



## 双线盾构隧道下穿对邻近机场航站楼高架桥的影响

咸庆军<sup>1</sup>, 王仙妹<sup>1</sup>, 豆海涛<sup>2</sup>, 樊志远<sup>1</sup>, 张斌<sup>1</sup>, 张浩然<sup>1</sup>

(1. 河南工业大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

**摘要:**为研究双线盾构隧道下穿施工对高架桥结构变形的影响,以郑许市域铁路下穿新郑机场 T1 航站楼高架桥工程为背景,采用有限元软件 Midas GTS 建立数值模型,模拟双线盾构隧道施工全过程。通过对比数值模拟结果与现场监测数据,验证了模型的可靠性,并分析了高架桥变形发展规律及其与工程规范控制标准的符合性。研究表明:高架桥墩台变形特征受左右线隧道相对位置和施工进度影响显著;双线隧道贯通后,ZQ11a 墩台最大沉降量为 2.265 mm,纵向相邻墩台 ZQ08a 与 ZQ09a 间最大沉降差为 0.963 mm,横向相邻墩台 ZQ08a 与 ZQ08b 间最大沉降差为 1.487 mm,ZQ08a 承台最大水平位移为 0.792 mm,各项变形指标均满足规范控制标准要求,能够保障 T1 航站楼落客平台高架桥的正常运营。本文研究成果深化了对双线盾构隧道下穿施工过程的理解和认识,可为类似隧道工程施工与安全管理提供参考。

**关键词:**盾构隧道; 高架桥; 桥梁墩台; 变形特征; 现场监测; 有限元模拟

中图分类号:U231<sup>+</sup>.3

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)09-0038-07

doi:10.13402/j.gcjs.2025.09.112

## Impact of double-line shield tunnel underpass on viaducts in adjacent airport terminals

XIAN Qingjun<sup>1</sup>, WANG Xianmei<sup>1</sup>, DOU Haitao<sup>2</sup>, FAN Zhiyuan<sup>1</sup>, ZHANG Bin<sup>1</sup>, ZHANG Haoran<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, Henan, China;

2. China Railway 4th Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China)

**Abstract:** In order to study the impact of double-line shield tunnel underpass construction on the structural deformation of viaducts, a numerical model is established by using finite element software Midas GTS to simulate the whole process of double-line shield tunnel construction based on the viaduct project of Zhengxu municipal railway under Xinzheng airport T1 Terminal. By comparing the numerical simulation results with the on-site monitoring data, the reliability of the model is verified, and the deformation development law of the viaduct and its conformity with the engineering code control standard are analyzed. The results show that the deformation characteristics of viaduct piers and abutments are significantly affected by the relative position of the left and right line tunnels and the construction progress. After the double-track tunnel is completed, the maximum settlement of ZQ11a pier is 2.265 mm, the maximum settlement difference between longitudinal adjacent piers ZQ08a and ZQ09a is 0.963 mm, the maximum settlement difference between transverse adjacent piers and abutments ZQ08a and ZQ08b is 1.487 mm, and the maximum horizontal displacement of ZQ08a is 0.792 mm. All deformation indicators meet the requirements of the specification control standards, which can ensure the normal operation of the viaduct of the passenger drop-off platform in Terminal 1. The results deepen the understanding and awareness of the

收稿日期: 2024-07-29

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目(242300420017); 国家自然科学基金资助项目(51708181); 河南工业大学创新基金支持计划资助项目(2022ZKCJ05)

作者简介: 咸庆军(1982—), 男, 副教授, 从事结构工程及地下空间工程方面的研究。

通信作者: 王仙妹(1998—), 女, 硕士研究生, 从事地铁隧道及地下空间工程方面的研究。

underpass construction process of double-line shield tunnels, and can provide references for the construction and safety management of similar tunnel projects.

**Key words:** shield tunnel; viaduct; bridge pier and abutment; deformation characteristics; finite element simulation; on-site monitoring

随着我国地铁建设与城镇化进程的深度融合, 地铁作为城市交通体系的重要组成部分, 其建设规模与速度不仅直接影响城市交通发展格局, 更在推动城市现代化进程中发挥着关键作用。然而, 地铁线路的铺设常面临复杂的地下空间布局问题, 与邻近建(构)筑物尤其是高架桥桩基产生空间冲突。近年来, 随着工程实践的积累, 新建地铁隧道穿越既有高架桥的技术难题日益凸显, 成为学术界和工程界关注的重点。

当前, 针对盾构施工对既有高架桥影响的研究已取得显著进展。布亚芳等<sup>[1]</sup>以西安地铁四号线某区间盾构侧穿高架桥为例, 通过数值模拟与现场监测相结合的方法, 揭示了盾构侧穿高架桥时桥墩的受力变形特征, 研究表明: 桥墩对地表沉降具有一定的约束作用, 合理布置桩基可使既有结构沉降减少 15%~20%。刘喆等<sup>[2]</sup>利用有限元软件 ANSYS 进行参数化分析, 发现优化盾构参数与采用隔离桩均能有效控制桥桩变形, 其中隔离桩措施可使桥桩水平位移降低 30% 以上。李方明等<sup>[3]</sup>通过有限元软件 Abaqus 模拟发现, 桩基参数与变形存在显著相关性: 桩长增加 20% 可减少 12% 的桩顶沉降, 而土体损失率每增加 1% 将导致桩基附加弯矩增大 8%。杨浩楠<sup>[4]</sup>的研究表明, 双线盾构隧道施工中箱涵结构沉降量可达管片变形的 2~3 倍, 采用环向注浆加固技术可将其控制在 5 mm 以内。李会良等<sup>[5]</sup>证实合理的前期加固措施可使地铁施工引起的高架桥变形降低 40%~50%, 完全满足规范控制要求。

然而, 现有研究多集中于常规建筑或高铁桥桩基, 对于大跨度、重荷载且沉降控制要求严格的机场航站楼高架桥, 在黏质粉土地层中双线盾构施工的影响机制研究仍显不足。本文以新郑机场站~遵大路站区间双线盾构隧道下穿新郑机场 T1 航站楼落客平台高架桥工程为研究对象, 采用有限元软件 Midas GTS 建立数值模型, 系统分析双线盾构隧道施工对邻近高架桥变形的影响规律,

并通过现场监测数据验证模型的可靠性, 以期为盾构隧道的正常施工提供理论指导。

## 1 工程概况

### 1.1 新郑机场站~遵大路站区间概况

新郑机场站~遵大路站区间为郑州机场至许昌市域铁路(郑州段)第八个区间, 位于郑州航空港区北部。该盾构区间隧道自新郑机场站始发后, 依次下穿新郑国际机场 T1 航站楼落客平台、T1 航站楼主体结构、货运停机坪、机场第一跑道(货机专用跑道)及其配套滑行道系统; 随后继续穿越规划中的第四跑道及滑行道、第五跑道及滑行道, 最终沿新郑机场南侧农田延伸至遵大路站。

区间隧道与 T1 航站楼落客平台高架桥桩基的空间位置关系如图 1 所示。隧道在右线 DK24 + 023.556~DK24 + 073.000 和左线 DK24 + 051.682~DK24 + 092.903 区段下穿高架桥结构。隧道整体呈南北走向, 采用斜向穿越方式通过高架桥区域, 左右线隧道中心间距为 15.8~16.9 m。施工过程中需特别关注对高架桥桩基承台 ZQ08a~ZQ13a 和 ZQ07b~ZQ11b 的影响。隧道采用标准断面设计, 衬砌外径为 6.2 m, 内径为 5.5 m, 使用通用楔形衬砌环错缝拼装, 单环宽度为 1.5 m, 厚度为 0.35 m。高架桥上部为现浇钢筋混凝土连续梁结构, 支点横梁设置预应力钢筋; 下部采用独柱接承台形式, 基础为 D500 mm × 125 mm 摩擦型高强预应力预制管桩。桥墩横向中心距为 16 m, 纵向中心距为 12 m。其中 ZQ13a~ZQ11a 和 ZQ11b 桩长为 21 m, ZQ10a~ZQ08a 及 ZQ10b~ZQ07b 桩长为 19m, 桩底与隧道顶最小净距为 3.04 m。

### 1.2 工程地质条件

新郑机场站~遵大路站区间地处郑州航空港区北部, 属于典型的山前冲洪积平原地貌, 整体地势平坦。工程地质条件良好, 场地土质均为稳定, 未发现软弱土层、深厚填土层和黄土冲沟等不良地质现象。表 1 为各土层分布情况及相应力

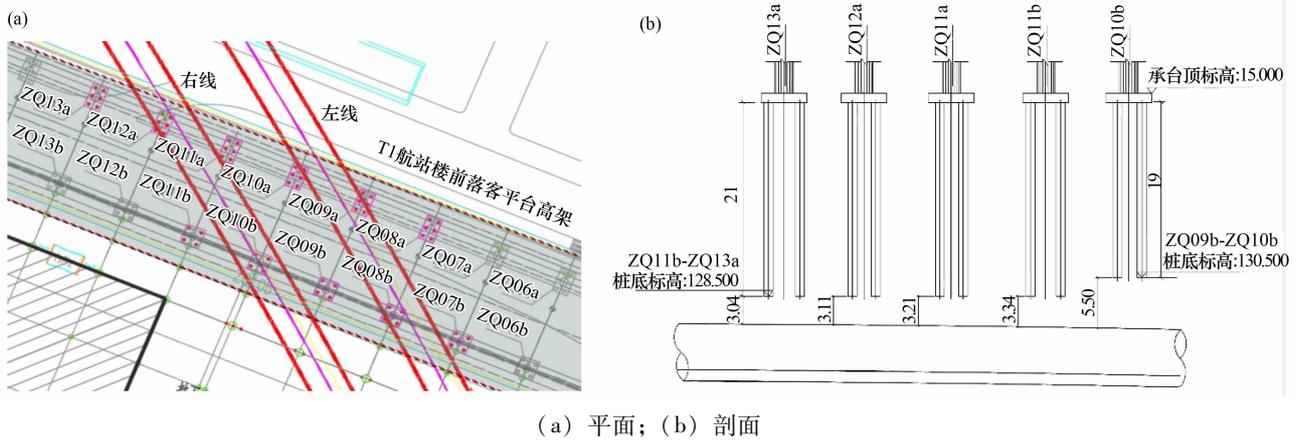


图 1 区间隧道与 T1 航站楼落客平台高架桥桩基之间的位置关系

表 1 各土层分布情况及力学参数

层号	土层名称	天然容重/(kN·m <sup>-3</sup> )	压缩模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
③31	黏质粉土	19.2	8.0	0.30	14	22.0
③31B	粉质黏土	19.0	7.5	0.32	27	16.0
③41	粉砂	18.5	15.0	0.28	0	27.0
③41A	黏质粉土	19.5	11.0	0.30	14	24.5
③22	粉质黏土	19.6	9.5	0.32	32	19.0
④21A	黏质粉土	20.0	13.5	0.30	18	23.0
④21	粉质黏土	19.7	11.5	0.32	27	18.0

学参数。由表 1 可知：各土层均具有中等~低压缩性特征，地基承载力较高，场地工程类别为 II 类。水文地质勘察数据显示，地下水位标高为 122.23~139.99 m，平均标高为 131.69 m，相应埋深为 10.5~18.3 m，平均埋深为 13.87 m。地下水主要赋存于③31 层黏质粉土、③41 层粉砂和③41A 层黏质粉土中，属于孔隙潜水类型，渗透性表现为弱~中等透水特性。

1.3 控制指标

鉴于 T1 航站楼落客平台高架桥的功能特性与市政桥梁相同，其盾构隧道下穿施工的变形控制标准可参照市政桥梁监测标准执行。根据《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911—2013) 的相关规定，表 2 详细列出高架桥的各项监测控

表 2 高架桥监测控制标准 mm

控制指标	控制值	预警值	报警值
桥梁墩台允许沉降	10	7.0	8.50
纵向相邻桥梁墩台间差异沉降	2	1.4	1.70
横向相邻桥梁墩台间差异沉降	3	2.1	2.55
承台水平位移	3	2.1	2.55

制标准。为确保施工安全，工程采用分级预警机制：将规范控制值的 70% 设定为预警阈值，85% 设定为报警阈值。

2 模型建立及数值模拟

2.1 模型建立

采用有限元软件 Midas GTS 建立模型，模型尺寸为 210 m × 97 m × 70 m (长 × 宽 × 高)。在材料本构模型选择方面，土体采用莫尔-库伦模型，结构材料采用弹性模型，具体力学参数如表 3 所示。模型单元类型设置：各土层、注浆层及承台均采用实体单元模拟，桩基采用梁单元，盾构机外壳和管片衬砌采用板单元。整体有限元模型如图 2

表 3 各种材料力学参数

材料名称	弹性模量/(10 <sup>4</sup> MPa)	泊松比	容重/(kN·m <sup>-3</sup> )
注浆层	0.20	0.23	20.0
承台	3.15	0.20	25.0
桩	3.81	0.20	25.0
盾壳	21.00	0.20	78.5
管片	2.76	0.20	26.0

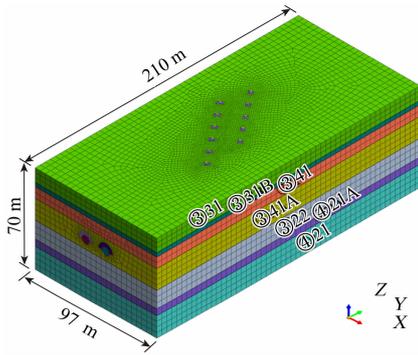


图 2 整体有限元模型

所示, 其中隧道与桩基的相对位置关系如图 3 所示。在边界条件处理上, 模型仅考虑土体自重应力, 忽略构造应力影响; 除顶面设为自由边界外, 其余四个侧面及底面均施加固定约束条件。

### 2.2 隧道下穿数值模拟

盾构隧道下穿开挖过程的数值模拟主要包括 4 个步骤: 1) 工作面开挖引起前方土体应力扰动; 2) 盾构机推进实施土体开挖; 3) 盾尾管片衬砌安装; 4) 盾尾同步注浆作业。采用有限元软件 Midas GTS 对 210 m 长隧道进行动态开挖模拟, 其中盾构外壳长度取 6 m, 每环管片长度为 1.5 m, 共计 140 环。施工模拟采用左右线分序开挖方案, 先完成左线贯通后再进行右线开挖, 具体模拟流程如下。

(1) 建立三维有限元模型, 首先进行初始地应力场平衡计算, 在承台柱顶施加荷载模拟桩基既有状态, 确定开挖位置时, 盾构机起始位置距离模型端部 6 m。

(2) 盾构机定位后, 将指定位置单元材料替换为盾构机材料, 施加掘进压力平衡开挖前方土体应力。

(3) 模拟盾构推进过程, 每推进一环即更新前方掘进压力, 同时激活后方千斤顶推力安装管片, 下一掘进步时钝化上一步的掘进压力和千斤顶推力。

(4) 采用管片单元替换外径单元模拟衬砌安装, 完成后施加法向均布注浆压力, 并将注浆区域材料属性由原地层改为注浆体。

(5) 按上述步骤循环实施, 依次完成左右线隧道开挖全过程模拟。

## 3 开挖过程中高架桥变形分析

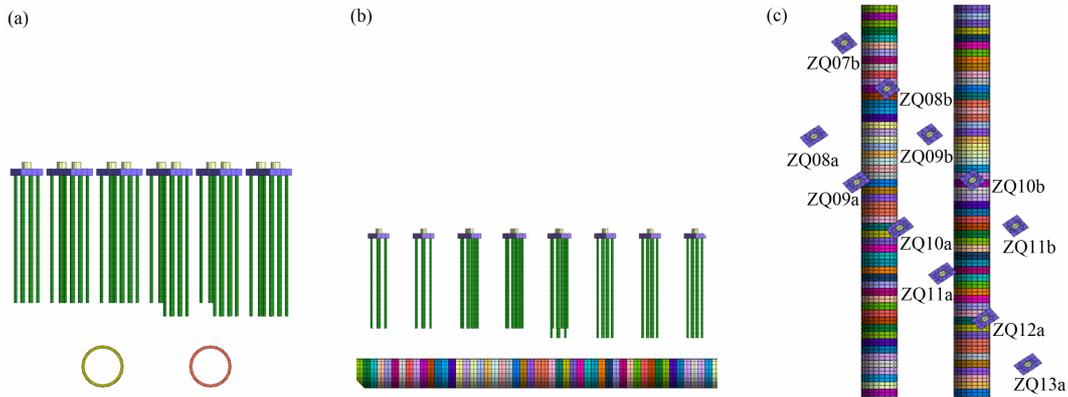
### 3.1 桥梁墩台竖向位移

ZQ08a ~ ZQ13a 桥梁墩台在盾构隧道左线、右线先后下穿贯通过程中竖向位移的发展曲线如图 4 所示。根据施工步序可以划分为 6 个阶段: 隧道左线开挖至高架桥, 左线穿过高架桥, 左线贯通, 隧道右线开挖至高架桥, 右线穿过高架桥, 右线贯通。由图 4 可知:

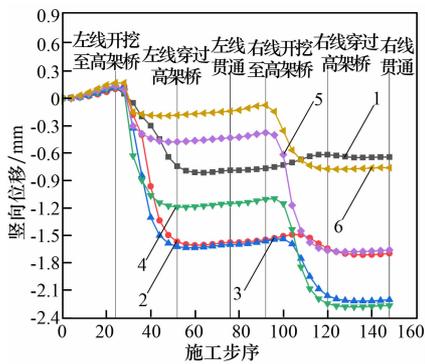
(1) 除第二阶段(左线逐步穿过高架桥)和第五阶段(右线逐步穿过高架桥)外, 其余阶段桥梁墩台的竖向位移均发展较为平稳, 位移值变化幅度较小。

(2) 在第二和第五阶段, 受盾构施工位置变化、桩-土相互作用改变以及地应力重分布等因素综合影响, 各桥梁墩台呈现不同程度的沉降特征, 沉降速率存在差异, 其中 ZQ08a 墩台在第五阶段出现轻微隆起现象。

(3) 第六阶段双线贯通后, 由于 ZQ10a 和 ZQ11a 位于双线隧道之间, 受影响最为显著, 两



(a) 主视; (b) 左视; (c) 俯视  
图 3 隧道与桩基的相对位置关系

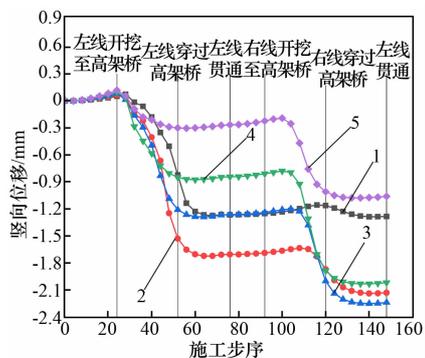


1—ZQ08a; 2—ZQ09a; 3—ZQ10a;  
4—ZQ11a; 5—ZQ12a; 6—ZQ13a。

图 4 ZQ08a ~ ZQ13a 桥梁墩台竖向位移

墩台的竖向位移趋于一致, 最大值达到 2.265 mm; ZQ09a 和 ZQ12a 分别位于左、右线隧道正上方, 受影响程度次之, 竖向位移最大值为 1.606 mm; ZQ08a 和 ZQ13a 位于隧道外侧, 受影响最小, 竖向位移最大值仅为 0.759 mm。

ZQ07b ~ ZQ11b 桥梁墩台竖向位移的发展曲线如图 5 所示, 根据施工步序也分为 6 个阶段。可见各桥梁墩台在整个施工过程中竖向位移的发展规律与图 4 类似, 此处不再赘述。由图 5 可知: 在第六阶段结束时, 各桥梁墩台最终竖向位移的大小主要与左线、右线隧道的空间位置有关。其中, ZQ09b 位于双线盾构贯通区域的中心部位, 其竖向位移最大, 达到 2.238 mm; ZQ08b 和 ZQ10b 布置在 ZQ09b 的两侧, 所受影响次之, 两竖向位移基本相同, 位移值为 2.130 mm; ZQ07b、ZQ11b 离中心区域渐远, 所受影响逐渐减小, 产生的竖向位移值分别为 1.284、1.061 mm。



1—ZQ07b; 2—ZQ08b; 3—ZQ09b;  
4—ZQ10b; 5—ZQ11b。

图 5 ZQ07b ~ ZQ11b 桥梁墩台竖向位移

表 4 为双线盾构隧道贯通后 a 类和 b 类桥梁墩

台的最终沉降值。由表 4 可知: 1) ZQ11a 墩台的最大沉降值为 2.265 mm, ZQ09b 墩台的最大沉降值为 2.238 mm, 均小于规范允许的沉降控制值 10 mm; 2) 纵向相邻墩台 ZQ08a 与 ZQ09a 之间的最大沉降差为 0.963 mm, 纵向相邻墩台 ZQ10b 与 ZQ11b 之间的最大沉降差为 0.956 mm, 均小于规范规定的纵向沉降差控制值 2 mm; 3) 横向相邻墩台 ZQ08a 与 ZQ08b 之间的最大沉降差为 1.487 mm, 小于规范规定的横向沉降差控制值 3 mm。

表 4 高架桥 a 类和 b 类桥梁墩台的最终沉降值 mm

墩台编号	沉降值
ZQ13a	0.759
ZQ12a	1.658
ZQ11a	2.265
ZQ10a	2.201
ZQ09a	1.606
ZQ08a	0.643
ZQ11b	1.061
ZQ10b	2.017
ZQ09b	2.238
ZQ08b	2.130
ZQ07b	1.284

监测结果表明, 双线盾构隧道下穿施工引起的高架桥墩台竖向位移均满足 GB 50911—2013 规定的控制标准要求, 能够保障 T1 航站楼落客平台高架桥的运营安全。

### 3.2 承台水平位移

ZQ08a ~ ZQ13a 承台水平位移的发展曲线如图 6 所示, 按照施工步序分为 6 个阶段。由图 6 可知: 1) 除第二阶段和第五阶段外, 其余阶段承台水平位移均发展较为平稳, 位移值变化不大; 2) 在第二和第五阶段, 主要由于左线、右线盾构施工先后穿过高架桥的位置及进度的变化, 承台受地层水平位移影响产生偏向隧道的位移(数值模拟以 X 轴正向为位移正方向); 各承台位移方向及速率各异, 其中位于双线隧道间的 ZQ10a 和 ZQ11a 在第五阶段出现反方向位移; 3) 在第六阶段结束时, 由于双线盾构隧道空间位置的共同影响, ZQ10a 和 ZQ11a 正处于双线隧道之间的中间部位, 两承台水平位移变化最小, 位移值仅为 0.258 mm。其余 4 个承台分布于 ZQ10a 和 ZQ11a 的两侧, 其水平位移所受影响

较大: 最左端的 ZQ08a 承台的水平位移最大, 位移值达到 0.792 mm, 最右端的 ZQ13a 承台的水平位移, 位移值为 0.698 mm。

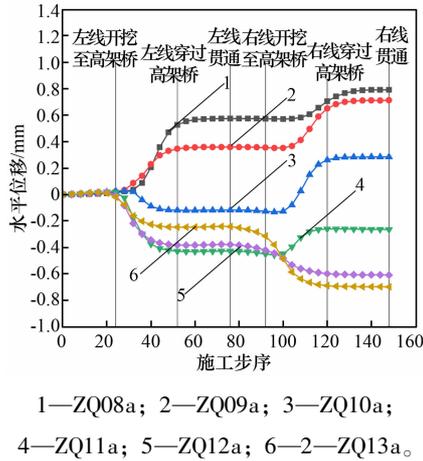


图 6 ZQ08a ~ ZQ13a 承台水平位移

ZQ07b ~ ZQ11b 承台水平位移的发展曲线如图 7 所示, 其发展规律与图 6 中相似。由图 7 可知: 在第六阶段施工完成后, 受双线盾构隧道空间位置影响, 位于双线隧道中心区域的 ZQ09b 承台水平位移最小, 仅为 0.121 mm; 分布在 ZQ09b 两侧的 ZQ08b 和 ZQ10b 承台水平位移逐渐增大, 最大值为 0.505 mm; 距离中心区域较远的 ZQ07b 和 ZQ11b 承台受影响最大, 水平位移值达到 0.744 mm。

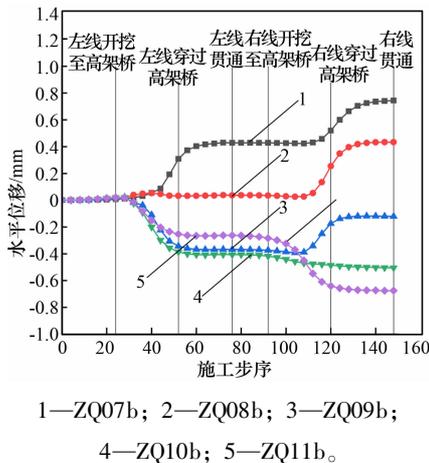


图 7 ZQ07b ~ ZQ11b 承台水平位移

表 5 为双线盾构隧道贯通后 a 类和 b 类承台的水平位移监测数据。由表 5 可知: ZQ08a 承台最大水平位移值为 0.792 mm, ZQ07b 承台最大水平位移值为 0.744 mm, 均小于规范规定的 3 mm 控制标准。

监测结果显示, 高架桥承台水平位移完全满

足 GB 50911—2013 要求, 能够保障 T1 航站楼落客平台高架桥的安全运营。

表 5 高架桥 a 类和 b 类承台的最终水平位移值 mm

承台编号	水平位移值
ZQ13a	0.698
ZQ12a	0.609
ZQ11a	0.258
ZQ10a	0.291
ZQ09a	0.713
ZQ08a	0.792
ZQ11b	0.675
ZQ10b	0.505
ZQ09b	0.121
ZQ08b	0.433
ZQ07b	0.744

#### 4 现场监测分析

现场监测作为工程安全风险控制的重要手段之一, 能够实时监测双线盾构隧道施工影响范围内高架桥墩台的变形情况, 准确评估高架桥的安全状况并预测其变形发展趋势。图 8 为 T1 航站楼落客平台高架桥变形监测布置方案。表 6 对比了高架桥变形的有限元模拟与现场监测结果, 通过分析发现:

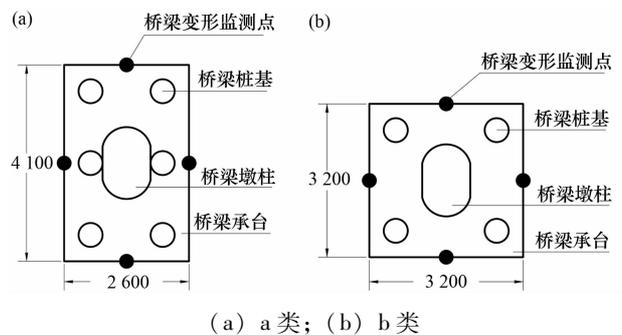


图 8 T1 航站楼落客平台高架桥变形监测布置方案

(1) 在沉降量方面, a 类桥梁墩台中沉降量较小的 ZQ08a 误差较大, 达到 9.86%; b 类桥梁墩台中沉降量较小的 ZQ11b 误差为 9.40%。这主要是由于建模过程中未能充分考虑竖向荷载, 特别是忽略了建(构)筑物和车辆动荷载等关键影响因素。

(2) 在水平位移方面, a 类桥梁墩台中水平位移较大的 ZQ08a 误差为 8.14%, b 类桥梁墩台

表 6 高架桥变形有限元模拟与现场监测结果对比

墩台编号	现场监测/mm		有限元模拟/mm		沉降量误差/%	水平位移误差/%
	沉降量	水平位移	沉降量	水平位移		
ZQ08a	0.71	0.86	0.64	0.79	-9.86	-8.14
ZQ09a	1.74	0.76	1.61	0.71	-7.47	-6.58
ZQ10a	2.39	0.30	2.20	0.29	-7.94	-6.45
ZQ11a	2.51	0.29	2.27	0.26	-9.56	-7.14
ZQ08b	2.31	0.46	2.13	0.43	-7.79	-6.52
ZQ09b	2.42	0.13	2.24	0.12	-7.44	-7.69
ZQ10b	2.21	0.55	2.02	0.51	-8.60	-7.27
ZQ11b	1.17	0.74	1.06	0.68	-9.40	-8.11

注：沉降量误差、水平位移误差均采用相应的“(模拟值 - 监测值)/监测值”计算得到。

中 ZQ11b 的水平位移误差为 8.11%。这主要是因为建模时未考虑外部水平荷载的复杂作用，以及盾构施工后地基土水平抗力和桩 - 土 - 承台相互作用的综合影响。

(3) 虽然这些建模假设和简化提高了有限元分析的效率，但相较于现场监测值，有限元模拟结果普遍呈现偏小的趋势。

## 5 结 论

(1) 通过合理的假设与简化，建立了双线盾构下穿施工的整体有限元模型，成功模拟了左线、右线隧道先后贯通的施工过程，并与现场监测结果进行了对比分析，验证了有限元模型的可靠性和准确性，为后续研究高架桥变形发展规律奠定了坚实基础。

(2) 研究揭示了 a 类和 b 类桥梁墩台竖向位移的发展规律。其中，ZQ11a 墩台的最大沉降量为 2.265 mm，纵向相邻墩台 ZQ08a 与 ZQ09a 之间的最大沉降差为 0.963 mm，横向相邻墩台 ZQ08a 与 ZQ08b 之间的最大沉降差为 1.487 mm，均满足相关规范对桥梁墩台竖向位移的监测控制标准。

(3) 通过对 a 类和 b 类承台水平位移的监测与分析，掌握了其变化规律。其中，ZQ08a 承台

的最大水平位移值为 0.792 mm，满足相关规范对承台水平位移的监测控制标准，进一步验证了施工过程的安全性。

(4) 通过有限元模拟与现场监测的对比分析，确认高架桥变形符合规范要求，满足 T1 航站楼高架桥的运营需求。研究深化了对双线盾构隧道下穿施工影响的认识，强调了施工控制的关键作用，为类似工程提供了施工与安全管理的重要参考依据，强调了安全控制的重要性。

## 参考文献：

- [1] 布亚芳,孙琳,刘柳,等. 土压平衡盾构近距离侧穿高架桥桥墩的受力与变形[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(9):23-27.
- [2] 刘喆,何平,张安琪,等. 盾构隧道施工过程及支护方式对高速铁路高架桥群桩基础影响分析[J]. 工程力学,2016,33(增刊1):219-226.
- [3] 李方明,陈国兴. 地铁隧道盾构施工对桩箱建筑物影响研究[J]. 铁道标准设计,2018,62(2):128-133.
- [4] 杨浩楠. 双线盾构隧道施工稳定性分析[J]. 工程建设,2023,55(9):51-55.
- [5] 李会良,刘宝许,冯海暴. 地铁隧道临近既有高架桥施工风险研究[J]. 公路,2019,64(1):284-289.