doi:10.3963/j. issn. 1001 – 487X. 2020. 03. 010

深圳赤湾停车场石方开挖爆破振动安全控制研究*

李　育[1],孙鹏昌[2],罗建斌[3],陈　明[2],李福千[1],聂　攀[1]
(1. 中国水利水电第八局工程局有限公司,长沙 410004;
2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室,武汉 430072;
3. 深圳市蛇口招商港湾工程有限公司,深圳 518000)

摘　要: 在城区复杂施工条件下开展的深圳赤湾停车场石方爆破开挖工程,爆破振动对周围建筑物的安全影响不容忽视。为了分析爆破振动对周围重要建筑物的影响,在石方爆破开挖过程中开展了爆破振动监测,基于监测数据,对爆破振动衰减规律进行了回归分析。根据爆破振动衰减规律计算了最大允许单响药量,为有效控制爆破振动的危害提供了参考。爆破振动监测及衰减规律分析结果表明:爆区后冲向的衰减参数均大于对应爆区侧冲向的衰减参数,采用控制最大单响药量、合理调整爆破开挖推进方向以及减小前排抵抗线等措施,能有效控制爆破振动对周围重要建筑物的影响。

关键词: 石方开挖; 爆破振动; 安全控制; 衰减规律

中图分类号: TD235.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1001 – 487X(2020)03 – 0063 – 05

Research on Blasting Vibration Control during Rock Excavation of Chiwan Metro Parking Lot, Shenzhen

LI Yu[1], *SUN Peng-chang*[2], *LUO Jian-bin*[3], *CHEN Ming*[2], *LI Fu-qian*[1], *NIE Pan*[1]
(1. Sinohydro Bureau 8 Co., Ltd., Changsha 410004, China;
2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Shekou Merchants Harbor Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: During rock excavation of Chiwan Metro Parking Lot, Shenzhen, in order to analyze the influence of blasting vibration on the surrounding important buildings, blasting vibration monitoring work was carried out. The vibration attenuation parameters K and α were obtained based on the monitored data through the least square method, and then the maximum single charging weight was calculated according to the attenuation law, which offers a reference for effectively controlling blasting vibrations. The results of blasting vibration monitoring and attenuation law analysis show that the impact of blasting vibration on important buildings can be effectively controlled by limiting maximum single charging weight, adjusting blasting excavation direction and reducing front-row burden.

Key words: rock excavation; blasting vibration; safety control; attenuation law

随着城市建设的快速发展,城市地铁的建设成为了缓解城市交通拥堵压力的有效手段,但是地铁线路沿线大多环境复杂,建(构)筑物密布,各种管线纵横交错,使得地铁施工难度增大,对于需要进行土石方爆破开挖的施工部位,施工安全风险更大[1]。在城市复杂环境下实施土石方爆破产生的

收稿日期: 2020 – 04 – 29
作者简介: 李　育(1989 –),男,工程师、交通土建工程学士,从事地铁工程建设管理研究,(E-mail)285509455@qq.com。
通讯作者: 孙鹏昌(1994 –),男,博士研究生、水利水电工程学士,主要从事工程爆破方面的研究,(E-mail)sunpch@whu.edu.cn。
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No 51779190)

振动效应对邻近建(构)筑物的影响不容忽视,爆破振动可能会对爆区邻近建(构)筑物产生有害影响[2],甚至破坏。在土石方爆破开挖过程中开展爆破振动监测,并基于监测数据对爆破振动衰减规律进行回归分析,有利于掌握爆破振动的传播特性[3,4],从而采取针对性的工程措施控制爆破振动对爆区邻近建(构)筑物的影响。工程实际中,控制最大单响药量、开挖减震沟、毫秒微差爆破技术以及数码电子雷管起爆网路等措施均被证明能够有效控制爆破振动[5-10],从而减小爆破振动对邻近建(构)筑物的影响,保证邻近建(构)筑物的安全。深圳赤湾停车场石方爆破开挖工程位于深圳市区,爆破施工环境条件复杂,为了确保邻近建(构)筑物的安全,在停车场石方爆破开挖过程中开展爆破振动监测,并分析复杂环境条件下爆破振动的传播特性,从而提出针对性的爆破振动安全控制措施。

1 工程背景

深圳赤湾停车场位于深圳赤湾山西南角,深圳市南山区赤湾山公园南麓,赤湾路北侧,兴海大道西北侧。停车场地块基本呈长方形,长约 1050 m,最宽处约 370 m,最窄处约 90 m。停车场局部场地地面起伏较大,凹凸不平,上层土方开挖完成后,停车场场地整体较为平整。停车场场地平整石方(中/微风化花岗岩)开挖深度较大,最大约 16 m,场平部分采用深孔梯段微差控制爆破的方案进行开挖。赤湾停车场周边有兴海大道高架桥、广东耀皮玻璃有限公司的烟囱、左炮台山上的海事局雷达监测站、工业厂房和工人住宿楼、中海油基地,以及基地各种设施和建筑等。爆区周边重要建筑物的平面位置如图 1 所示,周边重要建筑物统计表如表 1 所示。

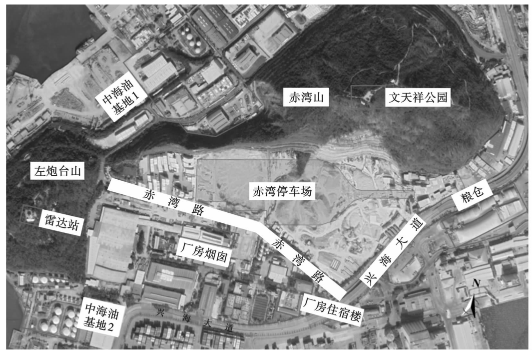


图 1 周边重要建筑物平面位置示意图

Fig. 1 Layout of important structures close to the parking lot

表 1 停车场周边重要建筑物统计表

Table 1 Important structures close to Chiwan Metro parking lot

序号	重要建(构)筑物	与停车场相对位置	距爆区最小距离/m
1	中海油基地 1	停车场西北侧	100
2	文天祥公园	停车场北侧	160
3	雷达监测站	停车场西侧	560
4	中海油基地 2	停车场西南侧	520
5	烟囱	停车场西南侧	75
6	厂房住宿楼	停车场南侧	120
7	兴海大道高架桥	停车场南侧	150
8	粮仓	停车场东南侧	65

2 爆破振动监测与分析

2.1 爆破振动现场监测

2.1.1 爆破参数

场平部分采用深孔梯段微差控制爆破的方案进行开挖,每次爆破均布置 3 ~ 4 排炮孔、炮孔数量20 ~ 40 个,钻孔装药参数见表 2。爆破起爆网路采用孔内孔外微差起爆网路,孔内均设置两发 MS9 导爆管雷管,两孔一段,段间采用 MS3 导爆管雷管传爆。

表 2 钻孔装药参数表

Table 2 Blasting parameters

炮孔直径/mm	药卷直径/mm	炮孔深度/m	炮孔超深/m	炮孔间排距/(m × m)	堵塞长度/m	装药长度/m	单孔药量/kg
115	90	12.0 ~ 13.0	0.8	4.0 × 4.0	4.0 ~ 4.5	8.0 ~ 8.5	57 ~ 63

2.1.2 爆破振动测试系统

爆破振动现场监测采用 BLAST-UM 型爆破振动智能监测仪,BLAST-UM 爆破监测仪自带嵌入式计算机模块,液晶屏显示,仪器高度智能化,可在仪器上直接现场设置参数;采样后能立即预览最大值、频率及波形等信息。仪器测量的振动速度范围为 0.001 ~ 35 cm/s,频率范围为 5 ~ 300 Hz。现场监测系统(图 2)由振动传感器、信号采集与记录设备、数据处理系统三部分组成。本次监测采用的振动传感器是三向振动速度传感器,在具体监测过程中,重点监测部位同一测点一般布置一台三向速度传感器,传感器可同时测量竖直向、水平径向和水平切向的振动,用

石膏固定在所需监测的部位,然后将测振仪与其相联。爆破振动信号传递到测点时,测振仪自动记录信号。爆后利用专门编制的爆破振动分析软件将测振仪采集到的振动信号输入电脑中,进行存储与分析处理。

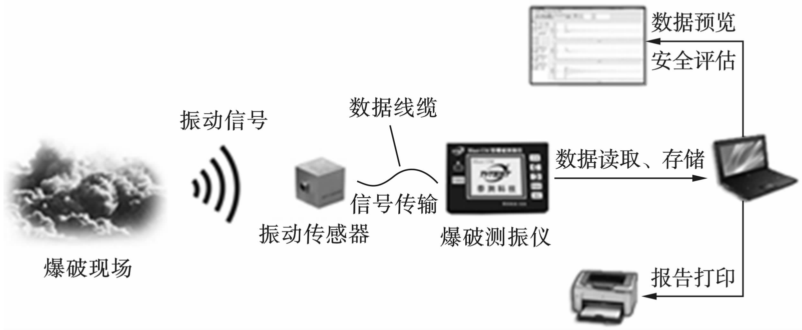
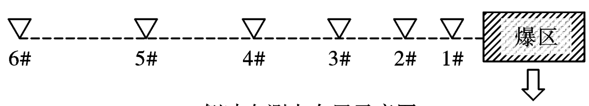


图 2 爆破振动测试系统

Fig. 2 Blasting vibration signal acquisition system

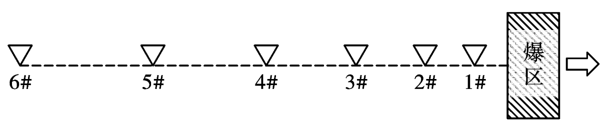
2.1.3 爆破振动测点布置

重要建(构)筑物主要位于爆破区域的后冲向和侧冲向,为评价爆破振动对重要建(构)筑物的影响水平,及现有爆破方案及振动控制措施的可行性,同时也为后续爆破振动的预测评估提供参考,分别在爆区后冲向、侧冲向场地监测爆破振动以确定相应的爆破振动衰减规律。爆区后冲向、侧冲向每次监测按“近密远疏,对数布置”的原则[11],在不同爆心距布置 5 ~6 个测点,如图 3 所示。考虑到地形高差对爆破振动会产生一定的影响[12],爆破振动各测点选择布置在平整的区域。



(a) 侧冲向测点布置示意图

(a) Layout of blasting vibration monitoring points in lateral direction



(b) 后冲向测点布置示意图

(b) Layout of blasting vibration monitoring points in backward direction

图 3 爆破振动测点布置示意图

Fig. 3 Layout of blasting vibration monitoring points

2.2 爆破振动测试结果分析

2.2.1 振动测试数据

爆区后冲向典型的爆破振动实测波形如图 4 所示。依据水平径向、水平切向和竖直向三个不同方向,作出爆区后冲向不同测点的质点峰值振动速度(*PPV*)随比例距离($R/Q^{1/3}$)变化的散点图,如图 5 所示。由图 5 可知,水平径向、水平切向和竖直向三个方向的 *PPV* 随比例距离增大均呈现指数幂衰减趋势。对于爆区侧冲向的爆破振动,其 *PPV* 随比例距离变化的分布规律与爆区后冲向相似,水平径向、水平切向和竖直向三个方向的 *PPV* 随比例距离增大呈现指数幂衰减趋势。

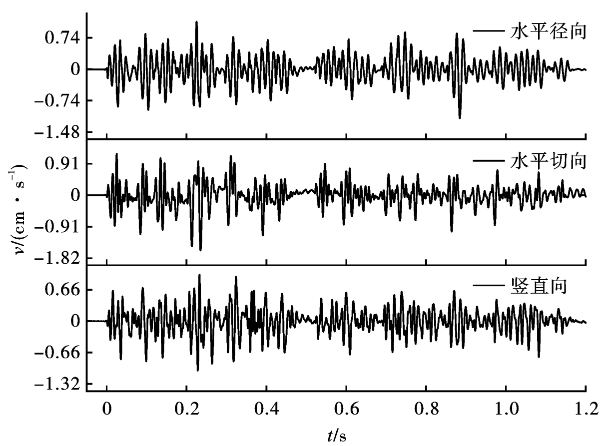


图 4 典型实测爆破振动波形

Fig. 4 Typical blasting vibration waveforms

2.2.2 爆破振动衰减规律分析

在实际工程中,质点振动速度主要受炸药量、爆心距影响,对获取的爆破质点振动速度进行分析,剔除异常值,然后依据萨道夫斯基公式[13](式 1),采用最小二乘法进行线性回归拟合,以获得爆破振动衰减参数,即 K、α 值。

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

式中:V 为质点峰值振动速度(*PPV*),cm/s;Q 为最大单响药量或单段药量,kg;R 为爆心距,m;K、α 为与场地及岩石条件、爆破条件及爆区与观测点相对位置等有关的衰减常数。

对爆破振动衰减规律进行回归分析,得到爆区后冲向爆破振动速度的衰减规律为

水平径向:$V = 257.0\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{2.28}$,($r = 0.891$);水

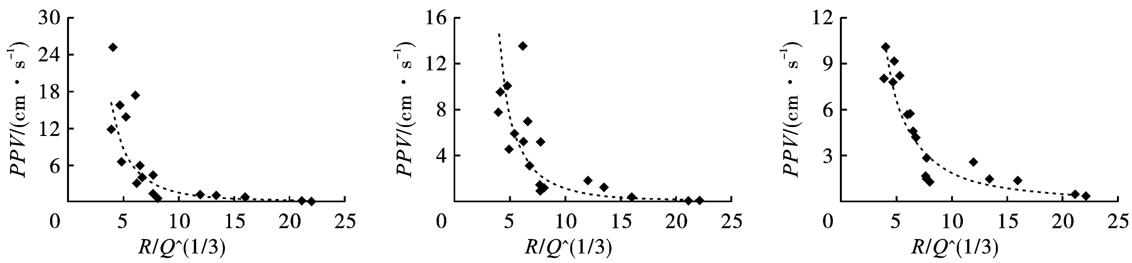
平切向：$V=204.2\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{2.14}$，($r=0.827$)；

竖直向：$V=134.9\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{1.87}$，($r=0.920$)。

对爆破振动衰减规律进行回归分析，得到爆区侧冲向爆破振动速度的衰减规律为

水平径向：$V=66.1\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{1.35}$，($r=0.890$)；水平切向：$V=55.0\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{1.31}$，($r=0.891$)；

竖直向：$V=39.8\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{1.25}$，($r=0.887$)。



(a) 水平径向 (a) Horizontal radial direction　(b) 水平切向 (b) Horizontal tangential direction　(c) 竖直向 (c) Vertical direction

图 5　爆区后冲向爆破振动峰值分布图

Fig. 5　PPVs of blasting vibration in the backward direction

由上述爆破振动衰减规律回归分析结果可知，爆区后冲向、侧冲向的爆破振动衰减规律回归分析结果的相关系数均超过 0.8，表明 V 和 $Q^{1/3}/R$ 的相关性较高，拟合结果可靠性强。从爆破振动衰减参数(K、α)看，爆区后冲向的衰减参数均大于对应爆区侧冲向的衰减参数，表明在相同单响药量、相同爆心距的同一场地条件下，爆区后冲向的爆破振动衰减更快。

3　爆破振动安全控制

3.1　爆破振动安全控制标准

根据图 1、表 1 可知，受赤湾停车场石方开挖爆破振动影响较大的建筑物主要为粮仓、烟囱、中海油基地 1、厂房住宿楼和兴海大道高架桥，其余周边建筑物距离爆区较远，受爆破振动影响相对较小。按照爆区周边建筑物的使用功能和建筑类型，将厂房住宿楼和兴海大道高架桥归为民用建筑物，粮仓、烟囱、中海油基地 1 等建筑物归为工业建筑物。根据《爆破安全规程》(GB 6722—2014)[13] 中的相关规定，一般的民用、工业及商业建筑物的爆破振动安全允许标准见表 3。由于实测爆破振动主振频率分布在 10～50 Hz 之间，且考虑到城区爆破施工环境的复杂性以及安全控制的严苛性，确定爆区周边民用建筑物的爆破振动安全允许振速为 2.0 cm/s，工业建筑物的爆破振动安全允许振速为 3.5 cm/s。

3.2　爆破振动控制措施

3.2.1　控制最大单响药量

根据确定的爆区周边建(构)筑物所允许的爆破振动安全控制标准，由爆破振动衰减规律求得允许的最大单响药量，从而对爆破单响药量进行控制。单响药量计算公式为

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

式中：$[Q]$ 为允许最大单响药量，kg；$[V]$ 为允许安全振动速度，cm/s。

表 3　爆破振动安全允许标准

Table 3　Safety velocity codes for blasting vibration

保护对象类别	安全允许质点振动速度/(cm·s^{-1})		
	f≤10 Hz	10 Hz<f≤50 Hz	f>50 Hz
一般民用建筑物	1.5～2.0	2.0～2.5	2.5～3.0
工业和商业建筑物	2.5～3.5	3.5～4.5	4.2～5.0

根据第 2 节所得的爆破振动衰减参数、表 1 中重要建构筑物的最小距离及表 3 中最小的安全允许质点振动速度，推算得到赤湾停车场石方开挖爆破允许的最大单响药量超过 150 kg，而赤湾停车场现场爆破施工最大单响药量均控制在 150 kg 以内，说明停车场正常爆破施工不会对周边民用、工业建筑产生有害影响。

3.2.2　调整爆破开挖推进方向

对于同一次爆破，相对爆源不同方向的振动衰减规律也是不尽相同的。根据第 3 节所得的爆破振动衰减规律，以 150kg 为单响药量标准，绘制得到如图 6 所示的赤湾停车场石方爆破开挖爆破振动速度随爆心距变化的传播规律。由图 6 可知，在爆心距为 25～30 m 以内时，在抵抗线后冲向的爆破振动速度较侧冲向要大，且衰减较快；在爆心距超过 25～30 m 时，在抵抗线后冲向的爆破振动速度较侧冲向

要小,且衰减较快。由此可见,在爆破中合理布置抵抗线方向,可以使爆破产生的爆破振动主方向避开保护对象,达到有效控制爆破振动影响的目的。考虑到赤湾停车场邻近建(构)筑物距离爆区最近距离为 65 m,因此现场临空面设置朝向东北向有利于保护距离爆区最近的建(构)筑物。

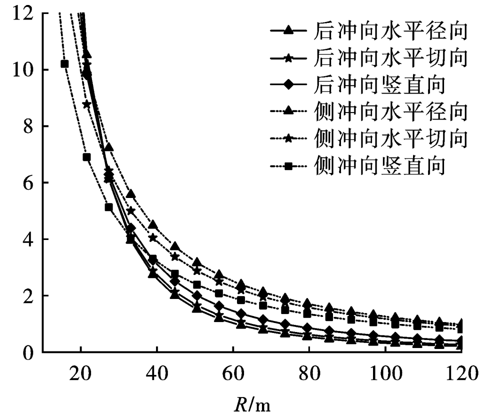


图 6　爆破振动传播规律

Fig. 6　Propagation law of blasting vibration

3.2.3　减小前排炮孔抵抗线

每次爆破完成后,应及时出渣,为下一次爆破创造出新的自由面,从而避免“夹制”爆破。在“夹制”爆破中,炸药爆炸产生的能量无法释放,一部分能量用于岩石粉碎和破裂,一部分能量将以地震波的形式向周围扩散,引起周围建(构)筑物的扰动。所以,为有效控制地控制爆破振动效应,应尽可能地为每次爆破清除前沿岩埂,减小前排抵抗线。

深圳赤湾停车场石方开挖爆破综合采用了控制最大单响药量、调整爆破开挖推进方向以及减小前排抵抗线等爆破振动控制措施,从爆破振动监测资料及爆破振动传播规律可以看出,爆区周围重要建(构)物的爆破振动在现有措施下均可控制允许范围之内。

4　结论

深圳赤湾停车场石方爆破开挖施工环境复杂,爆破振动安全控制要求严格,在爆破施工过程中,开展了爆破振动监测工作,并基于实测爆破振动数据进行了衰减规律回归分析,爆破振动监测及衰减规律回归分析的主要结论如下:

(1)水平径向、水平切向和竖直向三个方向的爆破振动 *PPV* 随比例距离增大均呈现指数幂衰减趋势,爆区后冲向的振动衰减参数(K、α)均大于对应爆区侧冲向的衰减参数,相同条件下爆区后冲向的爆破振动衰减更快。

(2)确定爆区周边民用建筑物的爆破振动安全允许标准为 2.0 cm/s,工业建筑物的爆破振动安全允许标准为 3.5 cm/s,赤湾停车场石方爆破开挖允许的最大单响药量超过 150 kg。

(3)综合采用了控制最大单响药量、调整爆破开挖推进方向以及减小前排抵抗线等爆破振动控制措施,在计划工期内安全快速地完成了深圳赤湾停车场石方开挖工程,且爆区周围重要建(构)物的爆破振动均控制在允许范围之内。

参考文献(References)

[1]　祝文化,宋成梓,陈卫雄,等. 复杂环境下地铁车站基坑爆破振动效应的试验研究[J]. 爆破,2009,26(2):99-101,107.

[1]　ZHU Wen-hua,SONG Cheng-zi,CHEN Wei-xiong,et al. Experimental research on blasting vibration effect in excavation of subway station under complex environment[J]. Blasting,2009,26(2):99-101,107. (in Chinese)

[2]　张志呈,向开伟,鲍罡武,等. 爆源远区爆破振动对建(构)筑物危害的原因分析[J]. 爆破器材,2004,33(S1):58-63.

[2]　ZHANG Zhi-cheng,XIANG Kai-wei,BAO Gang-wu,et al. Study on the damages to structures caused by distant vibration wave[J]. Explosive Materials,2004,33(S1):58-63. (in Chinese)

[3]　宗　琦,汪海波,周胜兵. 爆破地震效应的监测和控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(5):938-945.

[3]　ZONG Qi,WANG Hai-bo,ZHOU Sheng-bing. Research on monitoring and controlling techniques considering effects of seismic shock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(5):938-945. (in Chinese)

[4]　胡建敏,刘　华. 柘林水电站扩建工程施工期爆破振动衰减规律[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(z1):1861-1864.

[4]　HU Jian-min,LIU Hua. On the attenuation of blast-induced vibration during construction of extension project for zhelin hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2001,20(z1):1861-1864. (in Chinese)

[5]　秦绍兵. 复杂环境下大规模基础开挖爆破的安全控制[J]. 爆破,2012,29(2):123-126.

[5]　QIN Shao-bing. Safe Controlling technology in large-scale foundation excavation under complex environment[J]. Blasting,2012,29(2):123-126. (in Chinese)

[6]　熊祖钊,易　流,黄小武,等. 城市复杂环境下基坑土石方爆破振动控制研究[J]. 爆破,2016,33(1):45-49.

[6]　XIONG Zu-zhao,YI Liu,HUANG Xiao-wu,et al. Study on blasting vibration controlling of earthwork excavation in complex urban environment[J]. Blasting,2016,33(1):45-49. (in Chinese)

(下转第 108 页)