

## 隔离桩对复合地层小净距盾构隧道的变形影响研究

杨 益<sup>1</sup>, 褚继龙<sup>1</sup>, 黎伟佳<sup>2</sup>, 周书东<sup>2</sup>, 杜 涛<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213;

2. 东莞市建筑科学研究院有限公司, 广东 东莞 523820)

**摘要:**小净距盾构隧道施工难度大,安全风险大,容易影响盾构结构及周边环境的安全。文章以深圳某新建盾构隧道为依托,采用有限元软件 FLAC<sup>3D</sup> 建立数值分析模型,研究隔离桩对复合地层小净距盾构隧道施工的变形机理及其影响,对不同桩长、桩径、桩间距等因素进行敏感性分析,并提出在复合地层中盾构隧道施工建议。结果表明:隔离桩能够有效减少盾构隧道中的垂直位移,对水平位移影响相对较小;盾构隧道的最大垂直位移与隔离桩桩长近似呈负指数关系,与隔离桩桩径呈非线性减小关系,与隔离桩桩间距呈非线性关系;本项目隔离桩桩径取为 1 m 是合理的,并建议适当加大隔离桩桩间距以减少工程费用。

**关键词:**隔离桩; 盾构隧道; 小净距; 复合地层

中图分类号:U231<sup>+</sup>.3

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)04-0020-07

doi:10.13402/j.gcjs.2025.04.044

## Research on the deformation impact of isolation piles for minimal-distance shield tunnels in composite strata

YANG Yi<sup>1</sup>, CHU Jilong<sup>1</sup>, LI Weijia<sup>2</sup>, ZHOU Shudong<sup>2</sup>, DU Tao<sup>2</sup>

(1. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu 610213, Sichuan, China;

2. Dongguan Institute of Building Research Co., Ltd., Dongguan 523820, Guangdong, China)

**Abstract:** The construction difficulty and safety risks of minimal-distance shield tunnels are high, which affects the safety of the shield structure and surrounding environment. Based on a newly built shield tunnel in Shenzhen, a numerical analysis model is established using finite element software FLAC<sup>3D</sup> to study the deformation mechanism and impact of isolation piles on the construction of small-clearance shield tunnels in composite strata. Sensitivity analysis is conducted on such factors as different pile length, pile diameter, and pile spacing. Suggestions for shield construction in composite strata are proposed. The results show that: The isolation piles can effectively reduce the vertical displacement in the shield tunnel, with relatively little impact on the horizontal displacement; The maximum vertical displacement of the shield tunnel is approximately inversely proportional to the length of the isolation piles, nonlinearly decreases with the diameter of the isolation piles, and nonlinearly varies with the spacing between the isolation piles; It is reasonable to take the diameter of the isolation piles in this project as 1 m, and it is recommended to appropriately increase the spacing between the isolation piles to reduce engineering costs.

**Key words:** isolation pile; shield tunnel; minimal-distance; composite strata

城市地铁隧道通常采用双向并行盾构隧道,由于周边复杂的地下环境或者隧道线路规划的要

求,双向并行隧道之间的间距难免会出现小于规范要求的 6 m 的情况。小净距盾构隧道施工中双

收稿日期:2024-08-11

作者简介:杨 益(1985—),男,高级工程师,从事地下空间施工技术工作。

通信作者:黎伟佳(1994—),男,硕士研究生,从事岩土工程领域方面的研究工作。

洞相互影响,施工难度大,安全风险大。

隔离桩在隧道、基坑开挖时对周边重要建(构)物变形保护应用较为广泛,效果较好。隔离桩的设计参数主要包括桩长、桩径、桩间距等,国内外学者对不同设计参数的隔离桩进行了大量研究。姚爱军等<sup>[1]</sup>研究隔离桩在基坑开挖卸荷加载作用下对邻域既有地铁隧道的隔离保护效果,分别对隔离桩的不同影响因素进行了研究,发现适当增大桩间距和桩顶埋入深度仍可取得较好的隔离效果。郑刚等<sup>[2]</sup>以天津市采用隔离桩保护邻近既有隧道的某深大基坑工程为背景,采用考虑土体小应变特性的有限元方法,对隔离桩的作用机制进行参数分析。王顺祥<sup>[3]</sup>以杭州地铁某地下车站为背景,通过调整隔离桩间距、长度及与地连墙间距,模拟非平衡开挖对隔离桩变形及受力的影响。曾晓鑫等<sup>[4]</sup>基于杭州市采用隔离桩保护邻近既有地铁隧道的某个房建基坑工程,采用 ABAQUS 有限元软件进行数值模拟,建立二维模型对隔离桩在不同位置条件下隧道的变形进行了分析。杨冰<sup>[5]</sup>以复合土岩地层中的地铁深基坑工程为背景,采用数值模拟,分析了3种隔离方案下的基坑开挖对既有管廊结构的变形规律和围岩状态。周敏<sup>[6]</sup>以紧靠沙特阿拉伯利雅得地铁3号线1F4地下车站、区间隧道北侧的民建深基坑工程为例,采用 Midas GTS 建立三维模型研究不同隔离桩桩径下,围护桩施工、开挖至基底、回筑至顶板这三阶段对相邻地下结构的影响。杜明芳等<sup>[7]</sup>基于郑州地区某工程,运用有限元软件 Midas GTS NX 进行数值模拟,研究小半径隧道盾构施工期间隔离桩防护措施的作用效果,并结合监测数据验证数值计算的准确性。

目前小净距盾构隧道施工时,通常采用土体加固、洞内注浆加固、新建隧道临时台车支撑等方式控制变形<sup>[8-10]</sup>,而对于隔离桩在对软岩小净距盾构隧道施工的变形影响研究较少,隔离桩的影响机理不清晰,主要根据工程经验对隔离桩设计参数进行设定。本文以深圳市某新建盾构隧道为背景,采用有限元软件 FLAC<sup>3D</sup> 分析隔离桩对软岩小净距盾构隧道的变形机理及其影响,对不同桩长、桩径、桩间距等因素进行敏感性分析,提

出隔离桩的设计参数优化方案和在复合地层中盾构隧道的施工建议,以期可为类似工程提供参考。

## 1 工程概况

深圳市某新建隧道采用盾构法施工,双洞单线敷设,采用 EPB/TBM 双模盾构机。盾构区间埋深为 23.3~50.1 m,盾构隧道结构形式为圆形断面,外径为 8.8 m,内径为 8.0 m,盾构隧道区间左右线最小净距约为 2.5 m,净距小于 4 m 且隧道周围为软岩时需增设隔离桩。本工程隔离桩采用混凝土灌注桩( $\varnothing 1\ 000@1\ 200\ \text{mm}$ )共 343 根,隔离桩深入区间隧道底部以下 3 m,位于左右线盾构隧道中间。盾构隧道穿越区域主要地层从上往下依次为素填土、杂填土、砾石(稍密)、砾质黏性土(硬塑)、砾质黏性土(坚硬)、全、强、中风、微风化花岗岩。小净距隔离桩在隧道上 4.5 m,下 3.0 m,采用 GFRP 筋,剩余采用素桩。盾构隧道剖面如图 1 所示。

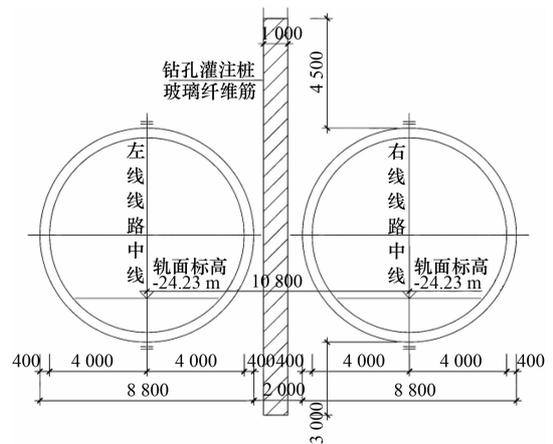


图1 小净距盾构隧道与隔离桩位置关系 mm

## 2 数值模拟及工况建立

### 2.1 模型建立及基本假定

三维数值分析模型尺寸为 560 m × 400 m × 97.3 m,总网格数量为 654 971 个,岩土体及盾构隧道衬砌采用六面体实体单元,隔离桩采用桩结构单元。由于岩土层起伏较大,通过地质钻孔数据插值划分地层,能如实反映实际地形,计算模型如图 2 所示。

采用有限元软件 FLAC<sup>3D</sup> 建立数值模型进行计算,岩土体的本构模型采用摩尔库伦模型,并作

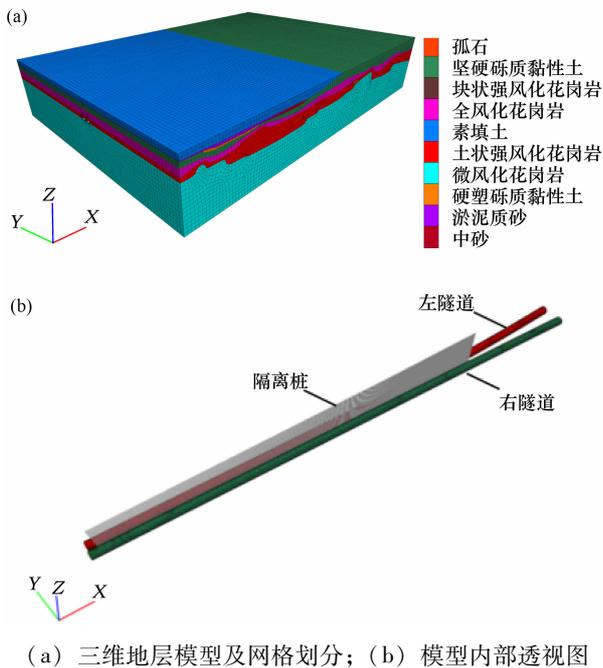


图 2 三维数值计算模型

出假设如下。

(1) 考虑土体的分层,且土体为各向同性的连续介质。

(2) 模型采用地层-结构模型进行计算,选取大于计算结构对象尺寸 3 倍洞径以上的建模范围。

(3) 在模型侧面及底面分别施加法向方向的位移约束,地表为自由面。

(4) 土质大多为黏土和岩层,孔隙水流动性差且假设衬砌为不透水,本次模拟分析中不考虑地下水渗流作用,土体采用饱和重度。

(5) 盾构隧道衬砌采用实体单元,衬砌与周边土体密贴,变形协调一致。

各岩土层及结构单元参数依据勘察报告及相关工程经验确定,岩土层的弹性模量取值为 3 倍的压缩模量,具体材料参数如表 1、2 所示。

## 2.2 计算工况

项目采用桩长为深入盾构隧道底面以下 3 m(孔深为 34.587~39.677 m)、直径为 1.0 m、桩间距为 1.2 m 的隔离桩,共 343 根。为分析不同桩长、直径、桩间距的隔离桩对小净距盾构隧道施工的保护作用,在原设计参数的基础上进行单变量分析,结合实际工程经验设置相应的取值范围,其他因素参数保持不变,各因素的取值范围如下:1) 隔离桩的深度取值范围为与盾构隧道顶部以上 2 m 到盾构

表 1 土层材料参数

土层	容重/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/MPa	黏聚 力/kPa	摩擦 角/ $^{\circ}$
素填土	18.5	9.90	10.0	12.0
淤泥质砂(松散)	19.3	18.36	42.9	14.8
中砂	19.0	15.00	0	23.0
硬塑砾质黏性土	18.6	22.00	22.0	20.0
坚硬砾质黏性土	18.6	28.00	24.0	22.0
全风化花岗岩	18.9	40.00	26.0	24.0
土状强风化花岗岩	18.8	80.00	28.0	26.0
块状强风化花岗岩	22.0	120.00	32.0	35.0
中等风化花岗岩	26.5	2 500.00	1 000.0	40.0
微风化花岗岩	26.5	5 500.00	2 000.0	42.0
盾构隧道衬砌 C35	2 500.0	33 000.00	—	—

表 2 结构材料参数

名称	容重/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/GPa	泊松比	直径/m
隔离桩	2 500	33 500	0.25	1.0

隧道底面 8 m 之间,每隔 2 m 设置一个样本,共 9 个样本;2) 隔离桩的直径取值范围为 0.6~1.2 m,每隔 0.1 m 设置一个样本,共 7 个样本;3) 隔离桩的桩间距分别取值为 1.0、1.1、1.2、1.3、1.5、1.7、2.0、2.5、3.0、5.0、7.0、10.0 m,共 12 个样本。

在数值分析过程中,结合现场实际施工工序,计算工况及步骤详情如下。

(1) 根据地质钻孔数据,采用 Rhino7 三维建模软件与 Griddle 插件建立三维数值模型及网格,将网格文件导入有限元软件 FLAC<sup>3D</sup>。随后,划分岩土层,赋予各岩土层摩尔库伦本构模型及参数。设置边界条件,将三维模型上表面设定为自由面,将模型其他表面的法向方向位移固定为 0,进行初始地应力平衡。

(2) 导入隔离桩 pile 单元,设置隔离桩参数,计算平衡后对岩土体及隔离桩单元的位移、状态清零,以忽略隔离桩施工对周边岩土的影响。

(3) 先施工左盾构隧道,赋予左盾构隧道衬砌线弹性本构模型及 C35 材料属性,通过生死单元法开挖左盾构隧道内部岩土体。

(4) 后施工右盾构隧道,赋予右盾构隧道衬砌线弹性本构模型及 C35 材料属性,通过生死单元法开挖右盾构隧道内部岩土体。

(5) 修改中步骤(2)中隔离桩参数或重新导入不同桩长的隔离桩单元, 重复步骤(3)、(4), 研究不同桩长、直径、桩间距的隔离桩对小净距盾构隧道施工的保护作用。

### 3 计算结果分析

#### 3.1 不同隔离桩深度

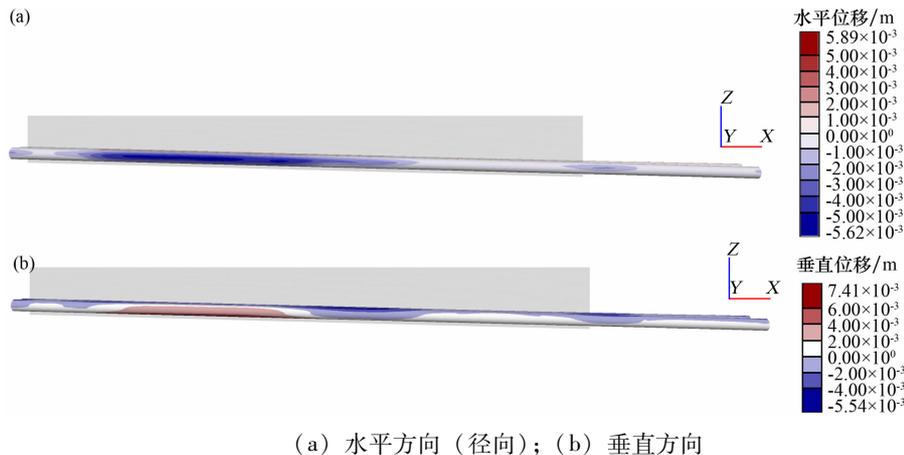
选取不采用隔离桩进行支护的工况作为参照样本, 其计算得到的最大水平位移为 5.795 mm, 最大垂直位移为 10.532 mm, 变形方向为向隧道内部移动。按照原设计方案, 隔离桩的深度为盾构隧道底部以下 3 m 时, 即盾构隧道顶部高程与隔离桩桩顶高程差为 12 m。如图 3 所示, 施工隔离桩时, 在双线盾构隧道开挖完成后的盾构隧道最大水平位移为 5.890 mm, 增加了 1.64%, 主要位于盾构隧道截面中部; 最大垂直位移为 7.413 mm, 减少了 29.62%, 分别位于盾构隧道截面底部和顶部。可知, 隔离桩能够有效减少了小净距并行盾构隧

道中的最大垂直位移, 对最大水平位移影响很小。

不同隔离桩深度下的小净距盾构隧道的最大水平位移和最大垂直位移如图 4 所示。设盾构隧道顶部高程与隔离桩桩顶高程差值为  $l$ 。当  $l$  取值为  $-2 \sim 14$  m 时, 盾构隧道最大水平位移  $w_y$  在 5.76 ~ 6.41 mm 之间, 最大垂直位移  $w_z$  在 7.08 ~ 10.43 mm 之间。盾构隧道最大水平位移  $w_y$  与  $l$  近似呈线性减少关系, 得到拟合方程式(1); 当  $l \leq 0$  m 时, 隔离桩对控制小净距盾构隧道施工中产生的最大垂直位移作用很小; 当  $l > 0$  m 时, 盾构隧道最大垂直位移  $w_z$  与  $l$  近似呈负指数关系而非线性关系, 得到拟合方程式(2)。当隔离桩的深度为盾构隧道底部以下 3 m 时( $l = 11.8$  m), 继续增加隔离桩的长度对减少盾构隧道的位移作用不大。

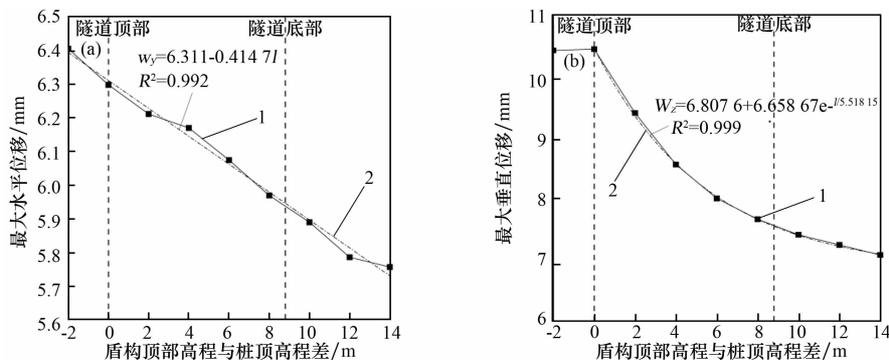
$$w_y = 6.611 - 0.4147l, R^2 = 0.992 \quad (1)$$

$$w_z = 6.8076 + 6.65867e^{-l/5.51815}, R^2 = 0.999 \quad (2)$$



(a) 水平方向 (径向); (b) 垂直方向

图 3 小净距并行盾构隧道施工完成后位移云图



(a) 水平方向; (b) 垂直方向

1—数值分析结果; 2—拟合曲线。

图 4 不同隔离桩深度下的盾构最大位移

### 3.2 不同隔离桩直径

不同隔离桩直径下的小净距盾构隧道的最大水平位移  $w_y$  和最大垂直位移  $w_z$  如图 5 所示。当隔离桩直径取值为 0.6 ~ 1.2 m 时, 盾构最大水平位移  $w_y$  在 5.66 ~ 6.01 mm 之间, 最大垂直位移  $w_z$  在 7.20 ~ 9.19 mm 之间。盾构隧道最大水平位移  $w_y$  与隔离桩桩径  $d$  呈线性增长关系, 但增长幅度很小, 得到拟合方程式(3); 盾构隧道最大垂直位移  $w_z$  与隔离桩桩径  $d$  呈非线性减小关系, 得到拟合方程式(4)。当隔离桩桩径大于 1.0 m 时, 对盾构隧道最大垂直位移作用较少。隔离桩桩径大于 1.0 m 时对盾构隧道最大垂直位移作用相对较大。可知, 采用 1 m 的隔离桩直径是较为合适的。

$$w_y = 5.304 1 + 0.584 9 d, R^2 = 0.999 \quad (3)$$

$$w_z = -21.428 + 144.322 7 d - 240.588 3 d^2 + 166.738 9 d^3 - 41.483 3 d^4, R^2 = 0.994 \quad (4)$$

### 3.3 不同隔离桩桩间距

不同隔离桩桩间距下的小净距盾构隧道的最

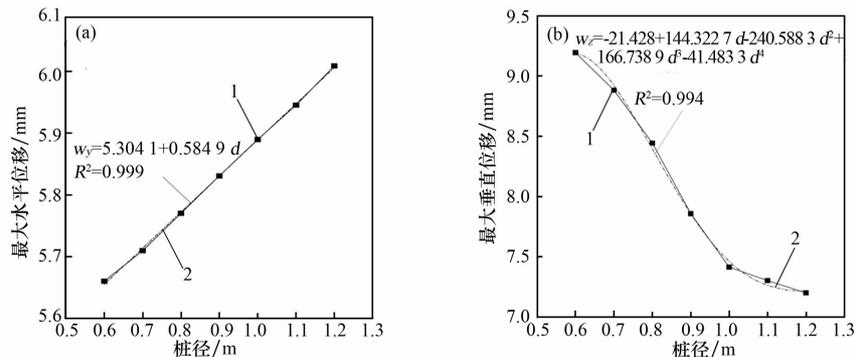
大水平位移  $w_y$  和最大垂直位移  $w_z$  如图 6 所示。当桩间距  $u$  取值为 1.0 ~ 10.0 m 时, 盾构最大水平位移  $w_y$  在 5.60 ~ 5.95 mm 之间, 最大垂直位移  $w_z$  在 7.14 ~ 7.59 mm 之间。盾构最大水平位移  $w_y$ 、最大垂直位移  $w_z$  与桩间距  $u$  均呈非线性关系, 随桩间距  $u$  的不断增大而先下降后略有增长, 分别在 2.5 m 和 7 m 达到了最小值, 得到拟合方程式(5)、(6)。桩间距  $u$  对盾构隧道的位移影响相对较小, 因此, 建议可适当加大隔离桩桩间距以减少实际工程费用。

$$w_y = (7.039 3 + 9.254 7 u) / (1 + 1.744 5 u - 0.006 31 u^2), R^2 = 0.991 \quad (5)$$

$$w_z = \begin{cases} 8.567 7 - 1.210 5 u + 0.235 3 u^2, u \leq 3 \\ R^2 = 0.985 \\ 7.011 5 + 0.135 4 u, u > 3, R^2 = 0.971 \end{cases} \quad (6)$$

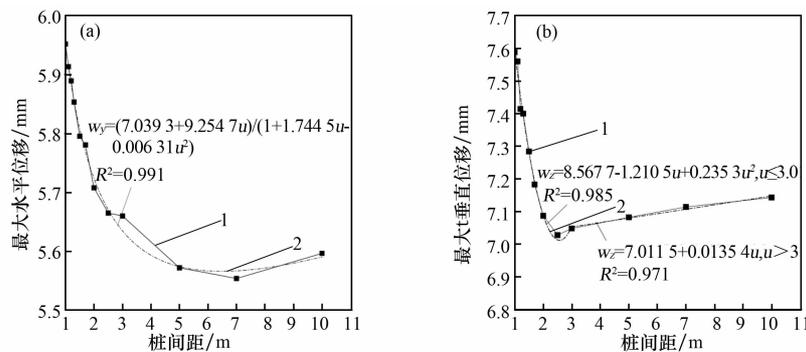
### 3.4 隔离桩轴力分析

隔离桩深度为盾构底部以下 3 m、直径 1.0 m、



(a) 水平方向; (b) 垂直方向  
1—数值分析结果; 2—拟合曲线。

图 5 不同隔离桩桩径下的盾构最大位移



(a) 水平方向; (b) 垂直方向  
1—数值分析结果; 2—拟合曲线。

图 6 不同隔离桩桩间距下的盾构最大位移

桩间距 1.2 m 时, 隔离桩的轴力如图 7 所示。隔离桩最大轴力为 7 272 kN。隔离桩轴力沿深度方向呈先增后减趋势, 结合图 3 中盾构隧道位移云图可知, 隔离桩轴力较大位置主要位于盾构隧道的深度范围内, 在盾构隧道底部隆起较大的区段, 隔离桩轴力相对较小。同一深度下的隔离桩轴力变化梯度较大位置, 亦是盾构隧道在垂直方向上的位移梯度较大位置。隔离桩轴力与盾构隧道垂直方向的位移密切相关。

#### 4 复合地层下的盾构隧道施工措施

盾构隧道穿越的地层情况如图 8 所示, 变形大小与盾构隧道穿越的地层密切相关。盾构隧道主要穿越地层为土状强风化花岗岩、微风化花岗岩, 局部存在全风化花岗岩或孤石。盾构隧道变形较大位置主要位于穿越土状强风化花岗岩的区段, 这是由于该区段的土状强风化花岗岩地层的刚度相对较低, 并且隔离桩未嵌入微风化花岗岩地层或嵌入深度较小。此外, 盾构隧道穿越了上软下硬的复合地层, 上部较软土状强风化地层自稳定性较差, 遇水易崩解, 属于 V 级围岩, 容易被刀盘切削进入土仓, 但下部较硬地层不易被刀盘破碎。上软下硬的复合地层容易造成盾构隧道姿态偏移、管片上浮、管片破损等情况, 应在施工过程中应引起重视, 根据实际情况可合理选用以下措施加强控制。

(1) 合理选择盾构机配置, 如超前地质预报系统、同步双液注浆系统等。超前地质预报系统能提前判断刀盘前方的地质情况, 提前判断软弱

层、断裂层、孔洞等不良地质, 为后续施工提供数据支撑, 提前选择合理的掘进参数、注浆工艺等控制措施。同步双液注浆系统能有效减少在岩层掘进过程中的管片上浮、错台现象。

(2) 采取掘进控制措施, 包括盾构机姿态、掘进速度、油缸压力、掘进参数、泥浆质量、管片拼装等的控制。盾构机姿态应不急纠、不猛纠, 每环纠偏量应控制在 4 ~ 6 mm。油缸压力采取“上大下小”的设定, 逐步减少盾构机与设计轴线的偏差。同步注浆(衬背注浆)的质量是解决管片上浮问题的关键措施之一, 浆液应具有充填性、和易性、早凝、收缩率小等特性。

(3) 其他控制措施, 如做好各项工序验收、盾构螺栓紧固连接、二次注浆及同步注浆密实性检查、上浮严重区域堆放重块等控制措施。如盾构隧道管片材料、吊运安装、曲线段管片选型, 以及同步注浆浆液、盾构推力和扭矩等参数设置, 这些环节都应进行严格验收。盾构隧道管片的连接螺栓应进行二次复紧或者在必要时进行三次复紧, 以保障盾构隧道管片的连接紧密, 减少变形引起的错台现象。二次注浆及同步注浆密实性检查可以防止由于盾构隧道因为围岩应力和地下水的变化造成的盾构隧道变形。在上浮严重的区段可以在不影响通行的前提下置放适当数量的重块, 太重也会引起盾构隧道下沉。

#### 5 结 论

本文以深圳某新建小净距并行盾构隧道为依托, 采用有限元软件 FLAC<sup>3D</sup> 建立数值分析模型,

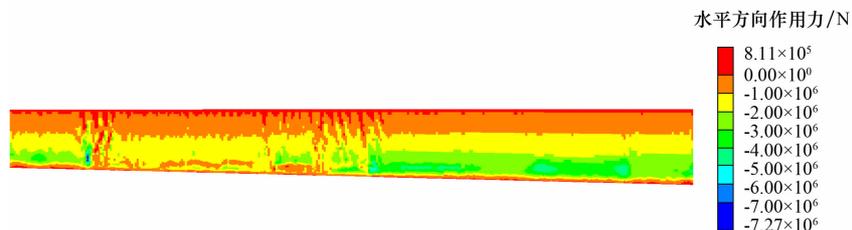


图 7 隔离桩轴力云图

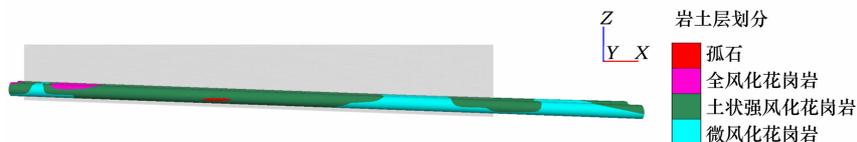


图 8 盾构穿越地层情况

分析隔离桩对复合地层小净距盾构隧道的变形机理及保护效果,提出在复合地层中的盾构施工建议,得出结论如下。

(1) 对是否采用隔离桩时盾构隧道的变形进行对比,隔离桩能够有效减少盾构隧道的垂直位移,对水平位移影响较小,隔离桩底部需要穿越盾构顶部才起作用。

(2) 对隔离桩的桩长、直径、桩间距进行敏感性分析,盾构隧道的最大垂直位移与隔离桩桩长近似呈负指数关系,与隔离桩桩径呈非线性减小关系,与隔离桩桩间距呈非线性关系。

(3) 本项目隔离桩桩径取为 1 m 是合理的,继续增加隔离桩桩径对盾构隧道的垂直位移影响较少,并建议适当加大隔离桩桩间距以减少工程费用。

#### 参考文献:

- [1] 姚爱军,郭彦非,郭海峰,等. 盾构隧道邻域基坑施工下桩隔离效果研究[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(4):1212-1224.
- [2] 郑刚,杜一鸣,刁钰. 隔离桩对基坑外既有隧道变形控制的优化分析[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(增刊1):3499-3509.
- [3] 王顺祥. 非平衡开挖下隔离桩性能分析[J]. 工程建设,2023,55(3):18-24.
- [4] 曾晓鑫,丁文湘,彭玲,等. 深基坑开挖时隔离桩位置对邻近既有地铁隧道的变形分析[J]. 科学技术与工程,2017,17(14):296-301.
- [5] 杨冰. 紧邻深基坑管廊变形影响及隔离方案研究[J]. 工程建设,2020,52(2):58-61.
- [6] 周敏. 深大基坑隔离桩桩径对相邻既有地下结构的影响分析[J]. 现代交通技术,2024,21(2):79-84.
- [7] 杜明芳,李贞贞,陈家豪,等. 小半径隧道盾构施工对铁路桥梁的影响[J]. 工程建设,2024,56(3):28-33.
- [8] 梁宇. 三线小净距并行隧道施工影响研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(9):53-58.
- [9] 宁波. 高水位小净距暗挖隧道注浆加固及快速施工关键技术[J]. 施工技术(中英文),2023,52(16):38-42.
- [10] 李然. 深埋三孔小净距隧道施工力学行为及其控制[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(6):1560.

---

#### 本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国-知识产权服务平台等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。