

文章编号: 1001-1455(2007)01-0075-07

# 小间距隧道爆破开挖动力效应数值模拟研究\*

李云鹏<sup>1</sup>, 艾传志<sup>1</sup>, 韩常领<sup>2</sup>, 霍明<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(北京)机电工程学院, 北京 102249;

2. 中交集团第一公路勘察设计研究院, 陕西 西安 710075)

**摘要:** 从爆破施工的特点入手, 对小间距隧道在采用典型双侧导坑法时的爆破施工动力效应进行了数值模拟研究, 给出了爆破施工在已有洞室周边产生的动力效应的一般规律, 指出在爆破(后开挖洞室)开挖影响区以内, 合理确定已有洞室二次衬砌施作时间的重要性, 并给出了爆破施工对已有洞室稳定性影响较大的关键开挖位置。研究表明, 爆破动载荷对小间距隧道围岩稳定性的影响主要表现为爆炸应力波造成围岩临空面的反射拉伸破坏, 破坏较严重的是已有洞室的迎爆墙、拱脚、拱顶等部位。所得结论对小间距隧道爆破施工有一定的参考价值。

**关键词:** 爆炸力学; 爆破施工; 动力分析; 公路隧道; 小间距

**中图分类号:** O383; TD235

**国标学科代码:** 130·3520

**文献标志码:** A

## 1 引言

爆破开挖施工方法是隧道工程施工普遍采用的方法, 在岩土等工程施工中得到了广泛应用。随着经济的发展和环保意识的增强, “生态路”“环保路”等新理念的出现, 小间距隧道、铁路复线隧道、城市双线隧道的建设工程不断启动。由于小间距隧道及复线隧道一般间距较小, 因此对施工技术, 特别是爆破开挖施工技术有较高的要求。爆破施工方法及机理已有大量的研究成果<sup>[1-2]</sup>, 而且因爆破对工程结构产生的动力效应分析也有一定的研究, 如根据监测资料和数值方法, 对某大型既有隧道及围岩爆破动力效应分析<sup>[3]</sup>, 对近距侧爆情况下马蹄形隧道动态响应特点分析研究<sup>[4]</sup>, 爆炸荷载作用下岩溶区隧道围岩变形分析<sup>[5]</sup>等, 另外, 对控制爆破下的爆破荷载计算模式、多孔爆破荷载的计算<sup>[6]</sup>、孔周裂缝及不连续结构面的考虑<sup>[7-8]</sup>等均进行了许多有意义的研究工作, 并取得了一些有应用价值的研究成果。尽管如此, 对此问题的研究目前仍然处于探索阶段, 广大工程技术人员及研究工作者试图从各个方面进行深入研究, 以便给出较切合实际且具有指导意义的施工参考依据。本文中从小间距公路隧道在双侧导坑法施工中的爆破开挖产生的动力效应问题进行分析探讨, 分析中选取了两种间距的三车道隧道, 并利用 ANSYS 软件的动力分析模块分别对有、无衬砌情况的爆破施工动力效应进行了模拟比较, 探讨了爆破对已有隧道的影响规律及应力波的传播规律和不同间距对隧道变形规律的影响, 取得了一些可供小间距隧道工程施工方案设计和现场监控的参考信息。

## 2 分析模型及力学参数

小间距三车道隧道爆破动力分析模型如图 1 所示, 洞高 11.54 m, 宽 16.22 m。为了用刚性边界取代无反射边界<sup>[9]</sup>, 分别沿  $x$ 、 $y$  方向上取洞径 5 倍以上的区域作为计算分析区域, 两侧水平约束, 底部竖向约束; 隧道埋深为 30 m, 模拟分析中视围岩为弹性材料。依据相关资料<sup>[3,9-10]</sup>, 在分析时忽略了重力作用效应。

爆破荷载模型有多种形式, 目前还没有统一的处理方法, 要精确模拟爆破荷载效应需要确切的钻爆

\* 收稿日期: 2005-10-21; 修回日期: 2006-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(50374049)

作者简介: 李云鹏(1956—), 男, 教授。

设计方案和大量的实验测试,以获得与实际施工相应的爆破荷载模型。本文中探讨爆破开挖施工对小间距隧道产生的动力效应规律为主,所以,采用了常用的均布三角形压力荷载模型<sup>[3,9]</sup>,荷载分布及荷载压力时程曲线如图1和图2所示。

设压力峰值为10 MPa,升压时间为 $t_r=1$  ms,降压时间为9 ms,总计算时间为10 ms。使用隐式Newmark算法计算求解,积分时间步长<sup>[8]</sup> $\Delta t=t_r/10=0.1$  ms。

如图1所示给出了两种施工状态,在模拟爆破开挖时,左洞已经形成。模拟分析方案如表1所示(均为III类围岩,三车道隧道,开挖方式均为双侧壁导坑法),围岩及衬砌力学参数见表2,表中 $C$ 、 $\varphi$ 、 $\mu$ 、 $E$ 和 $\gamma$ 分别表示凝聚力、内摩擦角、泊松比、弹性模量和重度。

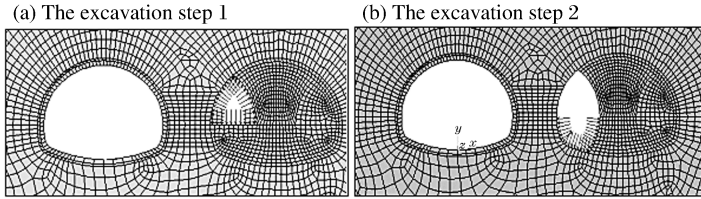


图1 分析模型及爆破开挖施工步示意图  
Fig.1 Analyzing model and excavation step

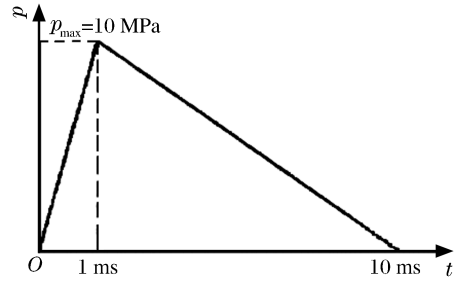


图2 爆破荷载时程曲线  
Fig.2 Curve of blasting load-time

表1 计算方案

Table 1 Calculating scheme

隧道间距	右洞开挖位置	模拟工况与计算编组
0.3B	左侧上台阶	不考虑衬砌(1)
0.3B	左侧上台阶	考虑衬砌(2)
0.3B	左侧下台阶	考虑衬砌(3)
0.45B	左侧下台阶	考虑衬砌(4)

注:  $B$  为隧洞跨径,三车道隧道跨径为  $B=16.22$  m。

表2 围岩及衬砌力学参数<sup>[11]</sup>

Table 2 Mechanical parameters of the surrounding rock and the lining

类别	$C/\text{MPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$\mu$	$E/\text{GPa}$	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$
III类围岩	0.6	39	0.300	5.2	26
衬砌 C25	1.9	45	0.153	28.5	27

### 3 动力效应模拟结果分析

#### 3.1 最大主应力分布规律分析

图3给出了三车道小间距隧道、间距0.3B、图1(a)所示情况且不考虑衬砌时爆破荷载作用下最大

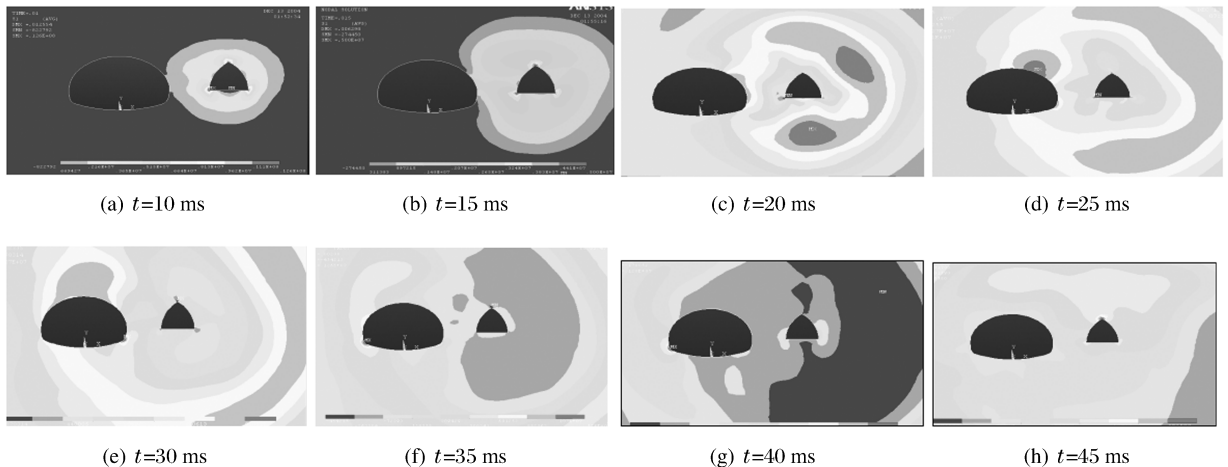


图3 不衬砌时最大主应力变化规律图(开挖步1)

Fig.3 Maximum principal stress for un-lining tunnel (excavation step 1)

主应力随时间变化的等色线图。由图 3 可见,爆炸应力波首先波及的是左洞迎爆墙附近,如图 3(a)和图 3(b)所示。在  $t=20\text{ ms}$  时刻,左洞迎爆墙出现反射拉伸区(见图 3(c))。随着时间的推移,这种反射拉伸区迅速向两侧转移,如图 3(d)和图 3(e)所示,反射拉伸区随应力波阵面的移动而移动到了拱顶和底板与边墙交界处; $t=35\text{ ms}$  以后,反射拉伸区转移到了背爆墙附近(见图 3(f)),此时迎爆墙附近围岩的高反射拉伸区已经消失。当  $t=40、45\text{ ms}$  时,左洞背爆墙底脚处出现拉应力区并逐渐减小, $t=50\text{ ms}$  以后,左洞附近围岩由于爆破产生的拉应力已经下降到了  $1\text{ MPa}$  以下,并逐渐消失(见图 3(g)、(h))。

由以上分析可见,随着时间的推移,最大拉应力依次出现在迎爆墙、拱脚、拱顶及底板、背爆墙等位置,并且其强度经历由弱变强,又由强变弱后逐渐减小消失。由岩石无拉力分析得到,爆破动载荷对小间距隧道围岩稳定性的影响主要表现为爆炸应力波造成围岩临空面的反射拉伸破坏,破坏较严重的应是已有洞室迎爆墙、拱脚、拱顶等部位。

### 3.2 施加衬砌后的最大主应力分布规律

图 4 给出了与图 3 相同条件下,施加衬砌后最大主应力随时间变化的等色线图。

由图 4 可见,施加了衬砌后,在爆破荷载作用下,反射拉伸区的出现位置仍然在左洞迎爆墙的临空面附近。随着时间的变化,这种拉伸区从迎爆墙上部到拱脚及拱顶,下部则经过边墙、底板,最后在背爆墙与底板交界处减弱消失。

将图 3 与图 4 对比可以发现,有衬砌的情况下衬砌所承受的最大主应力比毛洞要大,并且应力变化幅度也较大。所以,建议在右洞爆破开挖影响区以内,推迟左洞二次衬砌时间,避开右洞爆炸冲击波的作用,确保左洞二次衬砌的完整性和稳定性。图 5 给出的应力波传递与图 4 有相似的规律,但其洞周周边最大主应力值大小变化有较大差别。迎爆墙一侧仍然是受应力波的反射拉伸作用,其动应力集中

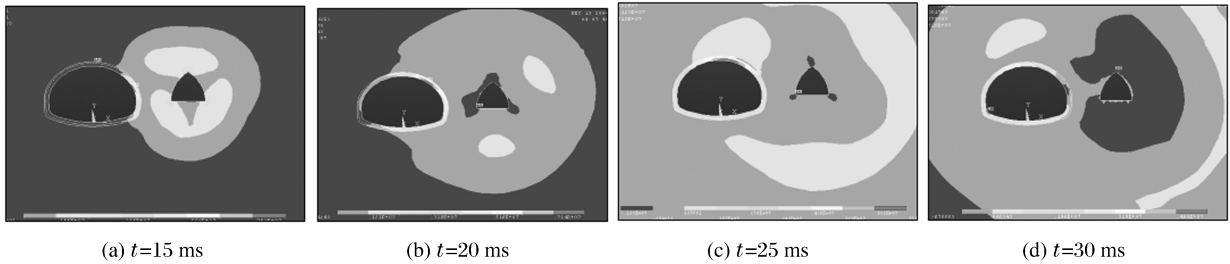


图 4 施加衬砌后最大主应力变化规律图(开挖步 1)

Fig. 4 Maximum principal stress after lining (excavation step1)

因子有所增大,而背爆墙一侧没有明显的变化,可见在施工步 2 后,应力波反射增强而绕射减速弱。由此可推得,在双侧导坑法的以后各步开挖中,由于迎爆墙和背爆墙的位置的转换和上述应力波的反射与绕射规律性,在隧道的中隔墙周边将不再会出现过大的拉应力区,图 1 (b)所示开挖步应是双侧导坑爆破施工中最不利的一关键步。

### 3.3 关键点最大主应力峰值比较

图 6 所示为左洞周边上各关键点  $n_k$  的几何位置示意图,图 7 为图 6 中各关键点在不同情况下的最大主应力峰值曲线,横坐标为关键点号,纵坐标为相应的最大主应力峰值。由图 7 可见,在所有情况下,迎爆墙上的最大主应力峰值一般均出现在点 1 和点 11 附近。迎爆墙与背爆墙的最大主应力峰值的比值系数,从第 1 组到第 4 组依次为  $2.70、5.05、2.03、2.81$ 。

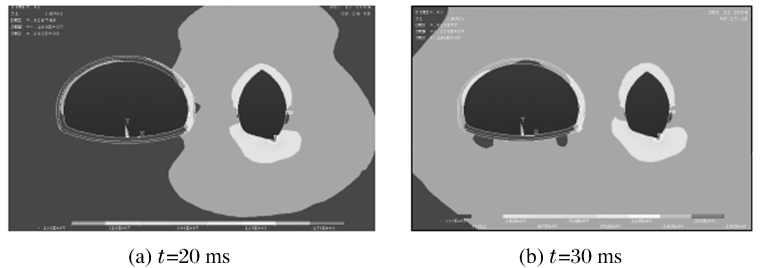


图 5 施加衬砌后最大主应力变化规律图(施工步 2)

Fig. 5 Maximum principal stress after lining (excavation step 2)

将图 7 中有衬砌时的各关键点最大主应力峰值与无衬砌时的情况相比较可见,计算组 2 的各点最大主应力峰值均比计算组 1 大。说明在其他条件及爆破荷载相同的情况下,施加衬砌后周边最大主应力峰值要比无衬砌时大。产生这种现象的主要原因是二次衬砌的材料刚度比围岩的刚度大,二次衬砌结构吸收了较多的爆炸应力波能量。结合前述分析结果可见,二次衬砌施作时间的合理与否,应是确保小间距隧道在施工期间及隧道建成后长期稳定的一个重要的设计技术参数之一。比较图 7 中第 3 组和第 2 组的计算结果可见,在迎爆墙上的点 1 和背爆墙上的点 7 处的最大主应力都有增加,且量值区别较大。特别是在点 1 处,开挖步骤 2 的最大主应力峰值是开挖步骤 1 时的 4.13 倍。由此说明,在双侧壁导坑法开挖方式的所有的爆破施工步中,开挖步骤 2 的爆破动力荷载对围岩稳定的威胁相对最大。

将有衬砌、间距为  $0.45B$  的开挖步骤 2 时各关键点的最大主应力峰值与间距为  $0.3B$  的开挖步骤 2 时的相应值相比较可见,隧道中隔墙间距从 5 m 增加到 7.3 m 时,迎爆墙和背爆墙的最大主应力峰值均有所下降,其中最危险的迎爆墙点 1 处的最大主应力峰值从 19.3 MPa 下降到了 13.7 MPa,下降幅度为 30%。这说明随着间距的增大,开挖爆破荷载在先开挖洞周边造成的拉伸应力有很大的衰减。

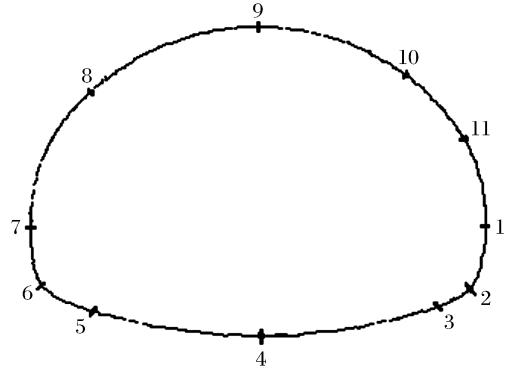


图 6 左洞周边关键点几何位置示意图

Fig. 6 Location of key points

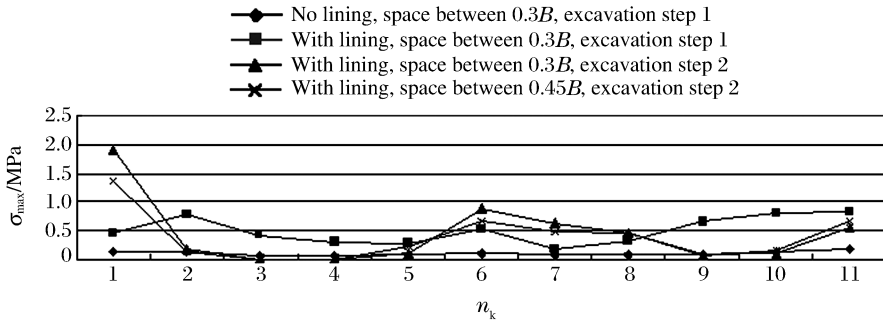


图 7 爆破荷载作用下左洞周边关键点最大主应力峰值曲线

Fig. 7 Peak value curve of the maximum principal stress at the key points of left tunnel under the action of blasting load

### 3.4 关键点振速分析

图 8 给出了间距为  $0.3B$  的三车道小间距隧道在开挖步骤 1 且不考虑衬砌时关键点振速时程图。图中纵坐标表示关键点处的振动合速度幅值。从图 8 中可以看到,洞周各点振速在爆破荷载作用后随着时间的增大而很快衰减,所有点在 50 ms 以后振速均衰减到了 10 cm/s 以下。对比图 8 中的(g)和(l),从量值上看迎爆墙点 11 处的振速峰值为 135.00 cm/s,背爆墙点 7 处的振速峰值为 10.30 cm/s;对称的两底脚点 2 和 6,振速峰值分别为 42.01 cm/s 和 8.85 cm/s。其振速峰值比分别为 13.106 和 4.765。

图 9 给出了各关键点在不同情况下的振速峰值曲线,纵坐标为绕左洞洞周各关键点处的振速峰值。由图可见,在所有情况下,迎爆墙点 1 和点 11 的振速峰值相对较大,沿洞周至背爆墙点 7,振速峰值平滑过渡到最小。将图中无衬砌和有衬砌情况的各关键点振速峰值相比较发现,施作衬砌后,洞周各关键点的振速峰值明显小于无衬砌时的振速峰值。洞周各点振速峰值最大的迎爆墙点 11,其振速峰值从 135.00 cm/s 下降到了 109.00 cm/s。这说明,二次衬砌的施作对爆炸波的传递起到了抑制作用,但这也以二次衬砌可能出现严重破损或稳定性降低为代价。

将图 9 中开挖步 2 时的各关键点振速峰值与开挖步 1 时的相应值进行比较发现,开挖步 1 时振速峰值最大的点是在迎爆墙上部的点 11 位置,而开挖步 2 是出现在迎爆墙下部的点 1 处;从量值上看,前

者的振速最大峰值为 109.20 cm/s,后者为 109.40 cm/s,非常接近;但在开挖步 2 时底板点 3、4、5 处的振速分别为 88.40、61.20、45.90 cm/s,开挖步 1 时相同位置的振速分别为 43.60、23.60、16.40 cm/s,前者是后者的两倍左右。由此可见,从围岩振速的角度来看,在使用如图 1 的双侧壁导坑法开挖时,在所有施工步骤中,开挖步 2 的爆破动力荷载对围岩稳定的威胁最大,这与从最大主应力峰值角度分析得到的结论一致。

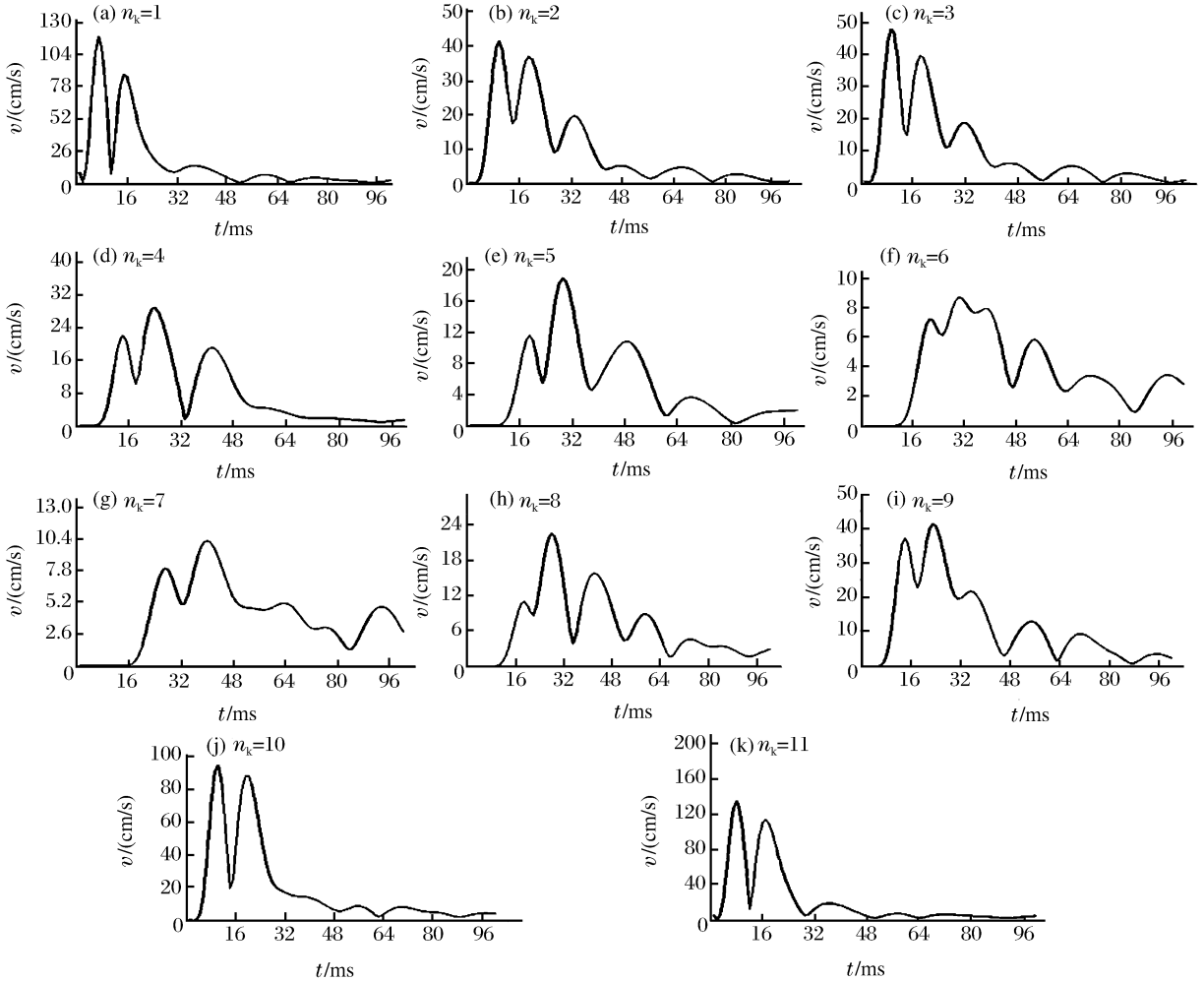


图 8 不考虑衬砌时关键点振速时程图

Fig. 8 Vibrating frequencies-time curve at the existing tunnel's key points without lining

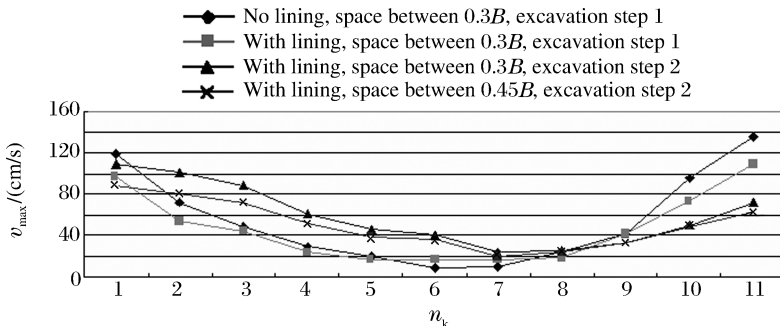


图 9 爆破动力荷载作用下左洞周边各关键点振速峰值曲线

Fig. 9 Peak value curve of the vibrating frequencies at the key points of left tunnel under the action of blasting load

比较图9第3组和第4组可见,当间距从 $0.3B$ 增加到 $0.45B$ 时,迎爆墙和背爆墙各点的振速峰值均有所下降,其中迎爆墙点1处的最大主应力峰值从 $109.00\text{ cm/s}$ 下降到了 $87.60\text{ cm/s}$ ,下降幅度为 $19.6\%$ 。围岩振动速度随洞间距增大而衰减,这与从最大主应力峰值角度分析结论相一致。

## 4 结论

(1) 在爆炸荷载作用下,随着时间的推移,由爆炸波引起的围岩最大拉应力依次出现在迎爆墙、拱脚、拱顶及地板、背爆墙等位置,并且其强度经历由弱变强,又由强变弱后逐渐减小的过程。爆破动荷载对小间距隧道围岩稳定性的影响主要表现为爆炸应力波引起围岩临空面的反射拉伸破坏,破坏较严重的应是已开洞室的迎爆墙、拱脚、拱顶等部位。迎爆墙一侧主要受应力波的反射拉伸作用,而背爆墙一侧主要是应力波的绕射作用,反射强度大于绕射强度。

(2) 在爆破荷载作用下,施加衬砌后,最大反射拉伸区的出现位置规律为从迎爆墙上部到拱脚及拱顶,下部则经过边墙、底板,最后在底脚处减弱消失。

(3) 在相同的爆破荷载作用下,施加衬砌后周边最大主应力峰值要比无衬砌时大,洞周各关键点的振速峰值明显小于无衬砌时的振速峰值。二次衬砌施作对爆炸波的传递有明显的抑制作用,但这有可能以二次衬砌出现严重破损或安全稳定性降低为代价。所以,建议在爆破开挖(后开挖洞室)影响区以内,推迟已有洞室的二次衬砌时间,避开后洞爆炸冲击波的作用,这是确保已有洞室二次衬砌的完整性和长期稳定性的有效措施。因此,二次衬砌的合理施作时间,是确保隧道长期稳定的一个重要的设计技术参数之一。

(4) 在双侧导洞法施工中,对已有洞室稳定性影响较大的爆破开挖施工步是后开洞室与已有洞室临近侧的下台阶开挖步。

## 参考文献:

- [1] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 北京:冶金工业出版社,2002:38-102.
- [2] 孙均,侯学渊. 地下结构[M]. 北京:科学出版社,1991.
- [3] 阳生权. 小线间距施工隧道爆破地震影响下既有隧道围岩线性动力分析[J]. 工程爆破,1998,4(1):1-6.  
YANG Sheng-quan. Linear dynamical analysis on rock-media of old tunnel affected by blasting vibration of new tunnel with small line-distance[J]. Engineering Blasting, 1998,4(1):1-6.
- [4] 刘慧. 近距离侧爆情况下马蹄形隧道动态响应特点的研究[J]. 爆炸与冲击,2000,20(2):175-181.  
LIU Hui. Dynamic responses of hoof-shaped tunnels to adjacent blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2000,20(2):175-181.
- [5] 黄红元,刘伟. 爆炸荷载作用下岩溶区隧道围岩变形分析[J]. 公路交通技术,2003(6):72-75.  
HUANG Hong-yuan, LIU Wei. Deformation Analysis of the surrounding rock for tunnel in karst area under explosive load[J]. Technology of Highway and Transport, 2003(6):72-75.
- [6] 许锡宾,赵明阶,荣耀. 公路隧道爆破掘进震动效应研究[J]. 水运工程,2004(9):74-78.  
XU Xi-bin, ZHAO Ming-jie, RONG Yao. Vibration effect of blasting and driving of road tunnel[J]. Port & Waterway Engineering, 2004(9):74-78.
- [7] 李宁, Swoboda G. 爆破荷载的数值模拟与应用[J]. 岩石力学与工程学报,1994,13(4):357-364.  
LI Ning, Swoboda G. A numerical model for blast load and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994,13(4):357-364.
- [8] 刘运通,高文学. 爆炸荷载岩石损伤的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(6):789-792.  
LIU Yun-tong, GAO Wen-xue. Numerical simulations on rock damage under explosion loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001,20(6):789-792.
- [9] 喻胜春,朱传云,苏大强,等. 爆破振动荷载作用下墩体结构的动态分析[J]. 西部探矿工程,2001(1):79-82.  
YU Sheng-chun, ZHU Chuan-yun, SU Da-qiang, et al. Dynamic analysis of responses of rock wall to blasting vibration loads[J]. West-China Exploration Engineering, 2001(1):79-82.

- [10] 李启发. 爆破地震波对岩质边坡稳定性的影响[J]. 爆破, 1995:1-8.  
LI Qi-fa. The effect of detonating on the stability of a rocky slope[J]. *Blasting*, 1995:1-8.
- [11] JTJ026-90. 公路隧道设计规范[S].

## Study on dynamics effect caused by blasting construction by numerical simulation for tunnels with small spacing

LI Yun-peng<sup>1\*</sup>, AI Chuan-zhi<sup>1</sup>, HAN Chang-ling<sup>2</sup>, HUO Ming<sup>2</sup>

(1. *School of Mechanical and Electric Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;*

2. *First Highway Survey and Design Institute, China Communications Construction Group, Xi'an 710075, Shaanxi, China*)

**Abstract:** Based on the characteristic of blasting construction, the dynamic effect caused by blasting construction for the typical double side excavation method is studied by numerical simulation. The general laws of dynamic effect are proposed at the boundary of the existing tunnel. The secondary supporting time is important to the existing tunnel in the region influenced by blasting construction, and the key locations which blasting construction influences the stability of existing tunnel are given. The analysis shows that the dynamic effects caused by blasting on the stability of surrounding rock of existing tunnel are mainly the tensile damage at the surface of surrounding rock caused by blasting stress wave. The most serious damage locates at the face-blast-wall, arch feet, arch roof of the existing tunnel. The results provide some reference for the blasting construction of the tunnels with small spacing.

**Key words:** mechanics of explosion; blasting construction; dynamic analysis; highway tunnel; small spacing

---

\* Corresponding author: LI Yun-peng  
E-mail address: liyp996@163.com  
Telephone: 86-10-89733926