

铁路隧道工程开挖工法选择及风险控制

赵万里*

中咨工程管理咨询有限公司, 北京 100048

摘要: 铁路工程线路大多穿越深山丛林, 隧道施工占据较大比重, 而隧道开挖及支护作业方法的选择, 直接影响着隧道施工的安全、质量及进度, 在隧道开挖前, 必须把超前地质预报、监控量测纳入工序管理, 根据预报的围岩等级选择适当的施工方法。如果施工方法选择不当, 易造成掌子面变形、掉块、溜坍, 在软弱、富水围岩中极易引起已完成的拱墙初支产生较大变形, 造成初期支护和围岩失稳, 甚至产生隧道洞身坍塌“关门”事件。为加强复杂地质条件下的施工安全风险防范工作, 有效防范事故, 因此需要对隧道开挖、风险控制进行研究, 为以后同类工程施工组织编制提供参考经验。

关键词: 隧道工程地质; 施工工艺; 风险控制

Excavation Method Selection and Risk Control of Railway Tunnel Engineering

Wan-Li Zhao*

CIECC Engineering Management Consulting Co., Ltd., Beijing 100048, China

Abstract: Most railway engineering lines cross remote mountains and forests, and tunnel construction accounts for a large proportion. Tunnel excavation and support methods directly affect the safety, quality and schedule of tunnel construction. Before tunnel excavation, advance geological prediction and monitoring measurement must be included in the process management. Appropriate construction methods are selected based on the forecasted surrounding rock grade. Inappropriate construction methods can easily cause deformation of the working area, block dropping, and topsoil slip. As tunnel construction under shallow buried and water-rich conditions is easy to cause large deformation of the completed arch wall, the initial support and surrounding rock will lose stability and even cause tunnel collapse. In order to strengthen the prevention of construction safety risks and effective prevention of accidents under complex geological conditions, tunnel excavation and risk control need to be studied to provide reference experience for the construction organization of similar projects in the future.

Keywords: Tunnel engineering geology; construction technology; risk control

一、项目情况

磨万铁路第Ⅱ标监理站中咨监理管段为: 新建铁路磨丁至万象线土建Ⅲ标(D2K161+861.3~D2K166+900)、土建Ⅳ标(DK179+520~DK253+614), 正线长度80.029 km。隧道18座, 长60.888 km, 隧道施工安全风险大。

(一) 工程地质情况

地处琅勃拉邦缝合带内, 沿线主要褶皱21个、长大断裂约30条。岩性复杂, 石炭系(C)板岩夹砂岩、白云质灰岩, 弱风化(W2), 板岩变余结构, 板状构造, 薄层—中厚层状, 泥钙质胶结, 质较软; 砂岩中细粒结构, 中厚层状, 钙质胶结, 岩质稍硬; 白云质灰岩为夹层, 层位不稳定, 分布无规律, 隐晶质结构, 中厚层状。受区域地质构造影响, 次级褶皱发育, 围岩节理裂隙发育, 岩体破碎, 岩质软硬不均^[1]。

(二) 工程水文情况

沿线地表水系发育, 多呈格状、羽状水系。湄公河是老挝境内最大的河流。

二、隧道开挖工法选择及其要求

中咨管段内Ⅲ围岩28%, Ⅳ级围岩27%, Ⅴ级岩45%。隧道群穿越山岭, 洞口段及浅埋段Ⅴ级岩居多, 进洞后多为Ⅳ级围岩, 进入山岭腹地后, Ⅲ围岩居多。铁路单线隧道Ⅲ级围岩采用全断面法开挖; Ⅳ、Ⅴ级围岩采用台阶法开挖; 车站段(双线)Ⅲ、Ⅳ级围岩采用台阶法、Ⅴ级围岩采用台阶法+临时仰拱法开挖。管段内的最有代表性的是Ⅲ级围岩采用全断面法开挖及Ⅳ、Ⅴ级围岩短台阶开挖, 已成熟运用到磨万铁路隧道群施工当中^[2]。

(一) Ⅲ级围岩采用光面爆破全断面开挖工法在森村二号隧道成功应用

隧道洞身开挖根据新奥法原理组织施工, 采用人工钻爆、红线爆破技术开挖, 爆破面积约63.05 m², 以超前水平钻预报与TSP物探法相结合方式进行超前地质预报, 预测隧道前方地质条件, 确保施工安全。

1. 施工准备

督促项目部编制作业指导书并对作业人员进行岗前培训及技术交底。

*通讯作者: 赵万里, 1980年8月, 男, 汉, 河南尉氏人, 现任中咨工程管理咨询有限公司监理组长, 中级工程师, 本科。研究方向: 铁路、公路、市政。

2. 围岩判定

地质预报小组做好掌子面围岩判定规则,采用地质素描方式对现场围岩进行判定,在做好TSP的基础上,加强超前水平钻的施工,现场监理做好地质状况的核对^[3]。掌子面采用C6钻施工超前水平钻,具体见图1。



图1 掌子面超前水平钻探

3. 光面爆破方案

(1) 森村二号隧道光面爆破设计相关参数

根据森村二号隧道的地质条件,每循环开挖进尺按3 m计算,周边眼深度为3.1 m,掏槽眼深度为3.2 m掏槽眼直径d = 50 mm,其余眼d = 40 mm。采用乳化炸药,全面布孔144个,每循环装药量为176.2 kg。采用电雷管位差爆破技术,具体通过爆破试验确定如下爆破参数,试验时爆破参照下表1。

表1 光面爆破参数表

岩石种类	周边眼间距E(cm)	周边眼最小抵抗线W(cm)	相对距E/W	周边眼装药参数q(kg/m)
硬岩	40~55	50~60	0.8~0.85	0.15~0.25
软岩	30~45	45~60	0.75~0.8	0.04~0.15

Ⅲ级围岩全断面法施工,每循环进尺3 m,开挖爆破孔布置见下图2。

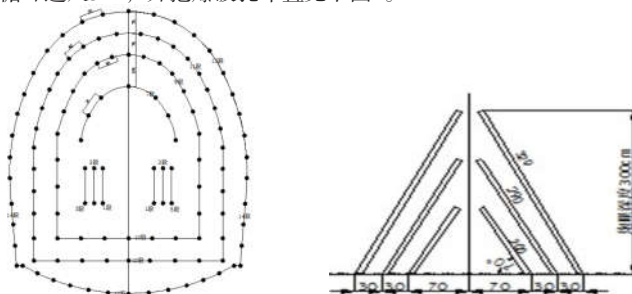


图2 Ⅲ级围岩全断面法施工开挖爆破孔布置图及平面八字掏槽爆破孔

表2 全断面法炮眼药量分配统计表

序号	位置	炮眼名称	炮眼个数	雷管段数	炮眼长度	炮眼装药量		
						单孔药卷数(个/孔)	单孔药重(kg/孔)	合计药量(kg)
1	全断面	周边眼	15	15	3.1	5	0.45	6.75
2			29	15	3.1	5	0.45	13.05
3			16	15	3.1	5	0.45	7.2
4		内圈眼	32	11	3.1	9	1.60	51.2
5			9	13	3.1	9	1.60	14.4
6		辅助眼	8	7	3.1	9	2.00	16.00
7			22	9	3.1	9	2.00	44.00
8			7	11	3.1	9	2.00	14.00
9		掏槽眼	2	1	2	5	1.00	2.00
10			2	3	2.9	9	1.80	3.60
11			2	5	3.2	10	2.00	4.00
12	合计	144					176.2	

4. 测量定位布眼

钻孔前,测量技术人员采用全站仪放样,在掌子面放样出隧道周边眼的位置及中心点的位置,并用红漆准确标识周边眼、掏槽眼的位置,要求放样标识的误差不超过20 mm。

5. 布孔定位开眼

(1) 定位开眼

按光面爆破设计方案给出的炮眼位置正确定位开眼，在开挖台车上布置钻机的位置，开挖人员分工明确，检查风、水、电的安全使用情况，经检查满足光面爆破方案后方同意开钻。按如下要求检查，掏槽眼眼口间距误差和眼底间距误差不大于5 cm，辅助眼眼口排距、行距误差均不大于10 cm，周边眼眼口位置误差不大于5 cm，眼底不得超出开挖断面轮廓线15 cm。

(2) 钻进施工

根据爆破方案，选好开眼位置，周边眼钻眼应严格控制外插角，眼底超出开挖边界线不大于15 cm，其他眼钻眼时应垂直于开挖面，严格控制炮眼间距、深度和外插角度，严禁炮眼角度不对，深度不足。

(3) 清孔施工

钻孔达到深度后，装药前，必须用小直径的钢管通入高压风将炮眼中的石屑杂物吹净。

(4) 现场监理

每个循环检查炮孔的深度、外插角度、间距应满足爆破方案的要求。

6. 爆破施工药卷堵塞

药卷堵塞：装药前，对于周边眼和中间眼用竹片和胶布将药卷分段固定，装药需分片分组按设计药量和雷管号段位进行，所有炮眼均用黄土做的炮泥堵塞，堵塞长度不小于20 cm。周边眼用小直径药卷间隔装药，药卷绑扎于厚竹片或铁片上，装入孔内时，厚竹片或铁片朝外，周边眼装药如下图3。

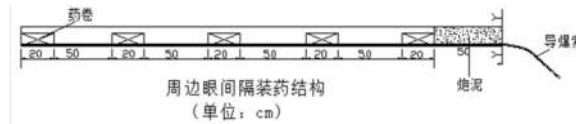


图3 周边眼装药

7. 连接起爆网络

(1) 起爆网络

采用电雷管并簇复式网络，连线顺序为：孔内雷管脚线分组→周边孔导爆索并接→同段非电雷管双发簇连→电雷管起爆。网络连接好后要有专人进行检查。起爆网络图见图4。

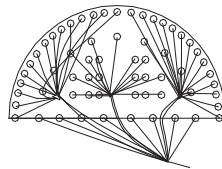


图4 起爆网络图

(2) 起爆方法

警戒完成后，并确保起爆设施正常，起爆人员在安全区采用起爆器手动起爆电雷管，并引发其他爆破品爆破。在完成爆破后15 min后进入爆区检查，确认无盲炮后方可解除警戒。

(3) 起爆顺序

掏槽眼→辅助孔→周边眼→底板眼。

8. 检查爆破效果

(1) 专业监理工程师检查项目

专业监理工程师按照验标要求，对开挖轮廓线进行检查，检查炮孔的残孔率，硬岩应大于80%，中硬岩应大于60%，对超欠挖进行检查，对局部有欠挖的进行补炮处理，要求每循环周边眼的位置在同一条线上，每个循环爆破后错台不大于10 cm，拱脚和墙角以上1 m范围内不允许欠挖^[4]。

(2) 爆破后检查处理及爆破方案的优化

爆破并通风完毕后，由爆破人员首先进入作业面检查是否有盲炮或危石，若有应按有关安全作业规程处理后，经洒水降尘及通风后才能让下道工序作业人员进场。

根据周边眼的完整情况，分析原因，根据围岩的软硬的实际情况，及时调整周边眼的间距及装药量，不断修正和优化光面爆破参数。使光面爆破效果达到最佳。

9. 效果评价

隧道开挖是隧道施工的源头，是隧道安全质量的最关键工序，硬岩隧道主要依靠超前水平钻探结合TSP物探法来预测掌子面前方地质条件，预防掌子面进入山体腹地后发现突水、突泥等安全风险。同时全断面开挖有利于光面爆破效果控制，大大降低了施工组织和成本控制，提高了生产效益。

(二) 软弱围岩短台阶开挖快速封闭及监控量测信息管理在沙嫩山二号隧道的应用

1. 基本情况

沙嫩山二号隧道出口沙拉巴士车站(双线)布置进入隧道690 m外,其余均为单线。隧道埋深约38~200 m,洞内线路坡度为单面上坡,线路坡度按里程从小到大分别为5.6‰(1495 m)、1‰(595 m)。

2019年4月27日,出口上台阶掌子面里程为DK211+008。DK211+059~+018段连续出现红色预警,单日最大变形90.8 mm,开挖揭示岩性为板岩夹炭质板岩,灰、深灰色,弱风化W2,薄层—中层状,炭质板岩岩质软,遇水易软化。节理裂隙很发育,岩体呈碎块、板状,受区域构造影响,局部层间挤压明显,层面光滑,边墙两侧褶皱发育,岩层产状变化较大。岩层及充填的灰白色方解石脉挤压后破碎,出现泥化现象,遇水后围岩软弱,整体稳定性及自稳性变差,开挖时拱部易掉块或局部小溜塌。掌子面潮湿,下台阶两侧边墙局部有渗水。

2. 变形情况

在施工过程中DK211+059~DK211+018段发生较大变形。

(1) 监控量测情况

截止2019年4月27日,DK211+059水平收敛累计269.46mm,DK211+054水平收敛累计达到262.9 mm,DK211+049水平收敛累计达到315.03 mm,拱顶沉降累计达到23.1 mm;DK211+044水平收敛累计达到227.99 mm,拱顶沉降累计达到214 mm;DK211+038水平收敛累计达到241.11 mm,拱顶沉降累计达到151.9 mm;DK211+034水平收敛累计达到215.97 mm,拱顶沉降累计达到113.7 mm;DK211+028拱顶沉降累计达到124.9 mm;DK211+018拱顶沉降达到49.1 mm。

(2) 变形情况

DK211+059~DK211+018段拱顶及边墙钢架受挤压变形,初支出现多条裂缝、裂缝宽度5~8 mm,拱顶存在表层开裂且不间断的出现掉块。施工时初支钢架预留变形量20 cm。

3. 设计参数

变形段属车站双线V级复合衬砌。(支护参数:1、钢筋网:直径8 mm,网格间距:20*20 cm;2、锚杆:长度4 m,间距:环*纵1.2*1.0 m;3、设拱墙I20b型钢钢架,间距0.8 m/榀;4、拱部设Φ42小导管超前支护,纵向2.4 m/环,环向间距0.4 m,每环42根,单根长4.5 m)

4. 施工情况

掌子面DK211+008,仰拱端头DK211+046,二衬端头DK211+078,仰拱步距38 m,二衬步距70 m。为有效控制围岩挤压变形产生的安全隐患,现场采用三台阶机械开挖配合仰拱初支快速封闭成环,开挖过程中采取临时横撑加斜撑加强支护。详见下图,如图5。



图5 三台阶法正面示意图

5. 变形原因

(1) 该段岩性为板岩夹炭质板岩,薄层-中层状,隧道的开挖,围岩应力重新分布,原有的岩体平衡状态遭到破坏,加之隧道开挖改变了地下水径流,地下水向隧道周边汇集,炭质板岩夹层岩质软,遇水易软化,层间结合性变差,稳定性变差。

(2) 隧道开挖后,拱部易松动掉块,开挖轮廓难以控制,造成钢架无法与围岩密贴、初支背后不密实甚至出现空洞等因素造成围岩松动圈进一步加大,洞周压力增大,致使初期支护难以长时间抵抗围岩压力而产生变形^[5]。

6. 量测分析

(1) 水平收敛原因分析

隧道开挖后,下台阶开挖及仰拱开挖时水平收敛加大,仰拱每循环有初支段落一次开挖大于3 m,水平收敛增加。针对软弱围岩遇水软化,开挖后先初喷4 cm进行初支封闭,起到明显效果。

(2) 按照监控量测等级管理的相关要求,增设锁脚锚管,增设措施效果不明显,变形未得到控制。

(3) 5月18日,DK211+059~DK211+018段拱顶及左侧初支存在裂缝。

(4) 5月18日,DK211+059~DK211+018段,对边墙采用水泥径向注浆处理,中台阶安装临时横撑及拱脚斜撑,水平收敛趋于稳定。

(6) 5月21日,对DK211+059~DK211+018段41 m进行全环采用径向注浆处理。

7. 总结

(1) 软弱围岩的施工,必须监控量测作为工序验收,测量监理及专业监理相互沟通,对过监控量测信息平台的数据,及时处理

预警。

(2) 软弱围岩隧道采取短台阶施工, 尽可能掌子面掘进10 m范围内完成初支封闭, 避免急剧收敛变形情况的发生, 同时仰拱初支每3 m及时封闭成环, 二衬每6 m施作一个循环。同一个断面的上台阶开挖完成至仰拱封闭最长不能大于20天。

(3) 监控量测断面停测要求, 监控量测断面停测需在该段施工完成仰拱, 断面变形趋于稳定后, 日均变形速率应低于1 mm/天。铺挂防水板之前, 必须进行监控量测断面验收, 填写《监控量测断面验收表》, 《结构防排水施作条件核查表》。

(4) 监控量测等级管理, 消警处理按老中公司的监控量测管理办法的具体要求处理, 发生以下监控量测预警情况时, 必须采取相应处理措施: 变形速率报红色预警, 且单日变形值达到25 mm; 变形速率报红色预警, 且两日内累计达到30 mm; 变形速率报红色预警, 且三日内累计达到35 mm; 变形速率报黄色预警, 且五日内累计达到35 mm; 变形速率三日内报红色和黄色预警, 且三日内累计达到35 mm; 计变形值报黄色预警, 且预留变形量不足8 cm (不含贯通误差预留量); 累计变形值报红色预警, 且预留变形量不足5 cm (不含贯通误差预留量)^[6]。

(5) 监控量测预警处理

工点测量班组负责打印监控量测日报, 报现场监理签字, 洞长负责在洞口值班室留存最近15天监测日报签字的复印件; 项目部测量队负责监控量测月报上报工作; 工段测量组负责人负责填写《磨万铁路第IV标段监控量测预警处置单》中测量数据分析一栏; 项目部测量队负责收集各洞口监控量测预警的实际处理措施, 整理成台账周报每周上报老中公司建设指挥部; 监控量测 U_0 值设定标准, V级围岩220 mm、IV级围岩180 mm、III级围岩150 mm, 特殊情况下, 由项目总工牵头确定^[7]。

三、管段内隧道施工可能产生的风险源及风险控制

中咨管理的在建铁路横跨的晚更新世活动断裂有莫边府—琅勃拉邦断裂中段, 断裂未来的活动可能对铁路工程产生一定程度的影响。IV标沿线处于地震带中, 2019年11月21日在琅勃拉邦200 km的位置发生6级地震。

本线隧道内主要的特殊和不良地质地段为碳质板岩断层破碎带软弱围岩, 可能会有变形、溜塌及突水突泥等风险。

对于初支易变形地段, 及时采用径向注浆处理措施, 及时控制初支变形。对于软岩围岩采用短台阶快速封闭技术, 对于监控预警变形较大的隧道, 采用钢架底部安装钢垫板, 增设钢脚锚管, 增设临时横撑, 对于掌子面发生小面积溜塌时, 采用反压回处理措施, 在拱顶及塌方部位预埋泵管, 砼送砼, 形成隧道受力拱。确保隧道安全步距处于可控状态。对于普亚村一号隧道4-1大里程突水突泥有针对性地采取帷幕注浆、超前注浆或管道引排等方案进行处理, 效果明显^[8]。

四、评估与总结

中咨管理管段内的硬岩全断面开挖, 采用光面爆破技术, 从周边眼的间距、孔位、外插角、装药量等重点控制, 使断面轮廓线及超欠挖得到了控制, 对初支表面平整度的质量得到了控制。

中咨管理管段内的软弱围岩、不良地质隧道, 现场采用三台阶开挖工法配合“仰拱初支快速封闭成环”的措施。有效地控制了围岩变形, 确保了隧道施工安全, 使得软弱围岩隧道施工有序推进。

参考文献:

- [1] 新建铁路磨丁至万象设计图纸; 中国中铁二院工程集团有限公司.
- [2] 孟凡军. 复杂地质条件下隧道施工技术研究[D]. 西南交通大学, 2003.
- [3] 《铁路隧道超前地质预报技术规程》(Q/CR 9217-2015); 中国铁路总公司.
- [4] 《铁路隧道工程施工质量验收标准》TB 10417-2018; 中铁三局集团有限公司.
- [5] 王树栋. 复杂地应力区隧道软弱围岩大变形控制技术研究[D]. 北京交通大学, 2010.
- [6] 2010老中工程25号. 《关于印发老中铁路有限公司隧道监控量测管理办法的通知》; 老中铁路有限公司.
- [7] 孙钧, 潘晓明. 隧道软弱围岩挤压大变形非线性流变力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1957-1968.
- [8] 周运祥. 富水隧道全风化花岗岩和蚀变大理岩段涌水涌砂加固治理技术[J]. 铁道标准设计, 2015, (6): 96-102.