

某水库影响区路面塌陷原因分析及对策建议

黑广民^{1,2}, 薛莉云^{1,2}, 余海^{1,2}, 冉锦屏^{1,2}

(1. 四川省地质环境调查研究中心, 四川 成都 610081; 2. 四川九〇九建设工程有限公司, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为了探究四川某水库影响区路面塌陷原因。通过现场调查, 采用比较分析法和建立渗流模型法, 分析了塌陷形成原因和成灾机理, 提出了防治建议。研究表明: 场区大面积分布较厚层粉土, 污水水管位于粉土、卵石两种持力层, 为地面不均匀沉降和地面塌陷提供了基础条件; 深埋的排水暗沟年久失修, 局部破损, 为渗流及土颗粒流失提供通道; 水库水位升降为渗流提供水动力条件, 污水抽排进一步加大了渗流水头差; 建议采用注浆加固、碎石回填、钢管桩加固等防治措施, 并开展地下雨污管道病害综合调查。可为类似路面塌陷防治提供参考。

关键词: 路面塌陷; 原因分析; 对策建议; 潜蚀

中图分类号: TU478

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0042-05

Cause Analysis and Countermeasure Suggestion of Pavement Collapse in the Affected Area of a Reservoir

HEI Guangmin^{1,2}, XUE Liyun^{1,2}, YU hai^{1,2}, RAN Jinping^{1,2}

(1. Sichuan Geological Environment Survey and Research Center, Chengdu 610081, China; 2. Sichuan 909 Construction Engineering Co., Ltd., Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to explore the cause of pavement collapse in the affected area of a reservoir in Sichuan, through the field investigation, the comparative analysis method is used and the seepage model is established to analyze the causes of collapse and the mechanism of disaster formation. And the prevention and control suggestions are proposed. The research results show that the site area is widely distributed with thick layers of silt. The sewage pipes are located in two bearing strata of silt and pebbles, providing the basic conditions for uneven ground settlement and ground collapse. The deeply buried drainage ditches have been in disrepair for a long time and are partially damaged, providing the channels for seepage and soil particle loss. The rise and fall of the reservoir water level provide the hydrodynamic conditions for seepage, and the pumping and discharge of sewage further increase the seepage head difference. It is suggested to adopt the grouting reinforcement, gravel backfill, steel pipe pile reinforcement and other preventive measures, and the comprehensive survey on the diseases of underground rainwater and sewage pipes is carried out, which can provide reference for the prevention and control of similar pavement collapses.

Keywords: pavement collapse; cause analysis; countermeasure and suggestion; subsurface erosion

0 引言

随着城镇化进程不断推进, 地下空间开发利用强度增加, 路面塌陷灾害频繁发生^[1]。近期发生的典型地面塌陷事件发生在 2024 年 7 月 1 日, 西安在建的地铁 8 号环线开远门站突发地面塌陷, 导致当地紧急疏散周边区域 5 栋楼的 353 户、800 余名居民。幸无人员伤亡, 但此次事件对城市交通、国民生命财

产安全及社会稳定构成了严重威胁。基于路面塌陷问题, 一些学者对其进行了针对性研究。胡聿涵等^[2]研究近 10 a 中国城市道路塌陷原因表明, 路面塌陷具有隐蔽性、突发性、群发性、复发性和严重性的特点, 路面塌陷形成条件复杂, 是多种因素共同作用的结果, 主要为自然因素和人为因素, 其中人为因素有关的占 65%, 人为因素对路面塌陷的影响不可小觑; 陈雨昂^[3]等研究 2014—2018 年中国城市路面塌陷时空规律发现城市路面塌陷频发于夏季, 主要分布于东部大中城市; 王晓波^[4]对地下水位变动诱发地表塌陷的内在机理和规律进行研究认为随着地下水位升高频率和幅度的加快, 土体崩解破坏速度

收稿日期: 2025-02-26

作者简介: 黑广民(1975—), 男, 本科, 高级工程师, 从事岩土工程勘察、设计、水工环地质工作。

通信作者: 薛莉云(1989—), 男, 本科, 高级工程师, 从事水工环地质、岩土工程勘察、设计工作。电子邮箱: 568317721@qq.com

越快,塌陷孕育历时明显缩短,最终形成的塌陷坑面积也越大;廖君橙^[5]采用室内模型试验与数值计算方法对城区地表塌陷发育破坏机制进行了研究,发现填土黏聚力对土洞极限半径影响最大;鄢天柱等^[6-8]采用室内试验、理论分析和数值模拟等方法对地下管线渗漏诱发地面塌陷成因机理进行分析,主要为地下管线渗漏,土颗粒流失形成地下空洞,最终形成塌陷;孙树荣等^[9-11]采用 CCTV、地质雷达、车载三维探地雷达等仪器可快速探测塌陷区;吴先志^[12]在淤泥厚度较大的软土地区的案例中发现,检查井管道接头脱节,产生较大空隙,造成大量的泥砂涌入,引起路基塌陷事故;吴远斌等^[13-17]主要针对塌陷防治对策、应急处治方法、风险评估方面开展了相关研究。

综上,前人研究集中在地下管线、渗漏等路面塌陷原因、机理、探测方法、防治对策等方面,但水库影响区地面塌陷原因分析鲜有研究。为此,本文基于 2024 年 7 月四川涪江红岩水电站水库影响区青义城镇聚居区发生的 1 处典型路面塌陷灾害,系统地分析了地面塌陷的原因,可为下一步防治提供建议。

1 塌陷区地质环境条件

1.1 地形与岩土特性

研究区位于绵阳涪江右岸,属河谷平坝一级阶地地貌,整体地势西高东低,场地标高 470.00 ~ 491.50 m,相对高差约 21.50 m,东侧紧邻涪江红岩水电站库区。

研究区范围内上覆第四系全新统人工素填土层、第四系全新统冲积层粉土、细砂、卵砾石层,下伏基岩强~中风化粉砂质泥岩层。

(1)素填土(Q_4^{ml}):褐黄色,松散,稍湿,为粉质黏土夹碎石,碎石约占 25%,粒径 1~3 cm,主要是路基填土,填筑时间较长。层厚为 0.3~1.0 m。

(2)粉土(Q_{4-1}^{al}):黄褐色,饱和,稍密,土质较均匀,包含碎石,粒径 1~2 cm,含量约 10%,摇震反应中等,稍有光泽。研究区广泛分布,且厚度较厚约 3.5~5.3 m。层底深度 4.10~6.00 m。

(3)粉砂(Q_{4-1}^{sl}):黄色,饱和,稍密,矿物成分以长石石英为主,颗粒形状呈次棱角状。该层较薄为 0.4~0.6 m。

(4)卵砾石土(Q_{4-1}^{gl}):杂色,稍密,卵石形态多为次圆状、亚圆状,卵石排列混乱,部分不接触,粒径一般 4~12 cm,大者 20~30 cm,卵石含量 50%~55%,

砾石、中细砂充填,研究区广泛分布,厚度不均,已揭露层厚 6.80~7.70 m,下伏强~中风化粉砂质泥岩层。

1.2 水文与水文地质

(1)水文条件

研究区东侧有涪江自北向南流过,路面塌陷位置距离江岸水平距离约 100 m,在研究区的下游 1.4 km 处修建有红岩水电站闸坝,自 2014 年 6 月建成开始蓄水,属于日调节水库,按径流量发电,汛期保持低水位运行,一般 7~8 月下泄流量较大,正常水位为 469.10 m,防洪高水位为 468.70 m。

(2)水文地质

研究区由于水电站闸坝的长期蓄水,使得河水位长期保持较高位置,第四系孔隙潜水主要受地表河流和降雨补给,同时少量受北、西、南侧基岩裂隙水的径流补给。地下水类型,粉土层和卵砾石层为孔隙潜水,强风化粉砂质泥岩为风化裂隙水;从透水程度划分,粉土层、卵砾石层为相对含水层,中风化粉砂质泥岩层为相对隔水层,粉土层、强风化粉砂质泥岩属弱透水层,卵石层属于强透水层,粉土层、卵石层和强风化粉砂质泥岩层之间有较强的水力联系,具有统一的稳定地下水位。

研究区地下水位年变化幅度为 0.50~1.00 m,最高历史水位约 469.50 m。塌陷发生期间,经观测水位埋深 2.4~3.0 m,相应水位高程 467.50~467.69 m。根据相关资料显示,水库放水后,区内地下水位出现明显的下降,下降最大幅度为 3.41 m;而水库蓄水后,地下水位出现明显的上升,上升最大幅度为 3.52 m。因此,研究区地下水位随涪江水位、水库蓄放水升降及季节性降雨变化明显。

1.3 人类工程活动

聚居区主要为规划的民房密集,主要为多层建筑。其间道路纵横,路面分布水沟,并在道路下方大量分布雨污排水管涵。在 20 世纪 80 和 90 年代,路面塌陷区所在社区人行道下方修建有雨污合流排水暗沟,其南北走向有排水明渠和暗渠,东西走向为污水暗管(涵)如图 1 所示,埋深 4.0~4.5 m,为砖砌、浆砌卵石、波纹管等形式。因修建时间距今已 30~40 a,年久失修,存在部分变形破坏情况,主要为排水沟水泥砂浆被水流侵蚀带走,波纹管脆化现象。另外研究区位于红岩电站闸坝水库蓄水影响区,也属于周边较为重要的人类工程建设活动。



图1 “2024.7”地面塌陷平面位置

2 路面塌陷特征及原因分析

2.1 塌陷特征

2024年7月的路面塌陷,初始沉降规模约5.20 m×4.10 m,总面积约为21.32 m²,沉降深度约0.50 m;最终塌陷区域规模约18.70 m×14.20 m,总面积约为222.00 m²,影响面积约350 m²,最大沉降深度为1.20 m,总沉降土方量约50 m³,详如图2所示。塌陷坑沉降量最大点位于污水管正上方,塌陷坑距离北侧房屋约2.0 m,距离南侧房屋约8.0 m。根据《地质灾害分类分级标准(试行)》(T/CAGHP001—2018),确定该道路塌陷规模为中型。



图2 “2024.7”地面塌陷现状

2.2 塌陷原因分析

2.2.1 岩土类型及指标对比分析

根据2024年7月室内试验与2020年10月该区域内粉土参数对比统计见表1,分析数据表明:2024年7月塌陷期间比2020年雨污管网改造资料试验指标含水率、孔隙比、压缩系数均有所增大,其中含水率增加值为2.46%,增大率为8.66%,孔隙比增加值为0.07,增大率为8.86%,压缩系数增加值为0.22,增大率50%;而压缩模量、黏聚力和内摩擦角均大幅降低,其中压缩模量减小值为1.34 MPa,减小率为32.37%,黏聚力减小值为4.60 MPa,减小率为30.26%,

内摩擦角减小值为5.67°,减小率为39.10%。

表1 粉土主要物理力学参数统计对比表

试验指标	平均值/标准值 (2020年10月塌 陷前)	平均值/标准值 (2024年7月塌 陷后)	差值
含水率 $w/\%$	28.4	30.86	2.46
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.91	1.91	0
干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.50	1.46	-0.04
土粒比重 G_s	2.69	2.69	0
孔隙比 e	0.79	0.86	0.07
饱和度 $S_r/\%$	94.40	94.16	-0.24
液限 $w_L/\%$	29.29	30.70	1.41
塑限 $w_p/\%$	19.73	21.12	1.39
塑性指数 I_p	9.56	9.58	0.02
压缩系数 $\alpha_{e1-2}/\text{MPa}^{-1}$	0.44	0.66	0.22
压缩模量 E_s/MPa	4.14	2.80	-1.34
直剪黏聚力 c/kPa	15.20	10.60	-4.60
直剪内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	14.5	8.83	-5.67

经塌陷前后土体试验数据对比分析表明:塌陷区粉土层统一位置的含水率、孔隙比稍有增大(8.66%~8.86%),但压缩系数急剧增大,增大率达50%,土质变软,同时黏聚力和内摩擦角减小率达30.26%~39.10%,抗剪强度急剧降低,变形破坏更易发生。

2.2.2 地下水变化渗流和沉降分析

(1) 渗流模型建立

根据现场的地质条件,建立了地下水渗流模型如图3所示。

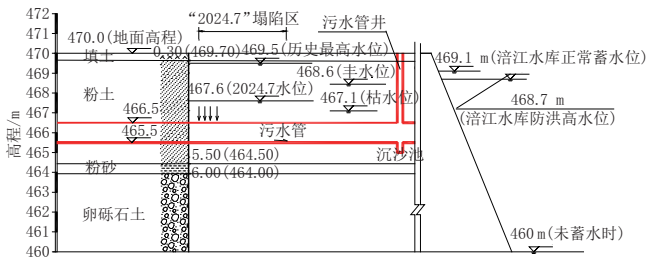


图3 渗流地质模型

(2) 水位变化渗流计算

当塌陷处历史最高水位(469.5 m),且污水管需要抽排至最低处(465.5 m)时,稳定渗流水位差 $\Delta h=469.5-465.5=4.0\text{ m}$;

$$i=\Delta h/L=4.0/4.0=1$$

式中: Δh 为水头损失, i 为水力坡降, L 为渗流长度;其作用在污水管顶增大的渗透水压力 $=10\times1\times(469.5-466.5)=30.0\text{ kPa}$;污水管底增大的渗透水压力 $=10\times1\times(469.5-465.5)=40.0\text{ kPa}$;

当塌陷处平均丰水位为468.6 m,且污水管需要

抽排至最低处 465.5 m 时,稳定渗流水位差 $\Delta h=468.6-465.5=3.1$ m; $i=\Delta h/L=3.1/3.1=1$;其作用在污水管顶增大的渗透水压力 $=10\times 1\times (468.6-466.5)=21.0$ kPa;污水管底增大的渗透水压力 $=10\times 1\times (468.6-465.5)=31.0$ kPa

当塌陷处平均枯水位(467.1 m),且污水管需要抽排至最低处(465.5 m)时,稳定渗流水位差 $\Delta h=467.1-465.5=1.6$ m;其 $i=\Delta h/L=1.6/1.6=1$;其作用在污水管顶增大的渗透水压力 $=10\times 1\times (467.1-466.5)=6$ kPa;污水管底增大的渗透水压力 $=10\times 1\times (467.1-465.5)=16$ kPa。

当塌陷处于丰水位或枯水位,雨污管不抽排时,水压力内外平衡,无压力差。

(3) 水位变化沉降计算

按短期水位变化为 1.0 m 计,采用大面积沉降计算公式:

$$\begin{aligned}\Delta s &= \sum \Delta p / E \times H \\ &= 0.5 \times 10 / 2.8 \times 1 + 1 \times 10 / 2.8 \times 1.1 \\ &= 5.71 \text{ mm}.\end{aligned}$$

式中: Δs 为沉降值; Δp 为变化压力差; E 为压缩模量; H 为压缩厚度。

按历史最高水位变化为 2.0 m 计,采用大面积沉降计算公式:

$$\begin{aligned}\Delta s &= \sum \Delta p / E \times H \\ &= 0.5 \times 20 / 2.8 \times 2 + 1 \times 20 / 2.8 \times 1.0 \\ &= 10.70 \text{ mm}\end{aligned}$$

(4) 渗流及沉降结果分析

经计算分析:地下水位变化引起的地面沉降量约为 5.71 ~ 10.70 mm,虽有一定的沉降影响,但总体影响较小。经渗流模型的定量计算分析,在丰水位及枯水位期,雨污管抽排时均产生渗流压力差,其污水管顶增大的压力为 6 ~ 30 kPa;污水管底部增大的压力为 16 ~ 40 kPa,相当于增加 1 ~ 2 m 厚土体压力,总体上动水压差较大;在动水压力差作用下产生的渗流,易使粉土层的细颗粒发生移动,随着周期性动水压力差作用,细颗粒逐渐流失后,潜蚀作用致使土骨架承载能力急剧降低,从而发生地面塌陷灾害。

2.2.3 排水暗沟年久失修渗漏分析

2014 年 6 月至 8 月、2015 年 6 月、2024 年 5 月、2024 年 7 月,均发生了不同程度的地面沉降或塌陷,尤以 2024 年 7 月发生的地面塌陷较为严重。经现场勘探,2024 年 7 月路面塌陷坑位于污水管正上方,现场调查塌陷段管道已堵塞损坏,管道接口存在错开

现象,且检查井中抽吸出的水中含有大量的粉土颗粒,说明深埋的排水暗沟局部破损、开裂,为渗流及土颗粒流失提供通道。其破损原因可能为两种:其一,经钻探资料显示,排污水管位于粉土、卵石两种持力层,可能在雨污水管道在自身重力、上部道路过往车辆等荷载作用下引发一定的不均匀沉降;其二,因年久失砖砌和浆砌石排水沟的水泥砂浆已被水流侵蚀带走,波纹管已脆化导致。污水管道内的污水采用抽排方式输送到污水处理厂,抽排过程中不仅降低水位,弱透水的粉土产生渗流作用,同时抽排产生的抽吸力进一步加速细颗粒物质被水流带走,粉土层内逐渐出现空洞,随着潜蚀作用的不断发展,空洞也不断扩大。

3 防治对策建议

经勘查该塌陷风险等级为 V 级,为保护居民生命财产安全,首先危险区内群众应及时撤离至安全地段,对塌陷区域围挡,危险区边界设置警戒线;其次实施工程勘察和治理,具体治理措施建议为:针对塌陷区北侧多层房屋基础变形,沿房屋基础边线以外 50 cm 左右布置 2 排钢管桩,采用梅花型布置,钢管可采用 DZ40 管材,管径为 $\phi 168$ mm,壁厚为 6 mm,桩中心距为 500 mm,桩深 8 ~ 10 m,排距为 500 mm,压力注浆体为水泥净浆。针对塌陷坑区域,建议深部先行采用注浆加固,提高地基承载力,其孔距可为 500 mm,梅花型布设,深度至雨污水管道以下不少于 2 m,水泥净浆压力注浆,注浆后浅部塌陷坑凹陷区局部清理再回填碎石或混凝土,并恢复路面。针对塌陷坑其他区域,建议采用人工调查、地质雷达探测^[10-11]、钻探等手段,扩大范围开展研究区所有地下雨污水管道病害的综合调查,根据病害体特征和原因再针对性处治。

4 结 语

(1) 地面塌陷主要原因为水库水位升降、污水抽排为渗流提供水动力条件,排水暗沟破损后为渗流及土颗粒流失提供通道,渗流过程中粉土颗粒不断被带入污水管内,粉土层内逐渐出现空洞,随着潜蚀作用的发展,空洞不断扩大,最终导致路面出现大面积塌陷。

(2) 针对此次塌陷病害体,根据病害体风险等级采用注浆加固、碎石或混凝土回填;对威胁周边房屋安全严重部位,在临房屋一侧设微型桩对地基土进

行保护,达到既稳定了道路塌陷坑,又保护了附近人民群众和房屋的目的。

(3)建议相关部门对研究区所有地下雨污水管道病害开展综合调查,调查其余地段雨污水管道是否存在破损、渗漏情况,发现问题及时处置;下一步可对周边年久失修的砖砌、浆砌石排水暗沟进行拆除重建,避免因潜蚀作用再次发生路面塌陷。

参考文献:

- [1] 仙永凯,史婧.城市路面塌陷成因分析与隐患点管理方法[J].中国高新科技,2022(3):141-143.
- [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,2022(9):130-134.
- [3] 陈雨昂,唐荣,方建,等.2014—2018年中国城市路面陷时空规律与原因分析[J].水利水电技术,2020,51(7):108-116.
- [4] 王晓波.地下水位变动诱发地表塌陷的机理和规律[D].长沙:湖南大学,2022.
- [5] 廖君橙.城区地表塌陷发育破坏机制研究[D].长沙:湖南大学,2021.
- [6] 鄢天柱.西宁市城区地下管线渗漏诱发地面塌陷成因机理及稳定性研究[D].贵阳:贵州大学,2022.
- [7] 高大潮.水力管线渗漏诱发地面塌陷模型试验研究[D].济南:山东建筑大学,2020.
- [8] 李雪竹,何翔,万凌锋,等.管道渗漏诱发路面塌陷的DEM—CFD耦合模拟[J].河南城建学院学报,2024,33(5):24-30.
- [9] 孙树荣,秦超.关于道路塌陷原因的分析[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2024,42(10):119-121.
- [10] 李波,李浩.地质雷达在路面塌陷探测中的管理应用[J].公路交通科技(应用技术版),2015(11):38-40.
- [11] 谢小国,张伟,罗兵,等.成都市城市道路塌陷成因及快速探测方法[J].中国地质调查,2022,9(4):112-120.
- [12] 吴先志.某软土地区路面塌陷事故分析及管道抢修[J].城市道桥与防洪,2015(8):191-193.
- [13] 吴远斌,殷仁朝,等.城市路面塌陷类型与防治对策[J].中国矿业,2023,32(增刊1):117-120.
- [14] 连峰,张旭光,刘治,等.城市道路塌陷分析及防治对策[J].城市建设,2020(1):60-62.
- [15] 张新磊.路面塌陷的原因分析与防治措施[J].广西城镇建设,2023(9):73-77.
- [16] 张作海.道路塌陷应急处治方法研究[J].工程施工技术,2024(1):197-199.
- [17] 张莹.城市排水管网运行风险评估研究进展[J].城市道桥与防洪,2022(6):104-109.

《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

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadbridgeflood@163.com

