

运营盾构隧道洞内注浆修复试验研究

万 勇¹ 王金龙² 唐 飞¹ 孙雪兵² 张雨蒙³ 蔡兴瑞² 柳 献³

(1. 武汉地铁桥隧管理有限公司, 430077, 武汉; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉;

3. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 200092, 上海)

摘 要 [目的] 盾构隧道结构发生横截面大变形后, 若采用内张钢圈等方法进行加固, 会花费大量材料和人工成本。通过二次注浆改善盾构隧道结构受力条件、主动回调变形是更加经济的手段。因此有必要对注浆修复盾构隧道结构横截面变形的有效性、注浆过程中及注浆后的结构响应进行深入研究。[方法] 依托武汉地铁盾构隧道进行现场洞内注浆试验, 测量、比较了注浆前后隧道的周边地层缺陷、结构裂缝及收敛变形。详细分析了洞内侧向注浆后隧道结构收敛变形、水平平移的时变规律。[结果及结论] 试验结果证明了洞内侧向注浆对修复地层缺陷、治理隧道结构裂缝和横截面大变形的有效性; 揭示了注浆荷载影响下衬砌环的收敛变形、水平平移的分布规律和时变发展过程。在注浆过程中, 注浆点位所在的衬砌环呈现“竖鸭蛋”收敛变形趋势; 注浆后 2.5 h, 受浆液收缩影响, 衬砌结构“竖鸭蛋”收敛变形有所回弹, “横鸭蛋”收敛变形趋势进一步发展; 注浆后 20.0 h 左右, 隧道结构收敛变形基本稳定。

关键词 地铁; 盾构隧道; 洞内注浆; 压密注浆; 收敛变形; 水平位移

中图分类号 U457+.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.016

Experimental Investigation on Grouting Repair in Operational Shield Tunnels

WAN Yong¹, WANG Jinlong², TANG Fei¹, SUN Xuebing², ZHANG Yumeng³, CAI Xingrui², LIU Xian³

(1. Wuhan Metro Bridge and Tunnel Management Co., Ltd., 430077, Wuhan, China; 2. China Railway Fourth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China; 3. Department of Geotechnical Engineering College of Civil Engineering, Tongji University, 200092, Shanghai, China)

Abstract [Objective] After a significant cross-sectional deformation of shield tunnel structure, using internal tension steel ring reinforcement and the like will incur substantial material and labor costs. Improving the stress conditions of the shield tunnel structure and proactively correcting deformations through secondary grouting is a more economical approach. Therefore,

it is necessary to conduct an in-depth study on the effectiveness of grouting repairing cross-sectional deformation in shield tunnel structure, as well as the structural response during and after grouting process. [Method] Field grouting tests are conducted in a shield tunnel of Wuhan Metro, peripheral strata defects, structural cracks, and convergence deformations before and after grouting are measured and compared. The law of tunnel structure convergence deformation and horizontal displacement changing over time after lateral grouting inside tunnel structure is analyzed in-depth. [Result & Conclusion] The test results demonstrate that the effectiveness of lateral grouting inside the tunnel in repairing ground defects, addressing tunnel structural cracks, and correcting significant cross-sectional deformations. The distribution pattern and time-history development of convergence deformations and horizontal translations of the lining ring under grouting load influence are revealed. During grouting process, the lining ring at the grouting point exhibit a 'vertical-ellipse' deformation convergence trend. Approximately 2.5 hours after grouting, the lining structure exhibits some rebound in 'vertical-ellipse' convergence deformation due to the grout shrinkage, and the deformation trend further continues. Around 20.0 hours post-grouting, the tunnel structure convergence deformation will be basically stabilized.

Key words metro; shield tunnel; grouting in the tunnel; compact grouting; convergence deformation; horizontal displacement

0 引言

横截面大变形是城市轨道交通盾构隧道常见病害, 影响城市轨道交通正常运营。现有的隧道内加固以内弧面张贴钢材和复合型材为主^[1], 可提升结构本体刚度、承载力, 从而被动地防止衬砌结构变形发展。但这种方式的材料和人工成本较高, 不能改善结构所受的不利荷载, 且减小了隧道净空。通过二次注浆改善衬砌受荷条件, 甚至主动回调变形, 将是更为经济、可靠的手段。

已有部分城市开展了注浆调整盾构隧道结构沉降和收敛变形的实际应用研究。文献[2]以宁波地铁为对象,通过现场试验验证了洞内微扰动注浆治理盾构隧道衬砌结构沉降病害的可能性;通过有限元模型讨论了注浆范围、地质条件对抬升效果的影响。文献[3]针对天津地铁隧道结构开展洞外注浆试验,结合有限元模拟,讨论了不同注浆量、注浆距离对隧道结构水平位移的影响。文献[4]以合肥地铁为背景开展了洞内二次注浆修复收敛变形的现场试验,但由于注浆压力大、注浆量多,造成了隧道的不均匀纵向变形和管片开裂;建议注浆修复时应控制注浆压力,应在注浆修复后再浇筑道床。文献[5]以杭州地区闻喜路大直径隧道下穿既有地铁工程的案例为背景,探究了洞内注浆对既有地铁隧道横截面收敛变形和沉降的影响。

表 1 地层力学参数

Tab.1 Mechanical parameters of stratum

土层编号	土层名称	天然重度/(kN/m ³)	承载力特征值/kPa	压缩模量/MPa	渗透系数/(10 ⁻⁶ cm/s)
10-3	黏土	20.5	400	16.5	0.17~3.30
13	粉质黏土	19.7	220	13.0	0.70~5.40
15a-1	强风化泥质粉砂岩	21.8	300	42.0	

1.2 结构概况

武汉地铁 3 号线三角湖站—汉阳客运站为盾构法区间隧道,管片内径 5.4 m、外径 6 m、厚度 0.3 m、环宽 1.5 m,衬砌环拼装方式为错缝拼装。管片材料为 C50 混凝土与 HRB400 钢筋。管片环缝接头及纵缝接头皆不设凹凸榫。纵缝接头采用 8.8 级 M27 弯螺栓连接,每条纵缝设 2 根,全环共 12 根;环缝接头亦采用 8.8 级 M27 弯螺栓连接,每隔 22.5° 设 1 根,全环共 16 根。注浆前,试验段衬砌结构已发生了 58~99 mm 不等的横截面收敛变形。施工资料的分析结果表明,该收敛变形可能是因施工期间同步注浆不足而使隧道结构两侧土体约束不足导致的。

1.3 注浆参数

从 2019 年 11 月 3 日起至 12 月 3 日一个月时间内,共进行了 9 轮注浆。注浆材料以硫铝酸盐水泥单液浆为主,注浆方式为全孔一次性注浆,注浆孔位置分布在衬砌结构两侧腰部 ±45° 范围内。对于施工期间同步注浆不足导致的地层空洞,注浆初期以回填注浆为主,后期以压密注浆为主。注浆过程中,采用注浆压力和收敛变形监测数据相结合的

综上,既有研究多以洞外注浆研究为主,洞内注浆的研究多针对衬砌结构的不均匀沉降。本文以武汉地铁三级阶地地区的在役地铁盾构隧道为背景,开展衬砌结构注浆修复现场试验,研究洞内二次注浆对治理隧道结构横截面大变形等病害的有效性,着重研究注浆修复对注浆衬砌环及相邻环收敛变形的影响。

1 试验过程

1.1 地层概况

在武汉地铁 3 号线三角湖站—汉阳客运站区间右线隧道第 322 环—第 328 环开展注浆试验,隧道顶覆土厚度约 20 m,洞身位于 10-3 黏土、13 粉质黏土、15a-1 强风化泥质粉砂岩。各层地质力学参数如表 1 所示。

双重控制方法,当单次注浆收敛变形不大于预设值时,以控制注浆压力为主,注浆压力不超过 0.5 MPa;当单次注浆收敛变形达到预设值时,立即停止注浆。

1.4 结构监测

注浆所在区段为第 322 环—第 328 环,结构监测所在区段为第 319 环—第 331 环。对于第 319 环—第 331 环,在每环的管片拱顶、两腰布设 3 个棱镜,使用全站仪监测水平位移及竖向位移;在道床布设 2 个棱镜监测水平位移及竖向位移。棱镜布设位置如图 1 所示。

2 注浆修复效果

2.1 地层缺陷

注浆前与注浆后的探地雷达扫描结果如图 2 所示。图中缺陷下方的数字代表该缺陷的深度范围。注浆前,第 322 环—第 328 环注浆区段共检测到地层缺陷 7 处,均为地层不密实缺陷;注浆后,地层缺陷数量减少为 4 处,1 处地层不密实,3 处地层欠密实。上述结果表明了洞内注浆修复地层缺陷的有效性,注浆后地层缺陷数量减少,缺陷程度减轻。

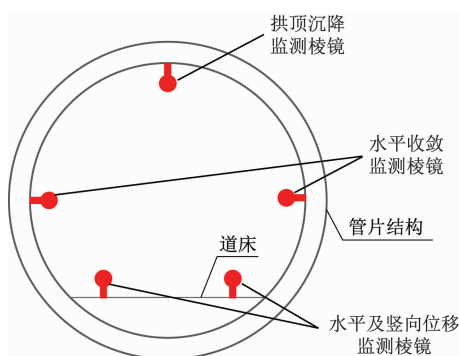


图1 测点布置位置示意图

Fig. 1 Layout position diagram of measuring points

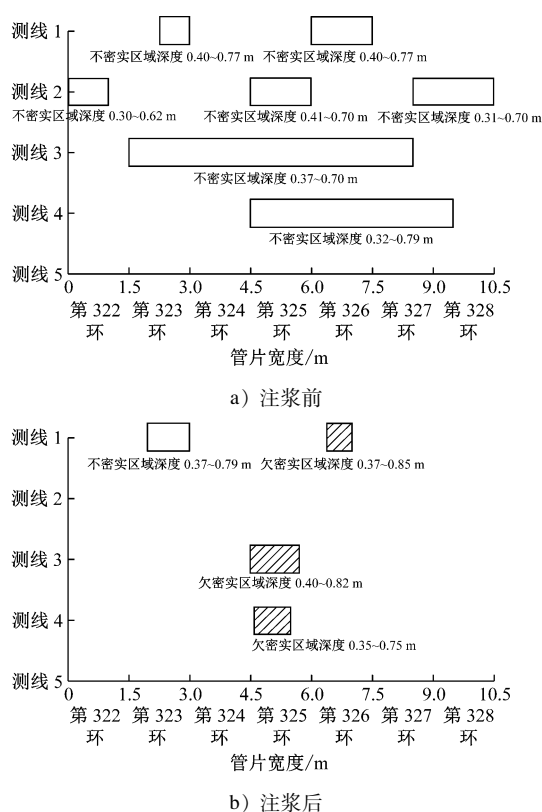


图2 探地雷达扫描结果

Fig. 2 Scanning results of ground penetrating radar

2.2 结构裂缝

注浆前,监测区段(第319环—第331环)共发现管片裂缝29条,裂缝宽度最大为0.12 mm(第326环、第327环);注浆后,监测区段(第319环—第331环)共发现管片裂缝33条,裂缝宽度最大为0.08 mm(第329环)。

将前后两次裂缝检测结果进行对比发现,注浆之后管片环裂缝宽度明显减小。一方面,回填压密注浆可增大隧道结构横截面轴力;另一方面,注浆可强化结构侧向土体约束,减小结构弯矩。上述两

方面原因均利于结构裂缝宽度减小。

2.3 收敛变形

注浆前,监测区段最大收敛变形为99 mm(第326环);注浆后第一次扫描结果表明结构收敛变形减小,最大收敛变形为86 mm(第326环),相比注浆前减小了13 mm;注浆后第二次扫描结果表明结构收敛变形有所回弹,最大收敛变形为89 mm(第326环),相比第一次扫描结果增大了3 mm,但相比注浆前仍减小了10 mm。

以上测量结果证明了洞内注浆修复衬砌结构收敛变形的有效性。虽然注浆后的一个月內衬砌结构变形有所回弹,但注浆区段(第322环—第328环)收敛变形相比注浆前仍减小了3~10 mm。

3 注浆引起的结构变形分析

以第二轮注浆为例,分析注浆过程中盾构隧道结构的位移响应。第二轮注浆时间为2019年11月19日01:30—03:09,仅对第326环注浆751 L;注浆位置在衬砌环横截面9点钟方向(即左腰侧),注浆过程中压力维持在0.2~0.3 MPa。11月19日注浆完成后至11月23日01:30前,未进行其他注浆。由于地铁运营要求,加密位移监测只在每日00:00—05:30进行。

3.1 横截面收敛变形

注浆期间及注浆后第326环的水平位移、竖向位移和收敛变形情况分别如图3和图4所示。水平位移以测点水平向右移动(3点钟方向)为正,竖向位移以测点上浮为正;收敛变形以衬砌环顶底向外扩张、腰部向内收敛为正。由图3可见:在19日注浆过程中,衬砌结构左腰和右腰侧水平位移均向右持续发展,左腰侧位移增加速度先快后慢,右腰侧先慢后快;左腰侧水平位移远大于右腰侧的,导致衬砌结构水平收敛变形减小;注浆结束后,左腰和右腰侧水平位移均减小,且减小的速率先快后慢,从而使隧道结构水平收敛变形减小,且在注浆完成后的最初半小时减小最快。由图4可见:在19日注浆过程中,衬砌结构拱顶和道床竖向位移均有增加,且拱顶竖向位移增量远大于道床,导致衬砌结构竖向收敛变形增加;注浆结束后,拱顶和道床竖向位移均减小,衬砌结构竖向收敛变形也随之减小。根据地铁运营要求,19日白天与20日白天不具备位移监测条件,水平位移、竖向位移监测数据均有中断,但以20日与21日凌晨的监测数据来看,

20 日 00:00 以后,结构腰部水平方向位移、拱顶和道床竖向位移已稳定。综上所述,注浆过程中受注浆荷载影响,隧道结构呈现“竖鸭蛋”变形趋势,水平方向收缩,竖直方向扩张;注浆结束后,由于浆液的收缩,衬砌环收敛变形有所回弹,但远小于注浆时发生的变形,结构整体上仍呈现“竖鸭蛋”变形;注浆发生约 20 h 后,衬砌结构收敛变形逐渐趋于稳定。

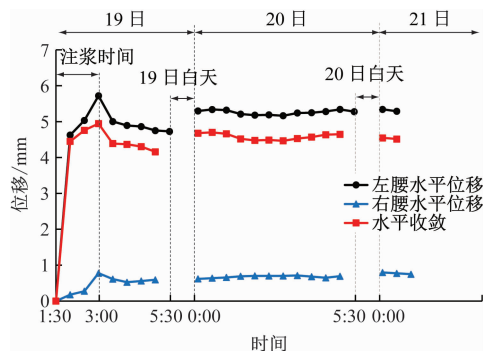


图3 第326环腰部水平位移监测结果

Fig. 3 Monitoring results of ring 326 waist horizontal displacement

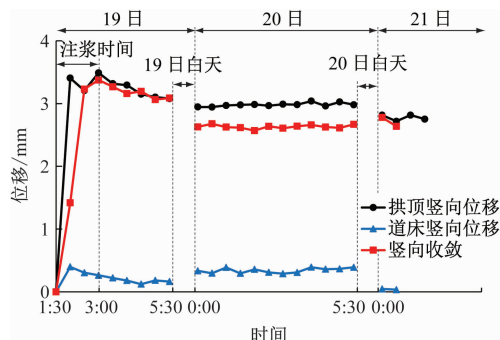


图4 第326环竖向位移监测结果

Fig. 4 Monitoring results of ring 326 vertical displacement

3.2 结构水平位移

注浆期间及注浆后第326环的拱顶和道床水平位移情况如图5所示。由于受力的对称性,本文用拱顶和道床的水平位移代表衬砌环整体的水平位移。由图5可见:在19日注浆过程中,衬砌环水平位移向右持续发展;由于道床刚度较大,拱顶水平位移大于道床水平位移。注浆结束后,拱顶与道床水平位移均减小,且减小的速率先快后慢,最终趋于稳定。根据地铁运营要求,19日白天与20日白天不具备位移监测条件,水平位移监测数据均有中断;但以20日与21日凌晨的监测数据来看,20日00:00以后,结构水平位移已基本稳定。

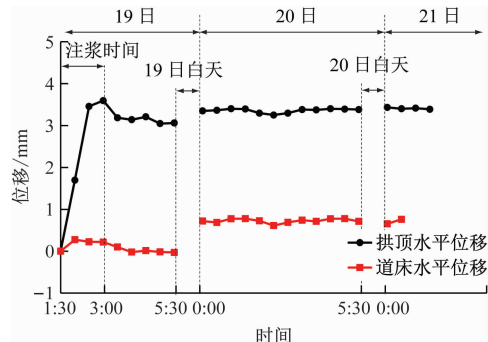


图5 第326环拱顶和道床水平位移监测结果

Fig. 5 Monitoring results of ring 326 vault and track bed horizontal displacement

4 结语

武汉地铁洞内注浆试验证明了洞内二次注浆对修复地层缺陷、治理隧道结构裂缝和横截面大变形的有效性。以第二轮注浆为例,着重剖析了侧向注浆对注浆衬砌环横截面收敛变形及结构整体水平位移的影响,结论如下:

1) 洞内二次注浆对修复盾构隧道施工期同步注浆不足导致的地层缺陷、结构裂缝、横截面大变形等病害是有效的。在试验段,通过洞内二次注浆,地层缺陷由7处减少为4处,缺陷程度由不密实减轻为欠密实;结构最大裂缝宽度由0.12 mm减小为0.08 mm;横截面收敛变形比注浆前减小了3~10 mm。

2) 注浆过程中,受注浆荷载影响,隧道结构呈现“竖鸭蛋”变形趋势,水平方向收缩,竖直方向扩张;注浆结束后,由于浆液的收缩,衬砌环收敛变形有所回弹,但远小于注浆时发生的变形,结构整体上仍呈现“竖鸭蛋”变形;注浆发生约20 h后,衬砌结构收敛变形逐渐趋于稳定。

3) 在左侧腰部注浆过程中,衬砌环水平位移向右持续发展;注浆结束后,拱顶和道床水平位移均有减小,且减小的速率先快后慢,最终趋于稳定。

参考文献

- [1] 张磊, 柳献. 盾构隧道加固用复合型材承载力计算方法研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(5): 169.
ZHANG Lei, LIU Xian. Bearing capacity calculation method for shield tunnel reinforcing filament wound profiles[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(5): 169.
- [2] 郭健. 盾构隧道注浆抬升管片的效率研究[J]. 铁道建筑技术, 2016, (9): 18.

(下转第102页)

1) 盾构重叠隧道施工中,上线隧道施工对最终沉降槽的最大沉降值影响更大。实测数据表明,下线隧道施工影响约为 42%,上线隧道施工影响约为 58%。模拟结果表明,下线隧道施工影响约为 41.84%,上线隧道施工影响约为 58.16%。两者获得的沉降影响规律较为一致。

2) 完全重叠隧道施工的地面沉降槽宽度仅受下线隧道影响,但最终的沉降槽并非双线隧道单独影响的简单相加,而是存在叠加效应。通过数值模拟计算可知,上、下线之间的叠加效应使上线隧道开挖造成的地层损失相比直接开挖减小了约 45.16%,最终沉降槽的最大沉降值减小了 11.45%。

3) 隧道开挖造成的地层损失率并不受隧道埋深变化影响,重叠隧道开挖过程中,上、下线隧道及两者叠加造成的最终地层损失率相差不大,在本工程类似的砂卵石地层中可以按照 0.25% 左右考虑。

参考文献

- [1] YIN M, JIANG H, JIANG Y, et al. Effect of the excavation clearance of an under-crossing shield tunnel on existing shield tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 78: 245.
- [2] 宋浩然, 张顶立. 叠落盾构隧道施工影响下地层变形及结构受力分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊1): 279.
SONG Haoran, ZHANG Dingli. Analysis of ground deformation and structural stress under the influence of overlapping shield tunnel construction[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 279.
- [3] 谢雄耀, 牛俊涛, 杨国伟, 等. 重叠隧道盾构施工对新建隧道影响模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 2061.
XIE Xiongyao, NIU Juntao, YANG Guowei, et al. Model test for effects of construction of shield tunnelling in overlapping tunnels on existing tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 2061.
- [4] 卢岱岳, 王士民, 何川, 等. 新建盾构隧道近接施工对既有隧道纵向变形影响研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(10): 108.
LU Daiyue, WANG Shimin, HE Chuan, et al. Research on effects of adjacent construction of new shield tunnel on longitudinal deformation of existent tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(10): 108.
- [5] 李磊, 张孟喜, 吴惠明, 等. 近距离多线叠交盾构施工对既有隧道变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1036.
LI Lei, ZHANG Mengxi, WU Huiming, et al. Influence of short-distance multi-line overlapped shield tunnelling on deformation of existing tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6): 1036.
- [6] LIU H Y, SMALL J C, CARTER J P. Full 3D modelling for effects of tunnelling on existing support systems in the Sydney region[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(4): 399.
- 收稿日期:2023-05-12 修回日期:2023-06-16 出版日期:2024-07-10
Received:2023-05-12 Revised:2023-06-16 Published:2024-07-10
· 通信作者:李振东,高级工程师,124971952@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 96 页)

- GUO Jian. Efficiency of grouting segment uplifting in shield tunnel [J]. Railway Construction Technology, 2016, (9): 18.
- [3] 白如冰, 郑刚, 刁钰, 等. 补偿注浆对隧道变形控制试验研究与数值分析[J]. 中国港湾建设, 2018, 38(3): 24.
BAI Rubing, ZHENG Gang, DIAO Yu, et al. Experimental study and numerical analysis of tunnel deformation control by compensation grouting[J]. China Harbour Engineering, 2018, 38(3): 24.
- [4] LIU J, HAMZA O, SIAN D V, et al. Repairing a shield tunnel damaged by secondary grouting[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 80: 313.
- [5] GAN X, YU J, GONG X, et al. Response of operating metro tunnels to compensation grouting of an underlying large-diameter shield tunnel: a case study in Hangzhou[J]. Underground Space, 2022, 7(2): 219.
- 收稿日期:2023-04-12 修回日期:2023-07-20 出版日期:2024-07-10
Received:2023-04-12 Revised:2023-07-20 Published:2024-07-10
· 第一作者:万勇,高级工程师,wanyong@wuhant.com
通信作者:张雨蒙,博士后,zhangym@tongji.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com