

基于数值模拟的不同土性条件下新建盾构隧道开挖对既有盾构隧道影响分析

查陈诚, 尹迎超, 朱海涛

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年6月19日; 录用日期: 2025年7月22日; 发布日期: 2025年7月30日

摘要

为探究不同土性条件下新建盾构隧道施工对既有盾构隧道的影响, 本文采用数值模拟方法, 选取黏土与砂土两种典型土层作为研究对象, 构建了新建盾构隧道开挖过程中对既有隧道影响的三维数值模型。通过对比分析两类土性条件下的既有隧道结构拱顶沉降、拱底沉降及地表沉降变形, 揭示了土层类型对施工影响程度的差异性, 并提出相应的风险控制措施。研究表明: 土层性质对盾构施工引起的地表沉降与隧道结构沉降有显著影响, 其中黏土条件下的地表沉降、拱顶沉降与拱底沉降均明显大于砂土条件, 且沉降影响范围更广、持续时间更长, 施工扰动对既有隧道结构的影响更为显著。该结论对类似工程中不同地质条件下的施工方案优化与风险控制具有重要指导意义。

关键词

数值模拟, 新建盾构隧道, 既有盾构隧道, 土层性质, 变形分析

Numerical Analysis of the Influence of New Shield Tunnel Excavation on Existing Shield Tunnels under Different Soil Conditions

Chencheng Zha, Yingchao Yin, Haitao Zhu

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

Received: Jun. 19th, 2025; accepted: Jul. 22nd, 2025; published: Jul. 30th, 2025

Abstract

To investigate the impact of new shield tunnel construction on existing shield tunnels under different soil conditions, this study employs numerical simulation methods. Two typical soil types—clay and

sand—were selected as the research objects. Three-dimensional numerical models were established to simulate the influence of new tunnel excavation on existing tunnels. Through comparative analysis of the deformation characteristics of existing tunnel structures—including vault settlement, invert settlement, and ground surface settlement—under these two soil conditions, the study reveals the differential influence of soil type on construction effects. Corresponding risk control measures are proposed. The results demonstrate that soil properties significantly affect ground surface settlement and tunnel structural settlement induced by shield tunneling. Specifically, under clay conditions, ground surface settlement, vault settlement, and invert settlement are significantly greater than those under sandy conditions. Moreover, the settlement extent is larger, the duration is longer, and the construction disturbance exerts a more pronounced impact on existing tunnel structures in clay. These findings provide important guidance for optimizing construction schemes and implementing risk control in similar projects under varying geological conditions.

Keywords

Numerical Simulation, New Shield Tunnel, Existing Shield Tunnel, Soil Properties, 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

随着城市化进程的加快，地下空间的综合开发利用日益频繁，盾构法隧道施工作为现代城市轨道交通和市政工程建设的重要手段，广泛应用于多层次、多线路的地下结构体系中。在复杂城市环境中，新建盾构隧道往往需穿越既有运营隧道或与之邻近布设，这种近距离穿越或邻接施工可能对既有隧道结构安全、使用功能及周边地层稳定性产生显著影响。因此，准确评估新建隧道施工对既有隧道的扰动影响，已成为当前隧道与地下工程领域研究的热点与难点问题之一。

当前，针对新建盾构隧道开挖对既有隧道影响的研究主要可以分为四类方法：模型实验[1]-[3]、数值模拟[4] [5]、现场实测[6] [7]，理论解析[8]-[10]。在模型实验方面，张晓清等[1]依据盾构施工技术规范，设计了多线隧道叠交室内模型，通过排液法研究了隧道开挖对既有隧道的纵向变形规律。刘效成等[2]通过深圳地铁 7 号线隧道重叠段的实验，探讨了新建隧道施工对既有隧道衬砌位移和内力的影响。黄德中等[3]采用离心机模型试验，研究了上海外滩通道的多线隧道穿越对既有盾构隧道的影响。尽管这些实验研究为盾构隧道施工中的土体变形提供了有益的实验数据，但其应用范围相对有限，难以广泛推广到不同土性条件和复杂施工环境下的实际问题。在数值模拟方面，赵秀绍等[4]建立了双线小曲率隧道上穿既有隧道的三维有限元模型，结果显示上部隧道的开挖会导致既有隧道的纵向隆起位移。张青等[5]依托青岛地铁 8 号线的工程案例，通过 ABAQUS 建立三维数值模型，分析了新建隧道施工对斜向既有隧道的水平位移、竖直位移及管片应力的影响。数值模拟研究能够模拟更复杂的土体条件和施工环境，因此在实际工程中具有较高的应用价值。然而，现有研究多集中于单一土性条件的分析，缺乏对不同土性条件下新建盾构隧道对既有隧道影响的深入探讨。在现场实测方面，张成平等[6]通过远程自动监测系统，对北京地铁 5 号线崇文门站施工对既有隧道沉降、道床沉降及裂缝的影响进行了监测。李倩倩等[7]则收集了北京地铁 6 号线下穿地铁 4 号线隧道的变形实测数据，分析了下穿段对既有隧道变形的影响。现场实测为分析盾构隧道施工的实际影响提供了宝贵的数据支持，但其数据采集依赖于特定的地理和施工条件，

难以涵盖所有可能的工况。在理论解析方面,张冬梅等[8]提出了基于 Kerr 地基梁模型的解析解,用于研究下穿新建隧道对既有隧道的影响。陈华东等[9]基于软土地区的土体黏弹性,推导了既有隧道纵向变形的黏弹性解,发现黏弹性系数对隧道变形稳定性的影响。江杰等[10]通过修正的 Mindlin 解,分析了新建曲线隧道引起的既有隧道沉降。尽管这些理论研究在一定程度上为隧道变形分析提供了简化的解析方法,但在考虑复杂土性条件和实际施工环境时,其适用性仍有待进一步验证。

上述研究成果针对新建盾构隧道对既有盾构隧道的影响进行了大量定性和定量分析,提供了大量的实际工况监测数据、该类问题的分析方法及计算方法,但对于考虑不同土性条件下新建盾构隧道对既有盾构隧道的影响的研究仍相对缺乏,因此本文对该问题进行研究具有一定的实际意义。因此,本文基于三维有限元数值模拟方法,选取具有代表性的砂土与黏土两种典型地层,构建包含既有盾构隧道与新建盾构隧道的三维地质模型,并采用上下台阶法模拟新建隧道施工过程,系统分析不同土性条件下地表沉降及既有隧道拱顶、拱底变形的发展特征与差异规律。研究成果可为复杂地质条件下的隧道协同布设与施工扰动控制提供理论支持与工程参考。

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三维数值模型,进行新建盾构隧道施工对既有盾构隧道影响的数值模拟分析。模型尺寸设定为 $60\text{ m} \times 60\text{ m} \times 60\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高),主要包含地层、新建盾构隧道和既有盾构隧道三部分。地层分别设置为典型的砂土层与黏土层,以反映不同土性条件下的响应特征。施工方法采用上下台阶法,以更贴近实际工程施工工艺。既有盾构隧道拱顶埋深为 5.8 m ,新建盾构隧道拱顶位于其拱底以下 7 m 处。两条隧道均采用外径为 6.20 m 、内径为 5.5 m 、管片厚度 0.35 m 的盾构结构,管片材料为 C50 级混凝土,弹性模量为 34.5 GPa 。模型的具体结构及网格划分如图 1 所示。

数值模型中,围岩地层的本构关系采用 Mohr-Coulomb 模型进行模拟,属性为 3D 实体单元;隧道衬砌结构采用各向同性的弹性单元建模,属性为 3D 实体单元;盾壳与注浆层采用各向同性的弹性单元建模,属性为 2D 板单元。模型经过离散化后,共生成 38636 个节点和 62940 个单元。模型中所用各类材料的主要物理参数详见表 1。

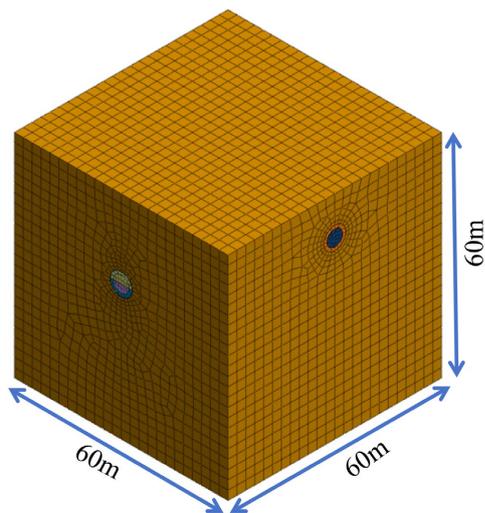


Figure 1. Rock mass-tunnel model
图 1. 围岩 - 隧道模型

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
砂土	18	30	0.3	0	37.1
黏土	17.66	10	0.35	30	20
衬砌	23.54	34500	0.2	-	-

2.2. 施工工况模拟方案

为分析不同土性条件下新建盾构隧道施工对既有盾构隧道的影响，本文采用上下台阶法对新建盾构隧道进行模拟开挖。该方法将隧道断面划分为上下两个台阶，按“先上后下”的顺序依次施工，具有较强的变形控制能力，适用于浅埋及软弱地层条件。其中上下台阶高度均为 3.1 m，具体开挖顺序为：首先开挖上台阶施加开挖面支护压力，同时模拟盾构壳体支护作用；待上台阶稳定后，进行下台阶开挖，并在该区域施加结构支护及同步注浆压力，完成一个环段的模拟施工。随后按此顺序循环推进，直至完成整体隧道模拟。同时土层分砂土和黏土两种工况分别建模，分析其对既有盾构隧道结构响应的差异性。

为探究不同土性条件下，新建盾构隧道开挖对既有隧道的影响，对不同土层模型的相同位置分别布置一条直线上的 7 个测点，方便准确提取位移结果。地表测点如图 2 所示，既有盾构隧道拱顶、拱底测点如图 3 所示。

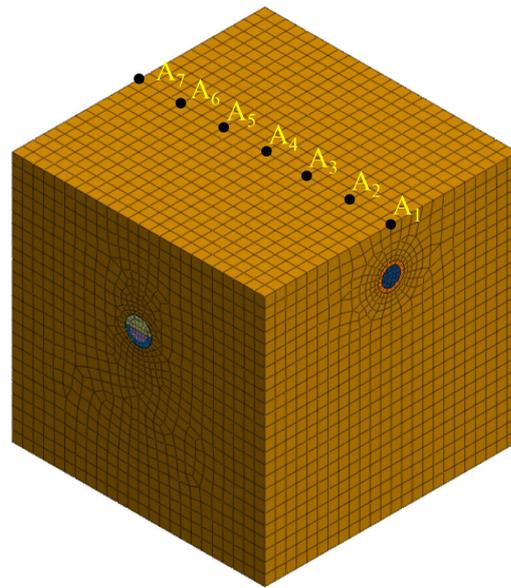


Figure 2. Schematic diagram of surface settlement monitoring points
图 2. 地表沉降测点示意图

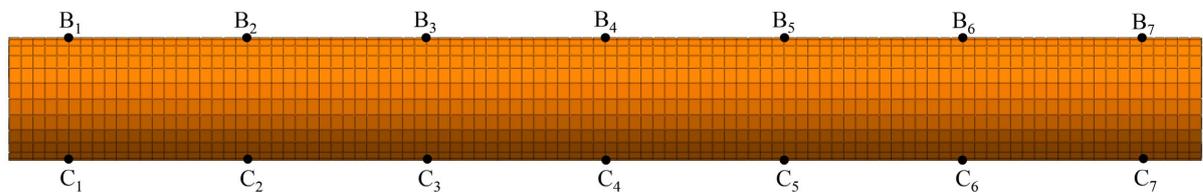


Figure 3. Schematic diagram of displacement monitoring points at the crown and invert of an existing shield tunnel
图 3. 既有盾构隧道拱顶、拱底位移测点示意图

3. 数值模拟结果分析

3.1. 地表沉降规律分析

砂土层、黏土层地表测点沉降分析

图 4 和图 5 分别为砂土层和黏土层工况下的隧道地表测点位移结果。从图中可以看出，砂土层和黏土层条件下的地表沉降特征有显著差异。通过对比分析两种土层的地表沉降数值模拟结果，发现土性条件对地表沉降的影响十分显著。

在砂土条件下，地表沉降较为均匀，沉降量在开挖中段位置达到最大值，约为 8 mm，随后沉降量逐渐减小，并向两侧扩展；沉降范围约为 10 米，持续时间为 2 小时。这一现象反映了砂土层的良好透水性和较高的自稳性，使得开挖扰动的的影响范围相对集中，且扰动后地层变形迅速趋于稳定。针对这一情况，在工程实践中，可以优化开挖步骤和速率，例如将开挖速率控制在 0.3 m/min 以下，并加强周边区域支护结构，如采用喷射混凝土或锚杆支护，以确保隧道周围土体的稳定性，减少沉降的扩展。

相比之下，在黏土条件下，地表沉降表现更为明显，最大沉降量达到约 10 mm，且沉降范围明显扩展。沉降最大值出现在隧道开挖中心位置，向两侧缓慢下降，沉降影响范围可达到 15 米，持续时间长达 5 小时。黏土层具有较高的压缩性和较低的渗透性，因此对施工扰动更为敏感，沉降变形在黏土层中扩散较广。为了减小这种影响，可以在黏土条件下加强围岩加固，例如采用地面预支护技术或超前注浆技术，同时使用喷射混凝土加固周边岩土。在施工过程中，可将开挖速率适当降低至 0.2 m/min，并提高支护结构的强度，例如通过增加钢支撑或采用更厚的注浆层，进一步控制沉降的扩展。

砂土和黏土层的地表沉降特征差异明显，因此在实际工程中应根据土性条件采取不同的施工策略和风险控制措施。在砂土层中，重点控制沉降影响范围，优化开挖步骤和支护设计；而在黏土层中，应更加注重围岩加固和监测，采取多重支护措施，防止地表过度沉降引发的风险。

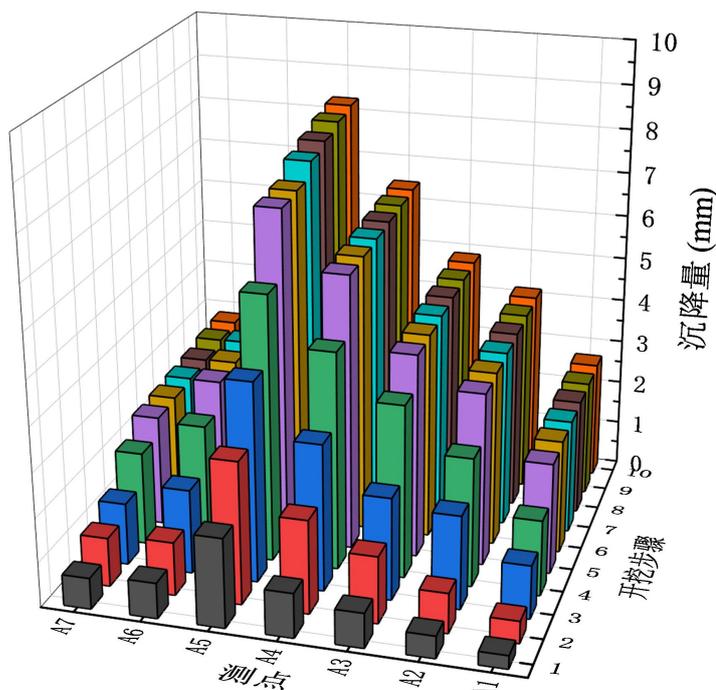


Figure 4. Surface monitoring point displacement in sand layer

图 4. 砂土地表测点位移

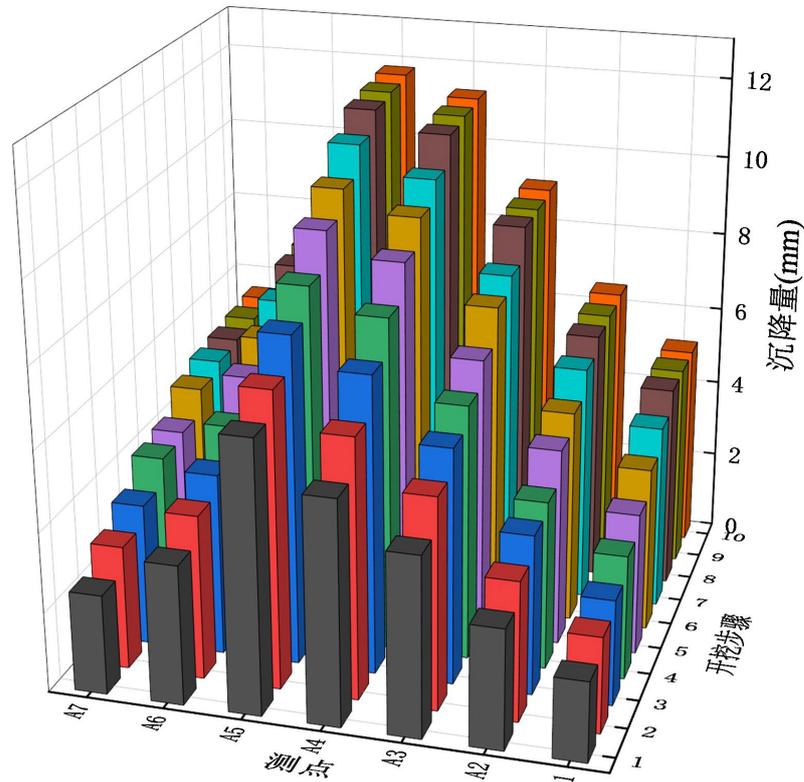


Figure 5. Surface monitoring point displacement in clay layer
图 5. 黏土层地表测点位移

3.2. 拱顶与拱底测点位移特征分析

3.2.1. 砂土层、黏土层拱顶测点位移特征

图 6、图 7 分别为砂土、黏土工况下既有盾构隧道结构拱顶沉降图，从图中可以看出，在砂土条件下，拱顶沉降量随着施工步距的推进逐渐增加，中心区域的最大沉降量达到约 14 mm，沉降分布呈现“中间高、两侧低”的特征；沉降范围约为 10 米，持续时间为 2 小时。该现象反映了砂土层相对较低的压缩性以及较好的稳定性，沉降变形集中且迅速趋于稳定。针对这一情况，建议在砂土条件下采取以下具体措施：合理控制隧道开挖速度(控制在 0.3 m/min 以下)，并加强周边支护结构，如采用喷射混凝土或锚杆支护，确保隧道周围土体的稳定性。此外，可以加强隧道内的顶撑结构和合理布置支撑点，以有效控制拱顶的稳定性。定期进行沉降监测，确保沉降量在可控范围内。

相比之下，在黏土条件下，拱顶沉降表现显著，中心区域的最大沉降量超过 18 mm，沉降范围更广，向两侧扩散明显。沉降最大值出现在隧道开挖中心位置，向两侧缓慢下降，影响范围可达 15 米，持续时间长达 5 小时。黏土层的较高压缩性和较差的稳定性使得拱顶沉降在此条件下更为显著。针对这一情况，可以采取以下措施以减小拱顶沉降：应加强围岩加固，采用分段开挖技术、超前注浆以及液压支撑等手段来控制沉降。在施工过程中，应定期进行沉降监测，确保沉降不超过预定的控制标准(例如，最大沉降量不超过 20 mm)，并根据监测结果及时调整施工策略。

通过对比砂土与黏土两种条件的拱顶沉降数据可以发现，土层性质显著影响盾构隧道开挖过程中既有隧道的变形特征。黏土条件下的隧道沉降远高于砂土条件，并具有更广泛的影响区域，表明黏土条件下隧道施工的风险管理与控制要求应明显提高。

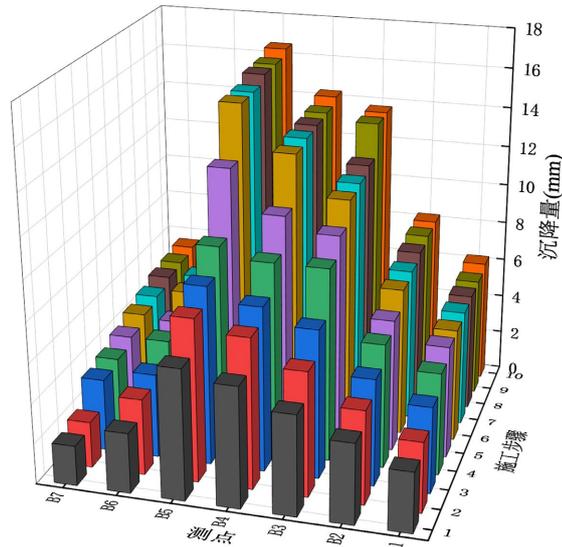


Figure 6. Crown monitoring point displacement in sand layer
图 6. 砂土层拱顶测点位移

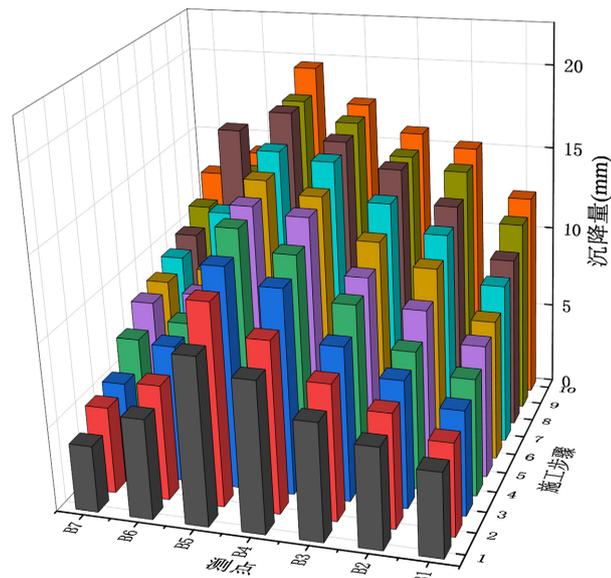


Figure 7. Crown monitoring point displacement in clay layer
图 7. 黏土层拱顶测点位移

3.2.2. 砂土层、黏土层拱底测点位移特征

图 8、图 9 分别为砂土、黏土工况下既有盾构隧道结构拱底沉降图，由图可知，在砂土条件下，拱底沉降量随施工进度逐步增加，最大沉降值约为 6 mm，沉降范围约为 8 米，持续时间为 2 小时。沉降分布趋势较为均匀，整体呈现较平缓的变化，沉降量在开挖过程中迅速趋于稳定。砂土层的较好排水性和适度固结性能使得开挖后的沉降范围较小且变化较快，表现出较强的自稳性。针对这一情况，建议采取以下措施：优化隧道开挖步骤，控制开挖速率(建议控制在 0.3 m/min 以下)，并加强支护设计，确保隧道结构稳定。此外，可以通过合理布置支撑点并加强顶撑结构，以有效控制沉降并保持结构的稳定性。

在黏土条件下，拱底沉降表现出明显的差异，最大沉降值超过 10 mm，沉降范围大约为 12 米，持续

时间长达 4 小时。沉降的分布较为不均匀，且沉降量较大，表现为沉降逐渐扩展且持久。黏土层的沉降变形具有较强的滞后效应，沉降影响区域远远超过砂土层。这一现象反映了黏土的低渗透性和较高的压缩性，施工扰动对黏土层的影响较为显著且持久。因此，在黏土条件下，除了优化开挖速率和支护设计外，还应特别加强围岩加固，采用分段开挖技术或超前注浆等措施。同时，在施工过程中加强沉降监测，特别是在拱底沉降较大的区域，可以采取地面沉降监测和预支护技术，确保结构安全和施工稳定。

通过对比砂土和黏土条件下的拱底沉降，可以明显看出土层性质对沉降变形的影响。在砂土条件下，沉降较小且范围有限，说明砂土具有较好的自稳性与恢复能力；而在黏土条件下，沉降量较大且影响范围广，尤其在施工过程中沉降较为显著且持续时间较长，可能对隧道结构造成更大的影响。黏土层的变形能力较差，对施工扰动的响应较为敏感，因此需要特别关注施工过程中的土层变形与稳定性。

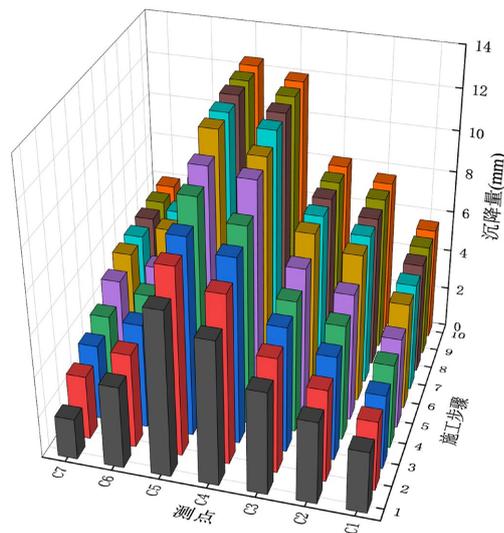


Figure 8. Invert monitoring point displacement in sand layer
图 8. 砂土层拱底测点位移

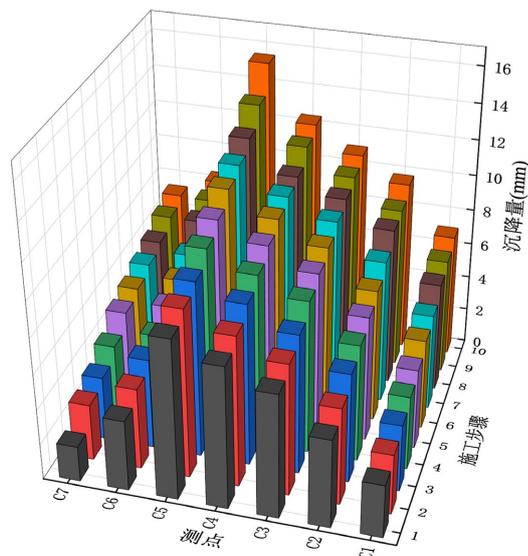


Figure 9. Invert monitoring point displacement in clay layer
图 9. 黏土层拱底测点位移

4. 结论

通过本研究对不同土性条件下新建盾构隧道施工对既有隧道影响的数值模拟分析,综合考虑了地表沉降、拱顶沉降和拱底沉降的变化特征,得出以下主要结论:

(1) 土层类型显著影响隧道施工对既有隧道的影响。在黏土条件下,隧道开挖引发的地表沉降、拱顶沉降和拱底沉降的变形程度明显大于砂土条件,且沉降范围更广,反映了黏土较高的压缩性和低渗透性使得隧道施工扰动对既有隧道的影响更为显著。

(2) 既有盾构隧道关键部位变形差异明显。无论在砂土还是黏土条件下,沉降量均呈现局部性分布,且通常在开挖中段位置达到最大值,逐渐向两侧减小。然而,黏土条件下沉降范围更广,沉降量更大,表明黏土层的变形反应更加显著且持续时间较长,施工扰动的影响扩展速度更快。这表明在黏土层施工时,需特别关注沉降影响的广泛性和长期性。

(3) 对新建盾构隧道开挖影响下的既有盾构隧道进行风险控制具有重要意义。针对不同土性条件,需采取差异化的风险控制措施。在砂土条件下,需优化开挖速率和支护设计;在黏土条件下,除了常规措施外,还应加强围岩加固与监测,尤其在施工过程中出现较大沉降的区域,采取及时的预支护和土层加固措施,确保隧道结构安全稳定。

参考文献

- [1] 张晓清,张孟喜,李林,等.多线叠交盾构隧道近距离穿越施工扰动机制研究[J].岩土力学,2017,38(4):1133-1140.
- [2] 刘效成,陈寿根,张超,等.重叠盾构隧道施工中两隧道相对位置变化的影响模型试验研究[J].铁道建筑,2018,58(1):107-109.
- [3] 黄德中,马险峰,王俊淞,等.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):520-526.
- [4] 赵秀绍,魏度强,于万友,等.小曲线半径盾构隧道上穿既有隧道影响分析[J].地下空间与工程学报,2021,17(04):1216-1224.
- [5] 张青,王洪超,赵耀,等.新建隧道近距离小角度斜下穿既有隧道稳定性分析——以青岛地铁8号线隧道工程为例[J].隧道建设(中英文),2021,41(S2):199-208.
- [6] 张成平,张顶立,骆建军,等.地铁车站下穿既有隧道施工中的远程监测系统[J].岩土力学,2009,30(6):1861-1866.
- [7] 李倩倩,张顶立,房倩,等.浅埋暗挖法下穿既有盾构隧道的变形特性分析[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S2):3911-3918.
- [8] 张冬梅,宗翔,黄宏伟.盾构隧道掘进引起上方已建隧道的纵向变形研究[J].岩土力学,2014,35(9):2659-2666.
- [9] 陈华东,申文明,张文杰.上穿隧道引起既有隧道变形的黏弹性分析[J].力学季刊,2022,43(4):958-969.
- [10] 江杰,龙逸航,欧孝夺,等.新建曲线地铁盾构隧道下穿施工引起的既有隧道沉降分析[J].工程科学与技术,2023,55(1):313-324.