DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.02.025　　文章编号:1671-2579(2025)02-0221-08

钢套筒协同端头土体加固辅助盾构进出洞技术应用研究

于静涛[1],张飞雷[2*],张贺[1],许超[2]

(1.中国路桥工程有限责任公司,北京市　100011;2.中交第二航务工程局有限公司,湖北 武汉　430040)

摘要:针对大直径泥水盾构在近海域富水粉细砂地层中始发和接收面临的涌水涌砂风险难题,基于孟加拉卡纳普里河底双线盾构隧道工程实践,采用理论计算和数值模拟的方法,分别研究端头加固长度的合理范围和洞门凿除厚度,最后通过盾构掘进参数分析评判加固效果。研究结果表明:富水砂层中工作井端头纵向加固合理范围是盾构主机长度加2～3 m;采用密闭钢套筒+三重管高压旋喷加固+降水井降水+注浆止水帷幕的综合措施,可有效降低盾构始发和接收时的涌水涌砂风险,且具有较高的安全系数和较好的经济性;洞门地连墙凿除厚度为60 cm时,既能确保洞门安全,又能保障施工进度。

关键词:密闭钢套筒;端头加固;洞门凿除;盾构始发;盾构接收

中图分类号:U455.43　　**文献标志码:**A

Application Research on Steel Sleeve Combined with Working Shaft End Reinforcement for Shield Launching and Receiving Technology

YU Jingtao[1], ZHANG Feilei[2*], ZHANG He[1], XU Chao[2]

(1. China Road & Bridge Corporation, Beijing 100011, China; 2. CCCC Second Harbor Engineering Company Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China)

Abstract: In view of the water and sand inrush risks faced by large-diameter slurry shield during launching and receiving in the water-rich silty fine sand stratum in the offshore area, the engineering practice of the double-lane shield tunnel at the bottom of the Karnaphuli River in Bangladesh was analyzed. The reasonable ranges of the tunnel portal chiseling thickness and the working shaft end reinforcement length were studied by theoretical calculation and numerical simulation. Finally, the reinforcement effect was evaluated through the analysis of shield tunneling parameters. The research results show that the reasonable range of longitudinal reinforcement of the end of the working shaft in the water-rich sand layer can be obtained by adding 2–3 m to the length of the shield body. The comprehensive measure of sealed steel sleeve + triple tube high-pressure rotary churning reinforcement + well drainage + curtain for water sealing by grouting can effectively reduce the risk of water and sand inrush during the shield launching and receiving, and it has a high safety factor with good economy. The chiseling thickness of the diaphragm wall at the tunnel portal is 60 cm, which can ensure the safety of the tunnel portal and the construction progress.

Keywords: sealed steel sleeve; end reinforcement; tunnel portal chiseling; shield launching; shield receiving

0　引言

盾构始发和接收是盾构法施工中最容易发生风险事故的关键步骤,合理的端头加固范围及高质量的加固效果成为盾构顺利施工的关键。目前,已有众多学者针对端头加固范围方面展开了研究[1-3],江玉生等[4]提出盾构始发纵向加固长度为盾构主机长度加1.5～2.0 m,盾构到达加固长度为主机长度加

收稿日期:2025-02-28(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52379114)

作者简介:于静涛,男,硕士,高级工程师.E-mail:yujingtao1999@163.com

***通信作者:**张飞雷,男,硕士,工程师.E-mail:zhangfl_93@163.com

2～3环管片长度；李大勇等[5]提出端头加固应满足强度、抗渗性和经济性的要求；马芸等[6]通过三维有限元分析，建议止水厚度为1.5～2.0 m；石宗涛[7]建议超大直径盾构的纵向加固范围为盾构机主机长度加2～3环管片宽度。

安全有效的端头处置通常是多种地基加固措施叠加的综合效果体现。在富水粉细砂地层或易涌水涌砂的项目施工中，密闭钢套筒工法协同常规端头加固措施，为盾构始发和接收提供了一种新思路。高瑞等[8]以苏州地铁5号线为例，介绍了冻结法辅助钢套筒盾构施工技术；陈少林等[9]介绍了采用三轴搅拌桩端头加固＋U形墙辅助降水＋钢套筒辅助盾构在狭窄工作井空间始发技术；李震[10]、陈树茂等[11]阐述了钢套筒接收技术的优越性和可靠性；刘阳军等[12]、岳红波等[13]、沈伟等[14]则通过不同的项目实践，详细介绍了冻结法与钢套筒工法联合进行盾构接收的施工技术；刘华等[15]基于项目实践，详细介绍了采用密闭钢套筒工法完成大直径泥水盾构接收施工工艺；周天豪等[16]采用冻结法＋钢套筒技术解决了无地面加固条件下富水砂层盾构接收难题。

本文基于孟加拉国卡纳普里河底隧道项目双线盾构始发实践，对近海地区富水粉细砂地层大直径盾构合理的端头加固范围进行研究，并对盾构掘进参数进行分析以评估不同端头处治措施效果，得出有益结论，以期为中国类似工程项目提供经验借鉴。

1 工程简介

孟加拉卡纳普里河底隧道项目地处卡纳普里河入海口，为双线并行隧道。采用单台开挖直径为12.16 m的泥水平衡盾构施工，盾构由西岸工作井始发，穿越水体后到达东岸工作井接收。端头工作井地层主要为黏性土层和砂土层互层，工程地质性质较差，且均靠近海岸线，最短距离不足200 m。地下水与海水形成相互强补给关系，导致盾构始发和接收过程中涌水涌砂风险极大。

以西岸工作井为例，盾构始发穿越地层从上到下依次为：①杂填土、③$_1$粉质黏土、③$_2$松散至稍密粉砂、③$_3$流塑（局部软塑）淤泥质粉质黏土、③$_4$稍密粉砂、③$_5$流塑（局部软塑）淤泥质粉质黏土、③$_6$中密粉砂、③$_7$软塑粉质黏土、③$_8$粉砂、④细砂。具体地层信息详见图1。

2 端头综合加固处置措施

2.1 端头加固范围确定

国内外确定端头加固范围的方法主要有理论计算方法和经验法两种。其中，端头加固理论计算方法包括：① 基于土体强度计算的板块理论方法和弹性静力学理论方法；② 基于土体稳定性计算的土体扰动极限平衡理论方法和滑移线理论方法。经验法则是通过总结国内外盾构法隧道施工工程经验，给出端头加固范围推荐值，具体见表1。

根据日本JET GROUT规范，端头纵向加固体厚度t计算公式为：

$$t=\left(\frac{K_0\beta PD^2}{4\sigma_t}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

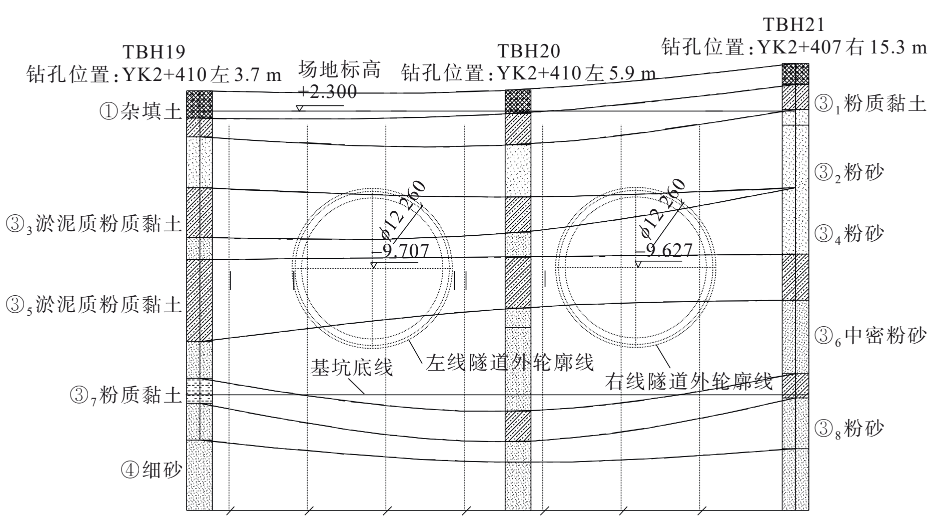


图1 西岸工作井地质剖面图(单位:mm)

Figure 1 Geological section of working well on west bank (unit: mm)

表1　盾构井端头横向加固长度经验值

Table 1　Experience value of transverse reinforcement length of shield well ends　m

D	B	H_1	H_2
$1\leqslant D\leqslant 3$	1.0	1.5	1.0
$3\leqslant D\leqslant 5$	1.5	2.0	1.0
$5\leqslant D\leqslant 8$	2.0	2.5	1.5
$8\leqslant D\leqslant 12$	2.5	3.0	2.0

注:D为洞门直径;B为隧道中心处水平向加固长度;H_1和H_2为盾构竖直方向加固土层厚度。

式中:K_0为安全系数,取1.5[1];β为计算系数,取1.2;P为洞门中心处水土压力,根据项目实际取值为0.1 MPa;D为洞门直径,取12.68 m;σ_t为加固体的极限抗拉强度,取抗压强度的10%,0.12 MPa。

根据式(1)计算可得,t=7.88 m。

基于上述理论计算结果,结合加固体须满足止水性和渗水性要求、盾构端头加固经验值以及现场施工便捷性要求,确定本项目端头纵向加固范围为盾构主机长度(13.58 m)加1～2环管片宽度,取15 m,横向加固宽度取5 m,竖向加固深度取6 m。

2.2　端头综合处置方法设计

受工期和当地施工技术水平影响,针对不同施工阶段采取的工作井端头加固方案见表2。

表2　盾构始发和接收端头加固形式

Table 2　Forms of reinforcement of shield launching and receiving ends

施工阶段	始发接收方式	端头加固措施
左线始发	钢套筒辅助始发	钢套筒＋三重管高压旋喷加固＋地层冻结
左线接收	钢套筒辅助接收	钢套筒＋三重管高压旋喷加固＋降水井＋注浆止水帷幕
右线始发	钢套筒辅助始发	钢套筒＋三重管高压旋喷加固＋降水井＋注浆止水帷幕
右线接收	水下接收	三重管高压旋喷加固＋降水井＋注浆止水帷幕

2.3　端头综合加固设计

2.3.1　密闭钢套筒结构设计

钢套筒筒身长14.4 m,外径12.86 m,内径12.42 m,盾构机与套筒单侧间隙为150 mm,内部设计4道50钢轨,作为盾构滑动基面。整体结构由延长钢环、筒体分块、一体化基座、端盖圆环、平底封盖组成。

筒身分为9块30°分块和底部一体化托架,材质为20 mm厚钢板,筒体外周焊接纵向和环向筋板加强,筋板厚20 mm,高180 mm,间隔340 mm×540 mm;各分块采用M30高强螺栓连接,中间设置2道O形橡胶圈。套筒一体化托架分为1#～6#底座分块,通过分块法兰螺栓和连接刚墩连接。下部安装调坡支墩以适应盾构始发和接收坡度要求。托架结构根据盾构机身组装顺序和位置,提前预留300 mm宽的工作槽,用于盾体结构焊接;端盖圆环为箱格结构,分为4块,与套筒筒身通过螺栓连接,内置30个预压液压油缸,用于施加预压力以顶紧套筒结构和延长钢环间隙;平底封盖主要用于盾构接收,使筒体本身形成密闭结构。具体钢套筒组成及结构设计如图2所示。

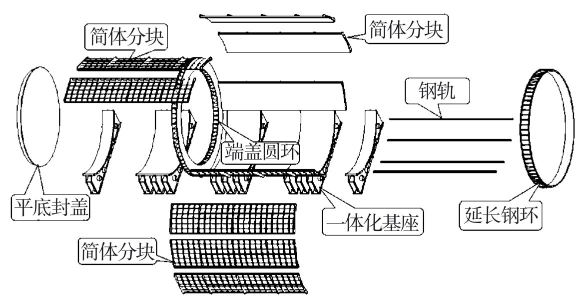


图2　钢套筒结构示意图

Figure 2　Steel sleeve structure

2.3.2　三重管高压旋喷桩设计

工作井端头采用直径1 200 mm、间距900 mm的三重管高压旋喷桩加固,左右线隧道同时进行加固,加固范围为41.97 m(宽)×15.00 m(长)×24.90 m(深),即加固深度在隧道底部以下5.4～6.0 m。

高压旋喷桩设计要求28 d无侧限抗压强度不小于1.2 MPa,现场实际取芯,芯样无侧限抗压强度为3.93 MPa,满足设计要求。端头加固设计如图3所示。

2.3.3　地层冻结设计

左线盾构始发端头加固措施增加了人工冻结设计。端头冻结管采用直径127 mm、壁厚4.5 mm低碳无缝钢管施工,坡口焊连接;供液管与测温管均采用直径57 mm、壁厚3.5 mm的焊管;冻结孔设计A/B两排,平均深度为25 m,A排距离地连墙围护结构400 mm,B排距离A排800 mm,冻结孔横向间距为800 mm,两排冻结孔呈梅花形布置,冻结加固范围为隧洞外2 000 mm,冻结宽度为1 500 mm。冻结管布置如图4所示。

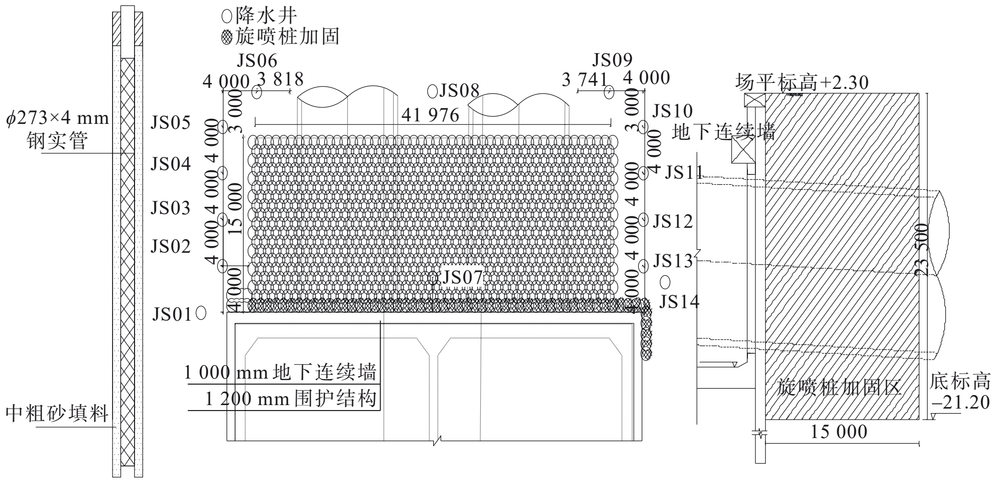


图3　旋喷桩加固设计(单位:mm)

Figure 3　Reinforcement design of rotary churning pile (unit: mm)

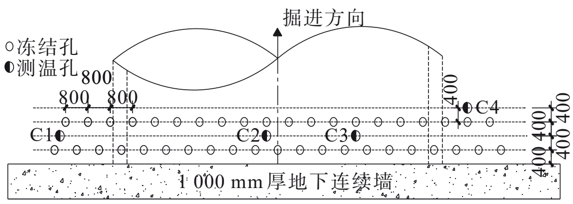


图4　冻结管布置图(单位:mm)

Figure 4　Freeze pipe layout (unit: mm)

2.3.4　降水井设计

降水设计采用"大井法"计算涌水量,选用承压水均质含水层非完整公式对涌水量进行预测[17]。根据总涌水量和单井出水能力,取1.2倍的安全系数。考虑水位下降造成降水井有效滤管减少,进而使单井涌水量减少,最终布井数量为14口,其中JS07兼做观测井,具体布置如图3所示。

2.3.5　注浆止水帷幕

受工作井基坑开挖影响,工作井围护结构周边土体随工作井内取土卸荷,加固体与围护结构间易存在空隙富水,对洞门凿除施工和盾构进出洞作业有一定影响。因此,在旋喷桩加固土与围护结构间采用钻注一体机进行引孔注浆,注浆形式为直径900 mm、间距300 mm,与加固体等深,注浆采用单液浆,水灰比为1:1。从洞门中心向两侧连续注浆灌水,洞门范围开设水平探孔,安装球阀泄水,直至水泥浆流出,完成注浆封堵施工。

3　洞门凿除分析

3.1　数值计算模型建立

采用密闭钢套筒联合常规端头加固技术时,风险较高的阶段主要是在盾构始发和接收前,即洞门区地连墙凿除一定厚度而钢套筒未形成压力空间。

针对此种情况,首先对地连墙、旋喷桩、冻结体及周围土体建立三维数值计算模型,均采用各向同性的弹性本构模型,取模型长度(X向:隧道掘进方向)为65 m,宽度(Y向)为90 m,深度(Z向)为45 m进行计算,计算模型如图5所示。各地层及加固区地质参数取值见表3。

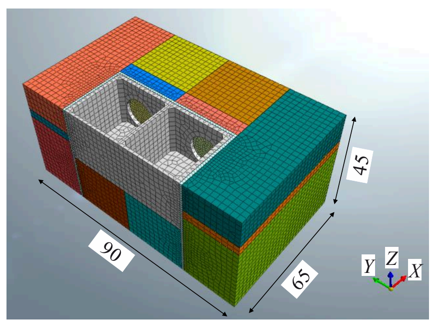


图5　数值分析模型(单位:m)

Figure 5　Numerical analysis model (unit: m)

表3　地层参数

Table 3　Parameters of layers

材料参数	重度/(kN·m^{-3})	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比
C35混凝土	25.0	3 150.00	3 180.00	55.00	0.35
旋喷加固区	20.0	100.00	200.00	30.00	0.25
冻结体	27.3	107.25	1.16	4.49	0.32
粉砂	18.0	12.00	5.40	31.00	0.30
淤泥质粉质黏土	18.0	3.13	7.20	4.50	0.35
中密粉砂	18.0	12.00	4.60	32.70	0.29

3.2 工况设计及计算结果

根据现场左右线隧道端头加固及施工情况,共设置5个工况,如表4所示。

表4 各工况数值计算结果

Table 4 Numerical calculation results of different working conditions

工况	工况描述/mm	Y向最大正应力/MPa	X向最大正应力/MPa	X向最大位移/mm
1	洞门全部凿除,洞门区无水	1.60	0.20	0.18
		满足	满足	满足
2	洞门全部凿除,洞门区富水	2.23	0.79	567.60
		满足	满足	不满足
3	洞门凿除600 mm	1.09	0.07	0.96
		满足	满足	满足
	洞门全部凿除	0.88	0.11	0.57
		满足	满足	满足
4	洞门凿除600 mm	2.61	1.53	310.80
		不满足	满足	不满足
	洞门全部凿除	2.10	0.17	305.20
		满足	满足	不满足
5	洞门凿除600 mm,洞门区无水	1.86	0.08	0.50
		满足	满足	满足

工况1:冻结体与高压旋喷桩加固体效果较好,一次性全部凿除1 000 mm厚的洞门。

工况2:冻结体与加固体效果一般,温度场平均温度无法达到−10 ℃,可能存在少量水,一次性全部凿除1 000 mm厚的洞门。

工况3:冻结体与加固体效果良好,分两次凿除洞门,第1次凿除600 mm厚的洞门,第2次凿除剩余的洞门。

工况4:冻结体与加固体效果一般,温度场平均温度无法达到−10 ℃,可能存在少量水,分两次凿除洞门,第1次凿除600 mm厚的洞门,第2次凿除剩余的洞门。

工况5:加固体效果良好,采用注浆帷幕止水+降水井降水,洞门凿除600 mm。

由表4可知:

(1) 在洞门凿除后,以洞门处地下连续墙混凝土抗拉强度极限值(2.50 MPa)与变形控制限值(100 mm)为标准判断洞门凿除作业的安全性,其中,工况1、工况3、工况5的位移及应力情况均满足施工要求。

(2) 工况2由于洞门区为富水情况,最大正应力为2.23 MPa(<2.50 MPa),安全系数较低,且X向位移过大,不能满足施工安全性要求;工况4在分两次凿除过程结束后,均不能满足洞门结构位移及应力要求。

(3) 对比工况3和工况5可知:针对洞门区凿除600 mm,采取降水井降水+注浆帷幕止水的效果与冻结加固效果相同,但前者更有利于盾构机的掘进施工。

4 盾构始发和接收效果分析

4.1 盾构始发切削地连墙效果分析

由于盾构机在接收段切削地连墙时容易出现大块、大面积混凝土掉落,难以全面分析盾构掘进参数,本节仅针对盾构两次始发切削地连墙效果进行对比分析。分析参数包括刀盘转速、扭矩、推进速度和盾构推力。隧道始发破除地连墙均为4环掘进,取掘进行程1 100 mm的内盾构总推力、扭矩、转速和推进速度进行对比,结果如图6所示。

由图6可知:① 左线始发。共耗时10 d,日进度10 cm,破墙速度极其缓慢。破墙期间总推力、扭矩、推进速度波动明显,推进速度0~5 mm/min,刀盘转速1.0~1.1 r/min。在行程700 ~1 100 mm,总推力维持为26 000~30 000 kN,最大为29 500 kN,扭矩最大达到7 000 kN·m;② 右线始发。破墙仅用时3 d,施工过程掘进参数平稳,掘进效率高。总推力维持为12 000~17 000 kN,扭矩为1 200~1 600 kN·m,推进速度为1~3 mm/min,刀盘转速1.1 r/min;③ 对比发现左线盾构始发增加的人工冻结措施提高了刀盘切削端头土体的难度,影响了盾构掘进效率。

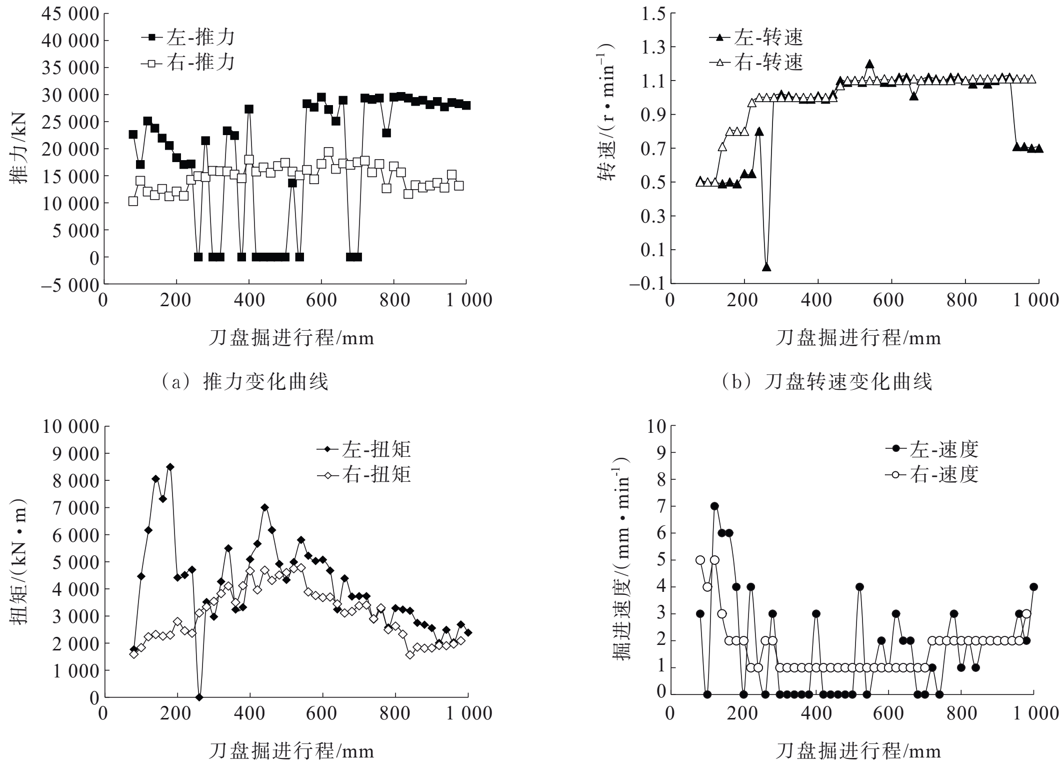
4.2 盾构穿越加固体效果分析

以盾构始发和接收为依据,分别对盾构穿越端头加固体范围内的掘进参数进行对比。对比结果如图7、8所示。

由图7、8及现场施工情况可知:

(1) 左线盾构始发穿越加固体有效掘进用时11 d,日进度1.46 m,总推力呈逐渐增大趋势,由24 000 kN逐步增至34 000 kN,推进速度为5~7 mm/min,刀盘转速由0.6 r/min增大至0.8 r/min,扭矩呈波动变化。

(2) 右线盾构始发穿越加固体有效掘进用时9 d,日进度1.67 m,其中总推力呈轻微增大趋势,由16 000 kN增大至25 000 kN,推进速度为4~7 mm/min,刀盘转速则控制为1.0~1.1 r/min,扭矩在第1环掘进达到最大值4 100 kN·m后逐渐下降。

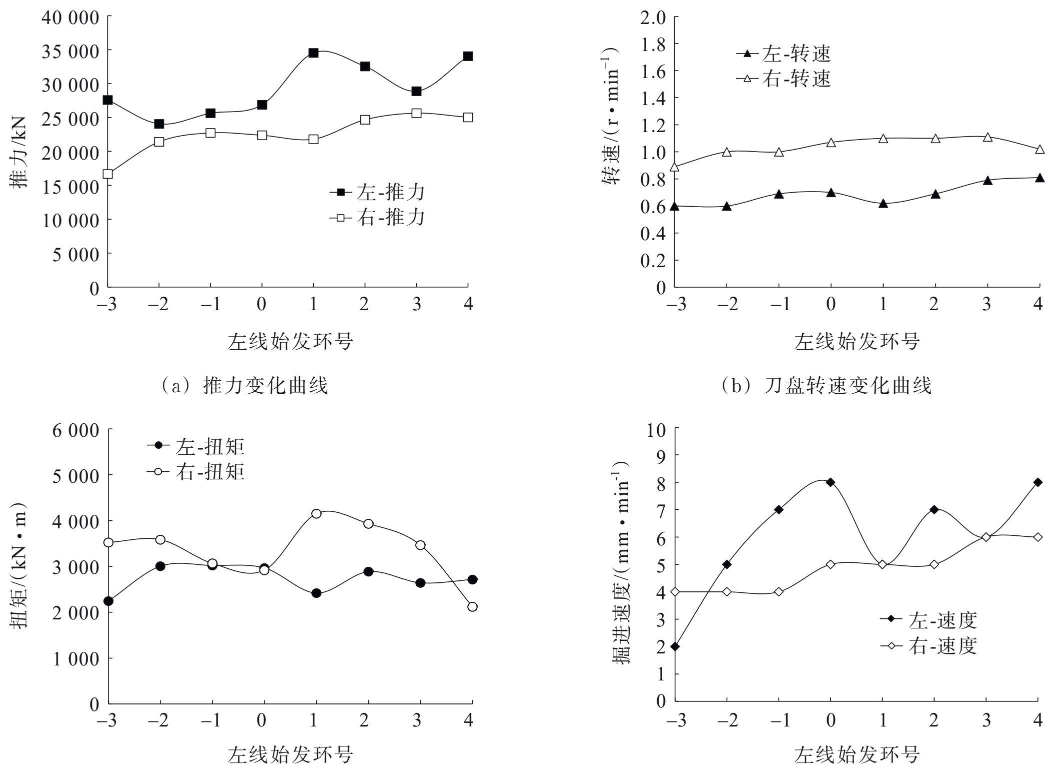


(a) 推力变化曲线 (b) 刀盘转速变化曲线

(c) 刀盘扭矩变化曲线 (d) 盾构推进速度变化曲线

图6 盾构始发切削地连墙参数对比

Figure 6 Parameter comparison of shield launching for chiseling diaphragm wall



(a) 推力变化曲线 (b) 刀盘转速变化曲线

(c) 刀盘扭矩变化曲线 (d) 盾构推进速度变化曲线

图7 盾构始发穿越加固体参数对比

Figure 7 Parameter comparison of shield launching across reinforcement soil

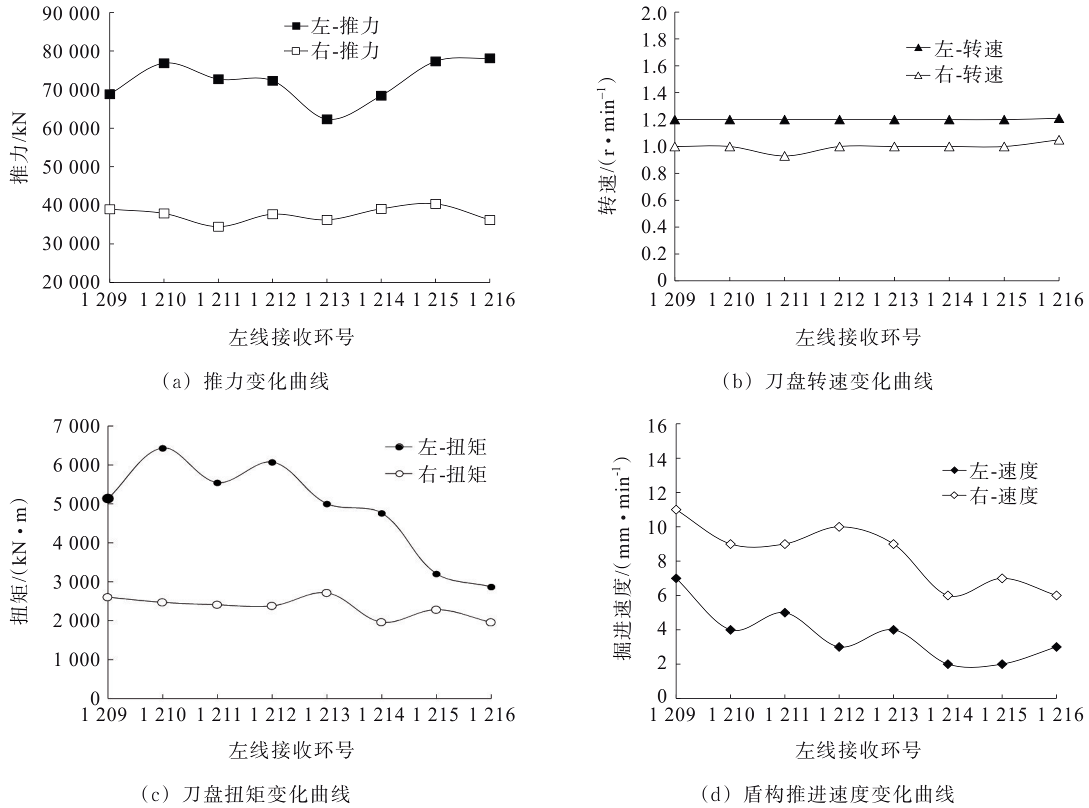


图 8　盾构接收穿越加固体参数对比

Figure 8　Parameter comparison of shield receiving across reinforcement soil

（3）左线盾构接收穿越加固体掘进共用时 10 d，日掘进 1.5 m，其中掘进总推力维持为 62 000～78 000 kN，推进速度逐渐减小，控制为 2～5 mm/min，刀盘转速为 1.2 r/min，刀盘扭矩随盾构机前进逐渐减小至 2 800 kN·m。

（4）右线盾构接收穿越加固体掘进用时 5 d，日掘进 3 m，其中掘进总推力稳定为 35 000～40 000 kN，推进速度为 6～10 mm/min，刀盘转速为 1 r/min，扭矩为 1 900～2 700 kN·m。

（5）在掘进效率方面，右线盾构接收＞右线盾构始发＞左线盾构接收＞左线盾构始发。

（6）在实际应用过程发现，盾构采用水下接收工法时存在以下问题：对盾构司机掘进技术要求高；滑动密封可靠性较差，容错率低；工作井注水填砂及清理工期长；端头区地表沉降不易控制。

综上所述，密闭钢套筒＋三重管高压旋喷加固＋降水井降水＋注浆止水帷幕是解决滨海富水粉细砂地层盾构安全高效始发和掘进难题的重要技术手段。

5　结论

本文基于孟加拉卡纳普里河底隧道工程 2 次始发和 2 次接收实践，对近海地区富水粉细砂地层端头纵向加固长度、加固形式及施工效果进行了分析，得到如下结论：

（1）考虑止水性及渗透性要求，富水粉细砂地层中端头加固的合理长度应为盾构机主机长度加 2～3 m，横向加固宽度和加固深度应结合现场施工难度进行统一考虑。

（2）在洞门加固效果良好且地层无水条件下，洞门凿除厚度为 60 cm 是合理的，且不影响施工效率。

（3）在滨海富水粉细砂地层中，密闭钢套筒＋三重管高压旋喷加固＋降水井降水＋注浆止水帷幕的综合设计，能够满足大直径泥水平衡盾构始发和接收安全性要求，并具有较好的经济性。

参考文献：

References：

[1] 王天明，戴志仁．盾构法隧道端头井地层加固方法及其应用研究[J]．铁道工程学报，2014，31(8)：90-95，100.
WANG Tianming, DAI Zhiren. Application on ground reinforcement method of launching shaft for shield tunnel [J].Journal of Railway Engineering Society,2014,31(8):90-

95,100.

[2] 孙超,张光伟.超大直径盾构空推段明挖隧道断面形式研究[J].中外公路,2025,45(1):204-211.
SUN Chao,ZHANG Guangwei.Section form of open-cut tunnel by ultra-large-diameter shield empty-push technology[J].Journal of China & Foreign Highway,2025,45(1):204-211.

[3] 佟彬,张斌,朱汉标,等.双模盾构土压模式下下穿珠江断裂带开挖面稳定性研究[J].中外公路,2024,44(5):232-240.
TONG Bin,ZHANG Bin,ZHU Hanbiao,et al.Stability of excavation face of double-mode shield in earth pressure mode crossing fault zone of pearl river[J].Journal of China & Foreign Highway,2024,44(5):232-240.

[4] 江玉生,杨志勇,江华,等.论土压平衡盾构始发和到达端头加固的合理范围[J].隧道建设,2009,29(3):263-266.
JIANG Yusheng,YANG Zhiyong,JIANG Hua,et al.Study on reasonable strata improvement scopes for EPB shield driving at its start and arrival[J].Tunnel Construction,2009,29(3):263-266.

[5] 李大勇,王晖,王腾.盾构机始发与到达端头土体加固分析[J].铁道工程学报,2006,23(1):87-90.
LI Dayong, WANG Hui, WANG Teng. Analysis of soil reinforcement for the starting and arriving of shield machine in metro construction[J]. Journal of Railway Engineering Society,2006,23(1):87-90.

[6] 马芸,段琼,桂超.地下隧道施工盾构端头土体加固三维有限元参数化分析:以天津地铁6号线宜宾道站—鞍山西道站区间隧道开挖工程为例[J].科学技术与工程,2020,20(21):8724-8731.
MA Yun, DUAN Qiong, GUI Chao. Three-dimensional finite element parametric analysis of soil reinforcement at the end of shield tunnel construction: Take the tunnel excavation project between Yibin Road Station and Anshan West Road Station of Tianjin metro line 6 as an example[J].Science Technology and Engineering,2020,20(21):8724-8731.

[7] 石宗涛.超大直径盾构工作井端头加固合理范围研究[J].铁道建筑技术,2022(2):127-131,141.
SHI Zongtao.Research on the reasonable range of end reinforcement of large diameter shield working shaft[J].Railway Construction Technology,2022(2):127-131,141.

[8] 高瑞,岳红波,梁聪,等.封闭环境下冻结法辅助钢套筒盾构施工关键技术研究[J].施工技术,2021,50(4):57-60.
GAO Rui,YUE Hongbo,LIANG Cong,et al.Research on key technology of freezing-assisted steel sleeve shield construction in closed environment[J]. Construction Technology,2021,50(4):57-60.

[9] 陈少林,黄新淼,杨杰,等.临海竖井4台大直径泥水盾构双向分体始发关键技术:以福州滨海快线滨机区间隧道工程为例[J].隧道建设(中英文),2022,42(增刊2):449-457.
CHEN Shaolin, HUANG Xinmiao, YANG Jie, et al. Key technology of two-way split initiation of four large-diameter slurry shields in Linhai shaft: Taking Binhai-airport tunnel project of Fuzhou Binhai Express Line as an example[J].Tunnel Construction,2022,42(sup 2):449-457

[10] 李震.地铁盾构钢套筒接收与旋喷桩端头加固应用对比研究[J].建筑机械,2018(9):61-64.
LI Zhen.Comparative study on application of metro shield steel sleeve receiving and rotary jet grouting pile end reinforcement[J].Construction Machinery,2018(9):61-64.

[11] 陈树茂,方一航,袁梦,等.地铁盾构隧道无端墙密闭钢套筒接收技术研究[J].广东土木与建筑,2018,25(7):39-42.
CHEN Shumao,FANG Yihang,YUAN Meng,et al.Study on receiving technology of closed steel bushing for metro tunnel shield without end wall[J].Guangdong Architecture Civil Engineering,2018,25(7):39-42.

[12] 刘阳君,杨智麟,羊涛,等.密闭钢套筒+冷冻法加固盾构接收技术[J].现代隧道技术,2020,57(增刊1):974-979.
LIU Yangjun, YANG Zhilin, YANG Tao, et al. Shield receiving technology strengthened by closed steel sleeve and freezing method[J]. Modern Tunnelling Technology,2020,57(sup 1):974-979.

[13] 岳红波,梁聪,刘媛莹,等.杯形水平冻结法端头加固联合钢套筒盾构接收技术研究[J].施工技术,2020,49(4):19-21.
YUE Hongbo,LIANG Cong,LIU Yuanying,et al.Study on shields rreceiving technology of cup-shape horizontal freezing method for end reinforcement combined with steel sleeves[J]. Construction Technology, 2020, 49(4):19-21.

[14] 沈伟,俞淼,付春青,等.盾构隧道冻结法与钢套筒联合接收施工技术[J].兰州交通大学学报,2021,40(1):20-26.
SHEN Wei, YU Miao, FU Chunqing, et al. Research on combined construction technology of freezing and steel sleeve for shield tunnel receiving[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University,2021,40(1):20-26.

[15] 刘华,何源,钟涵,等.滨海地区富水粉细砂层大直径泥水盾构钢套筒接收关键技术:以孟加拉卡纳普里河底隧道工程盾构段为例[J].隧道建设(中英文),2021,41(7):1225-1233.
LIU Hua,HE Yuan,ZHONG Han,et al.Key technologies for steel sleeve receiving of a large-diameter slurry shield in water-rich silty-fine sand strata in coastal area:A case study of Karnaphuli River-crossing tunnel in Bangladesh[J].Tunnel Construction,2021,41(7):1225-1233.

[16] 周天豪,邱国勇,王福兴,等.富水砂层冻结法加固地层结合密闭式钢套筒盾构接收技术[J].建筑技术,2022,53(9):1149-1151.
ZHOU Tianhao,QIU Guoyong,WANG Fuxing,et al.Shield receiving technology of freezing reinforcement of water-rich sand stratum in combination with closed steel sleeve[J].Architecture Technology,2022,53(9):1149-1151.

[17] 中冶集团武汉勘察研究院有限公司.管井技术规范:GB 50296—2014[S].北京:中国计划出版社,2015.
Wuhan Surveying-Geotechnical Research Institute Co., Ltd., MCC.Technical code for tube well:GB 50296—2014[S].Beijing:China Planning Press,2015.