

# 基于高速公路隧道施工爆破有害效应分析研究

黄其文

广西工程技术研究院有限公司

**摘要:** 爆破作为高速公路隧道施工的一种常见性施工作业方式,在隧道工程施工爆破作业过程中,爆破的有害效应主要指的是爆破振动、爆破作业冲击波、爆破噪音和爆破飞石等,这些有害效应会对项目施工产生不利影响,但有害效应又会随着与爆破源距离呈现减弱的状态,所以要针对性做好不同有害效应对保护对象所产生的破坏作用。本文主要以广西某高速公路工程项目隧道施工爆破开挖作为实例研究对象,提出了高速公路隧道施工爆破有害效应控制有关结论,可供高速公路隧道工程施工专业技术人员参考借鉴。

**关键词:** 高速公路; 隧道; 施工; 爆破; 有害效应  
【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2024.04.047

## 引言

本文结合广西某高速公路隧道施工爆破有害效应分析的实际应用作为背景,通过对该项目施工爆破方案、

隧道施工爆破有害效应分析验算、周边保护对象爆破振动有害效应分析验算、隧道施工爆破飞石验算,提出了隧道施工爆破需要注重的防护措施,也得出了隧道施工爆破有害效应分析结论。

## 一、广西某高速公路隧道施工爆破案例分析

### (一) 工程概况

广西某高速公路某隧道工程左线隧道起讫桩号: ZK19+155-ZK19+405,全长250m;右线隧道起讫桩号: YK19+135-YK19+425,全长290m。隧道出口端前面为旱地和荒山,四周为高山,西南面为项目的临时建筑物,与出口端距离约140m;出口端西北面有一条项目自用的10kV高压线路,与洞口距离约30m。隧道进口端东面和南面为旱地,主要种植火龙果,东南方向距离火龙果种植基地工棚340m;西面和北面为荒山。隧道出口端爆破点1000m范围内没有铁路,500m范围内没有110kV以上输电线路,300m范围内没有村庄民房。隧道基本情况如表1所示。

表1 隧道基本情况表

起讫桩号		结构形式/ 布置方式	设计隧道长度 (m)	围岩级别长度 (m)			明洞长度 (m)		洞门型式		备注
起点桩号	终点桩号			III级	IV级	V级	进口端	出口端	进口端	出口端	
YK19+135	YK19+425	小净距 分离式	290	/	164	126	10	13	端墙式	端墙式	偏压
ZK19+155	ZK19+405		250	/	169	81	17	15	端墙式	端墙式	偏压

## (二) 地质条件

### (1) 地形地貌

项目所在区地处桂西南岩溶山地,以岩溶地貌为主,总体地势西高东低。西部山峰一般海拔600~800m,东部一般海拔200~350m,山势走向多为南北向及北东向。西大明山山脉呈近东西向位于项目区南侧,山地一般海拔高度在1000m以下,最高点西大明山海拔1071m,形成左、右江区域分水岭,故又以西大明山山脉为中心,地势略向东北、西南倾斜的趋势。

### (2) 气候情况

项目所在区位于广西壮族自治区西南部,属南亚热带季风气候,四季区分明显。形成阳光充足、气候温暖、雨热同季,雨量充沛、热量丰富、无霜期长的特点。区内多年平均气温21.3℃左右,气温由南向北递减,由河谷平原向丘陵山区递减,区内极端最高气温39℃,极端最低气温2.2℃,1月最冷,月平均气温为12.1℃;7月最热,月平均气温为28.4℃年平均降雨量1267.5-1479.2mm,受冬夏季风交替影响,区内降水量季节分配不均,干湿季分明,5-9月为雨季(称丰水季节),月降雨量可达108.7-279.2mm,总降水量占全年降水量的70%-85%,11-3月是干季(称枯季节),月降雨量仅20.2-54.1mm,总降水量仅占全年降水量的10%-15%。降雨量最大的地区为西部峰丛洼地、谷地,最大降雨量1701.6-2011.0mm。多年平均日照时数1579小

时,多年平均蒸发量1285.8-1719.8mm,多年平均无霜期为341天。

### (3) 水文状况

项目所在区以近东西向西大明山山脉为分水岭,将项目区基本上分成南北两半各归属于右江、左江水系,西大明山山脉以北属右江水系,西大明山山脉以南属左江水系。区内地表水系不甚发育,较大的河流有项目区东部的右江及西部的黑水河,受岩溶水调节的季节性小河有中部的的大新河,东部的绿水江河和罗兴江河等。由于岩溶发育,地表支流较少。其基本特征为河水丰富,年径流量大,但流量和水位变化大。

### (4) 地层岩性

本项目所在区地层区划属桂西地层分区,区内出露的地层包括:寒武系(岩性主要为长石石英砂岩夹泥岩、页岩或互层)、泥盆系(灰岩、白云岩)、石炭系(碳酸盐岩)、二叠系(碳酸盐岩夹硅质岩)、三叠系(碳酸盐岩与碎屑岩)、第三系(泥质碎屑岩)和第四系(残积、冲积、坡积及洪积亚黏土或黏土)及印支期岩浆岩(主要为酸性火山岩)。沿线地质构造复杂,构造形迹非常发育,主要为褶皱及断层。项目所在区褶皱构造特征表现为紧密线状褶皱,轴向以近东西向与北东向为主,轴面一般较陡,少数较缓,岩层倾角一般较陡。项目区主要褶皱有巴香向斜、莒明背斜、都结向斜。项目所在区断裂构造发育,中、西部以近东西向与

北东向弧形为主，东部以北西向为主。区内主要断裂构造有近东西向断裂、北东向弧向断裂、北西向断裂（右江体系）。隧道围岩主要以中风化灰岩为主；隧址区工程地质及水文地质条件较为简单，区域稳定性为基本稳定，不良地质作用主要为岩溶及危岩体。

(5) 地震动参数

根据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015)及《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)(2016年版)，区内地震动峰值加速度为0.10g，峰值频谱特征周期为0.35s，地震基本烈度为Ⅶ度。

1.3 隧道施工爆破方案

根据《公路隧道施工技术规范》隧道开挖方法一般有全断面法、台阶法(台阶数量一般为2个或者3个，不宜大于3个)、分部开挖法。施工开挖应先做好超前支护，根据地质断面图各标段围岩情况，隧道洞口段开挖贯彻零开挖的理念，禁止大刷大挖，坡率符合设计要求。石方采用浅孔爆破，并严格控制药量。隧道洞身掘进采用新奥法开挖。根据施工设计资料，本标段隧道采用的开挖方法有环形开挖预留核心土法和中隔壁法，为适应现场施工需要本方案预留二台阶法开挖、三台阶法开挖和全断面法开挖的爆破设计。对于隧道洞口V级围岩段，采用环形开挖预留核心土法；对于小净距隧道V级围岩TSXX-Va衬砌段，采用中隔壁法；小净距隧道V级围岩TSXX-Vd衬砌段和小净距IV级围岩TSXX-IVb(c)衬砌段采用环形开挖留核心土法。

V级围岩开挖应尽可能采用机械开挖，若需爆破采用控制爆破；IV级围岩地段爆破方式采用光面爆破，最大限度地使开挖面符合设计轮廓线，减轻对围岩的扰动。严格控制药量，爆破后及时喷射混凝土，尽快封闭开挖岩面，使初期支护与围岩能共同受力；然后打锚杆、架立钢拱架、复喷至设计厚度，施工时实行流水作业。

二、隧道施工爆破有害效应分析

(一) 隧道施工爆破有害效应分析验算

一般爆破有害效应包括爆破振动、爆破飞散物、爆破粉尘、爆破空气冲击波和噪音以及爆破有害气体(包含CO、NO、N2O3、NO2与N2O4混合物等)。其中爆破振动、爆破飞散物是主要的危险有害因素，在临近民房时爆破冲击波以及爆破有害气体也有可能引起事故的发生。

炸药在岩土介质中爆炸时，在炸药近区(药包半径的10~15倍)传播为冲击波；在中区(药包半径的15~400倍)为应力波；在远区衰减为地震波，平常检测的就是地震波。

按《爆破安全规程》(GB6722-2014)要求，爆破振动安全距离按下式计算：

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

式中：

R—爆破振动安全距离，m；

V—爆破安全振动速度，cm/s；

Q—最大单段药量，kg；

V—爆破地震安全速度(cm/s)；隧道及洞口爆破时，保护的對象主要有：一般的砖混结构的建筑物(民房)，取V=2cm/s；高压线杆，取V=3.5cm/s；

K、α是与爆破地在地形有关的系数和衰减指数。

结合本项目的实际情况，取安全允许振速V=2.0cm/s，K=200，α=1.6；则：Q=R<sup>3</sup>/(200/2)<sup>1.875</sup>=R<sup>3</sup>/5623。

本项目的保护对象主要是民房、输电线路电杆。安全允许振动速度值分别取V=2cm/s、V=3.5cm/s；以V=2cm/s计算，如表4所示。

(1) 洞口。由于隧道爆破单次药量较小，一般不超过300kg，隧道掘进洞口端300m范围内没有民房和高压线等保护目标，隧道爆破产生的爆破振动不会对村庄民房产生影响。

表2 爆破时保护对象的安全距离及允许的最大单段药量表

R (m)	Qmax (kg)	R (m)	Qmax (kg)
20	1.4	70	61.0
25	2.8	75	75.0
30	4.8	80	91.0
35	7.6	85	109.2
40	11.4	90	129.6
45	16.2	95	152.5
50	22.2	100	177.8
55	29.6	110	236.7
60	38.4	120	307.3
65	48.8		

(2) 洞身。通过围岩分级管控，采取不同的开挖方式，选择合理的爆破参数，从而减少爆破振动对隧道支撑结构的影响，确保爆破振动对隧道的影响在可控范围内。根据公路工程施工安全技术规范，IV、V级围岩掌子面与二衬间距离最大分别为90m和70m，不同距离下最大单段药量计算表如表3和表4所示。

表3 IV级围岩掌子面与二衬间不同距离下最大单段药量计算表 (取V=15cm/s, K=200, α=1.6)

R (m)	Qmax (kg)	R (m)	Qmax (kg)
5	1.0	40	497.6
10	7.8	50	971.9
20	62.2	60	1679.5
23.43	100	70	2667
30	209.9	80	3981
33.79	300	90	5668

表4 V级围岩掌子面与二衬间不同距离下最大单段药量计算表 (取V=15cm/s, K=250, α=1.8)

R (m)	Qmax (kg)	R (m)	Qmax (kg)
5	1.2	31.95	300
10	9.2	40	588.5
20	73.6	50	1149.3
22.15	100	60	1986
30	248.3	70	3154

隧道开挖爆破最大单段起爆药量在100kg以内,爆破振动对IV、V级围岩距掌子面爆区分别为23.43m、22.15m以外的支撑结构(二衬)振动数据小于爆破振动允许范围内 $V=15\text{cm/s}$ 。

### (二) 周边保护对象爆破振动有害效应分析验算

距离保护对象较近的区域爆破时,需控制最大单段药量。本项目隧道工程施工爆破区域距火龙果种植基地工棚的最近距离为340m,取几种开挖方法的最大单段药量台阶法掏槽孔的药量21.6kg,经验算,当 $Q=21.6\text{kg}$ , $R=340\text{m}$ , $K=200$ , $a=1.6$ 时, $V=0.09\text{cm/s}$ 。对于村庄周围的民用建筑物,为降低爆破振动对民用建筑物的影响,构建和谐社会,将爆破振动安全允许振动速度降低50%,取 $V=1.0\text{cm/s}$ ;可见,计算值 $V=0.09\text{cm/s} < 1\text{cm/s}$ 。本项目隧道施工爆破对于周边保护对象(民用建筑物等)的爆破振动值均在国家安全允许标准范围内。

### (三) 隧道施工爆破飞石验算

对于露天爆破个别飞石距离的计算可采用以下公式估算:

$$R_f = (40/25.4) \times d \quad (3-14)$$

式中:  $d$ —为炮孔直径,单位: mm;

$R_f$ —为个别飞石最小距离, m。

计算结果: 炮孔直径 $\Phi 40\text{mm}$ ,  $R_f=63\text{m}$ 。这仅是爆破飞石进行估算,但按《爆破安全规程》(GB6722-2014)规定,深孔爆破安全允许距离按设计要求,但不得小于200m;沿山坡爆破时,下坡方向的个别飞散物安全允许距离应增大50%。隧道掘进端洞口爆破点,周围为荒山和旱地,远离村庄民房,爆破飞石的影响不用考虑。

### (四) 隧道施工爆破通风量计算

按排出炮烟需风量计算,作业面爆破产生的炮烟主要包括一氧化碳、二氧化碳和氮氧化物等有害气体和粉尘,爆破后排出炮烟的需风量,参照下列计算公式进行计算。

$$Q = \frac{2.25}{t} \sqrt[3]{A b S^2 L^2 K / P}$$

式中:  $t$ —通风时间(min),取 $t=15\text{min}$ ;

$A$ —爆破耗药量(kg),取台阶法开挖的用药量122.4kg;

$b$ —1kg炸药有害气体生成量,岩层中取40L;

$S$ —开挖断面面积,取台阶法开挖上台阶的断面面积 $82.81\text{m}^2$ ;

$L$ —隧道长度,按隧道最长考虑,取 $L=290\text{m}$ ;

$K$ —考虑淋水使炮烟浓度降低的系数,对于干燥岩层,取 $L=0.8$ ;

$P$ —隧道计算长度内的漏风系数,暂取 $P=1$ ;

将上述数据代入公式,计算得

$$\begin{aligned} Q &= \frac{2.25}{15} \sqrt[3]{122.4 \times 40 \times 82.81^2 \times 290^2 \times 0.8 / 1} \\ &= 1968 \quad (\text{m}^3/\text{min}) \end{aligned}$$

隧道风量还应按洞内同时工作最多人数需要的新鲜空气和最低风速及稀释和排出内燃机械废气需风量计算风量,取最大值。通常情况下按排出炮烟需风量是最大的。根据隧道施工机械情况,可选择SDF(C)№11.5型对旋式轴流风机,功率 $75 \times 2\text{kW}$ ,叶轮直径1150mm,风量为 $1171-2285\text{m}^3/\text{min}$ ,风压 $727-4629\text{Pa}$ ,高效风量为 $1865\text{m}^3/\text{min}$ ,转速 $1480\text{r}/\text{min}$ 。通风方式选用压入式,通风管选用软管,风管直径应考虑二衬台架上风管穿入的尺寸,可选用1.2m直径风管。

### 三、结语

综上所述,目前该隧道工程已顺利完成施工爆破作业,未发生质量安全生产事故。本文主要结合广西某高速公路隧道工程施工爆破有害效应进行分析研究,得出主要结论如下:

(1) 在进行爆破振动有害效应分析验算过程中,要充分了解项目施工现场环境,结合实际环境条件对相关系数进行取值。合理选择最小抵抗线方向和增加装药的分散性和临空面,选择合理的装药结构,并对炮孔进行覆盖,可以用装土的编织袋压住炮孔。

(2) 要注重周边保护对象爆破振动有害效应的分析验算,结合保护对象距离控制最大单段炸药用量,针对隧道开挖方法进行充分的验算,确保隧道施工爆破区域周边保护对象的爆破振动值符合标准要求。

(3) 隧道施工爆破点距离高压输电线路小于500m时,必须要采取安全可靠的防护措施确保电力设施的安全,所制定的防护措施要得到输电线路电力设施产权单位或管理部门的书面同意,方可开展爆破作业。

(4) 隧道风量还应按洞内同时工作最多人数需要的新鲜空气和最低风速及稀释和排出内燃机械废气需风量计算风量,取最大值。通常情况下按排出炮烟需风量是最大的。通风方式选用压入式,通风管选用软管,风管直径应考虑二衬台架上风管穿入的尺寸,可选用1.2m直径风管。

### 参考文献

- [1] 广西某高速公路工程隧道施工爆破方案, 2022.
- [2] 公路隧道工程施工技术规范, JTG/T 3660-2020, 2020.3.1.
- [3] 铁路隧道工程施工技术指南, TZ 204-2008, 2008.10.20.
- [4] 胡世敬. 山区公路隧道爆破振动对地表影响的数值分析[J]. 路基工程, 2019(3): 111-114.
- [5] 杨旭平. 拉耐(小净距)隧道施工技术[J]. 中国新技术新产品, 2018(9): 85-87.

作者简介: 黄其文(1984-), 男, 汉族, 籍贯广东罗定市, 大学本科, 工程师, 研究方向为高速公路工程项目施工质量管理与特种设备管理。