

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221992

基于 FLUENT 刚性植被直径对明渠水流特性的影响

马健鑫, 石喜, 谢晓刚, 宋明聪

(兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为探究岸滩及河底植被在不同时间段对水流特性的影响, 在只改变植被直径变化(6~10 mm)的条件下采用数值模拟的方法研究了不同植被直径下的水流纵向流速的垂向分布、速度等值线分布、沿程水位分布及沿程紊流强度变化情况。结果表明, 垂向流速分布在植被区内呈现“S”分布, 在植被区外大致呈现“J”分布; 且从总体上来看直径越大, 水流整体速度越小, 水位上游壅高越明显, 水面坡比也越大; 紊流强度与植被直径呈正比关系, 且植被直径相同时水流过植被时的紊流强度大于植被通道处的紊流强度。

关键词: 刚性植被; 植被直径; 数值模拟; 多相流; 紊流强度

中图分类号: TV135.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)09-0116-04

1 引言

近年来, 随着绿色生态理念的不断提出与发展, 我国已开始对江海湖泊的生态环境问题做出规划, 河道的岸滩修复及预防冲刷是其中的重点。而植被在其修复与预防中起着重要作用, 因此研究植被水流的水动力特性具有重要的现实意义^[1, 2]。目前, 针对水生植被和水流的相互作用机理方面的研究已较多^[3], 如槐文信等^[4]使用粒子图像速度仪(PIV)在同一流量情况下, 研究了非淹没及淹没刚性植被稳恒流纵向流速垂向分布; 宋滢汀等^[5]根据植被重数分单重植被、双重植被和三重植被3个工况分析对比了水流特性; 何贵平等^[6]通过定坡水槽试验与水力学理论相结合的方法, 系统性研究了植被和卵石耦合因子下的曼宁系数变化规律; 李雅琪等^[7]通过 Fluent 对比

了刚性植被的两种模拟方法(细圆柱群模型和多孔介质模型)。已有关于明渠植被问题的研究基本以试验为主, 数值模拟研究较少, 且已有研究基本考虑了河道植被种植时的不同因素, 未考虑河道植被在不同生长阶段对水流特性的影响变化。为此, 本文利用圆柱代替植被, 在只改变植被直径的情况下采取数值模拟的方法研究了含植被明渠水流植被直径的改变对明渠水流特性的影响, 获得了一些有益的结论, 可供借鉴。

2 模型建立

2.1 建模设置

明渠几何模型长 2 000 mm, 宽 400 mm, 高 250 mm, 坡比为 5.3‰, 分别以 x 、 y 、 z 轴表示模型的横向、纵向及垂直方向。用高度均为 130 mm 的圆柱体模拟植被, 模拟植被区见图 1(俯视

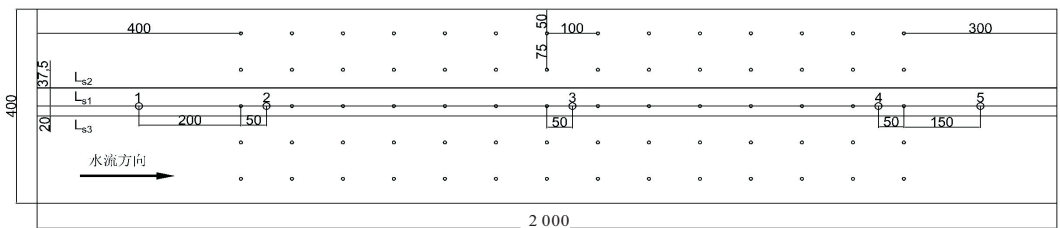


图 1 模型俯视示意图(单位:mm)

Fig. 1 A schematic top view of the model

收稿日期: 2022-09-23, 修回日期: 2022-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51969011); 甘肃省自然科学基金项目(20JR10RA239); 甘肃省高等学校产业支撑计划项目(2022CYZC-32)

作者简介: 马健鑫(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水利水电工程, E-mail: 1551703208@qq.com

通讯作者: 石喜(1985-), 男, 博士、副教授, 研究方向为工程水力学及计算水力学, E-mail: shixi103@163.com

图)。植被横向间距为 75 mm,纵向间距为 100 mm;在此次模拟中共设置五个测点(1~5)三个纵向断面(L_{s1} 、 L_{s2} 与 L_{s3}),其中以五处研究沿程流速在不同区域中受植被直径的影响,以 L_{s1} 与 L_{s2} 两个断面来研究沿程水位与紊流强度受植被直径变化的影响,以 L_{s3} 断面来验证数值模拟的可行性。

采用 gambit 软件划分计算区域网格,植被区采用 TGrid 网格,非植被区均采用三维六面体结构化网格;为保证数学模型运算的准确性,划分网格时对植被区进行加密处理;由于植被的直径不同,导致不同模型的网格数不同,不过总体网格数在 $160 \times 10^4 \sim 170 \times 10^4$ 个之间。图 2 为部分网格划分图($d=6$ mm)。

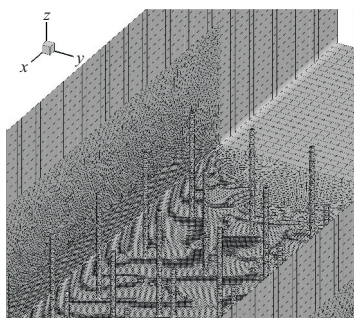


图 2 部分网格示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the grid in part

2.2 求解方法及边界条件

采用标准的 RNG κ - ϵ 湍流模型进行数值计算,用标准的壁面函数法来处理近壁流动。离散格式采用二阶迎风格式,并使用 SIMPLE 算法来满足压力与速度的耦合,自由液面采用 VOF 法进行处理。该模型为瞬态模型,时间步长为 0.005 s,由于时间步过了 2 000 步后,模型水流特性几乎无明显变化,故时间步设置为 2 000 步,每步迭代次数为 50 步。

模型的边界条件设置由液面一分为二,液体部分进口为速度进口,进口速度为 0.154 2 m/s,水深为 0.155 m,出口为自由流出;空气部分进口为压力进口,出口及模型顶部为压力出口,压力均为静压。其余壁面设置为 wall,摩擦系数均设置为 0.5。

2.3 计算模型验证

为保证计算模型的可行性,本文设计植被直径为 6 mm,试验在长 6 m、宽 0.4 m、高 0.3 m 的明渠可变坡水槽中完成。植被区长 1.5 m,设置水槽坡比为 5.3%;植被排列方式与计算模型相同,选用高度为 130 mm、直径 6 mm 的圆木棒来代替植被,采用一维 ADV 流速仪测量水流速度,

流量为 $34.42 \text{ m}^3/\text{h}$,水位为 155 mm,可得计算模型的进口水流速度为 0.154 2 m/s。图 3 为截面 L_{s3} 中高度 z 分别为 4、8、12 mm 处水流纵向流速的试验结果与模拟结果对比。由图 3 可知,在三组不同高度的数据对比中,测线越靠近水面流速就越大,这与已知的垂向流速三区划分非常吻合;模拟值与试验值误差大多均在 5% 左右,其中最大误差为 10.1%,其原因在于流速测量或模型划分网格等多方面造成的误差;但从整体上看,模拟值与试验值保持了良好的吻合性,验证了模型的有效性。

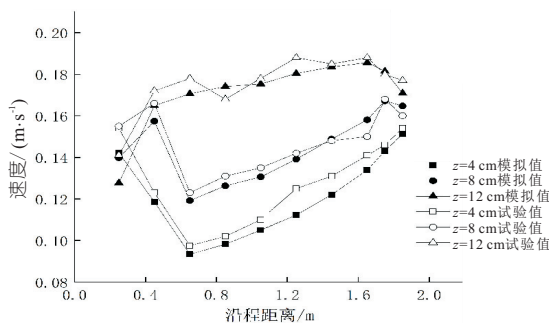


图 3 计算模拟模型验证图

Fig. 3 Calculates the simulated model validation diagram

3 结果与分析

3.1 流速分析

3.1.1 纵向流速的垂向分布

图 4 为在测点 1~5 处植被直径分别为 6~10 mm 时的纵向流速的垂向分布。由图 4 可看出,在靠近水面时五个测点速度均有所下降,这可能是淹没度较小而造成的。测点 1、5 分别位于第一排植被前 0.20 m 与最后一排植被后 0.15 m 处,其测点流速分布受植被影响较少,大致呈现“J”型分布。在高度相同的情况下,测点 1 的速度随植被直径的增加而逐渐减少,这说明植被直径对植被区上游水流存在影响。在同一高度同一植被直径的情况下,测点 5 的流速明显高于测点 1 的流速,这是由于坡比提供的动能及植被区后通道处水流往植被后方合流造成的影响。测点 5 在高度 $z < 6.5$ mm 时,直径为 6 mm 的水流速度明显小于直径为 7、8、9、10 mm 的水流速度,直径为 7、8、9、10 mm 的水流速度大致相同,这是因为随植被直径的增大,植被间隙逐渐减小,导致水流在植被后合流时受到水底的黏滞力减少,从而使水流流速增大;而随水深的增大,水流底部黏滞力对水流影响越来越小,故高度 $z > 6.5$ mm 时,随植被直径的增加,植被后方的尾流逐渐增长,导致水流速度恢复逐渐减慢,所以水流速度明显降低。

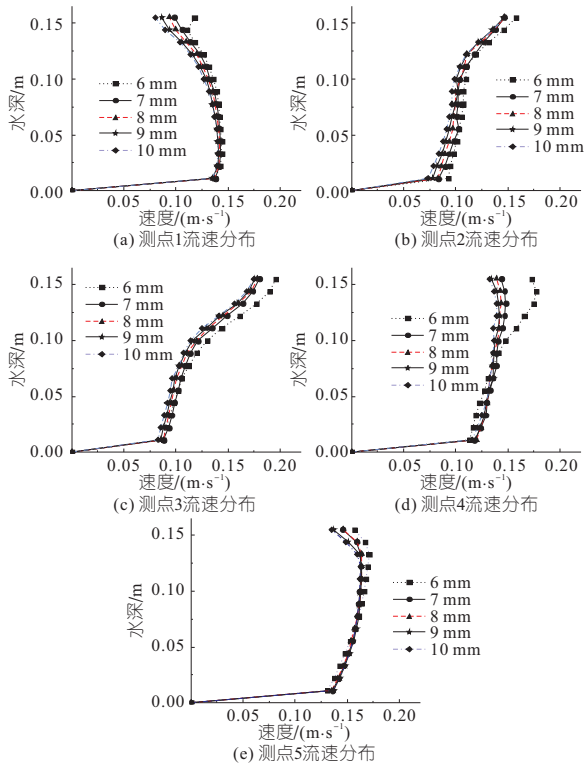


图4 不同测点的纵向流速沿垂向随直径变化分布

Fig. 4 The longitudinal flow rate of the different measurement points is distributed along the vertical direction with the diameter

测点2、3位于植被区上游及中间部分,水流特性受植被影响波动较大,流速特征不在为“J”型分布,大致呈现为“S”型分布。植被下层区内($z < 13$ mm)的纵向流速增加缓慢,且植被直径越大,水流流速越小;而一过植被冠层处纵向流速则快速增加,且在测点2中,随高度的增加,植被直径与流速呈正比关系,与 $z < 13$ mm时相反,造成这种现象的原因是因为植被下层区域水流受到植被阻碍使流速降低,水流被迫向上抬升,故随高度的增加水流速度增加。而淹没度较小可能是造成测点3无此现象与测点2此现象不明显的原因。测点4位于植被区下游,其流速垂向分布比较复杂,在植被下层区水流速度随植被的增加先增加后减少;而随高度的抬升,水流速度随着植被直径的增大而增大,这与测点3的现象相吻合。故测点4为测点3~5的过渡区域,其呈现的流速特征既像“S”型又像“J”型。

3.1.2 速度等值线分布

图5为 $z = 60$ mm横向剖面处不同直径的速度等值线分布,显示了植被直径的增加对水流流速的影响。由图5可知,植被的存在阻碍了水流,使得水流在植被前方发生回流,降低水流流速,使水流被迫向植被两端运动,增加了植被间的流速。植被后方出现尾流和涡流,前后两植被间流速逐

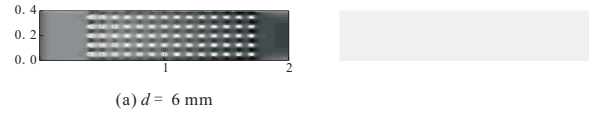


图5 各直径 $z = 60$ mm处速度等值线分布

Fig. 5 Distribution of velocity contour at $z = 60$ mm

渐增加,直至水流进入下一植被回流影响区,往后水流经过每一排植被均会呈现此规律。随水流的运动,水流流速先减少后增加直至下游水流流速明显高于上游,这是因为植被对水流的阻碍作用使水流上游发生壅水现象,从而使植被区下游水位降低,致使水面坡比增加,下游水流受到水位高差及过流断面减少的原因导致水流流速增大;越靠近植被区末端,水位越低,速度越快,从而使下游水流流速超过上游;但发现图2中 $z = 12$ cm时,水流流速基本呈增加趋势,这是因为在靠近水位面时,水流受植被影响较小,受水面坡比影响较大,故越靠近水面,水流流速增加趋势越明显;这与周建森等^[8]研究结果不符,原因是其选用植被直径较小,排列方式为插花排列。水流的整体流速逐渐随植被直径的增大而降低,这与肖苕萼等^[9]的研究结果一致,其原因是随植被直径的增加,水流动能由于植被的阻挡在每排植被中的耗散量增加,从而导致到达后排植被处的动能减少。这种圆柱局部的流动结构不容易通过试验研究得到,这表明了数值模拟的重要性^[8]。

3.2 沿程水位变化特征

图6为各直径植被在断面 L_{s1} 处水相含量为0.5的沿水流方向的水深变化。由图6可看出,直径不同下水位变化趋势一致,均是在上游部位发生壅水现象,水流在 $x = 0.1$ m左右处到达最

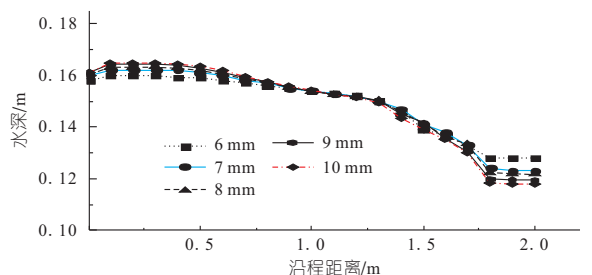


图6 各直径在 L_{s1} 纵断面处沿程水深分布

Fig. 6 The diameters are distributed along the L_{s1} profile

高值,持续至 $x=0.5$ m 处水位开始下降;至 $x=1.0$ m 处水位接近初始设定水位,之后水位开始降低,降幅明显大于之前,直至水流通过最后一排植被后水位快速下降后至平稳。在 $x < 0.1$ m 时,直径越大水位越高,这说明随直径的增大植被对水流的阻力增大,使水流被迫发生抬升运动,导致水位升高。而当 $x > 0.1$ m 时,水位与植被直径呈反比关系,这是因为上游水位的抬升导致下游水位下降,且上游水位越高,下游水位就越低。随水流的流动水位的降幅逐渐加快,且植被直径越大,降幅越快;直至水流通过最后一排植被,水位变得平稳。

3.3 紊流强度

图 7 为当植被直径为 7、8、9 mm 时水流沿纵断面 L_{s1} 和 L_{s2} 的紊流强度分布则很好地揭示了植被对于水流紊动结构的影响。由图 7 可看出,水流通过植被区时,不论是 L_{s1} 截面(通过植被处)或 L_{s2} 截面(植被通道处)处水流的紊动强度均受到干扰且迅速增大,表明了植被存在对紊动强度的影响。在截面 L_{s1} 中,水流通过第一排植被时,紊动强度先急速增加后又减小,在植被处达到第一个峰值;通过第一排植被后,紊动强度随水流前进开始减小直至进入下一排植被的影响区域中开始快速增加,呈现水流通过第一排植被时的现象,但在后一排植被处达到的峰值永远比前一排植被大,直至水流通过最后一排植被在其位置处达到最大值;之后紊动强度开始急速减小。这是因为水流在接近第一排植被时,水流受到植被阻碍作用的影响开始产生较高的紊动能,使得紊动强度增加;水流流过每一排植被后,紊动强度开始急速降低这是因为水流缺少了植被的阻碍,底面与壁面所产生的紊动能远远小于因植被产生的;降低不久后又开始增加是因为水流因前一排植被所产生的紊动强度未减少就又进入下一排植被的影响区域,导致水流通过后排植被产生的紊动强度大于前排植被,且在最后一排达到最大值;总体呈现锯齿状分布。而在截面 L_{s2} 中,紊动

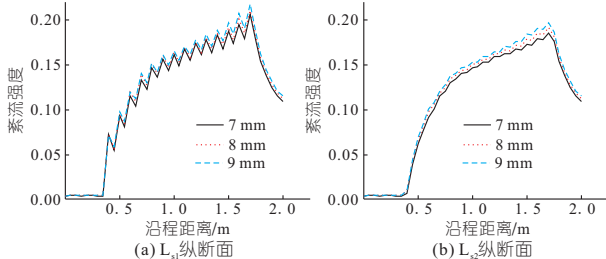


图 7 不同纵断面紊流强度沿纵向分布

Fig. 7 The turbulent intensity in different profiles is distributed along the longitudinal direction

强度在水流进入植被区后开始持续增加直至水流脱离植被区后开始减小,这是因为水流由于植被阻挡产生的涡流及被迫向通道处挤压造成的;与截面 L_{s1} 中不同。对直径相同的情况下,植被处的紊动强度一直大于通道处的;随植被直径的增加,无论是通道处或植被处的紊动强度均会随之增加。

4 结论

a. 试验研究与数值模拟得出的沿程流速误差最大为 10.1%,说明该数值模拟方法可行、有效。

b. 河道植被的存在,使得植被区通道处水流流速呈现先下降后增加的趋势,但靠近水面,水流流速整体呈现增加趋势;且随植被直径的增加,相应水流流速呈现大致递减趋势;沿程水位呈现先增加后减少的趋势。

c. 直径不同情况下的沿程紊流强度相似,均是在进入植被区时急速增加,过植被区后开始减小;过植被截面处在植被区呈现锯齿状分布,在通道处呈现斜“C”型分布,均随直径的增加而增加。

d. 本文仅考虑了岸滩及河道植被生长中直径的增加趋势,未来应当考虑到高度及河流在不同季节水位及流速的变化对水流特性造成的影响。

参考文献:

- [1] 王鹤霏. 生物-生态技术对水体修复效果的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- [2] 李露, 石喜, 李江涛. 刚-柔-柔-刚两种格局下植被水流特性试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(10): 67-73.
- [3] 唐洪武, 闫静, 吕升奇. 河流管理中含植物水流问题研究进展[J]. 水科学进展, 2007(5): 785-792.
- [4] 槐文信, 赵磊, 李丹, 等. 有植被明渠纵向流速垂向分布特性的 PIV 试验分析[J]. 实验流体力学, 2009, 23(1): 26-30.
- [5] 宋滢汀, 景何仿, 王维红, 等. 含多重刚性植被明渠水流特性实验研究[J]. 水力发电, 2020, 46(11): 125-130.
- [6] 何贵平, 谢艳, 雷孝章. 植被配置对坡面流阻力规律的影响分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(6): 25-28, 54.
- [7] 李雅琪, 刘善均, 刘超, 等. Fluent 关于刚性植被尾流区两种数值模拟方法对比[J]. 水电能源科学, 2021, 39(2): 82-85.
- [8] 周建森, 张升堂, 张景洲, 等. 基于 FLUENT 刚性植被茎粗对坡面流特性影响研究[J]. 节水灌溉, 2021(12): 87-93.
- [9] 肖苡轲, 张国志, 冯先导, 等. 刚性植被密度对岸滩作用的数值模拟[J]. 水运工程, 2020(12): 33-37, 52.

Study on Influence of Water-Rich Fault on the Stability of Surrounding Rock of Underground Cavern During Construction

LV Xiao-long^{1, 2, 3}, JING Lai-hong^{1, 2}, WANG Yu-jie³, ZHAI Li-jun¹, TIAN Wan-fu¹

(1. Yellow River Engineering Consulting Co. Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin, Ministry of Water Resources(Under Construction), Zhengzhou 450003, China;

3. Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: During the excavation of the construction adit, the Jiangmen Neutrino Underground Laboratory revealed three long and water rich cracks, and high-pressure jet water gushing appeared in local water exploration holes, which may have adverse effects on the stability of the surrounding rock of the tunnel. The influence of L1, L2, L3 on the deformation of surrounding rock of the experimental hall under different water pressures of the excavation face was systematically analyzed by using the discrete element method. The results show that the influence of water rich long cracks on the overall stability of the arch surrounding rock is small. The arch surrounding rock at L1 and L2 is not sensitive to the change of the drainage conditions of the excavation face. With the increase of the water pressure of the excavation face, the deformation of L3 arch shoulder increases sharply and the trend is not convergent. L2 has little effect on the deformation of the lower pool, and the shallow surrounding rock near L1 and L3 is obviously unloaded. Based on comprehensive analysis, 0.5 MPa is recommended as the control standard for shallow surrounding rock drainage at the excavation face of this project.

Key words: high pressure groundwater; large crack; super-large span; surrounding rock deformation; Jiangmen Neutrino Observatory

(上接第 119 页)

Study on Influence of FLUENT Rigid Vegetation Diameter on Water Flow Characteristics of Open Channel

MA Jian-xin, SHI Xi, XIE Xiao-gang, SONG Ming-cong

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to investigate the influence of the vegetation in beach and river bottom on the water flow characteristics at different time periods, under the condition of changing the vegetation diameter (6-10 mm) only, the numerical simulation was used to study the variation of vertical velocity distribution, contoured velocity, water level and intensity of turbulence along the way at different vegetation diameter. The results show that the vertical velocity distribution shows an "S" distribution in the vegetation zone and a "J" distribution outside the vegetation zone; In general, the larger the diameter is, the lower the overall velocity is, the more obvious the upstream congestion of the water level is, and the larger the water surface slope ratio is; The turbulence intensity is proportional to the vegetation diameter; The turbulence intensity of water flowing through the vegetation is greater than that of the vegetation channel when the vegetation diameter is the same.

Key words: rigid vegetation; vegetation diameter; numerical simulation; multi-phase flow; turbulent strength

(上接第 146 页)

[3] 刘新荣,涂义亮,钟祖良. 基于能量突变的强度折减法边坡失稳判据[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(6): 2065-2072.

[4] 涂义亮,刘新荣,钟祖良,等. 三类边坡失稳判据的

统一性[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 173-180, 190.

[5] 赵尚毅,郑颖人,张玉芳. 极限分析有限元法讲座——II 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 332-336.

Study of Slope Instability Criterion Based on Total Displacement Mode Mutation

XU Jing-qi, XU Li-qun, ZHANG Guo-chen

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The selection of instability criterion is particularly important when the finite element strength reduction method is used to analyze slope stability, but a consensus has not yet been reached. Based on ABAQUS finite element software, the method of total displacement mode combined with cusp catastrophe theory was proposed to judge the safety coefficient of slope. For a classical slope case, the safety coefficient was calculated by using calculation non-convergence, abrupt change of displacement of characteristic point, plastic zone penetration and abrupt change of total displacement mode as the instability criterion, and compared with Spencer method. The results show that the new criterion has a clear meaning, is less subject to human interference, has a wide range of application, and has certain advantages over the traditional three criteria.

Key words: slope stability; strength reduction method; instability criteria; total displacement mode; cusp catastrophe theory