

DOI: 10.7672/sgjs2026030103

软土地层超大直径盾构隧道下穿既有铁路 注浆加固技术*

吴奎

(中铁十四局集团大盾构工程有限公司,江苏 南京 211800)

[摘要] 软土地层强度低、变形大、压缩性高,超大直径盾构隧道下穿时易引起路基沉降变形,影响既有高速铁路正常运行。以通甬高速铁路苏州东隧道下穿既有沪宁城际高速铁路工程为依托,在超大直径盾构隧道下穿前,采用地表定向控域深孔注浆加固技术改良隧道上方软弱土体。施工前进行预试验确定浆液配合比、注浆压力等参数,采用数值模拟分析验证注浆加固技术的有效性,通过钻孔取芯法与弹性波CT法对注浆加固效果进行评价。研究表明,合适的注浆加固范围为距隧道顶部2m处的10m×40m×100m区域,注浆加固后路基下方土体密实度得到改善,承载力得到提升,沉降有所减小,强度与变形满足要求。

[关键词] 高速铁路;隧道;盾构;路基;注浆;加固

[中图分类号] TU478

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)03-0103-07

Grouting Reinforcement Technology for Super-large Diameter Shield Tunnel Undercrossing Existing Railway in Soft Soil Layer

WU Kui

(China Railway 14th Bureau Group Shield Engineering Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211800, China)

Abstract: Soft soil layer has low strength, large deformation and high compressibility, and it is easy to cause subgrade settlement and deformation when super-large diameter shield tunnel undercrossing, which affects the normal operation of existing high-speed railway. Based on the project of the Suzhou East Tunnel of the Tongyong High-speed Railway underpasses the existing Shanghai-Nanjing Intercity High-speed Railway, before the super-large diameter shield tunnel undercrossing, the surface directional control area deep hole grouting reinforcement technology was adopted to improve the weak soil above the tunnel. Before construction, pre-tests were conducted to determine parameters such as the slurry mix ratio and grouting pressure. Numerical simulation analysis was adopted to verify the effectiveness of the grouting reinforcement technology. The grouting reinforcement effect was evaluated by the core drilling method and the elastic wave CT method. The research results show that the appropriate grouting reinforcement range is the 10m×40m×100m area 2m away from the top of the tunnel. After grouting reinforcement, the density of the soil beneath the roadbed is improved, the bearing capacity is enhanced, the settlement is reduced, and the strength and deformation meet the requirements.

Keywords: high-speed railway; tunnels; shields; subgrade; grouting; reinforcement

0 引言

盾构法因其安全、稳定、高效的技术特点,被广泛应用于隧道建设领域中^[1-2]。随着我国高速铁路的飞速发展,超大直径盾构隧道下穿既有铁路路基

工程日益增多^[3-5],大多数高速铁路线路未设置下穿区,盾构隧道下穿多在下卧层中进行,下穿施工会对周边土体产生扰动,进而诱发地层损失和土体固结沉降。高速铁路普遍采用无砟轨道,对钢轨变形要求高,盾构隧道下穿产生的土体扰动会降低上部铁路路基承载力,增加轨道不平顺性,如果控制不当,会对高速铁路运行稳定性与安全性造成严重

* 国家重点研发计划(2023YFC3806702)

[作者简介] 吴奎,高级工程师,E-mail:wk740314@163.com

[收稿日期] 2025-09-28

影响。因此,采取可靠的加固保护措施至关重要。

针对盾构隧道下穿既有建筑问题,已有学者开展了沉降机理与加固措施等方面的研究。黄龙等^[6]通过现场监测与数值模拟,揭示了软土地区盾构隧道下穿多股铁路路基沉降变形规律,验证了袖阀管注浆加固方案的有效性;杨剑等^[7]依托深圳轨道交通某盾构区间工程,探究了上软下硬地层中袖阀管注浆对盾构下穿民房的扰动控制效果,结果表明注浆加固可改变沉降槽形状,使地表沉降明显减小;营升^[8]通过数值模拟与实测数据分析,揭示了北京地铁某区间盾构连续上跨下穿既有结构变形规律,验证了“径向注浆+底板注浆”加固措施对控制此类复杂穿越工程变形的有效性。目前,既有高速铁路路基加固主要以注浆的方式进行^[9],多采用袖阀管注浆、分段注浆、粗放式注浆技术,施工周期长、成本高、注浆加固效果不稳定,尤其在超大直径盾构隧道下穿富水软土地层时,地下水流动性较强,粗放式注浆难以使注浆材料在预定位置发挥作用,浆液易被稀释或流失,影响注浆加固效果,使路基加固达不到设计强度,继而引发事故,威胁工程安全^[10-14]。

苏州东盾构隧道工程位于苏州工业园区和吴中区,长 13 026m,由京沪高速铁路北侧入地,施工过程中下穿多条敏感交通设施。本文基于隧道下穿沪宁城际高速铁路工程,通过采用理论分析、数值模拟、现场试验手段,获取注浆加固施工参数,合理确定深孔注浆加固范围,分析地表定向控域深孔注浆加固技术的有效性,确保软土地层中超大直径盾构能够安全下穿既有高速铁路。

1 工程概况

新建通甬高速铁路苏州东盾构隧道管片外径 14.3m,内径 13.1m,环宽 2.0m,设计为单洞双线隧道,纵向整体呈 W 形纵坡,隧道最大埋深 58m,最大纵坡 $\pm 25\%$,主要下穿地层为粉质黏土层、粉土层、粉砂层。

隧道施工过程中需下穿繁忙的沪宁城际高速铁路,施工要求高、控制严。沪宁城际高速铁路与苏州东盾构隧道线路左线平面交叉点的运营里程为 K68+175.000,下穿段沪宁城际高速铁路平面为直线段,纵断面为 0.5‰的上坡;下穿段为无砟轨道路基段,路基高度 2.6m,基床表层厚度 0.4m,填筑级配碎石,基床底层厚度 2.3m,采用 A、B 组填料。路基采用 CFG 桩加固,桩径 0.5m,桩间距 1.8m,桩长 13.50m,呈正方形布置。CFG 桩桩顶筏板采用 C30 钢筋混凝土浇筑,厚度 0.5m,下设 0.2m 厚碎石

垫层。

工程区域内主要地层为第四系全新统及上更新统湖沼积层、海积层、滨海-沼泽沉积淤泥质粉质黏土层、粉质黏土层、粉土层、粉细砂层等,盾构掘进断面主要下穿粉质黏土层、粉土层和粉砂层,部分区段下穿淤泥质粉质黏土层。粉质黏土强度较低,呈软塑~可塑状,易发生剪切破坏和侧向变形。淤泥质粉质黏土层、软塑粉质黏土层、稍密粉土粉砂层具有含水量高、孔隙比大、强度低、变形大、压缩性高、灵敏度高等特点,且具有触变性、流变性、不均匀性。地下水主要为第四系松散岩类孔隙水,分布潜水及多层承压水,地下水位埋深 0.5~3m。综合工程地质条件与施工成本,采用注浆加固的方式降低盾构隧道下穿时既有高速铁路路基沉降风险。

2 地表定向控域深孔注浆加固

2.1 注浆工艺预试验

盾构隧道下穿前采用深孔袖阀管进行注浆,以降低下穿时路基沉降风险。正式注浆作业前先进行预试验,获取浆液配合比、注浆压力等参数。为尽可能保证地层情况一致,在准备实施注浆加固的线路区域旁,挑选不影响高速铁路运行的位置进行预试验,试验段里程为 DK56+515.000—DK56+525.000,位于盾构隧道线路正上方、沪宁城际高速铁路下行线路北侧 30m 范围外,邻近加固区 100m 范围内,选取与注浆加固区域相同的地层进行试验,共设置 3 个试验孔。

预试验选择水泥单液浆,原材料为 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥、普通工业用钠基膨润土、清水。注浆试验套壳料设计配合比为水:水泥:土=1.6:1:1,通过多组现场配合比试验,最终确定最优配合比为水:水泥:土=2.5:1:1.5(见表 1)。该配合比下拌制的套壳料在凝结后可徒手挤压捏碎,满足在地层中受压情况下(注浆压力)固结体能够被挤开的要求,起到有效封孔、利于注浆的作用。

表 1 预试验套壳料配合比

Table 1 The mix proportion of the shell materials used in the pre-tests

配合比 (水:水泥:土)	初凝 时间/min	终凝 时间/min	胶凝特性
1.6:1:1	63	720	凝结时间适中,硬度较大
2:1:1	95	794	凝结时间较长,硬度较大
2.5:1:1.5	51	605	凝结时间适中,硬度适中
3:1:1.5	182	830	凝结时间长,硬度较小

为确保注浆加固效果,注浆施工前对配合比参

数进行预试验,确定后现场采用。浆液采用的设计配合比为水:水泥=(0.8~1):1,通过现场浆液配合比试验,测定浆液初凝时间、终凝时间,如表2所示。

表2 预试验注浆浆液配合比

Table 2 The mix proportion of grouting slurry used in the pre-tests

配合比 (水:水泥)	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	初凝时间/ min	终凝时间/ min	平均 温度/ $^{\circ}C$
0.8:1	1.63	658	1 250	25
0.9:1	1.54	74	1 339	25
1:1	1.48	883	1 467	25

3个试验孔分别采用水灰比0.8,0.9,1进行注浆试验。当水灰比为0.8时,实测注浆压力为2.6MPa;当水灰比为0.9时,实测注浆压力为3MPa;当水灰比为1时,实测注浆压力为2.3MPa。以加固为主要目的的注浆终压一般为2~4MPa。通过对3个试验孔的试验记录,确定注浆压力为2~3MPa。

预试验注浆完成后,对试验孔进行取芯检测,确定注浆加固体力学强度与弹性模量,为后续数值模拟模型刚度参数选择提供参考。

2.2 注浆加固范围与深度计算

1) 注浆加固范围理论计算

合理确定注浆加固范围是实现隧道安全下穿的重要前提。以沪宁城际高速铁路行进方向为 x 向,以盾构隧道中轴线方向为 y 向,以竖直方向为 z 向,在注浆工艺预试验的基础上进一步确定加固范围。由于线路限制,注浆孔布置在沪宁城际高速铁路北侧,盾构掘进前进行地表单侧斜向深孔注浆加固。

首先,根据规范及设计文件确定路基竖向变形控制值 δ_0 ,通过式(1)计算最浅注浆加固深度 h_0 ,通过式(2)计算 x 向加固范围 x_s ,通过式(3)确定 y 向加固范围 y_s 。

$$\delta_0 = \frac{qt}{4\pi} \frac{\cos\beta}{(h_0 + a)^2(1 + \cos\beta^{-2})} \quad (1)$$

$$\delta_0 = \frac{V_L D^2 \pi}{10i} e^{-\frac{x_s^2}{2i^2}} \quad (2)$$

$$y_s = \alpha L \quad (3)$$

式中: q 为单位时间注浆量; t 为注浆时间; β 为地表任一点与出浆口中心的连线与竖直面的夹角; a 为在出浆口处形成的球形浆泡半径,为0.5~2m; V_L 为土体损失率,黏性土损失率为0.5%~2%,砂性土损失率<0.5%; D 为隧道直径; i 为沉降槽宽度系数; α 为安全控制系数,软土地层中 $\alpha \geq 2$; L 为既有铁路

路基宽度。

根据设计规范与类似工程案例,隧道下穿路基竖向变形控制值为4mm,计算得到 x 向加固范围为100m, y 向加固范围为40m,最浅注浆加固深度为地表以下28.6m。

2) 注浆加固深度数值模拟计算

为确定地表定向控域深孔注浆加固深度,对注浆体位于隧道上方不同距离下土体位移进行数值模拟分析。根据地质勘察报告,建立反映下穿段地层情况的平面模型进行模拟,土体采用小应变硬化本构模型模拟,土层具有复杂性、多样性等特点,小应变硬化模型可考虑土体在小应变范围内剪切模量随应变增大而衰减的特性,能够准确描述土体压硬性剪胀性。为保证模型精度和计算效率,模型 x, y 向尺寸分别为100,80m,上表面为自由边界,底部全约束,两侧设置法向约束,尽量减小边界效应对数值计算结果的影响。共划分6178个网格单元,57883个节点。土层物理力学参数结合地质勘察报告与工程实际情况进行取值,如表3所示。隧道下穿不考虑地下水、盾构停机及长期固结等影响因素。

表3 土层物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of soil layers

地层名称	重度/ ($kN \cdot m^{-3}$)	压缩模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	泊松比	厚度/ m
① ₂₁ 素填土	18.7	7.09	31.60	20.0	0.30	0~2.4
③ ₁ 粉质黏土	18.8	8.50	21.00	13.5	0.31	2.2
④ ₂₂ 粉砂	19.6	11.02	9.46	29.3	0.26	10.8
⑤ ₁ 粉质黏土	19.6	8.28	34.20	14.5	0.23	4.3~5.9
⑥ ₁ 粉质黏土	18.8	8.94	20.30	12.1	0.31	5.2~12.2
⑦ ₂₁ 粉土	19.4	10.64	9.00	23.0	0.28	3.0
⑦ ₂₂ 粉砂	19.2	11.85	11.80	27.3	0.29	2.1~3.7
⑧ ₂ 粉质黏土	19.4	8.32	26.30	14.1	0.28	27.3~35.0
⑧ ₁ 粉土	19.2	9.96	6.30	19.1	0.29	10.0

选取典型剖面进行研究,不同注浆加固深度下土体位移云图如图1所示。由图1可知,当注浆体距隧道顶部2m时,隧道下穿引起的土体最大沉降为1.81mm;当注浆体距隧道顶部12m时,隧道下穿引起的土体最大沉降为2.40mm;当注浆体距隧道顶部22m时,隧道下穿引起的土体最大沉降为3.81mm。综上所述,地表定向控域深孔注浆加固范围为距隧道顶部2m处的10m×40m×100m(竖向×垂直于沪宁城际高速铁路方向×沿沪宁城际高速铁路方向)区域。

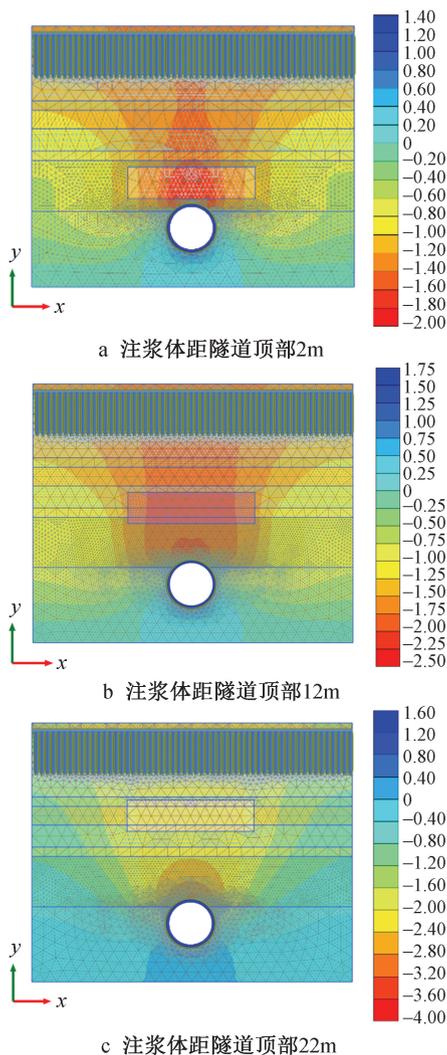


图 1 不同注浆加固深度下土体位移云图(单位:mm)

Fig. 1 Cloud maps of soil displacement at different grouting reinforcement depths (unit: mm)

3) 注浆加固范围验证

对未进行深孔注浆加固的盾构隧道下穿工况开展数值模拟分析,得到的沪宁城际高速铁路路基竖向位移曲线如图 2 所示。由图 2 可知,沪宁城际高速铁路路基竖向位移在盾构隧道中心线附近表现出明显的沉降槽规律,沉降最大值为 5.66mm。这表明不采取处理措施无法满足路基变形安全要求,变形影响范围与注浆方案中需要的控域范围吻合。

将沪宁城际高速铁路路基注浆加固方案中注浆区域内的岩土体参数替换为通过工艺试验得到的注浆体力学参数,模拟注浆加固后盾构隧道下穿工况,得到的沪宁城际高速铁路路基竖向位移曲线如图 3 所示。由图 3 可知,注浆加固后沪宁城际高速铁路沉降在隧道中心线附近处最大,约为 0.945mm,与未加固时相比,由于注浆体力学性能明

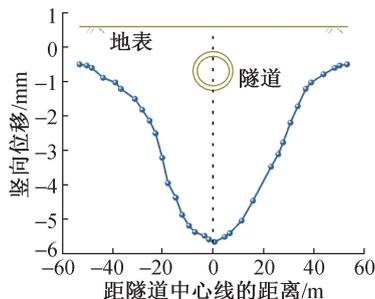


图 2 未加固时既有高速铁路路基竖向位移曲线

Fig. 2 The vertical displacement curve of the existing high-speed railway subgrade before reinforcement

显优于原有软弱地层,因而注浆加固后盾构隧道掘进对既有高速铁路路基变形的影响减小,变形值减小了 83.3%,这表明对本工程采用的地表定向控域深孔注浆加固技术是可行的。

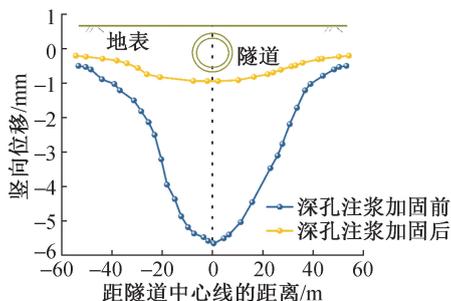


图 3 注浆加固后既有高速铁路路基竖向位移曲线

Fig. 3 The vertical displacement curves of the existing high-speed railway subgrade after grouting reinforcement

2.3 现场注浆施工

1) 前期准备

注浆钻孔设备进场前,对施工作业范围内既有管线和植被等进行迁移,并使用挖机等设备对场地进行整平和反复碾压,根据现场施工需求增设泥浆箱。做好进场原材料试验、检验及技术交底工作。

2) 测量定位

根据设计方案进行施工放线,在施工轴线上确定孔位,编上桩号、孔号、序号,依据基准点测量各孔口地面高程。桩位应严格按照设计图纸布设,横向布孔间距 1.6m,排距包括 0.4, 3.3m,孔位偏差 ≤ 50 mm。

3) 钻孔

施工场地分 5 个加固区域(见图 4),共配置 5 台 KR805 型多功能地质钻机。作业区域沿线路总长为 100m,每台钻机分配 20m 固定区域进行作业,对钻机与钻孔区域进行编号。对周边 4 条边线相应位置进行钻孔,通过双液浆进行封注形成帷幕。首

先进行单序排孔钻孔,然后进行双序排孔钻孔,按每排孔间隔 $\geq 4.8\text{m}$ 进行跳排钻孔。采用钻机按标出的孔位以设计倾斜角在地面进行钻孔,并采用 $\phi 146$ 套管跟进钻孔。孔位水平偏差 $\pm 2\text{cm}$,同时将钻机夹持器前端抵紧地面,以防止钻孔倾斜角波动。钻孔过程中做好详细记录,钻孔完成后进行退钻清孔操作。

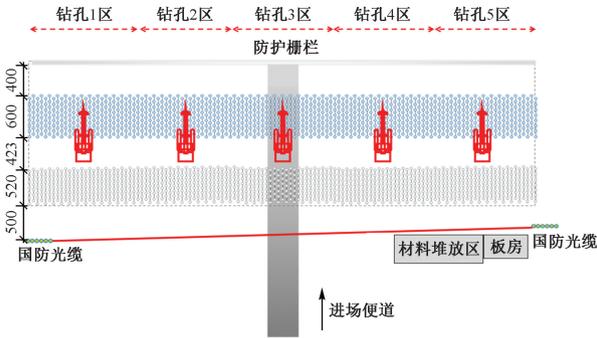


图4 施工区域孔位设计(单位:cm)

Fig. 4 Design of hole positions in the construction area (unit:cm)

4) 安装定向控域注浆管

钻孔达到成孔深度时,退钻杆后开始安装 $\phi 66 \times 5$ PVC 袖阀管及 $\phi 20$ PE 管(用于注入套壳料)。下管前提前检查管内壁是否光滑、管内是否无杂物及袖阀管胶皮位置密封性是否完好。袖阀管连接时接口处涂抹 PVC 胶水,同时使用胶布缠绕牢固。

5) 注入套壳料

袖阀管下入孔内后,通过 $\phi 20$ PE 管及时注入套壳料,直至泥浆通过钻孔孔口位置返出即可停止。然后拔出套管,如果套管拔出后泥浆液面下降,应补注套壳料。

6) 注浆加固

首先施作周边孔,然后施作中间孔。周边孔采用水泥-水玻璃双液浆进行封注加固,中间孔采用普通水泥单液浆掺入 HPC 外加剂进行加固。注浆跳孔施作顺序与钻孔跳孔顺序相对应。采用后退式分段注浆工艺,即由孔底开始向上注浆,每次注浆段长 1.0m ,第 1 注浆段完成后,后退注浆芯管,进行第 2 注浆段注浆,依次进行直至完成各段注浆加固。注浆结束后,采用水泥砂浆封闭注浆孔,防止堵塞出现空段。现场注浆加固施工如图 5 所示。

3 加固效果评价与现场监测

3.1 钻孔取芯法评价加固效果

注浆结束后对浆量少的孔、涌水量大的孔、终孔交圈处等设置检查孔,通过分析检查孔取芯率、岩芯完整性、强度等判定注浆加固效果,取芯率应 $>$



图5 现场注浆加固施工

Fig. 5 On-site grouting reinforcement construction

70%,强度应 $>0.3\text{MPa}$ 。注浆结束后,选取注浆结束时间达到 28d 的区域,按 10m/孔的设置方式进行钻孔取芯(见图 6),取芯段在注浆加固体内,取芯后岩芯完整率或采取率 $\geq 75\%$ 。



图6 钻孔芯样

Fig. 6 Drilling core sample

通过观察,两侧岩芯连续、完整,呈柱状,均匀性良好,采取率满足规范要求。部分钻孔芯样检测结果如表 4 所示。由表 4 可知,3 组试验芯样侧限抗压强度平均值分别为 0.57、0.58、0.62MPa,设计桩身强度为 0.50MPa,试件强度高于设计所需强度,较地质勘察报告中原地层承载力提高 4.2 倍,由此可判定注浆加固后路基强度达到了相应的加固效果。

表4 部分钻孔芯样检测结果

Table 4 Part of the drilling core sample test results

试件组号	直径/mm	高度/mm	抗压强度/MPa
1-1	99.6	99	0.56
	98.9	97	0.63
	99.1	99	0.52
1-2	98.7	98	0.62
	99.3	99	0.60
	98.7	98	0.51
1-3	99.1	99	0.62
	98.9	98	0.65
	99.1	98	0.59

3.2 弹性波 CT 法评价加固效果

通过注浆加固前后地震波数据采集与成像的对比分析判断注浆加固效果。在沪宁城际高速铁路所在场地附近布置 7 个物探钻孔,CT 钻孔由线

路外向沪宁城际高速铁路方向倾斜,与水平面呈 72° 夹角。本次探测区间地层主要为粉质黏土层,弹性波波速一般 $< 2\ 700\text{m/s}$ 。相邻 2 个钻孔之间均开展弹性波 CT 探测工作,共 6 组弹性波 CT,在注浆加固前后分别进行数据采集,进而判断注浆加固效果。

注浆加固前后弹性波 CT 测试结果(反演波速色谱)如图 7 所示,图中红色表示相对高速,蓝色表示相对低速。由图 7a 可知,注浆加固前探测区域内地震波波速整体较低,为 $1\ 820 \sim 2\ 020\text{m/s}$,且变化幅度较小,垂直方向上地震波波速随埋深的增加逐渐增大,水平方向上地震波波速基本相似。

由图 7b 可知,注浆加固后探测区域内地震波波速为 $1\ 820 \sim 2\ 300\text{m/s}$,垂直方向上地震波波速随埋深的增加逐渐增大,水平方向上地震波波速基本相似。

综合分析可知,30~42m 钻孔范围内(地表以下 28~40m),注浆加固前后地震波波速基本无变化;42~55m 钻孔范围内(地表以下 40~53m),注浆加固后地震波波速较注浆加固前有所提升,表明该范围内土体内孔隙减少,孔隙被浆液填充,土体密实度得到改善,固结程度增加。注浆加固范围(地表以下 42~52m)内地震波波速整体波动较小,表明岩土体内浆液填充较均匀,基本覆盖。

3.3 加固效果现场监测

为验证地表定向控域深孔注浆加固技术对既有高速铁路路基的加固效果,参照相关规范对竖向位移进行监测,确定下穿段监测等级为一级,监测点布设时设置监测断面,监测点埋设在原状土层,采用长度为 0.8m 的 $\phi 16$ 螺纹钢筋打入,钢筋顶端低于孔口约 20mm ,用黄砂回填至地表以下约 30mm 。监测断面纵向监测点沿隧道中心线及线路两侧布置,监测点间距 5m ,监测断面垂直线路方向间距 10m ,横向间距 $3 \sim 8\text{m}$ 。

数值模拟与现场监测得到的既有高速铁路路基竖向位移曲线如图 8 所示。由图 8 可知,注浆加固后盾构隧道下穿既有高速铁路期间,路基累积最大沉降为 0.755mm ,与数值模拟结果相差较小,较未加固时的理论变形减小了 86.7% ,注浆加固保证了既有高速铁路运营安全。

4 结语

1) 考虑超大直径盾构隧道下穿繁忙既有高速铁路的复杂工况,在下穿前采用地表定向控域深孔注浆加固技术改良隧道上方软弱土体。施工前进行预试验确定浆液配合比、注浆压力等参数,通过理论计算、数值模拟相结合的方式,确定注浆加固范围为距隧道顶部 2m 处的 $10\text{m} \times 40\text{m} \times 100\text{m}$ 区域,并通过数值模拟分析验证注浆加固的有效性。

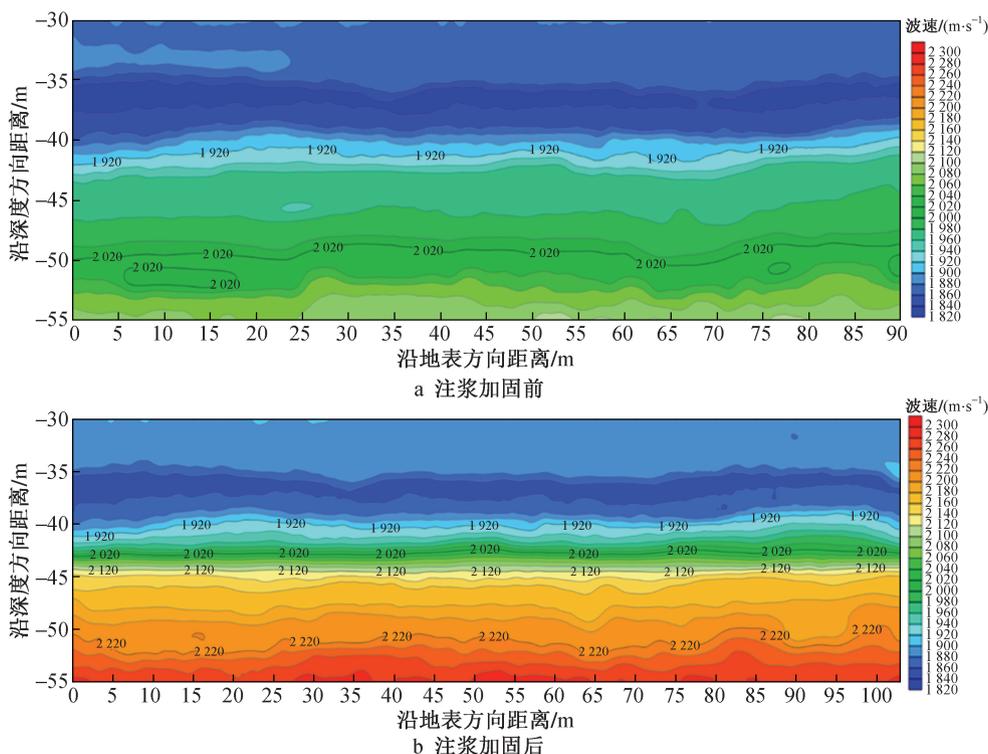


图 7 注浆加固前后弹性波 CT 测试结果

Fig. 7 Test results of elastic wave CT before and after grouting reinforcement

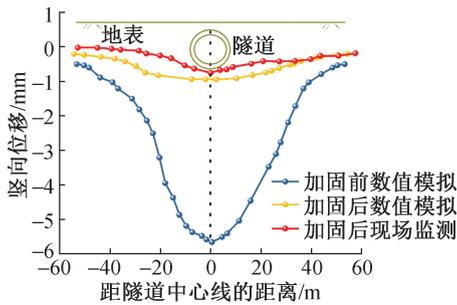


图8 数值模拟与现场监测得到的既有高速铁路路基竖向位移曲线

Fig. 8 The vertical displacement curves of the existing high-speed railway subgrade obtained through numerical simulation and on-site monitoring

2) 地表定向控域深孔注浆加固后,通过钻孔取芯法与弹性波 CT 法对加固效果进行了评价。注浆加固后土体密实度得到改善,浆液填充较均匀,强度较原地层提高了 4.2 倍,路基下方土体承载力得到提升,达到了设计要求与注浆加固的目的。

3) 地表定向控域深孔注浆加固技术降低了盾构隧道下穿时既有高速铁路路基发生沉降的风险,路基累积最大沉降为 0.755mm,较未加固时的理论变形减小了 86.7%,满足变形要求,保证了工程安全。

参考文献:

- [1] 柳献,纪汉卿,甘海杰,等.超高性能混凝土加固盾构隧道结构试验与数值研究[J].同济大学学报(自然科学版),2024,52(11):1720-1730.
LIU X,JI H Q,GAN H J,et al. Experimental and numerical study on shield tunnel strengthened by ultra-high performance concrete [J]. Journal of Tongji University (natural science), 2024, 52(11):1720-1730.
- [2] 韩圣章,冀叶涛,赵林嵩,等.盾构隧道下穿高铁站影响规律与控制措施:以天津地铁四号线下穿天津西站为例[J].科学技术与工程,2024,24(31):13601-13611.
HAN S Z,JI Y T,ZHAO L S,et al. Influence law and control measures of shield tunnel undercrossing high speed railway station: Taking the Tianjin Metro Line 4 as an example of undercrossing Tianjin West Station [J]. Science technology and engineering, 2024, 24(31):13601-13611.
- [3] 唐钱龙,李永恒,彭立敏,等.盾构下穿施工变形条件下既有铁路行车限速标准研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(9):2700-2708.
TANG Q L,LI Y H,PENG L M,et al. Research on speed limit standard of existing railway traffic under deformation of shield underpass construction [J]. Journal of railway science and engineering, 2022, 19(9):2700-2708.
- [4] 刘维正,孙康,戴晓亚,等.地铁盾构长距离下穿对既有铁路框架桥影响的数值与实测分析[J].铁道科学与工程学报,2022,19(1):208-218.

LIU W Z,SUN K,DAI X Y,et al. Numerical simulation and field monitoring of influence of metro shield tunnel undercrossing the existing railway frame bridge by long distance [J]. Journal of railway science and engineering, 2022, 19(1):208-218.

- [5] 夏群山.盾构下穿既有高速铁路框桥安全影响性研究[J].铁道工程学报,2021,38(6):82-86.
XIA Q S. Research on the safety influence of subway shield method crossing existing high-speed railway frame bridge [J]. Journal of railway engineering society, 2021, 38(6):82-86.
- [6] 黄龙,吴国伟,涂家康.软土地区盾构隧道斜下穿多股铁路路基变形规律[J].城市轨道交通研究,2023,26(9):170-174,179.
HUANG L,WU G W,TU J K. Deformation law of shield tunnel oblique under-passing existing multi-track railway subgrade in soft soil area [J]. Urban mass transit, 2023, 26(9):170-174, 179.
- [7] 杨剑,赵志坚,彭启辉,等.上软下硬地层袖阀管注浆对盾构下穿民房扰动控制分析[J].施工技术(中英文),2024,53(1):100-106.
YANG J,ZHAO Z J,PENG Q H,et al. Analysis on disturbance control effect of sleeve-valve-pipe grouting on shield tunneling crossing civil buildings in upper-soft and lower-hard strata [J]. Construction technology, 2024, 53(1):100-106.
- [8] 营升.盾构连续上跨下穿既有有线变形规律及控制技术研究[J].施工技术(中英文),2024,53(7):96-103.
YING S. Research on deformation characteristics and control technology of shield continuous crossing existing line [J]. Construction technology, 2024, 53(7):96-103.
- [9] LI Y B,MENG Q S,ZHANG Y,et al. Effect of high temperature on mechanical properties and microstructure of HSFCM [J]. Journal of marine science and engineering, 2023, 11(4):721.
- [10] 李慧,魏晨亮,李旭杰,等.水平小净距盾构隧道施工方案及影响性分析[J].施工技术(中英文),2025,54(16):43-48,60.
LI H,WEI C L,LI X J,et al. Construction scheme and influence analysis of horizontal small clear distance shield tunnel [J]. Construction technology, 2025, 54(16):43-48, 60.
- [11] 孙丰彪.大直径盾构隧道下穿既有高铁线变形控制技术研究[J].铁道建筑技术,2024(4):62-66.
SUN F B. Research on deformation control technology of large diameter shield tunneling under existing high-speed railway line [J]. Railway construction technology, 2024(4):62-66.
- [12] LI X Y,LIU W J,XU C J,et al. Explainable machine learning-based prediction model for dynamic resilient modulus of subgrade soils [J]. Transportation geotechnics, 2024, 49:101415.
- [13] XING T J,LIU H J,ZHENG J G,et al. Study on the effect of anchor cable prestress loss on foundation stability [J]. Applied sciences, 2024, 14(11):490.
- [14] ZHANG H G,LIU T,CUI Y X,et al. Experimental study on the deterioration mechanisms of physical and mechanical properties of red sandstone after thermal-acid coupling treatment [J]. Construction and building materials, 2024, 455:139106.