

基于勘察—设计—施工协同的岩溶隧道主动防控技术与实践

陈震宇

(福建省交发高科有限公司, 福建 福州 350001)

摘要: 岳圩口岸联线公路全线隧道均为岩溶隧道, 是典型的复杂地质岩溶隧道群。隧道建设依托超前探测、分级处治、动态设计施工相结合, 实现岩溶风险主动防控, 攻克溶洞隐蔽性强、形态多变等难题。以 2 号隧道为例详细介绍了典型大型岩溶动态处治技术: 左洞隧底大型溶洞采用桩筏结构跨越, 结合施工勘察动态优化桩基与筏板参数; 右洞经超前地质钻探发现隧旁溶腔, 经溶洞防护、深入探测, 采用护拱墙加固并加强排水进行岩溶处治。隧道建设期间勘察—设计—施工三方动态协同, 有效推动岩溶隧道工程从被动抢险向防控转型, 成功缩短工期、保障工程安全与可持续生产, 为西南地区复杂地质隧道建立岩溶隧道施工全过程健康管理體系提供了成熟的岩溶处治经验。

关键词: 岳圩口岸联线公路; 岩溶隧道; 岩溶处治技术; 动态设计; 护拱墙

中图分类号: U455.4

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)11-0239-05

Karst Treatment in Tunnels of Yuewei Port Connecting Highway

CHEN Zhenyu

(Fujian Jiaofa Hi-Tech Co., Ltd., Fuzhou 350000, China)

Abstract: The tunnel group along the Yuewei Port Connecting Highway is situated in a typical karst landform area with intense karst development, characterized by highly concealed and morphologically complex caves. To address such complex geological conditions, the project adopted a technical framework of "advanced detection-risk classification-dynamic treatment" and implemented a collaborative mechanism among survey, design, and construction teams. This approach enabled proactive karst hazard mitigation and efficient project advancement. Taking Tunnel No. 2 as an example, the left tunnel's large karst cave at the invert was crossed using a pile-raft structure, with dynamic optimization of pile foundation depth and raft thickness based on construction-stage surveys. For the right tunnel, advanced drilling revealed adjacent cavities, leading to comprehensive treatment measures including cavity protection, reinforced arch walls, and a multi-level drainage system, effectively mitigating collapse risks. Practical results demonstrate that this technical framework reduced the construction period, successfully shifted karst tunnel engineering from passive emergency response to proactive risk management. It provides reusable technical and managerial insights for karst tunnel construction in southwestern China.

Keywords: Yuewei Port Connecting Highway; karst tunnel; karst treatment technology; adaptive design; protective arch wall

0 引言

岩溶地质广泛分布于我国西南喀斯特地貌区, 其复杂的地下溶洞、破碎带及富水结构对隧道工程的安全性、经济性和生态性提出了严峻挑战。据统计, 我国岩溶区隧道施工中因地质条件不明引发的塌方、突水等事故占比超过 30%, 且治理成本较普通

地质条件提高 40% 以上。近年来, 随着“一带一路”交通基础设施建设的推进, 穿越岩溶区的隧道工程数量显著增加, 岩溶隧道岩溶处治、超前钻探等经验技术也有长足进步, 如王少辉、李锟、王建等对特大型溶洞难跨越分别提出承载桩基-纵横框架梁板-钢筋混凝土挡墙、洞渣回填、桥跨和拱形防护、工字钢结合钢筋混凝土板横跨溶洞的处治及施工关键技术^[1-3]; 陈禹成、周轮、黄鑫等通过对岩溶溶洞进行分类, 得出不同隐伏溶洞对隧道围岩稳定性的影响, 提出岩溶区域隧道处治原则及方法应用^[4-6]; 康泽强等

收稿日期: 2025-10-13

作者简介: 陈震宇(1991—), 男, 学士, 工程师, 从事隧道设计工作。

提出综合地质物探方法在岩溶隧道超前地质预报中的应用^[7];尹雪波、于晨旭等对复杂岩溶隧道提出预报掌子面前方地质情况对于降低地质灾害发生和危害程度的意义,并提供了超前预报的综合方法。目前岩溶隧道相关的研究与实践多局限于静态的岩溶勘察处治技术,对于勘察-设计-施工协同的动态岩溶隧道主动防控提及甚少。

广西岳圩口岸联线公路隧道工程地处喀斯特地貌发育区,隧道区岩溶见洞率高达50%,最大洞深近40 m,是典型的复杂地质岩溶隧道群。隧道工程在推进过程面临复杂岩溶地质条件多重制约。如何科学、高效地实现岩溶防控、保障结构安全、推进工程安全生产,是项目的核心课题。本文以项目为工程背景,探讨勘察(超前地质预报)-设计(岩溶处治)-施工(勘察校验动态优化)动态协同关键技术,旨在为类似地质条件下的隧道工程提供技术参考,为推动隧道建设的全过程健康管理及可持续生产提供成熟的实践经验。

1 工程概况

岳圩口岸联线公路项目位于广西省百色靖西市境内,起点位于靖西市同德乡新民村,设岳圩枢纽互通与现有合那高速相接,路线往南展线经化峒镇力行村、岳圩镇汉邦村,终点通过改路与岳圩镇现状沿边公路G219相接,路线全长8.9 km,主线采用双向4车道高速公路标准建设,设计速度100 km/h,路基宽度26 m,概算总投资14.45亿元。项目主线包含隧道1 629 m/4座(中隧道666.5 m/1座、短隧道962.5 m/3座),桥隧比29.26%,其中岳圩2号隧道为分离式短隧道,隧道平均长度333 m。

根据区域地质资料和现场地质、工程地质测绘成果,本项目全线隧道均为岩溶隧道,隧道区大部分覆盖层厚度小,陡坎地带见基岩出露,围岩主要为中风化灰岩,围岩层理、节理发育,岩溶发育,围岩级别进出口可溶岩发育段以Ⅳ~Ⅴ级为主,洞身且岩溶弱发育的段落以Ⅲ级为主。隧道场址主要不良地质为岩溶及灰岩滚石。

2 超前地质预报

对于岩溶隧道,超前地质预报是保证施工安全、优化工程设计、实现施工信息化的重要基础和重要技术手段。岩溶隧道超前地质预报以地质调查法为基础,以超前钻探法为主,结合多种物探法进行综合

超前地质预报,并采用宏观预报指导微观预报、长距离预报指导下短距离预报的方法。根据《广西高速公路投资有限公司关于印发超前地质钻探实施细则的通知》(桂高投发[2020]115号)要求,岳圩口岸联线公路岩溶隧道超前钻探必须全覆盖,本项目中短距离超前钻探探测布置如下。

(1)短距离加深炮孔探测

本项目短距离超前钻探预报距离3~6 m,采用加深炮孔探测,岩溶中等-强烈发育地段每循环布设13孔。孔深较爆破孔(或开挖进尺)深3 m以上且终孔于隧道开挖轮廓线以外3 m。加深炮孔分两循环交错布设,前后两循环钻孔重叠2~3 m。钻孔直径与爆破孔直径相同,钻孔外插角40°。隧道加深炮孔探测布置如图1~2所示。

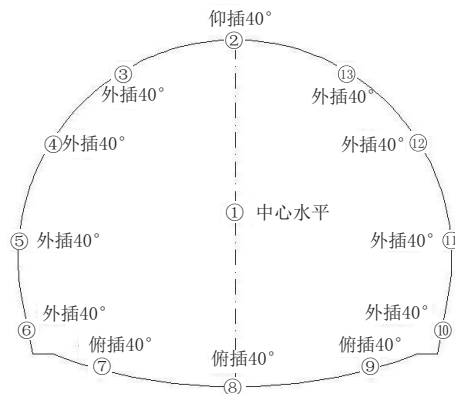


图1 第一循环加深炮孔探测布置图

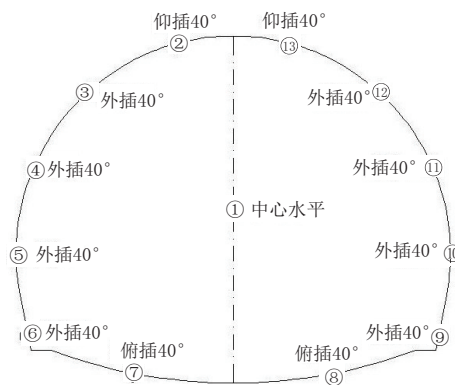


图2 第二循环加深炮孔探测布置图

(2)中距离超前地质钻探

本项目中距离超前钻探预报距离6~30 m,采用超前地质钻探,一般地段采用冲击钻,复杂地质地段采用回转取芯钻。岩溶中等-强烈发育地段每循环布设5孔。每循环钻30 m且终孔于隧道开挖轮廓线以外5 m,前后两循环钻孔重叠3~5 m。钻孔直径与潜孔钻机钻杆直径相同,钻孔外插角12°。隧道中距离超前地质钻探布置如图3所示。

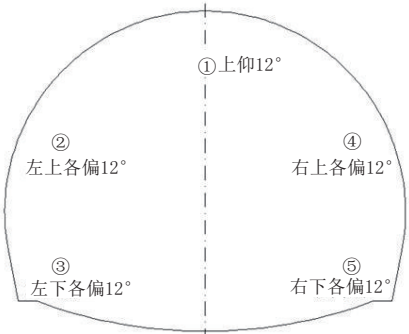


图3 超前地质钻探布置图

3 隧道岩溶处治方案

本项目隧道表现为全线岩溶隧道,结合地质勘察成果、岩溶表现形态,按“溶洞或管道”、“岩溶水”和“溶蚀带”等三种形态制定岩溶隧道处治原则如下:

(1)溶洞或管道的处治方案根据溶蚀洞穴或管道与隧道的相互位置关系及其自身的洞穴发育规模等信息制定。大型溶洞采用跨越方案和支顶加固方案,小型溶洞采用护拱、封闭、换填和回填等方案。

(2)岩溶水的处治方案根据涌水量、水质、围岩地质条件等信息制定。一般采用堵水方案和排水方案,前者包括预注浆堵水、后注浆堵水和补注浆堵水,后者包括依靠隧道自身的排水系统以及涵洞排水和泄水洞排水等措施。

(3)溶蚀带的处治方案综合溶蚀带与隧道的相互位置关系及发育规模、围岩和溶蚀充填物的地质条件等信息制定,一般可综合上述两种处治方案并结合超前预支护方案。

岳圩口岸联线公路岩溶隧道建设过程中勘察-设计-施工做到三方全程动态协同。设计结合地质勘察成果提出岩溶处治原则,施工中严格遵循超前地质钻探全覆盖,施工过程反复校验地质成果,及时优化调整设计方案,以下介绍本项目中较为典型的岳圩2号隧道大型溶洞处治技术。

3.1 岳圩2号隧道进口左洞隧底溶洞处治

根据地质勘察报告揭示(见图4),岳圩2号隧道进口左洞隧底发育大型全充填溶洞,洞口平面形态大致呈长方形,溶洞洞高0.8~38.5 m,多为全充填溶洞,局部无充填,推测岩溶水一般发育,对隧道围岩稳定有影响。

3.1.1 溶洞处治判定

对于隧底溶洞,需对隧底溶洞顶板厚度进行判断,目前国内常用相关规范^[8-11]及要求如下:

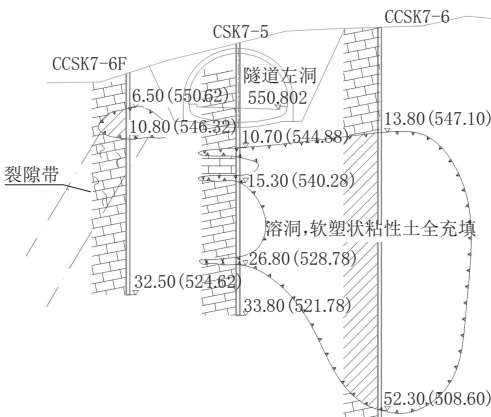


图4 左洞工程地质横断面图

(1)《铁路岩溶隧道勘察设计规范》(Q/CR 9251—2020)第5.4.3条条文说明:根据中铁二院《岩溶洞穴顶板安全厚度的研究》,线路可以安全跨越的溶洞,溶洞顶板条件为:溶洞具有完整顶板,顶板厚度与最大跨度之比大于0.5;溶洞具有不完整顶板,顶板厚度与溶洞高度之比大于5。

(2)《铁路岩溶隧道技术规范》(T/CRS C0801—2018)第5.4.10条条文说明、《公路岩溶隧道设计与施工技术规范》(征求意见稿)第6.4.7条条文说明:隧道与周边隐伏溶洞的安全岩盘厚度可采用工程类比法、数值分析回归法和结构力学近似分析法进行估算。

(3)《岩溶区公路隧道技术规范》(DB 45/T 2125—2020)第6.2.3条:地质资料揭示发现溶洞时,线位布置宜保证隧道周边外侧有一定厚度的完整基岩,中小规模溶洞完整基岩有效厚度两车道隧道宜≥8 m、三车道隧道宜≥12 m,大溶洞应进行分析论证后确定合理的避让距离。

根据上述条文规定,结合工程实际参数,可综合判断岳圩2号隧道进口段隧底溶洞顶板厚度不足,需对溶洞进行处治。

3.1.2 溶洞处治设计方案

根据溶洞处治初步判定,2号隧道进口段隧底溶洞顶板厚度不足,需对溶洞进行处治。结合勘察报告成果,初步提出3个处治思路。

方案一为全部回填。该方案需填充近40 m深溶洞,混凝土方量初步估算>1.5万m³。方案材料与工期成本过高,性价比差,且存在堵塞岩溶地下水通道引发水压升高,回填体沉降引发隧道衬砌扰动变形等风险。不做为推荐方案。

方案二采用桥梁跨越。根据左洞隧道地质纵断面图(见图5),该处洞口山体倾斜率大,总体设计采

用明洞过渡,避免了山体大开挖,不具备采用桥梁结构跨越溶洞的条件。如果在隧道内架设桥梁结构,隧道净空不足,无法满足桥梁墩台施工要求。方案不作为推荐方案。

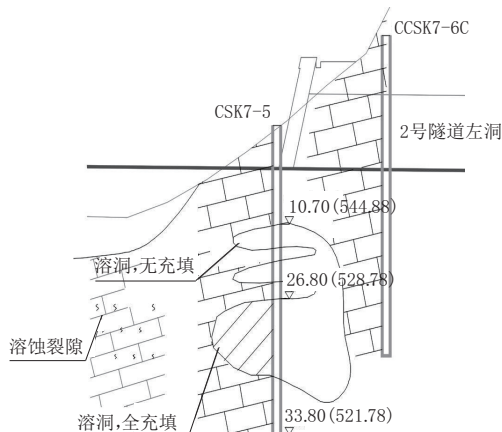


图5 左洞工程地质纵断面图

方案三采用桩筏结构。方案采用桩基穿透充填物锚固于稳定基岩(嵌岩 ≥ 2 m),筏板分散荷载,能适应不规则溶洞形态,在造价上的优势显著,且工期可以控制,结构可靠性更高。结合岳圩2号隧道进口左洞隧底溶洞发育规模、充填物性质,推荐溶洞地段采用桩筏结构,隧底溶洞处治详如图6所示。

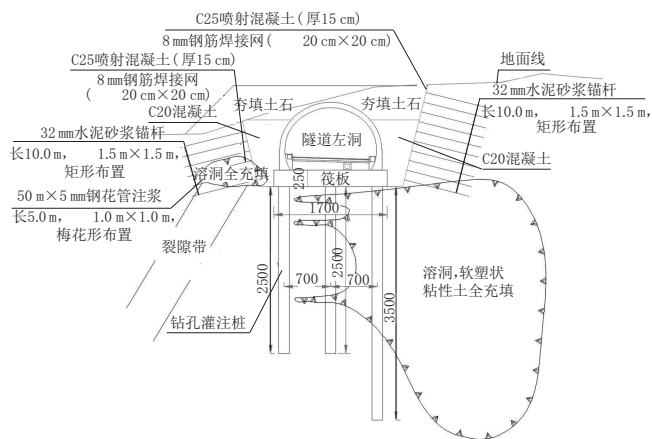


图6 隧底溶洞处治横断面图

桩筏结构由下部钢筋混凝土钻孔灌注桩、上部钢筋混凝土筏板组成,桩与板采用钢筋连接。结合施工钻孔探查实际地质状况,采用筏板板厚2.5 m,宽17 m,长18.5 m,采用C40钢筋混凝土。钻孔灌注桩按端承桩设计,桩径1.6 m,桩间距纵向7 m、横向7 m,共9根,桩长总计255 m,采用C35钢筋混凝土,桩底岩溶完整顶板厚度不小于10 m。桩基全断面嵌入完整基岩深度不小于2 m,基岩嵌固起点处桩侧襟边不小于3倍桩径。

3.1.3 岩溶处治施工动态优化

施工按照设计桩筏结构方案进行逐桩钻孔,进

一步探明隧底溶洞发育情况。通过进一步现场补勘,确定隧底2处溶洞发育区,1#溶洞位于隧道洞口左方,影响区域约5 m;2#溶洞位于隧道洞口右前方,影响区域15 m,呈串珠式,均为全充填溶洞。在探明确切溶洞发育状态后,对初步方案适当优化调整如下:

(1) 桩筏结构施工优化

维持设计桩筏结构方案,取消原1#~3#号桩基,筏板长度相应调整为11.5 m,宽度保持17 m不变。钻孔灌注桩桩径不变,桩间距纵向7 m,横向间距7 m,共6根。采用多护筒跟进施工。

(2) 筏板基底溶洞填充方案

施工过程洞门筏板基底开挖后揭示溶洞,采取如下填充措施:溶洞发育深度 ≤ 3 m,采用C20混凝土换填;溶洞发育深度 > 3 m,3 m深度内采用C20混凝土换填,并采用 $\varphi 108$ mm钢管桩加固,间距1.2 m $\times$ 1.2 m,梅花形布置,长度不小于10 m,且嵌入中风化破碎灰岩深度不小于1 m。

岳圩2号隧道左洞在勘察-设计-施工三方动态协同配合下,结构设计更为合理,岩溶处治技术更为精细化,在保障隧道安全基础上,节约了成本、缩短了施工工期,取得了较好的工程经济效益。

3.2 岳圩2号隧道右洞大型洞侧溶洞处治

岳圩2号隧道右洞YK7+728.6上台阶开挖过程经超前地质钻探揭示溶洞,图7为溶洞探查结果。该处隧道埋深约65 m,距离推测破碎带约20 m,原设计为IV级围岩。溶洞大部分位于隧道左侧开挖轮廓线外,溶洞洞顶距离隧道拱顶约9.4 m,洞壁距离隧道边墙约8.8 m,溶洞底部至下台阶中部,溶洞纵向深度约6.6 m。溶洞现状稳定性一般,发育一组 40° ~ 56° 节理裂隙,密度1~2 m,岩体较破碎。

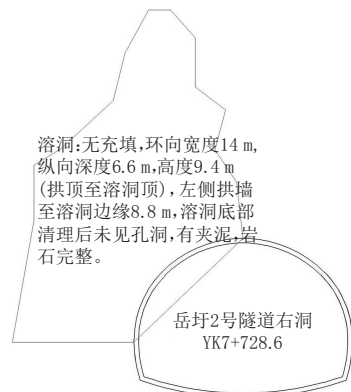


图7 施工中开挖揭露溶洞位置及规模

3.2.1 溶洞现场防护及探查

结合现场初步探查结果,首先对溶洞进行防护

处理并进一步探测溶洞情况。

(1)清除溶洞洞顶和洞壁危石,洞顶和洞壁采用喷网锚防护。喷网锚防护参数:C25喷射混凝土厚度10 cm; $\phi 8$ 钢筋网片,网格间距20 cm;D22水泥砂浆锚杆,长度3.5 m,间距1 m $\times$ 1 m,梅花形布置。

(2)清除溶洞洞底充填物和虚渣,调查溶洞内水流方向、落水洞等情况。探测隧道洞周(含隧底)隐伏溶洞,确保洞周(含隧底)20 m范围内无隐伏溶洞。

3.2.2 溶洞支顶处治方案

结合地质情况,对主体隧道溶洞一侧采用护拱墙加固、加强排水,并加强主体隧道超前支护及衬砌结构。以下介绍溶洞处置结构方案(见图8)。

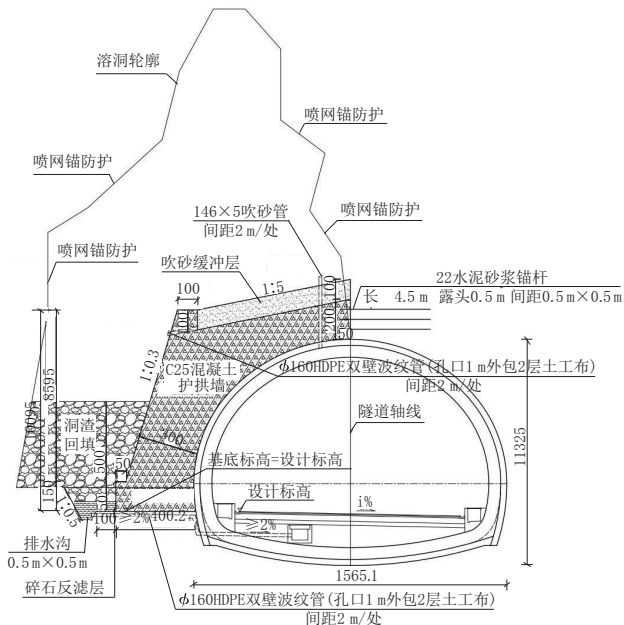


图8 2号隧道半侧溶洞处治方案

(1)护拱墙设计

溶洞洞顶、洞壁和洞底处理完成后,在复合式衬砌轮廓外设置护拱墙。护拱墙基础应位于坚实地基上,外侧采用洞渣回填,高度5 m。护拱墙采用C25现浇混凝土,厚度2~3 m。护拱墙与溶洞洞壁采用锚杆连接, $\phi 22$ 水泥砂浆锚杆长度4.5 m,露头0.5 m,间距0.5 m $\times$ 0.5 m。护拱墙顶部预埋 $\phi 160$ HDPE双壁波纹管(内侧孔口外包2层土工布),间距2 m/处。护拱墙顶部预埋 $\phi 146$ 吹砂管,间距2 m/处。护拱墙强度达到设计强度后进行吹砂,厚度1 m。

(2)加强排水措施

护拱墙基础外侧1 m设置0.5 m $\times$ 0.5 m排水沟,沟内回填碎石反滤层,厚度0.5 m。护拱墙基底设置 $\phi 160$ HDPE双壁波纹管(孔口1 m外包2层土工布),间距2 m/处,排水管与洞内中心排沟连通。岩溶段

落环向排水管和横向排水管间距2 m/处。

岳圩2号隧道右洞隧旁半侧溶洞为施工中经超前地质钻探发现的岩溶,整个岩溶处置过程安全有序,超前地质钻探-现场及时防护-溶洞深入探测-结构设计-施工的动态协同,推进岩溶处治从被动抢险向防控转型,克服了溶洞隐蔽性强、形态多变等难题,保障了工程安全和可持续生产。

6 结 语

岳圩口岸联线公路是西南地区复杂地质岩溶隧道群的典型工程,其8.9 km路线中即包含4座总长1 629 m的岩溶隧道群。该工程基于勘察-设计-施工协同,通过系统性岩溶处治方案,推动岩溶隧道工程从传统的“被动应对”向“主动防控”转型,形成了可推广的技术与管理实践,成功缩短了工期,保障了工程安全与可持续性生产,对岩溶区域基础设施建设具有重要示范价值。

(1)对于全线岩溶隧道,结合地质勘察、岩溶处治经验、超前地质钻探、施工动态优化,建立“勘察-设计-施工”信息共享机制与动态协同工作平台,做到深挖溶洞地质类型,提前布局岩溶处治原则,反复校验动态优化处治方案。岳圩口岸联线公路与同类工程相比,设计变更率减少近40%。

(2)隧底大型岩溶结合地质纵断采用桩筏复合结构体系跨越,替代大型溶洞全充填方案,在提高结构安全前提下,减少了经济和工期成本。结合动态施工优化,实现桩基布置与溶洞空间精准匹配,筏板基底溶洞分层级填充,岩溶处治技术更为精细化,在保障隧道安全基础上,取得了良好的经济和工期效益。

(3)2号隧道右洞隧旁大型半侧溶洞为施工中经超前地质钻探发现的岩溶,处置过程安全有序,凸显了超前地址钻探以及溶洞现场应急防预案在岩溶隧道全周期协同中的重要性,推进岩溶处治从“被动抢险”向“主动防控”转型。

岳圩口岸联线公路岩溶隧道基于勘察-设计-施工协同的岩溶隧道主动防控技术与实践克服了溶洞隐蔽性强、形态多变的难题,对于建立岩溶隧道施工全过程健康管理体系提供了重要的工程实践经验价值。

参考文献:

- [1] 王少辉,陈兆,蒋冲,等.特大型溶洞隧道综合处治方案及施工技术[J].隧道建设,2017,37(6):748-752.

(下转第260页)