文章编号:1009-6582(2019)04-0069-05 DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2019.04.011

西藏米拉山隧道围岩大变形成因分析

吴树元[1] 程 勇[1] 谢全敏[2] 刘继国[1] 陈必光[1]
(1中交第二公路勘察设计研究院有限公司,武汉 430056;2武汉理工大学土木工程与建筑学院,武汉 430070)

摘 要 隧道围岩大变形是隧道施工中的一个极其复杂难题。文章以西藏米拉山隧道围岩大变形为研究对象,通过现场调查与试验分析对大变形成因进行了研究,结果表明:米拉山隧道凝灰岩抗风化能力差和遇水易软化是围岩大变形的根本原因,而施工工艺不当是围岩大变形的重要诱因。基于米拉山隧道大变形成因分析,文章提出了米拉山隧道大变形处治方案和控制措施。

关键词 米拉山隧道 凝灰岩 围岩大变形 形成机理 灾害控制
中图分类号:U458.1 **文献标识码:A**

1 引 言

围岩大变形是一种典型的隧道地质灾害。随着地下工程建设的飞速发展,围岩大变形灾害的成因分析与处治已成为急需解决的难题[1~5]。目前国内外很多科研人员对隧道围岩大变形与控制进行了研究与实践,获得了不少研究成果[6~10]。但从解决实际工程问题来看,离实际工程需求还有很大的差距,这主要表现在:大变形隧道围岩支护问题一直存在要么支护成本太高,要么支护效果达不到预期目的,长期以来都没有很好地解决隧道围岩大变形破坏问题;大变形隧道围岩支护原理与设计方法不完善的问题也很突出。所以,加强隧道围岩大变形机理与处治技术的研究具有重要的理论价值和实际工程意义[1~17]。

米拉山隧道是西藏林芝—拉萨高等级公路控制性工程,隧道全长5 720 m,平均海拔为4 700多米,是目前世界上海拔最高的公路特长隧道。米拉山隧道在施工过程中围岩大变形灾害十分严重,给隧道施工进度、质量和安全带来了极大的影响。本文通过现场调查与试验分析,开展米拉山隧道围岩大变形机理与处治研究,为围岩大变形灾害控制、施工工艺的改进和支护参数的优化提供依据。

2 米拉山隧道大变形情况

米拉山隧道围岩主要为强风化和中风化凝灰岩,开挖后遇水软化、风化和崩解严重,图1所示为该隧道掌子面揭示后凝灰岩软化与风化崩解情况。米拉山隧道凝灰岩段开挖后围岩最大变形量达60~80 cm。图2所示为YK4480+550断面实测围岩变形监测曲线。米拉山隧道围岩支护变形破坏主要有拱部开裂及渗水、初期支护喷混凝土剥落、初期支护喷混凝土开裂和侧帮内挤拱架变形等。米拉山隧道围岩支护变形破坏情况如图3所示。

3 米拉山隧道围岩大变形成因分析

3.1 米拉山隧道凝灰岩特性

米拉山隧道围岩主要为全风化、强风化及中风化凝灰岩,其抗拉强度平均值为3.78 MPa,单轴饱和抗压强度在3.2~23.2 MPa之间,强度较低,属于较软

修改稿返回日期:2018-07-20
基金项目:西藏自治区重点科研项目(2016XZ01G31);国家自然科学基金项目(50874085).
作者简介:吴树元(1979-),男,高级工程师,主要从事道路与隧道工程设计方面的研究工作,E-mail:117232535@qq.com.
通讯作者:谢全敏(1968-),男,教授,博士,主要从事岩土与地下工程方面的研究工作,E-mail:xiequanmin@126.com.

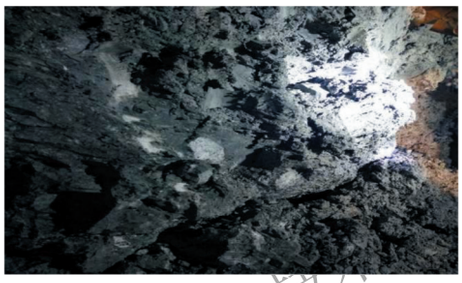


图1 凝灰岩围岩软化与风化崩解情况

Fig.1 Softening and weathering disintegration of tuff surrounding rock

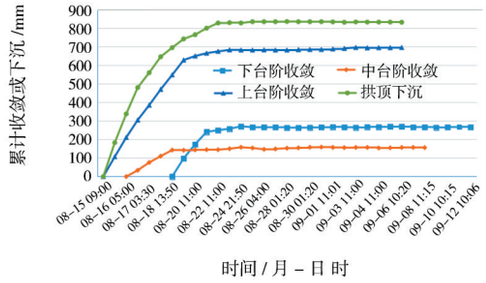


图2 米拉山隧道YK4480+550断面围岩变形监测曲线

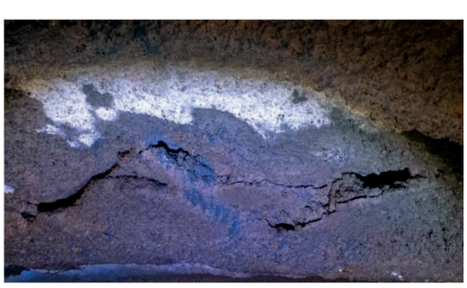
Fig.2 Curves of surrounding rock deformation at YK4480+550 section of Mirashan tunnel



(a) 拱部开裂及渗水



(b) 初期支护喷混凝土剥落



(c) 初期支护混凝土开裂



(d) 侧帮内挤拱架变形

图3 米拉山隧道围岩支护变形破坏形式

Fig.3 Deformation and failure patterns of the rock support of Mirashan tunnel

岩;软化系数在0.61~0.74之间,软化系数较小,易吸水,吸水后结构易破坏,即遇水软化性显著。

米拉山隧道凝灰岩的长英质和斜长石两者含量达76%,而长英质和斜长石抗风化能力较差,所以米拉山隧道凝灰岩易风化。米拉山凝灰岩的粒度分布不均匀,总体较细,凝灰岩的孔隙和裂缝十分发育,有显著湿化特性,使块状凝灰岩不断崩解风化成小块状,围岩自承能力大幅降低。

3.2 米拉山隧道大变形成因

3.2.1 气候分析

由于米拉山海拔较高,致使米拉山两侧气候条件不同,米拉山北边(隧道进口段)受印度洋暖湿气流影响,形成了高原温带半湿润季风气候,温暖湿润,雨量充沛,年平均降水量达808.3 mm。米拉山南边(隧道出口段)属高原温带半干旱季风气候区,年降水量达515.7 mm,且降雨多集中在每年的5~9月,持续时间长,是地下水的主要补给来源。由于地理原因,境内自然灾害多而频繁。春秋之季多旱、晚霜害,夏季常遭雷雨和冰雹袭击,干旱与洪涝极易成灾。漫长的冬季干燥与风沙相伴,冬季受雪灾威胁。隧址区最大冻土深度为140 cm。这样的高寒、温差大和干湿交替的气候条件是米拉山隧道凝灰岩围岩大变形的诱发因素。

3.2.2 隧道破坏因素分析

（1）地质构造因素

米拉山隧道区域主要有一条断裂（米拉山口逆掩断裂）通过，另外一条断裂（夏玛日断裂）从隧道出口附近通过。米拉山口逆掩断裂：近东西延伸，是米拉山口逆冲推覆带的南界。发育宽约20 m的破碎带，带内主要有角砾岩和断层泥，上盘为变质变形程度均较高的松多岩群岔萨岗岩组（AnOc），下盘为变质变形程度均较低的乌郁群（NW）、叶巴组（$J^{2-3}y^2$），上下盘地层产状相交或相顶，上盘变形强烈，约生成于中新世以后。夏玛日断裂：主要走向为北西西向，倾向为北东，倾角为35°~40°，约形成于喜马拉雅晚期，上盘为叶巴组（$J^{2-3}y^2$），下盘为乌郁群（NW），发育宽约100~200 m的破碎带，产状紊乱，小错动常见，并有花岗岩脉侵入其中。米拉山隧道有24条断层；落差大于等于10 m的断层9条，落差小于10 m的断层15条。

由于米拉山隧道处于断层破碎带上，断裂发育，导致岩石破碎松散，围岩性质差，自承能力低。区域地质构造复杂，在自重应力与构造应力双重作用下，导致隧道压力大，变形剧烈。

（2）水的因素

米拉山属尼洋河水系和拉萨河水系的分水岭，水量充沛。调查表明，米拉山隧道地下水丰富，主洞在枯水期总涌水量为61 800~71 300 m^3/d，在丰水期总涌水量为92 700~106 900 m^3/d。水对米拉山隧道围岩变形影响很大。

（3）气候温度影响

由于气候与温度的变化，米拉山隧道凝灰岩不断地受干湿循环和冷热循环的交替侵蚀，其结构构造遭受破坏，岩石强度降低，围岩稳定性变差。

（4）人为因素

通过现场调查，在施工的过程中未严格按设计施工工艺和施工顺序进行。例如，爆破施工时未采用光面爆破技术，而使用一般爆破方式，这就导致隧道开挖面成型不规整，常出现超欠挖的现象，导致局部应力集中，加重了隧道围岩的变形破坏。另外，设计有锚杆的地方常未施作，应对围岩进行径向注浆的地方有时也未实施，这也给隧道稳定性带来很大的影响。

3.2.3 米拉山隧道凝灰岩的破坏规律分析

米拉山隧道凝灰岩体在干燥的环境中通常不会发生形变破坏，一旦遇水即易发生风化，与水充分接触后还会发生崩解，再加上气候和温度的影响，岩石强度会大幅下降，甚至于为0。所以，米拉山隧道在丰富的地下水情况下自稳能力差且自稳时间短，极易产生变形破坏。

3.2.4 施工工艺对米拉山隧道稳定性的影响

通过现场调查分析发现，米拉山隧道施工工艺主要存在以下问题：（1）在三台阶七步法施工过程中，为了减少成本和抢工期进度，该预留核心土的地方没有按设计预留核心土或根本就没有预留核心土，从而导致隧道两侧墙及底板无约束变形过大；（2）隧道施工中的防水不到位和排水不畅，导致围岩浸泡后软化、风化崩解；（3）为了抢进度与工期，采用台阶法开挖的各台阶长度不满足设计要求的情况时常存在，各台阶围岩开挖后没有在围岩变形最佳时间进行支护，特别是下台阶开挖后仰拱未及时施作，二次衬砌施工也常常滞后，导致未能充分发挥围岩的自承能力，支护结构受压过大而变形破坏。

总之，在米拉山隧道凝灰岩段开挖过程中，由于施工工艺不当，加上围岩处于断层破碎带中，开挖后围岩更加破碎，节理与裂隙进一步发育，而且在较高的地压作用下，围岩压力来得快，压力也较大，同时由于该地区每年的降雨季节时间长，雨水多且量大，气候多变，这些因素导致米拉山隧道凝灰岩遇水后在较短时间内发生风化、软化和崩解，使隧道围岩的强度大幅下降甚至消失，导致米拉山隧道凝灰岩围岩自稳能力很差，支护十分困难，给施工安全、质量与进度带来了严重的影响。

4 米拉山隧道围岩大变形处治方案

以米拉山隧道出口左洞ZK4480+660~ZK4480+710段初期支护围岩大变形为例，提出处治方案。

米拉山隧道ZK4480+660~ZK4480+693段采用S-Va衬砌结构设计施工，预留变形量为12 cm，超前支护采用ϕ42×4 mm无缝钢管，单根长度为4.0 m，环向间距为40 cm，纵向排距为240 cm，采用间距为60 cm的I20b型钢拱架进行支护，C25喷射混凝土厚度为26 cm，二次衬砌为50 cm厚的C35钢筋混凝土。

该段初期支护施作完成后，在近一个月的时间里，ZK4480+665~ZK4480+674段出现4道环向裂缝，ZK4480+674~ZK4480+710段上台阶、下台阶出现纵向裂缝，喷射混凝土层出现掉块现象，最大变形量达72 cm。

围岩大变形处治方案为：（1）对ZK4480+660~ZK4480+685段中下台阶采用洞碴反压回填，对掌子面进行喷混凝土封闭，厚度为20 cm；（2）对ZK4480+660~ZK4480+685段上台阶进行临时支撑加固，采用I20b工字钢进行横撑和扇形竖撑；（3）仰拱、二次衬砌抓紧施工，尽快跟进到掌子面下台阶；（4）对

ZK4480+660～ZK4480+693变形过大段增加临时套拱，并进行径向注浆加固；(5)处理过程中，测量人员按时进行监控量测，并加密监控量测频率，实时掌控围岩变形情况；(6)当围岩变形稳定后，方可进行掌子面开挖。

5 米拉山隧道围岩大变形控制分析

根据上述的研究结果可知，影响米拉山隧道凝灰岩围岩大变形的主要因素包括地质构造、凝灰岩的性质、地下水、气候温度、施工工艺和地层压力等。由于米拉山隧道凝灰岩具有遇水易软化和风化崩解特性，所以水是造成米拉山隧道凝灰岩围岩大变形破坏的主要外因，同时地压的影响也起到一定的促进作用，由此提出要控制米拉山隧道围岩大变形破坏，必须采取以防水为重点的一系列工程措施方法，防止凝灰岩风化、软化，增加围岩强度、减小围岩塑性变形区范围和控制隧道位移，具体措施有：

(1) 加强米拉山隧道施工管理与工程技术人员配备，严控施工质量，加强对隧道光面爆破、短掘、短支、早封闭等隧道施工技术的培训。

(2) 加强督查，严格按设计方案执行，严禁在隧道施工过程中偷工减料。

(3) 严格按照三台阶七步法施工，确保对米拉山隧道围岩变形及稳定性的控制。

(4) 防止围岩与地下水接触，减小米拉山隧道围岩软化与风化崩解程度。

(5) 降低岩石风化、软化、崩解程度，采用光面爆破技术，减小凝灰岩节理裂隙进一步的发育和新的裂缝产生。爆破开挖后及时进行围岩注浆与喷浆加固，形成封闭带。适当增设和加强米拉山隧道排水系统功能，避免凝灰岩与水体接触而被浸泡的机会。

(6) 加大围岩体锚杆的应用率，提高凝灰岩抗剪和抗拉强度；挂钢筋网片使松散的凝灰岩形成一个整体，改善围岩应力分布，减小局部应力集中造成的围岩破坏。

(7) 改善米拉山隧道凝灰岩的岩性，通过对围岩径向注浆改变凝灰岩的岩性，降低其渗透性，提高其强度及其抗风化软化的能力。

(8) 加强隧道围岩变形监控量测与管理，充分利用围岩变形监测数据信息，以便在围岩开挖后的最佳支护时间内完成对凝灰岩隧道的合理支护。

6 结束语

米拉山隧道围岩大变形与地质构造、凝灰岩围岩特性和环境气候等因素有关，且与隧道施工工艺不当密切相关。所以，根据米拉山隧道凝灰岩段围岩大变形机理，要控制隧道围岩大变形破坏，必须采取以防水为重点的一系列工程措施，防止凝灰岩风化、软化，增大围岩强度，减小围岩塑性变形区范围和控制隧道位移。

现代隧道技术

参考文献
References

[1] 李术才, 徐 飞, 李利平. 隧道工程大变形研究现状、问题与对策及新型支护体系应用介绍[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35 (7): 1366-1376.
LI Shucai, XU Fei, LI Liping. State of the Art: Challenge and Methods on Large Deformation in Tunnel Engineering and Introduction of A New Type Supporting System[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (7): 1366-1376.

[2] 祁淑丽. 隧道大变形处理措施综述[J]. 铁道建筑技术, 2010 (1): 31-33.
QI Shuli. Overview of Tunnel Gross Distortion Processing[J]. Railway Construction Technology, 2010 (1): 31-33.

[3] 龚 伦, 孙克国, 仇文革. 大变形隧道初期支护受力特征及对策研究[J]. 现代隧道技术, 2102, 49 (6): 71-75.
GONG Lun, SUN Keguo, QIU Wenge. Study of the Force Characteristics of the Primary Support in a Tunnel with Large Deformation and Related Countermeasures[J]. Modern Tunnelling Technology, 2102, 49 (6): 71-75.

[4] 刘中勇. 大变形隧道力学效应及施工对策[J]. 城市道桥与防洪, 2014 (7): 288-291.
LIU Zhongyong. Mechanics Effect and Construction Countermeasures of Large Deformation Tunnel[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2014 (7): 288-291.

[5] 戴永浩, 陈卫忠, 田洪铭. 大梁隧道软岩大变形及其支护方案研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34 (增2): 4149-4157.
DAI Yonghao, CHEN Weizhong, TIAN Hongming. Study of Large Deformation and Support Measures of Daliang Tunnel With Soft Surrounding Rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (S2): 4149-4157.

[6] 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):

47-55.
WANG Shuying, YANG Junsheng, LI Xiping. Causes and Renovation for Large Deformation in Supporting Structure of Railway Tunnel in Tuff Formation under High Geostress[J]. China Railway Science, 2014, 35 (5): 47-55.
[7] 许金华, 何 川, 周 艺. 基于台阶法的极破碎软岩隧道开挖进尺优化研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40 (2): 42-49.
XU Jinhua, HE Chuan, ZHOU Yi. Research on Construction Optimization and Safety Control Technology for Complicated Condition′s Tunnel[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40 (2): 42-49.
[8] 李 潇, 严松宏. 篮家岩隧道软弱围岩大变形机理分析及综合控制[J]. 公路交通技术, 2015 (2): 102-106.
LI Xiao, YAN Songhong. Analysis and Comprehensive Control for Mechanisms of Large Deformation in Weak Wall Rocks of Lanjiayan Tunnel[J]. Technology of Highway and Transport, 2015 (2): 102-106.
[9] 张连成, 叶 飞, 谢永利. 软弱破碎围岩隧道大变形机理及处治[J]. 公路交通科技, 2011, 28 (12): 94-101.
ZHANG Liancheng, YE Fei, XIE Yongli. Mechanism and Treating Methods of Large Deformation of Tunnel in Soft and Cracked Surrounding Rock[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (12): 94-101.
[10] 杨哲峰, 徐 颖, 罗 林. 软岩隧道破坏机理及大变形趋势判断研究[J]. 铁道建筑, 2014 (11): 56-60.
YANG Zhefeng, XU Ying, LUO Lin. Research on Soft Rock Tunnel Fracture Mechanism and Judging of Its Large-Deformation Trend[J]. Railway Engineering, 2014 (11): 56-60.
[11] 陈建申. 隧道初期支护大变形处理技术[J]. 铁道建筑技术, 2014 (2): 43-46.
CHEN Jianshen. Processing Technology for Large Deformation of Tunnel Initial Supporting Structure[J]. Railway Construction Technology, 2014 (2): 43-46.
[12] 王成虎, 沙 鹏, 胡元芳. 隧道围岩挤压变形问题探究[J]. 岩土力学, 2011, 32 (增 2): 143-147.
WANG Chenghu, SHA Peng, HU Yuanfang. Study of Squeezing Deformation Problems during Tunnelling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (S2): 143-147.
[13] 姜 云, 李永林, 李天斌. 隧道工程围岩大变形类型与机制研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2004, 15 (4): 46-51.
JIANG Yun, LI Yonglin, LI Tianbin. Study of the Classified System of Types and Mechanism of Large Deformation of Surrounding Rock in Tunnel Engineering[J]. Journal of Geological Hazards and Environmental Preservation, 2004, 15 (4): 46-51.
[14] 李永林, 冯学钢, 姜 云. 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): 49-54.
LI Yonglin, FENG Xuegang, JIANG Yun. Large Deformations Encountered in the Surrounding Rocks and Their Prediction [J]. Modern Tunnelling Technology, 2005, 42 (5): 49-54.
[15] E HOEK, P MARINOS. Predicting Tunnel Squeezing Problems in Weak Heterogeneous Rock Masses[J]. Tunnels and Tunnelling International, 2000, 32 (11): 45-51.

Analysis on the Causes of the Large Deformation of Surrounding Rocks of Milashan Tunnel in Tibet

WU Shuyuan[1] *CHENG Yong*[1] *XIE Quanmin*[2] *LIU Jiguo*[1] *CHEN Biguang*[1]
(1 CCCC Second Highway Consultants Co. Ltd., Wuhan 430056; 2 School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

Abstract Large deformation of tunnel surrounding rocks is a sophisticated problem during tunnel construction. Taking the large deformation of surrounding rocks of Milashan tunnel in Tibet for example, the causes of large deformation were studied by site investigation and experimental analysis. The results show that properties of tuff such as poor weather resistance and softening upon meeting water are the two radical reasons of large deformation, and improper construction technology is a main inducement. A treatment scheme and control measures were proposed based on an analysis of causes of large deformation of Milashan tunnel.

Keywords Milashan tunnel; Tuff; Large deformation of surrounding rock; Formation mechanism; Disaster control