

引用格式 胡贵博,吕岸霖,张凯,等. 基坑旋挖钻进振动对周边建筑及环境影响规律研究[J]. 工业建筑,2024,54(11): 226-233. HU G B, LYU A L, ZHANG K, et al. Research on Influence Laws of Vibration by Rotary Drilling During Foundation Excavation on Surrounding Buildings and the Environment [J]. Industrial Construction, 2024, 54: 226-233 (in Chinese). DOI: 10.3724/j. gyjzG22122010

基坑旋挖钻进振动对周边建筑及环境影响规律研究^{*}

胡贵博^{1,2} 吕岸霖^{1,2} 张 凯^{1,2} 王志新³ 唐超华⁴ 朱建波^{1,2}

(1. 广东省深地科学与地热能开发利用重点实验室, 广东深圳 518060; 2. 深圳大学深地科学与绿色能源研究院, 广东深圳 518060; 3. 中铁十六局集团有限公司, 北京 100018; 4. 深圳市市政设计研究院有限公司政院, 广东深圳 518029)

摘 要 为研究基坑旋挖钻进施工振动对周边建筑及环境的影响,以深圳地铁 16 号线 5 号综合井工程为依托,对基坑旋挖钻进施工过程中周边地表及建筑物的振动进行现场监测,通过对监测振动数据的时域、频域分析,得出:旋挖钻进引发的周边地表及建筑振动以竖向为主;楼板质点的竖向峰值振动速度及振动加速度级整体随楼层升高呈线性增长趋势;振动加速度三分之一倍频程谱中,竖向振动最大加速度随楼层升高呈增长趋势;由旋挖钻进引发的楼板水平向振动和竖向振动以低中频为主,主要集中在 4~40 Hz;周边建筑内水平向和竖向振动最大加速度所对应的中心频率范围为 8~25 Hz;除建筑物楼顶测点及周边地表测点处竖向振级最大值大于 75 dB 以外,其他测点处竖向振级最大值均低于 75 dB。研究成果对于基坑旋挖钻进施工振动对周边建筑物及环境的影响分析具有一定的指导意义。

关键词 旋挖钻进;振动;质点峰值振动速度;最大竖向振级;振动传播规律

Research on Influence Laws of Vibration by Rotary Drilling During Foundation Excavation on Surrounding Buildings and the Environment

HU Guibo^{1,2} LYU Anlin^{1,2} ZHANG Kai^{1,2} WANG Zhixin³ TANG Chaohua⁴ ZHU Jianbo^{1,2}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Deep Earth Sciences and Geothermal Energy Exploitation and Utilization, Shenzhen 518060, China; 2. Institute of Deep Earth Sciences and Green Energy, College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, 518060, China; 3. China Railway 16th Bureau Group Co., Ltd., Beijing 100018, China; 4. Shenzhen Municipal Design and Research Institute, Shenzhen Co., Ltd., 518029, China)

Abstract: To study the influence law of vibration induced by rotary drilling during foundation excavation on surrounding buildings and the environment, the vibration of the adjacent ground and buildings were monitored under construction of rotary drilling for foundation excavation of the comprehensive well 5 in Shenzhen metro line 16. The following main conclusions were drawn based on time and frequency domain analysis on the field-recorded vibration data. Firstly, the vertical vibration of surrounding buildings caused by rotary drilling was stronger than horizontal vibration. Secondly, the vertical peak particle velocity (PPV) and the vertical vibration acceleration level on the floor of adjacent buildings linearly increased as the floor rose. Thirdly, in the one-third octave spectrum of vibration acceleration, the maximum vibration acceleration in the vertical direction increased with the increase in the floor. The floor vibration in vertical and horizontal directions caused by rotary drilling was mainly in low and medium frequencies, mainly concentrated in 4 to 40 Hz. And the range of center frequency corresponding to the horizontal and vertical peak vibration acceleration of the nearby buildings was in 8 to 25 Hz. Finally, except the maximum vertical vibration level on the roof and the surrounding ground were larger than 75 dB, the maximum vertical vibration level measured at other observation points was below 75 dB. The relevant findings were of guiding significance for analysis of the impact of vibration induced by rotary drilling on surrounding buildings and the environment.

Keywords: rotary drilling; vibration; peak particle velocity; maximum vertical vibration level; vibration propagation law

^{*} 广东省“珠江计划”创新创业团队项目(2019ZT08G315);国家自然科学基金面上基金项目(51974197);深圳市科创委基础研究面上项目(JCYJ20210324093402006)。

第一作者:胡贵博,硕士研究生, huguibo2020@email.szu.edu.cn。

通信作者:朱建波,博士,教授,博士生导师,主要从事非连续岩体波传播理论、裂隙岩体动态破坏行为、岩体工程动力响应规律与防护、深部动力灾害机理与防控的研究, jianbo.zhu@szu.edu.cn。

收稿日期:2022-12-20

随着城市人口日益增长,交通压力逐渐增大。虽然地铁在减轻交通拥堵、方便人们出行上发挥重大作用,但在地铁的建造过程中,施工产生的振动极易对周边环境产生不良影响。^[1-3]尤其在土地资源紧张的地区,地铁施工区与建筑物距离较近,施工产生的振动会严重影响到周围建筑和居民。因此,有必要对地铁施工产生的振动进行现场监测及评价。^[4-5]

地铁基坑开挖方法主要分为爆破开挖和非爆破开挖。对于爆破开挖,已有较多学者对爆破振动特性及振动传播规律进行了相关研究^[6-13]。但对于非爆破开挖振动研究较少,仅有对盾构机开挖隧道引发的振动进行了有限的研究^[14-16],关于对其他机械开挖(如旋挖钻机开挖等)振动的研究十分匮乏。此外,不少学者对地铁运行振动及爆破开挖振动随楼层升高的变化规律也进行了研究。赵凯等通过有限元数值仿真,发现当建筑物较低时,地铁运行引发的楼板竖向振级通常随楼层升高而增大,而高层建筑则会在某一中间楼层出现明显的振动放大效应。^[17]花雨萌等理论分析出振动放大区现象的发生机理,发现楼板跨度越小的建筑,振动放大效应愈明显。^[18]于蕾对北京门头沟区山体爆破开挖的周边建筑物振动响应进行现场监测,发现低频爆破振动会导致高层建筑产生顶层振动放大效应。^[19]雷振等对贵阳市观山湖区某道路边坡爆破过程进行了振动监测,发现随着距爆源高差的增大,爆破振动速度逐渐增大。^[20]总体而言,当前关于建、构筑物施工和运营引发的振动研究主要集中在爆破和列车振动,而对于钻进等机械开挖引发振动的研究较少。由于在振动性质上存在的差异,有关爆破、列车振动的研究成果并不适用于钻进等机械开挖。^[21-24]为了确保施工过程中周边建筑物或环境的安全,有必要深入分析钻进等机械开挖的振动特性,以及其对周边建筑或环境的影响。

依据深圳地铁 16 号线 5 号综合井旋挖钻进施工,对钻进引发的周边建筑振动进行了监测,通过对建筑楼板振动进行时域、频域分析,总结旋挖钻进振动特点及随楼层升高的振动传播规律,并分析振动对建筑及周边环境的影响,对了解钻进等机械开挖振动特性及振动分析方法具有一定的现实意义。

1 工程概况

深圳地铁 16 号线 5 号综合井位于深圳龙平西路和黄阁路路口东南侧,沿龙平西路东—西方向设

置,地形较为平整,岩土层主要分为 4 层,分别为素填土、粉质黏土、含砾粉质黏土和微风化灰岩,其中微风化灰岩岩质较硬,平均层厚为 9.76 m。各岩土层物理力学指标见表 1。

表 1 场地岩土层物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of rock and soil layers in site

地层编号	岩土名称	变形模量 E_0/MPa	地基承载力 特征值 f_{ak}/kPa	泊松比 μ
① ₁	粉质黏土素填土	8		0.35
⑥ ₁₋₃	粉质黏土	14	150	0.32
⑧ ₅₋₃	含砾粉质黏土	20	200	0.28
⑩ ₄₋₁₂	微风化灰岩		5 000	0.15

综合井南侧为新大新家居广场和商业楼,距离综合井约为 16.4 m。家居广场为四层的混凝土框架结构建筑,层高为 4 m,首层楼板采用 C25 混凝土,二层及以上楼板采用 C35 混凝土;商业楼为四层钢框架结构建筑,层高为 4 m,采用组合楼板,其中钢承板为厚 0.8 mm 的 Q235B 钢板,上浇 100 mm 厚 C20 细石混凝土。5 号综合井围护结构采用地下连续墙,墙厚为 1 m,采用 C30 水下混凝土,抗渗等级的为 P6。共设置 8 道混凝土支撑+2 道钢支撑换撑,混凝土支撑截面尺寸为 1 m×1 m,钢支撑尺寸为 $\phi 800$,基坑开挖深度为 38.4 m。连续墙槽段开挖采用旋挖钻机钻孔、双轮铣成槽,钻孔机械采用三一重工生产的 SR360R 旋挖钻机,其主要参数见表 2。

表 2 旋挖钻机主要参数

Table 2 Main parameters of rotary drilling rigs

整机高度/ mm	工作 质量/ t	发动 机功率/ kW	动力头 转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	最大钻孔	
				直径/ mm	深度/ mm
26 365	120	300	5~25	2 500	100

2 监测结果和分析

2.1 监测方法和测点布置

2.1.1 监测方法

采用成都交博科技有限公司生产的 L20 智能爆破测振仪及振动传感器对各测点振动速度进行监测,记录测点 X、Y、Z 三个方向的振动速度数据。现场监测期间,保证传感器 X 方向指向振源,在水平面内与 X 方向垂直为 Y 方向,竖直方向为 Z 方向。设置仪器触发振动速度阈值 0.01 cm/s,记录时长 8 s/次,采样频率为 10 kHz。

2.1.2 测点布置

考虑到现场环境及旋挖钻进振动特点,在振动

源与建筑物间布设一台监测仪器,编号为 C_1 ,距新大新家居广场(A区域)测点和商业楼(B区域)测点约 8 m。为记录楼层随旋挖钻进引起的振动的变化情况,在建筑物内布设了多个监测点,监测点分布于建筑 A、B 两区域的第一~四层,通过对楼板各个位置振动进行初步监测,确定 A 区域振动较强点为每层楼消防通道入口处左侧角落,B 区域振动较强点为每层楼曲面墙墙脚,因此测点布置在上述各层楼板振动较强点位,同一区域内不同楼层测点的相对位置相同,测点编号为区域+层数。另在 B 区域楼顶加设一台监测仪器,编号为 B_5 。现场监测点布置示意如图 1 所示。 $A_1 \sim A_4$ 、 $B_1 \sim B_5$ 、 C_1 测点监测位置见表 3,所有测点均监测楼板 X、Y、Z 三个方向的振动速度。

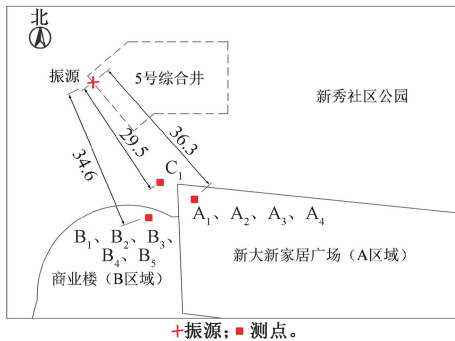


图 1 现场监测点布置示意 m

Fig. 1 A schematic diagram for locations of observation points on site

2.2 结果和分析

2.2.1 峰值质点振动速度

现场监测共获取 12 组有效振动数据,其中测点 A_1 、 B_1 和 C_1 的 X、Y、Z 方向质点峰值振动速度 (PPV) 见图 2。可知:测点 A_1 、 B_1 X 方向的 PPV 均大于 Y 方向的 PPV,约为 Y 方向 PPV 的 1.2~2.4

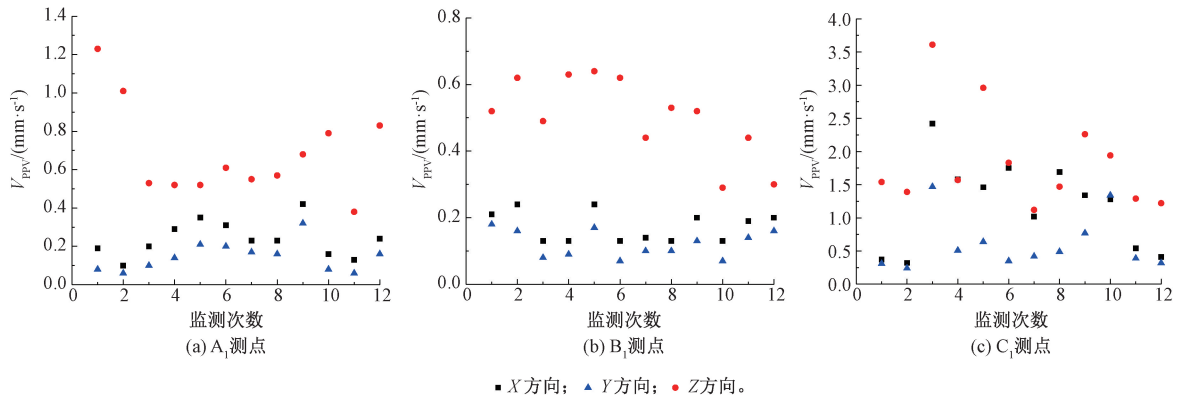


图 2 A_1 、 B_1 、 C_1 测点各方向 PPV 记录值

Fig. 2 Recorded PPV in each direction at observation points A_1 , B_1 and C_1

表 3 现场监测点位置

Table 3 Locations of observation points on site

测点	所在区域	楼层	测点	所在区域	楼层
A_1	A	1	B_2	B	2
A_2	A	2	B_3	B	3
A_3	A	3	B_4	B	4
A_4	A	4	B_5	B	5
B_1	B	1	C_1	C	1

倍,表明 X 方向最大振动速度高于 Y 方向。 C_1 测点除第 10 次监测结果以外,其他监测结果满足 X 方向最大振动速度高于 Y 方向。此外, A_1 和 B_1 测点 Z 方向的 PPV 大于 X、Y 方向,且差值较大。 A_1 、 B_1 和 C_1 测点中,由于测点 C_1 离振动源最近,所以该测点 X、Y、Z 方向的 PPV 通常大于其他两侧点,测点 A_1 和 B_1 与振动源距离相当,但是受振动波的传播介质、传播方向等因素的影响,最大 PPV 值相差较大,分别为 1.230、0.642 mm/s。 A_1 、 B_1 和 C_1 测点三个振动方向 PPV 值区间分布统计如图 3 所示。由图 3(a)、(b)可知:建筑物 A_1 和 B_1 测点 X 和 Y 方向 PPV 值大于 0.4 mm/s 区间内的占比不到 10%,而 Z 方向 PPV 值大于 0.4 mm/s 的占比超过 80%。由图 3(c)可知:地表 C_1 测点 Z 方向所有数据均大于 0.4 mm/s,而 X 和 Y 方向 PPV 值大于 0.4 mm/s 区间内的占比分别为 83.3%与 66.7%。可见,旋挖钻进引起的 Z 方向振动占主导地位。

对 A、B 区域各楼层测点 Z 方向多次测得的 PPV 值求平均值,并对平均值进行拟合,结果分别如图 4、图 5 所示。可知:各测点 PPV 均值的拟合决定系数均大于 0.8,说明拟合结果较合理。由拟合结果可得:基坑旋挖钻进施工振动作用下,邻近建筑内测点的 PPV 随着测点所处的楼层层数的增加呈线性增大,测点的 PPV 与楼层层数的函数关

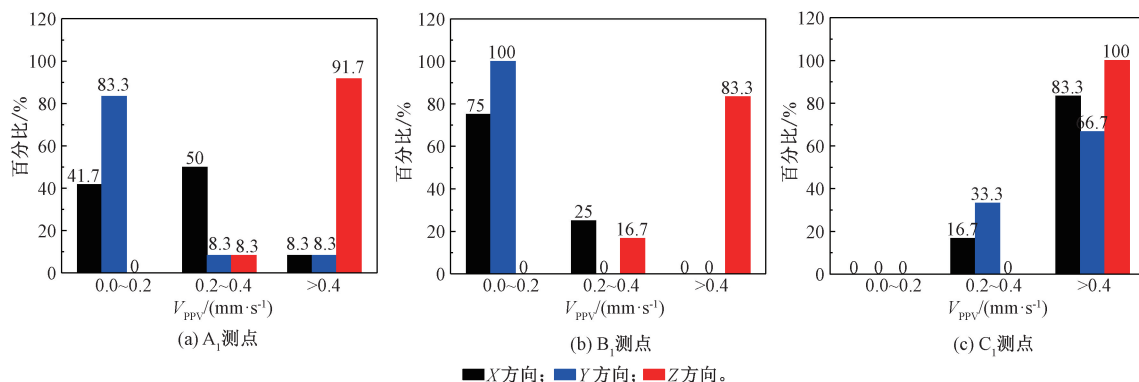
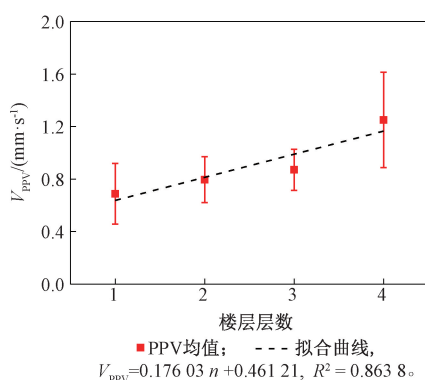
图 3 A₁、B₁、C₁ 测点各方向 PPV 占比Fig. 3 Percentages of PPV in each direction of observation points A₁, B₁ and C₁

图 4 A 区域各测点 Z 方向 PPV

Fig. 4 PPV in the Z direction of each observation point in area A

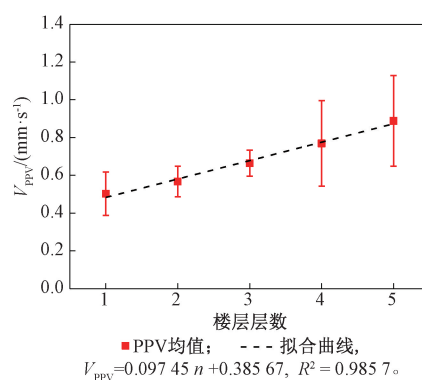


图 5 B 区域各测点 Z 方向 PPV

Fig. 5 6 PPV in the Z direction of each observation point in area B

系为:

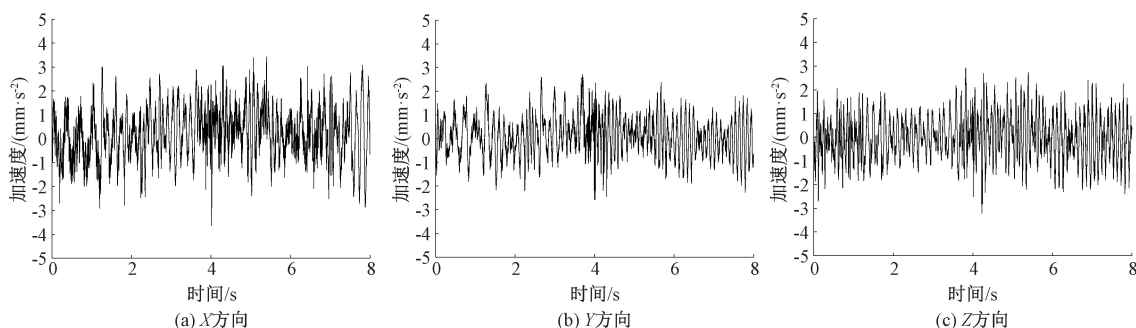
$$V_{PPVZ} = an + b \quad (1)$$

式中: V_{PPVZ} 为 Z 方向质点峰值振动速度; n 为楼层层数; a 、 b 为拟合系数。

2.2.2 振动加速度时域和频域分析

对监测所得 X 方向、Y 方向和 Z 方向振动速度进行微分处理,可以得到振动加速度。当旋挖钻机没有运行的时候,在各测点可以获得环境背景振动加速度信息。图 6 为 B₅ 测点环境背景 X、Y、Z 三个

方向振动加速度记录;图 7 为基坑旋挖钻进施工时 B₅ 测点 X、Y、Z 三个方向振动加速度记录。可知:X 和 Z 方向背景振动加速度处于同一水平,均为 10^{-3} m/s^2 量级;而旋挖钻进下楼板振动加速度有明显提升,其中 X 和 Y 方向振动加速度约增大 3 倍, Z 方向振动加速度约增大 10 倍。此外,基坑旋挖钻进施工期间,测点 B₅ 的振动加速度呈现一定的周期性;Z 方向质点振动加速度明显大于 X 和 Y 方向振动加速度;Z 方向质点峰值振动加速度

图 6 测点 B₅ 环境背景测得的振动加速度时程Fig. 6 Time-dependent vibration acceleration in conventional background measured at point B₅

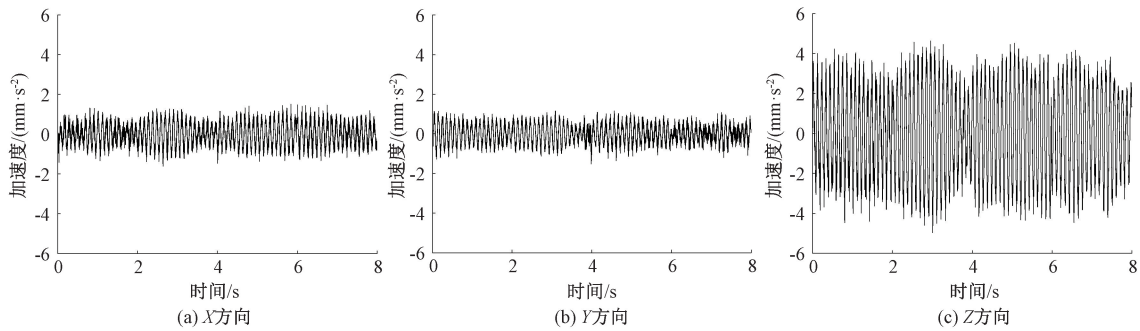

 图7 旋挖钻进下B₅测点振动加速度时程

 Fig. 7 Time-dependent vibration acceleration under construction of rotary drilling rigs measured at point B₅

(PPA)为 4.63 cm/s^2 ,约为 X 方向PPA(1.51 cm/s^2)和 Y 方向PPA(1.52 cm/s^2)的3倍。表明旋挖钻进引发的振动主要以 Z 方向为主。

三分之一倍频程谱分析方法^[14]具有谱线少、频带宽的特点,常被用于振动分析领域。对A、B两区域测点的振动加速度数据进行快速傅里叶变换得到幅值谱,再根据式(2)并结合幅值谱计算三分之一倍中心频率加速度幅值。

$$\frac{f_u}{f_l} = 2^{1/3} \quad (2a)$$

$$\frac{f_c}{f_l} = 2^{1/6} \quad (2b)$$

$$\frac{f_u}{f_c} = 2^{1/6} \quad (2c)$$

式中: f_l 为下限频率; f_c 为中心频率; f_u 为上限频率。

得到A、B区域各测点 X 和 Z 方向三分之一倍中心频率加速度幅值结果,分别如图8、图9所示。选取三分之一倍频程谱幅值开始趋于稳定所对应的频率作为最大中心频率。

图8所示为A区域 X 和 Z 方向三分之一倍频程谱图,由图8(a)可以看出: X 方向最大加速度幅值出现在A₄测点,为 0.42 mm/s^2 ;除A₂测点最大加速度幅值所在的频率为20 Hz,其他测点最大加速度幅值所在的频率均为10 Hz。由图8(b)可知: Z 方向振动最大加速度幅值出现在A₃测点,为 3.19 mm/s^2 ;除A₁测点最大幅值所在频率为20 Hz外,其他测点最大幅值所在频率均为10 Hz。

图9所示为B区域 X 和 Z 方向三分之一倍频程谱图,由图9(a)可知: X 方向振动中最大加速度幅值出现在B₅测点,为 1.23 mm/s^2 ,除B₁测点最大幅值出现的频率为20 Hz外,其他测点最大幅值出现的频率均为10~12.5 Hz; Z 方向上,最大加速

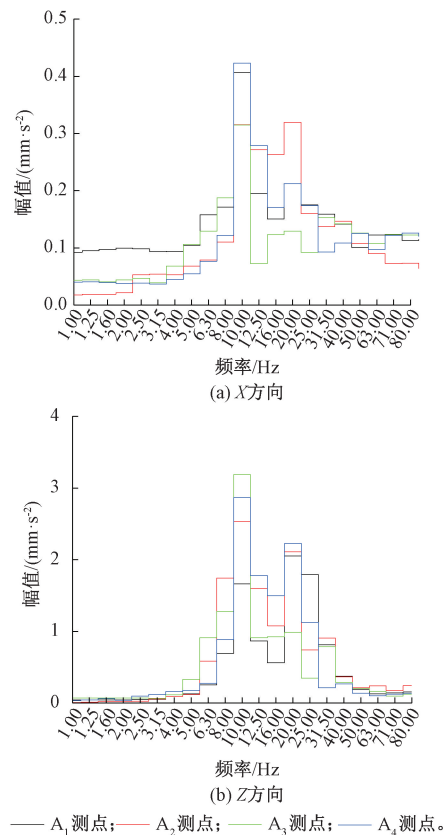


图8 A区域测点三分之一倍频程谱

Fig. 8 One-third octave spectra of observation points in area A

度幅值出现在B₅测点,为 6.23 mm/s^2 ,除B₁测点最大幅值出现的频率为20 Hz外,其他测点最大幅值出现的频率均为10~12.5 Hz。

结合图8、图9可得:在同一测点下 X 和 Z 方向振动最大加速度幅值所在频率不完全相同;在同一建筑物不同楼层的测点受建筑结构等因素的影响其最大振动加速度幅值所在频率也存在差别。针对该工程和地质条件,A、B两区域建筑物楼板 X 和 Z 方向振动最大加速度均出现在8~25 Hz中心频率范围内,其他中心频率下振动最大加速度相对较小。

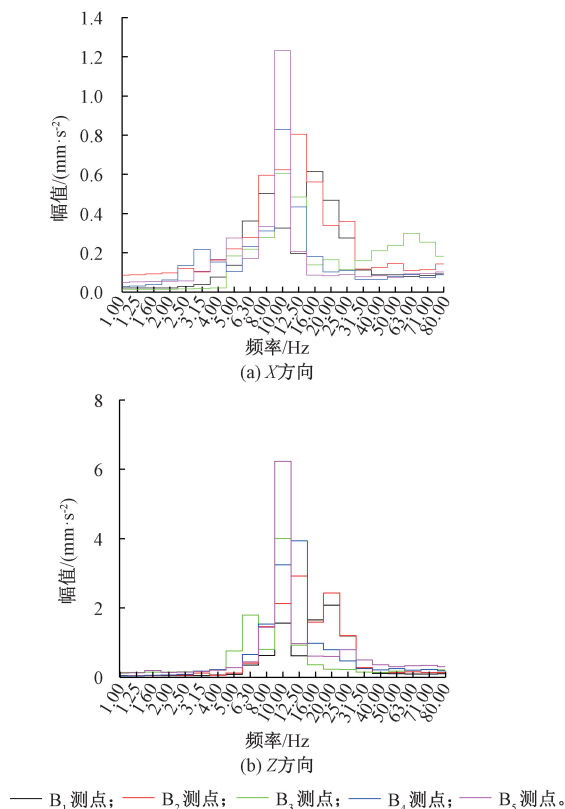


图 9 B 区域各测点三分之一倍频程谱

Fig. 9 One-third octave spectra of observation points in area B

旋挖钻进引起的邻近建筑物楼板振动频率与旋挖钻机的转速以及地层的参数密切相关。一般而言,相同条件下,钻机转速越快,引起的振动频率越高,岩层或土层密度越低,引起的振动频率越低。 Z 方向振动最大加速度随楼层升高呈增长趋势,而同一中心频率下各测点振动加速度未有明显变化规律。总体而言,由基坑旋挖钻进施工引发的 X 和 Z 方向楼板振动以低中频为主,主要集中在 $4 \sim 40$ Hz。

2.2.3 振动加速度级随楼层层数变化规律

振动加速度级 V_L 是评价环境振动强度的指标,单位为分贝,其计算式^[25-26]为:

$$V_L = 20 \lg \frac{a_{\text{rms}}}{a_0} \quad (3)$$

式中: a_0 为基准振动加速度,取值为 10^{-6} m/s^2 ; a_{rms} 为加权后的振动加速度有效值。

基于各测点现场多次监测数据求得的加速度值,根据式(3)求得 A、B 区域各测点 X 和 Z 方向多次振动加速度级,并求得振动加速度级的均值。对振动加速度级均值和楼层层数进行曲线拟合,结果如图 10、图 11 所示。可知,各测点加速度级均值的拟合决定系数均大于 0.8,说明拟合结果较合理。

由拟合结果可得,在基坑旋挖钻进施工振动作用下,邻近建筑内测点的加速度级均值随着测点所处的楼层层数的增加呈现线性增大,测点的加速度级与楼层层数的函数关系为:

$$V_{LX,Z} = an + b \quad (4)$$

式中: $V_{LX,Z}$ 为 X 或 Z 方向振动加速度级, dB; n 为楼层层数; a 、 b 为拟合系数。

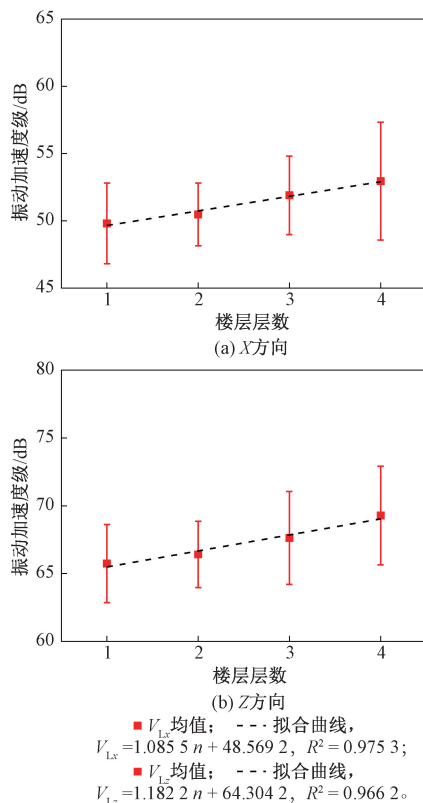


图 10 A 区域测点振动加速度级

Fig. 10 Vibration acceleration levels at observation points in area A

可见, A 区域 X 和 Z 方向振动加速度级与楼层层数的拟合曲线的斜率 a 分别为 1.085 5 和 1.182 2, 相差 8.91%; B 区域两方向拟合曲线的斜率 a 分别为 1.561 1 和 1.559 8, 相差 0.08%, 表明在同一区域内随楼层增加 X 和 Z 方向振动加速度级增幅相当。

3 讨论

将 Z 方向振动加速度级简称为 Z 振级。表 4 为各测点振动加速度级最大值。可得: 现场监测期间, 除测点 B_5 及 C_1 处 Z 振级最大值分别为 75.89、77.65 dB 外, 其他测点均低于 75 dB。根据表 5 所示的 GB 10070—1988《城市区域环境振动标准》^[27] 规定的城市各类区域 Z 振级标准可知: 混合区、商

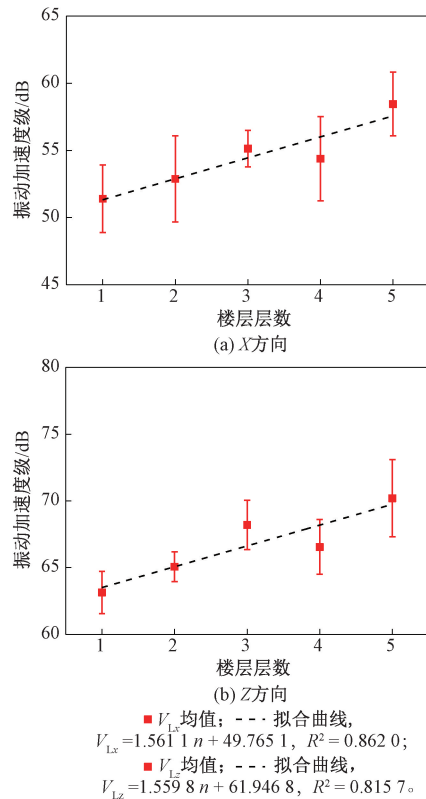


图 11 B 区域测点振动加速度级

Fig. 11 Vibration acceleration levels at observation points in area B

业中心区的 Z 振级昼、夜间标准值分别为 75、72 dB。因此,深圳地铁 16 号线 5 号综合井基坑旋挖钻进施工引起测点 B₅ 及 C₁ 处的振动超过了环境影响限值,对这两处的振动影响较大;而其他测点处的振动则低于环境影响限值,振动影响较小。

表 4 各测点振动加速度级最大值

测点	振动加速度级最大值	
	X 方向	Z 方向
A ₁	54.95	69.96
A ₂	53.22	69.03
A ₃	56.81	72.73
A ₄	60.92	74.44
B ₁	56.43	65.75
B ₂	58.21	66.76
B ₃	57.90	72.04
B ₄	53.35	70.23
B ₅	62.40	75.89
C ₁	63.31	77.65

PPV 代表监测时间段内的某一时刻的最大振动速度,而 Z 振级则是反映监测时间段内的整体振动水平,两者对于不同振动特征的评价其适用性存

表 5 城市各类区域 Z 振级标准值^[27]

Table 5 Standard values of the Z-vibration level in different

适用地带范围	areas in cities	
	昼间	夜间
特殊住宅区	65	65
居民、文教区	70	67
混合区、商业中心区	75	72
工业集中区	75	72
交通干线道路两侧	75	72
铁路干线两侧	80	80

在差异,如爆破开挖持续时间短且振动速度大^[28-29],通常用 PPV 来对振动进行评价,而地铁和高速列车运行引发的周边环境振动持续时间长且振动速度相对小^[30-32],一般采用 Z 振级进行评价。该项目各测点在两个振动评价指标下表现出相同的振动变化趋势,对其他同类型振动分析具有一定的指导意义。采用旋挖钻机进行基坑施工过程中,为了满足建筑振动要求,可根据邻近建筑的振动情况对旋挖钻机的转速进行调整。在监测点的选择方面,应优先考虑振动较强的区域进行监测;在振动分析方面,可采用 PPV 和振动加速度级两种指标对振动的影响进行综合评估。

调查显示:在振动监测期间,室内振感明显弱于现场监测前施工的最大振感。原因如下:1) 先前旋挖钻机开挖点与测点距离更近且待开挖岩体硬度更高;2) 先前旋挖钻机的输出功率更高;3) 监测时旋挖钻机、双轮铣已完成部分打孔和成槽,对振动波的传播具有一定的抑制作用。

4 结束语

针对旋挖钻进对周边建筑物产生的振动影响,对各层楼板振感较强区域进行振动监测,在时、频域内对振动进行分析,得出以下主要结论:

1) 旋挖钻进引发的周边建筑振动其速度及加速度均以 Z 方向为主;同一楼层上,邻近家具广场建筑 Z 方向 PPV 平均值约为邻近商业楼 Z 方向 PPV 平均值的 2 倍。

2) 对于研究的 4 层钢结构和混凝土框架结构建筑而言,基坑旋挖钻进施工引发的周边建筑楼板振动的 Z 方向 PPV 及振动加速度级整体随楼层升高呈线性增长趋势,在同一区域内随楼层的增加,X 和 Z 方向振动加速度级增幅相当。

3) 振动加速度三分之一倍频程谱中,Z 方向振动最大加速度随楼层升高呈增长趋势;由旋挖钻进引发的楼板 X 和 Z 方向振动以低中频为主,主要集

中在 4~40 Hz;建筑内 X 和 Z 方向振动最大加速度幅值所对应的中心频率范围为 8~25 Hz。

4) 基坑旋挖钻进施工过程中,除距基坑 34.6 m 处的钢结构建筑楼顶 B_5 测点,以及位于基坑与该建筑之间的地表 C_1 测点的 Z 振级最大值大于 75 dB 之外,其他测点均低于 75 dB;根据 GB 10070—1988,这两个测点处的振动超过了环境影响限值,应采取措施进行降振。

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/OL]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2020, 6[2022-12-20]. <https://doi.org/10.1007/s40948-020-00157-x>.
- [2] 张忆, 杨文东, 彭振, 等. 地铁隧道爆破开挖对高层框架结构的动态响应[J]. 爆破, 2018, 35(1): 147-153.
- [3] 张玉琦, 蒋楠, 周传波, 等. 地铁基坑爆破振动作用邻近高层框架建筑物结构动力响应[J]. 煤炭学报, 2019, 44(增刊1): 118-125.
- [4] 李兴高, 孙河川. 地铁施工环境影响定量风险指标研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2733-2736.
- [5] 侯公羽, 刘伟, 李乐, 等. 多风险因素耦合的地铁施工安全系统脆弱性分析[J]. 土木工程学报, 2022, 55(2): 111-119.
- [6] 王栋, 何历超, 王凯. 钻爆法施工对邻近埋地管道影响的现场实测与数值模拟分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊2): 134-140.
- [7] 冯小冬. 地铁钻爆法施工对邻近建筑物的振动响应预测[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(2): 580-589.
- [8] 李胜林, 方真刚, 杨瑞, 等. 浅埋地铁隧道爆破施工引起的地表振动规律分析[J]. 爆破, 2019, 36(2): 111-116, 130.
- [9] OZER U. Environmental impacts of ground vibration induced by blasting at different rock units on the Kadikoy-Kartal metro tunnel [J]. Engineering Geology, 2008, 100(1/2): 82-90.
- [10] FAKHIMI A, LANARI M. DEM-SPH simulation of rock blasting [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55: 158-164.
- [11] 张震, 周传波, 路世伟, 等. 超浅埋地铁站通道爆破暗挖地表振动传播特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(8): 2119-2125.
- [12] 陈士海, 刘小鸣, 张子华, 等. 隧道掘进爆破诱发隧道后方开挖段地表振动效应分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1800-1806.
- [13] 袁玉宝. 爆破振动下高层建筑振动传播规律研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- [14] 陶连金, 郭飞, 黄俊, 等. 砂卵石地层盾构施工诱发振动环境影响试验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(16): 213-218.
- [15] 王鑫, 韩焯, 周宏磊. 中心城区地铁盾构施工引起的环境振动响应研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊2): 309-314.
- [16] 郭飞, 陶连金, 孔恒, 等. 兰州砂卵石地层盾构施工振动传播及衰减特性分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3377-3384.
- [17] 赵凯, 王秋哲, 毛昆明. 地铁运行引起建筑物振动的三维有限元分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(2): 209-216.
- [18] 花雨萌, 谢伟平, 陈斌. 地铁振动对建筑物竖向楼层响应的影响研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(3): 122-129.
- [19] 于蕾. 爆破振动对多层建筑物的安全影响[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(3): 86-89.
- [20] 雷振, 贺路, 吴桂义, 等. 高层建筑在爆破地震波作用下振动传播规律[J]. 工程爆破, 2020, 26(3): 16-22.
- [21] 董霜, 朱元清. 地铁振动环境及对建筑影响的研究概况[J]. 噪声与振动控制, 2004(2): 1-4.
- [22] 高广运, 陈娟, 朱林圆. 上海地铁荷载作用下邻近建筑物振动响应分析[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(6): 136-141.
- [23] 王新宇, 邵珠山, 乔汝佳. 小净距下穿铁路隧道爆破震动的响应研究[J]. 应用力学学报, 2013, 122(4): 527-532, 645.
- [24] 刘彦涛. 下穿寺庙隧道爆破振动影响的数值模拟与分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(2): 160-166.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 机械振动与冲击 人体暴露于全身振动的评价 第1部分: 一般要求: GB/T 13441.1—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [26] 国家环境保护局. 城市区域环境振动测量方法: GB/T 10071—1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [27] 国家环境保护局. 城市区域环境振动标准: GB 10070—1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [28] 刘增伟, 蔡袁强, 史吏, 等. 爆破引起阀井桩基及阀井上部结构振动实测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊2): 3338-3345.
- [29] 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.
- [30] 张开伟, 杨灵杰, 王世森, 等. 城市地铁地下轨道振动对周边建筑的影响分析[J]. 工程地球物理学报, 2020, 17(1): 127-134.
- [31] 戚柳飞, 王安斌, 谢莹松, 等. 地铁车辆经过不同轨道结构时对地面振动的影响研究[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(6): 147-152.
- [32] 邹超, 汪益敏, 汪朝晖, 等. 地铁车辆段咽喉区地面振动传播规律实测与分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(16): 200-206.