

上软下硬地层及低净空环境下地下连续墙施工关键技术研究

王龙飞 刘龙飞 屈军涛

中铁十五局集团地下工程有限公司, 江苏 扬州 211400

[摘要]随着我国城市化进程的加速,轨道交通建设在诸多历史文化名城与地质条件复杂的城市中展开。扬州市作为典型的平原水网城市,其地层普遍具有典型的“漫滩相”沉积特征,即“上软下硬”的复合地层结构。在此类地层中及低净空环境下进行市域铁路车站深基坑施工,地下连续墙作为围护结构的关键,其施工过程中槽壁失稳风险突出、硬岩入岩难度大、成槽效率低、墙体质量难以保障。文中以南京至仪征线市域铁路一期工程扬州段万年路站基坑工程为背景,系统分析长江漫滩上软下硬地层及低净空环境下地下连续墙施工,提出槽壁预加固、泥浆护壁体系优化、“抓钻抓”组合成槽工艺、低净空范围内钢筋笼制安、水下混凝土浇筑等关键施工技术。实践表明,该方案可有效保障地下连续墙的施工质量及施工效率,为类似地质条件及低净空环境下地下连续墙施工提供技术参考。

[关键词]上软下硬地层;低净空;地下连续墙;施工技术

DOI: 10.33142/ect.v4i9.20481

中图分类号: TU473.2

文献标识码: A

Research on Key Technologies for Construction of Underground Diaphragm Walls in Soft Upper and Hard Lower Strata and Low Clearance Environments

WANG Longfei, LIU Longfei, QU Juntao

China Railway 15th Bureau Underground Engineering Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu, 211400, China

Abstract: With the acceleration of urbanization in China, the construction of rail transit has been carried out in many historical and cultural cities and cities with complex geological conditions. As a typical plain water network city, Yangzhou city generally has typical sedimentary characteristics of "floodplain facies" in its strata, namely a composite stratigraphic structure of "soft upper and hard lower". In the construction of deep foundation pits for urban railway stations in such geological formations and low clearance environments, the underground continuous wall serves as the key enclosure structure. During the construction process, the risk of instability of the groove wall is prominent, the difficulty of hard rock entering the rock is high, the efficiency of groove formation is low, and the quality of the wall is difficult to guarantee. The article takes the foundation pit project of Wannian Road Station in Yangzhou section of the first phase of the Nanjing Yizheng line urban railway as the background, systematically analyzes the construction of underground continuous walls in soft and hard strata on the Yangtze River floodplain and low clearance environment, and proposes key construction technologies such as pre reinforcement of groove walls, optimization of mud wall protection system, combination of "drilling and grabbing" to form grooves, installation of steel cages in low clearance range, and underwater concrete pouring. Practice has shown that this scheme can effectively ensure the construction quality and efficiency of underground continuous walls, providing technical reference for the construction of underground continuous walls under similar geological conditions and low clearance environments.

Keywords: upper soft and lower hard strata; low clearance; underground continuous wall; construction technology

引言

随着我国城市轨道交通建设的快速发展,车站深基坑工程大量涌现。长江漫滩作为长三角地区典型的地貌单元,广泛分布于南京、扬州、镇江等沿江城市,其第四系松散层厚度巨大、结构复杂,对地下工程施工构成了严峻挑战。

长江漫滩区域地质条件复杂,软土层厚、地下水位高^[1],基坑开挖过程中容易出现边坡失稳、支护结构变形过大、涌水涌砂等问题,给施工安全和周边环境带来较大风险。

地下连续墙作为深基坑的主要围护结构,其施工质量直接关系到基坑开挖安全和周边环境稳定^[2]。很多学者针

对不良地质条件下地下连续墙施工进行了研究。陶云超^[3]针对长江漫滩地层地下连续墙施工重难点问题,提出双轴搅拌桩加固地层、液压抓斗成槽、改进护壁泥浆配比、H型钢组合连接及型钢刷壁控制等关键技术。周伊凡^[4]以珠江口近海超厚流塑性淤泥层中的地下连续墙为研究对象,围绕地质勘察技术、槽壁稳定性控制及泥浆性能优化等方面,分析了该类地层中地下连续墙施工的关键技术。黄华^[5]针对邻海敏感环境下软硬交互地层中地下连续墙施工的问题,研究了一套组合成槽施工技术。谢培宁^[6]通过江阴靖江长江隧道项目,研究了长江漫滩超深地下连续墙的成槽工艺、垂直度控制、钢筋笼分节吊装、防渗缝优化等关键施工技术。刘俊^[7]研究了软土地区超长地铁车站地下连续墙的施工方法,提出“分区同步施工+复合泥浆+刚性接头+止水桩”组合技术。有少部分学者针对低净空条件下地下连续墙施工进行了研究。朱汉伟等^[8]针对220kV 高压线下超低净空地下连续墙施工的技术难题进行研究,提出并应用“四正三副”叠合冲孔成槽工艺、折臂式起重机分节吊装重型钢筋笼技术。柏严松^[9]依托西沈

汴路站受架空高压线影响的地下连续墙施工,制定了高压线防护、地层加固、低净空条件下成槽及分节吊装等技术方案。

目前针对“上软下硬”这一特殊地质条件及低净空环境下地下连续墙施工研究较少,如何选择合适的槽壁加固措施、成槽设备、泥浆配比、成槽工艺、钢筋笼制作安装等,是当前长江漫滩地区及低净空条件下地下连续墙施工面临的关键技术难题。本文结合南京至仪征线市域铁路扬州段车站深基坑工程实践,系统探讨长江漫滩上软下硬地层中低净空地下连续墙的施工关键技术,以期同类工程提供参考。

2 工程概况与地质条件

2.1 工程简介

南京至仪征线(含扬州延伸线)市域铁路扬州段主体工程包含2站1区间:万年路站、万年路站~工农路站区间、工农路站。万年路站位于万年南路与前进西路交叉路口,车站沿万年南路南北向敷设。万年路站范围内沿万年南路、前进西路方向有110KV 高压线。



图1 工程示意图

万年路站为地下三层侧式车站,单柱双跨箱型框架结构,纵向柱距9m,采用明挖顺作法施工。车站主体基坑深约24~30m,标高约-19.10~-24.30m,车站有效站台宽度7.8~10.2m,总长186.6m,标准段宽32.4m,顶板覆土厚度约3m,标准段底板埋深约24.5m。标准段围护结构采用1000厚地连墙+内支撑的结构形式,地连墙进入基坑底15~23m;基坑竖向设置5道支撑,第1、3道支撑采用钢筋混凝土支撑,支撑水平间距约9m,其余均采

用钢支撑,支撑水平间距约3m。

2.2 工程地质条件

场地地貌单元属长江漫滩。根据岩土工程勘察报告,围护结构影响范围内的土层主要为填土、淤泥质粉质黏土、粉砂与粉土互层、粉质黏土、圆砾、泥岩等。该地层结构清晰地呈现出“上软下硬”的特征,②层淤泥质粉质粘土与④层圆砾之间形成了显著的力学强度差异界面。

表 1 围护结构影响范围内岩土层参数

层号	岩土层	重度 $\gamma/(\text{kN/m}^3)$	泊松比 μ	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	层厚 h/m
①-1	杂填土	19	0.39	5	15	1.12
①-2	素填土	16.58	0.39	11	13	1.46
②-1b2	粉质黏土	18.58	0.38	23.5	13.02	1.12
②-2b3-4	淤泥质粉质黏土	17.32	0.43	11.7	15.04	6.04
②-2d3	粉砂与粉土互层	18.12	0.38	4.9	23.14	1.58
②-3b2-3	粉质黏土	18.52	0.39	17.8	15.48	6.08
②-4b2	粉质黏土	19.14	0.38	29.9	15.28	7.18
④-1b1-2	粉质黏土	19.33	0.29	53.8	19.37	9.47
④-4e1-2	圆砾	18.85	0.29	4	(38)	5.45
K _{2c} -2n	强风化泥岩	21.9	0.28	-	-	4.65
K _{2c} -3n	中等风化泥岩	22.4	0.26	-	-	10.94

场地地下水位较高, 含有孔隙潜水、承压水、基岩裂隙水等多层地下水。孔隙潜水主要赋存于浅部填土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土、粉砂与粉土互层中。承压水赋存于④-4e1-2 层圆砾中。基岩裂隙水主要赋存于深部泥岩的裂隙中。其中孔隙潜水和承压水对工程影响较大, 地下水的渗流是影响槽壁稳定的重要因素。

3 施工挑战

综合上述地层特征, 长江漫滩上软下硬地层及低净空作业面对地下连续墙施工提出了以下挑战:

一是上部软土层槽壁稳定性控制难度大。淤泥质软土自稳性极差, 成槽开挖卸荷后土体极易向槽孔内蠕动, 导致槽壁坍塌, 严重时甚至引起周边地面沉降和管线损坏。

二是地下水控制复杂。承压水头高、透水性强, 泥浆易被稀释, 成槽过程中若泥浆液面控制不当, 极易引发槽壁坍塌或泥浆漏失。

三是上软下硬地层中成槽效率低。常规的液压抓斗无法破碎坚硬岩层, 须结合其他设备钻进, 在成槽过程中不同设备作业过程中施工效率低。

四是南北向 110KV 架空高压线影响大型机械施工, 以及钢筋笼制作、吊装和连接施工。

4 地下连续墙施工关键技术

4.1 成槽设备选择

在上软下硬地层中进行地下连续墙成槽施工, 设备选型是首要环节。常用的成槽设备包括液压抓斗成槽机、旋挖钻机、冲击钻机等。液压抓斗在软土层中抓土效率高、成槽速度快, 但对硬岩破碎能力不足; 旋挖钻机入岩能力强, 但成槽效率受限于钻孔直径和钻进工艺; 冲击钻机虽可破碎坚硬岩层, 但成槽速度慢、泥浆消耗大。经综合比较, 万年路车站地下连续墙成槽选择“液压抓斗+旋挖钻机”的联合作业。在上软下硬地层中采用液压抓斗成槽机与旋挖钻机组合, 上部软土层由液压抓斗直接抓土成槽,

下部硬岩层先用旋挖钻机碎岩成孔, 再用抓斗清槽修整, 实现优势互补。

4.2 槽壁预加固技术

针对上部软土层自稳性差的特点, 保证地下连续墙成槽质量不受淤泥质粉质粘土的影响, 需要在成槽前对槽壁进行预加固。万年路站工程中, 结合现场水文地质情况, 采用 $\phi 850@600$ 咬合长度 250mm 的三轴水泥土搅拌桩进行槽壁加固。在高压线影响范围内, 采用 600mm 等厚度 TRD 水泥土搅拌墙进行槽壁加固, 加固深度为 6.5~17m。通过槽壁预加固大幅提高了地下连续墙成槽施工的稳定性和安全。

4.3 泥浆护壁体系优化

泥浆在地下连续墙施工中起着保持槽壁稳定、悬浮钻渣、冷却钻头、形成泥皮等多重作用。通过泥浆自身重力对槽壁产生静水压力, 可抵抗土压力与地下水压力, 既可保持槽壁稳定, 又可防止地下水向槽内渗透。针对长江漫滩上软下硬地层的特殊性, 泥浆性能参数的优化是保障成槽质量的核心环节。

(1) 泥浆原材料选择。应选用高粘膨润土作为造浆材料, 其膨胀倍数高、造浆率高, 形成的泥浆具有较好的流变和造壁性能。

(2) 泥浆配比优化。结合已有工程经验^[1], 针对长江漫滩地区, 采用水: 膨润土: 重晶石: 重质纯碱: 中粘 CMC 的质量比为 100: 13.7: 3.2: 0.4: 0.1 的配比方案。其中, 纯碱可调节泥浆 pH 值并分散膨润土颗粒; CMC (羧甲基纤维素钠) 可提高泥浆黏度, 降低滤失量; 重晶石可增加泥浆比重, 增强对地下水压力的平衡能力。

(3) 泥浆性能指标控制。泥浆黏度过低时护壁效果不足, 易导致槽壁坍塌; 黏度过高则会降低钻进效率并增加清槽难度。成槽期间, 泥浆性能指标为: 粘性土比重 1.03、黏度 19~25s, 砂性土比重 1.05、黏度 32s, pH 值

均为8。

(4) 泥浆循环与净化。成槽过程中建立完善的泥浆循环系统,包括泥浆池、沉淀池、振动筛、旋流器等。超标的旧浆经振动筛和旋流器二级净化后回用。

(5) 泥浆液面控制。在成槽阶段,槽内泥浆液面高于地下水位500mm以上,且不低于导墙顶面300mm,防止地下水向槽内渗透导致泥浆稀释。

4.4 “抓钻抓”组合成槽工艺

针对上软下硬地层特点,本工程提出“抓钻抓”组合成槽工艺方案,即:上部软土层以液压抓斗抓土成槽为主;进入坚硬岩层后,选用旋挖钻对泥岩进行旋挖破碎,用旋挖钻先打导孔,采用三孔一抓辅助成槽,提高成槽效率。抓斗与钻机交替作业,协同完成整个槽段的成槽。

地下连续墙标准段幅宽为5~6m,厚度为1m,槽段采用“三抓法”开挖成槽,即每幅连续墙施工时,先抓两侧土体,后抓中心土体,如此反复开挖直至设计槽底标高为止。

(1) 地下连续墙在粉砂层中成槽

通过砂层时,由于地下水丰富,砂层渗透系数较大,

成槽时将造成大量地下水涌入,稀释槽段内护壁泥浆,危及槽壁安全。因此,在砂层中成槽时,导杆应垂直槽段,抓斗张开入槽抓土,缓慢下斗,快速提升,防止破坏槽壁和坍塌;同时向导槽内输入新鲜的泥浆,提高泥浆黏度和密度,使槽内泥浆保持正常液面,泥浆密度控制在1.25~1.3,并适当加入加重剂,防止槽壁坍塌。

(2) 地下连续墙在泥岩层中成槽

在成槽过程中,遇泥岩层时,由于泥岩质地坚硬,液压抓斗无法抓土,造成成槽进尺困难,选用旋挖钻对泥岩进行旋挖破碎。用旋挖钻先打导孔,采用三孔一抓辅助成槽。每幅槽段安排一台旋挖钻施工,旋挖钻入岩成孔时,严格钻机钻杆垂直度,随时检查钢丝绳,防止斜孔和掉杆。地层变化处采用匀速钻进的方法小心通过。

(3) 清槽与修整

硬岩层成槽完成后,液压抓斗再次下槽,清除槽底沉渣,并对槽壁进行修整,确保槽壁平顺、无缩颈。成槽后,采用特制刮刀铲除H型钢接头沉积的淤泥和浇筑混凝土,确保接头防渗质量。

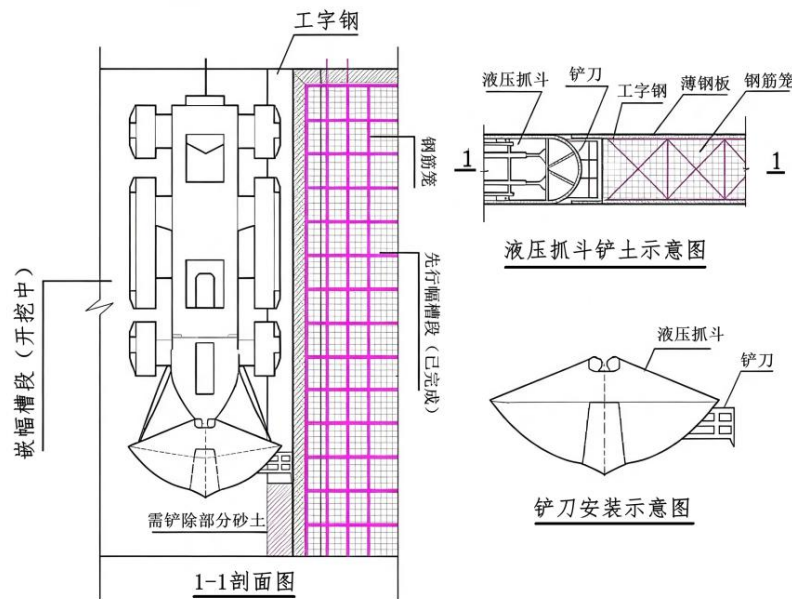


图2 特制刮刀及应用原理

在上软下硬地层中用“抓钻抓”组合成槽工艺进行地下连续墙成槽施工,具有槽壁稳定、垂直度好、综合钻进效率高等优点。

4.5 高压线影响范围内钢筋笼制作与吊装

钢筋笼连接以机械连接为主,焊接为辅方式进行。110kV 高压线范围10m内影响的地下连续墙主要有WQ6-WQ9, EQ6-EQ9,该8幅地下连续墙钢筋笼分4节

加工和吊装。WQ6-WQ9 中钢筋笼长为45.86m,分为12m+12m+12m+9.86m;EQ6-EQ9 中钢筋笼长为42.36m,分为12m+12m+12m+6.36m。临近高压线吊装由两台180t履带吊配合完成,施工时需对主吊180t吊车进行拆臂处理。拆臂后主吊臂长22m,工作半径12m,额定起重量[F]=74.5t。第一节钢筋笼起吊移动至槽段处;下放钢筋笼至合适位置,放置搁置横担;摘除吊钩,撤走搁置横担,

继续下放;重复上述下放操作至钢筋笼顶,放置搁置横担;起吊第二节钢筋笼至槽段处,切割第一节钢筋笼顶端吊环;调整钢筋笼位置,进行套筒连接和钢筋焊接;连接完成后,

重复上述步骤,最后下放至钢筋笼顶端,搁置横担穿过顶端吊环下放至地连墙标高位置,完成吊装。

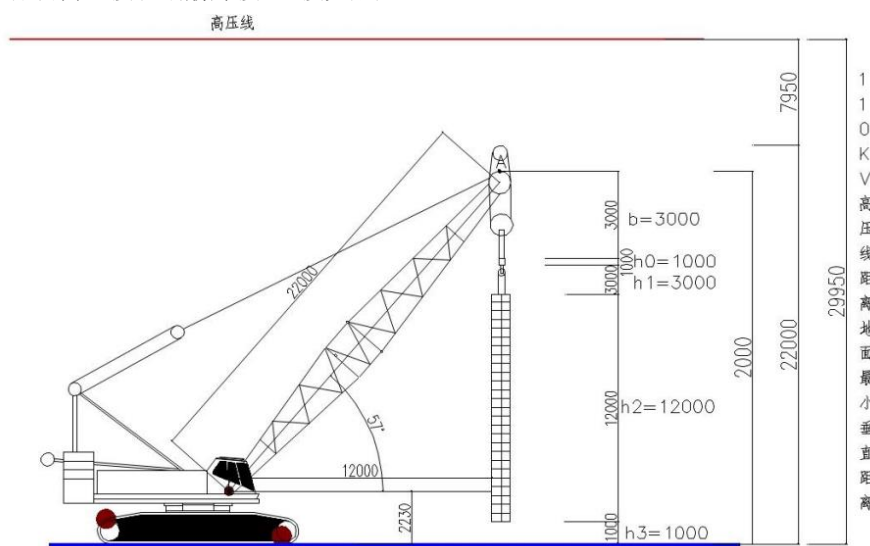


图3 临近高压线钢筋笼吊装示意图

4.6 水下混凝土浇筑

水下混凝土浇筑是地下连续墙施工的最后道工序,也是决定墙体最终质量的关键环节。浇筑时,混凝土配合比应满足水下浇筑要求,坍落度控制在 $180\sim 220\text{mm}$,初凝时间不应小于 6h 。标准槽段均采用两支导管灌注,导管底端距槽底距离控制为 400mm 。浇筑过程中保持连续供料,混凝土面上升速度不小于 3m/h ,避免因浇筑中断形成冷缝。

5 工程效果分析

万年路站地下连续墙施工过程中,取得了以下效果:

一是成槽质量优良。经超声波检测,所有槽段槽壁垂直度均满足设计要求,偏差不大于 $1/300$,槽壁平顺,未见明显缩颈或坍塌现象。

二是施工效率显著。采用“抓钻抓”组合工艺,单幅槽段平均成槽时间较单一施工工艺较短,保证了工程进度。

三是墙体质量可靠。地下连续墙混凝土浇筑连续、密实,经对万年路站18幅地连墙采用声波透射法进行检测,混凝土密实、无空洞、无夹泥,检测结果均为I类。

四是周边环境安全。施工过程中周边地表沉降和建筑物沉降均在允许范围内,基坑上方的 110kV 高压线及地下管线未受显著影响,实现了安全施工目标。

6 结论

本文以万年路车站深基坑工程为背景,研究了长江漫滩上软下硬地层及低净空环境下地下连续墙的施工技术,

得到以下主要结论:

(1) 长江漫滩上软下硬地层具有上部淤泥质软土自稳性差、中部粉细砂层透水性强、下部硬岩层成槽困难和复杂环境等复合特征,对地下连续墙施工提出了槽壁稳定控制、硬岩入岩效率提升、泥浆护壁性能优化、低净空施工等多方面的技术挑战。

(2) 采用“槽壁预加固+抓钻抓组合成槽+优化泥浆体系+钢筋笼分节加工吊装连接”的成套技术方案解决施工难题。考虑不同施工高度,使用三轴搅拌桩和TRD搅拌墙加固槽壁,提高上部软土层的自立能力;“液压抓斗抓土+旋挖钻碎岩+液压抓斗抓岩”的组合成槽工艺兼顾了软土层和硬岩层的双重需求,提高了成槽效率;优化后的泥浆配比和性能指标能够有效适应不同地层的护壁要求;高压线影响下钢筋笼分节制作吊装方案,解决了低净空条件下大型吊装作业的安全问题,保障了施工安全。

(3) 工程应用结果表明,本文提出的成套施工技术,有效解决了长江漫滩上软下硬地层及低净空环境下深基坑地下连续墙的施工难题,成槽质量、墙体质量、施工效率以及周边环境控制均满足要求,可为类似工程提供参考。

[参考文献]

- [1]何志超,徐永福.长江漫滩沉积软土地基处理施工灾变机制[J].工程地质学报,2023,31(6):2082-2092.
- [2]黄成建.富水地层非对称地下连续墙成槽稳定性分析[J].

市政技术,2023,41(9):96-101.

[3]陶云超.长江漫滩地层地下连续墙施工关键技术[J].黑龙江科技信息,2022,11(8):11-12.

[4]周伊凡.近海超厚流塑状淤泥层地下连续墙施工技术应用研究[J].工程技术研究,2025(8).

[5]黄华.软硬地层地下连续墙组合成槽关键技术与应用[J].Urbanism&Architecture/ChengshiJianzhu,2026,23(517).

[6]谢培宁.长江漫滩超深地下连续墙施工关键技术[J].土木工程与绿色建筑,2026,2(1):103-106.

[7]刘俊.软土地区超长地铁车站基坑地下连续墙施工关键

技术[J].路基工程,2026(3).

[8]朱汉伟,鲍国存,何泽锋,等.220kV 高压线下超低净空地连墙施工关键技术研究[J].广东土木与建筑,2026(2):76-83.

[9]柏严松.邻河富水架空高压线下超低净空地下连续墙施工技术研究[J].居业,2026(3):1-3.

作者简介:王龙飞(1984—),男,河南焦作人,高级工程师,吉林建筑工程学院土木工程专业毕业,现就职于中铁十五局集团地下工程有限公司,从事地铁车站,盾构施工,市域郊铁路施工建设管理工作。