

DOI: 10.7672/sgjs2025200123

新建停车楼及匝道桥对既有轨道交通结构的影响研究*

任远敏¹, 廖伟¹, 王洽亲², 刘翔³, 卢杨益⁴, 付邦萌³, 徐洲², 胡佑平¹, 李佳遥²

(1. 中国建筑第四工程局有限公司, 广东 广州 510665; 2. 重庆机场集团有限公司, 重庆 401120;

3. 大连海事大学交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026; 4. 中建四局第一建设有限公司, 广东 广州 510800)

[摘要] 新建工程对邻近既有结构的变形控制及安全评估至关重要。依托重庆江北国际机场 T3B 航站楼及第四跑道工程项目, 利用三维数值模拟方法分析新建停车楼和匝道桥对邻近既有轨道交通结构的影响, 进而制定针对性的轨道交通保护措施。利用 MIDAS GTS NX 数值模拟软件, 量化分析新建工程对既有轨道交通 15 号线施工通道和轨道交通 10 号线路基锚固桩挡墙、高架桥梁结构的位移影响, 评估拟建项目和既有轨道交通结构的安全性。结果表明, 新建停车楼与匝道桥对既有轨道交通结构的影响较小, 风险可控。

[关键词] 停车楼; 匝道桥; 轨道交通; 有限元分析; 位移; 安全

[中图分类号] U455

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)20-0123-08

Influence Research of New Parking Buildings and Ramp Bridges on Existing Rail Transit Structures

REN Yuanmin¹, LIAO Wei¹, WANG Qiaqin², LIU Xiang³, LU Yangyi⁴, FU Bangmeng³,
XU Zhou², HU Youping¹, LI Jiayao²

(1. China Construction Fourth Engineering Division Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510665, China;

2. Chongqing Airport Group Co., Ltd., Chongqing 401120, China;

3. College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China;

4. China Construction Fourth Engineering Division the First Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510800, China)

Abstract: The new project is very important for the deformation control and safety assessment of adjacent existing structures. Based on the project of Chongqing Jiangbei International Airport T3B terminal and the fourth runway, the influence of the new parking building and ramp bridge on the adjacent existing rail transit structure is analyzed by 3D numerical simulation method, and then the corresponding rail transit protection measures are formulated. Using MIDAS GTS NX numerical simulation software, the displacement influence of the new project on the anchor pile retaining wall and the viaduct structure of the existing Rail Transit Line 15 construction channel and the Rail Transit Line 10 is quantitatively analyzed, and the safety of the proposed project and the existing rail transit structure is evaluated. The results show that the new parking building and ramp bridge have little impact on the existing rail transit structure and the risk is controllable.

Keywords: parking building; ramp bridge; rail transit; finite element analysis; displacement; safety

0 引言

随着我国城市化进程的不断加快,大量公共设施项目不断修建导致城区核心区建筑物密集且敏感建筑物众多。新建工程项目邻近甚至穿越既有结构施工的情况日益增多。在此类工程中,既要确保新建工程的安全施工,也要保障既有建筑物和构

* 中建四局第一建设有限公司课题:复杂环境超深基坑智能化施工关键技术开发与应用(SJYGS-2021-KT-04)

[作者简介] 任远敏,高级工程师,E-mail:583107982@qq.com

[收稿日期] 2025-07-20

筑物的结构安全与运营稳定。新建工程不可避免地邻近既有结构物的结构安全造成影响,其中具有代表性的有基坑开挖、新建桩基对邻近既有地下结构产生的附加应力和变形^[1]。

目前,针对基坑开挖和桩基建造等新建工程项目对近接既有地下结构变形影响的研究方式主要有理论解析方法、数值模拟计算方法、现场实测方法和模型试验方法等。理论解析方法是通过先计算新建工程项目作用在既有地下结构上的附加应力场和位移场,再基于弹性地基梁模型建立地下结构纵向变形控制微分方程,从而最终得到新建工程项目导致的既有地下结构变形的理论解析解^[2]。弹性地基梁模型常采用欧拉-伯努利梁、铁木辛柯梁和温克勒地基、帕斯卡地基和柯瑞地基等模型。张治国等^[3-4]采用两阶段分析方法研究桩基近接既有隧道相互作用,计算地层位移和附加荷载,进一步采用帕斯卡地基模型研究双基坑开挖引起既有邻近隧道纵向变形影响。魏纲等^[5-6]基于帕斯卡地基模型提出考虑既有管线老化和邻近破损既有地下管线纵向变形的计算方法,发现管线老化会导致管线整体变形增加,管线破损会导致较大变形产生于破损位置。然后,考虑符合地层情况下近接工程施工引起既有地下结构变形和地层变形,在统一土体解析方法基础上对土质条件影响参数进行修正。房倩等^[7]在研究隧道施工对邻近既有地下结构影响的过程中,分析软弱围岩相似材料的力学性能,为砂土地层中圆形隧道施工易发生的塌方问题提供了解决思路。理论方法将地下结构多简化为梁模型,因此具有一定的局限性。

数值模拟方法可用于分析结构形式多样、变形与内力限制严格、施工工序及支护措施复杂的近接工程,从而较真实地还原近接施工对周围环境的影响。王彦伟^[8]针对实际工程项目,运用 GTS NX 岩土数值模拟软件探究轨道交通工程与新建市政桥梁施工的相互作用,并提出高架桥及邻近市政工程在施工过程中风险管理的关键点。刘挽群等^[9]以济南市某地铁车站双侧基坑工程为案例,结合三维有限元分析和现场监测数据,研究基坑开挖顺序对地铁车站位移的影响,得到最优开挖工序。杨波等^[10]基于扬州南站地铁深基坑项目,运用数值模拟技术分析了不同施工顺序对基坑围护结构变形和周边土体沉降的影响,并提出了相应的支护及变形控制策略。罗贤民等^[11]针对南宁某人行通道基坑下穿高架桥及邻近建筑结构工程,通过数值模拟与现场监测相结合的方法,研究不同开挖条件对环境

扰动和结构变形的影响,并通过比较分析确定适宜的开挖方案。林峰^[12]依据杭州文一西路改造工程的监测资料,运用 ABAQUS 有限元软件构建深基坑近接地铁隧道三维数值模型,分析深基坑施工过程中地表沉降、支撑轴力及地铁隧道沉降的变化趋势。

现场监测方法是通过现场技术人员采用专业的仪器设备对既有地下结构进行数据监测,通过实时监测数据衡量结构稳定性,从而保证在近接工程施工过程中既有地下结构稳定性与可靠性。崔天麟等^[13]采用光纤布拉格光栅传感技术对广州地铁 5 号线小北站区间隧道进行监测研究,建立监测系统设计与传感器封装保护方法,根据监测数据分析支护体内力、温度及围岩相互作用关系。徐莹等^[14]采用现场监测方法对武汉轨道交通 6 号线上跨既有地铁 2 号线区间进行数据监测,通过引入铁木辛柯梁和帕斯卡地基模型进行计算验证,保证了既有地铁运营稳定性。而 Ran 等^[15]针对现场监测中的难点和重点,依托杭州地铁施工海量数据,进一步建立反向传播神经网络变形预测模型,极大地提高了现场监测数据的应用性。探究近接工程对既有结构的影响问题,采用现场监测方法可直接得到既有结构应力和变形变化。但由于工程的差异化与个性化明显,监测所得到的数据往往只能针对对应工程,无法推广使用至其他不同工况工程,因此使用范围受到很大限制。

模型试验方法是采用与实际工程等比例放大或缩小的模型进行试验。黄德中等^[16]采用离心试验研究了双线和多线隧道近接工程造成的临界构筑物变形影响。刘翔^[17]利用离心试验研究了盾构隧道多种变形模式。芮瑞等^[18]则采用阵列式三维活动门试验,通过活动门下移产生的土体下沉体积模拟地层损失,研究土体开挖对地表变形的影响。通过模型试验与现场监测数据对比,模型试验可接近还原工程现场情况,但往往人工和时间成本高昂。

由于工程项目结构本身的多样性和所处地质条件的复杂性导致已有研究成果仅能对相似近接工程的安全分析和变形控制提供指导,无法推广至其他不同工况^[19-21]。本文以重庆江北国际机场 T3B 航站楼及第四跑道工程项目为背景,采用 MIDAS GTS NX 数值模拟方法,量化分析新建停车楼及匝道桥对既有轨道交通 15 号线施工通道结构及轨道交通 10 号线路基锚固桩挡墙、高架桥梁结构的位移影响。在此基础上,提出针对性的轨道交通保护措施。

1 工程概况

重庆江北国际机场新建停车楼位于 T3B 航站楼东南侧,占地面积 79 348m²,总建筑面积约 126 261.17m²,包含地上 8 层、地下 3 层。工程采用钢筋混凝土框架-剪力墙结构,设计使用年限为 50 年。新建匝道桥全长 169m,面积为 1 582m²,由钢桥和混凝土桥组成。新建停车楼及匝道桥区位如图 1 所示。

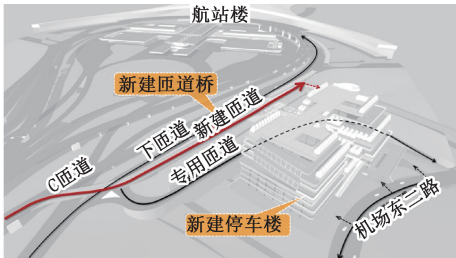


图 1 新建停车楼及匝道桥区位
Fig. 1 Location of new parking building and ramp bridge

受新建项目影响的轨道交通 15 号线 T3 航站楼站施工通道全长约 410.644m,由明槽段和暗挖段组成,明槽段长 66m,其余为暗挖段。明槽段地质以杂填土和砂岩层为主,暗挖段地质以砂质泥岩、砂岩及页岩互层为主。受影响的轨道交通 10 号线长河站—T3 航站楼站区间分为路基段和高架段,路基段长约 70.769m,路基下方以砂质泥岩和砂岩层作为持力层。高架桥段涉及 35m 长混凝土连续梁桥,桥梁下部采用群桩基础,为嵌岩桩设计,受影响范围为 CY64~CY65 号墩。

根据 CJJ/T 202—2023《城市轨道交通结构安全保护技术规范》,新建项目位于轨道交通 15 号线和 10 号线的控制保护范围内,关系如图 2 所示。场地西北侧停车楼及基坑、匝道桥墩与 15 号线施工通道的水平距离为 0~11.67m,进入轨道控制保护区;场地东北侧停车楼及基坑与 10 号线正线路基段和高架桥段间水平距离为 8.6~30m,同样进入轨道控制保护区。

在施工过程中,新建项目对邻近轨道交通结构可能产生风险,主要包括:基坑开挖对轨道交通 15 号线施工通道结构位移影响,匝道桥基础开挖对 15 号线隧道围岩的扰动,以及停车楼基坑开挖对轨道交通 10 号线路基和高架桥基础的受力改变和位移影响。通过定性分析,虽然采取相应措施后风险可控,但轨道交通 15 号线暗挖隧道段、轨道交通 10 号线路基段及高架桥段的危险仍需通过有限元计算等方法进行进一步评估。

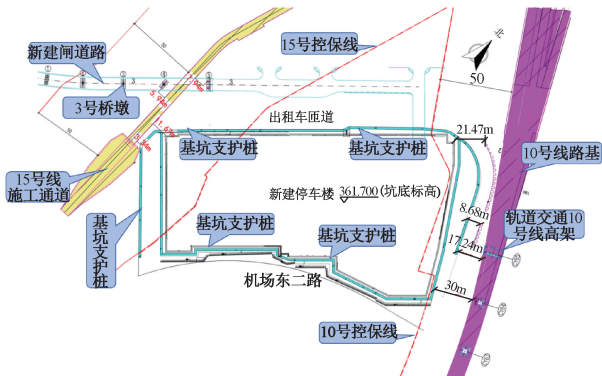


图 2 新建项目与轨道交通平面关系
Fig. 2 Plan relationship between new project and rail transit

2 数值计算分析

2.1 计算模型

针对新建项目对轨道结构的风险影响,利用 MIDAS GTS NX 软件建立三维有限元模型进行分析,选取新建项目与轨道交通 15 号线及 10 号线结构最不利断面进行平面有限元分析,计算分析新建项目对轨道交通结构的影响,评估拟建项目与轨道交通结构的安全性。

三维计算模型中岩土体采用三维实体单元,新建和既有区间隧道结构采用板单元进行模拟。计算模型底面约束 x,y 方向自由度,四周约束 x 方向自由度,地表为自由面。程序使用激活/钝化单元的方法实现基坑开挖、支护及基础结构修建。岩土体材料屈服条件采用莫尔-库仑屈服准则。为确保三维模型有足够计算精度并尽量减少计算工作量,对模型范围进行一定的限制。模型几何尺寸为 382m×255m×(81~106)m(长×宽×高)。三维实体模型如图 3、4 所示,计算采用的参数如表 1 所示。

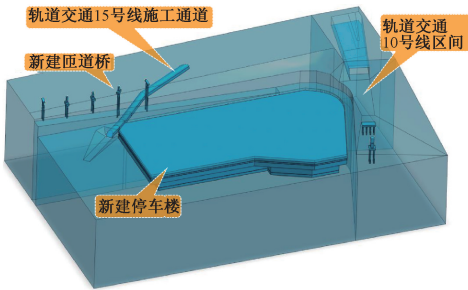


图 3 三维几何实体模型
Fig. 3 3D geometric solid model

模型计算分析流程为:①平衡自重应力场并清零位移;②模拟轨道交通 10 号线区间结构施工并再次清零位移;③进行轨道交通 15 号线施工通道开挖;④模拟新建匝道桥施工及加载过程;⑤进行

表 1 数值计算参数

Table 1 Numerical calculation parameters							
项目	材料	计算模型	弹性模量/MPa	重度/(kN·m ⁻³)	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
岩土	杂填土	莫尔-库仑	8.0	21.0	0.45	0	19.60
	中风化泥岩		808.0	25.5	0.37	360.5	22.40
	中风化砂岩		4 153.0	24.9	0.13	1 400.0	27.30
	中风化页岩		600.3	25.6	0.40	220.5	21.27
结构	C50 模筑混凝土	弹性	3.45×10 ⁴	25.0	0.20	—	—
	C40 模筑混凝土		3.25×10 ⁴	25.0	0.20	—	—
	C35 模筑混凝土		3.45×10 ⁴	25.0	0.20	—	—
	C30 模筑混凝土		3.15×10 ⁴	25.0	0.20	—	—
	C25 喷射混凝土		3.00×10 ⁴	25.0	0.20	—	—

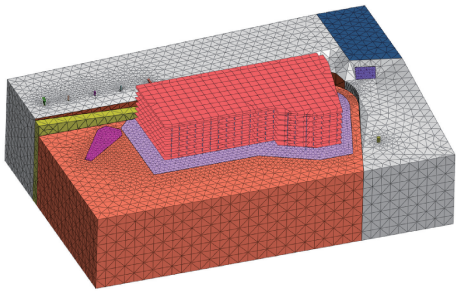


图 4 三维网格计算模型
Fig. 4 3D grid calculation model

新建停车楼基坑支护结构施工及基坑开挖;⑥完成新建停车楼主楼结构基础、梁、板、柱混凝土浇筑。

2.2 轨道交通 15 号线结构位移分析

新建匝道桥施工完成后轨道交通 15 号线施工通道结构位移如图 5 所示。由图 5 可知,在 x 方向上,最大正向位移主要发生在远离桥桩暗挖段区域,而最大负向位移则集中在匝道桥正下方。相比之下,明槽段 x 方向位移相对较小,显示出较稳定的

位移状态。在 y 方向上,最大正向和负向位移呈现对称性,且主要集中在桥桩两侧。对于 z 方向,位移沿桥桩走向大致呈对称分布。最大正向位移出现在明槽段远离桥桩位置,而最大负向位移则位于暗挖段靠近桥桩处。由位移计算结果可以看出,新建匝道桥施工引起的轨道交通 15 号线施工通道结构检测监测技术标准》中 10mm 的控制要求。

新建停车楼基坑开挖至基底后轨道交通 15 号线施工通道结构位移如图 6 所示。由图 6 可知,在 x 方向上未发生负向位移,并且最大正向位移出现在接近基坑的区域。在 y 方向上,最大负向位移同样出现在靠近基坑处,而最大正向位移出现在明槽段和暗挖段交界处。在 z 方向上,最大负向位移出现在远离基坑的暗挖段,而最大正向位移同样出现在明槽段和暗挖段交界处。由位移计算结果可知,新建停车楼施工引起的轨道交通 15 号线施工通道

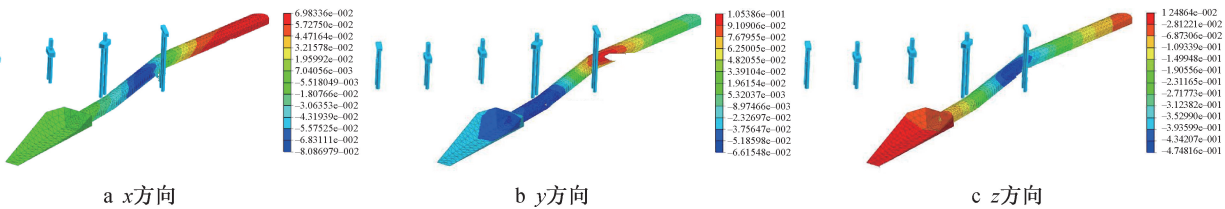


图 5 新建匝道桥施工完成后轨道交通 15 号线施工通道结构位移云图(单位:mm)

Fig. 5 Displacement of Rail Transit Line 15 construction channel structure after construction completion of new ramp bridge(unit: mm)

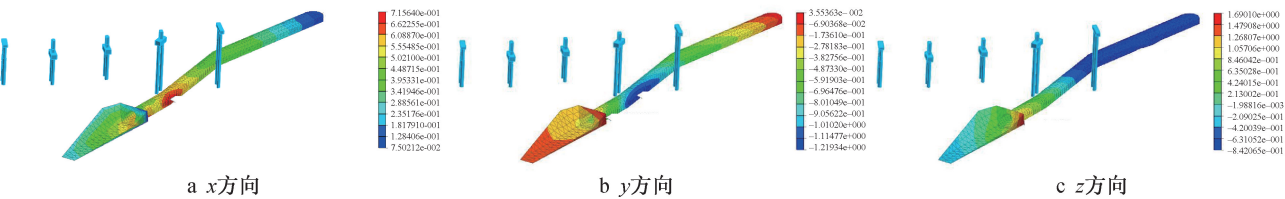


图 6 新建停车楼基坑开挖至基底后轨道交通 15 号线施工通道结构位移云图(单位:mm)

Fig. 6 Displacement of Rail Transit Line 15 construction channel structure after the foundation excavation of new parking building is excavated to the base(unit: mm)

结构最大水平位移为 1.2mm,最大竖向位移为 1.69mm。结构水平及竖向变形均小于《城市轨道交通结构检测监测技术标准》中 10mm 的控制值。

2.3 轨道交通 10 号线结构位移分析

新建停车楼基坑开挖至基底后轨道交通 10 号线路基锚固桩挡墙位移如图 7 所示。由图 7 可知, x 方向上最大正向位移出现在挡墙左上边缘,而最大负向位移则出现在挡墙右下顶点处。 y 方向位移沿 z 轴呈对称分布,其中最大正向和负向位移出现在挡墙 2 个下部顶点处。 z 方向上未发生负向位移,正向位移呈带状分布且沿 y 轴方向逐渐减小。由位移计算结果可以看出,轨道交通 10 号线路基锚固桩挡墙最大水平位移为 1.57mm,最大竖向位移为 1.32mm。支护结构水平及竖向变形均小于《城市轨道交通结构检测监测技术标准》中 10mm 的控制值。

新建停车楼基坑开挖至基底后轨道交通 10 号线高架桥梁结构位移如图 8 所示。由图 8 可知, x 方向最大负向位移出现在 CY64 桥墩桩基最底部,而 y 方向最大正向位移出现在相近位置,最大负向位移则出现在 CY64 桥墩顶部。 z 方向最大正向位移出现在 CY65 桥台顶部。由位移计算结果可以看出,高架桥梁结构最大水平位移为 0.98mm,最大竖向位移为 0.72mm。支护结构水平及竖向变形均小

于《城市轨道交通结构检测监测技术标准》中 11.83mm 的控制值。

由以上分析可知,新建项目施工对轨道交通结构安全的影响较小,结构安全。

3 实测数据对比分析

3.1 实测数据分析

在基坑顶部变形敏感区域布设系列监测点(见图 9),并选取 10 个关键点位实施重点观测。监测设备采用徕卡 TM60 全站仪与徕卡 LS15 数字水准仪,监测时间为 2024-08-19—2024-11-20。各监测点初始值采集时间为 2024-08-19。水平位移与竖向位移监测结果如图 10 所示,其中水平位移以“+”表示内移、“-”表示外移,竖向位移以“+”表示隆起、“-”表示沉降。

由图 10 可知,2024-09-02—2024-11-05 监测期间,各监测点水平位移和竖向位移均呈随时间递增的趋势,其中特定监测点(JC06,JC07,JC10)位移演变具有典型代表性。值得注意的是,进入 11 月 5 日后的监测后期,位移增长速率显著降低并趋于稳定状态。这种动态演变规律揭示了工程施工扰动对土体力学行为的阶段性影响:在施工初期,由于土体应力重分布及结构损伤效应,位移发展较为剧烈。随着施工进程的推进,土体逐渐趋于稳定,位

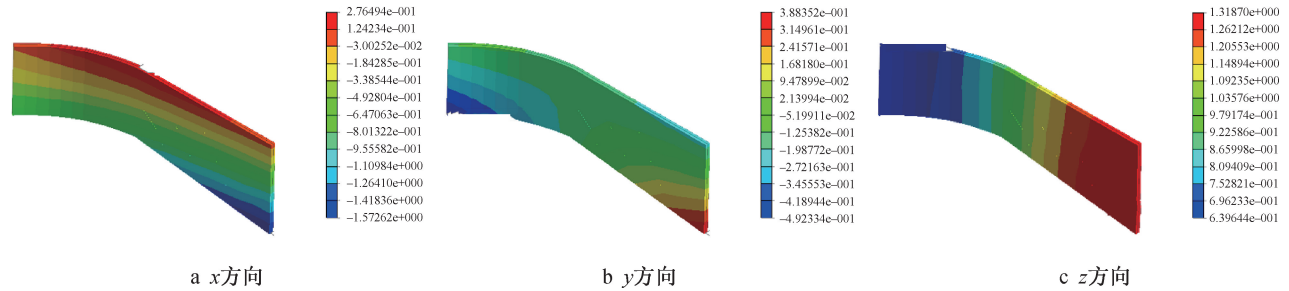


图 7 新建停车楼基坑开挖至基底后轨道交通 10 号线路基锚固桩挡墙位移云图(单位:mm)

Fig. 7 Displacement of Rail Transit Line 10 subgrade anchor pile retaining wall after the foundation excavation of new parking building is excavated to the base(unit:mm)

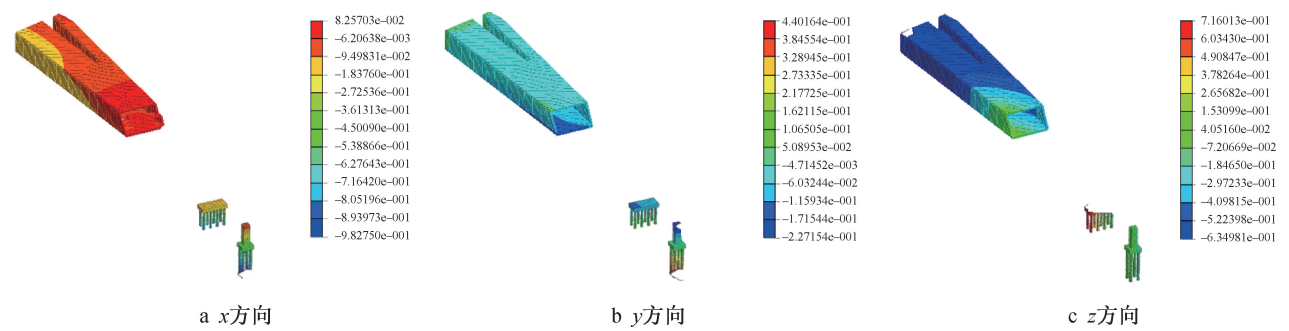


图 8 新建停车楼基坑开挖至基底时轨道交通 10 号线高架桥梁结构位移云图(单位:mm)

Fig. 8 Displacement of Rail Transit Line 10 elevated bridge structure after the foundation excavation of new parking building is excavated to the base(unit:mm)

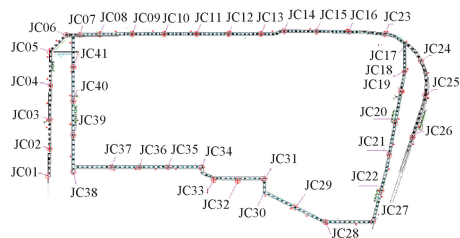


图 9 基坑监测点平面布置

Fig. 9 Plan layout of monitoring points for foundation excavation

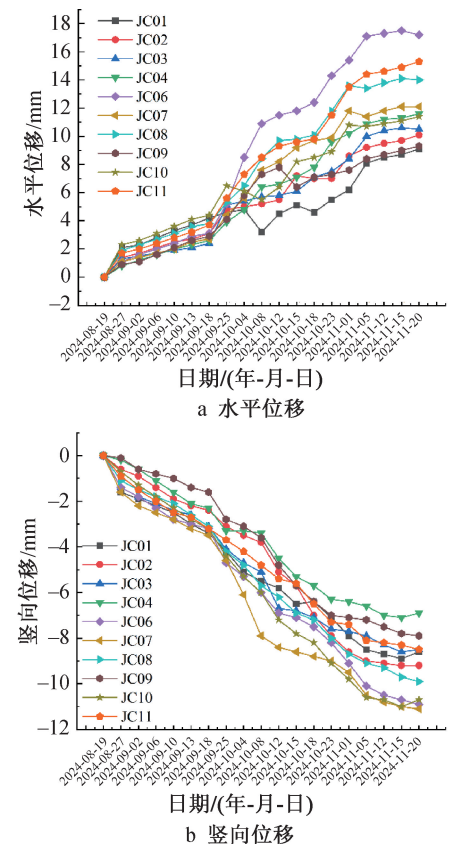


图 10 基坑位移监测结果

Fig. 10 Monitoring results of foundation excavation displacement

移增长速率相应减缓。

从水平位移演变特征来看,监测点 JC10,JC06 表现出显著差异性。监测点 JC10 自监测初始即呈现快速位移响应,其累积变形量由初始阶段的 2.6mm 增至 11 月 20 日的 11.4mm,增幅达 338%。相较而言,监测点 JC06 虽然在施工初期并未发生显著位移,但其增长速率非常迅速,从 9 月 2 日的 1.6mm 激增至 11 月 20 日的 17.5mm,成为所有监测点中水平位移最大的点。究其原因,主要与其邻近轨道交通 15 号线的特殊地理位置有关,地下结构相互作用加剧了该区域的土体变形。

由竖向位移分析显示,各监测点沉降变形量普

遍高于水平位移,且以沉降变形为主导。值得关注的是监测点 JC07,其初始沉降量即达-2.2mm,最终累积沉降-11.1mm,构成最大沉降值。监测点 JC10 则呈明显的时间滞后效应,监测前期沉降增速平缓,而后期日均沉降速率提高至 0.32mm/d,最终累积沉降-11.0mm,仅略小于监测点 JC07。值得注意的是,水平位移最大的监测点 JC06 在竖向位移方面同样突出,累积沉降达-10.9mm,显示出该区域土体变形的空间耦合特性。

3.2 数值模拟结果与实测结果对比

轨道交通 10 号线路基锚固桩挡墙监测点布置如图 11 所示。选取基坑开挖至基底后轨道交通 10 号线路基锚固桩挡墙位移实测值与模拟值进行对比。从图 12 中可以看出,模拟值较实测值普遍偏大。随着监测点位的变化,水平位移整体呈先减小后增大趋势,竖向位移整体呈逐渐增大趋势。在监测点 ZQC10 处,水平位移实测值为 0.29mm,模拟值为 0.35mm,数值差异较小。竖向位移实测值为 1.21mm,模拟值为 1.32mm,虽然存在一定误差,但整体趋势和量级较接近。综合水平位移和竖向位移对比分析结果,可看出数值模拟结果与实测结果在变化趋势和数值上均较接近。这表明所采用的数值模拟方法能较好地反映基坑开挖过程中挡墙实际位移变化特征,计算模型和分析思路具备合理性。

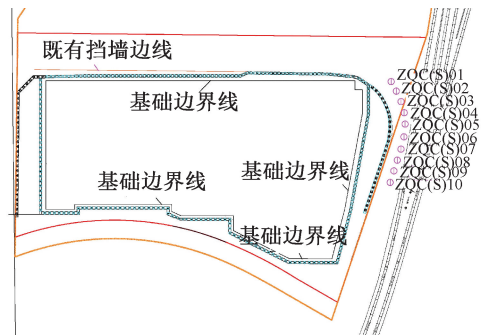


图 11 轨道交通 10 号线路基锚固桩挡墙监测点平面布置

Fig. 11 Plan layout of subgrade anchor pile retaining wall monitoring points for Rail Transit Line 10

4 轨道交通保护措施

根据拟建项目与轨道交通的关系、场地工程地质条件、拟建项目本身特点,为减小对已建轨道交通 15 号线和 10 号线的影响,采取如下轨道交通保护措施。

4.1 设计措施

1) 邻近轨道交通 15 号线施工通道的基坑支护桩,其底部深入隧道下方,以增强对偏压等不利工

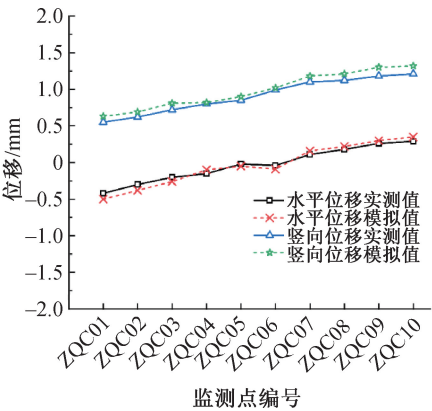


图 12 轨道交通 10 号线路基锚固桩挡墙位移
实测值与模拟值对比

Fig. 12 Comparison between measured and simulated
displacement values of Rail Transit Line 10
subgrade anchor pile retaining wall

况的抵抗能力,确保隧道安全。

2)通过多方案比选,匝道桥梁结构采用自重较小的简支箱梁结构,以消除地基不均匀沉降的影响。将轨道交通 15 号线隧道两侧 4 号桥墩和 5 号桥台的桩基础长度分别加大至 28,32m,确保桩底标高低于隧道底标高,从而避免竖向荷载传递至隧道结构上方。

3)邻近轨道交通 10 号线、15 号线一侧的基坑采用上、下两级台阶分级支护,每级基坑边坡相对独立,从而降低单级基坑支护高度,降低施工风险,同时在下排桩增设锚索,控制基坑水平位移,从而保护轨道结构。

4.2 施工措施

1)轨道控制保护范围内的基坑开挖后应及时封闭,防止泥岩遇水软化,并避免边坡因风化发生脱落;优化工程施工及运营阶段防排水措施,避免地表水下漏、围岩软化、裂隙水量增大,保障轨道建设与运营安全。

2)基坑开挖时,必须采用逆作法分层分段施工,减少对围岩扰动。

3)场地施工时,地表应设置合理截、排水沟,将地表水和施工废水引出轨道保护区范围以外。

4)轨道保护范围内严禁爆破作业,范围外应采用控制爆破或静态破碎法;机械开挖作业需严格控制振速,确保围岩完整性。

5)位于轨道保护范围内的土石方开挖后应立即装运,禁止在保护范围内堆载。施工中应尽量减少对周边岩土体的扰动,严禁超挖。

5 结语

1)有限元计算分析表明,新建匝道桥施工引起

的轨道交通 15 号线施工通道结构最大水平位移为 0.11mm,最大竖向位移为 0.47mm;新建停车楼施工引起的轨道交通 15 号线施工通道结构最大水平位移为 1.2mm,最大竖向位移为 1.69mm;新建停车楼施工引起的轨道交通 10 号线路基锚固桩挡墙最大水平位移为 1.57mm,最大竖向位移为 1.32mm;新建停车楼施工引起的轨道交通 10 号线高架桥梁结构最大水平位移为 0.98mm,最大竖向位移为 0.72mm,均小于控制值,表明本工程对既有和在建轨道结构的安全影响较小,影响可控。

2)停车楼基坑按两级台阶设计,平台宽度较大,使上、下两级边坡稳定性相互不受影响,降低了边坡单级高度,从而降低了对轨道结构的影响,对围岩扰动较小,对既有和在建轨道保护也较有利。

3)新建匝道桥平面按轨道交通 15 号线的走向调整布置,并加长了桥梁桩基长度,方案上规避了不利条件,对轨道保护较有利。

4)新建停车楼的实施,可保证既有轨道交通 10 号线区间结构的运营安全,风险可控;新建停车楼及匝道桥项目的实施,对在建轨道交通 15 号线施工通道结构的影响较小,不会影响其正常施工,风险可控,方案基本可行。

参考文献:

[1] 王伟星,韩侃,刘锬,等. 基坑施工对临近地铁隧道结构安全性影响分析[J]. 防灾减灾学报,2024,40(3):16-24.
WANG W X, HAN K, LIU K, et al. Analysis of the influence of foundation pit construction on the safety of adjacent subway tunnel structure[J]. Journal of disaster prevention and reduction, 2024,40(3):16-24.

[2] 章慧健,牛晓宇,刘功宁,等. 既有地铁列车振动荷载下密贴下穿通道的动力响应特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023,42(5):1273-1286.
ZHANG H J, NIU X Y, LIU G N, et al. Research on the dynamic response of the closely-attached underpass induced by the trains' vibrating load of metro[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2023,42(5):1273-1286.

[3] 张治国,蒋康明,王志伟,等. 考虑 Pasternak 地基模型的基坑开挖诱发既有隧道纵向变形理论分析[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(S1):57-67.
ZHANG Z G, JIANG K M, WANG Z W, et al. Theoretical analysis on longitudinal deformation of existing tunnel induced by adjacent foundation pit excavation considering Pasternak foundation model[J]. Tunnel construction, 2020,40(S1):57-67.

[4] 张治国,李振波,张孟喜,等. 考虑隧道开挖与桩基相互作用的大底盘塔楼建筑变形分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2021,51(4):603-609.
ZHANG Z G, LI Z B, ZHANG M X, et al. Analysis on deformation of tower with large chassis considering interaction between tunnel excavation and pile foundation[J]. Journal of Southeast

University (natural science edition),2021,51(4):603-609.

[5] 魏纲,朱德涵,王哲,等. 复合成层地层盾构隧道施工引起土体变形计算研究[J]. 岩土工程学报,2024,46(5):919-926.

WEI G,ZHU D H,WANG Z,et al. Calculation of soil deformation caused by construction of shield tunnels in composite layered strata [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2024, 46(5):919-926.

[6] 魏纲,郭丙来,王哲,等. 考虑管线老化和破损时基坑开挖对邻近管线纵向变形的影响[J]. 浙江工业大学学报,2024,52(1):9-16,24.

WEI G, GUO B L, WANG Z, et al. Influences of foundation excavation on adjacent pipelines considering aging and damage of pipelines[J]. Journal of Zhejiang University of Technology,2024,52(1):9-16,24.

[7] 房倩,杜建明,王赶,等. 砂土隧道开挖地层变形规律及影响因素分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2020,2(3):67-76.

FANG Q,DU J M,WANG G,et al. Stratum deformation laws and influence factors analysis of tunnel excavation in sand[J]. Hazard control in tunnelling and underground engineering,2020,2(3):67-76.

[8] 王彦伟. 复杂地质条件下市政高架桥与盾构区间间接施工影响研究[J]. 工程建设,2024,56(8):61-65,90.

WANG Y W. Study on approaching construction of viaduct and shield tunnel under complex geological conditions [J]. Engineering construction,2024,56(8):61-65,90.

[9] 刘挽群,刘燕,刘勇,等. 共用地下连续墙的双侧基坑近接开挖对地铁车站位移变形的影响[J]. 济南大学学报(自然科学版),2025,39(4):602-608.

LIU W Q,LIU Y,LIU Y,et al. Influences of proximity excavation of bilateral foundation pits with common diaphragm walls on displacement deformation of subway stations [J]. Journal of University of Jinan (science and technology),2025,39(4):602-608.

[10] 杨波,肖凯成,王长健. 近接高铁桥桩的深基坑不同开挖方案对比[J]. 南昌大学学报(理科版),2023,47(2):199-204.

YANG B,XIAO K C,WANG C J. Comparison of different scheme of deep foundation excavation near high-speed railway bridge piles[J]. Journal of Nanchang University (natural science), 2023,47(2):199-204.

[11] 罗贤民,黄勇,蒙强,等. 明挖基坑近接桥梁及航站楼施工控制研究[J]. 建筑技术开发,2024,51(5):112-115.

LUO X M,HUANG Y,MENG Q,et al. Study on the reasonable excavation scheme for open cut foundation pit approaching bridges and terminals buildings [J]. Building technology development, 2024,51(5):112-115.

[12] 林峰. 软土地区深基坑近接地铁隧道施工水平位移影响因素[J]. 铁道建筑,2023,63(1):100-104.

LIN F. Influence factors of horizontal displacement of deep foundation pit adjacent to metro tunnel construction in soft soil area[J]. Railway engineering,2023,63(1):100-104.

[13] 崔天麟,肖红渠,魏广庆,等. 广州地铁小北站暗挖隧道 FBG 监测技术研究[J]. 现代隧道技术,2007,44(4):28-31.

CUI T L,XIAO H Q,WEI G Q,et al. Applying FBG sensing technology for monitoring a bored tunnel at Xiaobei Station on Guangzhou Subway [J]. Modern tunnelling technology, 2007, 44(4):28-31.

[14] 徐莹,杜雁鹏. 基于 Timoshenko-Pasternak 模型的新建盾构隧道上穿引起既有隧道纵向变形分析[J]. 公路交通技术,2024,40(4):29-42.

XU Y,DU Y P. Analysis of longitudinal deformation of existing tunnel caused by overpassing of new shield tunneling based on Timoshenko-Pasternak model [J]. Technology of highway and transport,2024,40(4):29-42.

[15] RAN L,DING Y,CHEN Q Z,et al. Influence of adjacent shield tunneling construction on existing tunnel settlement: field monitoring and intelligent prediction [J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A,2023,24(12):1106-1119.

[16] 黄德中,马险峰,王俊淞,等. 软土地区盾构上穿越既有隧道的离心模拟研究[J]. 岩土工程学报,2012,34(3):520-527.

HUANG D Z,MA X F,WANG J S,et al. Centrifuge modelling of effects of shield tunnels on existing tunnels in soft clay [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2012, 34 (3): 520-527.

[17] 刘翔. 新建隧道下穿既有隧道力学响应分析[D]. 北京:北京交通大学,2020.

LIU X. Mechanical behaviours of existing tunnels due to new tunnels construction below [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2020.

[18] 芮瑞,杨宇,杨海青,等. 地层塌陷引起土体变形的阵列式三维活动门试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(12):2898-2907.

RUI R,YANG Y,YANG H Q,et al. Array three-dimensional trapdoor experimental study on soil deformation due to ground collapse[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2023,42(12):2898-2907.

[19] 王姝. 复杂环境下凹形深大基坑支护设计与实践[J]. 建筑结构,2025,55(7):131-136,39.

WANG S. Design and practice on support of deep-large concave foundation pit in complex environment [J]. Building structure, 2025,55(7):131-136,39.

[20] 汪明元,过锦,俞建霖,等. 基坑开挖诱发邻近桩基水平变形的理论分析方法[J]. 建筑结构,2025,55(5):142-147.

WANG M Y,GUO J,YU J L,et al. Theoretical analysis method for horizontal deformation of adjacent pile foundation induced by excavation of foundation pit [J]. Building structure, 2025, 55(5):142-147.

[21] 徐中华,王卫东,宗露丹,等. 软土地层 45m 级超深基坑工程实测变形性状分析[J]. 建筑结构,2024,54(10):118-127.

XU Z H,WANG W D,ZONG L D,et al. Analysis on measured deformation performance of 45m class ultra-deep foundation pit project in soft soil layer[J]. Building structure,2024,54(10):118-127.