

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222046

# 基于 GIS-Mike Flood 耦合模型的校园内涝模拟研究

叶沛成<sup>1</sup>, 郭 帅<sup>1</sup>, 陈传辉<sup>2</sup>, 胡腾宇<sup>2</sup>, 袁 伟<sup>3</sup>, 曹广学<sup>1</sup>, 徐 翹<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014; 3. 合肥测绘设计研究院, 安徽 合肥 230001)

**摘要:** 针对合肥市某校园内涝问题, 利用 GIS 解析卫星图像得到研究区五类下垫面分布信息, 并进行汇水区的自动划分, 再结合 RTK 设备实测高程点, 得到了园区的 3 m×3 m 高精度 DEM 数据。进而分别采用 Mike Urban 和 Mike 21 构建了研究区内的一维管道模型及二维地表模型, 并将两者在 Mike Flood 上进行了耦合。同时, 在易涝区安装了流量计、液位计和雨量计, 通过两场实测降雨对模型进行率定, 并根据相关系数( $R^2$ )与 Nash-Sutcliffe 效率系数( $E_{NSE}$ )评判率定结果。最后, 利用芝加哥雨型拟定了 5、10、30、50 年重现期的降雨情景, 模拟得到不同降雨过程中节点与管道超负荷的严重程度、淹没范围与淹没深度。结果表明, 该校园内涝主因是下垫面规划不合理, 部分区域存在管线较长和集水范围过大问题, 导致地面对雨峰径流吸收有限, 管网超负荷情况严重, 峰值雨水不能及时排出。

**关键词:** 城市内涝; Mike Flood; 管网; 淹没范围; 淹没水深

**中图分类号:** TV122<sup>+</sup>.9; TU992.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)08-0085-05

## 1 引言

近年来, 随着城市化规模不断扩大、城市建设不断加快, 加之气候环境的异常变化, 极端暴雨事件日益增多<sup>[1]</sup>。尤其是近年来一些城区关键防护单位如地铁站、医院、变电站与校园等受淹事件的频发, 引起了多方关注<sup>[2]</sup>。针对日益严重的城市内涝问题, 对内涝模拟技术与方法开展了大量研究。DEJENE TESEMA BULTI 等<sup>[3]</sup>对比了从 RFS 到 1D 再到 1D-2D 耦合的六种模拟方法的适用性、计算成本和数据需求大小; 苏晓天等<sup>[4]</sup>利用 Mike Urban 模型评估了不同管径排水管网负荷情况, 并模拟了管径扩大方法对管道排水压力的缓解作用, 为极端暴雨下区域洪涝预警部署及城市排水系统改造提供了技术支撑; 张旭等<sup>[5]</sup>以西安市新城区为例, 建立了研究区的 Mike Flood 耦合模型, 通过设定不同比例的绿地面积, 对比分析了不同情景下绿化率对地面积水和内涝风险的削减效果; 梁巧茵等<sup>[6]</sup>基于 Mike Flood 构建耦合雨水管网、河道、泵站等工程设施的综合系统模型,

模拟分析了排涝泵站上游河道沿程水位的变化及排水需求, 基于计算结果确定了泵站的设计规模及调度方式。然而, 当前很多研究一方面缺乏利用实测数据对模型进行验证与率定, 另一方面尚缺乏针对关键防护单位或区域的精细化模拟与研究<sup>[7]</sup>。鉴此, 本文以频受内涝侵扰的合肥市某高校大学校园为例, 开展了大量的实地勘测与现场试验, 分别采用 Mike Urban 和 Mike 21 构建了园区的一维管道模型及二维地表模型, 并将两者在 Mike Flood 上进行了耦合, 模拟分析了不同降雨情景下校园内的溢流节点、超载管段、淹没历时和淹没范围, 综合分析了园区的内涝成因, 为后续采取工程措施缓解园区内涝提供了科学依据与技术支撑。

## 2 数据处理

研究区位于合肥市西南角, 校园总面积约 110 hm<sup>2</sup>。园内管道设计为雨污分流, 雨水排放口有 12 个, 其中 9 个排入内湖, 3 个排入校外市政管道。区域地势走向呈东北高, 西北与西南方

**收稿日期:** 2022-09-30, **修回日期:** 2022-11-05

**基金项目:** 安徽省重点研发计划(202104i07020012)

**作者简介:** 叶沛成(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为城市内涝模拟, E-mail: 702366785@qq.com

**通讯作者:** 郭帅(1984-), 男, 博士、副研究员、硕导, 研究方向为城市内涝数值模拟技术等, E-mail: guoshuai@hfut.edu.cn

向低。局部区域高程变化较大,暴雨情况下局部区域易发生严重内涝。

### 2.1 雨水管网数据提取

前期收集到了该园区的排水管网设计资料,包括排水管网 CAD 设计图等。提取管网 CAD 设计图中的检查井、管线数据并导入到 ArcGIS 中,对数据进行异常值核验与合理性判断。通过实地走线与勘察,对管线走向和排放口位置等基本信息进行实地复核,及时修正与更新了 GIS 数据库中的错误信息。基于实际勘测成果,统计出该园区实际检查井总数为 348 个,排放口 12 个,管线 349 段,雨水管线总长为 11.76 km,更新后的管网见图 1。

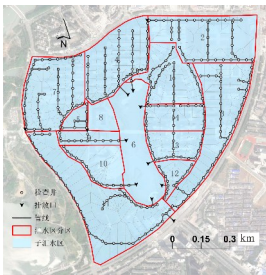


图 1 管网及汇水区划分

Fig. 1 Pipe networks and catchment division

### 2.2 汇水区分区与下垫面分类

根据实地探察成果,将研究区初步划分为 14 个主汇水区,在 GIS 中利用泰森多边形方法将 14 个主汇水区进行细分,总共生成 349 个子汇水区,见图 1。

首先,下载研究区域的高清卫星图,通过 GIS 软件将区域内的道路与房屋直接提取出图层,并利用 GIS 缓冲区功能将道路中线扩展成车道,将房屋生成面文件;其次,利用 GIS 图像分类工具对绿地、裸地、湖泊进行人为采样并合并整理同类型样本;最后,基于训练的分类样本,采用最大似然法进行下垫面解析,获得下垫面的五种分类结果见图 2。



图 2 土地利用类型

Fig. 2 Land use type

### 2.3 高程数据测量与高精度 DEM 构建

为解析研究区的高程数据信息,将 CAD 图

中标注的高程点提取至 GIS 软件中,剔除异常点后共获得高程点位 309 个。针对园区内的已知易涝区,使用 RTK 设备进行了高程点位补测,并对边界进行手动插值,最终得到整个园区的 731 个高程点位。

通过 GIS 中 3D 分析工具将高程点位生成 TIN 数据,再将 TIN 转换成像元大小为 3 m×3 m 的园区高精度数字高程图,结果见图 3。

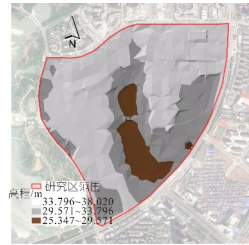


图 3 高精度 DEM 高程图(3 m×3 m)

Fig. 3 High-precision elevation DEM

### 2.4 降雨情景设计

本文选取芝加哥雨型作为设计雨型。芝加哥雨型是单峰雨型,能很好地模拟短历时强降雨过程,也能凸显峰值流量对管网的冲击。基于合肥市暴雨强度计算公式生成模拟降雨,公式具体参数为:

$$q = 3\,600(1 + 0.761\lg P)/(t + 14)^{0.84} \quad (1)$$

式中, $q$  为降雨强度,mm/min; $P$  为重现期,年; $t$  为降雨历时,min。

分别设置 5、10、30、50 年一遇,降雨历时为 120 min,雨峰系数为 0.4 的四种降雨工况,最大峰值雨强分别为 215、248、299、322 mm/h,见图 4。

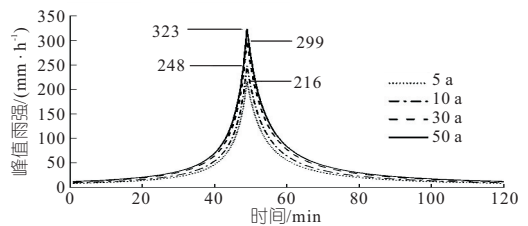


图 4 模拟降雨情景

Fig. 4 Rainfall simulation scenarios

## 3 径流模型构建与验证

### 3.1 Mike Urban 模型

通过将 GIS 数据库中处理好的检查井、管线与汇水区信息导入 Mike Urban 中,建立了研究区的一维管网模型。选用被广泛使用的 T-A 模型作为汇流模型,以满足模型计算时间和计算精度要求。对 GIS 提取的五种下垫面分别设置不同的不透水比例,将不同重现期降雨事件作为边

界输入条件,模拟得到各汇水区的总降雨量与径流过程曲线。

管网水动力模拟利用圣维南方程组求解得到管流状态。以径流模拟 CRF 结果文件作为边界,模拟选用动态波模拟,模拟时间步长为 1 s,各参数见表 1。模拟结果可显示不同时刻节点水深、管道流量、流速,并通过统计功能算出管道充满度、节点溢流和管道超载等。

表 1 模型参数设定

Tab. 1 Model parameter settings

Mike Urban		Mike 21	
参数	数值	参数	数值
绿地/%	10	网格大小/m	3×3
道路/%	80	时间步长/s	1
湖泊/%	0	淹没水深/m	0.003
裸地/%	30	糙率	32
径流模拟	T-A 模型	边界条件	闭边界
管道模拟	动态波		
初损	0.001		

### 3.2 Mike 21 模型构建

Mike 21 模型,即二维地表漫流模块,采用水深平均的二维浅水流动质量和动量守恒控制方程组求解计算,可评估地形因素对内涝的影响。

建立准确地地表漫流 Mike 21 模型的关键在于对地表地形的构建和网格大小的划分。首先,利用校核数据与实测高程结合构建 Bathmetry 地形文件,将房屋进行拔高设置以体现现实中房屋对水流汇集的阻碍作用,对绿地与道路进行适当高程降低处理,以模拟实际绿地与道路对雨水的蓄积与输送作用,二维地形见图 5。

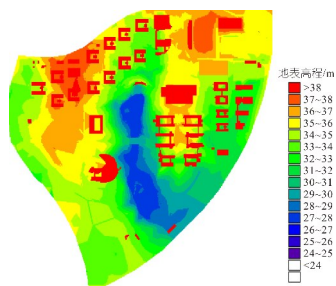


图 5 二维地形

Fig. 5 2D terrain

### 3.3 Mike Flood 耦合模型构建

利用 Mike Flood 构建 1D-2D 耦合模型,以实现城市排水管网中的水流和地表漫出的水流的交互、地表积水及退水等情景的模拟分析, Mike Flood 模型见图 6。选用孔口方程计算 1D-2D 水流交汇点流量,即:

$$Q_{UM21} = \text{sign}(H_U - H_{M21}) C_D \min(A_m, A_i) \cdot \sqrt{2g |H_U - H_{M21}|} \quad |Q_{UM21}| < Q_{\max} \quad (2)$$

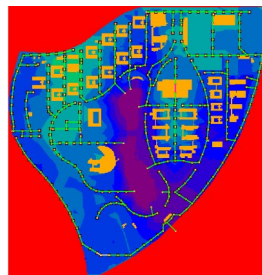


图 6 研究区耦合模型

Fig. 6 Pipe network terrain couple

式中,  $Q_{UM21}$  为从 Mike Urban 到 Mike 21 的流量值,代表节点溢流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $H_U$  为管内水位,  $\text{m}$ ;  $H_{M21}$  为对应二维栅格的地表平均水位,  $\text{m}$ ;  $A_m$ 、 $A_i$  分别为检查井断面面积、进水口断面面积,  $\text{m}^2$ ;  $C_D$  为流量系数,通常取 1.0;  $Q_{\max}$  为最大交互流量,取  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  [8]。

### 3.4 模型率定与验证

选取 2022 年 6 月 23、28 日捕捉的两场实际降雨对研究区模型进行参数率定与验证。利用相关系数 ( $R^2$ ) 和 Nash-Sutcliffe 效率系数 ( $E_{NSE}$ ) 评估模拟结果 [8]。一般认为  $R^2 > 0.75$  且  $E_{NSE} > 0.5$  时模拟可靠,而两场实测降雨计算得到的  $R^2$  分别为 0.80、0.81,  $E_{NSE}$  分别为 0.77、0.75,均符合误差要求,模型精度可靠。

## 4 结果与分析

### 4.1 节点与管道负荷模拟分析

利用构建的 Mike Flood 耦合模型,对 4 种降雨情景开展了模拟分析。根据模拟得到的检查井与管道的最大负荷值,分别将其划分为三级风险节点与五级风险管道。其中,白色代表不发生溢流的一级风险节点,灰色代表已发生溢流,但节点水位小于 1 m 的二级风险节点,深黑色表示溢流水位达到 1~3 m 的三级风险节点,浅白与浅灰色代表未发生满流的一、二级风险管段,深灰色代表水位线超出地面不足 1 m 的三级风险管段,加粗的灰色线段为最大水位超出地面 1~2 m 的四级风险管段,深黑色为水位超出地面 2~3 m 的 五级风险管段。不同降雨情境下的节点与管道风险模拟结果见图 7、表 2。

由图 7、表 2 可知,在 5 年一遇降雨峰值下,一级风险节点为 196 个,占比达 54.4%;二级风险节点 84 个,占比 23.3%;三级风险节点 80 个,占 22.2%。而随着重现期由 5 年一遇变为 50 年一遇,一级风险节点减少 64 个,二、三级风险节点数目则显著增加,分别增加 104、124 个。对管道

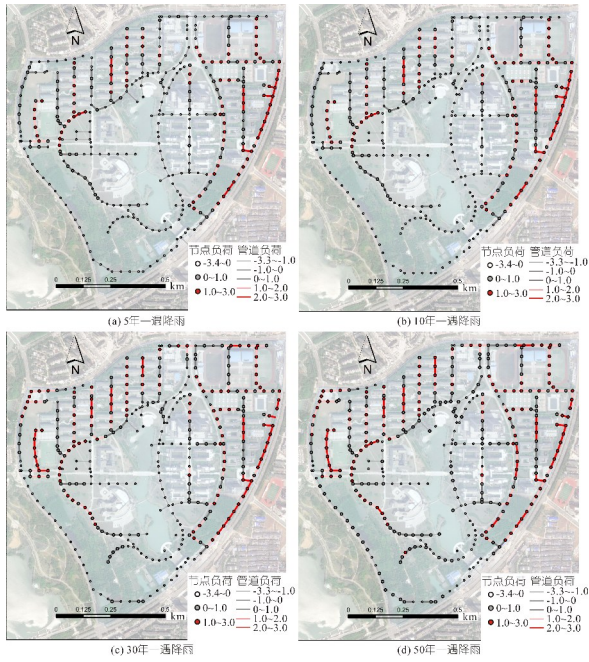


图7 四种模拟情景节点与管道风险

Fig. 7 Four scenario nodes and pipeline risk

表2 风险节点、管段数量统计

Tab.2 Statistics of number of risk nodes and pipe segments

重现期/a	风险节点/个			风险管道/段				
	一级	二级	三级	一级	二级	三级	四级	五级
5	196	84	80	44	124	81	78	22
10	190	90	80	38	128	83	78	22
30	138	109	113	29	88	87	110	35
50	132	104	124	28	86	82	114	39

而言,5年一遇降雨中未发生满管流的一、二级风险管段分别为44、124段,而随着重现期的增加,一、二级风险管段有规律地减少,而三级风险管段数量分布受降雨重现期的影响最小,四、五级风险管段数量则随重现期的增加而增加。

不同降雨情境下的节点与管段的风险分布综合反映了校园内不同区域对内涝抵抗力的不同。西南区域因草地覆盖面积大,下垫面渗透性好,管道排水能力充裕;北部生活区和东侧教学区因建筑密集,下垫面吸收差,管网排水压力大;东部区域市政道路路径长、汇水区大,且地势较低,易发生严重超载。

### 4.2 淹没范围及淹没水深分析

Mike Flood耦合模型能模拟二维地表的淹没范围与淹没历时,实现内涝成因的多维度分析。图8为四种情景下研究区地面最大淹没水深数值变化及其空间分布。由图8可知,随着重现期的增加,四种情景下园区最大淹没水深分别达0.31、0.45、0.52、0.61 m,增长比分别为18.4%、22.2%、14.5%。

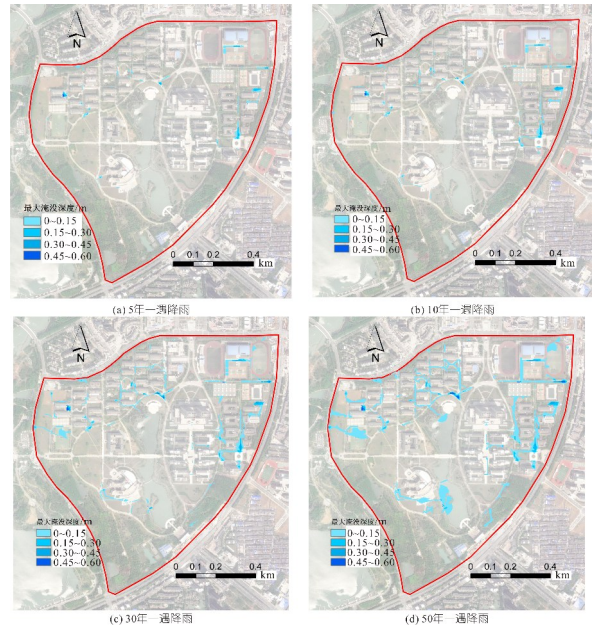


图8 四种情景最大水深分布

Fig. 8 The maximum water depth distribution of four scenarios

此外,利用GIS对dfs2结果文件提取栅格计算出淹没面积,可获得四种情景下最大淹没面积数值及其空间分布。可知随着重现期的增加,四种情景下淹没面积分别达0.74、1.24、2.98、6.25 ha,增长比分别为67%、140%、110%,淹没面积在30年重现期时有大幅增加。

## 5 结论

a. 利用GIS对CAD、卫星图等资料进行数据处理,结合实测成果实现了对园区下垫面的解析、高精度DEM数据的生成。通过将GIS与Mike软件进行数据交互,构建了基于Mike Flood的园区1D-2D耦合内涝模型。通过大量的现场勘察与试验及在园区安装雨量计、流量计、液位仪,采集实测降雨数据结合 $R^2$ 与 $E_{NSE}$ 指标对构建的1D-2D内涝模型开展了验证与率定。

b. 通过分析不同降雨情境下数值模拟结果,得出不同时刻检查井与管道的最大水位值、地表的最大淹没水深与淹没面积;通过对节点与管道内涝风险进行等级划分与图形显示,找出了园区易涝区的空间分布特征,即研究区管网管龄均在10年以上,部分区域存在下垫面结构不合理、管线较长等问题,导致峰值雨水不能及时排出而形成内涝。

### 参考文献:

[1] 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.
- [2] 石贇贇, 万东辉, 陈黎, 等. 基于 GIS 和 SWMM 的城市暴雨内涝淹没模拟分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(6):57-60, 12.
- [3] DEJENE TESEMA BULTI, BIRHANU GIRMA ABEBE. A review of flood modeling methods for urban pluvial flood application [J]. Modeling earth systems and environment, 2020, 6(3):1293-1302.
- [4] 苏晓天, 杨翠巧, 栾清华, 等. 基于 MIKE URBAN 的典型北方城区防洪排涝模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(3):368-375.
- [5] 张旭, 李占斌, 张洋, 等. 基于 MIKE 耦合模型的绿化率对城市内涝影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(3):137-144.
- [6] 梁巧茵, 张明凯, 李帅杰. 基于 MIKE FLOOD 的深圳市机场排涝泵站工程设计及运行模拟[J]. 水电能源科学, 2021, 39(3):86-90.
- [7] 邵蕊, 邵薇薇, 苏鑫, 等. 基于 TELEMAC-2D 模型分析不同洪涝情景对城市应急响应时间的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 62(1):60-69.
- [8] 张旭. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的西咸新区沣西新城内涝模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.

## Study of Waterlogging Simulation of University Campus Based on GIS-Mike Flood Coupling Model

YE Pei-cheng<sup>1</sup>, GUO Shuai<sup>1</sup>, CHEN Chuan-hui<sup>2</sup>, HU Teng-yu<sup>2</sup>,  
YUAN Wei<sup>3</sup>, CAO Guang-xue<sup>1</sup>, XU Qiao<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China; 3. Hefei Surveying and Mapping Design Institute, Hefei 230001, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of campus waterlogging in Hefei City, this paper constructs a 1D-2D coupled model based on Mike Flood. Firstly, GIS was used to obtain the distribution information of the five types of land surface in the study area by analyzing satellite images, and to automatically divide the catchment areas. Secondly, combined with the measured elevations by using the RTK device, the 3 m×3 m high-precision DEM data of the study area were obtained. A 1D pipeline model and a 2D surface model in the study area were constructed using Mike Urban and Mike 21 respectively, and the two models were coupled on Mike Flood. At the same time, a flowmeter, a liquid level meter and a rain gauge were installed in the campus. The model was calibrated by two measured rainfall events according to  $R^2$  and  $E_{NSE}$ . Finally, the Chicago rainfall pattern was used to design rainfall scenarios for the 5, 10, 30 and 50 years of recurrence periods, and the severity, inundation range and inundation depth of nodes and pipelines in different rainfall processes were simulated. The simulation results show that main causes for the waterlogging in the campus are due to unreasonable sub-catchment designs, which resulted in limited absorption of rain peak runoff and serious overload of the pipe network.

**Key words:** urban waterlogging; Mike Flood; pipe network; flood range; inundation depth

(上接第 116 页)

### 参考文献:

- [1] 王樱峻, 赵琳, 雷显阳. 某抽水蓄能电站高面板堆石坝坝体分区优化[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(5):47-52.
- [2] 李岳军, 吴毅瑾, 何世海, 等. 抽水蓄能电站水库土工膜防渗技术的研究和应用[J]. 水力发电, 2006(3):67-69.
- [3] 浙江省抽水蓄能工程技术中心. 句容抽水蓄能电站库盆及地下厂房三维渗流场分析报告[R]. 杭州: 浙江省抽水蓄能工程技术中心, 2014.
- [4] 张博, 朱晟. “蓄水一泄水”循环荷载作用下高面板堆石坝的稳定性分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(11):81-83, 80.
- [5] 王樱峻, 雷显阳, 姜晓桢, 等. 基于子模型法的某抽水蓄能电站库盆土工膜锚固处局部适应性研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(10):131-134.

## Experimental Study on Anti-seepage Connection Structure of Asphalt Concrete Slab and Geomembrane

WANG Ying-jun<sup>1,2</sup>, NING Zhi-yuan<sup>1,2</sup>, YE Qian<sup>1</sup>

(1. Power China Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, China;

2. Zhejiang Pumped Storage Engineering Technology Research Center, Hangzhou 311122, China)

**Abstract:** A new anti-seepage structure between the asphalt concrete slab and geomembrane is proposed, which eliminates the concrete connecting plate and adopts backfilling elastomeric epoxy mortar into drilling holes. The mechanical and impervious properties, as well as anchoring parameters of the connecting joints in the anchorage area, are experimentally studied. It is found that the torsional and anti-pulling performance of the proposed anchoring approach is reliable. The suggested double-channel anchoring approach is more compatible with the large deformation of the geomembrane under a pressure of 0.4MPa. According to the results, optimal drilling parameters are proposed, which have the features of good porosity, reliable impermeability and less impact on the asphalt slab, providing a reference for engineering design.

**Key words:** asphalt concrete slab; geomembrane; anchoring; elastomeric epoxy mortar; impermeability test