

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.03.003

下穿地铁隧道爆破作用下人防隧道的动力效应*

张旭,周传波,蒋楠,吴廷尧

(中国地质大学(武汉)工程学院,武汉 430074)

摘要: 隧道爆破作用下邻近既有隧道的安全性是爆破施工中的重点关注内容,以武汉地铁8号线洪山路站至小洪山站区间隧道爆破开挖为例,研究下穿地铁隧道爆破作用下上方既有人防隧道的动力效应。使用LS-DYNA建立了隧道爆破有限元数值模型,并结合现场振动监测数据验证数值模型的可靠性,对人防隧道的动力响应特征进行研究。现场测试和数值模拟研究表明:随着爆心距的增加人防隧道衬砌结构质点峰值振速(PPV)逐渐减小,PPV最大值出现在爆源正上方;人防隧道衬砌结构稳定性受拉应力控制,隧道底板和拱顶主控拉应力为隧道环向,边墙主控拉应力为垂直方向;衬砌结构最危险截面位于爆源上方,此截面最可能破坏的位置是迎爆侧拱脚,破坏方式为从内至外的拉破坏。基于极限抗拉强度计算分析得到的隧道衬砌结构振速安全阈值为14.9 cm/s。

关键词: 爆破振动;人防隧道;质点峰值振速;失稳模式;安全阈值

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)03-0010-09

Dynamic Effect of Civil Air-defense Tunnel Induced by Blasting of Undercrossing Subway Tunnel

ZHANG Xu, ZHOU Chuan-bo, JIANG Nan, WU Ting-yao

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: The safety of adjacent existing tunnels under the effect of tunnel blasting is a key concern in blasting construction. This paper takes the blasting excavation of the tunnel between Hongshan Road Station and Xiaohongshan Station interval of Wuhan Metro Line 8 as an example to study the dynamic effect of the upper existing civil air-defense tunnel under the blasting action of the underlying subway tunnels. A finite-element numerical model of the tunnel blasting was established by LS-DYNA, and the reliability of the numerical model was verified by field vibration monitoring data. Then, the dynamic response characteristics of the civil air-defense tunnel were studied. Field tests and numerical simulation studies reveal that with the increase of the distance to blasting center, the peak particle velocity(PPV) of the civil air-defense tunnel lining decreases gradually with the maximum PPV point located directly above the explosive. The results show that the stability of the civil air-defense tunnel lining is controlled by tensile stress. Specifically, the main tensile stress of the tunnel floor and vault is in circumferential direction, and the main tensile stress of side wall is in vertical direction. The most dangerous section of the lining structure is located above the source of the explosion, and the most likely location of damage to this section is the foot of the arch facing the blast. The damage mode is tensile failure from the inside to the outside. In addition, the safety threshold of vibration velocity of the tunnel lining structure calculated by the ultimate tensile strength criterion is 14.9 cm/s.

Key words: blast vibration; civil air-defense tunnel; peak particle velocity; instability mode; safety threshold

收稿日期:2021-07-07

作者简介:张旭(1996-),男,硕士研究生,主要从事地下建筑、工程爆破方面研究,(E-mail)frank-zx@cug.edu.cn。

通讯作者:周传波(1963-),男,教授,从事岩土工程、工程爆破方面的研究,(E-mail)cbzhou@cug.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41972286)

受地形地质和线路规划的限制,新建城市地铁隧道与既有隧道或其他地下构筑物近接的现象越来越多^[1-4]。城区地铁隧道一般靠近地表为土层、接

近隧道为岩层。钻爆法是岩层中隧道开挖的主要手段,在爆破施工过程中不可避免对邻近既有隧道造成影响。在此背景下,研究新建地铁隧道爆破振动作用下邻近既有隧道的动力响应对优化隧道爆破参数、保证既有隧道安全性具有重要意义。

隧道爆破施工将会引起围岩介质内部及邻近隧道结构产生强烈振动,严重时可能导致邻近隧道衬砌结构开裂、剥落等现象^[5-7]。为了研究爆破对邻近隧道的影响,于建新等通过对上下交叉隧道爆破振动监测^[8],获得爆破振动规律并反演得到最大掏槽药量及安全距离。刘明贵等结合监控量测,明晰了循环爆破造成小净距隧道围岩损伤更显著^[9],并获得损伤与位移的关系。高宇璠等通过现场试验,揭示了不同炮孔、不同区域小净距隧道中心夹爆破振动规律^[10]。随着计算机技术的发展,数值模拟被广泛应用于爆破振动分析。毕继红等^[11]、贾磊等利用 ANSYS 分析了不同围岩、不同间距下和不同埋深情况下对既有隧道衬砌的影响^[12]。钟冬望等^[13]、蒋楠等通过数值模拟分析了爆破作用下邻近隧道及衬砌振速和应力的关系^[14]。李云鹏等对小净距隧道爆破施工动力效应数值模拟研究^[15],揭示了爆破施工对既有隧道稳定性影响较大的位置。上述研究着眼于研究不同工况下邻近隧道爆破振动规律和危险截面,但是鲜有考虑邻近隧道衬砌结构危险截面的失稳模式。

以武汉地铁 8 号线洪山路站~小洪山站区间大断面隧道爆破开挖为背景,对大断面隧道左上导洞爆破开挖时人防隧道底板的振动速度进行监测,并结合 LS-DYNA 数值模拟,分析下穿隧道爆破对 人防隧道衬砌结构的动力响应特征、预测了衬砌结构的失稳模式并分析了人防隧道的振动速度安全阈值,为地铁区间隧道爆破提供指导。

1 工程概况

地铁 8 号线洪山路站~小洪山站区间里程全长 1595 m,里程范围内基岩为中风化、微风化灰岩,围岩级别为 III 级,岩质较硬,综合考虑采用钻爆法开挖。洪山路站~小洪山站区间为双线,其中里程范围 DK23 + 661.151 ~ DK23 + 770.251 设计为大断面单洞双线隧道,长 109.1 m。大断面隧道拱顶距地表 23 m,断面呈马蹄形,隧道净高 12.78 m,宽 20.04 m,采用双侧壁导洞法进行施工,共设 9 个导洞,左上导洞超前其他导洞开挖。区间隧道上方存在一条人防隧道,两条隧道轴线最大交角为 5°,人防隧道底板与区间隧道拱顶距离仅为 9.55 m,如图 1 所示。

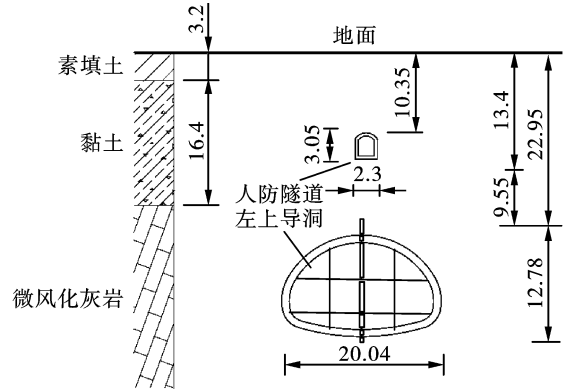


图 1 人防隧道与地铁区间隧道位置关系(单位:m)
Fig. 1 Position relationship between civil air defense tunnel and subway section tunnel(unit:m)

大断面隧道采用双侧壁导洞法开挖,以左上导洞爆破开挖为例,分析区间隧道爆破开挖对 人防隧道的影响。左上导洞宽 5.3 m,高 4.8 m,断面面积 15.2 cm²。根据现场爆破施工设计要求,爆破设计方案如下:隧道开挖每循环进尺为 2 m,炮孔直径 40 mm,炮孔采用直眼掏槽方式,周边孔和辅助孔长度为 2 m,光爆层厚度 0.4 m;掏槽孔长度为 2.2 m,中间布置两排 8 个掏槽孔,2 个空孔,间距 0.7 m,掏槽孔单孔装药 1.8 kg。左上导洞爆破时,在上方人防隧道中布置 5 个爆破振动监测点,如图 2 所示。左上导洞炮孔布置如图 3 所示。

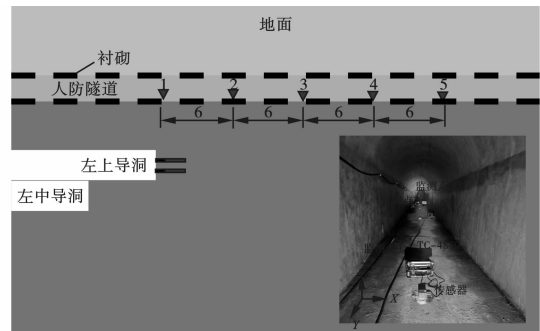


图 2 爆破振动监测点示意图(单位:m)
Fig. 2 Schematic diagram of blasting vibration monitoring points(unit:m)

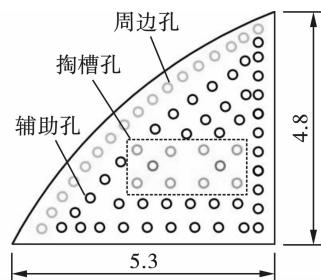


图 3 左上导洞炮孔布置图(单位:m)
Fig. 3 The hole layout diagram(unit:m)

2 数值模型及其验证

为分析评估区间隧道爆破开挖对方人防隧道的影响,依据地铁隧道爆破开挖工程实际,采用 LS-DYNA 动力有限元软件,建立大断面隧道左上导洞开挖爆破振动作用下人防隧道动力响应数值计算模型,并利用现场爆破振动监测数据与数值模拟结果对比分析验证数值模型的可靠性。

2.1 数值计算模型的建立

根据现场爆破参数,左上导洞掏槽孔装药量大于其他炮孔且自由面少,夹制作用大,引起的爆破振动大于其他炮孔,因此数值建模时仅考虑 8 个掏槽孔的爆破,用以模拟区间隧道左上导洞掏槽爆破对邻近人防隧道衬砌结构的影响。数值模型采用 SOLID 实体单元建模,模型材料包括炸药、炮泥、围岩、土层和人防隧道混凝土衬砌,均采用拉格朗日网格划分。由于左上导洞超前于其他导洞开挖,在模拟时为避免产生边界效应,数值模型的整体尺寸设计为 80 m × 50 m × 40 m,模型共划分 904154 个单元。建模时采用 cm-g- μ s 单位制。根据工程现场特点,数值模型顶面为自由边界,其他各面均采用无反射边界条件(non-reflecting boundary),数值模型尺寸及边界条件设置如图 4 所示。 X 方向为隧道环向, Y 方向为垂直方向, Z 方向为隧道轴向,其中左上导洞掌子面处 $Z = 0$, Z 轴正向为未开挖段, Z 轴负方向为已开挖段。

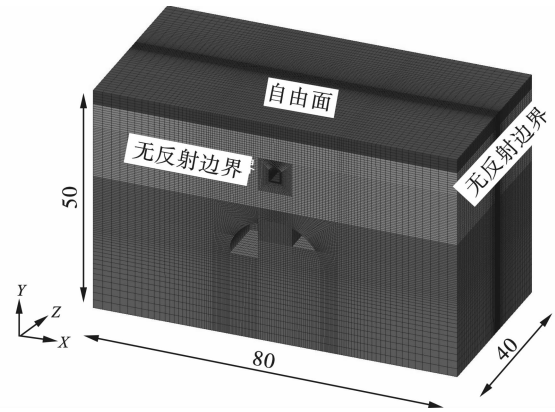


图 4 模型网格划分(单位:m)

Fig. 4 Mesh of the numerical model(unit:m)

2.2 材料本构模型及参数选取

隧道爆破现场采用 2 号岩石乳化炸药,数值模拟中选用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 高能炸药材料表示炸药性质。模拟炸药爆轰过程采用 JWL 状态方程描述爆轰产物中压力和内能及爆轰产物的相对体积之间的关系^[16],如式(1)所示。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中: p 为爆轰压力; V 为炸药初始相对体积; E_0 为炸药单位体积内能; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为特征参数。炸药及其状态方程的具体参数见表 1。

表 1 炸药及其状态方程相关参数

Table 1 Parameters of explosive and its equation of state

$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$v/(m \cdot s^{-1})$	ρ/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	E_0/GPa
1.1	3500	3.24	47.6	0.542	3.5	0.9	4.26

区间隧道所在地层较为复杂,建模过程中将其简化为三层依次为:杂填土、黏土、微风化灰岩。岩土体介质是非连续、不均匀的,目前还不能用数学方程直接描述这些围岩,所以一般工程数值模拟通常将围岩假设为连续的、各向同性的。使用 *MAT_DRUCKER_PRAGER 表示杂填土、黏土本构模型;使用 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC 表示微风化灰岩的本构模型;岩土体物理力学参数见表 2、表 3。

表 2 素填土与黏土力学参数

Table 2 Mechanical parameters of fill and clay

材料	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	μ	c/KPa	G/MPa	φ/rad
素填土	1.98	0.350	15	7.3	0.174
粘土	1.95	0.275	35	13.7	0.262

表 3 微风化灰岩力学参数

Table 3 Mechanical parameters of slightly weathered limestone

$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	μ	E/GPa	σ_s/MPa	τ/GPa
2.68	0.2	35	80	1.05

人防隧道衬砌结构是本文的主要研究对象,其位于黏土层中。根据现场资料知人防隧道衬砌结构使用的材料为 C30 的混凝土,考虑人防隧道修建时间较长,为更好的判定混凝土衬砌结构的极限强度,对材料强度进行折减。借鉴文献对老化混凝土材料爆破作用下响应特征的变化^[17],将混凝土标号由 C30 降为 C25,衬砌混凝土参数如表 4 所示。

2.3 数值模型的可靠性验证

分析现场爆破振动监测数据知,大断面隧道左

上导洞掏槽爆破引起人防隧道底板在 X 、 Y 、 Z 三个方向的振动响应不同。人防隧道底板 Y 方向质点峰值振速大于 X 和 Z 方向质点峰值振速。因 Y 方向振速最大,此方向的振动对人防隧道的影响最大。将监测得到人防隧道底板 Y 方向质点峰值振速与数值模型计算结果中的 Y 方向质点峰值振速对比,验证模型准确性。选取掏槽爆破过程中三个监测点的质点峰值振速与数值模拟中相应位置处的质点峰值振速进行统计,结果如表 5 所示,现场监测与数值模拟结果的误差较小,故可初步验证此模型的可靠性。

表 4 混凝土材料力学参数

Table 4 Mechanical parameters of concrete materials

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	μ	σ_c/MPa	σ_t/MPa	E_D/GPa
2.55	0.2	20.1	1.78	28

表 5 现场监测与数值模拟测点振速统计

Table 5 Field test and simulation velocity measuring points statistics

PPV/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	数值模拟	现场监测	误差/%
监测点 1	7.36	7.64	3.8
监测点 2	6.34	6.79	7.1
监测点 3	5.48	5.95	8.5

为进一步验证模型的可靠性,取 #1 监测点的掏槽爆破振动速度时程曲线与数值模拟爆破振动速度时程曲线对比,如图 5 所示。现场爆破监测所得掏槽爆破振速时程曲线和数值模拟振速时程曲线波形相似、质点峰值振速接近,判断此模型可靠。因此可利用此数值模型进一步分析爆破振动作用下上方既有人防隧道的动力效应。

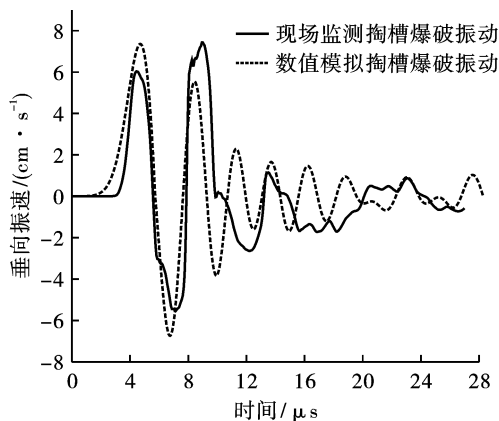


图 5 数值模拟与现场监测掏槽爆破振速时程曲线
Fig. 5 Numerical simulation and field test of blasting vibration velocity curve

3 人防隧道动力响应特征分析

3.1 人防隧道衬砌结构振动速度分析

爆破振动对邻近建(构)筑物产生的最直观影响为引起建(构)筑物结构产生振动。利用 LS-DYNA 建立下穿人防隧道的地铁区间隧道爆破开挖数值模型,对爆破引起的人防隧道动力响应问题进行研究。沿人防隧道衬砌结构的拱顶、迎爆侧拱肩、迎爆侧边墙、迎爆侧拱脚及底板五个关键部位布置 Z 方向测线,如图 6 所示,研究人防隧道衬砌结构断面各关键部位振动速度的轴向分布规律。统计五条测线上各质点峰值振速(PPV)分布,结果如图 7 所示。

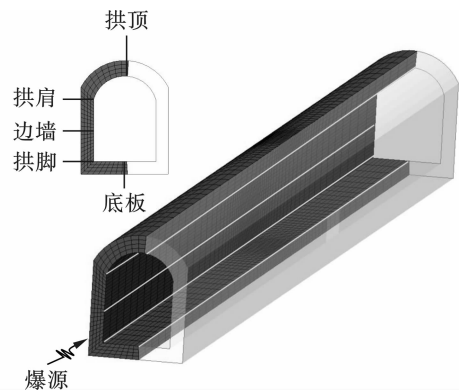


图 6 测线布置示意图

Fig. 6 Layout of measuring lines at key positions

从图 7 中可看出,人防隧道底板的 PPV 远大于其他四条测线,各部位的 PPV 随着与爆源距离的增大而逐渐减小。人防隧道底板的 PPV 最大值为 8.2 cm/s ,其他各部位的 PPV 最大值约为 2.6 cm/s ,左上导洞爆破开挖对人防隧道底板产生的振动影响最大。沿人防隧道轴向各测线 PPV 最大值均出现在爆源上方 ($Z = 2 \text{ m}$ 附近)。为控制爆破振动对人防隧道衬砌结构的危害,应重点监测 $Z = 2 \text{ m}$ 位置处的质点振动速度。

采用《爆破安全规程(GB6722—2014)》推荐萨道夫斯基公式分析未开挖区爆破振动沿人防隧道轴向的衰减规律^[18]。萨道夫斯基公式如下式

$$V = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (2)$$

式中: V 为振动速度, cm/s ; K 、 α 为与工程地质条件有关的衰减系数; Q 为炸药量, kg ; R 为爆心距, m 。

引入比例距离 $SD = R/\sqrt[3]{Q}$, 萨道夫斯基公式可写为

$$V = KSD^{-\alpha} \quad (3)$$

由 2.3 节分析可知,爆破引起的人防隧道衬砌

结构的振动响应中, Y 方向振动速度远大于其他两方向, 故对爆破振动引起的人防隧道底板上的 Y 方向振速衰减规律进行回归分析, 拟合得出峰值振速衰减规律如图 8 所示。

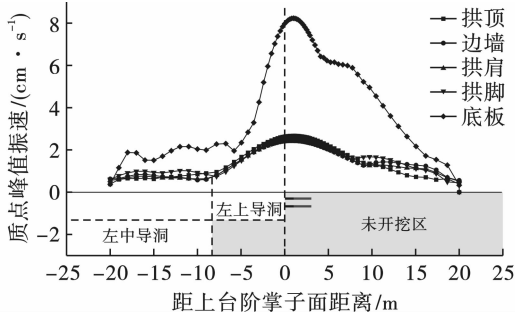


图 7 人防隧道轴向峰值振速分布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of axial peak vibration velocity of civil air defense tunnel

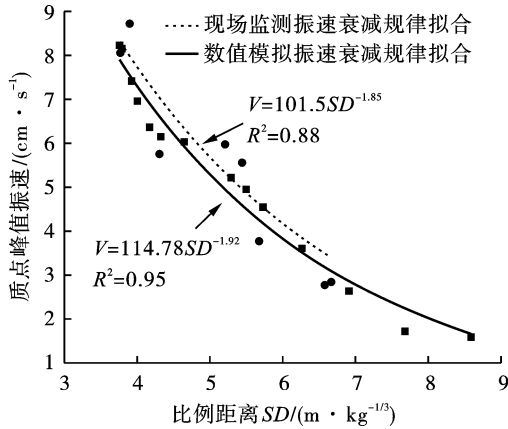


图 8 现场监测与数值模拟萨道夫斯基拟合曲线

Fig. 8 Field monitoring and numerical simulation of fitted Sadowski curve

从图 7 还可看出, 质点峰值振速在区间隧道已开挖区上方人防隧道底板的衰减速率存在明显突变。利用萨道夫斯基公式对左中导洞未开挖部分与已开挖部分峰值振速衰减规律如图 9 所示。左中导洞未开挖区 PPV 衰减系数为 3.51, 左中导洞已开挖区 PPV 衰减系数为 0.764。从图 9 中左中导洞已开挖区和未开挖区振速衰减速率对比可判断, 已成洞断面面积大小、爆心距大小对振速传播规律均有影响, 且质点峰值振速在掌子面后方较短距离内迅速衰减。

3.2 人防隧道衬砌结构应力分析

通过对人防隧道质点峰值振速的分析可知, 下穿隧道爆破引起爆源上方人防隧道衬砌结构的振动最大。对区间隧道未开挖区上方人防隧道衬砌结构分析, 不同时刻的最大主应力分布情况如图 10 所

示。21 ms 时人防隧道衬砌结构的最大主应力开始明显增大; 29 ms 时人防隧道底板最大主应力达到峰值, 为 0.349 MPa; 31 ms 时拱顶最大主应力达到峰值, 为 0.187 MPa; 32.5 ms 时隧道迎爆侧拱脚最大主应力达峰值, 为 0.557 MPa。各位置的最大主应力峰值均出现在 Z = 2 m 附近, 即爆源正上方人防隧道截面。

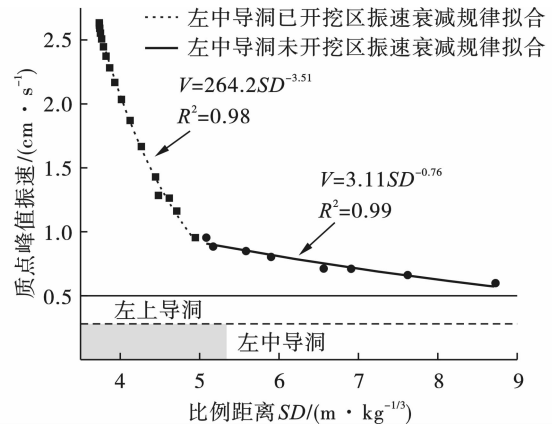


图 9 左中导洞开挖区前后萨道夫斯基拟合曲线

Fig. 9 Sadowski fitting curve before and after excavation area of left pilot tunnel

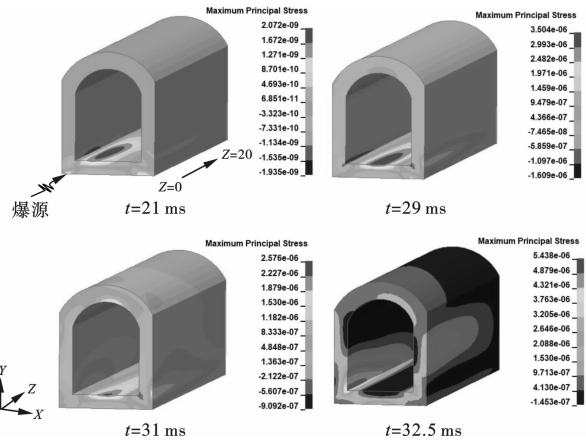


图 10 不同时刻最大主应力分布云图

Fig. 10 Distribution nephogram of maximum principal stress at different time points

结合分析振速分布特征与应力分布特征, 得出衬砌结构最危险截面位于 Z = 2 m。人防隧道此截面各位置处的应力时程曲线如图 11 所示, 有效应力峰值出现在迎爆侧拱脚处, 为 0.41 MPa; 有效应力最小值出现在人防隧道拱顶, 为 0.22 MPa。最大主应力峰值出现在迎爆侧拱脚处, 为 0.557 MPa; 最大主应力最小值出现在拱顶, 为 0.196 MPa。LS-DYNA 中应力分布服从“拉正压负”原则, 从图中可看出人防隧道衬砌结构所受拉应力大于受到的压应力。

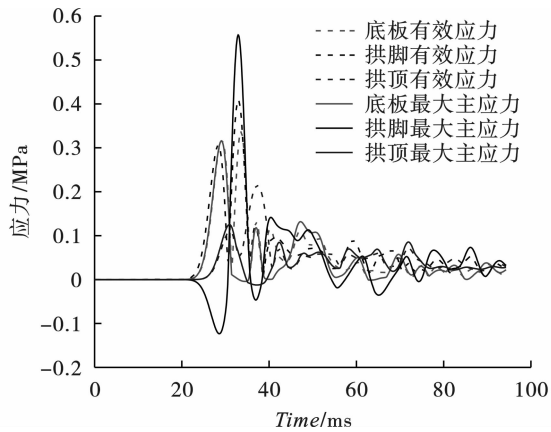


图11 最危险截面关键位置应力时程曲线
Fig. 11 Stress time curve at the critical position of the most dangerous section

最危险截面断面上各位置 X、Y、Z 方向应力峰值统计结果如图 12 所示。在隧道底板和拱顶 X 方向最大主应力大于 Y、Z 两方向最大主应力,在隧道边墙位置 Y 方向最大主应力远大于 X、Z 两方向最大主应力。X、Y、Z 三个方向的应力在拱脚、拱肩处存在应力集中现象。在底板上 X 方向应力峰值为 0.418 MPa;在拱顶上 X 方向最大应力为 0.25 MPa;在拱脚处 Y 方向应力峰值为 0.53 MPa;在拱肩处 Y 方向应力峰值为 0.274 MPa。人防隧道衬砌结构最危险截面所受拉应力小于衬砌结构的抗拉强度,故此工况下人防隧道衬砌结构处于安全状态。

3.3 人防隧道衬砌结构动力失稳模式

在最危险截面断面上选取 6 个关键截面(A、B、

C、D、E、F)如图 13,研究爆破振动作用下人防隧道衬砌结构最危险截面上最可能破坏的位置及其开裂方式。数值模型中人防隧道衬砌结构深度方向共划分 4 个单元(从内至外分别为单元 1~4),各单元应力大小分布如图 13 所示。从图中可知:人防隧道断面中边墙、拱肩、拱顶各截面的应力分布规律均为从内至外应力逐渐减小,即单元 1 的应力远大于其他各单元;迎爆侧拱脚 B 截面的单元 1 应力最大,为 0.558 MPa;拱顶左侧 D 截面的单元应力最小,为 0.17 MPa;人防隧道底板中轴线 A 截面单元应力从内至外分布规律为先减小后增大,单元 4 的应力最大为 0.543 MPa。

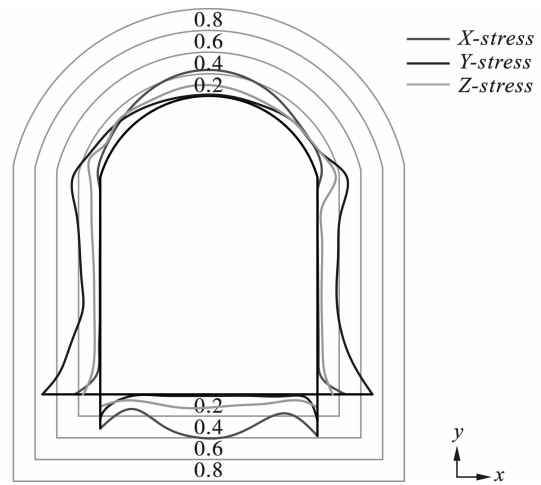


图12 隧道断面 X、Y、Z 方向峰值应力分布特征
Fig. 12 Distribution characteristics of peak stress in X, Y and Z directions on tunnel cross-section

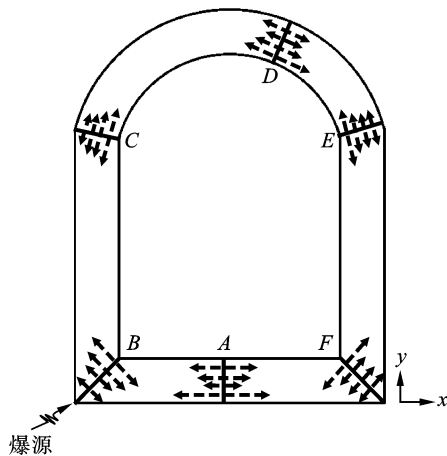
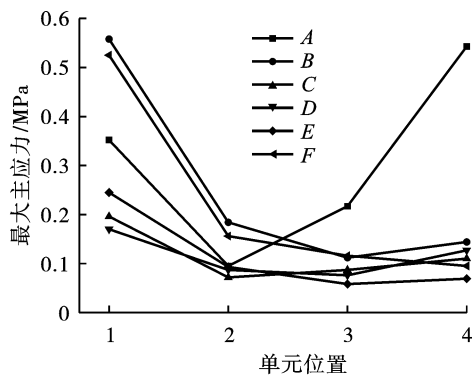


图13 人防隧道衬砌厚度方向应力分布规律

Fig. 13 Stress distribution law of civil air defense tunnel lining thickness direction

分析最大主应力的分布特征得出人防隧道衬砌结构稳定性受拉应力控制,衬砌结构可能的破坏方式为拉破坏。进一步分析衬砌结构所受拉应力的方向,人防隧道衬砌结构最危险截面的最大主应力矢



量分布如图 14。可以看出,不同时刻人防隧道衬砌断面各处的拉应力较大。其中,截面 B、C、E、F 受到的拉应力为垂直方向,截面 A、D 受到的拉应力为水平方向。当爆破应力足够大时,截面 B、C、E、F 的破

坏为垂直方向的拉伸破坏,截面A、D的破坏为水平方向的拉伸破坏。由最大主应力的大小及峰值应力出现的先后顺序,分析了人防隧道衬砌结构可能的开裂方式和破坏顺序为:B、C、D、E、F截面从内向外开裂,A截面从外向内开裂;人防隧道环向各截面可能开裂先后顺序为 $B > F > A > E > C > D$ 。

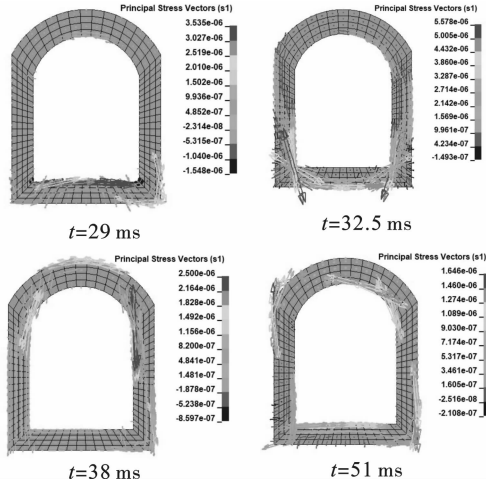


图14 最大主应力矢量云图

Fig. 14 Cloud map of maximum principal stress vector

3.4 人防隧道衬砌结构振动控制安全阈值

为确保区间隧道施工过程中人防隧道衬砌结构的安全稳定,采用控制爆破的方法降低爆破对衬砌结构的影响。根据数值模拟结果知应力在拱脚处存在应力集中,对迎爆侧拱脚处峰值振速和最大主应力进行线性拟合,得出峰值振速和最大主应力间的函数关系式,如式(4)所示。

$$\sigma_1 = 0.1617V_{\max} - 0.0234 \quad (4)$$

式中: σ_1 为最大主应力,MPa; V_{\max} 为峰值振速,cm/s。

混凝土衬砌结构在动力作用下极限抗拉强度将有所提高,其在动力作用下抗拉强度提高的程度与所受的荷载施加加速度有关,静抗拉强度与动抗拉强度有如下关系^[19]

$$\sigma_t = \sigma_0 [1 + 0.121g(V_H)] = K_D \sigma_0 \quad (5)$$

式中: σ_t 为岩石的动抗拉强度, σ_0 为岩石静抗拉强度; $V_H = \sigma_H / \sigma_{t1}$; σ_H 为任意加荷速度, σ_{t1} 为加荷速度; K_D 为动力强度提高系数。

考虑爆破地震波作用下岩石的加荷速度可达 10^6 MPa/s,一般岩石隧道加荷速度为 $10 \sim 10^3$ MPa/s之间,可取动力强度提高系数 K_D 取 1.34 ^[20]。由2.2节知混凝土极限抗拉强度为1.78 MPa,所以衬砌结构的动抗拉强度为2.4 MPa,带入式(4)计算可得人防隧道衬砌结构爆破振动速度安全阈值为14.9 cm/s。

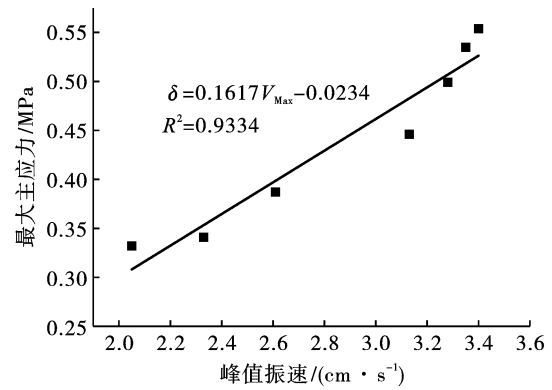


图15 迎爆侧拱脚最大主应力与峰值振速关系

Fig. 15 The relationship between the maximum principal stress and the peak vibration velocity of the arch foot on the explosion-bearing side

4 结论

通过对武汉地铁八号线洪山路站~小洪山站区间大断面隧道左上导洞爆破施工进行振动监测,并结合数值模拟分析隧道爆破施工对上方邻近人防隧道衬砌结构的影响,得出以下结论:

(1)爆破振动作用下,人防隧道底板的PPV值最大;随着爆心距的增加PPV逐渐减小,PPV最大值出现在爆源上方;对已开挖区振速衰减规律分析,得到开挖空洞的断面大小和爆心距大小对爆破振动速度衰减速率有较大影响。

(2)大断面隧道爆破施工引起人防隧道衬砌结构所受拉应力大于压应力,人防隧道衬砌结构稳定性受拉应力控制。人防隧道截面上的拉应力分布情况为:边墙上主要受垂直方向拉伸应力,底板与拱顶上主要受隧道环向拉伸应力。

(3)人防隧道最危险截面为爆源上方($Z = 2$ m处),此截面最可能破坏的位置为迎爆侧拱脚,破坏方式为从内至外的拉破坏。

(4)基于极限抗拉强度准则计算得到人防隧道衬砌结构爆破振动速度安全阈值为14.9 cm/s。

参考文献 (References)

- [1] 李术才,李克先,雷刚,等. 近距离下穿在建地铁隧道施工爆破变形及控制方法研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 284-289.
- [1] LI Shu-cai, LI Ke-xian, LEI Gang, et al. Study of blasting vibration and deformation control for metro construction beneath existing metro tunnel in short distance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 284-289. (in Chinese)

- [2] 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.
- [2] LIANG Shu-feng, LING Tian-long, LI Chen. Blasting vibration effect of small-spaced tunnel at great wall high railway station[J]. Blasting,2021,38(1):116-123,139. (in Chinese)
- [3] 张忆,杨文东,彭振,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):147-153.
- [3] ZHANG Yi, YANG Wen-dong, PENG Zhen, et al. Caused dynamic response of high rise frame structure by blasting excavation of subway tunnel[J]. Blasting,2018,35(1):147-153. (in Chinese)
- [4] 夏宇馨,蒋楠,周传波,等. 下穿地铁隧道爆破振动作用下给水管动力响应特性研究[J]. 爆破,2019,36(1):6-13,37.
- [4] XIA Yu-qing, JIANG Nan, ZHOU Chuan-bo, et al. Dynamic response characteristics of water supply pipeline under blasting vibration of underneath tunnel[J]. Blasting,2019,36(1):6-13,37. (in Chinese)
- [5] 王明年,潘晓马,张成满,等. 邻近隧道爆破振动响应研究[J]. 岩土力学,2004(3):412-414.
- [5] WANG Ming-nian, PAN Xiao-ma, ZHANG Cheng-man, et al. Study of blasting vibration influence on close-spaced tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics,2004(3):412-414. (in Chinese)
- [6] 易长平,卢文波. 开挖爆破对邻近隧洞的震动影响研究[J]. 工程爆破,2004(1):1-5,12.
- [6] YI Chang-ping, LU Wen-bo. A study of the effect of blasting vibration on adjacent tunnel[J]. Engineering Blasting,2004(1):1-5,12. (in Chinese)
- [7] 管晓明,聂庆科,李华伟,等. 隧道爆破振动下既有建筑结构动力响应及损伤研究综述[J]. 土木工程学报,2019,52(S1):151-158.
- [7] GUAN Xiao-ming, NIE Qing-ke, LI Hua-wei, et al. Research overview on dynamic response and damage of existing structure under tunnel blasting vibration[J]. China Civil Engineering Journal,2019,52(S1):151-158. (in Chinese)
- [8] 于建新,陈卫忠,杨建平,等. 上下交叉隧道爆破振动控制技术研究[J]. 岩土力学,2014,35(S2):445-452.
- [8] YU Jian-xin, CHEN Wei-zhong, YANG Jian-ping, et al. Study of blasting vibration control technology of up and down cross tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(S2):445-452. (in Chinese)
- [9] 刘明贵,张国华,刘绍波,等. 大帽山小净距隧道群中夹岩累计损伤效应研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(7):1363-1369.
- [9] LIU Ming-gui, ZHANG Guo-hua, LIU Shao-bo, et al. Research on accumulative damage effect of interlaid rock in damaoshan tunnel group with small clear distance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(7):1363-1369. (in Chinese)
- [10] 高宇璠,傅洪贤,季相臣,等. 小净距隧道钻爆施工中夹岩振动规律研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(S2):3440-3449.
- [10] GAO Yu-fan, FU Hong-xian, JI Xiang-chen, et al. Research and application of interlaid rock vibration law in drilling and blasting construction of small clear distance tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(S2):3440-3449. (in Chinese)
- [11] 毕继红,钟建辉. 邻近隧道爆破震动对既有隧道影响的研究[J]. 工程爆破,2004(4):69-73.
- [11] BI Ji-hong, ZHONG Jian-hui. Study on influence of blasting vibration from excavation of a new tunnel on existed tunnel[J]. Engineering Blasting,2004(4):69-73. (in Chinese)
- [12] 贾磊,解咏平,李慎奎. 爆破振动对邻近隧道衬砌安全的数值模拟分析[J]. 振动与冲击,2015,34(11):173-177,211.
- [12] JIA Lei, XIE Yong-ping, LI Shen-kui. Numerical simulation for impact of blasting vibration on nearby tunnel lining safety[J]. Journal of Vibration and Shock,2015,34(11):173-178. (in Chinese)
- [13] 钟冬望,吴亮,余刚. 邻近隧道掘进爆破对既有隧道的影响[J]. 爆炸与冲击,2010,30(5):456-462.
- [13] ZHONG Dong-wang, WU Liang, YU Gang. Effect of tunneling blasting on an existing adjacent tunnel[J]. Explosion and Shock Waves,2010,30(5):456-462. (in Chinese)
- [14] 蒋楠,周传波. 爆破振动作用下既有铁路隧道结构动力响应特性[J]. 中国铁道科学,2011,32(6):63-68.
- [14] JIANG Nan, ZHOU Chuan-bo. Dynamic response characteristics of existing railway tunnel structure subjected to blasting vibration[J]. China Railway Science,2011,32(6):63-68. (in Chinese)
- [15] 李云鹏,艾传志,韩常领,等. 小间距隧道爆破开挖动力效应数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击,2007(1):75-81.
- [15] LI Yun-peng, AI Chuan-zhi, HAN Chang-ling, et al. Study on dynamics effect caused by blasting construction by numerical simulation for tunnels with small spacing[J]. Explosion and Shock Waves,2007(1):75-81. (in Chinese)
- [16] YANG R, BAWDEN W F, KATSABANIS P D. A new constitutive model for blast damage[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts,1996,33(3):245-254.
- [17] 胡春红. 邻近栈桥在水下爆破地震作用下的动力响应及安全性评价[D]. 大连:大连理工大学,2006.
- [17] HU Chun-hong. Dynamic response and safety evaluation of vicinal pier subjected to underwater blasting vibration

- [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [18] GB 6722—2014 爆破安全规程[S].
- [19] 张程红. 邻近隧道爆破施工引起的既有隧道衬砌振动速度阈值分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2009.
- [19] ZHANG Cheng-hong. Analysis of velocity maximum of the lining of existing tunnel by blasting of the tunnel near-by [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [20] 蒋楠, 周传波, 罗钢, 等. 铁路隧道混凝土衬砌爆破振动安全判据[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(7): 2746-2750.
- [20] JIANG Nan, ZHOU Chuan-bo, LUO Gang, et al. Blasting vibration safety criterion of railway tunnel concrete lining [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(7): 2746-2750. (in Chinese)

英文编辑: 李立峰

(上接第9页)

(1) 水耦合装药爆破的不耦合系数增大, 径向裂纹的数量会增多且分布更均匀。

(2) 水耦合装药爆破的不耦合系数增大, 使破碎区减小, 裂隙区扩大, 避免过度破碎而浪费能量。

(3) 水耦合装药爆破效果达到最佳的不耦合系数应在 2.67 左右, 可以为以后的工程实践提供理论支持。

参考文献 (References)

- [1] 龚玖, 汪海波, 王梦想, 等. 空气和水不耦合装药对爆破块度影响分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(9): 105-110.
- [1] GONG J, WANG H B, WANG M X, et al. Analysis on the influence of air and water uncoupled charge on blasting fragmentation [J]. China Science and Technology of Work Safety, 2018, 14(9): 105-110. (in Chinese)
- [2] 宗琦, 罗强. 炮孔水耦合装药爆破应力分布特性试验研究[J]. 实验力学, 2006(3): 393-395, 397-398.
- [2] ZONG Q, LUO Q. Experimental study on blasting stress distribution characteristics of borehole water coupling charge [J]. Experimental Mechanics, 2006(3): 393-395, 397-398. (in Chinese)
- [3] 杨跃宗, 邵珠山, 熊小锋, 等. 岩石爆破中径向和轴向不耦合装药的对比分析[J]. 爆破, 2018, 35(4): 26-33, 146.
- [3] YANG Y Z, SHAO Z S, XIONG X F, et al. Comparative analysis of radial and axial uncoupled charges in rock blasting [J]. Blasting, 2018, 35(4): 26-33, 146. (in Chinese)
- [4] 田浩, 张义平, 王彬, 等. 不耦合装药对混凝土爆破效果的影响试验研究[J]. 爆破, 2019, 36(3): 25-30, 42.
- [4] TIAN H, ZHANG Y P, WANG B, et al. Experimental study on the effect of uncoupled charge on concrete blasting [J]. Blasting, 2019, 36(3): 25-30, 42. (in Chinese)
- [5] 付强. 径向不耦合系数对预裂爆破效果影响的数值模拟研究[J]. 四川建筑, 2020, 40(4): 158-159, 165.
- [5] FU Q. Numerical simulation study on the effect of radial decoupling coefficient on presplitting blasting effect [J]. Sichuan Jianshe, 2020, 40(4): 158-159, 165. (in Chinese)
- [6] 岳中文, 胡晓冰, 陈志远, 等. 不耦合装药对炸药能量利用率影响的实验研究[J]. 爆破, 2020, 37(3): 34-39.
- [6] YUE Z W, HU X B, CHEN Z Y, et al. Experimental study on the effect of uncoupled charge on the energy utilization of explosives [J]. Blasting, 2020, 37(3): 34-39. (in Chinese)
- [7] 庄义军, 薛峰, 张卫, 等. 深孔预裂爆破装药量计算方法及水耦合装药结构优化[J]. 中国矿业, 2021, 30(1): 150-154.
- [7] ZHUANG You-jun, XUE Feng, ZHANG Wei, et al. Charge calculation method of deep hole presplitting blasting and optimization of water coupling charge structure [J]. China Mining, 2021, 30(1): 150-154. (in Chinese)
- [8] 苟倩倩, 赵明生, 张光雄, 等. 装药结构对爆破振动能量传递的影响研究[J]. 爆破, 2020, 37(1): 61-67.
- [8] GOU Qian-qian, ZHAO Ming-sheng, ZHANG Guang-xiong, et al. Study on the influence of charge structure on the energy transfer of blasting vibration [J]. Blasting, 2020, 37(1): 61-67. (in Chinese)
- [9] HOYOUNG Jeong, BYUNGKYU Jeon, SEUNGBUM Choi, et al. Fracturing behavior around a blasthole in a brittle material under blasting loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 140 (prepublish): 103562.
- [10] 米中阳. 不耦合系数对水孔爆破效果影响的模型试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- [10] MI Z Y. Model test study on influence of decoupling coefficient on water hole blasting effect [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [11] 林哲, 张世平. 水耦合装药下爆炸应力波传播规律的数值模拟[J]. 煤炭技术, 2017, 36(8): 88-90.
- [11] LIN Z, ZHANG S P. Numerical simulation of explosion stress wave propagation law under water coupling charge [J]. Coal Technology, 2017, 36(8): 88-90. (in Chinese)

英文编辑: 陈东方