

文章编号: 1674—8247(2020)01—0090—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.01.019

中老铁路炭质软岩隧道施工关键技术

梁镜宇

(中铁二局集团有限公司, 成都 610031)

摘 要:炭质板岩具有遇水易软化的特性,当隧道通过此类地层时,隧区围岩自稳能力差,开挖后易出现变形坍塌,需采用特殊施工工艺,并辅助合理的防护措施,以有效控制隧道围岩变形。本文结合中老铁路会福莱隧道正洞施工实践,对炭质软岩地层隧道的施工关键技术、变形防治及质量安全控制措施等进行了研究总结,可供国内同类地层隧道工程施工参考借鉴。

关键词:中老铁路;炭质软岩;隧道施工;关键技术;变形

中图分类号:U 455 **文献标志码:**A

Key Construction Technique of Carbonaceous Soft Rock Tunnels on China-Laos Railway

LIANG Jingyu

(China Railway No.2 Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Carbonaceous slate is easy to be softened by water. When the tunnel passes through this kind of stratum, the surrounding rock in the tunnel area has poor self-stabilizing ability and is prone to deformation and collapse after excavation. Special construction technology and reasonable protective measures should be adopted to effectively control the tunnel surrounding rock deformation. Based on construction practice of Huifulai tunnel on China-Laos Railway, this paper studies and summarizes the key construction technology, deformation prevention and quality safety control measures of carbonaceous soft rock stratum tunnel to provide a reference for similar tunnel projects in China.

Key words: China-Laos Railway; carbonaceous soft rock; tunnel construction; key technique; deformation

琅勃拉邦缝合带处于墨江—程逸缝合带中南段,宽约 40 km,带内地层有层无序,比较杂乱。带内增生杂岩体,南北边界分别为两条延长数百公里的壳幔性深大断裂所挟持,其间平卧、斜歪、复式褶皱和区域性大断裂发育。区域内炭质软岩岩性变化快、变形收敛大,当隧道通过此类地层时,受地下水及爆破开挖扰动影响明显,围岩变形持续时间长、变形量大^[1-2]。部分隧道在施工期间频繁发生初期支护混凝土开裂、钢架扭曲断裂、溜坍、变形侵限换拱等问题,施工安全风

险高,施工进度极为缓慢。

在隧道施工过程中,围岩变形甚至软岩大变形是客观存在的,同时也是可以控制的^[3]。本文以中老铁路会福莱隧道正洞施工为研究对象,总结出炭质软岩隧道施工技术及变形防治措施,以期类似地质环境的隧道工程施工提供参考。

1 工程概况

新建中老铁路起于中老边境口岸磨丁,北接我国

收稿日期:2019-10-21

作者简介:梁镜宇(1986-),男,工程师。

引文格式:梁镜宇. 中老铁路炭质软岩隧道施工关键技术[J]. 高速铁路技术,2020,11(1): 90-94.

LIANG Jingyu. Key Construction Technique of Carbonaceous Soft Rock Tunnels on China-Laos Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(1): 90-94.

云南玉磨铁路,南至老挝首都万象市,线路全长418 km,铁路沿线主要褶皱21个,长大断层破碎带30条,全线1/3的隧道穿越石炭系板岩、泥灰岩、炭质板岩夹砂岩地层。泥灰岩为夹层,分布无规律,浅灰色,隐晶质结构,中层状。炭质板岩为深灰、灰黑色,变余致密结构,薄层板状构造,裂隙极发育,炭质含量高,遇水易软化^[4],多为Ⅳ、Ⅴ级围岩,地层岩土物理学指标如表1所示。

表1 岩土物理力学性质指标表

岩土名称	时代成因	状态或风化程度	天然密度 ρ / (g/cm ³)	凝聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)	基底摩擦系数 f	基本承载力 σ_0 / kPa
板岩夹砂岩、泥灰岩、炭质板岩	C	W ₄	1.91	42	16	0.3	200
		W ₃	2.4	—	45	0.4	350
		W ₂	2.5	—	55	0.55	500

2 工程地质

隧区位于琅勃拉邦缝合带内,北以班会海、班内海断裂带为界,以北为兰坪—思茅地块,南以班献伦断裂带为界,以南为南海印支地块^[5]。该区地质构造复杂,属次级构造发育,为剥蚀中高山地貌,沟壑发育,地形起伏较大,偶有“V”字型河谷,地表多被植被覆盖,基岩出露较差。隧区地表水多为山间沟水、河水,水量受季节降雨控制,地下水主要为基岩裂隙水,水量较丰富。洞身围岩受构造影响,节理裂隙发育,岩体较破碎且软硬不均,局部受地下水或地应力影响,围岩自稳性差。

典型工点以会福莱隧道、普亚村一号隧道、达隆一号隧道、森村二号隧道为代表,开挖揭示地质岩层为夹层,岩体呈碎石、板状结构,部分层面光滑,层间结合性差,岩质软,局部泥化较严重,开挖时易掉块或局部小溜坍,影响人员及设备安全。

3 关键施工技术与实践

3.1 关键施工技术

3.1.1 微台阶开挖

隧道穿越软岩等复杂地质地层较多,易发生软岩变形的段落多为Ⅴ级围岩,下台阶开挖或仰拱开挖施工时,支护结构的突变给隧道施工造成极大的安全风险,为保证仰拱快速封闭成环、控制围岩变形,现场优化传统的三台阶开挖方案,采用“短进尺、弱爆破”的微台阶法开挖,并根据围岩情况设计加工悬臂拼装多功能台架进行施工。上台阶长度为3~5 m,操作方便,翻渣量小^[6]。上台阶高度为3~3.5 m,每循环进尺为1.2 m,下台阶紧跟,仰拱每循环开挖进尺不大于

3 m,仰拱初支不超过6 m封闭成环,初支封闭成环位置距离掌子面不超过15 m,并及时施作仰拱及衬砌。采用微台阶法施工后,量测某隧道最大拱顶沉降为31 mm,拱腰收敛34 mm,绝大部分拱顶沉降和周边收敛在20 mm以内,现场施工安全可控。

3.1.2 溜坍处治措施

当发生溜坍时,暂停开挖施工,利用洞渣或砂袋施作反压平台稳定掌子面,采用湿喷混凝土对空腔部位围岩和溜坍体进行封闭处理,对洞身塌体及周边进行注浆加固,超前支护采用超前小导管及管棚联合支护^[7]。对初支发生变形处及时拆换拱架,逐榀跟进,空腔最高处预留高低错落埋设混凝土泵管,待拱架落地后,分次泵送混凝土回填。处理完成后,在溜坍段支护衬砌处设置监测断面,跟踪监测围岩稳定情况。

3.1.3 加强监控量测

以信息化为手段,提高工程质量和安全,全线隧道均实行围岩监控量测信息上传,及时报警处置,降低隧道安全事故发生的概率^[8]。根据监控量测情况及时掌握围岩变化规律,开挖时按实际测出的预留变形量确定开挖轮廓尺寸,防止变形后侵占隧道净空^[9]。

3.1.4 含水岩组富水性较强地层施工技术

隧区洞身有水的软弱围岩断层地段,其破碎带主要由板岩夹砂岩、泥灰岩组成,角砾胶结差,导水性好,岩层裂隙富水。为防止开挖施工引起涌泥或地下水,采取“以堵为主、限量排放”原则加强初期支护,通过采取超前周边注浆加固破碎带等措施,控制地下水流量,降低施工安全风险,保证围岩稳定,支护结构体系如图1所示。

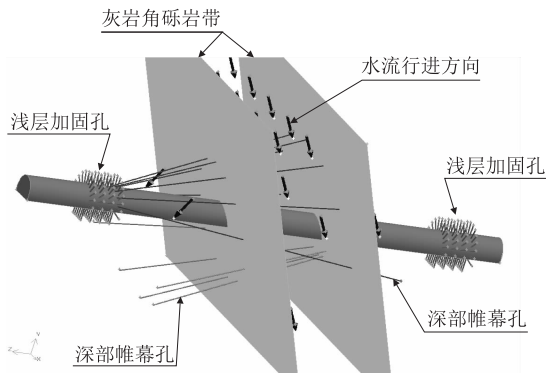


图1 富水软岩支护结构体系图

3.2 工程实践

3.2.1 工程概况

会福莱隧道全长6.969 km,为单线隧道,全线控制性工程,洞身最大埋深635 m,隧道穿越普巴道山、会福莱1号、会福莱2号、班会海断层破碎带。隧道在

V级围岩地段施工过程中,累计发生12次较大~大规模塌方,初期支护产生9次较大变形,不同失稳类型失稳次数统计如图2所示。

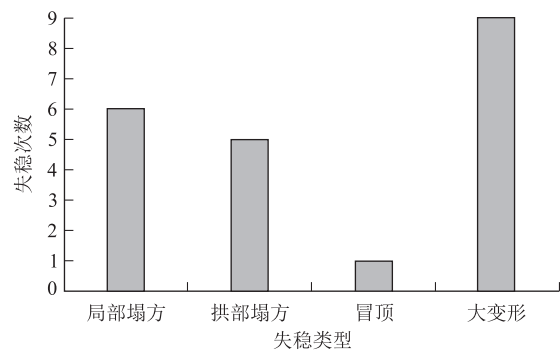


图2 不同失稳类型失稳次数图

现场采用三台阶法进行开挖,D2K 130+330~D2K 130+360预留变形量上台阶为65 cm,下台阶为60 cm,采用I16型钢支护。该段落岩层产状扭曲变形

严重,岩体挤压破碎强烈,隧道施工过程中初期支护变形严重,主要表现为喷混凝土开裂、拱架扭曲、初期支护侵限等。D2K 130+335 里程段施工过程中变形曲线如图3所示,D2K 130+300~D2K+400段复合式衬砌支护参数如表2所示。

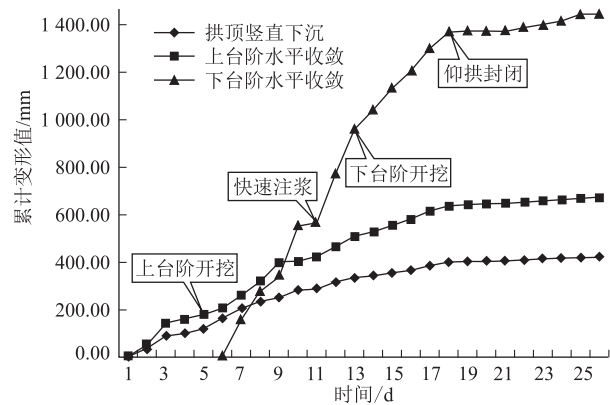


图3 D2K 130+335 变形曲线图

表2 复合式衬砌主要支护参数表

衬砌类型	初期支护							二次衬砌	
	C25 喷射混凝土		锚杆			钢架		厚度/cm	强度等级
	设置部位	厚度/cm	长度/m	间距(环×纵)/(m×m)	类型	规格	间距/m		
Va	拱部	23	3	1.2×1	φ22 组合中空锚杆	I16 型钢	1	45	C35
	边墙	23	3	1.2×1	φ22 砂浆锚杆	I16 型钢	1	45	C35
	仰拱	10	—	—	—	—	—	45	C35

3.2.2 原因分析

(1)工程地质原因:①隧道位于琅勃拉邦缝合带,岩体节理裂隙发育,地质条件复杂,区域内炭质板岩分布广泛,岩体抗压强度极低,受构造应力影响极易诱发高地应力软岩大变形现象。②岩层的单轴抗压强度低,隧道 D2K 130+230~D2K 130+370 段围岩开挖揭示为板岩夹炭质板岩、炭质泥岩,岩石单轴饱和抗压强度分别为 2.25 MPa 和 3.89 MPa,属于极软岩类。③水平构造应力场特征极其明显,隧址区地应力测试结果显示,埋深 530 m 时最大水平应力达 20.41 MPa,竖向应力 13.81 MPa,侧压力系数高达 1.47。④岩体极破碎,节理裂隙发育,岩质软,稳定性差,TSP 超前地质预报该段均为 V 级围岩。

(2)施工原因:①采用三台阶不留核心土法施工,仰拱及二次衬砌不能紧跟掌子面,导致初期支护变形持续时间增加,不能有效控制洞室稳定;②现场存在钢架安装不到位、支护不及时、监测不到位、变形加固不及时等问题,造成变形增大甚至侵限换拱。

3.2.3 优化设计

通过组织现场会勘,做好设计变更,优化设计参数。

(1)调整开挖轮廓线,加大初期支护边墙和仰拱曲率,改善受力结构。

(2)加强支护型钢,钢架支护由 I16 工字钢调整为 HW175 型钢,间距 0.6 m。

(3)钢架内外侧均设置纵向连接钢筋,并在上台阶拱脚处增设 I14 工字钢作为连接型钢。

(4)系统锚杆采用长短结合主动强支护。短锚杆长度 4 m,采用 φ22 速凝药包锚杆。长锚杆长度 8 m,采用 φ32 自行式锚杆,快凝早强浆液注浆。

(5)在拱部 140°范围内采用 φ42 小导管进行超前支护,单根长度为 4.5 m,环向间距 0.4 m,每环 27 根,按纵向 2.4 m/环布置。

(6)喷射混凝土强度由 C25 调整为 C30。

(7)加强钢架连接板接头连接质量,M20×65 高强度螺栓由 4 颗调整为 6 颗,钢架连接板采用三面满焊以增强钢架整体性。

(8)采用双锁脚,在原设计基础上增设一道锁脚锚杆,加强支护抗变形能力。

(9)根据监控量测数据,适当调整预留变形量。

3.2.4 施工方法及措施

(1)暂停掌子面掘进,增加临时支撑,防止初期支

护侵限,现场采用快速注浆工艺。

(2)现场严格规范施工,因变形侵限需换拱的部位,注浆完成待围岩变形稳定后,对拱墙逐榀进行换拱处理,避免再次换拱,同时做好超前地质预报和监控量测工作^[10]。

(3)优化工法,将爆破开挖调整为机械开挖,采用铣挖机开挖以消除爆破震动对围岩的扰动。现场采用微台阶法施工,开挖过程中控制台阶长度不超过6 m。

(4)安全质量控制措施:①完善安全质量管理体系,制定应急预案,完善救援措施,定期组织突发事件处置演练;②软岩地段严格按设计方案施工,下台阶和仰拱施工及时跟进,避免工序安全步距超标;③做好地质风险揭示工作,及时制定技术措施,确保施工安全和开挖进度;④及时清除喷混凝土回弹的虚碴,做好基础处理与支垫措施,安装钢架要位置准确,下台阶开挖一次不超过2榀,避免钢架悬空吊脚;⑤加强施工过程自检,规范湿喷工艺和混凝土灌注工艺,现场严格工序交接验收程序;⑥对境外水泥性能进行课题研究,通过国内外水泥检测指标对比,优化混凝土配合比,同时加强对试验室、拌和站的专项检查,从源头抓好质量控制;⑦定期开展施工安全及工期风险分析专题会议,现场采取有效措施,保证不良地段施工安全质量;⑧洞身通过石炭系地层炭质板岩时,可能存在瓦斯等有害气体,施工中应加强有害气体监测和隧道通风,确保施工安全。

3.2.5 处理效果

通过优化断面及支护参数、严格重要工序关键环节、采取施工技术改进措施和做好监控量测工作,初期支护开裂情况减少,围岩变形得到有效控制,基本无侵限换拱现象发生,隧道软岩段开挖月进度从22.8 m提高到43.7 m,施工进度明显加快。变形从开挖到二衬施工完成一直存在,后期速率降低,但不能完全收敛^[11],优化后D2K 130+445的不良地质变形曲线如图4所示。

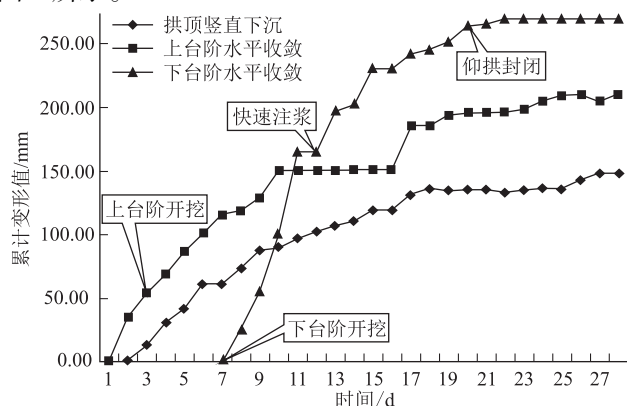


图4 D2K 130+445 变形曲线图

4 结束语

中老铁路炭质软岩地层主要集中在琅勃拉邦缝合带内的24座隧道工程施工管段,隧区围岩自稳能力差,其中石炭系地层易引起软岩大变形。当掌子面地质情况发生变化时,需注意做好围岩级别、支护形式等变更设计工作,已发生软岩变形的隧道,选择合适的工法施工,在对变形侵限部位更换初支的基础上,采用微台阶开挖、增加临时横撑、施作临时仰拱、地表注浆、径向注浆、超前注浆、增设锁脚、增加超前管棚周边注浆、加大超前支护范围等措施,能有效控制隧道软岩大变形。

参考文献:

- [1] 蔡路军, 彭胜, 周大华, 等. 花石沟碳质片岩隧道施工技术研究[J]. 施工技术, 2014, 43(7): 87-90.
CAI Lujun, PENG Sheng, ZHOU Dahua, et al. Construction Technology of Carbonaceous Schist in Huashigou Tunnel [J]. Construction Technology, 2014, 43(7): 87-90.
- [2] 任鹏. 勐远隧道软弱围岩收敛变形控制技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2019, 36(4): 80-82.
REN Peng. Technology Research on Convergence Deformation Control for Mengyuan Tunnel with Weak Surrounding Rock [J]. Railway Construction Technology, 2019, 36(4): 80-82.
- [3] 关宝树. 隧道工程施工要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
GUAN Baoshu. Tunnel Construction Key Points [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [4] 姜贵, 马建军, 蔡路军. 花石沟炭质片岩隧道弱爆破与机械联合开挖法[J]. 武汉科技大学学报, 2015, 38(5): 396-400.
JIANG Gui, MA Jianjun, CAI Lujun. Weak Blasting Combined with Machine Excavation for Construction of Huashigou Tunnel with Carbonaceous Schist [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2015, 38(5): 396-400.
- [5] 王宏, 林方成, 李兴振, 等. 老挝及邻区构造单元划分与构造演化[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 71-84.
WANG Hong, LIN Fangcheng, LI Xingzhen, et al. The Division of Tectonic Units and Tectonic Evolution in Laos and Its Adjacent Regions [J]. Geology in China, 2015, 42(1): 71-84.
- [6] 陈仁超. 铁路隧道软弱围岩在安全步距下快速施工技术研究[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(1): 84-90.
CHEN Renchao. Research on Fast Construction Technology of Weak Surrounding Rock in Railway Tunnel under Safe Distance [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(1): 84-90.
- [7] 张卫霞. 板岩隧道顺层塌方分析及预防失稳措施研究[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(S2): 218-224.
ZHANG Weixia. Study and Countermeasure for Collapse Instability of Tunnel in Slate [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(S2): 218-

224.

[8] 韩贺庚, 申志军, 皮圣. 蒙华铁路隧道工程施工技术要点及机械化配套[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(12): 1564 – 1570.
HAN Hegeng, SHEN Zhijun, PI Sheng. Technical Key Points and Mechanization Matching of Menghua Railway Tunnel Construction [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(12): 1564 – 1570.

[9] 王维富. 炭质板岩地层隧道施工要点及大变形防治措施[J]. 隧道建设, 2010, 30(6): 697 – 700.
WANG Weifu. Key Points and Large Deformation Control in Construction of Tunnel in Carbonaceous Slate [J]. Tunnel Construction, 2010, 30(6): 697 – 700.

[10] 张品, 米俊峰. 米拉山隧道软弱围岩大变形施工防控技术[J]. 铁道建筑技术, 2018, 35(11): 67 – 71.
ZHANG Pin, MI Junfeng. Prevention and Control Technology for Large Deformation while Constructing Mira Mountain Tunnel with Weak Rock [J]. Railway Construction Technology, 2018, 35(11): 67 – 71.

[11] 李永林, 冯学钢, 姜云, 等. 隧道工程围岩大变形及预测预报研究[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(5): 46 – 51.
LI Yonglin, FENG Xuegang, JIANG Yun, et al. Large Deformations Encountered in the Surrounding Rocks of Tunnels and Their Prediction [J]. Modern Tunnelling Technology, 2005, 42(5): 46 – 51.

(编辑:赵立红 苏玲梅)

(上接第 64 页)

中不含瓦斯或瓦斯浓度小于 0.5%,并保证作业区段通风效果的条件下实施。采用水炮泥替代煤矿许用炸药基本可行,但还需进一步完善相关标准。

(5)运营期间作为防灾疏散的辅助坑道宜尽量选取洞口为高端的辅助坑道,作为排水通道的辅助坑道结合工后瓦斯检测情况可选择交叉口不封堵、封堵设置通风竖井、封堵设置洞内管路通风系统等方式。

(6)瓦斯隧道运营通风的设置标准还需通过对各影响因素的深入分析来综合确定。

参考文献:

[1] TB 10120 – 2019 铁路瓦斯隧道技术规范 [S].
TB 10120 – 2019 Technical Code for Railway Tunnel with Gas [S].

[2] 高杨, 杨昌宇, 郑伟. 铁路瓦斯隧道分类分级标准探讨[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(11): 1366 – 1372.
GAO Yang, YANG Changyu, ZHENG Wei. Discussion on Standards of Classification of Railway Gas Tunnel [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(11): 1366 – 1372.

[3] 郑天中. 瓦斯隧道设计施工中有关问题的探讨[J]. 铁道标准设计, 1992, 36(2): 10 – 12.
ZHENG Tianzhong. Discussion on Several Problems in Design and Construction of Railway Tunnel with Gas [J]. Railway Standard Design, 1992, 36(2): 10 – 12.

[4] 国家安全生产监管总局令[2016] 第 87 号,煤矿安全规程 [S].
Order of the State Administration of Work Safety [2016] No. 87, The coal mine safety rules [S].

[5] TB 10003 – 2016 铁路隧道设计规范 [S].
TB 10003 – 2016 Code for Design of Railway Tunnel [S].

[6] JT 52/02 – 2014 贵州省高速公路瓦斯隧道设计技术指南 [S].
JT 52/02 – 2014 Design Guidelines for Freeway Tunnel with Gas in Guizhou [S].

[7] DB 51/T 2243 – 2016 公路瓦斯隧道技术规程 [S].
DB 51/T 2243 – 2016 Technical Regulation for Highway Gas Tunnel [S].

[8] 丁睿. 瓦斯隧道建设关键技术 [M]. 北京:人民交通出版社, 2010.
DING Rui. Key Technology for Construction of Tunnel with Gas [M]. Beijing: China Communications Press, 2010.

(编辑:车晓娟 白雪)

94