

文章编号:1006-2106(2014)08-0068-04

雁门关隧道变形控制技术^{*}

叶少敏^{**}

(铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300251)

摘要:研究目的:雁门关隧道处于恒山山脉,太古界变质岩地层,受多期构造运动影响,围岩稳定性差、大变形造成初期支护环纵向开裂,拱顶、拱脚喷混凝土剥落,钢架扭曲、折断,支护侵限甚至是二衬开裂等现象,给隧道建设带来极大的困难。通过隧道 DK 121 + 203 ~ DK 121 + 175 段典型大变形处理案例,分析其大变形的原因,提出合理的控制变形技术。

研究结论:(1)雁门关隧道变质岩地层虽属硬质岩,但复杂多变的地质条件加大了围岩变形破坏可能性;(2)根据现场施工及围岩量测情况采取信息化设计,对隧道各段采取针对性的措施,做到“岩变我变”,确保施工安全,有效的控制了工程成本;(3)采用快封闭、快支护、设置临时横撑、长锚杆、大管棚、分层加强初期支护以及早施工并适当加强二次衬砌等措施可以有效的控制并稳定隧道大变形;(4)本研究成果在构造复杂变质岩地层隧道设计、施工中有较广泛的应用价值。

关键词:铁路隧道;雁门关隧道;大变形;控制技术

中图分类号:U45 文献标识码:A

Deformation Control Technique for the Yanmenguan Tunnel

YE Shao - min

(The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300251, China)

Abstract: Research purposes: Yanmenguan Tunnel lies in Archean metamorphic strata, mount Hengshan. Influenced by multistage tectonization, surrounding rock is unstable and serious deformation of this tunnel has caused cracks in primary support at the longitudinal direction. Spalling of concrete at vault and arch foot as well as steel framework contorting happened, which even went beyond the limit value and caused splitting of secondary lining, thus bringing great difficulties for tunnel construction. Combined with treatment of large deformation in DK 121 + 203 ~ DK 121 + 175 section of Yanmenguan tunnel, reasons caused large deformation of this tunnel were analyzed, and control technology on deformation was proposed in this article.

Research conclusions: (1) Although metamorphic strata are hard rocks, because of complicated geological condition, possibility of deformation and failure of surrounding rocks increases. (2) On the basis of field construction and measurement, information design is adopted in Yanmenguan tunnel construction to effectively control large deformation, thus assuring construction safety and controlling the engineering cost simultaneously. (3) Some technology are put forward such as tough supporting and rapid closing, setting temporary invert, grouting reinforcement with long rope bolt, using pipe roofs for clearance - intrusion treatment and reinforce secondary lining, etc. (4) The research results have extensive application values for tunnel design in complicated geological condition.

Key words: railway tunnel; Yanmenguan tunnel; large deformation; control technique

* 收稿日期:2014-03-06

** 作者简介:叶少敏,1980年出生,男,工程师。

1 研究背景

围岩大变形作为一种严重的地质灾害,对隧道施工安全有严重的影响,给工程建设造成极大的困难。北同蒲取直线雁门关隧道建设过程中由于围岩大变形造成初期支护环纵向开裂,拱顶、拱脚混凝土喷层剥落,钢架扭曲、折断,支护侵限甚至是二衬开裂等。本文结合雁门关隧道修建过程中的典型案例,针对大变形的控制技术进行探讨。

2 雁门关隧道大变形段落处理情况介绍

2.1 工程概况

雁门关隧道全长 14 085 m,为北同蒲铁路扩能改造韩家岭至原平新建双线取直线重点控制性工程。隧道 200 km/h 客货混铁路要求设计,为单洞双线隧道,最大埋深约 820 m。雁门关隧道处于恒山山脉,太古界变质岩地层,地层受多期构造运动影响,围岩稳定性差,岩体多为Ⅳ和Ⅴ级。整个隧道在勘察阶段就推断有 19 条断层。隧道区所测定的最大水平主应力的优势方向为 NE30°,地质结构面发生一定程度张引,属于

走滑应力控制区。

2.2 雁门关隧道 DK 121 + 203 ~ DK 121 + 175 段大变形情况

DK 121 + 203 ~ DK 121 + 175 段按照Ⅴ级加强支护参数施工,参数如下:初支厚度 27 cm,钢筋网 $\phi 8$ 间距 20 cm \times 20 cm;采用 I20b 型钢钢架,间距 0.6 m,每榀拱架打设 24 根 $\phi 42 \times 5$ m 锁脚锚管,锁脚锚管长 4 m,注水泥 - 水玻璃双液浆。超前支护采用 $\phi 42 \times 3.5$ mm 小导管,长 4 m,环向间距每米 3 根,拱部 120°范围内打设,纵向 1.2 m 一环;系统锚杆采用 4 m 长锚杆,间距 1.0 m \times 0.8 m(拱部采用 $\phi 25$ 中空注浆锚杆,边墙采用 $\phi 22$ 砂浆锚杆)。

尽管设计考虑了初支增大刚度,但施工中该段还是出现了严重的挤压变形。从 4 月 18 日 DK 121 + 203 ~ DK 121 + 175 发生初期支护喷混凝土裂缝、局部脱落,到 5 月 13 日经过加固的段落再次出现支护开裂、脱落,钢架扭曲变形,最终被迫停工。这次挤压大变形表现出了影响范围大、变形破坏严重,且反复发生的特征,给施工造成了极大的困难,如表 1 所示。

表 1 雁门关隧道 DK 121 + 203 ~ DK 121 + 175 段大变形过程

时间	里程	变形破坏特征	采取的加固措施
4 月 18 日	DK 121 + 203 ~ DK 121 + 195	初期支护喷射混凝土出现纵向和环向裂缝,部分喷射混凝土出现开裂、脱落,监控量测数据单日超限:DK 121 + 200 拱顶下沉 31 mm,收敛 32 mm;DK 121 + 195 拱顶下沉 15 mm,收敛 22 mm	拱墙进行径向注浆、加大监测频率,根据量测情况加大预留变形量
5 月 1 日	DK 121 + 203 ~ DK 121 + 190	初期支护开裂,喷射混凝土脱落,3 榀拱架扭曲变形;DK 121 + 200 断面拱顶累计下沉 28.4 cm,收敛 16.7 cm;DK 121 + 185 ~ DK 121 + 203 段右侧边墙纵向开裂,喷射混凝土空鼓	(1)对拱脚进行回填反压;(2)增设锁脚导管,保证注浆压力;(3)增设临时横向支撑
5 月 5 日	DK 121 + 203 ~ DK 121 + 185	初期支护纵向及环向多处开裂、大面积脱皮掉块,3 榀拱架扭曲变形严重;掌子面封闭的 15 cm 厚的喷射混凝土被掌子面前方的围岩推开	拱墙 180°范围内进行径向注浆加固,注水泥浆。同时对该段进行套拱加固处理,采用 I20b 工字钢,间距 0.8 m; $\phi 22$ 纵向连接钢筋间距 0.8 m;每榀拱架设置 12 根锁脚锚管,长 3 m,注水泥浆
5 月 13 日	DK 121 + 203 ~ DK 121 + 175	初期支护又继续发生多处剥皮开裂,钢架又发生较大扭曲变形,其中 DK 121 + 203 ~ DK 121 + 193 段最为严重。DK 121 + 203 ~ DK 121 + 200 段隧道中心偏右 1 m 处以及 DK 121 + 197 和 DK 121 + 187 拱腰处钢架发生断开现象。水平收敛严重,DK 121 + 190 处水平收敛累计达 64.5 cm	洞砟回填,停工

2.3 原因分析

2.3.1 地质因素

本段围岩以黑云角闪斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩为主,属碎屑状黑云变粒岩组。局部有暗色岩脉和伟晶岩脉穿插,岩体破碎呈碎屑状结构,其中部分已呈

粉状,围岩软硬不均,手掰易碎,手摸光滑,且岩屑和泥质物含量较大,遇水软化明显,围岩自稳能力很差,尽管从地质钻孔资料看本段最大水平主应力为 16 MPa,但由于围岩强度低,本段围岩强度应力比值低,挤压变形势能大是上述大变形的根本原因。

2.3.2 人工开挖扰动因素

图1为DK 121+203~DK 121+175段典型断面变形监测曲线。由图1可以看出,围岩急剧变形大都发生在中导、下导开挖后。中、下台阶开挖时会导致围岩再次扰动,应力重新分布,围岩的塑性流变加剧,作用在初期支护上的围岩压力陡增,而初期支护再尚未闭合成环时其承载力又非常有限,这种情况下极易发生喷混凝土开裂、脱落,钢拱架扭曲、断裂,甚至发展为塌方。

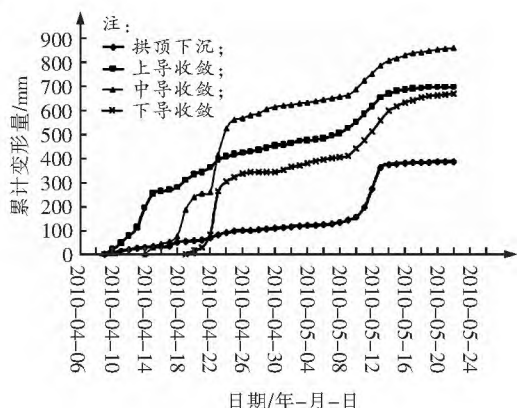


图1 DK 121+203~DK 121+175段典型断面变形监测曲线

2.3.3 支护进度因素

本段自3月23日开挖至5月5日仰拱没有施作,由于地下水汇集,造成围岩软化支撑力下降,围岩松动圈加大,使围岩压力增加,致使拱顶下沉严重。这也是造成初期支护纵向及环向多处开裂、大面积脱皮掉块乃至钢架变形挫断的重要原因。

2.4 DK 121+203~DK 121+175 处理方案

掌子面、仰拱、二次衬砌里程分别为DK 121+175、DK 121+193、DK 121+203。上台阶已采用洞砟回填至DK 121+198,下台阶已经回填至DK 121+203。为保证施工安全,采取30 m大管棚超前支护、三台阶预留核心土方案施工。

2.4.1 径向注浆加固未回填段

对DK 121+198~DK 121+204段未回填部分拱部进行径向注浆加固确保施作管棚空间的稳定($\phi 42$ mm壁厚3.5 mm小导管长5 m,管身设置梅花型布置注浆小孔,注水泥浆,间距2 m \times 2 m)。

2.4.2 大管棚超前支护控制围岩变形

为保证长管棚施工精度,设2榀I20工字钢,间距100 cm。钢架外缘设 $\phi 140$ mm壁厚5 mm导向钢管,长3.5 m,间距40 cm。钢管与钢架焊接。按导向管布孔间隔钻孔,钻孔直径为 $\phi 127$ mm,长度30 m。为提高导管的抗弯能力,在管内设置钢筋笼。管棚间距40 cm,拱部150°设置。大管棚之间设置6 m长 $\phi 42$ mm

壁厚3.5 mm注浆小导管。注浆参数可以根据现场实验确定,采取压力与注浆量双重控制原则:管棚采取M5水泥砂浆充填,并保证砂浆密实,以增强钢管棚强度(也可以增加钢筋笼)。

2.4.3 采用强支护控制变形

初期支护采用C25喷射纤维混凝土,厚度45 cm。采用双层钢架支护,第一层采用H175型钢钢架,间距0.6 m,全环布设,纵向连接采用 $\phi 22$ 双层连接筋,间距1.0 m。第二层采用格栅钢架,间距0.6 m,拱墙布设,格栅主筋采用 $\phi 28$ 钢筋,主筋间距20 cm \times 20 cm,纵向连接采用 $\phi 22$ 单层连接筋,间距1.0 m; $\phi 8$ 钢筋网,网格间距为20 cm \times 20 cm;每榀型钢钢架打设N51自进式锁脚锚杆16根,锁脚锚杆长6 m,下倾角不小于45°。

2.4.4 适当加强二次衬砌

拱墙、仰拱二次衬砌厚度调整为60 cm,二衬主筋调整为 $\phi 25$ 。

2.4.5 加强人员及机械力量确保快支护、快封闭

加强人员及机械力量,在管棚支护及注浆小导管支护下,采用松动爆破配合风镐开挖,随挖随撑,确保初支在7~10 d内封闭成环。

以上措施调整后,效果明显,变形得到了迅速的控制。

3 大变形处理措施探讨

关于围岩大变形,目前还没有形成一致的和明确的定义,常见的有从变形量的角度定义和从变形形式上定义两种。从变形量上定义:根据围岩变形是否超出初期支护的预留变形量来定义大变形,即在隧道施工时,如果初期支护发生了大于25 cm(单线隧道)和50 cm(双线隧道)的位移,则认为发生了大变形^[9]。也有的学者认为,不能从变形量的绝对值大小来定义大变形问题,具有显著的变形值是大变形问题的外在表现,其本质是由剪应力产生的岩体的剪切变形发生错动、断裂分离破坏,岩体将向地下空洞方向产生压挤推变形来定义大变形^[10]。

设计阶段对大变形的预测具有很大的不确定性,难以有针对性地采取措施,并考虑相应的费用。工程中对大变形的充分认识往往是在同大变形的病害斗争中获得的。笔者结合雁门关隧道5年的建设中参与处理的多次大变形病害的经验,对构造复杂的变质岩大变形的控制技术提出建议,以供参考。

3.1 快支护,快封闭

在大变形段初支护加强后,围岩变形一般会进入一个相对稳定的时期,但这种稳定一般是暂时,如果不

能及时封闭初支,及早施作二衬,会造成地下水汇集,使塑性变形区条件恶化,松动圈进一步加大,塑性区和地下水相互影响,使围岩稳定性不断变差,更进一步加剧了支护的开裂变形,形成“开裂-处理-围岩恶化-开裂”的恶性循环,最终导致初期支护完全破坏、侵限甚至塌方。因此解决大变形问题,施工中应立足于一个“快”字,即快支护、快封闭。要求开挖后及时封闭岩面,尽快施做初期支护,仰拱及早封闭成环,使支护结构在最短的时间发挥最有效的作用,防止围岩在暴露时间长、变形过快的情况下进一步恶化了围岩条件,大幅降低围岩强度,产生更大的塑性范围及更大的变形。

3.2 中、上台阶设置临时仰拱(临时横撑)

临时仰拱的设置有利于结构受力,特别是上台阶设置临时仰拱,高度仅有4 m左右,具有封闭成环断面小,刚度大,变形更易控制的优点,但不利于机械化施工,以现有的机械条件必须采用人工出砟,加大了劳动强度,不利于加快进度。

3.3 小导管、长锚杆注浆加固塑性圈

采用小导管、长锚杆径向注浆加固塑性圈,改善围岩条件,提高地层的抗剪强度,并将支护的荷载通过锚杆(小导管)传至深部稳定围岩,与塑性圈共同受力。同时浆液充填于各种裂隙中,提高围岩的整体性,有效地阻止地下水的渗入,从而使围岩不具备膨胀变形的地下水条件。根据塑性区范围及变形速率情况,锚杆长度8~12 m不等,锚杆采用R32N自进式锚杆,间距1~1.2 m,结合锚杆向围岩中压注水泥浆液。

3.4 分层加强支护,控制变形

强支护是控制围岩大变形最直接、有效的方法,软弱围岩开挖后会在较短的时间释放“压缩能”,从而产生初始的变形,为防止蠕变加速并发生围岩破坏,采取“先柔后刚,控制变形”的方法,使围岩出于稳定蠕变的阶段,并在该阶段完成控制围岩变形的措施。

支护结构采用“第一层初期支护+第二层加强支护+模筑衬砌”的形式,第一层支护为喷纤维混凝土、长锚杆、钢筋网及钢架组成的联合支护体系,在加固围岩的同时允许部分释放围岩变形产生的能量;第二层支护为钢格栅为骨架的模筑(或模喷)混凝土结构,以加强初期支护,进一步抑制围岩变形,并为二次衬砌的安全施做提供条件。模筑衬砌为C35钢筋混凝土结构,在两层支护加固后基本稳定的情况下施做。

3.5 长管棚(或长锚杆注浆)处理初期支护侵限

加强超前支护是抑制变形的有效手段。对于初期支护侵限段,应先采取径向长锚杆或小导管注浆加固,待围岩趋于稳定后在扇撑的保护下逐榀的拆换钢架重

新施作初期支护。对于严重侵限,且反复加固段落为确保拆换拱架安全,可采取长管棚加固的方法。

3.6 二衬应及早并适当加强

一般围岩地质条件下,为保证衬砌结构安全,往往推迟二次衬砌时机,以达到充分发挥围岩自承作用,尽量减小二次衬砌围岩压力分担比例的目的^[11]。但在软弱围岩大变形段落,由于隧道施工“时空”的要求,二次衬砌无法在围岩变形稳定后施做,需要及早承担围岩压力,因此,需要足够的强度。

4 结论

(1)雁门关隧道变质岩地层虽属硬质岩,但片理、软弱夹层非常发育,软硬、厚薄不均,与多组构造面组合极大破坏了岩体的完整性,而围岩强度应力比值低,挤压变形潜势大,更是加大了围岩变形破坏可能性。

(2)勘察设计阶段对隧道大变形的预测具有很大的不确定性,难以有针对性地采取措施,并考虑相应的费用。而根据现场施工及围岩量测情况采取信息化设计,对隧道各段采取针对性的措施,做到“岩变我变”,确保施工安全,有效的控制了工程成本。

(3)采用快封闭、快支护、设置临时横撑、长锚杆、大管棚、分层加强初期支护以及早施工并适当加强二次衬砌等措施可以有效的控制并稳定隧道大变形,在构造复杂多变变质岩地层隧道设计、施工中有较广泛的应用价值。

参考文献:

- [1] 铁道部第二勘测设计院. 铁路工程设计技术手册(隧道)[M]. 北京:中国铁道出版社,1995.
Second Survey Design Institute of Railway Ministry of China. Technical Manual of Railway Engineering Design—Tunnel[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1995.
- [2] TB 10003—2005, 铁路隧道设计规范[S].
TB 10003—2005, Code for Design on Tunnel of Railway [S].
- [3] TZ 204—2008, 铁路隧道工程施工技术指南[S].
TZ 204—2008, Technical Manual for Railway Tunnel Construction. [S].
- [4] 铁道第三勘察设计院集团有限公司. 雁门关隧道工程地质勘察报告[R]. 天津:铁道第三勘察设计院集团有限公司, 2007.
The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation. Report on Engineering Geological Investigation of Yanmenguan Tunnel[R]. Tianjin: The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, 2007.

(下转第77页 To P. 77)

(3) 车站站场规模和布置应考虑引入铁路线路的性质、特点,合理布置,减少干扰和交叉,提高车站的接发、通过能力。

(4) 车站站房设计数量和布局,应根据旅客进出站流线、城市轨道交通和旅客换乘要求,合理设置。

参考文献:

- [1] GB 50091—2006,铁路车站及枢纽设计规范[S].
GB 50091—2006, Code for Design of Railway Station and Terminal [S].
- [2] TB 10621—2009,高速铁路设计规范(试行)[S].
TB 10621—2009, Code for Design of High Speed Railway [S].
- [3] 铁道第四勘察设计院. 铁路工程设计技术手册(站场及枢纽)[M]. 北京:中国铁道出版社,2004.
The Fourth Railway Survey and Design Institute. Handbook of Engineering Design of Railway (Station and the Hub) [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.
- [4] GB 50090—2006,铁路线路设计规范[S].
GB 50090—2006, Code for Design of Railway Line [S].
- [5] 铁道部工程鉴定中心. 全国铁路主要枢纽规划图集[Z]. 北京:铁道部工程鉴定中心,2012.

Engineering Design and Appraisal Center, Ministry of Railway. The Planning Atlas of Main Terminal of National Railway [Z]. Beijing: Engineering Design and Appraisal Center, Ministry of Railway, 2012.

- [6] GB 50157—2003,地铁设计规范[S].
GB 50157—2003, Code for Design of Metro [S].
- [7] GB 50490—2009,城市轨道交通技术规范[S].
GB 50490—2009, Technical Code of Urban Rail Transit [S].
- [8] 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 新建铁路广州枢纽佛山西站及相关工程可行性研究报告[R]. 武汉:中铁第四勘察设计院集团有限公司,2012.
China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd. The Feasibility Study Report of the Newly Built Railway Hub in Guangzhou Foshan Station and Related Engineering [R]. Wuhan: China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd, 2012.
- [9] 秦永平. 及早规划建设我国市郊铁路和城际铁路[J]. 铁道工程学报,2014(1):1-9.
Qin Yongping. Plan and Build Suburban Railway and Intercity Railway Early in China [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014(1): 1-9.

(上接第71页)

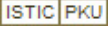
- [5] 铁道第三勘察设计院集团有限公司. 雁门关隧道施工图[R]. 天津:铁道第三勘察设计院集团有限公司,2007.
The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation. Construction Drawings of the Yanmenguan Tunnel [R]. Tianjin: The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, 2007.
- [6] 铁道第三勘察设计院集团有限公司. 雁门关隧道再认识报告[R]. 天津:铁道第三勘察设计院集团有限公司, 2012.
The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation. Recognition of the Yanmenguan Tunnel [R]. Tianjin: The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, 2012.
- [7] 孙春元. 片理化带隧道围岩稳定性分析评价及工程对策研究[R]. 天津:铁道第三勘察设计院集团有限公司, 2012.
Sun Chunyuan. Research on Stability Estimation and Engineering Measures for Tunnel Surrounding Rock in Schistosity Zone [R]. Tianjin: The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, 2012.
- [8] 中国科学院地质与地球物理研究所. 雁门关隧道工程地质条件综合评价[R]. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所,2010.
Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy

of Science. Evaluation of Engineering Geological Condition for Yanmenguan Tunnel [R]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, 2010.

- [9] 喻渝. 挤压性围岩支护大变形的机理及判定方法[J]. 世界隧道,1998(1):46-52.
Yu Yu. Serious Deformation of Surrounding Rock in Squeezing Ground [J]. World Tunnel, 1998(1): 46-52.
- [10] 翁汉民,李永林,等. 高地应力条件下隧道大变形破坏机理的研究及其在二郎山隧道工程中的应用[R]. 成都:西南交通大学,1999.
Weng Hanmin, Li Yonglin, etc. Research on Tunnel Destructive Mechanism of Large Deformation under high In-situ Stress and Application in Erlangshan Tunnel [R]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1999.
- [11] 李国良,朱永全,等. 乌鞘岭隧道高地应力软弱围岩大变形控制技术[J]. 铁道工程学报,2008(3):54-59.
Li Guoliang, Zhu Yongquan, etc. Control Technology for Large Deformation of Highland Stressed Weak Rock in Wushaoling Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(3): 54-59.

(编辑 曹淑荣)

雁门关隧道变形控制技术

作者: [叶少敏, YE Shao-min](#)
作者单位: [铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津, 300251](#)
刊名: [铁道工程学报](#) 
英文刊名: [Journal of Railway Engineering Society](#)
年, 卷(期): 2014, 31(8)

引用本文格式: [叶少敏, YE Shao-min](#) 雁门关隧道变形控制技术[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2014(8)