

雷风行,毛小勇,史培新.小净距叠行隧道先后上法变形控制技术[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(3):295-302.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250464

LEI Fengxing, MAO Xiaoyong, SHI Peixin. Deformation control techniques for small-clearance stacked tunnels constructed using the bottom-first, top-second method[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2026, 45(3): 295-302. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20250464

小净距叠行隧道先后上法变形控制技术

雷风行¹, 毛小勇^{2*}, 史培新¹

(1. 苏州大学 轨道交通学院, 江苏 苏州 215006; 2. 苏州城市学院, 江苏 苏州 215104)

摘要:为解决小净距叠行隧道开挖引起的地层和隧道衬砌变形超限与结构损伤等问题,采用数值模拟与工程验证的方法,以苏州轨道交通8号线上下净距1.6 m的叠行隧道为依托,建立三维有限元模型,比选“同步注浆”“地层加固”“支撑台车”以及“地层加固+支撑台车”加固方案对地层和隧道变形的控制效果。研究表明:单一同步注浆无法满足地层和隧道变形控制要求。地层加固可显著抑制地表沉降(降幅57%)和下行隧道上浮(降幅63%);支撑台车加固降低下行隧道衬砌环向应力21%,新建隧道盾构机临近阶段减缓隧道上浮(降幅为51%);“地层加固+支撑台车”组合加固方案控制效果最优,实现地表沉降9.3 mm,隧道上浮3.3 mm,净空收敛3.6 mm,与工程实测数据高度吻合。研究结论为类似小净距叠行隧道建设安全提供借鉴。

关键词: 叠行隧道; 变形控制; 同步注浆; 地层加固; 支撑台车; 小净距

中图分类号: TU91; U25

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)03-0295-08

Deformation control techniques for small-clearance stacked tunnels constructed using the bottom-first, top-second method

LEI Fengxing¹, MAO Xiaoyong^{2*}, SHI Peixin¹

(1. School of Rail Transportation, Soochow University, Suzhou 215006, China;

2. Suzhou City University, Suzhou 215104, China)

Abstract: In order to solve the problems of excessive deformation and structural damage of stratum and tunnel lining caused by excavation of small-clearance stacked tunnels, a three-dimensional finite element model was established based on the superimposed tunnel with a net clearance of 1.6 m on Suzhou Rail Transit Line 8 by using numerical simulation and engineering verification. The control effects of “synchronous grouting” “stratum reinforcement” “support trolley” and “stratum reinforcement + support trolley” reinforcement schemes on stratum and tunnel deformation were compared and selected. The results show that single synchronous grouting cannot meet the requirements of stratum and tunnel deformation control. The ground reinforcement can significantly inhibit the surface subsidence (reduction 57%) and the floating of the downward tunnel (reduction of 63%). The reinforcement of the supporting trolley reduces the circumferential stress of the lining of the downward tunnel by 21%, and the adjacent stage of the new tunnel shield machine slows down the floating of the tunnel (a decrease of 51%); the combined reinforcement scheme of “stratum reinforcement+support trolley” has the best control effect. The surface settlement is 9.3 mm, the tunnel floating is 3.3 mm, and the clearance convergence is 3.6 mm, which is highly consistent with the measured data of the project. The research conclusions provide a valuable reference for the construction safety of similar small-clearance overlapped tunnels.

Keywords: stacked tunnels; deformation control; synchronous grouting; stratum reinforcement; support trolley; small-clearance

收稿日期: 2025-10-30 修回日期: 2026-01-23 接受日期: 2026-01-30 责任编辑: 焦丽

作者简介: 雷风行(2001-),男,湖北武汉人,硕士研究生,主要从事地下与隧道工程方面的研究。E-mail: 20235246009@stu.suda.edu.cn

通信作者: 毛小勇(1974-),男,湖北十堰人,博士,教授,主要从事混凝土抗火方面的研究。E-mail: maoxiaoyong@yeah.net

0 引言

随着城市地下空间开发程度的持续提升,工程建设环境日趋复杂,建设空间受限程度增加,上下叠行隧道在城市轨道交通工程中的应用日益广泛。在国外,上下叠行隧道最早见于20世纪80年代的京都地铁,之后在开罗、德黑兰等地均出现相关案例^[1-3];在国内,上下叠行隧道首次应用于深圳地铁的修建,并逐步在武汉、南宁、成都等城市推广应用^[4-7]。在软土地层中,当叠行隧道净距不足隧道直径的2倍时,开挖影响区相互重叠,后建隧道开挖容易引起地层和先建隧道衬砌变形超限,甚至诱发结构损伤等风险^[8]。因此,必须采取针对性的工程措施控制地层和隧道的变形。

修建叠行隧道时,需先确定上下隧道的开挖顺序^[9]。刘明友等^[10]和李建东等^[11]考虑施工顺序对既有隧道变形的影响和对周边环境的扰动,基于大量工程实例和模拟分析认为,“先下后上”的施工顺序优于“先上后下”。对于软弱地层中的小净距叠行隧道,在采用合理施工顺序的基础上,通常需配套实施针对性的工程措施以控制地层和隧道变形,包括夹持土体注浆、内设钢支撑^[12]、施工后注浆、管片槽钢拉紧等。

在注浆压力与注浆量对地表沉降槽影响的研究中,学者模拟并验证了重叠隧道的空间相互作用^[13-14]。ZHANG等^[15]通过分析上海地铁13号线下穿磁浮结构的现场监测数据发现,近距离重叠隧道建设中,地表沉降槽的局部曲率和斜率明显大于水平近距隧道,因此重叠隧道施工应重点控制地表沉降。在隧道结构净距和注浆施工对既有结构变形影响的研究中,学者通过监测大量施工案例和模拟分析发现,上穿施工时,注浆压力对既有隧道沉降有较强影响^[16],认为空间位置、支护压力和隧道刚度是关键因素,隧道纵向附加应力是渗漏和衬砌损坏的主因,因此控制隧道纵向附加应力是上穿施工的首要目标^[16-17]。FU等^[18]基于数值模拟和实验结果认为,下穿角度和隧道间距对既有隧道沉降的影响较为显著,并结合上海地铁四线叠交工程,提出了上穿施工需同步压重的关键控制措施^[19]。

此外,研究表明既有隧道的纵向附加应力是控制变形的关键^[20],因此提出“强化夹持土体”和“内支撑台车”的加固方案。但现有研究多针对单一加固方案,对小净距叠行隧道工况下多种加固方案的组合研究较少。同时,固结软土地层中竖向分层、水平并行且长距离叠行的隧道布置,缺

乏定量的地层变形和结构安全评价方法。鉴于此,依托苏州轨道交通8号线南泽庄站至唐庄站区间,上下净距1.6 m的小净距叠行隧道工程,采用ABAQUS建立三维有限元模型,采用“先下后上”的施工顺序,以地表隆沉、既有隧道竖向位移、净空收敛,以及衬砌受力为评价指标,对比分析“同步注浆”“地层加固”“支撑台车”“地层+支撑台车”加固方案的变形控制效果,并结合现场监测数据进行验证,旨在提出适用于小净距叠行隧道的变形控制思路与工程建议,为类似工程安全施工与参数优化提供借鉴。

1 工程概况

苏州地铁8号线南泽庄站至唐庄站为盾构法施工区间,采用土压平衡盾构机,盾构机直径为6.83 m,衬砌管片外径为6.6 m、内径为5.9 m,管片宽度为1.2 m,上部隧道埋深为10 m,下部隧道埋深为18 m,隧道净距约为1.6 m。为满足便捷换乘需求,该区间远端采用并行布置,在临近唐庄站区域86 m内采取重叠布置。整体施工采用“先下后上”的顺序,上下重叠段盾构穿越土层情况见图1,土层及材料的物理力学指标见表1。

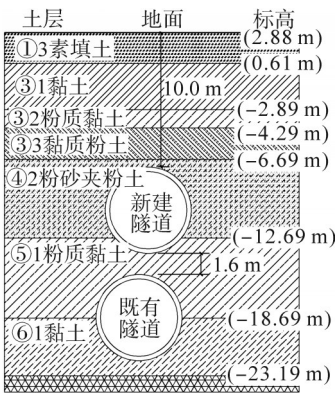


图1 重叠隧道断面
Fig.1 cross-section of overlapping tunnel

表1 土层及材料物理力学指标
Tab.1 physical and mechanical properties of soil layers and materials

土层	密度 (g·cm ⁻³)	黏聚力 /kPa	内摩 擦角/(°)	压缩 模量/MPa	泊松 比
①3素填土	1.91	13.6	23.7	15.00	0.25
③1黏土	1.97	14.0	14.5	14.76	0.26
③2粉质黏土	1.93	13.4	17.0	13.58	0.32
③3黏质粉土	1.92	10.3	15.3	16.60	0.26
④2粉砂夹粉土	1.96	7.2	20.6	28.96	0.25
⑤1粉质黏土	1.92	13.8	18.2	15.31	0.24
⑥1黏土	1.95	11.8	15.1	15.50	0.24
管片	2.50			3.45×10 ⁴	0.20
盾壳	7.50			2.06×10 ⁵	0.18

隧道穿越的粉砂夹粉质黏土层具有抗剪强度低、压缩性高的特性,在掘进过程中极易发生土体塑流变形,导致地表沉降超限。上部隧道属于典型浅埋隧道,覆土压力不足可能引发掌子面失稳坍塌;上下隧道1.6 m的极小净距形成空间叠加效应,后行隧道的施工振动和土体扰动会传导至先行隧道,可能造成管片错位、接缝开裂等结构损伤。砂性土层的高渗透性若遇注浆不充分,可能形成地下水渗流通道,进一步加剧地层软化甚至引发隧道上浮。

因此,针对软弱地层、浅埋隧道、极小净距、临近施工等风险开展研究,以优化施工参数,分析不同加固措施对既有结构变形控制效果,更好满足隧道建设安全的要求。

2 上下重叠隧道数值模型

采用ABAQUS软件,建立上下重叠隧道8号线区间的三维有限元模型,见图2。模型中,沿地表横向为 x 方向,取100 m,隧道轴向为 y 方向,取50 m,重力方向为 z 方向,取40 m。设置模型顶面为自由边界,底部额外施加完全固定约束,其余4个面均施加法向位移约束。各层土体、注浆层、衬砌管片均采用C3D8R八结点实体单元进行模拟,盾构机盾壳采用S4四结点曲面通用壳单元,土体本构使用Mohr-Coulomb模型,将重叠段的第12环作为监测断面。

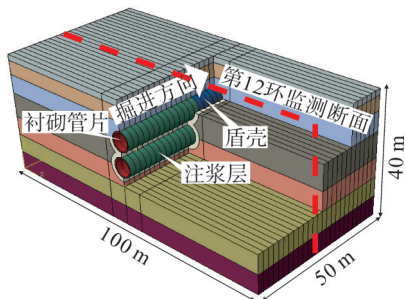


图2 上下重叠隧道三维模型

Fig.2 3D numerical model of vertically stacked tunnels

盾构过程采用生死单元法和弹性等代层^[21]模拟盾构隧道掘进和同步注浆效应,等代层等效厚度取0.35 m。上部隧道开挖工程示意图见图3。每一环开挖过程的模拟流程为:开挖第 n 环土体,添加第 $n-4$ 环等代层,并采用盾壳在第 $n-3$ 环、 $n-2$ 环、 $n-1$ 环作为临时支护,在开挖掌子面处施加土仓压力,同时对周围土体和衬砌管片施加注浆压力,删去 $n-4$ 环盾壳单元。设置4种加固形式,分别为同步注浆加固、针对重叠段中间夹持土体进行地层加固、下部隧道施加内支撑台车加固,以及地

层加固和内支撑台车加固的联合加固。

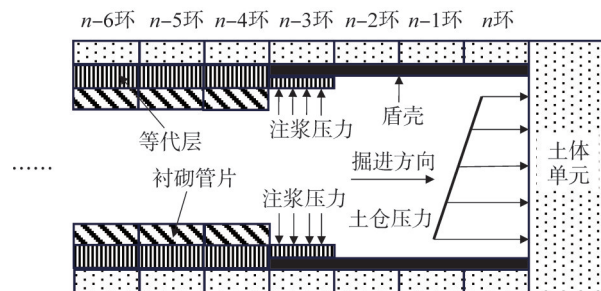


图3 上部隧道开挖过程示意

Fig.3 schematic of upper tunnel excavation

3 结果与分析

3.1 同步注浆加固分析

同步注浆作为盾构施工中的关键技术,通过实时填充盾构机外壳与衬砌管片之间的空隙形成稳定支护结构,对于上部隧道的土体损失有明显控制作用^[22]。采用等代层模拟注浆扩散后形成的稳定注浆层,为分析不同注浆量对下部隧道变形的抑制作用,分别进行5种工况的数值模拟。采用MA等^[23]在保持稳定条件下的静力学分析方法,分别得出上、下临界最优注浆压力 P_g^U 与 P_g^L 为

$$P_g^L = (\gamma - 2c_u/D)h, \quad (1)$$

$$P_g^U = \gamma H \left[1 + H \tan(45^\circ - \varphi/2)/D \right], \quad (2)$$

$$n_{fs} P_g^L < P_g < P_g^U/n_{fs}, \quad (3)$$

式(1)~式(3)中: h 为隧道顶点至地表的垂直距离; H 为隧道中心至地表的垂直距离; D 为隧道直径; γ 为土的容重; c_u 为黏聚力; φ 为内摩擦角; n_{fs} 为安全系数。

结合工程经验, n_{fs} 取1.8,最优注浆压力介于200~400 kPa。将工况1的注浆压力设为150 kPa,其余4种工况注浆压力设为200~400 kPa。基于Mindlin解与Euler-Bernoulli-Pasternak模型的变形分析结果^[17],等代层弹性模量与注浆压力最优比值为100:1,5种工况的等代层弹性模量设置与注浆压力相对应,见表2。

表2 同步注浆压力与等代层弹性模量
Tab.2 synchronous grouting pressure and equivalent layer elastic modulus

工况	注浆压力/kPa	等代层弹性模量/MPa
1	150	150
2	200	200
3	300	300
4	350	350
5	400	400

(1) 地表隆沉

选取开挖第 12 环的正上方断面作为监测断面, 监测不同注浆量下该断面地表纵向位移, 见图 4。由图 4 (a) 可知, 地表沉降槽向外延伸地表有轻微隆起, 约为 1.3 mm; 注浆压力为 150 kPa 时, 中线地表沉降最大, 为 26.1 mm; 注浆压力为 400 kPa 时, 中线地表沉降最小, 为 22.4 mm, 地表沉降最大值减少 3.7 mm, 占最大沉降值的 14%。由图 4 (b) 可知, 在掌子面临近监测点之前, 不同工况沉降速率基本相同, 当盾构机穿越监测点后, 不同工况的地表沉降响应呈现显著差异: 工况 1 注浆压力较小, 地表沉降在缓慢增加后有明显下降; 工况 2~工况 4 在盾构机穿越监测点后地表沉降基本保持不变; 工况 5 注浆压力较大, 在盾构机穿越后在盾尾注浆作用下地表竖向位移有明显回升。

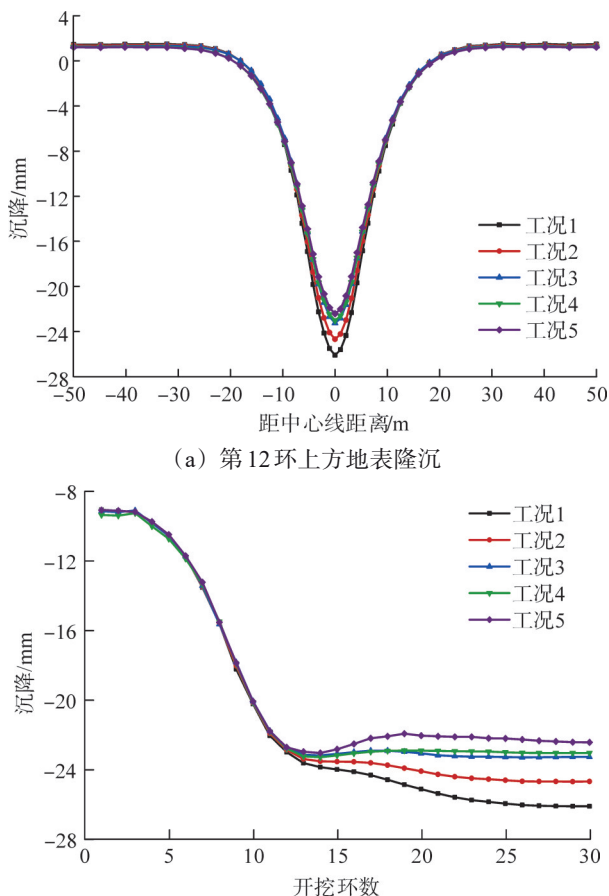


图 4 不同注浆量引起的第 12 环地表纵向位移

Fig.4 longitudinal displacement of the 12th ring surface caused by different grouting amount

(2) 下部隧道变形

选取下部隧道第 12 环管片为监测断面, 监测下部隧道竖向变形, 见图 5。由图 5 (a) 可知, 因

上部隧道开挖扰动, 掌子面临近前下部隧道产生了约 6.3 mm 的上浮; 盾构机穿越监测点过程中, 上浮有所减缓, 此时不同工况对下部隧道上浮抑制并不明显; 当盾构机穿越监测点后, 同步注浆作用逐渐明显。注浆压力由 150 kPa 提高至 400 kPa, 竖向位移由 10.1 mm 降至 8.7 mm, 降幅为 13.8%。由图 5 (b) 可知, 当下部隧道开挖完成后, 净空收敛约为 11 mm, 随着上部隧道逐渐开挖, 净空收敛下降较为迅速; 掌子面临近以及盾构机穿越时, 净空收敛几乎不变; 盾构机穿越监测点后净空收敛有轻微回升, 最终趋于平稳。此外, 计算结果表明不同注浆量对下部隧道净空收敛影响不明显。

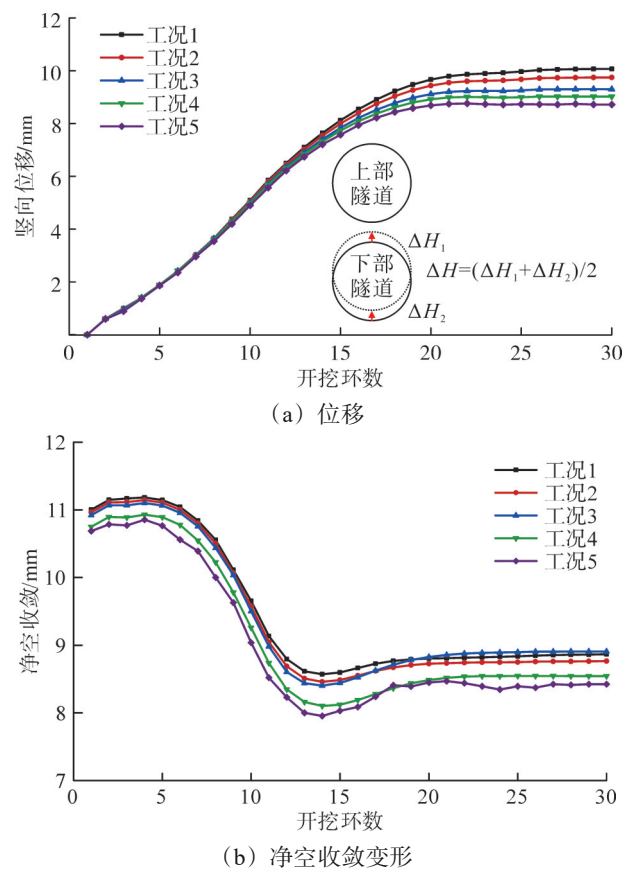


图 5 下部隧道竖向变形

Fig.5 vertical deformation of the lower tunnel

3.2 地层加固

通过注浆加固上下隧道间夹持土体, 可以减少土体的后期沉降, 减轻隧道的防水压力, 提高止水效果。地层加固采用直径为 38 mm, 壁厚为 3 mm, 长度为 2 m 的袖阀管, 通过预埋注浆孔注入水泥水玻璃双液浆。数值模拟中, 将加固范围内原有土体替换为浆液加固后的土体, 注浆范围见图 6 (a)。

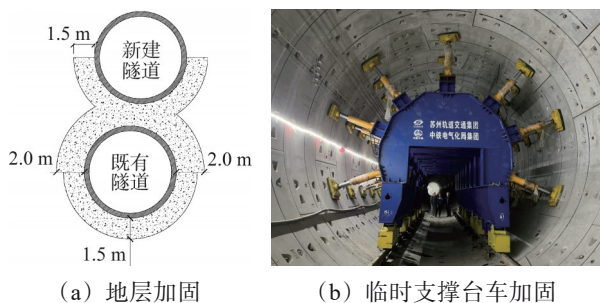


图6 加固方案

Fig.6 reinforcement solution

3.3 临时支撑台车加固

在下部隧道内部设置临时支撑台车。进行上部隧道开挖的盾构机进入重叠段前,完成下部隧道重叠段前10环支撑台车的安装。当上部盾构机推进至下部隧道已安装的10环支撑台车中心位置时,右线每掘进一环,台车同步前移一环,确保盾构机始终位于下洞台车加固区域内,见图6(b)。

数值模拟中,根据压杆变形公式反算下部隧道台车对管片的支撑力。压杆轴向(受压为负值)变形量为

$$\Delta L = \frac{F_N L}{EA}, \quad (4)$$

式中: F_N 为轴向压力; L 为杆件原长; E 为材料弹性模量; A 为横截面积。

3.4 “地层+支撑台车”加固

采用“地层+支撑台车”加固时,当下部隧道掘进施工完毕后,凿穿管片吊装孔外侧保护层进行中间夹持土的地层加固,待中间夹持土浆液固结后安装下部隧道支撑台车,当上部隧道掘进至重叠段内下部隧道台车中间时,上部隧道每掘进一环,台车同步前进一环,确保盾构机始终处于台车上方的中央位置。

3.5 4种加固措施效果比较

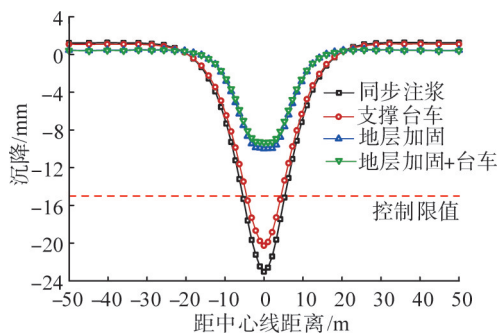
鉴于同步注浆加固中不同注浆量对下部隧道和地表隆沉影响差别较小,选取注浆压力为300 kPa的工况开展对比分析。依据《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911—2013)^[24]与《盾构法隧道施工及验收规范》(GB 50446—2017)^[25]的相关要求,确定变形控制限值(累计值)见表3。

表3 变形控制限值
Tab.3 deformation control limits

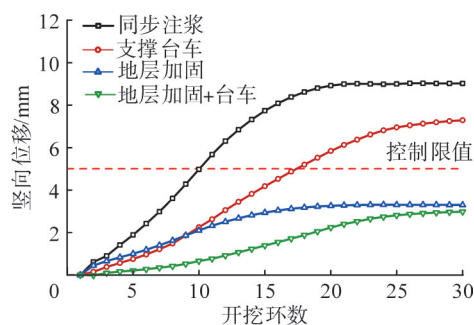
地表沉降/mm	地表隆起/mm	管片结构净空 收敛/mm	隧道结构 上浮/mm
15	10	13	5

不同加固措施下地表与既有隧道变形情况见图7。同步注浆和支撑台车加固均会导致地表沉降

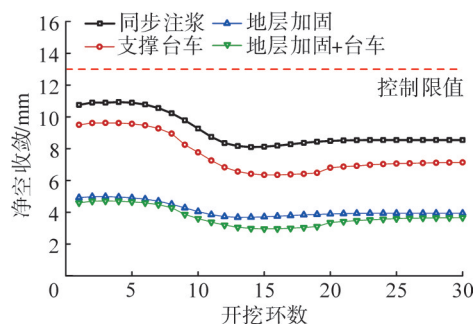
超限;地层加固对地表沉降控制作用显著,沉降由最大值23 mm减小至10 mm,减小57%;“地层+支撑台”加固对地表沉降控制最为明显,地表沉降最小为9.3 mm。盾构机临近监测断面时,下行隧道上浮减少51%,同时施加地层加固后,下行隧道上浮减少64%。地层加固竖向位移为3.3 mm,与同步注浆加固方案相比,降幅达63%。



(a) 地表隆沉



(b) 位移



(c) 净空收敛

图7 不同加固措施时的变形情况

Fig.7 deformation under different reinforcement measures

管片径向变形结果见图8。支撑台车对下部隧道整体径向变形有明显抑制作用,但对于拱底隆起抑制作用较小;地层加固对下部隧道拱底控制作用显著,隆起为6.5 mm;“地层+支撑台”加固时,隧道整体径向变形均未超过5 mm。同步注浆与支撑台车加固均会导致下部隧道上浮位移超限。由于支撑台车自重抵消了部分开挖卸荷,与同步

注浆加固相比,下部隧道竖向位移增加较缓慢。

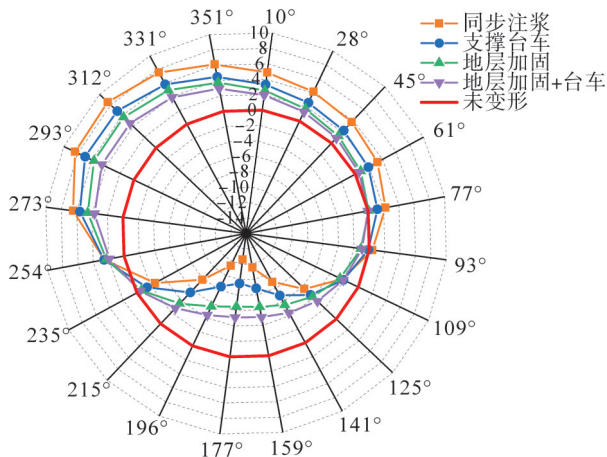


图8 监测断面管片径向变形(单位:mm)

Fig.8 monitored radial deformation of segment in the cross-section (unit: mm)

“地层+支撑台车”加固时,地表变形与净空收敛均最小。相较于地层加固,“地层+支撑台车”加固的地表沉降减小0.6 mm,净空收敛减小0.3 mm,最终竖向位移减小0.4 mm。这说明“地层+支撑台”加固与地层加固相比,最终变形较小。在盾构机穿越监测点时,既有隧道上升较为缓慢,下部隧道衬砌的竖向位移明显减小,施工过程中衬砌的抗弯、抗剪强度问题得到有效改善。4种加固方案模拟的净空收敛均在控制限值内,地层加固与台车施加均能有效减少下部隧道净空收敛,使净空收敛的最大值由8.5 mm降至3.6 mm,降幅达58%。

考虑环缝、拼装接头等因素对管片衬砌整体刚度的折减效应,折减系数 λ 取0.8^[26]。监测断面管片环向应力分布见图9。

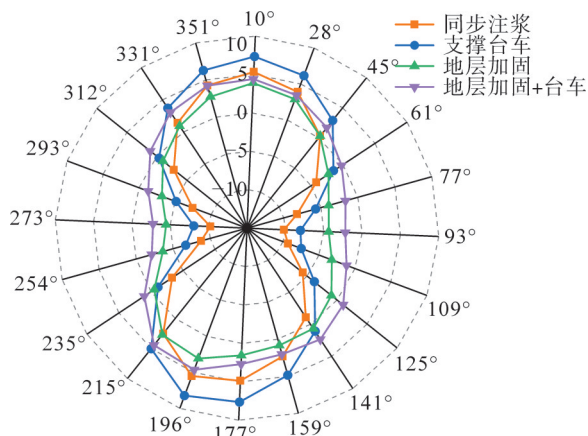


图9 监测断面管片环向应力(单位:kN)

Fig.9 circumferential stress of segment in monitoring section (unit: kN)

环向应力最大处集中于拱顶与拱底,最小处位于衬砌管片拱腰两侧。同步注浆加固工况下,

拱腰两侧受压最明显,最大应力达到10 179 N。支撑台车自重直接作用于衬砌管片,使拱底应力有所增加。与同步注浆加固相比,支撑台车加固使拱腰两侧应力明显下降,从10 179 N下降至8 044 N,降幅为21%。

“地层+台车”加固工况下,管片径向变形最小,隆起最大为4.8 mm,位于拱底处;环向应力较其余3种工况相对均匀,施加支撑台车会使拱底压力增加,拱腰两侧以及拱顶环向应力减小,最小值(2 466 N)位于拱腰两侧,最大值(4 460 N)位于左侧拱脚,管片整体受力性能在4种工况中最优。

对比4种加固方案可知,同步注浆加固效果最差,地表沉降、下部隧道竖向位移等均超出规范限值。施工过程中,仅靠下部隧道支撑台车加固并不能满足地表沉降和隧道上浮的控制需求,但对下部隧道衬砌的抗弯、抗剪均有很好的抑制作用。地层加固效果最为明显,各项控制指标均满足规范要求,与同步注浆加固相比,地表沉降、下部隧道径向变形和隧道上浮均减小,但上浮速度过快,衬砌内力过高等问题明显,需另外增加加固措施;“地层+台车”加固效果较好,在满足规范要求的同时,可为衬砌管片提供支撑。

4 实测数据验证分析

为确保施工过程中地表隆沉变化均在控制限值内,沿隧道纵向每10 m布置1个监测断面,每个监测断面内沿横向按10 m间距布设监测点。选取重叠段DBY20作为监测断面,监测点布置见图10(a)。针对下部隧道结构净空变形开展实时监测,根据监测数据动态调整盾构机掘进参数,下部隧道净空收敛测点布置如图10(b)所示。将地表纵向隆沉、净空收敛和管片环向应力的实测值与“地层+支撑台车”加固方案的模拟值进行对比,结果见图11~图13。由图11可知,上部隧道掘进完成后,中线地表左侧沉降的实测值最大为8.7 mm,与模拟最大值9.3 mm基本吻合。由图12可知,随着上部隧道逐渐开挖,下部隧道净空收敛实测值稳定在3.0 mm,当盾构机临近监测断面时有轻微回升趋势;开挖完成后,净空收敛实测值为3.3 mm,与模拟值3.6 mm接近。由图13可知,环向分布的模拟值与实测值均表现为拱顶、拱底受拉应力,左右拱腰受压应力。应力最大值位于拱底,为14 821 N,最小值位于右侧拱腰,为6 352 N。数值模拟的峰谷位置、拉压分区及应力水平,与实测值基本一致,验证了模型的有效性。

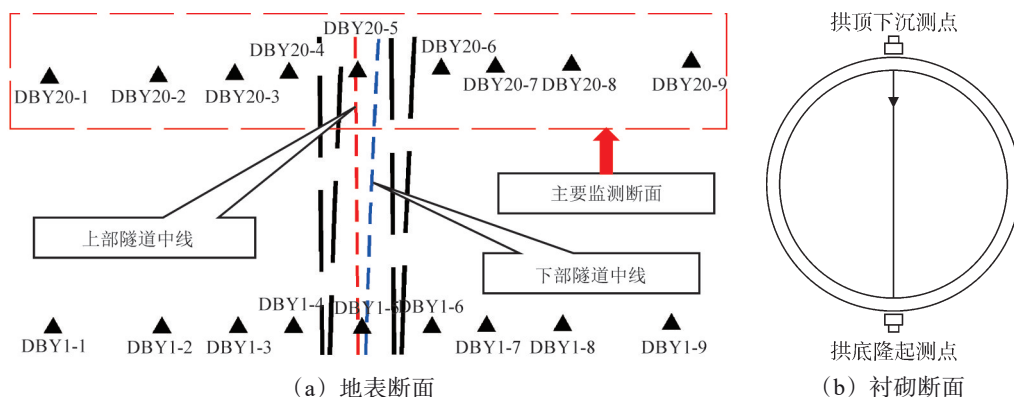


图10 监测点位布置

Fig.10 layout of monitoring points

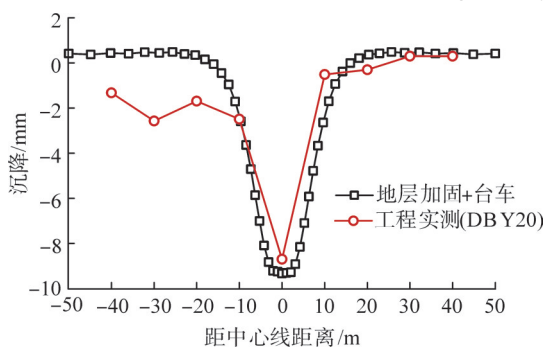


图11 地表沉降对比

Fig.11 comparison of ground subsidence

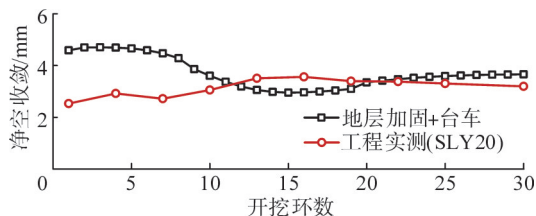


图12 净空收敛对比

Fig.12 comparison of clearance convergence

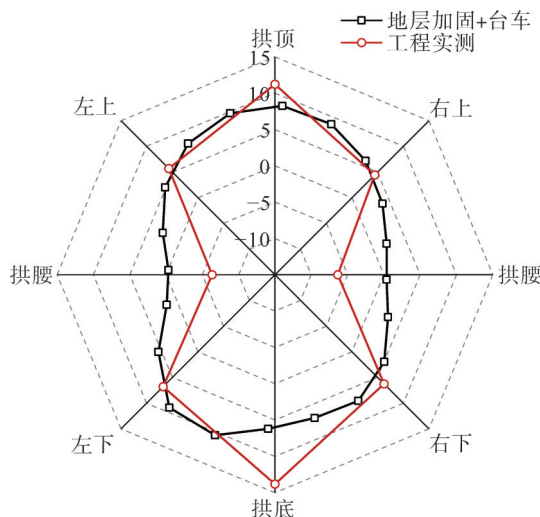


图13 环向应力对比(单位:kN)

Fig.13 comparison of circumferential stress (unit: kN)

5 结论

基于苏州地铁8号线南泽庄站至唐庄站区间小净距叠行隧道的特殊工况,建立有限元模型,分析了4种加固措施的效果,结合现场监测数据,确定最终加固方案,主要结论如下。

(1) 小净距叠行隧道施工中,同步注浆能有效控制地表沉降和隧道位移,控制效果随着注浆压力的增加而增加,既有隧道竖向位移减小。仅采用同步注浆方法无法将地表沉降和隧道位移控制在规范要求的限值内,需要辅助采取其他加固和变形控制措施。

(2) 地层加固对施工扰动和开挖卸荷效应引发的变形控制作用明显,但仍存在衬砌管片内力偏大和下部隧道上浮过快等问题。

(3) 下部隧道支撑台车加固对地表沉降抑制作用有限,但对下部隧道结构上浮有延缓作用,保障了后行隧道施工阶段的结构稳定与安全。

(4) “地层+支撑台车”加固工况下,衬砌管片环向应力最为均匀,施工过程中结构上浮最缓慢,为该工程的优选加固方案。

参考文献(References):

- [1] YAMAGUCHI I, YAMAZAKI I, KIRITANI Y. Study of ground-tunnel interactions of four shield tunnels driven in close proximity, in relation to design and construction of parallel shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(3): 289-304.
- [2] ABD-EL RAHIM H H A, ENIEB M, KHALIL A A, et al. Twin tunnel configuration for Greater Cairo metro line No. 4[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 68: 66-77.
- [3] TALEBINEJAD A, CHAKERI H, MOOSAVI M, et al. Investigation of surface and subsurface displacements due to multiple tunnels excavation in urban area[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7(9): 3913-3923.

- [4] 江华,殷明伦,江玉生,等.深圳地铁盾构隧道近距离上跨既有有线引起的结构变形研究[J].现代隧道技术,2018,55(1):194-202.
JIANG Hua, YIN Minglun, JIANG Yusheng, et al. Structure deformation caused by shield tunnel excavation above existing tunnels of Shenzhen metro[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(1): 194-202.
- [5] 石平.武汉轨道交通4号线及6号线区间隧道上下叠交盾构进洞施工技术[J].地下工程与隧道,2015(1):15-18,53-54.
SHI Ping. Construction technology of shield machine breaking in shaft for overlapped interval tunnels of Wuhan rail transit line 4 and line 6[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2015(1): 15-18, 53-54.
- [6] 陈凯.多孔叠交隧道盾构施工关键技术研究[J].隧道建设,2017,37(6):742-747.
CHEN Kai. Study of key technologies for shield tunneling of overlapping tunnels[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(6): 742-747.
- [7] 有智慧,马龙祥,农兴中,等.小净距上下重叠地铁隧道地基土车致动力响应特征研究[J].振动与冲击,2020,39(22):223-227,267.
YOU Zhihui, MA Longxiang, NONG Xingzhong, et al. Dynamic response characteristics of foundation soil surrounding small-spaced vertical-overlapped tunnels excited by metro trains[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(22): 223-227, 267.
- [8] 李金奎,庄文.城市隧道同时侧穿桩基和下穿既有隧道变形分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2023,42(6):664-670.
LI Jinkui, ZHUANG Wen. Analysis of deformation of power tunnel passing through pile foundation and underneath at the same time[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2023, 42(6): 664-670.
- [9] 孙艳阳,陈海,程坤,等.小净距隧道开挖沉降特性及其合理间距优化研究[J/OL].地下空间与工程学报,2024,1-7[2025-10-20].<https://link.cnki.net/urlid/50.1169.TU.20241216.1704.002>.
SUN Yanyang, CHEN Hai, CHENG Kun, et al. Study on settlement characteristics of small clear distance tunnel excavation and optimization of excavation spacing[J/OL]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 1-7[2025-10-20].<https://link.cnki.net/urlid/50.1169.TU.20241216.1704.002>.
- [10] 刘明友,韦宏业,么晓辉,等.软硬不均地层及不同开挖顺序下双顶管隧道施工对管片及地层的影响[J].城市轨道交通研究,2023,26(11):138-142.
LIU Mingyou, WEI Hongye, YAO Xiaohui, et al. Impact of double jacking tunnel construction on pipe segments and strata under uneven soft-hard soil conditions and different excavation sequences [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(11): 138-142.
- [11] 李建东,元光宗,边天奇,等.双隧道开挖对浅基础建筑物沉降影响的研究[J].岩土工程学报,2024,46(增刊1):147-151.
LI Jiandong, YUAN Guangzong, BIAN Tianqi, et al. Influences of twin-tunnel excavation on settlement of shallow foundation buildings [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(Suppl.1): 147-151.
- [12] 骆维斌,乔雄,倪伟淋,等.隧道新型装配式临时支撑结构研发及技术研究[J].建筑科学与工程学报,2022,39(5):262-273.
LUO Weibin, QIAO Xiong, NI Weilin, et al. Development and technical research of new prefabricated temporary support structure for tunnel [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(5): 262-273.
- [13] HU Y, LEI H Y, ZHENG G, et al. Assessing the deformation response of double-track overlapped tunnels using numerical simulation and field monitoring[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(2): 436-447.
- [14] WANG G, LIN Y H, LI Z P, et al. Study on the stability of the excavation face in parallel overlapping shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 166: 106936.
- [15] ZHANG D M, XIE X C, HUANG Z K, et al. Observed response of maglev structure undercrossed by three shield tunnels in soft soil[J]. Underground Space, 2022, 7(4): 636-661.
- [16] DING Z, ZHANG M B, ZHANG X, et al. Theoretical analysis on the deformation of existing tunnel caused by under-crossing of large-diameter slurry shield considering construction factors[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 133: 104913.
- [17] LIU Y N, LEI H Y, SHI L, et al. Deformation analysis of ground and existing tunnel induced by overlapped curved shield tunneling [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2025, 17(2): 795-809.
- [18] FU J Y, ZHAO N N, QU Y, et al. Effects of twin tunnel undercrossing excavation on the operational high speed railway tunnel with ballastless track[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 124: 104470.
- [19] 魏纲,蔡浩然,齐永洁,等.盾构下穿引起围压改变对既有盾构隧道的影响研究[J].隧道建设(中英文),2025,45(4):708-718.
WEI Gang, CAI Haoran, QI Yongjie, et al. Influence of confining pressure change caused by shield undercrossing on existing shield tunnels [J]. Tunnel Construction, 2025, 45(4): 708-718.
- [20] 王雨.基于FLAC^{3D}的砂质淤泥质土层地铁施工影响因素分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2024,43(2):179-186.
WANG Yu. Analysis of influencing factors for subway construction in special soil layers based on FLAC^{3D}[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2024, 43(2): 179-186.
- [21] GUO P J, STOLLE D F E. A physically meaningful homogenization approach to determine equivalent elastic properties of layered soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(3): 303-311.
- [22] 包龙生,刘德罡,齐阳,等.上覆采空区隧道注浆加固参数设计与应用[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(4):385-394.
BAO Longsheng, LIU Degang, QI Yang, et al. Design and application of grouting reinforcement parameters for overlying goaf tunnel[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2025, 44(4): 385-394.
- [23] MA G W, WANG Z H, WANG H D. Grouting geological model (GGM): definition, characterization, modeling, and application in determining grouting material and pressure[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025, 58(6): 6513-6538.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市轨道交通工程监测技术规范:GB 50911—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2014:23.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部.盾构法隧道施工及验收规范:GB 50446—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017:13.
- [26] 鞠杨,徐广泉,毛灵涛,等.盾构隧道衬砌结构应力与变形的三维数值模拟与模型试验研究[J].工程力学,2005,22(3):157-165.
JU Yang, XU Guangquan, MAO Lingtao, et al. 3D numerical simulation of stress and strain properties of concrete shield tunnel lining and modeling experiments[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(3): 157-165.