

吴远斌,殷仁朝,雷明堂,等.重庆中梁山地区隧道工程影响下岩溶塌陷形成演化模式及防治对策[J].中国岩溶,2021,40(2): 246-252.

DOI:10.11932/karst20210204

重庆中梁山地区隧道工程影响下岩溶 塌陷形成演化模式及防治对策

吴远斌,殷仁朝,雷明堂,戴建玲,贾龙,潘宗源,马骁,周富彪

(中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/中国地质调查局
岩溶塌陷防治重点实验室,广西桂林 541004)

摘要:重庆市中梁山是重庆市东西向交通通道的天然屏障,严重阻碍城区经济发展,隧道可快速穿越褶皱山区,但隧道工程施工常常诱发严重的岩溶塌陷、地下含水层破坏、地表水疏干等地质灾害,威胁隧道安全施工与当地生态地质环境。越岭隧道施工对区域地下水位疏干的不同阶段,其诱发岩溶塌陷的主控因素发生改变,据此,可将岩溶塌陷发生过程分为两个阶段、两种类型:疏干初期突涌型岩溶塌陷和疏干后期降雨型岩溶塌陷。其中,疏干初期突涌型岩溶塌陷的主控因素为真空吸蚀效应;疏干后期降雨型岩溶塌陷的主控因素为岩溶管道裂隙内水气压力突变。

关键词:中梁山;隧道工程;岩溶塌陷;真空吸蚀;岩溶管道裂隙

中图分类号:P642.25 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2021)02-0246-07 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

中梁山是离重庆市区最近的一座北东向山脊,为市区东西向交通的重要阻碍之一。40余年前的道路必须翻山越岭,严重阻碍交通出行及经济发展。自1971年中梁山修建第一条隧道开始,该地区已建、在建越岭隧道20余条,随着重庆西扩、东西城区联动发展的需求,还有10余条规划隧道将于近期或不久的将来修建完成。

目前中梁山地区已发生岩溶塌陷300个,疏干井泉约110个,严重影响了该地区的资源、生态、社会经济系统^[1]。大量学者已对中梁山地区的岩溶塌陷发育特征^[2]、机理^[3-4]、稳定性^[5-6]进行研究并取得较多成果。但以往研究多侧重塌陷诱发因素或动力因素分

析,而对隧道工程影响下岩溶塌陷群随时间的形成演化模式研究较少^[6]。

本文以重庆中梁山地区越岭隧道工程施工诱发的岩溶塌陷为研究对象,概化出该地区岩溶塌陷地质模型,根据越岭隧道施工对区域地下水位的影响,将岩溶塌陷发生过程分为两个阶段,分别对应两种类型:疏干初期突涌型岩溶塌陷和疏干后期降雨型岩溶塌陷,并分析不同阶段的动力因素,进而提出针对性的岩溶塌陷防治措施,以期为该地区乃至川东南高陡背斜山区的岩溶塌陷地质灾害防治提供地质依据。

1 研究区概况

中梁山位于川东南弧形地带,重庆华蓥山帚状

基金项目:中国地质调查项目(DD20190266,DD20160254);国家自然科学基金项目(42077273;41877300);中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2015017,2020002,2020016);广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA294020)

第一作者简介:吴远斌(1987—),男,助理研究员,长期从事岩溶地质灾害监测预警与风险防控工作。E-mail:wuyb86@qq.com。

收稿日期:2020-07-20

褶皱束东南部。受隔档式构造影响,中梁山为观音峡背斜形成的背斜条状山地貌,属低山地貌,山体两侧斜坡呈陡坡状,坡角在 $35^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 之间,山体中部为相对较为平缓的岩溶槽谷地貌,地形特征为“一山三岭二槽”或“一山二岭一槽”,山体呈南北走向,整个区域地势北高南低,两边高中间低。槽谷区的组成地层主要为雷口坡组、嘉陵江组;岩性为灰岩、白云质灰岩、白云岩、膏溶角砾岩等。槽谷内地形较平缓,相对高差为 $10 \sim 30 \text{ m}$,分布有第四系残坡积层($Q_4^{\text{cl+dl}}$),岩性为黏土、粉质黏土,单层结构,厚度为 $1.8 \sim 11.2 \text{ m}$,平均深度为 4.83 m 。两侧山岭及中部溶岭出露地层以三叠系上统须家河组(T_3xj)及下统飞仙关组(T_3f)为主。

研究区地处观音峡背斜,区内断裂构造较发育,以压扭性逆断层为主,其中白庙子断层为区内的主要断裂构造,同时在背斜轴部及附近相伴生或派生小褶皱、小断层、节理裂隙、层间滑动擦痕与破碎带。区内主要含水岩组为嘉陵江组+雷口坡组($T_3j^{1-4}+T_3l$)、飞仙关组(T_3f)灰岩膏溶角砾岩、灰质白云岩及白云岩含水岩组,主要分布于东、西槽谷以及两槽之间的溶岭地带。两翼受非可溶岩控制,岩溶地下水一般沿层面流动,往往具有高压、富水的特征^[7]。在该地区修建地下隧道工程,不但极易诱发大规模的涌水、涌泥等工程灾害,而且会对周围的地质环境造成极大的破坏^[8]。

2 地质模型概化

中梁山地区在煤矿、隧道工程建设以前,岩溶槽谷区水草丰茂,泉水横流,终年不干,地表水库(塘)分布较多。但自第一条襄渝铁路隧道建设以来,区内陆续修建了多条隧道,大量越岭隧道成为区域地下水的集水廊道,导致区域地下水位快速下降,槽谷区井泉干涸、溪沟断流、水库漏失、塌陷发育。

受中梁山地区隧道工程疏干排水影响,区域地下水位疏干至基岩面以下,因此,塌陷区地质模型可概化为地下水水位在基岩面以下波动的单层结构地质模型(图1)。

3 岩溶塌陷群形成演化模式

隧道工程影响下岩溶塌陷群的致塌作用不外乎

潜蚀、真空吸蚀和岩溶管道水气压力突变等三种,但其发生原因及演化方式主要受隧道施工揭露可溶岩非可溶岩接触带、断层或溶洞以及降雨控制,因而有别于单纯抽水或者采矿造成的塌陷。

根据越岭隧道施工对区域地下水位的影响,诱发岩溶塌陷的主控因素发生转变,从而对应不同的岩溶塌陷形成机理、演化模式。据此,可将隧道施工对区域地下水位的疏干分为疏干初期和疏干后期两个阶段(图2),并分别对应两种塌陷类型:突涌型岩溶塌陷和降雨型岩溶塌陷,不同阶段的主导地质营力和致塌模式存在明显差异。

3.1 疏干初期突涌型岩溶塌陷

当隧道施工进入岩溶区,揭穿碎屑岩与可溶岩接触带或者进入较完整岩溶区地层后突然揭露溶洞或大断层,隧道洞身成为区域集水廊道,地下水位突然或快速下降,地下水流速突然增大,加大了地下水对泥、沙的搬运能力,原先充填、半充填岩溶裂隙管道得到疏通,造成岩溶空腔内水压力降低,甚至产生负压,伴随着空腔开口附近土体所受压力增大,促进土体中渗透压力的增加从而使土体迅速发生渗透变形破坏,使得与岩溶管道连通的覆盖层稳定性受到破坏,当塌陷力超过极限抗塌力时而产生塌陷。可简单概括为:上覆单层结构土体厚度较薄、下伏灰岩地层岩溶发育→隧道施工进入岩溶区,突(涌)水造成区域地下水位急剧下降→真空吸蚀效应(土层裂隙水来不及疏干,密封性强)→渗流潜蚀→土洞扩展→岩溶塌陷产生(图3)。在此过程中,诱发岩溶塌陷的动力因素主要体现在以下两方面:

(1)真空吸蚀效应 在隧道疏干以前,塌陷区地下水位多位于基岩面以上,土岩界面处黏土多赋存一定量的土层裂隙水,发生大量突(涌)水后,岩溶管道裂隙内的岩溶水位急剧下降,而土层内裂隙水下降滞后,为形成岩溶管道内的真空负压提供了条件。岩溶管道内的负压效应促使土洞顶土体剥落加速向上发展,甚至当负压吸蚀力足够大时,土洞顶板可直接垮塌。

(2)渗流潜蚀作用 岩溶水位急剧下降以后,土层裂隙水开始加速向岩溶管道内渗流潜蚀,促进土体中渗透压力增加,带走土颗粒,从而使土体发生渗透变形破坏,进一步促进土洞向上扩展。

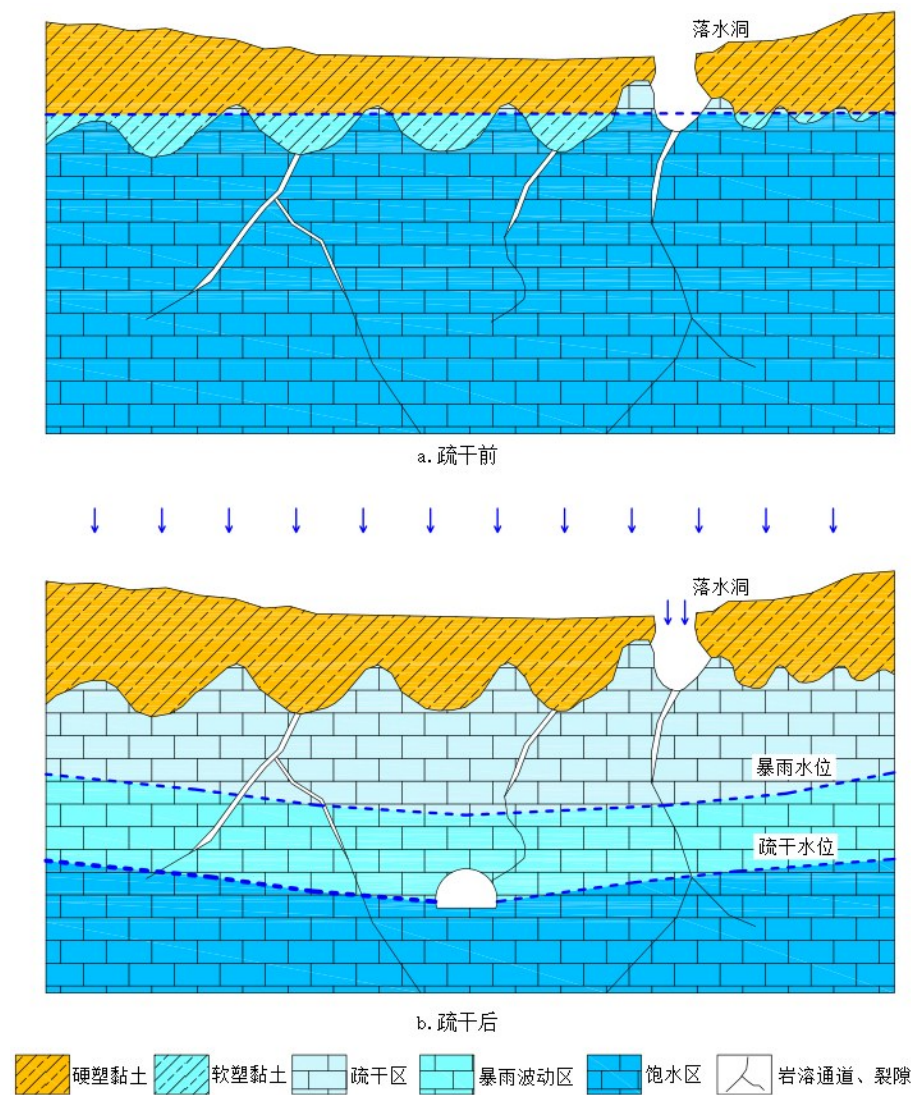


图1 塌陷区地质模型概化

Fig. 1 General geology model of the collapse area

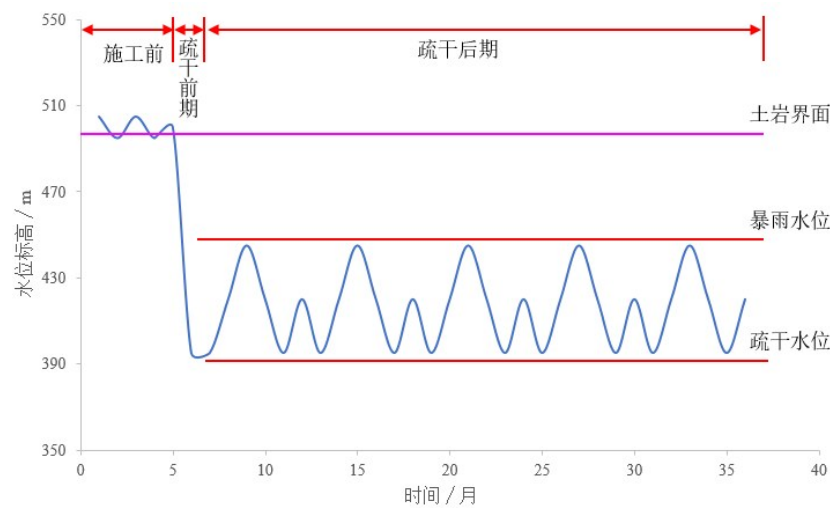


图2 隧道施工对区域地下水位的影响示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing influence of tunnel construction on regional groundwater level

真空吸蚀效应在前,渗流潜蚀作用在后,这也解释了为什么突涌水发生后,岩溶塌陷先有一个集中爆发,随后仍有一定数量塌陷发生的现象。这类塌

陷模式与岩溶大水矿床放水、突水诱发岩溶塌陷机理类似^[9-11]。

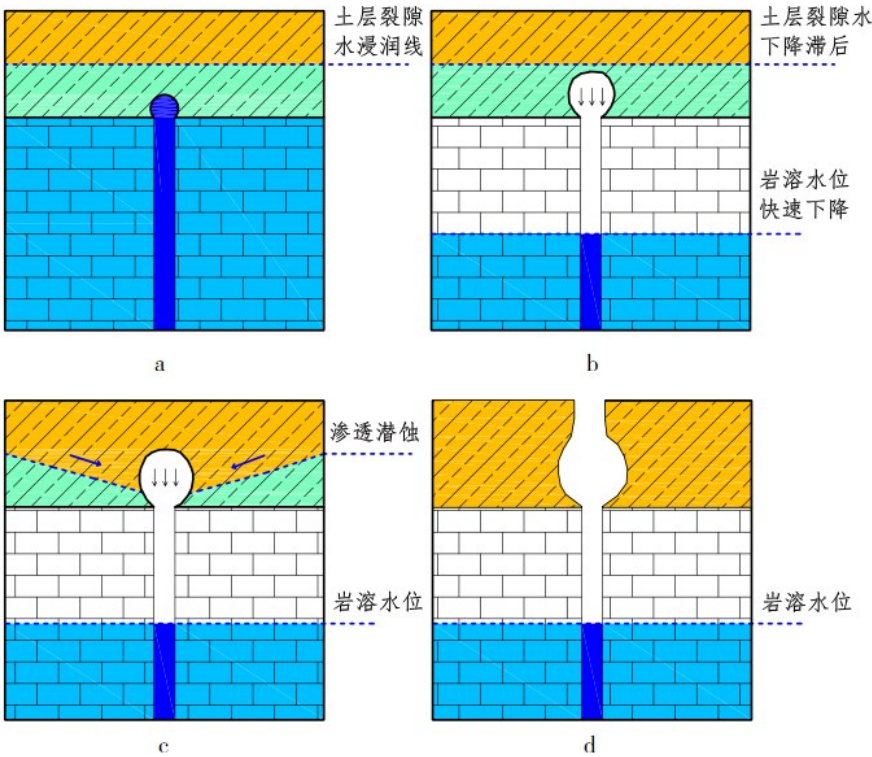


图3 隧道施工导致水位骤降条件下塌陷的形成演化过程示意图

Fig. 3 Sketch showing formation and evolution process of collapse in the condition of sudden drop of water level caused by tunnel construction

这一阶段的塌陷多发生于隧道施工揭穿岩溶含水层或者导水断裂后^[12-13],发生塌陷规模大、密度大,并且突涌水发生后1-2个月内,塌陷发生仍较为频繁(表1)。其中,双碑隧道右洞K5+359-389段多处发

生涌水,涌水量达 $23\,254.31\,\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,诱发多处大型塌陷坑^[14]。歇马隧道修建过程中,当揭露构造破碎带时,突水量突然达到 $500\,\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ^[15],随即隧道上方槽谷区的大烂池水库发生塌陷20余个。

表1 中梁山地区水位骤降与塌陷情况对比一览表^[16]

Table 1 Comparison of water level sudden drop and collapse case in Zhongliangshan area

隧道修建情况	隧道大规模突水导致水位骤降时间	塌陷数量(时间)
襄渝铁路隧道	1972年8月	11(1972年9—11月)
遂渝高速公路大学城隧道	2004年7月	4(2004年8—10月)
轻轨1号线隧道	2010年3月	5(2010年4—6月)
双碑公路隧道	2011年9月	15(2011年9—10月)
	2012年4月	21(2012年4—5月)
歇马隧道	2015年11月	22(2015年11月—2016年1月)

随着岩溶强发育带探测距离与精度的提升以及“以堵为主,限量排放”的施工策略,施工过程中这种突然揭露断裂带或强富水带发生突涌水而直接诱发大量岩溶塌陷的情况正在减少。因此,这一阶段的岩溶塌陷类型并不是一定存在的,更多的塌陷属于疏干后期降雨型岩溶塌陷。

3.2 疏干后期降雨型岩溶塌陷

水位骤降至基岩面以下后,区域地下水位逐渐达到一个比较稳定的动态平衡状态,此后诱发岩溶塌陷的主控因素发生改变,从原来的区域水位骤降

引起的真空吸蚀效应和渗流潜蚀效应转变为降雨条件下的岩溶管道水气压力突变效应。

中梁山地貌为典型川东高陡背斜形成的岩溶槽谷相间的“笔架形”平行岭谷地貌。槽谷区地势低洼,汇水面积较大,同时,槽谷内分布有大量落水洞、未回填塌陷坑,降雨形成的大量坡面流快速汇聚至槽谷地势低洼处,通过落水洞、塌陷坑入渗转化为地下水,导致岩溶管道系统内水气压力发生突变,引发岩溶塌陷(图4)。在此过程中,诱发岩溶塌陷的动力因素主要体现在以下三个方面:

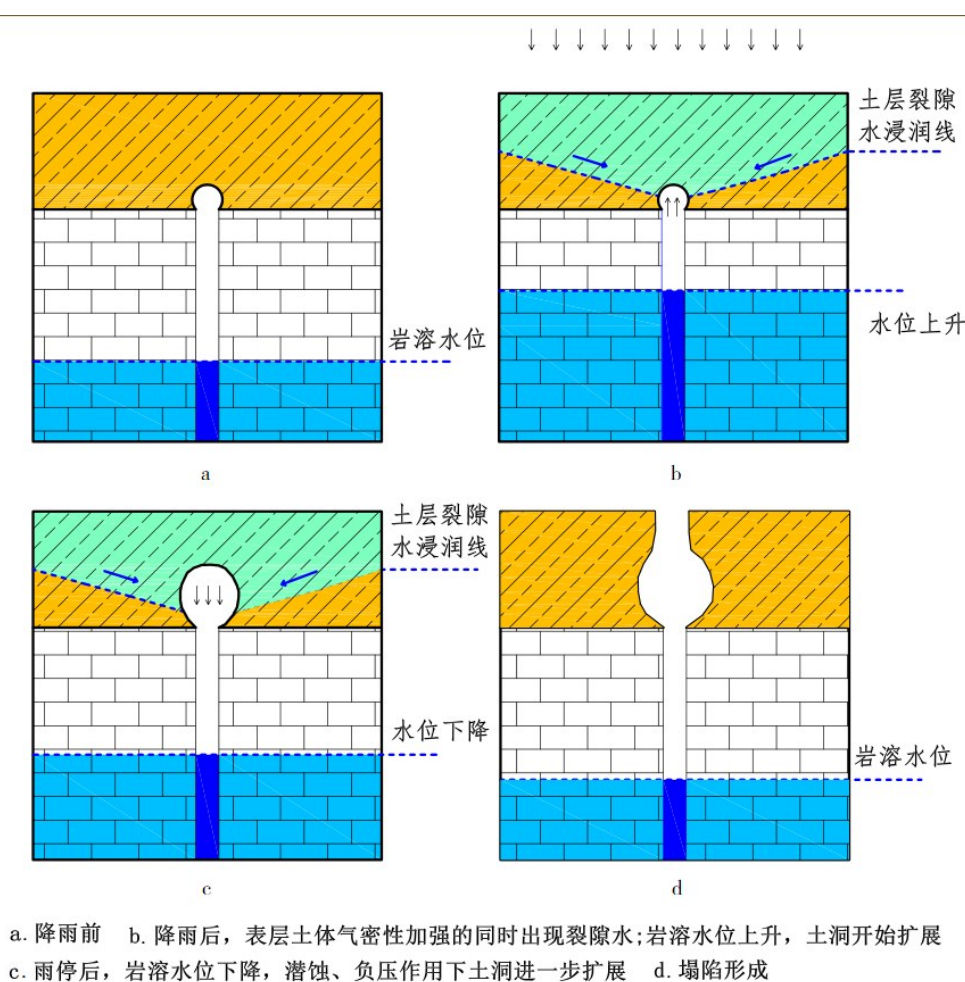


图4 暴雨条件下塌陷的形成演化过程示意图

Fig. 4 Sketch showing formation and evolution process of collapse in rainstorm condition

(1)土体系统密封效应 降雨使得塌陷区表层土体处于饱水状态,容重增加的同时气密性增强,形成一个土体系统密封效应,极大增强了对下伏岩溶管道系统内水气压力的敏感性,加速土洞顶部的土体崩落。

(2)潜蚀作用 塌陷区土体多发育裂隙,降雨入

渗至土体后沿裂隙面往岩溶管道径流、潜蚀,带动土颗粒迁移,加速土岩界面处土洞发育。

(3)岩溶管道裂隙内水气压力突变效应 降雨尤其是暴雨,一方面导致区域水位急剧变化(快涨快落),造成岩溶管道内形成高压顶托—负压吸蚀交替循环影响;另一方面主岩溶管道内地下水径流速度

加大,对侧支岩溶管道裂隙形成负压作用。这两方面作用叠加导致岩溶管道裂隙内水气压力发生急剧变化,直接作用于基岩面附近的土洞,从而诱发岩溶塌陷。

塌陷坑的地形分布特征可以很好地体现这三种效应的叠加影响效果,如土主隧道上方槽谷区的龙泉村岩溶塌陷多分布于槽谷内地势低洼处或地表溪沟附近,这些地区为地表水汇聚处且地表水可以快速转变为地下水,导致岩溶管道系统内水气压力发生突变。

这一阶段的塌陷多发生于隧道施工疏干后期第一年的雨季,其塌陷强度达到高峰,如土主隧道上方的龙泉村塌陷区,2020年雨季(4~6月)集中发生岩溶塌陷20处,占截止2020年11月总塌陷数量的44.4%,同时,其他时段的零星塌陷也多发生于降雨期间或降雨后1~2 d内(图5)。高峰期过后的数年内,塌陷仍会有零星发展,如2019年雨季发生的茅山峡村委塌陷,则是受到其南侧约1.0 km处的轻轨1号线中梁山隧道(2011年12月贯通)疏干影响所致。

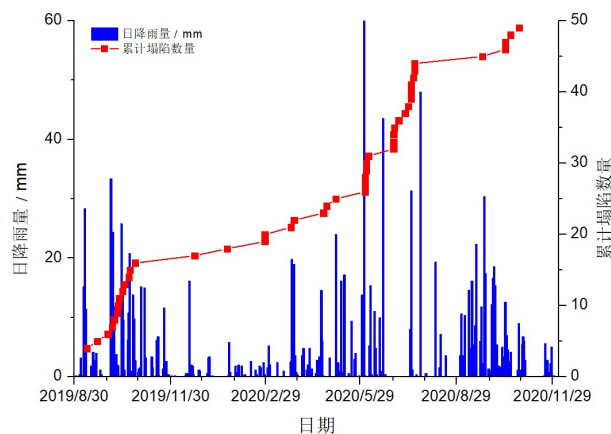


图5 龙泉村塌陷区降雨量与累计塌陷数量对比图

Fig. 5 Comparison of rainfall amount and cumulative collapse quantity at Longquan village

4 防治对策

4.1 隧道施工前

疏干初期突涌型岩溶塌陷的主控因素为真空吸蚀效应,因此,根据相关研究成果^[17-18]及当地经验对隧道轴线两侧3 km范围进行岩溶塌陷易发性评价,划分出高易发区。对高易发区内的低洼区域施工若干通气管道,其可用钻机钻进至基岩岩溶发育段或

溶槽内(孔径为110~300 mm),孔内预留地质管或水泥管、PVC管至地面以上0.5~1.0 m,以期降低突涌水时岩溶管道系统内的真空度,起到提前预防岩溶塌陷灾害发生或者降低岩溶塌陷灾害强度的作用。

4.2 隧道疏干后期

(1)塌陷回填 对于重点地段塌陷,如公路、房屋旁边的塌陷,进行注浆回填,回填前注意一定要开挖至基岩面,在基岩面处铺盖注浆,或者块石回填,否则,潜蚀通道未能彻底阻断,回填后的塌陷坑可能继续发展。

(2)地表水引流、截留 在塌陷区做好沟渠硬化引流工作:①对于没有硬化渠道地区,及时用水泥硬化渠道;②对破损的水泥沟渠,及时修复,避免形成集中入渗潜蚀通道。

及时将地表水引出塌陷区,可以避免降雨时地表水汇聚堆积,引起潜蚀作用。例如,付家湾塌陷群,回填治理后的一场暴雨因排水不畅在塌陷区积水1 m有余,最后在原塌陷区诱发新塌陷,积水迅速消入地下。

(3)建立岩溶塌陷动力条件监测网 在岩溶塌陷高易发区建立岩溶塌陷动力条件监测网,对岩溶管道裂隙内水气压力进行高频监测,监测数据采集频率为5~20 min·次⁻¹^[19]。

(4)降雨预警 疏干阶段诱发岩溶塌陷的主控因素为岩溶管道裂隙内水气压力突变,而这主要由降雨诱发,因此,可尝试划定一个降雨阈值作为塌陷预警阈值。

(5)群测群防,提高塌陷区群众防灾意识 虽然大部分塌陷是突然发生,但是仍有部分塌陷存在地面下陷、路面脱空等前兆,提高塌陷区群众防灾意识,可切实降低塌陷区的人员伤亡。

5 结论

根据越岭隧道施工对区域地下水位的影响,诱发岩溶塌陷的主控因素发生转变,从而对应不同的岩溶塌陷形成机理、演化模式,可将重庆中梁山地区岩溶塌陷的形成过程、类型划分为疏干初期突涌型岩溶塌陷和疏干后期降雨型岩溶塌陷。不同阶段岩溶塌陷的主导地质营力和致塌模式存在明显差异:疏干初期突涌型岩溶塌陷的主控因素为真空吸蚀效应,其次为渗流潜蚀效应;疏干后期降雨型岩溶塌陷的主控因素为降雨条件下岩溶管道裂隙内水气压力

急剧变化。根据不同岩溶塌陷类型及所处疏干阶段,针对性地采取不同的防治措施,可提高岩溶塌陷灾害的防治效果,取得较好的经济效益和社会效应。

参考文献

- [1] 刘丹,杨立中,王建秀.我国铁路建设中岩溶塌陷的基本特征及成因模式[J].中国地质灾害与防治学报,1997(S1):26-30.
- [2] 张海坦,李庆华,邓书金.歌乐山岩溶地面塌陷发育特征[J].中国岩溶,2015,34(1):58-63.
- [3] 胡婷.重庆地区地下工程建设诱发岩溶塌陷的机制研究[D].重庆:重庆交通大学,2014.
- [4] 谭开鸥,李玉生.重庆地区的岩溶塌陷及其形成机理[J].中国地质灾害与防治学报,1995(3):23-27.
- [5] 陈洪凯,王圣娟,粟俊江,等.地下水降落诱发岩溶洞穴土质盖层塌陷的机制研究:以重庆歌乐山余家湾水库地面塌陷为例[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2018,35(4):54-58.
- [6] 靳红华,王林峰,杨培丰,等.降雨与岩溶渗漏联合作用下岩溶塌陷稳定性分析[J].人民长江,2019,50(9):105-112.
- [7] 杨昌宇.岩溶地区隧道设计的几点思考及建议[J].现代隧道技术,2011,48(1):90-93.
- [8] 郭纯青,田西昭.岩溶隧道涌水量综合预测:以朱家岩岩溶隧道为例[J].水文地质工程地质,2011,38(3):1-8.
- [9] 徐卫国,赵桂荣.试论岩溶矿区地面塌陷的真空吸蚀作用[J].地质论评,1981,27(2):174-180,183.
- [10] 徐卫国,赵桂荣.真空吸蚀作用引起的塌陷实例[J].水文地质工程地质,1988(3):50-51.
- [11] 韩宝平,何宇彬,甘志杰,等.采矿诱发塌陷的研究[J].勘察科学技术,1994(3):29-32.
- [12] 肖载兴,郑彦飞.重庆歇马隧道ZK7+292涌水处治施工技术[J].工程建设与设计,2016(18):152-156.
- [13] 魏兴萍,张虹,苏程烜.重庆南山隧道工程涌水隐患研究[J].中国岩溶,2016,35(1):74-80.
- [14] 南力辉.双碑隧道涌水量预测及运营预警措施研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [15] 胡明健.突泥处治综合措施在歇马隧道施工中的应用[J].城市住宅,2018,25(4):107-109.
- [16] 重庆市地质矿产勘查开发局南山水文地质工程地质队.重庆“四山”规划区地质环境专项调查报告[R].重庆,2016.
- [17] 杜严飞,杨乐,廖云平,等.重庆市地下隧道地质环境影响因素分析[J].长江科学院院报,2016,33(8):105-108.
- [18] 龚睿.隧道工程建设对隔档式岩溶富水背斜地下水环境的影响研究:以观音峡背斜为例[D].成都:成都理工大学,2010.
- [19] 蒋小珍,雷明堂.岩溶塌陷灾害的岩溶地下水气压力监测技术及应用[J].中国岩溶,2018,37(5):786-791.

Triggering factors and prevention-control countermeasures of karst collapses caused by tunnel construction in the Zhongliangshan area, Chongqing

WU Yuanbin, YIN Renchao, LEI Mingtang, DAI Jianling, JIA Long, PAN Zongyuan, MA Xiao, ZHOU Fubiao

(Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR/Key Laboratory of Karst Collapse Prevention, CGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract The Zhongliangshan area is a natural barrier of the east-west traffic channel in Chongqing, that seriously hinders urban economic development. The tunnel traffic can quickly cross fold mountain areas. However, tunnel construction often induces serious karst collapse, failure of underground aquifers and surface water drainage, threatening tunnel safety construction and making impact on the ecological and geological environment. The main controlling factors of karst collapse are variable in different stages of tunnel construction with water level drainage. Therefore, the process of karst collapse can be divided into two stages: sudden drawdown and drainage. The main controlling factor of karst collapse is vacuum suction effect and the sudden change of water and gas pressure in the cracks of karst pipelines, respectively. Furthermore, the prevention and control measures of karst collapse are put forward in this paper. It provides a solid geological basis for effective management of geologic hazard by local karst collapse.

Key words Zhongliangshan area, tunnel, karst collapses, vacuum erosion, karst pipeline crack

(编辑 黄晨晖)