

邓祥辉,王靖媛,杨俊,等.地铁隧道爆破施工影响的邻近居民楼质点峰值振速研究[J].地震工程学报,2022,44(1):17-21.DOI:10.20000/j.1000-0844.20200617002

DENG Xianghui, WANG Jingyuan, YANG Jun, et al. Peak particle velocity of adjacent residential buildings influenced by blasting construction of subway tunnel[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(1): 17-21. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20200617002

地铁隧道爆破施工影响的邻近居民楼 质点峰值振速研究

邓祥辉¹, 王靖媛¹, 杨俊², 王睿¹, 丁潇¹

(1. 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710021;

2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710021)

摘要: 地铁隧道爆破施工时严重威胁邻近居民楼的结构安全,因此研究邻近居民楼爆破峰值振速是非常必要的。文章基于群孔荷载简化模型、柱面波理论及传统的应力波衰减理论,在考虑高程效应影响下推导质点峰值振速公式。依托乌鲁木齐地铁一号线工程,对一邻近六层居民楼的爆破施工响应进行监测,并将实测质点峰值振速、提出的修正公式预测振速和传统萨道夫公式预测的振速进行对比分析。研究结果表明:采用修正公式预测的质点峰值振速与现场实测值的分布规律一致,呈现出随着高程增大而逐渐增大的趋势;而且现场实测值与修正公式预测值相对误差较小,表明考虑高程因子的修正公式是可行的。

关键词: 地铁隧道; 爆破振动; 邻近居民楼; 质点峰值振速; 修正公式

中图分类号: U45

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2022)01-0017-06

DOI:10.20000/j.1000-0844.20200617002

Peak particle velocity of adjacent residential buildings influenced by blasting construction of subway tunnel

DENG Xianghui¹, WANG Jingyuan¹, YANG Jun², WANG Rui¹, DING Xiao¹

(1. School of Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;

2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710021, Shaanxi, China)

Abstract: The blasting construction of subway tunnel seriously endangers the structural safety of adjacent residential buildings. Therefore, it is necessary to propose blasting control measures based on the peak blasting vibration velocity. Based on the simplified model of multi-hole load, the cylindrical wave theory, and the traditional stress wave attenuation theory, the formula of peak particle velocity considering the effect of elevation was derived in this paper. The blasting construction response of an adjacent six-story residential building to the Metro Line 1 in Urumqi City

收稿日期:2020-06-17

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2017JM5136);西安市科技局高校人才服务企业项目(2019217214GXRC008CG009-GXYD8.2);陕西省教育厅专项科研计划项目((19JK0399)

第一作者简介:邓祥辉(1976-),男,教授,从事隧道与地下工程的研究。E-mail:xianghuideng@xatu.edu.cn。

通信作者:王靖媛(1996-),女,硕士,从事隧道与地下工程的研究。E-mail:15615557600@163.com。

was monitored, and the measured peak particle velocity was compared with the vibration velocity predicted by the modified formula and the traditional Sadov's formula. The results show that the distribution of peak particle velocity predicted by the modified formula is inconsistent with the measured value, showing a trend of gradually increasing with the elevation. Moreover, the relative error between the measured value and the predicted value is small, indicating that the modified formula considering the elevation factor is feasible.

Keywords: subway tunnel; blasting vibration; adjacent residential buildings; peak particle velocity; modified formula

0 引言

目前随着我国经济快速发展,城市化进度加快,很多城市交通需求剧增,推动了城市地下轨道交通建设的迅猛发展。而在重庆、乌鲁木齐等城市大多是岩质地层,常采用钻爆法进行地铁隧道施工。在爆破开挖中,炸药爆炸后产生的一部分能量以应力波的形式向外传播,这会使结构发生振动,容易损伤,甚至破坏邻近建筑物结构^[1-3]。为避免爆破振动对邻近建(构)筑物造成较大的危害,施工中常采用控制爆破振动技术,并以质点峰值振速作为判断依据^[4-5]。然而,在实际工程中,施工环境、地形、地质条件复杂,导致很难较准确预测质点峰值振速,因此有必要深入研究地铁隧道爆破对邻近建筑物的影响^[6-7]。

在爆破施工的研究中,目前常采用理论推导与数值模拟的方法对邻近建筑物的质点峰值振速进行预测^[8]。李君君等^[9]通过建立有限元模型分析了新建隧道爆破施工对邻近运营隧道的振动速度分布规律,通过对比数值模拟与现场实测结果,得到新建隧道合理的爆破参数及控制药量值。吴亮等^[10]以弹性力学为基础,结合结构力学的知识建立了一个爆破振动力学模型,通过模型计算出了在爆破中所能使用的最大单响药量。Sadeghi 等^[11]通过对三条新建地铁线的全面试验研究测得轨道和土壤特性以及地面传播振动,所得结果与 FTA 模型预测比较,对 FTA 模型进行了优化,从而提高了地铁系统中 FTA 模型预测地面传播振动的可靠性。张忆等^[12]以高层框架结构为研究对象,基于动力有限元法对隧道在不同开挖方式下的爆破振动垂直振速进行了研究,现场测试结果表明,实测数据与有限元分析结果较为一致,证明了该方法的可行性。邹新宽等^[13]采用现场实测数据结合有限元分析的方法探究了隧道明挖段拉槽爆破引发邻近隧道结构的振动响应规律,通过控制单孔装药量能够减少水平浅孔拉槽爆

破对邻近结构的振动影响,并基于萨道夫公式对监测数据拟合回归,进一步优化了质点峰值振速中单孔爆破装药量的计算方法。温智捷等^[14]对盾构隧道孤石预爆破中爆破峰值振动速率的影响因素进行了研究,结合各种影响因素的影响比重,对峰值振速衰减公式进行了优化。通过上述文献研究可以发现,虽然目前有许多学者考虑了一些因素对多孔爆破下的峰值振速和爆破影响进行了研究,但对于居民楼、商住楼,在爆破振动传播过程中质点振速是否受高程影响以及程度如何缺乏理论分析和现场研究。因此本文拟考虑高程效应对质点峰值振速的影响,通过理论分析和现场测试进行定量研究。

1 考虑高程因子的振速修正公式

1.1 多炮孔等效半径的确定方法

多孔多段的起爆方式是目前隧道施工中常用的爆破方法,并通过传统公式及爆破漏斗理论来描述装药量、爆破距离及质点峰值振速之间的数值规律,用系数表征爆破参数(炮眼布设、起爆方法、装药形式)及地质条件。

在多孔起爆时,质点峰值振速的公式为^[15]:

$$v = k'kv_0(r_b/R)^\alpha \quad (1)$$

式中: k 为与地形地质相关的系数; k' 为群孔起爆下的修正系数; v_0 为炮孔壁上的质点峰值振速; r_b 为炮孔半径; R 为爆心距; α 为应力衰减指数。

式(1)能够反映爆破参数对质点峰值的影响,但对多孔多段的叠加效应未能考虑。此时采用单炮孔半径计算峰值振速不合理。考虑工程实际无法将多孔多段爆破逐个叠加进行计算,故而运用群孔荷载简化模型来确定等效荷载以及多孔影响系数的取值。

群孔荷载简化模型将爆破后的岩体根据破坏程度划分为粉碎区和破碎区,这两个区域都被视为在爆源范围之内,整个等效弹性边界内的部分被视为爆心,等效爆破荷载将作用于这个边界之上,这样就实现了多孔爆破与单孔爆破的爆破荷载等效计

算^[16]。通过等代圆法将等效弹性区范围内所包围岩体近似看为圆形,岩体的质心作为圆心,掏槽眼的等效弹性边界半径为 r_e ,等效后的质点峰值振速公式为:

$$v=k'kv_0\left(r_e/R\right)^{\alpha}$$

(2)

1.2 修正的爆破质点峰值振速预测公式

国外学者研究了集中装药的爆破地震效应,对爆破后产生的振动规律进行大量的分析得出以下结论:在岩石爆破中质点峰值速度的大小对建筑物结构的振动破坏程度具有很大影响,并根据影响因素提出了经验公式。在传统经验公式中,爆心距和单响最大药量被认为对质点峰值振速影响很大,因此建议质点峰值振速公式为:

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

(3)

式中: Q 为起爆药量。但是工程师通过对很多工程的监测分析发现,距爆源一定的范围内建筑物振动速度随埋深下降,高程放大效应逐渐增强^[17]。因此本文将考虑高程 H 对质点峰值振速的影响。具体思路是:基于群孔荷载简化模型,在考虑物理参数和高程影响下修正传统的质点峰值振速公式。同时,考虑柱面波理论、球面波理论及短柱状药包激发的应力波场 Heelan 解,对多孔炸药爆破时质点峰值振速公式作进一步修正,公式为:

$$v=kv_0\left(r_e/R\right)^{\alpha}\times\sigma^{\beta}$$

(4)

式中: σ 为爆心距与高程的比值, $\sigma=(H/R)$ 对高程作了标量化处理; β 为和高程相关的系数,取 0.25 ~ 0.28,正高差时取正,负高差时取负,且硬岩中取大,软岩中取小。

2 工程概况

地铁隧道爆破掘进中,由于近距离施工,爆破振动严重威胁邻近居民楼的安全。本文依托乌鲁木齐地铁一号线工程,对一邻近六层居民楼的爆破施工响应进行了监测。隧址区从上到下地层分布为杂填土层、粉质黏土层、泥岩层、砂岩层,地铁隧道穿越全风化-中风化砂岩。隧道设计开挖方法为浅埋暗挖,施工工法采用二台阶法开挖。在本标段中,采用矿山法进行爆破施工。

3 现场实测与分析

3.1 现场监测方案

爆破振动监测段位于乌鲁木齐一号线北门街站

至新兴街站区间线上,监测对象为药材公司六层居民楼。居民楼所处桩号范围为:ZDK5+335~ZDK5+405 处,居民楼与地铁中心水平距离为 15 m,相对位置如图 1 所示。在被监测的六层居民楼上,每一层将振动传感器沿 X 水平径向、 Y 水平切向、 Z 垂直于隧道掘进方向布置,实测出六层建筑物不同高程的振动响应信号。



图 1 隧道与居民楼相对位置关系

Fig.1 Relative position between the tunnel and buildings

爆破振动监测采用 TC-4850 型爆破测振仪记录现场实测数据,触发电平值、振动周期以及延时分别设为 0.01 cm/s、2 s 以及 -100 ms。通过在居民楼内布置测点,可以得到爆破施工对居民楼的影响以及爆破地震波的传播规律,监测点设置在被测六层居民楼靠近施工方向一侧,各个楼层内均布设两个测点。布设如图 2 所示。

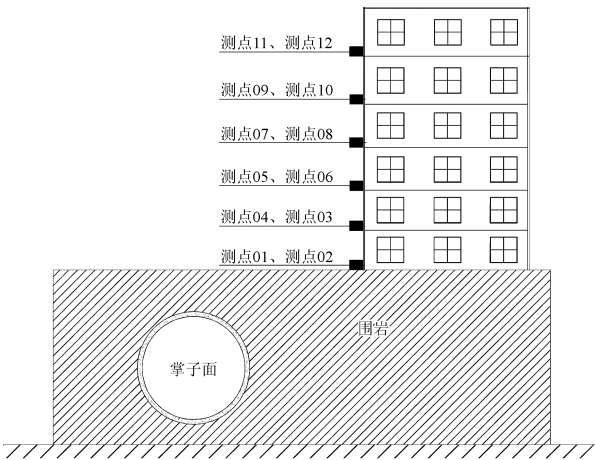


图 2 监测点布置

Fig.2 Layout of monitoring points

3.2 预测公式与传统公式的拟合

为了确定质点峰值振速预测公式中与地形地质相关的系数 k 和应力衰减系数 α ,利用现场爆破左线断面 ZDK5+335 处的首次监测数据及已知测点

的药量 Q 、爆心距 R 如表 1 所列进行回归分析,从而应用该公式对类似条件下居民楼进行振速预测计算。同时,为了对比修正公式与传统公式差异,考虑高程影响的必要性,先对传统公式进行回归分析,再对修正公式回归分析。

表 1 左线断面 ZDK5+335 监测数据

Table 1 Monitoring data of the left-line section ZDK5+335						
测点	单段最大装药量/kg	段位	爆心距/m	质点峰值振速/(cm·s ⁻¹)		
				X	Y	Z
1	0.45	9	24.32	0.27	0.38	0.55
2			24.92	0.27	0.38	0.54
3			27.24	0.28	0.39	0.57
4	0.30	7	27.77	0.28	0.38	0.57
5			30.26	0.30	0.40	0.58
6			30.83	0.30	0.41	0.58
7	0.30	5	33.44	0.32	0.42	0.58
8			33.53	0.32	0.42	0.59
9			36.21	0.33	0.43	0.60
10	0.45	3	36.26	0.34	0.44	0.60
11			39.72	0.35	0.45	0.63
12			39.55	0.35	0.46	0.63

由于式(3)中 k 、 α 不存在线性相关性,现将公式两边取对数,转化为线性函数,便于回归分析。对传统公式进行取对数处理后,如下:

$$\lg v = \lg k + \alpha \lg(\sqrt[3]{Q}/R) \tag{5}$$

令 $y = \lg v, x = \lg(\sqrt[3]{Q}/R), b = \lg k$, 式(5)可转化为 $y = ax + b$ 的线性方程形式。下面结合表(2)实测数据,基于最小二乘法对线性方程中的系数进行回归计算:

表 3 修正公式拟合回归结果

Table 3 Fitting regression results of modified formula					
掘进方向	kv_0	α	β	决定系数	拟合公式
X 方向	0.125	0.006	0.036	$r^2=0.89$	$v=0.125 (r_e/R)^{0.006} \times \sigma^{0.036}$
Y 方向	0.212	0.007	0.079	$r^2=0.92$	$v=0.212 (r_e/R)^{0.007} \times \sigma^{0.079}$
Z 方向	0.441	0.003	0.059	$r^2=0.95$	$v=0.441 (r_e/R)^{0.003} \times \sigma^{0.059}$

3.3 对比分析

为了进一步验证本文提出的修正公式的可靠性和准确性,在后续的多个断面进行了关键点的质点峰值振速监测。从多个断面的监测结果看,各断面实测数据呈现出类似的规律。本文以第二次爆破左线断面 ZDK5+380 测点的现场监测结果作为比较依据。从测试数据看,各断面 Z 向质点峰值振速相对较大,是质点峰值振速传播的主要方向。根据上文提出的修正公式和应用的传统公式对建筑物影响最大的 Z 方向质点振速进行预测,并将实测值、本文提出的修正公式预测值与传统公式预测值进行对比。具体结果列于表 4。

$$a = \frac{\sum x_i y_i - n(\bar{x})(\bar{y})}{\sum x_i^2 - n(\bar{x})^2}, b = \bar{y} - a\bar{x}, K = 10^b \tag{6}$$

相关系数 r 可通过式(7)求得:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \tag{7}$$

经过上述拟合得到传统公式关于 X 水平径向、Y 水平切向、Z 垂直方向的振动速度特征参数 K 、 α 如表 2 所列。决定系数 r^2 始终大于 0.8,表明运用线性回归方法所得特征参数值符合实际要求。

同样,为预测考虑高程影响后的质点峰值振速,与上述传统公式处理方法类似,在拟合前对式(4)两边同时取对数得:

$$\lg v = \lg(kv_0) + \alpha \lg(r_e/R) + \beta \lg(H/R) \tag{8}$$

采用最小二乘法得到修正的峰值振速预测公式中的回归系数 kv_0 、 α 、 β ,结合爆破监测所得数据,将修正公式对 X 向、Y 向、Z 向的振速相关参数运用软件分别拟合,修正公式得到的决定系数 r^2 接近 1,线性相关性显著。所得回归结果列于表 3。

表 2 传统公式拟合回归结果

Table 2 Fitting regression results of traditional formula				
掘进方向	k	α	决定系数	拟合公式
X 方向	0.138	0.005	$r^2=0.87$	$v=0.138 (\sqrt[3]{Q}/R)^{0.005}$
Y 方向	0.241	0.005	$r^2=0.90$	$v=0.241 (\sqrt[3]{Q}/R)^{0.005}$
Z 方向	0.421	0.005	$r^2=0.93$	$v=0.421 (\sqrt[3]{Q}/R)^{0.005}$

从表 4 可知,运用传统萨道夫公式预测的振动速度值随高程增大而逐渐变小,而运用修正公式预测的质点峰值振速呈现出随着高程增大而逐渐增加的趋势,后者从规律上与现场监测结果基本一致,表现出高程变化对振动速度有显著影响作用。出现这种情况的主要原因是传统公式未考虑高程对质点峰值振速的影响。而在实际工程中,爆破应力波传播过程中受高程变化影响,而且随着高程增大,这个影响是被放大的,体现在质点峰值振速是不断增加的。这个规律与地震波的传递规律类似。

从相对误差来看,修正公式预测值与监测值相对误差最大为 13.52%,最小为 10.10%,平均相对误

差为 11.69%；传统公式预测值与监测值相对误差的最大为 30.71%，最小为 8.20%，平均相对误差为 20.05%。从相对误差数值大小看，修正公式预测值与现场监测值较为接近，相对误差在 10% 左右，较为准确。而传统公式值与监测值误差接近 20%，计算结果有较大偏差。因此，从效果看，本文提出的考虑高程影响的修正公式可以相对准确预测邻近居民楼的质点峰值振速，这对改善爆破施工的效果是非常有帮助的。

表 4 三种方法的质点峰值振速结果对比

Table 4 Comparison of peak particle velocity results of three methods

测点	Z 方向质点峰值振速/(cm·s ⁻¹)			相对误差/%	
	监测值	修正公式	传统公式	相对误差 1	相对误差 2
1	0.45	0.40	0.41	11.75	8.20
2	0.46	0.40	0.41	12.31	9.23
3	0.47	0.41	0.41	11.56	13.27
4	0.47	0.41	0.40	12.10	15.07
5	0.49	0.42	0.39	13.52	19.47
6	0.48	0.43	0.40	11.20	17.64
7	0.49	0.43	0.38	12.37	22.52
8	0.50	0.44	0.38	12.42	23.65
9	0.50	0.44	0.38	12.15	24.90
10	0.51	0.46	0.37	10.24	26.77
11	0.52	0.46	0.37	10.10	29.13
12	0.52	0.47	0.36	10.56	30.71

* 注:相对误差 1 和 2 分别指修正公式和传统公式计算结果与监测值的相对误差。

4 结论

- (1) 基于群孔荷载简化模型、柱面波理论及传统的应力波衰减理论，在考虑高程效应影响下提出了质点峰值振速预测公式。
- (2) 通过对比分析现场监测值、传统公式与修正公式预测值的分布规律，现场监测值与修正公式计算值基本一致，均呈现出随高程增大而逐渐增大的趋势。这主要是由于本文提出的修正公式能较好地反映爆破应力波传播过程中高程对振动速度的放大效应。
- (3) 从误差精度看，现场监测数据与采用修正公式计算的相对误差最小值为 10.10%，最大值为 13.52%，平均相对误差为 11.69%，说明修正公式能比较准确地预测质点峰值振速，满足工程要求。

参考文献(References)

[1] 王林台,高文学,张发财,等.爆破地震作用下建筑物振动响应研究[J].兵工学报,2018,39(增刊 1):121-134.

WANG Lintai,GAO Wenxue,ZHANG Facai, et al. Research on blasting vibration response of high-rise building based on model simplification [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39 (Suppl01):121-134.

[2] 张梦雅,龙祖根,唐志鹏,等.露天矿爆破震动对周边建筑物的影响研究[J].矿业研究与开发,2017,37(4):17-19.

ZHANG Mengya, LONG Zugen, TANG Zhipeng, et al. Influence of blasting vibration in open-pit mine on the surrounding buildings[J]. Mining Research and Development, 2017, 37(4): 17-19.

[3] 刘锦东,王许峰,张文波.复杂条件下隧道爆破施工技术方案研究[J].水利水电技术,2019,50(2):133-138.

LIU Jindong, WANG Xufeng, ZHANG Wenbo. Study on technical scheme of tunnel blasting construction under complicated condition[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(2): 133-138.

[4] 付晓强,雷振,刘幸,等.城市浅埋隧道下穿密集建筑群控制爆破技术[J].科学技术与工程,2019,19(2):223-227.

FU Xiaoqiang, LEI Zhen, LIU Xing, et al. Controlled blasting technology of shallow tunnels crossing underneath intensive existing buildings in urban area [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(2): 223-227.

[5] 周志强,易建政,王波,等.控制爆破技术研究现状及发展建议[J].四川冶金,2009,31(6):59-64.

ZHOU Zhiqiang, YI Jianzheng, WANG Bo, et al. Research situation and development suggestions of controlled blasting technology[J]. Sichuan Metallurgy, 2009, 31(6): 59-64.

[6] 石杰红.建构筑物周边爆破施工安全控制距离及分析方法研究[J].中国安全生产科学技术,2016,12(11):125-129.

SHI Jiehong. Study on safety control distance and its analysis method of blasting construction to the surrounding buildings [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(11): 125-129.

[7] 赵丰,薛亚东,李硕标,等.新建铁路隧道上跨既有公路隧道控制爆破安全距离研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(7):1365-1371.

ZHAO Feng, XUE Yadong, LI Shuobiao, et al. Analysis on control blasting safety distance of the new railway tunnel overpasses the established highway tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(7): 1365-1371.

[8] 谢先启.精细爆破发展现状及展望[J].中国工程科学,2014,16(11):14-19.

XIE Xianqi. Precision blasting, current status and its prospective[J]. Engineering Sciences, 2014, 16(11): 14-19.

[9] 李君君,石文广,吕学科,等.连拱隧道下穿既有建筑物爆破方案优化动力研究[J].公路工程,2015,40(6):165-169,177.

LI Junjun, SHI Wenguang, LÜ Xueke, et al. Dynamic study on scheme optimization of blasting for double-arch tunnel under-crossing existing building [J]. Highway Engineering, 2015, 40 (6): 165-169, 177.

[10] 吴亮,李凤,卢文波,等.爆破扰动下邻近层状围岩隧道的稳定性与振速阈值[J].爆炸与冲击,2017,37(2):208-214.