

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.014



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基坑爆破施工减振孔减振效应现场试验研究

吕岸霖¹, 张凯¹, 吴振宇², 王建新³, 范佰通², 彭琦³, 柴德华²,
王邦浩⁴, 朱建波¹

(1. 深圳大学 广东省深地科学与地热能开发利用重点实验室; 深地科学与绿色能源研究院; 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060; 2. 中铁二十五局集团有限公司盾构工程分公司, 广州 510600; 3. 深圳市市政设计研究院, 广东 深圳 518029; 4. 长春国禧房地产置业有限公司, 长春 130022)

摘要: 为有效降低爆破施工对邻近建(构)筑物的动态扰动, 以深圳地铁 16 号线 1 号综合井基坑爆破工程为依托, 开展减振孔减振效应现场试验研究。通过对不同参数条件下减振孔地表振动的实时监测, 研究减振孔对地表峰值质点振动速度(PPV)和主振频率的影响, 分析减振孔参数对减振效应的影响。结果表明: 随着减振孔直径的增加, 水平径向隔振率与水平切向隔振率先增加后减小, 竖直方向隔振率整体上逐渐增加, 基于合速度的隔振率呈显著增大趋势; 随着减振孔排间距的增加, 减振孔的隔振率先显著减小后逐渐趋于稳定; 当减振孔内充填水时, 随着减振孔充填度的增加, 水平径向隔振率逐渐减小, 水平切向隔振率与竖直方向隔振率先增加后减小, 基于合速度的隔振率先增加后逐渐减小。

关键词: 爆破; 减振孔; 现场试验; 隔振率; 水充填度

中图分类号: TU751.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)02-0116-10

Field test study on vibration reduction effect of blasting barrier hole during excavation of foundation pit

LV Anlin¹, ZHANG Kai¹, WU Zhenyu², WANG Jianxin³, FAN Baitong²,
PENG Qi³, CHAI Dehua², WANG Banghao⁴, ZHU Jianbo¹

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Deep Earth Sciences and Geothermal Energy Exploitation and Utilization; Institute of Deep Earth Sciences and Green Energy; College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, P. R. China; 2. China Railway 25th Bureau Group Co., Ltd. Shield Engineering Branch, Guangzhou 510600, P. R. China; 3. Shenzhen Municipal Design and Research Institute, Shenzhen 518029, Guangdong, P. R. China; 4. Changchun Guoxi Real Estate Co. Ltd, Changchun 130022, P. R. China)

Abstract: In order to reduce the dynamic disturbance of adjacent structures caused by blasting construction of foundation pit by using blasting, field test to study the vibration reduction law of the blasting barrier holes was

收稿日期: 2022-09-19

基金项目: 广东省“珠江计划”引进创新创业团队项目(2019ZT08G315); 国家自然科学基金(52004163); 深圳市基础研究资助项目(JCYJ20210324093402006、JCYJ20220818095605012)

作者简介: 吕岸霖(1998-), 男, 主要从事岩石动力学研究, E-mail: lvanlin2020@email.szu.edu.cn。

朱建波(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: jianbo.zhu@szu.edu.cn。

Received: 2022-09-19

Foundation items: “Pearl River Talent Plan” Innovation and Entrepreneurship Team Project of Guangdong Province (No. 2019ZT08G315); National Natural Science Foundation of China (No. 52004163); Shenzhen Basic Research Foundation (Nos. JCYJ20210324093402006, JCYJ20220818095605012)

Author brief: LV Anlin (1998-), main research interest: rock dynamic mechanics, E-mail: lvanlin2020@email.szu.edu.cn.

ZHU Jianbo (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: jianbo.zhu@szu.edu.cn.

conducted relying on the blasting construction project of foundation pit of No. 1 comprehensive well of Shenzhen Metro Line 16. Based on monitoring of the ground vibration under different blasting barrier hole parameters, influence of blasting barrier hole on peak velocity and dominant frequency of particle vibration on the ground and the influence of parameters of blasting barrier hole on its vibration barrier effect were analyzed. It is found that when the diameter of the blasting barrier hole increases, the vibration isolation rate of vibration barrier hole (VIR) in horizontal radial and horizontal tangential directions increase first and then decrease, the VIR in vertical direction increases and the VIR based on resultant velocity increases. Furthermore the VIR decreases first and then tends to be stable with increase of the row spacing of the damping vibration barrier holes. In addition, when the proportion of water filling in the blasting barrier hole increases, the VIR in horizontal radial direction decreases, the VIR in horizontal tangential and vertical directions increase first and then decrease, and the VIR based on resultant velocity increases first and then decreases.

Keywords: blasting; barrier holes; field test; vibration isolation rate; water filling proportion

随着城市基础设施建设的不断发展,地下空间利用率显著增长^[1-3]。爆破作为一种经济高效的岩体开挖手段,已广泛应用于地下工程施工中。然而,爆破施工过程中产生的振动不可避免地对邻近建(构)筑物产生扰动,甚至破坏^[4-5]。因此,为了确保建(构)筑物的安全,有必要采取措施降低爆炸对邻近建(构)筑物的振动。爆破振动实际上是爆炸产生的应力波在岩土体内的传播造成的。而爆炸应力波在结构面和物质界面上会发生复杂的反射、透射,导致波能量减小,进而造成传播介质振动减弱^[6-7]。依据此减振机理,可以人为地在爆破源和被保护对象之间设置空孔,即减振孔,用以减小爆破振动对邻近建(构)筑物的影响。

目前,减振孔的减振效应研究已受到学者们的广泛关注,对减振孔减振效应的研究主要采用数值仿真和现场试验。数值仿真方面,赵蕊等^[8]采用AUTODYN模拟研究了减振孔的减振效应,发现随着减振孔直径的增加、减振孔排数的增多,或者减振孔间距、减振孔距爆源距离的减小,减振的隔振率呈显著增大趋势。Lei等^[9]利用LS-DYNA建立含减振孔的爆破模型,结果表明,增大减振孔直径和减小孔间距可明显提高隔振率和扩大振动屏蔽范围。Li等^[10]研究了爆炸动载荷作用下减振孔的振动和能量吸收特性,结果表明,增大减振孔直径比减小减振孔间距更有利于减振孔对爆炸应力波能量的吸收。现场试验方面,Uysal等^[11]进行了3排减振孔的现场爆破试验,与减振孔前测点的峰值质点振动速度相比,孔后测点峰值质点振动速度降低了18%。丁松波等^[12]通过试验对比了有无减振孔时测点水平方向与垂直方向的峰值质点振动速度,研究发现,减振孔的最大隔振率达到22.4%。何兴贵等^[13]通过研究发现,减振孔后质点主振频率急剧增大,可有效防止被保护对象发生共振。徐亮^[14]通过

多排密集钻孔现场试验研究发现,增大减振孔孔径后,减振孔后水平方向上峰值质点振动速度的减小幅度大于垂直方向。傅洪贤等^[15]、高宇璠等^[16]基于近距离下穿既有运营地铁隧道的爆破试验,提出了在爆破掌子面掏槽区采用减振孔的爆破减振措施,有效降低了既有隧道的爆破振动速度。Zhu等^[17]开展了减振孔与邻近洞室的模型试验,发现随着减振孔直径和排数的增加或减振孔间距的减小,邻近洞室侧壁的第一峰值压应变和峰值质点振动速度减小,隔振率显著增大。郑文富^[18]通过模型试验发现,随着减振孔排数的增加,孔后的水平径向主振频率呈增大趋势,水平切向和垂直方向上主振频率变化规律不明显。孙崔源等^[19]通过试验研究了减振孔后不同距离的地表峰值质点振动速度,分析了峰值质点振动速度的衰减规律。

总体而言,当前学者们对减振孔减振效应的研究做了大量的工作,研究成果对实际工程中减振孔的设置具有一定的参考价值。然而,数值模拟研究需做大量简化,不能真实有效地反映实际工程,其计算结果的正确性、可靠性难以保证。而减振孔现场试验研究中,试验规模均较小或者现场条件过于简单,对复杂环境条件下减振孔减振效应的试验研究不足;此外,现场试验中关于充水对减振孔减振效应的影响研究极少。基于此,笔者以深圳地铁16号线1号综合井基坑爆破工程为依托,通过现场试验,综合研究减振孔的孔径、排间距、充水状况对减振孔减振效应的影响。

1 工程背景

1.1 工程概况

深圳地铁16号线1号综合井位于宝荷深惠立交桥西侧花坛处,东、南、西侧3个方向均为环形道路。综合井基坑场地平整,长度为37 m,标准段宽

15 m(局部 18.7 m),基坑开挖深度 37.3 m,竖井结构形式为 6 层框架结构,爆破开挖方量约 18 000 m³,采用明挖顺筑法施工。地铁 14 号线侧穿综合井东南侧,平面净距为 5.3 m,地铁隧道埋深为 19.7 m,东南侧的地铁 3 号线现有高架桥桩离综合井平面距离约为 40 m。正南方爱南人行天桥离综合井平面净距为 14 m。北侧星河 Coco park 商业圈离综合井平面距离约为 75 m。综合井与周边环境相对位置关系如图 1 所示。综合井施工场地地层岩性较复杂,从上至下依次包括全新统人工填土层(Q4ml)、第四系全新统冲洪积层(Q4al+pl)、白垩系燕山四



图1 综合井与邻近建(构)筑物平面位置示意图

Fig. 1 Planar position diagram of comprehensive well and adjacent structures

期($\gamma k1$)、石炭系下统测水组(C1c)、石炭系下统石蹬子组(C1s)。基坑爆破开挖揭露的岩石为微风化砂岩或灰岩,见岩深度约为 12 m,普氏系数为 $f=10\sim 12$ 。微风化砂岩或灰岩的物理力学参数如表 1 所示。此外,综合井施工段内存在溶洞和溶洞充填物等特殊岩溶不良地质。

表 1 岩石物理力学参数				
Table 1 Physical and mechanical parameters of rock				
岩石类型	密度/ (g/m ³)	纵波速度/ (m/s)	弹性模量/ GPa	泊松比
微风化石灰岩	2.868	3 160	29.9	0.29
微风化砂岩	2.380	2 940	11.13	0.26

1.2 基坑开挖方案

根据爆破区域周边环境,基于安全、科学、经济的原则,综合考虑工程工期要求及工艺施工特点,采用浅孔台阶控制爆破的方案进行开挖,炮孔直径为 42 mm,其他爆破参数如表 2 所示,炮孔排数严格控制在 3 排以内。采用 2 号岩石乳化炸药,装药结构为连续耦合装药,起爆药包置于炮孔底部 1/3 处;采用数码雷管起爆网络,孔间延期时间为 50 ms,排间延期时间为 110 ms。为了减少爆破振动对邻近建(构)筑物的影响,地铁 14 号线的爆破安全距离为 8.3 m,地铁 3 号线的爆破安全距离约为 43 m,人行天桥的爆破安全距离约为 16 m,星河 Coco park 的爆破安全距离约为 77 m。

表 2 爆破参数表							
Table 2 Blasting parameter table							
台阶高度/m	最小抵抗线/m	超深/m	装药长度/m	堵塞长度/m	间距/m	排距/m	装药量/kg
3.0	1.2	0.4	1.8	1.2	1.2	1.2	1.73
4.0	1.2	0.4	2.6	1.4	1.3	1.2	2.50

2 试验方案

综合井东南侧地铁 14 号线隧道属于爆破开挖期间重点保护区域,因此,结合综合井基坑爆破设计方案,将其划分为 7 个不同的试验区域,布设不同参数减振孔,减振孔布设如图 2 所示。因爆破施工时炮孔的分布近似为矩形,为方便开展试验研究,可认为每次爆破施工的爆源位于矩形炮孔的几何中心,爆破开挖顺序按照爆源 1~3 的顺序。爆源 1~3 的空间方位如表 3 所示,其中, L_1 、 L_2 、 L_3 分别为

爆源 1、爆源 2、爆源 3 距离区域 I 基坑开挖线的距离, S_{1-IV} 与 S_{1-VI} 为爆源 1 距离区域 IV 与区域 VI 基坑开挖线的距离, S_{2-III} 与 S_{2-VI} 为爆源 2 距离区域 III 与区域 VI 基坑开挖线的距离, S_{3-II} 与 S_{3-VII} 为爆源 3 距离区域 II 与区域 VII 基坑开挖线的距离, H 为爆源距离地表的深度。爆源 1 施工时在区域 IV、V、VI 开展相应试验,爆源 2 施工时在区域 III 开展相应试验,爆源 3 施工时在区域 I、II、VII 开展相应试验。

根据综合井基坑现场钻机可提供的施工条件

表 3 爆源空间方位											
Table 3 Spatial orientation of detonation source											
爆源 1				爆源 2				爆源 3			
L_1 /m	S_{1-IV} /m	S_{1-VI} /m	H /m	L_2 /m	S_{2-III} /m	S_{2-VI} /m	H /m	L_3 /m	S_{3-II} /m	S_{3-VII} /m	H /m
9	7.5	7.5	16	19	7.5	7.5	16	30	11.2	16	16

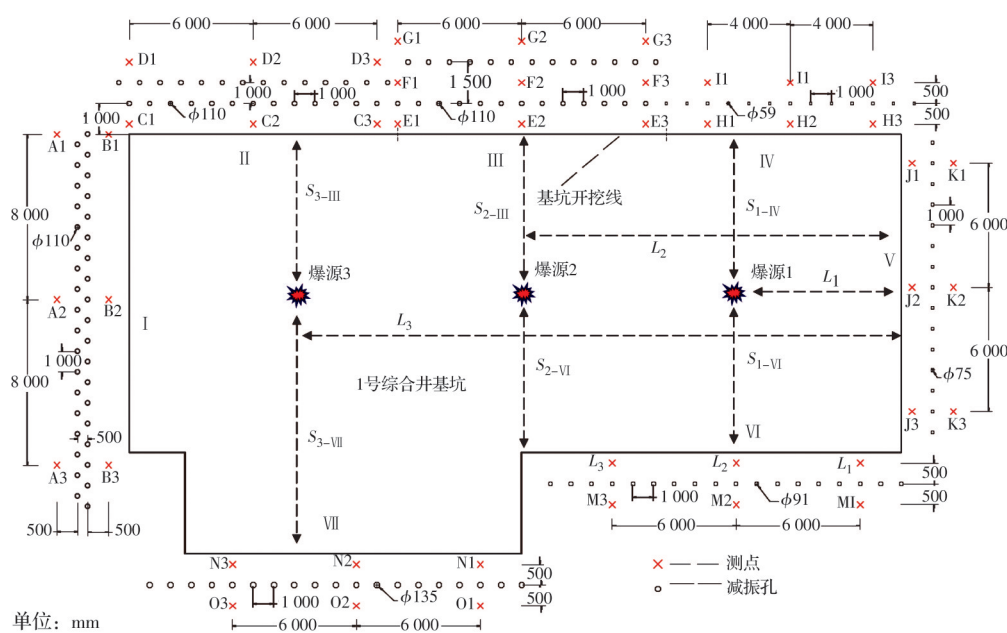


图 2 减振孔试验方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of arrangement of blasting barrier hole test

选取减振孔的孔径参数,由钻机施工难度以及建(构)筑物与综合井基坑的相对位置关系决定减振孔排间距的参数与方位,为了合理研究水充填度对减振孔减振效果的影响,设置了5个不同参数。减振孔试验方案见表4~表6。减振孔距离基坑开挖边缘1 m,深度约为37.3 m,除在区域Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ布设双排减振孔外,其他区域布设单排减振孔,双排减振孔为梅花型。此外,减振孔内采用PVC管护壁,防止发生塌孔,并且可使减振孔内保持充水状态。水充填度是减振孔内充水部分高度与减振孔深度之比。减振孔水充填度爆破试验开始前,在试验区域Ⅵ通过采用地下水位监测仪测量各减振孔的水位,保证各减振孔内水位符合相应的试验条件。每次向减振孔内充填水的长度为减振孔深度的1/4,即约为9.3 m。进行减振孔水充填度试验时,爆源深度、减振孔内充水部分高度以及减振孔深度的相对关系如图3所示。其中 H 为爆源1深度、 h 为减振孔内充水部分高度、 h_0 为减振孔深度。

根据试验设计方案,试验中测试的物理量为地表质点振动速度。采用L20-S型爆破振动测试仪测

表 4 孔径对减振孔隔振率的影响试验方案

Table 4 Experimental scheme of the influence of diameter on the vibration-isolation rate of barrier hole

爆源	试验区域	孔径/mm	孔间距/mm	排数
爆源 1	Ⅳ	59	1 000	1
	Ⅴ	75	1 000	1
	Ⅵ	91	1 000	1
爆源 3	Ⅰ	110	1 000	1
	Ⅶ	135	1 000	1

表 5 排间距对减振孔隔振率的影响试验方案

Table 5 Experimental scheme of the influence of row spacing on the vibration-isolation rate of barrier hole

爆源	试验区 域	孔径/ mm	孔间距/ mm	排间距/ mm	排数
爆源 2	Ⅲ	110	1 000	1 500	2
爆源 3	Ⅰ	110	1 000	500	2
	Ⅱ	110	1 000	1 000	2

表 6 水充填度对减振孔隔振率的影响试验方案

Table 6 Experimental scheme of the influence of filling degree on the vibration-isolation rate of barrier hole

试验 区域	孔径/ mm	孔间距/ mm	爆源 1 深 度 H /m	水充填 度/%	充水高度 h /m
Ⅵ	91	1 000	16	0	0
			20	25	9.3
			24	50	18.6
			28	75	27.9
			32	100	37.2

试地表水平径向(X)、水平切向(Y)以及竖直方向(Z)3个方向的振动速度。为了更好地对减振孔减振效应进行定量分析以及反映减振孔的减振隔振效果,各试验区域的测点应尽可能地靠近减振孔前后两侧。在综合井基坑地表距离减振孔前后0.5 m处布设相应的测试仪器进行测量,测点尽量选取平整地面,通常使用石膏将三矢量传感器紧紧固定在地面上,同时保证传感器水平径向(X)指向爆源,即指向综合井基坑内。在水平面内与水平径向(X)垂直为水平切向(Y),垂直水平面为竖直方向(Z)。当爆炸波传至地表时,即形成了沿地表传播的瑞利面波。减振孔试验中的测点均布置在基坑周边地表,

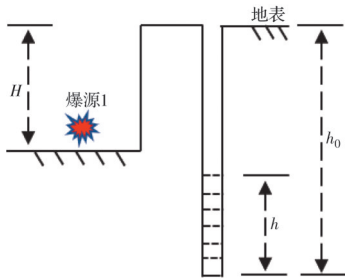


图3 减振孔水充填度试验布置示意图

Fig. 3 Water filling proportion test layout diagram of barrier hole

各测点处的振动传感器接受到的均为面波信号。因此,现场试验中主要关注的是爆炸产生的面波。

3 试验结果分析

作为爆破应力波经过岩体介质时爆破振动幅度大小最直接的体现,峰值质点振动速度(PPV)是爆破施工过程中最重要的监测参数。采用峰值质点振动速度计算出减振孔的隔振率,用以评价减振孔的减振效果。减振孔的隔振率计算公式为^[8]

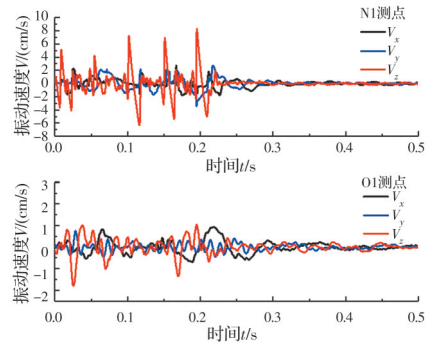
$$VIR = \frac{PPV_1 - PPV_2}{PPV_1} \quad (1)$$

式中:VIR为减振孔的隔振率;PPV₁与PPV₂分别为减振孔前、后测点的峰值质点振动速度,单位为cm/s。

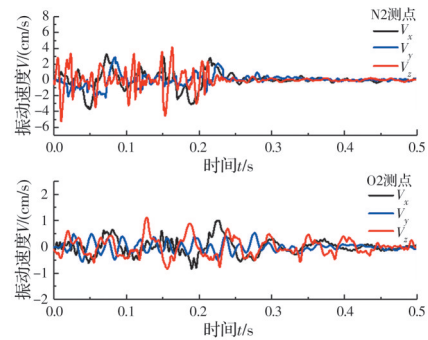
3.1 爆破振动速度与频率分析

根据上述减振孔现场试验以及爆破方案,依据实际爆破工程得到12次不同炸药量、不同爆破位置相应的减振孔前、后测点爆破振动测试数据。其中,当爆心距为20.4 m、爆破装药量为174 kg时,减振孔为孔径135 mm、孔间距1 000 mm的单排减振孔,如表4中区域Ⅶ所示。减振孔前测点为N1~N3,减振孔后测点为O1~O3,现场测试结果如表7所示,各组测点波形图如图4所示。由表7可知,竖直方向(Z)峰值质点振动速度均大于水平径向(X)与水平切向(Y)的峰值质点振动速度。此外,减振孔后的峰值质点振动速度明显小于减振孔前,水平径向(X)、水平切向(Y)与竖直方向(Z)的隔振率最小值分别超过了65%、76%、78%,基于合速度的隔振率最小值超过了73%,3个方向的隔振率与基于合速度的隔振率都较高,说明减振孔具有显著的减振隔振作用。

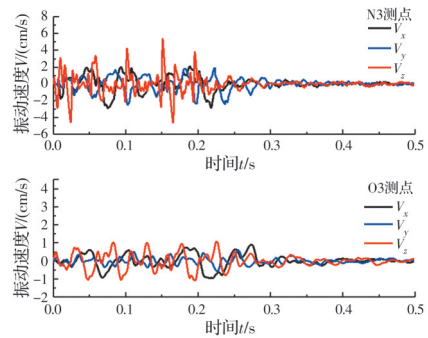
为进一步研究减振孔的减振隔振效应,对试验中N1~N3与O1~O3测点不同方向的爆破信号进行频谱分析,结果如图5所示。通过对比3组测点的频谱分析结果可知,减振孔前后测点的频率有明



(a) 测点N1与测点O1



(b) 测点N2与测点O2



(c) 测点N3与测点O3

图4 测点波形图

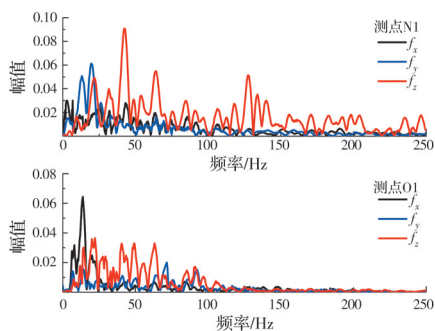
Fig. 4 Waveform diagram of measuring point

显变化。与减振孔前测点相比,减振孔后测点各频段的振动信号均有减弱,特别是在高于100 Hz的频段,振动信号基本消失。总体而言,减振孔前后测点的频谱信号反映出减振孔对爆破振动的明显减弱作用。根据频谱分析对各测点的主振频率进行统计,结果如图6所示。由图6可知,主振频率最小值为6.8 Hz,最大值为71.6 Hz,爆破主振频率主要集中在10~50 Hz的区间内,约占全部测点主振频率的90%。减振孔后O1~O3测点水平切向(Y)与竖直方向(Z)的主振频率大于水平径向(X),而3个方向的峰值质点振动速度较大,其相应的主振频率则较小,3个方向的峰值质点振动速度较小,其相应的主振频率则较大。分析可知,爆破应力波经过减振孔后主振频率显著增大,部分测点出现局部跳跃现象,由于岩体介质的各向异性和不均匀性,导致

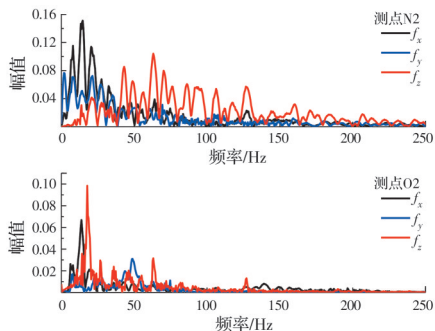
表 7 135 mm 孔径单排减振孔现场试验结果

Table 7 Field test results of single row blasting barrier hole with diameter of 135 mm

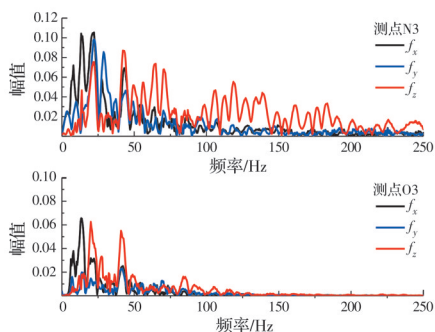
测点	水平径向(X)		水平切向(Y)		竖直方向(Z)		合速度方向	
	峰值振动速度 度/(cm/s)	隔振率/%	峰值振动速度 度/(cm/s)	隔振率/%	峰值振动速度 度/(cm/s)	隔振率/%	峰值振动速度 度/(cm/s)	隔振率/%
N1	2.725	65.5	3.444	78.1	8.295	78.3	8.936	79.8
O1	0.939		0.751		1.795		1.808	
N2	3.700	72.9	2.856	80.3	5.247	78.0	5.348	79.4
O2	1.003		0.562		1.152		1.101	
N3	2.888	67.1	2.492	76.3	5.365	79.9	5.404	73.9
O3	0.950		0.590		1.079		1.409	
隔振率均值		68.5		78.3		78.7		77.7



(a) 测点 N1 与测点 O1



(b) 测点 N2 与测点 O2



(c) 测点 N3 与测点 O3

图 5 测点频谱图

Fig. 5 Spectrogram of measuring point

减振孔对爆破应力波的滤波作用不一致,但整体上仍能反映减振孔的高频滤波作用,可加快爆破应力波的衰减速率;同时,应力波经过减振孔后频率较高,可以有效避免邻近建(构)筑物发生共振现象。

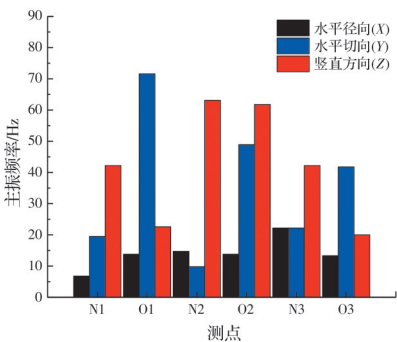


图 6 测点主振频率分析

Fig. 6 Dominant frequency of vibration of measuring points

3.2 减振孔直径对隔振率的影响

基于 X、Y、Z 三个方向 PPV 监测结果以及合成 PPV 结果,分别计算不同减振孔直径条件下减振孔的隔振率,结果如图 7 所示。由图 7(a)、(b)可以看出,随着减振孔直径的增加,水平径向隔振率与水平切向隔振率整体上呈先增加后减小的趋势,水平径向与切向的隔振率最大值分别为 85.7%、84.2%。由图 7(c)可知,随着减振孔直径的增加,竖直方向隔振率逐渐增加,最大值为 78.7%。减振孔直径越大,其减振隔振效果越显著。因此,在实际工程中尽量选择大直径减振孔。

由图 7 可知,减振孔孔径为 75 mm 时,水平径向隔振率为 55.3%,水平切向隔振率为 53.4%,竖直方向隔振率为 63.9%。水平径向隔振率、水平切向隔振率和竖直方向隔振率出现部分异常点。这是因为,孔径为 75 mm 的减振孔位于综合井基坑 V,此处标高为-14.5~-18.6 m,存在多处溶洞,受现场试验场地特殊地质条件的影响,实测结果与理论存在差异。

由图 7(d)可知,随着减振孔直径的增加,基于合速度的隔振率显著增加。当减振孔的直径由 59 mm 增大到 135 mm 时,隔振率由 49.9% 增大至 77.7%,隔振率增加了 27.8%,隔振效果显著增强。应力波传播至孔洞时,将会产生复杂的反射、透射及绕射

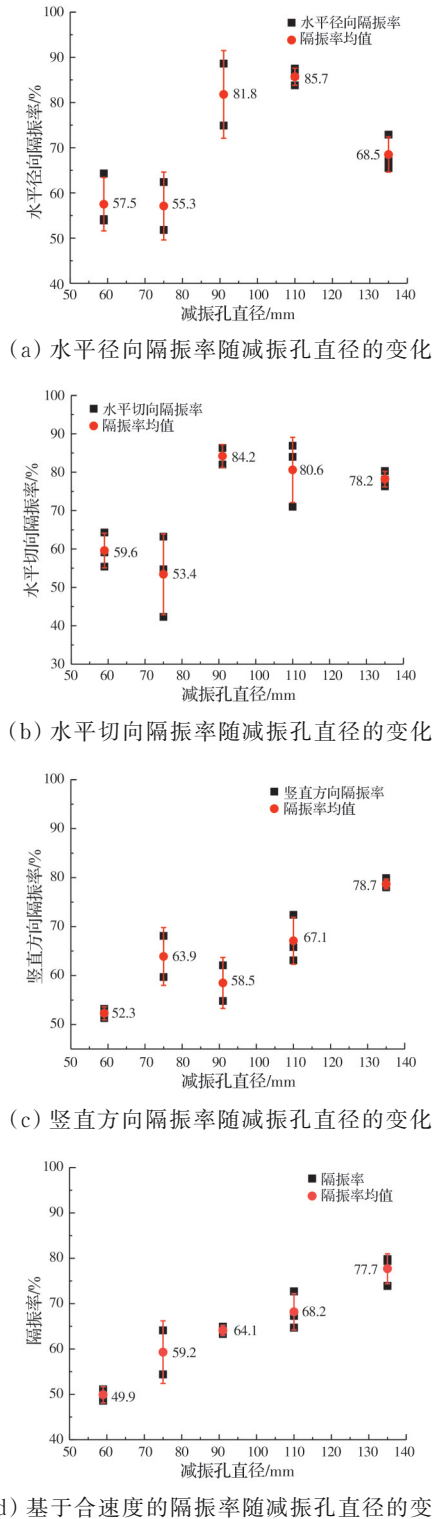


图 7 隔振率随减振孔直径的变化

Fig. 7 Change of vibration isolation rate along with diameter barrier hole

现象,减振孔中充填介质为空气时,一部分入射应力波能量发生损耗。理论上,减振孔直径越大,入射波能量耗散越多,应力波经过减振孔时反射、绕射距离越大,损耗的能量越多,减振效果越好^[20]。因此,试验结果与理论相一致。

3.3 减振孔排间距对隔振率的影响

图 8 为不同减振孔排间距条件下地表测点 3 个方向的隔振率,其中图 8(d)为基于合速度计算的隔振率。由图 8(a)、(b)、(c)可知,随着减振孔排间距的增加,水平径向、水平切向与竖直方向隔振率均

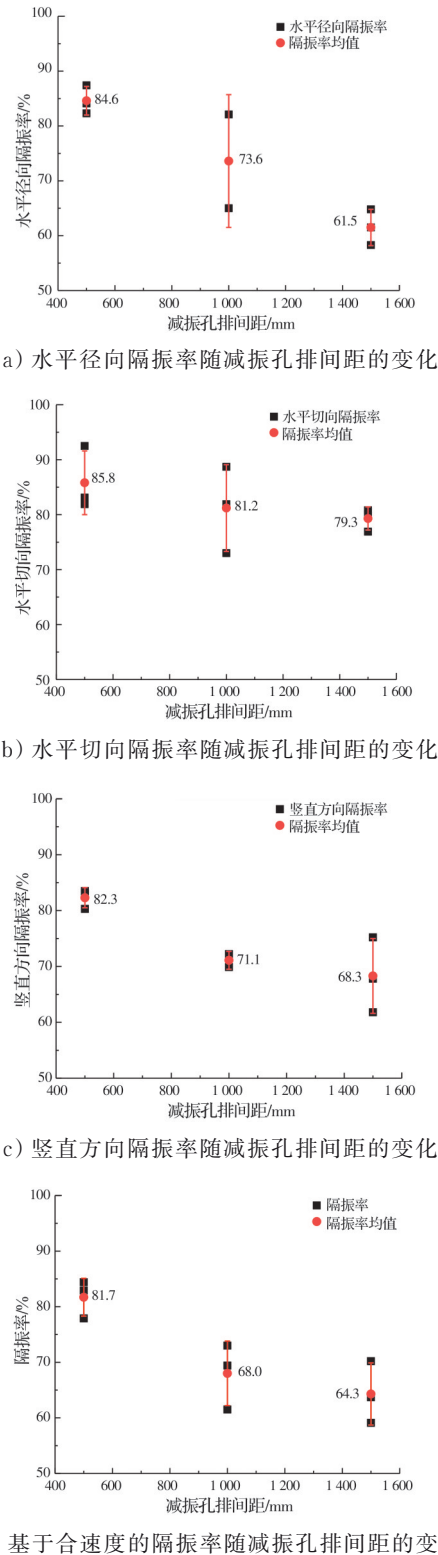


图 8 隔振率随减振孔排间距的变化

Fig. 8 Change of vibration isolation rate along with row spacing of blasting barrier hole

逐渐减小。减振孔排间距与水平径向隔振率呈近似线性负相关,竖直方向隔振率相较于水平切向隔振率降低速率更大。双排减振孔排间距为500 mm时,减振效果最佳;水平径向、水平切向与竖向隔振率最大值分别为86.7%、88.2%、81.6%。减振孔排间距与水平径向隔振率呈近似线性负相关,即随着减振孔排间距的增加,水平径向隔振率线性减小。由图8(b)、(c)可知,水平切向隔振率与竖直方向隔振率的变化趋势大致相同,随着减振孔排间距的增大,水平切向与竖直方向隔振率均逐渐减小,竖直方向隔振率降低速率较快。因此,综合考虑经济成本、施工难度以及施工周期,建议在实际工程中减振孔排间距取500 mm。

由图8(d)可以看出,双排减振孔条件下,隔振率随着减振孔排间距的增大而逐渐减小。双排减振孔排间距为500 mm时,隔振率为82%,减振孔隔振效果显著。理论上,双排减振孔排间距越小,应力波在双排减振孔之间的反射、透射和绕射路径越长,导致减振孔后应力波幅值越小,应力波通过减振孔时损耗的能量越多,从而形成有效的屏蔽区域,即减振孔的减振效果越好^[20]。当减振孔的排间距从500 mm增大到1 000 mm时,隔振率降低了13.7%;而当排间距从1 000 mm增加至1 500 mm时,隔振率仅减小了3.7%,表明减振孔排间距大于

1 000 mm时,减振孔排间距的变化对减振孔隔振效果的影响并不明显。

3.4 减振孔水充填度对隔振率的影响

图9为不同减振孔孔内水充填度条件下地表测点3个方向的隔振率。由图9(a)可知,减振孔充填度从0%增加至100%时,减振孔水平径向隔振率逐渐减小,随着减振孔充填度的增加,水平径向隔振率显著减小。由图9(b)可以看出,减振孔充填度从25%增加至100%时,水平切向隔振率逐渐减小,且减小速率逐渐降低。由图9(c)可以看出,当充填度从25%增加至100%,竖直方向隔振率逐渐降低,且降低速率逐渐增大。由以上分析可知,空孔的减振隔振效果更好,因此,实际工程中应避免减振孔内部充填水。

由图9(d)可知,随着减振孔充填度的增加,基于合速度的隔振率先增大后减小。减振孔充填度由25%增加至100%时,减振孔的隔振率呈线性减小趋势。理论上,由于水的波阻抗大于空气,水对应力波幅值的降低作用小于空气^[20]。减振孔水充填度越多,入射波能量耗散越少,从而应力波经过减振孔反射、绕射后损耗的能量越少,减振效果越差。因此,充水减振孔的隔振率小于未充水减振孔的隔振率,且减振孔内水充填度越高,隔振率越小。总体而言,试验结果与理论相一致。

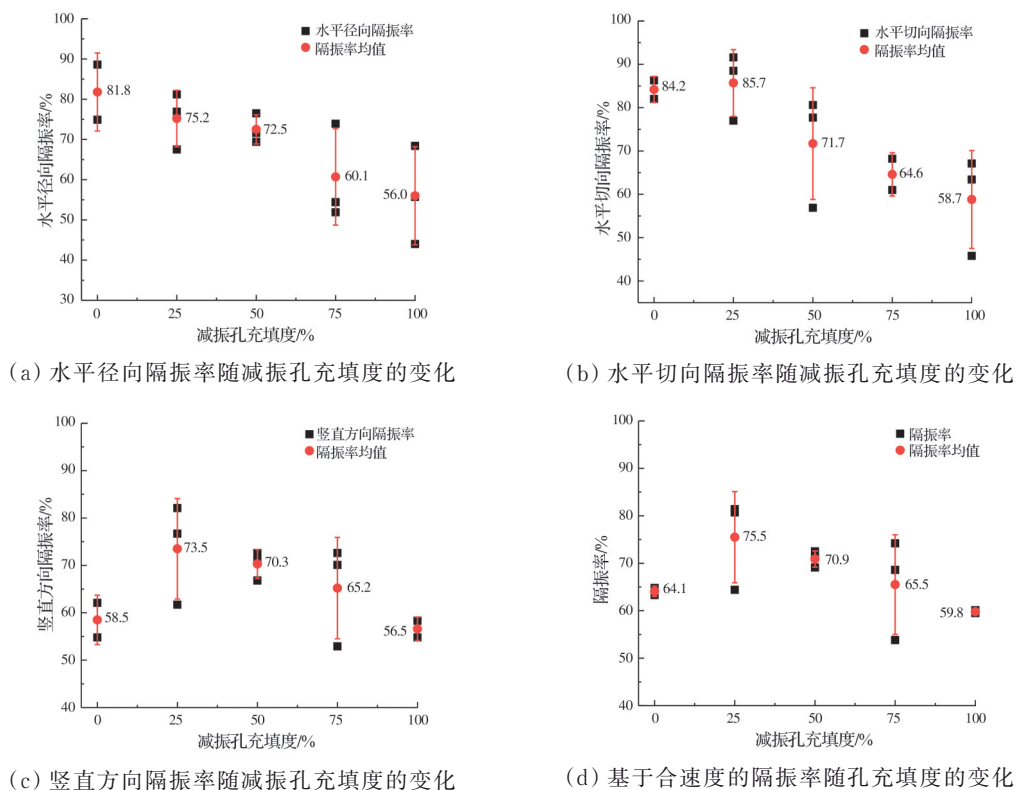


图9 隔振率随减振孔充填度的变化

Fig. 9 Change of vibration isolation rate along with water filling proportion in blasting barrier hole

4 结论

针对基坑爆破开挖过程中引起的爆破振动问题,通过现场试验,研究减振孔参数对减振孔减振效果的影响规律,得出如下结论:

1)当减振孔直径由59 mm增加到135 mm时,水平径向与水平切向隔振率均呈先显著增加后缓慢减少的趋势,竖直方向隔振率整体上表现为逐渐增加,基于合速度的隔振率显著增加。水平径向、水平切向、竖直方向及基于合速度的隔振率最大值分别可达85.7%、84.2%、78.7%、77.7%。

2)当减振孔排间距由500 mm增加到1 500 mm时,水平径向与竖直方向隔振率明显减小,而水平切向隔振率逐渐减小,基于合速度的隔振率先显著减小后趋于稳定。水平径向、水平切向、竖直方向及基于合速度的隔振率最大值分别可达84.6%、85.8%、82.3%、81.7%。

3)当减振孔水充填度由0增加到100%时,水平径向隔振率显著减小,而水平切向与竖直方向隔振率先增大后减小,基于合速度的隔振率先增加后逐渐减小。水平径向、水平切向、竖直方向及基于合速度的隔振率最大值分别可达81.8%、85.7%、73.5%、75.5%。

参考文献

- [1] XIE H P, ZHU J B, ZHOU T, et al. Conceptualization and preliminary study of engineering disturbed rock dynamics[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2020, 6(2): 34.
- [2] XIE H P, ZHANG Y H, CHEN Y Y, et al. A case study of development and utilization of urban underground space in Shenzhen and the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 107: 103651.
- [3] ZHU J B, LI Y S, WU S Y, et al. Decoupled explosion in an underground opening and dynamic responses of surrounding rock masses and structures and induced ground motions: A FEM-DEM numerical study [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 82: 442-454.
- [4] DENG X F, ZHU J B, CHEN S G, et al. Numerical study on tunnel damage subject to blast-induced shock wave in jointed rock masses [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 43: 88-100.
- [5] ZHU J B, DENG X F, ZHAO X B, et al. A numerical study on wave transmission across multiple intersecting joint sets in rock masses with UDEC [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(6): 1429-1442.
- [6] 卢文波. 应力波与可滑移岩石界面间的相互作用研究[J]. *岩土力学*, 1996, 17(3): 70-75.
LU W B. A study on interaction between stress wave and slipping rock interface [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1996, 17(3): 70-75. (in Chinese)
- [7] 卢文波, 赖世襄, 董振华. 岩石钻爆开挖中预裂缝的隔震效果分析[J]. *爆炸与冲击*, 1997, 17(3): 193-198.
LU W B, LAI S X, DONG Z H. Analysis of vibration isolating effect of pre-splitting crack in rock excavation by blasting[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1997, 17(3): 193-198. (in Chinese)
- [8] 赵蕊, 李雅诗, 王建新, 等. 减振孔减振效应的数值模拟研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(2): 49-59.
ZHAO R, LI Y S, WANG J X, et al. Numerical study on vibration reduction effect of barrier holes [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(2): 49-59. (in Chinese)
- [9] LEI Z, KANG Q, ZHAO M S, et al. Numerical simulation and experimental study on vibration-decreasing function of the barrier holes [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 602-605: 53-59.
- [10] LI Z Y, WANG L Q, LIANG J, et al. Energy and vibration absorption characteristics of damping holes under explosion dynamic loading [J]. *ACS Omega*, 2020, 5(28): 17486-17499.
- [11] UYSAL O, ERARSLAN K, CEBI M A, et al. Effect of barrier holes on blast induced vibration [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(5): 712-719.
- [12] 丁松波, 吴从师, 罗杰峰, 等. 地铁基坑爆破中减振孔的降振效果实测研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2014, 11(4): 85-89.
DING S B, WU C S, LUO J F, et al. Study on the effect of damping hole on reducing blasting vibration under the excavation of subway foundation pits [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2014, 11(4): 85-89. (in Chinese)
- [13] 何兴贵, 左宇军, 赵明生, 等. 减振孔对爆破振动的影响规律研究[J]. *矿业研究与开发*, 2016, 36(9): 93-96.
HE X G, ZUO Y J, ZHAO M S, et al. Influence study of damping hole on blasting vibration [J]. *Mining Research and Development*, 2016, 36(9): 93-96. (in Chinese)
- [14] 徐亮. 多排密集钻孔爆破减振理论及设计方法研究[D]. 福建 泉州: 华侨大学, 2014.
XU L. Study of the blasting damping theory and the design method of multi-row drilling holes [D]. Quanzhou, Fujian: Huaqiao University, 2014. (in Chinese)
- [15] 傅洪贤, 赵继罡, 高宇璠. 铁路隧道近距下穿地铁隧道的微振爆破技术[J]. *铁道工程学报*, 2019, 36(9): 72-78.

- FU H X, ZHAO J G, GAO Y F. Micro-vibration blasting technology for railway tunnels beneath existing metro tunnel in short distance [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(9): 72-78. (in Chinese)
- [16] 高宇璠, 傅洪贤. 近距离下穿既有盾构隧道的隧道钻爆降振技术研究[J]. 振动工程学报, 2021, 34(2): 321-328.
- GAO Y F, FU H X. Drilling and blasting technology for closely crossing existing shield tunnel [J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(2): 321-328. (in Chinese)
- [17] ZHU J B, ZHAO R, LI Y S, et al. Experimental study of vibration reduction effect of barrier holes under blasting [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(2): 1185-1198.
- [18] 郑文富. 减振孔参数对降振效率影响研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2016.
- ZHENG W F. Study of damping hole parameters influence on blasting vibration reduction [D]. Xiangtan, Hunan: Hunan University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [19] 孙崔源, 薛里, 刘世波, 等. 深基坑减震孔降震效果试验和数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(Sup1): 237-242.
- SUN C Y, XUE L, LIU S B, et al. Experimental and numerical simulation on vibration reduction effect of damping holes for deep foundation pits[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(Sup1): 237-242. (in Chinese)
- [20] ACHENBACH J D. Wave propagation in elastic solids [M]. Amsterdam, North-Holland Pub. Co.; New York, American Elsevier Pub. Co., 1973.
- (编辑 胡玲)