

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.01.019

高铁长城站小净距隧道爆破振动效应研究*

梁书锋¹, 凌天龙², 李晨¹

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;

2. 泰山学院机械与建筑工程学院, 泰安 271000)

摘要: 小净距隧道开挖工程中,隧道爆破对分隔墙的稳定性的影响极大,横通道的施工则会进一步加剧分隔墙的振动破坏。为研究爆破作用下分隔墙的振动响应特征,以新建京张高铁长城站小净距隧道工程为背景,分析非电雷管爆破地震波在分隔墙中的振动特征和衰减规律,同时开展电子雷管降振试验,对隧道爆破炮眼的合理延时进行研究。研究表明:受纵、横隧道分割的影响,分隔墙末端振动存在明显的放大效应;掌子面后方分隔墙受爆破振动的影响大于掌子面前方岩体,应用萨道夫斯基公式对爆破数据进行回归分析时, $K_{前} < K_{后}$, $\alpha_{前} < \alpha_{后}$;采用HHT方法对爆破振动信号进行时频分析,小净距隧道的波动能量集中分布在50~200 Hz范围内,掏槽孔和崩落孔爆破均能在掌子面后方分隔墙产生较多的振动能量;在数码电子雷管逐孔起爆试验中,掏槽孔孔间延时15 ms,崩落孔孔间延时20 ms时,可以使爆破振动信号能量分布更均匀,振速峰值降低50%~70%。

关键词: 小净距隧道; 振动测试; 时频分析; 降低振动

中图分类号: TD235.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2021)01-0116-08

Blasting Vibration Effect of Small-Spaced Tunnel at Great Wall High Railway Station

LIANG Shu-feng¹, LING Tian-long², LI Chen¹

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

2. College of Mechanical and Architectural Engineering, Taishan University, Taian 271000, China)

Abstract: In the excavation of small-spaced tunnels, tunnel blasting has a great impact on the stability of the interlaid rock wall, and the construction of the cross passage will further aggravate the vibration damage of the interlaid rock wall. In order to study the vibration response of the interlaid rock wall under blasting, we monitored the vibration velocity of the interlaid rock wall caused by blasting with non-electric detonator in the small-distance tunnel project of Great Wall station of the new-built Beijing-Zhang Jiakou high-speed railway, and then analyzed the attenuation law of the seismic wave in the interlaid rock wall. At the same time, the vibration reduction tests of blasting with electronic detonator have been carried out to study the reasonable delay time of tunnel blasting hole. Through experimental research, some conclusions have been obtained. Firstly, the vibration of the end of the interlaid rock wall has obvious amplification effect due to the influence of vertical and horizontal tunnel segmentation. Secondly, the regression analysis of blasting vibration data by Sadovsky's formula shows that $K_{front} < K_{behind}$, $\alpha_{front} < \alpha_{behind}$, which means that the influence of blasting vibration on surrounding rocks behind the tunnel face is larger than that in front of the tunnel face. Thirdly, the time-frequency analysis of the blasting vibration signal is carried out using the HHT method, and the result shows that vibration energy of the small-spaced tunnel is concentrated in the range of 50~200 Hz. Both the cutting holes and caving holes blasting contribute most of vibration energy to the rock behind the tunnel face. Finally, we set the time delay between cut holes and caving holes as 15 ms and 20 ms respectively in the hole with digital e-

lectronic detonator. This blasting scheme can make the blasting vibration energy distribution more distributed and reduce the peak value of vibration velocity by 50% ~ 70%.

Key words: small spacing tunnels; vibration tests; time-frequency analysis; decreasing vibration

近年来,随着我国铁路交通的发展,高铁隧道的建设也如火如荼地进行。小净距隧道作为特殊地形条件下解决铁路布线的有效结构形式,得到广泛的应用^[1]。在小净距隧道施工中,爆破开挖会对临近既有隧道造成一定的扰动,影响已有结构的安全^[2]。因此,开展小净距隧道爆破开挖及其振动效应研究,分析临近隧道之间的相互影响,具有重要的现实意义。

目前,国内学者在小净距隧道爆破控制和安全评估方面做了大量的研究工作。这些工作主要包括2个方面:(1)通过监测爆破地震波,研究其在隧道中的传播规律,进而提出相应的安全判据和控制措施^[3-7]; (2)运用数值模拟技术,研究小净距隧道的爆破振动特性,探讨爆破振动对既有临近隧道及中隔墙的影响,分析小净距隧道爆破振动效应的影响因素^[8-12]。

以新建京张高铁长城站为工程背景,通过对现场爆破实测振动数据的分析,研究爆破地震波在中隔墙中的传播规律,讨论小净距隧道中隔墙的振动特性以及相关减振技术措施,为类似工程的爆破施工提供指导建议。

1 工程概况

新建京张高铁八达岭长城站位于八达岭滚天沟停车场下方新八达岭隧道内,是国内首座采用矿山法施工的深埋高铁地下车站。车站中心处理深102.55 m,主体长度450 m,分为三连拱区段和三洞分离标准段。标准段为三心圆拱形断面,隧洞净空为11.38 m × 9.9 m(宽 × 高),中隔墙厚度为2 ~ 5.7 m。根据本隧道工程地质钻探资料揭露,八达岭长城站所处区域地层岩性主要为八达岭花岗杂岩,岩脉极为发育,围岩级别为IV级。八达岭长城站剖透图如图1所示。

长城站小净距隧道采用新奥法施工,侧洞先行,中洞跟进施工。为减小爆破对中隔墙整体性和稳定

性的影响,采用上下台阶法钻爆施工。上台阶采用楔形掏槽爆破,下台阶采用水平孔拉槽爆破。上台阶掏槽孔孔口间距5.5 ~ 5.8 m,崩落孔间距0.8 ~ 1 m,排距1 m,周边眼间距40 ~ 50 cm。炮孔直径为 $\phi 42$ mm,炮眼深度为3 ~ 3.5 m,药卷选用2#岩石乳化炸药,直径为 $\phi 32$ mm,密度 1.0 g/cm^3 。雷管选用1 ~ 13段塑料导爆管雷管,采用毫秒延期爆破技术控制爆破振动。上台阶炮孔布置如图2所示。



图1 长城站立体图

Fig. 1 Graphic model of the great wall high speed railway station

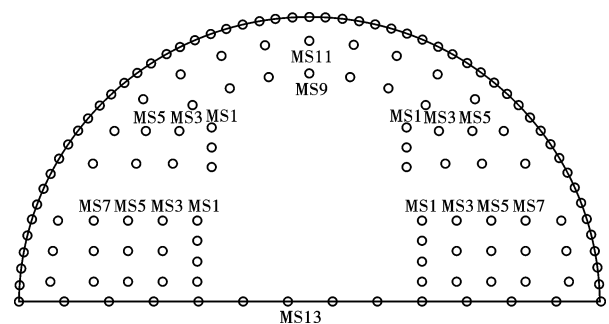


图2 炮孔布置图

Fig. 2 Layout of blasting holes

2 爆破振动测试

2.1 测试方案

在长城站三洞分离段施工过程中,为增加工作面数量,加快施工进度,侧洞施工一定距离后,在中隔墙开挖横向通道,然后施工后行中洞。由于中洞爆破时中隔墙端部的振动效应未有先行经验可借鉴,这将为现场振动监测内容之一;此外,爆破地震波在中隔墙中的衰减规律也作为监测内容的一部分。

通常在小净距隧道施工时,爆破振动对相邻隧道产生的最大振动速度出现在迎爆侧的边墙部位^[1]。按

收稿日期:2020-10-28

作者简介:梁书锋(1982-),男,汉族,山东省德州人,工程师、博士,主要从事岩石破碎与爆破测试技术研究,(E-mail) liang sf204@163.com。

通讯作者:凌天龙(1985-),男,满族,辽宁省丹东市人,讲师、博士,主要从事工程爆破与岩体破碎等方面研究,(E-mail) ling tianlong@tsu.edu.cn。

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010QL05);泰山学院引进人才科研启动基金(Y012019010)

照上述的监测内容并结合工程实际,本工程的爆破振动测试主要在先行侧洞中隔墙迎爆侧边墙部位进行。采集系统采用成都中科测控有限公司研制的 TC-4850 爆破测振仪。传感器采用 U 形卡和膨胀螺栓固定在初衬结构上,并在传感器和初衬之间使用石膏进行有效固定。此次振动监测分为两种工况:(1)中洞施工初

期,以 1~5 m 不等间距在侧洞迎爆侧中隔墙边墙上布设 5 个速度传感器,如图 3(a)所示;(2)后行中洞施工一定距离后,以 10 m 间距在侧洞迎爆侧中隔墙边墙上布设 7 个速度传感器,如图 3(b)所示。现场监测时,测点固定,根据掌子面的位置变化,监测并分析爆破地震波在中隔墙中的分布和传播规律。

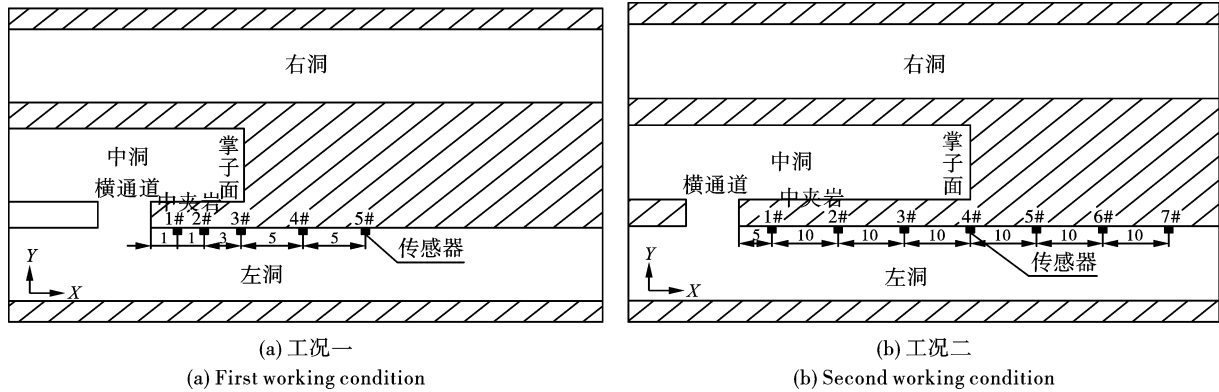


图 3 爆破振动监测点布置图(单位:m)

Fig. 3 Layout of blasting vibration monitoring point(unit:m)

2.2 爆破振动数据预处理

由于测试环境及测试系统的原因,在振动时程曲线上,波形偏离基线中心,存在明显的趋势项。通过信号的频谱分析可以发现,低于 1 Hz 的低频带幅值出现大幅度增高。趋势项的存在将严重影响峰值振速的判读和频谱分析的精度,误导对低频信息的把握,必须予以消除。

经验模态分解(EMD)技术是近年来被应用到非平稳信号趋势项去除的有效方法,具有较强的自适应性^[13]。但在对本次试验数据的处理过程发现,该方法存在明显的“端部效应”。为此,本文应用文献[14]提出的 EEMD 分解技术,按照以下步骤去除爆破振动信号中的趋势项:

(1)先对原始信号循环添加多次正态分布噪声

信号并逐次进行 EMD 分解,得到各 IMF 分量的“总和”,然后取其均值即为真实的 IMF 分量。

(2)将取均值后的各 IMF 分量进行频谱分析,得到其在频域内的尺度信息,最后根据测试系统的性能指标和爆破地震波信号特点,去除部分低频分量,将剩余分量重构即可得到去除趋势项后的真实振动信号。

图 4 为某次爆破施工中监测到的 Y 方向典型振动信号。从图中可以看出,趋势项对原始信号的影响极大,已经无法判断出峰值振动速度。应用 EEMD 分解后重构的振动信号,趋势项完全消除,波形重新回到基线中心位置,表明 EEMD 分解技术去除爆破地震波信号趋势项是可行的。将监测得到爆破振动信号按上述方法进行处理,并以此作为后续工作的研究基础。

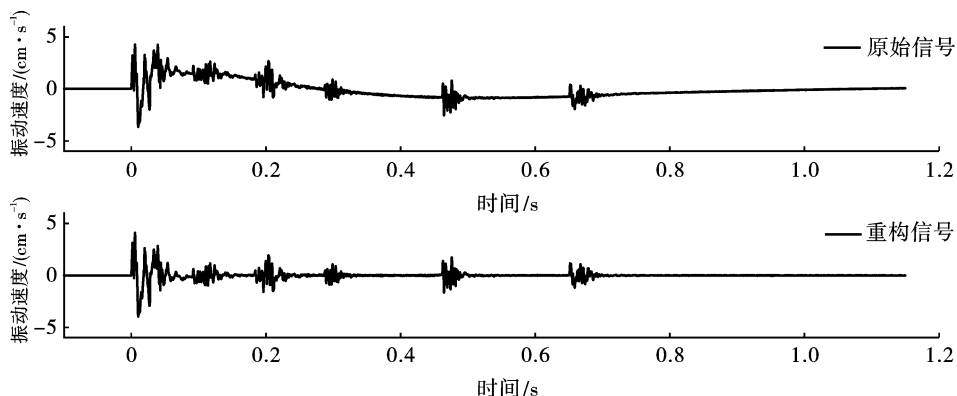


图 4 原始信号及重构信号对比

Fig. 4 Comparison of Original signal and reconfiguration signal

3 长城站爆破振动效应

3.1 中隔墙末端“鞭梢效应”

由于本工程中监测位置夹岩厚度仅有 5.8 m, 隧洞又较高, 中隔墙形成“类墙体”结构。横向通道的开挖改变了中隔墙的整体结构, 使得中隔墙末端的“刚度”降低, 同时新增的自由面为爆破地震波的反射提供条件。图 5 给出了工况一中监测的 2 组振动速度峰值的分布规律, 图中距离正值表示掌子面前方测点, 负值表示掌子面后方测点。

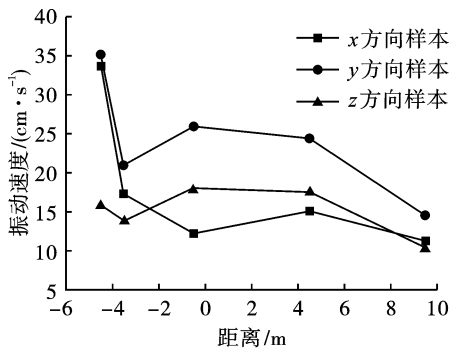
由图 5 可以看出:

(1) 在爆破地震波作用下, 中隔墙末端(1#和2#测试点) X 和 Y 方向的振动速度较大, 产生较大的位移, 呈现明显的“鞭梢效应”。特别是在后行中洞开

挖初期, 测点 1 振动速度甚至超过爆源附近的测点 3(见图 5(a))。

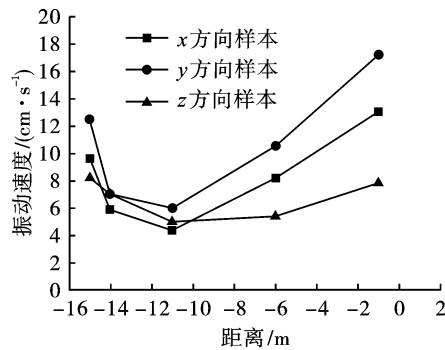
(2) 随着中洞掌子面的推进, 中隔墙末端的“放大效应”有所减弱, 但测点 1 的振动速度仍能达到测点 3 的 2~3 倍, 说明爆破振动对中隔墙末端岩体以及支护结构的仍有较大影响。在中洞施工过程中, 测点 1 附近的混凝土初衬结构已出现明显的开裂现象。

(3) 从图 5(b) 可以看出, 中隔墙末端的“鞭梢效应”仅存在较小的范围内, 当距离超过 5m 时(3#测点), 该效应则不复存在。因此, 采用纵、横交错的隧洞对中隔墙进行切割时, 应重点控制爆破振动对中隔墙末端岩体以及支护结构的影响, 不能忽视中隔墙末端对爆破地震波的放大作用。



(a) 第1组爆破振动速度

(a) The first set of blasting vibration velocity data



(b) 第2组爆破振动速度

(b) The second set of blasting vibration velocity data

图 5 中隔墙振动速度特征曲线

Fig. 5 Characteristic curves of vibration velocity of the interlaid rock wall

3.2 中隔墙爆破地震波传播规律

由于孔网参数和装药参数与岩层的水文地质条件等因素有关, 高铁长城站小净距隧道在施工过程中, 不同里程的各次爆破参数不尽相同。本工程以前述第二种工况为基础, 针对不同爆心距、不同装药量进行了一系列振动测试工作, 用以研究中隔墙爆破地震波的传播规律。

目前, 国内外多采用萨道夫斯基经验衰减公式对爆破数据进行回归分析^[15]

$$V_{\max} = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中, V_{\max} 为质点振动速度峰值, cm/s; Q 为与振动速度峰值 V_{\max} 相对应的单段最大起爆药量, kg; R 为爆心距, m; K 为与地质条件及岩石特性有关的系数; α 为与地质条件有关的爆破地震波衰减指数。

分别选取掌子面前方和后方的爆破振动速度峰值, 采用式(1)对数据进行回归分析, 回归曲线及参数如图 6 和表 1 所示。

表 1 振动速度拟合结果

Table 1 Fitting results of vibration velocity

参数	掌子面前方			掌子面后方		
	X 方向	Y 方向	Z 方向	X 方向	Y 方向	Z 方向
K	13.7	18.7	11.6	36.8	35.7	29.7
α	1.06	1.14	1.01	1.18	1.21	1.15

由图 6 和表 1 可以看出:

(1) 比例距离小于 6 时, Y 方向振动速度峰值最大, X 和 Z 方向的振动速度峰值相近; 当比例距离超

过 6 以后, 3 个方向的振动速度峰值趋于一致。

(2) 掌子面前方振动速度衰减较慢, 后方则相对较快, 说明在多次爆破荷载作用下, 中隔墙岩体受

到破坏,形成不同扩展程度的裂纹,完整性降低,这些裂纹可以吸收一部分地震波能量,加快其衰减速度,故掌子面后方振动数据的衰减系数 α 大于掌子面前方;而掌子面后方振动速度峰值回归曲线的 K 值大于掌子面前方,这是因为掌子面后方中隔墙两

侧均为临空面,中隔墙的约束条件降低,在一定比例距离范围内,掌子面后方的振动速度大于掌子面前方相同距离测点的振动速度,因此,施工中宜加强该部位的监测和相关支护。

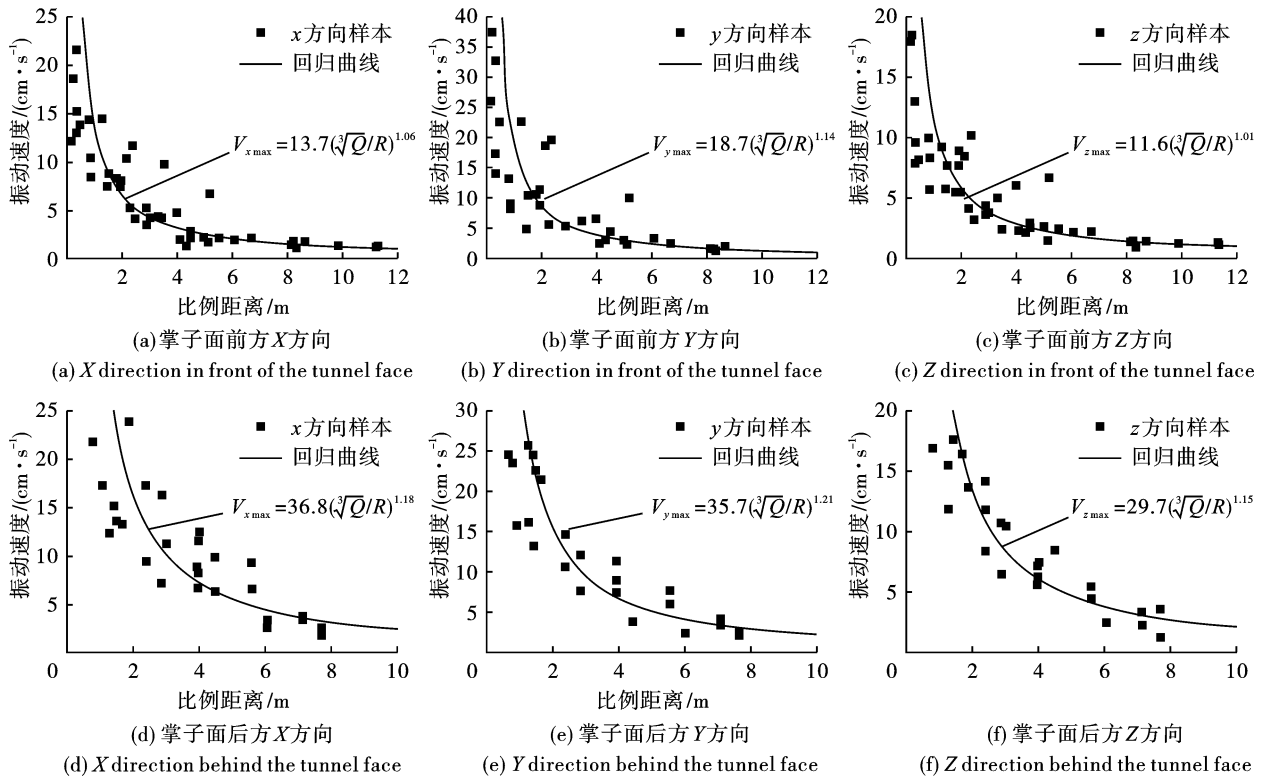


图6 振动速度样本数据及回归曲线

Fig. 6 Sample data and regression curve of vibration velocity

3.3 中隔墙爆破振动时频分析

HHT方法把信号中不同时间频率范围的波动或趋势逐层分解后,产生一组特征尺度不同的数据列,信号的能量在频率或时间等不同尺度上的分布规律能被真实反映^[16]。因此,在掌子面前方和后方选取与掌子面的距离均为25 m的两个测点的振动信号为研究对象,在第2节的基础上,将低频的趋势项分量去除后,对剩余IMF分量进行Hilbert-Huang变换,将每个分量所包含的能量与总能量的比值绘制成柱状图,如图7所示。

由图7可以看出,3个方向的振动速度信号中,前4个分量所含能量的比例较大,高频成分在振动信号中占据主导地位。随着分量频率的减小,能量逐渐减弱。需要指出的是,掌子面后方X和Z方向低频分量的能量出现不同程度的“反弹”现象,通过多组数据的计算分析发现,这种现象是普遍存在的,说明掌子面后方形成“类墙体”结构后,在中隔墙两侧隧洞波动场的影响下,动力响应变得十分复杂,而

这些能量占比相对较大的低频分量有可能对中隔墙的稳定性的不利,其影响不可忽视。

图8为3个方向上2组振动速度信号的Hilbert能量谱,它具有时间-频率-能量三维特性,能够精确地表明信号的能量分布情况。从图中可以看出,3个方向振动速度Hilbert能量谱的整体形式基本相同,信号的波动能量基本处在时间段0~0.6 s内,频率成分则相对复杂,0~400 Hz均有分布,在50~200 Hz范围内具有较大的振动能量。与X方向相比,Y方向拥有较高能量的频率范围更广,造成这种现象的原因是Y轴方向的振动信号是由勒夫波和瑞利波叠加产生的。特别地,Z方向信号的频率成分及其在时间上的能量分布均比X方向和Y方向复杂,这可能是因为车站隧洞将岩体切割成“类墙体”结构,中隔墙需承受上覆岩层传递的压力,使得该结构在Z方向的动力响应极为复杂。

对比掌子面前方和后方的Hilbert能量谱可以发现,掌子面前方振动信号X和Y方向的振动能量

主要集中在 0 ~ 0.1 s 范围内, 这部分振动能量是由掏槽孔引起的, 由崩落孔和周边孔引起的振动能量与掏槽孔相比均较小; 而掌子面后方振动信号 X 方向和 Y 方向的能量在 0.2 s 和 0.3 s 处出现次能量峰值, 甚至出现崩落孔引起的振动能量与掏槽孔相

当的现象, 这是因为崩落孔的单段药量较大以及掌子面后方“类墙体”结构动力响应的特殊性引起的。因此, 在进行爆破设计时不仅应重点控制掏槽孔的装药量, 还应重视崩落孔的单段最大装药量。

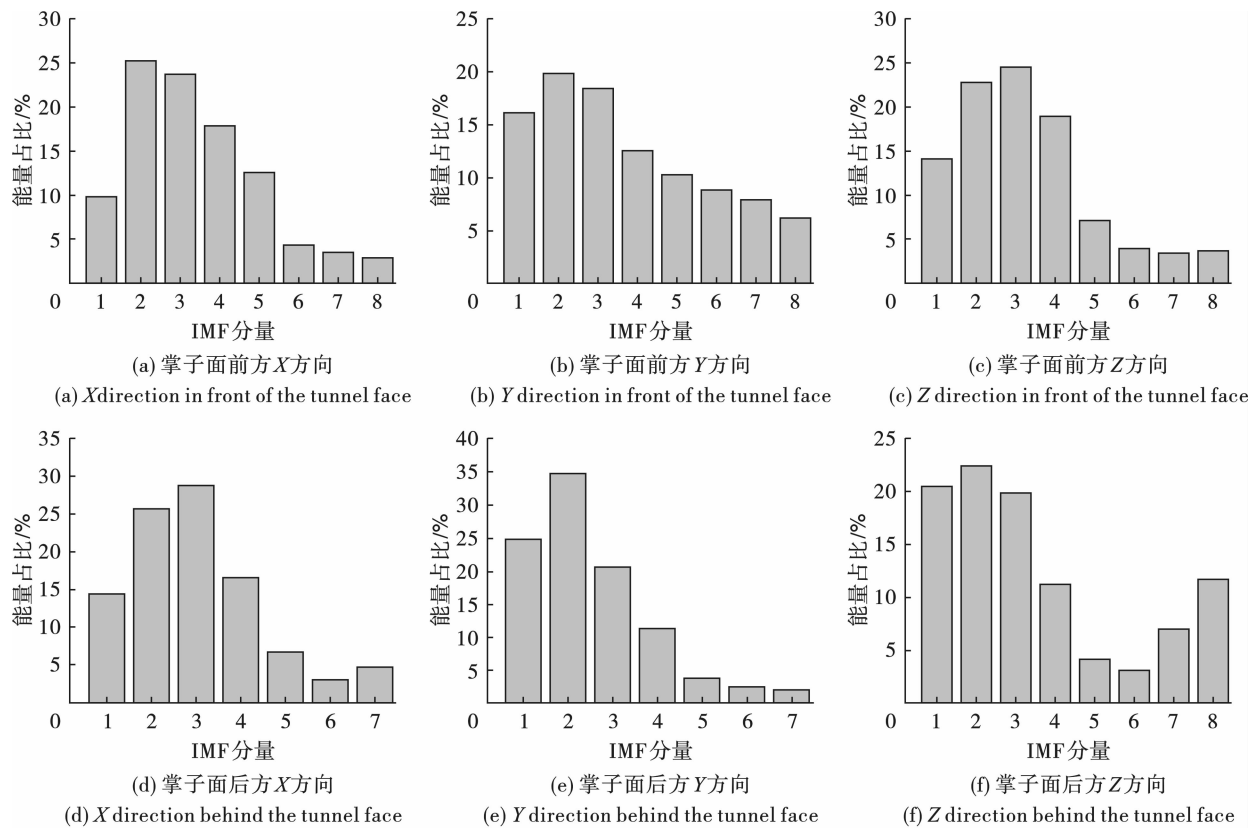


图 7 不同 IMF 分量能量分布图
Fig. 7 Energy distribution map of different IMF components

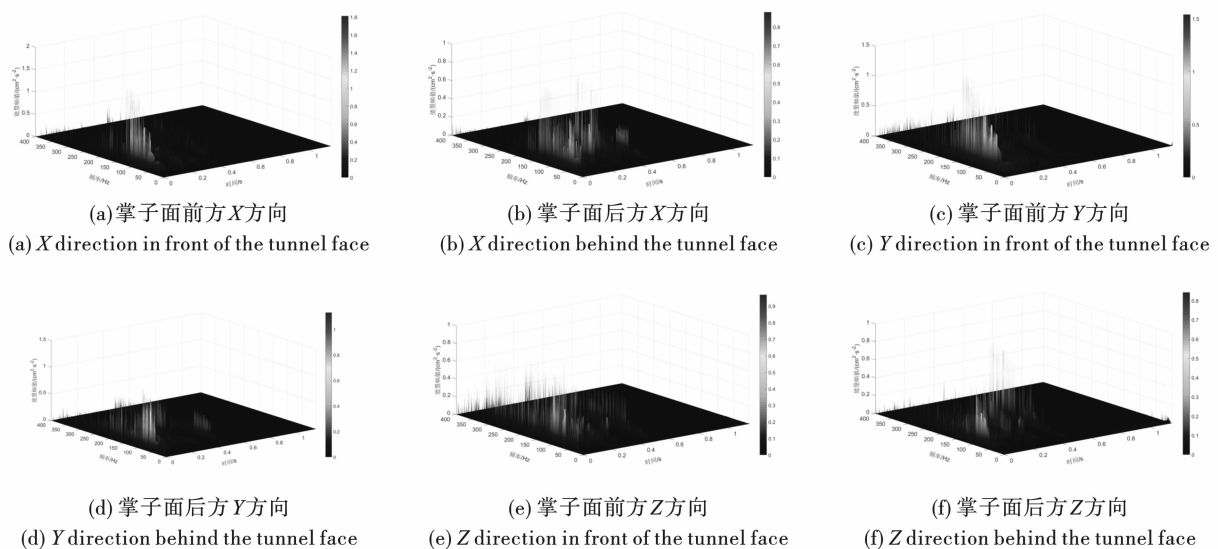


图 8 不同振动信号三维时频谱
Fig. 8 Three-dimensional energy spectrum of different vibration signal

4 电子雷管降振技术研究

为最大限度保护隧道围岩,长城站采用台阶法施工,以避免隧道围岩在多次爆破荷载作用下破坏失稳。然而,根据振速实测结果可知,采用非电导爆管雷管爆破时,由于段位少,单段起爆药量较大,爆破引起的与掌子面平齐位置中隔墙最大振动速度峰值大于 35 cm/s,远超过规程标准^[17]。因此,采用电子雷管起爆技术控制爆破振动。

电子雷管降振技术的关键在于时差的设定。炮孔间延期时间的设置既要保证岩体的破碎,也要实现错峰降振。通过多次试验,得出长城站小净距隧道电子雷管单孔连续起爆相关技术参数:掏槽孔间延期时间设置为 15 ms;崩落孔间延期时间设置为 20 ms;周边孔和底边孔间延期时间设置为 6 ms。同一圈崩落孔和周边孔均采取远离中隔墙一侧先爆,临近中隔墙一侧后爆的方式实施。在保持爆破进尺,炮孔布置,装药量等参数不变的情况下,采用上述孔间延期时间参数,对电子雷管起爆引起的振动进行监测,与掌子面平齐的中隔墙振动速度如图 9 所示。

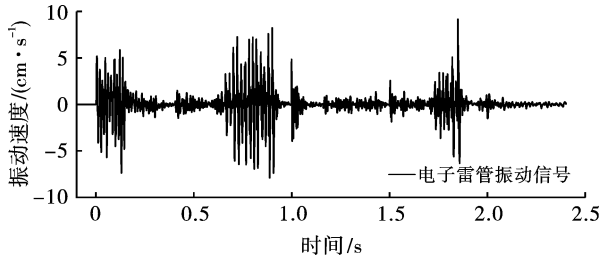


图 9 电子雷管爆破振动信号

Fig. 9 Blasting vibration signal of digital detonator

由图 9 可以看出,数码电子雷管施工引起的振动波形为分段式多峰波形,与普通导爆管雷管振动波形不同,电子雷管的多个峰段持续时间长,振速分布均匀;掏槽孔实现单孔连续爆破,产生振动的药量为单孔药量,极大地降低了掏槽爆破振动速度;掏槽孔崩落形成空腔,使得远离中隔墙一侧崩落孔诱发的振动极小,而近中隔墙侧崩落孔装药量大,与中隔墙距离较近,是影响中隔墙振动速度的主要因素;此次监测结果中,最大峰值速度发生在靠近中隔墙一侧的底角孔,这也与该炮孔的比例距离较小有关,可在后续的施工优化施工参数加以控制。

图 10 为上述数码电子雷管振动信号的 Hilbert 能量谱。由图中可以看出,振动能量出现的时间与振速多个峰段的时间相同,在整个振动过程中,振动能量的波动较为平稳,并未出现过度集中的能量峰

值,振动峰值在频率轴上呈现均匀化分布趋势。

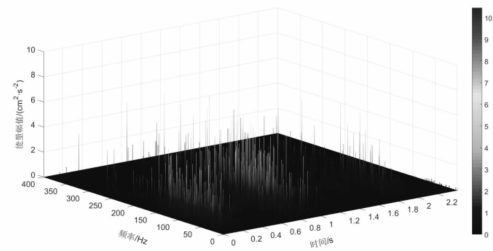


图 10 电子雷管 Hilbert 能量谱

Fig. 10 Hilbert energy spectrum of vibration velocity using digital electronic detonator

根据多次爆破振动测试的统计结果可知,与普通导爆管雷管相比,与掌子面平齐的中隔墙振动速度在使用数码电子雷管后降低 50% ~ 70%,而且爆破后岩石块度均匀,大块率降低,炮孔利用率达到 90% 以上。由此可见,采用上述数码电子雷管爆破方案施工,可以降低振速,改善爆破块度,取得了较好的爆破效果。

5 结论

以高铁长城站为工程背景,研究爆破地震波在小净距隧道中隔墙中的分布特征和传播规律,分析中隔墙爆破振动的时频特性,探讨数码电子雷管降振技术。得到如下结论:

(1) 岩体受纵、横隧洞的分割,形成“类墙体”结构,中隔墙末端振动速度大幅度提高,存在明显的“鞭梢效应”,应加强该部位的监测和支持。

(2) 当比例距离小于 6 时, Y 方向的振动速度最大;当比例距离大于 6 时, 3 个方向的振动速度峰值趋于一致。

(3) 采用萨道夫斯基公式对爆破振动数据进行回归分析,结果表明:对于参数 K 和 α 的值, $K_{前} < K_{后}$, $\alpha_{前} < \alpha_{后}$ 。产生这些差异的原因在于中隔墙受爆破荷载作用产生裂隙,完整性降低,而且两侧形成临空面,降低了中隔墙的约束条件。

(4) 对中隔墙振动信号进行希尔伯特变换,结果表明, $c_1 \sim c_4$ 所含的能量比例较高,高频成分占据主导地位。掌子面后方受双洞波动场影响,动力响应复杂,低频分量的能量比例出现“反弹”现象,可能对中隔墙的稳定不利。

(5) 应用 HHT 方法进行时频分析,小净距隧道爆破振动的波动能量集中在 50 ~ 200 Hz 范围内;掌子面前方岩体的波动能量集中在 0 ~ 0.1 s 内,主要由掏槽孔引起,而掌子面后方则在崩落孔起爆时产

生多个次能量峰值,其影响不容忽视。

(6)使用数码电子雷管实现逐孔起爆,降低单段最大装药量,振动波形呈多峰段均匀分布,振动能量波动平稳,振动速度峰值比采用普通雷管施工时降低50%~70%,降振技术方案有效可行。

参考文献 (References)

- [1] 龚建伍,夏才初,郑志东,等. 鹤上三车道小净距隧道爆破振动测试与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1882-1887.
- [1] GONG Jian-wu, XIA Cai-chu, ZHENG Zhi-dong, et al. Measurement and analysis of blasting vibration in Heshang three-lane tunnels with small clear space[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1882-1887. (in Chinese)
- [2] 杜峰,闫军,张学民,等. 大跨度小净距隧道爆破振动影响数值模拟分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(3): 568-574.
- [2] DU Feng, YAN Jun, ZHANG Xue-min, et al. Numerical simulation of large span and small spacing neighborhood tunnel blasting vibration effect[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(3): 568-574. (in Chinese)
- [3] 朱正国,孙明路,朱永全,等. 超小净距隧道爆破振动现场监测及动力响应分析研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3747-3753.
- [3] ZHU Zheng-guo, SUN Ming-lu, ZHU Yong-quan, et al. Field monitoring on blasting vibration and dynamic response of ultra-small spacing tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3747-3753. (in Chinese)
- [4] 叶培旭,杨新安,凌保林,等. 近距离交叉隧洞爆破对既有隧道的振动影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 537-541.
- [4] YE Pei-xu, YANG Xin-an, LING Bao-lin, et al. Vibration effects on existing tunnel induced by blasting of an adjacent cross tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 537-541. (in Chinese)
- [5] 陈连进. 小净距隧道爆破振动对邻近隧道影响测试研究[J]. 爆破, 2010, 27(2): 36-40.
- [5] CHEN Lian-jin. Experimental study on blasting vibration influence on nearby tunnels with small interval[J]. Blasting, 2010, 27(2): 36-40. (in Chinese)
- [6] 管晓明,余志伟,宋景东,等. 隧道超小净距下穿深埋供水管线爆破监测及减振技术研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(S2): 160-166.
- [6] GUAN Xiao-ming, YU Zhi-wei, SONG Jing-dong, et al. Blasting monitoring and vibration reduction technology of tunnel underpass deep buried water supply pipeline with ultra-small clear distance[J]. China Civil Engineering Journal. 2017, 50(S2): 160-166. (in Chinese)
- [7] 林丛谋,陈礼彪,蒋丽丽,等. 高速公路扩建大断面特小净距隧道爆破稳定控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1371-1378.
- [7] LIN Cong-mou, CHEN Li-biao, JIANG Li-li, et al. Research on blasting stability control technology of large-span highway tunnel with super-small clear spacing at highway expansion project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1371-1378. (in Chinese)
- [8] 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): 173-178.
- [8] JIA Lei, XIE Yong-ping, LI Shen-kui. Numerical simulation for impact of blasting vibration on nearby tunnel lining safety[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(11): 173-178. (in Chinese)
- [8] JIA Lei, XIE Yong-ping, LI Shen-kui. Numerical simulation for impact of blasting vibration on nearby tunnel lining safety[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(11): 173-178. (in Chinese)
- [9] 凌同华,曹峰,张胜,等. 分岔隧道过渡段的爆破振动特性研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(2): 43-50.
- [9] LING Tong-hua, CAO Feng, ZHANG Sheng, et al. Blast vibration characteristics of transition segment of a branch tunnel[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(2): 43-50. (in Chinese)
- [9] LING Tong-hua, CAO Feng, ZHANG Sheng, et al. Blast vibration characteristics of transition segment of a branch tunnel[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(2): 43-50. (in Chinese)
- [10] 吴亮,李凤,卢文波,等. 爆破扰动下邻近层状围岩隧道的稳定性与振速阈值[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(2): 208-214.
- [10] WU Liang, LI Feng, LU Wen-bo, et al. Vibration velocity threshold of a tunnel adjacent to surrounding layered rocks under blasting load[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(2): 208-214. (in Chinese)
- [10] WU Liang, LI Feng, LU Wen-bo, et al. Vibration velocity threshold of a tunnel adjacent to surrounding layered rocks under blasting load[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(2): 208-214. (in Chinese)
- [11] 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.
- [11] GUO Dong-ming, 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)
- [11] GUO Dong-ming, 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)
- [12] 张良,管晓明,张春巍,等. 浅埋隧道爆破地下马蹄形管道的振动效应研究[J]. 爆破, 2019, 36(2): 117-125.
- [12] ZHANG Liang, GUAN Xiao-ming, ZHANG Chun-wei, et al. Vibration response of horseshoe-shaped pipeline under tunnel blasting[J]. Blasting, 2019, 36(2): 117-125. (in Chinese)
- [12] ZHANG Liang, GUAN Xiao-ming, ZHANG Chun-wei, et al. Vibration response of horseshoe-shaped pipeline under tunnel blasting[J]. Blasting, 2019, 36(2): 117-125. (in Chinese)