

## 蜗形滞流器应用条件试验与模拟

章 蕾<sup>1,2</sup>, 季健康<sup>1,2</sup>, 喻卓尔<sup>3</sup>, 李 超<sup>1,2</sup>, 马光飞<sup>1,2</sup>

(1. 水利部产品质量标准研究所, 浙江 杭州 310024; 2. 水利机械及其再制造技术浙江省工程实验室, 浙江 杭州 310024; 3. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

**摘 要:** 为明确蜗形滞流器在排水管网中的应用条件, 采用物理模型进行试验, 探究蜗形滞流器发挥有效滞流作用的最小压力水头, 并建立 SWMM 雨洪模型, 模拟研究加载蜗形滞流器后在不同重现期(3、5、10、20、50 年)以及不同降雨历时(1、2 和 3 h)下研究区域的滞水改善情况。结果表明: 蜗形滞流器的滞流效果与相对水头有关, 型号为 D200R300 的蜗形滞流器产生滞流作用的最小相对水头在 15 cm 左右; 总滞水量和滞水时间削减率随着重现期的增大有所减少, 且蜗形滞流器对重现期 $\leq 10$  年的降雨具有更好的雨水调控作用, 但受降雨历时的影响较小; 蜗形滞流器更适宜安装在汇流后下游过水能力不足的管段, 在不同降雨条件下削减率能保持在 60% 以上, 最大可达到 100%。

**关键词:** 排水管网; 蜗形滞流器; 最小压力水头; SWMM; 重现期; 降雨历时

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)05-0116-07

## Test and Simulation of Application Conditions of Hydro-brake

ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, JI Jian-kang<sup>1,2</sup>, YU Zhuo-er<sup>3</sup>, LI Chao<sup>1,2</sup>, MA Guang-fei<sup>1,2</sup>

(1. Standard & Quality Control Research Institute <Ministry of Water Resources>, Hangzhou 310024, China; 2. Water Machinery and Remanufacturing Technology Engineering Laboratory of Zhejiang Province, Hangzhou 310024, China; 3. Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China)

**Abstract:** In order to clarify the application conditions of hydro-brake in drainage network, the minimum water pressure needed to motivate the rainfall retention capacity was explored by physical model test, a storm water management model (SWMM) was constructed, and the improvement of waterlogging in the experimental area with different rainfall return periods (3 years, 5 years, 10 years, 20 years, 50 years) and durations (1 h, 2 h, 3 h) after the application of a hydro-brake was simulated. The rainfall retention capacity was related to the relative water pressure, and the minimum relative water pressure the D200R300 hydro-brake needed was about 15 cm. The reduction rate of ponding volume and ponding time decreased with the increase of rainfall return periods. The hydro-brake had a better rainfall control efficiency when the return period was less than or equal to 10 years, but the effect was less influenced by rainfall duration. The hydro-brake was more suitable to be installed in the section with insufficient water passing capacity downstream after confluence, in which the reduction rate could be maintained above 60% and up to 100% under different rainfall conditions.

**Key words:** drainage pipe network; hydro-brake; minimum water pressure; storm water management model (SWMM); return period; rainfall duration

城市化发展进程迅猛、硬质地面铺装比例不断增大<sup>[1]</sup>,造成地表渗透系数降低、地面汇流时间缩短<sup>[2-3]</sup>、径流量明显增大等现象,这导致在雨季时城市雨水排放系统压力陡增<sup>[4-5]</sup>,城市内涝情况频发,市民生命和财产安全受到威胁<sup>[6]</sup>。因此,改扩建城市雨水排放系统成为缓解内涝情况的一种有效措施。但建设实施后尤其是一些老旧小区不易进行改造调整,且常规的雨水调节和人工渗水措施需要较大的设置空间<sup>[7-8]</sup>、改造工期长、人力和财力投入较大。蜗形滞流器是一种独立的、自激活的流量控制装置,具有结构简单、无需人工操作维护的特点,可简单快速安装于雨水排水系统中,起到较为显著的雨量调控作用。蜗形滞流器在国外的应用实例较多,在国内单个蜗形滞流器的滞水性能经 VOF 模型进行三维数值模拟分析<sup>[9]</sup>和实验室物理模型反复试验求证<sup>[10]</sup>较多,但关于蜗形滞流器产生滞流作用的先决条件及其成组在雨水管网系统中的性能研究很少。基于此,笔者考察了蜗形滞流器产生并完全形成空气带所需要的最小压力水头,并在根据现状雨水管网资料构建的 SWMM 雨洪模型系统中依据雨量调节的需要和水头条件,在不同位置加载不同型号的蜗形滞流器,以模拟对比不同降雨条件下该研究区域的雨洪调控效果,最终得出蜗形滞流器在系统中发挥高效滞流作用的适用条件。

## 1 最小压力水头物理试验研究

### 1.1 试验系统装置

试验系统如图 1 所示。

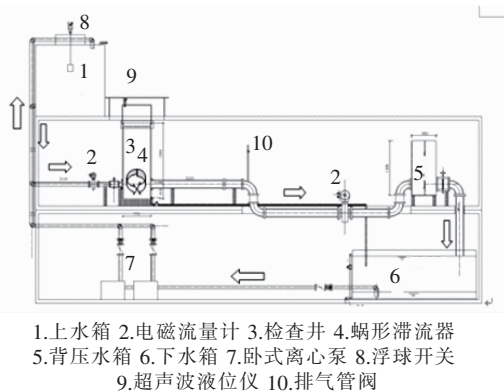


图 1 蜗形滞流器性能试验系统

Fig. 1 Performance test system of hydro-brake

采用涡流实验室的蜗形滞流器性能试验系统,使 D200R300 蜗形滞流器形成空气带,对产生“S 形”滞流作用所需的最小压力水头进行试验探究。

### 1.2 试验方法

未插入背压水箱内隔板情况下,打开 U 型管排气阀排气,进行正常进水试验,待出水管满管后关闭排气阀。依次在背压水箱插入隔板,逐渐加大进水量,分别观察装置内的空气带形态,记录空气带开始形成及完全形成时检查井水位、背压水箱水位及出口流量值。D200R300 蜗形滞流器在不同水位差下腔体中心空气带逐渐形成过程见图 2。以装置内中心开始出现密集气泡聚集且出水管中气泡出现旋流现象时为空气带开始形成,其状态见图 2(b);以装置内顶部积存气体完全消失时为空气带完全形成,其状态见图 2(d)。

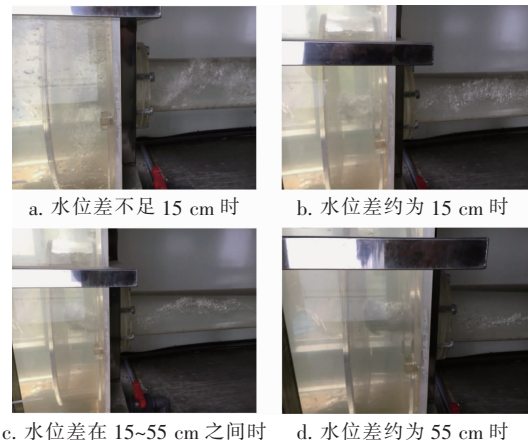


图 2 D200R300 蜗形滞流器在不同水位差下腔体中心空气带逐渐形成过程

Fig. 2 Formation of air section in the D200R300 hydro-brake at different water levels

### 1.3 试验结果

空气带开始形成及完全形成时的检查井水位、背压水箱水位及出口流量值如表 1 所示。可知,在背压水箱内依次插入隔板后,背压水箱水位升高,检查井内水位也相应抬升,且其水位始终高于背压水箱水位。当继续增加进水量,检查井与背压水箱内水位差逐渐加大,并在检查井内水位升至淹没蜗形滞流器装置顶部后,水位上升速度明显。在此过程中,空气带开始形成并直至出现完整密实的圆柱状

空气塞。由表1还可知,不同背压水箱或不同检查井水位下,只要水位差即相对水头相同,蜗形滞流器出口流量值基本保持一致。可见蜗形滞流器的滞流效果和上下游水位无直接关系,仅与相对水头有关。且针对D200R300蜗形滞流器,开始形成滞流作用所需最小相对水头在15 cm左右,完全形成空气带所需最小相对水头在55 cm左右。

表1 不同空气带状态下的水位、流量

Tab.1 Water level and flow in different air section states

试验工况	状态	检查井水位/cm	背压/cm	水位差/cm	出口流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )
未插入隔板	图2(b)	21	7	14	50
	图2(d)	62	7	55	56
插入2#隔板	图2(b)	33	18	15	50
	图2(d)	76	19	57	58
插入3#隔板	图2(b)	52	38	14	50
	图2(d)	92	39	53	57
插入4#隔板	图2(b)	71	57	14	49
	图2(d)	114	59	55	57
插入5#隔板	图2(b)	93	78	15	50
	图2(d)	136	78	58	60

图3为蜗形滞流器安装前后同一试验系统的相对水头-流量( $H-Q$ )曲线,以考察蜗形滞流器的局部水头对最小相对水头的影响。可以看出,在同一流量下,蜗形滞流器安装前后的相对水头在较低值时变化不大,而当相对水头 $>55$  cm,即空气带完全形成后,蜗形滞流器的局部水头逐渐增大,并最终产生明显的滞流作用,且一直保持较大的局部水头呈不断增长的趋势。由此可见,蜗形滞流器的局部水头在较低相对水头下几乎为零,最小相对水头基本不受影响。综上,可采用几何相似原理确定其他型号蜗形滞流器的最小相对水头,为其相应的安装点选择提供依据。

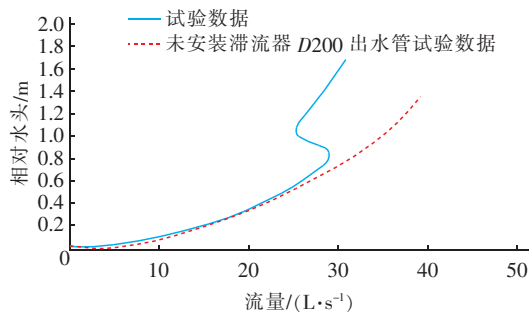


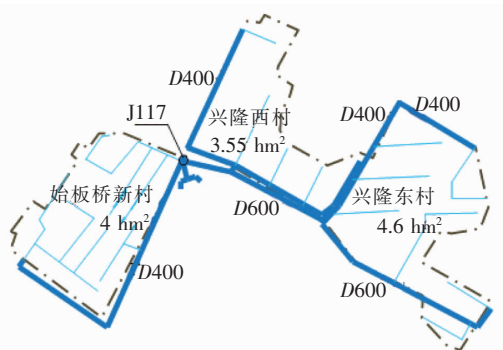
图3 D200R300 蜗形滞流器安装前后  $H-Q$  曲线

Fig.3  $H-Q$  curves before and after fixing the D200R300 hydro-brake

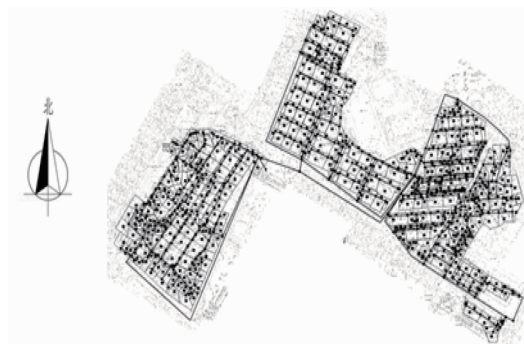
## 2 降雨条件的雨洪模型研究

### 2.1 研究区域雨水管网系统的概化

选取位于杭州上城区(老城区)的3个小区作为研究区域,该区域属亚热带季风气候区,年降水量在1 100~1 600 mm之间,年平均降水量为1 378.5 mm。该区域西至始板桥直街,南至东宝路-兴隆路,东至秋涛路一弄,汇水总面积约为12.15  $\text{hm}^2$ 。3个小区由东向西地势依次降低,高程分别约为7.3、6.3、5.8 m,总地势差在1.5 m左右,小区内部子汇水区坡度基本为0.2%,局部地区可达1.7%,小区道路均为沥青铺设。每个小区四周均建有围墙或商铺,中央设有花园,花园面积分别约为420、1 600、3 500  $\text{m}^2$ 。为便于研究蜗形滞流器在雨水管网系统中的雨量调节性能,探究其安装前后在模型小区内部及市政道路上的滞水改善情况,对该区域进行雨水管网模型概化,各小区内部雨水管道根据现有图纸建模,各小区出水经市政雨水管在检查井J117处汇合后排放[见图4(a)]。经SWMM模型对该片区域概化[见图4(b)]后,共划分集水区659个、设计雨水管355条、检查井节点355个、排水口1个,管径为300~600 mm。



a. 主要雨水管道汇水区域



b. 模型概化

图4 汇水区域示意及模型概化结果

Fig.4 Catchment and model generalization results



## 2.2 参数的确定

结合已有资料,并参考模型手册中参数典型值以及文献[11-12]进行参数取值,本研究中雨水管粗糙系数为 0.013,径流演算采用运动波方程进行模拟。入渗模型采用 Horton 模型,不透水面和透水面坡面汇流曼宁系数分别为 0.011 和 0.15,不透水面和透水面的洼地滞水量分别为 2 mm 和 6 mm。根据研究区域子汇水区中屋面、绿地、沥青路面的分布情况,将部分子汇水区具有蓄水功能的不透水面所占比例定为 25%。计算步长为 5 s。

## 2.3 设计雨型及雨量

本研究采用芝加哥雨型。将杭州城区的暴雨强度公式中相应参数代入芝加哥雨型峰前、峰后公式后得到不同暴雨重现期、不同降雨历时的降雨过程曲线。根据研究区域的降雨特征,选取降雨重现期为 3、5、10、20 和 50 年,以及降雨历时为 1、2 和 3 h 的多种雨量情况作为研究条件分别进行模拟计算。

## 2.4 装置特性曲线的加载

装置特性曲线经 Fluent 仿真模拟及实验室样机测试修正后得到,见图 5。在 SWMM 中加载蜗形滞流器特性曲线进行模拟计算的方法见图 6。

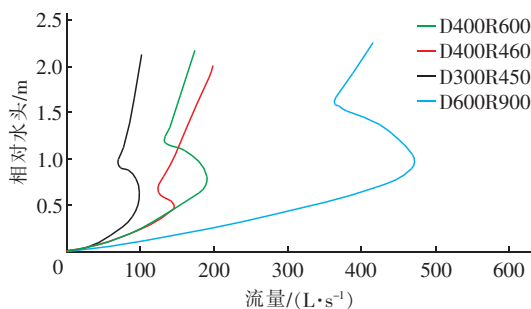


图 5 所加载的不同型号蜗形滞流器的特性曲线

Fig. 5 Characteristic curves of different hydro-brakes

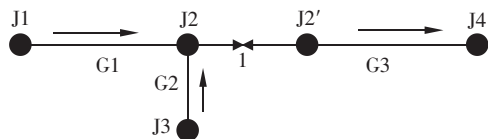


图 6 特性曲线加载方法示意

Fig. 6 Loading method of characteristic curves of hydro-brake

在模型中需要加载蜗形滞流器的检查井,如 J2,在其下游新增一个检查井 J2',其各项参数与 J2 保持一致,同时管道 G3 的长度等参数并不发生改变。用 Outlet 将两个节点相连,并在 Outlet 中以

rating curve 的形式加载不同型号蜗形滞流器的工作特性曲线。

## 2.5 模拟结果分析和安装方案确定

以重现期分别为 3、5、10、20、50 年,降雨历时为 2 h 的降雨情况为条件,对研究区域的滞水情况进行模拟分析。结果表明,随着降雨重现期的增加,滞水情况不断加重,不同重现期下最大滞水量均出现在 J76 检查井,重现期为 3 年时最大滞水量为 122 m<sup>3</sup>、滞水时间为 0.38 h,重现期为 50 年时最大滞水量达到了 307 m<sup>3</sup>、滞水时间达到 0.71 h。最大滞水量出现时间因不同降雨重现期而不同,基本和雨峰时间保持一致。不同积水深度的滞水点个数统计情况如表 2 所示。

表 2 降雨历时为 2 h 时不同重现期下不同积水深度的滞水点个数

Tab. 2 Number of waterlogging points with different ponding depth at different rainfall return periods and rainfall duration of 2 h

积水深度/cm	3 年	5 年	10 年	20 年	50 年
10 ~ 20	5	6	10	14	17
20 ~ 30	1	2	1	5	9
30 ~ 40			1	1	2
40 ~ 50				1	
> 50					1

通过分析可以发现,研究区域出现严重滞水点的原因可归纳为:汇流后排水能力不足、雨水支管起始点附近地势低、雨水干管中段地势低、下垫面径流系数过大等,前两种为本研究区域的主要滞水原因。汇流后排水能力不足是由于研究片区为老城区,雨水管网系统尤其是雨水干管的设计重现期过小导致过流能力不足;地势过低则是由于局部管道逆坡度敷设;下垫面径流系数过大是车位改造占用了原有花坛导致的。因此,需要依据系统模拟结果,在管网系统的合适位置安装适宜型号的蜗形滞流器,实现系统最优的雨水排放方案,从而降低内涝风险。

根据系统模拟结果,逐个对严重滞水点(重现期为 10 年、降雨历时为 2 h 降雨条件下积水深度超过 10 cm 的滞水点)上游相关检查井(通过对比安装点与其上游紧邻检查井同一时刻下的水位差是否符合最小相对水头条件)进行特性曲线加载模拟,根据加载前后的滞水改善效果,确定安装点位置及安装型号的优选方案。最终确定在研究区域内共安装蜗形滞流器 16 个,其中始板桥新村安装 7 个、兴

隆西村安装5个、兴隆东村安装4个,具体方案如表3所示。

表3 蜗形滞流器安装点检查井统计

Tab.3 Statistics of inspection wells with hydro-brakes

滞水点	安装检查井编号	安装型号	所在小区
J117	J66	D400R600	兴隆西村
	J142	D600R900	兴隆东村
J76	J101	D300R450	始板桥新村
	J75	D300R450	始板桥新村
	J72	D300R450	始板桥新村
	J85	D300R450	始板桥新村
J9	J8	D300R450	始板桥新村
	J30	D300R450	始板桥新村
J44	J43	D300R450	始板桥新村
J190	J189	D300R450	兴隆西村
J176	J175	D400R460	兴隆西村
	J187	D300R450	兴隆西村
	J192	D300R450	兴隆西村
J314	J313	D300R450	兴隆东村
	J327	D400R600	兴隆东村
	J323	D300R450	兴隆东村

注: 另有4个严重滞水点J170、J87、J18、J222位于支管起端附近,无适宜安装的上游检查井,故未列出。

## 2.6 模拟结果及分析

实施蜗形滞流器安装方案后,降雨历时为2h、不同重现期下,不同积水深度的滞水点个数统计如下:降雨重现期为3年和5年时,均只有4个积水深度为10~20cm的滞水点;降雨重现期为10年时,有8个积水深度为10~20cm的滞水点和1个积水深度为20~30cm的滞水点;降雨重现期为20年时,有17个积水深度为10~20cm的滞水点和3个积水深度为20~30cm的滞水点;降雨重现期为50年时,有23个积水深度为10~20cm的滞水点、5个积水深度为20~30cm的滞水点和1个积水深度为30~40cm的滞水点。

与原始雨水管网相比,安装蜗形滞流器后,相同重现期下积水深度超过20cm的滞水点明显减少;而积水深度为10~20cm的滞水点个数在重现期 $\leq 10$ 年时差异不明显,当重现期 $>10$ 年时滞水点个数则显著增加。这与蜗形滞流器在雨水管网系统中的滞流作用原理相一致,即分散严重滞水的重要区域的滞水量至上游其他区域,在减轻重要区域的滞水压力的同时,不造成新滞水点严重滞水。

选取2.5节中考察的严重滞水点,采用重现期

为3、5、10、20、50年,历时为2h的降雨条件,对研究区域进行产汇流计算,比较蜗形滞流器安装前后主要滞水点的总滞水量、滞水时间,按照削减率=(安装前-安装后)/安装前的计算方法,可得出总滞水量削减率和滞水时间削减率与降雨重现期的关系,见图7。

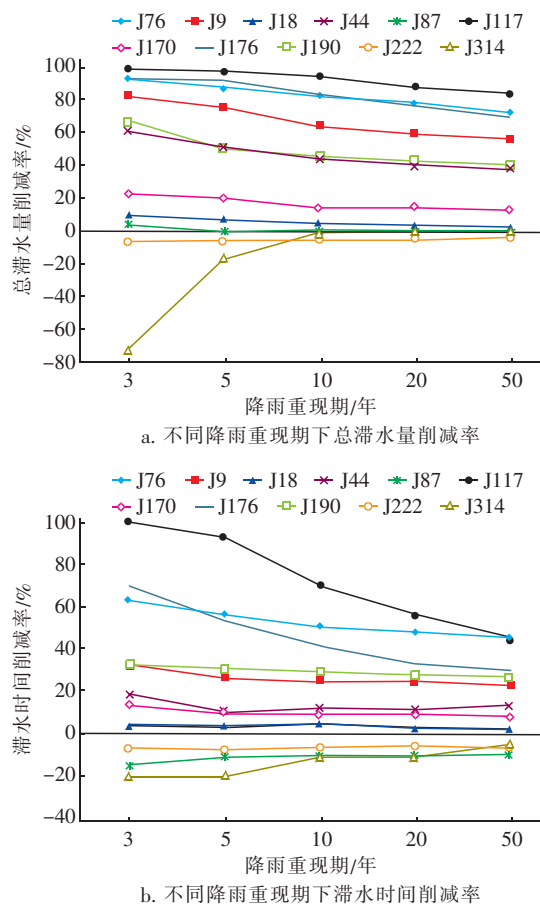


图7 主要滞水点在不同降雨重现期下的总滞水量削减率和滞水时间削减率

Fig.7 Reduction rate of ponding volume and ponding time at different rainfall return periods

由图7可知,各主要滞水点的总滞水量和滞水时间削减率随降雨重现期的增大而逐渐减小,其中J76、J9、J117、J176检查井的总滞水量削减率始终保持在60%以上,在重现期 $\leq 10$ 年时减量效果尤为显著;J190和J44检查井的总滞水量削减率由重现期为3年时的60%左右下降至50年时的40%左右,保持在较高水平;另外4个位于支管端部的严重滞水点J170、J87、J18、J222的总滞水量削减率随着重现期的变化并无明显差异;且位于上游的J314和J222检查井的最大滞水量削减率为负值,说明此检

查井的滞水量不降反升,这是由于该点下游安装蜗形滞流器后出水受到限流而使上游管网检查井中水位抬高,原本可进入管网系统的雨水因容量不足而溢出。虽然 J314 在低降雨重现期时最大滞水量削减率绝对值较大,达到 72.7%,但因总滞水量在  $20\text{ m}^3$  以下,故实际滞水量不大。而滞水时间方面,随着降雨重现期的逐渐增大,滞水时间削减率降低最为显著的是 J76、J176 和 J117 滞水点,其余各点受重现期变化影响不大,其中 J314、J87 和 J222 滞水点的滞水时间在安装蜗形滞流器后反而增加,但增幅均在 20% 及以下。

此外,采用重现期为 10 年,降雨历时分别为 1、2、3 h 的降雨条件,对研究区域进行雨洪模拟。模拟结果表明,同一重现期下,降雨历时对各大滞水点的总滞水量和滞水时间均无显著影响。J76、J9、J117、J176 检查井的总滞水量削减率始终保持在 60% 以上,而滞水时间削减率保持在 60% 以上的仅有 J117。

综上所述可以发现,蜗形滞流器对处于支管始端的滞水点(J170、J87、J18、J222)和地势高的滞水点(J314)产生减量作用效果较弱,甚至会出现滞水量和滞水时间不减反增的情况。对于这些滞水点,不适宜安装蜗形滞流器,其滞水情况可尝试采用改变下垫面径流系数、增加渗透量、新建小型蓄水池等其他措施改善。蜗形滞流器对管道地势低点(J44 和 J190)的雨水总滞流量削减效果较为显著,基本在 40% 以上,但对其滞水时间的改善情况不甚理想。而对于汇流后下游输水能力不足的管段(J76、J9、J117、J176 检查井下游管段),采用安装蜗形滞流器的方法滞水情况改善显著,其总滞水量削减率虽随着降雨重现期的增大而有所减小,但仍能保持在 60% 以上,尤其在重现期  $\leq 10$  年时最大可达到 100%。降雨历时的变化对总滞水量和滞水时间的影响不大。

### 3 结论

① 蜗形滞流器出流量大小跟背压无关,跟相对水头有关,型号为 D200R300 的蜗形滞流器开始形成滞流作用需要最小相对水头在 15 cm 左右、完全形成空气带需要最小相对水头在 55 cm 左右。

② 降雨历时相同的情况下,总滞水量和滞水时间削减率随着重现期的增大而有所减小;单从削减率看,蜗形滞流器对重现期  $\leq 10$  年的降雨具有更

好的雨水调控作用,且受降雨历时的影响较小。

③ 安装于雨水支管起端的蜗形滞流器对滞水点的雨水减量作用效果较弱,削减率基本在 20% 以下,但对于汇流后下游管径过小的管段,在不同降雨条件下削减率均能保持在 60% 以上,最大可达到 100%。

### 参考文献:

- [1] 王静,林于廉,何强,等. 不同雨水控制利用方案下城市暴雨径流效应[J]. 中国给水排水,2016,32(1): 100-105.  
Wang Jing, Lin Yulian, He Qiang, et al. Stormwater runoff effects under different schemes of stormwater control and utilization[J]. China Water & Wastewater, 2016,32(1):100-105(in Chinese).
- [2] 林辰松,邵明,葛韵宇,等. 基于 SWMM 情境模拟的外源雨水型公园绿地雨洪调控效果研究[J]. 北京林业大学学报,2016,38(12):92-103.  
Lin Chensong, Shao Ming, Ge Yunyu, et al. Research of storm flood regulation efficiency of the low impact development of exogenous-rainwater park based on the SWMM simulation [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016,38(12):92-103(in Chinese).
- [3] 张倩,苏保林,袁军营. 城市居民小区 SWMM 降雨径流过程模拟——以营口市贵都花园小区为例[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2012,48(3):276-281.  
Zhang Qian, Su Baolin, Yuan Junying. Simulating rainfall-runoff in urban residential area based on SWMM [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2012,48(3):276-281(in Chinese).
- [4] 李卓熹,秦华鹏,谢坤. 不同降雨条件下低冲击开发的水文效应分析[J]. 中国给水排水,2012,28(21):37-41.  
Li Zhuoxi, Qin Huapeng, Xie Kun. Hydrological effect analysis of low impact development under different rainfall conditions [J]. China Water & Wastewater, 2012,28(21):37-41(in Chinese).
- [5] 李家科,李亚,沈冰,等. 基于 SWMM 模型的城市雨水花园调控措施的效果模拟[J]. 水力发电学报,2014,33(4):60-67.  
Li Jiake, Li Ya, Shen Bing, et al. Simulation of rain garden effects in urbanized area based on SWMM [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014,33(4):60-67(in Chinese).



- [6] 李霞,石宇亭,李国金. 基于SWMM和低影响开发模式的老城区雨水控制模拟研究[J]. 给水排水,2015,41(5):152-156.
- Li Xia, Shi Yuting, Li Guojin. Simulation study on stormwater controlling system of the old town based on SWMM and LID[J]. Water & Wastewater Engineering, 2015,41(5):152-156(in Chinese).
- [7] Jia H F, Lu Y W, Yu S L, *et al.* Planning of LID-BMPs for urban runoff control: The case of Beijing Olympic Village[J]. Separation and Purification Technology, 2012,84:112-119.
- [8] Park S H, Kim M C, Park S H, *et al.* Optimal design of rainwater detention system using SWMM and linear programming[J]. International Journal of Control and Automation, 2015,8(11):211-224.
- [9] 李超,吴燕明,程文韬,等. 蜗形滞流器结构尺寸对其外特性影响规律的三维数值模拟[J]. 水利水电技术,2017,48(6):80-84,90.
- Li Chao, Wu Yanming, Cheng Wentao, *et al.* 3-D numerical simulation on law of influence from structural size of hydro-brake on its external characteristics[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017,48(6):80-84,90(in Chinese).
- [10] 章蕾,吴燕明,程文韬,等. 蜗形滞流器性能优化及不同工况试验研究[J]. 给水排水,2017,43(6):110-116.
- Zhang Lei, Wu Yanming, Cheng Wentao, *et al.* Performance optimization of vortex hydro-brake and experimental study under different working conditions [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(6): 110-116(in Chinese).
- [11] 周毅,余明辉,陈永祥. SWMM子汇水区域宽度参数的估算方法介绍[J]. 中国给水排水,2014,30(22):61-64.
- Zhou Yi, Yu Minghui, Chen Yongxiang. Estimation of sub-catchment width in SWMM[J]. China Water & Wastewater, 2014,30(22):61-64(in Chinese).
- [12] 陈晓燕,张娜,吴芳芳,等. 雨洪管理模型SWMM的原理、参数和应用[J]. 中国给水排水,2013,29(4):4-7.
- Chen Xiaoyan, Zhang Na, Wu Fangfang, *et al.* Stormwater management model (SWMM): Principles, parameters and applications [J]. China Water & Wastewater, 2013,29(4):4-7(in Chinese).



作者简介:章蕾(1989-),女,浙江诸暨人,硕士,工程师,主要研究方向为排水系统雨洪模拟。

E-mail:455033894@qq.com

收稿日期:2019-08-12

节水优先、空间均衡、  
系统治理、两手发力