

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240925002

基坑爆破临近砖砌体墙动力响应特征及安全控制*

鹿传磊^{1,2}, 薛明华³, 胡文奎³, 李远远³

(1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150081; 2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086; 3. 济南市勘察测绘研究院, 山东 济南 250101)

摘要: 控制基坑爆破振动效应对保证临近砖砌结构的安全稳定具有重要意义。依托武汉某地铁基坑爆破工程, 采用现场试验与 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟方法, 研究了基坑爆破临近砖砌体墙动力响应特征, 基于量纲分析原理, 构建了爆破振动预测模型, 并提出了砖砌体墙爆破振动安全标准。研究表明: 建立的数值模型结果与现场测试结果一致, 可以用于爆破动力响应分析; 砖砌体墙低阶模态振型为横向或纵向弯曲, 高阶模态下为横向与纵向弯曲耦合作用; 砖砌体墙迎爆侧动力响应大于背爆侧, 沿墙体延伸方向振速峰值出现在端部或中部或靠近中部位置, 且随高度发生改变; 砖砌体墙爆破振动存在高程放大效应, 在远离爆源位置更加显著, 应力在不同方向均呈现中间大两端小的特征; 墙高、开挖深度增大会使高程放大效应显著位置及应力集中位置由墙体中心向两端移动; 建立了爆破振动预测模型, 结合极限强度理论得到砖砌体墙爆破安全振速为 2.42 cm/s, 提出了爆破安全药量计算公式, 可用于基坑爆破设计。

关键词: 基坑爆破; 砖砌体墙; 动力响应; 安全控制

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2026)02-0409-10

Dynamic Response Characteristics and Safety Control of Brick Masonry Walls Adjacent to Foundation Pit Blasting

LU Chuanlei^{1,2}, XUE Minghua³, HU Wenkui³, LI Yuanyuan³

(1. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Harbin 150081, China; 2. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Ministry of Natural Resources, Harbin 150086, China; 3. Ji'nan Institute of Geotechnical Investigation and Surveying, Ji'nan 250101, China)

Abstract: Controlling the vibration effects of foundation pit blasting is of great significance for ensuring the safety and stability of adjacent brick masonry structures. Based on a foundation pit blasting project of a subway in Wuhan, field tests and ANSYS/LS-DYNA numerical simulations were adopted to investigate the dynamic response characteristics of brick masonry walls adjacent to foundation pit blasting. Based on the principle of dimensional analysis, a blasting vibration prediction model was established, and a safety standard for blasting vibration of brick masonry walls was proposed. The results showed that the established numerical model results were consistent with the field test results and could be used for analyzing the dynamic response under blasting. The lower-order mode shapes of the brick masonry walls were transverse or longitudinal bending, while under higher-order modes, they exhibited coupled transverse and longitudinal bending. The dynamic response on the blast-facing side

* 收稿日期: 2024-09-25; 修回日期: 2025-01-29

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20242632)资助

作者简介: 鹿传磊(1983—), 男, 高级工程师。主要从事工程勘查、施工技术与管理工。E-mail: Luchlei03@163.com

通信作者: 胡文奎(1979—), 男, 高级工程师。主要从事岩土工程专业技术与管理工。E-mail: noahhkw@126.com

of the brick masonry walls was greater than on the opposite side, and the peak vibration velocity along the extension direction of the wall occurred at the ends, the middle, or near the middle, and changed with height. The blasting vibration of the brick masonry walls exhibited an elevation amplification effect, which was more significant at locations farther from the blasting source, and the stress in different directions showed the characteristics of higher stress in the middle and lower stress at both ends. Increasing the wall height and excavation depth caused the locations of significant elevation amplification effects and stress concentration to shift from the center of the wall toward both ends. A blasting vibration prediction model was established, and combined with the ultimate strength theory, the safe blasting vibration velocity of brick masonry walls was determined to be 2.42 cm/s. A calculation formula for the safe charge of blasting was proposed, which can be applied to foundation pit blasting design.

Keywords: foundation pit blasting; brick masonry wall; dynamic response; safety control

0 引言

爆破作为一种常用的岩石破碎方法,因其具有施工高效、便捷、成本低等优点,常用于基坑开挖、隧道掘进、矿山开采等工程中。目前,随着城市建设的加快,基坑工程不断涌现。关于大型深基坑,如地铁基坑、高层建筑基坑等,不可避免地需要采用爆破方式在岩层中进行开挖作业,但由此带来的爆破振动有害效应会影响周边环境、结构的稳定,尤其在老旧城区等环境敏感区域,存在大量上世纪建立的砖砌体结构,在爆破振动作用下极易发生失稳等灾害,需要重点关注。

针对砌体结构爆破振动响应问题,一些学者进行了研究。黄俊等^[1]基于现场测试结果分析了老旧砌体结构爆破动力特性,认为累积爆破作用会降低结构自振频率。倪汉根等^[2]对拆除爆破振动作用砌体结构动力响应特征进行现场测试与数值模拟研究,发现在三层位置振动存在高程放大。田运生等^[3]建立了砌体结构在爆破振动作用下的剪应力计算公式,发现在转角、屋顶等位置容易产生剪切破坏。曲政^[4]开展了砌体结构爆破动力响应模型试验,认为结构响应参数与频率相关。公伟增等^[5]采用动力有限元方法研究了地铁隧道爆破引起的砌体结构动力响应,提出了改变装药结构、单段药量的控制爆破振动措施。丁玉琴等^[6]通过信号分析明确了隧道爆破振动作用砌体结构的滞回耗能特征,认为增大结构阻尼能够提高抗震性能。P. K. Singh等^[7]统计了露天矿区周边砌体结构振动,发现在振速达到 5.16~5.63 cm/s 时能够观察到宏观裂纹。R. K. Huo等^[8]采用小波包分析方法研究了多层砌体结构爆破振动信号特征,结果表明振动峰值出现

在中间层,而振动主频随楼层增高而减小。Z. B. Huang等^[9]通过现场测试对水下爆破振动作用砖石结构动力响应特征进行研究,发现振动能量主要集中在低频部分。此外,学者就砌体结构爆破振动安全控制进行了研究,如郭永刚等^[10]以结构极限强度作为砌体结构爆破振动安全控制标准,得到安全振速为 1.18 cm/s。邓长庆^[11]基于裂纹扩展与振速关系,提出了累积爆破作用下砌体结构安全控制标准。G. S. Zhong等^[12]基于小波包能量谱,提出了以能量响应为指标的砌体结构爆破振动安全判据。P. P. Roy^[13]通过分析砌体结构爆破振动传播规律,建立了改进爆破振动预测模型,用于爆破振动控制。R. L. Shan等^[14]基于隧道爆破振动传播规律,以爆破振速峰值为砌体结构安全控制指标,得到了安全药量。

综上所述,针对基坑爆破引起的砌体结构动力响应研究较少,相应的爆破安全控制标准大多基于隧道爆破、露天爆破工程提出。因此,本文基于地铁基坑爆破工程,采用现场测试与动力有限元数值模拟方法,分析基坑爆破振动作用砖砌体墙动力响应特征,建立适用于砖砌体墙的爆破振动预测模型,并进行安全评价,提出安全控制方法。研究结论对类似工程具有借鉴意义,为砌体结构爆破振动安全控制提供理论依据。

1 工程概况与数值模型

1.1 工程概况

本文以某地铁基坑爆破工程为研究背景,研究邻近砖砌体墙爆破动力响应特征与安全控制方法。基坑爆破与砖砌体墙概况如图 1 所示。

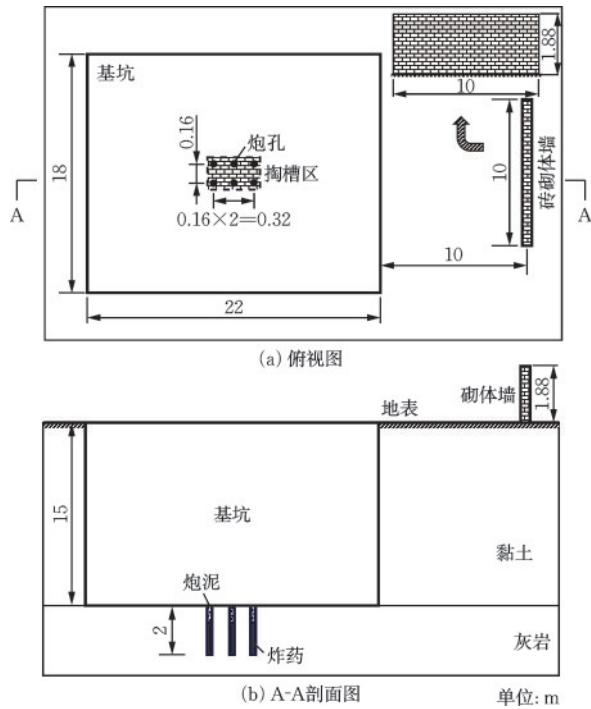


图1 基坑爆破与砖砌体墙概况

Fig.1 Overview of foundation pit blasting and brick masonry walls

场地地层呈现上土下岩分布特征,下部为灰岩,其上覆盖15 m厚黏土。基坑长22 m,宽18 m,距离边缘10 m位置存在一砖砌体墙,该墙为居民楼围墙,属于施工场地周边重要保护对象。砌体墙长10 m,宽0.24 m,高1.88 m,采用MU15烧结普通砖砌筑而成,砖体尺寸为(24×11.5×5.3) cm,灰缝厚1 cm。基坑内岩层采用钻爆法进行开挖,在中心设置掏槽区,如图1所示,掏槽孔共6个,炮孔间距、排距0.16 m,炮孔长度2 m,装药长度1.6 m,炮泥堵塞长度0.4 m。采用底部起爆方式,一次点火,完成单循环爆破。需要注意的是,由于掏槽爆破引起的振动最大,因此在本文只考虑掏槽孔爆破引起的振动响应^[15]。

1.2 数值模型

基于工程概况,开展爆破动载作用砖砌体墙动力响应数值模拟研究。采用ANSYS/LS-DYNA建

立动力有限元模型如图2所示。数值模型整体尺寸为36 m×22 m×20 m(X×Y×Z),地层包括黏土层与灰岩层,分别高15、5 m,基坑、炮孔、砖砌体墙尺寸与图1一致。掏槽爆破孔设置于基坑中心位置,包含炮泥与炸药结构,起爆点设置于炸药底部。砖砌体墙一般有两种建模方式:等效均质模型与分离式模型。在本文中采用分离式建模方式,建立烧结砖与灰缝耦合结构,其中烧结砖与灰缝通过共节点方式连接,能够更加准确模拟砖砌体墙动力响应特征。砖砌体墙底部设置固连接触,用于模拟墙体与土体的耦合作用,墙体其余边界均为自由端。为保证爆破应力波传递的有效性,模型整体网格尺寸控制在40 cm以内,炸药与墙体网格控制在5 cm以内。除地表、基坑内表面外,岩土体其余边界均设置为吸收边界,用以模拟无限边界条件。

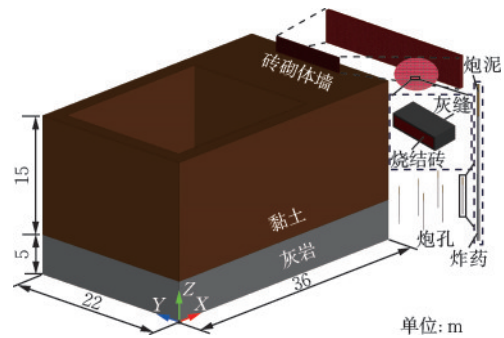


图2 数值模型

Fig.2 Numerical model

数值模型由岩土介质、墙体与爆破相关材料等部分组成,依据勘察报告与设计资料,各结构物理学参数见表1。其中黏土采用材料库中的Drucker-Prager模型(*MAT_DRUCKER_PRAGER)进行模拟,该模型是一种改进摩尔库伦模型,能够准确模拟土体屈服、变形特征。此外,灰岩、烧结砖、灰缝、炮泥均采用弹塑性双向随动硬化模型(*MAT_PLASTIC_KINEMATIC)进行模拟,该模型广泛应用于描述岩体、混凝土、钢筋等材料力学行为,该模型本构关系为^[16]:

表1 数值模型材料参数

Table 1 Material parameters of numerical model

材料	密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	屈服强度/MPa
灰岩	2.68	43.00	0.24	/	/	112.0
黏土	1.98	0.045	0.28	0.035	16	/
烧结砖	1.95	8.44	0.15	/	/	12.3
灰缝	2.00	4.64	0.25	/	/	10.6
炮泥	0.85	5.40	0.35	/	/	20.0

$$\begin{cases} \sigma_y = \sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{\text{eff}}^p \\ E_p = \frac{E_t E}{E - E_t} \end{cases} \quad (1)$$

式中, σ_y 为屈服强度; σ_0 为初始屈服强度; E_p 为塑性硬化模量; E 为弹性模量; E_t 为切线模量; ϵ_{eff}^p 为有效应变。

数值模型中炸药采用高能炸药本构模型 (*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN) 进行模拟, 依据工程实际, 基坑爆破采用 2# 岩石乳化炸药进行爆破施工, 具体参数为: 密度为 1.10 g/cm³, 爆速为 4 000 m/s, Chapman-Jouget 压力为 32.7 GPa。

应用 JWL (Jones-Wilkins-Lee) 状态方程控制炸药爆轰过程, 方程表达式为:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (2)$$

式中, p 为爆轰压力; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为炸药相关参数; V 为爆轰产物相对体积; E_0 为单位体积爆轰能量。JWL 状态方程参数见表 2。

表 2 JWL 状态方程参数

Table 2 JWL equation of state parameters

A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0 /GPa
214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4.192

2 砖砌体墙数值模型验证与模态分析

2.1 数值模型验证

在上述工程中, 为保证砖砌体墙的安全稳定, 在砖砌体墙边设置爆破振动监测点如图 3 所示。爆破振动监测采用 TC-4850 爆破振动仪进行信号采集, 该仪器由监测仪表与三向速度传感器组成, 在传感器底部粘贴石膏, 固定于待测位置, 实现传感

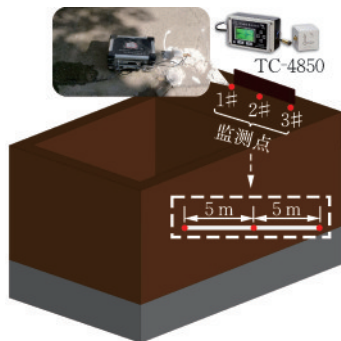


图 3 现场监测

Fig.3 Field monitoring

器与待测位置的耦合接触。现场监测共设置 3 个监测点, 平行于墙面布置, 间距为 5 m。

选取现场监测与数值模型中 1# 测点合振速波形进行对比, 如图 4 所示。从图中可以看到, 在波形方面, 数值模拟与现场测试波形基本一致, 数值模拟波形相对平滑, 原因在于数值模型中采用均质化模型模拟岩土体, 而实际岩土体中存在节理、裂隙等, 从而导致现场测试波形包含更多噪声。数值模拟波形基本保留了振动波形的主要特征, 尤其在峰值附近。进一步统计现场测试与数值模拟对应测点峰值振速见表 3。依据表中数据对比分析可知, 数值模拟结果与现场监测结果相近, 模拟误差不超过 7%, 因此可认为本数值模拟是可靠的, 可用于开展后续研究。

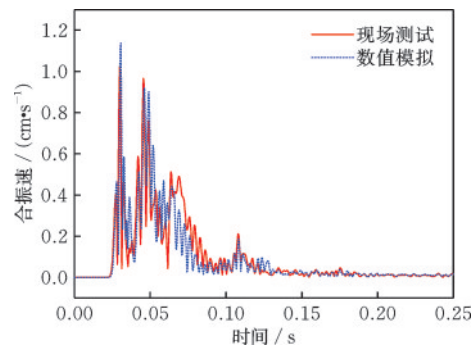


图 4 现场监测与数值模拟波形对比

Fig.4 Comparison of waveforms between field monitoring and numerical simulation

表 3 现场监测与数值模拟振速对比

Table 3 Comparison of vibration velocity between field monitoring and numerical simulation 单位: cm/s

来源	测点编号	X 方向振速	Y 方向振速	Z 方向振速	合振速
现场监测	1#	0.976	0.373	0.969	1.109
	2#	0.822	0.269	0.974	1.112
	3#	1.026	0.375	1.005	1.187
数值模拟	1#	0.937	0.412	0.965	1.137
	2#	0.833	0.250	0.966	1.148
	3#	0.977	0.391	1.020	1.198

2.2 模态分析

模态分析是分析建(构)筑物、设备等结构动力特性的常用方法, 可用于明确结构的固有频率与基本振型。ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件提供了隐式分析算法, 通过添加模态分析关键字 *CON-

TROL_IMPLICIT_EIGENVALUE 可得到结构模态参数。在本文中,针对研究对象砖砌体墙开展模态分析,得到1~12模态参数见表4,部分阶数下主要振型如图5所示。

依据表4中数据及图5可知,在低阶模态下,砖砌体墙主要振动型式为纵向和横向弯曲,最低阶固有频率达到23.29 Hz。随着阶数增大,砖砌体墙顶部横向弯曲次数增大,在9阶模态后,主要振型发生的变化,除11阶模态外振型基本以纵向与横向耦合弯曲变形为主,12阶模态下固有频率可达232.56 Hz。统计图3、图4所示工况下砖砌体墙爆破振动主频可知,在基坑爆破振动作用下砖砌体墙主频保持在60~80 Hz,对照表4所示模态参数,可认为在本文研究工况下,砖砌体墙主要爆破振动型式以顶部横向弯曲为主,因此需要重点关注该部位响应情况,进一步明确砖砌体墙动力响应特征。

表4 砖砌体墙模态参数

Table 4 Mode parameters of brick masonry walls

阶数	固有频率/Hz	振型
1	23.29	纵向1次弯曲
2	25.35	横向1次弯曲
3	31.30	横向2次弯曲
4	40.65	横向3次弯曲
5	53.50	横向4次弯曲
6	70.25	横向5次弯曲
7	91.15	横向6次弯曲
8	116.09	横向7次弯曲
9	136.01	纵向1次弯曲+横向小幅度弯曲
10	138.49	横向1次弯曲+横向小幅度弯曲
11	232.56	横向11次弯曲
12	242.97	纵向1次弯曲凸起+横向8次弯曲

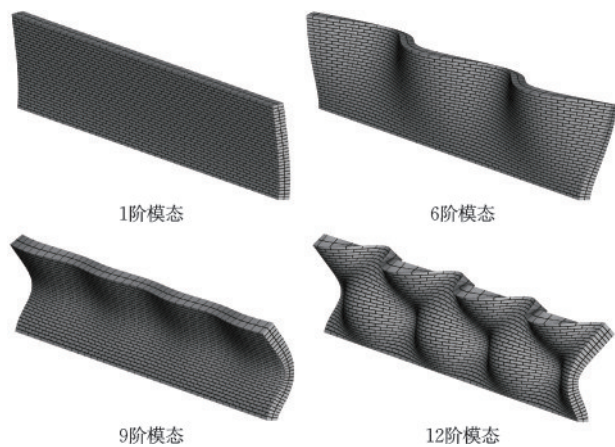


图5 砖砌体墙部分模态振型

Fig.5 Partial mode shapes of brick masonry walls

3 砖砌体墙爆破动力响应特征

基坑爆破振动作用下,砖砌体墙改变初始状态,进入动态响应阶段。在本节中,针对砖砌体墙爆破振动及应力特征展开分析,讨论关键参数下砖砌体墙动力响应特征。

3.1 振动响应特征

为明确砖砌体墙爆破振动响应特征,在砖砌体墙处设置局部坐标系如图6所示。图中给出了选点路径,在长度方向(y 方向)、宽度方向(x 方向)及高度方向(z 方向)各设置三条选点路径,其中由于爆源与砖砌体墙在空间分布上沿 y 轴中部呈对称分布,因此在 z 方向上按1/4长度间隔选点。

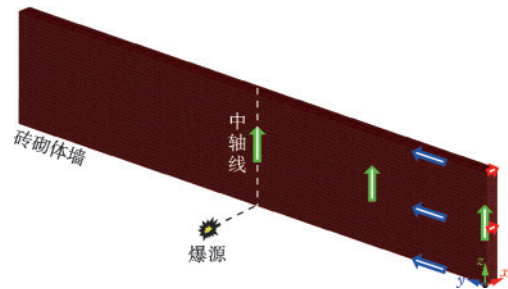


图6 局部坐标系及选点路径

Fig.6 Local coordinate system and point selection path

依照上述选点路径,得到不同方向下砖砌体墙振动分布特征如图7所示。需要注意的是,为了全面考虑墙质点振动特征,采用合振速 v 进行分析。

依图7可知,在 x 方向上,砖砌体墙质点合振速变化较小,但不同高度上变化趋势不同,在墙底部($z=0$ m)随 x 增大质点合振速呈现波动减小趋势,但在墙中部($z=0.94$ m)和顶部($z=1.88$ m)合振速呈现对称分布,其中墙中部合振速表现为先增大后减小的变化趋势,而顶部则正好相反,原因可能在于墙顶部约束相对于中部约束较小,尤其在两侧位置振动得到放大。

在 y 方向上,砖砌体墙质点合振速呈现波动对称分布,在墙中部和顶部合振速变化趋势相近,但在墙底部正好相反,主要体现在墙中部与顶部以 y 向中部合振速最大,而底部以两端合振速最大。在墙顶部,振速峰值出现在距离墙体 y 向对称中心2 m位置,而在墙中部振速峰值位于墙体 y 向中心。

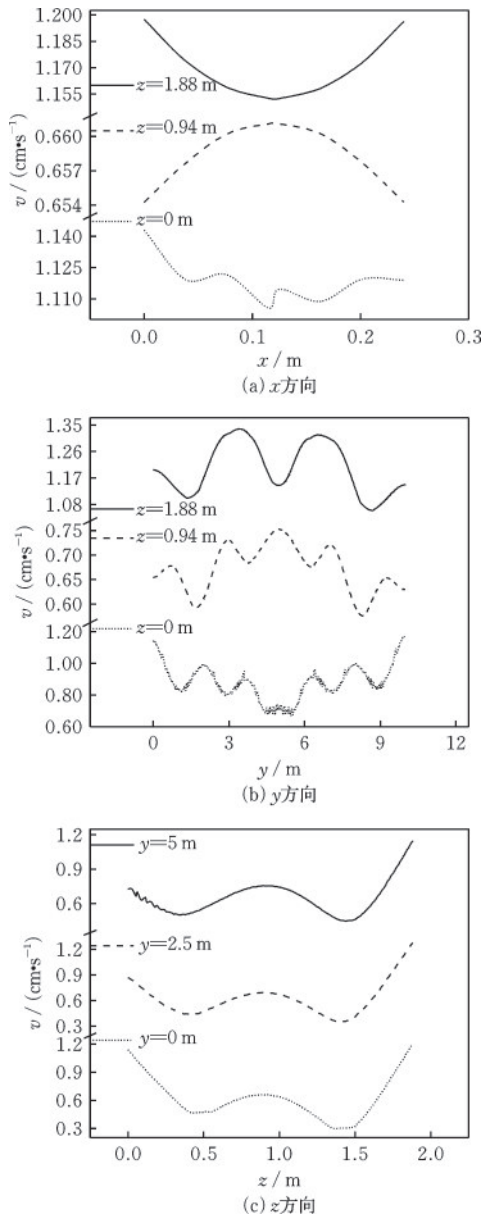


图7 砖砌体墙振速分布

Fig.7 Vibration velocity distribution of brick masonry walls

在 z 方向上,砖砌体墙不同部位质点合振速随墙高变化均表现出减小—增大的波动变化趋势,从数值上来看,各 y 值下墙底部振速均小于墙顶部振速,表明砖砌体墙爆破振动存在高程放大效应。结合2.2节分析可知,在爆破振动作用下砖砌体墙响应模式接近第6、7模态,在该模态下墙体顶部振动较大,从而产生高程放大现象。定义砖砌体墙顶部合振速与底部合振速比值为高程放大系数,得到 $y=0、2.5、5$ m位置对应的高程放大系数分别为1.05、1.47、1.58,表明在远离爆心距位置砖砌体墙高程放大效应越发明显。

3.2 应力响应特征

在爆破振动作用下,砖砌体墙内产生动应力。依照图6所示选点路径,提取数值模型中砖砌体墙有效应力峰值如图8所示。依图可知,在 x 方向上,不同高度位置砖砌体墙有效应力大致呈对称分布,其中墙中部应力响应最大,导致这种现象的直接原因在于墙体产生谐振,响应模式接近第6、7模态。随 x 增大不同高度位置砖砌体墙有效应力均表现为先减小后增大的变化趋势,表明在墙体迎爆侧与背爆侧应力响应要大于中部,这是导致墙面易脱落的直接原因。

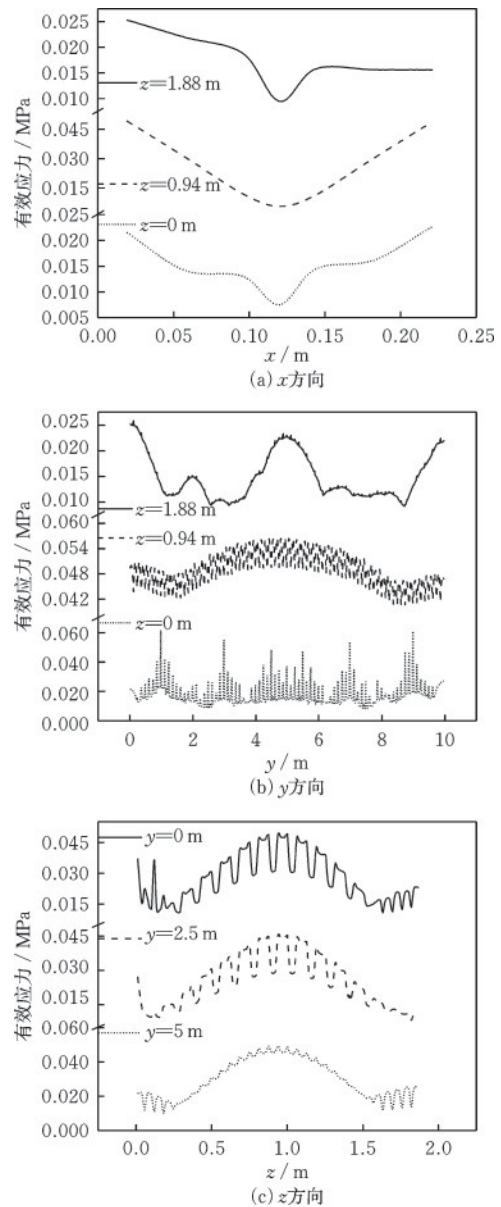


图8 砖砌体墙有效应力分布

Fig.8 Effective stress distribution of brick masonry walls

在 y 方向上,砖砌体墙有效应力呈现波动变化趋势。在墙顶部两端及中间应力出现突增,应力峰值位于端部。而在墙中部应力呈现密集波动变化趋势,应力大小维持在 $0.042\sim 0.057$ MPa,峰值出现在中部(正对爆源位置)。在墙底部,随 y 增大循环出现多个应力波峰,波峰整体呈现先减小后增大的变化趋势,即在靠近墙两端位置应力最大。

在 z 方向上,砖砌体墙有效应力呈现中间大两端小的分布特征,在靠近端部位置具有明显增大。此外,墙体各部位有效应力均呈现循环波动分布,原因在于砂浆与砖砌体有效应力峰值不同,在砖砌体部位有效应力明显更大。对比不同长度(y)位置墙体有效应力可知,随着爆心距增大,墙体有效应力逐渐减小,在墙体中部有效应力峰值可达 0.049 MPa。

3.3 关键参数影响特征

基于上节分析可知,在爆破振动响应方面,砖砌体墙存在明显的高程放大效应,而在爆破动力响应方面,砖砌体墙迎爆侧动应力要大于背爆侧,同时在墙体中部出现应力集中。因此可以看到,墙体的几何因素与基坑爆破爆源条件是影响砖砌体墙的关键。在本文中,以砖砌体墙高度、基坑开挖深度两个重要参数开展分析,就高程放大效应、应力集中程度进行深入探究。

选取墙高为 2.82 m(1.5倍当前工况)、 3.76 m(2倍当前工况)工况进行研究,得到不同墙高爆破振动放大系数及墙体中部位置应力分布如图9所示。依图可知,不同墙高条件下振动放大系数存在差异,当墙高为 1.88 、 2.82 、 3.76 m时,振动放大系数峰值分别出现在距离墙体中心 0.5 、 2 、 3.5 m位置,表明随着墙体高度增大,高程放大效应显著区域由墙体中心向两侧移动。同时,观察振动放大系数峰值大小发现,振动放大系数峰值与墙高不成正比例关系,而是随着墙高增大呈现先增大后减小的趋势,在高度较大时,振动放大系数变化趋势变缓,如墙高为 3.76 m时振动放大系数维持在 1.5 左右。在应力方面,小墙高下(1.88 、 2.82 m)应力峰值位于墙体中心位置,而在大墙高下(3.76 m)应力峰值位于距离墙体中心 3.5 m位置,与振动放大系数峰值位置一致,表明随着墙高增大,应力集中位置将由墙体中心向两端转移。对比不同墙高有效应力峰值可知,在墙高增大条件下,有效应力峰值逐渐减小,同样在大墙高下应力变化趋势趋于平缓。

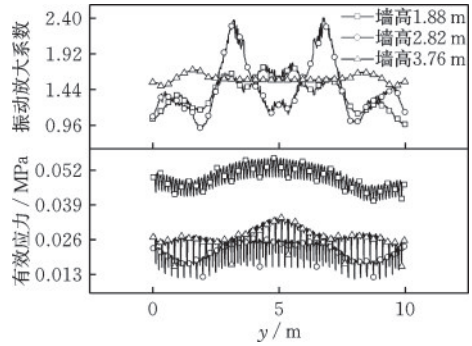


图9 不同墙高影响下振动响应特征

Fig.9 Vibration response characteristics under different wall heights

选取基坑岩层开挖深度为 4 、 6 m工况进行研究,得到不同开挖深度下爆破振动放大系数及墙体中部位置应力分布如图10所示。从图中可以看到,在不同开挖深度下振动放大系数与有效应力变化相近,但在变化趋势方面存在一些差异。在振动放大系数方面,随着基坑开挖深度增大,振动放大系数逐渐增大且随墙体 y 向变化趋于平缓,在开挖深度为 6 m时,振动放大系数维持在 $1.8\sim 2.1$ 。在应力方面,随着基坑开挖深度增大,应力由先增大后减小转变为先减小后增大的变化趋势且应力峰值逐渐增大,表明基坑开挖深度增大会使应力集中位置由墙体中心向两端转移。此外,在大开挖深度下墙体中部应力随 y 向变化趋势减缓,这与振动放大系数变化趋势一致。

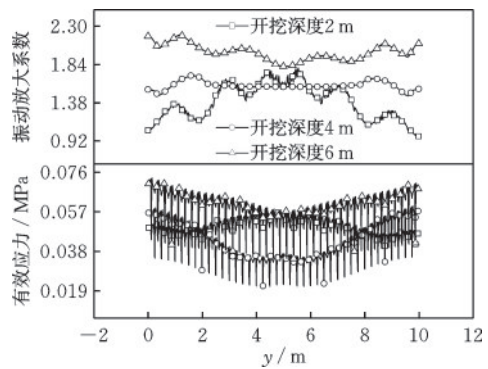


图10 不同开挖深度影响下振动响应特征

Fig.10 Vibration response characteristics under different excavation depths

4 砖砌体墙爆破振动安全评价

在明确砖砌体墙爆破动力响应特征下,开展爆破振动安全评价。

4.1 爆破振动预测模型

爆破振动预测是控制爆破振动效应的主要手段之一,在《爆破安全规程》^[17]中规定以萨道夫斯基公式进行爆破振动预测:

$$v = k \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^\alpha \quad (3)$$

式中, k 为场地系数; α 为衰减系数; Q 为单段最大药量; r 为爆心距。

根据第3节分析可知,砖砌体墙爆破振动分布与墙体高度、基坑开挖深度有关,墙体振速并不随爆心距增大而呈现绝对衰减特征,因此式(3)不适用于砖砌体墙爆破振动预测,需要提出新的预测模型。本文采用量纲分析法构建爆破振动预测模型,涉及爆破振动影响参量及其量纲见表5^[18]。

表5 影响参量及量纲

Table 5 Influencing parameters and dimensions

参量	量纲	参量	量纲
单段最大药量 Q	M	岩体波速 c_p	LT^{-1}
爆心距 r	L	开挖深度 h	L
振速 v	LT^{-1}	砌体墙高度 H	L
岩体密度 ρ	ML^{-3}	—	—

注:开挖深度指爆破段开挖深度

基于表5中参量,得到爆破振动预测模型为:

$$v = f(Q, r, \rho, c_p, h, H) \quad (4)$$

依据白金汉定理(π 定理),选择 Q, r, c_p 作为独立参量,构建无量纲数如下所示:

$$\pi_1 = \frac{v}{c_p}, \pi_2 = \frac{\rho}{Qr^{-3}}, \pi_3 = \frac{h}{r}, \pi_4 = \frac{H}{r} \quad (5)$$

结合式(4)与式(5),建立无量纲数关系为:

$$\frac{v}{c_p} \sim f\left(\frac{\rho}{Qr^{-3}}, \frac{h}{r}, \frac{H}{r}\right) \quad (6)$$

观察上式可知,对于同一基坑爆破工程而言,场地条件是保持不变的,因此式中 ρ, c_p 为定值,参照式(3),得到适用于基坑爆破工况下砖砌体墙振动预测模型的一般形式为:

$$v = k \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{\alpha_1} \left(\frac{h}{r} \right)^{\alpha_2} \left(\frac{H}{r} \right)^{\alpha_3} \quad (7)$$

式中, α_1 为爆破参数相关衰减系数; α_2 为基坑开挖相关衰减系数; α_3 为砖砌体墙相关衰减系数。

4.2 应力与峰值振速相关性分析

通过第3节分析可知,砖砌体墙爆破动应力与

爆破振速之间存在一定的协同变化现象。在弹性动力学中,根据动量守恒可得到应力 σ 与振速 v 的关系为^[19]:

$$\sigma = \rho_m c_p v \quad (8)$$

式中, σ 为动应力; ρ_m 为传播介质密度,在本文中为砖砌体墙密度。

由上述分析可知,在爆破动力作用下砖砌体墙动应力与振速应当存在一定的相关性。因此,基于第3节数值模拟,选取相同质点有效应力及合振速进行线性拟合,拟合结果如图11所示。依图可知,有效应力与合振速峰值拟合公式相关系数达0.87,表明两者呈现明显的线性相关。

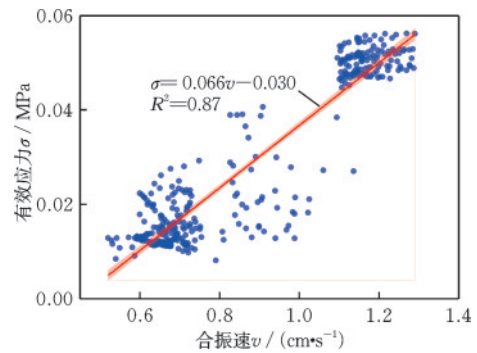


图11 应力与振速拟合结果

Fig.11 Fitting results of stress and vibration velocity

4.3 爆破振动安全控制

在爆破振动作用下,砖砌体结构内部应力分布发生改变,当振动引起的动应力强度超过砖砌体结构极限强度时将发生失稳破坏。已知本文工况砖砌体为MU15普通烧结砖,灰缝材料为M5砂浆,根据《砌体结构设计规范》^[20]规定,由此材料构筑的砖砌体墙轴心抗拉强度为0.13 MPa。结合3.2节分析可知,在本文工况下砖砌体墙处于稳定状态,但仍需要重点关注墙体中部及两端应力变化,必要时可以添加支撑以加固墙体。

在结构爆破振动研究领域,通常以爆破振动指标作为安全控制标准。我国《爆破安全规程》^[17]中规定,当爆破振动主频 $f \leq 10$ Hz时,一般民用建筑物安全允许振速为1.5~2.0 cm/s,当 $10 \text{ Hz} < f \leq 50$ Hz时,安全允许振速为2.0~2.5 cm/s,当 $f > 50$ Hz时,安全允许振速为2.5~3.0 cm/s^[17]。根据数值模拟分析可知,砖砌体墙主频在60~80 Hz,因此安全允许振速为2.5 cm/s。结合3.1节分析可知,在本文工况下墙体处于稳定状态。

尽管依照规范规定进行爆破振动安全控制是可行的,但缺少针对性,未能综合考虑结构振动与应力特征。基于4.2节中砖砌体墙振速应力关系,以极限强度作为安全判据,得到砖砌体墙爆破振动安全振速 $[v]$ 为:

$$[v] = ([\sigma] + 0.030) / 0.066 \quad (9)$$

式中, $[\sigma]$ 为砖砌体墙极限强度,在本文中抗拉强度,为0.13 MPa。

带入式(9)中得到安全允许振速为2.42 cm/s,与《爆破安全规程》^[17]中规定值接近,但更加精确。在基坑爆破工程中,依据式(7)可知最大单段药量是影响爆破振动大小的重要因素,与爆破设计紧密相关。因此,为指导基坑爆破施工,将安全控制振速引入式(7)中,得到爆破安全药量 $[Q]$ 计算式为:

$$[Q] = r^3 \left(\frac{[v]}{k} \right)^{3/\alpha_1} \left(\frac{h}{r} \right)^{-3\alpha_2/\alpha_1} \left(\frac{H}{r} \right)^{-3\alpha_3/\alpha_1} \quad (10)$$

结合数值模拟数据,拟合得到 $k=5.03 \times 10^{-8}$, $\alpha_1=-7.14$, $\alpha_2=0.13$, $\alpha_3=-0.23$,考虑当前工况下 $H=1.88$ m, $h=2$ m,振动峰值位置位于 $x=22$ m, $y=y_0=2$ m, $z=h+H$ 位置,代入式(10)得到爆破安全药量随开挖深度变化趋势如图12所示。依图可知,随着岩层开挖深度增大,爆破安全药量随之增大,在岩层开挖深度为2 m时,单段爆破最大药量不超过18.74 kg,在岩层开挖深度为6 m时,单段爆破最大药量不超过26.20 kg,其余开挖深度下依照图中公式计算得到,为基坑爆破设计提供依据。

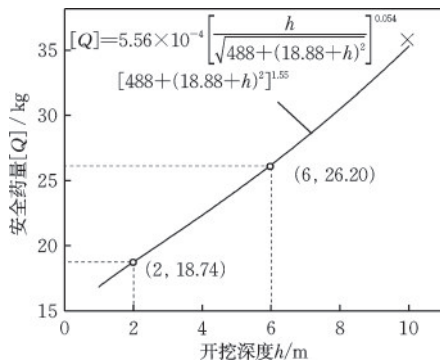


图12 不同开挖深度下安全药量

Fig.12 Safe charge amount under different excavation depths

5 结 论

基于基坑爆破工程实际,采用现场测试、数值模拟、理论分析等方法研究临近砖砌体墙动力响应特征,提出爆破振动安全控制方法。所得结论如下:

(1) 采用LS-DYNA建立的砖砌体墙爆破动力模型结果与现场测试结果一致,可用于爆破动力响应及爆破振动安全控制分析。

(2) 砖砌体墙低阶模态下主要振型为纵向或横向弯曲,在高阶模态下主要振型为纵向与多次横向弯曲,在爆破振动主频下主要振型为横向弯曲。

(3) 在振动响应方面,砖砌体墙迎爆侧振动响应大于背爆侧,在墙体延伸方向振速峰值随高度改变,出现在两端或中部及靠近中部位置,在墙体高度方向上存在高程放大效应,且在远离爆源方向越发显著;在应力响应方面,砖砌体墙应力在各方向上呈现中部大两边小的分布特征。

(4) 墙体高度与基坑埋深是影响砖砌体墙动力响应的主要因素,随着墙高、开挖深度增大高程放大显著部位及应力集中部位由中心向两端移动并逐渐趋于稳定,需要重点关注砖砌体墙中部、两端应力状态以及墙体顶部振动情况。

(5) 建立了适用于砖砌体墙基坑爆破振动预测模型,基于应力-振速关系与极限强度理论得到砖砌体墙爆破安全振速为2.42 cm/s;对于超出预警值工况建议在墙体中部及两端添加支撑,或基于本文提出的爆破安全药量计算公式改进基坑爆破设计。

参 考 文 献:

- [1] 黄俊,夏界宁,罗松. 爆破地震作用下的老旧砌体结构动力特性分析[J]. 爆破, 2024, 41(2): 185-193, 202. Huang J, Xia J N, Luo S. Analysis of dynamic characteristics of old masonry structure under blasting-induced earthquake [J]. Blasting, 2024, 41(2): 185-193, 202. (in Chinese)
- [2] 倪汉根,潘志宏,孙可,等. 爆破地震作用下砌体结构动力响应的现场实测与数值模拟研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(6): 122-126. Ni H G, Pan Z H, Sun K, et al. Field measurement and numerical simulation of dynamic response of masonry structure under blasting ground motion [J]. Building Structure, 2020, 50(6): 122-126. (in Chinese)
- [3] 田运生,田会礼,于亚伦,等. 爆破地震波作用下民房破坏分析和破坏特征[J]. 爆破, 2005, 22(1): 96-98. Tian Y S, Tian H L, Yu Y L, et al. Damage characteristics and damage analysis of residential house caused by blasting vibration wave [J]. Blasting, 2005, 22(1): 96-98. (in Chinese)
- [4] 曲政. 砌体结构的爆破地震响应及损伤演化规律研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2019.

- Qu Z. Study on blasting seismic response and damage evolution law of masonry structure [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2019. (in Chinese)
- [5] 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 W Z, Duan B F, Zhang X W, 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. (in Chinese)
- [6] 丁玉琴, 谢超, 魏新江. 隧道爆破地震波下砌体建筑物滞回耗能特性研究[J]. 爆破, 2018, 35(2): 144-150.
Ding Y Q, Xie C, Wei X J. Research on hysteresis energy of masonry under tunnel blasting wave [J]. Blasting, 2018, 35(2): 144-150. (in Chinese)
- [7] Singh P K, Roy M P. Damage to surface structures due to blast vibration [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(6): 949-961.
- [8] Huo R K, Li S G, Song Z P, et al. Analysis of vibration response law of multistory building under tunnel blasting loads [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 4203137.
- [9] Huang Z B, Lin C M, Huang J S, et al. The research on the structure response of underwater blasting on 4-story masonry-concrete building [J]. Advanced Materials Research, 2010, 163-167: 2521-2527.
- [10] 郭永刚, 李田军, 吕加贺, 等. 爆破影响下砌体结构振动效应及其安全性评价[J]. 土木工程与管理学报, 2024, 41(1): 25-31.
Guo Y G, Li T J, Lyu J H, et al. Dynamic response characteristics and safety evaluation of frame structure under blasting impact [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2024, 41(1): 25-31. (in Chinese)
- [11] 邓长庆. 频繁爆破对山区民房安全控制标准研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2018.
Deng C Q. Study on safety control standard of frequent blasting for residential houses in mountainous areas [D]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute, 2018. (in Chinese)
- [12] Zhong G S, Li J, Zhao K. Structural safety criteria for blasting vibration based on wavelet packet energy spectra [J]. Mining Science and Technology, 2011, 21(1): 35-40.
- [13] Roy P P. Vibration control in an opencast mine based on improved blast vibration predictors [J]. Mining Science and Technology, 1991, 12(2): 157-165.
- [14] Shan R L, Zhao Y, Wang H L, et al. Blasting vibration response and safety control of mountain tunnel [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(5): 166.
- [15] 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1): 118-125.
Zhang Y Q, Jiang N, Zhou C B, et al. Dynamic response of building structures with high-rise frames caused by blasting vibration at adjacent subway foundation pit [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44 (Sup1): 118-125. (in Chinese)
- [16] 郑文言, 段利亚, 方辉. 近距离爆炸下钢筋混凝土柱损伤的图像识别及快速评估[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(4): 712-720, 751.
Zheng W Y, Duan L Y, Fang H. Rapid assessment of reinforced concrete column damage after near-field explosion based on image recognition [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43 (4): 712-720, 751. (in Chinese)
- [17] 爆破安全规程: GB 6722—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [18] 刘建康, 杨顺, 杨东旭, 等. V型排导槽横纵比降对泥石流流速的差异影响研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(1): 141-146.
Liu J K, Yang S, Yang D X, et al. Research on the influence of transverse and longitudinal slopes in V-shaped channels on debris flow velocity [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(1): 141-146. (in Chinese)
- [19] 乔国栋, 刘泽功, 高魁, 等. 爆破载荷作用下高地应力巷道PPV衰减规律研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(23): 260-266, 283.
Qiao G D, Liu Z G, Gao K, et al. Attenuation law of PPV in high crustal stress tunnels under blasting load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(23): 260-266, 283. (in Chinese)
- [20] 砌体结构设计规范: GB 50003—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.

(本文编辑:池营营)