

种植凤眼莲河道的水流三维数值模拟

范济神 邱耿耀 赵振兴

(河海大学力学与材料学院 江苏 南京 210098)

摘要 采用 VOF 法对种植凤眼莲的河道的自由水面进行跟踪 ,将凤眼莲聚集带简化为多孔介质区域 ,在考虑惯性损失的情况下按不分区和分区 2 种方案分别对河道水流进行三维数值模拟。数值模拟结果与试验结果的对比表明 :分区方案在模拟水位壅高、流速分布、紊动特性等方面均比不分区方案更符合实际情况 ;用分区多孔介质模型模拟凤眼莲河道水流是可行的。

关键词 凤眼莲河道 ;VOF 法 ;多孔介质 ;三维数值模拟

中图分类号 :TV133 **文献标志码** :A **文章编号** :1006-7647(2012)03-0010-04

Three-dimensional numerical simulation of flows through eichornia crassipes in watercourse//FAN Ji-shen , QIU Geng-yao , ZHAO Zhen-xing(College of Mechanics and Materials , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : In this numerical study , the VOF method was used to track free-surface and eichornia crassipes simplified as porous medium. With consideration of inertial loss , non-divisional and divisional methods were used to simulate flows through eichornia crassipes in an ecological watercourse. Comparing the experimental measurements , it was found that the numerical simulations with the divisional method perform better with water-level prediction , velocity distribution , and turbulence characteristics than simulations with the non-divisional method. The results of numerical simulation show that it is feasible to use the divisional model to simulate flows through eichornia crassipes in an ecological watercourse.

Key words : watercourse with eichornia crassipes ; VOF method ; porous media ; three-dimensional simulation

在河道中种植对有机污染物和无机污染物均有显著吸收和降解作用的凤眼莲(俗称“ 水葫芦 ”) ,可达到生态修复的目的^[1] ,将这种河道简称为凤眼莲河道。凤眼莲河道是一种生态河道 ,其通过有效改善河道环境并最终构建人水和谐的理想环境为目的^[2]。近年来我国生态河道的建设正如火如荼地开展 ,例如秦淮河沿河环境的立体绿化和生态修复等。在凤眼莲河道中 ,漂浮于河道中的凤眼莲聚集带对河道的水流特性有较大的影响 ,已有不少研究成果。在物理模型试验方面 ,黄本胜等^[3]在室内水槽模拟凤眼莲河道 ,研究不同控制水深和来流速度下的河道水流特性 ;徐红辉^[4]针对全覆盖和半覆盖凤眼莲河道分别进行试验研究 ;朱红钊^[5]利用种植圈种植凤眼莲以防凤眼莲疯长 ,并对种植圈在不同排列方式及形状下的河道水力要素进行了比较分析。数值模拟方面的研究相对较少 ,黄本胜等^[6]采用 VOF 法利用多孔介质模型模拟了二维凤眼莲河道水流 ,为研究凤眼莲河道水流特性提供了另一种有效的方法。

本文以徐红辉^[4]的试验研究为基础 ,并改进黄

本胜等^[6]的数值模拟方法 ,选择三维标准 $k-\epsilon$ 紊流模型 ,采用 VOF 法跟踪自由水面 ,把凤眼莲聚集带简化为多孔介质区域 ,然后在考虑多孔介质区域水流惯性损失的影响下对凤眼莲河道进行数值模拟。多孔介质区域的简化采取 2 种方案 :方案 1 为不分区方案 ,仅有 1 个多孔介质区域 ;方案 2 为分区方案 ,有 2 个多孔介质区域 ,即茎叶区和根须区。

1 数学模型的建立

1.1 控制方程

凤眼莲河道中的水流运动属于自由液面流动 ,引入 VOF 法 ,通过联立雷诺时均方程与标准 $k-\epsilon$ 紊流模型方程 ,求解水和空气两相的流动。控制方程的离散采用有限体积法 ,压力-速度耦合采用 PISO 算法^[7]。采用 VOF 法时 ,水和空气两相共用一组动量方程 ,基本控制方程^[8]如下 :

连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \text{雷诺时均方程} \quad & \frac{\alpha(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\alpha(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \\ & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \mu_t \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k \text{ 方程} \quad & \frac{\alpha(\rho k)}{\partial t} + \frac{\alpha(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon \text{ 方程} \quad & \frac{\alpha(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\alpha(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} G_k \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \rho &= \beta_1 \rho_1 + \beta_2 \rho_2 \\ \mu &= \beta_1 \mu_1 + \beta_2 \mu_2 \\ \beta_1 + \beta_2 &= 1 \\ G_k &= \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ \mu_t &= \rho C_\mu \frac{k}{\epsilon} \end{aligned}$$

式中： i, j 为自由指标 ($i, j = 1, 2, 3$)； t 为时间； x_i 为位置坐标分量； u_i 为速度分量； ρ_1 和 ρ_2 分别为水和空气的密度； p 为压强； μ_1 和 μ_2 分别为水和空气的动力黏度； μ_t 为紊动黏性系数； g_i 为重力分量； k 为紊动能； ϵ 为紊动耗散率； G_k 为紊动能产生项； β_1 和 β_2 分别为计算单元中水和空气的体积分数； $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 C_μ 、 σ_k 、 σ_ϵ 均为常数。

VOF 法通过求解连续方程中水和空气两相的体积分数来完成对两相的跟踪，得到 β_1 和 β_2 的方程：

$$\frac{\partial \beta_1}{\partial t} + \frac{\alpha(\beta_1 u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \beta_2}{\partial t} + \frac{\alpha(\beta_2 u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

1.2 凤眼莲聚集带的简化处理

将凤眼莲聚集带简化为多孔介质区域，多孔介质模型就是在定义为多孔介质的区域中增加流动阻力，其本质是在计算多孔介质区域时，在动量方程中增加一个动量源项。动量源项包含两部分：黏性损失项（式 7 右边第 1 项）和惯性损失项（式 7 右边第 2 项）。

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu u_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |u| u_j \right) \quad (7)$$

式中： S_i 为 $(x, y \text{ 或 } z)$ 方向的动量方程中增加的源项； D_{ij} 和 C_{ij} 为与多孔介质渗透性相关的系数。

多孔介质单元中，动量源项对压力梯度有影响，产生一个与速度方阵成比例的压降。在多孔介质中考虑孔隙率的影响，其控制方程只需把式 (1)~(6) 中的物理量 u_i 、 k 和 ϵ 乘以孔隙率 γ 即可。

假设多孔介质区域是均匀且各向同性的固定区

域，其动量源项可简化为

$$\Delta p = - \left(\frac{\mu}{\alpha} u + C_2 \frac{1}{2} \rho u^2 \right) \Delta n \quad (8)$$

式中： α 为渗透性系数； C_2 为惯性阻力系数； Δn 为多孔介质长度。

1.3 计算区域及边界条件

凤眼莲分布在距进水口 14.85~20.00 m 之间的区域，其中水流方向为 x 轴正方向，渠底竖直向上方向为 z 轴正方向，垂直于 xOz 平面指向外侧方向为 y 轴正方向，渠道高 0.6 m，进口处给定水深 $h = 0.15$ m，渠底以上 $z = 0.05 \sim 0.11$ m 之间为根须多孔介质，0.11 m 以上为茎叶多孔介质，由流量计算平均流速。给定来流速度 $u_x = 0.3$ m/s， $u_y = u_z = 0$ ，气相出口为压力出口。近壁处用标准壁面函数处理，壁面采用无滑移条件。多孔介质区域采取 2 种方案，分别设置不同的孔隙率，由式 (8) 根据试验测得的数据拟合 $u \sim \Delta p$ 关系，计算 α 和 C_2 。方案 1： $\gamma = 0.5$ ， $\alpha = 9.37 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ， $C_2 = -0.306 \text{ m}^{-1}$ ；方案 2：茎叶区 $\gamma = 0.3$ ， $\alpha = 7.95 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ， $C_2 = -0.427 \text{ m}^{-1}$ ，根须区 $\gamma = 0.9$ ， $\alpha = 3.08 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ， $C_2 = -1.325 \text{ m}^{-1}$ 。方案 1 和方案 2 数值模拟凤眼莲河道计算区域见图 1。

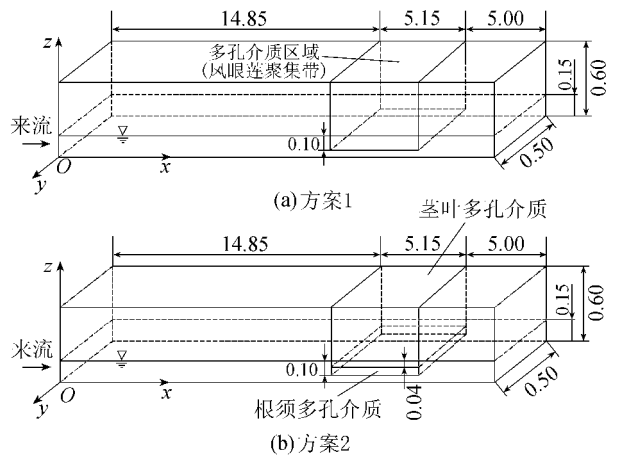


图 1 2 种方案数值模拟凤眼莲河道计算区域示意图 (单位: m)

1.4 网格划分

由于计算区域结构规则，因此使用结构化网格——六面体网格， x 方向节点间距为 0.33 m（在有凤眼莲的区域及其附近水位和流速等有较大变化的区域进行网格局部加密）， y 方向节点间距为 0.025 m， z 方向节点间距为 0.0125 m，节点间距为 0.2 m，整个计算区域划分的网格单元数为 374 400 个。

2 模拟结果分析

2.1 水位壅高

凤眼莲聚集带对水流起阻碍作用，数值模拟时需要在动量方程中加入动量源项 S_i ， S_i 的符号为

负 相当于一个与水流方向相反的阻力。根据质量守恒定律,流速减小,导致水位升高。

以闸门处为测量终点,沿上游每隔 1 m 测量 1 次水位,将数值模拟结果与试验测得数据进行对比,以验证模型的有效性。图 2 为 2 种方案数值模拟的水位壅高值与试验值的比较,从图 2 可以看出水位壅高的最大值都出现在凤眼莲聚集带上游 1 m 左右的位置,由于凤眼莲聚集带的影响,水位壅高逐渐降低。2 种方案模拟出的水位壅高均与试验结果总体趋势一致,但方案 2 与试验结果更接近。

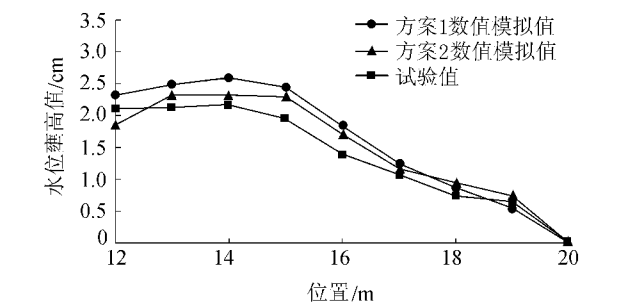


图 2 方案 1 和方案 2 数值模拟的水位壅高值与试验值的比较

2.2 流速分布

明渠水流流速一般呈“J”形分布,即符合著名的 Prandtl 流速公式:

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln z + C \tag{9}$$

式中: $\bar{u}$ 为时均流速; u_* 为摩阻流速; κ 为卡门常数; z 为测点至渠底的距离; C 为由壁面条件决定的常数。

凤眼莲的存在使得流速的分布发生了变化,水流流经凤眼莲后受阻,流速降低,而水流更趋向于流

向孔隙较大的地方,即水流在根须区和根须以下的区域流速较大。图 3(a)与图 3(b)分别为方案 1 和方案 2 模拟得到的凤眼莲河道流速分布云图。

将 $x = 13\text{ m}, 14\text{ m}, 16\text{ m}, 18\text{ m}$ 的 4 个横断面分别记为断面 1、断面 2、断面 3、断面 4,并分别将这 4 个横断面的流速试验值与数值模拟值进行对比,如图 4(a)~图 4(d)所示(图中相对水深为测点与渠底的距离和水深的比值)。

从图 4 可以看出,方案 1 中多孔介质区域的流速普遍比试验测得的流速小,而方案 2 与试验值比较吻合,原因如下:水流遇到阻碍时会尽可能往阻碍小的地方流动。方案 1 不分区模拟时,整个凤眼莲多孔介质区域的阻碍作用使得水流更趋于往根下空白区域流动,因此多孔介质下方的流速偏大而多孔介质区域流速偏小。方案 2 分区模拟时,茎叶区由于凤眼莲茎部膨大,聚集在一起时水流可以通过的缝隙即孔隙率较小,对水流的影响较大,流速小,黏性阻力起主要作用;根须区孔隙非常大,对水流的影响较小,流速较大,惯性阻力作用较明显。由此可见方案 2 分区模拟的水流流速分布更合理。

2.3 紊动特性

分析紊动特性可以了解水流的挟沙能力、污染物的输送和稀释以及扩散能力等,对研究实际问题起到重要的作用。相对紊动强度 T 是表示水流紊动特性的一个重要参数^[9], $T = \frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{u}}$,其中 u' 为脉动流速。

图 5 为断面 4 ($x = 18\text{ m}$)相对紊动强度随相对水深变化的试验值与数值模拟值的对比,根须所在区域相对水深在 0.3~0.6 之间,茎叶区域处于相对水

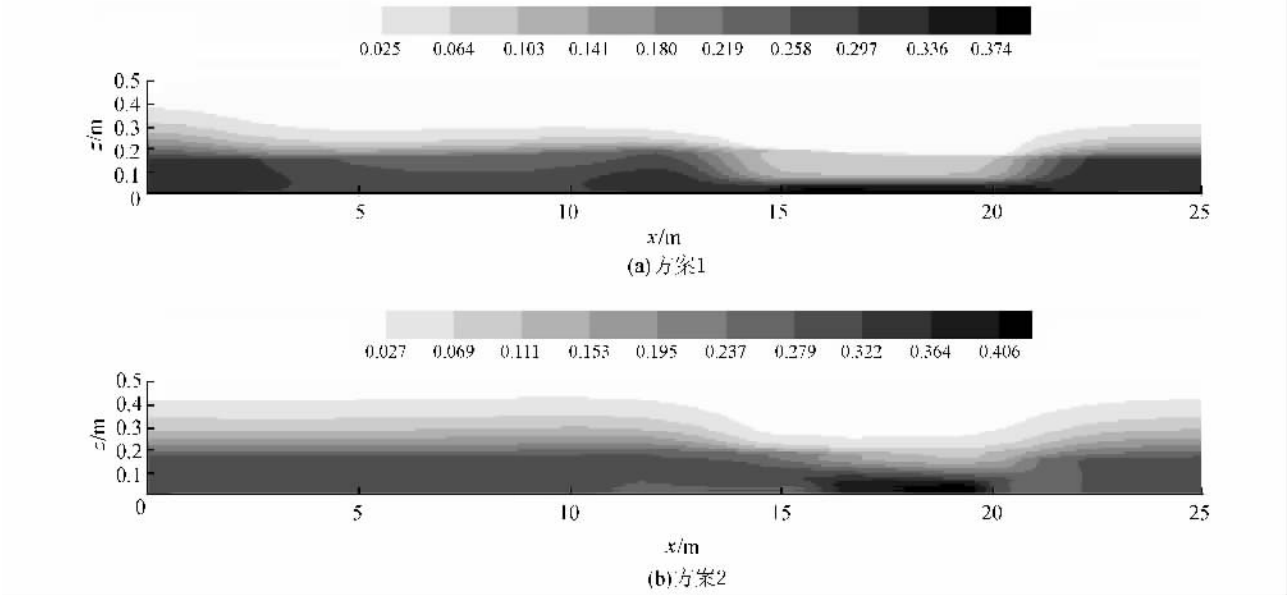


图 3 2 种方案模拟的凤眼莲河道流速分布云图(单位:cm/s)

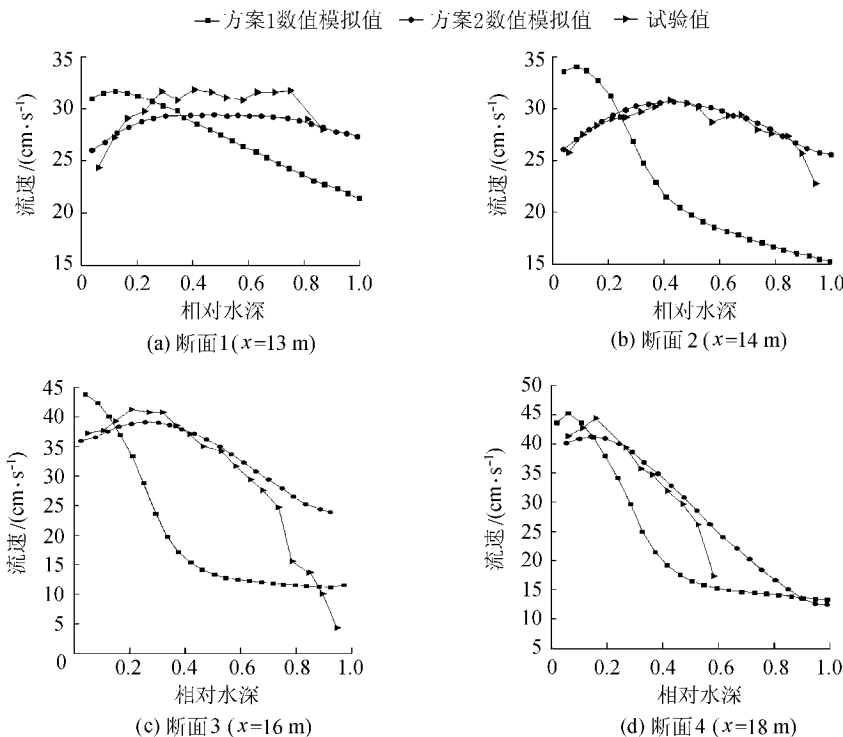


图4 各主要断面流速随相对水深的变化

深在0.6以上。从图5可以看出,根须以下区域2种方案模拟的相对紊动强度都在壁面处有1个峰值,然后迅速减小,再随相对水深的增加而变大,其变化规律均与试验值变化规律类似。在根须区,方案1由于黏性阻力占主要作用,速度的减小使得黏性力的作用更加突出,相对紊动强度随相对水深的增加而减小;方案2惯性力起主要作用,相对紊动强度随相对水深的增加而缓慢增大,与试验值变化规律一致。在茎叶区,2种方案都认为黏性力起主导作用,相对紊动强度随相对水深的增加略有减小,接近自由水面时又略有增大趋势。总体上说,方案2相对紊动强度数值模拟值更接近试验值。

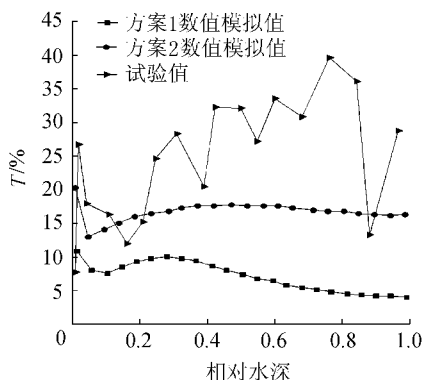


图5 断面4 ($x=18\text{ m}$)相对紊动强度随相对水深的变化

相对紊动强度实际变化与数值模拟结果有差异主要是由于实际情况下不同方向的相对紊动强度存在差异,各向同性假设下的数值模拟不能分别予以

考虑,同时还要考虑根须和茎叶随水流的摆动不同等方面原因。更精确地解决该问题,一方面可以对多孔介质模型进行改进,即引入更准确的源项;另一方面考虑紊动的各向异性,即计算不同方向的渗透系数和惯性阻力系数;此外,可以结合动边界理论对凤眼莲区域进行处理。

3 结 语

采用VOF法,结合多孔介质模型,按照不分区与分区2种方案分别对凤眼莲河道进行数值模拟,得出以下结论:分区模拟比不分区模拟水位壅高值及流速分布均更接近于试验值;紊动特性方面,由于数值模拟中多孔介质模型对紊流采取了近似处理,2种方案相对紊动强度值与试验值相比均有偏差,但是分区方案偏差比不分区方案小,且分区方案相对紊动强度变化规律与试验值变化规律更接近。数值模拟结果表明,用分区多孔介质模型来模拟凤眼莲河道是可行的。

参考文献:

- [1] 黄本胜,徐红辉.水葫芦灾害及其生态修复功能[J].广东水利水电,2008(3):1-4.
- [2] 高晓琴,姜姜,张金池.生态河道研究进展及发展趋势[J].南京林业大学学报:自然科学版,2008,32(1):103-106.

(下转第23页)

小差异显著。尤其对拉压破坏区的判定,规范准则的破坏区明显比大连理工大学准则判定的破坏区小。

和单轴破坏准则得到的安全度相比,两个三维破坏准则的结果都与其差异较大。对防渗墙的右下部位,单轴破坏准则判定的破坏区较大,而三维破坏准则结果显示防渗墙上游侧几乎没有破坏区,仅在下游面靠近右下岸坡的局部区域出现破坏。与此相反,对处于拉-压区的防渗墙混凝土(右上部靠近岸坡区域),单轴破坏准则判定的破坏区范围较小,因而偏危险。

综上所述,两种三维破坏准则总体上还是比较接近,但和单轴准则相比,安全度差异较大。理论上,三维准则更准确,对防渗墙破坏宜用三维破坏准则进行判定。

本文建议的安全度(式(1),式(10)),可以比较清晰地展示不同部位混凝土的安全程度,可方便地用于工程设计。

当然,由于有限元方法计算土体中混凝土结构时,会引起应力集中,加之土体及接触面的本构模型、模型参数的确定等都不很完善,导致得到的混凝土防渗墙的应力精度有限,甚至有时可能误差较大。因此,混凝土破坏准则需要研究,同时,应力的计算精度也更需要提高。

4 结 语

本文在对某砾石土心墙堆石坝及覆盖层防渗墙进行三维有限元分析的基础上,引入混凝土单轴及三维破坏准则,定义防渗墙安全度,对比分析了单轴和三维破坏准则下混凝土防渗墙的安全度。结果表明,以往防渗墙安全度判别常用的单轴破坏准则与防渗墙所处的复杂应力状态不符,在某些情况下对防渗墙破坏的可能性估计有较大偏差。混凝土三维破坏准则更全面地考虑了防渗墙所处的受力状态,对受力较复杂的混凝土防渗墙宜采用三维破坏准则,从而可更合理评判混凝土防渗墙的安全度。

参考文献:

[1] 卢廷浩,汪荣大.瀑布沟土石坝防渗墙应力变形分析[J].河海大学学报,1998,20(6):41-44.

[2] 王瑞骏,李炎隆,韩艳丽.均质土坝基础混凝土防渗墙应力变形特性研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(9):222-228.

[3] 邱祖林,陈杰.深厚覆盖层上混凝土防渗墙的应力变形特性[J].水文地质工程地质,2006(3):72-76.

[4] 酆能惠,米占宽,孙大伟.深覆盖层上面板堆石坝防渗墙应力变形性状影响因素的研究[J].岩土工程学报,2007,29(1):26-31.

[5] 田景元,王平.毛尔盖心墙堆石坝防渗墙与坝体防渗体连接形式[J].水利水电科技进展,2010,30(4):41-45.

[6] 燕乔,王立彬.混凝土防渗墙墙体材料发展探讨[J].水利水电科技进展,2009,29(增刊1):174-177.

[7] 姚汝方.高土石坝防渗墙混凝土性能试验[J].水利水电科技进展,2009,29(4):44-46.

[8] GB50010—2002 混凝土设计规范[S].

[9] 王万祯.轻骨料混凝土破坏准则[J].甘肃科学学报,2008,20(1):119-121.

[10] 丁发兴,余志武.基于损伤泊松比的混凝土多轴强度准则[J].固体力学学报,2007,28(1):13-19.

[11] 过镇海.混凝土的强度和本构关系:原理与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.

[12] 宋玉普.多种混凝土材料的本构关系和破坏准则[M].北京:中国水利水电出版社,2002.

[13] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].2版.北京:中国水利水电出版社,1996.

(收稿日期 2011-10-17 编辑 熊水斌)

(上接第13页)

[3] 黄本胜,陈秋月,邱静,等.有水葫芦的河道水力特性试验研究[C]//第20届全国水动力学研讨会文集.北京:海洋出版社,2007:439-444.

[4] 徐红辉.水葫芦灾害引起的生态水力学问题及其研究[D].南京:河海大学,2008.

[5] 朱红钧.凤眼莲生态型河道水流特性试验研究[D].南京:河海大学,2007.

[6] 黄本胜,袁梦,邱秀云.有水葫芦河道水流数值模拟[J].广东水利水电,2008(8):1-3.

[7] 王福军.计算流体力学分析:CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004:83-85.

[8] 陶文铨.数值传热学[M].2版.西安:西安交通大学出版社,2001:347-348.

[9] 赵振兴,何建京.水力学[M].2版.北京:清华大学出版社,2010:87-88.

(收稿日期 2011-11-24 编辑 骆超)

