

高地应力硬岩重载铁路隧道开挖断面成形特征统计分析

王维富¹, 柴文勇², 阴晓炜³, 阳军生², 傅金阳²

(1.蒙西华中铁路股份有限公司,北京市 100073; 2.中南大学 土木工程学院;
3.中铁十九局集团第一工程有限公司)

摘要:隧道开挖断面成形及超挖一直是隧道施工中的难题,直接影响工程建设的工期和施工成本。该文以蒙华铁路九岭山隧道工程为例,选取隧道典型开挖断面,从应力角度对隧道开挖围岩稳定性及成形进行了有限元分析。并基于现场实测开挖断面,应用统计学原理,对高地应力硬岩段不同围岩级别下隧道超挖量进行了统计特征分析。

关键词:隧道超挖;高地应力;硬岩;有限元分析;统计分析

1 引言

隧道超欠挖对隧道开挖断面成形有着直接影响,而且超欠挖不仅增加施工成本,还关系到工程进度、工程质量。中国学者从超欠挖原因、隧道超欠挖特征以及超欠挖控制等方面做了许多研究。洪松茂等总结了爆破开挖技术在隧道超挖控制中的作用;吕俊育结合具体工程实践,分析了影响隧道超欠挖产生的主要因素,即围岩类别、预留尺寸、钻孔设备及精度、爆破技术等,并有针对性地提出了控制隧道超欠挖应采取的技术措施;杨德运研究了一类广泛使用的隧道截面模型,并给出了使用计算机进行超欠挖面积计算的思路和步骤;周宏等在现场调查的基础上绘制超欠挖块体投影面的平面展示图,对超欠挖现象的几何形态进行了统计分析;许人平等应用统计学和模型学的原理,对高速公路连拱隧道超挖块体的几何形态和大小进行了统计特征评价;余健等使用数理统计的方法,分析各级围岩超欠挖的数字特征及概率分布,为隧道结构的可靠度分析提供相关参数,也为隧道工程质量控制提供了基准。虽然中国学者对隧道超欠挖的影响因素、成形特征和控制、数理统计特征等方面进行了研究,而针对高地应力硬岩地质条件下,隧道开挖过程中超挖严重导致的隧道成形困难的相关研究相对较少。该文结合蒙华铁路(重载铁路)九岭山隧道开展高地应力硬岩地质

条件下开挖断面成形特征研究。分析隧道超挖原因、定量计算该地质条件下超挖量及其统计特征,有针对性地采取措施控制开挖断面成形并尽量将超挖控制在最小范围内。

2 工程概况

蒙华铁路(重载铁路)九岭山隧道,设计为单洞双线隧道,全长15 390 m,最大埋深约862 m。该隧道位于江西省宜春市境内,起于铜鼓县顺化村附近止于宜丰县黄岗乡,是蒙华铁路89座隧道中重点控制隧道。隧道穿越地层主要为花岗岩,区域有6条断层与线路相交。根据设计资料 and 实际开挖情况,蒙华铁路湘赣段九岭山隧道穿越复杂特殊地层,穿越地层主要为硬质岩,存在高地应力、高地温、断层及节理密集带等不良地质现象。隧道钻爆开挖后容易产生小规模塌落掉块、片帮剥落现象和岩爆现象,存在爆破后围岩沿层间节理或构造缝自然溜塌现象,在挖机排险时容易出现掉块,隧道断面成形控制难度大,施工安全风险高,在施工过程中会造成较大超挖。采用全站仪扫描开挖后的隧道断面,并与隧道设计外轮廓比较,绘制成图1,图1中数值显示的是各位置的超挖值。目前规范及相关技术标准对超欠挖作出了规定(表1);隧道应严格控制欠挖,岩石个别突出部分(每1 m²不大于0.1 m²)欠挖不应大于5 cm。从图1可见隧道超挖严重。

收稿日期:2019-04-25

作者简介:王维富,男,大学本科,高级工程师,E-mail:461410252@qq.com

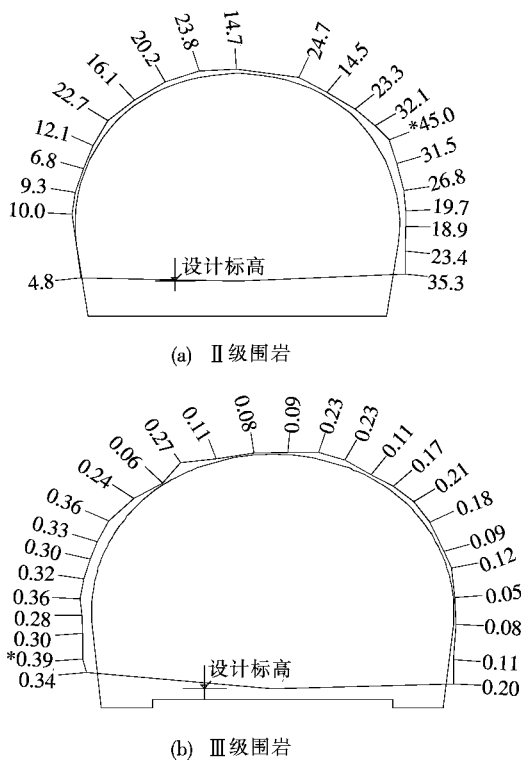


图 1 II 级、III 级围岩段开挖成形情况
(数值表示超挖值,单位:cm)

表 1 隧道允许超挖值

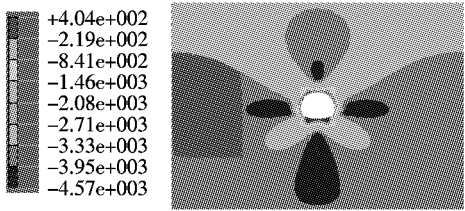
围岩 级别	拱部/cm		边墙平均 线形超 挖/cm	仰拱、隧底/cm	
	平均线 形超挖	最大 超挖		平均线 形超挖	最大 超挖
I	10	20	10		
II ~ IV	15	25	10	10	25
V ~ VI	10	15	10		

3 隧道开挖围岩稳定性数值分析

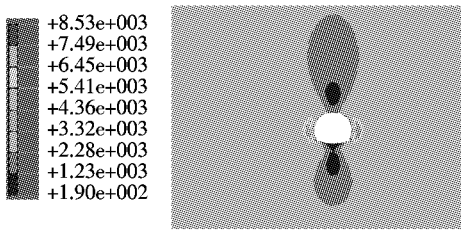
基于九岭山隧道围岩片帮脱落、岩爆和局部溜滑造成较大超挖情况,选取代表性断面进行数值模拟,结合地质情况从力学机理分析造成较大超挖的原因。

选取 DK1 686+800~DK1 687+570 段 DK1 687+565 断面,采用有限元分析方法对隧道围岩成形特征进行分析。根据工程地质资料,围岩条件为 III a 级,围岩重度取 24 kN/m³,弹性模量取 18 GPa,泊松比取 0.28,黏聚力取 1.2 MPa,内摩擦角取 45°;隧道埋深为 540 m,在隧道上方选取 60 m,隧道左右及下方分别选取 40 m 作为计算范围。采用全断面开挖方法对隧道开挖进行数值模拟,且不考虑施作初期支护。计算结

果如图 2 所示。根据图 2(a),隧道开挖后,在自重作用下隧道开挖后围岩卸荷回弹,应力重分布,仰拱两侧、拱顶及拱腰部位主应力集中,且主要为负(压)应力。



(a) 开挖后围岩主应力等值线图



(b) 开挖后围岩最大切向应力等值线图

图 2 数值分析计算结果(单位:kPa)

根据图 2(b),边墙部位最大剪应力集中。隧道围岩主要为硬质块状或厚层状脆性围岩,边墙部位由于压应力和剪应力集中,易出现一些平行的片状破裂薄板,沿壁面剥落,即所谓的片帮;块状或层状岩体存在结构软弱面,在高地应力及应力集中的情况下,拱腰及拱顶部位易发生剪切滑移破坏;深埋硬岩的地质条件下,地应力较高,隧道拱腰和边墙部位综合应力集中明显,根据相关岩爆判据,可判断该部位易发生岩爆。综合以上分析,隧道开挖时可能会存在局部超挖严重的现象,隧道开挖断面成形较困难。

4 基于断面扫描数据超挖量统计

基于隧道开挖围岩稳定性分析超挖原因,进一步定量计算该硬岩高地应力条件下隧道超挖量及超挖分布特征。计算统计基于现场数据和资料。目前在隧道超欠挖的测定上主要有激光束测定法、全站仪三维坐标法、激光隧道限界测定法、数值图像技术等。而全站仪在操作上相对便捷,全站仪应用于隧道断面超欠挖测定更为常见。在该隧道施工过程中,现场工作人员对隧道开挖轮廓进行测绘,使用免棱镜测距全站仪和手提电脑(手机),对开挖断面测量,通过外业软件和本地化解决方案处理直接打印出设计开挖轮廓与实际开挖轮廓(图 1),并标出测定点的超欠挖值及测定断面

超挖面积。

4.1 数理统计分析方法

对选取的典型地质段的全站仪扫描数据分类处理,以超挖面积、平均线性超挖值[超挖横断面积/爆破设计开挖断面周长(不包括隧底)]作为统计分析对象,并对统计分析对象进行正态分布检验。采用 T 分布方法计算隧道超挖面积和平均线性超挖值的均值,并给出均值置信度为 95%的置信区间,根据置信区间预测超挖范围。

4.2 典型地质段落超挖数据样本获取

选取九岭山隧道 DK1 686+800~DK1 687+570 段进行超挖量统计分析研究。隧道洞身为花岗岩、花岗闪长岩,弱风化,中粗粒结构,块状构造,岩质坚硬,岩体较完整。其中 DK1 687+425~DK1 687+570 段裂隙发育,岩体较破碎,局部有少量岩脉侵入,地下水为弱发育基岩裂隙水,开挖过程中有岩爆、洞壁岩体剥离和掉块现象出现,新生裂隙较多,成洞性差。设计围

岩等级为Ⅱ、Ⅲ级,采用全断面法施工开挖。

根据断面扫描结果,获得超挖面积、平均线性超挖值数据。绘制里程、围岩级别对应的断面超挖面积、平均线性超挖折线图。此次量测Ⅱ、Ⅲ级围岩段共计 770 m,每 5 m 选取一个断面,共 155 个实测断面(表 2)。

表 2 超挖样本数

围岩级别	长度/m	实测断面数/个
Ⅱ	625	125
Ⅲ	145	30

4.3 超挖量样本数据统计分析

参照建筑结构通常取值法,选取检验显著水平 $\alpha=0.05$ 以及 K-S 检验方法,对超挖面积、平均线性超挖值分布类型进行正态性检验。根据获得的围岩超挖样本数据,计算得到各类围岩超挖量统计分析结果(表 3)。

表 3 不同围岩超挖统计结果

围岩级别	超挖面积			平均线性超挖		
	平均值/ m ²	标准差/ m ²	变异系数	平均值/ cm	标准差/ cm	变异系数
Ⅱ	3.34	0.61	0.194	13.60	2.48	0.194
Ⅲ	4.59	0.69	0.744	18.45	2.74	0.854
分布类型	正态分布			正态分布		

由表 3 可知:

(1) Ⅱ级围岩平均超挖面积为 3.34 m²;平均线性超挖均值为 13.60 cm;Ⅲ级围岩平均超挖面积为 4.59 m²,平均线性超挖均值为 18.45 cm。

(2) 根据 K-S 检验结果,各级围岩超挖统计量服从正态分布。

采用 T 分布方法计算超挖面积和平均线性超挖值样本总体均值并给出其置信度为 95%的置信区间,根据置信区间预测不同围岩级别隧道超挖范围见表 4。

表 4 不同围岩超挖统计量总体均值置信区间

围岩级别	超挖面积/m ²	平均线性超挖/cm
Ⅱ	(3.23,3.44)	(13.16,14.04)
Ⅲ	(4.33,4.85)	(17.41,19.49)

4.4 基于超挖量统计结果喷射混凝土回弹量计算

根据表 3 超挖量统计分析结果,该地质条件下,

Ⅱ、Ⅲ级围岩超挖严重,若采用素混凝土进行超挖回填,喷射混凝土用量将会远远超出设计用量,并且混凝土回弹量随着每延米喷射混凝土用量的增加而增加,导致隧道初期支护费用增加。可采用式(1)计算Ⅱ、Ⅲ级围岩下喷射混凝土回弹量平均值和回弹率平均值:

$$H_i = S_i - J_i - C_i - D_i, h_i = \frac{H_i}{S_i} \tag{1}$$

式中: i 为不同围岩级别,取Ⅱ、Ⅲ级; H_i 为不同围岩级别下每延米喷射混凝土回弹量平均值; S_i 为不同围岩级别下每延米实际喷射混凝土量平均值; J_i 为不同围岩级别下每延米设计喷射混凝土量平均值; C_i 为不同围岩级别下每延米超挖量平均值; D_i 为不同围岩级别下每延米定额量平均值; h_i 为不同围岩级别下每延米喷射混凝土回弹率平均值。

基于表 3 超挖面积的平均值,可计算每延米超挖量平均值 C_i ,再结合每延米实际喷射混凝土量平均值 S_i (根据混凝土拌和站输出混凝土总量计算)、每延米

设计喷射混凝土量平均值 J_i (根据设计图纸设计量计算) 和每延米定额量平均值 D_i (根据造价定额计算除设计量以外预留部分), 可按式(1)计算不同围岩情况下, 喷射混凝土回弹量和回弹率, 通过技术改进和加强管理来降低喷射混凝土回弹量和回弹率, 从而提高经济效益、加快施工进度以及保证工人健康。

5 隧道开挖断面成形控制措施

九岭山隧道穿越复杂特殊地层, 存在高地应力、高地温、断层及节理密集带等不良地质现象。隧道开挖后容易产生小规模塌落掉块或片帮剥落现象, 存在爆破后围岩沿层间节理或构造缝自然溜塌可能, 隧道断面成形控制难度大, 施工安全风险高, 导致实际开挖与支护量超出原设计量。

针对爆破开挖围岩成洞性差, 超挖严重问题, 根据上述围岩级别与超挖量关系的统计结果, 在施工过程中针对性地采取以下措施对隧道开挖断面成形进行控制, 取得了较为理想的效果。

(1) 加强超挖支护与爆破控制, 最大限度减小对围岩的扰动。

(2) 施工中采取弱爆破、短进尺、加强支护及通风降温等针对性措施。

(3) 针对高地应力岩爆段, 加强超前地质预报及现场岩爆发生状况的记录工作, 并结合地应力测试结果, 对岩爆进行预报预测。

(4) 针对高地应力岩爆段, 加强岩爆控制, 采取增设锚杆、钢筋网片、钢筋格栅、超前钻孔注水、增加喷射混凝土厚度及人员机械防护等措施。

(5) 高地温地段施工过程中加强温度监测与记录, 加强洞内通风、洒水及其他措施降温。

6 结论

选取蒙华铁路九岭山隧道高地应力硬岩地质段, 对开挖断面成形特征进行统计分析, 主要结论如下:

(1) 针对九岭山隧道高地应力硬岩段存在开挖断面成形困难的问题, 对典型断面围岩开挖进行了数值

模拟, 从应力角度分析了造成较大超挖的原因。

(2) 通过对典型施工段超挖数据统计分析, 获得了各级围岩超挖量值: II级围岩平均超挖面积为 3.34 m^2 ; 平均线性超挖均值为 13.60 cm ; III级围岩平均超挖面积为 4.59 m^2 , 平均线性超挖均值为 18.45 cm 。硬岩高地应力地质条件下, 围岩条件越差, 超挖量越大。不同围岩超挖量服从正态分布, 可用于可靠度分析研究。

参考文献:

- [1] 洪松茂, 王泰典, 黄文. 台湾地区隧道开炸技术应用现况与展望[C]. 海峡两岸隧道与地下工程学术与技术研讨会论文集, 1999.
- [2] 吕俊育. 对隧道施工中超、欠挖问题的探讨[J]. 铁道建筑, 1988(8).
- [3] 杨德运. 隧道截面超挖与欠挖面积的计算[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2000(2).
- [4] 周宏, 陈显春, 彭建忠, 等. 金丽温高速公路红枫连拱隧道超欠挖分析[J]. 勘察科学技术, 2006(1).
- [5] 许人平, 吴继敏, 周宏. 高速公路连拱隧道超挖统计特征[J]. 公路交通技术, 2006(1).
- [6] 余健, 钟新樵. 公路隧道超欠挖统计规律研究[J]. 重庆交通学院学报, 2000(2).
- [7] Q/CR 9604—2015 高速铁路隧道工程施工技术规程[S].
- [8] TZ 204—2008 铁路隧道工程施工技术指南[S].
- [9] QGD 007—2005 隧道工程施工质量验收标准[S].
- [10] 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 九岭山隧道设计图纸[Z], 2015.
- [11] 杨斌. 正态性检验的几种方法比较[J]. 统计与决策, 2015(14).
- [12] 阮云凯, 陈剑平, 曹琛, 等. K-S检验在裂隙岩体统计均质区划分中的应用[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015(10).
- [13] 刘庆武, 胡志艳. 如何用SPSS、SAS统计软件进行正态性检验[J]. 湘南学院学报(医学版), 2005(3).
- [14] 李洪成. 数据的正态性检验方法及其统计软件实现[J]. 统计与决策, 2009(12).
- [15] 曾珍, 张宇. χ^2 分布、t分布、F分布与正态分布间的关系[J]. 湖北师范学院学报(自然科学版), 2015(3).