

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.02.001

高陡边坡动力响应研究*

季金铭,高文学,曹晓立,叶明班,张登杰
(北京工业大学 建筑工程学院,北京 100124)

摘要: 为研究爆破荷载作用下高陡边坡的动力稳定性问题,依托国家高山滑雪中心(延庆赛区)索道平台处边坡爆破工程,在现场监测的基础上结合数值模拟对爆破破岩过程中边坡的速度场、应力场和位移场进行了研究。研究表明:对于边坡坡顶平面,随着爆心距的增大,质点振速峰值呈现衰减趋势,一定范围内 $V_{\text{垂向}} > V_{\text{径向}} > V_{\text{切向}}$,质点垂向振速主频主要集中在0~50 Hz范围;对边坡坡面,随着爆心距增大,质点振速、位移总体呈现衰减趋势,台阶处受“鞭梢效应”影响,产生放大效应,并且具有方向性;台阶处应力峰值与振速峰值并非在同一位置出现,岩体边坡的岩体边坡的稳定性应综合考虑振速峰值大小及应力是否超过岩体的抗拉强度来判断。

关键词: 高陡边坡; 动力响应; 振动监测; 数值模拟; 鞭梢效应

中图分类号: TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)02-0001-07

Study on Dynamic Stability of High and Steep Slopes

Ji Jin-ming, GAO Wen-xue, CAO Xiao-li, YE Ming-ban, ZHANG Deng-jie
(Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to study the dynamic stability of high-steep slope under blasting load, relying on the slope blasting project of the cableway platform of the National Alpine Ski Center (Yanqing Division), combined with numerical simulation on the slope during the blasting process. The velocity field, stress field and displacement field were studied. The results show that: For the top plane of the slope, with the increase of the blasting distance, the peak particle velocity shows a decreasing trend, and $V_{\text{vertical}} > V_{\text{radial}} > V_{\text{tangential}}$ within a certain range. The frequency of vibration in vertical direction is mainly concentrated in the range of 0~50 Hz. For the slope, as the blasting distance increases, the vibration velocity and displacement of the particle show a decreasing trend, and the bench is affected by the “whiplash effect”, which produces a magnifying effect directionally. The peak stress at the bench and the peak particle velocity do not appear at the same position. The stability of the rock slope should be judged by the magnitude of the vibration velocity and whether the stress exceeds the rock tensile strength.

Key words: high and steep slope; dynamic response; vibration monitoring; numerical simulation; whiplash effect

爆破是边坡工程、道路工程、水利水电工程中常用的施工方法,爆破振动诱发的边坡崩塌、滑移等严

重影响人民的生命财产安全,因此对于边坡的动力响应研究具有十分重要的现实意义^[1,2]。目前,国内外学者针对这一课题进行了广泛研究,主要侧重于振速的高程放大效应研究。唐海等研究发现凸形地形、地貌对爆破振动波的放大效应具有方向性^[3],并运用量纲分析法推导了反映高程放大效应的爆破振动公式。陈明等依托溪洛渡水电站右岸坝

收稿日期:2020-01-16

作者简介:季金铭(1994-),男,硕士研究生,主要从事边坡动力稳定性研究,(E-mail)1174254812@qq.com。

通讯作者:高文学(1962-),男,博士、教授、博士生导师,主要从事路桥基础工程、隧道工程等方向的教学和研究工作,(E-mail)wxgao@bjut.edu.cn。

基金项目:国家重点研发计划“科技冬奥”(2018YFF0300205)

肩爆破工程,通过理论分析及数值模拟得到在边坡坡形骤变、坡度增大的坡段会产生显著的振动速度高程放大效应^[4]。付波等基于 LS-DYNA 的动力有限元计算,得出马道外缘点和马道中点出现明显的振动放大效应^[5],而马道内测点和坡面中点的爆破振动放大并不明显。武旭等基于台阶地形爆炸振动数值模拟与边坡振动实验,得出台阶高程对爆破振动速度既有放大作用同时也随高度的增加产生衰减作用^[6]。万鹏鹏等通过现场监测数据得出正高差边坡在爆破振动荷载作用下产生“鞭梢效应”^[7],使台阶突出部位岩体产生显著的高程放大效应。国外方面,Marrara、Havenith 及 Vladimir 等对边坡的动力响应进行了相关研究^[8-10]。

以往研究者在一定程度上探明了边坡在爆破荷载作用下的动力响应规律,但由于边坡的动力响应受地形地貌等因素影响,这些规律不具有普适性,因此有必要对高陡边坡在爆破开挖过程中边坡的动力响应进行进一步的深入研究。本文依托高山滑雪中心索道平台处高陡边坡爆破工程,通过现场振动监测和有限元软件模拟分析了爆破荷载作用下坡顶及坡面质点振速、应力、位移衰减规律,为后续爆破开挖设计与边坡支护提供依据。

1 现场测试

1.1 场地概况

本次爆破位于国家高山滑雪中心(延庆赛区)C1 索道平台处,原始地貌坡度在 20°至 45°之间。依据现场地质勘查,山坡表层为耕植土和碎石土,厚度约为 1~2 m。表层以下为节理裂隙较发育的花岗岩。开挖分为四级放坡,坡高依次为 4.4 m、9 m、9 m、8.3 m,台阶平台宽 2 m,边坡设计坡比为 1:0.3。本次爆破在第三级边坡处。

1.2 爆破设计及振动监测

爆破设计参数如下:钻孔直径 $\phi = 100$ mm,孔距 $a = 3 \sim 3.5$ m,排距 $b = 2.5 \sim 3$ m,爆破抵抗线 $W = 2.5 \sim 3$ m,最大单段药量为 792 kg。采用逐排起爆网路,共计 6 排炮孔,最外一排首先起爆,由外向内依次起爆。

爆破振动监测采用 TC-4850 测振仪,依据工程施工进度和地形条件,爆破振动监测点布置在边坡坡顶,第一个测点距离边坡外沿 3 m 处,其余三个测点间隔 5 m 依次布置,测点布置如图 1、图 2 所示。

1.3 振动规律分析

本次爆破中采集的 4 个测点的振速峰值统计数据如表 1 所示。

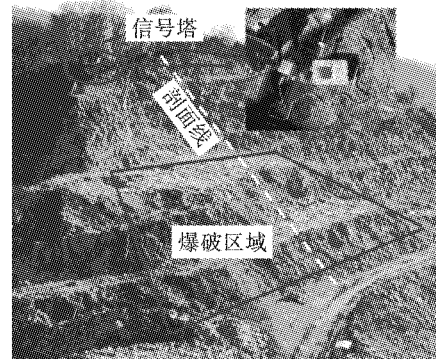


图 1 传感器布置方式示意图

Fig. 1 Vibration velocity sensor arrangement diagram

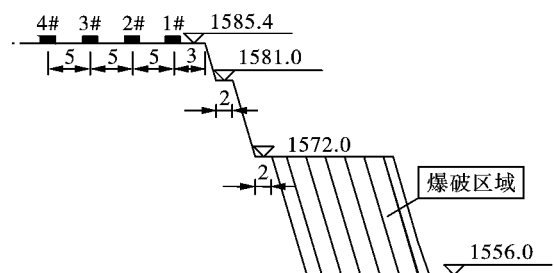


图 2 测点布置图(单位:m)

Fig. 2 Vibration velocity sensor arrangement diagram(unit:m)

表 1 测点峰值振速统计表

Table 1 Statistical table of peak vibration velocity at measured points

测点编号	爆心距 R/m	水平径向/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	水平切向/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	垂直方向/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	22	8.5700	7.889	13.845
2	27	7.3590	6.198	8.606
3	32	6.4951	5.536	7.350
4	37	5.9862	5.409	6.002

对三个方向的振速峰值按萨道夫斯基公式进行非线性拟合^[11-13],拟合结果如图 3 和表 2 所示。

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

表 2 回归参数表

Table 2 Regression parameter table

	径向	切向	垂向
K	15.723	15.207	58.649
α	0.705	0.789	1.697
R^2	0.997	0.927	0.966

拟合结果显示,三个方向拟合优度 R^2 均大于 0.9,拟合效果较好,具有较高的可靠性,拟合公式能

够应用于实际工程。

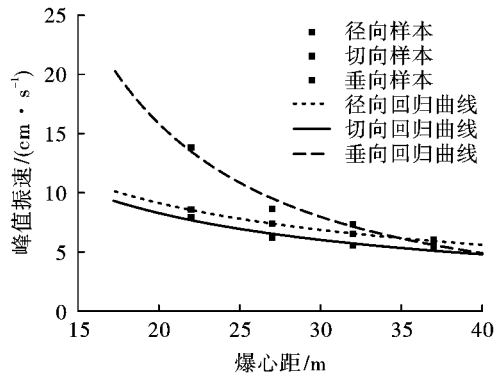


图3 测点峰值振速回归曲线

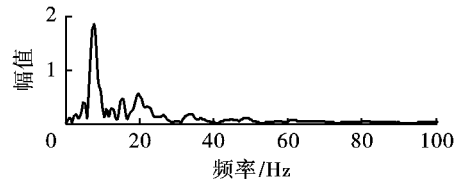
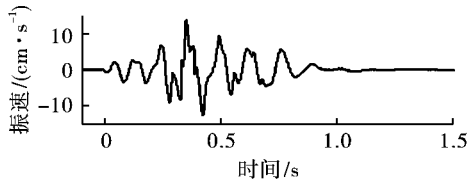
Fig. 3 Peak vibration velocity regression curve of measured points

从图3可以看出,在爆心距小于35 m范围内

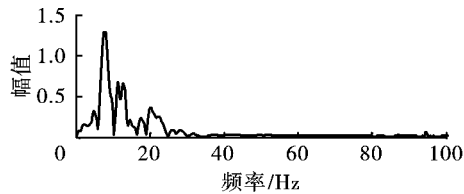
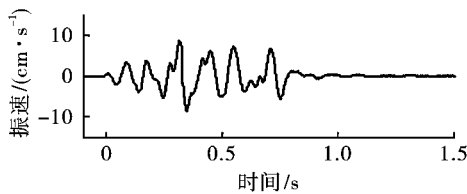
$V_{\text{垂向}} > V_{\text{径向}} > V_{\text{切向}}$,且随着爆心距的增大,三个方向振速逐渐减小。从振速峰值衰减速度上看,垂向振速衰减最快,切向振速和径向振速衰减较慢。

岩体爆破开挖过程中对岩体及周边建(构)筑物的爆破振动破坏作用不仅取决于峰值振速,而且和爆破振动波的振动频率以及持续时间密切相关。对四个测点垂向振速进行傅里叶变换得到频谱图,如图4所示。

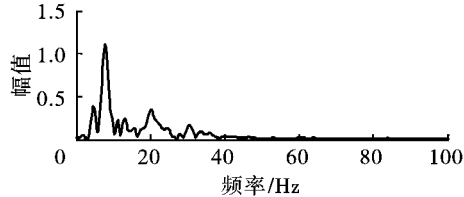
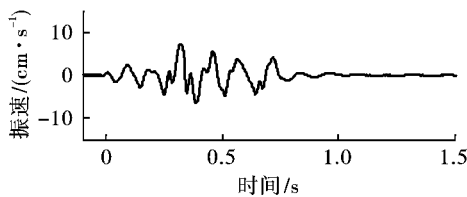
图中可以看出爆破地震波的主要频率范围在50 Hz以下,主要频率范围随着传播距离的增加逐渐变窄,并向低频的方向移动。同时,振动主频随着距离的增加也会衰减,爆破地震波通过岩体结构面时高频部分比低频部分更容易被滤掉,使得爆破地震波高频部分的能量衰减快于低频,高频部分携带的能量逐渐减小,能量向低频方向集中。



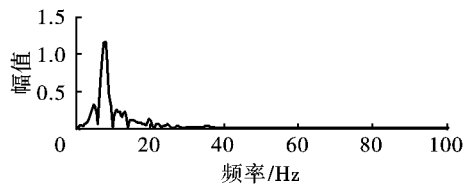
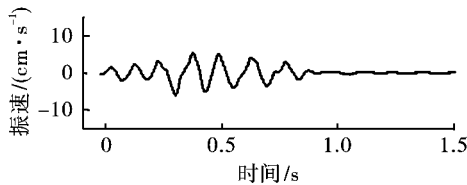
(a) 1#测点振速波形图及频谱图
(a) Wave velocity waveform of measuring point 1



(b) 2#测点振速波形图及频谱图
(b) Wave velocity waveform of measuring point 2



(c) 3#测点振速波形图及频谱图
(c) Wave velocity waveform of measuring point 3



(d) 4#测点振速波形图及频谱图
(d) Wave velocity waveform of measuring point 4

图4 测点振速波形图及频谱图

Fig. 4 Point vibration waveform and spectrogram

对于岩质边坡,《爆破安全规程》(GB6722—2014)^[14]中,根据爆破主振频率的不同,给出了边坡

振动速度控制标准如表3。

表3 边坡爆破振动安全允许标准

Table 3 Safety criterion of blasting vibration for rock slope

主振频率/ Hz	$f \leq 10$	$10 < f \leq 50$	$50 < f$
安全允许振速/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	5 ~ 9	8 ~ 12	10 ~ 15

本次爆破施工过程中,主频在10~50 Hz,除1#测点垂向振速大于12 cm/s,其余测点振速峰值均在安全允许范围内。爆破现场发现坡面有碎石塌落现象,但坡顶平面岩体没有明显损伤,边坡处于安全状态。

2 岩质边坡爆破振动数值模拟研究

2.1 模型的建立及边界条件

依据现场的实际情况和对边坡的初步分析,建立如下的三维模型:模型分为两个区域,表层为中等风化的花岗岩,以下为微风化的花岗岩,共86724个

有限单元,模型两侧添加自由场边界,底部采用固定约束。为保证计算精度,炮孔周边网格尺寸取0.04 m,边坡坡面取0.5 m,模型远处边界尺寸为2.5 m,模型尺寸图如图5所示。

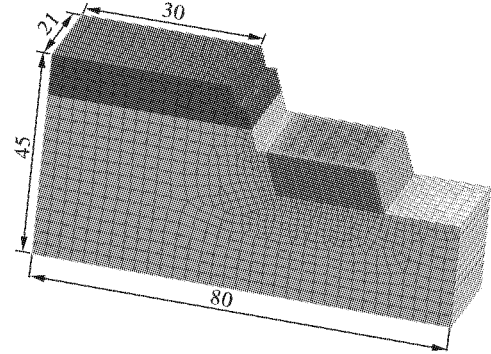


图5 模型尺寸图(单位:m)

Fig. 5 Model size chart (unit: m)

2.2 材料模型及参数

本模型采用理想弹塑性模型,基于摩尔-库伦屈服准则。具体岩石物理力学参数如表4。

表4 岩石物理力学参数表

Table 4 Rock physical mechanics parameter table

岩层	弹性模量/ GPa	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	泊松比	粘聚力/ MPa	摩擦角/ $^{\circ}$	抗拉强度/ MPa
花岗岩碎石土	18	23.7	0.3	15	45	2.1
中风化花岗岩	30	24.5	0.25	23	60	2.7

2.3 边界及爆破荷载的确定

采用三角形荷载曲线模型加载到炮孔壁上,对于耦合装药,荷载峰值等效荷载由式(2)、(3)计算^[15]

$$\sigma_{\max} = P_w \left(\frac{1}{r} \right)^{\alpha} \quad (2)$$

$$P_w = \frac{\rho_w D^2}{1 + K} \quad (3)$$

式中: P_w 为药包中心爆轰波产生的平均初始压力, N/m^2 ; r 为比例半径, $r = R/R_w$, R 为与药包轴线的距离, R_w 为药包横切半径; α 为与岩体介质和炸药种类有关的常数,一般取1.5; ρ_w 为装药密度; D 为炸药爆轰速度; K 为等熵指数,与装药密度有关,当 $\rho_w < 1.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ 时, $K = 2.1$, $\rho_w > 1.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ 时, $K = 3$ 。

爆破荷载升压时间 t_r 由式(4)计算

$$t_r = \frac{12 \sqrt{r^{2-\mu}} Q^{0.05}}{E_v} \quad (4)$$

爆破荷载压力正压作用时间 t_s 由式(5)计算

$$t_s = \frac{84 \sqrt[3]{r^{2-\mu}} Q^{0.2}}{E_v} \quad (5)$$

式中: E_v 为岩体体积压缩模量,MPa; μ 为岩体泊松比; Q 为装药量,kg,计算得到荷载时程图如图6所示。

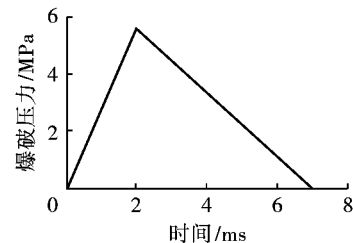


图6 爆破荷载时程曲线

Fig. 6 The history of blasting load

2.4 数值模拟结果分析

表5给出计算模型对应四个测点处的峰值振速实测值与模拟值的误差。

误差分析可以看出,1#测点模拟值与检测值基本吻合,但是随着水平爆心距的增大,测点误差也逐

渐增大,这是由于数值模拟假定边坡岩层为均质理想岩体,而实际岩层内部存在节理、裂隙,这些节理、裂隙会吸收爆破地震波的能量导致应力波明显衰

减。虽然测点振速峰值存在误差,但均在合理范围之内,数值模拟的结果可以应用在边坡中。

表 5 实测值与模拟值对比表

Table 5 Table of comparison between measured and simulated values

测点	水平径向			水平切向			垂 向		
	实测值/ (cm · s ⁻¹)	模拟值/ (cm · s ⁻¹)	相对 误差/%	实测值/ (cm · s ⁻¹)	模拟值/ (cm · s ⁻¹)	相对 误差/%	实测值/ (cm · s ⁻¹)	模拟值/ (cm · s ⁻¹)	相对 误差/%
1 [#]	7.595	9.860	29.82	7.889	8.30	5.21	13.84	13.96	0.87
2 [#]	7.086	8.830	24.61	6.198	7.42	19.72	8.61	10.85	26.02
3 [#]	7.959	8.410	5.67	5.536	6.50	17.41	7.35	9.24	25.71
4 [#]	8.570	7.042	17.83	5.409	6.30	16.47	6.01	8.52	41.76

注:相对误差 = $\frac{\text{模拟值} - \text{实测值}}{\text{实测值}} \times 100\%$

2.4.1 质点振动速度分析

图 7 为一个周期的爆破荷载作用下岩体内合速度的变化云图。为更好观察速度场在岩体内部的分布变化,剖取后半侧模型进行分析。

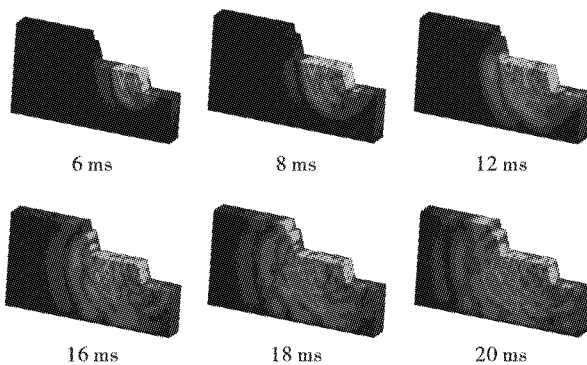


图 7 不同时刻速度变化云图

Fig. 7 Speed change cloud map at different times

从图 7 可看出爆破振动产生的速度场以爆源为中心呈环状扩散至整个岩体。扩散过程中地震波能量被岩体介质吸收,为更精确分析岩体爆破地震波的传播规律,提取坡面若干质点作为研究对象,坡面质点的振速峰值曲线如图 8 所示。

从图 8 可以看出,质点三向振速及合速度沿坡面总体呈现衰减趋势。在第 I 级台阶和第 II 级台阶处出现明显的波动现象,这是由于爆破振动波传播至台阶处会产生“鞭梢效应”^[16-18],在坡面相同高程处,第 II 级台阶外缘相对于内侧坡脚放大系数分别为合速度 1.66、垂向 1.67、径向 2.17、切向 2.24。在沿边坡坡型急剧变化的不同高程处,第 I 级台阶外缘振速相对于第 II 级台阶外缘在合速度向、垂向、径向均体现出明显的高程放大效应,放大系数分别为 1.1、1.13、1.15,但在切向上没有表现出高程放

大现象。此外,第 I 级台阶坡脚振速相对于第 II 级台阶坡脚也没有出现高程放大现象。

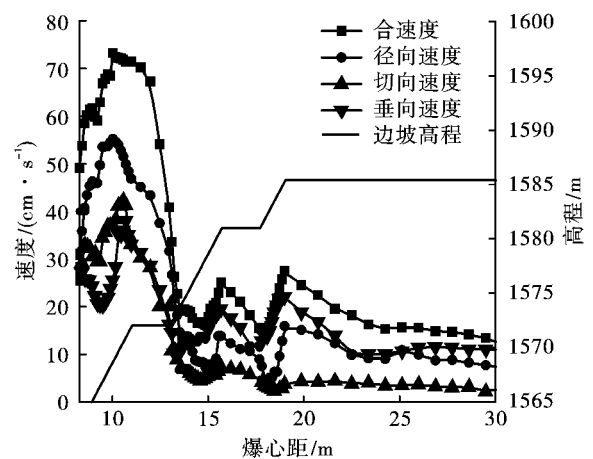


图 8 坡面振速峰值变化曲线

Fig. 8 Slope vibration velocity peak curve

2.4.2 质点应力分布规律分析

图 9 为一个爆破周期内最大主应力变化云图。爆破荷载作用开始后,爆破应力波以炮孔为中心逐渐扩散到整个边坡,扩散过程中受坡型变化影响,在坡脚处出现应力集中现象,提取坡面最大主应力峰值得到曲线图 10。

从图 10 中可以看出坡面各向最大主应力沿着坡面总体呈现衰减趋势,其中切向主应力受坡型变化影响小。而合主应力、径向主应力、垂向主应力有相似的变化趋势:在第 I、II 级台阶平面上,在台阶外缘出现最大主应力极小值,沿着台阶平面逐渐增大,在台阶坡脚处达到极大值。沿着坡面方向上,最大主应力逐渐增大,合主应力和垂向主应力曲线在坡中处略微波动产生小区域放大现象,随后逐渐衰减,在台阶外缘处达到极小值。结合图 8 可以得出,

台阶处速度峰值和应力峰值出现的位置无相关性,因此不应将台阶边缘处质点振速峰值作为边坡稳定性评价的单一指标。在第 I、II 级台阶坡脚处总应力大小分别为 0.17 MPa、0.27 MPa,两者均小于岩体抗拉强度,故爆破开挖时,坡脚处不会因为应力集中造成岩体破坏。

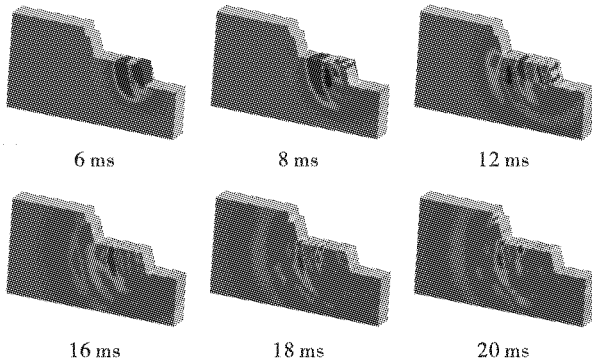


图 9 不同时刻应力场变化云图

Fig. 9 Stress field change cloud map at different times

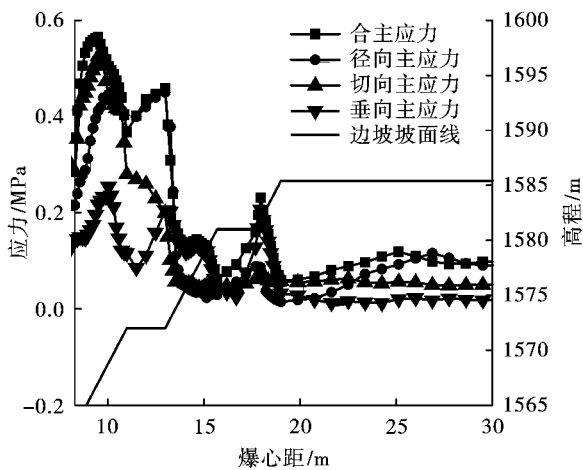


图 10 坡面应力变化曲线

Fig. 10 Slope stress curve

2.4.3 质点位移场分析

图 11 为边坡岩体内一个爆破周期内不同时刻位移场变化云图,从图中可以看出,爆破位移场呈环状扩散,质点位移呈现先增大后减小的趋势。提取坡面质点各方向位移图 12 所示。

与图 8 坡面振速峰值变化曲线相比,坡面位移变化曲线有相似的变化规律,坡面台阶处位移也受“鞭梢效应”影响,在台阶外缘处边坡位移有增大现象,但从数值来看,产生位移不会对边坡稳定性产生影响。

3 结论

依托国家高山滑雪中心(延庆赛区)索道平台处高陡边坡爆破工程,将现场监测和数值模拟相结

合,研究了爆破荷载作用下边坡振速、应力、位移的变化规律,在此基础上分析了爆破施工对边坡安全稳定性的影响,主要结论如下:

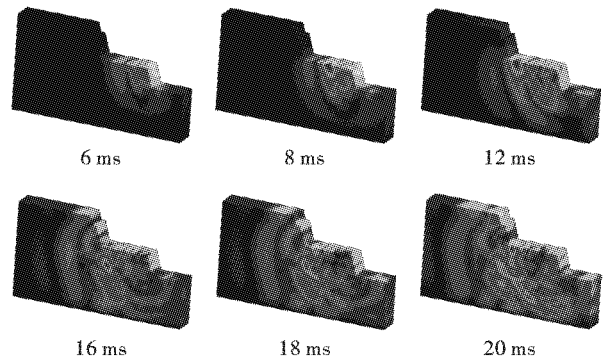


图 11 不同时刻位移场变化云图

Fig. 11 Displacement field change cloud map at different times

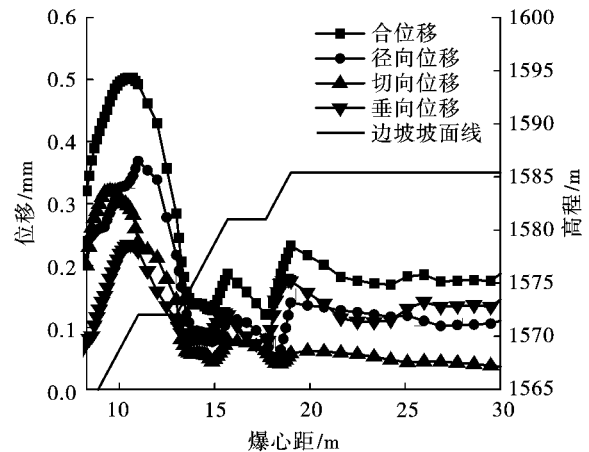


图 12 坡面位移变化曲线

Fig. 12 Slope displacement curve

1)对于边坡坡顶平面,随着爆心距的增大,质点振速峰值呈衰减趋势,一定范围内 $V_{\text{垂向}} > V_{\text{径向}} > V_{\text{切向}}$,质点垂向振速主频主要集中在 0~50 Hz,随着爆心距增大,主频范围逐渐变窄且向低频方向移动。

2)对于边坡坡面质点,随着爆心距增大,质点振速峰值总体呈衰减趋势;台阶处受“鞭梢效应”影响产生放大效果,且放大效果具有方向性;台阶外缘相对台阶内侧,质点振速在合速度向、垂向、径向、切向分别放大 1.66、1.67、2.17、2.24 倍;上一台阶相对下一台阶,质点振速在合速度向、垂向、径向分别放大 1.1、1.13、1.15,切向未产生放大效果。位移峰值具有相似的变化规律。

3)应力峰值出现在台阶内侧,而质点振速峰值出现在台阶外缘,应力与振速峰值并非在同一位置出现,岩体边坡的稳定性应综合考虑振速峰值大小及应力是否超过岩体的抗拉强度来判断。

参考文献 (References)

- [1] 胡英国,吴新霞,赵根,等. 水工岩石高边坡爆破振动安全控制标准的确定研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2208-2216.
- [1] HU Ying-guo, WU Xin-xia, ZHAO Gen, et al. Determination of safety control standard for high rock slopes under blasting vibration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2208-2216. (in Chinese)
- [2] 张智宇,刘殿柱,马军,等. 爆破振动载荷作用下露天矿高边坡动态响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(3): 373-377.
- [2] ZHANG Zhi-yu, LIU Dian-zhu, MA Jun, et al. Dynamic response analysis of high open-pit slope under blasting vibration load[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(3): 373-377. (in Chinese)
- [3] 唐海,李海波. 反映高程放大效应的爆破振动公式研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 820-824.
- [3] TANG H, LI H B. Study of blasting vibration formula of reflecting amplification effect on elevation[J]. Rock & Soil Mechanics, 2011, 32(3): 820-824. (in Chinese)
- [4] 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): 2189-2195.
- [4] CHEN Ming, LU Wen-bo, 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): 2189-2195. (in Chinese)
- [5] 付波,胡英国,卢文波,等. 岩石高边坡爆破振动局部放大效应分析[J]. 爆破, 2014, 31(2): 1-7, 46.
- [5] FU Bo, HU Ying-guo, LU Wen-bo, et al. Local amplification effect of blasting vibration in high rock slope[J]. Blasting, 2014, 31(2): 1-7, 46. (in Chinese)
- [6] 武旭,张云鹏,郭奇峰. 台阶地形爆破振动放大与衰减效应研究[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(6): 1017-1022.
- [6] WU X, ZHANG Y P, GUO Q F. Amplification and attenuation effect of blasting vibration on step topography[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(6): 1017-1022. (in Chinese)
- [7] 万鹏鹏,璩世杰,许文耀,等. 台阶爆破质点振速的高程效应研究[J]. 爆破, 2015, 32(2): 29-32, 63.
- [7] WAN Peng-peng, QU Shi-jie, XU Wen-yao, et al. Study of elevation effect of bench blasting particle vibration velocity[J]. Blasting, 2015, 32(2): 29-32, 63. (in Chinese)
- [8] MARRARA F, SUHADOLC P. Site amplifications in the city of Benevento (Italy) comparison of observed and estimated ground motion from explosive sources[J]. Journal of Seismology, 1998, 2(2): 125-143.
- [9] HAVENITH H B, VANINI M, JONGMANS D. Initiation of earthquake-induced slope failure; influence of topographical and other site specific amplification effects[J]. Journal of Seismology, 2003, 7(3): 397-412.
- [10] VLADIMIR G. Low-velocity zone and topography as a source of site amplification effect on Tarzana hill, California[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29(2): 324-332.
- [11] 吕涛,石永强,黄诚,等. 非线性回归法求解爆破振动速度衰减公式参数[J]. 岩土力学, 2007(9): 1871-1878.
- [11] LU Tao, SHI Yong-qiang, HUANG Cheng, et al. Study on attenuation parameters of blasting vibration by nonlinear regression analysis[J]. Rock & Soil Mechanics, 2007(9): 1871-1878. (in Chinese)
- [12] 莫小琴. 基于最小二乘法的线性与非线性拟合[J]. 无线互联科技, 2019, 16(4): 128-129.
- [12] Mo Xiao-qin. Linear and nonlinear fitting based on least squares method[J]. WUXIAN HULIAN KEJI, 2019, 16(4): 128-129. (in Chinese)
- [13] 陈钧潘. 爆破振动公式中K值上下限的探讨[J]. 爆破, 1996, 13(2): 12-15.
- [13] CHEN Jun-pan. Discussion on upper and lower limit of K value in blasting vibration formula[J]. Blasting, 1996, 13(2): 12-15. (in Chinese)
- [14] GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社.
- [14] GB6722—2014 Safety regulations for blasting[S]. Beijing: China Standards Press. (in Chinese)
- [15] 许红涛,卢文波,周小恒. 爆破震动场动力有限元模拟中爆破荷载的等效施加方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008(1): 67-71, 103.
- [15] XU Hong-tao, LU Wen-bo, ZHOU Xiao-heng. An equivalent approach for acting blasting load in dynamic finite element simulation of blasting vibration[J]. Engineering Journal of WUHAN University, 2008(1): 67-71, 103. (in Chinese)
- [16] 余敏,林从谋,常方强,等. 岩质深基坑爆破振动放大效应测试研究[J]. 爆破, 2017, 34(4): 27-32, 65.
- [16] YU Min, LIN Cong-mou, CHANG Fang-qiang, et al. Research on amplification effect of blasting vibration in rock deep foundation pit[J]. Blasting, 2017, 34(4): 27-32, 65. (in Chinese)
- [17] 廖涛,蒲传金,杨鑫,等. 桩井爆破振动在邻近边坡产生的特殊效应[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 623-628.
- [17] LIAO Tao, PU Chuan-jin, YANG Xin, et al. The special effect of pile well blasting vibration on the adjacent slope[J]. Rock & Soil Mechanics, 2015, 36(S2): 623-628. (in Chinese)
- [18] 孙健. 鞭梢效应对大坝安全的影响研究[J]. 东北水利水电, 2013, 31(3): 6-8, 71.
- [18] SUN Jian. Study on the influence of flagellate effect on dam safety[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2013, 31(3): 6-8, 71. (in Chinese)