

轨道交通地下车站连续沉井法施工技术研究

李 强

(中铁隧道集团一处有限公司, 重庆 401123)

摘 要 本研究聚焦市域铁路地下车站国内首座连续沉井法施工技术, 以嘉兴市域铁路项目为实践案例, 系统分析了该技术在软土地层施工中的应用及其在施工周期缩短、安全性提升、成本节约、环境影响降低和防水性能增强等方面的显著优势。通过对比传统明挖法, 连续沉井法展现了其在提高施工效率、降低工程造价、减少环境干扰以及提升结构安全性能方面的创新价值, 为市域铁路地下车站的现代化施工提供了一种高效、环保、安全的替代方案, 对促进城市轨道交通建设技术的可持续发展具有实践意义。

关键词 市域铁路; 地下车站; 连续沉井法; 数字孪生监控技术; 一体化助沉系统技术

中图分类号: U231

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.030

0 引言

市域铁路作为城市公共交通的重要组成部分, 其建设和发展受到了广泛关注。地下车站作为市域铁路系统中的关键节点, 其施工技术的选择直接影响到工程的安全性、经济性以及对环境的影响。传统的明挖法施工技术虽然成熟, 但在深层软土地层中面临着诸多挑战, 如承压水突涌、基坑变形控制难度大等问题, 这些问题不仅增加了施工风险, 也提高了工程成本。因此, 探索更为安全、经济的施工技术成为行业发展的迫切需求。

1 工程概况

本工程嘉兴至枫南市域铁路土建施工 SG1 标段是沪苏嘉城际铁路的重要组成部分, 位于浙江省嘉兴市经开区、南湖区, 工程整体呈南北走向布置; 主要工程内容含: 嘉兴南站~曹庄站区间、曹庄站、曹庄站~嘉兴科技城站区间及嘉兴南站附属工程; 实施范围 DK0+515.74~DK6+548, 标段全长 6 032.26 m。本标段含一站两区间, 曹庄站为地下两层矩形框架结构岛式车站, 是国内第一座连续沉井法施工的地下车站, 两区间均为盾构区间, 盾构机直径 $\phi 8.8$ m, 于曹庄车站分别向两端始发。

1.1 车站总体施工方案

曹庄站全长 283.4 m, 标准段宽 25.5 m, 总建筑面积为 19 030 m^2 , 各沉井相邻纵向净距 2.5 m, 沉井采用跳仓施工, 最后贯通相邻沉井间空隙, 形成完整的车站主体。采用连续沉井法(7 节)施工, 是该工法在国内地下车站上的首次应用。沉井采用跳仓施工, 压入法下沉, 各沉井相邻纵向净距 2.5 m, 最后贯通相

邻沉井间空隙, 形成完整的车站主体。充分考虑软土地区狭长型地下工程的特点, 采用分段预制结构设计, 通过数字化管控指导分批压入下沉施工后装配连通形成整体车站。每节沉井分为 4 次制作、2 次下沉, 制作辅助盘扣支架及贝雷梁施工, 下沉采用液压抓斗排土及水力冲泥辅助下沉, 最后封底完成后实施沉井间连接段结构。具体见表 1。

1.2 沉井施工工艺

连续沉井法施工, 是一种软土富水地区地下车站的全新建设手段, 通过预先在地面预制结构, 再下沉至地下预定位置完成地下车站建造, 该施工工艺具有绿色低碳、造价节省、环境影响小、施工周期短等显著优势。

2 连续沉井施工地下车站优势

2.1 施工周期方面

传统明挖法施工地下车站, 工序多、流程复杂, 如包含基坑开挖、支护、结构施工等众多环节, 各环节相互制约, 易造成工期延误^[1]。而连续沉井施工法工序相对简洁, 各节沉井可依次流水作业, 能有效缩短工期。例如: 曹庄站采用连续沉井施工, 相比传统方法预计可节省一定时长, 使工程能更早投入使用, 减少建设周期对城市交通和发展的影响。

对于基坑而言, 一般每个车站只设置一到两个工作面, 总体施工顺序依次是围护结构、开挖支撑、结构回筑, 顺次进行流水作业。对于沉井而言, 一方面, 整个车站分为先序沉井、后序沉井两个批次, 分别同步进行, 车站越长, 因增设施工面节省的工期越多。另一方面, 沉井施工是通过预先在地面上修建永久结

表 1 沉井制作与下沉节段划分

序号	沉井	制作	砼方量	下沉
1	1#、7# 沉井	第一次制作 5 585 mm	957 m ³	第一次下沉 10 000 mm
2		第二次制作 7 625 mm	1 125 m ³	
3		第三次制作 6 125 mm	878 m ³	第二次下沉 15 085 mm
4		第四次制作 5 750 mm	784 m ³	
5	2#~6# 沉井	第一次制作 5 085 mm	1 476 m ³	第一次下沉 7 100 mm
6		第二次制作 5 225 mm	753 m ³	
7		第三次制作 5 225 mm	899 m ³	第二次下沉 15 085 mm
8		第四次制作 6 650 mm	1 105 m ³	

构，然后原位下沉形成地下结构，即结构制作和土方开挖是同步进行的。沉井终沉到位时，除后浇楼板孔洞外的全部土建工程（通常占比 80% 以上）已全部完成。

鉴于上述原因，连续沉井法后可有效压缩土建施工工期，以曹庄站车站主体为例，连续沉井法可比传统明挖法节约工期约 2.5 个月（16%）。

2.2 施工安全方面

连续沉井法施工的地下车站具有较大的结构刚度和较低的重心，这使得结构在承载和抗倾覆方面表现出色。由于沉井能够深入土层，因此对地基承载力的要求相对较低，几乎适用于各种土质条件，尤其在软土地区具有明显优势。

1. 基坑工程施工步骤特点：（1）先开挖、后结构；（2）先降水，再挖土。
2. 沉井工程施工步骤特点：（1）先结构、后开挖；（2）水下开挖。

对于沉井工程而言，由于永临结合的特点，承受水土荷载的支护结构是地面上预先完成现场预制的永久结构，结构整体性好、抗弯刚度大，墙身变形可以忽略不计^[2]。施工期间的地表沉降主要由于井壁对井周土体的向下剪切、拖拽引起，主要集中在沉井边，影响范围小于基坑。同时，土方开挖采用水下挖土形式，可以在源头上规避抽降承压水，既避免了基坑突涌的安全风险，也避免了抽降承压水引起的周边地表、建（构）筑物沉降。因此，连续沉井法形成的车站主体骨架整体稳定性好，整体安全性相对基坑工程有了显著提高，能够承受较大的荷载和变形。

2.3 施工造价方面

在软土富水地区的地下工程，普遍存在建材用量高，工程造价大的特点^[3]。其原因和地质条件密不可分。一方面，场地内深厚软土层具有高含水量、高压缩性、

高灵敏度、低承载力的特点，为保证基坑工程安全以及周边环境影响可控，需要有较强的抗侧弯刚度围护结构、密集设置的内支撑体系、大体量的地基加固等综合技术措施。另一方面，场地内的承压水层又普遍具有承压水头高、降水影响大的特点，为有效隔断承压水层，需要围护结构有较大的插入比，进一步加大了围护结构的工程费用。

2.4 施工环保减碳方面

连续沉井施工是在地面预制沉井结构，然后下沉至地下，相比明挖法大面积开挖基坑，其开挖范围小，对周边土体的扰动小，能减少因土方开挖引起的地面沉降、塌陷等问题，降低对周边建筑物、道路、地下管线等基础设施的影响^[4]。例如：在城市中心区域，周边建筑物密集、地下管线复杂，连续沉井施工可避免大规模开挖对这些设施造成破坏，保护城市环境和居民生活的正常秩序。同时，施工过程中产生的噪声、扬尘等污染也相对较少，有利于城市环境保护和文明施工。

采用连续沉井法施工，可以大幅减少围护结构中临时结构使用和废弃，包括：

1. 长约 1 倍开挖深度地下连续墙嵌入段。
2. 密集设置的钢支撑以及相应的钢立柱、立柱桩。
3. 坑内加固、槽壁加固等大量水泥系地基加固。

以曹庄站为例，大幅减少了 90% 的水泥土加固和 16% 钢筋混凝土。因此，连续沉井法可以显著降低钢材和水泥这两项碳排放量最高的建材用量，对实现碳达峰、碳中和的国家战略具有重要意义。

2.5 施工防水性能方面

连续沉井结构自身整体性好，在下沉过程中，通过合理的施工工艺和止水措施，如采用触变泥浆套减阻时，可同时起到一定的止水和防渗漏作用^[5]。与传统施工方法相比，其结构接缝少，减少了渗漏隐患点。

例如：在地下水位较高的地区，连续沉井结构能够更好地抵抗地下水压力，有效防止地下水渗入车站内部，保证车站结构的干燥和安全使用，提高了地下车站的防水可靠性，降低了后期运营中的维护成本和风险。

综上所述，采用连续沉井施工地下车站具有施工周期短、工程造价省、环境保护好和安全性能高等多方面优势。这些优势使得连续沉井法成为一种高效、环保、安全的地下车站施工方法。

3 连续沉井施工地下车站关键施工技术

3.1 数字孪生监控技术

通过在沉井结构内预埋应力计、水平仪等传感元件，以每五分钟一次的监测频率将监测数据上传至数字孪生系统平台，平台通过对监测数据的汇集分析，同步映射至孪生模型中，实现沉井姿态实时监控与预测，达到灵活、准确指导沉井高质量下沉与纠偏目的。相较于传统沉井施工，可避免人工监测频率较低、监测数据无法及时指导施工、下沉及纠偏施工与监测数据脱离等不利现象。

3.2 一体化助沉系统技术

助沉系统是采用一体化控制平台将钢牛腿、千斤顶、锚箱和泵站组合而成。矩形沉井制作完成后，在外侧均匀安装 15/20 套助沉系统，可为沉井提供最大 4.2 万千牛的下压力值，过程中采用加压法下沉并保留沉井内部土塞，通过对各套助沉系统加压力值同步或针对性调整实现灵活纠偏。相较于传统沉井施工，可达到周边环境影响小、下沉精度高、安全风险低等显著优势。

3.3 不排水开挖取土技术

保留土塞并在承压水影响段采用不排水开挖，根据下沉系数计算，在压入法下沉的基础上，沉井刃脚内始终保持一定高度土塞，并在沉井进入承压水影响段，向井内注水抵消承压水影响。相较于传统沉井施工，可避免沉井突沉、偏沉并对充分保护周边环境。

由于水下取土的不可视，通过智能化取土设备联动，在智慧化调度室控制取土设备按照设计规划的路径在井孔内根据既定点位进行定点定量吸泥取土，通过水下探头对井底泥面高程进行自动测量，可视化查看井底泥面状态；设计了“取土深度+取土时间”双控机制，避免井下取土不均匀。

4 连续沉井施工地下车站施工优化措施

4.1 垫层破除优化措施

根据《沉井与气压沉箱施工规范》计算：砂垫层刃脚厚度：1.5 m，隔墙砂垫层厚度：0.7 m，根据现

场施工情况，将沉井内部（含隔墙）底部垫层均破除，内部土方开挖约 2 m 深，初步形成锅底，数字化压沉系统加压约 600 t，达到上述工况后，7 号沉井仍无下沉迹象，1 号沉井大里程端头出现突沉，分析原因在于 1 号沉井地层不均匀。根据现场施工采取以下优化措施：第一，规范计算公式相较现场实操安全系数较大；第二，后续沉井砂垫层及混凝土垫层尺寸缩减；第三，沉井混凝土垫层与支架混凝土垫层不得相连；第四，4 台设备按照事先设定的顺序同时破除垫层，破除支架混凝土垫层时保留刃脚垫层（刃脚外 1.5 m）。

4.2 止沉措施优化

连续沉井要实现高精度下沉，须确保相邻井不能同时下沉，并对各个下沉阶段的下沉的四角高差控制进行了规定，第一次下沉目标深度 1 m 范围内： ≤ 50 mm；自第二次下沉开始至终沉深度以上 2 m： ≤ 300 mm；终沉深度 2 m 范围内： ≤ 40 mm；并在下沉 2 m 范围内进行工字钢止沉辅助装置。

5 结束语

在连续沉井下沉施工中，传统方法是采用挖掘机进行第一次下沉取土，第二次进行水下取土下沉时采取抓斗取土，监测采用人工监测，人工监测频率不能实时反映沉井下沉姿态，极易出现取土不均匀进而导致沉井下沉偏斜，甚至是突沉等问题。本工程沉井下沉阶段应用了沉井数字孪生系统，能够实时掌握沉井下沉的姿态，依据沉井数字孪生系统进行智能化决策分析，及时发布各项指令，控制沉井下沉关键参数，同时采用止沉措施，实现了沉井高精度下沉。

参考文献：

- [1] 郭得福,张景丽,房玉中,等.嘉兴市域铁路地下车站连续沉井法施工工艺实践与创新[J].隧道建设(中英文),2025,45(08):1577-1589.
- [2] 张中杰,吕培林,俞剑,等.连续沉井法建设轨道交通地下车站的关键技术研究[J].隧道建设(中英文),2024,44(03):554-563.
- [3] 韩宝明,习喆,孙亚洁,等.2022年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J].都市快轨交通,2023,36(01):1-8.
- [4] 同[2].
- [5] 罗云峰.软土地区压沉法沉井关键技术研究[J].工程质量,2021,39(12):9-14.