

## 城市道路横截沟泄流效率试验研究

陈岚, 郭帅, 马文滢, 徐灵华, 陈国芬, 吴众华

### Experimental study on the hydraulic efficiency of continuous transverse grates

CHEN Lan, GUO Shuai, MA Wenyong, XU Linghua, CHEN Guofen, WU Zhonghua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20201201003>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于降雨情景模拟的城市社区尺度暴雨内涝研究

Study on rainstorm waterlogging on urban community scale based on rainstorm scenario simulation  
水利水运工程学报. 2021(1): 26 <https://doi.org/10.12170/20200914001>

#### 石家庄市暴雨内涝精细化水动力模型应用

Application and research of fine model for Shijiazhuang rainstorm waterlogging  
水利水运工程学报. 2017(3): 41 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.03.006>

#### 城市洪涝灾情评估与风险管理初探

Urban flood disaster assessment and risk management  
水利水运工程学报. 2019(6): 139 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.016>

#### 城市水-能源-粮食耦合协调发展研究

Research on the coupling coordinative degree in urban water-energy-food system  
水利水运工程学报. 2021(1): 9 <https://doi.org/10.12170/20200217001>

#### 城镇化背景下我国城市洪涝灾害演变特征

Study on evolvement law of urban flood disasters in China under urbanization  
水利水运工程学报. 2018(2): 10 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.02.002>

#### 水资源利用效率频谱分析方法及应用

Spectrum analysis method for assessing water use efficiency  
水利水运工程学报. 2019(6): 132 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.015>



扫码进入官网, 阅读更多精彩内容



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20201201003

陈岚, 郭帅, 马文滢, 等. 城市道路横截沟泄流效率试验研究 [J]. 水利水运工程学报, 2021(5): 92-100. (CHEN Lan, GUO Shuai, MA Wenyong, et al. Experimental study on the hydraulic efficiency of continuous transverse grates[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(5): 92-100. (in Chinese))

# 城市道路横截沟泄流效率试验研究

陈 岚<sup>1</sup>, 郭 帅<sup>1</sup>, 马文滢<sup>2</sup>, 徐灵华<sup>2</sup>, 陈国芬<sup>2</sup>, 吴众华<sup>3</sup>

(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. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 横截沟常设置于停车场入口、城市下穿隧道、机场停机坪等无适宜横坡或纵坡坡度过大的场所对道路径流进行截流, 其泄流效率决定了降雨期间地下管网系统的泄流量, 提高横截沟泄流效率对预防城市内涝的发生具有重要意义。利用长 12 m、宽 3 m、高 0.5 m 的试验平台, 研究了在不同入流径流量和纵坡坡度组合下 8 种横截沟雨水篦子对径流的截流情况, 重点分析了上游水流水力参数及横截沟雨水篦子几何参数对泄流效率的影响。试验结果表明: 不同篦子泄流效率与径流弗劳德数间的关系不一致; 增大篦子开孔长度对提高泄流效率比增大开孔面积更有效; 在篦子面积、开孔率、开孔面积相同时, 开孔交错分布的圆形开孔篦子比开孔对称分布的矩形开孔篦子更有利于泄流。在曼宁公式及孔口出流公式的基础上提出了计算试验篦子泄流效率的经验公式, 预测值与试验值之间的相对误差小于 15%。

**关键词:** 城市道路; 横截沟; 泄流效率; 路面径流; 城市内涝

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2021)05-0092-09

受全球气候变化及城市化进程加快的影响, 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<sup>[1]</sup>。雨水口作为市政排水系统的关键组成部分, 是地面径流进入市政排水系统的入口, 是连接地上径流和地下排水管道的枢纽, 其泄流效率直接影响路面积水程度<sup>[2-3]</sup>。然而, 在广场、停车场入口、城市下穿隧道、机场停机坪等无适宜横坡或纵坡坡度过大的场所, 雨水径流往往无法被导向设置于道路一侧的传统雨水口, 导致其泄流效率及泄流量无法满足安全要求<sup>[4]</sup>。这时, 通常在道路横断面上设置横截沟, 对雨水径流进行拦截并泄除<sup>[5-6]</sup>。

针对不同影响因素下横截沟的泄流效率问题, 国外学者开展了大量的研究。Gómez 等<sup>[7]</sup>以具有不同几何特征的横截沟雨水篦子为研究对象, 在不同的道路坡度及流量组合下进行模型试验, 分析以上因素对横截沟泄流效率的影响, 并基于试验数据总结出泄流效率与水流弗劳德数之间的线性关系, 但此关系式中含有两项与篦子几何特征相关的未知参数。Russo 等<sup>[8]</sup>进一步探讨泄流效率与篦子几何特征之间的关系, 在 Gómez 等<sup>[7]</sup>研究的基础上, 提出了不经试验就可直接计算横截沟雨水篦子泄流效率的公式。Tigrek 等<sup>[9]</sup>通过模型试验提出了泄流效率与径流流量、道路纵坡坡度及水流弗劳德数之间的关系式, 但由于研究只涉及一种篦子, 该公式具有很大的局限性。Ünver<sup>[10]</sup>关注篦子几何特性对泄流效率的影响, 研究了开孔率、开孔型式及连续设置的横截沟间距的影响。Sezenöz<sup>[11]</sup>通过建立横截沟的数值模型发现, 横截沟泄流效率与径

收稿日期: 2020-12-01

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(1908085QE211)

作者简介: 陈 岚(1995—), 女, 广西桂林人, 硕士研究生, 主要从事城市水力学、给排水管网优化设计与数值模拟等研究。E-mail: 616395697@qq.com 通信作者: 马文滢(E-mail: 32144046@qq.com)

流量之间的关系呈钟形曲线, 因此, 应分阶段研究泄流效率与径流之间的关系。然而, 该研究只涉及一种雨水篦子及纵坡坡度, 其结论可能不适用于其他试验条件。Lopes 等<sup>[12]</sup>以原型试验装置为基础建立横截沟的数值模型, 分析不同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, 研究在较大径流量条件下, 泄流效率与径流弗劳德数之间的关系, 得出与 Gómez 等<sup>[7]</sup>相同的结论。

李曦淳等<sup>[13]</sup>以天津市滨海新区海河隧道排水系统设计为背景, 通过建立整体缩尺模型和断面模型进行水力特性试验, 利用流体计算软件对横截沟的泄水情况进行模拟, 确定满足排水要求的横截沟设置间距。蒋丽君<sup>[14]</sup>在分析中环浦西段地道排水情况时指出, 地道坡度较大会使雨水越过横截沟, 引起地道路面积水, 而路面坡度较小, 会造成雨水水流不畅, 难以快速进入横截沟被排除, 易发生路面积水。曹美娟等<sup>[15]</sup>通过分析横截沟在地道中的应用指出, 将横截沟与地道低点设置的联篦收水井组合使用, 可快速排除强降雨过程中的地面径流, 保证交通及地下场站安全。可见, 国内研究大多基于工程实例对横截沟排水效果进行定性评估或进行布置位置优化, 而较少关注道路坡度、径流量及篦子几何特征对其泄水效果的影响, 关于我国实际工程中常使用的横截沟雨水篦子的泄流能力仍未有具体研究及相关参考规范说明, 这使得国内横截沟雨水篦子在设计、选用时存在一定的困难。

本文以国内实际工程中常使用的 8 种横截沟雨水篦子为研究对象, 通过搭建 1:1 模型试验平台, 测量计算雨篦子在不同坡度及径流量组合下的泄流效率, 并分析上游径流水力参数及篦子几何参数对泄流效率的影响, 提出泄流效率计算式, 为横截沟雨水篦子的设计及选用提供参考依据。

## 1 模型试验

### 1.1 试验平台

试验采用搭建于合肥工业大学水工模型试验大厅的原型道路试验平台, 如图 1 所示。试验平台包括进水管、引水箱、模拟道路、横截沟雨水篦子支架、排水箱、坡度调节装置、排水管道、电动阀门、电磁流量计等, 其中, 模拟道路根据单向单车道 1:1 的比例设计, 长 12 m、宽 3 m, 侧边高 0.5 m, 道路表面铺设一层厚 10 mm 的水泥砂浆。装置底部的千斤顶起支撑及坡度调节作用, 纵坡  $S_L$  调节范围为 0~5%。试验装置用水由水泵抽水至屋顶水箱, 再由水箱通过进水管供水到装置前端引水箱, 并由电动阀门和电磁流量计调节和测量入流径流量。水流首先进入装置前端的引水箱, 再由连接在引水箱上的水平导流板均匀导流进入模拟道路, 以保证水流均匀平缓。横截沟雨水篦子安装在模拟道路末端并沿横向铺满道路横断面, 路面径流沿模拟道路流向横截沟雨水篦子被部分截流, 未被截流的部分沿不透水幕布流入排水箱中, 并由排水管上的电磁流量计测量出流流量。横截沟雨水篦子泄流效率  $E$  由式(1)定义。

$$E = \frac{Q_{\text{int}}}{Q} = \frac{Q - Q_b}{Q} \quad (1)$$

式中:  $E$  为泄流效率;  $Q$  为入流径流量;  $Q_{\text{int}}$  为泄流量;  $Q_b$  为未被泄流的径流量。试验过程中所有水流最终均流入地下水库, 通过水泵实现用水循环。试验横截沟雨水篦子如图 2 所示, 其几何参数如表 1 所示。

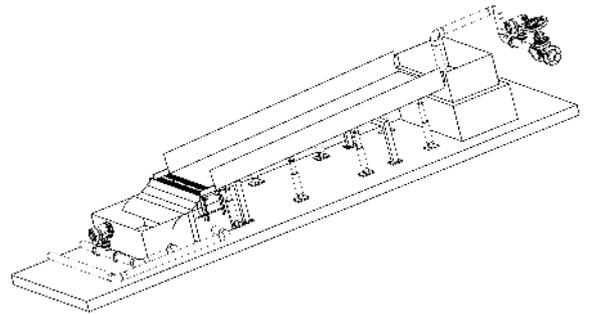


图 1 试验平台

Fig. 1 Test platform

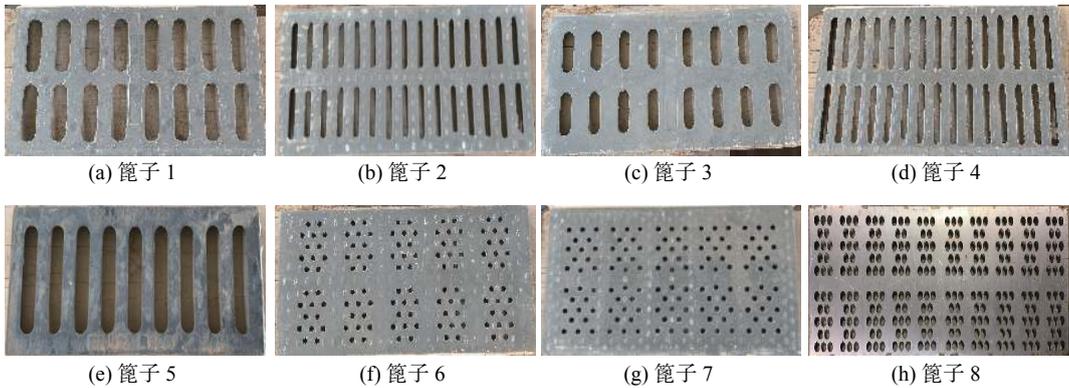


图 2 试验横截沟雨水篦子

Fig. 2 Grates used to form continuous transverse grates during experiments

表 1 横截沟雨水篦子几何参数、实测泄流效率范围及  $C_0$  与  $Q$  关系式

Tab. 1 Geometric parameters, efficiency ranges and formulation of  $C_0$  for the tested continuous transverse grates

编号	宽度/cm	长度/cm	开孔长度/cm	开孔形状	总面积/cm <sup>2</sup>	开孔面积/cm <sup>2</sup>	开孔率/%	效率范围/%	$C_0$ 与 $Q$ 关系式
篦子1	300	25	14.8	矩形	7 500	1 648	22.0	82~87	$C_0=7.575Q+0.049$
篦子2	300	25	18.0	矩形	7 500	1 944	25.9	93~95	$C_0=7.131Q+0.047$
篦子3	300	30	21.6	矩形	9 000	3 009	33.4	90~97	$C_0=5.794Q+0.009$
篦子4	300	30	23.6	矩形	9 000	2 795	31.1	93~100	$C_0=5.058Q+0.033$
篦子5	300	20	14.4	矩形	6 000	2 124	35.4	74~89	$C_0=6.486Q+0.028$
篦子6	300	25		圆形	7 500	565	7.5	63~97	$\sigma=0.147\ln Q+1.051$
篦子7	300	30		圆形	9 000	612	6.8	65~99	$C_0=0.162\ln Q+1.121$
篦子8	300	25		圆形	7 500	1 648	22.0	86~94	$C_0=0.093\ln Q+0.573$

1.2 试验内容

本试验通过测量雨篦子在不同纵坡坡度及入流径流量组合下的泄流效率,探究径流水力参数及篦子几何参数对泄流效率的影响。试验中模拟道路纵坡坡度  $S_L$  的取值参考《城市道路工程设计规范》(CJJ 37—2012)中关于车道、公共停车场、城市广场路面纵坡的规定<sup>[16]</sup>,取 1.0%、1.5%、2.0%、3.0%、4.0%;为评估横截沟雨水篦子整体泄流效率且考虑到机场停机坪、停车场入口等场所常常不设置横向坡度,试验中模拟道路不设置横坡坡度。试验径流量取值根据合肥市降雨情况,采用式(2)计算。

$$q = \frac{4\ 850(1 + 0.846 \lg P)}{(t + 19.1)^{0.896}} \tag{2}$$

式中: $q$  为设计暴雨强度(L/(s·hm<sup>2</sup>)); $P$  为设计重现期(a); $t$  为降雨历时(min)。

《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)中建议雨水口间距为 25~50 m<sup>[17]</sup>,表 2 为汇水面积为 150 m<sup>2</sup> (宽 3 m,长 50 m)时不同重现期和不同降雨历时下的径流量。考虑到设置横截沟的场所汇水面积通常较大且对雨水拦截要求较高,试验中径流量范围设置为 10~80 m<sup>3</sup>/h。本研究共进行 320 组试验,涉及 8 种工程常用篦子,入流径流流态包含急流、缓流。篦子编号为 1~8,纵坡坡度  $S_L$  为 1%~4%,入流径流量  $Q$  为 10~80 m<sup>3</sup>/h,篦子前侧径流深度  $h$  为 5.40~15.50 mm,径流弗劳德数  $Fr$  为 0.47~1.90。

表 2 不同重现期和不同降雨历时下的径流量

Tab. 2 Values of runoff rate under different recurrence periods and rainfall durations

单位: m<sup>3</sup>/h

降雨历时/ min	不同重现期下的径流量								
	1 a	2 a	3 a	5 a	10 a	20 a	30 a	50 a	100 a
5	13.61	17.10	19.12	21.67	25.13	28.62	30.64	33.19	36.65
10	11.48	14.44	16.13	18.29	21.24	24.16	25.88	28.04	30.96
15	9.97	12.53	14.00	15.88	18.43	20.95	22.46	24.34	26.86

## 2 横截沟泄流效率影响因素分析

### 2.1 径流水力参数对泄流效率的影响

由试验测量结果可知,随着入流径流量的增加,雨水篦子前侧径流深度及流速增大;随着纵坡坡度的增加,雨水篦子前侧径流深度减小、流速增大。这一现象与曼宁公式及连续性方程一致。Kemper 等<sup>[18]</sup>指出,在急流条件下,篦子前侧径流深度及流速是影响雨水口泄流效率的主要水力参数。Gómez 等<sup>[7]</sup>进一步提出,横截沟泄流效率仅取决于径流的弗劳德数和篦子的几何参数(长度、面积、开孔形状等)。

试验得到篦子泄流效率与径流弗劳德数之间的关系如图 3 所示。可见,在研究范围内,各篦子泄流效率与径流弗劳德数间的关系不一致。随着径流弗劳德数增大,对于开孔为矩形的篦子,篦子 1~4 的泄流效率保持稳定(泄流效率变化值  $\Delta E=2\% \sim 7\%$ ),而篦子 5 的泄流效率则增大( $\Delta E=25\%$ );对于开孔为圆形的篦子,篦子 6~7 的泄流效率降低( $\Delta E=34\%$ ),而篦子 8 的泄流效率则保持稳定( $\Delta E=8\%$ )。由图 3 还可发现,篦子 1~5,泄流效率与径流弗劳德数之间的关系符合 Gómez 等<sup>[7]</sup>提出的线性关系,而篦子 6~8 则不符合。

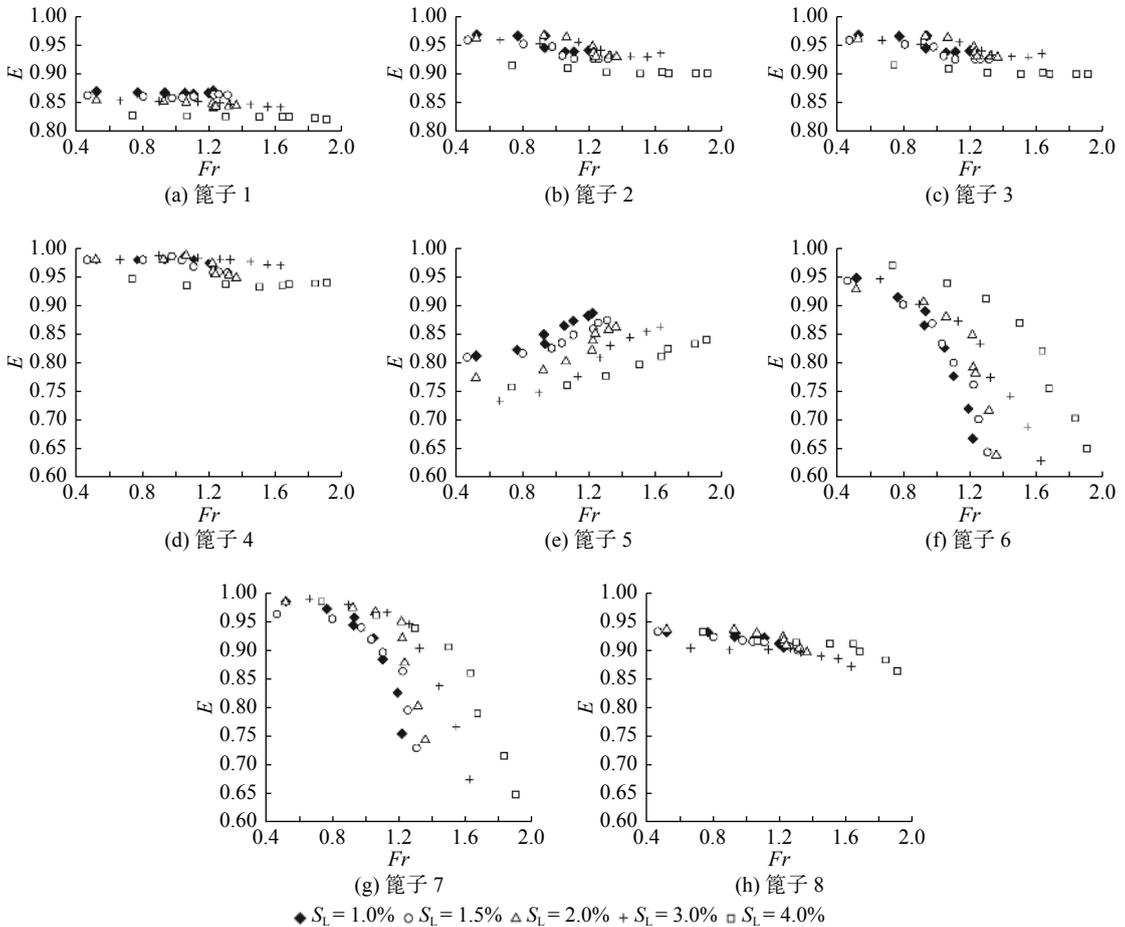


图 3 篦子 1~8 泄流效率与径流弗劳德数的关系

Fig. 3 Hydraulic efficiency  $E$  of Grates 1-8 with respect to Froude number  $Fr$

### 2.2 横截沟雨水篦子几何参数对泄流效率的影响

本试验探究了包括篦子总面积、篦子开孔长度、开孔面积、开孔率及开孔形状在内的篦子几何参数对

泄流效率的影响。横截沟雨水篦子 1~8 几何参数及实测泄流效率范围如表 1 所示。由表 1 可看出,当开孔形状为矩形时,篦子 1~4 泄流效率较高且在试验范围内保持稳定( $\Delta E=2\% \sim 7\%$ );而篦子 5 泄流效率较低且波动范围较大( $\Delta E=25\%$ )。其中,篦子 5 的总面积最小,在研究范围内其泄流效率小于篦子 2~4;但由于篦子 5 开孔率及开孔面积均大于篦子 1,其泄流效率最大值(89%)略大于篦子 1 泄流效率最大值(87%)。由此可知,总面积较大且开孔面积较大的篦子通常具有较高的泄流效率。

不同纵坡下篦子 1~4 泄流效率随径流量的变化关系如图 4 所示。由图 4 可看出,篦子 2 泄流效率始终高于篦子 1,篦子 4 的泄流效率始终大于篦子 3。分析篦子的几何参数可知,篦子 1~2 总面积相同,但篦子 2 的开孔面积及开孔长度均大于篦子 1;篦子 3~4 的总面积相同,篦子 4 的开孔面积较小但开孔长度较大。由此可知,增大篦子开孔长度对提高泄流效率比增大开孔面积更有效。

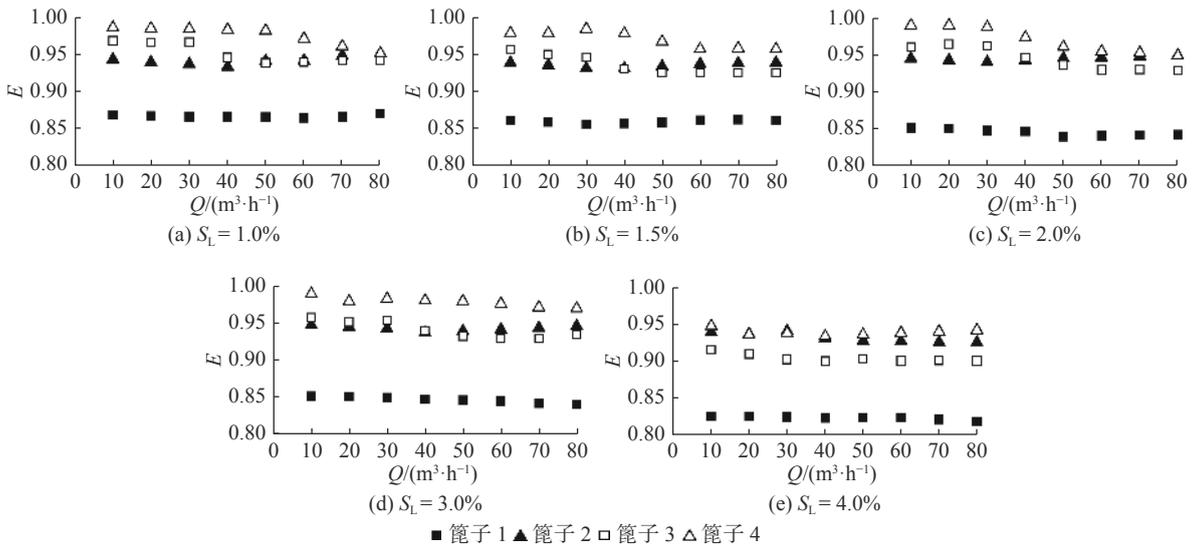


图 4 不同纵坡下篦子 1~4 泄流效率随径流量变化关系

Fig. 4 Hydraulic efficiency  $E$  of Grates 1-4 for different longitudinal slopes ( $S_L$ ) and approaching flow rates ( $Q$ )

不同纵坡下篦子 5~8 泄流效率随径流量的变化关系如图 5 所示。由图 5(a)可看出,篦子 5 的泄流效率随入流径流量的增大而增大,呈现出与其他试验篦子相反的趋势,这一现象与 Sipahi<sup>[19]</sup> 在试验中观察到的现象一致。如前文所述,在径流流量相同的条件下,篦子 5 泄流效率通常小于篦子 1~4。分析篦子 5 的几何参数可知,篦子 5 的开孔率虽然最大,但其长度、开孔长度及总面积均小于篦子 1~4。因此可推断,篦子长度、开孔长度是影响泄流效率与径流流量之间关系的关键因素。

对比图 5(a)与图 5(b)~(c)可知,当篦子开孔形状由矩形变为圆形时,篦子的泄流效率发生明显变化。当径流流量大于  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  且篦子总面积相同时,圆形开孔篦子 6~7 泄流效率总低于矩形开孔篦子 1~5。分析篦子几何参数可知,篦子 6~7 开孔率较小。试验中观察到,当径流量大于  $60 \text{ m}^3/\text{h}$  时,径流以孔口出流的方式通过篦子 6~7 被泄流。然而,对比图 4 与图 5(d)发现,当篦子面积、开孔率、开孔面积相同时,圆形开孔篦子 8 的泄流效率高于矩形开孔篦子 1 的泄流效率。对比两种篦子的开孔排列方式发现,篦子 8 的开孔为多排交错分布,未被前侧开孔泄流而沿栅条流向下流的径流可从交错设置的开孔排出;而篦子 1 的开孔为两排且呈对称分布,流向栅条的径流无法从开孔排出。由此可知,在篦子面积、开孔率、开孔面积相同时,开孔交错分布的圆形开孔篦子比开孔对称分布的矩形开孔篦子更有利于泄流。

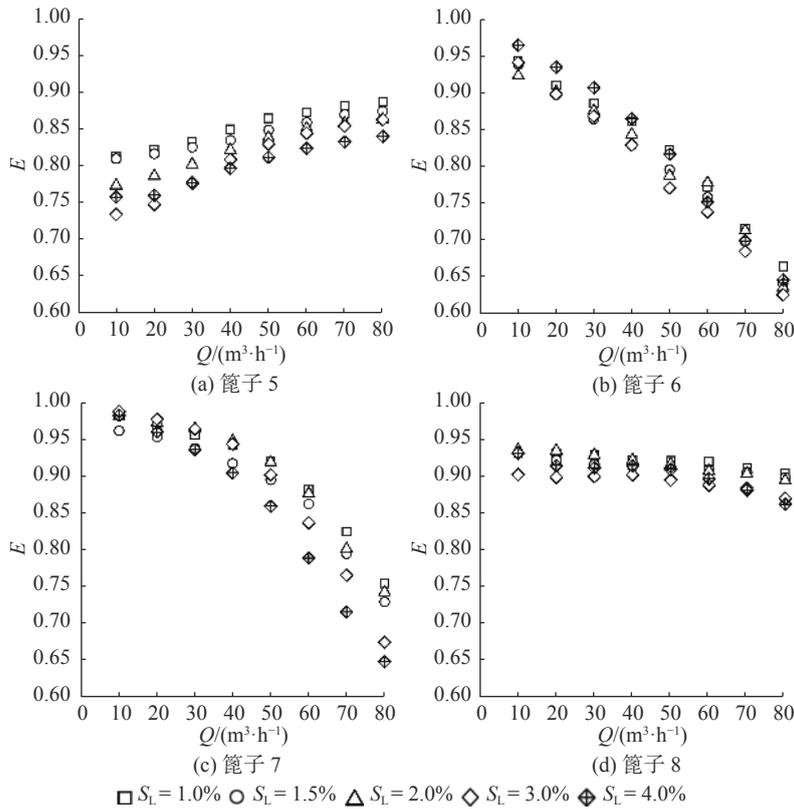


图 5 篦子 5~8 在不同纵坡坡度下泄流效率随入流量的变化关系

Fig. 5 Hydraulic efficiency  $E$  of Grates 5-8 for different longitudinal slopes ( $S_L$ ) and approaching flow ( $Q$ )

### 3 横截沟泄流效率计算式

Gómez 等<sup>[7]</sup> 提出了计算横截沟泄流效率的经验公式:

$$E = \alpha \times Fr \times \left(\frac{h}{L}\right)^{0.812} + \beta \quad (3)$$

式中:  $Fr$  为横截沟前侧径流弗劳德数;  $\alpha$ 、 $\beta$  为与篦子几何特征相关的参数;  $h$  为横截沟前侧径流深度 (cm);  $L$  为篦子沿水流方向的开孔长度 (cm)。Russo 等<sup>[8]</sup> 通过进一步研究推导出  $\alpha$ 、 $\beta$  的计算式:

$$\alpha = -1.924 \times \frac{L^{0.631}}{A^{0.279}} \times (n_d + 1)^{-0.089} \times (n_l + 1)^{-0.238} \times (n_t + 1)^{-0.045} \quad (4)$$

$$\beta = -26\,803 \times L^{-4.953} + 1.213 \quad (5)$$

式中:  $A$  为篦子开孔面积 ( $\text{cm}^2$ );  $n_d$ 、 $n_l$ 、 $n_t$  分别为篦子斜向、纵向及横向栅条数目。式(3)~(5)不适用于计算例如本研究中篦子 6~8 的圆形开孔篦子泄流效率。由式(3)~(5)计算的纵坡为 1.5% 时泄流效率预测值与试验值对比如图 6(a) 所示。由图 6(a) 可知, 式(3)~(5)计算的截流效率总是大于 100%。这是由于式(3)~(5)是在单位宽度径流流量较大 ( $6.7 \sim 66.7 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) 的试验条件下推导的, 不适用于计算单位宽度径流量较小 ( $0.93 \sim 7.41 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) 条件下篦子的泄流效率。

由于城市洪涝灾害发生时路面径流流速通常较大, 故可假设强降雨期间路面径流为急流状态并在被横截沟截流前达到均匀流状态。利用曼宁公式可推导出篦子前端水流深度的计算式:

$$h = \left( \frac{nQ}{WS_L^{0.5}} \right)^{0.6} \quad (6)$$

式中:  $n$  为路面粗糙系数;  $W$  为路面宽度(m);  $S_L$  为道路纵坡坡度。

路面径流通过横截沟雨水篦子的开孔泄流,符合孔口出流形式,故可用孔口出流方程计算雨水口泄流量<sup>[20]</sup>:

$$Q_{\text{int}} = C_0 A \sqrt{2gh} \quad (7)$$

式中:  $C_0$  为泄流系数;  $g$  为重力加速度( $\text{m/s}^2$ );  $h$  为横截沟前侧径流深度(m)。将式(6)代入式(7),可推导出泄流效率的计算式:

$$E = \frac{Q_{\text{int}}}{Q} = C_0 A \sqrt{2g} \left( \frac{n}{W} \right)^{0.3} Q^{-0.7} S_L^{-0.15} \quad (8)$$

将试验中测量的 8 种横截沟雨水篦子的泄流效率  $E$  值代入式(8),可发现  $C_0$  与径流量  $Q$  相关,其相关关系如表 1 所示。为与式(4)保持一致并便于使用,式(8)中  $A$  与式(4)中定义相同,均为篦子开孔面积。然而,试验现象表明只有在径流流量较大的情况下开孔面积  $A$  完全用于泄流,实际泄流孔口面积  $A_e$  通常小于篦子开孔面积  $A$ ,且在径流流量及坡度相同的条件下,不同篦子实际泄流孔口面积  $A_e$  不同。因此,式(8)中  $C_0$  反映了不同条件下实际泄流孔口面积  $A_e$  的变化情况。

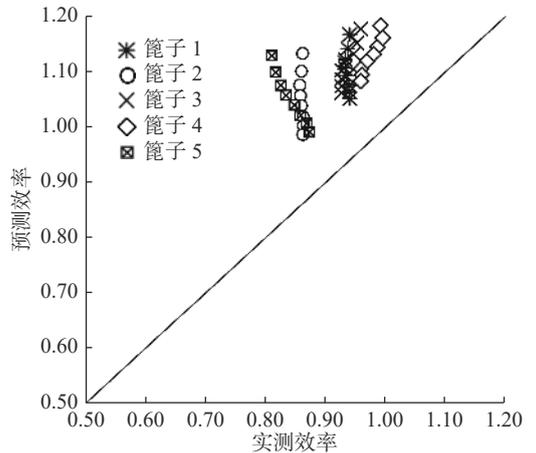
考虑到曼宁公式的使用条件,急流条件下纵坡坡度为 1.0%、2.0%、3.0%、4.0% 的试验数据用于推

导各篦子  $C_0$  与  $Q$  之间的关系式,纵坡坡度为 1.5% 的试验数据用于验证式(8)的适用性。试验测量效率与式(8)计算效率的对比如图 6(b)所示。由于用于推导各篦子  $C_0$  与  $Q$  之间关系式的试验数据大部分为大于 1.5% 坡度下的试验数据,故纵坡 1.5% 时式(8)预测的各篦子泄流效率高于实测值。由图 6 可看出式(8)计算效率与实测效率符合度较高,相对误差小于 15%。

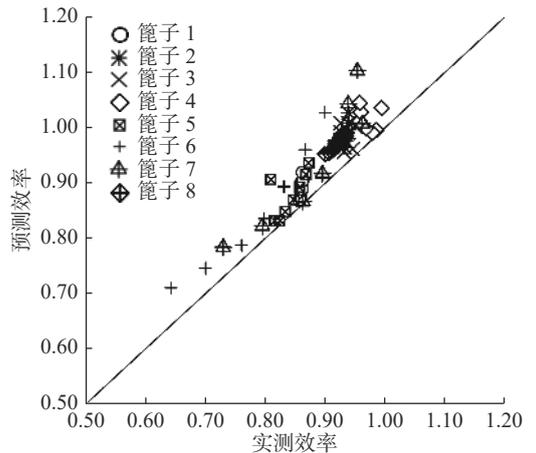
## 4 结 语

(1) 本文对包括 3 种圆形开孔篦子在内的 8 种横截沟雨水篦子泄流效率进行了试验研究,并分析了上游径流水力参数及横截沟雨水篦子几何参数对泄流效率的影响。试验结果表明:不同篦子泄流效率与径流弗劳德数间的关系不一致;总面积较大且开孔面积较大的篦子通常具有较高的泄流效率;增大篦子开孔长度对提高泄流效率比增大开孔面积更有效;在篦子面积、开孔率、开孔面积相同时,开孔交错分布的圆形开孔篦子比开孔对称分布的矩形开孔篦子更有利于泄流。

(2) 在曼宁公式及孔口出流公式的基础上提出了计算试验篦子泄流效率的经验公式,预测值与试验值之间的相对误差小于 15%,显示出了较好的一致性,可用于预测试验篦子的泄流效率。



(a) 式(3)~(5) 预测效率与实测效率对比



(b) 式(8) 预测效率与实测效率对比

图 6 预测泄流效率与实测泄流效率对比

Fig. 6 Comparison between experimental results and predicted results

## 参 考 文 献:

- [1] 苑希民, 秦旭东, 张晓鹏, 等. 石家庄市暴雨内涝精细化水力模型应用[J]. 水利水运工程学报, 2017(3): 41-50. (YUAN Ximin, QIN Xudong, ZHANG Xiaopeng, et al. Application and research of fine model for Shijiazhuang rainstorm waterlogging[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(3): 41-50. (in Chinese))
- [2] 陈倩, 夏军强, 董柏良. 城市洪涝中雨水口泄流能力的试验研究[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 10-17. (CHEN Qian, XIA Junqiang, DONG Boliang. Experimental study on discharge capacity of street inlet in urban flooding[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 10-17. (in Chinese))
- [3] 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. (CHEN Guofen, GUO Shuai, DUAN Yuanyu. Interception rate of road rainwater inlet in a sponge city[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(11): 135-138. (in Chinese))
- [4] GÓMEZ 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.
- [5] 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. (HU Weifen. Research on the hydraulic characteristics of drainage facilities of the urban road[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese))
- [6] 叶远春, 曲乐永, 何萌, 等. 新型道路雨水横截沟结构试验研究[J]. 城市道桥与防洪, 2014(5): 127-133, 149. (YE Yuanchun, QU Leyong, HE Meng, et al. Study on structural test of new road rainwater interception groove[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2014(5): 127-133, 149. (in Chinese))
- [7] GÓMEZ M, RUSSO B. Hydraulic efficiency of continuous transverse grates for paved areas[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2009, 135(2): 225-230.
- [8] RUSSO B, GÓMEZ 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.
- [9] TIĞREK Ş, SIPAHI S O. Rehabilitation of storm water collection systems of urban environment using the small roads as conveyance channels[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2012, 9(1): 95-103.
- [10] ÜNVER G D. Laboratory investigation of hydraulic efficiency of transverse grates in roads[D]. Ankara: Middle East Technical University, 2015.
- [11] SEZENÖZ B. Numerical modelling of continuous transverse grates for hydraulic efficiency[D]. Ankara: Middle East Technical University, 2014.
- [12] 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.
- [13] 李曦淳, 李鹏, 李东, 等. 滨海新区海河隧道排水系统设计[J]. 中国给水排水, 2010, 26(18): 39-41. (LI Xichun, LI Peng, LI Dong, et al. Design of Haihe river tunnel drainage system in Binhai new district of Tianjin[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(18): 39-41. (in Chinese))
- [14] 蒋丽君. 上海中环(浦西段)地道排水问题及改造[J]. 给水排水, 2011, 37(增刊1): 430-433. (JIANG Lijun. The drainage problem and reconstruction of the tunnel in Shanghai Middle Ring (Puxi Section)[J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(Suppl1): 430-433. (in Chinese))
- [15] 曹美娟, 许平. 横截沟在子牙河南路下穿西站北广场地道中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2014(6): 41-43, 47. (CAO Meijuan, XU Ping. Application of transverse ditch in Ziyaha Road(s) subway across north square of Tianjin west station[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2014(6): 41-43, 47. (in Chinese))
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市道路工程设计规范: CJJ 37—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 17-18. (Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of urban road engineering: CJJ 37—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 17-18. (in Chinese))
- [17] 中华人民共和国建设部. 室外排水设计规范: GB 50014—2006[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012: 34-35. (Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of outdoor wastewater engineering: GB 50014—2006[S]. Beijing: China Planning Press, 2012: 34-35. (in Chinese))
- [18] KEMPER S, SCHLENKHOFF A. Numerical simulation of intake structures like street inlets with supercritical flow

conditions[C]//Proceedings of the 7th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures. Aachen, Germany: ISHS, 2018.

[19] SIPAHI S Ö. Calibration of a grate on a sloping channel[D]. Ankara: Middle East Technical University, 2006.

[20] MUSTAFFA Z, RAJARATNAM N, ZHU D Z. An experimental study of flow into orifices and grating inlets on streets[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2006, 33(7): 837-845.

## Experimental study on the hydraulic efficiency of continuous transverse grates

CHEN Lan<sup>1</sup>, GUO Shuai<sup>1</sup>, MA Wenyong<sup>2</sup>, XU Linghua<sup>2</sup>, CHEN Guofen<sup>2</sup>, WU Zhonghua<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Power-China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** Continuous transverse grates are commonly used in some urban or impervious areas to collect the runoff (the entrance of parking lots, under-crossing tunnels, and airport aprons), where it is hard to place conventional inlets due to lack of suitable transverse slopes or steep longitudinal slopes. Hydraulic efficiency of continuous transverse grates determines the flow rate into the underground sewer system during rainfall and is of great significance to preventing the occurrence of urban waterlogging. Eight types of continuous transverse grates commonly used in China were experimentally tested in this study with different approach flows ( $Q=10\sim 80\text{ m}^3/\text{h}$ ) and a set of longitudinal slopes ( $S_L=1\%\sim 4\%$ ). A full-scale physical model simulating a 12 m long, 3 m wide road was constructed in the hydraulic lab in Hefei University of Technology for the hydraulic tests. Hydraulic efficiencies of these grates under different conditions were calculated during the tests, and their influencing factors were analyzed, including hydraulic parameters of the approaching flow (Froude number) and the geometric parameters of the grates (total area, length of the opening in flow direction, opening style and opening rate). The experimental results show that the hydraulic efficiency of different continuous transverse grates may not have a consistent relationship with the Froude number. The length of opening in flow direction may have greater influences on the efficiency than the opening area or rate. Compared to grates with rectangular openings symmetrically arranged, when the opening area and rate are the same, the grates with circular openings staggerly arranged are found to perform better for capturing runoff. Based on the Manning Equation and the orifice outflow formula, a set of empirical equations were also presented to relate the hydraulic efficiency and influencing factors. Good agreements were obtained between the predicted and measured results with relative difference of less than 15%.

**Key words:** urban road; continuous transverse grates inlet; hydraulic efficiency; road runoff; urban waterlogging