

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.04.020

引水隧洞下穿密集建筑群的 爆破振动损伤特征与影响评价*

饶宇^{1,2}, 谢志国³, 陆进彬⁴, 赵根¹, 马凯⁴, 郭镒维³

(1. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010; 2. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070;
3. 云南省滇中引水工程建设管理局, 昆明 650205; 4. 云南省滇中引水工程有限公司, 昆明 650205)

摘要: 振动是爆破作业所产生的首要有害效应, 科学地对爆破影响进行评价是工程建设需要解决的重要难点。以滇中引水工程下穿建筑群的隧洞爆破开挖为工程依托, 首先采用数值模拟和现场调查方法获得了建筑物受不同致损因素影响的损伤特征, 爆破振动会导致建筑物窗户、门洞四角形成“X”形态裂缝, 单侧不均匀沉降会导致建筑物出现沿窗户、门洞对角的45°斜裂缝。进而对不同爆源距的建筑物振动数据进行时频分析, 结果表明: 建筑物基础部位受迫振动占据主导作用, 爆破荷载结束后自由振动轻微并迅速衰减。随着水平距离的增加, FFT(快速傅里叶变换)主频和爆破振动能量均有下降趋势, 但FFT主频随距离变化不如能量敏感, 并且各频段能量对距离的敏感程度亦不相同。总体上各频段能量呈现出近区衰减快、远区衰减慢的特征; 随爆源距增大, 高频部分的爆破能量向中低频转移, 存在“低通高滤”效应, 从而导致各频段能量衰减出现差异化的特征。最后通过调查发现: 人体对爆破振动的感受与建筑物安全标准存在显著差异, 据此提出了基于结构损伤和人居环境影响的综合评价方法。

关键词: 爆破振动; 损伤机理; 时频特征; 影响评价

中图分类号: TU591 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2024)04-0156-11

Damage Characteristics and Impact Assessment of Blasting-induced Vibration on High-density Structures Adjacent to Diversion Tunnels

RAO Yu^{1,2}, XIE Zhi-guo³, LU Jin-bin⁴, ZHAO Gen¹, MA Kai⁴, GUO Yi-wei³

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Central Yunnan Water Diversion Engineering Construction Administration Bureau, Kunming 650205, China; 4. Central Yunnan Water Diversion Engineering Co. Ltd., Kunming 650205, China)

Abstract: Vibration is a primary detrimental effect generated by blasting operations, and accurately evaluating its impact remains crucial and challenging. Based on the blasting excavation of a tunnel under the Central Yunnan Water

收稿日期 (Date of reception): 2024-06-27

网络首发日期 (Published online): 2024-08-23

作者简介: 饶宇 (1990-), 男, 湖南宁乡人, 博士、高工, 主要从事岩土动力学的研究工作, (E-mail) raoyu@mail.crsri.cn。

通讯作者: 郭镒维 (1984-), 男, 云南昆明人, 硕士、高工, 主要从事水利水电建设环境影响评估等工作, (E-mail) 131803140007@hhu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52079009)

About the author: RAO Yu (1990-), male, born in Ningxiang, Hunan, Ph. D, senior engineer, and mainly engaged in the research work of geotechnical dynamics, (E-mail) raoyu@mail.crsri.cn.

Corresponding author: GUO Yi-wei (1984-), male, born in Kunming, Yunnan, master, senior engineer, and mainly engaged in the work of environmental impact assessment in water conservancy and hydropower construction, (E-mail) 131803140007@hhu.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (52079009)

Diversion Project, this study combines numerical simulation and field investigation to assess the damage characteristics of buildings affected by various factors. The results show that blasting vibration causes “X-shaped” cracks at the four corners of windows and doorways, while uneven settlement leads to 45° diagonal cracks. Subsequently, time-frequency analysis was performed on vibration data from buildings at varying distances from the blast source. The findings indicate that forced vibration predominates in building foundations, with minimal free vibration and quickly attenuating after the blasting load ends. As horizontal distance increases, the main frequency and blasting vibration energy exhibit a downward trend based on Fast Fourier Transform (FFT) analysis. However, the main frequency is less sensitive to distance changes than energy. Additionally, the sensitivity of energy to distance varies across different frequency bands. Generally, energy in each frequency band rapidly attenuates close to the blast source, with slower attenuation as distance increases. Furthermore, as the distance from the blast source increases, there is a shift in energy from higher to lower frequency bands towards lower frequency bands, and the effect of low-pass and high-filter results in distinct variations in energy attenuation within different frequency bands. Finally, the study highlights a significant disparity between human perception of blasting vibrations and building safety standards. Based on this observation, a comprehensive evaluation method is proposed to combine structural damage assessment with considerations of the human settlement environment.

Key words: blasting vibration; damage mechanism; time-frequency characteristics; impact assessment

振动、冲击波、噪声及有害气体是爆破作业引起的主要有害效应,而振动通常被认为是首要的有害效应。不同于过去传统的水利水电项目,近年来实施的一批抽水蓄能电站、引调水工程等项目,施工区域往往位于城镇周边,毗邻居民区、风景名胜区、重要的铁路、公路和油气管道等,甚至下穿保护物的情况也十分常见,爆破对周边环境影响的控制摆在了比爆破质量更为突出的位置。水利水电工程的爆破施工周期长、规模大、频次高、24 h 作业等特点,导致工程建设和各类建(构)筑物保护、人居环境影响之间的矛盾日益突出。因此,开展爆破振动对建筑物的损伤特征和影响评价研究具有重要的意义。

当前,爆破振动对建筑物的影响包含了建筑物自身响应、爆破振动衰减特征、爆破振动对人居环境以及爆破影响评价方法等诸多研究热点,众多的学者和工程技术人员对此进行了研究。结构响应方面,建筑物的爆破振动放大效应是可以明显观测到的^[1],但在不同方向的爆破振动分量和频率成分的反应特征却有不同的认识。He 等研究表明随着楼层的增高^[2],水平径向和水平切向速度和瞬时能量先增大后减小,而铅垂向则先减小后增大且为三个方向中振动最大的分量。Ren 在对历史建筑物的爆破振动影响研究中^[3],探明了水平向振动有明显的放大效应,而铅垂向则迅速衰减。Huo 则观测到质点峰值振动速度 (PPV) 随楼层增加逐步增大^[4],并在 3 楼达到最大,而 4 楼则衰减,并且随楼层增加主振频率呈现由高频向低频转变的趋势。基于模态分析理论,Wang 等将高层建筑简化为质量-弹簧-阻尼器模型^[5],并监测到各层的振动速度峰值随楼层的

增加而逐渐减小。廖德华认为铅垂向的爆破振动速度、频率及能量均有高程放大效应^[6],而水平径向和水平切向的速度则呈现出高程衰减。而有学者将爆破作用下高层建筑从底部到顶部依次分为振动衰减区、波动区和放大区^[7],一般来说,多层建筑物的底部和顶部爆破振动在频率成分、波至时间以及相位和幅值都存在较大差异^[8,9]。

部分学者还对不同距离处的建筑物爆破振动特征进行了研究。Chen 基于模糊神经网络提出了 PPV 衰减规律的优化预测模型^[10],并认为水平距离是影响峰值振动和主振频率最重要的因素,高程差、装药量及炸药类型也有一定影响。Wu 获得了隧道掌子面前方 5m 存在着应力波的空腔效应和明显的衍射现象^[11]。Xu 对不同掏槽爆破毫秒网路和装药结构下的建筑物爆破振动信号进行 HHT(希尔伯特黄变换)分析^[12],研究表明自由面、单段装药量和隧道埋深均对表面振动有显著影响。Yan 根据 PPV 数值将爆破影响划分为影响区、轻微影响区和未影响区^[13]。爆破振动导致房屋开裂和对人员舒适性的影响是显而易见的^[14,15]。Heath 研究了爆破振动和环境因素对住宅建筑开裂的影响^[16],并认为房屋开裂大多是黏土材料因温度和湿度变化而收缩或膨胀引起的,而爆破振动与房屋损坏直接关系并不明确。Yao 提出了人体爆破振动舒适性的定量评价方法^[17,18],并根据不同人群的爆破振动舒适感受调查结果确定了舒适性的影响因素。

建筑物受损主要表现为可见裂缝,众多研究中,爆破振动对裂缝的产生、延伸和扩展均被认为有重要影响,但在实际中致损因素却十分复杂。如

何对已有裂缝的形成原因进行有效调查辨识,并结合爆破振动特征和损伤机理科学合理地对爆破影响进行评价,仍是当前工程建设领域所面临的重大难点。本文以云南省滇中引水工程下穿密集建筑群的爆破影响为工程背景,基于数值模拟方法探明了建筑物爆破损伤机理,结合工程现场建筑物损伤的详细调查,有效地对致损因素进行了辨识,研究了爆破振动时频细化特征,并据此提出了爆破振动影响的评价方法,研究成果为解决当前爆破影响评价重点难点提供了依据。

1 建筑物爆破损伤的机理分析

爆破应力波成分复杂,主要分为体波和面波,体波包括纵波和横波,面波则主要考虑瑞利波。当传播介质近似为弹性介质时,上述不同类型应力波可按照弹性波考虑。当体波遇到不连续介质面将产生反射和折射,从而在介质面处产生剪应力 τ_p 和拉应力 σ_s 。其应力值根据质点振动速度按式(1)和(2)进行计算

$$\sigma_p = K_\sigma \rho v_p c_p \quad (1)$$

$$\tau_s = K_\tau \rho v_s c_s \quad (2)$$

同样地,对于瑞利波,其在波阵面产生的应力也可以近似为

$$\sigma_R = K_R \rho v_R c_R \quad (3)$$

式中: K_τ 、 K_σ 、 K_R 为与场地特征有关的系数; ρ 为岩体或保护对象的密度, kg/m^3 ; c_p 、 c_s 、 c_R 为弹性波纵波、横波、瑞利波波速, m/s ; v_p 、 v_s 、 v_R 为计算点处与各类型波振动方向一致的质点振动速度分量, m/s 。

按弹性波理论,上述应力不宜超过保护物内部相应的抗拉、抗压、抗剪强度,否则容易导致保护物出现损伤。因此,根据式(1)~式(3),爆破容许质点振动速度可以表示为

$$[v] = \frac{[\sigma]}{\rho C} \quad (4)$$

式中: $[v]$ 表示容许质点振动速度; $[\sigma]$ 为动态容许应力; C 为相应弹性波的传播速度。

地基不均匀沉降是导致建筑物开裂的主要诱因,工程建设产生的爆破振动往往被认为会致使建筑物受损而产生大范围的索赔纠纷,有效辨识 2 种致损因素的损伤形态特征,能够有效区分房屋建筑致损的因素和责任。为此,采用 ABAQUS 软件对爆破振动和不均匀沉降等 2 种工况对房屋的损伤进行模拟,其中,房屋采用 C20 混凝土的塑性损伤本构,具体材料参数如表 1 所示。通过拉压应力的损伤因子定义不同损伤退化程度。

$$\sigma = (1 - D)\sigma_0 \quad (5)$$

式中: σ 为模型的拉压应力; σ_0 为房屋混凝土材料无损情况下的初始拉压应力; D 为损伤因子, $0 \leq D \leq 1$, 当 $D = 1$ 时材料完全失去承载能力。爆破振动模拟采用高性能炸药模型 (MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN) 和 JWL 状态方程,调用 Explicit 显式动力学分析模块,具体参数如表 2 所示。不均匀沉降采用 Abaqus/Standard 通用模块进行非线性分析。为了简化分析,将爆破振动施加于建筑物底部基础部位,不设置复杂的爆破延期网路,具体结果如图 1 所示。

表 1 混凝土材料参数

Table 1 Material parameters of the model

材料	损伤模型	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	膨胀角/ $^\circ$	偏心率	应力比	k	粘性系数
C20 混凝土	CDP	2400	25 500	0.2	30	0.1	1.16	0.667	0.005

表 2 炸药 JWL 状态方程参数

Table 2 The used JWL parameters of explosive

炸药密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	爆压/GPa	参数 A/GPa	参数 B/GPa	参数 R_1	参数 R_2	参数 ω	单位体积 内能/GPa
1100	3800	9.5	374	0.182	4.15	0.9	0.30	4.2

从数值模拟结果可知,爆破振动和不均匀沉降对建筑物损伤的分布形态有较明显的区别,爆破振动导致房屋裂缝沿窗户、门洞四角呈现“X”形态,同时楼板与墙体连接处也是容易出现开裂的部位;单侧软弱不均匀沉降主要导致了窗户、门洞的对角形成近似 45° 的斜向开裂,裂缝沿沉降大的一侧向沉

降小的一侧下斜,不同楼层的斜向裂缝基本平行。

2 建筑物损伤辨识与影响因素分析

2.1 工程概况

滇中引水工程是云南省可持续发展的战略性基础工程,为我国西南地区规模最大、投资最多的水资

源配置工程。工程从金沙江上游石鼓河段取水, 隧洞沿线途径丽江、大理、楚雄、昆明、玉溪、红河六个州(市), 一期工程输水总干渠隧洞总长度 612 km,

隧洞规模大、沿线途经城区、乡镇以及村庄近 80 个建筑物密集分布区域, 建筑物结构类型众多、人居环境复杂、爆破影响处置难度大。

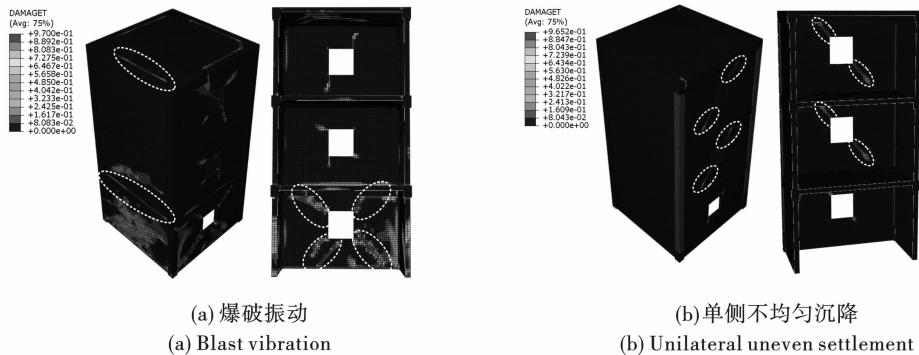


图 1 不同因素导致建筑物裂缝形态的数值模拟结果
Fig. 1 The induced crack geometry of building by using ABAQUS

以昆明段 LQ 隧洞为例, 隧洞下穿昆明市五华区, 其中 1#~2#施工支洞区间主隧洞正上方分布有 2 条高速公路(分别为 RC 高速、KT 高速)、2 个村庄(SK 村、HW 村)及 1 座寺庙(FZ 寺庙), 周边环境极其复杂, 具体如图 2 所示。隧洞轴线 300 m 范围内分布有各类型房屋 308 栋, 房屋结构形式以砖混结构、砖木结构农村自建房为主, 少量土木结构和框架

结构, 部分为砖混承重-钢屋盖结构房屋或砖混结构住房改建等作为生产厂房使用。下穿段采用控制爆破、辅以机械破碎的开挖方式, 爆破采用 2 号岩石乳化炸药、数码电子雷管毫秒延期网路, 单次炸药总量为 9~150 kg。LQ 隧洞为 7.62 m×8.22 m(宽×高)的马蹄形断面, 洞顶与周边村庄最小为 40 m, 如图 3 所示。

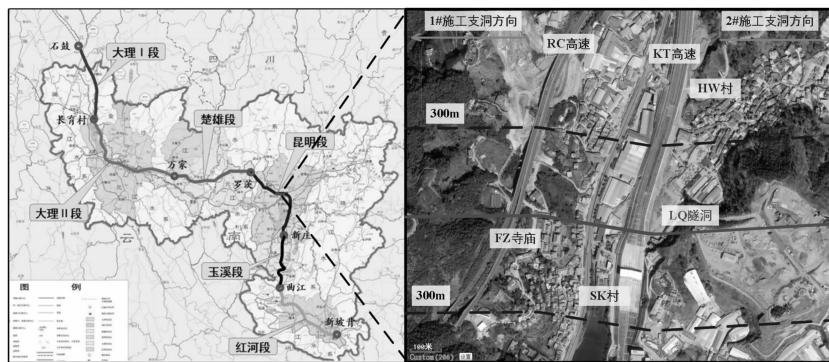


图 2 LQ 隧洞 1#~2#施工支洞区间段与周边保护物的相互位置示意
Fig. 2 The schematic diagram of LQ tunnel(1#~2# adit) and surrounding protection

2.2 致损因素分析

房屋产生损伤的原因众多, 总体来说包括了自身原因和外部原因, 自身原因主要包括了自然老化、房屋砌筑及养护质量、材料及结构设计缺陷等问题, 外部原因则包括有地基变形、温度、湿度、地震、爆破等^[19]。针对该下穿段 2 个村庄进行细致的调查, 建筑物典型的损伤问题如表 3 和图 4 所示。

表 3 虽然对建筑物常见裂缝的主要原因进行了分析, 实际上裂缝的形成是多重因素共同导致的。爆破振动对建筑物的损伤辨识需要依赖于爆破振动

特征分析, 并结合爆前、爆后裂缝测量和贯穿施工全过程的调查工作, 最后做出科学合理的评价。

3 爆破振动时频域细化特征分析

针对隧洞开挖产生的爆破振动, 沿隧洞轴线不同距离的民房建筑基础部位布置爆破振动速度测点, 同时监测水平径向(Long.)、水平切向(Tran.)及铅垂向(Vert.)的振动速度时程。测点布置及建筑物与隧洞相对位置如图 5 所示, 具体监测数据如表 4 所示。

表3 建筑物常见损伤及影响因素分析

Table 3 The analysis of typical structural damages and their influencing factors in buildings

损伤类型	形态特征	主导原因
收缩裂缝	裂缝较窄、长度不一,呈无规则的网状龟裂。	材料塑性收缩或干燥过程中养护不当造成。
温度裂缝	檐口、窗台部位细小裂缝,天棚和墙面出现贯通型裂缝。	温差较大的地区房屋沿檐口、窗台部位出现方向较为一致的细小裂缝,长度较大的混凝土屋盖可能导致天棚和墙面同一部位出现贯通型裂缝。
砌筑质量	沿砌块之间的竖向贯通型裂缝,墙面上部、特别是梁下的水平横缝。	竖向灰缝不足导致出现竖向裂缝、水平灰缝过厚或框架梁底部斜砌砂浆不饱满导致填充墙沉降呈水平横缝。
沉降裂缝	斜向为主,水平、竖向及八字形不常见,一般呈“上宽下窄”、左右宽中间窄。	建筑物一端较软弱可导致斜向裂缝,地基突变处易导致顶部拉裂呈竖向裂缝,长度大的墙面因地基变形不协调出现正八字形(中部)裂缝。
构造裂缝	沿窗户及门洞过梁两端的斜向及水平缝。	门窗洞口过梁的支撑处,局部应力集中出现斜向和水平向裂缝。
外力作用	“X”型裂缝及沿原有裂缝方向增宽、增长。	常见沿窗户门洞四周向外延伸的“X”型裂缝,或导致原有裂缝扩展。
相邻建(构)物影响	与建(构)物布置有关。	部分民房通过下沉地基建造低于周边路基的地下室,通过盖板搭建形成外出通道,外地面变形及车辆碾压对墙面挤压形成水平横缝等。

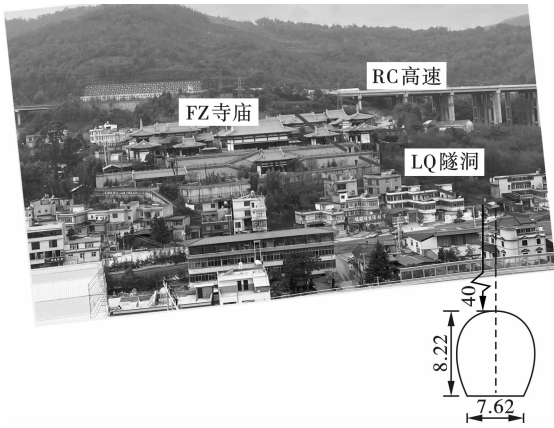


图3 LQ隧道断面

Fig. 3 The section of LQ tunnel

目前国内外规范引入了以爆破振动主振频率范围内的PPV作为爆破安全控制标准,爆破振动存在多个主振频段^[20],因而其频域特征对于确定建筑物影响情况十分重要,为此,以测点至爆源水平距离

(HD)为0 m、22 m、42 m及54 m的测点切向振动速度为例,对爆破振动信号进行FFT变换,获得其频谱特征。图6为原始振动波形(图6(a))及其对应的幅度频谱曲线(图6(b))。

从图6(a)可知,建筑物基础部位的爆破振动速度可以清晰地辨识爆破网路毫秒微差分段情况,爆破荷载作用结束后振动迅速衰减,建筑物的自由振动响应并不显著,因此基础部位还是以爆破荷载下的受迫振动占主导作用;图6(b)显示出建筑物基础部位的爆破振动频率基本在100 Hz以下,其中主振频率分布30~50 Hz之间。根据表4及图6(b),爆破振动的FFT主振频率呈现出随距离增大而降低的趋势,以切向为例,当HD=0 m时,主振频率为45.45 Hz,而HD=54 m时,主振频率则衰减为35.38 Hz,但各分量主振频率变化差异性大、在一定的距离范围内保持不变,总体呈现出对距离变化不敏感的特征。

表4 不同水平距离的建筑物基础部位爆破振动速度监测结果

Table 4 Measuring results of blasting-induced PPV at different horizontal distances (HD)

建筑物 测点编号	距离/m		径向(Long.)			切向(Tran.)			铅锤向(Vert.)		
	水平 (HD)	埋深 (Depth)	PPV/ (mm·s ⁻¹)	频率/ Hz	时刻/ ms	PPV/ (mm·s ⁻¹)	频率/ Hz	时刻/ ms	PPV/ (mm·s ⁻¹)	频率/ Hz	时刻/ ms
1	0	40	8.74	66.25	66	6.18	45.45	72	14.40	79.99	378
2	22	40	6.00	45.37	73	3.13	45.37	68	8.21	40.76	20
3	25	40	4.82	45.37	67	2.34	40.76	62	8.02	40.76	525
4	42	40	3.42	45.37	68	2.62	40.76	63	4.75	40.76	69
5	54	40	2.25	23.84	62	2.06	35.38	67	3.11	40.76	24

注:表中频率指FFT(快速傅里叶变换)主振频率,时刻指速度对应时刻。

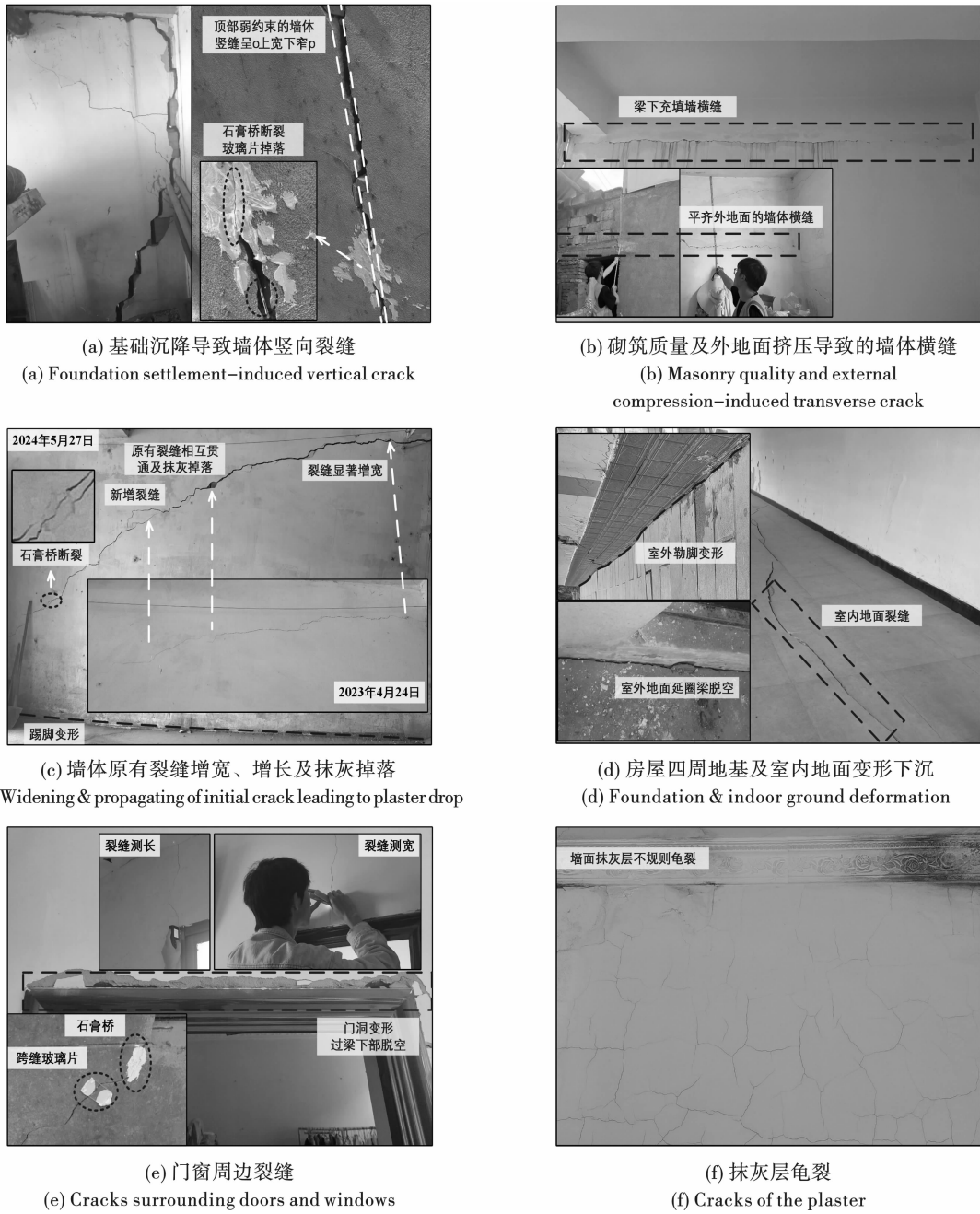


图 4 建筑物常见裂缝类型

Fig. 4 The types of cracks in buildings

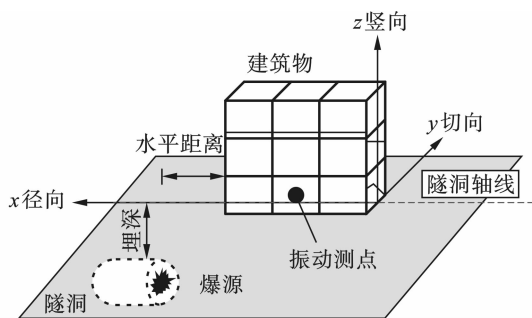


图 5 建筑物测点布置示意

Fig. 5 The measuring point of buildings

幅度频谱虽然能体现出信号频域特征,但幅值仍然是速度概念,没有很好的体现出爆破振动能量的分布特征,并且分布差异化并不显著。而功率谱密度(Power spectral density, PSD)则能准确描述各频率成分对爆破振动能量所做的贡献,并且由于功率谱密度定义为振动信号做 FFT 变换后的幅值的均方,体现了全频域的能量分布特征。以切向和铅垂向爆破振动速度为例,图 7 为不同距离测点振动信号的功率谱图。

比较图 7 可知,振动总能量及各频段能量分值均随距离增大明显的衰减,但各频段能量随距离

衰减的敏感程度不同。特别的,远区测点的个别频段能量数值存在接近甚至超过近区相同频段能量的情况存在,例如图 7(a)中 $HD=0$ m 时 45.45 Hz 功率谱密度为 $1.80 \times 10^{-5} (\text{cm/s})^2/\text{Hz}$, 低于 $HD=22$ m 时

45.35 Hz 功率谱密度 $1.89 \times 10^{-5} (\text{cm/s})^2/\text{Hz}$, 这表明随着距离的增大,高频部分的能量有向中低频转移的趋势,并存在“低通高滤”效应。

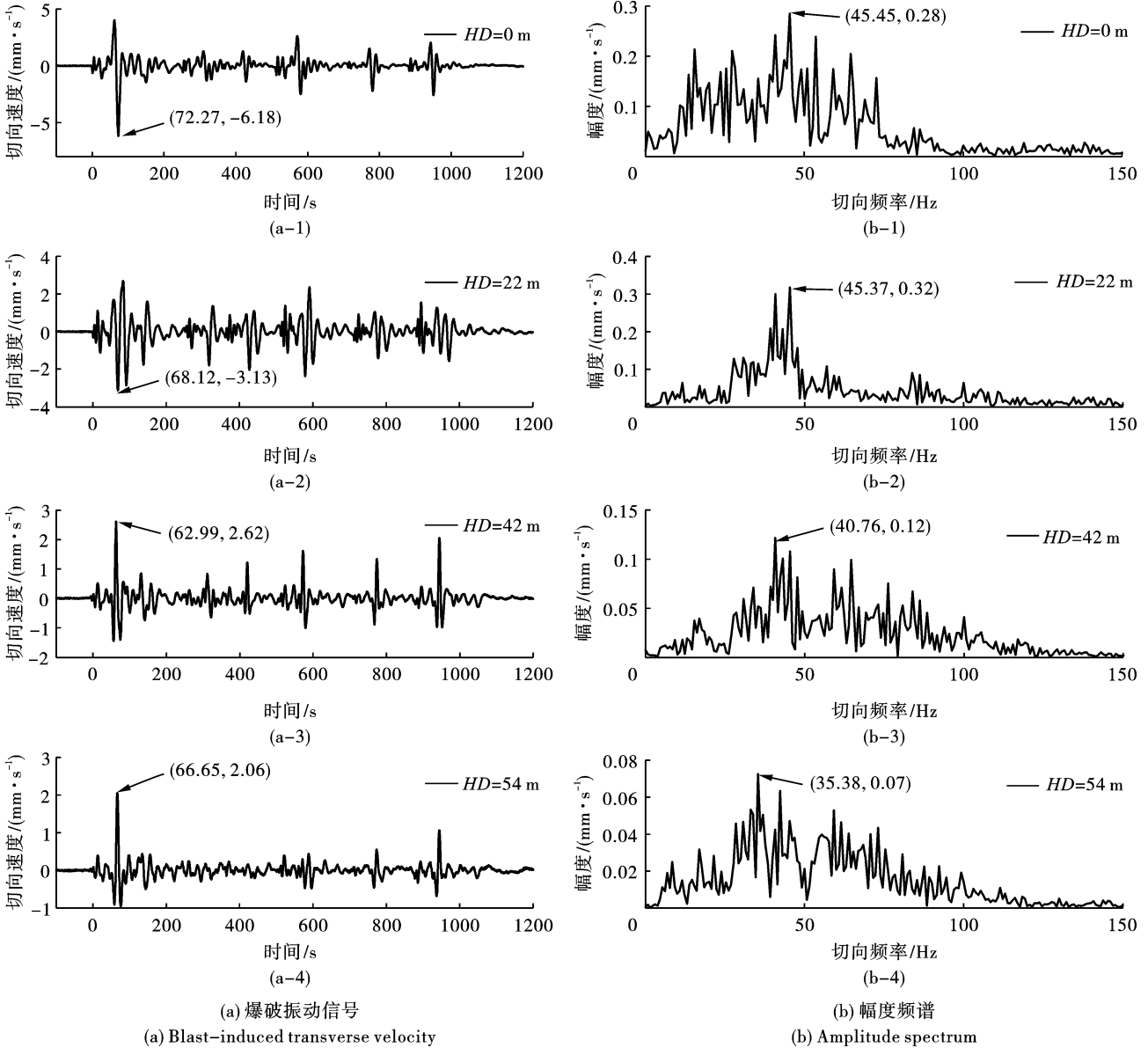


图 6 切向爆破振动速度及幅度频谱沿水平距离的变化

Fig. 6 The transverse velocity and its amplitude spectrum at different horizontal distances

为了进一步了解爆破振动功率谱衰减的细化特征,将频率按 < 20 Hz、 $[20$ Hz, 40 Hz)、 $[40$ Hz, 50 Hz)、 $[50$ Hz, 60 Hz)、 $[60$ Hz, 80 Hz)、 ≥ 80 Hz 细化为 6 个频段($[$ 表示 \geq 、 $)$ 表示 $<$), 获取 6 个频段内峰值功率谱密度 (peak PSD), 并绘制频段内峰值功率谱密度沿爆源距的衰减曲线, 以径向和切向为例, 具体如图 8 所示。

根据图 8, 不同频段峰值功率谱密度虽然均沿水平距离的增大呈现近区衰减快、远区衰减慢的特

征, 但影响程度差异化却十分明显, 总体而言, 本例中 < 40 Hz 及 > 50 Hz 部分呈现出快速衰减特征, 而 $[40$ Hz, 50 Hz) 频段则衰减相对平缓。即表明受到能量在频段内转移和“低通高滤”效应的影响, 个别频段能量存在衰减规律异常的情况。

虽然爆破振动能量随着距离的增加有显著的衰减, 对不同频率成分进行分析后可知, 特定频率段的能量存在衰减缓慢甚至升高的情况存在, 不排除存在分布在中远距离的建筑物的固有频率与特定频率

接近形成共振放大效应而产生破坏的极端情况。因此,在爆破振动监测及评价过程中,仅仅考虑爆破振

动对近区建筑的损伤而忽视对中远区域建筑物的影响是不足的。

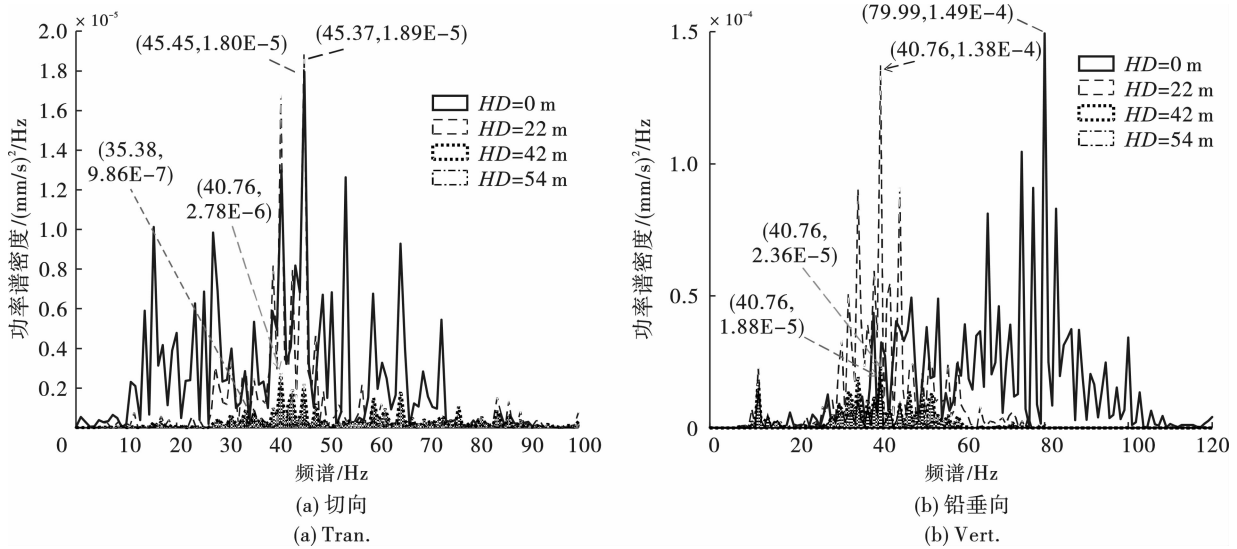


图 7 爆破振动速度功率谱
Fig. 7 PSD of blast-induced velocity

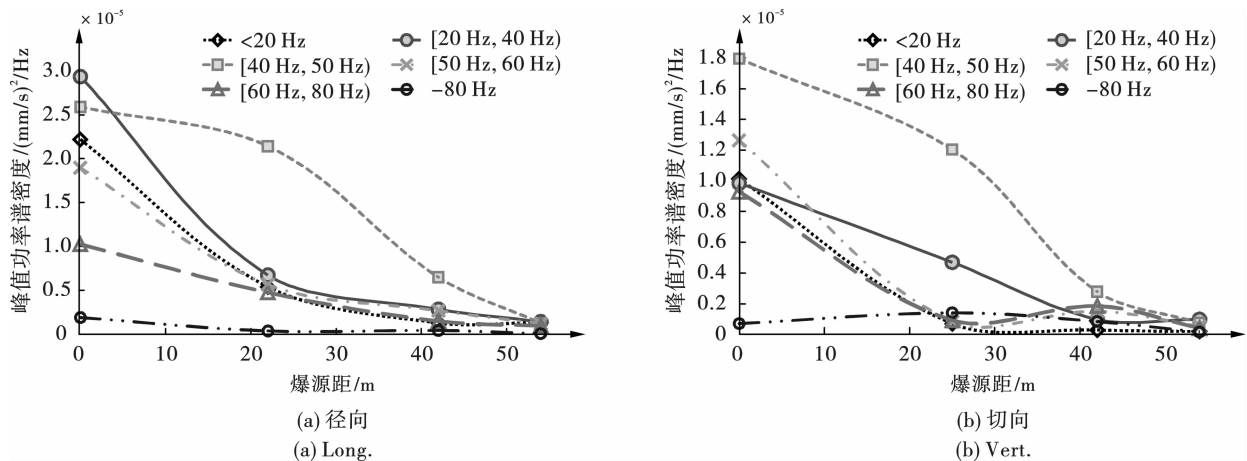


图 8 不同频段峰值功率谱密度沿距离的衰减曲线
Fig. 8 Peak PSD of different frequency bands at different horizontal distances

4 爆破振动影响评价方法

前文对建筑结构的爆破振动损伤机理及其特征的研究是开展爆破振动影响的基础,但人体感受与建筑物安全的巨大差异是爆破振动影响评价及处置所面临的重大难点^[21]。因此,在实际工程中只考虑爆破振动对建筑物的损害还不考虑其对人居环境的影响往往会带来较大的争议。本文通过对滇中引水工程沿线下穿、侧穿的超 3000 栋密集分布建(构)筑物长达 3 年的跟踪监测和调查,确定爆破振动速度对人居环境和建筑物安全的影响,如表 5 所示。

爆破振动影响具有“周期长、影响广、易感知、难辨识”的特点,由于施工周期往往长达数月,甚至数年,虽然爆破振动导致的裂缝形态较为特殊,但实际工程中,原有房屋往往由于自身及外部因素已受损,施工过程中,爆破振动、自然老化、地基沉降、开挖降水等因素叠加,导致了房屋受损加重,因此,从受损形态上判断致损因素是困难的。因此在爆破振动影响评价中应该遵循“事前预防、事中监控、事后决策”的原则,并对人居环境及建筑物安全区别评价。建议遵循的流程如图 9 所示。

表 5 爆破振动速度对人居环境及建筑物安全影响的调查结果

Table 5 The effect of blasting vibration velocity on human settlement environment and building safety

爆破振动速度量级/ (mm · s ⁻¹)	人居环境/ 人体感受	建筑物安全/ 房屋变化	投诉/ 上访事件
1	有感	无	无
5	轻微	基本无	个别
7	吓了一跳	门、窗等薄弱部位晃动,原有开裂抹灰层偶见掉落。	少量
12	中度	门、窗等薄弱部位响动明显,原有开裂抹灰层、破损玻璃等少量掉落。	小范围
20	严重	门、窗等薄弱部位响动强烈,个别瓦片掉落,简易建筑(如砖垒围墙、杂物间)原有开裂处偶见增宽增长,房屋主体结构未见新增裂缝。	较大范围
30	难以忍受	原有开裂抹灰层、瓷砖及松动瓦片少量掉落、简易建筑少量原有裂缝增宽增长,单次爆破房屋主体结构外观仍难见新增裂缝。	大范围

注:1)上述调查结果是基于有限的爆破次数和非破坏性的试验,不同工程案例不能完全套用;
 2)上述调查结果仅针对砖木、砖混结构以上的正常使用房屋,不针对土木结构及年久失修、长期无人居住或经鉴定为危房的房屋建筑;
 3)投诉与上访的产生除了与爆破振动速度量级有关外,还与下列因素密切相关:
 ①地方风气及基层自治组织(村委、小组等)对舆情的引导;②参建单位科学宣贯及对居民诉求的响应;③居住人员年龄结构;④房屋性质(自用、出租);⑤房屋用途(居住、办公、生产等);⑥房屋权属(公有、私有)。

备注

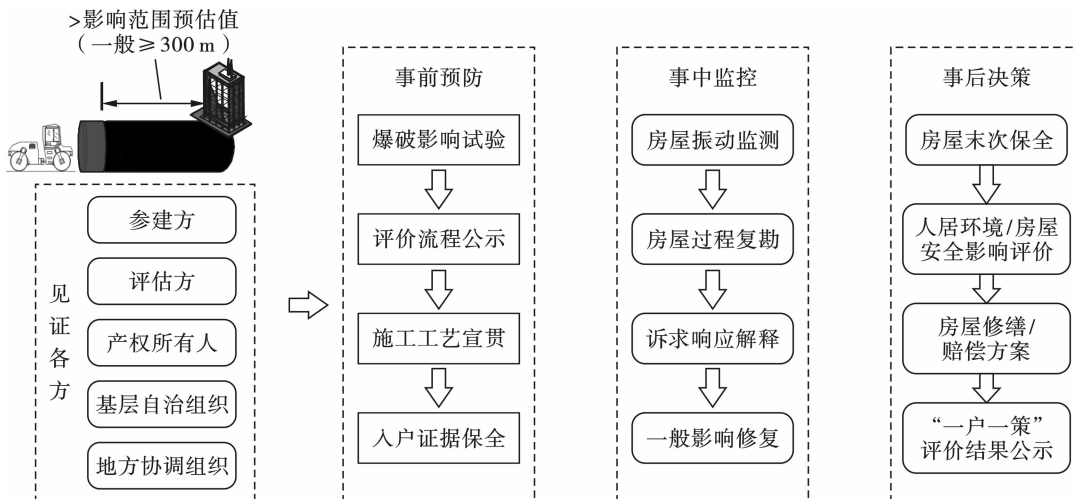


图 9 爆破振动影响评价一般流程

Fig. 9 The overall procedure for the effect assessment of blasting-induced vibrations

5 结论

基于滇中引水工程建设的建筑物爆破振动影响评价实践,采用数值模拟、现场调查、振动监测及其时频特征分析的方法,探究了建筑物爆破损伤机理,并对建筑物致损因素进行了有效的分类辨识,获得了爆破振动沿水平距离衰减的时频特征,最后提出了经工程应用检验行之有效的爆破振动影响评价方法,以期为建筑物的爆破损伤提供理论基础和应用借鉴,主要结论如下:

(1)基于裂缝形态的数值模拟反分析可知,爆破振动在建筑物窗户、门洞四角形成“X”形态裂缝,

同时楼板与墙体连接处也易见开裂的部位,单侧软弱不均匀沉降则会导致沿建筑物窗户、门洞的对角45°斜裂缝。

(2)建筑物基础部位在爆破荷载作用下的受迫振动占主导作用,爆破荷载结束作用后自由振动迅速衰减;随着水平距离的增加,FFT主频和爆破振动能量均有下降趋势,但又呈现出不同的细化特征,主频对距离变化不如能量敏感,各频段能量对距离的敏感程度不同,总体上呈现出“近快远慢”的衰减趋势。

(3)随距离增大,高频部分的爆破能量向中低频转移,存在“低通高滤”效应,从而可能导致特定

频段内的能量出现增大的现象存在,在这表明爆破振动对中远距离建筑物的影响是不容忽视的。

(4)人体对爆破振动的感受与建筑物安全标准存在显著的差异,科学合理的爆破影响评价应基于细致的事前、事中和事后工作,并对结构损伤和人居环境的影响加以区分、综合评价。

本文的研究成果主要从依托工程的实践中获得,但笔者深知,不同工程爆破影响评价所采用的施工参数、建筑物的类型与分布、受影响的人群心理和诉求不完全一致,因此本文成果的适用性仍有待更多工程进行检验。

参考文献 (References)

- [1] ROSENHAIM V L, KOPPE J C. Comparing the response of masonry built residences to blast-induced ground vibrations[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2017, 31(5): 04017085.
- [2] HE R, JIANG N, LI D W, et al. Dynamic response characteristic of building structure under blasting vibration of underneath tunnel[J]. *Shock and Vibration*, 2022(1): 9980665.
- [3] REN Y, XI S, YANG Y, et al. Structural vibration characteristics of the historical building in a nearby blasting test[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2024, 11: 1304354.
- [4] HUO R, LI S, SONG Z, et al. Analysis of vibration response law of multistory building under tunnel blasting loads[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019(1): 4203137.
- [5] WANG L, GAO W, SUN B. Study of dynamic response of high-rise buildings under blasting earthquake considering model simplifying[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2020, 27(24): 2068-2089.
- [6] 廖德华, 张建球, 扈世龙, 等. 航道疏浚临河高层建筑爆破振动高程效应分析[J]. *爆破*, 2023, 40(3): 170-176.
- [6] LIAO De-hua, ZHANG Jian-qiu, HU Shi-long, et al. Analysis of elevation effect of blasting vibration on high-rise buildings bear river in channel dredging[J]. *Blasting*, 2023, 40(3): 170-176. (in Chinese)
- [7] 孙中博, 赵毅鑫, 王海亮, 等. 临近地铁车站爆破振动效应对高层建筑的影响[J]. *矿业科学学报*, 2023, 8(1): 83-92.
- [7] SUN Zhong-bo, ZHAO Yi-xin, WANG Hai-liang, et al. Research on the influence of blasting vibration on high-rise building near subway station[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 8(1): 83-92. (in Chinese)
- [8] DOWDING C H, AIMONE-MARTIN C T, MEINS B M, et al. Large structure response to high frequency excitation from rock blasting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 111: 54-63.
- [9] KULARIYA M, SAHA S K. Performance evaluation of hillside buildings under blast and blast-induced ground motion[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2022, 36(5): 04022043.
- [10] CHEN F, HE G, DONG S, et al. Space-time effect prediction of blasting vibration based on intelligent automatic blasting vibration monitoring system[J]. *Applied Sciences*, 2021, 12(1): 12.
- [11] WU Y, MU C, ZONG Q, et al. Study on blasting vibration control of brick-concrete structure under subway tunnel[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(21): 10960.
- [12] XU R, ZHANG J, WU B, et al. Vibration reduction and explosion control investigation for an ultra-shallow buried tunnel under crossing buildings based on HHT Analysis[J]. *Sensors*, 2023, 23(17): 7589.
- [13] YAN P, ZOU Y, ZHOU J, et al. Assessment of seismic impact on residences during blasting excavation of a large-scale rock slope in China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75: 1-15.
- [14] OZCELIK M. Back analysis of ground vibrations which cause cracks in buildings in residential areas Karakuyu (Dinar, Afyonkarahisar, Turkey)[J]. *Natural Hazards*, 2018, 92(1): 497-509.
- [15] 邓涛, 金一平, 吴培贵, 等. 某高速公路隧道的爆破振动对邻近民房开裂的影响分析[J]. *现代隧道技术*, 2018, 55(3): 69-75.
- [15] DENG Tao, JIN Yi-ping, WU Pei-gui, et al. Highway tunnel blasting vibrations and cracking of adjacent residential houses[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2018, 55(3): 69-75. (in Chinese)
- [16] HEATH D J, GAD E F, WILSON J L. Blast vibration and environmental loads acting on residential structures: State-of-the-art review[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016, 30(2): 04015021.
- [17] YAO Q, YANG X, LI H. Development of absorbed blasting vibration energy index for the evaluation of human comfort in multistorey buildings[J]. *Shock and Vibration*, 2017, 2017(1): 9567657.
- [18] YAO Q, YANG X, LI H. Survey on the influencing factors of human comfort in a long-period frequent blast vibration environment[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2017, 19(7): 5498-5519.
- [19] 刘德平. 建筑物常见裂缝原因分析及防治措施[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [19] LIU De-ping. Analysis and prevention measures of conventional cracks for buildings[D]. Shanghai: Tongji U-

- niversity, 2007. (in Chinese)
- [20] 饶宇, 夏元友, 胡英国, 等. 预裂缝对爆破振动频谱分布特征的影响[J]. 振动与冲击, 2017, 36(7): 191-198.
- [20] RAO Yu, XIA Yuan-you, HU Ying-guo, et al. Influence of pre-splitting crack on spectrum distribution characteristics of blasting vibration[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(7): 191-198. (in Chinese)
- [21] CHEN S, ZHANG Z, WU J. Human comfort evaluation criteria for blast planning[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74: 2919-2923.

(上接第 155 页)

- [6] 史秀志, 薛剑光, 陈寿如, 等. 爆破振动信号双线性变换的二次型时频分析[J]. 振动与冲击, 2008, 27(12): 131-134.
- [6] SHI Xiu-zhi, XUE Jian-guang, CHEN Shou-ru, et al. Quadratic time-frequency distribution analysis of blasting vibration signal based on bilinear transformation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(12): 131-134. (in Chinese)
- [7] 杨仁树, 高祥涛, 车玉龙, 等. 基于 HHT 方法的爆炸应变波时频分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(10): 17-21.
- [7] YANG Ren-shu, GAO Xiang-tao, CHE Yu-long. Joint time-frequency analysis of blast strain wave based on Hilbert-Huang transformation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(10): 17-21. (in Chinese)
- [8] 杨仁树, 付晓强, 杨国梁, 等. EMD 和 FSWT 组合方法在爆破振动信号分析中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(2): 58-64.
- [8] YANG Ren-shu, FU Xiao-qiang, LIANG Guo-liang. Application of EMD and FSWT combination method in blasting vibration signal analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(2): 58-64. (in Chinese)
- [9] 李夕兵, 张义平, 刘志祥, 等. 爆破震动信号的小波分析与 HHT 变换[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(6): 528-535.
- [9] LI Xi-bing, ZHANG Yi-ping, LIU Zhi-xiang, et al. Wavelet analysis and Hilbert-Huang transform of blasting vibration signal[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(6): 528-535. (in Chinese)
- [10] 关晓磊, 颜景龙. 爆破振动信号的 HHT 时频能量谱分析[J]. 振动与冲击, 2012, 32(5): 535-541.
- [10] GUAN Xiao-lei, YAN Jin-long. The HHT time-frequency power spectrum analysis of the blasting vibration signal[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(5): 535-541. (in Chinese)
- [11] 赵建平, 林杭. 基于时频能分析技术的爆炸波能量分布及分离[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1): 3278-3285.
- [11] ZHAO Jian-ping, LIN Hang. Energy distribution and separation of blast wave based on time-frequency energy analysis technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 3278-3285. (in Chinese)
- [12] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, 1998, 454(3): 903-995.
- [13] YE H J R, SHIEH J S. Complementary ensemble empirical mode decomposition: A noise enhanced data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2010, 2(2): 135-156.
- [14] 郑近德, 程军圣, 杨宇. 改进的 EEMD 算法及其应用研究[J]. 爆炸与冲击, 2013, 32(21): 21-26.
- [14] ZHENG Jin-de, CHENG Jun-sheng, YANG Yu. Modified EEMD algorithm and its applications[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 32(21): 21-26. (in Chinese)
- [15] CHEN S J, SHANG P J, WU Y. Multivariate multiscale fractional order weighted permutation entropy of nonlinear time series[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2019, 515: 217-231.
- [16] 李军, 李青. 基于 CEEMDAN-排列熵和泄漏积分 ESN 的中期电力负荷预测研究[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(8): 71-79.
- [16] LI Jun, LI Qing. Medium term electricity load forecasting based on CEEMDAN-permutation entropy and ESN with leaky integrator neurons[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(8): 71-79. (in Chinese)
- [17] WU J, WU L, SUN M, et al. Analysis and research on blasting network delay of deep-buried diversion tunnel crossing fault zone based on EP-CEEMDAN-INHT[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40: 1363-1372.
- [18] 冯云智, 唐彬峰, 赵宁. 改进多尺度排列熵及模糊算法的 JTC 状态检测[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(12): 3337-3346.
- [18] FENG Yun-zhi, TANG Bin-feng, ZHAO Ning. JTC state detection based on improved multi-scale permutation entropy and fuzzy algorithm[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(12): 3337-3346. (in Chinese)