

DOI: 10.11779/CJGE201611003

盾构接收中钢套筒的受力变形特性与实测分析

廖少明^{1, 2}, 门燕青^{*1}, 赵国强³, 徐伟忠³

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海 200065)

摘要: 富水砂性地层中在盾构接收时极易发生涌水、涌砂等事故, 是盾构施工过程中的重大风险源之一。以上海轨道交通 11 号线龙华路站钢套筒接收工法盾构接收的工程实践为依托, 首先采用数值模拟对钢套筒在盾构接收施工期间的受力和变形规律进行了分析, 然后通过钢套筒变形和防汛墙沉降的现场实测数据验证了钢套筒接收工法的可行性。结果表明, 盾构推进使钢套筒结构的最大拉应力由后端板逐渐发展为筒体与地连墙连接部位的底部, 筒体结构的环向应力为纵向应力的 2~7 倍、腰部以下的环向轴力增长明显、腰部累计变形将近 10 mm, 筒体底部的纵向应力增长明显、腰部的纵向弯矩变化明显。盾构推进导致筒体结构的底部外张、腰部内凹, 筒体的径向变形由横鸭蛋变为竖鸭蛋并最终变为 8 字形, 椭圆度达到 3%, 但是盾构推进对后端板的应力和位移变化均不明显。筒体与地连墙间的接缝、钢套筒分块间的腰部接缝和底部接缝均是盾构接收中钢套筒结构受力和变形的薄弱部位。盾构完全进入钢套筒后, 钢套筒结构的受力和变形最为不利。工程实测表明, 采用钢套筒接收工法进行盾构接收安全、可行, 但在工程实践中应重视腰部、底部和后端板位移实测数据的大的波动, 规范施工操作并加强监控。

关键词: 盾构隧道; 钢套筒; 力学行为; 现场实测

中图分类号: TU441, U456 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2016)11-1948-09

作者简介: 廖少明(1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道、基坑等地下工程设计与施工控制关键技术方面的教学和科研。E-mail: liaosm@126.com。

Mechanical behaviors and field tests of steel sleeves during shield receiving

LIAO Shao-ming^{1, 2}, MEN Yan-qing¹, ZHAO Guo-qiang³, XU Wei-zhong³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Urban Construction

Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai 200065, China)

Abstract: Water inrush and gushing can be easily induced during shield receiving in water rich sandy ground. Based on shield receiving practice at Longhua Station of Shanghai Metro Line 11, the rules of stress and deformation of steel sleeves are analyzed by using the FEM numerical method, and the field tests on deformation of steel sleeves and settlement of flood wall are carried out to verify the feasibility. The results show that the maximum tension stress location gradually changes from the back plate to the bottom of connection area between sleeve and diaphragm wall during shield arriving. The circumferential stress is 2 to 7 times the longitudinal stress. The mechanical states at the following locations change obviously: circumferential axial force below the spring, longitudinal axial force at the bottom and longitudinal moment at the spring, and the accumulated deformation at the spring reaches 10 mm. As the shield advances, the bottom will deform outward while the spring inward, therefore, the radial deformation of the sleeve changes from a lying duck egg to a standing duck egg, and finally similar to the shape of 8, with the ovality reaching nearly 3%. However, the stress and strain have no significant changes at the back plate because of bracing constraint. The joints between the steel sleeve and the diaphragm wall and those at the spring and the bottom of blocks are the weak positions of steel sleeve for stress and deformation control during shield receiving, and the most disadvantage state occurs when the shield is completely into the steel sleeve. The in-situ measurements show that the steel sleeve receiving technology is safe and feasible when adopting

the current design parameters. However, the large fluctuations and instability of field data at the spring, bottom and back plate should be paid great attention to, and standard operating

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2015CB057806); 国家自然科学基金项目(51378389); 山东省自然科学基金项目(ZR2014EEQ028)

收稿日期: 2015-07-25

***通讯作者** (E-mail: menyanqing@126.com)

procedures and field monitoring should be strengthened.

Key words: shield tunnel; steel sleeve; mechanical behavior; field test

0 引言

为减少盾构接收的施工风险, 通常采用注浆法、搅拌桩法、冻结法、降水法、水中接收等多种方式对接收井洞口进行处理^[1-5]。然而, 上述加固方式在某些特殊工况下无法实施(如场地受限、管线改迁困难)或风险较大(如高承压水、高渗透性砂性地层), 寻求经济、安全、适用性强的盾构接收工法一直是关注的热点问题之一。

钢套筒接收工法是近年来发展起来的新型工法。该工法通过设置与洞门密闭连接的密闭钢套, 并在钢套内注入填充物和压力水使得盾构机在盾构接收施工过程中始终处于土压平衡状态并最终安全、平稳地进入盾构接收井内。该工法具有适用性强、施工安全、节省空间、可重复使用等优点。自广州地铁二号线首次应用以来, 相继在南京、上海、武汉、天津等地得到不断改进并成功应用。尽管采用钢套筒接收工法进行盾构接收的工程案例较多, 但在钢套筒设计及盾构接收施工过程中通常以经验为主, 存在对钢套筒的受力变形特性分析不足、对钢套筒的薄弱部位认识不清晰等问题。如, 陈珊东^[6]总结了钢套筒接收工法的优缺点; 郑石等^[7]指出了与钢套筒接收工法相关的多项关键技术; 王健^[8]优化了钢套筒结构的设计参数并总结了优化后的施工操作要点。

当前对钢套筒接收工法的研究主要集中在该工法的特点分析、施工控制、设计改进等, 缺少对关键部位的受力变形特性分析及工程实测试验验证, 而这对盾构接收施工过程中的风险点识别与控制具有重要意义。

本文结合上海轨道交通 11 号线龙华路站采用钢套筒接收工法进行盾构接收的工程实践, 采用数值模拟对钢套筒在盾构接收期间的受力和变形规律进行了分析, 并对钢套筒变形和防汛墙沉降进行了现场实测试验验证, 以期对钢套筒接收工法的改进与风险控制提供指导。

1 工程概况

上海轨道交通 11 号线云锦路站至龙华路站区间采用土压平衡式盾构施工, 盾构段全长约 719.6 m。龙华路站盾构接收段隧道中心标高-16.01 m, 地面标高+4.20 m。根据地勘报告, 盾构接收段土层分布及其物理力学指标如图 1 所示。可见, 盾构接收段隧道位于砂质粉土层中, 该层为微承压含水层, 在一定的水动力条件下容易产生涌水、涌砂等施工风险。此外, 盾构接收段附近有一根 $\Phi 450$ 波纹污水管, 距离车站最近仅 2.95 m; 且盾构接收井洞口与龙华港河道部分区域的防汛墙的最小平面净距仅 4 m, 如图 2 所示。

为确保盾构接收施工安全和防汛墙结构安全, 原设计方案采用了 MJS 工法(全方位高压喷射法)和洞门水平冻结双重加固措施。然而, 施工后经桩体取芯检测和盾构开仓检查发现, 部分 MJS 工法桩施工后存在断桩现象, 且冻结加固体不封闭, 局部伴有承压水涌入, 因此原设计方案不具备盾构接收条件。鉴于场地条件受限和水文地质环境复杂, 拟采用钢套筒接收工法进行盾构接收。

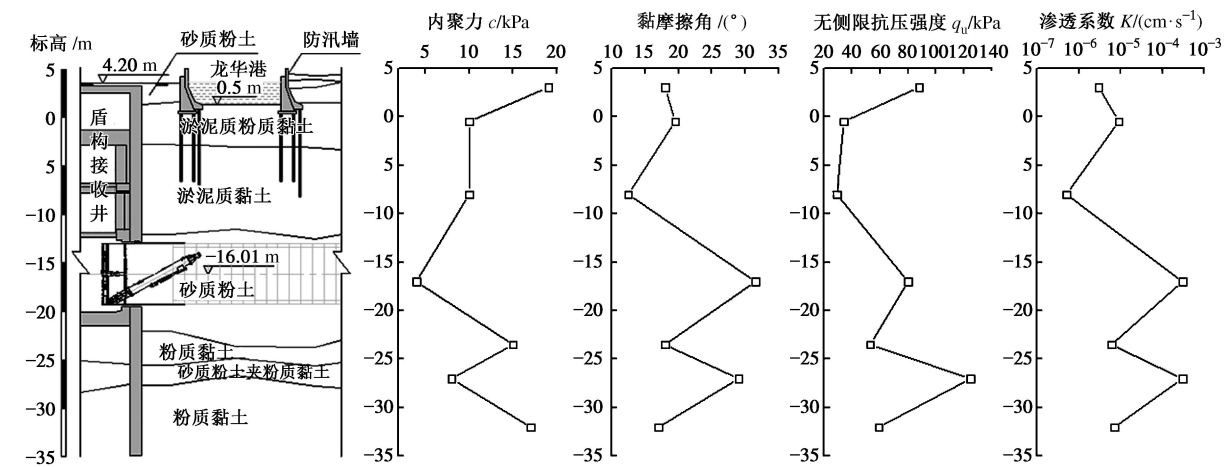


图 1 土体分层及岩土参数变化曲线

Fig. 1 Soil strata and variation of geotechnical parameters

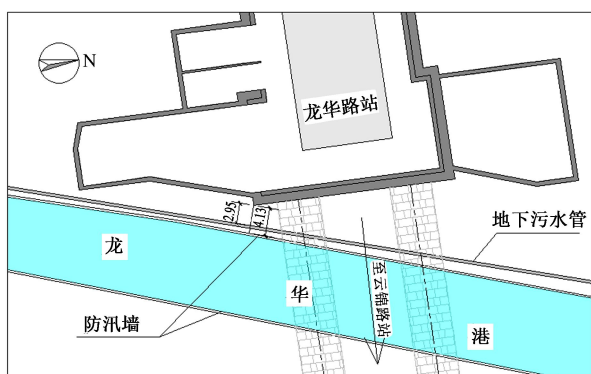


图2 盾构接收段周边环境示意图

Fig. 2 Surrounding environment of shield receiving

2 钢套筒接收工法

钢套筒接收工法基于盾构平衡到达的理念设计,通过在钢套内注入具有一定压力和流动性的填充物(黏性土、水等),使盾构在钢套筒内推进过程中舱内压力始终处于平衡状态。盾构接收施工中,应根据盾构进入钢套筒后的舱内压力传递的空间与时间特点,确定合理的卸压时机和卸压量,从而维持钢套筒内的压力平衡,确保盾构机在钢套筒内的平稳推进,最终安全、平稳地进入盾构接收井内。

钢套筒接收工法有效规避了传统工法由于洞口加固带来的盾构接收风险,且盾构接收施工前无需(或少量)进行接收井洞口加固、无需占道及管线迁改,具有良好的经济和社会效益。

2.1 钢套筒结构设计

钢套筒接收系统由筒体结构、底部支撑框架、后盾系统、后端盖板、支撑系统、加料口和卸压口等部分组成,如图3所示。其中,筒体结构分为连接段筒体和标准段筒体。连接段筒体长度较短,用来连接钢套筒与围护结构处的洞圈。标准段筒体分上部半圆筒

和下部半圆筒,之间通过法兰密封连接。下部半圆筒下方为底部支撑框架,与筒体结构通过肋板焊接成整体。标准段筒体与连接段筒体以及标准段筒体之间均通过法兰密封连接,后端盖板用井格形受力框架加强,并通过后盾系统进行传力支撑。

钢套筒结构的具体设计参数应根据隧道埋深、水文地质条件以及盾构施工参数等综合确定。

2.2 钢套筒接收施工

采用钢套筒接收工法进行盾构接收施工包含一系列关键工序,如洞门凿除、钢套筒安装与密封性检测、盾构到达推进、洞门密封、钢套筒拆除等。其中,盾构到达推进指盾构机穿越加固区、车站结构洞门并最终进入钢套筒,其系统性强、影响因素多、持续时间长,是决定钢套筒接收工法实施效果的关键。在盾构到达推进过程中,应严格控制盾构施工参数和盾构姿态,并通过监测反馈的钢套筒结构的变形和压力变化数据实时调整盾构参数和卸压量。

盾构到达推进的施工控制可分为3个阶段^[9],如图4所示。即盾构穿越MJS加固区、穿越冻结加固区、钢套筒内推进阶段。盾构到达前,应保持盾构机头高于洞门轴线20~30 mm并及时对盾构姿态进行复核,以确保盾构顺利进入钢套筒。根据工程经验,第一阶段盾构推进速度宜控制在10~20 mm/min;第二阶段推进速度降低至5~10 mm/min;第三阶段推进速度宜<5 mm/min,盾构推力宜在15000 kN以内。

3 钢套筒受力变形特性的理论分析

钢套筒在组装完成后需进行密封性检测,要求承受0.4 MPa的水压力,因此,可将0.4 MPa作为外荷载极限。根据表1所述的钢套筒结构的设计参数,考虑钢套筒结构自重、千斤顶推力、盾构机自身质量(250~300 t)及实际作用位置变化,同时考虑钢套

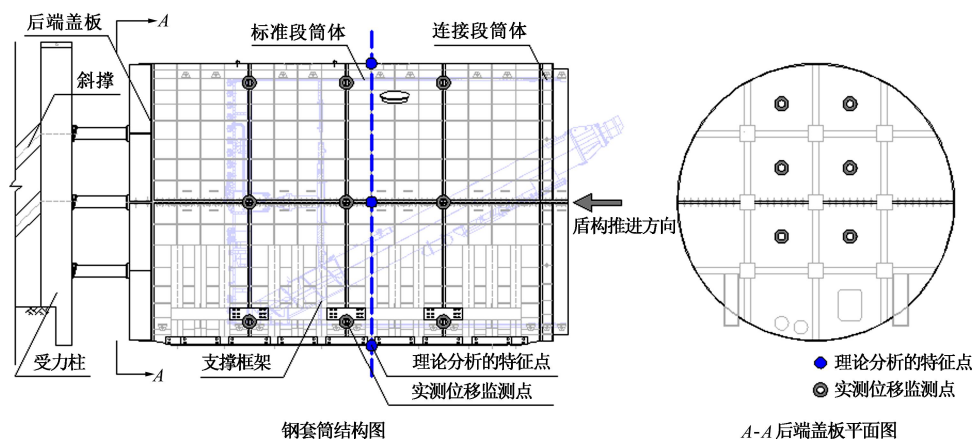


图3 钢套筒结构图

Fig. 3 Structural drawings of steel sleeve

筒底部支撑和后盾系统的约束作用, 采用 ABAQUS 有限元软件, 建立了如图 5 所示的三维弹塑性 S4R 壳单元分析模型对盾构到达及套筒内分步推进全过程(9 个分析步)引起的钢套筒结构的受力及变形规律进行分析, 钢套筒结构计算参数取值见表 2。

表 1 钢套筒结构设计参数

Table 1 Design parameters of steel sleeve					
钢套筒 材料	筒体			后端板	
	长度/mm	直径/mm	厚度/mm	厚度/mm	受力框架
Q235A	10500	6700	16	30	I56a

表 2 计算参数取值

Table 2 Parameters of FEM				
参数	E /GPa	μ	f /MPa	f_v /MPa
取值	210	0.3	215	125

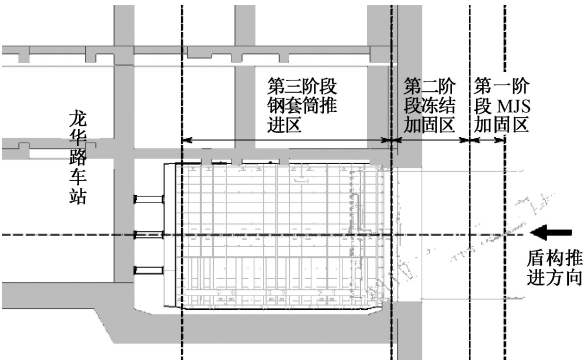


图 4 盾构推进阶段划分

Fig. 4 Stage partition for shield tunneling

3.1 钢套筒横截面受力变形分布规律

选取图 3 虚线标记的筒体中段为研究断面, 对盾构进洞前、进洞中和进洞后 3 种工况下筒体横截面的轴力、弯矩和位移的分布规律进行分析, 其结果如图

6~8 所示。

图 6 为 3 种工况下筒体结构的轴力变化图环向分布 (以受拉为正)。可以看出: ①筒体结构的环向和纵向均承受拉力作用, 由于受到盾构推进形成的内压的影响, 筒体结构承受的环向轴力明显高于纵向轴力; ②盾构推进导致筒体结构的不同位置的环向轴力变化规律不同, 顶部的环向轴力基本不变, 两肩略微降低, 腰部和底部持续增长, 最大环向轴力达到 1.6 MN/m; ③筒体结构的纵向轴力受到盾构机荷载的影响更为明显, 特别是当盾构通过后, 顶部及两肩的纵向轴力增长, 腰部降为原来的 30%, 底部的纵向轴力剧增至原来的 4.7 倍, 达到 0.95 MN/m。从轴力变化可见, 在盾构通过前, 筒体结构的轴力尽管有所调整, 但变化幅度较小。当盾构通过后, 盾构机荷载直接作用在筒体结构上, 导致轴力发生较大的变化, 尤其是筒体底部的轴力变化最为明显。

图 7 为 3 种工况下筒体结构的弯矩变化图 (横向弯矩以内弧面受拉为正, 纵向弯矩以外弧面受拉为正)。从弯矩分布可以看出, 筒体结构的横向弯矩值和纵向弯矩值大部分介于 -250~250 N·m 之间, 且均在腰部出现最大值, 分别为横向弯矩 392 N·m、纵向弯矩 1188 N·m。此外, ①筒体结构的横向弯矩和纵向弯矩的变化规律基本相同, 即, 筒体顶部弯矩略微减小, 两肩偏上弯矩增大, 两肩偏下弯矩减小, 腰部弯矩急剧增大, 腰部偏下弯矩值急剧降低; ②底部支座的约束作用导致筒体结构底部的横向弯矩和纵向弯矩值很小; ③筒体结构的纵向弯矩和横向弯矩在腰部的量值最大、变化最为明显, 腰部是钢套筒结构抗弯的薄弱部位, 尤其是分块间环缝的腰部。

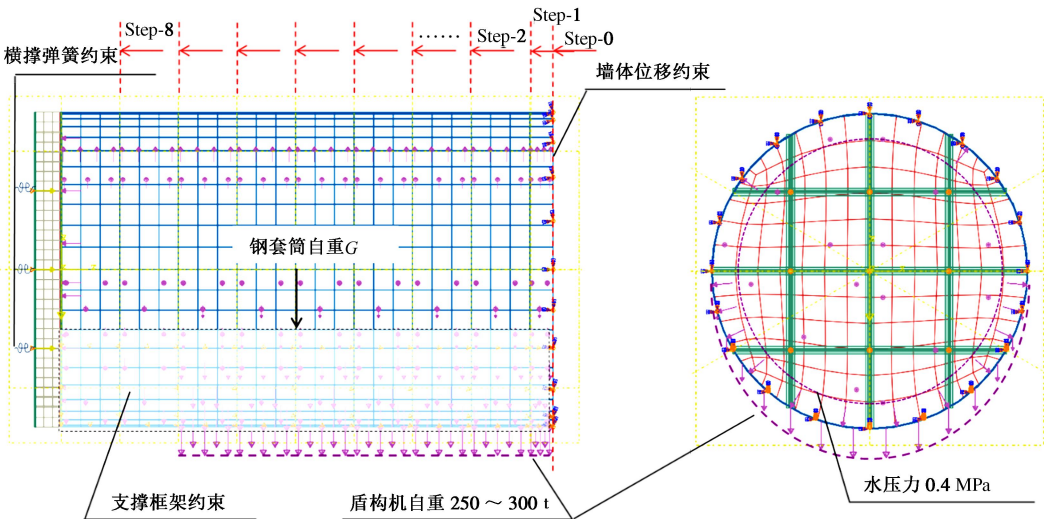


图 5 钢套筒结构有限元分析模型

Fig. 5 Numerical model of steel sleeve

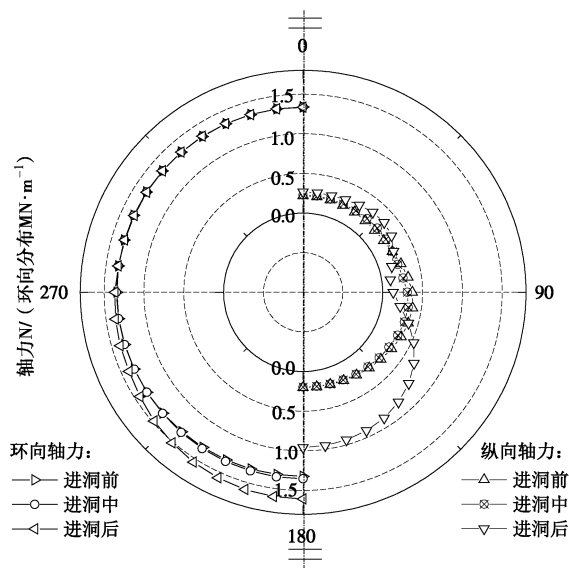


图6 轴力变化曲线

Fig. 6 Variation of axial forces

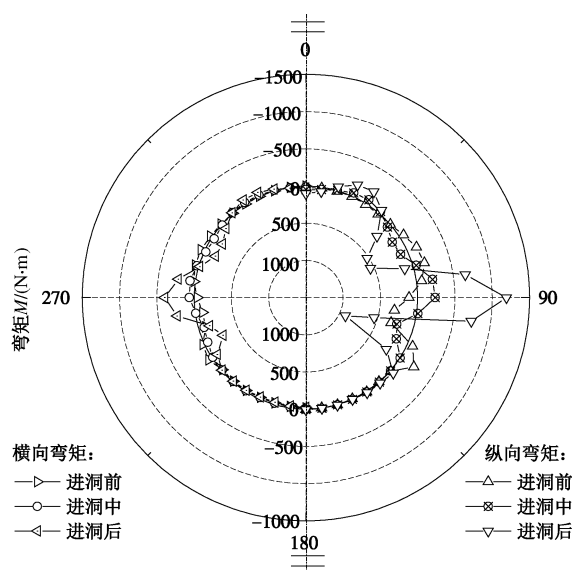


图7 弯矩变化曲线

Fig. 7 Variation of bending moments

图8为3种工况下筒体结构的变形图。由图8可见：①盾构推进对筒体结构的径向变形和纵向变形均产生影响，但变形量值基本介于0~4 mm，且径向变形更为敏感；②受盾构机荷载的影响，盾构推进导致筒体结构的径向变形由横鸭蛋变为竖鸭蛋并最终变为8字形，腰部的径向变形最为明显；③受到后端板井格形受力框架的约束等作用，筒体结构的纵向变形以底部为主，顶部变形较小。考虑拼装式筒体结构的非连续性，筒体的腰部（径向变形）和底部（纵向变形）及筒体分块间的接缝将是钢套筒结构变形较为薄弱的部位。

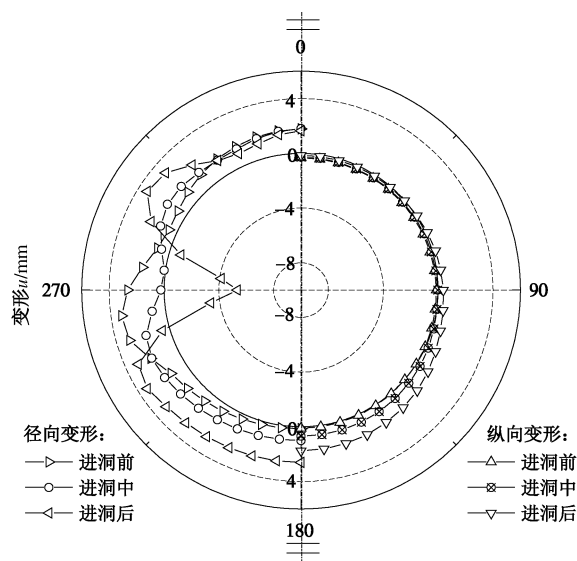


图8 变形变化曲线

Fig. 8 Variation of deformations

综上所述，盾构推进导致筒体腰部的环向应力较大、纵向弯矩较大、径向位移变化明显，筒体底部的纵向应力和纵向位移的变化明显。因此，筒体的腰部和底部以及筒体分块间的接缝是钢套筒结构受力和变形较为薄弱的部位，有必要对上述部位在盾构推进过程中的力学行为进一步分析。

3.2 盾构在钢套筒中的推进影响分析

选取图3标记的顶部、腰部和底部特征点对钢套筒受盾构推进的影响进一步分析。由于盾构到达推进处于第一、二阶段时（盾构尚未进入钢套筒），钢套筒结构承受的荷载较低，且变化不明显，故不在此讨论。当盾构到达推进处于第三阶段时（盾构机在钢套筒内推进），钢套筒结构的受力状态发生明显变化，如图9，10所示。

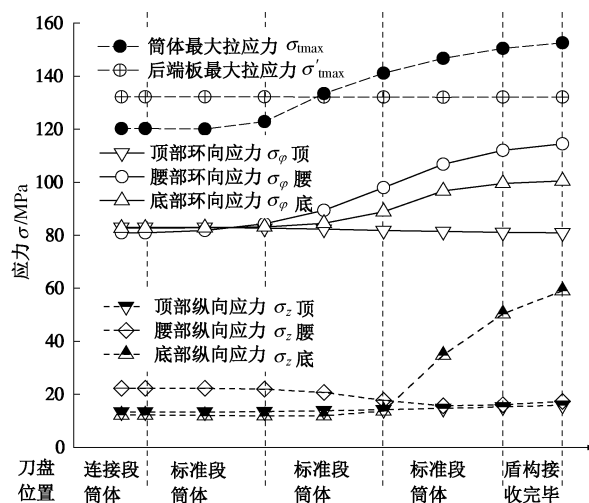


图9 应力随盾构推进变化

Fig. 9 Change of tension stress with operating time

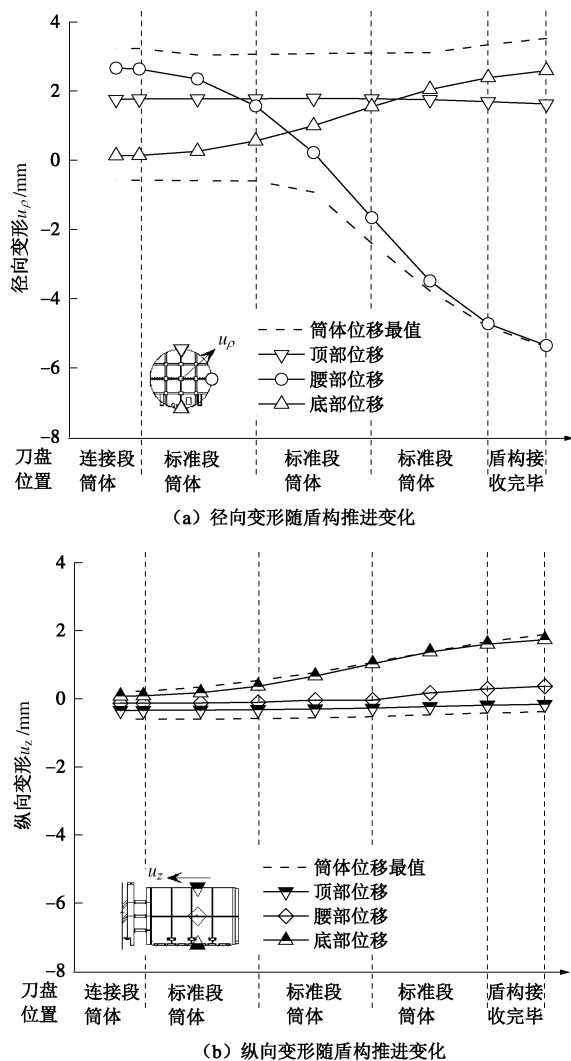


图 10 变形随盾构推进变化

Fig. 10 Change of deformation with operating time

由 9 图可见, 盾构到达推进进入第三阶段后, 钢套筒结构受到千斤顶推力、盾构机重力等因素的影响, 应力变化可概况为以下 3 方面: ①随着盾构推进, 筒体结构承受的最大拉应力 σ_{\max} 增加, 当盾构完全进入钢套筒后达到最大值 ($\sigma_{\max} = 152.6 \text{ MPa} < f = 215 \text{ MPa}$, f 为钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值), 出现在筒体与地连墙连接部位的底部、沿隧道纵向; ② 后端板受到井格形受力框架的加强, 不受盾构推进的影响, 最大拉应力 σ'_{\max} 基本稳定 (维持在 132.2 MPa), 位于受力框架与后端板的连接区域、沿隧道径向; ③ 盾构进入钢套筒一半时, 最大拉应力的位置由起初的后端板过渡为筒体结构。由于实际工作状态下钢套筒结构承受的外荷载不足 0.4 MPa , 后端板拉应力将减小, 筒体结构承受最大拉应力的现象将更明显。

由图 9 所示的顶部、腰部和底部特征点的应力变化曲线可以看出: ①盾构推进过程中, 筒体结构的环向应力明显高于纵向应力 (2~7 倍), 说明盾构推进形成的内压是钢套筒结构承受的主要荷载。②盾构到

达前, 钢套筒结构的环向和纵向应力在各特征点均相差不大且变化幅度较小 (不足 10%), 但当刀盘通过后, 筒体结构荷载变化导致各特征点的应力变化的差异性逐渐凸显, 如筒体结构的环向应力在腰部增大而在顶部基本不变。③尽管最大拉应力随着盾构推进逐渐增加, 但各特征点的应力变化规律各异甚至出现应力减小, 如顶部环向应力基本不变、腰部纵向应力略微降低。④受盾构推进的影响, 腰部的环向应力逐渐增大 42%, 并超过了顶部和底部的环向应力。在该变化过程中, 底部的环向应力增长 22%而顶部的环向应力基本不变。⑤在盾构通过前, 腰部的纵向应力略高于顶部和底部, 但在盾构通过后, 底部的纵向应力剧增至原来的 3.8 倍并远超顶部和腰部的纵向应力, 在该过程中, 顶部的纵向应力增加 19%而腰部减小 22%。应重视底部纵向应力增大对钢套筒分块间环缝的受力状态的影响。

图 10 为各特征点的变形随盾构推进的变化曲线 (径向位移以指向筒体结构外侧为正, 纵向位移以指向后端板为正)。由图 10 可见: ①盾构推进过程中, 筒体结构以径向变形为主, 纵向变形及变化率相对较小, 如, 腰部的径向变形累计变化量将近 1 cm , 而腰部的纵向变形累计变化量仅 0.5 mm ; ②受盾构机荷载的影响, 筒体结构的腰部将产生内凹 (径向变形), 且钢套筒结构的最大变形位置将由后端板逐渐过渡为筒体中段的腰部; ③盾构机荷载导致筒体底部产生外张, 表现为底部位置的径向变形和纵向变形的量值相当, 均为正值 (约 2 mm); ④筒体结构的顶部径向变形和纵向变形基本恒定, 表明顶部受盾构推进的影响很小。

由于后端板的厚度 (30 mm) 明显大于筒体结构, 且在盾构推进过程中盾构机荷载没有直接作用于后端板。因此, 在盾构接收期间后端板的应力变化不明显, 盾构接收施工中后端板的最大变形约为 4.0 mm , 故不在此讨论。

通过上述分析可得, 随着盾构推进, 筒体的应力及变形持续发展, 盾构机完全进入钢套筒将是筒体结构受力和变形最为薄弱的时刻, 此时应着重对筒体与地连墙间的接缝、钢套筒分块间的腰部接缝和底部接缝的受力和变形特性加强监测。

3.3 钢套筒结构薄弱部位的应力分析

钢套筒为拼装式结构, 确保接缝部位 (采用螺栓连接) 安全对钢套筒渗漏水防范、筒舱内保压、盾构姿态控制等至关重要。通过 3.1 节和 3.2 节分析得到, 盾构机完全进入钢套筒时, 筒体与地连墙间的接缝、钢套筒分块间的腰部接缝和底部接缝的受力最为薄弱, 因此, 可将盾构机完全进入钢套筒时的应力状态作为分析钢套筒结构薄弱部位安全状态的基础数据,

该时刻接缝部位的拉应力分布如图 11 所示。

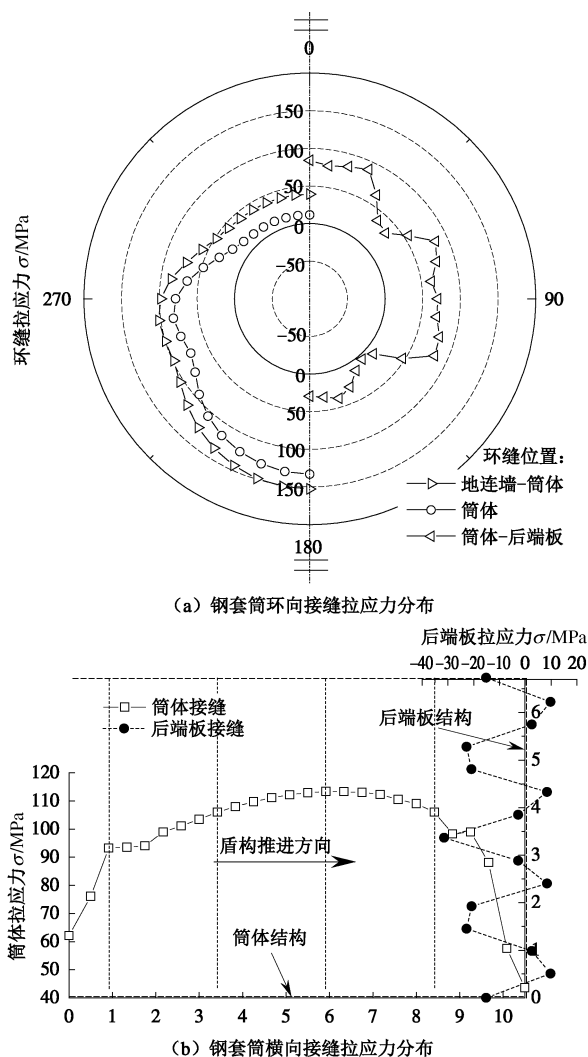


图 11 接缝拉应力分布曲线

Fig. 11 Distribution of tension stress of joints

筒体结构的环向接缝共计 6 条, 可分为 3 类, 即: 地连墙-筒体接缝 (1 条、8.8 级 M36 螺栓连接)、筒体接缝 (4 条、8.8 级 M30 螺栓连接)、筒体-后隔板接缝 (1 条、8.8 级 M30 螺栓连接)。由图 11 (a) 可见, 地连墙-筒体接缝和筒体分块间接缝的拉应力分布规律类似, 且地连墙-筒体接缝的拉应力略高; 上述两类环向接缝的最大拉应力均出现在筒体底部, 分别为 152, 133 MPa。受到井格形受力框架的加强, 筒体-后隔板接缝的拉应力呈现跳跃性分布, 拉应力较大值大致出现在相邻两榀框架的中间位置, 最大拉应力为 89 MPa。考虑螺栓规格和设置间距, 经换算可得出上述 3 类环向接缝的连接螺栓的安全系数分别为 1.5, 1.2, 1.8。

图 11 (b) 为钢套筒横向接缝拉力分布图。由图可见, 受到筒体内压及盾构机荷载等作用, 筒体结构的横向接缝均承受拉应力作用, 最大拉应力出现在筒体中段, 达到 113.4 MPa; 后隔板受到井格形受力框

架的加强及后盾系统的位移约束, 应力以压应力为主, 呈现拉、压应力跳跃性分布, 最大拉应力为 9.9 MPa。横缝均采用 8.8 级 M30 螺栓连接, 经换算可得出筒体横向接缝和后隔板横向接缝的连接螺栓的安全系数分别为 1.3, 6.7。

整体看来, 采用表 1 所述的钢套筒结构设计参数, 并在施工中严格控制盾构参数和及时卸压, 钢套筒结构本体及接缝均满足强度要求。

4 钢套筒接收工法的实测分析

4.1 监测方案

本工程钢邻近地下管线以及套筒安装后如图 12 所示。为确保盾构接收施工安全和防汛墙安全, 在盾构接收施工期间对盾构施工参数进行了严格控制 (如图 13 所示), 并对钢套筒变形、防汛墙变形等进行了严密监测。其中, 在钢套筒上布设了 15 个位移监测点 (见图 3 中圆环标记), 盾构机在钢套筒内每推进一环监测一次; 在隧道两侧 30 m 范围内的防汛墙上布设了多个位移监测点, 监测频率为 6 h/次, 并根据实际情况进行调整。

由于提前对盾构接收段范围内的污水管进行了封堵并增排临时排污管; 接收井附近土体已采用 MJS 加固, 因此, 污水管变形和地表位移监控不作为本工程监测的重点。



图 12 龙华站辅助盾构接收钢套筒结构

Fig. 12 Steel sleeve for shield receiving at Longhua Station

4.2 实测结果分析

为便于与第 3 节理论分析相比较, 选取钢套筒结构筒体中段的 3 个测点和后隔板的 3 个测点 (见图 3) 进行分析, 其实测变形规律如图 14 所示。由图 14 可见, 在盾构接收期间各测点的实测位移曲线具有一定的波动性, 但是筒体结构的径向变形的实测数据全部分布在理论分析限定的范围内, 纵向变形在起始阶段稍有偏离; 后隔板上部的实测变形在终止阶段稍有偏离, 中部和下部测点几乎全部分布于理论分析限定的范围内。上述波动及偏差是由于盾构施工参数波动、

盾构机工作状态及卸压时机人为控制等不确定性因素造成的。总体看来, 筒体腰部和底部的变形量值相对较大, 但是变形量均处于结构安全水平范围内, 且与理论分析结果较吻合, 进一步验证了盾构机在钢套筒内推进时内压平衡控制均匀、稳定、安全。

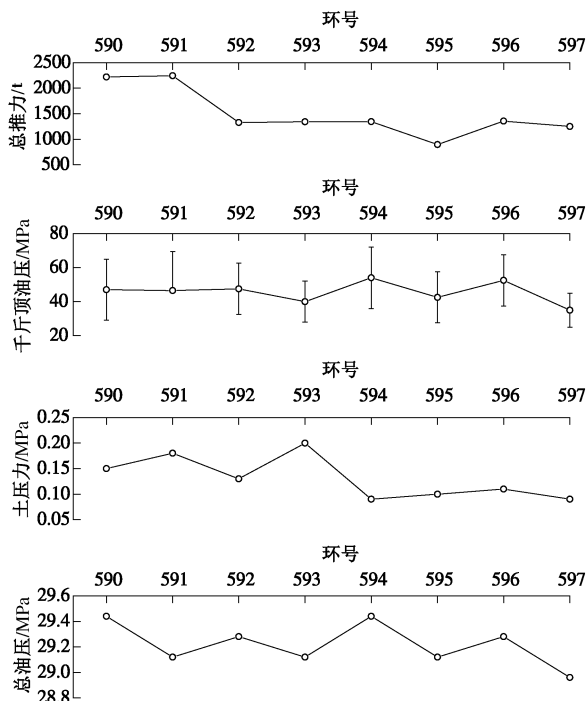
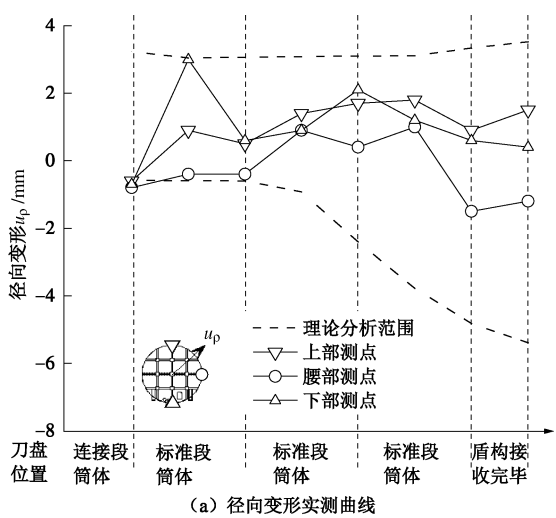


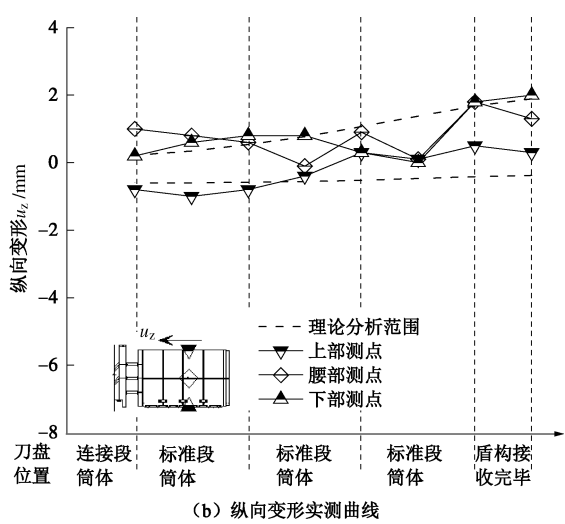
图 13 钢套筒内盾构施工参数

Fig. 13 Construction parameters of shield machine in steel sleeve

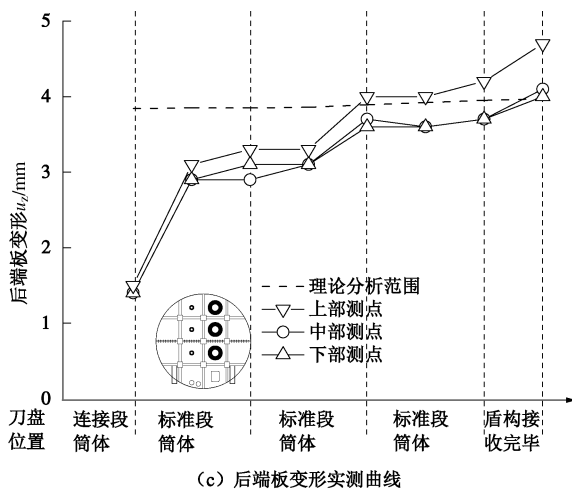
为确保防汛墙结构安全, 自钢套筒安装完成后即对临近隧道的防汛墙沉降进行了现场实测, 实测结果如图 15 所示。可见, 在盾构接收前, 防汛墙受到盾构施工扰动的影响产生沉降, 最大沉降位于隧道上方, 达到 24 mm。在盾构接收施工时防汛墙沉降基本趋于稳定。通过图 15 中的详图可以发现, 在盾构接收期间, 防汛墙结构仅发生微小波动的沉降变形。因此, 采用钢套筒接收工法进行盾构接收施工对防汛墙结构安全没有影响。



(a) 径向变形实测曲线



(b) 纵向变形实测曲线



(c) 后端板变形实测曲线

图 14 钢套筒实测变形曲线

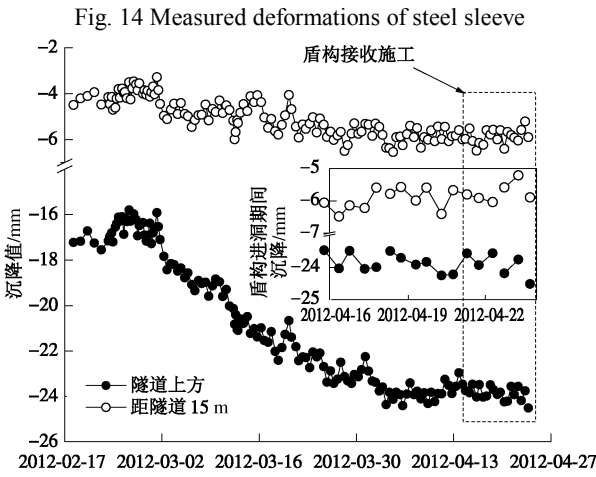


图 15 防汛墙实测沉降曲线

Fig. 15 Measured settlements of flood wall

5 结 论

本文依托上海轨道交通 11 号线龙华路站钢套筒接收工法盾构接收的工程实践, 采用数值分析方法研究了钢套筒的受力和变形规律, 并通过钢套筒变形和防汛墙沉降的现场实测进行了验证。主要得出以下 5

点结论。

(1)盾构推进过程中钢套筒最大拉应力的位置由后端板逐渐发展为筒体与地连墙连接部位的底部,该连接部位拉应力增长了27%,而此部位是发生渗漏水的危险部位,因此该部位是钢套筒加强设计的重点。

(2)盾构推进导致筒体结构的环向应力为纵向应力的2~7倍、腰部以下的环向轴力增大22%~42%,筒体底部的纵向应力增长至原来的3.8倍,腰部的纵向弯矩增长为原来的11倍,而后端板的应力和位移变化均不明显。

(3)盾构推进导致筒体结构的底部外张3 mm、腰部内凹将近10 mm,最大变形由后端板逐渐变为筒体中段的腰部,筒体的径向变形由横鸭蛋变为竖鸭蛋并最终变为8字形,椭圆度为3%。

(4)筒体与地连墙间的接缝、钢套筒分块间的腰部接缝和底部接缝是钢套筒结构受力和变形的薄弱部位,盾构完全进入钢套筒时,钢套筒的受力和变形最为不利,在施工中应对上述部位加强检查、监测,发现螺栓松动或接缝渗漏水时及时处理。

(5)工程实测表明,钢套筒接收工法安全、可行,但是鉴于现场实测得出的变形规律的波动性,在工程实践中应规范施工操作并加强监控。

参考文献:

- [1] LIAO S M, LI W L, FAN Y Y, et al. Model test on lateral loading performance of secant pile walls[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2014, **28**(2): 391 - 401.
- [2] 秦爱芳, 李永和. 人工土层冻结法加固在盾构出洞施工中的应用[J]. 岩土力学, 2004, **25**(增刊 2): 449 - 452. (QIN Ai-fang, LI Yong-he. Application of artificial soil freezing reinforcement method to shield tunneling setting out[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(S2): 449 - 452. (in Chinese))
- [3] 靳世鹤. 南京长江隧道盾构始发井深基坑降水方案设计[J]. 现代隧道技术, 2008, **45**(3): 46 - 49. (JIN Shi-he. Dewatering plan for a deep shield launching pit of Nanjing Yangtze River tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, **45**(3): 46 - 49. (in Chinese))
- [4] 李 罡, 黄宏伟. 超大直径盾构水中进洞风险分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, **5**(增刊): 1422 - 1426. (LI Gang, HUANG Hong-wei. Risk analysis on arriving into shaft of super large diameter shield machine under water[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, **5**(S0): 1422 - 1426. (in Chinese))
- [5] 王文灿. 冻结法和水平注浆在天津地铁盾构接收中的组合应用[J]. 现代隧道技术, 2013, **50**(3): 183 - 190. (WANG Wen-can. Application of the freezing and horizontal grouting methods to the shield arrival for the Tianjin metro[J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, **50**(3): 183 - 190. (in Chinese))
- [6] 陈珊东. 盾构到达接收辅助装置的使用分析[J]. 隧道建设, 2010, **30**(4): 492 - 494. (CHEN Shan-dong. Analysis on application of steel sleeves in shield arrivals[J]. Tunnel Construction, 2010, **30**(4): 492 - 494. (in Chinese))
- [7] 郑 石, 鞠世健. 泥水平衡盾构到达钢套筒辅助接收施工技术[J]. 现代隧道技术, 2010, **47**(6): 51 - 56. (ZHENG Shi, JU Shi-jian. Technology of steel reception sleeve for slurry shield[J]. Modern Tunnelling Technology, 2010, **47**(6): 51 - 56. (in Chinese))
- [8] 王 健. 盾构到达钢套筒辅助接收系统的改进设计及施工[J]. 现代交通技术, 2014, **11**(4): 59 - 62. (WANG Jian. Improved design and construction technology of steel sleeves in shield auxiliary arriving system[J]. Modern Transportation Technology, 2014, **11**(4): 59 - 62. (in Chinese))
- [9] 赵立锋. 土压平衡盾构到达钢套筒辅助施工接收技术[J]. 铁道标准设计, 2013(8): 89 - 93. (ZHAO Li-feng. Auxiliary construction technology with steel sleeve used for the arrival of soil pressure balance shield[J]. Railway Standard Design, 2013(8): 89 - 93. (in Chinese))