

峨汉高速庙子坪隧道岩溶发育特征及工程效应分析

李华明, 张永辉, 胡志平, 李芳涛, 蔡乐军

Analysis of karst development characteristics and influence of Miaoziping tunnel in E-Han expressway

LI Huaming, ZHANG Yonghui, HU Zhiping, LI Fangtao, and CAI Lejun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.01-11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于室内试验的四川峨眉—汉源高速廖山隧道碳酸盐岩溶蚀特征分析

Experimental analysis on dissolution characteristics of carbonate rocks in Liaoshan tunnel of EmeiHanyuan expressway in Sichuan Province

李华明, 蔡乐军, 陈南南, 黄平, 李芳涛 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 73-84

湖北鹤峰太平隧道特大溶洞发育特征及稳定性评价

王章琼, 柯茂东, 张兵, 李元松, 王亚军 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(4): 48-53

王章琼, 柯茂东, 张兵, 李元松, 王亚军 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(4): 48-53

香丽高速公路边坡地质灾害发育特征与易发性区划

Development characteristics and susceptibility zoning of slope geological hazards in Xiangli expressway

廖小平, 徐风光, 蔡旭东, 周文皎, 魏家旭 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 121-129

广州市白云区夏茅村岩溶地面塌陷特征及致灾因素和风险分析

Karst collapse characteristics, disaster factors and risk analysis in Xiamao Village, Baiyun District, Guangzhou City

周心经, 郭宇, 郑小战, 李晶晶, 张俊岭, 朱照宇 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 63-71

滇中香炉山引水隧洞工程区地应力场特征及断裂影响模糊综合评价

Characteristics of in-situ stress field and fuzzy comprehensive evaluation of the influence of active faults on the water diversion engineering of Xianglushan Tunnel Area in central Yunnan

付平, 张新辉, 刘元坤, 尹健民, 徐春敏 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 123-132

湖南通道播阳镇楼团滑坡发育特征及稳定性分析

Development characteristics and stability analysis on the Loutuan Landslide in Boyang Town, Tongdao County, Hunan Province

周小飞, 曹红娟 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 48-53



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.01-11

李华明, 张永辉, 胡志平, 等. 峨汉高速庙子坪隧道岩溶发育特征及工程效应分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 92-98.

LI Huaming, ZHANG Yonghui, HU Zhiping, *et al.* Analysis of karst development characteristics and influence of Miaoziping tunnel in E-Han expressway[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 92-98.

峨汉高速庙子坪隧道岩溶发育特征及工程效应分析

李华明¹, 张永辉², 胡志平², 李芳涛², 蔡乐军¹

(1. 四川乐汉高速公路有限责任公司, 四川 峨眉山 614000;

2. 长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要:以峨汉(峨眉山市—雅安市汉源县)高速庙子坪隧道为研究对象,首先通过对隧址区地质调查、示踪试验及统计现场揭露的溶洞数量,厘清隧址区岩溶发育特征并分析其控制因素,再通过整理分析现场监测数据探究岩溶发育对工程的影响。结果表明:隧址区岩溶在多溶控因素的耦合作用下表现出显著的不均性、集中性、方向性、连通性的特征。其中岩层岩性、地形地貌、水文地质、地质构造主要使得岩溶发育具有不均性和集中性;水文地质与地形地貌主要控制着岩溶发育方向和岩溶是否连通;气候则更进一步促进岩溶发育。隧址区岩溶发育的工程影响主要表现为隧道稳定性影响和隧道涌水,其中岩溶规模及尺寸对隧道稳定性有一定影响,但影响范围相对有限;而涌水使得隧道长期积水,在雨季时甚至使得人员、机械等被淹或冲毁,对隧道安全、进度、经济等造成严重影响。研究结论可为峨汉高速沿线隧道及其他类似工程的设计、施工、岩溶灾害防治等提供参考。

关键词:峨汉高速;岩溶隧道;发育特征;控制因素;工程影响

中图分类号: P642.25; U45

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)01-0092-07

Analysis of karst development characteristics and influence of Miaoziping tunnel in E-Han expressway

LI Huaming¹, ZHANG Yonghui², HU Zhiping², LI Fangtao², CAI Lejun¹

(1. Sichuan Lehan Expressway Limited Liability Company, Emeishan, Sichuan 614000, China;

2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710061, China)

Abstract: Taking Miaoziping tunnel of E-Han expressway as the research object, firstly, through the geological survey, tracer test and statistics of the number of karst caves exposed on the site, the characteristics of karst development in the tunnel site are clarified and its control factors are analyzed, and then the engineering influence of karst development is explored based on sorting and analyzing the on-site monitoring data. The results show that: under the coupling action of multiple solution control factors, the karst in the tunnel site shows remarkable characteristics of heterogeneity, concentration, directivity and connectivity. Among them, rock strata lithology, topography, hydrogeology and geological structure mainly make karst development uneven and concentrated; hydrogeology and topography mainly control the direction of karst development and whether karst is connected; climate further promotes karst development. The engineering impact of karst development in the tunnel site area is

收稿日期: 2021-03-28; 修订日期: 2021-04-16

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 四川省峨汉高速工程科研专项(LH-HT-45); 国家自然科学基金重大专项(41941019)

第一作者: 李华明(1977-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地下工程与岩土工程的科研与生产工作。E-mail: hmli19770604@163.com

通讯作者: 张永辉(1994-), 男, 博士研究生, 主要从事隧道与地下工程的研究工作。E-mail: 1742854458@qq.com

mainly manifested as the impact of tunnel stability and tunnel water inflow. The scale and size of karst have a certain impact on the stability of the tunnel, but the scope of impact is relatively limited. However, the water inflow makes the tunnel accumulate water for a long time, which even makes the personnel and machinery flooded or destroyed in the rainy season, which has a serious impact on the safety, progress and economy of the tunnel. The conclusion can provide reference for the design, construction, karst disaster prevention and control of tunnel along the E-Han Expressway and other similar projects.

Keywords: E-Han Expressway; karst tunnel; developmental characteristics; control factors; engineering effects

0 引言

我国是一个多岩溶发育的国家,西南地区岩溶更为发育。随着国家西部大开发战略的不断推进,在西南地区岩溶地带修建隧道越来越多,复杂多变的岩溶给隧道施工建设带来极大困难,如涌水突泥、岩溶塌陷等灾害给工程建设造成造成重大经济损失^[1]。

研究人员已对岩溶发育特征、工程效应等开展了一定的研究工作^[2-11],但对单个工程岩溶发育特征的研究较少,现场实测研究岩溶对工程的影响则更为少见。

文章以峨汉高速庙子坪隧道为研究对象,通过地质调查和示踪试验,厘清隧址区岩溶发育特征,分析岩溶发育控制因素,并通过现场监测探究岩溶发育对工程的影响,以为峨汉高速沿线隧道及类似工程提供参考。

1 隧址区地质环境概况

1.1 工程概况

峨眉至汉源高速公路项目起于峨眉山市,至雅安市汉源县,线路全长 123 km,桥隧比达 80% 以上,是连接成都经济区和大小凉山地区的重要经济走廊。庙子坪

隧道位于峨眉山市沙溪乡与龙池镇之间,设计为双洞单向分离式隧道,隧道右线全长 3 123 m,左线全长为 3 150 m,最大埋深 348.3 m,路面标高 776.67 ~ 843.49 m^[12]。

1.2 地形地貌

隧址区属构造剥蚀中低山地貌,山地海拔低于 1 000 m。风化壳经强烈风化崩塌,表层崩坡积土层较薄。这些母质土在强烈流水剥蚀下形成褶皱轴部的较厚堆积,山脊多形成猪背岭。在地层平缓的向斜轴部附近则呈穹窿状或馒头状桌状山顶。拟建隧道所穿越的山体最高点海拔标高约 1 121.6 m,相对低点标高约 766.9 m,相对高差约 354.7 m。

1.3 岩层特性

根据地质勘探成果,隧址区内主要地层为第四系全新统崩坡积层(Q₄^{ctdl})碎石土、块石土,三叠系上统须家河组(T_{3xj})砂岩、砂质页岩,三叠系中统雷口坡组(T_{2l})膏溶角砾岩、白云岩、硬石膏、泥质白云岩、灰岩、泥灰岩、白云质灰岩等。其中,三叠系中统雷口坡组碳酸岩地层发育最广,贯穿隧道全线,厚度较厚,如图 1 所示,较厚的碳酸盐岩层为岩溶发育提供了基础条件。

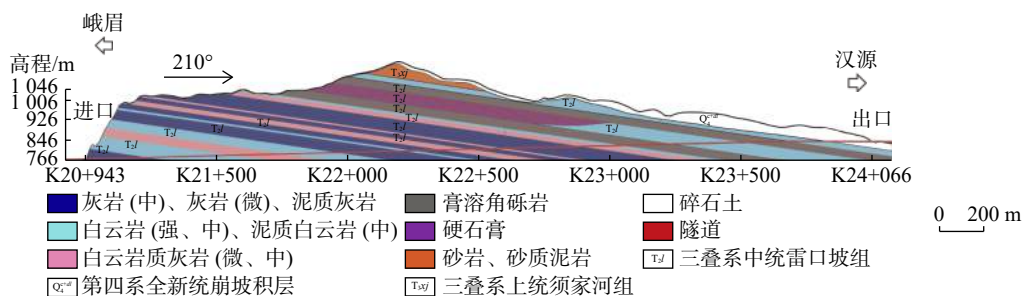


图 1 庙子坪隧道纵剖面图

Fig. 1 Longitudinal section of Miaoziping tunnel

1.4 地质构造

工程区位于扬子准地台西缘,属上扬子台褶带的峨眉山断拱与四川台坳的川西台陷两个三级构造单元的交接部位,次级构造属峨眉山断拱的峨眉穹断束。区域构造主要成生于喜山期,新构造运动特征明显,且具断

块运动的特征;区内褶皱、断层发育,以南北向构造为主,北东向、北西向和东西向构造次之。新构造运动反映强烈,小地震活动较频繁。隧址区无断层、褶皱构造直接通过,距离隧址区最近的构造为龙池湖断层,位于隧道出口端西南约 1 500 ~ 1 800 m,走向东西向,延伸

长度约 5 km。

1.5 水文地质特征

(1)地表水:工程区内的地表水系主要为徐沟、龙池河的支流及地表冲沟,支流、冲沟水系多呈树枝状分布,主要补给源为大气降水,受大气降水的控制和影响;在建的庙子坪隧道穿越龙池河及徐沟两个次级水文地质单元,两个次级水文地质单元同属大渡河二级水文地质单元,庙子坪隧道穿越的山岭为两个次级水文单元的分水岭。

(2)地下水:隧址区地下水类型主要有松散堆积层孔隙水、基岩裂隙管道水、碳酸岩类岩溶水,分别赋存于第四系全新统崩坡积层松散孔隙含水层、三叠系须家河组裂隙含水岩组以及三叠系雷口坡组岩溶含水岩组中。

2 岩溶发育特征

庙子坪隧道穿越围岩均为可溶岩,独特地形、丰富降水及附近构造发育导致区内岩溶发育强烈,地表岩溶主要表现为岩溶干沟、落水洞、土洞、溶隙、溶缝等。地下岩溶以溶洞、溶蚀通道、岩溶裂隙为主。

2.1 岩溶干沟

测区内岩溶干沟数量较多,主要分布于隧道进口与出口,其宽度多为 2~8 m,深 1~2.5 m,干沟底部被碎石块覆盖或局部为裸露基岩,干沟两侧已被植被覆盖或局部为阶梯状砾石,冲蚀-溶蚀痕迹显著(图 2)。岩溶干沟具有汇聚和排泄地表径流的作用,平时干涸无水,但在雨季时沟内水量大且流速急。



图 2 岩溶干沟及侧壁图
Fig. 2 Karst dry gully and side wall

2.2 落水洞

落水洞主要分布于隧道进出口处的冲沟底部,多数冲沟距离隧道左洞轴线距离小于 180 m,沟内充满碎块砾石并常年有水流淌。沟内底部落水洞较为发育,数量较多,仅出口一条冲沟内的落水洞多达 30 余个,主要以小型落水洞竖向发育为主,落水洞洞口大多呈圆形、椭

圆形,洞口直径一般介于 0.2~1.5 m,深度自数米至几百米不等,并常年有水流入,如图 3(a)。



图 3 落水洞与土洞
Fig. 3 Water hole and soil hole

2.3 土洞

土洞分布较为集中,主要分布于隧道出口处黏性土层中,数量较多并且集中,以小型土洞为主,洞口大多呈圆形、椭圆形,土洞口径直径约为 0.1~0.7 m,深 0.3~1.5 m,土洞底部大多堆积碎石土,如图 3(b)。

2.4 溶孔、溶隙和溶缝

隧址区地表溶孔在隧道进出口干沟、冲沟两侧裸露的岩壁上分布较为广泛。地表裸露的碳酸盐岩在风化和龙池湖断层作用下,节理裂隙发育,整体呈破碎状结构,质地疏松,溶孔多呈“蜂窝状”,如图 4(a)。溶隙、溶缝发育受岩性、岩溶水、断层等影响,其深度为 3~12 cm,宽度多介于 1~8 cm,延展长度 0.3~5 m,在发育方向上多呈竖向发育,局部受岩层倾向控制而呈现顺层发育。岩体裂隙表面潮湿且内部有细小水流沿缝隙流动,内部无填充,可见苔藓贴附于表面,如图 4(b)。



图 4 溶孔与溶隙
Fig. 4 Solution pore and solution gap

2.5 溶洞

按埋藏方式可分为裸露型溶洞与埋藏型溶洞。裸露溶洞在进、出口端的干沟两侧岩壁和洞身 K21+200~K21+700 段裸露碳酸岩上发育较多,主要以小溶

洞为主,直径(长度)多为0.1~0.5 m,形状呈长条形、圆形、椭圆等,见图5(a)。埋藏型溶洞主要发育于隧道进口高程为766~810 m和出口端高程830~850 m范围内,岩溶发育表现出强烈的集中性与不均匀性。溶洞以体积小于10 m³为主,如图5(b)所示,局部有较大溶洞。溶洞发育方向以沿岩层面顺层的溶洞为主,个别以沿竖向裂隙发育。



(a) 地表裸露型溶洞

(b) 洞内边墙溶洞

图5 裸露型溶洞与埋藏型溶洞

Fig. 5 Bare and buried karst caves

据揭露统计,溶洞在灰岩地层发育数量最多,白云质岩、白云质灰岩、泥灰岩发育次之、泥质白云岩、膏溶角砾岩地层发育数量最少,地层岩性对岩溶发育具有显著控制作用。从发育部位来看,溶洞在隧道拱脚及底板处发育为主,边墙及拱腰发育次之,拱顶发育最少。从填充情况来看,以泥质、粉质黏土半充填型溶洞为主,碎石和块石填充次之,无充填型溶洞最少。

2.6 溶蚀通道

隧址区溶蚀通道发育较弱,仅在左洞的进口灰岩地层与出口白云岩地层分别揭示一条溶蚀通道,这表现出隧道岩溶发育的选择性和不均匀性。根据现场揭示情况来看,两条溶蚀通道均位于隧道左洞拱脚部位,通道发育方向沿可溶岩层面发育为主,延展方向与岩层倾向相一致。通道断面均呈现管隙状、裂隙状等不规则形态,断面宽度介于1~7 m,长度不详,底部有较多粒径不等的不同形状鹅卵石。溶蚀通道常年有水流出,雨季时涌水量剧增,通过示踪试验(颜料标记试验)发现,进出口溶蚀通道的水流均与地表冲沟内落水洞的水流相通,表明隧址区地表岩溶与地下岩溶具有连通性,因此隧道溶蚀通道在雨季时涌水量剧增。

3 岩溶发育特征原因分析

3.1 地层岩性条件

岩石中可溶物质含量是控制岩溶发育规模和强度的主导因素。从研究区岩溶发育的情况来看,岩溶主要

集中在隧道进口与出口处,溶洞多发育于灰岩、白云质岩、白云质灰岩、泥灰岩地层,泥质白云岩、膏溶角砾岩地层则相对较少。

3.2 区域地质构造条件

隧址区无断层和褶皱直接通过,但在隧道出口附近有龙池湖断层,导致出口端节理裂隙密集,岩体破碎,为地表水或地下水提供良好的通道,并增加水与可溶岩的接触面,因此在出口端地表和地下岩溶都异常发育,甚至出现大型的溶蚀通道。溶蚀通道发育延展方向与岩层倾向相一致(图6),岩溶的发育方向受岩层产状控制显著。

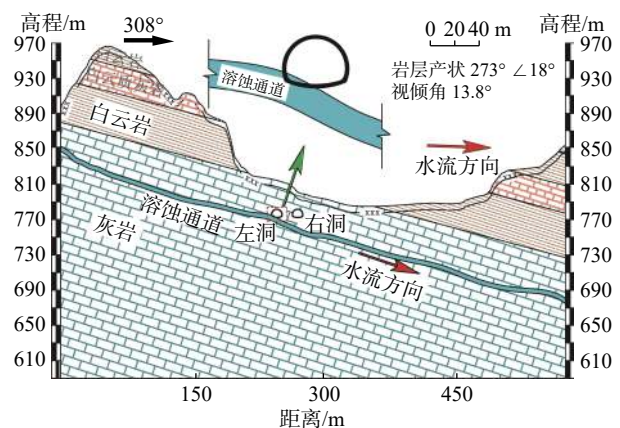


图6 进口溶蚀通道地质横剖面图

Fig. 6 Geological cross section diagram of entrance dissolution channel

3.3 地形地貌条件

地形地貌控制着地下水的重力势能、补给、径流和排泄,是控制岩溶发育的另一重要因素^[1]。在隧道进出口段地形陡峭,沟谷集中,地表水通过沟谷内分布的落水洞、裂缝及附近的土洞补给地下水,使得隧道进口、出口段地下水丰富。雨季时具有短时流量大、流速急等特点,导致隧道进口与出口段岩溶发育,甚至出现少量大型溶蚀通道。此外,隧址区受徐沟及龙池河区域侵蚀基准面影响,地下水于隧道进口区段及出口区段集中排泄,加之进出口地形陡峭,地下水水力坡度大,流速急,机械侵蚀能力较强,进一步导致进出口段岩溶发育及出现规模较大的溶蚀通道。如图7所示。

3.4 水文地质条件

水是岩溶发育的一个基础条件,水的径流大小和运动方向分别控制着岩溶的发育强烈和发育方向。隧址区降雨丰沛,多年平均年降水量达1335.5 mm,降雨渗入地表后主要以垂直运动补给地下水,因此在地表浅层岩溶以竖向发育为主,如隧道进出口的呈竖向发育的落水洞、土洞等。随后地下水再沿着岩层的产状方向集

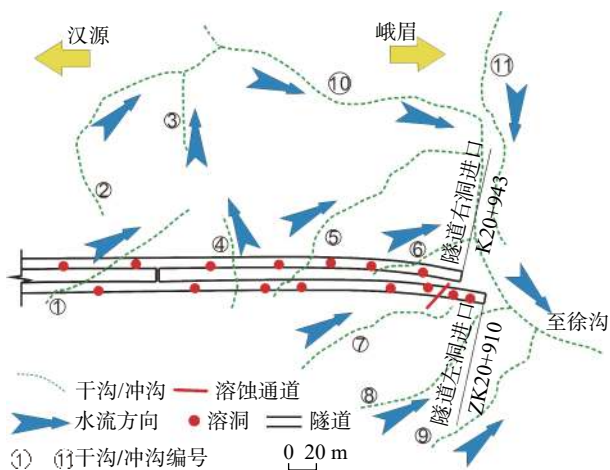


图 7 庙子坪隧道进口段工程地质平面图
Fig. 7 Engineering geological plan of Miaoziping tunnel import section

中排泄于徐沟和龙池河,因此在隧道进出端岩溶发育方向大多与岩层产状一致,并且岩溶较洞身发育。岩溶水在运移过程中,运移方式大致经历了“大气降水-基岩孔隙水-裂隙脉状水-岩溶管道水”等演化历程,是岩溶水逐渐由分散渗流状态过渡到集中汇流状态的过程^[1]。

3.5 气候条件

隧址区属中亚热带湿润季风气候类型,具有冬暖夏热、热量充足、降水丰沛,如该区域年雨日雾日多达 300 天左右,素有“华西雨屏”之称^[13]。充足的雨水补给为岩溶发育提供了有利条件。

4 岩溶发育的工程效应

4.1 岩溶对围岩变形的影响

隧址区揭示半露溶洞较多,并且以小于 10 m³ 溶洞溶腔为主。为了便于分析,本文采用文献 [14] 的划分标准,将岩溶划分为四种类型:小型溶洞(小于 10m³)、中型溶洞(10~100 m³)、大型溶洞(100~1 000 m³)和特大型溶洞(大于 1 000 m³)。以上述分类为依据分析岩溶规模及发育部位对隧道稳定性的影响。

4.1.1 溶洞规模的影响

庙子坪隧道左线出口 ZK23+532—K24+090 段,该段围岩均为Ⅳ级。针对所揭露的小型、中型、大型溶洞断面的监测数据进行分析,其中 ZK23+850 断面无溶洞,ZK23+745 断面处有小型溶洞,ZK23+300 断面处有中型溶洞,ZK23+410 处有大型溶洞(溶蚀通道)。针对不同规模的围岩拱顶及周边收敛进行监测(图 8)。

由图 8 可知,不同规模溶洞的围岩位移随时间变化曲线呈现以下一些特征:(1)不同规模溶洞的围岩位移

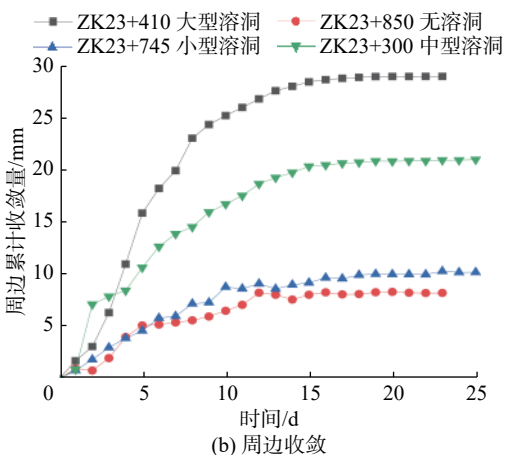
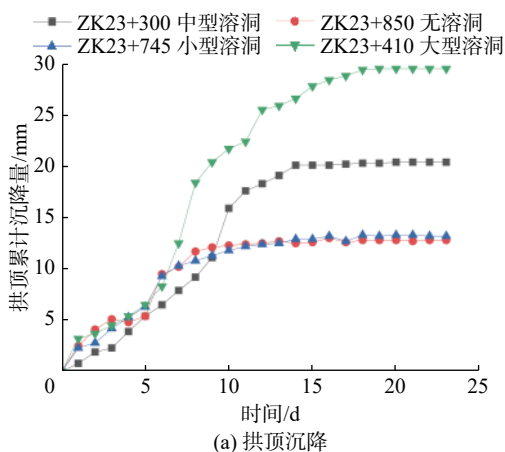


图 8 边墙处不同规模溶洞的围岩位移
Fig. 8 Displacements of surrounding rock of different sizes of karst caves at the side walls

随时间变化趋势基本一致,均为先快速增大然后逐渐减小并最后趋于某稳定值;(2)小型溶洞对隧道变形影响较小,大型溶洞对隧道变形影响较大,大型溶洞所在断面的拱顶下沉值与周边收敛值均为无溶洞或小型溶洞的 3 倍,但均在隧道安全允许值内;(3)溶洞规模对隧道拱顶下沉及周边收敛的影响整体表现为大型溶洞>中型溶洞>小型溶洞>无溶洞的变化规律。

4.1.2 隧道不同部位的溶洞的影响

由图 9 可知,溶洞位于隧道不同部位的围岩位移随时间变化曲线展现以下一些特点:(1)不同发育部位溶洞所在断面拱顶沉降及周边收敛变化规律一致,变化速率均呈先增后减并最终趋于某稳定值的变化趋势;(2)不同位置溶洞对隧道变形均有一定影响,拱底溶洞对隧道拱顶下沉影响较小,拱顶溶洞对隧道拱顶下沉影响较大,约为无溶洞的 3 倍;(3)溶洞位于拱顶对隧道周边收敛影响较小,溶洞位于边墙时对周边收敛影响较大,约为无溶洞的 2 倍;(4)不同位置溶洞所在断面的围岩下

沉值及收敛值均未超过隧道安全允许值; (5) 不同位置溶洞对隧道拱顶下沉的影响表现为溶洞位于拱顶处>边墙处>拱底处>无溶洞, 而对周边收敛的影响规律为溶洞位于边墙处>位于拱底处>位于拱顶处>无溶洞。

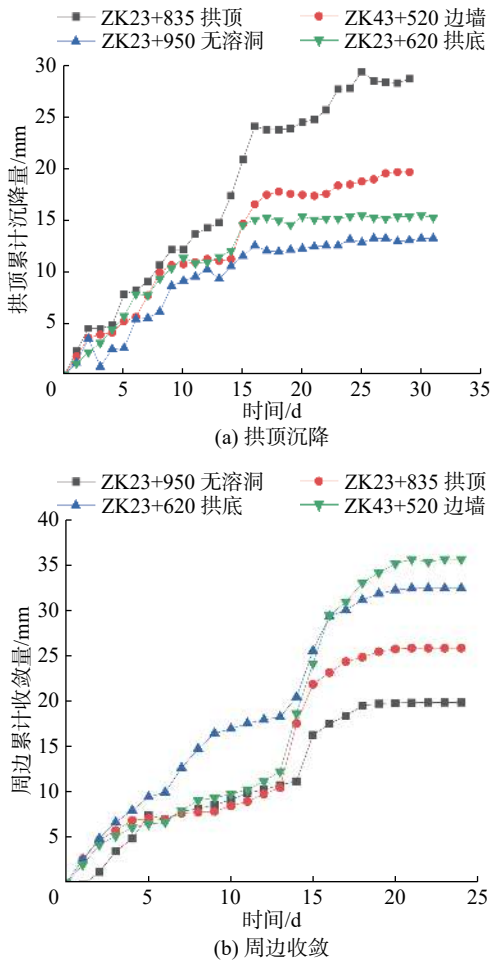


图 9 溶洞位于不同部位的围岩位移
Fig. 9 Displacements of surrounding rock at different positions of karst caves

4.2 岩溶涌水

庙子坪隧道揭露的两条溶蚀通道常年有较大水流, 据施工及设计单位所提供资料, 隧道进口溶蚀通道雨季(6—9月)最大涌水量约 6 400 ~ 10 000 m³/d, 出口溶蚀通道最大涌水量为 20 000 ~ 50 000 m³/d, 特别是 7—8 月期间测区暴雨频发, 受洞内外岩溶连通性的影响, 隧道的溶蚀通道涌水量剧增(图 10)。较大的涌水量易导致洞内施工人员、机具、电缆等被淹或冲毁而发生安全事故, 图 11(a)。在非雨季, 进口最大涌水量为 4 000 ~ 5 340 m³/d, 出口最大涌水量 8 000 ~ 15 000 m³/d。由于隧道为正坡, 使得出口段洞内长期大量积水, 严重影响隧道安全和进度, 如图 11(b)所示。

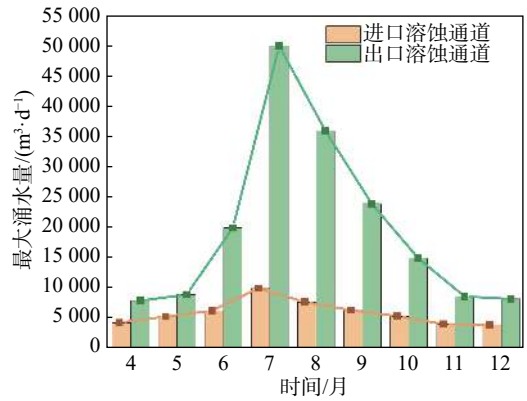


图 10 庙子坪隧道最大涌水量统计图 (2019.04—2019.12)
Fig. 10 Statistical diagram of maximum water inflow in MiaoZiPing tunnel (2019.04—2019.12)



(a) 雨季洞内涌水被淹 (b) 非雨季洞内涌水
图 11 庙子坪隧道洞内涌水
Fig. 11 Water gushing in MiaoZiPing tunnel

5 结论

通过开展地质调查、示踪试验(颜料标记试验)及现场监测, 探究隧址区岩溶发育特征及工程效应, 得出以下结论:

(1) 隧址区岩溶发育, 特别是隧道进出口段。地表岩溶形态多样, 主要表现为岩溶干沟、落水洞、土洞、溶孔、溶隙、溶缝等; 地下岩溶相对单一, 以溶洞、溶蚀通道、岩溶裂隙发育为主。

(2) 隧址区岩溶在多溶控因素的耦合作用下表现出显著的不均性、集中性、方向性、联通性的发育特征。其中岩层岩性、地形地貌、水文地质、地质构造主要使得岩溶发育具有不均性和集中性; 水文地质与地形地貌主要控制着岩溶发育方向和岩溶是否连通; 气候则更进一步促进岩溶发育。

(3) 隧道受地表岩溶影响较小, 受理藏型溶洞的影响较大, 主要表现为对隧道稳定性影响和隧道涌水。其中岩溶规模及尺寸对隧道稳定性有一定影响, 但影响范围相对有限; 而涌水使得隧道长期积水, 甚至在雨季时使施工人员、机械等被淹或冲毁, 对隧道安全、进度、经济等造成严重影响。

参考文献 (References) :

- [1] 李芳涛, 李华明, 胡志平, 等. 峨汉高速廖山隧道岩溶发育规律及其工程效应浅析 [J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 592 - 603. [LI Fangtao, LI Huaming, HU Zhiping, et al. Features of Karst development and geotechnical effects in the Liaoshan Tunnel on the E-Han expressway [J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 592 - 603. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 缪世贤, 黄敬军, 武鑫, 等. 徐州岩溶地质调查及其发育特征分析 [J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(2): 172 - 177. [MIAO Shixian, HUANG Jingjun, WU Xin, et al. Karst geological survey and analysis of its development characteristics in Xuzhou [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(2): 172 - 177. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 李慧娟, 金小刚, 涂婧, 等. 湖北武汉典型地区岩溶发育特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4): 40 - 47. [LI Huijuan, JIN Xiaogang, TU Jing, et al. Analysis on characteristics of Karst development in Wuhan of Hubei Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(4): 40 - 47. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 黄彬, 杨新安, 刘卫星, 等. 海德隧道浅层岩溶发育特征及影响分析 [J]. 铁道建筑, 2019, 59(8): 84 - 88. [HUANG Bin, YANG Xinan, LIU Weixing, et al. Analysis on development characteristics and project influence of shallow Karst in Haide tunnel [J]. Railway Engineering, 2019, 59(8): 84 - 88. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 王章琼, 柯茂东, 张兵, 等. 湖北鹤峰太平隧道特大溶洞发育特征及稳定性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4): 48 - 53. [WANG Zhangqiong, KE Maodong, ZHANG Bing, et al. Characteristics and engineering evaluation of extra large-scale Karst cavern of Taiping Tunnel in Hefang of Hubei Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(4): 48 - 53. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 江思义, 吴福, 刘庆超, 等. 广西桂林市规划中心城区岩溶发育特征及分布规律 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(3): 120 - 128. [JIANG Siyi, WU Fu, LIU Qingchao, et al. Karst development characteristics and distribution in Guilin urban planning center of Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(3): 120 - 128. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 罗利川, 梁杏, 周宏, 等. 香溪河流域岩溶洞穴发育与分布特征 [J]. 中国岩溶, 2018, 37(3): 450 - 461. [LUO Lichuan, LIANG Xing, ZHOU Hong, et al. Development and distribution characteristics of Karst caves in the Xiangxi river basin [J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(3): 450 - 461. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 宋战平. 隐伏溶洞对隧道围岩: 支护结构稳定性的影响研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2006. [SONG Zhanping. Research on the influence of concealed karst caverns upon the stability of tunnels and its support structure [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 赵明阶, 敖建华, 刘绪华, 等. 岩溶尺寸对隧道围岩稳定性影响的模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 213 - 217. [ZHAO Mingjie, AO Jianhua, LIU Xuhua, et al. Model testing research on influence of Karst cave size on stability of surrounding rockmasses during tunnel construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 213 - 217. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 吴梦军, 许锡宾, 赵明阶, 等. 岩溶地区公路隧道施工力学响应研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1525 - 1529. [WU Mengjun, XU Xibin, ZHAO Mingjie, et al. Construction mechanics response study of highway tunnel in Karst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9): 1525 - 1529. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王志杰, 唐力, 蒋新政, 等. 大断面公路隧道临近溶洞开挖稳定性模型试验研究 [J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(增刊 1): 16 - 24. [WANG Zhijie, TANG Li, JIANG Xinzheng, et al. Model test on stability of large cross-section highway tunnel adjacent to Caverns [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(Sup 1): 16 - 24. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司. 峨眉至汉源高速公路施工总承包 1-3 合同段两阶段施工图设计 [R]. 西安: 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 2017. [CCCC first highway survey, design and Research Institute Co., Ltd. two stage construction drawing design of contract section 1-3 of Emei Hanyuan expressway construction general contract [R]. Xi'an: CCCC first highway survey, design and Research Institute Co. Ltd., 2017. (in Chinese)]
- [13] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司. 峨眉至汉源高速公路工程第 B1 标段庙子坪隧道工程地质勘察报告 [R]. 西安: 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 2017. [CCCC first highway survey, design and Research Institute Co. Ltd. Engineering geological survey report of MiaoZiPing tunnel in bid B1 of Emei Hanyuan Expressway Project [R]. Xi'an: CCCC First Highway Survey and Design Institute Co. Ltd., 2017. (in Chinese)]
- [14] 陈禹成, 王朝阳, 郭明, 等. 隐伏溶洞对隧道围岩稳定性影响规律及处治技术 [J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(5): 33 - 43. [CHEN Yucheng, WANG Zhaoyang, GUO Ming, et al. Influence of concealed Karst cave on surrounding rock stability and its treatment technology [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2020, 50(5): 33 - 43. (in Chinese with English abstract)]