

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.03.009

深埋跨断层隧道爆破开挖动力响应规律研究*

骆正坤^{1a}, 李新平^{1b}, 孙吉主^{1a}, 夏新兵^{1a,2}, 刘婷婷^{1b}, 郑青青^{1a}, 袁霄雷^{1a}

(1. 武汉理工大学 a. 土木工程与建筑学院; b. 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 武汉 430070;

2. 中国建筑第二工程局有限公司, 北京 100160)

摘要: 断层带围岩稳定性较差, 往往是隧道建设的控制性区域。针对深埋隧道跨断层区域的爆破开挖围岩动力响应问题, 运用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA, 在高地应力和爆破荷载作用下对跨断层隧道进行三维数值模拟, 研究断层的存在对隧道爆破开挖动力响应的影响规律, 分析了断层带围岩的振速峰值及最大主应力附加值峰值的纵向分布特征, 总结了隧道开挖后拱顶沉降规律。计算结果表明: 断层对围岩的动力响应具有明显的放大作用, 主要集中在断层带及其前后区域, 且越靠近断层带, 放大效应越明显; 爆破应力波在断层与完整围岩的接触面上产生透、反射, 靠近接触面左侧的围岩, 其动力响应程度大于对称条件下围岩; 深埋隧道开挖推进后, 断层内围岩拱顶沉降大于相邻完整围岩。

关键词: 跨断层隧道; 爆破开挖; 动力响应

中图分类号: U45 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2020)03-0056-07

Study on Dynamic Response Law of Blasting Excavation in Deep Cross-Fault Tunnel

LUO Zheng-kun^{1b}, LI Xin-ping^{1b}, SUN Ji-zhu^{1a}, XIA Xin-bing^{1a,2},
LIU Ting-ting^{1b}, ZHENG Qing-qing^{1a}, YUAN Xiao-lei^{1a}

(1. a. School of Civil Engineering and Architecture; b. Hubei Key Laboratory of Roadway
Bridge & Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. China Construction Second Engineering Bureau Co Ltd, Beijing 100160, China)

Abstract: Because the surrounding rock of the fault zone is of poor stability, it is often a key area for tunnel construction. Aiming at the dynamic response of the surrounding rock in blasting excavation across deep faults, the finite element software ANSYS/LS-DYNA is used to establish a three-dimensional model of a cross-fault tunnel under high ground stress and blasting loads. This model can analyze the influence of faults on the dynamic response of the surrounding rock in blasting excavation and the longitudinal distribution characteristics of the peak vibration velocity, as well as the peak value of the maximum principal stress added to the surrounding rock of the fault zone. Then the settlement law of the arch after tunnel excavation is summarized. The dynamic response of the fault to the surrounding rock has obvious amplification effect, mainly concentrated in the fault zone and its adjacent regions. The closer to the fault zone, the more obvious the amplification effect is. The blast stress wave transmits and reflects on the contact surface between the fault and the intact surrounding rock, and the surrounding rock near the left side of the contact surface responds more greatly than the surrounding rock under symmetrical conditions. After the excavation of the deep tunnel, the settlement of the surrounding rock arch in the fault is greater than that of the adjacent intact surrounding rock.

Key words: crossing-fault tunnel; blasting excavation; dynamic response

断层破碎带是隧道建设中常见的不良地质现象,是因地壳运动使得地层岩体沿破裂面发生明显位移或较大错动的断裂构造^[1]。隧道在穿越断层带时,经常发生岩体沿软弱结构面滑动的现象,这是事故多发的险要阶段,是隧道开挖中的薄弱环节^[2]。公路隧道最常见的开挖方式是钻爆法,爆破开挖瞬间释放的能量巨大,尤其是隧道开挖穿越断层区域,会造成超欠挖,围岩大变形和塌方等不利情况^[3]。加之隧道开挖又存在于高地应力环境中,对于隧道建设来说无疑更是难上加难。因此,研究深埋隧道跨断层区域爆破开挖围岩的动力扰动响应问题,已逐渐成为隧道及地下空间领域的重点研究课题之一。

针对跨断层隧道在动力扰动下的响应规律,许多学者对此进行过研究。耿萍等将数值软件 ANSYS/LS-DYNA 和振动台模型试验相结合,分析跨断层隧道在地震作用下的横向和纵向动力响应特性,提出了跨断层隧道的合理抗震设防长度^[4]。朱长安通过 FLAC3D 数值模拟与现场监测资料相结合,研究跨断层隧道纵向动力响应,发现在断层破碎带处隧道的动力反应明显放大,并且在两侧一定范围内有所影响^[5]。凌同华等借助有限元软件,在爆破荷载作用下对断层隧道进行三维数值模拟,分析了不同位置下断层对围岩动力响应的影响,研究了含断层隧道的最不利工况,并提出了隧道与断层之间的最小安全距离^[3]。周旭东通过数值正交分析发现断层隧道纵向响应范围的敏感性依次为断层宽度大于断层倾角大于围岩级别^[6]。袁矫等研究发现大断面隧道穿越断层带施工过程中,多发生围岩失稳、大变形等现象,且随着隧道跨度增大,隧道围岩塑性区与断层带塑性区越易发生联通,支护结构安全性会突然降低^[7]。崔光耀等通过数值模拟及现场震害分析得到错动断层按对震害程度大小依次为,错动宽断层、错动窄断层和无错动宽断层^[8]。

迄今,国内外学者针对此类问题的研究依然不足,主要运用现场施工经验,模型试验,数值模拟验证来指导隧道的工程建设^[9]。已有的研究主要为已建成隧道抗震设防分析,而对于深埋隧道在穿越断层破碎带过程中,爆破开挖引起的动力扰动响应

问题研究较少^[3,10,11]。针对高地应力和爆破荷载作用下跨断层隧道开挖的动力响应规律,论文采用有限元软件建立三维数值模型进行深入的研究,来准确获得跨断层隧道爆破开挖过程中围岩的动力响应异常区域,以便于采取针对性的措施保障隧道工程建设的顺利进行,帮助优化炮孔设计、减少药量及调整开挖方案,并且对开挖后的隧道及时进行支护,避免围岩失稳坍塌等灾情的发生,同时也为类似隧道工程的设计及安全施工提供参考。

1 数值模型

1.1 工程背景

以摩岗岭某标段隧道为依托,隧址区受磨西断裂、二郎山断裂、大渡河断裂的交汇部位大断裂带影响,岩体较破碎,完整性差,构造裂隙等较为发育,最大埋深为 578 m。岩体被挤压破坏,有扭曲现象,有擦痕,并伴随有层间小错动、小揉皱等现象。在施工至某段时掌子面揭露一条断层,断层宽度约 12 m,倾角 75°,施工中采用了全断面爆破穿越断层的方法。该段是施工中的重点监测部位,对断层带的动力响应研究很有必要,针对该段的炮孔设计如图 1 所示。

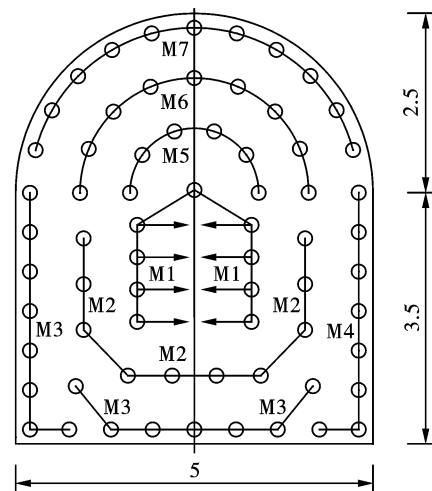


图 1 全断面开挖炮孔布置图(单位:m)

Fig. 1 Full section excavation blast hole layout (unit:m)

1.2 建立数值模型

ANSYS/LS-DYNA 作为最灵活的有限元分析软件之一,广泛用于非线性动力学计算,非常适合于模拟由大变形和非线性动态载荷引起的岩石材料破坏^[12]。文章借助 ANSYS/LS-DYNA 软件,建立模拟深埋隧道跨断层区域爆破开挖的三维计算模型。结合实际工程条件,模型尺寸取为 60 m × 60 m × 50 m ($L \times H \times W$),隧道横截面采用直壁-顶拱型,隧道宽

收稿日期:2020-04-12

作者简介:骆正坤(1993-),男,硕士研究生,主要从事隧道及地下空间方向研究,(E-mail)luozhengkunn@gmail.com。

通讯作者:李新平(1963-),男,教授、博士,主要从事隧道及地下空间方向研究,(E-mail)xinpingli@whut.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金(No. 51774222);国家自然科学基金青年项目(No. 51609183)

5 m,直墙高 3.5 m,顶拱半径 2.5 m,断层宽 12 m,倾角 75°,最大埋深 578 m,地应力为 20 MPa。模型采用三维 SOLID164 单元,并服从 $D-P$ 屈服准则。该模型为对称模型,作取半分析。边界条件为:(1)模型除对称边界外所有外边界面都被定义为非反射边界,以排除可能在模型边界处生成的反射应力波的影响;(2)模型前部施加法向约束,右面施加对称约束边界,底部施加固定约束;(3)上面、背面和左面施加等值法向应力以模拟地应力。隧道计算模型如图 2 所示。

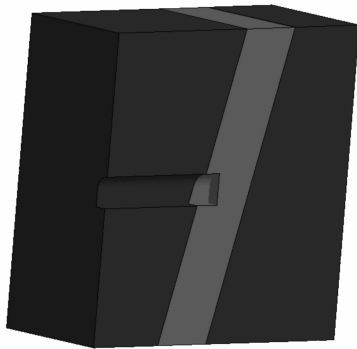


图 2 模型示意图

Fig. 2 Model schematic

1.3 模型计算参数选取

研究深埋隧道爆破开挖的动态响应涉及两个载荷,即静态的地应力和动态的爆破荷载,这是静态-动态载荷的耦合问题。考虑到 ANSYS/LS-DYNA 的显式动力方法更适用于短时间的瞬态动力计算,如爆炸、高速冲击等问题,而在处理初始地应力的静态问题时,则会出现计算效率低、耗时长、精度差等缺陷。隐式时间积分法更适合计算静态问题,可采用较大时间步长以节省计算时间,同时滤掉高阶不精确特征解对系统的影响^[13],对于这个问题,首先调用隐式模块来计算爆破开挖的初始静态地应力状态,从隐式求解阶段获得的应变、应力和位移,然后在此基础上切换到显示求解^[14]。其中静态的地应力以压力形式法向施加在模型边界上,爆破等效荷载以曲面方式加载在隧道围岩周边及其掌子面上。

文章以摩岗岭某标段隧道为依托,采用了全断面光面爆破穿越断层的施工方法。隧道岩体分段爆破时,最大爆破荷载峰值产生于掏槽孔段^[15],设计采用 40 mm 的炮孔直径,2 m 的循环进尺,掏槽段装药量为 9.0 kg。相邻段爆孔起爆时差为 100 ms,各段炮孔起爆产生的爆炸冲击波不会相互干扰,因此仅考虑掏槽孔爆破作用下隧道围岩动力响应的分布特征。根据爆破指数衰减型荷载

$$P(t) = P_m \times [e^{-(nwt/\sqrt{2})} - e^{-(mwt/\sqrt{2})}] \quad (1)$$

结合实践并代入相关参数 $m = 0.035$, $n = 0.055$, $w = 6.22 \times 10^3$,得 $P(t) = 109.7 \times [e^{-(2417.7t)} - e^{-(1538.6t)}]$,爆破荷载峰值为 $P_m = 18.0$ MPa,其中简化后的等效荷载曲线上升段 $t_r = 2.3$ ms,持续作用时间 $t_m = 17$ ms,爆破荷载采用三角形荷载以模拟实际中产生的爆炸荷载^[16],荷载曲线如图 3 所示。

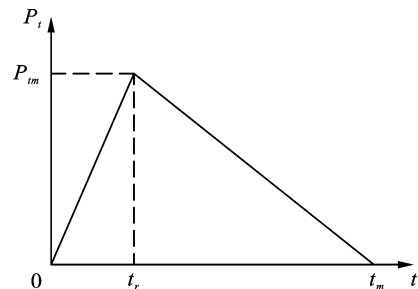


图 3 爆破荷载作用曲线

Fig. 3 Blasting load curve

通过面与面接触选项控制断层带与完整围岩单元连接的接触界面,完整围岩与断层带的物理力学参数见表 1。隧道由左向右以 2 m 为一个进尺分 30 个开挖步进行,逐层开挖。为研究断层对围岩动力响应的最不利影响,选取振动破坏最危险区拱顶作为分析重点,分别于不同断面隧道拱顶上方 1.2 m 处设置 9 个关键监测点,如图 4 所示。

表 1 围岩物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of surrounding rock

材料	弹模 E / GPa	泊松 比 μ	容重 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力 C /MPa	内摩擦 角 ϕ / $^\circ$
围岩	24.70	0.27	24.3	1.32	46
断层	1.42	0.32	19.2	0.43	25

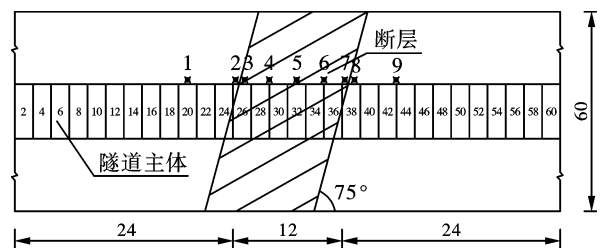


图 4 隧道开挖与关键点布置示意图(单位:m)

Fig. 4 The layout of tunnel excavation&key point(unit:m)

2 断层对围岩的动力响应影响分析

断层的存在改变了围岩的完整性,使得围岩的

性质变得各向异性,更加的具有不规律性,而这往往是工程建设中事故的灾变起因。通过对比分析含断层与无断层两种情况下整个爆破开挖期间隧道围岩的最大响应峰值,探究断层的存在对爆破开挖下围岩动力扰动响应空间分布的作用。提取围岩各监测点在整个开挖期间速度响应峰值,绘制出竖向最大振速峰值曲线如图5所示,模型所选取的监测点皆位于拱顶上方,由于监测点距离爆破工作面较近,在隧道拱顶上方1.2 m处,因此各振动监测数值较大。

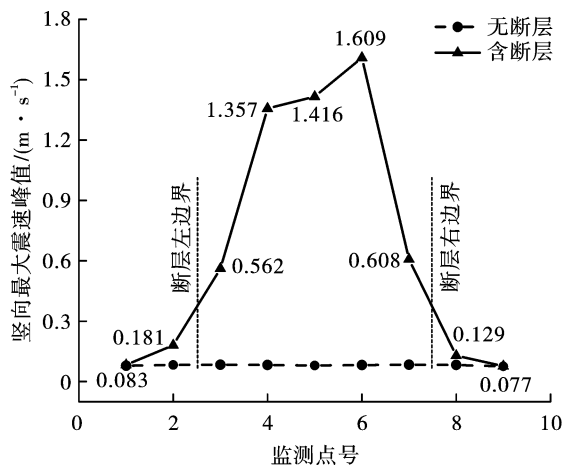


图5 围岩竖向最大振速峰值曲线

Fig. 5 Curve of the vertical maximum peak vibration velocities of surrounding rock

振速峰值和位移峰值是围岩扰动力学行为变化的重要依据,跨断层隧道爆破开挖过程中最大振速与位移峰值的分布规律相近,因此仅就振速峰值特征作详细分析。由图5分析得:无断层情况下隧道爆破开挖在各监测点产生的竖向最大振速峰值处于8 cm/s左右,且各点相差不大。而含断层情况下,围岩各处的动力响应程度与相对断层的距离有着直接的关系,距断层约5 m处#1和#9围岩的竖向最大振速峰值较无断层情况下基本相同,因此可判定该断层的存在与否对其两侧5 m开外围岩的动力响应影响可忽略不计。在影响区间内,靠近断层的#2和#8处竖向最大振速峰值分别较#1和#9有了2.18和1.67倍大幅的提升,断层内部围岩的竖向最大振速峰值更是处于0.562~1.609 m/s的高位区间,并在#6处出现全断层区域最大振速峰值,为1.61 m/s,显然是断层存在促进了断层及其附近围岩竖向最大振速峰值的大幅度提升。从接近断层开始,振速峰值开始增加,但增加幅度不大,穿越断层的过程中,振速峰值迅速增加,在断层中心附近位置,振速峰值增加的速率有所降低,穿越断层到达围岩的过程中,振速峰值迅速降低,最后远离断层的过

程中,振速峰值降至最小。造成这一现象的主要原因有两点:首先是开挖进尺的方向是从左往右,爆破应力波从左向右传播;其次是从围岩到断层,再从断层到围岩,爆破应力波传播的介质的波阻抗的变化。

结合上述分析得:断层的存在会对断层及其周围围岩的动力响应程度产生放大效应,且越靠近断层带位置,放大效应越明显。#2~#4以及#6~#8的纵向距离分别很近但是竖向最大峰值振速却前后相差2.4~4.7倍,且差幅较大,断层引起的围岩动力响应变化陡增主要位于断层与完整围岩的接触区域。对比有无断层情况下围岩最大竖向振速峰值响应曲线来看,断层的存在对隧道结构的动力响应有着较大的影响,但其影响范围有限,且主要为模型纵向19~41 m范围内。在动力扰动下,由于断层的存在导致围岩出现动力响应集中的现象在朱长安的研究中也同样提及^[5],可考虑选择该段为隧道抗振设防重点区域。

3 爆破开挖推进下围岩动力响应分析

通过讨论断层的存在对围岩速度的响应影响可知:当爆破开挖处于断层附近时,断层带的存在在一定范围内显著提升了隧道围岩的动力响应程度和响应范围,在该影响范围内,隧道的爆破开挖可分为接近断层、进入断层和远离断层三个阶段,为了深入研究断层对隧道围岩动力响应的影响,下文将重点分析爆破开挖推进下断层围岩代表性区域#2、#3、#5、#7和#8处围岩的动力响应。

3.1 竖向振速峰值分析

在爆破工作面逐步接近断层的过程中,各监测点的竖向振速峰值开始出现缓慢增长,接着在即将进入断层的时候均呈现加速增长趋势。如图6所示:开挖面最先到达#2处,在下一个爆破进尺过程中该处出现最大振速峰值0.18 m/s。所有监测点的峰值振速均出现在该点所处进尺的下一个爆破进尺过程中,这是因为该点所处进尺为下一个爆破进尺提供了良好的自由面,同时与爆源距离最近。#2和#3、#7和#8距离很近,但是振速峰值相差3~5倍,这是因为它们处于过渡区域,尽管距离很近,但是围岩性质的突变造成了振速的极大差异。由于断层的岩性较弱,在爆破荷载作用下容易产生较大的振动,位于断层内#3和#5处第一阶段开挖的峰值振速就已经超过#2。在爆破开挖进入断层的过程中,断层外已开挖部分#2处围岩振速峰值呈指数般下降,#8处振速峰值上升速度加快,断层内部#3、#5和#7处先后达到最大峰值振速。在此阶段,距开挖面

一定距离围岩的峰值振速随开挖面推进的相对变化较缓,整个断层内部围岩峰值振速处在 0.56 ~ 1.61 m/s 的高位区间,竖向振速峰值曲线局部区间存在台阶型变化。在爆破开挖穿过断层后并远离断层的过程中,已开挖部分围岩竖向振速峰值快速下跌,接着#8 处达到了最大振速峰值,随后各点的振速峰值逐步趋于稳定,并收敛于零。

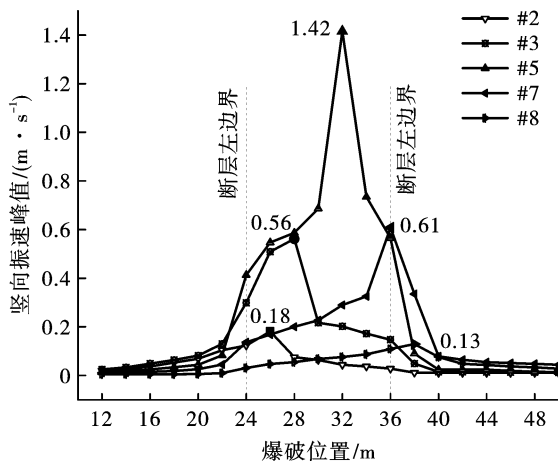


图6 围岩竖向振速峰值曲线

Fig. 6 Curve of the vertical peak vibration velocities of surrounding rock

竖向最大峰值速度变化分布曲线看似对称,却并非对称。隧道的开挖由左向右逐步推进,爆破荷载均匀布置于围岩和掌子面上,#2 下方遭受爆破开挖所产生的竖向振速峰值大于#8 处的开挖,#7 下方遭受爆破开挖所产生的竖向振速峰值大于#3 处的开挖。可以判定,由于断层的存在对爆破应力波传播的干扰,因此位于断层与完整围岩接触面左侧的围岩,动力响应程度大于对称条件下围岩。在爆破过程中低强度的岩体主要通过振动而消耗掉其吸收的能量,因此断层比完整围岩更容易因爆破开挖而产生较大的振速峰值,不光如此,断层更是对周边完整围岩也产生了一定的影响,越靠近断层带位置,围岩的竖向速度响应峰值越大,这也与隧道断层带附近位置往往更容易受到破坏相印证。因此,当隧道跨越断层施工时,应优化炮孔设计、减少药量及调整开挖方案,避免爆破能量过大而引发围岩失稳坍塌等灾情发生。

3.2 爆破开挖沉降位移分析

在模拟爆破开挖前对模型进行地应力初始化,不考虑地应力初始化所产生的围岩位移变化。如图7所示:深埋隧道岩体在开挖后不断产生新的自由面,此时围岩在高地应力作用下隧道拱顶会出现沉降。各监测点沉降变化趋势的改变与其相对断层和

开挖面的位置有关。断层与完整围岩的两个接触面把爆破开挖过程分为接近断层、进入断层和远离断层三个阶段。在第一阶段,当开挖到 16 m 时,#2、#3 处的沉降位移开始呈现指数加速增长趋势,开挖到 22 m 时,断层内部#5 处也迎来了加速增长的趋势。在第二阶段:#2、#3 处沉降增长开始减缓,并在该阶段末达到沉降稳定;#5 始终保持着 S 型的增长,#7 沉降位移呈直线型变化,#8 依然沉降值依然变化较缓。在第三阶段:#5 沉降的增长势头减弱并迅速趋于稳定;#7、#8 在第三阶段初期都为 S 型增长,并同时在开挖到 42 m 时开始收敛。

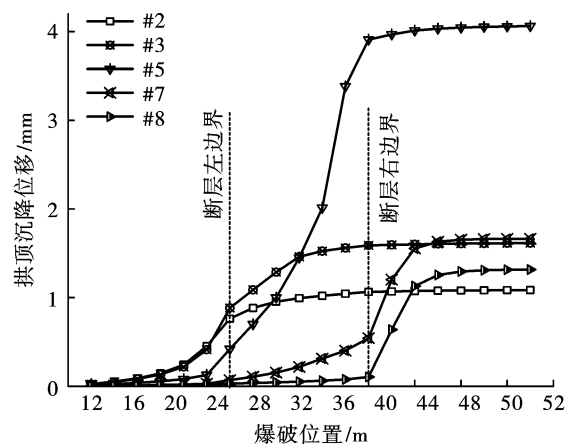


图7 各监测点开挖沉降位移曲线

Fig. 7 Settlement displacement curve of each monitoring point

断层围岩与周边完整围岩的拱顶沉降有着明显的差异,断层外#2 和#8 的沉降值为 1.1 ~ 1.3 mm,断层内#3 和#7 沉降值约为 1.6 mm,断层中心#5 的沉降值为 4.1 mm。断层中心#5 沉降远大于断层边缘#3 和#7,断层内围岩拱顶沉降比周边完整围岩大,越靠近断层中心区域沉降范围越大,沉降位移值也越大。围岩沉降曲线的变化趋势在断层与完整围岩接触处发生突变,各监测点处沉降位移的变化主要受到开挖后自由面延伸和岩体性质的影响。整个开挖期间断层带沉降值远大于完整围岩,因此,在实际断层隧道爆破施工中,应重视与爆破掌子面相交的断层区域,密切关注其动力扰动响应监测结果,并预先调整开挖方案。

3.3 最大主应力附加值分析

不考虑模型地应力初始化后隧道围岩各处的最大主应力初始值,仅考虑爆破开挖在原有应力基础上产生的最大主应力附加值。如图8所示:随着爆破开挖面逐渐接近断层,#2 和#3 处最大主应力附加值迅速达到峰值,此阶段#5、#7 和#8 的最大主应力

附加值增长幅度较小。在爆破开挖进入断层阶段,被开挖面逐渐远离的#2和#3处最大主应力附加值快速减小,在#5迎来了最大主应力附加值峰值后,#2、#3和#5的最大主应力附加值峰值加速衰减,此时#7和#8处的最大主应力附加值增长速度加快。在开挖远离断层的过程中,#7和#8先后达到最大主应力附加值峰值,随后各点的最大主应力附加值加速减小并趋于稳定。与振速峰值分布规律不同的是,最大主应力附加值出现在完整围岩#3处为5.01 MPa,最小值出现在断层中心带的#4为2.5 MPa,这种现象在凌同华的研究中也有所体现^[3]。

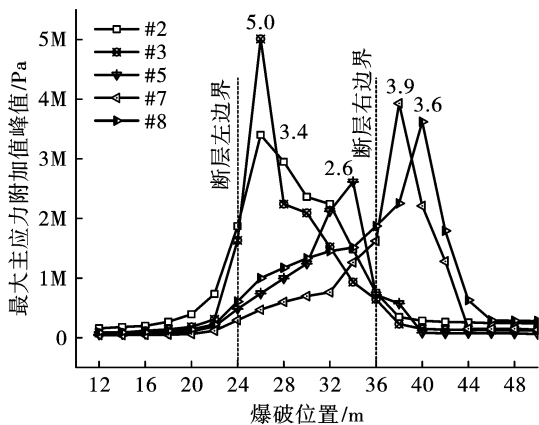


图8 围岩最大主应力附加值峰值曲线

Fig. 8 Peak value curve of maximum principal stress added value of surrounding rock

由于物理力学性质的差异,完整围岩与断层带在爆破开挖荷载作用下的动态与静态的动力响应值有着不同的表现规律。与竖向最大振速相同的是,最大主应力附加值峰值曲线的变化受到断层两端接触面的影响同样分为三个主要变化阶段,各曲线的最大值均处于其所代表区域下方遭受开挖期间;不同的是,最大主应力附加值峰值的最大值位于完整围岩,最小值位于断层中心,且接触面附近#2、#3与#7、#8两组值的最大主应力附加值峰值的最大值与前者的大小分布相反。虽然各点不同的监测值之间存在异同,其物理规律却是相对应的。隧道中的断层改变了围岩最大主应力的分布,断层内出现更低的最大主应力附加值,由于断层处的岩性较弱,相对其较差力学特性来说,断层处围岩存在着更大的损伤破坏。

4 结论

利用动力有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 对不同开挖工况下隧道围岩及断层的动力响应规律进

行分析,结论如下:

(1)断层的存在对爆破扰动下的隧道围岩动力响应有着明确的放大效应,且越靠近断层-中心位置,放大效应越明显。综合速度和应力响应来看,断层对隧道围岩动力响应的影响主要集中在断层带及其前后区域内。

(2)断层会对爆破应力波传播产生干扰,应力波在接触面上产生透、反射,接触面左侧的围岩的动力响应程度都大于对称区域对应条件下围岩。动力响应在接触面两侧都发生突变,曲线弯曲更为明显,说明在爆破开挖过程中,断层与围岩产生了相对滑移,应予以重点关注。

(3)深埋隧道开挖推进后,围岩会发生变形产生应力重分布,断层内围岩拱顶沉降大于周边完整围岩。完整围岩与断层带在爆破开挖荷载作用下的动态与静态的动力响应值有着不同的表现规律,即断层中心区域有着整个开挖期间的最大的震速峰值和沉降位移,也存在着最小的主应力附加值峰值。

(4)隧道跨越断层施工时,应优化炮孔设计、减少药量及调整开挖方案,并且对开挖后的隧道及时进行支护,避免引发围岩失稳坍塌等灾情发生。

参考文献 (References)

- [1] 黄成光,于敦荣.公路隧道施工[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [2] 毕旭冰,吴孝清,刘胜春.公路隧道穿越断层破碎带仿真分析[J].交通科技,2014(1):5-7.
- [2] BI Xu-bin, WU Xiao-qin, LIU Sheng-chun. Simulation analysis of tunnel through the fault fracture zone [J]. Transportation Science & Technology, 2014 (1): 5-7. (in Chinese)
- [3] 凌同华,曹峰,李洁.断层隧道爆破开挖的动力响应分析[J].现代隧道技术,2016,53(2):107-113.
- [3] LING Tong-hua, CAO Feng, LI Jie. Dynamic response analysis of blasting excavation for a tunnel passing through faults [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53 (2): 107-113. (in Chinese)
- [4] 耿萍,吴川,唐金良,等.穿越断层破碎带隧道动力响应特性分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(7):1406-1413.
- [4] GENG Ping, WU Chuan, TANG Jin-liang, et al. Analysis of dynamic response properties for tunnel through fault fracture zone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (7): 1406-1413. (in Chinese)
- [5] 朱长安.断层破碎带隧道地振动力响应分析[D].成都:西南交通大学,2009.
- [5] ZHU Chang-an. Study on seismic dynamic response of

- tunnel in the fault-rupture zone [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [6] 周旭东. 穿越断层隧道地振动力响应敏感性研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2009.
- [6] ZHOU Xu-dong. The sensitivity study on the seismic damage response of tunnels through fault [D]. Chengdu: Southwest Jiao tong University, 2009. (in Chinese)
- [7] 袁 娇, 张 滢, 王莲莲, 等. 大断面隧道穿越接触带施工稳定性分析 [J]. 公路工程, 2018, 43(5):157-162.
- [7] YUAN Jiao, ZHANG Ying, WANG Lian-lian, et al. Stability analysis during the construction of large cross-section tunnel through contact belt [J]. Highway Engineering, 2018, 43(5):157-162. (in Chinese)
- [8] 崔光耀, 王明年, 于 丽, 等. 汶川地振断层破碎带段隧道结构振害分析及振害机理研究 [J]. 土木工程学报, 2013, 46(11):122-127.
- [8] CUI Guang-yao, WANG Ming-nian, YU Li, et al. Study on the characteristics and mechanism of seismic damage for tunnel structures on fault rupture zone in wenchuan seismic disastrous area [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(11):122-127. (in Chinese)
- [9] 刘 凯, 孔 超, 唐浚哲, 等. 高地应力断层破碎带衬砌力学特性对比与分析 [J]. 铁道标准设计, 2014, 58(12):99-108.
- [9] LIU Kai, KONG Chao, TANG Jun-zhe, et al. Comparison and analysis of mechanical properties of lining in fault fracture zone with high geostress [J]. Railway Standard Design, 2014, 58(12):99-108. (in Chinese)
- [10] 王 文, 朱维申. 节理岩体隧道的稳定性分析 [J]. 现代隧道技术, 2014, 51(6):66-72.
- [10] WANG Wen, ZHU Wei-shen. Stability analysis of tunnels in jointed rock masses [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(6):66-72. (in Chinese)
- [11] 张志强, 李化云, 阚 呈, 等. 大相岭隧道断层破碎带围岩变形的 GA-BP 神经网络预测技术 [J]. 现代隧道技术, 2014, 51(2):83-89.
- [11] ZHANG Zhi-qiang, LI Hua-yun, KANG Cheng, et al. Prediction of surrounding rock deformation of the Daxiangling Tunnel in fault zones using the GA-BP nerve network technique [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(2):83-89. (in Chinese)
- [12] LI Xi-bing, WENG Lei. Numerical investigation on fracturing behaviors of deep-buried opening under dynamic disturbance [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 54(2):61-72.
- [13] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显式动力分析 [M]. 北京:清华大学出版社 2005.
- [14] LSTC, 2007. LS-DYNA Keyword User's Manual, Version 971 [M]. Livermore Software Technology Corporation, Livermore.
- [15] 刘 民. 浅埋隧道爆破开挖与监控技术研究 [D]. 北京:北京工业大学, 2012:2-5.
- [15] LIU Min. Study on explosive construction and monitoring technology of the shallow tunnel [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [16] 张 忆, 杨文东, 李新平, 等. 地铁隧道爆破开挖对高层框架结构的动态响应 [J]. 爆破, 2018, 35(1):148-154.
- [16] ZHANG Yi, YANG Wen-dong, LI Xin-ping, et al. Caused dynamic response of high rise frame structure by blasting excavation of subway tunnel [J]. Blasting, 2018, 35(1):148-154. (in Chinese)

英文编辑:何 松

《爆破》论文网络首发及著作权使用声明

《爆破》为使录用论文首发权及时获得确认,自 2019 年 12 月起与中国知网合作启动“网络首发”在线优先数字出版项目,即《中国学术期刊(网络版)》(简称 CAJ-N),统一连续出版物号 ISSN 2096-418、CN 11-6037/Z。

作者稿件经审稿录用后,将会以“录用定稿”模式第一时间上传至中国知网“网络首发”平台发布。每篇网络首发论文均可下载一份“中国知网学术期刊网络首发论文出版证书”,其效力等同于纸质出版论文。

为避免出现一稿多投的现象,凡已投《爆破》的稿件,在未确认录用或退稿前,请勿再投他刊!

《爆破》为《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》、《中文科技期刊数据库》、“万方数据——数字化期刊群”、维普网和超星学术期刊“域出版”平台收录期刊。本刊已许可上述机构以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议,请在投稿时说明,本刊将按作者说明处理。