

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.04.024

爆破施工对邻近既有隧道的振动响应研究

李小贝

(中铁四院集团工程建设有限责任公司,武汉 430063)

摘要: 针对新建隧道爆破施工影响邻近既有隧道结构的安全性和稳定性,以新建的衢宁铁路五都隧道为依托,采用 LS-DYNA 动力有限元程序建立小净距隧道爆破振动数值模型,分析既有隧道关键部位在受邻近爆破影响下的振动速度和应力;并结合现场监测数据,对新建隧道爆破施工中既有隧道结构的振动响应进行研究。研究表明:在合理的炸药当量下,既有隧道结构能承载爆破引起的有害振动;既有隧道在距离爆破点最近的断面振动速度达到峰值且衬砌中迎爆侧墙腰区域振动速度峰值和应力峰值最大。当爆破荷载达到破坏隧道衬砌混凝土破坏极限时,在动荷载作用下,破坏自墙腰部位起始,拱顶、拱脚和墙腰混凝土衬砌出现拉伸破坏,底板出现剪切破坏;在相同规模荷载作用下,既有隧道迎爆侧衬砌振动速度峰值与围岩级别呈正相关关系,对围岩薄弱的地区,应注意加强防护。

关键词: 爆破振动;数值分析;隧道;振动速度;应力

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)04-0149-07

Study on Vibration Response of Blasting Construction to Adjacent Existing Tunnels

LI Xiao-bei

(China Railway Siyuan Group Engineering Construction Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: The blasting of new tunnels would endanger the safety and stability of adjacent existing tunnel structures. Based on Wudu Tunnel on the newly-built Qu-Ning Railway, a numerical model of blasting vibration in closely-spaced tunnels was built by the LS-Dyna dynamic finite element program, and the vibration velocity and stress of the key parts of the existing tunnel were analyzed under the influence of adjacent blasting. Besides, the field monitoring data was also adopted to analyze the vibration effect of the blasting on the existing tunnel structures. The results show that the existing tunnel structure can bear the harmful vibration caused by the blasting of a reasonable explosive equivalent. The vibration velocity of the existing tunnel reaches the peak at the section nearest to the blasting point and the vibration velocity and stress peak at the side wall waist area of the front wall are the largest. Meanwhile, when the blasting load reaches the failure limit of the tunnel lining concrete, the failure starts from the waist of the wall under the action of dynamic load. The concrete lining of the vault, arch foot, and wall waist suffers a tensile failure, and the bottom plate suffers a shear failure. Under the same load, the peak vibration velocity of the lining on the explosion site of the existing tunnel is positively correlated with the surrounding rock classification. Therefore, more attention should be paid to strengthen the protection of weak surrounding rock areas.

Key words: blasting vibration; numerical analysis; tunnel; vibration velocity; stress

随着国民经济和城市规模的发展,现有的铁路干线不能满足日益增长的交通运输需求,迫切的需要对原有的线路进行改造或扩建。由于受到地形地

收稿日期:2021-10-19

作者简介:李小贝(1990-),男,工程师、硕士研究生,从事工程爆破研究与实践工作,(E-mail)350288618@qq.com。

质条件、环境保护和节约土地等方面限制,在工程实际中经常会出现新建隧道邻近既有隧道物或新建隧道上(下)穿既有隧道的情况^[1,2]。由于新建隧道与既有隧道的设计距离较近,其施工会破坏既有隧道的结构,严重的甚至影响到既有隧道的正常运营,同时增加了新建隧道施工难度和工程风险。新建隧道对既有隧道结构安全的影响主要表现在两方面^[3,4]:一方面是土方开挖引起既有隧道围岩应力重新分布;另一方面,传统钻爆法施工时所形成的爆破振动对既有隧道的结构造成损伤及强度弱化,尤其是净距偏小且有病害情况的隧道。因此,最大限度的减小新建隧道爆破施工对既有隧道的影响,以确保既有隧道的安全和新建隧道的顺利施工,成为邻近隧道爆破施工的核心问题。

围绕着新建隧道爆破施工对邻近隧道的影响,国内外学者进行了大量的研究,并在理论分析、现场监控、数值模拟等方面取得了丰硕的成果。研究爆破对邻近隧道影响的理论研究思想主要借鉴于岩土体中建筑物受地震或动荷载下的动态响应的理论方法^[5],该理论方法主要借助波动力学。Tan 采用弹性动力互等定理对柱形散射体弹性波的散射进行了较深入的研究^[6];陈志刚运用复变函数和多极坐标方法研究了稳态水平剪切(SH)波作用下含有圆柱形孔洞的各向异性弹性半空间的动力响应问题^[7]。由于隧道地下结构受动荷载响应的复杂性,传统数学解析法数学计算与处理上的困难决定了它只能适用于影响条件较简单情况下情形。20世纪40年代,爆破地震测试仪器开始用于爆破地震波的现场测试,获得了大量的测试结果,爆破监测的研究也开始步入定量分析阶段。国内外的许多学者以及工程技术人员从工程实际出发,利用概率统计的方法对爆破地震波的传播规律及其对隧道或者其它地下建筑物的影响进行了较为全面的研究^[8];在对监测资料统计分析的基础上,总结了大量以萨道夫斯基公式为参考的区域性的经验公式,同时探讨分析了影响爆破地震波传播的因素。随着现代计算机技术的发展,利用有限元分析软件在科学合理的选择爆破参数、介质力学参数的前提下,建立符合实际的有限元模型,通过模拟爆破过程,掌握各种变量之间的关联,从而设计具体工程背景下的具体爆破参数^[9,10]。应用较广泛的数值模拟软件主要有 ANSYS/LS-DYNA、FLAC3D、MIDAS/GTS 等。结合目前的研究成果,部分工程在临近既有结构的条件下施工时,围绕着降低爆破扰动、及时支护薄弱区域,爆破与机械开挖结合等几种形式对施工方法改进,也取得了一

定效果^[11,12]。

目前,针对新建隧道爆破荷载对既有隧道的影响,现有的学术研究与工程实践为解决这一问题积累了不少宝贵经验,但仍存在一定程度的不足,主要表现在:一是实际工程结构条件下新建隧道与既有结构的空間关系复杂,无法直接套用理论成果,同时工程岩体结构随机性大,目前多数研究仅考虑了基本岩体性质,而忽视了节理构造等因素,造成结果的不精确;二是检测观测手段的不完善,目前常规的隧道结构检测手段仅能对结构响应的结果进行检测,对于响应过程中结构体应力应变场变化等细节还难以观测;三是评判手段的不完善,目前在工程实际中可供参考的适用性规范仅有《爆破安全规程》的部分规定,但规程的条件较为宽泛,难以具体到实际工程进行详细指导。爆破施工对既有隧道的影响,是一项非常重要和复杂的问题。为尽可能全面地考虑的各种定量和定性影响因素,在衢州至宁德铁路五都隧道爆破工程施工期间,通过开展有限元数值模拟与现场爆破振动监测工作,在考虑围岩级别、隧道间距、单响药量情况下分析爆破振动对邻近隧道的影响,优化爆破施工设计参数,对保障邻近既有隧道结构的完整安全及正常的运营具有非常重要的工程意义。

1 工程概况

新建衢州至宁德铁路工程 QNFJZQ-5 标五都隧道,起止里程 DK388 + 210 ~ DK388 + 515,全长 305 m,设置为单线隧道。进口轨面设计标高 23.866 m,出口轨面设计标高 22.066 m,隧道最大埋深约 43.4 m。五都隧道Ⅳ级围岩 70 m,Ⅴ级围岩 235 m。

隧道施工采取由进口向出口单向掘进的方式开挖。隧道出口洞门明挖采用机械开挖;隧道洞身Ⅴ级围岩采用三台阶法爆破开挖,每循环进尺 1.0 m,每次爆破规模控制在总装药量 53 kg 以内,最大一段药量控制在 12 kg 以内;隧道洞身Ⅳ级围岩采用台阶法爆破开挖,每循环进尺 1.2 m,每次爆破规模控制在总装药量 54 kg 以内,最大一段药量控制在 11 kg 以内。

新建衢州至宁德铁路工程 QNFJZQ-5 标五都隧道,爆破施工邻近的既有杭深铁路设施为既有杭深铁路下坂一号隧道(K790 + 112 ~ K791 + 085)和既有杭深铁路下坂二号隧道(K791 + 293 ~ K791 + 783)。新建五都隧道进口明挖施工已完成,洞门距离既有杭深铁路下坂一号隧道出口最近处约

408 m;五都隧道距离既有杭深铁路下坂二号隧道最近距离为 35 m。五都隧道与既有铁路平面关系及五都隧道围岩分级详见图 1。



图 1 五都隧道与既有杭深铁路平面关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the plane relationship between the Wudu tunnel and the existing Hangzhou-Shenzhen railway

2 爆破振动估算

2.1 爆破振动安全允许标准

爆破振动指爆破引起传播介质沿其平衡位置作直线或曲线往复运动的过程。根据实际情况可知:爆破时产生的振动如不加以控制,可能对邻近既有杭深铁路设施产生影响。因此,爆破施工前需要评估爆破时产生的振动波对周边建筑物的影响。

《爆破安全规程》^[13] (GB6722—2014) 规定:评估爆破对不同建(构)筑物、设施和设备和其他保护对象的振动影响,应采用不同的安全判据和允许标准。地面建筑物、电站(厂)中心控制室设备、隧道与巷道、岩石高边坡和新浇大体积混凝土的爆破振动判据,采用保护对象所在地基础质点峰值振动速度和主振频率^[14],但铁路设施没有明确的爆破振动安全允许标准。考虑到铁路设施安全特殊性,参照《铁路工程爆破振动安全技术规范》^[15] 中爆破振动安全控制标准,并结合五都隧道设计规定(爆破振动速度不大于 5 cm/s)和既有线旁类似工程振动控制经验,对邻近既有杭深铁路隧道、桥梁、涵洞、轨道(路基)及接触网支柱基座的爆破振动控制值进

行选取(见表 1)。

表 1 不同类型建(构)筑物爆破振动控制值
Table 1 Blasting vibration control value of buildings(structures) with different types

序号	建(构)筑物类型	爆破振动控制值/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	隧道	3
2	轨道(路基)	5
3	接触网支柱基座	6
4	涵洞	6
5	桥梁	6

2.2 爆破振动估算

爆破振动安全允许质点振动速度,可按式计算

$$V = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: R 为爆破振动安全允许距离, m; Q 为炸药量, 齐发爆破为总药量, 延时爆破为最大单段药量, kg; V 为保护对象所在地安全允许质点振动速度, cm/s; K, α 为与爆破点至保护对象间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数, 应通过现场试验确定或参考相关规范选取。

根据该工程周围环境、工程地质情况, 公式(1)参数选取如下:

(1) 爆源至保护建筑的最近距离:

隧道 V 级围岩: 取 $R_1 = 36 \text{ m}; R_2 = 408 \text{ m};$

隧道 IV 级围岩: 取 $R_1 = 35 \text{ m}; R_2 = 508 \text{ m}.$

(2) 最大一段药量:

隧道 V 级围岩: 取 $Q = 11 \text{ kg};$

隧道 IV 级围岩: 取 $Q = 12 \text{ kg}.$

(3) 不同类型建(构)筑物爆破振动控制值详见表 1。

(4) 与爆破点至保护对象间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数, 取 $K = 200$ 、取 $\alpha = 1.65$ 。

代入公式(1)计算结果详见表 2。

表 2 爆破震动速度估算值

Table 2 Estimation of blasting vibration velocity

爆破方法	爆破地点	保护对象 (既有杭深铁路)	距爆破 区域/m	一次起爆 规模/kg	最大单段 药量/kg	控制爆破振动速度/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	计算爆破振动速度/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
短台阶法	V 级围岩	下坂一号隧道	408	53	11	3	0.04
		下坂二号隧道	36	53	11	3	1.77
台阶法	IV 级围岩	下坂一号隧道	508	54	12	3	0.03
		下坂二号隧道	35	54	12	3	1.94

从计算结果来看, 五都隧道爆破施工产生的振动符合安全要求, 爆破不会对邻近既有杭深铁路桥

梁、轨道路基、接触网杆架和通信信号等设备的安全造成影响。

3 有限元数值模拟

3.1 建立模型

五都隧道全长 532 m,断面尺寸为高 9.12 m,宽 7.19 m。既有杭深铁路下坂二号隧道正洞采用混凝土衬砌,其模型尺寸设与新建隧道相同,二者间距 35 m。计算模型取水平尺寸 61 m,竖向尺寸 18 m,作为计算分析范围,围岩等级分别设为 IV 级和 V 级,采用 HJC 本构模型模拟,围岩采用四节点平面应变等参单元,隧道衬砌采用梁单元,模型总共 272914 个单元。数值模型见图 2。

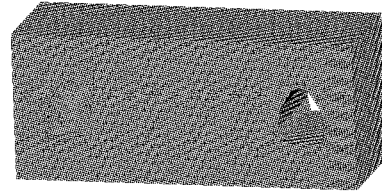


图 2 数值计算模型

Fig. 2 Numerical calculation model

3.2 围岩及混凝土物理力学参数

模型计算中围岩和混凝土物理力学参数如表 3 和 4 所示。

表 3 围岩物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of surrounding rock

围岩等级	弹性模量/GPa	泊松比	重度/(kN · m ⁻³)	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)
IV	4.0	0.30	22	0.7	30
V	1.5	0.35	18	0.2	25

表 4 混凝土材料物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of concrete materials

混凝土等级强度	弹性模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
C30	30	0.16	22.5	2.25

3.3 爆破荷载

本次数值模拟采用三角形脉冲波代替爆破荷载^[5]

$$\sigma_m = P_\omega \left(\frac{1}{r} \right)^\alpha \quad (2)$$

式中: P_ω 为爆心平均压力; r 为半径比例,取 120; α 为常数,与岩石性质有关,取 1.5。

$$P_\omega = \frac{\rho_\omega \cdot D^2}{1 + k} \quad (3)$$

式中: P_ω 为三角形荷载的波峰压力; ρ_ω 为装药密度,取 30 g/cm³; D 为炸药爆速,取二号岩石乳化炸药爆速 3200 m/s; k 为等熵指数,取 3。

爆破荷载确定后,将荷载以压力形式作用在施工隧道洞周壁上,压力的作用方向垂直于隧道洞周^[6]。三角形爆破荷载如图 3 所示。

3.4 计算结果及分析

在数值模拟计算过程中,通过试算将结果与现场采集的数据进行对比从而不断调整阻尼参数,使地震波正常衰减,得到合适模型。对既有隧道迎爆侧衬砌振动速度进行考察^[7],考察点分布如图 4 所示。

沿既有隧道掘进方向选取不同断面,对各断面考察点(拱顶 A、拱脚 B、墙腰 C、底边 D)的振动速度和进行统计分析,得到各考察点振动速度峰值。图 5 为 IV 级和 V 级围岩状态下所测振动速度。

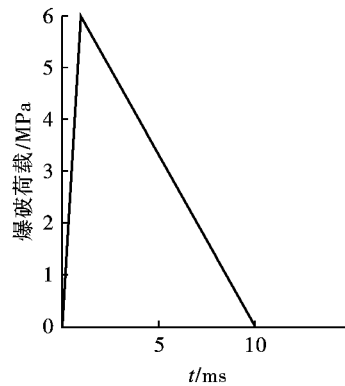


图 3 爆破荷载加载波形

Fig. 3 Loading waveform of blasting load

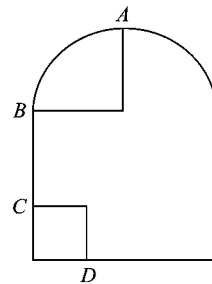


图 4 既有隧道考察点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of existing tunnel inspection points

对图 5 进行分析可知:

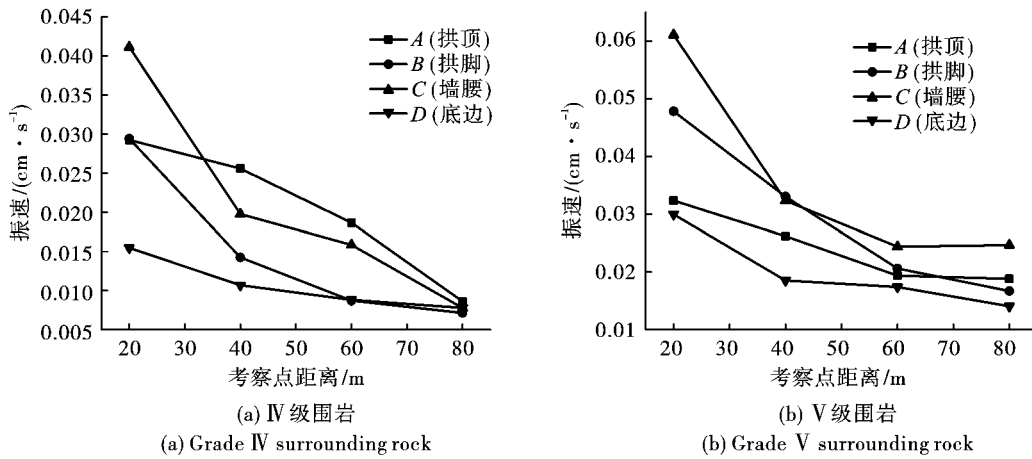


图5 沿掘进方向既有隧道衬砌截面各考察点振动速度
 Fig. 5 Vibration velocity at each inspection point of the existing tunnel lining section along the direction of excavation

(1) 既有隧道墙腰部位振动速度最大,在爆炸冲击荷载作用下,墙腰部位所受破坏程度最大,但随着与爆源距离的增加,振动速度衰减至于其他部位相近的水平。

(2) IV级围岩条件下,拱顶与拱脚初始振动速度相近,随着距离的增加,拱脚峰值振动速度衰减比拱顶更为迅速,在距离爆源较远处,各考察点峰值振动速度相近,已无明显差距。

(3) 在相同爆炸冲击荷载作用下, V级围岩较

IV级围岩既有隧道各考察点具有更高峰值振动速度,故其产生的破坏效果更严重。

(4) 计算所得的振动速度远小于《爆破安全规程》中,关于在爆破振动时,构筑物振动速度控制值(3 cm/s),故不会既有隧道安全性造成影响。

对既有隧道初始截面各观察点应力进行统计分析,得到不同围岩级别下各考察点应力峰值,如图6所示。

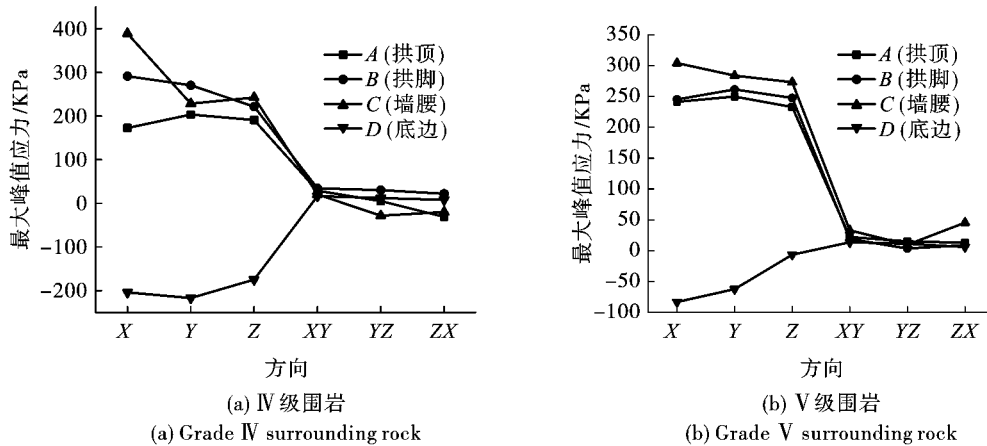


图6 既有隧道初始断面各观察点最大峰值应力

Fig. 6 Maximum peak stress at each observation point of the initial section of the existing tunnel

对图6进行分析可知:

(1) 各考察点中,墙腰部位所受应力峰值最大,主要承受X方向的拉应力作用,由此可见,在爆炸冲击荷载作用下,墙腰混凝土的破坏主要为X方向产生的拉伸破坏,因此,当拉伸应力超过混凝土的抗拉强度时,在隧道墙腰部位的横向会出首先现拉伸裂纹。

(2) 拱顶、拱脚、墙腰和底边所受剪切应力均较小,在爆炸冲击荷载作用下,拱顶、拱脚和墙腰主要承受拉应力作用,底板主要承受压应力作用。

(3) 随着围岩级别的增加,各考察点的最大峰值应力有一定下降,表明岩体质量对于隧结构抗爆破扰动性能有显著作用,在隧道掘进过程中,应注意对既有隧道结构薄弱段的防护,必要时,需对爆破参

数进行进一步控制。

4 现场监测分析

4.1 现场监测布置

根据现场施工现状,在五都隧道爆破施工初始阶段,在邻近既有杭深铁路下坂二号隧道内对应爆

破掌子面处,布置测点进行爆破施工振动测试。爆破振动测点布置在隧道内迎爆侧边墙位置,其中测点A、B、D、E、F采用自动触发爆破振动采集仪,测点C采用实时动态测试采集仪。测点布置详图7所示。

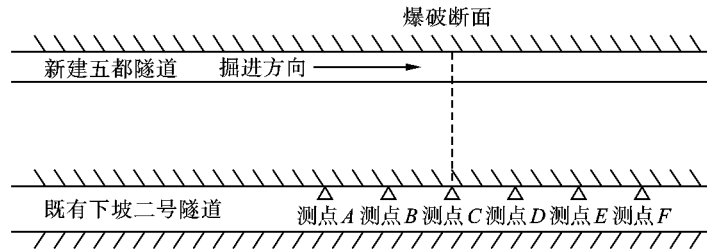


图7 既有杭深铁路隧道爆破测点平面布置示意图

Fig. 7 The layout diagram of the blasting points in the existing Hangzhou-Shenzhen Railway Tunnel

4.2 实测结果分析

根据设计的爆破参数,在V级围岩区域内进行

试爆,最大单段药量为6.5 kg,测得的各测点振动速度测值见表5。

表5 震动速度实测值

Table 5 Measured values of vibration speed

测点序号	测振方向	峰值振动速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	合速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	主频/Hz	结论
测点A	水平径向	0.229	0.428349157	63.5	<3.0 cm/s
	水平切向	0.151		52.7	
	竖向	0.329		45.9	
测点B	水平径向	0.436	0.701912388	47.9	<3.0 cm/s
	水平切向	0.248		52.7	
	竖向	0.491		43.0	
测点C	水平径向	0.572	1.099710871	81.1	<3.0 cm/s
	水平切向	0.432		74.2	
	竖向	0.834		54.7	
测点D	水平径向	0.379	0.956005753	47.9	<3.0 cm/s
	水平切向	0.509		95.7	
	竖向	0.715		47.9	
测点E	水平径向	0.278	0.536182805	52.7	<3.0 cm/s
	水平切向	0.268		91.8	
	竖向	0.372		49.8	
测点F	水平径向	0.230	0.384089833	49.8	<3.0 cm/s
	水平切向	0.220		102.5	
	竖向	0.215		43.0	

对实测结果进行分析,可知:

(1) 爆破断面处(测点C)振动速度最大,且振动速度沿爆破掘进方向逐渐降低。

(2) 既有隧道迎爆侧各测点水平切向的振动主频沿爆破方向逐渐增大。

(3) 同一点在径向、切向及纵向三个方向的同一时间测得的振动速度表明,质点在纵向振动速度最大。

(4) 爆破振动能量主要沿掘进方向传播,在既有隧道迎爆侧的爆破断面附近测得的振动速度明显高于其他方位,因此,要预先加固需要保护的地段。

5 结论

通过建立新建五都隧道小净距隧道爆破振动数值模型和分析现场监测数据,得到以下结论:

(1) 新建隧道爆破施工产生的爆破振动对既有隧道结构存在一定影响,其中,既有隧道衬砌迎爆侧墙腰部位所受影响最为显著,其振动速度和所受应力峰值最大。

(2) 振动速度随距离增加而逐渐降低,各质点在纵向振动速度最大。

(3) 在爆炸冲击荷载作用下,拱顶、拱脚和墙腰主要承受拉应力作用,底板主要承受压应力作用。

(4) 在相同爆炸冲击荷载作用下,既有隧道破坏程度随围岩级别的提高而增大,故在新建隧道爆破开挖过程中应加强对薄弱段的防护和监测。

(5) 数值模拟结果和现场监测数据表明:在合理炸药当量的情况下,新建五都隧道爆破施工不会对既有隧道产生破坏。

参考文献 (References)

- [1] 范兵旗. 新建小净距隧道爆破施工对既有邻近交叉隧道安全性影响的研究[D]. 重庆:重庆大学,2017.
- [1] FAN Bing-qi. Study on the influence of blasting construction on adjacent tunnel and adjacent tunnel [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [2] 郭伟平. 爆破振动对邻近既有隧道的影响[J]. 施工技术, 2020, 49(21): 86-89.
- [2] GUO Wei-ping. Influence of blasting vibration on adjacent existing tunnel [J]. Construction Technology, 2020, 49(21): 86-89. (in Chinese)
- [3] 于建新, 刘焕春, 郭佳奇, 等. 双线公路隧道开挖爆破振动响应规律研究[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(5): 1568-1575.
- [3] YU Jian-xin, LIU Huan-chun, GUO Jia-qi, et al. Determination of the vibration response regularity of the blasting excavation in the double-rack highway tunnels [J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(5): 1568-1575. (in Chinese)
- [4] 汪鑫. 渝怀复线黄草隧道爆破施工对邻近运营隧道的的影响研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2018.
- [4] WANG Xin. Study on the influence of blasting construction of huangcao tunnel in yuhuai double-track on the operation of a nearby tunnel [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [5] 杨光. 隧道爆破施工对邻近既有隧道结构安全的影响分析与控制研究[D]. 长沙:中南大学, 2011.
- [5] YANG Guang. Control and analysis of an existing tunnel vibration induced by blasting construction of nearby tunnel [D]. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese)
- [6] T H Tan. Appli SCI [J]. Res Res, 1976, 32: 97-144.
- [7] 陈志刚. SH波作用下各向异性弹性半空间中浅埋圆孔附近的动应力集中研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 899-905.
- [7] CHEN Zhi-gang. Dynamic stress concentration around shallow cylindrical cavity by SH wave in anisotropically elastic half-space [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 899-905. (in Chinese)
- [8] 于学馥. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1983.
- [8] 于学馥. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1983.
- [9] 林立宏, 倪迪, 朱爱山, 等. 小净距隧道扩挖爆破作用下邻洞振动响应研究[J]. 爆破, 2020, 37(1): 145-150.
- [9] LIN Li-hong, NI Di, ZHU Ai-shan, et al. Study on vibration response of adjacent tunnel induced by expansion excavation blasting of closely-spaced tunnels [J]. Blasting, 2020, 37(1): 145-150. (in Chinese)
- [10] 吴波, 兰扬斌, 杨建新, 等. 新建隧道爆破对临近隧道振动特性的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(11): 93-99.
- [10] WU Bo, LAN Yang-bin, YANG Xin-jian, et al. Influence of new tunnel blasting on vibration characteristics of adjacent existing tunnel [J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(11): 93-99. (in Chinese)
- [11] 韩高升. 新苔井山隧道平行近接爆破设计及施工研究[J]. 爆破, 2020, 37(2): 51-55.
- [11] HAN Gao-sheng. Blasting design and construction of adjacent parallel blasting in new Taijingshan tunnel [J]. Blasting, 2020, 37(2): 51-55. (in Chinese)
- [12] 吴波, 兰扬斌, 杨建新, 等. 基于AHP-GR A新建隧道爆破对邻近铁路隧道振动影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(3): 668-675.
- [12] WU Bo, LAN Yang-bin, YANG Xin-jian, et al. Study on vibration effect of blasting of new tunnel based on AHP-GR A method on adjacent railway tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(3): 668-675. (in Chinese)
- [13] GB 6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京:中国标准出版社, 2014.
- [13] GB6722—2014 Safety regulations for blasting [S]. Beijing: China Standard Press, 2014. (in Chinese)
- [14] 邹新宽, 潘强, 王微, 等. 隧道楔形分段掏槽爆破减震机理及试验研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(4): 186-192.
- [14] ZOU Xin-kuan, PAN Qiang, WANG Wei, et al. Experimental study of the vibration absorption mechanism of staged wedge-cut blasting technology [J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(4): 186-192. (in Chinese)
- [15] TB10313—2019 铁路工程爆破振动安全技术规程[S]. 北京:中国标准出版社, 2019.
- [15] TB10313—2019 Safety technical specification for blasting vibration of railway engineering [S]. Beijing: China Standard Press, 2019. (in Chinese)