

# 上软下硬复合地层隧道爆破施工对临近建筑物的影响研究

刘琪

中外建华诚工程技术集团有限公司山东分公司 山东济南 250000

DOI: 10.12238/ems.v7i4.12653

**[摘要]** 为了研究机械和爆破施工结合的复合型施工方法在上软下硬地层中的适用性及对临近建筑物的影响,本文选取实际工程案例,选择数值模拟并融合现场实测振动数据,对隧道施工全过程进行了系统分析。研究结论显示:在隧道实施爆破作业期间,邻近高层建筑物的振动速度分布特征表现为随楼层升高先经历递减阶段,随后转为递增,此现象明确指示了高程放大效应的存在。通过对比全断面爆破与机械-爆破复合型施工方案,发现后者在各监测点的振动速度峰值上展现出显著抑制效果,能够在确保施工安全的前提下,有效减轻对周边环境的振动影响,保障施工顺利进行。

**[关键词]** 上软下硬地层; 爆破; 建筑物; 数值模拟

## 1 引言

在隧道工程领域,钻爆法凭借其卓越的地质适应性、灵活的断面设计、多样化的施工设备选择、对地表沉降与坍塌的有效控制、经济高效性以及对面活动干扰的有限性,已成为广泛应用的技术手段<sup>[1~5]</sup>。然而,当隧道掘进紧邻既有高层建筑时,钻爆法施工中炸药爆破产生的强烈冲击波和振动效应,势必对邻近建筑结构造成不同程度的振动响应,甚至诱发损伤与破坏,成为工程实践中的一大挑战。

鉴于此,本文紧密依托特定工程项目实例,运用数值模拟技术,并深度融合详尽的现场振动监测数据,对上软下硬复合地层中隧道施工采用“上部机械掘进、下部钻爆作业”综合策略下的掘进过程及邻近高层建筑结构稳定性变化规律与内在影响机制进行了深入剖析。通过构建系统化的分析框架,本文旨在提炼出针对此类复杂地质条件下隧道施工的科学指导原则与技术支撑体系,以期未来相似工程实践提供可靠依据,推动隧道工程领域向更安全、高效、绿色的方向发展。

## 2 工程概况及开挖方案设计

### 2.1 工程概况

此工程隧道埋深约在 10.56m~21.86m 的范围内。区间隧道地质破碎,隧道左线侧向穿过建筑物给施工带来一定的困难,沿线地层复杂,呈现出明显的上软下硬特征,岩体破碎强度较低,本次研究区段为 ZK8+377.5~ZK8+413.6 下穿建筑物段,如图 1 所示。

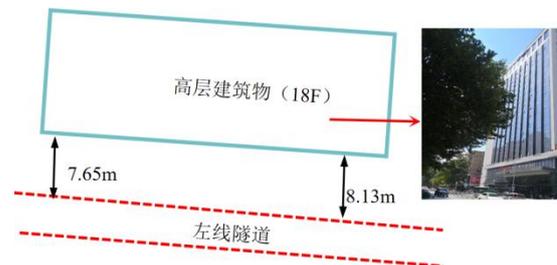


图1 隧道及临近建筑物示意图

### 2.2 机械开挖联合爆破施工方法

鉴于隧道穿越的上软下硬地层特性,创新性地提出了一种针对此类地层的机械开挖与爆破联合施工技术。此方案采取台阶式开挖策略,上导洞采用机械掘进以减少对软弱地层的扰动,下导洞则利用钻爆法高效攻克硬岩难题。机械开挖与爆破施工的协同作业模式如图 2 所示。

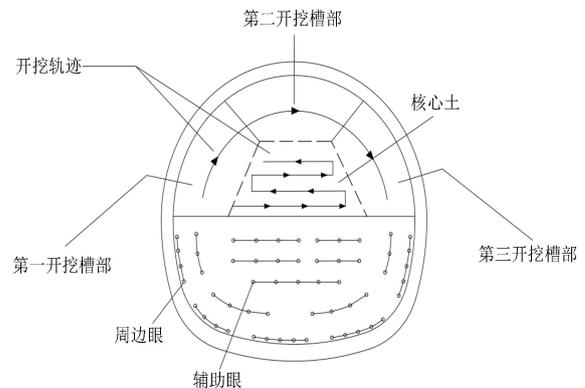
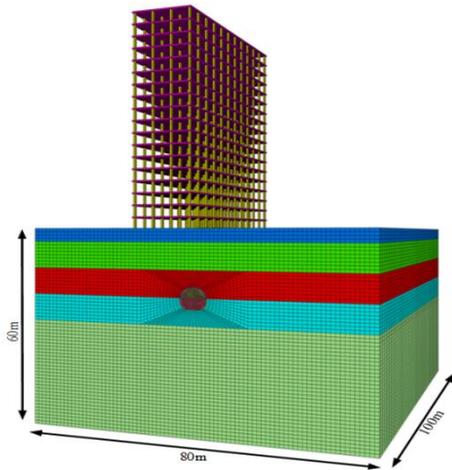


图2 机械开挖联合爆破施工工法示意图

## 3 模型建立及参数选取

选用有限差分软件进行模型的建立及施工过程分析,所

建模模型如图 3 所示。在模型边界条件设定上, 静力计算阶段, 四周边界应用法向约束以模拟周围土体的约束作用, 底部则施加完全固定约束, 顶部设定为自由边界以反映无约束状态。而在动力计算过程中, 则采用粘性边界条件以有效吸收边界处的波动能量, 确保计算结果的准确性。研究方法融合了静力分析与动力模拟的优势, 首先在隧道开挖完成状态下, 于开挖面位置施加经过等效处理的爆破荷载, 以模拟实际爆破过程。选取施工场地内具有代表性的地质断面, 地层模拟采用 Mohr-Coulumb 弹塑性本构, 建筑物、基础和衬砌采用线弹性本构, 具体参数如表 1 所示。



(b) 建筑物与隧道位置示意图

图 3 三维数值模型

表 1 地层及建筑物参数

围岩	E/MPa	$\mu$	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/MPa	$\phi / (^\circ)$
素填土	6	0.40	17.0	0.01	15
粉质黏土	15	0.37	19.0	0.02	18
强风化花岗岩	65	0.37	20.1	0.08	23
中风化花岗岩	8500	0.27	25.5	1.20	42

4 模拟结果分析

4.1 隧道全断面爆破方案高层建筑物振速分析

首先, 对全断面爆破方案下不同建筑物楼层的振动速度进行分析并绘制成图, 图 5 直观地展示了振动速度在垂直方向上的变化特征, 具体表现为随楼层升高先经历衰减阶段后转入放大阶段。依据图 4 中的振动速度分布曲线, 可明确界定第 7 层为振动行为转变的关键楼层: 1 至 7 层构成振动速度衰减区域, 而 7 至 18 层则呈现为振动速度放大区域。

此现象揭示了高层建筑在爆破振动作用下的复杂响应机制, 即振动效应可细分为衰减与放大两个连续过程。在 1 至 7 层范围内, 由于高程放大效应尚未显现, 振动速度的峰值

随起爆距离的增加而遵循传统的地震波衰减规律, 具体表现为峰值衰减率达 42.3%, 这与爆破地震波强度随爆心距增加而减弱的普遍规律相吻合。此衰减阶段的出现, 主要归因于振动波在传播过程中, 从较小截面的柱段传递至较大截面的楼板段时, 发生的波能反射与耗散, 导致振动速度的有效降低。

然而, 当楼层进入 7 至 18 层的放大区域时, 振动速度非但不减反增。这一现象的根源在于高层建筑的顶层约束条件相对宽松, 与底部受较强约束的楼层相比, 振动能量在此处更易积聚并放大。随着楼层的持续升高, 原本由距离增加导致的振动衰减趋势逐渐被楼层间的放大效应所超越, 最终使得高程放大效应成为主导因素。因此, 在涉及穿越高层建筑的隧道爆破施工中, 必须充分重视并合理评估高程放大效应对结构安全性的影响。

基于上述对建筑物振动速度的专业分析, 可明确在全断面爆破方案实施下, 建筑物的 18 层处观测到了峰值振动速度达 1.627cm/s, 这一数值已超出相关安全规范所设定的阈值。鉴于此, 为确保施工安全与建筑结构的完整性, 亟需对现有的爆破方案进行优化调整, 以有效降低爆破振动对周边环境的不利影响。

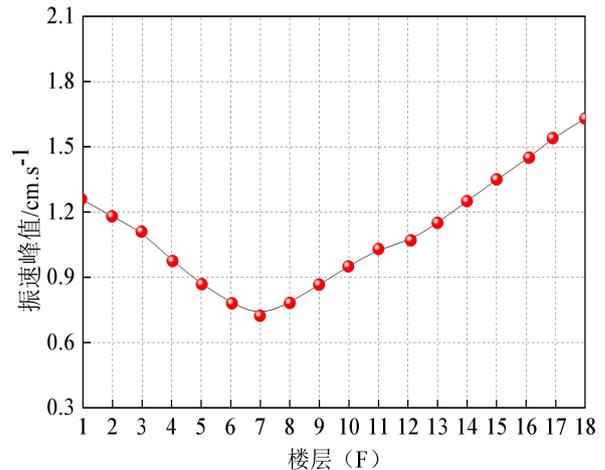


图 4 建筑物不同层高振速

4.2 不同开挖方案下的振速对比

鉴于全断面爆破方案实施过程中, 建筑物振动速度逾越了既定规范阈值, 遂有必要对爆破策略进行优化。本节采用数值模拟技术, 深入对比分析两种施工方案: 其一为传统全断面爆破法, 即在隧道上下断面全面布置炮眼, 执行全段钻爆作业; 其二为机械开挖与爆破结合的新型施工方案, 其中上台阶采用悬臂掘进机先行开挖, 下台阶随后以钻爆法跟进, 两者施工面错开 15m, 形成平行且有序的作业体系。

在模拟过程中,将前一节计算的等效爆破荷载精确施加于隧道开挖边界。对于全断面爆破方案,荷载遍布隧道全轮廓的外法线方向;而对于机械开挖联合爆破方案,则仅集中施加于下断面轮廓的外法线方向,以精准模拟爆破效应。通过对比分析两种方案下各监测点的振动速度,特别聚焦于18层层层(18F)监测点的垂直振动速度,如图5所示,全断面爆破方案的振速峰值高达1.627cm/s,已超出嘉香区间所规定的爆破振动安全阈值;相较之下,机械开挖联合爆破方案的振速峰值仅为0.636cm/s,远低于限值。此对比鲜明地展示了机械开挖联合爆破策略在减振方面的显著优势,各监测点振速峰值平均降低达61.1%。进一步验证,全断面爆破模拟结果显示部分区域振速超限,而优化后的联合施工方案则全面满足建筑物振动控制标准,有力证明了该创新施工工法的科学性与实效性。

此外,深入剖析建筑物在隧道爆破影响下的三向振动特性(径向、切向及垂直向),如图6所示,于18F测点采集的数据显示,垂直方向振动速度显著高于径向与切向,且迎爆侧振动略高于背爆侧,这一发现为精细化爆破振动控制与建筑物防护提供了重要参考依据。

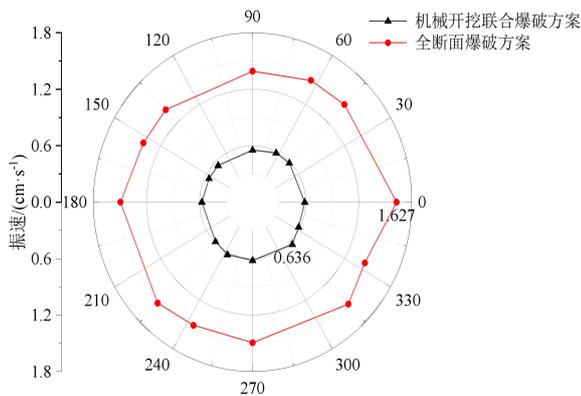


图5 不同爆破方案垂直振速对比

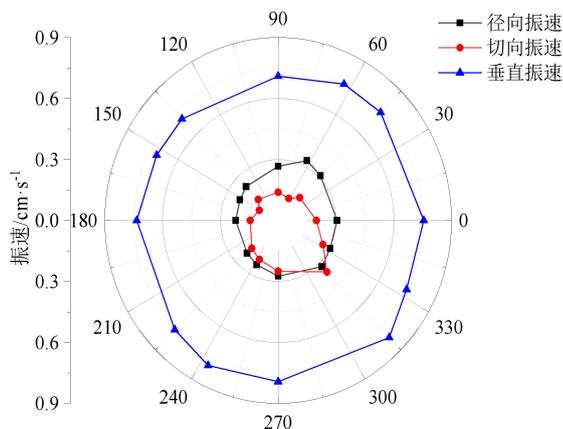


图6 联合爆破方案振速

## 5 结论

本章聚焦于隧道邻近既有建筑物区域所面临的爆破振动超标挑战,创新性地提出了机械开挖与爆破施工相结合的施工法,并依托数值模拟技术对其可行性进行了深入验证。同时,通过细致的施工参数比选分析,得出了以下关键结论:

(1)在隧道爆破作业影响下,所研究的高层建筑物振动速度随楼层变化呈现独特规律,具体表现为1至7层间振动速度递减,此现象归因于爆心距增加导致的振动峰值衰减效应,衰减率高达42.3%;而自7层往上,振动速度则逐渐回升,展现出显著的高程放大效应。

(2)全断面爆破策略实施过程中,测得的振动速度峰值高达1.627cm/s,这一数值明显超越了隧道区间所规定的爆破振动安全标准。相较之下,机械开挖联合爆破方案的实施,则有效将振动速度峰值控制在0.636cm/s,两者对比鲜明,彰显出该联合工法在减振方面的卓越成效,各监测点振动速度峰值平均降幅高达61.1%。

(3)机械开挖联合爆破工法的实施,在上断面开挖阶段即已创造有利的临空面条件,并有效削弱了岩石的夹制效应。在此基础上,炮孔布置得以优化,无需额外设置掏槽孔,依然能够实现理想的爆破效果。此工程实践验证了该工法在提升施工安全性方面的显著优势。

## [参考文献]

- [1]胡平.复杂地质条件下地铁隧道下穿建筑物减振爆破技术[J].工程爆破,2022,28(03):122-128.
- [2]赵广平.下穿城区隧道先下后上法控制爆破快速施工技术[J/OL].隧道建设(中英文),2024,27(04):25-34.
- [2]Song Z, Mao J, Tian X, et al. Optimization Analysis of Controlled Blasting for Passing through Houses at Close Range in Super-Large Section Tunnels[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019: 1941436.
- [3]贾海鹏,刘殿书,方真刚,等.地铁隧道钻爆法施工中敏感区间及安全药量确定[J].北京理工大学学报,2021,41(01):23-29.
- [4]傅鹤林,姜智博,邱琼.浅埋暗挖隧道爆破对敏感建筑物的影响及优化[J].铁道工程学报,2023,40(03):71-78.
- [5]宗琦,吴杨勇,王松青,等.地铁隧道下穿砖混结构建筑物爆破振动控制[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2019,39(03):16-22.