

含柔性沉水植物河道水力特性三维数值模拟研究

刘彦东, 徐国宾, 张雅卓

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 采用 RNG $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型, VOF 法追踪自由水面, 对含柔性沉水植物河道的水力特性进行三维数值模拟研究。将柔性沉水植物区域简化为多孔介质区域, 以多孔介质模型来模拟柔性植物对河道水流的影响, 设定多孔介质模型对湍流的生成和耗散没有影响, 以植物带前后压强差确定多孔介质模型的渗透率, 以柔性植物所占空间体积比确定多孔介质模型的孔隙率。模拟结果给出了河道沿程水位曲线、流速和紊动强度等参数的垂线分布。最后, 将数值模拟计算结果和试验实测结果进行了对比, 两者吻合较好, 这表明以多孔介质区域代替柔性沉水植物进行数值模拟是可行的。

关键词: 柔性沉水植物; 湍流模型; VOF; 多孔介质模型

中图分类号: TV131.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)06-0044-06

3D numerical simulation of hydraulic feature for watercourse including flexible submerged plant

LIU Yandong, XU Guobin, ZHANG Yazhuo

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: By use of RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and VOF method tracking the free surface, the paper carried out 3D numerical simulation to hydraulic characteristic of open channel with flexible submerged plants. The submerged flexible plants area is simplified as porous medium region, the porous medium model was selected to simulate the influence of porous medium on water flow. It is set up that porous medium model has no effect on generation and dissipation of turbulence, and the permeability rate of porous media model is determined by the pressure difference. The porosity rate is determined by flexible plant space volume ratio. The simulation results gave the curve of water level along open channel and the vertical distribution of velocity of flow and turbulence intensity. At the last, it compared the numerical simulation results with test results. Both the result are in good agreement, which means that the numerical simulation by use of porous media region instead of flexible submerged plants is feasible.

Key words: flexible submerged plant; turbulence model; VOF; porous medium model

随着人们对河道综合治理开发的重视, 水生植物在河道护岸和生态修复工程中得到越来越广泛的应用。河道中水生植物的存在, 有利于净化水质, 美化环境, 但是水生植物也增加了河道水流阻力, 降低了河道的行洪能力。因此, 有必要对含植物河道水力特性进行研究。河道中的植物, 按其枝干的柔软程度、过水时的弯曲程度和变形程度, 可以分为刚性植物和柔性植物。国内外对刚性植物的研究已趋于成熟, 相关的研究也较多。对柔性植物, Jarvela^[1]在

水槽中分别进行了几种不同的天然柔性植物存在下水槽平均流速分布规律和阻力特性的试验研究; Syunswke 等^[2]在室内通过用尼龙纤维模拟柔性植物进行研究, 发现在植物区域会产生涡旋, 并且在植物冠层区域流速发生显著变化, 在植物冠层处紊动强度和雷诺应力都达到最大。Faith - Maghadam 等^[3]对柔性非淹没状态下的西洋杉和松树进行了定性的无量纲研究, 得到了植物产生的阻力与植物参数和水流参数之间的关系, 但只给出了定性关系,

收稿日期: 2014-10-15; 修回日期: 2014-11-10

基金项目: 高等学校学科创新引智计划资助(B14012); 天津市应用基础与前沿技术研究计划自然科学基金重点项目(13JCZDJC36200)

作者简介: 刘彦东(1990-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 研究方向为水生态环境。

通讯作者: 徐国宾(1956-), 男, 河北石家庄人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水沙调度。

定量关系还需进一步研究。韩璐^[4]通过室内物理模型试验研究了复式断面河道滩地种植柔性植物后滩地区、滩槽交界区和主槽区水力特性的变化。朱红钧等^[5]对复式断面河道滩地有柔性植物的水流紊动特性进行了一定的研究,对不同流量条件下河道不同断面和沿程紊动强度的变化进行了分析。由于柔性植物对水流的影响非常复杂,以上所述众多学者的研究主要是通过室内物理模型或者原形观测进行研究,而对柔性植物数值模拟的研究较少。Hsieh Ping Cheng 等^[6]首先将多孔介质理论引入到柔性植物水流的研究中,来计算二维淹没柔性植物水流纵向流速。黄本胜等^[7]利用多孔介质模型模拟了二维水葫芦河道,计算了河道沿程水位变化和断面沿垂线流速分布。

本文研究的柔性沉水植物为种植在河道底部的淹没柔性植物。利用多孔介质模型模拟柔性沉水植物对河道水流的影响,采用 RNG $k - \varepsilon$ 双方程湍流模型,VOF 法对种植柔性沉水植物的河道自由水面进行跟踪,将柔性沉水植物区域简化为多孔介质区域,在考虑惯性损失的情况下对河道水流进行三维数值模拟。最后,将数值计算结果和王莹莹^[8]的物理模型试验实测结果进行对比分析。

1 数学模型建立

1.1 基本方程

采用有限体积法离散方程,通过联立雷诺时均方程和 RNG $k - \varepsilon$ 双方程求解,基本方程^[9]如下:

连续性方程:

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

动量守恒方程:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + S_i \quad (2)$$

k 方程:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

其中:

$$G_k = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j},$$

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3},$$

$$E_{ij} = 0.5 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad \eta = (2E_{ij}E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$$

式中: i 和 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 为密度; μ 为动力黏滞系数; μ_t 是紊动黏滞系数; G_k 为紊动能 k 的产生项; g_i 重力分量; p 为压强; E_{ij} 为时均应变率; k 为紊动能; ε 为紊动耗散率; $\eta_0, \beta, C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 均为经验常数, 分别为 $\eta_0 = 4.38, \beta = 0.012, C_\mu = 0.09, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 0.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

密度 ρ 和动力黏滞系数 μ 由体积分数加权平均值给出, 公式为:

$$\mu = F\mu_w + (1 - F)\mu_a, \quad \rho = F\rho_w + (1 - F)\rho_a \quad (5)$$

式中: F 为流体中水的体积分数, $0 \leq F \leq 1$; ρ_w 和 ρ_a 分别为水和空气的密度; μ_w 和 μ_a 分别为水和空气的动力黏滞系数。

1.2 水面线处理

采用 VOF 方法时, 自由水面通过求解如下方程计算得到:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial (Fu_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

1.3 多孔介质模型简化处理

水流在柔性沉水植物内部的流动可以看作是一种多孔介质内部的流动, 假定植物区域为多孔介质区域, 多孔介质模型对湍流的生成和耗散没有影响。多孔介质模型通过在动量方程中增加源项来模拟计算域中多孔性材料对流体的流动阻力, 源项包括黏性损失项和惯性损失项。动量源项方程^[10]为:

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

式中: S_i 是 $i(x, y, z)$ 动量方程的源项; $|u|$ 是速度大小; D_{ij} 和 C_{ij} 是矩阵。

动量源项对多孔介质区域的压力梯度有影响, 生成一个与速度大小成正比的压降。假定多孔介质为各向同性、均质的, 且多孔介质上边界为刚性可渗边界, 动量源项简化为:

$$S_i = - \frac{\mu}{\alpha} u_i - C_2 \frac{1}{2} \rho |u| u_i \quad (8)$$

$$\Delta P = - \left(\frac{\mu}{\alpha} u + C_2 \frac{1}{2} \rho u^2 \right) \Delta h \tag{9}$$

式中： C_2 为惯性阻力因子； α 为多孔介质渗透性系数； Δh 为多孔介质区域的厚度； ΔP 为多孔介质区域前后的压力差。对于多孔介质数值模拟时，最主要的是确定惯性阻力系数 C_2 和黏性阻力系数 $1/\alpha$ 。本文使用 Ergun 公式计算惯性阻力系数和黏性阻力系数，计算公式为：

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{150}{D_p^2} \frac{(1 - e)^2}{e^3} \tag{10}$$

$$C_2 = \frac{3.5}{D_p} \frac{(1 - e)^2}{e^3} \tag{11}$$

式中： D_p 为平均颗粒直径； e 为多孔介质孔隙率，其定义为孔隙体积与层床总体积之比。

在多孔介质区域，由于流速相对较少，黏性阻力项起主导作用，惯性阻力项所占比例相对较少，所以本模型中惯性阻力因子 C_2 设置为零，这样可以保证流过多孔介质的流体中，压力降正比于速度。

2 计算方法和边界条件

2.1 计算方法

由于模型比较规整，因此采用六面体结构化网格对模型进行网格划分，沿垂线方向，在渠底附近和自由水面附近进行网格加密；使用有限体积法对控制方程进行离散，压力和速度耦合采用 PISO 算法处理，各参数的离散均采用一阶精度的迎风格式。数值计算过程分两步进行，首先是进行河道无植物状态下的水气两相定常流模拟，收敛后加入多孔介质模型，在定常流结果基础上模拟含柔性沉水植物情况下的水气两相非定常流流动。

2.2 边界条件

数值模拟的边界条件设置如下：主要包括 2 个进口，速度进口和压力进口，进口水位参考室内试验结果设置，进口速度设置为 $u_x = u_0, u_y = 0, u_z = 0$ ；进口水位以上至下游出口断面设置为空气压力进口，静压设置为 0；下游设置为压力出口断面，静压设置为 0；各边界条件的湍流参数按照经验公式确定，渠底坡度

设置为 0.002。壁面采用无滑移壁面条件，近壁区采用标准壁面函数法处理。工况如表 1。

表 1 各组工况参数

工况	流量 $Q / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	入口水深 h / m	平均流速 $u_x / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	雷诺数 Re	佛汝德数 Fr
1	0.00828	0.256	0.108	10126	0.068
2	0.01121	0.145	0.258	18868	0.216

3 物理模型试验简述

本文数值计算结果用王莹莹^[8]的物理试验实测数据进行验证，该试验水槽长 7.8 m、宽 0.3 m、高 0.5 m，水槽两侧为玻璃壁面，底部铺有光滑的 PVC 板，选用的柔性植物高度为 0.04 m，平面直径为 0.03 m，种植密度为 1 000 株/ m^2 ，植物带布置在水槽正中间水流稳定段的底部，植物带长 2.5 m、宽 0.3 m。

4 计算结果分析

数值模拟时分别在沉水植物带上游、植物带中游及植物带下游选取 5 个测量断面，断面 1 ($x = 2.15 \text{ m}$) 和断面 5 ($x = 5.65 \text{ m}$) 分别取在沉水植物带上游和下游 0.5 m 处，断面 2 ($x = 3.025 \text{ m}$)、断面 3 ($x = 3.9 \text{ m}$)、断面 4 ($x = 4.775 \text{ m}$) 取在植物带中游；各断面间距取为 0.875 m。为了避免水槽边壁对水流的影响，只选取水槽中线处进行测量，测点平面布置图如图 1 所示。

4.1 沿程水位分布

图 2 为工况 1 和工况 2 模型试验和数值模拟得到的沿程水深变化图。由图 2 可知，两者吻合较好，最大偏差为 3.6%，说明以多孔介质区域代替柔性沉水植物区域进行数值模拟是可行的。同时还可以看出，工况 1 中水深并无明显下降，工况 2 水深在植物带前稍微雍高，相对无植物时雍高幅度为 3.6%，植物带中游水位稍微下降。由此可以得出，并非河道中存在植物必然会导致水位雍高，在含柔性沉水植物河道中，当水深远大于植物高度时，也即植物远处于淹没状态时，河道水深基本是保持不变的。

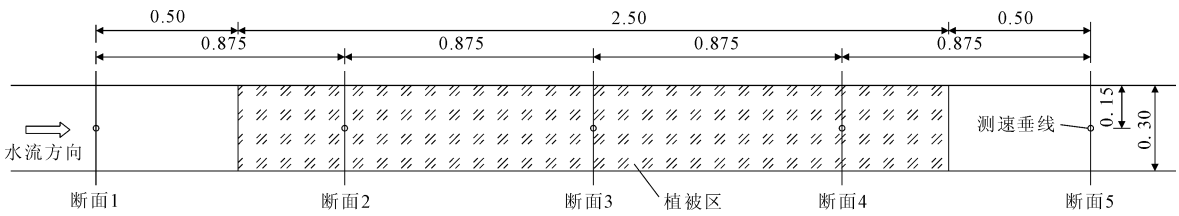


图 1 测点平面布置图(单位:m)

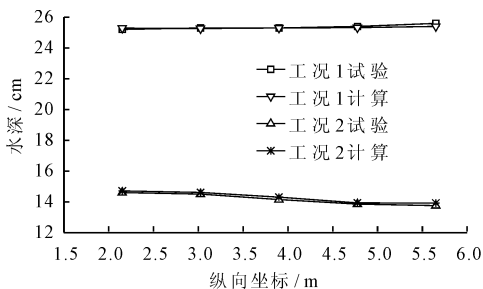


图 2 沿程水面线图

4.2 断面流速分布

已有研究结果指出,在不含植物明渠中,沿垂向纵向流速的分布规律满足半对数公式,流速分布图呈现“J”形,也即是 Von Karman - Prandtl 关系式:

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{K} \frac{z}{z_0} \tag{12}$$

式中: U 为距离明渠底部高度为 z 处纵向瞬时流速; U_* 为摩阻流速; K 为 Von Karman 常数; z_0 为粗糙长度。

在含柔性沉水植物明渠中,断面流速分布发生很大变化。Temple^[11] 提出了两层流速垂线分布的理论;Gourlay^[12] 总结前人学者的研究成果,指出沿垂线流速应分为 3 层:①渠底的植被层,由于植物的阻水作用,该层流速保持为很低的常数;②植被层顶部的过渡层,该层流速急剧增加;③靠近水面层,流

速保持为较大的常数。

图 3 为工况 2 下数值模拟计算与物理模型试验测得的各断面沿垂线纵向流速分布图,并与无植物时数值模拟得到的各断面纵向流速进行对比。由图 3 可知,数值模拟计算出的流速值与试验值吻合较好。图 3(a) 为断面 1 流速沿垂线分布图,由图 3(a) 可知,断面流速基本上满足“J”型分布,流速值相对无植物时有所减少,可知植物带对明渠的影响尚未波及到上游;图 3(b)、(c)、(d) 分别为断面 2、3、4 的流速沿垂线分布图,由于植物的阻水作用,数值模拟结果与 Gourlay^[12] 的结论较一致,渠底层 ($h < 4$ cm) 流速较低,保持为较小的常数,流速值小于无植物时水流流速;植物顶层 ($h = 4$ cm) 附近流速梯度较大,流速明显增大;水面以下一定深度流速基本保持不变,且大于无植物时流速。由水位分析可知,当种植柔性沉水植物时,且水深明显大于植物高度时,也即植物远处于淹没状态时,不但不会雍高水位,反而会增大植物区上部水流的流速。图 3(e) 为断面 5 流速沿垂线分布图,流速基本上恢复了半对数分布,该处水流已经基本上摆脱了植物带的影响,只是相对无植物时有所减少。图 3 中数值模拟和物理试验存在着某些差异,究其原因,可能一部分是测量时存在误差,一部分是数值模拟所采用的边壁粗糙度与实际水槽不完全相符。

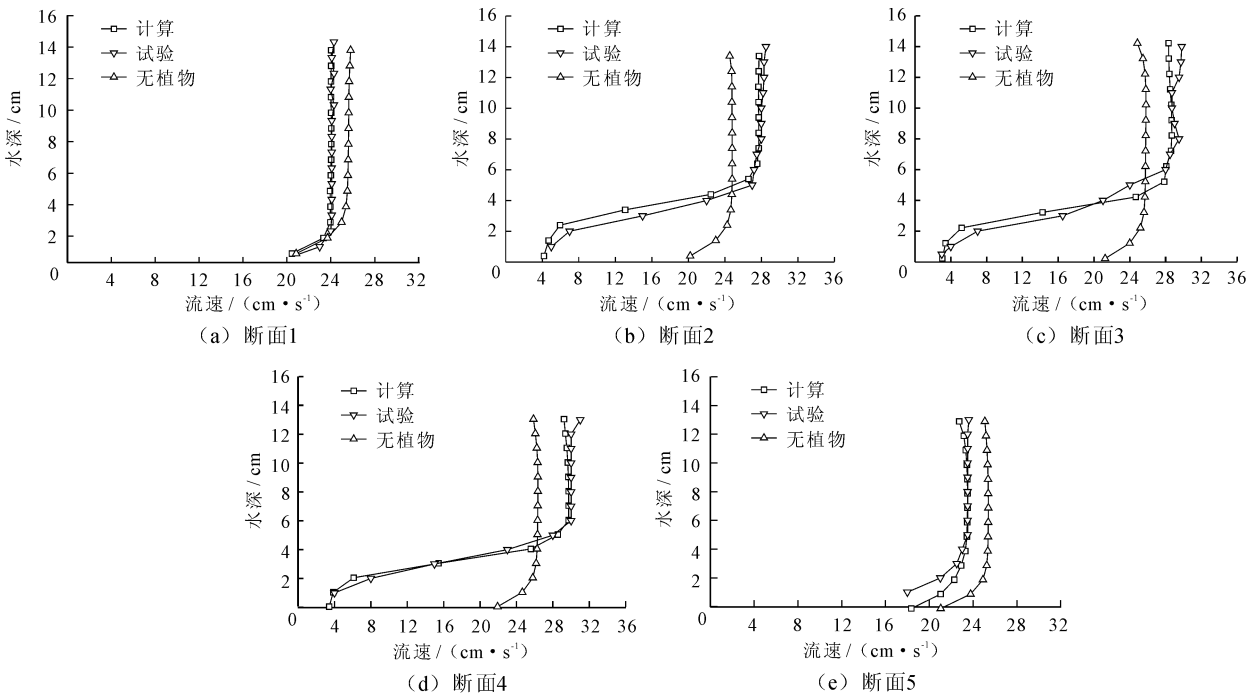


图 3 各断面流速沿垂线分布图

由图3可以看出,由于把植物带看作是各项同性、均质的多孔介质区域,且多孔介质区域相对水流是静止的,而真实植物带是各项异性、可以随水流来回摆动的,所以数值模拟计算值与物理模拟试验值存在差异。因此,为了更精确的数值模拟柔性植物,可采用更加精细的多孔介质区域,考虑多孔介质的各项异性,并且把多孔介质区域设置为动网格区域。

4.3 紊动强度分布

自然界中的流动和实际工程中所遇到的各种流体运动大部分是紊流,紊流中各层流体相互混掺,流体质点作不规则的运动。研究紊流的脉动强弱程度时常采用紊动强度(也称脉动强度)来反应紊流的强弱程度。紊动强度公式为:

$$\sigma = \sqrt{u'^2} \quad (13)$$

式中: σ 为水流流速的紊动强度; u' 为脉动流速。

图4为工况1数值模拟得到的有无植物带下各个断面紊动强度沿垂向曲线图。图4(a)为断面1有无植物下紊动强度沿垂线分布图,由图可知有无植物得到的紊动强度分布曲线基本相同,说明植物带的影响尚未波及到上游,相对紊动强度数值较小;

由于受到水槽底部的作用,在水槽底部紊动强度梯度最大,且紊动强度也最大,在水深 $h > 4$ cm 以上区域,紊动强度基本保持不变,紊动强度保持很小的常数,在水面部分由于空气和水的相互作用,水面产生波动,相对紊动强度略微增大,此研究结果与王洪虎^[13]、朱红钧^[5]研究结果一致;图4(b)、(c)、(d)分别为断面2、3、4的相对紊动强度沿垂线分布图,由图可知,从水槽底部起至植物顶部区域,相对紊动强度明显增大,在植物顶部附近达到最大,植物顶层以上至水面,由于逐渐摆脱了植物带的影响,相对紊动强度逐渐减小,最后保持较小的常数不变。说明植物的存在明显改变了河道水流的水力结构,促使植物带顶部紊动强度明显增大,该处存在明显的动量能量交换。图4(e)为断面5有无植物下紊动强度沿垂线分布图,由图可知,虽然断面5处已经远离了植物带区域,但是仍受到植物带的影响,紊动强度未能恢复到无植物时的大小,在植物带同等水平高度处紊动强度仍然较大,沿垂线呈现“S”型分布,此研究结果与王莹莹^[8]的研究结果一致。图4(f)为工况1下各个断面紊动强度沿垂线变化分布图。

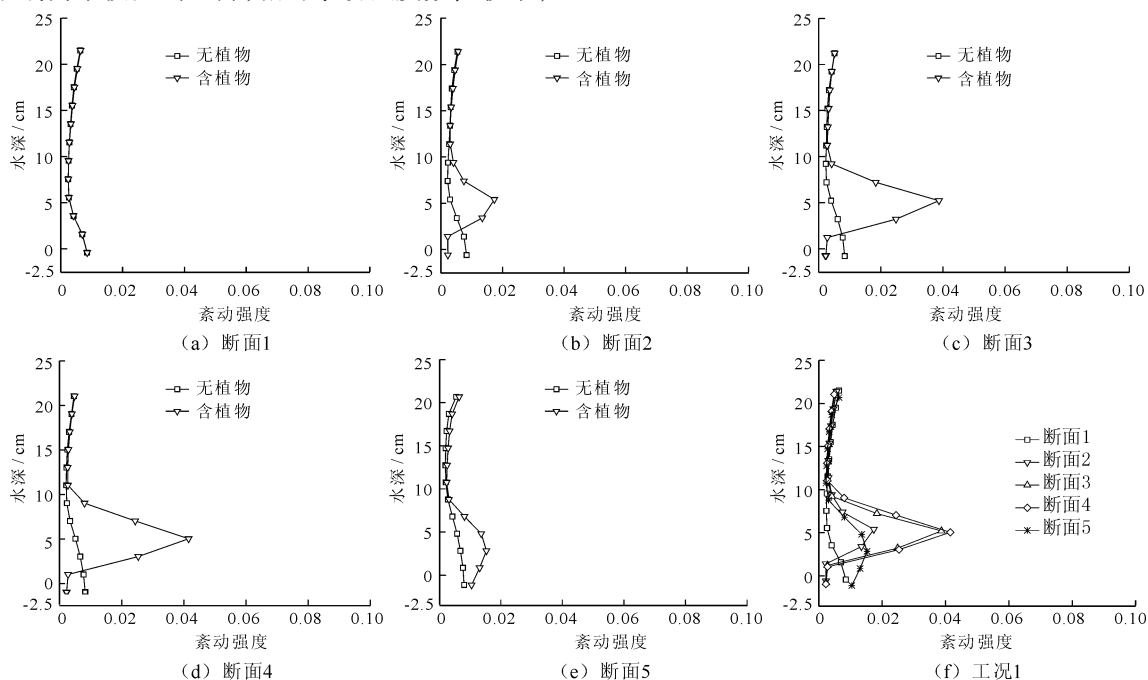


图4 工况1各断面紊动强度沿垂线分布图

5 结 语

通过对含柔性沉水植物河道的水力特性进行了三维数值模拟研究,得出如下结论:

(1)在含柔性沉水植物河道中,当水深远大于植物高度时,也即植物远处于淹没状态时,河道沿程

水深基本是保持不变的,并且植物带上部流速会明显的增加。

(2)由于植物的存在,沿垂线相对紊动强度发生明显改变,从水槽底部起至植物顶部区域,相对紊动强度明显增大,在植物顶部附近达到最大,植物顶层以上至水面,由于逐渐摆脱了植物带的影响,相对

紊动强度逐渐减小。

(3)数值模拟计算和物理模拟试验结果的对比分析可知,以多孔介质区域代替柔性沉水植物进行数值模拟是可行的。为了更精确的对柔性植物进行数值模拟,今后的研究可采用更加精细的多孔介质区域,考虑多孔介质的各项异性,并且把多孔介质区域设置为动网格区域。

参考文献:

- [1] Jarvela J. Flow resistance of flexible and stiff vegetation: a flume study with natural plants [J]. Journal of Hydrology, 2002,1(269):44-54.
- [2] Syunswe Ikeda, Minoru Kanazawa. Three-dimensional organized vortices above flexible water plants [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996,122(11):634-640.
- [3] Fathi - Maghadam M, Kouwen N N. Nonsubmerged vegetative roughness on floodplains [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997,123(1):51-57.
- [4] 韩璐. 柔性植被河道水流特性试验研究[D]. 南京:河海大学,2006.

- [5] 朱红钧,赵振兴,韩璐. 有植被的河道水流紊动特性模型试验研究[J]. 水利水运工程学报,2006(4):57-61.
- [6] Hsieh Ping Cheng, Shiu Yu Sheng. Analytical solutions for water flow passing over a vegetal area [J]. Advances in Water Resources, 2006,29(9):1257-1266.
- [7] 黄本胜,袁梦,邱秀云. 有水葫芦的河道水流数值模拟[J]. 广东水利水电,2008(8):1-3+18.
- [8] 王莹莹. 有双重植被河道水流特性试验研究[D]. 南京:河海大学,2007.
- [9] 高学平. 高等流体力学[M]. 天津:天津大学出版社,2005.
- [10] Fluent Inc. Fluent user's guide [M]. Fluent Inc., 2003.
- [11] Temple D M. Velocity distribution coefficients for grass lined Channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986,112(3):193-205.
- [12] Gourlay M R. Discussion of "Flow retardance in vegetated channels" by N Kouwen, T Eunny, H M Hill [J]. Irrigation Drainage Division, 1970,96(3):351-357.
- [13] 王洪虎. 不同植物对水流结构变化影响规律试验研究[D]. 武汉:长江科学院,2012.

(上接第43页)

(2)从大坝的残余变形可以看出,由于坝体主要材料为砂砾石,其抗剪强度和变形模量较高,因此震后残余变形量处于比较低的水平,这对整个工程的抗震有利。

(3)混凝土面板经过地震作用后,面板的坝轴向应力分布较震前有较大变化,从而导致坝体面板在局部出现或扩大的拉应力区,这应该在面板设计与施工中充分重视。总体上,经过对该面板坝的有限元动力计算,可以看出大坝整体是安全的。

3 结 语

基于 ABAQUS 有限元软件实现了砂砾石料动力分析中常用的等效线性粘弹性模型,在此基础上对已建的面板砂砾石坝进行了三维动力分析,得出了大坝动力反应加速度、坝体残余变形、混凝土面板地震应力和动位移等。计算结果表明,在超越概率4%~6%地震作用下,面板砂砾石坝的绝对加速度、动位移和残余变形等动力反应都不是很强烈,但是顺河向地震作用下坝顶存在明显的鞭梢效应。因此面板坝的抗震设计中应针对此薄弱区域进行强化设计,确保大坝在强震作用下能够安全运行。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. SL274-200 碾压式土石坝设

- 计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2002.
- [2] 费康,刘汉龙. ABAQUS 的二次开发及在土石坝静、动力分析中的应用[J]. 岩土力学,2010,31(3):881-890.
- [3] 潘家军,王观琪,江凌,等. 基于 ABAQUS 的高混凝土面板堆石坝地震反应三维非线性分析[J]. 水力发电学报,2011,30(6):80-84.
- [4] 赵剑明,汪闻韶,常亚屏,等. 高面板坝三维真非线性地震反应分析方法及模型试验验证[J]. 水利学报,2003,34(9):12-18.
- [5] 潘家军,饶锡保,张计,等. 超宽河谷上面板堆石坝地震响应特性分析[J]. 世界地震工程,2010,26(S1):301-304.
- [6] 王霄. 面板堆石坝三维动力响应分析[D]. 天津:天津大学,2005.
- [7] 丁陆军. 面板堆石坝三维动力反应分析[D]. 西安:西安理工大学,2005.
- [8] 国家电力公司西北勘测设计研究院. 黄河公伯峡水电站工程初步设计重编报告(第五篇枢纽布置及建筑物)[R]. 西安:国家电力公司西北勘测设计研究院,1995:1-119.
- [9] 中国水利水电科学研究院. 黑泉水库混凝土面板堆石坝坝体及坝基土料动力特性试验研[R]. 中国水利水电科学研究院,2005. 10.
- [10] 刘小生,王钟宁,赵剑明,等. 面板堆石坝振动模型试验及动力分析研究[J]. 水利学报,2002,33(2):29-35.
- [11] 胡文源,邹晋华. 时程分析法中有关地震波选取的几个注意问题[J]. 南方冶金学院学报,2003,24(4):25-28.