

DOI: 10.7672/sgjs2025240028

# 盾构施工产生的振动诱发邻近建筑物 振动响应研究\*

孟祥名

(中铁十八局集团第三工程有限公司,河北 涿州 072750)

[摘要] 盾构隧道施工极易诱发邻近建筑物桩基振动。为探明盾构施工过程中产生的振动在传播过程中诱发建筑物振动响应规律,依托南昌轨道交通 4 号线盾构隧道工程,基于现场振动监测及 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟进行振动研究。结果表明,实测数据显示,第 1 节衬砌管片及建筑物地面处盾构机掘进方向振动速度数值最大;数值模拟揭示楼板振动随楼层升高呈逐层放大趋势,放大系数由 1.00 增至 3.01,体现出建筑物对振动的楼层放大效应;盾构施工产生的低频振动其频率主要集中于 5Hz 以下,且在同一桩基不同监测点具有同步响应特性,桩顶至桩底趋于共振。

[关键词] 隧道;盾构;数值模拟;传播规律;振动响应;施工技术

[中图分类号] U455.43

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)24-0028-06

## Vibration Response of Adjacent Buildings Induced by Vibration Caused in Shield Construction

MENG Xiangming

(The Third Engineering Co., Ltd. of China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

**Abstract:** Shield tunneling readily induces vibration in the pile foundations of adjacent buildings. To elucidate the response characteristics of buildings induced by vibration caused in shield tunneling and their propagation mechanisms, this paper investigated the problem through field vibration monitoring and numerical simulation by FLAC<sup>3D</sup> based on the shield tunnel project of Nanchang Metro Line 4. The results indicate: Measured data show that the vibration velocity in the shield machine's direction of advance is largest at the first segmental lining ring and at the ground surface of adjacent buildings; The numerical simulation reveals that the floor vibration is amplified layer by layer with the increase of floor height, and the amplification coefficient increases from 1.00 to 3.01, which reflects the floor amplification effect of the building on the vibration; Vibration caused in shield construction is predominantly low-frequency, mainly concentrated below 5Hz, and monitoring points at different depths within the same pile foundation exhibit synchronous response characteristics, with the pile from head to toe tending toward resonance.

**Keywords:** tunnels; shields; simulation; propagation law; vibration response; construction

### 0 引言

地铁穿行的区域大多为建筑物密集的繁华地带,地下空间桩基及管线密集<sup>[1-3]</sup>。盾构施工振动诱发周边环境的二次振动及噪声,会对住宅区居民的正常生活造成干扰,对振动尤为敏感的存放有精密仪器的研究院、医院等单位以及年久失修的密集住宅老旧小区,振动甚至可能会导致结构损坏乃至

破坏,带来严重危害<sup>[4-6]</sup>。

目前对盾构施工诱发环境振动响应研究较多采用现场实测数据<sup>[7-8]</sup>和数值模拟<sup>[9]</sup>方法,在现场实测分析方面,大量研究<sup>[10-11]</sup>表明,盾构施工时采集目标处的振动会对周边环境产生影响,如陶连金等<sup>[10]</sup>对兰州地铁 1 号线进行实测,认为  $x, y, z$  3 个方向的振动都不可忽视,因此在进行环境振动评价时需考虑 3 个方向;王鑫等<sup>[11]</sup>选取典型断面的典型建筑物,对其竖向及垂直于隧道方向、沿隧道方向 2 个水平方向的振动进行测量,研究结果表明,对建

\* 中铁十八局集团有限公司 2024 年度科研创新项目(2024-031)

[作者简介] 孟祥名,工程师,硕士,E-mail:3423390300@qq.com

[收稿日期] 2025-05-26

筑物振动响应进行监测时,在考虑竖向振动的同时应注意水平振动的影响。

在数值模拟方面,王菁悦等<sup>[12]</sup>通过建立二维数值模型对盾构施工诱发的振动进行动力响应分析,在振动输入时仅仅考虑振动波的单向垂直传入。孙曦<sup>[13]</sup>建立二维有限元平面模型,计算地铁盾构施工引起的土层场地地面振动,但其动力学分析仅仅建立了二维模型,只考虑了 1 个方向的振动输入。建立二维数值模型虽在一定程度上有助于提升模型的计算效率,但同时也削弱了模拟结果的真实性。为了全面分析 3 个方向振动波对振动响应的影响,本文结合南昌轨道交通 4 号线土建三标区间施工案例,对盾构施工过程中振动信号进行了现场实测,利用 FLAC<sup>3D</sup> 软件建立数值模型,结合现场实测数据对盾构施工产生的振动在传播过程中诱发邻近建筑物振动响应规律进行研究。

1 工程概况

南昌轨道交通 4 号线土建三标区间线路长度约 4.765km,包括 4 站、3 区间,沿着开挖线路前进,路线周边建筑物与地下管线密集。本文的研究区段为上沙沟站一起风路站盾构隧道区间,盾构区间正穿民房住宅,该建筑为 1982 年建成的老旧建筑,公共区域楼梯区域常见细小裂缝,上部为 6 层砖混结构,采用桩基础,桩基长度为 9~10m,桩径为 0.377m。

研究区段线路埋深为 9.9~17.5m,穿越民房住宅时,线路埋深约为 13m。隧道掘进线路上部为砾砂层,下部为中风化、强风化泥质粉砂岩层,属于上软下硬地层。该区间为单圆隧道,开挖直径为 6.44m,管片宽度为 1.2m,每环 1.5m,管片外径为 6.2m、内径为 5.5m,研究区段工程概况如图 1a 所示,民房住宅与隧道垂直位置关系如图 1b 所示。

2 地层盾构掘进振动源现场测试

2.1 振动源振动测试

为了研究盾构掘进过程中振动源引起环境的振动响应,本文选择研究区段施工时产生的振动进行现场监测,将第 1 组传感器(监测点 1)安装在第 1 节衬砌管片处,测得最接近开挖面位置附近的振动响应;第 2 组传感器(监测点 2)布置于研究建筑物第 1 层楼板上,利用振动传感器测得建筑物内部振动信号,用于后续的数值模型有效性验证。监测点 1、2 现场布置如图 2 所示。

2.2 现场监测结果

监测点 1 现场采集的第 1 节衬砌管片处振动波速度时程曲线如图 3 所示,监测点 2 现场采集的建

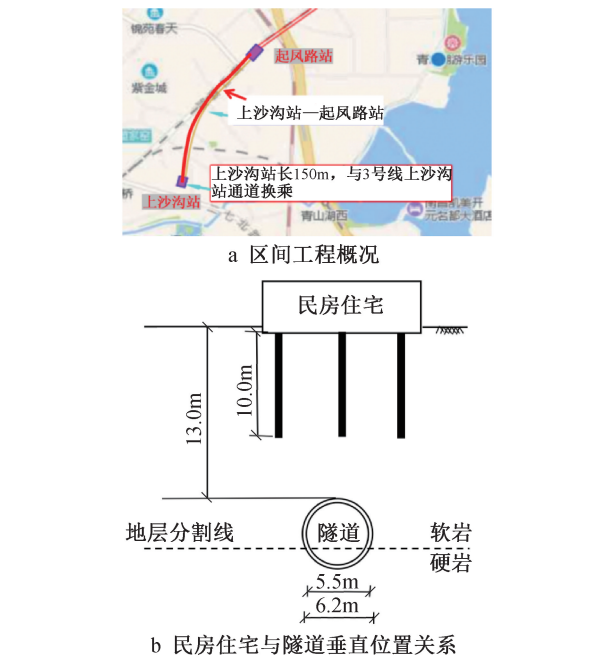


图 1 研究区段工程概况及民居住宅与隧道垂直位置关系

Fig. 1 Engineering overview of the study section and the relationship between the vertical position of residential house and tunnel

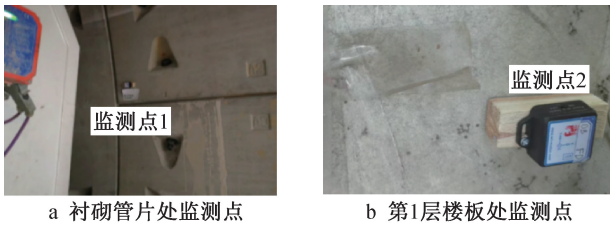


图 2 现场监测点布置

Fig. 2 Layout of on-site monitoring points

筑物地面处振动波速度时程曲线如图 4 所示。其中,  $x$  向为盾构机掘进的方向,  $y$  向为垂直于盾构机掘进方向,  $z$  向为重力方向。分析图 3a 可知,刀盘掘进时,第 1 节衬砌管片处测点  $x, y, z$  向最大振动速度幅值分别为 5.5, 4.5, 4.1 mm/s, 建筑物地面附近测点  $x, y, z$  向最大振动速度幅值分别为 1.50, 1.05, 0.91 mm/s, 结果表明,盾构施工产生的振动对  $x$  向即盾构机掘进方向的影响较大。

3 隧道施工数值模型及验证

3.1 计算模型建立及监测点布置

以南昌轨道交通 4 号线土建三标区间盾构隧道工程为背景,根据建筑物和隧道的相对位置关系,针对盾构施工产生的振动诱发邻近建筑物桩基振动响应研究开展数值模拟分析,建立如图 5 所示计算模型。

依托现场工程概况,考虑到模型的边界效应,

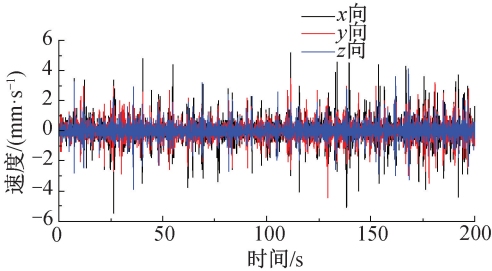


图 3 第 1 节衬砌管片处振动波速度时程曲线  
Fig. 3 Time-history curves of the vibration wave velocity at the lining segment of the first section

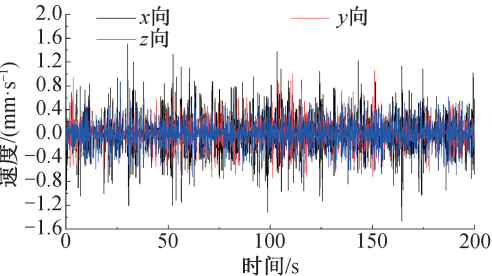


图 4 建筑物地面处振动波速度时程曲线  
Fig. 4 Time-history curves of the vibration wave velocity at the building ground surface

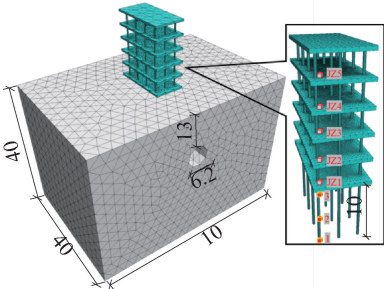


图 5 数值模拟计算模型及监测点布置(单位:m)  
Fig. 5 Numerical simulation model and layout of monitoring points (unit:m)

本文建立 1 个长 60m、高 40m、厚 40m 的三维数值模型,建筑物和隧道两侧均有盈余。隧道埋深 13.0m,根据建筑物主要情况调查结果,建筑物设置 56 根桩,桩长 10.0m,桩径 0.377m,隧道直径 6.2m,管片厚均为 0.35m,隧道内径 5.5m,网格划分时对隧道开挖部分、衬砌及桩基处均进行加密。模型四周及底部均为固定约束。桩与土层的接触关系采用库仑剪切模型模拟,桩及桩周土间设置接触面,实现桩土间的挤压与滑移。数值模型采用 Rayleigh 定义的黏性比例阻尼 ( $C=\alpha M+\beta K$ ),为了避免边界效应对模型计算结果产生影响,将模型四周及底部设置为安静边界条件。

依托现场地层工况,模型地层设置为 2 层,上层设置为砾砂层,下层设置为泥质粉砂岩层。衬砌管片为 C50 混凝土,建筑物、桩基均为混凝土结构,其

中桩基为 C40 混凝土,上部建筑物为 C30 混凝土,根据设计文件及勘测资料确定地层与其他参数取值,如表 1,2 所示。

表 1 模型土层参数设置						
Table 1 Soil layer parameters setting for the model						
土层名称	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )
砾砂层	2 700	15	0.35	5	3.0	46
泥质粉砂岩层	2 600	8	0.33	3	3.5	38

表 2 模型结构参数设置					
Table 2 Structure parameters setting for the model					
结构名称	材料	本构模型	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
管片	C50	弹性模型	$2.08\times 10^4$	$1.26\times 10^4$	2 400
建筑物	C30	弹性模型	$1.51\times 10^4$	$1.30\times 10^4$	2 500
桩基	C40	弹性模型	$1.64\times 10^4$	$1.39\times 10^4$	2 500

在数值模拟过程中,当第 1 节衬砌位于建筑物底部中心的桩基下方时,将第 1 节衬砌处现场监测的振动波输入到已支护完成的第 1 节衬砌上。在图 5 中,监测点 JZ1 布置在建筑物第 1 层地面上,用于模型有效性验证。监测点 1~3 用于研究同一根桩基不同位置处振动响应情况;监测点 JZ1,JZ2,JZ3,JZ4 用于研究建筑物的不同楼层振动响应情况,以便更好地研究建筑物内部的振动响应规律。

3.2 模型有效性验证

3.2.1 现场监测振动波输入

在数值模型中将监测点 1 现场采集的  $x,y,z$  3 个方向的现场监测振动信号同时施加在第 1 节衬砌上开展数值模拟分析,得到第 1 节衬砌上方建筑第 1 层地面振动的模拟振动信号,将监测点 2 现场采集的振动信号进行对比,从而进行模型有效性验证,参考实际工况,现场采集的振动信号取 12s 输入到数值模型中,数值模型中输入的现场监测振动波速度时程曲线如图 6 所示。

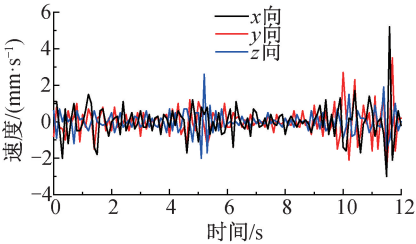


图 6 模型中输入的现场监测振动波速度时程曲线  
Fig. 6 The field monitoring vibration wave velocity time-history curves input in the model

3.2.2 模拟有效性验证

模型输入了从现场采集的  $x,y,z$  3 个方向的振

动监测信号,现场监测结果显示,盾构施工过程中产生的振动对  $x$  向的影响最大,同时考虑到文章篇幅限制,在数值模型有效性验证过程中仅列出  $x$  向验证结果。数值模型有效性验证结果如图 7 所示。模型有效性验证结果表明,数值模拟振动时程曲线与现场监测的地表振动时程曲线基本一致,现场监测振动时程曲线最大幅值为  $0.39\text{mm/s}$ ,理论模型输出地表振动速度时程曲线的最大值为  $0.37\text{mm/s}$ ,振动速度数值处于同一量级,验证结果表明模拟计算的结果基本可靠。

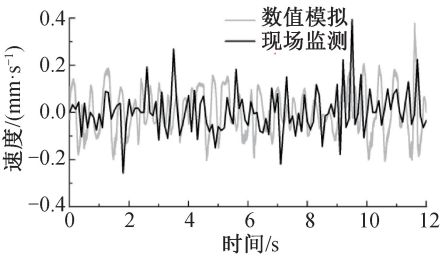


图 7 模型有效性验证  
Fig. 7 Validation of the model

4 模拟计算结果分析

4.1 建筑物内部振动响应情况分析

对建筑物第 1 层楼板上的振动信号进行现场监测发现,盾构隧道施工时对盾构机掘进方向( $x$  向)的影响较大,限于文章篇幅限制,以  $x$  向的振动响应信号为例进行后续分析。监测点 JZ1, JZ2, JZ3, JZ4, JZ5 用于分析建筑物内部不同楼层地面振动响应的差异。建筑物内部楼层板 5 个监测点的速度时程曲线如图 8 所示。

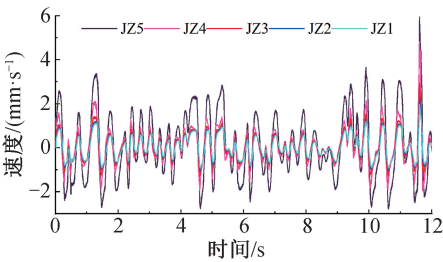


图 8 建筑物内部监测点速度时程曲线  
Fig. 8 Time-history curves of the velocity at monitoring points inside the building

由图 8 可知,在盾构施工所引发的振动作用下,不同楼层的楼板在振动响应的幅值和变化规律上表现出明显的差异性。1~5 层楼板的振动速度波动范围分别为  $-0.92 \sim 1.96$ ,  $-1.03 \sim 2.26$ ,  $-1.26 \sim 2.92$ ,  $-1.88 \sim 4.80$ ,  $-2.85 \sim 5.90\text{mm/s}$ 。可明显观察到,随着楼层高度的逐步升高,楼板的振动波动范围不断扩大,振动速度的响应幅值也呈现出逐层递增趋势。这一现象表明,振动在建筑结构内部存

在一定的放大效应,高层结构比低层结构更易受到振动影响。

这种放大效应主要与建筑结构的动力特性有关。通常情况下,高层结构由于其柔性更大、质量分布不同,易在受到激励时产生较显著的振动响应。此外,建筑物地基对结构振动的约束作用也在不同楼层表现出不同影响。低层楼板由于接近地面,受到地基的刚性约束较强,振动传播受到一定抑制;而高层楼板远离地基,约束减弱,导致其响应更加剧烈。因此,在盾构施工引起的地面振动传递至建筑物内部时,沿高度方向出现由下至上的响应放大效应。

为了对上述楼层板的放大效应进行分析,本文引入放大系数对楼层板的放大效应进行定量分析,将放大系数定义为:

$$\alpha = \frac{V_{\max}}{V_0}$$

(1)

式中: $V_0$  为 1 层地面振动速度峰值; $V_{\max}$  为其余楼层板振动速度峰值。

根据式(1),提取建筑物监测点上 1~4 层楼层板上的速度峰值,并计算出对应的速度放大系数,不同楼层板的放大系数如图 9 所示。

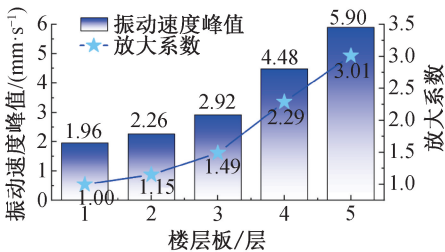


图 9 放大系数  
Fig. 9 Amplification coefficient

由图 9 可知,第 1~4 层楼层板的振动放大系数分别为 1.00, 1.15, 1.49, 2.29,表明盾构施工引发的振动在建筑结构中存在明显的逐层放大效应,且随楼层高度的增加而愈加显著。这种放大趋势可能与楼层刚度差异引起的结构动力特性有关,使得高层结构对振动激励的响应更为敏感。此外,由于建筑结构具有良好的整体性,地面及低层结构所受到的振动可向上传递并产生一定程度的累积,进而导致上部楼层的振动幅值进一步增加。因此,在工程实践中应重点关注上部结构的振动响应特性及其潜在影响。

为了对楼层间的振动响应影响进行评估,避免商业与住宅建筑内人员受建筑内外振动干扰,并控制振动源影响,住房和城乡建设部制定了

GB/T 50355—2018《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》。根据该标准中“昼间二级区域竖向振动加速度级”限值要求,其加速度限值取为 $0.008\text{m/s}^2$ ,振动水平计算公式如下:

$$\text{VAL} = 20\lg a/a_0 \tag{2}$$

式中: $a$  为振动加速度有效值 ( $\text{m/s}^2$ );  $a_0$  为基准加速度值 ( $\text{m/s}^2$ ),取  $1\times 10^{-6}\text{m/s}^2$ 。

根据图 8,将振动速度对时间求一阶导数可得振动加速度。结合式(2)可求得加速度级,不同楼层基础振动水平如表 3 所示。

表 3 不同楼层基础振动水平

Table 3	Vibration levels of foundation in different floors		
楼层板编号	加速度幅值/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	振动水平 VAL/dB	
1	0.012 2	81.727	
2	0.014 0	82.923	
3	0.018 2	85.201	
4	0.029 9	89.513	
5	0.036 7	91.293	

根据《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》中的规定,住宅建筑室内振动的限值标准分为一级和二级区域,昼间的限值分别为一级区域 73dB、二级区域 78dB,夜间为一级区域 70dB、二级区域 75dB。通过计算不同基础的振动加速度级,得出建筑物内部楼层板的振动水平分别为 81.727, 82.923, 85.201, 89.513, 91.293dB。经现场调查得知,盾构施工时上方现场人员均能感受到较明显的振感,距离较近的居民也有反映。由此可知,如在建筑正下方进行盾构施工,产生的最大振动加速度均有可能超过住宅建筑室内振动水平限值(78dB),对建筑内人员产生一定干扰。因此,由于盾构施工振动对周边建筑物及桩基存在影响,施工单位应在施工前进行充分的风险评估和动态监测,对施工参数进行优化,必要时采取减振措施,如使用减振垫、控制推进速度、调整开挖方式等。同时,应加强施工现场管理,确保施工人员和周边居民的安全与健康,防止施工振动对结构和人员造成不利影响。

4.2 同一根桩基不同位置处振动响应分析

将监测点布置在建筑物同一根桩基不同位置处以反映盾构隧道施工时同一根桩基不同位置处的振动响应情况。不同桩隧距下桩基不同监测点的速度时程曲线如图 10a 所示,对应的傅里叶谱如图 10b 所示;不同监测点位置处振动速度最大值及最大值出现的时间点如表 4 所示。

由图 10a 可知,对于建筑物的同一根桩基的不同监测点,监测点的位置距振源越远时,桩基振动

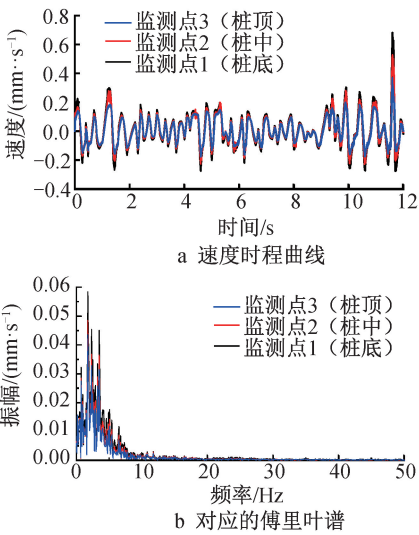


图 10 同一根桩基不同监测点振动响应

Fig. 10 Vibration response at different monitoring points on the same pile foundation

表 4 不同监测点速度最大值及出现的时间点

Table 4	The maximum values of velocities at different monitoring points and time points of occurrence			
监测点编号	与隧道中心埋深距离/m	振动速度最大值/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	振动速度最大值出现的时间点/s	
1	桩顶	0.369	11.614	
2	桩中	0.463	11.611	
3	桩底	0.682	11.606	

响应幅值越小,这表明在振动从源点向外传播的过程中,其能量逐渐衰减或被分散,导致距振源较远处的桩基所受到的振动影响相对较弱。

由图 10b 可知,盾构隧道施工引起建筑物桩基的振动响应频率基本在  $0\sim 30\text{Hz}$ ,属于典型的低频振动。其中,振动速度响应的主要能量集中在  $5\text{Hz}$  以内,速度幅值的波峰大多分布在  $<5\text{Hz}$  的频率区间,这表明盾构施工引发的桩基振动具有明显的低频主导性,易引起桩基整体的低频共振或周期性扰动。因此,在盾构施工过程中,必须充分考虑其引发的低频振动对周边建筑物桩基的影响,特别是在老旧建筑、结构复杂或地基承载力较弱的区域。施工单位应加强对施工过程的动态监测,采取必要的减振措施或优化施工参数,以有效降低低频振动对邻近建筑结构的不利影响,保障施工安全与周边环境稳定性。

分析表 4 可知,监测点位置距振源越远,振动速度最大值出现的时间点越迟。尽管各监测点与振源距离存在差异,但在同一根桩基上的各监测点所记录的振动速度最大值的出现时间点均高度集中在 11.61s 左右,仅存在极小偏差,这表明建筑物同

一根桩基在盾构施工的振动作用下整体表现出类似共振的动态响应特征。

5 结语

1)刀盘掘进时,第1节衬砌管片处测点 $x,y,z$ 向最大振动速度幅值分别为5.5,4.5,4.1mm/s,建筑物地面附近测点 $x,y,z$ 向最大振动速度幅值分别为1.50,1.05,0.91mm/s,结果表明,盾构施工产生的振动对 $x$ 向即盾构机掘进方向的影响较大。

2)数值模拟结果显示,盾构施工诱发振动在建筑结构中具有明显的逐层放大效应,随楼层高度的增加,楼层板振动速度峰值呈现逐层增大趋势,振动放大系数从第1层的1.00增长至第5层的3.01,显示出结构对盾构施工振动具有显著的楼层放大响应特性。

3)建筑物的同一根桩基的不同监测点其位置距振源越远时,桩基振动响应幅值越小。盾构施工引发的振动信号频率集中于5Hz以下,属于典型的低频振动。同一根桩基不同位置的振动速度最大值出现时间点集中在11.61s左右,说明盾构掘进过程中对建筑物桩基的动态激励具有同步性和一致性,桩顶、桩中、桩底响应趋于共振状态。因此,在盾构施工过程中,应严格执行施工安全规范,合理安排施工工序和减振措施,确保施工人员安全并尽量减小对周边建筑物结构和居民生活的不利影响。

参考文献:

[ 1 ] 王秋实,丁文其,乔亚飞,等.复合地层盾构穿越构筑物群扰动规律及桩基隔断效应分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2023,51(8):1240-1250.

WANG Q S, DING W Q, QIAO Y F, et al. Analysis on disturbance law and pile barrier effect of shield crossing underground structures in composite strata[J]. Journal of Tongji University ( natural science ),2023,51(8):1240-1250.

[ 2 ] HUANG K, SUN Y W, YANG J S, et al. Three-dimensional displacement characteristics of adjacent pile induced by shield tunneling under influence of multiple factors [ J ]. Journal of Central South University,2022,29(5):1597-1615.

[ 3 ] 汪伉,李国鹏,王瑞,等.基于DEM-FDM耦合模拟的盾构隧道浆液扩散特性研究[ J ]. 工程地质学报,2025,33(2):667-678.

WANG Y, LI G P, WANG R, et al. Research on slurry diffusion characteristics of shield tunnel based on coupled DEM-FDM numerical simulation [ J ]. Journal of engineering geology, 2025, 33(2):667-678.

[ 4 ] 梁志超,王言然,刘明高,等.超大直径盾构隧道穿越既有老旧建筑群的影响分析与监测[ J ]. 市政技术,2024,42(1):154-161,191.

LIANG Z C, WANG Y R, LIU M G, et al. Analysis & monitoring of large diameter shield tunnel through existing old buildings[ J ]. Journal of municipal technology,2024,42(1):154-161,191.

[ 5 ] 刘祥喜.长沙地铁6号线烈士公园段线路设计方案研究[ J ]. 中华建设,2019(6):110-111.

LIU X X. Research on line design scheme of martyrs park section of Changsha Metro Line 6[ J ]. China construction,2019(6):110-111.

[ 6 ] 戴亚军.长沙地铁6号线盾构侧穿博物馆振动控制与监测分析[ J ]. 现代城市轨道交通,2019(6):93-97.

DAI Y J. Vibration control and monitoring analysis of shield tunnel side crossing the museum on Changsha Metro Line 6[ J ]. Modern urban transit,2019(6):93-97.

[ 7 ] 郭飞,陶连金,孔恒,等.兰州砂卵石地层盾构施工振动传播及衰减特性分析[ J ]. 岩土力学,2018,39(9):3377-3384.

GUO F, TAO L J, KONG H, et al. Analysis of propagation and attenuation of vibration induced by shield tunneling in Lanzhou sandy gravel layer[ J ]. Rock and soil mechanics,2018,39(9):3377-3384.

[ 8 ] 夏毅敏,马劼嵩,李正光,等.主梁式TBM关键结构参数对其动力学特性的影响规律[ J ]. 振动与冲击,2020,39(8):193-201.

XIA Y M, MA J S, LI Z G, et al. The influence of key structural parameters of main beam TBM on its dynamic characteristics[ J ]. Journal of vibration and shock,2020,39(8):193-201.

[ 9 ] 王鑫,韩焯,周宏磊,等.北京地铁8号线盾构施工引起周围古旧平房振动响应的数值模拟研究[ J ]. 隧道建设,2013,33(12):822-827.

WANG X, HAN X, ZHOU H L, et al. Numerical simulation on vibration response of surrounding ancient buildings induced by shield tunneling: case study on Line 8 of Beijing Metro [ J ]. Tunnel construction,2013,33(12):822-827.

[ 10 ] 陶连金,马红红,郭飞,等.盾构施工中地表振动的传播与衰减特性[ J ]. 黑龙江科技大学学报,2018,28(2):174-180.

TAO L J, MA H H, GUO F, et al. Characteristics behind propagation and attenuation of surface vibration in shield construction [ J ]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology,2018,28(2):174-180.

[ 11 ] 王鑫,韩焯,周宏磊.中心城区地铁盾构施工引起的环境振动响应研究[ J ]. 土木工程学报,2015,48(S2):309-314.

WANG X, HAN X, ZHOU H L. Study on environmental vibration response caused by subway shield construction in central city [ J ]. China civil engineering journal,2015,48(S2):309-314.

[ 12 ] 王菁悦,葛忻声,吴平,等.可液化地层中盾构施工诱发振动影响的数值模拟研究[ J ]. 工程抗震与加固改造,2023,45(1):158-167.

WANG J Y, GE X S, WU P, et al. Numerical simulation of vibration induced by shield tunneling in liquefiable ground[ J ]. Earthquake resistant engineering and retrofitting,2023,45(1):158-167.

[ 13 ] 孙曦.合肥地铁3号线史河路站至清溪路站区间盾构施工诱发表沉降和振动研究[ D ]. 合肥:合肥工业大学,2019.

SUN X. Study on ground subsidence and vibration induced by shield construction in the section from Shihe Road Station to Qingxi Road Station of Hefei Metro Line 3 [ D ]. Hefei: Hefei University of Technology,2019.