

文章编号: 1000-7598-(2005)06-0964-04

# 隧道开挖施工的爆破振动监测与控制技术

陈 庆<sup>1</sup>, 王宏图<sup>1,2</sup>, 胡国忠<sup>1</sup>, 李晓红<sup>1,2</sup>, 李开学<sup>1</sup>, 庞 成<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆大学 西南能矿资源开发利用与安全技术研究院, 重庆 400044)

**摘 要:** 以万松岭隧道工程开挖为研究对象, 对隧道工程开挖施工爆破地震波的振动监测方法及控制技术进行了研究。通过对爆破振动监测结果的回归分析, 建立了隧道工程开挖爆破振动传播的数学模型; 确立了其传播衰减规律。结合工程实际, 提出了修正后的爆破地震波衰减经验数学公式; 经对比分析, 所得爆破地震波衰减规律公式预测的质点振动速度具有较高的精度。同时, 结合该隧道工程开挖爆破施工, 从选择合理爆破时差、最大装药量、微差起爆、掘进进尺、预裂爆破等5个方面提出了爆破振动控制技术措施使该隧道开挖施工爆破中的地面振动速度值控制在安全范围以内, 从而确保了施工段地面建筑群的安全和该隧道工程开挖爆破作业的安全。其研究对指导隧道工程开挖爆破施工和保证地面建筑物安全起到了重要作用。

**关 键 词:** 隧道开挖; 爆破振动; 衰减规律; 控制技术

**中图分类号:** TU 457; O 382.2

**文献标识码:** A

## Monitoring and controlling technology for blasting vibration induced by tunnel excavation

CHEN Qing<sup>1</sup>, WANG Hong-tu<sup>1,2</sup>, HU Guo-zhong<sup>1</sup>, LI Xiao-hong<sup>1,2</sup>, LI Kai-xue<sup>1</sup>, PANG Cheng<sup>1</sup>

(1. Key Lab for Exploitation of China Southwestern Resources & the Environmental Disaster Control Engineering,

Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Research Institute of Southwest China Energy and Mineral Resources Development & Safety Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** In this paper, based on project excavation of the Wansongling tunnel, the monitoring way and controlling technology of vibration of blasting earthquake wave induced by tunnel excavation were studied. Via regression analysis for the results of monitoring on blasting vibration, the mathematical model of spread of blasting vibration induced by tunnel excavation was established; the orderliness of spread of blasting vibration was drawn. Combined the project, the empirical formula after revised of attenuation of blasting earthquake wave was put forward; Through contrasting and analyzing, the particle vibration velocity were forecasted by the orderliness formula of attenuation of blasting earthquake wave is precise relatively. At the same time, combined the excavation blasting construction of this tunnel project, the controlling technology measures of blasting vibration were put forward from the choice of the reasonable blasting time difference, the maximum charge quantity, the millisecond blasting, the excavation plan, springing blasting, so as to control the vibration velocity of ground within safety range in the process of this tunnel excavation construction, consequently the safety of ground buildings of construction segment and blasting work of this tunnel project was insured. This study will play an important role in guiding the excavation blasting construction of the tunnel project and assuring the safety of ground buildings.

**Key words:** tunnel excavation; blasting vibration; attenuation orderliness; controlling technology

## 1 引 言

随着我国交通建设的发展, 城市化进程的加快, 城市公路隧道工程的建设也进入一个新的高潮。由于城市公路隧道施工地点多在城市中心地带, 人

口众多, 周围建(构)筑物密集, 使得施工难度增大, 施工过程中会对周围环境的安全产生影响。城市公路隧道工程施工对周围环境安全的影响主要是爆破振动影响和开挖引起围岩应力重分布影响。而对于初期施工, 主要的影响为爆破振动对周围建

收稿日期: 2005-03-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50334060)、国家自然科学基金(50474025)、重庆市应用基础研究项目(7293)和重庆大学大学生创新基金

作者简介: 陈庆, 男, 1972年生, 工程师, 重庆大学工程硕士研究生, 主要从事隧道开挖施工的监测与控制技术研究方面的工作。

E-mail: htwang@cqu.edu.cn.

(构) 筑物的影响。因此，在隧道开挖施工时，为了保证施工安全和施工质量以及地面建（构）筑物的安全，必须对隧道开挖爆破引起的爆破振动进行信息化施工监测，以此来指导隧道工程爆破参数的设计和后续施工。本文以万松岭隧道开挖施工为研究对象，对隧道工程开挖施工爆破地震波的振动监测方法及控制技术进行了研究。

## 2 工程概况

万松岭隧道是杭州市改善进入西湖风景区的交通条件而新建的一条城市公路隧道，它连接南山路和中山南路，处于西湖东侧，穿过云居山体。在隧道拱顶上方有一建筑群。

隧道设计净宽 15 m、全长 739.99 m，里程桩号为 k0+365.738~k1+159.728。其中穿越建筑群段全长 303 m，其里程桩号为 k0+717~k1+020。建筑群房屋为砖混结构。根据《爆破安全规程》（GB6722-86）的规定要求，在施工爆破掘进该隧道建筑群段的过程中，需要对其房屋地面质点振动速度进行监测，在监测数据的指导下进行爆破施工作业。本次监测的建筑群段的隧道围岩情况如表 1 所示。

表 1 建筑群段的隧道围岩情况

Table 1 Rock condition around tunnel in the place for building group

里程桩号	所属地带	围岩岩性	围岩的完整性	围岩类别	成洞条件
k0+640~k0+685	F3 断层影响带	灰岩和砂岩	差	III~IV	一般
k0+685~k0+830	微风化带	硬质泥岩	较差	IV	较好
k0+830~k0+860	F4 断层影响带	砂岩和泥岩	较差	IV	一般
k0+860~k1+020	海军干休所段	泥岩	较差	IV	一般
k1+020~k1+065	F5 断层影响带	泥岩	较差	II	差

## 3 爆破振动监测

### 3.1 监测的仪器和方法

本次监测采用了由 DSVM-4C 型振动测试仪、891—II 型拾振器、计算机、打印机等组成的测试系统，如图 1 所示。

该测试系统中的拾振器 1，2，3 分别测量振动速度的水平径向分量  $V_r$ 、水平切向分量  $V_t$  和垂直分量  $V_z$ 。量测过程中振动测试仪自动采集、存储相关数据。

由于爆破震动效应随着传播距离的增大逐渐衰

减，因此，每次测试时基本上是在离爆破点较近的测点进行测试。每次测量结束后，立即对测试结果进行整理分析，并参照监测数据，结合隧道的埋深、周边建筑物分布情况确定下一次爆破的参数、施工进度，从而确保了爆破作业顺利、安全地进行。

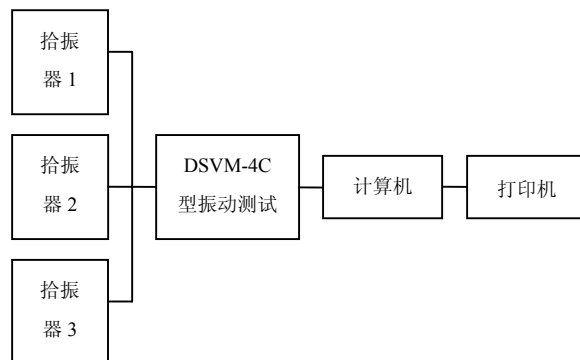


图 1 振动测试系统示意图

Fig.1 The sketch map of vibration testing system

### 3.2 监测点的布置

根据建筑群与隧道的空间位置及距离，在建筑群房屋地面共布置了 21 个监测点。其中，进口端从 k0+700 到 k0+880 分别在大约每间隔 12~16 m 的地方布置了 13 个测点；出口端从 k0+900 到 k1+040 也分别在大约每间隔 15~18 m 的地方布置了 9 个测点。

### 3.3 监测的结果

一般所采用的爆破技术有施工预裂爆破、施工预裂梯段爆破、常规梯段爆破、施工光面梯段爆破、基岩垂直保护层一次爆破和基岩垂直保护层水平预裂爆破等，本次主要以常规梯段爆破为主。共获 79 组数据，其中部分数据列于表 2。

## 4 爆破振动监测结果的回归分析

在监测初期根据所测得的数据对爆破地震波传播衰减监测结果进行了 2 次回归分析，第 1 次是根据施工到 k0+567 位置时所测得的数据进行回归分析；第 2 次是根据施工到 k0+679 位置时所得的数据进行回归分析，将为及时调整爆破设计方案提供依据。

### 4.1 回归数学模型

根据我国《爆破安全规程》（GB6722-86）及国内外的一些研究成果，在中国和前苏联地区爆破振动传播与衰减规律普遍都采用萨道夫斯基的经验公式<sup>[1-3]</sup>

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

表2 爆破参数和振动速度监测结果  
Table 2 The blasting parameters and the result of monitoring vibration velocity

测点	与爆心的高程差 H/m	爆心至测点的水平距离 L/m	爆破参数		振动速度		
			总装药量 / kg	段最大装药量 Q / kg	最大垂直分量 / cm · s <sup>-1</sup>	最大水平径向分量 / cm · s <sup>-1</sup>	最大水平切向分量 / cm · s <sup>-1</sup>
1	45	127	220	42	0.624	0.284	0.266
2	33	113	216	40	0.722	0.569	1.750
3	47	3.5	60	1.2	0.889	0.300	0.593
4	59	3	60	1.2	0.768	0.258	0.115
5	43	23	60	1.2	0.689	0.272	0.212
6	54	22	60	1.2	0.723	0.466	0.811
7	51	6	60	1.2	0.749	0.260	0.618
8	49	2	60	1.2	0.531	0.433	0.747
9	57	22	60	1.2	0.824	0.462	0.741
10	23	10	58	1.2	0.773	0.696	0.657
11	40	45	120	20	1.087	0.841	0.583
12	30	27	24	6	1.112	0.989	0.992
13	22	6	50	1.2	0.840	0.582	0.902

式中  $V$  为质点振动速度(cm/s);  $K$  为与爆破场地条件有关的系数;  $Q$  为最大段装药量(kg);  $R$  为安全距离(m);  $\alpha$  为与岩性、地形地质等因素相关的衰减系数。

已有的研究表明<sup>[4]</sup>, 式(1)在预测中考虑了传播介质条件、炸药量和爆心距测点的距离等主要因素, 但忽略了测点距爆心的高差距离、爆破振动主频等因素; 而这些因素在某些特定的条件下也是影响质点振动速度的主要因素; 又由于各测点之间的高差不在 0.5 m~1.5 m 范围内, 那么就必须考虑高程差对地震波传播的影响<sup>[5,6]</sup>。因此, 在隧道开挖爆破施工中, 为了使预测爆破振动更准确、符合实际情况, 在质点振动速度预测公式中应增加高差影响系数, 以萨道夫斯基公式为基础进行重新拟合, 将式(1)修正为<sup>[7]</sup>:

$$V = K \left( \frac{Q^{1/3}}{L} \right)^\alpha \left( \frac{Q^{1/3}}{H} \right)^\beta \quad (2)$$

式中  $\beta$  为高差影响系数;  $H$  为爆心与测点之间的高程差(m);  $L$  为爆心至测点的水平距离(m); 其它符号意义同前。

#### 4.2 回归结果及分析

将施工到 k0+567 位置时所测得的 17 组数据 ( $n=17$ ) 进行回归分析<sup>[8,9]</sup>, 回归得  $|F|=20.56 \geq F_{0.01}(2, 15)=6.55$ , 线性关系显著, 满足回归精确度要求, 并由此求得:  $K=81.57$ ,  $\alpha=1.334$ ,  $\beta=0.2756$ 。因此, 考虑了高差距离影响的爆破振动速度经验公式为:

$$V = 81.57 \left( \frac{Q^{1/3}}{L} \right)^{1.334} \left( \frac{Q^{1/3}}{H} \right)^{0.2756} \quad (3)$$

再将施工到 k0+679 位置时所测得的 62 组数据 ( $n=62$ ) 进行回归分析<sup>[6,7]</sup>, 回归得  $|F|=21.88 \geq F_{0.01}(2, 60)=6.68$ , 线性关系也非常显著, 满足回归精确度要求, 且由此求得:  $K=96.543$ ,  $\alpha=1.681$ ,  $\beta=0.3055$ 。因此, 考虑了高差距离影响的爆破振动速度经验公式为:

$$V = 96.543 \left( \frac{Q^{1/3}}{L} \right)^{1.681} \left( \frac{Q^{1/3}}{H} \right)^{0.3055} \quad (4)$$

从监测的数据来看, 在未进入建筑群段前, 在隧道爆破点正上方地面测得的振动速度基本上在 1~6 cm/s 之间; 而进入建筑群段后, 通过爆破监测的信息反馈, 逐渐调整装药量使在建筑群房屋地面测得的振动速度值均小于 1.5 cm/s, 且 95% 以上小于 1.0 cm/s, 并符合《爆破安全规程》(GB6722-86) 关于砖房地面质点振动速度不得超过 2~3 cm/s 的要求。其信息化爆破施工监测较好地指导了后续阶段隧道的爆破作业。

## 5 爆破振动控制技术

### 5.1 选择合理的爆破时差

对于本研究的短进尺的隧道施工爆破工程, 对低段位各排炮孔之间采取了合理的时差间隔, 并保证了主震动频率不接近于被保护建筑物的自振频率, 同时使地震波之间不产生叠加。因此, 为了不使后一段地震波与前段相叠加, 故应适当增加使用的非电导爆管(或电雷管)段数, 使前后段爆破时差  $\geq 100 \sim 150$  ms, 从而确定了合理的微差时间。

## 5.2 控制段最大装药量 $Q$

从式(2)中可知,在测点与爆心的水平距离  $L$  和垂直距离  $H$  相同、岩性和爆破条件同等的情况下,地震中质点振动速度  $V$  值与段药量  $Q$  的关系为:  
 $V_1 = V_2(Q_1/Q_2)^{(\alpha+\beta)/3}$ 。通过本次爆破振动监测表明,当降低段药量时,可以使质点的振动速度减小,达到减振的目的。

## 5.3 采用微差起爆

在爆破施工中,通过适当布置起爆顺序,采用跳段起爆,多次分批起爆,将首先破坏被爆岩石的拱形结构使其具有自坍趋势,达到了减少装药量的目的。

## 5.4 控制掘进进尺

为控制总装药量的单段药量,在立交段的进尺控制在 1 m 以内,其它地段的爆破进尺控制在 1.5 m 以内,并采用分台阶分部小导洞掘进,从而控制了单段药量,使爆破震动效应控制在较低的水平。

## 5.5 采用预裂爆破

实践表明,预裂爆破降震率大都在 30% 以上,效果好的预裂爆破降震率可达 50% 以上,预裂爆破已成为常用的有效降震措施。因此,对于本研究的爆破工程可以适当采取预裂爆破,以减低爆破振动。

## 6 结语

(1) 根据《爆破安全规程》(GB6722-86),对万松岭隧道爆破开挖施工的爆破振动进行了监测,并把监测结果与使用回归分析得到的经验公式预测得到的结果进行了对比,认为在考虑了高差距离影响的爆破振动中,质点振动速度预测公式预测的质点振动速度具有较高的精度,比传统的预测公式更接近实际。

(2) 在进入建筑群段前经过反复的爆破实验并根据监测数据及其回归分析,进一步优化调整了爆破参数,采取了控制掘进进尺、控制段最大装药量、多次分批启爆以及分台阶分部小导洞掘进等措施,从而将爆破震动效应控制在较低的水平,确保了地表建筑群的安全和爆破作业的安全。

(3) 制定控制隧道爆破地震效应措施要与隧道的开挖方法结合起来,满足隧道爆破开挖施工的要求。

## 参考文献

- [1] GB6722-86, 爆破安全规程[S].
- [2] 大爆破安全规程(GB13349-92)[S].
- [3] 中华人民共和国水利部. 水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范(SL-94)[S]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [4] 胡刚, 吴云龙. 爆破地震振动控制的一种方法[J]. 煤炭技术, 2004, 23(4): 104-105.  
HU Gang, WU Yun-long. A new method of the control of the earthquake vibration caused by explosive[J]. *Coal Technology*, 2004, 23(4): 104-105.
- [5] 李保珍, 王迪安. 高程差与爆破振动强度及衰减规律之间关系的探讨[A]. 第六届全国工程爆破学术会议论文集[C], [s.l.]: [s.n.], 1997. 778-783.  
LI Bao-zhen, WANG Dian. Discussion on the relationship between highness difference and blasting vibration and attenuation orderliness[A]. *The Paper Volume of 6th National Engineering Blasting Academic Conference*[C], 1997. 778-783.
- [6] 陈寿如. 两种质点振速预测公式的比选择[A]. 第七届全国工程爆破学术会议论文集[C], 2001. 702-706.  
CHEN Shou-ru, The Compare and Choice of two formula of particle vibration forecasting[A]. *7th National Engineering Blasting Academic Conference*[C], 2001. 702-706.
- [7] 谢全敏, 夏元友, 李新平. 龙滩水电站蠕变体边坡的爆破振动控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1929-1930.  
XIE Jin-min, XIA Yuan-you, LI Xin-ping. Study on blasting vibration control of creep mass slope of Longtan hydropower station[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1929-1930.
- [8] 孟吉复, 惠鸿斌. 爆破测试技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.  
MENG Ji-fu, HUI Hong-bin. *Blasting Testing Technology*[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1992.
- [9] 杨大地. 实用数值分析[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2004.  
YANG Da-di. *Practical Numerical Analysis*[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2004.
- [10] 郑大榕. 南京地铁隧道爆破开挖与振动控制[J]. 铁道工程学报, 2004, (3): 74-75.  
ZENG Da-rong. Excavation by blasting and vibration control of tunnel in Nanjing subway[J]. *Journal of Rail Way Engineering Society*, 2004, (3): 74-75.