

## 城市隧道爆破振动下建筑物的损伤机理及减振控制研究

刘 鹏

宜昌长乐城市建设投资开发有限责任公司, 湖北 宜昌 443413

**[摘要]**随着经济的发展,城市建设水平不断提高,各类城市隧道建设越来越多,而城市隧道往往处于建筑物、进出路和地下管线等设施密集区。隧道爆破施工必然会产生爆破地震波,为了减少隧道爆破振动引起的建筑物局部构件上的损伤,需要合理的控制爆破振动。通过对现场爆破振动实测数据的拟合分析,得出爆破地震波的振速、主频与隧道埋深、药量、围岩级别等因素的经验公式,实时监测建(构)筑物附近隧道爆破过程中的爆破地震波,通过分析爆破地震波特性和评价建筑物的安全,同时不断调整优化施工方案,从而为今后更好的开展城市隧道工程建设提供参考与借鉴。

**[关键词]**城市隧道;爆破振动;建筑物安全;电子雷管爆破参数

DOI: 10.33142/aem.v4i7.6402

中图分类号: TU352

文献标识码: A

### Study on Damage Mechanism and Vibration Reduction Control of Buildings under Blasting Vibration of Urban Tunnel

LIU Peng

Yichang Changle Urban Construction Investment and Development Co., Ltd., Yichang, Hubei, 443413, China

**Abstract:** With the development of economy and the continuous improvement of urban construction level, more and more urban tunnels are built, and urban tunnels are often located in densely populated areas such as buildings, access roads and underground pipelines. Tunnel blasting construction will inevitably produce blasting seismic wave. In order to reduce the damage on local components of buildings caused by tunnel blasting vibration, it is necessary to reasonably control blasting vibration. Through the fitting analysis of the measured data of blasting vibration on site, the empirical formulas of the vibration velocity and dominant frequency of blasting seismic wave and the factors such as tunnel buried depth, charge amount and surrounding rock grade are obtained. The blasting seismic wave in the process of tunnel blasting near buildings (structures) is monitored in real time, the safety of buildings is evaluated by analyzing the characteristics of blasting seismic wave, and the construction scheme is continuously adjusted and optimized, so as to provide reference for better urban tunnel construction in the future.

**Keywords:** urban tunnel; blasting vibration; building safety; blasting parameters of electronic detonator

#### 1 研究背景及现状

五峰新县城曹家坪城市连接线工程是县城避险迁建的重大基础设施项目,该项目为城市主干路,北起陆渔一级路,向南经杨家冲接曹家坪规划新区道路,线路长1.975km,工程概算约2.4亿元。项目建设规划红线宽20m,双向4车道,共设置隧道2座,总长1451.5m(按路线长计),隧道按左、右线分离式设计,其中王家冲隧道左线长690m,右线长600m;杨家冲左线长793m,右线长820m,在隧道施工中穿越了王家冲安置房及杨家冲安置房,涉及新建安置房及原居民住房近千户,对周边建筑物影响较大,环境复杂必须进行控制爆破施工。

一般隧道施工采用钻爆法时,必然会产生爆破地震波,当爆破地震波的峰值振速超过建筑物的振动安全标准,或者爆破地震波的主频接近建筑物的固有频率,都有可能引起建筑物发生不同程度的受损。众所周知,隧道爆破地震波具有频率高、峰值振速大、持续时间短等特性,使得隧道爆破振动下房屋的破坏形式不同于天然地震作用下的结构破坏形式,具有其显著特点,即房屋呈现局部式的破坏形式或应力集中式的破坏形式,例如门窗角与墙角开裂、

预制楼板接缝开裂、局部墙体开裂、女儿墙开裂及其他局部约束薄弱的部位开裂等。隧道爆破振动的频繁扰动,可能会加剧以上损害的发生,造成建筑物累积损伤和破坏,影响到当地居民的正常工作和生活。

隧道爆破振动引起的新建建筑物受损主要由两方面原因引起,一是峰值振速过大,引起结构构件上瞬间产生较高的拉应力或者剪切应力超过材料的抗拉或者抗剪强度所致;二是对于浅埋隧道,隧道爆破产生的地面振动波的主频一般较高,远离建筑物整体的固有频率,不会引起建筑物的整体振动模态下的共振损伤,更多的可能是引起建筑物局部振动模态下的损伤,现场调研中也发现隧道爆破振动下建筑物的某些薄弱的局部构件发生了开裂。这表明隧道爆破振动主频与建筑物局部构件的固有频率可能更为接近,从而引起局部构件上发生过大的振动变形,最终导致局部构件上的应力超过材料强度而发生损伤。因此,研究新建建筑物的局部振动模态与爆破振动波主频特性之间的关系对于认识建筑物的局部受损具有重要意义,但是目前这方面的研究还不多见。

为了减少隧道爆破振动引起的建筑物局部构件上的

损伤,需要合理的控制爆破振动,即使地面振动的峰值振速低于建筑物振动安全标准,同时又使爆破振动主频远离建筑物整体的固有频率,降低爆破振动在建筑物上产生的拉应力或者剪切应力,确保建筑物的安全。目前,采用非电毫秒雷管控制爆破振动具有很大的局限性。例如,单段药量同时起爆容易引起较大的地面振动,再加上毫秒延时采用药剂燃烧进行控制,延时误差较大且随机性较强,难以实现稳定的控制爆破振动;通过缩短进尺、减小段药量以及分部爆破开挖,虽然能够在一定程度上降低爆破振动,但又会大大降低施工效率、延长施工工期。近几年,随着数码电子雷管的快速发展,精细、稳定的控制隧道爆破振动已经获得成功,并且得到了不断的推广和应用。

综上所述,由于很多新建建筑物自身的强度还处于增长过程中,导致其力学性能可能未达到设计强度,在遭受外部强烈的隧道爆破振动下极易发生损伤。因此,本项目依托五峰新城曹家坪城市连接线工程,以新建建筑物为研究对象,通过重点分析新建建筑物的高阶局部模态和局部构件上的应力来研究隧道爆破振动下建筑物的损伤机理和部位,提出针对新建建筑物的爆破振动安全控制标准,提出隧道近距穿越新建建筑物的爆破减振控制技术,不仅可以为新建建筑物的损伤评估和振动安全控制奠定坚实的理论基础,而且对于确保复杂环境下近距下穿新建建筑物的安全、减少“扰民”和“民扰”事件的发生,均具有十分重要的理论意义和工程应用价值。

## 2 主要研究内容

(1) 隧道爆破下新建建筑物振动监测及爆破地震波特性研究

①总结查阅国内外文献,提出不同类型建(构)筑物的爆破振动测点布置的原则及方法,并根据工程的现场条件布置监测点,实时监测建(构)筑物附近隧道爆破过程中的爆破地震波,通过分析爆破地震波特性,评价建筑物的安全,同时不断调整优化施工方案。②研究隧道下穿不同类型建(构)筑物爆破引起的爆破地震波的振速、频率、持续时间基本特性,分析埋深、围岩级别、药量、延时等因素对爆破地震波的影响。③通过对现场爆破振动实测数据的拟合分析,得出爆破地震波的振速、主频与隧道埋深、药量、围岩级别等因素的经验公式,根据经验公式对爆破振动进行预测,指导爆破施工。

(2) 隧道爆破振动下建筑物控制标准及安全评价研究

①通过查阅国内外文献,总结归纳已有的混凝土和砖混建筑物的爆破振动安全控制标准,调研现场新建建筑物的重要性、建筑质量、新旧程度、自振频率等,提出有针对性的隧道爆破振动下新建混凝土和砖混建筑物的振动安全控制标准。②采用有限元法建立新建建筑物结构模型,研究楼房低阶整体模态和高阶局部模态下的振动特性;研究楼房典型局部构件的模态参数,分析隧道高频爆破振动与结构局部构件振动之间的相互关系。采用数值模拟方法,借助 LS-DYNA 程序,输入实测的爆破地震波,研究不同峰值、不同频率隧道爆破地震波作用下建筑物的动力反应,分析地面爆破地震波沿楼层向上传播过程中的振速、频率

的变化规律,得出建筑物较容易损伤的部位,作为实时监测、调研的重点部位;③在隧道爆破之前对新建建筑物的安全或损伤情况进行调研;隧道爆破施工开始后,根据施工进度不断对爆破频繁振动下建筑物的安全或损伤情况进行再调研,结合隧道爆破振动实测数据,评价隧道近距下穿新建建筑物的爆破振动安全性,验证建筑物爆破振动安全控制标准的合理性。

(3) 复杂环境下浅埋隧道爆破振动控制技术研究

①总结常用的隧道爆破振动控制方法,超前小导洞分部开挖方法、中导坑减跨降低振动、控制掘进进尺、控制单段药量、多级复合楔形掏槽、采用预裂爆破等、电子雷管单孔间隔起爆振动控制方法,分析不同方法的合理性、经济性和适用性。

②根据下穿建(构)筑物的爆破振动安全控制标准,针对隧道不同的围岩级别、埋深选用经济、合理、适用的爆破振动控制方法,现场不断量测爆破振动,根据爆破振动测试结果优化调整隧道爆破施工方案,确保同时满足隧道光面爆破的效果和建(构)筑物爆破振动控制的要求。

③分析电子雷管单孔间隔起爆降振的基本原理,研究得出电子雷管实现单孔间隔起爆的延时计算方法,得出电子雷管延时设置的原则。通过进行电子雷管不同爆破网路下的现场试验,提出 2 种典型的电子雷管爆破振动控制技术,得出相关爆破施工参数。

## 3 主要创新点

(1) 将机械、航天、桥梁等领域中用于结构损伤识别和诊断的模态分析方法引入到隧道爆破领域,用于研究高频、短持时的隧道爆破振动下新建建筑物的损伤机理。采用模态分析方法,通过探究隧道爆破地震波参数与新建建筑物整体模态、局部模态和局部构件模态参数之间的关系,探索隧道爆破地震波引起的是结构主体或是局部构件的振动反应,通过对比分析建筑物整体和局部构件上的位移和应力值,并结合现场调研结果,得出新建建筑物损伤的机理和部位,提出新建建筑物爆破振动安全控制标准。

(2) 考虑围岩特性、起爆药量、炮眼类别、炮眼深度、开挖进尺等因素,研究适用于复杂环境下浅埋隧道穿越新建建筑物的普通毫秒非电雷管和新型电子雷管单孔间隔起爆减振方法,提出采用隧道电子雷管减振控制爆破的延时计算方法,并结合现场试验,提出适用于不同新建建筑物振动安全要求的爆破减振控制技术,在确保新建建筑物安全的前提下实现隧道爆破快速施工。

## 4 技术路线方案

将在已有的研究工作基础上,充分运用隧道岩石爆破理论、结构动力学理论、结构模态分析理论、有限元理论展开多学科交叉研究,依托五峰新城曹家坪城市连接线工程,提出隧道爆破振动下不同新建建(构)筑物类型的振动安全控制标准,探究爆破振动下建(构)筑物的动力反应特征及规律,提出不同围岩、不同埋深、不同建(构)筑物条件下的大断面浅埋隧道控制爆破技术,确保复杂环境下隧道爆破振动下建(构)筑物的安全,减少对周围环境的振动影响,以期获得良好的社会效益和经济效益。

(1) 建(构)筑物爆破振动监测及现场调研

①根据爆破施工的进度,通过在新建建(构)筑物上布置测点,不断实时监测爆破地震波,分析爆破地震波的振速和频率,并与建(构)筑物的振动安全控制标准进行对比分析,当爆破地震波振速和频率超出标准后,通过优化和调整爆破施工方案,降低爆破振动,确保建(构)筑物的安全。爆破振动监测仪器如图1所示。②隧道爆破振动测试时,详细记录围岩的情况、隧道的埋深、测点的位置、药量、起爆顺序、雷管段位等信息,用于分析埋深、围岩级别、药量、延时等因素对爆破地震波的影响,并且根据实测数据,在萨道夫斯基公式的基础上,拟合得出爆破地震波的振速、主频的经验预测公式。图2为爆破振速随距离衰减拟合曲线图。



图1 建筑物周边爆破振动监测点布置

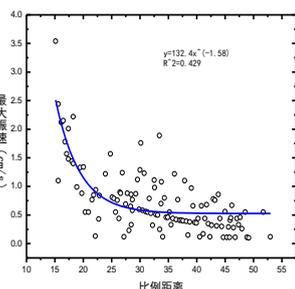


图2 某工程最大振速随比例距离衰减图

(2) 隧道爆破振动下建筑物的振动响应研究

①对于新建混凝土和砖混建筑物的动力反应,采用ANSYS软件,分别建立建筑物三维结构模型,求解建筑物的模态参数(固有频率和振型),分析建筑物的动力特性,研究隧道爆破振动特性与建筑物模态参数之间的关系;②爆破地震波的峰值振速考虑1.0、2.0、3.0cm/s三个不同值,爆破地震波的频率考虑不同的频率段;爆破地震波施加方向分为X、Y、Z方向单独施加和X、Y、Z方向同时施加,采用LS-DYNA软件,研究建筑物不同方向上、不同高度处的结构主体、局部构件上的振速、频率、位移和应力反应,计算结构主体及局部构件的最大位移、层间相对位移及主应力、等效应力,分析爆破地震波沿楼层传播过程中的变化规律。施加的荷载中,不考虑楼面活荷载,考虑建筑物自重荷载,最终计算得到的建筑物结构动力反应为重力和爆破地震波两者作用下的反应值。

(3) 隧道爆破振动控制技术的现场试验研究

①根据下穿建(构)筑物的振动控制标准,首先选取毫秒非电雷管爆破振动控制技术,如采用超前小导洞分部开挖方法、中导坑减跨降低振动、减小掘进进尺、减小单段药量、多级复合楔形掏槽等方式,并通过现场调整爆破施工参数,降低爆破振动,直至满足振动控制要求。②如果采用毫秒非电雷管爆破不能满足要求,或严重影响施工进度,建议采用电子雷管进行爆破振动控制。首先根据围岩性质、爆破施工参数等确定不同位置电子雷管延时的理论时间,然后通过在现场通过电子雷管爆破试验,对爆破地震波进行实测,通过对爆破地震波波分析,现场微调电子雷

管的延时,反复试验3~5次,即可确定出降振效果最优的电子雷管爆破参数。研究技术路线如图3所示。

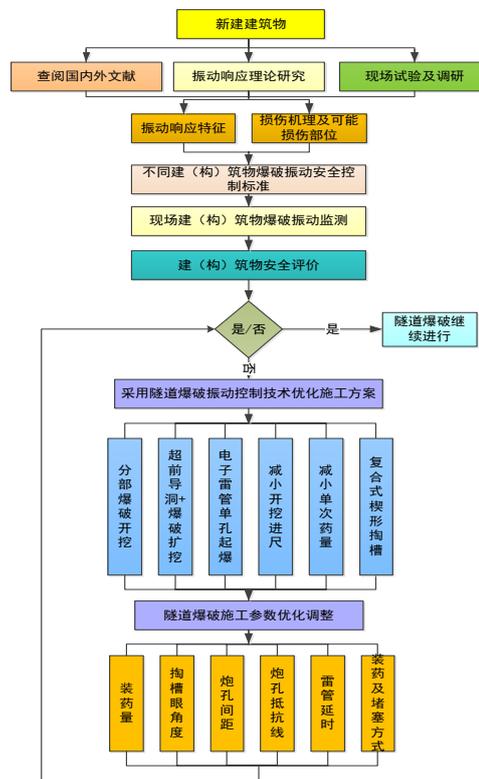


图3 研究技术路线图

5 结论与建议

通过合结依托五峰新县城曹家坪城市连接线工程隧道工程地质、水文地质特点、难点及周边建筑环境,应用风险理论与分析方法,通过调查分析、风险识别、风险分析和风险控制措施等方面的研究,建立近接建筑群条件下隧道施工中的降振效果最优的电子雷管爆破参数模型,对近接建筑群条件下隧道施工中各环节的风险因素进行识别、分析和评估,建立完整的近接建筑群条件下隧道施工风险管理体系,以达到控制近接建筑群条件下隧道施工中各环节风险的目的。

【参考文献】

[1]霍永基. 建筑结构爆破震动效应及安全分析研究[J]. 爆破, 2003(1): 1-6.  
 [2]王功琴. 爆破地震作用下造成建筑物损坏的安全性鉴定研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2007.  
 [3]黄志强. 建筑结构对爆破震动响应的数值模拟研究[D]. 湖北: 武汉科技大学, 2003.  
 [4]龙江涛, 江云星. 数码电子雷管在工程爆破中的应用分析[J]. 山东工业技术, 2015(13): 134.  
 [5]陈兴. 数码电子雷管在工程爆破中的应用研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2014.

作者简介: 刘鹏(1986-)男, 毕业于孝感学院土木工程专业, 大学本科学历, 就职于宜昌长乐城市建设投资开发有限责任公司, 任总工程师。