

城市隧道防淹工程性措施及策略研究

王新庆, 周建华, 王志红, 郭红敏

[悉地(苏州)勘察设计院有限公司, 江苏 苏州 215123]

摘要: 近年来极端暴雨频发使城市隧道内涝风险加剧, 为有效应对城市隧道积淹风险、提升内涝防控水平, 需充分发挥工程性和非工程性措施的效能。以城市隧道为研究对象, 聚焦工程性防淹措施展开系统分析, 遵循“疏堵结合、高水高排、低水低排”思路, 将工程措施分为拦截控源、削减峰值、强排兜底与配套保障, 明确各类措施的技术要求及综合运用策略。4类措施联动可有效阻断客水、削减径流峰值、提升强排能力, 形成可靠防淹屏障, 为隧道排水工程设计优化与管理增效提供参考。

关键词: 隧道; 防淹; 工程性措施; 策略

中图分类号: U457

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)09-0248-05

Research on Engineering Measures and Strategies for Flood Prevention in Urban Tunnels

WANG Xinqing, ZHOU Jianhua, WANG Zhihong, GUO Hongmin

[CCDI (SuZhou) Exploration and Design Consultant Co., Ltd., Suzhou 215123, China]

Abstract: In recent years, the frequent occurrence of extreme rainstorms has intensified the risk of waterlogging and flooding in urban tunnels. To effectively address the risk of urban tunnel flooding and enhance the level of urban waterlogging prevention and control, it is necessary to fully leverage the effectiveness of both engineering and non-engineering measures. Taking urban tunnels as the research object, a systematic analysis is carried out focusing on engineering flood prevention measures. Following the idea of “combining blocking and draining, discharging high-level water at high elevations and low-level water at low elevations”, the engineering measures are classified into interception and source control, peak reduction, forced discharge as a safety net, and supporting support. The technical requirements and comprehensive application strategies for each type of measure are clearly defined. The linkage of four types of measures can effectively block incoming water, reduce the peak of runoff, and enhance the capacity for forced drainage to form a reliable flood prevention barrier, which provides a reference for the design optimization and management efficiency improvement of tunnel drainage engineering.

Keywords: tunnel; flood prevention; engineering measures; strategies

0 引言

近年来, 全球极端天气事件呈现趋多、趋频、趋强、趋广态势, 暴雨洪涝等灾害的突发性、极端性、反常性越来越明显^[1]。在城市局部范围内, 受城市“雨岛效应”“热岛效应”等局地微气候的影响, 极端暴雨更加突出^[2], 局部短历时强降雨事件频发已对城市基础设施安全运行及居民生命财产安全构成严重威胁, 成为制约城市可持续发展、威胁人居环境安全的关键瓶颈。作为现代城市交通网络的核心节点, 城市隧道在沟通城市板块、提升路网通行效率方面发

挥着不可替代的作用, 但其“下凹低洼”的竖向空间特征, 使其天然具备内涝积水的易感性, 成为城市洪涝防控中的薄弱环节。因此, 城市隧道已被明确列为城市排水防涝体系中的重点保障对象, 其防淹措施与策略备受学界与工程界关注。

城市隧道防淹措施可分为工程性与非工程性2类, 二者协同互补。工程性措施以硬件设施为核心, 包含挡墙、驼峰、调蓄池、截水沟、排水管道、雨水泵站及出水口等, 主要针对设计标准内的降雨事件构建刚性防控能力。非工程性措施则以软件保障为支撑, 涵盖应急处置、日常养护、调度管理等, 防控范围延伸至超标降雨事件, 形成弹性应对机制。

王向斐^[3]建议开展防涝专项设计并与城市暴雨洪涝风险分析、城市内涝风险图充分衔接, 提高下穿

收稿日期: 2026-03-31

作者简介: 王新庆(1982—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事给排水和水资源利用相关的工程设计与研究。

通道设计标准;李前锋^[4]坚持雨污分流及“分外水、排内水”的工程措施;吴佳俊^[5]提出“围起来、打出去”的方式;黄俊^[6]从挡水、截水、排水、控制、预警和应急 6 个系统给出防淹要求。从研究现状看,多侧重对隧道淹水的拦截、排除等的局部或单项措施分析,缺乏从预防淹水措施启用流程视角的分析,尤其是系统化的全链条分析及运用策略,尚未形成系统完备的防淹体系^[7]。本文将聚焦完整的工程性措施,系统梳理其分类、内涵及运用策略,为城市隧道工程设计优化与管理提供借鉴。

城市隧道包括地下道路、人行地道和下穿立交通道^[6],在防淹技术方面,三者具有高度共性。本文研究的城市隧道主要指地下道路,人行地道及下穿立交通道在隧址环境、结构形式、工程规模等方面与地下道路存在一定差异,其防淹技术可参考本文成果,并结合自身特点适当调整。

1 工程性措施

城市隧道防淹应坚持“疏堵结合”的防洪排涝原则,遵循“高水高排、低水低排”的排水策略。通过挡墙等措施拦截客水,封闭汇水区域,阻断“高水”入侵;通过蓄水池等措施最大程度削减汇入隧道底部的水量,减轻雨水泵站负荷;通过提高泵站排除能力等措施将已汇入隧道底部的水量动力提升至下游受纳水体或管网;结合供电、监测等措施保障各类设施设备功能的可靠、高效发挥。4 类措施协同作用,为城市隧道构建安全可靠的防淹屏障,确保人员生命与财产安全。

1.1 拦截控源

通过源头干预,拦截客水,是城市隧道防淹的第一道屏障。城市隧道从结构形式上可分为 U 型槽式与挡墙式,U 型槽式天然具有阻隔地下水的能

1.1.1 挡墙

挡墙兼具道路功能单元分区、防撞及径流阻隔功能,设置在城市隧道敞开段两侧及端部。挡墙高度不应低于 1.0 m^[8],长度至少需延伸至驼峰顶点外侧 0.5 m;采用重力式挡墙,C30 实体钢筋混凝土结构,严禁镂空导致阻水失效。优先与隧道 U 型槽同步浇筑,提升整体性与抗渗性,受条件限制时可单独布设,衔接部位采用遇水膨胀止水条密封,避免

渗漏。

1.1.2 驼峰

驼峰可通过凸起段两侧高程差物理阻隔隧道所衔接的普通道路段客水汇入隧道,通常设置在隧道两侧敞开段外部,形成分水岭。平面位置与高程需严格契合道路总体纵断面设计方案及线路型走向,确保与周边道路平顺衔接以保障行车舒适性,如图 1 所示。驼峰高度应根据排水重现期、地形条件、道路功能等级等因素综合确定,通常应高于地面 0.2 ~ 0.5 m,最终需通过水力计算验证,保障降雨工况下排水安全。驼峰在防御较小强度或历时较小的雨水时作用明显^[9]。

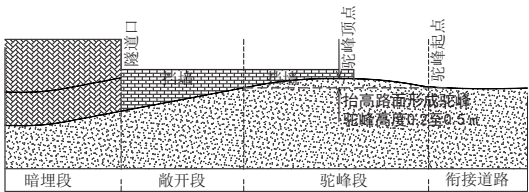


图 1 挡墙、驼峰示意图

1.1.3 截水沟

截水沟是拦截地表径流的明沟,布设于隧道敞开段与暗埋段分界洞口,采用双道连续布设,形成“主次拦截”的双重防护体系。第一道截水沟拦截 80% 以上的敞开段表面径流,第二道截水沟拦截残余径流。两道截水沟纵向间距不小于 1.0 m,沟底设置 1% ~ 2% 坡度坡向两侧边沟,以保证水流速度,避免泥沙淤积。排水遵循“定向导排、就近入泵”原则,敞开段雨水经横截沟导排至两侧边沟后再接入雨水泵房,动力提升排放至水体或市政管网,避免雨水汇入立交底部引发积水。

1.1.4 盲管

盲管是地下水疏导设施,主要适用于地下水埋藏浅,砂性土、裂隙岩、岩溶区等水文地质复杂的场地。其布设需遵循“全面覆盖、分区疏导”原则,间距为 2 ~ 5 m(地下水富集区取 2 ~ 3 m,弱渗透区取 3 ~ 5 m),埋深 ≥ 0.8 m 且需低于路床底面 30 cm 以上^[10],材质为透水性土工合成材料,管身包裹 200 g/m² 以上土工布滤层。通过“收集-疏导-排放”的闭环流程导排地下水,降低地下水结构渗透压力,减轻雨水泵站排水负荷。值得注意的是,应谨慎处理盲管防堵塞问题,避免侧墙渗水、翻浆及冻胀。

1.1.5 不透水层

不透水层作为地下水隔渗屏障,其适用场景与盲管互补。通常可采用 P8 级抗渗混凝土或 ≥ 2 mm 厚

高分子防水卷材^[11]。U型槽式隧道可在钢筋混凝土壳体内部涂刷厚度不小于1.5 mm的水泥基渗透结晶涂料,重点处理薄弱部位,避免渗漏引发结构病害。

1.2 削减峰值

在有效拦截客水基础上,还应最大限度削减进入隧道底部的径流量,例如设置调蓄池、分散设置雨水泵站;或迟滞径流峰值到达时间,例如减小地面坡度、增加地面粗糙系数等。上述分类并非严格界定,以一种目标为主的措施也常兼顾其他目标。

1.2.1 调蓄池

调蓄池通过在隧道周边设置截留设施,以削减径流峰值。利用蓄水空间缓冲、削减单位时间汇流量,待泵站排空前池水量或降雨结束后,再有组织地排出蓄积水量,本质上是以空间换时间。根据城镇雨水调蓄工程技术规范^[12],设置于隧道雨水管渠系统中削减峰值流量的调蓄池,有效容积应通过比较上下游流量过程线,按式(1)计算:

$$V = \int_0^T [Q_i(t) - Q_o(t)] dt \quad (1)$$

式中: V 为调蓄池有效容积, m^3 ; Q_i 为上游设计流量, m^3/s ; Q_o 为下游设计流量, m^3/s ; t 为降雨历时, min 。

调蓄池的典型规模还应考虑安全超高、放空检修及溢流的要求,容积应能够覆盖雨水泵站排水流量,并结合可利用场地空间,因地制宜确定。调蓄池的设置尚应考虑与雨水泵站的调蓄时间、水位相匹配。

1.2.2 分散设置雨水泵站

对于设有中隔墙的隧道,可将传统两侧车道合并设置的雨水泵站改为两侧分散设置,形成互不连通的排水单元。该方案以“化整为零”的分区策略,用2个相对较小规模泵站替代单一较大泵站,实现排水风险分散化。从可靠性角度,可降低单泵站故障(如失电、设备损坏等)的影响范围,从而提升系统的整体冗余度与抗风险能力,但也存在增加总投资及后期巡检、维修等工作量的弊端,需在工程设计阶段做好技术经济论证。

1.2.3 优化地面坡度

减小地面坡度可延长地面集水时间、降低流速,进而削减最大径流流量并延迟峰值。值得注意的是,在工程上,地面坡度不可随意降低,排水需求仅是地面坡度设置的考虑因素之一,地面坡度还需综合考虑道路等级、总体纵断面等因素。

根据城镇内涝防治技术规范^[13],当地面汇水距

离不大于90 m时,地面漫流状态为坡面层流,地面坡度可经数学推导后采用如下公式表达:

$$S = \left(\frac{n_0 \cdot L^{0.6}}{t_a \cdot q^{0.4}} \right)^{3.3} \quad (2)$$

式中: S 为地面坡度,无量纲; t_a 为地面集水时间, min ; n_0 为粗糙系数,无量纲; L 为地面集水距离, m ; q 为设计暴雨强度, $L/(S \cdot ha)$ 。

当地面汇水距离大于90 m时,坡面层流转变为浅层细沟流,流速不再与暴雨强度相关,只与地面粗糙程度和坡面状况有关,地面坡度经推导得出如下表达式:

$$S = \left(\frac{L}{60kt_a} \right)^2 \quad (3)$$

式中: k 为地面截留系数,无量纲,通常采用混凝土、沥青或砖石铺装的地面取6.19,未铺装地面取4.91。

无论以上何种情形,结合暴雨强度公式 $q = \frac{167A_1(1 + ClgP)}{(t + b)^n}$ 及雨水设计流量公式 $Q = \Psi Fq$ 可知,固定 Ψ 、 F 、 P 等参数时,坡度 S 越小,集水时间 t_a 越大,降雨历时 t 越大,暴雨强度 q 越小,则流量 Q 越小。

1.2.4 优化地面粗糙系数

增大地面粗糙系数可延长集水时间、削减径流峰值,其作用机理与坡度优化类似,如1.2.3节所述。在工程实践中,混凝土路面、沥青路面最常见,其粗糙系数为0.013~0.014,可通过技术手段进一步提高,常用提升技术分为2类。

(1)材料改性技术,通过添加玄武岩骨料、橡胶改性剂等外掺料提升路面机械嵌挤性能与摩擦阻力;

(2)表面构造优化技术,通过拉毛、刻槽、抗滑颗粒撒布等工艺增加路面纹理深度与构造起伏度,阻滞径流。上述技术可将路面粗糙系数提升至0.014~0.018,但该措施存在局限性,在降雨初期有效,形成径流后作用减弱甚至失效。

1.3 强排兜底

“堵水”不成则“疏水”,对于经拦截、削减后,仍汇流至隧道坡底的雨水,须动力强排。工程上,有组织地转输地面径流至坡段最低处的集水池,通过水泵动力提升,将集水池雨水排至高处周边水体;若周边无水体,则可排至市政雨水管网。为实现高效、可靠排除雨水的目的,可从以下方面着手:提高泵站设计能力、科学配泵、优化进出水管参数、控制下游受

纳水体水位、提高下游市政雨水管网排水能力。

1.3.1 提高泵站设计能力

在隧道底部设置强排雨水泵站是隧道排水的最常见工程措施。其排水设计暴雨重现期应根据城镇类型、地形特点和气候特征等因素,经技术经济比较后按表 1 取值^[14]。超大和特大城市一般取 50 年一遇,有条件的可同步按 100 年一遇校核,或直接提高重现期标准至 100 年一遇,以提升排水系统的极端降雨应对能力。

表 1 雨水管渠设计重现期 单位:年一遇

城镇类型	城区类型			
	中心城区	非中心城区	中心城区的重要地区	中心城区地下通道和下沉广场等
超大城市和特大城市	3~5	2~3	5~10	30~50
大城市	2~5	2~3	5~10	20~30
中等城市和小城市	2~3	2~3	3~5	10~20

1.3.2 科学配泵

雨水泵站的水泵配置应遵循科学合理、经济节约的原则,选取合适的流量及扬程,确保水泵在设计扬程工况下处于高效运行区间。水泵应分组布设,台数不应少于 2 台且不宜大于 8 台,当水量变化很大时,可配置不同规格的水泵,但不宜超过 2 种,也可采用变频调速装置或叶片可调式水泵^[14],以提升系统对流量波动的适应性。根据泵站重要程度设置备用泵:当工作泵台数≤4 台时,备用泵为 1 台;当工作泵台数≥5 台时,备用泵不少于 2 台。

1.3.3 优化进出水管设置

雨水泵站出水管应单独排放至下游水体,形成独立的隧道排水管网系统;受条件限制时,可排放至下游市政雨水管网。出水管管径应与水泵流量匹配,流速宜为 0.8~2.5 m/s。出水管起端应设止回阀,排放至下游水体出水管末端管内顶标高应高于水体洪水位,并按需设置拍门、鸭嘴阀等防倒流装置,避免高水位条件下倒灌。排放至下游市政雨水管网的出水管应考虑消能措施,应设置压力释放井,降低压力流雨水对下游检查井和管道的冲刷破坏。

1.3.4 控制下游接纳水体水位

下游接纳水体的水位直接影响泵站排水安全与效率,应优先选取圩区、包围圈等水位受控的河流、湖泊。此类水体可通过闸站调控水位,确保水体最高水位始终低于雨水泵站出水管管内顶标高,为泵站运行提供可靠的下游水力条件。在工程实践中,需结合水体的水文特征、防洪排涝规划等因素,合理

设定调控水位阈值,配套建设水位实时监测与预警装置,确保调控机制稳定可靠。

1.3.5 提高下游市政雨水管网排水能力

对于接纳泵站出水管的市政雨水管网,应复核其排水能力,重点验证管网是否能同时承纳本地流量与泵站出水管汇入的突增节点流量。若不满足,应提标改造管网,避免该下游管网成为泵站排水的限制性瓶颈。提标改造的设计重现期宜提高一级,例如原设计重现期为 5 年一遇的市政雨水管网,当同时接纳泵站出水管排放流量时,应按不低于 10 年一遇设计。

1.4 配套保障

除拦截、削减和强排措施外,可靠的供电条件、智慧监测、防淹板、逃生爬梯等配套设施亦为上述措施提供技术支撑,协同发挥降低人员和财产损失的作用。

1.4.1 可靠的供电条件

供电可靠性是雨水泵站核心设备(水泵)正常启动与稳定运行的前提。雨水泵站的供电应按二级负荷设计,特别重要地区的泵站应按一级负荷设计。二级负荷要求双回路电源供电,避免一回路线路失效时主机失电,泵站停运。工程实践中,现状泵站改造若受制于第二供电线路限制无法满足双回路要求,应增加柴油发电机作为备用电源。水泵配电柜应满足防淹要求,避免安装在雨水泵站的低处,优先布设在地面,且高于周围地面 0.5 m;地面不具备条件时,应提高配电柜基座安全高度,根据所在地区最高内涝水位确定,并预留不小于 0.3 m 的安全冗余,多层泵站的配电柜不得设置在最底层。

1.4.2 智慧监测

城市隧道防淹的关键之一是实现积水状态的实时监测与精准预警,构建“前端感知-中端预警-后端调度”的全链条架构,监测预警技术正向“空天地一体化”协同感知方向发展^[15]。隧道入口设置积水显示屏、声光报警装置,洞内关键断面及最低点布设视频监控、电子水尺,标注积水警戒线与禁行线,实现积水实时监测、精准预警及交通指引。雨水泵站采用“就地手动-远程自动”双控模式,具备远程自动启停、参数调节功能,快速响应雨情、缩短处置时间,配套安防监控与智能巡检系统,实现设备运行监测、故障预警及“无人值守、远传远控”的智慧运行目标。

1.4.3 防淹板

有条件的城市隧道可在入口处设置防淹板,构

建地面客水涌入隧道的物理阻断屏障,分为手动插板式与自动起浮式。手动插板式挡板采用梁式阻水结构设计,人工将预制阻水板插入预先埋设于隧道入口两侧的插板槽内,应检查插板与槽体的贴合密封性、阻水板材抗压强度。自动起浮式挡板采用高强度轻质复合材料,常规状态下与地面齐平,不影响正常交通,当遭遇强降雨导致地面积水达到设定阈值时,借助水浮力驱动挡板自动起浮,也可人工提前操作升起挡板实施预防性阻断。该装置无需供电,无需值守,可设置于斜坡地段^[16]。

1.4.4 逃生爬梯

为保障淹水时隧道内人员的安全疏散,有条件的城市隧道应沿隧道纵向设置应急逃生爬梯,畅通隧道内部与外部安全区域的紧急逃生通路。逃生爬梯纵向布设间距不宜大于500 m;爬梯点位应与隧道防淹门布置相协同,优先设置于防淹门外侧的安全区域,避免防淹门关闭后阻断逃生路径;爬梯配套设施应按应急救援标准配备救生背笼、救生圈等装备,并在爬梯周边设置清晰的应急疏散标识,保障人员紧急逃生需求。

2 运用策略

城市隧道防淹目标的实现,需依赖完善的配套技术措施体系作为支撑,综合运用拦截、削减、强排及配套措施,协同联动。有效拦截设计汇水范围以外客水,最大限度削减进入隧道底部的敞开段地面径流量,提升雨水泵站强排效能,确保城市隧道通行空间无积水、无内涝,保障车辆与人员通行安全。各类措施运用策略如图2所示。

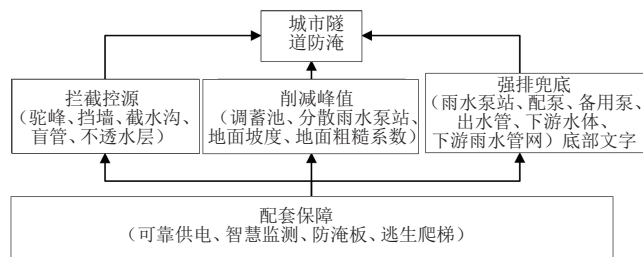


图2 策略示意图

3 结语

(1)本文聚焦城市隧道防淹工程性措施,系统梳理其分类与技术要求,构建“拦截控源-削减峰值-强排兜底-配套保障”协同防控体系,提出综合运用策略,确定了工程体系可应对暴雨积水的上限能力。

(2)本文突破现有研究碎片化局限,以全链条视角整合各类措施,细化了相关技术参数和要求,可为隧道排水工程设计优化与管理增效提供参考。

(3)防涝实践中的具体成效也有赖于非工程性措施的落实,例如应急预案及运用、调度管理、交通参与者的安全意识和依从性,这些与隧道防淹能力的下限相关,有待从业者进一步深入研究分析。

参考文献:

- [1] 张建云,宋晓猛,贺瑞敏.新时期大型城市洪涝灾害防控及思考[J].中国水利,2025(17):15-21.
- [2] 梅超,刘家宏,王佳,等.统筹城市防洪体系和内涝治理的难点及对策探讨[J].中国水利,2025(17):22-26.
- [3] 王向斐.城市下穿通道受淹风险分析及防范应对[J].中国防汛抗旱,2024,34(增刊1):24-27;63.
- [4] 李前锋.中心城区城市立交内涝系统化防治思路探讨[J].中国市政工程,2024(4):72-77;155.
- [5] 吴佳俊.下穿立交道路积水点改造问题研究与探讨[J].城市道桥与防洪,2017,5(5):151-153;161.
- [6] 黄俊,邢冬冬,张忠宇,等.城市隧道防淹技术体系研究[J].隧道建设,2024,44(10):1917-1927.
- [7] 武志松,刘俊,车轮飞.地铁工程防淹体系构建与创新设备应用[J].城市轨道交通研究,2024,27(8):275-278.
- [8] CJJ 37—2012 城市道路工程设计规范(2016年版)[S].
- [9] 叶云鹏,王龙飞.城镇地下空间利用工程多种防洪技术措施对比分析[J].水利科学与寒区工程,2024,7(4):97-99.
- [10] JTG D30—2015 公路路基设计规范[S].
- [11] GB/T 50010—2010 混凝土结构设计标准[S].
- [12] GB 51174—2017 城镇雨水调蓄工程技术规范[S].
- [13] GB 51222—2017 城镇内涝防治技术规范[S].
- [14] GB 50014—2021 室外排水设计标准[S].
- [15] 汤钟,张亮,刘豪,等.极端降雨背景下城市地下空间防淹体系构建与规划对策[J].水利规划与设计,2026(6):1-8;15.
- [16] 卢昌仪,王开玉,崔艳斌.城市轨道交通防淹措施研究[J].施工技术,2025,54(18):98-102.