

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.09.010

# 基于风险指数法的排水管道健康状况影响因素研究

黄荣敏<sup>1</sup>, 杜 预<sup>2</sup>, 张 浩<sup>1</sup>, 成浩科<sup>1</sup>, 周文明<sup>3</sup>, 申屠华斌<sup>3</sup>,  
郭 帅<sup>2</sup>

(1. 长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430062; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

**摘 要:** 为了建立高效率和高可信度的排水管道状况预测模型,需要确定国内排水管道健康状况影响因素。为此,提出了一种基于风险指数的描述性统计方法,并采用该方法研究了我国W市滨江排水区和城东排水区中排水管道属性与结构、功能以及健康状况的相关关系,其中管道属性包括管道类型、直径、长度、材料和位置。结果表明,同一城市内两排水片区管道属性与健康状况的关系稍有不同,但总体趋势相似:管道类型与健康状况呈现相关性,两区雨水管道的结构状况优于污水管道,而污水管道的功能状况优于雨水管道;直径越小的排水管道出现结构和功能缺陷的风险越高;长度为25~35 m的排水管道拥有最好的健康状况;钢筋混凝土类管道的结构性能更好,塑料类管道的功能性损失较小;垂直于行车道敷设的排水管道健康状况较差。

**关键词:** 排水管道; 健康状况; 风险指数法; 影响因素

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)09-0065-07

## Influencing Factors of Drainage Pipeline Health Based on Risk Index Method

HUANG Rong-min<sup>1</sup>, DU Yu<sup>2</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, CHENG Hao-ke<sup>1</sup>, ZHOU Wen-ming<sup>3</sup>,  
SHENTU Hua-bin<sup>3</sup>, GUO Shuai<sup>2</sup>

(1. Yangtze Ecology and Environment Co. Ltd., Wuhan 430062, China; 2. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

**Abstract:** To establish an efficient and reliable model for predicting the condition of drainage pipes, it is necessary to determine the factors affecting the healthy condition of drainage pipes in China. This paper proposed a descriptive statistical method based on risk index to investigate the relationship between the attributes of drainage pipe and the structural, functional and healthy status of drainage pipe in two drainage areas of W city (Binjiang drainage area and Chengdong drainage area). The attributes of drainage pipe included the type, diameter, length, material and position. The relationship between pipeline attributes and health status in the two drainage areas of W city was slightly different, but the general trend was the same. There was a correlation between the type and the healthy status of pipe. The

基金项目: 安徽省重点研发计划项目(202004i07020012); 中国三峡集团有限公司科研资助项目(202103355); 长江生态环保集团有限公司科技创新团队经费资助项目(YEEC-KCTD-202207)

通信作者: 郭帅 E-mail: guoshuai@hfut.edu.cn

structural status of stormwater pipe was better than that of sewage pipe, and the functional status of sewage pipe was better than that of stormwater pipe. The drainage pipe with a smaller diameter had a higher risk of structural and functional defects. The pipelines with the length between 25 m to 35 m had the best healthy condition. The structural performance of reinforced concrete pipe was better, while the functional loss of plastic pipe was less. The health of drainage pipes perpendicular to the carriageway was poor.

**Key words:** drainage pipeline; health status; risk index method; influencing factor

随着城市化的推进,排水管道规模迅速扩张,地下排水管道的结构状况和运行安全等问题得到了越来越多的关注和研究。我国约50%的城市地下排水管道服役期已有20年,这些管道由于自身结构问题、运行工况变化以及地理环境影响等各种因素出现老化甚至塌陷的现象<sup>[1]</sup>。目前国内主要通过QV、CCTV收集排水管道影像信息<sup>[2]</sup>,并基于《城镇排水管道检测与评估技术规程》(CJJ 181—2012)评估管道状况等级的方式来对排水管道进行检测与维护<sup>[3]</sup>。该方法原理清晰、操作简单,在检测工程中被广泛运用,但也存在检测成本高和耗时间长的的问题。目前,国内在排水管道状况预测模型及管网风险评估方面的研究方兴未艾<sup>[4]</sup>。

近年来,有研究学者提出了建立排水管道状况预测模型这种新方法<sup>[5]</sup>,它是一种通过分析影响排水管道的参数来预测管道使用寿命、未来状况或某种特定缺陷发生概率的工具。通过排水管道状况预测模型可以掌握管道寿命特性,设计更合理的主动检查频率,降低检测工作的压力;合适的检查间隔也可以避免被动维修带来的计划外费用。然而,想要建立可信度高的预测模型一方面需要获得满足要求的排水管道属性数据,另一方面需要确定其对排水管道状况的影响,即分析排水管道各类属性与排水管道状况的相关关系<sup>[6]</sup>。目前在预测模型的研究中对国内地区排水管道状况影响因素的分析有所欠缺。

基于风险指数法,笔者研究了排水管道属性与管道结构、功能以及健康状况的相关关系。选取的管道案例来自于中国南方W市2个独立的排水片区,采用的管道属性数据均为目前国内管道检测与维护工作中常见的统计信息。

## 1 数据处理

W市于2019年开展了名为“W市城区污水系统

提质增效”的城市地下排水管道检测项目。本研究选用的排水管道数据来自该项目中的两个检测区域——滨江区和城东区。滨江区总检测区域面积为100 km<sup>2</sup>,区域内排水系统采用分流制,检测污水管道总长为53.2 km,检测雨水管道总长为101.1 km;城东区总检测区域面积为90 km<sup>2</sup>,区域内排水系统采用分流制,检测污水管道总长为49.3 km,检测雨水管道总长为102.4 km。该项目管道数据由每个受检测街区的排水管道CCTV检测评估报告和排水管道物理信息勘测平面图组成,分别以“docx”文档和“dwg”图纸存储。对于每段排水管道,其数据信息包括管道的地理位置、管道始末井号、检查井井深、管道直径、管道长度、管道材料、检测图像和根据《城镇排水管道检测与评估技术规程》(CJJ 181—2012)给出的管道结构和功能评估结果。

为了获得科学可靠的分析结果,需要对排水管道数据进行整理和过滤,减少数据不合理或缺失带来的影响。数据处理规则如下:剔除缺失信息的排水管道;剔除不符合设计规范的排水管道;剔除长度小于5 m的排水管道;剔除评估报告和物理信息勘测平面图中信息不一致的排水管道;对重复的排水管道数据进行处理。

经处理,研究的数据样本包括滨江区的5 457段排水管道和城东区的5 340段排水管道。

## 2 实验内容

### 2.1 风险指数

先前所选地区未进行过有关排水管道状况的系统性统计分析,缺少相关先验知识,因此采用描述性统计的方法进行研究。囿于城市排水管道的实际情况,不同属性的管道样本数目不可能达到相对平均的状态,使用常见的描述指标难以表现属性的具体影响情况。为了更客观地反映出不同属性变量对排水管道的影响,基于描述统计常用的频率

指标开发了一种风险指数方法。根据式(1)~(2)引入结构风险指数 $R_s$ 和功能风险指数 $R_o$ ,两者能直观地表示排水管道出现结构和功能风险的概率<sup>[7]</sup>。

$$R_s = \frac{n_s/N_s}{n/N} \quad (1)$$

$$R_o = \frac{n_o/N_o}{n/N} \quad (2)$$

式中: $n_s$ 、 $n_o$ 分别为某类排水管道中出现结构风险和功能风险的管道数; $N_s$ 、 $N_o$ 分别为研究区域内出现结构风险和功能风险的排水管道总数; $n$ 为某类排水管道总数; $N$ 为研究区域内排水管道总数。

结构风险指数 $R_s$ 或功能风险指数 $R_o$ 越高,说明该类排水管道存在结构风险或功能风险的概率越大。当 $R_s$ 或 $R_o > 1$ 时,说明该类排水管道风险水平高于排水管道整体水平。根据风险指数将排水管道风险分为以下5类: $R_s$ 或 $R_o < 0.7$ 为低风险管道,  $0.7 \leq R_s$ 或 $R_o < 0.9$ 为较低风险管道,  $0.9 \leq R_s$ 或 $R_o < 1.1$ 为中等风险管道,  $1.1 \leq R_s$ 或 $R_o < 1.3$ 为较高风险管道,  $R_s$

或 $R_o \geq 1.3$ 为高风险管道。

## 2.2 管道类型

滨江区排水管道共有3 943段雨水管道和1 514段污水管道,城东区排水管道共有3 904段雨水管道和1 436段污水管道,两区的排水管道风险指数计算结果见表1。滨江区雨水管道的 $R_s$ 和 $R_o$ 分别为0.96和1.03,属于中等结构风险和中等功能风险管道;污水管道的 $R_s$ 和 $R_o$ 分别为1.12和0.92,属于较高结构风险和中等功能风险管道。城东区雨水管道的 $R_s$ 和 $R_o$ 分别为0.93和1.12,属于中等结构风险和较高功能风险管道;污水管道的 $R_s$ 和 $R_o$ 分别为1.18和0.67,属于较高结构风险和低功能风险管道。两区的雨水管道 $R_s$ 均小于污水管道 $R_s$ ,最大差值为0.25,说明两区雨水管道的结构状况优于污水管道;两区的雨水管道 $R_o$ 均大于污水管道 $R_o$ ,最大差值为0.45,说明两区污水管道的功能状况优于雨水管道。

表1 排水管道风险指数计算(管道类型)

Tab.1 Calculation of risk index for drainage pipelines (pipeline type)

区 域	管道类型	$n$	$n:N/\%$	$n_s$	$n_s:N_s/\%$	$R_s$	$n_o$	$n_o:N_o/\%$	$R_o$
滨江区	雨水管道	3 943	72.26	2 027	69.06	0.96	972	74.43	1.03
	污水管道	1 514	27.74	908	30.94	1.12	334	25.57	0.92
城东区	雨水管道	3 904	73.11	1 955	68.31	0.93	1 068	81.90	1.12
	污水管道	1 436	26.89	907	31.69	1.18	236	18.10	0.67

## 2.3 管道直径

管道直径对管内流速、水头损失等都有决定性作用,很大程度上影响着管道的运行状况。根据《城镇排水管道与泵站运行、维护及安全技术规程》(CJJ 68—2016)第3.1.6条规定,排水管道管径 $D < 600$  mm为小型管道,  $600 \text{ mm} \leq D \leq 1\,000$  mm为中型管道,  $1\,000 \text{ mm} < D \leq 1\,500$  mm为大型管道,  $D > 1\,500$  mm为特大型管道。

两区的排水管道管径分布范围为200~2 000 mm。滨江区管径为300 mm的排水管道 $R_s$ 为1.26,结构风险最高。滨江区排水管道 $R_s$ 随着管道直径的增加而减少,管径为1 100和1 600 mm的排水管道 $R_s$ 为0.00,结构风险最低。滨江区管径为2 000 mm的排水管道 $R_o$ 为1.90,功能风险最高。滨江区小型和特大型排水管道 $R_o$ 随着管道直径的增加而增加,中型排水管道 $R_o$ 随着管道直径的增加而减少;管径为1 100 mm的排水管道 $R_o$ 为0.00,功能风险最低。图1(a)反映了滨江区不同管径排水管道

$R_s$ 和 $R_o$ 的分布。对结构性风险而言,小型、中型排水管道 $R_s$ 与管径整体呈负相关关系;特大型排水管道 $R_s$ 与管径呈正相关关系。对功能性风险而言,小型和特大型排水管道 $R_o$ 与管径呈正相关关系;中型排水管道 $R_o$ 与管径呈负相关关系;大型排水管道 $R_o$ 在0.9以下波动明显,与管径无明显相关性,但隶属于较低功能风险管道范畴。

城东区管径为300 mm的排水管道 $R_s$ 为1.37,结构风险最高。城东区排水管道 $R_s$ 随着管道直径的增加呈波动形减少趋势,管径为1 500 mm的排水管道 $R_s$ 为0.10,结构风险最低。城东区管径为300 mm的排水管道 $R_o$ 为1.62,功能风险最高。城东区排水管道 $R_o$ 随着管道直径的增加同样呈波动形减少,管径为1 200 mm的排水管道 $R_o$ 为0.37,功能风险最低。图1(b)反映了城东区不同管径排水管道 $R_s$ 和 $R_o$ 的分布。对结构性风险而言,小型排水管道 $R_s$ 波动较大,若剔除管径为230 mm处的畸变点(此管径样本量较少),小型排水管道 $R_s$ 与管径总

体呈负相关关系;中型排水管道 $R_s$ 与管径呈明显负相关关系;大型排水管道 $R_s$ 在0.80以下波动明显,与管径无明显相关性,但隶属于较低风险管道范畴;特大型排水管道 $R_s$ 与管径呈正相关关系。对于功能性风险而言,小型排水管道 $R_o$ 波动较大,与管径无明显相关性;中型排水管道 $R_o$ 与管径呈负相关关系;大型排水管道 $R_o$ 在0.90以下波动明显,与管径无明显相关性,但隶属于较低风险管道范畴;特大型排水管道 $R_o$ 与管径呈负相关关系。

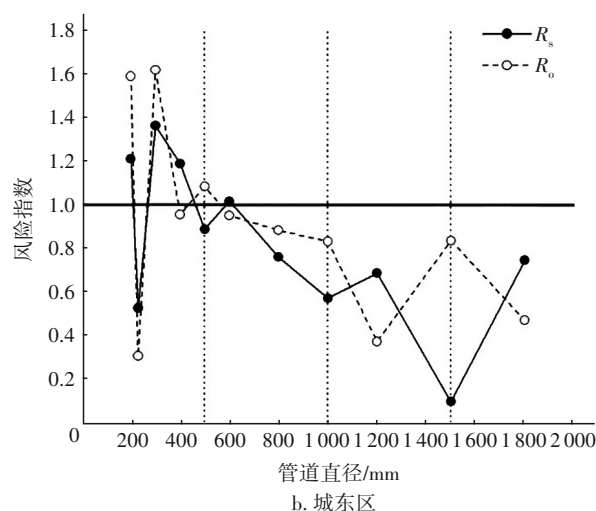
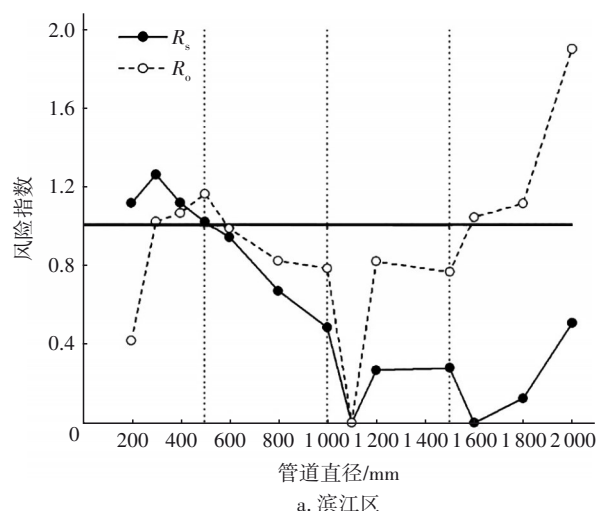


图1 排水管道风险指数分布(管道直径)

Fig.1 Distribution of risk index for drainage pipelines (pipeline diameter)

计算结果表明,两个区域排水管道 $R_s$ 与管道直径均大致呈负相关关系,但两个区域排水管道 $R_o$ 与管道直径的相关关系呈现的趋势相反。

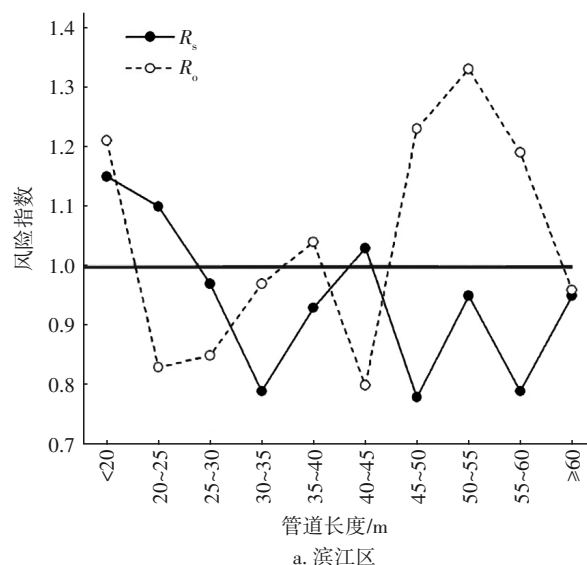
## 2.4 管道长度

两区的排水管道长度范围为20~60 m,将主要

管道长度以5 m为一个区间进行划分,小于20 m的短管道作为一个区间,大于60 m的长管道作为一个区间,则研究样本总共分为10个区间。

图2(a)为滨江区不同管长排水管道 $R_s$ 和 $R_o$ 的分布。长度属于30~35、45~50和55~60 m区间的排水管道结构风险较低,其中长度属于45~50 m区间的排水管道 $R_s$ 为0.78,结构风险最低;属于其他长度区间的排水管道结构风险中等或较高,其中长度<20 m的排水管道 $R_s$ 为1.15,结构风险最高。长度属于20~25、25~30和40~45 m的排水管道功能风险较低,其中长度属于40~45 m区间的排水管道 $R_o$ 为0.80,功能风险最低;属于其他长度区间的管道 $R_o$ 均大于0.90,属于中等及以上功能风险管道,其中长度属于50~55 m区间的排水管道 $R_o$ 为1.33,功能风险最高。由图2(a)可知, $R_s$ 和 $R_o$ 均随管长的增加呈波动形变化。

图2(b)为城东区不同管长排水管道 $R_s$ 和 $R_o$ 的分布。长度属于25~30和45~50 m区间的排水管道结构风险较低,其中长度属于25~30 m区间的排水管道 $R_s$ 为0.80,结构风险最低;属于其他长度区间的排水管道结构风险中等或较高,其中长度<20 m的排水管道 $R_s$ 为1.21,结构风险最高。长度>40 m的排水管道是较低和低功能风险管道,其中长度属于55~60 m区间的排水管道 $R_o$ 为0.52,功能风险最低;长度属于20~25 m区间的排水管道 $R_o$ 为1.24,功能风险最高。由图2(b)可知, $R_s$ 随管道长度的增加呈波动形变化,而 $R_o$ 随管道长度的增加有减少的趋势,并在管道长度为45 m时大幅度减少。





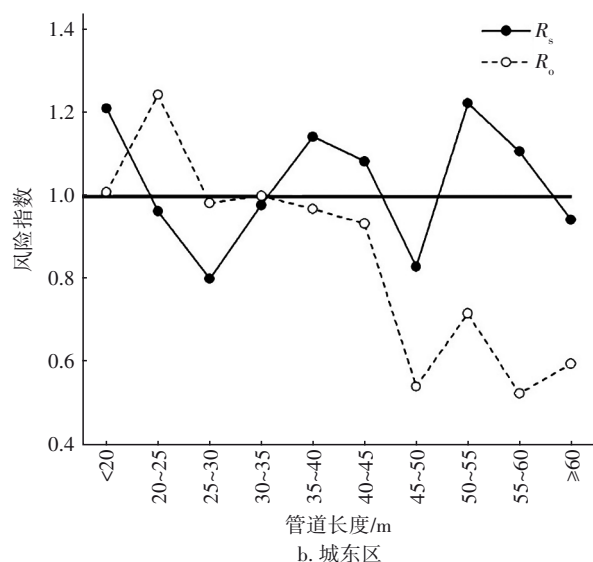


图2 排水管道风险指数分布(管道长度)

Fig.2 Distribution of risk index for drainage pipelines (pipeline length)

计算结果显示,长度为25~35、45~50和55~60 m的管道结构风险为中等及以下等级。滨江区排水管道 $R_o$ 在管道长度<20 m和>45 m时明显升高,城东区排水管道 $R_o$ 则在管道长度>45 m时明显下降。两区管道长度在25~35 m区间的 $R_s$ 及 $R_o$ 均小于1.0,综合健康状况较好。

## 2.5 管道材料

不同材料的排水管道具有不同的施工方式和强度特点,同时对土壤类型、地下水位等环境因素有着不同的反应,Davies等<sup>[8]</sup>指出管道状况和管道材料之间存在直接关系。滨江区和城东区的排水管道材料类型有钢筋混凝土、混凝土、硬聚氯乙烯(UPVC)和高密度聚乙烯(HDPE),此外还观察到滨江区部分排水管道有HDPE和钢筋混凝土两种材料组合的情况。

图3(a)为滨江区不同材料排水管道的风险指数。滨江区钢筋混凝土排水管道 $R_s$ 为0.83,结构风险最低;钢筋混凝土和HDPE组合排水管道 $R_s$ 为1.84,结构风险最高。钢筋混凝土和HDPE组合排水管道 $R_o$ 为0.22,功能风险最低;钢筋混凝土排水管道 $R_o$ 为1.15,功能风险最高。

图3(b)为城东区不同材料排水管道的风险指数。城东区钢筋混凝土排水管道 $R_s$ 为0.93,结构风险最低;UPVC排水管道 $R_s$ 为1.62,结构风险最高。HDPE管道 $R_o$ 为0.53,功能风险最低;混凝土管道 $R_o$ 为2.38,功能风险最高。

为2.39,功能风险最高。

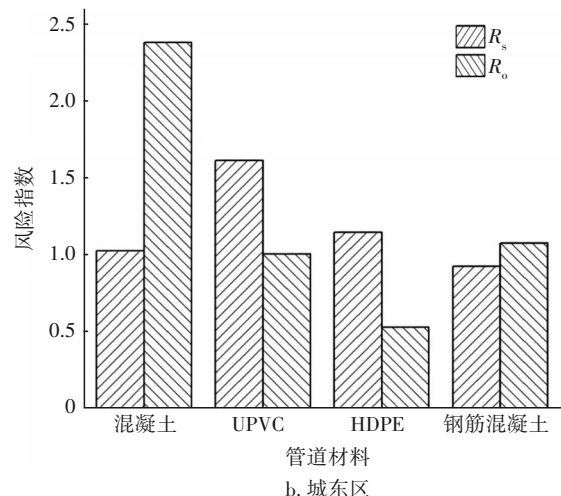
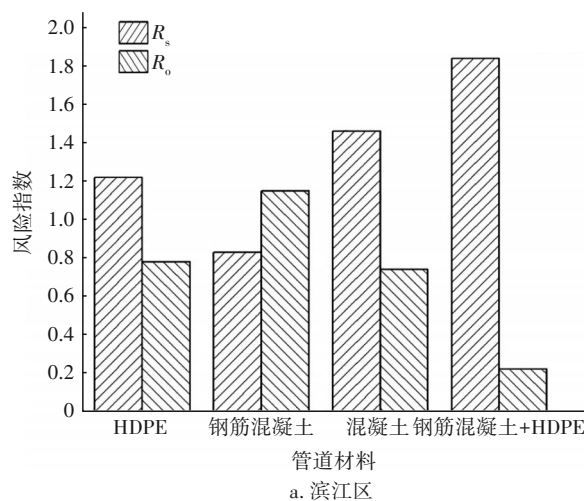


图3 排水管道风险指数(管道材料)

Fig.3 Risk index for drainage pipelines (pipeline material)

计算结果显示,钢筋混凝土排水管道在结构稳定性上具有良好表现,HDPE双壁波纹排水管道属于较高结构风险和较低功能风险的管道,在过流能力上表现得更好。实验中钢筋混凝土和HDPE组合排水管道可能进行过局部修复,从风险指数的角度来看,这种修复虽然解决了管道过流能力的问题,但是排水管道本身仍存在很大的结构风险。

## 2.6 管道位置

在探究管道直径和管道长度对排水管道健康状况的影响时,统计结果表明直径<500 mm或长度>20 m的管道属于较高风险管道。通过查阅排水管道的物理信息勘探平面图,发现同时满足上述管径、管长条件的排水管道主要为垂直于道路行车方向敷设的雨水连接管。相较于沿道路行车方向敷

设的管道,这类排水管道由于跨越行车道,因此更容易受到超重车辆、红绿灯路口急停车辆等引起的地面荷载变化带来的影响。为探究其是否具有更高的损坏风险,以物理信息勘探平面图为准标记了研究中所有跨越车行道的排水管道,按式(1)和式(2)计算已标记和未标记排水管道的风险指数,结果见表2。滨江区已标记排水管道的 $R_s$ 和 $R_o$ 分别为1.19和1.15,是较高结构风险和较高功能风险排水

管道;未标记管道的 $R_s$ 和 $R_o$ 分别为0.96和0.97,是中等结构风险和中等功能风险排水管道,滨江区两类管道的风险指数差距不大。城东区已标记管道的 $R_s$ 和 $R_o$ 分别为1.30和1.32,是高结构风险和高功能风险排水管道;未标记管道的 $R_s$ 和 $R_o$ 分别为0.96和0.96,是中等结构风险和中等功能风险排水管道,城东区横跨行车道的排水管道明显更容易出现结构和功能障碍。

表2 排水管道风险指数计算(管道位置)

Tab.2 Calculation of risk index for drainage pipelines (pipeline location)

区 域	管道位置	$n$	$n:N/\%$	$n_s$	$n_s:N_s/\%$	$R_s$	$n_o$	$n_o:N_o/\%$	$R_o$
滨江区	已标记	981	17.98	626	21.32	1.19	271	20.75	1.15
	未标记	4 476	82.02	2 310	78.70	0.96	1 035	79.25	0.97
城东区	已标记	554	10.37	387	13.52	1.30	206	13.65	1.32
	未标记	4 786	89.62	2 475	86.48	0.96	1 303	86.34	0.96

### 3 结果分析

基于风险指数的分析可知,在W市两个排水片区中,雨水管道的结构状况优于污水管道,而污水管道的功能状况优于雨水管道。管径越小的管道出现结构和功能缺陷的风险越高,大型排水管道在结构上比小型排水管道更加稳定。Micevski等<sup>[9]</sup>对小型管道劣化率更高的现象给出的解释是设计人员低估了小型管道所需的埋设深度和设计流量;Hawari等<sup>[5]</sup>指出管径大的管道具有更厚的管壁,而管壁越厚,管道劣化率越低;在Salman等<sup>[10]</sup>和Bakry等<sup>[11]</sup>建立的管道状况预测模型中,大型管道比小型管道的状况好;中、大型管道的水力条件相对较优,不易形成沉积和结垢,影响过流能力的障碍物更容易停留在小管道中,因此小型管道的功能缺陷风险也更高。本次研究发现特大型管道的结构风险指数有随着管径增加而增加的趋势,Jeong等<sup>[12]</sup>曾给出解释:大规模管道更容易出现缺陷是因为它有更大的表面积接触到污水和土壤,且其体积和质量大,施工难度高,也更容易在安装时出现问题。管长在25~35 m区间的管道拥有最好的健康状况,这符合《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)的建议管长范围;长度<20 m或者>55 m管道的健康状况则比较恶劣。在过去的研究中,Ana<sup>[13]</sup>认为长管道存在更高的状况风险,因为它们有更多可能发生缺陷的点和区域;Hawari等<sup>[14]</sup>认为长管道更容易受到弯曲应力的影响;Laakso等<sup>[15]</sup>发现长度超过40 m的管道比其他管道恶化速率要快;Davies等<sup>[8]</sup>和Jeong等<sup>[12]</sup>

则发现长管道的状况风险比短管道要低。在管道材料方面,钢筋混凝土管发生结构缺陷的风险最低,HDPE双壁波纹管发生功能缺陷的风险最低。混凝土管易被腐蚀使得管道内壁不光滑,固体颗粒在不光滑的管道内更易发生沉积,而结垢现象也更容易出现在表面粗糙度高的管道中,因此钢筋混凝土管较容易出现功能缺陷;混凝土管是我国城镇排水管道早期使用的管道类型,目前在役的混凝土管管龄较大,且其抗拉伸和抗剪切能力较弱,出现结构性缺陷的风险大;HDPE双壁波纹管作为第二代排水管道,具有管道表面光滑、耐腐蚀、质地轻和便于安装的优势,但是也存在力学性能差、容易发生变形的缺点。跨越行车道敷设的排水管道出现结构或功能缺陷的风险大于平行于行车道敷设的管道,原因在于它们更容易受到超重车辆、红绿灯路口急停车辆等引起的地面荷载波动的影响。

### 4 结论与建议

① 管道类型与健康状况呈现相关性,两区雨水管道的结构状况优于污水管道,而污水管道的功能状况优于雨水管道。

② 管道直径对排水管道状况的影响明显,总体来看,直径越小的排水管道出现结构和功能缺陷的风险越高。

③ 管道长度对排水管道状况有一定的影响,在25~35 m区间的排水管道拥有最好的健康状况。

④ 管道材料对排水管道状况有一定的影响,钢筋混凝土类管道结构性能更好,塑料类管道的功

能性损失较小。

⑤ 排水管道状况的变化是一个非常复杂的过程,各种影响因素的共同作用推动了排水管道状况的恶化过程,除了已分析的因素外,管龄、地面荷载、地质情况等参数均应成为未来管道检测工程中收集的资料。

⑥ 使用基于描述性统计的方法研究单一变量对排水管道状况的影响难以得出定量结果,建议尝试借助开发排水管道状况预测模型的方法进行后续研究工作。

#### 参考文献:

- [1] 李若晗. 城市污水管道检测、评价与影响因素研究[D]. 北京:清华大学, 2016.  
LI Ruohan. A Study of Urban Sewer Inspection, Assessment and Related Factors [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016 (in Chinese).
- [2] 李金龙. 我国城市排水管道检测与修复技术研究[J]. 工程建设与设计, 2021(1): 89-90.  
LI Jinlong. Research on detection and repair technology of urban drainage pipeline in China [J]. Construction & Design for Engineering, 2021(1): 89-90 (in Chinese).
- [3] 李予青. 城市排水管道现状评估与非开挖修复技术研究[J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(6): 74-77.  
LI Yuqing. Urban water drainage pipeline status assessment and non-excavation restoration technological research [J]. Coal Geology of China, 2021, 33(6): 74-77 (in Chinese).
- [4] 巴振宁, 匡田, 梁建文, 等. 城市排水管网风险评估研究[J]. 市政技术, 2021, 39(1): 90-93.  
BA Zhenning, KUANG Tian, LIANG Jianwen, et al. Research on risk assessment of urban drainage network operation [J]. Municipal Engineering Technology, 2021, 39(1): 90-93 (in Chinese).
- [5] HAWARI A, ALKADOUR F, ELMASRY M, et al. A state of the art review on condition assessment models developed for sewer pipelines [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2020, 93(1): 103721.
- [6] TSCHIEKNER-GRATL F, CARADOT N, CHERQUI F, et al. Sewer asset management—state of the art and research needs [J]. Urban Water Journal, 2020, 16

(9): 662-675.

- [7] PAN G, WANG B, GUO S, et al. Statistical analysis of sewer odour based on 10-year complaint data [J]. Water Science & Technology, 2020, 81(6): 1221-1230.
- [8] DAVIES J, CLARKE B, WHITER J, et al. Factors influencing the structural deterioration and collapse of rigid sewer pipes [J]. Urban Water, 2001, 3(1/2): 73-89.
- [9] MICEVSKI T, KUCZERA G, COOMBES P. Markov model for storm water pipe deterioration [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2002, 8(2): 49-56.
- [10] SALMAN B, SALEM O. Modeling failure of wastewater collection lines using various section-level regression models [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2012, 18(2): 146-154.
- [11] BAKRY I, ALZRAIEEL H, KADDOURA K, et al. Condition prediction for chemical grouting rehabilitation of sewer networks [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(6): 04016042.
- [12] JEONG H, BAIK H, ABRAHAM D. An ordered probit model approach for developing Markov chain based deterioration model for wastewater infrastructure systems [C]// American Society of Civil Engineers. Pipeline Division Specialty Conference 2005. Texas: American Society of Civil Engineers, 2005: 649-661.
- [13] ANA E. Modeling the structural deterioration of urban drainage pipes: the state-of-the-art in statistical methods [J]. Urban Water Journal, 2010, 7(1): 47-59.
- [14] HAWARI A, ALKADOUR F, ELMASRY M, et al. Simulation-based condition assessment model for sewer pipelines [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017, 31(1): 04016066.
- [15] LAAKSO T, KOKKONEN T, MELLIN I, et al. Sewer condition prediction and analysis of explanatory factors [J]. Water, 2018, 10(9): 1239.

作者简介:黄荣敏(1981—),男,湖北黄梅人,硕士,高级工程师,主要研究方向为市政工程给排水。

E-mail:huang\_rongmin@ctg.com.cn

收稿日期:2022-07-15

修回日期:2022-10-17

(编辑:沈靖怡)