

爆破开挖作用下隧道围岩振动响应特征研究

衣忠强

中铁九局集团第一建设有限公司, 江苏 苏州 215299

[摘要]隧道爆破开挖产生的振动效应对围岩和隧道结构造成不利影响,是隧道钻爆法施工亟待解决的重要难题之一。以安康隧道软弱围岩段爆破开挖为研究对象,构建了爆破开挖作用下隧道围岩振动数值分析模型,通过隧道等效爆破荷载施加,重点研究了不同爆心距离和围岩质量对隧道围岩振动响应的影响,分析了围岩峰值质点速度的变化规律。根据爆破荷载作用下隧道围岩振动响应数值分析结果,能够为安康隧道的结构稳定性分析提供基础依据,从而有助于提出安康隧道爆破控制措施和减振措施等。

[关键词]隧道工程;爆破开挖;振动响应;峰值质点速度

DOI: 10.33142/aem.v6i6.12041

中图分类号: U455.6

文献标识码: A

Research on the Vibration Response Characteristics of Tunnel Surrounding Rock under Blasting Excavation

YI Zhongqiang

First Construction Co., Ltd. of China Railway No. 9 Group, Suzhou, Jiangsu, 215299, China

Abstract: The vibration effect generated by tunnel blasting excavation has adverse effects on the surrounding rock and tunnel structure, which is one of the important problems that urgently need to be solved in tunnel drilling and blasting construction. Taking the weak surrounding rock section of Ankang Tunnel blasting excavation as the research object, a numerical analysis model of tunnel surrounding rock vibration under blasting excavation is constructed. By applying equivalent blasting load to the tunnel, the influence of different blasting center distances and surrounding rock masses on the vibration response of tunnel surrounding rock is studied, and the variation law of peak particle velocity of surrounding rock is analyzed. Based on the numerical analysis results of tunnel surrounding rock vibration response under blasting load, it can provide a basic basis for the structural stability analysis of Ankang Tunnel, which is helpful for proposing blasting control measures and vibration reduction measures for Ankang Tunnel.

Keywords: tunnel engineering; blasting excavation; vibration response; peak particle velocity

引言

钻爆法施工是隧道工程领域常用的施工方法之一,由于爆破开挖不可避免地产生不利的振动效应,如振动波传播、空气冲击、爆破飞石等,从而对隧道结构和地面构筑物稳定性造成不利影响^[1-2]。王蒙等^[3]根据隧道爆破现场监测结果和数值分析结果,分析了隧道爆破开挖围岩损伤特征,得到围岩损伤诱因主要包括爆炸产生的爆轰波和气体冲击波以及爆破振动损伤等,产生的隧道围岩损伤区域深度约为 2.4m;徐柯锋等^[4]基于数值软件构建了隧道爆破开挖数值分析模型,分析得到了隧道爆破开挖导致的地表振动响应特征,质点振动速度符合萨道夫斯基公式,并且岩石力学性质对振动传播规律影响较大,尤其是岩石弹性模量;梁宸等^[5]利用离散数值分析软件借助 UEDC 离散元数值模拟软件,分析了隧道爆破开挖过程中裂隙围岩的破坏运移全过程,深入探讨了围岩动力失稳过程中围岩位移、和加速度等参数的变化特征;梁世凡等^[6]基于大断面浅埋隧道钻爆法施工数值模拟结果,分析了爆破荷载作用对隧道围岩的振动影响,得到了不同间距、埋深和围岩级别等影响因素下隧道的振动速度变化规律的影响,爆破振

动波以掌子面为中心向四周传播;何曜城等^[7]通过分析不同爆破荷载施加形式的数值分析结果,根据不同爆破荷载形式作用下围岩位移变形以及振动速度等结果,提出了隧道爆破荷载求解方法的选择原则;项荣军等^[8]通过分析隧道三台阶齐爆和分爆开挖的现场监测结果,得到隧道拱顶具有振动速度大、振动主频高、衰减速度慢的特点;张波^[9]基于 LS-DYNA 数值模拟软件,数值模拟了隧道 8 个台阶循环爆破开挖作用下隧道围岩的损伤特征。

本文以安康隧道爆破开挖为研究对象,通过构建隧道爆破数值模型,研究不同爆心距离和围岩质量对隧道围岩振动响应的影响,分析了围岩峰值质点速度的变化规律,能够为安康隧道安全性分析和爆破控制措施制定提供基础,同时,也能够为类似工程施工提供相应的借鉴。

1 工程概况

安康隧道起讫里程 DK164+445~DK171+400,长链 45.877m,全长 7001m,为单洞双线隧道。由于安康隧道长度较大,穿越区域地质条件复杂多样,隧道最大埋深可达 160m,最小埋深仅为 2.0m。安康隧道断面跨度为 15.1m、高度 12.05m,隧道内最小线间距 5.0m,轨顶面以上净空

横断面积不小于 100m²。隧址区位于秦岭地槽一级构造单元，南秦岭华力西—印支褶皱系二级构造单元，南秦岭褶皱系三级构造单元内，区内构造运动强烈且复杂。

安康隧道围岩分级，如表 1 所示，其中，隧道穿越多个复杂地质区域，尤其是浅埋软弱围岩地区，V 级围岩及更差围岩的长度 2971.0m，约占隧道全长的 43.5%。

表 1 安康隧道围岩分级统计表

隧道名称	全长 (m)	围岩级别长度 (m) 及所占比例 (%)			
		III	IV	V	VI
安康隧道	7001	1380	2650	2105	866
占正线比例 (%)		19.7%	37.8%	31.1%	12.4%

安康隧道采用钻爆法施工时，严格按照《爆破安全规程》(GB 6722—2014) 进行工程设计和施工，为尽量减少爆破产生的动力荷载对隧道围岩的损伤破坏，爆破施工采用光面爆破，能够更好地控制隧道轮廓。由于安康隧道软弱围岩发育，主要以 IV 级围岩和 V 级围岩为主，钻爆法施工采用台阶法爆破开挖，根据不同围岩等级确定不同台阶形式、循环进尺和爆破参数等，其中，IV 级围岩采用双台阶施工法，V 级围岩采用三台阶爆破开挖方式。

2 数值模型

2.1 隧道数值模型

根据安康隧道施工设计资料，隧道跨度约为 15.0m、高度为 12.5m，由此建立隧道数值模型。为消除边界效应的影响，安康隧道数值模型水平方向取隧道跨度的 5 倍，竖直方向取隧道高度的 4 倍，模型尺寸为 75.0×50.0×10.0m，埋深设置为 20.0m，隧道受力主要以围岩的自重应力为主。安康隧道爆破开挖数值模型主要包括 8 个边界，考虑动力分析振动波的传播特征，数值模型底部边界设置为无反射边界条件，上部为能够反射振动波的自由边界，模型前后两侧固定，左右两侧边界施加无反射边界条件。

安康隧道 IV 级围岩采用上下台阶开挖，上台阶循环进尺取 2m，掏槽眼长度取 2.7m，同对眼口距离 3m，眼底距离 0.3m，对间距离 0.6m，钻眼与自由面夹角 60°。扩槽眼长度取 2.4m，钻眼与自由面夹角 70°；辅助眼取 2.2m，眼距 1.1m，排距 0.8m；周边眼取 2.2m，眼距 0.5m。下台阶循环进尺 3.6m，辅助眼取 3.8m，眼距 1.1m，排距 1.1m，周边眼取 3.8m，眼距 0.5m。根据安康隧道 IV 级围岩三台阶炮眼布置图，可以得到台阶法爆破参数，三台阶开挖施工炮眼数共 71 个，总装药量为 89.5kg。

2.2 隧道等效荷载

爆破荷载对围岩振动效应的分析主要包括两种方法：一种是将爆破荷载简化为作用于开挖边界上的多段线性荷载，常用的为三角形荷载；另一种是考虑炸药的本构模型，根据爆破孔的位置分布和装药量进行分析。本文采用第一种爆破荷载施加方法，将爆破荷载简化为作用于隧道

开挖轮廓面上的三角形荷载，主要包括线性上升段和下降段。其中涉及的主要参数包括上升时间，总作用时间和爆破峰值荷载等，其计算公式为^[10]：

$$t_r = 12 \frac{Q^{0.05} \sqrt{r^{2-\mu}}}{K} \quad (1)$$

$$t_s = 84 \frac{Q^{0.2} \sqrt{r^{2-\mu}}}{K} \quad (2)$$

$$P_{\max} = \frac{139.97}{Z} + \frac{844.81}{Z^2} + \frac{2154}{Z^3} - 0.8034 \quad (3)$$

式中：K 为岩石体积压缩模量 (MPa)；μ 为泊松比；Q 为炮眼装药量 (kg)；r 为对比距离；Z=R/Q^{1/3} 为比例距离。

根据安康隧道爆破参数设置内容，隧道爆破荷载施加上升段的时间为 0.08ms，下降段时间为 2.5ms，总时间为 6.0ms，通过公式求得爆破峰值荷载的大小为 32.60MPa，加载形式如图 1 所示。

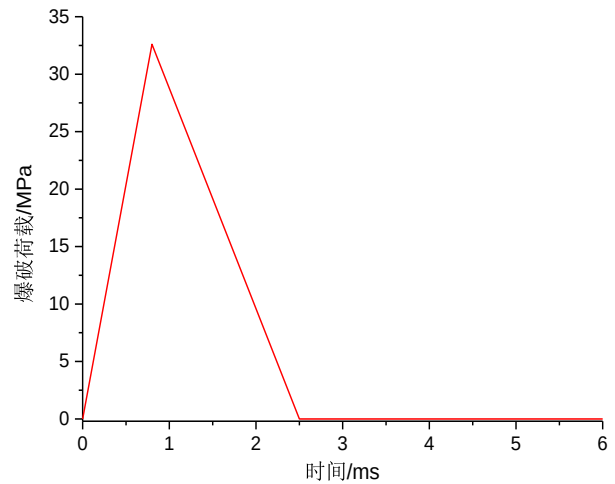


图 1 爆破荷载历程

3 爆破振动规律研究

《爆破安全规程》(GB 6722—2014) 中的规定，爆破质点振动速度 PPVL、PPVT 和 PPVV 分别为质点振动速度三分量，PPV 为质点振动速度三分量的最大值。根据爆破振动安全允许标准，不同频率范围条件下交通隧道的安全允许质点振动速度为 10~12cm/s ($f \leq 10\text{Hz}$)、12~15cm/s ($10\text{Hz} < f \leq 50\text{Hz}$) 和 15~20cm/s ($f > 50\text{Hz}$)。因此，对于安康隧道爆破振动规律，主要考虑爆心距离和围岩级别对围岩质点振动速度的影响。

3.1 不同爆心距离爆破振动规律

不同爆心距离爆破振动规律主要考虑隧道拱腰处围岩质点振动速度，沿着水平方向间隔 2.0m 布置振动波速监测点，共设置 10 个监测点，根据数值分析结果提取各个监测点的质点振动速度，其随着爆心距离的变化规律，如图 2 所示。

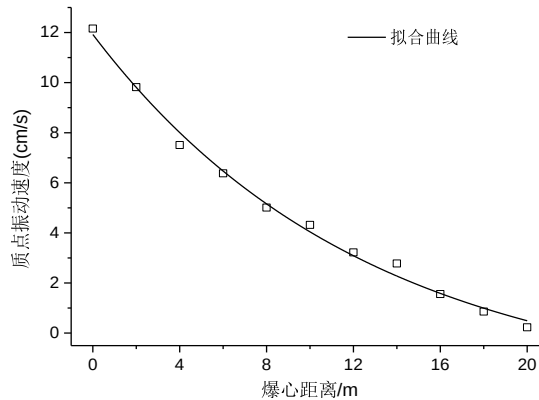


图2 质点振动速度 (PPV) 与爆心距离的变化关系

根据图2可以得到,随着爆心距离的增大,各个监测点的质点振动速度 (PPV) 逐渐减小,通过拟合得到质点振动速度 (PPV) 与爆心距离符合指数函数变化关系。根据《爆破安全规程》(GB 6722—2014) 中的规定,交通隧道爆破的频率一般大于 50Hz,因此安全允许质点振动速度为 15~20cm/s,通过对比分析数值模拟结果,提出的安康隧道IV级围岩段采用双台阶开挖围岩质点振动速度能够满足《爆破安全规程》的要求。

3.2 不同围岩质量爆破振动规律

由于安康隧道长度较大,穿越多种复杂地质区域,围岩质量以IV级围岩和V级围岩为主,围岩质量相对较差,因此,安康隧道爆破开挖振动响应分析需要充分考虑围岩质量对爆破振动规律的影响,根据《公路隧道设计细则》等建议,不同围岩级别的力学参数,如表2所示:

表2 不同围岩级别的力学参数

围岩级别	重度 (kN/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/°	黏聚力
IV-1	23	7.0	0.31	39	0.7
IV-2	22	3.8	0.30	35	0.5
IV-3	21	2.4	0.33	30	0.3
V-1	20	1.3	0.35	27	0.2
V-2	18	1.0	0.39	22	0.12

不同围岩级别条件下拱顶处质点振动速度监测结果,如表3所示,围岩质量越差,拱顶处质点振动速度逐渐增大,IV-1级围岩条件下质点振动速度为 5.51cm/s,而V-2级围岩条件下质点振动速度为 9.42cm/s。

表3 不同围岩级别拱顶处质点振动速度

测点	PPVL (cm/s)	PPVT (cm/s)	PPVV (cm/s)	PPV (cm/s)
IV-1	4.36	5.51	4.83	5.51
IV-2	6.62	6.31	6.25	6.62
IV-3	6.82	6.15	7.35	7.35
V-1	9.01	8.62	8.58	9.01
V-2	9.42	9.25	8.75	9.42

根据不同爆心距离和围岩级别条件下数值分析结果,距离隧道开挖轮廓越近,围岩极易受到爆破荷载振动效应的影响,同时,围岩质量越差,加剧了爆破振动效应对隧道围岩稳定性的不利影响。

4 结论

以安康隧道软弱围岩段钻爆法施工为研究对象,分析了隧道爆破开挖产生的振动效应对围岩的影响,通过构建爆破开挖作用下隧道围岩振动数值分析模型,分析了爆心距离和围岩质量对隧道围岩振动响应的影响。

随着爆心距离的增大,监测点的质点振动速度 (PPV) 逐渐减小,质点振动速度 (PPV) 与爆心距离符合指数函数变化关系。根据数值模拟结果得到安康隧道IV级围岩段采用双台阶开挖围岩质点振动速度能够满足《爆破安全规程》的要求。围岩质量越差,拱顶处质点振动速度逐渐增大,IV-1级围岩条件下质点振动速度为 5.51cm/s,而V-2级围岩条件下质点振动速度为 9.42cm/s。

【参考文献】

- [1]《中国公路学报》编辑部.中国隧道工程学术研究综述[J].中国公路学报,2015,28(5):1-65.
 - [2]王建秀,邹宝平,胡力绳.隧道及地下工程光面爆破技术研究现状与展望[J].地下空间与工程学报,2013,9(4):800-807.
 - [3]王蒙,刘殿书,陆欣雨,等.大断面斋堂隧道爆破近区围岩损伤研究[J].北京理工大学学报,2018(2):1-9.
 - [4]徐柯锋,赵庚成,邓捷程,等.隧道爆破施工导致地面振动优化控制数值模拟[J].公路,2023,68(11):369-374.
 - [5]梁宸,王迎超.爆破荷载作用下隧道裂隙围岩塌方规律研究[J].地下空间与工程学报,2023,19(5):1699-1707.
 - [6]梁世凡,晁晓辉,魏永冬,等.不同条件下后施工隧道爆破开挖对邻近隧道振速的影响规律[J].高压物理学报,2023,37(5):184-196.
 - [7]何曜城,魏立恒,倪修能,等.小净距双孔隧道爆破振动分析及爆孔优化措施[J].噪声与振动控制,2023,43(4):34-41.
 - [8]项荣军,刘传鹏,李胜林,等.隧道内部爆破振动传播规律与降振技术研究[J].爆破,2023,40(4):82-88.
 - [9]张波.大断面隧道台阶法爆破开挖围岩损伤特征研究[J].爆破,2023,40(1):69-76.
 - [10]刘国华,王振宇.爆破荷载作用下隧道的动态响应与抗爆分析[J].浙江大学学报(工学版),2004(2):77-82.
- 作者简介:衣忠强(1987—),男,辽宁丹东人,学历:本科,职称:高级工程师,研究方向:隧道与地下工程。