

土-岩地层水平孔爆破诱发振动传播特征及预测

蒙贤忠^{1,2,3}, 夏宇磬^{1,2}, 周传波³, 冯庆高³, 蒋楠^{1,2}, 杨玉民³

(1. 江汉大学 省部共建精细爆破国家重点实验室, 湖北 武汉 430056; 2. 江汉大学 爆破工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430056;

3. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 明确土-岩地层爆破振动特征是控制爆破振动效应影响的重要前提。基于典型城区土-岩地层地下爆破工程, 设计并开展土-岩地层水平孔爆破模型试验, 结合有限元数值方法, 分析爆源因素与场地条件对土-岩地层爆破振动传播规律的影响, 最后基于量纲分析建立土-岩地层爆破振动预测模型。结果表明: 土-岩界面具有高频滤波特性, 自由面存在振动放大特性; R波在远离震中方向发育, 导致自由面振速衰减存在分段特征; 增大爆源埋深将抑制不连续面振速衰减, 削弱土-岩界面能量耗散及场地放大效应; 增大岩土体波阻抗比将减缓土-岩界面振速衰减, 加快界面能量耗散与自由面振速衰减的同时, 场地放大效应得到增强; 土层厚度不影响土-岩界面振动特征, 但会促进自由面振速衰减, 场地放大效应被抑制; 在小倾角前提下, 土-岩界面角度几乎不影响场地振动; 构建的爆破振动预测模型考虑了土-岩地层场地特性, 为土-岩地层爆破振动控制提供理论依据。

关键词: 数值模拟; 土-岩地层; 水平孔爆破; 爆破振动; 模型试验; 振动预测

中图分类号: O 242

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2025)03-0737-15

The propagation characteristics and prediction of vibration induced by horizontal-hole blasting in soil-rock strata

MENG Xianzhong^{1,2,3}, XIA Yuqing^{1,2}, ZHOU Chuanbo³, FENG Qinggao³, JIANG Nan^{1,2}, YANG Yumin³

(1. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jiangnan University, Wuhan, Hubei 430056, China; 2. Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering, Jiangnan University, Wuhan, Hubei 430056, China; 3. Faculty of Engineering, China University of Geoscience(Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Clarifying the blasting vibration characteristics in soil-rock strata is a critical prerequisite for controlling the effects of blast-induced vibrations. Based on an underground blasting project in a typical urban soil-rock stratum, a model test of horizontal-hole blasting in soil-rock strata was designed and conducted. Combined with finite element numerical methods, the influence of the blasting source and site conditions on the propagation laws of blast-induced vibrations in soil-rock strata was analyzed. Finally, a predictive model for blasting vibration in soil-rock strata was established based on dimensional analysis. The results show that the soil-rock interface exhibits high-frequency filtering characteristics, while the free surface shows a vibration amplification effect. The R-wave develops in the direction away from the epicenter, resulting in a segmented attenuation characteristic of the vibration velocity at the free surface. Increasing the burial depth of the blasting source suppresses the attenuation of vibration velocity

收稿日期: 2024-08-19; **修回日期:** 2024-11-04

基金项目: 爆破工程湖北省重点实验室开放基金资助项目(BL2021-12); 湖北省教育厅科学技术研究项目(F2023032); 国家自然科学基金资助项目(41972286) Supported by the Foundation of Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering(Grant No. BL2021-12), Scientific Research Project of the Hubei Provincial Department of Education(Grant No. F2023032) and National Natural Science Foundation of China(Grant No. 41972286)

作者简介: 蒙贤忠(1997-), 男, 2019年毕业于中国地质大学(武汉)工程学院, 现为博士研究生, 主要从事地下工程及爆破动力学等方面的研究工作。E-mail: mxianzhong97@cug.edu.cn。通讯作者: 夏宇磬(1994-), 男, 博士, 现任讲师。E-mail: ricardo@cug.edu.cn

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2024.0631

across discontinuities, weakening energy dissipation at the soil-rock interface and site amplification effects. Increasing the wave impedance ratio of the rock and soil slows down the attenuation of vibration velocity at the soil-rock interface, while accelerating energy dissipation at the interface and vibration velocity attenuation at the free surface, thus enhancing site amplification effects. Increasing the soil thickness does not affect the vibration characteristics at the soil-rock interface but promotes vibration velocity attenuation at the free surface, suppressing site amplification effects. Under small-angle assumptions, the dip angle of the soil-rock interface almost does not affect site vibration. The constructed blasting vibration prediction model considers the site characteristics of soil-rock strata, providing a theoretical basis for blasting vibration control in such conditions.

Key words: numerical simulation; soil-rock strata; horizontal-hole blasting; blasting vibration; model test; vibration prediction

1 引言

城市地下空间工程的开发利用,如城区地铁隧道建设、深基坑工程多在城市地下土-岩地层中进行,该地层结构具体表现为下部为基岩,上部为第四系残积土的层状分布特征。以武汉市城区典型地层结构为例,第四系覆盖层通常呈现出上部黏土、砂土,下伏碳酸盐岩的复合层状结构^[1]。爆破作为破岩的主要手段常应用于地下空间工程的开发利用中,但由爆破施工带来的爆破振动等有害效应也会影响地表建(构)筑物的稳定及生产活动的正常进行^[2]。因此,明确土-岩地层爆破振动传播规律,对于保证周边环境的安全稳定具有重要意义。

目前,针对场地爆破振动问题学者们进行了一些研究。D. P. Blair^[3]基于射线理论提出了垂直孔爆破岩体场地地表振动场计算方法,分析了自由面影响下应力波传播规律。J. C. Li 等^[4]提出时域递归法用于求解地下隧道爆破引起的地震动。高启栋等^[5-7]采用波场分离方法分析了垂直孔、水平孔爆破诱发地表应力波的组分。在上述研究中,忽略了土体对爆破振动的影响,但相关研究表明土体厚度、力学性质等会影响地震动分布^[8]。张茂晨等^[9]构建了柱面SH波入射土-岩地层动力刚度矩阵,发现土层厚度增大会使土层放大效应减弱。李伟华等^[10]采用波动理论研究了体波入射不饱和土-岩地层地震动问题,分析了地下水位、频率等因素的影响。考虑理论解析的局限性,学者们进行了一系列现场测试与数值模拟研究。B. Jayasinghe 等^[11]获取了土-岩混合场地爆破振动数据,发现应力波入射土-岩界面后幅值将降低 37.2%。Y. G. Gou 等^[12-13]通过监测不同深度下的地下采矿爆破引起的地表振动,发现土体对地震动的放大效应具有偶然性。张继春等^[14]通

过现场测试分析了隧道爆破引起的地表振动效应。C. Yu 等^[15]采用混凝土砌块开展结构面爆破振动模型试验,分析了结构面倾角对地表振动衰减的影响。X. Tong 等^[16]通过振动台试验分析了土-岩边坡振动放大效应。Y. L. Gui 等^[17]采用有限差分法研究了土-岩地层爆破振动传播规律。L. He 等^[18]应用 LS-DYNA 分析了隧道爆破引起的地表边坡振动传播特征。

爆破振动预测是爆破安全控制的重要手段,在我国以萨道夫斯基公式应用最广^[19]。由于爆破振动与场地条件相关联,目前大多采用半理论半经验公式进行预测^[20-21]。此外,刘小鸣等^[22-23]提出了基于子波理论与叠加理论的全波形预测方法,但只适用于场地条件单一的情况。在计算机技术高速发展背景下,人工智能成为常用的预测方法之一,如苏国韶等^[24]基于高斯过程原理构建了大坝爆破振动预测模型,刘亚群等^[25]则基于遗传神经网络原理构建了智能预测模型。

前人对土-岩地层爆破振动传播规律研究主要采用现场测试与数值模拟方法进行,但大多针对垂直孔爆破,对于常见的地下水平孔爆破工况鲜有涉及,而在理论与模型试验研究方面通常对场地与爆源条件进行过多简化,与实际情况不符。此外,关于土-岩地层爆破振动预测模型并未见报道。因此,本文基于土-岩地层水平孔爆破工程开展模型试验与数值模拟研究,明确场地与爆源因素影响下场地振动特征,构建适用于土-岩地层的爆破振动预测模型,为控制爆破场地周边安全提供方法与理论支撑。

2 土-岩地层水平孔爆破模型试验

2.1 模型试验设计

为了研究地下岩石水平孔爆破引起的土-岩地

层振动问题，明确爆破应力波的传播特征，本文以武汉市地层为例，开展土 - 岩地层爆破振动效应模型试验。基于一般地下爆破工程特点，进行了简化与假设：(1) 岩土体为均质、连续、各向同性材料，忽略内部不连续面的影响；(2) 地下爆源以单孔爆破进行模拟，不考虑多段多孔爆破情况。

2.1.1 模型设计与相似材料

基于上述假设，以武汉市地层结构为研究对象，控制几何相似比 $C_L = 10$ ，密度相似比 $C_\rho = 1$ ，加速度 C_a 相似比为 1，设计上土下岩双层地质结构缩尺模型如图 1 所示。图 1 中缩尺模型长 2 m，宽 1.2 m，高 1 m，土层厚度为 0.5~0.6 m，岩层厚度为 0.4~0.5 cm，以模型左右中轴为界，设置一上倾 5.7° 的斜坡面，同时在距离模型底部边界 0.2 m 处设置 8 个平行炮孔，炮孔间距为 0.2 m，中部炮孔间距为 0.4 m。炮孔中部预留装药位置，具体长度由炸药尺寸决定。

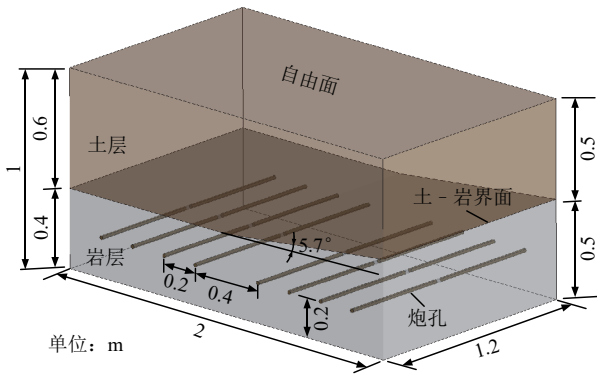


图 1 缩尺模型
Fig.1 Scale model

控制 C_L ， C_ρ ， C_a 不变，得到强度相似比 $C_s = 10$ ，时间相似比 $C_T = \sqrt{10}$ ，通过正交设计、室内试验、统计分析等手段开展相似材料配比试验，最终确定相似岩体材料组分为：重晶石粉、石英砂、铁粉、石膏粉、黏土、水，相应的质量配比为 0.29 : 0.31 : 0.14 : 0.09 : 0.04 : 0.13；确定相似土体材料

组分为：铁粉(Fe_3O_4)、细砂、黏土、水，相应的质量配比为 0.12 : 0.73 : 0.15 : 0.12。依据室内测试结果，相似岩土体主要材料参数均得以控制，具体物理力学参数如表 1 所示。

2.1.2 试验爆源特征

实际工程一般采用 2# 岩石乳化炸药进行爆破施工，由于工业炸药的管制特性无法正常获取，因此在本模型试验中采用高氯酸钾类混合炸药替代工业炸药，用于模拟地下爆源。

为了明确试验爆源的荷载特征，进行模拟爆源爆破压力测试试验。受压力传感器限制，爆破压力难以直接测量，因此试验通过以下步骤进行：首先将炸药放置于铜管中部，拉出引线，随后在铜管中部外侧设置 2 个应变片(1#，2#)用于监测环向应变，然后在铜管两端用黏土封堵，确保爆生气体不溢出，最后使用砝码压住铜管两端限制位移。试验设备及测点布置如图 2 所示。

试验中应变信号通过高频信号动态采集仪进行采集，采集频率为 10 kHz。在试验中使用的铜管尺寸为 1.5 cm × 50 cm(内径×长度)，壁厚 1.5 mm，炸药尺寸为 1.3 cm × 4 cm(直径×长度)，质量 1.5 g，由于两者直径相近，可认为本试验为耦合装药爆破。通过点火起爆，得到应变测试结果如图 3 所示。从图中可以看到，应变片 1#，2# 监测波形基本一致，存在明显的爆破升压段与降压段，爆压作用总持续时间约为 57 ms，爆压上升时间约为 4 ms，引起铜管环向微应变峰值为 451~452 $\mu\epsilon$ 。

为确定爆破压力时程曲线，忽略铜管轴向变形，铜管环向应变与内侧压力存在以下关系^[26]：

$$\varepsilon_\theta(t) R \rho h \omega = \int_0^t p(\tau) \sin \omega(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

式中： ε_θ 为环向应变； ρ 为密度； h 为壁厚； $p(\tau)$ 为作用在铜管内壁的正压力； t 为时间； ω 为常数， $\omega = \sqrt{E/\rho}/R$ ， E 为弹性模量， R 为铜管内径。

表 1 岩土体物理力学参数

Table 1 Physico-mechanics parameters of rock mass and soil mass

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	压缩模量/MPa
实际岩体	2 300~2 700	3 000~20 000	0.20~0.25	20~45	2 500~18 800	15~67	1~3	-
相似岩体	2550	309.46	0.21	40.16	490	1.85	0.11	-
实际土体	1 800~2 000	-	0.3~0.4	18~25	30~130	-	-	11~30
相似土体	1 980	-	0.30	23.00	4.41	-	-	2.28

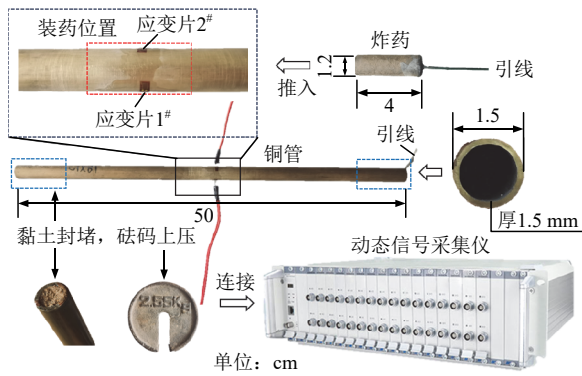


图2 试验设备及测点布置

Fig.2 Test equipment and measuring point arrangement

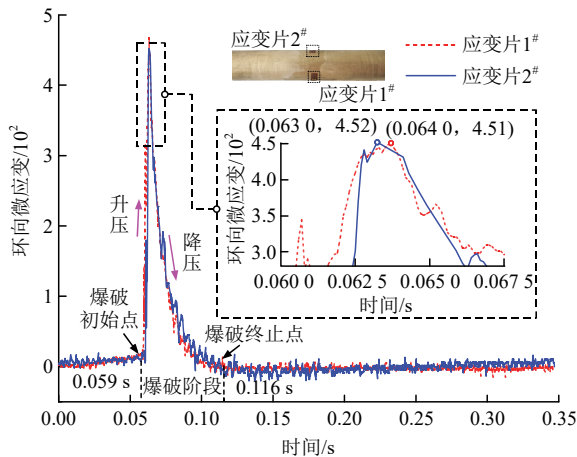


图3 应变测试结果

Fig.3 Strain test results

将式(1)转化为离散求和形式,可得到爆破压力时程曲线 $p(t)$, 其中单位时间 Δt 设定为 0.1 ms 。根据进一步参数测定, $\rho = 8960 \text{ kg/m}^3$, $h = 1.5 \text{ mm}$, $E = 110 \text{ GPa}$, $R = 6 \text{ cm}$ 。以应变片 1#测试数据为对象,结合式(1),经计算得到铜管内侧爆破压力时程曲线如图 4 所示。依图可知,模拟爆源产生的爆破压力峰值为 1.124 MPa ,对比图中 S. H. Cho 等^[27]得到的爆破压力曲线发现,在爆破压力变化历程上,模拟爆源与实际炸药表现基本一致,但在上升时间、总持续时间以及爆破压力峰值方面存在较大的差异。总的来看,模拟爆源能够反映爆破压力的时程

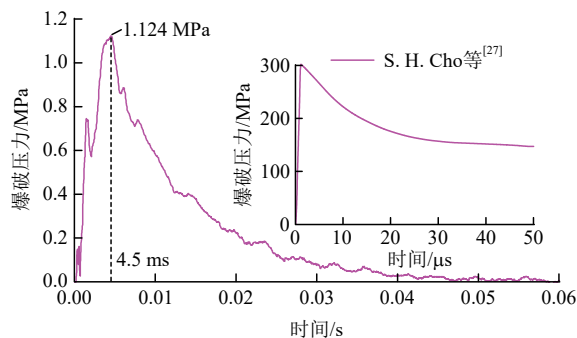


图4 爆破压力时程曲线

Fig.4 Blasting pressure time history curve

变化,但由于爆速小,释放能量低,导致加载率较小,但仍然属于冲击荷载范畴,可将模拟爆源视作低速、低当量炸药用于规律性研究,进行定性讨论。

2.1.3 测试方案

本模型试验目的为研究土-岩地层爆破振动效应,基于此以爆破应力波为监测对象开展全路径爆破振动监测。依图 1 可知,爆破应力波从爆源中心发出向上传播,穿越土-岩界面后进入土体,最后抵达自由面处,由于爆破应力波在不连续面处会发生偏振,引起质点振动在空间分布的离散性,而不连续面的影响特征仍不明确。因此,土-岩界面与自由面将是重点监测对象。模型试验监测方案如图 5 所示。从图中可以看到,模型中共设置 12 个测点,为了减少应力波几何扩散效应引起的振幅衰减,土-岩界面、自由面测点均设置于距离界面 2 cm 处,在该距离下涵盖了各类波型的作用范围^[28]。试验采用加速度传感器获取测点振动信号,加速度传感器为单向压电式传感器,在模型浇筑过程中埋置于指定位置,用于监测竖向振动。

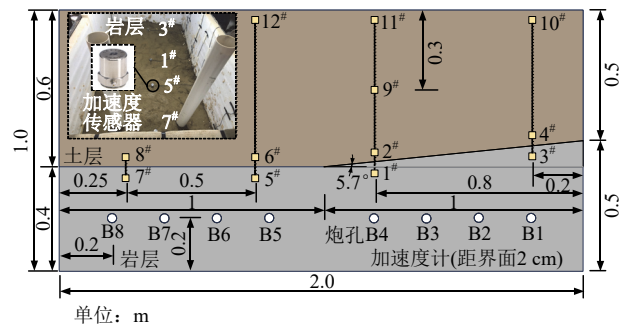


图5 监测方案

Fig.5 Monitoring scheme

模型在浇筑过程中采用直径为 1.5 cm 的 PVC 管预设炮孔位置,待炮孔成型后取出。模型浇筑完成后进入养护阶段,待模拟岩层与土层达到指定强度后进行试验。试验监测系统由图 2 所示信号采集仪、传感器与计算机构成,试验步骤为:(1) 连接仪器,测试监测系统;(2) 装药,将模拟爆源推至炮孔中部,拉出引线后填充炮泥堵塞;(3) 点火起爆,按照 B1~B8 顺序依次起爆;(4) 监测,每次爆破单独监测。模型试验布置如图 6 所示,图中模型箱四周及底部设置 5 cm 厚吸能板以减少振动反射,其中吸能板主要材料为发泡棉,通过在模型箱上设置应变测点,在模型箱附近地表设置振速测点以确保吸能效果,结果显示模型箱应变及附近振速均处于较低水平,表明发泡棉具有较好的吸能效果。此外, PVC

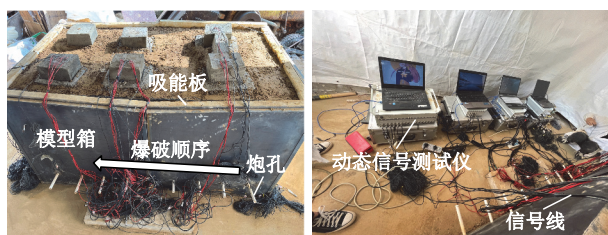


图6 模型试验布置

Fig.6 Model test arrangement

管在试验时拔出,预留炮孔装药。由于模型中包含的结构体不是本文的研究对象,因此不再赘述。

2.2 模型试验结果分析

2.2.1 爆破应力波特征

根据 Heelan 研究可知,柱状药包装药爆破会激发 P 波与 S 波,统称为体波^[29]。因土-岩界面两侧介质物理力学性质不同,当体波入射后会发生偏振,产生透射 P 波与 S 波、反射 P 波与 S 波。这些上行波入射到自由面后发生反射,产生下行 P 波与 S 波,遇到土-岩界面后再次发生透反射,如图 7 所示。受自由面与土-岩界面影响,爆破应力波将进行多次透反射。此外,在自由面影响下,爆破应力波相互干涉形成 R 波(Rayleigh 波)。根据惠更斯原理,土-岩界面处形成新的 P, S 波源,由此引起的 R 波一般出现在距离震中 $c_R h / \sqrt{c_P^2 - c_R^2}$ (P 波源)或 $c_R h / \sqrt{c_S^2 - c_R^2}$ (S 波源)位置,其中 c_P , c_S , c_R 分别为 P 波、S 波、R 波波速,可通过下式计算^[5]:

$$c_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, c_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, c_R \approx \frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} c_S \quad (2)$$

式中: λ 为拉梅常数, μ 为剪切模量, ρ 为密度, ν 为泊松比。

从爆破应力波传播过程来看,依图 7 所示,考虑自由面一次反射情况下,在自由面上一点将接收到透射 P 波、S 波(直达波: P_1P_2 , P_1S_2 , S_1P_2 , S_1S_2 ,

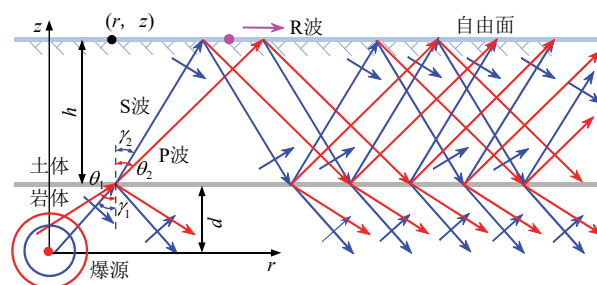


图7 爆破应力波传播路径

Fig.7 Blasting stress wave propagation path

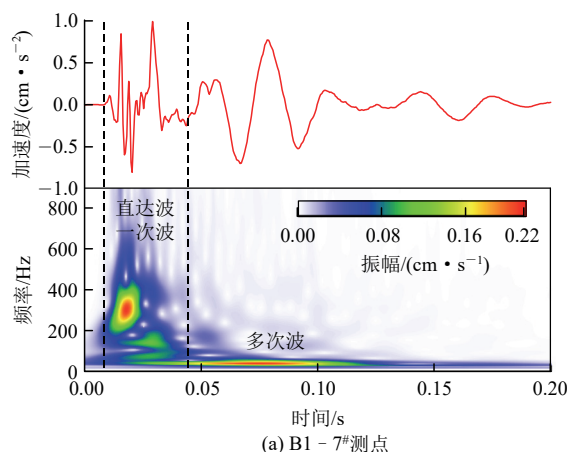
其中 1, 2 分别表示岩层与土层)以及 R 波;在土-岩界面下方,质点将接收到直达 P 波与 S 波、反射 P 波与 S 波(直达波: P_1 , S_1 , 一次波: P_1P_1 , P_1S_1 , S_1P_1 , S_1S_1);在土-岩界面上方,质点将接收到透射 P 波与 S 波(直达波: P_1P_2 , P_1S_2 , S_1P_2 , S_1S_2)。

选取部分测点测试波形进行时频分析,明确界面附近爆破应力波时频特征。S 变换常用于瞬态波的时频分析,该变换基本原理^[30]为

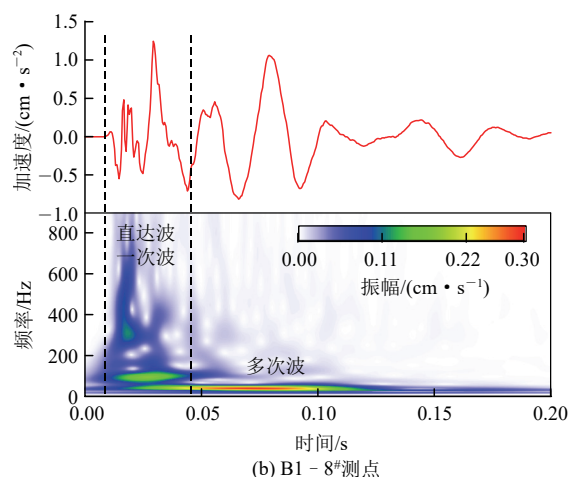
$$S_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) |f| e^{-\pi(t-\tau)^2 f^2} e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (3)$$

式中: S_x 为 S 变换谱, f 为频率, τ 为变换符, $x(\tau)$ 为输入波形。

依照前述式(2)得到的不同应力波波速关系及产生条件,结合时频图与波形图判定应力波成分如图 8 所示。参照图 5 所示测点布置,可知 7#, 8#测点分别位于岩层与土层中,由于在 B1 爆破工况下 7#, 8#测点爆心距较大,导致多次波的作用相对显著,加速度出现明显增大。对比两测点时频图可知,在岩土界面附近质点振动频率存在 2 个集中带,其中高频部分由直达波与一次波贡献,为 200~400 Hz,而低频部分由多次波贡献,为 0~100 Hz。当应力波穿过岩-土界面后,高频部分被压制,在图 8(b)中有所体现。



(a) B1-7#测点



(b) B1-8#测点

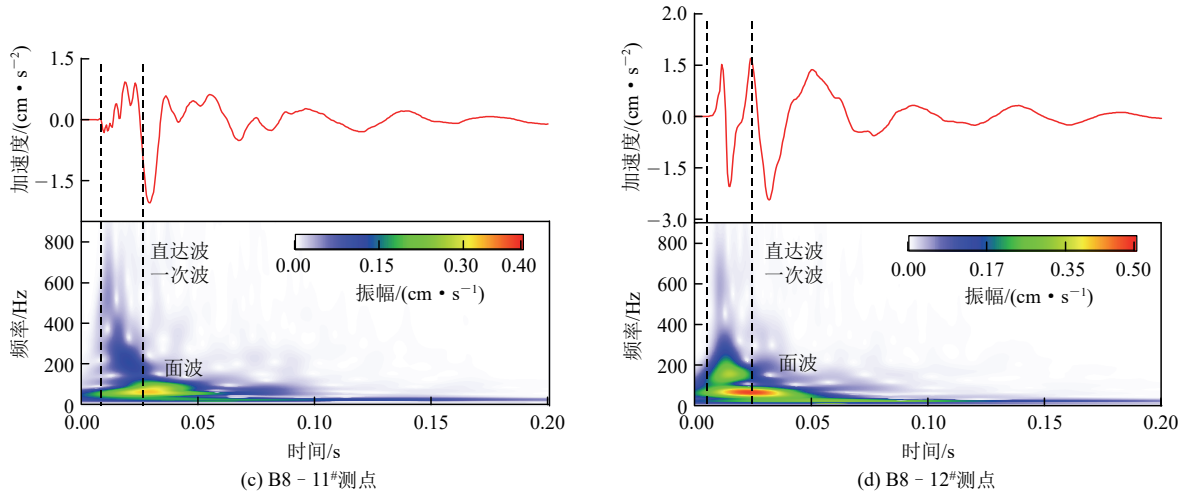


图8 典型加速度波形与时频分析

Fig.8 Typical acceleration waveform and time-frequency analysis

根据前述分析,通过计算得到本模型试验工况下 R 波出现于距离震中约 0.34 m 位置,而在 B8 爆破工况下 11#, 12#测点均处于该位置之外,因此在以上两测点位置均能接受到 R 波,如图 8(b), (c)所示。对比两测点时频图可知,距离震中越远,体波能量越低,面波能量凸显,原因在于体波衰减要快于面波,在爆心距较大位置面波将占据主导。

综合来看,爆破应力波穿过岩土界面过程存在高频滤波效应,在抵达自由面后激发 R 波,其在远离震中位置发育充分。

2.2.2 爆破振动传播规律

爆破振动通常采用质点峰值振速(PPV , peak particle velocity)进行描述,因此需要对加速度测试结果进行一次离散积分获取振速波形,在此基础上采用萨道夫斯基公式拟合爆破振动传播规律^[18]:

$$PPV = k \left(\frac{r}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-\alpha} = k \cdot SD^{-\alpha} \quad (4)$$

式中: k 为场地条件相关系数; α 为衰减指数; Q 为单段最大药量,在本试验中即为模拟爆源药量; SD 为比例距离, $SD = r / \sqrt[3]{Q}$; r 为爆心距。

岩土层爆破振动传播规律如图 9 所示。图中岩土层 PPV 均符合指数衰减规律,但岩层 PPV 相比较土层衰减更为迅速,且具有更高的拟合度,即 PPV 分布更为集中,结合节 2.2.1 分析可知,造成这种现象的根本原因在于土层质点振动受到土-岩界面、自由面影响,由体波与 R 波共同贡献,而岩层中仅由体波贡献,由于体波与 R 波具有不同的产生、衰减传播模式^[31],导致土层中振速在体波与 R 波耦合作用下呈现离散分布,同时也使得土层振速衰减模式介于体波与 R 波之间,产生比岩层振速衰减更慢的现象。

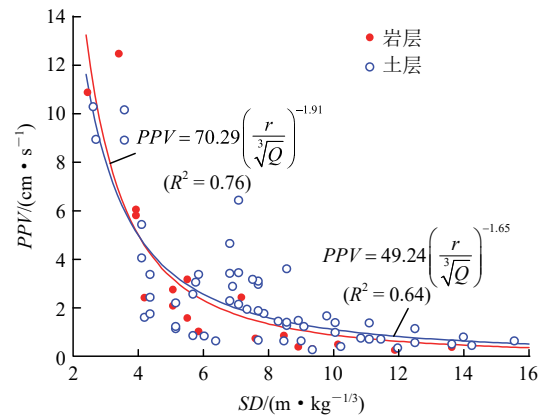
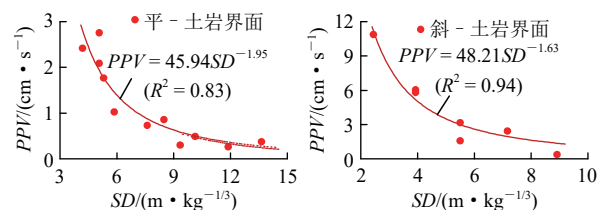


图9 岩土层爆破振动传播规律

Fig.9 Propagation laws of blasting vibration in rock and soil layers

为了进一步明确界面处的爆破振动传播规律,提取不同部位岩层、土层 PPV 如图 10(a), (b)所示。从图中可以看到,在土-岩界面岩层侧,斜面附近 PPV 要比平面附近 PPV 衰减更慢,这可能是应力波入射斜面的反射作用引起了振动加强,可以看作高程放大效应;而在土-岩界面土层侧,斜面附近 PPV 要比平面附近 PPV 衰减更快,原因可能是斜面处引起的应力波透射作用更加剧烈。值得注意的是,在深度 0.3 m 处(深度 0 m 为自由面),即土层中部位置 PPV 随爆心距增大呈波动变化,同时在深度 0.02 m 处,即自由面附近 PPV 呈现离散分布,导致拟合度



(a) 岩层

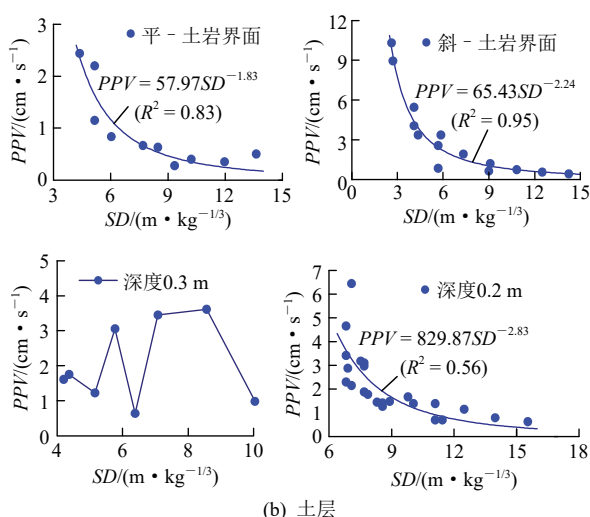


图 10 不同部位爆破振动传播规律

Fig.10 Blasting vibration propagation laws in different parts

较低, 这种随深度改变呈现不同的衰减特征显然是由自由面的反射效应和 R 波作用共同引起。

通过上述分析可知, 爆破应力波入射土 - 岩界面发生透反射作用引起振动大小的改变, 为了评估这种作用, 定义土 - 岩界面 PPV 衰减率 η_D 为

$$\eta_D = \frac{PPV_1^D - PPV_2^D}{PPV_1^D} \quad (5)$$

式中: D 为测点与界面的距离, PPV_N^D ($N=1, 2$) 为岩层、土层侧距离界面 D 处 PPV 。以图 5 中模型右下角为原点建立笛卡尔坐标系, 得到 $\eta_{0.02}$ 随爆源位置改变的变化规律如图 11 所示。

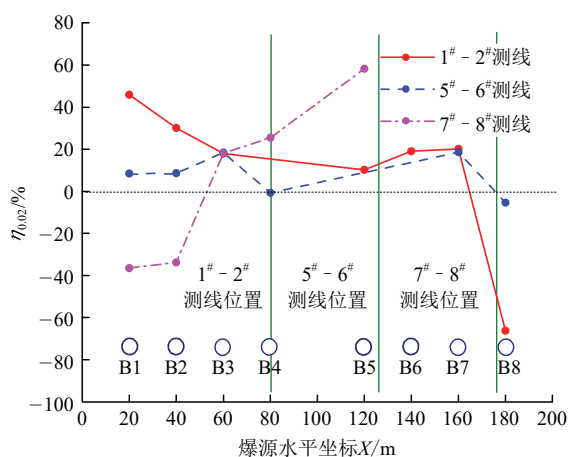


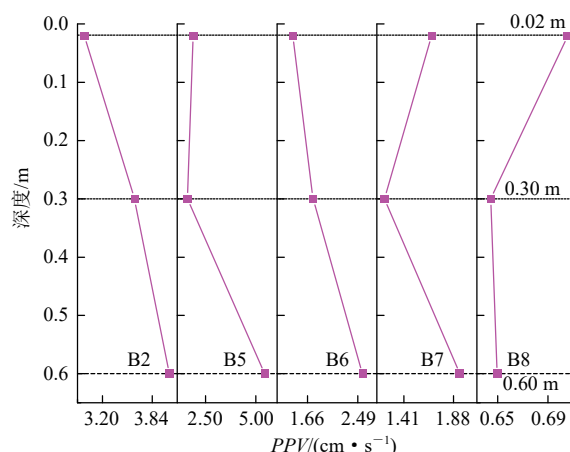
图 11 土 - 岩界面振动衰减率分布

Fig.11 Distribution of PPV attenuation rate at soil-rock interface

图 11 显示, $\eta_{0.02}$ 随着爆源位置的改变而呈现波动的特征, 波动范围为 $[-70\%, 60\%]$, 表明土 - 岩界面会引起振动增强或削弱, 具体表现为在远离爆源处衰减率较小甚至小于 0, 造成这种现象的可能

原因是当爆心距较小时, 应力波入射角较小, 反射作用显著, 在穿过土 - 岩界面时发生较多耗散, 当爆心距较大时, 应力波入射角较大, 透射作用显著, 同时土体刚度较小, 从而引起了振动增强, 此时爆破引起的主振方向可能由垂直转变为水平方向, 在水平方向表现出衰减特征, 这仍需进一步明确。

为明确图 10(b)所示的深度效应, 以 2# - 9# - 11# 测线为研究对象, 得到不同爆源位置下测线 PPV 随深度变化趋势如图 12 所示。从图中可以看出从深度 0.6 m 到地表并不表现为一致的衰减, 其中 B2 与 B6 孔爆破时 PPV 随深度减小而减小, 而 B5, B7, B8 孔爆破则表现出先减小后增大的趋势, 这说明来自自由面的反射与 R 波共同作用深度、强度与爆心距相关, 整体呈现出爆心距越大作用深度越大, 地表放大效应越明显的趋势。

图 12 2# - 9# - 11# 测线 PPV 随深度分布Fig.12 2# - 9# - 11# measuring line PPV distribution with depth

3 土 - 岩地层水平孔爆破数值模拟

由于模型试验受监测仪器限制, 导致水平振速特征尚未明确, 同时场地界面的影响特征仍需进一步阐明, 因此在本节中采用数值模拟开展深入研究。

3.1 数值模型概况

依据图 4, 采用 ANSYS/LS-DYNA 建立土 - 岩地层爆破动力数值模型如图 13 所示。数值模型尺寸根据相似比进行放大, 顶面无约束条件, 模型四周及底部设置为无反射边界, 抑制应力波的反射。B1 炮孔内装药位置设置爆破荷载边界条件, 施加在炮孔内壁的爆破压力由图 4 给出。

数值模型采用共节点建模方式, 网格尺寸控制在 5~20 cm 范围, 其中土 - 岩界面被视作黏结界面, 即界面两侧位移、应力连续。模型中包含岩体、

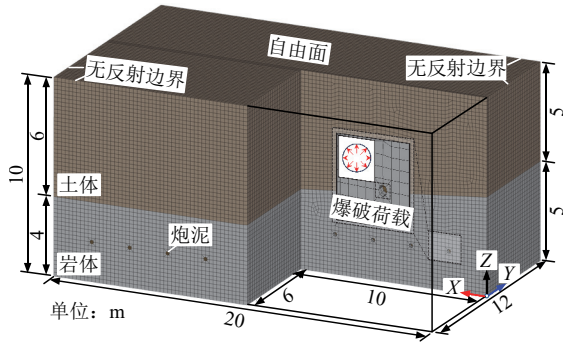


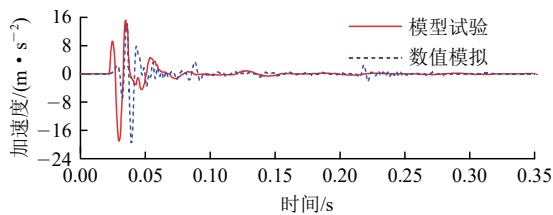
图 13 数值模型

Fig.13 Numerical model

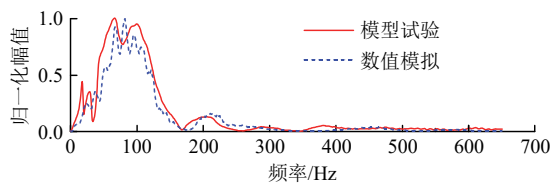
土体、炮泥 3 种材料，其中岩体采用双向随动硬化本构模型(MAT_PLASTIC_KINE-MATIC)进行模拟，土体与炮泥采用德鲁克 - 普拉格本构模型(MAT_DRUCKER_PRAGER)进行模拟，材料参数见表 1。试验中炮泥采用土体相似材料进行替代，因此材料参数与土体一致。

3.2 数值模型可靠性验证

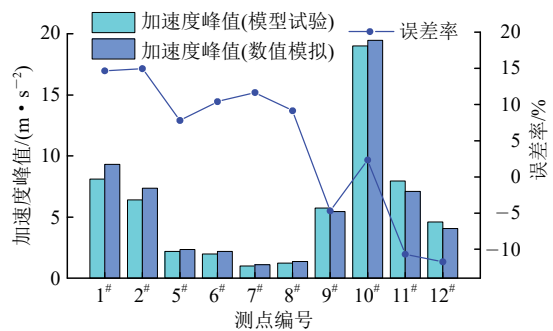
基于模型试验监测方案，提取数值模型中相同位置测点竖直方向加速度峰值，得到数值模拟与模型试验结果对比情况如图 14 所示。



(a) B1 - 10#测点波形对比



(b) B1 - 10#测点波形 FFT 谱



(c) 加速度峰值对比

图 14 数值模拟与模型试验结果对比

Fig.14 Comparison of numerical simulation and model test results

由图 14 可知，在加速度波形方面，数值模拟波形相比较模型试验波形更为复杂，原因在于模型试验中使用的加速度传感器对多次波的灵敏度不高，导致试验波形中多次波成分较少，但整体上波形具有相似性，特别在峰值位置，两者基本一致。此外，峰值出现的时刻稍有差别，原因在于数值模拟中各组分为均质材料，而实际模型中在浇筑过程中无法做到完全均匀，因此两者在波阻抗上存在一定差异。在频率方面，数值模拟与模型试验加速度信号傅里叶谱(FFT 谱)分布基本一致，主频与频带范围相近，表明本文的数值模型能够准确地体现振动参量(振速、频率)的特征。综合对比相同测点加速度峰值可知，模型试验与数值模拟结果相对一致，在爆心距较小位置测点存在较大误差，误差率最大可达 15%，反之，爆心距较大位置测点误差较小。整体来看，数值模型结果误差率均小于 15%，可以认为本文的数值模拟结果是可靠的。

3.3 数值模型结果分析

提取数值模型中部 $x-z$ 平面质点合振速波形得到波列图如图 15 所示，其中自由面与土 - 岩界面上质点沿界面延伸方向选取，其余沿 z 方向选取，振动波形为合振速波形。从图中可以看到，爆破应力波首先入射到土 - 岩界面并发生反射与透射，在岩层侧存在入射与反射 P 波、S 波，在土层侧存在透射 P 波、S 波。受土 - 岩界面影响，爆破应力波的偏振方向发生改变，产生的透射应力波斜入射自由面后发生反射，反射波在土层中传播，到达土 - 岩界面后发生二次反射。经过两次反射，应力波发生剧烈衰减，后续的反射波振幅可忽略不计。在自由面处，爆破应力波向爆心距增大方向传播，由于 R

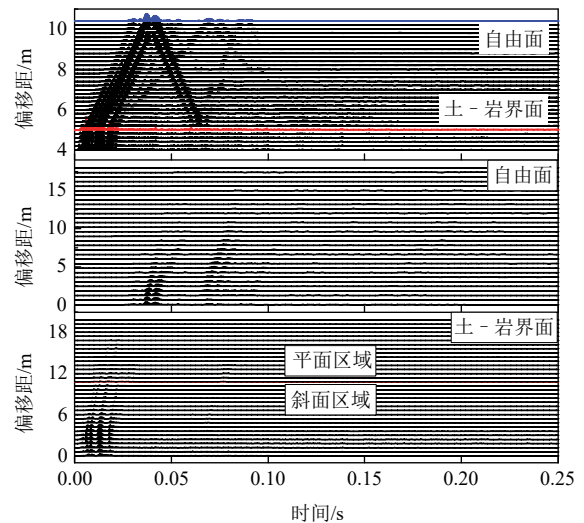


图 15 爆破应力波波列图

Fig.15 Blasting stress wave diagram

波的频散特性,应力波在传播过程中表现出发散的特征。在土-岩界面处,未见明显的R波成分,但在斜面与平面处应力波偏振方向稍有不同,这种现象本质上是由应力波入射角不同引起的。

沿深度方向选取 $X=2.0, 19.2\text{ m}$ 位置测点 PPV 如图 16 所示。已知爆源位置位于 $X=2.0\text{ m}$ 处,可见随着爆心距增大,主振方向由竖向转变为水平向,场地振动受自由面、土-岩界面的影响更甚。在自由面影响下,靠近自由面位置振动出现先减小后增大的趋势,这是典型的面波作用特征。在土-岩界面影响下,岩层侧 PPV 在靠近界面位置出现增大,而土体侧 PPV 出现衰减,在爆心距较大位置处衰减程度更大。需要注意的是,在 $X=19.2\text{ m}$ 处应力波穿过土-岩界面后 Z 方向 PPV 出现增大,这种现象在图 11 中也有体现。

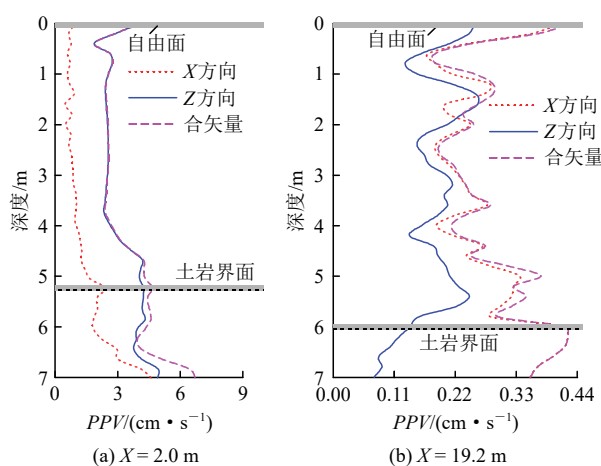


图 16 深度方向 PPV 变化趋势

Fig.16 Depth direction PPV change trend

4 土-岩地层爆破振动传播特征

通过节 3 分析可知,土-岩界面、自由面、爆源位置等会影响爆破应力波的传播,因此明确界面、爆源对土-岩地层爆破振动传播规律的影响是本研究的重点。在本节中,将基于模型试验参数,固定爆破药量不变,针对爆源埋深、界面角度、土层厚度、岩土体物理力学性质等因素进行分析,讨论土岩场地爆破振动传播特征,其中振速特征方面采用合振速进行表征,爆破振动传播规律采用下式进行描述:

$$PPV = k(\sqrt[3]{Q})^\alpha r^{-\alpha} = Kr^{-\alpha} \quad (6)$$

式中: K 为待定系数,在本节中表征场地条件。

4.1 爆源埋深影响特征

爆源埋深是影响爆破振动传播规律的关键因素,埋深的改变与爆破能量的释放紧密相关。在

图 13 所示数值模型基础上,不考虑倾斜土-岩界面情况,设定爆源埋深 $d=2.0, 4.0, 6.0, 8.0\text{ m}$,采用式(5),(6)得到土-岩界面爆破振动传播规律如图 17 所示。

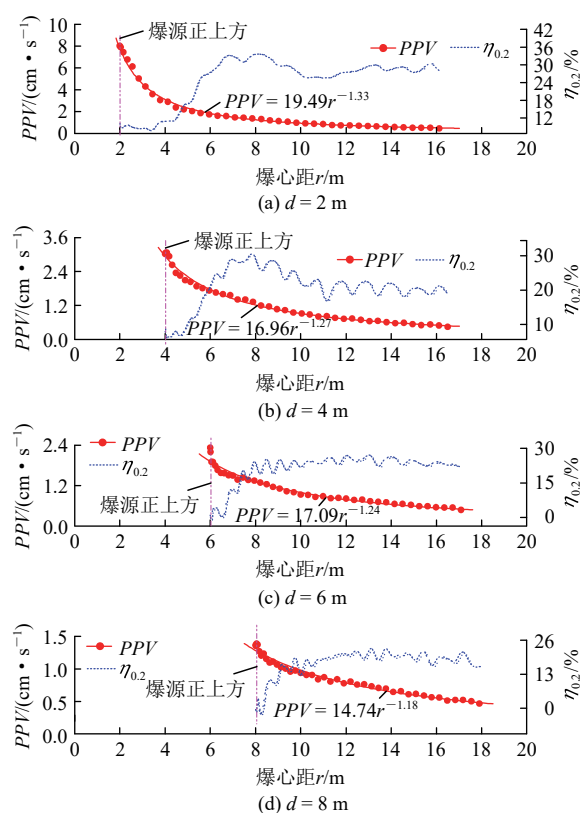


图 17 不同爆源埋深土-岩界面爆破振动传播规律

Fig.17 Blasting vibration propagation law of soil-rock interface under the influence of different blasting source depths

依图 17 可知,随爆心距增大,不同爆源埋深条件下土-岩界面处 PPV 均呈现指数衰减趋势,0.2 m 处土-岩界面衰减率呈现先增大后趋于平稳的变化趋势,这与模型试验结果表现一致。对比不同爆源埋深情况可知,随着爆源埋深增大,土-岩界面 PPV 衰减指数与衰减率逐渐减小,表明爆源埋深增大抑制了爆破能量的传输,但爆破应力波穿过土-岩界面引起的能量耗散有所减小,表现为:在 $d=2\text{ m}$ 工况下, $\eta_d=33\%$,而在 $d=8\text{ m}$ 工况下, $\eta_d=22\%$ 。

图 18 表示不同爆源埋深条件下,自由面处爆破振动传播规律。图中 φ_i 为场地系数,为同一震中距下自由面处 PPV 与土-岩界面处 PPV 之比,其中震中距即为水平爆心距。从图中可以看到,随着爆心距增大,不同埋深条件下自由面处 PPV 均呈现指数衰减趋势,但与土-岩界面处爆破振动传播规律存在区别,一方面,自由面处 PPV 衰减过程存在明显分段特征,如图所示,在靠近震中一定范围内 PPV 较其余位置衰减更快,且随着爆源埋深增大,此范

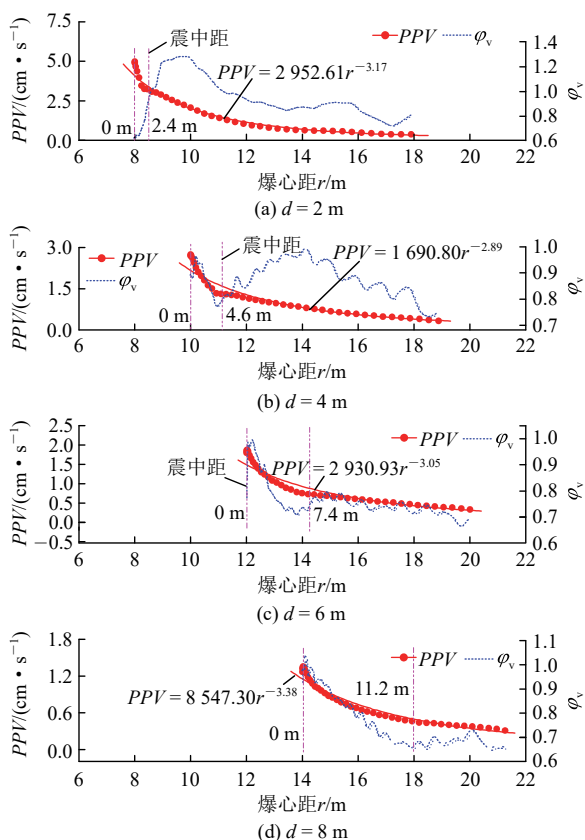


图 18 不同爆源埋深自由面爆破振动传播规律

Fig.18 Blasting vibration propagation law of free surface under the influence of different blasting source depths

围逐渐增大。结合已有研究及节 2.2.1 分析可知,造成这种现象的原因在于自由面处 R 波在距离震中一定位置才逐渐发育,因此在靠近震中位置主要由体波作用,而体波衰减要快于 R 波,因此在自由面振速分布上呈现分段特征。另一方面,正因前述 PPV 分段特征,导致自由面处 PPV 衰减指数较土-岩界面处更大,同时公式拟合度也更低,且随着爆源埋深增大, PPV 衰减指数呈现先减小后增大的趋势,这体现自由面处爆破振动离散性大、难预测的特点,尤其在爆源埋深较大工况下更为显著。

在场地放大效应方面,对于同一爆源埋深条件,场地放大系数呈现增大-减小的循环波动下降趋势。随着爆源埋深增大,场地放大效应逐渐削弱,体现在场地振动放大区域减小、放大程度降低。整体来看,只有在 $d = 2 \text{ m}$ 工况下自由面振动大于土-岩界面振动,表明在低爆源埋深情况下需要重点关注场地放大效应带来的影响。

4.2 岩土体物理力学性质影响特征

岩土体物理力学性质决定了爆破应力波波速及衰减特征,其中波阻抗是描述应力波在岩土体中传播效应的关键指标。现定义波阻抗比 γ 为

$$\gamma = \frac{\rho_1 c_{p1}}{\rho_2 c_{p2}} \quad (7)$$

式中: ρ_n , c_{pn} 分别为密度与纵波波速,其中, $n = 1, 2$ 分别指代岩层与土层。

基于表 1 岩土体参数,通过式(7)得到当前波阻抗比为 2.21,记作 γ_0 。为明确岩土体物理力学性质对土岩场地爆破振动传播规律的影响,保持其余因素不变,设定 $\gamma = 0.5\gamma_0$, γ_0 , $1.5\gamma_0$, $2.0\gamma_0$, 得到不同波阻抗比影响下土岩场地爆破振动传播规律如图 19 所示。依图可知,随着波阻抗比增大,对于相同爆心距下土-岩界面 PPV 迅速降低,表现为场地条件系数减小趋势明显。此外,由于波阻抗比直接影响爆破应力波穿过土-岩界面的透反射系数大小,尤其在波阻抗比较大时,爆破应力波透射效应会被抑制,在图中表现为爆破振动衰减指数随波阻抗比增大而逐渐减小, PPV 衰减率则逐渐增大。值得注意的是,当 $\gamma = 0.5\gamma_0$ 时,即岩层与土层波阻抗相近时, PPV 衰减率并不表现为先增大后稳定的变化趋势,而是保持先下降后平稳的变化趋势,在爆心距较大处衰减率为负值,这表明在小波阻抗比工况下,土体爆破振动将被放大。

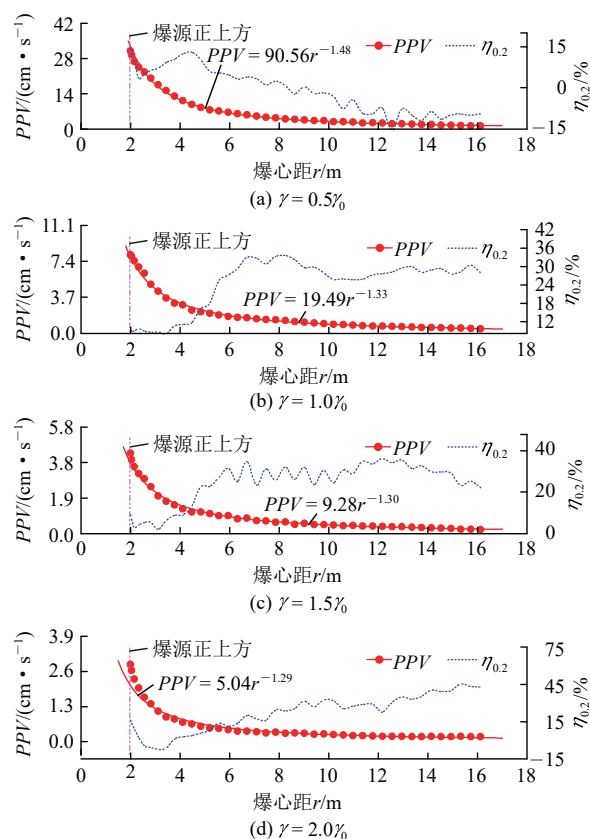


图 19 不同波阻抗比土-岩界面爆破振动传播规律

Fig.19 Blasting vibration propagation law of soil-rock interface under the influence of different wave impedance ratios

统计得到不同波阻抗比条件下自由面爆破振动传播规律如图 20 所示。依图可知, 随着波阻抗比增大, 自由面处 PPV 逐渐减小, 衰减指数逐渐增大, 这与土-岩界面处 PPV 变化规律正好相反, 表明波阻抗比增大加快了自由面处 PPV 的衰减。整体上, 自由面处 PPV 仍存在明显的分段特征, 且随着波阻抗比增大, 体波主导范围逐渐增大, 在 γ 达到 $1.5\gamma_0$ 后趋于稳定, 表明 R 波在自由面的发育受到岩土体波阻抗限制, 但这种限制存在上限。此外, 除 $0.5\gamma_0$ 场地放大系数随爆心距增大均呈现先增大后减小的波动变化趋势, 峰值出现在距离震中约 4 m 位置。随着波阻抗比增大, 场地放大系数峰值逐渐增大, 可达 1.18~1.54, 这表明岩土体波阻抗差异越大, 场地放大效应将越显著。

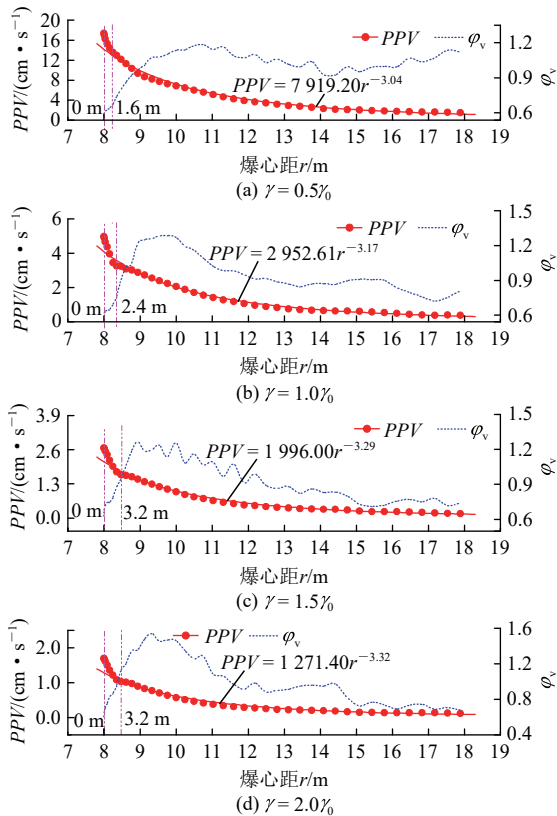


图 20 不同波阻抗比自由面爆破振动传播规律

Fig.20 Blasting vibration propagation law of free surface under the influence of different wave impedance ratios

4.3 土层厚度影响特征

根据节 4.2 分析可知, 应力波在土-岩界面与自由面间存在多次反射, 这种多次波作用对土-岩界面振动存在一定影响。同时, 由于 R 波作用具有深度效应, 这仍有可能影响土-岩界面振动分布。基于两方面特征, 可以发现土层厚度是决定多次波与 R 波作用特征的关键因素。为明确土层厚度与爆破应力

波作用特征的相关性, 得到不同土层厚度条件下土-岩界面 PPV 分布特征如图 21 所示。

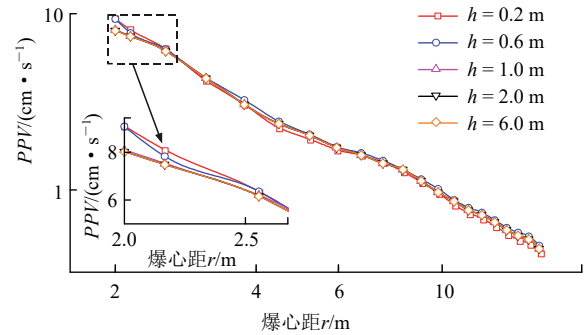


图 21 不同土层厚度土-岩界面 PPV 分布特征

Fig.21 PPV distribution characteristics of soil-rock interface under the influence of different soil layer thicknesses

由图 21 可知, 土层厚度变化对土-岩界面 PPV 分布影响较小, 当土层厚度大于 1 m 时, 土-岩界面 PPV 分布基本保持不变。结合节 2 分析, 综合表明多次波及 R 波作用只对土-岩界面波形、频率分布产生影响, 对 PPV 影响可忽略不计。

在保持其余因素不变情况下, 设定土层厚度为 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 m, 得到自由面处爆破振动传播规律如图 22 所示。从图中可以看到, 随着土层厚度增大, 自由面处爆破振动衰减指数、场地条件系数

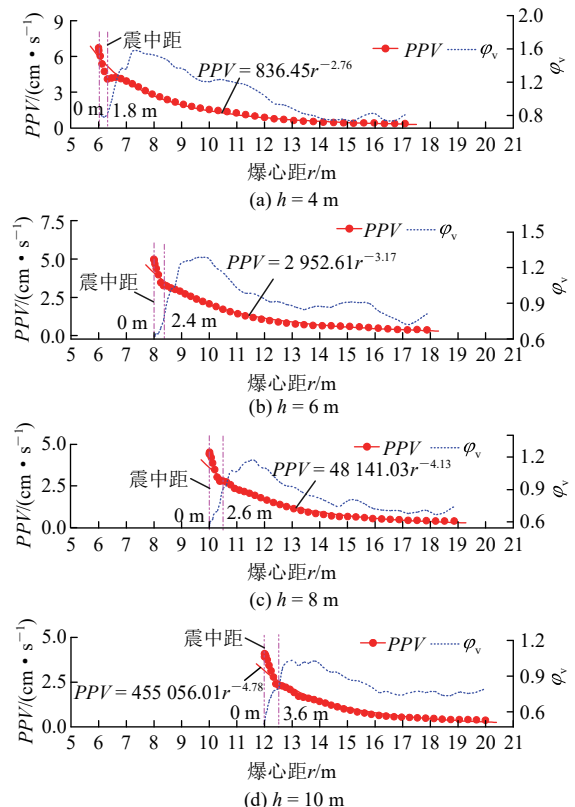


图 22 不同土层厚度自由面爆破振动传播规律

Fig.22 Blasting vibration propagation law of free surface under the influence of different soil layer thicknesses

逐渐增大, 本质原因在于爆破应力波在土体中衰减快, 而土层厚度增大使爆破应力波路径增长, 从而导致自由面处振动衰减加快。此外, 体波作用范围与土层厚度成正比例关系, 这与节 2.2.1 中提出的 R 波产生位置公式基本一致。在场地放大效应方面, 不同土层厚度工况下场地放大系数均呈现先增大后减小的变化趋势, 在震中距约 4 m 位置达到峰值。同时, 随着土层厚度增大, 场地放大效应逐渐削弱, 在 $h = 10$ m 时自由面振动均小于土 - 岩界面振动, 可见土层厚度是影响场地放大效应的主要因素。

4.4 土 - 岩界面倾角影响特征

根据图 10 分析可知, 土 - 岩界面角度改变会引起爆破振动传播规律改变。在本文研究背景下, 一般而言城区地表经过平整起伏较小, 因此不考虑自由面角度改变对爆破振动传播规律的影响特征。保持其余因素不变, 为控制土层厚度的影响, 设定土 - 岩界面倾角 $\theta = 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ$, 得到土 - 岩界面爆破振动传播规律如图 23 所示。由图可知, 倾角改变对土 - 岩界面爆破振动传播规律影响较小, 衰减指数表现为先增大后减小的趋势, 在 $\theta = 6^\circ$ 时衰减较 $\theta = 0^\circ$ 时更慢, 这与模型试验规律一致, 可认

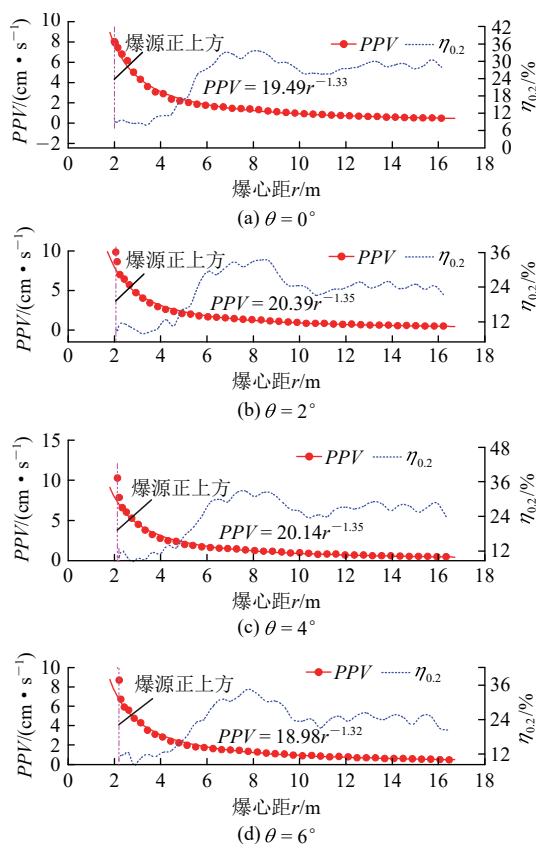


图 23 不同倾角土 - 岩界面爆破振动传播规律

Fig.23 Blasting vibration propagation law of soil-rock interface under the influence of different dip angles

为在倾角较大时土 - 岩界面会存在一定的高程放大效应。随着倾角增大, 土 - 岩界面 PPV 衰减率均呈现先增大后平稳的变化趋势, 衰减最大位置位于爆心距 8 m 处, 衰减率峰值可达 36%。整体而言, 土 - 岩界面小幅度倾斜对爆破振动传播规律及 PPV 衰减率影响不明显, 而在大角度倾斜工况下涉及自由面与土 - 岩界面振动耦合作用, 为多因素控制问题, 因此在本文中暂不考虑。

图 24 表示不同倾角影响下自由面处爆破振动传播规律。从图中可以看到, 不同土 - 岩界面倾角影响下, 自由面处爆破振动传播规律表现出一致的变化特征, 体现为场地条件相关系数与衰减系数相对接近。随着倾角增大, 体波作用区域保持在震中 2.4 m 范围内, 表明土 - 岩界面小倾角变化并未影响 R 波的产生。此外, 场地放大系数随爆心距增大呈现先增大后减小的变化趋势。同时, 随着倾角增大, 场地放大系数峰值逐渐减小, 峰值出现位置向震中偏移, 而随爆心距变化趋势趋于平缓, 原因在于土 - 岩界面与自由面夹角增大引起界面间爆破应力波传播路径改变, 应力波穿过界面偏振角增大, 导致在自由面处更接近震中位置振动叠加现象显著。

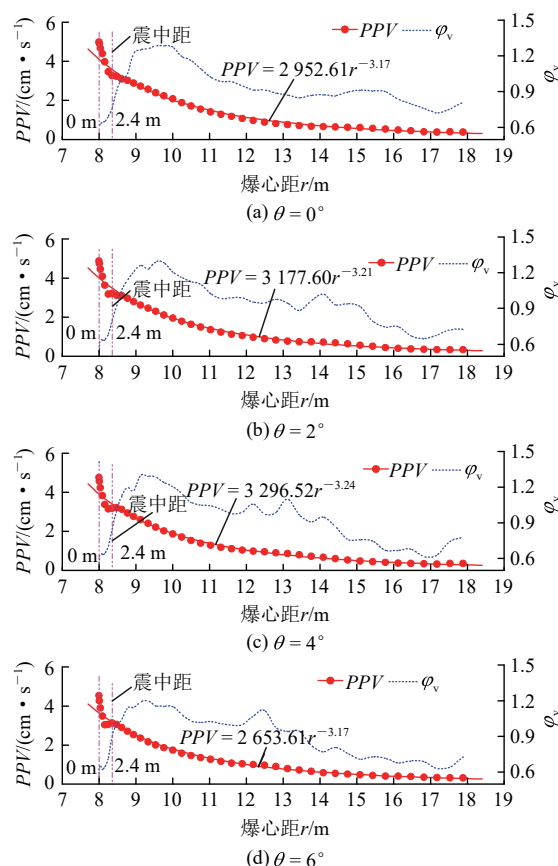


图 24 不同倾角自由面爆破振动传播规律

Fig.24 Blasting vibration propagation law of free surface under the influence of different dip angles

5 土-岩地层爆破振动预测模型

在节4中讨论了不同因素对土-岩地层爆破振动传播规律的影响特征,主要包括爆源、介质、界面因素。而目前通常采用式(4)所示萨道夫斯基公式对爆破振动传播规律进行描述与预测,显然对于土-岩地层爆破振动而言不具有针对性与全面性,需要提出新的预测模型以提升预测精度,能更准确描述土-岩地层爆破振动传播规律。

5.1 爆破振动预测模型构建

量纲分析法是构建数学模型的常用方法,在爆破振动领域应用广泛。该方法以白金汉定理(π 定理)为核心,选择影响变化规律的因素进行量纲推导,最终构建符合量纲的数学模型。基于节4分析可知,影响土岩地层爆破振动的主要因素分为爆源因素与场地因素,建模相关因素量纲如表2所示。表中M为质量量纲,L为长度量纲,T为时间量纲。

表2 影响因素与量纲

Table 2 Influencing factors and dimensions

因素	量纲	因素	量纲
单段最大药量 Q	M	土体密度 ρ_2	ML^{-3}
爆源埋深 d	L	土体纵波波速 c_{p2}	LT^{-1}
爆心距 r	L	土体厚度 h	L
岩体密度 ρ_1	ML^{-3}	土-岩界面倾角 θ	1
岩体纵波波速 c_{p1}	LT^{-1}	质点峰值振速 PPV	LT^{-1}

综合影响因素,得到爆破振动预测基本模型为

$$PPV = f(Q, d, r, \rho_1, c_{p1}, \rho_2, c_{p2}, h, \theta) \quad (8)$$

根据 π 定理,选取 Q, r, c_{p1} 为3个基本变量,考虑到倾角 θ 满足小角度假定,同时根据幂函数性质,当 $\theta = 0^\circ$ 时无法构建无量纲数,因此在保证量纲不变前提下对 θ 进行变形为 $g(\theta) = \tan \theta + 1$ 。由此可得到无量纲数 $\pi_i (i = 1, 2, \dots, 7)$ 为

$$\left. \begin{aligned} \pi_1 &= \frac{PPV}{Q^a r^b c_{p1}^c}, \quad \pi_2 = \frac{d}{Q^a r^b c_{p1}^c}, \quad \pi_3 = \frac{\rho_1}{Q^a r^b c_{p1}^c} \\ \pi_4 &= \frac{\rho_2}{Q^a r^b c_{p1}^c}, \quad \pi_5 = \frac{c_{p2}}{Q^a r^b c_{p1}^c} \\ \pi_6 &= \frac{h}{Q^a r^b c_{p1}^c}, \quad \pi_7 = \frac{g(\theta)}{Q^a r^b c_{p1}^c} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: a, b, c 为待定系数。基于量纲齐次原则,得到无量纲量为

$$\left. \begin{aligned} \pi_1 &= \frac{PPV}{c_{p1}}, \quad \pi_2 = \frac{d}{r}, \quad \pi_3 = \frac{\rho_1}{Qr^{-3}} \\ \pi_4 &= \frac{\rho_2}{Qr^{-3}}, \quad \pi_5 = \frac{c_{p2}}{c_{p1}} \\ \pi_6 &= \frac{h}{r}, \quad \pi_7 = g(\theta) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

基于无量纲量通过基本运算后仍保持无量纲这一特性,通过计算可知中存在以下关系:

$$\gamma = \frac{\pi_4 \pi_5}{\pi_3} \quad (11)$$

因此,结合式(10)可得到无量纲量具有相关性:

$$\frac{PPV}{c_{p1}} \sim f\left(\frac{d}{r}, \frac{\rho_1}{Qr^{-3}}, \gamma, \frac{h}{r}, g(\theta)\right) \quad (12)$$

由于式(11)中提供了 π_3, π_4, π_5 的相关性,同时为了保留基本量纲,在式(12)中以 π_3 及 γ 代替原有无量纲量,需要注意的是, γ 在岩土地层中始终大于1。根据式(11)可得

$$\frac{PPV}{c_{p1}} \sim \left(\frac{\sqrt[3]{\rho_1 r}}{\sqrt[3]{Q}}\right)^{\alpha_1} \left(\frac{d}{r}\right)^{\alpha_2} \left(\frac{h}{r}\right)^{\alpha_3} \gamma^{\alpha_4} [g(\theta)]^{\alpha_5} \quad (13)$$

对于同一岩土地层而言, $\rho_1, c_{p1}, \gamma, \theta$ 均为固定常量,因此,在正相关条件下,由式(13)可得以下爆破振动预测模型:

$$PPV = K \left(\frac{r}{\sqrt[3]{Q}}\right)^{\alpha_1} \left(\frac{d}{r}\right)^{\alpha_2} \left(\frac{h}{r}\right)^{\alpha_3} + C \quad (14)$$

综合考虑式(4)以及在无限远处爆破振动为0这一边界条件,可得到 $C=0$ 。观察式(14)可知,系数 K 表征岩土体物理力学性质、土-岩界面角度等场地地质特征,而 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 表征振动衰减特征。结合节4分析可知,土-岩界面振速几乎不受土层厚度影响,只有在极端厚度工况下才有轻微改变,因此,对于土-岩界面处振速可不考虑 h ,得到预测模型为

$$PPV_{SR} = K \left(\frac{r}{\sqrt[3]{Q}}\right)^{\alpha_1} \left(\frac{d}{r}\right)^{\alpha_2} \quad (15)$$

式中: PPV_{SR} 为土-岩界面质点峰值振速。

对于自由面振速,由于爆源埋深 d 及土层厚度 h 均会对自由面振速产生影响,得到预测模型为

$$PPV_{FS} = K \left(\frac{r}{\sqrt[3]{Q}}\right)^{\alpha_1} \left(\frac{d}{r}\right)^{\alpha_2} \left(\frac{h}{r}\right)^{\alpha_3} \quad (16)$$

式中： PPV_{FS} 为自由面质点峰值振速。

5.2 爆破振动预测模型评价

结合上述研究,选取土-岩界面倾角为 6° 工况下土-岩界面及自由面处 PPV ,应用式(4), (15), (16)预测模型进行拟合,得到拟合结果如表 3 所示。由表可知,本文提出的预测模型拟合精度(R^2)要高于萨氏公式拟合精度,可认为本文提出的土-岩地层爆破振动预测模型具有更强的准确性。此外,在拟合结果方面,对比预测模型中各组分衰减系数可知,比例距离对土-岩界面爆破振动影响要小于爆源埋深,同时土层厚度对自由面爆破振动影响要大于比例距离,参照式(4),在已有萨氏公式中只考虑了比例距离对爆破振动的影响,并未考虑土层厚度、爆源埋深的影响,显然,对于土-岩地层爆破振动而言,萨氏公式不具有针对性。综合来看,本文提出的预测模型能够准确预测土-岩地层爆破振动,能够体现场地因素对爆破振动的影响程度,具有较高的实际应用价值。

表 3 不同预测模型拟合结果

Table 3 Fitting results of different prediction models

位置	预测模型	公式	R^2
土-岩 界面	萨氏公式	$PPV_{SR} = 18.95 \left(\frac{r}{\sqrt{Q}} \right)^{-1.45}$	0.90
	本文预测 模型	$PPV_{SR} = 1.58 \left(\frac{r}{\sqrt{Q}} \right)^{3.00} \left(\frac{d}{r} \right)^{4.46}$	0.99
自由面	萨氏公式	$PPV_{FS} = 2678.72 \left(\frac{r}{\sqrt{Q}} \right)^{-3.38}$	0.88
	本文预测 模型	$PPV_{FS} = 2.19 \left(\frac{r}{\sqrt{Q}} \right)^{1.38} \left(\frac{d}{r} \right)^{0.70} \left(\frac{h}{r} \right)^{4.06}$	0.98

6 结 论

本文通过模型试验与数值模拟方法研究了土-岩地层水平孔爆破振动传播规律,结合量纲分析构建了土-岩地层爆破振动预测模型,得到以下结论:

(1) 构建了土-岩地层水平孔爆破模型试验系统,试验结果表明:土-岩界面存在高频滤波特性,界面附近竖向振速衰减受界面角度影响,在倾斜条件下衰减有所减缓,同时在靠近爆源方向土-岩界面引起竖向振速衰减,在远离爆源方向则相反;在自由面处存在体波与 R 波,在远离震中方向 R 波逐渐发育并占据主导,而在深度方向,距离自由面越近振速分布越发离散,且存在由反射波与 R 波引起的场地放大效应。

(2) 采用动力有限元建立了土-岩场地水平孔爆破数值模型,通过模型试验结果验证了准确性,数值模拟结果表明,爆破应力波在自由面与土-岩界面间存在多次透反射,在土-岩界面处应力波偏振方向与界面角度有关,而在自由面处应力波存在频散特征。此外,在震中附近以竖直方向为主振方向,在远离震中位置以水平方向为主振方向。

(3) 土-岩界面振速呈现指数衰减特征,受体波与 R 波衰减特征影响,自由面处振速呈现分段衰减特征,其中在靠近震中位置为体波作用段。

(4) 爆源埋深增大会减缓土-岩界面振速衰减,抑制应力波能量传输,削弱自由面处场地放大效应;岩土体波阻抗比增大会减缓土-岩界面振速衰减,加快自由面处振速衰减,但应力波能量耗散增大,场地放大效应得到增强;土层厚度增大几乎不影响土-岩界面振速,但会加快自由面振速衰减,同时场地放大效应被削弱;在小倾角条件下,土-岩界面倾角对场地振动影响较小。

(5) 土-岩地层爆破振动预测模型充分考虑了爆源条件与场地特性,预测精度相比较现有模型有所提高,可应用于控制实际爆破工程中的有害振动效应。

参考文献(References):

[1] 李 英,何忠泽,严桂华,等. 武汉二元结构地层基坑降水及其地面沉降研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增 1): 767 - 772.(LI Ying, HE Zhongze, YAN Guihua, et al. Study on dewatering and land subsidence of foundation pit in dualistic structure stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(Supp.1): 767 - 772.(in Chinese))

[2] 张玉琦,蒋 楠,周传波,等. 爆破地震荷载作用下承插式 HDPE 管道动力失效机制[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(12): 133 - 144. (ZHANG Yuqi, JIANG Nan, ZHOU Chuanbo, et al. Dynamic failure mechanism of HDPE pipelines with a gasketed bell and spigot joint subjected to blasting seismic load[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(12): 133 - 144.(in Chinese))

[3] BLAIR D P. The free surface influence on blast vibration[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 77: 182 - 191.

[4] LI J C, MA G W, ZHOU Y X. Analytical study of underground explosion-induced ground motion[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(6): 1 037 - 1 046.

[5] 高启栋,卢文波,杨招伟,等. 垂直孔爆破诱发地震波的成分构成及演化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(1): 18 - 27.(GAO Qidong, LU Wenbo, YANG Zhaowei, et al. Components and evolution laws of seismic waves induced by vertical-hole blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(1): 18 - 27.(in Chinese))

- [6] 高启栋, 卢文波, 杨招伟, 等. 水平光面爆破激发地震波的成分及衰减特征[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(8): 170 - 182.(GAO Qidong, LU Wenbo, YANG Zhaowei, et al. Components and attenuation of seismic waves induced by horizontal smooth blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(8): 170 - 182.(in Chinese))
- [7] 高启栋, 卢文波, 范勇, 等. 岩石钻孔爆破中 Rayleigh 波的形成机制与演化特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(1): 129 - 143.(GAO Qidong, LU Wenbo, FAN Yong, et al. Study on generation mechanism and evolution characteristics of Rayleigh wave in rock drilling and blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(1): 129 - 143.(in Chinese))
- [8] IGOR A B, WEN K L, et al. Seismological evidence for nonlinear elastic ground behavior during large earthquakes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1995, 14(2): 103 - 114.
- [9] 张茂晨, 路世伟, 周传波, 等. 上土下岩地层中柱面 SH 波的传播特性分析[J]. 工程爆破, 2023, 29(4): 35 - 42.(ZHANG Maochen, LU Shiwei, ZHOU Chuanbo, et al. Analysis of propagation characteristics of cylindrical SH waves in upper soil and lower rock strata[J]. Engineering Blasting, 2023, 29(4): 35 - 42.(in Chinese))
- [10] 李伟华, 胡叶尘, 赵成刚, 等. 非饱和土成层场地波动问题的解析解及应用[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1 790 - 1 798.(LI Weihua, HU Yechen, ZHAO Chenggang, et al. Analytic solution for wave propagations in layered unsaturated soil and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(10): 1 790 - 1 798.(in Chinese))
- [11] JAYASINGHE B, ZHAO Z Y, TECK CHEE A G, et al. Attenuation of rock blasting induced ground vibration in rock-soil interface[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(4): 770 - 778.
- [12] GOU Y G, SHI X Z, ZHOU J, et al. Attenuation assessment of blast-induced vibrations derived from an underground mine[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 127: 104220.
- [13] GOU Y G, SHI X Z, YU Z, et al. Evaluation of underground blast-induced ground motions through near-surface low-velocity geological layers[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(3): 600 - 617.
- [14] 张继春, 曹孝君, 郑爽英, 等. 浅埋隧道掘进爆破的地震震动效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4 158 - 4 163.(ZHANG Jichun, CAO Xiaojun, ZHENG Shuangying, et al. Experimental study on vibration effects of ground due to shallow tunnel blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(22): 4 158 - 4 163.(in Chinese))
- [15] YU C, YUE H Z, LI H B, et al. Scale model test study of influence of joints on blasting vibration attenuation[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80: 533 - 550.
- [16] TONG X, LIAN J, YANG C, et al. Shaking table test on dynamic damage characteristics of bedrock and overburden layer slopes[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2023, 51(2): 989 - 1 009.
- [17] GUI Y L, ZHAO Z Y, JAYASINGHE L B, et al. Blast wave induced spatial variation of ground vibration considering field geological conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 101: 63 - 68.
- [18] HE L, ZHONG D W, LIU Y H, et al. Prediction of bench blasting vibration on slope and safety threshold of blasting vibration velocity to undercrossing tunnel[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021(1): 9939361.
- [19] 中华人民共和国国家标准编写组. GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB6722 — 2014 Safety regulations for blasting[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.(in Chinese))
- [20] 胡学龙, 璩世杰, 蒋文利, 等. 基于等效路径的爆破地震波衰减规律[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(6): 966 - 975.(HU Xuelong, QU Shijie, JIANG Wenli, et al. Attenuation law of blasting induced ground vibrations based on equivalent path[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(6): 966 - 975.(in Chinese))
- [21] 陈明, 卢文波, 李鹏, 等. 岩质边坡爆破振动速度的高程放大效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2 189 - 2 195.(CHEN Ming, LU Wenbo, LI Peng, et al. Elevation amplification effect of blasting vibration velocity in rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2 189 - 2 195.(in Chinese))
- [22] 刘小鸣, 陈士海. 隧道掘进中掏槽孔爆破引起的地表振动波形预测[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1 731 - 1 737.(LIU Xiaoming, CHEN Shihai. Prediction of surface vibration waveform caused by cuthole blasting in tunneling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(9): 1 731 - 1 737.(in Chinese))
- [23] 刘小鸣, 陈士海. 群孔微差爆破的地表振动波形预测及其效应分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(3): 551 - 560.(LIU Xiaoming, CHEN Shihai. Prediction and effect analysis of surface vibration waveform for group hole delay blasting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(3): 551 - 560.(in Chinese))
- [24] 苏国韶, 宋咏春, 燕柳斌. 岩体爆破效应预测的一种新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 3 509 - 3 514.(SU Guoshao, SONG Yongchun, YAN Liubin. A new method for forecasting of blasting effect in rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Sup.1): 3 509 - 3 514.(in Chinese))
- [25] 刘亚群, 李海波, 裴启涛, 等. 基于灰色关联分析的遗传神经网络在水下爆破中质点峰值振动速度预测研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增1): 259 - 264.(LIU Yaqun, LI Haibo, PEI Qitao, et al. Prediction of peak particle velocity induced by underwater blasting based on the combination of grey relational analysis and genetic neural network[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup.1): 259 - 264.(in Chinese))
- [26] CHEN M, YE Z W, LU W B, et al. An improved method for calculating the peak explosion pressure on the borehole wall in decoupling charge blasting[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 146: 103695.
- [27] CHO S H, NAKAMURA Y, MOHANTY B, et al. Numerical study of fracture plane control in laboratory-scale blasting[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(13): 3 966 - 3 984.
- [28] FOTI S, LAI C G, RIX G J, et al. Surface wave methods for near-surface site characterization[M]. Boca Raton: CRC Press, 2014: 51 - 53.
- [29] HEELAN P A. Radiation from a cylindrical source of finite length[J]. Geophysics, 1953, 18(3): 685 - 696.
- [30] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Localization of the complex spectrum: the S transform[J]. IEEE transactions on signal processing, 1996, 44(4): 998 - 1 001.
- [31] LAMB H. On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London(Series A), 1904, 203(359/371): 1 - 42.