

Intelligent Dewatering and Pressurized Backfilling Integrated Construction Technology for Deep Excavations in Coastal Intertidal Zones

Congming Chen Huangbin Chen Chen Pan

China Construction Strait Construction & Development Co., Ltd., Fuzhou, Fujian, 351100, China

Abstract

Addressing the technical challenges faced in deep foundation pit projects within tidal zones of coastal cities in China—such as dynamic groundwater level fluctuations, the inefficiency of traditional dewatering methods, and the environmental subsidence risks caused by excessive dewatering—this paper proposes an integrated construction technology combining intelligent dewatering and intelligent pressurized recharge. The technology establishes a closed-loop control system featuring a sensor network as the sensing layer, an intelligent controller as the decision-making layer, and dewatering/recharge equipment as the execution layer, enabling automated and precise control of foundation pit dewatering. Additionally, it innovatively employs variable-frequency constant-pressure pressurized recharge technology to promptly and efficiently compensate for groundwater lost during dewatering, maintaining the balance of hydrostatic and earth pressures outside the pit.

Keywords

tidal zone deep foundation pit; intelligent control system; precise dewatering; pressurized backflow; settlement control; process principle

海滨潮汐区深基坑智能降水与加压回灌综合施工技术

陈聪明 陈煌斌 潘晨

中建海峡建设发展有限公司, 中国·福建福州 351100

摘要

针对我国沿海城市地铁建设中, 海滨潮汐区深基坑工程面临的地下水位动态波动、传统降水方法效率低下以及过度降水易引发周边环境沉降等技术难题, 本文提出了一种集智能降水与智能加压回灌于一体的综合施工技术。该技术通过构建一个以传感器网络为感知层、智能控制器为决策层、降水与回灌设备为执行层的闭环控制系统, 实现了基坑降水的自动化、精准化控制。同时, 创新性地采用变频恒压加压回灌技术, 对因降水流失的地下水进行即时、高效的补偿, 以维持坑外水土压力平衡。

关键词

潮汐区深基坑; 智能控制系统; 精准降水; 加压回灌; 沉降控制; 工艺原理

1 引言

随着我国城市化进程的加速推进, 城市人口激增与土地资源紧张的矛盾日益凸显。发展以地铁为代表的城市轨道交通体系, 已成为解决大城市交通拥堵、优化城市空间结构、实现可持续发展的核心战略之一。为解决上述困境, 本文通过在轨道交通车站的应用研究, 系统性地总结并提炼所形成的“海滨潮汐区基坑智能降水与加压回灌施工技术”, 从技术特点、工艺原理、操作要点到效益分析进行全方位阐述, 以期为国内外同类工程提供一套可复制、可推广的智能化解

决方案。

2 技术核心特点

2.1 智能降水系统: 从“人控”到“智控”的跨越

高度自动化: 通过部署于基坑内外的液位传感器网络, 实时采集水位数据, 并由中央智能控制器基于预设算法与阈值, 自动发出降水井水泵的启停指令, 实现了全过程无人值守, 极大解放了劳动力。

控制精准化: 系统能够智能感知并响应潮汐波动, 将基坑内水位动态维持在设计安全范围内, 避免了“时干时涝”的现象, 为基坑开挖与结构施工提供了持续、稳定的干作业环境。

运行安全化: 系统内置实时监测与多级报警功能(如水位超限、设备故障、电源异常等), 能够第一时间发现潜

【作者简介】陈聪明(1990-), 男, 中国福建福州人, 本科, 高级工程师, 从事市政工程施工技术管理研究。

在风险并预警，变被动处理为主动防控，显著提升了施工安全等级。

2.2 智能加压回灌系统 从“事后补救”到“事前防控”的革新

理念前瞻性：彻底颠覆了传统工程中待建筑物沉降发生后再进行注浆加固的被动模式。本技术通过实时监测坑外水位，在沉降趋势萌发之初即主动进行地下水回灌，是一种基于“动态平衡”理论的主动式环境保护技术。

技术高效性：核心技术在于采用变频恒压水泵作为回灌动力源。该设备能提供稳定且可调的压力，有效克服上层覆压和地层渗透阻力，将水强制注入至目标含水层，确保了深层回灌的效果，系统回灌率稳定在 80% 以上。

3 工艺原理体系

3.1 智能降水子系统原理

该子系统基于实时反馈控制理论运行。1、感知层：由布设于基坑内各代表性位置的液位传感器构成，持续采集坑内实际水位数据 (H_{actual})；2、决策层：数据通过有线或无线传输至智能控制器（通常为 PLC 或专用工业控制器）。控制器内部预存有根据开挖阶段动态调整的“安全水位设定值” (H_{set})。控制算法（如 PID 控制）实时计算偏差 ($e = H_{actual} - H_{set}$)；3、执行层：当 $e > 0$ （即实际水位高于安全水位）时，控制器输出指令，启动相应数量的降水井潜水泵进行抽水；当 $e \leq 0$ 时，则停止抽水。通过此闭环反馈，实现基坑内水位的精准维持^[4]。

3.2 智能加压回灌子系统原理

该子系统基于动态平衡与压力补偿机制。1、水源与暂存：将基坑内所有降水井抽排出的地下水，通过管网统一汇集至一个大型集水箱。箱内设过滤装置，确保回灌水源的洁净，防止堵塞回灌井；2、感知与触发：在基坑外侧、紧邻保护目标的回灌井内设置高精度液位传感器，实时监测坑外代表性点的地下水位 ($H_{outside}$)；3、加压与注入：当 $H_{outside}$ 低于为保护环境而设定的“维持水位” ($H_{maintain}$) 时，控制器发出指令，启动变频恒压水泵。该水泵从集水箱取水，并将其加压至预设压力（如 0.2~0.3MPa），通过专用注水管网将水强制注入回灌井，进而扩散至周围土层；4、闭环与稳定：回灌行为抬升了 $H_{outside}$ ，当其恢复至 $H_{maintain}$ 时，系统自动停止回灌。通过这种“监测-补偿”的闭环，使基坑外围的地下水位始终维持在极小波动范围内，从而从根源上遏制了因水土流失导致的周边土体沉降。

4 施工工艺流程与操作要点

4.1 工艺流程

施工总体工艺流程遵循：施工准备→方案设计与计算→井位测放→降水井/回灌井成井施工（钻孔、清孔、下管、填砾、封口）→洗井→智能系统安装与调试→加压回灌系统安装→系统联动试运行→正式运行与监控。

4.2 关键操作要点

4.2.1 方案设计与涌水量计算

此为工法实施的基础。必须依据详勘资料，准确获取地层渗透系数 (k)、含水层厚度 (M)、基坑等效半径 (r_0) 及设计降深 (S) 等参数。基坑涌水量根据《建筑基坑工程技术规范》涌水量公式 E.0.3 计算：

$$Q = 2\pi k \frac{Ms_d}{\ln\left(1 + \frac{R}{r_0}\right)} \quad (E.0.3)$$

根据《建筑基坑工程技术规范》群井按照大井进行简化，基坑降水总涌水量可按式计算（图 E.0.3）：

式中： M ——承压水含水层的厚度

根据基坑总涌水量以及管井单井出水能力，计算坑内降水井数量。管井数量按 7.3.10 式计算，单井出水能力按 7.3.11 式计算。

$$q = 1.1 \frac{Q}{n} \quad (7.3.10)$$

$$q_0 = 120\pi s_0 \sqrt[3]{k} \quad (7.3.11)$$

回灌井的布设则应遵循“重点防护、均匀补偿”的原则，在靠近保护建筑物一侧形成一道“水力屏障”。对于长度大于 50 米的建筑物及构筑物群适当增加井位以保障监测及回灌需要。

4.2.2 精细化成井施工

井位放样：根据基坑降水回灌施工方案中的井点平面布置进行坑内降水井点位及坑外回灌井点位放样。

护筒埋设：护筒需埋进原状土层中，管口高出地面 10 ~ 30cm，护筒周边采用粘性土进行封堵。

钻机安装：钻机底座应保持稳固水平，大钩需对准孔中心，大钩、转盘、与孔中心应成三点一线。

钻进成孔：降水井孔径 450mm，回灌井孔径 350mm。井深按设计要求控制，采用钻机成孔，井孔应保证垂直度符合要求。考虑到沉渣的因素，每口井的成井深度比设计加深 0.5m。开孔时应轻压慢转，以保证开孔的垂直度。钻进时一般采用自然造浆钻进，当遇砂层较厚时，采用人工制备泥浆护壁，泥浆密度控制在 1.10 ~ 1.15。当提升钻具和临时停钻时，孔内应保持泥浆充满，防止孔壁坍塌。

清孔换浆：钻进至设计标高后，在提钻前将钻杆提至离孔底 20 ~ 30cm 位置，并开动泥浆泵进行冲孔，清除孔内杂物，将孔内的泥浆密度逐步调至 1.10 左右，孔底沉渣应小于 20cm，返出的泥浆内不含泥砂为止。

下井管：降水井采用直径 219mm ($t=1.8mm$) 的钢管，钢管上采用直径 15mm@50mm 的滤孔。管井的连接采用对接焊接，并在接头接不少于 3 根 HRB400E Φ 14 的加强筋，加强筋长度满足单面焊 10d 的要求。

回填砾石：采用动水投砾。先将钻杆提至滤水管下面，管上口加闷头进行密封，将泥浆泵送至钻杆内，泥浆由井管

和孔壁之间上返,逐渐调小泵量,等泵量稳定后开始投放滤料。井管滤水段范围内需进行滤料填放,投砾过程中,应边投边测高度,直至下入预定位置为止^[2]。

填泥封孔:地表以下回填 2m 厚粘土。为防止回填过程产生“架桥”现象,回填前将块状的粘性土碾碎(粒径小于 2cm 为宜),沿着井管周围慢速回填。

4.2.3 高效洗井

成井后采用活塞或空压机(12m³)洗井,通过使用活塞在管内上下运动,或使用高压水泵向井内注入高压清水,冲击孔壁的泥皮及泥浆。洗井时,从井内从上而下分段进行,直至水清砂净。下完井管、填好滤料后 4 小时内需进行洗井,不允许搁置时间过长或完成钻探后集中洗井。洗井过程应一气呵成,以免时间过长导致护壁泥皮逐渐老化,影响渗水效果。若超出 4 小时,应采用化学洗井,保证洗井效果。

4.2.4 智能系统集成与联动调试

此为技术的“神经中枢”。

传感器部署:在每个降水井和回灌井中,按设计深度布设“高、中、低”三个水位探头,分别对应满水位、启停泵水位和低水位报警。

控制器接线:严格按照接线图将探头线、水泵动力电缆接入智能控制器,并做好防水绝缘处理。

加压回灌系统安装:采用变频恒压系统作为主线路,手动水泵调节系统作为副线。变频恒压系统是在保持恒压(压力以具体基底埋深进行控制,本工程基底深度将近 20m,故以 0.2~0.3MPa 控制)的情况下,通过压力传感器信号反馈,变频器自动进行调节达到系统自动运行。采用 2 寸 PVC 管分节连接作为系统主线路的注水总管及支管,同时在支管上增设一个止水阀和水表,以控制水流量。

系统连接:水泵电缆线与智能控制器连接完成后,将与下水池开关连接的水泵下放至降水井内,并铺设排水管道,排水管道沿基坑内支撑布置,将降水井内抽出的水通过排水管道抽至地面集水箱。与上水池开关连接的水泵通过进水管(2 寸、3 寸 PVC 管)连接至集水箱。地面设置集水箱,集水箱内设置滤水装置与进水管连接,确保回灌注水通畅。同时集水箱内设置浮球开关,单独连接一个抽水泵,当集水箱内水满时,通过抽水泵将多余的水排至市政管网或用于其他用途。

联动试运行:闭合系统总电源,进行模拟水位变化的联动测试。验证当降水井水位达到中水位时水泵能否自动启动,回灌井水位低于设定值时加压回灌系统能否准确响应,以及集水箱的液位控制功能是否正常^[3]。

5 施工保证措施

5.1 安全措施

所有施工人员在进入现场前均须接受安全生产及消防安全教育培训,未通过考核者不得上岗。此外,应根据施工进度及各工序特点,开展有针对性的安全知识教育及规章制度宣贯。

施工人员进入作业区域必须规范佩戴安全帽,并确保帽带系牢。

施工现场及材料加工区应按规定配置完好的消防器材。对于易燃易爆物品,应划定专门区域集中存放,实施可靠的防火措施,设置醒目的防火标识,并由专职安全管理人员监督落实。灭火器应安排专人负责维护保养,定期更换药剂,确保其处于正常使用状态。

现场须敷设消防供水主管道,配备消防栓及消防水带,并确保各类设施完好有效。严禁在施工区域使用明火取暖,禁止在作业区及材料加工场地吸烟。

施工现场所有电气线路的敷设与拆除,必须由具备相应资质的电工负责。电气设备应可靠接地,采用接零保护,并安装漏电保护装置。

临时用电线路的安装、检修与拆除作业,必须由持有特种作业操作证的电工执行。

现场供电系统须采用“三相五线制”,所有机电设备应严格遵循“一机一闸一漏一箱”的原则配置保护装置。严禁使用无绝缘防护的导线,电力线路的架设应符合相关规范要求。

夜间施工应保证充足的照明,并采取有效措施控制噪声。所有机械设备的传动部位必须加装防护罩,各类安全防护装置应齐全有效。

5.2 环保措施

泥浆处理:钻孔产生的废浆经沉淀池充分沉淀后,上清液达标排放,沉渣外运至指定场所。

噪声控制:高噪声设备(如空压机)尽可能避开夜间施工,或采取隔音罩等降噪措施。

扬尘控制:对现场道路进行硬化并定期洒水保洁,运输车辆覆盖篷布。

水资源循环:实现基坑抽排水的内部循环利用(用于回灌、降尘),节约水资源。

6 结语

本文详细论述的“海滨潮汐区基坑智能降水与加压回灌施工技术”,通过将现代自动化控制技术与传统岩土工程工艺深度融合,成功解决了潮汐动水环境下深基坑降水与环境保护的突出矛盾。工程实践证明,该技术具备:1、控制的精准性与自动化,显著提升了施工效率与安全性;2、环境保护的主动性与前瞻性,有效控制了周边地基沉降;3、资源利用的循环性与经济性,实现了降本增效与绿色施工。

参考文献

- [1] 张旷成,李亮.沿海潮汐地区深基坑降水引起地面沉降的控制研究[J].岩土力学,2015,36(S1):507-512.
- [2] 王浩,叶帅华.基于模糊PID控制的基坑智能降水系统研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(4):1215-1222.
- [3] 郑刚,邓楚涵,戴轩.深基坑工程降水引起的地面沉降研究进展[J].岩土工程学报,2018,40(1):1-15.