

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.02.011

骑跨式高架桥施工对既有地铁隧道的影响

李 川¹, 李宁宁², 闫 瑾², 王彤彤³, 孙建成⁴, 朱可睿⁵, 杨旭旭⁶

(1. 青岛城市更新发展有限公司, 山东青岛 266035; 2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 山东青岛 266100; 3. 青岛地矿岩土工程有限公司, 山东青岛 266101; 4. 青岛中房建筑设计院股份有限公司, 山东青岛 266000; 5. 青岛市地铁规划设计院有限公司, 山东青岛 266309; 6. 山东科技大学, 山东青岛 266590)

摘 要: 为探究骑跨式高架桥施工对既有地铁隧道的动态影响, 以济南地铁6号线王舍人站—王舍人北站区间为工程背景, 结合现场试验与数值模拟方法, 系统分析骑跨式高架桥施工时“桩基-基坑-桥梁荷载”多阶段耦合作用下的隧道变形规律。研究表明: 1) 基坑开挖引发隧道显著上浮(最大4.62 mm), 水平收缩(最大1.74 mm)与竖向膨胀(最大3.25 mm); 桥梁加载后, 隧道下沉, 水平方向转为膨胀, 竖向收敛; 2) 隧道净距对基坑开挖影响显著: 净距从6.7 m增至20 m时, 上浮量由5.74 mm降至0.90 mm(净距大于或等于15 m时上浮量趋近于0), 而下沉量稳定于5.2 mm左右, 建议净距大于或等于12 m以控制风险。3) 地层特性主导变形响应: 粉质黏土层在基坑阶段上浮量更大(+1.2 mm), 砾砂层在桥梁运营阶段下沉更显著(-1.5 mm), 而中风化及微风化岩层变形可忽略。4) 多承台间隔施工可降低后续开挖引起的上浮量(第二承台上浮减少12%), 推荐“隔一挖一”施工策略。

关键词: 城市轨道交通; 骑跨式高架桥; 既有地铁隧道; 现场试验; 数值模拟

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)02-0089-08

Impact of Straddle-Type Viaduct Construction on Existing Metro Tunnels

LI Chuan¹, LI Ningning², YAN Jin², WANG Tongtong³, SUN Jiancheng⁴, ZHU Kerui⁵, YANG Xuxu⁶

(1. Qingdao Urban Renewal Development Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266035; 2. Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266100; 3. Qingdao Geology and Geotechnical Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266101; 4. Qingdao Zhongfang Architectural Design Institute Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000; 5. Qingdao Metro Planning and Design Institute Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266309; 6. Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590)

Abstract: To investigate the dynamic impact of straddle-type viaduct construction on existing metro tunnels, this study takes the Wangsheren Station to Wangsheren North Station section of Jinan Metro Line 6 as the engineering background. Field tests and numerical simulations were conducted to systematically analyze the deformation patterns of tunnels under the multi-stage coupled effects of “pile foundation excavation, foundation pit unloading, and bridge superstructure loading.” The findings reveal that: (1) Foundation pit excavation induces significant tunnel uplift (maximum 4.62 mm), accompanied by horizontal contraction (maximum 1.74 mm) and vertical expansion (maximum 3.25 mm). After bridge loading, the tunnel subsides, with horizontal expansion and vertical convergence observed. (2) The clearance between the tunnel and foundation pit significantly

收稿日期: 2025-01-16 修回日期: 2025-10-09

第一作者: 李川, 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事城市市政工程及轨道交通工程建设、施工的技术管理, ynlichuan@126.com

通信作者: 闫瑾, 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事城市轨道交通及地下工程设计研究, yanjin@bjucd.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(52274088)

引用格式: 李川, 李宁宁, 闫瑾, 等. 骑跨式高架桥施工对既有地铁隧道的影响[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(2): 89–96.

Li Chuan, Li Ningning, Yan Jin, et al. Impact of straddle-type viaduct construction on existing metro tunnels[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(2): 89–96.

influences uplift deformation: as the clearance increases from 6.7 m to 20 m, the uplift decreases from 5.74 mm to 0.90 mm (approaching zero at ≥ 15 m), while subsidence remains stable at approximately 5.2 mm. A clearance of ≥ 12 m is recommended for risk mitigation. (3) Stratigraphic characteristics dominate deformation responses: silty clay layers exhibit greater uplift during excavation (+1.2 mm), whereas gravelly sand layers experience more pronounced subsidence during bridge operation (-1.5 mm). Deformations in moderately and slightly weathered rock strata are negligible. (4) Interval construction of multiple pile caps reduces subsequent excavation-induced uplift (with a 12% reduction for the second pile cap), supporting a “alternate excavation” construction strategy. Innovatively, this study proposes a deformation prediction model based on stratigraphic heterogeneity, which overcomes the limitations of traditional homogeneous assumptions and provides a theoretical foundation for optimizing the design and risk assessment of straddle-type viaduct projects.

Keywords: urban rail transit; straddle-type viaduct; existing metro tunnel; field test; numerical simulation

随着我国经济快速发展和城市化进程不断加速,城市立体交通网络逐渐成为缓解交通压力的重要解决方案。与此同时,邻近地铁结构施工对其影响的问题也愈发突出^[1-3]。在既有地铁隧道附近施作高架桥案例也已屡见不鲜,高架桥桥桩承台施工及后期运营都会对周围土体的应力及位移产生影响,继而引发邻近隧道产生较大附加变形和内力。因此,研究高架桥施工及后期运营对既有地铁隧道的影响具有重要的工程意义。

张海东等^[4]以隧道下穿高速公路桥梁工程,通过三维建模得到桩周注浆加固可有效补偿摩擦桩侧摩阻力损失。王腾等^[5]通过数值模拟及现场监测探究盾构隧道侧穿既有桥梁时对桥梁桩基的影响规律。贾春亚等^[6]以上海新建高铁站上跨地铁线路浅埋区间工程为背景,研究上部施工荷载对地铁隧道状态、行车安全性和平稳性的影响。王峰等^[7]针对邻近隧道基坑卸荷工程,探讨通过前期规划、隧道自身加固、施工措施和加强监测等方面采取措施以减小基坑开挖对邻近地铁隧道的影响。Lai等^[8]基于监测数据和数值模拟(FDM),研究因近距离小交叉角下穿隧道引起既有隧道的沉降特征。Meng等^[9]对饱和高岭土地带既有隧道附近基坑开挖进行模型试验,重点研究基坑和隧道的各项长期特性。

既有研究多集中于桩基施工的横向扰动效应,但对骑跨式高架桥施工中荷载传递方式及对地铁隧道的影响尚未明晰。鉴于此,本文通过有限元软件模拟及现场试验的方法对骑跨式高架桥施工对既有地铁隧道的影响展开研究。与既有研究相比,分析骑跨式高架桥施工中荷载传递方式,系统探讨骑跨式高架桥施工“桩基-承台基坑-桥梁荷载”多阶段耦合作用对地铁隧道的动态影响,并突破了传统均匀地层假设的局限性,建立基于地层非均匀特性的变形预测模型,进一步提升变形预测精度,以期类似工程设计与风险评估提

供借鉴和参考。

1 工程概况

凤凰黄河大桥南延工程是济南市快速路网规划的重要组成部分,在济南地铁6号线工程王舍人站—王舍人北站区间附近采用主线高架布置形式,与地铁区间并行,高架桥主线采用骑跨式承台结构形式避让地铁6号线隧道结构,如图1所示。

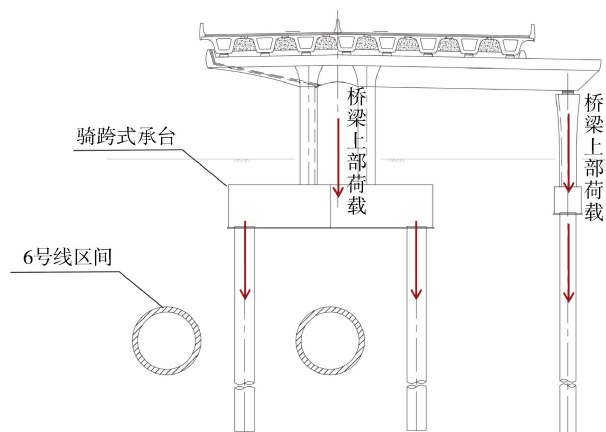


图1 桥桩与隧道区间位置关系

Figure 1 Bridge Pile and Tunnel Interval Location

侧穿施工荷载主要通过水平土压力作用于隧道侧壁,骑跨式高架桥施工因垂直荷载传递路径的复杂性,易引发隧道结构非对称变形。骑跨式施工包含基坑开挖、承台施作及桥梁加载三阶段,各阶段对隧道的影响呈现“卸载-部分回弹-再加载”的动态叠加特性。故本文主要针对骑跨式高架桥施工对既有地铁隧道的影响展开研究。

2 现场试验

为探究骑跨式高架桥施工对既有地铁隧道的影响,选取地质条件、埋深以及场地条件相吻合的场地开展现场试验。

2.1 监测方案

对试验场地进行隧道监测,监测项目为隧道拱顶竖向位移、隧道结构水平位移及相对收敛,监测方式采用自动化测量机器人。共布设 19 个监测断面,基坑正对显著影响区 5 m 一个断面,其他区域 10~20 m 一个断面。区间隧道每个断面 4 个点(拱顶监测点 1 个、拱底监测点 1 个、拱腰监测点 2 个)。

2.2 监测数据分析

自动化监测的隧道竖向位移曲线如图 2 所示,Z25~Z29 为基坑中心正下方监测点位。规定以隧道上浮为正,下沉为负。

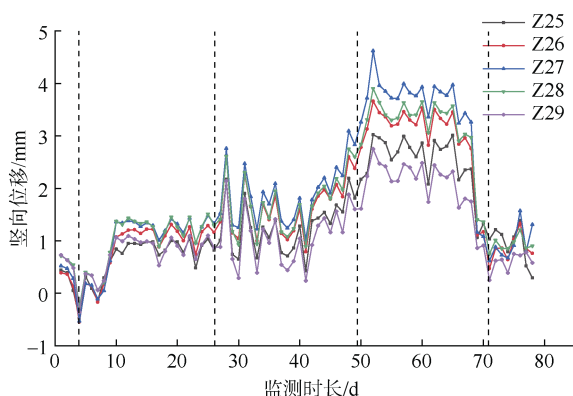


图 2 自动化监测数据

Figure 2 Automated monitoring data

由图 2 可知,在施作骑跨式承台桩基时,打桩对隧道变形影响较小,变形在 1 mm 以内;基坑开挖阶段,隧道上浮量随开挖深度增加呈线性增长,最大上浮量达 4.62 mm,印证了土体卸载的主导作用;在承台施作及拆撑回填后,上浮量回弹至 1.2 mm,说明承台施作部分恢复了地层约束。基坑正下方测点竖直位移变化幅度最大,随着隧道与基坑水平距离的增加,其他测点位移变化幅度逐步减小。变形时间滞后性较明显,约 3 d 后变形才趋于平缓,这与土体蠕变及孔隙水压力消散过程相关。

自动化监测的隧道径向收敛曲线如图 3 所示。规定径向膨胀为正,收缩为负。由图 3 可知,隧道径向收敛变形规律与隧道竖向变形规律一致,打桩时隧道径向变化不大;在基坑开挖时,隧道水平方向产生收缩,竖直方向产生膨胀,最大为 1.74 mm;在承台施作及拆撑回填后,隧道两侧径向收缩量也同时减小。

3 高架桥施工有限元模拟

3.1 有限元模型

为分析凤凰黄河大桥南延工程施工对既有轨道交

通区间隧道的影响,取相对不利位置——拟建工程与轨道交通 6 号线王舍人站—王舍人北站区间并行段,采用有限元分析软件 Midas GTS NX 做计算分析。

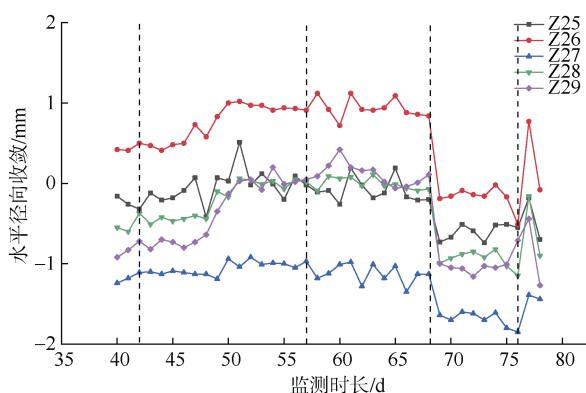


图 3 自动化监测径向收敛

Figure 3 Automated monitoring of radial convergence

3.2 材料参数选择

在数值计算中,桥梁承台及隧道衬砌混凝土采用线弹性模型描述。基坑支护中的排桩采用等效刚度法进行折算,使用板单元模拟。根据桥梁设计单位提资中承台底荷载及单桩桩顶最大轴力,施加荷载模拟桥梁运行时承台及桥桩受力情况。

桥桩采用植入式梁单元(Embedded Beam Element)模拟。该单元通过“桩-土界面单元”耦合桩体与周围土体的相互作用,可精确考虑桩侧摩阻力与端阻力的分布特性。

土体被视为均质连续介质,服从弹塑性本构关系;其初始应力场满足静力平衡条件。计算所需地层参数根据李连祥^[10]推荐的济南地区典型地层 HSS 模型参数选取办法,结合本工程地质勘察报告,初步确定各土层的初始参数。该办法基于济南地区大量地勘数据与反分析,建立了关键刚度参数(如 E_{50}^{ref} 、 E_{oed}^{ref} 、 E_{ur}^{ref})与土体类型、原位测试指标间的经验关系。在此基础上,通过迭代调整模型参数,使数值模拟的隧道变形与现场监测数据误差小于 5%(基坑开挖上浮量:模拟值 4.58 mm,监测值 4.62 mm)。具体迭代方法为:以现场监测数据为基准,依次调整土体刚度参数及强度参数,每步调整幅度控制在±10%以内,直至模拟与实测误差满足要求。最终优化后的地铁、桥梁参数及地层物理力学参数见表 1、表 2。

3.3 施工模拟

3.3.1 计算工况及步骤

为便于分析,在初始地应力平衡并开挖隧道后,

结合实际工况将高架桥施工及运营划分工序，模拟计算过程如图 4 所示。

3.3.2 模型试验与数值模拟对比分析

沿隧道模型纵向依次等间距选取 56 个节点，提取不同工况下隧道纵向各节点竖向位移，加图 5 所示，隧道变形最大点位于基坑正下方，取基坑正下方节点为监测点进行数据分析，绘制不同施工工序下隧道径

向收敛及竖向位移。

表 1 地铁及桥梁结构计算参数

Table 1 Stratigraphic physical and mechanical parameters

材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$
C35	3.15	0.2	2 400
C50	3.45	0.2	2 400
Q235	210	0.3	7 850

表 2 地层物理力学参数

Table 2 Stratigraphic physical and mechanical parameters

参数	地层厚度 h/m	静止侧压系数 K_0	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	三轴试验的割线刚度 $E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	主压密试验的切线刚度 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	卸载/加载刚度 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$
① ₂ 杂填土	2.7	0.50	0.30	5.0	10.0	17.6	4.0	4.0	32.0
⑦ ₁ 粉质黏土	5.8	0.42	0.29	35.0	16.0	19.3	5.6	5.6	44.8
⑨ ₁ 粉质黏土	1.8	0.43	0.30	27.0	18.0	20.2	5.0	5.0	40.0
⑩ ₁ 粉质黏土	4.5	0.39	0.28	28.0	18.0	20.0	5.1	5.1	40.8
⑭ ₁ 粉质黏土	3.7	0.42	0.3	28.0	18.0	19.5	5.1	5.1	40.8
⑯ ₁ 含碎石粉质黏土	4.7	0.34	0.25	32.0	17.0	19.9	6.8	6.8	54.4
⑰ ₃ 含碎石粉质黏土	90	0.35	0.26	35.0	18.0	19.2	9.7	9.7	77.6

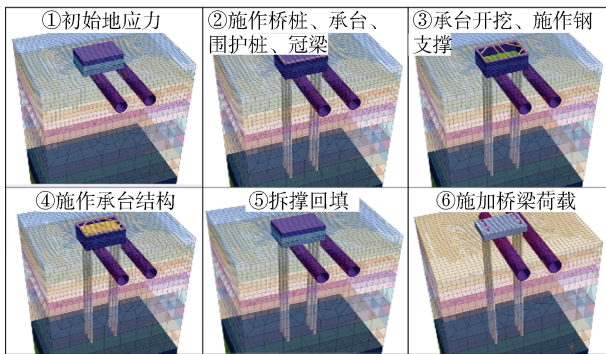


图 4 模拟计算流程

Figure 4 Flowchart of simulation calculation

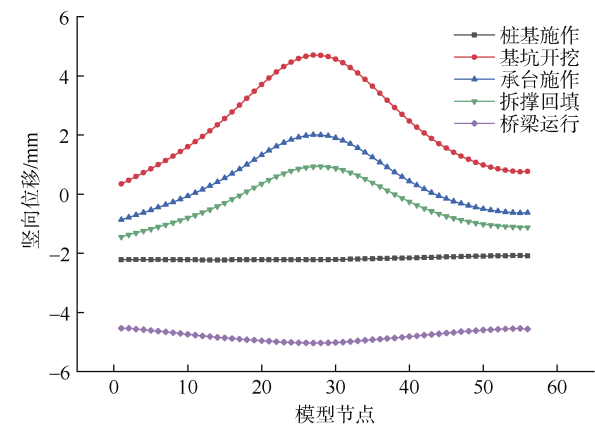


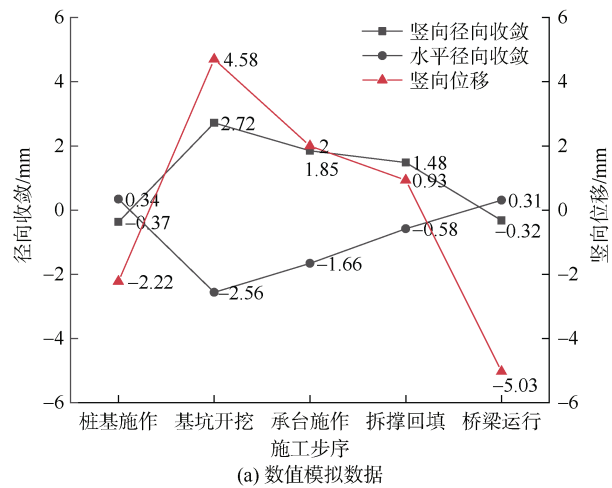
图 5 不同工况下隧道各节点竖向位移

Figure 5 Vertical displacements at each node of the tunnel under different working conditions

数值模拟数据与现场监测数据如图 6 所示，揭示了骑跨式施工特有的“浮-沉交替”变形机制：基坑开挖打破了隧道原有的应力平衡条件，土体卸荷引发隧道底部有效应力降低，导致隧道下方受到一个浮托力，因此基坑下方隧道产生上浮位移并水平收缩；同理，隧道上覆加载会导致下部地层应力重分布，隧道产生下沉，水平方向膨胀。

4 影响因素分析

根据工程经验，承台基底与隧道净距、基底地层情况、承台施作顺序等都是影响基坑下伏隧道变形的重要影响因素。因此，本文对这 3 种影响因素展开分析。



(a) 数值模拟数据

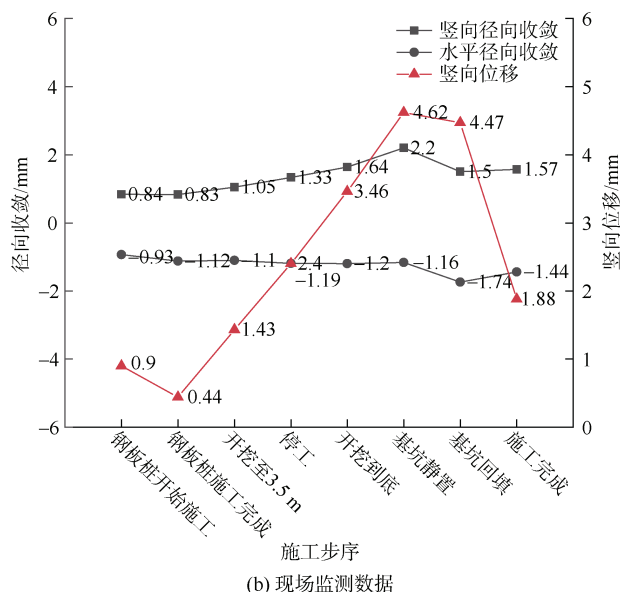


图6 数值模拟数据与现场监测数据

Figure 6 Numerical simulation data and field monitoring data

4.1 承台基底与隧道净距影响分析

承台基坑与隧道的净距决定了隧道上覆荷载的大小,因此承台基底与隧道的净距是影响隧道变形的重要影响因素。结合实际工程,选取净距 6.7、8.0、10.0、12.0、15.0、20.0 m 共 6 种工况,其他变量与实际工程相同。

以拱顶为监测点,绘制不同施工工序下隧道竖向位移及径向收敛变化曲线,如图 7 所示,在不同施工过程中,不同净距下其变形规律一致。不同净距下隧道变形差异明显,隧道净距越大,基坑开挖对隧道的影响越小,隧道上浮及水平收缩也就越小,当净距大于或等于 15 m 时,变形趋近于 0,建议工程中优先采用大于或等于 12 m 的净距设计以控制风险。不同工况下,隧道下沉稳定于 5.2 mm,与净距无关。

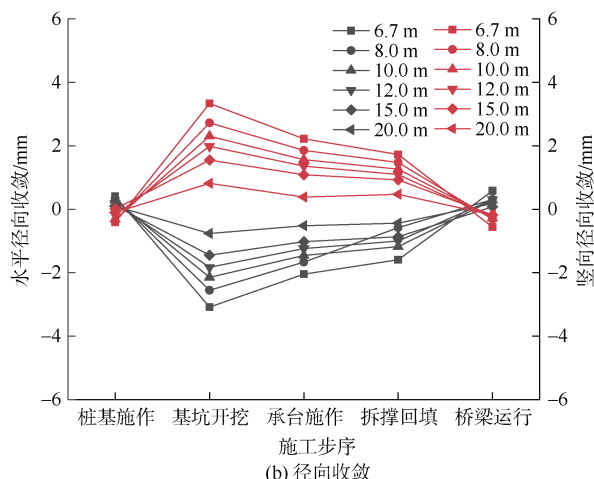
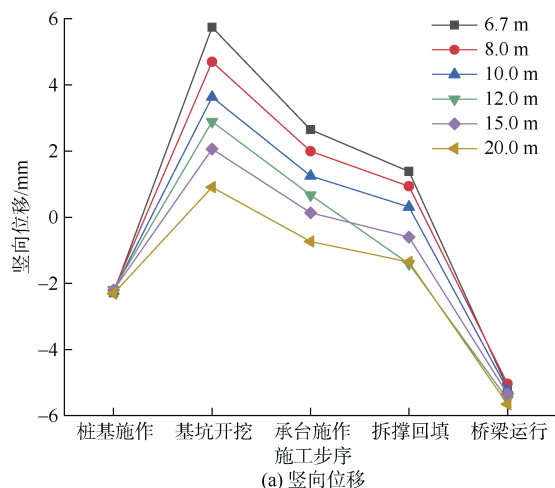


图7 不同净距下隧道竖向位移与径向收敛

Figure 7 Vertical displacement and radial convergence of the tunnel with different clearances

净距 6.7 m 时,隧道最大上浮 5.742 mm,最大下沉 5.162 mm,其上浮变形大于下沉;而随着隧道与承台净距的增加,隧道上浮量明显减少,如净距 20 m,隧道最大上浮 0.904 mm,最大下沉 5.655 mm,隧道变形主要受桥梁荷载作用,为下沉变形,承台基坑开挖对隧道的影响不大。

由图 7(b)可知,在不同施工过程中,不同净距下其收敛变形规律一致,呈现出先增大后减小的趋势,在基坑开挖时,径向变形达到最大值。不同净距下隧道径向收敛差异明显,隧道净距越大,基坑开挖对隧道的影响越小,隧道竖向膨胀也就越小。

4.2 基底不同地层影响分析

为研究隧道基底不同地层影响隧道位移的变化规律,选取粉质黏土、砾砂、强风化岩、中风化岩及微风化岩 5 种工况。

绘制不同施工工序下隧道竖向位移变化曲线,如图 8 所示。当隧道基底位于微风化及中风化岩层内时,桥梁施工及运行时隧道竖向位移变化不大,强风化变化次之,位于粉质黏土及砾砂地层时,隧道竖向位移变化最大。在基坑开挖时,位于粉质黏土地层下的上浮量要大于砾砂层,但在桥梁运行时,位于砾砂层的下沉量要大于粉质黏土。分析可知,粉质黏土地层渗透性低、固结时间长,导致基坑开挖阶段隧道上浮量更大;而砾砂地层因颗粒骨架效应,在桥梁加载阶段因应力重分布更剧烈,下沉量更大。这种地层依赖性在平行或侧穿施工中表现较弱。

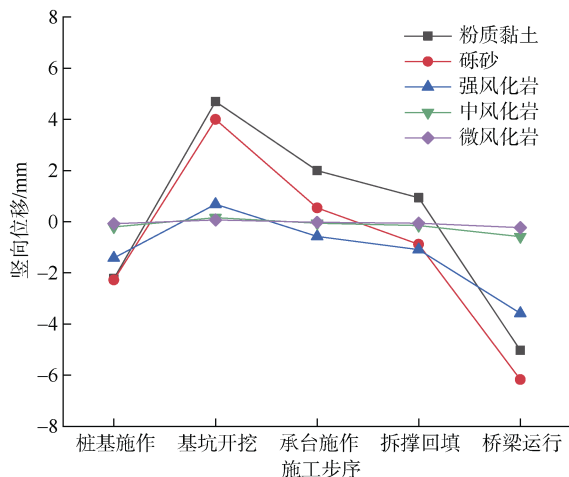


图8 不同地层情况下隧道竖向位移

Figure 8 Vertical displacement of the tunnel under different stratigraphic conditions

由图9可得,隧道径向收敛变化规律与竖向位移变化规律相同,当隧道基底位于中风化及微风化岩层内时,在不同工况下隧道径向收敛变化不大,强风化影响次之,粉质黏土及砾砂地层对隧道径向收敛影响最大。

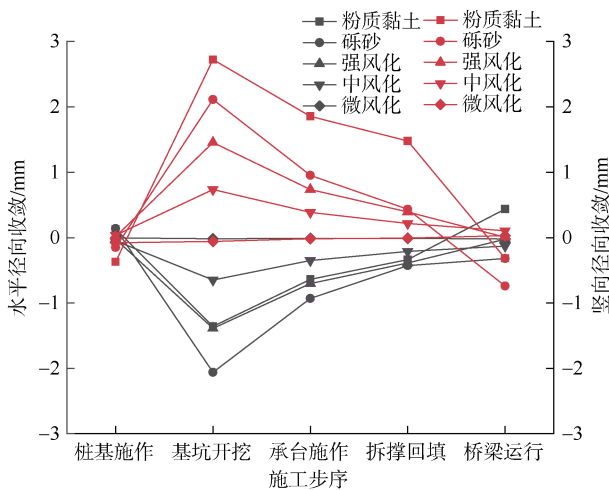


图9 不同地层情况下隧道径向收敛

Figure 9 Radial convergence of tunnel for different stratigraphic conditions

4.3 多承台施作影响分析

实际工程中桥梁一般为多承台,为分析实际工程中多承台施工对下覆隧道的影响,建立三承台模型,模拟桥梁承台基坑施工全过程,综合分析多承台施工过程中的隧道变形规律。

以实际工程为例,选取连续3个骑跨于隧道上方的承台,其与区间隧道的相对关系如图10所示,按

1-2-3 顺序施作承台。

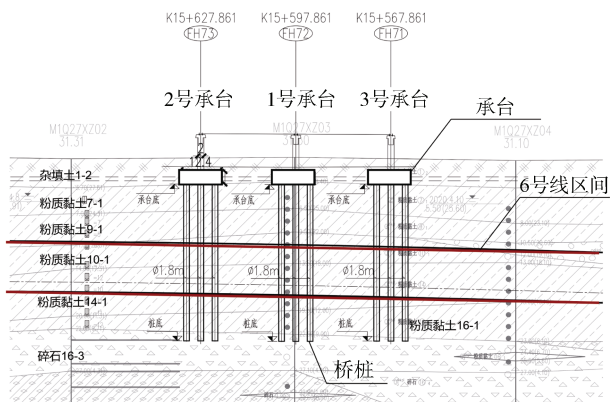


图10 承台与隧道位置关系

Figure 10 Relationship between pile caps and the tunnel location

如图11所示,1号承台基坑开挖后,隧道上浮量达到最大值,为5.14 mm,随后受承台施作以及拆撑回填影响,隧道上浮减小;后续承台基坑开挖后,隧道上浮竖向位移值分别为4.95 mm、4.59 mm。隧道最大上浮位移值随承台施作数目的增加而减小。2号承台基坑开挖后,其下方隧道上浮最大,但受1号承台施作的影响,位移小于1号基坑开挖时的位移最大值。同时,2号基坑开挖也会对1号承台下方隧道产生影响,导致其上浮1 mm。

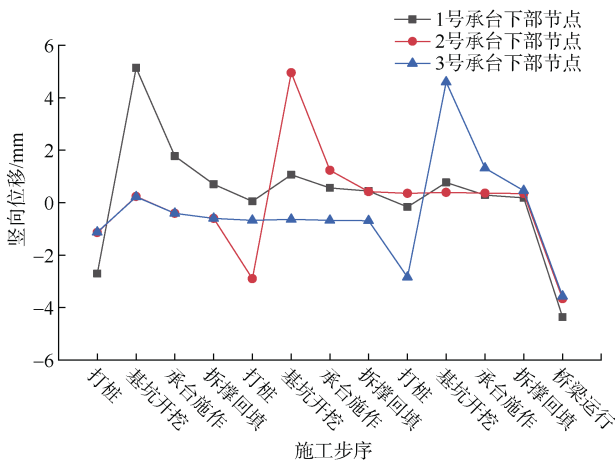


图11 不同工况下隧道单节点竖向位移

Figure 11 Vertical displacement of the tunnel at a single node under different working conditions

同样,3号承台基坑开挖后隧道上浮量继续减小,原有的1号、2号承台下方跟随3号承台的打桩、开挖、施作、回填发生轻微上浮或下沉,但影响微弱,总变形值不超过±1 mm。

由图 12 可知,隧道径向收敛的变化规律与隧道竖向位移一致,隧道径向收敛在 1 号承台基坑开挖时达到最大,隧道水平向最大收敛 2.84 mm,竖向最大膨胀 3.25 mm。受 1 号承台施作影响,2、3 号承台基坑开挖时隧道水平向最大收敛 2.54 mm,竖向最大膨胀 2.91 mm,径向收敛减小。

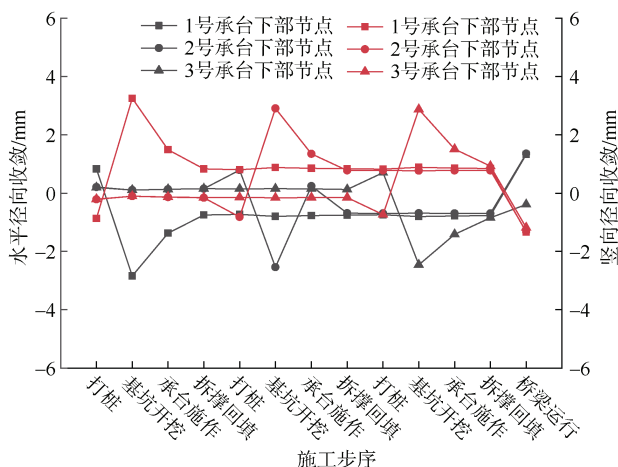


图 12 不同工况下单节点径向收敛

Figure 12 Radial convergence at a single node under different working conditions

5 模型预测分析

5.1 三维模型概况

通过基坑试验数据优化参数,根据建立的节点模型对隧道变形的影响因素进行分析,依据实际地勘资料及桥梁、区间结构图纸,建立 200 m×220 m 桥梁与地铁区间整体模型(主桥承台 F63~F68 以及匝道 Z14P1~Z14P6),预测分析实际工程桥梁施作对地铁隧道的影响。建立的桥梁与区间隧道模型如图 13 所示。

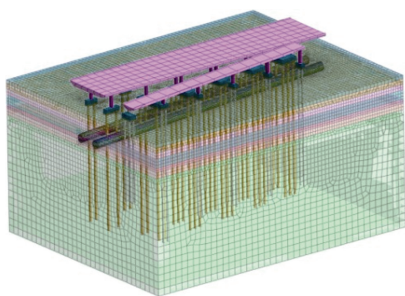


图 13 隧道区间大模型

Figure 13 Large model of the tunnel section

由上述分析可知,先施工承台可有效减小后施工承台的上浮变形,故在工程中采用隔一挖一的方式开挖承台基坑。

5.2 计算结果

隧道竖向位移与径向收敛如图 14 所示,此段模型隧道区间与承台净距平均为 11 m,轨道竖向变形在第一批承台基坑开挖时上浮 3.135 mm 左右,在承台施作完成后下沉至 1.176 mm,在第二批承台基坑开挖时上浮 2.814 mm 左右,上浮量明显小于第一批承台基坑开挖,在承台施作完成后下沉至 0.737 mm。

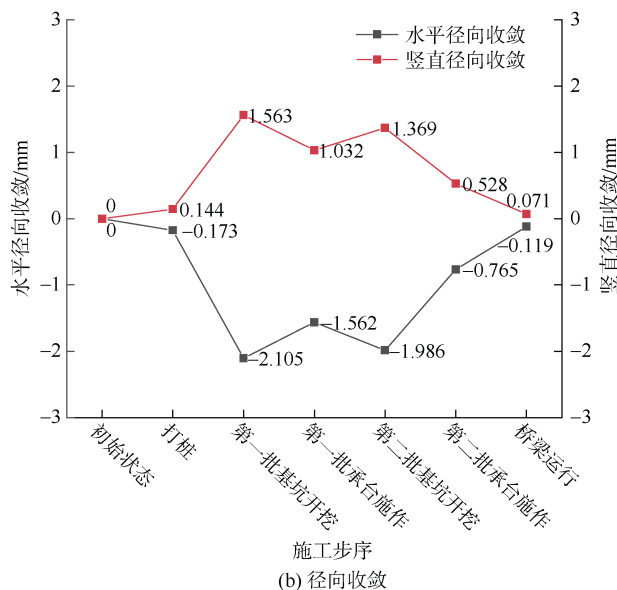
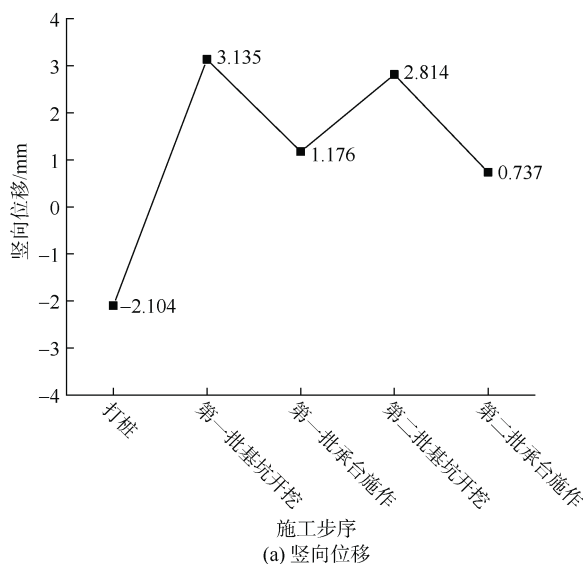


图 14 隧道竖向位移与径向收敛

Figure 14 Vertical displacement and radial convergence of the tunnel

隧道径向收敛在第一批承台基坑开挖时达到最大,水平向膨胀 1.563 mm,竖向收缩 2.105 mm。

拟建工程施工对轨道交通区间隧道结构的各方向变形影响均小于区间结构变形的警戒值 10 mm、控制

值 20 mm, 隧道整体处于安全稳定状态。

6 结论

1) 基坑卸载导致隧道上浮+水平收缩, 桥梁加载引发下沉+水平膨胀, 形成“浮-沉交替”响应。

2) 不同净距下隧道上浮量差异明显, 净距大于或等于 12 m 可有效抑制基坑开挖引起的上浮(大于或等于 15 m 时趋近于 0)。

3) 隧道的变形具有地层依赖性, 粉质黏土地层对基坑卸载敏感, 砾砂地层对桥梁加载敏感; 岩层变形可忽略。

4) 对施工工序进行优化, 多承台采用“隔一挖一”间隔施工, 可降低后续开挖变形。

5) 建立了基于地层特性的骑跨式施工隧道变形预测模型, 经整体工程验证, 可为类似工程提供设计依据。

参考文献

[1] 孙雪兵, 陈健, 栗晓龙, 等. 基于 BOTDA 技术和菱形布设方案的盾构隧道管片位移监测方法研究[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(2): 82-89.

Sun Xuebing, Chen Jian, Li Xiaolong, et al. Research on shield tunnel segment displacement monitoring method based on BOTDA technology and diamond-shaped layout[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(2): 82-89.

[2] 郜春海, 朱力, 苗佳, 等. 低空经济与城市轨道交通融合的技术路径与应用前景[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(2): 14-21.

Gao Chunhai, Zhu Li, Miao Jia, et al. Technological pathways and application prospects of low-altitude economy and rail transit integration[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(2): 14-21.

[3] 刘晓树. 市政隧道竖向扩建施工下层隧道技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2025(2): 178-181.

Liu Xiaoshu. Research on vertical expansion construction technology for lower layer tunnels in municipal tunnels[J]. Railway construction technology, 2025(2): 178-181.

[4] 张海东. 明挖隧道下穿桥梁工程中既有桩注浆加固方法与应用[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(7): 146-151.

Zhang Haidong. Grouting reinforcement method and applica-

tion for existing piles in open-excavation tunnel under-passing bridge engineering[J]. Urban mass transit, 2024, 27(7): 146-151.

[5] 王腾. 盾构隧道侧穿既有桥梁桩基的相互影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(增刊 1): 144-149.

Wang Teng. Study on interaction of shield tunnel side crossing existing bridge pile foundation[J]. Journal of safety science and technology, 2023, 19(S1): 144-149.

[6] 贾春亚, 肖灿云. 施工荷载对地铁线路沉浮及列车运行安全的影响研究[J]. 路基工程, 2025(3): 212-218.

Jia Chunya, Xiao Canyun. Study on the influence of construction load on the sinking and floating of subway lines and the safety of train operation[J]. Subgrade engineering, 2025(3): 212-218.

[7] 王锋. 基坑开挖对邻近地铁隧道影响的研究进展[J]. 铁道建筑技术, 2025(2): 187-192.

Wang Feng. Research progress on the impact of excavation of foundation pits on adjacent subway tunnels[J]. Railway construction technology, 2025(2): 187-192.

[8] Meng Fanyan, Chen Renpeng, Liu Shulun, et al. Centrifuge modeling of ground and tunnel responses to nearby excavation in soft clay[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2021, 147(3): 04020178.

[9] Lai Hongpeng, Zheng Haiwei, Chen Rui, et al. Settlement behaviors of existing tunnel caused by obliquely under-crossing shield tunneling in close proximity with small intersection angle[J]. Tunnelling and underground space technology, 2020, 97: 103258.

[10] 李连祥, 刘嘉典, 李克金, 等. 济南典型地层 HSS 参数选取及适用性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 4021-4029.

Li Lianxiang, Liu Jiadian, Li Kejin, et al. Study of parameters selection and applicability of HSS model in typical stratum of Jinan[J]. Rock and soil mechanics, 2019, 40(10): 4021-4029.

(编辑: 傅依萱)