

特大跨度隧道分部开挖爆破对 既有隧道结构的影响*

施有志^{1,2}, 柴建峰³, 阮建凑¹, 林树枝⁴

1. 厦门理工学院土木工程与建筑学院, 福建 厦门 361021;
2. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;
3. 国网新源控股有限公司技术中心, 北京 100073;
4. 厦门市建设局, 福建 厦门 361003)

摘要:以平潭综合实验区牛寨山双洞八车道小净距公路隧道为例,针对采用双侧壁导坑法开挖时,双洞八车道特大跨度隧道后行隧道断面分部开挖爆破对围岩及既有隧道的影响,采用LS-DYNA建立双隧道模型,结合现场振动速度的实测数据,对影响因素和变化规律进行了分析。结果表明:①随着爆心距围岩监测点距离的增大,最大振速显著衰减。②在后行隧道爆破对既有隧道结构的影响因素中,爆源与既有隧道的距离影响最大,装药量其次;既有隧道迎爆侧与背爆侧的最大振速比值为12.5;腰部是底部的2.1倍;肩部是底部的1.9倍。③在双侧壁导坑施工中,I分部由于距离既有隧道较近、周边临空面最少,对既有隧道的影响也最大,施工中可作为爆破引起既有隧道振动的控制工况。

关键词:特大跨度隧道;双侧壁导坑法;小净距隧道;多次爆破;数值模拟

中图分类号: U452 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2018)05-0072-09

The influence of zonal multiple blasting of a large-span tunnel on its surrounding rock and antecedent tunnel

SHI Youzhi^{1,2}, CHAI Jianfeng³, RUAN Jiancou¹, LIN Shuzhi⁴

1. School of Civil Engineering and Architecture, Xiamen University of Technology, Xiamen 361021, China;
2. Shanghai Jiao Tong University, School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai 200240, China;
3. Technology Center, State Grid Xinyuan Company Ltd, Beijing 100073;
4. Xiamen Construction Bureau, Xiamen 361003, China)

Abstract: This paper was intended to investigate the influence of zonal multiple blasting of the subsequently excavated tunnel on its surrounding rock and the antecedently excavated tunnel when a twin-tube eight-lane tunnel with a large cross section was excavated by the double sidewall heading method. To this end, the study took Niuzhaishan Tunnel, a twin-tube eight-lane road tunnel with a small clear distance in Pingtan Comprehensive Pilot Zone, as an example, established a twin-tube tunnel model in LS-DYNA, and carried out analysis based on field measurements of vibration velocity. The results were as follows: ① The maximum vibration velocity significantly attenuated as the distance between the blast center and

* 收稿日期: 2017-04-22

基金项目: 福建省自然科学基金(2016J01271); 厦门市科技计划项目(3502Z20183043)

作者简介: 施有志(1976年生),男;研究方向:从事岩土与地下工程方面的研究;E-mail: 2013110907@xmut.edu.cn

the monitoring site increased. ② Among all the factors that influenced the structure of the antecedent tunnel during the explosion of the subsequent tunnel, the distance between the explosive source and the antecedent tunnel exerted the greatest influence, followed by charge quantity; the ratio of the maximum vibration velocity of the tunnel wall facing the blasting site to that of the tunnel wall facing away from the blasting site was 12.5; such ratio of the tunnel wall at waist height to the tunnel wall at the bottom was 2.1; by the same token, such ratio of the tunnel wall at shoulder height to the tunnel wall at the bottom was 1.9. ③ During the excavation process using the double sidewall heading method, Zone I made the most impact on the antecedent tunnel, due to its shorter distance to the antecedent tunnel and its fewest number of free faces. Thus, Zone I could be made the controlled case to monitor the blast-induced vibration that the antecedent tunnel underwent.

Key words: large span tunnel; two side-wall pilot tunnel method; tunnel with small clear spacing; many times of blasting; numerical analysis

随着车流量的增加,道路的车道数从原来的双向四车道,增加为双向六车道甚至八车道。为节约用地,保持线路的顺接,穿越山岭的隧道也相应地变为双向六车道或者八车道等特大跨度隧道。这类隧道由于形状扁平,开挖后围岩稳定性变差;围岩应力更集中,松弛压力更大;支护结构所能提供的承载力相对减小^[1]。因此,往往采用 CRD 或双侧壁导坑等分部开挖法施工,目的是为了将大断面分为若干小断面,提高隧道的稳定性。若石质围岩的特大跨度隧道采用双侧壁导坑法施工,需采用爆破作业,隧道围岩遭受推进式往复的爆破荷载作用,使围岩遭受损坏、近区岩体损伤、中远区岩体振动^[2]。为了与道路顺接,双洞的间距往往较小,隧道洞口段一般为小净距隧道,那么后行隧道断面分部开挖爆破施工,对既有隧道亦会产生影响。因此,研究后行隧道爆破对围岩及既有隧道的影响,保证既有隧道的安全是施工难点,也是研究热点。

国内外学者采用数值模拟和监控量测等手段对后行隧道爆破开挖对既有隧道的影响、施工方法优化、安全爆破控制方法等进行了大量的研究工作^[3-7]。针对三车道以上的大断面小净距隧道,林从谋等^[8]以大帽山隧道为例研究了新建隧道爆破施工对既有运营隧道稳定性的影响,通过信息化施工使既有隧道质点振动速度控制在 20 cm/s 以内,并对既有隧道爆破质点震动速度进行了监测、回归分析和爆破参数优化;朱正国等^[9]以南京地铁超小净距隧道为工程背景,研究了循环进尺、段最大装药量与分段爆破差等爆破参数的优化;2009 年,张国华等^[10]结合大帽山大断面隧道群的现场声波监测,研究了推进式往复爆破作业的双侧壁导坑法施工过程中大断面隧道围岩的累积损伤范围。Oriard 等^[11-12]通过监测爆破时岩体峰值的质点振动

速度和多次爆破前后岩体声波波速的变化,研究了多次重复爆破所导致的岩体的累积损伤; Doucet 等^[13-15]通过滑动测微计和钻孔摄像等方法定性监测了多次推进式爆破后围岩的损伤情况。

国内外专家学者的研究已经积累了不少宝贵经验,但有关特大跨度扁平隧道工程双侧壁导坑法施工过程中不同导坑位置爆破对围岩、小净距的既有隧道影响的研究相对较少^[16]。本研究以平潭综合试验区金井湾大道的牛寨山隧道为工程背景,采用 ANSYS/LS-DYNA 建立双隧道模型,模拟计算了爆破时既有隧道的最大振速,并与实测值及萨道夫斯基公式的计算结果对比,验证了数值模型的准确性,探讨了特大跨度隧道断面分部开挖时多次爆破对围岩、既有隧道的影响。

1 工程概况

1.1 工程概况

牛寨山双洞八车道公路隧道是平潭综合试验区金井湾大道的一部分,北线全长 868 m,南线全长 829 m,最大毛洞开挖跨度 21.13 m,进口段南北线间距 45 m,中夹岩约 24 m,为小净距隧道;其余路段为分离式隧道。选择小净距隧道的进口段的 V 级围岩段作为研究对象,洞身长 238.5 m,岩土体主要由全风化花岗岩-中风化花岗岩构成,该段 [BQ] 值 < 250。

1.2 施工方案

隧道开挖采用双侧壁导坑工法,分为 6 个导坑(分部),每个循环进尺 0.5 m,如图 1 所示。钻爆法施工以新奥法理论为指导,采用光面爆破,炸药选用 2 号岩石硝铵炸药。

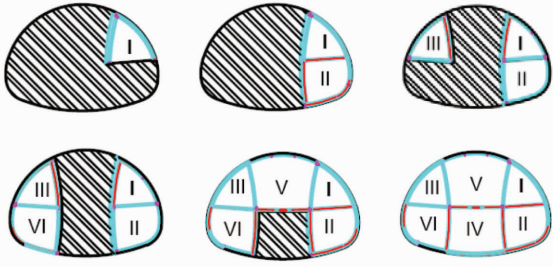


图 1 隧道掘进顺序横向剖面图

Fig. 1 Horizontal profile of tunneling sequence

该段隧道结构采用复合式衬砌。初期支护采用双层结构，第一层采用厚 30 cm 的 C25 喷射混凝土、20 cm × 20 cm 的 $\Phi 8$ 钢筋网和 22b 工字钢（纵距 0.6 m）；第二层采用厚 17 cm 的 C25 喷射混凝土和 22b 工字钢（纵距 0.6 m）。二次衬砌采用厚 55 cm 的 C30 钢筋混凝土，初期支护与二次衬砌之间铺设 EVA 防水板作为防水层。爆破的布孔方案如图 2 所示。

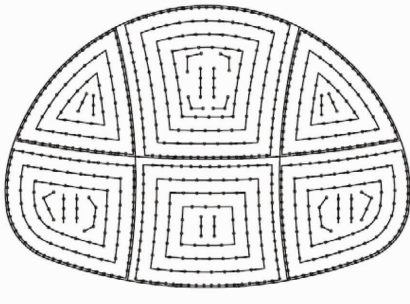


图 2 掌子面炮孔布置图

Fig. 2 Schematic diagram of the layout of blastholes on a tunnel face

各导坑分别设置了掏槽眼（深度 70 cm）、周边眼（深度 50 cm）、辅助眼（深度 60 cm）。其中，I、III 分部的炮眼数为 86，总装药量为 16.8 kg；II、IV 分部的炮眼数为 111，总装药量为 23.7 kg；V 分部的炮眼数为 162，总装药量为 37.1 kg；VI 分部的炮眼数为 119，总装药量为 26.7 kg。

1.3 现场振动监测分析

在既有隧道最大跨度处，每隔 10 m 设一个监测断面，具体布置见图 3。

2 数值模型设计

2.1 有限元数值模型

采用 ANSYS/LS-DYNA 建立双隧道有限元模型，横断面水平方向尺寸为 150.8 m，横断面竖直

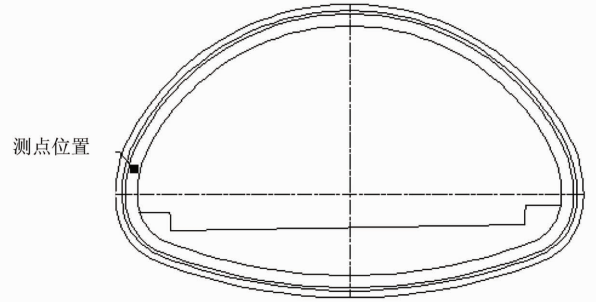


图 3 既有隧道振动速度测点布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the layout of measurement sites for blasting velocity in the existing tunnel

方向尺寸为 84.5 m，隧道深度为 100 m；网格划分尺寸为 1.0 m，在炮眼附近局部进行了部分加密处理。图 4 为典型断面的有限元网格图。其中，紫色为岩石单元，右侧贯通的隧道为既有隧道，黄绿色为后行隧道开挖后形成的空气单元。图 5 为整体有限元模型的三维等轴视图。其中， x 方向为断面水平方向； y 方向为竖直方向； z 方向为沿隧道方向。

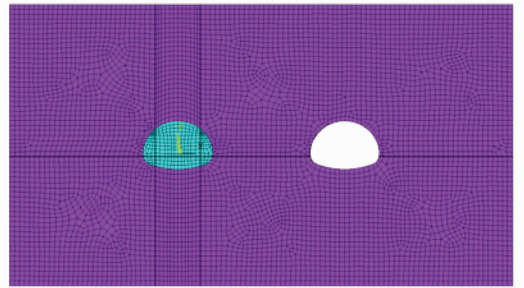


图 4 隧道典型断面有限元网格

Fig. 4 Finite element mesh for typical tunnel cross sections

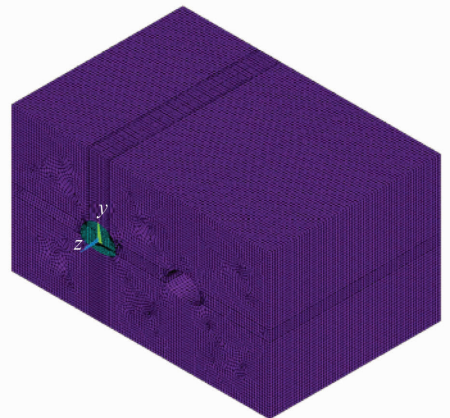


图 5 隧道整体有限元模型三维等轴视图

Fig. 5 3D isometric view of the entire tunnel's finite element model

2.2 参数取值

采用 JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE 模型来模拟爆炸荷载作用下岩石试件的响应及破坏过程。该模型是一个适合大应变、高应变率与高压条件的混凝土本构模型，可以拓展到包括材料损伤、应变率效应以及因压力和空隙而引起的永久性破坏等。围岩统一采用单一岩层进行模拟，密度为 $2\ 650\ \text{kg}/\text{m}^3$ ，剪切模量 $G = 1.486 \times 10^9\ \text{Pa}$ 。在 ANSYS/LS-DYNA 中爆炸过程一般采用 HIGH_EX-

PLOSIVE_BURN 模型以及 JWL 状态方程加以描述：

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

其中 ω , P 为爆轰压力； V 为相对体积； E 为单位体积内能； A 、 B 、 R_1 、 R_2 为材料常数。参数选取见表 1。

表 1 炸药材料参数

Table 1 Explosive material parameters

参数	密度	爆速	爆压	材料常数					初始内能
	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	P/Pa	A/Pa	B/Pa	R_1	R_2	ω	$E_0/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$
数值	1 000	4 500	5.06×10^9	178.85×10^9	0.311×10^9	4.75	1.05	0.18	2.25×10^9

数值模拟时，炸药量取各分部总药量，按照集中装药方式进行分析^[17]，并通过实测结果校验或修正参数。

2.3 数值结果与实测对比

模拟 NK4 + 390 断面 I 分部爆破对既有隧道的影响，采样点的位置如图 6 所示。A、B、C、E、F 和 G 采样点之间的间距为 10 m，D 为加密的观测点，C、D 之间的距离为 5 m。采样点的振动速度如图 7 所示。计算与现场实测值及其误差分析如表 2 所示。既有隧道三个断面的振动速度变化曲线如图 8 所示。

13.2 - 10.2 = 3 ms，主振频率 $f = 1/T = 333\ \text{Hz}$ ，与实测主频较吻合。从表 2 可以看出，三个监测点的振速计算值与实测值误差均小于 15%，距离爆破距离最近的 D 点，振速误差仅 2.3%。可见，数值模型的计算精度满足岩土工程计算要求。

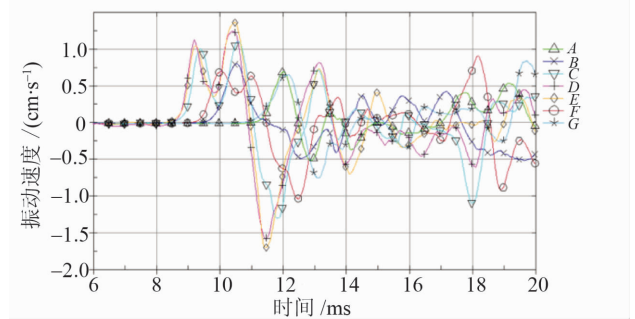


图 7 既有隧道采样点振速图

Fig. 7 Schematic diagram of the vibration velocity of sampling sites in the antecedent tunnel

3 特大跨度隧道断面分部开挖爆破对围岩及既有隧道结构影响规律

3.1 计算方案

根据金井湾大道的牛寨山隧道工程实际施工方案，分别对 6 个分部（导坑）的爆破进行数值分析，观察不同分部爆破引发的围岩振动速度的变化规律。围岩的拾取质点见图 9，工况信息见表 3。

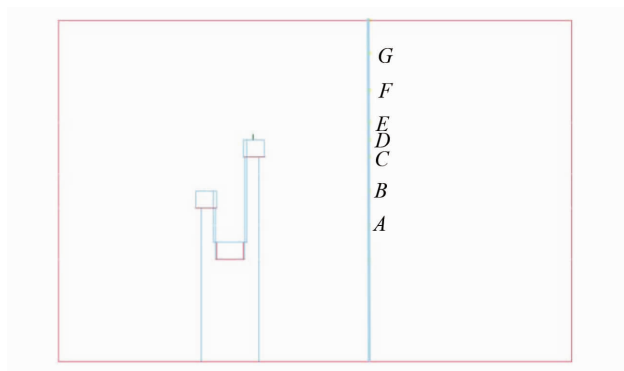


图 6 采样点位置图

Fig. 6 Schematic diagram of the location of sampling sites

通过图 7 可以获得主振周期，进而计算出主振频率，通过拾取 D 点峰值的时刻可知周期 $T =$

表 2 爆破引起既有隧道振动速度计算值与实测值对比

Table 2 Comparison of blast-induced vibration velocity in the antecedent tunnel between computation results and measurement results

	监测点	振动频率 f/Hz	最大振速 $V/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	振速误差
计算值	SK4 + 380 (B 点)	250	0.753	-12%
	SK4 + 390 (D 点)	333	1.690	2.3%
	SK4 + 400 (F 点)	285	1.105	-14.9%
实测值	SK4 + 380	303.345	0.856	-
	SK4 + 390	205.078	1.539	-
	SK4 + 400	104.98	1.299	-

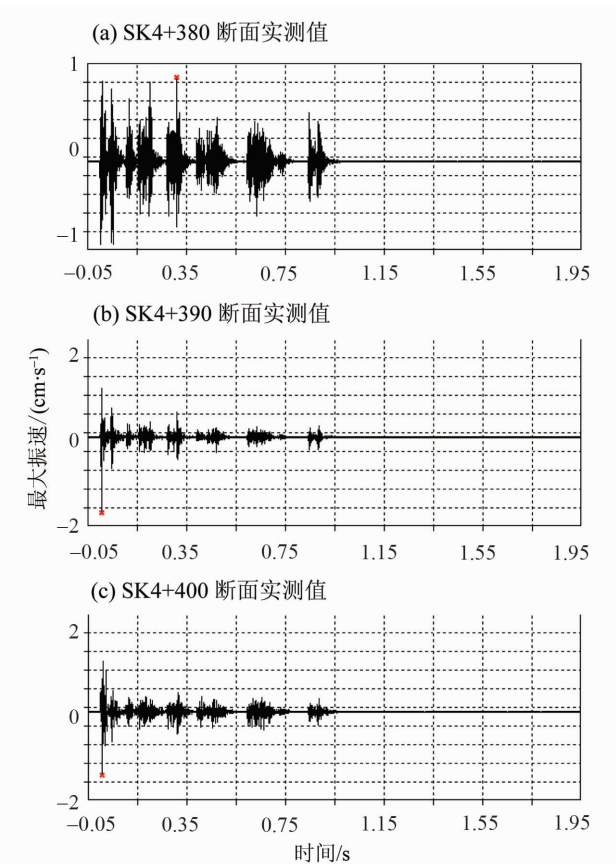
图 8 NK4 + 390 断面 I 分部
爆破引起既有隧道振动速度曲线

Fig. 8 Velocity curve for vibration in the antecedent tunnel caused by blast in zone I of tunnel section at NK4 + 390

3.2 周边场地的振动速度场分析

3.2.1 振动速度等值面的扩展过程 图 10 为后行隧道爆破振速等值面图。在图 10 的(a) - (c)中可以观测到椭圆形的等值面,这是由于炸药是细长的。在振速等值面的扩展过程中,隧道前方拓展区域稍大于已开挖的隧道后方,这是由于“临空面”

的隔振效果产生的影响。图 10 的(d) - (e)显示:随着振速等值面的扩展,在 8.3 ms 达到既有隧道。

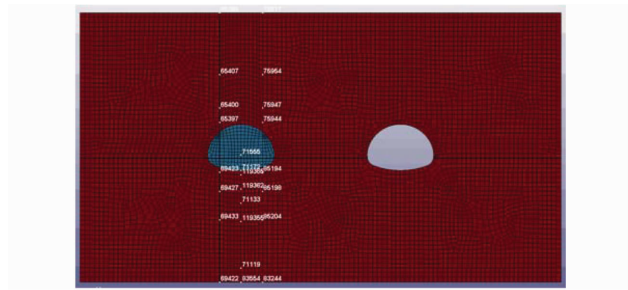


图 9 监测点分布图

Fig. 9 Schematic diagram of the monitoring sites

表 3 爆破分析工况

Table 3 Blasting condition analysis

分部编号	装药量 /单位	爆心位置/m		
		x	y	z
I	16.8	6.731 6	5.168 6	-65
II	23.7	-6.731 6	5.168 6	-50
III	16.8	6.731 6	-1.162 6	-60
IV	24.7	-6.731 6	-1.162 6	-45
V	37.2	0	5.168 6	-35
VI	25.7	0	-1.162 6	-30

3.2.2 既有隧道振动速度分析 为研究六个分部爆破对于既有隧道振动速度的影响,按照每个分部所在的 z 坐标(洞轴向),取前后间隔一定距离的质点作为监测点,监测点依次设置在既有隧道左洞壁中部,可得振动速度 - 时间曲线如图 11 所示。图中的监测点自上而下依次为开挖掌子面前方(未开挖区) 25、15、5、0 m,以及掌子面后方 5、

15、25 m。六个分部爆破时既有隧道测点的振动速度最大值如表 4 所示。

表 4 六个分部爆破既有隧道测点振动速度最大值

Table 4 The maximum vibration velocity of measurement sites in 6 blasting zones of the antecedent tunnel

分部	I	II	III	IV	V	VI
最大振动速度 /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.690	1.384	1.082	0.891	1.090	0.523

从图 11 和表 4 可以看出，I 和 III 分部的爆破对既有隧道的影响是六个分部中最大的。尽管药量不是最大的，但因 I 和 III 分部距离隧道最近，而且

I 分部周边临空面最少，所以对既有隧道的影响最大。从萨道夫斯基公式也可以看出，质点距离的影响是最大的。V 和 VI 分部的装药量最大，对既有隧道影响也较为显著。

根据文献 [8] 的研究成果，既有隧道肩部的振动速度是隧道底部的 1.19 ~ 3.99 倍，隧道腰部的振动速度是隧道底部的 1.10 ~ 3.11 倍，迎爆侧振动速度是背爆侧的 5 ~ 10 倍。但文献中的隧道跨度在 10 m 左右，而牛寨山既有隧道的跨度达到了 20 m 以上。为分析特大跨度隧道的周边振动速度的分布规律，提取 8 个振动质点，位置如图 12 所示。振动速度随时间的变化曲线见图 13。将所有质点的振动速度最大值提取出来列于表 5。

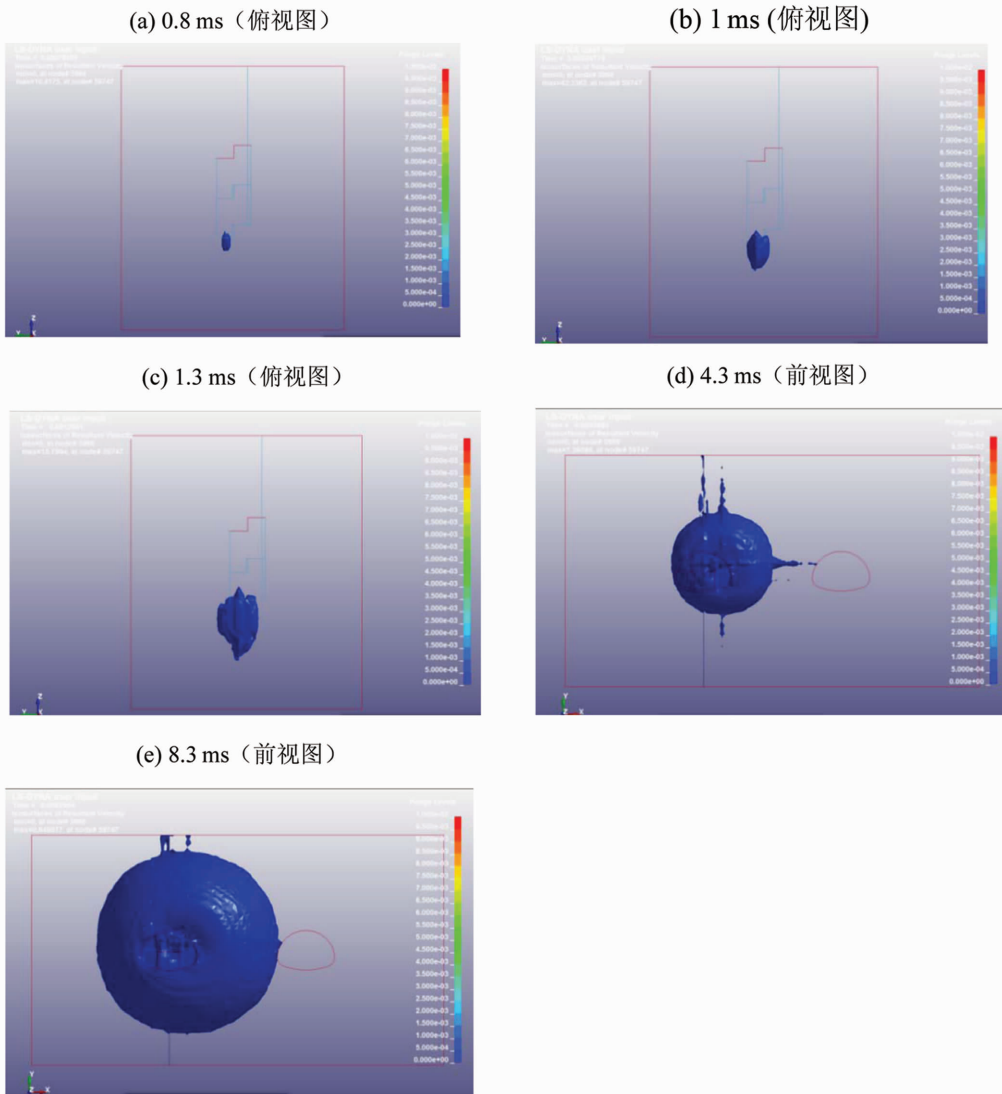


图 10 后行隧道爆破振速等值面图

Fig. 10 Contour surface of blast-induced vibration velocity in the antecedent tunnel

从表5可以看出:左中位置距离爆源最近,振速最大;右中位置距离爆源最远,且受到洞体的隔离,振动速度最小;左中位置的最大振速是右中的12.5倍,比文献[8]的5~10倍要高。这主要是因为牛寨山隧道既有洞跨度很大,所以振速衰减更多;左中(腰部)位置是下中(底部)的2.1倍;左上(肩部)位置是下中(底部)的1.9倍。此两处处于文献[8]给出的区间(1.10~3.11倍区间和1.19~3.99倍区间)的中值附近,吻合程度较高。

表5 既有隧道断面周边围岩的速度分布
Table 5 Velocity distribution surrounding the cross section of the antecedent tunnel

位置	节点编号	最大振速/(cm·s ⁻¹)
左中	108 618	1.515 14
左下	107 468	0.733 39
下中	94 120	0.714 85
右下	101 555	0.547 52
右中	105 228	0.121 42
右上	94 262	0.293 21
上中	94 051	0.882 24
左上	101 949	1.336 20

4 结 论

本文建立了牛寨山双隧道的三维有限元模型,

并考虑炸药的物理和力学属性、V级围岩的力学属性及三维隧道的掘进和空间效应,分析了爆破对隧道围岩和既有隧道衬砌结构的振动的规律,主要结论有:

1) 根据本文所建立的ANSYS/LS-DYNA数值模型计算出的周边质点振动速度与实测值相近,其衰减规律与萨道夫斯基公式吻合。模型可以准确预测某一点的振速。

2) 在围岩振速等值面的扩展过程中,由于“临空面”隔振效果的影响,使得隧道前方拓展区域稍大于已开挖的隧道后方。

3) 虽然I和III分部装药量不是最大,但距离既有隧道最近,因此爆破对既有隧道的影响是六个分部中最大,这与萨道夫斯基公式的结论一致。V和VI分部的装药量最大,对既有隧道影响也较为显著。

4) 既有隧道迎爆侧与背爆侧的最大振速比值为12.5;腰部位置是底部的2.1倍;肩部位置是底部的1.9倍。

5) 在双侧壁导坑施工中,I分部由于距离既有隧道较近、周边临空面最少,对既有隧道的影响也最大,施工中可作为爆破引发既有隧道振动的控制工况。

参考文献:

- [1] 施有志,李建锋,李汪颖,等. 扁平超大断面隧道的施工力学特征及其动力稳定性分析[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(7): 1023-1029.
SHI Youzhi, LI Jianfeng, LI Wangying, et al. Construction mechanics of tunnel with super-large cross-section and its dynamic stability[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2015, 49(7): 1023-1029.
- [2] 刘明高,高文学,张飞进. 小净距隧道建设的关键技术及其应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 952-955.
LIU Minggao, GAO Wenxue, ZHANG Feijin. Research on key construction technology and application of small interval tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(6): 952-955.
- [3] 邵珠山,李萍萍,王新宇. 小净距隧道爆破振动危害的主动控制研究[J]. 应用力学学报, 2014(2): 230-235.
SHAO Zhushan, LI Pingping, WANG Xinyu. Active control of blast-induced damage of tunnels with small spacing [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2014(2): 230-235.
- [4] 姚勇,何川. 并设小净距隧道爆破振动响应分析及控爆措施研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2815-2822.
YAO Yong, HE Chuan. Analysis of blasting vibration response of parallel set small clear-distance tunnels and blasting control measures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2815-2822.
- [5] 杨建平,陈卫忠,郭小红. 小净距公路隧道支护时机对围岩稳定性影响研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 483-490.
YANG Jianping, CHEN Weizhong, GUO Xiaohong. Analysis of blasting vibration response of parallel set small clear-distance tunnels and blasting control measures[J].

- Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 483 - 490.
- [6] 龚建伍, 夏才初, 朱合华, 等. 鹤上大断面小净距隧道施工方案优化分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 236 - 240.
- GONG Jianwu, XIA Caichu, ZHU Hehua, et al. Optimal analysis of construction schemes for Heshang small-space tunnels with large section[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 236 - 240.
- [7] 吴文琦, 金康康. 小净距隧道围岩强度、爆破振动速度及对结构影响的关系研究[J]. 公路, 2016(5): 254 - 257.
- WU Wenqi, JIN Kangkang. The study of relationship between surrounding rock strength, blasting vibration velocity and their influence on structure in small clear distance tunnel[J]. Highway, 2016(5): 254 - 257.
- [8] 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.
- LIN Congmou, CHEN Libiao, JIANG Lili, 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 & Engineering, 2010, 29(7): 1371 - 1378.
- [9] 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 - 3752.
- ZHU Zhengguo, SUN Minglu, ZHU Yongquan, et al. Field monitoring on blasting vibration and dynamic response of ultra-small spacing tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3747 - 3752.
- [10] 张国华, 陈礼彪, 夏祥, 等. 大断面隧道爆破开挖围岩损伤范围试验研究及数值计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1610 - 1619.
- ZHANG Guohua, CHEN Libiao, XIA Xiang, et al. Numerical simulation and experimental study of damage range of surrounding rock in large tunnel under blasting excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1610 - 1619.
- [11] ORIAD L L. The scale of effects in evaluating vibration damage potential [C] // Proceedings of the 15th annual conference on explosives and blasting research. New Orleans: 1989, 5(10): 161 - 176.
- [12] LAW T M, MAY J, SPATHIS A T, et al. Blast damage and blast dilution control: the application of bulk emulsion systems at the WMC St Ives Junction Mine[J]. International Journal for Blasting and Fragmentation, 2001, 5(1): 1 - 20.
- [13] DOUCET C, CAMERON A, LIZOTTE Y. The effects of rock mass characteristics on fragmentation in controlled blasting experiments in small development headings [C] // ISEE's 22nd annual conference. Orlando: 1996, 1 - 11.
- [14] VILLAESCUSA E, ONEDERRA L, SCOTT C. Blast-induced damage and dynamic behavior of hanging walls in bench stoping[J]. Fracture, 2004, 8(1): 23 - 40.
- [15] RAMULU M, CHAKRABORTY A K, SITHARAM T G. Damage assessment of basaltic rock mass due to repeated blasting in a railway tunneling project: a case study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 24(2): 208 - 221.
- [16] GB6722 - 2014 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- GB6722 - 2014 Safety regulations for blasting[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2014.
- [17] 刘慧. 招宝山超小净距双线隧道的安全控爆研究 [J]. 工程爆破, 2000, 6(1): 49 - 55.
- LIU Hui. Study on safety of controlled blasting of zhaobaoshan twin-tunnel with minishort separation[J]. Engineering Blasting, 2000, 6(1): 49 - 55.
- [18] 喻军, 刘松玉, 童立元. 浅埋隧道爆破振动空洞效应 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(1): 176 - 179.
- YU Jun, LIU Songyu, TONG Liyuan. Hollow effect induced by blasting vibration in shallow tunnels[J]. Journal of Southeast University, 2010, 40(1): 176 - 179.