

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.01.011

丽香铁路中义隧道高地应力软岩大变形控制技术

闫红江, 邓志刚

(中铁隧道局集团四处有限公司, 广西南宁 533307)

摘要: 在丽香铁路中义隧道围岩及初期支护变形、破坏特点归纳总结的基础上, 结合隧道的区域地质条件, 分析了围岩大变形的形成机制。研究表明: 丽香铁路中义隧道围岩及初期支护变形、破坏特点是由隧址区地应力最大主应力为水平方向且与隧道轴线接近垂直的特点决定的; 围岩大变形主要是由于隧址区强烈的地质构造使围岩完整性遭受严重破坏, 围岩破碎, 地层赋存较高的构造残余应力引起的。现场实验及施工实践表明: 按围岩的工程地质条件、强度应力比及相对位移将大变形分级管理, 根据大变形级别选用不同的衬砌断面、支护参数和预留变形量; 采用上下台阶、下台阶带仰拱一次开挖方法施工, 适当加长边墙系统锚杆和锁脚锚杆, 适时进行初期支护补强。

关键词: 隧道; 构造应力; 大变形; 初期支护; 控制

中图分类号: U456.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)01-0067-06

Large Deformation Control Technology of High Ground Stress Soft Rock in Zhongyi Tunnel of Lixiang Railway

YAN Hongjiang, DENG Zhigang

(Shichu Co., Ltd. China Railway Tunnel Group, Nanning, Guangxi 533307, China)

Abstract: Based on the conclusion that deformation and destruction characteristics of between tunnel rock mass, and combined with the regional geological conditions of the tunnel, this paper analyzed the formation mechanism of large deformation of surrounding rock. Research results show that the maximum principal stress in tunnel zone is horizontal and the stress is nearly perpendicular to the tunnel axis, which determines the characteristics of deformation and destruction between tunnel surrounding rock and primary support. The strong geological structure of the tunnel zone seriously damages the integrity of surrounding rock, the fragmentation of surrounding rock, and the high tectonic residual stress in the stratum, these factors mainly caused the large deformation of surrounding rock. Field experiment and site operation show that effective measures to control large deformation of surrounding rock are as follows. According to the engineering geological conditions, strength-stress ratio and relative displacement of surrounding rock, large deformation classification is good for the management. At different lining section, supporting parameters and deformation allowance could be determined according to the large deformation grade. By using the construction method of the up-and-down bench and lower bench one-time excavation with inverted arch, properly lengthening system anchor bolt on the wall and feet-lock bolt, timely strengthening initial support.

Keywords: tunnel; tectonic stress; large deformation; primary support; control

随着我国铁路、公路建设的不断推进,在地质环境恶劣、高地应力、软弱围岩地区建设长大隧道已不可避免。在 高地应力软弱围岩中修建隧道,往往出现围岩大变形问题。南昆铁路家竹箐隧道、兰新复

线乌鞘岭隧道、奥地利陶恩隧道、日本中屋隧道施工中 都出现过软岩大变形问题^[1]。在 高地应力地区修建地下工程,最大的难题就是软岩大变形控制问题^[2]。

收稿日期:2018-09-26

修稿日期:2018-10-17

基金项目:中铁隧道局集团有限公司科技创新项目(隧研台:2018-12)

作者简介:闫红江(1972—),男,河南洛阳人,硕士,高级工程师,主要从事隧道与地下工程的施工管理和技术工作。

E-mail:297203386@qq.com

地质构造发育地区的深埋地层由于曾经受到强烈的地质构造和构造挤压作用,除完整性较差外,往往还累积了较大的能量^[3]。穿过此类地层的深埋隧道,施工过程中由于开挖卸荷,围岩累积的能量逐渐释放必然出现较大的围岩变形。大量地应力测试结果表明:埋深较大的隧道赋存地层中存在着以水平方向为主的残余构造应力,应力历史及大小与围岩压力大小及分布、隧道变形特点密切相关^[4-5]。因此,对地质构造发育地区深埋隧道围岩大变形的特点及控制技术进行研究具有重要意义。

丽江—香格里拉铁路中义隧道地处欧亚板块和印度洋板块相互碰撞汇聚形成的青藏高原东南缘之川滇断块的西部边界断裂带内。川滇断块受印度洋板块北东向的推挤和青藏高原南南东向挤出的叠加作用,地质构造复杂,是我国现今地壳构造运动最为强烈的地区^[6]。受大规模地质构造的强烈挤压,隧址区构造应力大,围岩破碎,变质作用强烈,片理、劈理发育。从 2016 年 4 月起,隧道平行导洞、正洞施工中不断出现围岩大变形。

本文以丽香铁路中义隧道为例,在总结隧道大变形特点的基础上,分析围岩大变形的形成机制并结合工程实践,提出针对性的大变形控制技术及管理措施。所得结论对类似工程的设计、施工有一定的借鉴和指导意义。

1 工程概况

新建丽江—香格里拉铁路是滇藏铁路云南段的一部分,为 I 级单线铁路。中义隧道全长 14 745 m,最大埋深 1 240 m,是全线的控制性工程。隧道 2014 年 12 月 20 日开工建设,已施工段揭示地层以凝灰岩、绿泥石化变质玄武岩、片理化玄武岩为主。其中凝灰岩呈团块状,裂隙发育、软硬不一;片理化玄武岩呈层状、片状互层,基本为层状碎裂结构,层厚 1 cm~10 cm,层间绿泥石化和片理化变质强烈,绿泥石、绢云母等手摸有滑腻感的软弱夹层发育。

从 2016 年年初开始,隧道进出口和斜井工区相继出现围岩大变形,单侧最大水平收敛变形达 87 cm,平行导洞部分区段在仰拱施作后底板仍发生严重隆起,最大隆起达 1 m 多。围岩大变形造成初期支护混凝土开裂、剥落,拱架严重扭曲,初期支护严重侵限,多个地段需换拱,部分地段还进行了二次换拱。围岩大变形对施工安全和进度造成了严重影响。

2 隧道变形特点

中义隧道围岩及初期支护具有下列变形、破坏

特点。

2.1 围岩变形特点

(1) 围岩变形以水平收敛为主。大变形区段隧道开挖后,围岩水平收敛变形强烈,但拱顶下沉不明显(如图 1 所示)。最大拱顶下沉速率一般小于 2 mm/d,累计下沉一般小于 100 mm。边墙—拱腰段最大水平收敛速率一般大于 25 mm/d,最大单侧累计变形高达 868 mm。平行导洞全断面施工典型断面、正洞三台阶施工典型断面围岩变形历时曲线如图 2、图 3 所示。

(2) 围岩变形持续时间长。由图 2、图 3 可看出:无论是平行导洞还是正洞,围岩变形基本都要到 70 d 左右才达到稳定。

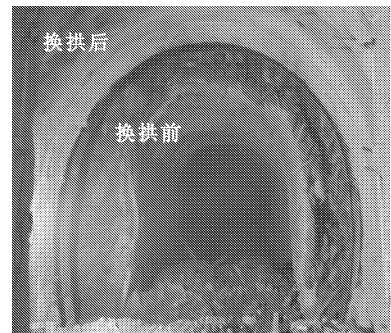


图 1 变形侵限段换拱前后照片

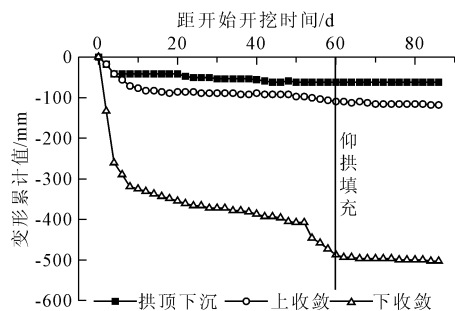


图 2 平行导洞全断面开挖典型断面围岩变形曲线

(3) 围岩变形受临近区段的开挖影响大。现场监控量测结果表明:中、下台阶及仰拱开挖时变形速率明显增大,台阶转换过程中水平收敛突变 20 mm~40 mm;距平行导洞平距 30 m 的正洞爆破开挖时,平行导坑同断面前后 20 m 范围内围岩变形速率明显增大。

图 4 为平行导洞 PDK50+555 断面围岩上台阶收敛变形监测结果。该断面前期变形较大,2016 年 3 月 15 日注浆加固处理后变形逐渐稳定,但 2016 年 3 月 30 日掌子面恢复开挖后,变形继续加剧,仰拱施作后变形才逐渐趋缓,累计变形达 510 mm。

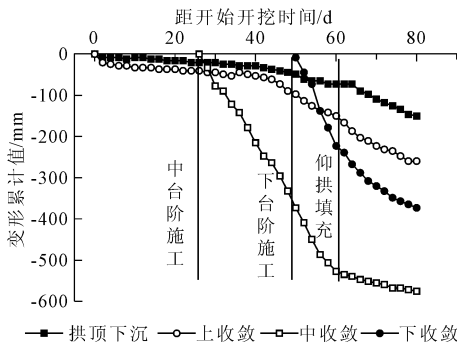


图 3 正洞三台阶开挖典型断面围岩变形曲线

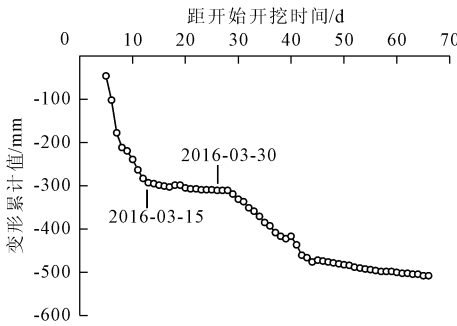


图 4 平行导洞 PDK50 + 555 断面上收敛历时曲线

2.2 初期支护变形、破坏形式

初期支护变形、破坏形式主要有:边墙拱架外鼓、喷射混凝土纵向开裂、钢拱架扭曲(如图 5 所示);拱顶喷射混凝土剥落、掉块(如图 6 所示);底板严重隆起等。



图 5 边墙拱架外鼓、喷射混凝土纵向开裂

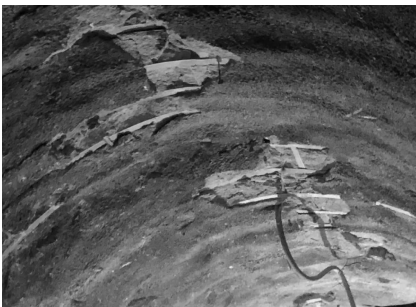


图 6 拱顶喷射混凝土剥落、掉块

3 隧道大变形机理分析

3.1 隧道大变形内因

研究表明:隧址区地质构造强烈,围岩破碎、软弱结构面发育且赋存较高的构造残余应力是围岩大变形的内因。

(1) 区域强烈地质构造作用。隧址区属青藏高原断块区的川—滇块体。该块体受印度板块北东向的推挤和青藏高原南南东向挤出的叠加作用,地质构造复杂,是我国现今地壳构造运动最为强烈的地区^[6]。受大规模地质构造的强烈挤压,围岩发生下列变化:

① 隧址区地层赋存较高的水平向残余构造应力。隧址区地应力测试结果表明:最大水平主应力与垂直应力之比的平均值为 1.2,最大达 1.9;隧址区地应力主要为构造应力,地应力最大主应力方向与隧道轴线接近垂直;地表深孔实测地应力最大值为 25.09 MPa。

② 隧址区地层受地质构造和地震的多次强烈作用,完整性遭受严重破坏,围岩破碎。

(2) 围岩破碎,软弱结构面发育。中义隧道大变形区段岩性以碎裂化、片理化玄武岩,凝灰岩等软岩—极软岩为主。玄武岩受构造影响,片理化、碎裂化极为严重,结构面上富集的绿泥石、蒙脱石等手摸有滑腻感的蚀变矿物大大弱化了岩体强度。凝灰岩,呈团状分布,强度低,遇水后,进一步弱化。

为了确定大变形区段围岩的力学参数,在发生大变形的片理化玄武岩段,选取了 4 个测点进行钻孔剪切测试。测试结果显示:围岩黏聚力 $c = 215 \text{ kPa} \sim 233 \text{ kPa}$,平均值为 220 kPa,内摩擦角 $\varphi = 14.4^\circ \sim 16.6^\circ$,平均值为 15.0° 。

由 Coulomb - Mohr 强度破坏准则可得:

$$\sigma_c = \frac{2c \cdot \cos\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (1)$$

式中: σ_c 、 c 、 φ 分别为岩体的单轴抗压强度、黏聚力和内摩擦角。将现场实测的岩体黏聚力和内摩擦角平均值代入式(1)得:

$$\sigma_c = \frac{2 \times 220 \times \cos 15^\circ}{1 - \sin 15^\circ} = 573.4 \text{ kPa}$$

多位学者的研究表明^[7-8]:当围岩单轴抗压强度 σ_c 与初始最大地应力 P_0 之比(强度应力比) $\sigma_c/P_0 < 0.25$ 时,可能发生严重的大变形; $\sigma_c/P_0 < 0.10$ 时,可能发生极严重的大变形。按此计算,本隧道片理化玄武岩段,初始地应力大于 5.7 MPa 时

就可能发生极严重的大变形。

3.2 隧道大变形外因

隧道大变形的的外因主要有隧道结构形状和施工工艺两方面。

(1) 隧道结构形状。中义隧道为单线铁路隧道,高跨比约 1.4,不利于水平收敛变形的控制。

(2) 施工工艺。受当前工艺水平限制,部分支护措施的效果无法达到设计要求。特别是系统锚杆、锁脚锚管的施作有一定滞后,加之围岩软弱、破碎,锚杆锚固力不足,导致钢拱架接头处变形加剧、下部钢拱架无法与之有效连接,接头处成为薄弱环节,严重削弱拱架的整体刚度。此外,初期支护封闭时间过长,也是影响变形的主要因素之一。

3.3 中义隧道大变形形成机制

通过对隧址区地质条件及围岩和初期支护变形、破坏特点的综合分析,得出中义隧道围岩大变形的机制如下。

(1) 隧址区地质构造复杂,强烈的地质构造及变质作用使围岩的完整性遭受严重破坏、围岩破碎、软弱夹层发育,强度低;隧址区地应力高,最大主应力为水平方向且与隧道轴线接近垂直。围岩在隧道开挖前受到较大的构造残余应力的作用,节理、裂隙受到强烈挤压,处于密闭状态。隧道开挖后,受开挖卸荷影响,发生下列促使围岩变形的作用:

① 围岩中众多的节理、裂隙因侧向挤压消除或减弱,由密闭状态逐渐张开,体积增大,发生扩容,向临空面位移。

② 洞室周边节理发育围岩因侧向限制消除或减弱沿软弱结构面滑移,向临空面移动。

(2) 隧址区地应力具有最大主应力为水平方向,且与隧道轴线接近垂直的特点。这直接决定了围岩及初期支护的变形、破坏特点。

图 7 为隧道埋深 400 m、水平向地应力与竖向地应力之比等于 1.2,初期支护未成环时的内力分布图。从图 7 中可看出:

① 边墙承受较大的弯矩,且临空侧受拉。在其

作用下拱架外鼓、边墙临空侧喷射混凝土纵向开裂,如图 5 所示。

② 初期支护拱顶承受较大的弯矩,且临空侧受压;此外,拱顶还承受较大的轴力。初期支护拱顶临空侧的喷射混凝土在弯矩、轴力产生的压应力的共同作用下发生压剪破坏,喷射混凝土剥落和掉块,如图 6 所示。此外,初期支护拱顶临空侧受压决定了拱顶具有下沉量小的特点。

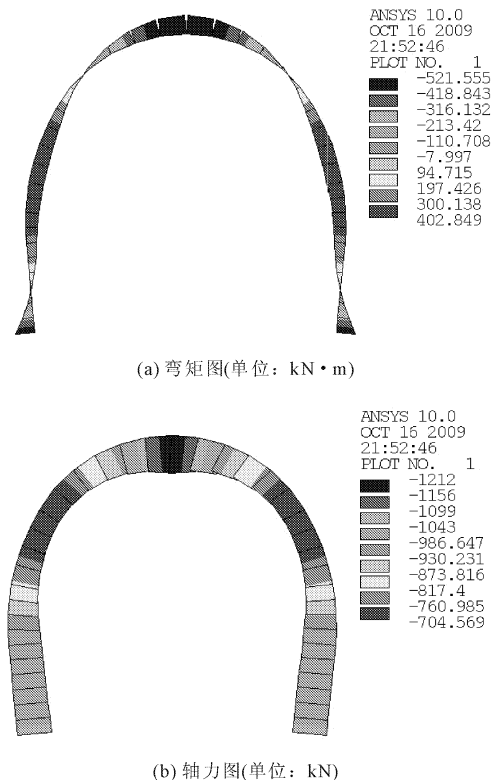


图 7 初期支护内力图

4 隧道大变形控制技术

针对中义隧道大变形的特点及形成机制,施工中采取了下列行之有效的措施。

(1) 分级管理,优化隧道结构及支护参数。在对前期围岩大变形规律系统总结的基础上,结合其它项目的相关成果和经验^[8-10],制定了表 1 的围岩大变形分级标准。

表 1 中义隧道围岩大变形分级标准

序号	大变形等级	工程地质条件	相对变形 $\epsilon/\%$	强度应力比 σ_c/P_0
1	I (一般)	薄—中厚层片理化玄武岩或块状凝灰岩,层间结合一般,地下水不发育。	3~5	0.25~0.50
2	II (严重)	全风化—强风化玄武岩、凝灰岩,呈石夹土或土夹石状,地下水不发育	5~8	0.10~0.25
3	III (极严重)	构造挤压带,母岩为片理化玄武岩,节理裂隙发育,杂乱无章。	>8	<0.10

注:相对变形—两侧水平收敛与隧道开挖宽度之比;强度应力比—围岩单轴抗压强度与初始最大地应力之比。

针对不同的大变形等级选用不同的支护参数及二次衬砌类型、预留不同的变形量^[10-12],并将原设

计的直墙断面优化为曲墙断面,见表 2。

表 2 中义隧道不同等级围岩大变形的衬砌类型

序号	大变形等级	衬砌断面及钢拱架类型	预留变形量/cm
1	I(一般)	采用 I 型衬砌,断面比正常断面曲率大 48 cm,全环设置 I18 工字钢拱架,间距 0.6 m~0.8 m	30
2	II(严重)	采用 II A 型衬砌,加大边墙曲率至 70 cm,全环设置 I20b 工字钢拱架,间距 0.5 m~0.8 m	40
3	III(极严重)	采用 III A 型衬砌断面,加大边墙曲率至 115 cm,全环设置 I20b 工字钢拱架,间距 0.5 m~0.6 m	50

初期支护结构受力的现场测试结果表明:采用表 2 所列初期支护结构及参数,初期支护的结构内力均未超过容许值,各部位的受力实测值与设计值之比大多超过 70%。这表明,采用表 2 的支护参数是较为合理的。

(2) 采用上下台阶、下台阶带仰拱一次开挖工法施工。为选择适宜的施工方法,项目部专门在严重大变形区段进行了三台阶、两台阶工法的对比试验。现场试验及施工实践表明:

① 采用三台阶施工,单个台阶长度一般为 6 m,初期支护封闭成环步距为 12 m~15 m,每天施工 2 个循环,进尺 1 m;初期支护成环时间最快为 15 d。监控量测数据显示:上台阶开挖后水平收敛速率为 8 mm/d~10 mm/d,台阶转换过程中突变 20 mm~40 mm;中台阶开挖后收敛速率为 14 mm/d~28 mm/d,台阶转换过程中突变 30 mm~50 mm;下台阶带仰拱开挖收敛速率 10 mm/d~15 mm/d;中台阶开挖到下台阶开挖前,上台阶收敛变形占总变形的 50%以上,平均收敛速率为 15 mm/d~30 mm/d,中台阶平均变形速率较大,平均为 20 mm/d~40 mm/d;下台阶带仰拱开挖、初期支护成环后,上、中台阶的水平收敛速率显著降低,仰拱混凝土施作完成后,变形逐步趋缓。

② 采用上下台阶、下台阶带仰拱一次开挖法施工,初期支护成环步距一般控制在 10 m 以内,时间控制在 10 d 以内,工序转换只需 1 次,减少了围岩扰动(特别是爆破)次数。监控量测数据表明:从开挖到初期支护成环,累计变形量可控制在 20 cm(1/2 预留变形量左右)以内。施工过程中,根据监控量测信息及时进行初期支护补强,可确保初期支护不破坏、不侵限。

③ 采用三台阶施工,除增加围岩开挖扰动次数外,还增加了拱架的受力薄弱环节(连接板接头处)。从开挖到初期支护成环至少需要 15 d,累计变形量一般大于 30 cm,在此期间即使采取补强措施,初期

支护也基本破坏,后期变形还会加剧,加大了变形侵限风险。

工法实施效果的对比分析表明:上下台阶、下台阶带仰拱一次开挖法,在工效和围岩变形控制方面均明显优于三台阶工法。

(3) 适当加长边墙系统锚杆、锁脚锚杆,选用合适的锚固材料。理论研究及工程实践均表明,锚杆在控制围岩变形方面可发挥重要作用^[13-15]。中义隧道 4 个区段围岩松动圈的现场测试结果表明:围岩松动圈厚度为 4.27 m~4.33 m。考虑到围岩变形具有水平收敛远大于拱顶下沉的特点,根据松动圈的测试结果,将边墙系统锚杆、锁脚锚杆长度由原设计的 4.5 m 增加至 6.5 m。

为提高锚杆施工质量,进行了锚杆施做工艺及注浆工艺的现场试验。试验表明:边墙用中空组合(或全长粘接)锚杆,采用早强灌浆料锚固,3 d 后锚杆拉拔力达 116.33 kN,可较好地控制围岩大变形。

现场采取表 1、表 2 的大变形分级控制措施及下台阶带仰拱一次开挖方法施工,加强锚杆施工工艺及拱架纵向连接质量后,换拱率由原来的 100% 下降到 26%,取得了较好的实施效果。

(4) 掌握初期支护补强时机,适时进行补强。根据监控量测数据,掌握初期支护补强时机并适时进行补强,可有效地控制初期支护变形,避免变形侵限、换拱的发生。中义隧道通过现场试验和施工总结,得出下列初期支护补强原则:

① 当变形发生黄色预警或累计变形超过预留变形量的 1/3(15 cm 左右)时,在变形部位及其两侧 1 m 范围内,及时采取增加锁脚锚杆、增设横撑,锚管径向注浆等措施进行初期支护补强。

② 如果报警持续且累计变形超过预留变形量的 2/3(30 cm 左右),则采用全长粘结锚杆并用早强灌浆料锚固,或者在钢拱架最大跨度的中部两侧各施作 2 根锚杆或 2 根 $\Phi 75$ 锚管,并注水泥浆液进行补强。

一年多的施工实践表明:中义隧道严格按上述原则进行初期支护补强的区段,均未出现初期支护侵限、换拱的情况。

(5) 适时施作二次衬砌。及时施作二次衬砌可有效控制初期支护变形,但过早施作又可能导致二次衬砌破坏^[13,15-16]。因此,在大变形区段,掌握二次衬砌施作时机尤为重要。为此,在大变形区段选取典型断面,在二次衬砌内埋设结构内力测试元器件,测得二次衬砌在初期支护不同变形速率下施作时的受力情况。在此基础上,通过综合分析,得出合理的二次衬砌施作时机。

中义隧道大变形区段 3 个测试断面、测试周期超过 9 个月的测试结果表明:在初期支护变形速度小于 2 mm/d ~ 3 mm/d 时施作二次衬砌比较合适。

(6) 做好重点工序的质量卡控。锁脚锚杆的数量、长度、角度必须符合设计要求。为保证锁脚锚杆的位置准确及锚固力,在拱架上焊定位环定位,并在二次衬砌施作前补注浆。

重视拱架单元连接及纵向连接的质量把控,关键部位纵向连接采用槽钢;根据拱脚变形情况,优化拱架加工工艺,特别是拱架接头处的加工精度。

(7) 优化施工组织。加强现场施工人员的组织管理,对上、下台阶,仰拱等工序,在时间、空间上进行优化组合,实现稳步有序作业和平行交叉作业,确保从开始开挖到初期支护成环在 10 d 内完成,仰拱混凝土在 15 d 内完成。

5 结 论

(1) 丽香铁路中义隧道围岩大变形具有持续时间长、水平收敛远大于拱顶下沉的特点。围岩及初期支护的上述变形破坏特点是由隧址区地应力最大主应力为水平方向,且与隧道轴线接近垂直的特点决定的。

(2) 丽香铁路中义隧道大变形主要是由于隧址区强烈的地质构造及变质作用使围岩完整性遭受严重破坏,围岩破碎,结构面发育且富集绿泥石等软弱夹层,地层赋存较高的残余构造应力引起的。

(3) 丽香铁路中义隧道施工中,根据工程地质条件、围岩强度应力比及相对位移将大变形分为一般、严重、极严重 3 个等级,分别采用 I、IIA、IIIA 型衬

砌断面和 30 cm、40 cm、50 cm 的预留变形量,并采取措施后,取得了较好的大变形控制效果。

参考文献:

- [1] 魏 来,刘 钦,黄 沛.高地应力软岩隧道大变形机理及控制对策研究综述[J].公路,2017,62(7):297-305.
- [2] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
- [3] 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.
- [4] 赵德安,陈志敏,蔡小林,等.中国地应力场分布规律统计分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(6):1265-1271.
- [5] 刘成禹,何满潮.深埋隧道地质构造发育段围岩压力的特点[J].岩土力学,2015,35(4):1101-1109.
- [6] 张广泽,蒋良文,柴春阳.丽香线金沙江大桥桥位工程地质比选[J].铁道工程学报,2013(10):22-25.
- [7] Hoke E, Marinos P. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses[J]. Tunnels and Tunnelling International, 2000,32(11):45-51.
- [8] 李国良,刘志春,朱永全.兰渝铁路高地应力软岩隧道挤压大变形规律及分级标准研究[J].现代隧道技术,2015,52(1):62-68.
- [9] 李廷春.毛羽山隧道高地应力软岩大变形施工控制技术[J].现代隧道技术,2011,48(2):58-67.
- [10] 张文强,王庆林,李建伟.木寨岭隧道大变形控制技术[J].隧道建设,2010,30(2):157-161.
- [11] 丁远振,谭忠盛,马 栋.高地应力断层带软岩隧道变形特征与控制措施研究[J].土木工程学报,2017,50(S1):129-134.
- [12] 陆鹏源,王 静.红层软岩隧洞施工过程围岩大变形特征及其支护[J].水利与建筑工程学报,2015,13(6):70-74.
- [13] 刘招伟,王明胜,方俊波.高地应力大变形隧道支护系统的实验研究[J].土木工程学报,2010,43(5):111-116.
- [14] 赵喜斌,刘成禹.管式锚杆提高破碎软弱围岩支护效果的理论与实践[J].隧道建设,2009,29(1):1-6.
- [15] 赵 勇,刘建友,田四明.深埋隧道软弱围岩支护体系受力特征的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(8):1663-1670.
- [16] 陈锦涛,韩爱果,任光明.基于应力监测的软岩隧道支护结构稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2018,16(1):178-181.