

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2025.01.022

引用格式: 向聃. 公路隧道特殊溶洞的处理技术[J]. 公路与汽运, 2025, 41(1): 112-115.

Citation: XIANG Dan. Treatment technology of special karst cave in highway tunnel[J]. Highways & Automotive Applications, 2025, 41(1): 112-115.

公路隧道特殊溶洞的处理技术*

向聃

(湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南长沙 410007)

摘要: 为适应岩溶地质条件、减少地质风险, 采用交叉中隔墙法(CRD), 通过分区域、分步骤开挖和即时支护, 结合大管棚套拱、超前小导管注浆及周边径向钢花管注浆等多层次支护系统形成坚固的结构安全网, 提高复杂地质区域尤其是溶洞频发区隧道的施工安全与结构稳定性。

关键词: 隧道; 交叉中隔墙法(CRD); 多层次支护系统; 溶洞; 施工安全; 结构稳定性

中图分类号: U455.49

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2025)01-0112-04

中国西南地区广泛分布的碳酸盐岩地层及岩溶对公路隧道建设提出了挑战, 研究有效的岩溶洞穴处理技术具有重要理论意义和应用价值。在隧道施工岩溶洞穴处理方面, Ebraheem M. O. 等开发了基于地质雷达的预探技术, 确定了岩溶变深度三维模型的截面特征^[1]; Bai M. Z. 等分析岩溶溶洞和土洞的雷达图像特征, 提出了通过探地雷达无损检测确定岩溶路基注浆效果的方法和特征标准^[2]; Ma J. J. 等采用离散点阵弹簧模型分析了不同溶洞位置和溶洞形状对 U 形隧道稳定性的影响^[3]; 胡小强通过 TRT7000 (True Reflection Tomography) 微波探测技术增强了对深层岩溶的识别能力^[4]; 周中等配制适用于岩溶区隧道注浆的新型绿色注浆材料, 解决了传统注浆材料难以同时满足岩溶区隧道注浆止水、回填及加固要求的问题^[5]; 刘永超等对多种注浆材料进行堵漏试验及对比, 分析了不同注浆材料的堵漏机制和效果, 提出了堵水比量化参数^[6]。在预防性管理方面, 王成亮等提出结合 TST (Tunnel Seismic Tomography)、TRT6000、红外探测、地质雷达短距离探测的综合地质超前预报技术, 解决了单一地质预报方法无法对地质异常体进行量化分析的问题^[7]; 许增光等基于集对分析模型开发岩溶区浅埋穿河隧道危险性评价体系, 预测并评估岩溶区浅埋隧道穿河段的突水、涌水风险^[8]; 刘桂卫等基于多源遥感数据, 提出遥感判释与 GIS (Geo-Information System) 空间分析技术相结合的岩溶区

铁路地质勘察方法, 查明了沿线地质构造和岩溶地貌特征, 为选线设计和岩溶灾害防治提供依据^[9]。现有研究普遍缺乏对复杂地质环境的全面适应性分析^[10-12], 尤其在技术应用的广泛性和经济性方面仍有较大改进空间。本文在前人研究的基础上, 针对西南地区碳酸盐岩地层特有的地质特征, 引入多尺度地质数据集成分析, 结合地质物理方法和化学处理方法, 应用新型环保注浆材料, 开发岩溶洞穴综合处理技术, 以提高岩溶洞穴处理的安全性和经济性, 为复杂地质条件下隧道建设提供溶洞处理方案。

1 工程概况

西南地区某隧道的道路等级为城市-II级, 洞内设计速度为 50 km/h, 为双向六车道小净距隧道; 隧道建筑限界宽度为 13.75 m, 高度为 5.00 m。左线起止桩号为 ZK0+575—ZK1+200, 长 625 m; 右线起止桩号为 YK4+040—YK4+700, 长 660 m。隧道址区位于六盘水断陷北西向构造变形区, 断裂及褶皱较发育, 岩层呈单斜分布, 下伏基岩为石炭系下统大塘组, 呈深灰色~灰色、中厚层~厚层状, 偶夹白云岩。岩层存在小的褶曲现象, 岩石节理较发育, 岩体较破碎。

左线开挖至 ZK0+810 掌子面(见图 1)时出现围岩溶蚀发育现象, 经现场测量, 溶洞横向宽度为 10 m, 高度为 8 m, 纵向长度为 15 m (ZK0+810—795), 洞中有大量充填物, 地下水呈滴水状, 有较多

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278139)

溶蚀裂隙和孔洞,洞顶地表塌陷,形成岩溶漏斗(见图 2)。



图 1 隧道掌子面

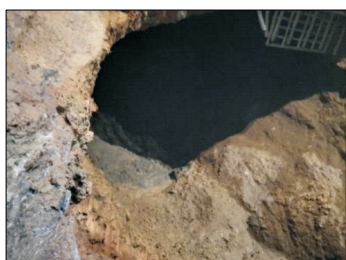


图 2 掌子面拱顶部位溶洞

2 溶洞处理方案

根据溶洞大小、所处位置、填充情况及地下水发育状况确定溶洞处理方法,一般可采取跨越、加固洞穴、引排、截流、清除充填物或对软弱地基注浆加固等处理方式^[13]。该隧道溶洞跨度较大,充填物数量不详,综合考虑施工进度、处理成本、施工安全性确定溶洞处理方案。

2.1 溶洞处理原则及思路

该溶洞纵向发育长度为 15 m,为充填型溶洞,拱顶以上出露充填物为塑性土夹碎石,补充钻探发现底板以下充填物为可塑红黏土夹部分碎石。溶洞处理原则和思路如下:

- (1) 超前支护采用洞内大管棚+超前小导管注浆。
- (2) 对于隧道边墙及拱顶周边充填物,通过周边径向钢花管注浆,形成注浆加固圈。
- (3) 对于隧道底板以下充填物,采用底板钢管桩注浆加固。
- (4) 衬砌采用加强复合式衬砌结构。

2.2 实施方案

2.2.1 开挖方法选择

如图 3 所示,溶洞段开挖采用 V 级围岩浅埋段开挖方法即交叉中隔墙法(Cross Diaphragm Me-

thod,CRD)^[14],分步骤、分区域地依次开挖隧道顶部、两侧壁和底部,并即时进行支护。CRD 法采用顶拱优先支护和分段施工的模式,能显著提升隧道施工的安全性和灵活性,有效应对岩溶等不稳定的特殊地质条件,特别适用于地质条件复杂或围岩质量较差的环境。

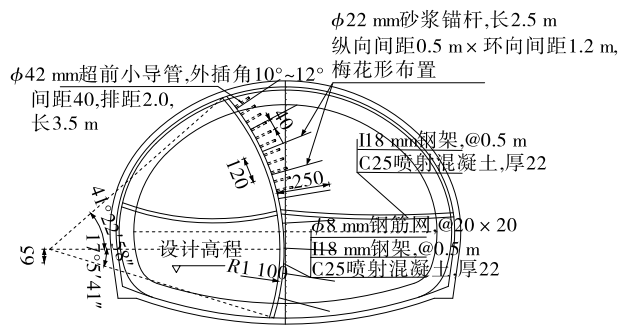


图 3 CRD 法支护断面图(单位:cm)

2.2.2 辅助施工措施(超前支护)

在当前掌子面 ZK0+810 处向大桩号方向后退 3 m(可根据现场情况灵活调整),施作大管棚套拱及洞内管棚工作室。如图 4 所示,大管棚工作室施工中,逐榫拆除原初期支护,逐榫扩挖并进行支护。

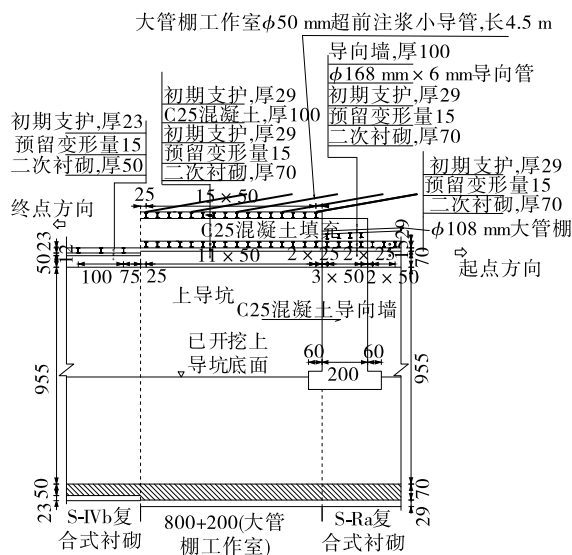


图 4 大管棚工作室支护结构纵断面(单位:cm)

为弥补 $\phi 127$ mm 管棚注浆的缺陷并防止在开挖过程中溶洞充填物从管棚间滑出,在 $\phi 127$ mm 管棚之间设置 $\phi 42$ mm 超前小导管进行辅助注浆加固,确保在开挖轮廓线外形成 1~2 m 注浆加固圈。

对于溶洞边墙范围内的溶洞充填物,在边墙设置超前 $\phi 42$ mm 小导管注浆加固,在上断面拱脚形成扩大基础,防止出现塌拱现象。 $\phi 42$ mm 小导管

长度为 4.5 m, 纵向排距为 2 m, 外插角为 30°。

每根管棚内设置钢筋笼, 并以水泥砂浆进行充填, 以增加管棚的刚度, 从而确保施工过程中掌子面的安全性。

2.2.3 径向注浆及泵送混凝土回填

对充填物为塑性土夹松散石的溶洞, 采用长 6 m 的径向注浆钢花管进行加固, 形成隧道外 6 m 厚注浆加固圈, 提高围岩自身承载能力, 减少衬砌承受的松散荷载。钢花管的环向设置范围根据溶洞形态及与隧道的相对位置确定。隧道周边出露为岩石但厚度不足 5 m 时, 也布设径向钢花管进行加固。

对于溶洞充填物局部存在的脱空段, 在管棚保护下完成初期支护封闭后, 采用泵送低标号混凝土进行回填, 确保施工安全与稳定。

2.2.4 隧道底板钢管桩注浆加固

对充填型溶洞底部常采用架梁通过、换填和底部改良的处理措施^[15], 其中架梁通过的施工周期长、干扰大, 换填则难以处理隧道底板以下深厚的充填物。因此, 该隧道采用钢管桩注浆加固方案, 其优点是能避免施工干扰, 同时节省时间和成本投入, 效率也更高。

仰拱施工前, 每 5 m (补充勘探可根据情况调整) 一个断面钻设竖向探测孔, 一个断面布置 3 个, 中线及两侧各 1 个, 探明仰拱底部充填物厚度, 以确定仰拱底部注浆范围及深度。

根据补充勘探钻孔资料, 隧道底部为溶洞充填物可塑状红黏土, 黏性好, 土质较均匀, 夹部分碎石, 承载力较低, 初期支护结构在仰拱未施作时沉降量很大, 且仰拱开挖后会诱发初期支护结构发生大变形, 稍有不慎, 将引发严重事故。为防止隧道在中下层及仰拱施工过程中出现掉拱及过大沉降导致坍塌事故, 采取以下措施对拱墙进行加固:

(1) 加长锁脚锚管的长度并增加层数 (由原来 1 层增加至 2 层)。

(2) 拱腰处采用长度为 6 m 的 $\phi 50$ mm 钢花管注浆加固, 并在拱脚处设置长度为 10 m 的 T76L 自进式锁脚锚杆进行注浆加固。

(3) 设置纵向托梁, 以自进式锚杆作为支撑, 采用 36 号槽钢作为纵向托梁将拱架连成整体, 控制初期支护结构的沉降。

(4) 隧道底板以下由可塑红黏土充填, 采用钢管桩注浆加固, 钢管桩按 1 m × 1 m 呈梅花形布置, 桩底嵌入中风化岩层深度不少于 1 m (见图 5)。对

于底板以下充填物厚度不超过 5 m 的部分, 采用 C25 混凝土进行回填。为确保隧道底部受力均匀, 对隧道底板以下 1 m 厚范围内充填物采用 C25 混凝土进行换填处理。

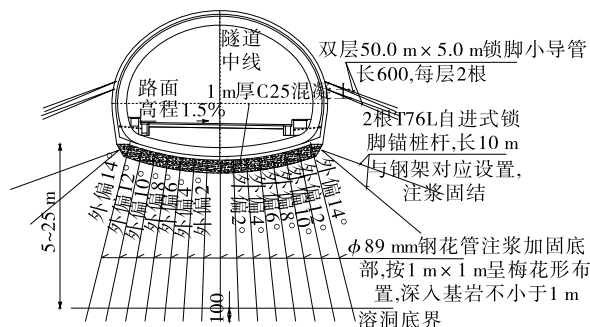


图 5 底板管桩加固示意图 (单位: cm)

2.2.5 加强型衬砌

充填型溶洞采用加强复合式衬砌结构, 其中: 初期支护采用 I25b 型钢, 纵向间距为 50 cm; 二次衬砌底板厚度为 100 cm, 拱墙厚度为 70 cm, 二次衬砌环向主筋采用 $\phi 28$ mm 钢筋、间距为 150 mm, 纵向构造筋采用受力钢筋 $\phi 25$ mm、间距为 150 mm, 以增强二次衬砌的纵向承载力; 混凝土中添加具有防水、减水双重功效的膨胀防水剂, 以缩短凝结时间, 确保早期形成承载拱, 提高隧道的整体稳定性和安全性。复合式衬砌设计见图 6。

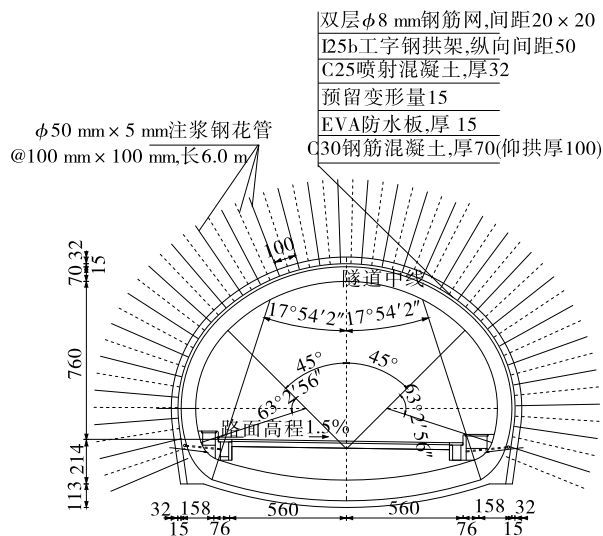


图 6 充填型溶洞加强复合式衬砌设计 (单位: cm)

3 结论

(1) 隧道穿越复杂地质区域尤其是溶洞区域时, 应采用多层次的支护措施, 如大管棚套拱、超前

小导管注浆及周边径向钢花管注浆,形成坚固的支护系统,有效保障施工安全和结构稳定性。

(2) 采用 CRD 法,分区域、分步骤进行开挖和支护,能有效适应不稳定的岩溶地质条件,减少地质风险,确保工程的顺利进行,并提高施工效率。

(3) 处理溶洞时必须综合考虑施工进度、成本和安全性,采用科学合理的工程措施和技术手段,实现隧道在复杂地质条件下的安全施工。

参考文献:

- [1] EBRAHEEM M O, IBRAHIM H A. Detection of karst features using ground-penetrating radar: a case study from the western limestone plateau, Assiut, Egypt[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(18): 563.
- [2] BAI M Z, CHEN Y, WANG C L, et al. Radar spectral analysis and evaluation of the effect of grouting treatment in karst caves and soil caves[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(24): 795.
- [3] MA J J, GUAN J W, DUAN J F, et al. Stability analysis on tunnels with karst caves using the distinct lattice spring model stability analysis on tunnels with karst caves using the distinct lattice spring model[J]. Underground Space, 2020, 2020(11): 1-26.
- [4] 胡小强. TRT7000 超前地质预报系统在岩溶发育隧道中的应用[J]. 福建交通科技, 2023(2): 54-57.
- [5] 周中, 邓卓湘, 鄢海涛, 等. 岩溶区隧道新型绿色注浆材料试验研究[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(7): 63-68.

- [6] 刘永超, 袁振宇, 程雪松, 等. 不同注浆材料对隧道漏水漏砂封堵效果试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊 2): 249-252.
- [7] 王成亮, 白明洲, 岐峰军, 等. 综合地质超前预报技术在岩溶隧道中的应用分析[J]. 铁道建筑, 2013, 53(5): 65-68.
- [8] 许增光, 线美婷, 熊伟, 等. 基于集对分析模型的岩溶区浅埋穿河隧道突涌水危险性评价[J]. 应用力学学报, 2023, 40(1): 135-145.
- [9] 刘桂卫, 王衍汇, 常天龙, 等. 遥感技术在岩溶区铁路地质勘察中应用研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(12): 6-10+23.
- [10] 李达. 城市高架桥桩基工程溶洞处理技术应用探讨[J]. 公路与汽运, 2024, 40(5): 124-128.
- [11] 李子丰, 张永杰, 黄金鑫, 等. 考虑溶洞空间形态的岩溶路基顶板稳定性分析[J]. 公路与汽运, 2023(3): 66-72.
- [12] 梁裔举, 高山, 陈璐. 岩溶地区浅埋隧道变形分析及处治[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(2): 49-54.
- [13] 沈洪伟. 岩溶区隧道溶洞的综合预报及治理方案研究[J]. 山西建筑, 2024, 50(15): 175-178.
- [14] 宋洋, 周林峰. 特大跨度铁路隧道浅埋段 CRD 工法临时支撑拆除危险性评价研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(增刊 1): 19-25.
- [15] 肖凯刚, 刘名. 叙毕铁路岩溶隧道防排水措施及隧底溶洞处理方案研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(增刊 1): 155-159.

收稿日期: 2024-08-14

(上接第 111 页)

- [3] 姜克寒, 刘邦, 秦坤元, 等. 断层破碎带中泥水盾构掘进参数优化研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(3): 43-49.
- [4] 颀永斌, 董建华. 断层破碎带内隧道纵向受荷特征和变形分析[J]. 中国公路学报, 2021, 34(11): 211-224.
- [5] 龚林金, 任锐, 王亚琼, 等. 隧道斜穿不同倾角断层破碎带围岩变形特征分析[J]. 公路, 2021, 66(7): 313-319.
- [6] 梁松林, 张瑞富, 段绪彬, 等. 软弱破碎围岩隧道开挖支护中 CD 法与环形开挖留核心土法对比分析[J]. 公路与汽运, 2023(3): 151-154.
- [7] 张智健, 梁斌, 徐红玉, 等. 富水软弱围岩隧道穿越断层破碎带的稳定性分析及施工技术[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 356-364+378.
- [8] 王茜, 凌同华, 刘唐利, 等. 穿越断层破碎带隧道入口段施工数值模拟[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(4): 78-84.
- [9] 孙浪, 欧湘萍, 闫志濠, 等. 断层破碎带地质特征对隧道

- 围岩稳定性的影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2020, 42(3): 23-31.
- [10] 韩瑀萱, 江腾飞, 谭碧舸, 等. 隧道穿越不同形态断层破碎带围岩稳定性分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(5): 162-173.
- [11] 罗春雨, 钱志豪, 刘富华, 等. 基于流固耦合效应的高地应力软岩大变形隧道开挖稳定性分析[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(9): 88-94.
- [12] 胡涛涛, 葛峻恺, 刘可萌. 含水率对高地应力炭质板岩隧道围岩稳定性的影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(5): 169-175+182.
- [13] 穆兰, 胡宇庭. 隧道穿越富水断层围岩稳定性流固耦合研究[J]. 公路工程, 2017, 42(4): 108-113.
- [14] 罗燕平, 刘得第, 王生, 等. 富水软弱破碎带大断面隧道施工渗流影响及控制效果分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(13): 5756-5763.

收稿日期: 2023-10-27