

文章编号: 1007-2993(2025)01-0063-09

# 地铁盾构隧道超小净距地段中隔墙加固效果分析

魏康林<sup>1</sup> 朱禹<sup>1</sup> 罗业华<sup>2</sup> 严晓周<sup>1</sup> 胥岚月<sup>3</sup> 李洪斌<sup>2</sup> 曾勇<sup>3</sup>

(1. 广州地铁集团有限公司, 广东广州 510300; 2. 中交四航局第二工程有限公司, 广东广州 510220; 3. 西南交通大学  
土木工程学院, 四川成都 610031)

**【摘要】** 为了探明地铁盾构隧道超小净距地段中隔墙加固效果, 依托广州地铁 12 号线大学城南停车场出入场线工程, 利用 FLAC 3D 软件建立盾构隧道施工仿真模型, 分析未加固与中隔墙加固情况下超小净距盾构隧道施工对周边岩土体及先修隧道的影 响规律。结果表明: 随着盾构开挖深度的增加, 地表沉降、土体水平位移、先修隧道管片变形均有明显增大, 中岩柱稳定性降低; 采用中隔墙加固措施效果显著, 与未加固时相比, 工程开挖至 19 环时, 地表沉降与土体水平位移最大值分别降低 31.1%、70%, 先行隧道管片横向扩张与竖向变形最大值分别降低 56.8%、73.5%, 中岩柱稳定性明显提高, 故在超小净距地段采用中隔墙可以起到良好的加固作用。

**【关键词】** 中隔墙; 超小净距; 盾构隧道; 土体位移; 管片变形; 中岩柱稳定性

**【中图分类号】** U455.43

**【文献标识码】** A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2023-0801

## Reinforcement effect of middle partition wall in ultra-small spacing section of subway shield tunnel

Wei Kanglin<sup>1</sup> Zhu Yu<sup>1</sup> Luo Yehua<sup>2</sup> Yan Xiaozhou<sup>1</sup> Xu Lanyue<sup>3</sup> Li Hongbin<sup>2</sup> Zeng Yong<sup>3</sup>

(1. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou 510300, Guangdong, China; 2. The Second Engineering Company of CCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510220, Guangdong, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**【Abstract】** To explore the reinforcement effect of the middle partition wall in the ultra-small spacing section of the subway shield tunnel, based on the entrance and exit line project of the south parking lot of Guangzhou Metro Line 12, the FLAC 3D software was used to establish the simulation model of the shield tunnel construction, and to analyze the influence law of the ultra-small spacing shield tunnel construction on the surrounding rock and soil mass and the pre-built tunnel under the condition of unreinforced and middle partition wall reinforcement. The results show that with the increase of shield excavation depth, the surface settlement, the horizontal displacement of soil and the deformation of the tunnel segment were obviously increased, and the stability of the middle rock column was reduced. The reinforcement effect of the middle partition wall was remarkable. Compared with the unreinforced condition, when the project was excavated to the 19th ring, the maximum surface settlement and horizontal displacement of the soil were reduced by 31.1% and 70%, respectively. The maximum lateral expansion and vertical deformation of the first tunnel segment were reduced by 56.8% and 73.5%, respectively. The stability of the middle rock column was obviously improved. Therefore, the middle partition wall can play a good reinforcement effect in the ultra-small clear distance section.

**【Key words】** middle partition wall; ultra-small spacing; shield tunnel; soil displacement; segment deformation; stability of middle rock column

### 0 引言

城市发展使建筑及地下隧道增多, 利用地下空间时限制越来越大, 新建隧道也不可避免地受到地下空间的制约。尤其在城市核心地段地铁采用并行盾

构隧道时, 采用的净距有时小于规范要求, 导致施工安全风险大大增加。因此, 为保证并行小净距盾构隧道施工安全, 需要采用有效的加固措施以控制隧道施工变形。

基金项目: 四川省自然科学基金项目(2022NSFSC1153); 中交第四航务工程局有限公司委托课题(2022-019)

作者简介: 魏康林, 男, 1977 年生, 硕士, 教授级高级工程师。研究方向: 岩土工程。E-mail: weikanglin@gzmttr.com

通信作者: 曾勇, 男, 1978 年生, 博士, 副教授。研究方向: 道路与铁道工程。E-mail: zengy@swjtu.edu.cn

针对小净距盾构隧道施工加固措施,学者们进行了大量研究。崔光耀等<sup>[1]</sup>采取管棚管幕预加固措施,利用FLAC 3D软件分析出该措施能有效控制路面沉降与既有线隧道变形。宋高锐等<sup>[2]</sup>分析了在帷幕注浆条件下后修隧道开挖对先修隧道管片的影响。李宗<sup>[3]</sup>通过对软土地层进行注浆加固控制后修隧道施工引起先修隧道的变形。Zheng等<sup>[4]</sup>通过地质力学模型试验和数值分析,研究了不对称紧密间距平行隧道之间中间土柱的力学特性,结果表明,中间土柱的稳定性被认为是确保不对称平行隧道施工过程中安全的关键因素。刘庆丰等<sup>[5]</sup>、何川等<sup>[6]</sup>研究表明,新建盾构隧道施工对已建隧道产生的影响主要集中于邻近新建隧道侧的拱腰附近。戴俊等<sup>[7]</sup>通过室内试验与数值分析等方法,得出两隧洞中岩柱是小净距隧道开挖受力最为薄弱的部位,因而保证小净距隧道中岩柱的稳定是小净距隧道设计、施工的关键。姚勇等<sup>[8]</sup>研究了注浆、预应力锚杆等不同加固措施对小净距隧道中岩柱受力变形的影响。扈萍等<sup>[9]</sup>通过数值模拟分析了在隧道中间打设钻孔灌注桩与帷幕注浆两种加固措施的变形控制效果,结果表明打设钻孔灌注桩效果更好。

相较上述加固措施,中隔墙施工简单、施工时间较短、适用范围广、可以有效分散土体荷载,在连拱隧道<sup>[10-11]</sup>、大直径盾构隧道<sup>[12]</sup>中均有应用,但在并行超小净距盾构隧道中很少应用。杜平阳<sup>[13]</sup>在左右线路外轮廓净距仅1.3~2 m条件下,在两隧道间施作20 m的600 mm厚的C30中隔墙,但没有对中隔墙加固效果进行研究。赵乙丁等<sup>[14]</sup>为降低后修隧道施工对先修隧道的影响,采用“隔断墙+水泥土搅拌桩”预加固措施,并分析了此组合措施的加固效果,未研究仅采用隔断墙措施时所能发挥的作用。

综上所述,目前对盾构隧道超小净距地段中隔墙加固相关问题的研究较少,对中隔墙加固能力的认识不够深入,无法为中隔墙设计与施工提供有效指导。因此,依托广州地铁12号线大学城南停车场出入场线工程,采用FLAC 3D软件建立盾构隧道施工三维数值分析模型,对比研究未加固与采用中隔墙加固两种条件下,超小净距地段盾构隧道施工对地表沉降、土体水平位移、中岩柱稳定性以及先修隧道变形的影响规律,并在此基础上分析中隔墙的加固效果,为现场施工提供理论指导。

## 1 工程概况

### 1.1 基本概况

广州地铁12号线大学城南停车场出入场线设计为并行盾构隧道,采用抗渗等级为P12的预制钢筋混凝土管片,管片内径为5800 mm,外径为6400 mm,厚度为300 mm,区间幅宽为1500 mm,混凝土为C50高强混凝土。新线并行段隧道最小净距仅为1.88 m,小于规范限制的最小间距,属于超小净距。区间采用一台复合式土压平衡盾构机施工,施工时先开挖左线隧道,后开挖右线隧道。盾构隧道穿越地层为上软下硬地层,隧道位置关系及地层分布情况见图1,其中左线出场线隧道,右线为入场线隧道。各地层物理力学参数见表1。

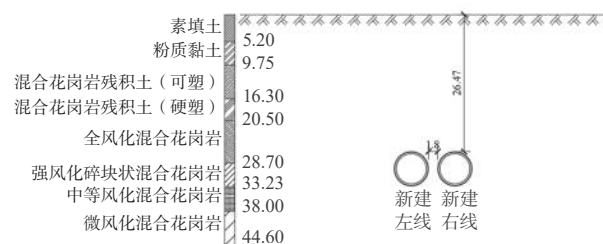


图1 盾构隧道位置及地层分布(单位:m)

表1 岩土物理力学参数

土层名称	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比
素填土	1900	21.0	13.5	8	0.34
粉质黏土	1910	26.9	15.8	18	0.32
混合花岗岩残积土(可塑)	1840	23.7	16.6	25.3	0.30
混合花岗岩残积土(硬塑)	1860	25.5	18.8	41.4	0.29
全风化混合花岗岩	1840	28.3	22.2	80.0	0.28
强风化碎块状混合花岗岩	2150	60.0	30.0	360	0.28
中等风化混合花岗岩	2330	200.0	42.0	1200	0.29
微风化混合花岗岩	2600	500.0	48.0	5000	0.29

### 1.2 中隔墙加固措施

为保证地铁盾构超小净距段的施工安全,在左

右线隧道间设置中隔墙(见图2)。中隔墙厚度为600 mm,墙底进入中等风化混合花岗岩层0.5 m,墙顶位

于地面下 2 m。采用中隔墙可以将左右线土体分离开来,减小左右线施工时的互相影响,尤其是减小后建隧道对先建隧道的扰动。中隔墙采用混凝土咬合桩形式,旋挖钻成孔后灌注素混凝土。

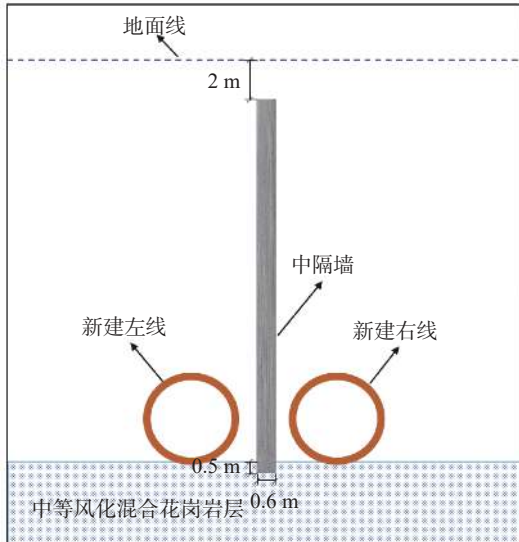


图 2 中隔墙剖面示意图

## 2 计算模型的建立及参数的确定

### 2.1 有关假设与工况设置

本文主要研究盾构隧道在超小净距条件下中隔墙在盾构开挖过程中的加固效果,为简化模型,提高计算效率,作如下假设:①岩土体为各向同性材料,呈水平均匀分布,且岩土体中间没有节理和裂隙;②将不连续的盾构管片设置为等效匀质圆环;③不考虑孔隙水的渗流作用。

分析时主要考虑不加固和采用中隔墙加固两种情况,同时在盾构开挖的第 4 环、第 7 环、第 10 环、第 13 环、第 16 环、第 19 环中点处所在 6 个断面设置监测点(见图 3),监测项目主要为地表沉降、隧道夹土层横向水平位移、隧道中岩柱位移变形及先修隧道管片变形。

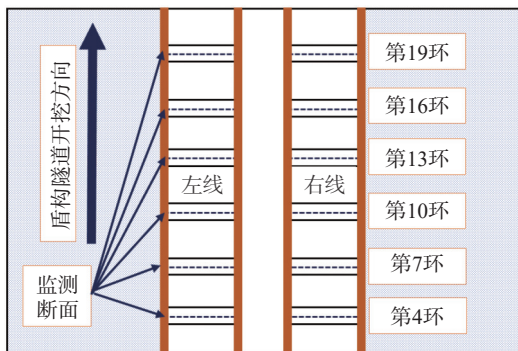


图 3 监测断面位置示意图

### 2.2 模型参数

计算模型尺寸为 80 m(长)×30 m(宽)×45 m(高),根据工程设计资料,将中隔墙尺寸设置为 0.6 m(长)×30 m(宽)×31.7 m(高),材料为素混凝土,盾构机土仓压力为 0.1~0.2 MPa,管片外围注浆压力为 0.3 MPa。考虑注浆材料的时间效应,将盾尾两环中的注浆材料弹性模量设置为最终值的 20%,两环后恢复为最大值。在进行计算时,将中隔墙、管片、注浆材料、盾壳考虑为弹性模型,土体采用 Mohr-Coulomb 模型。各材料物理力学参数见表 2。

表 2 材料物理力学参数

材料	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/MPa	泊松比
中隔墙	2400	$2.55 \times 10^4$	0.2
管片	2500	$3.45 \times 10^4$	0.3
注浆材料	硬化前	1.20	0.3
	硬化后	6.00	0.4
盾壳	7850	$2 \times 10^5$	0.3

### 2.3 超小净距并行盾构隧道开挖模型建立

采用 FLAC 3D 软件建立隧道施工三维数值仿真模型(见图 4),分析在超小净距条件下中隔墙对隧道开挖的影响。模型侧面、底面约束法向位移,上表面为自由边界。在模型计算时,除土仓压力与管片外围注浆压力外,只考虑隧道与土体自重作用,盾构施工荷载见图 5。

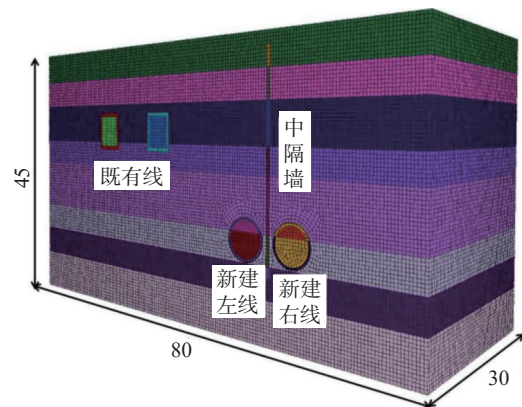


图 4 盾构隧道施工三维数值分析模型(单位:m)

根据盾构隧道实际施工过程进行数值模拟,主要包括地应力平衡和盾构掘进两个阶段。以 1 环幅宽 1.5 m 的管片为一个步距,左线隧道先行掘进结束后,右线隧道开始掘进,直至完全贯通。隧道掘进过程如下:

先开挖一环土体,同时激活这一环盾壳单元,并移除施加于开挖面上的土仓压力,激活下一环土体开

挖面上的土仓压力,重复上述步骤,在开挖6环后,9 m的盾壳单元已经全部激活,接着开挖一环土体,移除施加于开挖面上的土仓压力,激活下一环土体开挖面上的土仓压力,盾壳单元随着开挖向前移动,激活盾尾一环的注浆层(硬化前)单元及管片单元,同时在盾尾两环洞壁土层内表面及管片环外表面施加注浆压力,并移除上一步施加的注浆压力。考虑注浆材料的时间效应,将盾尾两环中的注浆材料弹性模量设置为硬化前的强度,两环后的注浆材料强度设置为硬化后的强度值。

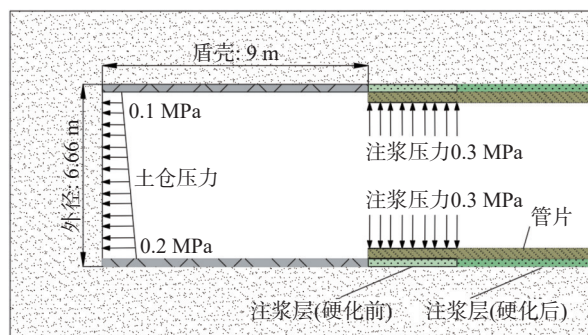


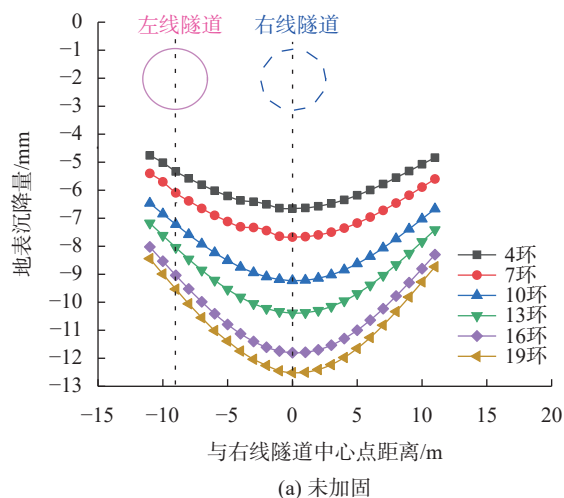
图5 盾构施工荷载

### 3 加固效果分析

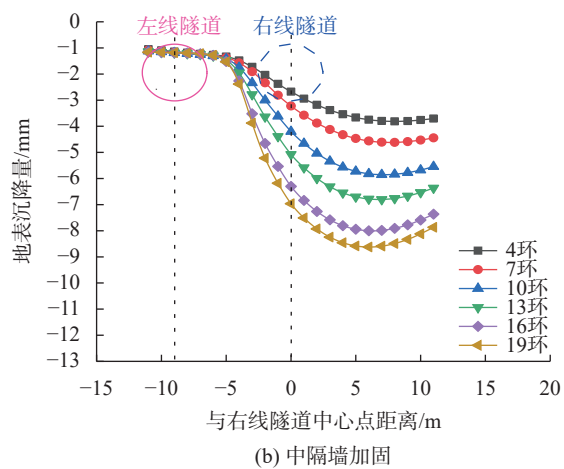
分析时,中隔墙加固效果主要采用地表沉降、中岩柱稳定性、土体水平位移和先修隧道管片位移等指标进行度量。

#### 3.1 地表沉降分析

盾构施工会对周围的土层进行较大幅度的变形和挤压作用,可用地表沉降与隆起表示盾构施工对土层的扰动情况<sup>[14]</sup>。以右线隧道中心线正上方地表对应点为中线,左右每隔1 m取1个点,各取11个点,提取施工完成后特征断面的地表沉降值,沉降曲线见图6。由图6可知,在未加固的情况下,右线(后行)隧道开挖时,其两侧的土体发生了相似的不均匀变形,地表沉降曲线在右线隧道中轴线两侧呈对称分布,地表最大沉降值在右线隧道中轴线处;随着环数增加,地表沉降值也随之增大,从第4环开始,各环地表沉降最大沉降值分别为6.66, 7.67, 9.23, 10.38, 11.80, 12.52 mm,开挖至第19环时达到最大;在加设中隔墙的情况下,中隔墙起到了较好的阻止土体变形的作用,两隧道之间地表土体沉降明显降低,地表最大沉降位置向右偏移6 m左右,且随着开挖环数增加,沉降值也随之降低,从第4环开始,各环地表最大沉降值下降为3.82, 4.62, 5.85, 6.80, 7.99, 8.62 mm,分别降低了42.64%, 39.77%, 36.62%, 34.49%, 32.29%, 31.15%。



(a) 未加固



(b) 中隔墙加固

图6 地表沉降曲线

#### 3.2 土体水平位移分析

为了分析中隔墙加固措施对超小净距并行隧道夹土层横向水平位移的影响,在6个监测断面均设置多个监测点,监测点位均设在两隧道中隔墙左侧边缘不同深度(见图7)。从地表开始,在深度方向每隔2 m设置1个监测点,共设有23个监测点。利用计算得到的隧道施工过程中各特征断面土体水平位移,绘制水平位移曲线(见图8)。

如图8所示,无论未加固还是加设中隔墙,超小净距并行隧道在开挖过程中监测点处土体水平位移呈现大致相同的变化趋势,其横向水平位移大多先缓慢减小,后迅速增大,在埋深26 m处达到最大,后又逐渐减小趋近于0。在未加固时,随着开挖环数增加,土体水平位移也随之增大,在第19环处土体水平位移值达到最大,其值为24.76 mm。

加设中隔墙后,中隔墙可在一定程度上分担原来由土体承受的荷载,从而减轻了土体的负荷,降低了土体的变形,但由于中隔墙并未直达地面,上方仍然有2 m土体,使得上层土体水平位移值降低幅度

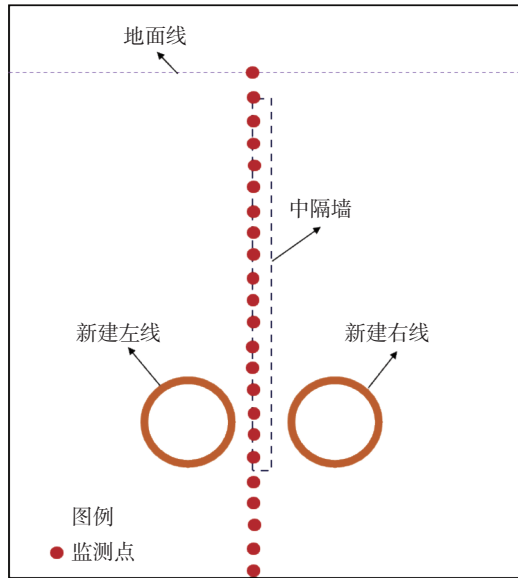
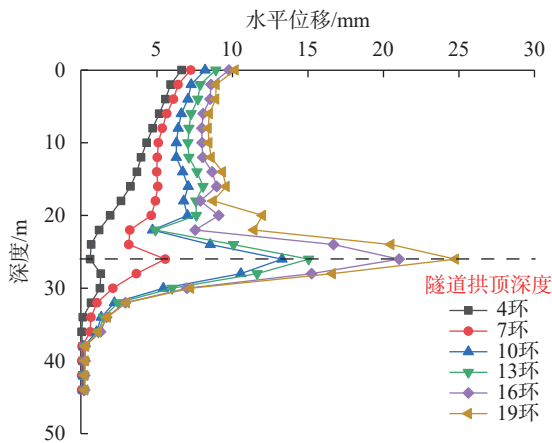
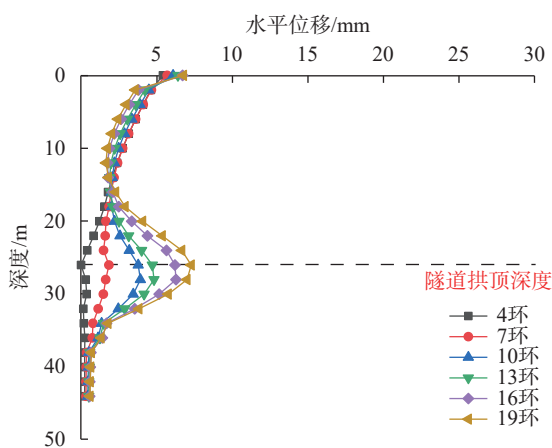


图7 土体水平位移监测点位布设



(a) 未加固



(b) 中隔墙加固

图8 土体水平位移

低于中层土体, 土体水平位移曲线呈现先逐渐减小, 在埋深 7~9 m 达到最小值, 后逐渐增大, 在埋深 26~28 m 处达到最大; 且随着环数增加, 土体水平位移也随之增大, 在第 19 环埋深 26 m 处土体水平位

移最大, 最大值降为 7.31 mm, 与未加固时相比, 降低了 70.5%。

### 3.3 中岩柱稳定性分析

为了分析中隔墙加固措施对超小净距并行隧道中岩柱稳定性的影响, 在 6 个监测断面分别设置监测点位 N1—N5, 监测点布置见图 9。提取隧道开挖施工过程中计算得到的监测点位横向、竖向位移, 将两个工况横向、竖向位移进行对比, 如表 3、表 4 所示, 表 3 中数值正、负分别表示测点位移水平向右、水平向左, 表 4 中数值正、负分别表示测点位移竖直向上、竖直向下。

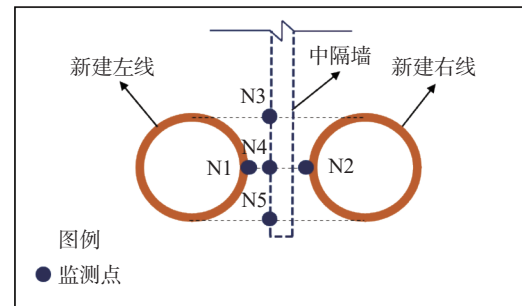


图9 中岩柱监测点位布设

由表 3、表 4 可知, 在未加固情况下, 中岩柱水平与竖向位移在 N3 点达到最大值, 分别为 24.76 mm 和 82.35 mm, 随着环数的增加, N3—N5 测点水平位移逐渐减小, 但 N3 点竖向位移随之增大; 在加设中隔墙的情况下, N1 与 N5 测点水平位移有小幅增加, 但 N3 点水平与竖向位移均大幅降低, 从第 4 环到第 19 环, N3 点水平位移依次降低了 0.57, 3.69, 9.49, 10.31, 14.79, 17.44 mm, 竖向变形依次降低了 7.64, 27.68, 48.82, 52.77, 63.07, 76.47 mm。

对第 19 环断面各个测点两种工况下的横向与竖向应力进行监测, 绘制 N1—N5 测点横向、竖向应力图, 如图 10—图 11 所示, 其中数值正、负分别表示拉应力、压应力。加设中隔墙后, N3—N5 测点竖向与横向应力均增大, 而 N1 测点应力均有减小, 由此可知中隔墙承担了土体部分应力, 有利于既有左线(先行)隧道的安全。

### 3.4 先行隧道管片变形分析

在后行隧道开挖过程中, 土体的剥离和膨胀可能会致该区域土体的极限状态失稳, 土体引起剪切破坏。这种情况下, 先行隧道周围的土体可能会塌陷, 导致先行隧道结构的破坏。因此, 需要对先修隧道管片变形进行监测, 确保已建隧道的安全。

对管片变形的研究主要考虑竖向收敛值与横向扩张值, 即拱顶与拱腰的绝对变形值之和以及左右拱

表3 N1—N5 测点水平位移

mm

监测断面	加固情况	N1	N2	N3	N4	N5
第4环	未加固	0.52	-0.73	0.58	1.28	0.64
	加固	0.58	-0.29	0.01	0.39	0.17
第7环	未加固	0.53	-0.89	5.55	3.55	1.02
	加固	1.54	-0.48	1.86	1.6	1.15
第10环	未加固	1.77	-0.92	13.29	7.88	2.18
	加固	2.89	-0.58	3.8	3.79	2.48
第13环	未加固	2.37	-0.64	15.05	8.51	2.44
	加固	3.64	-0.46	4.74	4.62	2.92
第16环	未加固	2.95	0	21.03	9.82	2.91
	加固	4.44	0	6.24	5.8	3.57
第19环	未加固	3.24	0	24.76	10.19	2.98
	加固	4.91	0	7.32	6.53	3.85

表4 N1—N5 测点竖向位移

mm

监测断面	加固情况	N1	N2	N3	N4	N5
第4环	未加固	-6.85	-8.93	-13.26	-9.31	-4.32
	加固	-4.48	-5.98	-5.62	-5.58	-5.56
第7环	未加固	-6.91	-8.03	-33.51	-2.28	1.67
	加固	-4.46	-5.60	-5.82	-5.51	-5.25
第10环	未加固	-6.78	-7.63	-54.74	1.13	6.93
	加固	-4.44	-5.33	-5.92	-5.37	-4.94
第13环	未加固	-6.58	-5.10	-58.72	1.74	7.69
	加固	-4.39	-3.59	-5.95	-5.31	-4.84
第16环	未加固	-6.13	-0.15	-68.99	4.72	9.29
	加固	-4.29	-0.12	-5.92	-5.20	-4.69
第19环	未加固	-5.81	-0.13	-82.35	4.20	9.53
	加固	-4.22	-0.08	-5.88	-5.12	-4.61

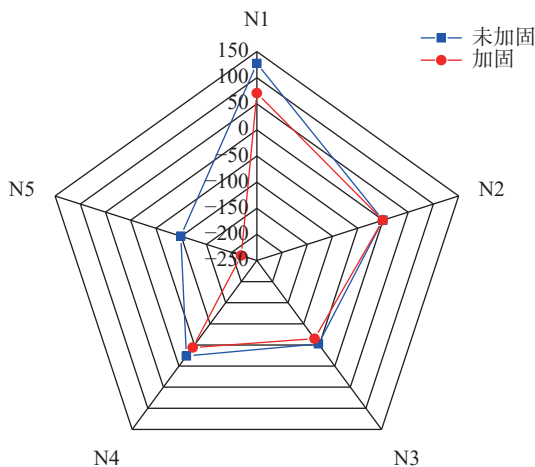


图10 第19环 N1—N5 测点横向应力图(单位:kPa)

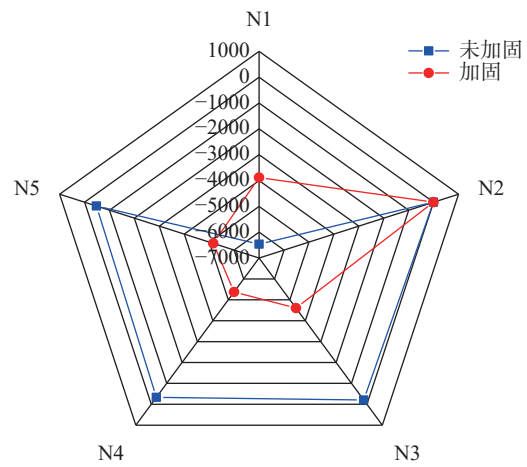


图11 第19环 N1—N5 测点竖向应力图(单位:kPa)

腰的绝对变形值之和<sup>[2]</sup>。为了分析中隔墙加固措施对先修隧道管片变形的影响,在监测断面设置监测点

位 L1—L6(见图 12)。下面主要选取隧道开挖至 4 环和 19 环时先行隧道管片横向与变形结果进行分

析,如图 13、图 14 所示。

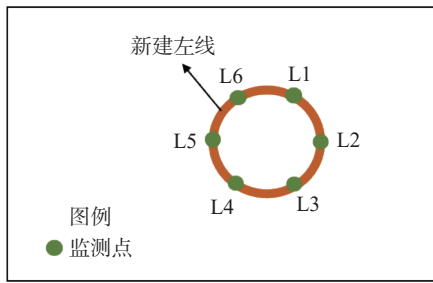


图 12 左线(先行)隧道管片变形监测点位布设

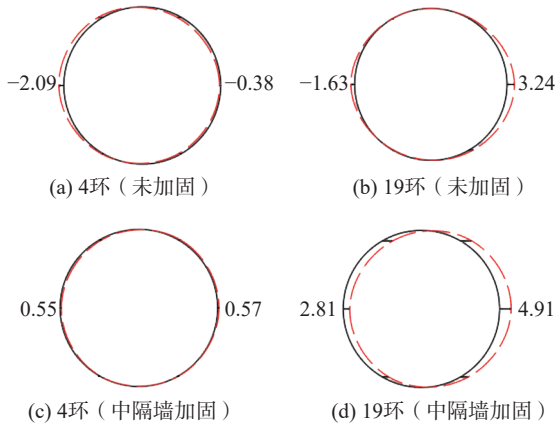


图 13 左线(先行)隧道管片横向变形(单位:mm)

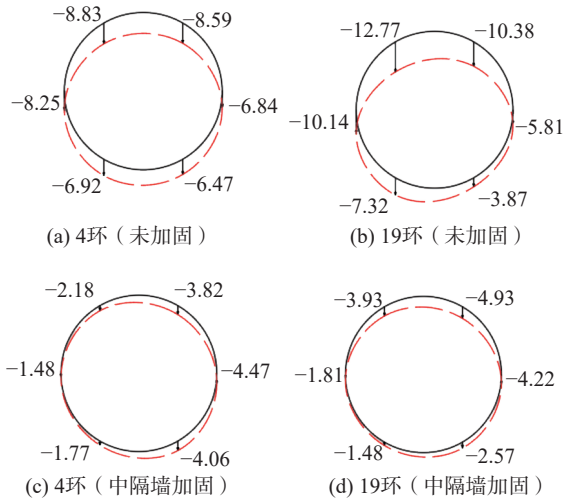


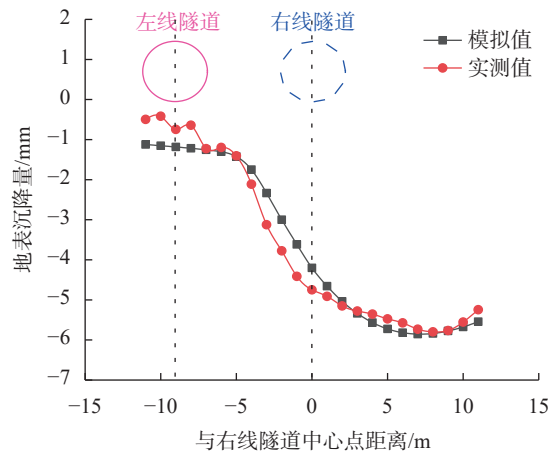
图 14 左线(先行)隧道管片竖向变形(单位:mm)

由图 13、图 14 可知,在未加固情况下,后行隧道开挖时周围土体应力得到释放,先修隧道管片在水平方向呈现扩张趋势,竖直方向呈现收敛趋势,且随着开挖环数增加,横向扩张值与竖向收敛值也随之增大,第 4 环到第 19 环的横向扩张值从 1.71 mm 增大为 4.87 mm,竖向收敛值从 2.36 mm 增大到 8.90 mm。在加中隔墙的情况下,中隔墙承担了部分荷载,先修隧道管片周围土体受到的左向力与未加固情况相比减小,使得先修隧道管片向右位移增大,但横向扩张值与竖向收敛值降低,从第 4 环到第 19 环的横向扩

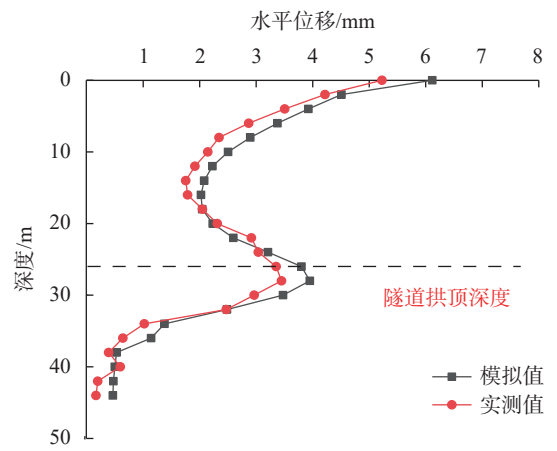
张值依次降低 2.77 mm,竖向收敛值降低 5.45 mm,且竖向最大位移最大处由左拱腰偏上变为右拱腰偏上。

### 3.5 现场监测分析

现场设置的中隔墙沿盾构隧道开挖方向长度为 30 m,起止里程为 CDK0+137—CDK0+167,对中隔墙地表沉降与土体水平位移值进行现场监测,监测点设置与数值模拟时一致。图 15 为隧道开挖至第 10 环时的实测值与模拟值,可知现场监测结果与数值模拟曲线基本一致,地表最大沉降量均在 5~6 mm,土体水平最大位移大致发生在靠近隧道拱顶的 28 m 深度位置。



(a) 地表沉降



(b) 土体水平位移

图 15 模拟值与实测值对比分析

## 4 结论

本文运用 FLAC 3D 软件建立模型,研究了未加固与设置中隔墙情况下超小净距隧道盾构掘进施工对地表沉降、土层横向水平位移、中岩柱稳定性、先修隧道管片变形的影响,分析了中隔墙的加固效果,得到以下结论:

(1) 中隔墙可以有效分担原来由土体承担的部分荷载,减小土体的变形和位移。加设中隔墙后,地表最大沉降位置由拱顶向右存在一定程度的偏移,隧道开挖至第 19 环处的地表沉降最大值降低 31.1%,埋深 26 m 处的土体水平位移最大值降低 70.5%。

(2) 加设中隔墙虽然会使中岩柱 N1 与 N5 测点水平位移有小幅增加,但会使 N3 测点水平与竖向位移均大幅降低,使得中岩柱土体整体位移均在安全范围内。与其他测点相比,测点 N3 处水平与竖向位移值最大,因而建议施工时对两隧道拱顶附近土体位移进行重点监测,以保障施工安全。

(3) 采用中隔墙加固时,后行隧道向前掘进过程中,由于中隔墙承担部分土体挤压荷载,先行隧道所受土体作用减小,管片横向扩张值与竖向收敛值均降低,在隧道开挖至 19 环处时二者分别降低 56.8% 与 73.5%。

(4) 隧道开挖时,土体最大水平、竖向位移与管片最大竖向变形均出现在拱顶附近,施工时应加强此区域监控量测。本研究仅对中隔墙加固效果进行了分析,关于中隔墙尺寸、材料等设计参数优化问题还有待后续深入研究。

#### 参 考 文 献

- [1] 崔光耀,田宇航,肖毅,等. 高风险城市环境地铁小净距隧道近接隧道群施工方案优选[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(3): 156-161. (CUI G Y, TIAN Y H, XIAO Y, et al. Optimization of construction scheme for metro small clear distance tunnel close to tunnel group in high-risk urban environment[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(3): 156-161. (in Chinese))
- [2] 宋高锐,王渭明,王国富,等. 盾构与浅埋暗挖隧道小净距并行施工工法优选[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(15): 6472-6478. (SONG G R, WANG W M, WANG G F, et al. Optimization of shield tunneling and shallow buried tunnel with small clear distance in parallel construction[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(15): 6472-6478. (in Chinese))
- [3] 李宗. 软土条件下地铁小净距盾构隧道变形控制技术[J]. 铁道标准设计, 2012(6): 112-116. (LI Z. Technology on deformation control of close-spaced shield tunnel of metro in soft soil conditions[J]. Railway Standard Design, 2012(6): 112-116. (in Chinese))
- [4] ZHENG H B, LI P F, MA G W. Stability analysis of the middle soil pillar for asymmetric parallel tunnels by using model testing and numerical simulations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 108: 103686.
- [5] 刘庆丰,吴剑,刘凯. 盾构并行穿越施工对既有隧道影响分析与关键技术[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(12): 4939-4947. (LIU Q F, WU J, LIU K. Influence analysis and key technology of shield tunnel parallel crossing construction under existing tunnels[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(12): 4939-4947. (in Chinese))
- [6] 何川,苏宗贤,曾东洋. 盾构隧道施工对已建平行隧道变形和附加内力的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2063-2069. (HE C, SU Z X, ZENG D Y. Research on influence of shield tunnel construction on deformation and secondary inner force of constructed parallel tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2063-2069. (in Chinese))
- [7] 戴俊,田国宾,熊咸玉. 基于围岩受力影响的小净距隧道开挖方法优化[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(29): 307-311. (DAI J, TIAN G B, XIONG X Y. Optimization of excavation method of small spacing tunnel based on the influence of surrounding rock stress[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(29): 307-311. (in Chinese))
- [8] 姚勇,何川,谢卓雄. 双线小净距隧道中岩墙力学特征及加固措施研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1883-1888. (YAO Y, HE C, XIE Z X. Study of mechanical behavior and reinforcing measures of middle rock wall of parallel tunnel with small interval[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1883-1888. (in Chinese))
- [9] 扈萍,马梁,李萌,等. 小净距隧道后行洞开挖对先行洞的变形影响[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(3): 246-251,272. (HU P, MA L, LI M, et al. Deformation effect of subsequent holes excavation on advanced holes in small clear distance tunnels[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2022, 36(3): 246-251,272. (in Chinese))
- [10] 李雨哲,柏署,杨雄,等. 不等跨四连拱隧道中隔墙结构受力现场测试与分析[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(10): 2201-2208. (LI Y Z, BAI S, YANG X, et al. Field mechanical tests and analyses of partition walls in unequal-span four-arch tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(10): 2201-2208. (in Chinese))
- [11] 田鲁鲁,张智,郭永发. 浅埋连拱隧道中隔墙地基受力变形及注浆加固研究[J]. 岩土工程技术, 2023, 37(3): 284-290. (TIAN L L, ZHANG Z, GUO Y F. Foundation force and grouting reinforcement of central separate wall in shallow buried multi-arch tunnel[J].



- Geotechnical Engineering Technique, 2023, 37(3): 284-290. (in Chinese))
- [12] 董飞, 黄俊, 李奥, 等. 大直径盾构隧道中隔墙顶裂缝模式及扩展机制研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2023, 43(1): 82-91. (DONG F, HUANG J, LI A, et al. Crack mode and propagation mechanism of diaphragm wall top in large-diameter shield tunnel[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(1): 82-91. (in Chinese))
- [13] 杜阳平. 土压盾构隧道小净距施工处理措施 [J]. 居舍, 2021(22): 41-42. (DU Y P. Measures to deal with small clearances in earth pressure shield tunnel construction[J]. Ju She, 2021(22): 41-42. (in Chinese))
- [14] 赵乙丁, 刘守花, 阳军生, 等. 小净距浅埋盾构隧道相互影响机制与控制措施研究 [J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(1): 120-128. (ZHAO Y D, LIU S H, YANG J S, et al. Interaction mechanisms and control measures of shallow-buried shield tunnels with small clear distance[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(1): 120-128. (in Chinese))

收稿日期: 2023-10-21