

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0315

既有裂缝、空洞病害隧道爆破振动安全控制标准*

郭新新¹, 刘锦超¹, 汪 波¹, 喻 炜¹, 王振宇¹, 李浩彬^{1,2}

(1. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031;

2. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450052)

摘要: 爆破荷载作用下, 既有隧道衬砌的振动安全振速控制标准制定, 大多以既有隧道完好为前提条件, 不考虑病害因子对结构动力响应的影响, 与实际不相符。为此, 以既有新岭隧道旁拟建新隧道为工程背景, 基于既有隧道衬砌裂缝和背后空洞的实际分布特征与规律, 建立带裂缝与空洞的二维、三维结构模型, 分析裂缝、空洞对衬砌动力响应的影响, 提出以振速为指标的标准管理体系。结果表明: 裂缝的最不利分布位置为迎爆侧边墙处, 裂缝的存在增强了既有衬砌对 S_1 应力(拉应力)的响应, 振速控制标准的制定应以 S_1 应力和裂缝径向深度为控制指标; 当裂缝径向深度为 $(0\sim 1/8)h$ 、 $(1/8\sim 1/2)h$ 和 $>(1/2)h$ (h 为衬砌厚度)时, 控制标准分别为 12、10 和 8 cm/s。空洞的最不利分布位置为拱顶, 空洞的存在增强了既有衬砌对 S_1 应力和振速的双重响应, 以增强振速响应为主, 振速控制标准的制定应以振速、空洞面积及纵向长度为控制指标, 空洞工况下, 控制标准为 12 cm/s; 空洞沿隧道纵向长度小于 7 m 时, 监控范围为 3~4 倍纵长; 空洞沿隧道纵向长度大于 7 m 时, 监控范围为 1~1.5 倍纵长; 纵向长度小时, 倍数取大值。

关键词: 隧道工程; 控制标准; LS-DYNA 三维模型; 裂缝; 空洞

中图分类号: O383.2; U451

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Safety control standard of blasting vibration for tunnels with existing cracks and cavities

GUO Xinxin¹, LIU Jinchao¹, WANG Bo¹, YU Wei¹, WANG Zhenyu¹, LI Haobin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co Ltd, Zhengzhou 450052, Henan, China)

Abstract: Most of safety control standard studies for existing tunnels under blasting vibrations are based on the premise that the existing tunnels are intact, and the effects of existing defects under the dynamic response are not considered. Therefore, based on the proposed new tunnel next to the Xinling tunnel as the engineering background, according to the actual distribution characteristics of tunnel defects (cracks and back-cavities), the two-dimensional and three-dimensional numerical models were established to analyze the influence of defects under structural dynamic response. Moreover, the standard management system was established. The results show that the most unfavorable distribution position of cracks is the side wall of explosion-proof which mainly increases the response of the lining structure to stress S_1 (tensile stress). The control standard should take the stress S_1 and the propagation depth of crack as the quantitative indicators. When the propagation depth is $(0\sim 1/8)h$, $(1/8\sim 1/2)h$, and $>(1/2)h$ (h represents the thickness of the lining structure), the corresponding vibration velocity limit value is 12, 10, and 8 cm/s, respectively. The most unfavorable distribution position of back-cavities is at the arch crown, which increases the dual response of the lining structure to the stress S_1 and the vibration velocity, and the vibration velocity response is the main one.

* 收稿日期: 2019-08-16; 修回日期: 2020-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(51878571, 51578456)

第一作者: 郭新新(1990—), 男, 博士研究生, zj_gxinxin@163.com

通信作者: 汪 波(1975—), 男, 博士, 教授, ahbowang@163.com

The control standard should take the vibration velocity, plane size and longitudinal length of the cavity as the quantitative indicators. The vibration velocity limit value is 12 cm/s. When the longitudinal length of the cavity is less than 7 m, the monitoring range is 3–4 times of the longitudinal length; when the longitudinal length of the cavity is greater than 7 m, the monitoring range is 1–1.5 times of the longitudinal length; when the longitudinal length of the cavity is small, the multiple takes a large value.

Keywords: tunnel engineering; control standard; LS-DYNA 3D model; crack; cavity

伴随交通道路建设的持续快速发展,既有隧道旁修建新隧道已成为隧道(交通流量)扩容的主要方式。目前,我国交通山岭隧道以钻爆法施工为主,当新旧隧道间距较小时,新隧道的爆破施工将不可避免地对既有隧道产生不利影响。因此,制定合理、可靠、准确的振动安全(振速)控制标准,是近接爆破施工中必须解决的首要技术问题^[1-2]。关于爆破对地下洞室安全性的影响,已有了大量研究:李洪涛等^[3]以混凝土与基岩面的层间抗拉强度为控制基准,研究了体波(P波)作用下的新浇筑衬砌混凝土的安全振动速度;易长平等^[4]采用混凝土抗拉强度作为基准,基于复变函数理论,推导了地震波不同角度作用下的衬砌临界振速;Jiang等^[5]采用数值模拟方法,研究了隧道衬砌的爆破振动安全判据。但无论采用理论或数值分析的方法,已有研究大多假设既有隧道完好。

实际工程中,既有隧道受地质环境、先期施工过程及后期的运营管理等因素的不利影响,不可避免存在病害,其中以衬砌裂缝和拱顶区域空洞最常见^[6-7]。裂缝与空洞的存在,会使衬砌结构的静态承载能力和动力响应发生变化,易加剧既有隧道结构的安全风险。因此,对于邻近既有隧道的爆破设计与施工,有必要分析裂缝与空洞对既有隧道衬砌动力响应的影响,具有工程价值。目前,已有考虑衬砌裂缝与背后空洞对既有衬砌动力响应影响的研究:刘敦文等^[8]研究了既有隧道拱顶脱空对衬砌动力响应的影响;罗攀峰^[9]采用数值模拟方法,研究了不同围岩级别下不同平面面积和不同部位空洞对衬砌结构动力响应的影响;汪波等^[10-11]基于隧道实测裂缝与空洞形态,采用数值模拟详细研究了,新隧道爆破下不同部位裂缝和空洞、不同扩展深度裂缝和不同大小空洞对既有隧道二衬结构动力响应的影响。但上述研究大多聚焦于分析结构的动力响应,缺乏对最终安全控制标准制定的研究。

本文中,以杭金衢高速公路既有新岭隧道旁拟建新隧道的具体工程为背景,在对既有隧道衬砌裂缝和背后空洞的分布规律、特征等进行统计与分析的基础上,系统开展爆破荷载作用下裂缝、空洞对既有隧道衬砌动力响应的影响,并最终提出振速安全控制标准。

1 工程概况

既有新岭隧道扩容采取了在既有隧道旁新建隧道的技术方案。新隧道为上行、下行独立分离式双向六车道隧道(净宽 15.25 m、净高 5.0 m),施工采用钻爆法。既有隧道为分离式双向四车道隧道(净宽 10.75 m、净高 5.0 m)。新、旧隧道穿越基本一致,围岩级别Ⅲ~Ⅴ级,区段内围岩岩性以粉砂岩和青灰色、夹紫红色泥质粉砂岩为主,地下水主要为基岩裂隙水。图1为新、旧隧道间距示意图,新建隧道在洞口段距原隧道距离 25~35 m,主体洞身段与旧隧道距离约 40 m。

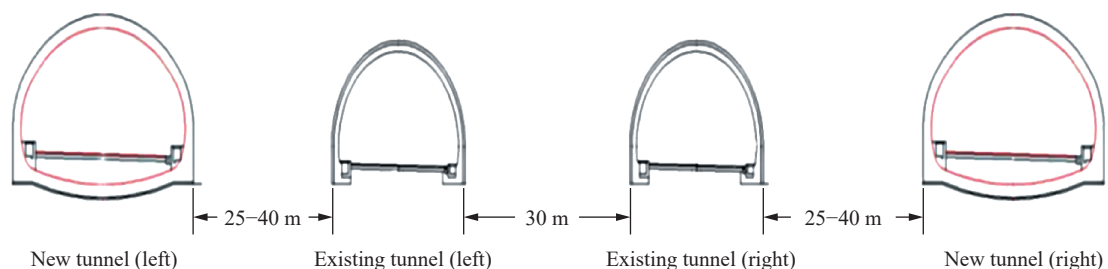


图1 新老隧道间距

Fig. 1 Distances between new and old tunnels

2 病害调研

为了方便数值模拟, 采用地质雷达沿隧道纵向对拱顶和左、右拱腰背后的空洞与不密实进行检测。测定了空洞沿隧道纵向(测线)的分布规律及深度, 当测得某点空洞深度大于 50 cm 时, 以该点为基准进一步测量了该处空洞沿隧道横断面向尺寸。对肉眼可见的衬砌裂缝采用了刻度放大镜进行表面开裂宽度检测, 当测得表面开裂宽度大于 1.5 mm 时, 采用超声波法测定该处裂缝的径向深度。最终的统计分析, 如图 2~5 所示。

图 2~3 为既有隧道空洞与裂缝沿隧道纵横向的分布规律: 空洞沿纵向主要分布于Ⅲ级围岩段, 占比 81%, 沿横向主要分布于拱顶, 占比 57.5%; 裂缝沿纵向主要分布于Ⅲ、Ⅳ级围岩段, 占比 55.8%、32.4%, 沿横向主要分布于边墙、拱腰及拱顶区域。图中, 拱顶-拱腰是指裂缝从拱顶延伸至拱腰位置, 拱顶-边墙是指裂缝从拱顶延伸至边墙位置, 以下类同。

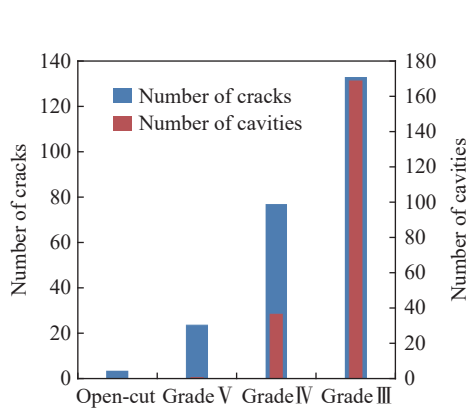


图 2 裂缝、空洞沿纵向分布

Fig. 2 Longitudinal distribution of cracks and cavities

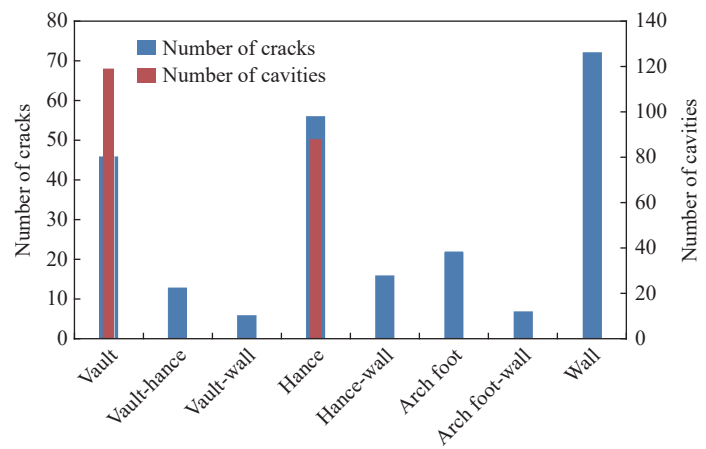


图 3 裂缝、空洞沿横向分布

Fig. 3 Transverse distribution of cracks and cavities

图 4~5 为既有隧道空洞与裂缝特征: 空洞深度一般为 20~50 cm, 极少超 100 cm; 深度超 50 cm 的空洞, 环向宽度一般为 0~100 cm, 极少超 200 cm; 纵向长度一般为 0~10 m, 极少超 20 m。裂缝(表面)宽度一般为 3 mm 以下, 极少超 3 mm, 均属微张开裂缝; 宽度超 2 mm 的裂缝, 径向深度一般为 $(0 \sim 1/4)h$ (h 为衬砌厚度), 极少超 $(3/4)h$ 。

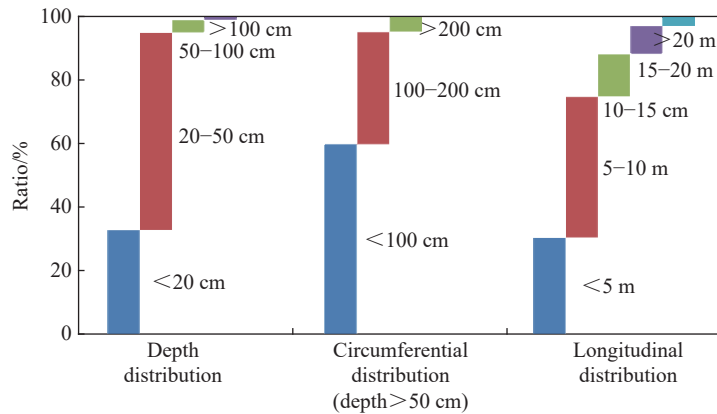


图 4 空洞特征 (深度、环向、纵向)

Fig. 4 Cavity characteristics (depth, circumferential, longitudinal)

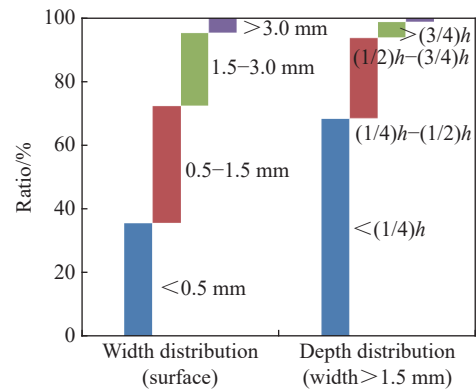


图 5 裂缝特征 (宽度、深度)

Fig. 5 Fracture characteristics (width, depth)

3 计算和分析

3.1 计算模型和方案

3.1.1 数值模型

采用 ANSYS 二维模型,分析裂缝出现部位及径向扩展深度和空洞横断面面积的影响;采用 LS-DYNA 三维模型,分析空洞沿隧道纵向长度的影响。选取Ⅲ级围岩隧道断面,新旧隧道净距 30 m,因此新隧道爆破开挖时,远端隧道的存在对近端隧道动力响应的影响小,同时远端隧道受到的振动影响小于近端隧道。为便于计算,选取右线新建隧道和右线既有隧道进行计算。

二维模型如图 6(a) 所示,尺寸为 135 m×80 m。为避免能量在边界反射导致计算结果与实际的不符,采用了黏弹性人工边界,即在边界节点上施加弹簧-阻尼器元件^[12]。各节点的弹簧刚度和阻尼器阻尼系数为:

$$K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{R}, \quad C_{BN} = \rho c_P \quad (1)$$

$$K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{R}, \quad C_{BT} = \rho c_S \quad (2)$$

式中: K_{BN} 、 K_{BT} 为法向、切向弹簧刚度; α_N 、 α_T 为法向、切向黏弹性人工边界的修正系数,文献 [13] 中分别取 $\alpha_N=1$ 、 $\alpha_T=0.5$; G 为介质的剪切模量; R 为振动源与边界单元节点之间的距离; C_{BN} 、 C_{BT} 为法向、切向阻尼器的阻尼系数; ρ 为介质的密度; c_P 、 c_S 为围岩中 P 波、S 波波速。三维模型如图 6(b) 所示,尺寸为 135 m×80 m×64.8 m,采用 LS-DYNA 自带的无反射边界选项。图 6(c) 为断面监测点布置。

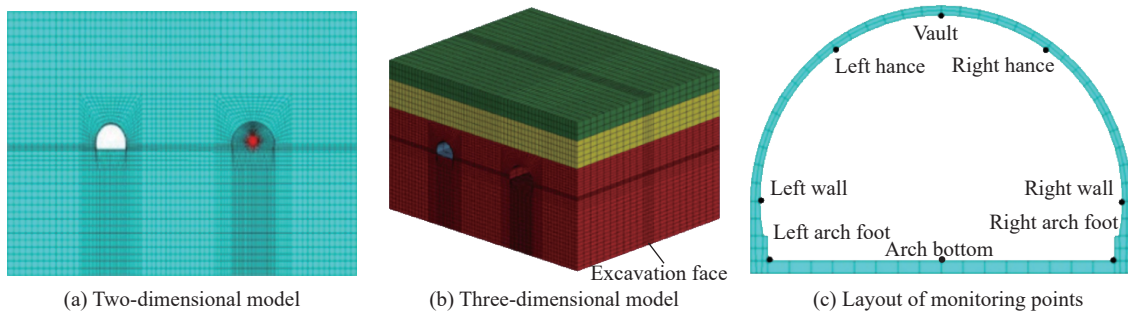


图6 计算模型

Fig. 6 Computing models

数值计算中,对于空洞的模拟主要有两种方式:(1)直接在模型中构建“空洞区域”,即不对空洞区域划分网格;(2)先对全模型划分网格,再采用单元的“生死”功能,“杀死”空洞区域网格。本文中采用在模型中构建“空洞区域”的方式对空洞进行模拟;如图 7(a)~(b)(拱顶空洞为例)所示,空洞最深点与断面中心的连线为“径向线”,空洞深度为 H ,空洞(环向)宽度 B 以“径向线”为基准左右均匀分布。对于裂缝,常用的特征参数主要有位置、深度、长度、宽度等,本文中计算模型为二维平面应变模型,因此选用裂缝位置、表面宽度和深度作为裂缝的基本参数,构建的裂缝模型如图 7(c)(拱顶 $(1/4)h$ 径向扩展深度的裂缝为例)所示,裂缝尖端与断面中心的连线为“径向线”,裂缝深度为 D ,裂缝表面宽度 C 以“径向线”为基准左右均匀分布。

工程实践和研究均表明^[14-15],隧道掌子面爆破中,掏槽孔产生的振动效应最大。因此,本文中仅计算掏槽孔段 1#(2 号岩石乳化炸药,药量 11.6 kg)的爆破效应,图 8 为Ⅲ级围岩断面掏槽孔设计。将爆破荷载施加于隧道开挖边界时,常见的荷载峰值计算方法有逐步演算法和经验公式法。逐步演算法涉及冲击波到压缩波至地震波的 3 个步骤计算,过程繁琐,参数众多,计算结果往往不甚理想。相比而言,经验公式更易应用,且准确度尚可,因此本文中采用经验法^[16]:

$$p_m = \frac{139.97}{Z} + \frac{844.81}{Z^2} + \frac{2\ 154}{Z^3} - 0.803\ 4 \quad (3)$$

式中: p_m 为荷载峰值, kPa; $Z = R/\sqrt{Q}$ 为比例距离, 其中 R 为炮眼至荷载作用面的距离, m, Q 为炮眼填药量, $Q=11.6$ kg。

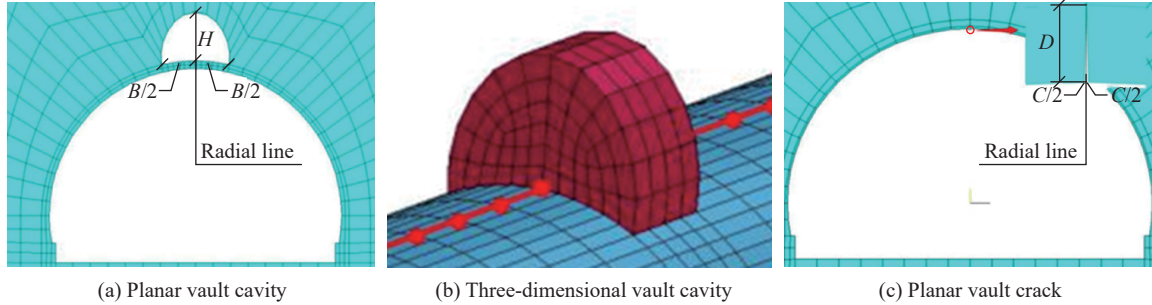


图 7 空洞与裂缝模型

Fig. 7 Cavity and crack models

依据爆破振动理论, 爆破荷载可简化为具有线性上升段和下降段的三角形荷载, 典型的爆破震动升压时间为 8~12 ms, 卸载时间约 50~120 ms^[17]。本文中, 取加载曲线上升段开始时间为 0 ms, 持续 12 ms, 下降段结束时间为 100 ms, 计算总持续时间 1.0 s, 加载曲线如图 9 所示。

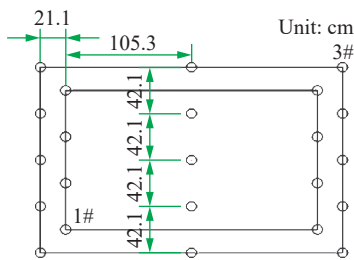


图 8 Ⅲ级围岩掏槽眼布置

Fig. 8 Layout of cut holes for class III surrounding rock

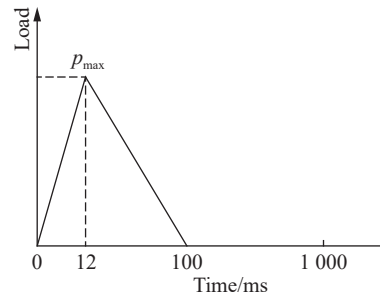


图 9 爆破荷载曲线

Fig. 9 Blasting load curve

围岩和衬砌的动强度与静强度有较大的差别, 主要原因是动荷载的瞬时性。依据王思敬等^[18]建立的动弹性模量 E_d 与静弹性模量 E_s 的转换公式、戴俊^[19]建立的动泊松比 μ_d 与静泊松比 μ_s 的转换计算公式:

$$E_d = 8.757\ 7 E_s^{0.588\ 2} \quad (4)$$

$$\mu_d = 0.8 \mu_s \quad (5)$$

获得了材料参数, 见表 1。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	E_d /GPa	μ_d	γ /(kg·m ⁻³)	c /kPa	φ (°)
中风化粉砂岩(Ⅲ级)	14	0.25	2 300	700	39
二次衬砌	50	0.20	2 500	-	-

3.1.2 计算方案

先设计裂缝隧道的计算方案。既有新岭隧道裂缝以纵向及微张开裂缝类型为主, 横断面上主要出现在边墙、拱腰及拱顶, 沿隧道方向上主要位于Ⅲ级围岩段。因此, 选定Ⅲ级围岩段, 采用二维计算模

型, 裂缝宽度 C 取 0.3 mm, 研究裂缝横断面分布位置、径向扩展深度的影响, 通过工况 K2-1 获取最不利工况, 再通过工况 K2-2 给出振速控制标准。

再设计空洞隧道的计算方案。既有新岭隧道空洞径向深度 20~50 cm, 纵向分布长度以 0~10 m 为主, 横断面上主要出现于拱顶和左、右侧的拱腰, 沿隧道方向上主要位于 III 级围岩段。因此, 选定 III 级围岩段, 采用二维计算模型, 研究空洞横断面分布位置、平面面积的影响, 通过工况 K3-1 获取最不利工况, 再通过工况 K3-2 给出振速控制标准。再以此为基准, 进一步采用三维计算模型, 分析空洞纵向长度的影响(工况 K3-3)。

具体计算工况见表 2, 表中 h 为二次衬砌厚度, 小空洞面积为 4.45 m²(宽 $B=2.7$ m, 高 $H=2.0$ m), 大空洞面积为 16.23 m²(宽 $B=5.5$ m, 高 $H=3.5$ m)。通过工况 K2-2、K3-2, 逐步增大爆破药量(以 $Q=1.5$ kg 对应的荷载峰值 p_{m0} 为基数), 直至结构应力值增至控制上限。

表 2 计算工况详述

Table 2 Detailed simulation conditions

工况	编号	病害	说明
K1	K1-1	无	二维平面模型
	K1-2	无	三维平面模型
K2	K2-1	裂缝	计算拱顶、拱腰(1/4) h 深度、右边墙(1/4) h 深度、右边墙(3/4) h 深度的裂缝
	K2-2	(最不利)裂缝	计算 p_{m0} , $2 p_{m0}$, $3 p_{m0}$, ..., $n p_{m0}$ 时的振动响应
K3	K3-1	空洞	计算拱顶大空洞、拱顶小空洞、左拱腰小空洞、右拱腰小空洞
	K3-2	(最不利)空洞	计算 p_{m0} , $2 p_{m0}$, $3 p_{m0}$, ..., $n p_{m0}$ 时的振动响应
	K3-3	空洞	三维模型, 计算纵向长度影响

3.2 最不利裂缝

爆破引起的动力响应可分为两部分。(1)振速响应: 一般有合速度与分速度之分, 参照 GB 6722—2014《爆破安全规程》^[20]第 13.2.2 节表 2《爆破振动安全允许标准》, 本文中振速响应分析采用分速度;(2)应力响应: 爆破荷载作用下, 混凝土衬砌的破坏以拉伸破坏为主^[21], 同时本文计算表明衬砌的 S_3 应力(压应力)远小于材料抗压强度, 因此应力响应的分析采用 S_1 应力(拉应力)。

如图 10(a)~(b) 所示, 相比完整工况, 不同位置和深度的裂缝对既有隧道衬砌振速响应的影响小。如图 10(c) 所示, 迎爆侧右边墙出现裂缝时, S_1 应力最大值明显增大, 且随裂缝深度的增加而增大; 裂缝深度为 (1/4) h , 断面 S_1 应力最大值为 1.13 MPa; 裂缝深度 (3/4) h , 断面 S_1 应力最大值增至 1.35 MPa。上述分析表明, 裂缝对衬砌断面的影响主要表现为 S_1 应力响应的增强, 且随裂缝深度增加 S_1 应力响应增强, 振速响应则基本不变。图中, x 、 y 为平面坐标系中的水平与垂直方向, 下同。

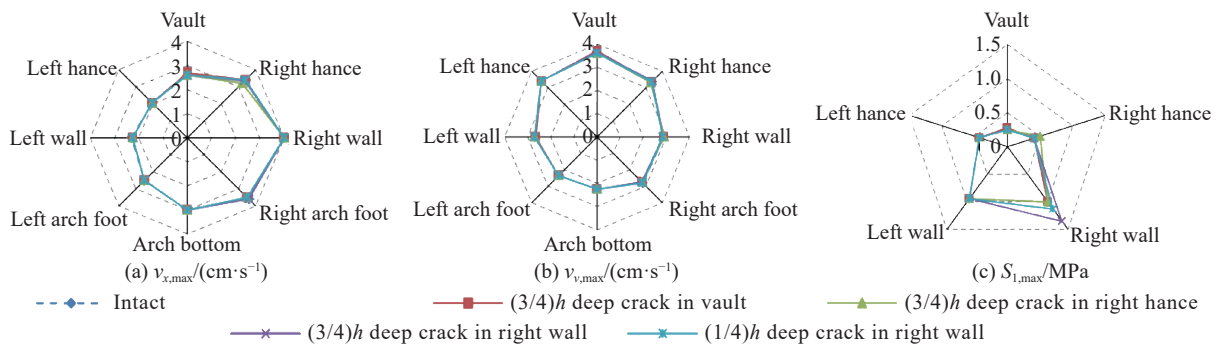


图 10 工况 K2-1 下 v_x 、 v_y 振速极值和 S_1 应力极值的分布

Fig. 10 Distributions of v_x , v_y and S_1 extremum under K2-1 working condition

3.3 最不利空洞

如图 11(a)~(b) 所示, 相比完整工况, 不同位置和平面面积的空洞对既有隧道衬砌振速响应的影响按强弱顺序为拱顶、左拱腰、右拱腰, 平面面积越大影响越大。以拱顶测点为例: 拱顶小空洞, 断面 $v_{x,max}$ 、 $v_{y,max}$ 为 2.6、4.0 cm/s; 拱顶大空洞, 断面 $v_{x,max}$ 、 $v_{y,max}$ 增至 2.75、10.00 cm/s。如图 11(c) 所示: 空洞对既有衬砌 S_1 应力极值的影响集中于上半断面, 表现为空洞区域内衬砌 S_1 应力极值增加, 区域附近 S_1 应力极值减小; 断面 S_1 应力最大值(1.0 MPa)位于迎爆侧右边墙; 空洞平面面积增大对空洞处测点 S_1 应力极值的影响减小。以拱顶测点为例: 拱顶小空洞, 拱顶测点 S_1 应力极值为 0.75 MPa; 拱顶大空洞, 拱顶测点 S_1 应力极值减至 0.46 MPa。上述分析表明: 空洞对衬砌断面的影响主要表现为振速响应的增强, 随着平面面积的增加而增强; 断面 S_1 应力最大值出现于迎爆侧边墙处, 不同工况下保持不变。

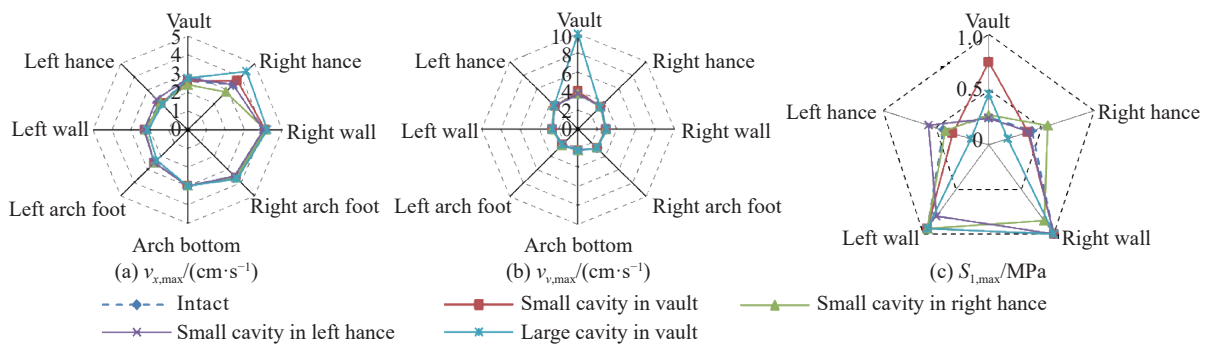


图 11 工况 K3-1 下 v_x 、 v_y 振速极值和 S_1 应力极值的分布

Fig. 11 Distributions of v_x , v_y and S_1 extremum under K3-1 working condition

3.4 控制标准

通过对裂缝和空洞的最不利工况的研究, 可知: 最不利裂缝工况 K2-2 为 $(3/4)h$ 深右边墙裂缝工况; 最不利空洞工况 K3-2 为拱顶大空洞工况。完整工况 K1-1、最不利裂缝工况 K2-2 和最不利空洞工况 K3-2 下, 断面 $v_{max}(\max\{v_{x,max}, v_{y,max}\})$ 、 $S_{1,max}$ 与荷载峰值的倍数 n 的关系如图 12 所示, 断面 v_{max} 与 $S_{1,max}$ 关系如图 13 所示。

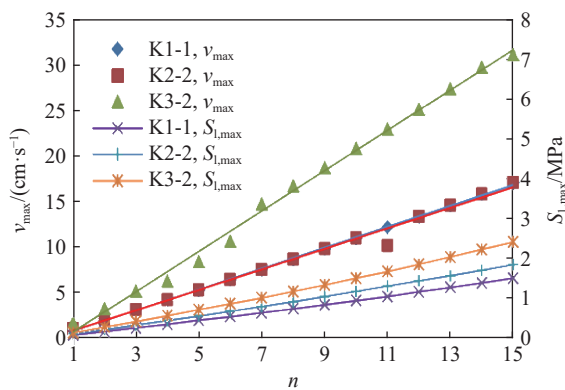


图 12 断面 v_{max} 、 $S_{1,max}$ 与 n 的关系曲线

Fig. 12 Relationship curves of v_{max} , $S_{1,max}$ and n

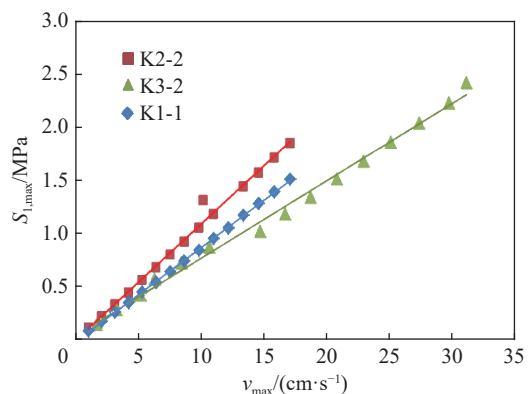


图 13 断面 $S_{1,max}$ 与 v_{max} 的关系曲线

Fig. 13 Relationship curves of v_{max} and $S_{1,max}$

由图 12 可见, 工况 K1-1 的断面 v_{max} 、 $S_{1,max}$ 增长率分别为 $1.146(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})/p_{m0}$ 和 $0.102\text{MPa}/p_{m0}$, 工况 K3-2 的为 $2.211(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})/p_{m0}$ 和 $0.162\text{MPa}/p_{m0}$, 工况 K2-2 的为 $1.124(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})/p_{m0}$ 和 $0.124\text{MPa}/p_{m0}$ 。以工况 K1-1 为基准, 工况 K3-2 的 v_{max} 、 $S_{1,max}$ 的增长率出现了较大增幅, 工况 K2-1 的增幅较小。分析图 13 中

曲线的斜率, 相比工况 K1-1, 工况 K3-2 的斜率下降, 工况 K2-1 的斜率上升, 表明裂缝、空洞对既有衬砌动力响应(振速和 S_1 应力)的影响不一致。裂缝主要增强了衬砌的应力响应, 空洞则增强了衬砌的振速响应和应力响应, 而振速增量明显大于应力增量, 表现为 v_{\max} - $S_{1,\max}$ 曲线的斜率降低。

对于 C25 混凝土, 其抗拉设计值一般为 1.3 MPa^[21], 考虑隧道混凝土衬砌强度与时间的相互关系^[22]取折减因数 0.8, 设定抗拉强度 (S_1 应力) 允许值为 1.04 MPa。代入图 13 进行插值计算: 完整工况的断面 v_{\max} 为 12 cm/s, 与《爆破安全标准》^[20] 规定比较一致, 佐证了计算的可靠性; 最不利裂缝工况的断面 v_{\max} 为 9.8 cm/s; 最不利空洞工况的断面 v_{\max} 为 15 cm/s (> 12 cm/s), 仍取 12 cm/s。

3.5 标准管理体系构建

3.5.1 裂缝标准管理体系

爆破动荷载作用下, 衬砌裂缝主要影响结构 S_1 应力的响应, 且与裂缝深度相关。因此, 以裂缝深度为控制指标, 获取不同裂缝深度下断面 S_1 应力最大值的变化曲线, 如图 14 所示。

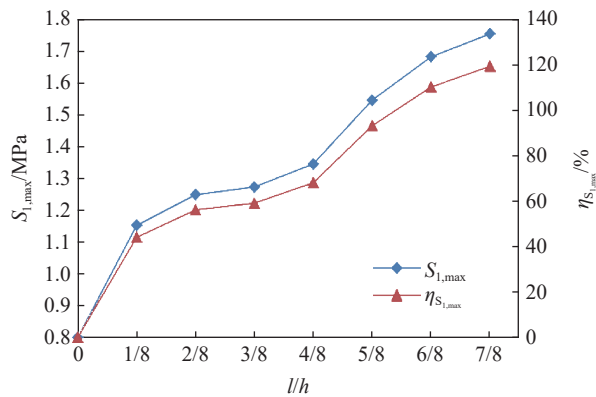


图 14 断面 $S_{1,\max}$ 和增幅与裂缝深度的关系曲线

Fig. 14 Relationship curves between $S_{1,\max}$, increase of $S_{1,\max}$ and fracture depth

由图 14 可见: 裂缝深度小于 $(1/8)h$ 时, 随深度增加, 断面 S_1 应力最大值增大明显; 裂缝深度为 $(1/8 \sim 1/2)h$ 时, 断面 S_1 应力最大值基本不变, 曲线平稳; 裂缝深度大于 $(1/2)h$ 时, 随深度增加, 断面 S_1 应力最大值再次增大明显。以不同深度裂缝的断面 S_1 应力最大值和增幅为基准, 划分裂缝管理等级, 见表 3。

表 3 裂缝管理等级

Table 3 Crack classification

裂缝管理等级	裂缝深度	控制标准/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
I	$(0 \sim 1/8)h$	12
II	$(1/8 \sim 1/2)h$	10
III	$> (1/2)h$	8

3.5.2 空洞标准管理体系

爆破动荷载作用下, 空洞对衬砌的应力响应和振速响应均有影响, 以对振速响应的影响为主, 且与空洞平面面积相关。因此, 以空洞平面面积为控制指标, 获取不同空洞平面面积下的断面 v_{\max} 变化曲线, 如图 15 所示。

由图 15 可见, 随着空洞平面面积的增加, 断面 v_{\max} 的变化可划分为 3 个区域时: 面积小于 5 m^2 时, 断面 v_{\max} 基本不变; 面积为 $5 \sim 10 \text{ m}^2$ 时, 断面 v_{\max} 快速增大; 面积大于 15 m^2 时, v_{\max} 又基本不变。

空洞作为三维结构, 制定(振速)安全控制标准过程中, 必须考虑空洞沿隧道纵向长度的影响。为此, 采用三维计算模型, 开展了不同纵向长度 L 的空洞(纵向)影响区域分析。影响范围 R 为较完整工况出现振速增大的纵向长度, 放大倍数 μ 为影响范围与空洞(纵向)长度之比。

如图 16 所示, 空洞纵向长度增加, 影响范围逐渐增大, 而放大倍数则逐渐减小。空洞纵向长度以 7 m 为界, 超过 7 m, 放大倍数逐渐趋于 1。因此, 以 7 m 为界, 定义空洞区域的纵向监控长度: 空洞纵向长度小于 7 m 时, 按 3~4 倍纵长进行监测; 空洞纵向长度大于 7 m 时, 按 1.0~1.5 倍纵长进行监测; 纵向长度小时, 倍数取大值。综合对空洞平面面积和纵向长度的分析, 划分空洞管理等级, 见表 4。

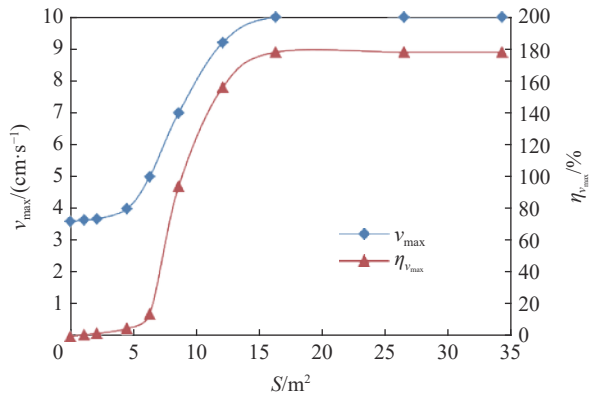


图 15 v_{max} 和增幅与空洞平面面积的关系曲线
Fig. 15 Relationship curves between v_{max} , increase of v_{max} and plane area of cavity

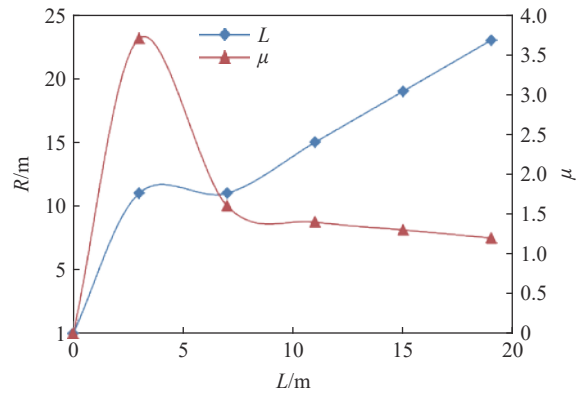


图 16 影响范围、放大倍数与空洞纵向长度的关系曲线
Fig. 16 Relationship curves between influence range, magnification and longitudinal length of cavity

表 4 空洞管理等级

Table 4 Cavity size classification

空洞管理等级	空洞平面面积/ m^2	监控范围	控制标准/($cm \cdot s^{-1}$)
I	<5	空洞中心线为测线; 纵向长度 <7 m, 3~4 倍纵长;	12
II	5~15	纵向长度 >7 m, 1.0~1.5 倍纵长;	
III	>15	纵向长度小, 倍数取大值	

4 结 论

以杭金衢高速公路既有新岭隧道旁拟建新隧道的具体工程为背景, 在对既有隧道衬砌裂缝和背后空洞的分布规律、特征等进行统计与分析的基础上, 系统开展爆破荷载作用下裂缝、空洞对既有隧道衬砌动力响应的影响, 提出了相应振速安全控制标准。具体结论如下。

(1) 裂缝对衬砌断面的影响主要表现为 S_1 应力响应的增强, 且随裂缝深度增加 S_1 应力响应增强, 振速响应则基本不变。以衬砌断面 S_1 应力最大值为控制基准, 划分裂缝管理等级如下: 裂缝深度为 $(0 \sim 1/8)h$ 时, 振速限值为 12 cm/s; 裂缝深度为 $(1/8 \sim 1/2)h$ 时, 振速限值为 10 cm/s; 裂缝深度大于 $(1/2)h$ 时, 振速限值为 8 cm/s。

(2) 空洞增强了衬砌的振速响应与应力响应, 但振速增量明显大于应力增量。以衬砌断面 S_1 应力最大值为控制基准, 划分空洞管理等级如下: 空洞隧道的振速限值统一为 12 cm/s, 与完整隧道振速限值一致; 空洞纵向长度小于 7 m 时, 监控范围为 3~4 倍纵长; 空洞纵向长度大于 7 m 时, 监控范围为 1.0~1.5 倍纵长; 纵向长度小时, 倍数取大值。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综述 2015 [J]. *中国公路学报*, 2015, 28(5): 1–65. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2015.05.001.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's tunnel engineering research: 2015 [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(5): 1–65. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2015.05.001.
- [2] 林从谋, 陈礼彪, 蒋丽丽, 等. 高速公路扩建大断面特小净距隧道爆破稳定控制技术研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(7): 1371–1378.
LIN C M, CHEN L B, JIANG L L, et al. Research on blasting stability control technology of large-span highway tunnel with super-small clear spacing at highway expansion project [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(7): 1371–1378.
- [3] 李洪涛, 卢文波, 舒大强, 等. P波作用下衬砌混凝土的爆破安全振动速度研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2007, 27(1): 34–39. DOI: 10.11883/1001-1455(2007)01-0034-06.
LI H T, LU W B, SHU D Q, et al. Study on the safety velocity for concrete lining under P wave loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(1): 34–39. DOI: 10.11883/1001-1455(2007)01-0034-06.
- [4] 易长平, 卢文波, 张建华, 等. 爆破振动作用下城门洞形衬砌的临界振速研究 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(8): 2203–2208. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2008.08.034.
YI C P, LU W B, ZHANG J H, et al. Study on critical failure vibration velocity of arch with vertical wall lining subjected to blasting vibration [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(8): 2203–2208. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2008.08.034.
- [5] JIANG N, ZHOU C B. Blasting vibration safety criterion for a tunnel liner structure [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 32: 52–57. DOI: 10.1016/j.tust.2012.04.016.
- [6] 王睿, 漆泰岳, 胡燊, 等. 隧道衬砌裂缝检测中的背景处理和断点连接算法 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2017, 25(4): 742–750. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2017.04.009.
WANG R, QI T Y, HU S, et al. Background processing of tunnel lining crack detection and breakpoint connection algorithm [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2017, 25(4): 742–750. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2017.04.009.
- [7] 应国刚, 张顶立, 陈立平, 等. 荷载结构模型在拱顶空洞存在情况下的修正 [J]. *土木工程学报*, 2015, 48(S1): 181–185.
YING G G, ZHANG D L, CHEN L P, et al. Amendment of load-structure model with voids behind tunnel lining at vault [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(S1): 181–185.
- [8] 刘敦文, 杨光, 彭怀德. 爆破作用下拱顶衬砌脱空对隧道结构安全的影响分析 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(10): 4214–4220.
LIU D W, YANG G, PENG H D. Analysis for impact of structural safety of tunnel induced by cavity on vault of lining under blasting [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(10): 4214–4220.
- [9] 罗攀峰. 爆破振动作用下空洞对杉树陀隧道衬砌结构的影响研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [10] 汪波, 郭新新, 王志伟, 等. 新建隧道爆破施工对既有空洞病害隧道的动力响应分析 [J]. *爆破*, 2019, 36(3): 116–123; 146. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2019.03.018.
WANG B, GUO X X, WANG Z W, et al. Caused dynamic response of existing cavity disease tunnel by blasting excavation of newly-built tunnel [J]. *Blasting*, 2019, 36(3): 116–123; 146. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2019.03.018.
- [11] 汪波, 郭新新, 王志伟, 等. 新建隧道爆破施工对既有裂缝病害隧道的动力响应分析 [J]. *爆破*, 2019, 36(1): 90–96. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2019.01.014.
WANG B, GUO X X, WANG Z W, et al. Caused dynamic response of existing tunnel with cracks to blasting excavation of newly-built tunnel [J]. *Blasting*, 2019, 36(1): 90–96. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2019.01.014.
- [12] BODAS A, KAHRAMAN A. Influence of carrier and gear manufacturing errors on the static load sharing behavior of planetary gear sets [J]. *JSME International Journal Series C*, 2004, 47(3): 908–915. DOI: 10.1299/jsmec.47.908.
- [13] 陆俊华, 朱如鹏, 靳广虎. 行星传动动态均载特性分析 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(5): 85–90. DOI: 10.3901/JME.2009.05.085.
LU J H, ZHU R P, JIN G H. Analysis of dynamic load sharing behavior in planetary gearing [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(5): 85–90. DOI: 10.3901/JME.2009.05.085.

- [14] 张震,周传波,路世伟,等.爆破振动作用下邻近埋地混凝土管道动力响应特性[J].*哈尔滨工业大学学报*,2017,46(9):79-84. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201611089.
ZHANG Z, ZHOU C B, LU S W, et al. Dynamic response characteristic of adjacent buried concrete pipeline subjected to blasting vibration [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 46(9): 79-84. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201611089.
- [15] 龚敏,陈哲,吴昊骏,等.掏槽药量与起爆时差的关系对隧道爆破合成振速的影响[J].*应用基础与工程科学学报*,2016,24(6):1110-1124. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2016.06.004.
GONG M, CHEN Z, WU H J, et al. Influence of correlation between cut blasting charge and detonating interval time on superposition vibration velocity caused by millisecond blasting in tunnel [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2016, 24(6): 1110-1124. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2016.06.004.
- [16] 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. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2018.01.024.
ZHANG Y, YANG W D, PENG Z, et al. Caused dynamic response of high rise frame structure by blasting excavation of subway tunnel [J]. *Blasting*, 2018, 35(1): 147-153. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2018.01.024.
- [17] 陈清松,崔硕,李小青.隧道爆破振动影响因素模拟分析[J].*武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*,2018,42(1):77-82. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2018.01.017.
CHEN Q S, CUI S, LI X Q. Simulation analysis on influence factors of tunnel blasting vibration [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*, 2018, 42(1): 77-82. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2018.01.017.
- [18] 王思敬,吴志勇,董万里,等.水电工程岩体的弹性波测试[M].北京:科学出版社,1980.
- [19] 戴俊.岩石动力学特性与爆破理论[M].北京:冶金工业出版社,2002.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.爆破安全规程:GB 6722-2014[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [21] 凌同华,曹峰,张胜,等.分岔隧道过渡段的爆破振动特性研究[J].*振动与冲击*,2018,37(2):43-50. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.2.007.
LING T H, CAO F, ZHANG S, et al. Blast vibration characteristics of transition segment of a branch tunnel [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(2): 43-50. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.2.007.
- [22] 陈元素.受腐蚀混凝土力学性能试验研究[D].大连:大连理工大学,2006.

(责任编辑 丁峰)