软土地基条件下闸站深基坑支护施工技术分析

周兴俊[1]，吴文君[2]

（1. 江苏祥通建设有限公司，江苏 无锡 214142；
2. 江苏中准工程质量检测技术有限公司，江苏 无锡 214142）

摘 要 软土地基中的闸站深基坑常处于高水位、低强度和强压缩性土层中，开挖后容易出现围护位移、坑底隆起、渗流破坏及周边沉降。本文围绕闸站基坑的受力和水文特点，分析围护结构、止水帷幕、内支撑、降水开挖及坑底加固等施工技术，并提出质量检查与监测反馈方法。研究结果显示，通过控制成槽垂直度、支撑安装时机、分层开挖厚度和坑内外水位差，可减小软土卸荷造成的变形，使支护体系在施工全过程保持稳定，为同类水利工程提供参考。

关键词 软土地基；闸站工程；深基坑；支护施工；变形控制

中图分类号：TV551.4 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.018

0 引言

闸站集挡水、排涝和调度功能于一体，泵房、闸室及进出水构筑物多埋置较深，施工期间还要承受河道水位和地下水的共同影响。软土结构松散，受扰动后强度下降较快，常规放坡难以满足场地与防渗要求。因此，深基坑通常采用围护、支撑、止水和加固组合方案。施工中任何一道工序滞后，都会使土压力、水压力重新分配，进而放大围护变形。基于此，从施工难点出发，对各关键工序及控制方法进行分析至关重要。

1 软土地基条件下闸站深基坑施工难点

1.1 软土变形控制难度较大

沿海冲积平原和河网地区的淤泥质黏土天然含水率常为35%～55%，孔隙比可达1.0～1.8，压缩系数多在0.5 MPa^{-1}～1.5 MPa^{-1}之间，不排水抗剪强度通常只有10 kPa～30 kPa。闸站基坑开挖深度常达到8 m～15 m，卸荷后坑内土体会产生回弹，坑外土体则向临空面移动。若围护结构刚度不足或支撑形成较慢，墙顶位移、深层水平位移和地表沉降会同步增加[1]。软土还具有流变性，开挖完成后变形并不会立即停止，长时间暴露会使支撑轴力继续增长。施工组织需要缩短无支撑暴露时间，将大面积开挖划分为若干小区，做到开挖一层、支撑一层，使围护结构受力及时闭合。

1.2 地下水对基坑稳定影响明显

闸站多靠近河道或现状水系，地下水位往往距地表0.5 m～2.0 m，汛期外河水位变化还会造成坑外水头反复升降[2]。软黏土本身渗透系数较小，常处于10^{-7} m/s～10^{-9} m/s范围，但夹层粉砂或薄层砂土可能形成集中渗流通道。帷幕接头、围护墙槽段接缝或降水井封闭不严时，水土容易从局部缺口进入基坑，引发流砂、管涌和墙后土体损失。过度降水同样会增加有效应力，使周边道路、管线或既有建筑产生附加沉降。因此，基坑水控制不能只追求坑内无水，还要维持合理的坑内外水位差，并根据河道水位、井内水位及地表沉降及时调整抽水量。

2 软土地基条件下闸站深基坑支护施工技术

2.1 围护结构施工

围护结构承担侧向土压力和水压力，也是止水体系的重要组成部分[3]。软土闸站基坑可根据深度、周边条件和施工设备选用地下连续墙或钻孔灌注桩配合搅拌桩帷幕。地下连续墙整体刚度较大，墙厚常取600 mm～1 000 mm，适合变形控制要求较高的泵房基坑。施工前应复核导墙轴线和顶面高程，成槽过程中连续检测槽深、垂直度与泥浆性能，接头处采用刷壁器反复清理，直至刷壁器基本无泥。钢筋笼应整体吊装或分节可靠连接，水下混凝土导管埋深保持在2 m～6 m，浇筑面上升速度宜稳定，防止夹泥和断墙。围护受力可用主动土压力合力进行初步校核，公式如下：

$$P_a=\frac{1}{2}\gamma H^2K_a+qHK_a \qquad K_a=\tan^2(45°-\varphi/2) \tag{1}$$

式（1）中，P_a为单位长度围护墙上的主动土压力

作者简介：周兴俊（1991-），男，本科，工程师，研究方向：水利施工、水利工程检测。

合力，kN/m；γ 为土的重度，kN/m^3；H 为开挖深度，m；q 为坑边均布荷载，kPa；K_a 为主动土压力系数；φ 为土的有效内摩擦角。软土中 φ 值较小，水土合算时还需叠加静水压力。围护成型后应采用超声波或取芯方法检查墙体完整性，对接缝渗漏位置提前布置注浆管。对钻孔灌注桩方案，成孔时应控制泥浆液面高于地下水位 1.0 m 左右，孔底沉渣厚度按设计要求验收，桩间净距较小时还应采用隔桩跳打，防止邻桩混凝土受到扰动。冠梁施工前凿除浮浆并校直主筋，使各桩共同受力。

2.2 止水帷幕施工

止水帷幕应在围护结构形成连续封闭体后再进行开挖。采用三轴水泥土搅拌桩时，施工设备先试运转并校正桩架垂直度，浆液按试桩确定的水灰比配制，喷浆和搅拌保持连续。相邻桩套接时间过长会形成冷缝，现场宜按跳槽或连续套打顺序组织施工，并对转角、接头及设备停歇处增加复搅[4]。帷幕底端应进入相对隔水层，无法落底时需结合坑内降压井控制承压水。施工参数可结合如表 1 所示的常用范围设置，但水泥掺量、提升速度和桩间搭接仍要通过试桩调整。

成桩 7 d 后可进行轻便触探，28 d 后检查无侧限抗压强度；发现渗漏时先降低局部水头，再采用双液浆由下向上封堵，避免高压注浆把渗流通道进一步冲开。靠近河岸的转角部位可预留袖阀管，开挖后根据渗水位置进行低压补浆。帷幕顶部与冠梁或压顶板之间也要封闭，避免地表水沿施工缝绕流进入坑内。

2.3 内支撑体系施工

内支撑将围护墙的侧向荷载传至对侧，是控制软土基坑位移的主要构件。首道支撑宜尽量靠近冠梁布置，以减小墙顶悬臂长度；下部支撑随开挖深度逐层安装。混凝土支撑刚度较大，适合平面尺寸较规则的闸站主体，钢支撑安装速度快，便于局部调整。钢支撑拼装前应检查法兰、螺栓和焊缝，吊装就位后及时施加预轴力，常按设计轴力的 40% ～ 60% 分级加载，每级稳压后记录油压和支撑伸长量。支撑端头与围檩之间不得留有松动间隙，斜撑节点还要设置抗滑构造。土方机械从支撑下方通过时应控制净空，严禁碰撞立柱和支撑[5]。拆撑前先完成底板、侧墙及换撑构件，并核对混凝土强度；拆除顺序与安装顺序相反，分区对称卸载，避免围护墙突然失去约束。对平面较大的泵房基坑，可设置临时立柱桩缩短支撑计算跨度，立柱垂直度通常控制在 1/300 以内。

表 1 软土深基坑关键工序常用控制参数

控制项目	常用范围或要求	检查方式
地下连续墙厚度	600 mm ～ 1 000 mm	设计图及尺量
成槽垂直度	不大于 1/300	超声成槽检测
水下混凝土坍落度	180 mm ～ 220 mm	现场试验
搅拌桩水泥掺量	18% ～ 22%，以试桩为准	流量与总量核验
钢支撑预加轴力	设计轴力的 40% ～ 60%	油压表和轴力计
单层开挖厚度	1.0 m ～ 2.0 m	水准仪复核
坑内水位控制	低于开挖面 0.5 m ～ 1.0 m	水位孔观测
坑底加固强度	28 d 不低于 0.8 MPa ～ 1.0 MPa	钻芯或试块

2.4 基坑降水开挖施工

降水和土方开挖应作为同一工序统筹安排。坑内降水井可沿基坑周边和中部布置，滤管进入主要含水层，井口设置流量计和水位测管。正常开挖时，地下水位宜保持在当前开挖面以下 0.5 m ～ 1.0 m，承压水则根据抗突涌验算确定降压幅度。估算井群抽水量时可采用达西定律：

$$Q=kiA \tag{2}$$

式（2）中，Q 为渗流量，m^3/s；k 为土层渗透系数，m/s；i 为水力坡降；A 为过水断面面积，m^2。计算结果用于确定水泵能力和井数，实际抽水量还应由试抽水修正。开挖采用分层、分区和对称方式，每层厚度一般控制在 1.0 m ～ 2.0 m，靠近围护墙和立柱的土体由小型机械配合人工清除，避免超挖。每一开挖区长度可控制在 15 m ～ 25 m，土方完成后尽快施工垫层或安装支撑。雨季在坑顶设置截水沟，坑内设置排水沟和集水井，备用泵能力不低于最大日常抽水量的 30%。河道水位快速上涨时减少开挖面暴露，并核对帷幕外水位变化。开挖至设计标高前保留 200 mm ～ 300 mm 保护土层，由人工清底后立即浇筑垫层，减少软土受水浸泡和机械扰动。

2.5 坑底加固施工

坑底加固用于提高被动区强度，减少围护墙底部位移和基底隆起。闸站泵房底板下方可采用三轴搅拌桩、高压旋喷桩或水泥土格栅，加固范围重点覆盖围护墙内侧、支撑立柱周边及进出水流道高差位置。常见加固深度为坑底以下2 m～4 m，平面上形成连续块体或格栅体，水泥掺量可按15%～20%试配，28 d无侧限抗压强度一般不低于0.8 MPa～1.0 MPa。正式施工前应通过试桩确定喷浆压力、提升速度和复搅次数。加固完成后留足养护时间，再进行最后一层土方开挖；机械不得直接碾压未达到强度的桩头。验收可采用钻芯、静力触探和开挖检查相结合的方法，对强度偏低或桩间搭接不足的区域实施补桩，使坑底形成连续受力体。

3 闸站深基坑支护施工控制

3.1 施工质量控制

围护施工前复测控制点，导墙、桩位和支撑轴线的偏差分别建档；成槽、清孔、钢筋笼吊装及混凝土浇筑实行旁站记录。止水帷幕重点检查浆液比重、单桩水泥用量和施工电流，停浆、断浆位置必须注明。支撑安装后复核标高、轴线和预加轴力，焊接节点按比例进行无损检测。关键工序参数可集中列入检查表，形成施工、监理和检测三方签认[6]。图1所示为围护、支撑、降水和坑底加固的空间关系，现场应按该受力路径安排工序，避免先大面积开挖、后补支撑。出现墙缝渗水、支撑松动或坑底局部隆起时，应立即暂停邻近区域开挖，先卸载坑边堆土，再采取封堵、复加轴力或反压措施。材料复验也不能脱离工序要求，水泥应按批次检测强度和安定性，钢支撑进场后核查壁厚、直线度及端板尺寸，混凝土试件除标准养护外，可增加同条件试件作为拆撑判断依据。

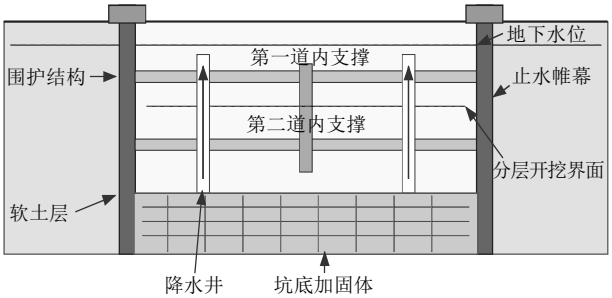


图1 闸站深基坑组合支护结构示意图

3.2 基坑监测控制

监测数据能够反映支护体系是否按设计状态工作。基坑开挖前应取得围护墙顶、周边地表、既有构筑物及地下水位的初始值，开挖期间同步监测墙体深层水平位移、支撑轴力、立柱沉降和坑底隆起。正常阶段可每日监测1次，支撑转换、暴雨或河道水位突变时提高到每日2次～4次。预警除了看累计值，还要关注变化速率和不同测项之间的对应关系，如墙体位移加快并伴随支撑轴力下降，表明节点松动；坑外水位下降同时地表沉降增大，则需减少抽水并检查帷幕。项目可将设计控制值的70%作为关注线，达到85%时启动专项复核，超过控制值立即停止相关工序。监测结论应当天反馈至施工负责人，形成“测量—分析—调整—复测”的闭环。仪器安装后应进行零点校核和保护，测斜管管口高程、轴力计编号及水位孔深度统一录入台账。数据平台可按平面分区显示变化曲线，并设置连续三次增量异常提醒，防止单点噪声造成误判。对于临河基坑，还应把外河水位纳入同一时间轴分析。闸站主体底板完成后，降水和监测仍需保持连续，待侧墙、顶板及回填形成稳定受力体系后再分级停泵。每级停泵宜观察6 h～12 h，若坑外水位回升同时出现墙体位移加快或结构渗水，应立即恢复抽水，并检查封底、施工缝及穿墙管部位，防止结构尚未闭合时产生浮托。

4 结束语

软土地基条件下的闸站深基坑施工，实质上是土体变形、水压力变化与支护结构受力不断调整的过程。围护墙、止水帷幕、内支撑、降水系统和坑底加固需要同步发挥作用，任何局部缺陷都会通过软土和地下水传递并放大。施工中应以勘察和设计为基础，用试桩、试抽水确定关键参数，以分层开挖缩短暴露时间，再通过质量检查与动态监测修正施工节奏，从而在控制基坑变形的同时，减少对闸站周边水系和既有设施的影响。

参考文献：

[1] 李玉强，夏扬，赵宇. 高水位软土深基坑支护关键技术与变形控制研究[J]. 红水河，2025(04):134-138,146.
[2] 王桢. 软土地区深基坑支护结构施工技术研究及质量分析[J]. 建筑科技，2024,08(05):164-167,172.
[3] 廖炫杰，孙小强. 周边环境复杂的深基坑支护施工技术[J]. 云南水力发电，2024,40(01):76-80.
[4] 曹星，曹冰心. 软土地区深基坑施工对周边环境的影响[J]. 电力勘测设计，2025(10):87-90,96.
[5] 李煜峰. 软土地区紧邻地铁车站深基坑支护设计实践[J]. 建筑施工，2024,46(07):1093-1097.
[6] 谭代强，黄斯导. 临江半悬臂式深基坑支护与内支撑拆除施工关键技术[J]. 广东土木与建筑，2026,33(02):90-93.