

预留核心土法隧道爆破围岩损伤 与振动特性研究

孙雅珍¹, 王龙岩², 王金昌^{3,4}, 何放², 祝奉斌⁵

(1. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;
3. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 4. 浙江大学平衡建筑研究中心, 浙江 杭州 310058;
5. 浙江交工路桥建设有限公司, 浙江 杭州 310058)

摘要 目的 研究预留核心土法爆破开挖影响下的山岭隧道围岩损伤与振动特性, 为爆破参数优化以及隧道加固设计提供理论参考。方法 依托新疆阿克特蒲2号左洞隧道工程, 借助 ANSYS/LSDYNA 软件建立隧道爆破开挖数值模型, 基于现场实际开挖轮廓和振速监测数据验证数值模型的合理性, 进而分析围岩累积损伤特性、振速分布和振速衰减规律。结果 爆破结束后, 隧道轮廓平整, 预留核心土上部损伤严重; 隧道拱顶 y 方向、拱肩 z 方向及拱脚 x 方向的振速最大; 距离掌子面越近, 采用萨道夫斯基经验公式预测的振速结果误差越大。结论 为保证结构稳定性, 在下次爆破施工前可以通过减少掏槽孔、辅助孔的装药量或者调整其孔网参数来减小小爆炸荷载, 沿最大振速方向进行重点加固; 采用萨道夫斯基经验公式预测距离掌子面 10 m 内的振速时, 避免仅用 z 方向距离近似为爆心距大小, 应同时考虑三个方向的距离。

关键词 预留核心土法; 损伤与振动特性; HJC 本构模型; 数值模拟; 现场监测

中图分类号 U45

文献标志码 A

引用格式: 孙雅珍, 王龙岩, 王金昌, 等. 预留核心土法隧道爆破围岩损伤与振动特性研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(5): 904-912. (SUN Yazhen, WANG Longyan, WANG Jinchang, et al. Study on damage and vibration characteristics of surrounding rock under tunnel blasting by reserved core soil method [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2024, 40(5): 904-912.)

Study on Damage and Vibration Characteristics of Surrounding Rock under Tunnel Blasting by Reserved Core Soil Method

SUN Yazhen¹, WANG Longyan², WANG Jinchang^{3,4}, HE Fang², ZHU Fengbin⁵

收稿日期: 2020-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52008269); 浙江交工协同创新联合研究中心项目(ZDJG2021004); 浙江省科技厅项目(2022C03180); 浙江省住房和城乡建设厅科研项目(2022K073, 2022K169)

作者简介: 孙雅珍(1969—), 女, 教授, 博士, 主要从事工程力学、隧道工程和地下工程等方面研究。

(1. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. School of Architecture and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, China, 310058; 4. Center for Balance Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, China, 310058; 5. Zhejiang Jiaogong Road & Bridge Construction Co. Ltd., Hangzhou, China, 310058)

Abstract: The damage and vibration characteristics of mountain tunnel surrounding rock under the influence of reserved core soil blasting method are studied to provide theoretical reference for blasting parameter optimization and tunnel reinforcement design. Based on the left tunnel project of Aktepu No. 2 in Xinjiang, the numerical model of tunnel blasting excavation is established with ANSYS/LSDYNA software. The rationality of the numerical model is verified based on the actual excavation contour and vibration velocity monitoring data, and then the cumulative damage characteristics, vibration velocity distribution and attenuation law of surrounding rock are analyzed. After blasting, the outline of the tunnel is smooth, and the upper part of the reserved core soil is seriously damaged. The vibration velocity of tunnel arch vault in y direction, spandrel in z direction and arch foot in x direction is the largest. The closer the distance to the tunnel face, the greater the error of the vibration velocity predicted by Sadowski's empirical formula. In order to ensure the stability of the structure, before the next blasting construction, the explosive load can be reduced by reducing the cut hole, the auxiliary hole charge or adjusting the hole network parameters, and the emphasis is placed on strengthening along the direction of the maximum vibration velocity. In the application of Sadowski's empirical formula to predict the vibration velocity within 10 m from the tunnel face, it is important to avoid approximating the size of the burst center distance by the distance in the z direction alone. Instead, it is necessary to consider the distances in all three directions simultaneously.

Key words: reserved core soil method; damage and vibration characteristics; HJC constitutive model; numerical simulation; field monitoring

钻爆法是目前山岭隧道施工最常用的一种方法,隧道开挖有全断面法、台阶法、环形开挖预留核心土法等多种方式,一般根据围岩的不同级别和不同工程类别、规模采取不同的开挖方式^[1]。施工过程中,爆破带来的冲击会给隧道保留岩体造成损伤劣化,影响其稳定性,开展爆破荷载作用下围岩的损伤演化及爆破振动特性研究十分必要。金生吉等^[2]采用 FLAC3D 有限元软件对隧道上下台阶爆破开挖过程进行模拟研究,结果表明,隧道两侧的拉应力是导致围岩破坏的主要因素,应采取合理的支护措施可防止围岩发生失稳、坍塌。H. B. Zhao 等^[3]采用现场监测试验和有限元数值模拟相结合的方法研究了采用台阶法开挖时爆破振动速度和振动频率对既有隧洞的影响。L. X. Xie 等^[4]基于自定义本构模型研究了地应力等因素影响下的

隧道爆破开挖损伤演化规律,结果表明,地应力对爆生裂纹存在抑制和导向作用。X. Q. Zhou 等^[5]采用理论结合数值模拟的研究方法,对爆破损伤以定量评价方法进行研究,准确地计算出围岩的爆破破坏规律。周海孝等^[6]以隧道全断面开挖工程为例,采用数值模拟与现场试验相结合的手段,以爆炸能量为指标研究了不同炮孔诱发振动特性差异的内在机理,结果表明,爆破振动强度由内部作用和外部作用共同决定。L. Ji 等^[7]模拟了隧道全断面单次和多次爆破开挖的围岩损伤过程,得出多次爆破条件下围岩振速峰值与现场监测数据更加吻合。陈玉等^[8]依托实际工程采用正交数值试验方法优化了全断面开挖爆破孔网参数,优化后的隧道爆破轮廓更加平整。徐昊等^[9]采用数值模拟的手段分析了预留核心土法隧道爆破开挖对初期支

护结构的影响,结果表明,初期支护结构的动力响应特征相比于采用其他开挖方法有一定区别。

综上所述,笔者研究采用环形开挖预留核心土法进行隧道爆破掘进对围岩振动损伤特性影响,依托新疆那巴公路项目2标段阿克特蒲2号左洞隧道工程,基于现场岩石基本力学参数标定岩石HJC爆炸损伤本构模型参数,利用ANSYS平台,采用等效爆炸荷载法及重启动技术建立隧道爆破开挖数值模型,并与实际的隧道开挖轮廓及爆破振速监测数据进行对比分析,重点分析爆破开挖过程围岩损伤特性及爆破振速衰减规律,以期同为类型隧道爆破开挖的设计与施工提供理论依据。

1 工程概况

阿克特蒲2号隧道左洞长2 318 m,地处天山—兴安地槽褶皱区的天山褶皱系,穿越伊犁地块,岩质总体较破碎。隧道进口段主要为中风化凝灰质砂岩,属于V级围岩。该隧道采用环形开挖预留核心土法进行爆破施工,上台阶断面尺寸及炮孔布置如图1所示。

型 x 、 y 、 z 方向分别取70 m、60 m和65 m。由于隧道断面及炮孔布置具有轴对称的特点,因此只须建立1/2模型,并在对称面施加对称边界。岩石单元类型选取3Dsolid164,采用拉格朗日算法,模型总共包含526 014个单元。为了模拟周边无限深岩体,除上表面以外,在模型的其它面施加无反射边界^[11]。

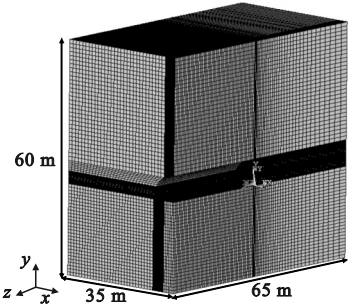


图2 隧道爆破开挖有限元模型
Fig. 2 Finite element modelling of tunnel blast excavation

2.2 等效爆炸荷载确定

环形开挖上台阶爆破段别划分如图3所示。

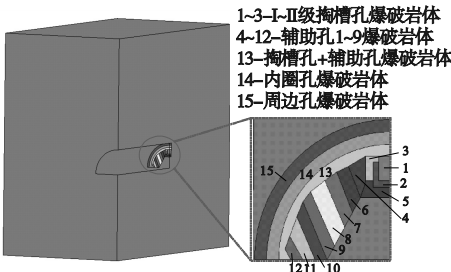


图3 爆破段别划分示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the division of blasting sections

CJ 爆轰理论常被用来确定爆炸荷载的峰值^[12]。在炸药爆炸后,炮孔壁岩体受到的爆炸荷载峰值计算公式^[13-14]为

$$P_{\max} = \frac{\rho_e D_e^2}{2(\gamma + 1)} \left(\frac{d_c}{d_b} \right)^{2\gamma} \left(\frac{l_c}{l_b} \right)^\gamma n. \tag{1}$$

式中: P_{\max} 为炮孔壁岩体受到的爆炸荷载峰值,MPa; ρ_e 为炸药密度, kg/m^3 ; D_e 为炸药爆速, m/s ; γ 为等熵指数,一般取3; d_c 和 d_b 分别为炸药直径和炮孔直径,mm; l_c 和 l_b 分别

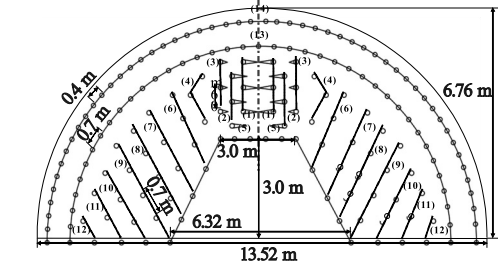


图1 上台阶断面尺寸及炮孔布置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the section dimensions and layout of gun holes on the upper steps

2 数值模型建立

2.1 模型建立

采用ANSYS软件建立隧道有限元模型,如图2所示。由圣维南原理可知,隧道爆破扰动范围大致为3~5倍的洞径^[10],故在模

为装药长度和炮孔的深度, m ; n 为压力增大系数, 一般取 8 ~ 11, 该工程使用乳化炸药, 故取 10^[15-16]。

根据文献[17]的荷载施加方法, 将等效爆炸荷载施加在爆破连心线的轮廓面上, 等效爆炸荷载峰值表示为

$$P'_{\max} = P_{\max} \frac{d_c}{s} \tag{2}$$

式中: P'_{\max} 为等效爆炸荷载的峰值, MPa; s 为相邻炮孔中心间距, mm。

该工程采用 2 # 乳化炸药, 密度为 1 000 kg/m³, 炸药爆速为 3 600 m/s, 炸药直径为 32 mm, 炮孔直径为 40 mm。代入式(2)计算出每段由炮孔中心线组成的轮廓面上的等效爆炸荷载峰值, 结果如表 1 所示。

表 1 各段别等效爆炸荷载

Table 1 Equivalent explosion loads for each section

炮孔类型	起爆顺序	炮孔间距/mm	装药系数/%	等效荷载/MPa
I 级掏槽孔	MS1	600	90	165.1
II 级掏槽孔	MS3	600	90	165.1
III 级掏槽孔	MS5	600	90	165.1
辅助孔 1	MS7	700	85	119.2
辅助孔 2	MS9	700	85	119.2
辅助孔 3	MS11	700	85	119.2
辅助孔 4	MS13	700	85	119.2
辅助孔 5	MS15	700	85	119.2
辅助孔 6	MS17	700	85	119.2
辅助孔 7	MS19	700	85	119.2
辅助孔 8	MS21	700	85	119.2
辅助孔 9	MS23	700	85	119.2
内圈孔	MS25	700	75	81.9
周边孔	MS27	400	60	73.4

爆炸荷载时程曲线采用三角形荷载曲线^[18], 计算较为简便, 同时可以保证精确度:

$$P(t) = \begin{cases} \frac{t}{t_r} P'_{\max}, & 0 \leq t \leq t_r; \\ \frac{t_d - t}{t_d - t_r} P'_{\max}, & t_r < t \leq t_d; \\ 0, & t > t_d. \end{cases} \tag{3}$$

式中: t_r 为爆炸荷载上升到峰值所需时间, s; t_d 为爆炸荷载正压作用时间, s; t_r 和 t_d 分别

取 0.5 ms 和 5 ms^[19-20]。

2.3 岩石 HJC 本构模型参数确定

取现场中风化凝灰质砂岩岩样开展静力学试验。岩石密度 ρ 为 2 300 kg/m³, 抗压强度 f_c 为 60 MPa, 抗拉强度 f_t 为 4 MPa, 弹性模量 E 为 26.2 GPa, 泊松比 ν 为 0.3。为准确描述岩石在高应变率作用下的动态响应特性, 岩石材料选用 HJC 本构模型^[21], 屈服方程为

$$\sigma^* = [A(1 - D) + Bp^*]^N (1 + C \ln \varepsilon^*) \tag{4}$$

式中: σ^* 为标准化等效应力; p^* 为标准化静水压力; ε^* 为无量纲应变率, 即实际应变率与参考应变率的比值; D 为损伤变量; A 、 B 、 N 和 C 为试验后确定的常数, 笔者基于三轴试验及消除静水压力法得到 A 、 B 、 N 和 C 分别为 0.55、1.23、0.89 和 0.009 7^[22]。

HJC 本构模型的损伤方程:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{\varepsilon_{f,p} + \mu_{f,p}} \tag{5}$$

式中: $\Delta \varepsilon_p$ 和 $\Delta \mu_p$ 分别为等效塑性应变和塑性体积应变增量。 $\varepsilon_{f,p} + \mu_{f,p}$ 为断裂时材料的塑性应变(一般不小于材料发生断裂的最小塑性应变 $\varepsilon_{f,min}$, 取 0.01), 其具体计算公式:

$$\varepsilon_{f,p} + \mu_{f,p} = D_1 (p^* + T^*)^{D_2} \tag{6}$$

式中: T^* 为特征化静水拉力; D_1 和 D_2 为损伤参数, 分别取 0.04 和 1.0。

HJC 本构模型状态方程曲线如图 4 所示, 包括弹性阶段、过渡阶段和压密阶段。

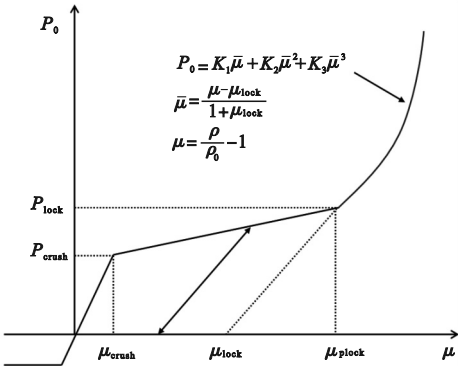


图 4 HJC 本构模型状态方程曲线
Fig. 4 State equation curve of HJC constitutive model

压密阶段的表达式:

$$P_0 = K_1 \bar{\mu} + K_2 \bar{\mu}^2 + K_3 \bar{\mu}^3. \tag{7}$$

式中: P_0 为静水压力; K_1 、 K_2 和 K_3 是状态方程参数; $\bar{\mu} = (\mu - \mu_{\text{lock}})/(1 + \mu_{\text{lock}})$ 为修正后的体积应变; μ_{lock} 为材料压实压力对应的塑性体积应变。

又 Hugoniot 经验公式^[23]:

$$P_0 = C_1^2 \rho_0 \bar{\mu} (\bar{\mu} + 1) / [(1 - S_1) \bar{\mu} + 1]^2. \tag{8}$$

式中: C_1 和 S_1 均为与岩石性质相关的参数。

通过拟合式(8)得到状态方程参数 K_1 、 K_2 和 K_3 分别为 39 GPa、-223 GPa 和 550 GPa。

破碎压力 $P_{\text{crush}} = f_c/3 = 20 \text{ MPa}$;破碎体积应变 $\mu_{\text{crush}} = P_{\text{crush}}/K = 0.001\ 25$,其中 K 为体积模量;岩石为脆性多孔材料,孔隙度 α 取 1.174,压实体积应变 $\mu_{\text{lock}} = \alpha - 1 = 0.174$;压实压力 P_{lock} 取 2 GPa。

2.4 模型验证

该爆破施工采用楔形掏槽方式,理论上岩体损伤最大位置在炮孔孔口及孔底处。这是因为楔形掏槽孔底炮孔间距较近,产生的爆炸荷载更大,更有利于爆破岩体。孔口由于贴近掌子面,压缩波会反射成为拉伸波,加剧岩体的破坏,因此统一提取孔口处围岩断面损伤结果进行分析。

图 5 为数值模拟结果与实际开挖轮廓对比。可以发现,隧道拱肩及拱顶位置爆破轮廓都较为光滑,在一定深度范围内,围岩裂隙发育较好。从模拟结果来看,拱肩及拱顶保留围岩损伤值 D 分别为 0.17 和 0.32,表示裂隙发育较好且无粉碎破坏。同时,核心

土上部破碎严重,模拟结果与实际情况较为吻合,表明围岩损伤数值分析模型是可行的,模拟计算结果是合理的。

3 围岩损伤及振动特性

3.1 围岩损伤特性分析

图 6 为围岩损伤演化历程云图。图 7 为拱顶及拱肩位置的爆破损伤变化曲线。

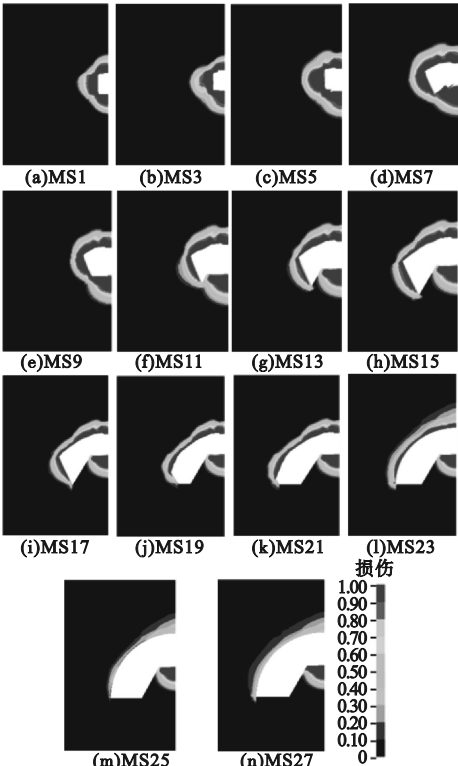


图 6 围岩损伤演化历程

Fig. 6 Damage evolution history of surrounding rock mass

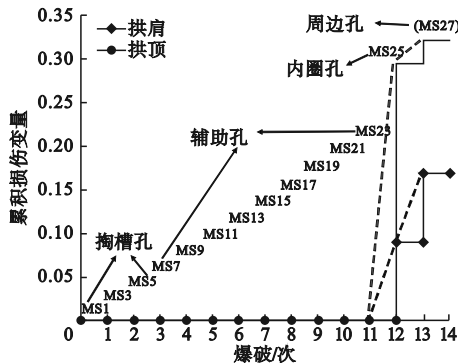


图 7 围岩累积损伤变化曲线

Fig. 7 Cumulative damage change curve of surrounding rock mass

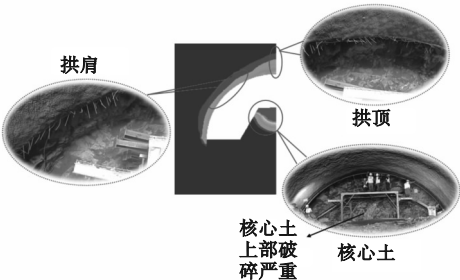


图 5 隧道开挖轮廓对比

Fig. 5 Comparison of tunnel excavation contour

由图6、图7可以发现,围岩的损伤是一个非线性累积过程。MS1至MS5段为掏槽爆破,装药量最大,产生的爆炸荷载也最大,在掏槽孔轮廓线周围出现了较大的损伤,围岩为粉碎性破坏,但对远端的隧道轮廓基本无任何影响。MS7至MS23辅助孔爆破时,炮孔附近围岩损伤继续累积,但周边保留围岩几乎无损伤累积。内圈孔MS25和周边孔MS27炸药起爆后,周边围岩损伤累积量又增大,轮廓面形成。拱顶位置损伤范围最大,并且在拱脚位置产生了应力集中现象。掏槽孔、辅助孔1和辅助孔2炸药爆炸产生的岩石粉碎区域明显大于预开挖区域,并且造成核心土上部出现了大范围的损伤。在实际爆破施工时,可以通过减少掏槽孔、辅助孔1和辅助孔2的装药量或者调整其孔网参数来减小爆炸荷载,进而减小预留核心土的破损程度,以达到结构整体稳定的目的。

3.2 围岩振动特性分析

3.2.1 围岩爆破振速衰减规律

采用三矢量传感器结合TC-4850爆破测振仪采集隧道围岩振动数据。为了分析不同位置处爆破振动速度,在掌子面后方50 m、75 m、100 m、125 m拱顶和拱肩处布置监测点。用 $\theta(0^{\circ}\sim180^{\circ})$ 来表示不同测点位置, θ 为监测点与圆心间连线和 x 轴的夹角,如图8所示。

振动速度峰值如表2所示。监测结果显示,测量值远小于《爆破安全规程》(GB 6722—2014)^[24]规定的振速,保证了施工安全性。

表2 爆破振动速度监测数据

监测点	爆心距/ m	各方向速度峰值/(mm·s ⁻¹)			
		v_x	v_y	v_z	$v_{\text{合}}$
I-拱顶	50	0.40	36.00	32.00	48.20
I-拱肩	50	29.00	33.00	57.00	71.90
II-拱顶	75	0.25	20.00	18.50	27.20
II-拱肩	75	21.00	20.20	36.00	46.30
III-拱顶	100	0.18	15.20	13.20	20.10
III-拱肩	100	13.60	14.90	29.90	36.10
IV-拱顶	125	0.15	13.00	11.80	17.60
IV-拱肩	125	9.80	11.20	26.80	30.70

预测爆破振速常用萨道夫斯基经验公式^[25]为

$$v=H(\sqrt[3]{Q}/R)^{\alpha}.$$
 (9)

式中: v 为爆破振动速度,m/s; H 为场地系数; α 为衰减系数; Q 为最大单段装药量,kg; R 为爆心距,m。

采用萨道夫斯基经验公式对不同位置爆破振动速度进行回归分析,拟合结果如表3所示,可以看出,拟合优度较高。

表3 爆破振动速度回归分析结果

Table 3 Results of regression analysis of blasting vibration velocity			
位置	方向	拟合公式	拟合优度
拱顶	x	$v=17.61(\sqrt[3]{Q}/R)^{1.11}$	0.997
	y	$v=2\,223.45(\sqrt[3]{Q}/R)^{1.22}$	0.977
	z	$v=1\,885.23(\sqrt[3]{Q}/R)^{1.20}$	0.982
	合	$v=2\,925.11(\sqrt[3]{Q}/R)^{1.21}$	0.979
拱肩	x	$v=1\,195.23(\sqrt[3]{Q}/R)^{1.09}$	0.961
	y	$v=1\,768.80(\sqrt[3]{Q}/R)^{1.17}$	0.999
	z	$v=1\,165.20(\sqrt[3]{Q}/R)^{0.89}$	0.961
	合	$v=1\,936.99(\sqrt[3]{Q}/R)^{0.97}$	0.992

图9为不同观测位置三个方向以及合速度拟合曲线。综合表3和图9可以看出,拱顶位置 v_y 大于 v_z 和 v_x ,拱顶位置以 y 方向

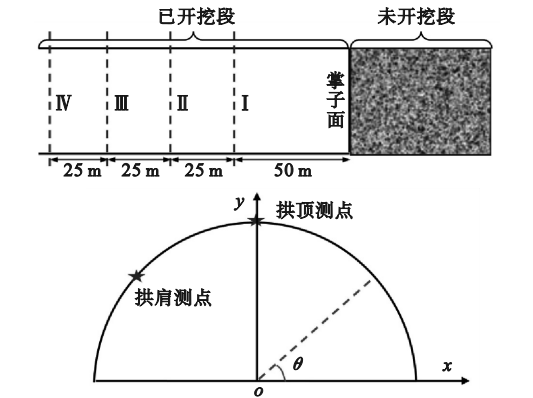


图8 爆破振动监测点布置

Fig.8 Blasting vibration monitoring point layout

不同爆心距下拱顶及拱肩位置三向爆破

振速为主;拱肩位置 v_z 最大, v_y 与 v_x 十分接近;拱顶位置 y 方向的振速衰减程度大于 z 方向和 x 方向,与振速大小规律一致。拱肩

位置振速衰减规律与拱顶一致。拱肩位置合振速大于拱顶,但是拱顶合振速衰减速度大于拱肩。

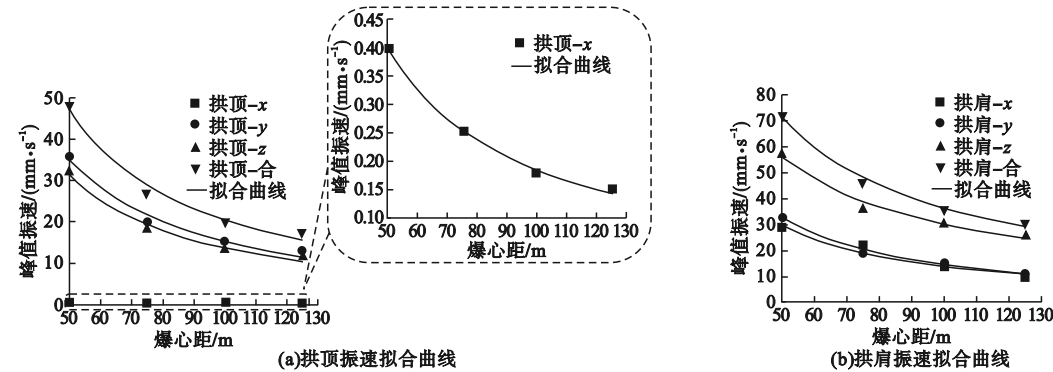


图9 振速拟合曲线

Fig.9 Vibration velocity fitting curves

3.2.2 隧道断面振速分布特性

表4为利用萨道夫斯基经验公式得出的隧道已开挖段距掌子面10 m、20 m和30 m处的拱顶和拱肩位置的爆破振动速度计算值与模拟结果对比。可以发现,理论计算值和数值模拟结果整体大致吻合。拱顶和拱肩位置理论与模拟结果误差随着与掌子面距离的增大逐渐减小,监测爆心距为10 m时,拱顶位置爆破振速最大误差达到21.64%,拱肩位置最大误差达到28.5%,均超过20%,误

差较大。究其原因,萨道夫斯基经验公式是与炸药量和爆心距相关的函数式,在计算时一般将监测点与掌子面的垂直距离(z 向)近似看作爆心距,但当距离掌子面较近时, x 与 y 方向距离不可忽略,否则,计算结果会存在较大的误差。所以,采用萨道夫斯基经验公式预测爆心距10 m范围之内测点振速时,应同时考虑三个方向的距离,避免对爆心距做简单近似处理。

表4 不同位置振动速度的理论结果与模拟结果对比

Table 4 Comparison of theoretical results and simulation results of vibration velocity at different positions													
观测位置		$v_x/(mm \cdot s^{-1})$		误差/ %	$v_y/(mm \cdot s^{-1})$		误差/ %	$v_z/(mm \cdot s^{-1})$		误差/ %	$v_{\text{合}}/(mm \cdot s^{-1})$		误差/ %
位 爆 置 距/m	理论	模拟	理论		模拟	理论		模拟	理论		模拟		
拱顶	10	2.50	2.12	15.20	251.40	197.00	21.64	219.50	178.00	18.91	333.70	265.50	20.44
	20	1.10	1.01	8.18	108.10	117.00	8.23	95.50	107.00	12.04	144.20	158.60	9.99
	30	0.70	0.74	5.71	65.90	69.00	4.70	58.70	61.80	5.28	88.30	92.60	4.87
拱肩	10	179.00	139.00	17.20	216.80	155.00	28.50	247.20	195.00	21.12	374.60	285.30	23.84
	20	83.80	90.90	8.47	96.40	104.00	7.88	131.60	121.00	8.05	183.30	183.60	0.16
	30	53.60	49.20	8.21	59.90	58.50	2.34	91.00	90.10	0.99	121.40	118.20	2.64

图10为爆心距10 m、20 m及30 m处的峰值振速分布曲线。掌子面爆破时已开挖段不同位置爆破峰值振速各方向分量大小与角 θ 具有很强的相关性。 v_x 随着 θ 的增大先减

小后增大,拱脚位置最大。 v_y 随着 θ 增大先增大再减小,当 θ 接近 45° 和 135° 时(拱肩位置) v_z 最大。通过上述分析可知,为了保证结构的稳定性,在下次爆破施工前需要对已

开挖段隧道拱顶 y 方向、拱肩 z 方向以及拱脚 x 方向做重点加固处理。

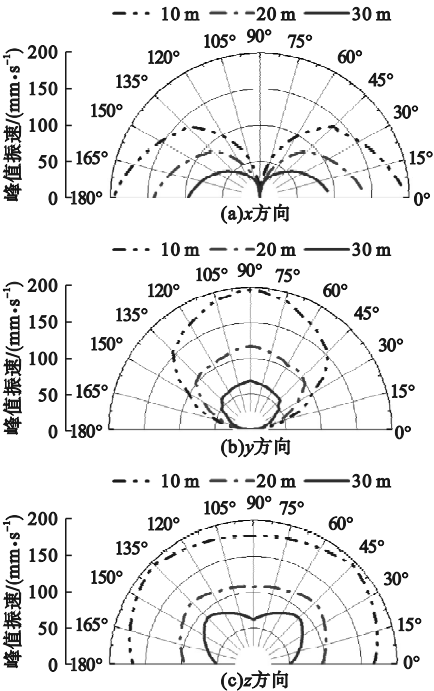


图 10 已开挖段峰值振速分布图

Fig. 10 Peak vibration velocity distribution diagram of excavated section

4 结 论

- (1) 围岩的损伤是在不同炮孔爆破作用下的累积形成的,非线性的;可以通过减少掏槽孔、辅助孔装药量或者调整其孔网参数来减小爆炸荷载,减小预留核心土的破损,有利整体结构稳定。
- (2) 距离掌子面越近,用萨道夫斯基经验公式预测结果误差越大;小于 10 m 时,避免仅用 z 方向距离近似为爆心距大小,应同时考虑三个方向的距离。
- (3) 隧道已开挖段围岩峰值振速与 θ 角具有很强的相关性,隧道拱顶 y 方向、拱肩 z 方向及拱脚 x 方向的振速最大,在下次爆破施工前须做重点加固处理。

参考文献

[1] 马伟斌. 铁路山岭隧道钻爆法关键技术发展及展望[J]. 铁道学报,2022,44(3):64-85.

(MA Weibin. Development and prospect of key technology of drilling and blasting for railway mountain tunnels [J]. Journal of the China railway society,2022,44(3):64-85.)

[2] 金生吉,李宁,芮勇勤,等. 隧洞开挖过程中爆破振动力学特性研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2012,28(1):66-71.
(JIN Shengji, LI Ning, RUI Yongqin, et al. Research on mechanical characteristics of blasting vibration during tunnel excavation [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012,28(1):66-71.)

[3] ZHAO H B, LONG Y, LI X H, et al. Experimental and numerical investigation of the effect of blast-induced vibration from adjacent tunnel on existing tunnel [J]. Ksce journal of civil engineering,2016,20(1):431-439.

[4] XIE L X, LU W B, ZHANG Q B, et al. Damage evolution mechanisms of rock in deep tunnels induced by cut blasting [J]. Tunnelling & underground space technology,2016,58(9):257-270.

[5] ZHOU X Q, YE J B, CHEN F, et al. Calculation of damage caused by blasting vibration on surrounding rocks of water-conveyance tunnel across the yellow river [J]. IOP conference series: earth and environmental science,2021,632(2):1-17.

[6] 周海孝,高启栋,王亚琼,等. 隧洞全断面开挖中不同爆破孔作用边界及其诱发振动特性的比较分析[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(4):785-797.
(ZHOU Haixiao, GAO Qidong, WANG Yaqiong, et al. Comparative analysis of vibration characteristics induced by different kinds of boreholes and their blasting boundaries during full-face tunnel blasting excavation [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2022,41(4):785-797.)

[7] 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):1-19.

[8] 陈玉,黄国栋,马龙浩,等. 砂岩隧道全断面光面爆破一次成形技术研究[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(增刊1):283-290.
(CHEN Yu, HUANG Guodong, MA Longhao, et al. Study on one-time forming technology of full-face smooth blasting in sandstone tunnel [J]. Chinese journal of underground space and engineering,2021,17(S1):283-290.)

[9] 徐昊,何如,李栋伟,等. 预留核心土法爆破开挖下隧道初期支护动力响应特性[J]. 爆破,2024,41(1):37-43.
(XU Hao, HE Ru, LI Dongwei, et al. Dynamic response characteristics of tunnel primary support under blasting excavation with reserved core soil method [J]. Blasting, 2024,41(1):37-43.)

[10] 曹峰,凌同华,李洁,等. 循环爆破荷载作用下

- 小净距隧道中夹岩的累积损伤特征分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(23): 141–148.
(CAO Feng, LING Tonghua, LI Jie, et al. Cumulative damage feature analysis for shared rock in a neighborhood tunnel under cyclic explosion loading [J]. Journal of vibration and shock, 2018, 37(23): 141–148.)
- [11] 王军祥, 赵梦梦, 陈四利, 等. 爆破荷载作用下大断面隧道围岩累积损伤特性[J/OL]. 沈阳工业大学学报, 2023; 1–10.
(WANG Junxiang, ZHAO Mengmeng, CHEN Sili, et al. Cumulative damage characteristics of large section tunnel surrounding rock under blasting load [J/OL]. Journal of Shenyang university of technology, 2023; 1–10.)
- [12] 戴俊. 柱状装药爆破的岩石压碎圈与裂隙圈计算[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2001, 20(2): 144–147.
(DAI Jun. Calculation of radii of the broken and cracked areas in rock by a long charge explosion [J]. Journal of Liaoning technical university (natural science edition), 2001, 20(2): 144–147.)
- [13] JI L, ZHOU C B, LU S W, et al. Modeling study of cumulative damage effects and safety criterion of surrounding rock under multiple full-face blasting of a large cross-section tunnel [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2021, 147: 104882.
- [14] 罗笙, 严鹏, 卢文波, 等. 深埋隧洞开挖爆破损伤数值模拟及损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程报, 2021, 40(增刊1): 2760–2772.
(LUO Sheng, YAN Peng, LU Wenbo, et al. Research on the simulation of blasting damage and its mechanism of deep tunnel excavation [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2021, 40(S1): 2760–2772.)
- [15] 孟祥林, 汪洋, 高进, 等. 等效荷载法在超大断面公路隧道爆破数值计算中的适用性[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(31): 13582–13591.
(MENG Xianglin, WANG Yang, GAO Jin, et al. Applicability of equivalent load method in numerical calculation of blasting of super large section highway tunnel [J]. Science technology and engineering, 2023, 23(31): 13582–13591.)
- [16] 王蒙, 刘殿书, 陆欣雨, 等. 大断面高堂隧道爆破近区围岩损伤研究[J]. 北京理工大学学报, 2024, 44(6): 597–605.
(WANG Meng, LIU Dianshu, LU Xinyu, et al. Blasting damage of large section tunnel to surrounding rock in near area [J]. Journal of Beijing institute of technology, 2024, 44(6): 597–605.)
- [17] 凌天龙. 长城站开挖围岩爆破损伤与累积效应研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2019.
(LING Tianlong. Study on blasting damage and cumulative effect of surrounding rock in excavation of Great Wall Station [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2019.)
- [18] 关振长, 朱凌枫, 俞伯林. 隧道掘进排孔爆破的精细化数值模拟[J]. 振动与冲击, 2021, 40(11): 154–162.
(GUAN Zhenchang, ZHU Lingfeng, YU Bolin. Fine numerical simulation of row-hole blasting in tunnel excavation [J]. Journal of vibration and shock, 2021, 40(11): 154–162.)
- [19] 杨建华. 深部岩体开挖爆破与瞬态卸荷耦合作用效应[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
(YANG Jianhua. Coupling effect of blasting and transient release of in-situ stress during deep rock mass excavation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.)
- [20] 王文龙. 钻眼爆破[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
(WANG Wenlong. Drilling and blasting method [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984.)
- [21] WAN W Z, YANG J, XU G J, et al. Determination and evaluation of Holmquist-Johnson-Cook constitutive model parameters for ultra-high-performance concrete with steel fibers [J]. International journal of impact engineering, 2021, 156: 103966.
- [22] 方秦, 孔祥振, 吴昊, 等. 岩石 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数的确定方法[J]. 工程力学, 2014, 31(3): 197–204.
(FANG Qin, KONG Xiangzhen, WU Hao, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook constitutive model parameters of rock [J]. Engineering mechanics, 2014, 31(3): 197–204.)
- [23] 叶序双. 爆炸力学基础[M]. 南京: 工程兵工程学院, 2004.
(YE Xushuang. Basis of dynamic explosion [M]. Nanjing: Engineering Institute of Engineeringcorps, 2004.)
- [24] 中华人民共和国国家安全生产监督管理总局. 爆破安全规程: GB6722—2014 [S]. 北京: 中国标准出版, 2014.
(State Administration of Work Safety of the People's Republic of China. Safety regulations for blasting: GB6722—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.)
- [25] 唐先习, 张春洋, 王要武, 等. 爆破振动下隧道初支混凝土振速衰减规律[J]. 工程爆破, 2022, 28(6): 42–50.
(TANG Xianxi, ZHANG Chunxiang, WANG Yaowu, et al. Vibration velocity attenuation law of initial support concrete in tunnel under blasting vibration [J]. Engineering blasting, 2022, 28(6): 42–50.)
- (责任编辑: 王国业 英文审校: 刘永军)