

土压平衡盾构掘进硬岩对周边环境的多种减振措施研究

韩星辰

徐州地铁集团基础设施工程有限公司, 江苏 徐州 221700

[摘要] 为解决盾构施工时对附近村庄产生的振动影响, 对振动的产生原理、传播特性、影响因素等方面进行分析后得出了三种有效的减振措施: (1) 盾构掘进参数调整; (2) 膨润土混合注浆; (3) 减振孔布设。首先单独测试了每种措施对地面的减振效果, 随后再将三种减振措施综合运用用于盾构施工中, 分析不同措施的减振效果。工程实测数据表明, 在单独测试中打设减振孔的减振效果最好, 并且通过施加多种减振措施后, 地面的振动速度整体减小了 60%, 显著降低了地面居民和建筑的影响。研究对其他工程中的减振措施具有一定的参考价值。

[关键词] 减振措施; 工程实测; 膨润土; 减振孔

DOI: 10.33142/ec.v7i9.13373

中图分类号: U492

文献标识码: A

Research on Various Vibration Reduction Measures for Hard Rock Excavation by Earth Pressure Balance Shield Tunneling in the Surrounding Environment

HAN Xingchen

Xuzhou Metro Group Infrastructure Engineering Co., Ltd., Xuzhou, Jiangsu, 221700, China

Abstract: In order to solve the vibration impact on nearby villages during shield tunneling construction, three effective vibration reduction measures were analyzed from the aspects of vibration generation principle, propagation characteristics, and influencing factors: (1) Shield tunneling parameter adjustment; (2) Bentonite mixed grouting; (3) Layout of vibration reduction holes. Firstly, the vibration reduction effect of each measure on the ground was tested separately, and then the three vibration reduction measures were comprehensively applied in shield tunneling construction to analyze the vibration reduction effect of different measures. Engineering test data shows that the vibration reduction effect of drilling vibration reduction holes is the best in individual testing, and after applying various vibration reduction measures, the overall vibration velocity of the ground is reduced by 60%, significantly reducing the impact on ground residents and buildings. The research has certain reference value for vibration reduction measures in other engineering projects.

Keywords: vibration reduction measures; engineering measurement; bentonite; vibration reduction hole

引言

随着我国经济发展, 地下铁路的建设成为缓解现今大都市用地紧张和交通拥挤的有效措施。盾构作为一种先进的地下隧道施工技术, 广泛应用于城市轨道交通建设。盾构施工具有高效快速、适用于各种地质条件和对地面交通干扰小等优点。但是盾构地铁施工会产生振动和噪音, 影响周边居民的生活并且对周边的建筑造成一定的危害。

盾构施工的振动主要由盾构机刀盘切割岩层造成并通过介质向周围传播, 引起地面建筑物产生二次振动, 同时伴随着噪声问题, 严重时会造成建筑物结构产生裂纹等危害^[1]。目前的研究主要在施工完成的线路运行阶段长期交通振动对建筑物的影响, 而关于盾构施工振动对邻近建筑物影响的研究内容存在空缺^[2-3]。而减振的分析主要是从现场监测以及数值模拟 2 部分开展的^[4-6]。随着盾构法在城市隧道修建中日渐频繁, 盾构施工阶段振动的产生机制、影响以及减振措施早已备受关注。

本文基于某城市地铁某标段的施工, 对盾构施工中产生的振动进行了减振措施的实践。通过对振动的产生原理、传播特性以及影响因素等分析, 提出了三种有效且简单的

减振措施: (1) 调整盾构掘进参数; (2) 膨润土混合注浆; (3) 打设减振孔。同时施加此三种措施可以有效减少地面 60% 的振动速度, 保证周围居民的生活和建筑的安全。具有重要的工程意义和参考价值。

1 工程概况

1.1 线路简介

本区间, 全长 2985.69m, 区间包含一个明挖中间风井, 如图 1 所示。

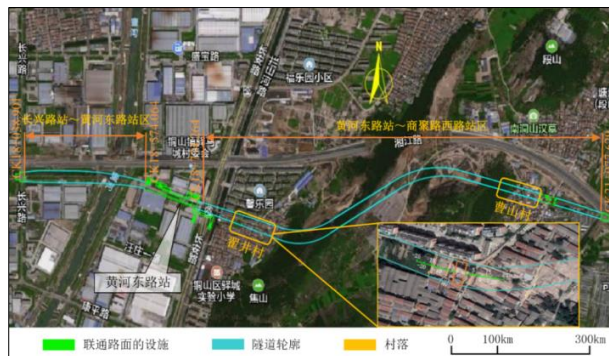


图 1 工程总体走向示意图

1.2 地质情况

减振措施的应用主要集中在村庄,位于区间西侧(见图1)。图2为区间的地质剖面图。根据盾构隧道地质勘察报告,隧道范围存在明显的上软下硬地层分布。村庄范围内的主要地层 2-3-4 层黏土、11-2-3 中风化灰岩、12-1-3 中风化灰岩,区间隧道主要处 11-2-3 中风化灰岩。

盾构隧道范围内的地层主要包括 2 类: 5-3a-4b 含砂浆黏土层,其厚度位于 0.3~8.2m,抗压强度为 9 kPa; 11-2-3 中风化石灰岩,其厚度处于 1.3~18.9m,盾构全程下穿全断面中风化石灰岩,天然抗压强度值不小于 124MPa,岩体较为完整,质量等级为 V 级,属于硬质岩石。盾构机设定的推进速度为 1.3cm/min,即 0.78m/h。

2 振速测定及影响性分析

左线盾构于 2022 年 3 月 20 日正式始发,2022 年 4 月 22 日掘进至村庄。盾构机掘进导致村民屋内地面及房屋振动明显,噪音也使得居民无法正常生活。接到反馈后,项目部第一时间与村委会及村民对接,并对盾构机掘进范围地面及建筑物振动情况进行测定,现场照片如图 2。



图2 村庄建筑状况及振速监测

本次监测位置在刀盘位置上方、刀盘前 5m 及刀盘前 10m 建筑物内地面或水泥路面,采集数值 6 次,每次采集时段为 1s,采集数据汇总如图 3 所示。刀盘里程平行方向(X 轴方向)振动峰值为 2.6mm/s,位于刀盘正上方;刀盘里程垂直方向(Y 轴方向)振动峰值为 3.9mm/s,位于刀盘正上方;竖直方向(Z 轴方向)振动峰值为 2.4mm/s,位于刀盘正上方。

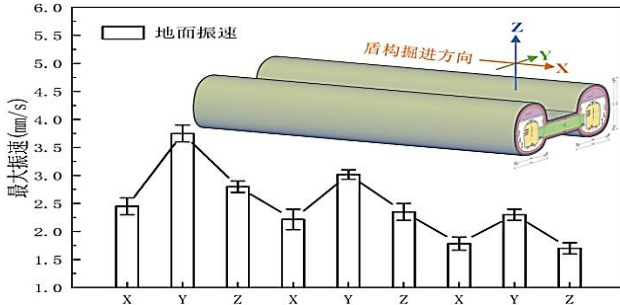


图3 区间左线盾构常规掘进振动数据

依据《建筑工程容许振动标准》(GB 50868—2013)中建筑施工振动相关规定,对于未达到国家现行抗震设防标准的城市旧房和镇(乡)村未经正规设计自行建造的房屋,宜按表 2 中居住建筑的 70%确定^[7]。根

据本次振动主频,选择 50Hz 一栏标准,则规范容许值为 4.2mm/s。

表1 打桩、振冲等基础施工对建筑结构影响在时域范围内的容许振值

建筑物类型	顶层楼面处容许振动速度峰值(mm/s)	基础容许振动速度峰值(mm/s)		
	1Hz~100Hz	1Hz~10Hz	50Hz	100Hz
工业建筑、公共建筑	12.0	6.0	12.0	15.0
居住建筑	6.0	3.0	6.0	8.0
对振动敏感、具有保护价值、不能划归上述两类的建筑	3.0	1.5	3.0	4.0

注:表中容许振值按频率线性差值确定

因此现场实际测得所有数据均未超限。经现场踏勘发现,部分房屋存在裂缝、违规搭设悬挑建筑等情况,盾构机在全断面岩层掘进对以上几类房屋的实际影响暂无法判定。因此为了保证周边居民的安全和正常生产生活,需要对区间西口的村庄进行减振处理。

3 减振优化措施及应用分析

不同于隧道运营阶段(振动主要是由于运行车辆产生的),盾构施工产生的振动主要包括:(1)盾构掘进施工时刀具切削岩层产生振动;(2)盾构掘进岩层产生的机械振;(3)施工配套车辆运行产生的振动。振动通过地下介质向周围传播至地面,振动传播路径如图 4 所示。振动的强烈程度随着盾构机掘进岩层开挖面覆土地层加权动弹性模量的增大而增大,且地层条件的影响相对较大^[8]。土体模量是影响地层振动频率的重要因素,同时,盾构施工过程中要注意激振频率,避免共振情况的发生。

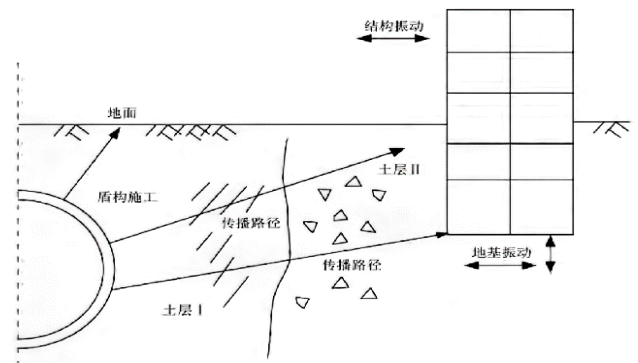


图4 地铁盾构施工振动传播路径^[9]

目前的工程减振思路主要分为三种:(1)振源控制,比如优化掘进参数、改进盾构刀具结构或安装隔振器;(2)振动传播途径控制,比如挖减振沟和设置波阻块;(3)受振对象保护,比如修缮和加固。工程实际不同于研究,无法定量控制,为了追求工程实际的合理性往往需要采用多种不同的措施。为尽量减少盾构机掘进对村庄居民及房屋的影响,通过衡量工法和成本等因素最终决定同时施加三

种减振措施,并研究每一种措施的单独减振效果和总体减振效果。

3.1 盾构掘进参数的优化

刀盘作为盾构机最重要的部件,与岩层直接接触,是产生振动的直接来源。在复合地层的掘进中,刀盘扭矩、刀盘转速、推进速度和总推力这4个关键的掘进参数与振动的产生最为密切^[10],应合理控制这些参数以提高掘进过程的平稳性,减少对地层的扰动^[11-12]。村庄区间的掘进参数统计如表2所示。

表2 盾构区间初始掘进参数统计

掘进参数	最大值	最小值	平均数	中位数	标准差	方差
刀盘扭矩 kN·m	2500	1400	2052.63	2075	176.41	31116
刀盘转速 r/min	1.90	1.30	1.67	1.70	0.09	0.01
推进速度 mm/min	12	5	10.34	10	0.99	0.97
总推力 t	1400	890	1148.55	1150	96.70	9351.21

从表2中可看出,刀盘扭矩和总推力都有较大波动。该区间的地层特性为上软下硬,隧道底部有中风化石灰岩突起,刀盘扭矩增大,刀盘转速减小,导致推进速度较慢。因此,为了保证一定的推进速度,控制刀盘转速进一步减小是减振的首选。

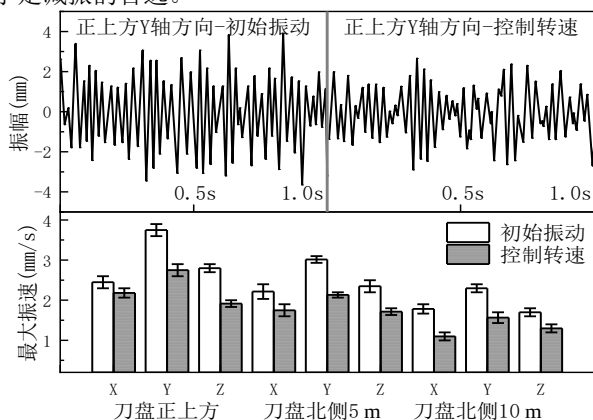


图3 降低刀盘转速地面振动情况前后对比

在保持掘进速度不变的情况下,刀盘转速由1.7r/min左右下调至1.2r/min左右,现场测定地面振速。同样在刀盘位置上方、刀盘前5m及刀盘前10m处采集数值6次,每次采集时段为1s,与原始振速形成对照。如图5所示,降低盾构机刀盘转速后,在刀盘里程平行方向振动峰值为2.3mm/s,位于刀盘正上方;刀盘里程垂直方向振动峰值为2.9mm/s,位于刀盘正上方;竖直方向振动峰值为2.0mm/s,位于刀盘正上方;整体上振速减少了26.6%,达到了一定的减振效果。

3.2 膨润土混合注浆

以蒙脱石为主要成分的高压实膨润土由于具有高膨

胀性、强吸附性、低渗透性以及自愈合性^[13]。膨润土和泡沫剂一样都是常用的渣土改造材料,但因其遇水膨胀的物理特性和行为能够吸收和分散振动能量,可以减弱刀盘与岩层碰撞所产生的振动。膨润土混合注浆技术已被熟练运用于多种地质条件下,如砂砾层、卵石层、砂层和风化岩层等^[14]。该区间的地层特性为上软下硬,上层土层含水率较高,而下层的岩石主要为中风化的灰岩和白云岩(见表1)。因此非常适合通过膨润土混合注浆来改良。

减振用纳基膨润土来自山东潍坊,基本性质如表4所示。而膨润土泥浆掺入比、浓度和盾构推进速度均会影响刀盘前方渣土的塌落度、抗剪强度和渗透系数。关于盾构施工中膨润土参数的大量研究表明^[14-17],为了保证良好的膨润土改良效果,盾构机推进速度不宜过快。因此,根据盾构机的推进速度约为10mm/min,确定膨润土泥浆浓度为7.8%,膨润土泥浆掺入比为23.7%。

表4 膨润土基本性质表

吸蓝量 /(g·100g ⁻¹)	胶质价 /(mL·15g ⁻¹)	膨胀倍数 /(mL·g ⁻¹)	pH值	细度 (200目)
30	400	20	8.5~9.5	95

在注入膨润土后,立即对地面正上方、刀盘前5m以及10m的位置进行了振速的检测。结果显示,通过膨润土的改良后(未降低刀盘转速的对比测试)平均振速峰值降低了26.5%。图6是膨润土注浆前后地面振动情况的对比。

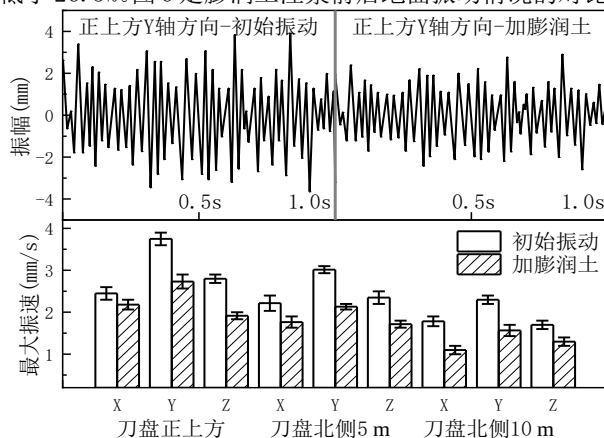


图6 注入膨润土地面振动情况前后对比

3.3 振动传播控制

土体是施工振动传播的直接媒介。切断振动传播途径也可以有效地减小振动对邻近建筑物的影响。空沟和填充式沟渠的隔振沟的效果主要取决于沟深与表面波的波长之比。而波阻块(WIB)主要针对列车运行产生的低频振动(0.5~10Hz)^[18]。而盾构施工振动属于中频范围(30~60Hz)。减振孔技术已被广泛运用于钻爆开挖的减振中^[19-21],对爆破所产生的不同频率的三种波(冲击波,应力波,地震波)都有较好的削减效果。因此选用泛用性较大的减振孔技术,在线路两侧分别打设一排减振孔。减振

孔对体波的削弱原理是通过减振管阻隔和吸收体波的能量,穿过减振管的波能量越大衰减作用明显,如图7所示。

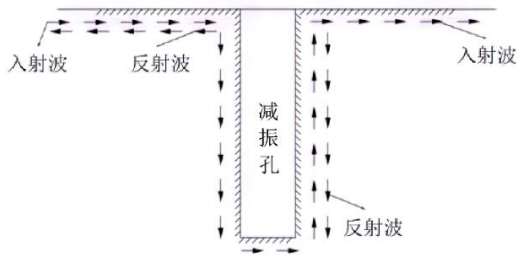


图7 减振孔的减振原理^[22]

通过相关的研究可以确定最佳的减振孔参数^[23-24],如表1所示。左右线中心距离为14m,隧道截面可看作直径为6.4m的圆形,盾构隧道深10~19m,消振孔布置在隧道两侧3m的距离。

表5 村庄消振孔统计表

部位	数量(个)	孔径(mm)	孔深(m)
左线 193环~400环	828	80	20~25
右线 153环~400环	988	80	20~25
合计	1816		

打设全部的减振孔共耗时半个月。随后立刻对刀盘正上方地面以及5m和10m位置处进行了振速的检测。减振效果显著,通过单独打设减振孔后,各方向的整体平均振速峰值降低了38.4%,如图8所示。

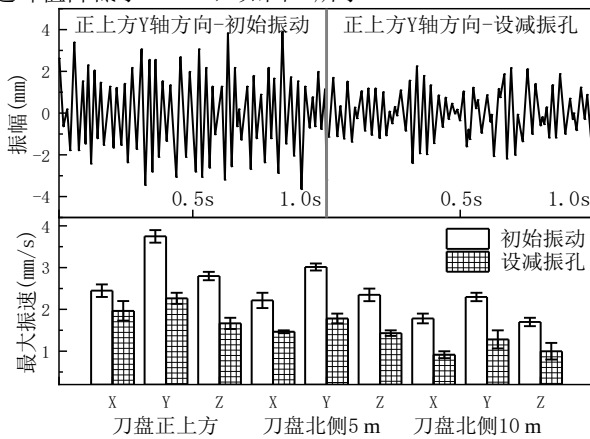


图8 打设减振孔后的减振效果对比

4 结果分析

第3章的数据表明,控制刀盘转速、膨润土混合注浆及打设减振孔这三种方法对地面的振动速度均有一定的减振效果。其中减振孔的减振效果最好,刀盘减速和注入膨润土的减振效果几乎相近。图12显示了同时运用上述三种减振措施后盾构地面上方三个位置的综合减振效果。可以看出垂直方向(Y方向)和竖直方向(Z方向)的减振效果最明显,平行方向(X方向)的减振效果随着远离中心线的距离而逐渐增加。刀盘正上方XYZ方向振速的平

均峰值分别为1.37mm/s、1.78mm/s和1.17mm/s,距离中心线10m的位置便衰减到了0.88mm/s、0.37mm/s和0.73mm/s。通过平均值计算可得,最后的综合减振效果达到了59.8%。

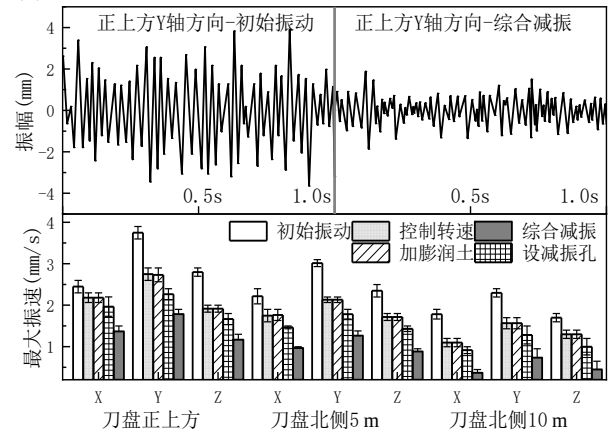


图9 综合减振效果对比

图10是各措施振动速度峰值的比较,可以看出垂直方向(Y方向)上的振速是最大的,而刀盘正上方平行方向(X方向)上的减振效果是最不明显的。值得注意的是,虽然三种减振措施在单独施加时都很难对刀盘正上方X方向的减速有明显的改善,但是当三种方法同时施加时,刀盘正上方X方向的最大振速却从2.6mm/s下降到了1.5mm/s。Y方向和Z方向上的最大振速也下降到了1.9mm/s和1.3mm/s,该振速下将不会再对盾构途径的村庄居民和房屋造成干扰。证明同时施加多种减振措施比单独加大某一种减振措施的投入要有更显著的效果和收益。

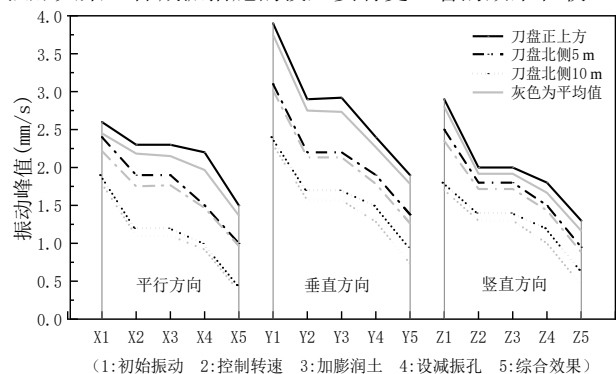


图10 各措施振动速度峰值比较

5 结语

本篇论文结合盾构施工过程中的振动发生原理、传播特性以及主要影响因素为徐州市城市轨道交通6号线一期工程SGTJ6103标段所遇到的振动扰民问题针对性地提出了三个有效的措施并已经受住了实践的检验。为盾构施工中的减振问题提供了新的解决思路,具有一定的工程价值。此次研究的结论主要分为以下三点:

(1) 在盾构参数优化、膨润土混合注浆和打设减振

孔这三种减振措施的横向对比中,打设减振孔的减振效果最好,达到了约40%。而膨润土改良和降低刀盘转速的效果相近。

(2) 现场实测数据证明,多种减振措施同时施加要比单独加大某一种减振措施的效果要更好,收益也会更高。

(3) 通过同时施加三种减振措施,刀盘正上方三个方向的平均振速从2.45mm/s(X方向)、3.75mm/s(Y方向)、2.8mm/s(Z方向)下降到了1.37mm/s、1.78mm/s、1.17mm/s。整体的减振效果接近60%。

[参考文献]

- [1]徐日庆,郭忠,丁盼,等.盾构施工振动对邻近建筑物影响与控制方法研究综述[J].隧道建设(中英文),2021,41(2):14-21.
- [2]官寅.城市轨道交通盾构隧道内3种典型减振轨道性能比较[J].铁道勘察,2023,49(2):131-136.
- [3]韩艺翬.城市轨道交通不同减振措施减振效果研究[D].浙江:西南交通大学,2018.
- [4]满石贤.临近古建筑的盾构隧道基岩爆破减振技术研究[D].北京:中国矿业大学,2021.
- [5]杨浩磊.强风化花岗岩地层土压盾构膨润土改良试验研究[J].低温建筑技术,2020,42(8):103-105.
- [6]李宏飞.膨润土泥浆改良土压盾构粉细砂渣土流动性

- 机制分析[J].隧道建设(中英文),2022,42(2):253-259.
- [7]段宝福,张正欣,张春武,等.减振孔参数降振作用的灰色关联度分析[J].金属矿山,2022(7):97-104.
- [8]王鑫,韩煜,周宏磊,等.盾构施工引起环境振动的实用计算方法[J].土木工程学报,2015,48(1):222-227.
- [9]戴亚军,刘婷.地铁盾构下穿振动超敏感建筑物保护措施研究[J].黑龙江交通科技,2019,42(10):139-142.
- [10]龚姝华.地铁盾构掘进参数与地层适应性分析研究[D].上海:上海应用技术大学,2020.
- [11]黄卫,汪志刚.盾构机穿越花岗岩球状风化体时掘进参数的控制分析[J].安徽建筑工业学院学报(自然科学版),2012,20(2):31-34.
- [12]陈龙.盾构刀盘与岩土交互作用规律研究[D].大连:大连交通大学,2015.
- [13]李裕诚,陈永贵,刘丽,等.高压实膨润土多尺度膨胀力特性研究进展[J].岩土工程学报,2020(32):76.
- [14]郑文富.减振孔参数对降振效率影响研究[D].湖南:湖南科技大学,2016.
- [15]丁恒军.地铁车站采用减振孔降低爆破振动速度的应用与研究[J].工程建设与设计,2019(24):61-66.
- 作者简介:韩星辰(1989.5—),男,民族:汉族,籍贯:江苏徐州市人,学历:大学本科。