

郭帅, 曾云辉, 陈国芬, 等. 城市道路雨水口截流效率数值模拟研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(10): 28-34.
GUO Shuai, ZENG Yunhui, CHEN Guofen, et al. Numerical simulation on the street grate inlets hydraulic efficiency[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(10): 28-34.

城市道路雨水口截流效率数值模拟研究

郭 帅¹, 曾云辉¹, 陈国芬², 马文滢², 段园煜³

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014; 3. 合肥学院 建筑工程系, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 城市道路雨水口是地表径流与地下雨水管网之间的连接点, 其截流效率决定了降雨期间地下管网系统的泄流量, 对预防城市内涝的发生具有重要意义。利用计算流体动力学软件 CFX17.0 构建了一段长 12 m、宽 3 m、高 0.5 m 的城市道路径流段, 并通过与原型试验结果进行对比验证研究了在不同的流量和坡度组合下雨水口对径流的截流情况和水力性能, 重点分析了水面宽度、断面平均流速、沿程水深、截流流量与截流率的变化情况。数值模拟结果表明, 篦前水深是影响雨水口截流量和截流率的主要因素, 流量越大(流量范围 $Q = 30 \sim 70 \text{ m}^3/\text{h}$), 篦前水深越大, 雨水口截流量越大; 而截流效率随着流量的增加而减小, 随着横坡的增大而增加(横坡变化范围为 $S_c = 1.5\% \sim 2\%$), 随纵坡增大而减小(纵坡变化范围 $S_l = 1\% \sim 2\%$)。所有研究工况下, 最大截流率为 85%; 数值模拟结果与试验数据具有较好的一致性, 各工况模拟截流效率与实测截流效率误差均在 10% 以内, 研究结果对雨水口优化设计具有重要的参考价值。

关键词: 城市道路; 雨水口; 截流率; 有限元; 数值模拟

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.10.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TU 992

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)10-0028-07



Numerical simulation on the street grate inlets hydraulic efficiency

GUO Shuai¹, ZENG Yunhui¹, CHEN Guofen², MA Wenying², DUAN Yuanyu³

(1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, Zhejiang, China; 3. Department of Architectural Engineering, Hefei University, Hefei 230601, Anhui, China)

Abstract: The street inlet functions as the entrance of the road runoff into the underground sewer system, which is a key component of the urban drainage system for preventing the occurrence of urban waterlogging. In order to study the hydraulic efficiency of the national standard street inlet under different conditions, a 3D finite numerical model (12 m long, 3 m wide and 0.5 m high) was constructed in use of CFX17.0 software. The numerical model has been validated with the full scale experimental results. The effects of cross slope, longitudinal slope, and runoff rate on flow patterns, water spread, average velocity, water depth, intercepted flow rate as well as the hydraulic efficiency were analyzed. The numerical simulation result shows that water depth before the inlet significantly influences the intercepted flow and hydraulic efficiency; when the approaching flow increases ($Q = 30 \sim 70 \text{ m}^3/\text{h}$)

收稿日期: 2020-04-30

基金项目: 安徽省自然科学基金(1908085QE211)

作者简介: 郭 帅(1984—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事城市水力学、供排水管网优化设计与数值模拟等研究。E-mail: guoshuai@hfut.edu.cn

h) , the water depth increases , therefore the intercepted flow increases. However , the hydraulic efficiency decreases as the approaching flow increases; it increases with the cross slope ($S_c = 1.5\% \sim 2\%$) but decreases with the longitudinal slope ($S_L = 1\% \sim 2\%$) . For all studied cases , the largest hydraulic efficiency of the grate is 85%. The numerical simulation results show good consistency with the experimental data , errors between the simulated hydraulic efficiency and the measured data are all within 10% , providing good references for future optical designing of street inlets.

Keywords: urban road; gutter inlet; hydraulic efficiency; finite element; numerical simulation

0 引 言

近年来城市极端天气频发,暴雨事件引起的城市内涝问题愈发严重,城市排水系统受到巨大的挑战。为有效应对内涝灾害,国际学界提倡城市排水系统的设计应采用双排水系统的理念,即地表排水系统作为主系统(major system),而地下排水管网作为次系统(minor system)^[1]。雨水口作为地下雨水管网系统的入口,是地表径流与地下排水系统的连接口,其对雨水的截流直接影响地下排水系统所接纳的雨水量。因此,针对不同影响因素下雨水口的截流效率问题,国内外学者开展了大量的研究。SCHMITT等^[2]结合双排水模型分析过高的地下排水管道水位所引起的城市内涝问题,分析了城市地表水和地下排水管道之间的相互作用,但对于道路雨水如何有效进入地下排水系统并未说明。RUSSO等^[3]在不同形状的雨水口和不同的道路坡度及流量下进行模型试验,分析不同因素对横截沟截流率的影响,总结出雨水口截流效率与雨水口篦前水深关系的经验公式。SLOBODAN等^[4]通过试验和3D数值模型研究地表径流在模拟道路上以及被雨水口截流后进入排水管道的整个流动过程,分析了雨水口截流状态以及截流率的变化情况。KEMPE等^[5]采用试验数据校核数值模型,通过数值模拟结果和试验结果对比,说明数值模拟可靠性及利用数值模拟分析雨水口不同部分的截流量,讨论路面径流被雨水口截流的具体情况。LOPES等^[6]以原型试验装置建立横截沟的数值模型,分析不同的网格划分对模拟结果的影响,对比试验结果分析数值模拟结果的误差大小。GOMEZ等^[7]通过数值模拟对比雨水口前后的流量差异,分析雨水口截流机制,发现大流量下的模拟结果更好且相对误差更小。MATTEO等^[8]针对圆形雨水篦子开展试验研究和数值模拟,分析不同的圆形雨水口的开孔形式、道路坡度和流量对水流流态和雨水口截流率的影响。CARVALHO等^[9]采用数值模拟方法研究雨水口地下泄流出口大小及其与雨水口连接位置对雨水进入雨水口后流速场和自由表面的影响,分析了不同接口状态下的水流动

情况。

国内,李杨杨、李品良等^[10-11]在MIKE URBAN基础上,模拟城市地下排水管道在不同降雨强度下的承压情况,结合排水管道泄流情况分析城市内涝产生的原因。安智敏等^[12]开展了不同形式的雨水口泄流试验,将试验数据和堰流公式结合拟合了立孔式雨水口和平篦式雨水口的泄水量公式,讨论了道路坡度对雨水口截流效果的影响。LI等^[13]通过试验,分析了道路坡度以及流量对国内立篦式雨水口排水效果的影响,并且提出立篦式雨水口泄流效率的经验公式。朱呈浩等^[14]基于国内外不同雨水口的经验公式对比SWMM模型的模拟结果来分析雨水口的截流能力。刘雷斌、郭磊等^[15-16]采用物理模型试验平台,对不同类型雨水口的截流率进行试验和模拟,分析道路坡度和雨水口的类型对雨水口截流效果的影响。文献[17-18]对各种不同开孔形式的雨水篦子进行试验,在不同的坡度和流量组合下,分析开口角度对雨水口的截流能力的影响。陈国芬等^[19]以杭州市某一段实际道路为原型,建立1:1CFD数值模型,模拟不同重现期降雨径流过程,分析其流线变化和径流被雨水口截流情况,得出雨水口的截流率随雨强增大而减小,并有趋于饱和的趋势。当前,国内通过CFD软件研究不同影响因素作用下雨水口截流效率的变化情况仍比较少。本文通过构建长12m,宽3m,高0.5m包含单个雨水篦子的道路径流段的3D数值模型,重点分析了道路地表径流量、道路坡度的变化对道路雨水口截流效率以及篦前水深的影响,并利用原型试验装置的试验结果对数值模型进行了率定与验证。研究成果对指导国内雨水口的优化设计具有较好的参考价值。

1 试验模型

试验采用搭建于合肥工业大学水工模型试验大厅的长12m,宽3m的单向单车道1:1原型道路试验平台[见图1(a)]。试验雨水口采用国家标准型雨水篦子,雨水篦子距离上游入流口10m处,研究其截流效率和道路横坡、纵坡以及入流流量之间的关系

[见图 1(b)]。试验装置通过底部的液压千斤顶调节道路横坡和纵坡, 横坡 S_C 调节范围为 $0\% \sim 10\%$, 纵坡 S_L 调节范围为 $0\% \sim 5\%$ 。水源通过水泵抽水至屋顶水箱, 再由水箱供水到试验装置前端水箱, 水箱前部导流板可以使水流均匀进入模拟道路形成路面径流, 径流在流动过程中部分被雨水篦子截留, 未被截流的部分从模拟道路末端泄流至排水箱中, 通过排水管排入到水渠中, 排水管上接有电磁流量计可以测量其出流流量。入流流量通过入流管上的电磁流量计以及电动阀门控制。试验各参数变化范围为: 流量 $Q = 30 \sim 70 \text{ m}^3/\text{h}$, 纵坡 $S_L = 1\% \sim 2\%$, 横坡 $S_C = 1.5\% \sim 2\%$, 测量其不同组合工况下的雨水口的截流效率。同时, 在雨水口上游 0.15 m 位置处测量其篦前水深。

2 数值模型

2.1 计算域及网格划分

数值模拟软件采用 ANSYS 旗下的计算流体动力

学(CFD)软件 CFX17.0 版本。由于道路下部分为水相, 上部分为空气相, 实际以研究水流特性为主, 为减少网格数量, 不同的道路区域采用不同的网格尺寸, 以减少计算时间^[6], 其中靠近道路上游的网格尺寸为 5 cm , 雨水口区域的最小尺寸为 0.1 cm , 共划分 680 万个结构网格。具体模型网格参数如图 2 所示。

2.2 模型网格验证

为检查网格的准确性, 在坡度为 $S_L = 1\%$, $S_C = 1.5\%$ 下, 采用三种不同尺寸参数的网格, 并对两种大流量工况 ($Q = 60$ 和 $70 \text{ m}^3/\text{h}$) 进行计算, 对比每个结果的出流流量(雨水口截流量+溢流出口流量)与边界设置入流流量的质量差来判断网格的可靠性, 对比结果如表 1 所列。从表 1 中可以看出, 当网格数量增加时, 质量丢失误差逐渐减小, 当网格最小尺寸达 0.1 cm , 网格数量达到 680 万时, 质量丢失误差 $< 1\%$, 因此, 后续对所有工况的模拟均采用第三种网格参数。

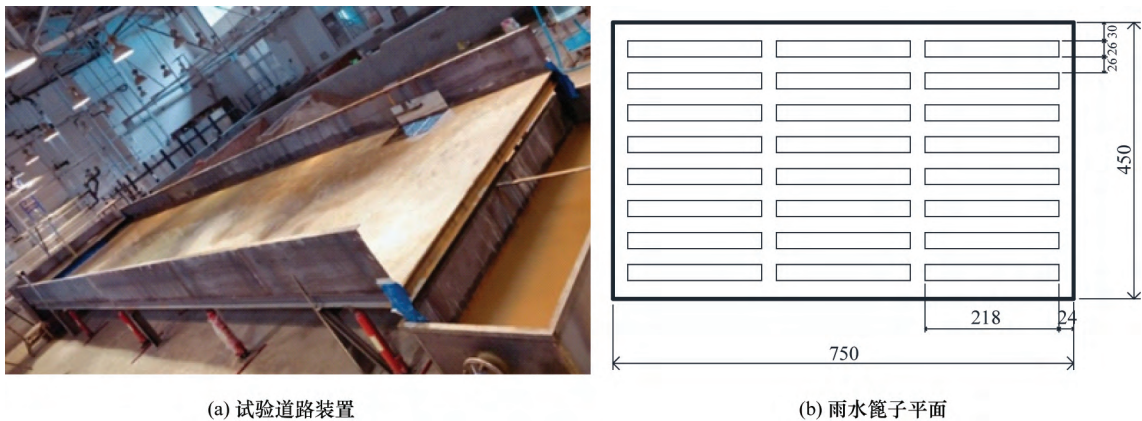


图 1 试验装置及雨水篦子平面(单位: mm)

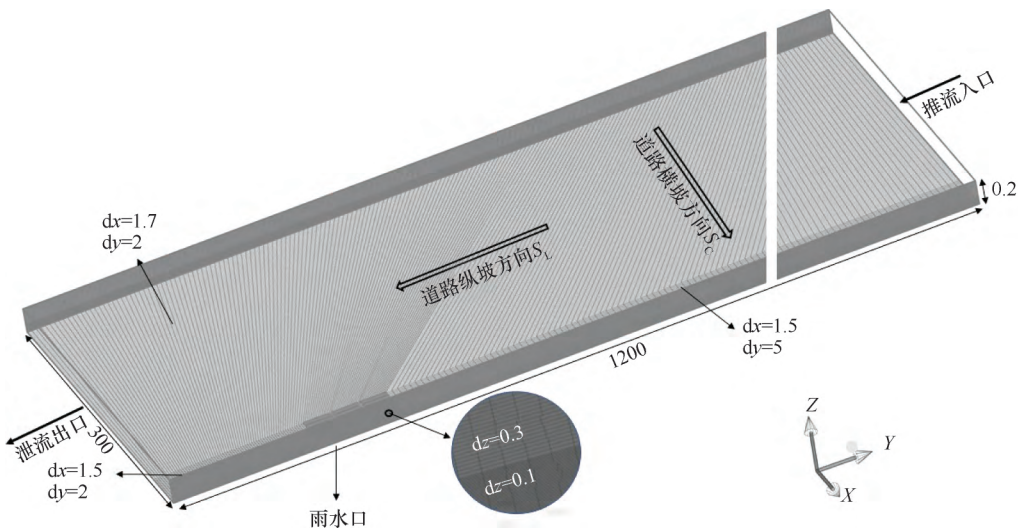


图 2 模型网格参数(单位: cm)

表 1 不同网格参数下质量丢失误差

网格尺寸高度/cm	网格数量	60 m ³ /h	70 m ³ /h
		工况误差/%	工况误差/%
0.5	868 630	13.0	11.0
0.2	4 793 620	7.8	6.9
上层 0.3, 下层 0.1	6 860 992	0.6	0.2

此外,还开展了不同湍流模型及不同时间步长下的验证分析,结果表明,采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型,时间步长为 0.1 s 时,收效效果最好。

2.3 边界及初始参数设置

模型上表面作为和空气接触的入口,类型设定为 Opening,空气的体积分数为 1,模型上游最前端断面作为水流入口,入口边界采用质量流量以对应试验工况,雨水口以及下游泄水口设置为自由出流,相对压力设置为 0,初始条件设置为水充满整个流域^[7]。模型的边壁采用无滑移边壁,粗糙度采用默认设值。计算精度设置为 High resolution,求解器离散格式采用 First order upwind,残差设置为 1E-04,模拟类型设置为瞬态分析,总时间设置为 60 s,时间步长为 0.1 s,湍流模型设置为 $k-\varepsilon$ 湍流模型,其他设值均为系统默认设定参数。

3 模拟结果分析

3.1 流线分析

工况 1 ($S_L = 1\%$, $S_C = 1.5\%$, $Q = 30 \text{ m}^3/\text{h}$) 计算稳定之后的流线如图 3 所示。在道路坡度以及重力作用下,流线发生偏转,水流逐渐向雨水篦子侧收缩,雨水口上游及侧边水流流过雨水口时被雨水口截流。模拟结果显示,在距离上游入口断面 7 m 位置处,水流收缩至水面宽度最小后又略有扩张的趋势。对于其他几种模拟工况,流线具有类似形态规律,但是随着横坡的增大,水流更快的形成收缩。而随着纵坡的增大,导致水流流速更大,但纵坡对水面宽度的变化影

响较小。

流量 $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,在三种不同的坡度下雨口水口附近的水流流线如图 4 所示。当纵坡较小($S_L = 1\%$)时,在雨水口下游会形成再循环区,部分水流从侧边进入雨水篦子[见图 4(a)]。水流直接向下游传递而不出现再循环区[见图 4(b)和图 4(c)]。在实际试验过程中也发现类似现象,研究所用的湍流模型对实际复杂流动具有很好的模拟能力^[4]。

3.2 断面平均流速分析

断面平均流速可以反映水流受到横坡和纵坡的影响后沿水流方向流态的变化情况。由连续性方程可知,断面平均流速和水深相互影响,从而影响雨水口的截流效率。相同坡度不同流量下的沿程断面平均流速如图 5(a)所示,同一流量不同坡度下的断面沿程平均流速如图 5(b)所示。相同坡度下,流量越大,其断面平均流速也越大。而相同流量下,纵坡以及横坡的增加都会导致流速的增加。

3.3 水深对比分析

3.3.1 篦前水深对比分析

不同工况下的雨水口篦前水深的试验和模拟结果对比如图 6 所示。当流量较小时($30 \text{ m}^3/\text{h}$),由于试验水深较小(14.11 mm),两者水深的绝对误差为 2.41 mm,相对误差为 17.1%。当流量为 $70 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,试验测量的篦前水深为 23.66 mm,两者的绝对误差为 2.15 mm,相对误差为 9.1%,可见,大流量工况下,篦前水深模拟结果的相对误差较小,对误差包容性较好。多种工况下数值模拟和试验的篦前水深对比显示,水深绝对误差均在 3 mm 以内,相对误差均在 20% 以内,模拟结果和试验结果有较好的一致性。

3.3.2 篦前水深与雨水口截流量分析

偏沟式雨水口分为前缘和侧向两部分进水,其中前缘进水量占雨水口截流量的主要部分^[10]。对比试验与模拟结果发现,篦前水深对雨水口截流量影响

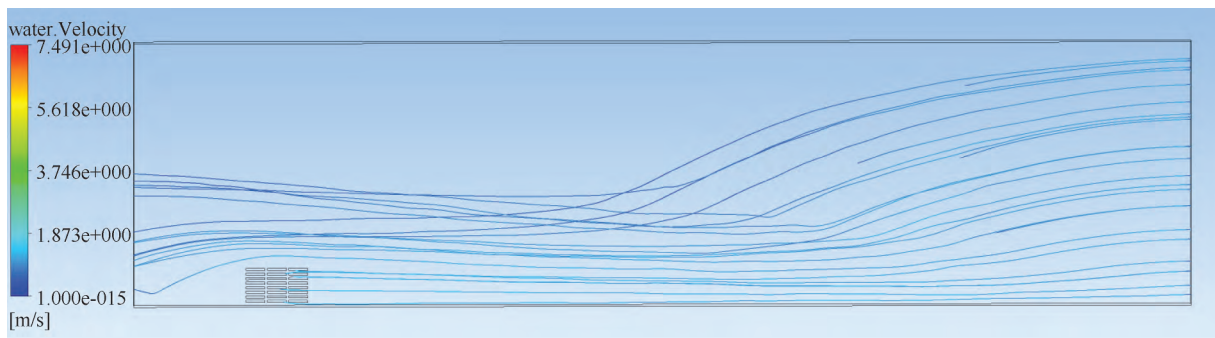
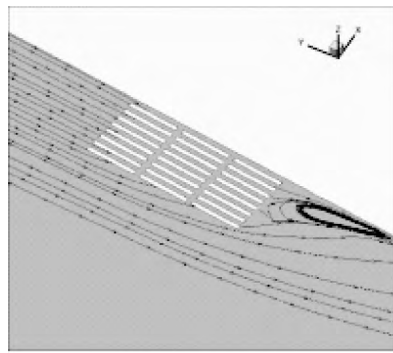
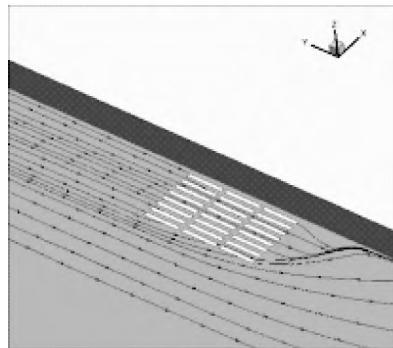


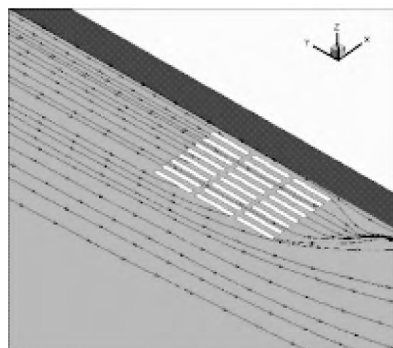
图 3 工况 1 流线



(a) $S_L=1\%$, $S_C=1.5\%$

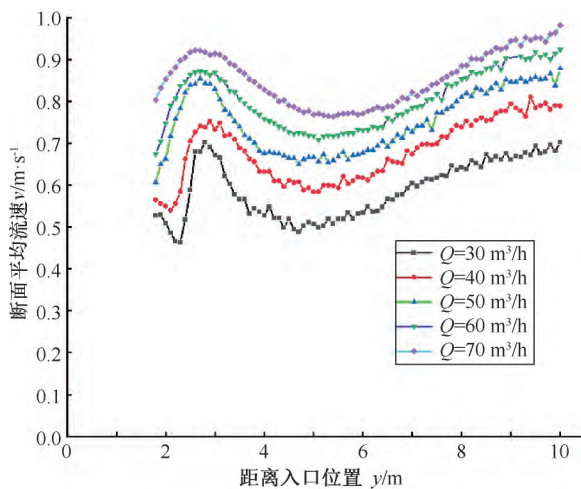


(b) $S_L=2\%$, $S_C=1.5\%$

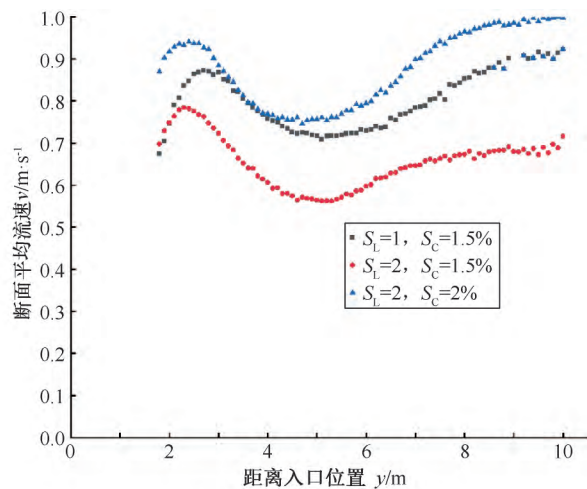


(c) $S_L=2\%$, $S_C=2\%$

图 4 不同坡度下雨水口局部流线



(a) 不同流量下断面平均流速对比 ($S_L=2\%$, $S_C=1.5\%$)



(b) 不同坡度下断面平均流速对比($Q=60\text{ m}^3/\text{h}$)

图 5 断面平均流速变化

很大, 两者呈明显的正相关关系, 但横坡与纵坡对截流量的影响存在显著差异, 各工况截流量与水深关系的模拟结果如图 7(a) 所示。因横坡主要影响水流的收缩情况, 因此, 横坡越大, 侧向进水量增大, 雨水口的截流量增大; 而纵坡主要影响水流的流速, 流速越大往往造成越篦流量越大, 前缘进水量越小。因此, 研究工况下, 截流量和横坡成正比, 与纵坡成反比, 如图 7(b) 所示。

3.4 截流效率对比分析

模拟的各个工况截流效率和试验结果对比如图 8 所示。模拟与试验结果表明: 截流效率随着流量的增大而减小, 随着横坡的增大而增大, 纵坡对截流效率影响相对较小, 如图 8(a) 所示; 所有工况的截流率误差均在 10% 以内, 如图 8(b) 所示。流量越大, 网格精度等引起的误差越小, 模拟结果与试验结果误差越小。

4 结 论

(1) 本文通过对 15 种试验工况进行数值模拟, 研究了不同坡度及流量对雨水口截流效果的影响。构建的 3D CFD 模型可以很好表征道路径流的水力特性及雨水口周围水流流态。由于试验水流水深较浅, 对雨水口附近区域采用网格加密, 可以更好的模拟整个流动的水力特性且具有良好的适应性。

(2) 模拟结果表明, 篦前水深是影响雨水口截流量和截流率的主要因素, 但道路横坡也是影响水深的重要参数。流量越大, 篦前水深越大, 雨水口截流量越大; 而截流效率随着流量的增加而减小, 随着横坡的增大而增加, 但受纵坡影响较小。所有研究工况下, 最大截流率为 85%, 均未达到 100%。

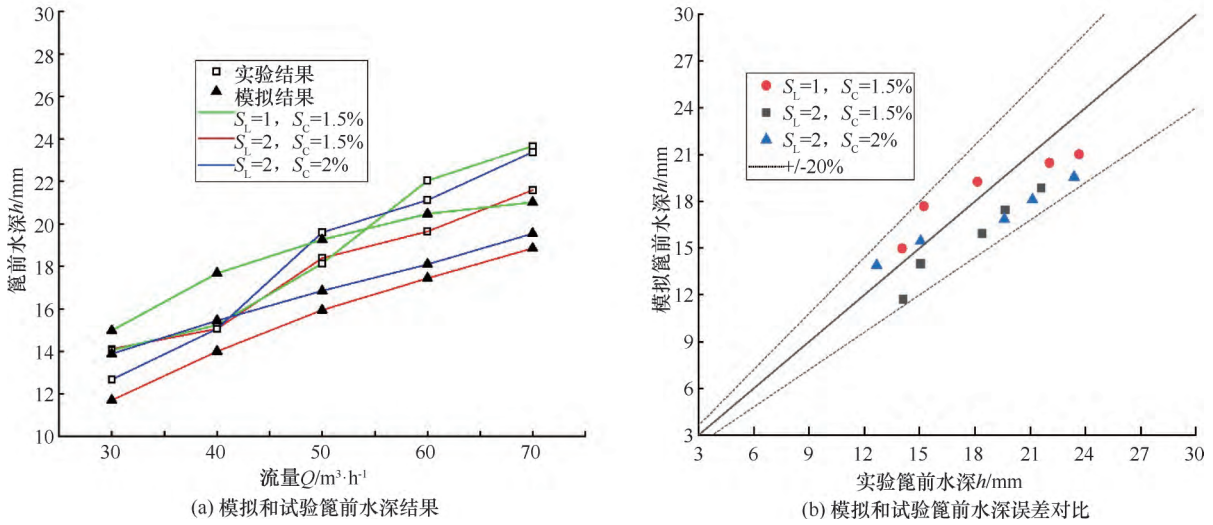


图6 模拟与试验篦前水深对比

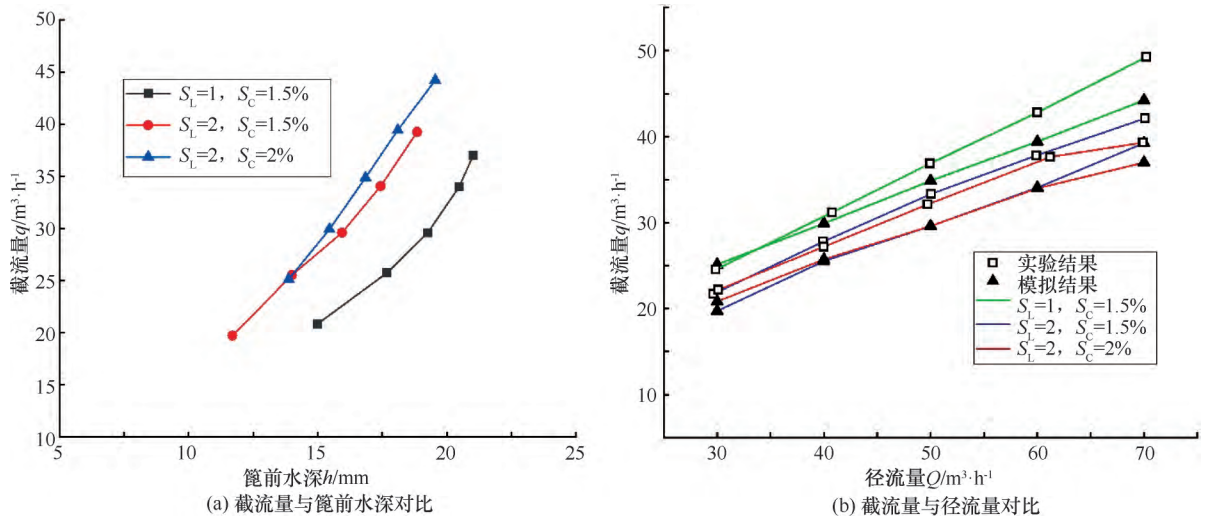


图7 雨水口截流量对比

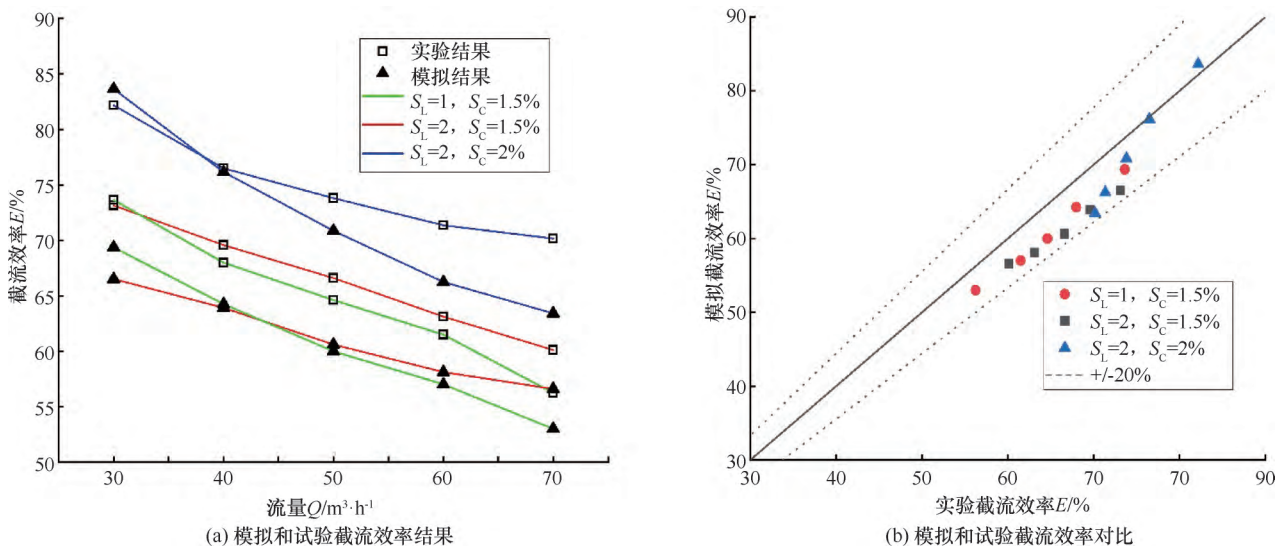


图8 模拟和试验截流效率对比

(3) 数值模拟结果和试验结果显示出很好的一致性, 所有工况的模拟截流率与实测截流率误差均在10%以内。因此, 该模型未来可用于模拟分析无法直接开展试验研究的工况, 数值模拟结果将对指导雨水口优化设计具有重要作用。

参考文献:

- [1] DJORDJEVIC S, PRODANOVIC D, MAKSIMOVIC C. An approach to simulation of dual drainage [J]. *Water Science & Technology*, 1999, 39(9): 95-103.
- [2] SCHMITT T G, THOMAS M, ETTRICH N. Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 299(3): 300-311.
- [3] RUSSO B, GOMEZ M, TELLEZ J. Methodology to estimate the hydraulic efficiency of nontested continuous transverse grates [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2013, 139(10): 864-871.
- [4] DJORDJEVIC S, SAUL A J, TABOR G R, et al. Experimental and numerical investigation of interactions between above and below ground drainage systems [J]. *Water Science & Technology*, 2013, 67(3): 535-542.
- [5] KEMPER S, SCHLENKHOFF A. Capacity of street inlets with partially severed grate openings [C]. 6th International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures, Wuppertal: Germany, 2016.
- [6] LOPES P, LEANDRO J, CARVALHO R F, et al. Assessment of the ability of a volume of fluid model to reproduce the efficiency of a continuous transverse gully with grate [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2016, 142(10): 04016039.
- [7] GOMEZ M, RECASENS J, RUSSO B, et al. Assessment of inlet efficiency through a 3D simulation: numerical and experimental comparison [J]. *Water Science & Technology*, 2016, 74(8): 1926-1935.
- [8] RUBINATO M, LEE S, MARTINS R, et al. Surface to sewer flow exchange through circular inlets during urban flood conditions [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2018, 20(3): 564-576.
- [9] CARVALHO R F, LOPES P, LEANDRO J, et al. Numerical research of flows into gullies with different outlet locations [J]. *Water*, 2019, 11(4): 794.
- [10] 李杨杨, 郭赟, 邓佑锋, 等. 城市雨水管网排水能力模型评估分析方法探究——以深圳市龙华区为例[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(10): 84-90.
- [11] 李品良, 覃光华, 曹冷然, 等. 基于 MIKE URBAN 的城市内涝模型应用[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(12): 11-16.
- [12] 安智敏, 岑国平, 吴章春. 雨水口泄水量的实验研究[J]. *中国给水排水*, 1995, 11(1): 21-23.
- [13] LI XN, FANG X, CHEN G, et al. Evaluating curb inlet efficiency for urban drainage and road bioretention facilities [J]. *Water*, 2019, 11(4): 851.
- [14] 朱呈浩, 夏军强, 周美蓉, 等. 雨水口泄流计算对城市洪涝模拟结果影响研究[J]. *水力发电学报*, 2019, 38(8): 75-86.
- [15] 郭磊, 刘森彦, 刘雷斌, 等. 城市道路雨水口设置研究[J]. *给水排水*, 2017, 53(5): 44-47.
- [16] 刘雷斌, 黄鸥, 郭磊, 等. 城市道路雨水口收水量研究[J]. *给水排水*, 2016, 52(S1): 12-16.
- [17] 赵江, 张林洪, 吴陪关, 等. 公路雨水口篦子泄水量试验研究[J]. *城市道路与防洪*, 2004, 7(4): 67-70.
- [18] 胡维芬. 城市道路排水设施水力特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [19] 陈国芬, 郭帅, 段园煜. 海绵城市道路雨水口截流率研究[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(11): 135-138.

(责任编辑 王璐)