

花岗岩地质隧道超欠挖控制技术

费东宇, 孙亮亮, 查秋雨

(中交一航局第五工程有限公司)

摘要:为解决花岗岩地质隧道超欠挖对施工安全、质量和成本的影响,以蕲春—太湖高速公路卢家湾隧道为工程背景,针对不同围岩分级条件,开展了光面爆破工艺参数优化研究。采用现场试验与正交试验法相结合的方式,对影响隧道超欠挖的关键因素进行系统分析和优化。结果表明,通过合理调整爆破参数,隧道超挖量减少约 5 cm,有效控制隧道超欠挖,同时显著降低了初期支护混凝土的超耗,节约了施工成本,提高了施工效率。研究还提出不同围岩条件下的最优爆破参数建议值,为类似花岗岩地质隧道工程提供了科学依据。

关键词:花岗岩地质隧道;超欠挖;爆破参数;正交试验

1 工程概况

1.1 项目背景

蕲春—太湖高速公路卢家湾隧道位于湖北省黄冈市蕲春县张榜镇马踏石村的低山山区,为双向四车道高速公路隧道。隧道采取分离式形式,其中左洞起止桩号 ZK61+485—ZK62+034,总长 549 m;右洞起止桩号 YK61+468—YK61+975,总长 507 m。隧址区属结构剥蚀侵蚀低山—丘陵区,地形起落较大,植物发育茂盛。通过工程地质调绘、钻探、物探、原位测试及室内试验等勘察手段总体分析,隧址区出露、揭露地层主要是花岗岩残积土、燕山期花岗岩。隧道右洞围岩等级及围岩质量指标值(BQ)如表 1 所示。

表 1 隧道右洞围岩 BQ 值

起讫桩号	长度/m	岩性	BQ	围岩级别
YK61+468—YK61+500	32	全一中风化花岗岩	245	V
YK61+500—YK61+590	90	中风化花岗岩	275	IV
YK61+590—YK61+640	50	破碎花岗岩	245	V
YK61+640—YK61+680	40	中风化花岗岩	275	IV
YK61+680—YK61+870	190	中风化花岗岩	360	III
YK61+870—YK61+930	60	中风化花岗岩	275	IV
YK61+930—YK61+975	45	全一中风化花岗岩	245	V

1.2 工程技术难点

随着岩体的风化作用,岩体的物理特性发生了很大的改变,特别是 V 类岩体更容易发生崩解和坍塌,给工程建设带来了极大的困难。但是,隧洞在跨越各种类型的岩体中,由于爆破参数的一致性与适用性,使得超欠挖的防治更加困难。同时,受地形起伏大、围岩条件复杂等因素的制

约,为减小超欠挖对围岩的不利作用,需要在设计时兼顾围岩的协调配合,保证隧洞的稳定^[1]。同时,由于花岗岩自身的高强度特性,对其进行超欠挖管理将会对建设费用及生产效益产生直接的影响:超挖会导致围岩稳定性减弱,增加初期支护和衬砌混凝土的施工量,造成原材料浪费并增加工程造价。欠挖需要额外进行机械凿岩或二次爆破,不仅降低施工效率,还可能对围岩造成二次扰动,进一步影响隧道安全性和施工进度。

2 超欠挖分析

2.1 超欠挖定义

将隧道的设计挖掘轮廓线作为基准线,实际开挖的断面在基准线以外的部分定义为超挖,在基准线以内的部分定义为欠挖。

2.2 超欠挖危害

超欠挖在隧道施工中对安全、质量、工期和成本均产生重要影响。超挖容易引发围岩变形过大,导致局部区域应力异常集中,从而威胁隧道结构的稳定性。欠挖可能因支护与衬砌未达到设计要求而产生隐患。工期方面,欠挖需要额外进行机械开挖或爆破修复,会扰乱施工节奏,延长建设时间。成本上,超挖增加了混凝土材料的投入,欠挖因修复操作导致效率下降和资源浪费。因此,对超欠挖精准控制不仅是保障隧道施工安全的基础,也是提升施工效益的重要途径。

2.3 超欠挖主要原因

2.3.1 装药集中度

装药集中度是指在每一孔的长度上所装药的平均值。装药量过大时,爆破能量集中,易破坏

设计断面,引起围岩过大垮落,形成超挖现象。相反,如果炸药浓度过低,则会导致爆破能量不足,无法彻底破坏设计断面的围岩,从而产生欠挖现象。另外,不同级别的围岩对装药浓度的敏感度也存在差异。如Ⅴ类围岩力学性能差,易因装药浓度过大而发生超挖;Ⅲ类围岩对装药浓度要求较高,但需加大装药量才能保证爆破效果^[2]。

2.3.2 周边眼间距

布置于掌子面四周靠近岩壁的炮眼称之为周边眼,对形成断面形状起到根本作用。因为周边孔的间距布置合理与否直接与光面爆破效果相关。周边孔间距可根据爆破施工的经验方法估测,但出于科研工作的严谨性,根据断裂力学、豪柔公式等理论分析方法对周边孔间距进行了大量的计算和研究。

2.3.3 周边眼最小抵抗线

隧道爆破中的周边眼抵抗线,即周边孔药包中心到最近的一排辅助孔的垂直距离。最小抵抗线直接决定了光面爆破时周边岩石是否完全掉落直接关系到爆破结果。如果周边眼最小抵抗线过小则围岩容易发生超挖;过大则围岩不能爆破充分会出现欠挖情况。

2.3.4 施工管理因素影响

1) 施工工艺的熟练度

工程技术水平的高低将直接影响到工程实施中所需的各项参数的精度。如果不能严格按设计要求进行凿岩、装药,就可能造成与设计要求的偏差。钻孔深度不够、孔距布置不当、炸药用量过大会导致井内的能量分配出现不正常现象,从而增大了超欠挖的可能性。尤其是对于Ⅴ类岩体这样的特殊情况,更是要求建设者具有更高的技术水平^[3]。为此,必须强化规范的操作规程,并进行专业的技术指导,以确保工程的高品质。

2) 机械设备的精度

钻孔机的精度直接关系到爆破参数的实施效果。高精度制孔设备可以保证孔径、孔深的精度,保证爆破能量的合理分配。但在实际应用中,由于设备性能老化、操作人员缺乏经验等,经常会出现定位误差偏大的问题。如钻孔位置偏离设计,会引起周边孔间距及最小抗力的偏离,进而影响开挖断面的完整性。另外,由于设备精度不高,在破碎围岩中可能会加剧局部坍塌的风险。

3) 现场监测的完善程度

本项目将 3D 激光扫描与高精度观测相结合,实现对隧洞施工过程的精确监控,有效控制超欠挖问题。3D 激光扫描可实现采集掘进表面的 3D 形貌信息,并与设计剖面进行比较,可快速判定超挖和欠挖位置,并可用于指导施工队进行爆破参数的合理设置和优化。同时,与基于地质雷达的非破坏性检测方法相融合,实现对岩体内部损伤及可能的异常检测,为评价岩体的稳定及支护效能奠定理论基础。两者结合,既提高施工精度,又大幅减小开挖量,实现超挖量控制在 5 cm 以下,节约了大量的混凝土和建设费用,有效地保证了隧道的质量与经济效益^[4]。

4) 管理协调与信息化水平

施工管理的协调、信息化程度是影响超欠挖控制的重要因素。复杂地质条件下,施工环节不合理衔接易导致钻爆信息不对称,造成施工参数难以落实。由于没有在施工过程中建立统一的信息管理平台,不能对爆破数据进行动态更新和分析,从而制约了施工精度的提高^[5]。本项目建立统一的爆破资料档案,对各类资料进行分类存档,定期进行分析总结。专人负责数据的审核和更新,保证数据准确及时。通过信息化方法,实现数据与管理平台的共享,便于有关部门实时查询。

5) 施工环境的动态适应性

由于隧道建设过程中存在着复杂多变的地质环境,如突然发生的地质灾害,给工程建设带来了严峻的挑战。在工程建设过程中,若不具备良好的应变能力,很容易造成工程技术与爆破参数的调整,造成超欠挖现象的出现。

3 隧道超欠挖优化措施及结果

在编制施工计划时,根据 JTG/T 3660—2020《公路隧道施工技术规范》要求,在兼顾保留沉降及施工误差的前提下,根据各类型岩体的特性,提出了对应的爆破工艺参数。在测试期,超挖量被限制在 150 mm 以内,保证工程顺利进行。在此基础上,利用正交试验法,选取某一因素,调节其它因素,通过比较研究,得到最佳的工艺参数。利用 Minitab 进行有限元数值模拟,实现了对盾构法开挖过程中各工序的合理设计,保证了隧洞开挖过程中的超欠挖量控制。

根据施工现场试验爆破数据进行分析,通过正交试验法(见表 2)进行爆破试验,确定不同围岩等级最优的爆破参数。

表 2 Ⅲ级围岩超欠挖的正交分析表

序号	装药集中度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)	周边眼间距/ mm	周边眼最小 抵抗线/mm	超欠挖量/ mm
1	0.30	575	725	220
2	0.30	625	775	145
3	0.30	675	825	122
4	0.32	575	775	212
5	0.32	625	825	145
6	0.32	675	725	172
7	0.34	575	825	165
8	0.34	625	725	225
9	0.34	675	775	178

通过以上试验分析得出了在不同围岩等级下的最优爆破参数, 见表 3。

表 3 不同围岩等级下的最优爆破参数

围岩等级	装药集中度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)		周边眼间距/mm		周边眼最小 抵抗线/mm	
	规范取值 范围	建议取值 范围	规范取 值范围	建议取 值范围	规范取 值范围	建议取 值范围
Ⅲ级围岩	0.30~0.35	0.30~0.32	550~700	575~625	700~850	775~825
Ⅳ级围岩	0.20~0.30	0.20~0.24	450~600	525~575	600~750	675~725
Ⅴ级围岩	0.07~0.15	0.07~0.11	300~500	400~450	400~600	500~550

表 3 给出了在各种围岩分级条件下, 优化出的最佳爆破参数范围, 以反映定向优选的结果。从装药集中度上看, 所有的岩体分级都在国家规定的中、低级别, Ⅲ级岩体 0.3~0.32 kg/m , Ⅳ级岩体 0.2~0.24 kg/m , Ⅴ级岩体 0.07~0.11 kg/m 。研究结果显示, 在岩体强度下降时, 可通过减小炸药用量来减小爆炸能量过大的危险和对周围环境的干扰, 达到有效抑制超欠挖的目的。无论是外围眼间距还是周边眼最小抵抗线都有细微的变化。其中, Ⅲ级围岩的最大周边眼间距为 575~625 mm, 周边眼最小抵抗线为 775~825 mm, 较符合设计要求, 保证了爆破连续性与精度; 而对于较弱级别(如 Ⅴ级), 为了减小二次干扰, 对其进行了较为保守的参数调节。

4 优化后成果

根据正交试验的结果, 通过将装药集中度调至 0.3~0.32 kg/m 、周边眼间距设置为 575~625

mm、周边眼最小抵抗线调节至 775~825 mm, 成功实现隧道超挖量减少 5 cm。超挖减少后, 隧道每 10 m 节约混凝土 57 m^3 , 1 016 m 暗洞累计减少了 5 791.2 m^3 的 C25 混凝土消耗, 节约成本约 579.1 万元。同时缩短湿喷台车作业时间 193 h。通过参数优化调整, 既节省材料及工期, 又有效降低围岩扰动, 提高施工安全与总体效率。

5 结语

本文以蕲春—太湖高速公路卢家湾隧道为工程背景, 采用工程地质勘察和正交实验相结合的方法, 系统研究并优化影响超欠挖的关键参数。采用理论分析和数值模拟相结合的方法, 从理论上分析了影响隧道超挖的主要因素, 即装药集中度、周边眼间距和周边眼最小抵抗线等因素, 通过对各参数的合理优化, 可有效降低隧道超挖(5 cm 左右), 显著减少初支混凝土用量和施工成本, 提高施工效率。研究成果可为类似花岗岩地质条件下的隧道施工提供科学依据, 对提高施工质量、节省资源、缩短工期有重要意义。

然而, 上述结论均是基于单个工程的试验数据, 其对不同地质条件的适用性有待进一步验证。此外, 目前已有的研究多集中在爆破参数优化方面, 没有充分考虑施工装备、爆破材料等多方面的综合影响。进一步的研究需要结合实际工程资料对参数化模型进行验证。在此基础上, 探索将智能监测技术与先进爆破材料设计方法相结合, 实现对隧道施工全过程的精细控制, 提高复杂地质条件下施工安全。

参考文献:

[1] 任子熊, 罗文斌. 三维激光扫描技术在地铁隧道变形监测中的应用[J]. 工程技术研究, 2023, 8(18): 87-89.
[2] 朱丽叶. 隧道施工成本控制要点分析及策略[J]. 中国新技术新产品, 2019, (20): 132-133.
[3] 满轲, 刘晓丽, 王锡勇, 等. 周边孔炮眼间距对光面爆破效果的影响[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(29): 47-53.
[4] 刘远. 地质雷达无损探测技术在隧道检测中的应用研究[J]. 工程技术研究, 2024, 9(15): 75-77.
[5] 张斌. 如何加强隧道施工成本控制管理[J]. 低碳世界, 2020, 10(3): 155-156.