

钻爆法施工小净距隧道的损伤与振动

吴波¹, 崔阿龙¹, 徐世祥¹, 林一石², 黄勇华³, 林孝明³

(1. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330100;

2. 福建省榕盛市政工程股份有限公司, 福建 福州 350011;

3. 连江县城投建设集团有限公司, 福建 福州 350500)

摘要: 为探究隧道钻爆法开挖过程中小净距隧道围岩扰动特点, 以贵安隧道工程为依托, 使用 ABAQUS 软件并利用等效爆破方法对隧道左洞实施进尺 3 m 的 3 次全断面爆破模拟。结果表明: 应力波到达岩体边界发生反射容易造成围岩拉裂损伤, 因此隧道洞口附近的开挖爆破应注意洞门处的支护与监测; 隧道左洞的围岩损伤主要集中在拱顶和拱底附近, 损伤深度最大可达 3~4 m, 拱肩其次, 拱腰和拱脚处的损伤最轻; 隧道中央岩峰值振速随着与爆源距离的增加, 测点峰值振速先是下降, 靠近已形成空区的右洞时又上升, 曲线整体呈“U”形, 说明岩体中的空区对振速有放大效应; 隧道右洞临爆侧距爆源最近的拱腰处受到的振动扰动最明显。

关键词: Johnson-Holmquist-Ⅱ本构模型; 等效爆破; 隧道; 围岩损伤; 峰值振速

中图分类号: TD235

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)04-0314-06

Damage and vibration of small spacing tunnel constructed by drilling and blasting method

WU Bo¹, CUI Along¹, XU Shixiang¹, LIN Yishi², HUANG Yonghua³, LIN Xiaoming³

(1. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330100, China;

2. Fujian Rongsheng Municipal Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350011, China;

3. Lianjiang City Construction Investment Group, Fuzhou 350500, China)

Abstract: This research aims to explore the disturbance characteristics of the surrounding rock of the tunnel with small spacing during the excavation process of drilling and blasting method. Based on the Guian tunnel project, ABAQUS software and the equivalent blasting method were used to simulate three full-section blasting of the left hole of the tunnel with a blasting footage of 3m. Results show that the stress waves reaching the rock boundary is prone to cause tensile failure of the surrounding rock, so in the excavation and blasting near the tunnel entrance, special attention should be paid to the support and monitoring of the tunnel door. The surrounding rock damage of the left tunnel is mainly concentrated near the vault and the bottom, and the damage depth can reach up to 3~4m, followed by the arch shoulder, and the damage at the arch waist and the bottom is the lightest. With the increase of the distance from the explosion source, the peak vibration velocity of the measurement point in the rock between the twin tunnels first decreases, and when it is close to the right hole that had formed the void area, it rises again, and the curves are approximately “U” shaped, indicating that the void area in the rock mass has an amplifying effect on the vibration velocity. The vibration disturbance at the arch closest to the explosion source of the tunnel is the most obvious.

Keywords: Johnson-Holmquist-Ⅱ constitutive model; equivalent blasting; tunnel; surrounding rock damage; peak vibration velocity

收稿日期: 2023-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278397, 52168055); 江西省自然科学基金项目(20212ACB204001); 江西省“双千计划”创新领军人才项目(jxsq2020101001)

第一作者简介: 吴波(1971—), 男, 四川阆中人, 教授, 博士, 研究方向: 隧道及地下工程。

由于双线小净距隧道钻爆法施工中炸药短时间内释放大能量,有少部分能量会扩散到开挖范围外,对围岩和相邻隧道结构产生扰动,因此,掌握小净距隧道爆破扰动的特点和规律对隧道施工安全意义重大。

国内外学者对小净距隧道爆破施工中的振动、变形、损伤、施工安全控制等方面研究取得了一定的成果。刘闽龙^[1]等通过数值模拟和现场探测研究了炮孔周围的损伤范围和中夹岩受双线隧道交替爆破的影响;蒙国往^[2]等研究了循环爆破荷载作用下小净距隧道5个开挖进尺内围岩的累积损伤演化过程;罗阳^[3]等结合 ANSYS/LS-DYNA 软件模拟结果和现场振动监测数据,探究了爆破施工对先行隧道的爆破振动影响与净距的关系,并对先行隧道最大振速进行萨道夫斯基公式拟合,得到了对应的场地系数和衰减系数;于建新^[4]等开展爆破振动现场监测实验,得到了各典型爆破段引起地表及已开挖隧道迎爆侧的振动传播规律;梁琨^[5]等分析监测和模拟结果,先行洞在后行洞上台阶爆破作用下的动力响应;梁书锋^[6]等对隧道爆破炮眼的合理延时进行了研究;Wu^[7]等人提出了在邻近隧道的下穿隧道内设置减震岩层的四分开挖法,利用数值模拟来模拟减震岩层的防损机制;Song^[8]等设计开发了大型三维隧道开挖模拟试验系统,基于该系统和便携式电火花源,研究了小净空大断面隧道夹层岩在开挖过程中的动态响应规律。

本研究将 JH-2(johnson-holmquist- II)本构模型和等效爆破方法应用于 ABAQUS 模拟中,探究爆破围岩损伤,以及中夹岩、先行隧道的振动分布特点,为相似工程实践提供参考。

1 工程概况

贵安隧道位于连江县潘渡乡溪利村东南侧山体中,隧道全长 913 m,最大埋深 235 m。左、右洞呈小净距、分离布置;右洞桩号为 YK3+893~YK4+799,全长 906 m;左洞桩号为 ZK3+865~ZK4+785,全长 920 m。隧道净高 5 m,净宽 14 m;隧址区及其附近新构造运动不强烈,未见影响场地稳定的活动性断裂。

本研究主要针对 II 级围岩隧道段(起止桩号 ZK7+30~ZK7+320),埋深约为 8~40 m,重度 25 kN·m⁻³,弹性模量 20 GPa,泊松比 0.2,内摩擦角

50°,黏聚力 1.5 MPa。隧道左、右洞间距约 24 m,右洞作为先行隧道超前左洞开挖 30 m,沿隧道前进方向地表存在一定坡度。

2 数值模拟

利用数值模拟软件 ABAQUS 对隧道爆破开挖进行模拟,结合相关文献和模拟结果,分析爆破过程中的围岩损伤特点、双线隧道中夹岩以及先行隧道周边的质点振动规律。

2.1 工况设置

模拟建立隧道和岩体模型,双线隧道中右洞开挖 35 m,左洞开挖 5 m,将对左洞进一步爆破开挖 3 次,此隧道段围岩力学性能良好,故采用全断面开挖方法,各段炸药起爆的时间间隔为 5 ms。单次开挖进尺设为稍大于实际开挖的 3 m。在模型的周边一层单元类型采用 CIN3D8,以减少应力波反射对模拟结果的影响,模型内部使用常规的 C3D8R 单元。模型纵向尺寸 50 m,前、后未设置无限单元,以观察洞门附近爆破对洞门围岩的影响,且模拟中 3 次爆破集中在前端,模型后端应力波反射对模拟结果的影响忽略不计。具体隧道模型如图 1 所示。

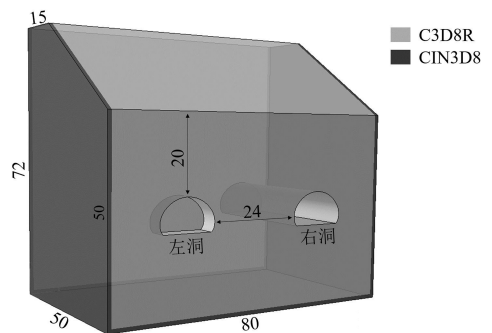


图1 隧道与围岩模型(单位:m)

Fig.1 Model of tunnel and surrounding rock (unit: m)

2.2 爆破参数及岩石本构

模拟炮孔分为掏槽孔、辅助孔、周边孔、底孔 4 类,参考工程设计资料,不同类型炮孔的爆破参数如表 1 所示。

表 1 4 种炮孔的参数和起爆顺序

Tab.1 Parameters and blasting sequence of four types of holes

炮孔类型	孔深/m	K	l	起爆顺序
掏槽孔	3.5	1.2	1.35	1

续表

炮孔类型	孔深/m	K	l	起爆顺序
辅助孔	3.2	1.25	1.45	2
周边孔	3.2	1.30	1.45	3
底孔	3.3	1.23	1.40	4

注: K 为炮孔径向不耦合系数; l 为炮孔轴向不耦合系数。

表 2 岩石 JH-2 本构模型参数

Tab.2 JH-2 constitutive model parameters of rock

A	B	C	M	N	D_1	D_2	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	T/MPa
1.248	0.68	0.005 1	0.83	0.676	0.008	0.435	25.7	-386	12 800	8.03

注: A, B, C, M, N 为材料强度参数; D_1, D_2 为损伤参数; K_1, K_2, K_3 为状态方程参数; T 为最大拉伸强度。

2.3 等效爆破荷载理论

2.3.1 等效边界

炸药在发生爆炸后释放剧烈能量,产生的冲击波和应力波会对炮孔周围岩体造成不同程度的影响,根据破坏程度的不同分为粉碎区、破碎区和弹性区。根据上述爆破后炮孔周围各区域岩石的特性,在模拟时将爆破荷载直接施加在拟形成的爆破轮廓面上,如图 2 所示。

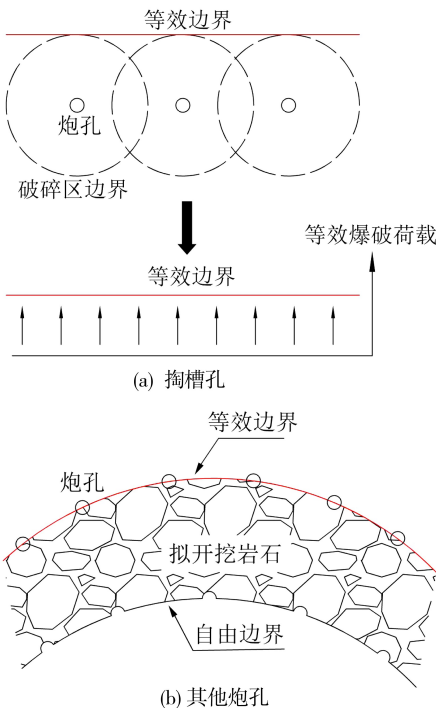


图 2 等效边界示意图

Fig.2 Diagram of equivalent boundary

2.3.2 等效爆破荷载

通过压力时程函数确定压力时程曲线后直接施加在等效边界上,探讨围岩的动力响应。对于

模拟隧道围岩采用 JH-2 本构模型,该模型最早被用于模拟陶瓷等脆性材料的行为,模型中包含软化特征、膨胀、应变率效应;还包含与压力相关的强度、损伤和断裂等。隧道围岩为 II 级,基于实际工程数据,并参考文献[9],岩石雨贡纽弹性极限 HEL(hugoniot elastic limit)取 4.5 GPa,并在此基础上确定其余所需参数,如表 2 所示。

等效爆破荷载,使用指数压力函数计算爆炸压力曲线^[10],其公式为:

$$P_w(t) = 4P_{\max}(e^{(-\beta t/\sqrt{2})} - e^{(-\sqrt{2}\beta t)}) \quad (1)$$

式(1)中, $P_w(t)$ 为作用在炮孔壁上压力的时程函数; P_{\max} 为在一个时程内的峰值; t 为时间,s; β 为阻尼系数,其值取决于爆破荷载达到峰值的时间 t_r ,有 $P_w(t_r) = P_{\max}$,得到 $\beta = (\sqrt{2}\ln 2)/t_r$ 。

炸药起爆后起爆信号到达炮孔各横截面炮孔壁的时间^[11]:

$$t_r = \frac{L}{D} \quad (2)$$

式(2)中, L 为装药药柱长度,m; D 为炸药爆炸速度, $m \cdot s^{-1}$,本文选取乳化炸药爆速为 6 690 $m \cdot s^{-1}$ 。

当爆轰波通过药柱的传播结束时,平均炮孔压力达到峰值,基于爆轰波的 C-J 模型,炮孔壁上的峰值压力 P_{\max} 可由式(3)计算^[12]:

$$P_{\max} = \frac{\rho_e D^2}{2(\gamma + 1)} K^{-2\gamma} l^{-\gamma} n \quad (3)$$

式(3)中, ρ_e 为炸药密度, $kg \cdot m^{-3}$,本文选取乳化炸药密度为 1 320 $kg \cdot m^{-3}$; γ 为与炸药密度相关的熵指数,对于乳化炸药约为 3; n 为炮孔壁上冲击波压力的放大系数,取 8~11。

计算得到作用于炮孔壁上的压力 $P_w(t)$ 后,将其转换为作用于等效边界的等效爆破荷载。掏槽孔和其他炮孔等效边界的选取方式不同,其等效爆破荷载可分别按下式计算。

掏槽孔等效边界上的等效爆破压力历程 $P_{be,c}(t)$:

$$P_{be,c}(t) = mP_w(t) \left(\frac{r_b}{r_c}\right)^{2+\frac{\nu}{1-\nu}} \left(\frac{r_c}{r_f}\right)^{2-\frac{\nu}{1-\nu}} \quad (4)$$

式(4)中, m 为多炮孔群爆轰的影响系数,一般取10。

其他孔(掘进孔、光爆孔、底板孔等)等效边界上的等效爆破压力历程 $P_{be,o}(t)$ 为:

$$P_{be,o}(t) = \frac{d_b}{S} P_w(t) \quad (5)$$

式(5)中, S 是每次爆破相邻炮孔间的间距,m。

根据所使用炸药参数和炮孔布置,代入公式(1)~(5),求得如图3所示等效爆破荷载曲线,与之对应的等效边界如图4所示。

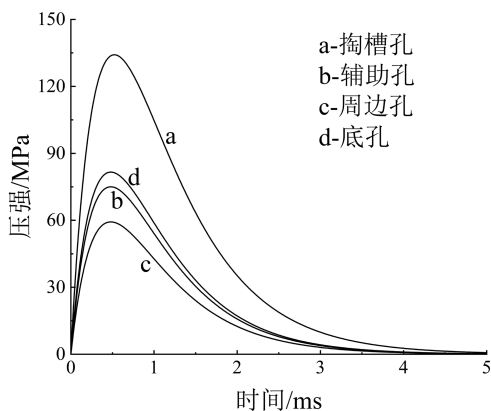


图3 等效爆破荷载

Fig.3 Equivalent blasting load

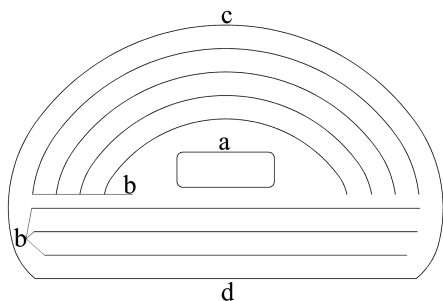


图4 等效边界布置

Fig.4 Layout of equivalent boundary

3 结果分析

3.1 隧道爆破损伤

将上文中计算所得等效爆破荷载施加在等效边界上,3次爆破开挖后得到如图5所示的隧道(左洞)损伤云图。云图显示隧道围岩发生了不同程度的损伤。数值模型中隧道口处没有施加无限边界单元,爆破完成后此处发生了严重的损伤,推测是应力波到达模型边界时发射,造成围岩拉裂损伤。因此,隧道洞口附近的开挖爆破应格外注意洞门处的支护与监测。

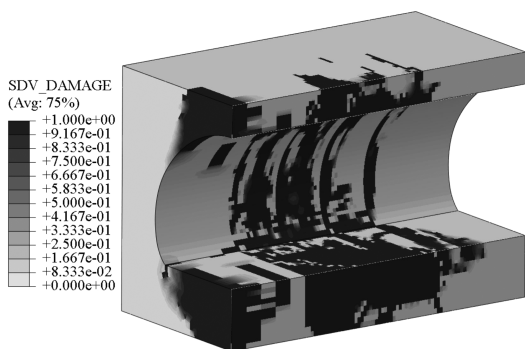


图5 隧道左洞围岩损伤云图

Fig.5 Damage nephogram of surrounding rock of left tunnel

为了更直观地观察开挖段围岩的损伤发展,沿开挖方向,间隔1 m分别截取垂直于隧道轴线且距首次爆破开挖掌子面0~11 m的云图切片,如图6所示。由图6可见,各个截面的围岩损伤主要集中在拱顶和拱底附近,损伤深度最大可达3~4 m,拱肩其次,拱腰和拱脚处的损伤最轻。此外,在拟爆破的9 m隧道段,0~7 m处截面上的损伤程度明显大于8 m和9 m处,前两个爆破开挖段开挖后,受到后续爆破开挖的损伤累积作用,而第3段的爆破开挖空区最后形成,受到损伤累积作用较小,因此后续损伤程度逐渐减小。在拟开挖的9 m隧道段外,10 m和11 m处围岩在拱底附近也产生了明显损伤。

3.2 中夹岩振速

距首次爆破开挖掌子面4.5 m的拱腰连线上均匀取10个点,如图7所示。分别提取这10个点在3次爆破过程中的峰值振速绘制成图,如图8所示。

将3条曲线横向对比,整体振速从高到低依次为第2次爆破、第3次爆破、第1次爆破。第2次爆破时测点距爆源最近,即测点与爆源的距离越近,整体振速越高,这种现象在曲线两端最为明显,在7.2~19.2 m范围内,3条曲线的振速值趋近。第3次爆破和第1次爆破时与测点距离相当,不过第3次爆破时其后方已经形成了空区,故前者产生的峰值振速要略高于后者。纵向观察单个曲线,随着与爆源距离的增加,测点峰值振速先是下降,在21.6~24 m范围内,即靠近已形成空区的右洞时,又发生了上升,曲线整体呈“U”形。综上,振速通常和与爆源的距离呈反比,但岩体中的空区对振速有放大效应。

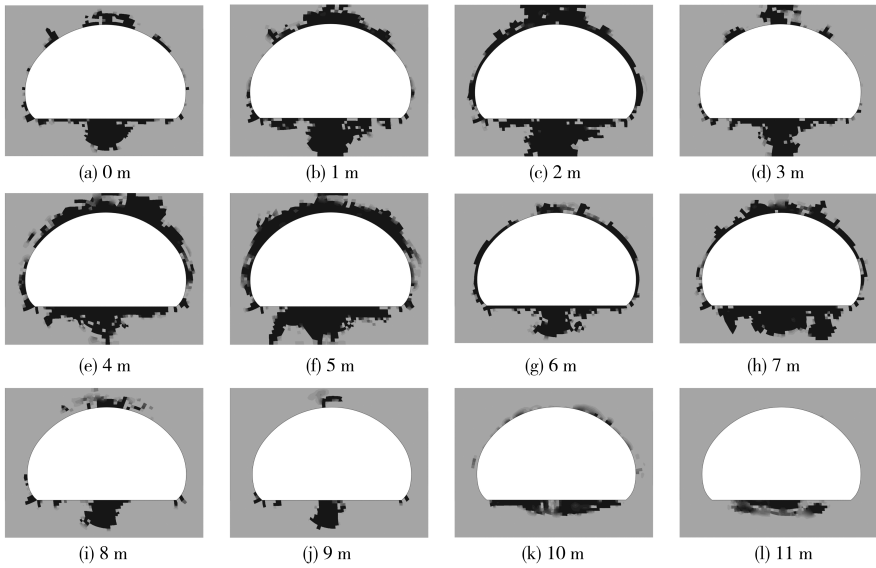


图 6 不同纵剖面上的围岩损伤

Fig.6 Surrounding rock damage on different longitudinal sections

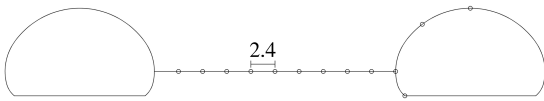


图 7 测点布设 (单位:m)

Fig.7 Layout of monitoring points (unit: m)

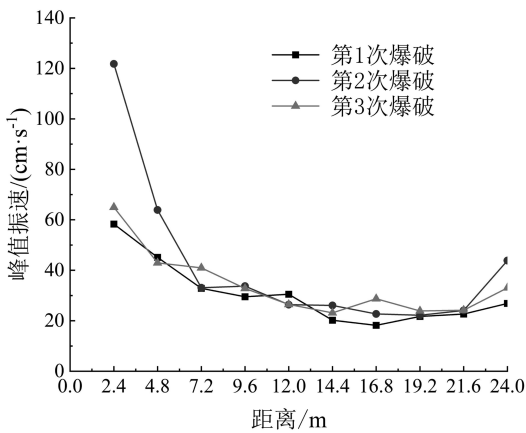
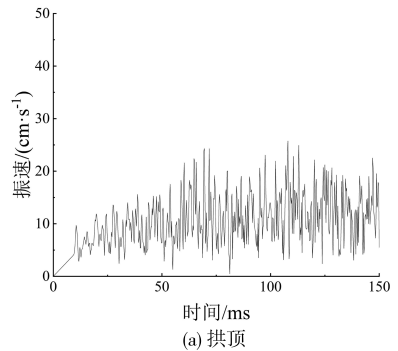


图 8 中夹岩中不同距离测点的峰值振速

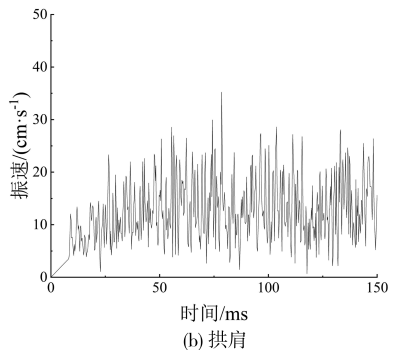
Fig.8 Peak vibration velocity of measuring points at different distances in the middle rock

3.3 先行隧道围岩振速

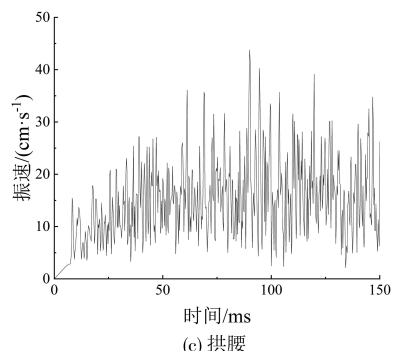
在与上文相同截面的隧道轮廓线临爆侧取拱顶、拱肩、拱腰、拱脚处 4 个测点,如图 7 所示。分别绘制其振速时程曲线,如图 9 所示。由图 9 可知,拱腰处的振速最大,峰值振速为 $43.78 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; 其次是拱肩,峰值振速为 $35.21 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。拱顶和拱脚处振速时程曲线较为接近,峰值振速分别为 25.75 和 $29.85 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。



(a) 拱顶



(b) 拱肩



(c) 拱腰

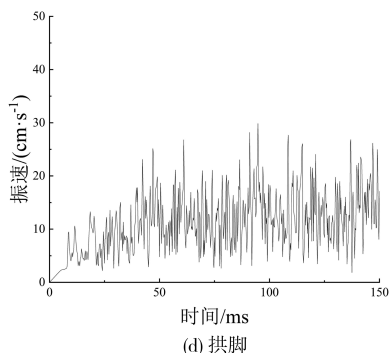


图9 隧道内壁上不同测点的振动速度

Fig.9 Vibration velocity of different measuring points on the inner wall of tunnel

拱肩和拱腰处的峰值振速超过了 GB 6722-2014 爆破安全规程^[13] 中交通隧道的安全允许振速上限 $20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 推测原因: 一是等效爆破荷载计算过程中为便于观测损伤, 部分参数取值偏大, 比如冲击波压力放大系数 n ; 二是模拟中没有考虑锚杆、衬砌等实际施工中的支护与减震措施, 导致峰值振速模拟值比实际值偏大。从模拟结果能看出, 先行隧道临爆侧距爆源最近的拱腰处受到

的振动扰动最明显, 这个结论与文献[14]中根据现场监测结果得到的结论一致。

4 结论

1) 隧道爆破施工过程中, 应力波到达土体边界发生发射容易造成围岩拉裂损伤, 因此隧道洞口附近的开挖爆破应注意洞门处的支护与监测。

2) 隧道左洞的围岩损伤主要集中在拱顶和拱底附近, 损伤深度最大可达 $3 \sim 4 \text{ m}$, 拱肩其次, 拱腰和拱脚处的损伤最轻。在拟开挖的 9 m 隧段中, 因第3段的空区最后形成, 受到损伤累积作用较小, $0 \sim 7 \text{ m}$ 处截面上的损伤程度大于 8 m 和 9 m 处。在拟开挖的 9 m 隧道外, 10 m 和 11 m 截面围岩在拱底附近也产生了明显损伤。

3) 隧道中夹岩峰值振速随着与爆源距离的增加, 测点峰值振速先是下降, 在 $21.6 \sim 24 \text{ m}$ 范围内, 即靠近已形成空区的右洞时, 又发生了上升, 曲线整体呈“U”形, 振速通常和与爆源的距离呈反比, 但岩体中的空区对振速有放大效应。

4) 隧道右洞临爆侧距爆源最近的拱腰处受到的振动扰动最明显, 施工中应重视此处防护。

参考文献:

- [1] 刘闽龙, 陈士海, 孙杰, 等. 浅埋小净距隧道爆破损伤探测及数值模拟分析[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(11): 149-157.
- [2] 蒙国往, 张景龙, 吴波, 等. 循环爆破荷载作用下小净距隧道围岩累积损伤特性研究[J]. 爆破, 2021, 38(4): 52-60, 107.
- [3] 罗阳, 杨建辉, 胡东荣. 小净距隧道围岩的爆破振动影响规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(4): 1309-1313, 1336.
- [4] 于建新, 郭敏, 陈晨, 等. 城市超浅埋小净距隧道爆破振动响应特性研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S1): 272-277.
- [5] 梁琨, 王树欣, 张宪堂, 等. 大跨度小净距隧道爆破振动响应研究[J]. 爆破, 2021, 38(2): 67-72, 159.
- [6] 梁书锋, 凌天龙, 李晨. 高铁长城站小净距隧道爆破振动效应研究[J]. 爆破, 2021, 38(1): 116-123, 139.
- [7] WU XD, GONG M, WU H J, et al. Vibration reduction technology and the mechanisms of surrounding rock damage from blasting in neighborhood tunnels with small clearance[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023, 33(5): 625-637.
- [8] SONG S G, LI S C, LI L P, et al. Model test study on vibration blasting of large cross-section tunnel with small clearance in horizontal stratified surrounding rock[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 92: 103013.
- [9] WANG J X, YIN Y, LUO C W. Johnson-Holmquist-II (JH-2) constitutive model for rock materials: parameter determination and application in tunnel smooth blasting[J]. Applied Sciences, 2018, 8(9): 1675.
- [10] SHIN J H, MOON H G, CHAE S E. Effect of blast-induced vibration on existing tunnels in soft rocks[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(1): 51-61.
- [11] LU W B, YANG J H, YAN P, et al. Dynamic response of rock mass induced by the transient release of in situ stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 53: 129-141.
- [12] JI L, ZHOU C B, LU S W, et al. Numerical studies on the cumulative damage effects and safety criterion of a large cross-section tunnel induced by single and multiple full-scale blasting[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(12): 6393-6411.
- [13] 中国工程爆破协会. 爆破安全规程: GB 6722-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [14] 徐世祥, 韦汉, 于建新, 等. 城市浅埋小净距隧道爆破振动响应及现场监测分析[J]. 科技资讯, 2019, 17(29): 39-42, 45.