

U型冻结法在大直径泥水盾构接收中的应用研究

罗赛楠

上海隧道工程有限公司, 上海

收稿日期: 2024年3月19日; 录用日期: 2024年4月9日; 发布日期: 2024年4月18日

摘要

本文通过对常用盐水冻结形式与大直径盾构两种接收方式在接收施工风险两阶段的适用性研究, 对比了不同冻结形式在不同接收方式下的优缺点, 提出了一种新的U型冻结形式并阐述了其在大直径盾构接收中的应用特点, 指出了U型冻结在大直径盾构接收应用中的有效性和适用性, 并且在上海轨道交通市域线机场联络线3标项目14m大直径泥水气平衡盾构接收中进行了成功应用。

关键词

大直径泥水盾构接收, 垂直冻结, O型水平冻结, U型冻结, 水/土中接收

Research on the Application of U-Shaped Freezing Method in the Receiving of Large-Diameter Slurry Shields

Sainan Luo

Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai

Received: Mar. 19th, 2024; accepted: Apr. 9th, 2024; published: Apr. 18th, 2024

Abstract

This article studies the applicability of commonly used salt water freezing form and two receiving methods in the two stages of large-diameter shield receiving construction risks. It compares the advantages and disadvantages of different freezing forms under different reception methods, proposes a new U-shaped freezing Form and expounds its application characteristics in large-diameter shield receiving, and points out its effectiveness and applicability. It has been successfully applied in the reception of 14 m diameter slurry shield in the third section of Shanghai Rail Transit Municipal Line Airport Connection Line Project.

Keywords

Large-Diameter Slurry Shield Receiving, Vertical Freezing, O-Shaped Horizontal Freezing, U-Shaped Freezing, Receiving in Water/Soil

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

盾构接收一向是盾构法隧道施工重要的风险点, 盾构接收施工时, 即使安装了类似橡胶袜套和铰链板等止水装置, 由于其翻转方向与盾构推进方向相同, 在有一定水土压力下很难保持密封效果, 而盾构接收过程中一旦出现洞门渗漏, 处理不及时容易造成水土流失, 地面沉降甚至接收洞门附近地面坍塌。

目前长三角地区, 尤其是上海, 接收井埋深越来越深, 上海机场联络线的接收井基坑大多深度超过 30 m, 有些甚至达到 40 m 以上, 这种深度一般是在承压水的砂性地层中进行盾构接收施工, 而常用的水泥系加固(注浆加固、深层搅拌桩、高压旋喷桩、MJS、RJP 等)在这种超深的承压水层中很难保证洞门处的止水效果, 而敞开式的降水施工无法将地下水位降至接收洞门以下, 且对周边环境影响很大, 因此为了保证盾构接收时洞门处的止水效果, 减少对周边环境的影响, 大直径泥水盾构接收中, 常在水泥系加固的基础上, 增加盐水冻结法的方式(贴壁垂直冻结、O 型水平冻结)对接收洞门局部土地进行冻结加固, 形成止水帷幕的同时与不同接收方式(常规干接收、水/土中接收)相配合来保证盾构接收施工安全。

近些年关于盾构接收施工方法和加固方法的研究中, 邢慧堂[1]详细阐述了南京长江隧道工程超大型泥水盾构水中接收施工技术, 其中采用了三轴搅拌加固、冷冻加固、强降水三重措施来保证盾构接收安全。魏龙海, 郭小红, 乔春江[2]结合南京纬三路过江通道盾构出洞现场实际情况, 利用数值方法, 就冻结施工时土体冻胀效应对地下连续墙安全性的影响进行了研究, 分析了局部冻结和全局冻结对地表变形的影响, 探讨了冻结壁的合理厚度。王文灿[3]结合天津地铁某标段的工程实践, 对冻结法和水平注浆的组合加固技术进行了分析。贲志江, 杨平, 陈长江[4]分析了南京地铁 10 号线过江隧道大型泥水盾构水中接收的施工关键技术, 其中采用了三轴搅拌桩 + 高压旋喷桩 + 垂直冷冻固结, 并分析了垂直冻土墙的温度变化规律。赵亮, 杨平, 刘增光等[5]针对某地铁车站端头隧道施工中所遇到的特殊工程地质条件, 提出并采用了杯型水平冻结法端头加固与钢套筒辅助的盾构接收施工工艺。陈松[6]为解决复杂周边环境及软弱富水地质条件下的盾构接收难题, 以天津地铁 5 号线某车站盾构接收端头加固工程为例, 提出 RJP 高压旋喷法 + 冻结法组合加固方法。徐锦斌, 王锋, 傅聪等[7]结合地铁 7 号线王家墩东站 - 新华路站盾构区间工程实例, 通过对冻结效果进行验算, 阐述组合接收方案在盾构接收施工中的实践应用。

这些研究均未指出当前大直径盾构接收常采用的冻结形式(贴壁垂直冻结、O 型水平冻结)与接收方式(常规干接收、水/土中接收)配合中存在的缺点, 本文指出了这一点并提出的一种 U 型冻结形式弥补了常用冻结形式的缺点, 并在上海机场线大直径盾构接收施工中进行了应用验证。

2. 常用盐水冻结形式与盾构接收方式

根据盾构接收的施工流程, 盾构接收过程中主要有两个阶段的渗漏风险, 盾构接收时一般采用盐水冻结法与接收方式相配合, 从而把盾构接收两阶段的风险降到可控的程度。

2.1. 盾构接收风险两阶段

2.1.1. 阶段一：破除洞门地下连续墙

大直径盾构接收洞门破除一般采用机械破除的形式，破除洞门时间约一周，见图 1，洞门暴露时间长，破除洞门时的洞门漏水风险较大。



Figure 1. Opening chiseling
图 1. 洞门破除

2.1.2. 阶段二：盾构进入接收井至洞门封堵完毕

盾构机进入接收井至洞门封堵完毕阶段，盾构机/管片与洞门圈之间的间隙始终处于暴露阶段，一直都有漏水风险。

1) 盾构机进入接收井

盾构机进入接收井过程中，考虑到推进偏差、测量误差、洞门圈安装偏差以及盾构姿态等情况，洞门圈直径一般设计比盾壳外径大 40 cm 以上，单边有超过 20 cm 间隙。上海机场线 3 标盾构接收洞门圈直径 14.5 m，盾尾 14.01 m，盾构机盾尾与洞门圈有 24.5 cm 的间隙，掘进过程中每环需要进行管片的环向纵向钢板焊接，盾尾后管片环箍注浆，时间较长，一般一天掘进 2 环，盾构机约 15 m，7~8 环长度，盾构进入接收井阶段时间一般需要三四天时间，24.5 cm 的间隙一直处于暴露状态，洞门有渗漏风险，见图 2。

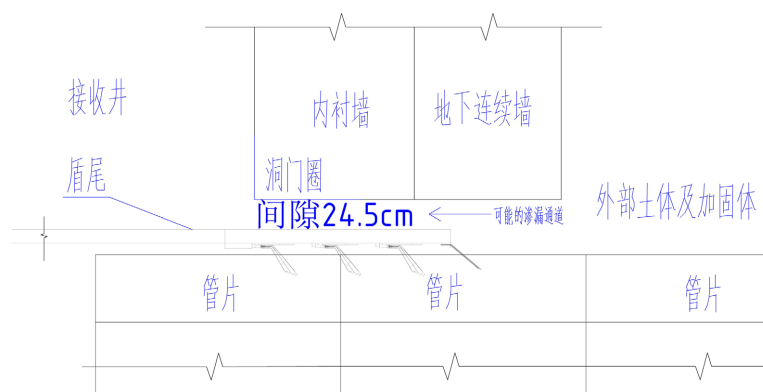


Figure 2. The gap between the shield shell and the portal ring
图 2. 盾壳与洞门圈间隙示意图

2) 盾构盾尾脱出洞门圈处管片及洞门临时封堵

盾构完全进入接收井，其盾尾在洞门圈处脱出管片过程中，由于盾尾外径一般比管片外径大 40cm

左右。上海机场线3标盾构机盾尾外径14.01m，管片外径13.6m，盾尾与管片之间间隙19.5cm，盾尾过洞门圈脱出管片过程中，洞门圈处周边间隙会从24.5cm增大到44cm，盾构盾尾脱出管片后，需要约2~3天的时间进行洞门的临时封堵，即采用多块扇形钢板将管片与洞门圈的约44cm间隙进行焊接封闭，在焊接过程中洞门有渗漏风险，见图3。

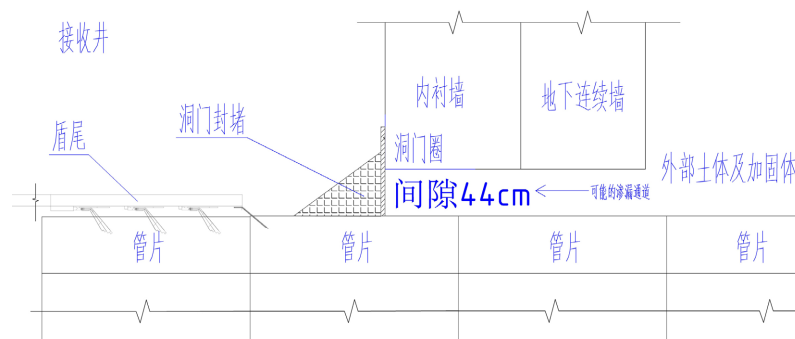


Figure 3. Portal sealing
图3. 洞门焊接封闭示意图

2.2. 常用盐水冻结形式

1) 贴壁垂直冻结

贴壁垂直冻结就是在地面上，靠近洞门处地下连续墙，打设数排垂直于即将开挖隧道的冻结管，从而进行贴壁垂直冻结帷幕的设置，见图4。

垂直冻结由于在地面进行冻结管的打设，施工便利，无需占用接收井，速度较快，且钻孔时无渗漏风险。

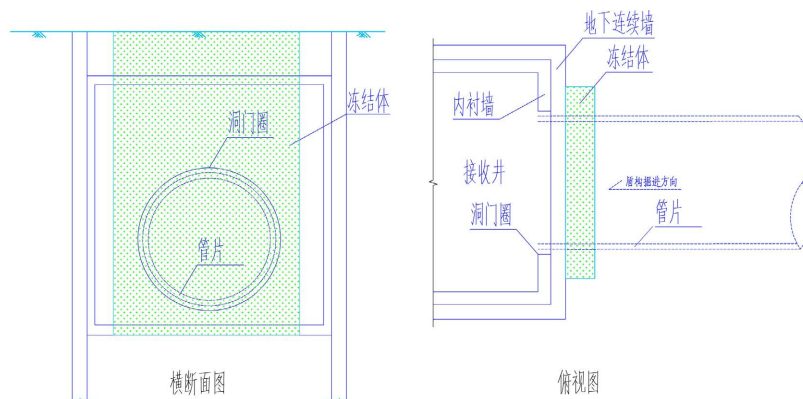


Figure 4. Vertical freezing
图4. 垂直冻结示意图

2) O型水平冻结

O型水平冻结，即在洞门圈周围平行于即将开挖隧道设置冻结管，从而进行O型冻结帷幕的设置，见图5。

水平冻结管是在接收井内施工，靠近洞门圈打设与即将开挖隧道水平的冻结管，需要打穿接收井内衬墙和地下连续墙施工，并且除了底部的冻结管，其余冻结管施工时均需要搭设支架及平台，施工工期较长，水平钻孔时还会有漏水漏砂风险。

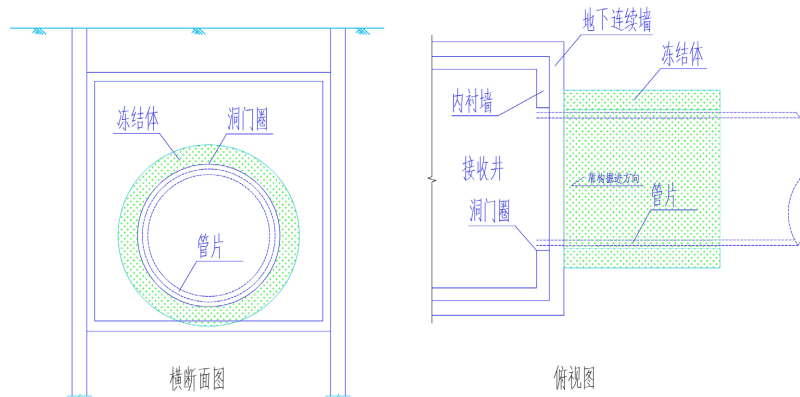


Figure 5. O-shaped horizontal freezing
图 5. O 型水平冻结示意图

2.3. 常用接收方式

1) 常规干接收

常规干接收即破除洞门处地下连续墙后，盾构机继续往前推进，进入接收井，落在钢筋混凝土基座上，最终盾尾脱出洞门圈处管片后，封堵洞门。由于接收时，即使有止水装置，其效果也较差，因此该种接收方式一般需要在无水情况下施工，无论是加固止水还是配合井点降水。

2) 水/土中接收

水/土中接收即破除洞门后，对接收井进行灌水或者填土，盾构机进入接收井切削并落在砂浆基座上时，实际上是进入水中或者土中，由接收井内的水或者水土压力来平衡地下水压力，再通过密实的管片环箍注浆来填充管片与洞门圈的间隙，然后从上往下抽水/挖土封堵洞门，见图 6。

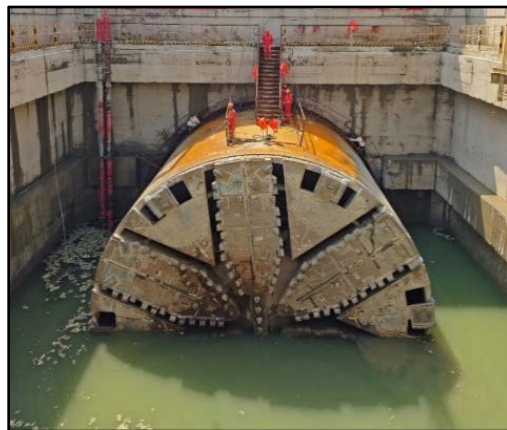


Figure 6. Shield underwater reception
图 6. 水中接收抽水封洞门

2.4. 冻结形式与接收方式的配合

盾构接收施工主要的漏水风险有两个阶段，一是洞门破除阶段，二是洞门破除后直到洞门封堵完毕阶段。两种盐水冻结的方式，均能够有效的解决洞门破除阶段的渗漏风险，盐水冻结法与盾构接收方式的配合，主要是为了解决在盾构接收的第二个风险阶段，防止洞门漏水或者漏水可控，从而保障接收安全。

1) 垂直冻结 + 常规干接收

垂直冻结 + 常规干接收基本流程: 水泥系加固 - 垂直冻结施工(基座同时施工或提前施工) - 盾构机靠近冻结壁(同时环箍注浆) - 洞门破除 - 拔除冻结管(部分维持冻结) - 盾构机进入接收井(同时环箍注浆) - 盾构机盾尾脱出洞门管片并在基座上就位 - 封堵洞门。

洞门破除后, 隧道范围内的冻结管拔除或者拔至盾构以上重新维持冻结。在盾构进入接收井过程中, 冻结体尤其是盾构机底部冻结体逐渐融化, 两侧和上部冻结体可以继续维持冻结, 因此在接收的第二阶段, 洞门圈底部一直有漏水风险, 随着冻结壁的逐渐融化, 风险越来越大直至洞门临时封堵结束。

2) 垂直冻结 + 水/土中接收

垂直冻结 + 水/土中接收基本流程: 水泥系加固 - 垂直冻结施工(基座同时施工或提前施工) - 洞门破除 - 接收井灌水/填土 - 盾构机进入接收井切削砂浆基座就位(同时环箍注浆) - 分层抽水/挖土封堵洞门。

洞门破除后, 在接收井内灌水或填土, 灌水或填土高度以平衡地下水压力为准, 灌水或填土完毕后, 拔除所有冻结管。

在盾构进入接收井过程中, 盾构机均在水/土中推进, 直到盾构机停到临时封堵洞门的位置, 此时盾构机盾尾仍然包裹一定长度的管片从而防止接收井内的水土进入成型隧道内。

盾构停机后, 继续环箍注浆, 直至水平渗漏通道全部封堵完毕, 开始从上往下分层降水/挖土, 分层封堵洞门, 如果无渗漏即从上往下封堵完毕, 如果出现渗漏无法控制, 可以重新回水/土, 继续注浆, 再重复上一道工序直至洞门封堵完毕。

这种接收方式虽然在一定程度上解决了第二阶段的渗漏问题, 但是在分层降水/挖土过程中, 由于接收过程中冻结壁已经融化了, 仍然会有渗漏可能性, 如果出现了渗漏, 只能通过重新回水/土, 继续注浆来解决, 效率较低。

3) 水平冻结 + 常规干接收

水平冻结 + 常规干接收流程: 水泥系加固 - 接收井内施工水平冻结管 - 基座施工 - 盾构机靠上洞门 - 环箍注浆 - 洞门破除 - 盾构机进入接收井(同时环箍注浆) - 盾构机盾尾脱出洞门管片并在基座上就位 - 封堵洞门。

洞门破除后, 在盾构进入接收井过程中, 可以继续维持水平冻结, 在接收的第二阶段, 洞门圈漏水风险较小, 唯一可能的漏水即承压水顺着成环管片与加固体的间隙进入到接收井, 如果管片环箍注浆密实, 可以降低该风险发生的可能性。

4) 水平冻结 + 水/土中接收

水平冻结 + 水中接收基本流程: 水泥系加固 - 接收井内施工水平冻结管 - 砂浆基座施工 - 洞门破除 - 灌水/填土 - 盾构机进入接收井切削砂浆基座就位(同时环箍注浆) - 分层抽水/挖土封堵洞门。

洞门破除后, 在接收井内灌水或填土, 灌水或填土高度以平衡地下水压力为准, 灌水或填土过程中及完毕后, 继续维持冻结。

在盾构进入接收井过程中, 盾构机均在水/土中推进, 直到盾构机停到临时封堵洞门的位置, 此时盾构机盾尾仍然包裹一定长度的管片从而防止接收井内的水土进入成型隧道内。

盾构停机后, 继续环箍注浆, 直至水平渗漏通道全部封堵完毕, 开始从上往下分层降水/挖土, 分层封堵洞门。第二阶段可以继续维持冻结, 这种接收方式解决了第二个阶段可能的渗漏问题。

2.5. 常用盐水冻结形式优缺点与小结

从上述比较见表 1, 可以得出以下结论:

1) 垂直冻结施工速度快, 但是配合常规干接收时, 有冻结壁融化漏水的风险, 因此往往需要配合水/土中接收。然而即使采用垂直冻结 + 水/土中接收, 在封堵洞门阶段, 垂直冻结已经融化失效, 降低接收井内水/土面封洞门的过程中存在漏水的可能性, 如果出现较大渗漏, 需要重新回水/土, 继续注浆, 再降低水/土封堵洞门, 效率较低。

2) 水平冻结可以较好的解决冻结壁融化漏水的风险, 在周边环境风险较小的情况下配合干接收更加有利, 但水平冻结管施工占用关键线路工期, 同时需要在内衬墙上钻孔, 本身水平钻孔施工有一定风险, 后期这些内衬墙上的孔洞也有渗漏风险。

Table 1. Comparison of advantages and disadvantages of commonly used freezing forms
表 1. 常用冻结形式优缺点比较

数量	贴壁垂直冻结	O 型水平冻结
优点	1) 垂直冻结管的施工不在关键线路上, 节省了工期。	水平冻结可以在接收第二阶段维持冻结, 漏水风险较小: 1) 可以采用常规干接收的方式, 比水/土中接收的工期短两周。 2) 周边环境风险较大时, 也可以配合水/土中接收, 将施工风险降到最低。
缺点	在接收的第二阶段, 冻结壁已经融化, 有一定的漏水风险: 1) 垂直冻结 + 常规干接收时, 一旦漏水, 处理起来较为困难, 容易演变成事故。 2) 垂直冻结 + 水土中接收时, 一旦漏水, 可以重新回水土后注浆处理, 增加了工期。	1) 由于需要在接收井内搭设施工支架平台, 冻结管施工占用关键线路工期。 2) 水平冻结管施工过程中有渗漏风险。 3) 接收井内衬墙上需要钻较多的孔洞, 后期有一定的渗漏风险。 4) 接收井内连接的盐水管路较多, 采用水/土中接收时, 有一定的损坏失效风险。

3. U 型冻结形式及应用

由于贴壁垂直冻结和 O 型水平冻结在施工中均存在一定的缺点, 即垂直冻结无法在接收第二阶段维持冻结, 而水平冻结管施工风险大和占用关键线路, 因此本文阐述一种新的 U 型冻结方式, 可以在一定程度上解决上述缺点。

U 型冻结形式, 是采用洞门圈底部一排水平冻结与洞门圈两侧沿着隧道掘进方向的垂直冻结组合形成的, 包裹盾构机三面的 U 型冻结壁, 见图 7。

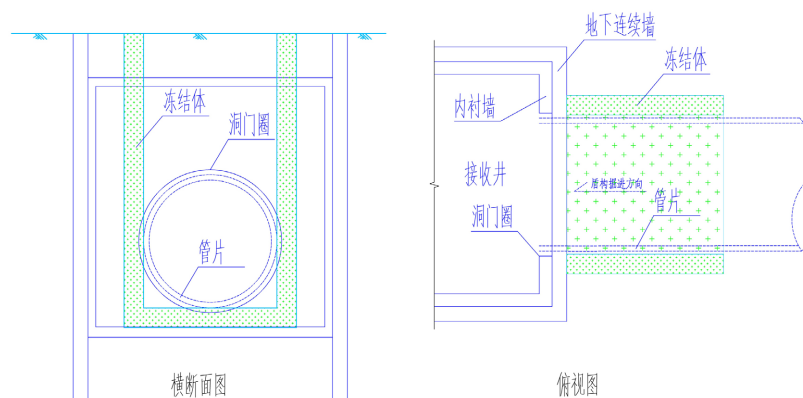


Figure 7. U-shaped freezing form
图 7. U 型冻结示意

采用 U 型冻结, 接收井内只需要施工底部水平冻结管, 两侧的冻结管在地面进行垂直打设, 盾构接收过程中无需拔除冻结管, 可以维持冻结。

1) 与垂直冻结相比, U 型冻结可以在接收第二阶段维持冻结, 降低了漏水风险, 起到了水平冻结的效果。

2) 与水平冻结相比, 冻结孔施工难度较小, 且两侧垂直冻结管的布设可以和井内准备工作同时进行, 工期较短。

3) 与水平冻结类似, U 型冻结与常规干接收、水/土接收均可以有效的配合: 在工期控制比较紧而周边环境风险较小的情况下, U 型冻结配合干接收使用可以达到水平冻结配合干接收的效果, 从而达到缩短工期, 降低冻结管施工本身的风险; 在周边环境风险较大的情况下, U 型冻结可以配合水/土接收, 比垂直冻结 + 水/土接收风险更小。

因此, U 型冻结兼顾了垂直冻结和 O 型水平冻结的优点, 又尽量避免了两者的缺点。

上海机场线 3 标梅富路工作井~2 号风井区间直径 14.05 m 的泥水气压平衡盾构在 2 号风井处接收, 接收井深 30.218 m, 盾构接收时位于④淤泥质粉质黏土、④1 粉砂夹粉质黏土、⑤1 粉质黏土、⑥1 粉质黏土, 接收洞门处隧道顶覆土 12.8 m, 接收洞门处盾构机底部 2.5m 以下的⑦1 粉砂夹粉质黏土为承压水层, 且邻近两条营业线铁路线, 见图 8, 工程采用了 U 型冻结 + 水中接收的方式, 取得了良好的效果, 保证了盾构接收和周边环境的安全。

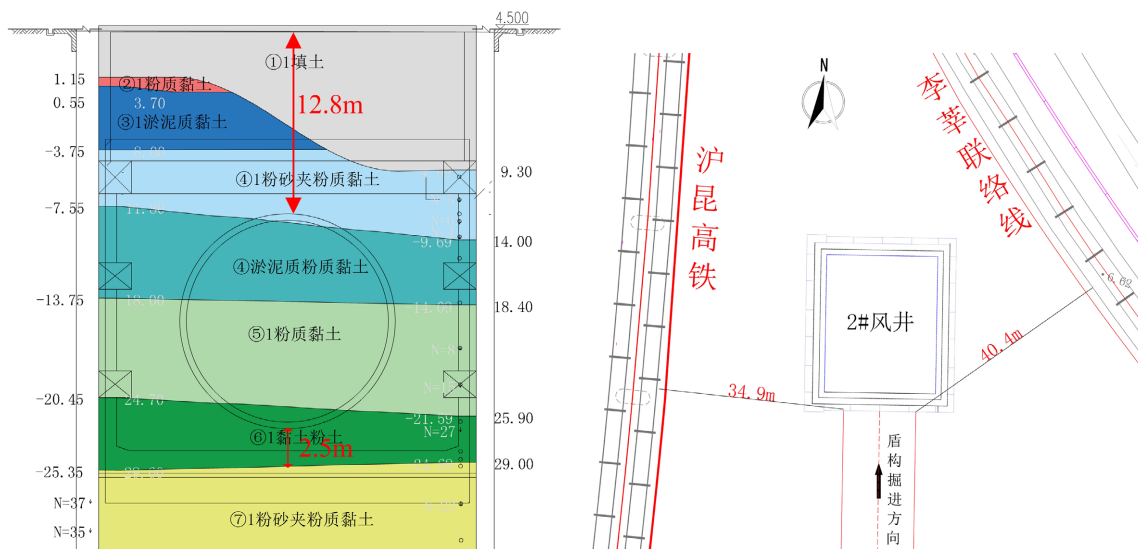


Figure 8. Geological profile and surrounding situation of the shield receiving shaft

图 8. 上海机场线 3 标接收地质及平面

4. U 型冻结存在的缺点及改进办法

U 型冻结由于其冻结的形式, 只封闭了三面来水, 当盾构机靠上洞门连续墙破除洞门阶段, 如果盾构上部地层有承压水, 而水泥系加固有裂缝等情况下, 可能会出现漏水情况, 即水会顺着水平方向通过盾壳与洞门间隙进入接收井。

可能的解决办法为:

- 1) 增加洞门水平探孔的数量, 确认加固的有效性。
- 2) 盾构机靠上洞门后, 进入开挖仓进行检查漏水情况再破除洞门。
- 3) 必要的情况下, 可以增加洞门圈范围的贴壁垂直冻结。

5. 结语

在软弱富水地层尤其是超深含承压水砂性地层中,大直径泥水平衡盾构接收,由于周边环境影响无法降水的情况下,无论是常规干接收还是水/土中接收,采用冻结法的方式均能够形成较好的止水帷幕,可以有效防止盾构接收过程中的水土流失,大大降低接收风险。

常用的贴壁垂直冻结和 O 型水平冻结有其适用的条件和局限性。垂直冻结仅能保证洞门破除时的安全,在复杂条件下,往往需要配合水/土中接收来保证盾构接收安全,并且即使采用了水/土中接收,由于冻结壁的融化,也可能会出现漏水而反复回水/土的情况。O 型水平冻结则需要在内衬墙上水平钻孔,施工风险大,并且冻结管施工工期长,占用关键线路工期。

因此本文阐述了一种 U 型冻结的方式,施工方便灵活,无论是常规干接收还是水/土中接收,均有较好的适用性,可以在一定程度上弥补上述冻结方式的不足,并在上海轨道交通市域线机场联络线 3 标 2 号盾构接收中进行了成功应用,为类似工程应用提供了指导,同时本文也阐述了该种冻结方式的缺点以及可能改进的冻结组合方式,为后续的应用研究指明了方向。

参考文献

- [1] 邢慧堂. 超大型泥水盾构水中接收施工技术[J]. 铁道建筑, 2010(8): 62-65.
- [2] 魏龙海, 郭小红, 乔春江, 等. 南京纬三路大直径越江盾构隧道冻结法出洞方案研究[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(3): 80-86.
- [3] 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(3): 183-190.
- [4] 贲志江, 杨平, 陈长江, 等. 地铁过江隧道大型泥水盾构的水中接收技术[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(1): 119-124.
- [5] 赵亮, 杨平, 刘增光, 等. 杯型水平冻结法端头加固与钢套筒辅助的盾构接收技术[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(9): 126-130.
- [6] 陈松. RJP 高压旋喷法及冻结法在盾构接收端头的组合运用[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(6): 1037-1043.
- [7] 徐锦斌, 王锋, 傅聪, 等. 水泥系与垂直冻结法在武汉地铁盾构接收中的组合应用[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(2): 358-365.