

# 城市轨道交通盾构隧道变形超限的壁后 注浆加固治理技术

顾志敏 吴 哲

(苏州市轨道交通集团有限公司运营一分公司,215101,苏州//第一作者,高级工程师)

**摘 要** 城市轨道交通盾构隧道结构超限变形极有可能引发隧道结构失稳甚至破坏,使其丧失使用功能。因此需要采取必要加固或纠偏措施治理盾构隧道结构超限变形。以苏州轨道交通实际运营线路盾构隧道为例,介绍了盾构隧道管片壁后注浆横向纠偏技术,结合三维激光扫描监测数据分析了盾构隧道管片壁后注浆加固效果。由分析可知,管片壁后注浆可有效提升盾构隧道结构的强度,能够纠正盾构隧道结构超限收敛变形,纠偏范围可控制在 0~20 mm 内。同时需通过轨道精调等处理道床存在的问题,这可有效控制盾构隧道变形超限带来的结构问题。

**关键词** 城市轨道交通;盾构隧道;变形超限;壁后注浆

**中图分类号** U457+.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.05.014

## Research on Wall Grouting Reinforcement Measures for Urban Rail Transit Shield Tunnel Deformation Exceeding Limit

GU Zhimin, WU Zhe

**Abstract** Urban rail transit shield tunnel structure deformation exceeding limit can possibly cause tunnel structure instability and even destruction, loss of functionality. Therefore necessary reinforcement or correction measures for treating shield tunnel structure deformation exceeding limit should be adopted. Taking shield tunnel of Suzhou rail transit operating lines as an example, the lateral rectification technology of shield tunnel grouting behind segment wall is introduced. With the 3D laser scanning monitoring data, the reinforcement effect of shield tunnel grouting behind segment wall is analyzed. Analysis shows that grouting behind segment wall can effectively improve shield tunnel structure strength, the shield tunnel structure convergence deformation exceeding limit can be rectified, and the range can be controlled within 0~20 mm. At the same time, existing problems of track bed can be treated through track fine adjustment, and structure problem caused by shield tunnel deformation exceeding limit can be effectively controlled.

**Key words** urban rail transit; shield tunnel; deformation exceeding limit; grouting behind segment wall

**Author's address** Suzhou Rail Transit Group Co., Ltd., 215101, Suzhou, China

城市轨道交通发展有效地提高了地下空间利用率,改善了城市交通拥堵状况。但是也带来了另一个不可避免的问题,就是运营隧道变形超限而引发的结构问题。现有的隧道加固方式无法克服施工难度大、作业时间短等问题;同时,现有隧道加固手段受施工经验影响较大,对其中各种参数的控制无明确的规范要求,无法实现较为准确的控制加固。因此,对于存在大变形的运营隧道结构,多点、多次、适量壁后注浆可在一定程度上起到隧道结构补强和变形纠偏的作用。三维激光扫描技术已广泛应用于隧道结构状态监测中,可较为全面了解隧道结构变形、结构病害等。将三维激光扫描技术与隧道结构超限变形壁后注浆加固方法相结合,可极大提高注浆效果和精确性。

## 1 盾构隧道常见变形分析

### 1.1 盾构隧道装配特点分析

苏州轨道交通的隧道结构分为盾构隧道区间和明挖隧道区间两部分。盾构隧道主要采用装配式管片结构错缝拼装而成,缝隙较长,结构柔性较好,可根据地质情况及时调整管片姿态,更好地利用围岩,适应软弱地层。盾构隧道管片布置如图 1 所示。砌管片分为 6 块:3 块标准管片(A1、A2、A3 型)、2 块邻接管片(B1、B2 型)和 1 块封顶管片(K 型)。衬砌环间采用错缝拼装,标准衬砌环环宽为 1 200 mm,错缝角度为 22.5°。环与环之间设 16 个纵向连接螺栓,沿圆周均匀布置。环向相邻两块管片间连接设 2 个螺栓,每环共设 12 个环向螺栓。纵

向、环向螺栓形式采用弯螺栓。衬砌环预制管片混凝土强度等级为 C50,抗渗等级为 P10;钢筋采用 HPB300 和 HRB400 钢。连接螺栓为材料性能等级 5.8 级的 C 级螺栓。环向螺栓固定,大大提高了管片横向刚度。

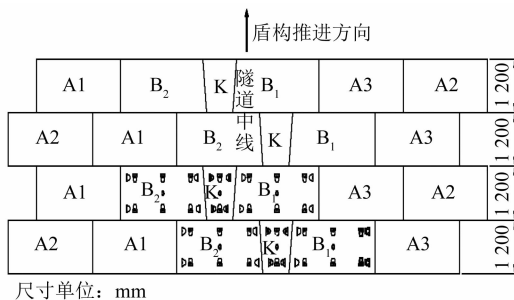


图1 盾构隧道管片衬砌圆环布置图

Fig. 1 Layout of shield tunnel segment lining ring

与部分地区采用通缝拼接不同,苏州轨道交通盾构隧道采用错缝拼接,可使结构纵向刚度有所加强,从而增强纵向结构抗性。但由于环缝位置可能位于拱底,整体道床进行浇筑时,极有可能使道床位于管缝之上,以至于环缝密封垫失效时,渗漏水会随道床管片结构接缝涌出,在震动作用下,极易造成道床脱空和部分排水沟伸缩缝的翻浆冒泥。

通过装配式管片压密处理和螺栓固定链接,使得管片整体刚度提高,抵抗外荷载作用抗力增加,但由于管片刚度不均匀,且外界应力环境较为复杂,使得隧道结构穿越软弱地层时,极易出现拉压扭转等多种受力状态,导致隧道结构变形;同时,外部地质条件、装配时的施工质量、施工扰动、内外荷载变化、列车发车密度和周边工程施工影响等因素都会造成管片变形超限。

## 1.2 盾构隧道常见变形

### 1.2.1 横向收敛变形

由于隧道管片衬砌环向刚度不均匀,存在螺栓铰接,因此其受力后的收敛变形轮廓线非光滑变形,而是存在部分突变,主要表现为横向上发生“横竖鸭蛋式”椭圆变形。横鸭蛋式管片变形主要由于上部堆载过大,或者是两侧土体卸荷而引发的结构变形,管片整体处于压密状态,隧道顶部和底部处于受压状态,接缝外弧面闭合,内弧面受拉,管片内接缝张开。外部与土体连接接缝闭合不易发生渗漏水,接头处混凝土易发生塑形破坏。而一旦发生竖向鸭蛋式椭圆变形时,隧道顶部和底部外弧面受拉,而侧向压力作用于接缝处使得外弧面张开,纵

缝处极易发生渗漏水。

### 1.2.2 纵向收敛变形

管片纵向变形的产生多是由外部地质环境发生变化造成的,产生的影响范围较大,且多与横向变形同时产生,可能造成隧道纵向线性发生改变,严重时会产生沉降或者隆起槽段。纵向变形的主要特征为发生“刚体转动”和“环间错台”变形。纵向变形产生的影响主要为弹性止水垫变形,同时可能造成螺栓发生剪切破坏和管片变形,以及隧道整体的纵向沉降变形。相邻管片错台量应控制在 10 mm 以内。

## 1.3 盾构隧道结构变形影响因素

由于盾构隧道为装配式结构,因此极易受到内外环境因素的影响,隧道结构变形的主要影响因素为:地面区域性沉降;复杂的地质条件变化;设计施工质量;列车振动引起的隧道下卧层液化或者振陷;隧道之间因换乘需要相互穿越施工。

## 2 盾构隧道壁后注浆横向纠偏整治技术

对于盾构隧道的变形超限问题,一般采取的加固和纠偏防护技术方法有结合参数分析的信息化施工控制、MJS(全方位高压喷射)工法、注浆加固法,既有隧道内张钢环加固法以及纤维材料加固法等,这些方法都得到了广泛应用<sup>[1-13]</sup>。国内相关研究多集中在盾构隧道服役前的施工阶段,对于运营期间盾构隧道纠偏控制的研究较少。运营期间盾构隧道的整治纠偏属于抢险工程,实际工程方案需要考虑运营期间的施工时间短、需及时进行设备恢复,而且不能影响线路运营等。因此,需根据实时数据监测情况及时调整现场工程技术方案,并对现场处理效果进行评判,同时要避免纠偏过量带来的不良影响。

### 2.1 盾构隧道概况

以苏州轨道交通既有实际工程为例进行分析。该盾构隧道区间服役时间为半年,隧道右线区间 580 环—680 环中存在部分环累积收敛值大于 70 mm,且最大的超过 90 mm,管片姿态不良。对部分管片采用壁后注浆进行处理,盾构隧道右线长 1 305.921 m,成型隧道内径为 5 500 mm,外径为 6.2 m;环宽为 1.2 m,共 1 085 环,管片厚度为 350 mm;侧穿河流,下穿经济发展厂房片区、下穿既有铁路路基,而后直线前行一段距离后,最后左右线隧道上下重叠到达车站。盾构隧道左线有 3 段曲线,

右线有 4 段曲线,最大曲线半径为 1 500 m,最小曲线半径为 400 m。盾构隧道左右线线间距为 0.10~37.7 m。

该盾构隧道穿越土层主要为④1 粉质黏土层、④2 粉土夹粉砂层、⑤1 粉质黏土层、⑥1 黏土层以及⑥2 粉质黏土层。

2.2 盾构隧道现状

根据盾构隧道右线三维激光扫描数据,该盾构隧道整体变形状态如图 2 所示。该盾构隧道存在横向收敛变形超限,共计 55 处,累计收敛控制值  $\geq 70$  mm。该盾构隧道收敛变形分布如表 1 所示。

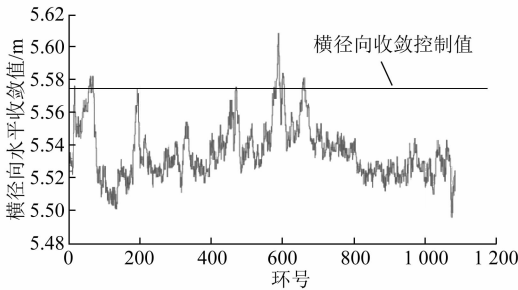


图 2 盾构隧道横径向收敛值变化图

Fig. 2 Transverse radial convergent variation diagram

表 1 盾构隧道收敛变形分布

Table. 1 Distribution of shield tunnel convergence deformation

位置	实测横径变形量/m	破坏程度
480 环	$\leq 0.03$	合格
261 环	$>0.03 \sim 0.04$	预警
168 环	$>0.04 \sim 0.05$	警告
71 环	$>0.05 \sim 0.06$	报警
46 环	$>0.06 \sim 0.07$	严重损坏
38 环	$>0.07 \sim 0.08$	严重损坏
12 环	$>0.08 \sim 0.09$	严重损坏
5 环	$>0.09$	严重损坏

该盾构隧道产生结构变形超限主要是因施工期间隧道同步注浆不饱满而引起两拱腰侧壁存在空洞,进而引发横向变形超限。根据盾构掘进记录,盾构掘进过程中,同步注浆采用 4 点注浆,注浆压力控制在 0.2~0.3 MPa 之间,壁后注浆量控制在标准注浆量的 130%~180%(5.4~6.0 m<sup>3</sup>)。掘进 1 环的出土量为 41~43 m<sup>3</sup>,而管片外径为 6.2 m,环宽为 1.2 m,即管片所占空间为 36.23 m<sup>3</sup>,不考虑土体体积膨胀则可粗略计算超挖量为 4.77~6.77 m<sup>3</sup>,而同步注浆量为 5.4~6.0 m<sup>3</sup>。因隧道掘进速度较快,由此可推测同步注浆未能及时充填超挖区域,充填量未能充满超挖区域。

通过对该盾构隧道现状调查发现,该盾构隧道的病害相对较少,裂缝共计 9 条,大于 2 mm 的裂缝有 1 处,渗漏水病害无较大发展。因此该盾构隧道存在较大收敛变形,管环姿态不良,椭圆度长短轴较小,拱腰横向变形较大;累积收敛变形较大值集中在右线 580 环至 680 环,589 环的收敛变形值最大,为 101 mm;最大错台位置在 459 环与 458 环之间,错台量为 19.3 mm。对该盾构隧道累积变形收敛值大于 70 mm 的管片进行加密监测,并对其拱腰位置进行壁后注浆。

2.3 注浆方案

该盾构隧道管片是预制钢筋混凝土结构,属于弹塑性体。变形区段地层处于⑥1 黏土层,粘聚力较大,管片脱出盾尾后,周围土体对管片不能及时包裹,管片下沉产生弹性变形;若继续承受荷载,可能会出现螺栓受剪破坏或管片受拉破坏,主要表现为螺栓孔附近变形加大、混凝土开裂、上下左右混凝土纵向裂缝等。由于隧道管片顶部并未出现裂缝,两腰处管片并无渗漏水,且隧道底部管片与道床结合良好,并无脱开的趋势,因此,根据相关标准和以往经验以及成环管片试压试验情况,若管片变形量不超过 70 mm,可保持原状,以避免破坏管片三向受力状态;若管片变形量超过 70 mm,则采用壁后注浆方式进行处理。

1) 注浆孔位:580 环—680 环。选择注浆环号时,需选择 2 环,至少间隔 4—5 环且不超过 10 环。

2) 注浆方式:采用对称注浆。应根据不同点位管片变形和姿态,通过左上与右上、左中与右中注浆孔分别同时注浆,防止隧道偏位。相邻最近的 2 个孔号的注浆时间间隔不得小于 5 h;如遇管片姿态不良,根据三维激光扫描管片椭圆度等参数,及时调整注浆点位。

3) 注浆参数:浆液采用水泥单液浆,水灰比在 0.8:1.0—1:1 之间,注浆压力在 0.3~0.5 MPa 之间,浆液流量为 20 L/min。

4) 注浆顺序:每 5 环注浆 1 环,同一排内按照做一跳五施工;相邻孔注浆间隔不少于 2 d,并根据监测情况即时调整;由收敛变形最大点向两端进行。根据变形监测数据,在施工前确定每次施工具体注浆孔位。

2.4 数据分析

对 580 环至 680 环管片注浆前的累积收敛变化进行日常监测,统计结果如图 3 所示。由图 3 可见,

整体横径向收敛值处于减少的趋势,尤其在 589 环联络通道附近,这种趋势更为明显。自 2019 年 12 月 12 日起,逐步对 589 环等进行了壁后注浆纠偏处理,使得管片的横径向收敛值有所减少。

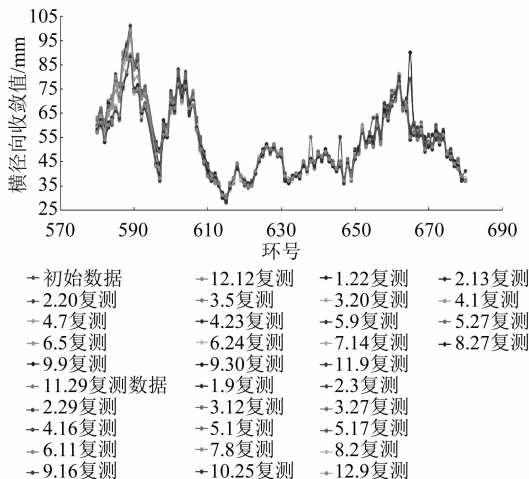


图3 盾构隧道 580 环至 680 环管片注浆前累积收敛值统计图  
Fig. 3 Statistics of cumulative convergence before grouting of shield tunnel segment rings 580 to 680

自 2019 年 12 月 12 日起,对 580 环至 593 环管片进行壁后注浆。注浆后,区间累积收敛值减小,如图 4 所示。注浆前,589 环的累积收敛值最大,为 101 mm,注浆后减小至 89 mm。注浆后的整体横径向收敛值趋于稳定,如图 5 所示。

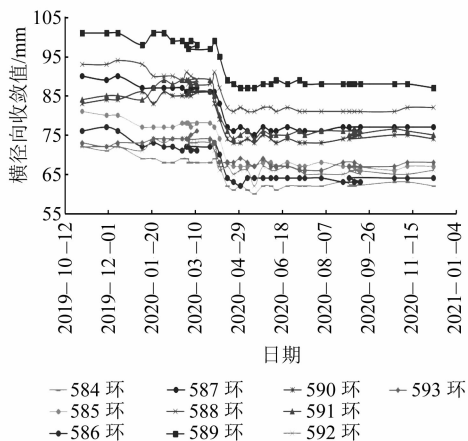


图4 580 环至 593 环管片注浆前后累积收敛值统计图  
Fig. 4 Statistics of cumulative convergence before and after grouting of segment rings 580 to 593

对所注浆盾构隧道区间进行持续监测,监测结果显示管片的整体累积收敛值趋于减小。注浆过程中,580 环—590 环的累积收敛变化值较大,主要原因是注浆量和注浆次数多。因此及时减少该区

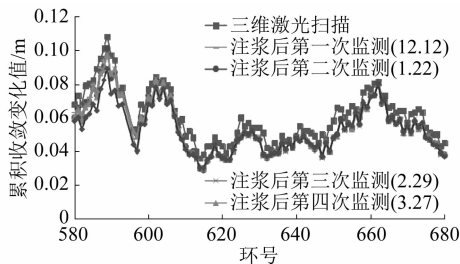


图5 580 环至 593 环管片注浆后累积收敛监测变化图  
Fig. 5 Monitored changes of cumulative convergence after grouting of segment rings 580 to 593

段的注浆量,同时加强对道床进行监测。道床监测发现,该注浆区间沉降值较大,因此及时进行调整注浆参数及点位,减少因注浆次数多而引起的线路问题。整体注浆过程中,及时对注浆参数进行调整,以使累积收敛值变化比较缓慢,避免因较大变形而引起管片结构破损。在控制管片收敛变形的同时,通过对道床结构加固处理或精调轨道指标,使盾构隧道整体变形得到了有效控制。

在运营前期,该盾构隧道区间曾多处出现管片变形超限,其中以联络通道位置最为严重,主要原因还是由于建设期间,在盾构管片装配过程中,未进行及时注浆,导致管片壁后存在较大空洞,进而引起较大横向变形。壁后注浆处理后,该盾构隧道现状稳定,管片收敛变形有较大改善。其中:586 环管片的收敛变形减小量最多,为 25 mm; 589 环管片的收敛变形最大,为 8.9 cm。壁后注浆对纠正盾构隧道横向变形超限、加固隧道结构具有明显效果。

### 3 结语

对盾构隧道管片变形受力特性及变形范围进行了研究,管片变形主要是横向收敛变形和纵向收敛变形,横向大变形极易造成螺栓失效、渗漏水、结构崩裂等病害,纵向变形是造成管片错台和道床整体沉降的主要诱因。管片壁后二次注浆配合三维激光扫描监测可有效控制地铁盾构隧道变形超限而引发的结构问题;通过管片壁后注浆可有效提升盾构隧道结构强度,有效纠正结构超限收敛变形,纠偏范围可控制在 0~20 mm 内。为精确控制加固效果,可采用多点、多次、适量的注浆方式,对注浆量进行调整,优化注浆效果。同时,对盾构隧道结构大变形调整之后,可通过轨道精调等对道床存在的问题进行处理,这可有效控制盾构隧道变形超限带来的结构问题。

## 参考文献

- [1] 汪洋,何川,曾东洋,等. 盾构隧道正交下穿施工对既有隧道影响的模型试验与数值模拟[J]. 铁道学报,2010(2):79.  
WANG Yang, HE Chuan, ZENG Dongyang, et al. Model test and numerical simulation of influence of perpendicular under-cross shield tunnel construction on existing tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2010(2):79.
- [2] 胡群芳,黄宏伟. 盾构下穿越已运营隧道施工监测与技术分析[J]. 岩土工程学报,2006(1):42.  
HU Qunfang, HUANG Hongwei. Analysis and monitoring on shield tunneling under existing adjacent tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006(1):42.
- [3] 石明江. 注浆法在盾构推进穿越已运营地铁隧道中的应用[J]. 西部探矿工程,2006(4):155.  
SHI Mingjiang. Application of grouting in shield tunnel excavating through the operating metro tunnel[J]. West-China Exploration Engineering, 2006(4):155.
- [4] 孔庆凯,刘化图. 新建隧道穿越施工对既有双线地铁隧道的影响[J]. 地下空间与工程学报,2010(6):1448.  
KONG Qingkai, LIU Huatu. Influence of new bored tunnel driven in close proximity on existing subway tunnels[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010(6):1448.
- [5] 丁传松,杨兴富. 盾构近距离上穿越对已运营隧道的影响分析[J]. 施工技术,2009(38):48.  
DING Chuansong, YANG Xingfu. Influence analysis on shield tunnel up-crossing nearby built tunnel[J]. Construction Technology, 2009(38):48.
- [6] 齐明山. 上海市轨道交通9号线盾构上穿1号线影响分析[J]. 城市轨道交通研究,2009(1):52.  
QI Mingshan. Influence of rail transit line 9 tunneling over line 1 in Shanghai[J]. Urban Mass Transit, 2009(1):52.
- [7] 朱蕾,黄宏伟. 软土地区盾构掘进对已建隧道影响的研究现

状[J]. 地下空间与工程学报,2010(增刊2):1692.

ZHU Lei, HUANG Hongwei. Review on the influence of shield tunneling in soft soil on adjacent existing tunnel[J]. Underground Space and Engineering, 2010(S2):1692.

- [8] 陈越峰,张庆贺,季凯,等. 盾构下穿越施工对已建隧道沉降的影响[C]//中国力学学会. 上海岩土力学与工程2011年学术年会论文集. 上海:中国力学学会,2011:1490.

CHEN Yuefeng, ZHANG Qinghe, JI Kai, et al. The influence of shield tunneling construction on settlement of existing adjacent tunnel above[C]//Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics. Proceedings of Shanghai Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 2011 Academic Annual Conference. Shanghai: Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2011:1490.

- [9] 杨广武. 地下工程穿越既有地铁线路变形控制标准和技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2010.

YANG Guangwu. Study on the permissible value and technique for deformation controlling of underground construction crossing existing metro line[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.

- [10] 严长征. 盾构隧道近距离共同作用机理及施工技术研究[D]. 上海:同济大学,2007.

YAN Changzheng. Research on the mechanism and construction techniques of interaction for adjacent tunneling performed by shield[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.

- [11] 白廷辉,尤旭东,李文勇. 盾构超近距离穿越地铁运营隧道的保护技术[J]. 地下工程与隧道,2000(3):2.

BAI Tinghui, YOU Xudong, LI Wenyong. Protection technology of shield tunnel undercrossing operating metro tunnel at super-close distance[J]. Underground Engineering and Tunnel, 2000(3):2.

(收稿日期:2021-12-10)

(上接第60页)

根据上述分析,经接触网专业研究后,对某城市地铁2号线接触网软定位拉线长度进行排查,对于软定位拉线长度小于300 mm的,建议采用 $\phi 3.5$  mm 不锈钢软态钢丝双股缠绕加固方案;对于软定位拉线长度大于300 mm的,建议采用可靠度较好的并沟形式尾支线加固方案。尾支线与既有软定位拉线互为备用。

## 5 结语

软定位作为柔性架空接触网在小半径曲线段的定位装置,对保证通过小半径曲线段列车受电弓正常受流具有极其重要的作用。对软定位拉线采取双线加固与尾支线加固,将增加软定位设备的安

全性与稳定性。

## 参考文献

- [1] 诸忠华. 接触网软定位软态钢丝脆断分析及应对[J]. 装备维修技术,2020(1):85.

ZHU Zhonghua. Analysis and countermeasures of brittle breakage of soft positioning soft steel wire in catenary[J]. Equipment Technology, 2020(1):85.

- [2] 徐磊. 一种新型零小部件尾支线在轨道交通上的应用[J]. 电气化铁道,2019(增刊1):169.

XU Lei. Application of tail wires for a new type of fittings on rail transportation system[J]. Electric Railway, 2019(S1):169.

(收稿日期:2021-12-10)