

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.02.010

大跨度小净距隧道爆破振动响应研究*

梁琨^{1a,1b}, 王树欣^{1a,1b}, 张宪堂^{1a,1b}, 焦淑军², 王海亮^{1c}

(1. 山东科技大学 a. 山东省土木工程防灾减灾重点实验室; b. 土木工程与建筑学院;
c. 安全与环境工程学院, 青岛 266590; 2. 日照市政工程集团, 日照 276800)

摘要: 以济南市顺河快速路南延(英雄山立交至南绕城高速)建设工程为工程背景,结合现场爆破振动监测及 ANSYS/LS-DYNA 建立模型进行对比研究,分析小净距隧道爆破开挖中,先行洞在后行洞上台阶爆破作用下的动力响应。结果表明:先行洞三向振速中, X 水平径向振速最大,且与合速度大小接近,先行洞振速由掌子面后方至隧道入口处呈现衰减趋势,提出了现场监测应根据对于 X 水平径向的数据调整爆破方案参数。针对济南隧道的施工条件,现场采用 CD 法施工方法,通过控制实际爆破单段药量、炮孔深度、超前小导管、复合衬砌超前支护等措施取得了良好的爆破效果。

关键词: 小净距隧道; 爆破振动; 钻爆施工; 振动监测; 数值模拟

中图分类号: U455 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)02-0067-06

Response of Large-span Tunnel to Blasting Vibration of Small Clear Spacing Tunnel Excavation

LIANG Kun^{1a,1b}, WANG Shu-xin^{1a,1b}, ZHANG Xian-tang^{1a,1b}, JIAO Shu-jun², WANG Hai-liang^{1c}

(1. a. Shandong Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Civil Engineering;
b. School of Civil Engineering and Architecture; c. School of Safety and
Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology,
Qingdao 266590, China; 2. Rizhao Municipal Engineering Group, Rizhao 276800, China)

Abstract: Taking the construction project of south extension of Shunhe Expressway, Yingxiong Mountain overpass to South Ring Expressway, in Jinan city as an example, dynamic response of step blasting in rear tunnel to advance tunnel with the field blasting vibration monitoring and simulation with ANSYS/LS-DYNA, the dynamic response of the excavated tunnel to the up-step blasting of the excavating tunnel with small distance was analyzed. The results show that the X horizontal radial velocity is the largest and is close to the combined velocity in the three-direction velocity of the excavated tunnel. The vibration velocity of the excavated tunnel decreases from the back of working face to the entrance of the tunnel, and the parameters of blasting scheme should be adjusted according to the data of X horizontal radial in the field monitoring was proposed. According to the construction conditions of Jinan tunnel, the construction method of CD method is adopted, and good blasting effect is achieved by controlling the actual blasting charge of single section, hole depth, small leading pipe and composite lining supporting methods, which can provide some reference for other projects.

Key words: small clear spacing tunnel; blasting vibration; drilling and blasting construction; vibration monitoring; numerical simulation

济南市顺河快速路南延(英雄山立交至南绕城高速)建设工程,是构建济南市快速路路网骨架的重要组成部分,隧道施工过程中上方道路保持高流量通行状态,道路两侧的居民区、学校等建筑物密集复杂,考虑到对周围环境的保护,需要采取隧道爆破减振措施降低对周围环境的破坏。近年来国内外研究者对小净距隧道爆破振动进行深入研究,研究方式主要包括现场监测、数值模拟及模型试验,影响小净距隧道爆破振动的因素较多,主要包括爆破参数、围岩性质和隧道间距等。蔚立元等分别采用FLAC3D软件模拟及现场振动监测,得到爆破掌子面前方的振动强度大于后方,振动速度峰值出现在先行洞迎爆侧边墙位置^[1,2]。孙振等采用ANSYS/LS-DYNA模拟研究得到三向振速中水平径向振速最大^[3-5]。林从谋等采用监测数据及仿真模拟得到迎爆侧边墙隧道振速最大^[6-8]。陆伟等结论表明,小净距隧道开挖采用台阶法施工对中夹岩柱稳定性扰动最小^[9-11]。王春梅等通过对现场监测数据进行统计及线性回归,确定了爆心距以及分段装药量对于爆破振速传播规律影响^[12]。仇文革等采用现场监测和数值模拟结合的方法研究新建隧道对既有隧

道爆破的影响,表明新建隧道爆破引起的振动强度与单段药量和监测点相对位置有关^[13]。以济南顺河南延隧道工程为背景,结合现场实测数据及ANSYS/LS-DYNA动力有限元软件,对先行洞爆破振动响应进行分析,同时将现场采取的爆破减振措施进行总结,拟对现场爆破施工、衬砌施工及类似工程的研究提供一定的参考价值。

1 工程概况及监测方案

1.1 工程概况

济南市顺河快速路南延(英雄山立交至南绕城高速)建设工程,承担着主城区对外进出交通的快速集散任务,同时承担重要的公共交通走廊功能。下道路工程暗挖段采用小净距隧道的形式,双向分离式6车道,隧道最小间距为5 m,最大间距25 m,隧道暗挖段长度1.47 km,隧道单洞断面轮廓为单心圆断面,建筑限界净高4.5 m,净宽13.25 m,并且设置车行横通道及人行横通道,路缘侧设置防撞侧石,路面设置单面横坡,横向坡度1.5%,隧道标准段轮廓如图1所示。

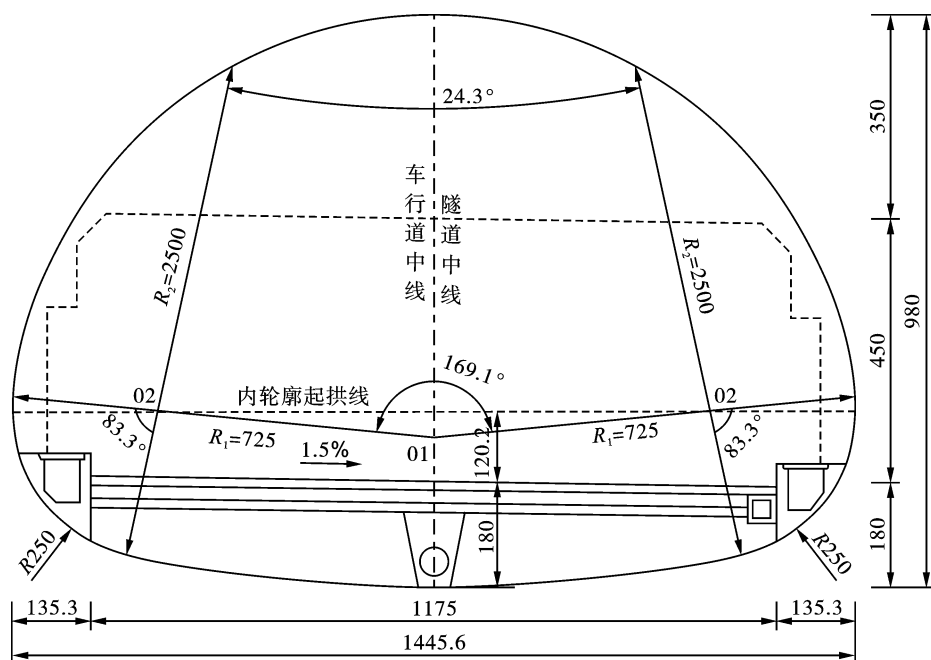


图1 隧道标准段轮廓图(单位:cm)

Fig. 1 Standard section outline of tunnel(unit:cm)

收稿日期:2021-02-07

作者简介:梁琨(1995-),男,山东威海人,硕士研究生,主要从事岩土力学与工程爆破的研究,(E-mail)1120024345@qq.com。

通讯作者:张宪堂(1973-),男,河北井陘人,教授、博士生导师,主要从事岩土结构动力学和爆破工程研究,(E-mail)zzxhtm@163.com。

基金项目:国家自然科学基金(51874189);山东省自然科学基金(ZR2017MEE043、ZR2019PEE044);山东研究生教育创新计划项目(SDY15086、SDY15088)

工程沿线属山前冲洪积平原地貌单元,局部属剥蚀残丘,工程沿线地势总体南高北低,现状地面标高一般介与128.0~198.3 m,南北高差约70 m。隧道围岩分级为V级,为了降低隧道爆破振动效应的影响,主要采用CD法开挖,分三台阶,上台阶拟采用综掘机配合人工开挖的冷开挖、钻爆法相结合方

式开挖施工;下台阶拟采用钻爆法施工,同时考虑建筑物、管线保护,不具备爆破条件地段采用综掘机配合人工开挖的冷开挖方式。

1.2 爆破振动监测方案

本次爆破振动采用的是 TC-4850 爆破测振仪,监测系统是由信号调理电路、A/D 转换电路、CPU 等组成,其工作原理主要是传感器把爆破引起的地震波速度转换成电压信号,通过 A/D 转换为数字信号,记录到仪器中的存储器里,测试完成后由数据线传送到计算机上,由计算机对信号进行计算处理,最

后以报告的形式输出到打印机。

为了研究隧道爆破引起的振动效应,以隧道先行洞掌子面为中轴面,在后行洞靠近爆破掌子面沿隧道掘进方向设置了五个监测点,并且测点位置随隧道掌子面进尺移动,保持监测点与掌子面的相对距离不变,测点间距为 15 m 左右,每个监测点均布置了垂直方向、水平方向及切向方向的振动速度传感器,监测传感器通过快粘粉固定在中夹岩层墙上,距离地面高度在 1.5 ~ 2 m,监测方案及测点位置如图 2 所示。

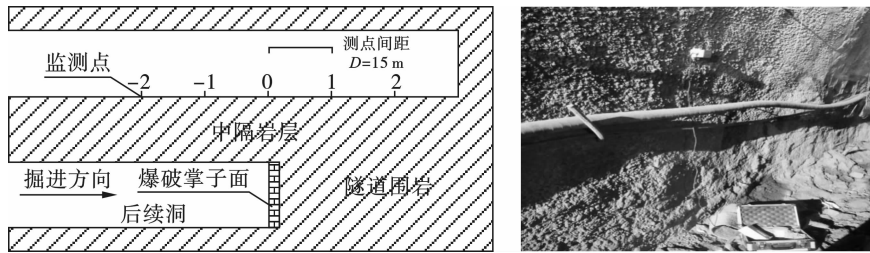


图 2 先行洞监测点布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the layout of the monitoring points of the advance tunnel

2 有限元模拟参数选取及建模仿真

2.1 模型尺寸及边界条件

建模时依据实际工程背景,进行适当简化,左洞为上下台阶开挖,右洞为先行隧道,隧道长度均为 75 m,后行洞开挖到距离洞口 20 m,先行洞全部开挖完毕,两隧道间距为 5 m。根据查阅的文献及规范,爆破振动速度大小主要取决于最大单段药量,模拟时将全部药量等效为三个上下排列的炮孔,炮孔直径选择 20 mm,长度为 1.5 m,炮孔间距 75 cm,装药量为每孔 10 kg。

当模型边界大于开挖洞径的 3 ~ 5 倍时,边界效应的影响,尤其是爆破开挖对于振动效果的峰值影响几乎忽略不计,隧道纵向方向为 X 轴,Y 轴为竖直方向,Z 轴为隧道掘进方向。根据实际的工程条件所有的模型的埋深统一取为 30 m,模型的尺寸为 140 m × 70 m × 110m,最大开挖宽度为 15 m,高度 10 m,隧道底部距离下边界 30 m,隧道左右边界均选择 50 m,采用映射网格划分法,对后行洞的掌子面部位进行网格细化,从而保证计算的精度。模型上表面模拟地面设为自由面,模型的底部设置竖向

约束,侧面设置法向约束,并将计算模型的四周和底面均设为无反射边界条件。

2.2 材料参数及计算方程选取

济南顺河南延隧道使用的是二号岩石乳化炸药,密度为 0.95 ~ 1.30 g/cm³,爆速为 > = 3200 m/s,药卷直径为 32 mm,重量为 300 g,针对混凝土结构和岩石在侵彻和爆炸载荷作用下的大变形、高应变率 and 高压行为,Holmquist 等提出了 HJC 混凝土本构模型,采用状态方程描述静水压力和体积应变之间的关系,并分为三个阶段即弹性段、过渡段和压实段。

ANSYS/LS-DYNA 根据不同工况提供了不同的工程算法,其中主要的算法为拉格朗日算法、欧拉算法和流固耦合算法三种,他们均有各自的优缺点,但是爆破模拟时,存在爆破产生的应力波及爆生气体的冲击作用,因此本次模拟采用的是流固耦合算法,即 ALE 法。ANSYS/LS-DYNA 提供的模拟时采用的炸药参数为二号乳化炸药材料参数,采用的模拟围岩为 V 级围岩参数,选取 LS-DYNA 中弹塑性材料中的塑性随动硬化模型,是对于应变率相关的且可考虑失效的混合模型,材料参数见表 1 及表 2。

表 1 2 号乳化炸药材料参数
Table 1 Material parameters of No. 2 emulsion explosive

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa
1000	3300	229	0.55	6.5	1.0	0.35	3.51

表2 V级围岩材料参数

Table 2 Material parameters of grade V surrounding rock

名称	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	切线模量/MPa	失效应变	泊松比
V级围岩	2700	400	33	1.25	0.27

3 数值模拟结果及现场数据分析

3.1 现场监测结果及分析

针对隧道先行洞进行了将近30次爆破监测,现场爆破药量在30~40 kg之间,炮孔数量在25~45个之间,分段同时起爆,部分数据由于现场仪器布置及连接失误等原因不可采用,典型的振动矢量合成图及振速数据如图3及表3所示。

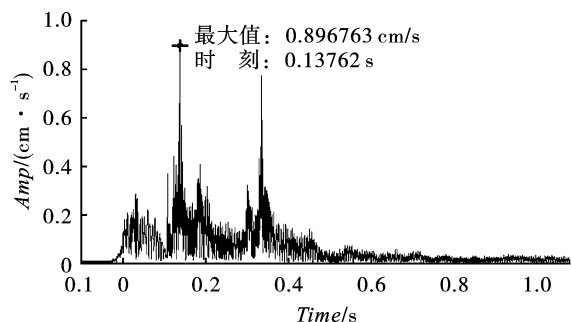


图3 典型数据振速矢量合成图

Fig. 3 Typical data vibration vector synthesis diagram

表3 振动速度峰值监测数据(单位: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)Table 3 Peak vibration monitoring data (unit: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)

测点编号	-2	-1	0	1	2
X水平径向振速	0.42	0.54	0.86	1.48	2.48
Y水平轴向振速	0.26	0.38	0.45	0.67	1.41
Z垂直方向振速	0.38	0.50	0.68	1.24	1.75

由现场监测结果可以看得出来,隧道振速矢量合成达到第一段峰值时间约为40 ms,第一段峰值矢量合成约为0.3 cm/s ,隧道振速矢量合成达到最大值时间约为130 ms,最大值约为0.89 cm/s ,并未超过预警值1.0 cm/s ,隧道爆破方案较好,对隧道及附近建筑物损伤较小;众多研究中,部分学者认为爆破振动三向振动中垂直方向Z速度最大^[14,15],本次监测数据汇总得到的三方向振速峰值占比情况如表4所示(表中数据已去除部分测量失真数据),三向振速中,X水平径向方向振速最大,占比达到64.4%,Y水平轴向方向振速最小,仅占比8.4%,因此现场监测应实时关注X水平径向的监测数据,对现场爆破方案进行调整;掌子面后方的振速均大于掌子面前方的振速,矢量合成图存在叠加现象,主要

是未设置分段延时爆破的因素。见表4。

表4 三向振速峰值占比表

Table 4 Three-way vibration velocity peak ratio

	X水平径向	Y水平轴向	Z垂直方向	合计次数
峰值次数	76	10	32	118
比例%	64.4	8.4	27.2	100

3.2 模拟结果及分析

3.2.1 先行洞隧道爆破振动响应

从模型中选择与实际监测图1位置相对应的节点,绘制出如图4所示的三向振速及合速度。

由于建模坐标系设置问题,此处的Z方向对应实际工况中的Y水平轴向方向,由图5可知,三向振速中X水平径向振速最大,Z水平轴向方向振速最小,合速度基本与X水平径向振速接近,这也与实际情况基本吻合,由X水平径向方向、Y垂直方向及合速度的监测点对比可以得到,关于掌子面对称测点,振速变化趋势为掌子面后方2号测点振速最大,向外衰减,呈现出由内向外减小的变化趋势,这也符合大多学者提出的“空洞效应”现象^[16-18],这主要是因为掌子面后方爆破能量的传播直接通过岩石传播到先行洞迎爆侧的,掌子面前方的岩石已经开挖成行型,爆破能量通过空气快速向外传递部分能量且将岩石破碎抛掷出去导致先行洞迎爆侧掌子面前方的岩石可传递的能量减少。

3.2.2 先行洞不同截面爆破应力效应规律

提取典型时刻有效应力如图5所示,随爆破应力波及爆生气体共同产生的爆破能量在 $t=8.5$ ms传递至后行洞隧道拱顶,能量继续向两侧拱底传播; $t=21$ ms时,能量传递至两侧拱腰及拱底部位,提取后行洞靠近中夹岩层拱腰位置,此处最大主应力达到了1.4 MPa,然后能量通过中夹岩层传递至先行洞迎爆侧拱腰位置; $t=35$ ms时,能量传递至先行洞迎爆侧,之后应力波继续向四周传播; $t=38$ ms时,拱顶及底部位置也受到了爆破冲击的影响,其中拱顶位置应力变化范围更大。

4 爆破减振措施

隧道两侧建筑物及管道线路密集复杂,其中隧道北出口位置一侧为中学,隧道施工过程中,上方快速路保持通行,为了保障隧道周围既有结构及人员

安全,因此设计爆破时需要考虑爆破振动对既有结构影响,施工过程中应根据实测数据调整爆破方案

及参数等,济南隧道采取的减振措施如下:

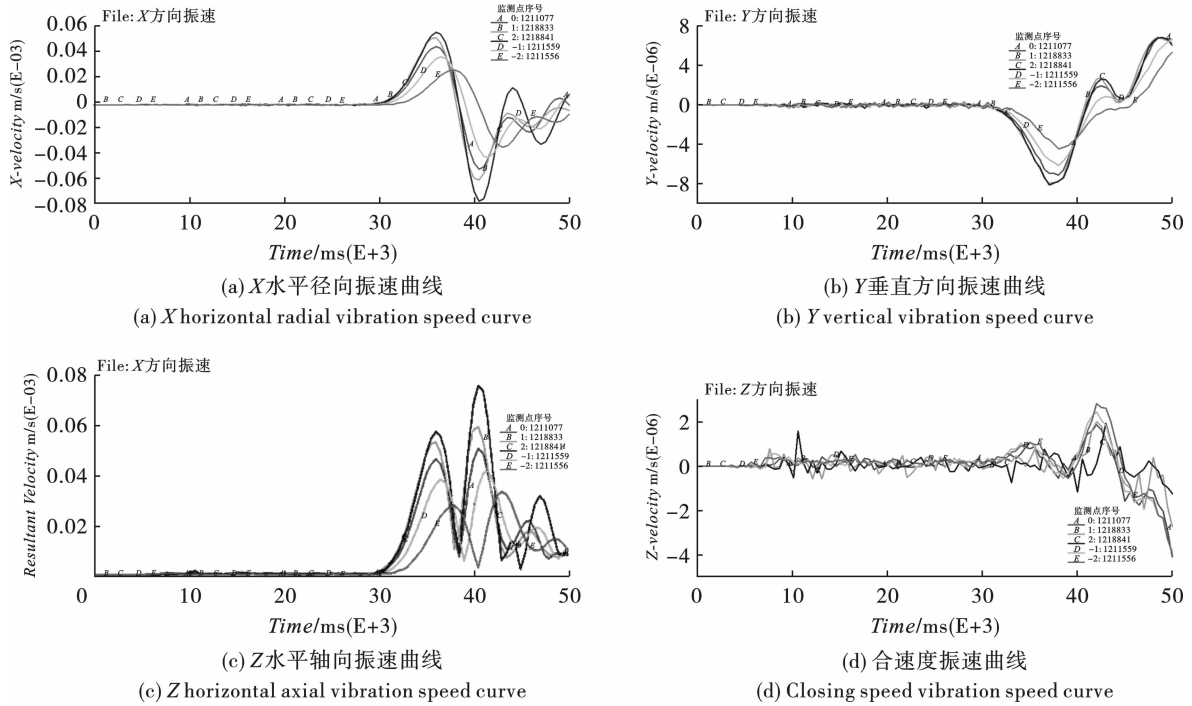


图 4 三向振速及合速度曲线

Fig. 4 Three-way vibration speed and closing speed curve

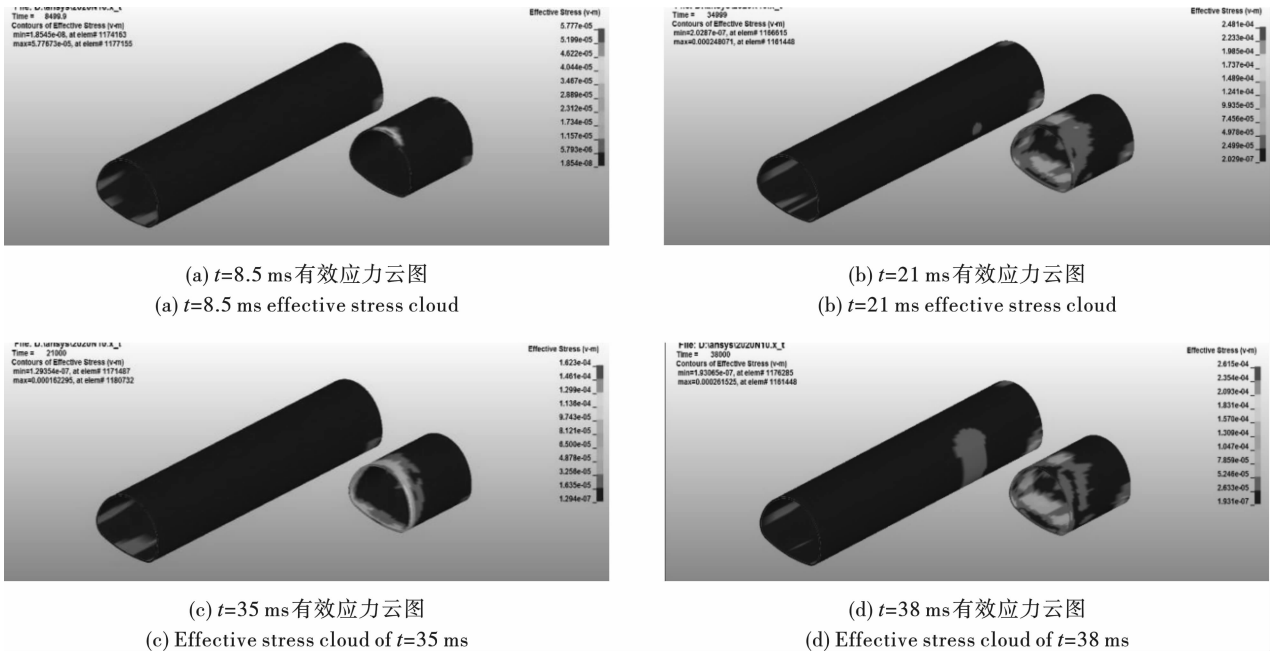


图 5 不同时刻有效应力云图

Fig. 5 Effective stress clouds at different times

(1)开挖工法选择及优化。一般来说隧道开挖洞口处间距最小,考虑到隧道北口出存在中学及建材批发市场,隧道北口暗挖段进尺达到 30 m 后才可进行钻爆法施工。为保证隧道施工正常施工进度及

对周围既有建筑物使用安全,采用 CD 法施工,减少开挖面积,同时对现场爆破振动进行实时监测,必要时采取双侧壁导洞法施工,对于靠近管道及围岩等级较差位置可采用机械开挖方式。

(2) 爆破参数优化。隧道爆破单段药量对爆破振动存在很大影响,现场将实际爆破单段药量控制在 50 kg 内,掏槽眼、辅助孔采用连续装药,炮眼剩余部分必须填满炮泥。掏槽眼和底眼连续装药。周边眼采用间隔不耦合装药结构,炮泥封口,炮孔深度控制在 1.4 m 内,采用毫秒延时导爆管雷管起爆网路,逐孔起爆;重点保护对象附近可以考虑采用电子雷管起爆网路,减少爆破振动效应叠加。

(3) 隧道衬砌结构等。采用复合式衬砌即以系统锚杆、钢筋网、喷射混凝土、型钢钢架或格栅钢架等作为初期支护,并根据不同的围岩级别辅以管棚、超前小导管、超前锚杆等超前支护措施,二次衬砌采用模筑钢筋混凝土,在两次衬砌之间敷设防水层。隧道上方道路保持高速通行,为保证隧道施工安全,隧道上方道路采取限高及大型货车绕行等分流措施,隧道两个出口位置采用超前锚杆、铺设钢板等进行措施加固,充分保证隧道安全施工。

5 结论

(1) 现场监测及隧道爆破模拟均表明三向振速中, X 水平方向振速最大,且与合速度大小接近,先行洞振速由掌子面后方至隧道入口处呈现衰减趋势,因此隧道爆破监测应时刻注意 X 水平方向振速变化,着重观察掌子面后方监测数据,根据实际情况调整现场爆破药量、炮孔数量及炮孔深度等参数。

(2) 模拟结果表明, $t = 35$ ms 时爆破能量传递至先行洞迎爆侧, $t = 38$ ms 时,拱顶及拱底位置也受到了爆破冲击的影响;提取不同时刻位移云图,可以观察到,隧道拱顶最先出现应力集中。

(3) 对济南隧道采用的减振措施进行总结,该隧道主要通过施工工法的选择、合理设置分段药量及衬砌等支护措施的控制降低了隧道施工对周围环境的影响。事实证明,控制措施效果明显,有效降低了隧道施工的爆破振动,并保证了安全施工及隧道上方道路的通行。

参考文献 (References)

- [1] 蔚立元,李术才,徐帮树. 青岛小净距海底隧道爆破振动响应研究[J]. 土木工程学报,2010,43(8):100-108.
- [1] YU Li-yuan,LI Shu-cai,XU Bang-shu. Study on the effect of blasting vibration for Qingdao twin subsea tunnels[J]. China Civil Engineering Journal,2010,43(8):100-108. (in Chinese)
- [2] 林立宏,倪迪,朱爱山,等. 小净距隧道扩挖爆破作用下邻洞振动响应研究[J]. 爆破,2020,37(1):141-146.
- [2] LIN Li-hong,NI Di,ZHU Ai-shan,et al. Study on vibration response of adjacent tunnel induced by expansion excavation of closely-spaced tunnels [J]. Blasting,2020,37(1):141-146. (in Chinese)
- [3] 孙振,谢事臻,张宪堂,等. 减震孔在小间距隧道爆破开挖中的降振效应[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(1):25-31,39.
- [3] SUN Zhen,XIE Shi-zhen,ZHANG Xian-tang,et al. Vibration reduction effect of damping holes in blasting excavation of tunnels with small spacing [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2019,38(1):25-31,39. (in Chinese)
- [4] 吴钦鑫,王海亮,胡红星,等. 海底新建隧道爆破对既有隧道的振动影响研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(4):41-49.
- [4] WU Qin-xin,WANG Hai-liang,HU Hong-xing,et al. Study on blasting vibration of new undersea tunnel affecting existing tunnels [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2019,38(4):41-49. (in Chinese)
- [5] 罗阳,韦麟,支彦锋,等. 相邻隧道围岩爆破振动影响规律研究[J]. 浙江科技学院学报,2019,31(5):412-418.
- [5] LUO Yang,WEI Lin,ZHI Yan-feng,SI Ji-ping,et al. Study on influence law of blasting vibration of surrounding rock of adjacent tunnels [J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology,2019,31(5):412-418. (in Chinese)
- [6] 林从谋,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.
- [6] 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)
- [7] 毕继红,钟建辉. 邻近隧道爆破震动对既有隧道影响的研究[J]. 工程爆破,2004(4):69-73.
- [7] BI Ji-hong,ZHONG Jian-hui. Study on the influence of blasting vibration from excavation of a new tunnel on existed tunnel [J]. Engineering Blasting,2004(4):69-73. (in Chinese)
- [8] 施有志,柴建峰,阮建凑,等. 特大跨度隧道分部开挖爆破对既有隧道结构的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版),2018,57(5):72-80.
- [8] SHI You-zhi,CHAI Jian-feng,RUAN Jian-ou,et al. The influence of zonal multiple blasting of a large-span tunnel on its surrounding rock and antecedent tunnel [J]. Acta Scientiarum Naturalium University Sunyatseni (Natural Science Edition),2018,57(5):72-80. (in Chinese)