

基坑爆破开挖爆点位置与基坑高度对 爆破振动影响研究

刘宽¹,徐志豪²,汤渊³,沈俊^{2*},包小华²,沈平欢¹,欧阳³

(1.上海隧道工程有限公司,上海市 200232;2.深圳大学土木与交通工程学院,广东 深圳 518060;

3.广东长正建设有限公司,广东 珠海 519000)

摘要:针对基坑爆破振动预测不准确的问题,该文采用有限元模拟软件,深入研究基坑爆破开挖时爆点位置和基坑高度对振动的影响。首先,基于妈湾跨海隧道基坑爆破开挖工程进行数值模拟,验证模型的适用性;随后在保持爆心距不变的情况下,通过调整基坑爆破点到基坑边缘的距离和基坑的高度,研究这两个因素对地表振动的影响。研究结果表明:随着爆破点到基坑边缘的距离增加,相应距离测点的振动速度逐渐减小;基坑高度越高,相应距离测点的振动速度越大;基坑高度对地表振速的影响要大于爆点位置的影响。研究成果能为基坑爆破的振动预测提供一定参考,具有工程实际意义。

关键词:基坑;爆破;振动;数值模拟;爆点位置;基坑高度

中图分类号:U455.6

文献标志码:A

Influence of Blasting Point Position and Foundation Pit Height on Blasting Vibration during Foundation Pit Blasting Excavation

LIU Kuan¹, XU Zhihao², TANG Yuan³, SHEN Jun^{2*}, BAO Xiaohua², SHEN Pinghuan¹, OU Yang³

(1. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd, Shanghai 200232, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China; 3. Guangdong Changzheng Construction Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000, China)

Abstract: In view of inaccurate vibration prediction of foundation pit blasting, the influence of blasting point position and foundation pit height on vibration during foundation pit blasting excavation was studied by using finite element simulation software. First, based on the foundation pit blasting excavation of the Mawan Cross-Sea Passage, a numerical simulation was carried out to verify the applicability of the model. Then, under unchanged blasting center distance, the distance from the blasting point to the edge of the foundation pit and the foundation pit height were changed respectively, and the influence of these two factors on surface vibration was studied. The results show that a greater distance from the blasting point to the edge of the foundation pit indicates a smaller vibration velocity of the corresponding distance measuring point. As the height of the foundation pit increases, the vibration velocity of the corresponding distance measuring point gets larger. The influence of foundation pit height on surface vibration velocity is greater than that of blasting point position. The research results can provide some reference for the vibration prediction of foundation pit blasting and have practical engineering significance.

Keywords: foundation pit; blasting; vibration; numerical simulation; blasting point position; foundation pit height

收稿日期:2022-10-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52022060,52090084);深圳市科技创新计划项目(编号:JCYJ20190808112203700)

作者简介:刘宽,男,高级工程师.E-mail:773737845@qq.com

*通信作者:沈俊,男,博士研究生.E-mail:sj_szu@163.com

0 引言

随着城市交通越来越拥挤,城市快速路作为一种解决交通拥挤的方案逐渐受到关注。现今城市快速路往往需要修建下穿隧道的深基坑,当遇到坚硬的岩基地层时,钻爆开挖^[1]是开挖深基坑的有效方法。但是城市快速路的建设地址常位于城市建筑密集的区域,钻爆法的使用不可避免地会产生爆破振动,对周围的建筑物产生影响,严重时可能导致结构物出现裂缝,甚至坍塌^[2-3]。在目前的研究中,往往使用爆破产生的爆破振动大小来判断其对建筑物影响的程度,所以对爆破振动的预测控制,对于此类工程项目的顺利进行至关重要。

近年来,国内外的研究学者都对爆破振动的预测做了大量研究,主要预测形式有各种爆破振动预测公式、数值模拟、大数据预测等。周俊汝等^[4]使用有限元软件LS-DYNA研究了柱状药包和球状药包的振动频率变化;朱斌等^[5]通过数值模拟计算了爆破时邻近的燃气管道的动力响应特性;叶红宇等^[6]通过建立隧道的三维有限元模型,分析计算了隧道内近区和中远区的爆破振动衰减规律;冯小冬^[7]将经验方法与灰度模型预测相对比,得出灰度模型更能反映空洞效应,经验公式更能反映距离效应的结论;王建国等^[8]使用BP神经网络预测了露天煤矿爆破时的振动,结果表明这种方式精度较高且误差较小,对于振动的预测是适用的。同时,国外学者也根据各种网络模型对爆破振动的预测进行了一定的研究,Saadat等^[9]使用最大药量、爆破面到监测点的距离、堵塞和孔深作为输入值,将峰值质点速度(PPV)作为输出值来进行预测,结果准确度要优于经验公式;Lawal等^[10]利用爆心距和药量作为神经网络的预测参数,发现比多元线性回归的预测结果准确;Azimi等^[11]在进行神经网络预测时提出将径向距离进行修正,以得到更准确的结果。目前工程中常用的爆破振动的预测公式主要是萨道夫斯基公式^[12],但是萨道夫斯基公式常用于连续介质的振动预测,当遇到基坑开挖爆破,预测点与爆点之间有着大量的空气介质,这必然会影响萨道夫斯基公式的准确性。因此,通过有限元的方法对爆破振动预测时将空气介质考虑进去,能够有效地弥补公式预测的不足。

基于此,本文建立数值模型,将模拟结果与妈湾

地区基坑爆破开挖的监测结果进行对比,验证模型的准确性,然后在有限元模型的基础上通过改变基坑爆点到基坑边缘的位置、基坑的高度,研究爆点位置和基坑高度对地表振动的影响。此研究可以明确爆破振动在基坑爆破中的衰减效应,为基坑爆破的地表振动控制提供一定依据。

1 工程概况

妈湾跨海通道(月亮湾大道沿江高速)工程位于深圳市西部,途经前海妈湾及宝安大铲湾两区域。路线呈南北向布置,南起于妈湾大道与月亮湾大道相交处,向北穿越前海湾海域,止于沿江高速大铲湾收费站及金湾大道与西乡大道相交处,路线全长约8.05 km,其中前海段2.5 km,海域段1.1 km,大铲湾段4.45 km,道路规划等级为城市快速路。

爆破工程位于始发段基坑深度为28.4~40.1 m,基坑位置如图1所示,基坑东侧为社会道路,西侧为西部政府码头,码头主要堆放有砂、集装箱等物,周边无高层建筑,无相邻市政管线等。由于周边有建筑物,所以需要控制爆破振动,以保证周边建筑物的安全。



图1 基坑开挖位置示意图

Figure 1 Foundation pit excavation position

基坑在爆破施工时会对附近建筑物的地表进行监测,监测位置如图2所示,距离基坑爆破区域约为30 m。监测使用TC-4580型爆破测振仪系统,该系统由传感器和测振仪组成。安装时将传感器黏结在监测点地面上,当爆破振动传来就会记录在测振仪中,通过安装爆破测振仪对爆破振动进行监测并能够及时调整爆破的药量等参数。

2 基坑爆破数值模拟

2.1 数值建模

通过对比有限元模型模拟结果与监测结果验证

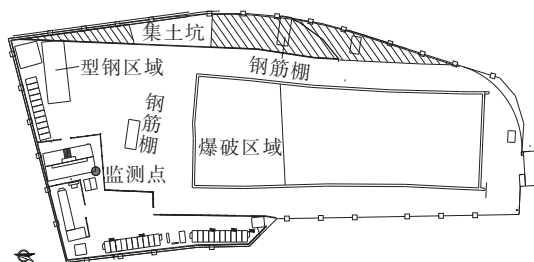


图2 爆破振动监测点示意图

Figure 2 Blasting vibration monitoring points

模型的有效性。然后在此基础上通过改变其他参数进行进一步研究。为了与实际情况接近,选取实际过程中的单次基坑爆破过程进行模拟。

根据现场的实际施工和监测情况,建立基坑开挖至 25 m,爆点距离基坑边缘 7.5 m,炸药单响药量为 10 kg 的数值模型,模型整体尺寸为 40 m×70 m×30 m,如图 3 所示。模型由下至上分别为中风化岩石、强风化岩石以及土层。单元采用 8 节点 Solid 164 实体单元,其中岩石、土层采用拉格朗日网格,炸药及空气采用欧拉网格,模型计算使用流固耦合的方法^[13],整个建模过程采用 m·kg·s 单位制。由于无法建立无限大的模型,所以在模型的无限边界使用无反射边界,而基坑内部以及地表采用自由边界。由于爆破过程较快,所以模拟计算时间设置为 0.4 s,监测点位置与图 2 中实际测点位置相符,选取 H685112 单元。

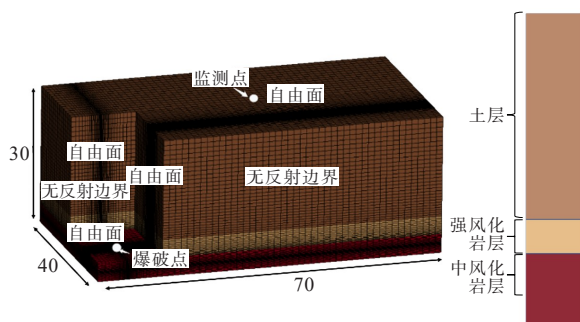


图3 模型及地层信息图(单位:m)

Figure 3 Model and stratigraphic information(unit:m)

2.2 材料模型及参数

由勘察资料可知,基坑范围内的岩石主要为中风化花岗岩,同时与土层之间存在一些强风化花岗岩等过渡层。对研究范围内的岩体简化为单一性质的岩体,不考虑节理裂隙等情况,因此采用能够反映岩体弹塑性、应变、硬化等性质的*MAT_PLASTIC_

KINEMATIC 模型模拟岩体^[14]。根据勘察资料和相关规范选取中风化花岗岩以及强风化花岗岩的物理力学参数见表 1。

表1 中风化及强风化花岗岩的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of moderately and strongly weathered granite

花岗岩 类型	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模 量/GPa	泊松比	屈服强 度/MPa	切线模 量/MPa	硬化 系数
中风化	2 500	3.9	0.25	30	500	0.5
强风化	2 200	0.5	0.30	10	41	0.5

在 LS-DYNA 中可以使用*MAT_DRUCKER_PRAGER 模型来对土体的材料进行模拟,可以较好地模拟出土在爆破时的振动特性,土层具体物理力学参数见表 2。

表2 土层的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of soil layer

密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ MPa	泊松比	摩擦角/ rad	黏聚力/ kPa
1 800	57	0.3	0.46	40

炸药模型使用 LS-DYNA 中的高能炸药材料*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN,同时使用 EOS_JWL 关键字对其状态方程进行定义。其中 JWL 状态方程为:

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

式中: A、B、R₁、R₂、ω 为炸药的材料参数; P 为爆炸压力; V 为爆炸产物的比容; E₀ 为爆炸产物的初始比内能。

炸药的主要材料参数见表 3。

表3 炸药材料参数

Table 3 Explosive material parameters

密度/ (kg·m ⁻³)	爆速/ (m·s ⁻¹)	爆压/ GPa	JWL 状态方程参数					
			A/ GPa	B/ GPa	R ₁	R ₂	E ₀ / GPa	ω
1 630	6 780	18.5	540	9.4	4.5	1.1	8	0.35

空气采用*MAT_NULL 材料模型和相应的线性多项式状态方程进行描述。

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E' \quad (2)$$

式中: $C_0 \sim C_6$ 为空气的状态方程参数; $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$; ρ 为密度; ρ_0 为初始密度; E' 为材料的内能。

空气状态参数见表4。

表4 空气状态参数

Table 4 Air state parameters

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	内能 E' / kPa
1.25	0	0	0	0	0.4	0.4	0	250

2.3 数值模拟结果验证

本次模拟主要研究爆破振动在地面的振动响应。通过数值计算结果与现场监测验证模型的准确性,故选取图3中监测点单元H685112与实际监测结果进行对比。计算输出其振动曲线和施工过程中监测得到的振动曲线如图4所示。

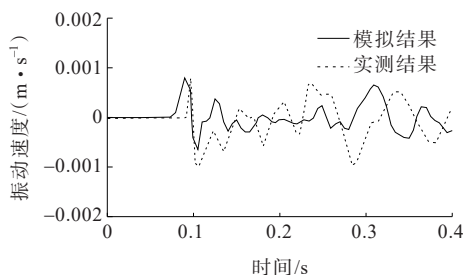


图4 模拟与实测爆破振动对比图

Figure 4 Comparison between simulated and measured blasting vibration

由图4可知:数值模拟结果为0.081 cm/s,现场实际监测结果为0.088 2 cm/s,数值模拟结果与实际监测结果误差为-8%,误差较小,因此本模型的模拟结果对实际情况有一定参考意义。在此基础上通过改变模型基坑爆破点距离以及基坑高度讨论其对地表振动的影响。

3 爆破振动传递分析

萨道夫斯基公式常用来预测爆破振动的峰值振动速度,其公式如下:

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

式中: V 为质点的峰值振动速度; Q 为单响炸药药量; R 为爆心距; K 为场地系数; α 为衰减系数。

当基坑在爆破开挖时,基坑与地表之间存在大量的空气介质,会对萨道夫斯基公式的预测结果产生一定的影响,因此,基坑爆点到基坑边缘的位置 D_1 、基坑高度 H 这两个参数的改变会对地表的振动响应产生一定的影响。在保证爆心距和药量不变的情况下,分别改变 D_1 和 H ,监测相同爆心距处质点的振动速度。基坑示意图如图5所示, $D_1 + D_2$ 和 H 分别为直角三角形的两个直角边,爆心距 R 为该直角三角形的斜边,本研究是在勾股定理的条件下,改变 D_1 或者改变 H ,调整 D_2 保证爆心距 R 不变。

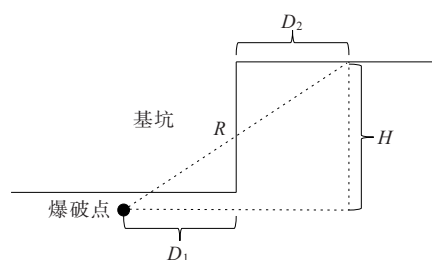


图5 基坑示意图

Figure 5 Foundation pit

3.1 基坑爆点位置影响分析

模型的俯视图如图6所示,通过改变 D_1 的位置,保证 $D_1 + D_2$ 的距离不变, H 保持不变,从而保证爆心距不变,在此基础上进行监测点振动速度分析。基坑爆点距离基坑边缘的初始距离为6 m,基坑高度为14 m,炸药埋深为1 m,故爆心距为 $R = \sqrt{(D_1 + D_2)^2 + 15^2}$ 。当 D_1 为6 m时,监测点 D_2 位置为24 m,以此类推,保证 $D_1 + D_2 = 30$ m。监测点选取爆破点 y 轴正向方向上面的节点单元,在图6中标注,具体数据如表5所示。

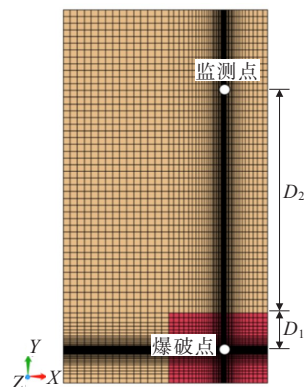


图6 监测节点位置图

Figure 6 Position of monitoring nodes

表 5 D_1 变化的振动速度Table 5 Vibration velocity with varying D_1

测点 编号	D_1 / m	D_2 / m	H / m	爆心距/ m	药量/ kg	振动速度/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	6	24	15	33.5	10	0.187
2	8	22	15	33.5	10	0.173
3	10	20	15	33.5	10	0.161
4	12	18	15	33.5	10	0.156
5	14	16	15	33.5	10	0.153
6	16	14	15	33.5	10	0.150
7	18	12	15	33.5	10	0.149
8	20	10	15	33.5	10	0.147
9	22	8	15	33.5	10	0.131
10	24	6	15	33.5	10	0.118

由表 5 可知:当 D_1 不断增加时,质点的振动速度随之减小。在爆心距不变的情况下,当 D_1 增大时,爆点远离基坑边缘,爆点与监测点之间的空气间隔增大,不利于介质传播;同时在岩石上振动传播的自由面增大,对于振动的损耗较多。因此可以得出结论:在爆心距不变的情况下,基坑爆破点的位置距离基坑边缘越远,对监测点振动速度的削弱能力越强。

3.2 基坑高度影响分析

如图 6 所示,保持 D_1 不变,改变高度 H , D_2 需进行相应的改变来保证爆心距 R 不变。为了本次研究不受介质变化的影响,在保留强风化层的基础上,基坑高度的起始点从强风化层的 4 m 开始,每次增加 2 m,爆心距仍取 33.5 m。振动测点的位置由计算得出,选取在爆点 y 轴正向上面的单元。由于网格较大,在测点附近的网格尺寸为 1 m,所以在距离较近的地方会出现网格重合的情况,这种情况下选取同样网格,最终研究振动速度变化的整体趋势,具体计算结果见表 6。

由表 6 可知:基坑高度增加时,相同爆心距的测点位置的振动速度会增大。由表 5 可知,爆心距相同时,测点位置距基坑边缘的距离变化较小,所以振动速度的主要变化来源是基坑高度增加。在水平爆心距相似或者差距较小、高度越高时,振动速度越大,这就是高程效应^[15]。显然在爆心距不变的情况下,基坑高度的变化受高程效应的影响更大,产生了高度越大、振动速度越大的结果。同时,分析表 5、6 可知:爆点位置的变化使振动速度减小了 36.9%,而基坑高度的减少使振动速度减小了 60.4%,显然,在爆心距保持不变的情况下,基坑高度的变化对地表振

动的影响更大。

表 6 基坑高度 H 变化的振动速度

Table 6 Vibration velocity with varying foundation

pit height H

测点 编号	D_1	D_2	H / m	爆心距/ m	药量/ kg	振动速度/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
11	7.5	32.26	5	33.5	10	0.064
12	7.5	31.89	7	33.5	10	0.065
13	7.5	31.38	9	33.5	10	0.073
14	7.5	30.74	11	33.5	10	0.096
15	7.5	29.95	13	33.5	10	0.121
16	7.5	29.00	15	33.5	10	0.129
17	7.5	27.87	17	33.5	10	0.148
18	7.5	26.55	19	33.5	10	0.152
19	7.5	25.00	21	33.5	10	0.154
20	7.5	23.17	23	33.5	10	0.162

在上文中通过现场监测数据验证了模型的正确性,因此可认为该数值模拟结果对于现场的实际情况有一定的指导作用。当出现爆点距离基坑边缘越近或者基坑爆破深度越大的情况时,相同距离时的测点产生的爆破振动越大,因此在基坑爆破时靠近基坑边缘的爆破要适当减小药量,控制地表的振动速度,防止对建筑物产生危害。

4 结论

本文对妈湾跨海隧道项目的基坑爆破开挖进行模拟验证,在保证爆心距不变的基础上,探讨爆破点到基坑边缘的位置和基坑高度变化对地表振动的影响,得出以下主要结论:

(1) 爆破点距基坑边缘的距离越大,由于振动受到爆点与测点间空气阻隔的影响,振动的衰减作用会越强,同时自由面的振动也会消耗一部分振动能量。

(2) 在相同爆心距情况下,基坑高度越高,地表测点振动速度越高,此时的地表振动速度主要受高程效应的影响。

(3) 在爆心距相同的情况下,基坑高度对地表振速的影响大于爆点位置的影响。

参考文献:

References:

- [1] 王梦恕. 中国铁路、隧道与地下空间发展概况[J]. 隧道建

- 设,2010,30(4):351-364.
- WANG Mengshu. An overview of development of railways, tunnels and underground works in China[J]. Tunnel Construction,2010,30(4):351-364.
- [2] 宋宏坤. 基于爆破振速衰减规律的爆破振动控制技术[J]. 中外公路,2022,42(2):188-193.
- SONG Hongkun. Blasting vibration control technology based on blasting velocity attenuation law[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(2):188-193.
- [3] 谢晓峰,吴从师,邓小钊,等. 立交下穿隧道爆破振动对既有隧道影响研究[J]. 中外公路,2013,33(6):208-212.
- XIE Xiaofeng, WU Congshi, DENG Xiaozhao, et al. Study on the influence of blasting vibration of overpass underpass tunnel on existing tunnel[J]. Journal of China & Foreign Highway,2013,33(6):208-212.
- [4] 周俊汝,卢文波,张乐,等. 爆破地震波传播过程的振动频率衰减规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(11):2171-2178.
- ZHOU Junru, LU Wenbo, ZHANG Le, et al. Attenuation of vibration frequency during propagation of blasting seismic wave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(11):2171-2178.
- [5] 朱斌,蒋楠,周传波,等. 基坑开挖爆破作用邻近压力燃气管道动力响应特性研究[J]. 振动与冲击,2020,39(11):201-208.
- ZHU Bin, JIANG Nan, ZHOU Chuanbo, et al. Effect of excavation blast vibration on adjacent buried gas pipeline in a foundation pit[J]. Journal of Vibration and Shock,2020,39(11):201-208.
- [6] 叶红宇,杨小林,卓越. 频繁爆破下隧道内振动传播的数值研究[J]. 现代隧道技术,2020,57(2):149-156.
- YE Hongyu, YANG Xiaolin, ZHUO Yue. Numerical simulation of the propagation law of blast-induced vibration in the tunnel under frequent blasting[J]. Modern Tunnelling Technology,2020,57(2):149-156.
- [7] 冯小冬. 地铁钻爆法施工对邻近建筑物的振动响应预测[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(2):580-589.
- FENG Xiaodong. Prediction of vibration response of adjacent buildings by subway drilling and explosion method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2021,17(2):580-589.
- [8] 王建国,黄永辉,周建明. 露天煤矿爆破振动的BP神经网络预测[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2016,35(3):322-328.
- WANG Jianguo, HUANG Yonghui, ZHOU Jianming. BP neural network prediction for blasting vibration in open-pit coal mine[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science),2016,35(3):322-328.
- [9] SAADAT M, KHANDELWAL M, MONJEZI M. An ANN-based approach to predict blast-induced ground vibration of Gol-E-Gohar iron ore mine, Iran[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2014,6(1):67-76.
- [10] LAVAL A I. An artificial neural network-based mathematical model for the prediction of blast-induced ground vibration in granite Quarries in Ibadan, Oyo State, Nigeria[J]. Scientific African,2020,8:e00413.
- [11] AZIMI Y, KHOSHROU S H, OSANLOO M. Prediction of blast induced ground vibration (BIGV) of quarry mining using hybrid genetic algorithm optimized artificial neural network[J]. Measurement,2019,147:106874.
- [12] 葛克水. 爆破振动的计算方法初探[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2003,30(S1):299-300.
- GE Keshui. Preliminary study on calculation method of blasting vibration[J]. Drilling Engineering, 2003, 30(S1): 299-300.
- [13] 黄佑鹏,王志亮,杨辉,等. 流固耦合法模拟岩石爆破时耦合范围的确定[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2019,42(12):1672-1678,1694.
- HUANG Youpeng, WANG Zhiliang, YANG Hui, et al. Determination of coupling range in the simulation of rock blasting using fluid-solid coupling algorithm[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science),2019,42(12):1672-1678,1694.
- [14] 邹新宽,张继春,潘强,等. 隧道明挖段拉槽爆破时既有隧道结构动力响应特性[J]. 振动与冲击,2015,34(19):203-207,212.
- ZOU Xinkuan, ZHANG Jichun, PAN Qiang, et al. Dynamic response characteristics of an existing tunnel structure under cutting blast utilized in open excavation[J]. Journal of Vibration and Shock,2015,34(19):203-207,212.
- [15] 张鹏,刘宇,周永利,等. 露天煤矿台阶边坡爆破振速的高程放大效应研究[J]. 煤炭科学技术,2020,48(5):216-221.
- ZHANG Peng, LIU Yu, ZHOU Yongli, et al. Study on elevation amplification effect of blasting vibration velocity of bench slope in surface mine[J]. Coal Science and Technology,2020,48(5):216-221.