

上下交叉隧道爆破振动特性研究

刘殿柱，高全臣，王鑫尧

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083)

摘要：上下交叉隧道爆破开挖过程中,确保已开挖隧道在爆破载荷作用下的安全是施工过程中的关键问题。以八达岭长城站隧道工程为背景,对进站层主通道爆破开挖进行爆破振动监测,得到了开挖断面在接近和远离监测点的过程中,各监测点的振速分布规律;对实测波形进行频谱分析,得到了不同频率范围的能量分布及不同时刻的瞬时能量。运用 LS-DYNA 程序建立上下交叉隧道有限元模型,提取了各监测单元的速度时程曲线及等效应力时程曲线。结果表明:各单元振速分布规律与实测振速分布规律相吻合;各单元的等效应力值小于岩体的拉伸屈服强度,未对隧道岩体造成破坏。结合数值计算结果,依据等效应力判据确定了保证已开挖隧道安全的质点临界振动速度,为上部隧道开挖对下部隧道的爆破扰动控制提供了理论依据。

关键词：上下交叉隧道；爆破振动监测；频谱分析；临界振速

中图分类号：U455.6 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-0645(2020)12-1267-08

DOI：10.15918/j.tbit.1001-0645.2019.279

Study on Blasting Vibration Characteristics of Up and Down Cross Tunnels

LIU Dian-zhu, GAO Quan-chen, WANG Xin-yao

(School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology
(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: During the blasting excavation process of the up and down cross tunnels, it is a key issue to ensure the safety of the excavated tunnel under blasting load. Based on the tunnel engineering of Badaling Great Wall station, the blasting vibration monitoring with the blasting excavation of the main tunnel in the entrance layer was carried out, and the vibration velocity distribution law of each monitoring point was obtained when the excavation section was close to or far from the monitoring point. The frequency spectrum analysis was performed to obtain the energy distribution in different frequency ranges and the instantaneous energy at different times. The LS-DYNA program was used to establish the finite element model of the up and down cross tunnels. The velocity time history curves and effective stress time history curves of each monitoring unit were extracted. The results show that the vibration velocity distribution law of each unit was consistent with the measured vibration velocity distribution law. The effective stress value of each unit was less than the tensile yield strength of the rock mass, and the tunnel rock mass was not damaged. Combined with the numerical calculation results, the critical vibration velocity of particles was determined to ensure the safety of the excavated tunnel according to the effective stress criterion, which provides a theoretical basis for the blasting disturbance control of the lower tunnel by the upper tunnel excavation.

收稿日期：2019-11-06

基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金(2010YL01)

作者简介：刘殿柱(1986—),男,博士生,E-mail:liudz1110@163.com.

Key words: up and down cross tunnels; blasting vibration monitoring; spectrum analysis; critical vibration velocity

随着经济的持续发展,我国隧道及地下工程得到了迅速发展,新建结构物邻近既有结构物、小净距平行隧道、上下交叉隧道等形式的近接工程大量涌现^[1]。在近接隧道爆破开挖过程中,不可避免地会产生爆破扰动,这不但会影响工程进度,同时还可能造成结构的安全问题。因此,研究近接隧道爆破振动特性,保证工程进度的同时,最大限度的降低爆破振动带来的有害效应具有重要的现实意义。

目前,国内外学者对近接隧道爆破振动特性进行了大量的研究。王明年等^[2]对邻近隧道爆破进行了现场监测与数值分析,得到不同间距情况下,既有隧道衬砌不同部位的质点振动速度及最大主应力值。阳生权等^[3]通过对某小净距平行公路隧道的爆破振动监测,得到质点振动速度峰值出现的位置及速度峰值对应主频的分布范围,同时指出振动速度峰值的影响因素。李云鹏等^[4]通过数值模拟对比分析了小间距平行隧道施加衬砌前后最大主应力随时间的变化规律及各关键点的振速峰值。钟冬望等^[5]通过数值计算得到交叉处既有隧道各考察点的质点振速时程曲线和应力时程曲线。贾磊等^[6]计算模拟了邻近平行隧道不同间距、不同进尺、不同埋深条件下,爆破开挖对既有邻近隧道衬砌的影响。孙宝平等^[7]通过数值模拟对比了两种隧道爆破方案的破岩过程,并将数值模拟评估的爆破方案应用于实践。郭东明等^[8]通过室内试验和数值分析手段,分析了不同间距下临近隧道的振速分布规律和衰减规律。朱正国等^[9]运用数值软件,计算分析了交叉隧道不同断面、不同部位的峰值速度和峰值位移,同时得到不同围岩级别、不同隧道净距下既有隧道 3 种不同程度的定量影响范围,并确定了各情况下的安全范围。

爆破振动特性的研究是近接隧道开挖工程领域的重点之一,尽管国内外学者已经对小净距平行隧道的现场监测和数值分析进行了一定的研究,但由于交叉隧道现场布置监测点存在一定困难,对于上下交叉隧道的爆破振动特性研究较少,且多采用数值分析手段。因此,文章以京张高铁八达岭长城站进站层开挖为工程背景,对进站层主通道(上层)爆破开挖进行了多次爆破振动监测,得到站台层(下

层)交叉隧道不同部位的振动特性,并采用数值分析手段进行验证分析,得出确保开挖隧道安全的质点临界振动速度。

1 爆破振动监测与分析

1.1 工程背景

八达岭长城站是目前国内埋深最大的高铁地下车站,车站洞室多,错综复杂,是新建京张铁路的关键控制工程。京张铁路全长 12 010 m,地下车站站台层长 450 m。地下车站自上而下由 3 部组成,分别为出站层、进站层及站台层,如图 1 所示。进站层又包含进站层主通道、设备洞室和众多分通道。进站层主通道起迄里程 DK0+072.0~DK0+000.0,最大开挖高度为 17.4 m,采用台阶法施工,其中上部隧道净空为 10 m×7 m(宽×高),采用分部开挖法。进站层主通道开挖拱底距站台层拱顶最短距离为 14.5 m。进站层主通道揭露岩性主要为花岗岩,围岩级别包括Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ 级,其中振动监测段围岩级别为Ⅱ 级。

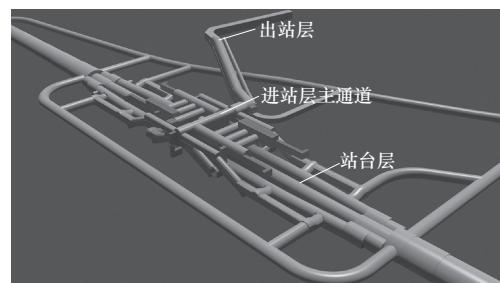


图 1 长城站立体图
Fig. 1 Three-dimensional display of Great Wall station

1.2 爆破方案

进站层主通道开挖拱底与站台层拱顶间距较小,开挖时应重点关注爆破振动对既有隧道的振动影响。通过观测前几次现场监测结果,采用全断面法施工振动速度较大,因此,现场施工采用分部开挖法,即每个循环进尺,先开挖一、二架,后开挖三架。工作面采用楔形掏槽爆破,一、二架布置 6 对掏槽孔,平均循环进尺为 2 m,掏槽孔单孔装药量为 1.2~1.8 kg。采用 1、3、5、7、9、11、13、15 段毫秒延期雷管逐排起爆,周边孔采用 13 段雷管串联导爆索起爆。进站层主通道上部炮孔布置和起爆顺序

图如图 2 所示。

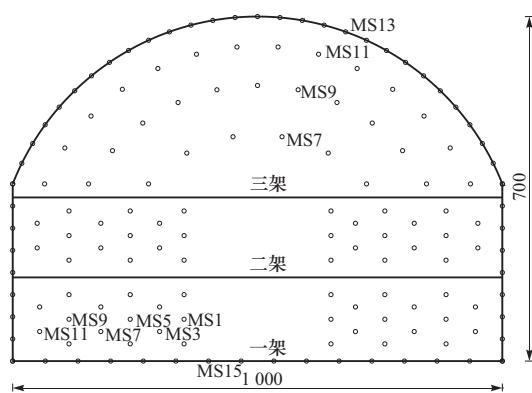


图 2 炮孔布置和起爆顺序图(单位:cm)

Fig. 2 Layout of blasting holes and detonating sequence
(unit:cm)

1.3 振动监测方案

进站层通道开挖中线正下方对应站台层的中心里程为 DK68+050,以此里程断面为监测断面。沿下部既有隧道监测断面的拱腰、拱肩、拱顶布置 5 个监测点,其中 1 号为拱顶监测点,2 号、3 号分别为迎爆侧拱肩、拱腰监测点,4 号、5 号分别为背爆侧拱肩、拱腰监测点。以水平方向距离 1 号监测点正上方 30 m 的开挖面为起始点,监测隧道开挖断面在接近和远离监测断面过程中,各测点的振动响应情况,从而得到上下交叉隧道爆破施工时,既有隧道各关键部位的振动特性。监测点布置如图 3 所示。

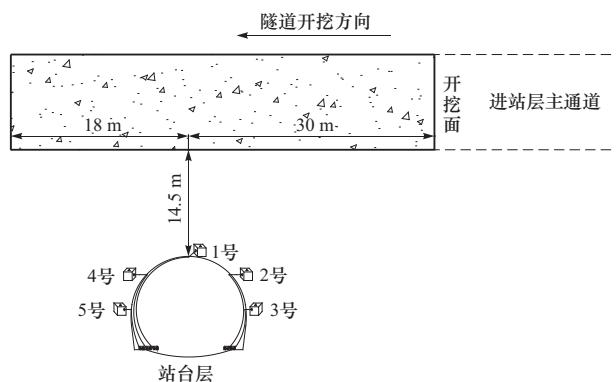


图 3 测点布置图

Fig. 3 Layout of measuring points

1.4 振速分析

在进站层开挖期间,现场共对一、二架爆破进行了 19 次振动测试,开挖里程为 DK0+050.0~DK0+000.0,其中开挖断面 DK0+020.0 位于拱顶

监测点的正上方,爆心距经历了一个由远及近,再逐渐变远的过程。现场单次爆破总装药量为 96~120 kg,最大单段药量为 7.2~25.2 kg,掏槽孔装药量为 14.4~21.6 kg。汇总实测波形,选取具有典型时频特征的实测波形,绘制如图 4 所示,振速峰值随开挖推进的变化曲线如图 5 所示。

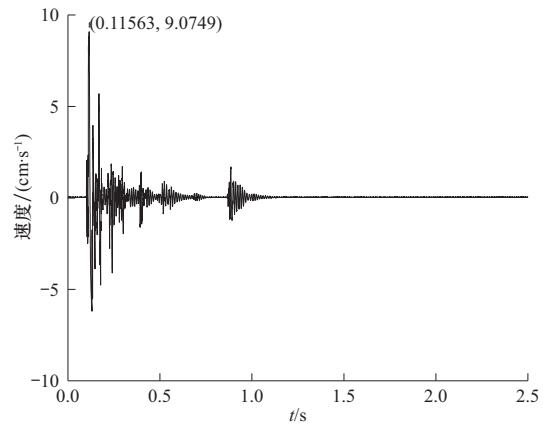


图 4 实测波形图

Fig. 4 Vibration velocity waveform monitored

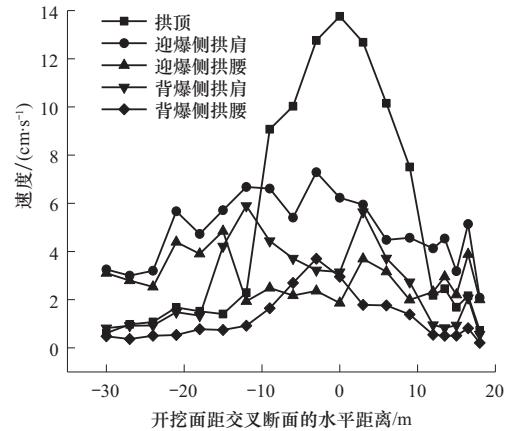


图 5 振速峰值随开挖推进的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of peak vibration velocity with excavation advance

将所有振动数据汇总,绘制出振速峰值变化曲线。由图 5 可知,在开挖断面逐渐接近和远离监测点(以 1 号测点正上方为中心)的过程中,即水平向爆心距 $-30 \sim -12$ m 和 $12 \sim 18$ m 范围内,迎爆侧拱肩振速大于迎爆侧拱腰振速,且二者振速普遍大于背爆侧拱肩和拱腰的振速,而拱顶振动速度较小。究其原因,同一次爆破测试中,其他条件一定的情况下,迎爆侧拱肩测点距离开挖断面较近,能量衰减得小,因此,迎爆侧拱肩振动

速度较大。在开挖断面逐渐接近拱顶测点并远离的过程中,即水平向爆心距 $-12\sim-12$ m 范围内,拱顶振速大于拱肩及拱腰振速,最大值出现在距离拱顶测点最近的正上方。整体而言,虽然每次爆破的爆破参数不同,但整个监测断面的振速分布具有一定的规律性,爆心距对振速大小起决定性作用。由图 4 可知,最大振速值对应的时间为 115.6 ms,由于爆破振动测试时设置了 100 ms 的延期时间,实际最大振速值对应的时间为 15.6 ms,与掏槽孔起爆时间范围相对应,因此,振速峰值出现在掏槽孔部位。究其原因,掏槽爆破时岩石受到的夹制作用大,爆破产生的能量转化成振动波的能量较大,因此,质点振动速度也较大。

1.5 频谱分析

HHT 变换是目前分析爆破振动信号的主要方法之一,通过对 HHT 变换得到的 Hilbert 谱进行积分变换,即可得到爆破振动信号的边际谱和瞬时能量谱,进而分析爆破振动信号的主频及能量分布情况。HHT 变换中的重要一步是对爆破信号进行 EMD 分解^[10],但在 EMD 分解中容易出现模态混叠现象,为此,文中引入 CEEMDAN^[11]法解决上述问题,CEEMDAN 方法在分解的每一阶段添加自适应的白噪声,通过计算唯一的余量信号获取各个模态分量,无论集成次数为多少,重构误差几乎为 0,因此,该方法克服了 EMD 方法存在的模态混叠现象。

将上述实测波形去除趋势项后,进行爆破振动信号分析,图 6 为爆破振动信号经 CEEMDAN 分解的各 IMF 分量图。由图 6 可以看出,模态混叠现象已基本消除。

对信号的 IMF 分量进行频谱分析,图 7 为边际谱,图 8 为不同频率范围的能量比例图,图 9 为瞬时能量谱。

由图 7 和图 8 可知,能量主要分布在 21~70 Hz,其中,1~10 Hz 能量占比为 0.49%,11~20 Hz 能量占比为 4.51%,从安全的角度来说,低频区的能量越小,对保护物越有利,因此,目前采用的爆破方案较为合理。由图 9 可知,不同时间段对应的瞬时能量值不同,瞬时能量最大值对应的时间为 120.4 ms,由于爆破振动测试时设置了 100 ms 的延期时间,实际瞬时能量最大值对应的时间为 20.4 ms,与掏槽孔起爆时间范围相对应,因此,在现场施工过程中应重点关注掏槽孔起爆产生的振动速度和影响。

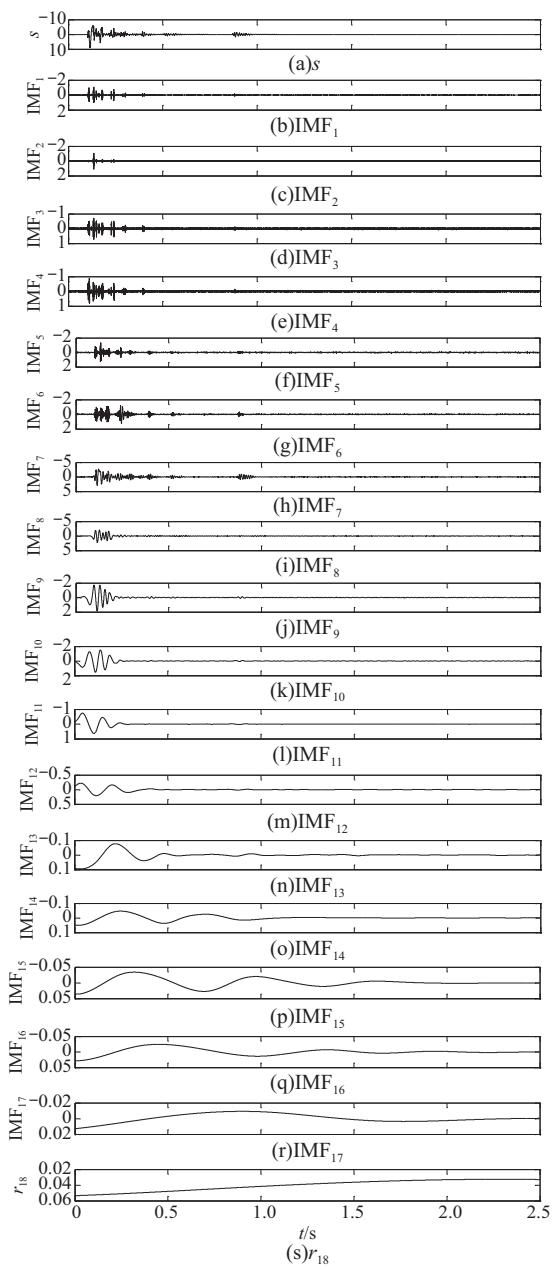


图 6 爆破振动信号的 CEEMDAN 分解

Fig. 6 CEEMDAN decomposition of blasting vibration signals

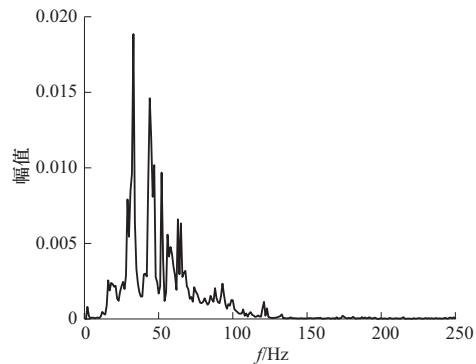


图 7 边际谱

Fig. 7 Marginal spectrum

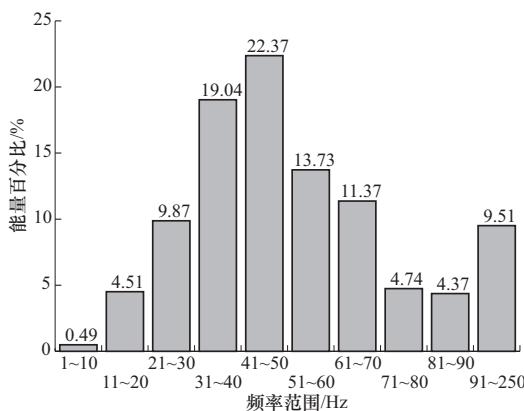


图 8 不同频率范围的能量比例

Fig. 8 Energy proportion under different frequencies

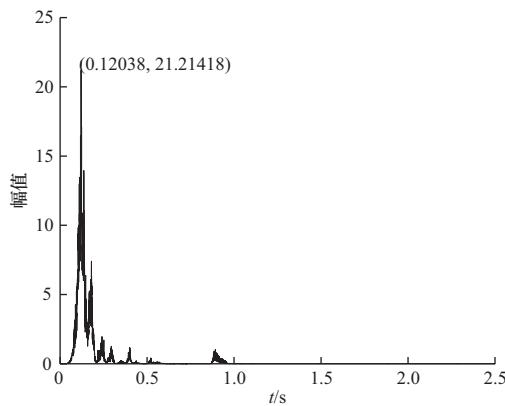


图 9 瞬时能量谱

Fig. 9 Instantaneous energy spectrum

2 计算模型与参数

2.1 计算模型

计算模型采用 SOLID164 实体单元, 模型尺寸取 $34 \text{ m} \times 43 \text{ m} \times 34 \text{ m}$, 下层为已开挖隧道, 上层为正在施工隧道, 模型网格采用映射网格划分, 模型边界设置为无反射边界条件, 计算模型如图 10 所示.

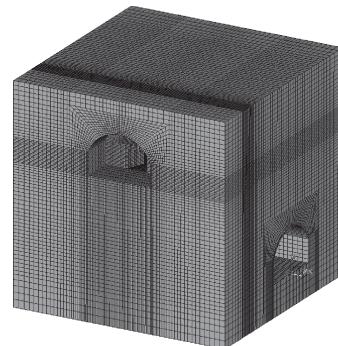


图 10 数值计算模型

Fig. 10 Numerical model

2.2 材料参数

开挖岩体主要为花岗岩, 岩体力学参数见表 1^[12]. 表 1 中: c 为内聚力; φ 为内摩擦角; μ 为泊松比; σ_{cm} 为单轴抗压强度; σ_{tm} 为单轴抗拉强度; f_{sm} 为抗剪强度; E_m 为弹性模量; G_m 为剪切模量; K_m 为体积模量.

表 1 岩体力学参数值

Tab. 1 Value of rock mass mechanics parameters

c/MPa	φ	μ	σ_{cm}/MPa	σ_{tm}/MPa	f_{sm}/MPa	E_m/GPa	G_m/GPa	K_m/GPa
3.4	66°	0.12	64.1	0.8	9.63	44.4	19.8	19.5

对于岩体动态抗拉强度,一般认为动态抗拉强度与静态抗拉强度存在如下关系^[13],

$\sigma_t = \sigma_{t0} [1 + 0.12 \lg V_H] = K_{DT} \sigma_{t0}$, (1)
式中: σ_t 为动态抗拉强度; σ_{t0} 为静态抗拉强度; V_H 为加载率; K_{DT} 为动力提高系数.

通常 K_{DT} 取 $1.24 \sim 1.48$, 本文取平均值 1.36, 因此, 岩体动态抗拉强度为 1.1 MPa.

RHT 本构模型可以很好地体现材料在动载荷下的初始屈服强度、失效强度和残余强度的变化特性,因此,文中采用 RHT 本构模型^[12,14].

2.3 爆炸荷载

使用加载载荷的方法可以省去建立炮孔的环节,简化了模型,同时又缩短了计算耗时. 模拟爆破

中远区时,应用较为广泛的施加载荷的方法是将爆破载荷依据圣维南原理等效后,施加在同排炮孔的连心线上或者面上,确定等效载荷首先需要确定峰值压力^[15].

根据爆轰波 C-J 理论, 炸药的平均爆轰压力为^[16]

$$p_d = \frac{1}{1+\gamma} \rho_e (v)^2, \quad (2)$$

式中: ρ_H 为波阵面上气体压力; ρ_e 为炸药密度, 取 1000 kg/m^3 ; v 为炸药的爆速, 取 3600 m/s ; γ 为等熵指数, 对于爆轰产物, 近似取 $\gamma=3.0$.

不耦合装药条件下,岩石中的透射冲击波压力为

$$p_{\max} = \frac{1}{2} P_d \left(\frac{r_0}{r_e} \right)^6 \left(\frac{l_c}{l_b} \right)^3 n, \quad (3)$$

式中: r_0 为药卷半径, 取 16 mm; r_e 为炮孔半径取 21 mm; l_c, l_b 分别为装药长度和炮孔长度, l_c/l_b 取 0.8; n 为炸药爆轰产物膨胀碰撞孔壁时的压力增大系数, $n=8\sim 11$, 一般取 10.

依据文献[15]提出的方法, 等效载荷为

$$P_e = (2r_e/a)P_{\max}. \quad (4)$$

式中 a 为孔间距, 取 500 mm.

根据式(2)~(4)计算得到本工程的等效载荷大小为 136.3 MPa.

爆炸载荷作用形式选用简化后的三角形载荷, 载荷上升时间 t_r 为 100 μs , 载荷正压作用时间 t_d 为 600 μs ^[15]. 由上文对监测数据分析可知, 产生最大振动速度为掏槽孔爆破, 且最大瞬时能量出现在掏槽孔起爆的时间范围内, 因此, 将爆破载荷施加在掏槽孔楔形开挖断面上, 分析掏槽孔爆破对上下交叉隧道的振动响应情况.

3 计算结果分析

3.1 振速分析

在已开挖隧道上选取 5 个单元, A 为拱顶单元, B 为迎爆侧拱肩单元, C 为迎爆侧拱腰单元, D 为背爆侧拱肩单元, E 为背爆侧拱腰单元. 图 11 为数值计算的各单元 x 向振动速度, 图 12 为数值计算的各单元 y 向振动速度图, 图 13 为数值计算的各单元 z 向振动速度图.

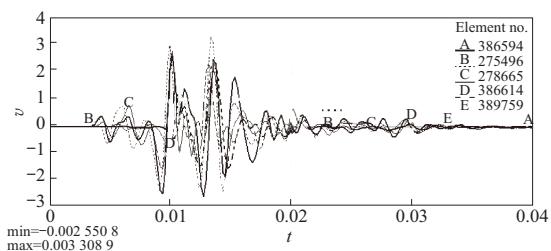


图 11 x 向速度时程曲线

Fig. 11 Time-history curves of x -axis velocity

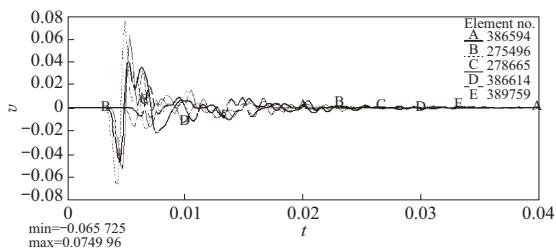


图 12 y 向振动速度图

Fig. 12 Time-history curves of y -axis velocity

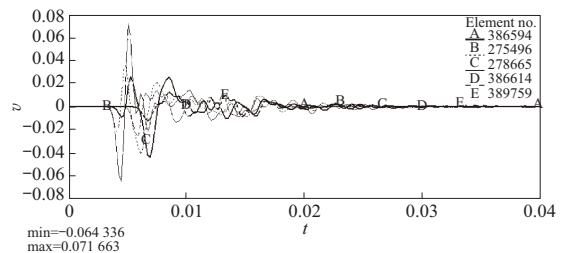


图 13 z 向速度时程曲线

Fig. 13 Time-history curves of z -axis velocity

由图 11 可知, 迎爆侧拱肩的振速最大, 其值为 0.33 cm/s, 由于 x 向振速为水平切向振速, 且与 y 、 z 向振速相差一个数量级, 在此可忽略. 由图 12 可知, A、B、C、D、E 各单元振速分别为 4.65, 7.50, 6.21, 3.15, 1.98 cm/s, 其中迎爆侧拱肩振速最大. 由图 13 可知, A、B、C、D、E 各单元振速分别为 7.17, 4.00, 4.37, 2.50, 1.26 cm/s, 其中拱顶振速最大. 整体而言, 迎爆侧振速大于背爆侧振速, 拱肩振速大于拱腰振速, 模拟结果与现场实测振速规律相吻合. 需要说明的是, 数值模拟得到的振速结果普遍小于实测值. 由于现场施工中, 围岩受到的作用是各段炮孔共同作用的爆破载荷, 本文只加载了掏槽孔爆破产生的载荷来分析各部位质点振动规律, 因此, 模拟值普遍小于实测值.

3.2 应力分析

图 14 为上述各单元的等效应力时程曲线, 由图 14 可知, 各单元最大等效应力分别为 0.56, 0.41, 0.55, 0.38, 0.18 MPa, 其中拱顶单元的等效应力值最大, 迎爆侧单元的等效应力值大于背爆侧单元, 各单元等效应力值均小于岩体动态抗拉强度 1.1 MPa, 隧道岩体未发生破坏.

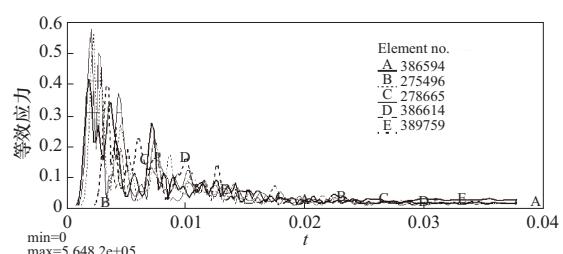


图 14 等效应力时程曲线

Fig. 14 Time-history curves of effective stress

选取数值模型上的单元, 将单元振速最大值与等效应力值进行统计分析, 得到如下关系,

$$\sigma = 0.05v_{\max} + 0.16. \quad (5)$$

式中: σ 为等效应力峰值; v_{\max} 为振速峰值。

当动态抗拉强度取 1.1 MPa 时,根据上式计算可得质点临界振速为 18.8 cm/s。

4 结 论

本文通过对上部隧道开挖面接近和远离下部交叉断面的爆破施工过程进行爆破振动监测,并结合数值分析得到如下结论:

① 开挖断面在接近和远离监测点的过程中,水平向爆心距 $-30 \sim -12$ m 和 $12 \sim 18$ m 范围内,迎爆侧振速普遍大于背爆侧振速,且拱顶振速较小;水平向爆心距 $-12 \sim 12$ m 范围内,拱顶振速大于拱肩及拱腰振速,且最大值出现在距离拱顶测点最近的正上方。

② 典型的实测信号能量主要分布在 21~70 Hz,低频区的能量较小,对保护物较有利;瞬时能量最大值出现在掏槽孔起爆时刻,掏槽孔起爆产生的振动速度和影响最大。

③ 数值计算的振速分布规律与现场实测振速规律吻合较好;依据数值模拟确立了等效应力判据,得到岩体破坏的临界振速为 18.8 cm/s。

参考文献:

- [1] 龚伦,仇文革.上下交叉隧道近接施工振动影响研究[C]//中国交通土建工程学术论文集.成都:西南交通大学出版社,2006:654~661.
Gong Lun, Qiu Wenge. Study on vibration influence of up-down crossover tunnel approaching excavation[C]//Collection of Papers on Traffic and Civil Engineering in China. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2006:654~661. (in Chinese)
- [2] 王明年,潘晓马,张成满,等.邻近隧道爆破振动响应研究[J].岩土力学,2004,25(3):412~414.
Wang Mingnian, Pan Xiaoma, Zhang Chengman, et al. Study of blasting vibration influence on close-spaced tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3): 412~414. (in Chinese)
- [3] 阳生权,周健,李雪健.小净距公路隧道爆破震动观测与分析[J].工程爆破,2005,11(3):62~65.
Yang Shengquan, Zhou Jian, Li Xuejian. Blasting vibration analysis of little-space road tunnel[J]. Engineering Blasting, 2005, 11(3): 62~65. (in Chinese)
- [4] 李云鹏,艾传志,韩常领,等.小间距隧道爆破开挖动力效应数值模拟研究[J].爆炸与冲击,2007,27(1):75~81.
Li Yunpeng, Ai Chuanzhi, Han Changling, et al. Study on dynamics effect caused by blasting construction by numerical simulation for tunnels with small spacing[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(1): 75~81. (in Chinese)
- [5] 钟冬望,吴亮,余刚.邻近隧道掘进爆破对既有隧道的影响[J].爆炸与冲击,2010,30(5):456~462.
Zhong Dongwang, Wu Liang, Yu Gang. Effect of tunnelling blasting on an existing adjacent tunnel[J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(5): 456~462. (in Chinese)
- [6] 贾磊,解咏平,李慎奎.爆破振动对邻近隧道衬砌安全的数值模拟分析[J].振动与冲击,2015,34(11):173~177.
Jia Lei, Xie Yongping, Li Shenkui. Numerical simulation for impact of blasting vibration on nearby tunnel lining safety[J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 34(11): 173~177. (in Chinese)
- [7] 孙宝平,高文学,周世生.隧道掘进爆破岩数值模拟及应用研究[J].北京理工大学学报,2018,38(10):1025~1029.
Sun Baoping, Gao Wenxue, Zhou Shisheng. Study on numerical simulation and application of blasting of tunnel excavation[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(10): 1025~1029. (in Chinese)
- [8] 郭东明,刘康,张伟,等.不同间距邻近爆破载荷下隧道破坏规律及动态响应研究[J].北京理工大学学报,2018,38(10):1000~1005.
Guo Dongming, Liu Kang, Zhang Wei, et al. Research on failure rule and dynamic response of tunnel under adjacent blasting loads of different spacing[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(10): 1000~1005. (in Chinese)
- [9] 朱正国,杨利海,王道远,等.立体交叉隧道爆破动力响应和安全范围研究[J].铁道工程学报,2019,27(1):59~64.
Zhu Zhengguo, Yang Lihai, Wang Daoyuan, et al. Analysis of dynamic response and Safety range of crossing tunnel based on blasting vibration[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 27(1): 59~64. (in Chinese)
- [10] 黄乃恩,申志,龙士仁,等.非线性非平稳时间序列分析的模式分解和希尔伯特谱[J].皇家学会哲学学报 A:数学、物理和工程科学,1998,454(1971):903~915.
Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London-Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903~915.
- [11] Torres M E, Colominas M A, Schlotthauer G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise[C]// IEEE International Conference on

- Speech and Signal Processing (ICASSP) Prague.
Czech:[s. n.],2011,4144 - 4147.
- [12] 凌天龙. 长城站开挖围岩爆破损伤与累积效应研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2019.
Ling Tianlong. Study on blasting damage and cumulative effective of surrounding rock in excavation of Great Wall station[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing),2019. (in Chinese)
- [13] 蒋楠. 露天转地下开采边坡爆破动力特性研究[D]. 武汉:中国地质大学,2013.
Jiang Nan. Study on blasting dynamic characteristics of open pit to underground mining slope[D]. Wuhan: China University of Geosciences,2013. (in Chinese)
- [14] 李洪超,刘殿书,赵磊,等. 大理岩 RHT 模型参数确定研究[J]. 北京理工大学学报,2017,37(8):801 - 806.
Li Hongchao,Liu Dianshu,Zhao Lei,et al. Study on parameters determination of marble RHT model [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2017,37(8):801 - 806. (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,2008,41(1):67 - 71.
Xu Hongtao,Lu Wenbo,Zhou Xiaoheng. An equivalent approach for acting blasting load in dynamic finite element simulation of blasting vibration[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2008,41(1):67 - 71. (in Chinese)
- [16] 王文龙. 钻眼爆破[M]. 北京:北京煤炭工业出版社,1984.
Wang Wenglong. Drill hole and blast[M]. Beijing: Coal Industry Press,1984. (in Chinese)

(责任编辑:刘雨)