

基于数值模拟的不同土性条件对浅埋盾构隧道影响分析

尹迎超, 查陈诚, 朱海涛

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年4月23日; 录用日期: 2025年5月16日; 发布日期: 2025年5月26日

摘要

为研究不同土性条件下, 上下台阶法施工对浅埋盾构隧道稳定性的影响规律, 文章利用数值模拟手段, 以砂土与黏土两种典型土层为研究对象, 建立了隧道施工过程的数值分析模型。对比分析了砂土与黏土浅覆土层条件下, 上下台阶法隧道开挖过程中隧道围岩变形、地表沉降及隧道拱顶与拱底变形的差异。结果表明土层性质显著影响施工过程中围岩与结构的响应特征, 砂土条件下围岩变形与地表沉降更为敏感, 施工扰动影响范围相对较大; 而黏土条件下围岩稳定性相对较好, 施工扰动影响范围相对较小。本文研究成果可为浅埋隧道施工方法选择、施工风险评估及优化设计提供重要参考依据。

关键词

数值模拟, 浅埋盾构隧道, 土层性质, 上下台阶法, 变形分析

Numerical Simulation-Based Analysis of the Effects of Different Soil Conditions on Shallow-Buried Shield Tunnels

Yingcaho Yin, Chencheng Zha, Haitao Zhu

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

Received: Apr. 23rd, 2025; accepted: May 16th, 2025; published: May 26th, 2025

Abstract

To investigate the influence of different soil properties on the stability of shallow-buried shield tunnels constructed by the bench excavation method, numerical simulation models were established for two typical soil conditions—sand and clay. Comparative analyses were conducted on the deformation

文章引用: 尹迎超, 查陈诚, 朱海涛. 基于数值模拟的不同土性条件对浅埋盾构隧道影响分析[J]. 建模与仿真, 2025, 14(5): 693-702. DOI: 10.12677/mos.2025.145426

characteristics of surrounding rock, ground surface settlement, tunnel crown, and invert deformation during bench excavation under shallow cover conditions. The results demonstrate that soil properties significantly affect the response characteristics of surrounding rock and tunnel structures during construction. In sandy soils, deformation of surrounding rock and surface settlement are more sensitive, resulting in a relatively larger range of construction disturbance. In contrast, clay soils exhibit better stability of the surrounding rock and a comparatively smaller area of construction disturbance. The findings provide important references for construction method selection, risk assessment, and optimal design of shallow-buried tunnels.

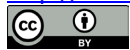
Keywords

Numerical Simulation, Shallow-Buried Shield Tunnel, Soil Property, Bench Excavation Method, 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

浅埋盾构隧道因施工高效、经济性好,广泛应用于城市轨道交通与地下管廊建设。但在浅覆土条件下,隧道开挖易引发地表沉降与围岩失稳,不同土性下结构响应差异显著,研究其影响规律对提升施工安全与优化支护设计具有重要意义。

当前,针对浅覆土盾构隧道施工引起的地表沉降与结构响应问题,国内学者开展了多角度研究。符宇坤等[1]通过模型试验揭示了地表堆载对浅埋隧道变形发展的非线性规律;高洪吉等[2]与李建强等[3]利用数值模拟与现场监测分析了砂土与黏土条件下的地表沉降特征。此外,青兵波[4]针对盾构浅覆土穿越结构的力学机制,提出了上下台阶法开挖过程中的围岩-结构耦合响应模型。樊虎等[5]提出基于 Peck 公式修正的两阶段沉降预测模型,结合 ABAQUS 模拟与实测数据揭示了施工与荷载叠加作用下的沉降规律。刘厚朴[6]分析了上软下硬地层双线盾构施工中的扰动演化,构建“强度余量”指标并明确地表沉降峰值区间。叶友林等[7]通过实测与模拟分析,指出拱顶覆土厚度、注浆模量与土体强度对沉降控制的关键作用。杨志勇等[8]在砂卵石地层中,系统研究了双线隧道施工不同间距对地表沉降的影响,提出 1.5 D 与 3.0 D 为扰动影响界限。陈仙宇等[9]针对浅覆土软弱地层近距离上跨运营隧道的工程,构建了“加固-监测-掘进”一体化控制体系,实现运营隧道最大变形控制在 4.7 mm 内。鲍泽辰[10]则基于 1:1 模型试验与有限元分析,验证了 16 点集中加载法可有效模拟超浅覆土工况下管片的弯矩与变形响应。上述研究为复杂地质条件下浅覆土盾构施工的变形预测、扰动控制及结构安全评估提供了理论依据与工程方法,也为后续深入探讨土性差异对隧道结构影响机制奠定了基础,但系统性对比分析不同典型土性条件下围岩与隧道关键部位变形特征的研究仍相对缺乏。

基于此,本文选取砂土与黏土两种典型土性为研究对象,采用三维有限元方法,模拟上下台阶法施工过程中隧道结构及围岩的响应过程。通过地表、拱顶与拱底测点位移变化的对比分析,系统揭示不同土层性质主导下的结构变形模式与扰动范围差异,旨在为浅埋隧道施工设计优化与风险控制提供科学依据。

2. 数值模拟模型建立

2.1. 数值模型构建及参数设置

为了研究不同土性条件下,上下台阶法施工对浅埋盾构隧道稳定性的影响规律,本文以符宇坤等[1]

模型实验中的隧道原型尺寸为参考，即盾构隧道外径为 6.20 m，环宽为 1.20 m，管片厚度为 0.35 m，管片材料为 C50 等级混凝土，弹性模量为 34.5 GPa。利用数值模拟手段，建立了砂土与黏土两种典型浅覆土层条件下的三维有限元围岩 - 隧道模型。模型尺寸长、宽、高分别为 30 m、24 m 和 20 m，主要包括地层与隧道结构两部分，其中地层按照实际情况分别设置为砂土层与黏土层，隧道结构采用上下台阶法施工工艺，衬砌厚度为 0.35 m。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 2D 板单元。模型经过离散化后，共生成 20438 个节点和 19576 个单元。模型中所用各类材料的主要物理参数详见表 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
砂土	15.21	30	0.3	0	37.1
黏土	17.66	50	0.35	30	20
衬砌	23.54	34500	0.2	-	-

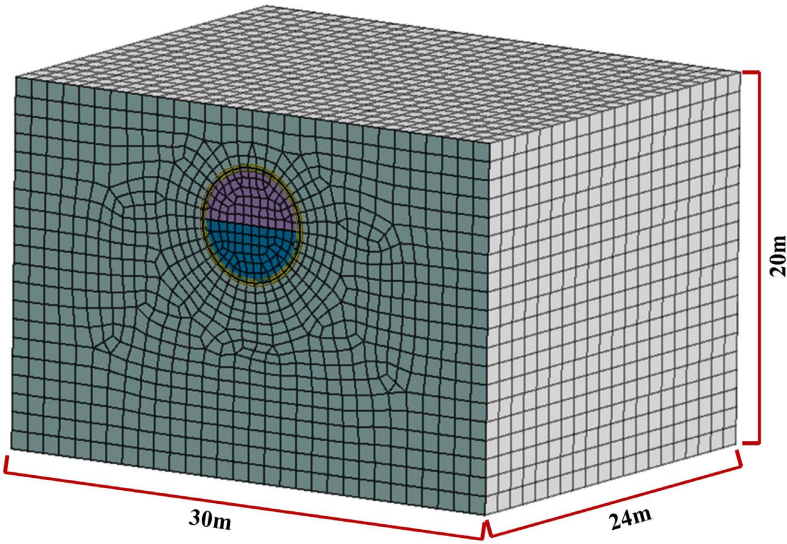


Figure 1. Rock mass-tunnel model
图 1. 围岩 - 隧道模型

2.2. 施工工况模拟方案

浅埋盾构隧道的覆土厚度为 0.5 D (长覆土厚度为 1.5 D)，土层分砂土和黏土两种工况分别建模。为保证对比准确性，两种土性下隧道开挖模拟均采用上下台阶法开挖，具体开挖顺序为：先将上台阶纵深开挖 6 m，并每开挖 1.2 m 做衬砌施工；当上台阶第 7 m 开挖时，下台阶同时开始开挖，每阶段开挖深度相同，以此类推直到开挖结束。

为研究不同土性条件下，上下台阶法施工对浅埋盾构隧道稳定性的影响，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，拱顶、底测点如图 3 所示。

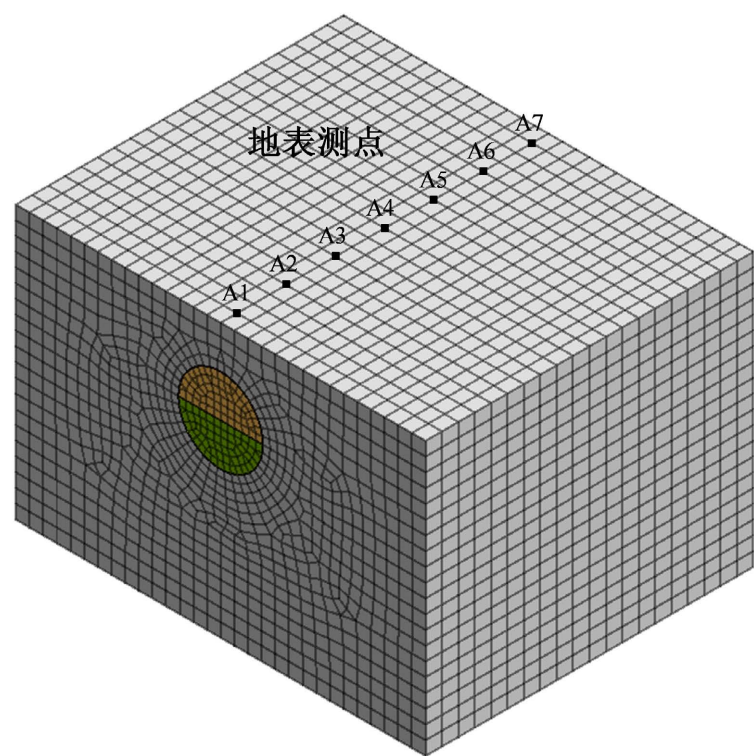


Figure 2. Schematic diagram of surface settlement monitoring points
图 2. 地表沉降测点示意图

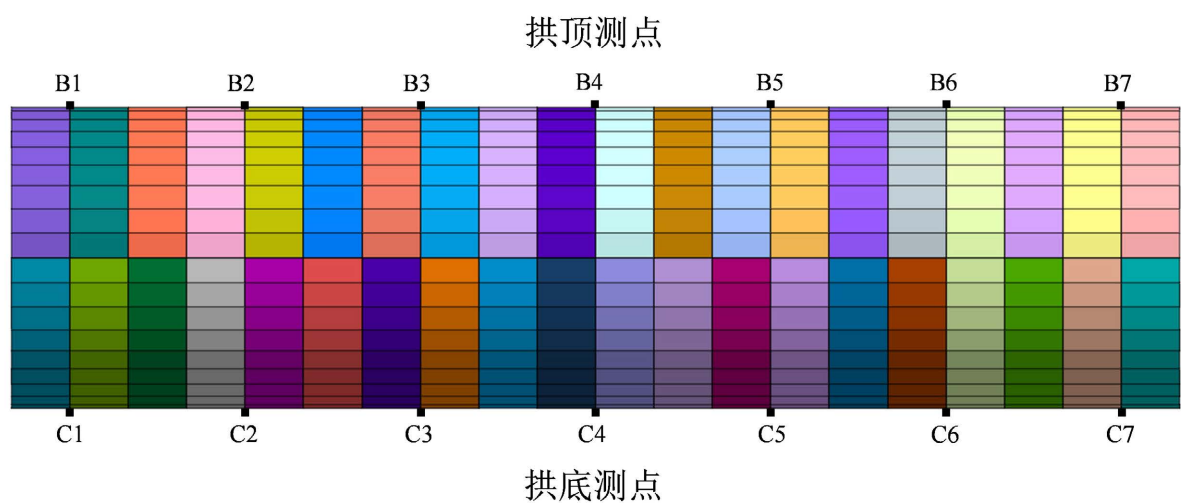


Figure 3. Schematic diagram of tunnel crown and invert displacement monitoring points
图 3. 隧道拱顶、底位移测点示意图

3. 数值模拟结果分析

3.1. 围岩变形规律分析

砂土层、黏土层条件下中间环位移云图分析

图 4、图 5 分别为砂土层、黏土层工况下中间环的位移云图。对比发现，两种土性条件下隧道结构变形特征存在明显差异。在砂土工况中，隧道拱底区域位移最大，整体变形幅度更大，最大位移约为 11.5

mm, 反映出砂土层在上下台阶法施工扰动下易发生压密沉降, 围岩响应较为敏感。而在黏土层中, 尽管拱底同样为主要变形区域, 但最大位移值降低至约 8.15 mm, 整体变形幅度明显减小, 说明黏土具有更好的变形协调性和塑性缓冲能力, 能够在一定程度上抑制施工扰动带来的结构变形。

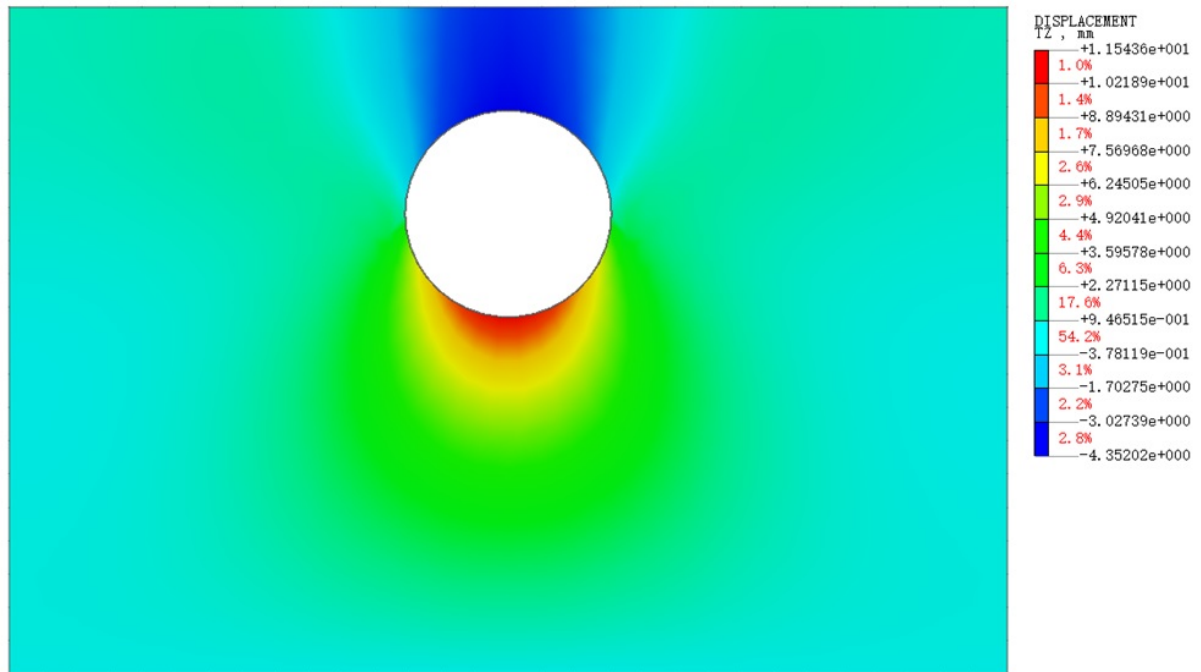


Figure 4. Displacement cloud diagram of the middle ring in sand layer

图 4. 砂土层中间环位移云图

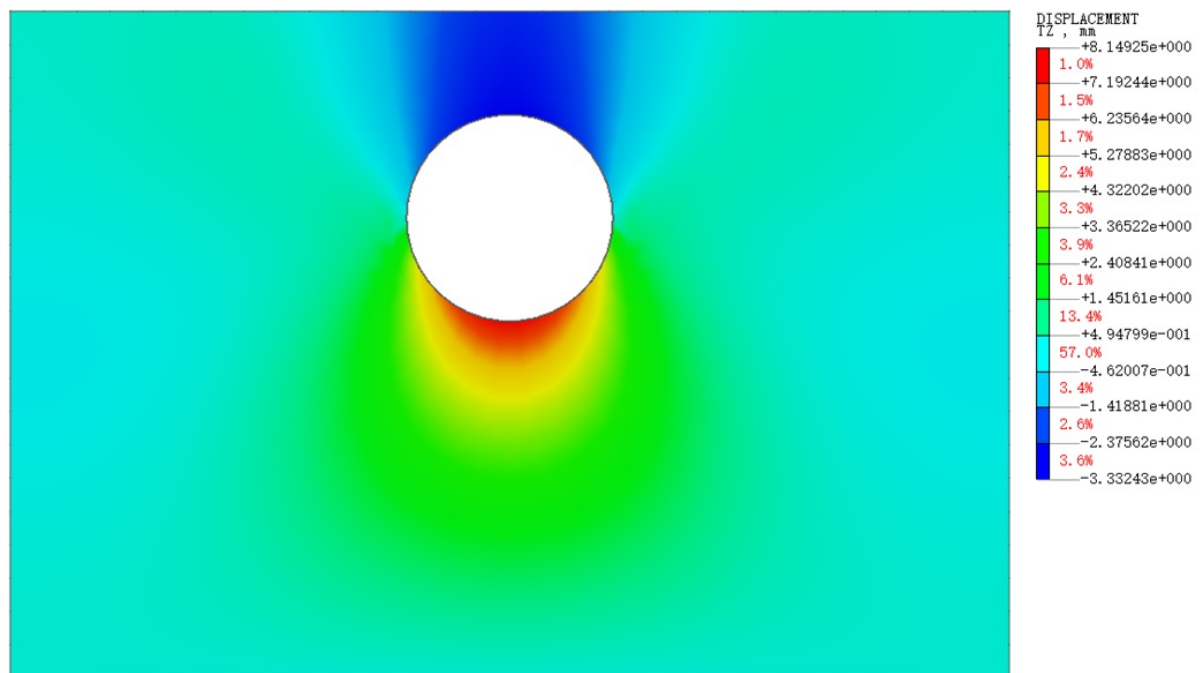


Figure 5. Displacement cloud diagram of the middle ring in clay layer

图 5. 黏土层中间环位移云图

此外，从变形范围来看，砂土层中变形影响区更大，云图中红 - 黄 - 绿区域分布广泛，说明施工引起的扰动向更大范围扩散；而黏土层中变形分布更集中，变形区域局限于隧道下方和周边少量区域，表现出良好的隔震和缓冲特性。拱顶区域在两种工况下均出现抬升现象，但在黏土中更为明显，表明其柔性更强，上部土体对结构的约束较小。

3.2. 地表沉降规律分析

砂土层、黏土层地表测点沉降分析

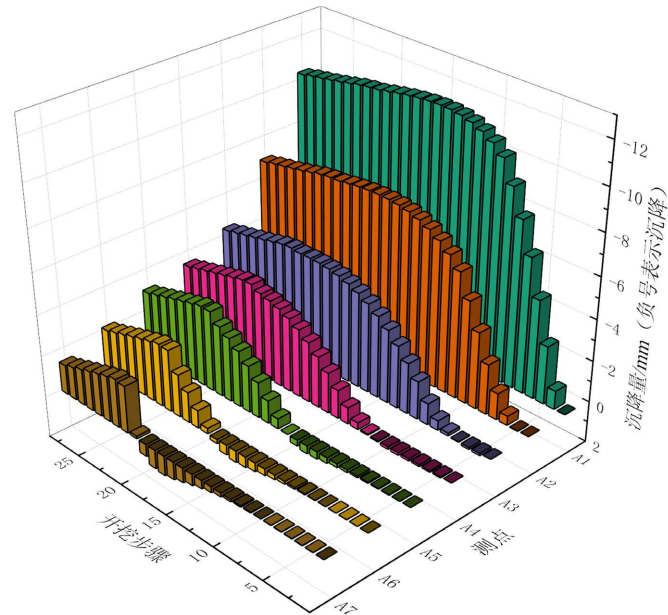


Figure 6. Surface monitoring point displacement in sand layer
图 6. 砂土层地表测点位移

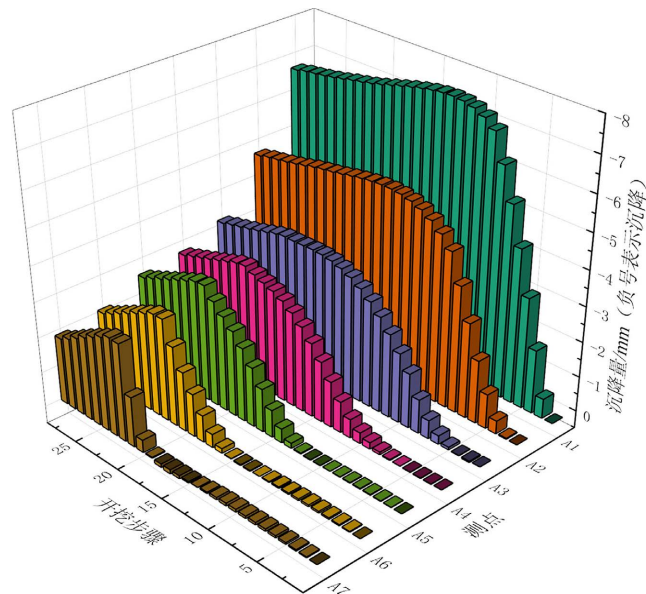


Figure 7. Surface monitoring point displacement in clay layer
图 7. 黏土层地表测点位移

图6、图7分别为砂土层、黏土层工况隧道地表测点位移结果图。对比图6和图7可见，砂土层与黏土层在隧道施工过程中所产生的地表沉降规律存在显著差异。在砂土层工况下，地表测点沉降值较大，沉降曲线陡峭，随着施工工序推进，沉降快速增长，尤其在隧道中部测点处，呈现出明显的集中沉降趋势，沉降槽宽度与深度均显著，扰动范围大。这主要由于砂土层结构松散、抗剪强度低、压缩性大，施工扰动更易引发地表快速、集中下沉。

相比之下，黏土层地表沉降整体幅度较小，沉降曲线较为平缓，最大沉降值明显低于砂土工况，且沉降变化过程更为连续稳定。虽然黏土具有一定可压缩性，但其塑性强、协调性好，能够缓冲施工扰动所引起的应力释放，从而有效控制地表沉降的发展。其沉降槽范围相对集中，扩展趋势弱，表现出良好的地表稳定性。

3.3. 拱顶与拱底测点位移特征分析

3.3.1. 砂土层、黏土层拱顶测点位移特征

图8展示了砂土层工况下拱顶沿纵向布设测点的位移变化情况。由图可见，拱顶位移整体呈现“下沉”趋势，最大位移出现在中部施工阶段，随着施工工序的推进，拱顶变形逐步累积，沉降曲线陡峭，表明砂土层拱顶响应施工扰动高度敏感。其原因在于砂土抗剪强度较低、变形模量小，结构开挖后拱顶上方土体易发生剪切滑移和压密沉降，导致拱顶下沉显著。位移分布范围较广，表明扰动向纵深方向传播强烈。

图9展示了黏土层条件下拱顶沿纵向测点的位移演化过程。整体来看，拱顶位移也表现为下沉特征，但变形值明显小于砂土工况，沉降过程平稳，曲线斜率较缓。拱顶最大变形位于中部段落，且随施工工序的增长，拱顶沉降发展较慢。说明黏土层良好的粘聚性和塑性缓冲性能在拱顶区域起到了较好的应力扩散与形变协调作用，有效减缓了结构沉降速率。

从图8与图9的对比中可以看出，在相同施工工序与测点布置下，砂土层拱顶位移始终高于黏土层，最大位移差值显著。在砂土层中，拱顶受扰动影响大、位移集中，表现出明显的结构沉降趋势；而黏土层中变形相对分散、缓慢，施工扰动对拱顶的影响得到有效抑制。二者在曲线斜率、峰值位置及沉降速率方面均表现出明显差异，充分说明土性条件在控制拱顶变形方面的重要作用。

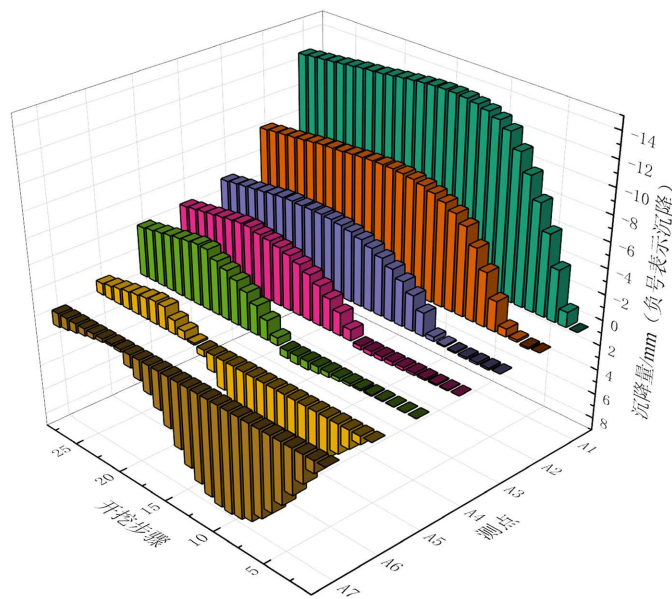


Figure 8. Crown monitoring point displacement in sand layer

图8. 砂土层拱顶测点位移

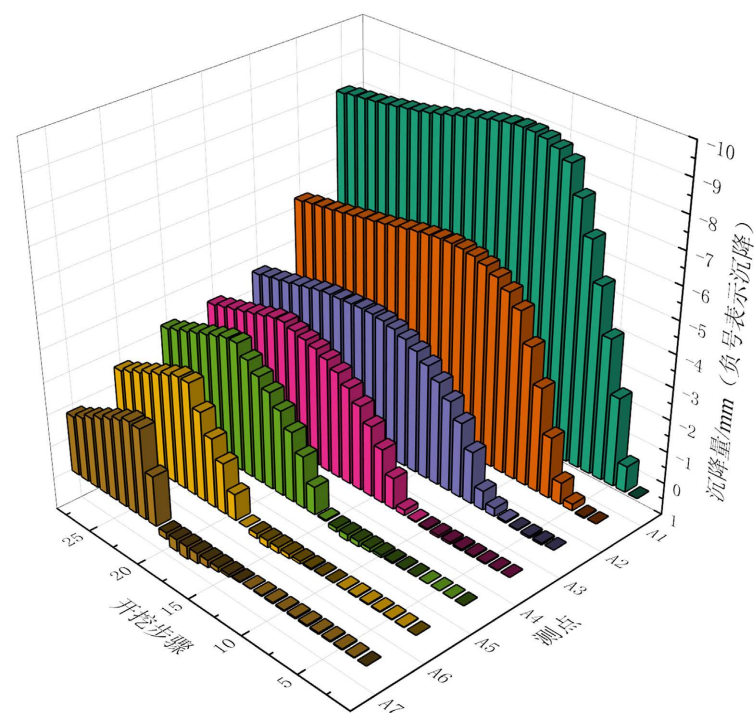


Figure 9. Crown monitoring point displacement in clay layer
图 9. 黏土层拱顶测点位移

3.3.2. 砂土层、黏土层拱底测点位移特征

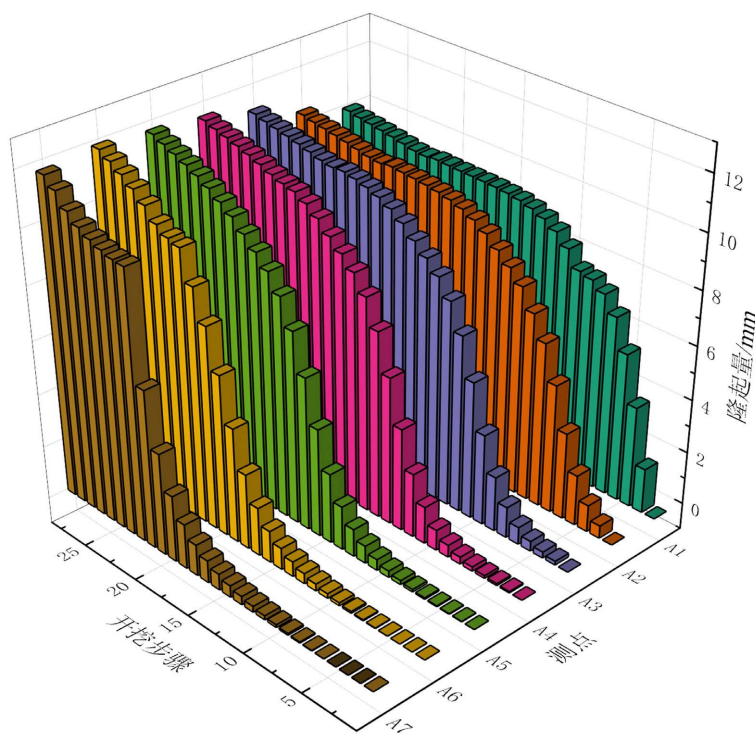


Figure 10. Invert monitoring point displacement in sand layer
图 10. 砂土层拱底测点位移

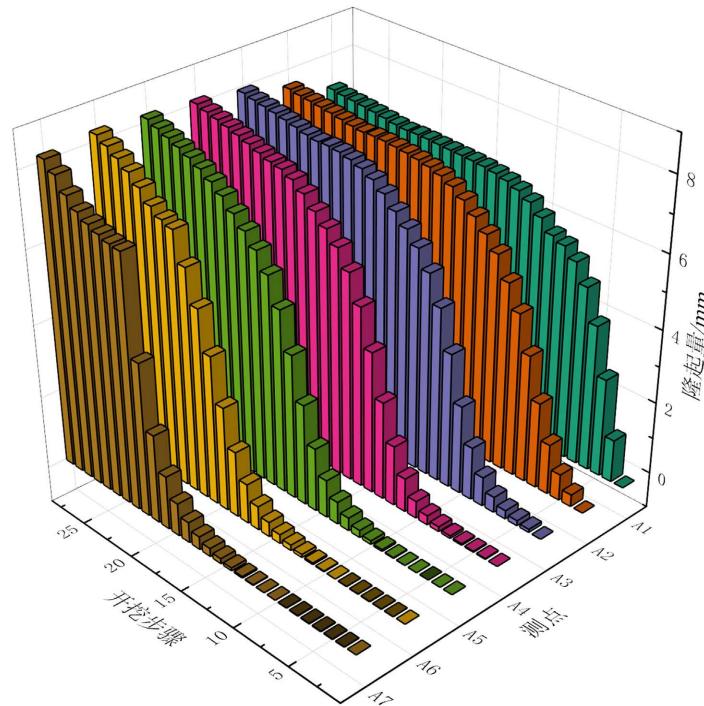


Figure 11. Invert monitoring point displacement in clay layer
图 11. 黏土层拱底测点位移

图 10 显示了砂土层工况下，沿隧道纵向方向布设的拱底测点位移变化情况。从图中可见，拱底在施工过程中产生了较为显著的下沉变形，且变形随施工步骤推进逐步增加，尤其在中段区域位移最大。曲线斜率较大，变化趋势陡峭，说明拱底在砂土层中受施工扰动影响剧烈。由于砂土本身压缩模量低、结构疏松，在上下台阶法开挖过程中，拱底承受了来自上覆土体和结构位移的双重叠加效应，导致变形持续扩大，位移集中明显，拱底成为变形的集中区。

图 11 展示了黏土层工况下，拱底测点在不同施工阶段的位移演化情况。整体来看，拱底同样表现为沉降趋势，但变形幅度较小，曲线走势平稳，说明黏土层对开挖扰动的缓冲能力更强。中部测点沉降最大，但其变化范围明显小于砂土工况。黏土材料具有良好的粘聚性和变形协调性，可有效抑制开挖引起的深部扰动，从而减缓拱底位移的发生与发展，使得变形控制更具可预测性与安全性。

对比图 10 与图 11 可见，在相同的测点布置与施工阶段条件下，砂土层拱底的沉降变形显著大于黏土层，不仅最大位移值更大，且沉降增长速度更快，曲线波动更剧烈。砂土层中拱底易受结构与地基共同变形影响，形成“集中沉降区”；而黏土层中拱底位移发展缓慢、分布均匀，扰动范围较小，表现出较好的稳定性与延展性。

综上所述，拱底作为隧道结构中关键的受力控制位置，其变形特征对施工安全有直接影响。砂土条件下拱底应加强支护与实时监测，而黏土工况则可适当降低拱底加固等级，优化资源配置。

本文所采用的隧道结构参数、开挖顺序与材料参数均参考符宇坤等[1]与李建强等[3]的研究设定，模拟结果与文献中所报告的变形趋势和扰动分布区域基本一致，具有一定的工程代表性与可参考性。后续将进一步结合现场监测数据或物理试验结果对模拟结论进行对比与校验，增强研究结果的科学有效性。

4. 结论

本文基于三维数值模拟方法，分析了砂土与黏土两类典型土性条件下，浅埋盾构隧道采用上下台阶

法施工过程中围岩变形、地表沉降及拱顶、拱底位移特征的差异规律。主要结论如下：

1) 整体变形响应显著受土性控制。砂土层施工扰动引起的围岩变形与地表沉降幅度较大，扰动范围广泛；而黏土层因其良好的粘聚性与塑性缓冲能力，表现出更强的抗扰动稳定性与变形协调性。

2) 隧道结构关键部位变形差异明显。在两类工况中，拱顶与拱底均呈现显著沉降趋势，但砂土层中拱底沉降更为剧烈，位移累积速度快，需重点加强支护与监测。相比之下，黏土层拱顶与拱底变形值较小，变化平缓，施工风险较低。

3) 不同土性条件显著主导隧道结构响应与扰动扩散机制。在砂土工况中，应重点控制地表沉降与深部结构变形；而在黏土工况中，则可适度优化施工参数与支护体系，提升施工经济性与安全性。本文结论可为不同地质背景下浅埋隧道施工方法选择、结构优化设计与风险评估提供参考依据。

参考文献

- [1] 符宇坤, 康成, 梁荣柱, 等. 地表堆卸载对浅覆土盾构隧道影响试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(1): 241-252.
- [2] 高洪吉, 谢文达, 孙正阳, 等. 浅覆土盾构隧道施工引起地表沉降规律研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(29): 12143-12149.
- [3] 李建强, 梁鑫勇, 朱金贤. 浅覆土盾构隧道施工引起地表沉降的研究[J]. 工程建设, 2023, 55(2): 29-35.
- [4] 青兵波. 盾构浅覆土下穿城市河道桥梁影响分析与保护措施研究[J]. 山西建筑, 2024, 50(11): 164-167.
- [5] 樊虎, 庄妍, 宋相伟. 运营期浅埋公路隧道拱顶覆土层力学分析模型及沉降规律研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(1): 230-241.
- [6] 刘厚朴. 上软下硬地层浅覆土超大直径盾构扰动规律研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(7): 128-135.
- [7] 叶友林, 路志旺. 砂砾地层浅埋盾构隧道开挖对地表变形的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(6): 1064-1072.
- [8] 杨志勇, 谢文达, 高洪吉, 等. 浅覆土砂卵石地层盾构施工地表沉降规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S1): 367-374.
- [9] 陈仙宇, 李杰. 浅覆土软弱地层盾构近距离上跨地铁运营隧道施工控制技术研究[J]. 福建建设科技, 2025(1): 74-77.
- [10] 鲍泽辰. 超浅覆土工况下隧道管片结构试验的有限元分析[J]. 土工基础, 2020, 34(6): 689-694.