

新建市政桥梁施工对既有隧道变形控制及安全性研究

王飞¹, 王志岗^{2,3}

(1. 山东省公路桥梁建设集团有限公司, 山东 济南 250000; 2. 河北大学 建筑工程学院, 河北 保定 071000;

3. 河北省基础设施防灾减灾与智能评估重点实验室, 河北 保定 071000)

摘要: 采用数值模拟方法, 定量评估桥梁施工对下伏地铁盾构隧道稳定性的影响。通过系统分析桥梁建设全过程(开挖成孔、桥墩桩基施工、回填及路面施工)中隧道的多维度结构响应, 揭示了隧道在轴向、横向、垂向位移及断面收敛变形等方面的演化规律。结果表明: 隧道位移与施工工序呈时序耦合关系, 各向位移均在主路施工阶段达到峰值, 其中垂向沉降(-0.32 mm)与径向收敛(0.27 mm)最为显著, 是该阶段成为控制安全的最不利工况。位移发展主要受荷载施加与土体应力路径控制, 初期卸荷引起轻微回弹, 后续加载导致持续沉降与收敛, 变形累积效应明显。模拟结果均远低于规范限值, 结构安全裕度充足, 验证了施工方案的可行性, 相关方法与结论可为类似邻近工程的风险评估与防控提供依据。

关键词: 城市道路; 地铁隧道; 桥梁; 近接施工; 力学特性

中图分类号: TG333.17

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)07-0404-04

Study on Deformation Control and Safety of Existing Tunnels in Construction of New Municipal Bridges

WANG Fei¹, WANG Zhigang^{2,3}

(1. Shandong Highway Bridge Construction Group Co., Ltd., Jinan 250000, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Hebei University, Baoding 071000, China; 3. Hebei Key Laboratory of Infrastructure Disaster Mitigation and Intelligent Assessment, Hebei University, Baoding 071000, China)

Abstract: The numerical simulation methods are used to quantitatively evaluate the impact of bridge construction on the stability of the underlying subway shield tunnel. By systematically analyzing the multidimensional structural response of the tunnel throughout the bridge construction process such as excavation and tunneling, pile foundation construction, backfilling and pavement construction, the evolution patterns of tunnel axial, lateral and vertical displacements, as well as cross-sectional convergence deformation are revealed. The result shows that the displacements of the tunnels demonstrate a sequential coupling relationship with various construction phases, and all displacements reach their peak during the main road construction, in which the vertical settlement (-0.32 mm) and the radial convergence (0.27 mm) are the most pronounced, and are in this stage that becomes the most unfavorable condition for controlling safety. The development of displacement is principally governed by the application of load and the control of soil stress paths. The accumulative effect of deformation is obvious because of minor rebound caused by the initial unloading and the continuous settlement and convergence led by the subsequent loading. The simulation results are all lower than the limits specified in the code. The structural safety margin is sufficient, verifying the feasibility of the construction scheme. The related methods and conclusions can provide a basis for risk assessment and control in similar adjacent projects.

Keywords: urban roads; subway tunnels; bridges; close to construction; mechanical properties

收稿日期: 2026-01-14

基金项目: 河北省高等学校科学研究项目-科学技术类青年基金项目(QN2026261)

作者简介: 王飞(1988—), 男, 学士, 工程师, 从事城市道路与交通工程建设管理工作。

通信作者: 王志岗(1993—), 男, 博士, 副教授, 从事桥梁与隧道工程研究工作。电子邮箱:wangzhigang0618@163.com

0 引言

随着我国城市化进程的不断深入, 地下空间的开发利用与地表基础设施的建设日益频繁^[1-2], 形成了大量交叉近接工程^[3-4]。在此背景下, 上部新建结构施工对下方既有隧道稳定性的影响, 已成为影响

城市轨道交通运营安全与工程建设的关键问题。盾构隧道对周边荷载变化与土体扰动极为敏感,邻近施工易引发隧道位移与变形,威胁其结构安全与正常使用。尤其在开挖、桩基施工、桥台桥墩建设、回填及路面铺装等全过程中,隧道变形响应机制、累积规律及最不利工况尚不明确,制约了隧道结构安全风险精准控制能力的提升。因此,系统研究桥梁全周期施工对下伏隧道多维度变形演化规律具有重要意义。

目前,国内外学者围绕隧道与邻近结构的相互作用开展了广泛研究,但对新建城市道路桥梁这类多工序、动态荷载的施工过程,系统性研究仍相对缺乏。既有研究在隧道近接施工领域已积累丰富成果。李镇^[5]、董裕坤等^[6]人分别研究了盾构隧道穿越或侧穿桥梁桩基时的结构响应与扰动机制;既有成果多集中于盾构隧道穿越或侧穿桥梁桩基的工况分析^[7-10]、不同下穿工法^[11]对桥桩变形的影响比较,或在施工控制^[11-13]、影响区划分^[14]、近接优化^[15]等方面进行了有益探索。现有研究多采用数值模拟、现场监测与理论分析相结合的方法,重点关注变形特征与影响机理,但在新建道路桥梁全工序、多维度变形协同分析与安全系统评价方面仍显不足。

为此,本文以某桥梁上跨地铁盾构隧道工程为背景,建立精细化三维数值模型,系统模拟桥梁全工序施工对隧道结构的影响,重点揭示隧道在轴向、横向、竖向位移及径向收敛等多维变形规律与机理,识别关键控制工序,并依据《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJ/T202—2013)进行安全性定量评估。研究可为类似邻近工程的风险预测与控制提供参考。

1 数值模拟

1.1 模型尺寸

本工程为新建大桥与下穿地铁区间隧道形成的立体交叉结构。大桥主桥台承台基础位于隧道正上方,相邻桥墩桩基与承台紧邻隧道侧向布置,形成基础荷载直接作用于隧道顶部及侧向的敏感工况。隧道顶部覆土平均厚度约 19.0 m,隧道底部主要位于全风化花岗岩地层,该地层对隧道在外部荷载下的变形与稳定性具有重要影响。三维有限元模型如图 1 所示。

为准确模拟复杂工况并确保计算可靠性,本研

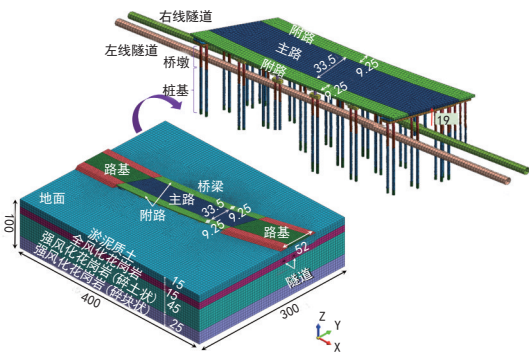


图 1 三维有限元模型图(单位:m)

究依据隧道力学理论确定模型计算范围,以确保边界条件不影响隧道周边关键区域的应力与位移场。具体原则为:模型横向边界距隧道外轮廓不小于 3 ~ 5 倍洞径,底部边界距隧道底板大于 1 倍洞径,上边界取至实际地表。经初步验证,最终模型尺寸确定为长 400 m、宽 300 m、高 100 m。该范围可充分涵盖施工引起的土体应力重分布与变形影响区,为后续施工阶段模拟与结构响应分析提供可靠基础。

1.2 计算工况

本研究基于有限元法建立了考虑土-结构相互作用的精细化三维数值模型。计算模拟严格遵循实际施工工艺流程,将大桥建设过程划分为 6 个连续的分析步序,分别为初始地应力阶段,开挖成孔,桩、桥台、桥墩施工,回填,主路施工和辅路施工共 6 个施工步序,以期精确捕捉不同施工阶段对隧道结构的影响机理。通过此分步模拟方法,定量揭示每个施工环节对地铁隧道影响的程度与范围,从而为工程的风险管控与防护措施制定提供精准的数据支持。

1.3 边界约束

为保证模拟准确高效,模型边界条件依据连续介质力学原理设定。具体而言:水平方向(X和Y)边界约束法向位移,模型底部设为完全固定,地表边界保持自由。该边界条件体系能够有效消除刚体位移,同时合理地反映土体在远场边界处的实际约束状况,为桥梁施工过程的模拟提供符合物理现实的力学基础。

1.4 力学参数

基于场地工程地质勘察报告,系统整理并提取了新建桥梁结构与下伏既有盾构隧道所穿越地层的岩土体信息。数值模拟中各土层厚度与物理力学参数如表 1 所示。根据隧道管片结构设计资料选取盾构隧道结构的力学计算参数如表 2 所示。

表1 土体力学参数

岩土名称	泊松比	天然容重/(kN·m ⁻³)	割线模量/MPa	切线模量/MPa	卸载模量/MPa	黏聚力c/kPa	内摩擦角/(°)
淤泥质土	0.45	16.5	2.43	1.83	7.30	10	8
全风化花岗岩	0.23	19.0	260.00	195.00	780.00	25	26
强风化花岗岩(砂土状)	0.25	20.0	3 200.00	2 400.00	9 600.00	28	30
强风化花岗岩(碎块状)	0.25	21.0	4 900.00	3 675.00	14 700.00	35	40

表2 盾构隧道结构参数

项目	强度等级	重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
盾构管片	C55	25	35 500	0.2

2 结果分析

2.1 轴向位移

图2显示了不同施工工序下隧道轴向(X方向)位移的变化规律。计算表明,隧道纵向位移随施工推进整体呈增大趋势:在开挖成孔至回填阶段,位移保持为0.01 mm;主路施工时由于大面积恒载引起附加应力集中,位移显著增至峰值0.06 mm;辅路施工阶段回落至0.01 mm。主路施工是引起位移的主要工况。全过程累计最大位移为0.10 mm,体现荷载的累积效应。各阶段及累计位移值均远低于规范限值(仅为控制值的0.05%~0.5%),安全裕度充足。

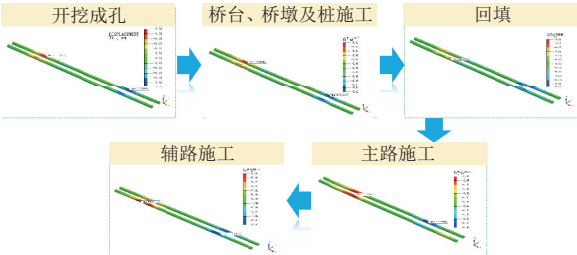


图2 不同施工工序下隧道轴向位移变化规律

2.2 水平向位移

图3显示了各施工阶段对地铁隧道横向(Y方向)位移的影响。隧道横向位移随施工推进持续累积:开挖成孔阶段为0.02 mm,桥台等主体结构施工增至0.03 mm,回填阶段为0.04 mm,主路施工达到峰值0.19 mm,辅路施工阶段为0.06 mm。主路施工期间的位移占总累计位移的56%,是该方向位移控制的关键阶段。位移增长趋势与上部结构荷载施加及土体应力重分布密切相关。尽管横向位移大于纵向位移,但各阶段及峰值(0.19 mm)均远低于规范限值(仅为允许值的0.95%),表明位移在可控范围内,且符合预期规律,为隧道保护措施提供了可靠依据。

2.3 垂向位移

图4揭示了各施工阶段地铁区间隧道竖向(Z向)位移的演变过程。监测数据表明:位移随施工推进呈

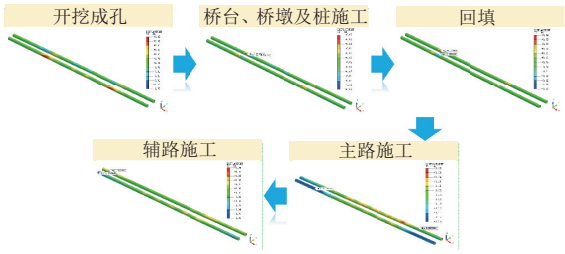


图3 不同施工工序下隧道水平向位移变化规律

阶段性变化,由开挖成孔时的轻微上浮(+0.05 mm),经桥台等结构施工转为下沉(-0.07 mm),至回填与主路施工阶段沉降持续增大(分别达-0.10 mm与峰值-0.32 mm),最终在辅路施工后收敛至-0.11 mm。整个过程累计沉降为-0.47 mm。从发展趋势看,竖向位移呈现“轻微上浮→稳定下沉→沉降收敛”3阶段特征,这与施工荷载变化完全对应:初期卸荷回弹,后续加载沉降,主路大面积堆载是沉降主因。所有位移值均远低于规范限值(最大沉降仅占允许值的1.6%),表明隧道结构在施工期间保持稳定,符合软土地层受外载作用的典型特征,从竖向位移控制角度验证了施工方案的可行性与安全性。

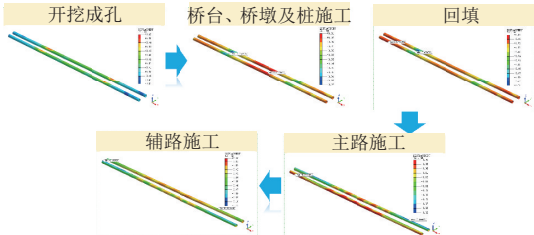


图4 不同施工工序下隧道垂向位移变化规律

2.4 收敛变形

图5展示了各施工工序对地铁隧道径向收敛变形的影响规律。隧道径向收敛变形随施工推进呈阶段性递增,并在主路施工阶段达到峰值:开挖成孔阶段为0.05 mm;桥台等施工阶段,左线增至0.06 mm,右线为0.07 mm;回填后进一步增大至0.09 mm;主路施工期间,左、右线分别达到峰值0.24 mm与0.27 mm;辅路施工后最终稳定在0.11 mm与0.12 mm。总体来看,隧道径向收敛变形主要受外部荷载与土体扰动影响,且在主路施工阶段最为显著。

2.5 总变形

图6展示了新建桥梁施工各阶段引起下伏地铁

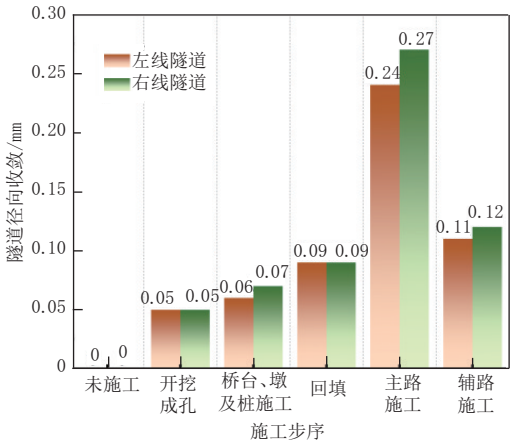


图5 不同施工工序下隧道径向收敛变形数据图

隧道总位移的变化规律与机理。隧道总位移随施工推进呈阶段性累积:开挖成孔时土体卸荷,隧道轻微上浮(+0.05 mm);桥台等结构施工传递附加应力,位移增至+0.07 mm;回填进一步改变应力分布,位移达+0.10 mm;主路施工阶段因大面积恒载与孔隙水压力作用,位移达到峰值+0.33 mm;辅路施工后应力重分布基本完成,位移稳定于+0.11 mm。可见,外部荷载变化与土体应力路径主导着隧道位移响应,其中主路施工的堆载应力叠加是位移显著增大的关键原因。

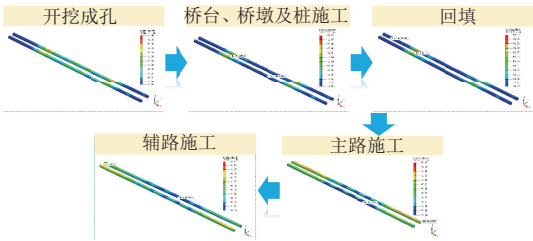


图6 不同施工工序下隧道总位移变化规律

3 结 语

通过对上部桥梁施工全过程的三维精细化模拟,分析了地铁盾构隧道的多维结构响应,主要结论如下。

(1)隧道变形呈现与施工工序同步的阶段性规律:位移及收敛变形在开挖与基础施工阶段变化较小,于回填阶段逐渐增长,在桥梁主路施工工期达到峰值后趋于稳定。竖向位移呈现“卸荷回弹→加载沉降→变形稳定”的典型三阶段特征,与荷载及土体应力状态的时序变化高度吻合。

(2)主路施工是隧道安全控制的关键工序,该阶段的大面积堆载是引起隧道结构响应的最主要因素,各项变形均在此阶段达到峰值:纵向位移0.06 mm、横向位移0.19 mm、竖向沉降-0.32 mm、径向收敛变形0.27 mm。左右线收敛变形不对称,反映了荷载分布的空间不均匀性。

(3)隧道结构安全储备充足,方案可靠:所有位移与变形指标均远低于规范限值(20 mm),最大值仅为限值的1.6%,表明隧道在施工期间具有很高的安全裕度,当前工程方案对隧道运营风险可控。

参考文献:

[1] 王志岗,陶连金,石城,等.逆断层错动作用下双仓管廊结构力学特性和抗断设计研究[J]. 土木工程学报, 2024, 57(7): 1-14.

[2] 陶连金,王志岗,石城,等.基于Pasternak地基模型的断层错动下管线结构纵向响应的解析解[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(9): 1577-1586.

[3] 董捷,王志岗,仲帅.新建隧道下穿高速公路动力响应及变形控制研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(8): 133-139.

[4] 袁鹏,魏力峰,贺小宾.超大直径盾构近接侧穿临堤桥梁桩基变形控制研究——以济南济泺路穿黄隧道工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(5): 907-916.

[5] 李镇.盾构隧道近接施工诱发桥梁桩群力学行为及变形控制措施研究[D]. 南宁:广西大学, 2025.

[6] 董裕坤.盾构隧道近接桥梁桩基施工扰动机制及其控制研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2025.

[7] 梁子轩,王健,潘可明.明挖法隧道施工对近接桥梁桩基的影响[J]. 市政技术, 2011, 29(2): 84-86.

[8] 高长军,丁茂瑞,王琪,等.隧道近接施工对既有桥梁稳定性影响的二维模拟研究[J]. 中外公路, 2010, 30(3): 229-233.

[9] 巩江峰,卿伟宸,朱宏,等.铁路隧道近接工程变形控制标准梳理及工程防护措施研究[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(6): 1-11.

[10] 郑明新,杨婧雯.基于AHP-CRITIC与TOPSIS的路基下穿高铁桥梁施工工法评价[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(8): 2563-2571.

[11] 唐亮,陈虹侨,郑霄阳,等.考虑施工全过程的超近距邻近既有桥影响[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(28): 12627-12633.

[12] 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): 1235-1242.

[13] 高骏,孟小伟,马龙祥,等.软土地层顶管法地下通道近接桥梁施工保护方案研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(增刊2): 234-241.

[14] 龚伦,马相峰,孔超,等.桥梁桩基近接既有隧道的数值模拟分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(12): 125-130.

[15] 王景春,刘旭菲,侯卫红.新建桥梁对运营高铁基础变位的影响研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(7): 60-65; 83.