

浅埋隧道爆破施工近接建筑结构动力响应规律

罗燕平¹,李吉刚²,王生¹,曾斌¹,赖金星³,冯志华⁴,邱军领^{3*}

(1.四川川交路桥有限责任公司,四川 广汉 618300;2.中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西 西安 710000;
3.长安大学 公路学院,陕西 西安 710064;4.河北省交通规划设计研究院,河北 石家庄 050011)

摘要:为了研究上覆建筑物在浅埋隧道爆破施工时的动力响应规律,该文以福州某城市隧道为工程背景,采用现场监测和Ansys/LS-DYNA模拟相结合的方法对上覆建筑群结构响应进行分析。监测结果表明:建筑结构在竖直方向上受爆破影响最为明显且具有高程放大效应,最大振速值为2.45 cm/s;各向振速随爆心距的增大而逐渐减小并趋于稳定,在爆心距较小时衰减较快;竖向振动主频更接近于建筑结构自身频率,主要分布在25~35 Hz区间。数值模拟结果与监测结果相吻合,进一步分析得到:同一测点在Ⅲ~Ⅴ级围岩下最大峰值振速分别为2.29 cm/s、2.51 cm/s和2.79 cm/s,地表建筑物振动响应随围岩等级提高而增强;建筑物柱体和板等结构的力学响应与振速变化密切相关,建筑物保护要充分考虑爆破在建筑物中引起的各方向振速。

关键词:隧道工程;建筑物;爆破振动;传播规律;动力响应

中图分类号:U455.6

文献标志码:A

Dynamic Response Rules of Adjacent Buildings to Blasting Construction in Shallow Buried Tunnels

LUO Yanping¹, LI Jigang², WANG Sheng¹, ZENG Bin¹, LAI Jinxing³, FENG Zhihua⁴, QIU Junling^{3*}

(1.Sichuan Chuanjiao Road and Bridge Co., Ltd., Guanghan, Sichuan 618300, China; 2.CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710000, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 4.Hebei Provincial Communications Planning, Design and Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050011, China)

Abstract: In order to study the dynamic response rule of overlying buildings during blasting construction in shallow buried tunnels, the urban tunnel in Fuzhou was taken as the engineering background, and the on-site monitoring and Ansys/LS-DYNA simulation were used to analyze the structural response of overlying buildings. The monitoring results show that the building is most obviously affected by blasting in the vertical direction and has an obvious elevation amplification effect, and the maximum vibration velocity is 2.45 cm/s. The vibration velocity in all directions gradually decreases and tends to be stable with the increase in explosion center distance and decays rapidly when the explosion center distance is small. The dominant frequency of vertical vibration is closer to the natural frequency of the building and is mainly concentrated between 25 and 35 Hz. The numerical simulation results are consistent with the monitoring results, and further analysis shows that the maximum peak vibration velocities under grade Ⅲ-Ⅴ surrounding rock at the same measuring point are 2.29, 2.51, and 2.79 cm/s, respectively. A higher grade of surrounding rock indicates a stronger vibration response of surface buildings. The mechanical response of structures such as building columns and plates is closely related to the change in vibration velocity. The vibration velocity in all directions caused by blasting should be fully considered for building protection.

Keywords: tunnel engineering; building; blasting vibration; propagation law; dynamic response

收稿日期:2024-04-02(修改稿)

基金项目:四川公路桥梁建设集团有限公司技术开发(委托)项目(编号:220221210155);交通运输部应用基础项目(编号:2015319812140)

作者简介:罗燕平,男,大学本科,高级工程师.E-mail:382246810@qq.com

*通信作者:邱军领,男,博士.E-mail:870133597@qq.com

0 引言

岩质隧道目前仍以钻爆法为主,其具有施工简便、成本低、适应力强等优点,成为地下空间工程比较常用的施工方法^[1],除此之外,其还具备劳动强度低、施工效率高等优点。然而,常规爆破存在超欠挖、围岩损伤、影响周边建筑物等问题。随着岩质隧道的逐渐增多,爆破施工产生的振动对周围既有构筑物造成的影响越来越受到人们的关注,由于距离较近引起的建筑物安全问题比较突出^[2-3]。

目前,众多研究者均采用数值模拟或现场实测对隧道爆破开挖对近接建筑结构的影响进行科学研究,并且在爆破波的传播规律及建筑结构响应方面取得了较理想的研究成果。缪宏兵等^[4]、张春武^[5]以Ansys/LS-DYNA进行仿真分析,研究了框架结构在隧道爆破施工时的动力响应;叶海旺等^[6]、公伟增等^[7]使用模拟软件研究了砌体建筑物在隧道爆破作用下的结构损伤;梁师俊^[8]、孟灵鑫等^[9]研究了爆破对既有构筑物的影响;贾晓旭^[10]以广州地铁为背景,运用Ansys/LS-DYNA对隧道爆破开挖进行数值模拟,结合现场监测数据分析了振动波的传播特性和振动速度衰减规律;李岩松等^[11]通过监测和模拟发现建筑物垂直方向受隧道爆破影响显著,而建筑物高度不变的情况下,振速随着爆源水平距离的增大而减小。目前的研究大部分仅考虑爆破波的传播规律或者建筑物的力学响应,而对于两者的综合研究较少,且缺乏土体参数对爆破影响的研究。

在城市密集建筑群下方采用钻爆法开挖隧道时易引起邻近建筑物损伤,该文以福州某城市公路下穿隧道为工程背景,通过对隧道爆破施工进行现场监测,分析了爆破波的传播规律及其对上覆建筑群的影响。进一步采用数值模拟研究了爆破波在不同地质条件下的传播及建筑结构的响应规律,旨在爆破施工期间地表建筑物的安全及隧道安全高效施工提供理论指导。

1 工程概况

隧道为城市二类分离式双孔隧道,线路为东西走向。隧道全长约1 600 m,建筑限界宽9.25 m,高5 m,整体线形为鱼腹式。隧道在K0+524.6进入隧道浅埋暗挖段,下穿学校以及居民区,建筑物距隧道竖

向距离仅为20.1 m,隧道与地面建筑物的相对位置如图1所示。建筑物为5层混凝土框架结构,层高3.5 m,其墙体为加气混凝土砌块,主梁、楼板及构造柱为钢筋混凝土材料。

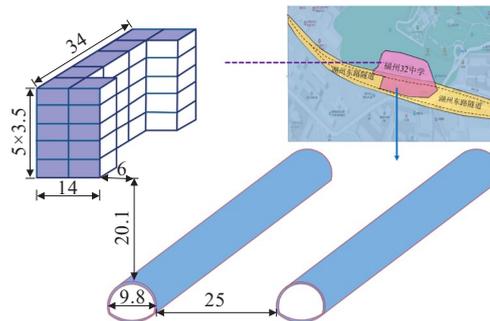


图1 隧道与地面建筑物的相对位置(单位:m)

Figure 1 Relative position of tunnel and surface buildings (unit: m)

隧道区地层主要为海积海陆过渡、冲洪积层、坡残积等类型的第四系土层,由人工填土、卵碎石土、黏性土、微风化和中风化花岗岩等组成,单层厚度一般不大于20 m。场地上部地质主要为人工填土和淤泥土等软土;中部是以中密为主的卵碎石土和黏土,胶结较好;下部的微风化岩层横贯此区域,是暗挖段隧道跨越的主要地层,详细地质情况如图2所示。

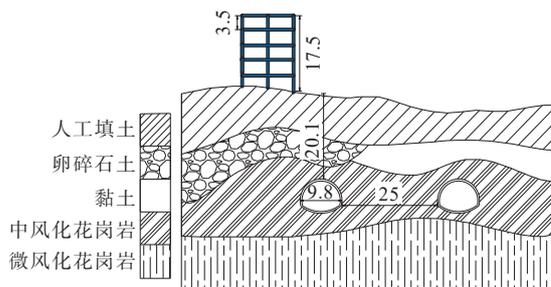


图2 隧道地质断面图(单位:m)

Figure 2 Geological section of tunnel(unit:m)

2 现场监测及结果

2.1 爆破方案

隧道下穿学校教学楼区域,经过地层为微风化花岗岩,为了尽量降低爆破振动对建筑物的扰动,现场采用图3所示的两台阶预留核心土法进行爆破开挖,台阶宽度为5 m,循环进尺为1.5 m。隧道采用机械开挖上台阶弧形导坑并辅以弱爆破,开挖后及时进行初期支护,核心土部分采用控制爆破技术进行施工。

爆破所用炸药选用2号岩石乳化炸药和岩石膨

化硝酸炸药并采用非电毫秒延期雷管方式起爆。进行核心土炮孔布置时,主爆孔最小抵抗线适当增大,单孔装药量适当减少;周边眼装药量自上而下逐渐增加,抵抗线逐渐减小。为了降低对围岩及上方建筑物的扰动和避免爆破施工引起超欠挖问题,主爆破孔与周边炮孔在设计装药时采用了不同的装药方式。炮孔直径均为 42 mm,药卷直径分别为 32 mm 和 25 mm,底部主炮孔排距为 70 cm,其余主炮孔相互间距均为 80 cm,周边孔间距均为 55 cm。

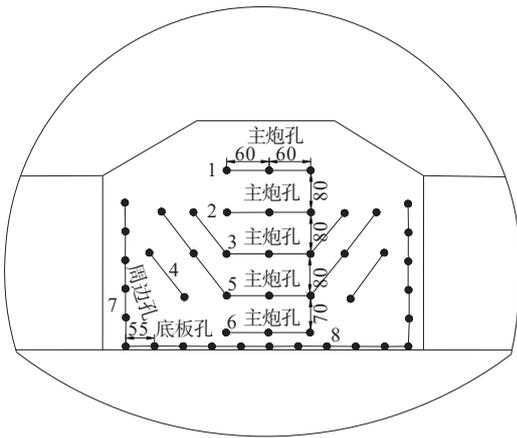


图3 爆破设计图(单位:cm)

Figure 3 Blasting design(unit: cm)

2.2 监测方案

使用 L20 型智能爆破测振仪记录爆破过程中地震波的振动速度和振动频率。对同一测振仪时间历程曲线进行分析可得振速峰值及优势主频分布,不同测振仪对比分析可得振动波传播规律。测点 B~D 布置于建筑物一侧的不同楼层,测点 A 布置于建筑物 1 层的另一侧,测点布置断面见图 4,爆源相对位置及各参数变量相对位置如图 5、6 所示,图中:O 点为爆源,B 点为结构基础,爆源距建筑基础的竖向距离为 H,纵向距离为 L,爆源距结构基础为 R',R 为 R' 在竖向面的投影。

2.3 监测结果分析

2.3.1 振动速度分析

由于核心土开挖面积大,爆破引起的地表扰动更剧烈,因此主要对 IV 级核心土爆破施工引起的地面结构振动进行监测。图 7、8 为各楼层监测点在爆心距 R' 不同时测得的各项振动速度。由图 7 可知:在一次循环进尺爆破开挖时,竖向振速峰值随楼层高度增加而增大,各监测点实测振动速度最大值为

2.45 cm/s,位于第 5 层测点 D,已经接近于建筑安全控制标准 2.5 cm/s。最小值为 0.85 cm/s,位于第一层测点 A。

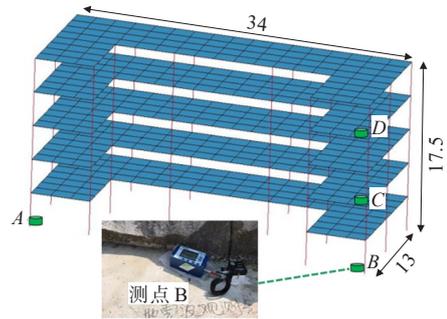


图4 测点布置断面图(单位:m)

Figure 4 Section of measuring point layout (unit:m)

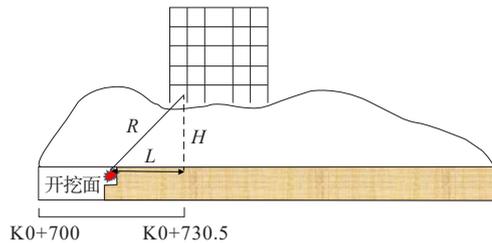


图5 爆源相对位置图

Figure 5 Relative position of explosion source

$$R' = \sqrt{L^2 + 6^2 + H^2}$$

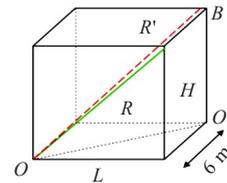


图6 各参数变量相对位置图

Figure 6 Relative position of each parameter variable

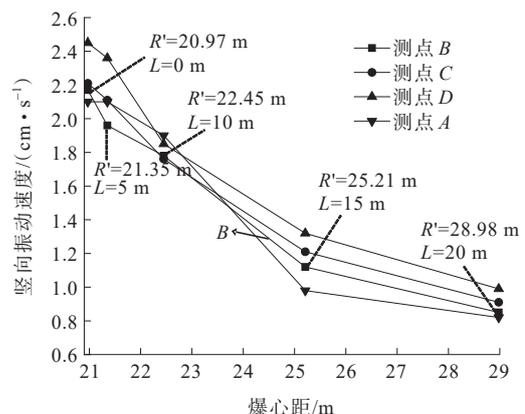


图7 各楼层竖向爆破振动速度

Figure 7 Vertical blasting vibration velocity of each floor

由图8可知:纵向振速峰值随建筑物高度增大表现出先增大后减小的趋势,第3层的振动速度最大,而第1层的振速最小。当爆心距 $R'=20.97\text{ m}$ 时,测点C纵向振速最大值为 0.42 cm/s ;当 $R'=25.21\text{ m}$ 时,测点B纵向振速最小值为 0.14 cm/s 。横向振速峰值随层高增加而逐渐降低,并没有表现出高程放大效应。

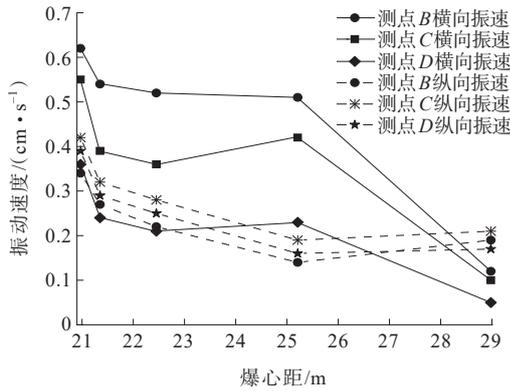


图8 各楼层纵横向爆破振动速度

Figure 8 Vertical and horizontal blasting vibration velocities of each floor

爆破振动速度在不同爆心距情况下的变化规律如图9所示。

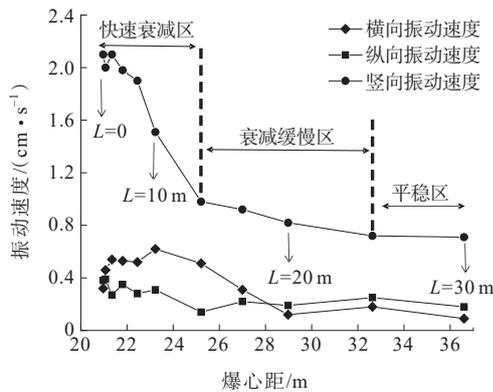


图9 爆破振动速度随爆心距变化趋势

Figure 9 Variation of blasting vibration velocity with explosion center distance

由图9可知:同一爆心距各方向振动速度,竖向振动速度大于纵向和横向振动速度,而纵向振动速度和横向振动速度相差较小。振动速度整体变化趋势为随爆心距的增大而逐渐减小并趋于稳定。在爆心距较小时,振动速度的衰减较快;当爆心距达到一定值时,随着爆心距的继续增大,振动速度的变化值较小。

2.3.2 振动频率分析

隧道爆破过程中地面建筑物竖向、横向振动主频如图10所示,两者变化趋势相似。同一测点的水平振动频率随爆心距的增大呈现下降的趋势;同一水平爆心距下,频率也随着楼层高度的增加逐渐衰减。竖向最低频率为 18.76 Hz ,位于5层测点D;最高频率为 45.23 Hz ,位于1层测点B。1层测点B横向振动主频最大,分布在 $35\sim 55\text{ Hz}$ 区间;5层测点D横向振动主频最小,集中在 $25\sim 45\text{ Hz}$ 。

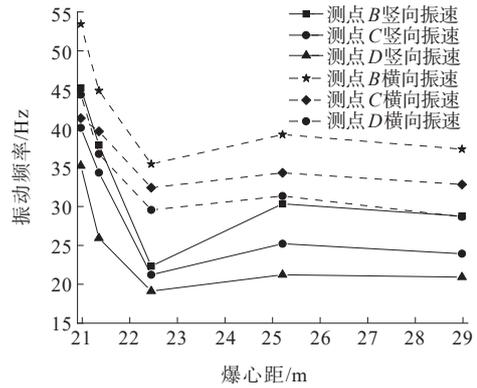


图10 爆破时建筑竖向和横向主频变化图

Figure 10 Variation of vertical and horizontal dominant frequencies of buildings during blasting

根据实测数据,横向振动主频要普遍大于竖向振动主频,比建筑物固有频率大,5层楼板所测得的竖向振动主频最接近于建筑物固有频率。说明振动波频率与建筑结构自身频率接近会引起更强的动力响应。

3 数值模拟对比分析

3.1 数值模型的建立

地面建筑物为框架结构,尺寸为 $20\text{ m}\times 100\text{ m}$,总高度为 17.5 m 。建筑物5层高度均为 3.5 m 。在实测建筑物结构尺寸的基础上,模型中设置梁的尺寸为 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}\times 0.75\text{ m}$,柱构件为 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$,楼板厚度为 0.15 m 。围岩模型尺寸为 $50\text{ m}\times 150\text{ m}\times 50\text{ m}$,隧道直径 $D=9.8\text{ m}$,隧道顶部距离建筑物底部 20.1 m ,围岩级别为IV级。针对地质勘察和爆破施工现场实际的工程地质条件,在合理简化的基础上利用Ansys/LS-DYNA建立了如图11所示的浅埋隧道-地层-建筑物实体有限元模型。表1~3为围岩、炸药及建筑物参数。爆轰产物膨胀过程中状态参数变化采用JWL状态方程模拟^[12-13]。

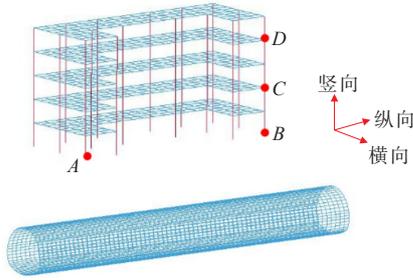


图 11 数值模型轮廓图

Figure 11 Outline of numerical model

表 1 围岩材料参数

Table 1 Material parameters of surrounding rock

重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	切线模量/GPa
27	45 000	0.17	22.8

表 2 炸药参数

Table 2 Explosive parameters

重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	A/ GPa	B/ GPa	R_1	R_2	ω	E_0 / GPa
15.8	175.6	3.01	4.74	1.01	0.26	2.07

注:A、B、 R_1 、 R_2 、 ω 为材料参数; E_0 为爆轰产物单位体积内能。

表 3 建筑物参数

Table 3 Building parameters

构件	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ (10^4 MPa)	泊松比	抗拉强度/ MPa
柱	25.0	35 000	0.2	1.89
梁	24.2	33 000	0.2	1.71
板	21.3	30 000	0.3	1.43

3.2 实测与模拟结果对比分析

3.2.1 不同爆心距下结构动力响应

数值模拟结果与现场实测数据对比如图 12 所示。

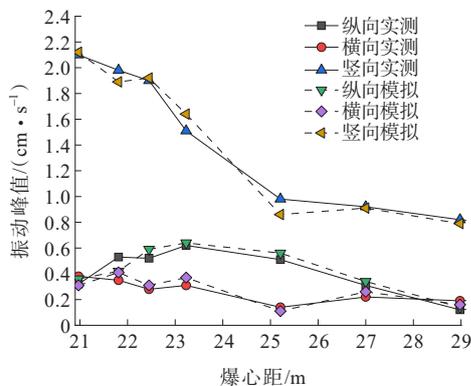


图 12 振动速度随爆心距变化对比

Figure 12 Comparison of variation of vibration velocity with explosion center distance

由图 12 可知:模拟值与实测值高度一致,数值模拟能较好地吻合工程实际。相互印证了隧道爆破开挖时振动波的传播规律,竖向振速随爆心距的增大而逐渐减小,而横纵向振速随爆心距的改变未表现出明显的变化规律。

3.2.2 不同层高下结构动力响应

数值模拟各测点竖向、纵向、横向振速峰值沿楼层高度的变化如图 13 所示。

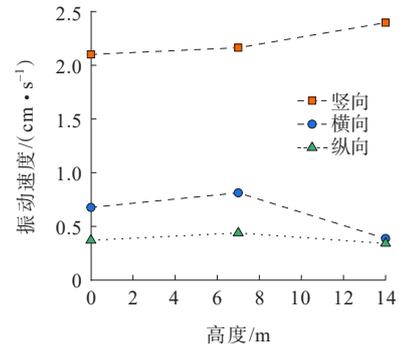


图 13 振速峰值随层高变化曲线

Figure 13 Variation of peak vibration velocity with floor height

由图 13 可知:总体振速值大小为竖向振速>横向振速>纵向振速;竖向振速随着楼层的增高而逐渐增大,由 2.1 cm/s 增大到 2.4 cm/s ;横纵向振速随楼层高度增大呈现出先增大后减小,最大值均位于第 3 层,分别为 0.81 cm/s 和 0.44 cm/s ,最小值位于第 5 层,分别为 0.39 cm/s 和 0.34 cm/s 。与图 7 实测振速对比可知:建筑结构模拟结果较实测数据小,是由于结构参数选取与实际存在差异且未能完全考虑影响因素导致。

4 进一步研究

4.1 土层对结构动力响应的影响分析

由实测和模拟计算结果可知:爆破引起建筑物的竖向振动速度明显大于横向和纵向振速,研究土层对爆破振速的影响以竖向为主。由于振速随楼层增高和爆心距的减小而增大,通过改变土层的参数模拟各楼层在爆心距最小情况下($L=0$)不同岩层介质的竖向力学响应,结果如图 14 所示。

由图 14 可知:在Ⅲ级围岩条件下各楼层振速峰值分别为 1.99 cm/s 、2.09 cm/s 和 2.29 cm/s ,而 V 级围

岩速度峰值分别为2.49 cm/s、2.79 cm/s和2.70 cm/s。楼层振动速度峰值随围岩等级提高而增大,软弱围岩情况下建筑结构更易产生损伤。V级围岩下振速超过建筑物允许值,在软弱围岩中进行隧道爆破时要加强建筑物振速监测。

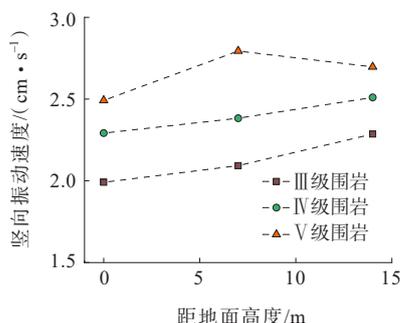


图14 不同岩层介质下各楼层的竖向振速

Figure 14 Vertical vibration velocity of each floor in different rock media

4.2 不同结构构件响应分析

4.2.1 柱的动力响应分析

建筑物中间柱体承受较大的结构荷载,因此研究爆破荷载作用下建筑物柱体的动力响应时,选取建筑物各楼层中间柱体为研究对象,并且重点对柱结构应力的变化规律进行分析。不同楼层柱体同一高度处的剪应力峰值总体表现为随楼层增加而先增大后减小(图15),与图13横纵向振速峰值变化趋势一致。同一楼层柱体不同高度处的应力峰值表现出明显的悬臂效应,即随高度的增加而增大。剪应力最大值为1.3 MPa,位于第3层上部节点N3,在现场对建筑物柱体进行力学分析及保护时,需要关注横纵向振速并考虑柱体的悬臂效应。

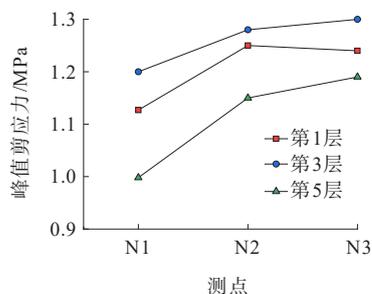


图15 建筑物柱体应力特征变化曲线

Figure 15 Stress characteristic variation of building column

4.2.2 板的变形响应分析

柱体的剪应力与爆破产生的水平振动密切相

关,剪应力的变化规律与水平向振速峰值变化存在对应关系。为研究建筑物板的力学性能,对各楼层板的竖向位移进行分析,结果如图16所示。

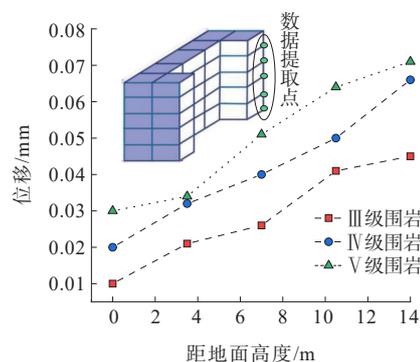


图16 各楼层板的竖向位移

Figure 16 Vertical displacement of each floor plate

由图16可知:同一围岩等级下,楼板的位移随着高度的增加而增大,与实测(图7)和模拟(图13)竖向振速变化趋势一致。不同围岩等级下,各楼层竖向位移随着围岩等级的提高而增大,和图14中不同围岩等级下竖向振速的变化趋势一致,表明板的力学响应与竖向振速呈正相关关系。

5 结论

通过现场监测试验并结合 Ansys/LS-DYNA 进行数值模拟。研究了爆破作用下建筑物结构动力响应特性,得出以下结论:

(1) 爆破振速随距离增大而逐渐减小,当爆心距由20.97 m增大到25.21 m、由25.21 m增大到36.60 m时,变化值分别为1.12 cm/s、0.23 cm/s,振速在爆心距较小时衰减较快。

(2) 竖向振动频率分布于18.76~45.23 Hz,优势主频集中在20~40 Hz,与结构自身频率接近,易引起共振效应进而导致动力响应加强,隧道爆破施工时应综合考虑振速及振频。

(3) 同一测点下III~V级围岩下最大峰值振速分别为2.29 cm/s、2.51 cm/s和2.79 cm/s,软弱围岩情况下建筑结构更易产生损伤,要加强建筑物振速监测。

(4) 建筑物柱体和楼板的力学响应分别与水平振速和竖向振速密切相关,建筑物保护要充分考虑到爆破在建筑物中引起的各方向振速。

参考文献:

References:

- [1] 刘才亮,刘成禹.浅埋暗挖地铁隧道开挖工法对比分析[J].铁道勘察,2019,45(1):31-34,67.
LIU Cailiang, LIU Chengyu. Contrastive analysis of shallow underground excavation methods for metro tunnels[J]. Railway Investigation and Surveying, 2019, 45 (1):31-34,67.
- [2] 金生吉,慕安鑫,毕博,等.某新建桩基近接施工对毗邻地铁区间隧道的影响[J].中外公路,2023,43(3):191-197.
JIN Shengji, MU Anxin, BI Bo, et al. Influence of proximity construction of a new pile foundation on adjacent metro tunnel[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023, 43(3):191-197.
- [3] 李明华,冯佳荟,韩雯静.临近既有有线门式墩基础施工影响因素的正交分析[J].中外公路,2023,43(4):183-187.
LI Minghua, FENG Jiahui, HAN Wenjing. Orthogonal analysis of influential factors in construction of portal pier foundations adjacent to existing railway[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023, 43(4):183-187.
- [4] 缪宏兵,田宇杰.隧道爆破施工对地表框架结构的影响分析[J].盐城工学院学报(自然科学版),2018,31(1):57-63.
MIAO Hongbing, TIAN Yujie. Impact analysis of tunnel blasting on the surface frame structure[J]. Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition),2018,31(1):57-63.
- [5] 张春武.浅埋隧道爆破施工中邻近框架结构的振动响应分析[J].隧道建设(中英文),2020,40(S2):93-99.
ZHANG Chunwu. Vibration response analysis of adjacent frame structure to shallow buried tunnel blasting construction[J]. Tunnel Construction,2020,40(S2):93-99.
- [6] 叶海旺,冉成,雷涛,等.爆破振动作用下砌体房屋结构动态响应与损伤分析[J].爆破,2018,35(1):161-166,174.
YE Haiwang, RAN Cheng, LEI Tao, et al. Dynamic response and damage analysis of masonry structures under blast vibration[J]. Blasting,2018,35(1):161-166,174.
- [7] 公伟增,段宝福,张雪伟,等.隧道爆破地震波作用下砌体建筑物振动响应分析[J].科学技术与工程,2019,19(33):377-383.
GONG Weizeng, DUAN Baofu, ZHANG Xuewei, et al. Analysis of vibration response of surface masonry buildings under tunnel blasting seismic wave[J]. Science Technology and Engineering,2019,19(33):377-383.
- [8] 梁师俊.洞窟下紧邻隧道爆破振动响应分析及控爆措施研究[J].中外公路,2019,39(3):193-198.
LIANG Shijun. Study on responses and control measures for blasting vibration of contiguous tunnels undercrossing border cavern[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019,39(3):193-198.
- [9] 孟灵鑫,陈德云.隧道爆破施工对邻近桥梁安全的影响[J].铁道勘察,2019,45(5):54-58.
MENG Lingxin, CHEN Deyun. Study on safety influence of tunnel blasting construction close to existing bridge[J]. Railway Investigation and Surveying,2019,45(5):54-58.
- [10] 贾晓旭.城区复杂环境下地铁开挖控制爆破关键技术研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2017.
JIA Xiaoxu. Study of the key technology of the blast-control during the subway excavation under the complex environment in urban areas[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University,2017.
- [11] 李岩松,罗利,杨根明,等.隧道开挖爆破对临近既有建筑安全影响分析[J].工程爆破,2022,28(1):123-129.
LI Yansong, LUO Li, YANG Genming, et al. Impact of tunnel blasting on the safety of adjacent buildings[J]. Engineering Blasting,2022,28(1):123-129.
- [12] 宋宏坤.基于爆破振速衰减规律的爆破振动控制技术[J].中外公路,2022,42(2):188-193.
SONG Hongkun. Blasting vibration control technology based on blasting velocity attenuation law[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(2):188-193.
- [13] 王鑫,张昌锁.基于ANSYS/LS-DYNA的工业炸药材料参数标定方法[J].爆破,2022,39(1):36-42,50.
WANG Xin, ZHANG Changsuo. Parameter calibration method of industrial explosive material based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Blasting,2022,39(1):36-42,50.