon$ 为紊动动能耗散率。其中经验系数的取值及各系数的计算公式如下:

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2, C_2 = 1.9,$$

$$C_1 = \max \left( 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right),$$

$$\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon},$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

$$C_u = \frac{1}{A_0 + A_s U^* k / \varepsilon}, A_0 = 4.0, A_s = \sqrt{6} \cos \phi,$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1} (\sqrt{6} W), W = \frac{E_{ij} E_{jk} E_{ki}}{(E_{ij} E_{ij})^{1/2}},$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), U^* = \sqrt{E_{ij} E_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}},$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk} \omega_k, \Omega_{ij} = \tilde{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k.$$

以上方程组构成了求解流场分布规律的封闭方程组,根据实际工况施加相应的边界条件后,构成该方程组的定解问题。

### 1.2 模拟自由水面的 VOF 法<sup>[17-18]</sup>

VOF 法的基本思想是:定义体积率函数  $F = F(x, y, z, t)$  为计算区域内流体体积与计算区域体

积的相对比例。对于某一个计算单元,当  $F(x, y, z, t) = 1$ , 则表示该单元被液体充满; 当  $F(x, y, z, t) = 0$ , 则表示它是一个空单元; 若  $F(x, y, z, t) \in (0, 1)$ , 则表示该单元部分充满液体。显然, 对于自由表面问题, 自由表面存在于第三种单元中。 $F$  的梯度可以用来确定自由边界的法线方向。计算各单元的  $F$  数值及梯度之后, 就可以确定各单元中自由表面的近似位置。在每个单元中, 水和气的体积分数之和为 1。与真正的单相流相比, 就会多一个(水或气的)体积分数变量。如果即  $a_w$  表示水的体积分数, 则气体的体积分数  $a_a$  可表示为

$$a_a = 1 - a_w \quad (6)$$

只要流场中各处的水和气的体积分数都已知, 所有其它水和气共有的未知量和特征参数都可用体积分数的加权平均值来表示。所以在任何给定单元中, 这些变量和特征参数要么代表纯水或气, 要么代表两者的混合。换言之, 在一个单元中, 水的体积分数会有 3 种情况, 即  $a_w = 0, 1$  或介于 0 和 1 之间, 分别与充满气、充满水和包含水气界面 3 种情况相对应。

水气交界面的确定是通过求解下面的方程:

$$\frac{\partial a_w}{\partial t} + u_i \frac{\partial a_w}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

式中:  $t$  为时间;  $u_i$  和  $x_i$  分别为速度分量和坐标分量 ( $i = 1, 2, 3$ )。

引入 VOF 的  $k - \varepsilon$  模型与单相流的  $k - \varepsilon$  模型的形式是完全相同的, 只是密度  $\rho$  和  $\mu$  的具体表达式不同而已, 前者是通过体积分数加权平均值给出, 也就是说,  $\rho$  和  $\mu$  是体积分数的函数, 而不是一个常数, 其形式如下:

$$\rho = a_w \rho_w + (1 - a_w) \rho_a \quad (8)$$

$$\mu = a_w \mu_w + (1 - a_w) \mu_a \quad (9)$$

式中:  $a_w$  为水的体积分数;  $\rho_w$  和  $\rho_a$  分别表示水和气的密度。  $\mu_w$  和  $\mu_a$  分别为水和气的分子粘性系数。通过对水的体积分数  $a_w$  的迭代求解,  $\rho$  和  $\mu$  值都可以由(8)和(9)式求出。

## 2 数值模拟及验证

### 2.1 计算区域及网格划分

文献[3]中的实验水槽长为 18.0 m, 宽 0.4 m, 高 0.4 m。实验工况参数为: 丁坝为圆头丁坝, 坝上底轴线长为 0.04 m, 半圆半径为 0.015 m, 下底轴线长为 0.055 m, 2 个四分之一圆半径为 0.03 m, 丁坝高 0.05 m, 边坡比为 1: 3, 布设在水槽的左侧, 坝轴线位于距计算入口 3.0 m 的地方, 进口水深为 0.0989 m,

出口流量为 0.02312 m<sup>3</sup>/s。丁坝区域见图 1。

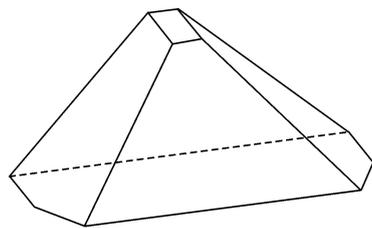


图1 丁坝图

### 2.2 网格划分

初始计算网格由 GAMBIT 软件生成。计算时采用结构化网格进行划分, 沿水流方向计算网格划分为渐变网格, 在丁坝处加密, 网格总数为 235023 个。计算网格如图 2 所示:

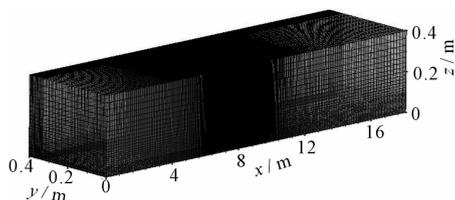


图2 网格图

### 2.3 边界条件与求解方法

进口边界: 进水口边界设定为速度进口, 流速为 0.58 m/s; 空气进口边界也为速度进口, 速度与水平相同。出口边界: 出水口边界设定为压力出口, 初始水位为 0.0989 m; 空气出口边界也为压力出口, 相对压强为 0。水面与空气接触的部分边界设定为压力出口, 相对压强为 0。固体壁面上的边界条件由“壁面函数”给定; 自由水面按 VOF 法确定。

求解方法: 水流控制方程的求解采用有限体积法; 速度与压力耦合方程组求解时使用半隐式 SIMPLE (Semi - Implicit Method for Pressure - Linked Equations) 算法。

### 2.4 结果分析和讨论

通过对文献[3]中水槽淹没丁坝水流的模拟, 得到了流速、水面线等水力参数的分布规律。图 3、4、5 分别为  $z = 0.02967$  m 水平面上流速矢量图、丁坝附近的局部矢量图、丁坝附近流速等值线图。图 6 为距水槽左边壁 0.1、0.2 和 0.3 m 处纵向断面的水深计算值与实测值的对比图; 图 7 为丁坝上、下游典型横断面水深计算值与实测值的对比图。根据图 6, 得到了纵向断面水深实测值与计算值相对误差表, 见表 1。

从图 3、4、5 可以看出, 在丁坝上游, 由于丁坝的束水作用, 以及丁坝对水流的阻挡作用, 使得流速逐

渐减小,在丁坝上缘处流速等值线非常密集,在丁坝上游靠近丁坝一侧的边壁附近形成一个低流速区,在该横断面上,流速由丁坝一侧向对岸逐渐增大;另外,由于丁坝的束水作用,在淹没丁坝后,上游来流受丁坝的阻挡,水流经丁坝后下跌,流速相对丁坝上缘明显增大。而后在距离丁坝较远处,丁坝对水面的影响较小,横断面流速分布不均匀性趋缓。

水流受丁坝影响的纵向水面线形态如图6所示,水流绕过坝头时,水位急剧降落,接着是一段近

乎水平的区段,而后缓缓降落。从图6和表1也可看出,利用VOF模拟的方法对丁坝附近自由水面进行模拟,纵向水深的计算值和实测值吻合良好。

横向水位线的变化如图7所示。在丁坝的上游,水面自丁坝所在的一侧向对岸倾斜,丁坝上游较远处,丁坝对水面的影响较小;在丁坝附近的上游,由于丁坝对水流的阻挡和顶托作用,产生雍水现象,从丁坝一侧到对岸,形成一个自丁坝向对岸倾斜的

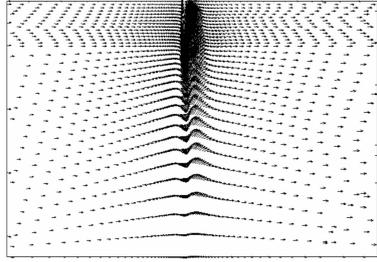


图3  $z = 0.02967$  m 时断面  
流速矢量图

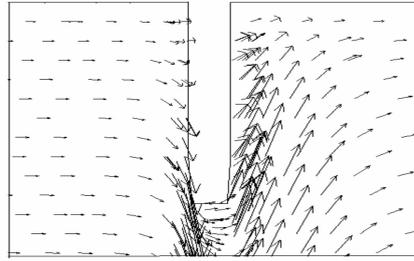


图4  $z = 0.02967$  m 时断面  
丁坝局部矢量图

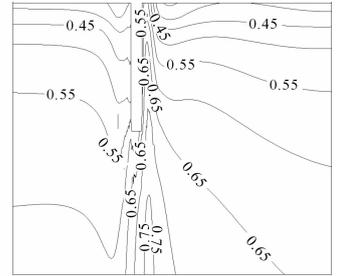
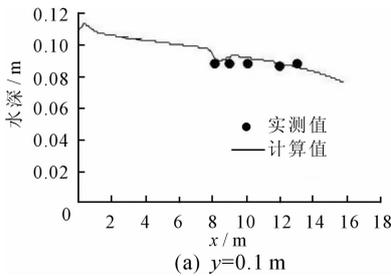
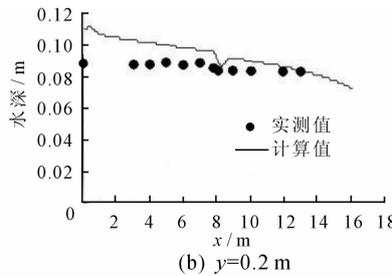


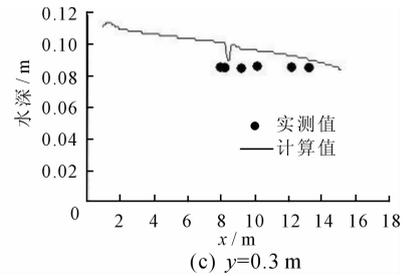
图5  $z = 0.02967$  m 时淹没丁坝  
附近流速等值线图



(a)  $y = 0.1$  m



(b)  $y = 0.2$  m



(c)  $y = 0.3$  m

图6 纵向水深计算值与实测值对比

表1 纵向水深实测值与计算值误差计算表

m, %

距离	$y = 0.1$			$y = 0.2$			$y = 0.3$		
	实测值	计算值	相对误差	实测值	计算值	相对误差	实测值	计算值	相对误差
0.01				0.089	0.111	24.816			
3.02				0.088	0.103	17.658			
3.98				0.088	0.102	16.190			
4.95				0.089	0.100	12.332			
5.97				0.088	0.098	11.779			
6.97				0.089	0.097	8.740			
7.77				0.086	0.097	12.426	0.085	0.101	18.867
8.09				0.084	0.088	5.415	0.085	0.097	13.636
8.15	0.088	0.091	3.303						
8.93				0.084	0.092	9.249			
9.02							0.085	0.097	14.394
9.06	0.089	0.093	4.388						
9.96							0.086	0.096	11.194
10.0				0.084	0.090	7.739			
10.1	0.088	0.093	4.770						
11.9	0.087	0.089	2.242	0.083	0.086	3.497	0.086	0.093	8.271
12.9				0.084	0.083	-1.162			
13.0	0.089	0.086	-3.653				0.085	0.090	5.283

水面;在丁坝附近下游,水流在坝顶后缘突然下跌,从靠近丁坝一侧到对岸,水位逐渐增大,坝后形成一个相对较浅的区域,而后水位逐渐回升,与实际情况吻合良好。

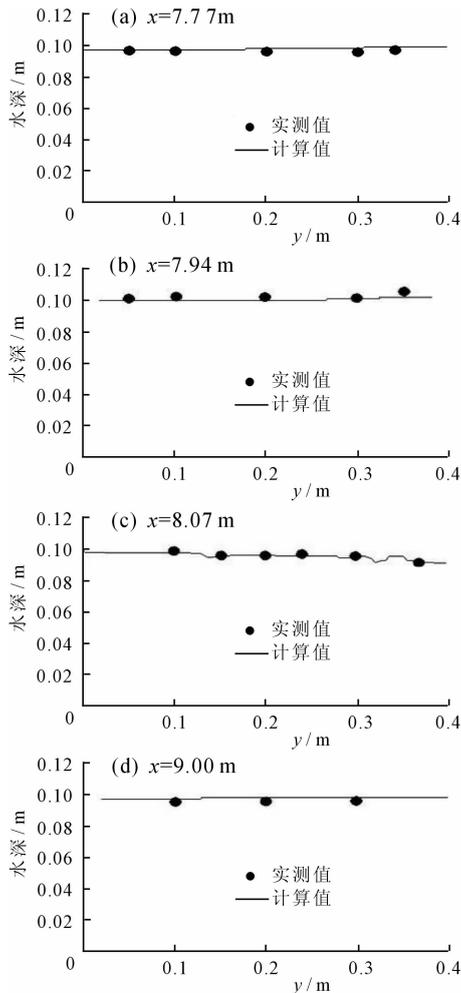


图7 丁坝上、下游典型横断面水深计算值与实测值对比

### 3 结语

本文用VOF方法和Realizable  $k-\varepsilon$ 模型耦合的方法对溢流丁坝附近的水力特性进行了研究,得到了流速、水面线等水力参数的分布规律。计算结果与文献[3]中水槽实验数据的比较表明,模型计算结果与实测值吻合良好,说明用VOF方法和Realizable  $k-\varepsilon$ 模型耦合来模拟淹没丁坝状态下的三维水流形态是合理的。该方法在明渠丁坝绕流的水力特性分布规律与丁坝附近自由水面的研究中将得到广泛应用。

#### 参考文献:

[1] 辛永政,张莉莉. 3种紊流数值模型模拟明渠丁坝三维水流初探[J]. 贵州水力发电, 2011, 25(5): 56-58+67.

[2] 刘玉玲,周孝德,杨国丽. 基于WENO格式的天然河道丁坝群二维水流数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2010, 25(1): 93-98.

[3] 黄文典,李嘉,李志勤. 淹没丁坝平面二维水流数值模拟研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2005, 37(1): 19-23.

[4] 李志勤,李洪,李嘉,等. 溢流丁坝附近自由水面的实验研究与数值模拟[J]. 水利学报, 2003, (8): 53-57.

[5] Mayerle R, Wang S S Y, Toro F M. Verification of a three-dimensional numerical model simulation of flow in the vicinity of spur-dikes[J]. Journal of Hydraulic Research, 1995, 33(2): 243-256.

[6] Jia Y, Scott S, Xu Y, et al. Three-dimensional numerical simulation and analysis of flows around a submerged weir in a channel bend way[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(8): 682-693.

[7] 彭静,河源能久,玉井信行. 线性与非线性紊流模型及其在丁坝绕流中的应用[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2003, 18(5): 589-594.

[8] 蒋昌波,吕昕,杨宜章. 丁坝绕流的二维大涡数值模拟[J]. 长沙交通学院学报, 1999, 15(3): 68-72.

[9] 应强. 淹没丁坝附近的水流流态[J]. 河海大学学报, 1995, 23(4): 62-68.

[10] 白静,方红卫,何国建. 非淹没丁坝绕流的三维大涡模拟研究[J]. 力学学报, 2013, 45(2): 151-157.

[11] 李冰冻,李嘉,李克锋. 丁坝水流的水槽试验及数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2013, 28(2): 176-183.

[12] 崔占峰,张小峰,冯小香. 丁坝冲刷的三维紊流模拟研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2008, 23(1): 33-41.

[13] Tang Xuelin, Ding Xiang, Chen Zhicong. Experimental and numerical investigations on secondary flows and sedimentations behind a spur dike[J]. Journal of Hydrodynamics (Ser. B), 2007, 19(1): 23-29.

[14] 邓绍云,王义刚,邱清华. 非淹没丁坝三维绕流数值模拟[J]. 水运工程, 2010(6): 90-94.

[15] 戎贵文,魏文礼,刘玉玲,等. 涌潮作用下丁坝附近水流运动特性的数值模拟研究[J]. 水利学报, 2012, 43(3): 296-301.

[16] 魏文礼,戴会超. 紊流模型理论及工程应用[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 2006.

[17] 沙海飞,周辉,吴时强,等. 坝身泄洪水气两相流二维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2007, 22(3): 311-316.

[18] Guo Lidong, Sun Dapeng, Wu Hao. A new numerical wave flume combining the 0-1 type BEM and the VOF method [J]. Journal of Hydrodynamics (Ser. B), 2012, 24(4): 506-517.