

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.06.010

隧道扩挖既有衬砌的爆破拆除^{*}

彭泽森^① 倪迪^② 陶小钧^② 朱爱山^③

- ①中国地质大学(武汉)(湖北武汉,430074)
- ②台州市交通投资集团有限公司(浙江台州,318000)
- ③浙江省隧道工程集团有限公司(浙江杭州,310005)

[摘 要] 以浙江温岭楼山隧道扩挖工程为背景,采用 ANSYS 数值模拟软件对两种工法下隧道拱顶既有衬砌的爆破拆除方案进行对比,研究不同的爆破开挖方案对隧道周边岩土体及既有隧道产生的影响。其中,工法一对隧道 I 部分衬砌及上方 I 部分岩土体同时进行开挖;工法二则对上述两部分进行分部开挖。通过对两种工法下监测点的振动速度进行研究分析,并参考 GB 6722—2014《爆破安全规程》,对比选出合适的爆破拆除方法。结果表明:两种工法左侧未开挖隧道的振动速度均低于安全标准;工法一的爆破振动速度相对较大,隧道右洞质点振动速度大于安全允许值;采用 Matlab 对右洞监测点的振动速度进行拟合,获得了爆破振动衰减规律。

[关键词] 隧道工程;方案比选;爆破拆除;振动速度;数值模拟

[分类号] U457+.6

Blasting Demolition of Existing Lining in Tunnel Expansion Excavation

PENG Zesen^①, NI Di^②, TAO Xiaojun^②, ZHU Aishan^③

- ① China University of Geosciences (Wuhan) (Hubei Wuhan, 430074)
- ② Taizhou Communications Investment Group (Zhejiang Taizhou, 318000)
- ③ Zhejiang Tunnel Engineering Group (Zhejiang Hangzhou, 310005)

[ABSTRACT] Based on the project of expanding and digging Wenling Loushan Tunnel in Zhejiang, the blasting demolition schemes of existing lining of tunnel arch roof under two engineering options were compared by ANSYS numerical simulation software, and the influences of different blasting excavation schemes on surrounding rock and soil mass and existing tunnels were studied. In construction method 1, the lining of part I of the tunnel and the rock and soil mass of part I above the tunnel are excavated at the same time. In construction method 2, the above two parts are excavated by segments. Vibration velocity of monitoring points under the two construction methods were analyzed. According to *Safety Regulations for Blasting* (GB 6722—2014), it was concluded that blasting vibration velocities in the two construction methods meet the standard. Vibration velocity in construction method 1 is relatively large, and that of the particle point in the right hole of the tunnel using engineering method 1 is greater than the safety allowable value. Matlab was used to fit the vibration velocity of the monitoring point in the right hole, and the blasting vibration attenuation tendency was obtained.

[KEYWORDS] tunnel engineering; scheme comparison; blasting demolition; vibration velocity; numerical simulation

引言

爆破拆除技术在建(构)筑物的拆除中被广泛应用^[1]。然而,爆破方案的选定和参数设计仍不够准确,仅采用工程类比及经验进行设计的风险较高,仍需要进行深入细致的分析来保证爆破的成功^[2-4]。

目前,数值模拟已成为拆除爆破方案设计及分析的重要方法。国内学者通过数值模拟对实际爆破过程进行再现和分析,开展了大量与爆破拆除相关的研究^[5-7],包括隧道爆破振动、施工方法优化以及安全爆破控制等^[8-13]。本文中,采用数值模拟对两种工法下的隧道衬砌爆破拆除方案的安全性进行研究,并对监测数据进行拟合、比较,得出合适的爆破拆除

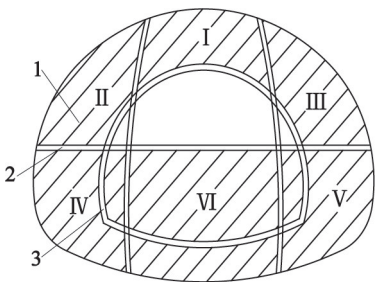
^{*} 收稿日期:2019-06-14
基金项目:浙江省交通运输厅科研计划项目(2018013);国家自然科学基金(41672260)
第一作者:彭泽森(1995-),男,硕士研究生,主要从事爆破技术相关的研究。E-mail:1774783464@qq.com

方案及爆破振动的衰减规律。

1 爆破方案

楼山隧道位于浙江省温岭市楼山村,为分离式隧道,是台州市通往温岭市的主要交通要道。目前正在使用,交通流量较大。现需对既有双向四车道隧道原位扩建为双向八车道隧道。为了保证交通,实行一洞改建,另一洞保持交通通行,要求在实施爆破作业时,保证通行隧道的安全。

根据工程实际情况,楼山隧道拟定两种不同的爆破方法进行既有钢筋混凝土衬砌的爆破拆除。隧道模型示意图见图 1,罗马数字表示隧道开挖顺序。



1 - 岩土体;2 - 钢架;3 - 衬砌。

图 1 计算模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of calculation model

I 部分及既有衬砌炮孔参数如表 1 所示。表 1 中,衬砌炮孔共 21 个,计算得到每个炮眼装药量取整为 150 g。

1.1 整体开挖(工法一)

工法一为整体开挖。在第 I 部分岩土体及衬砌处都安放了炸药,采用毫秒微差爆破一次爆破开挖,设置 4 个段别起爆,顺序依次为掏槽眼、辅助眼、周边眼、衬砌炮眼。炮眼布置如图 2 所示。

1.2 分部开挖(工法二)

工法二为分部开挖。利用钢架对岩土体进行加固,同样采用毫秒微差爆破。但 1 阶段只在第 I 部分岩土体中放置了炸药,设置 3 个段别起爆,顺序依次为掏槽眼、辅助眼、周边眼;2 阶段 I 部分岩土体已经开挖完毕,因此只对既有衬砌进行爆破。炮眼布置如图 3 所示。

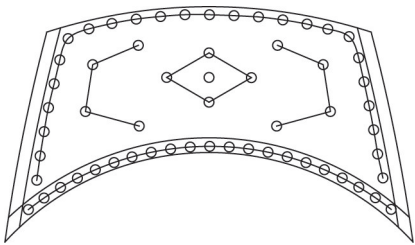
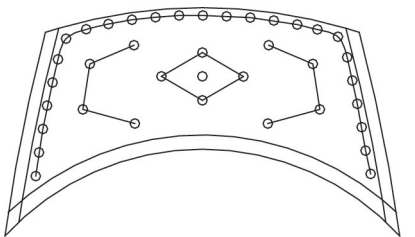
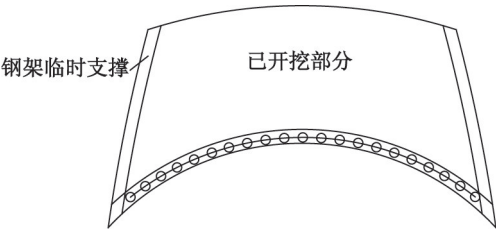


图 2 工法一炮眼布置图

Fig. 2 Perforation design in method 1



(a) 1 阶段



(b) 2 阶段

图 3 工法二炮眼布置图

Fig. 3 Perforation design in method 2

2 有限元模拟

对两种不同工法下的既有钢筋混凝土衬砌爆破拆除过程进行数值模拟,对模型中相同位置监测点的振动速度进行比较,并与 GB 6722—2014《爆破安全规程》^[14]进行对比分析,选择合适的爆破方法。

2.1 模型及参数设定

以楼山隧道的起止桩号为右线 K19 + 446.4 ~ K19 + 956.0 (全长 509.6 m)、左线 ZK19 + 442.5 ~ ZK19 + 973.0 段为背景建模。原隧道的净断面为 10.25 m × 5 m,隧道两幅最小间距 29 ~ 35 m,总宽度为 10.25 m,隧道净空高 5 m。扩建后的楼山隧道

表 1 I 部分炮孔参数取值

Tab. 1 Hole parameters of part I

单位药量/ (kg · m ⁻¹)	装药长度/ cm	堵塞长度/ cm	循环药量/ kg	炮孔数量			单孔药量/kg		
				周边孔	掏槽孔	辅助孔	周边孔	掏槽孔	辅助孔
0.28	150	50	10.92	25	4	8	0.25	0.60	0.40

起止桩号为:右线 K19 + 468 ~ K19 + 955,全长 487 m;左线 ZK19 + 462 ~ K19 + 970,全长 508 m。隧道净断面为 17.25 m×5 m,隧道两幅最小间距 25 ~ 31 m,总宽度 17.25 m,隧道净空高 5 m。

该隧道模型以隧道横向为 X 轴,轴线方向为 Z 轴。综合考虑计算精度和效率,在 X 方向上,由隧道轴线向 X 轴负方向取 65.8 m,向 X 轴正方向取 30.0 m;在 Y 方向上,由隧道轴线向 Y 轴负方向取 25.0 m,向 Y 轴正方向取 60.0 m;在 Z 方向上,由隧道轴线向 Z 轴负方向取 7.0 m,向 Z 轴正方向取 0.5 m。因此,本隧道衬砌爆破拆除数值计算模型三维尺寸为 95.8 m×85.0 m×7.5 m。模型图见图 4。爆破部位见图 5。

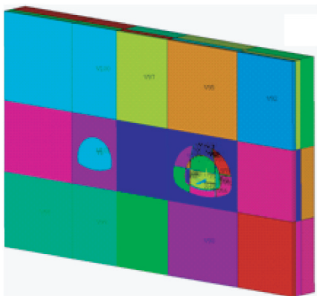


图 4 数值模拟模型

Fig.4 Numerical simulation model

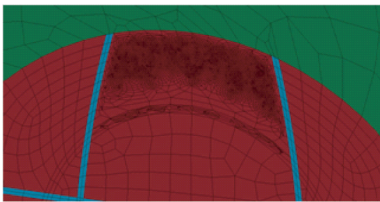


图 5 爆破部位示意图

Fig.5 Schematic diagram of blasting site

模型材料主要由炸药、岩土体、衬砌、空气和钢架 5 个部分组成,均选用实体单元 Solid164 进行网格划分。其中,2[#]岩石乳化炸药采用 Mat_High_Explosive_Burn 材料模型,参数如表 2 所示;岩土体及衬砌采用 Mat_Plastic_Kinematic 材料模型,参数如表 3 和表 4 所示;空气采用 Eos Linear Polynomial 材料模型,参数如表 5 所示;钢架采用 Mat_Johnson_Cook 材料模型,参数如表 6 所示。岩石、衬砌和钢架采用拉格朗日网格建模,炸药和空气采用流固耦合建模,单元使用多物质 ALE 算法。为了模拟无限大岩体,外边界均采用无反射边界条件。

考虑工程实际情况,同时为了便于数值模拟,模型炮孔深度为 2.0 m,炮孔直径为 4.5 cm,炮

表 2 炸药的计算参数

Tab.2 Parameters of the explosive

密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆速 D / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	A/Pa	B/Pa	
1 640	4 000	3.74×10^{11}	0.323×10^8	
R_1	R_2	ω	E/Pa	V
4.15	0.95	0.3	7×10^9	1.0

表 3 岩土体的计算参数

Tab.3 Parameters of rock masses

密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	屈服 强度/ MPa	弹性 模量/ GPa	剪切 模量/ MPa	硬化 系数
2 680	0.22	5.5	0.228	22	0.5

表 4 衬砌的计算参数

Tab.4 Parameters of lining

密度/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量/ GPa	剪切模量/ MPa
2.67	0.25	0.202	22

表 5 空气的计算参数

Tab.5 Parameters of air

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)		μ	C_0	C_1	
1.29		1.0	-1.0×10^{-6}	0	
C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E/Pa
0	0	0.4	0.4	0	2.5×10^{-6}

表 6 钢架的计算参数

Tab.6 Parameters of steel frame

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切 模量/ MPa	弹性 模量/ GPa	硬化 指数	初始内部 能量/J
7.83	0.77	0	0.26	0

孔间距为 50 cm,装药使用 2[#]岩石乳化炸药。炮孔起爆位置在炸药中间处。采用 LS-DYNA Solver 进行求解,使用 LS-Prepost 软件进行后处理。数值模拟中,所有参数均统一使用 cm-g- μs 单位制。

2.2 计算方案

爆破拆除的过程具有高速、复杂的特点,在数值模拟中很难将所有因素都考虑进去。因此,只考虑影响爆破效果的主要因素,简化次要因素。模拟中做出假设:

- 1)既有衬砌、岩石、炸药等材料性质均连续且具有各向同性;
- 2)模型任意两种介质的接触面上位移及速度

连续条件均得到满足;

3)爆破拆除过程为绝热过程,热力学参量的影响不作考虑;

4)不考虑岩石中裂隙的影响。

采用多物质材料与拉格朗日结构耦合算法来满足涉及两种以上物质的计算。

2.3 有限元模拟结果

模拟在各个工法下爆破振动速度的变化情况以及峰值大小。由于隧道模型右洞对称,结合温州绕城高速屏山隧道小净距段发现,在爆破施工中先行隧道迎爆侧边墙处应为重点监控范围^[15]。因此,分别取拱顶、拱腰、拱脚及拱底中的点研究爆破振动速度随时间变化的规律及振动速度的最大值。其中,右洞监测点位置取距离爆破掌子面 30 m 的既有隧道二衬位置处;左洞监测点所在面则与爆破掌子面平行。结果如表 7~表 9、图 6 所示。图 6 中,A~F 分别为各监测点的编号。

表 7 右洞监测点主振频率

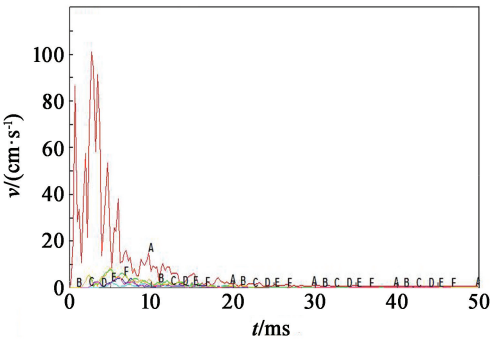
Tab. 7 Main vibration frequency of monitoring points in the right hole

Hz		
工法一	工法二 1 阶段	工法二 2 阶段
91.503	73.005	64.943

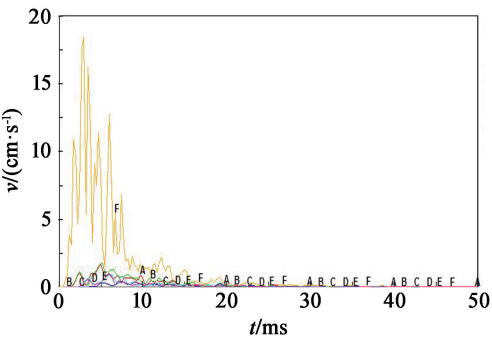
3 爆破方案优选

3.1 整体开挖方案(工法一)

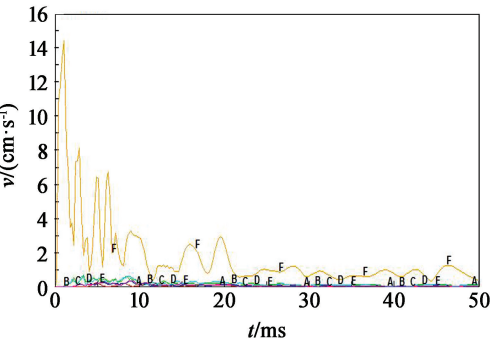
工法一的主振频率为91.503 Hz,振动速度为101.400 cm/s,造成这种现象的原因是第I部分岩土体中的炸药以及衬砌中的炸药同时引爆,导致炸药同时产生的压缩应力波叠加,在波阵面的切线



(a) 工法一



(b) 工法二 1 阶段



(c) 工法二 2 阶段

图 6 爆破振动速度随时间的变化趋势
Fig. 6 Blasting vibration velocity changing with time

表 8 右洞各点振动速度

Tab. 8 Vibration velocity of each point in the right hole

cm/s						
爆破方法	拱顶	左拱腰	右拱腰	左拱脚	右拱脚	拱底
工法一	101.400	8.052	8.645	4.270	4.703	2.132
工法二 1 阶段	18.504	7.058	6.747	3.648	3.841	1.569
工法二 2 阶段	14.430	2.565	2.290	1.264	1.340	0.860

表 9 左洞各点振动速度

Tab. 9 Vibration velocity of each point in the left hole

cm/s						
爆破方法	拱顶	左拱腰	右拱腰	左拱脚	右拱脚	拱底
工法一	0.597	0.153	1.233	0.117	1.129	0.357
工法二 1 阶段	0.440	0.115	0.927	0.090	0.834	0.262
工法二 2 阶段	0.171	0.058	0.385	0.041	0.313	0.132

方向上的拉伸应力增大,形成应力增高现象。由此使得岩土体局部应力过大,稳定性变小,导致了岩土体出现过大的变形,甚至产生裂缝。此时,岩土体抵抗爆炸冲击波的能力下降,使得岩土体振动速度增大。

3.2 分部开挖方案(工法二)

工法二的 1 阶段和 2 阶段的主振频率分别为 73.005 Hz 和 64.943 Hz,振动速度分别为 18.504 cm/s 和 14.430 cm/s。由于对岩土体和衬砌分别进行爆破开挖,单次爆破药量减少,振动频率与速度也相应减少;并且在 1 阶段开挖岩土体之后,对开挖轮廓用钢架进行了加固,从而有效地减小了对周围岩土体的破坏。

3.3 隧道左洞模拟结果

由表 9 可知,隧道左洞在两种工法下振动速度都很低,说明两种工法所产生的地震波或冲击波在传递的过程中都有很大程度的衰减,对左洞影响甚微。因此,在右洞进行爆破拆除的施工过程中,隧道左洞能够保持正常通车。

3.4 爆破方案对比

从楼山隧道振动速度随时间变化的模拟结果可以看出,楼山隧道爆破振动速度在爆破时达到了峰值,随后呈波浪状下降并最终平稳地趋于 0。隧道爆破振动速度的最大值均分布在拱顶位置,且各监测点的振动速度满足从拱顶到拱底逐渐减小的规律,模拟结果与实际情况相似。右洞进行爆破时对楼山隧道左洞的影响远低于安全允许标准,能够满足在右洞进行爆破的同时左洞正常交通的要求。

采用 GB 6722—2014《爆破安全规程》^[14] 建议的临界振动速度作为评判隧道破坏的标准,即邻近隧道爆破施工引起的在不同的振动频率下既有隧道破坏的临界振动速度为 10~20 cm/s。而从模拟结果中可以得出,工法一的振动速度远大于工法二,且超出了安全允许范围;采用工法二对隧道进行开挖,即先开挖第 I 部分岩土体,再对衬砌进行爆破拆除的分部开挖法能够满足安全要求。

4 工程应用

在实际施工过程中采用工法二对楼山隧道既有衬砌进行爆破拆除并监测。由于隧道爆破直接作用于岩土层,所产生的地震波对岩土层造成了一定的破坏。工程上一般采用萨道夫斯基经验公式进行爆破振动评价:

$$v=K\left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R}\right)^{\alpha}.$$

(1)

式中: v 为质点峰值振速,cm/s; Q 为单次爆破装药量,kg; R 为测点距爆破等效中心距离,m; K 和 α 为地质条件决定的系数和指数,一般情况下, K 、 α 取值如表 10 所示。

表 10 K 、 α 值与岩性的关系

Tab. 10 Relationship between K or α and lithology

岩性	K	α
坚硬岩石	50~150	1.3~1.5
中硬岩石	150~250	1.5~1.8
软岩石	250~350	1.8~2.0

在进行爆破拆除施工时,沿隧道轴线方向,在右洞扩挖部分隧道顶部选取监测点,记录监测点与隧道爆破掌子面的距离 R 。爆破监测示意图见图 7。

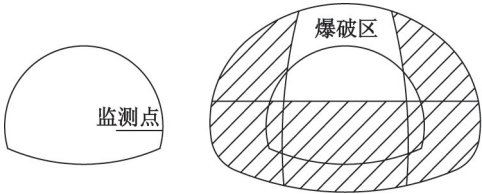


图 7 爆破监测示意图

Fig. 7 schematic diagram of blasting monitoring

选取 5 个节点,各监测点 R 值以及从数据采集软件中导出各观测点最大合成振动速度 v 见表 11。

表 11 测点最大振速 v 及对应的 R 值

Tab. 11 Maximum vibration velocity and its corresponding R at the measuring points

测点编号	R /m	v /(cm·s ⁻¹)
31609	38.27	15.932
31597	43.21	12.516
31585	48.15	10.742
31573	53.08	9.331
31561	58.02	9.016

从表 11 中可知,实测最大振速满足 GB 6722—2014《爆破安全规程》所规定的安全振速。通过对比发现,数值模拟的结果整体上小于实际监测结果。这是由于数值模拟是基于有限元理论进行计算的,其计算过程做了许多假设并忽略了一些复杂的因素,简化了运算,导致与实测结果有一定的差异。但总体来说,数值模拟的结果为实际施工提供了理论参考与指导作用,使爆破产生的实际振速控制在安全允许范围内。

此外,为验证实测数据的准确性,将萨道夫斯基

经验公式进行变换,可得

$$\ln v = \alpha \ln \frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} + \ln K。$$

(2)

对应的自变量和因变量数据如表 12 所示。

表 12 测点对应变量统计

Tab. 12 Statistics of corresponding variables
of measurement points

测点编号	$\ln v$	$\ln(Q^{1/3}/R)$
31609	2.72	-1.51
31597	2.55	-1.63
31585	2.40	-1.74
31573	2.27	-1.84
31561	2.14	-1.93

将表 12 的数据带入式(2),利用 Matlab 软件对式(2)进行线性拟合,可获取线性回归分析图,如图 8 所示。

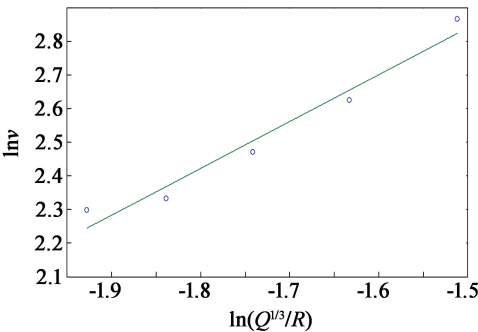


图 8 萨道夫斯基公式线性变换拟合

从拟合结果可知:拟合曲线斜率 $\alpha = 1.39$,截距 $\ln K = 4.83$,即 $K = 125$ 。现场待爆破区主要为凝灰岩,获取的 K 、 α 值在表 10 所示范围内,符合设定。由此即可确定出萨道夫斯基经验公式中两个未知参数 K 、 α ,该公式可优化为

$$v = 125 \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.39}。$$

(3)

楼山隧道按分部开挖法成功实施爆破,实际开挖情况如图 9 所示。爆破后,隧道岩土体整体性较好,不平整度以及平均超欠挖量在允许范围以内,岩面上用肉眼看不见明显裂缝;爆破后的岩石块体及衬砌大小适中,易于搬运。

5 结论

对楼山隧道爆破进行数值模拟并应用于实际工程中,得到以下结论:



图 9 爆破拆除施工现场
Fig. 9 Blasting demolition site

- 1)楼山隧道工法一监测点爆破振动速度大于工法二下两个爆破开挖步骤对应位置监测点爆破振动速度。
- 2)两种工法下左侧未开挖隧道质点振动速度均符合安全标准,可正常通车。
- 3)工法一隧道拱顶处振动速度大于安全允许值,而工法二质点振动速度均符合安全标准,隧道模型模拟质点振动速度满足拱顶至拱底逐渐减小的规律,因此在实际工程中采用了分部开挖法(工法二)。
- 4)采用 Matlab 对右洞的 5 个监测点的振动速度进行拟合,得到萨道夫斯基公式的两个未知参数,获得了隧道右洞爆破振动衰减规律。

参 考 文 献

[1] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京:冶金工业出版社,2011:201-203.

[2] 谢先启,刘军,贾永胜,等. 拆除爆破数值模拟研究进展[J]. 中国工程科学,2014,16(11):20-27.
XIE X Q, LIU J, JIA Y S, et al. Advances in numerical simulation of demolition blasting [J]. Engineering Sciences,2014,16(11):20-27.

[3] 谢先启,贾永胜,姚颖康,等. 复杂环境下城市超长高架桥精细爆破拆除关键技术研究[J]. 中国工程科学,2014,16(11):65-71,77.
XIE X Q, JIA Y S, YAO Y K, et al. Key technologies of

- precision demolition blasting of ultra-long urban viaduct in complicated surroundings [J]. Engineering Sciences, 2014, 16(11): 65-71, 77.
- [4] 李清, 杨阳, 杨仁树, 等. 基于 MAT96 本构模型的钢筋混凝土结构爆破拆除数值模拟[J]. 爆破器材, 2015, 44(1): 41-45.
- LI Q, YANG Y, YANG R S, et al. The numerical simulation of reinforced concrete structure blasting based on MAT96 constitutive model [J]. Explosive Materials, 2015, 44(1): 41-45.
- [5] 季杉, 王桂玲, 谢伟平. 高架桥爆破坍塌全过程数值模拟与分析[J]. 爆破, 2014, 31(4): 76-81.
- JI S, WANG G L, XIE W P. Analysis and numerical simulation of whole process of blasting and collapse of viaduct [J]. Blasting, 2014, 31(4): 76-81.
- [6] 费鸿禄, 杨小庚, 周健华, 等. 18 层框架楼房定向爆破倒塌迟缓原因分析[J]. 爆破, 2017, 34(4): 149-154, 174.
- FEI H L, YANG X G, ZHOU J H, et al. Analysis of collapse delay causes of directional explosive demolition in 18 layers frame buildings [J]. Blasting, 2017, 34(4): 149-154, 174.
- [7] 谢先启, 贾永胜, 黄小武, 等. 17 层框-剪结构大楼定向爆破拆除[J]. 爆破, 2016, 33(2): 107-112.
- XIE X Q, JIA Y S, HUANG X W, et al. Directional explosive demolition of 17-layer frame-shear structure building [J]. Blasting, 2016, 33(2): 107-112.
- [8] 朱正国, 孙明路, 朱永全, 等. 超小净距隧道爆破振动现场监测及动力响应分析研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3747-3752, 3759.
- ZHU Z G, SUN M L, ZHU Y Q, et al. Field monitoring on blasting vibration and dynamic response of ultra-small spacing tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3747-3752, 3759.
- [9] 姚勇, 何川, 晏启祥, 等. 董家山隧道小净距段爆破控制的数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(增 2): 501-506.
- YAO Y, HE C, YAN Q X, et al. Numerical simulation of blasting control for small clear distance zone of Dongjiashan Tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Suppl. 2): 501-506.
- [10] 王春梅. 小间距隧道爆破对既有隧道振动影响分析[J]. 爆破, 2013, 30(2): 84-89.
- WANG C M. Analysis of vibration influences of small spacing tunnel blasting on existing tunnel[J]. Blasting, 2013, 30(2): 84-89.
- [11] 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, 27(1): 75-81.
- LI Y P, AI C Z, HAN C L, et al. Study on dynamics effect caused by blasting construction by numerical simulation for tunnels with small spacing [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(1): 75-81.
- [12] 王继槐, 刘辉, 颜东煌. 小间距隧道爆破振动影响分析[J]. 中外公路, 2012, 32(3): 268-271.
- [13] 李秀地, 蒋树屏, 刘元雪, 等. 小净距隧道扩建爆破动力响应数值模拟方法研究[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 784-789.
- LI X D, JIANG S P, LIU Y X, et al. Numerical simulation of blasting dynamic response of small spacing tunnel expansion[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 784-789.
- [14] 爆破安全规程: GB 6722—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- Safety regulations for blasting: GB 6722—2014 [S]. Beijing: China Standard Press, 2014.
- [15] 杜峰, 闫军, 张学民, 等. 大跨度小净距隧道爆破振动影响数值模拟分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(3): 568-574.
- DU F, YAN J, ZHANG X M, et al. Numerical simulation of large span and small spacing neighborhood tunnel blasting vibration effect [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(3): 568-574.

声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部