

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.09.008

城市下凹桥区内涝系统治理

郭磊, 范科文, 曹玉鑫, 韩宏泉, 王通, 程玉林
(北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京市 100082)

摘 要: 下凹桥区等低洼区域排水问题, 不仅会使其所在环线交通中断, 还会影响周边道路及其它环线的通行, 影响人民正常生活, 并给国家和人民的财产造成了重大损失。以内涝频发并受到广泛关注的城市下凹桥区为研究对象, 在研究过程中通过校核城市下凹桥区现状排水能力、诊断下凹桥区内涝形成原因, 分析下凹桥区排水设施改造方案, 提出了针对下凹式立交桥积滞水问题的预防建议和解决方案。

关键词: 内涝; 下凹桥区; 排水系统模拟

中图分类号: TU992 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2023)09-0042-06

0 引 言

近年来, 随着极端降雨事件的发生, 北京市的下凹式立交桥桥区多次遭受城市内涝灾害的侵袭。下凹式立交桥, 顾名思义, 其在道路十字交叉处并未采取高架的方式, 而是其中一条道路降到地面以下, 以横穿过位于地面的另一条道路或铁路。

下凹桥区的雨水排水系统分为两套: 专为排除下凹道路区域雨水的低水雨水排水系统和排除桥区周边流域雨水的高水雨水排水系统。其中, 低水系统设有雨水泵房, 由雨水管收集的雨水经雨水泵提升后排入到该地区下游的水体内。而高水系统则主要通过重力流排水排入到下游水体。

由于桥区下凹处地势低于周边区域, 遇极端降雨时易造成内涝积水。而采用传统的方法, 难以量化分析桥区积水的具体时空分布和积水原因, 因此本研究拟采用基于数学模型的模拟分析方法对桥区的积水情况进行研究。

1 现状问题及分析

1.1 现状条件

北京属于暖温带半湿润半干旱季风气候, 其特点是四季分明, 冬季最长, 夏季次之, 春、秋短促; 雨热同季, 降水集中且强度大, 主要集中在夏季, 7、8 两月尤为集中; 降水量分布不均, 山前迎风坡为多雨区, 而背风坡为少雨区。

北京平均年降水量 532.0 mm, 年平均降雨日数为 70.6 d。极端年最大雨量 813.2 mm(1994 年), 极端年最少雨量 266.9 mm(1999 年)。降雨集中在每年 6 月至 9 月, 7 月、8 月最多。月、年降水量常年值见图 1。

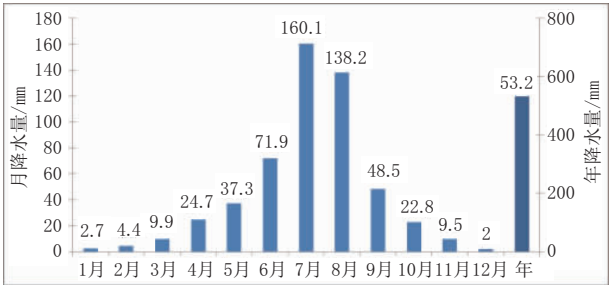


图 1 月、年降水量常年值(1981-2010 年平均)

北京市城近郊区已建成有较完善的雨、污水排水系统, 现有雨水管线系统多按重现期 $P=1 \sim 2$ a 降雨强度设置, 雨水泵站多按重现期 $P=2 \sim 3$ a 建设。北京市中心城区现状管网情况见图 2。



图 2 北京市中心城区现状管网评估图

1.2 桥区排水分析

(1) 中心城区桥区情况

从影响立交桥区雨水排水方式的角度分析, 立交桥有二种形式: 上跨式立交桥、下穿式立交桥。一般上

收稿日期: 2023-08-08

作者简介: 郭磊(1983—), 男, 本科, 高级工程师, 从事给排水规划设计工作。

跨式立交桥桥区雨水通过重力流排向下游,即高水系统,包括下游雨水管道或下游天然水体。下穿式立交桥又分为两种情况,其一是交互式立交,其二是直接下穿,道路过铁路时大部分为该种型式。下凹桥区雨水的排除则有二种可能:当下凹桥区最低点高程较高,可采用重力流排除雨水;当下凹桥区最低点高程较低时,桥区的雨水无法通过重力流排除,则需要提升下凹桥区的局部雨水,然后向下游排除,即为低水系统,排水型式也可称为强排。

北京市四环内强制排水的下凹桥区泵站共 52 座,其分布见图 3, 52 座立交排水泵站中,设计重现期 $P=5\text{ a}$ 的有 4 座,重现期 $P=3\text{ a}$ 的有 13 座,重现期 $P=2\text{ a}$ 的有 32 座,重现期 $P<2\text{ a}$ 的有 3 座。

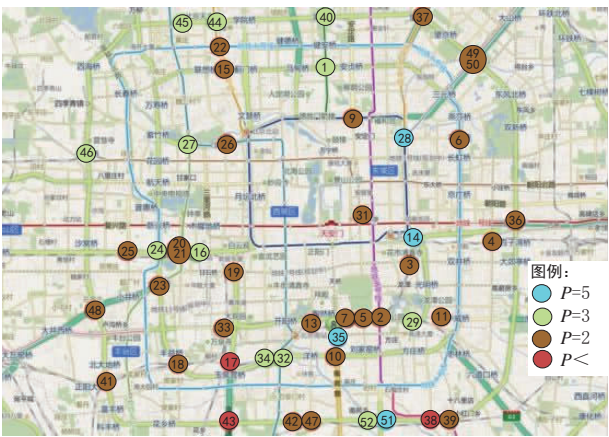


图 3 北京市中心城区下凹式立交桥排水泵站分布图

(2)下凹桥区积水原因

近年来极端暴雨的频发,暴露了下凹桥区的排水问题。分析 52 座泵站存在的问题,其主要分为 5 种状况:a. 泵站汇水面积增加,综合径流系数增大;b. 低水收水系统不完善;c. 高水系统排水标准偏低,高水系统不完善;d. 河水位对排水管线的顶托;e. 泵站供电系统为单路供电(非积水主要原因,是泵站的不安全因素)。前三种情况比较普遍。随着汇水面积的加大或径流系数的增大,径流量也相应增加,而高水系统的标准偏低与收水系统却不完善,当超频率降雨发生时,就会形成客水流入桥区,从而造成收水能力不足。积水原因所占比例见图 4。

2 总体思路

2.1 桥区排水分析

下凹桥区内涝综合整治是系统工程,需要统筹源头、过程、末端各个系统,既需要在源头减排减少进入桥区的径流量,又要提高管线、泵站标准提升排水能力,同时需要通过调蓄合理处置涝水并加

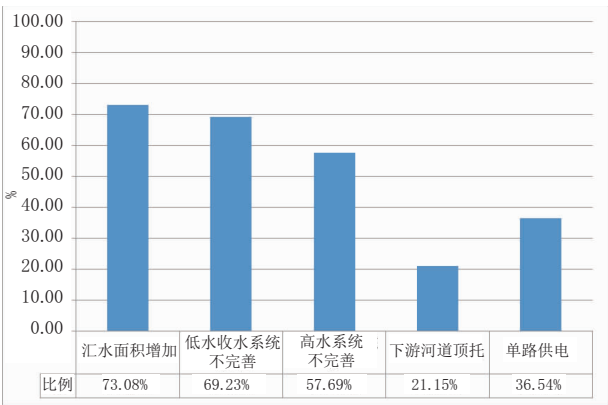


图 4 北京市中心城区下凹式立交桥积水原因分析图

大雨水利用。考虑到每个下凹桥区具体情况不同,制定方案前要因地制宜,一桥一策,科学论证。同时,将桥区雨水系统改造和下游雨水出路整治相结合,保证排水安全。由于下凹桥区高水和低水都有各自的流域面积,要“高水高排,高截高蓄;低水低排低蓄,雨水就近入河”,高水高排目的是减少低水区泵站的汇流面积,控制进入下凹桥区低点的雨水量。实施高水高截高蓄,尽量避免高水进入下凹桥区范围。桥区雨水收水系统由雨水口、雨水口连接管及泵站进水管组成,可以形象地比喻为“嘴巴”和“喉咙”,收水系统功能是否完备,直接影响到路面的雨水能否迅速排除,低水系统要提高收水系统能力,改造泵站及新建调蓄池,整体提升桥区排水能力。在此原则下,通过新建及改扩建现有防涝设施,采取调蓄、滞渗和管理等措施,使下凹桥区防涝系统能够有效应对防涝重现期设计暴雨。具体思路是:

(1)通出路:按规划治理河道,提高河道的排水能力,以解决河道洪水顶托高水管道的的问题。

(2)拦客水:针对客水汇入问题,考虑提高下凹桥区周边地区雨水(高水)管道的设计标准,同时对桥区周边小区进行海绵城市改造,减少客水流量并在高水区采取雨水拦蓄措施,尽量减少客水汇入桥区。

(3)提标准:增加桥区低水区雨水口,改造雨水(低水)管道和泵站,提高低水区雨水收水和抽升能力。

(4)蓄涝水:以下凹桥区及周边地区防涝系统规划为基础,按防涝重现期设计暴雨核算蓄水池容积。

2.2 数学模型法计算

为解决下凹桥区的内涝积水问题,雨水调蓄池是其中一项重要措施,雨水调蓄池容积的合理计算关乎内涝安全和工程投资。《城镇雨水调蓄工程技术

规范》中采用脱过系数法,可用于无客水汇入的低水区调蓄计算,对于存在客水汇入的桥区,调蓄池容积分为客水部分和低水区部分,由于客水汇入时间与低水区峰值时间不同,若用脱过系数法分别计算客水及低水区部分容积进行叠加,会造成调蓄池容积计算偏大,可采用数学模型,计算得到雨水调蓄池容积。

模型构建流程如下:

首先,进行资料收集。资料收集的范围应包括下凹桥区所在排水分区,具体收集资料内容为:管线,检查井信息;雨水口信息;雨水口水位流量关系;排水系统的流域范围及其下垫面信息(用地类型及分布);地面高程信息;实测降雨数据和设计降雨数据;泵站数据(泵的流量扬程信息,泵的启停控制信息,集水池和出水井的几何尺寸等);调蓄池数据(调蓄容积,调蓄池和泵站先后入流的控制信息等),边界条件数据(如排水系统的上游入流信息,下游排水口水的水位信息等)。

其次,建立数学模型并进行参数确定和优化。应以下凹桥区所在排水分区内的全部管网为基础建立管网模型,包括高水管网和低水管网(含泵站等设施);以地形图为基础建立DEM并根据建筑、道路、绿地情况进行地形处理,特别需要对下凹桥区周边道路驼峰以及铁路、挡墙、围墙和堤坝等对地面径流有较大影响的要素进行特别处理,以真实反应地形情况;模型构建完成后,应根据经验和规范要求对参数进行设定,有监测数据的地区应根据监测数据进行校核;最终,将上游入流信息和下游河道水位信息(水位过程线或者具体水位)输入模型,调试后确定最终模型。

最后,根据现状评估和规划方案的需求,确定具体的模拟情景(不同降雨条件、不同边界条件等),分析积水的核心原因、评估设施的运行效果。

下凹桥区模型是针对具体积水点的辅助模型,模型中需要对细节进行特别关注。雨水口是桥区雨水收水系统的重要组成部分,在建模过程中需要对雨水口的收水能力进行评估并概化到模型中,以评估收水系统影响,合理确定雨水口改造方案。

3 典型桥区总体方案

以肖村桥桥区积水治理工程(成寿寺雨水泵站升级改造工程)为例,介绍下凹桥区总体方案设计。

3.1 现况校核

肖村桥桥区现况系统见图5。

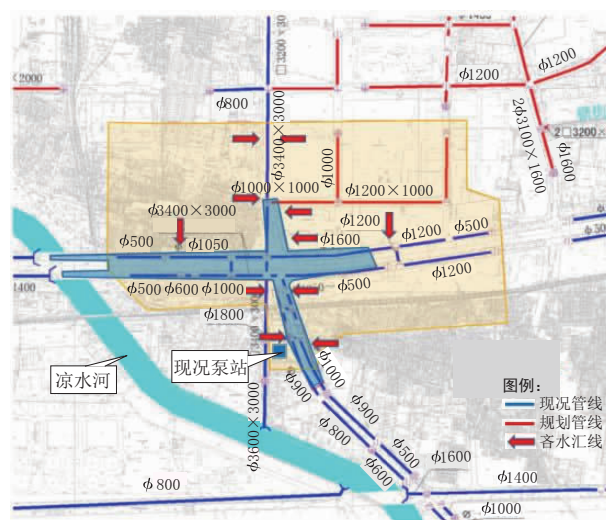


图5 肖村桥桥区现况系统图

(1) 泵站设计标准偏低

成寿寺雨水泵站建于1994年,位于成寿寺路与双丰铁路立交以南约250m处,南邻成寿寺污水泵站,占地面积0.256hm²。雨水泵站汇水面积11.4hm²,设计重现期 $P=1a$,设计流量为1.9m³/s,单路供电。泵站进、出水管管径 $D=1400mm$,下游排入成寿寺路西侧 $W \times H=3400mm \times 3000mm$ 雨水方沟,最终排入凉水河。

根据最新的地形测量及现场踏勘分析,最终确定泵站汇水面积为13hm²,现况泵站设计标准偏低,泵站能力不足。

(2) 管网能力不足

a. 桥区低水排除系统能力不足

肖村桥低水雨水经 $D=500 \sim 900mm$ 雨水管汇集后,进入双丰铁路桥下 $D=900 \sim 1400mm$ 雨水干线,自北向南再向西进入雨水泵站,经提升后排入成寿寺路西侧 $W \times H=3400mm \times 3000mm$ 雨水方沟,最终排入凉水河。

桥下主路雨水口58个,辅路雨水口52个。按每座雨水口15L/s的泄水量计算,进水量为1.65m³/s。现有雨水口数量无法满足进水量要求,需增加。成寿寺雨水泵站进水管管径 $D=1400mm$,坡度为0.0011,满流时过水能力1.95m³/s;出水管管径 $D=1400mm$,坡度为0.0012,满流时过水能力2.14m³/s。收水系统、出水系统按 $P=10a$ 设计标准, $Q=5.7m^3/s$,现况进、出水管无法满足设计流量要求。

b. 桥区高水排除系统排水能力不足,客水进入桥区

肖村桥西侧 $D=1000mm$ 高水雨水,东侧 $D=400 \sim 1600mm$ 高水雨水,均汇入 $W \times H=3400mm \times$

3 000 mm 雨水方沟(穿双丰铁路处为 $2-D=1\,550\text{ mm}$),西北向南排入凉水河。路段内雨水设计重现期 $P=1\text{ a}$,径流系数 Ψ :建设区 $\Psi=0.55$,村镇和绿地 $\Psi=0.35$ 。高水管线设计标准偏低,且高水雨水在穿双丰铁路处由 $W\times H=3\,400\text{ mm}\times 3\,000\text{ mm}$ 雨水方沟变为 2 根 $D=1\,550\text{ mm}$ 雨水管,由于排水能力不足,在降雨时会有冒水现象发生。

另外,于 1995 年建立的“城外诚家具模范城”区域雨水也汇入立交高水系统。由于此区域内雨水管线不完善,在降雨时,该区域会有雨水从成寿寺路东侧入口、南四环路北侧入口进入桥区。由于高水系统超标降雨排水能力不足,客水进入下凹桥区,增加了流入泵站水量。

(3)河道未按规划实施

肖村桥桥区及其周边地区的排水出路为凉水河。凉水河是北京市区主要排水河道之一,上游支流起于石景山区人民渠入口,流经海淀、西城、丰台、朝阳、下游向东向南经大兴区、北京经济技术开发区、通州区,最终由通州榆林庄闸入北运河,全长约 67 km,总流域面积约 629.7 km^2 。

凉水河干流最近一次治理是在 2004 年,治理时综合考虑投资力度和拆迁难度,河道治理未实现规划断面,治理设计的 20 a、50 a 一遇洪水位均比规划水位高 40~50 cm,同时沿线京津铁路桥、大红门铁路桥、肖村桥等 7 座铁路、公路桥未按规划实施改造,50 a 一遇水位雍高 0.8~1.2 m,造成干流 9.4 km 河段洪水出槽漫溢。“7.21”暴雨时,凉水河水位超 20 a 一遇洪水位,泵站排水受凉水河水位顶托。

3.2 规划方案

通过对肖村桥桥区排水系统的分析,肖村桥桥区积水的主要原因是桥区周边地区的排水系统设计能力较低,且受到河道水位顶托,不能及时排除本区域的雨水,造成雨水以坡面流方式汇入下凹桥区。而桥区雨水收水系统和排除能力不足以排除这些雨水,造成桥区积水。针对以上造成积水的主要原因,提出相应的解决方案,使桥区达到内涝防治标准。

(1)对凉水河干流进行治理,在现状河道断面基础上拓宽,实现城市防洪规划断面,改建现状 7 座阻水严重的铁路、公路桥。

(2)提高桥区周边地区高水系统雨水管道的排水能力,客水区雨水分区域进行拦截,采取工程措施尽量将客水拦截在桥区外围,避免超过雨水管道设计标准的客水进入桥区,尽量减少客水的汇入量。

(3)考虑到桥区周边排水系统不可能完全排出本区域内的雨水,仍会有一部分雨水进入桥区,因此,需要提高桥区内的排水和蓄水能力,包括改扩建雨水口、雨水管道、排水泵站和新建桥区调蓄池等。

4 典型桥区设施设计

下凹桥区雨水调蓄设施宜结合立交雨水泵站设置,无条件时可充分利用立交范围内绿地或相邻区域建设,调蓄设施可因地制宜,采用多种形式。

收水系统设计,完善现有低水区域收水系统,以达到 10 a 重现期标准。

具体改造方案(见图 6):废除肖村桥南侧现状 $D=900\text{ mm}$ 雨水管,新建 $D=900\sim 1\,200\text{ mm}$ 雨水管;自铁路桥低点新建 $D=1\,600\text{ mm}$ 雨水管向北,与新建 $D=900\sim 1\,200\text{ mm}$ 雨水管汇合后,新建 $D=2\,000\text{ mm}$ 雨水管向西进入新建泵站、调蓄池。废除现状 $D=900\sim 1\,400\text{ mm}$ 现状泵站进水管。拆除现有桥区低水范围雨水口,改为联合式雨水口(收水能力 20 L/s),共需新建雨水口 428 座。



图 6 肖村桥桥区总体改造设计图

排水系统设计,新建 $P=5\text{ a}$ 雨水泵站及独立退水,桥区高水管线分流。

新建雨水泵站。由于现状泵站结构尺寸有限,现状水泵间距较小,没有足够空间更换大流量水泵,所以考虑拆除现状泵站。在肖村桥西南侧绿地新建泵站。按 $P=5\text{ a}$ 、 $\Psi=0.95$ 、 $t=5\text{ min}$ 升级泵站提升能力,设计流量 $Q=5.0\text{ m}^3/\text{s}$,其中一台水泵选用变频器控制。

改造泵房出水管路,泵房独立压力出水,满足 $P=5\text{ a}$ 设计标准 $Q=5.0\text{ m}^3/\text{s}$ 。新建泵房出水管 $D1\,800\text{ mm}$,向西排入凉水河。

由于高水雨水系统在下穿铁路时,2 根 $D=1\,550\text{ mm}$

雨水管排水能力不足,在南四环南侧与现况 $W \times H=3\,400\text{ mm} \times 3\,000\text{ mm}$ 雨水方沟相接新建 $W \times H=4\,400\text{ mm} \times 3\,000\text{ mm}$ 雨水方沟,分流部分高水雨水直接向西排入凉水河。

4.3 调蓄系统设计,新建初期雨水池及雨水调蓄池

(1)调蓄池规模

根据改造要求,需为泵站新建调蓄池,新建调蓄池与泵站合建,位于肖村桥西南侧绿地内。调蓄池由初期雨水池和雨水调蓄池两部分组成。初期雨水池按照初期降雨厚度 15 mm 计算;新建调蓄池,进行削峰调蓄;初期雨水储存池 $1\,950\text{ m}^3$,雨水调蓄池 $10\,450\text{ m}^3$,总池容 $12\,400\text{ m}^3$ 。

初期雨水池及雨水调蓄池内分别设置放空泵,负责排空池内雨水。泵坑上方设置检修孔,方便水泵吊装和维修。为方便池内排泥,池底设置坡道,坡向泵坑。池底沉积物可在重力作用下滑进泵坑。为保证池内压力正常及空气流通,池顶设置通风管。

(2)调蓄池运行流程(见图 7)

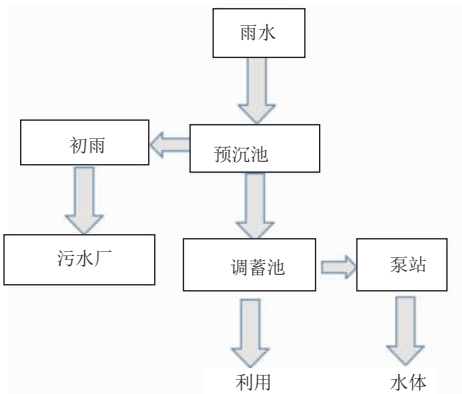


图 7 调蓄池运行流程图

调蓄池运行流程为初期雨水进入初期雨水池内,雨水提升泵不启动。初期雨水存储完毕后关闭初期雨水池闸门。雨水进入雨水调蓄池,随后开启泵站将超量雨水排入下游河道。降雨后,初期雨水提升排至污水管道系统;雨水调蓄池内雨水用来浇灌周边绿地等市政杂用。

4.4 模型模拟

模型模拟采用 InfoWorks ICM 软件进行模拟。

(1)模型数据

成寿寺的高低水系统的地理范围包括交会于肖村桥的南北向的成寿寺路,三台山路和东西向的南四环东路以及周边汇水区域。该雨水系统包括沿道路铺设的雨水口,检查井和管道,以及用于抽排低水雨水的泵站,其排水出路为凉水河。

分别构建了成寿寺流域改造前的现况模型及改

造后模型。成寿寺调蓄池平剖面见图 8。

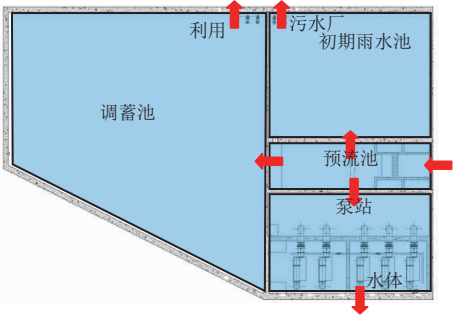


图 8 成寿寺调蓄池平剖面图

(2)模型参数

雨水量模拟采用划分子集水区,并将子集水区指定到雨水口或者检查井的模型。其中,径流表面类型及其参数的设置见表 1。

表 1 子集水区参数

径流表面	产流模型	固定径流系数	径流模型	地面糙率
道路/屋面	Fixed	0.95	SWMM	0.014
其余区域综合	Fixed	0.50(流域用地加权平均)	SWMM	0.018

新建管道粗糙系数按设计规范选用 0.013,现况管道考虑使用后粗糙度增加,粗糙度系数设置为 0.014。

(3)设计降雨

设计降雨过程按北京市地方标准《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》中的“1 440 min 雨型分配表”,见图 9。

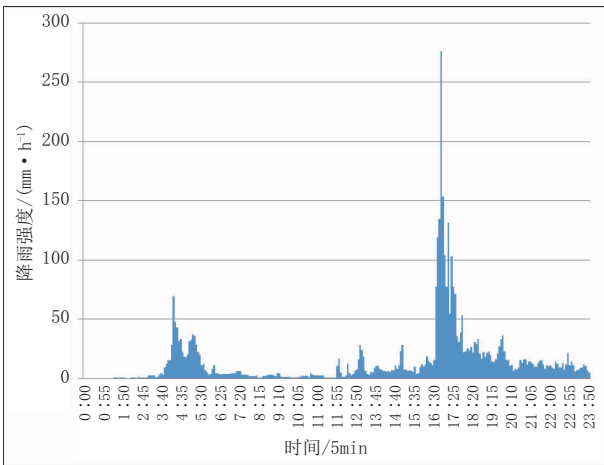


图 9 北京市 50 a 一遇设计降雨过程线

(4)现况模型模拟

对现况管网进行了“7.21”实际降雨强度下的全流域模拟,其结果如下:现况管线在“7.21”实际降雨强度下流域内有多处积水,肖村桥桥区低点积水情况严重。肖村桥桥区东侧高水管线的水力坡降明显大于管道坡降,已为压力流状态,且部分区域地势过

低,导致低洼处检查井冒水,流入桥区低点,见图 10。



图 10 肖村桥桥区建模平面图

(5)改造模型模拟

实施排水改造项目后的肖村桥排水系统,其排水条件得到极大改善。在设计降雨模拟中,即使在 $P=50$ 的降雨模拟中,成寿寺桥区低点积水最深为 0.44 m,水深在 0.15 m 以上的积水时间为 26 min,未达到积水 30 min 的标准,见图 11、图 12。

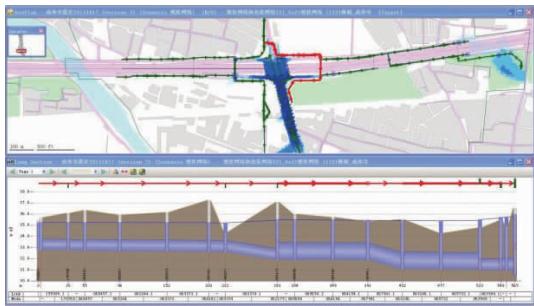


图 11 改造前成寿寺桥区积水及高水管平面纵断面图



图 12 $P=50$ a 改造后成寿寺桥区积水及泵站出水管平面纵断面图

5 结 语

本文统计了北京中心城区的立交桥形式,并对现况立交桥区的排水现状和可能的积水原因进行了分析。应用数学模型模拟分析各桥区排水情况,深入分析桥区积水产生的原因,评价桥区改造方案。研究表明采用数学模型分析桥区排水系统能够深入研究内涝积水的过程,并能对积水原因进行量化分析。客水是桥区积水的重要原因,若桥区封闭性较好,无客水流入,现况泵站可应对较高强度降雨。针对客水进入桥区的情况,可通过提高周边高水管线标准,减少客水汇入桥区,同时通过改造泵站及新建调蓄池,提高桥区低水标准,应对重现期 $P=50$ a 一遇降雨。通过模型模拟可以得出,改造方案显著改善了桥区排水,缓解了内涝积水情况。通过本次研究,综合排水能力校核与诊断的城市雨水排水系统模拟方法是可行的,此次利用构建的数学模型对排水能力的校核是后评估,建议有条件时应首先对其进行模拟,通过分析现况积水原因,制定相应的改造方案,并通过模拟验证方案效果,再实施方案设计,这样会使改造方案更加科学合理。

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com