

文章编号: 1674-599X(2021)03-0065-07

上跨临近既有线隧道爆破振动响应分析

朱和昆¹, 张庆彬¹, 李传华², 唐伟伟², 刘公剑¹, 颜天成¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 中铁十局集团城市轨道交通工程有限公司, 广东 广州 510000)

摘 要: 为减小新建隧道爆破施工对既有隧道的影响, 且满足爆破开挖引起既有隧道的爆破振动速度不得超过2 cm/s的要求。以在建赣深高铁羊台山隧道近似平行上穿既有广深高铁的羊台山隧道为工程背景, 基于萨道夫斯基经验公式, 推导出爆破药量和振动速度的对应关系模型, 并反演满足振动速度为2 cm/s时, 上、下台阶法施工对应的最大控制药量, 为优化爆破设计方案、指导现场施工提供了依据。

关键词: 爆破开挖; 既有隧道; 爆破振动; 优化爆破

中图分类号: U416.1⁺13

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.010

Blasting vibration response of the existing tunnels to the neighboring and overpassing tunnel

ZHU He-kun¹, ZHANG Qing-bin¹, LI Chuan-hua², Tang Wei-wei², LIU Gong-jian¹, YAN Tian-cheng¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. China Railway Tenth Bureau Group Urban Rail Transit Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: The blasting vibration velocity of existing tunnel caused by blasting excavation should not exceed 2 cm/s. In order to reduce the impact of the blasting of new tunnel on the existing tunnel, the blasting vibration response characteristic was investigated. The data of blast vibration was monitored during the construction process of the Yangtaishan tunnel of the Ganshen high-speed railway overpassing the existing tunnel of GuangShen high-speed railway. Consequently, the corresponding relationship between blasting charge and vibration velocity was obtained according to the Sadowski's empirical formula. The maximum explosive charge for the excavating of upper and lower steps was calculated, when the vibration velocity is controlled at the value of 2 cm/s. This study can provide a theoretical basis for the optimizing of blasting design and the construction of tunnel.

Keywords: Excavation by blasting; existing tunnel; blasting vibration; optimized blasting

国内外学者针对临近既有新建隧道爆破施工影响开展了大量研究工作。郑明新等人^[1]依托花岗岩及粉砂质板岩地层中邻近金山顶隧道的平行救援通道爆破施工, 通过现场测试和数值分析提出了6 cm/s的振速控制标准。周林立等人^[2]对流纹质晶屑凝灰岩地层爆破引起邻近隧道的振动速度进行了测试, 结合爆破振动频率建立了不同围岩等级与最大段控制药量关系, 提出了10 cm/s的振速控制标准。Duan等人^[3]对弱风化砂质泥岩

地层中上下交叉隧道爆破振动影响进行研究, 通过现场监测和数值模拟等手段, 预测和控制爆破对既有隧道的破坏, 以保证新建隧道施工正常进行。刘唐利等人^[4]通过数值模拟分析了爆破振动对既有线的影 响, 验证了数值模型参数的准确性, 且发现掏槽眼爆破对既有线迎爆侧的左脚处影响最大。蔡路军等人^[5]依托上穿既有供水隧洞的大望山公路隧道开挖爆破项目, 应用数值模拟研究了既有隧洞的应力及振速的变化情况, 且隧

收稿日期: 2020-09-08

基金项目: 中国铁路工程集团有限公司科技项目(2019-重点-15); 中铁十局集团有限公司科技项目(2019-39)

作者简介: 朱和昆(1995—), 男, 长沙理工大学硕士生。

洞拱顶质点垂直振动速度最大约为 2.8 cm/s，小于规定的安全振速。Zhao 等人^[6]研究了粉质黏土与强风化砂岩中邻近隧道爆破振动对既有隧道的影响，采用现场监测试验和数值方法，分析了既有隧道的轴向和径向的爆破振动速度分布及 PSD 分布，优化了爆破开挖方案。钟冬望等人^[7]结合灰岩中在建邻近贵昆线狮子口隧道的扒挪块隧道，通过数值模拟分析得到了最大拉伸应力（没超限值）和最大振速（小于振速控制标准 5 cm/s）。

对邻近隧道爆破的振动控制标准大多不小于 5 cm/s，且两隧道位置关系多以水平邻近和下穿既有隧道为主，地层岩性以灰岩、砂岩和板岩等中等强度岩体为主。针对本工程，为了保证既有隧道的支护结构不受损及正常运营，采取 2 cm/s 的爆破振速控制标准，且新建隧道主要在Ⅱ级和Ⅲ级花岗岩地层中上穿既有隧道。严格的振动控制标准、坚硬完整的岩体条件以及特殊的位置关系都给该项目的施工增加了难度。当前，国内尚无类似工程及经验可供借鉴。因此，作者拟基于萨道夫斯基经验公式，拟合振动速度和最大段控制药量对应关系，反演出满足振动速度为 2 cm/s

时，不同施工工艺的最大段控制药量，为优化爆破设计方案及指导现场施工提供了依据。

1 工程概况

在建赣深铁路羊台山隧道近似平行上穿既有广深港铁路羊台山隧道，其中，既有线受在建隧道进口 DK429+373.43~DK429+900.71 段（长度为 527.28 m）爆破开挖的影响，对应既有广深港高铁里程为 K2387+316~K2387+830.5（长度为 514.5 m），既有线影响终点里程为 DK429+900.71，设计要求爆破振速≤2 cm/s。新建隧道段洞身围岩以弱风化花岗岩为主，呈青灰色或灰白色，块状构造，岩体较完整，质地坚硬，围岩等级主要为Ⅱ级。两隧道段位置关系如图 1 所示。两隧道在 DK429+373.43/K2387+316 处，横断面结构间最小净距约为 91 m，轨面高差约为 32 m；在 DK429+900.71/K2387+830.5 处，横断面结构间最小净距约为 200 m，轨面高差约为 32 m。

新建赣深铁路羊台山隧道采用上、下台阶法施工，具体施工工序如图 2 所示。

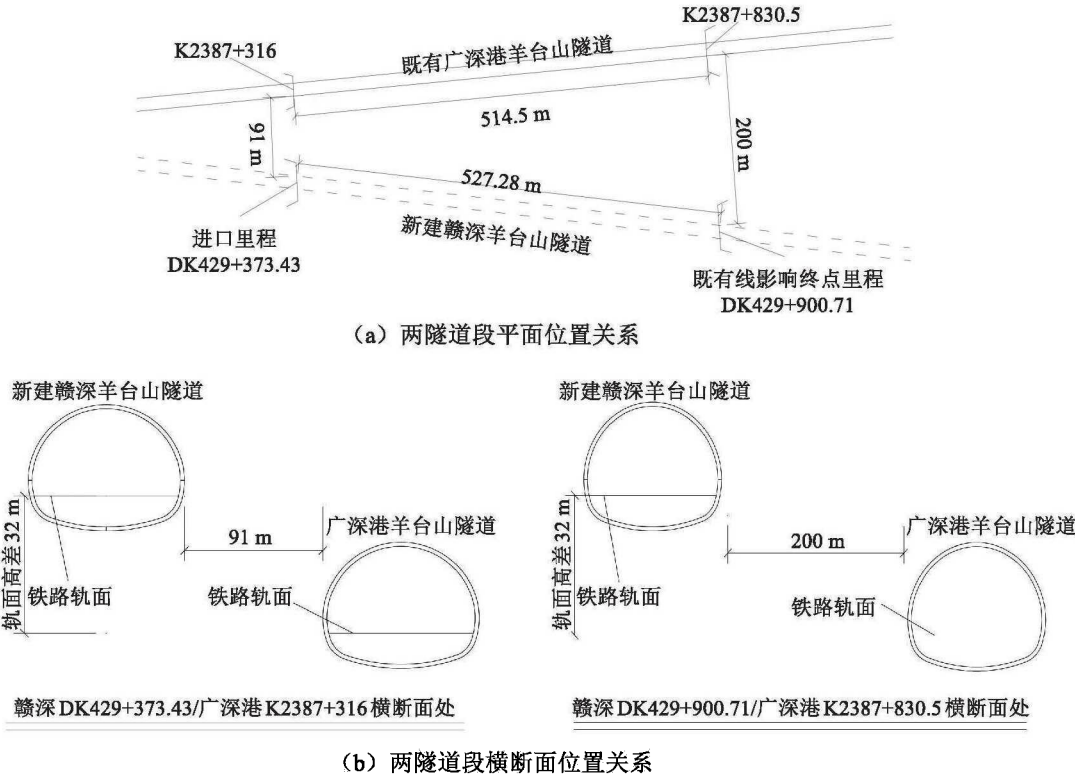


图 1 赣深羊台山隧道段与广深港隧道段的位置关系

Fig. 1 Location map of the Yangtaishan tunnel section and the Guangshenggang tunnel section in Ganshen

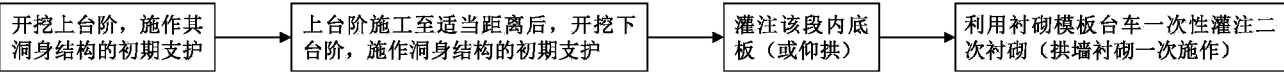


图2 施工工艺流程

Fig. 2 Construction process flow chart

2 爆破设计及现场振动测试

2.1 爆破设计

上台阶采用楔形掏槽隧道爆破法，周边采用光面爆破，而下台阶采用水平台阶爆破法。上、下台阶的起爆方式都采用毫秒精确非电雷管起爆，循环进尺约3 m，爆破装药量见表1。工程采用炮孔直径为40 mm，用炸药药卷规格Φ32 mm×300 g，且炸药为2号岩石乳化炸药。上、下

台阶炮孔布置如图3所示，同时各循环爆破施工依据现场围岩类别及爆破影响要求对爆破孔网参数进行调整。

在图3中，MS代表延期时间，数字代表段别。上台阶开挖宽度为14.40 m，开挖高度为8.15 m，掏槽眼孔间距50 cm，排距70 cm，辅助孔间距60~100 cm，周边孔间距50 cm。而下台阶开挖宽度为14.40 m，开挖高度为4.25 m，台炮眼孔间距80~120 cm，排距60~120 cm。

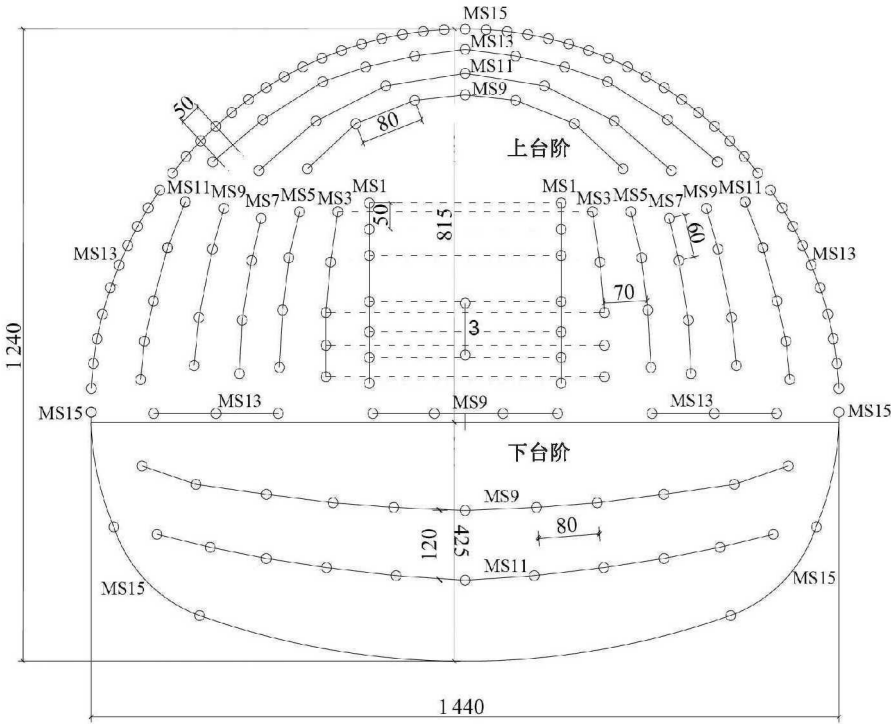


图3 上下台阶炮孔布置示意（单位：cm）

Fig. 3 Schematic diagram of the blast hole layout of the upper and lower steps (unit: cm)

表1 上下台阶爆破装药量

Table 1 Blasting Charge of up and down lower step

爆破位置	炮孔位置	炮孔深度/m	炮孔数量/个	雷管段别	单孔装药量/kg	装药量/kg	总装药量/kg
上台阶	掏槽眼	3.8	14	1	2.7	37.8	277.2
	辅助眼	3.5	69	3~13	2.4	165.6	
	底眼	3.5	12	9~15	2.4	28.8	
	周边眼	3.5	50	13~15	0.9	45.0	
下台阶	台炮眼	3.8	20	7~11	2.7	54.0	66.0
	底眼	3.5	4	13~15	3.0	12.0	

注：下台阶开挖分左、右两部不同时开挖，即总装药量为实际下台阶开挖所需炸药的一半

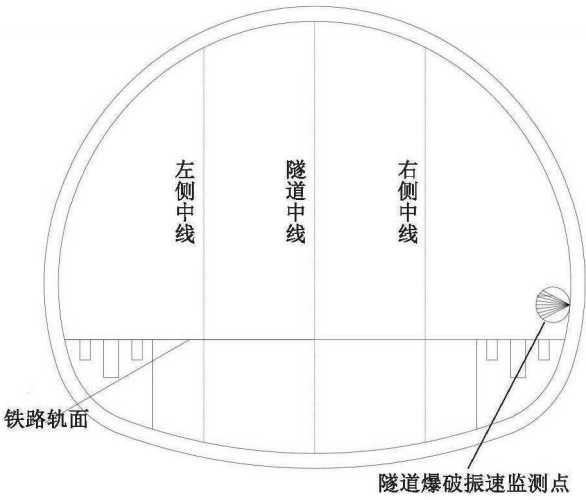
2.2 测试方案

2.2.1 测试目的

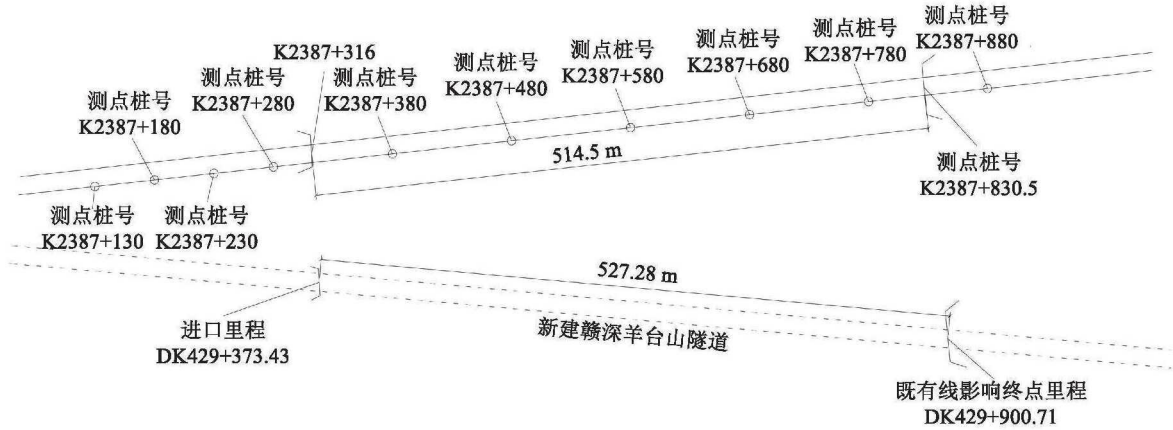
为了解并掌握新建赣深铁路羊台山隧道爆破开挖的影响规律，测试方案以上穿隧道爆破开挖对其下部隧道二衬结构的影响为重点，新建赣深羊台山隧道爆破开挖时，在相应受影响的既有广深港隧道段右侧拱墙边沿隧道纵向布设振速测点，测试不同位置二衬的振速衰减规律，测点布置情况如图4所示。

2.2.2 测试仪器

监测仪器采用成都中科测控有限公司生产的TC-4850 爆破测振仪，配备TCS-B3 型速度传感器，并有与之相匹配的三矢量合成分析软件。



(a) 测点横断面示意



(b) 测点平面布置

图4 测点布置

Fig. 4 Arrangement of measuring points

2.2.3 测试方法

①测点定位。为准确测定测点与爆破面的位置关系，使用全站仪对测点坐标进行定位，并在隧道衬砌上使用喷漆和贴纸进行标记。

②爆破振动监测。爆破测振系统由TCS-B3 型传感器、低噪声屏蔽电缆、TC-4850 爆破振动记录仪和计算机组成。为了有效采集到信号，避免干扰信号致使仪器误触发，将触发电平值设为0.06 cm/s；为了监测波形的完整性，将爆破振动仪周期设置为5 s。由于每次爆破触发仪器记数之前的波形均不超过0.1 s，故延时设置为一100 ms。同时，为了保证采集波形不失真，本次现场测试选用的采样频率为4 kHz。

③测试前，配制水灰比为1.0：3.5 的石膏浆，再将传感器固定在测点上，并使传感器x 轴沿隧道横向，y 轴沿隧道纵向，z 轴沿隧道竖向。

2.3 现场监测振动数据

新建赣深羊台山隧道上台阶爆破对应的振速监测共采用了19 次循环爆破，共127 个有效数据进行分析。下台阶爆破对应的振速监测，共采用了5 次循环爆破，共13 个有效数据进行分析。

3 爆破振动影响分析

3.1 振动速度规律分析

新建赣深羊台山上、下台阶爆破对应的部分振速监测数据见表2~3。从表2~3 可知，上、下台阶爆破时，随着爆心距的不断增大，最大振速方向首先出现在沿隧道竖向，其次出现在隧道横向，最后出现在隧道纵向。合速度随着爆源与测点的竖向距离不断增大，其最大振速方向变化规律与随爆心距增加的最大振速方向变化规律相

表2 上台阶爆破对应的既有线结构监测振动数据

Table 2 Monitoring vibration data of existing line structure corresponding to step blasting

掌子面桩号	掏槽眼药量/kg	测点桩号	爆心距/ m	水平径向/ (cm•s ⁻¹)	水平纵向/ (cm•s ⁻¹)	竖直方向/ (cm•s ⁻¹)	合振速/ (cm•s ⁻¹)
DK429+583	37.8	K2387+130	454.130	0.15	0.24	0.20	0.35
DK429+583	37.8	K2387+180	406.310	0.80	0.17	0.12	0.22
DK429+583	37.8	K2387+230	359.090	0.11	0.14	0.35	0.39
DK429+583	37.8	K2387+280	312.730	0.17	0.25	0.42	0.52
DK429+583	37.8	K2387+380	224.740	0.60	0.52	0.69	1.05
DK429+607.3	37.8	K2387+180	427.360	0.10	0.17	0.10	0.22
DK429+607.3	37.8	K2387+230	379.990	0.14	0.13	0.38	0.42
DK429+607.3	37.8	K2387+280	333.390	0.19	0.35	0.28	0.49
DK429+607.3	37.8	K2387+580	129.180	0.91	0.89	1.62	2.06
DK429+607.3	37.8	K2387+780	231.760	0.01	0.22	0.34	0.40
DK429+617.4	37.8	K2387+130	411.793	0.10	0.15	0.11	0.21
DK429+617.4	37.8	K2387+180	365.928	0.08	0.19	0.09	0.23
DK429+617.4	37.8	K2387+230	321.299	0.15	0.16	0.40	0.46
DK429+812.6	33.6	K2387+180	631.080	0.10	0.14	0.07	0.19
DK429+812.6	33.6	K2387+230	582.930	0.20	0.05	0.27	0.34
DK429+812.6	33.6	K2387+280	535.100	0.18	0.14	0.11	0.25
DK429+812.6	33.6	K2387+380	440.910	0.21	0.17	0.17	0.32
DK429+812.6	33.6	K2387+580	265.600	0.71	0.80	0.17	1.08
DK429+812.6	33.6	K2387+780	163.340	0.01	0.78	1.50	1.69
DK429+812.6	33.6	K2387+880	186.410	0.62	0.28	0.24	0.72
DK429+821.6	37.8	K2387+280	544.010	0.14	0.12	0.12	0.22
DK429+821.6	37.8	K2387+380	449.710	0.19	0.17	0.17	0.31
DK429+821.6	37.8	K2387+480	358.520	0.27	0.14	0.66	0.73
DK429+821.6	37.8	K2387+580	273.550	0.60	0.52	1.02	1.29
DK429+821.6	37.8	K2387+780	165.600	0.01	0.74	1.18	1.39
DK429+821.6	37.8	K2387+880	183.630	0.47	0.33	0.23	0.62

表3 下台阶爆破对应的既有线结构监测振动数据

Table 3 Vibration monitoring data table of existing line structure corresponding to step-down blasting

掌子面桩号	最大段 炸药量/ kg	测点桩号	爆心距/ m	水平径向/ (cm•s ⁻¹)	水平纵向/ (cm•s ⁻¹)	竖直方向/ (cm•s ⁻¹)	合振速/ (cm•s ⁻¹)
DK429+592	30.0	K2387+380	229.34	0.14	0.53	0.21	0.59
DK429+592	30.0	K2387+480	155.32	0.41	0.52	1.57	1.70
DK429+592	30.0	K2387+580	125.11	0.27	0.35	1.40	1.47
DK429+595	27.0	K2387+280	320.83	0.11	0.18	0.08	0.23
DK429+595	27.0	K2387+380	232.10	0.19	0.30	0.24	0.43
DK429+595	27.0	K2387+480	157.49	0.27	0.58	1.24	1.40
DK429+595	27.0	K2387+580	125.46	0.28	0.38	1.43	1.51
DK429+598	30.0	K2387+380	234.85	0.16	0.34	0.18	0.42
DK429+598	30.0	K2387+480	159.69	0.27	0.41	0.70	0.85
DK429+604	21.0	K2387+130	164.17	0.20	0.24	0.65	0.72
DK429+695.1	19.5	K2387+380	326.46	0.11	0.20	0.10	0.25
DK429+695.1	19.5	K2387+480	240.40	0.21	0.30	0.56	0.67
DK429+695.1	19.5	K2387+580	170.31	0.36	0.55	0.67	0.94

反, 且合速度随爆心距增大先减少而后增大。如: K2387+780、K2387+380、K2387+180 与爆源的距离在上台阶掌子面桩号为 DK429+812.6 处, 测点 离逐渐增大, 其最大振速方向首先出现在沿隧道

竖向,其次出现在隧道横向,最后出现在隧道纵向。

3.2 振动速度衰减规律分析

因为振动速度与岩土性质有较稳定的相关关系,规律性较好^[8],所以多采用振动速度来表征爆破振动强度。由于在现实场地复杂,影响爆破振动强度的因素多,难以找出表述爆破振动强度的具体数学函数表达式。国内外学者结合室内和现场试验,得出了不同的爆破振动强度经验预测公式(萨道夫斯基经验公式)等。在《爆破安全规程》(GB6722-2014)^[9]中,使用前苏联萨道夫斯基公式研究爆破规律。因此,本研究也基于萨道夫斯基经验公式,进行工程现场爆破特性规律的分析及研究。萨道夫斯基公式为:

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

式中: v 为地震波波速, cm/s ; Q 为单段最大装药量, kg ; α 为振动衰减系数; R 为爆源中心到测点的距离, m ; k 为与介质和爆破条件因素有关的系数。

为便于进行振动数据拟合,对式(1)中各参数进行参数等效替代。令振动合速度 $Y=v$, 比例药

$$\text{量 } X = \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right), a=k, b=\alpha。$$

3.3 拟合结果分析

3.3.1 上台阶爆破数据拟合结果

基于表2中的数据,经过数据曲线回归分析,上台阶最大单响药量拟合曲线如图5所示。

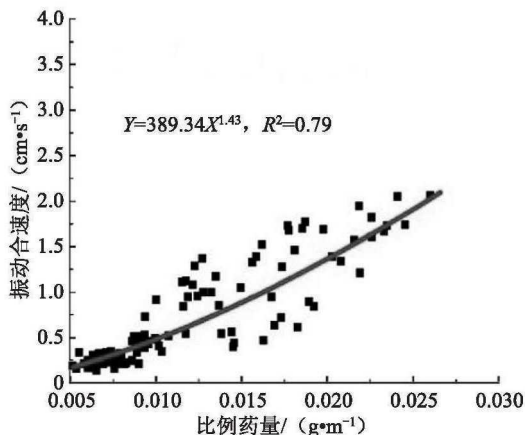


图5 上台阶最大单响药量拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of maximum single explosive quantity on the upper stop

拟合后的萨道夫斯基公式为:

$$v = 389.34 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.43} \quad (2)$$

其中,拟合的爆破回归特性曲线相关系数 $R^2=0.79$, $k=389.34$, 振动衰减系数 $\alpha=1.43$ 。

3.3.2 下台阶爆破数据拟合结果

基于表3中的数据,经过数据曲线回归分析,下台阶最大单响药量拟合曲线如图6所示。

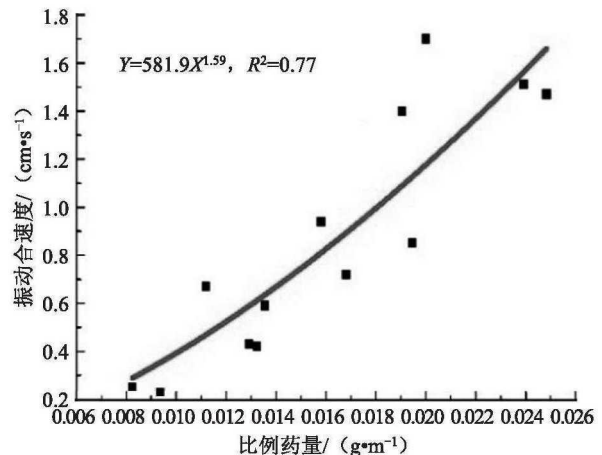


图6 下台阶最大单响药量拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of maximum single explosive quantity on the descending steps

拟合后的萨道夫斯基公式为:

$$v = 581.9 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.59} \quad (3)$$

其中,拟合的爆破回归特性曲线的相关系数 $R^2=0.77$, $k=581.9$, 振动衰减系数 $\alpha=1.59$ 。

由上、下台阶爆破拟合结果分析可知,特性规律拟合结果较好。根据曲线拟合公式和两隧道段位置关系可知,其水平净距在91~200 m内,所以仅计算离既有爆心距最小情况下新建羊台山隧道进口(DK428+373.43)处、既有线影响终点里程(DK428+900.71)处,以及二者的中心里程(DK428+637.07)处的隧道爆破在振速控制为2 cm/s 条件下,其对应的最大单响药量见表4。

在表4中,验证了前两次上台阶现场测试最大单响药量大于25.15 kg , 爆破振速均超警戒值,表明在进口至中心里程段需要优化爆破方案,减少隧道爆破开挖影响;下台阶现场最大单响药量小于34.26 kg ,表明现场下台阶爆破方案更符合施工要求。

表4 最小爆心距在振速控制为2cm/s下的最大单响药量
Table 4 Maximum single detonation velocity controlled at 2 cm/s

爆破位置	里程位置	最小爆心距/m	最大单响药量/kg
上台阶	进口	116.89	25.15
上台阶	中心	163.35	68.65
上台阶	影响终点	211.58	149.17
下台阶	进口	115.12	34.26
下台阶	中心	162.09	95.62
下台阶	影响终点	210.60	209.73

4 结论

1) 经统计监测振动数据可知，上、下台阶爆破时，引起既有线结构振动的最大振速方向出现在隧道竖向的频率高；对于单次上、下台阶开挖爆破循环时，上台阶开挖爆破比下台阶开挖爆破引起既有线结构振动响应的测点多。

2) 分析现场监测振动数据可知，随爆心距的增大，上、下台阶爆破的最大振速方向首先出现在沿隧道竖向，其次出现在隧道横向，最后出现在隧道纵向，且合速度随爆心距增大先减少而后增大，而随着爆源与测点的竖向距离增大，其最大振速方向变化规律与其相反。

3) 在进口至中心里程段需要优化爆破方案，减少隧道爆破开挖影响，而现场下台阶爆破方案更符合施工要求。

4) 通过收集现场监测振动数据，得出爆破振动传播规律及萨道夫斯基公式，作为本工程爆破设计依据，也为类似工程提供参考。

参考文献(References):

[1] 郑明新,夏一鸣,胡国平,等. 爆破振动对既有高铁隧道衬砌安全的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(3): 813-818. (ZHENG Ming-xin, XIA Yi-ming, HU Guo-ping, et al. Impact analysis of blasting vibration on the safety of existing high speed tunnel lining[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14 (3): 813-818.(in Chinese))

[2] 周林立, 许俊, 严赫. 爆破振动对既有隧道安全影响分

析[J]. 土工基础, 2019, 33(5): 550-554. (ZHOU Lin-li, XU Jun, YAN He. Impact of blasting induced vibration on the safety of an existing tunnel[J]. Soil Engineering and Foundation, 2019, 33(5): 550-554.(in Chinese))

[3] Duan B F, Gong W Z, Ta G S, et al. Influence of small, clear distance cross-tunnel blasting excavation on existing tunnel below[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 1-16.

[4] 刘唐利, 凌同华, 陈增辉, 等. 爆破振动对既有隧道影响的数值模拟分析[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(3): 79-84. (LIU Tang-li, LING Tong-hua, CHEN Zeng-hui, et al. Numerical analysis of the effect of blasting vibration on existing tunnels[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(3): 79-84.(in Chinese))

[5] 蔡路军, 朱方敏, 吴亮, 等. 上穿公路隧道爆破对下方供水隧洞的振动影响研究[J]. 公路工程, 2015, 40(3): 28-32. (CAI Lu-jun, ZHU Fang-min, WU Liang, et al. Influence of blasting vibration of lower water supply tunnel on the excavation of upper tunnel[J]. Highway Engineering, 2015, 40(3): 28-32.(in Chinese))

[6] Zhao H B, Long Y, Li X H, et al. Experimental and numerical investigation of the effect of blast-induced vibration from adjacent tunnel on existing tunnel[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20(1): 431-439.

[7] 钟冬望, 吴亮, 余刚. 邻近隧道掘进爆破对既有隧道的影响[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(5): 456-462. (ZHONG Dong-wang, WU Liang, YU Gang. Effect of tunneling blasting on an existing adjacent tunnel[J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(5): 456-462.(in Chinese))

[8] 李育枢. 山岭隧道地震动力响应及减震措施研究: 以国道318线黄草坪隧道为例[D]. 上海: 同济大学, 2006. (LI Yu-shu. Study on earthquake responses and vibration-absorption measures for mountain tunnel: A case study of huangcaoping tunnel on No. 318 national highway[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese))

[9] 汪旭光, 郑炳旭, 张正忠, 等. 爆破安全规程: GB 6722—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. ((WANG Xu-guang, ZHENG Bing-xu, ZHANG Zheng-zhong, et al. Safety regulations for blasting: GB 6722—2014. [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese))