

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.06.009

屋面雨水与地面雨水高低分流蓄排设计方法

刘云帆

(中国城市建设研究院有限公司, 北京 100120)

摘要: 针对现有排水管道设计重现期不足的问题,提出屋面与地面雨水高低分流蓄排的设计方法,利用屋面雨水自带的高度势能,建设独立的小管径、浅埋深、无动力的压力排水系统,尤其对于建筑密度较大的老旧城区,能够有效削减既有管网的峰值流量,降低施工成本和难度,大幅提高排水系统的整体重现期。在降低内涝风险的同时,也为充分利用屋面优质雨水资源创造条件。采用 FLUENT 模型,模拟不同重现期降雨对应的系统运行情况,分析工况特点并给出设计边界条件。

关键词: 屋面雨水; 高低分流; 蓄排; FLUENT 软件

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)06-0057-07

Design Methodology for High-Low Shunt Storage and Drainage of Roof and Pavement Rainwater

LIU Yun-fan

(China Urban Construction Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: In order to solve the problem of insufficient design return period of existing municipal drainage pipelines, this paper presented a design method for the high-low shunt storage and drainage of rainwater from rooftops and pavements. By leveraging the high potential energy of roof rainwater, an independent pressure drainage system was constructed, characterized by small pipe diameter, shallow burial depth, and no reliance on external power sources. Particularly in densely built-up old urban areas, this system could effectively mitigate peak flows within existing pipe networks, reduce construction cost and complexity, and significantly enhance the overall return period of the drainage system. In addition to mitigating the risk of waterlogging, this approach also established favorable conditions for the optimal utilization of high-quality rainwater resources from rooftops. FLUENT was employed to simulate the system's operation under rainfall conditions corresponding to various return periods, analyze the operational characteristics of these scenarios, and establish the design boundary conditions.

Key words: roof rainwater; high-low shunt; storage and drainage; FLUENT software

“高水高排、低水低排”是城市排水系统规划常用的基本原则,然而在进行社区尺度的排水系统设计时,却往往忽视了屋面相对于路面这一“高水”的特点。当前对于屋面雨水,设计通常采取地面散排或通过雨落管接入雨水井后排入市政管道的方式,与地面径流一同排至市政排水系统。这种方式忽视了屋面雨水所具备的高度势能优势,尤其对于一

些建筑密度较大、屋面占比较高、道路空间受限、排水管网设计重现期偏低、改造难度较大的老旧城区,若将屋面雨水和路面雨水分流排放,建设独立的“高水”压力排水系统,则能充分利用屋面势能,分担路面市政排水系统压力。新建的压力排水系统无需供能,管径小,可沿路边沟敷设,施工便捷;无需更换既有管线,对原有路面破坏小。同时,由

于屋面雨水水质较好, COD多低于100 mg/L, 氨氮和总磷分别在10、0.5 mg/L以下, 基本满足或经简单处理后能够满足城市杂用水水质要求, 独立排放后可集中收集处理, 带来客观的经济效益。此外, 屋面雨水单独蓄排可以减少既有市政排水系统负荷, 降低局部内涝风险, 有利于管网提质增效, 减轻合流制管网溢流污染对水环境的危害^[1]。

然而, 由于不同屋面面积、高度不同, 如果简单地将所有雨落管连接起来, 则会造成系统压力不协调, 不仅不能快速有效地排出屋面雨水, 还可能威胁建筑安全。为克服这一问题, 提出了一种针对屋面雨水的压力整体调控系统设计方法, 通过为单体建筑配置雨水气水分离及压力调节器, 确保压力排水系统中接入各节点的压力稳定协调。

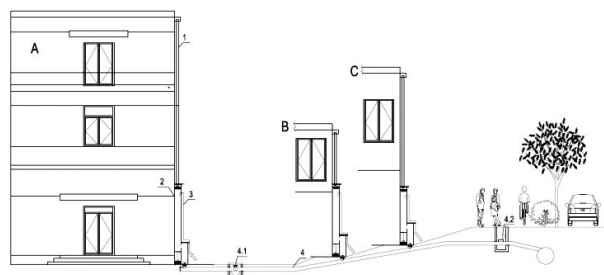
目前, 雨水高低分流蓄排系统设计尚存在较大的改善空间, 提出该方法不仅在于为建筑密度较大地区进行雨水控制与利用工程规划设计提供创新性的技术参考, 更希望能为形成一种新型雨水蓄排设计理念投石问路。

1 方法原理

1.1 系统组成

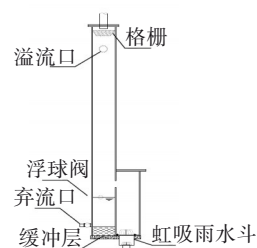
雨水高低分流蓄排系统主要包括屋面雨水系统、雨落管、雨水气水分离及压力调节器(以下简称“调节器”)、溢流管、地面压力雨水干管。

系统特制的雨落管负责连接屋面雨水系统和雨水气水分离及压力调节器, 调节器中设有虹吸雨水斗、溢流口、缓冲层、格栅、浮球阀、弃流口。设备通过溢流口的安装高度来控制调节器中水头, 用于克服沿程阻力和局部阻力, 将地面雨水排放系统中的雨水由低洼处压送至高点。低洼社区屋面雨水收集和无动力排放系统如图1所示。



1. 雨落管 2. 雨水气水分离及压力调节器 3. 溢流管
4. 地面压力流雨水管 4.1. 泄水阀 4.2. 自动排气阀

a. 整体系统



b. 雨水气水分离及压力调节器大样

图1 屋面雨水收集和无动力排放系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the harvesting and non-powered discharge of roof rainwater system

不同位置建筑的水头控制范围不同, 靠近系统末端的较小, 靠近系统始端的较大, 同一地面雨水干管可与多套包含雨落管、雨水气水分离及压力调节器和溢流管在内的系统相连接, 以满足成组建筑的雨水排放需求, 从而构成整个社区的屋面雨水收集和无动力排放系统。

1.2 系统雨水收集及排放运行流程

① 降雨初期: 弃流

降雨初期雨量较小, 屋面雨水通过雨落管进入调节器, 途中利用格栅清除雨水中大颗粒及悬浮物, 经过缓冲层进行消能及消音, 浮球阀开启, 初期雨水通过弃流口弃流至市政排水管道或通过低影响开发措施消解[见图2(a)]。

② 降雨中期: 运行

调节器中液位升高至虹吸雨水斗的开口液位时, 浮球阀关闭, 调节器中水位逐渐上升, 根据建筑高度, 调节器可将雨水水头控制在地面以上3 m左右[见图2(b)]。

当调节器中雨水水头上升超过地面雨水排放系统中最高点, 并能克服全部水头损失时, 系统开始形成压力流[见图2(c)]。

在最不利点形成负压真空状态后(为加速虹吸状态出现, 可考虑在最不利点增设真空器), 管道中液体在虹吸作用下流量和流速均快速增加, 系统中雨水可逆坡排放至低洼片区以外的市政雨水管网[见图2(d)]。

当降雨强度超过设计降雨强度时, 调节器中水位上涨超过溢流水位, 雨水将通过溢流口进入溢流管, 溢流至地面进行散排。

在排放过程中, 系统中的压力彼此平衡补偿。当降雨强度减弱时, 单个调节器排空后虹吸被破坏, 系统重新恢复重力流状态[见图2(e)]。

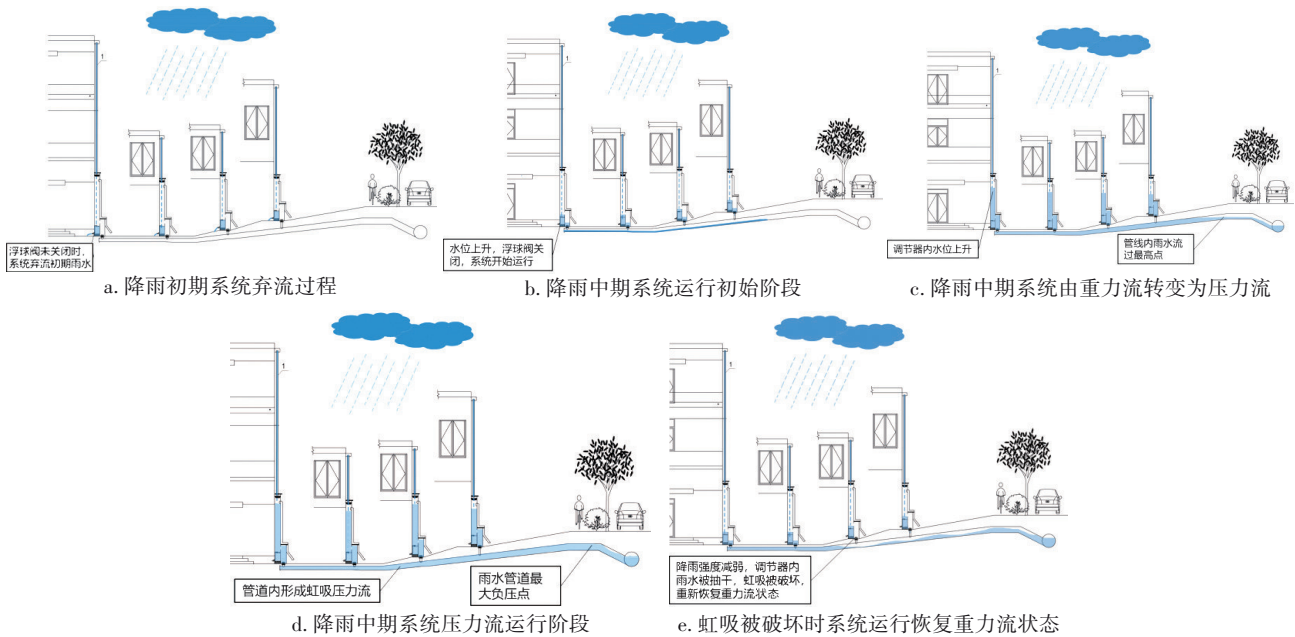


图2 降雨全流程系统示意

Fig.2 Schematic diagram of the whole rainfall flow system

③ 降雨结束

利用地面雨水排放系统最低处设置的泄水阀并将管道内积存的雨水排入既有雨水管渠中,错峰排水。

1.3 系统运行状态

该系统并非持续的重力流或压力流,而是二者交替更迭进行,其运行状态的连贯性取决于调节器高度、管道及各部件的设计优化程度。理论而言,系统基本运行状态遵循以下规律:

- ① 当降雨强度 \leq 弃流流量时,系统不运行;
- ② 当弃流流量 $<$ 降雨强度 \leq 重力流设计流量时,系统以重力流状态运行,调节器不溢流,不形成虹吸;
- ③ 当重力流设计流量 $<$ 降雨强度 \leq 压力流设计流量时,形成虹吸,系统在满管压力流和重力流之间反复切换,调节器不溢流;
- ④ 当降雨强度 $>$ 压力流设计流量时,始终保持虹吸状态,系统为满管压力流,调节器溢流。

1.4 技术特点

- ① 利用屋面雨水的势能对低洼社区雨水进行收集和排放,充分利用屋面雨水压力水头,无需建设泵站即可实现压力流排水,比雨水泵站排水更为节能。
- ② 适用于老旧小区等建筑密度较大、道路改

造条件较差的地区。

③ 屋面雨水具有水量大、水质优良的特点,应优先收集回用,但老旧城区受限空间内往往不具备建设调蓄池的条件,通过压力流雨水排放系统,可将社区内屋面雨水输送至数百米外的区域,为在受限空间外建设雨水调蓄池收集低洼片区的雨水提供条件。

④ 该方法新建管道埋深较浅、管径较小,可沿路边沟敷设,对地下管位空间占用较少,对周边建筑扰动较小,无需开挖替换原有管线,一次性投资较小。

⑤ 该方法中雨水气水分离及压力调节器的设计,除截留污染物和降低噪声外,还具有以下作用:首先,不同高差建筑的雨落管压力不均,若不设计调节器,则高楼层屋面雨水压力过大,导致低楼层屋面雨水无法进入压力雨水排水系统。压力调节器可以协调系统压力,使系统中每一节点的压力水头保持在设计高度,即使屋面面积不同,流量差异造成调节器内水位下降快慢不均,各调节器也会由于压力连通器平衡的原理相互调节水位。同时调节器本身具有一定调蓄能力,可以适应短时液位波动影响;其次,屋面雨落管内流体一般为气水混合流态(保持水膜流或水塞流状态),调节器积蓄水流形成水封,使地面压力排水管道系统快速形成虹

吸效应。

⑥ 雨水气水分离及压力调节器设计中包含的初期弃流装置,除具有初期弃流和补充周边绿化用水的作用,还使得系统在降雨强度较小的降雨早期不工作,在降雨强度较大,甚至超过既有排水系统设计重现期后才开始工作,可以有效地发挥削减降雨峰值流量的作用。

2 应用边界条件

屋面雨水与路面雨水高低分流蓄排设计方法应用于工程实践时,具有一定限制条件,主要包括道路宽度、规划片区总面积、屋面面积占比、低洼区最大落差等。

2.1 由道路宽度确定系统规模

在老旧城区、历史街区等道路施工条件较差的区域应用时,道路宽度对压力雨水管道的管径规模以及敷设方式构成制约,直接影响系统设计汇水区的面积规模(见表1)。

表1 不同道路宽度对应的管道敷设方式

Tab.1 Pipeline laying methods corresponding to different road widths

道路宽度/m	敷设方式	管径规模
<6	沿道路一侧敷设于线性沟中(见图3)	≤DN350
[6,8)	沿道路一侧敷设于线性沟中	≤DN400
[8,12)	单侧沿路浅埋	≤DN700
	双侧沿路浅埋	≤DN500

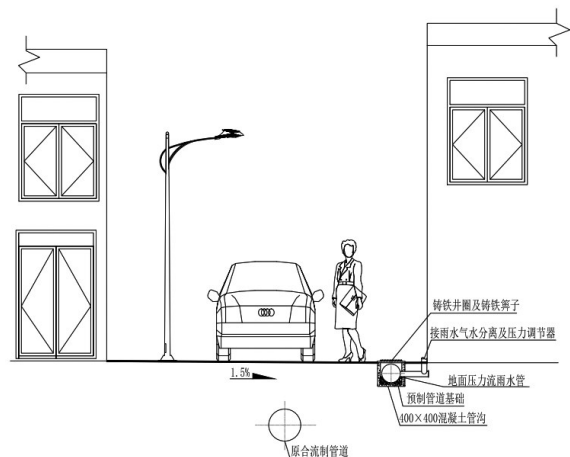


图3 道路雨水压力管道断面示意

Fig.3 Schematic diagram of road stormwater pressure pipeline cross section

2.2 规划片区总面积对管线长度的要求

规划片区总面积对管线长度的要求如表2所示。

表2 规划片区总面积与管线长度的关系

Tab.2 Relationship between the total area of planning district and the length of pipeline

片区总面积/hm ²	最不利管线长度/m	推荐末端管径
<10	一般≤300	≤DN400
[10,15)	一般≤400	≤DN550
[15,20)	一般≤500	≤DN700
[20,30)	一般≤550	≤DN800

注: 推荐末端管径是在北京地区3年一遇降雨强度下,起端调节器控制水头2.5 m条件时,克服对应最不利管路水头损失的合理管径。

2.3 屋面面积占比对方法应用效率的限制

将屋面雨水与地面雨水分流可以有效降低既有排水管道的水力负荷,但径流削减程度的高低依赖于片区内屋面面积的占比。在北京地区5年一遇降雨强度下[5.06 L/(s·100 m²)],假定地面综合径流系数为0.7,当屋面面积占比达30%时,系统可以达到约36%的总径流削减率;当既有排水能力为1年一遇[3.23 L/(s·100 m²)]时,采用屋面单独排水理论上可以使整体排水能力提高至5年一遇(见表3)。

表3 5年一遇降雨强度下不同屋面面积占比对应的径流削减率

Tab.3 Runoff reduction rates corresponding to different roof area proportions under the rainfall intensity which occurs once every five years

屋面面积占比/%	削减率/%	削减后等效降雨强度/(L·s ⁻¹ ·100 m ⁻²)	屋面面积占比/%	削减率/%	削减后等效降雨强度/(L·s ⁻¹ ·100 m ⁻²)
10	12	4.45	22	26	3.72
12	14	4.33	24	28	3.60
14	16	4.21	26	31	3.48
16	19	4.09	28	33	3.36
18	21	3.97	30	36	3.24
20	24	3.85			

由表3可知,采用雨水高低分流蓄排的方法对径流的削减率直接取决于片区的屋面面积占比,屋面面积占比越大的片区,应用该方法时效果越好。

2.4 低洼区最大落差对系统的要求

地面雨水管线系统最重要的设计指标是水头损失,管径、管材、管线长度都会影响水头损失的大小,而水头损失最终决定了调节器的设计高度。因此,在系统设计时首先要确定管线的总水头损失。调节器最高控制水位至管线系统最高点的最大

大高差(H_0)为系统内流体提供了克服沿程水头损失和局部水头损失的能量以及流体的动能,具体如图4所示。

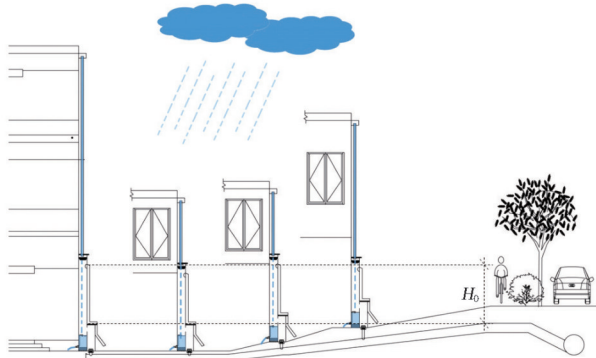


图4 最高控制水位至管线系统最高点的最大高差示意

Fig.4 Schematic diagram of the maximum height difference from the highest control water level to the highest point of the pipeline system

受建筑安全性及建筑外立面美观性的限制,调节器的高度一般不超过3 m,直径不大于1 m。在调节器高度确定的情况下,系统中管道起始点与最高点的管顶标高落差越大,可用水头越小。因此,为使系统安全运行,对于10 hm²左右的片区,管道起始点与最高点的管顶高差不宜大于1 m。

3 基于FLUENT的雨水高低分流排放案例

3.1 模型构建

目前国内尚无在实际项目中采用雨水高低分流蓄排设计方法的实践,而基于流体力学的理论测算无法反映复杂系统运行的流体状态,因此,笔者利用FLUENT软件,针对某老旧小区改造案例进行雨水高低分流蓄排设计,重点验证以下几个问题:①系统运行后各位置调节器的实际溢流情况;②系统运行后各部位的充满度、流速变化;③系统形成满流后虹吸作用对流量的影响;④系统实施后对提升既有管线排水重现期及雨水收集的实际效果。基于FLUENT的模型构建技术流程见图5。

案例社区为北京市某老旧小区,总面积约31 hm²,最不利管路长度460 m,最不利汇水区面积6.3 hm²;管路起始端地势低洼,地面高程海拔44.1 m,管路沿线最高点海拔45.0 m,最大落差0.9 m;小区道路宽度以6~8 m为主,最窄处5.7 m。

基于FLUENT的流场分析采用数值法求解,由于模型壁面不规则,故该研究所建立的流场模型

CFD数值求解方法采用有限体积法(FVM)模型。在进行数值分析时,网格划分质量直接关系到分析结果的正确性和精度。该研究采用FLUENT前处理软件SDCM和FLUENT-meshing对流道进行前处理和网格划分,流道网格见图6。整个流道计算域采用多面体核心网格,共划分为1 008 453个单元,网格质量0.792。多相模型采用欧拉双流体模型,液态水为第一相,空气为第二相,设置压力-速度耦合(Pressure-velocity Coupling)算法为SIMPLIC,压力项采用二阶格式,动量项、湍流动能项均采用二阶迎风格式,选择默认的松弛因子。采用标准迭代方式进行求解,设置迭代计算从入口端面为起始位置对流场求解初始化^[2-5]。

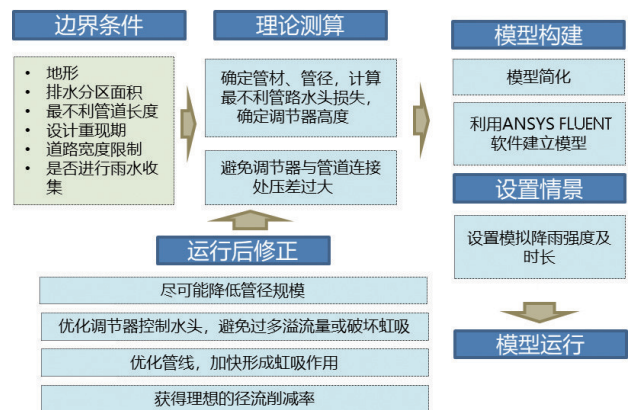


图5 基于FLUENT的模型构建技术流程

Fig.5 Technical process of model construction based on FLUENT

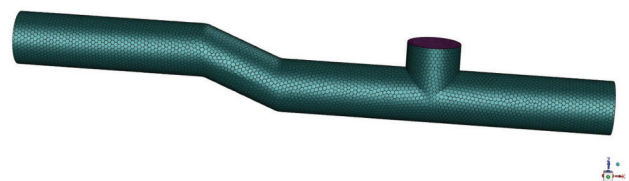


图6 流道网格模型构建

Fig.6 Model construction of channel mesh

3.2 模型分析

模型基于ANSYS FLUENT软件,采用北京地区暴雨强度公式计算,在北京市3年一遇降雨强度[4.48 L/(s·100 m²)]下连续运行,设定降雨时长为2 h,不考虑现状排水系统的排水能力,单纯核算屋面系统的雨水排水能力。

分别对系统中1、3、5、6、7、8点的液体充满度及流速进行监测,选择9个调节器监测其充满度及溢流量变化,监测点布局如图7所示。



图7 监测点布局示意

Fig.7 Schematic layout of monitoring points

由运行结果可知,在管道充满度方面,运行初期系统内水量快速增加,由于监测点1位于系统最上游,标高最低,在重力作用下最先形成满流状态。在保持3年一遇降雨强度下,监测点7,即管道最高点处在降雨开始后5 800 s左右形成满流。监测点7至出口处的管底坡度由逆坡变为顺坡,此时管道最高点处产生负压,形成虹吸作用[见图8(a)]。

在流速方面,运行初期系统内快速充水,由于进水量恒定,各监测段流速很快趋于稳定,虹吸作用形成后,系统中各监测点流速出现较明显的提升[见图8(b)]。

图8(c)为系统内9个调节器充满度及管道的平均充满度,图8(d)为调节器溢流情况。可知,运行初期,大部分调节器已出现溢流。这说明在3年一遇降雨强度下,系统以重力流状态运行时,受通水能力的限制,虽然此时系统已经开始排水,且管道内尚有富余容积,但多数调节器在3 min内就完全充满,且会保持较长时间的溢流状态,由此可见设计中调节器的调节容积偏小,不足以应对3年一遇降雨强度冲击下的瞬时流量负荷。这显然降低了系统的运行效率,解决此问题的方法是在单体建筑中增加调节器数量,降低单一调节器的进水量,增大调节器连通管管径,减少局部水头损失或适当增大调节器容积。不过在系统运行初期,由于上游管线标高最低,系统出现逆流,水量无法及时排出,无论如何调整,上游调节器仍然会不可避免地出现持续溢流。在系统发生虹吸作用后,系统内管道流速增加,流量加大,调节器充满度明显下降且不再出现溢流。

分析调节器溢流量,在系统运行后,由于降雨强度恒定,输入流量不变,整体溢流量也比较稳定,

各调节器溢流量的区别主要由屋面面积差异导致,3年一遇降雨强度下调节器溢流量约为调节器进水量的12%~16%,在虹吸现象出现后溢流量明显降低,并呈现持续下降趋势。

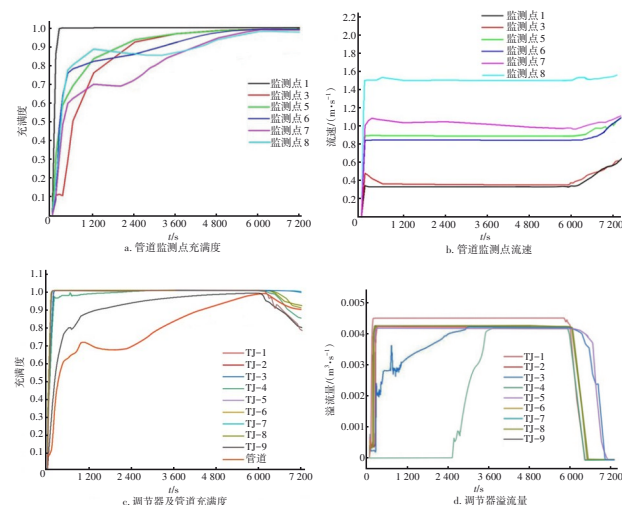


图8 模型运行结果

Fig.8 Model running results

从模拟结果看,降雨强度为4.48 L/(s·100 m²)时,2 h内屋面径流总量为3 132 m³,系统出水口收集雨水共2 705.4 m³,管道内存留雨水19.4 m³。该排水分区总面积6.3 hm²,地面综合径流系数0.7,屋面面积0.97 hm²,片区总径流量15 166 m³,系统收集率为18%。在实际情况中,由于降雨不会在2 h内一直保持在3年一遇强度,因此系统收集率会略有提高。

4 结语

① 利用屋面与地面雨水高低分流蓄排的设计方法,可以有效削减既有管网的峰值流量,处理效果与片区内建筑密度呈正相关,建筑密度越大的片区,采用该方法越能有效提升排水系统重现期。当屋面面积占比达到30%时,采用屋面单独排水理论上可以使整体排水能力由1年一遇提高至5年一遇。

② 屋面与地面雨水高低分流蓄排的设计方法中,考虑到建筑外立面美观性,调节器的设计高度一般不超过3 m,在此条件下,系统中管道起始点与最高点的管顶高差不宜大于1 m。当条件允许时,适当增大调节器的设计高度,仍可以有效提高系统的运行能力。

③ 屋面雨水水质较好,利用屋面与地面雨水

高低分流蓄排的设计方法,可以有效收集屋面雨水并实现无动力前提下数百米距离的转输,适用于老旧小区将雨水资源转输至周边空间。

④ 利用ANSYS FLUENT软件进行模拟,降雨强度为 $4.48 \text{ L}/(\text{s} \cdot 100 \text{ m}^2)$ 时,系统运行的常态溢流量为12%~16%。即使在系统内整体充满度较低的情况下,调节器仍可以较快形成满流并开始溢流。虹吸作用能有效加快系统流速,提高系统充满度,因此尽早使系统形成虹吸是提高其工作效率的关键。为了加快虹吸形成,可以在管道最高点增设快速排气抽真空设备,或在适当位置增加气囊封堵装置,加速形成满流状态,提高运行效率。

⑤ 该方法适用于建筑密度较大、地形低洼、道路改造条件较差的空间受限片区的排水系统改造工程,将其应用于外排水的多层建筑屋面雨水系统改造时,成本相对较低。一般地区的排水系统及内排水的高层建筑进行排水系统优化改造时,可经技术经济比选后考虑是否采用该方法。

参考文献:

- [1] 王宁,曾坚,康晓鹏,等. 高密度建成区排水系统雨污分流改造研究与实践[J]. 给水排水, 2022, 48(12): 56-61.
- WANG Ning, ZENG Jian, KANG Xiaokun, *et al.* Research and practice on transformation of rainwater and sewage diversion of drainage system in high-density built-up areas [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(12): 56-61(in Chinese).
- [2] 陈韬,钟传胤,李丹,等. 基于SWMM的大型双曲屋面雨水径流模拟[J]. 中国给水排水, 2022, 38(15): 121-127.

CHEN Tao, ZHONG Chuanyin, LI Dan, *et al.* Modeling of stormwater runoff in large hyperbolic roof based on SWMM [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(15): 121-127(in Chinese).

- [3] 王慧莉. 虹吸式屋面雨水系统非稳态工况水力测试研究[J]. 给水排水, 2019, 45(3): 100-105.
- WANG Huili. Study of the non steady state condition hydraulic test in the siphonic roof drainage system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(3): 100-105(in Chinese).
- [4] 朱德,刘杰,肖欣谕,等. 基于Fluent的液压密封流体膜压力精确化研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(10): 122-129.
- ZHU De, LIU Jie, XIAO Xinyu, *et al.* Precise study on fluid film pressure of hydraulic seal based on Fluent[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(10): 122-129 (in Chinese).
- [5] 邓小叶,彭培英,朱海荣,等. 基于Fluent的波节管内流体流动与传热特性研究[J]. 河北工业科技, 2020, 37(3): 144-150.
- DENG Xiaoye, PENG Peiying, ZHU Hairong, *et al.* Research on fluid flow and heat transfer performance in corrugated tubes based on Fluent [J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2020, 37(3): 144-150(in Chinese).

作者简介:刘云帆(1988-),男,北京人,硕士,高级工程师,主要从事给排水设计、规划、标准化工作。

E-mail:lyfsoar@pku.org.cn

收稿日期:2023-10-08

修回日期:2023-11-16

(编辑:沈靖怡)

珍惜水,爱护水,以水促和平