

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201907023

软岩隧道围岩变形季节性特征与防控措施研究*

方星桦¹, 刘 澍¹, 陈 维², 王康云², 阳军生¹

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 云南丽香高速公路投资开发有限公司, 云南 昆明 650217)

摘要:以香丽高速洼里别隧道为依托,通过隧道围岩变形监测结果,分析了炭质板岩隧道围岩变形与季节性降雨之间的关系,研究了围岩旱季和雨季隧道施工围岩变形差异的原因,提出隧道围岩大变形防控措施。结果表明,受季节性降雨的影响,洼里别隧道围岩变形呈现出一定的季节性特征,较于旱季时期,雨季施工时围岩变形呈现出变形量大且变形速率快的特点;围岩大变形因围岩条件、地下水及施工原因共同影响产生,而炭质板岩的软化性、崩解性及其岩层倾角是引发围岩大变形的内因,地下水则是造成围岩变形呈现出季节性特征的主要原因。最后,基于三个主要影响因素,提出适用于洼里别隧道的围岩变形防控措施,采用控制措施后,现场施工效果良好。

关键词:隧道; 炭质板岩; 围岩变形; 季节性降雨; 防控措施

中图分类号: TU459.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1331-08

Seasonal Characteristics of Surrounding Rock Deformation in Soft Rock Tunnel and Prevention Measures

FANG Xinghua¹, LIU Shu¹, CHEN Wei², WANG Kangyun², YANG Junsheng¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. Yunnan Li Xiang Expressway Investment and Development Co. Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: This paper analyzed the relationship between the surrounding rock deformation of a carbonaceous slate tunnel and the seasonal rainfall, based on the field monitoring results. To propose the prevention and control measures for large deformation in the surrounding rock, the difference of surrounding rock deformation during tunnel construction between the dry season and the rainy season was studied. The results show that the surrounding rock deformation has certain seasonal characteristics. Compared with the dry season, the deformation in the rainy season is larger and the deformation rate is faster. Besides, surrounding rock conditions, groundwater and excavation are the main factors that contribute to large seasonal deformation of surrounding rock. Finally, based on the above three main influencing factors, measures for deformation prevention and control of surrounding rock in Walibie tunnel are proposed. The research can provide guides for subsequent construction of the tunnel.

Keywords: tunnel; carbonaceous slate; surrounding rock deformation; seasonal rainfall; prevention and control measures

* 收稿日期:2019-07-06;修回日期:2019-08-31

基金项目:国家自然科学基金项目(51878669)资助

作者简介:方星桦(1995—),男,博士研究生。主要从事隧道工程方面的科研工作。E-mail: fangxinghua@csu.edu.cn

引言

隧道在建设过程中影响围岩变形的原因很多,其中降雨是很重要的诱发因素。多雨季节建设期间,隧道洞口边坡失稳、掌子面塌方、隧道大变形等情况常有报道,这些问题将严重影响施工进度和成本,给隧道建设带来极大的难题,且当隧道穿越易受地下水影响的地层时尤甚。

炭质板岩是一种典型的软岩,呈黑色、灰黑色,板状构造。因其具有抗剪强度较低,层理、节理发育,遇水易软化等特性,隧道在穿越炭质板岩地层时易出现围岩大变形、隧道初支开裂、掉块等问题。对此国内学者进行了广泛的研究,较为典型的有:左清军等^[1]研究了不同开挖方法下特大断面板岩隧道施工期围岩时空变形规律;宋勇军等^[2]依托木寨岭二期隧道,进行了干燥与饱水状态下炭质板岩蠕变试验研究;吴发展等^[3]分析了同寨隧道进口段炭质板岩大变形的原因,并通过工程试验研究了变形控制措施;王云龙等^[4]研究了板岩隧道塌方的工程特征及影响因素,探讨了板岩塌方现象的发生机制,并提出了预防塌方现象的关键措施;刘高等^[5]探讨了木寨岭隧道大变形的原因和机制,提出了大变形控制方案,确保了隧道安全顺利贯通;吕显福等^[6]以木寨岭隧道为例,分析了软岩隧道大变形机理,阐述了围岩大变形的破坏特征以及控制大变形的措施。但遗憾的是,上述研究主要集中在炭质板岩室内试验和隧道大变形机理和控制措施方面,而隧道围岩变形与季节性降雨间的关系并未深入研究。

香丽高速洼里别隧道施工中发现,隧区5~10月份降水充沛,降雨量占全年90%以上,7、8月份降雨尤为集中,10月下旬至次年5月为干风季,隧区季节性降雨特征明显(图1)。受季节性降雨影响,洼里别隧道炭质板岩段围岩变形呈现出一定的季节性特征(图2),2017年雨季隧道拱部沉降平均值为301.5 mm,水平收敛平均值为210.3 mm;旱季隧道拱部沉降平均值为174 mm,水平收敛平均值为109.1 mm。两时期围岩变形量差异明显,这说明洼里别隧道施工时围岩变形受季节性降雨影响较大,因此,对炭质板岩隧道围岩变形与季节性降雨间的关系进行研究具有重要意义。

鉴于此,本文基于洼里别隧道炭质板岩段围岩

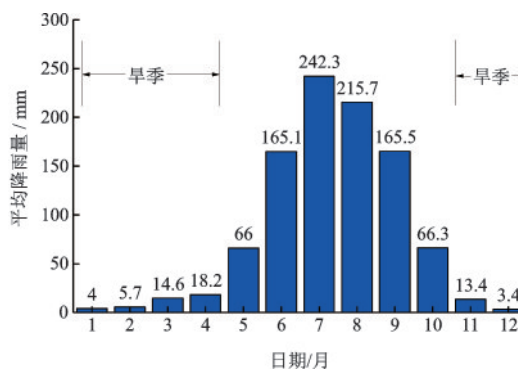


图1 隧区月均降雨量直方图

Fig.1 Histogram of monthly average rainfall in the tunnel area

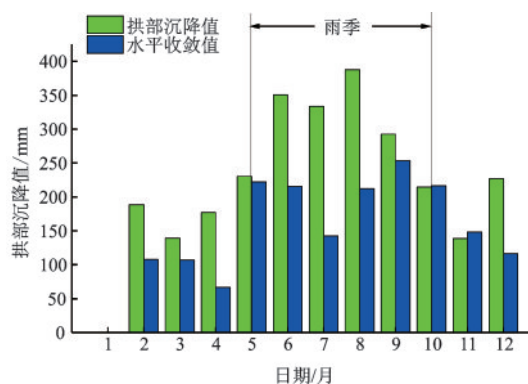


图2 2017年洼里别隧道累计变形平均值直方图

Fig.2 Histogram of cumulative mean deformation of the Walibie Tunnel in 2017

变形特征,研究了围岩变形与季节性降雨间的关系,并提出相应的防控措施,可为隧道后续施工以及类似工程施工提供参考。

1 工程概况

洼里别隧道是一座分离式隧道,隧道右线全长1 230 m,隧道穿越三叠系下统板岩,最大埋深约347 m,洞身围岩为IV、V级。隧道地处高山斜坡中部,地形起伏,自然坡度较陡,沟谷深切呈“V”字形,地质作用以侵蚀、风化作用为主。隧区地表水分布于金沙江水系,地下水以松散岩类孔隙水和基岩裂隙水为主。

2017年,洼里别隧道于雨季时期施工158.4 m,旱季时期施工154.9 m(图3),两段施工期间均出现围岩大变形现象,局部存在初支侵限等问题。对此,现场多次停止开挖进行拆换拱处理,严重影响了工期和成本。

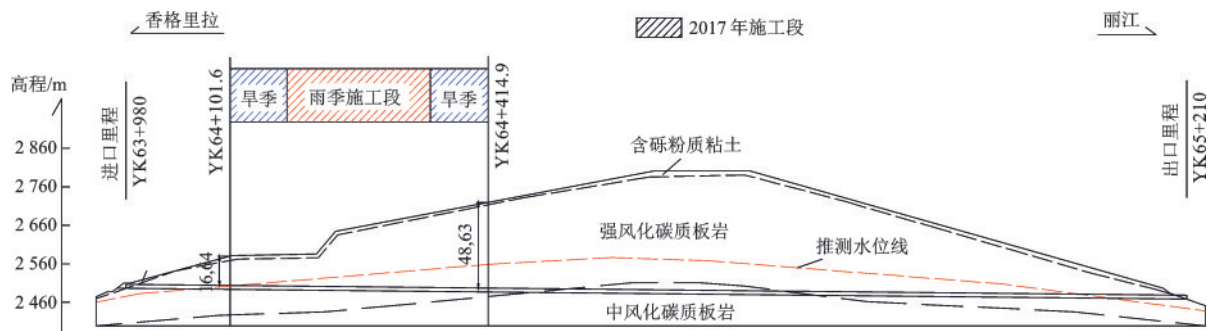


图3 注里别隧道右线纵断面示意

Fig.3 Longitudinal section of the right line of Walibie tunnel

1.1 地质概况

YK64+101.6~YK64+414.9段为V级围岩,埋深约为75~220 m。该段洞身围岩为灰、黑色强风化炭质板岩(图4),呈薄~中层状,岩体泥质胶结且局部碳化严重。围岩节理裂隙发育,岩层走向与隧道平行,岩体受层理、节理切割后完整性较差。此外,该段施工时掌子面存在不同程度的渗水现象,渗水处岩体强度较低,徒手可捏至泥状,围岩整体承载能力较差。

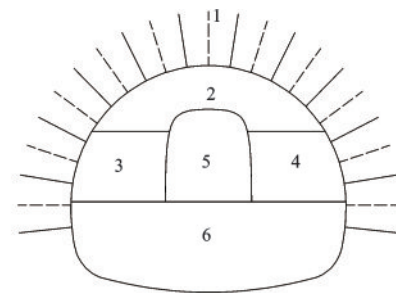


图4 强风化炭质板岩

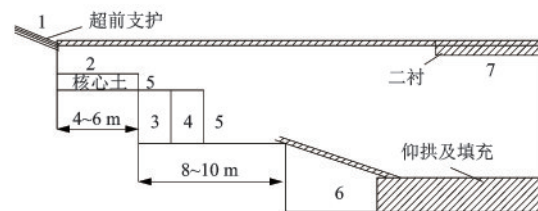
Fig.4 Heavily weathered carbonaceous slate

1.2 施工情况

YK64+101.6~YK64+414.9段开挖时采用三台阶分步开挖法(图5)施工,光面爆破。施工过程为:①掌子面拱部软弱层进行超前小导管预注浆加固;②上台阶开挖支护预留核心土,台阶高3 m,台阶长4~6 m;③中台阶左侧开挖支护,台阶高3.2 m,台阶长8~10 m;④中台阶右侧开挖支护;⑤核心土开挖,高4.2 m,宽3~4 m;⑥下台阶与仰拱开挖支护;⑦根据监控量测结果,确定最佳衬砌时间,施作二次衬砌。该段支护采用复合式衬砌结构,支护情况见表1。



(a) 施工步骤横断面



(b) 施工步骤说明

图5 三台阶分布开挖法施工步骤示意

Fig.5 Construction diagram of three-step excavation method

2 围岩变形特征

2017年隧区雨季较于丰富,较于注里别隧道旱季施工段,雨季施工段洞内渗水情况更为严重,局部区段出现初支大面积湿润、线状、股状渗水现象(图6)。现针对注里别隧道实际情况,选取旱季与雨季施工段典型断面进行围岩变形特征分析,两断面围岩情况见表2。

2.1 旱季施工围岩变形特征

2017年3月30日,YK64+160断面在上台阶支护完成后立即对初支变形进行监控量测,该断面采用SF5e型复合式衬砌。监测结果如图7所示,图中负值表示沉降与收敛。

截至2017年4月30日,YK64+160断面共监测32 d。监测结果表明:该断面上台阶开挖支护后,左

表1 YK64+101.6~YK64+414.9段支护情况

Table 1 YK64+101.6~YK64+414.9 section support situation

支护类型	支护区段	支护参数
SF5a	YK64+101.6~YK64+129.8	I18 钢拱架、3 m 长注浆小导管、25 cm 厚 C25 喷射砼
	YK64+310.1~YK64+350.9	
	YK64+371.3~YK64+374.9	
SF5c	YK64+350.9~YK64+371.3	I20a 钢拱架、4 m 长注浆小导管、27 cm 厚 C25 喷射砼
SF5d1	YK64+374.9~YK64+394.9	I20a 钢拱架、4.5 m 长注浆小导管、29 cm 厚 C25 喷射砼
SF5e	YK64+129.8~YK64+170.3	I22b 钢拱架、4 m 长径向小导管、29 cm 厚 C25 喷射砼
SF5e1	YK64+170.3~YK64+310.1	I22b 钢拱架、4 m 长注浆小导管、29 cm 厚 C25 喷射砼
	YK64+394.9~YK64+414.9	

表2 断面围岩情况对比

Table 2 Comparison table of surrounding rock conditions

断面里程	围岩情况	备注
YK64+160	V 级层状强风化板岩,完整程度较差,节理裂隙发育,地下水弱发育。掌子面右侧岩层倾角为 0~10°,左侧岩层倾角 20~40°,向线路左侧倾斜	旱季施工断面
YK64+295	V 级层状、碎裂强风化板岩,岩体破碎,节理裂隙较发育,完整程度差,地下水较发育。掌子面岩层倾角 15~40°,向线路左侧倾斜	雨季施工断面



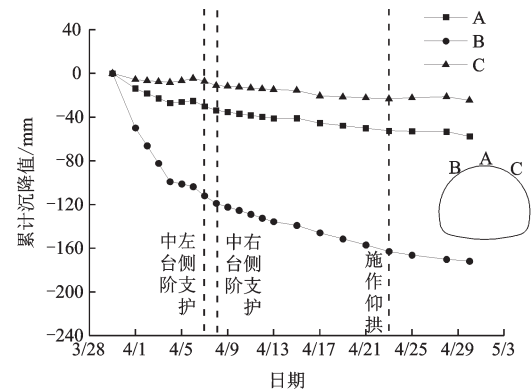
图6 雨季施工段初支湿润情况

Fig.6 Wet condition of the initial support of the construction section during the rainy season

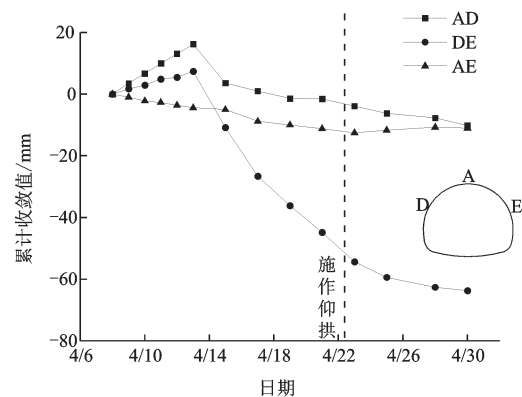
拱腰处沉降值增长迅速,在开挖完成 1 d 内,拱部左侧下沉 49.9 mm;中台阶开挖支护后,各监测点沉降仍有增长,此时断面左右侧沉降变形速率存在差异,导致收敛测点的空间坐标发生差异变化,使得水平收敛与中左收敛于早期呈现正值,但收敛值随时间增长逐渐减小;仰拱支护完成后,拱部沉降与周边收敛逐渐趋于收敛;此外,该断面拱部最大沉降值达 176.9 mm(断面左拱腰处),周边收敛最大值达 66.6 mm,最大沉降值已超过预留变形值(20 cm)的 2/3,但仰拱施作完成后变形速率减缓。

2.2 雨季施工围岩变形特征

2017年8月16日,YK64+295断面在上台阶支护完成后进行监控量测(图8),该断面采用SF5c型复



(a) 拱部沉降时程曲线

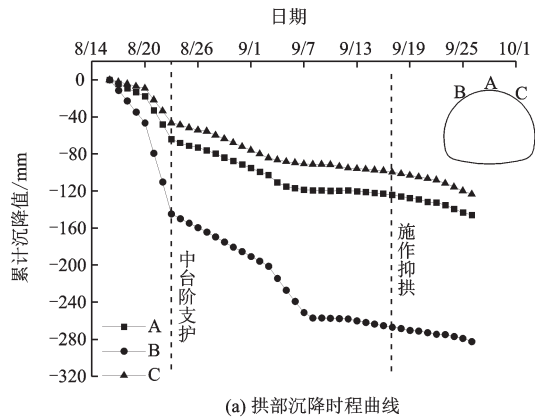


(b) 周边收敛时程曲线

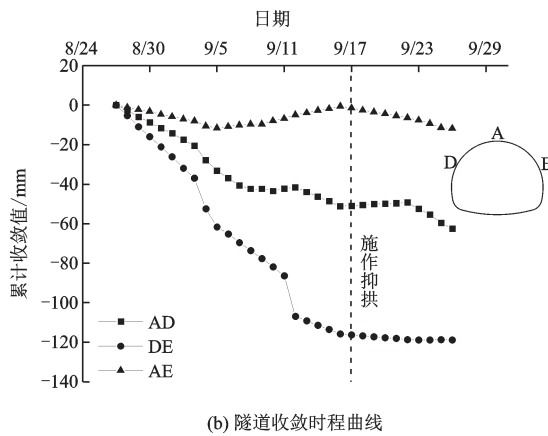
图7 YK64+105初期支护结构变形时程曲线

Fig.7 Time history curve of initial support structure deformation at YK64+105

合式衬砌结构。此外,因已支护区段出现了围岩大变形现象,该断面处的预留变形量已变更为 30 cm。



(a) 拱部沉降时程曲线



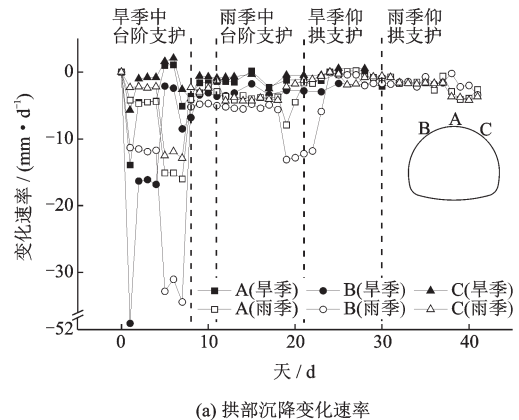
(b) 隧道收敛时程曲线

图8 YK64+295初期支护结构变形时程曲线

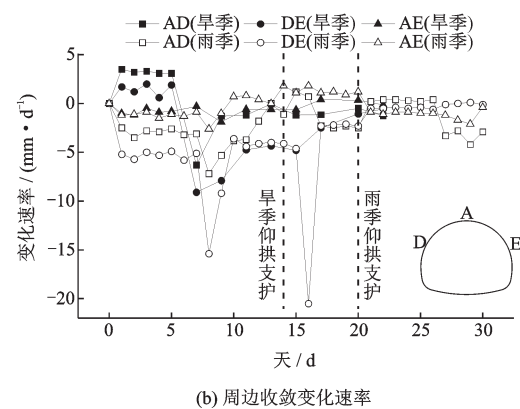
Fig.8 Time history curve of initial support structure deformation at YK64+295

截至2017年9月26日, YK64+295断面共监测42 d。监测结果表明: 该断面上台阶开挖支护后, 拱部沉降量较大且增长迅速, 在开挖完成后7 d内, 拱部左侧累计下沉144.6 mm, 拱部右侧下沉46.4 mm, 拱顶沉降64.0 mm; 中台阶开挖后, 各监测点的沉降速率减缓, 但在11 d后左拱腰处沉降速率变大; 仰拱支护完成后, 拱部沉降与周边收敛未见明显收敛趋势。此外, 该断面拱部最大沉降值达282.3 mm(断面左拱腰处), 水平收敛最大值达118.8 mm, 初期支护几乎侵限(预留变形量30 cm)。

根据拱部沉降与周边收敛变化速率绘制旱季、雨季时期变形速率如图9所示。由图9可知, YK64+160断面(旱季开挖)在开挖后拱部沉降与周边收敛变形速率最大值分别为49.9、9.1 mm/d, YK64+295断面(雨季开挖)则为34.4、20.5 mm/d, 整体上旱季开挖断面变形速率小于雨季开挖断面。其中, 受围岩破碎影响, 旱季断面开挖后B点沉降速率立即达到峰值49.9 mm/d, 随后速率逐渐减小, 至中台阶与仰拱开挖支护后, 旱季断面围岩变形速率



(a) 拱部沉降变化速率



(b) 周边收敛变化速率

图9 旱季、雨季时期围岩变形速率

Fig.9 Deformation rate diagram of surrounding rock during the dry season and the rainy season

均发生明显减小; 雨季断面开挖后, 拱部沉降与周边收敛速率均持续增长, 各支护施作完成后围岩变形速率未出现明显减小趋势。

综合分析监测数据, 洼里别隧道在施工中围岩呈现出明显的变形特征: (1)旱季和雨季施工时, 围岩前期均表现出变形较大且变形速率快的特点; (2)较于旱季施工段, 雨季施工时围岩变形大且变形速率快, 其中在旱季施工段, 仍会出现变形速率增加的情况, 而旱季施工段在中台阶支护后变形速率降低, 趋于收敛; (3)变形持续时间长, 30 d内围岩变形无法收敛, 且仰拱施作后围岩持续变形, 围岩蠕变特性明显; (4)围岩变形具有空间分布不对称性, 岩层倾向一侧变形量大于另一侧。

3 影响因素分析

洼里别隧道在建设过程中, 在多种影响因素共同作用下出现了围岩大变形现象, 且旱季和雨季施工段变形规律存在差异, 为了对围岩大变形采取有效的防控措施, 必须对大变形影响因素进行探讨和

分析。

3.1 围岩条件

3.1.1 矿物成分

X射线衍射试验结果表明,注里别隧道炭质板岩中主要矿物为石英、白云母、绿泥石、钠长石、方解石和白云石(图10),其中黏土矿物(绿泥石)含量为18.6%,碳酸盐类矿物(方解石、白云石)含量共8.6%,这两类矿物使得注里别隧道炭质板岩水理性质较差,遇水后易发生软化、崩解现象,岩体强度降低甚至部分岩体强度完全丧失。经试验验证,炭质板岩岩样于水中浸泡1分钟时已崩解为大量细小颗粒(图11),充分体现了注里别隧道炭质板岩的崩解特性。此外,经现场简易试验,该岩样在浸泡30 min后,岩样软化抗折强度降低,可轻易折断。

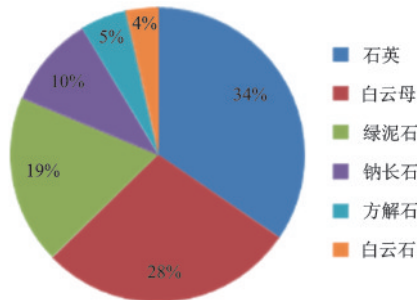


图10 炭质板岩矿物组成成分

Fig.10 The mineral composition of carbonaceous slate

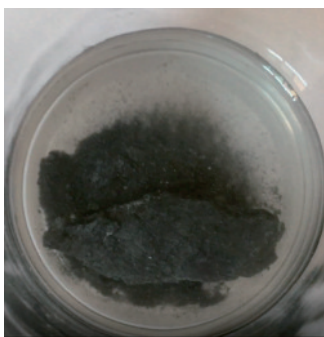


图11 岩样崩解性试验

Fig.11 Rock sample disintegration test

3.1.2 围岩情况

YK64+101.6~YK64+414.9段岩层节理裂隙发育,岩层走向与隧道轴向平行,岩层倾向不一,存在一定倾角(YK64+160断面掌子面右侧岩层倾角为0~10°,左侧岩层倾角20°~40°;YK64+295断面掌子面岩层倾角15°~40°,两断面岩层均向线路左侧倾斜)。受到岩层倾角影响,隧道左右两侧围岩

变形机制不同^[7-8]:两断面在开挖支护后,在地应力的作用下左侧围岩发生弯曲变形,围岩临空面处岩体处于弯拉状态,加之该段围岩自稳能力较差,岩体极易发生弯曲破坏从而加剧围岩变形;而右侧围岩变形以顺层剪切滑移变形为主。该机制是围岩变形呈现出空间分布不对称性的主要原因,可与两断面拱部沉降监测结果相互印证。

3.2 地下水

YK64+101.6~YK64+414.9段地下水以松散岩类孔隙水和基岩裂隙水为主,由于旱季降雨量远比雨季时期少,旱季施工段地下水量较小,地下水对于围岩变形不是主要影响因素。而在雨季施工段时,降雨量大且降雨持续时间长,地下水补给充足,隧道内渗水现象突出,故不能忽视地下水对于围岩变形的影响,具体影响为如下两个方面:(1)洞室开挖后,地下水沿着裂隙流出持续冲刷岩层,炭质板岩中的碳酸盐类矿物与水相互作用后出现软化、崩解现象,岩体强度急剧降低,围岩自稳能力下降,变形增大;(2)由于在相同应力条件下,饱水状态下炭质板岩的蠕变量以及粘弹性应变远大于干燥状态下的应变^[2,9],雨季施工段炭质板岩在地下水的影响下,蠕变变形加剧,围岩累计变形量增大。

3.3 施工原因

YK64+101.6~YK64+414.9段局部存在的施工方法与围岩特性不匹配、钢拱架连接板的焊接质量不佳、锁脚锚杆施工工艺不当导致其未与工字钢有效连接等情况(图12)均会影响初期支护结构的支护效果,导致支护结构无法较好的承受围岩压力,从而出现围岩大变形、衬砌结构破坏等问题。施工原因也是该段围岩出现大变形的主要原因之一。



(a) 连接板翘曲焊接不佳

(b) 锁脚锚管未有效连接

图12 注里别隧道现场施工情况

Fig.12 Site construction problems in Walibie tunnel

4 围岩变形防控措施研究

4.1 提升围岩自身承载能力

(1) 超前控制围岩变形

针对注里别隧道围岩破碎且遇水易软化的特点,可对拱部 120° 范围内进行 $\phi 42$ mm超前小导管注浆,浆液在注入围岩裂隙后,能与之紧密接触并将其胶结起来,形成一个强度大、防水性能良好的固结体,从而提高围岩整体性和自承能力,控制掌子面和周边围岩变形。此外,对开挖掌子面上部断面喷射5 cm厚C30混凝土,也能够起到改善掌子面稳定性的效果。

(2) 长锚杆加固围岩

采用长6 m以上的系统锚杆加固层状围岩,间距 100×50 cm。在施工过程中,长锚杆能够打入围岩塑性区外的稳定岩体中,有效地形成加固圈,并且能够穿越数层炭质板岩并将其挤压组合在一起,形成“组合梁板”结构,使得板岩的整体刚度得到提升,从而改善围岩的自身承载能力。值得注意的是,锚杆打设应与岩层大角度相交,避免锚杆顺岩层施作加剧岩体的破坏。

4.2 改善隧道防排水功能

针对注里别隧道雨季施工特征,可采取“以堵为主,疏堵结合”的原则进行控制,具体措施如下:(1)径向注浆加固围岩。在开挖后,对拱、墙范围进行径向注浆,并保证注浆效果,其能够改善炭质板岩自身强度较低的特性,同时能够减弱地下水对于围岩的影响,起到雨季防水的作用;(2)合理优化排水系统。针对雨季连续降雨的特点,现场可适当加密排水盲管的布设,并且在施工过程中必须要保证排水系统的畅通性,定期对排水系统进行检查,一旦出现排水盲管堵塞现象应及时处理。

4.3 增强支护体系整体性能

(1) 提高支护结构的强度^[10-11]

选用更高规格的工字钢进行初期支护,使其在初支混凝土达到设计强度前有效地承担围岩压力;同时提升初期支护厚度。

(2) 初期支护封闭成环

严格控制台阶长度,避免因台阶过长导致支护

结构长时间未封闭的情况,必要时也可采用临时仰拱或临时横撑进行支护,使支护结构迅速封闭,抵抗围岩变形。

(3) 辅助施工措施

加强锁脚锚杆与连接板的施工工艺^[12],并采用4.5 m长, $\phi 89 \times 6$ mm的注浆小导管进行缩脚加固,以尽可能避免钢拱架拱脚悬空或直接立于虚渣上的情况。此外,规范仰拱的施工工艺,提高仰拱的支护质量也是大变形施工控制措施之一。

4.4 合理优化施工方法

针对注里别隧道季节性降雨特征,旱季施工时应加强支护结构刚度,在控制围岩变形的同时加快施工进度,在旱季多进行开挖进尺;雨季施工时以“预防”为原则,严格控制爆破进尺,合理选择支护参数,同时加强防排水系统的布设,一旦遇上极端暴雨天气应及时加强支护,以预防出现围岩大变形现象。

采用上述控制措施后,注里别隧道右线围岩变形均处于安全范围内,施工中未发生变形侵限、局部塌方等破坏情况,施工效果良好。

5 结 论

在注里别隧道监控量测资料的基础上,分析了隧道围岩变形与季节性降雨之间的关系,得出以下结论:

(1)受季节性降雨的影响,注里别隧道围岩变形呈现出一定的季节性特征,较于旱季时期,雨季施工段围岩变形更大、变形速率更快,且在支护过程中,围岩变形速率会出现突然增大的情况。

(2)围岩大变形因围岩条件、地下水及施工原因共同影响产生,而炭质板岩的软化性、崩解性及其岩层倾角是引发围岩大变形的内因,地下水则是造成围岩变形呈现出季节性特征的主要原因。

(3)针对注里别隧道围岩变形特征,施工过程中可从提升围岩自身承载能力、改善隧道防排水功能、增强支护体系整体性能以及合理优化施工方法四个方面进行围岩大变形的防控,在旱季时期做到控制围岩变形的同时加快施工进度,雨季时期以“预防”为原则,以控制围岩变形为重点进行施工。采用控制措施后,现场施工效果良好。

参考文献:

- [1] 左清军, 吴友银, 闫天玺. 特大断面板岩隧道施工期围岩变形时空效应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(2): 233-243.
Zuo Q J, Wu Y Y, Yan T X. Analysis of time-space effect for surrounding rock deformation in super-large cross section slate tunnel during construction period[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(2): 233-243. (in Chinese)
- [2] 宋勇军, 雷胜友, 邹狮, 等. 干燥与饱水状态下炭质板岩蠕变特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 619-625, 664.
Song Y J, Lei Sh Y, Zou Ch, et al. Study on creep characteristics of carbonaceous slates under dry and saturated states[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 619-625, 664. (in Chinese)
- [3] 吴发展, 傅政. 同寨隧道进口变形控制技术研究[J]. 铁道工程学报, 2014, 186(3): 87-90, 101.
Wu F Zh, Fu Zh. Research on deformation control technology of Tongzhai tunnel entrance[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 186(3): 87-90, 101. (in Chinese)
- [4] 王云龙, 谭忠盛. 木寨岭板岩隧道塌方的结构失稳分析及预防措施研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增2): 263-268.
Wang Y L, Tan Zh Sh. Structural instability analysis and prevention measures of structural collapse in Muzhailing slate tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(Sup 2): 263-268. (in Chinese)
- [5] 刘高, 张帆宇, 李新召, 等. 木寨岭隧道大变形特征及机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增2): 5521-5526.
Liu G, Zhang F Y, Li X Zh, et al. Research on large deformation and its mechanism of Muzhailing tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Sup 2): 5521-5526. (in Chinese)
- [6] 吕显福, 赵占群, 魏星星. 高地应力软岩隧道大变形机理及控制措施探讨——以木寨岭隧道为例[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6): 227-231.
Lyu X F, Zhao Zh Q, Wei X X. Discussion of the large deformation mechanism and control measures for a soft rock tunnel under high ground stress: a case study of the Muzhailing tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(6): 227-231. (in Chinese)
- [7] Meng L B, Li T B, Jiang Y, et al. Characteristics and mechanisms of large deformation in the Zhegu mountain tunnel on Sichuan-Tibet Highway [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013(37): 157-164.
- [8] 刘阳, 伍晓军, 刘志强, 等. 关于炭质板岩隧道大变形机理及应对措施的探讨[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(6): 19-24.
Liu Y, Wu X J, Liu Zh Q, et al. Discussion of and solutions for the large deformation mechanism of a tunnel in carbonaceous slate[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(6): 19-24. (in Chinese)
- [9] 王更峰. 炭质板岩蠕变特性研究及其在隧道变形控制中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
Wang G F. Study on the creep properties of carbonaceous slate and its application in tunnel deformation control technology [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)
- [10] 王树英, 阳军生, 肖小文, 等. 乔家山隧道粘土岩大变形及支护结构稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(6): 1545-1551.
Wang Sh Y, Yang J Sh, Xiao X W, et al. Study on large deformation of claystone and support stability in Qiaojiaoshan tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(6): 1545-1551. (in Chinese)
- [11] 王树英, 阳军生, 李习平. 高地应力凝灰岩地层铁路隧道支护结构大变形的原因及其整治[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(5): 47-54.
Wang Sh Y, Yang J Sh, Li X P. Causes and renovation for large deformation in supporting structure of railway tunneling tuff formation under high geostress [J]. China Railway Science, 2014, 35(5): 47-54. (in Chinese)
- [12] 王一鸣, 任登富, 王立川, 等. 三联隧道穿越煤系地层软岩大变形控制研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(增1): 1613-1619.
Wang Y M, Ren D F, Wang L Ch, et al. Control of large deformation for soft rock of sanlian tunnel through coal-bearing strata[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(Sup 1): 1613-1619. (in Chinese)

(本文责编: 苏泽云)