

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.02.014

## 孤石深孔爆破对临近竖井的振动影响研究<sup>\*</sup>

张彪

(中铁二十三局集团有限公司,成都 610072)

**摘要:** 采用现场测试和数值分析相结合的方法,研究了孤石深孔爆破对临近竖井结构振动影响。结果表明:减振孔可以有效减缓孤石爆破对竖井基坑围护桩的破坏;隔离孔可以保证相临爆区孤石的完整性;增加孤石爆破分区,减小炮孔间距,减少一次爆破量,可以有效控制竖井爆破振速。以孤石分区5区为例,将炮孔间距调整为 $0.5\text{ m}\times 0.4\text{ m}$ ,炸药直径调整为 $32\text{ mm}$ ,竖井监测点爆破振动速度可以控制在 $2\text{ cm/s}$ 以内,保证临近结构物的安全性,且孤石爆破效果满足盾构掘进要求。

**关键词:** 孤石;深孔爆破;竖井;减振措施

**中图分类号:** TD235.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-487X(2021)02-0095-05

## Study on Vibration Influence of Boulder Deep-hole Blasting on Adjacent Shaft

ZHANG Biao

(China Railway 23<sup>rd</sup> Bureau Group Co., Ltd., Chengdu 610072, China)

**Abstract:** Field testing and numerical analysis were used to study the influence of boulder deep-hole blasting on the vibration of adjacent shaft. The results show that: vibration holes can effectively reduce damage on the retaining pile of foundation pit by boulder blasting; Isolation holes can guarantee the explosion integrity. The blasting vibration speed of shaft can be effectively controlled by increasing blasting area, reducing the distance between holes and reducing the amount of one blasting. Taking the 5 partitions of boulder as an example, the blasting vibration velocity can be controlled within  $2\text{ cm/s}$  as the hole spacing was adjusted to  $0.5\text{ m}\times 0.4\text{ m}$  and the explosive diameter was adjusted to  $32\text{ mm}$ . As a result, the safety of adjacent structures was ensured, and the boulder blasting effect met the requirements of shield tunneling.

**Key words:** boulder; deep-hole blasting; shaft; vibration damping measures

孤石为花岗岩残积土中不均匀风化所残留的球状风化核<sup>[1]</sup>,由于其具有分布随机、形状各异、大小不等、单轴抗压强度较高等性质,盾构无法直接破碎,需要采取预处理措施。

城市环境下的爆破法施工经常遇到临近建筑物振动影响问题,国内学者采用理论分析、数值模拟及现场监测等手段进行了研究。夏宇磬等通过现场测

试研究了爆破振动下预埋混凝土管道的动力响应特征<sup>[2]</sup>。刘义佳等分析了爆破振动频率和持续时间对结构爆破振动响应的影响<sup>[3]</sup>。杨招伟等提出了基于地表实测振动的岩石动力学参数预测方法<sup>[4]</sup>。管晓明等研究了隧道爆破振动下既有建筑结构的动力响应<sup>[5]</sup>。雷振等采用现场试验和数值计算研究了台阶爆破对临近建筑的振动影响<sup>[6]</sup>。张黎明等通过现场试验对管道地表的爆破振动峰值振速、主振频率及轴向微应变进行了研究<sup>[7]</sup>。李新平等以白鹤滩水电站为工程依托,分析了地下洞室高边墙上质点爆破振动速度随高程变化规律<sup>[8]</sup>。夏宇磬

收稿日期:2021-01-20

作者简介:张彪(1990-),男,工学博士、工程师,主要从事地下工程科研工作,(E-mail)835754217@qq.com。

基金项目:国家重点研发计划资助(2018YFC0808702)

等研究了隧道开挖爆破振动对下埋供水管道的动力响应<sup>[9]</sup>。于建新等开展了大跨度隧道爆破现场监测试验,分析了爆破参数对隧道结构振动规律的影响<sup>[10]</sup>。孙金山等分析了露天爆破时瑞利波在爆源远区边坡岩土介质中诱发的动应力和质点振动特征<sup>[11]</sup>。叶海旺等研究了砌体房屋结构在爆破振动下的动态响应<sup>[12]</sup>。

以厦门轨道交通 1 号线【集美中心站~诚毅广场站】盾构区间隧道为依托工程,基于现场测试和数值分析的方法,针对城市环境下孤石深孔爆破下临近建(构)筑物的振动影响展开研究,提出了满足盾构掘进要求的孤石爆破减振措施。

## 1 工程实例

### 1.1 孤石尺寸及周边环境

厦门轨道交通 1 号线集美中心站~诚毅广场站区间隧道为单洞单线圆形隧道,线路埋深 15~20 m。补勘期间在区间右线 YDK24+008~YDK24+026 段(左线竖井旁)发现存在对盾构掘进影响较大的中、微风化花岗岩孤石。经详细补勘,孤石沿盾构掘进轴线长约 17.88 m、宽 10.96 m(布满盾构掘进横断面)、厚度 8.05 m(对盾构掘进产生影响的最大厚度为 4.05 m),需爆破的方量约 700 m<sup>3</sup>,孤石与竖井结构位置关系及相关尺寸如图 1 所示。

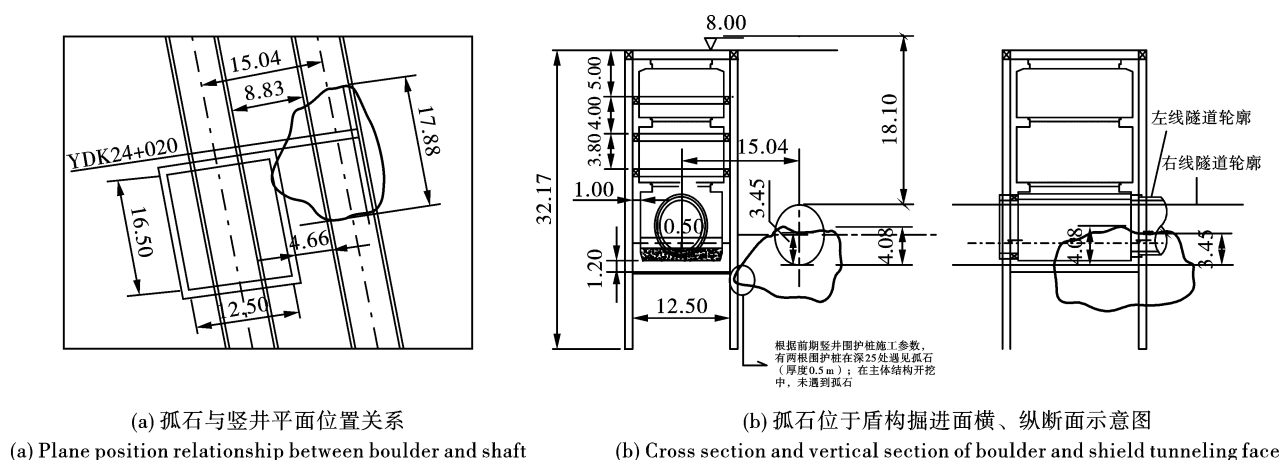


图 1 孤石与竖井位置关系(单位:m)

Fig. 1 Relative position of boulder and shaft(unit:m)

孤石西侧为左线竖井结构,竖井壁围护桩有两根桩与该孤石相连,孤石东侧、东南侧及南侧为市民公园山体,在距离孤石约 130 m 的山顶上有一处新建的集美塔,西北侧约 197 m 为西亭村民房,东北侧约 115 m 为在建钢筋混凝土框架结构楼房,西侧约 140 m 为已建诚毅书城。

### 1.2 现场爆破方案

为满足盾构机掘进需求,孤石爆破后块度应满足单边长度小于 30 cm。由于孤石在地面 10 m 以下,没有临空面,很难进行石渣的抛掷,表现为“无限均匀介质中炸药的内部作用”现象,岩石破碎范围主要为“爆腔、粉碎区、裂隙区”。为尽量扩大“爆腔、粉碎区、裂隙区”,采用 110 mm 钻孔孔径进行钻孔,并用直径 90 mm PVC 套管护孔,采用直径 60 mm 的 2#岩石乳化炸药进行爆破,孤石爆破炸药单耗  $q$  取 5.0 kg/m<sup>3</sup>。

为防止孤石爆破时竖井基坑围护桩和相邻分区孤石完整性发生破坏,在竖井基坑一侧距离盾构掘进边线 1.5 m 处设置两排减振孔及孤石爆破分区之

间设置两排隔离孔。减振孔与隔离孔孔径均为 127 mm,孔距 20 cm,排距 20 cm,钻孔深度大于装药孔 50 cm 以上。

为了加快孤石爆破的施工效率,同时也为避免爆破对竖井造成过大的冲击或挤压,孤石采用五个爆破分区进行爆破,如图 2 所示。

考虑到爆区周边的环境状况,孤石爆破采用多段别毫秒延期、小规模爆破、单孔单响的设计方案,采用有利于爆破能量均匀分布的三角形布孔方式。爆破一区~爆破四区爆破装药孔的孔、排距为  $a \times b = 0.8 \text{ m} \times 0.7 \text{ m}$ ,钻孔深度超过盾构开挖边界 1.0 m。为了减小爆破振动对竖井围护桩的影响,靠近竖井围护桩的爆破五区孔、排距调整为  $a \times b = 0.6 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ,从而减小单孔装药量。

## 2 孤石爆破现场监测

为了分析孤石爆破对临近构(建)筑物的振动影响,采用爆破振动测振仪对竖井围护桩顶部、集美塔进行现场监测。

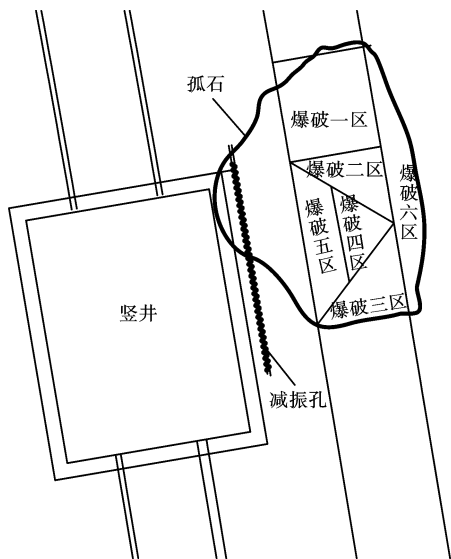


图 2 孤石爆破分区  
Fig. 2 Boulder Blasting partition

以孤石爆破分区 1 区、5 区为例,对孤石爆破振动监测结果进行分析,如表 1 所示。

表 1 孤石 1 区、5 区爆破监测结果  
Table 1 Blasting monitoring results of boulder 1 and 5 partitions

| 测点<br>编号 | 距爆破<br>源/m | 振动速度/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )及主频频率/Hz |        |       |        |        |         |       |        |       |       |       |       |
|----------|------------|--------------------------------------------------|--------|-------|--------|--------|---------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
|          |            | 环向                                               |        |       |        | 径向     |         |       |        | 竖向    |       |       |       |
|          |            | 1 区                                              |        | 5 区   |        | 1 区    |         | 5 区   |        | 1 区   |       | 5 区   |       |
|          |            | $V_x$                                            | $F_x$  | $V_x$ | $F_x$  | $V_y$  | $F_y$   | $V_y$ | $F_y$  | $V_z$ | $F_z$ | $V_z$ | $F_z$ |
| 1        | 13         | 7.778                                            | 31.008 | 5.023 | 34.282 | 2.974  | 121.212 | 3.591 | 28.824 | 0.525 | 9.009 | 2.609 | 31.28 |
| 2        | 25         | 14.130                                           | 31.250 | 3.067 | 19.324 | 11.828 | 97.561  | 4.429 | 32.520 | 7.418 | 3.949 | 1.015 | 16.22 |
| 3        | 122        | 0.539                                            | 26.144 | 0.589 | 16.598 | 0.664  | 7.678   | 1.122 | 27.797 | 0.925 | 6.757 | 0.364 | 25.57 |
| 4        | 127        | 0.067                                            | 5.202  | 1.290 | 24.056 | 0.075  | 2.736   | 1.269 | 11.095 | 0.097 | 0.938 | 0.845 | 12.94 |
| 5        | 116        | 0.184                                            | 6.485  | 0.264 | 33.324 | 0.147  | 3.165   | 1.056 | 27.350 | 0.135 | 1.254 | 0.097 | 19.90 |

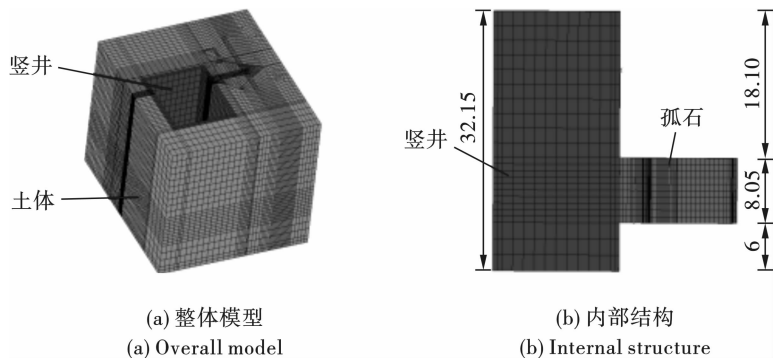


图 3 计算模型(单位:m)  
Fig. 3 Numerical calculation model(unit:m)

孤石模型内部分区如图 4 所示。  
考虑到孤石分区 5 区离竖井结构最近,以爆破 5 区为例,研究减少装药量对竖井结构的振动影响。  
计算参数分别如表 2 ~ 表 5 所示。

孤石 1 区、5 区爆破时,集美塔监测点均低于 2.0 cm/s,满足爆破安全规程(GB6722—2014)要求,而竖井监测点均超过爆破安全规程,究其原因主要为爆破源离竖井结构较近,孤石爆破对竖井结构扰动较大所致。

对比分析 1 区、5 区爆破时监测点 1#、2#的振速值,5 区爆破振速值明显低于 1 区爆破振速值,表明后期施工时应减小炮孔间距,减少单孔装药量,可以有效控制竖井结构振动速度,防止临近结构的破坏。

3 数值分析

3.1 孤石爆破计算模型

结合施工现场探测绘制的孤石所处位置的平、纵剖面图上的形状、尺寸以及位置相对关系,建立了数值计算模型,模型整体尺寸设定为 35.74 m(长度)×40.56 m(宽度)×36.17 m(高度)的无限均匀土体介质,如图 3 所示。

孤石为 MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC 模型,材料参数见表 3。  
竖井结构采用 MAT\_ELASTIC 模型,材料参数见表 4。

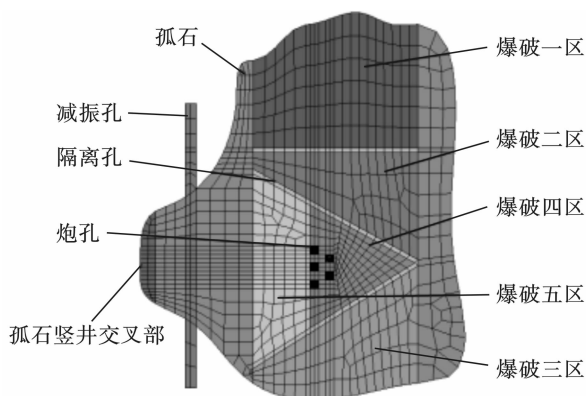


图 4 孤石模型

Fig. 4 Boulder model

表 2 炸药单元计算参数

Table 2 Calculation parameters of explosive elements

| 密度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 爆速/<br>( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 爆压/<br>GPa | A/<br>GPa | B/<br>GPa | $R_1$ | $R_2$ | $\omega$ |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------|------------|-----------|-----------|-------|-------|----------|
| 1200                                       | 3200                                      | 9.7        | 214.4     | 0.18      | 4.2   | 0.9   | 0.15     |

表 3 孤石计算参数

Table 3 Boulder parameters

| 密度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 弹性模量/<br>GPa | 泊松比  | 屈服强度/<br>MPa | 切线<br>模量 | 硬化<br>系数 |
|--------------------------------------------|--------------|------|--------------|----------|----------|
| 2.60                                       | 51.6         | 0.36 | 75           | 0.5      | 0.5      |

表 4 竖井计算参数

Table 4 Calculation parameters of shaft

| 密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 弹性模量/GPa | 泊松比 |
|----------------------------------------|----------|-----|
| 2300                                   | 25       | 0.2 |

表 5 空气单元参数

Table 5 Parameters of air elements

| 密度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | $C_0$ | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ | $C_5$ | $C_6$ | $E_0$ | $V_0$ |
|--------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1290                                       | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.4   | 0.4   | 0     | 0     | 0     |

### 3.2 竖井振动效应分析

取不同位置监测点分析孤石爆破时竖井的振动影响,监测点如图 5 所示。

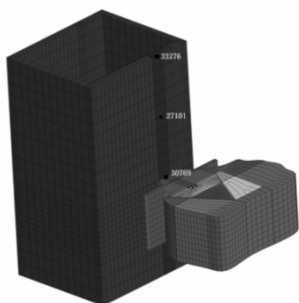
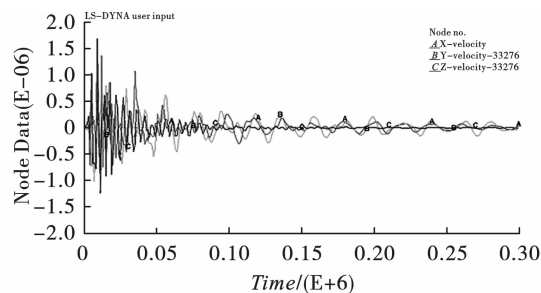


图 5 竖井监测点

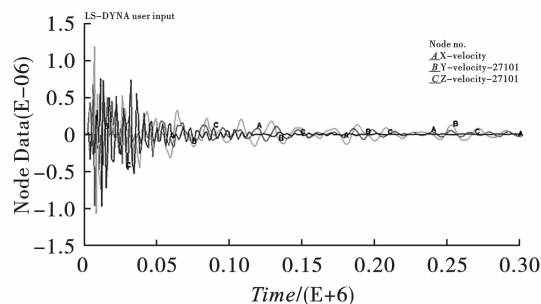
Fig. 5 Monitoring points of shaft

图 6 给出了竖井监测点振动时程曲线。



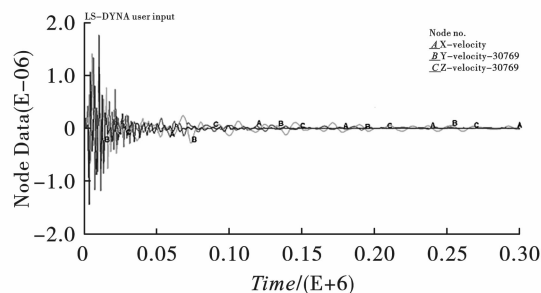
(a) 测点 33276

(a) Measuring point 33276



(b) 测点 27101

(b) Measuring point 27101



(c) 测点 30769

(c) Measuring point 30769

图 6 竖井监测点振动时程曲线

Fig. 6 Vibration time curve of shaft monitoring point

从竖井监测点振速时程曲线可以看出,监测点振动速度均小于  $2 \text{ cm/s}$ ,孤石爆破分区五区在爆破过程中使邻近竖井结构产生的振动速度控制在合理范围内,不会对竖井结构造成破坏或损上,因此增加孤石爆破分区,减少一次爆破量,可以有效减小临近建筑物的振动影响。

## 4 结论

(1)减振孔可以有效减弱孤石爆破对竖井基坑围护桩的破坏,隔离孔可以保证相临爆区孤石的完整性。

(2)以孤石分区 5 区为例,为减少单孔装药量,减小炮孔之间行距和排距,可以有效控制竖井振动速度,并保证孤石爆破效果。

(3) 竖井监测点振动时程曲线表明,通过增加孤石爆破分区、减小炮孔间距等措施,减少单孔的装药量,可以有效控制竖井结构振动速度,防止临近结构的破坏。

### 参考文献 (References)

- [1] 竺维彬, 鞠世健. 复合地层中的盾构施工技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2006.
- [2] 夏宇磐, 蒋楠, 姚颖康, 等. 粉质黏土层预埋承插式混凝土管道对爆破振动的动力响应[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(4): 73-83.
- [2] XIA Yu-qing, JIANG Nan, YAO Ying-kang, et al. Dynamic responses of a concrete pipeline with bell-and-spigot joints buried in a silty clay layer to blasting seismic waves[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(4): 73-83. (in Chinese)
- [3] 刘义佳, 卢文波, 陈明, 等. 结构爆破振动响应的频率与持续时间依赖性分析[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(8): 192-202.
- [3] LIU Yi-jia, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Frequency and duration dependence analysis of structural blasting vibration response[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(8): 192-202. (in Chinese)
- [4] 杨招伟, 卢文波, 高启栋, 等. 基于地表实测爆破振动的岩体动力学参数快速反演方法[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 775-781.
- [4] YANG Zhao-wei, LU Wen-bo, GAO Qi-dong, et al. Inversion of dynamic parameters of rock mass based on field blasting vibration[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(4): 775-781. (in Chinese)
- [5] 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.
- [5] 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)
- [6] 雷振, 高正华, 左宇军, 等. 台阶爆破振动传播规律及动力响应特征研究[J]. 爆破, 2019, 36(4): 137-145.
- [6] LEI Zhen, GAO Zheng-hua, ZUO Yu-jun, et al. Research on vibration propagation law and dynamic response characteristics of bench blasting[J]. Blasting, 2019, 36(4): 137-145. (in Chinese)
- [7] 张黎明, 赵昌龙, 池恩安, 等. 地下管道爆破振动安全允许峰值振速试验研究[J]. 爆破, 2019, 36(4): 146-149, 154.
- [7] ZHANG Li-ming, ZHAO Chang-long, CHI En-an, et al. Experimental investigation on allowed blasting vibration velocity of underground pipeline[J]. Blasting, 2019, 36(4): 146-149, 154. (in Chinese)
- [8] 李新平, 吴泽民, 罗忆, 等. 中深部大型地下洞室高边墙爆破振动高程效应研究[J]. 爆破, 2019, 36(1): 1-5, 43.
- [8] LI Xin-ping, WU Ze-min, LUO Yi, et al. Study on blasting vibration altitude effect of high-sidewalls in deep large underground cavern[J]. Blasting, 2019, 36(1): 1-5, 43. (in Chinese)
- [9] 夏宇磐, 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.
- [9] 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)
- [10] 于建新, 刘希亮, 郭佳奇, 等. 大跨隧道爆破振动响应特性研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(S2): 772-780.
- [10] YU Jian-xin, LIU Xi-liang, GUO Jia-qi, et al. Study on blasting vibration response characteristics of large span tunnels[J]. Modern Tunneling Technology, 2018, 55(S2): 772-780. (in Chinese)
- [11] 孙金山, 李正川, 刘贵应, 等. 爆破振动在边坡岩土介质中诱发的动应力与振动特征分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(10): 141-148.
- [11] SUN Jin-shan, LI Zheng-chuan, LIU Gui-ying, et al. Dynamic stress and vibration characteristics of geomaterials in slopes induced by blasting vibration[J]. Journal of Vibration and shock, 2018, 37(10): 141-148. (in Chinese)
- [12] 叶海旺, 冉成, 雷涛, 等. 爆破振动作用下砌体房屋结构动态响应与损伤分析[J]. 爆破, 2018, 35(1): 161-166, 174.
- [12] YE Hai-wang, RAN Cheng, LEI Tao, et al. Dynamic response and damage analysis of masonry structures under blast vibration[J]. Blasting, 2018, 35(1): 161-166, 174. (in Chinese)

英文编辑: 陈东方