

## 地铁盾构隧道下穿古建筑影响及控制措施\*

何晟亚<sup>1</sup> 李恒一<sup>1</sup> 王志杰<sup>2</sup>

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州;

2. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 610031, 成都)

**摘 要** [目的] 为了明确软土地区隧道施工及运营对古建筑的影响, 并制定相应的控制方案, 有必要研究地铁隧道施工对古建筑的影响控制问题。[方法] 以深圳地铁 3 号线下穿坪西萧氏碉楼为例, 建立了大型三维计算模型, 研究了隧道施工掘进及列车振动对碉楼结构的影响, 对比了桩梁托换和基础注浆加固的控制效果, 确定了优选控制措施, 并结合现场监测结果, 验证了所提控制措施的可行性。[结果及结论] 若未采取控制措施, 地铁隧道施工会造成碉楼严重的整体性倾斜, 运营期列车运行引起的碉楼顶部水平振动速度达到了 1.41 mm/s, 不满足控制要求。采用基础注浆加固措施后的碉楼顶部沉降值仅降低了 17.5%, 而采用桩梁托换措施后, 基本可以解决碉楼基础整体性下沉问题, 碉楼振动速度降低为 0.33 mm/s, 结构最大响应应力为 30.39 kPa。根据现场监测数据可知, 采用桩梁托换措施后的碉楼顶部沉降、碉楼倾斜率及地面沉降分别为 10 mm、0.4‰和 12 mm, 分别低于 14 mm、2.0‰和 30 mm 的控制值。开展软土地区结构稳定性控制时, 应充分运用桩式加强措施, 并保证桩端嵌入有效持力层。

**关键词** 地铁; 盾构隧道; 古建筑; 控制措施

**中图分类号** U455.43

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2025.05.022

## Impact and Control Measures of Subway Shield Tunnel Underpassing Ancient Buildings

HE Shengya<sup>1</sup>, LI Hengyi<sup>1</sup>, WANG Zhijie<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China; 2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

**Abstract** [Objective] To clarify the impact of tunnel construction and operation in soft soil areas on ancient buildings, and formulate corresponding control plans, it is necessary to study the control of subway tunnel construction impact on ancient buildings. [Method] Taking Shenzhen Metro Line 3

under the Xiao's Diaolou (watchtower) in Pingxi Community as an example, a large-scale three-dimensional calculation model is established to study the influence of tunnel construction and train vibration on the Diaolou structure. The control effects of pile-beam underpinning and foundation grouting reinforcement are compared, and the optimal control measures are determined. Combined with the on-site monitoring results, the feasibility of proposed control measures is verified. [Result & Conclusion] If no control measures are taken, the construction of subway tunnel may cause severe overall tilt of Diaolou. During operation periods, the horizontal vibration velocity at top of Diaolou caused by trains reaches 1.41 mm/s, failing to meet the control requirements. Upon foundation grouting reinforcement measures, the settlement value at top of Diaolou is only reduced by 17.5%, while the overall sinking problem of the Diaolou foundation can be basically solved after adopting pile-beam underpinning measures, with Diaolou's vibration velocity reduced to 0.33 mm/s, and its structure maximum response stress is 30.39 kPa. According to on-site monitoring data, the Diaolou top settlement, Diaolou tilt rate and land subsidence after adopting pile-beam underpinning measures are 10 mm, 0.4‰ and 12 mm respectively, lower than the control values of 14 mm, 2.0‰ and 30 mm. When carrying out structural stability control in soft soil areas, pile reinforcement measures should be fully utilized, and the pile ends be certainly embedded to the effective bearing layer.

**Key words** subway; shield tunnel; ancient building; control measure

地铁在隧道施工及运营阶段极易对周边邻近建筑造成扰动, 进而引发一系列安全问题, 尤其对于市区的古建筑, 由于其建设年代久远、建造及材料工艺相对落后, 对周边环境因素更为敏感<sup>[1-3]</sup>。考虑到古建筑具有突出的历史、科学和社会价值,

\* 广州地铁设计研究院股份有限公司科研基金项目 (KY-2021-058); 中央高校基本科研业务费专题项目 (SWJTU11ZT33); 教育部创新团队发展计划项目 (IRT0955)

科学地评估地铁隧道施工对其造成的影响并提出合理的控制措施,对于古建筑的保护具有重要意义。

已有文献针对近接工程的施工影响及控制措施开展了研究。文献[4]通过数值模拟,研究了地铁隧道施工对既有隧道的影响,并提出影响分区的概念。文献[5]通过数值模拟和现场监测,分析了新建桩基近接施工对邻近地铁隧道及旧桥桩的影响。文献[6]开展了淤泥地层盾构隧道上穿邻近地铁隧道稳定性研究,提出了旋喷桩联合袖阀管注浆加固技术,并给出了相关施工参数。文献[7]结合数值模拟和现场监测,分析了地铁车站基坑施工对邻近城际铁路桥梁的影响,并提出了相应的控制措施。

综上所述,既有文献较少涉及到隧道施工对古建筑的影响及控制措施。鉴于此,本文以深圳地铁3号线下穿坪西萧氏碉楼(以下简称“碉楼”)为例,结合数值计算、理论分析和现场监测,深入分析地铁隧道施工及列车振动对碉楼的影响,对比注浆加固和桩梁托换的保护控制效果,提出合理的控制方案。本文研究可为软土地区隧道施工及地铁线路运营对古建筑影响评价及控制方案的制定提供借鉴与参考。

## 1 工程概况

碉楼始建于中华民国时期,主要用于防御匪徒及彰显萧氏家族的雄厚财力,是当时社会动乱环境的真实产物,也是广东省深圳市龙岗区旧时社会环境的重要载体,见证了龙岗区乃至深圳市的发展兴盛,具有突出的历史、科学和社会价值。碉楼为一幢四层土木结构建筑,承重墙体为夯土墙,下三层为木梁木楼板,第四层为钢筋混凝土楼板。楼身长为6.70 m,宽为4.27 m,高为14.12 m,占地面积为28 m<sup>2</sup>。三至四层上部结构承重夯土墙存在明显开裂,建筑物整体安全性较差。

深圳地铁3号线四期工程坪西站—低碳城站区间采用盾构法施工,盾构外径为6.2 m,内径为5.5 m。盾构里程YDK48+817—YDK48+831段下穿碉楼,且碉楼位于右线区间隧道上方,与左线平面距离约为4 m。地铁隧道与碉楼平面位置示意图如图1所示。

## 2 计算模型及参数

### 2.1 计算模型

采用有限元软件MIDAS/GTS建立大型三维仿



图1 地铁隧道与碉楼平面位置示意图

Fig. 1 Plane position schematic diagram of the subway tunnel and Diaolou

真计算模型,并开展数值计算分析。计算模型尺寸为80 m(长)×45 m(宽)×35 m(高),注浆层、衬砌结构、碉楼和地层均采用三维实体单元模拟,盾壳采用二维壳单元模拟。隧道采取逐环施作,包含地层注浆、盾构机掘进、管片衬砌施作3个步骤,以真实模拟隧道施工全过程。模型底面和四周设置法向位移约束,上表面为自由面。整个模型共包含79 044个单元及47 235个节点。有限元计算模型示意图如图2所示。

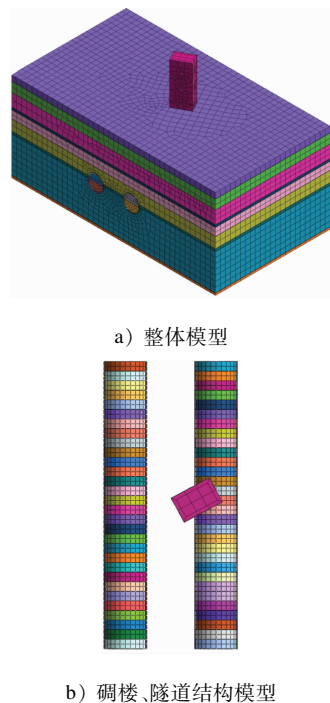


图2 有限元计算模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the finite element calculation model

### 2.2 材料参数

地铁隧道衬砌采用C50混凝土,碉楼采用C15混凝土,地层假设为弹塑性体,并采用修正摩尔-库伦破坏准则模拟土体的非线性受力行为<sup>[8]</sup>。地层

及结构计算参数如表 1 所示。

表 1 地层及结构计算参数

Tab. 1 Calculation parameters for strata and structures

名称	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比	土层厚度/m
回填土	18.5	4.0	10	18.5	0.35	2.3
冲洪积砂层	20.0	35.0	2	30.0	0.24	4.6
冲洪积粉质黏土	18.2	7.0	26	18.0	0.25	8.1
可-硬塑粉质黏土	18.5	15.0	23	14.0	0.35	4.2
微风化大理岩	27.2	2 000.0	5 000	40.0	0.15	0.9
软塑状粉质黏土	19.0	2.0	20	13.0	0.43	14.1
全风化大理岩	19.4	60.0	30	23.0	0.25	0.8
衬砌、托换桩梁	25.0	34.5			0.20	
碉楼、注浆加固区	20.0	22.0			0.16	

### 3 地铁隧道施工及运营对碉楼影响分析

#### 3.1 土体沉降

采用前文所述模型对地铁隧道施工引起土体沉降对碉楼的影响进行分析,盾构逐段掘进并施作衬砌后,提取隧道施工阶段周边土体和碉楼顶部变形量。隧道施工后,地面及碉楼顶部的竖向位移云图如图 3 所示。

由图 3 可知:隧道施工期间,施工影响范围内的地面均产生了不同程度的沉降,最大沉降值约为 24.7 mm,处于两隧道中间位置并向两侧逐渐递减。该现象导致碉楼结构东、西两侧变形存在差异,差值高达 5.2 mm,引起碉楼整体性倾斜。因此,需采取控制措施保证隧道上方土体的稳定性,防止土体沉降引起建筑结构及基础过度变形。

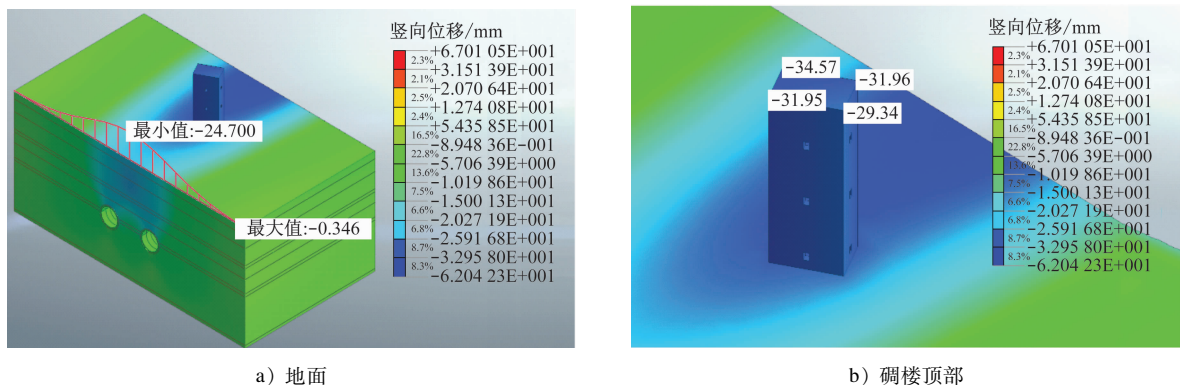


图 3 隧道施工后地面及碉楼顶部竖向位移云图

Fig. 3 Vertical displacement nephogram of the ground and Diaolou top after tunnel construction

#### 3.2 地铁列车振动

地铁列车在运行过程中,轮轨接触力激发振动,并经由道床和衬砌在地层半自由空间传播,直至地面和碉楼基底。GB/T 50542—2008《古建筑防工业振动技术规范》规定,评价古建筑振动的标准是其水平方向的振动速度。本文采用该规范中的古建筑结构速度响应预测模型,定量分析地铁列车振动对碉楼安全性的影响。

根据萧氏碉楼的结构特征和保护级别,根据古

建筑物的容许振动标准,确定其容许振动速度 $[v]$ 为 0.45 mm/s。

地铁列车运行时产生的古建筑结构最大速度响应 $v_{\max}$ 可以表示为:

$$v_{\max} = v_r \sqrt{\sum_{j=1}^n (\gamma_j \beta_j)^2} \quad (1)$$

式中:

$v_r$ ——建筑基础处水平方向的地面振动速度,本文取为 0.381 mm/s;



$n$ ——振型叠加数,本文取为3;

$\gamma_j$ ——第 $j$ 阶振型参与系数,根据其结构特征,

取  $\gamma_1 = 1.273$ 、 $\gamma_2 = -0.424$ 、 $\gamma_3 = 0.255$ ;

$\beta_j$ ——第 $j$ 阶振型动力放大系数。

要确定  $\beta_j$ ,先要获得第 $j$ 阶固有频率  $f_j$ ,则有:

$$f_j = \frac{1}{2\pi H} \lambda_j \psi \quad (2)$$

式中:

$H$ ——结构计算总高度,本文取为16.2 m;

$\lambda_j$ ——结构第 $j$ 阶固有频率计算系数,本文取

$\lambda_1 = 1.571$ 、 $\lambda_2 = 4.712$ 、 $\lambda_3 = 7.854$ ;

$\psi$ ——结构质量刚度参数,本文取为230 m/s。

则根据式(2)可以计算出  $f_1 = 3.55$  Hz、 $f_2 = 10.65$  Hz、 $f_3 = 17.76$  Hz。地面振动频率  $f_r$  取为13.12 Hz,再根据  $f_r/f_j$  值及 GB/T 50542—2008《古建筑防工业振动技术规范》中规定确定  $\beta_j$ ,可得  $\beta_1 = 2.00$ 、 $\beta_2 = 5.55$ 、 $\beta_3 = 5.00$ 。

最终计算得到  $v_{\max} = 1.41$  mm/s,远超水平方向的容许振动值。在不考虑任何减振措施的情况下,由地铁列车运行引起的碉楼结构响应超过行业标准,须采取有效控制措施,以满足古建筑的安全保护要求。

## 4 控制方案及效果分析

### 4.1 基础注浆加固

在碉楼底部施作规模为10.70 m(长)×8.27 m(宽)×0.50 m(厚)的基础加固层,以增强碉楼底部抵抗变形的能力。注浆加固模拟方法及测点位置示意图如图4所示。注浆加固后,地面、碉楼顶部及结构基础的竖向位移云图如图5所示。采取基础加固后的地面沉降分布规律与不采取加固措施类似,最大沉降值约为23.9 mm,相比于不采取加固措施

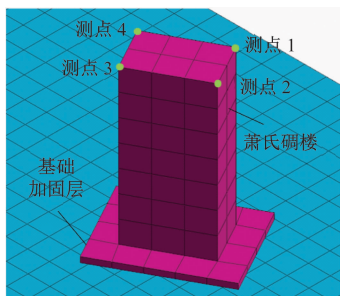
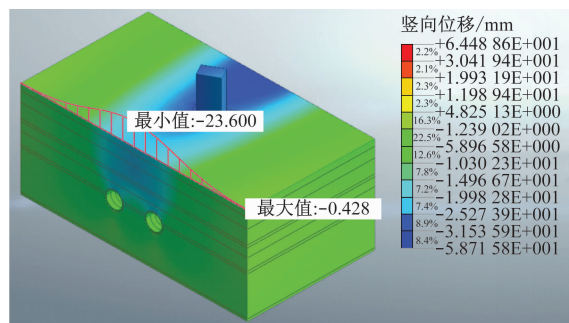
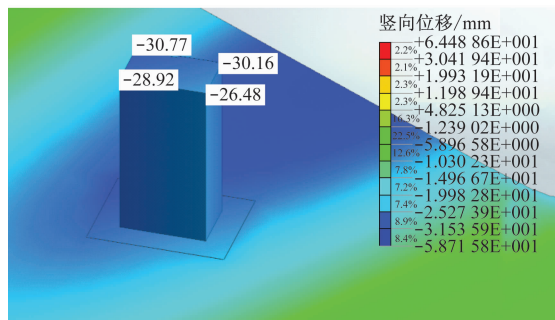


图4 注浆加固模拟方法及测点位置示意图

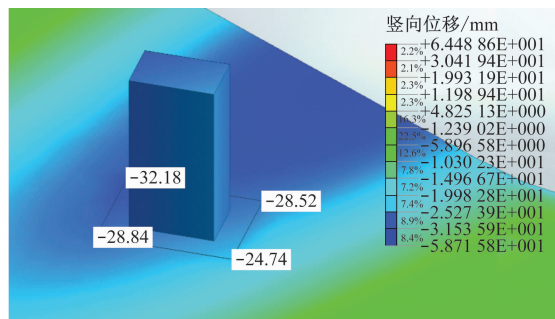
Fig.4 Grouting reinforcement simulation method and measuring points layout



a) 地面



b) 碉楼顶部



c) 结构基础

图5 注浆加固后地面、碉楼顶部及结构基础竖向位移云图

Fig.5 Vertical displacement nephogram of the ground and Diaolou top and structure foundation after grouting reinforcement

的情况,最大沉降值仅减小了3.2%。碉楼顶部仍存在明显的差异性沉降,最大差值约为4.29 mm,相比于不采取加固措施的情况,最大差值减小了17.5%。结构基础顶部4个角点的平均沉降值为28.57 mm,说明基础加固层存在严重的整体性下沉。由此可知,在软土地区开展古建筑保护时,对基础实施注浆加固可能存在区域性整体下沉问题,难以满足保护控制要求。

### 4.2 桩梁托换

桩梁托换模型如图6所示,其中:托换新桩采用直径为1000.0 mm、深度为36.8 m的旋挖钢筋混凝土桩,布置于地铁隧道两侧;托换梁采用预应力主

梁+夹墙次梁+穿墙小梁,此处简化为混凝土板。桩梁托换后,碉楼底部及顶部的竖向位移云图如图 7 所示。由于托换钢混桩底部位于全风化大理岩层,持力效果良好,故碉楼结构及托换桩梁的竖向变形不超过 0.1 mm,满足施工影响控制要求。桩梁托换的影响控制效果明显优于基础注浆加固,说明在软土地区进行结构沉降控制时,可优先考虑加桩并尽量使其端部嵌入质地坚硬地层,从而保证结构的竖向稳定性。

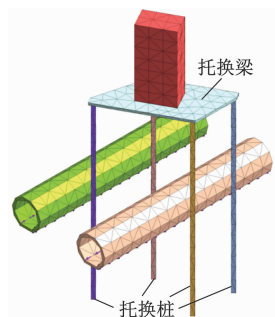
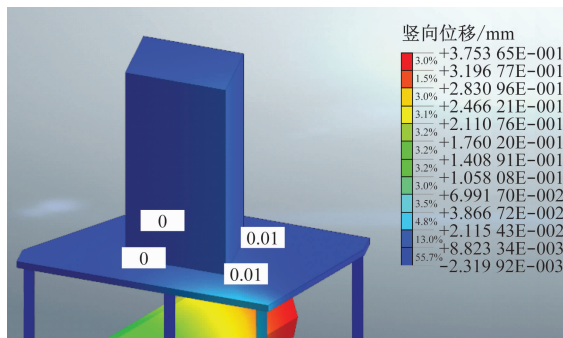
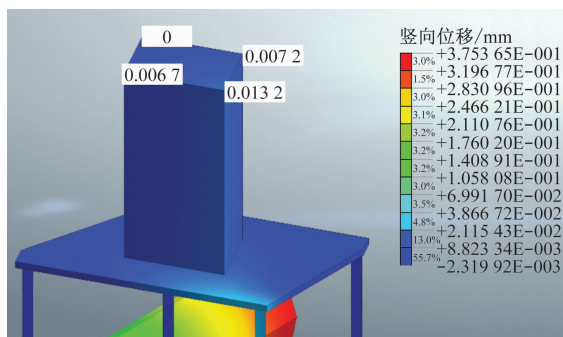


图 6 桩梁托换模型

Fig. 6 Pile-beam underpinning model



a) 碉楼底部



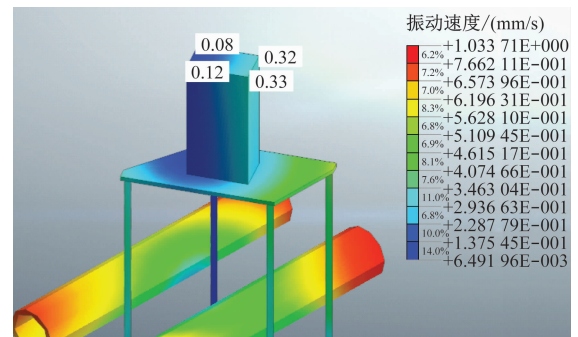
b) 碉楼顶部

图 7 桩梁托换后碉楼底部及顶部竖向位移云图

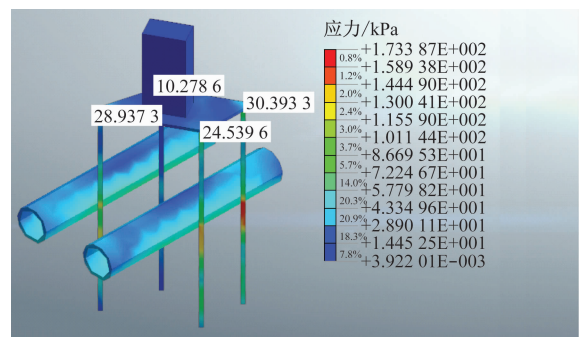
Fig. 7 Vertical displacement nephogram at bottom and top of Diolou after pile-beam underpinning

进一步分析桩梁托换后,地铁列车运行振动对古建筑的影响。列车运行阶段,整体结构的振动速

度及应力响应云图如图 8 所示。采用桩梁托换后,由列车运行引起的碉楼振动速度最大值为 0.33 mm/s,满足容许振动值。托换梁的最大应力响应值为 30.39 kPa,远未超过材料强度值。综上所述,采用桩梁托换可从结构变形、振动和受力 3 个方面有效控制隧道施工及列车运行对碉楼产生的影响,保证碉楼结构稳定性和受力安全性。



a) 振动速度



b) 应力响应

图 8 列车运行阶段整体结构振动速度及应力响应云图

Fig. 8 Vibration velocity and stress response nephogram of entire structure during train operation

## 5 现场监测分析

对碉楼顶部沉降、楼身倾斜率和地面竖向位移开展现场施工监测。在碉楼顶部设置 PL-JG01 至 PL-JG04 共 4 个监测点,在碉楼周边地面以下 6 m 处设置 M1、M2、M3 共 3 个监测点,测点布置示意图如图 9 所示。不同时间下,碉楼顶部沉降、楼身倾斜率及地面竖向位移实测数据如图 10 所示。由图 10 a) 可知:在 2022 年 11 月 14 日前,PL-JG01 至 PL-JG04 监测点的沉降值随时间显著增长,此后由于隧道掘进面逐渐远离碉楼,楼体沉降进入稳定阶段,最大沉降值约为 10 mm,未超过监测控制值 14 mm。由图 10 b) 可知:碉楼倾斜率在 2022 年 10 月 25 日至 11 月 5 日期间存在明显的变化,变化幅值

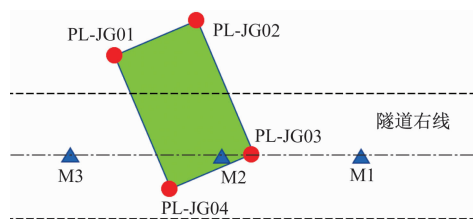
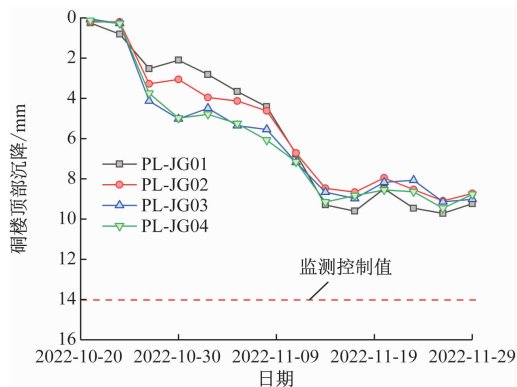
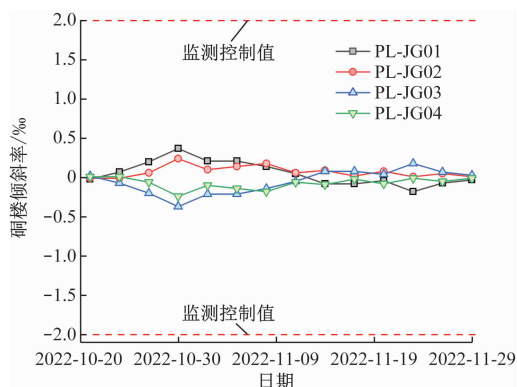


图9 测点布置示意图

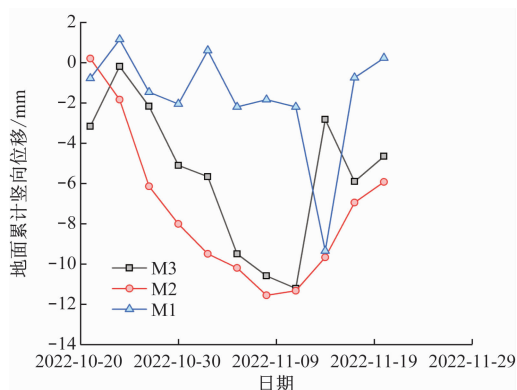
Fig. 9 Measuring points layout



a) 碉楼顶部沉降



b) 碉楼倾斜率



c) 地面累计竖向位移

图10 不同时间下碉楼顶部沉降、楼身倾斜率及地面竖向位移实测数据

Fig. 10 Measured data of Diaolou top settlement, inclination rate, and vertical ground displacement over time

约为0.4‰,其余时间段无明显波动;在整个施工期间,碉楼倾斜率远小于监测控制值2.0‰。由图10c)可知:碉楼附近3个监测点的地面沉降发展趋势大致相同,均呈先增大后减小的变化趋势;距碉楼最近的M2监测点地面沉降最明显,并于2022年11月9日达到峰值12 mm,此时期对应的碉楼累计沉降发展速率也较快,可能是由于盾构掘进面正下穿碉楼所导致的;在整个施工期间,地面累计沉降值远未达到监测控制值30 mm。由于数值模拟在实体模型、材料本构模型等方面存在一定的简化,难以完全反映结构的非线性力学行为,导致模拟结果与监测数据在量值上存在一定的差异,但两者均表明采用桩梁托换方法可有效满足地铁施工影响控制要求。因此,本文数值模拟结果对于软土地区古建筑保护方案的比选具有足够的借鉴意义。

## 6 结语

本文以深圳地铁3号线下穿碉楼为例,结合数值模拟和理论计算,从碉楼变形和动力响应两方面定量评价地铁隧道施工及列车运行对碉楼的影响,比选基础注浆加固和桩梁托换两种保护方案,提出针对软土地层隧道施工对古建筑影响控制的措施建议。主要获得以下结论:

1) 若未采取保护措施,地铁施工会造成地面差异性沉降,引起碉楼整体性倾斜,碉楼顶部最大沉降值可达34.57 mm;地铁列车运行造成碉楼顶部水平振动速度达到1.41 mm/s,不能满足规范控制要求。

2) 采用基础注浆加固后,碉楼顶部差异沉降差值约为17.5%,不能有效解决整体性下沉问题;采用桩梁托换方法后,碉楼无明显沉降,列车运行引起的碉楼振动速度为0.33 mm/s,结构最大响应应力为30.39 kPa,满足规范控制要求。

3) 针对古建筑的影响评价可分为隧道施工期和运营期,涉及结构变形、振动速度、响应应力等参数。在开展软土地层结构稳定性控制研究时,应充分运用桩式加强措施,并保证桩端嵌入有效持力层,从而解决基础整体性下沉问题。

## 参考文献

- [1] 郑建国,徐建,钱春宇,等. 古建筑抗震与振动控制若干关键技术研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(1): 1.  
ZHENG Jianguo, XU Jian, QIAN Chunyu, et al. Research on several key technologies of earthquake resistance and vibration con-



- trol of ancient buildings[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(1): 1.
- [2] 杨娜, 李天昊, 刘威, 等. 中国古建筑木结构健康监测 Benchmark 平台[J]. 土木工程学报, 2022, 55(6): 1.  
YANG Na, LI Tianhao, LIU Wei, et al. Health monitoring Benchmark platform of Chinese ancient wooden structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(6): 1.
- [3] DAI L, YANG N, ZHANG L, et al. Monitoring crowd load effect on typical ancient Tibetan building[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23(7): 998.
- [4] 吴贤国, 杨赛, 田金科, 等. 盾构近接施工对既有隧道影响参数分析及近接度分区研究[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(4): 96.  
WU Xianguo, YANG Sai, TIAN Jinke, et al. Analysis on the influence of shield tunneling construction on the proximity of existing tunnels and research on proximity zoning[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2021, 38(4): 96.
- [5] 骆瑞萍, 陈保国, 闫腾飞, 等. 淤泥地层中盾构上穿近接地铁线施工稳定性研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(10): 88.  
LUO Ruiping, CHEN Baoguo, YAN Tengfei, et al. Construction stability of shielded tunnel overcrossing an adjacent metro tunnel in silt stratum[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(10): 88.
- [6] 陈卓, 孔超. 地铁车站隧道群近接既有桥梁结构施工的安全影响分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(增刊2): 1235.
- CHEN Zhuo, KONG Chao. Study on the influence of the construction of metro station tunnel group on the adjacent existing bridge structure [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(S2): 1235.
- [7] 李恒一, 王志杰, 何晟亚, 等. 地铁基坑下穿铁路桥的桥墩保护设计方案合理性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(7): 180.  
LI Hengyi, WANG Zhijie, HE Shengya, et al. Rationality study on pier protection and design scheme of metro foundation pit under crossing railway bridge [J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(7): 180.
- [8] 胡建林, 孙利成, 崔宏环, 等. 基于修正摩尔库伦模型的深基坑变形数值分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7717.  
HU Jianlin, SUN Licheng, CUI Honghuan, et al. Numerical analysis of deep foundation pit deformation based on modified Mohr-coulomb model[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(18): 7717.
- 收稿日期:2023-03-13 修回日期:2023-04-13 出版日期:2025-05-10  
Received:2023-03-13 Revised:2023-04-13 Published:2025-05-10  
• 通信作者:何晟亚,工程师,410160733@qq.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

#### (上接第 120 页)

- [5] 魏贤奎, 王平, 庞玲, 等. 一种小半径曲线桥上无缝线路稳定性加强方案研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(4): 14.  
WEI Xiankui, WANG Ping, PANG Ling, et al. One strengthening scheme of stability of small radius curve continuous welded rail on bridge[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(4): 14.
- [6] 张大超. 半径 250 m 曲线无缝线路稳定性分析及加强措施[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(1): 54.  
ZHANG Dachao. Analysis and reinforcement measures for stability of CWR with a radius of 250 m[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(1): 54.
- 收稿日期:2023-03-08 修回日期:2023-09-19 出版日期:2025-05-10  
Received:2023-03-08 Revised:2023-09-19 Published:2025-05-10  
• 通信作者:胡志鹏,高级工程师,779355629@qq.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

#### (上接第 127 页)

- [6] 余俊, 翁贤杰, 樊文胜, 等. 松散地层隧道进洞段管棚注浆加固效应分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(6): 92.  
YU Jun, WENG Xianjie, FAN Wensheng, et al. Analysis of pipe roof grouting reinforcement effect at tunnel entrance in loose stratum[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2020, 50(6): 92.
- [7] 王海洋. 浅埋暗挖黄土隧道下穿铁路道岔区技术研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(8): 85.  
WANG Haixiang. Research on the technology for shallow mining tunnel in loess area crossing railway turnout zone[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(8): 85.
- [8] 戴志仁, 任建, 李小强, 等. 富水砂卵石地层盾构隧道穿越铁路咽喉区道岔群技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(6): 1005.  
DAI Zhiren, REN Jian, LI Xiaoqiang, et al. Technologies for shield tunnel crossing underneath turnout groups of railway turnout area in water-rich sandy cobble stratum[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(6): 1005.
- 收稿日期:2023-08-09 修回日期:2023-09-12 出版日期:2025-05-10  
Received:2023-08-09 Revised:2023-09-12 Published:2025-05-10  
• 通信作者:姜键骏,副教授,jiangjianjun@zime.edu.cn  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license