

复合式中墙无导洞连拱隧道爆破振动影响研究

李 波¹, 李培锋², 赵 亮¹, 于建新³, 姜成业^{4,5}

(1. 云南交投集团公路建设有限公司, 云南 昆明 650100; 2. 云南交投集团投资有限公司, 云南 昆明 650000;

3. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454003;

4. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为探究不同爆破方案条件对隧道结构的影响, 保证施工安全, 以某短隧道为例, 采用 LS-DYNA 显式动力数值模拟方法, 分析了不同爆破施工方案条件下后行洞对先行洞的影响规律。结果表明: 上台阶不同进尺爆破引起垂直中墙方向的振速最大, 内圈及周边爆破段大于掏槽及辅助段, 迎爆侧振速明显大于背爆侧; 沿隧道轴线方向, 对应爆破掌子面前方未开挖处的振速大于后方已开挖处的振速, 后方振速衰减速率大于前方; 上下台阶进尺爆破药量相差不大的情况下, 上台阶爆破引起临近隧道中墙以上测点振速大于下台阶, 下台阶对拱脚及仰拱测点影响较大。此研究结果对类似工程具有一定的指导意义和参考价值。

关键词: 复合式中墙; 连拱隧道; 动力影响; 数值模拟

中图分类号: U455.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2021)06-0179-07

Blasting Vibration Response of Compound Middle-Wall Double-Arch Tunnel Without Guide Tunnel

LI Bo¹, LI Peifeng², ZHAO Liang¹, YU Jianxin³, JIANG Chengye^{4,5}

(1. Yunnan Exchange Investment Group Highway Construction Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650100, China;

2. Yunnan Jiaotou Investment Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China;

3. School of Civil Engineering, He'nan Polytechnic University, Jiaozuo, He'nan 454003, China;

4. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to explore the influence of different blasting programme conditions on tunnel structure and ensure the safety of the construction, taking a short tunnel as an example, the influence law of trailing tunnel on leading tunnel under different blasting construction programme is analyzed by LS-DYNA explicit dynamic numerical simulation method. The results show that the blasting with different footages on the upper steps causes the maximum vibration velocity in the direction of the vertical middle wall. The inner ring and surrounding blasting sections are larger than the cut and auxiliary sections, and the vibration velocity on the front blast side is significantly greater than that on the back blast side; along the tunnel axis, it corresponds to the blasting palm. The vibration velocity of the unexcavated area in front of the sub-front is greater than the vibration velocity of the excavated area at the rear, and the decay rate of the vibration velocity at the rear is greater than that in the front; when the amount of blasting charge in the upper and lower steps is not much different, the blasting of the upper steps causes the middle wall of the adjacent tunnel to be above the wall. The vibration velocity of the measuring point is higher than that of the lower step, and the lower step has a greater influence on the arch foot and the invert measuring point.

Keywords: composite mid-wall; double-arch tunnel; dynamic influence; numerical simulation

我国隧道及地下工程建设的规模和速度都处于世界前列^[1]。交通基础设施建设方面的发展速度显著加快,连拱隧道多用于改善公路规划设计线性和提高管理效率方面有着优势,因此在公路建设方面有着较大的优势^[2]。但由于两隧道相距较近,施工相互影响较大,特别是隧道整体稳定性与中墙的设计有很大关系^[3-6],连拱隧道的爆破振动控制更是成为国内外研究学者的热点问题。张庆彬等^[7]通过现场实测,分析了中隔墙导洞先行施工,后行洞爆破对先行洞的影响规律:对于大跨度的连拱隧道,最大单响药量对它的影响并不是最大,后行洞爆破对隧道的影响主要在于:中隔墙的振动速度衰减速率方面,径向比切向的大;在振动衰减上,先行洞对应后行洞的已开挖部分的岩层比对应的未开挖部分快。陈昕^[8]采用数值模拟分析了连拱隧道爆破对复合式直中墙的影响规律,指出弹性模量对隧道结构的影响,它的增大会使得地震波的传播速度增大;中隔墙 X 方向的峰值震速较大被影响于左右洞的不同开挖过程。曹峰等^[9]采用现场监测与数值模拟分析了中隔墙导洞开挖情况下,后行洞爆破对先行洞的影响规律,得出:爆破对于先行隧道侧的中隔墙的振动速度影响表现为径向和切向均较大,爆破振动速度在成洞区具有放大效应。乔青青等^[10]通过数值模拟得出:对于同一竖截面,竖向振速作为主导振速时,上部和下部的振速略大于中部振速;单侧隧道的中隔墙存在规律:未开挖段的振速与开挖段的振速相比会放大 1.3 倍左右。王家辉^[11]通过数值分析指出在设置隔震层时,横向和竖向地震的作用对于隧道衬砌的位移影响并不大,同时对于加速度的分布情况影响也不明显;衬砌的地震应力水平会随着其材料的弹性模量的减小和其层厚度的加大

而明显减小。钱正富等^[12]对红层软岩无中导洞连拱隧道的爆破振动控制技术进行了研究,后行洞的开挖方法中选择三台阶法以及二台阶法对于先行洞的衬砌进行振动观测,提出了相应的控制技术措施,收到了良好效果。

以上分析可以看出,后行洞爆破时对连拱隧道的中隔墙具有较大影响。对于不同的中隔墙形式,由于距离和爆破方案的不同,引起的振动规律及采取的控制技术措施也有不同,因此必须针对具体的工程,制定对应的控制技术措施。某隧道设计采用无中导洞连拱隧道形式,中墙的组成主要是两个隧道的支护以及他们的二次衬砌,后行洞爆破对中墙影响较大。鉴于此,本文基于 LS - DYNA 数值仿真,对不同爆破方案条件下的振动影响规律进行研究,以期制定相应的控制技术措施,保证施工安全。

1 工程概况

拟研究隧道全长 130 m,为短隧道,最大埋深 39.580 m。其海拔高程介于 1 214.082 m ~ 1 250.341 m 之间,高度的相对差 36.259 m,属于中切割中山地貌。隧道区地形起伏大,地表植被发育,以松林及灌木为主。

隧道洞身段围岩分级划分为Ⅳ级,岩体以粉砂岩为主,较完整,为中风化,其节理与裂隙较发育,镶嵌块石结构;岩体的富水性较弱,在实际开挖过程中,可能会存在一定量的水滴落、水渗出等现象。围岩状况基本稳定,但若是在开挖过程中不进行支护或者支护的处理不当,则可能会引起小规模的坍塌现象,岩体的侧壁相对来说较为稳定。隧道支护结构形式如图 1 所示。

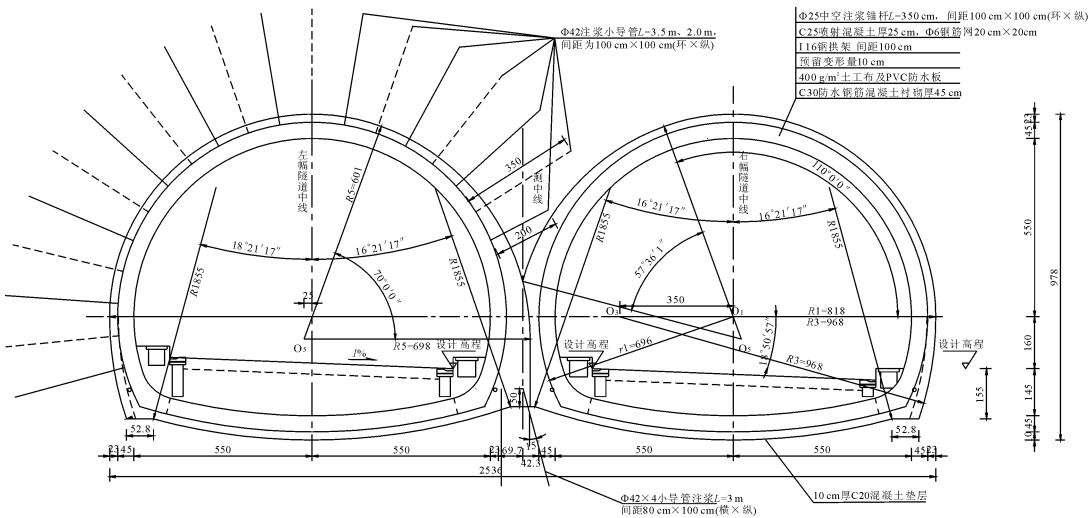
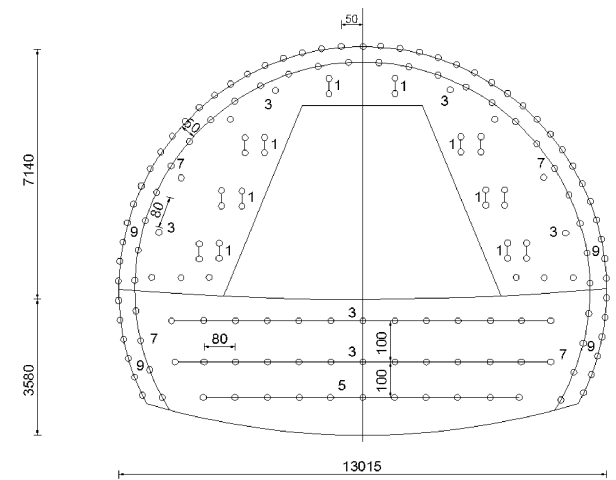


图 1 隧道结构形式(单位:mm)

施工过程中采用超前小导管注浆超前预加固,为提高混凝土喷射的施工质量从而提高整体性,尤其是防止先行洞右侧拱和墙部初支喷射的混凝土开裂,采取在先行洞初支喷射混凝土的基础上,同时在右侧拱、墙部(隧道净空侧)设置 $\varphi 16$ 钢筋网,中间位置钢筋网采用 $\varphi 8$ 钢筋网。

隧道采用无中导连拱施工方案,先行洞(左幅)采用三台阶法开挖,后行洞(右幅)为上下台阶留核心土法,采用控制爆破施工。本次研究主要分析后行洞爆破对先行洞及中墙的影响,后行洞爆破参数如图 2、表 1、表 2 所示。



$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{p}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p^{\text{eff}}) \quad (1)$$

式中： σ_y 为屈服应力，Pa； $\dot{\varepsilon}$ 为应变率； σ_0 为初始屈服应力，Pa； D 、 P 为应变率参数； β 为硬化参数； E_p 为塑性硬化模量，Pa； $\varepsilon_p^{\text{eff}}$ 为有效塑性应变。

(2) 炸药参数。炸药选 LS-DYNA 自带的高性能炸药材料，炸药的状态方程^[17-18] 如式(2) 所示，相关参数如表 4 所列。

$$P = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (2)$$

式中： A 、 B 、 ω 、 R_1 、 R_2 、 V 为炸药状态方程参数； E_0 为炸药的初始内能。

表 4 炸药及状态方程主要参数

材料	密度/(kg·m ⁻³)	爆速/(m·s ⁻¹)	CJ 压力/GPa	A/GPa	B/GPa	R ₁	R ₂	ω/GPa	E ₀ /GPa	V
炸药	1447	4300	3.43	214.4	0.182	4.5	0.9	1.5	3.5	1

如图 4 所示，在先行隧道内，在距离隧道开挖面最近的地方选择背爆侧边墙以及迎爆侧底板、拱顶、边墙处的 A、B、C、D、E、F、G、H 等 8 个位置的节点，作为振动重点监测位置。我国《爆破安全规程》^[19] (GB 6722—2014) 选择的主要控制指标为爆破振动速度，故本文亦将其作为重点关注对象。振动方向的三个分量依次为： V_x 垂直隧道中墙， V_y 为竖直方向， V_z 为隧道轴向， V_R 为三方向合速度。

3 计算结果分析

由于上台阶的开挖面积较大，一次爆破药量较多，首先对上台阶不同进尺下的振动影响进行分析。

3.1 不同进尺下对应掌子面位置爆破振动分布规律

以迎爆侧最近点 A 为例，研究爆破方案的差异对于三向振速的影响，0.6 m 进尺下 A 点三向振动速度如图 5 所示，1.2 m 进尺下 A 点三向振动速度如图 6 所示。

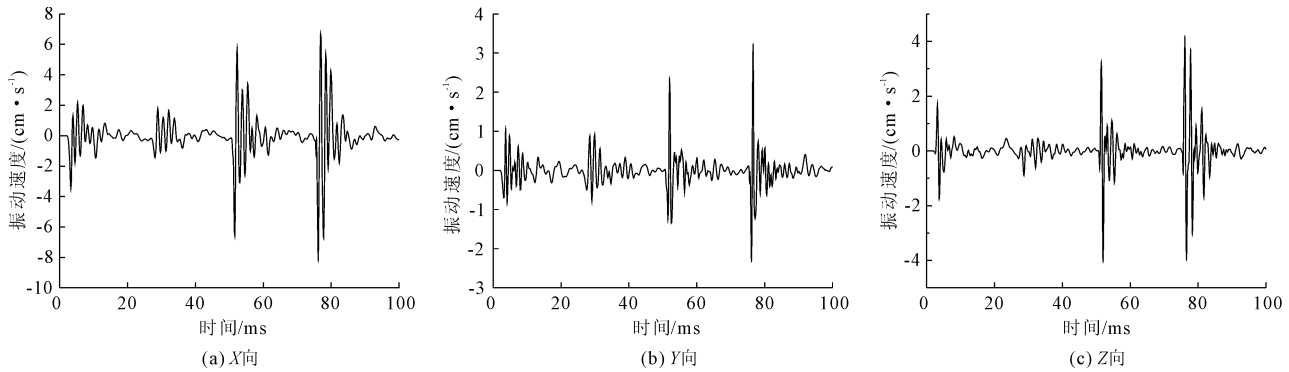


图 5 0.6 m 进尺下 A 点三向振动速度

(3) 隔震层材料。为减小爆破振动对中墙的影响，在如图 4 所示处增设隔震层，泡沫选用 MAT_SOIL_AND_FOAM 材料，本文取隔震层的密度为 2.5 g/cm³，弹性模量为 1.601 × 10⁷ Pa。

表 3 围岩及衬砌参数

材料	重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
Ⅳ级围岩	24.5	1.5	0.35	350	22
初衬	25.0	28.0	0.20	365	23
初衬加强区	25.5	55.0	0.27	379	24
二衬	26.5	30.0	0.20	425	25
二衬加强区	27.0	60.0	0.27	453	26
超前管棚	26.0	10.0	0.28	300	22

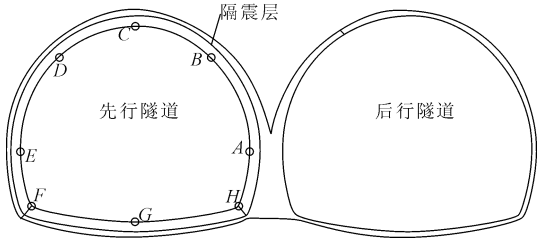


图 4 关键测点选择

从图 5—图 6 中可以看出，不同进尺下，各段爆破引起中墙振速较大的为内圈及周边爆破段，三向振速中 X 方向最大，即垂直于隧道中墙方向。对比 A 点三向振速：0.6 m 进尺下，最大 X 向振速为 8.2 cm/s，Y 向振速为 3.2 cm/s，Z 向振速为 4.2 cm/s；1.2 m 进尺下，最大 X 向振速达到了 66.9 cm/s，Y 向振速为 46.5 cm/s，Z 向振速为 14.4 cm/s。药量的加大将引起中墙振动速度的急剧增大。因此，在进行爆破参数设计时，建议采用短进尺爆破方案，并将距离中墙较近的内圈眼与周边眼采用分段爆破的形式。

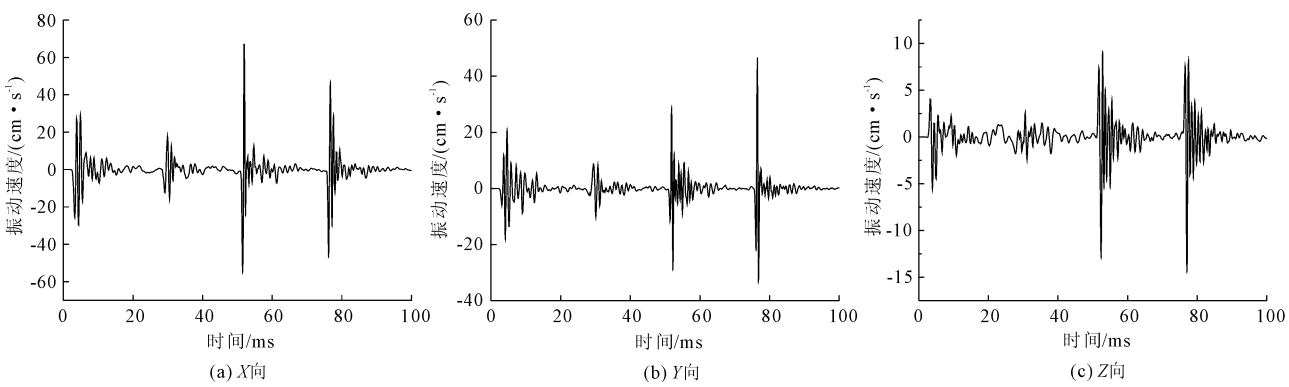


图 6 1.2 m 进尺下 A 点三向振动速度

以各测点合速度为研究对象,分析振动对临近隧道整体结构的影响,如图 7 所示。

化,选取如图 8 所示的测点,分析振动传播衰减规律,各点 X 向振速时程曲线如图 9 所示,振速峰值如图 10 所示。

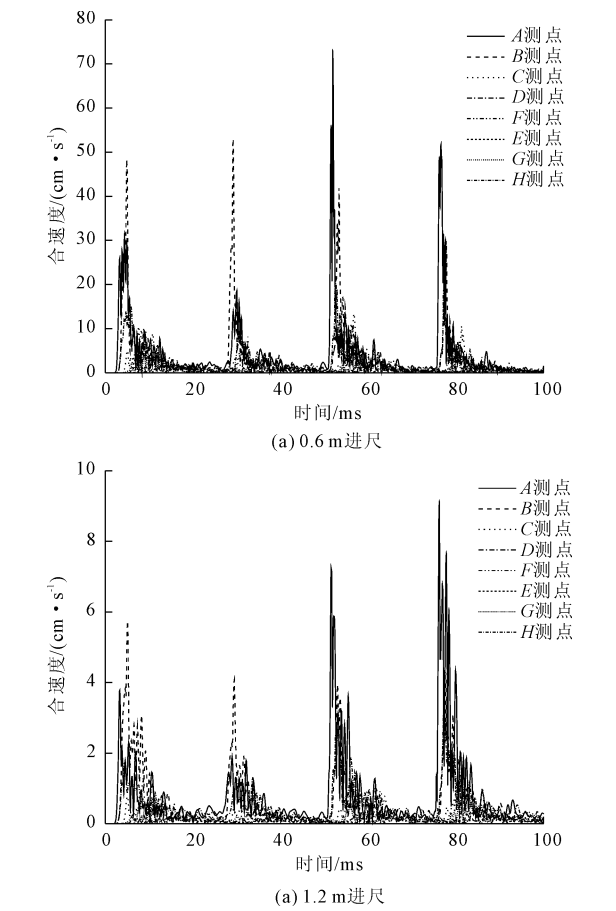


图 7 不同进尺下的各点合速度

对比两种进尺条件下的各测点合速度,我们可以看出,迎爆侧,掏槽与辅助爆破对 B 点影响较大,内圈及周边爆破对 A 点影响较大;随着振动向背爆侧传播,振动逐渐减小,由于已开挖隧道空洞的存在,振速减小约 40 倍~50 倍。

3.2 不同进尺下对应掌子面前后爆破振动衰减规律
为研究爆破对中墙轴向一定范围内的振速变

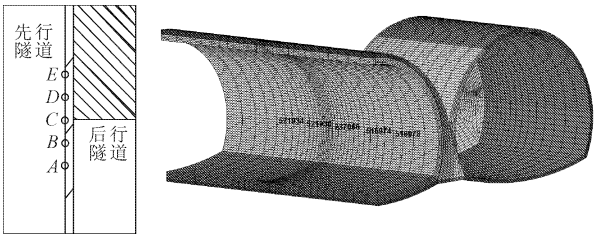


图 8 中墙轴线方向测点选择

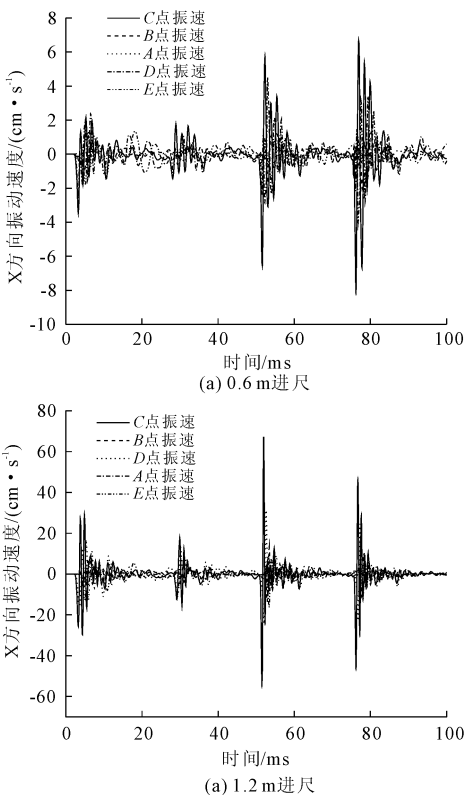


图 9 轴线测点 X 向振速时程曲线

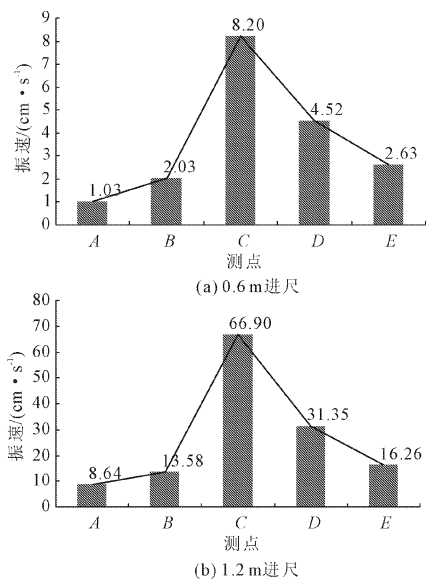


图 10 各点 X 向振速沿轴向衰减规律

对比两种进尺条件下,中墙各测点 X 向振速沿隧道轴向的衰减特性,我们可以看出,掌子面前方未开挖处的振速大于后方已开挖处的振速,且后方振速衰减快于前方。在进行现场施工过程中,需严格控制循环进尺,各段起爆药量,尤其是注意掌子面爆破对前方围岩的扰动危害,在掌子面前后一定范围内,布置多个测点进行监测,防止振速超标,保证隧道及中墙的安全。

3.3 上下台阶爆破对应掌子面位置中墙的影响对比

以 1.2 m 进尺为例,分析后行洞上下台阶爆破对复合式中墙连拱后行隧道的影响,同样选取如图 4 所示的测点,上述分析可知,垂直隧道壁的 X 向振速最大,各点 X 向振速时程曲线对比如图 11 所示。

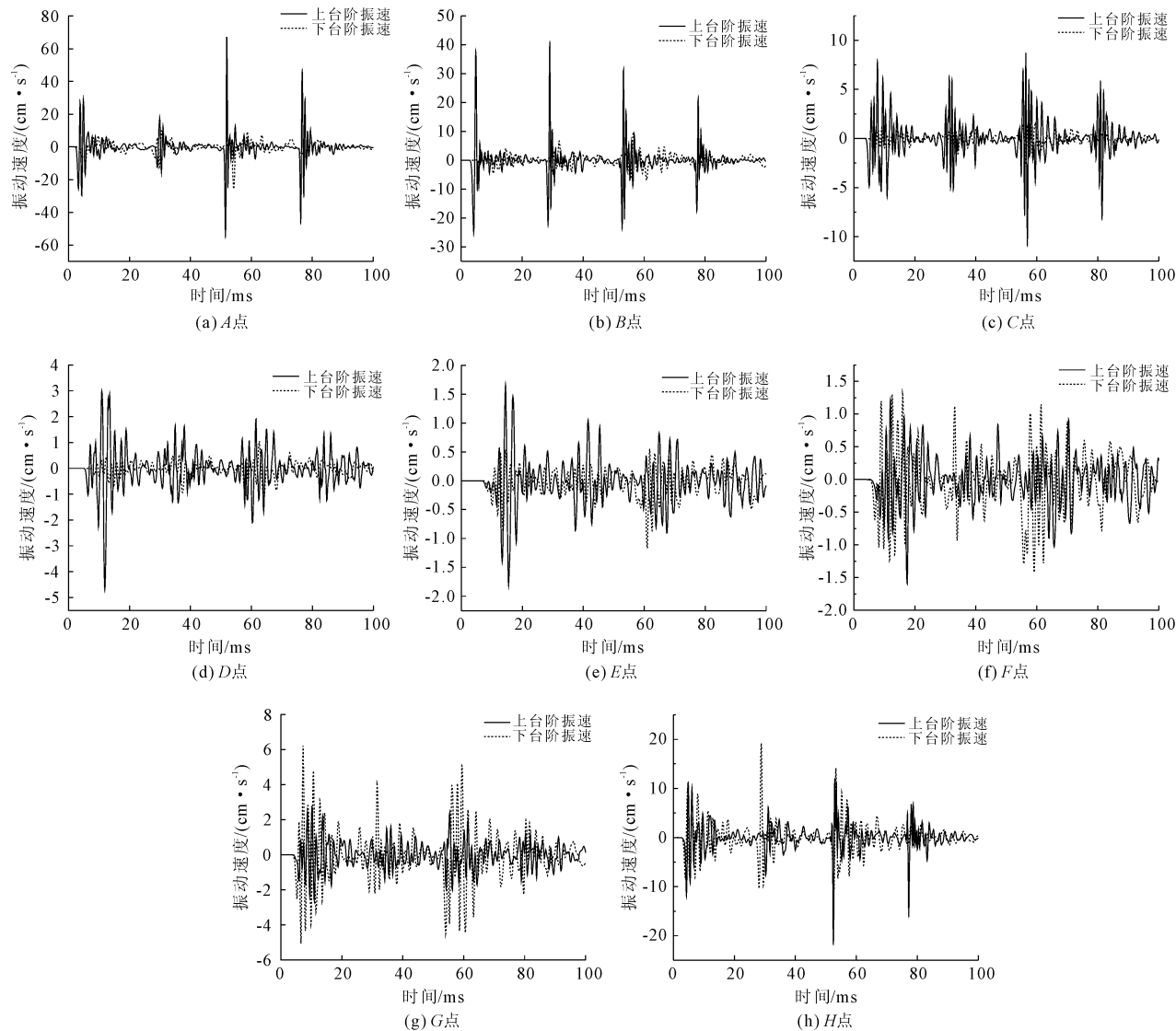


图 11 上下台阶各测点 X 向振速对比

从图11中,我们可以看出,1.2 m进尺条件下,上下台阶各段药量和一次起爆药量相差不大,但对临近隧道的影响程度不同。 $A-E$ 测点,上台阶爆破引起的振动大于下台阶, F 点相差不大, $G、H$ 点,下台阶爆破引起的振动大于上台阶。分析其原因,我们认为,上台阶爆破时,距离 $A-E$ 点较近, $G、H$ 点距离下台阶较近。整体来看,由于上台阶爆破时岩石夹制作用较大,上台阶爆破对中墙及临近先行隧道的影响要大于下台阶,但下台阶爆破时对拱脚及仰拱的影响也不容忽视,均需要进行振动控制。

4 结 论

借助LS-DYNA动力有限元软件,研究了复合式中墙隧道无中导洞施工方案下,后行洞不同进尺爆破对先行洞及中墙的影响规律,结论如下:

(1) 上台阶不同进尺爆破引起垂直中墙方向的 X 向振速最大,且内圈及周边爆破段大于掏槽及辅助段,药量的加大将引起中墙振动速度的急剧增大,迎爆侧振速明显大于背爆侧,为保证两隧道的安全必须制定相应的控制技术措施,起爆药量为首要控制因素。

(2) 沿隧道轴线方向,对应爆破掌子面前方未开挖处的振速大于后方已开挖处的振速,后方振速衰减速率大于前方,施工过程中,需沿中墙轴线方向多布置测点进行监控。

(3) 上下台阶进尺与各段药量和一次起爆药量相差不大的情况下,上台阶爆破引起临近隧道中墙上测点振速大于下台阶,下台阶对拱脚及仰拱测点影响较大,仍需进行振动监控。

(4) 综合上述分析,复合式中墙无导洞爆破施工时,一方面需进行严格的振动控制,制定相应的监测方案,实时动态调控爆破参数;另一方面,采取一定的隔震技术措施,如加设隔震层等方案,减小爆破振动对先行隧道结构的影响。

参考文献:

[1] 郭陕云. 我国隧道及地下工程的历史机遇、发展困局及若干建议[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(10): 1545-1552.

[2] 苟德明, 阳军生. 连拱隧道复合式中墙力学特征分

析[J]. 中外公路, 2009, 29(4): 153-156.

[3] 夏永旭, 王文正, 胡庆安. 公路双连拱隧道施工过程中中隔墙的变形及稳定性[J]. 中国公路学报, 2007(5): 83-88.

[4] 许崇帮, 夏才初, 王华牢. 特大断面连拱隧道中墙偏压机制及施工影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 2820-2828.

[5] 李志厚, 朱合华, 丁文其. 公路连拱隧道设计与施工关键技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.

[6] 杨果林, 胡敏, 申宗球, 等. 大跨连拱隧道复合式中墙承载模式研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(1): 136-141.

[7] 张庆彬, 吴从师, 叶勇, 等. 陈家桥大跨连拱隧道爆破振动测试分析[J]. 公路与汽运, 2008, 3: 63.

[8] 陈昕. 连拱隧道爆破震动效应研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2005.

[9] 曹峰, 凌同华, 刘家澍, 等. 分岔隧道浅埋连拱段的爆破振动效应分析[J]. 公路交通科技, 2018, 35(2): 86-94.

[10] 乔青青, 雷胜友, 杨瑞, 等. 分岔隧道过渡段爆破对中隔墙振动响应的数值分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021, 45(1): 171-176.

[11] 王家辉. 某公路隧道衬砌减隔震性能的时程分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.

[12] 钱正富, 徐金峰, 周应新, 等. 红层软岩无中导洞连拱隧道爆破振动控制技术研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(3): 167-174, 188.

[13] Lste. LS-DYNA Keyword User's Manual[M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2006.

[14] 白金泽. LS-DYNA3D理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[15] 何国富, 金微, 秦志勇, 等. 地下水封储油洞库洞室爆破地震动影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3): 86-92.

[16] 尚晓江, 苏建宇. ANSYS/LS-DYNA动力分析方法与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

[17] O Hallquist J. LS-DYNA Theory Manual[M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2006.

[18] 廖志毅, 唐春安. 爆炸应力波作用下岩体破碎特性数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3): 98-102, 107.

[19] 爆破安全规程: GB 6722—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.