

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.02.010

# 基于径向水泥土桩的隧道变形矫正研究与应用

王 臣, 毛海和, 蔡宗洋, 张 戈

(北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037)

**摘要:** 针对我国运营盾构隧道的超限变形病害治理难题, 研发以径向水泥土桩隧道超限变形矫正工法为核心的综合隧道变形矫正技术体系。该体系在隧道外侧土体中主动构建由水平、竖向和斜向水泥土桩组成的空间网状加固体, 制定“先施作水平桩约束收敛、再施作竖直桩抬升沉降、后施作斜向桩协调变形”的优化施工顺序, 并采用压力分级控制等精细化策略以精准施加矫正力; 同时, 基于最小势能原理推导用于预估单环抬升与收敛矫正量的半经验公式, 形成了一套完整的技术措施。该技术体系在东北某地铁区间隧道工程中进行了应用验证, 结果表明, 径向水泥土桩隧道超限变形矫正工法能够协同矫正沉降与收敛问题, 有效稳定施工后沉降速率, 并显著改善渗漏病害。研究成果可为运营盾构隧道的病害治理提供创新性技术方案, 对类似工程项目具有参考价值。

**关键词:** 盾构隧道; 超限变形病害; 径向水泥土桩隧道超限变形矫正工法; 变形矫正; 渗漏病害

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)02-0081-08

## Research and Application of Tunnel Deformation Correction Based on Radial Cement-Soil Piles

WANG Chen, MAO Haihe, CAI Zongyang, ZHANG Ge

(Beijing Urban Construction Design &amp; Development Group Co., Ltd., Beijing 100037)

**Abstract:** To address the challenge of managing excessive deformation defects in operational shield tunnels in China, a comprehensive tunnel deformation correction technology system centered on the Radial Cement-Soil Pile Method for Correcting Excessive Tunnel Deformation has been developed. This system actively constructs a spatial network reinforcement body composed of horizontal, vertical, and inclined cement-soil piles in the soil outside the tunnel. It formulates an optimized construction sequence of “first constructing horizontal piles to restrict convergence, then constructing vertical piles to lift settlements, and finally constructing inclined piles to coordinate deformation” and adopts refined strategies such as graded pressure control to accurately apply correction forces. Meanwhile, based on the principle of minimum potential energy, a semi-empirical formula for predicting the single-ring lifting and convergence correction values has been derived, thereby forming a complete set of technical measures. This technology system has been applied and verified in a metro tunnel section in Northeast China. The results show that the Radial Cement-Soil Pile Method for Correcting Excessive Tunnel Deformation can synergistically correct settlement and convergence issues, effectively stabilize the post-construction settlement rate, and significantly improve leakage defects. The research results provide an innovative technical solution for the treatment of defects in operational shield tunnels and have reference value for similar engineering projects.

收稿日期: 2025-10-11 修回日期: 2025-12-21

第一作者: 王臣, 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事城市轨道交通设计、研究工作, wangchen1@bjucd.com

通信作者: 蔡宗洋, 男, 硕士, 高级工程师, 从事城市轨道交通设计研究工作, 235222951@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(52474236)

引用格式: 王臣, 毛海和, 蔡宗洋, 等. 基于径向水泥土桩的隧道变形矫正研究与应用[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(2): 81–88.

Wang Chen, Mao Haihe, Cai Zongyang, et al. Research and application of tunnel deformation correction based on radial cement-soil piles[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(2): 81–88.

**Keywords:** shield tunnel; excessive deformation defects; the radial cement-soil pile method for correcting excessive tunnel deformation; deformation correction; leakage disease

随着我国城市化进程的加速推进,城市轨道交通系统作为关键基础设施,其线网规模持续增大。截至2025年6月30日,中国内地共有58个城市投运城市轨道交通线路,总长度达12 381.48 km。其中,超3 000 km的线路运营时间超过10年,开始进入“老化关注期”。在长期列车荷载、周边工程活动、土体扰动及材料劣化等多因素耦合作用下,部分盾构隧道出现超限变形问题,尤其以纵向不均匀沉降和横向收敛变形最为突出,严重威胁运营安全与结构耐久性。随着运营年限增加,维护成本逐年上升。

全国已有部分城市的轨道交通盾构隧道出现了严重的变形(椭圆化和沉降)超限情况。例如,某城市轨道交通1号线盾构隧道变形超限率高达70%,最大椭圆超过200 mm,最大沉降超过240 mm,远超《城市轨道交通运营监测技术规范》(GB/T 39559.3—2020)等相关规范控制值,局部变形仍未稳定,危及行车安全<sup>[1-4]</sup>。

孙磊<sup>[5]</sup>针对盾构隧道管片结构出现的收敛变形、裂缝、渗漏水等病害,提出“微扰动注浆+钢环加固”的组合技术路径。李芹峰<sup>[6]</sup>介绍上海轨道交通运营隧道受损后采用的隧道外微扰动注浆和隧道内钢圈支撑加固技术,指出这两项技术可在非运营时间施工,对地面环境影响小。柳献等<sup>[7-8]</sup>通过半环与整环加固盾构隧道的试验研究表明,两种加固方式均能有效提高隧道结构刚度与极限承载能力,且钢板与混凝土衬砌黏结面破坏均为加固结构的关键控制因素。然而,上述两种技术也存在相应局限。注浆法易出现耐久性不足的情况;钢环加固能够显著提升隧道环向刚度,但加重了沉降负担(管片增重超15%),且工艺不可逆,使盾构隧道管片结构的破坏形态变为脆性破坏。此外,锈蚀问题导致维护工作量大,增加了全生命周期成本。

针对上述问题,本文提出径向水泥土桩隧道超限变形矫正工法。该工法通过径向水泥土桩形成空间支撑网络,实现沉降与收敛的协同治理。其创新内容包括:在隧道内打设径向空间水泥土桩,改善隧道周围岩土性,形成有效的空间支撑体系;精准调控回浆压力大小,有效控制隧道变形矫正力,合理规划径向桩施工顺序,精确矫正隧道椭圆化;注重长效性与稳定性,避免传统方法的反弹问题。本工法通过可控力旋喷注浆形成水泥土桩,不仅能即时矫正变形,还能

改善周围土体性质,预防未来变形,为我国盾构隧道病害防控提供新的技术支撑。

## 1 基于径向水泥土桩的隧道矫正技术

本研究提出以径向水泥土桩隧道超限变形矫正工法为核心的超限变形综合矫正技术体系。该体系集成了创新工法、理论模型与精细控制策略,旨在实现运营隧道超限变形的长效、协同与可控治理。

### 1.1 工法原理

径向水泥土桩隧道超限变形矫正工法的核心矫正机理在于:在已发生变形的隧道结构外侧土体中,主动构建一个由径向水泥土桩组成的空间网状加固体<sup>[9-10]</sup>。如图1所示,该加固体由水平加固桩群、竖向抗拔桩群和斜向支撑桩群共同构成,形成一个对隧道衬砌的复合支撑体系。通过控制施工过程的回浆压力和施工顺序,控制矫正力 $\Delta P$ ,从而达到隧道变形超限精准矫正目的,并实现土体的定向改良;利用水泥土桩硬化后提供的桩-土复合地基支撑力与摩阻力,有效抵消导致持续变形的土压力,最终达到协同矫正沉降与收敛、改善隧道设计净空并稳定结构的目的。

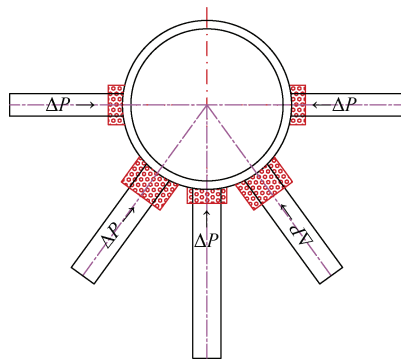


图1 径向水泥土桩隧道超限变形矫正工法原理示意  
Figure 1 Schematic Diagram of the Radial Cement-Soil Pile Method for Correcting Excessive Tunnel Deformation

### 1.2 实施流程

施工配置与工序基于隧道变形模式、地质条件进行精细化设计。其实施流程可分为以下6个阶段,如图2所示。

- 1) 现场调查与方案设计: 依监测、勘察及结构数据,确定桩群布置方案(含参数)与施工策略。
- 2) 孔位放样与开孔: 用管片现有孔或新开孔(水钻穿透保护层植套管),孔口装密封止喷装置防泄漏。

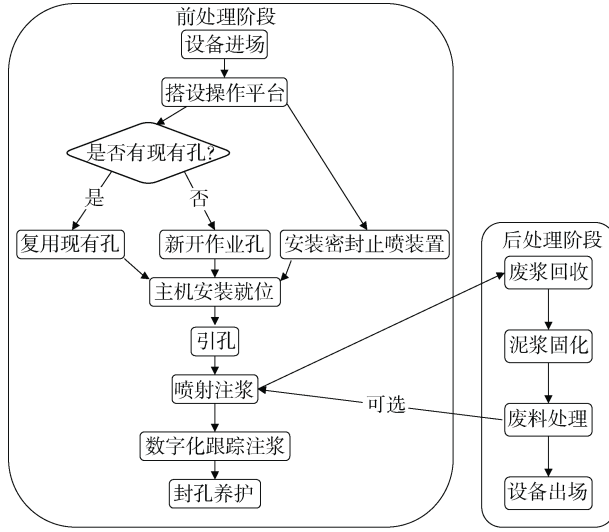


图2 径向水泥土桩隧道超限变形矫正工法实施流程

Figure 2 Flowchart of the Radial Cement-Soil Pile Method for Correcting Excessive Tunnel Deformation

3) 设备就位与引孔: 钻机按设计角度定位, 护壁引孔至规定深度。

4) 浆液配制与喷射注浆: 按设计水灰比自动拌制水泥浆, 搅拌过滤后高压泵输送, 同步喷射成桩, 注浆压力依目标动态调整。

5) 数字化跟踪注浆: 桩体形成后, 对桩-管片缝隙二次注浆, 填补空隙增强整体性。

6) 封孔与养护: 注浆后关阀门, 凝固拆密封, 用微膨胀水泥或螺纹堵头封孔, 确保长期密封。

### 1.3 精细化控制策略

1) 压力分级控制策略: 采用“稳压保压”工艺, 避免注浆压力骤升骤降对已处于临界状态的管片结构造成冲击损伤。通过精细控制压力, 确保土体被平稳挤压密实的同时, 隧道结构能够缓慢、平稳地矫正至目标位置。

2) 过渡段平滑处理: 在加固区与非加固区之间设置力学过渡段(通常延伸数环), 通过逐渐减小桩径或增大桩距, 使加固区与未加固区之间的刚度变化趋于平缓。

## 2 半经验矫正预估技术

### 2.1 管片抬升矫正半经验矫正预估公式

管片抬升矫正力示意如图3所示, 采用高压喷射注浆工艺, 即向发生变形超限的单个管片外围土体进行注浆, 沿管片外圆周形成桩柱结构。注浆过程中, 注浆压力经外围土体传递至管片, 从而对管片施加矫正

力, 以修正其超限变形。

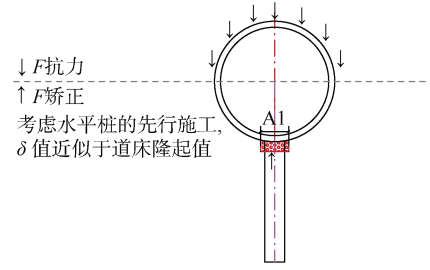


图3 管片抬升矫正力示意

Figure 3 Schematic diagram of segment lifting correction force

其中矫正压力  $F_{\text{修正}}$  及地层抗力  $F_{\text{抗力}}$  可用下式计算得到,

$$F_{\text{修正}} = c_i \times \Delta P_i \times A_{1i} \quad (1)$$

$$\Delta P_i = P_i \times \beta \quad (2)$$

式中,  $c_i$  为第  $i$  个管片旁的其他管片对第  $i$  个管片的约束影响系数;  $\Delta P_i$  为第  $i$  个管片上的矫正压力, MPa;  $A_{1i}$  为矫正压力作用于第  $i$  个管片的加固体上每延米的有效作用面积,  $\text{m}^2$ , 所述加固体为桩柱与管片相接触的一端并且该端为加粗端,  $P_i$  为第  $i$  个管片施工时的注浆压力, MPa;  $\beta$  为水泥浆液压力传递效率系数(取值范围建议为 0.01~0.05)。

$$F_{\text{抗力}} = K_{vi} \times e_i \times A_{2i} \quad (3)$$

式中,  $K_{vi}$  为第  $i$  个管片旁的地基反力系数,  $\text{kN}/\text{m}^3$ ;  $e_i$  为第  $i$  个管片与土体间的密实系数(取值范围建议为 0.6~1.0);  $A_{2i}$  为盾构隧道的与桩柱相对的一侧的土体每延米有效作用面积,  $\text{m}^2$ 。

结合图3推导公式, 管片抬升矫正量  $\delta$  如下:

$$\delta_{ii} = \frac{c_i \times \Delta P_i \times A_{1i}}{K_{vi} \times e_i \times A_{2i}} \quad (4)$$

式中,  $\delta_{ii}$  为第  $i$  个管片自身进行注浆时对自身的竖直矫正量, m;

同理可推导出相邻环对本环管片的矫正量:

$$\delta_{ji} = \sum_{j=1}^n \frac{\delta_{jj}}{d_{ji}^k} = \sum_{j=1}^n \frac{c_j \times \Delta P_j \times A_{1j}}{K_{vj} \times e_j \times A_{2j} \times d_{ji}^k} \quad (5)$$

式中,  $\delta_{ji}$  为第  $j$  个管片进行注浆时对第  $i$  个管片的竖直矫正量, m;  $\delta_{jj}$  为第  $j$  个管片自身注浆对自身竖直方向的矫正量, m;  $d_{ji}$  为第  $j$  个管片与第  $i$  个管片之间的距离, m;  $k$  为衰减因子(取值为 1~2);  $n$  为其他在注浆时会影响第  $i$  个管片的竖直方向矫正量的管片的总数量;  $c_j$  为第  $j$  个管片旁的其它管片对第  $j$  个管片的约束影响系数;  $\Delta P_j$  为第  $j$  个管片上的矫正压力, MPa;  $A_{1j}$

为矫正压力作用于第  $j$  个管片的加固体上每延米的有效作用面积, 单位为  $\text{m}^2$ , 所述加固体为桩柱与管片相接触的一端并且该端为加粗端;  $K_{vj}$  为第  $j$  个管片旁的地基反力系数, 单位为  $\text{kN}/\text{m}^3$ ;  $e_j$  为第  $j$  个管片与土体间的密实系数;  $A_{2j}$  为盾构隧道的与桩柱相对的一侧的土体每延米有效作用面积, 单位为  $\text{m}^2$ ;

基于最小势能原理, 推导出用于预估单环管片抬升矫正量  $\delta_i$  的半经验公式:

$$\delta_i = \delta_{ii} + \delta_{ji} \quad (6)$$

式中,  $\delta_i$  为第  $i$  个管片的竖直方向的总矫正量,  $\text{m}$ 。

## 2.2 管片横向收敛半经验矫正预估公式

管片横向收敛矫正力的作用原理如图 4 所示, 具体通过在管片外侧实施水平注浆作业, 于管片外圆面形成桩柱结构。注浆过程中所产生的注浆压力, 通过管片外侧土层传递至管片, 从而在管片上形成矫正力, 对管片的超限变形实施收敛矫正。

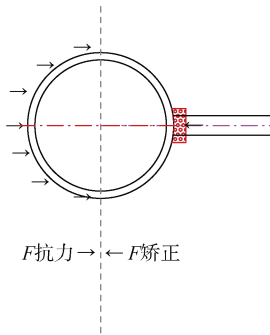


图 4 管片横向收敛矫正力示意

Figure 4 Schematic segment transverse convergence correction force

参考上述管片抬升矫正原理, 横向收敛的矫正压力  $F_{\text{矫正}}$  与  $F_{\text{抗力}}$  公式为:

$$F_{\text{矫正}} = \Delta P_i \times A_{li} \quad (7)$$

$$F_{\text{抗力}} = E_{ci} \times b_i \times f_i \quad (8)$$

式中,  $E_{ci}$  为第  $i$  个管片的混凝土弹性模量,  $\text{MPa}$ ;  $b_i$  为第  $i$  个管片水平方向的厚度,  $\text{m}$ ;  $f_i$  为第  $i$  个管片的刚度折减系数(取值范围建议为 0.5~1)。

结合图 4 推导横向收敛矫正量  $S$  公式如下:

$$S_{ii} = \Delta P_i \times e_i \frac{R_i^2 \times (1 - \nu_{ci}^2)}{E_{ci} \times b_i \times f_i} \quad (9)$$

$$\Delta P_i = P_i \times \beta \quad (10)$$

$$R_i = r_i + t/2 \quad (11)$$

式中,  $S_{ii}$  为第  $i$  个管片自身注浆对自身的收敛矫正量,

$\text{m}$ ;  $R_i$  为管片壁厚中心线的直径,  $\text{m}$ ;  $r_i$  为第  $i$  个管片的内径,  $\text{m}$ ;  $t$  为第  $i$  个管片的水平方向的厚度,  $\text{m}$ ;  $\nu_{ci}$  为第  $i$  个管片的混凝土泊松比(取 0.2)。

同理可推导出相邻环对本环管片的矫正量:

$$S_{ji} = \sum_{j=1}^n \frac{S_{jj}}{d_{ji}^k} = \sum_{j=1}^n \frac{\Delta P_j \times e_j \times R_j^2 \times (1 - \nu_{cj}^2)}{E_{cj} \times b_j \times f_j \times d_{ji}^k} \quad (12)$$

式中,  $S_{ji}$  为第  $j$  个管片自身注浆对第  $i$  环的收敛矫正量,  $\text{m}$ ;  $S_{jj}$  为第  $j$  个管片自身注浆对第  $j$  环的收敛矫正量,  $\text{m}$ ;  $R_j$  为第  $j$  个管片的水平方向的内径,  $\text{m}$ ;  $\nu_{cj}$  为第  $j$  个管片的混凝土泊松比(取 0.2);  $E_{cj}$  为第  $j$  个管片的混凝土弹性模量,  $\text{MPa}$ ;  $b_j$  为第  $j$  个管片水平方向的厚度,  $\text{m}$ ;  $f_j$  为第  $j$  个管片的刚度折减系数(取值范围建议为 0.5~1);

基于最小势能原理, 推导出用于预估单环管片收敛矫正量  $S_i$  的半经验公式为

$$S_i = S_{ii} + S_{ji} \quad (13)$$

式中,  $S_i$  为第  $i$  个管片的总收敛矫正量,  $\text{m}$ 。

## 3 工程应用实例

为验证径向水泥土桩隧道超限变形矫正工法在整治盾构隧道超限变形中的有效性, 选取东北某运营超 10 年的地铁隧道开展工程应用, 该线路病害典型, 地质条件具有代表性。本工程是该工法在运营地铁隧道大规模整治中的首次全面应用, 对验证其适用性与可靠性具有重要意义。

### 3.1 工程概况与病害特征

该隧道管片设计参数如下: 内径为  $\Phi 5\,400\text{ mm}$ , 厚度为  $300\text{ mm}$ , 宽度为  $1\,200\text{ mm}$ 。隧道下卧主要位于  $A_{\text{③}}$  层中砂层(中密状态, 受扰动易软化), 其顶部为  $A_{\text{③T2}}$  淤泥质粉质黏土层(流塑状态)。  $A_{\text{③}}$  层中砂属强透水地层(渗透系数  $64.50 \sim 72.74\text{ m/d}$ ), 为孔隙微承压水层。期间虽经历多次常规注浆治理, 均未能从根本上遏制变形发展趋势。截至 2024 年年底, 根据运营长期监测数据显示: 上行线最大累计沉降点下沉量达  $106.9\text{ mm}$ , 最大水平收敛值为  $92.7\text{ mm}$ ; 下行线最大累计沉降点下沉量达  $94.1\text{ mm}$ , 最大水平收敛值高达  $124.8\text{ mm}$ , 如图 5 所示。

超限结构变形已引发渗漏水、漏泥沙、管片错台(最大错台量  $35\text{ mm}$ )等一系列结构性损伤。轨道几何尺寸严重偏离设计标准, 接触网导高最低仅余  $3\,965\text{ mm}$ (设计标准为  $4\,040\text{ mm}$ ), 对列车安全运营构成直接威胁。

微动探测技术进一步揭示,隧道仰拱下方3~7 m深度范围内存在多处低速异常区,证实该区域因长期水土流失已形成疏松、富水的软弱带。此前多次常规

注浆治理效果不佳,表明在此类敏感且易扰动的地质条件下,传统工法难以实现长效整治。地表纵断面如图6所示。

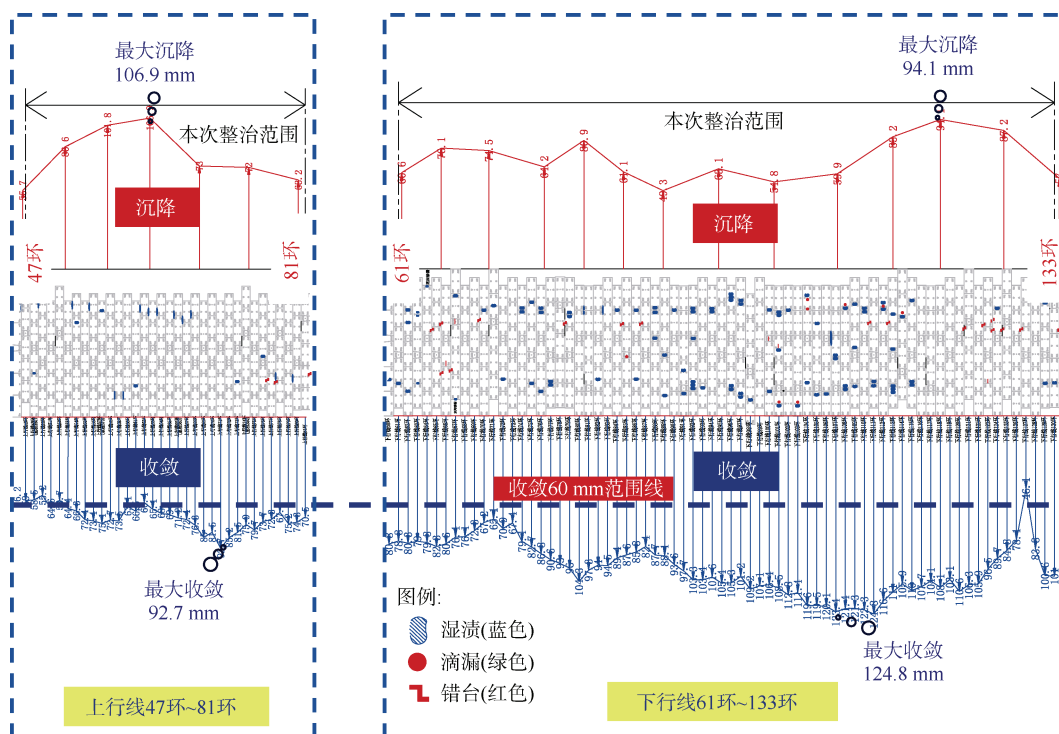


图5 东北某地铁区间隧道初始病害情况

Figure 5 Initial defect conditions in a metro tunnel section in Northeast China

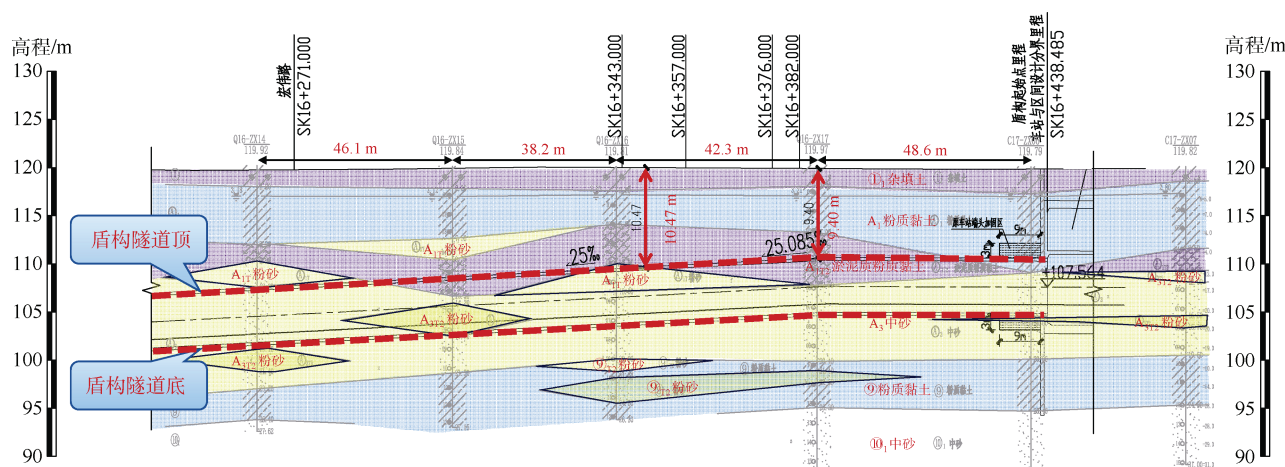


图6 地质纵断面

Figure 6 Geological longitudinal section

### 3.2 隧道矫正设计与施工

基于该地铁运营区间隧道的变形特征与地质条件,本研究制定了针对性的径向水泥土桩隧道超限变形矫正工法整治方案。该方案以构建空间网状加固体为核心,通过控制回浆压力来控制矫正力、施工顺序

与过程控制参数,实现超限变形的协同矫正。

#### 3.2.1 桩基配置设计

径向水泥土桩隧道超限变形矫正工法采用水平、竖直与斜向桩组合的立体加固体系,其设计参数根据变形量与地质条件差异化设置。

1) 水平桩: 直径  $\Phi 1\,000\text{ mm}$ , 间距  $2\,400\text{ mm}$ , 旨在提供侧向约束力, 抑制隧道水平收敛变形。

2) 竖直桩: 直径  $\Phi 1\,200\text{ mm}$ , 间距  $2\,400\text{ mm}$ (沉降量  $\geq 80\text{ mm}$  区段)或  $3\,600\text{ mm}$ (沉降量  $50\sim 80\text{ mm}$  区段), 用于提供竖向支撑, 矫正不均匀沉降。

3) 斜向桩: 直径  $\Phi 800\text{ mm}$ , 倾角  $45^\circ$ , 间距  $2\,400\text{ mm}$ , 通过斜向支撑协调隧道整体变形, 增强结构稳定性。桩体长度根据地层条件动态调整, 竖直桩需穿透软弱土层至稳定持力层(粉质黏土层), 平均桩长  $4\sim 5\text{ m}$ 。

施工顺序遵循“先约束、后抬升、再协调”的原则(见图 7), 具体流程如下: 先施作水平桩约束变形, 间隔  $4\sim 5$  环; 再施作竖直桩抬升沉降, 监测隆起; 最后施作斜向桩协调变形, 增强支撑。

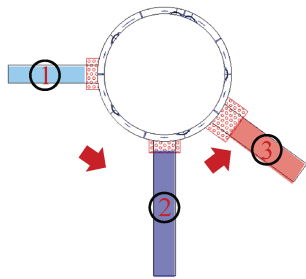


图 7 施工顺序示意

Figure 7 Schematic diagram of the construction sequence

该顺序通过工程实践验证, 可有效减少施工扰动, 避免因同时多向施工导致的管片应力重分布失衡。

3.2.2 隧道矫正力控制设计

施工过程中的变形控制遵循“可控”原则, 通过实时监测系统对管片位移实施动态反馈。单次施工所致管片环变形量需控制在  $5\text{ mm}$  以内, 以保障施工期间隧道结构的安全稳定。最终纠偏精度的验收标准为: 矫正后隧道收敛内缩量不超过  $45\text{ mm}$ , 沉降抬升量不超过  $35\text{ mm}$ , 且断面净空符合《地铁设计规范》(GB 50157-2013)的限值要求。核心控制参数包括注浆压力、浆液配比及实时反馈机制。

1) 注浆压力控制: 采用“稳压保压”工艺。通过动态调节注浆压力与回浆压力, 实现矫正力的精准施加。

2) 浆液配比: 水灰比设置为  $0.8\sim 1.0$ , 水泥采用 P-O 42.5 级, 浆液流动性控制在  $150\sim 180\text{ mm}$ (流锥试验), 通过对成桩芯样进行无侧限抗压强度试验, 要求  $28\text{ d}$  龄期强度不低于  $1.0\text{ MPa}$ , 确保桩体强度与耐久性。

3) 实时监测与反馈: 依托全自动化监测系统, 实时采集管片位移、土压力及桩体形成数据。采用公式

计算的矫正量  $\delta_i$  与实测值比对, 动态调整施工参数。

3.3 整治效果分析

整治后隧道变形得到显著矫正, 具体效果如表 1 及图 8 所示。

表 1 径向水泥土桩隧道超限变形矫正工法整治工程效果统计  
Table 1 Statistics on the effects of the Radial Cement-Soil Pile Method for Correcting Excessive Tunnel Deformation

| 指标            | 上行线    | 下行线   |
|---------------|--------|-------|
| 平均沉降矫正量/mm    | +19.6  | +19.4 |
| 最大沉降矫正量/mm    | +30.6  | +33.1 |
| 平均收敛矫正量/mm    | -11.14 | -18.2 |
| 最大收敛矫正量/mm    | -18.5  | -41.8 |
| 工后沉降速率/(mm/d) | <0.02  | <0.02 |



图 8 工后隧道表面情况

Figure 8 Apparent condition of the tunnel after remediation

结果表明, 径向水泥土桩隧道超限变形矫正工法有效实现了隧道沉降与收敛变形的协同控制, 施工后下半环渗漏情况得到显著改善。在平均抬升  $2\text{ cm}$  的基础上, 长期监测显示大部分测点未出现沉降趋势。在  $9\sim 10$  个月的观测期内, 上行线工后沉降值介于  $-2.4\sim -0.8\text{ mm}$  之间, 下行线工后沉降值介于  $-3.6\sim 0.7\text{ mm}$  之间, 最大沉降速率稳定控制在  $0.014\text{ mm/d}$  以下的极低水平, 这一数据充分证明了该工法具备优异的长效性, 显著优于传统注浆工法, 充分证明了径向水泥土桩隧道超限变形矫正工法具有良好的长期稳定性。

3.4 典型断面分析及计算对比

以图 9 上行线第 60 环与下行线第 107 环变形数据为例, 道床隆起量分别为  $20.5\text{ mm}$  与  $17.9\text{ mm}$ , 水平收敛内缩量分别为  $18.6\text{ mm}$  与  $31.5\text{ mm}$ , 竖向收敛变化量分别为  $17.3\text{ mm}$  与  $32.0\text{ mm}$ 。其变形时程曲线清晰地呈现出不同桩基施工阶段的矫正效果: 在水平桩施工阶段, 收敛变形初步得到抑制; 在竖直桩施工阶段, 沉降得到了有效控制; 而在斜桩施工阶段, 整体变形进一步趋于协调, 最终使得断面形态显著改善。

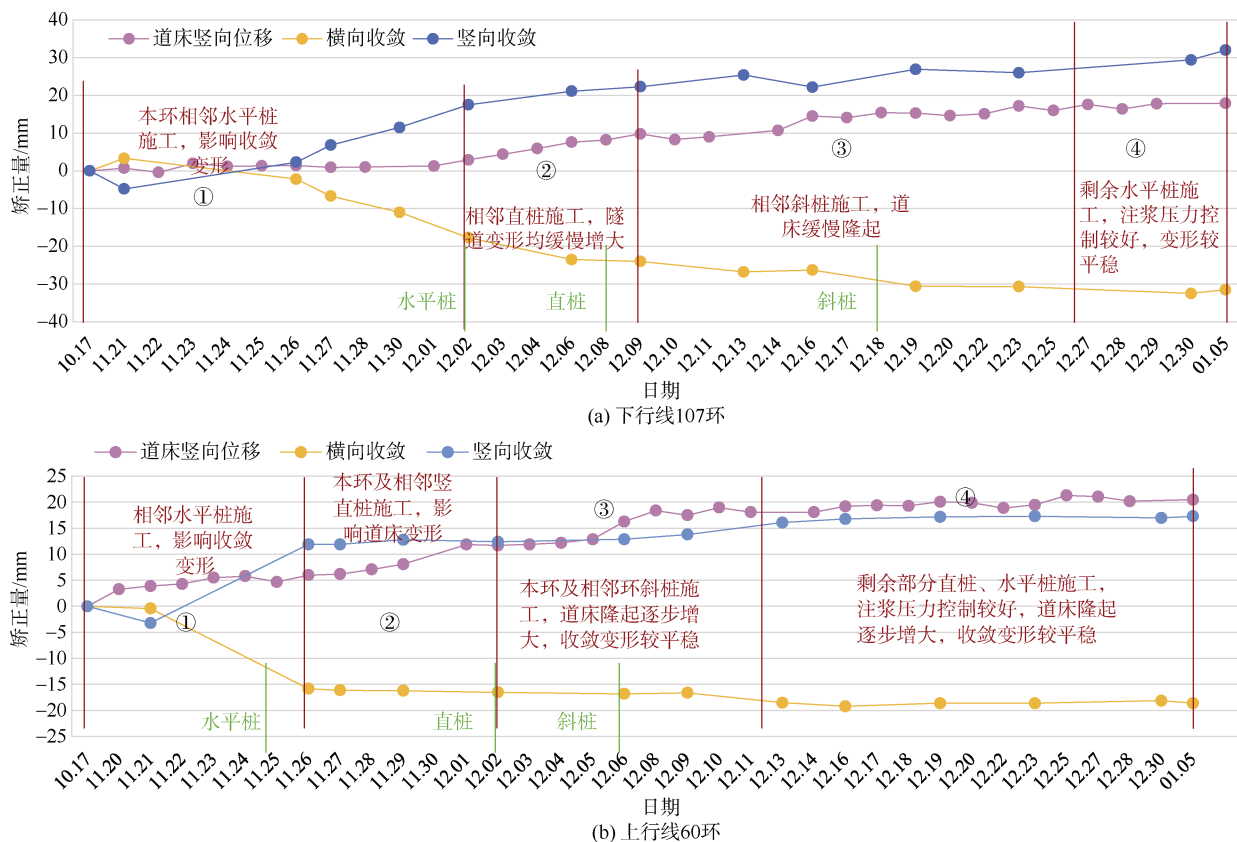


图9 典型环变形数据分析

Figure 9 Analysis of typical segment ring deformation data

通过具体算例对半经验公式的可靠性予以了验证。在沉降矫正方面, 以上行线第60环竖桩施工为例, 将施工参数( $\Delta P=0.2$  MPa,  $A_{1i}=1.4$  m<sup>2</sup>,  $K_v=5\ 000$  kN/m<sup>3</sup>)代入公式(2), 经计算得出单环抬升量 $\delta_{ii}$ 为5.8 mm, 与实测隆起值4.3 mm趋势基本相符。考虑相邻5环桩基施工影响( $d_j=1.2$  m、2.4 m、3.6 m、4.8 m、6.0 m), 将 $d_j$ 代入公式(1), 经计算得出相邻环对其抬升量分别为 $\delta_{ji}=4.36$ 、1.44、0.74、0.47、0.33 mm, 故本环总隆起量为20.4 mm, 与实测隆起值20.5 mm趋势基本相符。

在收敛矫正方面, 以上行线第60环水平桩施工为例, 代入参数( $\Delta P=0.3$  MPa,  $e=0.8$ ,  $R=2.85$  m,  $E_c=34\ 500$  MPa)于公式(6), 计算得单桩引起的收敛矫正量 $S_{ii}$ 为-4.52 mm, 与实测初始缩径值-4.1 mm高度吻合。考虑相邻5环桩基施工影响( $d_j=1.2$ 、2.4、3.6、4.8、6.0 m), 将 $d_j$ 代入公式(5), 经计算得出相邻环对其抬升量分别为 $S_{jj}=-3.77$ 、-1.88、-1.27、-0.94、-0.75 mm, 故本环总收敛矫正量为-21.74 mm, 与实测缩径值-18.6 mm趋势相符, 有效验证了公式对单桩及相邻桩矫正效应的精准预测能力。算例证明, 该半经验公式可为工程设计与效果预估提供定量参考。

### 3.5 各桩型矫正规律

1) 水平桩的影响规律: 水平桩施工一般会使得隧道水平收敛减小、竖向净空增大, 且部分区域存在道床沉降抬升现象。该现象表明, 隧道下半环与周围土体存在一定程度的脱空。水平桩旋喷至下半环时, 浆液会填充于空隙区域, 进而导致道床抬升。从贡献占比分析, 水平桩在控制隧道竖向净空变化及水平收敛变形方面的贡献最为突出, 贡献占比达50%~90%, 是矫正该类变形的关键桩型。

2) 竖桩的影响规律: 竖桩主要影响隧道的竖向变形, 尤其对道床的抬升效应较为明显, 但其对隧道水平收敛变形的影响相对有限。研究表明, 竖桩的矫正效果并非独立发挥作用, 而是受相邻5环范围内已施工竖桩的显著影响, 这表明其施工具有明显的群桩效应。从贡献占比分析, 竖桩在道床竖向变形矫正中占比较高, 贡献占比达30%~60%, 这是其核心贡献方向。

3) 倾斜桩的影响规律: 倾斜桩的影响兼具水平与竖向变形控制的特点。因其数量约为直桩数量的2倍, 其对道床隆起的总贡献与竖桩大致相当。同时, 倾

斜桩对抑制隧道水平收敛也具有一定作用。其贡献占比体现在对道床隆起及水平收敛的综合影响方面:对收敛的贡献占比为10%~30%,对道床竖向变形的贡献占比为20%~50%,在整体变形控制体系中发挥着重要的协同加固作用。

## 4 结论

本研究针对运营盾构隧道超限变形整治,通过理论创新、技术研发与工程实践,形成了一套完整的关键技术体系。主要研究成果如下。

1) 基于空间网状支撑理论,构建径向水泥土桩隧道超限变形矫正工法的理论体系。随后,通过工程实践验证了该工法的有效性。结果表明,其具备微扰动、长效性(工后沉降速率小于0.014 mm/d)、多病害协同治理(同步解决沉降、收敛、渗漏等问题)的三大核心优势,为行业提供了全新的解决方案。

2) 揭示径向水泥土桩隧道超限变形矫正工法的矫正机理,并建立设计理论。推导出用于预估单环矫正量的半经验公式,并通过实际项目数据验证了其合理性。同时,明确了各类桩基的贡献度:水平桩对收敛矫正贡献50%~90%,竖直桩与斜桩共同主导沉降抬升(贡献50%~80%)。

3) 构建了完整的施工控制与质量验证体系。确定了“水平桩→竖直桩→斜桩”的优化施工顺序。建立基于实时监测数据的动态反馈机制,有效保障了施工安全与纠偏精度。

4) 基于全生命周期成本分析理论,相较于传统注浆(需约1~2年重复施工)与钢环加固方案,本工法凭借一次施工、效果长效稳定的特点,可显著减少后续维护与重复整治成本,在全生命周期内具有显著经济优势。

5) 尽管径向水泥土桩隧道超限变形矫正工法在隧道变形矫正领域取得了一定进展,未来还需在优化布桩设计、长期性能跟踪及拓展技术应用方面进一步研究。

## 参考文献

- [1] 袁云辉,高永.盾构隧道收敛与病害特征及性能相关性研究[J].地下空间与工程学报,2023,19(1):319-325.  
YUAN Yunhui, GAO Yong. Study on the correlation between convergence and structural damage characteristics and performance of shield tunnels[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2023, 19(1): 319-325.
- [2] 叶灏睿,刘庭金,黄志斌,等.某软土加固地层盾构隧道病害规律及原因分析[J].铁道科学与工程学报,2025,22(11):5064-5077.  
YE Haorui, LIU Tingjin, HUANG Zhibin, et al. Disease patterns and causes of shield tunnel in reinforced soft soils[J].

- Journal of railway science and engineering, 2025, 22(11): 5064-5077.
- [3] 陈仁朋,刘慕淳,孟凡衍,等.基坑开挖旁侧盾构隧道结构横向受力与变形研究[J].岩土工程学报,2023,45(1):24-32.  
CHEN Renpeng, LIU Muchun, MENG Fanyan, et al. Circumferential forces and deformations of shield tunnels due to lateral excavation[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2023, 45(1): 24-32.
- [4] 邹洋,叶艺超,唐钱龙,等.考虑接头转动的盾构隧道椭圆化环变形行为研究[J].中南大学学报(自然科学版),2025,56(9):3797-3809.  
ZOU Yang, YE Yichao, TANG Qianlong, et al. Deformation behavior of elliptic ring in shield tunnel considering joint rotation[J]. Journal of central south university (science and technology), 2025, 56(9): 3797-3809.
- [5] 孙磊.盾构隧道管片结构病害治理措施[J].城市道桥与防洪,2025(7):252-256.  
SUN Lei. Measures for treatment of defects in segment structure of shield tunnels[J]. Urban roads bridges & flood control, 2025(7): 252-256.
- [6] 李芹峰,许熠,柳献.轨道交通盾构法区间隧道结构受损补强加固措施的发展和创新[J].隧道与轨道交通,2023(增刊1):34-37.  
LI Qinfeng, XU Yi, LIU Xian. Development and innovation of reinforcement measures for structural damage of shield tunnel in rail transit[J]. Tunnel and rail transit, 2023(S1): 34-37.
- [7] 柳献,张浩立,唐敏,等.内张钢圈加固盾构隧道结构承载能力的试验研究:半环加固法[J].现代隧道技术,2014,51(3):131-137.  
LIU Xian, ZHANG Haoli, TANG Min, et al. Experimental study of the ultimate bearing capacity of a shield tunnel reinforced by a semi-ring steel plate[J]. Modern tunnelling technology, 2014, 51(3): 131-137.
- [8] 柳献,唐敏,鲁亮,等.内张钢圈加固盾构隧道结构承载能力的试验研究:整环加固法[J].岩石力学与工程学报,2013,32(11):2300-2306.  
LIU Xian, TANG Min, LU Liang, et al. Experimental study of ultimate bearing capacity of shield tunnel reinforced by full-ring steel plate[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2013, 32(11): 2300-2306.
- [9] 陈用伟,冯师,柳满军,等.MJS工法在杭州地铁3号线盾构隧道中的应用[J].建筑科技,2022,6(3):100-103.  
CHEN Yongwei, FENG Shi, LIU Manjun, et al. Application of MJS method in the shield tunnel of Hangzhou metro line 3[J]. Building technology, 2022, 6(3): 100-103.
- [10] 陈昌富,廖佳卉,蔡焕,等.基于扰动状态概念水泥土桩-土界面强度演化规律研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2024,51(11):23-32.  
CHEN Changfu, LIAO Jiahui, CAI Huan, et al. Research on the evolution law of cemented soil-soil interface strength based on the disturbed state concept[J]. Journal of Hunan University (natural sciences), 2024, 51(11): 23-32.

(编辑:王艳菊)