

地铁保护区内爆破施工对既有地铁隧道结构的振动影响

徐庆辉¹ 吴 军¹ 李 耀^{2*} 闫 兵³

(1. 青岛地铁集团有限公司, 266011, 青岛; 2. 上海勘察设计院(集团)有限公司青岛分公司, 266199, 青岛;
3. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 266101, 青岛//第一作者, 高级工程师)

摘 要 目的: 为探究地铁保护区内爆破振动对既有地铁隧道结构的影响, 总结爆破振动响应规律, 需研究既有地铁隧道衬砌结构对爆破地震波的动态响应规律。方法: 基于青岛市某地铁保护区基坑工程的爆破施工具体案例, 运用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立了显动力数值计算模型, 设定了模型的计算参数和炸药参数。根据基坑爆破中心与隧道衬砌结构的径向距离、爆破角度 2 个参数的不同取值, 设置了四种工况, 分别对各工况下隧道衬砌结构的振动速度(以下简称“振速”)与频率响应特征、应力响应进行了环向和纵向分布规律分析, 并通过与现场实测值进行对比来验证模拟数值结果的合理性。结果及结论: 振速峰值出现在距离爆心最近的衬砌结构部位; 振速最大值和最小值总体呈对角线分布; 隧道迎爆面的振速最大, 背爆面的振速最小; 爆破药量越大, 振速从迎爆面到背爆面的衰减幅度越大; 隧道衬砌结构应力场呈动态变化, 背爆面结构拉应力值约为迎爆面的 40%~50%, 且呈现由爆距最小处向两侧衰减的规律; 爆破振动监测点宜布置在距爆心最近处, 并随着爆心方位的变化及时更换布设位置; 爆破振速控制指标(1.0 cm/s)下, 爆破产生的附加应力对衬砌结构带来损伤的可能性较低。

关键词 地铁隧道; 地铁保护区; 爆破施工; 振动响应规律
中图分类号 U456; TU714; TU751.9

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.11.015

Influence of Blasting Construction in Subway Protection Zone on Tunnel Structure Vibration

XU Qinghui, WU Jun, LI Yao, YAN Bing

Abstract Objective: In order to explore the effect of blasting vibration in subway protection zone on the existing tunnel structure, and summarize the response law of blasting vibration, it is necessary to study the dynamic response law of existing subway tunnel lining structure to blasting seismic wave.

Method: Based on a specific case of blasting construction in the protection zone of a subway excavation project in Qingdao, ANSYS/LS-DYNA software is used to establish a dynamic numerical calculation model. The calculation parameters and explosive parameters of the model are set, together with four different working conditions based on different values of the radial distance between the blast center and the tunnel lining structure, and the angles of blasting. The vibration speed, frequency response characteristics, and stress response of the tunnel lining structure under each working condition are analyzed for circumferential and longitudinal distribution patterns. The validity of the simulation numerical results is verified by comparing them with on-site measured data.

Result & Conclusion: The peak vibration velocity occurs in the lining structure closest to the blasting center. The maximum and minimum vibration velocities are generally distributed diagonally. The vibration velocity is highest on the blasting face of the tunnel and lowest on the back blasting face. The larger number of explosives, the greater the attenuation of vibration velocity from the blasting face to the back blasting face. The stress field of the tunnel lining structure undergoes dynamic changes, with the tensile stress value of the back blasting face being approximately 40% to 50% that of the blasting face and exhibiting a pattern of decreasing towards both sides from the point of minimum blast distance. Blast vibration monitoring points should be arranged closest to the blasting center and their locations should be altered promptly with changes in the blasting direction. Under the blast vibration control index of 1.0 cm/s, the possibility of additional stress generated by blasting causing damage to the lining structure is low.

Key words subway tunnel; subway protection zone; blasting construction; vibration response law

First-author's address Qingdao Metro Group Co., Ltd., 266011, Qingdao, China

在青岛、大连等地质条件较好的地区, 地铁保护区内进行基坑爆破开挖的情况逐年增多^[1-3]。爆破会不可避免地邻近的地铁隧道衬

* 通信作者

砌结构产生影响^[4-5]。探究爆破振动对邻近地铁隧道结构的影响规律,是保障地铁运营安全的首要问题。

目前,隧道结构爆破振动响应规律的研究在工程监测、数值模拟和理论研究三方面均有一定成果^[6-8]。在工程监测方面,文献[9]通过分析现场实测数据,指导现场装药施工,降低了掏槽孔爆破产生的地面振动效应。在数值模拟方面,文献[10]采用 LS-DYNA 有限元软件研究了球状药包爆破振动的特征,并给出了爆破振动助阵频率和平均频率的衰减规律;文献[11]通过数值模拟,探究了既有隧道扩建爆破过程中特征点的振动速度(下文简称“振速”)和衰减规律。在理论研究方面,文献[12]推导了爆破地震波作用下圆形地下洞室围岩的应力和位移表达式,求出了不同条件下围岩周围的应力和振速分布规律。

本文以青岛地铁保护区内基坑爆破施工具体案例为背景,采用数值模拟方法,研究基坑爆破开挖时既有地铁隧道衬砌结构对爆破地震波的动态响应规律,探索空间位置对该隧道衬砌结构振动响应的影响规律,以期在工程实践中对地铁隧道衬砌结构爆破振动响应规律有更为深入的了解,对爆破振动监测在监测点布置位置、监测范围等方面有所指导。

1 工程背景

拟建的青岛市某地下工程项目二期在建基坑(以下简称“二期基坑”)与既有地铁隧道(以下简称“隧道”)结构外边线的最小水平距离约为 10 m,如图 1 所示。

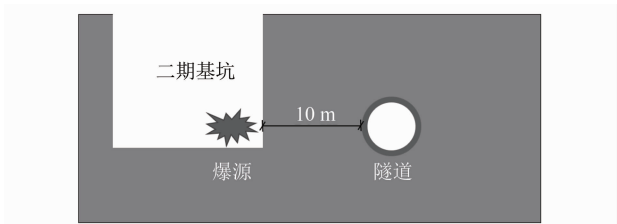


图 1 地铁隧道与二期基坑的相对位置
Fig. 1 The relative position of the subway tunnel and the second stage foundation pit

结合青岛市特殊地质状况,该基坑拟采用爆破开挖方式。本工程所处场区内基岩以花岗岩为主,煌斑岩、细粒花岗岩呈脉状穿插其间,局部地段发育碎裂岩等构造岩。

2 数值模拟

2.1 建立数值计算模型

基于项目工程资料,运用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立了显动力数值计算模型。如表 1 所示,拟设置四种工况,分别计算不同的爆源与隧道结构的距离(以下简称“爆距”),以及隧道与爆破中心(以下简称“爆心”)的夹角(以下简称“爆破角度”)下,爆破振动对隧道结构的影响。其中:工况一为实际施工工况;其余工况为虚拟假定工况。

表 1 四种工况的设定
Tab. 1 Setting of 4 working conditions

工况	爆距/m	爆破角度/(°)
工况一	15	180(即爆心在隧道的左侧面)
工况二	25	180(即爆心在隧道的左侧面)
工况三	15	-45(即爆心在隧道的左斜上方 45°)
工况四	25	-45(即爆心在隧道的左斜上方 45°)

四种工况对应的数值计算模型如图 2 所示。模型尺寸为 40 m(长)×5 m(宽)×30 m(高),隧道轴向长度为 5 m。将模型上、下表面的右侧边界设为无反射边界,并在前后面施加法向约束。

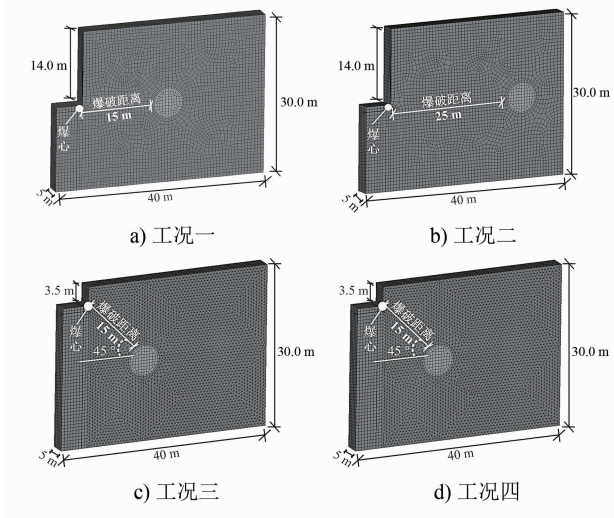


图 2 四种工况对应的数值计算模型
Fig. 2 Numerical calculation models corresponding to four working conditions

2.2 参数选取

为简化计算,不考虑炮孔的布置方式,假定炸药为球状炸药。计算模型采用八节点实体单元,岩石材料和隧道衬砌结构使用 * MAT_PLASTIC_KINEMATIC 材料模型。模型的计算参数如表 2 所示。

表 2 模型的计算参数				
Tab.2 Calculation parameters of the model				
项目	泊松比	弹性模量/ MPa	重度/ (kg/m ³)	屈服强度/ GPa
岩石地层	0.30	2 400	2.5×10 ³	0.45
C50 混凝土	0.20	3 400	2.5×10 ³	

炸药采用 ANSYS/LS-DYNA 软件中内置的高性能炸药,关键字为 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN,炸药状态方程使用 JWL 状态方程。模型的炸药参数取值分别为:重度取 $1.63\times10^3\text{ kg/m}^3$;爆速取 $5\,500\text{ m/s}$;爆破压力取 $1\times10^{10}\text{ Pa}$ 。

工况一采用的爆破药量(以下简称“药量”)为工程实际药量(0.36 kg)。由于工况二、工况三及工况四为虚拟假定工况,本文基于实际爆破监测数据修正后的萨道夫斯基公式,以及运营期地铁爆破振速允许值控制在 1.0 cm/s 的要求,综合考虑地铁线路运营期间乘客的心理承受度,计算得到工况二、工况三及工况四下所需的药量分别为 1.68 kg 、 0.36 kg 及 1.68 kg 。

2.3 隧道监测点选取

分别选取隧道环向的 8 个特征点(A_1 — A_8)、纵向的 8 个特征点(B_1 — B_8)进行振速及应力分析,各特征点的位置分布如图 3 所示。

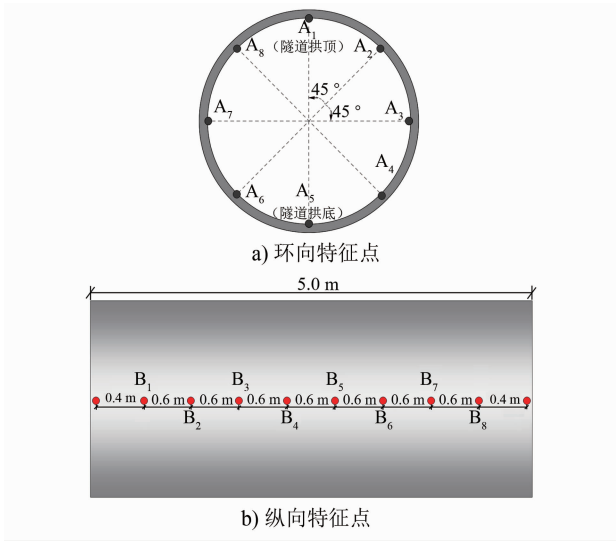


图 3 隧道监测点的位置分布
Fig. 3 Location distribution of tunnel monitoring points

3 模拟结果分析

3.1 环向隧道衬砌结构振速与频率响应特征分析

爆破产生的振动波经非常短暂的传播时间后对隧道产生影响。本文以工况二下的 A_7 特征点为

例进行分析。与其他环向特征点相比, A_7 为距离爆心最近的特征点,其振速衰减和变化幅度最大。设 t_i 为振动波的传播时间, $v_{\max,i}$ 为第 A_i 个特征点的振动速度峰值。

工况二下 A_7 的振速时程曲线如图 4 所示。由图 4 可知:由于爆破振动波的影响, A_7 会在极短时间内到达振动峰值 $v_{\max,7}$,然后迅速衰减。直至下次振动波到来时,才会再次重复此规律。但是随着炸药能量释放完毕,衬砌结构监测点振动波的峰值会逐渐衰减,直至爆炸完毕。

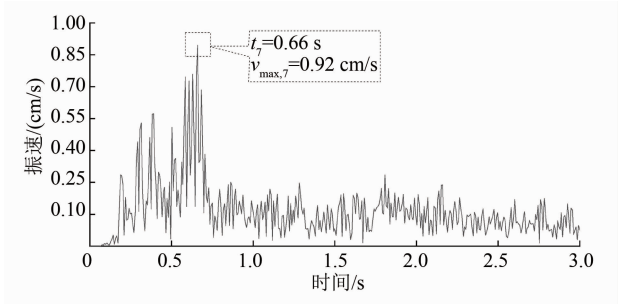


图 4 工况二下 A_7 的振速时程曲线
Fig. 4 Time history curve of vibration velocity of A_7 at working condition II

各工况下,环向各特征点 A_i 的 t_i 及 $v_{\max,i}$ 存在一定差异。为展现隧道衬砌振速响应规律,将四种工况下各特征点的振速峰值绘制于隧道轮廓外侧,如图 5 所示。

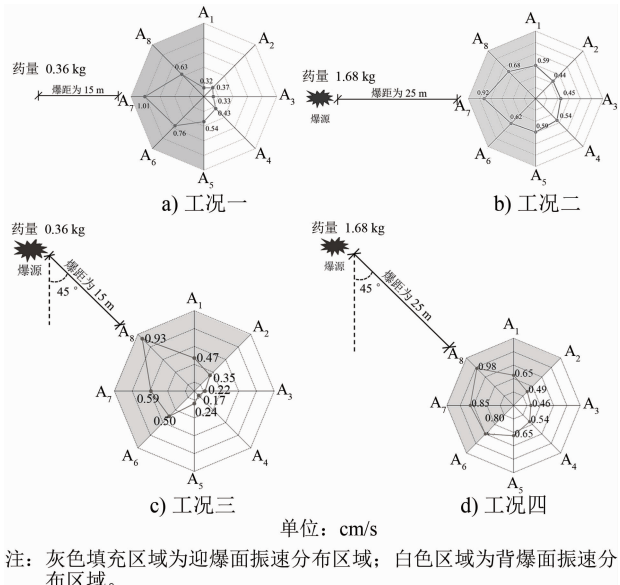


图 5 四种工况下环向各特征点的振速峰值
Fig. 5 Peak vibration velocity of each characteristic point in the circumferential direction under four working conditions

对图 5 的四种工况进行对比,可知:

1) 各工况下,因爆心与衬砌结构的相对方位不同,环向 8 个特征点的振速峰值有所差异,各特征点振速峰值的最大值出现在距离爆心最近的部位(即 A_7 处)。

2) 环向 8 个特征点中,振速峰值的最大值和最小值呈对角线分布,即:振动对迎爆面影响最大,对背爆面影响最小。

3) 爆破药量不同,爆破振速从迎爆面到背爆面的衰减幅度有所不同,小爆破药量条件(工况一及工况三)下背爆面的振速峰值为迎爆面的 20%~30%,大爆破药量条件(工况二及工况四)下背爆面的振速峰值约为迎爆面的 50%。

3.2 环向隧道衬砌结构应力响应

爆破振动会使隧道结构受到动态的压缩和拉伸,不同位置对爆破振动的响应时间和响应程度也不尽相同。图 6 为工况二爆破过程中 A_1 及 A_7 处的拉应力变化情况。由图 6 可知:爆破振动最先对迎爆面产生影响;随着时间的推移,爆破振动逐渐影响拱顶和拱底,最后影响背爆面;受爆破振动的影响,隧道衬砌结构 2 个特征点处的拉应力均呈现迅速增大至峰值后逐渐衰减的规律。

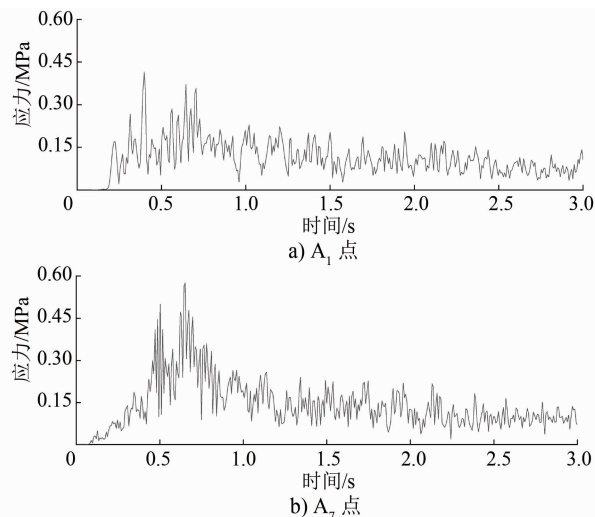
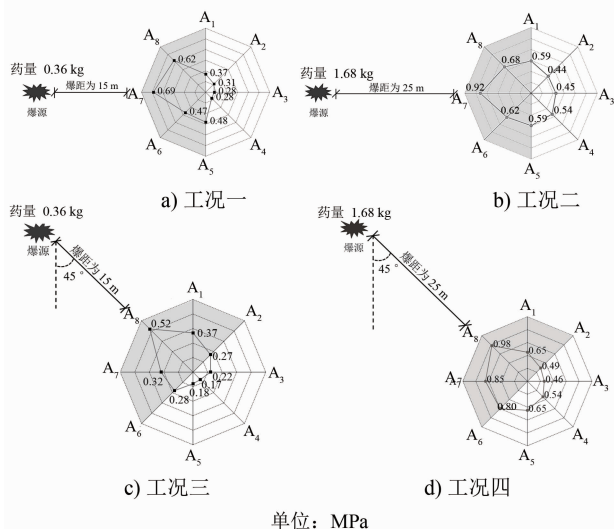


图 6 工况二爆破过程中 A_1 及 A_7 处的拉应力变化

Fig. 6 Tensile stress changes at A_1 and A_7 during blasting process in condition II

图 7 描述了整个爆破过程中四种工况下隧道衬砌结构环向各特征点的拉应力分布变化情况。如图 7 所示,以工况二为例,分析如下:

1) 迎爆面的拉应力普遍高于背爆面的拉应力,背爆面的结构拉应力值约为迎爆面的 40%~50%。



注:灰色填充区域为迎爆面拉应力分布区域;白色区域为背爆面拉应力分布区域。

图 7 四种工况下隧道衬砌结构环向各特征点的拉应力分布
Fig. 7 Tensile stress distribution of characteristic points of tunnel lining structure in the circumferential direction under four working conditions

2) 隧道结构受到的最大拉应力为 0.92 MPa。根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》,C50 混凝土抗拉设计强度值为 1.89 MPa,隧道结构的拉应力未超过混凝土设计强度值,这说明爆破振速为 1.0 cm/s 时,隧道衬砌结构发生拉裂破损的可能性很小。

3.3 纵向隧道衬砌结构振速与应力响应分析

对隧道衬砌结构的纵向 8 个特征点(见图 3 b))对应的 8 个断面进行分析。其中, B_4 — B_5 的中点处与爆源的距离最近。每个测点断面均选取四个环向特征点开展分析,其中:工况一及工况二选取 A_1 、 A_3 、 A_5 、 A_7 的四个环向特征点;工况三及工况四选取 A_2 、 A_4 、 A_6 、 A_8 四个环向特征点。各测点断面选取特征点的振速及应力数值计算结果如图 8 所示。

由图 8 可知:

1) 振速和应力总体呈现由爆距最小处向两侧衰减的规律,且二者分布规律呈现出一致性;工况一、工况二的振速峰值出现在 B_5 断面 A_7 处,分别为 1.01 cm/s 和 0.92 cm/s,其应力最大值也出现在 B_5 断面 A_7 处,分别为 0.69 MPa 和 0.52 MPa;工况三、工况四的振速峰值出现在 B_4 断面 A_8 处,分别为 0.97 cm/s 和 0.93 cm/s,其应力最大值出现在 B_5 断面 A_8 处,分别为 0.52 MPa 和 0.57 MPa。

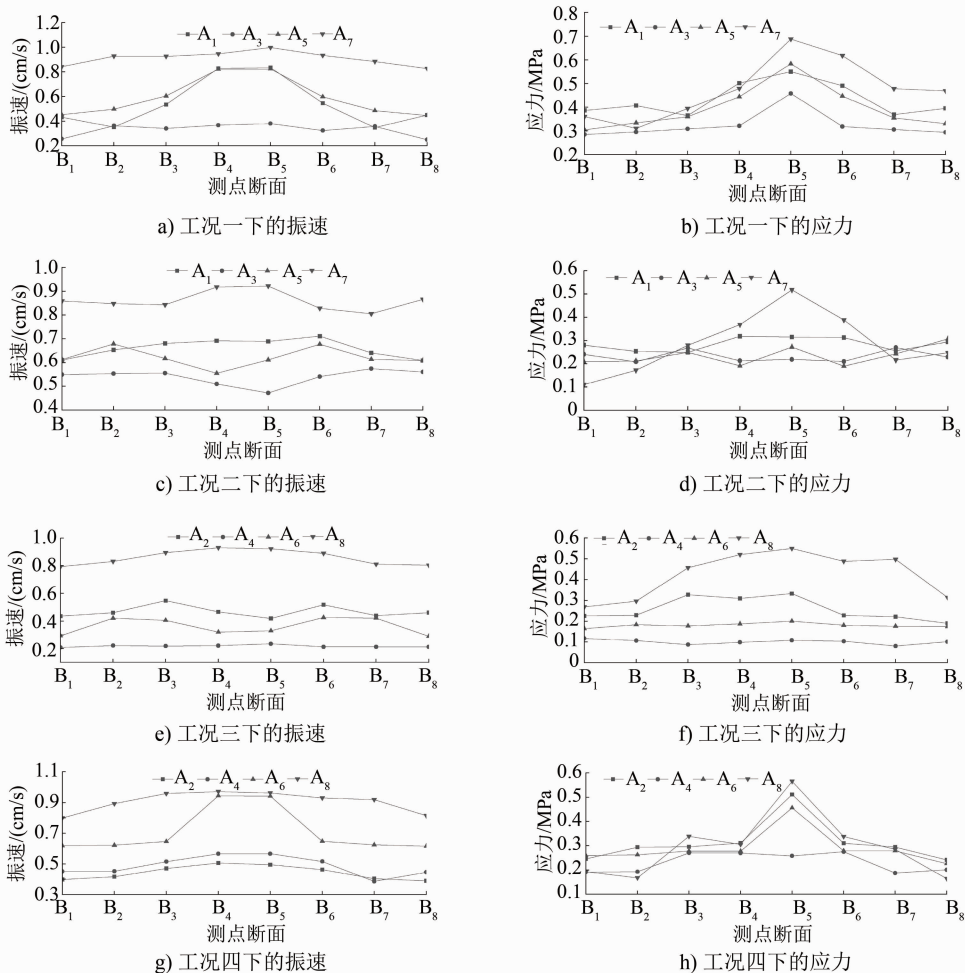


图 8 各测点断面选取特征点的振速及应力数值计算结果

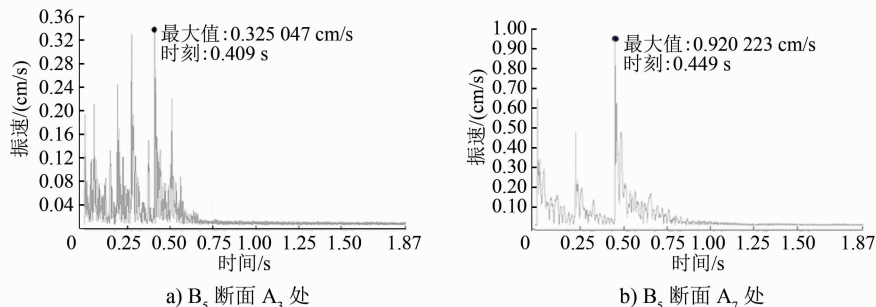
Fig. 8 Calculation results of vibration velocity and stress values of characteristic points selected in each measuring point cross-section

2) 隧道两端个别特征点的振速和应力值出现了较小幅度的增加,这主要是因边界条件限制,振动波和应力波在模型边界处的正常传播受到了一定的影响。

3.4 现场实测与数值模拟结果拟合度分析

对工况一开展了现场监测,以获取爆破施工过

程中隧道衬砌结构的振动数据,进而验证数值模拟计算结果的准确性。工况一下,取与爆心距离最近 B_5 断面,在断面上设了两个监测点(测点 1 位于隧道右拱腰 A_3 处,测点 2 位于隧道左拱腰 A_7 处),这两个测点在 B_5 断面的两拱腰处正对布设,得到的实测振速值如图 9 所示。

图 9 工况一下 B_5 断面 A_3 及 A_7 处的振速实测值Fig. 9 Measured vibration velocity at A_3 , A_7 on section B_5 under condition I

仍以工况一为例,取 B_3 、 B_5 、 B_7 三个断面 A_3 、 A_7 处振速的模拟值与实测值进行对比,其结果如表 3 所示。

表 3 工况一下 B_3 、 B_5 、 B_7 断面监测点振速的模拟值与实测值对比

Tab.3 Comparison between simulated and measured values of vibration velocity at monitoring points (B_3 , B_5 , and B_7) under condition I

测点位置	爆距/m	振速实测值/(cm/s)	振速模拟值/(cm/s)	振速差值率/%
B_3 断面 A_7 处	15.64	0.853	0.935	8.77
B_5 断面 A_7 处	15.47	0.920	1.013	9.18
B_7 断面 A_7 处	15.89	0.824	0.912	9.64
B_3 断面 A_3 处	18.87	0.298	0.331	12.99
B_5 断面 A_3 处	18.52	0.325	0.374	13.10
B_7 断面 A_3 处	18.63	0.296	0.319	9.07

注:振速差值率= $[(\text{振速模拟值}-\text{振速实测值})/\text{振速模拟值}]\times 100\%$ 。

由表 3 可知:各测点的振速差值率均在 8.77%~13.10%范围内,这说明模拟结果能够较好地反映实际施工爆破对隧道衬砌结构的影响。模拟值较实测值偏高,其主要原因为数值模拟时将地层设为均一、连续地层,而现实地层中可能存在破碎带、软弱面等不良地质体,因此爆破振动波在现实地层中传播时振速有所减弱。

4 结语

本文运用 ANSYS/LS-DYNA 软件,结合工程实践,模拟了基坑爆破开挖对邻近既有地铁隧道的动态影响,分析了爆破荷载条件下隧道结构的爆破振动响应规律,得到结论如下:

- 1) 受邻近爆破影响,隧道衬砌结构各点在极短时间内达到振速峰值,然后振速迅速衰减;振速峰值均出现在距离爆心最近的衬砌结构部位。
- 2) 振速最大值和最小值总体呈对角线分布,隧道衬砌结构迎爆面振速最大、背爆面振速最小;爆破药量越大,爆破振速从迎爆面向背爆面衰减幅度越大。
- 3) 在爆破荷载作用下,隧道衬砌混凝土应力场呈现动态变化,背爆面结构拉应力值约为迎爆面结构拉应力值 40%~50%。
- 4) 振速曲线和应力曲线总体上均呈现从爆距最小处向两侧衰减的规律,且振速分布规律与应力分布规律具有一致性。
- 5) 开展保护区地铁隧道结构爆破振动监测时,

监测点的位置宜选取在距爆心最近处,并随着爆心方位的变化及时更换监测点的布设位置;在爆破振速控制指标(1.0 cm/s)下,隧道衬砌结构产生的附加应力对衬砌结构带来损伤的可能性较低;对于已开通运营的地铁隧道,考虑到乘客的舒适度与心理接受度,建议采用更为严格的爆破振速控制指标。

参考文献

[1] 刘世波,薛里,孙崔源,等. 紧邻运营地铁安全保护区基坑爆破振动控制技术[J]. 铁道建筑, 2017, 57(10): 71.
LIU Shibo, XUE Li, SUN Cuiyuan, et al. Blasting vibration control technology for foundation pit adjacent to safety protection area of operation subway[J]. Railway Engineering, 2017, 57(10): 71.

[2] 段忠辉. 既有地铁区间隧道上方深大基坑开挖安全影响分析[J]. 建筑结构, 2020, 50(增刊 2): 747.
DUAN Zhonghui. Study on safety impact of excavation for deep and large foundation pit above existing subway tunnel[J]. Building Structure, 2020, 50(S2): 747.

[3] 朱斌,蒋楠,周传波,等. 基坑开挖爆破作用邻近压力燃气管道动力响应特性研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(11): 201.
ZHU Bin, JIANG Nan, ZHOU Chuanbo, et al. Effect of excavation blast vibration on adjacent buried gas pipeline in a foundation pit[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(11): 201.

[4] 宋肖龙,高文学,季金铭,等. 爆破振动对隧道围岩累积损伤效应的影响[J]. 振动与冲击, 2020, 39(24): 54.
SONG Xiaolong, GAO Wenxue, JI Jinming, et al. Influence of blasting vibration on cumulative damage of surrounding rock[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(24): 54.

[5] 刘华丽,赵跃堂,徐迎,等. 爆破地震动荷载方向对边坡安全系数的影响[J]. 振动与冲击, 2020, 39(17): 94.
LIU Huali, ZHAO Yuetang, XU Ying, et al. Effects of blast seismic dynamic load direction on slope safety factor[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(17): 94.

[6] 郭新新,刘锦超,汪波,等. 既有裂缝、空洞病害隧道爆破振动安全控制标准[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(11): 149.
GUO Xinxin, LIU Jinchao, WANG Bo, et al. Safety control standard of blasting vibration for tunnels with existing cracks and cavities[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(11): 149.

[7] 李新平,边兴,罗忆,等. 地下洞室边墙爆破振动传播衰减规律研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 2063.
LI Xinping, BIAN Xing, LUO Yi, et al. Study on attenuation law of blasting vibration propagation of side wall of underground cavern[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 2063.

[8] 陈士海,刘小鸣,张子华,等. 隧道掘进爆破诱发隧道后方开挖段地表振动效应分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1800.

的风量和开启数量,TVF 总风量在宏观层面决定了配线区间内总体可分配的风量;射流风机主要起气流分配的作用,其开启数量和方式决定了起火区间内断面风速的大小。TVF 和射流风机的合理组合,可形成有效的排烟气流组织方案。

2) 单存车线区域若不设置射流风机,无法确保起火区间内纵向风速 $2 \sim 11 \text{ m/s}$ 的要求;应设置射流风机,对该区域的各线路进行气流分配,以保证着火区间的风速满足要求。

3) 射流风机并非开启越多越好。平行的存车线和正线内同时开启射流风机,风机间会存在分流和相互抑制情况,进而导致需要排烟的线路风量减小,烟气控制效果并不好。仅开启起火位置所对应隧道内的射流风机,具有纵向风速大、控制简单等优点。

4) 单存车线区间内开启 1 组射流风机即可使得断面纵向风速不低于 2 m/s 。考虑到可能存在起火源位于射流风机附近的情况,此时火源附近射流风机可能会因隧道内温度过高导致设备失效,因此建议至少设置 2 组射流风机,且 2 组射流风机的间距不宜小于 1 列列车的长度,以确保火灾工况下设备运行的可靠性。

参考文献

[1] 蔡德强. 广州南站桥建结合结构设计综述[J]. 铁道标准设

计, 2015, 59(6): 164.

CAI Deqiang. Design of combination structure of bridge and building in Guangzhou Nan railway station[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(6): 164.

[2] 房爱民. 地铁复杂配线区防排烟方式研究[J]. 硅谷, 2015, 8(2): 33.

FANG Aimin. Study on smoke control and exhaust methods in complex distribution area of subway[J]. Silicon Valley, 2015, 8(2): 33.

[3] 荣建忠, 邓保顺, 乔小博, 等. 地铁双存车线配线区间的烟气控制研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(6): 818.

RONG Jianzhong, DENG Baoshun, QIAO Xiaobo, et al. Research on smoke control system of double storage line of an underground railway station[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(6): 818.

[4] 王静伟, 罗辉, 罗燕萍. 地铁特殊配线车站的隧道通风系统配置[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(1): 56.

WANG Jingwei, LUO Hui, LUO Yanping. Configuration of tunnel ventilation system at subway special assistant line station[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(1): 56.

[5] 陈磊, 姜娜. 地铁车站双存车线区域排烟系统设计研究[J]. 科技与企业, 2016(10): 230.

CHEN Lei, JIANG Na. Study on the design of smoke exhaust system in subway station with double parking lines[J]. Keji Yu Qiye, 2016(10): 230.

(收稿日期:2022-12-29)

(上接第 84 页)

CHEN Shihai, LIU Xiaoming, ZHANG Zihua, et al. Analysis of surface vibration effect on tunnel excavation section induced by tunneling blasting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10): 1800.

[9] 石连松, 高文学, 王林台. 地铁浅埋隧道爆破振动效应试验与数值模拟研究[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(12): 1237.

SHI Liansong, GAO Wenxue, WANG Lintai. Experimental and numerical simulation study on blasting seismic effect of subway shallow buried tunnel[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(12): 1237.

[10] 周俊汝, 卢文波, 张乐, 等. 爆破地震波传播过程的振动频率衰减规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2171.

ZHOU Junru, LU Wenbo, ZHANG Le, et al. Attenuation of vibration frequency during propagation of blasting seismic wave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(11): 2171.

[11] 刘冬, 高文学, 孙宝平, 等. 既有隧道扩建爆破振动数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 3011.

LIU Dong, GAO Wenxue, SUN Baoping, et al. Numerical simulation of blasting vibration on existing tunnel extension[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(10): 3011.

[12] 杨建华, 吴泽南, 姚池, 等. 地应力对岩石爆破开裂及爆炸地震波的影响研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(13): 64.

YANG Jianhua, WU Zenan, YAO Chi, et al. Influences of in situ stress on blast-induced rock fracture and seismic waves[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(13): 64.

(收稿日期:2021-04-29)