

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.06.007

影响邻近建筑物振动响应的路堑边坡爆破参数的优化*

陈晟^① 王志东^② 张建国^② 段达^① 范紫涵^③

①中国中铁开发投资集团有限公司(贵州安顺,561000)

②中铁六局集团路桥建设有限公司(贵州安顺,562100)

③重庆大学煤矿灾害动力学与控制全国重点实验室(重庆,400044)

[摘要] 为有效控制路堑边坡爆破对邻近建筑物的有害影响,依托沪昆高速安顺至盘州段深挖路堑爆破工程,采用数值模拟和现场试验相结合的方法,分析了在不同延期时间、装药结构和爆心距等爆破参数下邻近建筑物的振动响应规律。结果表明:在爆心距为50 m的高程差地形条件下,15 ms以上的延期时间可使爆破振速衰减为齐爆的1/2到1/3,间隔装药使振速衰减为连续装药的1/6到1/8;不同延期时间时,在不同爆心距下的振速衰减程度不同。在30~70 m的爆心距范围内,起爆延期时间应控制在25~30 ms之间,既可有效地衰减振速,又能将振动时间限制在1 s以内。基于研究结果,提出爆破参数的优化设计。在安全允许振速1.5 cm/s下,确定最大段装药量为29.0 kg,实施双区爆破优化。应用至现场爆破后,各测点的峰值振速均低于安全限值,表明方案合理可行。

[关键词] 爆破振动;延期爆破;路堑边坡

[分类号] TU 451

Parameter Optimization of Road Graben Slope Blasting Affecting the Vibration Response of Adjacent Buildings

CHEN Sheng^①, WANG Zhidong^②, ZHANG Jianguo^②, DUAN Da^①, FAN Zihan^③

① China Railway Development & Investment Group Co., Ltd. (Guizhou Anshun, 561000)

② Road and Bridge Construction Co., Ltd., China Railway Sixth Bureau Group (Guizhou Anshun, 562100)

③ State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University (Chongqing, 400044)

[ABSTRACT] In order to effectively control the harmful effects of road graben slope blasting on adjacent buildings, based on the deep excavation road graben blasting project of the Anshun to Panzhou section of the Shanghai-Kunming Expressway, a combination of numerical simulation and field experiments was used to analyze the vibration response laws of adjacent buildings under different blasting parameters such as delay time, charge structure, and blast center distance. The results indicate that under terrain conditions with an elevation difference of 50 meters from the center of explosion, a delay time of more than 15 ms can attenuate the vibration velocity to 1/2 to 1/3 of that of a simultaneous explosion, and interval charging can attenuate the vibration velocity to 1/6 to 1/8 of that of a continuous charging. The degree of vibration velocity attenuation varies with different delay times and detonation distances. The delay time for detonation should be controlled between 25-30 ms within the range of 30-70 m. In this way, it can effectively attenuate the vibration velocity and limit the vibration time to within 1 second. Based on the research results, an optimized design of blasting parameters was proposed. At a safe allowable vibration velocity of 1.5 cm/s, the maximum charge for the section is determined to be 29.0 kg. After implementing dual zone blasting optimization, the peak vibration velocity at each measuring point is lower than the safety limit, indicating that the plan is reasonable and feasible.

[KEYWORDS] blasting vibration; delay blasting; road graben slope

* 收稿日期:2025-03-12

基金项目:国家自然科学基金(52074048)

第一作者:陈晟(1984—),男,工程师,主要从事土木工程方面的研究。E-mail: 1770369166@qq.com

通信作者:范紫涵(2001—),女,硕士研究生,主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: fzh88@stu.cqu.edu.cn

0 引言

在高速公路建设过程中,不可避免地会遇到路堑边坡开挖工程。在众多开挖施工技术中,爆破开挖技术应用最为广泛。爆破施工会产生爆破地震波,而爆破地震波带来的爆破振动是爆破有害效应之首^[1-3]。邻近爆破区域的建筑物受爆破振动的影响后,轻则扰动,致使墙体开裂;重则坍塌,对居民的生命、财产安全带来了极大威胁^[4-7]。

近年来,国内外学者运用数值模拟、理论分析等方法对建筑物在爆破载荷下的振动响应进行了多方面的研究。Tolani 等^[8]在考虑表面爆炸引起的爆破效应以及忽略爆破波影响 2 种情况下,对 1 栋 6 层建筑物进行了渐进式倒塌的非线性时间历程分析。于蕾^[9]通过现场监测,发现低频爆破振动会导致高层建筑物产生顶层振动放大效应。Norén-Cosgriff 等^[10]以现浇混凝土和轻质建筑砌块为研究对象,通过不断增强振动,观测建筑物的破坏情况,发现大多数国家的振速限制标准是有较大安全裕度的。陆瑜等^[11]采用数值模拟的方法进行研究,认为频繁爆破振动作用下,砖混结构建筑物的峰值振速限制应乘以 0.45~0.55 的折减系数。雷振等^[12]通过数值模拟结合现场试验,发现建筑物高度的增加对三维峰值振速均有高程放大效应。高富强等^[13]运用 LS-DYNA 软件模拟在不同的爆破振速和爆破主频下的 4 层建筑物结构的位移和振速的变化特性。奚俊杰^[14]以地表框架结构为分析对象,发现配有地下室的建筑物在爆破振动作用下受到的威胁较小。

对于施工过程中的爆破振动控制方面,刘义佳等^[15]提出建筑物结构响应的不同是由于单段和多段爆破振动的频率和持续时间的差异引起的;张家琦^[16]发现,应用竖井切缝药包控制爆破可减弱对周边围岩的扰动;Jayawardana 等^[17]利用人工神经网络提出,设置深度较浅的双排减振沟的减振效果高于单排减振沟;邹烽等^[18]提出了减振沟和减振孔组合的综合减振技术,减振率在水平和垂直方向分别可达 81.91% 和 75.74%。

路堑边坡爆破施工中,爆源与需要被保护的建筑物之间往往会出现高程差。高程差的存在很大程度上影响着爆破地震波的传播。而目前针对爆破振动的研究大都集中于隧道领域或平坦、连续的地形条件,针对高程差条件下的爆破地震波传播特性缺少研究。鉴于此,以沪昆高速安顺至盘州(黔滇界)段扩容工程中的 K6+200~K6+600 段深挖路堑爆

破开挖工程为依托,采用数值模拟与现场试验结合的研究方法,基于现场高程差地形条件,重点研究不同装药结构、爆心距和延期时间等爆破参数对于邻近建筑物的振动影响规律。在此基础上,结合工程实际情况,设计最优爆破方案,并进行工程应用。最终,通过现场爆破振动监测结果验证了爆破方案的合理性及可行性。可为相似地形条件下的爆破设计提供参数优化依据。

1 工程概况及试爆方案

1.1 工程概况

工程地质平面图如图 1 所示。

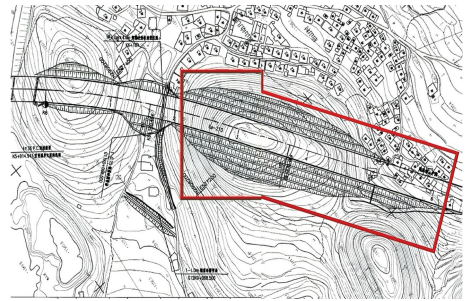


图 1 深挖路堑工程地质平面图

Fig. 1 Geological plan of deep excavation cutting

1.2 试爆情况

使用了深孔爆破技术试爆。采用 2# 岩石乳化炸药和径向不耦合装药结构。首次试爆是 3 个炮孔同时引爆;第 2 次试爆则是逐孔引爆,孔间延期时间为 25 ms,排间延期时间为 110 ms,爆破网路为 5 排,3 列的矩形布局。测点设在距离爆源 40 m 和 50 m 的空地上,用于监测爆破振动。详细参数见表 1。

表 1 试爆参数

Tab. 1 Test explosion parameters

孔径 ϕ/mm	孔距 a/m	排距 b/m	超深 h/m	孔深 L/m	单排单 孔药量 Q/kg	堵塞 长度 L_1/m
90	2.5	2.0	1.0	11.0	18	3.5

图 2 为第 2 次试爆时爆破区域未爆破前与爆破后的比较情况。可见,试爆后的岩石大块率高,破岩效果及爆破成型效果差。此外,监测到爆心距 40 m 处的峰值振速为 6.225 cm/s,远超 GB 6722—2014《爆破安全规程》规定的 2.0 cm/s 安全标准。表明爆破产生的振动对周边建筑物和居民生活影响严重,迫切需要解决爆破成型和振动控制问题。

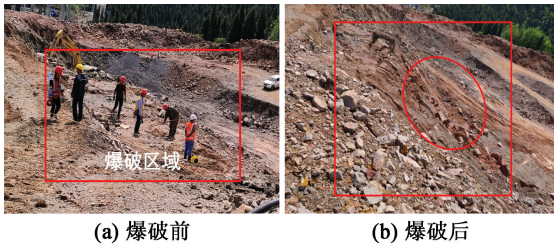


图2 爆破区域爆破前、后的对比

Fig. 2 Comparison of blasting area before and after blasting

2 爆破数值模型的构建与分析

2.1 模型的材料参数

2.1.1 岩石材料模型

根据现场地勘资料,本段深挖路堑为白云质灰岩。模拟中采用等向及随动硬化弹塑性模型 * Mat_Plastic_Kinematic。岩石材料参数见表2。

表2 岩石材料参数

Tab. 2 Material parameters of the rock

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应力/ MPa	切线模量/ GPa
2 600	38.0	0.23	97.0	3.90

2.1.2 建筑物材料模型

建筑物简化为框架结构,采用等向及随动硬化弹塑性模型 * Mat_Plastic_Kinematic。框架结构具体的材料参数见表3。

表3 建筑物框架结构材料参数

Tab. 3 Material parameters of the building frame structure

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应力/ MPa	切线模量/ GPa
2 500	32.5	0.20	26.8	3.25

2.1.3 空气材料模型

空气材料使用关键字 * Mat_Null 定义。相关参数见表4^[9]。

表4 空气材料参数

Tab. 4 Material parameters of the air

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_0/MPa
1.20	0	0	0	0	0.4	0.4	0	0.25

2.1.4 炸药材料模型

炸药材料使用关键字为 * Mat_High_Explosive_

Burn 的本构模型,并采用2#岩石乳化炸药,主爆孔药卷规格 $\phi 70 \text{ mm}$ 、2 kg,预裂孔药卷规格 $\phi 32 \text{ mm}$ 、300 g。炸药参数见表5^[10]。

表5 炸药材料参数

Tab. 5 Material parameters of the explosive

$\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$D/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$A/$ GPa	$B/$ GPa
1 150	5 122	276.4	8.4
R_2	R_1	ω	E_0/GPa
5.2	2.1	0.57	3.87

2.2 数值模型

使用 Ansys LS-DYNA 软件构建爆破模型。模型中包括岩石、台阶、建筑物及基础、空气和炸药。岩土的尺寸为 $80.0 \text{ m} \times 10.0 \text{ m} \times 10.0 \text{ m}$,台阶简化为上底 $20.0 \text{ m} \times 10.0 \text{ m}$ 、下底 $40.0 \text{ m} \times 10.0 \text{ m}$ 的棱台。爆心距设置为 50.0 m ,炮孔直径为 90 mm ,孔深 11.0 m (超深 1.0 m),炮孔间距为 2.5 m 。炸药使用2#岩石乳化炸药。为更贴合工程实际,模拟中采取不耦合装药结构,孔底连续装药,孔底起爆。为减少计算时间,只设置3个炮孔的爆破模型。模型图和网格划分见图3。

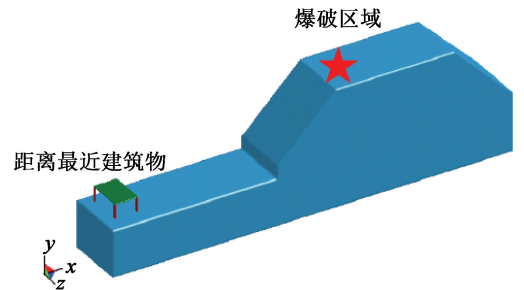


图3 模型建立及网格划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of model and grid division

在建筑物框架结构上共取10个测点。框架结构的4根柱记为柱A、B、C、D。取柱A的下、中、上3个节点依次为测点1#~3#;取柱D的下、中、上3个节点依次为测点4#~6#;取建筑物板上4个测点依次为测点7#~10#。其中,测点8#、9#为板中点。如图4所示。

2.3 延时爆破对建筑物爆破振动响应的影响

爆破模型整体采用kg-m-s的国际单位制。为了研究爆破延期时间对于建筑物振动的影响,采用 * Initial_Detonation 关键字定义各炮孔的起爆时刻,并通过LT卡片设置起爆时间。将起爆时间设置为 0.015 、 0.020 、 0.025 、 0.030 s ,即可实现毫秒级的延期起爆。设置4组延时工况,分别为15、20、25

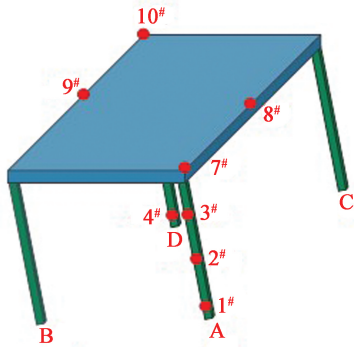


图 4 测点的布置

Fig.4 Layout of measuring points

ms 以及 30 ms, 炸药由左至右逐个起爆, 统计 4 组工况下 10 个测点的峰值振速 v_p 的柱状图, 如图 5 所示。

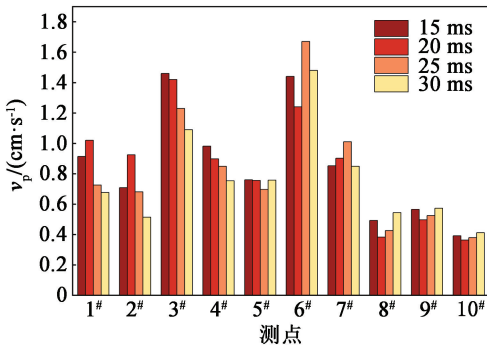


图 5 4 组延时工况下测点的峰值振速

Fig.5 Peak vibration velocity at measuring points under four delay conditions

延期爆破使振速显著降低到齐次起爆的 1/2 至 1/3。分析不同延时工况下的峰值振速发现, 建筑物板上的 4 个测点振速差异小, 而柱上的测点振速有差异: 测点 1#、2# 在 20 ms 延期时间下振速最高; 测点 3#、4# 在 15 ms 延期时间下振速最高; 测点 5# 在 4 个工况下振速相近; 测点 6# 在 25 ms 延期时间下振速最高, 峰值振速无明显规律。总体上, 30 ms 延期时间下各测点处峰值振速最小。建议施工时采用约 30 ms 的延时起爆。

据统计, 当振动持续时间从 1 s 增加至 50 s 时, 爆破能量对邻近建筑物的破坏能力可增大 40 倍^[19]。而最小延期时间是影响爆破振动持续时间的关键因素^[20]。当增大起爆延期时间, 需充分考虑振动持续时间增加可能带来的负面影响。研究表明, 对于典型的爆破(振动持续时间 1 s), 当质点振速达到 1.3 cm/s 时, 大部分人会感觉到不适^[21]。因此, 本设计方案中, 应确保振动持续时间控制在 1 s 以内。原方案中, 一次起爆约 20 个炮孔, 以 30 ms

的起爆延期时间计算, 振动持续时间可控制在 1 s 以内, 表明 30 ms 的起爆延时是可行的。

2.4 装药结构对建筑物爆破振动响应的影响

以总长 5 m 的孔底连续装药作为基准工况 I。为减少炮孔底部岩石夹制的影响, 保持总装药量不变, 设计了 3 种空气间隔装药结构。工况 II, 将 3 m 炸药分为 3 段, 每段间隔 1.00 m; 工况 III, 将 3 m 炸药分为 2 段, 每段间隔 1.00 m; 工况 IV, 将 3 m 炸药分为 4 段, 每段间隔 1.00 m。4 种工况的装药结构如图 6 所示。

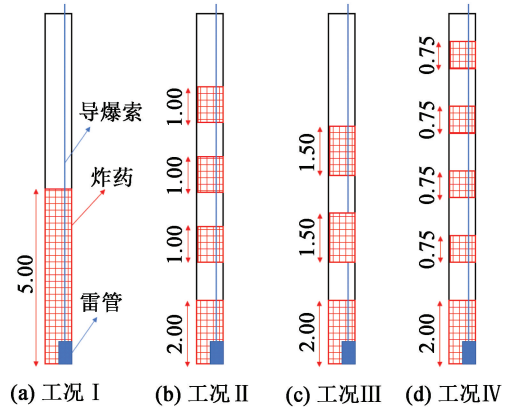


图 6 不同工况的装药结构(单位: m)

Fig.6 Charge structures in different working conditions (Unit: m)

绘制 4 种装药结构下所有测点处峰值振速的柱状图, 如图 7 所示。

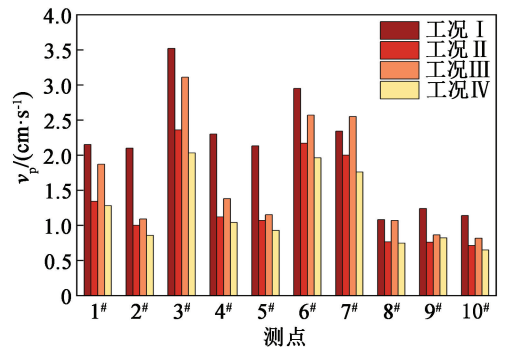


图 7 不同装药结构中测点处的峰值振速

Fig.7 Peak vibration velocity at measuring points of different charge structures

以工况 I 作为对比项, 3 种间隔装药工况的峰值振速放大倍数见表 6。

分析图 7 和表 6 发现, 相比连续装药, 间隔装药能显著降低爆破振动。这是因为, 爆破能量逐段释放, 减少了爆炸的瞬时冲击力。在 3 种间隔装药工况中, 工况 III 的振速衰减程度最小; 因为此时的装

表6 间隔装药下测点处峰值振速的放大倍数

Tab.6 Amplification times of peak vibration velocity at the measuring points under interval charge

测点	工况 II	工况 III	工况 IV
1 [#]	0.62	0.87	0.60
2 [#]	0.48	0.52	0.41
3 [#]	0.67	0.88	0.58
4 [#]	0.49	0.60	0.45
5 [#]	0.50	0.54	0.43
6 [#]	0.74	0.87	0.66
7 [#]	0.85	1.09	0.75
8 [#]	0.71	0.99	0.69
9 [#]	0.61	0.70	0.66
10 [#]	0.62	0.72	0.57

药更集中,冲击力和能量更大。

2.5 爆心距对建筑物爆破振动响应的影响

基于前述研究及相关经验结论认为,在路堑边坡爆破工程中,20 ms 以上的爆破延期时间较为合理。因此,分别建立 30、50、70 m 3 种爆心距下 20、25 ms 和 30 ms 延期爆破的路堑边坡爆破模型,对振动响应进行分析。

2.5.1 不同爆心距下建筑物的振动响应规律

以 20 ms 延期时间为例,绘制了 30、50 m 和 70 m 爆心距下测点 1[#]、2[#]、3[#] 的振速时程曲线,以关注建筑物柱的振动响应。如图 8 所示。

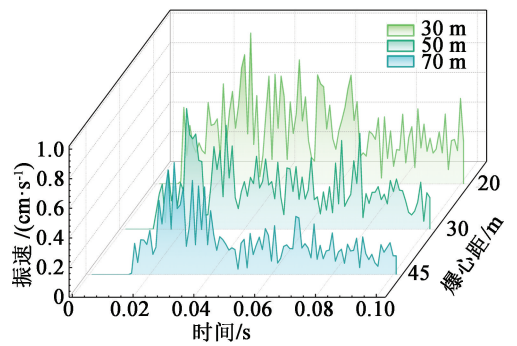
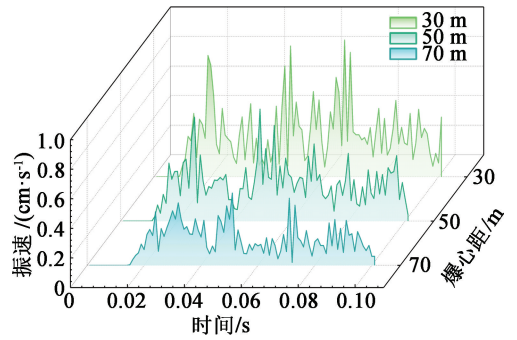
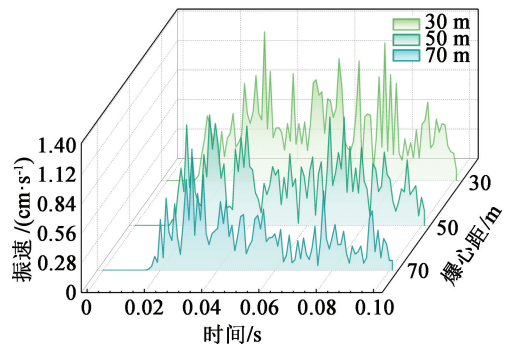
建筑物中柱上的测点振速曲线显示,振动响应相似,波峰出现时间与炸药起爆时间对应,且随着爆心距的增加,波峰延迟,振速减小,符合爆破振动的传播规律。在 30 m 爆心距下,随着炸药逐个起爆,振速波动明显;0.08 s 后,振速缓慢衰减。50 m 爆心距下,波形分离明显,但振速衰减得更快;0.03 s 达到最大振速后,逐步衰减。70 m 爆心距下,波形叠加不明显,仅有 3~4 个波峰;振速在 70 m 处明显衰减。

2.5.2 不同工况下的峰值振速

3 种爆心距时,绘制 20、25 ms 以及 30 ms 延期时间下建筑物 10 个测点的峰值振速 v_p 曲线,如图 9 所示。

峰值振速随爆心距的增加而降低。不同爆心距下,最大振速出现在特定的工况。例如,30 m 处,最大振速出现在 25 ms 延时工况的测点 6[#];50 m 处,最大振速出现在 30 ms 延时工况的测点 6[#];70 m 处,最大振速出现在 25 ms 延时工况的测点 3[#]。

爆破延期时间对建筑物振动的影响随爆心距的

(a) 测点 1[#](b) 测点 2[#](c) 测点 3[#]图8 测点 1[#]~测点 3[#] 的振速时程曲线Fig.8 Time history curves of vibration velocity at Measuring Point 1[#]-Measuring Point 3[#]

变化而不同,可能引起振动波叠加,导致振速增强或减弱。这是由于,传播介质的阻尼特性使得爆破振动在不同爆心距处表现不同。例如,在 30 m 和 70 m 左右爆心距时,30 ms 的微差可以最大程度地衰减振速;50 m 左右爆心距时,不宜选取 20 ms 的爆破延期时间。因此,实际工程中,应根据爆心距调整爆破延期时间。此外,综合分析 30、50 m 和 70 m 3 个爆心距下的 10 个测点在不同起爆延时条件下的振动数据发现,20 ms 延期时间情况下,有 16 次振动数据高于 25 ms 和 30 ms 时;而在 25 ms 和 30 ms 延期时间情况下,分别有 8 次和 6 次达到最高振速。因此,在 30~70 m 的爆心距范围内,将爆破延期时间控制在 25~30 ms 范围内,既能有效衰减振速,又可将振动持续时间限制在 1 s 以内。

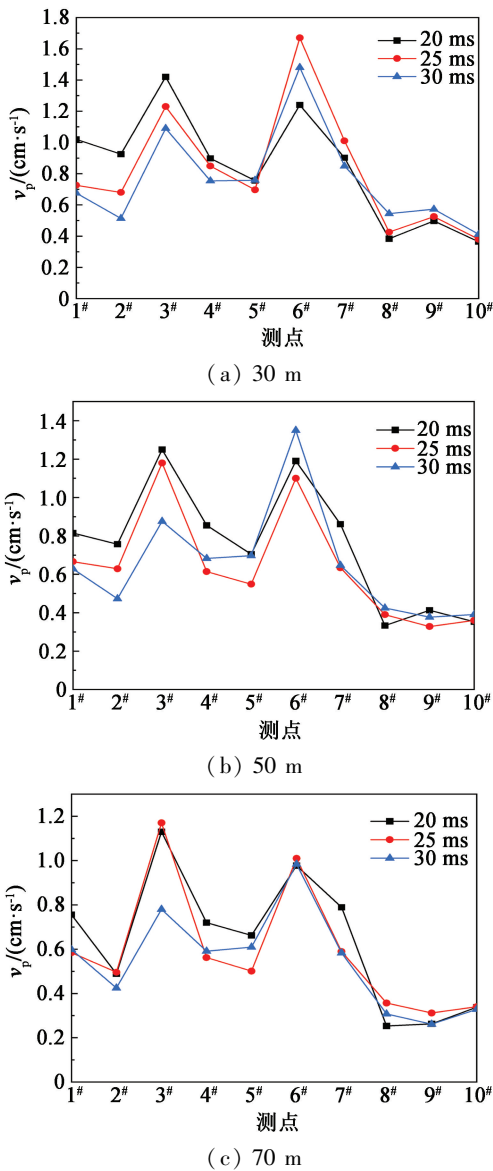


图 9 不同爆心距下延期爆破测点的峰值振速
Fig. 9 Peak vibration velocity at measuring points during delay blasting at different blast center distances

3 爆破参数优化

3.1 最大段装药量

爆破区域左侧约 50 m 处有一居民区。为保护民房,需计算控制最大段装药量。考虑到高程放大效应,一次起爆最大段装药量^[14]

$$Q = R^3 \left(\frac{v}{K} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: R 为被保护对象至爆源中心的距离,即爆心距; v 为被保护对象允许的振速; K 、 α 分别为与爆破条件、岩石特性有关的系数。

本工程爆区主要为灰岩,岩性为中硬岩石,由工程前期试爆数据结合萨道夫斯基公式进行回归分

析,计算取 $K = 170$, $\alpha = 1.7$ 。GB 6722—2014《爆破安全规程》中,居民房屋与既有公路的振动控制标准均为 $1.5 \sim 2.0 \text{ cm/s}$,取下限 $v = 1.5 \text{ cm/s}$ 作为爆破振动安全判据。因此,根据式(1)计算振速为 1.5 cm/s 时不同爆心距处允许的最大单响药量,结果如表 7 所示。

表 7 不同爆心距下允许的最大单响药量
Tab. 7 Maximum allowable single shot charge at different distances

R/m	Q/kg	R/m	Q/kg
30	6.40	60	51.18
35	10.16	65	65.07
40	15.16	70	81.27
45	21.59	75	99.96
50	29.62	80	121.32
55	39.42	85	145.52

由于该段深挖路堑距居民区最近距离为 50 m,依据表 7 计算结果,为最大程度地保护居民区,应控制最大单响药量在 29.0 kg 以内。

3.2 爆破参数设计

采用控制爆破技术进行路堑边坡开挖,以减少对村庄、居民和环路的影响。岩石台阶将采用自上而下的分层开挖,结合深孔和预裂孔技术一次成型。首先,起爆预裂孔,进行预裂切割,以降低对周边环境的影响;随后,按设计一次性完成主体爆破和边坡成型。

爆破自由面选在西侧,施工从西向东,分 10 m 台阶自上而下进行。施工前,需清理台阶 1# 上覆土层,使用机械开挖。为减少对村庄影响,施工分为靠近居民区和远离居民区 2 个部分,如图 10 所示。台阶 1# ~ 3# 不设预裂孔,台阶 4# ~ 7# 设预裂孔,孔间距 0.5 m,每次爆破循环设 4 个预裂孔。

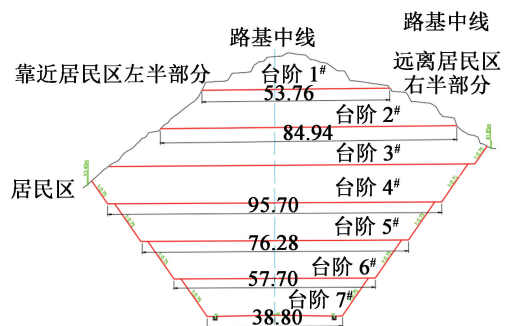


图 10 K6 + 200 ~ K6 + 600 段工程地质典型横断面开挖台阶划分(单位: m)

Fig. 10 Division of typical cross-sectional excavation steps in section K6 + 200-K6 + 600 (Unit: m)

施工开始于远离居民区的右半部分,使用深孔爆破技术,挖掘深度为10 m。随后,靠近居民区的左半部分采用中深孔爆破,挖掘深度为5 m。每次爆破作业仅设置1排炮孔,具体爆破参数见表8~表11。由于本工程段开挖台阶数较多,各台阶横断面的炮孔布置根据爆破参数实时调整。其中,台阶1#远离居民区部分,经计算,主孔爆破共11个炮孔;靠近居民区部分8个炮孔。

3.3 装药结构及爆破网路设计

爆破工程中,路基右线的爆破振动控制得当。因此,无需使用间隔装药结构,可直接采用孔底连续耦合装药。而路基左线靠近居民区的部分,根据数值模拟结果,应采用空气间隔装药结构,并按照工况II的装药方案。即底部加强装药,使用4.8 kg药包,之后每隔0.5 m再放置2.4 kg药包,单孔总装药量为12.0 kg。

计算得出,单孔最大装药量为24.0 kg,最大段装药量为29.0 kg。为保护居民区,采用逐孔起爆和数码电子雷管。预裂孔0时刻起爆,与主爆孔间隔75 ms。根据前述分析,设置远离居民区的右半部分孔间延期时间为30 ms,靠近居民区的左半部分孔

间延期时间为25 ms。

3.4 爆破效果分析

以台阶1#为例,运用LS-DYNA软件模拟远离居民区部分的深孔爆破。提取该工况下建筑物的振动数据,对比分析爆破方案是否合理。

根据爆破方案,炸药从右至左逐个起爆,通过关键字*Initial_Detonation设置,炸药从0时刻开始起爆,爆破延期时间为30 ms。

在实际工程监测中,通常只在建筑物地面放置测振仪进行测试。因此,本次模拟中仅选取了建筑物柱与地面接触的2个测点I和II,并提取它们的振动信息。

2个测点的振速时程曲线如图11所示。2个测点的峰值振速分别为1.212 9 cm/s和1.094 5 cm/s,均低于2.0 cm/s的安全标准,表明爆破方案是合理的。测点I和测点II的振速时程曲线显示,振动规律相似,均在0.05 s达到峰值振速;随后,随着炸药逐个起爆,振动波呈现波动,并按规律衰减。

3.5 现场爆破监测结果对比

3.5.1 爆破振动监测方案

为评估爆破对村民住宅区的影响,采用质点振

表8 台阶4#~7#预裂孔爆破参数(远离居民区)

Tab. 8 Blasting parameters for pre split holes on Steps 4#-7# (far away from residential areas)

孔径 d/mm	孔距 a/m	药包直径 d_0/mm	超深 h/m	孔深 L/m	线装药密度 $\Delta/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	堵塞长度 l/m	单孔装药量/ kg	延期时间/ ms
90	0.5	32	1.5	14.0	0.32	3.5	5.1	30

表9 远离居民区深孔爆破参数

Tab. 9 Deep hole blasting parameters far away from residential areas

孔径 d/mm	底盘抵抗线 W_d/m	排距 b/m	孔距 a/m	超深 h/m	孔深 L/m	单排单孔药量 Q/kg	填塞长度 L_t/m
90	1.8	2.0	2.7	1.5	11.5	24.0	2.5

表10 台阶4#~7#预裂孔爆破参数(靠近居民区)

Tab. 10 Blasting parameters for pre split holes on Steps 4#-7# (near residential areas)

孔径 d/mm	孔距 a/m	药包直径 d_0/mm	超深 h/m	孔深 L/m	线装药密度 $\Delta/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	堵塞长度 l/m	单孔装药量/ kg	延期时间/ ms
90	0.5	32	1.0	7.3	0.32	2.0	2.7	30

表11 靠近居民区中深孔爆破参数

Tab. 11 Medium deep hole blasting parameters near residential areas

孔径 d/mm	底盘抵抗线 W_d/m	排距 b/m	孔距 a/m	超深 h/m	孔深 L/m	单排单孔药量 Q/kg	填塞长度 L_t/m
90	1.8	2.0	2.7	0.8	5.8	12.0	1.8

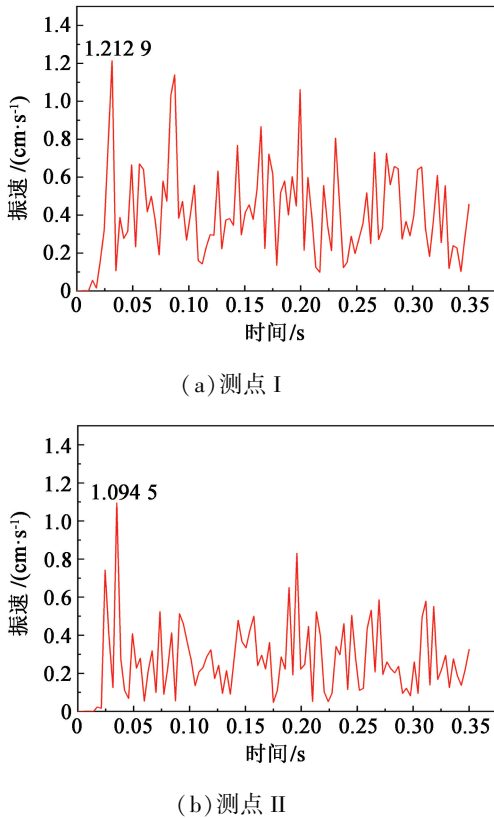


图 11 测点 I 和测点 II 的振速时程曲线
Fig. 11 Time history curves of vibration velocity at measuring point I and measuring point II

速作为测试指标。使用成都中科测控的 TC-4850-3 型爆破测振仪进行监测。

在探明爆区周边环境以及建筑物分布后,在路堑需保护最近距离布置 1 个测点,测点位于距爆区最近的民房附近。

3.5.2 爆破振动监测结果

监测记录显示了 K6 + 200 ~ K6 + 600 段深挖路堑台阶 1# 的爆破振动信息。图 12 展示了远离居民区的炮孔起爆时的分振速时程曲线。起爆后,药包每隔 30 ms 依次爆炸。 x 、 y 、 z 3 个方向的振速在约 0.1 s 后达到峰值;0.6 s 后,所有药包爆炸完毕,振速随后逐渐下降。 x 、 y 、 z 方向的峰值振速分别为 0.425、0.315、1.357 cm/s。 z 方向的振速高于 x 和 y 方向的振速。结果显示,该路堑的质点振速均低于安全标准。此段深挖路堑的爆破振动监测数据如表 12 所示。

模拟工况为靠近居民区,水平距离 42 m,垂直距离 15 m 的爆破段。将优化后的仿真结果与实际爆破监测结果进行对比。模拟得到 z 方向的峰值振速为 1.391 cm/s,实际监测结果为 1.367 cm/s (表 12),误差约为 2.43%。误差较小,可能来源于爆破参数的微调、地质条件的局部差异或监测设备的精

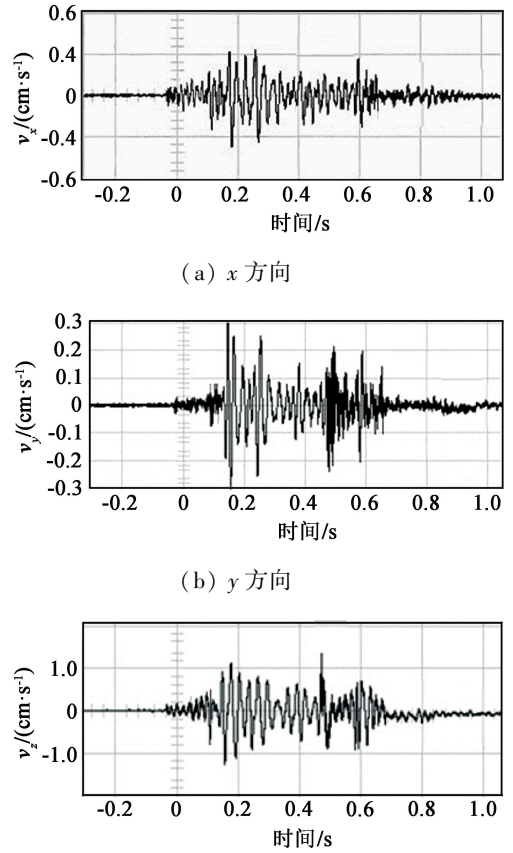


图 12 K6 + 200 ~ K6 + 600 段台阶 1# 爆破施工的分振速

Fig. 12 Sub vibration velocity at step I in section K6 + 200-K6 + 600

表 12 K6 + 200 ~ K6 + 600 段爆破振动监测结果

Tab. 12 Monitoring results of blasting vibration in section K6 + 200-K6 + 600

爆破段	水平距离/ m	垂直距离/ m	峰值振速/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)		
			v_x	v_y	v_z
靠近居民区	38	20	0.425	0.315	1.387
	32	15	0.417	0.320	1.400
远离居民区	48	20	0.342	0.296	1.260
靠近居民区	45	20	0.356	0.288	1.358
	42	15	0.382	0.290	1.367
远离居民区	65	20	0.259	0.230	1.196

度限制。此外,村镇民用建筑自振频率通常低于 10 Hz,根据 GB 6722—2014《爆破安全规程》,0 ~ 10 Hz 内建筑物的安全振速为 1.5 ~ 2.0 cm/s。监测数据显示,本段深挖路堑的振速主要集中在 1.5 cm/s 以下,表明爆破方案合理可行。

4 结论

通过 LS-DYNA 模拟技术,研究了在高程差地形条件下,不同爆破延期时间及装药结构下建筑物的振动响应情况。分析了不同距离下,不同爆破延期时间引起的建筑物的振动变化。并在此基础上,以控制爆破振动为首要目标,将质点振速作为安全判据,对本段深挖路堑边坡进行爆破参数的优化与评价。得到结论如下:

1) 延期爆破可显著降低爆破振动,在 15 ms 以上的长延时下,爆破振动强度衰减为齐次爆破的 1/2 到 1/3。过长的爆破延期时间可能会导致爆破地震波产生叠加,从而加强振动。应确保振动持续时间控制在 1 s 以内。不同的爆破延时间隔在不同的爆心距范围内引起的振速衰减程度也有所不同。

2) 间隔装药结构下,爆破振速衰减为连续装药结构的 1/6 到 1/8。振速衰减程度与间隔装药的方式有关:单孔装药量相同的情况下,装药越分散、分割出来的药包药量越小,引起的爆破振动就越小。

3) 随着爆破距离的增加,建筑物的振动速度普遍下降。当使用延期爆破时,距离越远,分离波形越不明显,振动波在较远距离处叠加。不同延期时间在不同距离对振速的衰减效果不同。大约在 30 m 和 70 m 爆心距时,30 ms 的延期时间能最大程度减少振速;而在大约 50 m 爆心距时,20 ms 的延期时间减振效果不佳。进一步可知,在 30 ~ 70 m 的爆心距范围内,起爆延期时间应控制在 25 ~ 30 ms。从而既能有效地衰减振速,又可将振动时长限制在 1 s 以内。

4) 针对深挖路堑进行爆破参数的优化设计。以 1.5 cm/s 为安全允许振速,计算得本段深挖路堑最大段装药量为 29.0 kg。设计爆破区域以路基中线为准,分 2 次爆破;远离居民区段为深孔、逐孔爆破,单孔药量 24.0 kg,孔间延期时间 30 ms;靠近居民区段为中深孔、逐孔爆破,单孔药量 12.0 kg,孔间延期时间 25 ms,并设置底部加强的 0.5 m 空气间隔的装药结构。通过数值模拟,验证了爆破方案的可行性。将该爆破设计方案应用于现场,爆破振动监测数据表明:本段深挖路堑引起最近民房的振速小于安全允许振速 1.5 cm/s,爆破开挖并未对民房造成破坏,优化后的爆破方案合理可行。建议在类似地形条件下,延期时间可根据爆心距和地质特征在 25~30 ms 区间内灵活调整,装药量和间隔装药结构则需结合具体安全振速的要求进一步优化。

参 考 文 献

- [1] 张云鹏,葛晓东,武旭,等. 爆破地震波入射角度对振动和放大效应的影响[J]. 工程爆破, 2023, 29(1): 122-129.
ZHANG Y P, GE X D, WU X, et al. Impact of blasting seismic wave incidence angle on vibration and amplification effect [J]. Engineering Blasting, 2023, 29(1): 122-129.
- [2] 何理,殷琳,钟冬望,等. 爆破振动强度、波形与频谱研究综述:预测及主动控制[J]. 爆破, 2024, 41(3): 189-204, 262.
HE L, YIN L, ZHONG D W, et al. Research review on blast vibration intensity, waveform and spectrum: prediction and active control [J]. Blasting, 2024, 41(3): 189-204, 262.
- [3] 石义虎,邓德志,廖兵,等. 基于 HHT 研究断层岩溶对爆破地震波传播的影响[J]. 爆破, 2023, 40(2): 199-209.
SHI Y H, DENG D Z, LIAO B, et al. Influence of fault karst on propagation of blasting seismic wave based on HHT method [J]. Blasting, 2023, 40(2): 199-209.
- [4] 谢全民,贾永胜,姚颖康,等. 城市高架桥拆除爆破振动信号的非线性特征分析[J]. 工程力学, 2022, 39(10): 79-87.
XIE Q M, JIA Y S, YAO Y K, et al. Nonlinear characteristic analysis of blasting vibration signals in the demolition of urban viaducts [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(10): 79-87.
- [5] 伍岳,贾永胜,黄小武,等. 隧道爆破对临近高压输电铁塔的振动影响分析[J]. 爆破, 2022, 39(3): 165-171, 198.
WU Y, JIA Y S, HUANG X W, et al. Influence analysis of tunnel blasting vibration on adjacent high voltage transmission tower [J]. Blasting, 2022, 39(3): 165-171, 198.
- [6] 孙琰,刘敬智,李吉杨芙,等. 减振孔在缅甸某露天矿区爆破振动控制中的应用[J]. 中国矿业, 2022, 31(2): 155-159.
SUN Y, LIU J Z, LI J Y F, et al. Application of shock absorbing holes in blasting vibration control in an open mining area in Myanmar [J]. China Mining Magazine, 2022, 31(2): 155-159.
- [7] 孙冰,罗志业,曾晟,等. 爆破振动影响因素及控制技术研究现状[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(6): 129-134.
SUN B, LUO Z Y, ZENG S, et al. Research status of influencing factors and control technology of blasting vibra-

- tion [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2021, 48(6): 129-134.
- [8] TOLANI S, BHARTI S D, SHRIMALI M K, et al. Response behavior of buildings under the simultaneous actions of surface blast and progressive collapse [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2022, 36(2): 04021119.
- [9] 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.
YU L. Safety influence of blasting vibration on multistory buildings[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2015, 32(3): 86-89.
- [10] NORÉN-COSGRIFF K M, RAMSTAD N, NEBY A, et al. Building damage due to vibration from rock blasting [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 138: 106331.
- [11] 陆瑜, 蒙磊, 黄婷. 频繁爆破振动作用下砖混结构安全控制标准研究[J]. *爆破*, 2023, 40(1): 45-49.
LU Y, MENG L, HUANG T. Study on safety control standard of brick-concrete structure under frequent blasting vibrations [J]. *Blasting*, 2023, 40(1): 45-49.
- [12] 雷振, 李卓, 雷兴海, 等. 爆破振动作用下高层建筑振速变化规律研究[J]. *工程爆破*, 2022, 28(2): 7-14.
LEI Z, LI Z, LEI X H, et al. Variation law of vibration velocity of high-rise buildings under blasting vibration [J]. *Engineering Blasting*, 2022, 28(2): 7-14.
- [13] 高富强, 张光雄, 杨军. 爆破地震荷载作用下建筑结构的动力响应分析[J]. *爆破*, 2015, 32(1): 5-10, 80.
GAO F Q, ZHANG G X, YANG J. Dynamic response analysis of building structure under blasting seismic loads [J]. *Blasting*, 2015, 32(1): 5-10, 80.
- [14] 奚俊杰. 隧道台阶爆破开挖对地表临近建筑物影响的研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
XI J J. Study on the vibration of adjacent surface building induced by tunnel bench blasting excavation [D]. Nanjing: Southeast University, 2022.
- [15] 刘义佳, 卢文波, 陈明, 等. 结构爆破振动响应的频率与持续时间依赖性分析[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(8): 189-199.
LIU Y J, LU W B, CHEN M, et al. Frequency and duration dependence analysis of structural blasting vibration response [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(8): 189-199.
- [16] 张家琦. 切缝药包竖井壁定向断裂控制爆破与减振研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
ZHANG J Q. Research on directional fracture-controlled blasting and vibration reduction of shaft wall by cutting seam cartridge [D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [17] JAYAWARDANA P, THAMBIRATNAM D P, PERERA N, et al. Dual in-filled trenches for vibration mitigation and their predictions using artificial neural network [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 122: 107-115.
- [18] 邹烽, 席田, 胡业红, 等. 爆破振动综合减震措施的减震效应研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2022, 18(6): 119-126.
ZOU F, XI T, HU Y H, et al. Research on damping effect of comprehensive damping measure for blasting vibration [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2022, 18(6): 119-126.
- [19] 苏莹, 吴立, 彭亚雄, 等. 紧邻建(构)筑物水下爆破振动安全判据研究综述[J]. *爆破器材*, 2016, 45(3): 55-61.
SU Y, WU L, PENG Y X, et al. Research review on safety criterion of underwater blasting nearby constructions [J]. *Explosive Materials*, 2016, 45(3): 55-61.
- [20] 段宝福, 他国山. 露井联采爆破振动效应的灰色关联度分析[J]. *工程爆破*, 2017, 23(5): 9-13.
DUAN B F, TA G S. Gray correlative degree analysis on blasting vibration effect of open-pit combined mining [J]. *Engineering Blasting*, 2017, 23(5): 9-13.
- [21] 姚强, 杨兴国, 李洪涛. 爆破振动舒适性评价方法研究现状及展望[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(22): 152-160, 175.
YAO Q, YANG X G, LI H T. Review on status quo and prospect of assessment methods for comfort under blasting vibration [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(22): 152-160, 175.