

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202011032



新建隧道下穿既有铁路结构爆破 振动影响分区及减震优化

石伟民¹, 何方², 陈士海¹, 揭海荣², 李海波³

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 中铁二十四局集团福建铁路建设有限公司, 福建 福州 350013;
3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 以厦门轨道 3 号线区间隧道下穿既有铁路为工程背景,通过现场爆破振动监测数据,引入比例距离(\bar{R})拟合振动衰减曲线,探究新建隧道下穿既有铁路结构的振动响应规律.通过数值模拟计算隔振空孔爆破、单孔单响与分段延时起爆对铁路结构的减震作用.试验结果表明:当 $0 < \bar{R} < 13.73$ 时为爆破振动影响近区,当 $13.73 \leq \bar{R} \leq 28.45$ 时为爆破振动影响中区,当 $\bar{R} > 28.45$ 时为爆破振动影响远区,且振动影响近区振速衰减最快,中区衰减过渡,远区趋于衰减平缓;增设隔振空孔不仅可以减震,还能扩大分区影响范围,提升作业效率;相比单孔单响起爆,分段延时间隔起爆能显著降低波形叠加效应,达到减震作用.

关键词: 爆破振动; 振动分区; 数值模拟; 参数优化

中图分类号: TD 235 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2021)06-0764-08

Blasting Vibration Influence Zone and Damping Optimization of New Tunnel Under Existing Railway Structure

SHI Weimin¹, HE Fang², CHEN Shihai¹,
JIE Hairong², LI Haibo³

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. China Railway 24th Bureau Group Fujian Railway Construction Limited Company, Fuzhou 350013, China;
3. Wuhan Institute of Geotechnical Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Taking the tunnel of Xiamen Railway Line 3 under the existing railway as the engineering background, through the field blasting vibration monitoring data, the proportional distance (\bar{R}) is introduced to fit the vibration attenuation curve, the vibration response is investigated when a new tunnel is built under the existing railway. Numerical simulation is used to calculate the vibration damping effect of vibration isolation hole blasting, single hole with single detonation and piecewise delayed detonation on railway structure. The test results show that, when $0 < \bar{R} < 13.73$, it is the near zone affected by blasting vibration, when $13.73 \leq \bar{R} \leq 28.45$, it is the middle zone affected by blasting vibration, and when $\bar{R} > 28.45$, it is the far zone affected by blasting vibration. The vibration speed reduces fastest in the near zone affected by blasting vibration, slows in the middle zone, and flats in the far zone; the addition of vibration isolation holes not only reduces the vibration, but also expands the area of influence and improves the work efficiency. Compared with a single hole with

single detonation, the detonation of the segmented delay interval can significantly reduce the waveform superimposition effect and achieve the effect of shock absorption.

Keywords: blasting vibration; vibration zone; numerical simulation; parameter optimization

随着城市轨道交通的发展,地铁隧道通过下穿既有铁路爆破施工的案例增多,因新建隧道与上部铁路结构地层联系紧密,导致隧道爆破开挖的难度加大,不合理的爆破施工会增加施工成本,影响作业进度,严重时可能引发铁路结构的工程事故。

隧道爆破产生的高压冲击波向外传递时伴随着能量的衰减,周仕仁等^[1]对某区间地铁隧道进行上下台阶法分部爆破开挖时,通过现场监测数据,得出斜井隧道爆破振动的水平径向振速最大,垂直方向的主频率大于水平方向,而水平方向的衰减速率大于垂直方向的结论;孟海利^[2]将掌子面爆破区域由内而外划分为掏槽区、辅助区和周边区,爆破振动结构表明,振动衰减系数随着爆破开挖区域的增大而逐渐减小;王海亮等^[3]以两条立体交叉隧道为工程背景,通过回归分析现场数据得出掌子面后方振速普遍大于前方,出现“空洞效应”,后方爆破振动速度衰减快。隧道在爆破掘进过程中,对铁路的振动影响会随着地震波的衰减变化而变化,因此,张在晨等^[4]将比例距离(\bar{R})的概念应用于隧道爆破振动分区中,提出采用逆向传播(BP)小波神经网络的方法预测爆破近区的振速,表明当 $\bar{R} < 5.0$ 时为爆破近区,当 $5.0 \leq \bar{R} \leq 9.0$ 时为爆破中区,当 $\bar{R} > 9.0$ 时为爆破远区。

学者对炸药量、延时间隔、装药结构等爆破参数进行相关的减震研究。刘江超等^[5]从应力、振速变化、动态损伤及爆后粉尘等角度对药柱上部、两端、下部水间隔 3 种不同装药结构进行模拟分析,得出两端装药是工程爆破的最优装药结构;郑炳旭^[6]为减小炸药单耗的资源浪费,采用 Kuz-Ram 数学模型建立控制矿石大块率的炸药单耗预测模型,并将边坡的预裂爆破改为缓冲爆破,达到爆破效果的同时,减少炸药的使用量;申涛等^[7]引入 JH-II 型岩石动态损伤模型,采用数值计算方法比较传统药包爆破与切缝药包法产生的振动峰值速度和围岩损伤情况,指出切缝药包法产生的振速小且围岩受损轻;叶海旺等^[8]结合时序控制预裂爆破参数的优化,得出孔径为 42 mm 的时序控制预裂爆破,合理起爆最佳延时为 75~100 μs ;温廷新等^[9]提出通过爆破参数优化遗传算法与极限学习机结合的方法(GA-ELM)预测抛掷爆破模型,最终预测的爆堆曲线接近真实爆堆曲线,有效降低了抛掷剥离成本,减少了振动的影响。

上述对爆破振动传播规律的研究多采用现场数据拟合和理论分析预测,对于爆破振动影响进行分区后是否要进一步优化并未明确考虑。目前,对于隧道下穿铁路爆破振动影响分区的研究并不多,且下穿铁路爆破开挖时产生地震波所传递的能量对铁路结构有显著的影响,爆破参数的合理性需要进行优化论证。因此,本文针对新建隧道下穿既有铁路施工产生的爆破振动规律开展研究。

1 工程概况

1.1 位置关系

厦门地铁 3 号线创业安兜区间隧道是单洞单线马蹄形隧道,左线起止里程为 DK9+546.773~DK10+085.000 m,长为 538.227 m;右线起止里程为 DK9+546.773~DK10+086.000 m,长为 539.227 m;隧道洞径 6.2 m,区间左、右线间距 16.5 m,新建隧道与既有鹰厦铁路线呈现空间下穿,交叉处夹角达到 83°,隧道拱顶与铁路路基竖向高度约为 15.1 m,鹰厦铁路为路基-挡墙式铁路结构形式。新建隧道与既有铁路的位置关系,如图 1 所示。

1.2 施工方案

距铁路中心线 DK9+855.542 m 左右各 38.8 m 范围内桩段采用静态破碎开挖;距离铁路中心线 38.8 m 外桩段采用区间线路封锁的控制爆破施工,主要采用上下台阶法分部开挖。施工方案示意图,如图 2 所示。

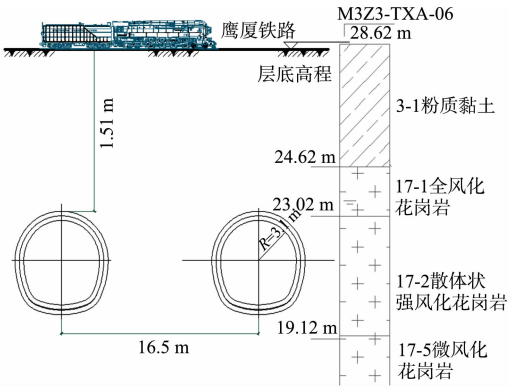


图 1 新建隧道与既有铁路的位置关系
Fig.1 Position relationship between new tunnel and exiting railway

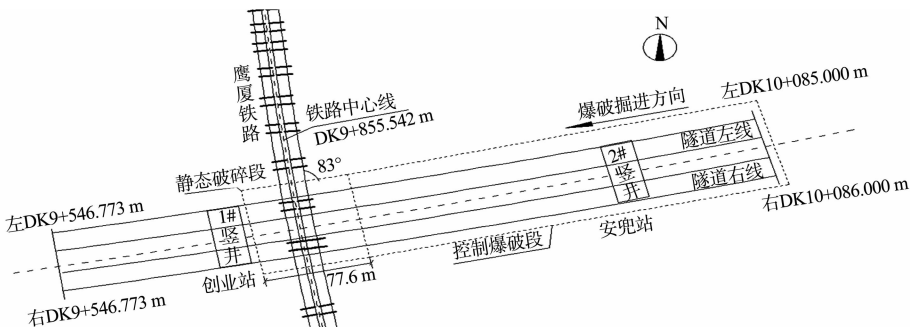


图 2 施工方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of construction scheme

2 爆破振动试验

2.1 试验方案

为掌握爆破沿隧道纵向的传播变化规律和对上部铁路结构的振动影响,在隧道爆破开挖初期,对隧道右洞上台阶进行 5 次试爆试验,每次爆破开挖进尺均为 2 m. 右洞上台阶爆破试验参数,如表 1 所示.

表 1 右洞上台阶爆破试验参数

Tab. 1 Blasting test parameters of upper bench in right tunnel

爆破试验次数	掌子面爆破里程/m	距铁路中心线距离/m	总药量/kg	炮孔总数/个	掏槽孔个数/个	掏槽孔药量/kg	相邻段爆破延时间隔/ms
1	DK10+080.000	224.548	40.0	58	4	3.6	30
2	DK10+078.000	222.548	42.4	58	4	4.8	30
3	DK10+076.000	220.548	40.0	56	4	6.0	40
4	DK10+074.000	218.548	37.6	54	4	4.8	50
5	DK10+072.000	216.548	37.6	58	4	4.8	40

2.2 测点布置

由于铁路结构为路基-挡墙形式,重点监测和保护对象是上部铁路结构,且测振仪传感器无法直接布置于铁路轨道上,测振接收器也要防止外界干扰,因此,在铁路挡墙(DK9+859.542 m,测点 1)、89# 接触杆(DK9+858.042 m,测点 2)及 88# 接触杆(DK9+853.042 m,测点 3)处放置 3 台 L20-N 型爆破测振仪(图 3). 测振仪全天候自动监测并接收爆破振动波和记录爆破时刻. 测点布置情况,如图 4 所示.

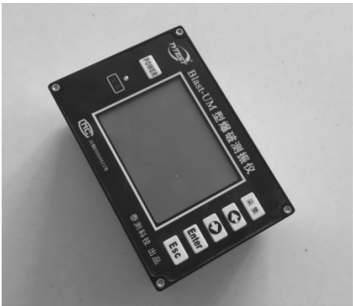


图 3 L20-N 型爆破测振仪

Fig. 3 L20-N blasting vibration meter

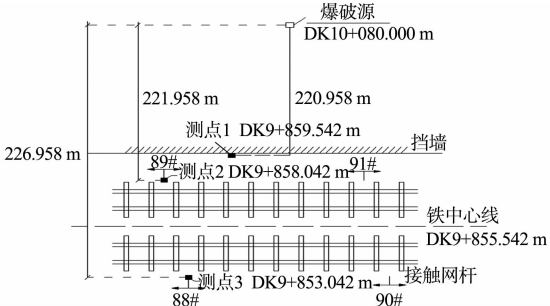


图 4 测点布置情况

Fig. 4 Layout of measuring points

2.3 爆破试验结果

测点 1~3 的爆破振速最大值曲线,如图 5 所示. 图 5 中: v_{\max} 为铁路振速最大值; n 为爆破次数. 由图 5 可知:在掌子面后方先后爆破的 10 m 范围内,比较第 1,2 次及第 3,5 次试爆,改变掏槽孔药量,振速最大值显著改变,即掏槽孔药量与振速最大值呈明显的正相关;比较第 4,5 次试爆,保持掏槽孔药量相同,改变爆破延时间隔,当地震波的持续时间 t_c 大于炮孔延时间隔 t_k 时,会引起波形的叠加,结合本次试爆的振速,当地震波持续时间为 110~200 ms,炮孔延时间隔为 30~50 ms 时,则会引起波形的叠加效应. 考虑到波的叠加效应可能是叠加或消减,因此,需要通过数值分析计算得到较合理的爆破延时方式.

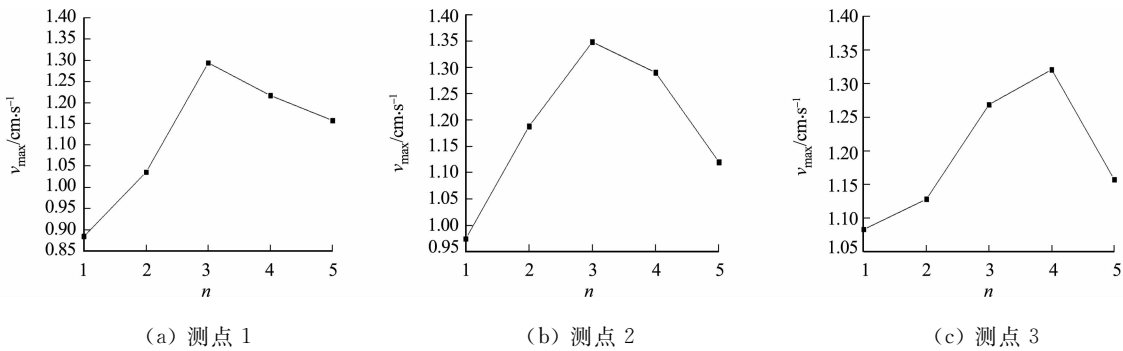


图 5 测点 1~3 的爆破振速最大值曲线

Fig. 5 Maximum blasting vibration velocity curves of measuring points 1-3

3 下穿铁路爆破振动影响分区

3.1 下穿铁路爆破振动影响分区的标准

隧道爆破后,其产生的各种地震波以不同的速度向外传播,表现为纵波最快,横波次之,面波最慢^[10],并且对外传播趋势不断衰减,从而对铁路结构产生影响.因此,研究爆破地震波的传递机理,对传播区域进行合理的振动影响分区,引入比例距离(\bar{R})的概念作为确定分区的标准^[11],对于保护铁路结构具有重要研究意义.

爆破振动产生位移(u)可以用质点位移解^[12]表示,即

$$u=AR^{-2}+BR^{-1}.$$
(1)

式(1)中: A,B 为权重参数^[13]; R 为爆源与测点距离,当距离爆源较近的区域时, $R^{-1}<R^{-2}$,当距离爆源较远的区域时, $R^{-1}\geq R^{-2}$.

一般情况下, A,B 的具体数值很难得到^[14].为求得一般意义上的数值解析,同时也便于探究距离变化下的爆破衰减规律,将实际距离转换为比例距离进行处理,比例距离定义为

$$\bar{R}=R/\sqrt[3]{Q}.$$
(2)

式(2)中: Q 为炸药量,当齐发爆破时为总药量,当延时爆破时为最大一段药量.

将比例距离代入质点位移求解式中,令 $R=\bar{R}$,可以得到一般意义下的地震变化规律中振动位移与比例距离的关系式^[15],即

$$u=A\bar{R}^{-2}+B\bar{R}^{-1}.$$
(3)

由于爆破地震波在对外传递时会发生能量的耗散,若不考虑波的反射和折射现象^[16],只考虑其幅值的衰减情况,则在弹性波的传递情况下,传播过程不发生频散,不同比例距离中的波形应该表现为相似.萨式经验公式为

$$v=K\left(\frac{Q}{R}\right)^{\frac{1}{3}\alpha}.$$
(4)

式(4)中: v 为振速,即质点振动安全允许速度; K 为场地系数; α 为衰减指数.

结合式(2)~(4),可得振速与比例距离的关系式为

$$v=K\bar{R}^{-\alpha}.$$
(5)

3.2 下穿铁路爆破振动影响分区的计算结果

将现场监测数据按照式(5)进行回归拟合,可以得出 $v_{\max}\bar{R}$ 曲线,如图 6 所示.

将振速衰减曲线斜率 k' 作为分区标准的计算依据,从而确定爆破影响近、中、远区.对式(5)两边同时求导,得到 k' 关系式,即

$$k'=-K\alpha\bar{R}^{-\alpha-1}.$$
(6)

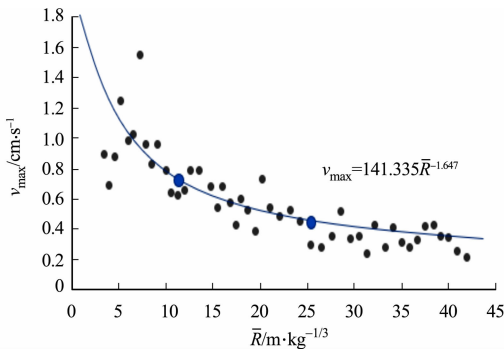


图 6 爆破振动影响区 $v_{\max}\bar{R}$ 曲线

Fig. 6 $v_{\max}\bar{R}$ curve of blasting vibration affected zone

张在晨等^[4]结合大量工程数据和小波神经网络算法,分析得出 $k' < -5$ 时为爆破影响近区, $-5 \leq k' \leq -1$ 时为爆破影响中区, $k' > -1$ 时为爆破影响远区。

结合图 6 及式(5),(6),计算可得 $K=141.335$, $\alpha=1.647$,并可知当 $0 < \bar{R} < 13.73$ 时,爆破振速衰减很快,为振动影响近区;当 $13.73 \leq \bar{R} \leq 28.45$ 时,爆破衰减速度由快变慢,为过渡段振动影响中区;当 $\bar{R} > 28.45$ 时,振动速度衰减趋于平缓,为爆破振动影响远区。

4 爆破振动影响分区下的减震优化数值分析

实际爆破施工时左、右洞并非同时起爆,因此取对称半结构进行爆破分析,考虑爆破对边界的影响,模型尺寸为 $20\text{ m} \times 30\text{ m} \times 80\text{ m}$,其中,掌子面开挖方向 80 m ,隧道拱顶距离铁路路基底为 15.1 m ,掏槽孔 4 个,孔直径为 50 mm ,孔距为 1.5 m ,掏槽孔网格局部加密,采用实体 Solid164 单元划分网格,整体模型及掏槽孔布置,如图 7 所示。

考虑到模型边界会产生振动波反射^[12],将模型边界设为无反射边界条件,采用等效荷载模拟爆源压力作用. 掏槽孔荷载示意图,如图 8 所示。

荷载形式为指数型衰减荷载^[12],表达式为

$$P(t) = P_{\max} e^{-\alpha t} \tag{7}$$

荷载峰值 P_{\max} 计算表达式为

$$P_{\max} = \frac{1}{8} \rho_c D^2 k_d^{-6} \eta \tag{8}$$

式(8)中: ρ_c 为装药密度,取 $1.2\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; D 为炸药爆速,文中爆炸采用 2 号岩石乳化炸药, $D=3\,800\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; k_d 为装药不耦合系数,即炮孔直径(40 mm)与药卷直径(32 mm)的比值, $k_d=1.25$; η 是爆轰气体碰撞孔壁时压力增大倍数, η 为 $8 \sim 11$,取 11 。

模拟中计算可得 $P_{\max}=6\,250\text{ MPa}$;衰减指数 α 与压力持续时间有关,取 $4\,000$ ^[12-13];控制荷载输入时间为 0.025 s ,终止时间取 0.2 s . 围岩本构选择塑性随动硬化模型,铁路结构选择各项同性弹性材料. 模型计算参数,如表 3 所示. 表 3 中: γ 为重度; E 为弹性模量; μ 为泊松比; σ 为屈服应力; τ 为剪切模量。

表 2 模型计算参数
Tab. 2 Model calculation parameters

材料	$\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	E/MPa	μ	σ/MPa	τ/MPa
围岩	2 500	5 500	0.27	235	212
铁路路基	1 970	120	0.25	35	83
钢轨	1 870	30	0.28	480	384
道砟	2 130	180	0.23	48	27

4.1 设置隔振空孔减震优化数值分析

隔振空孔的减震效果表现为爆破应力波在传播过程中,在隔振空孔处会产生反射和折射作用,进入保护区的能量减少,产生的振动速度降低,对保护区的破坏作用减弱。

取爆破掌子面距离铁路中心线纵向距离 40 m 位置($\bar{R}=11.85\text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)进行设置隔振空孔的计算分析,炮孔分别设置无隔振空孔和有隔振空孔(图 9),隔振空孔孔径为 20 mm ,孔距为 1.5 m . 计算终止时间为 0.2 s ,计算时间(t)为 $0.05, 0.10\text{ s}$ 的质点总速度云图,如图 10,11 所示。

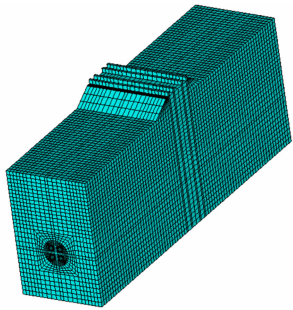


图 7 整体模型及掏槽孔布置
Fig. 7 Whole model and cut hole layout

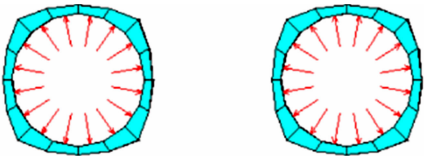
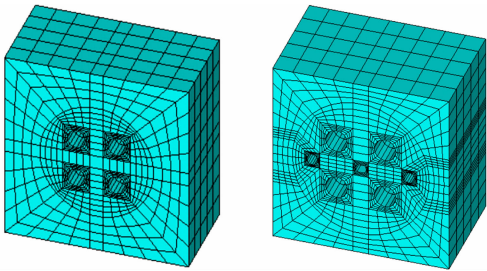


图 8 掏槽孔荷载示意图
Fig. 8 Load diagram of cut hole



(a) 无隔振空孔 (b) 有隔振空孔
图 9 炮孔布置示意图
Fig. 9 Schematic diagram of blast hole layout

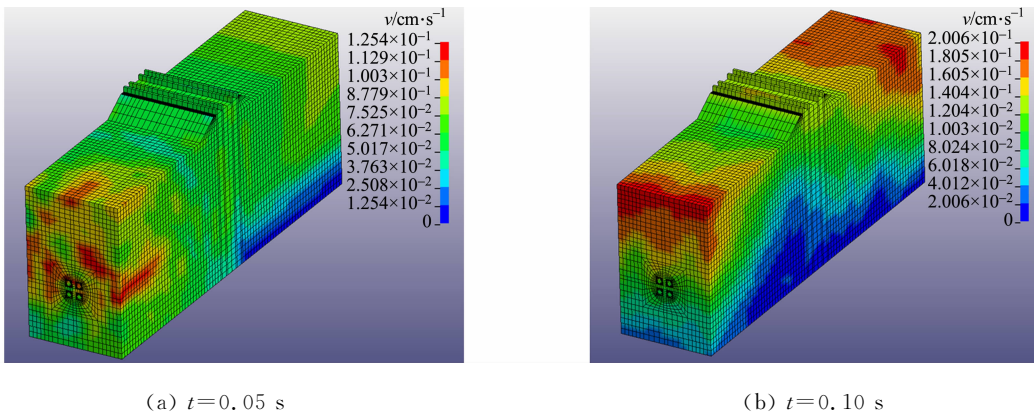


图 10 无隔振空孔的质点总速度云图

Fig. 10 Cloud chart of total velocity of mass point without vibration isolation hole

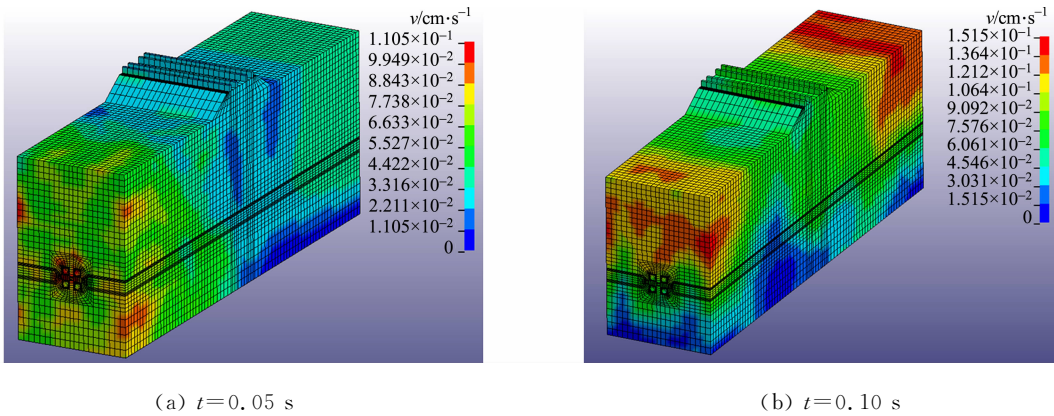


图 11 有隔振空孔的质点总速度云图

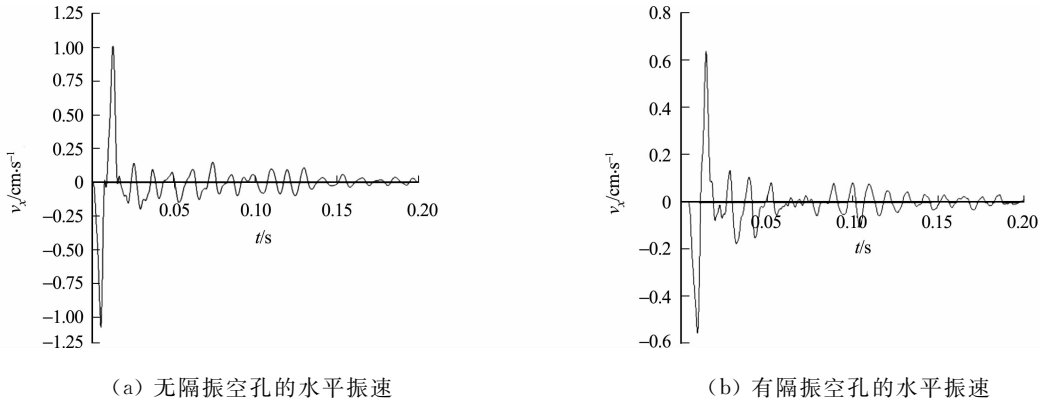
Fig. 11 Cloud chart of total velocity of mass point with vibration isolation hole

根据图 10,11 的计算结果可知:当 $t=0.05\text{ s}$ 时,不设隔振空孔的爆破应力波向外传递速率大于设置隔振空孔时,原因是爆破应力波遇到隔振空孔发生了折射和反射,阻隔了爆破应力波直接对外传播,且不设隔振空孔爆破产生的振动更剧烈;当 $t=0.10\text{ s}$ 时,最大振速出现在隧道上部路面基底附近,不设隔振空孔的振速总体较大,说明设置隔振空孔能够有效降低振动的影响,起到优化作用。

当 $t=0.20\text{ s}$ 时,无隔振空孔和有隔振空孔的水平、竖向振速时程曲线,如图 12 所示。图 12 中: v_x , v_y 分别为水平、竖向振速。

由图 12 可知:在爆破振动影响近区设置隔振空孔后,爆破振动影响显著降低;不设隔振空孔时,水平振速最大达到 $1.05\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$,竖向振速最大达到 $0.47\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$;设置隔振空孔后,水平振速最大值为 $0.64\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$,竖向振速最大值为 $0.26\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$,水平减震率为 39.04% ,竖向减震率为 44.68% 。由此可见,距离铁路结构近时,在掏槽孔附近设置一定数量的隔振空孔对减震有显著效果。

进一步分析设置隔振空孔对比例距离分区的影响,对式(5)进行变式,得到



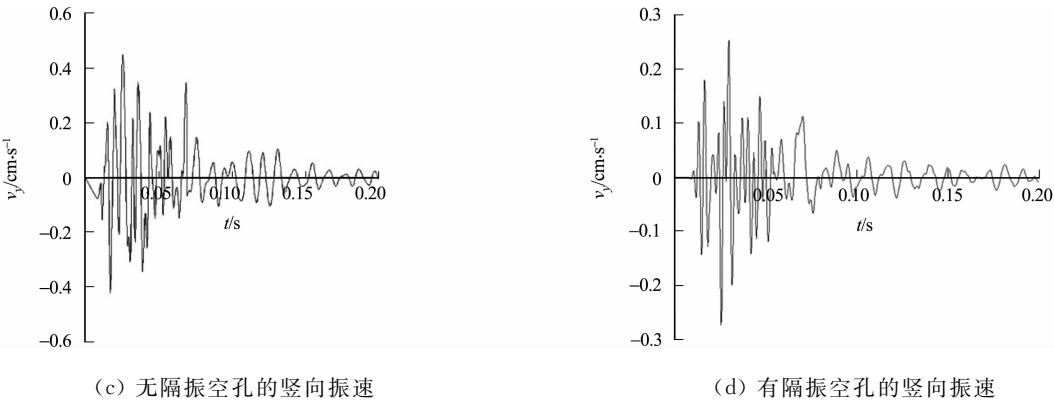


图 12 有、无设置隔振空孔的振速时程曲线
Fig. 12 Time history curves of vibration velocity with or without vibration isolation hole

$$\overline{R} = \sqrt[\alpha]{K/v}. \tag{9}$$

记设置隔振空孔的振速为 v_g , 无隔振空孔的振速为 v_0 , 则设置隔振空孔后, $v_g < v_0$, 又 $\alpha > 1$, 则 $\sqrt[\alpha]{K/v_g} > \sqrt[\alpha]{K/v_0}$, 即有隔振空孔的比例距离 $\overline{R}_g > \overline{R}_0$, 说明隔振空孔不仅能够起到减震效果, 还能扩大爆破施工范围, 从而提高作业效率.

4.2 调整起爆延时间隔优化数值分析

对比例距离 $\overline{R} = 36.45 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ (远区) 进行不同起爆方式的数值模拟, 分别设置单孔单响(每个掏槽孔起爆延时 $\Delta t = 30 \text{ ms}$)和分段延时(上排 2 个掏槽孔起爆延时 $t_1 = 30 \text{ ms}$, 下排 2 个掏槽孔起爆延时 $t_2 = 40 \text{ ms}$)起爆. 不同起爆方式的振速时程曲线, 如图 13 所示.

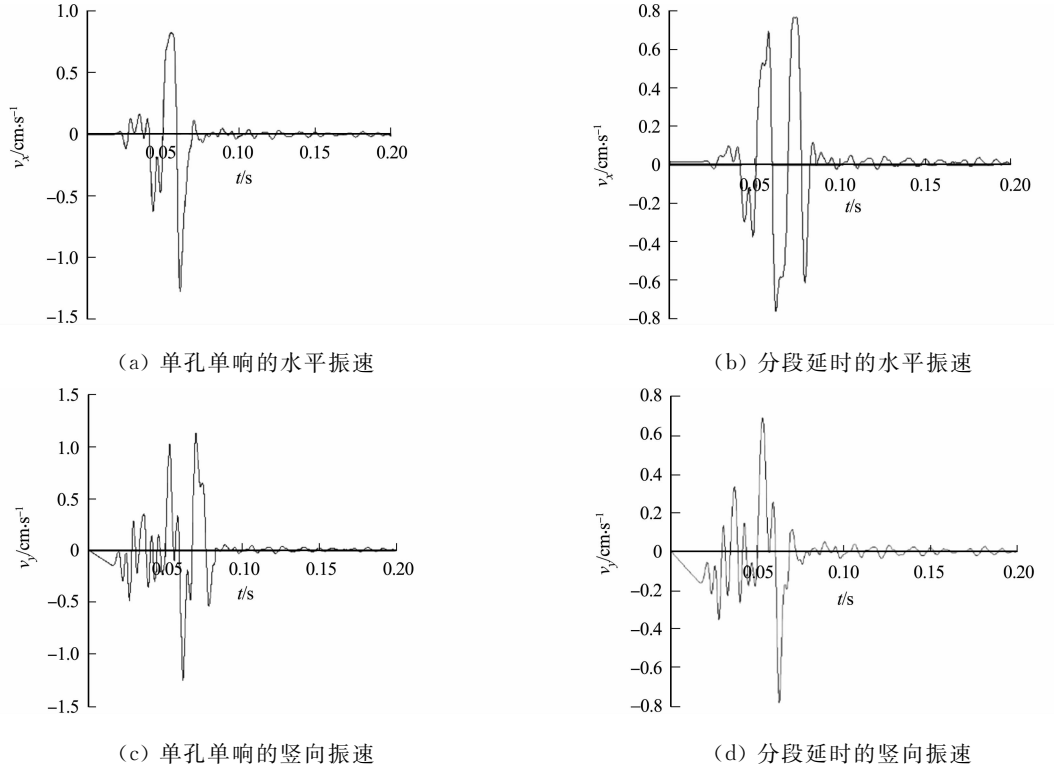


图 13 不同起爆方式的振速时程曲线
Fig. 13 Vibration velocity time history curves of different detonation modes

由图 13 可知: 单孔单响对于振动波叠加效应的分离要求高于分段延时起爆, 且减震优化效果比分段延时差, 单孔单响的水平振速最大值为 $1.28 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 竖向振速最大值为 $1.34 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; 采用分段延时起爆时, 其水平振速最大值为 $0.76 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 竖向振速最大值为 $0.82 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 减震效果显著. 因此, 合理的分段延时起爆有助于爆破施工.

5 结论

- 1) 铁路振动速度最大值与掏槽孔起爆药量呈正相关, 掏槽孔起爆药量越大, 铁路振速最大值越大, 当掏槽孔起爆药量一定时, 起爆延时间隔影响振速, 相邻段别的爆破振动波会出现波形叠加效应。
- 2) 以本工程为例, 当 $0 < \bar{R} < 13.73$ 时为爆破振动影响近区, 当 $13.73 \leq \bar{R} \leq 28.45$ 时为爆破振动影响中区, 当 $\bar{R} > 28.45$ 时为爆破振动影响远区, 且爆破振动影响近区振速衰减急剧, 爆破影响中区振速衰减由快变慢, 远区振速衰减趋于平缓。
- 3) 设置隔振空孔能起到减震优化作用, 与优化前相比, 设置隔振空孔后的振速最大值显著降低; 并且设置隔振空孔会影响爆破分区, 扩大使用爆破法施工范围, 从而提升施工效率。
- 4) 爆破应力波对外传播过程中, 相邻段别的波分离开始产生叠加效应, 单孔单响的振动叠加效应大于分段延时间隔。因此, 实际施工时, 应尽量使用分段延时间隔, 并根据爆破距离合理地调整延时间隔以减小振动叠加效应。

参考文献:

[1] 周仕仁, 周建敏, 王洪华, 等. 地铁隧道爆破参数优化及其振动效应研究[J]. 爆破, 2018, 35(2): 85-89. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2018.02.015.

[2] 孟海利. 隧道分区爆破振动传播规律试验研究[J]. 铁道建筑, 2015(4): 50-54. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2015.04.14.

[3] 王海亮, 陈吉辉. 隧道上台阶分区爆破振动规律[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(3): 43-50. DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2018.03.006.

[4] 张在晨, 林从谋, 黄志波, 等. 隧道爆破近区振动的预测方法[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(3): 367-372.

[5] 刘江超, 高文学, 王林台, 等. 水封爆破装药结构优化数值分析及其应用[J]. 振动与冲击, 2020, 39(9): 57-62, 96. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.09.008.

[6] 郑炳旭. 经山寺铁矿优化开采综合爆破技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1530-1536.

[7] 申涛, 罗宁, 戚福州, 等. 切缝药包岩石巷道光面爆破数值模拟与优化研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(4): 674-680.

[8] 叶海旺, 唐可, 万涛, 等. 时序控制预裂爆破参数优化及应用[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(3): 502-509. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)03-0502-08.

[9] 温廷新, 陈晓宇, 邵良杉, 等. 参数优化 GA-ELM 模型在露天煤矿抛掷爆破的预测[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 630-638. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0572.

[10] 吴贤振, 尹丽冰, 刘建伟, 等. 基于 LS-DYNA 的临近采空区多段爆破微差时间优化研究[J]. 爆破, 2015, 32(1): 87-92. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2015.01.018.

[11] 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): 1731-1737. DOI: 10.11779/CJGE201909018.

[12] 陈士海, 吴建. 双孔微差及长柱药包爆破振动数值模拟研究[J]. 爆破, 2017, 34(3): 46-52. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2017.03.008.

[13] 吴建, 陈士海. 长柱药包爆破振动位移特性研究[J]. 工程爆破, 2014, 20(5): 50-54, 58.

[14] 逢焕东, 陈士海. 弹性介质中爆破地震波传播的分区变化规律研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(3): 105-107, 202.

[15] 谢烽, 韩亮, 刘殿书, 等. 基于叠加原理的隧道爆破近区振动预测方法[J]. 爆破, 2017, 34(3): 151-156. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2017.03.027.

[16] 郭学彬, 张继春, 刘泉, 等. 微差爆破的波形叠加作用分析[J]. 爆破, 2006, 23(2): 4-8, 49. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2006.02.002.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)