

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.23.020

基于多维水力模型法的机场雨水管网排水能力评估

赵也¹, 娄明月², 杨艺¹

(1. 深圳市创环环保科技有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对南方某机场卫星厅工程以及配套站坪工程设计项目, 为了分析卫星厅及站坪区域内排水能力与内涝风险, 提高机场安全运行保障能力, 开展机场卫星厅及站坪区域雨水管网评估研究。传统管网排水能力评估往往采用推理公式法, 该方法适用于特定重现期和满足一定条件的管网, 而机场卫星厅屋面通常采用的是大型虹吸排水, 进入管渠瞬时流量较大, 因此推理公式法不适用于机场雨水管网排水能力评估。为此, 基于水力模型法, 建立多维水力学模型, 精确评估机场卫星厅及站坪区域内的排水能力与内涝风险。评估结果显示, 在自由出流工况下, 航站楼区域管网基本可以达到设计排水能力, 但仍有部分跑道区域地面积水风险较高; 在排口2 m水位淹没出流工况下, 规划区管网超载风险较高, 现状外围明渠涝点较多, 核心区排水顺畅; 在降雨峰值时排水渠有充足的空间承接屋面虹吸雨水, 屋面虹吸管接入处虹吸雨水会对排水系统产生一定的偏向, 但不会影响到主流。

关键词: 雨水管网; 排水能力评估; 多维水力模型法; 内涝风险评估; 机场; 三维流场模拟

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)23-0122-07

Drainage Capacity Evaluation of Airport Rainwater Pipe Network Based on Multi-dimensional Hydraulic Model Method

ZHAO Ye¹, LOU Ming-yue², YANG Yi¹

(1. Shenzhen Chuang Huan Environmental Protection Technology Co. Ltd., Shenzhen 518000, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Aiming at the design project of satellite hall project and supporting station platform project of an airport in South China, to analyze the drainage capacity and waterlogging risk in the satellite hall and station platform area and improve the safe operation support capacity of the airport, an evaluation project of rainwater pipe network in the satellite hall and station platform area of the airport was carried out. Traditional drainage capacity evaluation of a pipe network usually adopts the reasoning formula method, which is suitable for the pipe network with a specific return period and certain conditions. However, roof of the airport satellite hall usually adopts large siphon drainage, and the instantaneous flow into the pipe channel is large. Therefore, the reasoning formula method is not suitable for drainage capacity evaluation of airport rainwater pipe network. A multi-dimensional hydraulic model was thus established to accurately evaluate the drainage capacity and waterlogging risk in the satellite hall and station platform area based on hydraulic model method. According to the evaluation results, terminal area pipe network reached the designed drainage capacity in the case of free outflow. However, there were still a few runway areas with high waterlogging risk. In the case of submerged outflow with 2 m water level

above the outlet, the overloading risk of the pipe network in the planning area was large, there were many waterlogging points in the peripheral open channels, and the drainage in the core area was smooth. At the peak of a rainfall, the drainage channel had enough space to undertake the roof siphon rainwater. The siphon rainwater at the entrance of the roof siphon pipe led to a certain deviation of the drainage system, but it had no influence on the mainstream.

Key words: rainwater pipe network; drainage capacity evaluation; multi-dimensional hydraulic model method; waterlogging risk evaluation; airport; three-dimensional flow field simulation

城市内涝成因具有复杂的系统性特征,我国在解决城市内涝策略方面,也经历了从以“排水能力”为核心,到构建“内涝综合防治体系”的认知过程。2017年7月1日起实施的《城镇内涝防治技术规范》(GB 51222—2017)要求,城镇内涝防治应构建包括源头减排、滞蓄空间建设、排水能力提升在内的工程措施和风险应急管理非工程措施相结合的综合防治体系。与理念上的进步相适应,我国城镇内涝防治方案的制定也越来越多地借助水力模型,以更好地研究城市内涝问题发生的系统性特征,并由此找出导致内涝问题产生的关键环节^[1-6]。为了了解南方某机场卫星厅及站坪区域的排水能力与内涝风险,提高机场安全运行保障能力,笔者采用多种水力学模型对机场雨水管网的过流能力及内涝风险进行评估,对不达标的雨水管网提出改造措施,保证机场新建卫星厅区域排水的达标性。

1 项目概况

针对南方某机场卫星厅及配套站坪工程设计项目,为了分析工程区域内的排水能力与内涝风险,开展雨水管网排水能力评估分析。模型评估区域范围见图1,面积约为4 km²,包括2#泵站服务区域的1.5 km²和4#泵站服务区域的2.5 km²。

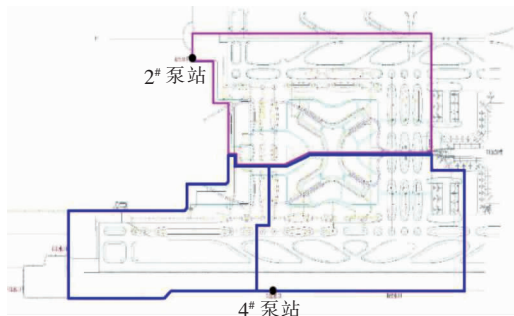


图1 模型评估区域范围

Fig. 1 Model evaluation area

2 评估方法及模型构建

2.1 整体评估思路

评估技术路线如图2所示。

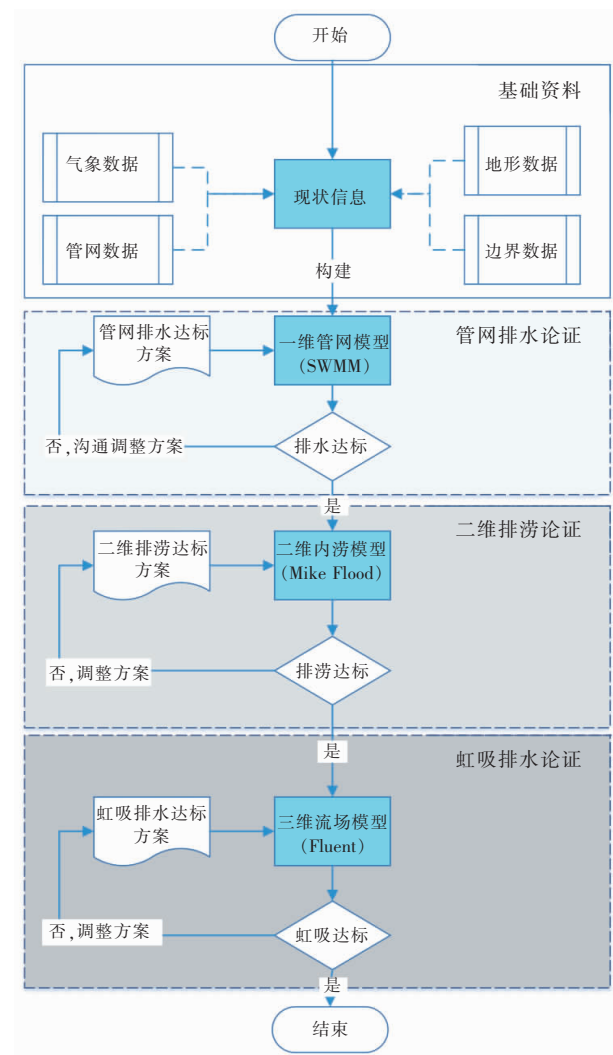


图2 技术路线

Fig. 2 Technology roadmap

本研究构建了三个水力模型:利用SWMM构建机场下垫面产汇流模型与一维管网水动力模型;利

用 Mike Flood 构建 Mike Urban 管网模型与 Mike 21 漫流模型的耦合模型;利用 Fluent 构建三维明渠水动力模型。先利用 SWMM 模型评估项目设计的卫星厅及站坪区排水管渠是否满足规定排水标准;再利用 Mike Flood 二维地表漫流与内涝模拟评估排涝系统内涝防御能力是否满足规范;接着利用 Fluent 进行三维明渠水动力模拟,评估在紊流情况下卫星厅虹吸排水末端明渠是否能够满足设计条件。

2.2 评估标准

① 管网标准

根据 2016 年版《室外排水设计规范》(GB 50014—2006),管网设计标准为 5~10 年一遇,其中卫星厅周围管渠为 10 年一遇,其他为 5 年一遇。根据最新的排水防涝规范,机场排水管渠建设标准为 5~10 年一遇,故本次评估中分析了 10 年一遇自由出流和边界水位(2 m)淹没出流两种工况。

② 内涝标准

根据 2016 年版《室外排水设计规范》(GB 50014—2006),内涝标准应达到 100 年一遇,机场为重要基础设施,故本次内涝评估标准按照 100 年一遇进行。考虑到调蓄池水位的变化,对自由出流和最不利条件(2 m 边界水位淹没出流)两种工况进行评估。

③ 虹吸排水标准

根据《建筑给水排水设计标准》(GB 50015—2019),重要公共建筑、高层建筑的屋面雨水排水工程与溢流设施的总排水能力不应小于 50 年一遇重现期的雨水量,综合虹吸排水特性以及业主的意见,本次模拟采用了 50 年一遇重现期的排水量乘以径流系数 2.0 作为虹吸排水设计流量。

2.3 模型构建流程

模型构建具体流程如图 3 所示。

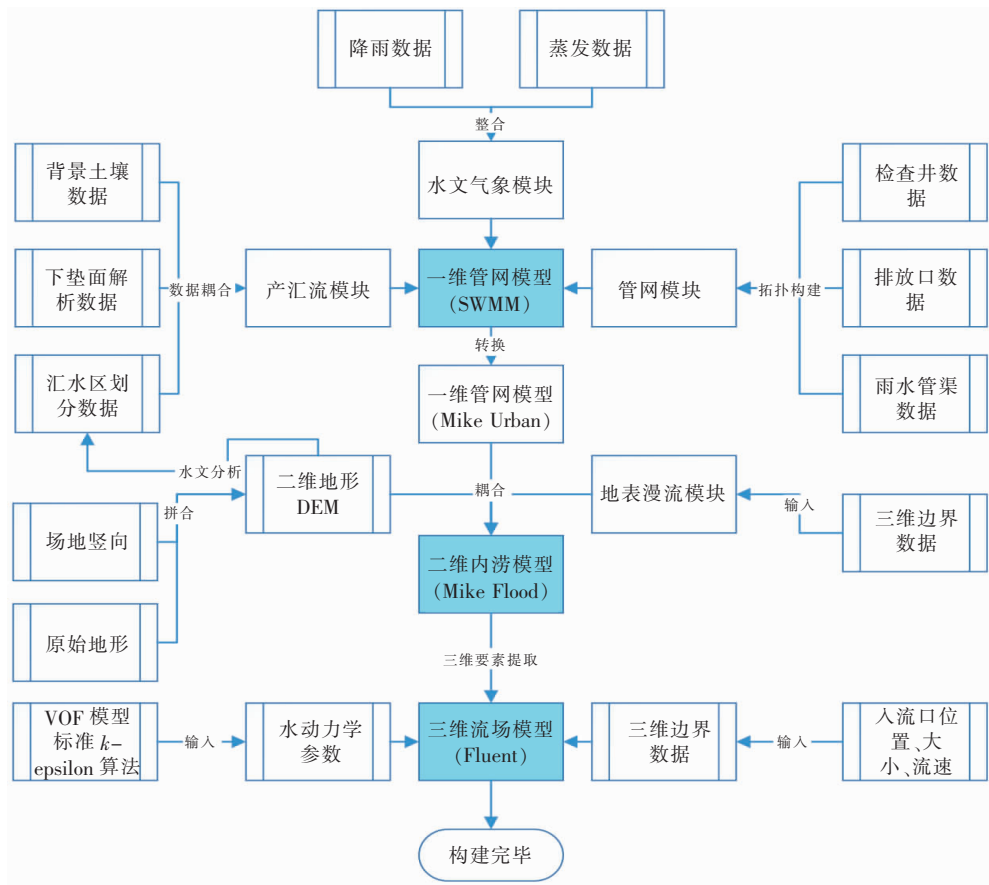


图 3 模型构建流程

Fig. 3 Flow chart of model building

2.4 模型文件构建

① 机场物探 GIS 数据库

根据机场提供的物探 Excel 信息,通过数据提取、管网 GIS 数据生成、坐标匹配、拓扑检查等步骤,

建立机场物探 GIS 数据库。

管网数据库中主要包含研究区管网底部高程、表面高程、管径、起点编号、终点编号等信息。节点数据库主要包含节点编号、节点高程以及节点所在位置坐标。

② 地形文件

将竖向数字高程模型 (DEM) 和现状周边 DEM 以及建筑地块进行拼合修正处理得到最终的模型模拟所用的 DEM,拼合地形如图 4 所示。

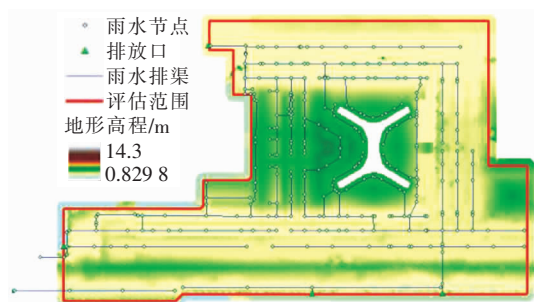


图 4 拼合修正后的地形图

Fig. 4 Topographic map after splicing and correction

③ 汇水分区分

通过对 DEM 的水文分析,得到研究区域的排水分区与自然径流过程,在此基础上,利用泰森多边形进一步进行汇水分区的划分,如图 5 所示。

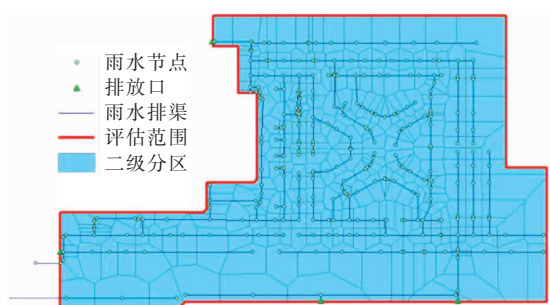


图 5 汇水分区的划分

Fig. 5 Division of catchment area

④ 下垫面数据库

下垫面数据库主要包含子汇水区面积、不透水率等参数,面积通过 GIS 自带的统计工具统计,不透水率根据绿地占比利用 GIS 工具包统计。

⑤ SWMM 模型文件

将管网数据和下垫面数据统一导入到 SWMM 模型中,设置好模拟时间和边界条件即可完成 SWMM 模型的初步构建。

⑥ Mike Urban 模型文件

将管网数据和下垫面数据统一导入到 Mike Urban 模型中,设置好模拟时间和边界条件即可完成 Mike Urban 模型的初步构建。

⑦ Mike 21 模型文件

将 DEM 数据转换成 Mike 21 模型能够识别的 bathymetry 格式的 dfs2 文件,设置好边界条件即可完成 Mike 21 模型的初步构建。

⑧ Mike Flood 耦合模型文件

Mike Flood 耦合模型的构建主要是指将构建好的 Mike Urban 管网模型和 Mike 21 漫流模型按照一定的逻辑关系有机耦合起来,即可完成 Mike Flood 耦合模型构建。

⑨ Fluent 模型文件

模型框架构建主要是建立三维的点线面模型,通过输入点坐标确定主要结构点位置,通过点构成线再构成面从而完成模型框架的构建。然后,再进行功能区块划分,定义不同的 part,即各个面的作用,分别定义为 wall (明渠边壁)、water - in (入口)、pressure - in (明渠上表面空气层)等。最后,需要进一步划分网格。一般划分的网格有结构性格和非结构性格两种,有些特殊的结构图可能会用到混合的网格,网格质量在 0.2 以上。

2.5 模型边界数据

机场管网排水能力评估模型所用的边界条件主要包括:研究区域的短历时降雨数据和长历时降雨数据;管网排口处 2#调蓄池、4#调蓄池的上限水位 2.0 m;卫星厅虹吸排水末端明渠连接管道的入流量以及流速。

① 降雨强度边界

评估管网排水能力主要使用短历时降雨数据,采用 2 h 降雨过程的雨峰系数为 0.35 (第 42 分钟)。本研究使用的短历时降雨数据采用当地气象局发布的《暴雨强度公式及查算图表》。

评估内涝风险主要使用长历时降雨数据,本研究使用的长历时降雨数据采用当地气象局编制的《暴雨雨型》。

② 卫星厅虹吸排水末端管道边界

由于卫星厅四周明渠和排水情况较对称,且考虑到三维模型构建复杂程度较高,本次三维模型构建范围仅选取卫星厅部分片区的明渠来构建,明渠连接虹吸排水末端管道口编号分别为 C、D、E、F、G,具体位置见图 6。

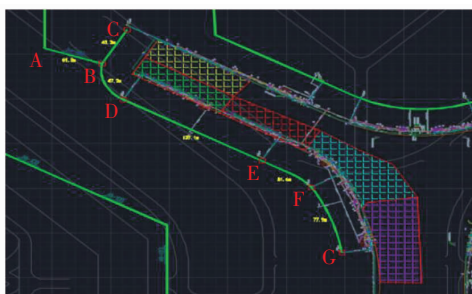


图 6 卫星厅虹吸排水末端管道口位置

Fig. 6 Location of siphon drainage end pipe mouth in satellite hall

根据暴雨强度公式即可求出不同进口处的流量和流速,考虑到虹吸排水的特性,本次模拟将虹吸排口的流量和流速乘以径流系数 2.0。考虑到三维模型不支持沿程漫流入渠,本研究模拟采用极端不利排水的情况,假设路面雨水从 G 口处统一汇入。综上考虑,计算得出表 1。

表 1 卫星厅虹吸排水末端管道边界计算结果

Tab. 1 Boundary calculation results of siphon drainage end pipe in satellite hall

编号	集水面积/ m^2	流量/ $(\text{L} \cdot \text{s}^{-1})$	管径/mm	流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	模型输入流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
C	1 947	114	400	0.91	1.82
D	1 940	113	400	0.90	1.81
E	2 008	118	500	0.60	1.20
F	3 397	199	400	1.58	3.17
G	3 678	215	400	1.72	3.43

2.6 模型参数选取

① 水文水力参数

SWMM 模型、Mike Urban 模型和 Mike 21 模型所用的水文水力参数来源于 EPA 官方手册、DHI 官方手册和本地化参数。

② Fluent 模型参数

参数设置包括系统参数设置、算法参数设置和模型模拟参数设置。系统参数主要设置求解器的求解类型、模拟相位的基本属性;算法参数主要设置求解所用的算法(本研究采用 VOF 模型,标准的 $k-\epsilon$ 算法);模型模拟参数主要是设置边界条件即不同入口的流速。

3 模型评估结果及验证

3.1 管网排水能力评估结果

① 自由出流

在输入 10 年一遇的短历时降雨数据而且排口

为自由出流工况下,航站楼区域雨水管网可以达到设计排水能力,但部分跑道区域地面积水风险较高,在降雨峰值情况下部分管网承压较高,部分管道接近满流。模拟结果如图 7 所示,部分内涝风险管段统计结果如表 2 所示,内涝风险点统计结果如表 3 所示。

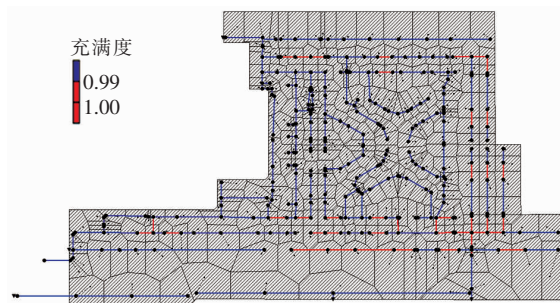


图 7 自由出流工况下超载管段情况

Fig. 7 Overload pipe sections under the condition of free outflow

表 2 自由出流工况下部分内涝风险管段统计

Tab. 2 Statistics of some waterlogging risk pipe sections under the condition of free outflow

管段编号	最大流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	最大流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	最大深度/m	最大充满度
C295	7.954	3.16	6.10	1.00
C291	10.603	2.70	4.04	1.00
C292	9.973	2.54	3.48	1.00
C296	3.915	2.33	3.36	1.00
C321	40.869	2.35	3.33	0.91

表 3 自由出流工况下内涝风险点统计

Tab. 3 Statistics of waterlogging risk points under the condition of free outflow

检查井编号	积水时间/h	总积水量/ m^3
J239	0.01	39
J240	0.01	15
J241	0.02	16
J286	0.01	11

② 淹没出流

在输入 10 年一遇的短历时降雨数据且排口为 2 m 水位淹没出流工况下,规划区管网超载风险较大,部分区域地面积水风险较高,但由于实际工况下不会始终保持 2 m 的淹没出流工况,实际内涝风险较本模拟结果要低,本模拟仅作为极端情况下的风险评估结果使用。模拟结果如图 8 所示,部分内涝风险管段统计结果如表 4 所示,内涝风险点统计结

果如表5所示。

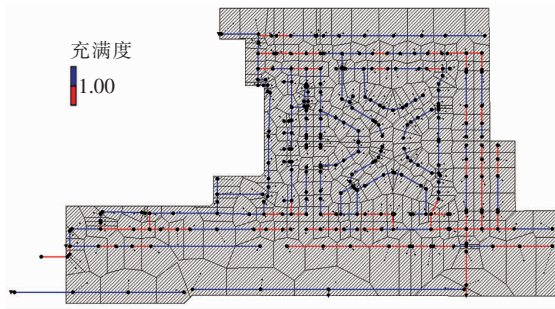


图8 淹没出流工况下超载管段情况

Fig.8 Overload pipe sections under the condition of submerged outflow

表4 淹没出流工况下部分内涝风险管段统计

Tab.4 Statistics of some waterlogging risk pipe sections under the condition of submerged outflow

管段编号	最大流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	最大流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大深度/ m	最大充满度
C295	5.728	2.27	4.40	1.00
C291	8.562	2.18	3.26	1.00
C292	7.987	2.04	2.78	1.00
C296	3.784	2.25	3.25	1.00
C321	37.640	1.98	3.06	1.00

表5 淹没出流工况下部分内涝风险点统计

Tab.5 Statistics of some waterlogging risk points under the condition of submerged outflow

检查井编号	积水时间/h	总积水量/ m^3
J30	0.07	290
J43	0.12	933
J45	0.06	692
J47	0.01	22
J48	0.01	37

3.2 内涝风险评估结果

基于 Mike Flood 平台,耦合城市水文模型和二维地表模型评估研究区域的排水防涝现状条件,识别内涝风险。采用 Mike Urban 模块构建排水管网模型, Mike 21 模块构建二维地表模型,以不同设计重现期下 24 h 设计降雨雨型作为降雨条件,并考虑自由出流和淹没出流等不同工况,最终在 Mike Flood 平台中将以上加以耦合,形成完整的内涝风险综合评估模型。自由出流和淹没出流工况下的模拟结果如图9所示。从图9(a)可以看出,在自由出流工况下,易涝风险区主要集中卫星厅南侧区域,主要是由于该区域部分管段在 100 年一遇暴雨峰值时排

水能力不足。其中,易涝点 1、2、3 的内涝风险程度均为非常轻(积水深度 $< 15 \text{ cm}$),积水面积分别为 $4\,500$ 、 $2\,750$ 、 $1\,250 \text{ m}^2$,合计 $8\,500 \text{ m}^2$ 。在图9(b)中淹没出流工况下,易涝点 1~5 的内涝风险程度分别为非常轻、轻(积水深度大部分 $< 15 \text{ cm}$,局部 $> 15 \text{ cm}$)、轻、非常轻、非常轻,积水面积分别为 $2\,000$ 、 $4\,500$ ($> 15 \text{ cm}$ 的面积为 500 m^2)、 $1\,500$ ($> 15 \text{ cm}$ 的面积为 250 m^2)、 $8\,250$ 、 $3\,250 \text{ m}^2$,合计 $19\,500 \text{ m}^2$ 。

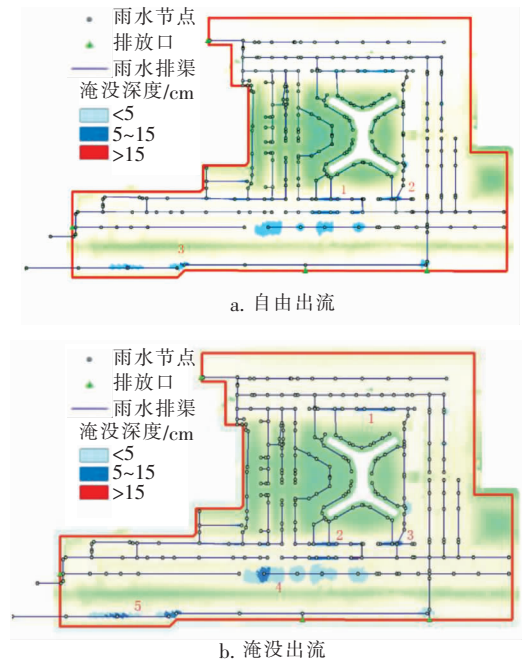


图9 100年一遇重现期条件下自由出流和淹没出流的内涝风险评估结果

Fig.9 Waterlogging risk evaluation results of free outflow and submerged outflow under return period of 100 years

从 Mike Flood 二维地表漫流与内涝模拟结果来看,现状外围明渠涝点较多,核心区排水顺畅。该项目设计的排水系统,内涝防御能力基本能达到 100 年一遇标准。在现有边界条件下,外围飞行区有局部积水的现象,但积水主要位于低洼草地处,积水深度 $< 15 \text{ cm}$,在规范允许范围内。

3.3 三维模拟评估结果

根据卫星厅虹吸排水末端明渠尺寸以及连接管道入流量和流速等边界条件,采用 Fluent 建立三维明渠水力模型,模型计算结果如图10所示。可以看出,在降雨峰值时排水渠有充足的空间承接屋面虹吸雨水,不会因虹吸造成排水补偿。屋面虹吸管接入处虹吸雨水会对排水系统产生一定的偏向,但

是不会影响到主流。

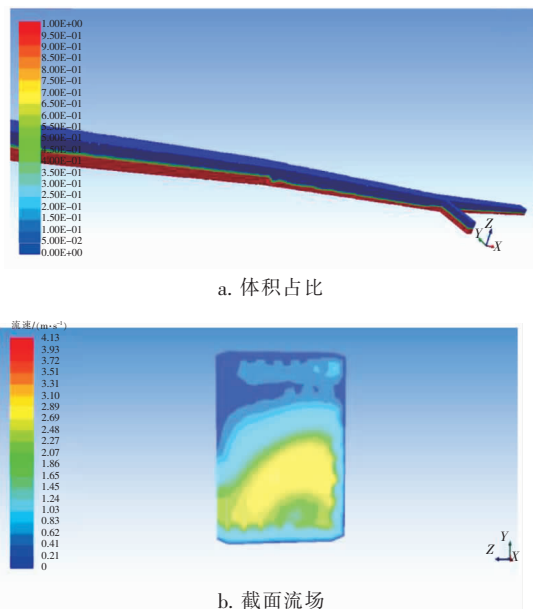


图10 三维模拟体积占比图和截面流场图

Fig. 10 Diagram of volume proportion and cross section flow field by three-dimensional simulation

4 结论

① 外围飞行区现状雨水管渠在降雨峰值时有超载现象,建议对部分风险管段进行改扩建。

② 原有机场建设规划标准为5年一遇,排涝标准为20年一遇。由于新规范的发布,原有标准偏低,建议按照最新的标准,对于不满足新排涝标准的系统局部进行升级改造,提高机场的排水安全保障能力。

③ 虹吸式屋面雨水系统应定期维护,每年至少在雨季、大风之前做一次巡检,以保持良好的工作状态。

参考文献:

- [1] 苏伯尼,黄弘,张楠. 基于情景模拟的城市内涝动态风险评估方法[J]. 清华大学学报(自然科学版),2015,55(6):684-690.
SU Boni, HUANG Hong, ZHANG Nan. Dynamic urban waterlogging risk assessment method based on scenario simulations[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2015, 55(6): 684-690 (in Chinese).
- [2] 王慧斌,荣宏伟,王竞茵. 水力模型在城市内涝灾害风险评估中的应用[J]. 中国给水排水,2015,31(19):

133-136.

WANG Huibin, RONG Hongwei, WANG Jingyin. Application of hydraulic model to risk assessment of urban waterlogging disasters[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(19): 133-136 (in Chinese).

- [3] 尹占娥,许世远,殷杰,等. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 地理学报,2010,65(5):553-562.
YIN Zhan'e, XU Shiyuan, YIN Jie, et al. Small-scale based scenario modeling and disaster risk assessment of urban rainstorm waterlogging[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(5): 553-562 (in Chinese).
- [4] 陈翠珍,蒋佳鑫,李敏. 基于水力模型的青山海绵示范区排水防涝风险评估[J]. 中国给水排水,2016,32(17):105-108.
CHEN Cuizhen, JIANG Jiaxin, LI Min. Risk assessment of drainage and waterlogging prevention system for Qingshan sponge demonstration area based on hydraulic model[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(17): 105-108 (in Chinese).
- [5] 童旭,覃光华,王俊鸿,等. 基于 MIKE URBAN 模型研究设计暴雨雨型对城市内涝的影响[J]. 中国农村水利水电,2019(12):80-85.
TONG Xu, QIN Guanghua, WANG Junhong, et al. The effect of design storm patterns on urban waterlogging based on MIKE URBAN model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(12): 80-85 (in Chinese).
- [6] 朱颖蕾,于永强,俞芳琴,等. 基于 MIKE 21 和 MIKE Urban 耦合的湖区平原城市内涝模拟应用研究[J]. 中国农村水利水电,2018(10):177-181.
ZHU Yinglei, YU Yongqiang, YU Fangqin, et al. Research on the waterlogging simulation of the lakeshore plain city based on MIKE 21 and MIKE Urban coupling model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(10): 177-181 (in Chinese).

作者简介:赵也(1992-),男,湖北黄冈人,本科,工程师,主要从事水务大数据信息化建设、水文水质模型构建、市政基础设施规划与设计研究工作。

E-mail:253165290@qq.com

收稿日期:2020-06-11

修回日期:2020-08-11

(编辑:刘贵春)