

基于耦合模型的城市隧道洪涝安全评估研究

魏文鼎

(广东省建筑设计研究院有限公司, 广东 广州 500010)

摘要: 从源头有效治理城市内涝,提升城市品质,对城市隧道开展洪涝安全评估工作,显得尤为重要。通过耦合一维河网水动力模型、二维陆域地表模型及地下管网排水模型,建立一套珠三角城市隧道洪涝模型计算方法。通过模型计算结果,得出隧道淹没水深,结合城市建设用地洪涝风险等级划分标准中内涝风险图的要求,评价拟建隧道风险等级。再通过水文分析、暴雨、洪水及外江潮位综合分析,对城市隧道进行防洪排涝评估,供其他类似项目参考。

关键词: 城市隧道;洪涝安全评估;一维河道模型;陆域地表模型;耦合模型

中图分类号: U457.45

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)11-0174-04

0 引言

为贯彻落实习近平总书记防灾减灾救灾重要论述,坚持以防为主,防抗救相结合,努力实现从注重灾后救助向注重灾前预防转变,从源头有效治理城市内涝,提升城市品质,对城市基础设施项目,尤其是城市隧道开展洪涝安全评估工作,显得尤为重要。

万环西路位于南沙新区万顷沙板块,南接南沙港区、深中通道、北连东新高速,是新区南部片区的门户通道,地理位置详见图 1。对其快速化改造可进一步提升南沙自贸区作为湾区核心区的战略地位,将有效增强拓展粤港澳合作、加强珠三角协作、参与全球化的区域联动发展。



图 1 项目地理位置图

1 工程概况

万环西路快速化改造(下横沥南岸至南中高速段)工程起于下横沥南岸,止于南中高速,路线全长 14.3 km,规划道路等级为城市主干路,红线宽度为 60 m。

番中公路节点,万环西路主线采用双向 6 车道隧道下穿,隧道敞口段长 220.0 m(敞口段)+120.0 m(暗埋段)+215.0 m(敞开段)=555.0 m。隧道明挖施工,闭口段采用矩形钢筋混凝土框架结构,宽度 28.5 m,敞口段采用 U 形钢筋混凝土结构,宽度 27.5 m,具体情况详见图 2。

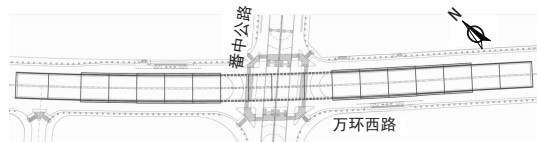


图 2 隧道平面图

番中公路隧道起点设计高程 7.11 m,附近现状地面高程 4.34~6.82 m;终点设计高程 7.112 m,附近现状地面高程 4.39~6.66 m,隧道位置最低点高程为 -0.7 m。以番中公路为界,西段雨水由万环西路两侧雨水管道收集排入二涌,东段雨水由万环西路两侧雨水管道收集排入三涌,雨水泵站位于隧道中间位置。

2 洪涝模型计算

本项目建设单元年径流总量控制率为 75%,设计降雨量为 34.02 mm,控制降雨量 21.5 万 m^3 ,防洪(潮)标准为 200 a 一遇,排涝标准为 50 a 一遇,内涝防治标准为 100 a 一遇。

收稿日期: 2023-12-18

作者简介: 魏文鼎(1987—),男,工学硕士,高级工程师,从事市政路桥设计工作。

2.1 河网模型计算

2.1.1 计算方法

番中公路隧道位于万顷沙排涝片区,片区内水系复杂,河网纵横交错,并且涉及多座水闸、泵站的联合调度,传统水力分析工具无法对其进行准确计算。本次研究通过建立一维河网水动力模型进行模拟计算,模拟范围为万顷沙片区。借助数学模型,计算万顷沙片区各河涌的规划水面线,为河涌整治方案提供依据。

(1)基本方程

水动力计算模型是基于垂向积分的物质和动量守恒方程,即一维非恒定流 Saint-Venant 方程组来模拟河流或河口的水流状态^[1-2]。

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q |Q|}{C^2 AR} = 0$$

式中: Q 为断面流量, m^3/s ; A 为过水断面面积, m^2 ; Q 为源汇的单宽流量, m^2/s ; x, t 分别为是距离坐标和时间坐标; h 为水位, m ; C 为谢才系数; R 为水力半径, m ; g 为重力加速度; α 为动量校正系数。

(2)求解方法

方程组利用 Abbott-Ionescu 六点隐式有限差分格式^[3]求解,如图3所示。该格式在每一个网格点不同时计算水位和流量,而是按顺序交替计算水位或流量,分别称为 h 点和 Q 点。Abbott-Ionescu 格式具有稳定性好、计算精度高的特点^[4]。

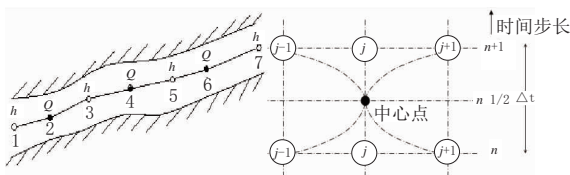


图3 Abbott 格式水位点、流量点交替布置图

2.1.2 模型搭建

(1)河网设置

模型共概化河道 33 条,分河段数 46 个。

(2)水工建筑物设置

模型根据建筑物上下游水文条件自动判断所处流态^[5],选用相应的流体力学公式进行计算。在河网模型设置中,分别考虑了水闸和泵站两种水工建筑物,其中泵站仅有二涌西泵站,其设计流量为 $56.76 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

(3)排涝方案

根据该地区的防洪潮排涝规划,排涝选择调蓄 +

强排 + 自排 + 场地填高相结合的模式。常水位 5.0 m , 预降水位为 4.5 m , 管控水位为 6.2 m , 由于计算工况中 5 a 一遇典型潮位最低潮位要高于预降水位 4.5 m , 同时考虑洪潮遭遇的情形, 无法通过开闸将内河涌水位降低至预降水位, 需在洪水来临前开泵, 将水位预先降低至 4.5 m 。水闸控制原则为内河涌水位高于外江潮位时开闸, 反之则关闸。

2.1.3 边界条件

本次模型设置有流量边界和潮位边界两种, 其中内河涌流量边界采用不同频率的设计暴雨径流过程, 由于该研究区域为平原河网, 各河道的流量边界通过河道离散断面均匀分配至河道中。

选取距工程相对较近的万顷沙站典型潮型, 以外江 5 a 一遇洪潮水位为控制, 得出本工程所在片区排涝出口外江 5 a 一遇设计潮位过程。

为分析研究区域河段水位最不利情况。本次模型考虑峰峰叠加以及错峰叠加, 其中错峰叠加考虑洪水峰值提前潮位峰值 1 h 和 2 h 两种工况, 计算工况共有 3 组, 最终得出各河段水位、流量以及流速最大值的成果。

2.2 陆域模型计算

2.2.1 计算方法

模型是基于不可压缩和 Reynolds 值均布的 Navier-Stokes 方程^[6], 并服从 Boussinesq 假定和静水压力的假定, 采用笛卡尔坐标系下的二维浅水方程计算^[7]。

2.2.2 模型搭建

本次二维模型研究包括拟建工程及周边范围, 以北界河涌、洪奇沥水道、万顷沙二涌和万顷沙四涌为界。二维模型网格采用结构性正方形网格, 网格大小 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, 网格总数为 3543×3521 。

地形数据根据实测地形图、隧道设计方案竖向高程以及万顷沙区域 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的 dem 数据。

拟建工程区域来水主要为降雨, 降雨边界条件主要加载在管网模型中, 通过模型耦合为二维模型提供边界条件计算降雨在隧道工程的淹没情况。对研究范围内随高水位低水位而出没的沙洲和滩地, 计算时采用动边界技术^[8], 即将低水位期间出露的区域转化为滩地, 同时形成新边界; 反之, 将高水位期间淹没的滩地转化成计算水域, 为了保证模型的精度, 同时提高模型的准确度, 最终设置干水深为 0.001 m , 淹没水深为 0.002 m 。

2.3 管网模型计算

2.3.1 计算方法

城市管网模型是基于水文水动力学的分布式城市暴雨径流管理数学模型,用于模拟降雨地表产汇流、管网水动力学传输过程,被广泛应用于城市暴雨洪水研究和排水系统的规划设计^[9],本次研究采用动力波法求解。

2.3.2 模型搭建

城区管网模型是依据规划管网数据搭建的,在排水管网模型中所涉及水文、水力模型参数中,需要设置的参数包括水文学参数:不透水率、初损、沿损、集水时间、 $T-A$ 曲线控制;水力参数为管道糙率^[10]。本次模型中初损为 0.002 m,沿程损失系数为 0.9,不透水率为根据不同下垫面计算得到。地表平均流速为 0.3 m/s,混凝土管道糙率为 0.014,内边界为在雨水口中加入降雨边界,分析了 50 a 和 100 a 一遇的降雨。

2.4 耦合模型计算

一维河道模型、二维地表模型、地下管网排水模型通过以下过程进行耦合。

一维河道 - 二维地表模型通过堤岸进行耦合,以模拟漫堤洪水演进过程;一维河道 - 排水管网通过排水口进行耦合,以反映河道水位对管网的顶托或倒灌作用;二维地表 - 排水管网通过雨水口 / 地表单元进行耦合,以反映管网排水作用及漫溢淹没过程^[11]。模型耦合示意图如图 4 所示。

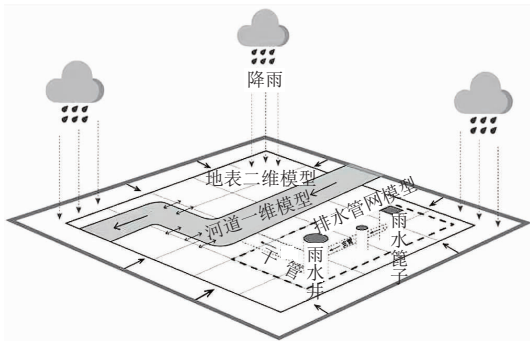


图 4 耦合模型示意图

隧道工程的内涝模型是将城市排水管道网络模型以及二维地表模型相耦合来模拟计算,主要考虑城区排水管道网络模型的井与二维地表模型相应的计算网格相耦合,以反映管道网络和地表之间的水流相交互,耦合模型的建立步骤如下:

- (1) 基于地形数据建立起二维的地表漫流模型;
- (2) 基于管道网络数据设置模型;
- (3) 根据管网的排水能力计算每一个井的最大

流入量,该流量是管道网络模型与二维地表漫流模型水量相交互的阈值;

(4) 将每一个井连接到二维的地表漫流模型的计算网格;

(5) 进行耦合模拟计算。

通过对隧道工程的内涝洪水结果进行统计,各暴雨工况条件下,50 a 一遇暴雨条件下淹没范围及淹没水深相对较小,而 100 a 一遇暴雨条件下淹没范围及淹没水深较大。各工况条件下淹没范围及淹没水深见表 1 所列。

表 1 隧道各工况淹没情况统计表 单位:m

隧道位置	淹没水深(50 a)	淹没水深(100 a)
番中隧道	0.043~0.079	0.055~0.088

2.5 选址适宜性分析

番中公路隧道竖向地势较高,通过计算得知,在 100 a 一遇暴雨条件下,番中公路下穿隧道淹没水深 0.055~0.088 m,隧道淹没水深均小于 0.3 m,结合城市建设用地洪涝风险等级划分标准中内涝风险图的要求,拟建隧道属于低风险区域。洪涝风险等级为低风险,选址满足相关要求。

3 防洪排涝评估

3.1 水文分析计算

3.1.1 水文站情况

万顷沙西站资料序列连续,从国家基本站所收集,按国家规范及行业标准观测收集以及汇编审查,具有较高的可靠性,因此可选用万顷沙西站作为本次外江潮位分析代表站。

3.1.2 设计暴雨

水文分析计算采用广东省水文局 2003 年《广东省暴雨参数等值线图》,分别查出各河流流域中心点 $t=10\text{ min}, 1、6、24、72\text{ h}$ 的时段雨量均值 $H_t(\text{mm})$ 和变差系数 C_v 值,及各个设计频率下不同 C_v 值所对应的 P-III 型曲线系数 K_p 值。工程所在的万顷沙片区各频率的暴雨统计参数及设计点暴雨成果见表 2。

3.1.3 设计洪水

该片区地势平坦,区域内多分布河涌、鱼塘、农田,河网密布且排水路径短,产汇流时间较短。从工程安全角度考虑,本次采用广东省综合单位线法计算的设计洪水成果^[12]。工程所涉及各河涌设计洪峰流量计算成果见表 3。

表2 万顷沙暴雨参数及设计点暴雨成果表 单位:mm

历时 /h	参数			设计暴雨值			
	H_t	C_v	C_s / C_v	$P=20\%$	$P=10\%$	$P=5\%$	$P=2\%$
1/6	22.9	0.31	3.5	28.21	32.43	36.34	41.22
1	62.6	0.40	3.5	80.25	96.09	111.12	130.21
6	112.9	0.40	3.5	144.74	173.30	200.40	234.83
24	157.8	0.42	3.5	203.88	246.17	286.72	339.27
72	203.6	0.44	3.5	264.88	322.91	378.70	449.96

表3 万顷沙排涝片区各河涌设计洪峰流量计算成果 单位:m³/s

河道断面	$P=1\%$	$P=2\%$	$P=5\%$
二涌西口	37.0	36.1	34.8
三涌西口	38.6	37.7	36.3

3.1.4 设计潮位

本次内涝与外潮遭遇情况如下:片内10 a一遇(农业区)、20 a一遇(城建区)、50 a一遇(中心城区,蕉门河中心及明珠湾新城)暴雨洪水遭遇外江5 a一遇潮位过程。

涝水与潮水的过程遭遇,考虑到降雨与潮水的成因系统不同,一般认为两者相关性不强,遭遇的偶然性较大,加之区域发展对排涝安全需求迫切,各排涝片面积不大,同时结合南沙区已有规划、工程设计的习惯做法,采用试算以最不利工况确定涝水与潮水的过程遭遇^[13]。各涝片经试算,暴雨洪峰早于外潮最高潮位1 h出现时最为不利。

3.2 外江防洪(潮)评估

通过对工程附近万顷沙联围海堤高程进行分析,虽然部分堤防现状为50 a一遇,但是现状堤顶高程在8.6~9.2 m之间,可抵御外江200 a一遇洪潮。

3.3 治涝标准评估

万顷沙联围属于调蓄+自排+抽排+填高相结合的治涝体系,拟建隧道工程附近有二涌、三涌、四涌以及黎十顷涌,现状河涌排涝能力能满足其治涝标准,另外,隧道工程的建设不涉及河道以及水闸泵站,因此本工程的满足50 a一遇内涝防治标准。

3.4 管网设施标准评估

本次拟建番中公路隧道采用50 a一遇设计标准,隧道排水总体上按照隧道内、外部分别设置独立排水系统。由于番中公路隧道地势较低,两侧地面辅道新建雨水管无法重力流排入河涌,考虑到下沉式隧道的重要性,隧道内部采用提升泵房强排措施。将隧道汇集的雨水及时提升,就近排入独立可靠的排

水系统,保证隧道内路面不积水,从而保证隧道行车的安全性。隧道外部两侧地面辅道分别新建DN800~DN1500雨水管,通过重力流方式就近排入河涌。

隧道雨水泵站:雨水排水泵房所涉及汇水面积为13 700 m²,径流系数为0.9,设计流量为1 117.30 L/s;设置5台潜水泵,4用一备;单泵性能 $Q=305.5\text{L/s}$ (1 100 m³/h), $H=20\text{ m}$, $N=90\text{ kW}$ 。

根据计算,每台泵排水流量为 $Q=279\text{ L/s}$,单泵出水管管径为DN400,出水管流速为2.22 m/s,满足规范不大于2.5 m/s要求。五台泵排水流量为 $Q=1117\text{ L/s}$,出水总管管径为DN800,出水管流速为2.22 m/s,满足规范不大于2.5 m/s要求。对拟建工程新建雨水管进行水力计算,可知拟建工程管网设施符合南沙区规划暴雨重现期标准。

3.5 内涝防治标准评估

隧道工程地势较周边高,周边暴雨内涝对隧道工程基本无影响,同时隧道内部有雨水泵站,可对隧道区域局部涝水进行外排。根据洪涝模型计算成果表1可知,在100 a一遇暴雨条件下,番中公路隧道淹没水深为0.055~0.088 m,淹没水深小于15 cm,满足内涝防治标准的要求。

道路两侧地块开发时可能会填高,但是道路高程在9~10 m,地势较高,隧道区域涝水流入万环西路可能性不大,同时由于工程附近河涌水系发达,南侧排水直接流入这些河涌。因此随着城市开发,万环西路隧道工程洪涝风险基本不会增加,其内涝防治能力也不会降低。

4 结语

(1)根据洪涝模型计算成果可知,在100 a一遇暴雨条件下,番中公路下穿隧道淹没水深小于0.3 m,结合城市建设用地洪涝风险等级划分标准中内涝风险图的要求,拟建隧道工程属于低风险区域。

(2)拟建隧道工程所在万顷沙联围采用调蓄加泵排的排涝方式,其内涝防治标准为50 a一遇。拟建隧道工程附近有二涌、三涌、四涌以及黎十顷涌,现状河涌排涝能力能满足其治涝标准。

(3)通过对拟建工程新建雨水管进行水力计算,可知拟建工程管网设施符合南沙区规划暴雨重现期标准。

参考文献:

- [1] Mujumdar P. Flood wave propagation—the Saint Venant equations [J]. Resonance, 2001(5): 66–73.

少了扬尘、渣土车辆运输等问题,对途经沿线的相关生产、生活环境上仅产生了微量影响,有力保障了城市卫生环境;从投资角度,根据每延米造价测算,采用紫外光固化的原位固化法相较螺旋缠绕法、内衬法节约投资30%。

5 结语

(1)解释结构模型结果说明专业人才、施工条件是影响系统决策的关键因素,而工程概算和技术工艺对整个系统的影响辐射范围最广。决策者应更审慎地考虑这4个影响因素,着重注意实际施工条件的限制和专业人才的配备。

(2)ISM方法以递阶结构模型为依据,按照各要素的相对层级位置构造判断矩阵,所得权重更具理论性解释,但缺乏检验基础;而AHP方法以专家组的知识和经验为依据,所得权重更具经验性和实践性,但忽视了部分影响因素的作用。ISM-AHP组合模型能够在一定程度上协调2种方法的优劣,平衡其结果产生的差距。

(3)对某城区排水管网修复工程的实证分析结果表明,该管网适宜采用原位固化法进行修复。各方案的评价结果在不同方法中基本一致,而单指标的ISM权重和AHP权重存在出入,体现为施工成本和专业人才指标差值过高。其中施工成本更容易引导决策者的决策偏向,而专业人才对实际决策的影响

容易“下沉”。实际决策应该提高对专业人才的重视,加强人才支撑体系的建设。

参考文献:

- [1] 汪路,张鹏,姚志华,等.UV-CIPP技术在城市排水管网修复中的应用[J].给水排水,2022,58(增刊2):447-453.
- [2] 唐其林.排水管道非开挖修复技术选择研究[J].工程技术研究,2019,4(19):44-46.
- [3] 沈云.排水管道非开挖修复技术的造价分析[J].城市道桥与防洪,2020(1):221-223,27.
- [4] 王远峰.两种非开挖修复工艺的现行标准条款的比较[J].给水排水,2022,58(增刊2):511-517.
- [5] 杨晓慧.城市排水管道修复技术适用性研究及工程应用[D].西安:西安工业大学,2019.
- [6] 周杨军,蒋仕兰,解铭,等.非开挖修复技术在城市排水管道维护中的应用[J].中国给水排水,2020,36(20):58-62.
- [7] 熊露.排水管道非开挖修复技术经济评价指标体系的研究[D].广州:广东工业大学,2015.
- [8] 何东强.浅析城中村道路排水管道的重要性及修复措施[J].江西建材,2022(8):335-336.
- [9] 郁片红,庄敏捷,曹依雯,等.上海市《城镇排水管道非开挖修复技术标准》解读[J].净水技术,2021,40(11):1-5,34.
- [10] 郁片红,孙跃平.排水管道原位固化法修复常见问题与质量控制方法[J].净水技术,2020,39(增刊1):252-255,259.
- [11] 孔晖.分析市政工程排水管道修复施工管理[J].科学中国人,2016(9):35.
- [12] 曾晓岚,崔福义,时文歆,等.人工智能+给排水科学与工程专业复合型人才的行业需求调研[J].中国给水排水,2021,37(24):11-16.

(上接第177页)

- [2] Chagas Patricia,Souza Rai mundo.Solution of Saint Venant's equation to study flood in rivers through numerical methods[J].Hydrology Days,2005:205-210.
- [3] 槐文信,赵明登,童汉毅.河道及近海水流的数值模拟[M].北京:科学出版社,2005.
- [4] 李高青.引汉济渭调水系统水质变化模拟与预测研究[D].西安:西安理工大学,2021.
- [5] 李荣辉.鱼类栖息迁徙习性及其监测技术研究[D].南宁:广西大学,2013.
- [6] 王强,代振东.不可压缩 Navier-Stokes 方程的流函数-涡度形式流线扩散方法分析[J].西川大学学报(自然学科版),2002,39(2):197-201.
- [7] 耿艳芬,郑鑫,柯兴.基于一维二维耦合模型的衢州城市洪涝演进分

- 析[J].东南大学学报(自然学科版),2019:1005-1010.
- [8] 柯文杰.广州同德围高架桥工程对新市涌雍水影响分析[J].广东水利电力职业技术学院学报,2017(2):4-6.
- [9] 肖君健,罗强,王修贵,罗文兵,张晓春.感潮河网地区城镇化对排涝模数的影响分析[J].农业工程学报,2014(3):247-255.
- [10] 刘心玲.吉林市城区洪水风险图编制研究[D].大连:大连理工大学,2017.
- [11] 潘文俊,柳树票,徐嫣,等.基于多维耦合模型的城区内涝模拟及风险评估[J].陕西水利,2022(10):19-22.
- [12] 张志敏.三坑水库除险加固设计的优化研究[D].武汉:湖北工业大学,2017.
- [13] 杨晨,张钰涵.平原感潮河网区暴雨潮位的计算及遭遇变化研究[J].甘肃水利水电技术,2021(8):5-9.