

软土地区市域快速轨道交通大直径盾构隧道的横断面变形特征及其控制限值

顾 锋

(广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州//高级工程师)

摘 要 为研究软土地区大直径盾构隧道横断面变形对隧道结构安全的影响,以已运营的广州南沙地区深厚软基区段速度 160 km/h 市域快速轨道交通(以下简为“市域快线”)大直径盾构隧道工程为例,利用数值模拟方法研究了线路运营期间加、卸载引起的隧道横断面变形与结构性态的发展规律。结果表明:隧道横断面变形与接缝最大张开量、接头螺栓应力和混凝土结构损伤存在较高的相关性。建立了以隧道拱腰直径变化量为控制指标的市域快线盾构隧道横断面变形安全等级,分为 I (正常)、II (退化)、III (劣化)、IV (恶化)、V (危险)等 5 个等级,并针对各安全等级状态提出了相应的处理措施。

关键词 市域快速轨道交通;大直径盾构隧道;横断面变形;控制指标;软土地区

中图分类号 U456.3⁺1;U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.022

Cross-sectional Deformation Characteristics and Control Limits of Large-diameter Shield Tunnel in Urban Rapid Rail Transit in Soft Soil Area

GU Feng

Abstract In order to study the influence of cross-sectional deformation of large-diameter shield tunnel on the safety of tunnel structure in soft soil area, the development law of cross-sectional deformation and structural state caused by loading and unloading of large-diameter shield tunnel in Nansha deep and soft foundation section of Guangzhou 160 km/h operating urban rapid rail transit is studied by numerical simulation method. Results show that there is a high correlation between the cross-sectional deformation of the tunnel and the maximum opening of the joint, the stress of the joint bolt, and the damage of the concrete structure. The variation of tunnel arch waist diameter is taken as the control index, and the safety level of cross-sectional deformation of shield tunnel in urban rapid rail transit is established, which is divided into five levels: I (normal), II (degradation), III (deterioration), IV (deteri-

oration worsening), V (danger). Corresponding treatment measures are put forward.

Key words suburban rapid rail transit; large-diameter shield tunnel; cross-sectional deformation; control index; soft soil area

Author's address Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

地铁隧道横断面变形过大会引起隧道管片接缝张开、渗漏水、螺栓拉流和管片开裂等病害,极端情况下甚至会造成隧道结构整体垮塌。目前,对于隧道横断面变形发展规律和控制标准的认识相对滞后。文献[1-2]提出隧道横断面变形安全控制指标及限值,但研究对象为车辆最高运行速度 80 km/h 的常规盾构隧道。文献[3-4]利用足尺试验研究隧道结构的承载性能和变形规律,但主要侧重于设计和施工阶段隧道结构的力学性能,尚缺少针对错缝拼装盾构隧道运营阶段破坏机制和横断面变形规律的试验研究。

已运营的广州地铁 18 号线(以下简为“18 号线”)为全地下市域快速轨道交通线路(以下简为“市域快线”),列车设计速度为 160 km/h,区间为 8.5 m 外径的大直径盾构施工错缝拼装隧道。本文以该线路南沙地区深厚软土区段大直径盾构隧道(以下简为“盾构隧道”)为研究对象,模拟分析加、卸载条件下隧道结构的受力状态和变形规律,并以管片接头允许张开量和螺栓屈服强度为控制指标,确定隧道横断面变形的控制限值和分级标准。

1 工程概况

1.1 地质情况

18 号线某区间隧道位于南沙地区深厚软土区段,其主要穿越土层为淤泥层、淤泥质土层、粉质黏土层。该区间软土地层厚度较大,最大软土层厚度约为

33 m,平均厚度大于 10 m,主要土层参数见表 1。

表 1 广州地铁 18 号线某区间主要土层参数

Tab.1 Parameters of main soil layers of Guangzhou Metro Line 18 certain interval								
土层号	土层名称	重度 γ / (kN/m^3)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	压缩模量 E_s/MPa	渗透系数 $k/(\text{m}/\text{d})$	静止侧压力 系数 K_0	孔隙比 e
①	杂填土	17.8	13.0	7.0	4.83	0.1~2.0	0.50	1.038
②-1A	淤泥	15.9	6.5	5.2	1.90	0.001	0.75	1.731
②-1B	淤泥质土	16.8	7.0	6.3	2.77	0.001	0.74	1.346
③-2	中粗砂	19.2		32.0	9.00	12.000	0.65	
④N-2	粉质黏土	19.4	16.0	12.0	4.76	0.050	0.70	0.830

1.2 管片设计

盾构隧道采用外径为 8.5 m、内径为 7.7 m、环宽为 1.6 m 的大管片。衬砌环由 4 块标准块(B1—B4)、2 块连接块(L1、L2)、1 块封顶块(F)组成。衬砌环型式为通用衬砌环,采用错缝拼装施工技术。衬砌环的接缝连接包括 19 个环缝连接螺栓(型号为 M30)和 14 个纵缝连接螺栓(型号为 M30)。混凝土管片强度等级 \geq C50,抗渗等级 \geq P12,钢筋采用 HPB300 级、HRB400/HRB400E 级钢,环纵向螺栓强度等级不低于 6.8 级。

2 隧道横断面变形与结构形态关系

运营期盾构隧道横断面变形的发展,受到隧道自身结构特征、周围土体特性及荷载条件变化等众多因素的共同影响^[5]。盾构隧道在运营期,常受到上部堆载和邻近基坑工程的影响而发生“横鸭蛋”形或“竖鸭蛋”形变形,会严重降低隧道结构的服役性能。本文采用 Abaqus 数值软件,基于荷载-结构法计算,研究加载及卸载引起的隧道横断面变形与结构性态的发展规律。

2.1 数值计算模型

建立包含三环管片的错缝拼装盾构隧道结构三维数值模型,管片采用实体单元,接头螺栓采用梁单元,钢筋采用桁架单元,如图 1 所示。通过设置管片-管片、管片-钢筋、管片-接头螺栓等接触面,实现应力和位移的连续,其中法向接触行为采用硬接触,切向接触采用库伦摩擦接触,摩擦系数取 0.5。混凝土本构采用塑性损伤本构模型,螺栓和钢筋采用三折线弹塑性本构模型,计算参数见表 2 和表 3。

2.2 计算工况

数值分析时选取典型断面作为研究对象,隧道顶部埋深约为 12.5 m,隧道底部存在较厚的淤泥

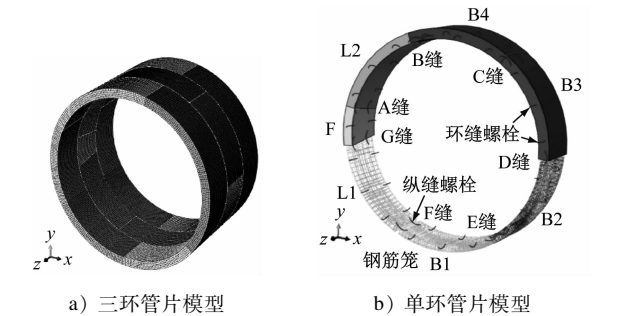


图 1 18 号线某区间错缝拼装盾构隧道结构三维数值计算模型

Fig. 1 Three-dimensional numerical calculation model of shield tunnel structure with staggered joints in Line 18 certain interval

表 2 混凝土塑性损伤本构模型参数

Tab.2 Parameters of concrete plastic damage constitutive model				
弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	剪胀角 $\psi/(^\circ)$	双轴与单轴抗压 强度比(f_{b0}/f_{c0})	黏滞系数 ν
34.5	0.2	38	1.16	0.000 01

表 3 钢筋、螺栓材料本构参数

Tab.3 Constitutive parameters of steel bar and bolt				
材料	E/GPa	μ	屈服强度 f_y/MPa	抗拉强度 f_{st}/MPa
螺栓	200	0.3	480	600
分布筋、箍筋	210	0.3	300	420
主筋	200	0.3	400	540

层,土重度取 17 kN/m^3 ,侧土压力系数取 0.75。侧向土体抗力假定为等腰三角形,与水平直径上下呈 45°,土体抗力系数取 6 000 $\text{kPa}/\text{m}^{[1]}$ 。数值模拟中采用控制荷载条件的方式使模型发生不同程度的横向收敛变形直至结构破坏,以研究管片结构的承

载性能及抗变形能力。由于隧道发生横断面变形的本质为隧道上覆竖向荷载和水平荷载的比值发生变化^[1],因此,本文通过固定水平荷载,增大或减小竖向荷载,使隧道发生横断面变形。

施加竖向及水平荷载至设计荷载水平,设计荷载分布如图 2 所示。对于加载工况,加载至设计荷载水平后保持水平荷载不变,继续以同一幅度施加竖向荷载至 430 kPa;对于卸载工况,加载至设计荷载水平后保持水平荷载不变,将竖向荷载逐渐减小至 0。数值模型荷载曲线如图 3 所示。

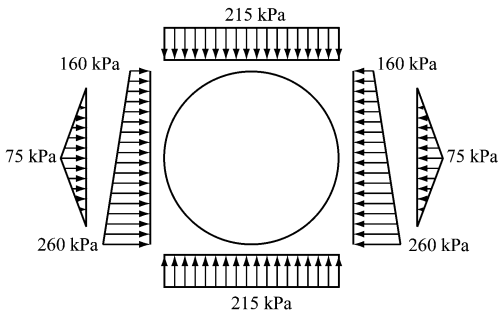


图 2 18 号线某区间盾构隧道设计荷载分布示意图
Fig. 2 Design load distribution of shield tunnel in Line 18 certain interval

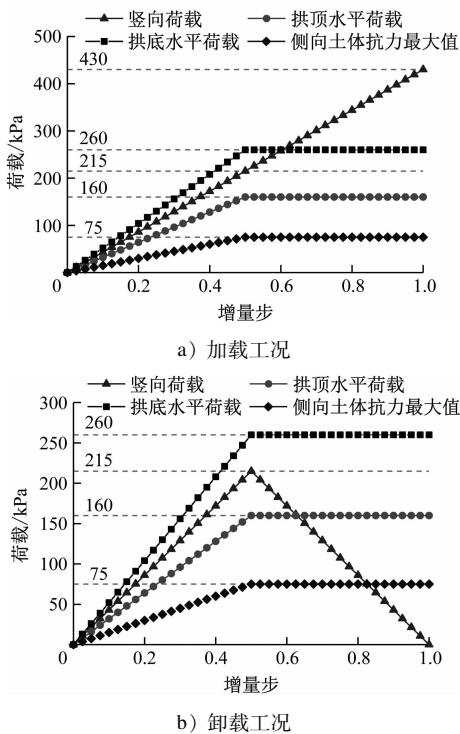


图 3 18 号线某区间盾构隧道数值模型荷载曲线
Fig. 3 Numerical model load curves of shield tunnel in Line 18 certain interval

2.3 典型断面模拟计算结果与分析

2.3.1 盾构隧道横断面变形与竖向荷载的关系

选取中间环进行分析,由于盾构隧道拱腰处直径变化量较大,文中所提及的横断面变形均为盾构隧道拱腰处收敛变形。隧道横断面变形与竖向荷载的关系见图 4。由图 4 可知,在加载至设计荷载水平前,盾构隧道横断面变形与外部荷载近似呈线性正相关。对于加载工况,当竖向荷载超出设计荷载后,隧道结构收敛变形发展进入非线性阶段,这是由材料的非线性本构关系所致;当竖向荷载达到 333.25 kPa 时,竖向荷载-横向收敛变形曲线平缓,盾构隧道结构出现屈服。对于卸载工况,在竖向荷载减小至 161.25 kPa 的过程中,竖向荷载与横向收敛变形仍是线性变化关系;当竖向荷载小于 161.25 kPa 后,盾构隧道结构收敛变形发展进入非线性阶段;当竖向荷载为 119.41 kPa 时,盾构隧道结构发生破坏。

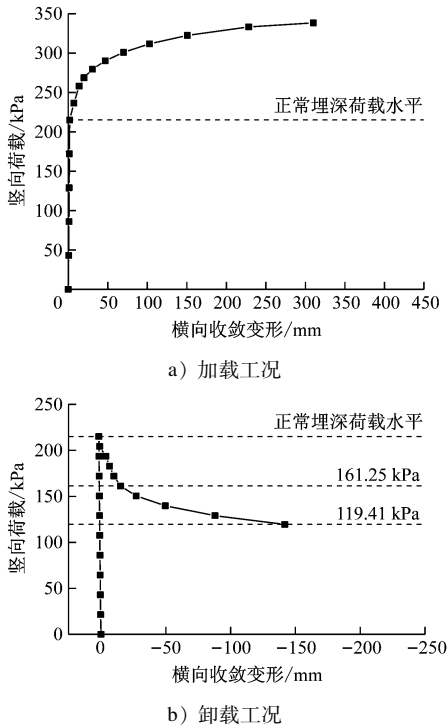


图 4 盾构隧道横断面变形与竖向荷载的关系
Fig. 4 Relation between shield tunnel cross-sectional deformation and vertical load

2.3.2 盾构隧道横断面变形与接缝最大张开量的关系

由于 B2 与 B3 标准块之间的纵缝(即 D 缝)位于右侧拱腰处,在加载及卸载两种工况下,接缝张开量均较大,且加载时发生外部张开,卸载时发生

内部张开。选取该接缝进行分析,由图 5 可知,两种工况下接缝张开量与横断面变形呈现出较好的线性相关性。文献[6]指出,当纵缝张开量大于 6 mm 时,盾构隧道存在较大的渗漏风险。对于加载工况:D 缝张开量达 6 mm、12 mm、18 mm 时,其横向收敛变形分别为 98 mm、166 mm、228 mm。对于卸载工况:D 缝张开量达 6 mm 时,其横向收敛变形为 90 mm;结构破坏时,D 缝张开量未达 12 mm。

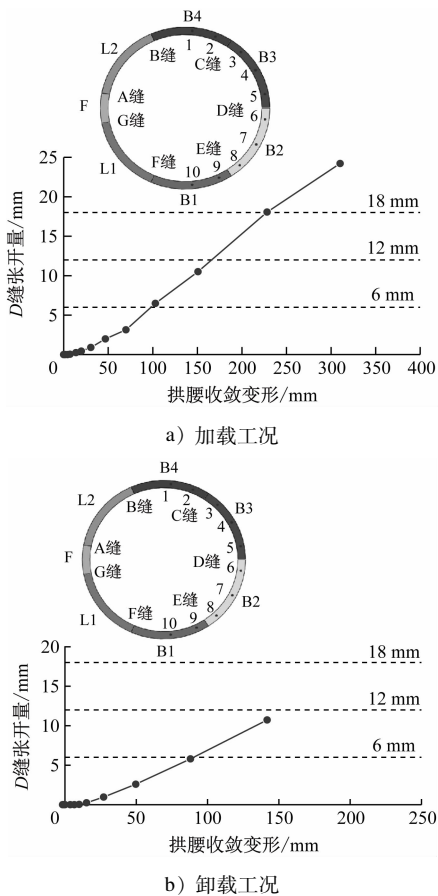


图 5 盾构隧道横断面变形与接缝最大张开量的关系
Fig. 5 Relation between cross-sectional deformation of shield tunnel and maximum opening of joint

2.3.3 盾构隧道横断面变形与纵缝螺栓应力的关系

盾构隧道横断面变形与纵缝螺栓应力的关系见图 6。由图 6 可知,当管片结构逐渐加载至设计荷载水平时,位于左侧拱腰的封顶块 F 与连接块 L1 间纵缝(G 缝)的螺栓应力较大。对于加载工况,竖向荷载逐渐增加后出现结构内力的重分布,G 缝螺栓应力相对减小,A 缝、D 缝螺栓应力急剧增大;首个纵缝螺栓(D 缝)应力达到屈服强度 480 MPa 时,横向收敛变形约为 84 mm;当横向收敛变形为 151

mm 时,超过半数纵缝(A、B、D、F 缝)螺栓屈服。对于卸载工况,螺栓应力呈现出先减小后增大的趋势;当横向收敛变形为 88 mm 时,C、D、G 缝螺栓同时进入屈服;当横向收敛变形为 141.8 mm 时,D、G 螺栓屈服,A、F 螺栓接近屈服。此外,可知两种工况下纵缝螺栓应力最大值均发生在盾构隧道拱腰位置。

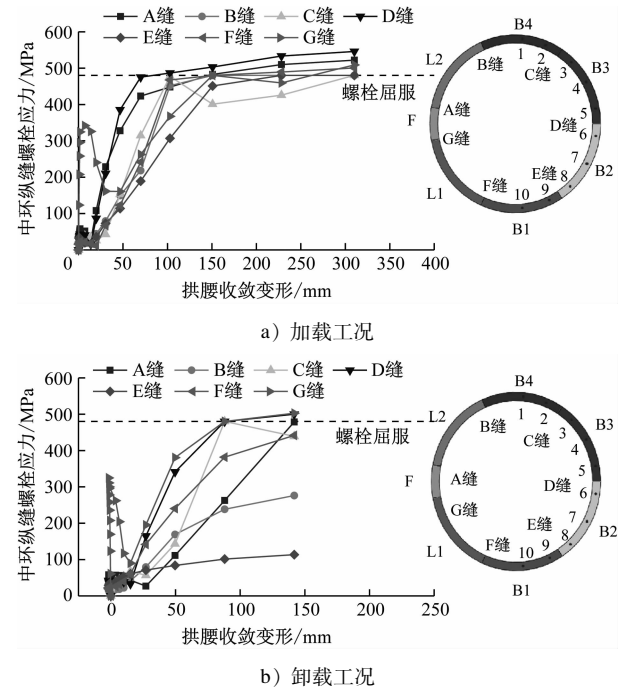


图 6 盾构隧道横断面变形与纵缝螺栓应力的关系
Fig. 6 Relation between cross-sectional deformation of shield tunnel and stress of longitudinal joint bolt

2.3.4 盾构隧道横断面变形与环缝螺栓应力的关系

选取中环与上环(Z 轴前进方向)间 10 个环缝螺栓应力发展进行分析,见图 7。对于加载工况,横断面收敛变形为 103 mm 时,6 号环缝螺栓应力达到屈服强度 480 MPa;横断面收敛变形为 310.2 mm 时,结构发生破坏,3、5、7、8 号螺栓接近屈服。对于卸载工况,横断面收敛变形为 88 mm 时,1、5 号环缝螺栓应力达到屈服强度;横断面收敛变形为 141.8 mm 时,结构发生破坏,3 号、4 号、8 号及 10 号环缝螺栓应力达到屈服强度,7 号螺栓接近屈服。由此可知,环缝螺栓应力最大值多发生在右侧拱腰处。

2.3.5 盾构隧道结构损伤开裂过程

加载及卸载工况下盾构隧道结构损伤云图见图 8。由图 8 可知,盾构隧道结构裂缝均主要分布在拱顶、拱底及拱腰附近,封顶块所在区域受拉损

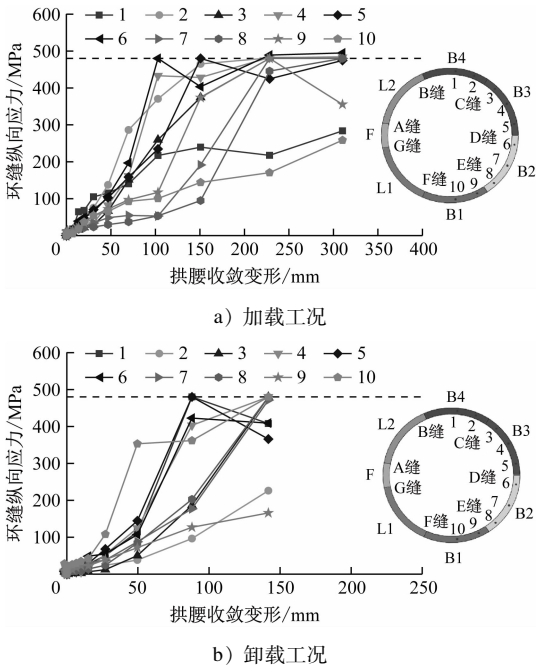


图7 盾构隧道横断面变形与环缝螺栓应力的关系

Fig. 7 Relation between cross-sectional deformation of shield tunnel and stress of annular joint bolt

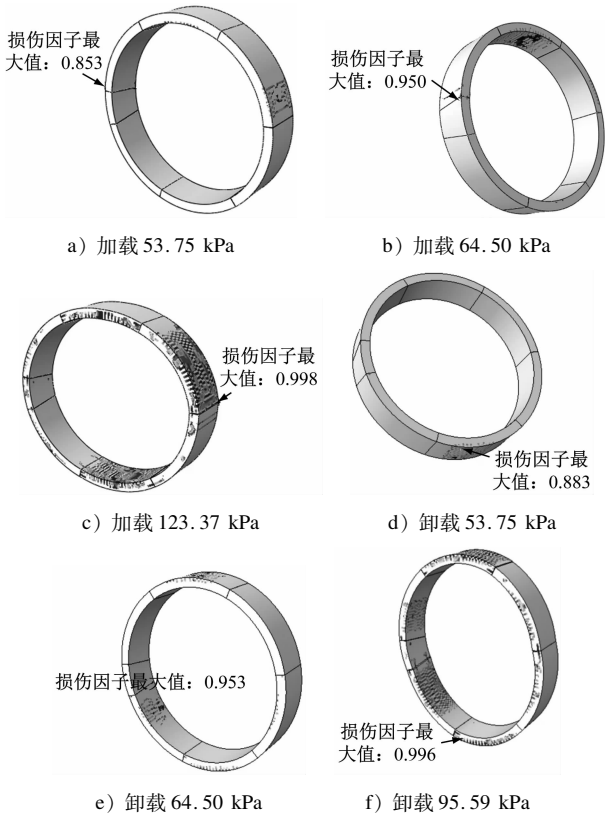


图8 加载及卸载工况下盾构隧道结构损伤云图

Fig. 8 Damage nephogram of shield tunnel structure under loading and unloading conditions

伤发展不明显。当加载/卸载量达到 53.75 kPa 时,管片开始出现裂缝,对应的横断面收敛变形分别为 19.8 mm(加载)、15 mm(卸载);当加载/卸载量达到 64.50 kPa 时,管片拱顶处受拉损伤区域沿纵向贯通,对应的横断面收敛变形分别为 30.5 mm(加载)、27.1 mm(卸载);随着加载/卸载量进一步增大,混凝土损伤区域沿环向扩大、损伤程度加深,当两种工况下结构发生极限破坏状态时,加载量及卸载量分别为 123.37 kPa、95.59 kPa,对应的横断面收敛变形分别为 310.2 mm、141.8 mm。由此可见:2 种工况下管片结构受拉损伤发展规律一致,但卸载工况下损伤开裂情况更严重,结构发生受拉破坏时对应的卸载量和横向收敛变形更小。

3 盾构隧道横断面变形安全等级

上述模拟计算研究表明,深厚软土地区大直径盾构隧道的横断面变形与接缝缝开量、最大螺栓应力以及混凝土结构损伤之间具有较好的相关性。因此,盾构隧道横断面变形在一定程度上可以反映盾构隧道结构的性态发展。汇总加载及卸载工况下盾构隧道结构性能随拱腰处收敛变形的发展状态,如表 4 所示。可知,两种工况下纵缝张开量与拱腰收敛变形的发展规律基本一致,且螺栓发生屈服时对应的盾构隧道收敛变形量值相近。为便于实际操作,本文确立了统一的大直径盾构隧道横断面变形安全等级划分方法,见表 5。

表 4 盾构隧道结构性能随拱腰处收敛变形的发展
Tab. 4 Development of shield tunnel structure performance with arch waist convergence deformation

结构状态	拱腰收敛变形量/mm	
	加载工况	卸载工况
纵缝张开量 < 6 mm	0 ~ 98	0 ~ 90
无螺栓屈服	0 ~ 84	0 ~ 88
纵缝张开量 6 ~ 12 mm	98 ~ 166	90 ~ 142
螺栓开始屈服	> 84	> 88
纵缝张开量 12 ~ 18 mm	166 ~ 228	
纵缝张开量 > 18 mm	> 228	
结构破坏	> 310	> 142

4 结语

1) 在加载至设计荷载水平之前,盾构隧道横断面变形与外部荷载近似呈线性正相关;对于加载工

表 5 盾构隧道横断面变形安全等级评定

Tab. 5 Assessment of the safety level of shield tunnel cross-sectional deformation

等级评定	拱腰收敛 变形/mm	描述
I (正常)	[-80,0] 或[0,80]	纵缝张量小于 6 mm,盾构盾隧道正常服役,无明显结构病害
II (退化)	[-150, -80] 或[80,150]	纵缝张开 6 ~ 12 mm,具有渗漏风险;螺栓开始屈服,结构进入应力调整阶段
III (劣化)	[-165, -150] 或[150,210]	纵缝张开 12 ~ 18 mm,出现明显渗漏水;大量螺栓屈服,外部较小荷载增量就会致结构变形快速发展
IV (恶化)	[-175, -165] 或[210,250]	纵缝张开 18 ~ 24 mm,防水能力完全丧失;整环结构濒临屈服,需采取一定的加固措施
V (危险)	>300 或 < -175	整环结构屈服,危及安全,确定关闭盾构隧道或更换管片

注:拱腰收敛变形为负值表示收敛变形方向朝内。

况,当竖向荷载超出设计荷载后,盾构隧道结构收敛变形发展进入非线性阶段;对于卸载工况,当竖向荷载小于 161.25 kPa 后,盾构隧道结构收敛变形发展进入非线性阶段。

2) 盾构隧道横断面变形与接缝最大张开量、接头螺栓应力、混凝土结构损伤存在一定的内在联系:①最大接缝张开量位于右侧拱腰处纵缝,且接缝张开量与盾构隧道横断面变形呈现出较好的线性关系;②纵缝和环缝螺栓应力最大值均位于盾构隧道拱腰处;③管片结构裂缝主要分布在拱顶、拱底以及拱腰附近,加载及卸载引起的结构受拉损伤发展规律一致,但卸载工况下损伤开裂情况更为严重。

3) 以盾构隧道拱腰处收敛变形为控制指标,建立了大直径盾构隧道横断面变形安全等级,分为 I (正常)、II (退化)、III (劣化)、IV (恶化)、V (危险) 共 5 个等级,针对不同的安全等级应及时采取相应

的保护措施。当盾构隧道拱腰直径变化量超过 80 mm 时,应密切关注盾构隧道结构状态变化,并加强对拱顶、拱腰接头的监测。

参考文献

[1] 王如路,张冬梅. 超载作用下软土盾构隧道横向变形机理及控制指标研究[J]. 岩土工程学报, 2013(6): 1092.
WANG Rulu, ZHANG Dongmei. Mechanism of transverse deformation and assessment index for shield tunnels in soft clay under surface surcharge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013(6):1092.

[2] 朱斌. 软土盾构隧道横断面变形规律及控制限值研究[J]. 铁道工程学报, 2014(9): 71.
ZHU Bin. Research on the law and controlled limit value of transverse deformation for shield tunnel in soft clay[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014(9): 71.

[3] 曹文宏,陈正杰,杨志豪. 超大直径隧道衬砌足尺结构试验研究[J]. 市政技术, 2009(增刊2): 239.
CAO Wenhong, CHEN Zhengjie, YANG Zhihao. Experimental investigation of super large lining structure of tunnel in full size[J]. Municipal Engineering Technology, 2009(S2): 239.

[4] 卢院,庞小朝,刘钊,等. 错缝拼装盾构管片的收敛变形研究[J]. 铁道建筑, 2019(5): 64.
LU Yuan, PANG Xiaochao, LIU Zhao, et al. Research on convergence deformation of staggered assembly segmental lining in shield tunnel[J]. Railway Engineering, 2019(5): 64.

[5] 刘梓圣,张冬梅. 软土盾构隧道芳纶布加固机理和效果研究[J]. 现代隧道技术, 2014(5): 155.
LIU Zisheng, ZHANG Dongmei. The mechanism and effects of AFRP reinforcement for a shield tunnel in soft soil[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014(5): 155.

[6] 郑永来,韩文星,童琪华,等. 软土地铁隧道纵向不均匀沉降导致的管片接头环缝开裂研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(24): 4552.
ZHENG Yonglai, HAN Wenxing, TONG Qihua, et al. Study on longitudinal crack of shield tunnel segment joint due to asymmetric settlement in soft soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(24): 4552.

(收稿日期:2021-04-30)

上海地铁第一个海外运维项目即将诞生

为进一步推动上海市企业“走出去”行稳致远,促进上海对外投资合作实现高质量发展,2022 年 7 月 14 日下午,上海市副市长宗明出席上海市“走出去”企业座谈会。座谈会由市商务委主办,以“疫情常态化背景下,境外企业的合规经营与权益保护”为主题,各相关委办局和部分“走出去”企业负责人等参加座谈会。

据悉,上海申通地铁集团有限公司旗下的两家企业上海申凯公共交通运营管理有限公司和上海申电轨道交通科技有限公司,与菲律宾马卡蒂市地铁有限公司签订了《关于马卡蒂地铁运营与维保合作备忘录》。此次合作备忘录的签署,标志着上海地铁的第一个海外运维项目即将诞生。(来源:上海申通地铁集团有限公司)