

文章编号: 1674—8247(2023)02—0043—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.02.009

巨型溶洞松散回填体内超大断面隧道修建技术

汪 勇

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:本文介绍了玉京山隧道巨型溶洞、暗河工程难点及其处理方案,针对溶洞回填体内修建隧道这一难题,从结构型式、注浆加固、开挖支护及控制隧道沉降变形等方面进行了深入研究,提出了整体沉降和差异沉降双标准隧道沉降控制技术,保证了超大断面隧道结构安全。本工程施工经验可为同类工程提供借鉴。

关键词:隧道;巨型溶洞;回填体;超大断面;沉降控制

中图分类号: U452.27

文献标识码: A

Construction Technology of Super-large Section Tunnel in Loose Backfill of Giant Karst Cave

WANG Yong

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: This paper introduced the difficulties of construction of the Yujingshan Tunnel in case of giant karst cave and underground river, as well as the treatment schemes. In view of the difficulty of tunneling in the backfill of the karst cave, this paper conducted in-depth study from the aspects of structural type, grouting reinforcement, excavation support, and controlling tunnel settlement deformation, and put forward the double-criteria tunnel settlement control technology of overall settlement and differential settlement to ensure the safety of the super-large section tunnel structure. The practice can provide a reference for similar projects.

Key words: tunnel; giant karst cave; backfill; super-large section; settlement control

我国可岩溶地貌分布广,西南地区约占一半^[1]。在西南地区修建隧道工程时,不可避免会穿越可岩溶地层,遭遇各种岩溶难题。复杂的岩溶地质条件导致隧道施工困难,成本增加,工期延长,隧道施工和运营风险增加。

随着我国交通建设的快速发展,在处理复杂岩溶难题方面也积累了丰富的工程经验,主要有改线绕避、桩基承台(或桥梁)跨越、混凝土柱支顶和回填处理等处治技术。回填处理因技术简单、施工方便、费用低,且有利于洞壁稳定等特点,在岩溶处理中被广

泛采用。长昆客运专线朱砂堡2号隧道巨型溶洞^[2]和云桂客运专线营盘山隧道巨型溶洞^[3]对线路范围隧底溶洞采用大体积混凝土分层回填,混凝土回填以外区域采用隧道弃渣回填;宜万铁路龙麟宫隧道1号溶洞对路基面以下范围溶洞采用隧道弃渣进行回填,且冒顶段改为路基工程^[4];黔张常铁路高山隧道巨型溶洞下部范围采用弃渣回填,上部范围采用级配碎石回填处理^[5];田德铁路陇外隧道大型溶洞自下而上采用抛填片石、块石土层回填及碎石土层分层碾压回填^[6],然而,现有研究中在溶洞回填体中修建隧道的

收稿日期:2021-11-15

作者简介:汪勇(1975-),男,高级工程师。

引文格式:汪勇. 巨型溶洞松散回填体内超大断面隧道修建技术[J]. 高速铁路技术,2023,14(2):43-47.

WANG Yong. Construction Technology of Super-large Section Tunnel in Loose Backfill of Giant Karst Cave[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(2):43-47.

工程实例较为罕见。本文通过玉京山隧道巨型溶洞松散回填体内成功修建超大断面隧道工程实例的介绍,以期为解决同类工程问题提供借鉴。

1 工程概况

成贵客运专线玉京山隧道全长 6 306 m,最大埋深 350 m。隧道主要穿越煤系地层和可溶岩地层,其中 D3K 279 + 515 ~ D3K 280 + 310 段穿越二叠系下统栖霞茅口组灰岩,岩溶强烈发育。该区域可岩溶地层中发育有暗河,长约 18 km,推测暗河位于轨面以下约 71 m。2016 年 7 月 23 日,隧道 D3K 279 + 948 上台阶开挖揭示巨型溶洞。隧道位于溶洞顶部,溶洞高 50 ~ 120 m,沿线路方向发育约 93 m,垂直于线路发育约 230 m,平面呈“蚕豆”状,顶部呈穹窿状,底部为斜坡堆积体,坡脚发育一条暗河,河面宽 5 ~ 15 m,如图 1 所示。

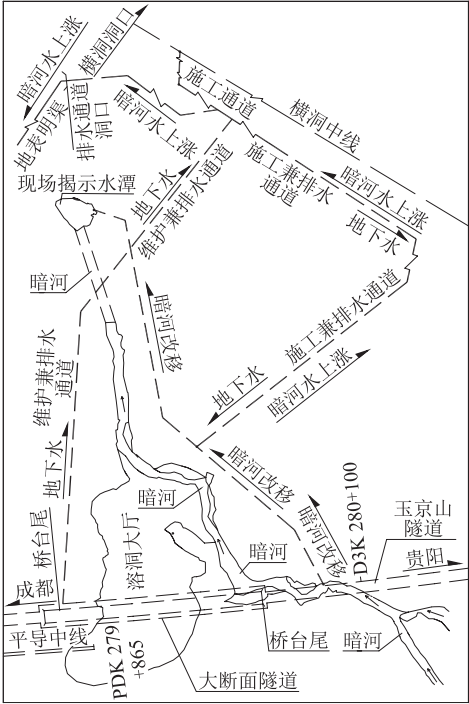


图 1 巨型溶洞平面图

2 工程难点

- 玉京山隧道施工难点有:
- (1) 溶洞巨大,隧道高悬,无作业平台,施工困难
溶洞体积约 106 m³,隧道位于溶洞顶部,隧顶需对溶洞顶板进行“削皮式”开挖,隧底悬空,无施工作业平台,施工困难。
 - (2) 溶洞壁浅层稳定性差,掉块风险高,洞壁加固困难
溶洞壁为灰岩,岩层走向和大厅长轴走向夹角为

- 31°,受地下水、节理裂隙及施工影响,溶洞壁浅层稳定性差,表层掉块严重。现场分析结果表明,溶洞壁浅层易产生楔形掉块,径向高度最大可达 15 m,洞壁加固困难。
- (3) 溶洞底部斜坡堆积体厚度大,成分复杂,处理困难
溶洞底部为斜坡堆积体,厚 30 ~ 90m,成分复杂,以碎块石土为主,夹杂软塑状黏土、粉砂等,在地下水及外力作用下,斜坡体局部可能出现失稳坍塌,造成处理困难。
- (4) 溶洞水系复杂,暗河水冲刷及涨跌对溶洞稳定影响大
溶洞内发育 4 处岩溶管道,常年有水,最大流量 4 L/s,洞壁发育多处季节性裂隙水。暗河雨季最大流量约 20.16 m³/s,至下游溶洞出口距离约 8 km,可能出现下游洞壁坍塌堵塞暗河,引起暗河水上涨。结合溶洞底部表层静水沉积物,判断暗河水位曾经涨至 990 m 高程,涨幅约 30 m,暗河水冲刷和涨跌对溶洞稳定影响大。
- 3 溶洞处理方案
- 根据溶洞发育规模、形态、工程地质水文特征及其与隧道空间关系,研究了改线绕避、路基填筑、桥梁(桩基)跨越 3 类 12 种处理方案。经技术经济比较,结合运营单位意见,最终采用了“暗河改移 + 溶洞回填 + 穹顶防护 + 回填体中暗挖隧道 + 桥梁跨越”的桥梁一体综合处理方案,如图 2 所示。

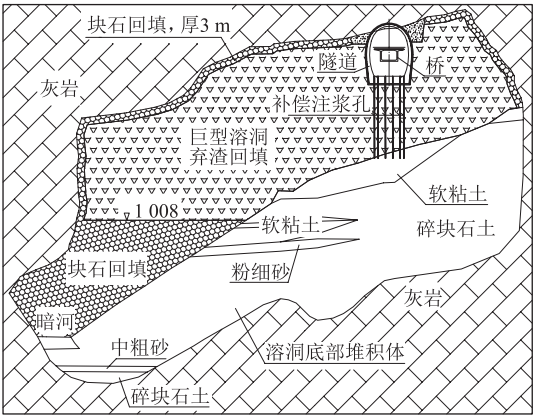


图 2 巨型溶洞处理方案图

4 巨型溶洞松散回填体对隧道的影响

- 巨型溶洞松散回填体对隧道的主要影响为:
- (1) 回填体松散、自稳性差对隧道开挖的不利影响

溶洞采用隧道弃渣回填,每3 m 进行分层找平碾压,回填体整体较松散,开挖后自稳性差,隧道开挖成型困难。

(2) 回填体与溶洞顶板分离对隧道结构受力的不利影响

虽然对溶洞进行了满回填,但考虑沉降作用,隧道拱顶与溶洞顶板间会出现脱空现象,在侧压力作用下,拱顶脱空部分受力处于不利状态,影响结构安全。

(3) 基底不均匀沉降对隧道结构的影响

溶洞底部为巨厚斜坡堆积层,且在隧道纵向及横向分布不均,加之回填厚度不相等,隧底将产生不均匀沉降,对隧道结构产生不利影响。

(4) 溶洞地下水、暗河水对隧道安全的影响

虽然对溶洞范围暗河进行了改移,但暗河下游管道至暗河出口段长约8 km,可能出现暗河下游洞壁坍塌,堵塞暗河,在溶洞已回填情况下,上涨的暗河水可能淹没隧道,影响隧道结构及运营安全。

5 巨型溶洞松散回填体内超大断面隧道修建技术

5.1 回填体内隧道结构型式选择技术

由于回填体与溶洞顶板分离对隧道结构受力不利,影响隧道结构安全,因此选择一种合适的隧道结构型式尤为重要。圆形结构受力条件好,但开挖量大,空间利用率低;变截面较等截面更能有效增大侧向受力,使结构更符合现场受力分布;隧底采用刚度大、抗扭能力强的厚底板结构,能减小基底不均匀沉降影响。综合考虑上述因素,结合结构检算,隧道采用马蹄形变截面曲墙底板复合式衬砌结构,如图3所示。隧道高约25 m,宽约20 m,开挖面积约400 m²;二次衬砌采用75 cm厚变截面钢筋混凝土,底板厚3 m。

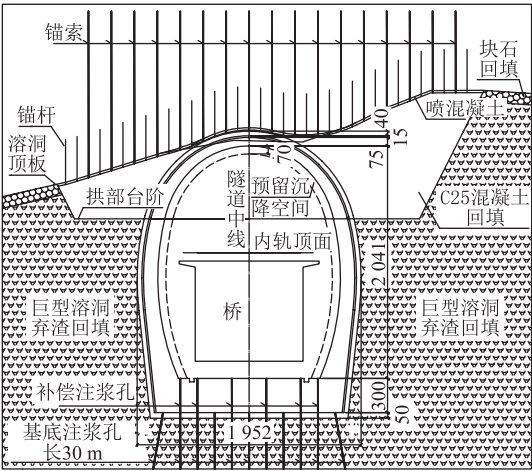


图3 隧道衬砌断面图(mm)

5.2 隧道两侧松散回填体注浆加固技术

为提高隧道两侧回填体物理力学性质,增强围岩自稳性,对其进行注浆加固。注浆范围为隧底开挖轮廓线外5 m处最大破裂面外5 m,采用 $\phi 50$ 钢管袖阀管注浆加固,沿隧道方向每2.5 m 布置一个注浆断面,如图4所示。注浆材料以水泥浆为主,周边止浆帷幕采用水泥-水玻璃浆,要求注浆后加固体综合 Φ_c 值不小于45°。施工中采用分区块注浆,每4个注浆断面为1个区块,每区块周边孔及中间孔孔底5 m范围采用水泥-水玻璃浆进行帷幕封堵,中间采用水泥浆充填,该注浆方式注浆效果好,且单孔注浆耗时从分区块的36 h 缩短到分区块后的12 h,大大节约了注浆时间。

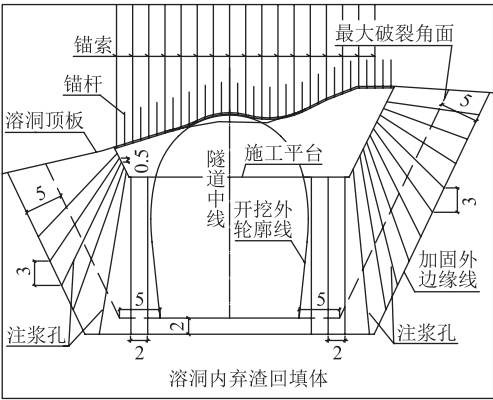


图4 注浆加固断面图(m)

5.3 回填体内超大断面隧道开挖支护技术

隧道两侧回填体注浆加固后,采用五台阶法施工,设两道临时横撑,横撑采用大刚度 $\phi 609$ mm 钢管。施工时利用溶洞顶板防护期间已开挖的平台,先施作隧道第一台阶初支,架设HW300型钢钢架,间距0.5 m,喷C30混凝土,厚40 cm,采用大拱脚,锁脚锚杆为 $\phi 76$ 钢管,每侧拱脚2根,每根长6 m。施作完隧道第一台阶后,由小里程端向大里程端分台阶开挖第二至第五台阶,及时施作初支,架设临时钢管横撑,并对初支及钢管横撑进行监控量测,及时掌握支护变形及钢管横撑受力情况,以便指导施工。隧道初支完成后,进行隧底注浆加固,再施作隧道底板,然后由下而上分四段施作边墙衬砌,拱部一次浇筑,如图5所示。为保证工期,隧道衬砌与桥梁同步作业,隧道两侧边墙采用“梳形”钢架模支撑进行分段浇筑,拱部采用贝雷梁及简易台车进行混凝土灌注作业,同时于隧道底板上设置满堂支架,施作桥梁。

5.4 回填体内隧道沉降变形控制技术

隧道位于溶洞巨厚层堆积体上回填体中,根据基

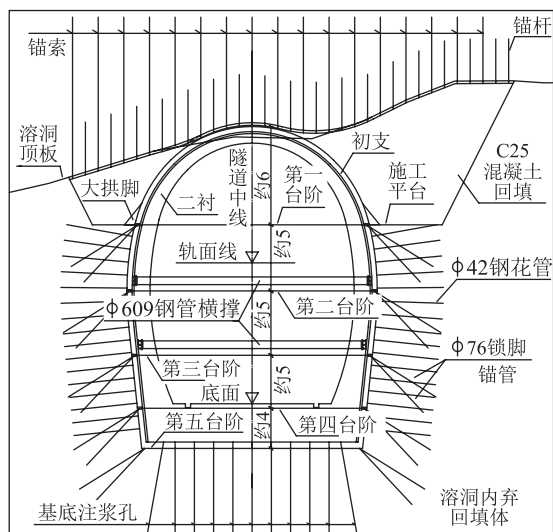


图5 施工方法图(m)

底沉降分析,工后沉降约 70 cm,不均匀沉降差值约 10 cm。为减少沉降对结构的不利影响,达到有效控制沉降的目的,隧道沉降采用整体沉降和差异沉降双控制标准,整体沉降控制隧道净空不侵入限界,隧道预留 70 cm 整体沉降空间;差异沉降控制结构安全,根据结构检算,要求工后差异沉降不超过 2 cm。为控制隧道沉降变形,保证结构及运营安全,研究采取了以下技术。

(1) 隧底注浆加固技术

隧底堆积层由于受回填体预压作用,其初期沉降已基本完成,工后沉降主要是蠕变沉降。然而,回填体本身较松散,其初期沉降远未完成。为减小沉降,对隧底回填体进行注浆加固,使回填体固结形成稳定地层,地层越稳定其沉降量越小^[7]。注浆采用 $\phi 108$ 钢管花管内设置 $\phi 50$ PVC 袖阀管进行多次反复注浆,以提高注浆效果。钢管间距 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$,注浆材料以水泥浆为主,周边止浆帷幕采用水泥-水玻璃浆。

(2) 柔性仿生构造技术

为减小基底不均匀沉降对隧道结构的影响,将隧道沿线路方向每 5~6 m 分段,每段间设 15 cm 宽变形缝,当隧道在不均匀沉降影响下,每段衬砌间允许发生错动,“宽变形缝+短节段衬砌”似动物脊柱构造一样,使原本刚性的隧道结构在纵向具有一定“柔性”,能适应一定程度不均匀沉降,最大限度保证了隧道结构安全。

(3) 缓冲隔离层技术

为避免二次衬砌受初支约束作用而产生裂缝,于二次衬砌与初支间设缓冲隔离层,使二次衬砌有一定

“自由活动”空间,减小了因沉降使初支对二次衬砌局部约束力增加风险。隔离层材料采用挤塑聚苯板,厚 5 cm,压缩强度 300 KPa。

(4) 隧道健康监测技术

通过健康监测及时掌握隧道受力变化及基础沉降情况,也为运营期间隧底补偿注浆和拱墙充填注浆提供依据。隧道健康监测包含对结构受力监测和基础沉降监测。受力监测主要对衬砌结构钢筋应力、二衬混凝土应变、初支与二衬间接触压力、围岩与初支接触压力及钢架应力进行监测;基础沉降监测主要对隧底沉降、隧底与回填体脱空及基底回填层分层沉降进行监测^[8]。

(5) 隧底补偿注浆技术

为有效控制隧底沉降,对隧底进行补偿注浆,以确保运营期间隧底累计整体沉降量不大于 70 cm,差异沉降量不大于 2 cm。补偿注浆孔结合衬砌分段情况,每段衬砌设 3 排,每排约 6 个孔。运营期间,根据隧道健康监测结果确定隧底补偿注浆的范围和时机,以保证结构安全。

(6) 隧道拱墙充填注浆技术

受隧底沉降影响,隧道拱部或边墙可能出现局部脱空,恶化隧道受力环境,使结构局部受力增加。为减小隧道局部变形风险,利用预留注浆孔,对隧道边墙、拱部脱空部分及时进行注浆充填,以使隧道与围岩紧密结合,改善隧道受力环境。

5.5 地下水排放

溶洞范围地下水包含溶洞壁季节性裂隙水、溶洞底部岩溶管道水及暗河水。一般情况溶洞范围地下水通过溶洞内回填的块石层排水通道汇入暗河进行排放;当出现暗河下游管道坍塌堵塞,溶洞范围暗河水上涨影响隧道结构安全时,暗河水通过设置的泄洪通道进行排放,以保证隧道结构及运营安全。

6 结论

本文以玉京山隧道巨型溶洞为背景,从结构型式、注浆加固、开挖支护及控制隧道沉降变形等方面进行了深入研究,得出如下结论:

(1) 玉京山隧道溶洞规模巨大,地质水文条件复杂,在国内外隧道工程建筑史上较为罕见,从溶洞揭示、补充勘察至处理结束,历时约 3 年,隧道自 2019 年 12 月 16 日开通运营以来,隧道结构及运营情况良好。在巨型溶洞松散回填体内成功修建超大断面隧道,填补了巨型溶洞回填体中修建隧道的技术空白,具有开创意义。

(2) 溶洞回填体内隧道开挖成型困难, 为提高回填体整体性, 增强回填体自稳能力, 采用钢管袖阀管进行注浆加固。注浆采用分区块先进行帷幕封闭, 再填充注浆的方式, 取得了良好效果, 且钢管也对注浆体起到了加强连接、锚固作用, 增强了回填体的整体稳定性。

(3) 为有效控制沉降, 先经计算分析确定了控制标准, 再通过基底注浆改善回填体物理力学性质, 减少沉降量, 最后设置健康监测掌握沉降情况, 并根据监测结果及时进行补偿注浆, 达到有效控制沉降的目的。

(4) 隧道结构采用了“宽变形缝+短节段衬砌”的柔性防生构造, 在减小基底不均匀沉降影响方面取得了良好效果。从现场监测情况看, 每节段间差异沉降对结构基本无影响, 节段内差异沉降最大值发生在对角点上, 隧底采用了大刚度的厚底板结构以及补偿注浆, 基本消除了基底不均沉降对隧道的影响, 保证了隧道的结构安全。

参考文献:

- [1] 李大通, 罗雁. 中国碳酸盐岩分布面积测量[J]. 中国岩溶, 1983, 2(2): 147-150.
LI Datong, LUO Yan. Measurement of Carbonate Rocks Distribution Area in China [J]. Carsologica Sinica, 1983, 2(2): 147-150.
- [2] 林本涛, 巩江峰. 朱砂堡二号隧道特大型岩溶空腔处理技术[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(3): 91-96.
LIN Bentao, GONG Jiangfeng. Treatment Technology of Super Large Karst Cavity in Zhushabao No. 2 Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(3): 91-96.
- [3] 李勇良. 云桂客专营盘山隧道穿越巨型溶洞处治技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2016(2): 57-60, 74.
LI Yongliang. Treatment Technology for Yingpan Mountain Tunnel of Kunming-Nanning Dedicated Line Passing through a Giant Cave [J]. Railway Construction Technology, 2016(2): 57-60, 74.
- [4] 马涛. 宜万铁路龙麟宫隧道1号大型溶洞处理技术研究[J]. 铁道标准设计, 2010, 54(8): 125-128.
MA Tao. Study on Treatment Technology of No. 1 Large Karst Cave in Longlingong Tunnel of Yichang-Wanzhou Railway [J]. Railway Standard Design, 2010, 54(8): 125-128.
- [5] 刘同江, 唐钢, 王军, 等. 黔张常铁路高山隧道巨型溶洞处理技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(6): 972-982.
LIU Tongjiang, TANG Gang, WANG Jun, et al. Treatment Technology of Giant Karst Cave of Gaoshan Tunnel on Qianjiang-Zhangjiajie-Changde Railway [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(6): 972-982.
- [6] 张欣. 田德铁路陇外隧道巨型溶洞的处理[J]. 铁道运营技术, 2011, 17(2): 29-31.
ZHANG Xin. Treatment of Giant Karst Cave in Longwai Tunnel of Tiande Railway [J]. Railway Operation Technology, 2011, 17(2): 29-31.
- [7] 邱敬格. 巨型岩溶条件下高铁隧道超厚回填体路基沉降规律与控制技术研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2018.
QIU Jingge. Settlement Regularity and Control Technology Research of Ultra Thick Backfill Subgrade in High Speed Railway Tunnel under the Condition of Giant Karst [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2018.
- [8] Q/CR 9218-2015 铁路隧道监控量测技术规程[S].
Q/CR 9218-2015 Technical Specification for Monitoring Measurement of Railway Tunnel [S].
- [9] 曲村, 高亮, 陶凯, 等. 客运专线42号无砟轨道无缝道岔参数分析[J]. 铁道标准设计, 2010, 54(2): 43-46.
QU Cun, GAO Liang, TAO Kai, et al. Parameter Analysis of Jointless Turnout on No. 42 Ballastless Track of Passenger Dedicated Line [J]. Railway Standard Design, 2010, 54(2): 43-46.
- [10] TB 10015-2012 铁路无缝线路设计规范[S].
TB 10015-2012 Code for Design of Railway Continuous Rail [S].
- [11] Q/CR 9130-2018 铁路轨道设计规范(极限状态法)[S].
Q/CR 9130-2018 Code for Design of Railway Track (Limited State Method) [S].
- [12] 乔神路. 高速铁路桥上无砟道岔系统空间精细化设计理论及试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
QIAO Shenlu. Spatial Detailed Design Theory and Experimental Research on Ballastless Turnout System on Bridge in High-speed Railway [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [13] 乔神路, 高亮, 程玉生. 复式交分道岔力学特性及无缝化研究[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(4): 61-65.
QIAO Shenlu, GAO Liang, CHENG Yusheng. Mechanical Characteristics and Seamless Research of Double Slip Switches [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 36(4): 61-65.