

DOI: 10.7672/sgjs2026010088

新建隧道爆破施工诱发邻近既有隧道振动响应研究*

杨璐瑶

(中铁十八局集团第三工程有限公司,河北 涿州 072750)

[摘要] 爆破施工极易诱发邻近建筑结构振动。以莲花山隧道扩建工程为依托,针对新建隧道爆破施工诱发邻近既有隧道振动响应问题,采用 FLAC3D 建立三维数值模型,研究爆破荷载作用下既有隧道拱顶与拱脚的振动响应及沉降特性。结果表明:爆破振动速度分布经历了“局部集中、外扩扩散、均匀衰减”的演化规律,约在 0.041 7s 达到峰值,至 1.0s 基本稳定;拱顶振动速度峰值普遍高于拱脚,呈现先增大后减小的空间分布特征,且受左右线洞口机械开挖长度差异的影响存在一定差异性。数值模拟结果显示,既有隧道拱顶与拱脚的最大振动速度分别为 12.23, 9.15, 7.30, 6.79cm/s, 均低于交通隧道安全限值的 15cm/s;拱顶与拱脚最大沉降值分别为 -22.47, -22.30, -22.85, -22.65mm, 均小于 30mm 的警戒值。研究表明,所采用的爆破施工方案及参数设置合理,对既有隧道结构安全影响较小,具有较好的可行性与安全性。

[关键词] 隧道;爆破;数值模拟;振动响应;沉降

[中图分类号] U453.5

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)01-0088-05

Research on Vibration Response of Adjacent Existing Tunnels Induced by Blasting During Construction of a New Tunnel

YANG Luyao

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

Abstract: Blasting construction is prone to inducing vibration of adjacent building structures. Based on the expansion project of the Lianhuashan Tunnel, aiming at the problem of vibration response of the adjacent existing tunnel induced by blasting construction of a newly built tunnel, a three-dimensional numerical model is established by FLAC3D to study the vibration response and settlement characteristics of the existing tunnel vault and arch foot under blasting load. The results indicate that the distribution of blasting vibration velocity has experienced the evolution law of “local concentration, external diffusion, and uniform attenuation,” reaching the peak at about 0.041 7s and basically stable at 1.0s. The peak vibration velocity of the vault is generally higher than that of the arch foot, showing the spatial distribution characteristics of increasing first and then decreasing. And there are some differences due to the difference in the mechanical excavation length of the left and right lines. The numerical simulation results indicate that the maximum vibration velocities of the vault and the arch foot of the existing tunnel are 12.23, 9.15, 7.30, and 6.79cm/s, respectively, which are lower than the safety limit of the traffic tunnel of 15cm/s. The maximum settlement values of vault and arch foot are -22.47, -22.30, -22.85, and -22.65mm, respectively, which are less than the warning value of 30mm. The research indicates that the blasting construction scheme and parameter setting are reasonable, which has little influence on the safety of the existing tunnel structure and has good feasibility and safety.

Keywords: tunnels; blasting; simulations; vibration response; settlement

0 引言

在现代城市建设中,地下空间资源的开发利用愈加频繁,地铁、城市快速路以及综合管廊等工程不断延伸和叠加,隧道线路相互邻近的情况已难以

* 中铁十八局集团有限公司 2024 年度科研创新项目(2024-031)

[作者简介] 杨璐瑶,助理工程师,E-mail:3423390300@qq.com

[收稿日期] 2025-05-26

避免。这种复杂环境下,保障既有隧道结构的安全成为地下工程设计与施工中必须面对的核心问题。当采用爆破开挖这一常见且高效的方式时,爆破产生的瞬态冲击荷载和传播波动可能引起邻近既有隧道的结构振动和附加应力,轻则导致衬砌开裂、渗漏,重则可能引发结构损伤甚至破坏,进而带来严重的运营安全隐患和经济损失。因此,研究爆破施工条件下新建隧道对邻近既有隧道的振动响应影响规律,对于优化施工方案、保障既有隧道结构安全、提高地下空间开发利用效率,具有重要的理论研究价值和广泛的工程意义。

目前对于爆破施工产生的振动诱发环境响应研究较多采用现场实测^[1-2]和数值模拟^[3-4]以及算法预测^[5-7]的方法。在现场实测方面,张桂清等^[1]采用 Blast-UM 型爆破测振仪对既有隧道边墙衬砌进行振速采集;在数值模拟方面,伍海龙等^[8]利用 FLAC3D 软件建立数值模型,模拟隧道爆破开挖对既有隧道的安全影响;在算法预测方面,王晗等^[5]采用灰色综合关联度理论识别了影响爆破振动速度的 7 个重要因素,通过麻雀搜索算法(SSA)改进 Elman 神经网络的方法建立了爆破振动速度预测模型。

在复杂空间环境下,隧道爆破施工引起的振动必然会对周边环境造成不同程度的影响,本文结合莲花山隧道扩建工程施工案例,利用 FLAC3D 软件建立隧道爆破振动三维数值模型,结合现场工程概况对新建隧道爆破施工诱发邻近既有隧道振动响应进行研究。

1 工程概况

1.1 线路情况

深圳至岑溪高速公路江门龙湾至共和段改扩建工程为原江鹤高速一期工程,东起江门市区龙湾,与深圳至岑溪高速公路中山新隆至江门龙湾段对接,项目路线全长 18.725km,其中,莲花山隧道扩建为该项目的 TJ01 标段的分项工程,TJ01 标起终点桩号为 K95+960—K101+050,标段路线长 5.09km。

在既有莲花山隧道左右侧净距 18.15~25.48m 处,各新建 1 座单洞四车道隧道,隧道左线进口里程为 ZZK97+808,出口里程为 ZZK98+280,左线隧道长 472m,其中进口明洞长 10m,出口明洞长 10m;隧道右线进口里程为 YYK97+810,出口里程为 YYK98+156,右线隧道长 346m,其中进口明洞长 20m,出口明洞长 20m。新建莲花山隧道出口周围环境如图 1 所示,新建隧道左右线具体情况如表 1

所示。



图 1 隧道出口周围环境

Fig. 1 Surrounding environment of tunnel exit

表 1 新建隧道左右线具体情况

Table 1 Details of the left and right lines of the newly constructed tunnel

隧道名称		起始里程	终止里程	隧道长度/m
新建莲花山隧道	左线	ZZK97+808	ZZK98+280	472
	右线	YYK97+810	YYK98+156	346
既有莲花山隧道		K97+823.54	K98+223.54	400

1.2 地质情况

主要穿越土层可分为 4 层,主要包括粉质黏土、全风化花岗岩、中风化花岗岩、微风化花岗岩,相应岩土层参数如表 2 所示。其中隧道穿越地层以中风化花岗岩为主,青灰色,少量黄褐色,中粒花岗结构,块状构造,节理裂隙发育,见高倾角节理,裂隙面铁锰质侵染严重,岩芯较破碎,呈短柱状、碎块状,节长 $\geq 10\text{cm}$ 的岩芯约占 50%,岩质较硬、较新鲜。

表 2 相应岩土层参数

Table 2 Parameters of corresponding geotechnical layers

岩土名称	土层厚度/m	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/ $(^\circ)$
粉质黏土	0~2.0	1 800	0.03	0.35	20
全风化花岗岩	2.0~6.0	2 100	0.08	0.30	30
中风化花岗岩	6.0~32.0	2 600	5.00	0.30	36
微风化花岗岩	32.0~72.1	2 700	15.00	0.25	38

1.3 施工方案

新建莲花山隧道工程采取左右线双向同时掘进的施工方式。在隧道进、出口洞口工程完成后,包括边仰坡支护、护拱、套拱及管棚等采取必要的防护措施,确保洞口段结构安全与稳定。随后,左线隧道首先采用机械方式向洞内开挖约 10m,而右线隧道则采用相同工艺开挖约 20m,为后续爆破作业创造施工条件。机械开挖完成后,施工人员利用

工字钢拼装台车顶撑洞口,并在洞口设置防护门、棉帘等多重安全措施,以有效阻挡可能产生的爆破飞石,降低施工风险。在上述准备工作完成并形成安全屏障后,方可开展后续爆破施工。

2 隧道施工数值模型

2.1 计算模型建立

以莲花山隧道扩建工程为背景,根据拟建隧道与既有莲花山隧道的相对位置关系,采用 FLAC3D 软件建立隧道三维数值模型,针对爆破施工产生的振动诱发邻近既有隧道振动响应开展数值模拟分析,建立的数值模型如图 2 所示。

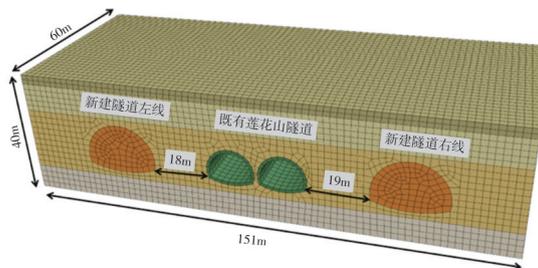


图 2 数值模拟计算模型

Fig. 2 Numerical simulation model

依托现场工程概况,考虑到模型的边界效应,本文建立 1 个长 151m、高 40m、厚 60m 的三维数值模型,建筑物和隧道两侧均有盈余,盈余距离为 20m。根据新建隧道左右线与既有莲花山隧道的相对位置关系,新建左线隧道距既有隧道左线距离为 18m,新建右线隧道距既有隧道右线距离为 19m。网格划分时对隧道部分、既有隧道衬砌处均进行加密处理。模型四周及底部均设置为固定约束。数值模型采用 Rayleigh 定义的黏性比例阻尼 ($C = \alpha M + \beta K$),为了避免边界效应对模型计算结果产生影响,将模型四周及底部设置为安静边界条件。

依托现场地层工况,模型地层设置为 4 层,将土层模型设置为莫尔-库伦模型 (Mohr-Coulomb),地层参数设置如表 2 所示。衬砌管片为 C50 混凝土,设置为弹性模型,根据设计文件其他参数取值如表 3 所示。

表 3 模型结构参数

Table 3 Parameters of model structure

结构名称	材料	本构模型	体积模量/ MPa	剪切模量/ MPa	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
衬砌	C50	弹性模型	2.08×10^4	1.26×10^4	2400

2.2 监测点布置

从隧道模型的前界面至隧道的后界面,左右线隧道拱顶和拱脚处每隔 5m 设置 1 个监测点,共布

置 4 组,每组 11 个监测点,整个模型共布置 44 个监测点,其中,第 1 个监测点布置在距离模型边界 5m 的位置处,用来监测新建隧道在爆破施工过程中对其安全使用的影响。模型监测点布置如图 3 所示。

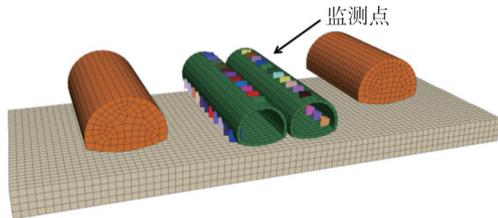


图 3 监测点布置

Fig. 3 Layout of monitoring points

2.3 爆破荷载

炸药爆炸作用时间非常短,通常认为炸药爆破时冲击波作用的持续时间约 $1.0 \times 10^{-6} \sim 0.1 \text{ s}$,爆轰气体压力作用时间约为 $1.0 \times 10^{-3} \sim 0.1 \text{ s}$ 。根据相关文献^[9-10],隧道在爆破过程中的爆破荷载可简化为具有上升阶段和下降阶段的三角形线性荷载。根据隧道爆破荷载的加载时间公式,可确定本次隧道爆破过程中的荷载总时间。爆破荷载加载的上升阶段荷载时间为 0.01s,总的荷载时间为 0.06s,爆破荷载的最大值为 25.9MPa,荷载曲线如图 4 所示。

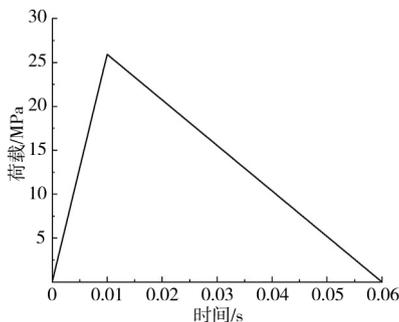


图 4 爆破荷载加载曲线

Fig. 4 Blast loading curve

2.4 模拟爆破开挖过程

模拟过程主要通过以下 3 个步骤展开分析:①用重力应力场作为初始应力场进行初始应力平衡计算;②开挖新建隧道洞口,将开挖的隧道洞口机械开挖部分设置空模型,利用莫尔-库伦准则描述岩土体的应力应变关系,进行静力计算分析;③在开挖的隧道洞室壁施加爆破荷载,计算分析邻近已建隧道拱顶和拱脚处的速度以及沉降位移等变化规律。初始地应力平衡如图 5 所示,展示了模型前界面竖向位移情况。机械开挖洞口后的模型如图 6 所示,依托实际工程概况,新建隧道左线施加爆破荷载位置距离前界面 10m,新建隧道右线施加爆破

荷载位置距离前界面 20m。

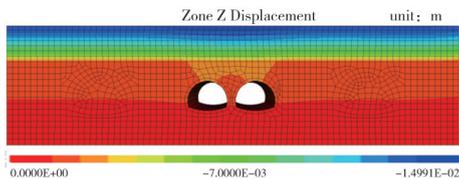


图 5 初始地应力平衡

Fig. 5 Initial geostress equilibrium

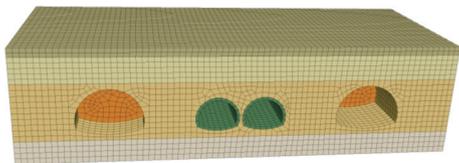


图 6 机械开挖洞口后的模型

Fig. 6 Model after mechanical excavation of the tunnel entrance

3 模拟计算结果分析

3.1 爆炸速度云图分析

为了更加直观地展示爆破时振动速度的传播规律,爆炸后 0.01, 0.06, 0.1, 1.0s 时的模型速度分布云图如图 7 所示。

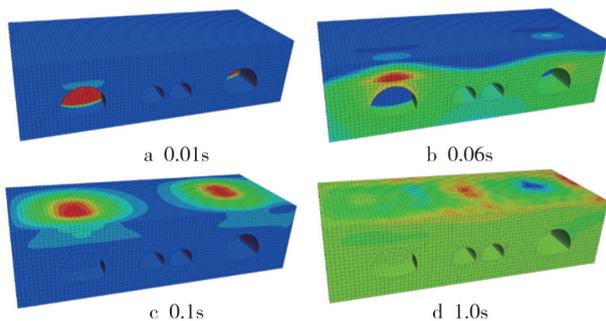


图 7 爆破后模型速度分布云图

Fig. 7 Velocity distribution cloud map of the model after blasting

分析图 7 可知,模型在爆炸后的速度分布演化过程呈现出明显的时序性和阶段性,显示了模型在爆炸后不同时刻的速度分布演化过程。在 0.01s 时,爆炸荷载此时处于峰值 25.9MPa,速度云图显示速度区域主要集中于爆炸中心,高速区局部明显,而整体结构内部尚未出现大范围的速度响应。此时振动速度主要分布在爆破面一带,表现为能量集中释放的初始特征,反映出爆炸荷载作用下的瞬时冲击效应。在 0.01~0.06s,速度分布逐渐扩散并向模型前界面传递,在前界面位置已经能够观察到较为明显的速度响应。但此时地表区域尚未受到强烈影响,速度值较低。随着时间的推移(0.06~0.1s),速度区域逐渐由爆破区向外扩展。计算时间

为 1.0s 时,振动速度发生显著衰减,高速区域几乎消失,模型各部分运动趋于稳定,速度分布较为均匀,表明爆炸能量已基本耗散。整体来看,模型速度分布呈现由局部集中、整体扩散到衰减均匀的演变规律。

3.2 既有莲花山隧道拱顶拱脚振动速度

在隧道爆破施工前,左、右线隧道洞口由机械开挖 10m 和 20m 的距离,取既有隧道左右线拱顶拱脚处分别距离前界面 10m 和 20m 处的监测点绘制了典型监测点的速度时程曲线,如图 8 所示。

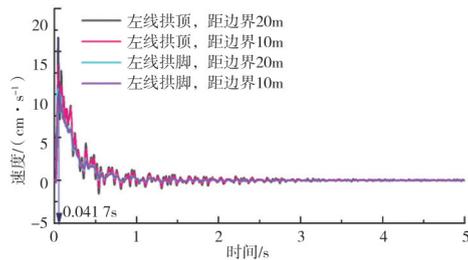


图 8 典型监测点振动速度时程曲线

Fig. 8 Time history curve of vibration velocity at a typical monitoring point

分析图 8 可知,在隧道爆破后 0.0417s 左右振动速度达到峰值,在 1.0s 左右速度值趋于稳定。隧道拱顶位置处的振动速度峰值高于拱脚位置处,表明爆破产生的主振动能量在极短时间内传递并到达监测点,形成明显的瞬态冲击,由于围岩与隧道结构的阻尼和散射作用振动能量被耗散或反射,速度逐步减小并稳定。

既有隧道左右线拱顶拱脚处不同监测点振动速度峰值如图 9 所示,监测点 1 处于距离前界面 5m 位置处,监测点 11 处于距离后界面 5m 位置处,每 2 个监测点之间的距离为 5m,均匀分布。

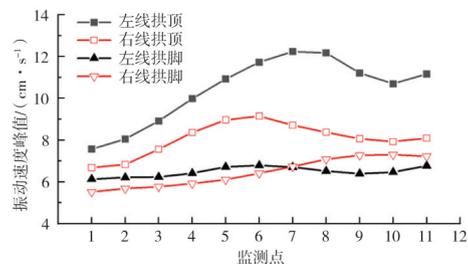


图 9 不同监测点振动速度峰值

Fig. 9 Peak vibration velocity at different monitoring points

由图 9 可以看出,左右线隧道全部监测点处拱顶振动速度峰值高于拱脚速度峰值,表明拱顶为动力响应敏感区,对爆炸冲击的响应更为显著,应作为重点巡视与加密监测的位置。从空间分布规律

来看,左右线隧道的振动速度峰值呈现出先增加后减小的趋势。在具体监测点上,邻近既有隧道的左线拱脚和拱顶监测点的峰值分别出现在监测点7和6,而右线拱脚和拱顶的峰值分别出现在监测点6和10。造成这种差异的主要原因是新建隧道洞口的机械开挖长度不同:左线隧道洞口机械开挖长度为10m,而右线隧道为20m。因此,施加爆破荷载的位置存在差异,使得振动波在不同监测点的传播路径和能量分布不同,从而形成左右线隧道峰值出现位置的差异性。

本次隧道爆破施加的爆破荷载(25.9MPa)引起的邻近既有隧道左线拱脚和拱顶监测点、右线拱脚和拱顶监测点最大振动速度分别为12.23,9.15,7.30,6.79cm/s,均小于GB 6722—2014《爆破安全规程》规定的交通隧道安全振动速度15cm/s的标准值,说明本次新建隧道爆破施工对邻近已建隧道的影响较小,可以认为本次隧道爆破方案可行、爆破参数合理。

3.3 既有隧道拱顶拱脚沉降位移

判断隧道安全风险的另一重要依据是拱顶和拱脚的沉降量是否超过相关规范规定的警戒值。在本研究的数值模拟分析中,对邻近既有隧道的拱顶和拱脚沉降进行了跟踪记录,其沉降随时间的变化规律如图10所示。

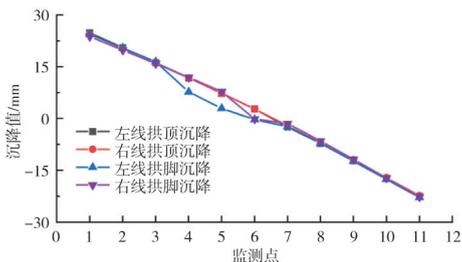


图10 同一根桩基不同监测点振动响应

Fig. 10 Vibration response at different monitoring points on the same pile foundation

由图10可知,在新建隧道进行爆破施工过程中,左右线隧道的拱顶与拱脚监测点均经历了由隆起变形向沉降变形的转变。这一转变主要发生在6~7号监测点之间。邻近既有隧道的左线拱脚和拱顶监测点的最大沉降分别为-22.47mm和-22.30mm,右线拱脚和拱顶监测点的最大沉降分别为-22.85mm和-22.65mm。整体而言,4个关键监测点的最大沉降值差异较小,表明隧道左右线的沉降响应较为一致,且均小于规范规定的警戒值30mm,表明结构整体稳定性良好,爆破施工方案具有可行性与安全性。

4 结语

本研究通过数值模拟对新建隧道爆破施工过程中邻近既有隧道的动力响应和沉降特性进行了系统分析。在分析隧道速度场演化、振动峰值分布及沉降变化规律的基础上,可以得出以下主要结论。

1) 爆破后模型速度分布呈现由局部集中、向外扩散、衰减均匀的演化规律;爆破瞬间(0.01s)速度集中于爆心,高速区局部明显,0.06~0.1s逐渐向外扩展,1.0s时振动速度显著衰减,模型运动趋于稳定。

2) 爆破后约0.0417s振动速度达到峰值,至约1.0s基本稳定。拱顶振动速度峰值高于拱脚,表明拱顶为动力响应敏感区。从空间分布看,振动速度峰值呈先增加后减小的趋势,且由于左右线洞口机械开挖长度不同,导致两线隧道存在差异性。

3) 爆破荷载峰值取25.9MPa时,邻近既有隧道左线拱脚、拱顶,右线拱脚、拱顶的最大振动速度分别为12.23,9.15,7.30,6.79cm/s,均小于《爆破安全规程》规定的交通隧道安全限值15cm/s,说明本次爆破对既有隧道的动力影响较小,爆破方案可行,参数合理。

4) 爆破施工过程中,隧道拱顶、拱脚沉降由隆起转为沉降,最大沉降值分别为-22.47,-22.30,-22.85,-22.65mm,整体差异不大,且均小于警戒值30mm,进一步验证了爆破施工的安全可行性。

参考文献:

- [1] 张桂清,杨秀竹,雷金山,等.爆破荷载作用下邻近运营隧道衬砌安全性影响分析[J].施工技术(中英文),2025,54(1):39-45.
ZHANG G Q, YANG X Z, LEI J S, et al. Study on safety analysis of adjacent operation tunnel under blasting load[J]. Construction technology, 2025, 54(1): 39-45.
- [2] 王正庆,郭运华,王明明,等.上软下硬复合地层大断面隧道爆破施工的安全控制分析[J].施工技术(中英文),2025,54(11):14-18.
WANG Z Q, GUO Y H, WANG M M, et al. Blasting safety control of large section tunnel in upper soft and lower hard composite strata[J]. Construction technology, 2025, 54(11): 14-18.
- [3] 肖欣欣,李夕兵,官凤强.隧道开挖及爆破对地表高压铁塔影响的FLAC3D分析[J].地下空间与工程学报,2013,9(6):1401-1405.
XIAO X X, LI X B, GONG F Q. Analysis of tunnel excavation and explosion influence on high voltage tower with FLAC3D[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2013, 9(6): 1401-1405.

- 换时机研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(13): 106-113.
- HE Y C, LI A, ZHOU P, et al. Research on conversion time of construction method in upper-soft and lower-hard stratum in super-large section tunnel[J]. Construction technology, 2025, 54(13): 106-113.
- [2] 楼慧元. 特大断面隧道工程微扰动爆破对初支混凝土喷层扰动效应研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(10): 56-63.
- LOU H Y. Study on disturbance effect of micro-disturbance blasting on initial concrete shotcrete layer in large section tunnel engineering[J]. Construction technology, 2025, 54(10): 56-63.
- [3] 钟元庆. 采用三台阶工法开挖的原位扩建隧道现场监测及分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(5): 170-179.
- ZHONG Y Q. Field monitoring and analysis of in situ tunnel extension by three-bench method [J]. Modern tunnelling technology, 2019, 56(5): 170-179.
- [4] 张桂清, 杨秀竹, 雷金山, 等. 爆破荷载作用下邻近运营隧道衬砌安全性影响分析[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(1): 39-45.
- ZHANG G Q, YANG X Z, LEI J S, et al. Study on safety analysis of adjacent operation tunnel under blasting load[J]. Construction technology, 2025, 54(1): 39-45.
- [5] 王正庆, 郭运华, 王明明, 等. 上软下硬复合地层大断面隧道爆破施工的安全控制分析[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(11): 14-18.
- WANG Z Q, GUO Y H, WANG M M, et al. Blasting safety control of large section tunnel in upper soft and lower hard composite strata[J]. Construction technology, 2025, 54(11): 14-18.
- [6] 周环羽. 路堑高陡边坡岩体爆破振动响应数值模拟研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(24): 12-17, 24.
- ZHOU H Y. Numerical simulation study on blasting vibration response of high-steep slope rock mass in road cutting [J]. Construction technology, 2024, 53(24): 12-17, 24.
- [7] 陈国政, 孟陈祥, 万波, 等. 三台阶七步开挖法在超大断面扁平隧道的应用[J]. 价值工程, 2023, 42(32): 86-89.
- CHEN G Z, MENG C X, WAN B, et al. Application of three-step and seven-step excavation method in super-large section flat tunnel[J]. Value engineering, 2023, 42(32): 86-89.
- [8] 曹明星, 刘子阳, 张东, 等. 立体交叉隧道爆破振动响应分析[J]. 工程爆破, 2020, 26(5): 93-99.
- CAO M X, LIU Z Y, ZHANG D, et al. Analysis of blasting vibration response of crossing tunnel [J]. Engineering blasting, 2020, 26(5): 93-99.
- [9] WANG Y, GAO T Y, WANG R, et al. Study on the mutual interference and propagation characteristics of three-dimensional vibration during shield tunnel construction in hard rock strata [J]. Scientific reports, 2025, 15: 14875.
- [10] 于咏妍, 高永涛. 钻爆法地铁隧道开挖对地下管线的影响[J]. 工程爆破, 2015, 21(4): 6-10.
- YU Y Y, GAO Y T. Effect of subway tunnel excavation by drill-blasting method on pipeline [J]. Engineering blasting, 2015, 21(4): 6-10.
- [11] 费鸿禄, 吕金齐, 刘梦, 等. 新建隧道上跨既有隧道爆破振动响应研究[J]. 工程爆破, 2017, 23(4): 54-58.
- FEI H L, LÜ J Q, LIU M, et al. Study on blasting vibration response of the existing tunnel crossing the new tunnel [J]. Engineering blasting, 2017, 23(4): 54-58.

(上接第92页)

- [4] 于海涛. 爆破振动对周边建筑物影响的三维数值分析[J]. 广东土木与建筑, 2023, 30(11): 16-18.
- YU H T. Three-dimensional numerical analysis of influence of blasting vibration on surrounding buildings [J]. Guangdong architecture civil engineering, 2023, 30(11): 16-18.
- [5] 王晗, 闫鹏, 张云鹏, 等. 基于 SSA-Elman 神经网络的爆破振动速度预测[J]. 工程爆破, 2025, 31(3): 140-150.
- WANG H, YAN P, ZHANG Y P, et al. Prediction of blasting vibration velocity based on SSA-Elman neural network [J]. Engineering blasting, 2025, 31(3): 140-150.
- [6] 李洪超, 张继, 石玉莲, 等. 基于 APO-VMD 联合小波阈值的爆破振动信号去噪方法研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44(15): 249-258.
- LI H C, ZHANG J, SHI Y L, et al. Denoising method for blasting vibration signals based on APO-VMD combining wavelet threshold [J]. Journal of vibration and shock, 2025, 44(15): 249-258.
- [7] 刘干, 肖双双, 龚伟, 等. 基于 Transformer-LSTM 耦合模型的露天矿爆破振动峰值速度预测[J]. 煤矿安全, 2025, 56(9): 71-80.
- LIU G, XIAO S S, GONG W, et al. Prediction of peak particle velocity from open-pit mining blasting based on Transformer-LSTM coupled model [J]. Safety in coal mines, 2025, 56(9): 71-80.
- [8] 伍海龙, 梁家琴, 梁兴印, 等. 基于 FLAC3D 软件分析爆破施工对既有砂岩隧道的影响[J]. 建筑施工, 2020, 42(9): 1794-1796.
- WU H L, LIANG J Q, LIANG X Y, et al. Analysis of influence of blasting construction on existing sandstone tunnel based on FLAC3D software [J]. Building construction, 2020, 42(9): 1794-1796.
- [9] 于咏妍, 高永涛. 钻爆法地铁隧道开挖对地下管线的影响[J]. 工程爆破, 2015, 21(4): 6-10.
- YU Y Y, GAO Y T. Effect of subway tunnel excavation by drill-blasting method on pipeline [J]. Engineering blasting, 2015, 21(4): 6-10.
- [10] 费鸿禄, 吕金齐, 刘梦, 等. 新建隧道上跨既有隧道爆破振动响应研究[J]. 工程爆破, 2017, 23(4): 54-58.
- FEI H L, LÜ J Q, LIU M, et al. Study on blasting vibration response of the existing tunnel crossing the new tunnel [J]. Engineering blasting, 2017, 23(4): 54-58.