

# 珠海隧道浅覆土段地层注浆加固对管片上浮的影响规律研究

李政国<sup>1</sup>, 包鹤立<sup>2</sup>, 张子新<sup>1\*</sup>, 黄昕<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海

<sup>2</sup>上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海

<sup>3</sup>新疆大学建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2024年1月19日; 录用日期: 2024年2月21日; 发布日期: 2024年2月29日

## 摘要

本文针对珠海隧道工程浅覆土段盾构施工期上浮问题, 采用ABAQUS有限元模拟软件对地层加固效果进行了研究, 模拟考虑未加固和加固的情况, 同时考虑盾构掘进过程中掌子面的位置, 共设置8种工况, 研究了地层注浆加固对隧道上浮、地表沉降、衬砌收敛变形的影响规律。结果显示地层注浆加固有效降低了加固区内的隧道顶部位移、隧道底部位移、隧道上浮量和衬砌收敛变形, 盾构同步注浆压力会影响地层注浆加固效果。

## 关键词

盾构隧道, 管片上浮, 地层加固

# Study on the Influence Pattern of Strata Grouting Reinforcement on the Segments Floating in Shallow Overburden Section of Zhuhai Tunnel

Zhengguo Li<sup>1</sup>, Heli Bao<sup>2</sup>, Zixin Zhang<sup>1\*</sup>, Xin Huang<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

<sup>2</sup>Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Co. Ltd., Shanghai

<sup>3</sup>College of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang

Received: Jan. 19<sup>th</sup>, 2024; accepted: Feb. 21<sup>st</sup>, 2024; published: Feb. 29<sup>th</sup>, 2024

\*通讯作者。

文章引用: 李政国, 包鹤立, 张子新, 黄昕. 珠海隧道浅覆土段地层注浆加固对管片上浮的影响规律研究[J]. 土木工程, 2024, 13(2): 208-219. DOI: 10.12677/hjce.2024.132024

## Abstract

In this paper, for the segments floating problem of shield tunnels in shallow overburden section of Zhuhai Tunnel Project during the construction period, ABAQUS finite element simulation software was used to study the effect of strata reinforcement. The simulation considered both unreinforced and reinforced cases, and at the same time, considered the position of the tunnel face during shield tunneling, and set up a total of eight working conditions to study the influence of strata grouting reinforcement on the segments floating, the surface settlement, and the lining convergence deformation. The results show that the strata grouting reinforcement effectively reduces the displacements at the top of the tunnel and at the bottom of the tunnel, segments floating and lining convergence deformation in the reinforcement area, and the synchronized grouting pressure of the shield affects the effect of strata grouting reinforcement.

## Keywords

Shield Tunnel, Segments Floating, Strata Reinforcement

Copyright © 2024 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

随着我国基础设施建设水平的提高, 隧道建设已经开始向超大直径[1]、超浅埋深[2]、超软土层[3]发展, 在复杂的工程条件和地质条件作用下, 隧道上浮、地表沉降、衬砌结构变形过大等问题层出不穷, 严重威胁隧道施工和运营安全, 因此本文利用三维有限元数值模拟, 探究了软土地区浅覆土段地层加固对隧道上浮、地表沉降、衬砌结构变形的影响。

盾构隧道施工期上浮是一个复杂的三维力学问题, 近年来国内外学者[4] [5]对于隧道上浮的原因进行了大量研究, 包括理论研究、数值模拟、现场监测与试验。沈征难[6]分析了引起隧道上浮的诸多因素, 包括地质条件、同步注浆不及时、地基回弹、盾构超挖、注浆填充率不够等。黄忠辉等[7]以上海长江隧道工程为研究背景, 利用 1:1 衬砌水平整环错缝结构进行试验对上浮问题进行研究, 试验确定了刚度折减系数取值和管片环间螺栓抵抗能力, 利用弹性地基梁模型对大直径盾构隧道上浮问题进行计算。付艳斌等[8]推导了盾构隧道单环管片上浮量计算公式, 并考虑了注浆填充率的影响。叶俊能等[9]采用有限元软件 ABAQUS 建立考虑管片环接头错台、张开影响的管片施工期上浮分析数值模型, 研究了管片上浮变形发展规律及环接头变形模式。Chen R 等[10]利用有限元软件 ANSYS 建立了考虑注浆压力、千斤顶推力等因素的三维数值模型, 研究表明隧道管片上浮大致可以分为三个阶段。

对于盾构施工期上浮的控制, 目前在工程实践中, 主要采用提高同步注浆效果、控制调整盾构掘进姿态与参数、调整二次注浆等措施[11]应对隧道施工期上浮。同时, 通过对软弱地层进行注浆加固, 成为了减小隧道施工期上浮量的又一重要措施。孔恒[12]通过理论推导和数值模拟对地层预加固效果进行了研究, 全面分析了预加固参数的影响。于洪豪[13]对非均质软弱地层劈裂注浆扩散与加固开展了系列研究, 分析了地层结构、注浆压力和注浆位置对加固效果的影响规律。

## 2. 工程概况

### 2.1. 工程地质条件

珠海隧道穿越了填砂、粉砂、淤泥质粉质黏土、砾砂、强风化花岗岩等地层，浅覆土段最小埋深仅为 0.75 D，穿越了淤泥质粉质黏土、砂质黏性土等软弱地层，其中淤泥质粉质黏土标准贯入击数 N 仅为 1~2。

### 2.2. 浅覆土段加固情况

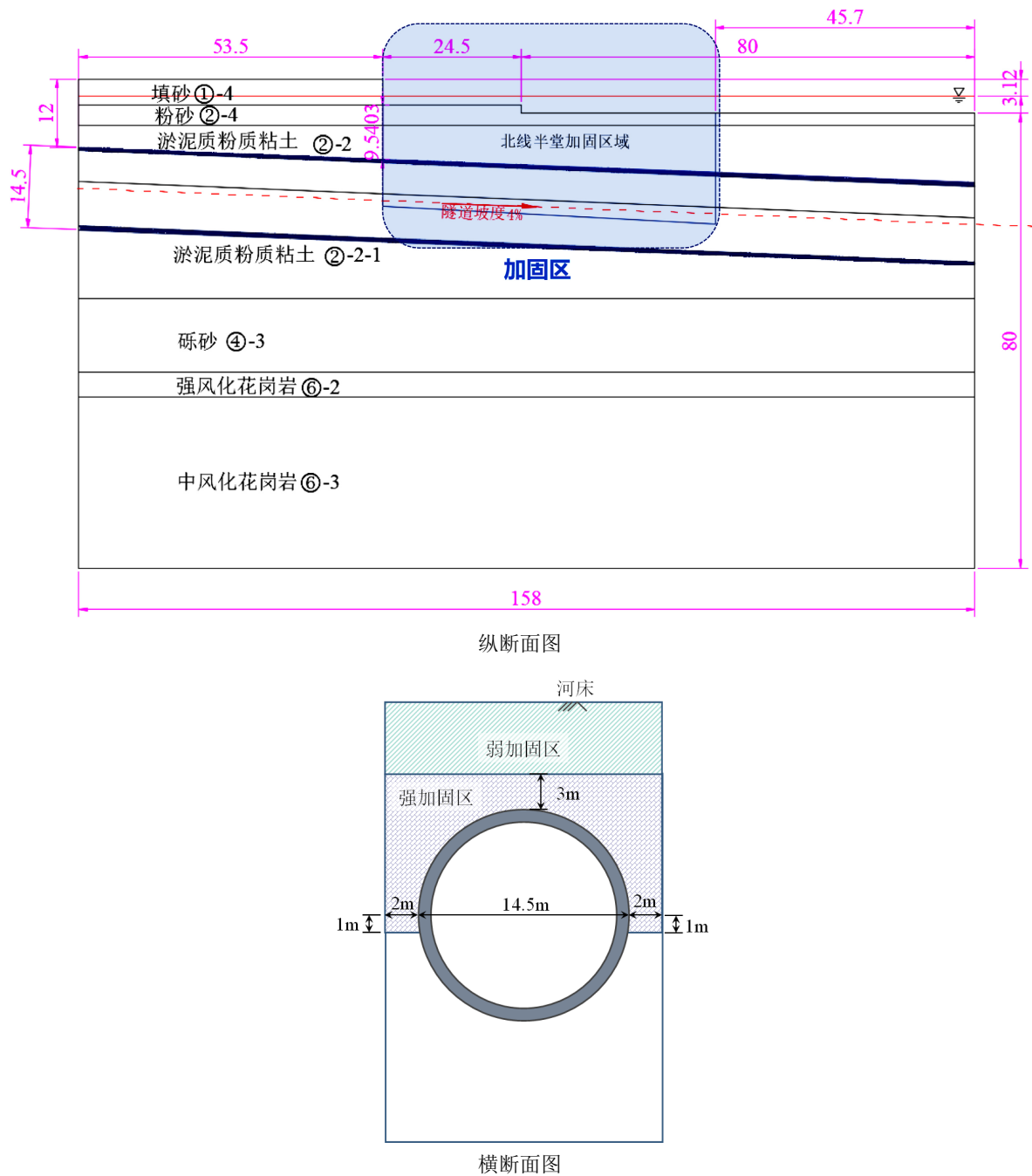


Figure 1. Schematic diagram of strata reinforcement  
图 1. 地层加固示意图

考虑到隧道上浮和地表沉降的影响,对浅覆土段采用水泥土搅拌桩门式加固,加固情况见图 1。平面加固宽度为隧道结构边线两侧 2 m,为防止盾构掘进冒顶,加固深度至隧道腰部以下 1.0 m,以隧道拱顶之上 3 m 为界,以下为强加固区,以上至河床为弱加固区,强加固区和弱加固区分别采用不同的水泥土配合比。

### 3. 浅覆土段隧道掘进三维有限元数值模拟

#### 3.1. 几何模型

通过有限元软件 ABAQUS 建立地层结构模型,对隧道开挖过程进行三维数值模拟。模拟的区域为珠海隧道盾构段包含南线和北线在内的 100 m × 158 m 的区域范围,数值模型如图 2 所示,自始发工作井起,至隧道加固区外 45.5 m 处,全长 158 m 的范围内,地层厚度 80 m。

衬砌管片外径 14.5 m,内径 13.3 m,厚度 600 mm,宽度 2.0 m。数值模型中包含衬砌管片 79 环,其中加固区为第 26 环至第 56 环,第 41 环位于加固区中间位置。衬砌管片环间有剪力销连接,剪力销长 0.25 m,直径 72 mm,沿环均匀分布 20 个。

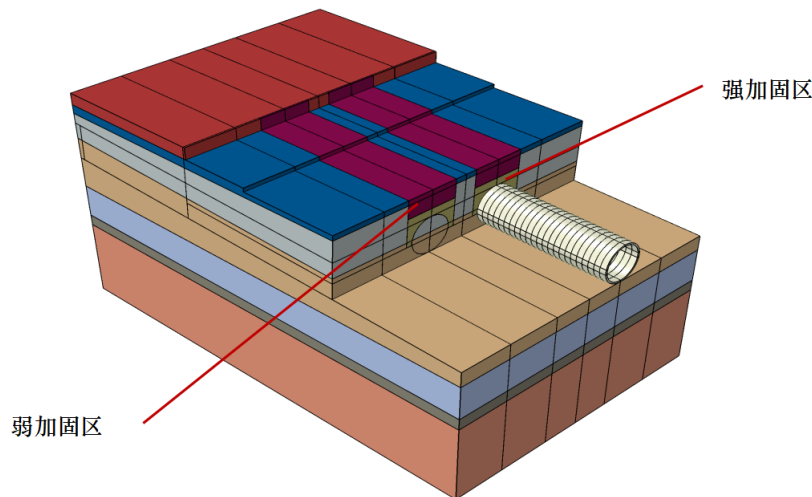


Figure 2. Numerical model of soil and structure  
图 2. 地层结构数值模型

#### 3.2. 本构关系

Table 1. Geotechnical parameters  
表 1. 岩土力学参数

土层	密度 g/cm <sup>3</sup>	粘聚力 kPa	内摩擦角 °	弹性模量 MPa	泊松比
填砂①-4	1.8	2	15	50	0.32
粉砂②-4	1.8	3	21	50	0.32
淤泥质粉质粘土②-2	1.74	16	13.5	39	0.32
淤泥质粉质粘土②-2-1	1.72	15	13	34.5	0.32
砾砂④-3	1.98	1	30	150	0.3
强风化花岗岩⑥-2	2.2	45	30	750	0.26

续表

中风化花岗岩⑥-3	2.65	50	36	750	0.25
强加固区	2.5	27.9	48	500	0.2
弱加固区	2.5	32.5	27	500	0.25

**Table 2.** Physical and mechanical parameters of other materials**表 2.** 其他材料的物理力学参数

材料	密度	弹性模量	泊松比
	$\text{g/cm}^3$	GPa	
ABS	1.04	3	0.3
Q235B 钢材	7.85	206	0.25
C60 混凝土	2.5	35.5	0.16

根据地质勘察报告,针对工程地质的特点,对上部摩擦角较小的软弱土层采用 Drucker-Prager 本构模型提高模型收敛性,下部硬岩采用 Mohr-Coulomb 本构模型,网格单元类型均为 C3D8R 实体单元。衬砌物理力学参数参考 C60 混凝土,采用线弹性本构模型,网格单元类型为 C3D8R 实体单元。剪力销材料为 Q235B 钢材和 ABS 套筒,根据剪力销剪切试验结果,采用线弹性本构模型,并简化结构为梁单元模型,网格单元类型为 B31。各材料物理力学参数见表 1 和表 2。

### 3.3. 相互作用、荷载与边界条件

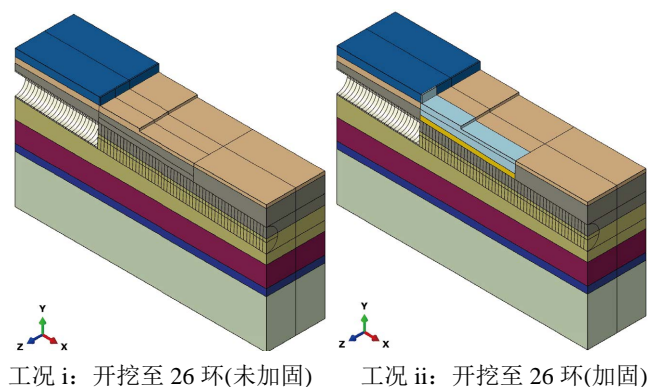
衬砌与土体之间采用面面接触,法向硬接触,切向罚系数为 0.2;衬砌与衬砌之间采用面面接触,法向硬接触,切向罚系数为 0.55;剪力销与衬砌之间采用内置区域,将剪力销嵌入到衬砌中。

地层底部完全固定,四周限制法向位移与面外转角,边界处衬砌限制法向位移和面外转角,开挖面土体限制法向位移。

自重荷载通过体力施加于整个模型,将河床上方水体等效为均布荷载施加于地表,水位下的土层计算饱和重度。根据白云等[14]学者的研究,注浆压力采用沿环上小下大分布,顶部最小 0.143 MPa,底部最大 0.237 MPa,在邻近开挖面的五环施加。

### 3.4. 模拟工况

为比较软土地层中隧道掘进到注浆加固区域的不同位置时,隧道上浮和地表沉降的规律,根据隧道开挖与加固区域的位置,选取工况如图 3 所示。此外,对于工况 iii 和工况 iv,增设不考虑注浆压力的对照工况 vii 和 viii,以此研究同步注浆的影响。



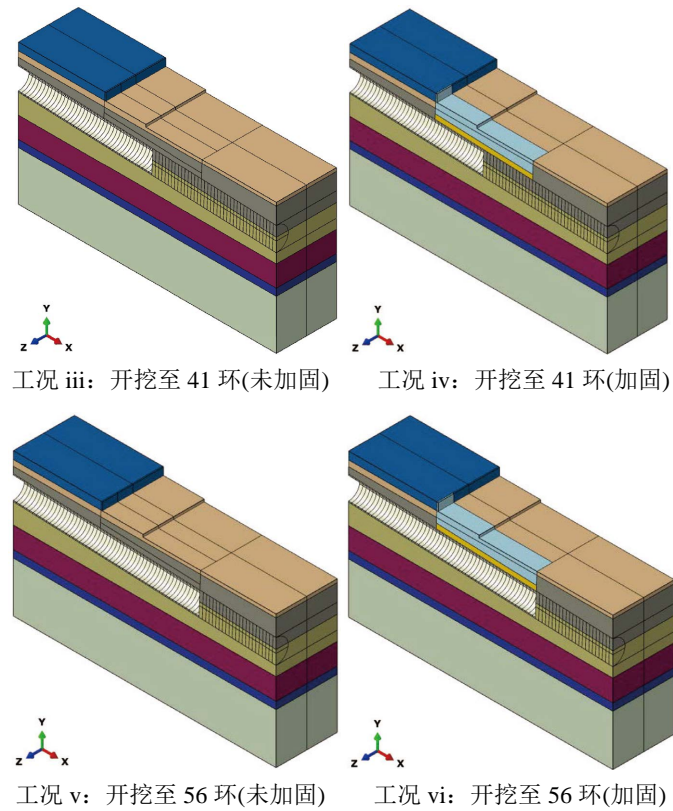


Figure 3. Numerical simulation working conditions  
图 3. 数值模拟工况

### 3.5. 模型验证

珠海隧道工程在模拟区域设置了第 55 环结构变形监测断面和第 47 环水土压力监测断面，断面布置如图 4 所示，将现场监测数据与数值模拟工况 vi 进行对比，以验证模型有效性。

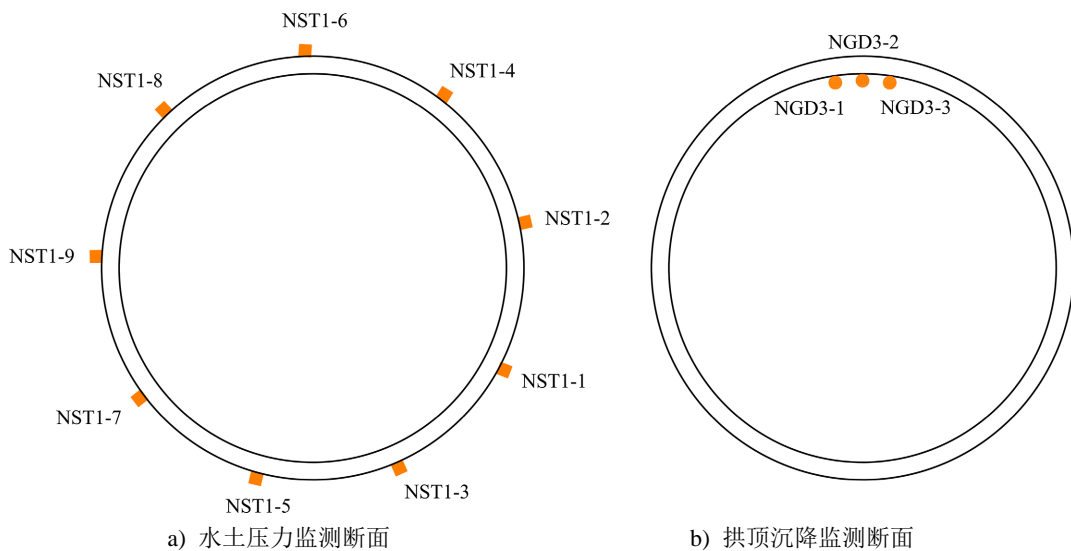


Figure 4. Layout of monitoring sections  
图 4. 监测断面布置图

图5为珠海隧道北线第55环拱顶沉降随时间变化曲线图。拱顶沉降处于波动状态，且整体上有增大趋势。拱顶沉降在5 mm左右波动，与数值模拟的结果4.84 mm很接近，2023/5/18~2023/6/17期间，南线掘进至55环附近，对北线产生扰动，拱顶沉降增大至10 mm，随后下降至原来水平。图6为珠海隧道北线第47环水土压力分布图。水土压力分布现场实测结果整体上呈上小下大，初始状态左右接近对称，最终状态水土压力左小右大，大小与数值模拟结果较为接近。通过数值模拟结果与实测值的对比，可以认为本数值模型与实际情况较为符合。

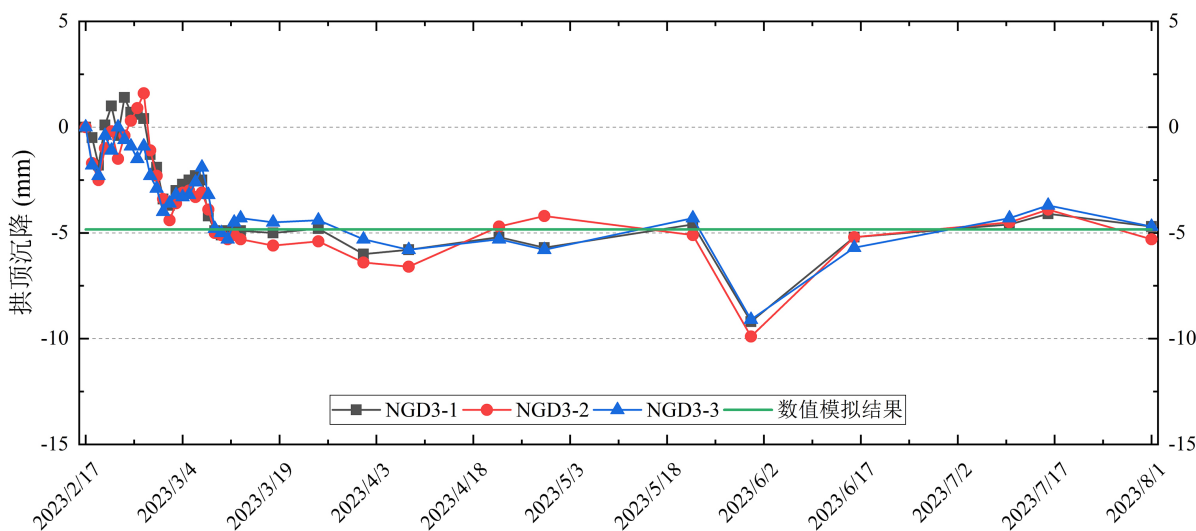


Figure 5. Vertical settlement of the 55th ring of the northern route  
图5. 北线第55环拱顶沉降

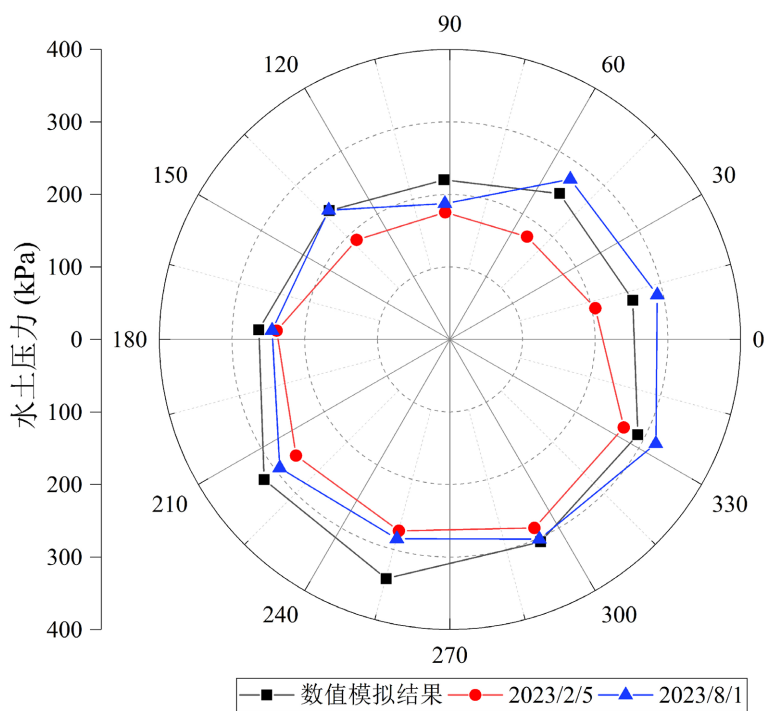
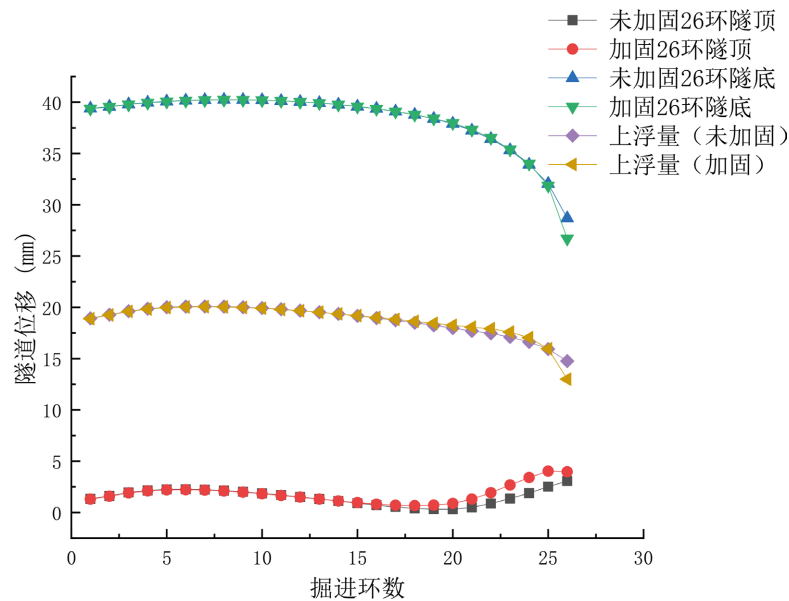


Figure 6. Distribution of soil and water pressures of the 47th ring of the northern route  
图6. 北线第47环水土压力分布

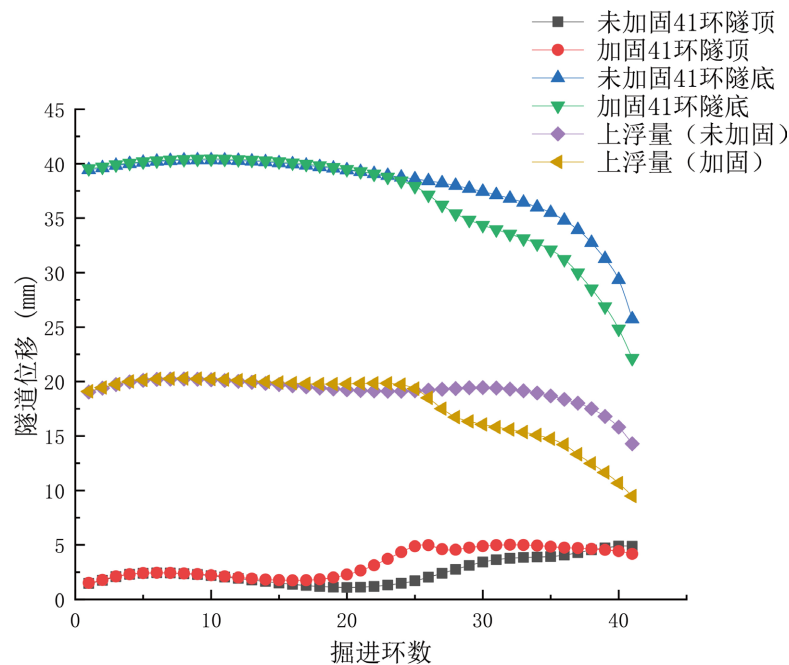
## 4. 结果分析

### 4.1. 地层加固对隧道上浮的影响

隧道开挖对隧道底部产生卸荷影响，隧道底部的土体回弹使隧道出现上浮。以隧道两腰的竖向位移作为隧道上浮量，不同工况下隧道顶部和底部的位移以及隧道上浮量如图 7 所示。结果显示，隧道底部的位移显著高于隧道顶部，且临近开挖面，隧道底部回弹有明显下降。这是由于隧道衬砌自身在水土压力作用下发生收敛变形，与部分隧道上浮量抵消。且临近开挖面 5 环内，由于注浆压力的存在，隧道底部的土体回弹显著降低。



a) 开挖至 26 环时



b) 开挖至 41 环时



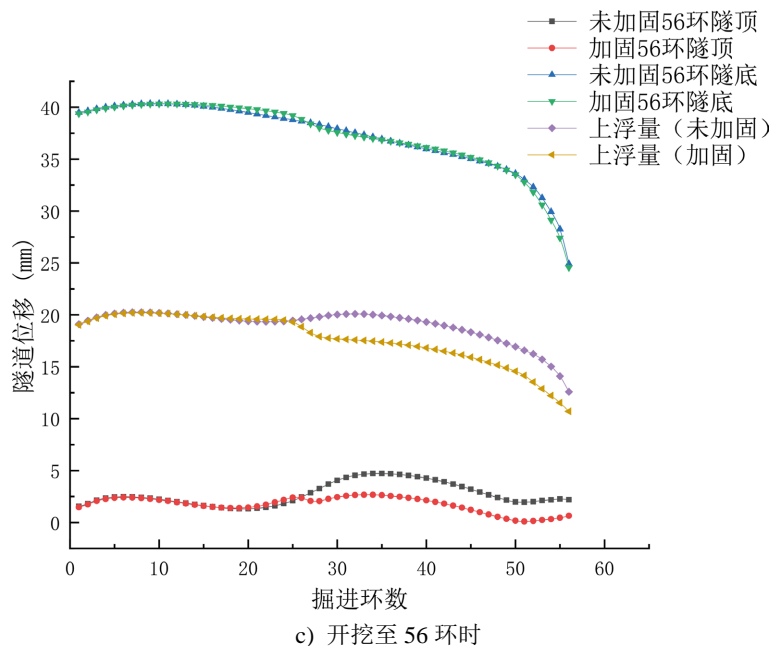


Figure 7. Segment floating displacement  
图 7. 管片上浮量

开挖至 26 环时，隧道开挖面刚刚抵达加固区，土体加固对开挖面近端隧道影响较大，底部回弹与隧道上浮量降低了约 3 mm。开挖至 41 环时，隧道开挖面位于加固区中部，注浆加固对于加固区内的隧道底部回弹和隧道上浮量均有明显的降低，降低约为 45 mm；对于隧道顶部的上浮量影响较小。开挖至 56 环时，注浆加固对于加固区内的隧道底部回弹影响较小，对隧道上浮量和隧道顶部影响较大。

#### 4.2. 地层加固对地表隆起的影响

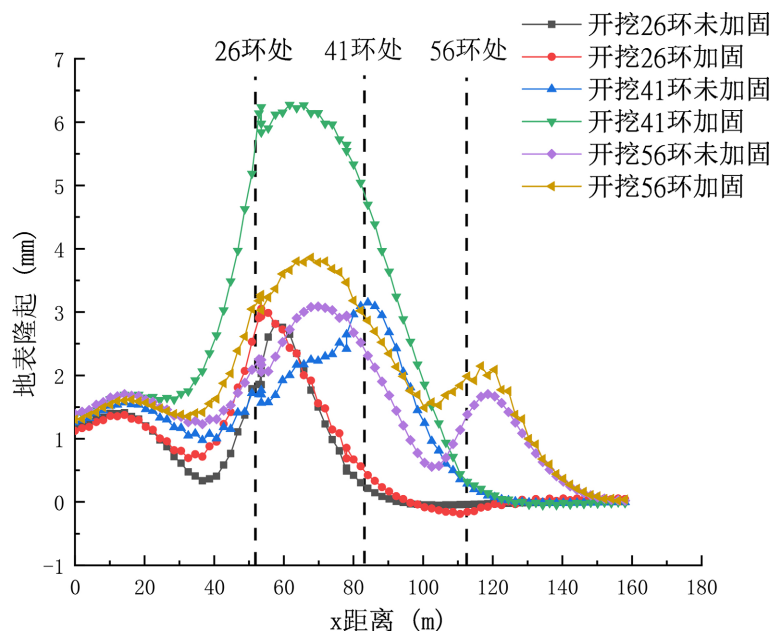


Figure 8. Surface settlement  
图 8. 地表沉降

隧道开挖使周边土体发生应力重分布，隧道上方的地表也会发生位移。对于不同工况下，隧道掘进轴线上方的地表沉降沿掘进方向的分布如图 8 所示。隧道开挖部分上方土体出现隆起，而开挖面前方地表变现为微小沉降。开挖至 26 环时，隧道开挖面刚刚抵达加固区，开挖面前方为注浆加固区，地层注浆加固可以降低开挖面前方土体沉降，但会增大隧道上方的地面隆起。地面隆起量与隧道上方荷载关系较大，埋深增加，隆起减小，反之亦然。注浆加固后，对邻近的地面沉降最大减小了 0.15 mm，也是由于注浆加固增强地层的弹性模量的同时，将土层的密度从  $1740 \text{ kg/m}^3$  增大到  $2500 \text{ kg/m}^3$  左右，使加固区内的隧道衬砌受到的荷载也增加。在一定范围内，隧道上方荷载越大，底部土体初始应力更大，开挖后的回弹位移更大。

#### 4.3. 地层加固对衬砌收敛变形的影响

隧道衬砌在荷载作用下的收敛变形既反映了地层与结构的荷载关系，又反映了地层和结构的变形关系，不同工况下的隧道收敛变形关系如图 9。结果表明，注浆加固增大了土体的弹性模量，使土体变形减小，对于邻近加固区(26 环位置)和加固区内(41 环、56 环)位置的衬砌收敛变形都有显著的降低。

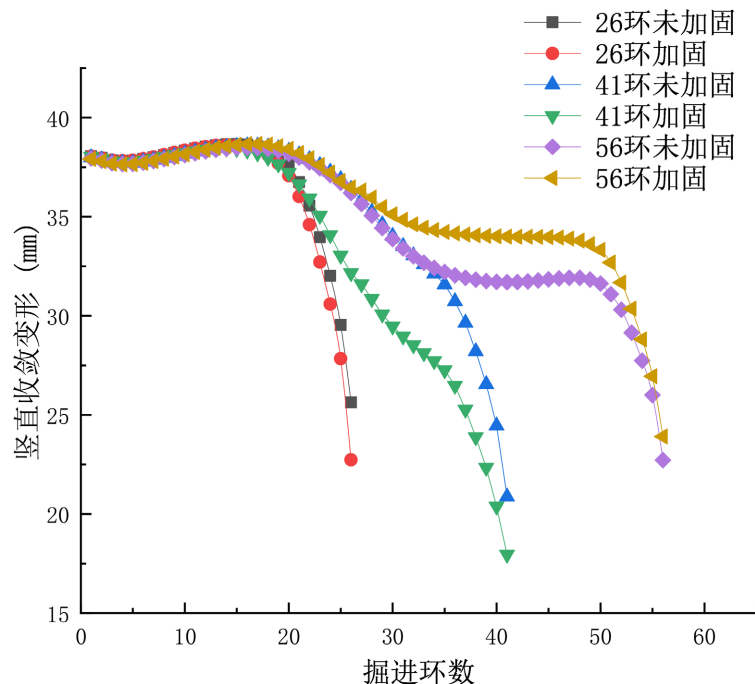


Figure 9. lining convergence deformation  
图 9. 衬砌收敛变形

#### 4.4. 同步注浆对隧道上浮的影响

模拟采用的注浆压力在  $0.143 \text{ MPa}$ ~ $0.237 \text{ MPa}$  的范围，通过工况 vii、viii 模拟在掘进至 41 环时，无注浆压力的结果，研究注浆压力对于隧道上浮的影响。注浆压力对隧道上浮量的影响如图 10 所示，结果表明：未加固时，注浆压力会使隧道上浮量提升；有土体加固时，注浆压力会使隧道上浮量降低。这是由于注浆压力作为荷载作用于整环衬砌，衬砌受到的整体荷载增加，开挖后土体的回弹也会增加。未加固时，上方为自由表面，土体有向上回弹的趋势，隧道上浮量增加；而加固时，隧道上方加固区土体的密度和弹性模量增加，几乎不在产生变形，因此土体向下回弹，隧道上浮量减小。

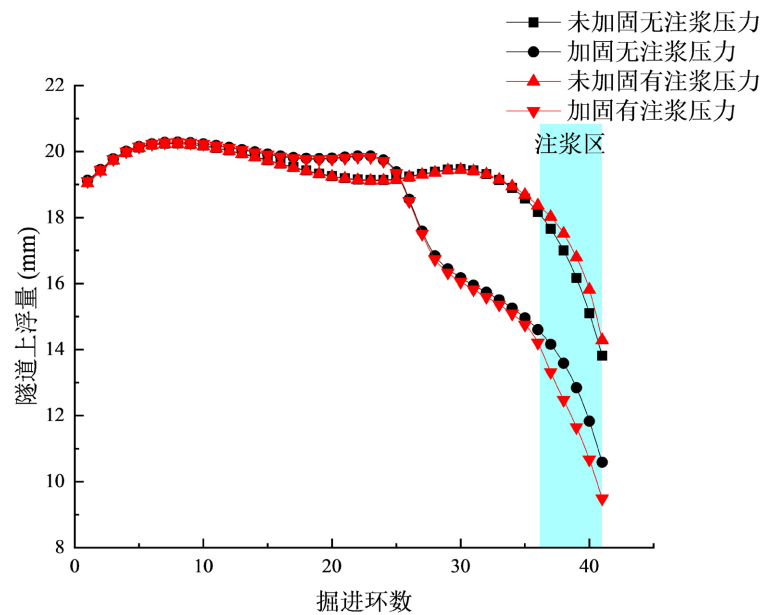


Figure 10. Effect of synchronized grouting pressure  
图 10. 同步注浆压力的影响

## 5. 结论

本文以珠海隧道浅覆土段盾构隧道为背景, 通过有限元模拟, 建立三维数值模型, 设置 8 种工况, 研究了地层加固对隧道上浮、地表沉降和衬砌收敛变形的影响规律。结论如下:

- 1) 地层注浆加固有效降低了加固区内的隧道顶部位移、隧道底部位移、隧道上浮量和衬砌收敛变形, 其中开挖至第 41 环时, 加固后隧道上浮量降低了 4~5 mm。
- 2) 隧道开挖部分上方土体出现隆起, 而开挖面前方地表变现为微小沉降, 地层注浆加固可以降低开挖面前方土体沉降, 但会增大隧道上方的地面隆起。
- 3) 盾构同步注浆压力会影响地层注浆加固效果。未加固时, 注浆压力会使隧道上浮量提升; 有土体加固时, 注浆压力会使隧道上浮量降低。

## 参考文献

- [1] 钱七虎, 陈健. 大直径盾构掘进风险分析及对特大直径盾构挑战的思考[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(2): 157-164.
- [2] 张继清. 超浅埋大直径盾构穿越海河的设计施工关键技术[J]. 中国铁路, 2015(7): 69-73.
- [3] 郑坚. 在软土层中应用盾构法施工的关键技术研究[J]. 建筑施工, 2000(6): 53-56.
- [4] 王涵. 大直径盾构隧道管片上浮机理与施工控制研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2022.
- [5] 吴尚坤. 超软土地层盾构隧道管片上浮规律及控制措施研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [6] 沈征难. 盾构掘进过程中隧道管片上浮原因分析及控制[J]. 现代隧道技术, 2004(6): 51-56.
- [7] 黄忠辉, 季倩倩, 林家祥. 超大直径泥水平衡盾构隧道抗浮结构试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(2): 250-254.
- [8] 付艳斌, 梅超, 卞跃威, 等. 考虑注浆填充率的大直径盾构管片上浮解析解与应用[J]. 中国公路学报, 2022, 35(11): 171-179.
- [9] 叶俊能, 刘源, 陈仁朋, 等. 盾构隧道管片施工期容许上浮量研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 4067-4074.

- 
- [10] Chen, R., Meng, F., Ye, Y., *et al.* (2018) Numerical Simulation of the Uplift Behavior of Shield Tunnel during Construction Stage. *Soils and Foundations*, **58**, 370-381. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.02.007>
- [11] 冯益文, 张忠祥, 郑选荣, 等. 富水砂卵石地层隧道盾构施工管片上浮规律及控制措施分析[J]. 工程技术研究, 2023, 8(3): 114-116.
- [12] 孔恒. 城市地铁隧道浅埋暗挖法地层预加固机理及其应用研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2003.
- [13] 于洪豪. 非均质软弱地层劈裂注浆扩散与加固规律研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2023.
- [14] 白云, 戴志仁, 张莎莎, 等. 盾构隧道同步注浆浆液压力扩散模式研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(4): 38-45.