

软土地层双线盾构隧道近距离上穿既有隧道引起的变形特征有限元分析

黄茂庭*, 陈艳泰, 覃瑜芳

南宁学院土木与建筑工程学院, 广西 南宁

收稿日期: 2025年12月27日; 录用日期: 2026年1月18日; 发布日期: 2026年1月29日

摘要

软土地层中双线盾构隧道近距离上穿既有隧道施工不可避免地引起土体扰动, 易导致既有隧道结构产生变形, 对既有结构安全构成潜在风险。为揭示该类工程中既有隧道的变形特征及其演化规律, 依托某双线盾构隧道近距离上穿既有隧道工程, 使用ABAQUS有限元软件建立盾构隧道近距离上穿施工的三维有限元模型, 分析双线盾构上穿过程中既有隧道的变形响应特征, 并研究加固措施对既有隧道变形的影响机理。研究结果表明, 盾构上穿施工过程中, 既有隧道以竖向隆起变形为主, 伴随轻微扭转, 影响范围约为 $3.5 D$ (D 为隧道直径), 且隆起变形具有明显的滞后效应; 双线施工中, 后行线开挖对既有隧道产生明显的二次扰动作用, 使隆起峰值及影响范围进一步增大, 并导致最大隆起位置发生一定偏移; 在新建隧道重叠区段内采用MJS工法桩加固措施, 可有效抑制既有隧道的最终上浮变形。研究成果可为软土地层中盾构隧道近距离上穿既有隧道的设计与施工控制提供参考。

关键词

隧道开挖, 变形响应, 既有隧道变形, 数值模拟, 全方位高压喷射工法桩

Finite Element Analysis of Deformation Characteristics of Existing Tunnels Induced by Close-Proximity Overcrossing of Double-Line Shield Tunnels in Soft Soil

Maotong Huang*, Yantai Chen, Yufang Qin

College of Civil and Architectural Engineering, Nanning University, Nanning Guangxi

Received: December 27, 2025; accepted: January 18, 2026; published: January 29, 2026

文章引用: 黄茂庭, 陈艳泰, 覃瑜芳. 软土地层双线盾构隧道近距离上穿既有隧道引起的变形特征有限元分析[J]. 土木工程, 2026, 15(2): 21-32. DOI: 10.12677/hjce.2026.152021

Abstract

The close-proximity overcrossing construction of double-line shield tunnels in soft soil inevitably induces soil disturbance, which may lead to deformation of existing tunnel structures and pose potential risks to structural safety. To investigate the deformation characteristics and their evolution of existing tunnels under such conditions, a case study of a double-line shield tunnel overcrossing an existing tunnel at close proximity was conducted. A three-dimensional finite element model of the shield tunneling process was established using ABAQUS to analyze the deformation response of the existing tunnel during the overcrossing process, and to investigate the influence mechanism of reinforcement measures on tunnel deformation. The results indicate that during the overcrossing construction, the existing tunnel predominantly undergoes vertical uplift deformation accompanied by slight torsion, with an influence range of approximately 3.5 D (D denotes the tunnel diameter). The uplift deformation exhibits a pronounced lag effect. In double-line construction, excavation of the trailing tunnel induces a significant secondary disturbance to the existing tunnel, resulting in an increase in the uplift magnitude and influence range, as well as a shift in the location of maximum uplift. The application of MJS method piles in the overlapping zone of the new tunnel effectively suppresses the final uplift deformation of the existing tunnel. The findings of this study can provide valuable references for the design and construction control of close-proximity overcrossing shield tunnel projects in soft soil conditions.

Keywords

Tunnel Excavation, Deformation Response, Existing Tunnel Deformation, Numerical Simulation, Metro Jet System Reinforcement

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地铁作为具有大运载量、高速度、占地少等特点的交通方式，迅速发展。截至 2024 年底，我国拥有轨道交通的城市多达 61 个，运营总里程达到了 11949.7 km，已成为世界上地铁隧道工程技术发展最快的国家[1][2]。随着地铁交通的快速发展，新建隧道穿越临近既有隧道已经成为了不可避免的情况。截至目前，盾构隧道穿越既有隧道工程达到了 62 个，上穿工程占比 35%、下穿工程占比 39% [3]。软土地区近距离穿越既有隧道施工难度大，易扰动土体，影响既有结构和地表，可能引发不均匀沉降、管片脱开、开裂等安全问题。

新建隧道穿越施工的工程问题一直是研究的重点，众多学者对这类问题进行了大量的研究，研究重点主要集中于盾构隧道穿越施工引起既有隧道变形的研究。在上述研究中，数值模拟方法因能够较好地反映盾构上穿施工过程及其对既有隧道变形的影响，逐渐成为研究上穿施工问题的重要手段。Lin 等对新建双洞斜交隧道下穿既有隧道进行了三维数值模拟，结果表明，盾构下穿施工会引起既有结构管片产生不可恢复的局部扭转变形[4]。Avgerinos 等使用有限元分析研究了新建隧道垂直下穿既有隧道过程中不同外断面位置既有隧道环向力、弯矩和衬砌的变形情况[5]。刘树佳等构建了隧道上、下多线叠穿三维有限元模型，研究了不同参数(新旧隧道净距、土仓压力、注浆量)对既有隧道变形的影响，提出了多线叠穿隧道施工影响系数的概念[6]。房明等建立了新建隧道正交下穿的三维有限元模型，研究了不同盾构机支护

压力、盾尾注浆压力、千斤顶推力和不同新旧隧道交叉角度下既有隧道的变形模式[7]。张海波等对隧道近距离叠交施工进行了三维有限元模拟，研究了既有隧道衬砌的应力和变形模式，分析了土层性质、覆土层厚度等参数的影响，得到既有隧道位移和应力随相对距离减少和新建隧道位置升高而增大的结论[8]。张孟喜等对新建隧道上穿的双层4线叠交工程进行了三维有限元模拟，结果表明，隧道二次上穿使既有隧道最大位移点产生偏移，既有隧道管片产生“竖鹅蛋”式变形[9]。

总体来看，现有研究已对新建盾构隧道穿越既有隧道引起的工程影响开展了大量分析，但研究对象多集中于新建隧道下穿既有结构的工况，对上穿施工条件下既有隧道变形响应的研究相对较少。受施工空间关系、土体扰动机制及结构受力特征差异的影响，下穿工况的研究结论难以直接适用于上穿这一在软土地层中较为常见的工程形式，相关变形特征及演化规律仍有待进一步深入探讨。因此，本文依托浙江省宁波市地铁5号线新建盾构隧道上穿既有2号线隧道的工程，利用有限元软件ABAQUS，建立了盾构隧道上穿施工的三维有限元模型，重点研究上穿施工过程中既有隧道的变形响应特征，并进一步探讨加固措施对既有隧道变形控制效果的作用机理，以期为类似工程的设计与施工控制提供参考。

2. 工程概况

2.1. 工程简介

本文研究的区间为某市轨道交通5号线新建隧道上穿既有2号线隧道，其中5号线为双线隧道，上行线单圆隧道长1184.09 m，下行线单圆隧道长1195.88 m。该区间采用单圆盾构法施工，采用土压式平衡盾构机，区间隧道衬砌环外径6200 mm、内径5500 mm、厚350 mm，标准环宽1.2 m，错缝拼装。新建隧道以近距离方式上穿既有2号线隧道，两隧道之间的最小垂直净距为1.167 m，最大为1.239 m，属于典型的小净距上穿工程，施工过程中对既有隧道变形控制要求较高。

研究区位于冲积平原区，地层以第四纪沉积层为主，软土分布广泛，主要由淤泥、淤泥质黏土及粉质黏土组成，具有高压缩性、低强度和显著的流塑特征。新建隧道上穿区段主要位于淤泥质黏土及黏土层中，既有隧道埋设于较深部黏土与粉质黏土层内，土层条件复杂，对盾构上穿施工及既有隧道变形控制较为不利。针对新建隧道近距离上穿既有隧道的施工风险，工程采取既有隧道预加固和新建隧道后加固的加固方案，以降低施工中既有隧道的变形风险。

2.2. 隧道加固

2.2.1. 既有隧道注浆预加固

为减小新建隧道上穿施工对既有2号线隧道的不利影响，在新建隧道与既有隧道重叠区段，对既有隧道周围土体进行了注浆预加固。其中，重叠区域指新建5号线盾构隧道与既有2号线隧道在平面投影上相互交叉位置为中心，沿既有隧道纵向一定范围内展开，是盾构切口接近、通过并远离既有隧道过程中，既有结构变形集中的区域。加固过程中利用既有隧道管片预留注浆孔，对重叠区段周边土体实施水泥浆注浆。注浆范围为隧道上断面约1 m、下断面约2 m，既有2号线注浆加固的平面图以及剖面图如图1所示。

2.2.2. 新建隧道MJS工法桩后加固

在新建地铁5号线接收前，为减小后期既有2号线和新建5号线盾构隧道的变形，新建5号线穿越完成后通过盾构管片注浆孔对重叠段范围处的新建隧道进行MJS工法桩加固，根据实际情况情况调整加固范围，确保MJS加固距2号线区间隧道净距不小于0.5 m，共计加固范围为84 m(约70环管片)，新建隧道洞内MJS工法桩后加固的平面图和剖面图如图2所示。

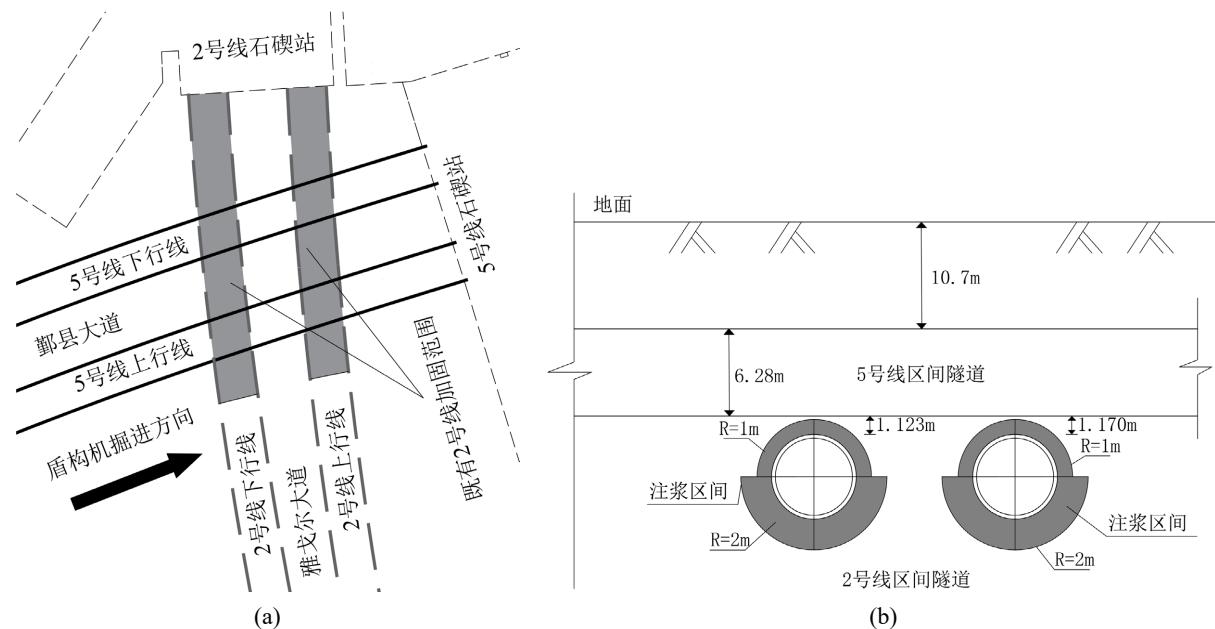


Figure 1. (a) Plan of interval reinforcement for line 2; (b) Section of interval reinforcement for line 2
图 1. (a) 2 号线区间加固平面图; (b) 2 号线区间加固剖面图

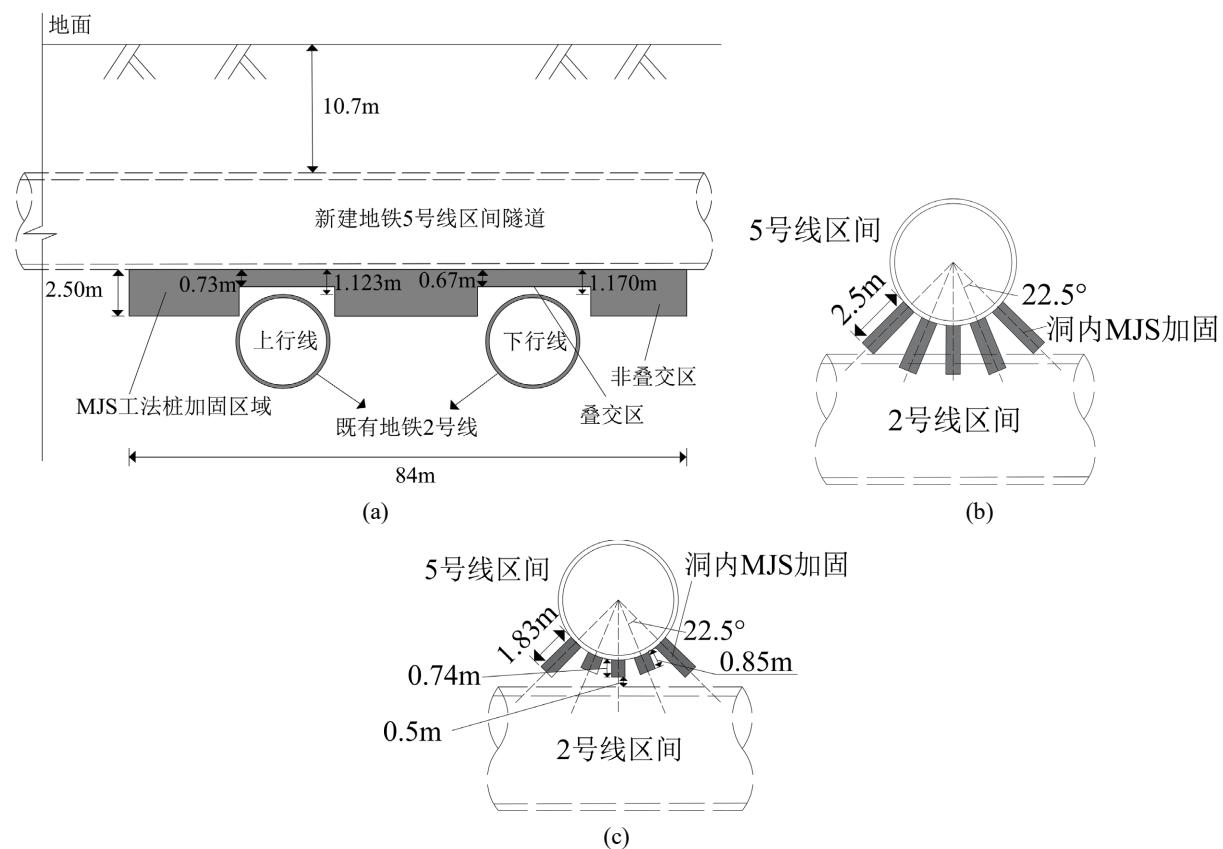


Figure 2. (a) Longitudinal section of tunnel MJS method pile reinforcement for line 5 interval; (b) Transverse section of tunnel MJS reinforcement for non-overlapping interval; (c) Transverse section of tunnel MJS reinforcement for overlapping interval
图 2. (a) 5 号线区间洞内 MJS 工法桩加固纵剖面图; (b) 非叠交区洞内 MJS 加固横剖面图; (c) 叠交区洞内 MJS 加固横剖面图

3. 盾构隧道上穿施工引起既有隧道变形的研究

3.1. 有限元分析模型建立

地层模型尺寸确定时，基于隧道洞径来确定影响范围、并考虑边界效应的影响。在建立隧道盾构模型时，模型范围一般取隧道直径的3~5倍，3倍宽度时边界效应对隧道的影响在10%以下、而5倍宽度为3%以下[10]。根据专项施工报告，本次上穿工程新建盾构隧道的外径D=6.2 m；为了充分减少边界效应对模拟结果的影响，将模型的三维尺寸沿新建盾构隧道轴向取111.6 m、约为18D，沿新建盾构横向取90 m、约为15D，沿竖向取50 m、约为8D。因此，本文所建立的盾构上穿施工三维有限元模型的尺寸：111.6 m(长)×90 m(宽)×50 m(高)，如图3所示。

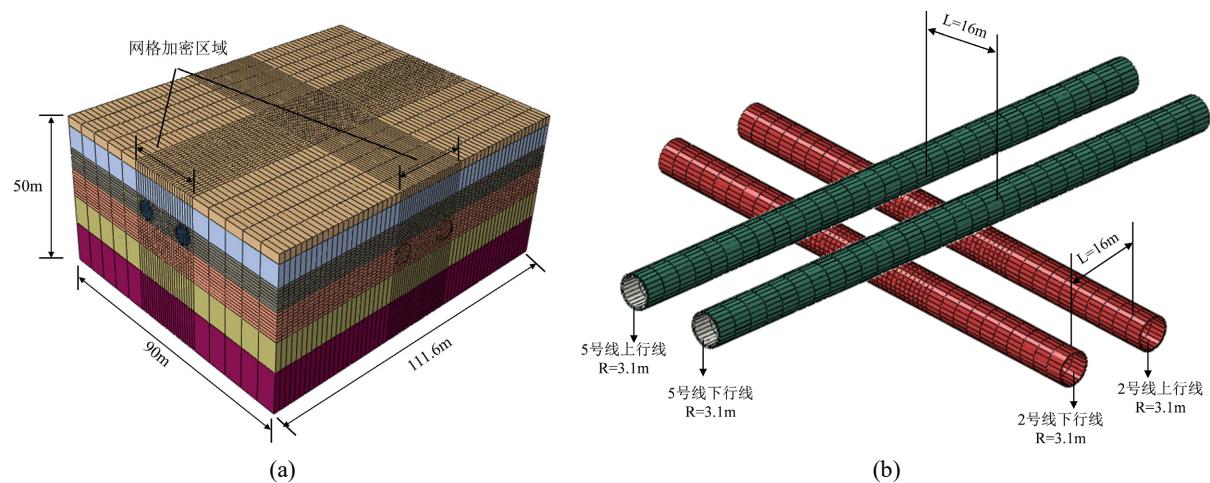


Figure 3. (a) Overall model diagram; (b) Structural position relationship diagram
图 3. (a) 整体模型图；(b) 结构位置关系图

新建隧道与既有隧道均采用单圆断面，衬砌外径6.2 m、内径5.5 m，标准环宽1.2 m。为降低计算量，对衬砌环进行等效简化，单元长度取3.6 m。新建隧道与既有隧道均为双线布置，线间距为16 m，并简化为正交上穿工况。新建隧道覆土厚度约为10.7 m，与既有隧道的最小垂直净距约为1.2 m。隧道及其周围土体区域进行了局部网格加密处理，模型共划分单元72,328个，节点83,274个。

模型中土体、管片及注浆层均采用三维实体单元模拟，盾壳采用二维壳单元表示，不考虑盾构机内部结构。盾构施工荷载主要包括土仓压力和同步注浆压力，其中土仓压力作用于开挖面，注浆压力作用于开挖轮廓周边，如图4所示。

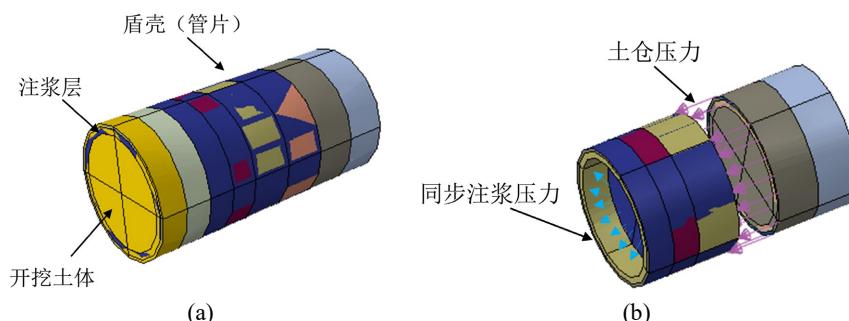


Figure 4. (a) Schematic diagram of tunnel structure; (b) Schematic diagram of loads
图 4. (a) 隧道结构示意图；(b) 荷载示意图

在新建隧道上穿施工前, 为减小施工扰动对既有隧道结构的影响, 针对既有隧道重叠区域实施了注浆预加固措施。数值模拟中通过提高既有隧道周围加固区土体的弹性模量来等效模拟注浆加固效果, 加固区材料参数与等代层参数一致, 既有隧道加固区域如图 5 所示。

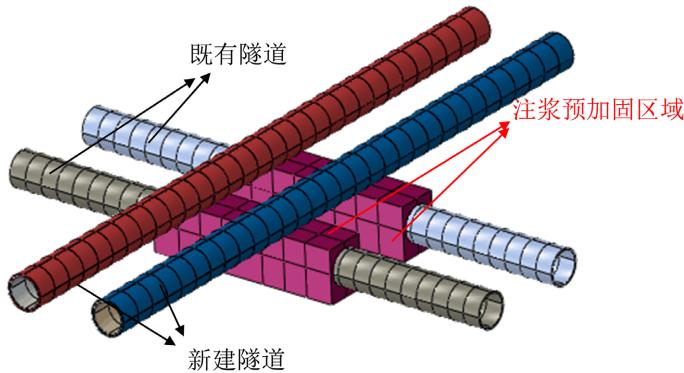


Figure 5. Pre-reinforcement area of existing tunnel

图 5. 既有隧道预加固区域

为明确不同施工与加固条件下既有隧道的变形响应特征, 本文设置两类计算工况(Case)。其中, Case 1 为未考虑既有隧道及新建隧道加固措施的基准工况, 用于分析新建隧道上穿施工过程中既有隧道的变形特征及其演化规律; Case 2 为考虑既有隧道注浆预加固及新建隧道后加固(MJS 工法桩)的实际工程工况, 用于模型验证以及后续加固措施对既有隧道最终变形控制效果的定量评估。

3.2. 既有隧道有限元模拟结果与监测结果的对比

为了验证所建盾构上穿施工有限元模型的合理性与计算结果的可靠性, 选取考虑工程实际加固措施的 Case 2 工况, 对既有隧道下行线的模拟值与监测值进行对比。既有隧道下行线在新建隧道双线开挖完成情况下的剖面曲线如图 6 所示, 图中横坐标表示新建 5 号线上行线盾构掘进位置相对于既有 2 号线下行线中心线的距离, 单位为 m; 纵坐标表示既有 2 号线隧道拱顶的竖向位移, 单位为 mm, 其中正值表示隆起, 负值表示沉降。

从图 6 可以看出, 在新建隧道双线开挖完成情况下, 既有 2 号线隧道拱顶竖向位移的数值模拟结果与现场监测结果在整体变化趋势上保持一致, 均表现为在新建隧道交叉区域附近产生明显的隆起变形, 且变形主要集中于既有隧道中心线附近。就变形分布特征而言, 数值模拟结果能够较好地反映既有隧道竖向位移沿纵向的变化规律, 隆起峰值位置与监测结果基本一致。尽管在局部位置模拟结果与监测值仍存在一定差异, 但整体吻合程度较好。因此, 计算结果具有较好的可靠性, 可为后续既有隧道变形特征分析及加固效果评估提供可信的数值基础。

3.3. 盾构隧道上穿施工引起既有隧道变形特征的分析

新建隧道上穿施工不可避免地对下部既有隧道产生影响, 新建隧道盾构机切口与重叠区域距离不同时影响大小也不一样。在前述模型验证的基础上, 为研究新建隧道上穿施工过程中既有隧道的变形特征, 以下分析采用未考虑加固措施的基准工况(Case 1), 通过排除加固因素的影响, 可更加清晰地描述施工扰动本身对既有隧道结构的作用特征。为研究不同工况下, 新建隧道上穿施工对既有隧道的影响, 根据盾构机切口与重叠区域监测剖面的距离不同, 选取施工过程中典型的 6 个施工工况进行分析, 具体施工阶段(工况)划分如表 1 所示。

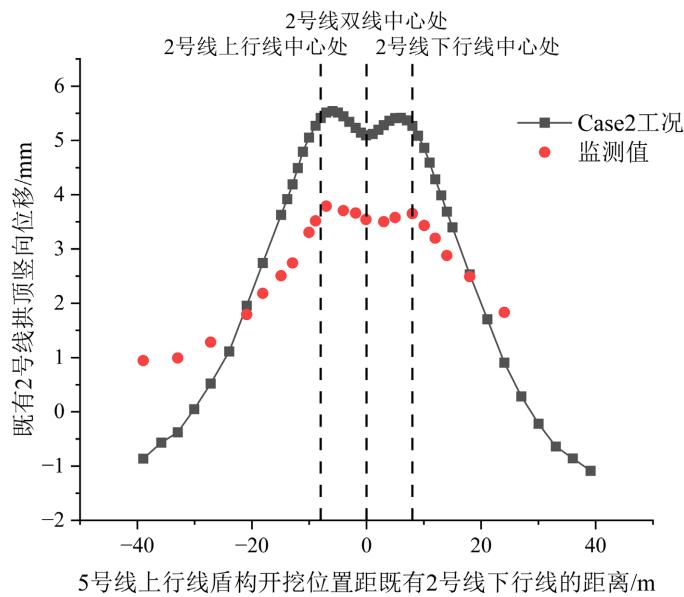


Figure 6. Simulated and monitored values of vertical deformation profile curve at vault of existing tunnel on line 2
图 6. 既有隧道 2 号线拱顶竖向变形剖面曲线的模拟值与监测值

Table 1. Division of construction stages
表 1. 施工阶段的划分

施工阶段序号	施工阶段说明
工况 1	盾构机远离监测剖面
工况 2	盾构机靠近监测剖面
工况 3	盾构机位于监测剖面正下方
工况 4	盾构机穿越监测剖面
工况 5	新建隧道上行线施工完成
工况 6	新建隧道双线施工完成

3.3.1. 既有隧道整体竖向变形特征分析

既有隧道在工况 5、6 情况下的竖向变形云图如图 7 所示(图中单位为 mm, 图中 U 表示位移, U3 表示为垂直于既有隧道的位移、即既有隧道竖向变形)。可以看出, 由于新建隧道开挖引起既有隧道上覆土体卸荷, 既有隧道主要以隆起变形为主。单线开挖完成时, 既有隧道在新建隧道上行线轴线处隆起最大、隆起量约为 4.5 mm 左右、影响范围约为 12 m (2 D 范围)。双线开挖完成时, 受到新建隧道下行线的“二次扰动”, 既有隧道隆起持续变大、隆起量约为 7.0 mm 左右、影响范围扩大为 19 m (3.5 D), 云图基本呈轴对称形状。先行线开挖引起的既有隧道隆起占总隆起量的 60% 左右。由于新建隧道双线间距较近, 双线开挖完成时新建隧道上、下行线轴线以及中间区域都产生了较大的隆起。

3.3.2. 既有隧道纵向变形特征分析

为了研究新建隧道上穿工程中既有隧道的竖向变形特征, 下面以既有隧道下行线为例(图 7 中右侧隧道), 将既有隧道在工况 1~6 下的拱顶竖向剖面曲线绘制于图 8 中。

从图 8 可以看出：

- (1) 当新建隧道盾构机离既有隧道下行线较远时(工况 1), 盾构施工对既有隧道基本没有影响。当盾构机距离既有隧道下行线轴线约 15 m (2.5 D)时(工况 2), 既有隧道开始受新建隧道的影响, 出现微小隆起变形、隆起量约为 0.20 mm。
- (2) 当盾构机位于既有隧道下行线正上方时(工况 3), 在土体卸荷的作用下, 既有隧道产生了较大的隆起、最大隆起值为 3.04 mm、位于上行线中心处。当盾构机通过既有隧道下行线约 11 m (2 D)时(工况 4), 既有隧道持续产生隆起, 并达到隆起峰值 4.86 mm。这是因为, 当盾构机位于既有隧道下行线正上方时, 由于盾构机重力的存在, 土体卸荷对既有隧道的影响没有全部体现出来; 当盾构机通过一段距离后, 土体卸荷作用才全部体现出来, 说明既有隧道的竖向变形存在“滞后效应”[11]。
- (3) 当新建隧道上行线开挖完成时(工况 5), 由于衬砌管片和注浆的作用、土体的固结沉降, 既有隧道产生了少量沉降(既有隧道隆起量为 4.42 mm、较工况 4 减少了 0.44 mm), 既有隧道剖面曲线呈“单峰状”分布形式、沿上行线呈轴对称分布。当新建隧道双线开挖完成时(工况 6), 既有隧道受到下行线的“二次扰动”, 隆起持续变大。既有隧道隆起峰值向双线中心处偏移, 隆起最大值为 6.88 mm、位于上行线中心右侧 4 m 左右; 既有隧道剖面曲线沿双线中心呈非对称分布。

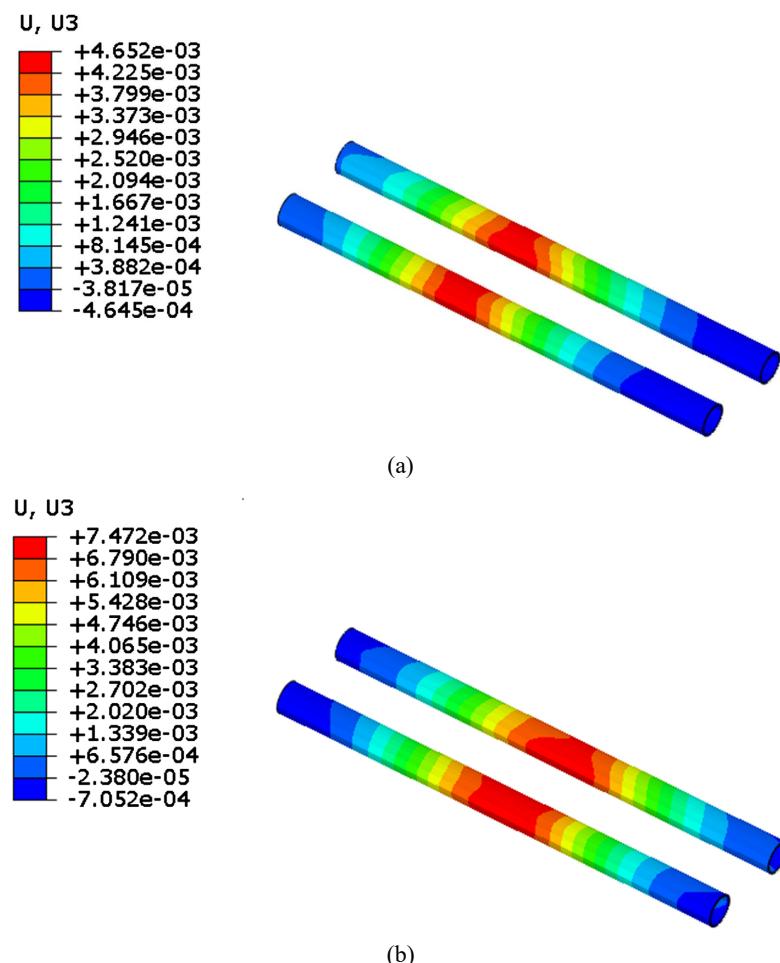


Figure 7. (a) Vertical deformation contour of existing tunnel upon completion of single-line excavation under working condition 5; (b) Vertical deformation contour of existing tunnel upon completion of double-line excavation under working condition 6
图 7. (a) 工况 5 单线开挖完成时既有隧道竖向变形云图; (b) 工况 6 双线开挖完成时既有隧道竖向变形云图

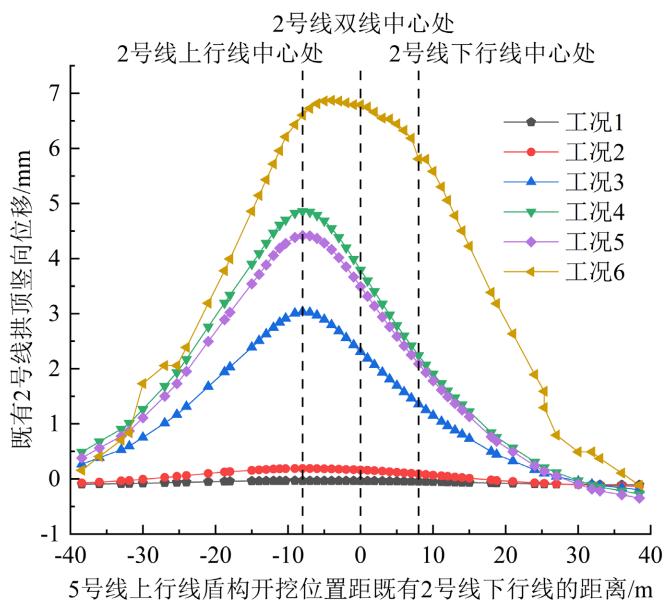


Figure 8. Profile displacement curves of existing tunnel under different working conditions
图 8. 不同工况下既有隧道剖面位移曲线

3.3.3. 既有隧道水平变形特征分析

根据林越翔[12]的研究,在新建隧道穿越工程中,既有隧道管片会发生扭转,而扭转变形情况可以体现于既有隧道拱顶和拱底的位移差值。重叠区域既有隧道下行线拱顶和拱底水平位移随开挖步的变化见图9。

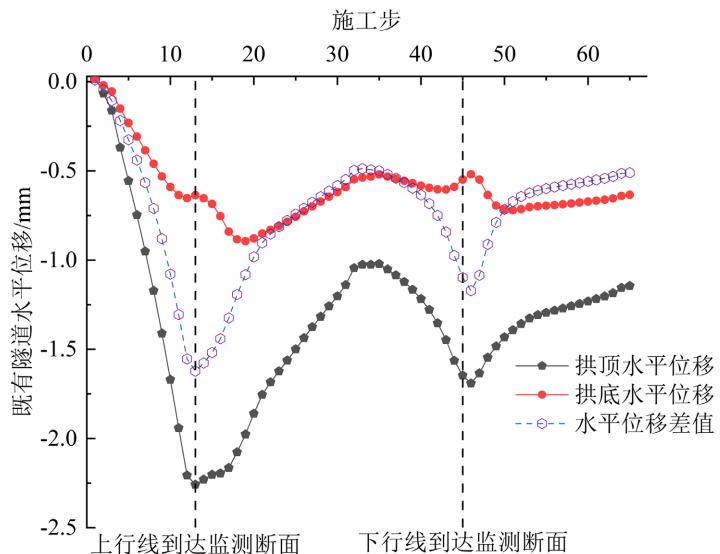


Figure 9. Horizontal displacement curves of typical positions of existing tunnel
图 9. 既有隧道典型部位水平位移曲线

从图9可以看出,在盾构隧道推进过程中,既有隧道拱顶和拱底的位移变化趋势类似,均向着盾构机推进方向进行水平移动。既有隧道拱顶和拱底水平位移最大值分别约为-1.96 mm 和-0.90 mm,拱顶和拱底的水平位移差值最大值约为1.0 mm。既有隧道拱顶和拱底的水平位移差值,反映既有隧道发生了轻微扭转。这是因为,新建隧道上穿施工造成了既有隧道上覆土层卸荷,土体因为卸载而产生了回弹,盾

构的推进先后顺序造成了周围土体回弹具有明显的时间顺序。对于已卸载的土体部位，土体回弹量较大，既有隧道隆起较大；而对于未开挖卸载的部位，土体回弹量较小，既有隧道的隆起较小，造成既有隧道朝着盾构机推进方向发生扭转变形[13]。扭转变形是上穿工程中既有隧道较为关注的变形，扭转变形过大会导致管片开裂、削弱既有隧道的整体稳定性[14]。

3.4. 加固措施对既有隧道变形影响的分析

在前述既有隧道变形特征分析的基础上，为进一步评估加固措施对既有隧道变形控制的效果，本节以新建隧道洞内 MJS 工法桩后加固为研究对象，对加固与未加固条件下既有隧道的变形响应进行对比分析。根据前文分析结果，既有隧道变形以竖向隆起为主，故选取既有隧道竖向变形作为主要研究指标，分析洞内 MJS 工法桩加固对既有隧道变形的控制效果。参考已有研究成果[15]-[17]，通过提高新建隧道重叠区周围土体的弹性模量，对 MJS 工法桩加固效果进行等效模拟。加固区域范围如图 10 所示。

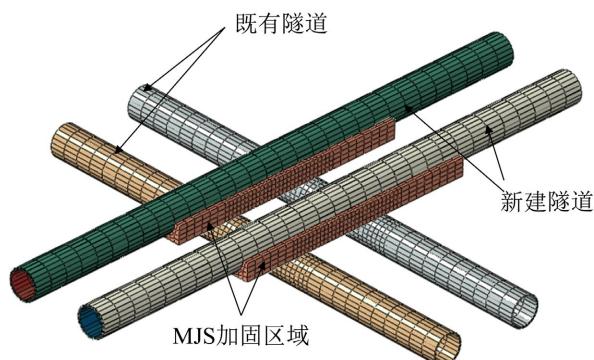


Figure 10. Post-reinforcement area of MJS method piles in newly-built tunnel
图 10. 新建隧道洞内 MJS 工法桩后加固区域

由于洞内 MJS 加固属于后加固，因此，选择的工况为新建隧道双线开挖完成的情况。既有隧道下行线在加固和未加固情况下的剖面曲线如图 11 所示。

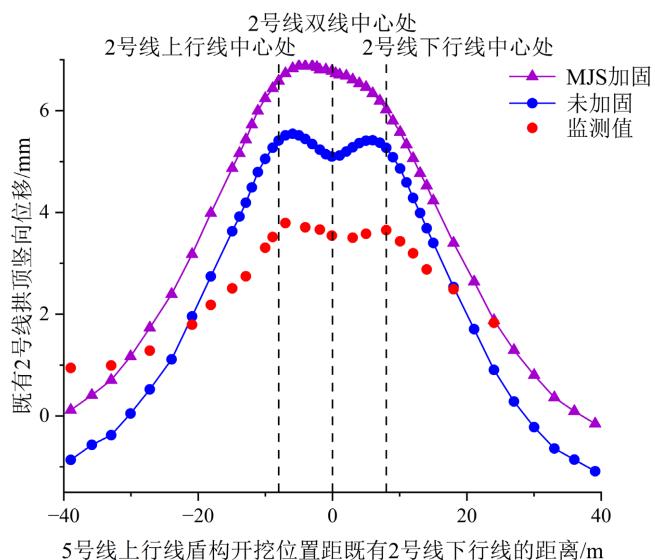


Figure 11. Comparison of vertical deformation between reinforced and unreinforced existing tunnel
图 11. 加固与未加固既有隧道竖向变形对比

既有隧道在双线开挖完成情况下加固与未加固时既有隧道下行线隆起峰值统计结果见表2。表中，正值表示为隆起，误差为模拟值与监测值之差。

Table 2. Statistical results of maximum vertical displacement of down line of existing tunnel
表 2. 既有隧道下行线最大竖向位移的统计结果

施工阶段	拱顶竖向位移				
	监测值/mm	加固后/mm	误差/mm	未加固/mm	误差/mm
双线开挖完成	3.8	5.54	1.74	6.87	3.07

从图11和表2可以看出：

(1) 对新建隧道进行洞内MJS工法桩后加固后，既有隧道在新建隧道双线开挖完成后的模拟值与监测值更接近，既有隧道下行线最大隆起模拟值为5.54 mm、与监测值相差1.74 mm。

(2) 与未使用加固措施的模拟值相比，新建隧道进行洞内MJS工法桩加固措施后的既有隧道最大隆起量(5.54 mm)较未加固的最大隆起量(6.87 mm)减少了1.33 mm。同时，加固后上穿施工对既有隧道的影响范围也明显减少，既有隧道的主要隆起范围由3.5 D减少为3 D。

(3) 与未使用加固措施的模拟值相比，加固后既有隧道最终剖面曲线为“M”型的双峰状(即双线中心处隆起小于两侧)；而未加固情况下既有隧道的最终剖面曲线为“单峰状”形式(即双线中心处隆起与周围类似)。这说明，新建隧道进行洞内MJS工法桩后加固措施，能有效防止重叠区域既有隧道的整体隆起。

通过上述分析可知，对新建隧道进行洞内MJS工法桩加固可以有效减少既有隧道的后期竖向变形。这是因为，对新建隧道进行洞内MJS工法桩后加固，可以有效改变新旧隧道之间夹土层的土体性质，增强土体强度，提高土体的承载能力[17]，进而可以有效减少既有隧道由于上穿施工引起的最终隆起量。注浆预加固是盾构隧道穿越既有隧道中常见的加固措施，但对新建隧道进行洞内MJS工法桩后加固却比较罕见。因此，通过上述分析作者认为，在新建隧道上穿工程中，施工现场车流量和人流量都较大、没有条件对地面进行预加固时，可以采用新建隧道洞内MJS工法桩后加固的方式来减少新旧隧道的竖向变形，保证上穿施工的安全。

4. 结论

(1) 在未考虑加固措施的基准工况(Case 1)下，新建隧道上行线开挖完成时，既有隧道隆起的影响范围约为2 D(D为隧道直径)，隆起峰值位于新建隧道上行线轴线处，既有隧道纵向变形曲线呈“单峰状”形式；下行线开挖会对既有隧道产生“二次扰动”，影响范围扩大到3.5 D，隆起峰值向既有隧道双线中心偏移；盾构机距离既有隧道结构边线约2.5 D时，新建隧道开始对既有隧道产生影响；既有隧道隆起具有“滞后效应”，盾构机穿越既有隧道约2 D后，既有隧道隆起达到峰值。

(2) 在既有隧道水平变形方面，新建隧道上穿施工会引起既有隧道产生向着盾构机推进方向的水平位移，既有隧道拱顶和拱底水平位移最大值分别约为-1.96 mm和-0.90 mm、都远小于竖向位移。拱顶和拱底的水平位移存在差值、差值最大值约为1.0 mm，表明在隧道上穿过程中既有隧道产生了轻微的扭转变形。

(3) 在考虑洞内MJS工法桩后加固措施的实际工程工况(Case 2)下，新建隧道上穿施工引起的既有隧道最终竖向变形得到有效控制。与未加固工况相比，使用新建隧道洞内MJS工法桩加固措施后的既有隧道最大隆起量(5.54 mm)较未加固的最大隆起量(6.87 mm)减少了20%；既有隧道隆起范围明显减少，主要影响范围由3.5 D减少为3 D，表明洞内MJS工法桩后加固措施对抑制软土地层中隧道上穿施工引起的既有隧道最终变形具有良好效果。

参考文献

- [1] 钱七虎. 迎接我国城市地下空间开发高潮[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 112-113.
- [2] 王福文, 梁帅文, 冯爱军. 2024年我国城市轨道交通数据统计与发展分析[J]. 隧道建设(中英文), 2025, 45(2): 425-434.
- [3] 魏新江, 张默爆, 丁智, 张霄. 盾构穿越对既有地铁隧道影响研究现状与展望[J]. 岩土力学, 2020, 42(S2): 1-20.
- [4] Lin, X., Chen, R., Wu, H. and Cheng, H. (2019) Deformation Behaviors of Existing Tunnels Caused by Shield Tunneling Undercrossing with Oblique Angle. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **89**, 78-90. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.03.021>
- [5] Avgerinos, V., Potts, D.M. and Standing, J.R. (2017) Numerical Investigation of the Effects of Tunnelling on Existing Tunnels. *Géotechnique*, **67**, 808-822. <https://doi.org/10.1680/jgeot.sip17.p.103>
- [6] 刘树佳, 张孟喜, 吴慧明, 李林. 新建盾构隧道上穿对既有隧道的变形影响分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(S1): 399-405.
- [7] 房明, 周翠英, 刘镇. 交叉隧道盾构施工参数与交叉角度对既有隧道的沉降影响研究[J]. 工程力学, 2011, 28(12): 133-138.
- [8] 张海波, 殷宗泽, 朱俊高. 近距离叠交隧道盾构施工对老隧道影响的数值模拟[J]. 岩土力学, 2006, 26(2): 282-286.
- [9] 张孟喜, 张靖, 吴应明, 加武荣, 韩佳尧, 周力军. 全风化岩层中双线盾构上穿近邻地铁隧道影响分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(9): 100-108.
- [10] 潘涛. 软土地区双线区间盾构隧道施工对周边地表以及建筑物沉降的影响[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 101-108.
- [11] 朱蕾, 黄宏伟. 盾构近距离上穿运营隧道的实测数据分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10): 1962-1966.
- [12] 林越翔, 彭立敏, 施成华, 雷明锋, 李云峰. 盾构下穿施工对既有隧道管片接头力学性能影响机制研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(8): 1698-1706.
- [13] 黄德中, 马险峰, 王俊淞, 李削云, 余龙. 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.
- [14] 方勇, 何川. 盾构法修建正交下穿地铁隧道对上覆隧道的影响分析[J]. 铁道学报, 2007, 29(2): 83-88.
- [15] 张登雨, 张子新, 吴昌将. 盾构侧穿邻近古建筑地表长期沉降预测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2143-2150.
- [16] 吴昌将, 张子新, 丁文其, 张登雨. 盾构侧穿邻近古建筑的施工影响分析及保护措施加固效果的研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 158-165.
- [17] 王岩. 基于 MJS 功法地铁近接施工对既有隧道的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2019.