

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222154

山地城市末端排水口跌水消能特性数值模拟研究

毛 钧¹, 黄恒粤¹, 陈 垚¹, 刘 非¹, 袁绍春¹, 甘春娟²

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆市市政设计研究院有限公司, 重庆 400012)

摘要: 海绵城市建设过程中无法进行源头式减排时, 通常在排水管末端区域设置公共雨洪控制设施(SCM)进行兜底, 实现径流控制和污染物削减目标。由于山地城市排水口与水岸区域落差大, 导致排水管出水流速高, 易对 SCM 造成强烈的水力冲刷而影响设施的正常运行。基于重庆市主城排水口高落差地形特征设置的跌坎消能设施, 采用 FLUENT 软件构建的数值模型对不同消能构型进行了水力过程模拟。结果表明, 实心挡板跌坎消能设施(BD2)的消能率高达 90% 以上, 且末端出水流速与进水流量无关, 仅与单级跌坎高度有关; 单级跌坎高度越高, 水流受势能影响易在跌坎回水区形成水力涡流, 并造成流速场在矢量方向上发生显著变化, 使能量发生最大程度紊动耗散, 最终导致水流在水平方向上的最大压强沿程降低而达到水力消能效果。

关键词: 雨洪控制设施; 跌水消能; 消能构型; 消能率; 数值模拟

中图分类号: TV135.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)08-0139-04

1 引言

在海绵城市建设过程中通常融入源头式雨洪控制设施(SCM)以减少城市径流污染, 并缓减城市内涝问题^[1]。作为典型的山地城市, 重庆市由于土地开发程度较高, 建设 SCM 进行源头或中途减排, 通常需要更高的建设成本。根据实地调研, 位于主城次级河流沿岸的末端排水口周边水岸区域拥有较多可利用空间, 可修建末端式 SCM 实现对径流的控制。但排水口普遍存在流量大、落差高等特点, 导致出水流速高, 易对后续 SCM 造成强烈的水力冲刷作用或造成填料表面侵蚀, 进而影响设施的正常运行, 不利于雨水径流污染控制^[2]。进水流速过大甚至还可显著降低单位时间内处理量, 从而增加溢流风险, 降低设施的径流控制能力。因此, 为确保水岸区域修建的末端式 SCM 正常运行, 有必要对排水口出水进行消能处理, 使流速降至 SCM 所允许的流速范围^[3]。针对水力消能措施已开展了一系列研究, 如范永孟等^[4]提出在排水口端墙处设置石砌消能区进行水力消能, 但其要求了消能区的最小长度, 并不适合高落差区域。针对高落差的水力消能, 目前通常

采用跌落式竖井的外消能设施, 但其消能效果一般, 且易引起竖井强烈振动^[5,6]。为此进行了一系列改良, 形成了折板式、交错板式、螺旋阶梯式等改良型竖井^[7-9], 但在极端降雨期间容易发生气阻现象^[10], 甚至产生间歇式喷涌现象^[7], 影响后续设施运行。此外, 利用高落差的地形条件, 提出了台阶消能方案^[11]。台阶消能(亦称跌坎消能)适合于高落差、大流量的排水消能, 并能结合山地城市次级河流沿岸地形特点进行设置, 但目前对于跌坎消能设施的最佳构型及其消能机理尚未开展系统研究。因此, 在重庆市主城排水口实地调查的基础上, 构建跌坎消能设施物理模型, 运用 FLUENT 软件进行水力过程数值模拟, 对比分析不同构型和单级跌坎高度在不同流量下的消能率, 并探究实心挡板跌坎式消能设施的消能机理, 以期为山地城市末端 SCM 的进水消能设计提供理论依据。

2 试验装置与方法

2.1 物理模型

根据嘉陵江流域九曲河岸边的某跌坎式排水设施, 按 1:10 的几何比尺构建 5 级跌坎式消能

收稿日期: 2022-10-16, **修回日期:** 2022-11-06

基金项目: 重庆市建设科技计划项目(城科字 2020 第 5-7)

作者简介: 毛钧(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为城市雨洪管理, E-mail: 659208860@qq.com

通讯作者: 陈垚(1983-), 男, 博士、教授, 研究方向为水污染防控与城市雨洪管理, E-mail: chenyaoc@cqjtu.edu.cn

设施物理模型(透明亚克力材质),并在前、后端分别设置进、出水段。为获取模型的水力参数,在每级跌坎上布置3个平行测点(图1)。在进水流量 Q 为2.5、3.0、3.5 m^3/h 的工况下,分别利用钢尺和JC-HS-2便携式多功能流速仪测量测点的水深和流速,并对跌落流态进行拍照记录。

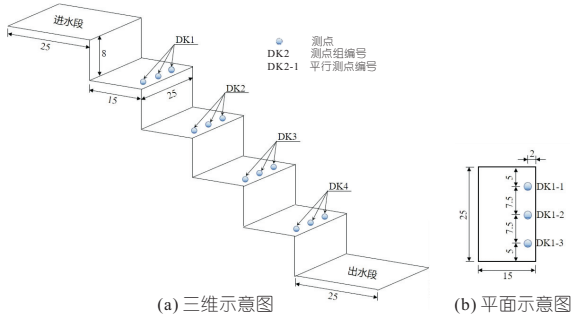


图1 测点布置图(单位:cm)

Fig. 1 Layout of measuring points

2.2 计算模型

采用ICEM CFD软件对计算模型进行结构多边形网格划分,并在跌水流态复杂的壁面处进行局部网格加密。所用网格最小、最大尺寸分别为0.001、0.006 m,网格总数约为 47×10^4 个。网格正交性超过0.907,且未产生负体积网格现象。

入口边界设为速度入口,出口边界设于自由压的出水段出口,而壁面边界选择不考虑摩擦力影响的刚体无滑移作为边界条件。采用VOF多相流模型与Realizable $k-\epsilon$ 模型进行计算,动量方程、湍动能方程和湍动能耗散率均采用一阶迎风差分格式。其中,动量、体积分数、湍动能(湍动能耗散率)的亚格弛因子分别取0.5、0.4、0.3,而其他项保持默认值。模型选择瞬态控制方式,并采用PISO算法求解压力与速度的耦合。当变量残差低于0.001且出口流速稳定时认为模型计算已收敛。

不同流量下各测点的水深、流速测量均值与模拟值见表1。由表1可知,模型对不同测量点位的水深和流速模拟的相对误差均控制在10%左右,且水流流态基本一致,均存在水舌跌落区、回水区、冲击与水跃区、水流平顺区等典型流态(图2)^[12],尤其是在跌坎处产生坎后旋涡并形成空腔现象。可见计算模型精度满足要求,可用于后续模拟计算。

2.3 跌坎消能设施设计构型

由于传统跌坎消能设施(SD构型)并未达到消能目的,反而出现第4级出水流速高于第1级进水流速的情况(表1)。为此,在不改变消能设施总长度和高度的情况下进行不同构型改良,构建了7种构型的计算模型(表2)。

表1 不同流量下水深与流速模拟值与测量均值

Tab. 1 Simulated and observed mean values of water depth and velocity under different flow

跌坎位置	测点编号	流量 Q	水深			流速		
			测量均值	模拟值	相对误差	测量均值	模拟值	相对误差
第1级	DK1	2.5	8.8	8.1	7.95	0.315	0.286	9.20
		3.0	8.8	8.0	9.09	0.376	0.351	6.65
		3.5	9.5	8.6	9.47	0.391	0.362	7.42
第2级	DK2	2.5	7.8	6.9	11.50	0.356	0.328	7.87
		3.0	8.5	7.7	9.41	0.388	0.359	7.47
		3.5	9.3	8.5	8.60	0.419	0.387	7.64
第3级	DK3	2.5	7.4	6.6	10.81	0.378	0.345	8.73
		3.0	8.3	7.6	8.43	0.398	0.371	6.78
		3.5	8.8	8.1	7.95	0.443	0.408	7.90
第4级	DK4	2.5	6.8	6.2	8.82	0.412	0.387	6.07
		3.0	7.1	6.5	8.45	0.479	0.441	7.93
		3.5	7.6	6.9	9.21	0.509	0.468	8.06

注:流量单位为 m^3/h ;水深测量均值、模拟值单位均为mm;相对误差单位为%;流速测量均值、模拟值单位均为m/s。

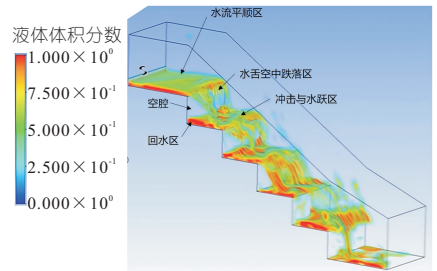


图2 跌坎消能设施跌落水流典型流态

Fig. 2 Free overfall's form in falling-sill dissipation facility

表2 跌坎消能设施设计构型

Tab. 2 Design configuration of falling-sill dissipation facility

构型	名称	构造方案(计算模型)
SD	光滑型跌坎消能设施	图1所示跌坎消能设施,且粗糙系数为0
DH	斜坡型消能设施	将跌坎段更改为斜坡段,且粗糙系数为0
RD1	粗糙型跌坎消能设施	将SD构型的表面粗糙系数由0更改为0.5
RD2	粗糙型跌坎消能设施	将SD构型的表面粗糙系数由0更改为0.7
RD3	粗糙型跌坎消能设施	将SD构型的表面粗糙系数由0更改为1.0
BD1	穿孔挡板跌坎消能设施	在SD构型的每级跌坎外边缘增设一高度为1 cm的穿孔挡板(98个孔径2.5 mm的小孔上下两排交错布置,并排孔间距5.0 mm,错排孔间距2.5 mm)
BD2	实心挡板跌坎消能设施	在SD构型的每级跌坎外边缘增设一高度为1 cm的实心挡板

2.4 水力消能评价指标

本文模拟的跌坎消能设施在水流跌落过程会产生附壁射流、坎后旋涡、冲击射流等相互伴生相互作用的流动结构^[12],使水流发生大尺度旋涡和相互碰撞达到消能目的。由于设施设置了进、出水段,且均满足恒定流条件,可采用恒定流能量方程来计算水流经过消能设施时产生的水头损失,以此计算出水流能量的削减率,即水力消能率 η 为:

$$\eta = 1 - \frac{H_2 + \alpha_2 v_2^2 / (2g)}{H_1 + \alpha_1 v_1^2 / (2g)} \times 100\% \quad (1)$$

式中, H_1 、 H_2 分别为上、下游水面水深, m; α_1 、 α_2 分别为上、下游断面的流速系数, 一般取 1; ν_1 、 ν_2 分别为上、下游断面的断面平均速度, 采用模拟结果中的质量平均速度, m/s。

3 结果与分析

3.1 不同设计构型对水力消能效果的影响

不同流量工况下各消能设施表现出不同的消能效果, 但消能率排序均为 $DH < SD < RD1 < RD2 < RD3 < BD1 < BD2$, 而同一消能设施的消能效果基本不受进水流量的影响。其中实心挡板构型(BD2)的消能率最高, 超过 90%。斜坡构型(DH)由于水流直接从进水段下泄至出水段, 中途未受任何阻挡, 水流只能通过与壁面的摩擦作用和周围空气的混掺作用进行消能, 使消能作用较弱, 消能率仅达 45% 左右。由于跌坎构型增加了水流与固定边界碰撞消能的途径, 尤其是表面粗糙的跌坎壁面可使水流与附壁产生更强的摩擦效应, 从而表现出消能率随粗糙率的增加而增加。增加挡板后, 水流会在跌坎壁面上形成一层水垫层, 并产生明显的水体回流现象, 同时水流冲击水垫层后还易形成水跃旋涡, 进一步增强水流下泄时的能量损耗^[13], 增加消能率。若挡板设置过水小孔, 由于过水断面的突然减少, 使水流的流速有所上升, 反而增加水舌空中跌落的射程, 削弱水流跌落时与水垫层发生的冲击与水跃碰撞消能面积。同时, 流速的增加也会增大水流进入下一级跌坎的入射角度, 使入射主流轴线流速沿程总削减率减少^[14], 从而表现出 BD1 消能率略低于 BD2。

3.2 不同单级跌坎高度对水力消能过程的影响

在保持跌坎级数、跌坎长度(15 cm)和跌坎实心挡板高度(1 cm)不变的情况下, 将单级跌坎高度分别调整为 8、6、4 cm, 利用计算模型模拟不同进水流量下各跌坎消能设施的水流速度矢量变化, 结果见图 3。由图 3 可知, 在相同跌坎高度下, 消能设施的末端出水流速与进水流量无关。但末端流速随单级跌坎高度的增加而增加, 如当跌坎高度从 4 cm 增至 8 cm 时, 末端流速从 0.45~0.47 m/s 提升至 0.67~0.70 m/s。这是因为水流逐级经过跌坎时, 在每一级跌坎中均有挡板对水流起到阻挡作用, 最开始会形成水垫层, 当水垫层上升至挡板高度时, 水流才会经挡板顶部以淹没射流方式溢流至下一级跌坎中。此时溢流的水体在冲击与水跃区经水垫层和挡板的阻挡作用得到消能^[15], 进一步降低流速。同时, 当水流从水

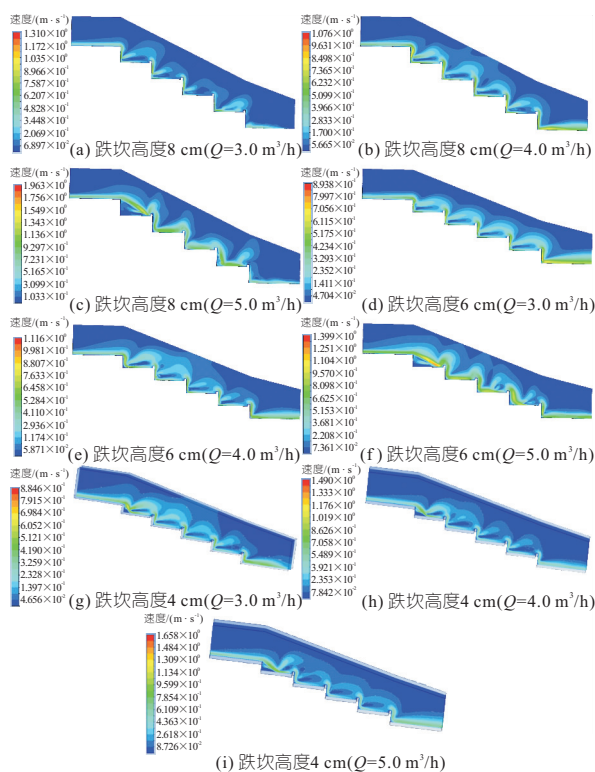


图 3 不同单级跌坎高度下流速沿程变化

Fig. 3 Variation of flow velocity at different single drop height

舌空中跌落区射流时, 重力势能会转化为动能, 且单级跌坎高度越高, 势能转化为动能也越多, 导致出水流速有所增加。模拟计算结果与陈婷^[16]在自由跌水消能研究中得到的结论相似, 即出水流速随消力墙高度的增加(3.0 cm 增至 3.5 cm)而增加。

3.3 跌坎水力消能机理分析

由于 BD2 构型的消能效果最好, 因此选取流量 $Q=5.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 对消能设施的速度矢量、跌坎底板压强分布和紊流特征进行模拟分析。消能设施纵断面方向的速度矢量分布图(图 4(a))清晰显示, 水流在每级跌坎三角区域内形成一个顺时针的坎后旋涡水流, 部分水流受挡板的阻挡作用而

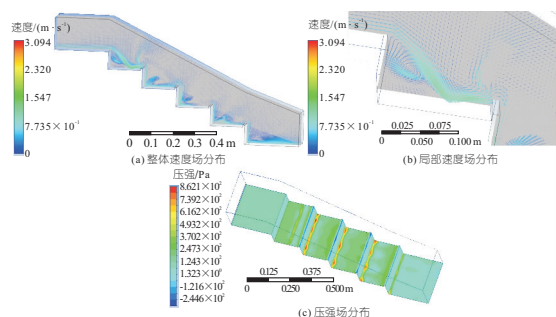


图 4 实心挡板构型设施内部速度场与压强场分布

Fig. 4 Distribution of velocity field and pressure field in solid baffle configuration

发生回流(图 4(b)),形成回水区(图 2)。同时,水流与水流、水流与壁面之间的相互碰撞显著改变了水流的速度矢量方向。

BD2 构型中凸起的挡板较好阻挡了水流的下泄过程,使水流与壁面发生相互碰撞作用,并对跌坎底板产生水力冲击作用(图 4(c))。结果表明,除第一级跌坎外,其他跌坎最大压强均出现在前、后两级跌坎交接处且离挡板较远的回水区。这是因为跌坎上的水流受挡板的阻挡作用,流速得到有效降低,减少了水舌空中跌落的射程,使冲击与水跃区逐渐远离挡板,并向回水区靠近,从而使该区域产生较大的压强场分布。第一级跌坎的较大压强场出现在距离跌坎挡板较近位置,主要是由于水流从出水管流出后,流速较大,水舌空中跌落的射程较远,使冲击与水跃区靠近挡板处,但由于存在较高的水垫层,对底板有一定水力消能作用,使底板压强较其他相对要小。同时,从沿程压强场分布来看,消能设施底板上的最大压强沿程减少,反映了水流速度不断得到削减。

通常情况下,水流紊动能和紊流动能耗散率能从机理上揭示消能过程。由图 5 可知,当水流由上一级跌坎向下一级下泄流动时,由于水流碰撞区域受边界约束,水流碰撞后,速度及其矢量方向均发生改变而重新分布,流线紊乱(图 4),发生显著的能量转化过程,从而表现为流速场与紊动能分布相互响应,并在跌坎回水区发生最大程度紊动耗散,最终导致水流在水平方向上的最大压强沿程降低而达到水力消能效果。

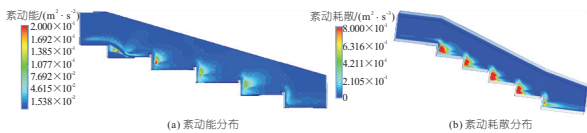


图 5 纵断面紊动能和紊动耗散分布

Fig. 5 Distribution of turbulent energy and turbulent dissipation on longitudinal section

4 结论

a. 不同构型消能设施的消能率基本不受进水流量的影响,仅受构型显著影响,其消能率排序为 $DH < SD < RD1 < RD2 < RD3 < BD1 < BD2$,其中 BD2 构型的消能效果最好,其消能率可达 90% 以上。同时,消能设施的末端出水流速与进水流量无关,仅与单级跌坎高度有关,并随跌坎高度的增加而增大。

b. 跌坎高度越高,水流受势能影响越易在跌

坎回水区形成坎后旋涡,经挡板阻流作用而造成流速场在矢量方向上发生显著变化,使能量在回水区发生最大程度紊动耗散,最终导致水流在水平方向上的最大压强沿程降低而达到水力消能目的。

参考文献:

- [1] 胡东起,陈星,张其成,等.低影响开发在海绵城市建设中的应用[J].水电能源科学,2017,35(4):18-21.
- [2] 陈焱,刘梦一,段玲红,等.雨水花园设计要点剖析与应用实例[J].环境工程,2017,35(12):6-10.
- [3] MELBOURNE WATER. WSUD engineering procedures: Stormwater [M]. Melbourne, Australia: CSIRO Publishing,2005.
- [4] 范永孟,陈人瑜,陈焱.生物滞留设施进水管系统设计方法研究[J].给水排水,2021,47(增刊1):246-252.
- [5] GRANATA F. Dropshaft cascades in urban drainage systems[J]. Water science & technology,2016,73(9):2052.
- [6] 浦胜男,赵兰浩,张海容,等.深层隧道竖井流激振动响应分析[J].水电能源科学,2019,37(8):68-72.
- [7] 安瑞冬,游景皓,廖磊,等.深层隧道排水系统中井隧水力学特性研究[J].水利学报,2021,52(12):1498-1507.
- [8] 马永林,王海阳,傅宗甫,等.内湿外干型折板式竖井泄流特性数值模拟[J].水电能源科学,2020,38(1):108-111.
- [9] 王斌,李进平,程永光.深隧排水系统水舌对冲式入流竖井设计研究[J].中国农村水利水电,2023(3):138-143.
- [10] CHAN S N, CONG J, LEE J H W. 3D numerical modeling of geyser formation by release of entrapped air from horizontal pipe into vertical shaft [J]. Journal of hydraulic engineering,2018,144(3):04017071.
- [11] 葛新峰,孙洁,吴丹,等.基于 VOF 模型的排水渠道流动数值模拟及消能措施优化研究[J].水电能源科学,2021,39(5):109-112.
- [12] 王琼,李万稳,王月,等.多级跌坎跌水复氧过程及影响因素试验研究[J].环境工程,2016,34(11):49-54.
- [13] 刘沛清,许唯临.高拱坝挑跌流非碰撞水垫塘消能形式研究[J].水利学报,2010,41(7):841-848.
- [14] 崔召,王海军,刘家伟.跌坎型消能工冲击区流速衰减规律研究[J].人民黄河,2018,40(6):127-132.
- [15] 杨红宣,赵伟,徐一民,等.连续跌坎型底流消能工水力特性的影响因素研究[J].南水北调与水利科技,2007(5):142-144.
- [16] 陈婷.小流量自由跌水长度及消能研究[D].成都:西华大学,2016.

较高。但泵站实际运行扬程远低于设计扬程,这使得启用泵站时实际过泵流量较装机流量明显超出。

b. 过高的泵站设计扬程并不利于工程效益的有效发挥,根据相关规范标准,结合实测水文资料分析,建议将望虞河沿江泵站设计扬程调整为 1.78 m,以进一步提高泵站有功功率和减少运行成本。

参考文献:

[1] 胡琦玉,杨道军. 平原河网区闸控河段入河排污口水环境影响分析及优化调度方案研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(1):63-66.

[2] 水利部太湖流域管理局. 太湖流域防洪规划[R]. 上海:太湖流域管理局,2008.

[3] 高兴和,吴忠,陈晔. 太湖通江大型水利枢纽工程关键技术研究与应用[J]. 水利规划与设计, 2020, (12):147-150,157.

[4] 于建忠,陈晔,朱颖,等. 最高扬程与平均扬程相差较大的特低扬程泵站选型研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(5):68-76.

[5] 水利部太湖流域管理局. 太湖流域综合规划[R]. 上海:太湖流域管理局,2013.

[6] 国家防汛抗旱总指挥部. 太湖流域洪水与水量调度方案[R]. 北京:国家防汛抗旱总指挥部,2011.

[7] 中国住房和城乡建设部. 泵站设计标准:GB 50265-2022[S]. 北京:中国计划出版社,2022.

[8] 江苏省水利厅. 关于确定湖西引排、武澄锡引排沿江枢纽有关水位设计标准确定的通知[R]. 南京:江苏省水利厅, 1997.

Optimization of Design Parameters of Pumping Station in the Wangyu River Under Tidal Level Change of the Yangtze River

LIU Zi-hao, ZHONG Li, CHEN Ye, QIN Hao, WU Xin-yi, WANG Yuan-sheng

(Jiangsu Taihu Water Conservancy Planning and Design Institute Co., Ltd., Suzhou 215006, China)

Abstract: The Wangyu River is an important watercourse connecting the Yangtze River and Taihu Lake. Relevant hydrological data shows that the pumping opportunity can account for 25.9% of the total drainage period from the Wangyu River to the Yangtze River, which indicates that the pumping station plays a crucial role in the drainage period of Taihu Basin. The current design lift (2.5 m) of the pumping station is higher than the actual operating lift, and the running time of the pumping station exceeding 20% of the installed designed capacity accounts for 65.9% of the total operation time. According to the design specifications of the pumping station and relevant local standards, combined with the analysis of the hydrological data, it is recommended to adjust the design lift of the pump station to 1.78 m in the subsequent upgrading of the pumping station. The optimized design lift is more compatible with the actual operating environment of the pumping station, and it also reduces the operating costs of the pumping station such as power consumption, and prolongs the service life of equipment, which is of great significance for the overall benefits of the Wangyu River Hydro-junction.

Key words: Taihu Basin; the Wangyu River; pumping station; drainage; designed lift; optimization

(上接第 142 页)

Numerical Simulation of Falling-sill Dissipation Characteristics of Terminal Drainage Outlets in Mountainous Cities

MAO Jun¹, HUANG Heng-yue¹, CHEN Yao¹, LIU Fei¹, YUAN Shao-chun¹, GAN Chun-juan²

(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Municipal Research Institute of Design Co., Ltd., Chongqing 400012, China)

Abstract: When the source-based reduction facilities cannot be carried out during the construction of sponge city, the stormwater control measures (SCM) are usually set up at the terminal drainage outlets to achieve the goal of runoff control and pollutant reduction. Because there is usually large drop between the drainage outlet and the waterfront zone in mountain city, resulting in a high flow rate of water from the drainage outlets, it is easy to cause strong hydraulic erosion to the SCM and may adversely affect their normal operation. Based on the falling-sill dissipation facility installed according to the high drop topographic features of drainage outlets in Chongqing urban, the numerical model with FULENT software was constructed to simulate the hydraulic process of different energy dissipation configurations in this study. The results show that the solid-baffle typed falling-sill dissipation facility has out-performance energy dissipation, and the energy dissipation rate was as high as 90%, and the outlet velocity of the end of facilities was irrelevant to the inlet flow, while only related to single drop height. The higher the single drop height, the water flow was susceptible to form a hydraulic vortex in the backwater area of falling-sill under the influence of potential energy, which can lead the greatest extent of turbulence kinetic energy dissipation, and finally result in a gradual decrease of the maximum pressure of water flow in the horizontal direction to achieve the targeted hydraulic energy dissipation.

Key words: stormwater control measures; falling-sill dissipation; dissipation configuration; energy dissipation rate; numerical simulation