

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.05.010

# 台阶法隧道掘进爆破时地表及邻近隧道的振动响应\*

王肖辉 杜 镀 韩 超

河南建筑职业技术学院(河南郑州,450064)

[摘 要] 在隧道掘进爆破设计时,基于最小二乘法,得到了台阶法爆破施工时地表振速的萨道夫斯基公式,并结合数值分析软件 ANSYS/LS-DYNA 模拟了爆破振动对邻近隧道的影响。结果表明:地表振动速度随比例距离的增加呈指数形式衰减,上台阶爆破时的  $K$  值比下台阶爆破时大,而  $\alpha$  值基本不变;邻近既有隧道迎爆侧各测点沿  $X$  方向(炮孔径向)振速峰值最大,背爆侧各测点振速峰值最大时的方向是变化的;背爆侧振速峰值远小于迎爆侧,且迎爆侧拱帮位置振速峰值最高,应作为重点支护对象。

[关键词] 爆破振动;萨道夫斯基公式;地表;邻近隧道;ANSYS/LS-DYNA

[分类号] TD235

## Vibration Response of Ground and Adjacent Tunnel under Bench Blasting for Tunnel Excavation

WANG Xiaohui, DU Du, HAN Chao

He'nan Vocational and Technical College of Architecture (He'nan Zhengzhou, 450064)

[ABSTRACT] In the design of tunnel excavation blasting, based on the least square method, the Sadovsky Formula of surface vibration velocity caused by bench blasting construction was obtained. Meanwhile the influence of blasting vibration on adjacent tunnels was simulated with the numerical analysis software ANSYS/LS-DYNA. The results show that the surface vibration velocity decays exponentially with the proportional distance.  $K$  value obtained by upper bench blasting is larger than that in lower bench blasting, and the attenuation coefficient  $\alpha$  value is basically not varied. The peak velocity of each measuring point on the front blasting side of the adjacent existing tunnel is the maximum along the  $X$  direction (radial direction of blasthole), and the direction of the peak velocity of each measuring point on the back blasting side is changing when it is the maximum. The peak value of vibration velocity at the back blasting side is far less than that at the front blasting side, and the peak value of velocity at the side wall of the front blasting side is the highest. It should be the key support object.

[KEYWORDS] blasting vibration; Sadovsky Formula; ground; adjacent tunnel; ANSYS/LS-DYNA

## 引言

工程爆破中,爆破振动对周围环境产生的危害不容忽视。较高的爆破振动强度极有可能引起地表建(构)筑物的损伤、破坏。地下隧道爆破掘进时,对已开挖邻近隧道也有一定的影响。为减小爆破振动的危害,工程现场大多对爆破振动引起的介质质点振速进行监测,分析其对爆源周边环境的影响<sup>[1-3]</sup>。

目前,很多学者都采用萨道夫斯基(萨氏)公式

对监测获得的爆源周边介质振速进行拟合,以分析爆破振动波的传播衰减规律,并反馈指导施工。张继春等<sup>[4-5]</sup>基于萨氏公式对现场实测数据拟合,发现未开挖区地表测得的振动强度要高于已开挖区。樊浩博等<sup>[6]</sup>使用数值模拟软件,结合工程实测数据,分析了隧道爆破施工引起的地表振速峰值。李胜林等<sup>[7]</sup>分析浅埋地铁隧道施工引起的地表振动,发现掏槽孔爆破时振速最大。基于最小二乘法,冯志楼等<sup>[8]</sup>分析并预测了露天矿深孔爆破产生的振动效应,预测值与监测值具有较好的一致性。汪平等<sup>[9]</sup>采用HHT方法研究了爆破振动对邻近既有隧道的

\* 收稿日期:2020-01-02

第一作者:王肖辉(1992-),男,硕士,助教,主要从事土木工程相关的教学工作。E-mail:wxh12271913@163.com

道的影响,结论和文献[7]一致。李新平等<sup>[10]</sup>研究了地下洞室边墙爆破振动传播衰减规律,发现在爆源近区和边墙中心区域,地下洞室爆破引起的边墙质点振速峰值传播衰减具有更大的放大效应。刘赶平<sup>[11]</sup>结合现场监测数据与数值分析软件 ANSYS/LS-DYNA,分析了主洞爆破开挖对邻近斜井支洞围岩中的爆破振速的影响,基于最小二乘法,建立了主洞及斜井两侧围岩中最大质点振速处的爆破振速预测模型。费鸿禄等<sup>[12]</sup>通过现场监测和数值模拟研究了隧道爆破施工中岩体和地表的振动传播规律,数值模拟与实测数据较吻合。

通过现场隧道爆破振动监测,使用最小二乘法获得台阶法爆破施工引起的地表振速的萨氏公式,并结合数值分析软件 ANSYS/LS-DYNA 模拟了隧道爆破施工引起的邻近隧道的振动效应,为类似地质条件下的隧道爆破施工提供指导。

## 1 工程概况

隧道位于北京城区西部平原。现场爆破掘进时,炮孔 $\varnothing 42$  mm,药卷 $\varnothing 32$  mm,装药长度 1.2 ~ 2.0 m,采用 2# 岩石乳化炸药,隧道断面采用上、下台阶法爆破开挖,具体爆破参数见表 1 和表 2。

沿线周围有已开挖隧道,两隧道平行,中心线的最小距离约为 12 m。基于最小二乘法和数值分析研究爆破振动对地表及邻近既有隧道的影响。

## 2 地表振速采集及回归分析

### 2.1 监测仪器与测点布置

爆破测振仪型号为 TC-4850。为获取隧道爆破

表 1 上台阶法爆破参数

Tab. 1 Blasting parameters of upper bench method

炮孔	炮孔数	孔深/m	段号	单孔装药/kg	单段装药/kg
掏槽孔	6	1.6	1	0.7	4.2
掏槽孔	4	1.4	3	0.7	2.8
掏槽孔	9	1.2	5	0.4	3.6
辅助孔	11	1.2	7	0.4	4.4
周边孔	10	1.2	9	0.3	3.0
周边孔	10	1.2	11	0.3	3.0
底板孔	5	1.2	13	0.4	2.0
底板孔	5	1.2	15	0.4	2.0

表 2 下台阶法爆破参数

Tab. 2 Blasting parameters of lower bench method

炮孔	炮孔数	孔深/m	段号	单孔装药/kg	单段装药/kg
掏槽孔	5	1.2	1	0.5	2.5
掏槽孔	3	1.2	3	0.5	1.5
掏槽孔	4	1.2	5	0.7	2.8
辅助孔	3	1.2	7	0.4	1.2
周边孔	4	1.2	9	0.4	1.6
周边孔	4	1.2	11	0.4	1.6
周边孔	5	1.2	13	0.6	3.0
周边孔	5	1.2	15	0.6	3.0

引起的地面质点振速,测点布置方式(俯视图)如图 1 所示。横向测点和纵向测点分别沿平行掌子面和垂直掌子面方向布置,测点 1# 位于掌子面正上方,其余测点依次向后布置,各测点实际间距根据现场环境确定。

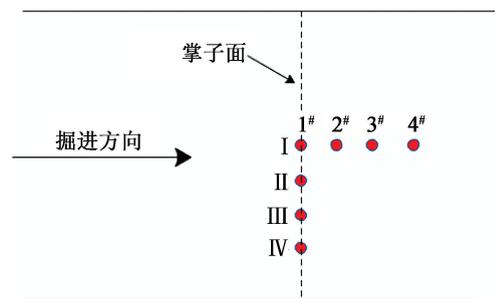


图 1 测点布置图

Fig. 1 Layout of measuring points

### 2.2 数据处理与分析

由于爆炸应力波传播的复杂性及岩体介质的非均匀性,理论推导地表介质的振速几乎不可能。目前,国内外普遍认可并使用的经验公式,即萨氏公式

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

式中: $v$  是质点振速峰值, cm/s;  $Q$  是单段最大药量, kg;  $R$  是测点到爆源的距离, m;  $K$ 、 $\alpha$  是与爆破参数及地形、地貌相关的参数。

对式(1)两侧同时取以  $e$  为底的对数,得到

$$\ln v = \ln K + \alpha \left( \frac{1}{3} \ln Q - \ln R \right) \quad (2)$$

令式(2)中  $Y = \ln v$ 、 $X = (\ln Q - 3 \ln R)/3$ 、 $a = \ln K$ 、 $b = \alpha$ , 可得到

$$Y = a + bX \quad (3)$$

将现场测试数据带入式(3),即可得到  $a$  值与  $b$  值,进而换算成萨氏公式中相应的  $K$  与  $\alpha$ 。

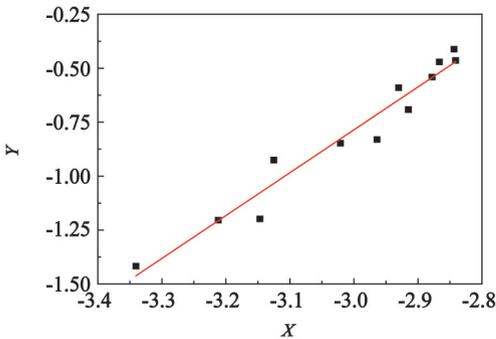
上台阶法爆破振速峰值的萨氏公式为

$$v = 238.0 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.08} \quad (4)$$

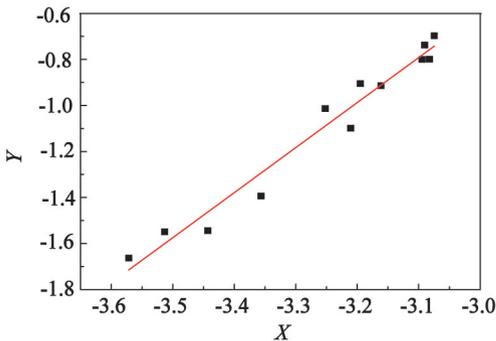
下台阶法爆破振速峰值的萨氏公式为

$$v = 196.6 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.01} \quad (5)$$

由于测振仪水平放置于地表,爆炸振动波引起垂直地表的振速最大。回归分析时,取此方向振速峰值进行统计,分别对上台阶法及下台阶法爆破时多日、多次监测获得的地表振速汇总处理。使用作图软件 Origin 对数据进行拟合,得到上、下台阶法爆破时的回归曲线,如图 2 所示。



(a) 上台阶法爆破



(b) 下台阶法爆破

图 2 萨氏公式拟合

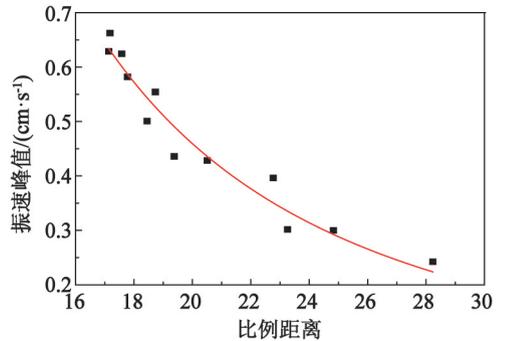
Fig. 2 Fitting of Sadovsky formula

从图 2 可以看出,上、下台阶法爆破时的回归曲线的线性关系很好。但对比发现,上、下台阶法爆破时回归得到的萨氏公式中  $K$  值存在一定差异,而  $\alpha$  值基本不变。上台阶法爆破时只有一个自由面,此时爆破受到的岩石夹制作用较大,更多的爆破能向岩石内部传递,加大了爆破振动强度,相应的  $K$  值增大;而下台阶法爆破时自由面为两个,炮孔所受限制变弱,爆破引起的振动强度随之减弱, $K$  值变小。而在具体的工程中,周边地质状况相对稳定,与地形、地貌相关的衰减系数  $\alpha$  值基本不变。

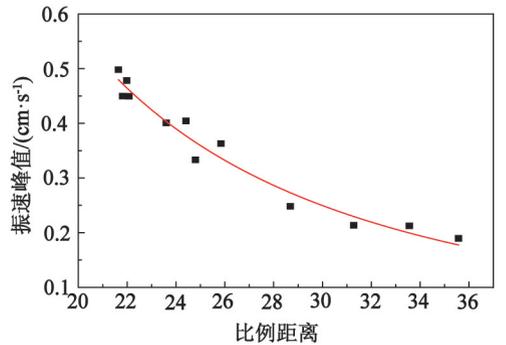
基于回归得到的爆破现场的萨氏公式,按规范安全标准允许的最大振速  $v_m$ ,可以反算出允许最大单段药量  $Q_{max} = R^3 (v_m/K)^{3/\alpha}$ ,为类似地质条件下爆

破施工提供指导。

为便于直观分析地表测点振速与药量和距离的关系,将萨氏公式中的  $R/\sqrt[3]{Q}$  定义为比例距离  $R'$ ,振速峰值与比例距离的关系如图 3 所示。



(a) 上台阶法爆破



(b) 下台阶法爆破

图 3 振动速度峰值的衰减规律

Fig. 3 Attenuation law of peak velocity of blasting vibration

通过引入比例距离  $R'$ ,图 3 可以直观看出,爆破时地表质点振速峰值随比例距离的增加呈指数衰减。比例距离在一定范围内时,振速峰值的衰减幅较快,之后幅度减缓,这种指数衰减规律在爆破振动控制中可以考虑作为重要的参考依据。

### 3 爆破振动对邻近隧道的影响

新建隧道爆破掘进施工对邻近既有隧道有一定影响。为防止造成损伤、破坏,通过数值模拟能够很好地预测爆破方案对邻近隧道的振动效应,并有助于优化爆破参数、改进爆破方案。

#### 3.1 模型建立

实际爆破施工中,掏槽孔引起的爆破振动能量最大<sup>[7,9]</sup>。因此,为简化模型,只设置一个炮孔,即第一段位的掏槽孔爆破,并监测邻近隧道周边质点的振速。

模型长 25 m、宽 6 m、高 16 m。炮孔尺寸及装

药和工程概况一致。临近隧道直径7 m,距离掏槽孔12 m。为了消除边界应力波反射的影响,模型外边界设置了无反射边界条件。采用实体单元对岩石与炸药进行欧拉网格划分。图4为模型网格划分。

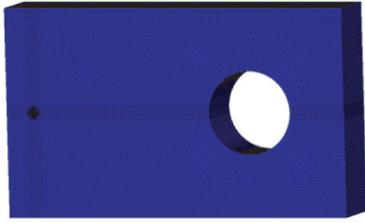


图4 隧道网格划分

Fig.4 Tunnel grid division

基于实际工程地质情况,岩石本构关系采用随动硬化模型,使用关键字 \* Mat\_Plastic\_Kinematic 定义,具体参数见表3。

表3 岩石力学参数

Tab.3 Mechanical parameters of rock

密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/GPa	泊松 比	屈服应 力/MPa	切线模 量/MPa	$C$	$P$
2 600	50	0.26	78	160	2.5	4

炸药使用软件自带本构模型,关键字为 \* Mat\_High\_Explosive\_Burn,使用JWL状态方程模拟炸药爆炸时气体膨胀做功过程。具体参数值见表4。

表4 炸药相关参数

Tab.4 Relevant parameters of explosives

密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	爆速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$p_{\text{CJ}}$ / GPa	$A$ / GPa	$B$ / GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$
1 200	4 200	5.06	214	182	4.2	0.9	0.15

### 3.2 数值模拟结果分析

为分析爆破振动对邻近隧道不同位置的影响,分别提取已开挖隧道8个测点的振速,如图5所示。其中, $S_2, S_3, S_4$ 为迎爆侧的拱肩、拱帮和拱腰; $S_6, S_7, S_8$ 为背爆侧的拱腰、拱帮和拱肩; $S_1$ 和 $S_5$ 分别为拱顶和拱底。采用后处理软件LS-PrePost,提取

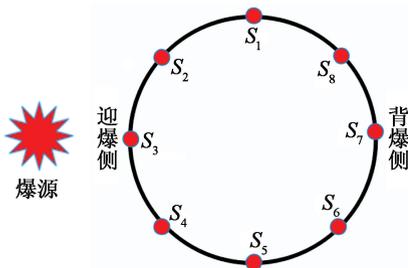


图5 已开挖隧道测点位置

Fig.5 Location of survey points of excavated tunnel

图5中8个测点的各方向质点振速峰值,见图6。

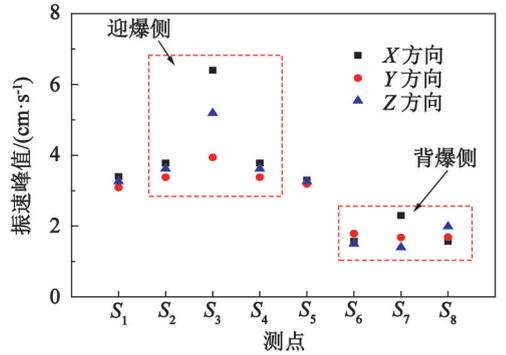


图6 各测点的振速峰值对比

Fig.6 Comparison of peak vibration velocity of each measuring point in different parts of excavated tunnel

#### 3.2.1 迎爆侧与被爆侧质点振速对比分析

图6可以看出,迎爆侧各测点振速峰值相对较大,测点 $S_2, S_3, S_4$ 均大于 $3.00 \text{ cm/s}$ ;帮部位置作为应力集中点,受到爆炸应力波的作用,振速峰值甚至达到了 $6.44 \text{ cm/s}$ 。而背爆侧质点振速峰值远小于迎爆侧,各测点振速峰值基本在 $2.00 \text{ cm/s}$ 。分析原因:已开挖隧道形成临空面,阻碍了爆炸应力波向背爆侧传播,爆炸应力波只能通过已开挖隧道上、下侧面绕射作用于背爆侧,背爆侧质点振速急剧降低。因此实际施工中,迎爆侧尤其是帮部位置应作为重点支护对象。

#### 3.2.2 质点各方向振速对比分析

图6可以看出,对于迎爆侧,3个测点各方向质点振速峰值具有较好的一致性;X方向质点振速峰值最大,其次是Z方向、Y方向,测点 $S_3$ 的这种趋势尤为明显。由于两隧道掌子面平行,爆炸应力波沿径向(X方向)垂直入射作用于迎爆侧各测点,导致X方向振速峰值较高,而测点 $S_3$ 距离爆源更近,本身又位于应力集中点,其峰值上升更明显。测点 $S_1$ 处于迎爆侧与背爆侧的临界点,3个方向的振速峰值均较大,差值并不明显。因此对于迎爆侧,在实际工程中,可以把X方向的监测值作为振速峰值。而对于背爆侧,各测点振速峰值出现的方向并不固定;对于X方向,振速峰值最大的测点为 $S_7$ ;Y方向振速峰值最大的测点为 $S_6$ ;Z方向振速峰值最大的测点为 $S_8$ ;但可以看出,背爆侧各方向质点振速峰值差异并不大。

## 4 结论

通过对台阶法隧道掘进爆破时地表监测数据分

析及邻近隧道振动响应数值模拟,得出结论如下:

1) 利用最小二乘法对地表监测数据进行了拟合,获得了台阶法爆破时地表振速的萨氏公式,结合规范安全标准允许振速,可以反推单段最大允许药量,为类似地质下爆破施工方案的制定及振动控制提供了依据。

2) 上台阶法爆破时,岩石夹制作用大,因而振动强度较大, $K$  值较大;下台阶法爆破时,炮孔所受限制变弱,爆破引起的振动强度随之减弱, $K$  值变小。与地形、地貌相关的衰减系数  $\alpha$  基本不变。

3) 邻近既有隧道对爆炸振动波的阻隔导致背爆侧的振速峰值大幅度减小,迎爆侧帮部位置振速最大。迎爆侧各测点  $X$  方向振速峰值最大,其次是  $Z$  方向、 $Y$  方向;背爆侧各测点振速峰值最大时的方向不定,拱顶和拱底 3 个方向振速峰值差异较小。

4) 在对既有隧道进行爆破振动监测时,测点埋设最合理的位置是迎爆侧拱帮位置,出于对既有隧道的保护,重点控制  $X$  方向的振速。

### 参 考 文 献

- [1] 闫常陆,王峰. 基于萨道夫斯基公式拟合的爆破振动规律研究[J]. 现代矿业,2018(6):109-111.  
YAN C L, WANG F. Study on blasting vibration regularity based on Sadov's formula fitting method[J]. Modern Mining, 2018(6): 109-111.
- [2] 费鸿禄,王振达,蒋安俊,等. 地铁隧道爆破振动对地面的影响规律研究[J]. 爆破,2018,35(3):68-73.  
FEI H L, WANG Z D, JIANG A J, et al. Study on influence of blasting vibration on ground of metro tunnel [J]. Blasting, 2018, 35(3): 68-73.
- [3] 宋瑞城. 隧道开挖爆破振动对地表建筑物影响的研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017.  
SONG R C. The Research of the tunnel excavation blasting vibration impact on the surface buildings[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2017.
- [4] 张继春. 三峡工程基岩爆破振动特性的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(2): 131-137.  
ZHANG J C. Vibration characteristics of blasting in bed rock mass at Sanxia Project [J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(2): 131-137.
- [5] 杨勇,白云龙,王鹏飞. 新柳林河隧道爆破振动监测及分析[J]. 矿业研究与开发, 2014, 34(2): 115-118.  
YANG Y, BAI Y L, WANG P F. Monitoring and analysis on blasting vibration of New Liulinhe Tunnel [J]. Mining Research and Development, 2014, 34(2): 115-118.
- [6] 樊浩博,邱军领,谢永利,等. 下穿村庄隧道爆破振动对地表建筑的影响[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2016, 17(3): 209-214.  
FAN H B, QIU J L, XIE Y L, et al. Blast-induced ground vibration from tunnel undercrossing a village [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 17(3): 209-214.
- [7] 李胜林,方真刚,杨瑞,等. 浅埋地铁隧道爆破施工引起的地表振动规律分析[J]. 爆破, 2019, 36(2): 111-116, 130.  
LI S L, FANG Z G, YANG R, et al. Analysis of ground vibration caused by blasting construction of shallow buried tunnel [J]. Blasting, 2019, 36(2): 111-116, 130.
- [8] 冯志楼,张云鹏,刘永亮. 某露天矿深孔爆破振动效应预测分析[J]. 华北理工大学学报(自然科学版), 2019, 41(4): 13-18.  
FENG Z L, ZHANG Y P, LIU Y L. Prediction and analysis of vibration effect of deep hole blasting in an open-pit mine [J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 41(4): 13-18.
- [9] 汪平,孟海利. 基于 HHT 方法对紧邻既有隧道爆破振动信号的分析[J]. 工程爆破, 2018, 24(6): 70-74.  
WANG P, MENG H L. Analysis of adjacent existing tunnel blasting vibration signal based on HHT method [J]. Engineering Blasting, 2018, 24(6): 70-74.
- [10] 李新平,边兴,罗忆,等. 地下洞室边墙爆破振动传播衰减规律研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 1-7.  
LI X P, BIAN X, LUO Y, et al. Study on attenuation law of blasting vibration propagation of side wall of underground cavern [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 1-7.
- [11] 刘赶平. 大断面隧道爆破振动速度预测[J]. 爆破, 2019, 36(3): 129-136.  
LIU G P. Prediction of blasting vibration velocity for large-section tunnel blasting [J]. Blasting, 2019, 36(3): 129-136.
- [12] 费鸿禄,国志雨,杨智广,等. 隧道掘进爆破振动在地表及上部岩体传播特征[J]. 爆破器材, 2016, 45(4): 54-60.  
FEI H L, GUO Z Y, YANG Z G, et al. Propagation characteristics of tunnel excavation blasting vibration on surface and in upper rock mass [J]. Explosive Materials, 2016, 45(4): 54-60.