

文章编号:1000-582X(2010)02-0110-07

特大断面车站隧道爆破开挖对地表建筑物的影响

朱泽兵,张永兴,刘新荣,赵宝云

(重庆大学 土木工程学院,重庆 400045)

摘要:对于采用钻爆法施工的城市隧道,不可避免地存在爆破开挖对邻近建筑物的影响问题。因此,研究爆破振动对地下洞室的影响,不仅具有重要的理论意义,同时也具有重要的工程意义。重庆轻轨大坪车站隧道最小埋深仅 4 m,最大跨度 26.3 m,地面人口密集,建筑物林立。采用浅眼多循环,分部开挖,增设周边减震眼及严格控制药量等措施,通过数值模拟爆破震动效果,并与实测结果对比来进行研究,有效地控制了爆破地震动强度,爆破对建筑物没有产生损坏,说明采用的隧道施工新方法和爆破药量是可行的,从而为复杂条件下的特大断面城市隧道施工参数和爆破参数的确定提供了重要的依据。

关键词:轻轨;隧道;爆破震动

中图分类号:U457

文献标志码:A

Influence of blasting vibration on adjacent buildings of station tunnel

ZHU Ze-bing, ZHANG Yong-xing, LIU Xin-rong, ZHAO Bao-yun

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The influence of blasting vibration on the adjacent buildings is inevitable if blasting is employed for excavation. Daping station tunnel of Chongqing light railway project, on which there is dense with population and buildings, has a minimum buried depth of only four meters and maximum span length of 26.3 meters. The stepped excavation mode with short-hole, multi-round and V-shaped cut are adopted. The maximum charge weight of one delayed interval is determined by the permitted vibration velocity. The smooth blasting technology with adding vibration-reduction holes is used. Meanwhile, the charge weight per hole is strictly controlled. With the simulation and on-site test, it is found that the proposed technology for tunnel construction is feasible.

Key words: light railway; tunnel; blasting vibration

在城市轨道交通工程建设中,存在大量的地下隧道开挖,由于城市地理条件的限制,必须采用钻爆法施工,而且绝大部分隧道埋深浅,断面大,地表环境复杂,不可避免地存在爆破开挖对邻近建筑物的影响问题。因此,研究爆破振动对地下洞室的影响,不仅

具有重要的理论意义,同时也具有重要的工程意义。重庆轻轨较新线大坪车站隧道工程跨度大、埋深浅、地面人口及建筑密集,多为抗震性能差的楼房和交通干道公路路面。据查新显示,其规模仅次于米兰城市铁路威尼斯车站隧道,且差距很小。因此,无论

收稿日期:2009-10-19

基金项目:国家自然科学基金创新群体基金资助项目(50621403);教育部“新世纪优秀人才计划”资助项目(NCET-05-0763)

作者简介:朱泽兵(1971-),男,重庆大学博士研究生,主要从事岩石工程隧道及地下工程研究,

(E-mail)zhuhanqing0924@163.com。

从围岩稳定性及支护结构的复杂程度还是从城市环境保护角度看,施工难度是国内外少见的,文献[1-10]对爆破震动进行了研究,从爆破震动对地表建筑物的影响来说,采用全断面爆破开挖或简单的分步爆破开挖方式很难控制爆破震动对地表建筑物产生的危害。

重庆轻轨大坪车站隧道根据国内外大跨隧道的施工经验、大跨隧道开挖后应力分布情况分析以及大坪隧道结构特点,通过综合分析,首次在地铁和城市轻轨工程施工中采用“上半断面侧壁导坑法,下断面先中槽后侧墙开挖、先拱后墙衬砌”的隧道施工新方法,这种方法通过数值模拟可以有效控制地表沉降,而且有利于大型机械设备施工,极大的提高隧道掘进速度,降低隧道建设费用,创造巨大的经济效率和社会效益。但是这种方法是否可以有效控制爆破震动对地表建筑物产生的危害影响还需要进一步研究。文中主要从选择合理的开挖方法、合理分配炸药药量方面来研究控制爆破震动,研究成果对以后类似城市隧道爆破施工具有重要的参考价值。

1 工程概况

大坪车站里程为 K7+609.7~K7+739.5,其中 K7+658.2~DK7+739.5 段为暗挖车站隧道,全长 81.3 m。车站隧道覆盖层厚 4~25 m,岩层为砂岩、泥岩和地表杂填土,其中 DK7+658.2~DK7+701.00 段覆盖层厚 4~10 m,为Ⅲ类围岩,顶跨比为 0.15~0.5,顶板岩层薄,成洞条件极差。车站隧

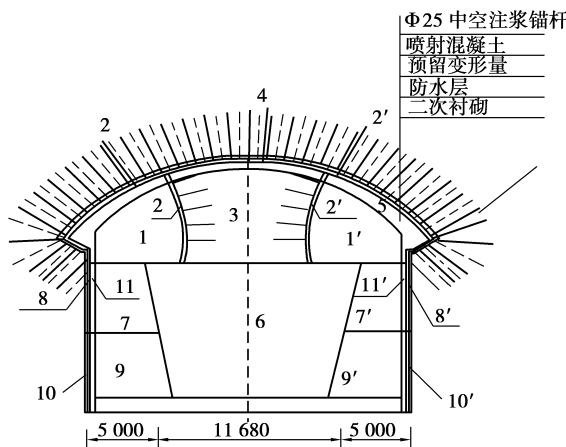
道与明挖车站接口段底部开挖宽度为 22.68 m,隧道开挖高度为 20.6 m,拱部开挖宽度为 26.3 m,最大开挖面积为 430 m²。

工程地处繁华市区,行经地段地表人文情况复杂,多为抗震性能差的楼房或交通干道公路路面,而主洞洞室高、跨度大、顶板薄,施工难度非常大。因此,爆破施工必须采取措施,确保施工区周围人员和建筑物的安全;重庆市公安局对爆破震动提出了严格要求,楼房地面质点的振动速度控制在 2 cm/s 以内。

2 开挖方案

不论国内还是国外,尽管大跨度扁平隧道的开挖方法多种多样,但基本上是经过适当的地层预加固处理后采用双侧壁导洞法、CD 或 CRD 工法、台阶法或其中的组合^[11-17]。其出发点是尽可能地借助于辅助施工方法化大为小、先拱后墙或先墙后拱,从而尽快地沿开挖轮廓形成封闭或半封闭的承载结构,再开挖核心土和仰拱。通过方案比选,采用以下方案。

在大管棚预支护下进洞,正台阶开挖,上台阶采用双侧壁导坑开挖,两侧壁导坑掌子面间距 15 m,下台阶先开挖中槽,再开挖左右两侧边墙,边墙开挖采用短台阶开挖,共将开挖分成 9 个部分(见图 1)。导坑采用双楔形掏槽,预留光爆层光面爆破,每循环进尺控制在 1.2 m,开挖后立即进行初期支护^[18]。



项目	工序号	工序施工项目
一	1 1'	左、右导坑开挖
二	2 2'	左、右导洞拱部及中隔壁锚杆、挂网、型钢钢架、喷射砼施工
三	3	中隔壁开挖
四	4	中隔壁拱顶初期支护
五	5	拱部防水层及拱部混凝土浇筑
六	6 6'	下半断面中槽开挖
七	7 7'	下半断面左、右侧上台阶开挖
八	8 8'	左、右侧边墙上台阶支护
九	9 9'	下半断面左、右侧下台阶开挖
十	10 10'	左、右侧边墙下台阶支护
十一	11 11'	左、右侧边墙混凝土施工

图 1 开挖工序图

3 车站隧道拱部(DK7+658.2~739.5 段)钻爆设计

为确保工程进度和施工安全,爆破施工应按“多

眼、少药、浅孔”的原则。为控制超欠挖,减少围岩扰动,全面采用光面爆破技术,边墙部预留光爆^[19-20]。

3.1 上半断面炮眼布置

1) 拱部左右侧壁导坑及中间隔壁上部(一个临

空面)掏槽方式为双楔形掏槽,孔深比其它眼深 30 cm,间距 60 cm,斜眼眼底距离 30 cm。辅助眼间距 70~80 cm,周边眼间距 50 cm,距相邻辅助眼 60 cm。

2)拱部核心土下部(3个临空面,水平钻眼)

拆除临时支柱,做完拱部二次衬砌,即进行拱部核心土下部开挖。采用水平布眼,孔距 1.2 m,排距 1.0 m,梅花形布置。

3)在爆破大拱脚时,周边眼间增加一个空眼,增强光爆效果,减少爆破对大拱脚的扰动。

3.2 下半断面炮眼布置

隧道下半断面采用中间留核心土,两侧边墙错

开开挖,采用水平布眼,孔距 1.2 m,排距 1.0 m,梅花形布置。

3.3 拱部炮眼布置及钻爆参数

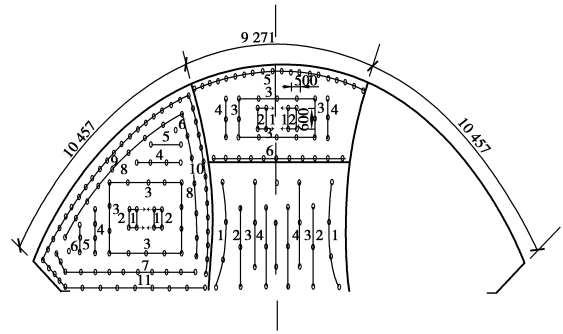


图 2 车站暗挖段拱部炮眼布置图(单位:mm)

表 1 车站隧道拱部(DK7+693~739.5段)钻爆参数

爆破参数	爆孔编号	爆孔名称	数量 /个	孔深 /m	单孔装药量/kg	段装药量/kg	起爆顺序	毫秒雷管段号
上半断面左、右侧壁导坑 S=47.2 m ² q=0.6 kg/m ³ n=110 个 循环进尺 l=1.2 m	1	掏槽孔	4	1.5	0.375	1.5	1	3
	2	掏槽孔	4	1.5	0.375	1.5	1	3
	3	辅助孔	14	1.2	0.3	4.2	2	5
	4	辅助孔	8	1.2	0.3	2.4	3	7
	5	辅助孔	5	1.2	0.3	1.5	4	9
	6	辅助孔	2	1.2	0.3	3.9	4	9
	7	辅助孔	12	1.2	0.3	3.6	5	11
	8	辅助孔	15	1.2	0.3	4.5	6	13
	9	周边孔	13	1.2	0.15	1.95	7	15
	10	周边孔	24	1.2	0.15	3.6	8	17
	11	底孔	9	1.2	0.45	4.05	9	19
装药合计		110			32.7			
上半断面核心土 S=20.2 m ² q=0.6 kg/m ³ n=58 个 循环进尺 l=1.2 m	1	掏槽孔	4	1.5	0.375	1.5	1	3
	2	掏槽孔	4	1.5	0.375	1.5	1	3
	3	辅助孔	12	1.2	0.3	3.6	2	5
	4	辅助孔	6	1.2	0.3	1.8	3	7
	5	周边孔	21	1.2	0.15	3.15	4	9
	6	底孔	11	1.2	0.3	3.3	5	11
装药合计		58			14.85			

4 爆破开挖震动模拟分析

4.1 爆破地震波施加区域的确定

对于在爆破荷载作用下,岩石中形成的压碎区、裂隙区和震动区的作用范围的确定,许多学者都提出了自己的计算模型和计算方法。对于耦合柱状装药情况下,柱状药包周围形成的压碎区、裂隙区和震动区范围,一般采用下面的方法进行计算^[3]。

压碎圈的半径用以下公式计算:

$$R_c = \left[\frac{\rho_0 D_V^2 AB}{4 \sqrt{2} \delta_{cd}} \right]^{\frac{1}{5}} r_b, \quad (1)$$

式中:

$$A = \frac{2\rho C_p}{\rho C_p + \rho_0 D_V},$$

$$B = [(1+b)^2 + (1+b^2) - 2\mu_d(1-\mu_d)(1-b)^2]^{\frac{1}{2}},$$

$$\alpha = 2 + \frac{\mu_d}{1-\mu_d}; \rho, \rho_0 \text{ 为岩石和炸药的密度, kg/m}^3;$$

C_p, D_V , 分别是岩石中应力波传播速度和炸药爆速, m/s; μ_d 是岩石的动态泊松比, 一般认为动态泊松比是静态泊松比的 0.8 倍。B 为侧向压力系数,

$$\text{取 } b = \frac{\mu_d}{1-\mu_d}.$$

裂隙区半径公式:

$$R_p = \left[\frac{\sigma_{id}}{\sigma_d} \right]^{\frac{1}{\beta}} R_c, \quad (2)$$

式中: $\beta = 2 - \frac{\mu_d}{1 - \mu_d}$; α 和 β 分别称为冲击波和应力波的衰减指数。

利用式(1)和(2)可以估计岩石中炸药爆炸后,在炮孔周围形成的裂隙圈的范围。在数值计算过程中可以假设炸药爆炸后,爆炸波在经过压碎区,裂隙区衰减后,在裂隙区的边缘处均匀地作用在弹性区上。根据研究与实验观察^[11],常规炸药在岩石中引起的冲击波的作用范围仅有装药半径的3~5倍,裂隙圈半径为装药半径的10~15倍。

4.2 爆破荷载的确定与简化

爆破荷载的确定一直是爆破数值计算中的一个难点。利用炮孔爆破岩石时(如隧洞、巷道掘进),通常炸药柱在一端用雷管引爆,爆轰波不是平面波,而是呈球形,而且爆轰波对炮孔壁岩石的冲击也不是正冲击(正入射),而是斜冲击。目前确定炸药产生的传入岩石中的荷载,多采用的是近似计算方法。

根据文献[20]施加在裂隙区边缘的应力荷载可以通过下式进行计算:

$$P_d = \frac{1}{4} \rho_0 D_V^2, \quad (3)$$

$$P_h = \frac{2P_d}{1 + \frac{\rho_0 D_V}{\rho C_p}}, \quad (4)$$

P_d 为炸药的爆轰压力; P_h 为岩石中冲击波的初始峰值压力; ρ, ρ_0 为岩石和炸药的密度, kg/m^3 ; C_p, D_V 分别是岩石中应力波传播速度和炸药爆速, m/s ;

由式(3)、(4)可知:同一种炸药在相同药量的情况下在不同的岩石中爆破时作用在孔壁上的压力是不同的;岩石的波阻抗大,作用在孔壁上冲击波峰值压力也会大。因此,岩石越硬,其纵波传播速度越大,波阻抗也会大,同一种炸药在相同的药量的情况下在孔壁上的作用力的初始峰值压力也会越大。

在压碎区范围内:冲击波的应力衰减规律为

$$\sigma_r = P_h (r/r_b)^{-\alpha}, \quad (5)$$

在裂隙区则冲击波转化为应力波,其衰减规律为

$$\sigma_r = P_h (r/r_b)^{-\alpha} (r_2/r_1)^{-\beta}, \quad (6)$$

这里, r_1 取压碎区半径, r_2 取裂隙区半径, r_b 为炮孔半径。

通过式(6)可以得到作用在裂隙圈边缘的爆破

地震荷载的峰值压力,可以看出炮孔中的压力变化遵循指数衰减规律。采用FLAC软件对爆破地震作用进行数值模拟,一项重要的工作就是要确定荷载加载模型,包括爆破地震荷载的大小、作用位置和方向、峰值时刻和持续时间等方面的问题。根据文献[13-15]数值计算中可以将施加的爆破地震荷载压力时程为

$$\sigma_r = P_h t e^{-\alpha t}, \quad (7)$$

其中: P_h 为岩石中冲击波的初始峰值压力, $P_h = \frac{1}{8} \rho D^2$ 。 ρ, D 为炸药的密度和爆速; α 为衰减指数, $\alpha = 2000$ 。

本次计算中采用炸药的密度 $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, 爆速 $D_0 = 3600 \text{ m}/\text{s}$, 爆破时间据前述对现场爆破振动速度的分析取用 0.12 s 。荷载采用公式(7)以动压力形式均匀垂直施加在开挖后隧道洞壁上。计算过程中采用局部阻尼,按经验取值,一般为 0.05 。

4.3 计算模型及参数选取

计算模型左右及下部按实际设计取3倍最大跨距,隧道纵深取 30 m 。系统锚杆采用 $\phi 25$ 中空注浆锚杆,每根长 3.5 m ,围岩间距为 $@1.0 \times 1.0 \text{ m}$,按梅花型布置。模型网格划分见图2,共分为 13420 单元, 15444 个节点,及围岩均采用8节点块单元。二衬混凝土直墙 62.26 cm ,拱顶最小厚度 100 cm 。数值模拟计算,围岩采用摩尔-库伦本构。模型动力计算采用粘滞边界条件,在模型的左右、前后边界和下边界均施加粘滞边界条件,上边界作为自由边界。

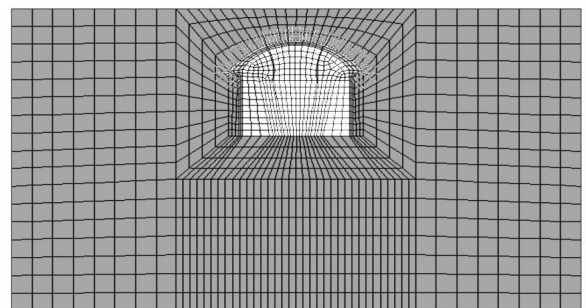


图3 计算模型

一般而言,岩石材料的动态物理力学特性参数都是与应变速率相关的,但对于岩体的变形模量和泊松比等参数随应变率的变化幅度很小,通常用相应的静态参数表示。隧道围岩各项物理力学指标根据工程地质勘察报告和室内岩体力学实验确定。材料的各项力学指标见表1。爆破过程支护锚杆参数依据设计选用取横截面积 $3.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$,弹性模量

2.1e11, 拉伸屈服强度 15e4 GPa, 外周长 6.28e-2 m², 水泥浆的刚度^[18] 18e6 MPa, 水泥浆的粘聚力^[18] 1.5e3 MPa。

表 2 材料力学参数

类型	静弹模 $E_s/10^4$ MPa	动弹模 $E_d/10^4$ MPa	静泊松比 μ_s	动泊松比 μ_d	粘聚力 C /MPa	摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$
围岩	3.30	4.69	0.25	0.24	2.10	75.0	2 600
C30 混凝土	3.00	3.75	0.17	0.17	1.88	60.6	2 500

4.4 计算结果分析

4.4.1 开挖位移分析

岩体隧道开挖过程中岩体位移变化规律是判断隧道围岩稳定与否的一种手段。在爆破开挖计算过程中,按照设计前两次爆破开挖后均施加相应的锚杆进行初期支护,第二次爆破开挖后对隧道顶部进行衬砌,第三、第四次爆破开挖结束后对隧道直墙进行衬砌。每次计算结束后对围岩位移与速度清零。

图 4 为埋深 10 m 不同爆破开挖步地表下沉位移曲线,可以看出,第二次爆破开挖对地表的影响最大为 0.5 cm。

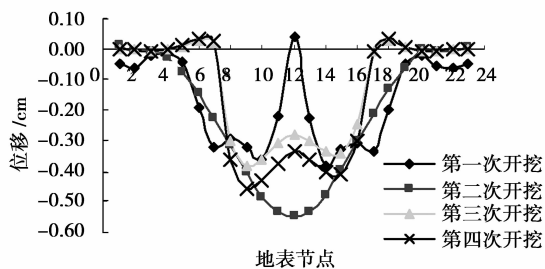
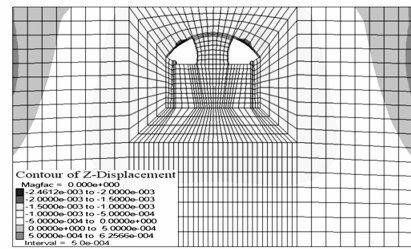
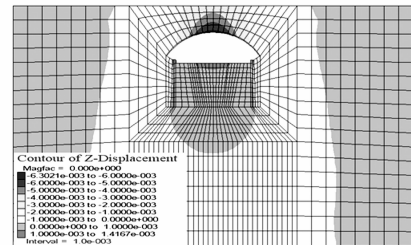


图 4 埋深 10 m 不同爆破开挖步地表下沉位移曲线

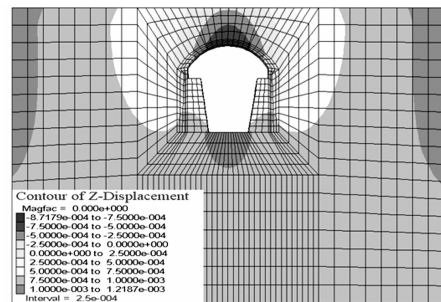
图 5 给出了岩体在埋深 10 m 时不同爆破开挖围岩竖向位移变化等直线图,岩体在爆破荷载下出现一定的变形,岩体在爆破荷载作用 0.12 s 后基本上趋于稳定状态。在爆破荷载作用下岩体最大位移均出现在开挖跨度中部位置,可以看出第 2 次开挖后围岩位移变形主要集中在开挖对应的上下部位,这是因为第 2 次爆破开挖过程中打入岩体中的锚杆开始起作用对两侧的岩体变形起到了阻碍作用;第 3、第 4 次爆破开挖后永久支护在开挖过程中亦开始起作用,从图中可以看出岩体在第 4 次开挖后永久支护的作用更加明显,永久支护在阻碍隧道变形的同时产生了 1.3 mm 微小的变形。



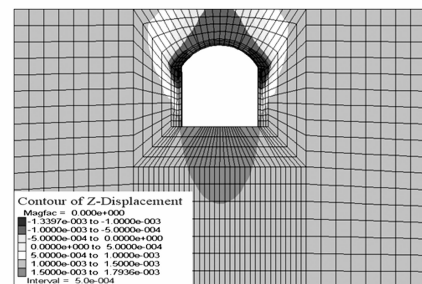
(a) 第 1 次爆破开挖



(b) 第 2 次爆破开挖



(c) 第 3 次爆破开挖



(d) 第 4 次爆破开挖

图 5 埋深 10 m 不同爆破开挖步地表位移等直线图

4.4.2 地表质点垂直振速与实测结果比较分析

将数值模拟得到的地表质点垂直振速与现场实测的质点振速进行结果对比分析。图 5 为 III 级围 DK7+659 断面实测以及数值模拟的正上方地表质点垂直振速图。

由图 6 得到的波形进行对比分析:

1) 实测振动波与模拟振动波最大振速相差不大,实测最大质点振速为 1.68 cm/s,而模拟得到的最大质点振速为 1.624 cm/s,二者相差不大,相对误差仅为 3.33%,说明爆破动荷载采用公式(7)是有效可行的。存在误差的原因是由于实际的爆破是一

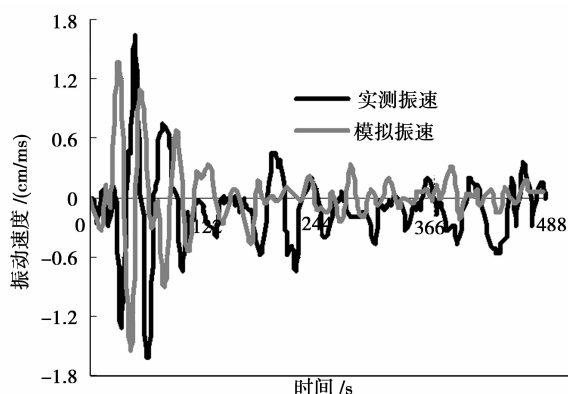


图6 DK7+659断面实测地及模拟表质点垂直振速图

个非常复杂的过程,岩石受的动荷载远不只是简单的三角形脉冲。此外,将围岩整体简化处理而不考虑结构面的存在也是引起误差的主要原因之一。

2)实测波在达到最大振速前可以清楚看到一些小幅值的波动,而在模拟图中看不到这一特征,模拟波在很短的一个时间内速度就达到了峰值。这是由于在爆破地震波的传播过程中,纵波的传播速度大于横波,振幅小于横波,这样就在最大振幅前出现了纵波小振幅波动;而模拟得到波形是纵波与横波共同作用的结果,已经区分不出纵波与横波特征。

3)实测波可以清楚的看到微差爆破的各段波形,而模拟爆破波只是对微差爆破中的一段爆破模拟的结果,整体上呈衰减趋势。

5 结 论

1)运用FLAC3D对大坪车站隧道分步爆破开挖对地表振动进行了数值模拟,从地表下降位移、振动速度进行了数值模拟计算,计算得出在设计爆破药量下进行爆破施工是相对稳定的,证明了采用该爆破方案是合理的,从爆破的角度证明在地铁和城市轻轨工程施工中采用“上半断面侧壁导坑法,下断面先中槽后侧墙开挖、先拱后墙衬砌”的隧道开挖新方法是可行的。

2)运用FLAC3D模拟隧道爆破,将爆破动荷载施加在开挖边界,数值模拟只是模拟微差爆破中的一段,所以得到的波形较实测波形简单,持续时间短,数值模拟得到的爆破地震波随距离的衰减规律与实测爆破地震波随距离的衰减规律一致。证明采用FLAC3D模拟隧道爆破研究地表质点振动是可行的,为隧道爆破振动对建筑物的影响的预测提供了一种有效途径。

参考文献:

- [1] 毕继红,钟建辉. 邻近隧道爆破震动对既有隧道影响的研究[J]. 工程爆破, 2004, 10(4): 69-73.
BI JI-HONG, ZHONG JIAN-HUI. Study on influence of blasting vibration from excavation of a new tunnel on existed tunnel[J]. Engineering Blasting, 2004, 10(4): 69-73.
- [2] 王明年,潘晓马,张成满,等. 邻近隧道爆破振动响应研究[J]. 岩土力学, 2004(03): 412-414.
WANG MING-NIAN, PAN XIAO-MA, ZHANG CHENG-MAN, et al Study of blasting vibration influence on close-spaced tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004(03): 412-414.
- [3] 霍永基. 建筑结构爆破震动效应及安全分析研究[J]. 爆破, 2003, 20(1): 1-6.
HUO YONG-JI. Blasting vibration effects on structures and safety analysis [J]. Blasting, 2003, 20(1): 1-6.
- [4] RAFAEL RODRIGUEZ, JAVIER TORANO, MARIO MENENDEZ. Prediction of the airblast wave effects near a tunnel advanced by drilling and blasting [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22: 241-251.
- [5] CENGIZ KUZU, ERIM GUCLU. The problem of human response to blast induced vibrations in tunnel construction and mitigation of vibration effects using cautious blasting in half-face blasting rounds [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24: 53-61.
- [6] WU C S A, J X LI B, CHEN X, et al. Blasting in twin tunnels with small spacing and its vibration control [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, 19: 518
- [7] CHANG-HA RYU, CHOON SUNWOO, SANG-DON LEE, et al. Suggestions of rock classification methods for blast design and application to tunnel blasting [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21: 401-402
- [8] INNAURATO N, MANCINI R, CARDU M. On the influence of rock mass quality on the quality of blasting work in tunnel driving [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(1): 81-89.
- [9] UMIT OZER. Environmental impacts of ground vibration induced by blasting at different rock units on

- the Kadikoy-Kartal metro tunnel [J]. *Engineering Geology*, 2008, 100: 82-90.
- [10] SEONHONG KIM, WON, JOON JEONG, et al. Numerical simulation of blasting at tunnel contour hole in jointed rock mass[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, 21: 306-307.
- [11] 于学馥. 岩石力学新概念与开挖结构优化设计[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [12] 朱维申, 何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [13] 吕爱军. 地下洞室最优开挖形状的确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(3): 552-558.
- LVU AI-JUN. The method for optimum shapes of tunnel and cavities [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1996, 15(3): 552-558.
- [14] 刘洪洲. 大跨度扁担隧道施工的力学响应及施工方法的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1999.
- [15] 朱永全, 景诗庭, 张清. 时间序列分析在隧道施工监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(4): 353-359
- ZHU YONG-QUAN, JING SHI-TING, ZHANG QING. Application of time series analysis method to measured displacement in tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1996, 15(4): 353-359.
- [16] 朱泽兵, 仇文革. 大跨超浅埋轻轨车站隧道施工技术[J]. 施工技术, 2003, 32(1): 47-49.
- ZHU ZE-BING, QIU WEN-GE. Construction technology of large span and ultra-shallow-buried light railway station tunnel[J]. *Construction Technology*, 2003, 32(1): 47-49.
- [17] 蒋树屏, 刘洪洲, 鲜学福. 大跨度扁担隧道动态施工的相似模拟与数值分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 567-572.
- JIANG SHU-PING, LIU HONG-ZHOU, XIAN XUE-FU. Physical simulation and numerical analysis on dynamic construction behavior of large span flat tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(2): 290-295.
- [18] 朱泽兵, 刘新荣, 张永兴. 大跨超浅埋轻轨车站隧道开挖方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 290-295.
- ZHU ZE-BING, LIU XIN-RONG, ZHANG YONG-XING. Study of excavation method for ultra-shallow-buried light railway station tunnel with large span[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(2): 290-295.
- [19] 朱泽兵, 张东明. 大坪隧道掘进中爆破震动的控制[J]. 工程爆破, 2002, 8(4): 67-70.
- ZHU ZE-BING, ZHANG DONG-MING. Control of blasting vibration in excavation of Daping tunnel[J]. *Engineering Blasting*, 2002, 8(4): 67-70.
- [20] 刘波. FLAC原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [21] Naouer J A L, Malan D F A. Viscoplastic Discontinuum Model of Time-Dependent Fracture and Seismicity Effects in Brittle Rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1997, 34(7): 1075-1090.
- [22] 陈士海. 爆破地震作用下结构破坏安全标准研究[D]. 南京: 中国人民解放军理工大学, 2004.

(编辑 陈移峰)