

塌落振动作用下建筑结构动力响应研究及评估*

刘开放^{1,2}, 刘彦辉², 徐丽², 贾永胜^{3,4}, 姚颖康^{3,4}, 周福霖²

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院 西安, 710055) (2. 广州大学工程抗震研究中心 广州, 510415)

(3. 江汉大学爆炸工程湖北省重点实验室 武汉, 430056) (4. 武汉爆破有限公司 武汉, 430056)

摘要 以某工程为研究对象,开展了一系列塌落振动现场监测,进行了塌落振动对周围建筑结构动力影响研究及评估。首先,通过对实时监测的周边测点数据进行分析,研究塌落振动的传播规律;其次,将测点的加速度作为动力荷载加载到有限元模型,讨论框架结构在不同距离振动波作用下的动力响应及其对楼层的影响规律,并将水平和竖向加速度进行倍频程谱分析,获得 1/3 倍频程;最后,以振动加速度级为基准,进行结构的振动分析及评估。结果表明,塌落振动作用下周边建筑结构动力强度随振动波的距离增大而减小,随着层数的增加,响应呈放大趋势,且竖向振动均大于水平向振动。

关键词 爆破拆除;塌落振动;振动波;倍频程谱分析;振动分析与评估

中图分类号 O329; TD235; TH113

引言

随着我国经济的发展,高层和超高层建筑越来越多,需要拆除大量的废旧建筑物为高层建筑提供场地,传统的拆除方法如机械拆除、人工拆除等已经不能满足安全、经济的要求。爆破拆除以其拆除速度快、高效和拆除彻底等优点已成为城市重建和改建的首选方法,在国内得到了广泛的应用^[1-5]。爆破工程在加速建筑物的拆除工作时,其爆炸作用以及楼房构件塌落冲击对于周边复杂建筑和区域不容忽视。工程实践表明,建筑物拆除时楼房构件塌落振动冲击往往比爆破振动大^[6]。季杉等^[7]证实塌落触地振动引起的主频率与一般建筑物前几阶频率相接近,可与周围结构发生共振而引起较大的动力响应。在保证爆破顺利的同时,还应考虑爆破塌落触地振动响应规律,对爆破拆除而引起的地面振动以及周边建筑做出定性和理论的分析与评估。Zhao 等^[8]通过计算分析,研究某高架桥爆破拆除对周边地铁隧道的影响得知,认为必须采取相应的措施降低爆破中的坍塌物所引起的地基振动,以确保临近隧道安全。文献[9-11]以振动速度、频率等作为安全判据,评估了爆破振动对建筑物的安全效果。文献[12-15]以峰值加速度为基准,通过试验测试和数值仿真分析对爆区周边环境进行评估,结果表明,即使爆破振

动速度满足爆破安全规程标准,矿区附近居民对振感仍反映较强烈。因此,有必要研究塌落振动对周边建筑结构的动力强度。

目前,对于爆炸荷载的模拟多以三角形脉冲波为主^[16-18],而这种简化的爆炸荷载与真实条件的动力荷载存在一定的误差。因此,笔者将直接监测得到的爆源近点的加速度数据作为输入荷载加载到数值模型中,仿真分析不同位置的振动波对建筑结构的影响。以某工程为案例,在周边不同区域布置测点。首先,通过对地面上不同距离的测点进行分析,得到地面振动的加速度、主频等参数,研究塌落振动触地产生的振动传播情况;其次,将监测得到的爆源近点的加速度数据作为输入荷载加载到所建立的典型框架模型中,进一步研究框结构在不同距离振动波作用下的动力响应规律以及对楼层的影响;最后,对每层的水平和竖向加速度进行分析,获得 1/3 倍频程,以振动加速度级为基准,根据国家相关振动规范及标准,对塌落振动作用下周边建筑的振动限值进行评估。

1 工程概况

本项目位于武汉市汉口滨江国际商务区,爆破的 19 栋楼层高为 7~12 层,总建筑面积约为 $15 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。

* 广东省高校创新团队资助项目(2016KCXTD016)

收稿日期:2020-09-15;修回日期:2020-11-13

楼房四周分布有大量的商铺、小学、居民楼、人行天桥及地铁车站等。其中,1#楼南侧为拆迁后空地,西侧距解放大道 9.9 m,北侧距离某卫生服务中心 46.0 m,与周边某加油站和 2#楼距离分别为 57.4 m 和 241.0 m,19 栋群楼周边环境以及现场倒塌如图 1 所示^[19-20]。



(a) 群楼及周边建筑

(a) Group buildings and surrounding buildings



(b) 群楼坍塌

(b) Collapse of group buildings

图1 19栋群楼周边环境及现场倒塌图

Fig.1 Site drawing and collapse of group buildings of 19 buildings

2 现场爆破测试

2.1 测点布置

为了更好地研究爆破拆除中塌落振动诱发的地面传播规律,避免群楼倒塌引起的振动应力波峰值叠加,选择周围大部分建筑处于待拆除或完全拆除的 1#楼作为主要研究对象,根据群楼爆破拆除总体方案充分考虑 1#楼倒塌对周边建筑的影响,在 1#楼周边共布置 12 个测点,如图 2 所示。综合测试效果以及方位,分别选择测点连线垂直于 1#楼、距离为 45 m 的 11#测点,以及距离为 78 m 和 112 m 的 7#和 6#测点,作为本研究的主要测点。

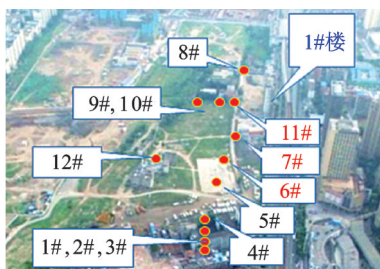


图2 1#楼周边测点布置图

Fig.2 Layout of measuring points around 1# building

2.2 测试仪器

采用 JM3874 多功能振动测试系统进行数据采集及分析,这是一套建筑桥梁动载、模态测试分析系统,支持在线、离线测试,内置 x 向、 y 向和 z 向三向拾振器。通道序号如下: CH_1 , x 向; CH_2 , y 向; CH_3 , z 向。采样速率最高为 1 024 Hz/CH,多挡设置,精度在 $\pm 3\%$ 内,频率范围为 0.1~100 Hz。整个测试系统由 JM1805 USB 无线路由网和 JM3874 多功能振动测试系统主机组成,利用无线传输数据,广泛应用于桥梁、大型建筑等不易实现人工激励的结构实验模态分析。仪器设备及现场部分测点布置如图 3 所示。



(a) JM3874多功能振动测试系统

(a) JM3874 multifunctional vibration test system



(b) 数据采集

(b) Data acquisition

图3 仪器设备及现场部分测点布置图

Fig.3 Layout of instrument and equipment and some measuring points on site

2.3 振动测试结果与分析

倒塌过程中,由于垂直 1#楼连线的测点 9#和 10#传感器上有干扰信号,因此选择距离 1#楼较近且测试效果较好的 11#测点,水平连线上选择 6#和 7#测点,研究 1#楼爆破倒塌下周边测点的振动响应。由爆破方案可知,安装在 1#楼非电导爆管雷管的起爆最大延时为 3 400 ms。由图 4 可知,选取的 3 个测点 6#,7#和 11#在 3 s 时出现 1 次峰值,为爆破的第 1 阶段。其次,测点的方位不同,峰值出现的时间点不同,如 11#测点连线垂直于 1#楼,在 3 s 时 x 和 z 方向出现最大值,在 7 s 左右出现次大峰值。6#和 7#测点连线平行于 1#楼,此次峰值大于前面的峰值,为大楼触地阶段,可定为爆破的第 2 阶段。相比之下,塌落触地阶段的响应更大,对地面造成的振动更加强烈。

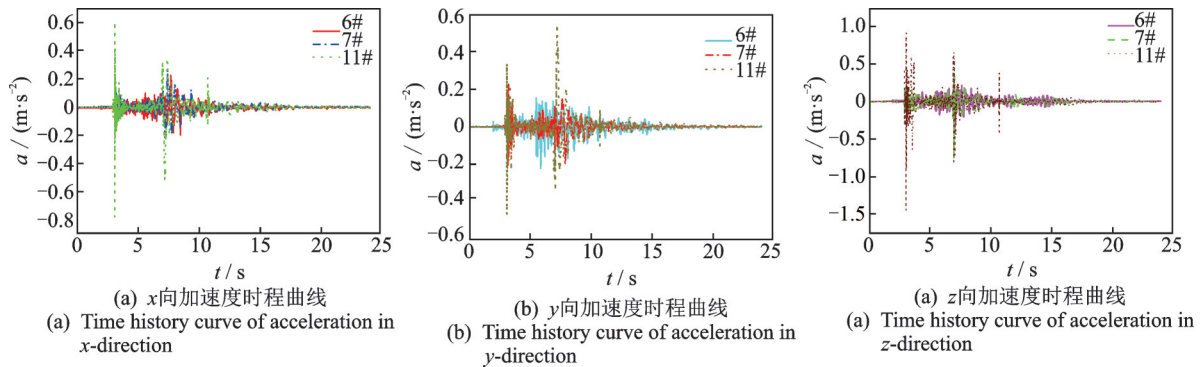


图4 3个测点不同方向的加速度时程曲线

Fig.4 Acceleration time history curves of three measuring points in different directions

此次爆破拆除产生的地面振动振幅,具有脉冲型高、次大峰值多次出现的形式,各测点记录到的地面有效振动持续时间在15 s左右。振源越近,出现峰值点的时间越快。如图4(b)所示,y向拾振器采集的由于1#楼倒塌引起的3个测点的加速度时程曲线中,7#测点距离振源较近,加速度峰值出现的时间约为3 s左右,大小为0.23 m/s²;6#测点相比于7#测点较远,在6 s左右出现峰值,大小为0.15 m/s²,小于7#测点的响应。同理,7#测点x和z方向的加速度峰值为0.26和0.37 m/s²,同样大于6#测点的0.22和0.23 m/s²。

由图5(a)可知,同一测点的竖向加速度峰值大于水平向峰值,如7#测点z方向加速度峰值为0.37 m/s²,大于x和y方向的加速度峰值0.26和0.23 m/s²。由图5(b)可知,不论是水平向还是竖向,塌落振动作用下,地面振动主频以低频成分为主,在2~3.5 Hz附近的能量最大,与建筑物自振频率范围相近。由表1可知,其余测点如11#号测点,z向加速度峰值为0.91 m/s²,约为水平向响应的1~2倍;12#测点竖向加速度峰值相比于水平加速度峰值增大更明显,约为水平向加速度的3倍多。

3 塌落振动传播规律数值仿真分析

本节重点研究不同位置的振动波对固定建筑物的影响,振动输入波选择第2节监测的加速度数据。考虑到1#楼结构体系的复杂性,对于有限元模型,选择通过建立一个典型的框架模型作为加载对象,查阅相关的规范确定模型各个构件的参数,建立一个5层的框架模型。该5层框架的低阶频率与监测的振动波主频谱较接近,为本次的加载模型。模拟框架结构的前几阶振型符合常规框架结构的振型,第1阶模态和第2阶模态以水平方向为主,与

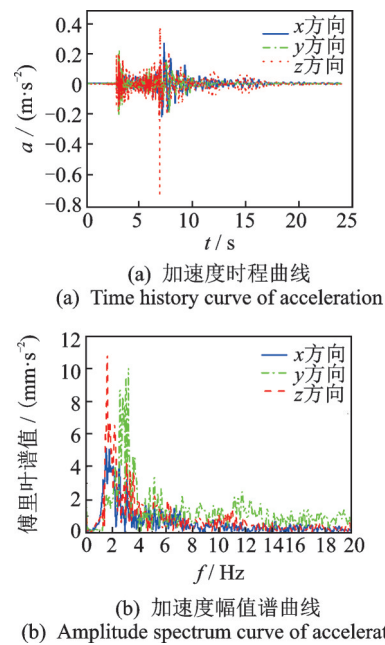


图5 7#测点三向加速度时程及幅值谱曲线

Fig.5 Time history and amplitude spectrum curve of acceleration in three directions of 7# measuring point

表1 塌落振动下测点的响应

Tab.1 Response of measuring point under collapse vibration

| 方向 | 加速度峰值/(m·s ⁻²) | | | | | | |
|----|----------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 2# | 4# | 5# | 7# | 8# | 11# | 12# |
| x | 0.55 | 0.68 | 0.37 | 0.26 | 0.39 | 0.61 | 0.13 |
| y | 0.64 | 0.35 | 0.66 | 0.23 | 0.38 | 0.54 | 0.15 |
| z | 0.67 | 1.09 | 0.86 | 0.37 | 0.52 | 0.91 | 0.45 |

文献[21]结果一致,保证模拟结果的可靠性。

选用有限元软件ANSYS建立了简易的框架结构模型,将部分测点的三向振动波的加速度借助地震波编程文件输入到模型中进行加载,并选择较常用的瞬态分析求解方法,计算不同位置振动波作用下结构的响应。

3.1 有限元模型

3.1.1 单元的选取及材料参数

选用 BEAM188 单元模拟主梁、次梁和柱等构件, SHELL181 单元模拟混凝土板。模型材料的参数如表 2 所示。框架结构的主要构件包括主、次梁和混凝土楼盖。其中:主次梁的截面类型均为矩形截面,尺寸分别为 300 mm×500 mm 和 200 mm×400 mm;混凝土板的厚度为 150 mm;底层柱高为 4.2 m,其余层高为 3.3 m;长边跨度为 18 m,短边跨度为 10.8 m。通过合并不同构件同一位置节点实现整体结构的连接。将柱底的节点全部固接约束,模拟结构与基础的刚性连接,有限元模型如图 6 所示。

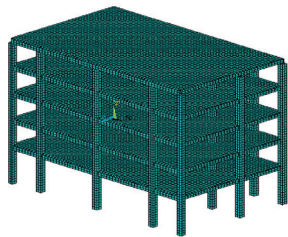


图 6 框架结构有限元模型

Fig.6 Finite element model of frame structure

3.1.2 模态分析

在框架结构整体建模完成后,进行结构的模态分析,采用较常用的分块兰索斯法获取框架结构体系的振型和频率,选取其竖直方向的前 2 阶振型,如图 7 所示。前 3 阶频率如表 3 所示,其中前 2 阶频率分别为 2.16 和 2.70 Hz。

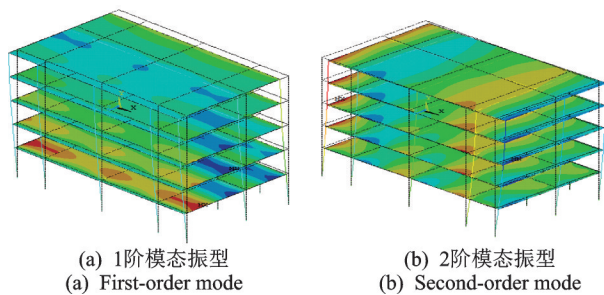


图 7 有限元模型前 2 阶振型图

Fig.7 First two mode shapes of finite element model

表 2 模型构件参数

Tab.2 Model component parameters

| 单元类型 | 弹性模量(N·mm ⁻¹) | 密度/(kg·m ⁻³) | 泊松比 |
|----------|---------------------------|--------------------------|-----|
| SHELL181 | 3.15×10 ¹⁰ | 2 550 | 0.2 |
| BEAM188 | 2×10 ¹¹ | 7 850 | 0.3 |

表 3 前 3 阶结构的模态特性

Tab.3 Modal characteristics of the first three order structures

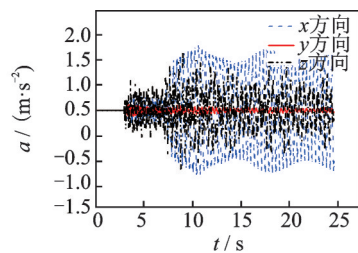
| 阶数 | f/Hz | 振型特点 |
|----|------|--------|
| 1 | 2.16 | 沿着短边方向 |
| 2 | 2.70 | 沿着长边方向 |
| 3 | 2.84 | 整体扭转 |

3.2 振动波作用下结构 1 层的响应

为研究不同距离振动波对结构的影响规律,综合方位和距离,选定连线垂直于 1#楼的 11#测点、连线平行于 1#楼的 7#和 6#测点,距离分别为 45, 78 和 112 m,以 50 m 为界限。

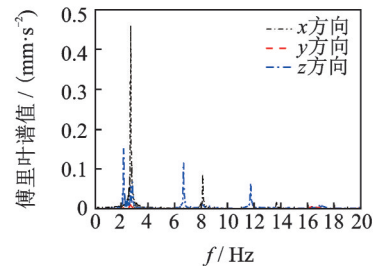
3.2.1 结构对近距离振动波作用的响应特征

由图 8(a)可知,由于模拟的简易框架与真实条件的 1#楼不同,与实验测试的结果存在一定的误差。结构在输入的 3 个方向的振动波作用下,x 向振动波对建筑物的动力响应的贡献最大,11#测点 x 向振动波作用下建筑物的位移为 4.89 mm,均大于 y 向和 z 向的 0.22 和 3.34 mm。加速度同样满足此规律,x 向振动波作用下建筑物的加速度为 1 276 mm/s²,均大于 y 向和 z 向的 111 和 1 121 m/s²。x 和 z 方向加速度响应大于 y 向的振动响应 10 倍以上。由图 8(b)可以发现,主频率同样以 2~3.5 Hz 为主,与结构自振频率接近。



(a) 三向加速度时程曲线

(a) Time history curve of acceleration in three directions



(b) 三向加速度幅值谱曲线

(b) Amplitude spectrum curve of acceleration in three directions

图 8 近距离振动波作用下结构的加速度时程及其幅值谱比较
Fig.8 Comparison of acceleration time history and amplitude spectrum of structures subjected to close range vibration waves

3.2.2 结构对远距离振动波作用的响应特征

图9对比了近、远距离加载点3个测点振动波作用下结构的水平时域及频域曲线。11#测点距离振源最近,响应最大,其 x 向的加速度为 $1\,276\text{ mm/s}^2$,是6#测点(381 mm/s^2)和7#测点(456 mm/s^2)的3.4倍和2.8倍。由图9(b)可知,3个测点均激起了楼盖的低阶频率,在 $2\sim 3.5\text{ Hz}$ 能量最大。

3个测点 z 向振动波作用下的加速度峰值分别为 $553, 687$ 和 $1\,121\text{ mm/s}^2$,与振源距离越近, z 向

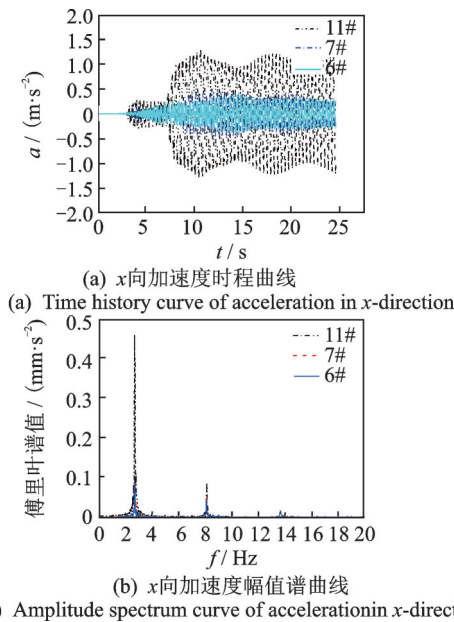


图9 不同位置加载点的振动波作用下结构的水平加速度时程及其幅值谱比较

Fig.9 Comparison of time history and amplitude spectrum of horizontal acceleration of structures under the action of vibration waves at different loading points

振动波对结构的响应越明显。由图10(b)可知,3个测点激起的频率一致。结合表4可以得出,振动波加载点11#测点距离1#楼最近, x 和 y 两个方向的位移峰值同样最大,随着与爆炸振源距离的增加,振动衰减明显,如11#测点 x 和 y 方向的位移峰值分别为 4.89 和 0.22 mm 。当距离增大到6#测点附近时, x 和 y 方向的位移峰值降低到 0.98 和 0.052 mm 。

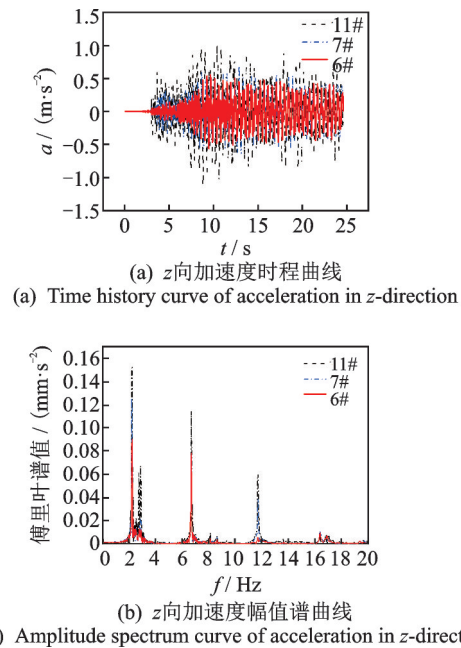


图10 不同位置振动波作用下结构的竖向加速度时程及其幅值谱比较

Fig.10 Comparison of vertical acceleration time history and amplitude spectrum of structures under vibration waves at different points

表4 结构在不同距离振动波作用下的响应
Tab.4 Response of structures to vibration waves at different distances

| 测点 | x 向 | | y 向 | | z 向 | |
|-----------|-------|-----------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|-----------------------------------|
| | 位移/mm | $a/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-2})$ | 位移/mm | $a/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-2})$ | 位移/mm | $a/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-2})$ |
| 6#(112 m) | 0.98 | 381 | 0.052 | 93 | 1.6 | 553 |
| 7#(78 m) | 1.18 | 456 | 0.064 | 121 | 2.0 | 687 |
| 11#(45 m) | 4.89 | 1 276 | 0.220 | 111 | 3.3 | 1 121 |

3.3 振动波作用下结构多层的响应

选取前3层进行讨论。第2层、第3层提取的节点编号为3915(12.9,3.3,10.8)和6174(12.9,6.6,10.8),与第1层提取的节点位置1661(12.9,0,10.8)对应。

图11为11#测点 z 向振动波作用下结构不同层数竖向加速度时程及幅值谱比较。结合表5可得,塌落振动时11#测点在 x 方向振动波作用下,结构

前3层的加速度峰值分别为 $1.28, 2.15$ 和 3.05 m/s^2 ,振动波对结构的响应随着层数的增加而增加。 y 和 z 方向的振动波作用下结构的响应同样满足此规律,随着层数的增加,响应逐渐增大。由图11(b)可知, z 向振动波作用下,提取的前3层所激起的频率一致,主频以 2.2 Hz 左右为主。

根据表5对比可得,3个测点6#,7#和11#三方

向振动波诱发的结构前3层的响应与层数呈正比。

6#测点在 x 向振动波作用下,第3层的加速度为 0.61 m/s^2 ,约为第1层加速度峰值 0.38 m/s^2 的2倍。11#测点在三向振动波作用下,其3层的加速度峰值

分别为 $3.05, 1.26$ 和 1.90 m/s^2 ,大于远距离6#测点的 $0.61, 0.23$ 和 0.85 m/s^2 。层数增加后,同样满足振源越近、响应越大这一规律。

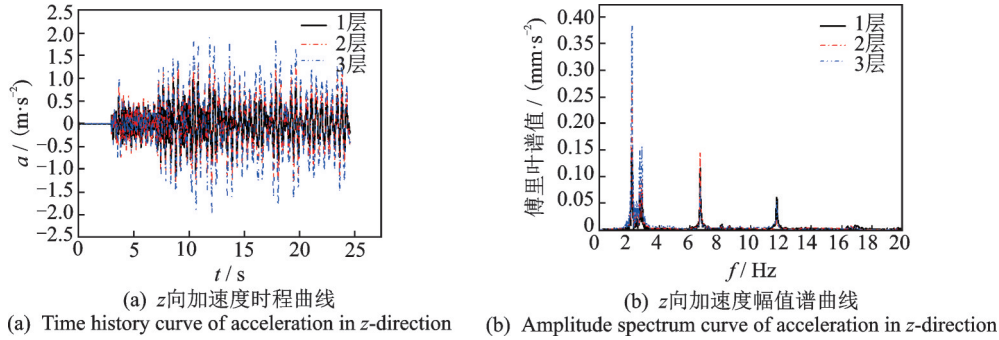


图11 11#测点振动波作用下不同层加速度时程及其幅值谱比较

Fig.11 Comparison of acceleration time history and amplitude spectrum of different layers under the action of vibration wave at 11#

表5 不同层数下的三向加速度

Tab.5 Three dimensional acceleration under different layers

| 测点 | x 向 | | | y 向 | | | z 向 | | |
|-----|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| | 1层 | 2层 | 3层 | 1层 | 2层 | 3层 | 1层 | 2层 | 3层 |
| 6# | 0.38 | 0.55 | 0.61 | 0.09 | 0.19 | 0.23 | 0.55 | 0.86 | 0.85 |
| 7# | 0.46 | 0.72 | 0.87 | 0.12 | 0.22 | 0.27 | 0.69 | 0.92 | 1.14 |
| 11# | 1.28 | 2.15 | 3.05 | 0.11 | 1.20 | 1.26 | 1.12 | 1.34 | 1.90 |

4 爆炸振动波对结构的振动限值及评估

将数值计算的结构在振动波作用下的加速度数据进行相应的格式转换,导入DASP平台软件中,借助其倍频程谱分析模块,通过1/3倍频程分析,进而获得结构在振动波作用下所对应的振级。根据国家相关振动规范及标准(建筑振动容许振动标准),进行塌落振动对周边建筑的振动限值及评估。

4.1 倍频程谱分析

在进行倍频程分析时,常常对频谱结果进行各

种加权处理。 Z 振级是反映人体垂直方向对环境振动的感受^[22],DASP中的 Z 计权系数根据《城市区域环境振动标准》(GB10070—1988)来确定。

4.2 结构的动力响应评估

选取全程分析对全程波形进行平均方式分析,快速傅里叶变换(fast fourier transformation,简称FFT)分析点数为2048,在每次FFT计算之前,先去除信号中的直流分量,加窗方式选择汉宁窗。通过倍频程谱分析计算振动波作用下结构的总级值,图12所示为7#测点对应的1~3层 z 向振级曲线。

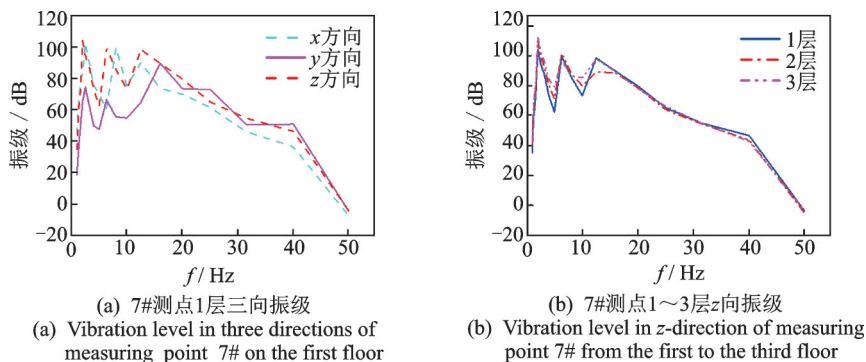


图12 7#测点振动波作用下结构的振级曲线

Fig.12 Vibration level curve of structure under the action of vibration wave at 7# measuring point

表6 总有效值振级

Tab.6 Total root mean square vibration level

| 测点 | x 向振级/dB | | | y 向振级/dB | | | z 向振级/dB | | |
|----|------------|--------|--------|------------|-------|-------|------------|--------|--------|
| | 1层 | 2层 | 3层 | 1层 | 2层 | 3层 | 1层 | 2层 | 3层 |
| 6# | 102.82 | 106.51 | 108.59 | 87.73 | 93.33 | 95.04 | 105.21 | 109.16 | 110.85 |
| 7# | 104.66 | 108.40 | 110.45 | 89.92 | 95.46 | 97.24 | 106.59 | 110.79 | 113.25 |

首先,基于GB10070—88《城市区域环境振动标准》和JGJ170—2009《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》对不同爆破距离下的振级进行环境及噪声评估。由图12和表6可知,同一层数下,竖向振级要大于水平振级;随着距振源距离的增加,振动衰减明显。选取的3个距离的振动波中,最小振级为较远处6#测点位置对应的 y 向振级87.73 dB,均超过了两个规范的限值75 dB。

其次,进一步根据上述两个标准评估不同层数的振级,随着结构楼层的增加,振级呈增加的趋势。以6#测点例,1层在 z 方向振动波作用的振级为105.21 dB,随着层数的增加,顶层的振级增大至110.85 dB,对比标准限值可得,其余测点1~3层振级同样超过了上述两个规范的限值。

最后,根据GB 50868—2013《建筑工程容许振动标准》进行建筑物内人体舒适性评估,选取规范中楼板振动国家标准车间办公区竖向振动计权加速度级92.0 dB为评估依据。由表6中不同距离的振动波作用下目标建筑物1层的振级峰值可知,除6#和7#测点处的 y 向满足要求,其余方向和11#测点位置3个方向的振级均大于92 dB,不符合国家标准车间工作区舒适度要求。

5 结论

1) 爆破拆除振动响应监测结果表明,各测点记录到的地面有效振动持续时间在15 s左右,爆破拆除产生的塌落振动的振幅具有脉冲型高、次大峰值多次出现的形式,进一步证明了塌落触地振动对周边建筑的危害更大。在今后的爆破工程中,合理减少此阶段对地面的冲击值得研究。

2) 选取监测的测点加速度作为振动波进行加载,数值仿真分析结果表明,目标建筑物的响应与振动波的距离呈反比,竖向振动波贡献较大,且三向振动波均激起了结构的低阶频率,在2~3.5 Hz能量最大,与建筑物自振频率范围相近。随着层数的增加,响应呈正比增加。

3) 振动评估结果表明,随着振源距离的增加,

振动衰减明显。近、远距离振动波作用下结构的振级均超过了JGJ170—2009和GB10070—88的规定。除远距离 y 向振动波下结构的振级满足要求,其余方向均大于《建筑工程容许振动标准》规定的92 dB,不符合相关要求。因此,在今后的爆破拆除工程中,应充分考虑塌落振动对周边建筑物环境及居民舒适性的影响。

参 考 文 献

- [1] LOIZEAUX M, OSBORN A E. Progressive collapse—an implosion contractor's stock in trade [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2006, 20(4): 391-402.
- [2] 徐书雷,郑学召,王小林,等. 浅述国内外拆除爆破现状[J]. 爆破, 2003(2): 20-23.
XU Shulei, ZHENG Xuezhao, WANG Xiaolin, et al. The present situation of demolition blasting at home and abroad [J]. Blasting, 2003(2): 20-23. (in Chinese)
- [3] 郭进,公文新. 高层框架楼房单向折叠爆破拆除[J]. 工程爆破, 2016, 22(6): 58-61.
GUO Jin, GONGWEN Xin. Unidirectional folding blasting demolition of high-rise frame building [J]. Engineering Blasting, 2016, 22(6): 58-61. (in Chinese)
- [4] 谢钱斌,熊万春. 2座90 m高的双曲线冷却塔爆破拆除[J]. 工程爆破, 2018, 24(3): 44-49.
XIE Qianbin, XIONG Wanchun. Blasting demolition of two 90 m high hyperbolic cooling towers [J]. Engineering Blasting, 2018, 24(3): 44-49. (in Chinese)
- [5] 褚怀保,徐鹏飞,叶红宇,等. 钢筋混凝土烟囱爆破拆除倒塌与受力过程研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(22): 183-186, 198.
CHU Huaibao, XU Pengfei, YE Hongyu, et al. Study on collapse and stress process of reinforced concrete chimney blasting demolition [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(22): 183-186, 198. (in Chinese)
- [6] 杨永强,胡进军,谢礼立,等. 高架桥爆破拆除触地振动速度特征分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(11): 151-154.
YANG Yongqiang, HU Jinjun, XIE Lili, et al. Analysis of vibration velocity characteristics of viaduct blasting demolition [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(11): 151-154. (in Chinese)

- [7] 季杉, 谢伟平, 王礼. 爆破振动与塌落触地振动特点及传播规律试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(11): 195-201.
JI Shan, XIE Weiping, WANG Li. Experimental study on characteristics and propagation law of blasting vibration and collapse touchdown vibration [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(11): 195-201. (in Chinese)
- [8] ZHAO H B, LONG Y, JI C, et al. Study on the dynamic response of subway tunnel by viaduct collapsing vibration and the protective measures of reducing vibration [J]. Journal of Vibroengineering, 2015, 17(5): 2433-2443.
- [9] HA I. Estimation of shear wave velocity of earth dam materials using artificial blasting test [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 55: 120-129.
- [10] YUGO N, SHIN W. Analysis of blasting damage in adjacent mining excavations [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015, 7(3): 282-290.
- [11] BAYRAKTAR A, ALTUNISIK A C, OZCAN M, et al. Safety assessment of structures for near-field blast-induced ground excitations using operational modal analysis [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 39: 23-36.
- [12] 张西良, 仪海豹, 辛国帅, 等. 高程对某露天矿边坡爆破振动传播规律的影响[J]. 金属矿山, 2017(7): 55-59.
ZHANG Xiliang, YI Haibao, XIN Guoshuai, et al. Influence of elevation on slope blasting vibration propagation law of an open pit mine [J]. Metal Mine, 2017(7): 55-59. (in Chinese)
- [13] SKLAVOUNOS S, RIGAS F. Computer simulation of shock waves transmission in obstructed terrains [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2004, 17(6): 407-417.
- [14] ZHANG Q, BAI C H, LIU Q M, et al. Experimental research on amplitude change of blasting seismic wave with topography [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2000(3): 237-242.
- [15] 唐海, 李海波, 蒋鹏灿, 等. 地形地貌对爆破振动波传播的影响实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(9): 1817-1823.
TANG Hai, LI Haibo, JIANG Pengcan, et al. Experimental study on the influence of topography on blasting vibration wave propagation [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(9): 1817-1823. (in Chinese)
- [16] 孙建运, 李国强, 陆勇. 爆炸荷载作用下SRC柱中混凝土的断裂破坏原理[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(2): 168-171.
SUN Jianyun, LI Guoqiang, LU Yong. Fracture failure principle of concrete in SRC columns under explosive loading [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(2): 168-171. (in Chinese)
- [17] 刘亚群, 李海波, 李俊如, 等. 爆破荷载作用下黄麦岭磷矿岩质边坡动态响应的UDEC模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3659-3663.
LIU Yaqun, LI Haibo, LI Junru, et al. UDEC simulation study on dynamic response of Huangmailing Phosphate rock slope under blasting load [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3659-3663. (in Chinese)
- [18] 师燕超, 李忠献. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱的动力响应与破坏模式[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 112-117.
SHI Yanchao, LI Zhongxian. Dynamic response and failure mode of reinforced concrete columns under blast loading [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 112-117. (in Chinese)
- [19] 路东. 武汉市滨江国际商务区19栋楼房群楼爆破拆除项目安全管理[J]. 工程技术研究, 2019, 4(4): 137-140.
LU Dong. Safety management of blasting demolition project of 19 buildings in Binjiang International Business District, Wuhan City [J]. Engineering Technology Research, 2019, 4(4): 137-140. (in Chinese)
- [20] 刘璘. 建筑物定向爆破倒塌模拟及触地振动传播规律研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2018.
- [21] 高连海, 马艳娟. 基于ABAQUS的框架结构模态数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2011, 30(S1): 95-97.
GAO Lianhai, MA Yanjuan. Numerical simulation of frame structure modal based on ABAQUS [J]. Journal of Liaoning University of Engineering and Technology (Natural Science Edition), 2011, 30(S1): 95-97. (in Chinese)
- [22] 张凌, 雷晓燕, 刘全民, 等. 地铁环境振动源强测试与评价标准分析[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(1): 89-94.
ZHANG Ling, LEI Xiaoyan, LIU Quanmin, et al. Test and evaluation standard analysis of subway environmental vibration source intensity [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(1): 89-94. (in Chinese)



第一作者简介:刘开放,男,1994年10月生,博士生。主要研究方向为结构振动测试与控制研究。曾发表《幕墙对悬挑楼盖振动模态影响及等效模拟方法》(《振动、测试与诊断》2021年第41卷第6期)等论文。

E-mail: 1550820476@qq.com