

郭佳奇, 钱源, 王珍珍, 等. 城市地下综合管廊常见运维灾害及对策研究[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 27-32. [GUO Jiaqi, QIAN Yuan, WANG Zhenzhen, et al. The Common Operational Disasters and Countermeasures of Utility Tunnel in Urban[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 27-33. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.006.]

城市地下综合管廊常见运维灾害及对策研究*

郭佳奇^{1,2}, 钱源^{1,2}, 王珍珍^{1,2}, 顿志林^{1,2}, 刘希亮^{1,2}

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南理工大学 城市地下综合管廊研究所, 河南 焦作 454000)

摘要: 城市地下综合管廊作为现代化城市建设中不可或缺的一种重要基础设施, 是保持城市能量流、物质流及信息流畅通的众多生命线之家, 然而可以预见大量的灾害将成为其正常运行的严重威胁。在对国内外城市地下综合管廊灾害事故统计分析的基础上, 结合与之具有一定程度相似性的市政管线(或隧道)及其他类型运营隧道灾害, 系统划分了其运维期灾害类型, 并对自然灾害、技术灾害和人为灾害类型进行了细分, 提出了其运维期灾害防控的基本原则。在此基础上, 重点分析总结了综合管廊火灾和震害的产生机理和应对措施; 还就人为灾害、渗漏水问题、不均匀沉降以及环境安全问题及其对策进行了研究。研究成果可为运维期综合管廊减灾防灾提供参考。

关键词: 城市地下综合管廊; 运维灾害; 火灾; 震害; 应对措施

中图分类号: X43; X45; X9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2019)01-0027-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.006

城市地下综合管廊是指在城市地下用于集中敷设两类及以上市政工程管线的公共隧道^[1]。1832年法国巴黎建造了世界上第一条综合管廊, 随后英国、德国、西班牙、美国等也相继建设了少量, 20世纪, 日本和我国台湾地区的综合管廊建设走在了世界前列^[2]。我国大陆地区起步较晚, 于1958年在天安门广场下修建了第一条; 之后一直未得到大的发展。近年来, 鉴于综合管廊在解决各类管网设施能力不足, 实现城市节能降耗和资源共享等方面具有突出优势, 国务院与住建部先后出台了一系列推动其健康发展的指导意见和方针政策。据初步统计, 截至2016年12月底, 我国内地已有147个城市正在开工建设, 综合管廊的建设真正迎来了发展的春天^[3]。

相较于传统直埋或架空铺设的各种市政管线, 集中设置于综合管廊内的市政管线, 虽可抵御地震、台风、冰冻、侵蚀等灾害^[4], 但由于高危管线大量入廊, 极易产生诸如电力通讯线缆火灾、天然气管道泄露火灾等危害综合管廊安全的事; 此外, 各种管线集中放置在同一空间内, 相互之间产生干扰, 在内、外部致灾因素联合作用下, 诱发多灾种耦合灾害。随着2015年确定的首批10个试点城市的综合管廊逐步投入运营, 以及未来大量综合管廊运维关键时期的到来, 如何保障综合管廊这个城市重要“生命线”集合体的安全, 防控各类运维灾害, 保障人民群众生命财产安全和

城市良好运行秩序, 是一个迫切需要关注的严峻问题。

本文全面统计分析了国内外城市地下综合管廊运营维护期间的灾害事故; 结合其他在役地下工程的灾害特征, 系统划分了其运维期灾害类型, 并提出防灾减灾基本原则。基于此, 重点研究了火灾和震害两大综合管廊运维灾害的机理及防治对策, 还就人为灾害、渗漏水、不均匀沉降和环境安全问题等几类灾害进行了分析。研究成果对我国城市地下综合管廊安全运维具有重要意义。

1 综合管廊事故统计及其灾害分类

本文对公开报道的综合管廊运维灾害事故进行了统计(表1)。据表1, 共有17次事故, 其中7次火灾(1次引发了爆炸), 9次地震(1次引发了爆炸)和1次洪水。据此得出综合管廊运维期间的灾害主要集中在火灾和地震; 这些灾害虽未引起重大的人员伤亡事故, 但造成了停水、停电、停气、通信中断和道路临时封闭等不良后果。而且这些灾害仍具有巨大的危险性, 一旦从灾害发生到救援的任何环节出现失误, 就很可能酿成巨大的灾难。

综合管廊内部环境和外部环境一直处于动态

* 收稿日期: 2018-05-23 修回日期: 2018-07-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51778215); 河南理工大学青年骨干教师资助计划(2017XQG-08)

第一作者简介: 郭佳奇(1981-), 男, 河南周口人, 副教授, 博士, 研究方向为隧道与地下工程。E-mail: gjq519@163.com

的变化中，使得其运维灾害致灾因素复杂多样，给灾害的防控带来了困难，也增加了灾害发生后救援过程中出现失误或不当的概率，灾害事故后果风险将随之增大。结合与综合管廊灾害具有一定程度相似性的传统地下管线和各种在役隧道已发生的灾害类型，根据综合管廊内外部环境孕育的致灾因素，可以预测城市地下综合管廊运维期间可能出现如图 1 所示的灾害形式。

为明晰综合管廊运维期灾害致灾因素、归纳不同类型灾害发生的频率、划分灾害等级、预测

可能的破坏程度和后果，进而制定具有针对性的灾害防控对策，十分有必要对图 1 中所列举的综合管廊运维期间的常见灾害形式进行分类。本文提出一种基于灾害成因的分类方法，把城市地下综合管廊运维期灾害分为综合管廊自然灾害、综合管廊人为灾害和综合管廊技术灾害三大类型，如图 1 所示，每一大类型灾害又分为若干种亚型灾害，甚至亚型灾害进一步细分为数量不等的小类型。综合管廊自然灾害是由于客观自然条件变异引发的，包括气象灾害(如暴雨或高温)、水文灾

表 1 城市地下综合管廊事故统计

时间	地点	事故类型	事故特征及影响
1964 年	日本新潟县	地震	新潟地震引起的砂土液化使管廊整体上浮，沙土流入管廊内部。
1964 年	美国阿拉斯加州	地震	阿拉斯加地震中一处综合管廊因土体侧向位移过大，廊体被剪断。
1971 年	日本仙台市	地震	宫城地震导致管廊接口拉断，廊体出现裂缝；大量泥沙和地下水涌入；给水、排水和供气管道破坏。引起短期停水、供气中断。
1989 年	美国旧金山海湾	地震	洛马·普雷塔大地震中综合管廊因侧向土体变形过大出现结构破裂。
1992 年	美国芝加哥市	洪水	芝加哥大洪水导致一处管廊墙体被豁开。通信、电力几乎瘫痪。
1994 年	美国洛杉矶市	地震和爆炸	洛杉矶北岭大地震引起燃气管道爆炸，廊体损坏。
1995 年	日本神户市、仙台市	地震	阪神地震导致神户 2 号管廊内部许多结构接缝错位或分开，内壁混凝土大面积脱落，给水管道破裂，其他管线受到影响；仙台市地下给水隧道严重破坏，全市供水瘫痪。
1997 年	土耳其伊兹米特市	地震	伊兹米特地震中一处管廊侧墙开裂，部分混凝土脱落。
1999 年	中国台湾南投县	地震	集集地震使管廊出现断裂、龟裂、大变形和混凝土剥落。
2001 年	美国西雅图市	地震	西雅图地震中土体侧向位移过大使一处管廊侧墙破裂，内部管道全部破坏。
2004 年	英国曼切斯特市	火灾	管廊内部起火。大约 13 万户电话线被烧断，周围四个市的通信受到影响。
2009 年	美国印地安纳州 圣母大学	火灾	管廊内部起火，伴随大量浓烟产生。一名工人由于吸入浓烟入院治疗；校区内部分地区停电，互联网、电话、有线电视中断。
2013 年	瑞典斯德哥尔摩市	火灾	电缆故障引发廊内火灾。市内一辖区供电和通信中断。
2015 年	英国伦敦市	火灾	管廊内天然气管道泄漏起火。天然气供应中断，近 5000 人被紧急疏散。
2016 年	意大利罗马市	火灾	管廊内部着火，伴随大量灰色浓烟。道路关闭，电力中断。
2017 年	美国斯克内克塔市	火灾和爆炸	综合管廊电缆线短路起火，并引发爆炸，并盖冲到四米多高，有大量浓烟从井口冒出。附近部分地区停电，街道封闭。
2017 年	美国亚特兰大市 杰克逊机场	火灾	管廊内电缆线起火。停电 11 小时，期间航班被取消。

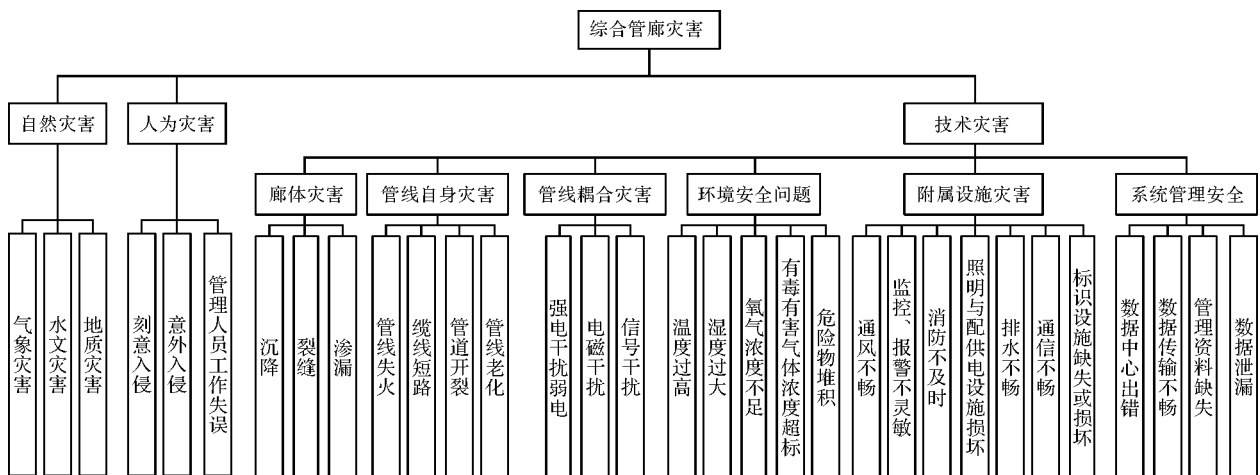


图 1 城市地下综合管廊灾害分类

害(如洪水)和地质灾害(如地震),它们破坏管廊结构,影响其正常功能,危害人类生活环境。具有以下特点:①广泛性,当自然灾害发生时,该地区几乎所有综合管廊都要承受这种灾害;②不确定性,自然灾害发生的时间、区域及频度难以精确预测;③连锁性,综合管廊自然灾害中可能诱发另外两种灾害的发生。

综合管廊人为灾害是由人的故意行为或操作不当引起,主要包括管理人员操作不当、人或动物的蓄意入侵和意外入侵,具有潜伏性和可防范性的特点,即该类型灾害致灾因素多处于潜伏状态,但可通过有效的措施提前防止这类灾害的形成。综合管廊技术灾害是由于技术失当或管理失误引起的,致灾因素最多,存在最为广泛,具有显著地技术性和区域性的特点。综合管廊的建设和运营涉及到多种技术的应用,不同技术的使用兼顾不同的方面和不同区域,而某种技术灾害通常只会影响它所控制的区域,较难扩散到综合管廊的所有舱室和综合管廊全部长度范围。

2 综合管廊防灾减灾原则

综合管廊防灾减灾工作的顺利开展,需要把契合其特点的防灾减灾原则渗透到规划、设计、施工和运营的全生命周期,以达到控制灾害出现几率最小化和灾害损失最小化。广泛的调研发现,现有管廊工程和科研成果蕴含有灾害防治思想,可总结为如下三条综合管廊防灾减灾原则。

(1) 发展、减灾,齐头并进

综合管廊的发展和减灾本质上是正相关的,两者相辅相成、不可分割。“减灾”的意义可以从两个方面表述,既可表述为通过建设管廊并发挥它协调管道、监控预测等功能来减少由于地面盲目开挖和管线陈旧等问题带来的灾害,减少城市功能受损的几率,实现地下空间的可持续利用并抵抗一定的自然灾害^[5];又可表述为在管廊内部和周围采取必要的消防措施来保障其内部管线的安全运营,防止管廊成为“隐蔽的定时炸弹”。也就是说“减灾”意味着管廊建设的目的之一是减少城市中人为灾害和部分自然灾害,另外也要采取必要的措施减轻管廊自身可能带来的灾害。管廊对于城市的减灾作用是城市的需要,这也正是促使管廊发展的原因之一;而管廊做好自身的减灾是其为城市减灾的前提。因此管廊事业的发展需要管廊对自身和对城市“减灾”,正是由于其具有减灾效果,才使之有用武之地并得到蓬勃发展。

(2) 预防为主,防患未然

防灾减灾的基本原则是“灾前防、灾中抗、灾后救”,在这三个阶段中要做到“预防为主、抗救相结合”^[6]。在这种思想的指导下,综合管廊防灾形成了以降低灾害诱因为主的思路。即提前把握致灾因子,采取预防措施尽量降低灾害发生的可

能性,而不把重点放到灾后救援与重建上。《城市综合管廊工程技术规范》^[1]中规定了“天然气管道应在独立舱室内敷设”、“热力管道不应与电力电缆同舱敷设”、“天然气管道应采用无缝钢管”……此类规定要求综合管廊在设计阶段就必须起到预防运维期灾害的作用。仲崇军^[7]结合广州知识城KS1路综合管廊不采用自动灭火系统的消防设计方案,提出尽可能在防火措施上考虑完善,而不把大部分费用用在事后消防设备上,从而节约工程造价。孙磊等^[8]通过广泛的调研分析提出在规模较小、覆盖面积较小、电压等级低的电力电缆综合管廊,可采取有效的工程措施而不设置自动灭火系统装置。

(3) 抗、救为辅,亡羊补牢

现实中灾害预防很难做到万无一失,况且像地震这样的自然灾害不能提前预测,因此在灾害发生时综合管廊需要有完善的抗灾策略和及时有效的救灾措施。火灾在刚形成时需要信息化智能化消防系统及时报警和尽快灭火;管廊渗漏水和不均匀沉降需要在日常巡检中及时发现,并尽快采取措施抵抗灾害,保证管廊的正常工作。通过这些措施控制灾害蔓延减少灾害带来的损失并降低二次灾害发生的可能性,亡羊补牢,犹未迟也。

3 综合管廊火灾事故及应对措施

3.1 火灾发生机理

可燃物的类型和数量是引起综合管廊火灾的主要因素^[9]。综合管廊中可能会诱发火灾的管线主要有电力电缆、天然气管道和污水管。

(1) 电力电缆引起的火灾。电力电缆发生火灾的一个必要条件是温度到达电缆保护层的着火点。通常有三个方面的因素够满足这一条件:①廊内通风降温效果不明显引起热量消散延迟,包括通风系统设计不合理、部分通风设备发生故障;②电力电缆自身起火,分别包括:电缆相间短路、电缆对地短路、电缆接触不良和电缆线路过载,其中前三者造成局部火灾,而电缆线路过载会引起整条电缆多起火灾;③外来火源,主要指维修人员带来的火源和其他无意或故意纵火^[10]。

(2) 燃气管道引起的火灾。管道内运输的燃气泄漏后,廊内形成爆燃性气体环境才会发生此类火灾,没有泄漏的燃气舱内缺乏可燃物质较难形成火灾。燃气泄漏后,泄露的燃气和管廊内的空气形成混合物,随着燃气浓度的逐渐增加,并达到爆炸浓度下限,形成了爆燃性环境。如果此时管廊内温度升高到一定程度或有火星出现,可燃物(燃气)、助燃物(氧气)和引火源燃烧三要素能得到满足即形成火灾,某些情况下会引起爆炸。这类火灾常发生在通风条件不良的区域^[11]。

(3) 污水管道引起的火灾。此类火灾和燃气管道火灾相似,主要区别是可燃物质及其来源不同。

排放的污水既包括生活污水也有工业废水,采用管道排放使管内污水处于无氧环境中。这种环境下,生活污水中的有机物容易被产甲烷细菌分解生成甲烷;工业废水中可能存在蛋白质、油脂、有机酸、碳水化合物等有机物,在微生物分解作用下产生硫化氢、一氧化碳等可燃气体^[12]。它们从管道内泄漏出去,在合适的条件下会引起火灾。

3.2 消防措施

广义上讲综合管廊的消防措施可以分为“两道防线”,“第一道防线”是管廊结构和入廊管线的防火设计,这是管廊防灾的第一要务。“第二道防线”是管廊的信息化智能化消防系统。

3.2.1 管廊结构和入廊管线的防火设计

在管廊结构和入廊管线设计中常用的防火设计方法主要有:

(1) 管线分舱布局。危险性高的管道(如天然气管道)要在独立舱内敷设;相互影响而发生火灾的管道(如热力管道和电力电缆)不能同舱敷设^[1]。

(2) 使用耐火材料。天然气管道要采用无缝钢管;电力电缆采用阻燃电缆或不燃电缆;除镶嵌材料外,管廊内装修材料采用不燃材料等^[1]。

(3) 采用防爆电气。防爆电气的使用减少了火源出现的几率。

(4) 设置防火分区。防火分区的设置有利于阻止火灾的蔓延,使之控制在一定的区域内。

(5) 合理设计通风系统。合适的通风条件不但能降低管廊内空气温度还可以降低舱内可燃气体浓度防止出现爆燃性环境。综合管廊内宜采用自然进风和机械排风相结合的方式,其中在天然气管道舱和含有污水管道的舱室内应采用机械进风、机械排风的方式^[1]。

3.2.2 智能化信息化消防系统

一旦火灾形成并突破灾前预防的“第一道防线”,智能化信息化消防措施得以大显身手。管廊内消防联动系统的组成结构是火灾探测报警系统+消防控制中心+灭火系统,分别执行发现火情、指挥灭火和实施灭火的任务。

(1) 火灾探测报警系统。最为关键的是天然气探测系统和火灾探测系统。

天然气泄漏根据泄漏量的大小可分为微孔泄漏、小孔泄漏和断裂暴露。同时根据探头的安装位置把气体泄漏探测分为内部探测和外部探测,前者把探测器安装在管道上,后者则安装在管道周围^[13]。甲烷泄漏时最先向最高空间扩散,且浓度沿高度层状分布^[14],因此微孔泄漏由于泄漏量小只能采用外部探测,且探测器宜安装在距离顶板较近的位置;靠近管道壁面甲烷浓度有所增加,因此小孔泄漏和断裂暴露因泄漏量较大适合采用内部探测;甲烷摩尔组分浓度沿管廊轴向随距离增加而迅速下降,鉴于此探测器需每隔一段距离进行安装。实际工程中为减少漏报,需采用外部探测和内部探测相结合的全面探测^[13]。

火灾的表现形式是火焰出现、温度大幅升高、

大量烟雾产生和气体急剧膨胀,因此常用的火灾探测器有红外火焰探测器、感烟火灾报警器、感温火灾报警器等,应依据管线特点针对不同的廊道采用合适的报警器。电力缆线管廊内不宜采用感烟火灾报警器和感温火灾报警器,因为此类缆线容易发热,在有着火时已经产生了黑烟雾和易燃气体,而可以采用红外火焰探测报警器,但它的视野可能会被管线遮挡,因此安装地点的选择需尤为慎重。Hiromitsu Ishii 等提出了一种光导纤维火灾探测系统,此系统可在 30 s 内检测长达 2 km 的管廊,且能在误差 5 m 内定位火源,所测点温度误差不超过 5℃,具有较高的准确性和实效性^[15]。近期用于管廊安全监控的机器人也得到了较大的发展,其中集成了红外测温、气体检测、烟雾检测以及图像识别技术,改被动防范为主动防范。能够完成日常巡检、可疑点复查、特殊任务、数据分析、分析报警等任务。

(2) 消防控制中心。分为总控中心和分控中心,它们和探测系统、灭火系统协调工作进行消防。管廊内的探测系统把感知的天然气浓度、温度、烟雾等信息传输到分控中心,分控中心采集管廊环境与设备信息、安防与消防信息、管线状态信息、报警信息及应急响应信息等实时信息,并将信息上传到本地服务器或视频矩阵,供总控中心监控程序连接访问。总控中心对接受的信息进行分析与处理,生成并发布控制信息给分控中心。分控中心再对管廊内的设备和设施等进行控制实施灭火^[16]。这一过程实现了以云计算、云存储、物联网技术为核心的集中一体化监控。

(3) 灭火系统。主要包括消防站点和自动灭火系统。消防站点中需安装消火栓和灭火器,只有在工作者进入管廊中才能发挥作用。自动灭火系统具有较高的时效性,收到消防控制中心的指挥后能立即实施灭火。常用的自动灭火系统有二氧化碳灭火系统、气溶胶灭火系统、水喷雾灭火系统和泡沫灭火系统。通过理论分析和对已运营的管廊案例进行比较,发现水喷雾灭火系统和 s 型气溶胶灭火系统优势最明显,前者可带电消防、设备简单、降温有效、适应性强而且造价低廉,适合固体、可燃液体和电气火灾,后者设置方便、灭火效率高、占用空间小、造价低而且可带电消防特别适用于电气火灾^[17]。

4 综合管廊地震及应对措施

1970 年代之前,学者们普遍认为地震对地下建筑物影响有限,然而近几十年调查发现位于地下的综合管廊在强震中损坏也时有发生^[18]。绝大多数综合管廊是典型的箱形浅埋钢筋混凝土结构,因其埋深较浅,地震的毁坏程度会比深埋结构严重得多。为保障管廊安全,有必要弄清其在地震作用下的破坏机理并采取应对措施。

4.1 综合管廊地震破坏机理

地震波包括纵波(P波)、横波(S波)、瑞利波(R波)和勒夫波(Q波),综合管廊对其响应特征各不相同,总体上可从四个方面进行分析。

(1) 震动响应。横波(主要指垂直偏振横波)引起综合管廊水平震动,纵波和瑞利波引起垂直震动。

(2) 变形响应。作为一种地下结构的综合管廊符合地震波作用下地下结构的变形特征,其变形可分为轴向拉压变形,如图 2a; 轴向弯曲变形,如图 2b; 截面椭圆变形(圆形截面)或挤压变形(矩形截面),如图 2c、图 2d,前两种变形是波沿结构轴向传播引起的;后一种是波入射方向垂直于结构引起的^[19]。其中,综合管廊弯曲变形最为常见,它主要由横波和瑞利波引起,但两者区别较大,在横波作用下,结构上下表面对应点应变幅值大小相差不大;而在瑞利波作用下,结构顶面的应变幅值比对应底面的应变幅值大得多,大约是前者的 2 倍^[20-21]。而且弯曲变形的最大应变分布呈现出中间大两头小的特征,且随着加速度峰值的增大而增大^[20]。

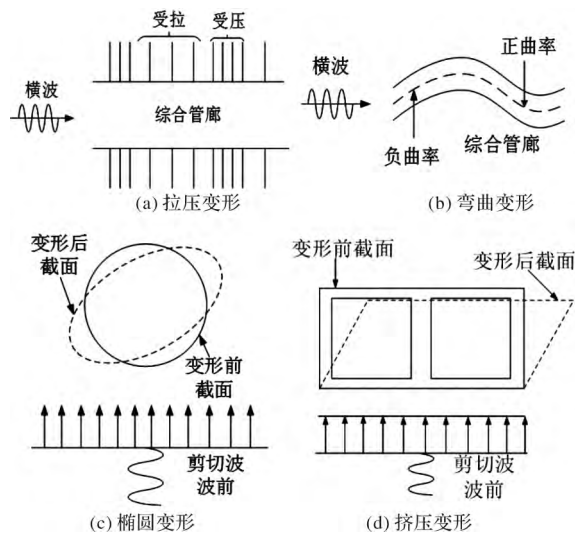


图2 地震作用下地下结构的主要变形形式

(3) 位移响应。体波(包括纵波和横波)引起综合管廊横向位移,瑞利波引起竖向位移,且三种波中瑞利波能产生自由面的最大位移^{[22]-[23]}。

(4) 液化土中的响应。松散沙质沉积地基在地下水位较高的情况下发生地震常伴随砂土液化发生,液化土中结构的震害与地基失效密切相关。场地液化引起结构的上浮,是综合管廊在地震中破坏的原因之一^[24]。液化后的土体一方面产生很大的侧向扩展,另一方面使上覆土体有效应力急剧减小,直接导致综合管廊产生很大的上浮位移和侧向位移^[25]。

综合管廊在地震作用下的各种响应达到一定程度后必然导致破坏。管廊廊体总体表现为弯剪破坏,且脆性明显,混凝土裂缝从腋角边缘开始出现。综合管廊节点破坏形态为受弯破坏,且主

要集中在壁板下部和变截面附近区域;腋角变截面处首先出现弯曲裂缝,逐渐发展为剪切裂缝^[26]。此外,综合管廊中的管线和支架也会被地震破坏^[27],经常表现为管线从支座或扣环掉落、管线接头扭伤或拉伤、管道破裂、管线支架脱落等。

4.2 应对措施

为减弱地震的不利影响需在综合管廊廊体结构接头和构造方面采取措施,通常在接头处采用柔性接头,能降低震动,减轻纵向应变,同时对温度变化引起的热胀冷缩进行补偿;接头还宜采用预应力筋、螺栓或承插式接头。在构造上需满足管廊主承重侧壁的厚度不宜小于 250 mm,非承重墙和隔墙等构件的厚度不宜小于 200 mm;混凝土保护层厚度迎水面不宜小于 50 mm;角部配筋须加强加密,减少初始裂缝的出现。

为减少地震中管道的损伤,Aiping Tang 等设计了一种用于综合管廊管道的铅芯隔震橡胶装置。它是在普通橡胶隔震支座中开孔注铅,充分利用铅芯的弹塑性性能,使铅充当阻尼,发挥铅芯耗散地震能量的作用,减小地震震害。通过振动台实验和有限元数值模拟证明这种装置可以使管道地震响应减少 50%~60%^[18]。抗震支吊架也能减弱管道地震响应,它由锚固体、加固吊杆、抗震连接构件及抗震斜撑组成,通过抗震支吊架连接管线与廊体,将管线承受的地震作用传递到廊体上,可降低震动减少位移,为管线提供可靠的保护。因抗震支吊架把地震对管线的作用传到了廊体,廊体的抗震性能必须有充分的保证。

5 其他灾害及应对措施

5.1 人为灾害

综合管廊内集中的大量市政管线是城市的“生命线”,一旦遭受破坏将使城市面临瘫痪,因此很容易成为蓄意破坏和恐怖袭击的目标。有可能进行这一破坏活动的主要有刻意入侵者(包括极端主义者、犯罪分子、暴力的激进分子、故意破坏者、城市探险家)和从事管廊工作的失意员工。在这种人为灾害中,人的主观思想是诱导灾害的重要原因,对其防治需要在注重技术手段的基础上强调非技术手段。通常采用的技术手段是在出入口处采用智能电子井盖,它能监控井盖是否为异常打开,并及时向控制中心汇报;也可以在出入口安装红外入侵报警器,进行非法入侵探测和报警。非技术手段是制定综合管廊防入侵方案,一种以上述人员作为分析对象,基于彩色标度、德尔菲法和层次分析法(AHP)的综合管廊安全策略规划专家系统,能为综合管廊防入侵方案提供思路^[28]。

5.2 渗漏水问题

综合管廊像其他地下工程一样,易遭到渗漏水问题的困扰。通常混凝土结构施工缺陷、外界水压过高、地表车辆震动荷载都是引起管廊渗漏

水的原因,此外,必须指出的是,管廊内的热力管线、电缆线等管线会使廊内温度明显高于外界,管廊由于内外部温差产生劣化,进而出现裂缝发生渗漏水。渗漏水部位主要集中在管廊结构面混凝土缺陷处、拼装接缝、变形缝、沉降缝等。根据渗水量的不同应采取相应的方法进行维修堵水,通常采用防水涂料修补裂缝结合注浆背衬的方法,其中注浆常用化学注浆、固体注浆、帷幕注浆、回填注浆相结合。除传统注浆外,王复明院士提出的渗漏涌水快速治理复合注浆技术采用发泡聚氨酯类非水反应高聚物作为注浆材料,能够快速防堵堵涌,具有早强、高效、经济的优点,工程实践效果极好^[29]。

5.3 不均匀沉降问题

相比施工期间综合管廊发生的沉降,运维期管廊内因有大量管线其沉降更应引起关注。运维期间管廊会因地下水剧烈变化、周围基坑开挖等因素发生沉降,管廊不均匀沉降不但会引起廊体结构开裂、渗漏水,还会造成廊内管道变形、断裂,从而诱发更大的灾害。为及时控制沉降,保持管廊正常工作,常用对管廊底部土体进行跟踪注浆保护的方法。对下沉段管廊底部土体进行分层叠加注浆,多次注浆,每次少量,严格控制管廊抬升量,避免注浆施工加剧土层扰动^[30]。

5.4 环境安全问题

综合管廊检修维护目前主要依靠人力,工作人员深入管廊内施工作业期间必须保证管廊内的气体环境不危害人身安全。而管廊内部空气中可能存在的潜在威胁主要有:温度过高、湿度过大、氧气浓度不足、有毒有害气体浓度超标和危险物质堆积(危险物包括致癌物质、细菌等),如图1所示。前四种威胁对人体的伤害显而易见,以石棉纤维为代表的致癌物质和以军团菌为代表的细菌威胁易被忽视^[11]。石棉具有较好的耐火性、绝缘性、绝热性和耐化学腐蚀性,在一些国家的综合管廊内中被采用。然而它易分裂成极细的元纤维悬浮在空气中,在管廊这种封闭场所内迁移困难,被吸入会诱发肺部疾病和癌症。为降低管廊内气体环境带来的伤害,在进入管廊之前必须穿戴足够的保护设备且不能单独进入,在进入没有通风设备的管廊之前还必须进行气体测试;最好留有一个穿戴同样保护措施的人员在入口外以防不测^[11]。此外管廊内有脏水或者湿度很高的部位很可能滋生细菌群落,尤其是给排水管附近引发军团病的军团菌。在管廊内要减少与冷水直接接触,必要时带上安全眼镜,穿戴合适的呼吸防护,并在工作后清洗身体暴露部位。

6 结论

本文对城市地下综合管廊常见灾害及其应对措施的研究进行了系统的分析和总结。主要涉及

综合管廊事故统计及其灾害分类、防灾减灾原则、火灾和地震等灾害发生机理及其应对措施等,得出以下结论:

(1) 综合管廊运维期间常见灾害基于成因可分为综合管廊自然灾害、综合管廊人为灾害和综合管廊技术灾害。自然灾害源于自然变异,其防治依靠技术手段,后两种灾害和人的行为密切相关,其防治需技术手段和非技术手段联合采用。

(2) 综合管廊火灾发生的几率最大,其防治需要两道“防线”相结合,既要在管廊设计上减少致灾因子,又要采取信息化智能化消防联动系统。地震中管廊破坏主要是由地震波的作用和场地破坏引起,其中接头破坏最为严重,可通过改变结构设计来改善,管线抗震可通过安装抗震支吊架来实现。

(3) 提出了“发展、减灾,齐头并进”、“预防为主,防患未然”和“抗、救为辅,亡羊补牢”三条综合管廊防灾减灾原则,对我国综合管廊发展和防灾减灾具有参考意义。

(4) 目前综合管廊灾害的机理研究和措施的提出只局限于特定灾害,实际上在管廊内部各类灾害具有耦合、共生、伴生的灾害链式特征,多灾种耦合事故致灾机理的研究和综合安全防控平台的构建有待进一步开展。

参考文献:

- [1] GB50838—2015 城市综合管廊工程技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [2] 钱七虎,陈晓强. 国内外地下综合管线廊道发展的现状、问题及对策[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(2): 191-194.
- [3] 油新华. 城市综合管廊建设发展现状[J]. 建筑技术, 2017, 48(9): 902-906.
- [4] YANG Chao, PENG FangLe. Discussion on the development of underground utility tunnels in China[J]. Procedia Engineering, 2016, (165): 540-548.
- [5] J J Cano - Hurtado, J Canto - Perello. Sustainable development of urban underground space for utilities[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1999, 14(3): 335-340.
- [6] 方印. 论我国防灾减灾法的基本原则[J]. 贵州警官职业学院学报, 2013, 25(2): 5-12.
- [7] 仲崇军. 综合管沟消防系统的一种设计方案探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2015, 32(6): 239-241, 24.
- [8] 孙磊, 刘澄波. 综合管廊的消防灭火系统比较与分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(3): 616-620.
- [9] Carvel, R O, Drysdale, D D. The influence of tunnel geometry and ventilation on the heat release rate of a fire[J]. Fire Technology 2004, 40(1): 5-26.
- [10] ZHANG XingHui, GUAN YuXi, FANG Zheng, et al. Fire risk analysis and prevention of urban comprehensive pipeline corridor[J]. Procedia Engineering, 2016, 135: 462-467.
- [11] Jorge Curiel - Esparza, Julian Canto - Perello. Indoor atmosphere hazard identification in person entry urban utility tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(5): 426-434.
- [12] 包亮. 城市下水道及化粪池可燃气体监控预警系统研制与应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [13] 胡敏华, 李良胜, 简宏. 燃气共同沟的火灾危险性及其自动报

- 警[J]. 基建优化, 2005, 26(1): 79-82.
- [14] 方自虎, 王家远. 共同沟内燃气扩散规律的数值分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(2): 215-218, 235.
- [15] Hiromitsu Ishii, Kiyoshi Kawamura, Takashi Ono, et al. A fire detection system using optical fibres for utility tunnels[J]. Fire Safety Journal, 1997, 29(2): 87-98.
- [16] 蔡贤卿, 朱玉明, 王鹏. 城市地下综合管廊智能监控平台研究[J]. 城市住宅, 2017, 24(3): 27-31.
- [17] 王建, 王恒栋, 祁峰. 综合管沟消防设计研究[J]. 城市道桥与防洪, 2008, 25(1): 73-76, 20.
- [18] TANG Aiping, GAI Zengbin, WEN Aihua, et al. Seismic Isolation Simulation of Pipeline in Utility Tunnel[C]// ICPTT 2012: Better Pipeline Infrastructure for a Better Life - Proceedings of the International Conference on Pipelines and Trenchless Technology 2012. Wu Han, 2013: 1534-1544.
- [19] 岳庆霞. 地下综合管廊地震反应分析与抗震可靠性研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [20] 岳庆霞, 李杰. 地下综合管廊地震响应研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(3): 285-290.
- [21] 岳庆霞, 李杰. 近似 Rayleigh 地震波作用下地下综合管廊响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(4): 409-416.
- [22] JIANG Luzhen, LI Jie, CHEN Jun. Seismic Response of Underground Utility Tunnel under Different Types of Earthquake Wave Excitation[C]// ICPTT 2014 - Proceedings of the 2014 International Conference on Pipelines and Trenchless Technology. Xia Men, 2014: 750-755.
- [23] JIANG Luzhen, CHEN Jun, LI Jie. Dynamic Response Analysis of Underground Utility Tunnel during the Propagation of Rayleigh Wave[C]// Proc. International Conference on Pipelines and Trenchless Technology 2009, ICPTT 2009: Advances and Experiences with Pipelines and Trenchless Technology for Water, Sewer, Gas, and Oil Applications. Shang Hai, 2009, 361: 1174-1183.
- [24] 汪敏. 某综合管廊工程抗地基液化变形的的设计[J]. 城市道桥与防洪, 2011, 28(8): 361-364.
- [25] YANG Jian, WANG Hengdong. Seismic Response Analysis of Shallow Utility Tunnel in Liquefiable Soils[C]// ICPTT 2012: Better Pipeline Infrastructure for a Better Life - Proceedings of the International Conference on Pipelines and Trenchless Technology 2012. Wu Han, 2013: 1606-1618.
- [26] 薛伟辰. 预制拼装混凝土综合管廊试验与理论研究[R]. 北京: 中国市政工程协会, 2017.
- [27] 许海勇, 范益群. 城市地下大空间防灾中的几个重点问题[J]. 灾害学, 2016, 31(3): 91-94.
- [28] Julian CantoPerello, Jorge CurielEsparza, Vicente Calvo. Criticality and threat analysis on utility tunnels for planning security policies of utilities in urban underground space[J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(11): 4707-4714.
- [29] 王复明, 李嘉, 石明生, 等. 堤坝防渗加固新技术研究与应用[J]. 水力发电学报, 2016, 35(12): 1-11.
- [30] 汪小兵. 城市地下综合管廊沉降跟踪注浆保护措施[C]// 2015 城市地下空间综合开发技术交流会论文集. 上海: 同济大学, 2015.

The Common Operational Disasters and Countermeasures of Utility Tunnel in Urban

GUO Jiaqi^{1 2}, QIAN Yuan^{1 2}, WANG Zhenzhen^{1 2}, DUN Zhilin^{1 2} and LIU Xiliang^{1 2}

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Institute of Utility Tunnel, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: As an indispensable infrastructure during modern city development, utility tunnel is the home of many lifelines which keeps city energy flow, material flow and information flow unimpeded. However, it can be predicted that a large number of disasters will become a serious threat to the normal operation of utility tunnel. Based on the statistical analysis of utility tunnel disaster accidents, and referred to operational disasters of municipal pipelines (or tunnels) and other types of tunnel, we systematically classified the types of operation disasters of utility tunnel, it also split natural disaster, technological disaster and man-made disaster into small hazards, besides, basic principles of disaster prevention during operation period of utility tunnel were raised. Based on the work above, the mechanism and countermeasures of fire and quake-proof of utility tunnel were summarized. Meanwhile, many other hazards such as man-made disaster, leakage problems, differential settlement and environmental safety problems were also studied. The results can be used as a reference for disaster prevention and mitigation in operation period of utility tunnel.

Key words: utility tunnel; operational disasters; fire; quake-proof; countermeasure