

城市排水管网运行风险评估研究进展

张莹

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市200092]

摘要:排水管网运行风险管理对城市排水系统的安全运行至关重要。通过调研国内外文献,识别了城市排水管网运行中的四种风险类型和九种主要风险事件,基于各类风险相关理论和实验研究成果,阐述了风险事件产生的主要原因和影响因素;分类总结了目前排水管网运行风险评估所采用的主要方法及相关应用研究,为未来排水管网运行风险评估工作提供有益参考。

关键词:城市排水管网;排水系统;风险管理;风险评估

中图分类号: S276.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)06-0104-06

0 引言

城市排水系统是保障城市安全的重要基础设施,承担了城市雨水和污水的收集、输送、处理和排放的功能。近年来,随着城市化进程的加快,我国排水管网规模增长迅速。据统计,截至2019年,我国城市排水管道总长度已达73.7万千米。市政排水管网多数设于地下,运行环境复杂,养护管理难度大,部分管网存在管道腐蚀老化、设计排水能力偏低、养护不及时等问题,对排水系统的运行造成了安全隐患,甚至发生内涝积水、污水冒溢、道路塌陷、气体爆炸等事故,严重威胁了城市排水安全、环境安全、交通安全和居民的生命安全。

排水管网运行风险的识别与评估可以为排水管网运行风险的防范提供科学依据,主要包括:(1)为排水管网的检测、养护和修复计划的制定提供依据;(2)为排水系统提标改造工程计划的制定提供依据;(3)为城市内涝灾害防治规划与措施的制定提供依据;(4)为排水管道作业人员及周围居民的生命健康安全风险防范机制的建立和完善提供依据。因此,排水管网运行风险识别与评估对预防排水系统运行事故、保障城市安全具有重要意义。

1 排水管网运行风险事件

1.1 排水管网运行风险类型

国内外学者针对不同类型的排水管网运行风险

开展了研究工作,总体而言,根据风险影响的主体,排水管网运行风险可分为四种类型:

(1)管道结构和功能风险:指排水管道结构和功能损害或失效的风险,包括内涝积水、污水冒溢以及管道结构损害风险等。

(2)周围基础设施和地质结构破坏风险:主要指由于管道破损渗漏等原因引起的地面、道路塌陷,以及周边其他基础设施破坏的风险。

(3)环境污染风险:主要包括由于管道渗漏引起的周边土壤和地下水污染风险,以及合流制管网溢流和分流制雨水排放对河道水体造成的污染。

(4)人员健康与安全风险:主要指由于排水管道的封闭空间和输送污水的性质产生有毒或可燃性气体,导致管道运维养护人员中毒的风险和管道气体爆炸引起人员伤亡的风险,以及排水系统中微生物气溶胶引发的工作人员健康风险。

1.2 排水管网主要运行风险事件

城市排水管网运行的主要风险事件包括内涝积水、污水冒溢、管道结构损害、路面塌陷、地下水和土壤污染、溢流污染、有害气体中毒、气体爆炸、微生物暴露风险等。

(1)内涝积水风险

随着近年来极端天气的增多,城市内涝已经成为我国主要自然灾害之一,全国60%以上城市发生过严重的内涝灾害。城市内涝积水是多因素综合作用的结果,包括降雨、地形、下垫面、管网排水能力、周围河网调蓄能力等因素。相关研究表明,强降雨、管网排水能力不足、局部地势低洼、下垫面不透水面积大是城市内涝的主要原因,河网调蓄能力、河道顶托等因素也对区域内涝积水有不可忽视的影响^[1-4]。其中,

收稿日期:2022-01-25

基金项目:上海市浦江人才计划(21PJ1422100);上海市青年科技启明星计划(21QB1404600)

作者简介:张莹(1988—),女,博士,工程师,从事水污染治理相关研究和咨询工作。

管网排水能力与管网覆盖率、管网设计排水能力、泵站排水能力和运行情况、管道淤积状况、调蓄设施建设情况等密切相关;下垫面的地面硬化程度、渗透性特征一般采用综合径流系数表征;地面高程和坡度是影响积水的两大地形因子;河湖水面率、河网密度、河道水位等因子则对区域的河网调蓄能力有重要影响。

(2) 污水冒溢风险

当污水管道水量过大或水位过高时,可能导致排水不畅,甚至污水流出地面,发生污水冒溢。污水冒溢的直接原因是管网高水位甚至满管运行、蓄水空间不足,从而失去了缓冲排水水量冲击的能力。当前,造成城市污水管网高水位运行和污水冒溢的原因较为复杂,主要包括五个方面:a. 管网、泵站设计标准偏低;因前期规划和设计标准偏低,排水能力不足,随着污水接入量增大,用水高峰期污水管网调蓄空间降低。b. 泵站运行管理导致的高水位运行;部分城市的污水泵站出于节约动力、减少污水厂溢流等原因,将进水水位壅高后才开始提升,导致其服务范围内管网高水位运行。c. 污水厂处理能力不足;部分城市污水厂时常超负荷运行,为满足水环境保护要求,需尽量减少溢流,这必然导致管网和泵站运行水位被动壅高。d. 管网破损渗漏、雨污混接混流、河水倒灌等原因引起的外水入侵导致管网调蓄空间下降;国内外相关调查显示,城市管网中外水入侵占比约25%~70%^[5],严重削弱了污水管网的实际排水能力。e. 管网淤积、堵塞等因素导致过水断面减少;污水管网中大多存在颗粒物沉降导致的底泥淤积问题,部分管道淤积深度甚至会超过管径的50%,若清淤养护不及时,将引起管道排水能力下降。总的来说,管网和泵站排水能力、下游泵站运行管理情况和污水厂处理能力对污水冒溢的发生有着决定性影响,外水入侵情况和管网淤积等因素也是导致污水冒溢的重要因素。

(3) 管道结构损害风险

管道结构损害是指管道结构本体遭受损伤,发生对其强度、刚度和使用寿命产生影响的缺陷和破坏。《城镇排水管道检测与评估技术规程》(CJJ 181—2012)中规定了十种管道结构性缺陷,包括破裂、变形、腐蚀、错口、起伏、脱节、接口材料脱落、支管暗接、异物穿入和渗漏等^[6]。管道结构损害是决定排水管道是否需要修复的关键因素。管道发生结构损害的概率受管龄、管材、管径、接口形式等管道自

身性状因素和路面交通荷载、覆土深度、土壤类型、周边施工扰动等环境因素影响^[7]。一般来讲,管龄越大,管道材料老化和腐蚀程度越严重,管道越容易发生损坏;管道材质及其强度是管道损坏的内在因素;管道接口的性质对管道错位、脱节缺陷的发生有重要影响;管道所在道路的交通荷载状况、覆土深度、土壤类型和施工扰动等对管道承受外界荷载或环境腐蚀作用有显著影响。

(4) 地下水和土壤污染风险

水利部2016年公开的一项调查结果显示,我国浅层地下水水质普遍较差^[8]。排水管网破损引发的污水外渗是造成地下水和土壤污染的主要原因之一。因管道埋藏地下,外渗污水量及其污染风险的量化评估十分困难,目前,我国在该领域的研究较少。国外相关调查表明,管道外渗污水量约占旱天污水量的2%~6%^[9]。研究发现,地下水中硝酸盐氮、大肠杆菌、硼等指示污染物的浓度与污水管道的泄露有密切联系^[10-11]。影响污水外渗的因素较多,主要包括地下水位、管道污水水位、管道破损面积、管道基础和周围土壤的孔隙率、渗透性以及土壤的饱和度等^[9,11-12]。已有学者基于达西定律建立污水外渗率预测的理论模型,但目前尚不成熟,参数的取值和预测结果都具有较大的不确定性^[12]。此外,污水外渗量与其造成环境污染的程度并无正相关关系,例如,降雨可能导致污水外渗量的增加,但污染物浓度也可能因雨水稀释作用而降低^[11]。

(5) 溢流污染风险

本文将合流制系统溢流和分流制系统雨水排放造成环境污染的风险统称为溢流污染风险。近年来,传统点源污染逐渐得到有效控制,溢流污染已成为影响我国城市水环境质量改善的重要问题。溢流污染现象反映出排水系统无法同时满足排水防汛安全和环境保护双重需求的现状,是排水系统问题的一个集中体现。造成溢流污染的原因复杂,主要包括三个方面^[13-15]:a. 排水体制自身不完善。例如,分流制系统存在大量雨污混接错接造成“无效”的分流;合流制系统污水厂处理能力与截流干管截流能力不匹配形成厂前溢流;溢流污水调蓄及就地处理设施不完善等。b. 管道清淤养护不及时。部分排水管道失养或养护不到位,导致管道内沉积污染物不能及时清除,雨天沉积物因大流量冲刷混入雨污水中,随溢流污水或雨水排放至水体。c. 地表径流污染影响。城市屋顶、街道等不透水表面上蓄积的各类污染物在降雨

和地表径流的冲刷下进入排水管网,随溢流污水或雨水排放进入水体。由此,影响溢流污染风险的因素包括分流制系统雨污混接程度、合流制系统截流和调蓄能力、污水处理厂处理能力、管道淤积状况、降雨特征、下垫面特征等。

(6)路面塌陷风险

路面塌陷是指地面由于地下物质移动而发生的急剧下沉。路面塌陷事故成因复杂,据一项对2005~2015年期间我国路面塌陷事件的统计^[16],人为因素在路面塌陷事件的成因中占比65%,而管道破损渗漏在人为因素中占比55%,是对道路路面塌陷影响最大的因素之一。许多城市的老城区排水管道建设年代久远,管材的老化导致其抗拉和抗冲击强度降低,容易出现管道破损和渗漏。管道破损渗漏发生后,一方面外渗污水会冲蚀路基之下的土体,带走土体形成冲蚀坑,在外荷载作用下引发路面塌陷;另一方面,地下水或地表水也可能会携带管道周围土体入渗管内,土体流失引起路基下空洞的形成,进而导致路面塌陷^[17]。王帅超^[17]通过室内模型实验和数值模拟研究发现,地下空洞的空洞跨径增大和上覆土层的减小是导致空洞塌陷的直接原因;空洞塌陷的临界跨径与空洞周围土的容重、粘聚力、内摩擦角、外部荷载以及上覆土层厚度等关系密切。同时,对于已发生地下空洞的区域,强降雨和周围地铁、隧道或管线的施工扰动等外部因素也会加剧路面塌陷的进程。

(7)有害气体中毒风险

排水管道是相对封闭的空间,空气流通性差,容易形成厌氧环境。污水中的有机物在管道环境中被微生物分解,产生 H_2S 、 CH_4 、 SO_2 、HCN等有害气体,这些气体在管道积累达到一定浓度后泄露,会导致人员中毒,严重危害排水管道作业人员的健康。其中, H_2S 是排水管道中最典型的有毒气体,人体暴露在含 H_2S 气体的环境中,可能引发眼部刺激、头痛、恶心,甚至窒息和死亡。据不完全统计,1994~2005年我国北京、上海、天津发生的硫化氢中毒事故中就有40多人伤亡^[18]。 H_2S 一般通过厌氧环境下含硫有机物分解和硫酸盐还原菌(SRB)对硫酸盐的生物转化产生。排水管道沉积物是 H_2S 气体的重要来源, H_2S 主要产生于沉积物表层有机物和管道内生物膜中的SRB菌的还原反应。常见^[19]通过实地调研探索了我国南方某城市排水管网及其附属构筑物中 H_2S 的产生规律和影响因素,研究表明,水流的扰动和温度变化对 H_2S 的产生和释放影响较大,跌水井和泄

压井等水流波动剧烈处 H_2S 气体的含量最高;低温对 H_2S 气体的产生和释放都有显著的抑制作用,例如,当跌水井气温在 32°C 以上时, H_2S 最高浓度大于60 ppm,而跌水井气温在 $8^\circ\text{C} \sim 16^\circ\text{C}$, H_2S 最高浓度为12 ppm。一些停留时间较长的构筑物,如格栅井和化粪池井等容易产生和积累液相 H_2S ,而液相 H_2S 通常在下部跌水井中释放。在排水管道运维养护工作中,合理通风换气和穿戴个人防护用具可有效降低有害气体中毒风险。

(8)气体爆炸风险

排水管道中的可燃性气体积聚达到一定浓度后,遇明火会发生爆炸,威胁排水作业人员和周围居民的生命安全,还会对周边排水管道和路面造成破坏。我国许多城市都发生过严重的排水管道爆炸事故。据统计,2004~2011年重庆市主城区共发生37起污水管道和化粪池爆炸事故,造成70多人伤亡^[20-21]。排水管道内的可燃性气体包括内源性可燃气体和外源性可燃气体。内源性可燃气体典型的是甲烷(CH_4),主要由微生物厌氧分解污水和沉积物中的有机物产生, CH_4 的产生受温度、污水浓度、水力停留时间、管道生物膜量、管道沉积物状况等多种因素影响。外源性可燃气体包括汽油、石油、苯等挥发性可燃物,主要来源于加油加气站油气泄露、企业排放含可燃气体的化工废水、居民倾倒液化气残渣等^[22]。同时,作为排水管网中气体爆炸的主要风险点,检查井内管网交汇状况直接影响了可燃性气体的积聚,因此检查井内连接管道和化粪池的个数也是气体爆炸风险的一项重要风险因素^[22]。

(9)微生物暴露风险

生活污水中存在大量细菌、病毒、寄生虫等病原微生物,在污水的输送和处理过程中,由于激荡、扰动等原因,病原微生物逸散到空气中形成生物气溶胶污染物,可能会对排水相关工作人员和周边居民的生命健康造成威胁^[23]。这类由微生物气溶胶带来的健康风险称为微生物暴露风险。微生物气溶胶常见的暴露途径包括皮肤接触和呼吸吸入。目前,美国等发达国家已形成了较为成熟的微生物定量风险评估体系,常用的有基于暴露情景建立的暴露评估模型和表征暴露剂量与健康风险关系的剂量-响应模型等^[24-25]。影响微生物暴露风险的因素较多,包括:微生物气溶胶浓度及其粒径分布、被评估人群暴露于微生物气溶胶中的时间、预计从业时长、安全防护措施和防护用具使用状况等。其中,微生物气溶胶的浓

度和粒径分布随空间和时间变化极大,其产生和扩散受温度、湿度、风速、光照强度等气象条件以及排水构筑物类型和运行条件等多方面因素影响^[26]。

2 排水管网运行风险评估方法

排水管网运行风险评估方法通常可分为三类:定性评估方法、定量评估方法、定性与定量结合的综合评估方法。不同类型下的常用评估方法见表 1。

表 1 常用风险评估方法表

方法类型	常用方法	方法描述
定性评估法	风险矩阵法	风险概率等级和风险危害程度等级结合用以描述风险大小的方法
	专家评分法	结合专家经验和主观判断,对风险事件及影响因素进行描述、解释和评价的方法
定量评估法	理论或经验模型评估方法	采用理论模型或经验模型进行风险评估的方法
	仿真模型情景模拟法	基于仿真模型模拟不同情景下风险因子的动态变化从而实现风险评估的方法
	统计模型法	基于大量历史数据,采用数理统计方法分析建立的描述风险影响因素变量和风险评估指标之间关系的模型
综合评估方法	层次分析法	一种将定性和定量分析相结合的多准则决策方法,一般步骤包括:建立层次结构模型、构造判断矩阵、计算权重系数和一致性检验
	模糊综合评价法	基于模糊数学原理,从多个因素对被评价事物隶属等级状况进行综合性评价的方法。一般步骤包括:确定评价因素和评价等级,构造模糊关系评价矩阵并确定权重,以及通过模糊合成建立评判模型进行评判
	人工神经网络综合评价法	基于人工神经网络的自学习、自适应能力和强容错性建立的模拟人类思维模式的综合评价模型
	色综合评价法	基于灰色系统理论建立的对系统态势的量化比较分析方法。一般步骤包括确定最优指标集、指标值的规范化处理和计算综合评判结果

2.1 定性评估方法

典型的定性评估方法包括风险矩阵法和专家评估法。

风险矩阵法是一种基于风险评估主体需求和风险识别建立的,将风险概率等级和风险危害程度等级相结合来描述风险大小的方法^[27-28]。Johansen 等^[29]利用风险矩阵法对丹麦哥本哈根市约 1 200 km 的污水管网的运行风险进行粗评估,研究采用的 HAZOP 工具就是一种典型的基于“风险事件发生频率-后果”矩阵建立的定性风险分析方法。风险矩阵法也被广泛应用于职业健康风险评估中,常见的有罗马尼亚职业事故和职业病风险评估方法(罗马尼亚 MLSP 模型)、澳大利亚职业健康与安全风险评估方法(澳

大利亚 UQ 模型)、国际采矿与金属委员会风险评估方法(ICMM 模型)中的矩阵法等。冯玉超等^[30]采用多种职业风险评估方法实现了污水处理厂接触 NH₃、H₂S 和粉尘作业岗位的职业健康风险评估,其中包含澳大利亚 UQ 法和 ICMM 矩阵法。

专家评估法是通过咨询相关领域的专家,结合专家经验和主观判断,对风险事件及相关影响因素进行描述、解释和评价的方法。专家评估法常见的有德尔菲法和专家评分法。专家评估法很少单独使用,一般作为一些综合评估方法的组成部分,例如,层次分析法(AHP)风险评估过程中,通常需要采用专家评价来构造判断矩阵计算指标权重和对指标进行风险评分;风险评价指标体系构建也可结合德尔菲法进行专家咨询^[31]。

2.2 定量评估方法

定量评估方法一般是基于大量实验结果和统计数据建立数学模型,从而实现对风险指标分析和评估的方法^[32]。典型的定量评估方法包括理论或经验模型评估方法、仿真模型情景模拟法和统计模型法。

理论或经验模型评估方法是采用基于实验和实证研究建立的理论模型或经验模型进行风险评估的方法。例如,欧盟计算机辅助排水管网修复科技项目(CARE-S)中研发并建立了基于生物化学机理对管道外部和内部腐蚀情况的预测和评估的理论模型 Extcorr 和 WATS 模型^[33]。美国 EPA 针对有毒物质建立的致癌/非致癌健康风险评估模型是一种基于剂量-响应关系的半经验模型,有大量实验室和流行病学数据作支撑^[34]。梁锦钊等^[35]采用 EPA 方法对排水管道作业人员吸入管道内有害气体的风险进行了评估,其中,有害气体污染浓度、管道作业人员暴露在污染气体中的时间、频率等参数通过实地监测、调研以及理论模型估算等方法获取。

基于仿真模型的情景模拟法在内涝风险评估中有较多的应用。王诗婧^[36]采用商业仿真模型软件 Infoworks ICM 开展了不同降雨情景下区域内涝风险的预测和评估,基于模型预测的积水深度和积水时间实现了内涝风险等级评定和内涝风险空间分布特征识别。苏伯尼等^[37]基于二维水动力仿真模型开展了福建省龙岩市某区在不同暴雨情景下的内涝动态模拟,获取了该区域内涝积水的时空分布特征和灾害损失情况。实际应用中,仿真模型情景模拟法也可与层次分析法等综合评估方法相结合,作为重要指标的计算和预测工具。孙阿丽^[38]基于 SWMM 仿真模

型对上海市某区域在不同降雨情景下的内涝积水情况进行了模拟,并采用层次分析法结合模拟降雨积水深度和历时等参数开展区域内涝风险评价,形成不同情景下内涝风险区划。

统计模型,又称概率模型,是指基于大量历史数据,采用数理统计方法分析建立的描述风险影响因素变量和风险评估指标之间关系的模型。常见的统计模型方法包括多元线性回归模型、逻辑回归模型、多元判别分析法、证据推理法、群分析法、马尔科夫链模型和贝叶斯网络模型等^[33]。Bakry 等^[39]采用多元线性回归方法基于管网历史 CCTV 检测数据分析建立了化学注浆修复后污水管和检查井结构与功能状况预测与评估模型。Alasqqar 等^[40]采用多元判别分析法建立了巴格达市污水干管结构损坏预测模型。统计模型也可与其他方法结合,作为综合评估方法来使用。例如,Hawari 等^[41]结合模糊集合理论、模糊网络分析法、蒙特卡洛模拟和证据推理法建立了污水重力和压力管网的健康状况评估模型。

2.3 综合评估方法

定性与定量相结合的综合评估方法是多因素、多指标评价和决策中常用的手段。综合评估过程通常包含评估指标体系的建立,指标权重的确定和综合评价模型的构建等步骤,评价的依据主要包括数据、模型和专家知识等。常见的综合评估方法包括层次分析法、模糊综合评价法、人工神经网络综合评价法和灰色关联分析法等。

层次分析法是美国运筹学家 A.L.Saaty 在 20 世纪 70 年代提出的一种多目标综合决策方法,它模拟了人的思维过程,并将人的主观判断客观量化,实现了决策思维过程的数学表达^[42]。其一般步骤见表 1。张文俊等^[43]利用层次分析法构建了污水干管运行风险评估指标体系,结合专家评分计算获得各级指标权重,为污水管道运行风险评估提供指导和依据。刘威等^[44]建立了排水管网风险评估指标体系,并采用结合了层次分析法和熵权法的组合赋权方法确定指标权重。

模糊综合评价法是以模糊数学为基础,应用模糊关系合成的原理,将一些边界不清、不易量化的因素定量化,从多个因素对被评价事物隶属等级状况进行综合性评价的方法^[42]。其一般步骤见表 1。范小花等^[45]基于模糊综合评价法建立了污水管网气体爆炸风险评估模型,并将模型应用于某小区污水管道

气体爆炸风险的评估。

人工神经网络综合评价法是基于人工神经网络的自学习、自适应能力和强容错性建立模拟人类思维模式的综合评价模型的方法。常用的人工神经网络模型有反向传播神经网络(BPNN)模型和概率神经网络(PNN)模型。Najafi 等^[46]和 Sousa 等^[47]基于管网特性和历史 CCTV 管网检测数据建立了用于预测污水管网健康状况的人工神经网络模型,为管网预防性检测和养护方案的制定提供了科学依据。

灰色关联分析法是基于灰色系统理论建立的对系统态势的量化比较分析方法,利用各方案与最优方案之间关联度的大小对评价对象进行比较、排序,从而进行评价。其一般步骤见表 1。徐得潜等^[48]结合灰色关联分析法和层次分析法建立了合流制管网风险评估模型,涵盖甲烷气体爆炸风险、硫化氢中毒风险、溢流污染风险和环境风险等四大类风险,

综合评价的结果依赖于方法的选择,选择不同的评价方法得到的结果不尽相同。实际应用中,除单一评价方法外,还时常将不同方法组合使用,实现优势互补,以取得更为科学、合理的评价结果。例如,前文提到的层次分析法和熵权法的组合赋权确定指标权重,综合考虑了决策者、专家的主观倾向以及管道自身客观情况^[44]。而徐得潜等^[48]建立的组合方法在不同阶段采用不同的评估方法,将层次分析法用于风险指标因素权重的确定,灰色关联分析应用于管道风险等级的评估。

3 结 语

排水管网运行风险的识别与评估对保障城市排水系统安全运行具有重要意义。根据风险影响的主体,将排水管网运行风险分为四种类型,涵盖九种主要运行风险事件,包括内涝积水、污水冒溢、管道结构损害、路面塌陷、地下水和土壤污染、溢流污染、有害气体中毒、气体爆炸、微生物暴露风险等。本文基于目前相关的理论和实验研究成果,阐述了不同风险事件发生主要原因及影响因素。

目前,排水管网运行风险评估采用的方法可分为定性评估方法,定量评估方法,及综合评估方法三种类型,常用方法包括风险矩阵法、专家评分法、理论或经验模型评估方法、仿真模型情景模拟法、统计模型法、层次分析法、模糊综合评价法、人工神经网络综合评价法以及灰色综合评价法等。在实际应用中,建议根据评估目标和数据的可获得性选择适宜

的方法进行评估。

参考文献:

- [1] 王若楠.城市内涝风险等级评估方法及案例研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.
- [2] 李芮,潘兴瑶,邸苏闯,等.北京城区典型内涝积水原因诊断研究——以上清桥区域为例[J].自然资源学报,2018,33(11):1940-1952.
- [3] 谢胜.高度城市化区域内涝灾害风险评估与区划[J].城市道桥与防洪,2014(11):8-10,18-19.
- [4] 白婉萍,杨宇栋,李正兆.常州市城市内涝风险评估体系的构建[J].常州工学院学报,2015,28(4):16-20,83.
- [5] 曹业始,Christian A,刘智晓,等.改造当前国内污水管网需要综合考虑的四个因素[J].给水排水,2021,57(8):125-137.
- [6] CJJ 181—2012,城镇排水管道检测与评估技术规程[S].
- [7] 李晓峰.城镇污水管网健康状况评价与修复技术优选研究[D].苏州:苏州科技大学,2019.
- [8] 地下水动态月报[R].北京:中华人民共和国水利部,2016.
- [9] Reynolds J H,Barrett M H. A review of the effects of sewer leakage on groundwater quality[J].Water and Environment Journal,2003,17(1):34-39.
- [10] Pitt R,Clark S,Field R.Groundwater contamination potential from stormwater infiltration practices[J].Urban water,1999,1(3):217-236.
- [11] Held I,Wolf L,Eiswirth M.,et al.Impacts of sewer leakage on urban groundwater.In:Urban groundwater management and sustainability [M].Dordrecht:Springer,2006.
- [12] Rutsch M,Rieckermann J,Cullmann J,et al.Towards a better understanding of sewer exfiltration[J].Water Research,2008,42(10-11):2385-2394.
- [13] 闫攀,赵杨,车伍,等.中国城市合流制溢流控制的系统衔接关系剖析[J].中国给水排水,2020,36(14):37-45.
- [14] 赵杨,车伍,杨正.中国城市合流制及相关排水系统的主要特征分析[J].中国给水排水,2020,36(14):18-28.
- [15] 张杰.合流制排水系统雨天溢流污染控制及优化调度研究[D].天津:天津大学,2012.
- [16] 胡聿涵,白玉川,徐海珏.近10年中国城市道路塌陷原因及防治对策分析[J].公路,2016,61(9):130-135.
- [17] 王帅超.城市地下管道渗漏引起的路面塌陷机理分析与研究[D].郑州:郑州大学,2017.
- [18] 许小冰,王怡,王社平,等.城市排水管道中有害气体控制的国内外研究现状[J].中国给水排水,2012,28(14):9-12.
- [19] 常见.排水管网硫化氢气体来源识别与诊断的研究[D].西安:长安大学,2018.
- [20] 胡修稳.重庆主城区污水管道气体安全风险评估模型研究[D].重庆:重庆大学,2012.
- [21] 彭述娟.山地城市污水管道气体爆炸风险评估及预警研究[D].重庆:重庆大学,2012.
- [22] 米莉.城市下水道和化粪池气体爆炸风险评估与预警机制研究[D].重庆:重庆大学,2010.
- [23] 刘曼丽,熊红松,马民,等.市政污水处理厂中生物气溶胶污染物的排放和微生物定量风险评估[J].给水排水,2020,56(S1):567-575.
- [24] 肖国生,王兆丹,陈林,等.微生物定量风险评估[J].环境科学与技术,2013,36(08):59-64.
- [25] 杨亚飞,Ali W,张蒙蒙,等.某市政污水处理厂的微生物气溶胶排放特征及其定量风险评估研究[J].给水排水,2021,57(S1):104-109.
- [26] 程荣,亓畅,石磊,等.污水处理设施中微生物气溶胶的产生、传播及风险评估[J].给水排水,2020,56(4):59-69.
- [27] 阮欣,尹志逸,陈艾荣.风险矩阵评估方法研究与工程应用综述[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(3):381-385.
- [28] 俞素平.基于风险矩阵法的公路高边坡风险评估[J].长春工程学院学报(自然科学版),2018,19(1):85-89.
- [29] Johansen N B,Sorensen S,Jacobsen C,et al.Risk assessment of sewer systems[C]//Sixth International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management.Lyon: GRAIE,2007:925-932.
- [30] 冯玉超,赵远,高原,等.多种职业健康风险评估方法在污水处理行业中的应用研究[J].职业卫生与应急救援,2021,39(1):45-49,79.
- [31] 应亮,张怡琼,孙雅雯,等.基于德尔菲法上海市生活饮用水集中式供水水质风险评估指标体系构建[J].中国公共卫生,2019,35(11):1561-1564.
- [32] 巴振宇,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.
- [33] 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):1-18.
- [34] 周莉芳,张美辨.职业健康风险评估方法学研究进展[J].环境与职业医学,2020,37(2):125-130.
- [35] 梁锦钊,周云.城市排水管道作业人员风险评估探讨[J].给水排水,2016,52(4):118-123.
- [36] 王诗婧.基于降雨情景模拟的排水系统内涝风险评估与分析[J].中国给水排水,2020,36(11):112-116.
- [37] 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.
- [38] 孙阿丽.基于情景模拟的城市暴雨内涝风险评估[D].上海:华东师范大学,2011.
- [39] Bakry I,Alzraiee H,Kaddoura K,et al.Condition prediction for chemical grouting rehabilitation of sewer networks[J].Journal of Performance of Constructed Facilities,2016,30(6):1-11.
- [40] Alsaqqar A S,Khudair B H,Jbbar R K.Rigid Trunk Sewer Deterioration Prediction Models using Multiple Discriminant and Neural Network Models in Baghdad City, Iraq[J].Journal of Engineering,2017,23(8):70-83.
- [41] Hawari A,Alkadour F,Elmasry M,et al.Condition assessment model for sewer pipelines using fuzzy-based evidential reasoning[J].Australian Journal of Civil Engineering,2018,16(1):23-37.
- [42] 杜栋,庞庆华.现代综合评价方法与案例精选[M].北京:清华大学出版社,2021.
- [43] 张文俊,谢震方,黎雷.城市污水干管运行风险评估指标体系[J].净水技术,2019,38(6):112-117,121.
- [44] 刘威,董婉琪.基于 AHP-熵权法组合赋权的排水管网风险评估方

PM438 桥墩西侧存在约 15 m 缺口。测量显示 2019 年 8 月至 11 月对低于设计标高区域补抛后水下地形比较稳定,未发现明显的冲刷现象。

(4)桥墩两侧防护范围外的地形均有冲刷,PM434-PM435、PM437-PM438 附近冲刷较大,2018 年 6 月至 2020 年 3 月,平均冲刷深度约 1.5 m;PM135-137 附近冲刷相对较小,2018 年 6 月至 2020 年 3 月,平均冲刷深度约 0.7 m。

4 结 语

(1)大桥桥墩过度冲刷区域的防护设计方案总体效果明显,达到试验工程目的。东海大桥海域冲淤变化呈现为冲刷态势,防护工程的实施,保证了桥墩防护区域的稳定;填充结构基本稳定,软体排及勾连体保护区域水深未发现明显变化;但桥墩防护范围以外的冲刷仍在持续,后续应继续做好定期监测。

(2)监测结果分析表明,冲刷坑抛填存在泥沙淘蚀、抛填料下沉的情况,实施了护面护滩防护的冲刷坑稳定性明显较好,因此防护措施的完整性对防护效果至关重要。由于海域水深流急,软体排铺设、栅栏板压边的施工工效低,有必要对设计方案或施工工艺进行完善。

(3)抛填袋装碎石和干混料施工中,水流波浪条件对施工安全质量的影响干扰都很大,船舶锚泊定位难,抛填料整体平整度不佳,存在部分区域标高低于设计要求。水下抛填料施工需研究进一步改进施工设备,提高桩群中心区抛填的安全控制和水下抛填质量精度。

(4)护面使用袋装干混料工程效果不佳。专项试验显示,2019 年 5 月 17 日使用钢丝网兜将干混料试验样本吊放施工水域,2019 年 12 月 10 日取出检查,编制袋完好,干混料部分凝结成块体但较为松散,硬化强度未能达到设计要求。

参考文献:

- [1] 孙晨.不同水流冲击角对于桩群局部冲刷的影响研究[D].南京:南京水利科学研究院,2009.
- [2] 高正荣,黄建维,卢中一.苏通大桥主塔墩冲刷防护工程关键技术[J].水利水运工程学报,2005(2):18-22.
- [3] 何超.苏通大桥桥墩冲刷防护工程研究[J].现代交通技术,2020(3):46-49.
- [4] 东海大桥桥墩冲淤状况专项检测技术报告[R].上海:交通运输部东海航海保障中心上海海事测绘中心,2017.
- [5] 韩昇林.东海大桥桥墩冲淤状况分析[J].公路桥梁,2016(27):134,152.
- [6] 毛娟龙,杨磊.东海大桥深水群桩基础防冲刷设计与施工[J].施工技术(中英文),2021(15):112-114.

(上接第 109 页)

- 法研究[J].安全与环境学报,2021,21(3):949-956.
- [45] 范小花,丁允超.城市污水管网气体爆炸风险评估[J].工业安全与环保,2016,42(8):32-34.
 - [46] Najafi M, Kulandaivel G. Pipeline condition prediction using neural network models[C]//Optimizing Pipeline Design, Operations, and Maintenance in Today's Economy. Texas:ASCE, 2005:767-781.
 - [47] Sousa V, Matos J P, Almeida N, et al. Risk assessment of sewer condition using artificial intelligence tools: application to the SANEST sewer system[J]. Water science and technology, 2014, 69(3):622-627.
 - [48] 徐得潜,张倩.基于 AHP-GRA 的合流制污水管道风险评估[J].安全与环境学报,2019,19(4):1149-1154.