

软流塑地层低净空条件下地下连续墙施工技术研究

游聚晖

中铁隧道局集团有限公司市政工程公司, 浙江 杭州 310000

[摘要]地下连续墙作为地铁车站基坑围护结构中常用的支护形式,在地下工程领域已得到广泛应用,但由于其施工工艺的特点,在复杂环境及复杂地质条件下,有着一定的局限性。文章以杭海城际铁路工程某车站低净空地下连续墙施工技术为例,通过设计技术措施、邻近建筑物评估监测、特种设备应用、低净空连续墙施工工艺等,有效解决净距离、低净空、软流塑地层条件下地下连续墙施工技术问题。通过工后监测数据分析及实践结果表明,方案切实可行及安全可靠,在同类型工程中,可提供一定借鉴作用。

[关键词]地铁车站;连续墙;特种设备;低净空施工技术

DOI: 10.33142/ec.v3i3.1558

中图分类号: TU753

文献标识码: A

Study on Construction Technology of Diaphragm Wall under the Condition of Low Clearance in Soft Flow Plastic Stratum

YOU Juhui

Municipal Engineering Company of China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

Abstract: As a common form of support in the foundation pit of subway station, diaphragm wall has been widely used in the field of underground engineering, but due to the characteristics of its construction technology, it has certain limitations in the complex environment and geological conditions. Taking the construction technology of low clearance diaphragm wall in a station of Hanghai intercity railway project as an example, the paper effectively solves the construction technology problems of diaphragm wall under the conditions of clear distance, low clearance and soft flow plastic stratum through design technical measures, evaluation and monitoring of adjacent buildings, application of special equipment and construction technology of low clearance diaphragm wall. Through the analysis of monitoring data after construction and the results of practice, it shows that the scheme is feasible, safe, reliable and can provide some reference in the same type of project.

Keywords: subway station; continuous wall; special equipment; low clearance construction technology

城市地铁作为解决城市交通问题的主要手段之一,线路主要穿越城市各重要交通干线和中心区域,施工场地周边环境及边界条件普遍复杂,同时地质情况与周边既有建(构)筑物对地下轨道交通工程施工影响较大。地下连续墙作为深基坑围护结构中常用的支护形式之一,因其对作业空间高要求的特点,如何在城市天桥、高架等低净空建(构)筑下安全、优质的完成施工,已成为地铁工程能否如期完工的制约因素。本文依托杭海城际铁路工程某地铁车站站,针对华东地区富水软弱地层中建筑物下方地下连续墙作业空间受限问题,通过设计技术措施、特种设备选型、低净空连续墙成槽、钢筋笼分节吊装连接等一系列措施,有效解决复杂地层中近距离、低净空地下连续墙施工技术难题。同时根据工后监测数据分析及实践结果表明,实施方案安全可靠,在同类型工程中,可提供一定借鉴作用。

1 工程概况

1.1 工程简介

杭海城际铁路工程某车站,为地下两层岛式站台车站,布置于海州西路与广顺路交叉路口,沿海州西路南北两侧东西向布置,车站下穿既有皮革城商业西天桥。车站外包总长 258.8 米,标准段外包总宽 21.3m、深 16.45~16.95m,端头井外包总宽 26m、深度 17.97~19.47m,采用明挖顺做法施工。

车站东段基坑(约 31.2m 长度范围)位于海宁皮革城西天桥下方,天桥下净空约 8.68m(天桥底部至地面),车站基坑边距天桥主墩桩基水平距离约为 7.7~8.0m,天桥下车站主体围护结构采用 800mm 厚工字钢接口型地下连续墙,连续墙深度为 36m,基坑开挖深度约 16.8m。受天桥下低净空影响,共有 12 幅(单侧 6 幅)地下连续墙需采用低净空施工工艺进行连续墙成槽及钢筋笼吊装施工。

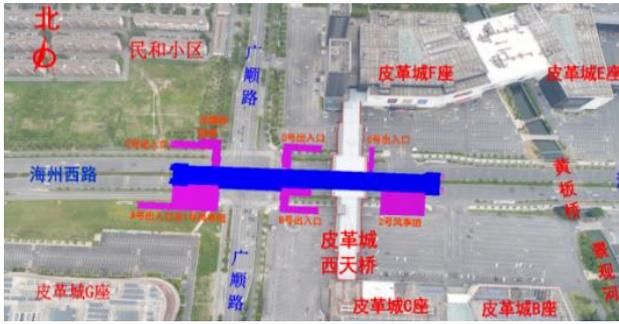


图1 车站平面示意图



图2 天桥与车站基坑关系图



图3 天桥与车站基坑平面示意图

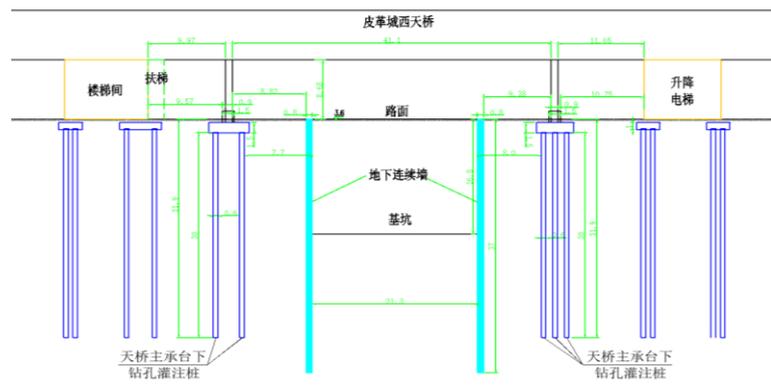


图4 天桥与车站基坑剖面示意图

1.2 工程地质及水文地质情况

车站基坑开挖及地下连续墙施工范围主要所处地层为：④2、⑥2 淤泥质黏土地层、⑤2 粉质黏土地层，其中④2 淤泥质黏土地层位于基坑开挖范围，分布土层较厚，直剪摩擦角约 10.83°，平均标贯值仅为 3，具有流塑状、高含水量、低渗透性、自稳能力差、易蠕变等特点，属于对地下工程不利的极软流塑地层。

表 1 土层主要物理力学性质指标汇总表

地层代号	定名	天然含水量	天然密度	塑性指数	液性指数	标贯实测击数	水平渗透系数
		%	g/cm ³			击	10 ⁻⁶ Cm/S
④2	淤泥质粉质黏土（流塑）	46	1.74	18.90	1.18	3	0.3
⑤2	粉质黏土（软塑）	31.73	1.89	13.10	0.79	8	6.1
⑥2	淤泥质粉质黏土（流塑）	43.40	1.76	18.8	1.03	4.8	6.2
⑦2	粉质黏土（可塑）	26.59	1.96	14.87	0.34	15	8.9
⑦2-2	粉质黏土（软塑）	31.21	1.91	14.65	0.71	10	6.6

本工程沿线场地地表水属上塘河水系，场地地貌单位为冲积湖平原。根据勘察资料，施工范围内地下水类型主要可分为孔隙潜水、孔隙微承压水，其中地下潜水位埋深为 0.20~2.50m，本工程主要受潜水、地表水影响，无承压水影响。

2 重难点分析及拟解决问题

(1) 车站主体基坑共有 12 幅（单侧 6 幅）地下连续墙位于天桥正下方，天桥底部距地面净高仅为 8.68m，天桥两侧承台立柱距离连续墙水平净距仅 7.7m~8.0m，而常规成槽设备作业高度为 15.65m（以宝峨 GB34 为例），常规钢筋笼吊装设备作业高度为 53m 以上（以 180t 履带吊为例），因此，必须通过特种设备选型、低净空施工技术，解决天桥下地下连续墙低净空成槽、吊装施工。

(2) 天桥主承台下部桩基采用钻孔灌注桩，桩径 600mm，桩长 30m，承台桩基距连续墙净距仅 7.7m，在近距离施工及复杂地层叠加影响下，施工扰动易造成周边地层隆沉和位移，从而导致天桥隆沉及倾斜风险。因此，及时进行天

桥安全状态评估、跟踪监测是确保天桥安全及稳定的重点工作。

(3) 根据低净空连续墙试成槽试验, 从成槽到混凝土灌注结束需要约 46h~60h (根据地层及现场情况变化), 是常规施工时间的两倍以上, 存在施工效率低、总体时间长的特点, 加之所处流塑状地层, 施工中槽壁极易坍塌。因此配置高性能泥浆确保槽壁稳定性, 是本工程低净空连续墙施工必须解决的问题。

(4) 连续墙钢筋笼连接质量, 是确保后期基坑安全的重要因素, 受天桥下低净空限制, 低净空连续墙钢筋笼需采用分段入槽、垂直拼装, 其施工难点在于分段钢筋笼中的大量钢筋连接接头, 常规焊接方式效率低且不满足设计要求, 采用机械连接, 对接精度要求极高, 连接质量直接影响吊装安全及后期基坑安全。

3 针对重难点采取的应对措施

3.1 设计针对性技术措施

针对天桥下低净空地下连续墙成槽及钢筋笼耗时较长, 以及连续墙所处的自稳能力差、流塑状不利地层影响(④2、⑥2 淤泥质黏土层), 为确保槽壁稳定性, 保证地下连续墙施工过程中天桥的安全, 在低净空地下连续墙槽壁两侧设计了高压旋喷桩槽壁加固, 槽壁加固采用 $\Phi 800@600$ 二重管高压旋喷桩, 加固深度为地面至基底以下 5m, 水泥掺量 25%。具体设计如图 5 所示。

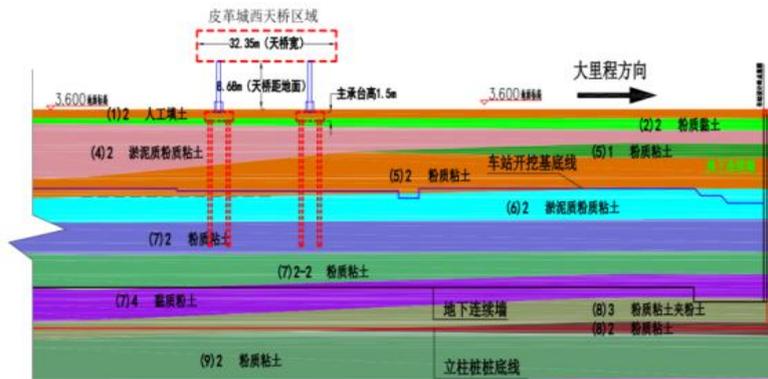


图 5 车站主体基坑地层分布示意图

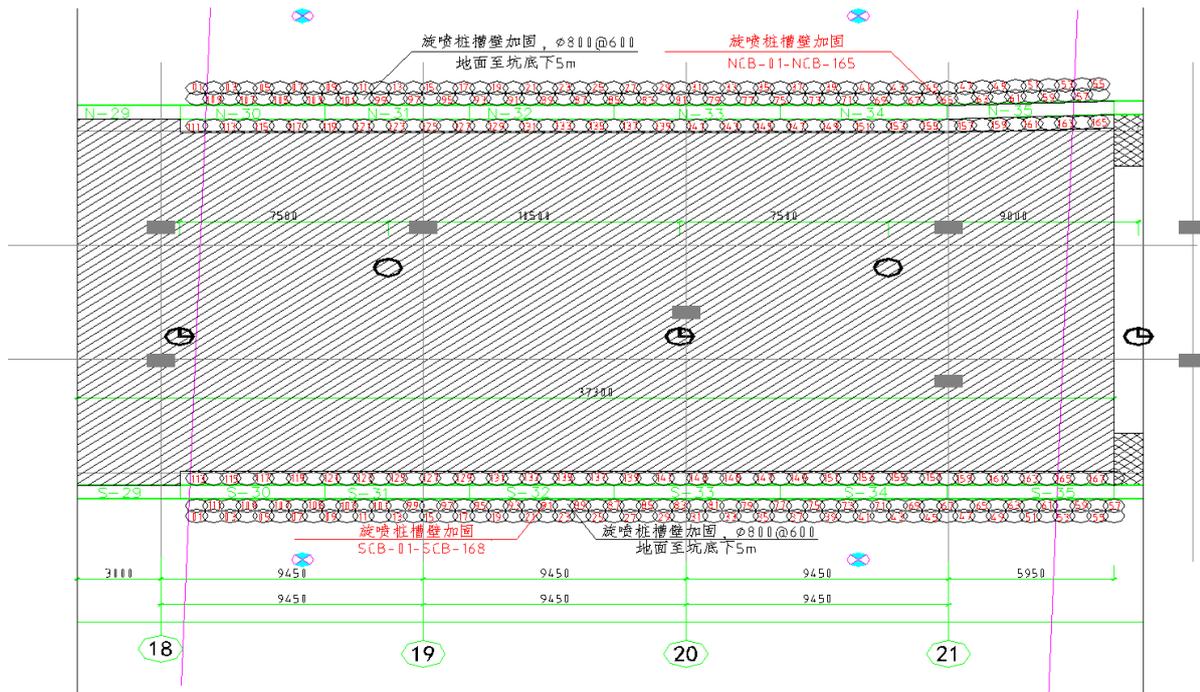


图 6 连续墙槽壁加固平面示意图

3.2 天桥现状安全评估

为确保低净空地下连续墙及后期基坑施工期间天桥处于安全可控状态，施工前委托第三方检测单位对天桥现状安全状态进行检测、评估，通过检测以及对天桥下多工况施工进行建模、分析，对施工期间可能产生的影响作出研判与评估，为指导后续施工提供有利的技术数据支撑，并根据评估结果确定了天桥沉降、位移监测的预警值和控制值。低净空连续墙施工阶段，对天桥安全状态分别采取了常规施工监测、自动化监测、过程评估检测等措施，并根据监测数据及时调整施工，确保了天桥的安全稳定。

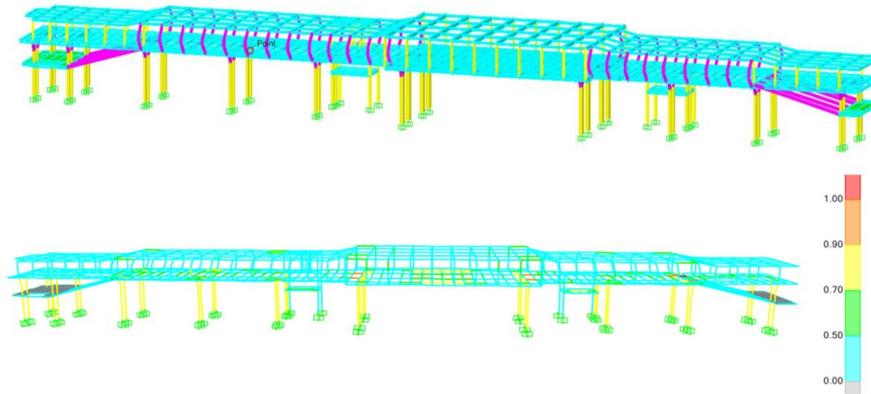


图7 天桥结构安全建模计算分析

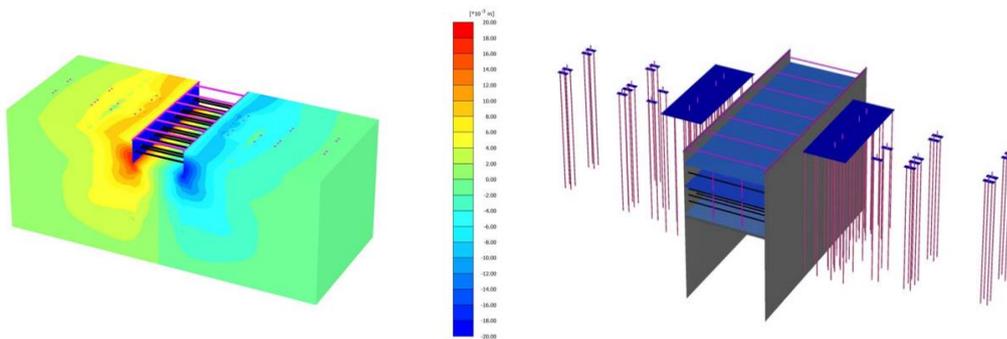


图8 车站各工序施工建模计算分析

3.3 低净空施工设备选型

常规地下连续墙成槽设备及钢筋笼吊装设备因设备高度限制，均不能满足天桥下地下连续墙施工要求，经市场调研及参照类似工程施工经验，本工程采用上海金泰 SG40L 型低净空连续墙成槽设备（净高 6.5m）进行成槽施工、采用 SQ3200ZB6 型折臂式起重机（随车吊）进行分节吊装、拼接、入槽施工。

表2 常规地下连续墙与低净空地下连续墙对比表

序号	作业工序	常规施工方案	低净空条件下施工方案	备注
1	成槽施工	宝峨 GB34 液压抓斗成槽机(作业高度 15.65m)	上海金泰低净空液压抓斗成槽机（作业高度：6.5m）	
2	钢筋笼制作	整体制作、机械连接	整体制作、分段拆分、机械连接	
3	吊装环境	正常、无障碍	天桥下 8.68m 净高	

(续表)

序号	作业工序	常规施工方案	低净空条件下施工方案	备注
4	钢筋笼吊装、入槽	180t、100t 履带吊双机抬吊、整体吊装，采用一次吊装入槽形式。	天桥外 50t 履带吊分节起吊，天桥下 80t 折臂起重机起吊入槽，采用分节起吊、槽口上方对接入槽。	
5	接头刷壁、封堵	工字钢接头专业刷壁器、配套铲泥板+接头箱+沙袋	工字钢接头专业刷壁器、配套铲泥板+沙袋	

低净空连续墙成槽设备：上海金泰 SG40L 型低净空连续墙液压抓斗设备，在常规成槽机的基础上改制而成的一种定制化产品，将桅杆高度降低的同时对常规成槽机的提升/下放系统和液压/传动系统进行重新匹配，该设备净高度不足 6.5m，成槽厚度 600mm-1200mm，单槽宽度为 2800mm，配套设备与常规地下连续墙成槽设备基本一致。



图 9 SG40L 型低净空成槽机

低净空钢筋笼吊装设备：SQ3200ZB6 型折臂式起重机水平额定起重质量为 80t（工作半径 3.9m），最大工作半径 15.44m，水平工作半径 4.94m 时，起重质量为 70t，提升高度为 7.1m，可满足天桥下低净空钢筋笼安全起重吊装要求。同时在特殊情况下折臂式起重机可同时实现运输、吊装一体作业。

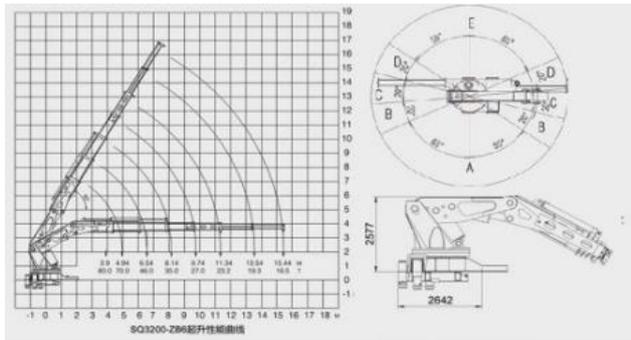


图 10 起重机提升性能曲线、作业方位图 图 11 折臂式起重机现场实景图

3.4 低净空连续墙泥浆施工

为提高泥浆的黏度、屈服值及泥皮的形成能力，维护槽壁的稳定，防止槽壁加固水泥（含碱性）或盐类污染泥浆，选用优质膨润土作为制备泥浆的材料，并加入一定比例的羧甲基纤维素（CMC）和分散剂碳酸钠（Na₂CO₃），起到增大泥浆黏度和增多膨润土颗粒表面吸附的负电荷的作用。经过试验分析，泥浆质量配合比为水：膨润土：CMC：纯碱 = 3：80：0.3：3。其中泥浆性能各项指标为：比重 1.04~1.06，黏度 20s~25s，胶体率>90%，含砂率不大于 3%，失水量<30ml/30min，泥皮厚度<1mm，pH 值 8~9。

3.5 低净空连续墙成槽施工

低净空地下连续墙成槽质量控制与常规地连墙基本一致，因低净空成槽设备进行了桅杆降低改造，抓斗土方不能直接装车，需临时放置地面，由挖机配合装车。此外，由于钢筋笼分节吊装、拼接入槽的特点，对成槽的垂直度及槽

壁的稳定性要求极其严格，施工过程需加强对槽段垂直及槽壁稳定性的检测，做到“勤检测、早纠偏”。以 36m 深度连续墙为例，每抓斗至少进行 3 次超声波过程检测。



图 12 天桥下低净空成槽施工

3.6 低净空连续墙钢筋笼制作及吊装

3.6.1 钢筋笼制作总体方案

为确保低净连续制作及安装精度，低净空连续墙钢筋笼首先必须在同一钢筋笼加工平台进行整体加工制作，同时根据分度长度，提前控制接头位置，整体制作完成后对钢筋笼进行分节拆分、编号，并分节吊装、拼接入槽。天桥下低净空钢筋笼总长 35.43m，根据天桥与地面净空、钢筋笼吊装设备性能，共分为 7 节进行吊装，每节钢筋笼分段长度约为 5m。



图 13 钢筋笼整体制作及分段拆分、编号

3.6.2 钢筋笼接驳器连接方法

在常规的钢筋机械连接施工中，钢筋接驳器两端钢筋滚扎丝头长度为 $1/2$ 接驳器长度+2P (2 圈丝头)，在旋转拧紧接驳器时，两端钢筋要同时相对移动 ($1/2$ 接驳器长度)，但在钢筋笼垂直吊装及分段连接状态下，基本不具备操作性。为确保分段钢筋笼连接质量及施工效率，本项目拟采用同一个直螺纹接头一半滚扎全丝头、一般滚扎标准丝头的工艺进行施工，即在滚扎丝头时，将一端钢筋丝头长度扩大为 1 个接驳器长度，另一端为 0.5 个接驳器长度。考虑低净空连续墙施工工效及基坑开挖安全，在进行钢筋笼机械连接时，计划于基坑开挖面以上采用相邻接头 50% 错开；开挖面以下范围采用一级钢筋接头同一断面施工。

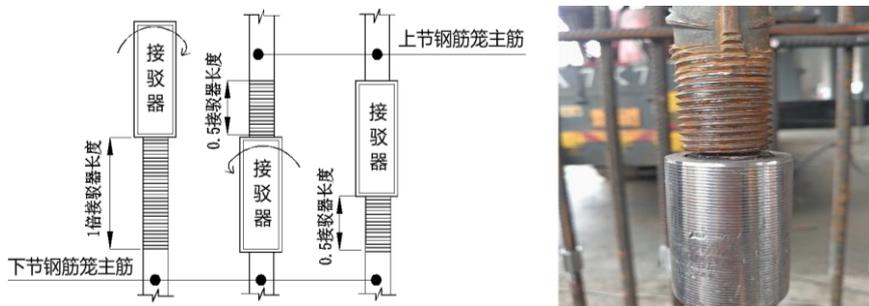


图 14 钢筋接驳器连接示意

3.6.3 低净空钢筋笼吊装施工

天桥下连续墙钢筋笼总长 35.43m，拟分 7 节进行吊装，拼接入槽。天桥外采用 50t 履带吊吊装至天桥边缘，通过与 80t 折臂式起重机进行吊点转换后，由水平状态转为竖直状态，槽段上依次对接拼装。



图 15 低净空分节吊装、拼接、入槽

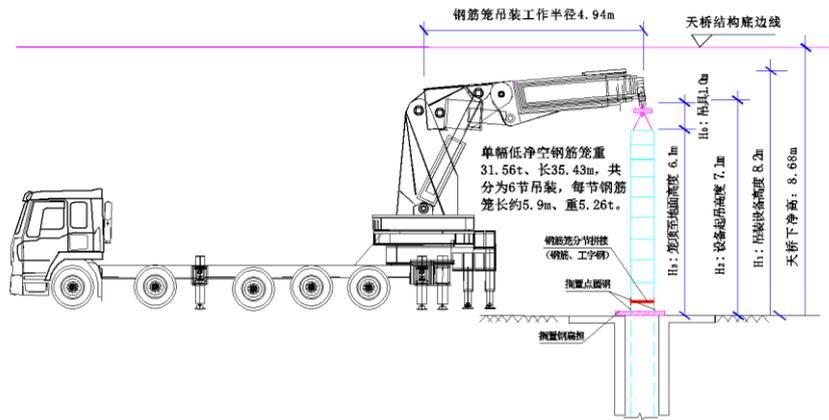


图 16 低净空钢筋笼下放示意图

吊点位置的确定：低净空分节钢筋笼吊装，采用天桥外水平吊装、天桥下转换为竖直状态的起重吊装方式，纵向向吊点均设置 2 吊，按钢筋笼宽度、长度受力简化为双悬臂简支梁进行计算，于钢筋笼纵、横向弯矩最小吊点位置布设吊点。

钢筋笼连接：现场连接时需注意分级分批拧紧套筒，同时由 4 人由对角线位置向中心成对连接，连接顺序如图 5 所示；且应分两级拧紧，第 2 级只将套筒连接上，起到一定的限位作用，第 2 级时拧紧到位。安装时用管钳拧紧，半丝处的外漏螺纹不宜超过 2P。针对连续墙工字钢接头，先采用对接焊接，焊接固定后采用 10mm 厚钢板进行帮焊连接，确保工字钢接头连接牢固。

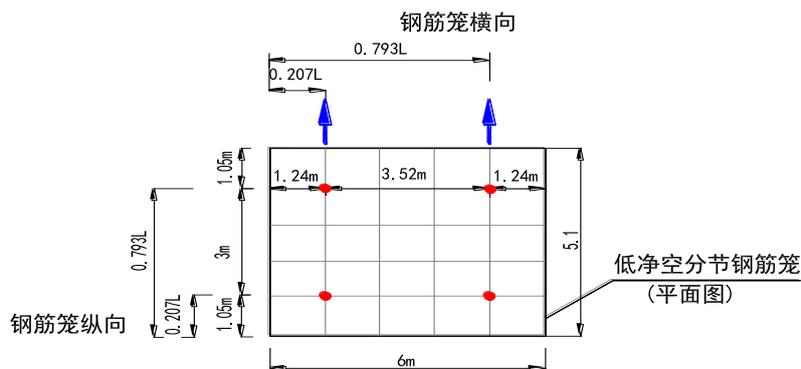


图 17 单节钢筋笼纵、横向吊点平面图

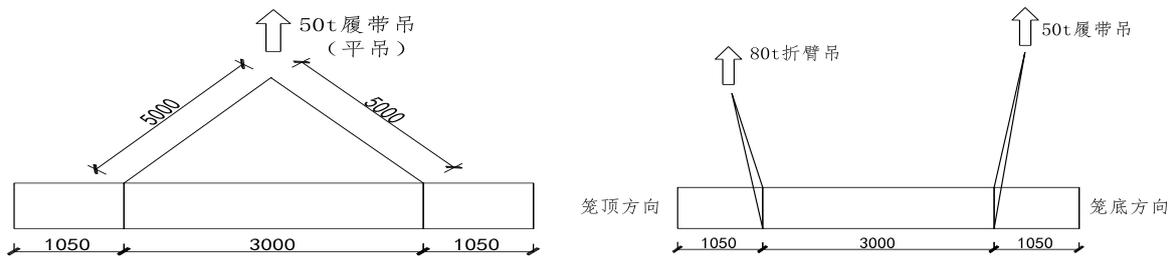


图 18 水平吊装、转竖直状态示意图



图 19 钢筋笼及工字钢接头连接图

4 低净空连续墙关键技术措施控制要点

(1) 与常规成槽机不同,低净空液压抓斗仅上方设置两块纠偏系统液压推板,增加了成槽垂直度纠偏难度,对操作手要求更高,更需要遵循“早纠偏、勤纠偏的原则”,采用成槽机自带垂直度纠偏系统及超声波检测仪相结合控制。

(2) 低净空地下连续墙,存在施工时间长、施工工效低,泥浆护壁效果对成墙质量至关重要,采用粘度、稠度高,膨胀及颗粒悬浮效果好的优质泥浆,是保证槽段稳定的关键要素。

(3) 当采用连续墙槽壁加固施工时,应严格控制加固桩位平面、垂直度及喷浆压力,确保加固桩体不侵入连续墙槽段内,如在低净空情况下处理侵限桩体,将带来严重安全质量风险。

(4) 低净空钢筋笼各节段之间的连接质量需重点确保,尤其是吊点对应位置处纵向桁架筋是确保吊装安全的关键,在采用接驳器连接的基础之上,需采用与主筋相同型号的钢筋进行帮焊。

(5) 在临近周边敏感建(构)筑物施工时,除连续墙施工过程监测外,应重视前期施工监测,如连续墙槽壁加固、临近建(构)筑物地下障碍物处理等前期施工时,应同样开展相应监测工作。

5 结语

本工程低净空地下连续墙自2018年4月20日开始实施,2018年5月23日顺利完工,在低净空作业受限、紧临敏感建筑物、极软流塑地层条件下,项目通过设计技术措施加强、低净空特种设备选型、低净空施工工艺实施、建筑物评估监测等一系列措施,确保工程顺利推进及施工期间天桥的整体稳定,在安全、质量、进度、经济、社会、环境等方面取得了良好的成效。为以后同类工程施工中,可提供一定借鉴作用。

[参考文献]

- [1] 杜峰. 近距离低净空下地下连续墙成槽技术研究和探讨[J]. 隧道建设, 2015(2): 160.
- [2] 李少利. 超深地下连续墙钢筋笼制作与吊装技术[J]. 隧道建设, 2015(6): 718.
- [3] 冯晓峰. 液压双轮铣槽机在地下连续墙施工中的应用[J]. 公路交通技术, 2012(5): 50.
- [4] 韩旭. 钢筋直螺纹套筒等强连接技术及施工控制[J]. 商品与量, 2016(2): 392-392.
- [5] 张晓东. 高层建筑结构地下连续墙施工技术研究[J]. 建筑技术, 2012(6): 182.
- [6] 陈怀伟. 杭州地区地下连续墙施工工艺研究[J]. 建筑与土木工程, 2008(15).

作者简介: 游聚晖(1991-), 现从事轨道交通及地下工程施工专业。