

钻爆法隧道施工对超近距构筑物的影响分析

冯 恺¹ 毛金龙¹ 张 宁² 洪阳洲³

(1. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210017 2. 南京理工大学 理学院, 江苏 南京 210094 ;
3. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005)

摘 要 :采用钻爆法开挖隧道时,爆破振动将不可避免地对临近构筑物产生影响。文章以贵州盘兴高速上坡地隧道为研究背景,对该隧道施工方案及爆破振动计算原理进行了分析,通过 LS-DYNA 建立了该隧道的计算模型,模拟了隧道中药包爆炸过程,计算分析出岩体的受力及位移情况,研究爆炸产生的振动冲击波下输电塔的响应特征,提出隧道不同区段的爆破开挖优化设计方案,为类似工程提供参考和技术支撑。

关键词 :隧道工程 ;钻爆法 ;有限元模型 ;动力响应 ;安全措施

中图分类号 :U455.41 **文献标识码** :A **文章编号** :1672-9889(2017)03-0075-04

Research on Influence of Drilling and Blasting Method on Structures Nearby During Tunnel Excavation

Feng Kai¹ ,Mao Jinlong¹ ,Zhang Ning² ,Hong Yangzhou³

(1. JSTI Group ,Nanjing 210017 ,China ;
2. School of Science ,Nanjing University of Science and Technology ,Nanjing 210094 ,China ;
3. School of Civil Engineering ,Xiamen University ,Xiamen 361005 ,China)

Abstract :Drilling and blasting method are widely used in the excavation of tunnel , vibration induced by blasting inevitably influences the structures nearby. Taking Shangpodu tunnel of Panxing highway in Guizhou province as research background ,this paper analyzes the tunnel construction scheme and calculation model of blasting vibration ,and creates finite element model of the tunnel by LS-DYNA to simulate the explosion process of tunnel. Stress and displacement field of the surrounding rock are calculated and analyzed. The response characteristics of transmission tower under vibration shock wave are studied , and the optimum design scheme of blasting excavation in different sections of tunnel is obtained , which could provide reference and technical support for similar projects.

Key words : tunnel engineering ; drilling and blasting method ; finite element model ; dynamic behavior ; safety measures

随着钻爆法在城市、山区的隧道工程建设中的大量使用,人们越来越重视钻爆法对爆源周边交通设施以及构筑物的影响破坏^[1]。在隧道进行钻爆开挖时,药包爆炸后产生的能量一部分会转换成地震波,以波的形式向四周扩散,从而引起爆源四周岩土层的振动响应,当波的强度、频率达到一定值时,还可能引起周边地表上的构筑物的损坏,甚至倒塌^[2,3]。实践工程表明,某些建筑、地质的破坏损坏与钻爆法开挖隧道所产生的震动有关,如边坡滑落、山体塌陷、建筑开缝、构筑物摇晃等。在浅埋

隧道的爆破施工中,其产生的震动问题更为突出,由于爆破点距离地表面、周边的构筑物相对较近,钻爆法施工的工程难度与安全风险系数会相对较高^[4,5]。因此有必要对隧道钻爆法开挖施工产生的震动效应进行有效、合理的控制,探讨分析爆源的邻近地表及其周边建(构)筑物的结构特性与动力响应特征,提出相关减震防护技术措施。

1 工程概况

贵州隧道入口地处盘县山体的上部,左线隧道

作者简介:冯恺(1985-)男,江苏无锡人,助理工程师,主要从事隧道支护技术研究工作。

的入口里程为Z1K7+117~Z1K7+343,长度为226 m;右线隧道入口里程值为K7+129~K7+351,长度为222 m;隧道的限界净空为10.25 m×5.0 m(宽×高),入口处隧道的方向为116°,隧道埋深最大不超过45 m,为浅埋深。隧道入口处连某大桥,出口处连路基段。隧道所处的地形图见图1。

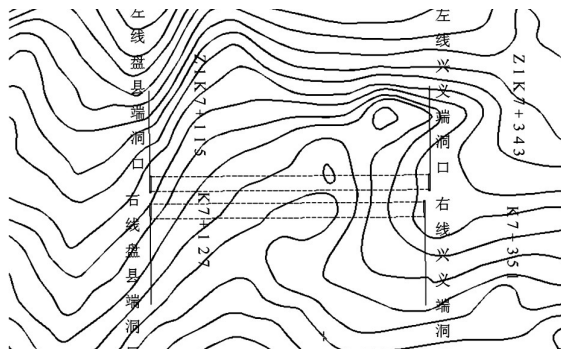


图1 隧道地形图

隧道入口处位于山坡的上部,并横穿该山体,出口处则位于村落周边,山体属于中低山区。山体坡度较大,范围为25°~45°。入口处的山坡坡度为33°,可见基岩。岩体的部分为第四系松散堆积层,该层较薄,表面的植被覆盖状况良好,植被主要为灌木,而在隧道出口处的山坡坡度为26°,后缘处的坡度较大,可见基岩。其上表生溶蚀现象多,山体的岩土介质较碎散。隧道入口处灰岩弹性模量 E 为 1.297×10^9 Pa,力学性能见表1。

表1 岩石的力学参数表

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性 模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	摩擦角/ ($^\circ$)	抗拉 强度/ MPa
2 650	35.0	0.23	4.62	42.9	1.95

贵州省的盘兴高速隧道工程中,上坡地隧道的进口左线Z1K7+158左侧离隧道开挖线轮廓线外不足35 m处有一处高压输电塔,该高压输电塔为红果至珠东乡220 kV高压线路电塔,红果至珠东乡220 kV高压线路为单串二回线路与盘兴高速背武甲特大桥斜交约30°,线路位于上坡地隧道进口35 m处,线路高度约30 m,跨越杆塔023-024。

2 爆破振动理论及构筑物振动响应计算机理

随着钻爆法在城市、山区的隧道工程建设中的大量使用,人们越加重视钻爆法对爆源周边交通设施以及构筑物的影响破坏,并进行了大量的关于爆破振动的研究^[6,7]。

爆破振动对邻近构筑物的危害主要取决于3个

要素:爆破振动的持续时间、爆破振动的频谱特征和爆破振动的强度幅值。这3个要素在整个爆破振动过程中互相影响,共同作用。

(1)爆破振动的持续时间为质点从开始振动到完全停止的时间。在实际工程中,一般将开始运动到其振动波幅值衰减至最大值的1/3这段过程所耗费的时间作为相对持续时间^[8]。振动持续时间对非线性反应阶段影响较大。

(2)爆破振动的频谱特征即不同自振周期下的结构反应特性,一般用功率谱、反应谱与傅里叶谱来表征。研究发现,爆破振动波的振动主频率与传播距离呈负相关关系,振动波在远距离传播中,频率较低的波作用较为明显,而主频率随距离的增大而衰减。

大量试验表明,当爆破振动频率与周边构筑物的自身固有频率相近时,会产生共振现象,共振会对构筑物的振动响应产生加强效果,导致其振幅剧烈增加而发生巨大危害;与此同时,在波的传播过程中经过不同的场地,而各场会对振动波中与其自身周期所不同的波产生吸震作用,从而改变了该波的幅值与频率。当爆源产生的爆破振动波到达构筑物时,建筑物会把与其自身频率相近的波进行放大,同时把其余与其频率不接近的部分波吸能衰弱。因此松软介质上大周期的柔性构筑物结构与坚硬场地上的刚性构筑物结构所发生的危害相比其他震害更为严重。

(3)爆破振动的强度幅值。质点在振动时做简谐运动,同时爆破振动波对周边构筑物的影响过程也是动态的,其间作用过程中,振动波会产生一种动态应力,而该动态应力由质点传播速度、质点振幅及传播介质材料特性等各因素决定,该力会对周边建筑物产生影响。

综上所述,爆破地震波对周边构筑物的破坏,其影响因素包括振动波的振幅、频率以及持续时间。在实际工程应用中,由于构筑物的结构特性、受力特点和构造形式的多样性,应综合考虑各种影响因素,分析其对构筑物的振动影响。

3 隧道钻爆法的数值模拟与计算分析

为了保证划分网格的质量,将规则体进行映射网格划分,而山体表面部分采取自由划分的方式;同时对输电塔处的山体细化网格。最后得到总网格数量为152 251个,网格划分效果见图2,在隧道中间取 $3 \times 3 \times 3$ 的长方体单元模型作为炸药模型。

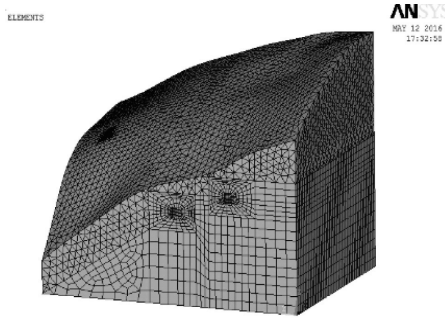


图2 隧道及山体的网格划分图

由于CPU时间随着单元积分点数量的增加而延长,所以积分单元的简化是解决耗时过长的的重要途径。简化单元除了能节省计算分析时间,同时对于处理大变形应力计算很有效。ANSYS/LS-DYNA3D程序采用单点高斯积分,能够有效减少数据存储量及其运算次数。不过简化积分单元也存在弊端,如单元简化可能影响计算结果准确度,因为应力结果准确度与积分点直接相关,简化积分单元还可能导致零能量模式(沙漏模态)的出现。

通过数值模拟计算来研究分析爆炸波,其中一个关键步骤就是对模型结构边界条件的考虑及处理。边界条件的设置需要考虑如何抑制波传播过程中在模型结构边界上的反射问题。在实际隧道钻爆工程中,隧道爆破的震动发生在半无限大区域内,因此在数值模拟计算时,要通过一个有限大小的模型来模拟无限大的空间,若在边界上施加固定节点约束,可能会导致振动波在边界处发生反射和折射,各种波互相叠加作用,使计算结果出现较大的误差,影响最终对隧道爆破力学分析的准确性。

由分析结果可知,爆炸对输电塔处的振动影响不大,在可控范围;不过要将其振动的初速度对实际输电塔进行振动相应研究,得出最终的结果。

表2 各阶阵型频率表

阵型	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
频率/Hz	2.396 3	3.551 4	5.384 6	8.384 9	8.568 6	10.483	10.910	11.014	11.766	11.854

5 隧道爆破的减震措施

5.1 信息化作业

隧道在采取钻爆法开挖方式时,必然会对爆破的岩石介质产生剧烈的振动影响,从而传递到周边构筑物,对其稳定安全造成威胁。所以,在对隧道进行钻爆施工时需要及时掌握详细的振动监测信息,从而科学计算分析出该隧道采取钻爆法施工对周边构筑物的影响。同时基于监测得到的数据结果,

4 输电塔动力响应及减震措施

采用CAD软件建立贵州某隧道输电塔的线框模型,从而在导入ANSYS后进行材料属性的添加。在不影响结构抗震能力的基础上对输电塔实际结构进行适当的简化,以便建模与后期的动力响应研究,输电塔模型见图3。

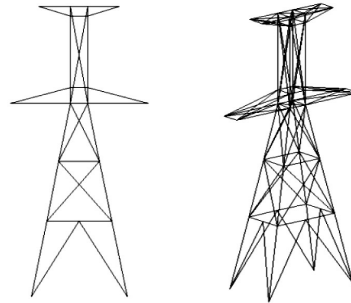


图3 输电塔模型

(1) 定义单元类型

输电塔的单元类型选择Beam4, Beam4作为一种单轴的受力单元,能够承受拉、压、扭、弯等形式的力。在单元上节点的自由度有6个,绕 x 、 y 、 z 坐标轴的角位移,在 x 、 y 、 z 方向上的线位移。该单元可处理结构大变形以及应力硬化的问题。

(2) 定义材料参数

该输电塔的材料采用钢型材料,弹性模量 $E=2 \times 10^{11} \text{ Pa}$,泊松比 $\mu=0.30$,密度 $\rho=7\ 800 \text{ kg/m}^3$ 。

(3) 施加边界条件

在输电塔与地基连接的4个节点进行各方向的位移、转动约束,并对该输电塔施加重力条件, z 轴方向的重力加速度 $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 。

由模态分析得前10阶阵型的频率值,见表2。由分析结果可知,输电塔的振动在安全范围之内。

计算出在适当的药包量下,隧道爆破开挖所引发周边构筑物的振动强度,结合构筑物的自身结构及动力响应特征,分析出最终的振动影响程度。基于影响的结果分析,合理设计并改善优化其爆破参数,从而达到确保隧道工程的顺利施工及周边构筑物的正常使用的目的。

为了保障隧道爆破的安全进行,可以考虑设立爆破振动监测部,对每次的爆破振动进行监测,并对结果进行统计整理,在监测爆破施工后,负责对

监测数据处理,进行数学分析并得出可供参考的结果总结及意见。对数据的处理分析内容主要包括:以爆破振动速度信息为依据,推导出相关振动加速度信息等,并结合爆炸点与观测点之间的距离,以此提出次轮施工进度、爆破参数的相关意见,并将最终结果及意见汇报到爆破施工部门,辅助其合理规划下一轮的爆破计划,从而保证隧道爆破作业顺利进行以及周边构筑物结构安全及正常使用。

5.2 爆破优化

通过观察数据信息以及爆炸的现场效果,总结每次的爆破振动结果,并对监测得到的数据进行数理统计及回归分析,总结出爆破振动产生的波强度衰减规律,从而通过爆破参数的调整与优化,数理统计分析所总结出的振动波衰减规律来预测监测点处的振动强度等参数,并将其数据与施工现场得到的振动数据进行比对分析,从而总结出各项爆炸减振措施的经济性与效果,最终采取最优策略来实现减震防灾目的。爆破优化的减震措施主要为:

(1)采取合理布药结构,分散药包并增加其临空面。

研究发现,采用不耦合炮孔爆破,可以有效地控制冲击压力和初始条件下的爆破压力,而合理地分散药包,增加其临空面,可以有效地削减爆破振动波的振动速度,从而有效降低爆破振动强度。

(2)采用多段微差起爆,选择合理的起爆时差。

将总药包进行分段,单段最大装药量将减少,爆破所产生的震动强度也随之减少,造成的危害也小。提前合理计划爆破方案,严格控制微差起爆的间隔时间,确保炸药爆破后,破碎的岩石充分松动,防止爆破后岩石的夹制作用的现象发生。

(3)合理选取单位体积炸药量,确定恰当的爆破参数。

过多的单位炸药量,将释放过多的爆炸能,引起周边构筑物的剧烈振动响应。但是过少的单位炸药量,会造成爆破后的岩体破碎松动不良。需要在施工现场,进行多次爆炸试验,得出适量的单位炸药消耗量和爆破参数。

(4)布置减震孔与减震带

当爆破试验的振动强度过大时,可考虑预钻防

震孔法施工,或者在爆破点附近设置隔振带。当爆破产生的振动波在传播过程中经过预裂隔振带时,由于波的传播介质发生变化,振动波会在不同介质的界面上发生反射或透射现象,由于岩石的波阻抗远大于空气的波阻抗,所以地震波在此界面上主要发生反射行为,而透射过的地震波较少,能有效减少爆破地震效应的不良影响。

(5)构筑物抗震加固

对周边构筑物进行结构分析及动力响应特征研究,在此基础上,对建筑物结构进行优化、加固。例如此次贵州隧道钻爆施工时,可对输电塔及其附属电力设施进行结构加固,增强结构的防爆破振动能力,也可对输电塔周边地质进行改良,设置防震带等措施。

6 结论

本文通过建立正确的物理模型,采用合理的材料参数,对爆炸荷载作用下附近构筑物的响应进行了科学的研究。通过数值模拟分析得到了隧道爆破施工地震波引起地表建筑物的动力响应,提出了爆破震动下合理的减震措施。

参考文献

- [1]王书明.隧道钻爆法施工对地表建筑结构的动力响应研究[D].长安:长安大学,2014.
- [2]李兆国.厦门海底隧道钻爆施工爆破振动规律研究[D].北京:北京交通大学,2009.
- [3]王凯.滨海地区钻爆法施工对邻近腐蚀管线的影响及风险评估分析[D].大连:大连理工大学,2013.
- [4]张雪亮,黄树棠.爆破地震效应[M].北京:地震出版社,1981.
- [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]付士根,许开立.爆破振动效应预报及减振措施[J].中国安全生产科学技术,2006,2(6):45-48.
- [7]张永哲等.爆破地震波传播特性研究[J].矿业研究与开发,2007.
- [8]王文韬.重庆地铁隧道钻爆法施工对邻近高层建筑振动响应研究[D].北京:北京交通大学,2011.

(收稿日期 2016-09-10)