

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.11.038

机场交通枢纽区域超深地下连续墙设计及 施工关键技术应用

臧小龙

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要:上海机场联络线浦东机场站位于浦东机场 T1 和 T2 航站楼之间,机场主干道迎宾大道正下方,项目地处机场交通枢纽核心区域,周边环境保护要求高,管线复杂,且施工期间机场不停航,对项目施工提出非常高的要求,施工难度极大。车站主体基坑围护结构采用超深地下连续墙形式。运用基坑支护设计模型模拟计算,参照相关技术规范,通过理论分析,并结合浦东机场站工程实践,研究地下连续墙设计和施工关键技术的应用,为同类工程的设计施工与应用提供借鉴。

关键词:地下连续墙;地墙;深基坑;套铰接头

中图分类号: TU476+.3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)11-0154-07

0 引言

深基坑支护是基坑施工的必要环节,其主要目的是提高基坑稳定性,为后续基坑开挖以及结构作业奠定基础,保证整个施工期间的安全总体稳定。上海市域铁路地下车站设置在客流量大和交通繁忙的地段,深基坑支护设计及施工必须重点考虑交通地段狭小、对邻近建筑物的影响等限制条件,同时要考虑如何有效缩短施工工期、保护邻近建筑物的安全,并尽可能减少噪声。在现代基坑支护工艺研究中,地下连续墙是一种应用效果良好、技术优势明显的基坑支护技术,具有坚实坚固、噪声低、负荷能力强等优势,更适合现代工程施工^[1]。本文主要结合地下连续墙在机场核心区深基坑施工中的应用,对超深地下连续墙的设计方法和施工关键技术进行应用研究分析。

1 工程概况

机场联络线浦东机场站位于机场主进场干道——迎宾大道正下方。车站为城际列车和市域列车共线停靠站,是地下二层单岛加越行站,主体长 557 m,宽 35 m,总建筑面积约 4.6 万 m²。其北侧为景观水池,南侧为在建旅客过夜用房,西侧为 P1 停

车库,东侧为磁浮及轨道交通 2 号线。车站范围内存在大量涉及机场运营的重要管线,车站上方 3 座人行连廊、空港宾馆上匝道、长途客运站需要拆除,周边环境非常复杂,同时项目施工期间要保证机场运营需求,机场不停航施工要求高。图 1 为浦东机场站平面示意图。

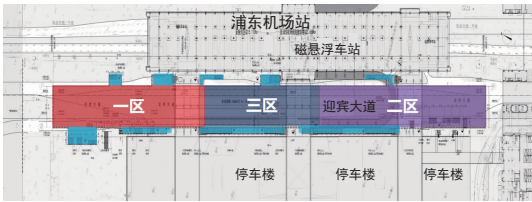


图 1 浦东机场站平面示意图

在机场核心区实施深基坑,施工难度极大。车站主体结构东侧距离交通中心最小距离为 12.2 m,与磁悬浮桩基础距离仅 26.5 m;西侧距离 P1 停车库最小距离为 6.5 m,对周边环境保护要求也极高。鉴于周边环境保护要求,浦东机场站车站主体划分为 3 个基坑,采用地下连续墙+内支撑的基坑支护体系。

2 工程地质及水文地质

2.1 工程地质概况

由于车站基坑长达 557 m,整个工程南北纵向地质差异较大。场地北端为正常沉积区,南端为古河道沉积区,在整个地墙施工范围内,根据地层形成年代、成因类型及工程性质特征,自上而下可划分为 6 个土层和若干亚层。各土层分别为①₁层填土层、②₃层灰

收稿日期: 2023-03-07

作者简介: 臧小龙(1976—),男,工学硕士,高级工程师,从事工程管理工作。

色黏质粉土、③层灰色淤泥质粉质黏土、③_T层灰色砂质粉土、④层灰色淤泥质黏土,底板及底以下土层为⑤₁层灰色黏土、⑤₃₋₁层灰色黏土、⑤₃₋₃层灰色粉质黏土夹粉土、⑦₂层粉砂、⑨层粉砂。

2.2 水文地质概况

根据地质勘探以及水文资料,该区域浅层潜水年平均高水位埋深为0.5 m,年平均低水位埋深为1.5 m,承压含水层主要有⑦₁层黏质粉土、⑦₂层粉砂、⑨₁层粉砂和⑨₂层砾砂层,⑦层的承压稳定水位平均埋深为6.68 m。

浦东机场站一区、三区地下连续墙墙趾位于⑦₂层粉砂,二区地墙墙趾位于⑤₃₋₁层粉质黏土。该工程地层受古河道切割影响,南北向地质条件起伏大。浅层②₃、③_T砂性土较厚,约7 m;④层淤泥质土厚且深,层底埋深19.5~22.5 m;⑥、⑧层缺失,承压水⑦、⑨层连通。图2为地质纵剖面图。

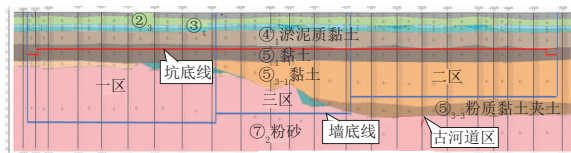


图2 地质纵剖面图

3 设计施工重点考虑因素

(1)紧邻磁悬浮、地铁2号线,保护要求高。

该工程车站主体结构东侧距离交通中心最小距离为12.2 m,西侧距离P1停车库最小距离为6.5 m,与磁悬浮桩基础距离仅为26.5 m(见图3),距离地铁2号线约44 m。该工程施工期间必须重点对磁悬浮及地铁2号线进行保护。

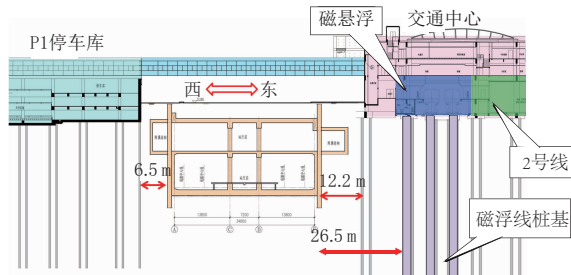


图3 浦东机场站与磁悬浮位置关系图(单位:m)

(2)基坑超长超深,设计、施工难度大。

车站规模为557m×36.2 m(内净),埋深23 m,与同埋深常规地铁车站相比,在长度、宽度、层高、柱网间距方面均偏大,且地质条件较差,基坑开挖范围内分布有较厚的④₁淤泥质黏土层、⑤₁灰色黏土层,软弱土层厚度大,基坑变形较大。表1为磁悬浮基础变形控制标准。

表1 磁悬浮基础变形控制标准

序号	控制标准	累计变形量/mm
1	基础总沉降量	2.0
2	前后相邻墩柱不均匀沉降量	1.0
3	同一承台左右侧墩柱不均匀沉降量	0.5
4	功能面横向(Y向)偏移量	2.0
5	相邻功能面横向(Y向)差异偏移量	1.0

该工程地下连续墙施工数量大、技术要求高、耗费时间长,根据现场场地移交情况以及场内交通组织需要,必须采取多点面施工组织等措施。

4 地墙结构设计

4.1 地墙结构参数设计

(1)地墙长度

由于车站范围内⑦层与⑨层连通,围护结构无法隔断承压水,为减小降承压水对磁浮的影响,根据各分区降水情况,通过增加地墙长度来增加绕流路径,从而减小降压对环境的影响。经对基坑开挖对磁浮桩基变形的影响进行分析,地墙长度取60~75 m,基坑开挖磁浮桩基产生的最大变形约1.1 mm。

(2)地墙厚度

项目基坑标准段开挖深度约23 m,端头井段开挖深度约25 m。根据本结构验算结果,并参考已建成车站的类似案例以及周边环境保护等级,项目基坑标准段采用1 000 mm厚地墙,端头井段采用1 200 mm厚地墙。

(3)支撑设计布置

基坑较普通车站宽,沿基坑深度共设置6道支撑,其中第一、三、五道为钢筋混凝土支撑(第三道混凝土支撑按留撑设计),钢支撑均采用φ800 mm×20 mm钢管撑^[2]。为控制基坑变形,降低对周边环境的影响,第四、第六道钢支撑采用伺服系统,伺服预加力按钢支撑标准值70%考虑。平面布置上,钢筋混凝土支撑水平间距为7~8.5 m,钢支撑水平间距为2~4 m。

(4)地基加固设计

车站基坑坑底位于⑤₁灰色黏土中,坑底以上淤泥质黏土层厚约13 m,从第三道混凝土支撑至坑底下5 m实施三轴搅拌桩裙边加固,混凝土支撑下2 m采用高压旋喷桩抽条加固,加固土体28 d无侧限抗压强度不小于1.0 MPa。

地下连续墙平面和剖面示意图4、图5。

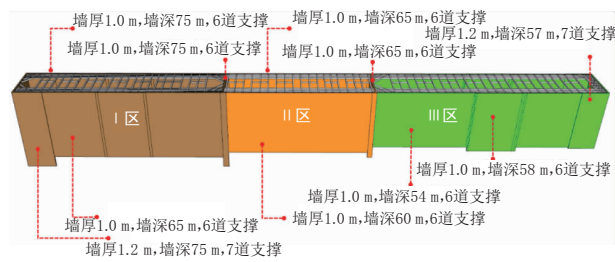


图4 地下连续墙平面示意图

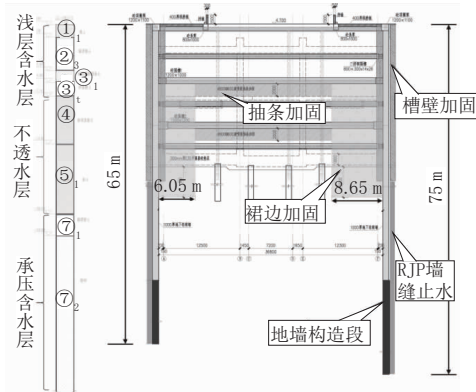


图5 地下连续墙剖面示意图

4.2 围护墙体结构验算

4.2.1 地墙结构内力及变形计算

(1)计算模型

采用弹性地基梁法进行地墙结构内力及变形计算。

(2)计算参数

土加权天然重度—— $\gamma=18\text{ kN/m}^3$ 。

钢支撑—— $\phi 800$ 钢管($t=20\text{ mm}$), $\phi 609$ 钢管($t=16\text{ mm}$)。

土弹簧——考虑“时空效应”的经固化后的土弹簧刚度。

地面超载—— 20 kN/m^2 (基坑施工阶段)。

侧向荷载——采用水土分算结果。

(3)计算结果

地下连续墙最大弯矩 $M_{\max}=1\,945\text{ kN}\cdot\text{m/m}$, 最大剪力 $Q_{\max}=1\,269\text{ kN/m}$, 最大侧向位移为 30.6 mm , 小于 $0.14\%H_0=31.8\text{ mm}$, 满足一级基坑侧移控制要求。图6为围护结构计算包络图。

(4)基坑稳定性计算

为确保基坑工程的安全,在充分考虑土层、支护墙、支撑体系三者的“时空效应”前提下,根据地基加固和其他土层的力学指标,按照相关规范进行了围护结构的抗倾覆、整体稳定及基底土体的抗隆起等验算,验算结果见表2。

从表2可以看出,基坑各项指标均能满足基坑开挖的稳定要求。

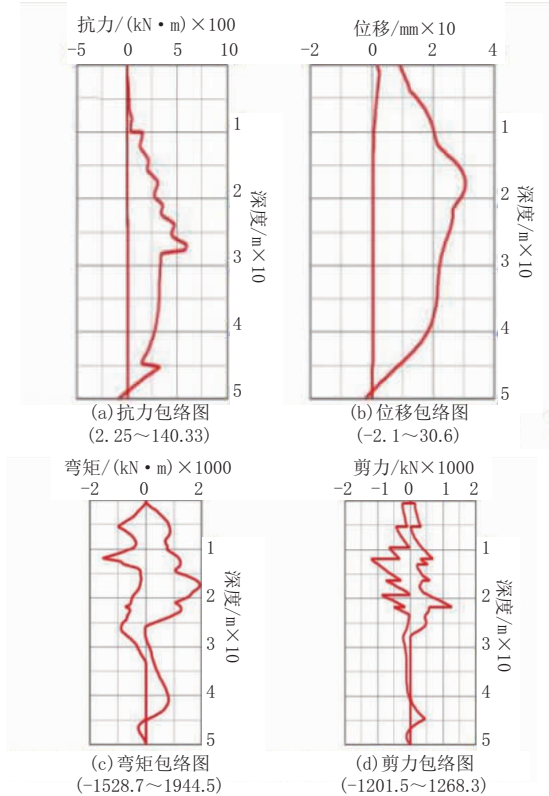


图6 围护结构计算包络图

表2 围护结构基坑稳定性验算

验算项目	基坑标准段
坑底抗隆起稳定性	$3.11 \geq 2.2$
抗倾覆稳定性	$2.6 \geq 1.2$
抗渗流稳定性	$3.93 \geq 2.0$
墙底抗隆起稳定性	$13.65 \geq 2.5$

4.2.2 对磁悬浮的影响分析

磁悬浮为运营线,其对沉降、变形极为敏感,车站主体基坑距离磁浮桩基最近距离约 26.5 m , 该范围内磁悬浮基础采用 $450\text{ mm} \times 450\text{ mm}$ 方桩或 $\phi 600\text{ mm}$ PHC 管桩,方桩桩长约 34 m ,管桩桩长约 60 m ,桩端均进入⑦₂粉砂层。

(1)计算模型

为分析浦东机场站基坑开挖对磁悬浮的影响,设计采用有限元分析软件 PLAXIS-3D 进行三维有限元整体建模分析。混凝土支撑采用梁单元模拟,钢支撑采用锚杆单元模拟,承台采用板单元来模拟,地下连续墙采用板单元来进行模拟,磁悬浮桩基则用嵌固桩单元模拟,可以有效模拟桩侧摩阻力和桩端承载力。图7为三维整体计算模型示意图。

(2)基坑计算结果

通过有限元数值模拟可以看出,当基坑开挖时,

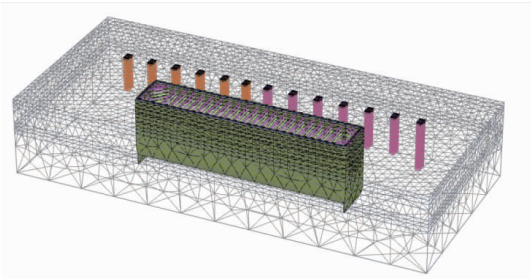


图 7 三维整体计算模型示意图

磁浮承台最大沉降值为 0.79 mm,同一承台不均匀沉降最大值为 0.26 mm,前后承台差异沉降量最大值为 0.23 mm,横向(Y 向)最大偏移值为 1.885 mm,前后承台差异偏移量最大值为 0.415 mm,各项指标均满足基坑开挖期间周边环境的保护要求。图 8 为基坑开挖引起的竖向变形云图,图 9 为基坑开挖引起的水平向变形云图,表 3 为基坑开挖引起的磁悬浮附加变形值。

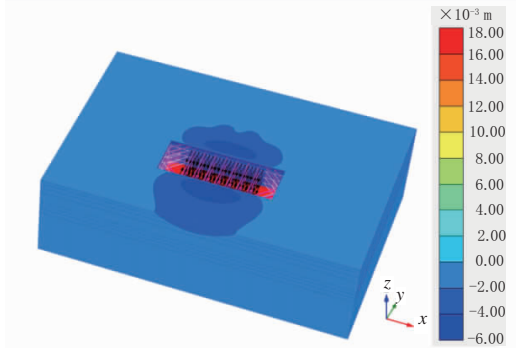


图 8 基坑开挖引起的竖向变形云图

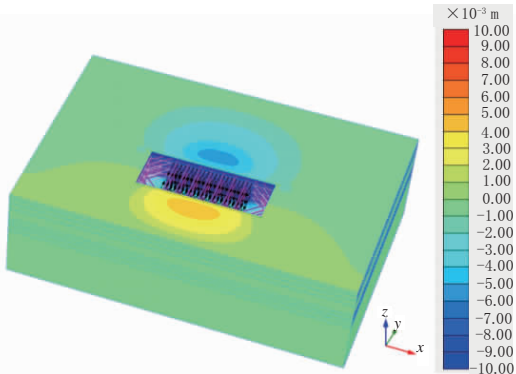


图 9 基坑开挖引起的水平向变形云图

表 3 基坑开挖引起的磁悬浮附加变形 单位:mm

承台 编号	沉降值				偏移值	
	最大值	最小值	同一承台 不均匀 沉降量	前后承台 差异沉 降量	横向 (Y 向)	前后承台差 异偏移量
1171	-0.18	-0.24	0.06	0.22	0.290	0.360
1172	-0.32	-0.46	0.14		0.650	
1175	-0.54	-0.79	0.26	0.09	1.470	0.415
1176	-0.63	-0.78	0.25		1.885	
1180	-0.35	-0.52	0.17	0.23	0.790	0.230
1181	-0.21	-0.29	0.08		—	

5 地墙主要施工要点分析

5.1 成槽施工

由于项目南北地质差异较大,地墙设计深度为 57~75 m,综合考虑地质情况、墙体深度、厚度和精度指标要求,项目施工主要采用液压抓斗式成槽机和双轮铣槽机两种类型机械,其中铣槽设备采用德国进口的双轮铣槽机。铣槽施工阶段,一期槽段采用三铣成槽,直线幅先两边后中间,转角幅先短边后长边,中间留土厚度不小于 600 mm;二期槽段采用纯铣成槽。成槽设备选型见表 4。

表 4 成槽设备选型

对比项目	液压抓斗式成槽机	进口双轮铣槽机
适用环境	地层适用性广,是目前地墙施工的主力设备。在 N<50 的黏性土、砂性土、砾卵石土等中,除大块漂卵石、基岩外,一般的覆盖层均可	对地层适应性强,淤泥、砂、砾石、卵石、中等硬度岩石均可铣削,配置特种铣刀可钻进强度达到 200 MPa 左右的坚硬岩石
掘进深度	受地层影响,遇硬层时受限	最深可至 150 m
掘进速度	快	快
成槽精度	较高(1/300)	高(可达 1/1 000)

(1)铣槽机掘进时,必须做到稳、准、轻放、慢提,确保成槽垂直度不大于 1/1 000。成槽过程中通过铣槽机配置的垂直度仪表以及液压纠偏系统控制液压纠偏板,对垂直度进行纠正^[3]。该工程浅层土为路基填土及杂填土,为确保墙体整体垂直度,一期槽段采用抓铣结合的方式,0~6 m 范围采用液压抓斗成槽机进行成槽施工。

(2)具体施工时,采用导向板定位+导向架工艺,保障施工精度。一期槽浇筑前,将导向板插入两侧端头位置,待一期墙浇筑完成一段时间后将导向板拔出;二期槽段施工前,设置导向架,确保对二期槽进行精确定位。同时,在一期墙钢筋笼两侧每隔 3 m 安装 400 mm 的 PVC 管,作为一期槽段钢筋笼限位装置,防止二期槽段铣槽施工过程中铣削到一期墙钢筋笼,损坏设备。图 10 为套铣接头成槽施工照片。

(3)根据施工期间的统计分析,一期槽段成槽时间通常为 20~40 h,二期槽段普遍为 15~30 h。二期槽在具体成槽时间上受一期槽混凝土龄期影响,一期墙养护的强度过高会导致二期槽切削时间过长,容易导致槽壁坍塌,对周边环境保护也会造成不利影响。该工程结合施工场地布置及施工工序安排,在两侧一期槽浇筑完成 7~10 d 后进行二期槽段施工。

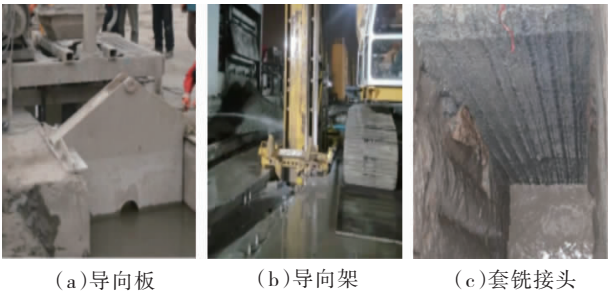


图 10 套铣接头成槽施工

5.2 泥浆系统

铣槽过程中,泥浆系统具有护壁、携碴、冷却机具和切土润滑等作用,泥浆的使用事关整个地墙的成败,因此泥浆的质量至关重要。根据项目土层地质情况及以往地下连续墙施工经验,结合试成槽施工,该工程新制泥浆采用表 5 中配合比。泥浆拌制 24 h 后充分水化方可使用。

表 5 新浆配合比参数表

制浆材料	材料用量 /kg
水	1 000.0
膨润土(钠土)	100.0
增黏剂 CMC	0.2
纯碱 Na_2CO_3	3.0
其他外加剂	—

(1)泥浆原材料主要为水和膨润土,添加纯碱(Na_2CO_3)使钙基膨润土转化为钠基膨润土,改善钙基膨润土的水化能力。配制泥浆采用的增黏剂均为 CMC(羧甲基纤维素钠),以提高泥浆黏度,提高泥皮形成性能。新拌制泥浆比重整体较为稳定,基本控制在 1.05 g/cm^3 左右,黏度为 $25\sim35\text{ s}$ (见图 11)。

(2)地下连续墙铣槽施工中,由于槽壁泥皮的形成,泥浆中膨润土、纯碱和 CMC 等成分会不断消耗,地下水、泥渣、混凝土等不断的侵入,也会使泥浆受到污染而变质。因此,要对循环使用的泥浆进行分离净化和再生处理,尽可能提高泥浆的重复使用率。泥浆使用过程中要不断对其性能指标进行检测,一般每个台班检测一次。泥浆性能指标应满足表 6 要求。图 12 为地下连续墙循环浆黏度及泥浆比重统计。

(3)泥浆多次使用后,混入了许多无法分离的细小泥沙颗粒,致使泥浆的比重、黏度、含砂率等不达标,该部分泥浆应作废浆处理。废浆全部先集中排入废浆池,废浆经泥浆固化系统固化后再进行外运。泥浆工厂总容量按单日成槽量的 2.5 倍考虑,可满足该工程铣槽施工的泥浆需求。

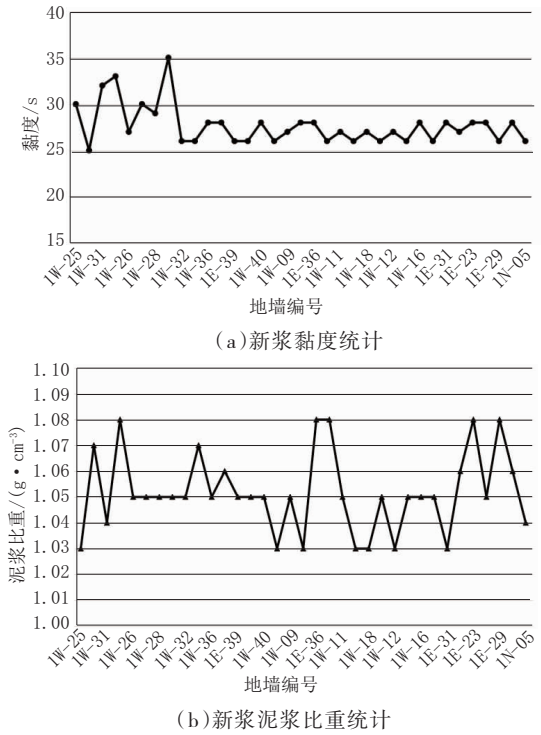


图 11 地下连续墙新浆黏度及泥浆比重统计

表 6 泥浆性能表

检测项目	阶段划分		
	新浆	循环浆	废浆
比重 $/(g \cdot cm^{-3})$	1.03 ~ 1.10	1.05 ~ 1.25	>1.3
黏度 /s	25 ~ 35	25 ~ 40	>60
pH 值	8~9	8~11	—
含砂率	—	上层 $<3\%$, 中层 $<5\%$, 底层 $<7\%$	$>10\%$
检测频率	静置 24 h 之后	1 次 /12 h	—

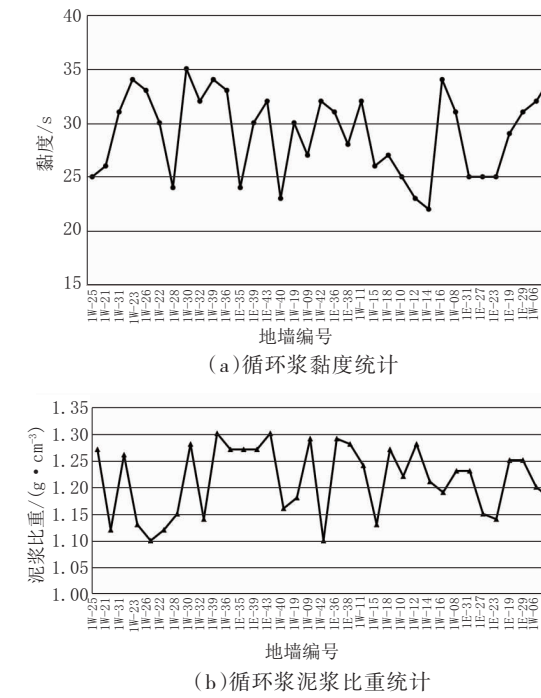


图 12 地下连续墙循环浆黏度及泥浆比重统计

(4)该工程铣槽涉及砂层厚,如果泥浆黏度过小,循环浆携带泥砂能力降低,会造成除砂机除砂不充分,循环浆各项数据难以满足要求,导致废浆率高。泥浆黏度过大,影响地下连续墙施工进度,后续会出现夹泥现象。经施工对比分析,控制循环浆黏度 28 s 左右,能较好地满足该工程地下连续墙施工需要,可将一期槽段废浆率控制在约 50%,二期槽段按需切割混凝土,总体废浆率约 90%。

5.3 刷壁清基

成槽结束后,为把沉积在槽底的沉渣清除,需要对槽底进行清槽,以提高地下连续墙的承载力和抗渗能力,提高成墙质量。沉渣过多时,会使钢筋笼插不到设计位置,降低地下连续墙的承载力,增大墙体的沉降。

(1)对于后施工槽段采用履带吊+特制钢丝刷子进行刷壁,刷壁次数不小于 20 次,每上升一次清除一次刷子上的淤泥,直到钢丝刷上不再有泥为止^[4]。刷壁结束后应立即进行清基和泥浆置换,套铣接头槽段内泥浆应进行 100%置换。

(2)套铣接头地墙槽段采用双轮铣槽机自带的反循环泥浆泵进行清基和换浆,新浆或调整后的循环浆从供浆管自槽段顶部补充,旧浆由铣槽机反循环泵从槽底吸出,存入循环泥浆池,确保清基后的沉渣厚度控制在 10 cm 以内。该工程砂层厚,应适当加长清基时间,保证清底换浆的彻底性。

(3)用泥浆分离系统对回收泥浆进行分离,分离后泥浆应经过检测,合格的泥浆继续循环使用,不合格的作废弃处理。

5.4 钢筋笼制作及吊装

(1)该工程地下连续墙钢筋笼重量达 100 t,最长约 75 m。受机场区域 60 m 限高管制,该工程地下连续墙钢筋笼采用同胎制作,分节吊装。钢筋笼分节吊装及对接质量控制是钢筋笼施工的重中之重。

(2)钢筋笼吊装对接采用机械连接,对接采用长短丝接头,对接完成后短丝外露不超过 3 丝,对接过程中使用千斤顶对下节钢筋笼水平高度进行微调,辅助对接(见图 13),节省对接时间,保证钢筋笼对接的质量、安全、效率。

(3)根据现场施工数据,一期槽钢筋笼对接吊装时长控制在 4 h,二期槽段钢筋笼吊装对接时长控制在 2.5 h 左右,能有效避免成槽后搁置时间过久引起的槽壁坍塌。

5.5 混凝土浇筑

(1)对于超深地连墙而言,混凝土浇筑质量的控



图 13 钢筋笼对接使用千斤顶进行辅助

制是围护结构能否满足要求的关键,为避免槽壁坍塌或沉渣过厚,在钢筋笼吊放完成后应及时灌注混凝土,间隔不宜超过 4 h。

(2)混凝土浇筑采用定制导管,导管直径 300 mm,导管壁厚不宜小于 4 mm。使用前进行水密性试验,试验压力不宜小于 1.5 MPa。

(3)一个槽段内同时使用两根导管灌注,导管的水平布置距离和距槽段两侧端部距离控制在 3 m 和 1.5 m 以内。初灌时导管下端距离槽底宜按 500 mm 考虑,导管下口不能有沉渣封口。初灌时必须采用球胆,一次性连续放料不得中断,初灌混凝土搅拌车必须满足 20 m³ 的要求。

(4)导管埋入混凝土深度应为 2~4 m,相邻两导管间混凝土高差应小于 0.5 m,槽段混凝土面应均匀上升且连续浇筑,浇筑上升速度不宜小于 3 m/h,同时不宜大于 5 m/h。

(5)根据现场实际施工统计数据,一期槽段混凝土浇筑时间约 8 h,二期槽段混凝土浇筑时间约 5 h,能有效避免槽底沉渣、槽壁坍塌等现象,减小对周边环境造成的影响。

(6)在地下连续墙混凝土达到设计强度后,开始压入水泥浆,注浆压力不宜超过 2 MPa,每根注浆管水泥用量不少于 2 t。适当控制压浆量,不仅能使槽底沉渣很好地固结,还能明显提高地墙的承载力,降低沉降量。

6 成墙效果

地下连续墙成槽过程中采用超声波检测,确保槽段的垂直度,施工过程中每幅槽段每 25 m/50 m/65 m(75 m)进行一次垂直度超声波检测。经检测,地下连续墙成槽垂直度均满足 1/1 000 的要求(见图 14)。

实施过程中,通过适时调整泥浆比重、加强各工序之间的搭接、严格控制单幅墙的施工时间等措施,确保地下连续墙的施工质量。从实际实施效果来看,地下连续墙浇筑混凝土充盈系数平均控制在 1.04 左右。地墙施工完成后,进行了墙身完整性检测,其结

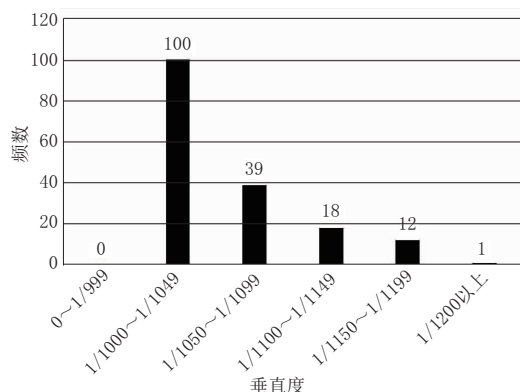


图 14 地下连续墙成槽垂直度统计(单位:幅)

果均符合设计要求。

基坑开挖后,地墙墙面无鼓包、渗水等异常情况(见图 15),同时基坑开挖过程中,做到了快挖快撑,控制好连续墙的变形,从而有效地控制了接缝渗漏水的情况,确保了基坑及周边建构筑物安全。



图 15 基坑开挖面墙体情况

7 结 语

本文结合上海机场联络线浦东机场站超深基坑施工的工程实践,重点研究了深基坑地下连续墙支护结构的设计和施工关键技术。采用地下连续墙+内支撑体系是目前地铁车站深基坑支护的主要设计形式,但位于复杂城市交通枢纽区域进行超深地下连续墙施工,既要确保基坑本体的稳定安全,又要保证基坑周边建筑物、市政基础设施变形控制在保护要求范围内,对地下连续墙的设计及施工提出了非常高的要求。项目在设计阶段进行了针对性的模型分析,提出设计构造措施,对变形进行模拟验算;在地下连续墙施工阶段,在成槽施工、泥浆配置、钢筋笼制作吊装、刷壁清基及混凝土浇筑等方面指出关键控制点,通过合理工序搭接,严控各项工序作业时间和施工质量,最终实现了保护周边环境的目的。

参考文献:

- [1] 赵俊友.地下连续墙在深基坑支护中的应用分析[J].中国勘察设计, 2022(9):94-96.
- [2] 殷一宏.邻近地铁站的深基坑工程设计与实践[J].地下空间与工程学报, 2018, 14(S1):263-269.
- [3] 李阳.特殊环境超深地下连续墙成槽关键施工技术研究[J].建筑安全, 2023, 38(3):13-17.
- [4] 聂建国.复杂环境下深基坑支护设计及施工关键技术应用[J].山西建筑, 2021, 47(24):56-58.
- [5] 上海隧道工程股份有限公司.复杂地层条件下超深地下连续墙施工技术研究[R].上海市:上海隧道工程股份有限公司, 2007.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com