

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.05.011

# 路基边坡逐孔微差爆破对邻近桥梁的影响\*

罗如登<sup>①</sup> 鲍志斌<sup>①</sup> 王正阳<sup>②</sup>

<sup>①</sup>中南大学土木工程学院(湖南长沙,410000)

<sup>②</sup>中交二航局建筑科技有限公司(湖北武汉,430000)

**[摘要]** 为控制山区路基爆破对邻近既有桥梁的危害效应,基于 ANSYS/LS-DYNA 软件建立路基边坡-炸药-桥梁三维有限元模型,结合爆破振动实测数据,进行路基边坡爆破振动载荷作用下邻近既有桥梁的振动响应规律分析。通过控制变量法对比分析发现,逐孔起爆微差时间对邻近既有桥梁的爆破振动响应具有非单调性影响规律。研究表明:本工程案例中雷管逐孔起爆延期时间 0~5 ms 区间内,可使邻近既有桥梁振速响应取到极小值;桥梁墩柱的振速响应与爆心距离成反比,但桥梁梁体中靠近墩柱处的振速响应则并非随着爆源距离的增加而递减,而是出现一定幅度的上升,爆破安全校核时应充分重视。

**[关键词]** 边坡;微差爆破;有限元;振动响应

**[分类号]** TD235.1; O382

## Influence of Hole-by-Hole Millisecond Blasting of Subgrade Slope on Adjacent Bridges

LUO Rudeng<sup>①</sup>, BAO Zhibin<sup>①</sup>, WANG Zhengyang<sup>②</sup>

<sup>①</sup>School of Civil Engineering, Central South University (Hu'nan Changsha, 410000)

<sup>②</sup>Construction Technology Co., Ltd., China Communications 2nd Navigational Bureau (Hubei Wuhan, 430000)

**[ABSTRACT]** In order to control the harmful effect of subgrade blasting on adjacent existing bridges in mountainous areas, a 3D finite element model of subgrade slope-explosive-bridge was established based on ANSYS/LS-DYNA software. Combined with the measured blasting vibration data, the vibration response law of adjacent existing bridges under the blasting vibration load of subgrade slope was analyzed. Comparative analysis results of control variable method show that the millisecond time of hole-by-hole initiation has a non-monotonic effect on the blasting vibration response of adjacent existing bridges. Research results show that the vibration velocity response of adjacent existing bridges can be minimized within the delay time 0-5 ms of detonator hole-by-hole initiation in this engineering case. Vibration velocity response of bridge pier column is inversely proportional to the distance from the explosion center. But vibration velocity response near the pier column in the bridge beam increases to a certain extent with the increase of the distance from the explosion source. It should be paid full attention to when checking blasting safety.

**[KEYWORDS]** slope excavation; millisecond blasting; finite element; vibration response

## 引言

工程爆破广泛应用于山区土木工程基础开挖项目中,为推动我国基础设施建设发挥了非常重要的作用。在钻爆法施工过程中,爆破安全一直是工程爆破行业关注的重要问题。采用钻爆法开挖时,经常会面临对爆破点邻近目标(如既有桥梁)的保护。控制爆破地震波对邻近桥梁结构安全性的影响,同

时又确保在建项目的高效爆破施工,是爆破施工单位、行政主管部门、监理单位等多方共同面临的技术难题<sup>[1-7]</sup>。

丁茂瑞<sup>[8]</sup>利用二维数值分析研究了新建隧道爆破开挖对邻近既有桥梁的安全性动力影响。黄赫烜等<sup>[9]</sup>通过监测数据,研究了隧道爆破和钻孔灌注桩施工对邻近高铁桥梁的影响,并结合有限元模型分析了桥梁的安全性和可靠性。孟灵鑫等<sup>[10]</sup>基于 FLAC3D 用瞬态动力学方法,分析了爆破振动对邻近

\* 收稿日期:2022-06-18

第一作者:罗如登(1973-),男,博士,副教授,主要从事桥梁工程、工程力学和岩土工程等领域的研究。E-mail:397800785@qq.com

桥面及桥墩的影响。李杰<sup>[11]</sup>在水下爆破中,对邻近桥梁振动危害进行了实时监测及数据分析。

近年来,随着高精度雷管、数码电子雷管等新型爆破器材的问世,通过微差爆破技术可改善爆破效率、提高爆破质量,同时可有效减少爆破地震波、冲击波等的危害效应<sup>[1-3,12]</sup>。

贵黄高速公路 TJ13 标段路基边坡,爆区之间有一既有高铁桥梁需要保护。为确保爆破安全,需结合邻近保护目标的振动危害效应监测信号及数值模拟分析,开展微差爆破方案优化研究。

## 1 现场试验设计

贵黄高速公路 TJ13 标段路基边坡长 260 m,爆区宽 20 m,开挖高度 16 ~ 20 m,中硬岩,总石方量约 20 000 m<sup>3</sup>。爆区 I 和爆区 II 之间的既有高铁桥梁需被重点保护。其中,七号墩距爆区最近,离爆区 I 北面 340 m,爆区 II 南面 582 m,如图 1 所示。

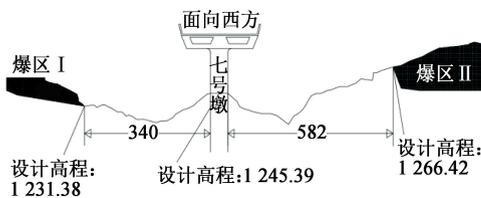


图 1 边坡爆破区域与高铁桥梁相对位置(单位:m)

Fig. 1 Relative position of slope blasting area and high-speed railway bridge (unit: m)

试验方案设计如下:

1) 爆区 I 距离既有桥梁更近。现场试验时,采用 TC-4850 爆破测振仪,在爆区 I 微差爆破时对邻近高铁桥梁的振动响应进行实时数据采集。

2) 将爆区 I 的边坡开挖成高 1.5 m、宽 1.5 m 的台阶,在边坡中部钻 3 个炮孔,孔径 100 mm、孔深 3.0 m、孔距 3.0 m,单耗取 0.35 kg/m<sup>3</sup>,逐孔起爆,孔间微差时间初步设定为 6 ms。

3) 测点布置在七号墩以及离爆源中心直线距离最短的第六跨梁,测点编号如图 2 所示。迎爆侧,从七号墩底开始间隔 2 m 布置 1# ~ 5# 测点,从第六跨梁跨中梁体开始间隔 2 m 布置 6# ~ 10# 测点,桥墩上 1# 测点、梁体上 7# 测点距爆源最近。

## 2 数值模型建立

### 2.1 计算模型

基于 ANSYS/LS-DYNA 软件,建立爆区 I 边坡

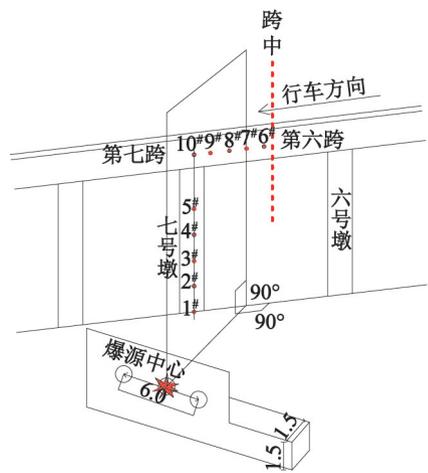


图 2 测点布置示意图(单位:m)

Fig. 2 Layout of measuring points (unit: m)

和邻近既有桥梁的 1 : 1 数值计算模型。采用 ALE 算法,Solid164 单元,长 340 m,宽 260 m,按实际尺寸建立 3 个炮孔,微差起爆时间 6 ms,总计算时长 200 ms。桥梁结构建模时进行简化,跨径 30 m,梁和墩模型材料分别为 C55 和 C50 混凝土。总体建模如图 3 所示。



图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

### 2.2 材料模型及参数

岩石采用弹塑性动力模型(Mat\_Plastic\_Kinematic)。该模型能精确地模拟岩石材料的动力特性,其屈服条件为<sup>[13]</sup>:

$$\frac{1}{2}\xi_{ij}^2 - \frac{\sigma_y^2}{3} = 0; \quad (1)$$

$$\xi_{ij} = s_{ij} - a_{ij}; \quad (2)$$

$$\sigma_y = [1 + (\frac{\dot{\epsilon}}{C})^{\frac{1}{F}}](\sigma_0 + \beta E_r \epsilon_{eff}^p). \quad (3)$$

式中: $s_{ij}$ 为柯西应力张量; $a_{ij}$ 为屈服面中心点处的应力偏张量; $F$ 和 $C$ 为输入常数; $\sigma_y$ 为屈服应力; $\sigma_0$ 和 $\beta$ 分别为初始屈服应力和硬化参数; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; $E_r$ 为塑性硬化模量, $E_r = E_1 E / (E - E_1)$ ;  $E$ 为弹性模量; $E_1$ 为切线模量; $\epsilon_{eff}^p$ 为有效塑性应变。

根据地质资料,岩石力学参数如表 1 所示。

梁和墩分别采用标号为 C55 和 C50 的混凝土,

混凝土材料参数见表2。

表1 岩石参数

Tab.1 Parameters of rock

材料	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	弹性模量/ $10^4$ MPa	泊松比
中硬岩石	2.6	5.5	0.27

表2 混凝土参数

Tab.2 Parameters of concrete

材料	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	抗压弹性模量/ $10^4$ MPa	泊松比
C55	2.50	3.60	0.2
C50	2.45	3.45	0.5

炸药采用高能炸药材料模型(Mat\_High\_Explosive\_Burn),结合JWL状态方程<sup>[13]</sup>,对炸药起爆点、起爆时间加以控制,实现对炸药爆炸过程的模拟。

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (4)$$

式中: $p$ 为爆轰压力; $V$ 是相对体积; $E$ 是单位体积内能; $\omega$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 为材料常数。

具体参数如表3所示。

表3 炸药材料及状态方程参数

Tab.3 Parameters of explosive material and equation of state

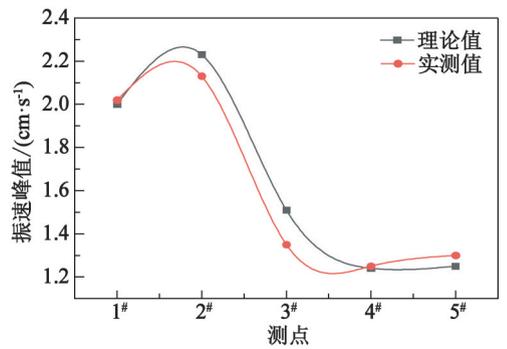
密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	爆速/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	爆压/ GPa	$A$	
1.08	0.38	5.06	178.85	
$B$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E$
0.311	4.75	1.05	0.18	2.25

## 2.3 边界条件

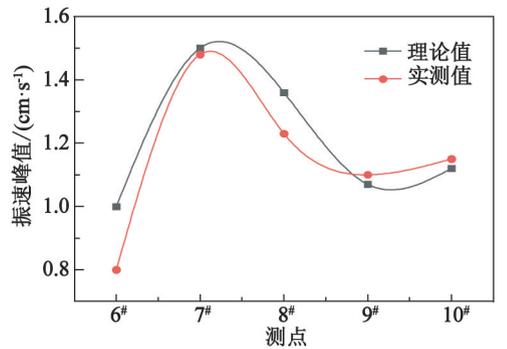
在有限元模型中,需要采用有限域来模拟爆破地震波作用下炸药爆炸产生的邻近高架桥的动力响应规律。在ANSYS建模过程中,需要在范围有限的模型边界上施加无反射边界条件,消除爆破地震波传递到模型边界时发生的反射、折射现象,确保计算结果的准确性。在计算模型中,除上部界面外,其余模型面均施加无反射边界。

## 2.4 数值计算方案验证

基于上述试验和数值模拟方案,将逐孔起爆微差时间6ms时,实际采集到的桥墩和跨梁上各测点的爆破振速峰值与数值模拟计算所得各测点的振速峰值进行对比,如图4所示。总体吻合情况良好,最大偏差不超过10%,验证了上述所采用的数值模拟



(a) 桥墩



(b) 跨梁

图4 微差时间为6ms时实测振速峰值和计算振速峰值对比

Fig.4 Comparison between measured peak vibration velocity and calculated peak vibration velocity when the millisecond is 6ms

方案基本科学合理。

## 3 数值模拟分析

采用控制变量法进行数值模拟及对比分析。保持测点位置不变,研究微差时间对邻近桥梁同一测点处振速响应的影响规律;保持微差时间不变,研究测点所处空间位置对测点处振速响应的影响规律。

在上述数值模拟方案基础上,增加样本量以提升数值模拟及数据分析的可靠性。分别增设0、5、10、15、20、25ms共6组逐孔起爆微差时间,并在六号墩相对于七号墩同样位置处增设11#~15#共5个测点,在第六跨梁远离爆源的另半跨梁体上对称增设16#~20#共5个测点,共计20个测点,测点编号及位置如图5所示。分别计算得到20个测点在6组微差时间下的爆破振速时程曲线。提取这120组振速时程曲线的峰值,进行不同微差起爆时差条件下邻近高铁桥梁的爆破振动响应分析。

### 3.1 微差时间对桥梁振速响应的影响规律

将1#测点分别在6组微差时间下的振速响应

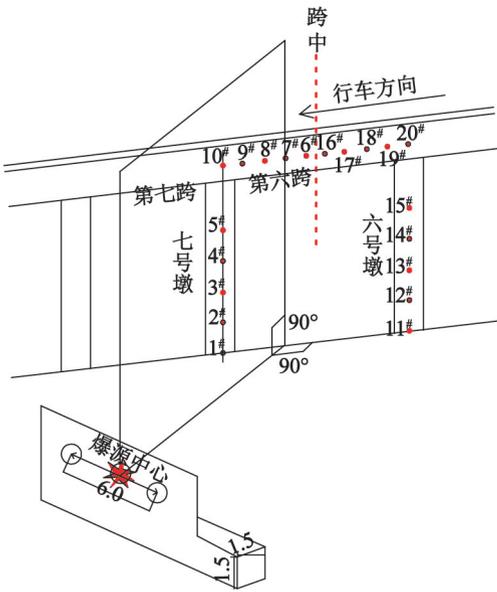
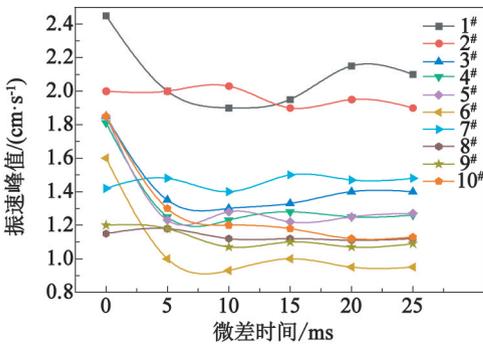


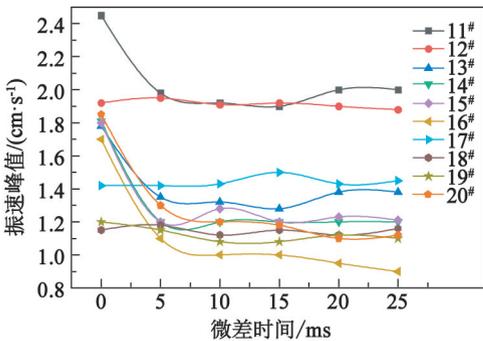
图 5 测点编号及位置(单位:m)

Fig. 5 Number and location of measuring points (unit: m)

峰值绘成散点形式,并用样条曲线连接。对 2# ~ 10# 测点进行同样操作,结果如图 6(a) 所示;对 11# ~ 20# 测点进行同样操作,结果如图 6(b) 所示。10 条不同颜色的曲线,分别代表 10 个不同测点处的综合振速峰值随不同微差时间的变化规律。



(a) 1# ~ 10#



(b) 11# ~ 20#

图 6 各测点处不同微差时间下的综合振速峰值

Fig. 6 Comprehensive peak vibration velocity at each measuring point under different millisecond time

由图 6 分析可知:

1) 1# ~ 10# 测点和 11# ~ 20# 测点分布规律相近,故振速响应应随微差时间的变化规律大致相同。

2) 综合测点处振速峰值随微差时间变化规律有两种类型:随微差时间的增加而快速下降,随后微差时间继续增加时趋于平缓,成波浪状微微起伏,此规律对应的是 1#、3#、4#、6#、10# 测点和 11#、13#、14#、16#、20# 测点,其中,1#、3#、4#、11#、13#、14# 测点分布在桥墩上,6#、10#、16#、20# 测点分布在跨梁上;没有随微差时间增加而快速下降的阶段,在微差时间增加的全程均缓慢上升或下降,成波浪状微微起伏,对应的是 2#、5#、7#、8#、9# 测点和 12#、15#、17#、18#、19# 测点,其中,2#、5#、12#、15# 测点分布在桥墩上,7#、8#、9#、17#、18#、19# 测点分布在跨梁上。

进一步分析可知:

1) 微差时间对邻近桥梁的振速响应有显著影响,但只集中在一个区间范围内,超出此区间,则微差时间对振速响应影响不显著。炮孔之间微差时间若过小,则接近于同时起爆;若过大,则接近于逐孔起爆。数值模拟结果及试验测试数据分析表明,炮孔微差时间很小或很大情况下,改变微差时间来控制爆破振动响应的效果均不明显。本工程背景下对邻近桥梁振速响应有显著影响的微差时间取值范围是 0~5 ms,而 5~10 ms 则是一个下降到上升的过渡阶段,这里存在一个极小值。

2) 针对不同位置处的测点,对其振速峰值有显著影响的微差时间区间范围不同。

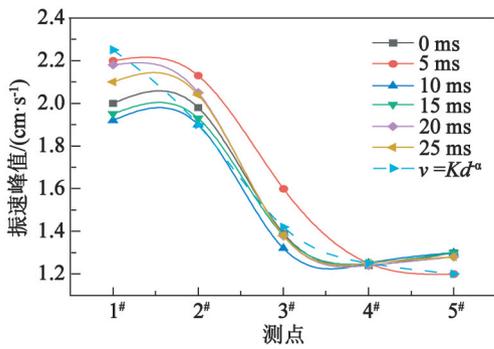
3) 随着微差时间的增加,结构振速响应的变化并非单调递增或递减趋势,而是反复增减,故总存在一个振速响应的极小值。

### 3.2 空间位置对桥梁振速响应的影响规律

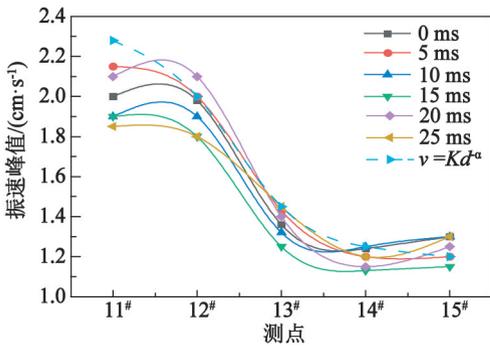
以微差时间为控制变量,研究测点所处空间位置对测点处振速响应的影响规律。列出在 6 组微差时间下邻近桥梁七号墩上 1# ~ 5# 测点振速响应的空间分布规律,如图 7(a) 所示;六号墩上 11# ~ 15# 测点振速响应的空间分布规律如图 7(b) 所示。第六跨梁上 6# ~ 10# 测点振速响应的空间分布规律如图 8(a) 所示;16# ~ 20# 测点振速响应的空间分布规律如图 8(b) 所示。7 种不同颜色的曲线中,前 6 条分别代表在 6 组不同的微差时间下各测点的振速分布规律,第 7 条曲线代表地表振速峰值随爆心距呈指数衰减的规律曲线<sup>[14]</sup>:

$$v = Kd^{-\alpha}; \tag{5}$$

$$d = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}}. \tag{6}$$

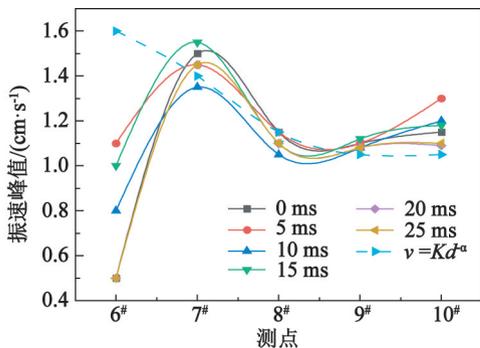


(a) 1# ~ 5#测点

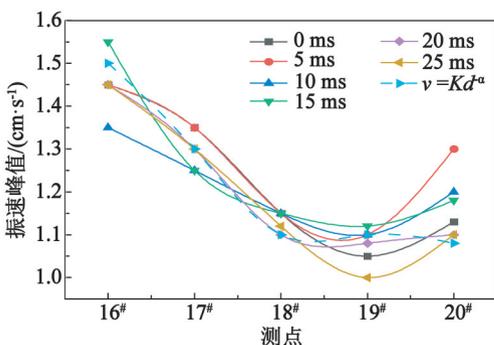


(b) 11# ~ 15#测点

图7 各微差时间下桥墩上不同测点处的综合振速峰值  
Fig. 7 Comprehensive peak vibration velocity at each measuring point on the pier under different millisecond time



(a) 6# ~ 10#测点



(b) 16# ~ 20#测点

图8 各微差时间下跨梁上不同测点处的综合振速峰值  
Fig. 8 Comprehensive peak vibration velocity at each measuring point on the beam under different millisecond time

式中: $v$ 为爆破振动质点最大振速,  $\text{cm/s}$ ;  $Q$ 为炸药量,  $\text{kg}$ , 齐爆时取总药量, 延时起爆时取单段最大药量;  $R$ 为爆源的距离,  $\text{m}$ ;  $d$ 为比例距离;  $K$ 和  $\alpha$ 分别为爆源至测点间地形、地质条件的相关系数和衰减指数。

由数据分析可知:

1) 从第7条曲线分析可知, 1# ~ 5#测点的振速响应随微差时间的变化规律大致和 11# ~ 15#测点的振速响应随微差时间的变化规律相同; 6# ~ 10#测点的振速响应随微差时间的变化规律大致和 16# ~ 20#测点的振速响应随微差时间的变化规律相同; 再次印证了所采用数值模拟方案的正确性。

2) 跨梁上测点振速起初随测点离爆源的距离增加而减小, 但最远的靠近桥墩顶处的跨梁上测点的振速反而增大, 存在一定程度的高程放大效应。

由此可知, 邻近高铁桥梁受爆破作用后的振速响应不仅和爆破作用大小有关, 也和结构所受约束条件有关, 在桥墩底部和主梁靠近墩顶处这些端部固结位置, 会出现离爆源较远的地方振速响应反而增大的情况, 在爆破安全校核过程中应予以重视, 确保爆破安全。

## 4 结论

1) 微差时间对路基边坡爆破时邻近桥梁的振速响应有明显影响, 规律体现为非线性、非单调性。微差时间对邻近桥梁的作用效应不能线性叠加, 在有限区间内存在一个最佳的微差时间, 使邻近桥梁的爆破振动响应最小, 并可通过现场爆破振动监测及数值模拟方法进行确定。

2) 对于桥梁的墩柱部分, 爆破振速响应与爆源的距离成反比。但桥梁结构的梁体部分, 在靠近墩柱处的振速则并非随离爆源距离的增加而递减, 爆破安全校核环节应引起重视。

## 参考文献

- [1] 陈松. 保丰水库扩建工程预裂爆破施工技术应用[J]. 黑龙江水利科技, 2020, 48(10): 153-155.
- [2] 石震鑫, 陈亮亮. 研究微差爆破时间对爆破效果的影响[C]//北京力学学会第26届学术年会论文集. 北京, 2020: 464-466.
- [3] 陈士海, 燕永峰, 戚桂峰, 等. 微差爆破降震效果影响因素分析[C]//第十二届全国岩石动力学学术会议暨国际岩石动力学专题研讨会. 北京, 2019: 127-132.

- [4] 赵丰, 薛亚东, 李硕标, 等. 新建铁路隧道上跨既有公路隧道控制爆破安全距离研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(7): 1365-1371.  
ZHAO F, XUE Y D, LI S B, et al. Analysis on control blasting safety distance of the new railway tunnel overpasses the established highway tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(7): 1365-1371.
- [5] 杨润强, 严鹏, 王高辉, 等. 地应力水平对深埋隧洞爆破振动频谱结构的影响[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(5): 116-127.  
YANG R Q, YAN P, WANG G H, et al. Effect of in-situ stress level on frequency spectrum of blasting vibration in a deep-buried tunnel [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(5): 116-127.
- [6] 何理, 钟东望, 李鹏, 等. 下穿隧道爆破荷载激励下边坡振动预测及能量分析[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(7): 108-117.  
HE L, ZHONG D W, LI P, et al. Vibration prediction and energy analysis of slope under blasting load in underpass tunnel [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(7): 108-117.
- [7] 王先前, 黄亚兵, 彭立敏, 等. 隧道爆破全时程荷载研究及其应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(1): 144-151.  
WANG X Q, HUANG Y B, PENG L M, et al. Study on full-time load function of tunnel blasting and its application [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(1): 144-151.
- [8] 丁茂瑞. 新建隧道爆破开挖对既有桥梁安全的动力影响分析[J]. 中外公路, 2011, 31(1): 165-169.
- [9] 黄赫焜, 黄万刚, 张亮. 公路隧道爆破施工对邻近高铁高架桥梁的影响研究[J]. 地基处理, 2020, 2(3): 209-216.
- HUANG H X, HUANG W G, ZHANG L. Influence of the tunnel blasting on the adjacent high-speed railway viaduct[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(3): 209-216.
- [10] 孟灵鑫, 陈德云. 隧道爆破施工对邻近桥梁安全的影响[J]. 铁道勘察, 2019, 45(5): 54-58, 64.  
MENG L X, CHEN D Y. Study on safety influence of tunnel blasting construction close to existing bridge[J]. Railway Investigation and Surveying, 2019, 45(5): 54-58, 64.
- [11] 李杰. 水下爆破对邻近铁路桥梁震害的防护与监测[J]. 铁道建筑, 2004(7): 8-11.  
LI J. Protection of adjacent railway bridge from shock damage induced by underwater blasting and its supervision[J]. Railway Engineering, 2004(7): 8-11.
- [12] 国家安全生产监督管理总局. 爆破安全规程: GB 6722—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.  
State Administration of Work Safety. Safety regulations for blasting: GB 6722—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [13] 李云, 刘霖. 岩石中浅孔爆破特性的数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(4): 1519-1522.  
LI Y, LIU J. Numerical simulation on mechanical properties of shallow-hole blasting in rocks[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(4): 1519-1522.
- [14] 赵凯, 赵丁凤, 张东, 等. 地铁隧道毫秒延时爆破环境振动特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(10): 134-140.  
ZHAO K, ZHAO D F, ZHANG D, et al. Characteristics of environmental vibration induced by millisecond-delay blasting in metro tunnel excavation[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(10): 134-140.