

# 复线隧道施工爆破对既有隧道结构的影响分析\*

申玉生<sup>1,2</sup>, 高波<sup>2</sup>, 王志杰<sup>2</sup>, 孟凡君<sup>3</sup>

(1 西南交通大学力学博士后流动站, 成都 610031;

2 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031;

3 中铁十一局集团第二工程有限公司, 湖北 十堰 442013)

**摘要:** 结合襄胡二线新刘家沟隧道实际工程, 通过对既有花果隧道的四次爆破振动测试分析及一次爆破验证, 说明爆破振动的参数设计是合理的, 质点的振动速度能够客观反映现场的地质状况和衰减规律, 新建隧道施工爆破对爆心距最小的左边墙影响最大。随着测点与爆心距的增大, 质点振速衰减明显, 质点振动幅值依次减小。建议在新建隧道洞口段进行分段爆破, 限制每次爆破最大段装药量, 以保证既有隧道结构的稳定安全和正常运营。

**关键词:** 隧道工程; 既有隧道; 施工爆破; 振动测试

中图分类号: U451 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2009)05-0980-05

## Effect of Blasting in Double Line Tunnel on Existing Tunnel

SHEN Yu-sheng<sup>1,2</sup>, GAO Bo<sup>2</sup>, WANG Zhi-jie<sup>2</sup>, MENG Fan-jun<sup>3</sup>

(1 Postdoctoral Station of Mechanics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2 School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;

3 The 2nd Engineering Co. Ltd. of China Railway 11th Bureau Group, Shiyan, Hubei 442313, China)

**Abstract** Based on the Xinlijiagou tunnel project in No. 2 Xiangu railway, the vibration design is proved to be reasonable through four blasting vibration analyses and a blasting on the existing tunnel. The particle vibration velocity could reflect the site-geological condition and the attenuation law and the sidewall which is the nearest place to the existing tunnel is influenced seriously during the blasting in new built tunnel. The particle vibration attenuates obviously with the distance increase between the monitoring point and explosion center, and the amplitude of the monitoring points decrease gradually apart from the explosion centre. It is proposed that the repeatedly blasting should be carried on at the Entrance of the new tunnel and the maximum amount of the charge should be limited in order to ensure the structural stability and normal operation of the existing tunnel.

**Keywords** tunnel engineering; existing tunnel; excavating blasting; vibration monitoring

## 1 前言

随着我国国民经济的发展,越来越多的单线铁路改建为复线,由于受到地形地质条件的制约,不得不减小新建隧道与既有隧道之间的距离。在新

建隧道施工过程中,既有隧道结构时常遭到破坏,从而危及到行车安全,特别是对于两隧道间距偏小的洞口段。为了有效防护既有隧道的损伤与破坏,通过相应的经验公式或参数来评价、预测爆破振动强度,并利用爆破设计来控制振动强度,从而达到

\* 收稿日期: 2009-05-09(修改稿)

作者简介: 申玉生(1976-),男,山东临朐县人,西南交通大学讲师、博士后,主要从事大跨度隧道施工力学及山岭隧道抗减震技术研究。E-mail: sys1997@yahoo.cn

基金项目: 中国博士后基金资助(编号: 20080431267); 国家自然科学基金项目(50878187); 西南交通大学校科学基金项目(2007B19)

减小爆破地震危害的目的<sup>[1]</sup>。

新建隧道施工对既有隧道结构安全的影响主要表现在两个方面,即爆破振动影响和开挖引起围岩应力重分布影响,而对于围岩较好的中硬岩隧道爆破振动影响较大<sup>[2]</sup>。新建隧道爆破主要与炸药及装药特性、起爆方法、爆破参数设计(孔间距、孔间延时、最小抵抗线)等有着密切的关系<sup>[3,4]</sup>。因此,对新建隧道爆破参数进行合理设计是具有重要的现实意义。

在复线隧道的施工过程中,可以根据现场隧道爆破振动的测试(质点振动速度的测试)的反馈信息,了解新建隧道的爆破对近距离既有隧道的影响,对爆破参数进行合理设计或优化,使爆破振动强度不至于危及既有隧道的安全<sup>[3]</sup>。因此,本文结合实际工程对既有隧道振动强度进行现场监测,分析新建隧道爆破对既有隧道的影响,确定合理的爆破参数,确保隧道安全顺利施工及既有隧道的正常运营。

## 2 工程概况

新刘家沟隧道位于十堰市花果街办与西城开发区交界处,花果至黄龙间,地处低山区,地形起伏较大,隧道通过段沟谷较多,冲沟两侧地势陡峻。进出口坡度较陡,自然山坡植被茂密。隧道起讫里程为 DZK 123+902~DZK 124+772,全长 870m,该隧道处于半径  $R=1600\text{m}$  曲线上,纵坡地势为单面下坡,进口端 48m,坡度为 1.5‰,洞身其余地段坡度均为 4.7‰,洞身段为 III~V 级围岩。隧道内轮廓按旅客列车行车速度为 160km/h 进行设计,轨面以上隧道净空横断面面积不小于  $42\text{m}^2$ 。新刘家沟隧道进口右邻既有隧道花果隧道(图 1),DZK 123+902~DZK 124+020 段距离既有隧道较近,最小线间距仅为 11m,新建隧道右侧开挖线与既有衬砌外侧最小距离为 4.95m(图 2)。进口紧接新建千字沟中桥安台,下临 316 国道,地势陡峭,自然坡度大,隧道中心偏右侧围岩风化严重,风化层厚约 2~5m,自稳性差。

根据新刘家沟隧道地质条件及岩性、技术规范要求、开挖方法及以往施工经验,采用微差爆破技术,弱爆破、多循环、强支护方式,轮廓线为光面爆破,起爆时严格控制最大段装药量,减小对隧道设计开挖面的爆破振动。爆破参数主要参照经验公式确定,在实施过程中将根据实际开挖情况(振动测试报告)不断的调整、优化爆破参数,保证隧道



图 1 新刘家沟隧道与既有隧道洞口照片

Fig 1 Xinliujiagou tunnel and exiting tunnel at the entrance

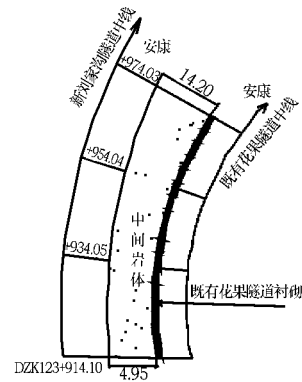


图 2 新建隧道与既有隧道位置关系(单位:m)

Fig 2 Relative position between new building tunnel and exiting tunnel

安全顺利施工。

## 3 既有隧道振动测试方案

### 3.1 一元线性回归计算方法

回归公式采用国内外常用的预测爆破振动速度的萨道夫斯基公式<sup>[5]</sup>:

$$V = K(\sqrt[3]{QR})^{\alpha} \quad (1)$$

式中:  $V$  为最大振动速度,  $\text{m/s}$ ;  $Q$  为单段最大装药量,  $\text{kg}$ ;  $R$  为爆心距,  $\text{m}$ ;  $K$  为介质系数;  $\alpha$  为衰减系数。

将式(1)两边取自然对数变为线性方程:

$$\ln(V) = \ln(K) + \alpha \ln(\sqrt[3]{QR}) \quad (2)$$

令  $y = \ln(V)$ ,  $x = \ln(\sqrt[3]{QR})$ ,  $a = \ln(K)$ ,  $b = \alpha$  则有:

$$y = a + bx \quad (3)$$

对于测试所得的多组  $V, Q, R$  数据,代入上式得到  $(x_i, y_i)$ 。为确定系数  $a, b$  通常采用最小二乘法,即要使

$$\xi = \sum_{i=0}^{n-1} [y_i - (ax_i + b)]^2 \quad (4)$$

达到最小。根据极值定理,  $a, b$  满足下列方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \xi}{\partial a} &= 2 \sum_{i=0}^{n-1} [y_i - (ax_i + b)] (-x_i) = 0 \\ \frac{\partial \xi}{\partial b} &= 2 \sum_{i=0}^{n-1} [y_i - (ax_i + b)] (-1) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

从而解出:

$$a = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=0}^{n-1} (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x}, K = e^a, \alpha = b$$

式中:  $\bar{x} = \sum_{i=0}^{n-1} x_i / n; \bar{y} = \sum_{i=0}^{n-1} y_i / n。$

从公式 (1) 中可以看出,  $K, \alpha$  为反映爆破方式与地质条件等综合影响的回归待定统计系数, 经过计算可以得出振速公式中的系数  $K$  和衰减指数  $\alpha$ , 振速均随单段最大装药量的增加而增大, 随爆心距的增大而减小<sup>[6]</sup>。

### 3.2 测试方案

振动记录仪采用 DTS-3850 爆破振动记录仪, 该仪器已通过中国测试技术研究院鉴定, 采用石膏粉或特殊胶将传感器固定于隧道衬砌上 (图 3)。



图 3 花果隧道左边墙测点照片  
Fig 3 Point of measurement at left sidewall in Huaguo tunnel

现场监测工作分两步进行, 第一步对新建隧道进行试爆监测; 第二步根据试爆的反馈信息, 设计合理爆破参数, 然后验证其可靠性。测点布置于最大震动可能发生位置、可能导致结构与围岩破坏的

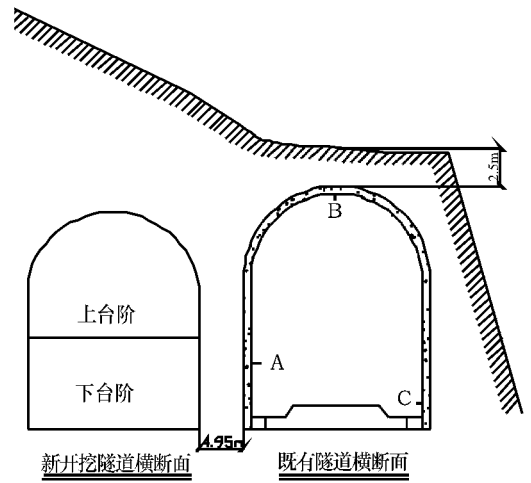


图 4 隧道测点布设示意图

Fig 4 Points of measurement in the tunnel

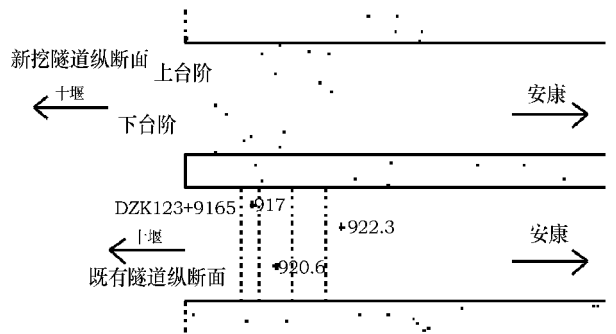


图 5 既有隧道振动测试方案平面示意图

Fig 5 Schematic plan of monitor scheme on existing tunnel 位置以及能够反应爆破震动衰减规律的部位<sup>[7,8]</sup>。测点的具体布置位置见爆破振动测点主要布置在既有隧道两边墙及拱顶, 由于条件所限将拱顶测点转移至既有隧道地表相应位置 (见图 4)。爆破振动的能量主要沿掘进方向 (纵向) 传播, 在掌子面前方测得的振动速度比后方大<sup>[9]</sup>, 并且水平方向峰值振动速度远大于竖向峰值速度<sup>[10]</sup>, 因此测点布设均比新建隧道掌子面超前 1 米左右 (图 5)。在本次测试方案中, 按照不同部位、不同装药量, 在新建隧道中试爆 4 次, 根据反馈信息, 设计或优化爆破振动参数, 同时对爆破振动参数的可靠性进一步验证 (测验 1 次)。

## 4 测试结果分析

在第一次爆破中, 既有隧道测点最大振动速率出现于左边墙水平测点 (表 1), 因此重点对左边墙的测点进行测试, 对其它各测点进行有选择的监测。测点的传感器输出的振动过程信号均被记录仪记录到, 数据获得率为 100%。

按《爆破安全规程》(GB6722-2003)<sup>[11]</sup>规定:地面建筑物的爆破振动判据,采用保护对象所在地质点峰值振动速度和主振频率;而水工隧道、交通隧道、矿山巷道、新浇大体积混凝土的爆破振动判据,采用保护对象所在地质点峰值振动速度。因此本文主要对测试点的峰值振动速度进行分析。

由于篇幅限制,本文只对第一次测试数据进行分析。根据第一次测试结果分析(图6),新建隧道的爆破对既有隧道临近开挖隧道侧边墙影响最大,在左边墙测点处,质点最大振速为4.489cm/s(水平向),最大主振频率为113.5Hz。由于隧道覆盖层仅为2.5m,在地表测试的质点最大振速为3.12cm/s(竖向),最大主振频率为26.2Hz。由于右边墙与左边墙之间无直接实体接触且有路基、排水沟等隔离,质点的振速衰减较大,最大振速为0.65cm/s(竖向),最大主振频率为96.2Hz。

由于隧道爆破过程中,采用微差爆破技术,在质点振动时程曲线中明显出现三段波动(图6),有效地削弱了地震动对既有隧道的振动影响。随着各测点与爆心之间距离增大(左边墙、拱顶、右边墙),质点振速衰减非常明显,测点振动幅值依次减小,因此,在对既有隧道的爆破中,应重点对左边墙测点的监控。

在第一次爆破振动中,隧道的主振频率范围一般在4~150Hz,主振频率的大小取决于地震波的传播介质。由于爆炸荷载作用时间短,爆破的地震波形是非周期性的瞬态波形,其频率比较复杂,并且爆破药量、爆破方法、地形地质等条件对爆破地震波形、频率成分均有不同程度的影响。

根据现场测试数据(表1)及其回归分析,计算出质点振速与单段最大装药量、爆心距的关系式:

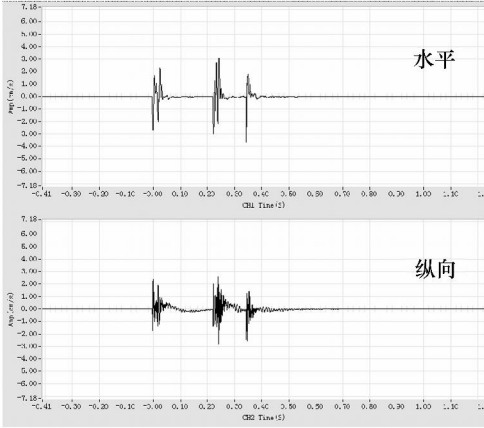
$$V = 256.4(\sqrt[3]{Q/R})^{1.8} \quad (7)$$

根据公式(7)的换算关系,对隧道爆破测试进行了可靠性验证(表1中第五次测试),结果表明质点峰值速度,均小于《爆破安全规程》关于爆破地震不产生破坏的安全振速的要求(控制振速为10cm/s),达到安全爆破的要求,说明公式(7)中参数的设计是合理的。但考虑到既有隧道是20世纪50年代修建,洞口段混凝土长期受到各种侵蚀介质的侵蚀以及冻融、干湿交替作用,混凝土的强度大大降低,而多次施工爆破对隧道结构可能会造严重破坏,建议每次爆破装药量不要超过第五次爆破的装药量(总装药量69.8kg,最大段装药量12.35

kg),以保证既有隧道结构的稳定安全和正常运行。

表1 测试数据表

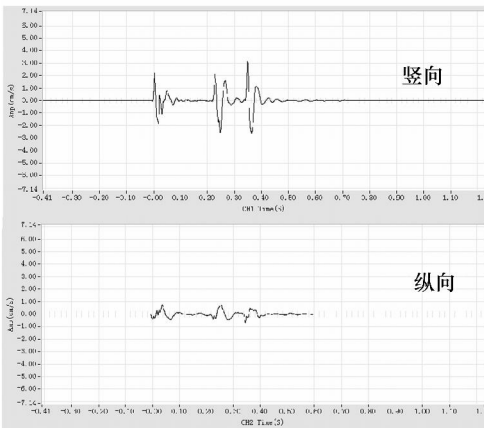
测点号	测点名称	单位	量程	传感器品牌	偏差	触发时间	最大幅	频率	主频	辅助时间
0	CE1	m/s	2.0F	3E.009/2F	0.00F	12/11/2008 15:13:30	4.489cm/s	0.342PC	113.526Hz	0.3171S
1	CE2	m/s	2.0F	3E.009/2F	0.00F	12/11/2008 15:13:30	3.081cm/s	0.340CE	4.2728Hz	0.3711S



(a) 左边墙

表2 测试数据表

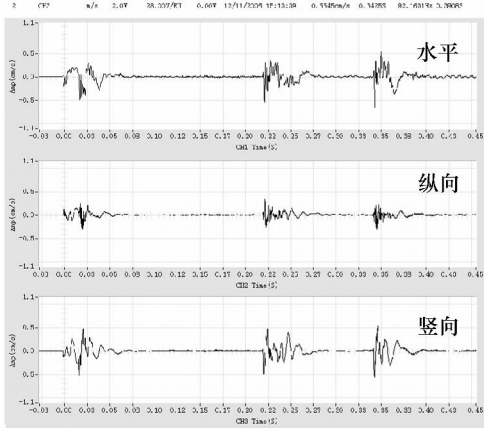
测点号	测点名称	单位	量程	传感器品牌	偏差	触发时间	最大幅	频率	主频	辅助时间
0	CE1	m/s	2.0F	3E.009/2F	0.00F	12/11/2008 15:13:30	3.117cm/s	0.3482E	26.2151Hz	0.2705S
1	CE2	m/s	2.0F	3E.009/2F	0.00F	12/11/2008 15:13:30	0.970cm/s	0.3500ca	34.2848Hz	0.2513S



(b) 拱顶

表3 测试数据表

测点号	测点名称	单位	量程	传感器品牌	偏差	触发时间	最大幅	频率	主频	辅助时间
0	CE3	m/s	2.0F	3E.009/2F	0.00F	12/11/2008 15:13:30	0.620cm/s	0.3430S	49.4885Hz	0.2088S
1	CE2	m/s	2.0F	3E.009/2F	0.00F	12/11/2008 15:13:30	0.391cm/s	0.3433S	64.0889Hz	0.2004S
2	CE7	m/s	2.0F	3E.009/2F	0.00F	12/11/2008 15:13:30	0.540cm/s	0.3438S	82.7611Hz	0.2004S



(c) 右边墙

图6 第一次爆破既有隧道振动时程曲线(a,b,c)

Fig 6 Velocity-time curves of exiting tunnel at primary blasting

表 1 既有隧道质点最大振动速率一览表  
Table 1 Max vibration rate of the exiting tunnel particle

次数	测点里程	实测振速 (cm/s)							备注
		左边墙		拱顶		右边墙			
		水平	竖向	竖向	纵向	水平	纵向	竖向	
1	DZK 123+ 916 5	4 4852	3 9834	3 1175	0 7775	0 6506	0 3922	0 5545	最大段装药量 3 12kg
2	DZK 123+ 917	3 3343	2 3007	1 1263	0 7003	0 4953	/	/	最大段装药量 1 32kg
3	DZK 123+ 917	3 6830	2 8453	1 8294	1 4636	0 4046	/	/	最大段装药量 1 56kg
4	DZK 123+ 920 8	7 1394	3 6586	/	/	/	/	/	最大段装药量 10 16kg
5	DZK 123+ 922 3	7 1778	7 1708	2 4451	1 7857	1 7160	/	/	最大段装药量 12 35kg

## 5 结束语

为了既充分发挥爆破技术的经济效益,又最大限度地达到安全效益,必须重视爆破振动的分析研究,通过现场一定规模(相应)爆破试验测定结果,综合确定爆破设计参数是非常关键的。

通过对四次爆破振动测试分析及一次爆破验证,说明爆破振动的参数设计是合理的,质点的振动速度能够客观反映现场的地质状况和衰减规律。新建隧道施工爆破对距离既有隧道最近的左边墙影响最大(质点水平速度最大)。应加强对左边墙测点的监控,随着测点与爆心之间距离增大,质点振速衰减非常明显,并且各测点振动曲线的振幅依次减小。同时必须确保既有隧道安全运营,建议在新建隧道洞口段进行分段爆破,并且最大段装药量不要超过 12 35kg/次,以保证既有隧道的结构的稳定安全,正常运营。

### 参考文献:

- [1] 林从谋,杨林德,崔积弘,浅埋隧道掘进爆破振动特征研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(2): 276-279 (LN Congmou, YANG Linde, CUI Jihong Study on the Vibration Characteristic of the Shallow-Tunneling Blasting[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering 2006, 2(2): 276-279. (in Chinese))
- [2] 王明年,潘晓马,张成满. 邻近隧道爆破振动响应研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 412-414 (WANG Mingnian, PAN Xiaoma, ZHANG Chengman. Study of blasting vibration influence on close-spaced tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3): 412-414 (in Chinese))
- [3] 李飞,陈卫忠,李术才,等. 高速公路浅埋大跨度双跨

连拱隧道爆破振动影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增 2): 4 744-4 748 (LI Fei, CHEN Weirzhong, LI Shurcai, et al. Study of effects of blast on shallow large-span double-linked-arch tunnel of expressway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Supp2): 4 744-4 748. (in Chinese))

- [4] 许海亮,张继春,任贺靖. 隧道掘进爆破震动放大效应试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 609-612 (XU Hailiang, ZHANG Jichun, REN Hejing. Experimental Study on Magnifying Effects of Vibration Resulting from Driving Blasting in Tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(4): 609-612. (in Chinese))
- [5] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社. 1990: 237-238. (ZHOU Weiyuan. Advanced rock mechanics[M]. Beijing Water Power Press, 1990: 237-238. (in Chinese))
- [6] 闫鸿浩,李晓杰,曲艳东,欧阳欣. 爆破振动速度测试精细分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2091-2094. (YAN Honghao, LI Xiaojie, QU Yandong, Ou Yangxin. Fine analysis of blasting vibration velocity testing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2091-2094. (in Chinese))
- [7] 阳生权,周健,陈秋南,等. 爆破震动作用下的地下结构及围岩幅频特性分析. 地下空间与工程学报[J]. 2006, 2(1): 104-107. (YANG Shengquan, ZHOU Jian, CHEN Qiunan, et al. Frequency and Amplitude Analysis of Underground Structure and Round rock Affected by Blasting Vibration [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 104-107. (in Chinese))
- [8] 张继春,郭学彬,郑爽英,等. 顺层边坡岩体的爆破振动特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报[J]. 2005, 1(7): 1041-1044. (张继春,郭学彬,郑爽英,等. 顺层边坡岩体的爆破振动特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报[J]. 2005, 1(7): 1041-1044. (下转第 1032 页))

## 4 结论

随着计算机技术的快速发展,对于有理函数模型这一类拟合难度较高的四参数模型,已可快速的应用到工程中来,从以上的计算分析可以看出,本文采用有理函数模型在回归分析隧道拱顶变形中得到了较好的应用,取得了以下几个结论:

(1)拱顶下沉回归函数的线性相关系数  $r_1 = 0.9943$ , 剩余标准离差  $S_1 = 0.0629\text{mm}$ , 说明回归函数  $u_1 = \frac{-2.6348 \times 10^{-3} + 0.4779 \times t}{1 + 0.2337 \times t + 2.2493 \times 10^{-4} \times t^2}$  比较好的反应了拱顶下沉实测数据  $u$  和时间  $t$  之间的关系。

(2)在对拱顶下沉的回归分析中,所选用的回归方程曲线与实测数据散点曲线的拟合程度最高,误差范围最小,能够比较真实的反应围岩变形的实际情况,可以为指导施工提供充分的理论依据。

参考文献:

[1] JTJ042—94 公路隧道施工技术规范. (JTJ042—94

Technical Specifications for Construction of Highway Tunnel (Industrial Standard of the People's Republic of China (in Chinese))

- [2] 李世辉. 隧道围岩稳定系统分析 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991. (LI Shihui Stability Analysis for Surrounding Rock of Tunnels [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991. (in Chinese))
- [3] 李晓红. 隧道新奥法及其量测技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. (LIXiaohong New Austrian Tunneling Method and its measured technic Beijing Science Press, 2002)
- [4] [http://en.wikipedia.org/wiki/Rational\\_function](http://en.wikipedia.org/wiki/Rational_function)
- [5] [http://www.britannica.com/EBchecked/topic/492008/rational\\_function](http://www.britannica.com/EBchecked/topic/492008/rational_function)
- [6] 季夜眉. 概率与数理统计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. (JI Yemei Probability and Statistics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. (in Chinese))

(上接第 984 页) (ZHANG Jichun, GUO Xuebin, ZHENG Shuangying et al. Experimental Study on Vibration Characteristics of Rock Mass Blasting at Layered Slope [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(7): 1041-1044. (in Chinese))

[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): 501-505. (YAO Yong HE Chuan, YAN Qixiang Numerical simulation of blasting control for small clear distance zone of Dongjiashan tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Supp): 501-505. (in Chinese))

- [10] 阳生权, 周健, 吕中玉. 不同距离条件下爆破引起的质点振动频幅分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 637-641. (YANG Sheng-quan, ZHOU Jian LU Zhong-yu Amplitude-frequency Analysis of Particle Vibration with Blasting at Different Distance [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(4): 637-641. (in Chinese))
- [11] 中华人民共和国国家标准, 爆破安全规程 [S]. GB6722-2003. (National Standard of PRC, Safety regulations for blasting [S]. GB6722-2003. (in Chinese))