

软弱富水砂层地质条件下土压平衡盾构接收施工技术

温良涛

(中交三公局工程总承包分公司,北京 100123)

摘要:在软弱富水砂层地质条件下,盾构接收施工是盾构法施工过程中主要的重大风险之一,也是整个盾构施工过程中的重大难题之一。本文结合福州地铁 2 号线桔园洲站—洪湾站区间在软弱富水砂层中盾构接收施工,对盾构接收端头加固、降水施工、盾构接收姿态控制、二次注浆等施工工艺进行阐述,为后续类似地质盾构区间施工提供参考。

关键词:软弱富水砂层;土压平衡盾构机;盾构接收;端头加固;二次注浆

中图分类号:U455.43 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)06-0088-06

Receiving process for earth pressure balanced shield in soft water-rich sand formation

WEN Liangtao

(General-contract Engineering Branch of CCCC Third Highway Engineering Co. Ltd., Beijing 100123, China)

Abstract: Under the geological conditions of soft and water-rich sand, the shield receiving process is one of the major risks in shield tunneling. It is also one of the most difficulties in the whole work. Based on the shield receiving operations in the soft and water-rich sand layer between Juyuanzhou Station and Hongwan Station of Fuzhou Metro Line 2, this paper expounds reinforcement of the shield receiving end, dewatering, control of the shield receiving attitude and secondary grouting, providing reference for shield tunneling in similar geological conditions in the future.

Key words: weak water-rich sand layer; earth pressure balanced shield; shield receiving; end reinforcement; secondary grouting

0 引言

随着我国基础设施建设快速发展,盾构法施工以其安全性和高效性在城市地铁隧道施工中得到了广泛的应用。盾构接收是盾构施工过程中最主要的风险点之一,尤其是在软弱富水砂层地质中盾构施工、安全接收、对周边建筑物的保护、地面沉降的控制是施工中的难点^[1-15]。本文以福州地铁 2 号线桔园洲站—洪湾站区间盾构接收施工为背景^[16],探讨在软弱富水砂层地质条件下盾构接收施工技术,为类似地质条件下施工提供参考。

1 工程概况

1.1 工程简介

福州市地铁 2 号线桔园洲站—洪湾站区间在桔园洲站始发,沿金祥路由西向东洪湾站接收。区间

隧道两侧主要为商铺、居民小区,北侧为横江渡河,与本区间平行向东。区间设计起终点里程为 Y(Z)DK20+853.339~Y(Z)DK21+284.215,区间右线长 430.882 m、区间左线长 430.076 m(左线长链 0.193 m)。线路出桔园洲站后左右线分别以 2%上坡,之后以 3.997%、4%上坡,最后以 4.22%下坡接入洪湾站,线间距 14 m,隧道埋深 9.2~9.6 m。区间采用盾构法施工。

区间隧道衬砌采用通用的楔形环错缝拼装(双面楔形环),管片外径 6.2 m,内径 5.5 m,环宽 1.2 m,管片厚度为 350 mm。管片为钢筋混凝土预制构件,混凝土强度为 C50,抗渗等级为 P10,钢筋采用 HPB300、HRB400 热轧钢筋。

管片环缝与纵缝采用双头 M30 镀锌弯螺栓连接,机械性能等级为 6.8 级,每环管片纵缝共 12 根

收稿日期:2019-01-16;修回日期:2019-03-23 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.06.016

作者简介:温良涛,男,汉族,1988 年生,助理工程师,土木工程专业,从事轨道交通及地下工程技术管理工作,广东省佛山市禅城区南庄镇紫洞北路中交三公局项目部(528061),373023963@qq.com。

引用格式:温良涛.软弱富水砂层地质条件下土压平衡盾构接收施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(6):88-93.

WEN Liangtao. Receiving process for earth pressure balanced shield in soft water-rich sand formation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(6):88-93.

螺栓,每个环缝 16 根螺栓。

1.2 工程地质

根据地质详勘报告,区间隧道通过及影响范围内地层由上至下分别为杂填土、粉质粘土、淤泥质土、粗中砂(稍密)、粗中砂(中密)、淤泥质土,局部为粉细砂(2-5-1),粗中砂层厚约 14 m。

粗中砂为饱和性砂土,松软,富含承压水,易产生涌水、涌砂,极易坍塌变形;粉土、粉质粘土为残坡积层,硬塑,性质较好。

1.3 水文概况

场地地下水主要为潜水(二)和基岩裂隙水(四)。潜水水位埋深 1.00~4.10 m,水位标高 3.85~6.93 m,主要分布于淤泥夹砂层、粉细砂层和粗中砂层中;基岩裂隙水赋存于强风化花岗岩(砂土状)层、强风化花岗岩(碎块状)层,场地本层水埋深较大,对本工程影响较小。

区间隧道施工为全断面富水粗中砂层,地下水水位高,地层渗透系数大,施工中极易产生涌水、涌砂及开挖面失稳。

2 盾构接收施工风险分析

根据国内类似地层盾构接收施工经验,结合本工程现场实际地质情况及场地条件进行施工风险分析。在富水砂层盾构接收施工中,盾构接收端头加固方案选择及加固效果的检测至为关键,将直接影响盾构接收施工安全。

本工程盾构接收施工风险主要有以下几个方面:

(1)在富水砂层地质中,盾构接收时姿态控制不好易发生“磕头”等事故,造成盾构刀盘周边损伤洞圈密封橡胶带,致使洞门密封止水装置失效发生涌水、涌砂事故。

(2)本工程盾构施工为全断面粗中砂层,地下水水位高。若端头加固范围及加固深度未达到设计要求,加固质量不满足设计规范要求,盾构接收施工极易发生涌水、涌砂事故。

(3)富水砂层流动性大,一旦发生涌水、涌砂风险,将造成地面塌陷,危及周边建筑物安全^[13]。

(4)盾构接收端头位于市政主干道金祥路,地下管线多而杂,其允许变形较小且具有较大的不确定性,盾构接收施工中,地下管线的安全保护是主要风险之一。

(5)盾构接收时,需提前凿除预留洞口处围护结

构地连墙,而后由盾构刀盘切削洞口加固土体进入洞圈密封装置,此过程中洞口土体及加固土体暴露时间较长,且受前期工作井施工方法及其施工扰动影响,容易因加固土体或洞圈密封装置的缺陷而发生洞口水土流失或坍方。

3 盾构接收前施工准备措施

3.1 盾构接收端头加固

盾构接收时须提前破除盾构井围护结构——地下连续墙,为确保盾构接收时暴露出来的盾构掌子面稳定,保证盾构接收端土体有良好的自稳性和密实性,使接收洞口土体在洞门破除时不坍塌,以免造成地下水及砂土涌入工作井,需提前对接收端头土层进行加固。

原接收端头加固初步设计为:(1)U形素墙深度为 20.8 m,墙底在透水层粗中砂层中,未能有效隔断止水帷幕内外地下水联系;(2)原端头加固止水帷幕内设置 2 口 $\varnothing 273$ mm 降水井;(3)原素墙止水帷幕内三轴搅拌桩地层加固地面以下 6.6 m 为弱加固区域,水泥掺量为 7%;盾构隧道外边线各 3 m 为强加固区,水泥掺量为 15%,现场施工操作时难以区分强弱加固区。

根据施工地质实际情况,洪湾站接收端头加固设计方案调整如下:

(1)在车站端头采用 800 mm 厚素砼地下连续墙形成封闭止水帷幕,素砼地连墙深度约 29 m,素墙墙底进入不透水层淤泥质土层中 2 m,有效阻隔止水帷幕内外地下水的联系,使止水帷幕内降水井降水施工达到预定效果。每相邻地连墙幅段接缝处设置 3 根 $\varnothing 800@600$ 三重管旋喷桩止水,深度与地连墙深度相同。

(2)素墙止水帷幕内采用 $\varnothing 850@600$ 三轴搅拌桩对盾构施工范围地层进行加固,加固深度为地面至盾构隧道底下 3 m,加固长度约 9 m,取消地面以下 6.6 m 弱加固区域。搅拌桩加固区水泥掺量 15%;水灰比均为 1.0。施工中,应保持搅拌桩机底盘的水平与导向架的竖直,搅拌桩垂直度偏差 $\geq L/200$ (L 为桩长),桩定位偏差 ≥ 50 mm。搅拌桩钻进搅拌速度 0.8 m/min,提升搅拌速度 1.2 m/min。为保证桩端成桩质量,搅拌桩钻头下到设计深度后,应坐底喷浆 ≤ 30 s 并重复搅拌喷浆。

(3)车站主体结构地连墙与素砼墙围闭内侧设

置一排 $\text{O}800@600$ 三重管旋喷桩密贴主体结构地连墙止水。水灰比 $0.8\sim 1.0$ ，施工控制参数如下：空气压力 0.7 MPa ，浆液压力 3 MPa ，水压 25 MPa ，提升速度 10 cm/min ，旋转速度 10 r/min ，浆液流量

100 L/min 。施工过程中出现不返浆、返浆量少时可以采用适当卸压、放慢钻杆提速等措施保证返浆畅通，减少对周边环境挤压影响。

端头加固平面布置如图1、图2所示。

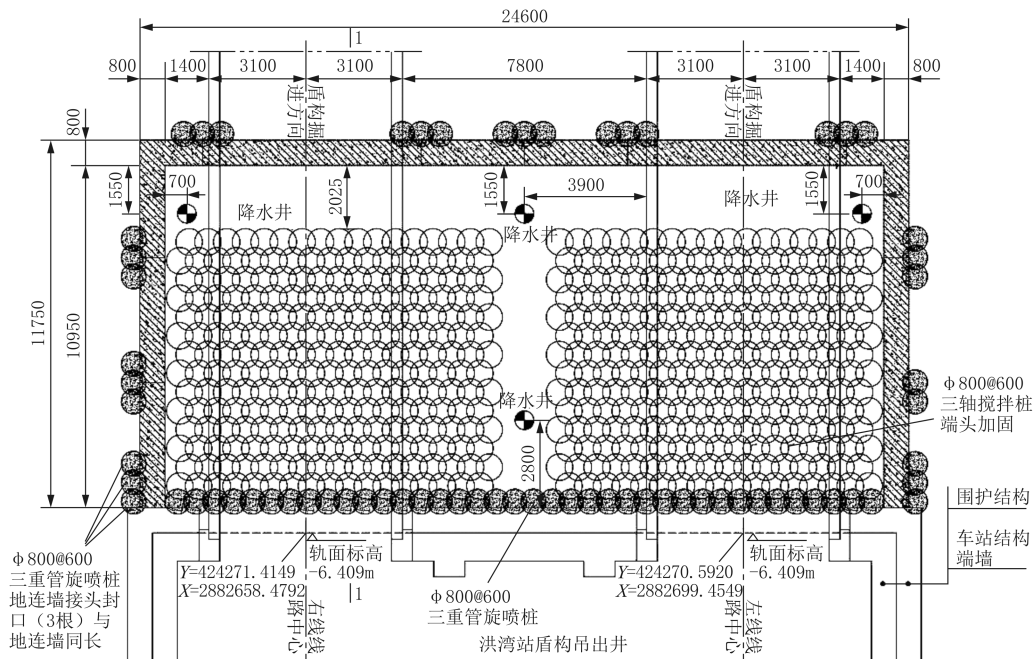


图1 洪湾站接收端头加固平面图

Fig.1 Layout of shield receiving end reinforcement at Hongwan Station

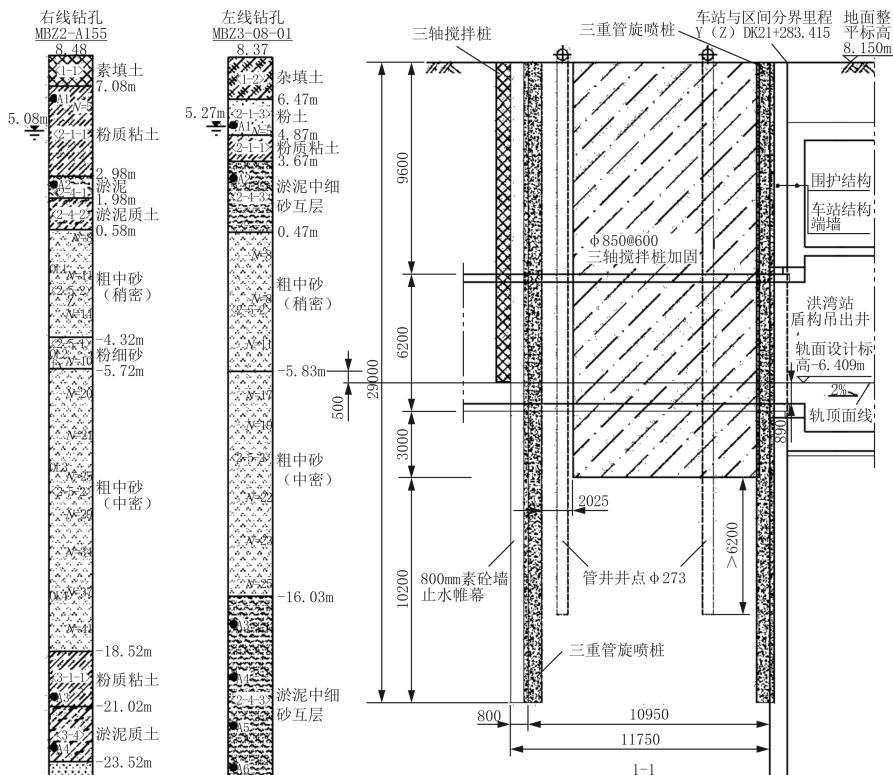


图2 洪湾站接收端头加固剖面图

Fig.2 Sectional elevation of shield receiving end reinforcement at Hongwan Station

在现有施工工艺中,三轴搅拌桩和三重管旋喷桩是富水砂层地质端头加固较为成熟的工艺。但其加固质量很大程度上取决于施工过程中的参数控制(如水泥掺量、喷浆压力、提升速度等),其加固的最终效果与盾构接收施工风险紧密相关。

接收端头地基加固完成后,检测加固后土体 28 d 无侧限抗压强度 < 0.8 MPa。

3.2 盾构接收端头降水施工

盾构接收端头加固区域前需对止水帷幕加固区域进行降水施工。本区间地层主要为粗中砂层,地下水位高,基坑降水使盾构接收端头止水帷幕内地下水水位降至隧底以下,使盾构接收在无水状态下作业,保证盾构接收的安全。本盾构接收端头止水帷幕加固区域内共设置 4 口降水井,降水井深约 25 m,井管为 $\varnothing 273$ mm、壁厚 3 mm 的钢管。降水稳定后水位应在隧底标高以下 2 m,降水即满足设计施工要求。

接收端头止水帷幕区域内降水施工完成后,在洞门开挖轮廓线范围内打检查孔,检查地基加固及降水施工效果,检查孔全断面布置且不少于 9 个,米字形布置,检查孔直径 63 mm,长度 3 m。根据端头加固施工图设计检查方法及标准^[12]:(1)平均出水量 < 0.2 L/min 或任一孔出水量 < 0.5 L/min;(2)压水检查,在 0.8 MPa 压力下,吸水量 < 2 L/min;(3)加固土体抗压强度 < 0.8 MPa;(4)渗透系数 $< 10^{-7}$ cm/s。

3.3 联系测量及洞门复测

联系测量是将地面平面坐标系统和高程系统传递到井下,使盾构区间上下能采用同一坐标系进行测量工作。为保证盾构接收准确进洞,本区间盾构接收共进行了 4 次联系测量,4 次测量相互间差值未超过规定限差,确保了盾构姿态等测量数据的正确性。

根据联系测量结果,对接收端头洞门中心坐标进行复测,确定盾构机的贯通姿态及掘进纠偏计划^[11]。在调整盾构接收贯通姿态时应注意两点:一是盾构接收贯通时的中心轴线与隧道设计轴线的偏差;二是接收洞门中心坐标的偏差。综合这些因素在隧道设计中心轴线的基础上进行盾构姿态调整。为保证盾构顺利接收上接收架,一般考虑盾构接收贯通前 20 m 可逐渐将盾构姿态抬高 15~30 mm。

4 盾构接收施工控制措施

富水砂层中盾构接收施工极易发生涌水、涌砂事故,主要风险为盾构开挖直径比盾构机直径大,在盾构机外围形成一环缝,且富水砂层中土层的稳定性很差,使得高水头细砂和水从此环缝涌入盾构井中,引发涌水、涌砂事故,进而导致地面坍塌,故须采取施工技术措施防止涌水、涌砂事故发生。

4.1 加固区内盾构掘进参数

盾构进入接收端头加固区后,由于加固区土体强度较高,盾构掘进时扭矩较大,为控制推进轴线,盾构总推力控制在 12000 kN 以内,降低掘进速度,控制在 10 mm/min 以内,刀盘转速降低到 0.8 r/min,盾构机在接近洞门前 10 环范围内掘进时对每一环同步注浆量需达到每一环理论注浆量的 90% 以上,并对接收端头加固区端位置的前后各二环进行二次注浆。

在盾构机抵近围护结构时需密切关注刀盘扭矩、盾构总推力等掘进参数的变化,避免刀盘前方土体过度挤压^[17]。

4.2 盾尾止水环箍注浆施工

现阶段施工工艺中,盾尾注浆封闭止水环一般采用“聚氨酯+双液浆”,注浆顺序为先在靠近盾尾的最后一环或两环管片上开孔注入聚氨酯,然后再在盾尾第三至五环管片开孔注双液浆,这样既能保证止水效果持久,又能避免双液浆流到盾体外壳快速固结以及导致盾体被固结不能前进的次生事故。

本工程中当盾尾抵近接收端头加固区与非加固区接缝处时,暂停盾构掘进,通过管片吊装孔在 346~350 环进行整环压注“聚氨酯+双液浆”,将衬砌管片与开挖面之间的间隙填充密实,在盾尾后方形成止水环箍,保证接收端头止水的封闭性。

4.3 止水帘布安装(参见图 3)

盾构机进洞前,采用帘布橡胶板+折页压板+螺栓按施工工序安装在洞门钢环上进行洞门密封。为保证盾构密封止水效果,采用钢丝绳穿过折页压板卡环,并用倒链将钢丝绳拉紧,使帘布橡胶板与折页压板紧压在盾构机上。为使帘布橡胶板不被盾构刀盘损坏,在帘布橡胶板外侧及盾构机刀盘外边刀上涂抹黄油,以避免帘布橡胶板损坏。

当盾构刀盘进入车站接收洞口时盾构与洞门之间的缝隙可能发生涌水、涌砂现象,需立即收紧钢丝绳压紧洞门密封。

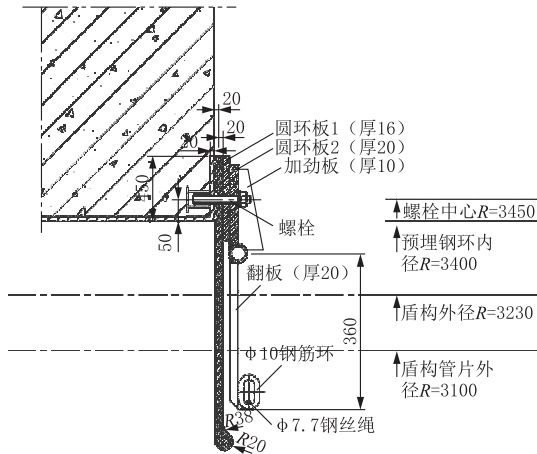


图3 止水帘布橡胶安装大样图

Fig.3 Detail drawing of water-sealing fabric rubber installation

4.4 洞门破除

为保证施工安全,应在盾构机刀头顶到连续墙后再安排洞门破除,且应在洞门破除之前安装止水帘布,而托架安装应在第一次洞门破除之后。只有这样,方可在刀头顶到连续墙后,空仓观察土仓内是否有水位上升现象,若有,应采取降水等有效技术措施降低地下水水位,确保洞门破除时无涌水、涌沙现象。

盾构机接收前要先通过水平探孔检查端头加固土体的稳定性和渗水情况,防止盾构接收时土体(洞门)塌方。洞门地连墙采用二次破除法,破除洞门结构原则上先破除外层钢筋混凝土,保留里排钢筋和约 10 cm 厚的砼层。第一次破除应在盾构机进入到接收端头加固区后割除外侧钢筋,凿除 600 mm 厚地连墙混凝土,安装止水帘布。为防止洞门完全破除后土体失稳危及车站及隧道安全,第二次破除洞门应在盾构机刀头顶到围护结构后开始割除里排钢筋,凿除剩余 10 cm 砼并清理混凝土渣和杂物。

4.5 接收基座施工

盾构接收基座采用钢筋混凝土浇筑导台(见图4、图5),导台斜面预埋 $300\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 钢板,钢板间距 0.5 m,钢板上焊接 43 号钢轨作为盾构滑行导轨。导台由左右两个混凝土梁组成,导台梁长 11.2 m,梁宽 0.9 m,梁间距 2.9 m。导台梁内植两排 $\Phi 25@500$ 钢筋,防止导台梁受盾构侧压力发生侧移破坏。导台梁浇筑完成后及时对预埋钢板标高进行复测,以检测导台标高误差是否在允许值范围内,保证盾构能顺利上导轨。

4.6 管片拉紧紧固

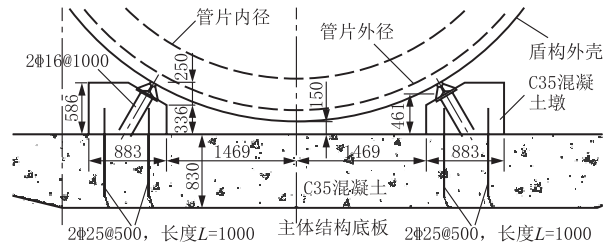


图4 接收导台示意图

Fig.4 Schematic diagram of receiving guide platform

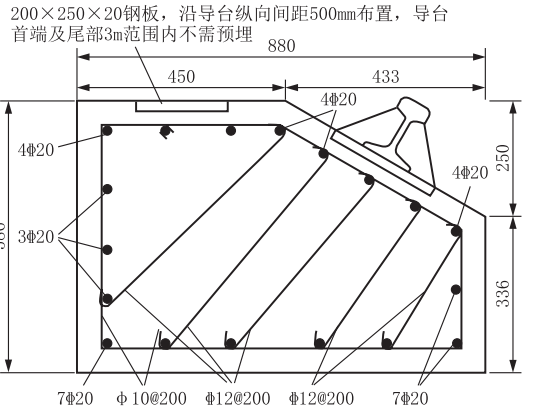


图5 接收导台大样图

Fig.5 Detail drawing of receiving guide platform

因洞门围护结构破除后,刀盘前方土压力消失,为防止管片之间缺乏足够的千斤顶推力致使管片不能紧密连接,为保证盾构进洞前管片的稳定,在接收前最后 10 环管片采用槽钢与管片纵向螺栓拉紧连接,确保洞门附近管片的整体稳定性。

4.7 洞门密封

盾构脱出洞门环后,立即通过管片注浆孔对管片壁后进行二次注浆,将管片与加固土体间隙填充密实。同时盾构机完全进洞后,采用加工好的弧形钢板将管片与洞门钢环直接焊接封堵,并在弧形钢板上预留 6 个钻孔进行双液注浆。注浆遵循先下部、后上部施工顺序,使注浆浆液将土体间隙填充密实,保证加固土体与管片形成一个封闭的防水体系。

5 结语

富水砂层中进行盾构接收施工风险系数大,尤其在盾构施工场地周边建筑物密集,地面为城市主干道等复杂环境条件下,施工技术难度更高,应对各风险因素有针对性的设计、施工方案来保证盾构机安全接收。本文针对桔园洲站—洪湾站区间富水砂层地质条件下盾构接收施工技术进行分析探讨,总结出以下几点经验:

(1)应根据盾构端头现场地质水文条件及周边场地环境选择合理的接收端头加固方案,同时适当加长端头加固长度,以降低涌水、涌砂的风险,从技术方案上确保盾构接收的安全。

(2)通过端头地连墙加固与加固区内降水井降水相结合,把加固区水位降至盾构机底面以下 2 m,确保盾构接收在无水状态下作业。

(3)盾构进入端头加固区后,逐步降低土压设定值,同时放慢掘进速度,加强盾构姿态测量及接收端头地层变形监测等,超出限值时应采取有效措施进行修正后方能继续掘进。

(4)盾构进入加固区后,加强对同步注浆施工控制,使加固土体与管片间隙填充密实,控制接收端头周围地层沉降。同时在加固区与非加固区接缝处 5 环管片进行二次注浆压注双液浆形成一道止水环箍,彻底将地下水阻止在加固区外,保证盾构接收的安全。

参考文献(References):

- [1] 张凤翔,傅德明,项兆池,等.盾构隧道施工手册[M].北京:人民交通出版社,2005.
ZHANG Fengxiang, FU Deming, XIANG Zhaochi, et al. Shield tunneling manual[M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [2] 竺维斌,鞠世健.复合地层中的盾构施工技术[M].北京:中国科学技术出版社,2006.
ZHU Weibin, JU Shijian. Shield tunneling technology in mixed face ground conditions[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2006.
- [3] 刘建航,侯学渊.基坑工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
LIU Jianhang, HOU Xueyuan. Excavation engineering handbook [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [4] 杨明金.全断面强富水砂层土压平衡盾构施工技术[J].山东交通科技,2012,(1):31-33.
YANG Mingjin. Earth pressure balance shield construction technology in full section strong water-rich sand stratum[J]. Shandong Jiaotong Keji, 2012,(1):31-32.
- [5] 江招胜,郭广才,黄威然.富水砂层中土压平衡盾构施工的技术措施[J].城市轨道交通研究,2006,9(7):58-60.
JIANG Zhaosheng, GUO Guangcai, HUANG Weiran. EPB excavating technology in watered sandy stratum[J]. Urban Mass Transit, 2006,9(7):58-60.
- [6] 刘玉林,刘天祥.富水砂层地质条件下盾构接收技术[J].施工技术,2012,41(S1):255-258.
LIU Yulin, LIU Tianxiang. Acceptance technology of shields on watered sandy stratum [J]. Construction Technology, 2012,41(S1):255-258.
- [7] 陈鸿杰,魏鑫.土压平衡盾构机过富水砂层施工技术[J].现代城市轨道交通,2010,(2):50-52.
CHEN Hongjie, WEI Xing. Construction technology of earth

- pressure balance shield machine in water-rich sand layer[J]. Modern Urban Transit, 2010,(2):50-52.
- [8] 张旭东.土压平衡盾构穿越富水砂层施工技术探讨[J].岩土工程学报,2009,31(9):1445-1449.
ZHANG Xudong. Construction technology of earth pressure balance shield in watery sandy stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009,31(9):1445-1449.
- [9] 徐岩,赵文,黄龙光,等.富水砂层土压平衡盾构关键施工技术[J].施工技术,2011,40(7):71-73,77.
XU Yan, ZHAO Wen, HUANG Longguang, et al. Key construction technology of earth pressure balance shield in watery sandy stratum[J]. Construction Technology, 2011,40(7):71-73,77.
- [10] 孟海峰,刘江涛,李世君.土压平衡盾构富水粉砂地层进、出洞常见问题分析[J].隧道建设,2011,31(S2):57-61.
MENG Haifeng, LIU Jiangtao, LI Shijun. Common issues of launching and arriving for earth pressure balance shield tunneling in water-rich and silty strata[J]. Tunnel Construction, 2011,31(S2):57-61.
- [11] 任福松,金建俊.地铁施工中的盾构机姿态控制研究[J].交通标准化,2009,(9):134-137.
REN Fusong, JIN Jianjun. Shield machine attitude control in subway construction[J]. Transport Standardization, 2009,(9):134-137.
- [12] 刘国楠,张远荣,肖文海.盾构过富水砂层对地表建筑物影响的研究[J].西北地震学报,2011,33(3):243-248.
LIU Guonan, ZHANG Yuanrong, XIAO Wenhai. Influence of shield tunneling on the buildings above in saturated sandy stratum area[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011,33(3):243-248.
- [13] 张敏,郑志敏,邓棕.扩展土压平衡盾构在含水地层中的适应性[J].隧道建设,2003,(5):4-6,22.
ZHANG Min, ZHENG Zhimin, DENG Zong. Study on adaptability of earth pressure balance shield in aquifers[J]. Tunnel Construction, 2003,(5):4-6,22.
- [14] 朱考飞,张可能,毛亚军,等.浅埋盾构隧道水下岩溶处治与施工控制技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):16-20.
ZHU Kaofei, ZHANG Keneng, MAO Yajun, et al. Underwater karst treatment and construction control technology for shallow shield tunnel[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(10):16-20.
- [15] 张林.超大直径泥水盾构穿堤施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(6):80-84.
ZHANG Lin. Dyke-crossing construction by slurry shield with super large diameter[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(6):80-84.
- [16] 福州市轨道交通 2 号线工程 5 标段初步设计方案[R].浙江杭州:中国水电顾问集团华东勘测设计研究院,2013.
Preliminary design for Lot 5 section of Fuzhou Rail Transit Line 2[R]. Hangzhou Zhejiang: Hydrochina Huadong Engineering Corporation, 2013.
- [17] 李向红,傅德明.土压平衡模型盾构掘进试验研究[J].岩土工程学报,2006,28(9):1101-1105.
LI Xianghong, FU Deming. Experimental study on excavation behaviour using model EPB shield with a diameter of 1.8m[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006,28(9):1101-1105.