

张可能,张岳,廖阳,等. 贵阳某地铁车站岩溶发育特征及突水模式分析[J]. 中国岩溶, 2018, 37(2): 300-306.
DOI:10. 11932/karst20180218

贵阳某地铁车站岩溶发育特征及突水模式分析

张可能^{1,2}, 张岳³, 廖阳^{1,2}, 万浩然^{1,2}, 许培浩⁴, 张云毅^{1,2}

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

2. 有色金属矿产预测与地质环境监测教育部重点实验室(中南大学), 长沙 410083;

3. 中铁二十四局集团南昌铁路工程有限公司, 南昌 330002;

4. 贵阳市城市轨道交通有限公司, 贵阳 550081)

摘 要:岩溶可诱发基坑涌水、涌泥等灾害, 给在富水岩溶区及断层破碎带区域施工的地铁工程带来诸多难题。因此, 调查车站区域岩溶发育特征, 分析突水模式, 对车站基坑的设计和工程施工具有重要的指导作用。文章以贵阳某地铁车站深基坑岩溶涌水治理工程为背景, 采用现场调查及理论分析相结合, 借助三维地质模拟软件, 对该地铁车站的岩溶发育特征和涌水条件进行系统分析, 总结出基坑岩溶发育特征及涌水突水模式, 建立了岩溶、断层破碎带与地铁车站空间关系的三维地质模型。对类似地铁车站岩溶水文地质勘察及涌水防治方案的设计和施工具有参考作用。

关键词:地铁工程; 岩溶; 发育特征; 突水模式; 三维地质模型

中图分类号: P642. 253

文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2018)02-0300-07

0 引 言

岩溶是水动力对可溶性岩石的化学溶解作用所形成的地表和地下的各种景观与现象, 亦称喀斯特^[1], 水不断冲蚀裂隙与管道, 裂隙与管道得以扩展变大, 从而形成洞穴。管道及洞穴在水流的不断冲蚀下继续扩展, 造成上部岩土体的重力崩塌, 有的可直达地表; 可溶性岩石在地下形成复杂贯通的岩溶管道系统, 在地表塑造出独特的喀斯特地貌景观, 形成独特的水文地质特征^[2]。

以往对岩溶发育规律研究较多的是区域性的, 针对工程建设影响范围内的岩溶发育规律研究较少, 在实际工程中往往对局部地质体的工程性质更加关注, 区域岩溶调查范围较广泛, 不能很好地反映建设场地的岩溶类型、蓄水构造、垂直渗流带、水平径流带的分布位置及特征^[3], 无法准确预测某一具体部位, 如地

铁车站通过地段, 施工过程中可能发生的涌水段、涌水点的具体位置以及对工程的危害程度。对于基坑岩溶涌水灾害, 经常是等它发生后才采取相关的处治措施, 因而造成施工进度的严重滞后及建设成本增加^[4]。因此在地铁基坑开挖前, 应详细查明场地区域内地层岩性、构造、水文地质条件及周边建筑物类型、分布状况等具体情况, 为基坑开挖及支护设计提供依据, 因地制宜的进行水文地质的勘察工作, 可采用瑞雷波探测^[5]技术, 探测建设场地岩溶空间分布规律; 在进行支护桩施工时, 记录清楚钻孔遇溶情况, 再结合地勘及物探资料, 分析场地内岩溶发育特征及控制因素, 制定科学合理的岩溶地下水处治方案, 减少岩溶地下水对地铁建设造成的影响^[6]。

本文依托贵阳某地铁车站深基坑岩溶涌水处治工程, 通过对该地铁车站的岩溶发育特征和涌水条件

资助项目: 贵州省 2016 年建设科技计划项目“富水岩溶和断层破碎带城市地铁车站深基坑岩溶水处治关键技术研究”

第一作者简介: 张可能(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程基础理论、设计和施工技术研究和教学工作。E-mail: ken@mail.csu.edu.cn。

收稿日期: 2017-03-04

的系统研究,建立岩溶、断层破碎带与地铁车站空间关系的三维地质模型,对类似地铁车站涌水防治方案的设计和施工提供参考。

1 工程概况

贵阳某地铁站深基坑处于泥质石灰岩、白云岩富水岩溶区,岩溶发育强烈,且照壁山断层破碎带横穿车站基坑,环境地质条件复杂。该车站长 180 m,设计开挖深度 24~28 m。2014 年 2 月正式开始施工,于 2015 年 3 月根据施工具体情况,将北侧围护结构由间隔桩调整为全套管咬和桩;至 2015 年 11 月,基坑开始明挖,挖至 17 m 时出现涌水,最大出水量达 $8\,000\sim 10\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,严重影响施工和工期。

2 研究区地质概况

2.1 地质构造

贵阳市地处贵州省中部,云贵高原的东斜坡^[7]。原有地面南边低于北边,东边高于西边。

查阅区域地质资料(贵阳市中心区基岩地质图 1:10 000)(图 1),并参考前期勘察成果资料,研究站点在区域上位于南北走向的贵阳向斜^[9]的轴部东侧,处于喷水岩溶浅洼地,是贵阳溶蚀盆地核心地段,属于贵阳规模最大的富水区域^[10]。基坑内地层为三叠系安顺组和松子坎组地层,并有自师大照壁山的压扭性断层(F15,照壁山断层)通过,该断层走向为北东—南西向,在所研究基坑内变为近东西向。根据现场开挖及涌水情况,断层北盘富水性较好,为富水区域,南盘富水性较差,判断该断层为阻水断层。

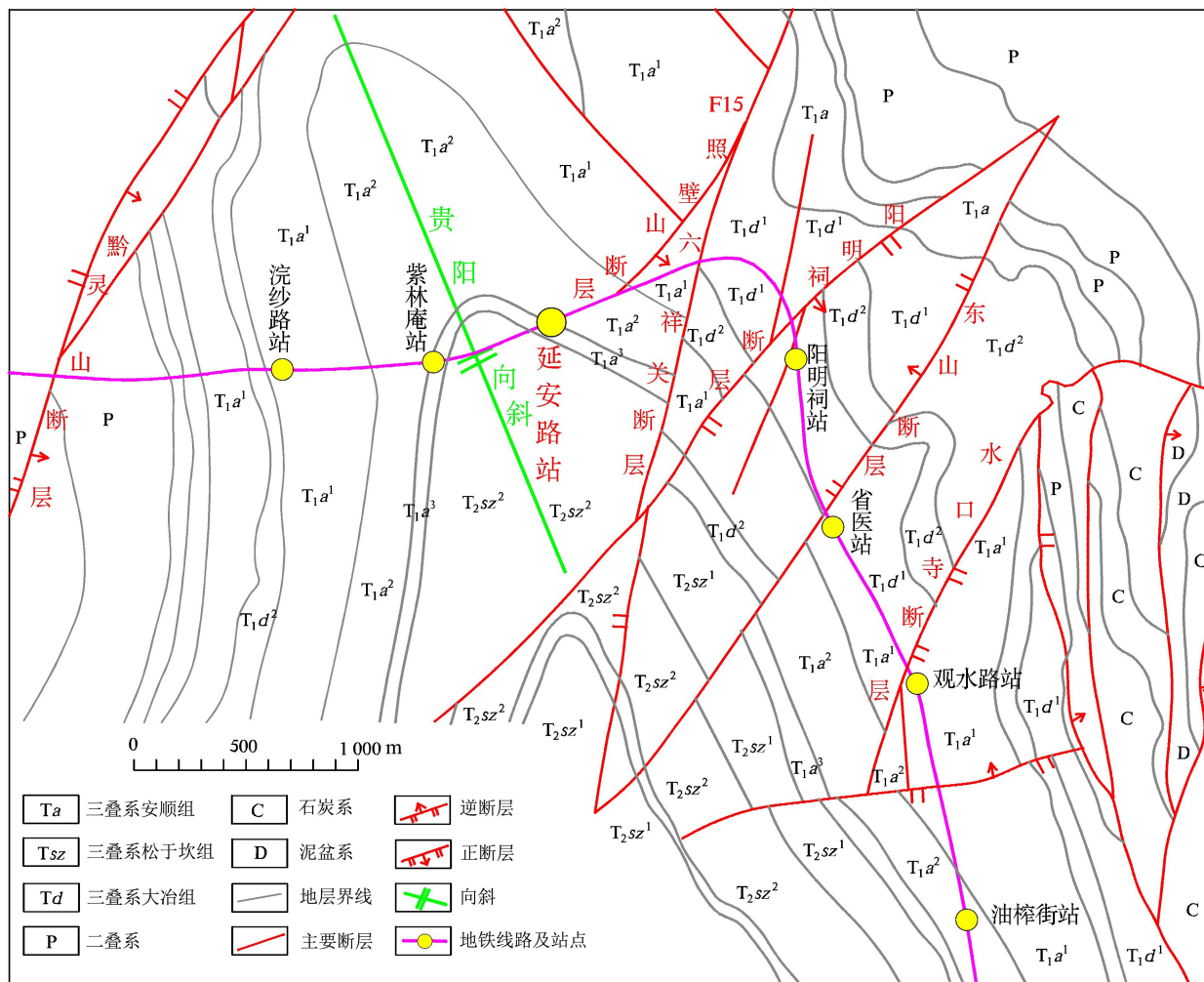


图 1 区域地质构造图

Fig. 1 Regional geological structure map

2.2 水文地质特征

根据地层岩性及含水介质类型^[10-11],研究站点地下水可分为碳酸盐岩类岩溶水、碎屑岩类基岩裂隙水和第四系松散岩类孔隙水,结合研究站点区域构造、地层岩性及泉点排泄的特点可将场地划分为2个水文地质单元^[11-12],即断层北面水文地质单元和断层南面水文地质单元,图2为基坑典型地质剖面。

2.2.1 断层北面水文地质单元

以照壁山断层面以北为界构成独立的水文地质单元,含水层主要为三叠系安顺组白云岩,岩溶较发育,地下水丰富,该区域出露泉为薛家井,枯水期流量 $4.1\sim 4.5\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,富水性强,车站基坑开挖到该区域遇地下水,水量大,对基坑施工的影响较大。

2.2.2 断层南面水文地质单元

以照壁山断层段盘面以南为界构成独立的水文地质单元,含水层主要为三叠系松子坎组泥质白云岩、泥质石灰岩。其地下水的富水性和岩溶发育程度相对北盘都较弱,基坑开挖到该区域遇地下水,水量较小,对车站基坑开挖施工的影响较小。

3 岩溶发育特征

3.1 岩溶发育总体特征

所述车站修建在富水岩溶及断层破碎带发育的地层中,地层岩性为泥质石灰岩、白云岩,加之F15压扭性正断层横穿车站基坑,工程范围内岩体节理、裂隙、岩溶管道极其发育。

岩体相对薄软的部位:节理、裂隙、岩溶通道等都是地下水主要的流经通道^[13]。影响岩溶发育的基本因素有地层岩性、地质构造、地形地貌等,其中地层岩性对岩溶具体形态的影响最为突出^[14]。由于岩体中节理裂隙、岩溶通道发育具有不均匀性和随机性等特点,造成地下水网络复杂且不均匀,在岩体中地下水较为聚集的区域,将导致地层局部承受较高的水压力,当区域地层强度达不到抵抗高水压的强度要求时,就将导致基坑涌水灾害。

根据地质资料、现场勘察、瑞雷波探测和底板钻孔等多手段的资料综合分析,该车站基坑处于浅层岩溶覆盖区^[15],基坑内岩溶强烈发育,多以尺度不一的岩溶裂隙和管道形式存在。

(1)基坑建设场地处于可溶岩分布地段,岩溶形态以为溶洞、溶槽、石芽为主,溶洞、溶槽主要发育在岩面及负岩面以下 $1.0\sim 6.0\text{ m}$ 深度范围,强烈的溶

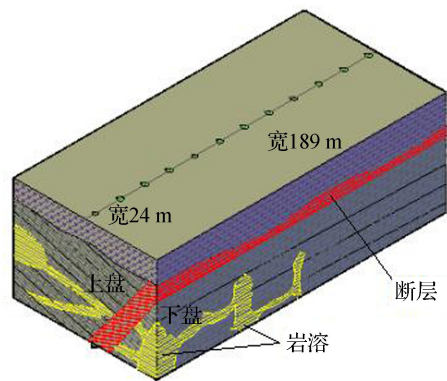


图2 基坑典型地质剖面图

Fig. 2 Typical geological section of foundation pit

蚀作用造成基岩面凹凸不平,局部岩体呈悬臂状产出,溶蚀裂隙与溶洞主要沿层面发育;

(2)断层北盘岩溶发育程度比南盘强烈;

(3)浅部岩体中岩溶洞隙较多,深部岩体中洞隙数量逐渐较少,即垂向上具有上多下少的特征;

(4)竖向溶蚀与侧向溶蚀的现象交织共存,溶沟、溶槽常与侧壁岩体中的溶洞、溶隙共存,在溶蚀沟槽的旁侧出现悬臂状岩体;

(5)基坑内浅部洞隙数量多,但规模均较小,深部洞隙数量虽不多,但溶隙规模相对较大;

(6)基坑内岩体中的岩溶洞隙,埋藏较浅者一般都有黏土和碎石充填,部分发育较深的洞隙是半充填和无充填的空洞;

(7)基坑中的岩溶现象除溶洞和裂隙以外,还有针状和蜂窝状溶孔,由于溶孔的发育,导致地下水网络系统相互连通,造成岩层整体强度降低,透水性增大;

(8)基坑勘察深度范围内岩溶主要分布在海拔 $1\,023.2\sim 1\,055.6\text{ m}$,推断岩溶发育厚度为 32.4 m ,溶蚀基准面为海拔 $1\,023.28\text{ m}$,推断基坑内的岩溶主要呈管道连通。根据推断结果基坑内 61.3% 的岩溶位于基坑结构底板顶面以上, 38.7% 的岩溶位于基坑结构底板顶面以下。

3.2 岩溶地下水通道

根据岩溶地下水理论分析,岩溶地下水通道可分为富水岩溶管道、岩溶裂隙通道、断层岩溶通道、地下河通道、层间岩溶通道、覆盖岩溶通道和隐伏岩溶通道等^[16]。结合基坑现场开挖情况,贵阳某地铁站基坑内岩溶地下水通道主要有以下几种类型:

(1)富水岩溶管道

基坑内断层破碎带、白云岩和泥质石灰岩岩层的层面在地下水的溶蚀和侵蚀作用下,经过漫长的地质作用,形成了大规模的岩溶地下管道网络(图 3),并且网络系统随着时间的发展在不断地演变和交替。



图 3 溶槽发育带

Fig. 3 Grooves development zone

(2) 岩溶裂隙通道

岩溶地下水沿着岩层层面的节理裂隙流动,在地下水的溶蚀作用下,节理裂隙不断扩大,形成岩溶裂隙通道。岩溶裂隙通道在岩层中分布较均匀,没有大的岩溶管道和溶洞^[17]。

(3) 富水断层破碎带

基坑内形成的断层破碎带(图 4)为压扭性正断层,断层南盘岩层较破碎,北盘岩溶较南盘发育。富水断层不仅是岩溶地下水的富集空间,更是断层围岩中基岩裂隙水和岩溶水的蓄水通道。



图 4 基坑内出露断层

Fig. 4 Fault section in the foundation pit

所述基坑内的断层破碎带是南北两盘水文地质单元的水力联络通道,当基坑开挖揭露断层时,在水头压力作用下,软弱的断层破碎带发生突水灾害。

(4) 层间岩溶通道

在所研究基坑内,白云岩层面、泥质白云岩与泥质石灰岩互层,层面间岩溶溶蚀后形成层间岩溶通道^[16-17]。这种通道的厚度有限,它的顶板及底板为相对隔水的泥质石灰岩与泥质白云岩。

3.3 三维地质模型

根据文献资料,在前期勘察报告及瑞雷波探测的基础上,结合施工过程中的钻孔记录及开挖揭露具体情况,掌握车站的实际地质资料,利用三维数值模拟软件建立基坑内松子坎组一段($T_2s_{z^1}$)、安顺组下统三段(T_1a^3)、照壁山 F15 断层破碎带及溶洞分布的地质模型(图 5,图 6)。

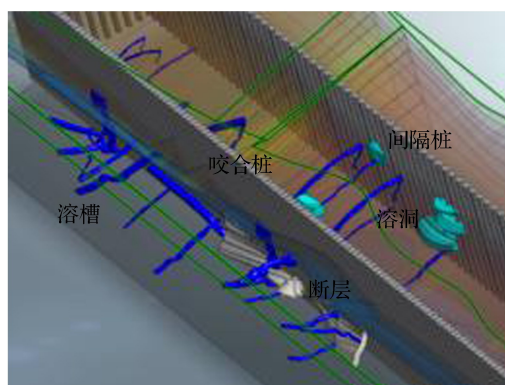


图 5 基坑区域地质模型

Fig. 5 Regional geological model of foundation pit

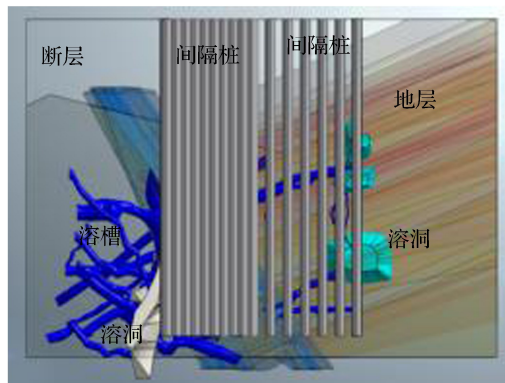


图 6 基坑区域地质模型(E-W)

Fig. 6 Regional geological model of foundation pit(E-W)

基坑内岩溶管道纵横交错,管道大小不一,充填物性质差别较大。南北盘岩层的岩溶管道通过断层破碎带形成地下水流通的联系通道,基坑北侧由于全套管咬合桩的存在,岩溶管道被分割拦截,地下水流速降低,但地下水流通道并未被桩体完全封闭,断层破碎带揭露过程中,基坑发生了涌水涌泥,给基坑的正常施工带来严重的影响。

4 基坑涌水灾害分析

4.1 涌水过程

在车站基坑实际开挖过程中,涌水现象主要以开挖揭露和钻孔揭露两种方式发生。

4.1.1 开挖揭露

在基坑开挖或钻孔施工过程中,炮机碎岩时的震动,以及潜孔钻机、风钻钻孔过程中的高压风,都对地层有一定程度的扰动,使得地下水通道内的高压水冲开薄弱的岩溶填充物涌出,造成涌水突泥(图 7)。其表现形式为先涌出小股的流塑状黏土,如果涌泥未被及时发现,高压水会继续冲洗过水通道,将通道内的黏土、细砂冲出,随着过水通道内阻水的岩溶填充物越来越少,出水量将越来越大,涌水也由浊变清。



图 7 溶洞涌水

Fig. 7 Karst water gushing

如在基坑 13# 和 14# 临时立柱桩南侧,距基坑支护桩 1.5 m 处凿岩过程中,震动较大,岩溶通道中的软弱岩溶填充物在压力水作用下形成裂缝,造成涌水,首先涌出流塑黄泥,随着过水通道不断被洗通,涌水点形成直径约 15 cm 的空洞,出水量达 $75 \text{ m}^3/\text{h}$;另外,在 34# 抗拔桩开挖至 5.4 m 时,桩侧壁揭露出一个直径约 30 cm 的溶洞,填充物为黏土、碎石和水的混合物,揭露溶洞时,洞口有流塑黏土涌出,半小时后抗拔桩因积水过多,无法施工,必须用抽水泵辅助排水。

4.1.2 钻孔揭露

第二种是钻孔过程中,地下水通道内的高压水从钻孔中涌出。其一是钻机直接打到断层破碎带或者岩溶裂隙的过水通道,水直接从钻孔内涌出(图 8);

其二与开挖揭露相似,钻孔打到断层破碎带或富



图 8 钻孔涌水

Fig. 8 Water gushing when drilling

水岩溶通道附近,钻孔内的薄弱地层无法承受临近地下过水通道内水的压力时,钻孔内空腔与地下水之间的软弱黏土便被挤出,发生涌泥现象。此时,钻孔内的黏土像牙膏一样被挤出,出泥时间 5~20 min 不等,随后黏土中的含水量越来越高,变成泥水涌出。当通道完全洗通之后,涌水变清,出水量逐渐稳定(图 9)。



图 9 涌水颜色变化

Fig. 9 Color changes of water gushing

4.2 涌水水力特征

4.2.1 突发性

基坑涌水毫无预兆,基坑内岩溶发育,开挖过程中随时有涌水的可能,且涌水量由小变大的缓冲时间较短,大大增加了基坑涌水的不可控性。

4.2.2 富水性

涌出的岩溶地下水水量较大,且出水浑浊,携带大量泥砂,这充分体现了岩溶的富水性。

4.2.3 高压性

基坑内发生突水灾害,往往富含泥砂,且能喷射一定距离,表现出岩溶地下水的高压特点。

4.2.4 破坏性

破坏性主要体现在两个方面,第一是基坑涌水量大,影响基坑内施工人员安全及设备的正常施工;第二种潜在破坏性较大,发生突水灾害时,涌水携带大量泥砂,造成地下水位下降及岩溶地下空洞,引起岩溶地面塌陷^[18-19],严重威胁基坑围护体系及周边生态环境的安全。

4.3 涌水充填物特征

结合现场涌水突泥现象分析,基坑内岩溶充填物主要有细砂与黏土。细砂粒径小,工程实践表明,岩溶基坑施工中,充填物为细砂型的岩溶容易发生涌水、涌砂现象;基坑内揭露较多黏土型全充填溶洞,黏土为软塑—流塑状态,工程性质较差,施工过程中一旦揭露此类岩溶充填物,极易发生涌水突泥灾害。

4.4 涌水模式分析

岩溶突水、突泥(砂)是富水岩溶地区深基坑施工中常见的地质灾害^[20],给基坑的正常施工与安全生产造成工程进度缓慢,危机施工人员及设备安全等危害。本文所研究的地铁深基坑位于富水岩溶及断层破碎带等地质条件复杂区域,其涌水模式为渗漏型涌水、岩溶管道涌水、阻水断层揭露型和水力劈裂型。

4.4.1 渗漏型

渗漏涌水在基坑侧壁上较为常见。基坑位于地下水位影响带内,岩层为缓慢流渗流系统^[21]。由于水位较高,地下水在支护桩侧壁汇集成股或点流下或滴落,一般情况下基坑排水压力不会受到很大的影响,且支护桩也不会产生很大的水压力,渗漏型地下水多为静储量类型^[22],随着水流不断滴落,排水量逐渐降低。

4.4.2 岩溶管道揭露型涌水

这种涌水方式在富水岩溶区的深基坑突水中最为常见。当富水地下岩溶管道网络被揭露时^[23],地下水将从揭露的岩溶管道涌入基坑内。如果揭露的富水岩溶管道与上部覆盖层的土层相连通,大量洞隙充填物和上覆土体将会涌入基坑内,造成基坑突泥灾害,甚至引发岩溶地面塌陷。

4.4.3 阻水断层揭露型涌水

阻水断层在调控地下水方面具有重要作用^[23-24]。本次施工基坑中线附近发育一条阻水断层,由于断层的分割作用,南北两盘的水文地质条件差异较大,两盘存在巨大的水头差。当施工揭露断层时,断层破碎带南北盘的两个水文地质单元被联通,

在水头差的作用下,岩溶地下水携带大量泥砂涌入基坑,破坏基坑支护结构、阻碍正常施工,威胁施工人员安全,造成工期严重滞后。

4.4.4 水力劈裂型

基坑开挖后,高水头压力管道或裂隙与基坑之间的隔水岩层被清除,即管道或裂隙与基坑之间的水力屏障消失,岩溶管道或裂隙中岩溶填充物,在水头压力作用下产生劈裂,形成过水通道,从而使水头压力得到释放^[25]。

5 结 语

岩溶涌水、突水灾害具有突发和难以预见等特点,基坑施工前很难确定具体的突水部位。因此,施工时应严格按照相关规范进行场地岩溶勘察,查明基坑范围内岩溶强烈发育区域,在基坑施工过程中对岩溶强烈发育区域进行超前地质探测和预报,加强物探工作,如利用瑞雷波探测等,再结合勘察钻孔及探测资料初步构建基坑地质模型,并在施工中逐步完善。

通过对基坑岩溶涌水特征、岩溶地下水通道及涌水模式、机理的分析,确定基坑施工过程中可能出现的突水模式,采用合理的基坑支护方式,防治岩溶突水、突泥灾害,最大可能地降低突水等灾害的不良影响,确保工程质量及按时修建完成。

参考文献

- [1] 卢耀如. 岩溶:奇峰异洞的世界[M]. 暨南大学出版社 清华大学出版社, 2005.
- [2] 束龙仓, 范建辉, 鲁程鹏, 等. 裂隙管道介质泉流域水文地质模拟试验[J]. 吉林大学学报(地), 2015, 45(3): 908-917.
- [3] 金新锋. 宜万铁路沿线岩溶发育规律及其对隧道工程的影响[D]. 北京:中国地质科学院, 2007.
- [4] 金圣杰. 三都隧道施工涌水量的动态预测研究[D]. 成都:成都理工大学, 2012.
- [5] 杨威. 瑞雷波在岩溶勘察中的应用研究[D]. 长沙:中南大学, 2012.
- [6] 廖景. 岩溶地层对地铁工程影响分析与处理[D]. 广州:华南理工大学, 2006.
- [7] 陈起伟, 熊康宁, 兰安军. 岩溶地区水土流失遥感监测研究:以贵州省贵阳市为例[J]. 兴义民族师范学院学报, 2013, 31(1): 10-13.
- [8] 李兴中, 徐际鑫, 李双岱. 贵阳地区岩溶水文地质特征[J]. 中国岩溶, 1985(z1): 72-80.
- [9] 张罗致. 贵阳市轨道交通1号线主要水文地质问题分析[D]. 成都:成都理工大学, 2011.

- [10] 何宇彬,邹成杰. 中国南北方喀斯特水特征对比[J]. 中国岩溶, 1996,15(3):259-268.
- [11] 王伟. 关于贵州地下水类型和含水岩组划分及其与地下水资源量计算关系的思考[J]. 贵州地质, 2012,29(2):104-107.
- [12] 曾红彪,邵莲芬,余宏明,等. 贵州修文县陶家龙潭水源地水文地质特征[J]. 长江科学院院报, 2016,33(8):22-27.
- [13] 郭娣. 西南岩溶山区汇水条件及其对越岭隧道涌突水的控制作用[D]. 成都:成都理工大学, 2009.
- [14] 李扬红. 五指山隧道岩溶水文地质特征及涌水原因研究[D]. 成都:成都理工大学, 2010.
- [15] 罗小杰,罗程. 覆盖型岩溶地面塌陷综合地质预测与危险性评估[J]. 中国岩溶, 2016,35(1):51-59.
- [16] 林传年,李利平,韩行瑞. 复杂岩溶地区隧道涌水预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008,27(7):1469-1476.
- [17] 韩行瑞. 岩溶水文地质学[M]. 北京:科学出版社, 2015.
- [18] 赵博超,朱蓓,王弘元,等. 浅谈岩溶塌陷的影响因素与模型研究[J]. 中国岩溶, 2015,34(5):515-521.
- [19] 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.
- [20] 孙锋,滕柯延,赵雷,等. 承压水岩溶隧道突水机理细观模拟研究[J]. 施工技术, 2015,44(17):104-108.
- [21] 何世秀,胡其志,庄心善. 渗流对基坑周边沉降的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2003,22(9):1551-1554.
- [22] 高钟. 有关地下水资源概念的统一问题[J]. 工程勘察, 1984(4):72-74.
- [23] 王建秀,杨立中. 大型地下工程岩溶涌(突)水模式的水文地质分析及其工程应用[J]. 水文地质工程地质, 2001,28(4):49-52.
- [24] 孟陆波. 隧道超前地质预报技术与计算机辅助预报系统研究[D]. 成都:成都理工大学, 2009.
- [25] 叶英. 岩溶隧道施工超前地质预报方法研究[D]. 北京:交通大学, 2006.

Analysis on karst development and water burst in a subway station

ZHANG Keneng^{1,2}, ZHANG Yue³, LIAO Yang^{1,2}, WAN Haoran^{1,2}, XU Peihao⁴, ZHANG Yunyi^{1,2}

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha, Hu'nan 410083, China;

2. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring
(Central South University), Ministry of Education, Changsha, Hu'nan 410083, China;

3. China Railway 24th Bureau Group Nanchang Railway Engineering Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 330002, China;

4. Guiyang Urban Rail Transit Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract Water and mud burst occurs commonly in karst region, which causes many problems to the engineering construction of subway station in the water-rich karst area and the fault rupture zone. It is of great importance to the design and construction of subway station excavation by investigating of the characteristics of the karst development and water burst. In this paper, the treatment of karst water burst in the deep pit of a subway station in Guiyang is presented. Based on site investigation and theoretical analysis, the characteristics of karst development and water burst in the subway station was studied and summarized with the aid of 3D geological software. The spatial relationship between the karst, the fault zone and the subway is established and represented by 3D geological model. This study can be very useful to the design and construction of similar subway station in terms of karst hydrogeology and the treatment of water burst.

Key words subway engineering, karst, development features, water burst mode, three-Dimensional geological model

(编辑 张玲)