

## 隧道注浆范围对地层沉降及桥桩位移影响分析

付涵露<sup>1</sup> 赵洪尧<sup>2</sup>

1. 南昌轨道交通集团有限公司地铁项目管理分公司, 江西 南昌 330013

2. 大连海事大学交通运输系, 辽宁 大连 116026

**[摘要]**盾构隧道施工在城市轨道交通和基础设施建设中发挥着重要作用, 但其对邻近结构, 特别是轻轨桥桩的影响, 是工程安全的关键考量。本研究以某城市地铁5号线区间隧道工程为例, 采用FLAC3D软件建立三维数值模型, 分析不同壁后注浆范围对地层沉降和桥桩位移的影响。研究表明, 注浆范围的增加能有效减少地表沉降和拱顶沉降, 同时降低桥桩的竖直位移和水平位移, 有效控制负摩阻力的发展。本研究推荐40cm壁后注浆范围的施工方案, 以实现地层沉降和桥桩位移的优化控制。该研究成果为盾构隧道施工参数的优化提供了理论依据和技术支持, 具有重要的工程应用价值。

**[关键词]**盾构隧道; 注浆范围; 地层沉降; 桥桩位移; 数值模拟

DOI: 10.33142/aem.v6i9.13848

中图分类号: U455.49

文献标识码: A

## Analysis of the Influence of Tunnel Grouting Range on Ground Settlement and Bridge Pile Displacement

FU Hanlu<sup>1</sup>, ZHAO Hongyao<sup>2</sup>

1. Subway Project Management Branch of Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330013, China

2. Department of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning, 116026, China

**Abstract:** Shield tunnel construction plays an important role in urban rail transit and infrastructure construction, but its impact on adjacent structures, especially light rail bridge piles, is a key consideration for engineering safety. This study takes the section tunnel project of Metro Line 5 in a certain city as an example, and uses FLAC3D software to establish a three-dimensional numerical model to analyze the influence of different grouting ranges behind the wall on ground settlement and bridge pile displacement. The research results indicate that increasing the grouting range can effectively reduce surface and arch settlement, as well as reduce the vertical and horizontal displacement of bridge piles, effectively controlling the development of negative frictional resistance. This study recommends a construction plan with a grouting range of 40cm behind the wall to achieve optimized control of ground settlement and bridge pile displacement. The research results provide theoretical basis and technical support for the optimization of shield tunnel construction parameters, and have important engineering application value.

**Keywords:** shield tunnel; grouting range; geological subsidence; bridge pile displacement; numerical simulation

### 引言

城市化进程的加速推进对城市交通系统提出了更高的要求, 轨道交通作为城市公共交通的重要组成部分, 对于缓解城市交通压力、提升市民出行效率具有不可替代的作用<sup>[1]</sup>。盾构隧道施工技术, 因其对环境影响较小、施工速度快、安全性高等特点, 在城市轨道交通建设中得到了广泛应用<sup>[2]</sup>。然而, 盾构施工对周边环境的影响, 尤其是对邻近重要基础设施如轻轨桥桩的潜在影响, 已成为工程安全的关键考量因素<sup>[3]</sup>。

地层沉降和结构位移的有效控制, 直接关系到隧道工程的稳定性及邻近建筑物的安全。盾构隧道施工引起的地层变形、沉降以及邻近结构的响应, 是一个复杂的多物理过程, 涉及到土力学、结构力学、地质学等多个领域<sup>[4]</sup>。因此, 深入研究盾构隧道施工过程中的地层响应和邻近结构的受力行为, 对于优化施工方案、确保工程安全具有重

要意义。

近年来, 随着工程技术的不断进步, 注浆技术作为控制地层变形的重要手段, 在盾构隧道施工中的应用日益广泛<sup>[5]</sup>。注浆范围的合理确定, 对施工效果有着直接影响。数值模拟技术的发展, 为隧道施工影响的分析和预测提供了新的视角和方法。通过数值模拟, 可以对盾构隧道施工过程中的地层变形、结构位移等进行预测, 为施工方案的优化提供理论依据<sup>[6]</sup>。

本研究以某城市地铁区间隧道工程为背景, 通过建立三维数值模型, 研究不同隧道注浆范围对地层沉降和桥桩位移的影响。研究结果可为类似工程提供理论依据和技术支持, 对盾构隧道施工参数优化具有重要的工程应用价值。

### 1 工程概况

本研究是基于某城市地铁5号线的关键工程段落, 该区间隧道设计穿越一段轻轨桥梁下方, 桥梁与地铁车站相

邻, 隧道开挖长度为 75m, 顶部覆盖层厚度为 13m。该城市地铁 5 号线一期工程全线总长 19.688 公里, 线路沿城市主要街道敷设, 连接了城市多个重要区域和交通枢纽。该地区属于中温带大陆性半湿润、半干旱季风气候, 具有明显的四季变化和季节性降水特征。地形地貌上, 该城市所在区域属于平原地貌, 海拔高度在 189 至 306 米之间, 地层结构多样, 包括多种类型的沉积岩和土壤。地质特征方面, 该地区位于沉降带, 地质构造运动相对较弱, 但存在多条不同方向和规模的断裂。水文条件上, 该区域有若干河流水系, 包括大型河流及其上游的水库, 对地下水文地质条件有重要影响。

在隧道施工过程中, 注浆技术的应用对于控制地层沉降和减少施工对邻近结构的影响至关重要。本研究通过数值模拟方法, 分析了不同壁后注浆范围对地层沉降和桥桩位移的影响, 以期为盾构施工参数的优化提供科学依据。



图 1 隧道开挖实际现场图

## 2 数值模型建立

### 2.1 模型建立

根据工程现场实际情况对隧道建模条件进行简化。简化结果如下: 隧道顶部至地表 13m, 地层分布规律自上而下分别为杂填土, 全风化泥岩, 强风化泥岩, 中风化泥岩。

考虑到隧道施工过程中的边界效应, 计算范围去 3~4 倍的隧道直径, 模型的尺寸设置为横向尺寸 106m, 纵向尺寸 74m, 竖向尺寸 59m。通过 FLAC3D 软件建立三维模型, 土层采用实体单元进行模拟, 选取摩尔库伦本构模型, 衬砌管片选用实体弹性壳体单元, 选用弹性本构模型。地表轻轨部分由轻轨桥面及轻轨桥桩组成, 横板、支撑、条形基础选用实体单元模拟, 模型模拟桥面长 74m, 宽 4m, 高 2m。材料性质设为钢筋混凝土, 应用弹性本构模型。模型边界约束条件: 模型左、右两侧施加 X 方向垂直边界面的水平约束, 前、后侧施加 Y 方向垂直边界面的水平约束, 底部 Z 方向竖向约束, 上部自由无约束。渗流边界条件: 土体边界不透水, 开挖面不透水, 管片及注浆不透水。三维计算模型如图 1 所示, 共计 101695 个节点, 112448 个单元。

### 2.2 模型参数

在简化后的三位数值模型中, 隧道开挖所影响范围的

地层共有四种地层, 分别是素填土, 全风化泥岩, 强风化泥岩, 中风化泥岩。简化后的各地层参数结果如表 1 所示。

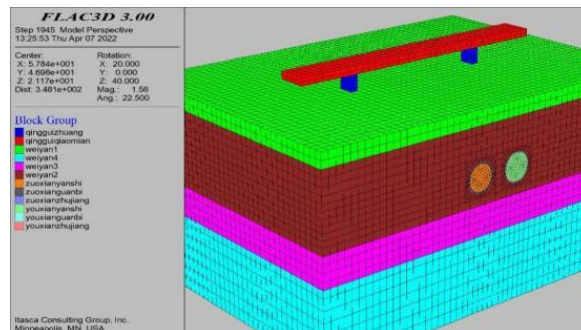


图 1 三维模型图

表 1 模型地层计算参数

地层类型	体积模量 E/GPa	剪切模量 E/GPa	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 $\Phi/^\circ$	密度 $\rho/\text{kg/m}^3$
素填土	0.12	0.04	15	9	1800
全风化泥岩	0.25	0.07	26	15	1920
强风化泥岩	0.39	0.10	60	25	2170
中风化泥岩	4.23	1.03	120	30	2390

## 3 计算结果分析

为了分析盾构开挖对建筑物沉降的影响, 在两个桥桩中心设置监测点, 监测其竖向位移, 并在桥桩周土设置监测点, 逐步跟进监测, 隧道模型的测线布置如图 2 所示。

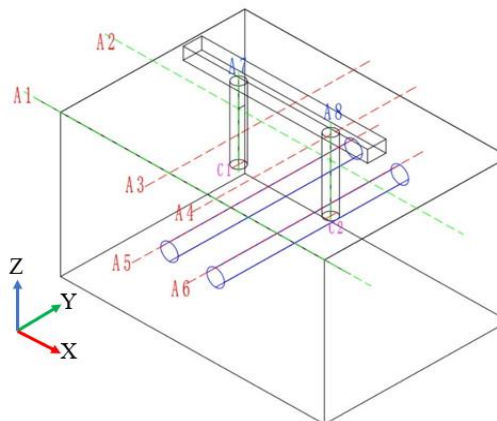
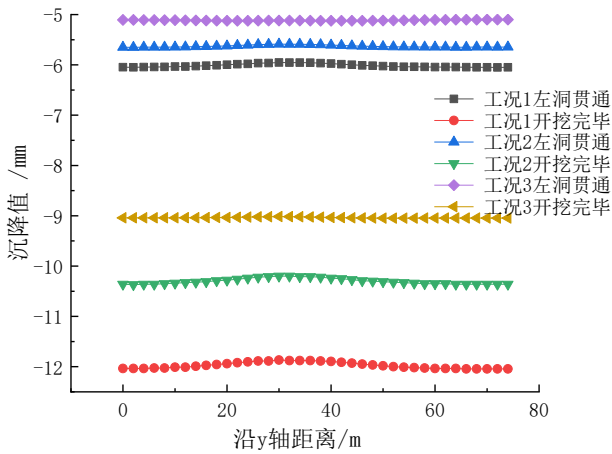


图 2 测线布置图

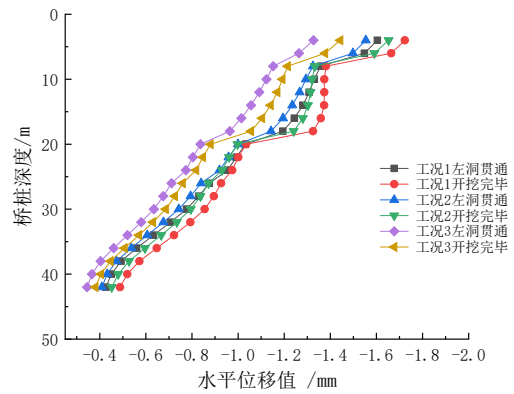
本小节设置如下三种工况进行比较, 研究隧道注浆范围对地表及桥桩的影响。工况 1: 注浆圈厚度 20cm; 工况 2: 注浆圈厚度 30cm; 工况 3: 注浆圈厚度 40cm。

### 3.1 地表位移分析

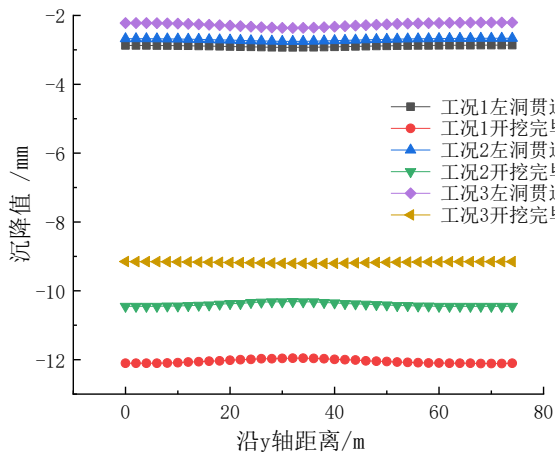
如下图 3 所示, 随着监测点 Y 轴距离的增加, 地表沉降的变化呈一条直线。通过三种工况对比可以看出, 无论是第一洞开挖还是全部开挖完成, 工况 1、2、3 的左洞地表沉降值逐渐增加, 随着壁后注浆范围的增加, 左隧道地表沉降有明显的减少。三种工况的最大沉降分别是 11.87mm, 10.22mm, 9.02mm。



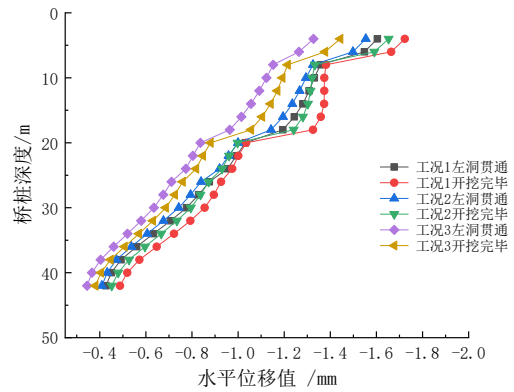
(a) A3 测线沉降值



(a) A7 测线竖直位移值



(b) A4 测线沉降值



(b) A8 测线数值位移值

图3 纵向地表沉降值

图4 桥桩竖直位移值

### 3.2 桥桩位移分析

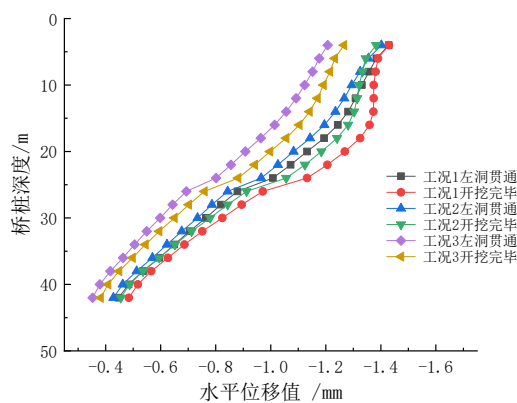
为了分析盾构开挖对桥桩位移的影响,在两个桥桩中心设置监测点,监测其竖向位移,逐步跟进监测,根据监测数据绘制本小节桥桩位移的相关曲线。

从图4中可以看出随着桥桩深度的增加,桩身的竖向位移逐渐减小。桥桩的竖向沉降由两部分组成,分别是桥桩的竖直位移和桥桩的压缩引起。由于桥桩是在隧道开挖以前建成,所以桥桩的竖直位移为桥桩底部土体的沉降引起,而桥桩的压缩变形由桥桩的轴力大小变化引起。另外,由图中可以看出,开挖隧道穿越桥桩时,桥桩沉降有一个较大变形。从深度角度来看,在隧道的深度桥桩因开挖引起的沉降有一个变化比较大的值。是因为隧道开挖的影响范围引起的应力重分布导致桥桩的轴力变化比较大,周围土体的变形也比较大,所以引起桥桩沉降较大。由于壁后注浆范围的增加,限制了土体的竖向位移,同样限制了桥桩的竖向位移,所以随着壁后注浆范围的增加三种工况的整体的竖向位移都减少。三种工况下引起的A7测线桥桩最大竖向位移为1.72mm, 1.65mm, 1.44mm, A8测线桥桩最大竖向位移为1.71mm, 1.65mm, 1.45mm。

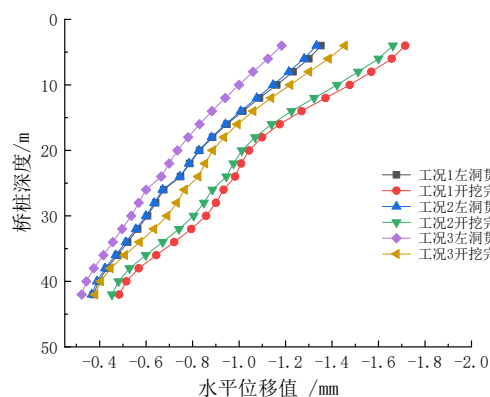
如图5所示,从图中可以看出,随着深度的增加,土体的沉降值逐渐减小。这符合土体固结的规律,上层土的变形比下层较大。在开挖过程中,随着开挖的进行,土体沉降逐渐增加,因为盾构对土体的扰动导致土体沉降。且在隧道的深度沉降值明显大于其他深度位置。在盾构穿越桥桩时,桥桩桩周土的影响最大,且左隧道的开挖对左桥桩影响较大,右隧道开挖对左桥桩影响较小,其变化趋于平缓。由于壁后注浆范围的增加,限制了土体的竖向位移,同样限制了桥桩的竖向位移,所以随着壁后注浆范围的增加三种工况的整体的竖向位移都减少。三种工况引起的左桥桩最大竖向位移为1.43mm, 1.38mm, 1.27mm, 右桥桩最大竖向位移为1.72mm, 1.66mm, 1.45mm。

由于桩周土与桥桩的沉降变形不一致,所以有可能导致桥桩上的负摩阻力。负摩阻力是由于桩周土因自重而产生固结、水土作用湿陷、地面附加荷载作用等原因产生相对位移,从而引起的对桩体的向下方向的摩阻力。设计时,如果忽视负摩阻力,将会造成桩端地基的屈服或刺入破坏,相当于间接增加了桩上端荷载,会引发桩身破坏以及上部构筑物不均匀沉降等,甚至引发构筑物沉降、倾斜、开裂

等事故。将桥桩的变形与桩周土的变形相减，可以得到桩周土与桥桩的相对位移。



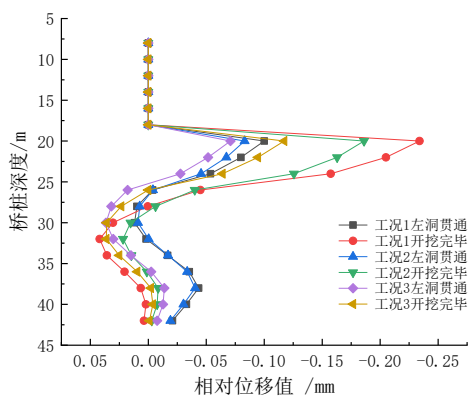
(a) 左桥桩桩周沉降值



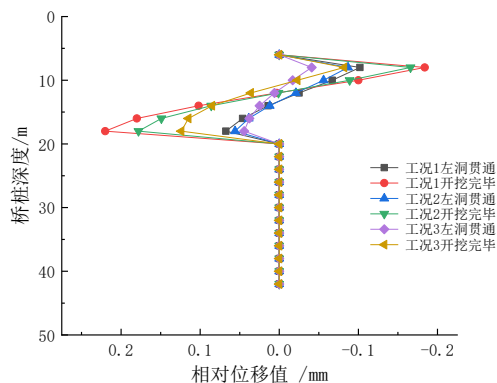
(b) 右桥桩桩周土沉降值

图5 桥桩桩周土沉降值

如图6所示，图中为桩周土的沉降值减去桥桩的沉降值，可以得到桩周土与桥桩的相对位移。其中“+”桥桩相对桩周土位移向下，即产生正的摩阻力，“-”表示桥桩相对桩周土位移向上，产生负摩阻力。由图中可以看出桥桩在隧道深度范围和桩端范围有可能产生负摩阻力。但是可以看出，随着壁后注浆范围的增加，桥桩与桩周土相对位移越来越小，其最大相对位移值逐渐减小，即产生负摩阻力的大小也会减小。



(a) 左桥桩相对位移值

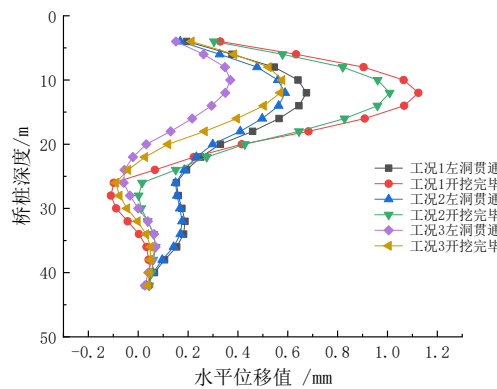


(b) 右桥桩相对位移值

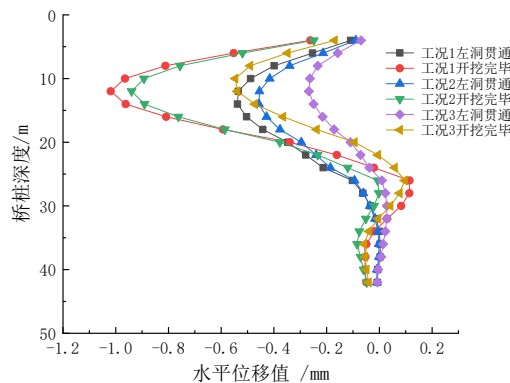
图6 桥桩与桩周土相对位移值

### 3.3 桥桩倾斜分析

如图7所示，从深度范围来看，桥桩变形为“S”型，在桥桩端部的水平位移接近0，而在中部发生挠曲变形。可以看出，其变形最大位置正在隧道中心深度位置，朝着隧道方向变形。从三种工况对比变化来看，随着壁后注浆范围的增加，桥桩的水平位移逐渐减小，这是因为壁后注浆范围的增加，隧道周围土体的强度和土体参数对应增加，限制了桥桩的横下位移。所以桥的水平位移随着壁后注浆范围的增加而减少。三种工况下 A7 测线即左桩最大水平位移为 1.12mm, 1.00mm, 0.57mm, A8 测线即右桩最大水平位移为 1.02mm, 0.94mm, 0.54mm。



(a) A7 测线水平位移值



(b) A8 测线水平位移值

图7 桥桩水平位移曲线

#### 4 结论

本研究通过 FLAC3D 软件建立了某城市地铁区间隧道的三维数值模型,分析了不同壁后注浆范围对地层沉降和桥桩位移的影响。研究表明:

(1) 壁后注浆范围的增加可以有效减少地表沉降和拱顶沉降,随着注浆范围的扩大,沉降值逐渐减小,其中 40cm 注浆范围的工况表现出最佳效果。

(2) 随着注浆范围的增加,桥桩的数值位移和水平位移均有所减小,负摩阻力也可以得到有效控制。

综合考虑,本研究推荐采用 40cm 的壁后注浆范围进行施工,以实现地层沉降和桥桩位移的有效控制。本研究为类似工程提供了理论依据和技术支持,对盾构隧道施工参数优化具有重要的工程应用价值。

#### [参考文献]

[1] 洪开荣,冯欢欢.近 2 年我国隧道及地下工程发展与思考(2019—2020 年)[J].隧道建设(中英

文),2021,41(8):1259-1280.

[2] 王晓慧,齐九龙,王建涛,等.城市轨道交通工程暗挖施工技术质量控制措施[J].运输经理世界,2024(3):25-27.

[3] 林湘,陈相宇,韦锦呈.盾构近接施工对桥桩沉降影响分析及保护措施[J].岩土工程技术,2024,38(4):391-397.

[4] 阚绍德,黄旭民,梁禹.考虑土层侧向力和变异性的隧道下穿引起既有隧道纵向沉降分析与控制[J].铁道科学与工程学报,2024(8):19.

[5] 申子龙.地铁盾构隧道掘进过程注浆技术研究[J].工程机械与维修,2024(2):162-164.

[6] 芮勇勤,袁健玮,范文举,等.双线隧道施工过程中地层变形控制数值分析[J].公路,2023,68(6):455-462.

作者简介:付涵露(1993—),男,汉族,江西南昌人,硕士研究生,工程师。研究方向:工程管理。