

# 软弱围岩隧道爆破开挖施工工艺研究

王磊

中铁九局集团第一建设有限公司, 江苏 苏州 215299

**[摘要]** 隧道钻爆法是常用的隧道施工方法之一, 具有工艺简单和效率高等优点。由于软弱围岩隧道施工难度大, 极易产生垮塌和塌落等, 对隧道结构稳定性造成不利影响。依托于安康隧道软弱围岩钻爆法施工工程, 开展了软弱围岩隧道爆破工程设计并根据现场监测结果验证了施工工艺的合理性。软弱围岩隧道爆破设计成果能够为类似工程设计提供有益借鉴, 不断丰富隧道钻爆法施工的研究成果。

**[关键词]** 隧道工程; 软弱围岩; 爆破开挖; 施工工艺

DOI: 10.33142/aem.v6i6.12042

中图分类号: TD235

文献标识码: A

## Research on Blasting Excavation Construction Technology for Tunnels in Weak Surrounding Rocks

WANG Lei

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

**Abstract:** Tunnel drilling and blasting method is one of the commonly used tunnel construction methods, which has the advantages of simple process and high efficiency. Due to the high difficulty of construction in weak surrounding rock tunnels, collapse and other factors are prone to occur, which have adverse effects on the stability of the tunnel structure. Based on the construction project of Ankang Tunnel's weak surrounding rock drilling and blasting method, the blasting design of the weak surrounding rock tunnel was carried out, and the rationality of the construction process was verified based on on-site monitoring results. The blasting design results of weak surrounding rock tunnels can provide useful reference for similar engineering designs and continuously enrich the research results of tunnel drilling and blasting construction.

**Keywords:** tunnel engineering; weak surrounding rock; blasting excavation; construction technology

### 引言

随着我国工程建设规模和进程不断加快, 隧道工程的设计与施工也取得了长足的发展。隧道钻爆法施工具有施工效率高、工艺简单且成本较低的优点, 是我国隧道施工中适应性最强的施工方法之一<sup>[1-2]</sup>。从隧道工程稳定性角度, 爆破施工产生的围岩动力响应对隧道结构的稳定性造成不利影响, 随着爆破产生的振动波的传播, 在围岩动力响应的近场区, 岩石易发生断裂破碎, 随着与爆源中心的距离的增大, 远场区振动波幅度和能量影响减弱, 但是也能够引起围岩力学特性的变化<sup>[3-4]</sup>。隧道钻爆法施工产生的爆破振动效应对隧道结构和邻近环境造成影响, 容易引起隧道围岩掉块和坍塌, 导致邻近构筑物的危险性系数增大<sup>[5-7]</sup>。对于隧道围岩自身而言, 爆破施工需要尽量降低对围岩的过度扰动, 《爆破安全规程》(GB6722—2014) 对交通隧道、水工隧洞和矿山隧道等各种隧道工况的爆破振动安全允许标准进行规定, 采用爆破安全运行质点振动速度 (cm/s) 为判断指标<sup>[8]</sup>。因此, 为了更好的适应软弱围岩隧道爆破开挖, 保障隧道爆破施工过程中结构安全, 通过现场监测结果分析安康隧道软弱围岩段围岩质点振动速度的变化规律, 与《爆破安全规程》的规定比较, 验证了软弱围岩隧道爆破施工工艺的合理性。

### 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 100 m<sup>2</sup>。隧址区位于秦岭地槽一级构造单元, 南秦岭华力西一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。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%。

安康隧道施工采用钻爆法开挖时, 严格按照《爆破安全规程》(GB 6722—2014) 进行工程设计和施工, 为了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。

### 2 隧道爆破方案

#### 2.1 爆孔参数

根据安康隧道地质勘探结果, 隧道以 IV 级围岩和 V 级

围岩为主，围岩质量相对较差，通过理论分析、数值模拟和工程经验等综合分析手段，同时，为了更好的控制隧道爆破引起的振动消极效应。安康隧道IV级围岩和V级围岩周边孔沿隧道开挖轮廓线布置，采用楔形掏槽，周边孔间距 0.35~0.7m，周边孔采用间隔孔装药。通过理论计算与光面爆破工程经验相结合方法确定光爆参数。设计选定的光爆参数合理与否，与现场地质变化情况息息相关，需经现场试爆或多循环统计研究，根据爆破效果进行调整与确定，爆孔参数表 1 所示：

表 1 爆孔参数

岩石种类	周边眼间距 E(cm)	周边眼最小抵抗线 W (cm)	相对距 E/W	周边眼装药参数 (kg/m)
硬岩	55~70	60~80	0.8~1.0	0.25~0.3
中硬岩	45~65	60~80	0.8~1.0	0.2~0.25
软岩	35~50	60~80	0.5~0.8	0.07~0.12

### 2.2 装药量

隧道爆破施工中，爆孔的装药量是爆破设计的关键参数，为了保证爆破开挖效果和更加安全合理，软弱围岩隧道爆孔装药量确定根据《爆破安全规程》(GB 6722-2014) 中的规定，爆破质点振动速度计算公式为：

$$V = K \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

变形得到炸药量的计算公式：

$$Q = \frac{R^3 V^{\frac{3}{\alpha}}}{K^{\frac{3}{\alpha}}} \quad (2)$$

式中：V 为质点峰值振动速度，cm/s；R 为爆破震源距被监测点水平距离，m；Q 为炸药量，齐发爆破为总药量，延时爆破为最大单段药量，kg；K， $\alpha$  为与爆破点至监测点间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数，可以通过表 2 确定。

表 2 K， $\alpha$  取值表

岩性	K	$\alpha$
坚硬岩石	50~150	1.3~1.5
中等硬度岩石	150~250	1.5~1.8
软岩石	250~350	1.8~2.0

根据安康隧道围岩的岩性、节理裂隙发育程度以及岩石的可爆性，确定安康隧道 IV 级围岩炸药单耗取  $Q=0.8 \sim 1.0 \text{kg/m}^3$ ，V 级围岩炸药单耗取  $Q=0.6 \sim 0.8 \text{kg/m}^3$ 。

### 2.3 IV级围岩爆破参数

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  $60^\circ$ ；

扩槽眼长度取 2.4m，钻眼与自由面夹角  $70^\circ$ ；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，如表 3 所示，三台阶开挖共施工炮眼数 71 个，总装药量为 89.5kg。

表 3 IV级围岩台阶法爆破参数

部位	名称	眼数 (个)	雷管数 (个)	药卷直径 (mm)	装药系数	眼深	单眼装药量 (kg)	取整药量 (kg)	总药量 (kg)
上台阶	掏槽眼	10	10	$\Phi 32$	0.55	2.7	1.485	1.5	15
	扩槽眼	8	8	$\Phi 32$	0.5	2.4	1.2	1.2	9.6
	辅助眼	73	73	$\Phi 32$	0.3	2.2	0.66	0.7	51.1
	周边眼	36	18	$\Phi 32$	0.2	2.2	0.44	0.4	14.4
	底眼	14	14	$\Phi 32$	0.65	2.2	1.43	1.5	90.1
	合计	141	123	—	—	—	—	—	180.2
下台阶	辅助眼	46	46	$\Phi 32$	0.3	3.8	1.14	1.2	55.2
	周边眼	12	6	$\Phi 32$	0.2	3.8	0.76	0.8	9.6
	底眼	13	13	$\Phi 32$	0.5	3.8	1.9	1.9	24.7
	合计	71	65	—	—	—	—	—	89.5

### 2.4 V级围岩爆破参数

安康隧道 V 级围岩采用三台阶开挖，上台阶开挖循环进尺为 0.6m，掏槽眼长度取 1.2m，同对眼口距离 2m，眼底距离 0.3m，对间距离 0.5m，钻眼与自由面夹角  $65^\circ$ ，辅助眼取 1m，眼距 0.8m，排距 0.8m，周边眼取 1m，眼距 0.5m。中、下台阶的爆孔布置参数一致，为开挖循环进尺 1.2m，辅助眼取 1.4m，眼距 1.0m，排距 1.0m，周边眼取 1.4m，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，如表 4 所示，三台阶开挖共施工炮眼数 65 个，总装药量为 27.9kg。

### 3 现场监测结果

爆破振动监测是为了实时监测爆破作业对周边围岩和山体造成的振动，及时根据反馈的数据调整优化爆破参数，更好的确保施工安全。安康隧道现场监测点主要布置于邻近隧道轮廓掌子面附近，分别位于隧道拱顶、拱肩、拱腰、拱脚和拱底，IV 级围岩和 V 级围岩断面共包括 10 个监测点，其中 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，监测结果如表 5 所示。

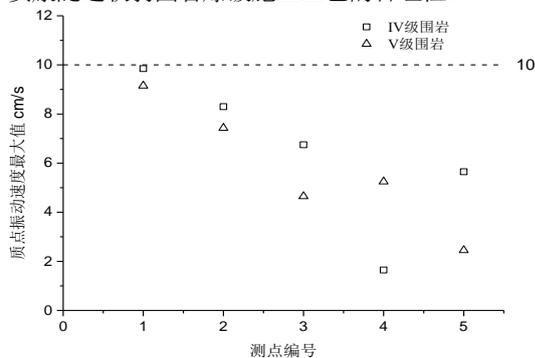
**表4 V级围岩台阶法爆破参数**

部位	名称	眼数(个)	雷管数(个)	药卷直径(mm)	装药系数	眼深	单眼装药量(kg)	取整药量(kg)	总药量(kg)
上台阶	掏槽眼	10	10	Φ32	0.6	1.2	0.8	0.8	8
	扩槽眼	6	6	Φ32	0.5	1.2	0.6	0.6	3.6
	辅助眼	57	57	Φ32	0.3	1	0.35	0.4	22.8
	周边眼	34	17	Φ32	0.2	1	0.2	0.2	3.4
	底板眼	14	14	Φ32	0.8	1	0.8	0.8	11.2
	合计	121	104	—	—	—	—	—	49
中台阶	辅助眼	42	42	Φ32	0.3	1.4	0.4	0.4	16.8
	周边眼	14	7	Φ32	0.2	1.4	0.3	0.3	2.1
	底板眼	14	14	Φ32	0.5	1.4	0.68	0.7	9.8
	合计	70	63	—	—	—	—	—	28.7
下台阶	辅助眼	44	44	Φ32	0.3	1.4	0.4	0.4	17.6
	周边眼	8	4	Φ32	0.2	1.4	0.27	0.3	1.2
	底板眼	13	13	Φ32	0.5	1.4	0.68	0.7	9.1
	合计	65	61	—	—	—	—	—	27.9

**表5 IV级围岩和V级围岩质点振动速度**

测点	PPVL (cm/s)	PPVT (cm/s)	PPVV (cm/s)	PPV (cm/s)
IV-1	8.52	9.53	9.85	9.85
IV-2	7.66	8.30	7.55	8.30
IV-3	5.55	6.75	5.35	6.75
IV-4	1.5	1.36	1.65	1.65
IV-5	4.75	5.65	4.45	5.65
V-1	9.15	8.55	7.45	9.15
V-2	7.35	6.81	7.43	7.43
V-3	4.51	3.12	4.65	4.65
V-4	5.25	4.57	4.62	5.25
V-5	2.45	2.25	2.35	2.45

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( $f > 50\text{Hz}$ )。通过与隧道现场实测数据的对比分析,安康隧道软弱围岩爆破施工工艺能够较好的控制爆破振动,围岩质点振动速度均小于爆破振动安全允许标准,如图1所示,因此,进一步说明了安康隧道软弱围岩爆破施工工艺的合理性。


**图1 质点振动速度**

为了更好的控制安康隧道软弱围岩爆破施工工艺的效果,爆破振动控制措施可以采用控制一次起爆的最大药量。通过采用微差分段,减小最大齐爆药量,控制爆破振动强度。从传播途径上隔振、减震。在炮孔与开挖边界之间形成一条预裂面,从传播途径上减震和消震。采用机械开挖、空气间隔装药、超前支护等技术措施减震。爆破减振具体措施有:合理选择炮孔深度,控制单耗和单孔药量,楔形掏槽中心增加两个浅直炮孔,使掏槽爆破的临空面得到改善,降低夹制作用,从而降低爆破振动。或者采用机械掏槽,提前创造临空面。采用较小的抵抗线(排距),精确钻孔,避免超深钻孔,控制单次起爆规模,减小单次起爆总药量,以减小爆破振动叠加的可能。周边孔减小间距密集打设,间距为25~30cm,作为隔震孔使用。采取间隔装药起爆。钻孔时,在周边孔与辅助孔之间加一排减振孔,间距为25~30cm。与周边孔距离为25~30cm,交错布置。

#### 4 结论

针对软弱围岩隧道钻爆法施工工艺问题,以安康隧道工程为研究对象,介绍了IV级围岩和V级围岩的台阶法施工工艺,从爆孔参数、装药量计算以及爆破参数设置等关键内容分析了软弱围岩钻爆法施工工艺。

通过与隧道现场实测数据的对比分析,安康隧道软弱围岩爆破施工过程中,围岩质点振动速度均小于爆破振动安全允许标准,验证了提出的IV级围岩和V级围岩的台阶法施工工艺的合理性,能够较好的控制爆破振动,降低的隧道围岩的损伤。

#### [参考文献]

- [1]洪开荣,冯欢欢.近2年我国隧道及地下工程发展与思考(2019—2020年)[J].隧道建设(中英文),2021,41(8):1259-1280.

- [2]洪开荣,冯欢欢.中国公路隧道近10年的发展趋势与思考[J].中国公路学报,2020,33(12):62-76.
- [3]李秀地,蒋树屏,刘元雪,等.小净距新建隧道爆破对运营隧道的影响与控制[J].地下空间与工程学报,2016,12(6):1631-1636.
- [4]贾磊,解咏平,李慎奎.爆破振动对邻近隧道衬砌安全的数值模拟分析[J].振动与冲击,2015,34(11):173-177.
- [5]舒磊,仇文革,龚伦.下穿隧道爆破施工对既有隧道的振动影响及对策研究[J].铁道标准设计,2013(7):70-74.
- [6]蒋楠,周传波.爆破振动作用下既有铁路隧道结构动力响应特性[J].中国铁道科学,2011,32(6):63-68.
- [7]王祥秋,周岳峰,周治国.爆破冲击荷载下隧道振动特性与安全性评价研究[J].中国安全科学学报,2010,20(11):134-138.
- [8]中华人民共和国国家标准编写组.GB6722-2014 爆破安全规程[S].北京:中国标准出版社,2015:1-3.

作者简介:王磊(1983—),男,辽宁沈阳人,学历本科,职称高级工程师,研究方向:桥梁工程。