

隧道爆破下建筑结构局部应力响应及损伤研究*

王旭春¹, 管晓明¹, 于云龙¹, 余志伟¹, 李伟^{1,2}

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 青特置业有限公司, 山东 青岛 266100)

摘要: 依托新红岩隧道工程, 探究了隧道典型爆破地震波与砌体低阶与高阶模态之间的关系, 研究了不同工况爆破振动下砌体结构不同构件上的应力响应。砌体结构局部构件上的内力响应远比位移响应要显著, 并且与质点的振速约成正比。在峰值振速相同条件下, 当隧道爆破振动主频较高时, 引起建筑物高阶局部模态下的动力反应, 竖向振动引起的结构局部构件上的应力较大; 反之, 爆破振动主频较低, 引起建筑物的低阶整体模态的动力反应, 水平振动(结构弱轴方向)引起结构局部构件上的应力较大。砌体结构上的门角、窗角等应力集中部位最容易受损开裂, 其次是在峰值振速较高时, 局部振动较大的女儿墙、中隔墙等部位及砖墙与混凝土接触的部位也可能受损开裂。

关键词: 隧道爆破; 砌体结构; 模态分析; 应力响应; 损伤部位

中图分类号: U455.6

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2019)01-0125-09

Local Dynamic Stress Response and Damage of Structure under Tunnel Blasting Vibration

Wang Xuchun¹, Guan Xiaoming¹, Yu Yunlong¹, Yu Zhiwei¹, Li Wei^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Qingdao Technology University, Qingdao, Shandong 266033, P.R. China;

2. Qingte Property, Qingdao, Shandong 266100, P.R. China)

Abstract: Relying on the New Hongyan tunnel, the interaction between the characteristics of seismic waves and low-order modes and high-order modes of a masonry structure was explored. In addition, the stress on different members under different blasting vibration conditions was investigated. The internal force of local members of the masonry structure is much greater than displacement, which is proportional to the particle velocity. Under the same condition of the peak particle velocity, when high principal frequency of tunnel blasting vibration leads to dynamic response of the structure under high-order local modes, the stress on local members of the structure caused by vertical vibration is greater than that caused by horizontal vibration. On the contrary, when low principal frequency of tunnel blasting vibration leads to dynamic response of the structure under low-order global modes, the stresses on local members of the structure caused by horizontal vibration are greater than that caused by vertical vibration. Stress concentration areas such as doors and windows are most prone to damage and cracking, followed by local members where vibration is greater due to high vibration velocity. For example, damage and cracking may occur on parapet walls, partition walls, balconies and brick walls in contact with concrete.

Keywords: tunnel blasting; masonry structure; modal analysis; stress response; damage locations

* 收稿日期: 2018-06-05(修改稿)

作者简介: 王旭春(1963-), 男, 吉林洮南人, 博士(后), 教授, 主要从事采矿、岩土及地下工程研究。

E-mail: xcwang2008@qq.com

通讯作者: 管晓明(1985-), 男, 山东诸城人, 博士, 讲师, 主要从事隧道与地下工程研究。

E-mail: gxm1369@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(51708317); 山东省重点研发计划项目(2016GSF120016); 山东省自然科学基金(ZR2016EEB27)

0 引言

近年来,随着高速铁路、城市公路隧道及地下铁道的大规模修建,涌现出大量近距下穿城区密集建筑群下的复杂环境隧道。采用隧道钻爆法施工时必然产生爆破地震波,如果隧道爆破地震波的峰值振速超过建筑物的安全容许振速,或者爆破地震波的主频接近建筑物的固有频率,就有可能引起建筑物结构发生损伤而导致墙体开裂,进而造成当地居民与施工单位的冲突,影响隧道爆破施工作业的顺利进行。因此,研究隧道爆破作用下建筑物的动力反应及损伤,成为目前亟待解决的问题。

目前,隧道爆破作用下建筑物的动力反应及损伤研究主要有3种方法,一是基于房屋振动响应监测数据的分析,如娄建武等^[1]、林键等^[2]通过实测地面爆破振动数据来研究房屋的动力响应和破坏。二是采用反应谱理论研究结构的动力响应,如凌同华^[3]探讨了爆炸参量对爆破震动反应谱的影响;言志信^[4]研究了多自由度体系的爆破地震反应;李洪涛等^[5]研究得出建筑物对于爆破振动中的不同频率能量成分存在明显的选择放大效应。三是采用时程分析法研究结构在整个振动持续时间内的动力反应,如魏海霞等^[6]研究了爆破地震波三要素对多层砌体结构弹塑性地震的加速度、速度和位移响应的影响;陈士海等^[7]研究了不同频率的爆破振动下框架结构中的应力响应;田玉滨等^[8]进行了爆炸荷载作用下配筋砌体结构的动力响应;Wu等^[9-10]、Lu等^[11]、Hao等^[12]得出高频振动下结构表现出显著的局部模态响应,应力较高而全局性整体位移较小,高频振动下的结构动力反应主要受应力控制,而不是层间位移;Ma等^[13]得出建筑物底层更容易产生分布式结构损伤,爆破近区的竖向地面振动对结构的影响更大。此外,Alemdar等^[14-15]采用OMA(Operational Modal Analysis)方法研究建筑物及桥梁结构在爆破振动下的动力安全。

隧道爆破作用下建筑物的动力反应特征及损伤部位主要取决于隧道爆破地震波特性和建筑物动力特性,通过分析爆破地震波的主频、振速与建筑物的固有频率、振型及物理力学参数之间的相互作用关系,研究得出爆破作用下建筑物的位移及力学反应特征,分析得出建筑物的损伤机理及容易损伤部位。本文以成渝客运专线新红岩隧道工程为例,其浅埋段隧道下穿大量2~3层砌体楼房,由于

砌体楼房年代较远,为20世纪80—90年代修建,且未设圈梁和构造柱,导致其抗震能力较弱,隧道爆破振动对周围砌体楼房的安全构成了极大的威胁。首先分析隧道爆破地震波特性和选取的典型二层砌体楼房的动力特性(固有频率和振型),然后采用振型位移叠加法和弹性波动理论研究隧道爆破作用下结构的位移和应力响应,并且采用LS-DYNA软件研究不同工况条件下砌体结构的动力反应特征,分析砌体结构的损伤机理和容易损伤部位,对于控制隧道爆破作用下砌体楼房的振动安全和建筑物爆破损伤鉴定评估均有重要的理论和现实意义。

1 工程概况及隧道爆破地震波

1.1 工程概况

成渝客运专线新红岩隧道地处重庆市沙坪坝主城区繁华地段,覆盖层浅,地表建筑物密集且多为20世纪70年代前建筑,抗震性能极差,施工爆破具有极高的安全风险。

隧道浅埋段主要位于新红岩隧道进出口处,埋深在10~50 m之间。隧道上覆第四系全新人工填筑碎石土、坡洪积层粉质黏土、坡残积层粉质黏土等;下伏基岩为侏罗系中统沙溪庙组砂岩、泥岩夹砂岩。隧道穿越地层主要由泥岩、砂岩、泥岩夹砂岩组成,其中V级围岩占29%,IV级围岩占71%。

隧道浅埋段下穿沙坪坝区建设新村和新民坡村山区,地形起伏变化很大,隧道周围低层民房密集,房屋老旧,以2~3层砌体楼房为最多,房屋安全性要求较高。隧道上部2~3层砌体楼房主要结构形式为悬挑结构,采用预制楼板和毛石、砖砌刚性基础。房屋门窗开洞很不规则,导致受力性能较差,而且大多数房屋没有设置圈梁和构造柱等抗震构件,导致房屋的整体抗震能力较差。因此,一旦地表振动强度过大,或者爆破振动主频接近房屋的固有频率,产生共振,使房屋结构受损。

1.2 隧道爆破振动测试方案及爆破地震波特性

隧道爆破采用台阶法施工,由于上台阶开挖面积大,且只有一个临空面,先行爆破引起的地表振动强度更大,因此,主要对上台阶隧道爆破施工引起的地面振动进行监测,并根据掌子面开挖位置的不断变化选取新的测点。

以GDK297+850~GDK297+852为例,2处民房位于隧道中线左侧,受爆破振动影响较大,深埋

侧民房和浅埋侧民房结构形式分别为土坯房和2层砌体楼房。根据浅埋隧道监测测点的布置原则,总共布置纵向和横向2条振动监测线。隧道纵向振动监测线, A 、 B 测点分别布置 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 测点, A_1 、 B_1 测点位于掌子面成洞区后方2~3 m, A_2 、 B_2 测点正对应掌子面, A_1 和 A_2 、 B_1 和 B_2 测点纵向保持一条直线,并与隧道轴线平行。测量传感器安置在一楼的地面。考虑到地面的竖向振速(Z 向)一般大于水平振速(X 向),故 A_1 和 B_1 测点测试竖向(Z 向)和水平方向(X 向), A_2 和 B_2 测点只测试竖向速度(Z 向),测点布置如图1~2所示。

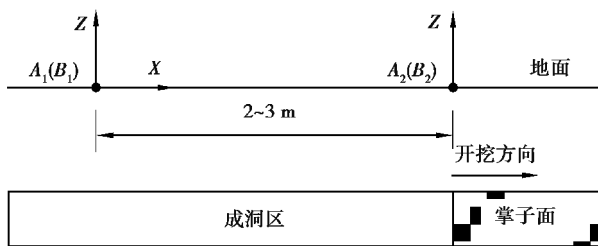


图1 隧道地表纵向振动测点布置示意图

Fig. 1 Layout of longitudinal vibration points of surface

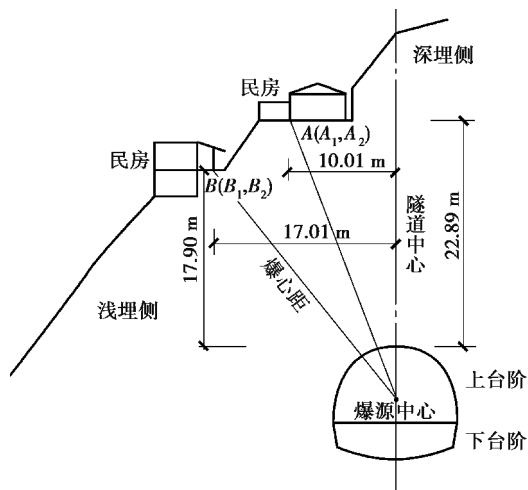


图2 隧道地表横向振动测点布置示意图

Fig. 2 Layout of transverse vibration points of surface

隧道爆破开挖通过该段期间,测得了大量爆破振动实时数据。从爆破振动实测数据中选择1组典型的高频和低频爆破地震波,如图3~4所示,并分别进行傅立叶频谱分析,如图5~6所示。

隧道爆破施工产生的爆破地震波首先到达距离爆源中心最短距离处,爆破地震波呈现出频率高、峰值振速大等特征,如图3和图5,此处典型高频爆破地震波峰值振速为0.9 cm/s,主频为76.9 Hz;随着爆破地震波向远处传播,爆破能量逐渐衰

减,峰值振速和主频表现为逐渐降低,如图4和图6所示,此处典型低频爆破地震波峰值振速为0.59 cm/s,主频为22.5 Hz。分析隧道爆破作用下砌体结构的动力反应特征时,需要同时考虑高频和低频爆破地震波的影响。

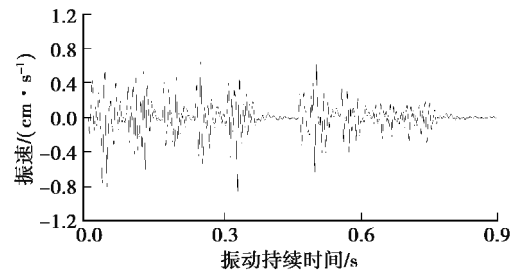


图3 典型高频爆破地震波波形(峰值振速 0.90 cm/s)

Fig. 3 Typical high frequency blasting seismic wave

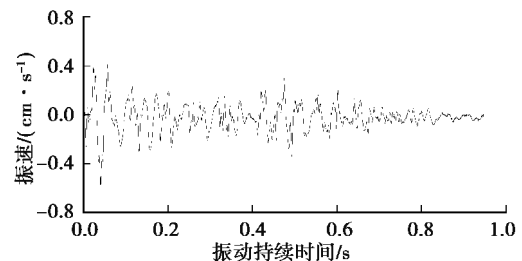


图4 典型低频爆破地震波波形(峰值振速 0.59 cm/s)

Fig. 4 Low frequency blasting vibration waveform

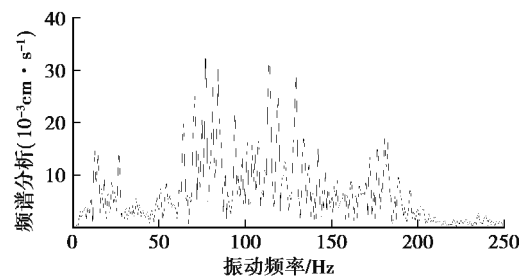


图5 高频爆破地震波频谱(主频 76.9 Hz)

Fig. 5 High frequency blasting vibration waveform spectrum chart (principal frequency 76.9 Hz)

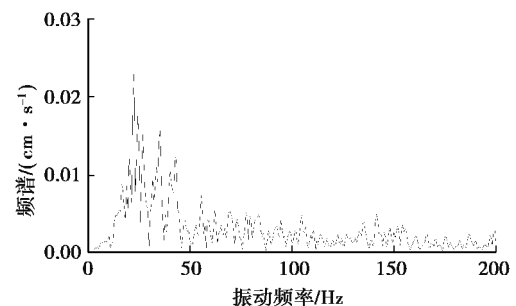


图6 低频爆破振动波形频谱图(主频 22.5 Hz)

Fig. 6 Low frequency blasting vibration waveform spectrum chart (principal frequency 22.5 Hz)

2 砌体结构模态分析及与爆破地震波相互作用

2.1 砌体结构模态分析

采用模态分析方法研究结构的动力特性,在机械、桥梁、航天航空等领域应用十分广泛。模态分析是所有动力学分析类型中最基础和最重要的内容,可以使结构避免共振或以特定频率进行振动,可以认识到结构对于不同类型的动力载荷是如何响应的。模态参数包括固有频率、振型、振型参与系数。根据模态参数的不同,砌体结构的模态可以分为 2 种,低阶整体模态和高阶局部模态。低阶整体模态是指在较低阶模态下,主体结构上有较大变形而且各部件变形较为均匀的模式。高阶局部模态是指在较高阶模态下,主体结构变形较小或不变形,而以局部尺寸较大且约束较弱的板、壳等辅助结构的变形为主的模式。

通过采用模型修正方法建立了典型二层砌体楼房的结构模型^[16],如图 7 所示。采用有限元模态分析方法获取了砌体结构的模态参数。以建立的二层砌体楼房模型为基础,采用有限元模态分析方法获得 1~20 阶模态参数如表 1 所示。

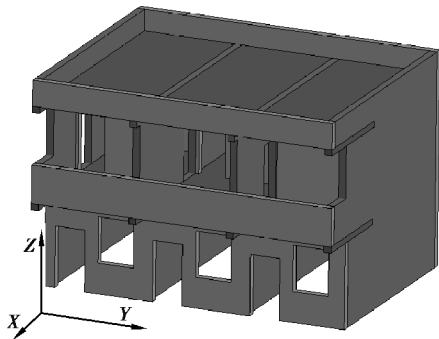


图 7 建筑物结构全图及剖面图

Fig. 7 Building structure overall view and cross-section

表 1 砌体结构 1~20 阶模态参数

Table 1 The first to the 20th modal parameters of masonry structure

阶次	频率/Hz	振型
1	8.80	纵向一次弯曲
2	12.48	横向一次弯曲
3	15.99	扭转
4	23.18	纵向二次弯曲
5	24.99	横向二次弯曲

续表1

阶次	频率/Hz	振型
6	26.10	二层左侧墙和前端女儿墙局部振动为主
7	26.55	二层左侧墙局部振动为主
8	28.71	二层右侧墙局部振动为主
9	29.91	一层中间隔墙
10	30.09	一层中间隔墙
11	30.16	一层中间隔墙
12	30.38	前端女儿墙和二层横隔墙局部振动为主
13	31.30	右边侧墙、二层横隔墙局部振动为主
14	31.54	前端女儿墙、右侧墙和二层横隔墙局部振动为主
15	32.55	前端女儿墙、右侧墙和二层横隔墙局部振动为主
16	32.97	前端女儿墙、一层横墙和二层横隔墙局部振动为主
17	33.60	二层横隔墙、阳台和前端女儿墙局部振动为主
18	33.98	阳台和前端女儿墙局部振动为主
19	35.47	二层横隔墙、阳台和右窗边墙局部振动为主
20	36.34	二层横隔墙、阳台和右窗边墙局部振动为主

砌体结构振型根据频率的高低和振动的特点可以分为低阶整体振型、高阶局部振型:

(1) 1~5 阶为低阶模态,固有频率为 8.80~24.99 Hz,对应结构整体振型,分别表现为纵向一次弯曲、横向一次弯曲、扭转、纵向二次弯曲和横向二次弯曲,结构表现为整体均匀的位移变形。

(2) 6~20 阶为高阶密集模态,固有频率为 26.10~36.34 Hz。随着固有频率逐渐增大,结构的振型也由整体振型变为局部振型,即结构的振动特征并未表现出整体各部件均匀的位移变形,而是局部侧墙、隔墙、女儿墙、阳台等约束较弱的构件变形较大,具有显著的局部模态特征。选取 6、19 阶部分高阶振型,如图 8 所示,局部构件表现出显著振动。

2.2 砌体结构与隧道爆破地震波相互作用

砌体结构由不同的构件组成,包括承重墙、挑

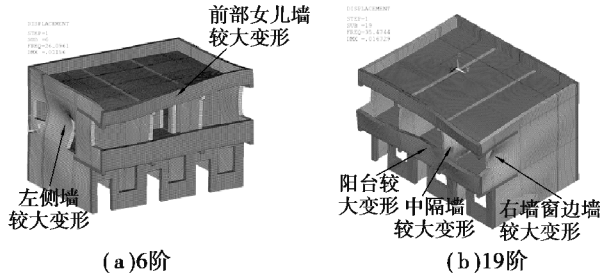


图8 砌体结构部分局部模态振型

Fig. 8 Local modes of the masonry structure

梁、楼板、隔墙、侧墙、女儿墙、阳台等。对于砌体结构来说,其振动特性与外部振动频率相对应。当外界振动频率较低,与结构低阶整体固有频率一致时,结构中的构件以整体振型的方式伴随整体一起振动,各个构件表现出共同的振动状态,即结构呈现整体模态。当外界振动频率逐渐增大,与结构高阶固有频率一致时,各个构件逐渐从结构的整体振动状态脱离出来,局部构件表现出各自的振动状态。此时,砌体结构纵墙等刚度较大的构件振动较小,而局部侧墙、隔墙、阳台、屋顶的女儿墙等刚度较弱或者周围限制约束作用较弱的构件,往往相比其他构件振动更为显著,即结构呈现局部振动模态。

由于隧道爆破振动频域较宽,并且以高频爆破地震波为主,其主频带更接近砌体结构的高阶局部模态的固有频率,引起砌体结构高阶模态局部构件的较大振动,从而造成局部构件的变形和应力要高于其他部位,导致砌体结构局部构件的发生受损。

3 隧道爆破振动下结构应力响应理论

3.1 砌体结构应力与爆破振动频率关系

采用振型叠加法可以得到结构的总位移 $v(t)$ 反应,如式(1)所示:

$$v(t) = \phi_1 Y_1(t) + \phi_2 Y_2(t) + \dots + \phi_n Y_n(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n Y_n(t) \quad (1)$$

式中: ϕ_n 为振型向量; $Y_n(t)$ 为坐标向量。

动力反应分析过程中,对于大多数低频荷载类型,通常低阶振型的位移贡献较大,而高阶振型的贡献则趋于减小,叠加过程中,可以忽略不必要的高阶振型。但是,对于少数的短持时高频荷载类型,结构的动力反应呈现与低频荷载类型不同的特征。弹性力 $f_s(t)$ [16] 计算如公式(2)(3)所示。

$$f_s(t) = kv(t) = k\Phi Y(t) \quad (2)$$

$$f_s(t) = \omega_1^2 m \phi_1 Y_1(t) + \omega_2^2 m \phi_2 Y_2(t) + \dots + \omega_n^2 m \phi_n Y_n(t) = \sum_{n=1}^N \omega_n^2 m \phi_n Y_n(t) \quad (3)$$

式中: m 为质量; k 为刚度; ω_n 为固有频率。

从式(3)中看出,弹性力 $f_s(t)$ 中 $\omega_n^2 m \phi_n Y_n(t)$ 中每个元素都乘以固有频率的平方,可以得出高阶振型对于结构内力反应的影响要比对位移反应的影响大得多。换句话说,高频隧道爆破作用下引起结构的内力反应远比位移反应要显著,可以更好地评价爆破振动对建筑物的影响。

3.2 砌体结构应力与隧道爆破振速关系

地下浅埋爆破传递4种波,分别为纵向压缩波(P波),纵向稀疏波(N波),剪切横波(S波)和瑞利表面波(R波)。压缩波和稀疏波传播得最快,横波传播的慢一些,瑞利波传播得最慢,这4种波在传播过程中逐渐互相分开。根据钱七虎院士等^[17]阐述的应力波的组成及水平与竖向振动特征,在隧道爆破的近区,以P波为主,隧道爆破的远区,则以R波为主。

隧道爆破地震波传递到建筑物结构上,引起建筑物上瞬间产生很高的压力、拉力及剪应力。根据弹性波动理论,爆破地震波对建筑物作用产生的应力与质点振速关系如式(4)、式(5)所示:

$$\sigma = \frac{E}{C_p} V_p \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \quad (4)$$

$$\tau = \frac{E}{C_s} V_s \frac{1}{2(1 + \mu)} \quad (5)$$

式中: σ 为纵波作用产生的正应力; τ 为横波作用产生的剪应力; C_p 为纵波传播速度; C_s 为横波传播速度; V_p 为纵波引起的质点振速; V_s 为横波引起的质点振速; E 为弹性模量; μ 为介质泊松比。

由此可见,建筑物上产生的最大应力与质点的峰值振速约成正比,质点的振速越大,引起的建筑物上的应力水平越高。因此,由于隧道爆破振动持续时间较短(一般持续1~2s),隧道爆破振动下结构的动力反应主要由瞬时产生的高应力控制(而不是位移),应该重点分析结构的应力反应特征,得出结构容易发生破坏的部位,为隧道爆破振动下结构的安全控制提供依据。

4 不同工况隧道爆破振动下砌体结构应力响应

研究隧道爆破作用下砌体结构上的应力变化规律时,一方面需要考虑施加不同方向爆破地震波

的情况;另一方面还需要考虑施加不同频率的爆破地震波的情况;此外,还需要考虑多个方向共同施加爆破地震波的情况。因此,采用 LS-DYNA 动力分析程序,总计考虑 3 种工况用于分析不同形式的隧道爆破振动对砌体结构应力的影响。对于砌体结构而言,由于砂浆和砖均为脆性材料,抗拉能力较弱,砌体的破坏准则为受拉破坏,最大主拉应力达到砂浆的极限抗拉强度为损伤标准。

施加的荷载中,不考虑楼面活荷载,考虑建筑物自重荷载,最终计算得到的结构反应为重力和隧道爆破作用下结构的反应值。

4.1 不同方向高频隧道爆破振动下的结构应力

为了分析不同方向高频爆破振动引起的结构应力情况,令不同方向隧道爆破地震波的峰值振速和振动频率相同,即分别对 X 、 Y 、 Z 方向施加峰值振速为 1.0 cm/s 、主频为 76.9 Hz 的高频隧道爆破地震波(图 1 中爆破地震波乘以 1.11 的系数),隧道爆破振动主频接近建筑物的高阶局部模态的固有频率,此时以局部构件的变形为主。经过计算, Z 向施加隧道爆破地震波得到的结构第一主应力如图 7~8 所示,图中拉应力为正压应力为负。结构上不同部位构件的典型单元编号也如图 9~10 所示,提取得到不同部位构件典型单元上的主拉应力值如表 1 所示。

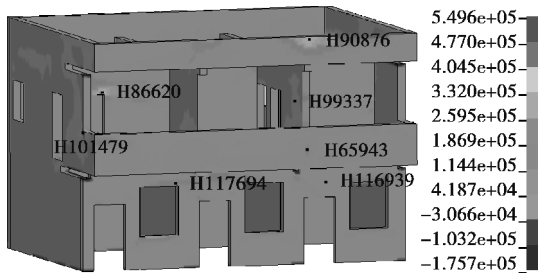


图 9 Z 向施加爆破地震波砖墙第一主应力云图($t=0.101\text{ s}$)
Fig. 9 Masonry first principal stress cloud ($t=0.101\text{ s}$)

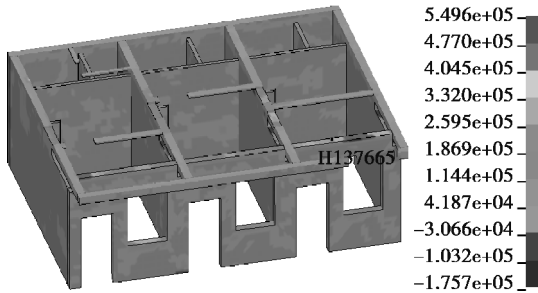


图 10 Z 向施加爆破地震波一楼第一主应力云图($t=0.101\text{ s}$)
Fig. 10 Masonry first principal stress cloud on the first floor cross-section ($t=0.101\text{ s}$)

从表 2 中可以得出以下结论:

(1)对于结构主体纵墙单元, X 、 Y 方向振动引起的纵墙单元的拉应力要大于 Z 方向。对于其他局部构件单元, Z 方向振动引起的局部拉应力要大于 X 、 Y 方向。此外,从结构上单元的最大拉应力也可以看出, Z 方向振动引起的最大拉应力也要大于 X 、 Y 方向。换句话说, X 、 Y 、 Z 三个方向峰值振速相同的高频隧道爆破振动作用下,以 Z 向振动波引起砌体结构的最大拉应力评价建筑物的安全是可行的,忽略水平振动影响。

(2)砌体结构不同部位上的拉应力差别较大。以施加 Z 向隧道爆破地震波为例进行说明。首先,以结构上应力集中部位的拉应力最大,其拉应力约是纵墙拉应力的 10~20 倍,并以应力集中部位门角(H86620)拉应力峰值为最大;其次是结构局部振动较大的部位和楼板与砖墙接触的部位拉应力较大,其拉应力约是纵墙拉应力的 7~15 倍,并以女儿墙(H90876)的主拉应力峰值为最大;纵墙上的拉应力水平最低。

表 2 不同方向高频爆破作用下的结构应力

Table 2 Local principal tensile stress under X , Y , Z direction respectively applying vibration wave

部位类别	不同部位	典型单元	主拉应力峰值/MPa		
			X	Y	Z
结构主体	纵墙	H116939	0.039	0.046	0.034
	阳台	H65943	0.11	0.091	0.24
局部振动部位	中隔墙	H99337	0.24	0.25	0.27
	女儿墙	H90876	0.48	0.49	0.51
	窗角	H117694	0.29	0.29	0.34
应力集中部位	门角	H86620	0.67	0.68	0.70
	侧墙窗角	H101479	0.49	0.47	0.55
楼板与砖墙	一楼楼板与接触部位	H137665	0.30	0.28	0.35
结构单元上					
最大拉应力			0.70	0.69	0.73

4.2 不同方向低频隧道爆破振动下的结构应力

为了分析不同方向低频隧道爆破振动引起的结构应力情况,令不同方向隧道爆破地震波的峰值振速和振动频率相同,即分别对 X 、 Y 、 Z 方向施加峰值振速为 1.0 cm/s 、主频为 22.5 Hz 的低频隧道爆破地震波(图 4 中爆破地震波乘以 1.70 系数),隧道爆破振动主频接近建筑物的低阶整体模态的

固有频率,此时以整体变形为主,提取得到不同部位构件典型单元上的主拉应力值如表 3 所示。

表 3 不同方向施加振动波引起的局部主拉应力

Table 3 Local principal tensile stress under X, Y, Z direction respectively applying vibration wave					
部位类别	不同部位	典型单元	主拉应力峰值/MPa		
			X	Y	Z
结构主体	纵墙	H116939	0.08	0.04	0.05
	阳台	H65943	0.12	0.08	0.09
局部振动部位	中隔墙	H99337	0.29	0.25	0.19
	女儿墙	H90876	0.50	0.48	0.48
	窗角	H117694	0.26	0.25	0.20
应力集中部位	门角	H86620	0.69	0.66	0.66
	侧墙窗角	H101479	0.50	0.47	0.55
楼板与砖墙接触部位	一楼楼板与砖墙接触处	H137665	0.28	0.29	0.33
结构单元上最大拉应力/MPa		0.80	0.68	0.78	

从表 3 中可以得出以下结论:

X 方向振动引起的结构主体部分及局部构件的拉应力大多数要普遍大于 Y、Z 方向。此外,从结构上单元的最大拉应力也可以看出,X 方向振动引起的最大拉应力也要大于 Y、Z 方向。因为 X 方向横向刚度较小,属于砌体结构的弱轴方向,振动相比其他方向更为强烈,从而引起的拉应力水平较高。隧道爆破振动频率越低,X 方向振动引起的结构上的拉应力越大。换句话说,X、Y、Z 三个方向峰值振速相同的低频隧道爆破振动作用下,以 X 向振动波引起砌体结构的最大拉应力评价建筑物的安全是可行的,忽略竖向振动影响。

4.3 多个方向隧道爆破振动下的结构应力

考虑两个方向同时施加隧道爆破地震波,即 Z 和 X 方向同时施加在结构上,Z 方向施加高频隧道爆破地震波(图 1),峰值振速为 1.0 cm/s,振动主频为 76.9 Hz;在浅埋隧道爆破近区掌子面上方地表,隧道爆破地震波以 P 波为主,入射纵波引起的竖向地面振速一般大于水平方向振速,故令 X 方向的爆破地震波的峰值振速为 0.7 倍 Z 向,即峰值振速为 0.7 cm/s。而对于 X 向振动波的频率分为 2 种情况考虑:①X 方向振动频率与 Z 方向均为高频,振动主频为 76.9 Hz(图 1);②X 方向振动频率低于 Z 方向,振动主频为 22.5 Hz(图 4)。不同条件下计算得到的结构上的拉应力如表 4 所示,并与只在 Z 向施加爆破地震波进行对比分析。

表 4 Z、X 方向同时施加振动波引起的局部主拉应力

Table 4 Local principal tensile stress under X, Z direction simultaneously applying vibration wave					
部位形式	不同部位	典型单元	主拉应力峰值/MPa		
			Z 高频, 无 X	Z、X 均是高频	Z 高频、X 低频
结构主体	纵墙	H116939	0.034	0.02	0.05
	阳台	H65943	0.24	0.24	0.23
局部振动部位	中隔墙	H99337	0.27	0.30	0.31
	女儿墙	H90876	0.51	0.51	0.50
应力集中部位	窗角	H117694	0.34	0.36	0.32
	门角	H86620	0.70	0.69	0.70
	侧墙窗角	H101479	0.55	0.55	0.61
楼板与砖墙接触部位	一楼楼板与砖墙接触处	H137665	0.35	0.36	0.32
结构单元上最大应力/MPa		0.73	0.72	0.79	

从表 4 中可以得出以下结论:

Z、X 均是高频时,两个方向同时施加隧道爆破地震波与只施加 Z 方向引起的结构上的拉应力相差不大,因为高频时 Z 向振动引起结构上的应力要高于 X 向振动,故增加 X 方向振动,结构上应力变化不大;Z 是高频、X 是低频时,同时施加 Z、X 方向振动引起结构的上拉应力大多数大于只施加 Z 向。从结构上单元的最大拉应力也可以看出,Z 是高频、X 是低频时,振动引起的最大拉应力也要大于只施加 Z 向或 Z、X 均是高频。表明 X 向振动为低频时,水平振动会增大得结构上的拉应力。水平振动频率越低,结构上的拉应力增加越多。

5 隧道爆破振动下砌体结构损伤部位

5.1 砌体结构损伤原理

通过对砌体结构进行隧道爆破作用下的动力反应分析得出,由于隧道爆破振动的持续时间较短(1~2 s),爆破振动引起的结构整体性位移很小,更多的是引起结构上产生很高的拉(压)应力或剪应力。在隧道爆破掌子面上方地表为爆破的近区,爆破地震波的频率往往较高,导致局部构件上产生很高的拉应力,其拉应力是主体结构上拉应力的数倍。当局部构件的拉应力超过材料的抗拉强度时,局部构件发生损伤导致开裂。

对于砌体结构,砖墙由于其抗压强度远大于抗拉

强度,一般不会发生受压破坏,砖墙最有可能发生受拉破坏。应力集中部位,例如门角、窗角,在较低的峰值振速下就可能发生开裂;随着峰值振速的增大,局部振动较大的部位,如女儿墙、中隔墙和阳台,及砖墙与混凝土接触的部位上的应力也可能超过材料的力学强度,导致以上部位发生损伤。对于主体结构,由于结构上的应力水平最低,一般不会发生损伤。

5.2 隧道爆破振动下砌体结构损伤部位

依托成渝高铁新红岩隧道工程,实地调研了隧道爆破振动下部分砌体房屋的损伤情况,根据爆破前后现场实地图片比对,判断由爆破作用产生的裂缝,分析了裂缝的开展部位,有助于认识和评估爆破振动下的结构损伤。

5.2.1 应力集中部位的开裂

应力集中部位自身受力性能较差,受力极为不均匀,应力水平较高,是隧道爆破作用下结构最容易开裂的部位。现场隧道爆破振动引起的墙角裂缝如图 11 所示。



图 11 应力集中部位裂缝形态图

Fig. 11 Cracks in the stress concentrated area

5.2.2 砖墙与混凝土楼板交界处的墙面开裂

由于混凝土强度高,弹性模量大,砖墙强度低,弹性模量比混凝土低,刚度发生突变,受力不均匀,使得砖墙侧应力水平较高,可能引起抗震能力较弱的砖墙侧发生裂缝或者交界面处的附属装饰物发生开裂掉块,如图 12 所示。



图 12 楼板和砖墙交界处的裂缝、附属物脱落

Fig. 12 Cracks in the interface between the floor and the brick wall and appendages shedding

5.2.3 预制楼板接缝开裂

预制板楼板不同于结构其他部位,一般预制板

之间采用混凝土填缝灌浆,没有钢筋连接,导致预制板本身之间的连接就非常薄弱。在动荷载作用下,预制板和接缝混凝土由于联系作用较弱,两者刚度也不完全相同,两者在反复的振动下不能一起工作进而可能发生脱离,导致相邻预制板开裂,并引起其他不利的影响。如遇到雨水下渗,可能会侵蚀楼板和墙壁等附属物,如图 13 所示。

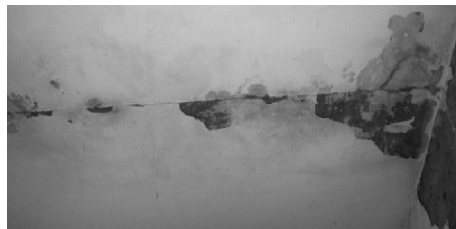


图 13 预制楼板接缝开裂

Fig. 13 Precast floor slab joint cracking

综上所述,实地调研的爆破作用引起的砌体结构的损伤部位与动力反应分析的结果是一致的,表明爆破振动引起的确实是砌体结构上局部构件产生较高的应力而导致局部的损伤和开裂。

6 结论

通过引入模态分析方法,探究了隧道爆破地震波特性和建筑物模态特性之间的相互作用,采用理论分析、数值模拟和现场调研的方法研究了隧道爆破振动下砌体结构的应力响应及损伤部位,得出以下结论:

(1)砌体结构的振动特性与外部振动频率相对应。高频隧道爆破振动下,激起的是砌体结构的高阶局部模态反应,引起局部构件上发生显著的变形;低频隧道爆破振动下,激起的是砌体结构的低阶整体模态反应,引起结构整体发生较为均匀的变形;隧道爆破作用的时间很短,导致结构局部构件上的内力反应远比位移反应要显著,并且与质点的振速约成正比。

(2)峰值振速相同时,高频隧道爆破地震波作用下,竖向振动引起的结构上的应力水平较高,可以忽略水平振动影响;而当低频隧道爆破地震波作用下,水平振动(弱轴方向)引起的结构上的应力水平较高,可以忽略竖向振动影响。当竖向振动为高频、水平振动为低频,应该同时考虑两个方向振动对结构上应力的影响。

(3)隧道爆破作用下砌体结构的应力集中部位,如门角、窗角可能最先发生开裂,其次是局部振动较大的部位,如女儿墙、中隔墙和阳台,以及砖墙

与混凝土接触的部位上的应力也可能发生损伤和开裂。对于主体结构,一般不会发生损伤。实地调研的隧道爆破作用引起的砌体结构的损伤部位与动力反应分析的结果是一致的,表明隧道爆破振动引起的确实是砌体结构上局部构件产生较高的应力而导致局部的损伤和开裂。

参考文献(References)

- [1] 娄建武,龙源,徐全军,等.普通民房在爆破地震波作用下的振动破坏分析[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2011,2(2):22-26. (Lou Jianwu, Long Yuan, Xu Quanjun, et al. Analysis of damage to low-rise houses under blasting seismic wave[J]. Journal PLA University of Science and Technology, 2011, 2(2): 22-26. (in Chinese))
- [2] 林键,林从谋,林丽群.爆破振动荷载作用下3-4层房屋结构响应测试研究[J].振动与冲击,2010,29(3):48-51,66. (Lin Jian, Lin Congmou, Lin Liqun. Research on response characteristics of structure under dynamic blasting load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(3): 48-51, 66. (in Chinese))
- [3] 凌同华.爆破震动效应及其灾害的主动控制[D].长沙:中南大学,2004. (Lin Tonghua. Blast vibration effect and initiative control of vibrational damage[D]. Changsha: Central South University, 2004. (in Chinese))
- [4] 言志信.结构拆除及爆破地震效应[D].重庆:重庆重庆大学2002. Yan Zhixin. Study on structure demolition and blast vibration effect[D]. Chongqing: Chongqing University, 2002. (in Chinese)
- [5] 李洪涛,舒大强,卢文波,等.建筑物对爆破振动中不同频率能量成分的响应特征[J].振动与冲击,2010,29(2):154-158. (Li Hongtao, Shu Daqiang, Lu Wenbo, et al. Response characteristics of a structure to different frequency components in blasting vibration energy[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(2): 154-158. (in Chinese))
- [6] 魏海霞,陈士海.爆破地震波三要素对多层砌体结构弹塑性地震响应的影响[J].爆炸与冲击,2011,31(1):55-61. (Wei Haixia, Chen Shihai. Effects of three main factors of blasting seismic waves on elasticplastic seismic response of multistory masonry buildings[J]. Explosion Shock Waves, 2011, 31(1): 55-61. (in Chinese))
- [7] 陈士海,魏海霞,张安康.多维爆破地震动作用下框架结构动态响应有限元时程分析[J].振动与冲击,2010,29(9):134-137. (Chen Shihai, Wei Haixia, Zhang Ankang. Finite-element time-history analysis of dynamic response of frame structure under multi-dimensional blasting vibration[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(9): 134-137. (in Chinese))
- [8] 田玉滨,李朝,张春巍.爆炸荷载作用下配筋砌体结构的动力响应[J].爆炸与冲击,2012,32(6):658-662. (Tian Yubin, Li Zhao, Zhang Chunwei. Dynamic response of reinforced masonry structure under blast load[J]. Explosion Shock Waves, 2012, 32(6): 658-662. (in Chinese))
- [9] Wu C Q, Hao H, Lu Y, et al. Numerical simulation of structural responses on a sand layer to blast induced ground excitations[J]. Computers and Structures, 2004, 82(9-10): 799-814.
- [10] Wu C Q, Hao H, Lu Y. Dynamic response and damage analysis of masonry structures and masonry infilled RC frames to blast ground motion [J]. Engineering Structures, 2005, 27(3): 323-333.
- [11] Lu Y, Hao H, Ma G W, et al. Simulation of structural response under high-frequency ground excitation [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2001, 30(3): 307-325.
- [12] Hao H, Ma G W, Lu Y. Damage assessment of masonry infilled RC frames subjected to blasting induced ground excitations[J] Engineering Structures, 2002, 24(6): 799-809
- [13] Ma GW, Hao HLu Y. Modelling damage potential of high-frequency ground motions [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32(10): 1483-1503
- [14] Alemdar B, Temel T, Ahmet CA, et al. Evaluation of blast effects on reinforced concrete buildings considering Operational Modal Analysis results[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(5): 310-319
- [15] Alemdar B, Ahmet A, Mehmet Ö. 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.
- [16] 管晓明,傅洪贤.基于OMA试验模态参数的砌体结构有限元建模及修正[J].振动与冲击,2014,33(14):181-187,210. Guan Xiaoming, Hongxian. Finite element modeling and model updating of brick masonry structure. Based on modal parameters obtained from operational modal analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(14): 181-187, 210. (in Chinese)
- [17] 钱七虎,王明洋.岩土中的冲击爆炸效应[M].北京:国防工业出版社,2010. (Qian Qihu, Wang Mingyang. Impact and explosion effects in rock and soil [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.) (in Chinese)