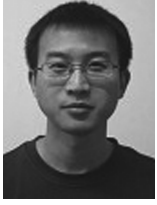


· 航道及通航建筑物 ·

空隙率对丁坝周围水位影响数值模拟研究^{*}



喻涛^{1,2}, 段秋铅¹, 王平义^{1,2}, 芦冉¹, 刘倩颖³

(1. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

3. 重庆市水文监测总站, 重庆 400014)

摘要: 丁坝是航道整治常用的整治建筑物之一, 实际工程中多采用散抛石丁坝, 此类丁坝具有一定透水性, 不同的空隙率对改善透水丁坝附近水位具有不同的效果。基于计算流体力学 FLOW-3D 软件, 研究空隙率对透水丁坝坝身段、坝头前端以及主流带区各个位置水位变化影响。结果表明: 在丁坝坝身段、坝头前端以及主流带区水位与空隙率变化关系基本一致, 丁坝上游段, 当空隙率小于 15.4% 时, 水位随空隙率增大先降低后升高, 当空隙率大于 15.4% 时, 水位减小至某一值后趋于稳定; 坝体轴线处, 水位随着空隙率增大呈现上下波动; 各透水丁坝坝后水位均高于实体丁坝, 但坝后水位与空隙率并非呈正相关变化。

关键词: 空隙率; 透水丁坝; 水位; 数值模拟

中图分类号: U 617.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0118-08

Numerical simulation of influence of porosity on water level around spur dike

YU Tao^{1,2}, DUAN Qiu-qian¹, WANG Ping-yi^{1,2}, LU Ran¹, LIU Qian-ying³

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing

Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. Chongqing General Hydrological Monitoring Station, Chongqing 400014, China)

Abstract: Spur dikes are one of the commonly used waterway regulation structures, and scattered riprap spur dikes are especially popular in actual projects. This type of spur dike has a certain degree of water permeability, and different porosity has different effects on improving the water level near the permeable spur dike. Resorting to the computational fluid dynamics software FLOW-3D, this paper studies the influence of porosity on the water level changes at different parts of a permeable spur dike, including its body, the front of its head, and its main flow area. The results show that the variations of water level with porosity at those parts are similar. In the upstream section of the spur dike, the water level first decreases and then rises as porosity increases when the latter is lower than 15.4%. When the porosity is higher than 15.4%, it decreases to a certain value and then stabilizes. At the axis of the dike body, the water level fluctuates up and down with increasing porosity. The water level behind each permeable spur dike is higher than that in the case of solid spur dikes. Nevertheless, water levels behind the dikes are not positively correlated with porosity.

Keywords: porosity; permeable spur dike; water level; numerical simulation

收稿日期: 2021-11-20

***基金项目:** 国家重点研发计划项目(2018YFB1600403); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN201800737); 国家内河航道整治工程技术研究中心开放基金项目(SLK2018B05)

作者简介: 喻涛(1982—), 男, 博士, 副教授, 从事港口及航道工程教学及科研。

丁坝作为航道整治中最常用的一种阻水建筑物, 具有束窄水流、壅高水位、改变原有河道局部水流流态和水沙条件的作用。Mostafa 等^[1]通过动床试验对比分析透水丁坝与实体丁坝对主航道水深影响, 认为透水丁坝主航道中心线处水深不会改变, 实体丁坝主航道中心线处水深会发生一定改变; 李明龙等^[2]通过水槽概化试验研究坝体挑角、流量以及不同坝头形式对双丁坝周围水面线的影响, 得到上、下丁坝坝头均为圆弧直头时水面横纵比降最大的结论; 刘焕芳等^[3]通过模型试验推导出桩柱式透水丁坝壅水高度经验公式, 认为丁坝壅水高度主要与坝长、河道水深以及透水率有关; 许百强等^[4]通过水槽概化模型试验研究不同空隙率和空隙尺寸对透水丁坝周围横纵断面水面线的影响规律, 认为在一定的空隙率和空隙尺寸条件下, 透水丁坝对其上游的壅水效果更佳; 在此基础上, 负宝革等^[5]研究不同空隙尺寸和不同空隙率对坝身段、坝头前端和主流带区能量变化的影响, 得到在坝身段空隙尺寸越小, 水流通过损耗的位能就越小的结论; 闫杰超等^[6]研究淹没齿型丁坝阻力与淹没程度之间的关系, 认为淹没度与阻力系数呈反比关系; Ahmed 等^[7]研究丁坝相对长度对其周围水流结构、流速和水深的影响; Yu 等^[8]通过水槽试验, 研究丁坝周围紊动与局部冲刷之间的关系; 常留红等^[9]通过水槽试验研究透水率指标对空心梯形块丁坝透水特性的影响规律; 杨元平^[10]推导出透水丁坝坝后回流区长度计算公式, 认为透水丁坝坝后回流区长度与坝长、坝边坡、水深以及丁坝透水性有关; 任志等^[11]通过动床模型水槽试验研究水力插板式透水丁坝的性能, 并认为当透水率为 30% 时, 水力插板透水丁坝的防冲促淤效果达到最佳。事实上, 天然河道中的丁坝三维水流情况非常复杂, 计算机技术的飞速发展使复杂水流问题的计算提供了计算手段, 黄文典等^[12]通过研究认为将有限元方法、Newton-Raphson 迭代法与平面二维数学模型结合的计算方法用于淹没丁坝条件下的水流数值模拟是可行的; Duan 等^[13]利用改进二维模型对天然河道中泥沙输运过程进行仿真试验; 刘玉玲等^[14]应用高精度的加权基本无震荡格式 (weighted

essentially non-oscillatory schemes, WENO) 结合有限体积法建立河道丁坝群二维水流的数学模型, 并验证该模型能够有效地计算复杂边界天然河道丁坝群二维水流水力特性问题。近年来越来越多的学者开始进行丁坝的三维数值模拟, 如李志勤等^[15]采用控制体积法和标准的 $k-\varepsilon$ (湍流动能-耗散率) 模型相耦合的方法验证了流体体积 (volume of fluid, VOF) 模型对模拟丁坝影响范围内自由水面的可行性; Ouillon 等^[16]利用三维 $k-\varepsilon$ 模型研究丁坝周围三维水流结构和自由液面形状, 并求解坝后冲刷区水流的水力特性; 杨兰等^[17]采用 FLOW-3D 软件, 对上挑丁坝群的周围流场分布和局部冲刷进行三维数值模拟, 并得出可适用于计算丁坝群的湍流模型和推移质输沙率模型; 郭延祥等^[18]利用 FLUENT 软件对淹没式丁坝周围流场进行了数值模拟研究, 得到丁坝主流区的流速较大而回流区的流速较小的结论; 王文森等^[19]通过粒子图像测速技术 (PIV) 试验和 FLOW-3D 数值模拟相结合的方法研究均匀开孔的梯形透水潜坝附近水面线与坝体透水率的关系, 认为潜坝结构附近水面线壅水及水跌高度随着透空率逐渐增大而减小, 并得到透水率综合公式。

以上学者通过物理模型试验和数学模型等方法对丁坝周围水力特性进行研究, 试验的丁坝形式越来越多, 但对梯形横断面圆弧头形式的透水丁坝的研究甚少。本文基于 FLOW-3D 计算流体力学软件建立透水丁坝水动力特性数值模型, 考虑丁坝刚好淹没情况, 开展空隙率对丁坝坝身段、坝头段以及主流带区各个位置水位变化影响研究, 研究结果对合理选取透水丁坝空隙率具有一定参考价值。

1 基本理论

本文将流体视为不可压缩黏性流体, 即:

$$\frac{\partial(uA_x)}{\partial x} + \frac{\partial(vA_y)}{\partial y} + \frac{\partial(wA_z)}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

流体的动量守恒定律由 Navier-Stoke 方程描述, 即:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \tag{3}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

式中： A_x 、 A_y 、 A_z 分别为流体在 x 、 y 、 z 方向单元面内流体可流过区域的面积分数； u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向上的速度分量(m/s)； V_F 为单元内流体可流动区域的体积分数； ρ 为流体密度(kg/m³)； G_x 、 G_y 、 G_z 分别为流体在 x 、 y 、 z 方向上的质量力加速度(m/s²)； f_x 、 f_y 、 f_z 分别为流体 x 、 y 、 z 方向上的黏滞力加速度(m/s²)； p 为作用在流体微元上的压力(N/m²)。

FLOW-3D 中有以下紊流模型可以采用：普朗特混合长度模型、一方程模型、两方程 $k-\varepsilon$ 模型、重整化群(renormalization group,RNG) $k-\varepsilon$ 模型以及大涡模型。RNG $k-\varepsilon$ 模型可以更准确地描述低强度湍流和强剪切区域的流动，故本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型模拟计算。

表 1 试验工况

丁坝	空隙半径/mm	空隙率/%	控制流量/(L·s ⁻¹)	控制水位/cm
透水丁坝	16	6.4、10.3、12.8、15.4、18.0、20.6、23.2	0.065	11
实体丁坝	0	0		

2.1.2 物理模型水槽设计

为了对数学模型水槽进行率定，另在实验室内进行与数学模型水槽尺度一样的物理模型水槽

2 模型设计及验证

2.1 模型设计

2.1.1 数学模型水槽设计

采用 FLOW-3D 软件模拟矩形水槽中透水丁坝周围水动力场，矩形水槽长 30.0 m、宽 2.0 m、高 0.2 m。通过对长江上游丁坝尺寸的总体统计研究，并结合实际试验条件，采用 1:40 的正挑丁坝作为模型丁坝，该丁坝采用梯形横断面圆弧头丁坝，坝长 50 cm、高 10 cm，坝顶、底宽分别为 7.5、42.5 cm。模型丁坝的迎水坡坡比 1:1.5，背水坡坡比 1:2.0，向河坡坡比 1:2.5。透水丁坝为圆形空隙，空隙半径为 16 mm，设计 7 个空隙率： $P_1=6.4\%$ 、 $P_2=10.3\%$ 、 $P_3=12.8\%$ 、 $P_4=15.4\%$ 、 $P_5=18.0\%$ 、 $P_6=20.6\%$ 、 $P_7=23.2\%$ ；实体丁坝空隙率为 $P_0=0\%$ ；控制流量 $Q=65$ L/s，控制(坝前)水位 $H=11$ cm，试验工况见表 1。

试验，分别布置了 9 个横断面和 9 个纵断面，并测量各断面水位，模型布置见图 1。

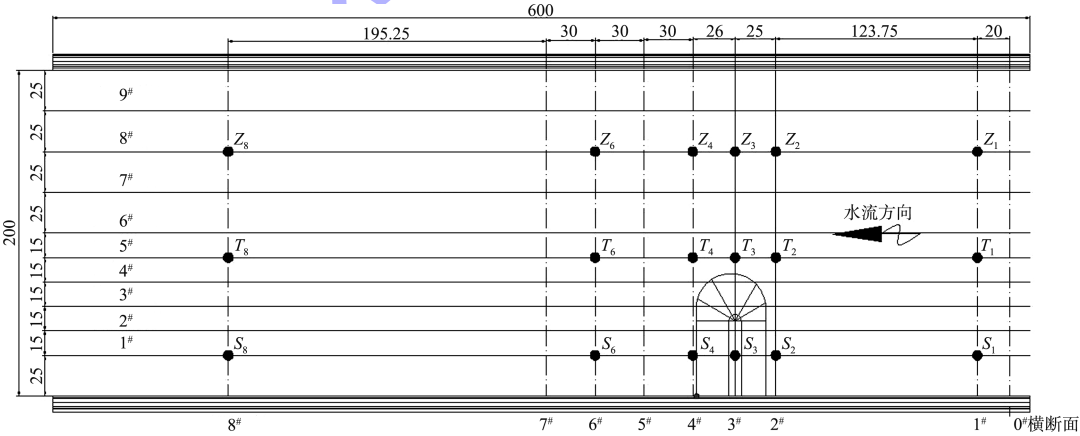


图 1 物理模型水槽布置 (单位: cm)

2.2 网格划分与边界条件

透水丁坝模型见图 2，数值模拟范围为丁坝上游 15 m—下游 15 m，采用正六面体结构化网格， x 、 y 、 z 方向网格尺寸为 2 cm。 x_{\max} 方向采用流量

边界，入口流量为 65 L/s，对应水位为 11 cm； x_{\min} 方向为压力边界，设置出口水位 10 cm； z_{\max} 方向同样设置为压力边界，赋予大气压；其余边界均采用无滑移壁面 WALL 条件。

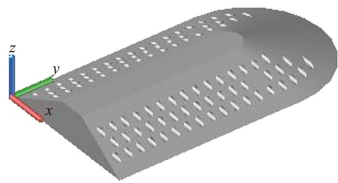


图 2 $R=16\text{ mm}$ 、 $P=15.4\%$ 透水丁坝三维模型

2.3 模型验证

以物理模型试验结果对比数值模拟结果进行验证,选取坝前 2#断面、坝后 4#断面,以及 $P=0\%$, $R=0\text{ mm}$, $Q=65\text{ L/s}$ 、 $H=11\text{ cm}$ 工况进行模型水位验证,结果对比见图 3。可以看出,数模计算结果与物模实测结果的最大偏差为 0.2 cm ,平均偏差为 0.1 cm ,说明数值模拟能较好地模拟透水丁坝周围水动力情况,其具有较好的可靠性。

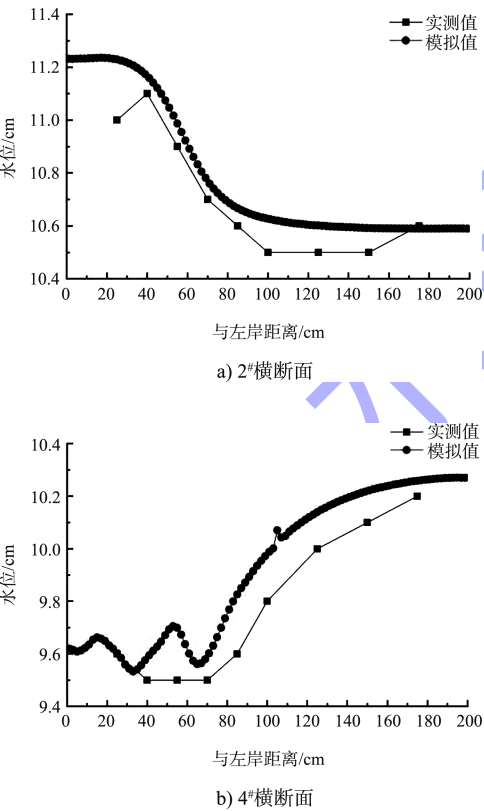


图 3 数模计算与物模实测水位验证

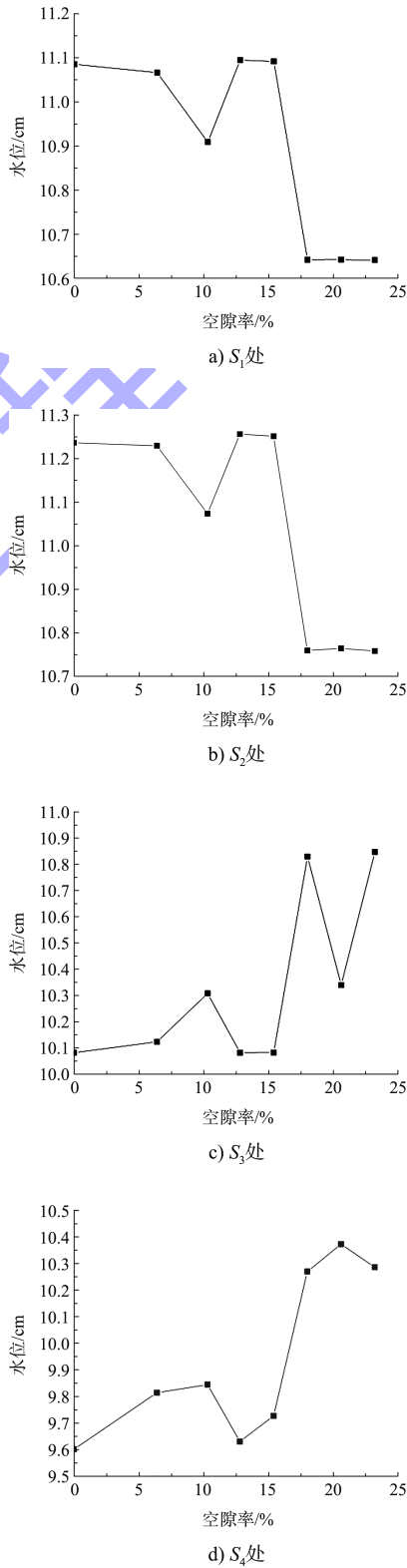
3 试验结果

3.1 坝身段各位置水位变化分析

将试验区划分为坝身段、坝头前端和主流带区,其中坝身段为 1#、2#纵断面,坝头前端为 5#、6#纵断面,主流带区为 8#、9#纵断面,选取坝前 1#、2#、坝轴线 3#、坝后 4#、6#以及远离坝体 8#

横断面与 1#、5#、8#纵断面的交点(图 1)进行水位分析。

选取 1#纵断面分析坝身段各个位置水位与空隙率之间的关系,其各个位置水位随空隙率变化关系见图 4。



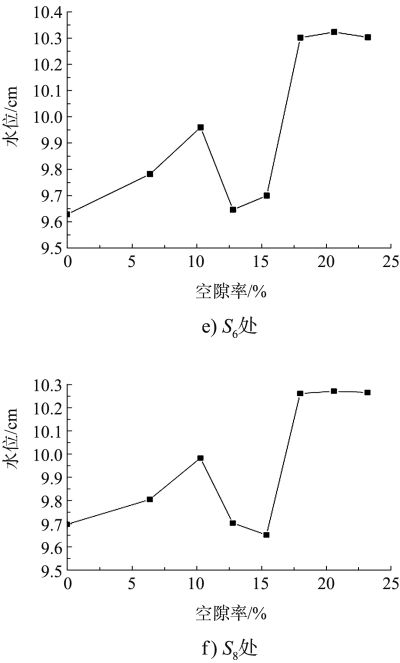


图 4 1#纵断面不同空隙率条件下坝身段水位变化

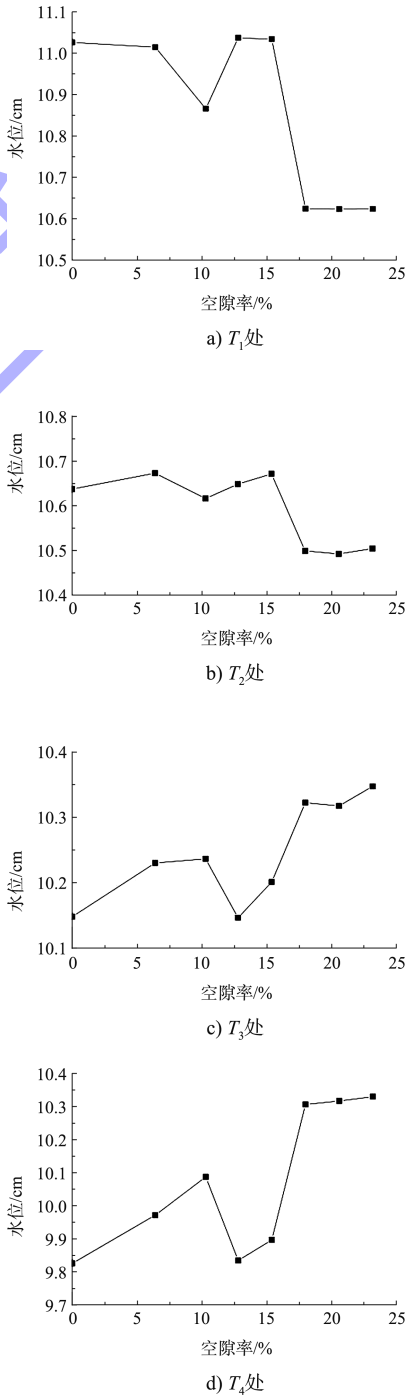
由图 4 可知，坝身段(1#纵断面)， S_1 、 S_2 处，水位随着空隙率的增大变化趋势大体一致，在空隙率小于 15.4% 时，随着空隙率增大，水位先降低后升高；在 S_3 处，当空隙率大于 15.4% 时，水位减小至 10.64 cm 后趋于稳定，水位随着空隙率增大呈现上下波动，在空隙率为 20.6% 时，水位迅速下降，此时 S_3 位置刚好是空隙处，水流顺着空隙流过了坝，造成水位偏低。 S_4 、 S_6 处，随着空隙率增大，水位总体呈现上升趋势，但空隙率为 12.8% 时水位偏低。当空隙率小于 15.4% 时， S_8 处的水位随着空隙率增大先升高后降低，当空隙率大于 15.4% 时，水位升高至 10.26 cm 后趋于稳定。

在坝身段，坝体上游区水位壅高与空隙率的关系表现为：中空隙率(12.8%、15.4%)时效果与实体丁坝基本一致，大空隙率(18.0%、20.6%、23.2%)时效果远不如实体丁坝，小空隙率 6.4% 时效果与实体丁坝基本一致，空隙率 10.3% 时效果不如实体丁坝。坝体下游区水位与空隙率的关系表现为：各透水丁坝对抬高坝后水位均具有积极作用，大空隙率(18.0%、20.6%、23.2%)效果最佳，小空隙率(6.4%、10.3%)次之，中空隙率(12.8%、15.4%)效果稍差，该现象与文献[4]的

物理模型试验结果一致，表明透水丁坝对水流的阻力与空隙率呈非线性关系；文献[20]指出树冠阻力系数与空隙率满足一个近似二次多项式关系，即阻力系数随空隙率增大先增大后减小，因此透水丁坝坝后水位出现这种现象是合理的。

3.2 坝头前端各位置水位变化分析

选取 5#纵断面分析坝头前端各个位置水位与空隙率之间的关系，其各个位置水位随空隙率变化关系见图 5。



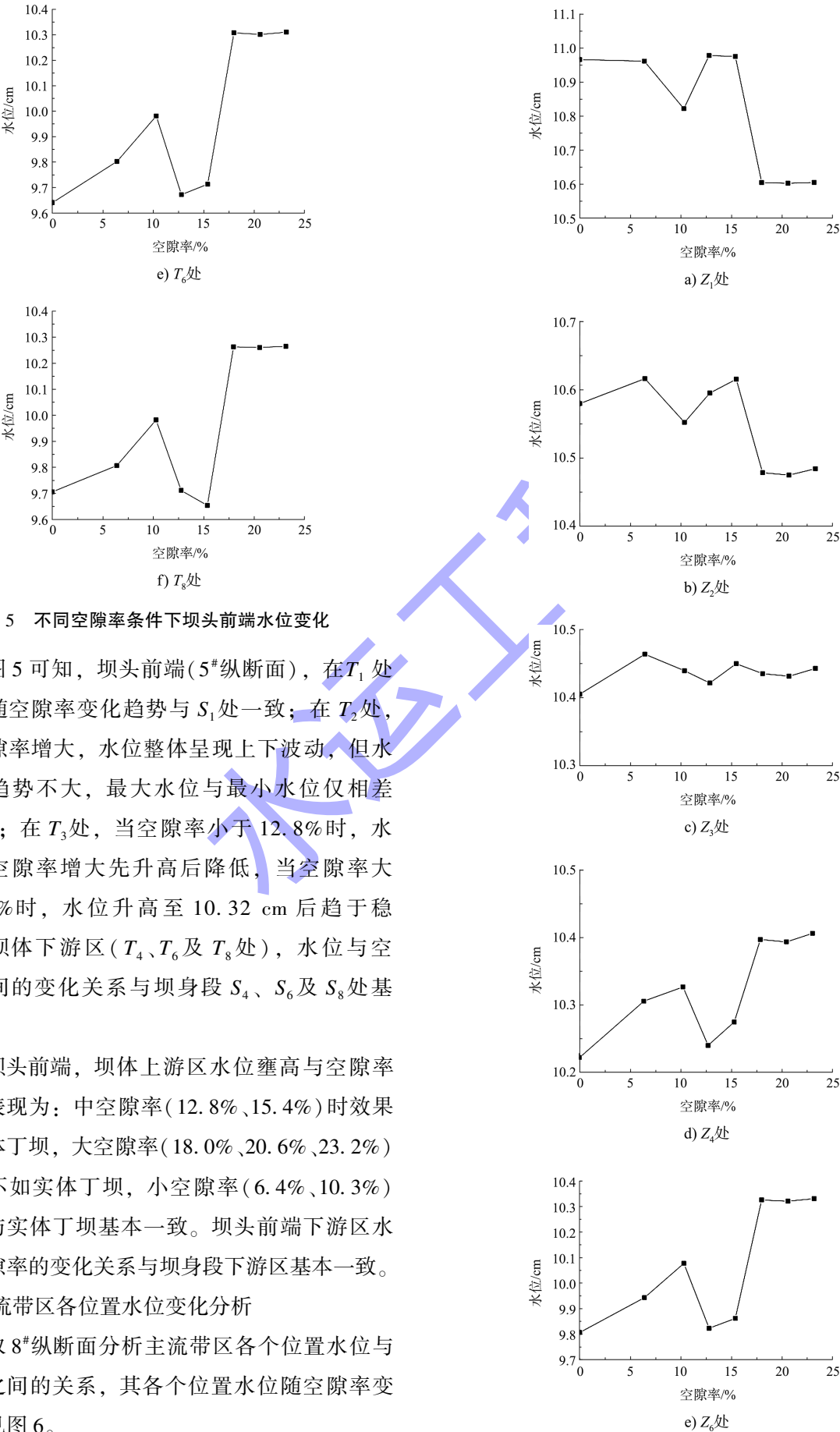


图 5 不同空隙率条件下坝头前端水位变化

由图 5 可知, 坝头前端(5#纵断面), 在 T_1 处的水位随空隙率变化趋势与 S_1 处一致; 在 T_2 处, 随着空隙率增大, 水位整体呈现上下波动, 但水位变化趋势不大, 最大水位与最小水位仅相差 0.18 cm; 在 T_3 处, 当空隙率小于 12.8%时, 水位随着空隙率增大先升高后降低, 当空隙率大于 12.8%时, 水位升高至 10.32 cm 后趋于稳定。在坝体下游区(T_4 、 T_6 及 T_8 处), 水位与空隙率之间的变化关系与坝身段 S_4 、 S_6 及 S_8 处基本一致。

在坝头前端, 坝体上游区水位壅高与空隙率的关系表现为: 中空隙率(12.8%、15.4%)时效果优于实体丁坝, 大空隙率(18.0%、20.6%、23.2%)时效果不如实体丁坝, 小空隙率(6.4%、10.3%)时效果与实体丁坝基本一致。坝头前端下游区水位随空隙率的变化关系与坝身段下游区基本一致。

3.3 主流带区各位置水位变化分析

选取 8#纵断面分析主流带区各个位置水位与空隙率之间的关系, 其各个位置水位随空隙率变化关系见图 6。

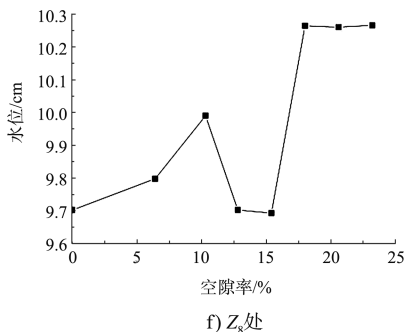


图6 不同空隙率条件下主流带区水位变化

由图6可知,主流带区(8#纵断面),在 Z_1 处,水位随空隙率变化趋势与 S_1 、 T_1 处一致;在 Z_2 处,随着空隙率增大,水位呈现上下波动的变化趋势,空隙率为10.3%时水位出现最小值;在 Z_3 处,随空隙率增大,水位上下波动,但整体变化很小,最大水位与最小水位相差仅0.058 cm。在坝体下游区(Z_4 、 Z_6 及 Z_8 处),水位与空隙率之间的变化关系与坝身段 S_4 、 S_6 及 S_8 处基本一致。

在主流带区,坝体上游区水位壅高与空隙率的关系表现为:中空隙率(12.8%、15.4%)时效果与实体丁坝基本一致,大空隙率(18.0%、20.6%、23.2%)时效果不如实体丁坝,小空隙率6.4%时效果优于实体丁坝,孔隙率10.3%时效果不如实体丁坝。主流带区坝体下游段水位与空隙率的变化关系与坝身段下游区基本一致。

4 结论

1)坝身段 S_1 、 S_2 处,当空隙率小于15.4%时,随空隙率增大水位先降低后升高;当空隙率大于15.4%时,水位降低至10.64 cm后趋于稳定;在 Z_3 处,水位随着空隙率增大呈现上下波动,且波动较大; S_4 、 S_6 及 S_8 处,随空隙率增大水位总体呈上升趋势。

2)坝头前端 T_1 处,当空隙率小于15.4%时,水位随着空隙率增大先降低后升高;当空隙率大于15.4%时,水位减小至10.62 cm后趋于稳定;在 T_2 处,随着空隙率增大,水位整体呈现上下波动,但水位变化趋势不大,最大水位与最小水位仅相差0.18 cm;在 T_3 、 T_4 及 T_6 处,当空隙率小于12.8%时,水位随着空隙率增大先升高后降低,

当空隙率大于12.8%时,水位升高至10.32 cm后趋于稳定;在 T_8 处,水位在空隙率为15.4%时出现最低值。

3)主流带区 Z_1 处,当空隙率小于15.4%时,随着空隙率增大,水位先降低后升高;当空隙率大于15.4%时,水位减小至10.60 cm后趋于稳定。在 Z_2 、 Z_3 处,随空隙率增大,水位上下波动,但整体变化较小。在 Z_4 、 Z_6 及 Z_8 处,当空隙率小于12.8%时,水位随着空隙率增大先升高后降低,当空隙率大于12.8%时,水位升高至某一值后趋于稳定。

4)综上所述,坝体上游区水位壅高与空隙率的关系表现为:中空隙率(12.8%、15.4%)时效果与实体丁坝基本一致,大空隙率(18.0%、20.6%、23.2%)时效果远不如实体丁坝,小空隙率6.4%时效果与实体丁坝基本一致,空隙率10.3%时效果不如实体丁坝。坝体下游区水位与空隙率的关系表现为:大空隙率(18.0%、20.6%、23.2%)抬高坝后下游区水位效果最佳,小空隙率(6.4%、10.3%)次之,中空隙率(12.8%、15.4%)效果稍差,该现象与物理模型试验结果一致,表明透水丁坝对水流的阻力与空隙率之间可能存在非线性关系,下一步将深入探究坝体阻力系数与空隙率之间的关系。

参考文献:

- [1] MOSTAFA M M, AHMEDHS, EL-RAHEEMGA, et al. Flow analysis around groyne with different permeability in compound channel flood plains[J]. Journal of engineering sciences, 2013, 41(2): 302-320.
- [2] 李明龙,王平义,刘怀汉,等.山区河流双丁坝水面线试验研究[J].中国水运(下半月), 2014, 14(11): 215-219.
- [3] 刘焕芳,周银军,宗全利,等.透水丁坝壅水高度探讨[J].人民长江, 2008(5): 37-39.
- [4] 许百强,喻涛,王平义,等.长江上游透水丁坝水面线分布试验研究[J].水利水运工程学报, 2019(5): 62-68.
- [5] 贡宝革,喻涛,王平义.透水性对丁坝周围能量变化的影响试验研究[J].科学技术与工程, 2021, 21(9): 3783-3789.
- [6] 闫杰超,李社生,焦增祥.淹没齿型丁坝阻力与壅水响

应关系试验研究[J].水运工程, 2021(4): 86-90.

[7] AHMED H S, HASAN M M, TANAKA N. Analysis of flow around impermeable groynes on one side of symmetrical compound channel: an experimental study[J]. Water science and engineering, 2010, 3(1): 56-66.

[8] YU T, WANG P Y, GAO G J. Turbulence kinetic and local scour around spur dike[C]//LUO X F, HAN Y F, CHEN Z C. Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2010: 46-50.

[9] 常留红, 徐斌, 肖政, 等. 空心梯形块丁坝结构透水特性试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2019, 34(1): 99-105.

[10] 杨元平. 透水丁坝坝后回流区长度研究[J]. 水运工程, 2005(2): 18-21.

[11] 任志, 李玉建, 侍克斌, 等. 不同透水率对水力插板透水丁坝防冲促淤效果的试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 172-174, 179.

[12] 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(1): 19-23.

[13] DUAN J G, NANDAS K. Two-dimensional depth-averaged model simulation of suspended sediment concentration distribution in a groyne field[J]. Journal of hydrology, 2005, 327(3): 426-437.

[14] 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.

[15] 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.

[16] OUIILLON S. Three-dimensional computation of flow around groyne[J]. Journal of hydraulic engineering, 1997, 123(11): 962-970.

[17] 杨兰, 李国栋, 李奇龙, 等. 丁坝群附近流场及局部冲刷的三维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2016, 31(3): 372-378.

[18] 郭延祥, 程宦, 唐学林. 淹没式丁坝三维绕流的数值模拟[J]. 水运工程, 2013(5): 106-109.

[19] 王文森, 程永舟, 王小明, 等. 梯形透水潜坝附近水面线及透水率[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 66-71.

[20] 王冰清, 付海明. 树冠微观尺度流动阻力特性分析[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2016, 42(3): 426-431.

(本文编辑 王璁)

(上接第 28 页)

2) 侵蚀型岸段海堤修复除加固海堤断面外, 还需考虑采取一定的保滩措施, 防止堤前水深进一步增大。

3) 文中采用的管桩顺坝透射系数及海堤稳定性计算方法可应用于其他侵蚀型岸段海堤的修复加固工程。

参考文献:

[1] 吉学宽, 林振良, 闫有喜, 等. 海岸侵蚀、防护与修复研究综述[J]. 广西科学, 2019, 26(6): 604-613.

[2] 黄哲, 徐修林, 王红川, 等. 江苏沿海某海堤局部失稳机理分析[C]// 中国海洋工程学会. 第十九届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下) 北京: 中国海洋学会海洋工程分会, 2019.

[3] 王登婷, 陈长奇, 赵一晗, 等. 江苏省海堤建设及生态海堤研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2020.

[4] 李路, 刘新成, 宋永港, 等. 强潮河口海岸冲蚀对海堤安全的影响研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2019(4): 202-211.

[5] 张长宽. 江苏省近海海洋环境资源基本现状[M]. 北京: 海洋出版社, 20138.

[6] 张林. 苏北废黄河三角洲海岸冲淤演变及其控制因素[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.

[7] 李孟国. 用波浪弥散关系确定波长的办法[J]. 中国港湾建设, 2002(6): 33-34.

[8] 黄哲, 徐华, 王登婷. 一种新型生态护坡结构及其设计方法[J]. 水运工程, 2021(7): 111-116.

[9] HAYASHI T, HATTORI M, KANO T, et al. Hydraulic research on closed spaced pile breakwaters [C]// ASCE. Proceeding 10 Coastal Engineering Conference. Tokyo: ASCE, 1966.

[10] 龚崇准, 陈美发, 朱宪伟, 等. 桩式离岸堤保滩促淤工程消浪效果试验研究[J]. 海洋工程, 2001(4): 72-77.

[11] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[12] 黄河勘测规划设计研究院有限公司. 碾压式土石坝设计规范: SL 274—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.

(本文编辑 郭雪珍)