

大直径盾构始发端头加固区域隧道变形 差异特征实测研究^{*}

杨光¹ 高俊华¹ 甘彬霖² 黄忠凯³ 张吾渝⁴ 张冬梅^{2,3,4}

(1. 中交隧道工程局有限公司上海机场联络线项目部, 211106, 南京;

2. 同济大学上海自主智能无人系统科学中心, 200092, 上海;

3. 同济大学土木工程学院, 200092, 上海; 4. 青海大学土木水利学院, 810016, 西宁)

摘要 [目的] 为保证盾构顺利始发, 通常对始发工作井周围区域进行局部地层加固, 导致加固区域两侧隧道变形存在差异, 影响隧道结构安全, 但目前变形差异特征及其规律尚不明确, 因此有必要对大直径盾构始发端头加固区域隧道变形的差异特征进行实测研究。[方法] 以上海市域铁路机场联络线大直径盾构隧道工程为例, 基于现场实测数据, 分析了始发工作井加固区域盾构掘进施工地面竖向变形、隧道竖向变形、隧道横向收敛的差异特征, 分析了地层局部加固对软土地层大直径盾构隧道掘进差异变形的影响规律。[结果及结论] 地层局部加固导致盾构隧道变形响应差异显著; 地面竖向变形发展由非加固区的扰动沉降、卸荷隆起、固结沉降和相对稳定 4 个阶段, 转变为加固区的扰动沉降、卸荷隆起和相对稳定 3 个阶段; 对于隧道竖向变形, 非加固区一侧以波动上浮为主, 加固区以沉降为主, 导致临界区域差异沉降达到 $0.022\% L_s$ (L_s 为隧道轴线两个监测点间距), 超过管片结构差异沉降预警值; 对于隧道横向收敛, 加固区隧道结构呈竖鸭蛋变形特征, 非加固区呈横鸭蛋变形特征; 施工中, 应重点防范临界区域管片结构差异沉降和差异收敛造成的环缝螺栓剪切破坏和螺栓孔混凝土损伤。

关键词 盾构隧道; 端头加固区域; 隧道变形差异; 现场监测

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.020

Measurement Study on Characteristics of Tunnel Deformation Differences in Reinforced Area of Large-diameter Shield Originating End

YANG Guang¹, GAO Junhua¹, GAN Binlin², HUANG Zhongkai³, ZHANG Wuyu⁴, ZHANG Dongmei^{2,3,4}

(1. Project Department of Shanghai Airport Link Line, CCCC Tunnel Engineering Bureau Co., Ltd., 211106, Nanjing,

China; 2. Shanghai Research Institute for Intelligent Autonomous Systems, Tongji University, 200092, Shanghai, China; 3. College of Civil Engineering, Tongji University, 200092, Shanghai, China; 4. College of Civil Engineering and Water Resources, Qinghai University, 810016, Xining, China)

Abstract [Objective] To ensure the smooth launch of shield tunneling, local ground reinforcement is usually carried out around the originating shaft, resulting in differences in tunnel deformation on both sides of the reinforced area, which can affect tunnel structural safety. However, the characteristics and law of deformation differences are still unclear yet. Hence, it is necessary to conduct a field measurement study on the characteristics of tunnel deformation differences in the reinforced area at large-diameter shield tunnel originating end. [Method] Taking the large-diameter shield tunnel project on Shanghai City Railway Airport Link Line as example, based on field measurement data, the differential characteristics of shield excavation construction ground vertical deformation, tunnel vertical deformation, and tunnel lateral convergence in the reinforced area of the originating shaft are analyzed. The influence law of local ground reinforcement on deformation differences during large-diameter shield tunnel excavation in soft soil stratum is investigated. [Result & Conclusion] Local ground reinforcement leads to significant differences in shield tunnel deformation response. The development of ground vertical deformation transitions from 4 stages (disturbance settlement, unloading uplift, consolidation settlement, and relative stability) in the non-reinforced area to 3 stages (disturbance settlement, unloading uplift, and relative stability) in the reinforced area. For tunnel vertical deformation, fluctuating uplift dominates on the non-reinforced side, while settlement dominates in the reinforced area, causing a differential settlement of $0.022\% L_s$ (L_s as the distance between 2 monitoring points a-

^{*} 国家重点研发计划课题(2022YFC3800905);国家自然科学基金项目(52238010,52108381,52090082)

long tunnel axis) in the critical area reaching, exceeding the warning value for differential settlement of segmental structures. Regarding tunnel lateral convergence, the reinforced area tunnel structure exhibits a vertical egg-shaped deformation, while a horizontal egg-shaped deformation in the non-reinforced area. During construction, particular attention should be paid to preventing shear damage to circumferential joint bolts and concrete damage to bolts holes caused by segmental structure settlement and convergence differences in the critical area.

Key words shield tunnel; originating end reinforced area; tunnel deformation difference; field monitoring

随着城市立体化发展和地下交通建设的需要,盾构隧道朝着大直径、复杂地质条件、装配化和近接施工等方向发展。目前,我国共修建大直径盾构隧道工程 65 项,大直径盾构隧道建设迈入高质量、快速发展阶段^[1]。然而,大直径盾构隧道仍然面临地质条件复杂、掘进开挖扰动大等严峻挑战。掘进施工会产生工程扰动和地层损失,进而导致周围土体和隧道结构产生变形响应。盾构施工变形响应研究主要针对地层未加固区域,而盾构始发端头局部地层加固临界区域的施工变形差异特征及机理研究尚不足。

始发掘进是盾构施工的控制性环节,为保证施工安全,通常在始发端头区域进行局部地层加固。目前,盾构始发端头加固研究主要基于强度或稳定性理论对加固范围和加固方法进行优化,鲜有考虑地层局部加固后临界区域地面和隧道结构差异变形的影响。已有研究表明,盾构施工变形响应特征与土层参数、隧道尺寸、隧道埋深、掘进参数、地层损失率等因素密切相关。文献[2]的研究结果表明,土体弹性模量的空间变异性会导致盾构施工引起的地面变形形态和量值出现明显差异。文献[3]的研究结果表明,土体弹性模量的变化会导致盾构隧道施工最大地层变形值显著变化。文献[4]通过数值分析表明,临界土体弹性模量差异会产生地层刚度差,进而导致盾构施工地层变形差异。文献[5]分析了黏聚力和内摩擦角的空间变异对盾构隧道开挖引起地面变形的影响,研究表明,土体强度参数的空间变异对地面变形影响显著。

盾构始发端头局部地层加固会明显改变土体黏聚力、强度、弹性模量、内摩擦角和渗透性等土层参数,人为造成盾构掘进方向上的地层突变,从而导致临界区域盾构掘进变形响应不协调,这在软土

地层中尤为突出。在大直径盾构施工的强扰动耦合作用下,临界地层变形不协调程度势必进一步加剧,极易诱发隧道结构差异沉降、管片错台与地面建筑物倾斜等风险,但相关影响机理和差异变形特征仍有待深入研究。

鉴于此,本文针对软土地层大直径盾构始发端头地层局部加固诱发盾构施工变形响应差异问题,以上海市域铁路机场联络线大直径盾构隧道工程为例,通过监测数据分析了盾构始发端头地层加固区与非加固区地面竖向变形、隧道结构竖向变形、隧道结构横向收敛的差异特征及其原因。本文研究可为软土地层大直径盾构始发端头加固方案优化及施工变形控制提供参考与借鉴。

1 工程概况

上海市域铁路机场联络线起于虹桥火车站站,经上海浦东国际机场接入上海东站站,全长 68.627 km,共设车站 9 座。其中,张江站一度假区站区间为单洞双线盾构隧道,盾构自张江站进洞始发,至度假区站出洞接收,总长 5.69 km,隧道中心埋深为 14.454 ~ 32.816 m,盾构开挖外径为 14.04 m,隧道结构外径为 13.6 m,隧道结构内径为 12.5 m,管片采用通用楔形环错缝拼装,环宽为 2 m。

场区地层为典型上海地区软土地层,始发掘进段主要穿越地层为④淤泥质黏土、⑤₁灰色粉质黏土、⑤₃₋₁灰色粉质黏土夹粉砂。浅层潜水年平均高水位埋深为 0.5 m,年平均低水位埋深为 1.5 m;承压水水位埋深为 5.30 m,相应标高为 -2.03 m。

2 地层加固与变形监测方案

2.1 地层加固方案

为保证掘进姿态稳定和防止渗漏水,通常在盾构始发区域进行局部地层加固。始发区域位于浦东新区康新公路东侧、外环高速南侧空地。加固范围自端头井洞门起沿掘进方向长为 18 m,两侧加固至隧道结构外侧 5.000 m,宽度为 23.600 m,深度为 30.787 m。隧道始发端头地层加固及监测点布置平面图软件截图如图 1 所示。采用 $\phi 850 \text{ mm} @ 600 \text{ mm}$ 三轴搅拌桩 + 单排 $\phi 2000 \text{ mm} @ 1600 \text{ mm}$ RJP (高压旋喷桩) 接缝止水进行地层加固。三轴搅拌桩采用 P.O42.5 普通硅酸盐水泥,水泥掺量为 20%,加固后三轴搅拌桩取芯强度最小为 1.01 MPa。

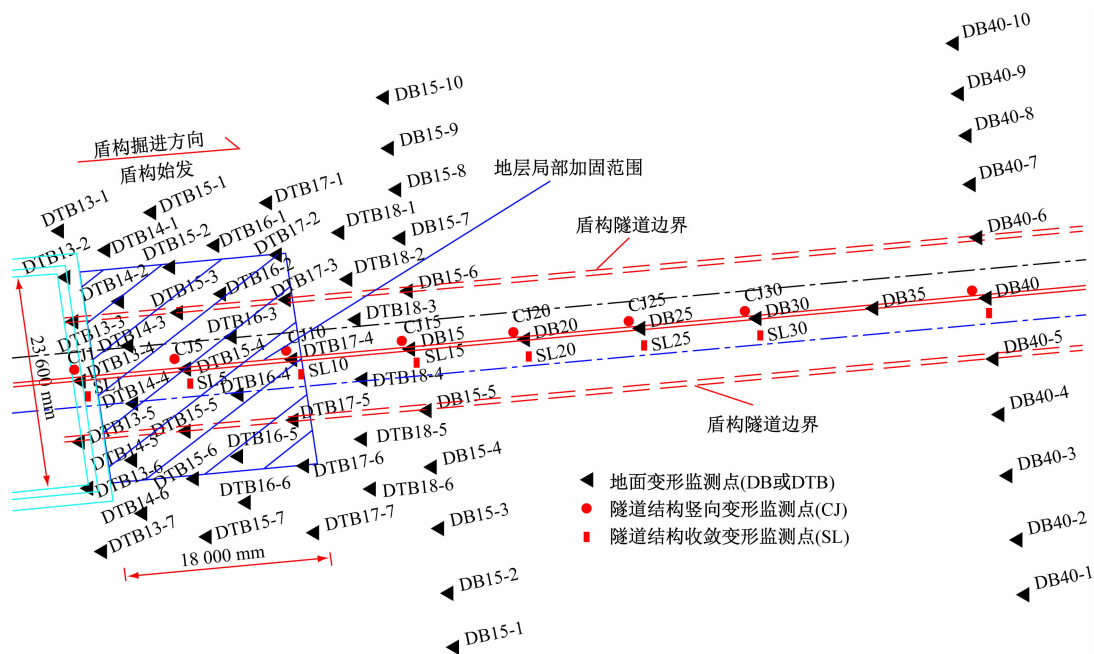


图1 隧道始发端头地层加固及监测点布置平面图软件截图

Fig. 1 Software screenshot of tunnel originating end stratum reinforcement and monitoring point layout plan

2.2 变形监测方案

该工程项目的重要性等级和监测等级均为Ⅰ级,监测项目主要包括隧道沿线地面竖向位移监测和隧道结构变形监测。

2.2.1 监测点布置

1) 地面竖向变形监测。地面竖向变形监测分为加固区地面竖向变形监测和推进区地面竖向变形监测。①沿盾构始发推进方向,加固区每5 m设置1组监测断面,设置DTB13—DTB18共6组监测断面(见图1)。第1组断面中,隧道中心线布置1个监测点,隧道边线各布置1个监测点,隧道边线往外每隔6.8 m布置1个监测点至加固区外,共7个监测点。其余断面测点与相邻断面相交错布设,形成加密网络。②推进区地面竖向变形监测沿隧道中心线每5环布设1个监测点,每30环布设1组监测断面,监测点命名为DB+管片环号,即监测点序号与管片环号相对应(见图1)。监测断面垂直于隧道中心线方向,每组断面设11个监测点,中间点与轴线地面点共点,依次向两侧间距6.8 m、5.0 m、10.0 m、15.0 m、15.0 m进行布设。

2) 隧道结构变形监测。隧道结构变形监测分为结构竖向变形监测和结构收敛变形监测。结构竖向变形在进洞50 m范围内每5环布设1个沉降变形监测点,出洞50 m范围外每10环布设1个监测点,命名为CJ+管片环号(见图1)。结构收敛监

测沿隧道内出洞50 m范围内收敛点每5环布设1个收敛断面,出洞50 m范围外每10环布设1个收敛断面,监测点命名为SL+管片环号。

2.2.2 监测频率与控制值

各监测项目的监测频率与监测变形控制值如表1所示。在盾构切口前50 m至盾尾脱出后50 m范围内,若发生异常情况,则加密监测频率;当监测变形超过控制值时,加密监测频率。

3 施工变形差异特征分析

3.1 地面竖向变形

隧道自2022年1月10日开始始发掘进,2022年2月14日掘进至第43环(自始发井起掘进86 m),盾构掘进距离 S 为0~80 m时,地面竖向变形历时变化曲线如图2所示。其中,0~20 m为始发加固区域,20~80 m为非加固区域。由图2可知,始发加固区域地面固结沉降不明显,地面竖向变形主要包括扰动沉降、卸荷隆起和相对稳定3个阶段。而非加固区域盾构隧道掘进过程中,地面竖向变形可分为扰动沉降、卸荷隆起、固结沉降和相对稳定这4个阶段。加固区与非加固区轴线地面最终变形差异显著,其中:加固区上浮变形为主,最大上浮量为8.49 mm;非加固区表现为沉降变形,最大沉降量为24.93 mm。由此可知,地层加固提高了土体强度和刚度,降低了土体渗透性,改善了加固区土层

表 1 各监测项目的监测频率与监测变形控制值

Tab.1 Monitoring frequency and deformation control values of each monitored item

监测项目	不同变形速率下盾构推进施工在盾尾脱出 50 m 后的监测频率				变形速率/ (mm/d)	变形累计值/ mm
	≥ 5 mm/d	$1 \sim 5$ mm/d	$0.5 \sim 1$ mm/d	< 0.5 mm/d		
地面竖向变形	1 天 2 次	1 天 1 次	2 天 1 次	1 周 1 次	3	10.0(隆起量); 30.0(沉降量)
隧道竖向变形	1 天 1 次	3 天 1 次	7 天 1 次	2 周 1 次	3	10.0
隧道横向收敛	1 天 1 次	3 天 1 次	7 天 1 次	2 周 1 次	3	40.8

注:在盾构切口前 50 m 至盾尾脱出后 50 m 范围内,地面竖向变形的监测频率为 1 天 2 次;在该范围内无隧道变形监测项目。

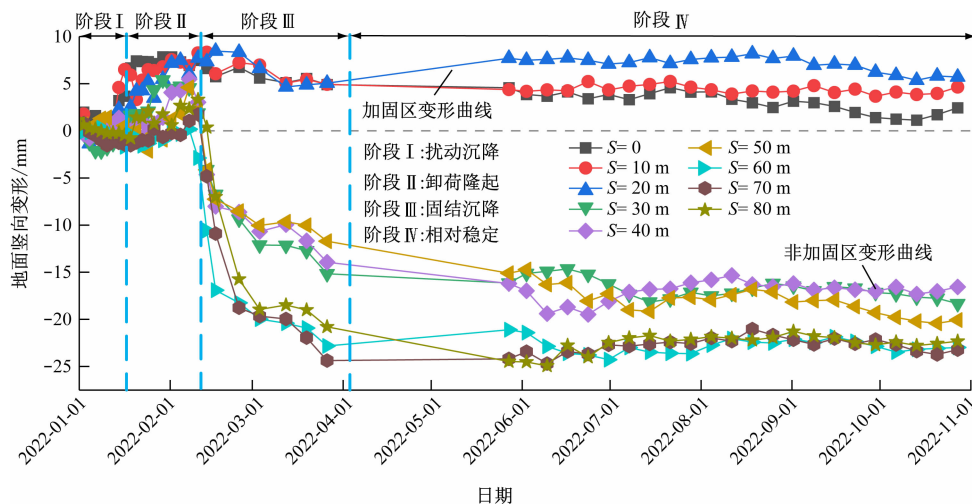


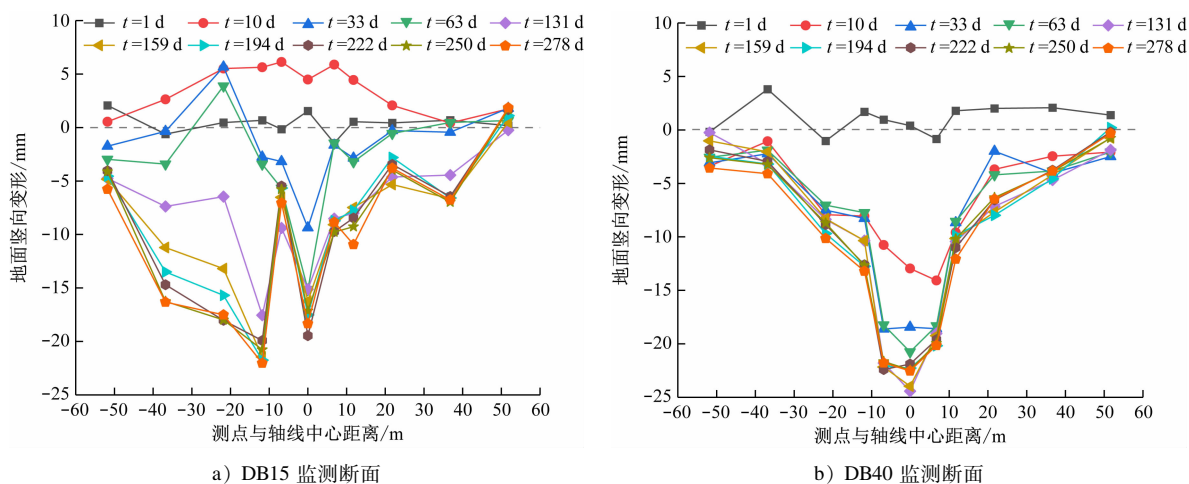
图 2 不同盾构掘进距离下的地面竖向变形历时变化曲线

Fig. 2 Time-history change curves of ground vertical deformation under different shield excavation distances

性质。同时,加固区紧邻始发工作井,使加固区土体在工作井施工期间发生工前固结,掘进施工未引起明显的固结沉降特征,导致加固区地面最终竖向变形以上浮隆起为主。

对于非加固区,受开挖卸荷和固结作用影响,

断面地面通常以隧道轴线为中心,先向上拱形隆起,再向下凹形沉降,呈沉降槽特征。非加固区 DB15 和 DB40 监测断面地面竖向变形历时变化曲线如图 3 所示。非加固区地面断面在掘进 10 d 内总体呈拱形隆起,10 d 后开始凹形沉降,最终总体



注: t 为掘进天数;测点与轴线中心距离以盾构掘进方向左侧为正,以盾构掘进方向右侧为负,余类同。

图 3 非加固区 DB15 和 DB40 监测断面地面竖向变形历时变化曲线

Fig. 3 Time-history change curves of ground vertical deformation at DB15 and DB40 monitoring profiles in non-reinforced area

呈沉降槽特征。

加固区 DTB15 和 DTB17 监测断面地面竖向变形历时变化曲线如图 4 所示。DTB15 和 DTB17 监测断面整体变形较为协调,未出现沉降槽特征。但加固区边界处不同方向的地面竖向变形趋势差异较大,其中,加固区内侧以整体上浮为主,加固区外侧呈现沉降趋势。

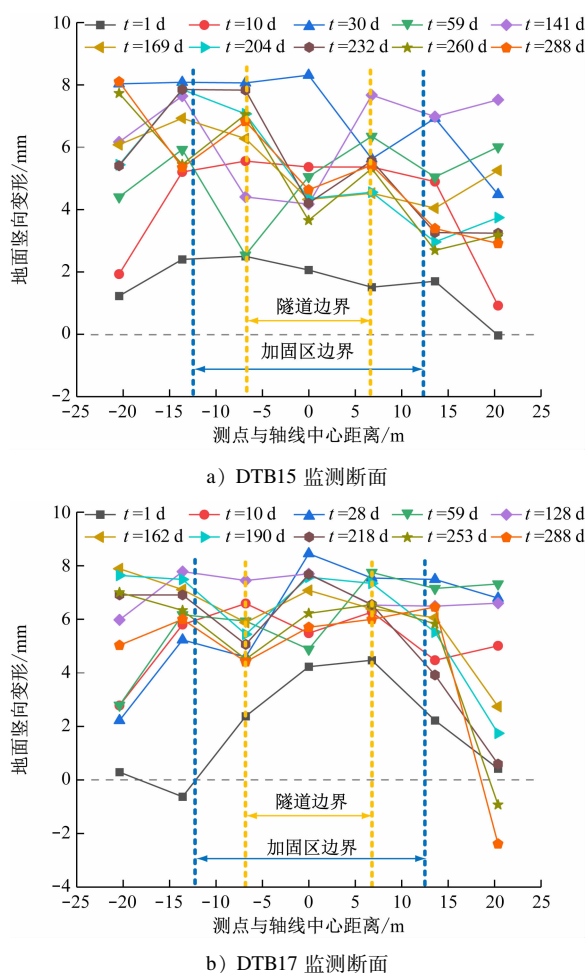


图4 加固区 DTB15 和 DTB17 监测断面地面竖向变形历时变化曲线

Fig. 4 Time-history change curves of DTB15 and DTB17 monitoring profile ground vertical deformation in reinforced area

由图 3 和图 4 可知:加固区与非加固区的地层变形差异显著。地层加固使土体黏结为一个相对整体,降低了土体的离散性,在掘进开挖卸荷作用下,加固区断面地面呈现整体协调上浮特征。加固区外侧土体保持其离散性,受隧道施工扰动、开挖卸荷、固结沉降和边界变形协调等因素耦合影响,地面呈现上浮隆起现象,且越偏离隧道轴线的地面

上浮变形量越小,并出现沉降变形趋势。

为进一步分析临界区地面变形差异特征,选取 DTB17 与 DB15 监测点进行差异沉降分析。其中:DTB17 监测点位于加固区,DB15 监测点位于非加固区,二者水平距离为 10 m。DTB17 与 DB15 监测点地面差异沉降与相对差异沉降值对比如图 5 所示。在 DTB17 监测点所属环号掘进完成 10 d 内,临界区地面差异沉降先由 2.42 mm 逐渐减小,10 d 后差异沉降迅速增大,但增速随时间趋缓,约 180 d 时达到最大值 25.27 mm,相对差异沉降最大值为 0.253%,根据 GB 50911—2013《城市轨道交通工程监测技术规范》,该值会对临近地下管线的安全使用造成威胁。

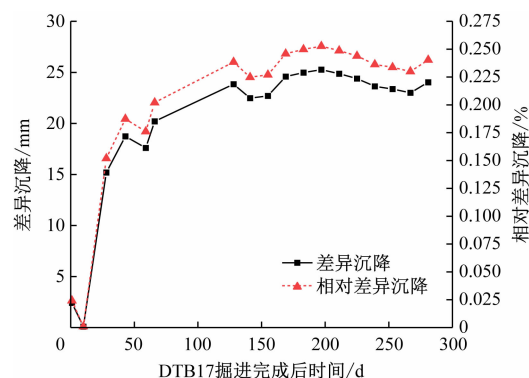


图5 DTB17 与 DB15 监测点地面差异沉降与相对差异沉降值对比

Fig. 5 Comparison of ground differential settlement and relative differential settlement values at DTB17 and DTB15 monitoring points

3.2 隧道结构竖向变形

自每环管片拼装完成后开始计时,不同监测点下,隧道结构竖向变形与管片拼装后时间的关系曲线如图 6 所示。其中:CJ01、CJ05、CJ10 为加固区结构竖向变形监测点;CJ15、CJ20、CJ25、CJ30、CJ40 为非加固区结构竖向变形监测点。管片拼装完成后,隧道结构随时间发生波动沉降。其中:加固区内的管片结构表现为波动下沉,约 150 d 后达到相对稳定;非加固区内的管片结构表现为波动上浮,约 150 d 达到最大值后,其竖向变形值有所减小并逐渐趋于稳定。

分析图 6 可以获得不同管片环号下的隧道结构竖向变形特征曲线,如图 7 所示。加固区,隧道竖向变形量相对较小,最大沉降量和最大上浮量均在 2.10 mm 以内,相对最大沉降量为 $0.007\% H \sim 0.011\% H$ (H 为隧道中心埋深),最大上浮量为 $0.004\% H \sim 0.010\% H$,最终表现为沉降变形。非加

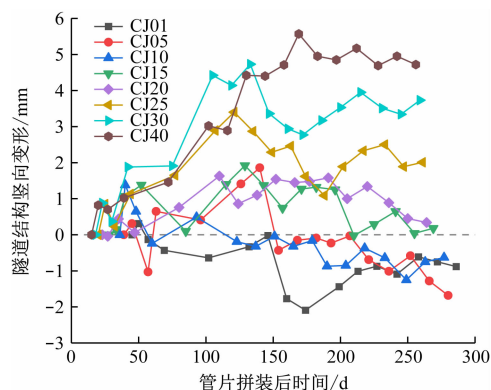


图6 不同监测点下隧道结构竖向变形与管片拼装后时间的关系曲线

Fig. 6 Relation curves of tunnel structure vertical deformation and duration since segment assembly at different monitoring points

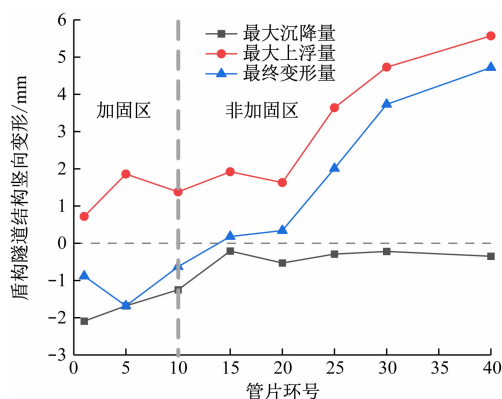


图7 不同管片环号下的隧道结构竖向变形特征曲线

Fig. 7 Characteristic curves of tunnel structure vertical deformation at segment rings of different numbers

固区,隧道结构以上浮变形为主,越偏离加固区分界面,隧道结构上浮变形量越大,最大上浮量为 $0.009\% H \sim 0.037\% H$,最终竖向变形量为 $0.001\% H \sim 0.031\% H$ 。

加固区与非加固区隧道结构竖向变形差异主要受土体开挖卸荷和固结沉降耦合影响。对于加固区,盾构初始掘进速度较慢(掘进速度为 $15 \sim 20 \text{ mm/min}$),盾构掘进后土体开始卸荷上浮并逐渐趋于稳定,管片拼装后尤其是结构沉降变形监测开始后,隧道结构受底部地层固结沉降作用大于开挖卸荷作用,导致加固区隧道结构的竖向变形以沉降为主,但其变形量相对较小。对于非加固区,盾构掘进速度相对较快(掘进速度为 $25 \sim 35 \text{ mm/min}$),监测开始后,隧道结构同时受卸荷作用和土层固结的影响,但隧道结构卸荷上浮位移量大于土层固结沉降位移量,同时离散性土体难以抑制刚性隧道的结

构上浮,导致非加固区隧道结构竖向变形以上浮为主,且其变形量相对较大。

选取加固区与非加固区分界两侧的 CJ10 和 CJ15 监测点,分析隧道结构差异沉降特征。CJ10 与 CJ15 监测点隧道结构差异沉降绝对值如图 8 所示。隧道结构差异沉降呈明显波动特征,隧道结构最大差异沉降绝对值为 2.24 mm 。经计算分析可知,隧道结构相对差异沉降达到 $0.022\% L_s$ (L_s 为隧道轴线两侧两个监测点间距),根据 GB 50911—2013《城市轨道交通工程监测技术规范》,该值超过相应规范控制值要求的一半,即达到隧道结构差异沉降预警值。因此,应重点关注地层加固临界区域隧道管片结构差异沉降问题,避免差异沉降过大造成隧道渗漏,以及环缝螺栓剪切破坏而造成安全事故。

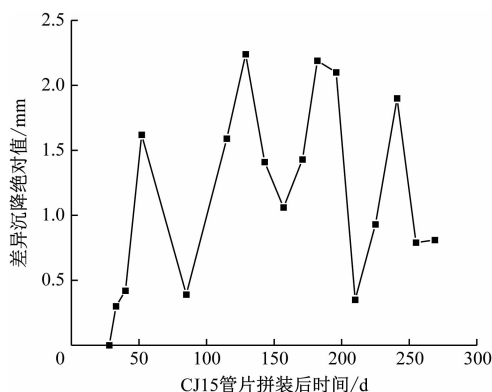
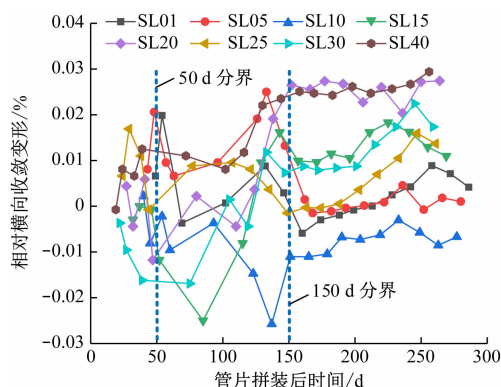


图8 CJ10 与 CJ15 监测点隧道结构差异沉降绝对值

Fig. 8 Absolute values of tunnel structure differential settlement at CJ10 and CJ15 monitoring points

3.3 隧道结构横向收敛变形

自管片拼装完成开始,不同监测点下,隧道结构相对横向收敛变形(隧道结构横向收敛量与隧道结构外径的比值)与管片拼装后时间的关系曲线如图 9 所示。管片拼装后 50 d 内,不同环片结构收敛变形差异较大。当管片拼装后时间为 $50 \sim 150 \text{ d}$ 时,不同环片结构横向收敛变形均变大,但变形方向相反。其中:加固区结构测点 (SL01、SL05、SL10) 收敛变形向负值发展,即结构向内压缩;非加固区结构测点收敛变形正向发展,即结构向外扩张。当管片拼装后时间大于 150 d 时,不同环片结构收敛变形趋于稳定。其中:非加固区最终相对横向收敛变形均为正值,发生结构横向扩张,呈横鸭蛋变形;加固区管片结构最终相对横向收敛变形为负值或接近于 0,呈竖鸭蛋变形特征。



注:相对横向收敛变形为正表示测点向外扩张,为负表示测点向内压缩;余类同。

图9 不同监测点下隧道结构横向收敛变形与管片拼装后时间的关系曲线

Fig. 9 Relation curves of tunnel structure lateral convergence deformation and duration since segment assembly at different monitoring points

不同管片环号下的隧道结构相对横向收敛变形特征曲线如图10所示。结合图9和图10可知,与非加固区相比,加固区隧道结构最终横向收敛变形明显减小。三轴搅拌桩加固提高了土体强度和刚度,土体黏结为一个整体,减轻了上覆土对隧道结构的压力作用。但加固区与非加固区临界区域(10环—15环),隧道结构收敛变化幅值显著增大,在环间收敛方向相反的耦合作用下,极易产生环间剪切力,从而造成环缝螺栓剪切破坏或螺栓孔混凝土损伤。

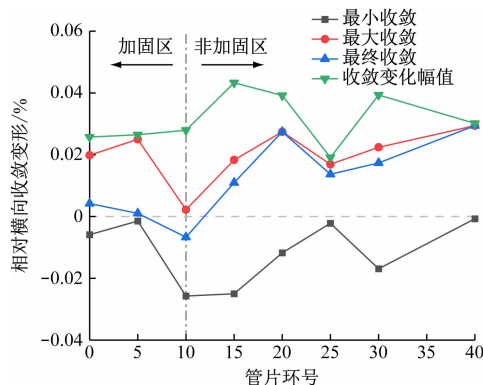


图10 不同管片环号下的隧道结构相对横向收敛变形特征曲线

Fig. 10 Characteristic curves of tunnel structure relative lateral convergence deformation under different segment ring numbers

4 结语

本文针对软土地层大直径盾构始发端头局部

地层加固临界区域施工变形差异特征问题,以上海市域铁路机场联络线大直径盾构隧道工程为例,通过监测数据分析了盾构始发端头地层加固区与非加固区的地面竖向变形、隧道结构竖向变形、隧道结构横向收敛的差异特征及其影响机理,主要获得以下结论:

1) 加固区地面竖向变形发展可分为扰动沉降、卸荷隆起和相对稳定3个阶段,非加固区包括扰动沉降、卸荷隆起、固结沉降和相对稳定4个阶段。加固区地面以上浮变形为主,非加固区地面表现为沉降变形,临界区域地面差异沉降在掘进施工10 d后迅速增大,约180 d时相对差异沉降达到最大值。

2) 加固区隧道结构以波动下沉为主,约150 d后达到相对稳定,最大沉降量为 $0.007\% H \sim 0.011\% H$ 。非加固区隧道结构表现为波动上浮,约150 d达到最大值后上浮量减小并相对稳定,偏离临界面越远的隧道结构上浮变形越大,最终竖向变形为 $0.001\% H \sim 0.031\% H$ 。临界区结构相对差异沉降最大值为 $0.022\% L_s$,达到管片结构差异沉降预警值。

3) 管片拼装后50~150 d时,隧道结构横向收敛变形均变大;管片拼装150 d后,隧道结构横向收敛变形相对稳定,非加固区结构最终表现为横鸭蛋变形,而加固区结构表现为竖鸭蛋变形,且最终变形量相对减小,但临界区域结构横向收敛变化幅值显著增大。

4) 始发端头地层加固临界区域掘进变形响应差异显著,应重点防范临界区域管片结构差异沉降和差异收敛造成的环缝螺栓剪切破坏和螺栓孔混凝土损伤。

参考文献

- [1] 代洪波,季玉国.我国大直径盾构隧道数据统计及综合技术现状与展望[J].隧道建设(中英文),2022,42(5):757.
DAI Hongbo, JI Yugu. Statistical analysis of Chinese large-diameter shield tunnel and state-of-art and prospective of comprehensive technologies[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(5): 757.
- [2] 程红战,陈健,李健斌,等.基于随机场理论的盾构隧道地表变形分析[J].岩石力学与工程学报,2016,35(增刊2):4256.
CHENG Hongzhan, CHEN Jian, LI Jianbin, et al. Surface deformation analysis of shield tunnel based on random field theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S2): 4256.

(下转第126页)

- [2] 魏纲, 洪杰, 魏新江. 盾构隧道施工阶段管片上浮的力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1257.
WEI Gang, HONG Jie, WEI Xinjiang. Mechanical analysis of segment floating during shield tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1257.
- [3] 胡辉, 张恒, 刘晓迪, 等. 泥岩地层盾构隧道施工管片上浮影响因素分析[J]. 公路, 2018, 63(12): 312.
HU Hui, ZHANG Heng, LIU Xiaodi, et al. Analysis on influencing factors of segment floating in construction of shield tunnel in mudstone stratum[J]. Highway, 2018, 63(12): 312.
- [4] 贾少东, 马杲宇, 王士民, 等. 考虑注浆压力的泥岩地层管片上浮特性与控制[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(2): 72.
JIA Shaodong, MA Gaoyu, WANG Shimin, et al. Floating properties and control of segments in mudstone stratum considering grouting pressure[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(2): 72.
- [5] 李强, 甘鹏路, 钟小春. 盾构隧道管片壁后注浆厚度对隧道抗浮影响研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(6): 27.
LI Qiang, GAN Penglu, ZHONG Xiaochun. Study on effect of backfilling grouting thickness on anti-floating of the shield tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(6): 27.
- [6] 王新, 李庭平, 王印昌. 软土大直径泥水盾构隧道施工期上浮的控制措施[J]. 隧道建设, 2014, 34(12): 1168.
WANG Xin, LI Tingping, WANG Yinchang. Countermeasures for floating of large-diameter slurry shield tunnel in soft soil[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(12): 1168.
- [7] 杨延栋, 陈馈, 李凤远, 等. 全断面硬岩地层盾构隧道管片上浮控制技术研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(2): 180.
YANG Yandong, CHEN Kui, LI Fengyuan, et al. Control technologies for up-floating of segment rings of shield-bored tunnel in full-face hard-rock ground[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(2): 180.
- [8] 曾学艺, 梁禹, 李科, 等. 浅覆大直径越江盾构隧道施工阶段管片上浮分析及控制措施研究[J]. 铁道建筑, 2017, 57(5): 71.
ZENG Xueyi, LIANG Yu, LI Ke, et al. Study on segment floating and its control measures during construction of large-diameter cross river shield tunnel with shallow covering[J]. Railway Engineering, 2017, 57(5): 71.
- [9] 舒瑶, 季昌, 周顺华, 等. 考虑地层渗透性的盾构隧道施工期管片上浮预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊1): 3516.
SHU Yao, JI Chang, ZHOU Shunhua, et al. Prediction of segment floating during shield tunnel construction considering stratum permeability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3516.
- [10] 舒瑶, 周顺华, 季昌, 等. 多变复合地层盾构隧道施工期管片上浮实测数据分析与量值预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊1): 3464.
SHU Yao, ZHOU Shunhua, JI Chang, et al. Analysis and prediction of measured data of segment floating during construction of shield tunnel in changeable composite stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3464.
- 收稿日期:2022-01-28 修回日期:2022-05-20 出版日期:2024-07-10
Received:2022-01-28 Revised:2022-05-20 Published:2024-07-10
• 第一作者:夏明,高级工程师,xiamjxnc@163.com
通信作者:张志强,教授,clarkchang68@163.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 119 页)

- [3] 李健斌, 陈健. 考虑参数空间变异性的盾构隧道施工地层变形综合可靠度分析[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(6): 127.
LI Jianbin, CHEN Jian. Comprehensive reliability analysis of deformation induced by shield tunneling considering spatial variability of soil parameters[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(6): 127.
- [4] 包昊, 薛亚东, 葛彬. 考虑多层土的盾构隧道地表变形分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊1): 431.
BAO Hao, XUE Yadong, GE Bin. Surface deformation analysis of shield tunnel considering multi-layer soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S1): 431.
- [5] 靳雪梅, 黄宏伟, 张东明. 关于土的空间变异性对盾构隧道施工影响的探讨[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(2): 62.
JIN Xuemei, HUANG Hongwei, ZHANG Dongming. The impact of spatial variability of soils on shield tunnelling[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(2): 62.
- 收稿日期:2023-05-26 修回日期:2023-07-16 出版日期:2024-07-10
Received:2023-05-26 Revised:2023-07-16 Published:2024-07-10
• 第一作者:杨光,高级工程师,275744852@qq.com
通信作者:甘彬霖,博士研究生,binlin_g@163.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