兰州地铁沿线路面塌陷灾害特征及防治分析

Characteristics and prevention Analysis of Pavement Collapse Disaster Along Lanzhou Rail Transit

魏蒙恩

（兰州资源环境职业技术大学　甘肃兰州　730021）

摘要：全国各地城市路面塌陷事故时有发生，近十年来兰州几乎每年都会有“路踏踏”的新闻报道。由于城市路面建筑及管线密集，往返车辆和人员众多，路面塌陷常造成不小的影响。在梳理兰州地铁沿线近十年路面塌陷灾害时空特征基础上，从降雨、人类工程活动、地质概况等方面进行灾害特征分析，对比其它类型城市路面塌陷事件，总结轨道交通沿线路面塌陷的原因，归纳主要防治措施，以期为今后市区路面塌陷的防治及下一步研究方向提供一定参考。

关键词:轨道交通；路面塌陷;特征分析

近年来国内城市路面塌陷频发，轻则影响道路的通畅,重则车毁人亡。特别是城市轨道交通沿线（以下简称“沿线”）突发频发的“路塌踏”事件引起媒体和社会的广泛关注，也考验着公众对城市管理的信心。兰州近年路面塌陷事故频发，据报道兰州 3 年内 43 起“路面塌陷”。自轨道交通工程建设以来，部分沿线闹市区的塌陷更是引起广泛关注，央视 2018 年更是关注曝光，兰州路面“塌陷”几十次，多起事件均在工程建设沿线，引起媒体的广泛报道，网络舆论四起。如 2018 年 11 月 11 日下午城关区瑞德大道一处公交站点附近，人行道突然塌陷，一名女子掉落坑里并受伤；2016 年 8 月 23 日下午张掖路步行街突发路面塌陷,4 人掉入瞬间塌落的坑内。

地铁沿线马路塌陷事关百姓的生命权、财产权，最主要的就是要查明事故原因，发生规律，才能进行针对性设防。近年来北京、广州、佛山等中东部地区对于地铁施工引起路面塌陷研究较多较早。孙长军（2017 年）系统研究了北京地铁近接施工安全风险控制，刘博韬（2016 年）对佛山地铁二号线登州车站深基坑开挖对周边建筑物的影响进行了研究，丁智（2014 年）针对杭州地铁 1 号线盾构隧道掘进对邻近建筑物影响及变形预测研究，张成平（2010 年）等，对北京城市隧道施工诱发的地面塌陷灾变机制及其控制进行了研究，杨天鸿（2002 年）采用数值模拟分析了广州地铁 2 号线隧道施工诱发的海珠广场地塌陷问题。

而西北地区路面塌陷的研究相对较少，对轨道交通路面塌陷特征分析的更少。张剑（2020 年）基于 Sentinel-1 数据对兰州市中心城区地面沉降监测进行了研究。张建秋（2020）在舆情治理研究中分析了兰州路面塌陷事故案例。杨晓锋（2019 年）兰州市道路塌陷成因分析及检测技术研究，高洁（2018）对兰州轨道交通富水砂卵石地层盾构施工地表沉降控制技术进行了研究。于雷等（2017）指出兰州轨道交通建设引起部分路面塌陷。邢峰（2013）针对地下管网施工管理，对兰州市路面塌陷现象进行了分析。

本文统计分析 2012 年至 2021 年十年间兰州市城区地面塌陷事件，并着重对 2016 年-2020 年路面建筑及管线密集，往返车辆和人员众多，路面塌陷影响较大的兰州轨道交通沿线路面塌陷进行研究，旨在分析兰州市路面塌陷事故特征，研究分布规律及内在因素。

1. 路面塌陷数据库建设

首先运用网络调查法与关键词控制变量法检索整理近年来兰州市塌陷数据；其次从权威机构、权威媒体、权威人员等多方求证，对每条数据真实性进行甄别，确保所获数据的真实性；最后挖掘整理并完善每条数据，并纳入数据库待后期分析。信息主要来源于城关区应急管理办公室、兰州交警指挥中心官微发布和相关媒体的详实新闻报道。对轨道交通工程建设以来市区路面塌陷事件做了不完全统计，并综合采用定性与定量相结合的方法，对塌陷数据进行挖掘、提取、分类、统计归纳与总结分析。认真核实塌陷事故发生时间、地理空间位置、塌陷最直接原因、塌陷规模与发展、造成的直接损失、伤亡情况、社会影响等信息，分析兰州近十年轨道交通工程沿线路面塌陷事故。整理得到兰州市 2012 年-2021 年塌陷事故近 213 起，其中有详尽资料的有 133 起，占 62.4%；2016-2020 年地铁沿线路面塌陷 87 次，有详细报道的有 60 次，占沿线事故的 68.9%。

2. 特征统计分析

2.1 基本情况

轨道交通已经改变了市区人们的出行方式，沿线塌陷事故高比例频发也引起了广泛的关注。2020 年兰州市区公共交通出行占所有出行方式的 40%，其中地铁 1 号线出行就占公共交通出行量的 15-20%。轨道交通 1、2 号线共长 35.3 公里，仅占全市市区道路总长的 3%左右，但在 2015-2020 年沿线塌陷事故共 87 起，占全市区事故数的 45.8%，沿线塌陷事故更值得关注。

2.2 事故年度频数对比

2014 年轨道交通 1 号线全线开工，2017 年 11 月全线“洞通”，仅从事故年度发生频数来看，沿线塌陷事故与轨道交通工程之间存相关性较差。对比 2015-2020 年每年沿线事故发生频数与当年全市区事故发生频数（如图 1）可知，事故频数主要集中在 2016-2018 年之间，2015-2017 年沿线事故与全市事故频数趋势一致，先增大再减小，且 2016 年均出现峰值；2018 年沿线事故频数继续下降，而全市塌陷数缺反弹增加，达到最大峰值；2018 年以后沿线事故与全市事故频数均逐渐减小。沿线塌陷事故与轨道交通工程之间的关系有待进一步研究。近年来兰州市在应用探地雷达等多种手段进行道路病害体检测，对兰州市道路进行体检，并针对性修复，取得了显著的效果，事故数量明显降低。

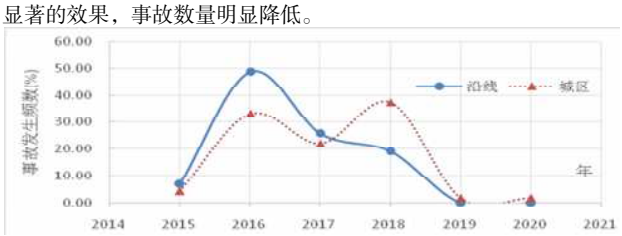

图 1 事故年度频数对比图

2.2 事故月分布与降雨对比

为探究兰州市市区与轨道交通沿线塌陷事故月份分布的普遍规律，将塌陷事故按照事故发生月份进行统计，如图 2 所示，其中兰州市区降雨数据来自于国家气象科学数据中心。沿线事故与全市事故数趋势基本一致，且与降雨量存在明显的相关性。11 月-次年 3 月，降雨量较少，塌陷次数也较少；4-10 月降雨量先增加再减少，于 8 月达到峰值，4-10 月塌陷数也相对较多，于 8 月达到峰值；此外，在 5 月，塌陷出现小高峰。

事故频数自 3 月起骤升，这可能与春季降雨明显增长有一定关系。每年的 7、8 月份是路面塌陷事故的高发期，兰州市这两个月份的降雨量远高于其他月份，瞬时降雨强度大，雨污水管网往往难以满足排水需求，故这在两个月中，因暴雨等恶劣气候所致路面塌陷事故占比较高，雨污水管道爆管所致事故也存在不少。不难发现，这种变化规律与降雨量月份变化规律极其相似。

2.3 事故规模及影响

6 年间，其中最大全市塌陷事故总共导致 1 人死亡、11 人受伤和 32 辆车辆损失，其中沿线事故共导致 6 人受伤，无人员死亡，21 辆车辆损失。塌陷面积集中在 2-20 平方米，其中最大面积 100 平方米；塌陷空洞中最大空洞约 200 方；塌陷深度主要集中在 5 米以内，其中最大深度 10 米。

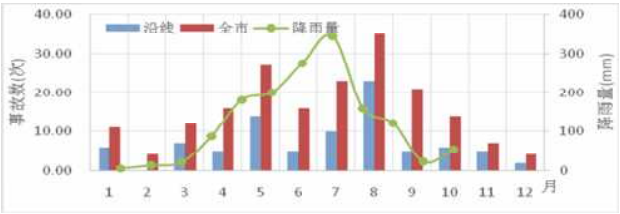

图 2 事故月分布及降雨对比图

3. 成因及发育机制分析

3.1 地质地层方面

根据轨道交通工程及其他地基基础工程揭露情况，地表分布有人工填土，其下为第四系全新统冲积黄土状土、卵石，底部为下古新统—始新统砂岩，塌陷深度内主要为稳定性较差的人工填土和黄土状土。尤其是管线施工回填不实或遇到湿陷性黄土地层，当在一定压力下受水浸湿，土结部分胶结物被溶解，土体结构遭到破坏，地层强度迅速降低，在自重或者附加荷载作用下，地层产生湿陷下沉，形成地下空洞甚至导致路面塌陷。

3.2 工程建设方面

地下工程施工，势必影响施工周围地层土体在水文环境方面、应力环境方面、宏观及微观结构方面发生改变，造成差异，不稳定性增加，造成城市地下工程附近出现不同程度的空洞、脱空、不密实等病害的发生。在地层应力方面，城市地下工程施工引起地下水位的改变，可以导致地层沉降。尤其是地下水抽排过程中，水头压力减小，含水层的浮托力减小，骨架颗粒间有效应力增加，使部分骨架孔隙压缩，导致部分地层沉降。其次管线施工回填不实，在后期在自重、附加荷载和地下水位变动等因素作用下，可造成地层沉降的隐患。此外，由于施工过程及后期行人、车辆等各种动荷载，各类震动，往往是压死骆驼的最后一根稻草，常常造成直接的塌陷事故。

3.3 气象降雨方面

根据国家气象科学数据中心降雨数据，研究发现 2016 年–2020 年兰州市区塌陷频次与降雨频次呈现较好的相关性。雨季期间，路面塌陷次数明显增加，尤其超过 80%的塌陷发生在降雨过后的 3–5 天内。受过量降水影响，特别是由于降雨无法及时排走，引起的“看海模式”，对道路下方地层造成不可逆的影响。过量降水不仅引起道路基层及基层以下层位应变发生，对地层的溶蚀、冲蚀、软化等作用，也势必增加了道路塌陷的病害几率。

3.4 路基脱空和空洞

路基脱空和空洞是路面塌陷的基本原因，从病害体形成上来看，严重的道路病害体空洞和脱空形成是一个发展过程，主要是地层基本条件基础上，工程活动、气象降雨、地下管线渗漏等因素诱导使得道路某处开始出现疏松，路基下方发生土体流失，随着时间推移，逐渐延伸到道路浅部，土体流失处上方由于中重力原因下沉补充，逐渐发展形成脱空，进而随着时间推移病害体不断发育形成规模不一的空洞。

当路基脱空、空洞或小规模塌陷病害发生以后，反过来又引起周围地层在结构、受力、水文等环境的进一步改变，并作用于给水、排水、地下设施等，造成这些设施的进一步破坏，两者的相互作用，形成恶性循环，加快了地层沉陷，空洞，甚至塌陷事故的发生。

4. 主要防治措施分析

4.1 地面塌陷的预防

（1）在道路规划阶段，对塌陷发生频次较高，规模较大、长期治理效果较差的路段可以根据情况对已有的塌陷发生且稳定性较差的地区进行避让。但是对于城市道路，由于线路规划较为困难，实施避让的可能性较小。

（2）在道路及地下管道施工阶段，必须严格做好地质勘查工作，在工程设计时应该注意消除或者减轻人为因素的不良影响，优化区域排水系统，施工过程中对路基作特殊处理，并尽量减少施工引起的振动、地下水位变动等方面的影响，并保证路面施工质量。

（3）在道路运维阶段，应加大对路面沉降的监测力度，针对频繁塌陷区域，做好定期巡视工作，利用探地雷达等技术探测地下空洞，及时检查路面下陷或裂缝等可疑迹象，定期排查地下管道的渗漏情况，尤其在雨季应加大巡视密度。在雨季来临的时候，且容易形成塌陷灾害的情况下，对道路周围群众进行组织避让。

（4）对已经出现的地面变形路段设置监测点位，进行阶段性监测。若是发现出现位移或者变形速度加快的情况，就一定要加密观测，且根据进展情况设置预警。另外，若有必要，还需要对塌陷地区周围的植物变态、建筑物的倾斜、水位的含沙量或动物的惊恐异常情况等进行观测。一旦发生塌陷事故，相关部门能够及时处理，减少塌陷事故产生的经济损失、人员伤亡，减轻事故负面影响。

4.2 路面塌陷治理

（1）对已经发生较浅的塌陷坑进行及时的填堵处理，防止地表水汇集灌人。当塌陷坑中露出了基岩时，需要首先在坑内进行块石、碎石的填入，作为反滤层，或者直接采取地下岩进行爆破回填，然后上覆黏土进行压实。若是坑内没有露出岩石，则代表塌陷坑的危害较小，此时使用回填块石或者粘土直接进行回填。

（2）对于较大的路面塌陷坑，对于交通等影响较大，但短时间内回填却又十分的困难的，这时候使用跨越法来进行临时过度。采用结实稳固的跨越结构，使塌陷坑上的荷载能够通过跨越结构作用在可靠的土体或者岩石上作为应急使用。

（3）也可通过灌注法将填筑浆液回填至塌陷区域，填筑地下孔隙裂隙，胶结地下松散地层，对地下水流进行拦截，改善地下土洞或者洞穴内的填充物强度，使路基得到加固，从而有效的降低塌陷发可能性。

（4）针对一些深度较大的、跨越结构又无能为力的路面塌陷坑，采用深基加固方式，通常都是使用打入桩、钻孔灌注桩或者深井和墩式基础等方式将路基基础放置在基岩上，从而达到治理的目的。

5. 结论

（1）轨道交通承担了城市相当一部分交通功能，同样的病害在其沿线发生时，灾害隐患和社会影响将更大。塌陷病害体发育特征显示兰州市道路塌陷的是自然和人为等多种因素共同作用的结果，具有一定的规律，综合物探在城市道路塌陷隐患检测中有一定的应用价值。

（2）随着城市地下空间的大量开发利用，地下工程、管线等布局的布置不仅越来越复杂。因此，完善城市地下地图，构建“道路塌陷危险地图”，把地下塌陷区域、不稳定区域等进行统一标定具有重要意义。

（3）此外，在对兰州市城市地下地层的研究，路面塌陷特征分析及机理分析的基础上，急需从路面塌陷的风险识别与评估、预警信息的发布与传播、应急处置能力的建设和基础保障体系等方面着手，完善兰州市区路面塌陷预警体系。

参考文献：

[1]郭林飞,柴仕琦,董静怡,肖镇涛,余群舟.我国城市路面塌陷事故统计分析[J].工程管理学报,2020,34(02):49−54.

[2]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(09):130−135.

[3] 杨晓锋. 兰州市道路塌陷成因分析及检测技术研究[J]. 城市勘测, 2019, 000(0z1):178−182.

[4] 魏蒙恩, 赵博. 兰州市近年来城市道路塌陷灾害发育特征分析[J]. 信息周刊, 2019, 000(032):1−2.

[5]张成平,张顶立,王梦恕,李倩倩,刘胜春.城市隧道施工诱发的地面塌陷灾变机制及其控制[J].岩土力学,2010,31(S1):303−309.

作者简介：姓名：魏蒙恩 性别：男 籍贯：甘肃兰州民族：汉 出生年月：1990.1 学位：硕士研究生 职称：讲师 单位：兰州资源环境职业技术大学 研究方向：地质工程与地质灾害

项目名称：甘肃省教育厅创新基金项目《兰州城区道路塌陷地质灾害发育机制及防灾减灾体系建设研究》（2019B−250）。