

硬岩地层浅埋地铁隧道爆破振动衰减规律分析*

雷 刚^{1,2} 马全武^{3,4} 孙吉晨² 胡新涛^{3,4} 祝建业²

(1. 浙江大学建筑工程学院, 310058, 杭州; 2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 100037, 北京;

3. 青岛地铁集团有限公司, 266101, 青岛; 4. 青岛市地铁四号线有限公司, 266101, 青岛//第一作者, 正高级工程师)

摘 要 以青岛地铁3号线工程为依托, 针对浅埋硬质花岗岩地层, 采用现场实测与统计回归方法分析了试验段横通道爆破振动监测数据, 较为系统地研究了钻爆法施工条件下地表最大振动速度、最大单响药量、主频分布的相关关系, 总结了适应于该地层的振动衰减经验公式, 并通过现场实测数据拟合预测出本段爆破施工最大单响药量。主要研究结论如下: 隧道爆破过程中竖向振动速度最大, 振动速度随传播距离的增加呈指数规律衰减; 掏槽眼爆破受围岩夹制作用最强烈, 产生的振动最大, 分段起爆能很好地控制爆破振动波的能量分布; 爆破振动主频多分布于20~70 Hz范围内, 与爆心距和药量无明显相关关系, 为避免与周围建筑物产生共振, 应避免多段雷管同时起爆, 并严格控制最大单响药量。

关键词 地铁隧道; 硬岩地层; 爆破振动; 现场监测; 回归分析

中图分类号 U455.41

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.10.001

Blasting Vibration Attenuation Law Analysis of Shallow Tunnel Built in Hard Rock Stratum

LEI Gang, MA Quanwu, SUN Jichen, HU Xintao, ZHU Jianye

Abstract Based on Qingdao metro Line 3 project that was built in shallow buried hard granite stratum, the monitoring data of horizontal channel blasting vibration in test sections are analyzed by using field measurement and statistical regression method. The relationship among the maximum surface vibration velocity, the maximum single shot charge and main frequency distribution under drilling and blasting construction conditions is systematically studied, the empirical formula of vibration attenuation suitable for this stratum is summarized, and the maximum single charge of blasting construction in this section is predicted based on the site measured data fitting. It is concluded that in the process of tunnel blasting, the vertical vibration velocity is the largest, and the vibration velocity decays exponentially with the increase of propagation distance. Due to

the strong "clamping" effect of the surrounding rock, the blasting vibration of the cutting hole is the largest, and the energy distribution of the blasting vibration wave can be well controlled by the staged initiation. The main frequency of blasting vibration is mostly distributed in the range of 20~70 Hz, that has no obvious correlation with the distance between blasting center and the charge weight. In order to avoid the resonance with surrounding buildings, the simultaneous initiation of multiple detonators should not be adopted, and the maximum single shot charge quantity should be strictly controlled.

Key words metro tunnel; hard rock stratum; blasting vibration; field monitoring; regression analysis

First-author's address College of Architectural Engineering, Zhejiang University, 310058, Hangzhou, China

随着地铁建设蓬勃发展, 钻爆法施工以其型式灵活、施工便捷、造价低廉的突出优势, 在很多以岩石地质为主的城市地铁工程中得到大量应用, 如重庆、青岛、大连、厦门等地^[1-4]。城市地铁钻爆开挖受周边建筑物、管线等因素影响较大, 老旧城区建筑、管线已使用较长年限, 对爆破振动速度敏感, 因此, 城区等复杂环境的地铁建设中, 了解并掌握爆破振动衰减规律、控制爆破振动速度、减轻对周边环境的不利影响, 成为矿山法施工的重难点。

目前, 针对工程爆破及其减振措施方面的研究日趋成熟。文献[5]采用多段定制非电雷管, 通过确定微差爆破间隔时间来实现控制爆破; 文献[6]采用多级楔形掏槽、分部爆破及孔内外延时来控制爆破振动速度; 文献[7]研究隧道爆破近区与远区振动传播差异, 重点分析了爆破近区爆破振动的测试方法及规律。

结合青岛地铁3号线(以下简为“3号线”)工程, 通过对该线路试验段横通道爆破振动进行连续监测, 研究了硬岩地层浅埋隧道爆破振动衰减规

* 青岛地铁科技创新基金项目(M4-ZH-2020-134)

律;对现场监测数据进行回归分析并得到其衰减规律拟合公式,预测并验证最大单响药量,提出爆破振动控制措施。

1 工程概况

3 号线保尔站—河西站区间隧道为全线试验段工程,设计里程为 K14 + 500—K15 + 995,全长约 1 495 m。区间采用矿山法施工。爆破测试地点位于竖井横通道,里程为 HK15 + 200—HK15 + 225。其西侧紧邻河西小学,东侧为居民区,道路两侧建筑物密集,建筑物基础底距横通道拱顶的垂直距离仅为 7~12 m。横通道上覆的第四系土层不发育,洞身位于中微风化花岗岩中,围岩级别为 II—VI 级。该区段建筑物距离隧道较近,对爆破振动控制要求更严格。根据 GB 6722—2014《爆破安全规程》的要求,爆破振动速度控制在 1.5 cm/s 以内方可满足允许振动速度。

2 试验段横通道爆破设计方案

试验段横通道采用台阶法开挖,上下台阶间隔为 5~10 m。为降低爆破振动效应,掏槽眼布置在上台阶底部,增加掏槽部分到地表的距离,采用双楔型斜眼掏槽,掏槽区域设有空孔,增加岩石碎胀空间和自由面;周边孔采用密集减振孔,隔孔装药选用毫秒延时起爆以控制爆破振动影响。炮眼布置图如图 1 所示。

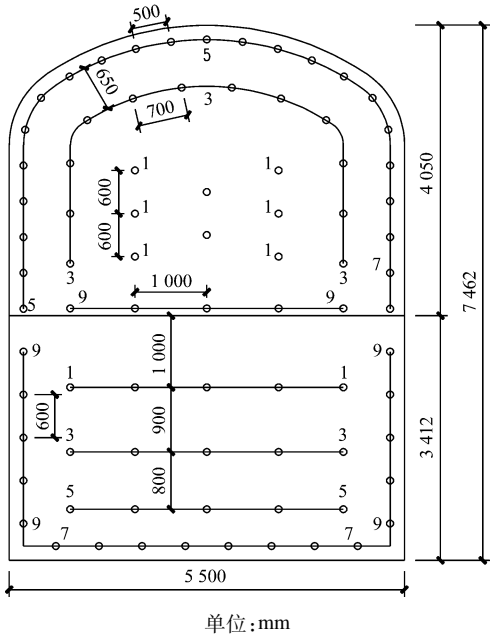


图 1 横通道炮眼布置图

Fig. 1 Layout of cross channel gun hole

3 爆破振动监测与分析

3.1 爆破振动监测方案

为研究隧道爆破施工引起的地表振动衰减规律,在沿隧道掘进方向的地表设置振动测点,分析不同爆心距离时的地表振动速度和振动频率等规律。地表爆破振动监测点布设如图 2 所示。

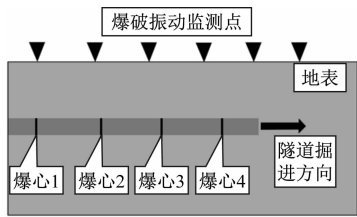


图 2 地表爆破振动监测点布设示意图

Fig. 2 Layout of surface blasting vibration monitoring points

实际工程中,不同爆破次数时药量、炮眼布置等因素均不能保证完全一致,这必然会对测试数据的分析造成影响。为综合考虑变量影响,将爆心距转化为比例距离处理^[8]。比例距离 R_0 定义如下:

$$R_0 = R / \sqrt[3]{Q} \tag{1}$$

式中:

R ——爆心距;

Q ——一次爆破时, Q 为总药量,延时爆破时, Q 为各单段对应的药量。

3.2 监测数据分析

3.2.1 爆破振动速度实测分析

结合施工实际,典型测点竖向振动速度时程曲线如图 3 所示。

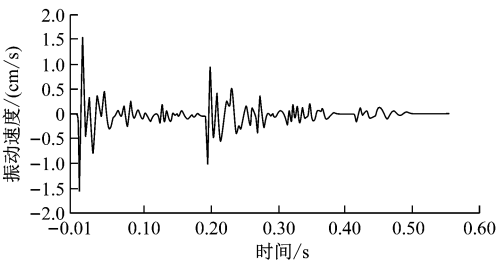


图 3 典型测点竖向振动速度时程曲线

Fig. 3 Time history curve of vibration velocity in Z direction of typical blasting measuring points

由图 3 得到如下规律:

1) 爆破振动波随传播距离的增加而衰减。爆破振动波由起爆点传播到无限远处的过程中,其能量不断消耗直至消失。

2) 不同段位起爆方式上掏槽眼爆破振动速度

最大,且最大振动速度的出现时间与掏槽眼起爆时间基本吻合。由此推断,不同段位起爆方式上掏槽眼爆破产生的振动最大,主要是因为掏槽眼起爆时只有掌子面后方存在一个临空面,围岩“夹制”作用最为强烈,起爆过程中振动波能量向岩体内部传播,造成围岩强烈振动。

3) 采用分段起爆可以很好地控制爆破总能量的分布形式,从而减小振动。图 3 中各段位爆破能量未相互叠加,由此可见,分段装药起爆有效地削减了横通道断面整体爆破能量。

4) 根据横通道现场爆破振动速度测试结果,爆破振动速度峰值均未超过规范要求的 1.5 cm/s,说明该横通道爆破设计方案安全有效,满足爆破设计及规范安全要求。

3.2.2 爆破振动速度回归分析

隧道工程中常利用萨道夫斯基经验公式预测爆破振动速度及估计最大药量。我国将萨道夫斯基公式编入 GB 6722—2014《爆破安全规程》。萨道夫斯基经验公式如下:

$$V = K(\sqrt[3]{Q}/R)^{\alpha} \tag{2}$$

式中:

V ——振动速度峰值;

K 、 α ——分别为与传播介质、起爆方式等因素相关的系数和衰减指数。

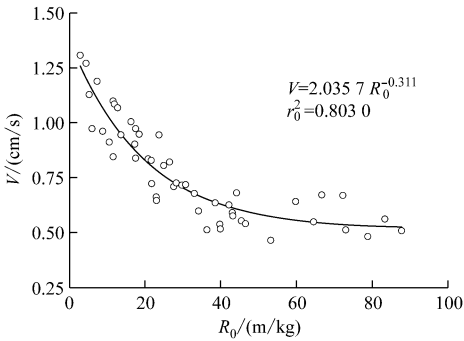
根据现场测试结果,按照式(1)计算各组数据的比例距离,对横通道上下台阶及整体断面的爆破数据进行回归分析,绘制竖向振动速度峰值随比例距离的衰减曲线,如图 4 所示。

采用最小二乘法做回归分析,得到相应的回归值 K 、 α ,以及线性相关系数 γ 。回归值及线性相关系数统计如表 1 所示。

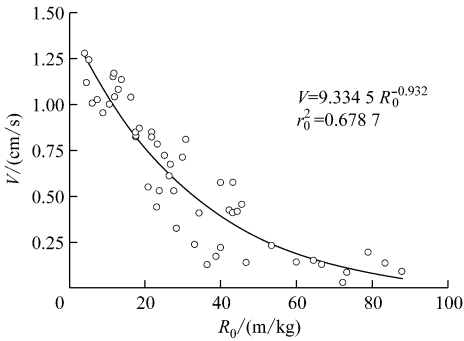
由图 4 可知, V 随 R 的增加基本呈指数衰减的趋势。 K 、 α 中,上台阶爆破数据相关性较高,下台阶爆破和整体爆破数据相关性较低。究其主要原因现场爆破条件和爆破方式参差不齐,上台阶爆破发生在拱架架立及喷射混凝土之后,断面轮廓清晰;而下台阶补炮等情况时有发生,下台阶爆破受到的影响因素更多,故其爆破数据相关性较低。

选取相关性最高的上台阶爆破数据,将其进行回归分析计算后所得的 K 、 α 值作为表征该隧道围岩振动特性的系数。由式(2)拟合出的幂函数为:

$$V = 2.0357 R_0^{-0.311} \tag{3}$$



a) 上台阶爆破



b) 下台阶爆破

注: r_0 为拟合度。

图 4 横通道上、下台阶爆破竖向峰值振动速度衰减规律回归分析图

Fig. 4 Attenuation law regression analysis of peak vibration velocity in cross channel Z direction

表 1 横通道爆破数据回归值及线性相关系数统计
Tab.1 Statistics of regression value and linear correlation coefficient of cross channel blasting data

回归项目	K	α	γ
上台阶爆破数据	2.0357	0.311	0.80
下台阶爆破数据	9.3345	0.932	0.68

依据式(3)可以实时对爆破安全距离及最大单响药量进行合理调整。

3.2.3 回归公式验证及最大单响药量预测

为了验证由萨道夫斯基经验公式回归拟合的隧道爆破地表振动衰减规律的准确性,将横通道掌子面里程 HK15+221 处上台阶爆破地表振动现场实测数据与式(3)所预测的地表爆破振动速度峰值数据进行对比。对比结果见表 2。

由表 2 可知,横通道掌子面 HK15+221 处上台阶测点爆心距为 12 m、18 m 及 25 m 时,地表振动速度峰值现场实测数据与式(3)拟合值的相对误差分别为 6.1%、9.7% 及 12.8%。由此可知,经拟合的振动衰减幂函数对爆破振动速度的预测较准

表 2 横通爆破振动速度峰值实测值与回归预测值对比
Tab.2 Comparison of measured value and regression prediction value of vibration velocity peak value in cross blasting

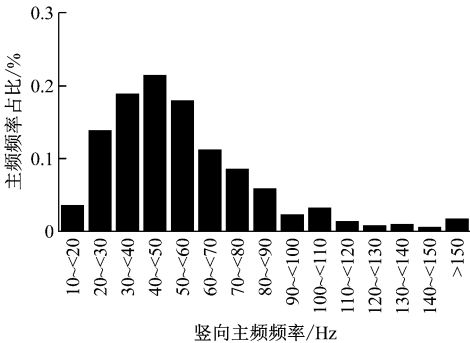
掌子面里程	R/m	最大单响药量/kg	V/(cm/s)	
			实测值	预测值
HK15 + 221	12	36	1.48	1.40
HK15 + 221	18	36	1.34	1.22
HK15 + 221	25	36	1.14	1.01

确。本次爆破振动速度的上限值为 1.5 cm/s,依据式(3)可以预测爆破施工最大单响药量为 38.32 kg。

3.2.4 爆破振动频谱分析

实际工程中爆破产生的振动波频率对在建隧道及周边建筑物也有较大影响。当爆破振动波主频频率与建(构)筑物自振频率接近或者一致时,爆破振动波与地表建(构)筑物发生共振作用,导致建(构)筑物振动加剧,极易造成破坏。爆破振动主频分布如图 5 所示。

由图 5 可见,硬质岩层浅埋隧道爆破振动 3 个方向主频分布广泛,占比约 90%的主频集中于 20 ~ 70 Hz 频带之内。由于在建隧道结构及周边建筑物的自振频率均较小,当建(构)筑物自振频率位于 20 ~ 70 Hz 频带之内时,爆破振动波对其影响尤其强烈。为避免或减小爆破振动波与建(构)筑物产生共振现象,应当避免多段雷管同时起爆,严格控



c) 竖向主频频带分布

图 5 横通道爆破振动主频频率分布图

Fig.5 Main frequency distribution of blasting vibration in cross channel

制最大单响药量,并采取必要措施对建(构)筑物进行加固。

4 结论

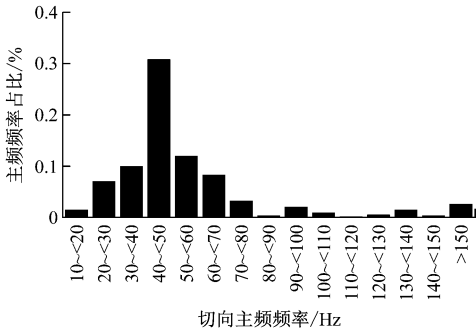
1) 浅埋硬岩隧道爆破振动波传递到地表各个方向中的竖向振动速度最大,振动速度随传播距离的增加而逐渐衰减,其中最大振动速度随比例距离呈指数形式衰减。

2) 对于硬质围岩,爆破振动波传递速度较快,对振动速度削减作用较弱。当隧道埋深较浅时,爆破振动对地面建(构)筑物影响强烈,采用分段起爆方式可以很好地控制爆破振动波能量分布,其中由于掏槽眼爆破时临空面少,受到围岩夹制作用最强,因此掏槽眼在所有起爆段位中振动最强烈。在设计爆破减振方案时,增加临空面和隔振带、采用延时分段起爆等措施可以有效降低爆破振动影响。

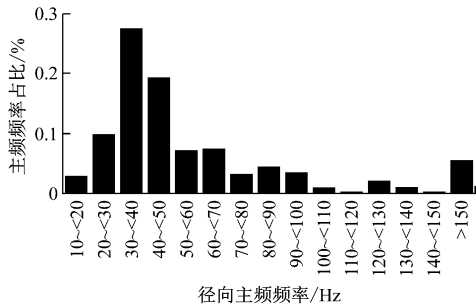
3) 基于萨道夫斯基公式 $V = K(\sqrt[3]{Q}/R)^\alpha$,运用统计学原理对隧道爆破最大振动速度随爆心距增加的衰减规律进行了回归分析,得到衰减规律回归公式为 $V = 2.0357 R_0^{-0.311}$,通过实测爆破振动速度与拟合数据对比验证了拟合公式的准确性。根据建筑物保护允许振动速度 1.5 cm/s,反算出允许最大单响药量不得超过 38.32 kg。

4) 对现场监测数据进行振动频谱分析得知,主频大小与爆心距、最大单响药量等参数无法形成相关关系,各个方向爆破振动主频主要集中在 20 ~ 70 Hz,使得横通道易与自振频率为低频的在建隧道结构及周边建筑物发生共振,因此爆破时应尽量减少多段雷管同时起爆,同时严格控制最大单响药量,避免产生共振现象。

(下转第 9 页)



a) 切向主频频带分布



b) 径向主频频带分布

- [2] 陈文彪. 地铁运营反恐应急处置机制及反爆炸技术[J]. 都市快轨交通, 2017(5):1.
CHEN Wenbiao. Anti-terrorism emergency disposal mechanism and anti-explosion technology in subway Operation [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017(5):1.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 城市轨道交通公共安全防范系统工程技术规范: GB 51151—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical code for engineering of public security and protection system of urban rail transit; GB 51151—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [4] 何伟. 新标准 新突破——城市轨道交通安防工程标准实施将引领行业快速发展[J]. 中国安防, 2017(4):38.
HE Wei. New standards, new breakthroughs--the implementation of urban rail transit security engineering standards leading the rapid development of the industry [J]. China Security Protection, 2017(4):38.
- [5] 段海洋, 许得杰, 曾俊伟, 等. 城市轨道交通运营安全事故分析及评价[J]. 铁道运输与经济, 2019(9):110.

DUAN Haiyang, XU Dejie, ZENG Junwei, et al. An analysis and evaluation of urban rail transit operation safety accidents [J]. Railway Transport and Economy, 2019(9):110.

- [6] 张凌翔. 城市轨道交通运营风险分析与评价研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
ZHANG Lingxiang. Study on the risk analysis and evaluation for urban rail transit operation [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [7] 盛伊琳. 基于风险管理的城市轨道交通运营安全评价方法探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2019(4):52.
SHENG Yilin. Risk management-based assessment method on the operation safety of urban rail transit [J]. Urban Mass Transit, 2019(4):52.
- [8] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 标准化工作导则 第1部分: 标准化文件的结构和起草规则: GB/T 1.1—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration of Market Supervision and Administration, National Standardization Management Committee. Directives for standardization-part 1: Rules for the structure and drafting of standardizing documents; GB/T 1.1—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.

(收稿日期: 2020-12-29)

(上接第4页)

参考文献

- [1] 李立功, 张亮亮, 刘星. 小净距双洞隧道下穿建筑物爆破振动控制技术[J]. 隧道建设, 2016(5):592.
LI Ligong, ZHANG Liangliang, LIU Xing. Study on blasting vibration velocity control technology of small clear distance double hole tunnel under buildings [J]. Tunnel Construction, 2016(5):592.
- [2] 闫鸿浩, 杨瑞, 李晓杰, 等. 地铁隧道浅埋段下穿砖混结构房屋爆破振动控制研究[J]. 施工技术, 2016(增刊1):422.
YAN Honghao, YANG Rui, LI Xiaojie, et al. Study on blasting vibration control of shallow buried section of subway tunnel passing through brick concrete structure building [J]. Construction Technology, 2016 (S1): 422.
- [3] 王旭春, 管晓明, 于云龙, 等. 隧道爆破下建筑结构局部应力响应及损伤研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019(1):125.
WANG Xuchun, GUAN Xiaoming, YU Yunlong, et al. Study on local stress response and damage of building structure under tunnel blasting [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2019(1):125.
- [4] 林正. 复杂环境下城市地铁车站基坑爆破开挖振动控制技术[J]. 福建建材, 2016(10):76.
LIN Zheng. Vibration control technology for foundation pit blasting excavation of urban subway station under complex environment [J]. Fujian Building Materials, 2016(10):76.

- [5] 龚敏, 邱臻可, 李永强, 等. 定制雷管微差时间实测与识别法在城市隧道爆破设计中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015(6):1179.
GONG Min, QIU Yike, LI Yongqiang, et al. Application of differential time measurement and identification method of customized detonator in blasting design of urban tunnel [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015(6):1179.
- [6] 管晓明, 余志伟, 宋景东, 等. 隧道超小净距下穿深埋供水管线爆破监测及减振技术研究[J]. 土木工程学报, 2017(增刊2):160.
GUAN Xiaoming, YU Zhiwei, SONG Jingdong, et al. Study on blasting monitoring and vibration reduction technology of tunnel with ultra-small clear distance passing through deep buried water supply pipeline [J]. Journal of Civil Engineering, 2017(S2):160.
- [7] 傅洪贤, 赵勇, 谢晋水, 等. 隧道爆破近区爆破振动测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(2):335.
FU Hongxian, ZHAO Yong, XIE Jinshui, et al. Measurement and research on blasting vibration near tunnel blasting [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011(2):335.
- [8] 许红涛, 卢文波. 几种爆破振动安全判据[J]. 爆破, 2002(1):5.
XU Hongtao, LU Wenbo. Several safety criteria for blasting vibration [J]. Blasting, 2002(1):5.

(收稿日期: 2020-08-01)