

文章编号: 1000-5013(2012)01-0079-05

# 四车道扩挖隧道爆破振动对新建隧道的影响

孟凡兵, 林从谋, 郑强, 黄志波, 邓成豪

(华侨大学 岩土工程研究所, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 以泉厦高速公路大帽山隧道为工程背景,应用数值模拟方法从振动速度、振动应力和应力波 3 个方面分析得出沿扩挖隧道轴向动力特性,同时分析自由面对爆破地震波的影响. 结果表明:距掌子面 15 m 处振速衰减达 50%,且在离掌子面 10 m 处振速已经低于安全临界值;最大主应力峰值在距掌子面 15 m 的范围内衰减最快,在离掌子面 15 以上时爆破振动影响逐渐趋于稳定;应力波在 0.4 ms 时应力达到最大值 13.3 GPa,而在 0.6 ms 时最大应力衰减到 771.2 MPa,只有 0.4 ms 时的 5.80%;自由面对爆破地震波的反射作用使能量损失 55.6%,但先建隧道自由面使地震波反射叠加,从而使能量增加.

**关键词:** 四车道;隧道;扩挖;爆破;振动

**中图分类号:** U 455.41; O 382.2

**文献标志码:** A

众所周知,四车道大跨度隧道的扩挖目前在国内是十分罕见的.在扩挖施工过程中,由于断面面积大,工序十分复杂,并且需要考虑复杂的地质条件、防排水、围岩稳定、工程措施、断面几何特征、成本和工期等问题.此外,没有比较成熟的经验可以借鉴,有很多标准不适用,使得这类施工变得更加复杂.人们在这类施工中特别关心在扩挖爆破时对新建隧道部分的影响.由于安全的原因,新建隧道不便于现场监测,因此采用数值模拟的办法来分析四车道大跨度扩挖隧道爆破振动对新建隧道部分影响.然而,目前大多数的隧道爆破数值模拟都集中在对既有隧道爆破振动响应的研究<sup>[1-6]</sup>,对自身新建隧道关注比较少.大跨度隧道是比较特殊的隧道形式,特别是二车道扩建成四车道,临近隧道又是四车道大断面隧道,这样的隧道形式与一般的隧道施工方法有很大的区别,施工经验也十分少,同时相关的安全标准也不适用.基于此,本文运用大型的通用有限元软件,对这种新型的隧道形式的爆破振动响应进行研究.

## 1 工程背景

泉厦高速公路大帽山隧道是国内首座四车道大跨度小净距隧道,其隧道结构形式和施工难度也是国内罕见,没有类似工程可以拿来类比.原大帽山隧道是传统的双洞分离式隧道,并且两洞的距离达到 50 m.单洞全长 600 m(左线 ZK459+583.43~ZK460+183.43,右线 YK459+580~YK460+180),开挖断面面积为 189.16 m<sup>2</sup>,隧道采用曲墙三心圆拱的内轮廓净空,两洞轴线仅 29.61 m,最大毛洞开挖跨度为 21.67 m,中间岩核净宽为 8.83 m(约为 0.4 个隧道跨度),扁平率约为 0.626,设计行车速度 120 km·h<sup>-1</sup>.新的隧道是在原隧道的基础上扩建,在原隧道两洞之间新建一个四车道隧道,再把原右隧道扩建成四车道的隧道,形成单线四车道的大断面小净距隧道.

## 2 模型建立

采用 SOLID-164 单元空间三维建模,材料单元选用 LS-DYNA 中通用粘弹性材料(\* MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC)模型,塑性屈服判断准则采用德鲁克-普拉格(Drucke-Prager)屈服准则.同时,模型模拟真实炮孔大小和深度.

**收稿日期:** 2011-05-17

**通信作者:** 林从谋(1957-),男,教授,主要从事地下结构的研究. E-mail: cmlin@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50978109);福建省交通科技发展基金资助项目(200910)

选 YK459+590~YK459+650 段进行建模,处于Ⅳ,Ⅴ类围岩地段,模型沿隧道方向的长为 60 m,规定模型中隧道开挖的方向为 Z 轴的负向,竖直向上的方向为 Y 轴正方向,根据右手规则,沿开挖方向看,水平向右是 X 轴正方向.模拟爆破区域如图 1,图 2,3 为数值模拟模型.

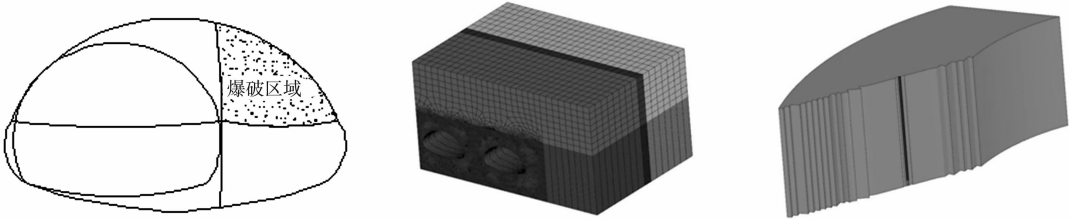


图 1 模拟爆破区域

图 2 数值模型立体图

图 3 数值模拟炮孔立体剖断图

Fig.1 Simulation blasting area

Fig.2 Numerical 3D model

Fig.3 Numerical simulation blast hole 3D section

根据设计可知四车道的隧道直接达到 22 m,扩建隧道和中间隧道净距只有 8.28 m.在充分考虑实际和计算时间的情况下,选择如下进行建模:X 方向模拟 80 m,上边到自然地面,下边到 20 m;炸药引爆时,炸药位于扩建隧道右上导坑,质量为 12.8 kg,集中装药引爆.在起始断面 ZK459+590 施加 Z 方向位移约束;沿 X 方向对左右两侧施加位移约束;沿 Y 方向对底面施加位移约束,最上面地面为自由边界,模型的地面和侧面都施加无反射边界,这样可以避免爆破地震波的发射干扰.

模型网格划分用的是六面体单位,模型上覆浅层土也有适当形式来模拟.充分考虑各个方面的因素,划分网格共得 467 477 个实体单元.

模型由炸药、岩石和空气 3 部分组成.炸药采用程序中有的高性能炸药 MAT\_HIGH\_EXPLOS-TIC\_BURN.其中:密度为  $1\,891\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;爆速为  $5\,500\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;参数 A,B 分别为 778.3,7.071 GPa;W 为 0.3; $R_1$  为 4.2; $R_2$  为 1.0;爆压为 4.2 GPa; $E_0$  为 8.5 GPa.岩石材料采用 MAT\_PLASTIC\_KI-NEMATIC.其中:密度为  $2\,820\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,弹性模量为 25.5 GPa,泊松比为 0.27,屈服应力为 6.5 MPa,剪切模量为 15 GPa,衰减系数为 0.8.文中模拟的是扩挖隧道右上部分.

3 数值计算值与实测结果的比较

因为安全原因,现场没有办法对新建隧道进行检测,只能通过先建隧道的现场检测,从定性和定量上分析比较数值计算的准确度.隧道拱腰部位振动速度峰值实测值与数值计算值及误差,如表 1 所示.表 1 中: $v_m,v_c$  分别为振动速度峰值实测值与数值计算值; $\eta$  为误差.

表 1 先建隧道拱腰部位振动速度峰值实测值与数值计算值的比较

Tab.1 Comparison between test values and calculation values of peak value of vibration velocity at hance of constructed tunnel

位置	测点	垂直隧道方向			平行隧道方向			垂直地面方向		
		$v_m/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	$v_c/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	$\eta/\%$	$v_m/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	$v_c/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	$\eta/\%$	$v_m/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	$v_c/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	$\eta/\%$
前方	CD1	8.61	9.12	5.92	7.08	7.58	7.06	5.9	6.12	3.73
	CD2	4.74	5.53	16.67	3.67	4.2	14.44	2.74	3.17	15.69
	CD3	3.81	4.31	13.12	3.23	3.61	11.76	2.13	2.43	14.08
	CD4	3.16	3.43	8.54	2.56	2.82	10.16	1.75	1.83	4.57
	CD5	2.92	3.27	11.99	2.2	2.34	6.36	1.44	1.54	6.94
后方	CD1	8.48	9.18	8.25	7.21	7.41	2.77	4.92	5.12	4.07
	CD2	4.63	5.37	15.98	3.43	3.84	11.95	2.62	2.91	11.07
	CD3	3.59	3.99	11.14	3.18	3.48	9.43	2.07	2.33	12.56
	CD4	3.12	3.34	7.05	2.41	2.61	8.30	1.67	1.74	4.19
	CD5	2.83	2.92	3.18	2.19	2.41	10.05	1.59	1.62	1.89

(1) 定性分析数值计算结果:实测数据取掌子面前方和后方先建四车道隧道观测点 CD1,CD2,CD3,CD4 和 CD5 拱腰的部分数据,数值计算数据取先建四车道隧道拱腰相应位置的数据.根据数值计

算的结果可以得知:距离掌子面越远,爆破振动速度越小;垂直隧道方向速度最大,平行隧道方向振动速度次之,最小的振动速度是垂直地面. 这些规律跟实测数据结果体现出来的一样.

(2) 定量分析数值计算结果. 从表中 1 可以看出:误差基本上控制在 15% 以内,有个别方向超出,在工程误差范围之内. 数值计算值比实测值要大,说明数值计算结果是偏保守的. 所以,从定量上分析数值计算准确度比较高.

## 4 扩挖隧道轴向动力特性

### 4.1 振动速度

扩建隧道右侧拱脚、右侧拱肩、拱顶、左侧拱肩和左侧拱脚振速衰减规律,如图 4 所示. 从图 4 中很明显看出:振速在 5~15 m 时的衰减最快,无论是那个观测点还是那个方向衰减都达到 50% 以上;振速在 15~25 m 的衰减比较缓慢. 当距离掌子面 10 m 时,振速明显低于  $20\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,已经远远低于隧道安全临界振动速度  $25\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

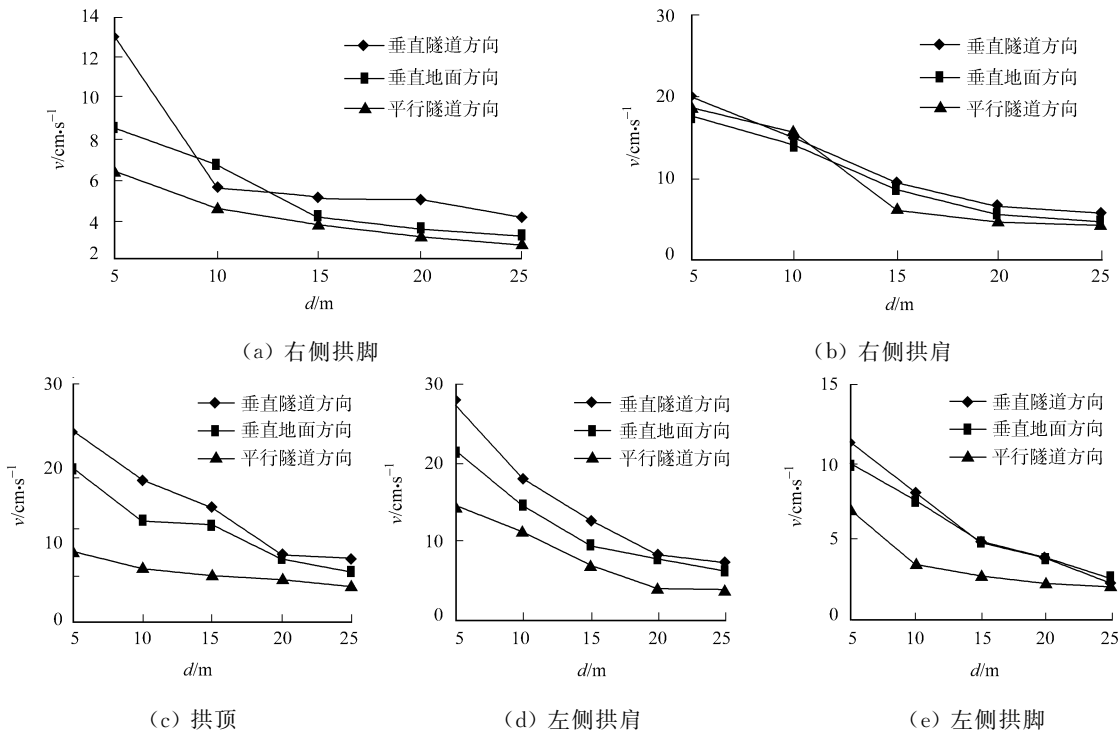


图 4 扩建隧道各部位振速衰减规律

Fig. 4 Each part of tunnel vibration velocity attenuation law

### 4.2 振动应力

扩建隧道最大主应力峰值随隧道距离衰减规律,如图 5 所示. 从图 5 的整体上看,同一断面上拱顶的应力最大,右拱肩次之,再就是右拱脚,这主要是模拟的爆源是右上部分决定的. 最大主应力峰值随着距离的增加而不断衰减是显而易见的,并且在距离掌子面 15 m 的范围内衰减速度的最快的. 离掌子面 5 m 的断面拱顶最大主应力峰值是 3.76 MPa,但是到了 15 m 远的断面拱顶最大主应力峰值是 1.94 MPa,衰减到了 51.6%;在离掌子面 15 m 以上时,最大主应力的衰减变得比较缓慢,这就说明在离掌子面 15 m 以上时爆破振动影响逐渐趋于稳定.

### 4.3 爆破应力波

当炸药在岩体中爆炸时,一部分能量使炸药周围的介质引起扰动,并以波的形式向外传播. 炸药爆炸在近区产生的是

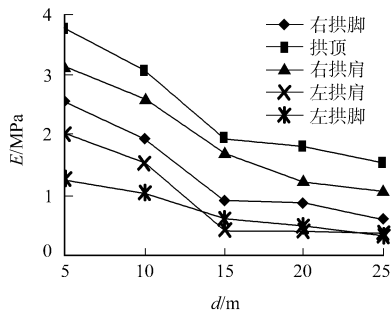


图 5 最大主应力峰值随隧道距离衰减规律

Fig. 5 Maximum principal stress peak attenuation with tunnel distance

冲击破<sup>[7]</sup>,此时冲击波开始不断衰减,在爆破中区变成应力波.所形成的应力波是一以爆破点为中心的圆逐渐向外扩展,应力波在 0.4 ms 时的应力达到最大值 13.3 GPa.在应力波向外传播的过程中,因粘弹性介质的内摩擦和热传导导致能量耗散,在岩石中产生的应力也逐渐衰减.应力波在 0.6 ms 时,最大应力衰减到 771.2 MPa,只有应力波在 0.4 ms 时应力的 5.80%.随着时间的推移衰减速度减慢,应力波随着时间的衰减规律如图 6 所示.

4.4 自由面对爆破地震波影响

炸药爆炸产生的一部分能量引起围岩扰动,另外一部分能量会以波动的形式向外传播.在爆破近区是冲击波,中区是应力波,应力波传播到远区到达自由面或则界面反射和折射叠加形成的是地震波.显然,地震波是由应力波转换来的,虽然它只是炸药爆炸产生能量的一小部分,可研究地震波传播机理对控制振动危害是十分必要的<sup>[8-9]</sup>.

隧道扩挖爆破产生地震波是以爆为中心呈球状向外传播,传播时遇到原有隧道,也可以当成是遇到自由面.这时,地震波就会出现波反射、绕射和叠加效应.爆源两侧观测点的布置,如图 7 所示.图 7 中:夹岩选取的观测点还是前面所述的 D1~D5 共 5 个观测点,为了形成对比,另外选取一组观测点 DC1~DC5 位于爆源的右侧,观测点 DC1 跟中夹岩扩建隧道侧壁上的观测点 D5 到爆源的距离都是 22.67 m,其余点跟此点距离同中夹岩一样.提取垂直隧道方向、垂直地面方向和平行隧道方向各观测点的振速,如图 8 所示.图 8 中: $v$  为振速; $d$  为与同组离爆源最近的观测点距.

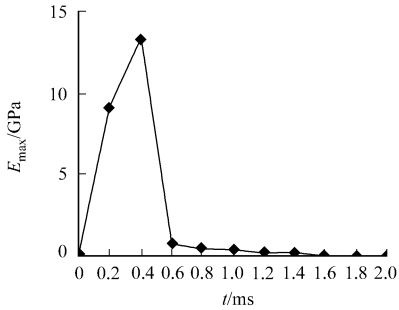


图 6 应力波随着时间的衰减规律  
Fig. 6 Stress wave attenuation with time

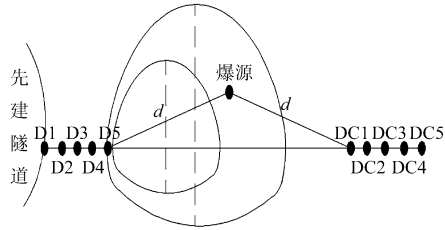
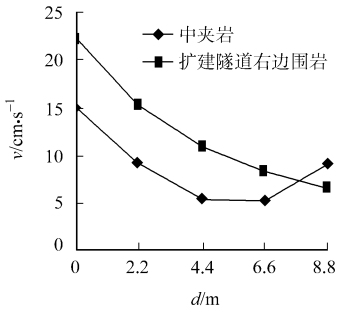
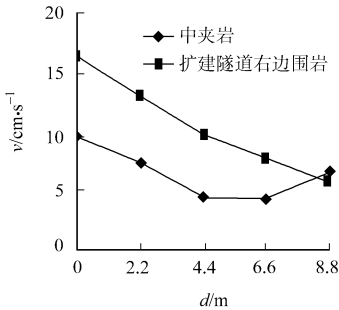


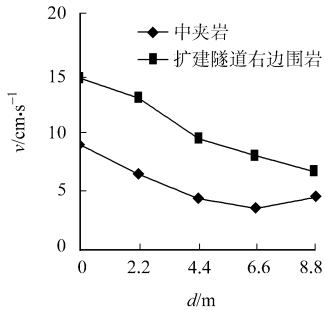
图 7 爆源两侧观测点的布置图  
Fig. 7 Distribution of test points  
at both sides of explosion



(a) 垂直隧道方向



(b) 垂直地面方向



(c) 平行隧道方向

图 8 各观测点的振速对比图

Fig. 8 Vibration velocity at every test point

从图 8(a)可以看出:在爆源右侧不存在自由面,这样地震波也就不会发生反射、绕和叠加的效应,离爆源最近的观测点是 DC1 振速峰值为  $22.23 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,是左侧同距离 D5 观测点振速峰值的 1.48 倍.对于同一场次的爆破而言,爆破地震的总能量同峰值振速的平方近似成正比例<sup>[10]</sup>.因此,由于原有隧道的存在,通过反射能量损失 55.6%.右边的地震波几乎呈线性衰减,到观测点 DC5 时,振速峰值已经衰减到了  $6.58 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ .但是左边地震波在 D1 和 D2 之间由于波的叠加效应,使得振速突然增加到  $9.09 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,是 DC5 振动峰值的 1.38 倍.所以,即便有原有隧道的存在起到了一定的减震作用,但也不能放松对先建隧道的监测.

由图 8(b)可知:在垂直地面方向 DC1 观测点的振速峰值达到  $16.34 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,是 D5 的 1.7 倍,几乎呈线性衰减;到 DC5 时衰减到最小值  $5.65 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;爆源左边中夹岩观测点呈现的是两头大中间小的局面,同样也是由于波的反射叠加效应使 D2 到 D1 之间出现振动峰值增加的现象.由图 8(d)可知:在平行隧道方向也呈现类似规律.

5 结论

- 1) 距离掌子面 15 m 的范围内振速衰减很快,在 15 m 处已经衰减达到 50%,15 m 以后衰减比较缓慢;在离掌子面 10 m 处,振速已经低于安全临界值.
- 2) 最大主应力峰值随着距离的增加而不断衰减,在距离掌子面 15 m 的范围内衰减速度最快;在离掌子面 15 m 以上时,最大主应力的衰减变得比较缓慢. 说明在离掌子面 15 m 以上时,爆破振动影响逐渐趋于稳定.
- 3) 应力波在 0.4 ms 时,应力达到最大值 13.3 GPa. 在应力波向外传播的过程中,因粘弹性介质的内摩擦和热传导导致能量耗散而逐渐衰减. 在 0.6 ms 时最大应力衰减到 771.2 MPa,只有 0.4 ms 应力的 5.80%,且随着时间的推移,衰减速度减慢.
- 4) 自由面对隧道爆破地震波的反射作用使能量损失了 55.6%,但旁边因为先建隧道自由面的存在,使地震波出现反射叠加作用,从而能量增加.

参考文献:

[1] 顾翠莲. 相邻特大断面隧道爆破施工相互影响的研究[D]. 上海:同济大学,2007.

[2] 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(增刊 1):501-506.

[3] 崔积弘. 隧道掘进爆破振动的数值模拟研究[D]. 青岛:山东科技大学,2005 .

[4] 崔积弘,周建,林从谋. 爆破震动对既有洞室影响的数值模拟[J]. 有色金属,2008,60(1):101-104.

[5] 谭忠盛,杨小林,王梦恕. 复线隧道施工爆破对既有隧道的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(2):281-285.

[6] 龙源,冯长根,徐全军,等. 爆破地震波在岩石介质中传播特性与数值计算研究[J]. 工程爆破,2000,6(3):1-7.

[7] 孟吉复,惠鸿斌. 爆破振动测试技术[M]. 北京:冶金工业出版社,1992:80-138.

[8] 张奇,白春华,刘庆明. 爆炸地震波频谱特性研究[J]. 北京理工大学学报,1999,19(3):306-308.

[9] 张义平,吴桂义. 爆破地震波特性研究[J]. 矿业研究与开发,2007,27(6):68-72.

[10] 李洪涛,卢文波,舒大强,等. 爆破地震波的能量衰减规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(增刊 1):3364-3369.

Influence of Expanded Four-Lane Tunnel  
Blasting Vibration on New Tunnel

MENG Fan-bing, LIN Cong-mou, ZHENG Qiang,  
HUANG Zhi-bo, DENG Cheng-hao

(Research Institute of Geotechnical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Taking Tai Mao Shan tunnel in Quanxia express way as example, the analysis of the vibration velocity, vibration stress and stress wave was carried out by the numerical simulation, to obtain the dynamic axial characteristics during the tunnel expansion, the influence of the free face on seismic wave of blasting was investigated. The results show that: the velocity attenuation is up to 50% 15 meters away from the tunnel face, and the velocity is below the safe value 10 meters away from the tunnel face; the attenuation of the peak maximum principal stress is the largest within 15 meters away from the tunnel face, for the region more than 15 meters away from the tunnel face, the blasting vibration tends to be stable; the stress wave reaches the maximum stress 13.3 GPa at 0.4 ms, and maximum stress attenuation to 771.2 MPa at 0.6 ms, which is only 5.80% of 0.4 ms; the energy dissipation is up to 55.6% due to the blasting seismic wave reflection caused by free face effects , but the free face of the constructed tunnel superposes the seismic reflection, so that the energy increases.

**Keywords:** four-lane; tunnel; expanding excavation; blasting; vibration