

基于数值模拟的不同加固方式下基坑开挖对既有盾构隧道影响分析

苏哲阳

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年8月16日; 录用日期: 2025年9月8日; 发布日期: 2025年9月16日

摘要

为探究不同加固方式下基坑施工对既有盾构隧道影响, 采用数值模拟方法对比分析了门式加固及抗拔桩加固两种方式下地表沉降分布特征及隧道结构位移影响规律。研究结果表明, 门式加固能有效改善土体刚度分布, 显著降低地表沉降并优化隧道结构的整体变形协调性; 而抗拔桩加固虽具有一定控制效果, 但会引发坑边土体隆起, 并导致隧道产生不利的非对称变形模式。研究同时发现, 开挖深度对隧道变形具有显著影响, 深层开挖会加剧土体塑性变形发展。

关键词

数值模拟, 门式加固, 抗拔桩加固, 盾构隧道, 变形分析

Numerical Simulation-Based Analysis of the Influence of Different Reinforcement Methods on Existing Shield Tunnels during Foundation Pit Excavation

Zheyang Su

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Aug. 16th, 2025; accepted: Sep. 8th, 2025; published: Sep. 16th, 2025

Abstract

To investigate the influence of foundation pit excavation on existing shield tunnels under different reinforcement methods, this study conducted a comparative numerical simulation analysis of

文章引用: 苏哲阳. 基于数值模拟的不同加固方式下基坑开挖对既有盾构隧道影响分析[J]. 建模与仿真, 2025, 14(9): 163-171. DOI: 10.12677/mos.2025.149593

surface settlement characteristics and tunnel displacement patterns under portal reinforcement and anti-uplift pile reinforcement schemes. The results demonstrate that portal reinforcement effectively improves soil stiffness distribution, significantly reduces surface settlement, and enhances overall deformation coordination of tunnel structures. In contrast, while anti-uplift pile reinforcement provides some control effect, it induces soil heaving near excavation edges and causes unfavorable asymmetric deformation in tunnels. The study further reveals that excavation depth significantly affects tunnel deformation, with deeper excavations exacerbating the development of soil plastic deformation.

Keywords

Numerical Simulation, Portal Reinforcement, Anti-Uplift Pile Reinforcement, Shield Tunnel, Deformation Analysis

Copyright © 2025 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

随着城市化进程加速推进,城市人口持续集聚,地下空间开发已成为缓解土地资源约束的关键途径。目前,地下空间开发正呈现出规模扩大化、结构复杂化和深度增加化的发展趋势,新建地下工程与既有结构的近距离穿越问题日益突出。因此,建立考虑多因素耦合作用的基坑加固-隧道响应评估体系,定量揭示不同加固工艺对既有隧道结构的扰动规律,对于确保现有地下轨道交通正常运营和保障基坑施工安全非常重要。

当前,针对地下空间开发对既有隧道影响的研究主要可以分为四类方法:理论解析[1]-[4]、模型实验[5][6]、数值模拟[7]-[14]、现场实测[15]-[20]。冯国辉[1]等采用 Timoshenko 梁和 Kerr 地基模型简化计算基坑开挖对既有隧道的影响,验证结果合理。研究表明:隧道位移和弯矩随基坑宽、深增加而增大,随地基模量、隧道埋深及与基坑中心距离增加而减小。沈国政[2]等基于 Mindlin 解计算基坑开挖卸荷对隧道的附加荷载,并采用 Pasternak 地基模型建立隧道纵向变形微分方程,通过 Hermite 插值构建七点有限差分格式进行求解,得到邻近隧道的纵向位移。朱春柏等[3]重点分析了围护结构的变形问题。基于 Mindlin 解,从理论上推导了基坑开挖卸荷对既有隧道产生的附加应力;将隧道简置于 Pasternak 地基上的 Euler-Bernoulli 梁,在考虑支护结构空间效应的情况下,计算了地铁隧道的位移变形,并结合实际工程案例,通过数据对比验证了理论计算结果的合理性。王理想等[4]采用理论分析方法,研究了开挖引起的既有隧道隆起变形解析解。通过建立带环间接头的三维计算模型,并基于 Pasternak 地基理论,运用两阶段法计算得出下卧隧道的隆起位移及环缝张开量。最后,结合三个实际工程案例,验证了理论计算结果的合理性。王志杰等[10]综合理论分析、数值模拟与实测数据,发现基坑开挖引发的隧道位移极值集中于 0.59H~0.73H 区间,该范围为最不利影响区,工程中需重点加强该区段的支护安全性。梁发云[5]等通过离心模型试验研究了深基坑开挖过程中地下连续墙与邻近地铁隧道的变形特性。研究表明,采用“先大后小”的分区开挖方案能有效控制基坑变形,对邻近隧道的影响较小。该成果为紧邻既有隧道的深基坑工程提供了可行的施工具有参考价值。徐晓兵[6]等通过室内模型试验,对比研究了无隔离桩、无埋深隔离桩及有埋深隔离桩三种工况下基坑开挖对邻近隧道变形的影响。研究结果表明:有埋深隔离桩可有效抑制隧道变形;而无埋深隔离桩不仅无法控制变形,反而会加剧隧道位移。史江伟[7]等采用 ABAQUS 有

限元软件分析了圆形基坑开挖对下卧隧道三维变形的影响规律。研究表明, 基坑直径与开挖深度的比值是影响隧道变形的关键因素, 当该比值达到 7 时, 隧道横向和竖向变形最为显著。张国涛[8]等通过数值模拟对比研究了不同支护条件下基坑开挖对邻近隧道的影响。研究发现: 采用传统支撑体系时, 地下连续墙顶部位移显著, 导致邻近隧道位移接近 10 mm 的警戒值, 且墙身水平位移随开挖深度持续增大; 而应用钢支撑轴力伺服系统后, 通过预加轴力有效抑制了围护结构变形。徐国元[9]以珠海某基坑工程为背景, 建立了三维数值模型, 并利用有限元软件模拟施工过程, 研究了深基坑分区开挖方式及施工顺序对基坑自身和邻近城轨隧道的影响。研究表明, 在施工过程中采用“大化小”的分区开挖策略, 并结合合理的支护方案, 可有效减小对邻近隧道的不利影响。王沛等[11]通过有限元分析发现, 相较于小直径隧道, 基坑开挖中超大直径盾构隧道竖向变形更小而横向变形更大, 变形量随距围护结构距离增大而减小、随开挖深度增加而增大, 且其位移控制警戒范围可更靠近基坑。岳云鹏等[12]以深圳某基坑工程为例建立数值模型, 分析表明: 在分块开挖方式相同条件下, 横向分块数量越多, 隧道竖向位移越小, 且开挖前进行地基加固可有效控制其变形。柯明中[13]等结合杭州某工程实例, 采用理论经验与数值模拟相结合的方法, 通过计算验证了基坑支护体系是否满足当地变形控制要求, 为杭州地区邻近地铁的基坑工程提供了设计依据。何忠明等[14]通过数值模拟与理论计算, 分析了基坑开挖对邻近地铁隧道的变形影响, 并利用正交试验得出支撑刚度对隧道最大水平位移影响最为显著的结论。王卫东[15]等通过分析上海地区多个深基坑工程数据, 发现地表沉降与墙厚、软土厚度成正比, 与坑底抗隆起稳定性成反比, 并建立了沉降与倾斜的预测关系。何小龙[16]等基于厦门地铁上跨基坑工程实测数据, 揭示底层土体开挖对既有隧道变形影响最为显著。丁智[17]等基于杭州某项目, 发现基坑开挖过程中, 围护结构施工、降水和无支撑暴露均会引发显著地层与隧道初始位移, 且开挖具有明显空间效应, 中部变形大于边角, 单向开挖易造成应力叠加, 使隧道最大变形区向后挖段偏移。许四法[18]等通过现场实测分析, 在运营地铁隧道周边及结构布置监测点, 研究表明: 支护结构施作与坑内土体卸荷阶段引起紧邻盾构隧道的变形最为显著。王立新[19]等通过室内模型试验与正交试验, 研究了黄土地区基坑开挖对既有隧道位移变形的影响, 并分析了各因素对隧道变形的敏感性。邓江雨[20]等通过实测分析, 在隧道施工过程中, 由于隧道侧方的土体卸载必然会引起地层中应力的重新分布, 从而可能会导致隧道必然上浮或者下沉。掘进压使得掌子面前方及侧前方土体有一个上浮的趋势, 而土体的卸载使得掌子面前方及侧前方的土体有下沉的趋势。

上述研究成果针对基坑开挖对邻近隧道的影响机制及防护措施提供了大量实际工况监测数据、理论分析方法及计算方法, 但对于不同加固方式(如门式加固、抗拔桩等)对既有盾构隧道的影响研究仍相对缺乏。因此本文通过数值模拟方法, 构建保护基坑围护结构、既有盾构隧道二维模型, 系统分析门式加固及抗拔桩加固等方案下基坑地表沉降及隧道结构拱顶、拱底变形的特征于影响规律。

2. 数值模拟模型建立

2.1. 数值模型构建及参数设置

本文采用有限元软件建立二维数值模型, 进行基坑开挖土体卸载对下卧隧道影响的数值模拟分析。模型边界条件设定为 80 m × 100 m (宽 × 高), 主要包含土体、基坑、围护结构和下卧隧道四个部分。本工程基坑采用顺作法施工, 该工法更符合实际工程施工工艺特点。基坑跨度为 38 m, 开挖深度为 8 m, 下卧隧道拱顶埋深为 12 m。隧道采用外径为 5 m、内径为 4.3 m、管片厚度为 0.3 m 的盾构结构, 管片材料为 C50 混凝土, 弹性模量为 345000 MPa。模型的具体结构几何特征及网格划分方案如图 1 所示。

数值模型中, 土体采用 HS-small 模型进行模拟, 属性为平面应变单元; 地下连续墙、基坑底板及隧道衬砌采用各向同性板单元进行模拟。模型经过网格划分后, 共生成 1311 个节点, 11073 个单元。模型

中主要土体及结构相关参数见表 1。

Table 1. Physical and mechanical parameters of the model
表 1. 模型物理力学参数

土层性质	容重/kN/m ³	弹性模量/MPa	泊松比	粘聚力/kPa	内摩擦角/Deg
杂填土	17	38.92	0.3	15	5
黏土	18.9	20.51	0.35	28	23.9
地下连续墙	19.5	30000	0.24		
混凝土支撑	18.5	32500	0.2		
衬砌	23.54	34500	0.2	-	-

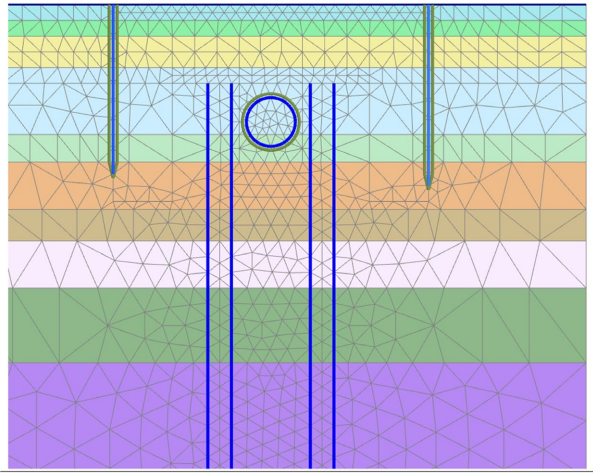


Figure 1. Soil-tunnel model
图 1. 土体 - 隧道模型

2.2. 施工工况模拟方案

本文采用数值模拟方法系统研究了不同土体加固方式对基坑开挖过程中下卧既有隧道结构的影响机制。基于顺作法施工工艺，建立了完整的有限元分析模型，具体模拟过程分为三个主要阶段：首先完成 800 mm 厚地下连续墙施工并进行初始地应力平衡计算，将位移场归零作为基准状态；随后分步模拟基坑开挖过程，第一阶段开挖至-4.0 m 标高时同步激活第一道 C40 混凝土支撑；第二阶段继续开挖至-8 m 标高并激活第二道支撑，同时施作 1200 mm 厚底板结构。同时进行土体加固和抗拔桩加固两种工况分别进行建模，分析其对下卧隧道结构影响的差异性。

3. 数值模拟结果分析

3.1. 地表沉降规律分析

坑内土体沉降规律分析

图 2、图 3 为不同加固方式工况下的基坑内地表沉降竖向位移结果。从图中可以看出，抗拔桩加固和土体门式加固条件下的地表沉降特征有明显差异。通过对比分析两种加固方式的基坑内部地表沉降数值模拟结果，发现加固方式的不同对地表沉降的影响十分显著。为了更好地分析加固后即可基坑内部地表沉降变化规律，设置不进行加固基坑开挖(对照组)。传统基坑开挖引起的地表沉降通常呈现单峰“碗状”

分布,最大沉降位于基坑中心。然而,对照组可见在开挖深度 8 m 的对称基坑中,地表沉降曲线呈现明显的双峰特征,峰值分别位于距坑边 8.5 m 和 28.5 m 处(沉降量 85.3 mm),而基坑中心沉降仅为 45.3 mm。这种异常现象与坑底下方 2 m 处存在的既有地铁隧道密切相关。隧道衬砌承担了土体卸荷应力,导致正上方土体沉降减少。

采用门式加固方案后,数值模拟结果显示沉降分布得到有效控制。最大沉降值降低至 56.1 mm,降幅达 34.2%;双峰沉降的差值从 0.5 mm 减小至 0.12 mm,沉降分布更趋均匀;沉降影响范围由 38 m 缩减至 35 m。通过对比分析两组数值模拟结果,可以得出门式加固通过以下机制发挥作用。通过对土体加固,提升刚度改变土体中的应力传递路径;其次,有效抑制了隧道周边的土体的塑性变形发展;最后改善了支护结构与土体的协同工作性能。建议在实际工程应用中关注在沉降峰值区域采用更高强度的加固体。

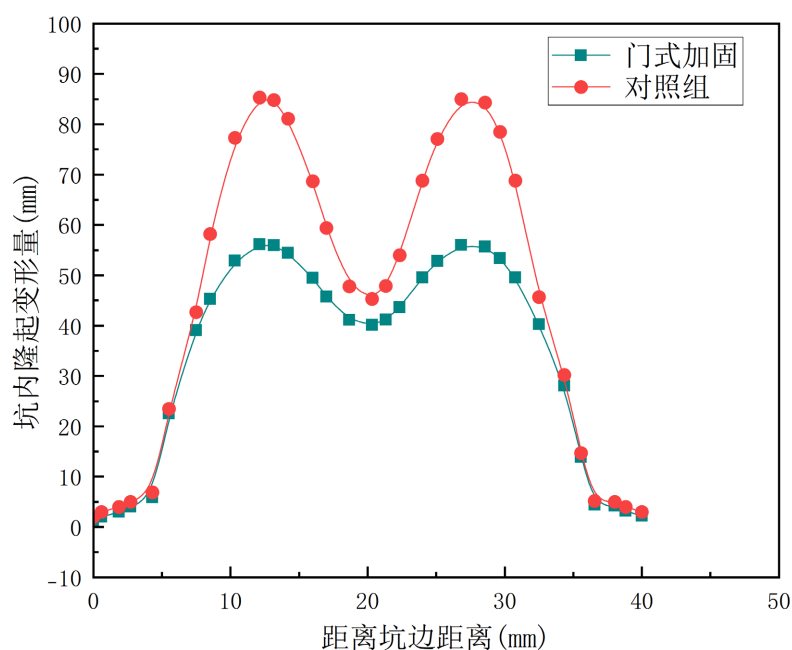


Figure 2. Ground surface settlement inside the pit with portal reinforcement

图 2. 门式加固坑内地表沉降

采用抗拔桩加固方案后,模拟结果表明,抗拔桩的设置显著改变了传统的地表变形模式,呈现出独特的变形特征。在距离坑边 0~4 m 范围内,抗拔桩加固工况出现了明显的负向位移(隆起变形),最大隆起量达到 2.87 mm (距离坑边 0 m 处)。这一现象与常规基坑开挖的变形特征形成鲜明对比,主要归因于抗拔桩在开挖过程中产生的上拔作用。随着距离增加,隆起量逐渐减小,在 4.31 m 处转为正向沉降。在 5~30 m 范围内,抗拔桩有效控制了地表沉降发展,使最大沉降值从对照组的 85.3 mm 降低至 70.4 mm,降幅达 17.5%,平均沉降量也从 46.8 mm 降至 38.2 mm。值得注意的是,沉降曲线呈现出明显的双峰波动特征,峰值分别出现在 12.1 m (69.9 mm)和 28.6 m (70.4 mm)处,这种特殊分布模式反映了桩土相互作用导致的复杂应力重分布现象。进一步分析表明,这种变形特征主要源于三个作用机制:首先,桩体抗拔力引起坑边土体回弹;其次,桩土刚度差异改变了应力传递路径;第三,桩间距效应导致局部应力集中。研究发现不仅揭示了抗拔桩加固的特殊变形机理,也为类似工程的设计优化提供了理论依据,但需注意坑边隆起可能对支护结构产生的不利影响。

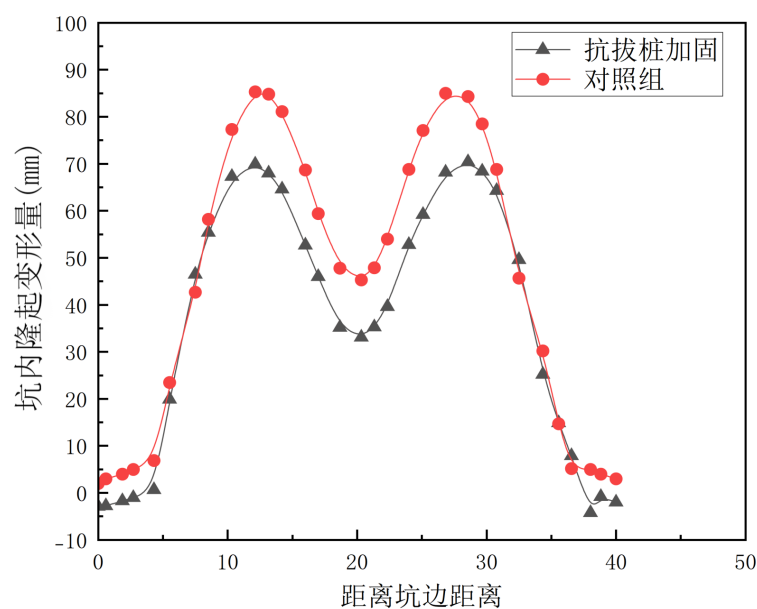


Figure 3. Internal ground surface settlement in excavation with uplift pile reinforcement

图 3. 抗拔桩加固坑内地表沉降

3.2. 隧道结构位移特征分析

3.2.1. 不同开挖深度对隧道结构影响

通过选取 0 m、2 m、4 m、6 m、8 m 开挖深度，并控制隧道位置和围护结构参数等其他条件保持不变，分析隧道结构位移即竖向位移的影响。

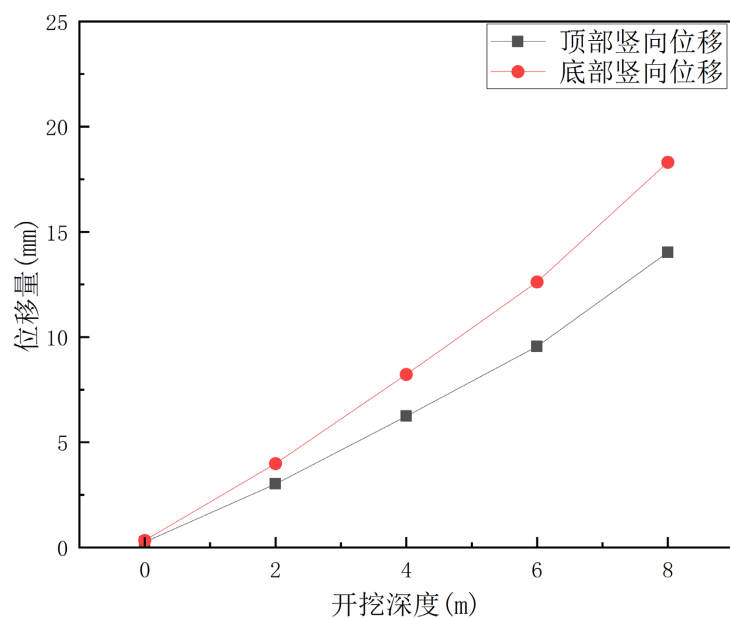


Figure 4. Tunnel displacement variation with excavation depth

图 4. 开挖深度隧道位移变化量

在基坑开挖深度 0 m、2 m、4 m、6 m、8 m，分别对应的隧道结构顶部最大竖直位移为 0.26 mm、

3.02 mm、6.24 mm、9.56 mm、14.03 mm；隧道结构底部隆起 0.34 mm、3.99 mm、8.23 mm、12.62 mm、18.31 mm。如图 4 所示，随着基坑的开挖深度的增加，隧道结构顶部竖直位移主要呈上升趋势，隧道结构底部竖直位移呈上升趋势，这是因为基坑开挖对土体所产生的沉降应力，导致隧道部位沉降增加并导致隧道上浮。当开挖深度超过 4 m 后，位移增长率显著提升，这反映了土体塑性变形的发展过程，建议在实际工程中，当开挖深度超过 4 m 时应采取加强监测和支护的措施。

3.2.2. 隧道结构拱顶位移特征

图 5、图 6 分别为门式加固、抗拔桩加固方案下既有盾构隧道结构位移图，从图中可以看出，在门式加固方案下，竖向位移分布方面，拱底部位表现出显著的上抬变形特征，最大计算值达 12 mm，这主要源于基底土体的卸荷回弹效应；与此同时，拱顶部位则呈现明显的沉降趋势，计算沉降量为 6 mm，反映了上部荷载与加固区刚度的相互作用机制。进一步分析表明，这种上下反向的变形特征与加固方案的针对性设计密切相关：拱底的位移主要受下部未加固土体的弹性恢复影响，而拱顶沉降则体现了加固区对上部荷载的再分配作用。

在抗拔桩加固方案下，数值计算结果表明：在竖向位移分布方面，隧道结构呈现出典型的非均匀变形特征，其中结构底端产生竖向隆起计算值 15 mm，这一现象主要归因于抗拔桩对基底土体的约束作用不足；与此同时，隧道顶部观测到的竖向沉降计算值 10 mm。进一步机理分析表明，这种位移分布特征源于抗拔桩的双重作用机制：一方面，抗拔桩通过应力传递显著改善了拱顶区域的受力状态；另一方面，桩土相互作用形成的复合加固体系有效提升了地基的整体刚度。

通过对比门式加固与抗拔桩加固两种方案的隧道结构竖向位移数据可以发现，拱底隆起大于拱顶隆起使管片变为扁椭圆形，这是因为隧道主要受到下方未加固土体上浮对拱底的压力。门式加固方案在隧道结构变形控制方面优于抗拔桩方案。这种加固方式特别适用于对拱顶沉降控制要求严格的工程场景，其优越的荷载再分配能力为隧道结构稳定性提供了可靠保障。

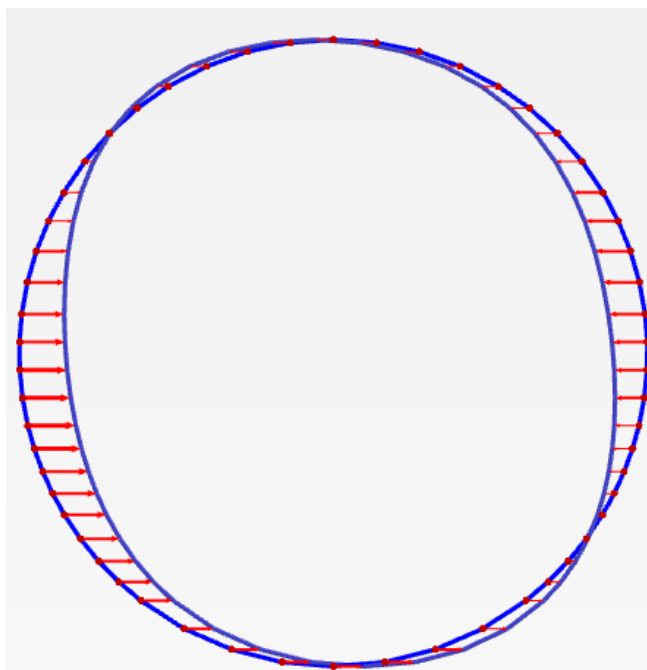


Figure 5. Deformation of tunnel structure under portal reinforcement scheme

图 5. 门式加固方案下隧道结构变形

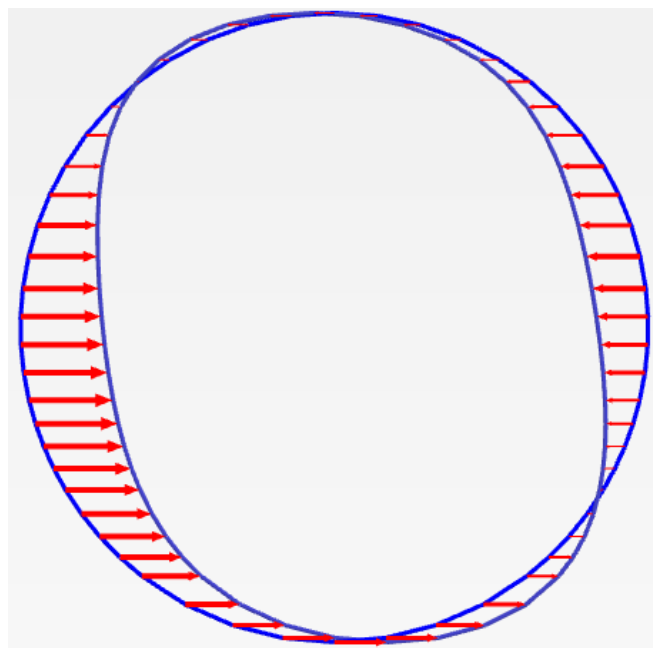


Figure 6. Tunnel structure deformation under uplift pile reinforcement scheme
图 6. 抗拔桩加固方案下隧道结构变形

4. 结论

本文通过数值模拟研究了不同加固条件下基坑开挖对邻近既有盾构隧道的影响规律，主要得出以下结论：

(1) 门式加固与抗拔桩加固对地表沉降的调控机制存在本质区别。门式加固通过增强土体刚度和优化应力路径，使沉降分布更趋均匀，最大沉降量降低 34.2%，且有效抑制双峰沉降现象。抗拔桩加固则因桩体上拔作用，在坑边 0~4 m 范围内引发土体隆起，沉降控制效果较于门式加固弱。这样，门式加固更适用于需严格控制整体沉降的工程，而抗拔桩方案需谨慎评估坑边隆起对支护结构的潜在风险。

(2) 隧道位移随开挖深度增加呈非线性增长，当深度超过 4 m 后，位移增长率显著提升。开挖深度 8 m 时，隧道顶部沉降达 14.03 mm，底部隆起 18.31 mm，形成显著差异变形。这一现象表明，浅层开挖阶段以弹性变形为主，而深层开挖会引发土体塑性发展，建议在超过临界深度时加强监测并优化支护参数，以控制隧道扁椭圆化趋势。

(3) 门式加固与抗拔桩加固对隧道变形的影响机制存在显著差异。门式加固通过形成整体刚性结构，有效协调了隧道拱顶沉降与拱底隆起的变形关系，使结构受力更加均匀。相比之下，抗拔桩加固由于其对土体的局部约束特性，难以完全抑制隧道底部土体的卸荷回弹，导致拱底隆起量明显大于拱顶沉降。这种非对称变形模式易使管片产生扁椭圆化变形，对隧道结构的长期稳定性构成潜在威胁。这表明，在软土地层等对变形敏感的区域，采用门式加固方案能更有效地保证隧道结构的整体稳定性，而抗拔桩方案则需要配合其他辅助措施来弥补其在整体变形控制方面的不足。

5. 讨论

(1) 基坑开挖阶段易引发隧道结构产生非对称变形为“水平收缩，竖向拉伸”扁椭圆变形，这一发现加深了许四法[18]关于基坑施工队临近隧道变形影响等理论。

(2) 门式加固通过形成整体刚性区，有效协调了拱顶沉降与拱底隆起的变形关系，显著改善了隧道的

受力状态。而抗拔桩加固由于其局部约束特性,对抑制隧道底部的卸荷回弹有限。这一发现对王沛[11]坑内土体加固对隧道位移控制措施研究进行补充。

(3) 本文采用二维建模二维数值模型虽然在计算效率方面具有优势,但无法真实反映隧道纵向的变形协调效应。难以真实模拟抗拔桩与土体间的三维相互作用及动态施工过程,导致对加固效果的评估与实际情况可能存在偏离。这些局限性提示,在采用二维模型进行定量分析时,需对计算结果保持审慎,并建议通过三维模型或现场监测数据予以必要修正。

参考文献

- [1] 冯国辉,徐长节,郑茗旺,等.考虑剪切变形下基坑开挖引起下卧既有隧道的纵向变形研究[J].铁道学报,2022,44(3):132-141.
- [2] 沈国政,赵宏华,赵凯,等.深基坑开挖引起隧道纵向位移的 Hermite 差分法[J].地下空间与工程学报,2020,16(S2):841-848.
- [3] 朱春柏,钱栋栋,余忠祥,等.考虑空间效应的基坑开挖对邻近隧道影响分析[J].地下空间与工程学报,2023,19(5):1471-1477.
- [4] 王理想,梁荣柱,李忠超,等.基坑上跨开挖诱发既有盾构隧道隆起变形研究[J].工程力学,2022,39(12):130-140.
- [5] 梁发云,褚峰,宋著,等.紧邻地铁枢纽深基坑变形特性离心模型试验研究[J].岩土力学,2012,33(3):657-664.
- [6] 徐晓兵,胡琦,曾理彬,等.隔离桩对干砂地基中基坑侧方隧道影响的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(S1):3015-3022.
- [7] 史江伟,陈丽.圆形基坑开挖引起下卧隧道三维变形机理研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(4):1083-1090.
- [8] 张国涛,苏栋,庞小朝,等.基坑开挖轴力伺服控制对既有地铁隧道变形的影响[J].现代隧道技术,2020,57(S1):521-527.
- [9] 徐国元,邱蕴佳,刘启清.软土深基坑分区开挖顺序对支护桩及城轨隧道影响的数值分析[J].河南理工大学学报(自然科学版),2021,40(1):162-168.
- [10] 王志杰,周飞聪,周平,等.基于强近接大型基坑单侧开挖卸载既有车站变形理论研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(10):2131-2147.
- [11] 王沛,任洁,翟杰群.上海软土地区基坑侧向隧道位移控制措施研究[J].地下空间与工程学报,2022,18(S1):466-471.
- [12] 岳云鹏,刘晓玉,张龙云,等.基坑分块开挖对下卧盾构隧道的变形影响分析[J].铁道标准设计,2020,64(9):113-119.
- [13] 柯明中,李玉明,王坚,等.基于数值模拟的基坑开挖对临近地铁隧道变形影响规律分析[J].建筑结构,2023,53(S1):2837-2841.
- [14] 何忠明,王盘盘,王利军,等.深基坑施工对临近地铁隧道变形影响及参数敏感性分析[J].长安大学学报(自然科学版),2022,42(4):63-72.
- [15] 王卫东,徐中华,王建华.上海地区深基坑周边地表变形性状实测统计分析[J].岩土工程学报,2011,33(11):1659-1666.
- [16] 何小龙,董浩伟,陈燕青,等.上跨地铁基坑开挖对区间隧道变形影响的监测与数值分析[J].水利与建筑工程学报,2019,17(4):39-44.
- [17] 丁智,张霄,金杰克,等.基坑全过程开挖及邻近地铁隧道变形实测分析[J].岩土力学,2019,40(S1):415-423.
- [18] 许四法,周奇辉,郑文豪,等.基坑施工对邻近运营隧道变形影响全过程实测分析[J].岩土工程学报,2021,43(5):804-812.
- [19] 王立新,徐硕硕,王俊,等.黄土地层基坑开挖对既有地铁隧道影响分析[J].科学技术与工程,2022,22(6):2468-2476.
- [20] 邓江雨,姚爱军,周敬,等.邻近隧道盾构施工的现场实测分析[J].地下空间与工程学报,2020,16(6):1809-1817.