

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221674

消能墩在分段加墩式台阶消能工中的应用研究

王 磊^a, 田 煜^b, 冯子玮^b, 李 芊^b

(太原理工大学 a. 建筑设计研究院有限公司; b. 水利科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 为了提高台阶消能工的掺气浓度, 减缓空化空蚀危害, 提高消能率, 提出了分段加墩式台阶消能工, 采用数值模拟的方法, 研究消能墩正墩和反墩布置形式对分段式加墩台阶消能工水力特性的影响。结果表明, 分段加墩式台阶消能工在台阶平直段消能墩附近产生水跃, 正墩布置形式水跃掺气效果较好, 沿程掺气浓度较高, 减缓空蚀效果较好; 各台阶段沿程流速逐渐增大, 正墩布置具有更低的流速, 消能效果更好; 消能墩迎水面和上游区域形成了较大范围的正压, 消能墩顶部及背水面产生了负压, 正墩布置对水流的阻碍作用较高, 反墩布置负压较大; 各流量工况下, 两种布置形式消能率较高, 正墩布置形式在流量较大时消能率更高, 具有更好的消能效果。正墩布置形式在减小台阶空蚀破坏和提高消能率方面效果更好, 可为分段加墩式台阶消能工结构设计提供一定的参考依据。

关键词: 台阶消能工; 梯形消能墩; 流速特性; 压强特性; 消能特性

中图分类号: TV135.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)06-0106-04

1 引言

随着碾压混凝土筑坝技术的发展, 台阶式溢洪道得到关注与应用。与传统光面溢洪道相比, 台阶式溢洪道加糙了溢流面, 增加了水流的沿程能量损失, 进而减小了下游消力池尺寸, 降低了工程造价。对此, 已进行了大量研究。在水流流态方面, CHANSON H 等^[1]将台阶溢洪道水流流态分为跌落水、过渡水流、滑行水流; 在掺气特性方面; 田嘉宁^[2]通过试验提出了滑行水流状态时初始掺气点计算公式及断面掺气浓度分布; WAN W 等^[3]研究了台阶式溢洪道的高度和几何形状对初始位置点的影响, 发现初始掺气点位置、流量与台阶数呈正相关关系, 而与台阶高度呈负相关关系; 王奕森等^[4]研究了过渡台阶体型对台阶溢洪道的影响, 发现过渡台阶尺寸增大, 初始掺气点向上游移动并且流速降低。在流速特性方面, 赵相航等^[5]发现台阶水流流速先沿程逐渐增大, 然后减小, 再增大, 最后趋于稳定。在压强特性方面, MARTÍ SÁNCHEZ-JUNY 等^[6]分析了台阶水平面及竖直面压强分布, 发现台阶水平面从凹角到凸角位置压强变化呈 S 形, 竖直面压强在靠近凸角位置出现负压, 易产生空化空蚀破坏。

在消能特性方面, 田嘉宁等^[7]发现台阶数量对消能率几乎无影响; 伍平等^[8]根据工程实际得出, 消能效果最好的坡比为 1:2~1:3。由此可看出, 在台阶竖直面靠近凸角位置产生负压, 易造成空蚀破坏, 增大台阶水流沿程掺气浓度则可以降低空蚀危害。因此, 本文采用分段加墩式台阶消能工, 利用数值模拟方法, 研究消能墩在分段加墩式台阶消能工中的应用, 旨在为提高台阶水流掺气效果, 增加消能率提供一定的参考依据。

2 数学模型构建

2.1 模型建立

使用 Auto CAD2018 绘制 3D 几何模型, 分段加墩式台阶消能工由 3 段台阶+平直段组成。该台阶消能工总长为 5.41 m, 总高差 1.08 m, 渠宽 0.2 m, 坡比 1:3, 单级台阶宽 20 cm, 长 18 cm, 高 6 cm, 台阶下平直段长度为 50 cm。梯形消能墩下底宽 2 cm, 上底宽 1 cm, 长 2 cm, 高 2 cm。梯形消能墩在每个平直段沿 x 轴方向的 22.5 cm 位置处布置 2 排共 8 个, 布置方式为: ①方案 1。消能墩正向布置(将消能墩竖直面作为迎流面并将两排消能墩对齐放置); ②方案 2。消能墩反向布置(将消能墩斜面作为迎流面并将两

收稿日期: 2022-07-14, 修回日期: 2022-09-02

作者简介: 王磊(1988-), 男, 工程师, 研究方向为水工结构设计, E-mail: wangleityut@163.com

排消能墩对齐放置);③方案 3(参照组)。无消能墩布置(不放置消能墩)。纵向位置为距离边壁各 2.4 cm,消能墩的纵向间距亦为 2.4 cm,见图 1。

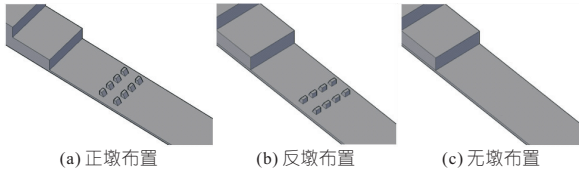


图 1 消能墩布置方式

Fig. 1 Arrangement of energy dissipation piers

2.2 湍流模型

由于台阶水流属于水气两相流,速度梯度较大,因此利用 Fluent 软件,采用 RNG κ - ϵ 模型对台阶水流进行模拟,该模型可以精确模拟复杂的流动,且对 CPU 成本要求不高,控制方程中连续方程为:

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

动量方程为:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \overline{\rho u_i u_j'})}{\partial x_i} \quad (2)$$

κ 方程为:

$$\frac{\partial(\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\kappa \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + G_\kappa + \rho \epsilon \quad (3)$$

ϵ 方程为:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon}^* G_\kappa / \kappa - C_{2\epsilon} \rho \epsilon^2 / \kappa \quad (4)$$

式中, ρ 、 μ 分别为密度及分子粘性系数; G_κ 为平均流速梯度引起的湍动能的产生项; μ_t 为紊流粘滞系数; μ_{eff} 为有效粘度; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 均为紊流模型系数,取值分别为 1.44、1.92; α_κ 、 α_ϵ 分别为 κ 、 ϵ 的普朗特数的倒数,分别取 1.0、1.3; C_μ 为经验系数,取值为 0.084 5。

2.3 网格划分与边界设置

采用六面体结构化网格对台阶消能工进行网格划分,网格尺寸为 0.006 m。在边界设置方面,入口边界为水和空气进口,水进口采用流速入口,空气进口采用压强进口;上边界设置为大气压强;出口边界为压力出口;边壁边界为固体无滑移边界。

2.4 网格敏感性分析

为了兼顾计算精度与计算时间、资源成本,进行网格无关性检验来确定网格尺寸,选取流量 $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,距进水口 65 cm 处的平均水深变化

为参考,对 0.004、0.005、0.006、0.007、0.008、0.009 m 六种不同网格尺寸进行模拟,结果表明距进水口 65 cm 处的水深随网格尺寸的缩小而减小,当网格尺寸减小到 0.006 m 时,0.006 m 与 0.005 m 网格尺寸的模拟结果相对误差仅为 0.3%,可以认为此时网格尺寸已不是影响模拟结果的主要因素,且该模拟结果与物理试验结果吻合较好,说明 0.006 m 的网格尺寸可以满足本次模拟的要求,故模拟选取的网格尺寸为 0.006 m,网格数量约为 110×10^4 个。

3 模型验证

物理模型试验系统由阀门、离心泵、地下水库、电磁流量计、稳水箱和排水池组成,见图 2。水流自地下水库,通过离心泵抽到稳水箱并通过阀门控制流量大小,通过电磁流量计读取流量,经过稳水箱稳定流态后使水流流入台阶测试段自由下泄,分别使用测针和旋浆式流速仪对测试段的水体水深和流速进行测量,最终经过排水池排入地下水库,形成一个完整的循环系统。

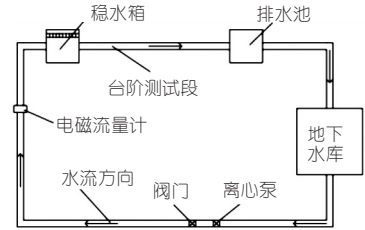


图 2 试验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the test system

选取第 1 段台阶+平直段及台阶段前 20 cm 作为测试段,在流量 $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ 工况下,模拟双排布置所得的沿程水深、流速并与相应物理试验的实测值进行对比验证,结果见图 3。由图 3 可看出,两种布置方式下,沿程水深、流速的模拟值与实测值吻合较好,最大相对误差分别为 7.09%、6.54%,可以认为该模拟方法是可行的。

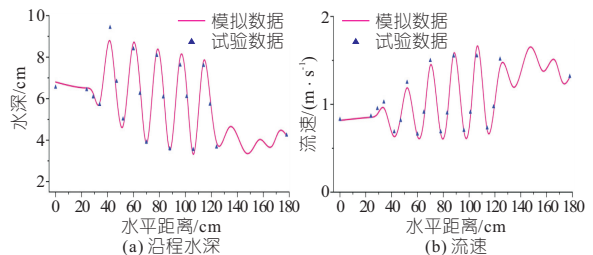


图 3 $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ 模拟和实测值对比

Fig. 3 Comparison of simulated and measured values at $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$

4 结果分析

4.1 水流流态

图 4(a)~(c)为 $Q=40 \text{ m}^3/\text{h}$ 时不同方案的台阶消能工在 $y=7 \text{ cm}$ 断面处的水流流态图,其中水体积分数为零的是空气。由图 4(a)~(c)可看出,各方案下台阶消能工上水流较为稳定,均为滑行水流;3 种方案在第 1 台阶段水流流态基本一致,水面线与台阶凸角连线形成的虚拟底板平行。在第 1 台阶段下游的平直段,传统台阶水流较为平缓,水面线与底板平行,分段加墩式台阶消能工平直段由于消能墩对水流的阻碍作用,在消能墩迎水面位置开始产生水跃;相较于传统台阶消能工,分段加墩式台阶消能工在第 2 台阶段掺气浓度增大。因此,在平直段增设消能墩,可使平直段水流掺气,使水流在进入第 2 台阶段时提前掺气,增加第 2 台阶段水流的沿程掺气浓度,降低空化空蚀风险。在第 2 台阶段下游平直段与第 3 台阶段亦发生了相同的水跃,利用消能墩产生水跃,增加沿程水流的掺气浓度。

正墩布置与反墩布置形式相比,正墩布置产

生的跃后水深更高,这是由于正墩布置水流直接撞击消能墩竖直面,而正向布置时水流撞击消能墩斜面,水流爬升的较为平缓,从而正向布置跃后水深较高,反向布置的水跃水深变化较为平缓。因此,正向布置的水跃效果更好,掺气效果更好,下游台阶段掺气浓度更高,减小空化空蚀效果更好。

4.2 流速特性

图 4(d)~(f)为 $Q=40 \text{ m}^3/\text{h}$ 时各方案的台阶消能工在 $y=7 \text{ cm}$ 断面的流速分布图。由图 4(d)~(f)可看出,各方案台阶消能工在台阶段水流流速沿程逐渐增大,在到达平直段时流速达到最大;在虚拟底板上,各方案台阶消能工流速遵循底层小、表层大的规律。各方案台阶消能工在第 1 台阶段流速分布基本相同;在第 1 台阶段下平直段,传统台阶水流沿程流速基本不变,而分段加墩式台阶消能工则由于消能墩对水流的阻碍作用,可以清晰看到水流被挑射,在水跃段底层与表层流速较低,中间层流速较大。在第 2、3 台阶段,分段加墩式台阶消能工流速明显低于传统台阶消能工,可见消能墩在降低台阶水流流速,减缓水流冲刷作用方面效果明显。

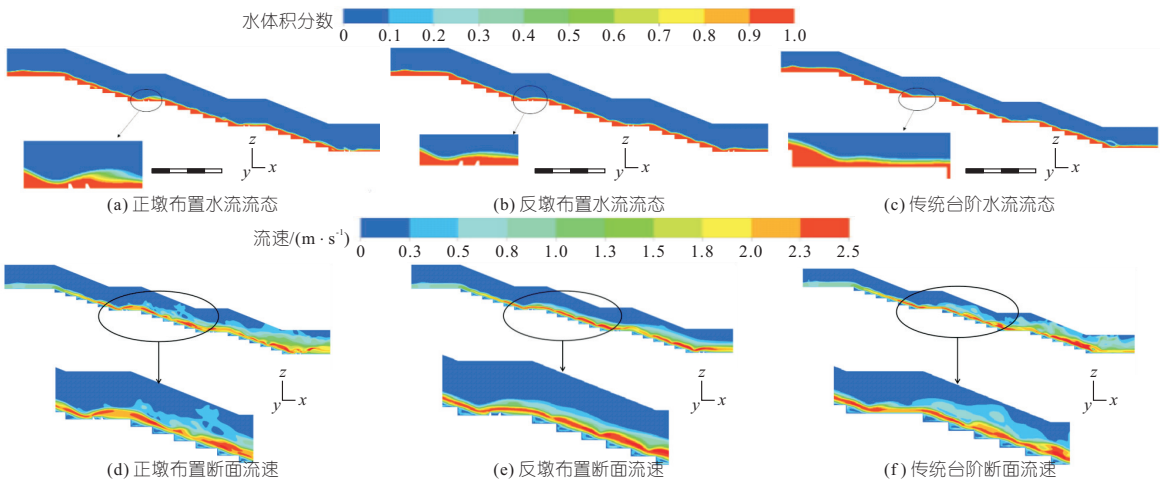


图 4 $Q=40 \text{ m}^3/\text{h}$ 时各体型台阶水流流态、断面流速

Fig. 4 Flow pattern of water flow and flow rate of step section for each body at $Q=40 \text{ m}^3/\text{h}$

正墩布置与反墩布置相比,正墩布置形式由于平直段消能墩竖直接对水流的阻碍作用更大,因此对水流的挑射作用更大,水跃更加明显;正墩布置形式沿程流速也相对较低,在下游出口位置流速更低,因此其消能效果更好;而反墩布置水流流速分布更加平稳,可见反墩布置在改善水流结构,稳定水流方面具有更好的效果。

4.3 压强分布

图 5 为 $Q=40 \text{ m}^3/\text{h}$ 时分段加墩式台阶消能

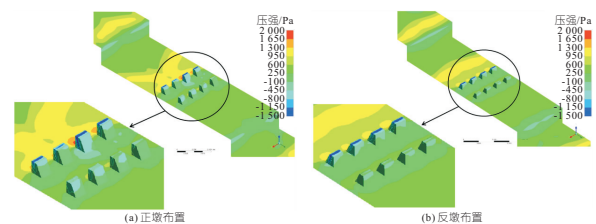


图 5 $Q=40 \text{ m}^3/\text{h}$ 时分段加墩式台阶消能工压强分布
Fig. 5 Segmented pier-type step dissipation pressure distribution at $Q=40 \text{ m}^3/\text{h}$

工第 1 台阶段下平直段消能墩附近的压强分布。由图 5 可看出,在台阶平直段增设消能墩,使消能墩迎水面及上游区域产生了较大正压,消能墩顶部及背水面产生了负压,且第 1 排负压大于第 2 排,最大负压在第 1 排消能墩顶部。对比正墩布置与反墩布置形式可知,正墩布置时消能墩上游区域较高,正压范围更大,消能墩迎水面压强值更高,这是因为消能墩正向布置时,消能墩迎水面与水流方向垂直,对水流的阻碍作用较强,反墩布置消能墩迎水面与水流方向角度较大,迫使水流抬升,阻碍作用较低;而反墩布置消能墩顶部与背水面负压则更大,更易发生空蚀破坏。因此,选择正墩布置具有更好的消能效果与更小的空蚀影响。

4.4 消能特性

为对比分析各体型台阶消能工的消能效果,利用上下游的能量差与上游能量的比值计算消能率。以下游底板 0-0 断面为基准面,以距离进水口 45 cm 位置处 1-1 断面为上游断面,出水口 2-2 断面为下游断面,则消能率 η 计算公式为:

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \times 100\% = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100\% \quad (5)$$

$$E_1 = H_1 + \Delta h + \alpha_1 v_1^2 / (2g) \quad (6)$$

$$E_2 = H_2 + \alpha_2 v_2^2 / (2g) \quad (7)$$

式中, E_1 、 E_2 为别为 1-1、2-2 断面即上下游断面的总能量; ΔE 为能量差; α_1 、 α_2 分别为上下游断面流速系数,一般取 1; v_1 、 v_2 分别为上下游断面平均流速。

图 6 为各方案台阶式消能工的消能率变化对比图。由图 6 可看出,各体型台阶消能工消能率随流量增大逐渐降低;各流量工况下,分段加墩式台阶消能工消能率明显大于传统台阶消能工,且随着流量增大,与传统台阶消能工消能率差值逐渐增大,可见在台阶平直段增设消能墩不仅可以增加消能率,而且可以减缓消能率的降低;正墩布置与反墩布置两种形式相比,在流量较小时,消能率基本相同,在流量较大时,正墩布置大于反墩布置形式,可见相较于反墩布置,正墩布置消能效果更好。

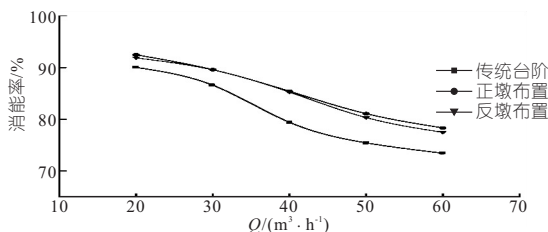


图 6 各体型台阶消能工消能率

Fig. 6 Energy dissipation rate of steps of each body type

5 结论

a. 分段加墩式台阶消能工可使台阶平直段产生水跃,促进水流掺气,从而增大台阶段水流掺气浓度,减缓台阶空化空蚀影响;正墩布置具有更好的掺气效果,可以更好地降低空蚀危害。

b. 分段加墩式台阶消能工台阶段水流呈底层小、表层大的规律;消能墩对水流的阻碍作用,促使台阶段水流流速降低,减缓了对下游的冲刷破坏;相较于反墩布置,正墩布置沿程流速更低,消能效果更好。

c. 分段加墩式台阶消能工中,消能墩对水流产生了阻碍作用,使消能墩迎水面及上游区域产生了正压,消能墩顶部及背水面产生了负压;正墩布置形式正压较大,对水流阻碍作用较强,消能效果也更好;反墩布置形式负压较大,消能墩更易遭受空蚀破坏。

d. 分段加墩式台阶消能工消能率较高,可减缓消能率随流量增大而降低的趋势,具有更好的消能效果;在流量较小时,正墩布置与反墩布置形式消能率基本相同;在流量较大时,正墩布置消能率更高。

参考文献:

- [1] CHANSON H. Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators[J]. Dam engineering, 2001, 11(4): 205-242.
- [2] 田嘉宁. 台阶式泄水建筑物水力特性试验研究[D]. 西安:西安理工大学, 2005.
- [3] WAN W, RAZA A, CHEN X. Effect of height and geometry of stepped spillway on inception point location[J]. Applied sciences, 2019, 9(10): 2091-2091.
- [4] 王奕森, 张晋, 杨磊, 等. 阶梯溢流坝过渡台阶体型水力特性研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(5): 77-80, 107.
- [5] 赵相航, 解宏伟, 郭馨. 台阶式溢洪道水力特性数值研究[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2016, 34(4): 98-103.
- [6] MARTÍ SÁNCHEZ-JUNY, ERNEST BLADÉ, JOSEP DOLZ. Analysis of pressures on a stepped spillway[J]. Journal of hydraulic research, 2008, 46(3): 410-414.
- [7] 田嘉宁, 天津岩夫, 李建中, 等. 台阶式溢洪道各流况的消能特性[J]. 水利学报, 2003(4): 35-39.
- [8] 伍平, 王波, 陈云良, 等. 阶梯溢洪道不同坡比消能研究[J]. 四川大学学报(工程科版), 2012, 44(5): 24-29.

注意地表孕灾环境与地下排水管网建设不匹配的问题。

c. 新、老城区在承灾体稳定性方面差别较大,对于城市化程度较高的金水区来说,避难所和医疗部门在暴雨内涝灾害来临时发挥着重要作用。

参考文献:

- [1] 中国建设新闻网. 住房和城乡建设部积极应对极端天气,持续抓好城市排水防涝工作[EB/OL]. (2022-07-19)[2022-08-11]. <http://www.chinajsb.cn/html/202207/11/28019.html>.
- [2] 许拯民,荆燕燕. 关于城市暴雨强度公式推求的研究[J]. 水文, 2014, 34(3): 53-56.
- [3] FAN L, XIAODING L, TAO X, et al. Driving factors and risk assessment of rainstorm waterlogging in urban agglomeration areas: a case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China[J]. Water, 2021, 13(6): 770.

- [4] 张金萍,张浩锐,方宏远. 基于 SWMM 和 SCS 法的城市内涝模拟及雨水管网系统评估[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(1): 110-121.
- [5] AYESHA S R, ATAUR R. Application of principal component analysis and cluster analysis in regional flood frequency analysis: A case study in New South Wales, Australia[J]. Water, 2020, 12(3): 781.
- [6] 刘娜. 南京市主城区暴雨内涝灾害风险评估[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [7] 甄亿位,郝敏,陆宝宏,等. 基于随机森林的中长期降水量预测模型研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(6): 6-10.
- [8] 林奕晨,周鹏,潘悦,等. 荆州市洪涝灾害影响因子探究及风险评估——基于随机森林和 XGBoost 算法[J]. 中国农村水利水电, 2022(6): 125-132.
- [9] 付宇,曹文庚,张娟娟. 基于随机森林建模预测河套盆地高砷地下水风险分布[J]. 岩矿测试, 2021, 40(6): 860-870.

Importance Analysis of Disaster Risk Indicators for Storm Flooding in New and Old Urban Areas of Zhengzhou City

ZHANG Jin-ping^{a,b}, CHEN Wei^a, FANG Hong-yuan^a, ZHANG Hao-ru^a

(a. School of Water Conservancy and Civil Engineering; b. Yellow River Institute for Ecological Protection & Regional Coordinated Development, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The Gaoxin District and Jinshui District were selected as the representatives of the new and old urban areas of Zhengzhou to explore the evaluation indexes that affect the risk of rainstorm waterlogging in cities and the importance of each index, and a risk index evaluation system covering natural and social factors was established. The importance of each evaluation index in new and old urban areas was determined by using random forest model. The results show that for both new and old urban areas, the sensitivity of disaster-inducing environment is the most important first-level indicator. Among them, imperviousness and pipe density are the most important tertiary indicators for surface and subsurface disaster-preventing environments, respectively. The risk of disaster-causing factors is the least important for Jinshui District and Gaoxin District, and the importance of rainfall is much greater than that of rain type. The difference between the old and new urban areas is mainly reflected in the stability of disaster-bearing body, whose importance is 0.23 and 0.09 for Jinshui District and Gaoxin District. The conclusion can provide some reference for the prevention and control of rainstorm waterlogging disaster in Zhengzhou.

Key words: urban rainstorm waterlogging disaster; risk evaluation system; new and old urban areas; random forest; importance of indicators

(上接第 109 页)

Application of Energy Dissipation Piers in Segmented Pier Type Step Energy Dissipator

WANG Lei^a, TIAN Yu^b, FENG Zi-wei^b, LI Qian^b

(a. Architectural Design and Research Institute; b. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to improve the aerated concentration of the stepped energy dissipator, mitigate the damage of cavitation and cavitation erosion, and improve the energy dissipation rate, the stepped energy dissipator with segmented piers was proposed. The influence of the arrangement of the front pier and the reverse pier of the energy dissipator on the hydraulic characteristics of the stepped energy dissipator with segmented piers was studied by numerical simulation. The results show that the stepped energy dissipators with segmented piers generate hydraulic jump near the energy dissipators in the flat and straight section of the terrace. The arrangement of the main pier has better effect of hydraulic jump aeration, higher concentration of aeration along the way, and better effect of cavitation erosion mitigation; The flow velocity along each stage increases gradually, and the arrangement of the main pier has lower flow velocity and better energy dissipation effect; A large range of positive pressure is formed on the upstream area and the upstream area of the energy dissipation pier, and negative pressure is generated on the top and back surface of the energy dissipation pier. The arrangement of the positive pier has a high blocking effect on the water flow, and the arrangement of the reverse pier has a large negative pressure; Under each flow condition, the energy dissipation rate of the two arrangement forms is higher, and the energy dissipation rate of the positive pier arrangement form is higher when the flow is larger, which has better energy dissipation effect. The arrangement of the main pier has better effect in reducing the cavitation damage of the step and improving the energy dissipation rate, which can provide a reference for the structural design of the stepped energy dissipator with segmented piers.

Key words: step energy dissipator; trapezoidal energy dissipation pier; velocity characteristics; pressure characteristics; energy dissipation characteristics