

刘昭京, 蒋小珍, 冯涛, 等. 湘桂铁路二塘车站路基岩溶塌陷成因与防治对策[J]. 中国岩溶, 2023, 42(1): 109-118.
DOI: 10.11932/karst20230109

湘桂铁路二塘车站路基岩溶塌陷成因与防治对策

刘昭京¹, 蒋小珍², 冯涛³, 黄胜平¹, 周富彪², 伊小娟³

(1. 中国铁路南宁局集团有限公司建设管理部, 广西南宁 530029; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/
中国地质调查局岩溶塌陷防治技术创新中心, 广西桂林 541004;
3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川成都 610031)

摘要: 湘桂铁路二塘车站高铁区段 1996-2016 年间发生岩溶塌陷险情 27 起, 虽经过多期悬挂式帷幕注浆整治, 但塌陷问题仍是行车安全的极大隐患。通过资料收集、场地野外调查、岩溶地下水气压力长期监测站的监测资料分析, 细化了研究区的地质构造、岩溶水文地质条件及岩溶发育特征, 从地质结构、岩溶地下水动力特征等方面分析, 认为岩溶塌陷形成的成因为临桂地区房地产基坑开挖抽排水影响岩溶地下水水位变化, 造成基岩面上覆土体的潜蚀, 形成土洞, 进而发展至地面形成塌陷坑。针对铁路运行段地下水位埋深具承压性, 隐伏溶洞充填率高的复杂岩溶地质条件以及注浆压力的限制, 提出加强基岩面上覆土层抗渗强度、管控岩溶地下水降深的岩溶塌陷防治对策。

关键词: 岩溶塌陷; 成因; 防治对策; 管控岩溶水降深; 二塘车站

中图分类号: P642.25 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2023)01-0109-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

二塘车站位于广西桂林市临桂新区, 西南临永福县, 东北接桂林市秀峰区, 东南靠桂林市雁山区。车站始建于 1938 年, 至今已运营 80 多年。2011 年完成扩能改造, 在既有铁路基础上改造成动车线, 设计时速为 200 km·h⁻¹ 及以上。由于地处岩溶强发育区, 岩溶塌陷一直是二塘车站区段内面临的主要地质灾害问题。根据桂林工务段记录, 二塘车站 5 km 长的路段(DK368-DK371)共发生岩溶地面塌陷 27 起, 其中, 扩能改造工程开工前的 1996 年至 2011 年共发生 13 起; 扩能改造后, 2012 年至 2016 年发生 14 起。从 2010 年至 2020 年, 二塘车站段内采用悬

挂式帷幕注浆进行了 4 期塌陷整治, 注浆孔的间距从 7 m 缩小至 2 m, 注浆深度加深到 25 m^[1-4], 但是岩溶塌陷问题仍未彻底解决, 高铁行车至该路段车速一直处于 50 km·h⁻¹ 的限速状态。

本文通过场地资料收集、补充野外调查、地下水水位统测、岩溶地下水气压力长期监测等工作, 进一步分析线路段所处的岩溶地质背景及岩溶塌陷的成因, 并提出相应的处置对策。

1 地质条件与岩溶特征

二塘车站属大型岩溶侵蚀谷地地貌, 盆地狭长呈 U 字型, 走向 NE, 地势北高南低, 相对平缓。表层

基金项目: 中国铁路南宁局集团有限公司科研计划项目(建 18-5); 国家自然科学基金(42077273); 中国地质调查局项目(DD20190266); 岩溶所基本科研业务费项目(2021003)

第一作者简介: 刘昭京(1966—), 男, 正高级工程师, 工程建设专业带头人。

通信作者: 蒋小珍(1970—), 女, 博士, 研究员, 博导, 主要从事岩溶地质灾害防治研究。E-mail: 511036641@qq.com。

收稿日期: 2022-01-20

为土层覆盖,自然坡度 5°~10°,相对高差小于 10 m。铁路两侧房屋密集,附近公路网纵横,交通方便。

1.1 地层岩性

场地内出露地层主要为泥盆系和石炭系(图 1),由老至新分述如下:

(1)泥盆系上统融县组(D₃r)分为两个岩性段,下段(D₃r¹)分布在区内东北部,灰—深灰色中厚层灰岩;上段(D₃r²)为场地内主要地层,厚层灰—灰白色灰岩、白云质灰岩。

(2)石炭系下统英塘组(C₁y)为灰黑色中—薄层状泥灰岩夹薄层泥岩、硅质岩。

1.2 地质构造

区内受 NE 向灵川大断裂 F1、芦笛岩断裂的影响,发育临桂背斜、四塘罗锦向斜(图 1)。临桂背斜呈 C 形状,轴部由北至南经过桂林机械厂、临桂酒厂、大律村,于二塘车站 DK369+500 处倾覆。东翼缓倾向 ES,倾角 10°,西翼倾向 NW,倾角 20°~25°。罗锦

向斜轴部区由油塘尾、临桂白云岩矿延展至小律村。灵川断裂 F1 为压扭性逆断层,倾向 NW。

1.3 岩溶水文地质条件

区内西部为碎屑岩缓坡丘陵,中部为孤峰平原、峰林平原,东部为峰丛洼地,地势总体上东西两侧高,中间低。地表水属柳江水系,岩溶含水岩组为泥盆系融县组灰岩,为碳酸盐岩裂隙溶洞水,受 NE 向灵川断裂及临桂背斜的影响,以柳江分水岭为边界,地下水流向总体由北向南,向太平河排泄(图 2)。

场地地下水的补给来源主要为大气降雨的垂直入渗和青狮潭水库的渠道渗漏补给、西部碎屑岩侧向补给。地下水呈承压管道流和网状流,水头高于基岩面 1~5 m,地下水水力坡度一般为 0.5‰~2.5‰,由于水力坡度小,地下水径流速度缓慢。

地下水排泄主要有二种:①以泉点状形式排泄,如临桂背斜两翼发育两个岩溶地下水系统,西翼排泄出露点在小律村,东翼及铁路研究区则由北西南东向排泄,排泄点分布在大律及二塘老街区域。

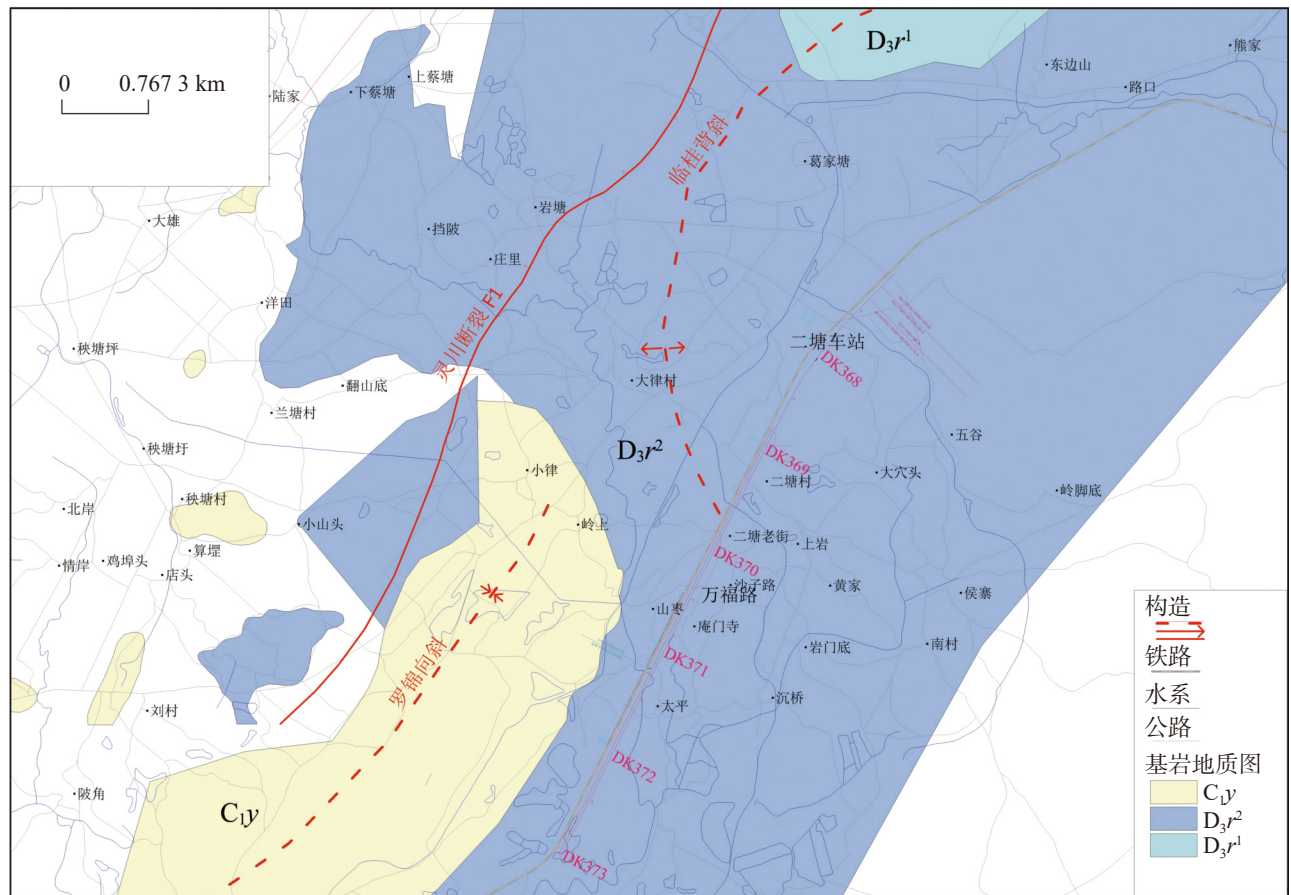


图 1 场地基岩地质与构造图

Fig. 1 Geological structure of bedrock of the site

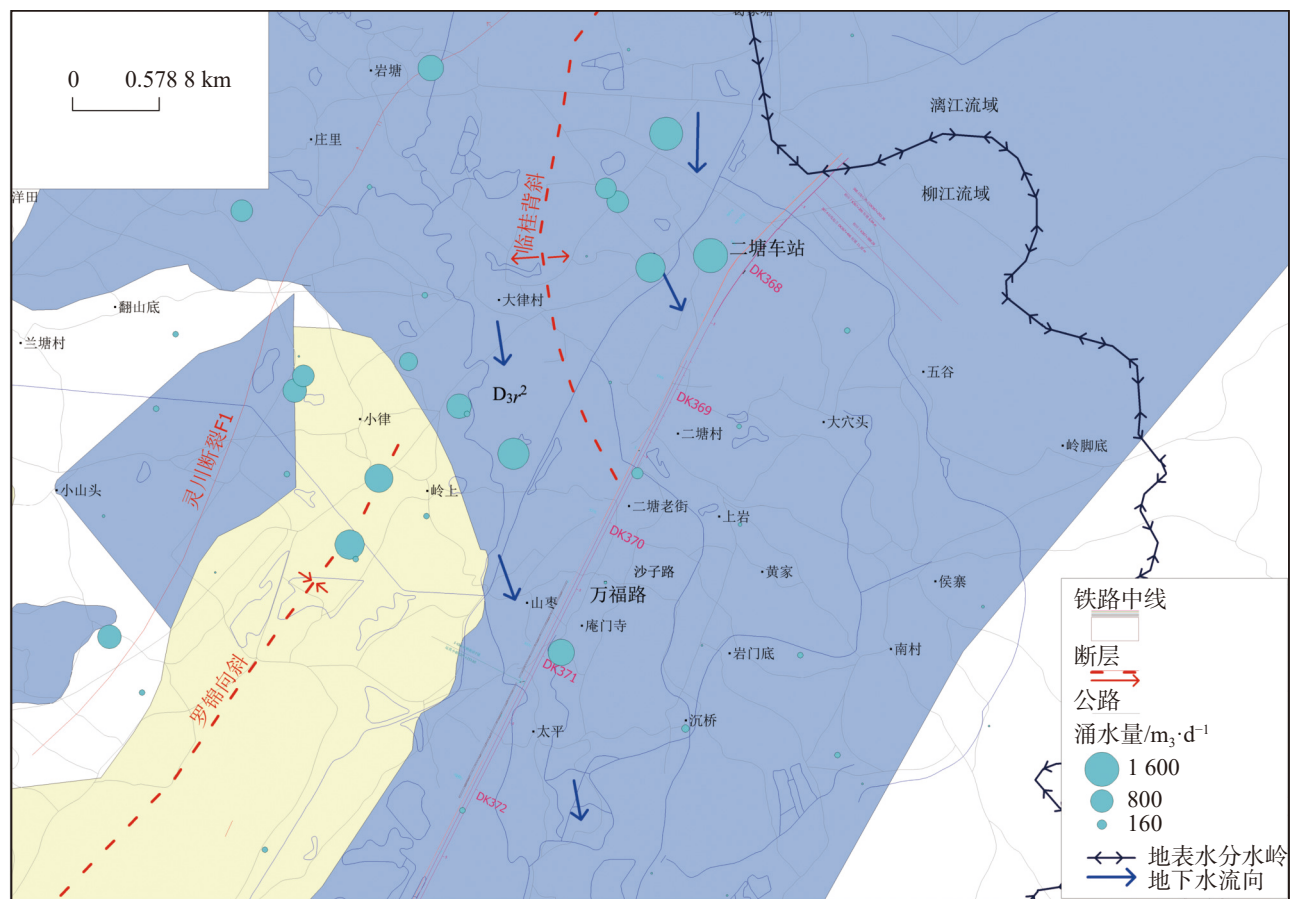


图 2 水文地质图

Fig. 2 Hydrogeological map of the site

②人工开采及建筑基坑排水。如万福路下穿铁路抽水泵站、饲料厂和滑石厂的地下水开采井, 2019年碧桂园、锦绣华宇楼盘的基坑, 基坑抽水距离铁路分别是 100 m、300 m。

影响地下水富集的因素主要有补给条件、储水空间。其中, 储水空间受岩溶发育程度制约, 在构造带、可溶岩与非(次)可溶岩接触带岩溶强烈发育, 富水性强。如岩溶发育以裂隙管道型为主的临桂背斜, 富水性为中等—丰富; 罗锦向斜核部发育于石炭系下统岩关组泥灰岩中, 岩溶空间以裂隙为主, 岩溶发育程度相对较弱, 富水性为中等—贫乏。

1.4 岩溶发育特征

场地为裸露型及覆盖型岩溶区, 岩溶主要发育于泥盆系融县组上段灰岩中(D_3r^2)。裸露型岩溶为峰丛、孤峰地貌类型, 区内分布较多的脚洞及地下河出入口(图 3), 可见高度大于 10 m 的水平溶洞及洞穴系统(图 4)。

根据水文勘探资料统计(表 1), 钻孔遇洞率高

达 72%。溶洞规模大小不一, 一般为 0.6~5 m, 个别大于 6.0 m, 单孔(井)涌水量较大, 一般为 500~1 500 $m^3 \cdot d^{-1}$, 其中涌水量大于 1 000 $m^3 \cdot d^{-1}$ 的钻孔比例高于 38%。

区内收集了 20 个深度超过 80 m 深的钻孔(表 2), 最深的钻孔 201.75 m, 临桂储水盆地内地下岩溶发育程度随深度增加而逐渐减弱。地面以下 30 m 为岩溶最发育段, 且相当大部分溶洞为充填、半充填状态, 40~60 m 为岩溶较发育段, 且 70~80 m 间岩溶发育程度相对较弱。

2 岩溶塌陷特征及成因分析

2.1 铁路沿线岩溶塌陷特征

自 1990 年以来, 二塘车站所处的临桂区塌陷事件不断, 达 67 起(图 5), 塌陷坑主要出现在施工基坑和抽水井附近 300 m 范围内。二塘车站线路内从 1996 年开始出现塌陷坑, 至 2016 年塌陷坑合计 27 起。从 2010 年始, 二塘车站至万福路南线路开展

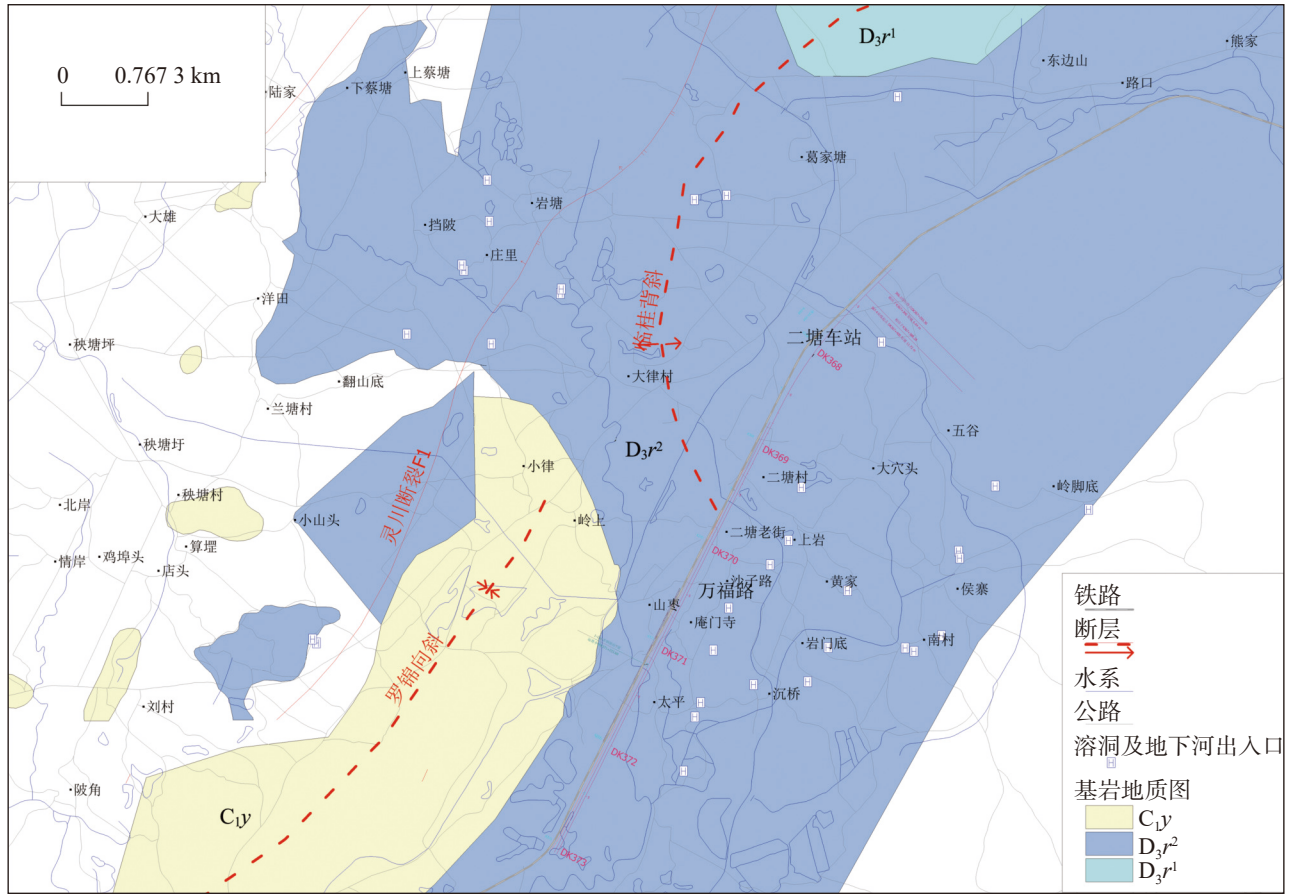


图 3 场地内人可进入的溶洞分布图
 Fig. 3 Distribution map of accessible caves



图 4 溶洞照片
 Fig. 4 Cave photo

悬挂式帷幕注浆整治工程, 2014 年后岩溶塌陷主要出现在二塘车站至二塘老街区段, 塌陷坑多出现在雨季, 直径小于 3 m, 深度最大 10.7 m(图 6)。

2.2 地质结构

覆盖型岩溶区第四系土层主要由残积红黏土组成, 土层厚度变化大, 平均厚 8 m, 最浅 3 m, 最深 35 m, 主要分布在 5~10 m(图 7), 局部发育深溶槽。

第四系土层下伏岩层岩溶发育。据二塘车站龙门桥勘察资料, 59 根桩中有 54 根桩遇溶洞, 钻孔遇溶洞总高 468.3 m, 溶洞占场地桩长的 31%; 设计桩长变更大于 10% 的桩有 13 根, 大于 30% 的有 3 根桩, 其中下伏溶洞单个最高达 24 m, 最深的桩 2#-1 达 43 m。2020 年线路注浆段长度 1 200 m, 上行、下行线注浆钻孔合计 2 450 个, 孔深 25 m, 遇溶洞钻孔 920 个, 88% 的溶洞为黄色软流塑状黏土充填、半充填, 部分充填物含粉砂。线路内溶洞顶板埋深平均

表 1 调查区地下岩溶发育特征表

Table 1 Development characteristics of underground karst in the survey area

区段	统计孔数/个	遇洞孔数/个	钻孔遇洞率/%	有水孔数/个	平均有水钻孔 出水量/L·s ⁻¹	充填、半充填溶洞 充填率/%	空洞率/%
临桂城区	25	18	72	18	11	70	26.3

表 2 岩溶发育深度特征统计表
Table 2 Statistics of karst development depth

钻孔编号	钻孔深度/m	孔口标高/m	初见水位/m	稳定水位/m	土层厚度/m	裂隙发育段/m
zk2-1	80	160.93	1.16	1.98	3.7	4.8~9.9, 68.9~71
zk6-1	80	171.99	1.8	1.63	1.9	40~54.3, 63.2~69.8
zk7-1	80	158.21	1.1	3.66	1.2	1.2~38.4
zk7-2	32.3	161.62	2.9	2.9	4.5	4.5~14, 28.3~30.1
zk9-1	80	159.91	2.76	2.8	2.5	13.7~18.4, 34.6~37.2, 41.9~46.6
zkD-1	80	157.1	1.8	1.67	3.8	11.5~13.8, 19.7~28, 50.2~57.2, 77.3~80
zk9-2	80	158.22	2.33	2.33	6.4	22.6~24.9
zk10-1	80	158.11	0.7	0.7	2.3	27.3~32
zk11-1	80	158.98	1.1	1.1	3.8	7.4~12.7, 17.9~31.4, 39.3~41.3, 48.5~70.6
zk12-3	30	160.13	0.6	0.6	4.6	15.7~17.3
zk12-4	80	151.59	1.91	1.95	3.2	20.2~22.6, 24.9~29.6, 32~43.7, 48.3~50.7
zk13-3	80	155.56	3.03	3.03	4.4	17.2~23.4, 25.5~30.2, 32.8~39.6, 47.5~63.4, 75.8~77.5
zk14-2	80	151.13	0.7	0.7	2	2~28.1, 40.1~63.6, 68.3~70.9
zk15-1	30	163.52	3.5	3.5	7	7~8.5, 10.9~24.9
zk15-4	80	157.85	7.05	6.9	8.4	50~80

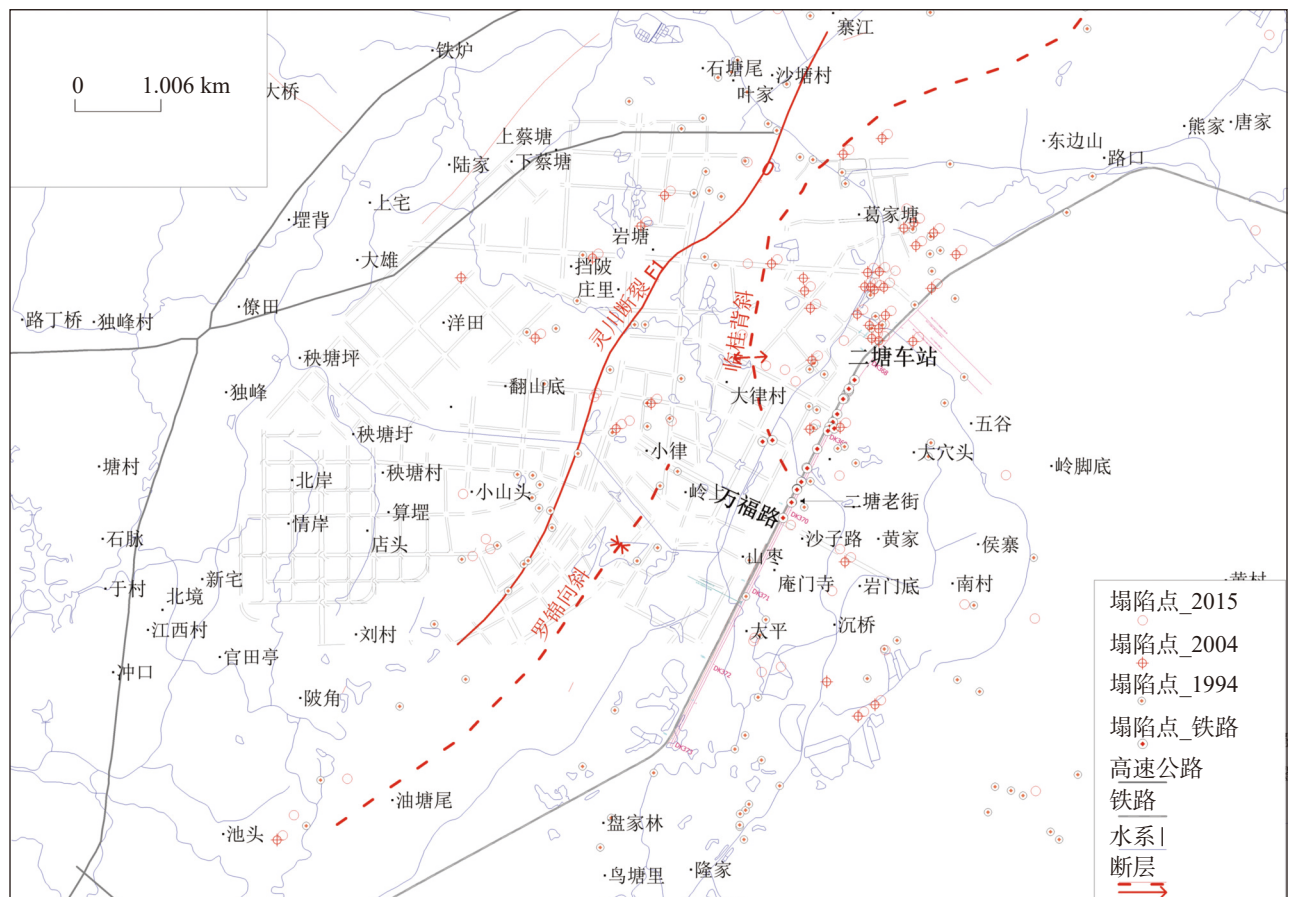


图 5 区内岩溶塌陷分布图

Fig. 5 Distribution map of karst sinkhole pits



A、2012 年 11 月 8 日,二塘站 K368+900 处塌陷坑,宽 1.5 m、长 2.5 m、深 3.5 m。



B、2016 年 11 月 10 日 1 时 59 分,二塘站内 K353+970 处道心内塌陷坑,直径 1.5 m,深 2 m

图 6 铁路线内塌陷坑照片

Fig. 6 Photos of karst collapse pits

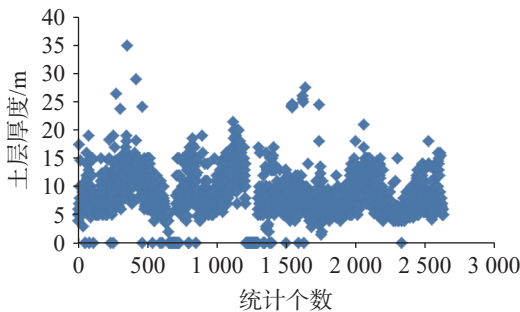


图 7 注浆钻孔土层厚度统计图

Fig. 7 Statistics of Quaternary thickness of grouting drilling

为 13.76 m, 溶洞高度达 5 m, 发育 1~3 层串珠状溶洞。

2.3 地下水动力特征

场地内地下水动态不仅受大气降雨和灌溉渠道渗漏影响,加之受线路附近基坑、厂矿抽排地下水形成局部区域地下水降落漏斗的影响,铁路沿线由北至南存在两个明显的降落漏,即滑石厂和万福路下穿铁路泵站(图 8),影响范围分别为 0.5 km²、0.15 km²,其中万福路泵站的影响直径达 400 m,岩溶地下水位埋深保持在 7.5~10 m,在基岩面以下 3 m 波动。滑石厂地下水长观监测资料显示:岩溶地下水位埋深

1~2.5 m, 水位年变幅 1~3.5 m(图 9), 主要受降雨及周边抽水井(基坑)的影响。

2.4 塌陷成因分析

岩溶塌陷的规模及空间分布与岩溶发育状况、构造特征、第四系覆盖层性状及水文地质条件等因素关系密切。塌陷坑主要分布在施工基坑附近,以塌陷群的形式出现。因此,临桂地区房地产开发等基础工程建设频繁,基坑开挖排水、桩基振动施工影响岩溶地下水,造成基岩面上覆土体的潜蚀,是近年来岩溶塌陷频繁出现的根本原因。

地下水潜蚀形成的土洞一般由水位反复升降引起,分以下几个阶段:

(1)土洞形成、发展阶段。土洞孕育阶段之后,便在岩土体之间形成了细小的空间,为土体的潜蚀、崩解脱落提供了临空面。地下水对隐伏基岩溶槽周围土体浸泡、扰动,使土体发生崩解形成土洞,当水位不断升降变化时,由于渗透、真空吸蚀等作用加速了土洞的向上扩展,周而复始,土洞规模扩大,发展速度进一步加快;

(2)塌陷阶段,随着土洞发展扩大,土洞顶板愈来愈薄,抗塌力愈来愈降低。最后,在土体自重以及其它附加应力作用下,土洞顶板垮塌,形成地面塌陷坑;

(3)调整阶段。塌陷产生后,在各种自然、人力因素影响下,塌陷坑会继续扩展、调整,此外就是由于塌陷坑壁上部坍塌,不断改变塌陷的形态与规模;

(4)休止阶段。经调整阶段后,塌陷的形态、规模逐渐趋向稳定,从而进入休止阶段。有的塌陷成为了漏斗、岩溶潭、消水洞、溶井等;也有的被回填,地表形成洼坑。

地下水潜蚀型塌陷形成的整个过程时间可长可短,长者几年,甚至几十年,短者只需几小时或几分钟。这主要取决于地下水位变幅、频度、土体的崩解速率、土层厚度以及地下岩溶的规模、连通性等。地下水位变幅愈大、频度愈高、土体的崩解速率愈大、土层愈薄、地下岩溶规模愈大、连通性愈好,所需时间就愈短,反之,则愈长。

渗透变形试验获取的临界破坏渗透压力,可以表征基岩面附近土体形成土洞的必要条件,即土洞形成、发展阶段。因此该值可作为该区域岩溶塌陷

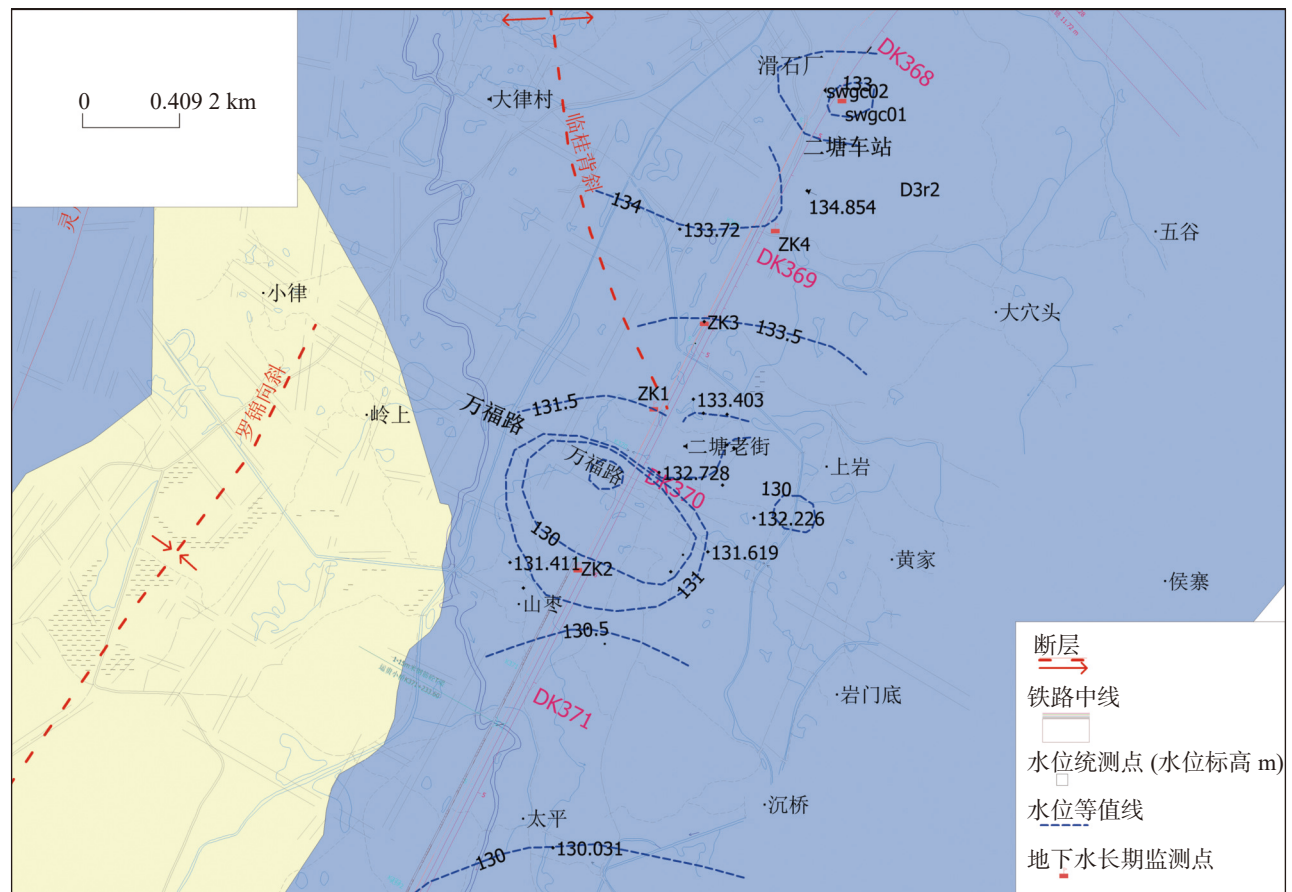


图 8 铁路沿线地下水降落漏斗分布图

Fig. 8 Contour map of karst groundwater along the railway

安全管控的预警,为解决基础工程施工扰动岩溶地下水,造成地下水位突变,引发岩溶塌陷问题,提供了地下水位下降的控制红线。如临桂慧佳华府基坑,基坑抽水前地下水位埋深 1 m,基坑降水至地面以下 6 m,水位短期内下降达 5 m,远超过了该区岩溶土洞形成的条件(1.6~4.7 m),所以在基坑附近 100 m 范围内,出现多个地面塌陷坑。

3 岩溶塌陷防治建议

岩、土、水是岩溶塌陷发生的三要素,因此防治措施应从岩溶地下水的安全降深、第四系土层的抗塌强度及溶洞的注浆三个方面考虑。

3.1 地下水降深安全防控

岩溶地下水降深安全防控就是控制二塘车站周边的工程活动对岩溶地下水的影响,可通过岩溶塌陷动力条件的高频高精度监测进行^[5],一旦发现地下水位下降或突变超过一定预警值^[6-7],可通过行政管理部门对相关的地下工程活动采取停工令,要求采

取止水措施,保障高铁范围内的地下水波动控制在安全范围。目前二塘车站两侧已布置 6 个岩溶地下水气压力监测孔,覆盖高铁沿线长度 2 km(图 8)。

3.2 路基加固

路基的加固主要是增加第四系土层的抗塌强度,对已有塌陷坑、土洞及扰动带采取以下措施:

- (1) 换填法,开挖,回填块石、碎石,形成反滤层;
- (2) 跨越法,对于地下水活动频繁、基岩面起伏较大区域,采用梁板跨越,两端支承在可靠的岩体上;
- (3) 灌注法,把灌注材料通过钻孔进行注浆,其目的是强化土层,可采用旋喷等注浆方法。

3.3 溶洞处置

溶洞是上覆第四系土层发生破坏、运移、堆积的通道和空间,通过溶洞注浆不失为有效的方法。由于区内岩溶含水层厚度大于 100 m,溶洞发育深度达 80 m,目前悬挂式帷幕注浆(基岩面以下浅部溶洞注浆)作为该区高铁运营段近 10 年来的首选处置方法。

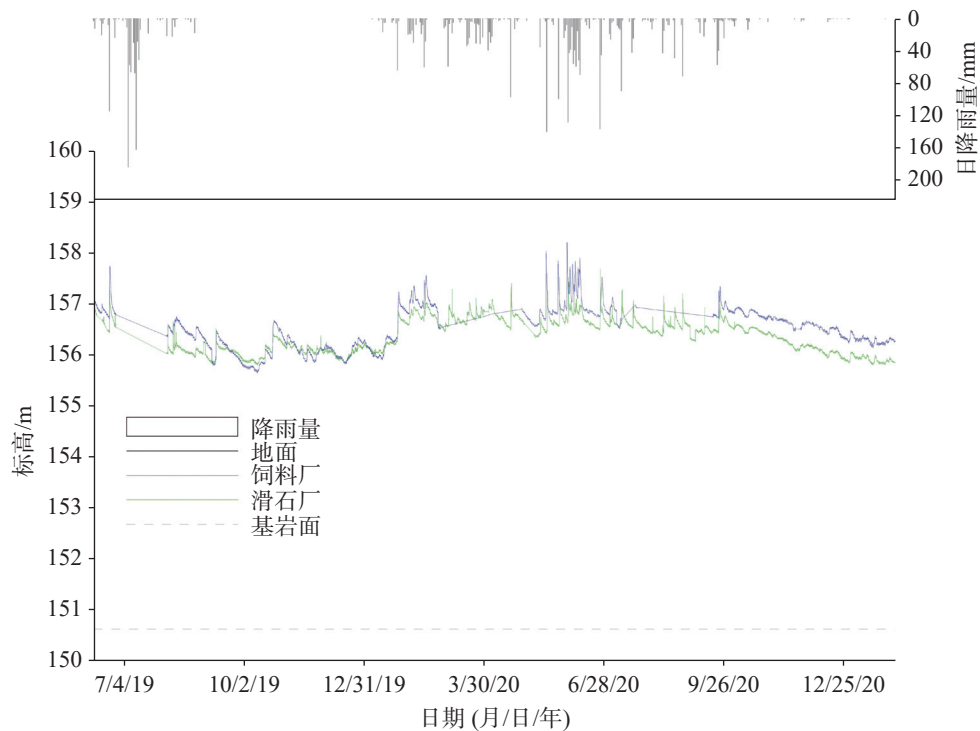


图9 滑石厂、饲料厂监测点岩溶水位动态(2019.7-2021.2)

Fig. 9 Relationship between groundwater-air pressure and rainfall (from July, 2019 to February, 2021)

悬挂式止水帷幕在第四系潜水中应用较为广泛,效果显著^[8-9],在岩溶区的应用实例较少,在贵州、山东等的水库大坝以及芜铜铁路狮子山站有应用效果较好的实例^[10-14],这些成功案例有个重要的特点:注浆期间,岩溶地下水位都处于基岩面以下。万福路铁路注浆段的地下水位由于抽水泵站的控制,也一直在基岩面以下,2014年注浆后效果较好。2019—2021年间二塘车站—二塘老街路段采用2 m间距悬挂式帷幕注浆方式进行塌陷整治,钻孔遇洞率38%,现场许多钻孔淤堵严重。由于高铁仍需通行,不能采用高压置换溶洞充填物(当注浆压力 >0.25 MPa时,铁轨会隆起,影响行车安全)。因此,对于区内地下水位埋深浅并具承压性以及浅部隐伏溶洞88%全充填、半充填的复杂岩溶地质条件,低压注浆浅部溶洞并进行灌浆效果的评价还需深入的研究^[2]。

4 结论

临桂二塘地区处于漓江与柳江流域的分水岭附近,通常岩溶发育会受到一定的限制,但是通过资料收集、野外地质调查、地下水的统测及地下水的高频长观监测数据分析表明,该区岩溶强发育、富水性强,研究主要结论如下:

(1)由于受构造带的影响,该区岩溶发育深度达百米,地下岩溶溶洞规模大并呈串珠状发育;其中,地面以下30 m溶洞最发育,而88%的浅部溶洞为软流塑状黏土全充填或半充填;

(2)该区多处泉水出露,形成地表小溪,为岩溶地下水的排泄区,地下水泉点的出露及径流受临桂背斜构造影响,铁路线路内地下水由北西流向南东。第四系覆盖层为残积红黏土,厚3~35 m,岩溶水埋深浅具承压性;

(3)自2013年临桂新区大开发,人类工程活动(基坑排水)频繁,造成基坑周围塌陷坑频繁出现,所以二塘车站沿线也深受其害。铁路沿线目前已形成两个明显的地下水位降落漏斗区:滑石厂、万福路下穿铁路泵站;

(4)由于万福路泵站控制周边的地下水位在基岩面以下3 m,该段2014年以来悬挂式注浆效果较好,一直未出现新的塌陷坑。所以悬挂式帷幕注浆用于岩溶塌陷处治有一定的条件限制;

(5)对于滑石厂至万福路路段,在隐伏串珠状溶洞发育、岩溶地下水位埋深浅并具承压性、浅部隐伏溶洞高充填率的复杂岩溶地质条件下,叠加高铁运行的限制,软流塑黏土充填溶洞的低压注浆效果不确定性较大,因此建议岩溶塌陷防治措施重点应

放在地下水的安全降深控制、增强基岩面上覆土体的抗塌强度方面;

(6)本文采用的研究方法及其岩溶塌陷防治对策可为同类地区岩溶塌陷成因的细化分析及处置效果评价提供依据。

参考文献

- [1] 蓝天阳. 二塘站路基岩溶注浆的工程实践[J]. 铁道运营技术, 2019, 25(2): 40-42.
LAN Tianyang. Grouting construction of subgrade karst in Ertang Station[J]. Railway Operation Technology, 2019, 25(2): 40-42.
- [2] 杨俊东. 衡柳线二塘站复杂岩溶悬挂式帷幕注浆技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2020(增1): 204-208.
YANG Jundong. Study on hanging curtain grouting technology for complex karst in Ertang Station of Hengliu Railway[J]. Railway Construction Technology, 2020(Supplement 1): 204-208.
- [3] 陈文海, 文江泉, 彭伟. 湘桂铁路提速地段路基岩溶病害注浆整治试验与施工[J]. 路基工程, 2011(3): 205-207+210.
CHEN Wenhai, WEN Jiangquan, PENG Wei. Experiment and construction of karst subgrade grouting treatment in speed raising section of Hunan-Guangxi Railway[J]. Subgrade Engineering, 2011(3): 205-207+210.
- [4] 胡仁强. 湘桂铁路扩能改造工程桂林段路基岩溶注浆处理效果研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
HU Renqiang. Study on karst grouting treatment effect of Xiang-Gui Railway expansion and renovation project in the Guilin section[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [5] 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.
JIANG Xiaozhen, LEI Mingtang. Monitoring technique and application of karst groundwater-air pressure for karst collapse[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(5): 786-791.
- [6] 蒙彦, 郑小战, 祁士华, 雷明堂, 李卓骏, 贾龙. 岩溶塌陷易发区地下水安全开采控制: 以珠三角广花盆地城市应急水源地为案例[J]. 中国岩溶, 2019, 38(6): 924-929.
MENG Yan, ZHENG Xiaozhan, QI Shihua, LEI Mingtang, LI Zhuojun, JIA Long. Safe pumping in areas prone to karst collapses: A case study of the urban emergency water source of the Guanghua basin in the Pearl River Delta[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(6): 924-929.
- [7] 姜伏伟, 张发旺, 柳林, 刘伟, 李亮, 陈航. 南宁地铁施工降水诱发岩溶塌陷条件及安全防护措施[J]. 中国岩溶, 2018, 37(3): 415-420.
JIANG Fuwei, ZHANG Fawang, LIU Lin, LIU Wei, LI Liang, CHEN Hang. Dewatering induced karst collapse conditions and safety prevention and control measures in Nanning subway construction[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(3): 415-420.
- [8] 王代连, 王珽, 张北京. 浅覆盖型岩溶区深基坑涌水的勘察治理: 以桂林市万福路铁路下穿段帷幕灌浆治水为例[J]. 矿产与地质, 2006, 20(6): 693-696.
WANG Dailian, WANG Ting, ZHANG Zhaojing. Reconnaissance and harnessing for water control in basic pit of shallow overburden type karst area[J]. Mineral Resources and Geology, 2006, 20(6): 693-696.
- [9] 张志林, 马涛, 王秀丽, 刘思源. 悬挂式止水帷幕地下水控制方法探讨: 以北京地铁8号线永定门外站为例[J]. 城市地质, 2015, 10(2): 61-66.
ZHANG Zhilin, MA Tao, WANG Xiuli, LIU Siyuan. Discussion on the method about groundwater control with the deaden water purdah above aquifer baseboard: Taking the Beijing Metro Line 8 Yong Ding Men Wai Station as an example[J]. Urban Geology, 2015, 10(2): 61-66.
- [10] 罗成干, 宋满炎, 曾新民. 北江白石窑水电站岩溶坝基防渗处理[J]. 人民珠江, 1999(5): 39-42.
LUO Chenggan, SONG Manyan, ZENG Xinmin. Seepage prevention treatment of karst dam foundation of Beijiang Baishiyao Hydropower Station[J]. Pearl River, 1999(5): 39-42.
- [11] 杨余秀. 贵州上尖坡大坝悬挂式帷幕灌浆施工质量控制要点[J]. 住宅与房地产, 2018(31): 193-194.
YANG Yuxiu. Key points of construction quality control for hanging curtain grouting of Shangjianpo Dam in Guizhou[J]. Housing and Real Estate, 2018(31): 193-194.
- [12] 乔兵, 张大雷, 孙颖. 悬挂式帷幕灌浆在水库加固工程中的应用[J]. 水利规划与设计, 2011(6): 77-79.
QIAO Bing, ZHANG Dalei, SUN Ying. Application of hanging curtain grouting in reservoir reinforcement project[J]. Water Resource Planning and Design, 2011(6): 77-79.
- [13] 李传军, 刘赤明, 范金星. 悬挂式帷幕灌浆在直界水库除险加固工程中的质量控制[J]. 山东水利, 2006(9): 41-44.
LI Chuanjun, LIU Chiming, FAN jinxing. Quality control of hanging curtain grouting in the reinforcement project of Zhijie Reservoir[J]. Shandong Water Resources, 2006(9): 41-44.
- [14] 华丽晶. 芜铜铁路狮子山站岩溶塌陷路基勘察与整治研究[J]. 铁道工程学报, 2014(1): 32-36.
HUA Lijing. Survey and remediation on karst collapse subgrade of Shizhishan station in Wuhu-Tongling Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014(1): 32-36.

Formation mechanism and prevention countermeasures for karst collapse in Ertang railway station, Guilin

LIU Zhaojing¹, JIANG Xiaozhen², FENG Tao³, HUANG Shengping¹, ZHOU Fubiao², YI Xiaojuan³

(1. Construction Management Department of China Railway Nanning Bureau Corporation, Nanning, Guangxi 530029, China; 2. Key Laboratory of Karst Collapse Prevention, Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. No. 2 Railway Engineering Group Co. Ltd., China Railway Group Limited, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract Twenty-seven karst sinkholes had occurred at Ertang railway station, Lingui district, Guilin City in China from 1996 to 2016. This section had been undergone four stages of collapse treatment by curtain grouting of suspension type from 2010 to 2020, during which the spacing of grouting holes had been reduced from 7 m to 2 m, and the grouting depth had been deepened from 10 m to 25 m. During the 10 years, the train speed had been limited at $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ in this section rather than the designed speed of $200 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. However, the karst collapse problem still has been posing a threat to the safety operation of high-speed railway. In this study, the geological background including geological structure and karst hydrogeological condition has been further explored according to high-precision field surveys and data collected at 5-minute intervals by the established long-term monitoring station of karst groundwater-air pressure. Lingui anticline and Sitang Luojin syncline are developed in the area under the influence of northeast Lingchuan fault and Ludiyuan fault. Lingui anticline is C shaped and overturns at Ertang railway station. The Quaternary in this covered karst area is mainly composed of clay. The thickness of the Quaternary varies greatly from 3 m to 35 m, with an average thickness of 8 m. The underlying bedrock is the limestone of Rongxian formation of Devonian system. Due to the influence of structural belt, the depth of karstification in this area is up to 100 meters below the bedrock. The percentage of cavities encountered in drilling is up to 72%, mainly concentrating at 30 m below the ground, and 88% of the karst cavities are fully or partially filled with fluidal plastic clay. The groundwater dynamics in the site is not only affected by the atmospheric rainfall and the leakage of irrigation channels, but also affected by the pumping of groundwater from the foundation pits and factories near the railway. Two groundwater cones of depression have been formed from north to south along the railway. According to the analysis of geological conditions of karst sinkholes and with the development of real estate in Lingui area, drainage from foundation pits and factories has affected the karst groundwater, causing the failure of the overlying soil on the bedrock surface.

Generally, the prevention measures for karst collapses should be considered from three aspects, control of karst groundwater, the collapse resistance strength of Quaternary and the grouting of karst cavities. Under complex conditions involving shallow buried depth of karst groundwater borne with pressure, high cavity-filling rate and limited grout pressure, low-pressure grouting of shallow karst cavities and the evaluation of grouting effect may be faced with many challenges. Countermeasures for collapse prevention are also proposed in this study: strengthening the impermeability of the overlying soil on the bedrock surface through grouting; controlling the drawdown of groundwater in a safe way. At present, 6 crust groundwater-air pressure monitoring boreholes, covering a length of 2 km along the high-speed railway, have been arranged on both sides of Ertang railway station.

Key words karst collapse, factor, prevention countermeasure, controlling drawdown of groundwater, Ertang railway station

(编辑 张玲 杨杨)