

繁华城区极硬地层连拱隧道施工技术探讨

孙宗波¹, 肖 惠^{2,3}, 付艳斌^{2,3}

(1. 深圳市南山区建筑工务署, 广东 深圳 518071; 2. 深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060;

3. 深圳大学 滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘 要: 针对硬岩地质条件, 公路隧道通常采用钻爆法进行开挖。当新建隧道处于复杂环境, 尤其是穿越繁华城区时, 隧道周边往往有许多建(构)筑物及既有隧道等, 施工中的爆破振动会不可避免地对周边建(构)筑物的结构安全以及居民区造成不利影响。依托深圳市望海路微波山隧道工程项目, 探讨了不同开挖方案下的施工效益。结果表明: 采用钻爆法施工时, 爆破引起的既有地铁隧道振动速率大于 1.2 cm/s; 采用其他非爆破方法施工时, 开挖功效低于 0.1 m/d, 且修边工作量大; 采用悬臂式掘进机技术施工时, 其单日开挖功效可达 1.0~1.5 m/d, 且施工带来的振动和噪声较小, 隧道成型效果更好, 开挖效率更高。

关键词: 繁华城区; 连拱隧道; 悬臂式掘进机; 施工技术

中图分类号: U455.4

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)04-0207-05

Discussion on Construction Technology of Multi-arch Tunnel in Extremely Hard Stratum in Busy Urban Area

SUN Zongbo¹, XIAO Hui^{2,3}, FU Yanbin^{2,3}

(1. Shenzhen Nanshan District Construction and Engineering Bureau, Shenzhen 518071, China; 2. College of Civil and Transportation

Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 3. Key Laboratory of Coastal Urban Resilient Infrastructures Education

Department, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: In view of hard rock geological conditions, the highway tunnels are usually excavated by drilling and blasting method. When a new tunnel is in a complex environment, especially through a busy urban area, there are often many buildings (structures) and existing tunnels around the tunnel. The blasting vibration during construction will inevitably cause the adverse effects on the structural safety of the surrounding buildings (structures) and residential areas. Supported by the Shenzhen Wanghai Road Weibo Mountain Tunnel Project, the construction benefits with the different excavation schemes are discussed. The result shows that when the drilling and blasting method is used, the vibration rate of the existing subway tunnel caused by blasting is greater than 12 mm/s. When the other non-blasting construction methods are used, the excavation efficiency is less than 0.1 m/d, and the trimming workload is large. When the cantilever tunneling machine technology is used for construction, the tunneling efficiency per day can be 1.0~1.5 m/d, and the vibration and noise caused by the construction are small. The tunnel forming effect is better, and the excavation efficiency is higher.

Keywords: busy urban area; multi-arch tunnel; cantilever tunneling machine; construction technology

0 引 言

随着我国城市交通建设的迅猛发展,在繁华城区复杂环境下新建公路隧道工程日益增加。我国是一个多山的国家,为进一步完善繁华城区的交通网络,修建公路会不可避免地穿越山区。截至2020年底,中国已建成公路隧道21 316座,总长度达21 999.3 km。2016—2020年,中国公路隧道以每年

超过1 000座且长度超过1 200 km的速度急剧增长^[1]。由于连拱隧道具有空间利用率高、洞口引线占地小、与洞外线路接线方便等特点,其在城市公路隧道中应用越来越多。尤其是随着我国隧道施工技术的不断发展,连拱隧道更符合城区人口数量大、空间资源小,交通流量大的特点。

与单洞隧道相比,连拱隧道跨度更大,断面结构形式更特殊^[2],施工工艺及力学行为更加复杂;同时其对邻近既有建(构)筑物的影响也更加明显,因此对于施工质量要求很高,安全控制难度较大。由于城市交通的分期规划,会不可避免地出现近接隧道

收稿日期: 2023-02-14

作者简介: 孙宗波(1984—),男,学士,高级工程师,从事市政
工程管理工作。

的主要施工方法。这种方法对岩层地质条件适应性强、开挖成本低,尤其适合岩石坚硬的洞室施工。

由于本工程所处环境的特殊性,传统炸药爆破施工方式受到一定程度上的限制。随着爆破技术的发展,一些新型技术得到了愈来愈多的研究和应用,如静态爆破、CO₂爆破等。

2.1.1 静态爆破

静态爆破分为静态破裂剂施工和新型机械化静态爆破技术。

目前,静态破裂剂的主要成分为CaO,其与适量水混合发生水化反应后能放出大量热,并产生体积膨胀,进而破碎被爆物。该技术具有以下优点:(1)提高经济效益和施工效率,节约能源;(2)施工环境得到改善,操作简便;(3)静态破裂剂相比传统炸药更加安全,更适于繁华城市施工。缺点是静态破裂剂施工周期较长、施工产量低、受环境影响大、有喷浆和强碱性危害等,影响因素较多。

机械化静态爆破技术采用静爆超级液压岩石分裂机对岩石进行分裂,是针对坚硬岩石的破裂新技术和新工艺,优点是作业时无振动、无冲击、无噪声、无粉尘、效率高、成本低。

2.1.2 CO₂爆破

CO₂爆破技术是利用液态CO₂瞬间相变为气体所产生的高压作用于周围岩体,从而实现破岩的目的,目前已成功应用于露天台阶破岩、块体破岩、孤石破岩、隧道掘进、地铁车站基坑开挖等工程领域^[7-10]。该技术具有以下优点:(1)作业时不会产生明火,且基本不扬尘,安全性较高;(2)相比传统炸药,其爆破效果更好、经济效益更高、施工效率更高;(3)爆破所产生的有害气体大大减少,作业环境更优良。

2.1.3 该工程的适用性

钻爆法开挖施工的优点有:比较灵活,可以很快地开始开挖施工;可以开挖各种形状、尺寸、大小的地下洞室;既可以采用比较简单便宜的施工设备,也可以采用先进、高效、比较贵的设备;可以适应坚硬完整的围岩,也可以适应较为软弱破碎的围岩。

根据《地铁运营安全保护区和建设规划控制区工程管理办法》(2018版)、《爆破安全规程》(GB 6722—2014),考虑到周边环境的复杂性和敏感性,要求本工程在保护建筑物监测点的振动速率应不大于以下值:

- (1)一般民用建筑物:1.0 cm/s;
- (2)地铁2号线区间:1.2 cm/s;

(3)132 kV高压电缆:1.5 cm/s。

由于隧道采用爆破方法施工存在较大的安全隐患,无法满足《地铁运营安全保护区和建设规划控制区工程管理办法》(2018版)规定的爆破振动速率小于1.2 cm/s的要求,故钻爆法对本工程不适用。

2.2 掘进机法

掘进机法是挖掘隧道、巷道及其他地下空间的一种方法。采用特制的大型切削设备(如全断面掘进机、悬臂式掘进机、盾构机),将岩石剪切挤压破碎后,通过配套的运输设备将碎石运出。

由于微波山隧道全长约为150 m,且岩石偏硬,因此选择在广西、贵州、西藏等地常用的隧道非爆破开挖技术——悬臂式掘进机技术。它能规避爆破法开挖所带来的振动扰动,避免对既有地铁2号线造成不利影响。

悬臂式掘进机是一种能够实现截割、装载运输、自行走及喷雾除尘的联合机组。其优点包括:(1)开挖围岩扰动小,隧道成型质量好,洞壁稳定,超挖量容易控制;(2)施工过程安全性高,管理风险压力相对较低;(3)开挖效率高,掘进速度快;(4)与钻爆法相比,悬臂式掘进机技术对任意形状断面的切割更自如、更准确;(5)施工成本较低,经济效益高。

2.2.1 CTR300A型悬臂式掘进机

在贵阳市某地铁项目中,CTR300A型悬臂式掘进机可以在岩层强度为70~90 MPa的白云岩、灰岩岩层中顺利开展掘进作业,平均进尺2 m/d。

根据微波山隧道《地勘报告》(见表1)可知,本项目中风化粗粒花岗岩最大单轴抗压强度为28.2 MPa,微风化粗粒花岗岩最大单轴抗压强度为87.6 MPa。微波山隧道项目与贵阳市某地铁项目的岩层强度情况相当,均在90 MPa以下,因此悬臂式掘进机适用于本隧道的岩石开挖。

2.2.2 CTR450型悬臂式掘进机

根据掘进机考察情况、地勘报告显示的围岩状况和岩石强度(围岩破碎、节理裂隙发育,最大岩石单轴抗压强度87.6 MPa),本项目与贵阳市某地铁项目的岩石强度相当。综合考虑微波山隧道工程项目的围岩情况,拟采用比CTR300A型悬臂式掘进机功率更高、截割能力更强、适用于90 MPa以下岩石强度的CTR450型悬臂式掘进机。

(1)在中导洞洞口,采用上述悬臂式掘进机并配备滚刀式截割头(见图5)进行试挖。试挖后发现,滚刀式截割头无法对岩石进行有效破碎,且因岩石较

表1 微波山隧道地勘情况表

分段里程	长度/m	工程地质条件
K0+87.872(进口)~K0+115	27.128	围岩为强风化岩($R_c<5\text{ MPa}$, $K_v=0.134$, $[BQ]<138$)、中风化岩($R_c=16.6\sim28.2\text{ MPa}$, $K_v=0.261$, $[BQ]<205\sim240$)及微风化岩($R_c=39.1\sim87.6\text{ MPa}$, $K_v=0.595$, $[BQ]=356\sim489$), 碎裂状松散结构, 不稳定, 易坍塌, 地下水主要以第四系上层滞水为主
K0+115~K0+228.5	113.5	围岩为中微风化花岗岩($R_c=16.6\sim28.2\text{ MPa}$, $K_v=0.261$, $[BQ]<205\sim240$), 微风化岩($R_c=39.1\sim87.6\text{ MPa}$, $K_v=0.595$, $[BQ]=356\sim489$), 节理裂隙发育, 呈微张-闭合状态, 稳定性较差。岩体呈碎石状压碎结构或碎块状镶嵌结构, 地下渗水或滴水, 围岩开挖后, 拱部无支护时会产生较大坍塌, 侧壁有时易失稳
K0+228.5~K0+253.125(出口)	24.625	围岩为强风化岩($R_c<5\text{ MPa}$, $K_v=0.134$, $[BQ]<138$)、中风化岩($R_c=16.6\sim28.2\text{ MPa}$, $K_v=0.261$, $[BQ]<205\sim240$)及微风化岩($R_c=39.1\sim87.6\text{ MPa}$, $K_v=0.595$, $[BQ]=356\sim489$), 散体结构, 不稳定, 易坍塌

注: R_c 为岩石单轴饱和抗压强度; K_v 为岩体完整性系数; $[BQ]$ 为岩体基本质量指标。

硬,围岩完整性好、裂隙少,刀盘极易损坏。

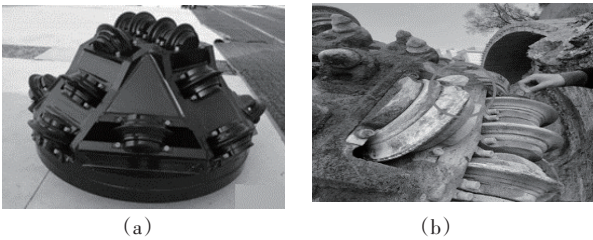


图5 滚刀式截割头

(2)将滚刀式截割头换成截齿截割头(见图6)进行开挖,在多次试掘进过程中,掘进机截齿因材料强度、偏磨、温度过高等问题导致截齿消耗量过大,更换截齿成本高。

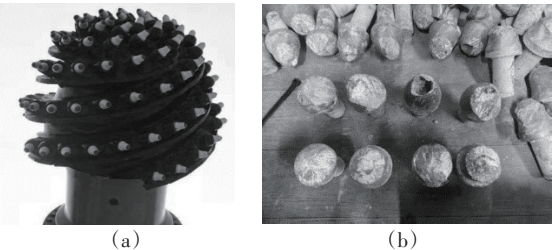


图6 截齿截割头

综合以上开挖情况,CTR450型悬臂式掘进机仍无法满足本隧道的开挖要求。

2.2.3 XTR360型悬臂式掘进机

项目现场岩石样品(见图7)强度(见表2)与地勘报告中强度存在较大差异,且其完整性好、基本无裂隙,岩石平均抗压强度为106~139 MPa,最大单轴抗压强度达到214 MPa。

XTR360型悬臂式掘进机的破岩能力强,可用于坚硬岩石施工,切割高度可达7 m。

2.3 其他开挖方法

因CTR450悬臂式掘进机对本隧道的岩石试开挖效果不佳,考虑采取其他非爆破开挖方式。

(1)施工现场采用1台环切台车进行隧道(左洞)开挖试验。由于环切台车前端水磨钻无法对隧

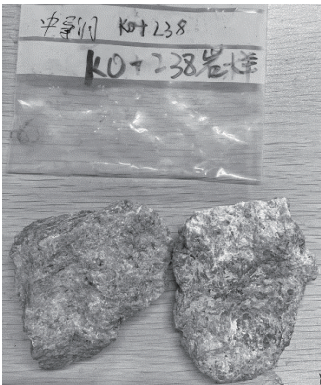


图7 中导洞岩体

道硬岩进行有效切割,经常卡钻,因此该台车无法适用于本工程。

(2)在中导洞部位采用“钻孔+劈裂”工法进行试验(见图8)。因围岩完整性好,岩石强度高,潜孔钻机无法快速形成临空面,需在中心位置连续钻孔开1条竖槽,且只有在周边钻孔密集的情况下,劈裂棒方可有效胀裂岩石,所以此方法开挖效率极低,也不适用于本工程。



图8 现场钻孔与劈裂

3 开挖方案对比分析

3.1 爆破荷载响应理论分析

根据《爆破安全规程》,爆破振动安全允许距离R的计算方式为:

$$R=\frac{K}{V^{\frac{1}{\alpha}}}\times Q^{\frac{1}{3}}$$

(1)

式中: Q 为炸药量,齐发爆破为总药量,延时爆破为

表2 隧道岩石强度表

序号	部位	进尺/m		岩石强度/MPa		
		左洞	右洞	最高值	最低值	平均值
1	中导洞			144	68	108
2	左洞 ZK0+108	10		157	65	107
3	右洞 YK0+130		32	92	50	66
4	左洞 ZK0+140	42		146	91	106
5	右洞 YK0+160		62	214	42	139
6	左洞 ZK0+170	72		148	56	106
7	右洞 YK0+190		92	155	53	108
8	左洞 ZK0+210	112		118	20	49

最大单段药量,kg; V 为保护对象所在地安全允许质点振动速率,cm/s; K 和 α 为与爆破点到保护对象间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数,有条件时可通过现场试验获得,无试验数据条件下可参照表3。

表3 不同岩石的 K,α 取值表

岩性	K	α
坚硬岩石	50~150	1.3~1.5
中硬岩石	150~250	1.5~1.8
软岩石	250~350	1.8~2.0

由式(1)可得振动速率 V 的表达式:

$$V=K\times\left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R}\right)^{\alpha}$$

(2)

根据地勘资料,微波山主要地质条件为Ⅳ级和Ⅴ级围岩,属于软岩体。取 $K=300,\alpha=1.8,R=8\text{ m}$ 代入式(2),可得振动速率与最小安全距离表,如表4所示。

表4 振动速率与最小安全距离表

装药量/kg	振动速率/(cm·s ⁻¹)	最小安全距离/m
0.2	2.71	11.6
0.4	4.10	14.6
0.6	5.23	16.7

由表4可知,装药量为0.2、0.4、0.6 kg时所对应的理论计算振动速率均不满足《爆破安全规程》要求的小于1.2 cm/s这一规定。若满足振动速率小于1.2 cm/s的要求,则计算的最小安全距离均大于新建隧道底部与既有地铁隧道外边界的最小距离8 m。

3.2 非爆破开挖方案对比

CTR450型悬臂式掘进机配滚刀式截割头累计开挖20 min,开挖方量为0,同时刀盘消耗量为4个,刀盘极易损坏。当更换为截齿截割头时,累计开挖

139 min,开挖方量为5 m³,同时截齿消耗量为52个;在开挖过程中,因岩石强度较高,导致掘进机工作时电气设备温度过高,电阻丝多次熔断,维修时间长,施工作业不连贯,无法正常施工。

进行“潜孔钻机+劈裂棒”施工作业时,累计作业10 d,开挖进尺约为1 m,开挖方量约40 m³(中导洞截面面积约为37.6 m²),开挖效率低,仅为0.1 m/d,且开挖后修边工作量大,对于掌子面前方的工作人员危险性大。

XTR360型悬臂式掘进机经过中导洞开挖统计,开挖共耗时88 d,累计开挖方量5 701.93 m³,折合平均日进尺1.7 m,平均截齿消耗量为1.88个/m³,开挖效率达到预期。

4 结 语

(1)通过计算,爆破所引起的既有地铁隧道振动速率超过了《爆破安全规程》要求的小于1.2 cm/s这一规定。

(2)针对工程的特殊地质,需对现场进行岩石取样测试。基于测试数据选用合适的悬臂式掘进机,能有效提高施工效率,缩短工期。

参考文献:

[1] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述·2022[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1-40.

[2] 彭立敏,姚振凯,黄云平,等. 公路连拱隧道工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.

[3] 卢智强,侯晓文,邢小江. 连拱隧道零距离无损下穿防空洞施工技术[J]. 隧道建设, 2012, 32(增刊2): 167-173.

[4] 唐明明,刘森,林森,等. 地铁双连拱隧道暗挖下穿既有建筑的稳定性评价[J]. 西部探矿工程, 2015, 27(1): 175-178.

[5] 于清浩,高志萍,谢勇涛. 浅埋大跨连拱隧道下穿既有建筑物施工沉降控制[J]. 隧道建设, 2010, 30(1): 67-70; 77.

[6] 谢荣清,胡学兵. 下穿建筑物的梧村山浅埋大跨连拱隧道设计与施工技术研究[J]. 公路交通技术, 2010(1): 102-106.

[7] 杜泽生,范迎春,薛宇飞,等. 二氧化碳爆破采掘装备及技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(9): 36-42.

[8] 夏军,陶良云,李必红,等. 二氧化碳液-气相变膨胀破岩技术及应用[J]. 工程爆破, 2018, 24(3): 50-54.

[9] 崔玉明,张福宝,宋战平. 二氧化碳爆破技术在隧道施工中的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(5): 254-256.

[10] 望远福,蒋永祥,于明朗. 新型二氧化碳致裂技术在地铁车站基坑开挖中应用[J]. 公路, 2021, 66(6): 418-420.