

海绵城市

## 道路-生物滞留带豁口水力特征及设计方法研究

李小宁<sup>1,2</sup>, 王建龙<sup>1</sup>, 赵梦圆<sup>1</sup>, 宫永伟<sup>1</sup>, 李俊奇<sup>1</sup>, FANG Xing<sup>1,2</sup>

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. Auburn University  
Department of Civil Engineering, USA)

**摘要:** 生物滞留带作为一种低影响开发设施在海绵城市建设过程中得到了广泛应用,尤其是道路-生物滞留带组合系统不仅能够有效减少路面径流外排总量,还能降低峰值流量、有效控制雨水径流污染。城市道路路缘石豁口作为连接道路与生物滞留带的关键设施,其水力特征和截流效率计算至关重要。总结了国外城市常见的道路豁口设计计算方法,并结合具体案例分析了不同设计方法的特点,以期对海绵城市建设中城市道路豁口设计计算方法提供参考。

**关键词:** 道路-生物滞留带系统; 豁口设计计算; 海绵城市

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)08-0001-08

### Research on Hydraulic Characteristics and Design Method of Road Biologic-retention Curb Inlet

LI Xiao-ning<sup>1,2</sup>, WANG Jian-long<sup>1</sup>, ZHAO Meng-yuan<sup>1</sup>, GONG Yong-wei<sup>1</sup>,  
LI Jun-qi<sup>1</sup>, FANG Xing<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Department of Civil Engineering, Auburn University, USA)

**Abstract:** As an important measure of low impact development (LID), the biologic-retention facility is widely used in the sponge city construction. In particular, the combination of road biologic-retention system could not only reduce the road surface runoff, but also reduce the peak discharge efficiently, and effectively control the rain water runoff pollution. As a key connection between road and bioretention, the calculation of hydraulic characteristics and closure efficiency of the curb inlet is very important. This paper summarized the design methods of common curb inlet used in foreign cities, and analyzed the characteristics of different design methods combined with concrete cases. This study could provide some suggestions for road biologic-retention curb inlet design during sponge city construction.

**Key words:** road biologic-retention system; curb inlet calculation and design; sponge city

在城市道路-生物滞留带系统的设计中,路缘石豁口是连接道路-生物滞留带的主要构筑物,其

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103-002); 北京市社会科学基金资助项目(15JGB052); 国家自然科学基金资助项目(51109002)

通信作者: 王建龙 E-mail: wjl\_xt@163.com

设计合理与否直接关系到雨水径流总量的控制效果。目前国内对路缘石豁口的设计计算尚无成熟经验,也缺乏相关研究。现行的设计规范《室外排水设计规范》(GB 50014—2006,2014年版)缺乏对豁口设计计算方法的详细说明;毛绪昱等<sup>[1]</sup>研究提出先将豁口简化为堰后再利用宽顶堰堰流公式近似计算豁口的排水能力;刘增超等<sup>[2]</sup>借鉴国外的方法进行豁口计算设计,但在应用过程中进行了一定程度的简化。梁小光<sup>[3]</sup>总结介绍了国外道路-生物滞留带豁口设计方法并应用于计算案例中。在现阶段海绵城市建设情况下,对道路-生物滞留带豁口截流效率、水力特征和设计计算方法进行系统研究就显得尤为重要。

## 1 豁口入流研究现状

国外对道路-生物滞留带系统中豁口的水力特征、设计计算方法已开展了相对系统的研究,早在1964年Bauer等<sup>[4]</sup>进行了一系列变坡式路缘石豁口的实验,结果显示当边沟宽度( $W$ )/深度( $a$ )=12时,且上下游过渡段长度为 $W$ 时豁口截流效率( $E$ )最高;并根据弗劳德相似性关系得出了豁口设计曲线,设计中需要考虑的参数主要包括上游路面涉水宽度[也称为漫幅( $T$ )]、道路横坡( $S_x$ )、道路纵坡( $S_l$ )以及豁口长度( $L$ )。当路缘石豁口的横坡与道路横坡一样时,称为无变坡路缘石豁口;当豁口的横坡大于道路横坡时(豁口局部变坡或者道路有变坡边沟),称为变坡式路缘石豁口。Bauer等<sup>[4]</sup>实验中发现豁口设计中路面粗糙度即曼宁系数( $n$ )并不敏感,因而设计曲线中并未考虑曼宁系数的影响。1992年Uyumaz<sup>[5]</sup>通过分析Bauer等的实验结果并结合自己的实验结果得出了豁口截流效率( $E$ )和几何特征的计算公式,其中 $E = Q/Q_a$ , $Q$ 为豁口的截流量, $Q_a$ 为路面上游来/产流的总流量;剩余的流量沿路面继续往下流。豁口几何特征为 $L/Fr_w T$ , $Fr_w$ 为道路横截面方向距离豁口 $W$ 处水流弗劳德数。Uyumaz实验中模型比为1:4,路面纵坡为0~0.06,路面横坡为0.02~0.06,豁口几何形状与Bauer等的实验一致,长度分别为0.38、0.76、1.14 m。Uyumaz发现当截流效率 $E < 0.6$ 时, $E$ 与 $L/Fr_w T$ 呈线性关系;当 $E \geq 0.6$ 时, $E$ 与 $L/Fr_w T$ 为二次方的关系。Uyumaz针对不同纵坡和横坡的路面归纳总结得到了计算公式中不同的经验系数。Forbes<sup>[6]</sup>将豁口入流过程划分为若干小段并假设在

每一小段中水流流态稳定且不变,进而计算每一时间步长后小段之间横截面水流流量、方向以及流速,从而确定从每一个横截面中流入豁口的水量。结果表明将重力加速度( $g$ )乘以经验系数0.48即将 $g' = 0.48g$ 代入公式中才能得到与实验数据相符的结果。1992年Holley等<sup>[7]</sup>研究了不同形式(线性、反曲线)的豁口上下游过渡带(改变道路局部的横坡)对豁口截流量的影响,并研究了不同变坡坡度的影响,提出了等效豁口长度的概念,认为豁口变坡坡度和上下游过渡带对豁口截流量的提升与延长无变坡路缘石豁口的长度有相同的效果。

通过上述分析可知,单向纵坡道路-生物滞留带豁口入流问题的水力特征非常复杂,并不存在一个解析式来计算豁口截流量。现行的大部分研究都是基于一定假设的前提下推导出豁口入流量计算公式后结合试验结果对推导公式进行修正,从而确保公式能够适用于不同的设计情境中。通过查阅相关文献资料,详细总结了1950年Izzard<sup>[8]</sup>和Li等<sup>[9-10]</sup>在豁口设计计算方面的研究以及美国现行城市排水设计手册(*Urban Drainage Design Manual: Hydraulic Engineering Circular No. 22, HEC-22*)中有关豁口设计计算的规定。

## 2 豁口设计方法

### 2.1 Izzard方法

Izzard认为无变坡路缘石豁口入流水力特性与宽顶堰水力特性有相似之处并做了如下假设:①豁口处水流只有沿道路横坡方向的速度( $V_l$ )而没有沿道路纵坡方向的速度( $V_l$ ),也就是并未考虑道路纵坡对豁口截流效率的影响;②对于无变坡路缘石豁口来说,豁口内水头高度与路面末端水头高度相同,而变坡式路缘石豁口内水头高度等于路面末端水头高度与边沟深度之和;③豁口内水头高度沿道路纵坡方向线性分布;④豁口上游水流流态为均匀流。

根据曼宁公式可计算豁口前路面径流流量,具体公式为:

$$Q_a = \left(\frac{1}{2}\right)^{5/3} \frac{y_n^{8/3} S_l^{1/2}}{n S_x} = 0.315 \frac{y_n^{8/3} S_l^{1/2}}{n S_x} \quad (1)$$

式中  $Q_a$ ——上游路面的径流流量,  $m^3/s$

$y_n$ ——豁口前路面边缘正常水深,  $m$

$S_l$ ——水流沿道路纵坡方向的水力坡度,在均匀流情况下等于道路纵坡  $S_x$

$n$ ——曼宁系数

$S_x$ ——道路横坡

但是人们普遍认为不能完全按照曼宁公式中水力半径的定义来计算路面相对较宽的浅层水流流量。因此,Izzard等<sup>[11]</sup>根据曼宁公式计算得出局部路面水流纵向流速后(假设水力半径等于水深 $y_1$ ),再沿道路横坡方向进行积分计算路面的径流量。

$$V_{11} = \frac{1}{n} y_1^{2/3} S_x^{1/2} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Q_a &= \int_0^T V_{11} dA = \int_0^T \frac{1}{n} y_1^{2/3} S_x^{1/2} (T-x) S_x dx \\ &= \frac{3}{8} \frac{y_n^{8/3} S_x^{1/2}}{n S_x} = 0.375 \frac{y_n^{8/3} S_x^{1/2}}{n S_x} \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $x$ ——积分单元与路缘石距离,m

$V_{11}$  和  $y_1$ ——分别是  $x$  处积分单元纵向径流流速(m/s)和水深(m)

$T$ ——路面漫幅,m

豁口前路面径流横截面视图见图1。

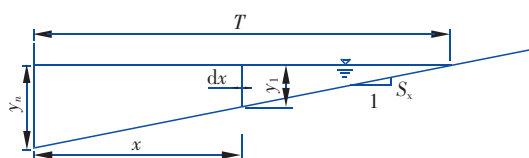


图1 豁口前路面径流横截面视图

Fig.1 Cross-section view of runoff flow along the road with a cross slope of  $S_x$  just before the opening of curb inlet

豁口边缘处水流特性如图2所示。

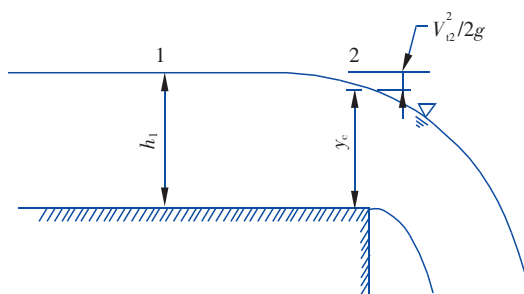


图2 豁口边缘处入流示意

Fig.2 Schematic diagram of flow at curb inlet edge

假设豁口边缘处水深为临界水深( $y_c$ ),根据伯努利公式有:

$$h_1 = y_c + V_{12}^2/2g \quad (4)$$

式中  $h_1$ ——图2中1点水头高度,m

$y_c$ ——图2中2点临界水深,m

$V_{12}$ ——图2中2点沿路面横坡方向水流速

度,m/s

根据假设①,此时图2中2点处沿路面纵坡方向水流速度即 $V_{12}=0$ 。值得注意的是式(4)并不适用于道路纵坡较大时豁口处产生超临界流的情况。

根据连续性公式,沿豁口积分长度 $dL$ 处进水量为:

$$dQ = V_{12} dA = y_c \sqrt{2g(h_1 - y_c)} dL \quad (5)$$

根据 Henderson<sup>[12]</sup>的研究可知,在矩形明渠中,当水流宽度远远大于水深时,有:

$$y_c = \frac{2}{3} h_1 \quad (6)$$

假设当豁口长度为 $L_r$ (即全部截流豁口长度,m)时能将路面径流全部截流,根据假设③可以得到在距离豁口上边界 $L$ 处路面边缘的水头高度为:

$$h = y_n \left(1 - \frac{L}{L_r}\right) \quad (7)$$

综合式(5)~(7)并在豁口长度 $L_r$ 上积分可以得到长度为 $L$ 的无变坡路缘石豁口截流量为:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{4}{15\sqrt{3}} \frac{2}{g} y_n^{3/2} L_r \left[1 - \left(1 - \frac{L}{L_r}\right)^{5/2}\right] \\ &= 0.682 y_n^{3/2} L_r \left[1 - \left(1 - \frac{L}{L_r}\right)^{5/2}\right] \\ &= Q_{at} \left[1 - \left(1 - \frac{L}{L_r}\right)^{5/2}\right] \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $Q_{at}$ ——理论全部截流豁口长度对应的截流量, $m^3/s$

根据一系列的试验结果,Izzard将全部截流豁口长度计算公式修订为:

$$Q_a = 0.39 y_n^{3/2} L_r \quad (9)$$

长度为 $L$ 的无变坡路缘石豁口的截流效率计算公式为:

$$E = \frac{Q}{Q_a} = 1 - \left(1 - \frac{L}{L_r}\right)^{5/2} \quad (10)$$

根据假设②推导变坡式路缘石豁口截流量并结合实验数据进行修订后的计算公式为:

$$Q_a = \frac{0.39}{y_n} L_r \left[ (a + y_n)^{5/2} - a^{5/2} \right] \quad (11)$$

式中  $a$ ——变坡豁口边沟深度

长度为 $L$ 的变坡式路缘石豁口的截流效率计算公式为:

$$E = \frac{Q}{Q_a} = \frac{\left(\frac{a}{y_n} + 1\right)^{5/2} - \left(\frac{a}{y_n} + 1 - \frac{L}{L_r}\right)^{5/2}}{\left(\frac{a}{y_n} + 1\right)^{5/2} - \left(\frac{a}{y_n}\right)^{5/2}} \quad (12)$$

## 2.2 Li 方法

Li<sup>[10]</sup>将豁口入流类比于明渠自由出流推导豁口截流量计算公式。豁口入流可以看作是加速度为  $g \cos \theta_0$  ( $\theta_0$  为路缘石与路面夹角,  $\cot \theta_0 = S_x$ ) 的自由出流(见图3),在明渠自由出流中容易求得全部截流豁口长度( $L_r$ )为:

$$L_r = V_1 \sqrt{\frac{2y_n}{g}} \quad (13)$$

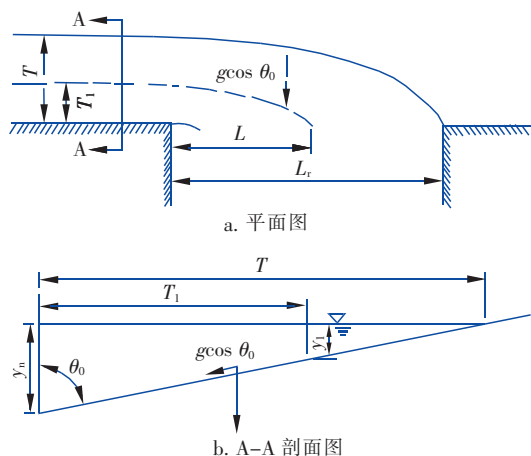


图3 有豁口及路缘石的道路平面及剖面示意

Fig.3 Schematic diagram of plan and cross-section view of road with inlet and curb

相应地,在豁口入流中有:

$$L_r = V_1 \sqrt{\frac{2y_n \tan \theta_0}{g \cos \theta_0}} \quad (14)$$

通过曼宁公式可以计算三角形断面明渠在豁口边缘处的正常水深,计算公式为:

$$y_n = \frac{1.54(1 + \sec \theta_0)^{1/4}}{(\tan \theta_0)^{5/8}} \left( \frac{Q_a n}{\sqrt{S_1}} \right)^{3/8} \quad (15)$$

豁口入流流量可以通过下式计算:

$$Q_a = V_1 A = \frac{V_1 y_n^2 \tan \theta_0}{2} \quad (16)$$

结合式(14)和(16)并简化可以得到:

$$\frac{Q_a}{L_r y_n \sqrt{g y_n}} = \sqrt{\frac{\sin \theta_0}{8}} \quad (17)$$

$$Q_a = 0.35 L_r y_n \sqrt{g y_n} = K \sqrt{g y_n^3} L_r \quad (18)$$

当道路横坡为 0.083 3 时,  $K$  的理论值是 0.35, 但根据实验结果,  $K = 0.23$ ; 当道路横坡为 0.041 7 和 0.020 8 时,  $K = 0.20$ 。

在自由出流中,路面水深  $y_1$  对应的豁口长度  $L$  与正常水深  $y_n$  对应的全部截流豁口长度  $L_r$  之间的

关系为:

$$\frac{y_1}{y_n} = \left( \frac{L}{L_r} \right)^2 \quad (19)$$

豁口长度为  $L$  和  $L_r$  时对应的路面漫幅  $T_1$  和  $T$  之间也具有类似的关系:

$$\frac{T_1}{y_n \tan \theta_0} = \frac{T_1}{T} = \left( \frac{L}{L_r} \right)^2 \quad (20)$$

当豁口长度为  $L$  时,豁口入流过流断面面积计算公式为:

$$A_1 = y_n T_1 - \frac{T_1^2}{2 \tan \theta_0} \quad (21)$$

此时豁口的截流效率为:

$$E = \frac{Q}{Q_a} = \frac{A_1}{A} = 2 \left( \frac{L}{L_r} \right)^2 - \left( \frac{L}{L_r} \right)^4 \quad (22)$$

在变坡式路缘石豁口截流量计算中, Li 等<sup>[9]</sup>引入额外的常数  $C$  对式(18)进行了修正:

$$\frac{Q}{L y \sqrt{g y}} = K + C \quad (23)$$

根据量纲分析,  $C$  应该是关于  $\frac{V_1^2}{g y}$ 、 $\frac{L}{a}$ 、 $\theta_0$ 、 $\frac{L_2}{a}$  以及

$\frac{Q_{co}}{Q_a}$  的函数,  $L_2$  是变坡式路缘石豁口下游过渡段长度,  $Q_{co}$  是豁口下游路面流量。基于实验数据得出常数  $C$  的计算公式,具体如下:

$$C = \frac{0.45}{1.12^M} \quad (24)$$

$$M = \frac{L \frac{V_1^2}{g y}}{a \tan \theta_0} \quad (25)$$

由于 Li 方法中变坡式路缘石豁口流量计算公式是根据实验数据得出的经验公式,因此并不适于所有的豁口计算设计情景。

## 2.3 HEC-22 方法

美国联邦公路管理局(Federal Highway Administration, FHWA)颁布的水利工程 12 号通知(Hydraulic Engineering Circular No. 12, HEC-12)中规定了公路豁口的设计计算方法,此后 HEC-22 中基于 HEC-12 的设计公式和步骤在城市公路豁口设计中得到了广泛应用。HEC-22 中规定了无变坡路缘石豁口和变坡式路缘石豁口设计步骤,对于无变坡路缘石豁口来说用于计算全部截流豁口长度( $L_r$ )的公式为:



$$L_r = 0.817 Q_a^{0.42} S_1^{0.3} \left( \frac{1}{n S_x} \right)^{0.6} \quad (26)$$

式(26)与 Izzard 法中计算  $L_r$  的经验公式类似,根据 Izzard 法计算得到正常水位  $y_n$  并代入式(9)中即可得到 Izzard 经验公式:

$$L_r = 1.477 Q_a^{0.44} S_1^{0.28} \left( \frac{1}{n S_x} \right)^{0.56} \quad (27)$$

可以明显看出来,在无变坡路缘石豁口设计中,利用 HEC-22 公式计算得出全部截流豁口长度  $L_r$  值小于 Izzard 法的计算结果。

HEC-22 中用于计算长度为  $L$  无变坡路缘石豁口的截流效率公式为:

$$E = \frac{Q}{Q_a} = 1 - \left( 1 - \frac{L}{L_r} \right)^{1.8} \quad (28)$$

将式(26)和(27)应用于变坡式路缘石豁口时,只需将  $S_x$  替换为等效横坡  $S_e$  即可,  $S_e$  (HEC-22 中并未区分局部变坡豁口和边沟变坡豁口)计算方法为:

$$S_e = S_x + S'_w E_0 \quad (29)$$

$$S_w = S_x + a/W \quad (30)$$

$$S'_w = a/W \quad (31)$$

式中  $S_w$ ——变坡坡度

$W$ ——变坡边沟宽度

$E_0$ ——边沟内流量与路面总径流量的比值

在 HEC-12 中并未给出计算公式,而是提供了一个计算表格供查询,在 HEC-22 中提供了变坡式路缘石豁口中  $E_0$  的计算方法:

$$E_0 = \frac{1}{1 + \frac{S_w/S_x}{(1 + \frac{S_w/S_x}{T/W - 1})^{2.67} - 1}} \quad (32)$$

其中路面漫幅  $T$  可以用下式计算:

$$T = [Q_a n / (0.376 S_x^{5/3} S_1^{1/2})]^{3/8} \quad (33)$$

### 3 豁口设计计算

#### 3.1 无变坡豁口设计

上述三种方法均适用于工程设计,取  $S_1 = 0.02$ ,  $S_x = 0.015$ ,  $n = 0.018$ ,  $Q_a = 0 \sim 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ ,应用三种不同方法计算无变坡路缘石全部截流豁口长度  $L_r$ ,以及不同豁口长度  $L$  的截流效率。

在 Izzard 方法中,首先通过式(3)计算得到豁口处正常水深( $y_n$ );然后通过式(9)计算全部截流豁口长度( $L_r$ );最后通过式(10)计算在不同豁口长度下豁口的截流量。

在 Li 的方法中,可以通过式(15)计算得到豁口处的正常水深  $y_n$ ,然后通过式(18)计算得到全部截流豁口长度( $L_r$ ),最后通过式(22)计算不同豁口长度时的截流量。

在 HEC-22 的规定中,可以通过式(26)直接计算全部截流豁口长度( $L_r$ ),并根据式(28)来计算不同长度豁口截流效率。HEC-22 方法不需要计算豁口处正常水深  $y_n$ ,具体计算结果如图4所示。

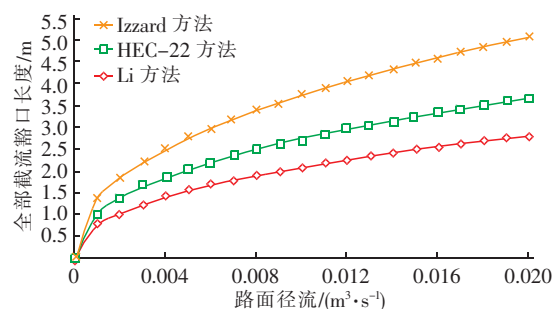


图4 全部截流豁口长度与设计流量关系(纵坡=0.02,横坡=0.015,  $n=0.018$ )

Fig. 4 Relationship between 100% capture required curb inlet length and design flow ( $S_1=0.02$ ,  $S_x=0.015$ ,  $n=0.018$ )

由图4可以看出, Izzard 方法计算得到的完全截流豁口长度最长,其次是 HEC-22 方法的计算结果,最短的是 Li 方法得到的结果。Izzard 方法的计算结果约为 HEC-22 方法的 1.4 倍,约为 Li 方法计算结果的 1.8 倍。也就是说, Izzard 方法的经验公式中认为豁口的截流效率最低。造成这样的结果可能是因为 Izzard 在推导豁口截流量公式的时候只考虑了重力对豁口入流的影响,并未考虑实际情况中路面径流横向动量对豁口入流的增强效果。另外, Izzard 假设豁口入流处水深为临界水深,然而在实际实验中豁口处可能会有超临界流,其水深低于临界流,进而导致根据实验结果得出的经验系数偏小。如果将 Izzard 方法和 Li 方法豁口截流量计算公式直接进行比较可以发现, Li 方法所得豁口截流量约为 Izzard 方法计算值的 1.7 倍,但是由于两种方法中用于计算正常水深的公式[式(3)、(15)]略有不同,最终导致 Li 方法中豁口截流量实际计算结果约为 Izzard 计算结果的 1.8 倍。

不同豁口长度比例下截流效率的计算结果见图5。图5显示, Izzard 和 HEC-22 方法中截流效率都随豁口长度增大呈现指数增长的趋势,而且始终  $E = Q/Q_a > L/L_r$ , 当  $L/L_r$  比例较低时截流效率增大

较快,在  $L/L_r$  比例较大时截流效率增大速度降低。然而 Li 方法的计算结果显示,在  $L/L_r < 0.6$  时豁口截流效率增大较慢且  $E < L/L_r$ ,当  $L/L_r \geq 0.6$  后豁口截流效率增大较快且  $E \geq L/L_r$ 。可以发现,虽然具体计算结果有一定程度的差异,但在国外的豁口设计中以上三种方法均有所应用,现行美国公路排水设计主要采用 HEC-22 方法。

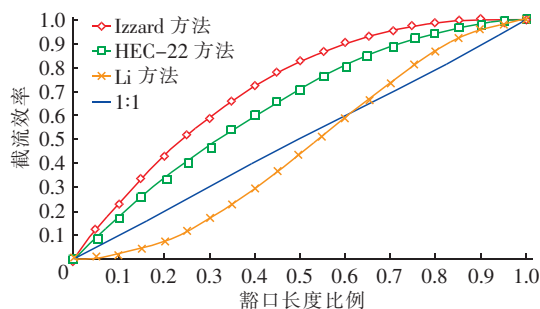


图5 豁口长度比例与截流效率变化关系(纵坡 = 0.02, 横坡 = 0.015,  $n = 0.018$ )

Fig. 5 Relationship between curb inlet length and capture efficiency ( $S_1 = 0.02, S_x = 0.015, n = 0.018$ )

### 3.2 变坡式路缘石豁口设计

文中所研究的豁口案例及监测数据来源于

Hammonds 等<sup>[13]</sup>的报告,其在报告中研究了德克萨斯州交通部推荐的两种变坡式路缘石豁口(C型和D型,详见图6)的水力特征,实验中建造了全尺寸不同纵坡和横坡的路面设施,并监测了不同上游流量情况下豁口截流流量,计算了豁口截流效率( $E_{ob}$ ),最终根据实验结果得出了两种豁口的水力特征曲线。

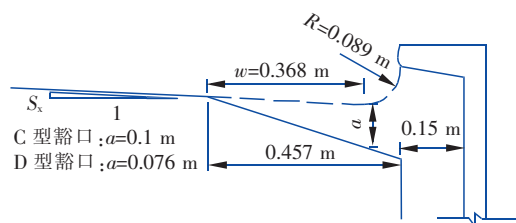


图6 局部变坡的C型和D型豁口示意

Fig. 6 Schematic diagram of type C and type D local depressed curb inlet

Hammonds 在报告中提出了等效豁口长度的概念,并应用此概念结合实验结果总结得出适应于C型和D型豁口的经验设计公式。

不同设计方法计算结果与试验结果的比较见表1所示。

表1 不同设计方法计算结果与试验结果的比较

Tab. 1 Comparison of calculation results with different methods against experimental results

实验编号		道路纵坡	道路横坡	路面流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	道路漫 幅/m	实测截流 效率/%	HEC-22 截 流效率/%	Izzard 截 流效率/%
C 型 豁 口	C01	0.004	0.021 0	0.24	4.27	57.24	54.95	54.86
	C02	0.004	0.021 0	0.11	4.27	83.06	80.21	85.66
	C03	0.010	0.021 0	0.24	4.27	49.90	47.69	49.80
	C04	0.010	0.021 0	0.18	4.27	57.49	54.98	58.72
	C05	0.020	0.021 0	0.12	3.45	62.27	59.52	69.53
	C06	0.020	0.021 0	0.24	4.27	43.90	41.83	45.34
	C07	0.040	0.021 0	0.13	4.07	54.91	52.36	64.71
	C08	0.040	0.021 0	0.16	4.07	49.14	46.80	56.00
	C09	0.060	0.021 0	0.12	4.07	53.68	51.19	66.95
	C10	0.060	0.021 0	0.25	4.27	36.14	34.33	40.09
	C11	0.004	0.042 0	0.23	3.87	69.79	65.48	66.04
	C12	0.004	0.042 0	0.14	3.21	84.38	79.70	83.03
	C13	0.010	0.042 0	0.14	2.84	74.29	69.36	76.60
	C14	0.010	0.042 0	0.23	3.37	59.97	55.73	59.13
	C15	0.020	0.042 0	0.24	2.97	51.90	47.94	53.01
	C16	0.020	0.042 0	0.10	2.28	76.30	71.15	86.25
	C17	0.050	0.042 0	0.17	2.16	51.91	47.75	59.10
	C18	0.050	0.042 0	0.24	3.09	44.28	40.65	48.31
	C19	0.070	0.021 0	0.15	4.07	45.29	43.09	54.55
	C20	0.070	0.042 0	0.15	3.05	51.46	47.30	61.60

续表 1 (Continued)

实验编号		道路纵坡	道路横坡	路面流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	道路漫 幅/m	实测截流 效率/%	HEC-22 截 流效率/%	Izzard 截 流效率/%
D 型 豁 口	D01	0.004	0.041 7	0.17	3.33	72.19	67.01	68.28
	D02	0.010	0.041 7	0.17	2.88	62.17	57.00	61.26
	D03	0.020	0.041 7	0.17	2.64	54.90	49.93	56.24
	D04	0.040	0.041 7	0.26	2.48	38.75	35.03	39.92
	D05	0.060	0.020 8	0.23	4.27	31.66	29.73	34.11
	D06	0.040	0.020 8	0.14	3.07	45.20	42.53	50.10
	D07	0.020	0.020 8	0.24	4.27	37.37	35.27	37.68
	D08	0.010	0.020 8	0.24	4.27	42.23	40.01	41.28
	D09	0.004	0.020 8	0.11	4.27	72.41	69.11	71.52

图 6 和表 1 显示 C 型和 D 型豁口只在豁口处有局部变坡,即为局部变坡式豁口在路面并没有变横坡;但是 C 型和 D 型豁口在豁口的前后有 1.52 m 的纵坡横坡过渡区<sup>[13]</sup>,从而利于路面径流流入豁口以提高豁口的截流效率。在 Hammonds 等的实验中,道路宽度为 4.27 m,曼宁系数为 0.018,豁口长度为 1.52 m。

根据 C 型和 D 型局部变坡式豁口的参数应用 HEC-22 和 Izzard 方法计算不同实验方案中豁口截流效率。由于 Li 公式实验中豁口边沟宽度(0.838 m)远远大于 C 型和 D 型边沟宽度(0.457 m),在 Li 实验中路面径流只在边沟内流动,推导变坡式路缘石豁口截流量计算公式也只适于路面径流仅在边沟内流动的情境,然而在此处 C 型和 D 型变坡式路缘石豁口截流量实验中,路面径流不只是在边沟内流动;在应用 Li 方法计算变坡式路缘石豁口截流量时需要试算边沟内水深<sup>[9]</sup>,但是此处 C 型和 D 型豁口的计算,不同横坡、纵坡组合,沟内水深难以用统一值定量描述,在 C 型和 D 型豁口设计中难以运用,因此 Li 方法在此处不加入分析。HEC-22 和 Izzard 公式计算结果  $E_{ca}$  与实验监测结果  $E_{ob}$  比较见图 7。

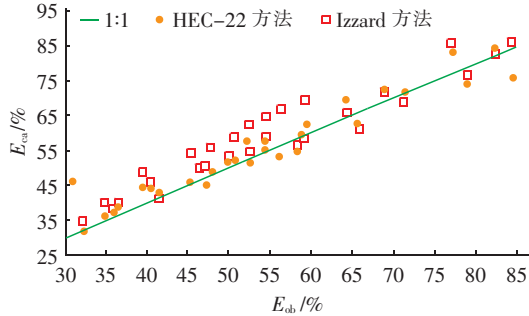


图 7 截流效率公式计算结果与监测结果比较  
Fig. 7 Comparison of calculation and observed results

由图 7 可以看出,两种计算方式与实际效果的吻合程度都很高,应用 HEC-22 方法计算得到结果  $R^2 = 0.95$ ;应用 Izzard 方法计算得到的结果  $R^2 = 0.91$ 。但 Izzard 方法所计算的豁口截流效率结果普遍大于实际监测结果,即所设计豁口雨水控制效果往往小于实际效果。而 HEC-22 计算方法略小于实际监测结果,设计方法偏保守。

HEC-22 和 Izzard 方法的误差通过公式  $E_r = (E_{ca} - E_{ob})/E_{ob}$  计算得到,其分析结果如图 8 所示。

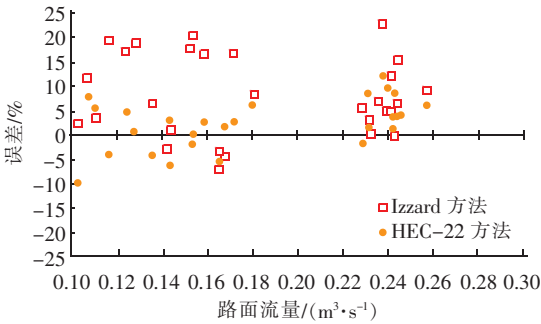


图 8 公式计算结果误差  
Fig. 8 Error of equation calculation results

从图 8 可知,HEC-22 和 Izzard 方法在设计流量较大时,即  $0.22 \sim 0.26 \text{ m}^3/\text{s}$  时计算误差较为接近,而对于设计流量为  $0.10 \sim 0.18 \text{ m}^3/\text{s}$  时,HEC-22 计算法的误差明显小于 Izzard 方法。总而言之,由于 Li 方法的推导前提、实验中豁口几何特征独特性以及繁琐的计算步骤<sup>[9]</sup>限制了其在变坡式路缘石豁口效率计算中的适用性。HEC-22 方法和 Izzard 方法在计算变坡式路缘石豁口截流效率时都具有很高的准确性。Izzard 计算结果偏大的原因之一是由于其在推导豁口截流量经验公式系数中的实验路面是复合坡度路面而并不是单一坡度路面<sup>[8]</sup>,复合坡度路面会使豁口排水能力有所增强,进而导

致根据实验结果得到的经验系数也偏大。

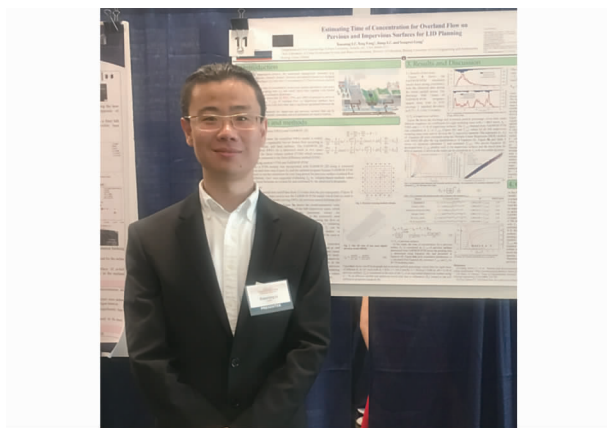
HEC-22方法具有很高的准确性,在计算变坡式豁口时不管是在低流量还是高流量实验中都与实验结果吻合程度很高。HEC-22方法中公式比较简单明了,设计步骤也很简单直接,在美国公路豁口设计中得到了广泛应用。

#### 4 结语

城市道路-生物滞留带系统中豁口的设计是海绵型道路的重要设计内容之一,不同设计计算方法对设计结果具有重要影响。目前,大多豁口截流量的计算公式都是根据明渠流流量公式,即曼宁公式基于一定的假设进行推导,并最终根据实验结果确定公式中的经验系数。通过计算比较各种方法得知HEC-22方法设计更偏向保守,并且具有更高的准确性,设计步骤也很简洁,在美国公路豁口设计中具有广泛的应用,也可以用来指导国内海绵城市道路-生物滞留带系统豁口设计计算。美国大部分州都会针对适应于本州的局部变坡式豁口的水力特性进行研究。国内在参考HEC-22方法进行道路-生物滞留带豁口设计的同时,也应该积极研究不同类型豁口的水力特性和设计计算方法,并为海绵城市建设提供更多的研究基础。

#### 参考文献:

- [1] 毛绪昱,黄丽萍. 基于海绵城市理念的山地城市道路低影响开发设计[J]. 中国给水排水,2016,32(10): 81-85.  
Mao Xuyu, Huang Liping. Design of municipal roads in mountainous city using low impact development technology based on sponge city concept [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(10): 81-85 (in Chinese).
- [2] 刘增超,李家科,蒋春博,等. 生物滞留槽快速设计方法及实例研究[J]. 西安理工大学学报,2017,33(2): 145-151.  
Liu Zengchao, Li Jiake, Jiang Chunbo, et al. Rapid design and example research on bioretention groove[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(2): 145-151 (in Chinese).
- [3] 梁小光. 海绵城市建设中路沿石开口水力计算及设计优化[J]. 中国给水排水,2018,34(2): 42-45.  
Liang Xiaoguang. Hydraulic calculation and design optimization of curb opening in sponge city construction [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(2): 42-45 (in Chinese).
- [4] Bauer W J, Woo D C. Hydraulic design of depressed curb opening inlets [J]. Highway Res Record, 1964, 1: 61-80.
- [5] Uyumaz A. Discharge capacity for curb-opening inlets [J]. J Hydraulic Eng, 1992, 118(7): 1048-1051.
- [6] Forbes H J C. Capacity of lateral stormwater inlets [J]. Civil Eng South Africa, 1976, 18(9): 195-206.
- [7] Holley E R, Woodward C, Brignetti A, et al. Hydraulic Characteristics of Recessed Curb Inlets and Bridge Drains [R]. Texas: Texas Department of Transportation (TxDOT), 1992.
- [8] Izzard C F. Tentative results on capacity of curb opening inlets [A]. 29th Annual Conference of the Highway Research Board [C]. Washington: Highway Research Board, 1950.
- [9] Li W H, Sorteberg K K, Geyer J C. Hydraulic behavior of stormwater inlets: II. Flow into curb opening inlets [J]. Sewage Ind Wastes, 1951, 23(6): 722-738.
- [10] Li W H. Hydraulic theory for design of stormwater inlets [A]. Proceedings of the Highway Research Board [C]. USA: Highway Research Board, 1954.
- [11] Izzard C F, Hicks W. Hydraulics of runoff from developed surfaces [A]. Proceedings of the Twenty-sixth Annual Meeting of the Highway Research Board [C]. Washington: Highway Research Board, 1947.
- [12] Henderson F M. Open Channel Hydraulics [M]. 2nd ed. New York: Macmillan, 1966.
- [13] Hammonds M A, Holley E. Hydraulic Characteristics of Flush Depressed Curb Inlets and Bridge Deck Drains (FHWA-TX 96-1409-1) [R]. Texas: Texas Department of Transportation, 1995.



作者简介:李小宁(1990-),男,山东潍坊人,奥本大学博士在读,研究方向为城市雨水资源管理、洪涝模拟。

E-mail: wjl\_xt@163.com

收稿日期:2018-09-12