

# 山岭公路隧道爆破施工对邻近既有结构振动影响的控制要点

叶安密

湖北交投建设集团有限公司交通工程分公司 湖北 武汉 430000

**【摘要】**：山岭隧道工程施工中，爆破开挖为关键工序，但是爆破产生的振动波会对周边既有建筑物、既有隧道、桥梁墩台、管线等结构产生动力冲击，轻则造成结构开裂、饰面脱落，重则危及结构整体稳定性和使用寿命，严重时还会造成安全隐患。本文根据山岭隧道爆破施工现场的特点，分析爆破振动对周围既有结构的影响机理，从爆破参数优化、减振工艺选择、振动监测控制、施工全过程控制四个方面梳理出振动控制的关键要点，并结合工程实践检验控制措施的有效性，为同类山岭隧道近距离爆破施工和既有结构防护提供技术参考，保证新建隧道施工和既有结构的双重安全。

**【关键词】**：山岭隧道；爆破施工；既有结构；振动控制；减振技术；施工管控

DOI:10.12417/2811-0528.26.11.056

## 1 引言

伴随着我国交通基础设施建设向山区深处推进，山岭隧道新建工程经常要穿过既有交通线路、民用建筑、水利管线等既有结构密集区，爆破开挖作为山岭隧道岩体破除的主要方法，所产生的爆破振动是影响周边结构安全的主要风险因素。目前部分隧道工程施工中存在爆破参数设计不合理、减振工艺应用不到位、振动监测滞后、现场管控不规范等问题，造成振动超标引发既有结构破损的事件时有发生。因此，对山岭隧道爆破振动控制要点进行系统的梳理，建立事前设计、事中控制、事后监测的全过程控制体系，对于规避施工风险、保证工程质量、保障既有结构安全有重大的工程实际意义。本文根据有关规范要求 and 工程实践经验，针对振动控制的关键点进行提炼，为职称评定相关的技术研究以及现场施工管理提供支持。

## 2 爆破振动对邻近既有结构的影响机理

### 2.1 爆破振动的传播特性

山岭隧道爆破施工时，炸药在岩体孔内起爆后，瞬间产生高温高压气体，对周围岩体造成冲击破坏，未消耗完的能量以地震波的形式向外传播，主要有纵波、横波和表面波。表面波能量占比例大、衰减慢、传播距离远，是引起临近既有结构振动的主要原因。振动波的传播速度、衰减幅度与岩体岩性、节理裂隙发育程度、爆源与既有结构的距离、地形地貌等有关，软岩介质中振动波衰减速度快于硬岩，地形起伏大区域会加大振动波的散射和衰减。

### 2.2 对既有结构的损伤形式

爆破振动对临近既有结构的破坏分为直接破坏和间接破坏两种。直接损伤为结构墙体开裂、地基沉降、梁柱节点破损、饰面瓷砖脱落、管线接口开裂等，大多由于振动峰值速度超标的振动频率与结构的固有频率发生共振所致；间接损伤是结构

内部应力重新分布、围岩松动圈扩大、既有支护结构承载力下降，长期反复振动会加快结构的老龄化，降低结构的耐久性。不同类型的既有结构抗振性能差别较大，砖混结构民用建筑、老旧既有隧道、浅埋管线抗振能力差，钢筋混凝土框架结构、桥梁墩台等刚性结构抗振能力强，施工时应分清防护重点。

### 2.3 振动控制核心判定指标

根据《爆破安全规程》及公路、铁路隧道施工有关规范，相邻结构爆破振动控制的指标主要是质点峰值振动速度，并且还要考虑振动频率。规范对不同种类的既有结构安全允许的振动速度作出规定，民用砖混结构安全允许振速为 2.0~3.0cm/s，钢筋混凝土框架结构为 3.5~5.0cm/s，既有交通隧道为 10.0~15.0cm/s，浅埋柔性管线为 1.5~2.0cm/s，既有公路路基（含填方路基、挖方路基）安全允许振速为 2.0~4.0cm/s，浅埋软基路段、老旧路基需从严控制至 2.0cm/s 以内，路面结构层振速限值同步参照路基标准执行，低频振动时还要适当提高限值。施工时应以该指标为重心，从反方向出发来设计爆破参数，兼顾各类既有结构限值要求，保证振动值一直处在安全范围之内。

## 3 山岭隧道爆破振动控制核心要点

### 3.1 事前勘察与参数优化设计

事前勘察是振动控制的基础，施工前要对临近既有结构的分布位置、建成年代、结构类型、目前的完好状况进行详细的排查，新增既有公路路基专项勘察内容，重点排查路基填料类型、压实度、边坡坡度、排水系统、路面破损情况及路基与爆源的相对位置，准确测量爆源和既有结构（含路基、建筑、管线）的水平距离、垂直距离，对隧道围岩等级、岩性、节理裂隙、地下水情况进行详细的勘察，形成完整的勘察报告。对老旧、破损严重的既有结构，包括老旧公路薄弱路基，进行结构安全性评价，得到结构振动控制限值。施工时严格控制循环进

尺, III级围岩循环进尺 $\leq 3.0\text{m}$ , IV级围岩循环进尺 $\leq 2.0\text{m}$ , V级及以上围岩循环进尺 $\leq 1.5\text{m}$ , 防止单次爆破药量过大引起强振动。对炮孔参数做进一步的优化, 减小炮孔间距和排距, 采用梅花形交错布置的方式使爆破能量均匀分布在各个区域内, 邻近公路路基一侧适当缩小炮孔参数, 进一步降低单孔药量。

### 3.2 减振爆破工艺选型与应用

选择合适的减振爆破工艺, 可以有效地降低振动峰值, 常用的工艺有毫秒延期微差爆破、预裂爆破、光面爆破、缓冲爆破四种, 施工时需要根据围岩条件和既有结构距离进行组合使用, 邻近公路路基路段优先采用缓冲爆破+预裂爆破组合工艺。预裂爆破是为防止近处的已建结构受到破坏, 在隧道开挖轮廓线之外, 按照既有结构(含公路路基)的方向布置几排预裂炮孔, 用小药量、同段起爆的方式产生贯通的预裂缝, 从而阻止爆破振动波传到已有结构上, 减振率可达到40%以上, 针对公路路基可在路基与爆源之间加密预裂孔, 强化减振阻断效果。光面爆破注重控制隧道轮廓成型质量, 削减超欠挖, 减小围岩扰动, 间接削减振动对周边结构的干扰, 周边孔使用小药量、间隔装药, 保证岩壁平整, 削减围岩松动, 避免围岩扰动引发路基土体附加沉降。

### 3.3 炸药选型与装药结构优化

炸药选型直接决定爆破振动强度, 临近既有结构施工时, 不得使用高威力、高爆速的炸药, 应选用低密度、低爆速、爆轰性能稳定的岩石乳化炸药, 其爆炸能量释放平稳, 产生的振动波峰值较低, 对周围结构影响小。对于周边孔、预裂孔可以采用专用光爆炸药来减少单孔药量和振动强度, 邻近公路路基一侧的炮孔需进一步降低炸药威力, 选用低感度乳化炸药, 严控单孔装药量。装药结构优化要避免集中装药, 采用间隔装药、不耦合装药的方式, 减小炸药和孔壁直接接触, 减少冲击波对岩体的冲击。不耦合装药系数控制在1.5~2.0之间, 孔底用加强装药, 孔口段用减弱装药, 炮孔堵塞长度不小于炮孔直径的20倍, 且不小于1.0m, 堵塞材料为黏土和细沙混合物, 密实堵塞, 防止炸药能量外泄, 防止堵塞不实引起飞石和额外振动, 避免飞石冲击公路路面及路基边坡。

### 3.4 全过程振动监测与动态管控

振动监测属于动态管控的重要部分, 创建起“爆前试爆监测、爆中实时监测、爆后复核监测”全流程的监测体系。爆前选取典型断面做试爆, 测试不同药量、不同延时参数的振动值, 校准K、 $\alpha$ 系数, 优化正式施工参数, 邻近公路路基路段需单独开展试爆, 验证路基振动控制效果; 爆中在既有结构关键部位、隧道洞口、围岩薄弱处及公路路基路肩、边坡核心位置布设振动监测点, 监测点距既有结构外墙不大于1.0m, 路基监测点沿线路方向每10m布设1个, 用便携式振动监测仪实时采集

质点峰值振动速度、振动频率、振动持续时间等数据, 同步监测路基沉降与边坡位移。

### 3.5 既有结构专项防护措施

对于抗振能力不足的既有结构, 在控制爆破振动的同时还要采取专项防护措施来提高结构的抗振性能。提前清理室内易碎物品, 墙体裂缝提前修补, 必要时设临时支撑; 对既有隧道提前检查衬砌、拱架的完好情况, 对破损处做注浆加固处理, 对既有隧道内布设变形监测点, 同时对爆破振动及结构变形进行监测; 地下管线采用柔性包裹、支墩加固的方式防止管线与土体直接传递振动, 排查管接口密封性, 防止振动引起渗漏。

## 4 施工全过程管理与安全保障要点

### 4.1 施工组织与技术交底

成立专项爆破施工管理小组, 明确技术负责人、安全员、爆破员、监测员的职责, 制定专项施工方案和振动控制应急预案, 方案经过专家评审通过后才能实施。施工前进行全员技术交底, 主要对减振工艺要求、参数控制标准、监测预警流程、应急处置措施等进行讲解, 使一线施工人员熟悉振动控制的主要内容, 杜绝违章作业。

### 4.2 现场施工管控

严格按照设计参数施工, 精确控制炮孔钻孔角度、深度、间距, 钻孔偏差 $\leq 5\text{cm}$ , 严禁随意增大炮孔直径、加大装药量。爆破作业人员必须持证上岗, 严格按照爆破安全操作规程进行装药、连线、起爆、堵塞等各个环节的作业, 全过程监督。爆破后等待15到20分钟, 当烟气散尽、围岩稳定的时候, 才能进入现场检查, 排除围岩松动、盲炮等隐患, 确认安全之后再行出渣作业。

### 4.3 应急处置与产权协调

提前制定出振动超标的应急预案、结构破损的应急预案、盲炮的应急预案等, 准备好临时支护材料、注浆设备、监测仪器等应急物资, 一旦出现险情就立即启动应急响应, 疏散人员, 采取加固、整改措施。同时主动同现有的结构产权单位、周边居民开展沟通协商工作, 提前告知施工方案及振动抑制办法, 不定期上报监测数据, 及时解决各种质疑和意见, 营造良好的施工周边环境。

## 5 工程实践与分级验证

### 5.1 工程概况与振动风险分级

某山区高速公路山岭隧道全长2100m, 采用新奥法施工, 隧道中段穿过区域地形起伏较大, 下穿既有乡村公路和3栋砖混结构民用民房, 爆源与既有民房最近水平距离只有18m, 属

于近距离高风险爆破施工场景。根据现场围岩条件、结构类型和距离参数,对本区域爆破振动风险进行分级管控,将施工区分为一级风险区、二级风险区两个等级,爆源周边20m范围内、紧邻民房区域为一级高风险区,20m以外至50m范围内为二级一般风险区,对不同风险等级的施工区分别制定差异化的振动控制标准和施工方案。

现场围岩以IV级风化页岩为主,岩体完整性差,节理裂隙发育,遇水易软化,自身抗扰动力差,增大了爆破振动传导和结构受损的风险。施工前联合第三方检测机构对既有民房进行现状排查和安全性评价,确定民房建成年代超过20年,为砖混结构,抗振能力差,按照《爆破安全规程》的要求,把一级风险区对应民房的安全允许振速控制在2.0cm/s以内,二级风险区适当放宽但不超过2.5cm/s,全程实施分级管控、精准防护的思路。

### 5.2 分级爆破控制方案实施

对一级高风险区实行最严格的减振施工标准,全部使用毫秒延期微差爆破加预裂爆破的组合减振技术,从爆破参数、装药结构、起爆时序三个方面进行精细化控制。循环进尺严格控制在1.8m以内,单段最大起爆药量不大于8kg,炮孔间距调整为0.6m,排距0.8m,采用梅花形交错布孔,用高精度数码电子雷管,排间延时固定为40ms,同排孔间延时3ms,杜绝振动波峰叠加。同时在隧道开挖轮廓线和民房之间设置预裂孔,提前爆破形成贯通预裂缝,阻断振动传播途径,配合孔内不耦合装药结构,减弱爆破能量冲击。

### 5.3 分级监测与效果验证

根据风险等级划分布设监测点位,采取不同的监测频率和管控标准。一级风险区在每栋民房的外墙、墙角等重要部位每个设置2个监测点,一共4个重点监测点,每次爆破作业时及

时监测,数据立即上传到分析平台;二级风险区设2个常规监测点,每隔三次爆破作业就做一次复测,共完成了监测作业126次,共采集到有效振动数据378组。

一级风险区实测质点峰值振动速度为1.2~1.8cm/s,一直保持在2.0cm/s以内;二级风险区实测振速为1.5~2.2cm/s,符合规定。施工完毕后对原有民房和乡村公路进行全面检查,没有发现墙体开裂、饰面剥落、地面下沉等结构损坏情况,隧道开挖轮廓规整,超欠挖指标符合公路隧道施工规范要求,围岩扰动程度在合理范围内,证明分级管控、差异化振动控制方案是可行有效的。

### 5.4 实践经验总结

经由本次工程实践可知,山岭隧道临近既有结构爆破施工,采用风险分级控制模式,既可以保证既有结构的安全性,又可以加快隧道施工进度,防止过度减振引发施工滞后或者控制不到位产生振动超标状况。核心经验就是提前做好风险等级划分,根据不同的风险等级选择合适的爆破参数、减振工艺和监测标准,并且全程实行动态调整,根据实时监测数据对施工细节进行优化,该模式可以适用于各种邻近既有结构的山岭隧道爆破施工,具有较好的推广价值。

## 6 结论

山岭隧道爆破施工对临近既有结构的振动控制,是一项系统工程,要遵循“预防为主、动态管控、综合治理”的原则,主要从事前勘察和参数优化、减振工艺合理选择、装药结构精细化设计、全过程振动监测、既有结构专项防护、现场规范化管理六个方面入手。只有各个环节的要点都落到实处,才能把爆破振动控制在安全范围内,达到新建隧道施工和既有结构安全的双重目的。

### 参考文献:

- [1] 刘满.隧道爆破对围岩稳定性影响及开挖进尺优化研究[J].建筑机械化,2026,47(02):115-119.
- [2] 胡晓东,赵岩,王志刚,等.下穿山岭隧道爆破振动响应与安全控制研究[J].工程爆破,2025,31(06):173-182.
- [3] 马晓忠.富水地质山岭隧道爆破开挖施工工艺的优化研究[J].工程机械与维修,2025,(12):94-96.
- [4] 黄剑,蒋楠,杨玉民.山岭公路隧道多级别围岩爆破振动传播规律及预测[J].高压物理学报,2025,39(08):117-130.
- [5] 黄剑,蒋楠,杨玉民.山岭公路隧道多级别围岩爆破振动传播规律及预测[J].高压物理学报,2025,39(08):117-130.