

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.07.001

上海道路地面塌陷统计及机理分析与风险防控

刘文

(上海市道路运输事业发展中心, 上海市 200000)

摘要:近年来全国各地道路地面塌陷事故频发,造成了严重的经济损失与人员伤亡,已成为影响城市公共安全问题的焦点。结合收集2003—2020年期间上海市道路地面塌陷数据,通过系统统计分析城市道路地面塌陷主要成因,评估不同因素对地面塌陷风险的影响程度,并结合实际案例和最新技术进展,为城市道路地面塌陷风险防控提供建议对策和管控技术措施,研究工作可为上海超大城市道路地面塌陷精细治理防控提供理论支持和实践支持,指导提高城市道路基础设施韧性安全水平。

关键词:城市道路;地面塌陷;机理分析;风险防控

中图分类号: U416

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)07-0001-07

0 引言

随着我国城市化进程加快和上海城市发展,城市道路基础设施网络不断扩展增加。近年来全国各地城市道路地面塌陷事件频发,造成了严重的经济损失和人员伤亡,引发了公众的广泛关注和社会的普遍担忧。例如,2020年,青海省西宁市1·13南大街长城医院门前发生路面坍塌^[1](见图1),一辆17路公交车陷入其中,事故造成10人遇难,17人受伤,事故后调查发现是湿陷性黄土路基因多年渗水导致路基土体流失,逐步形成地下陷穴,年久失修的防空洞外壁空腔为水土流失提供通道等多项因素所致。2021年,河南省郑州7·20特大暴雨过后,全市道路检测共排查道路地面塌陷2 840处,大量道路地面塌陷隐患严重危害城市安全。城市道路地面塌陷不仅威胁着城市居民的生命财产安全,也对城市基础设施正常运行和社会公共安全带来了巨大的风险,深入研究城市道路地面塌陷的成因机理与风险防控措施,对于提升城市道路基础设施的安全性和可靠性具有重要意义。

国际上,针对城市道路地面塌陷的研究近年快速兴起,并取得了部分进展^[2]。早期研究主要集中在地下水文条件和地质灾害预测、邻近第三方影响分



图1 西宁“1·13”路面塌陷重大事故

析等方面,近期则逐渐转向更为复杂的多因素耦合作用与其量化分析模型以及综合风险防控技术。例如:美国、德国等通过实际案例分析和模型模拟,研究了道路基础设施地质稳定性的影响,并提出了相应的工程防护措施;韩国开发了基于物联网(IoT)和大数据分析的城市地下管网监测系统,有效提升了对地面塌陷风险的监控能力。相较于国外,国内对城市道路地面塌陷研究最近五年快速发展,形成了具有中国特色的研究体系和系列成果^[3],尤其是对地下工程施工引发地面塌陷问题进行了深入研究^[4-5]。例如:上海、广州等大城市研究团队,通过案例分析和数值模拟,提出了施工过程中减少地面扰动优化方案;武汉市建立了基于北斗卫星和地面传感器的地面沉降监测系统,实现了对城市道路重点区域的实时监控和预警。与此同时,国家及地方政府高度重视城市道路地面塌陷治理工作,例如:2020年12月,住房和城乡建设部发布《关于加强城市地下市政基础设施建设的指导意见》(建城〔2020〕111号)^[6],明确指出城市道路塌陷事故

收稿日期:2023-09-25

基金项目:上海市2022年度“科技创新行动计划”重点项目(22dz1201200,22dz1200402)

作者简介:刘文(1978—),女,工学博士,高级工程师,从事市政设施管理工作。

频发的问题,强调提升城市安全韧性;2023年8月,上海市道路运输管理局、上海市水务局和上海市住房和城乡建设管理委员会联合发布《关于完善道路塌陷隐患防治联合工作机制的通知》(沪道运设养〔2023〕156号)^[7],要求加强城市道路安全风险防控和应急保障体系,提高风险防控和应急处置能力。总结现有国内外研究,部分研究工作取得了较好进展,但对于道路地面塌陷形成机理缺乏长期数据调查与系统机理分析,同时,缺少风险管控技术研究。城市道路地面塌陷的复杂性和多变性,决定了研究的长期性和持续性,需要不断结合新的技术发展和研究方法进步。

本文将在系统梳理现有研究成果的基础上,结合收集2003—2020年期间上海市道路地面塌陷数据,通过系统统计分析探讨城市道路地面塌陷主要成因,评估不同因素对地面塌陷风险的影响程度,并结合实际案例和最新技术进展,为城市道路地面塌陷风险防控提供全面深入的对策,总结出行之有效的风险管控经验和技术措施,并为上海超大城市道路地面塌陷精细治理防控提供理论支持和实践指导,提高城市道路基础设施韧性安全水平。

1 上海道路地面塌陷案例统计

城市道路地面塌陷作为一种复杂的事故灾害问题,其成因涉及自然与人为因素的综合作用,且这些因素相互交织、耦合影响,形成事故灾害级联效应,极大地增加了道路地面塌陷事件发生概率和事故危害影响。通过对历史上公开媒体报道案例和文献资料数据查阅,研究系统收集了2003—2020年期间上海市道路地面塌陷案例共89起,具体见图2。上述收集案例均为道路地面塌陷事故,并已对城市道路运营安全造成了地面损坏、交通中断或人员伤亡等不利影响。



图2 2003—2020年上海市道路地面塌陷事故统计

结合该数据分析,可以将城市道路塌陷成因分为不良地质条件、交通荷载、自然灾害、邻近工程施工以及周边地下管线影响等五项主要因素,具体数据分析如图3所示。由图3可知,道路邻近工程施工、周边地下管线和不良地质水文条件是导致城市道路地面塌陷事故发生的最主要、最直接的三项关键因素,分别占比达37.5%、34.4%和18.8%。其中,首要因素为邻近工程施工影响,其主要源于地下工程的施工活动,包括邻近基坑、隧道、打桩、降水或堆载等施工行为造成的地下扰动影响,道路地面塌陷发生范围一般在周边邻近工程15~20 m范围以内。其次,周边地下管线破坏也是造成道路地面塌陷的重要原因,周边地下管线破坏类型主要包括雨污排水、供水或燃气电力等大口径管道,尤其是排水管道破损渗漏后出现水土流失等影响最为突出。第三是不良地质水文条件,上海地区浅层不良地质水文条件主要有浅层砂质粉土(即②₃层)发育区域,包括暗浜发育区、地基回填土不密实、临水堤岸地基不密实等,由于上海地区年降雨量大、河流水系发育多,地表潜水层补水波动变化大,往往在大气降水补给后呈现饱和状态,易产生地下流砂和震动液化等不良工程地质问题,从而加剧城市道路地面塌陷形成。

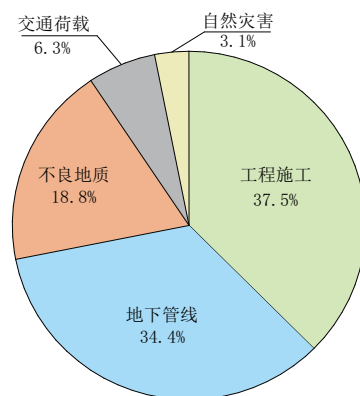


图3 上海市道路地面塌陷事故影响因素分析

考虑城市道路地面塌陷发生时间规律,针对上述案例按照月份进行统计,具体分析每年1~12月不同月份和季节期间的影响,其中,道路地面塌陷主要集中发生在7月、9月和6月,其次是1月、4月、8月和11月,具体如图4所示。

由图4可知,城市道路地面塌陷发生具有显著的月份特征,主要受季节变化降雨及周边邻近河道水系影响,上海地区气候类型属于亚热带季风气候,夏季高温多雨,主要分布有春雨、夏雨、秋雨三个雨期,尤其是每年的7月,上海市降雨比较密集,且整个汛期5~9月期间降水量达全年的60%左右,道路

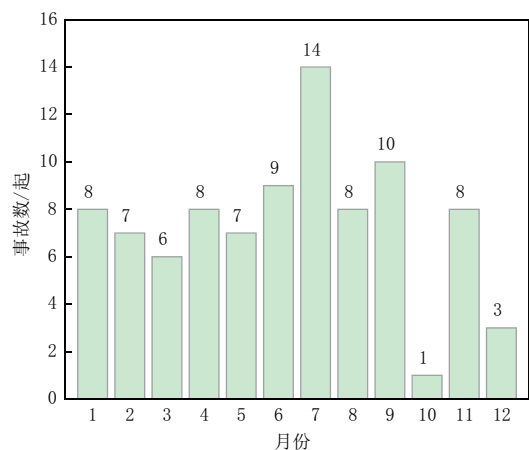


图4 上海市道路地面塌陷事故发生月份影响

地面塌陷事故发生比例也约占 60%以上，其次季节主要发生在冬季降雨和每年夏季梅雨季节，上述两个月份期间发生塌陷相对比较多，平均每月 8 起左右。通过对上述塌陷事件发生特征的分析可知，道路地面塌陷防控应重视极端气候变化下降雨变化影响与监测预报。

为进一步分析城市道路地面塌陷与外部降雨影响时空分布规律，系统收集了国家气象科学数据中心 1991—2020 年期间上海市全市降雨量监测数据，按照年平均降雨量和年累计降雨量两个因素进行统计，具体见图 5 和图 6 所示。

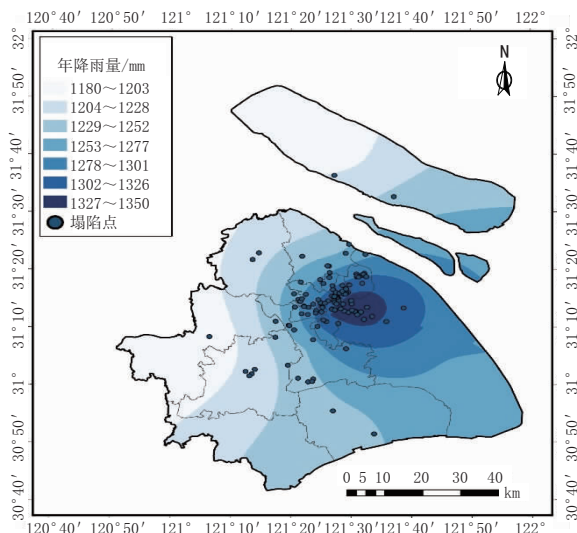


图5 上海市道路地面塌陷事故年平均降雨影响

对比图 5 和图 6 可知，城市道路地面塌陷事故的发生与上海市年平均降雨量和所在区域密切相关，尤其是年降雨量分布较大的浦东新区、黄浦区、普陀区和闵行区等行政区域，年平均降雨量超过 1 300 mm 以上。其次，年累计降雨量对城市道路地面塌陷事故的发生有一定的影响，但总体相关性不显著，城市道路地面塌陷的发生主要集中在 1 700~

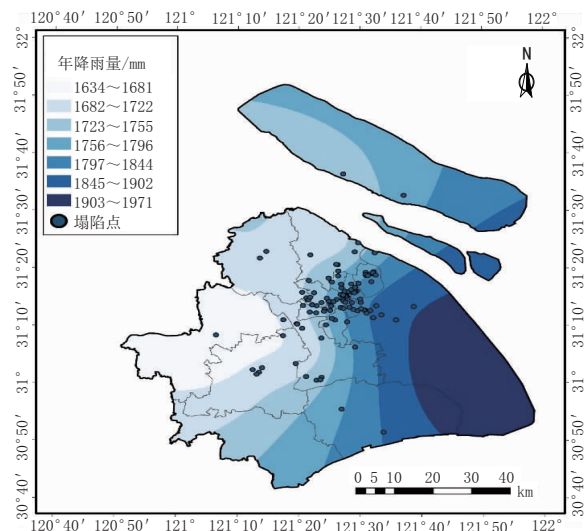


图6 上海市道路地面塌陷事故累计降雨影响

1 850 mm 区间。因此，结合城市降雨量对道路地面塌陷影响分析可知，上海地区道路地面塌陷主要与所在区域的年平均降雨量相关，尤其注意主要影响城市道路地下水位变化。另外，近年来，随着全球气候变化，上海市城市降雨呈现明显雨量增强、变化不均的趋势，上述降雨量变化对城市年平均降雨、年累计降雨均有直接影响，从而会加剧城市道路地面塌陷事故的发生，且呈现复杂、多变特征。

2 城市道路地面塌陷形成机理

从城市道路地面塌陷形成过程分析，道路地面塌陷一般需满足 3 个条件，即地面长期受荷载作用扰动、地下空洞病害体形成以及外部周边诱发因素。通常情况下，在外部周边诱发因素下，道路下方因各类荷载及水土影响发生空洞，并逐渐扩展产生、发育至失稳，最终导致上覆地层破坏坍塌，从而造成道路地面塌陷事故，如图 7 所示。

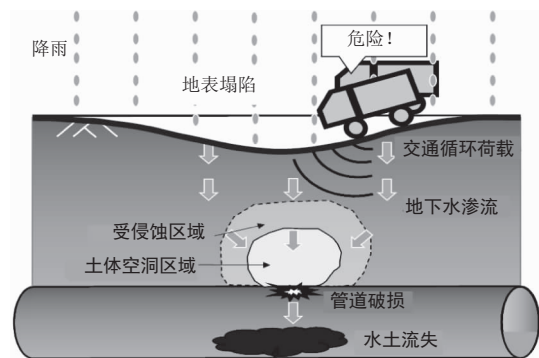


图7 城市道路地面塌陷机理示意图

结合上海市城市道路地面塌陷案例数据分析，塌陷事故主要包括以下四种类型，即：不良地质水文条件、地下管线破损泄漏、邻近工程施工以及其他类型道路地面塌陷，不同类型道路地面塌陷演化过程

存在差异,具体如下。

(1)不良地质水文条件

上海地区城市道路下方地层中常见的不良地质条件为软弱地层以及地下水变化流动侵蚀等。上海市沿江沿海区域浅部砂层发育,在地下水作用下,该浅层砂土中极易出现流砂现象,并形成隐伏空洞^[8],具体表现为两种类型:一为下覆盖层为砂性土层时为砂漏型,即在各种因素作用下,软土中砂土颗粒漏失进入下方空洞或管道内,以致地表逐渐形成漏斗状塌陷坑;二为覆盖层为软弱土层时表现为泥流型,软弱土体抗剪强度低,在诱发因素的作用下,软弱土体缓慢“流入”邻近空洞或管道内,地面随之形成碟状、坛状的塌陷坑。鉴于上海地区考虑浅层不良水文地质条件,如图 8 所示,上述砂漏型和泥流型两种类型均存在,其中砂漏型与底层中砂质粉土(即②₃层)发育区域有关,泥流型与周边水系和地下管网泄漏状态有关,两种分布具有明显的地域特征,可结合不良地质水文、周边水系、年均降雨量和邻近地下管线分析其发生规律。

(2)地下管线破损泄漏

结合上海市 2003—2020 年城市道路地面塌陷事故案例数据可知,地下管线破损泄漏是导致发生道路地面塌陷发生的重要影响因素^[9]。如图 9 所示,地下管线破损引起道路地面塌陷的形式主要有两种:一种是地下管线渗漏引起土体渗流侵蚀,管周土体中形成隐伏空洞,空洞逐渐发展直至上覆地层失稳塌陷;另一种是大直径埋地管道在路面及周边扰动荷载作用下发生结构损坏坍塌,直接导致上覆地层塌陷。

考虑地下管线损坏渗漏引起管周土体产生渗流侵蚀,上述问题通常发生砂土地层中,砂土性质、管线缺陷位置和大小等条件决定了管周土体渗流侵蚀的模式。调研国内外研究学者试验研究可知,不均匀级配砂土中管线渗漏引起管周土体渗流侵蚀影响显著,其中,砂土级配和管线破损尺寸对侵蚀量和隐伏空洞大小有明显影响,不均匀级配砂土中细砂含量越多、管线破损尺寸越大,管周土体侵蚀量越高,并将间断级配砂土侵蚀过程分为快速侵蚀、稳定侵蚀、收敛沉降等三个阶段。结合上海地区地面塌陷案例多次实地调研发现,破损地下管线中水流处于满流状态时,更容易在管周土体中引起渗流侵蚀,且满流流速对渗流侵蚀程度有着显著影响。

(3)邻近工程施工

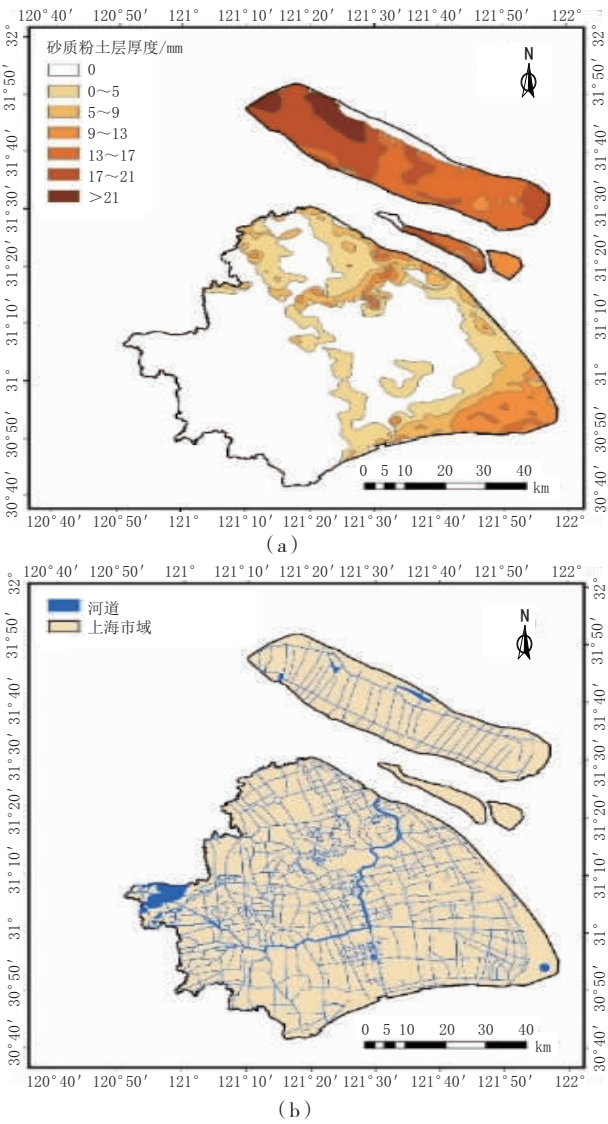


图 8 不良地质水文条件道路地面塌陷

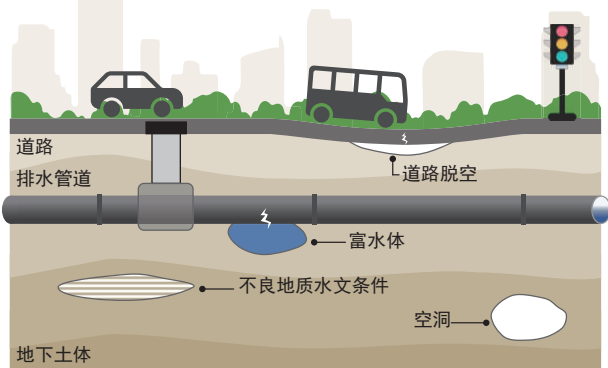


图 9 地下管线破损泄漏导致道路地面塌陷

在上海超大城市环境中,由于地下空间、地下道路、地铁隧道和深基坑开挖等邻近地下工程施工造成的道路地面塌陷事故十分普遍,且该类型道路地面塌陷事故所造成的生命财产损失往往更加严重。如图 10 所示,其中,周边邻近施工活动造成道路地面塌陷类型主要有以下三种:一是地下工程施工直接导致上覆地层失稳坍塌;二是地下工程开挖活动

破坏不良地质体引起塌陷；三是邻近施工造成周边大口径地下管线损坏诱发塌陷。

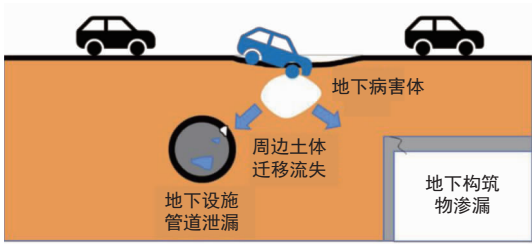


图 10 邻近工程施工导致道路地面塌陷

考虑上海地区工程建设特点，邻近基坑工程诱发道路地面塌陷问题需要引起重视，尤其地面高层建筑、高架道路和地下工程深基坑等施工，其主要破坏表现为围护结构漏水漏砂和泥水流失，尤其是在粉土、砂土地层中开挖深基坑，若深基坑围护结构出现渗漏现象，细小土体颗粒则会随地下水流迁移，造成基坑外地层严重的水土流失，甚至形成地下隐伏空洞，进而诱发道路塌陷事故。深基坑工程及周边地下管线耦合发生漏水漏砂是一个更为严重的问题并加速恶化过程，大量的渗漏水造成周边土体颗粒的流失，同时进入邻近破坏管道，周边土体渗透性在增大同时，随着漏水流量不断增大，地层水土流失进一步加剧，并导致道路地面塌陷发生，该类塌陷具有更为严重的突发性、严重性特征。

(4)其他类型道路地面塌陷

除上述三种常见道路地面塌陷类型以外，路面荷载、气象条件等因素也可通过间接方式诱发道路地面塌陷事故。其中，城市道路的路面荷载主要包括车辆动荷载和堆积静荷载两种形式，路面荷载过大往往会导致以下三方面问题：道路下方隐伏空洞扩张、失稳；地下管线断裂、渗漏；路基沉降，进而间接地引起路面塌陷。另外，天气包括降水量、气温等气象条件对地下水活动、地下基础设施正常运行具有显著影响，例如，降水量较大的 7 月，地下水活动显著增强，不良地质水文条件变化甚至恶化，加剧地层渗透破坏，道路地面塌陷风险明显提升。还有，冬季寒潮期间，低温条件容易致使地下管线出现大规模爆管，也会导致塌陷事故增加。

3 城市道路地面塌陷风险防控

为了进一步对城市道路地面塌陷进行风险防控，结合最新技术发展和防控手段应用，城市道路地面塌陷风险防控应涵盖主动预防、检测监测和精细治理三个方面^[10]，详如图 11 所示，具体包括以下几

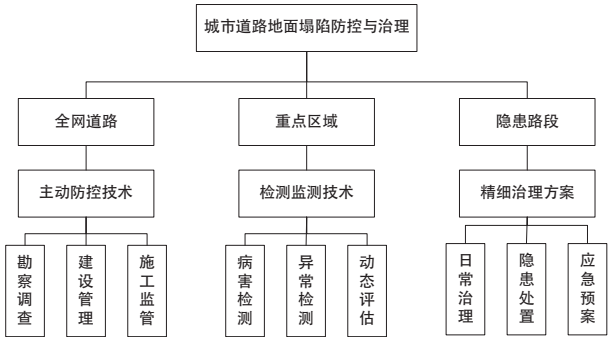


图 11 城市道路地面塌陷风险防控治理

方面。

(1)主动预防技术。开展不良地质水文勘察与评估，在城市规划、道路及邻近工程设计阶段，进行详细的地质勘察和评估，识别潜在的地质风险区域，包括对地下空洞、软土层等进行详细调查。采取合理的地基处理技术，在建设过程中，根据地质条件选择合适的地基处理方法，如换填土、桩基、地基加固等，确保地基的稳定性。重视地下水管理，尤其是工程施工中降水，应制定合理的地下水管理方案，控制地下水的抽取量和抽取速度，防止地下水位的剧烈波动。主动应用先进的施工技术保障工程安全，包括采用先进的施工技术和设备，减少对周边地质水文条件的扰动或破坏，减少对道路地面不均匀沉降的影响。

(2)检测监测技术。考虑城市道路地面塌陷问题发生过程，针对不同工程采取具体措施，包括：对于既有道路已曾发生地面塌陷问题，需采取地质雷达探测^[11]，即利用三维地质雷达对道路下方的土层进行探测，及时发现潜在的空洞和异常区域。重视工程建设及周边环境沉降监测，尤其是在道路和地下工程附近安装沉降监测仪器，实时监测地面的沉降情况，一旦发现异常沉降，及时采取措施进行处理。积极开展地下水位监测，在地下水位容易波动及邻近河道周边区域，通过安装地下水位监测设备，实时监测地下水位变化情况，防止因水位剧烈变化引发地面塌陷。实施周期性开展地下管网检测，定期使用管道内窥镜、声纳检测等技术对地下管网尤其是大口径即 DN300 以上排水管网进行状态检查^[12]，及时发现和修复破损和泄漏的管道，防止因管道渗漏引起的土体软化或塌陷。同时，结合检测和监测数据考虑多种因素进行城市道路地面塌陷风险评估（见图 12），上述技术应用将大幅减少或降低塌陷风险^[13]。

(3)精细治理方案。城市道路地面塌陷治理包括日常治理和隐患治理，其中，日常治理方面需要建设城市道路地面塌陷防控平台，建立城市地质信息系

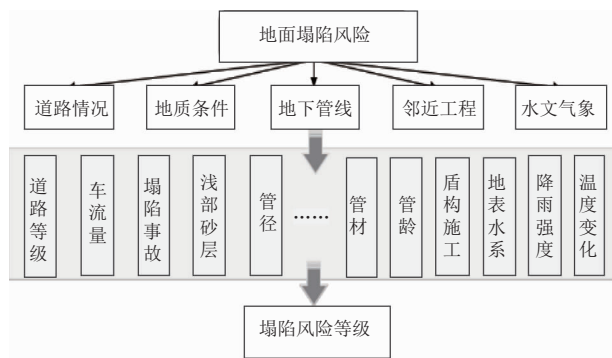


图 12 城市道路地面塌陷风险评估指标体系

统和地面塌陷风险管理平台,集成地质勘察、监测数据和预警信息,实现信息共享和综合管理;开展道路地面塌陷风险评估与智能预警,基于监测数据和地质信息,开展地面塌陷风险动态评估,建立风险预报预警机制,及时向相关部门和公众发布预警信息;加强公众参与和普及宣传教育及应急演练,通过加强公众的防灾减灾意识教育,提高公众对地面塌陷风险的认识和应对能力。隐患治理方面主要针对已发生问题进行及时处理,具体技术措施包括地下病害注浆加固,对出现空洞和地基松散区域,采用高压注浆技术,填充和加固土体,防止进一步塌陷;道路检测发现空洞回填,对于已经形成的地下空洞,采用混凝土或其他填充材料进行回填,恢复道路路基的稳定性;工程基础加固处理,在沉降严重的区域,通过增加地基承载力的方法,如桩基、地基加固等,提升地基的稳定性;塌陷突发事件紧急处置需预先制定应急预案,配备必要的应急设备和物资,一旦发生地面塌陷,能够迅速反应并采取有效的应急措施,减少人员和财产损失。

通过以上三方面技术和措施的综合应用,可以有效预防和控制城市道路地面塌陷的发生,保障城市的安全和稳定发展。

4 结 语

城市道路地面塌陷作为现代城市发展过程面临的一种复杂的公共安全事故,其发生涉及多种成因及其相互作用。本文结合上海市 2003—2020 年 89 起道路地面塌陷事故形成机理分析,得到关键性认识结论如下。

(1)城市道路地面塌陷形成具有多因素综合作用,即城市道路地面塌陷通常是多种因素综合作用的结果,包括自然因素与人因因素共同影响。其中,地下水位变化、地质条件、降雨、地下工程施工和地下管线破损等都是主要的诱发因素。这些因素在不

同情境下的相互作用,决定了地面塌陷的发生机制和严重程度。

(2)季节性降雨即地下水位波动影响严重,上海地区年平均降雨量大、地表水系发育多、地下不良地质水文条件分布不均匀,地下水位的剧烈变化对道路路基土体的稳定性具有显著影响,特别是在地下水过度抽取或地下水位快速上升的情况下,容易引发周边土体的松散和失稳,从而导致地面塌陷。

(3)城市密集邻近施工活动影响干扰问题突出,上海市尤其是最近 20 a 城市化进程中,地下空间开发利用显著增加,如地铁、隧道和各种地下管线的建设,上述工程在施工过程中容易扰动土体,破坏原有的稳定平衡,从而增加道路地面塌陷的风险。此外,周边地下管线因老化和破损也是常见的诱发因素之一。

为加强城市道路地面塌陷风险防控与精细治理,上海市政府住建委、交通委等部门及行业管理单位主动采取了系列措施进行管控,后续为提升城市道路地面塌陷治理能力与水平,应重视以下工作开展,具体对策建议包括以下几方面。

(1)开展综合性防控措施是关键,原有单一的防控措施难以全面应对复杂的地面塌陷问题。必须采用综合性的防控措施,包括地质勘察、地下水管理、施工技术改进和监测预警等手段,才能有效降低地面塌陷的发生概率。

(2)加强不良地质水文条件与邻近工程施工干扰监测是基础,通过详细的地质调查,掌握城市地下空间的地质条件和水文情况,并通过实时监测,及时发现潜在的风险点,可以实现早期预警和预防。

(3)采取先进的工程建造技术与科学管理是手段,尤其是在地下工程施工过程中,采用先进的施工技术,可以有效减少对土体的扰动,同时,工程建设中的科学管理和严格的施工规范,能够降低人因因素导致塌陷风险。

(4)实施定期维护与应急预案是举措,通过对城市地下管线和地基进行定期检查和维修,及时修复破损和老化的管线,这是预防地面塌陷的重要举措。同时,制定和完善道路地面塌陷防控应急预案,配备必要的应急设备和物资,能够在塌陷发生时迅速反应,减少损失。

(5)加强公众宣传窗普及教育参与与培训是保障,城市道路地面塌陷防控治理涉及全社会参加,应重视提高公众对地面塌陷风险的认识,增强防灾减灾

灾意识,这也是地面塌陷防控的重要环节,公众的参与可以有效提升城市防灾减灾的整体能力。城市道路地面塌陷的防控是一项系统工程,需要政府、企业、科研机构和公众的共同参与。通过科学的分析、综合的防控措施和有效的管理策略,可以大大降低地面塌陷的风险,保障城市的安全与可持续发展。

参考文献:

- [1] 青海省政府. 西宁市“1·13”公交车站路面塌陷重大事故灾难调查报告 [EB/OL]. (2020-07-08)[2023-10-11]. https://www.gov.cn/xinwen/2020-07/08/content_5525169.htm?eqid=a55b4e290000473000000003645f459e.
- [2] Rawal K, Hu L B, Wang Z M. Numerical investigation of the geomechanics of sinkhole formation and subsidence [M]//Geotechnical Frontiers, 2017.
- [3] 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.
- [4] 苏永华,廖君橙,黄腾.城区地表塌陷土洞发育破坏特征[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(11):177-184.
- [5] 李涛,张子真,宗露丹.地下空洞引起土质地层地陷的形成机制与预测研究[J].岩土力学,2015,36(7):1995-2002.
- [6] 住房和城乡建设部. 关于加强城市地下市政基础设施建设的指导意见(建城[2020]111号)[EB/OL].(2020-12-30)[2023-10-12].https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-01/06/content_5577510.htm.
- [7] 上海市道路运输管理局,上海市水务局和上海市住房和城乡建设管理委员会. 关于完善道路塌陷隐患防治联合工作机制的通知(沪道运设养[2023]156号)[EB/OL].(2023-08-25)[2023-10-12].<https://www.shanghai.gov.cn/gwk/search/content/09640bd942d84e249b32e69407b437d6>.
- [8] 蔡剑韬,付栋,李婧铭,等.上海浅部砂层管道渗漏引发塌陷的数值模拟[J].地下空间与工程学报,2021,17(6):1980-1987.
- [9] 张冬梅,杜伟伟,高程鹏.间断级配砂土中管线破损引起的渗流侵蚀模型试验[J].岩土工程学报,2018,40(11):2129-2135.
- [10] 安关峰,胡群芳.城市道路塌陷灾害防控技术指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2022.
- [11] 刘海,黄肇刚,岳云鹏,等.地下管线渗漏环境下探地雷达信号特征分析[J].电子与信息学报,2022,44(4):1257-1264.
- [12] JGJ/T 437—2018,城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准[S].
- [13] CJJ/T 181—2012,城镇排水管道检测与评估技术规程[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com