

软土路基处理中深层搅拌桩施工工艺研究

罗冬¹ 高亮²

1. 宁波奉化交投基础建设工程有限公司 浙江 宁波 315504

2. 浙江省建投交通基础建设集团有限公司 浙江 杭州 310012

【摘要】：软土路基具有高含水率、高压缩性等特性，深层搅拌桩施工易出现桩体成型差、均匀性不足、桩身缺陷及水泥土融合失效等工程问题。本文剖析软土地质对成桩质量的制约机理，探究搅拌转速、提升速度、水灰比、注浆压力及桩体搭接间隔等关键参数的影响机制，提出复搅工艺优化、搅拌叶片结构调整、分层分段注浆调控及桩位施工顺序优化等改进措施。依托钻芯、动力触探与变形监测开展成桩质量检测，建立不合格桩体工艺溯源与参数修正方法。工程应用证实，优化工艺可有效改善桩体完整性与均匀性，提升软土复合地基承载与沉降控制能力。

【关键词】：深层搅拌桩；软土路基；施工工艺；桩体均匀性；参数修正

DOI:10.12417/2811-0722.26.07.084

引言

在软土地区开展工程建设，路基稳定性与沉降控制始终是技术难点。深层搅拌桩因其能有效改善软土力学性能、提升地基承载力而被广泛应用。然而，软土的高含水率、高压缩性及结构性弱等特点，对搅拌桩成桩质量构成严峻挑战。施工过程中常因工艺参数失配、机械操作不当或地质响应不足，导致桩体强度离散、完整性差等问题，进而影响复合地基整体性能。因此，深入剖析施工问题成因，明晰关键参数作用机制，并针对性优化工艺措施，对确保深层搅拌桩在软土路基中发挥预期加固效果具有重要工程意义。

1 软土路基处理中深层搅拌桩施工工艺的问题剖析

1.1 软土高含水率与高压缩性对桩体成型的制约

软土普遍具备高天然含水率、大孔隙比及强压缩性的工程属性，深层搅拌桩作业期间这类土体无法提供充足侧向约束，水泥浆注入后难以充分裹附并固化土颗粒，初凝阶段桩体受自身重量或上覆土压力易出现局部坍塌与变形^[1]。高含水率还会稀释水泥浆液降低胶结效能，致使水泥与软土间水化反应不够彻底，影响桩体强度提升，软土高压缩性使得搅拌扰动下结构易遭破坏，产生超静孔隙水压力阻碍排水固结，进一步弱化桩周土对桩体的支撑效能。成桩初期若未能及时形成具备充足早期强度的水泥土骨架，桩身就容易出现缩颈、断桩及强度离散度大等情况，深厚软土层中上述问题会随深度增加愈发明显，桩体下部成型质量远差于上部，进而影响复合地基整体承载力与沉降控制成效。

1.2 深层搅拌桩施工中桩身均匀性与完整性的典型缺陷

深层搅拌桩施工阶段，机械性能、操作管控及地质状况等因素常引发桩身均匀性欠佳、完整性欠缺的典型问题，搅拌头升降过程中转速波动频繁或提钻速率控制失当，致使水泥浆与软土掺合不彻底，形成局部夹泥、夹芯及水泥富集区域，造成桩体内部强度排布失衡。软硬土层衔接处，搅拌阻力的突变易

诱发钻杆偏移或搅拌叶片扰动范围不足，进而出现桩径缩减或局部未搅透情况，供浆系统压力波动及供浆中断，会造成注浆量欠缺或断浆问题，形成桩身空洞、蜂窝状构造乃至断桩隐患。相邻桩体搭接施工间隔过久，先施工桩体已进入初凝状态，后施工桩体难以实现有效融合，产生冷缝，弱化防渗帷幕与复合地基的整体效能，此类缺陷会降低单桩承载能力，还可能诱发路基差异沉降，威胁上部结构稳固性。

1.3 工艺参数设置不当引发的水泥与软土融合失效

深层搅拌桩施工中，工艺参数若脱离现场软土实际物理学指标，易造成水泥与软土拌合不充分、融合失效。搅拌头提升速度过快且注浆量未同步匹配时，单位桩长水泥浆补给不足，土体仅表层附着薄浆，内部仍保持原状软土结构，难以形成有效胶结强度。搅拌转速过低时，高塑性黏土难以被充分破碎，水泥颗粒无法有效嵌入土体微观结构，整体拌合均匀性大幅降低。水灰比管控不当同样影响成桩质量，比值偏大易引发浆液析水，固结后桩体竖向强度差异明显；比值偏小则浆液流动性不足，泵送阻力增大并出现局部缺浆缺陷。喷浆起止深度未严格贴合设计桩长，还易在桩顶、桩底产生素土夹层。施工参数缺乏试桩耦合优化，会造成桩体强度离散性偏高，芯样松散呈豆渣状，直接削弱复合地基承载力与沉降控制能力。

2 深层搅拌桩施工工艺关键影响因素的作用机制

2.1 搅拌头转速与提升速度对桩体均匀性的控制作用

搅拌头转速与提升速度，共同决定单位体积土体剪切扰动次数及水泥浆液掺入时长，是把控桩体拌合均匀性的核心工艺参数。转速过低时，搅拌叶片破碎翻拌软土能力不足，高黏粒含量或含薄层粉砂夹层地层易形成土团，造成水泥呈斑块状分布；转速过高则受离心作用影响，浆液易甩向孔壁，桩体中心形成干芯缺陷。提升速率偏高时，同等注浆流量下单位桩长浆量偏少，搅拌次数不足，无法实现多轮交叉拌合，引发桩身上下强度不均、局部夹生。施工需依据土层稠度指数与标准贯入

击数，匹配 60 - 120 r/min 转速及 0.5 - 1.0 m/min 提升速度，保证每延米桩体不少于两次正反转搅拌，让浆液充分扩散渗透。两项参数协同调控水泥石微观均质状态，直接影响桩体无侧限抗压强度离散性与整体完整性。

2.2 水泥浆液水灰比及掺入量与软土性质的适配关系

水泥浆液水灰比与掺入量需根据软土工程特性合理选配，直接决定深层搅拌桩成桩质量。高含水率、低渗透性软土中，浆液过稀无法有效置换孔隙水，固化反应不充分易造成桩体松散；浆液过稠流动性变差，难以渗入土体微孔隙，易出现局部夹泥与水泥团聚缺陷。针对结构性差、高压缩性淤泥及淤泥质黏土，可适度增加水泥用量，强化胶结骨架整体性，同时严控浆体浓度，防止搅拌阻力过大影响施工。有机质含量偏高软土层会抑制水泥水化反应，需优化浆液配比、提升碱性稳定性，保证水化产物充分包裹胶结土颗粒。通过协同调控水灰比与掺入量，平衡浆液流变性与土体固结能力，使水泥浆搅拌均匀分布，养护后形成高强度、高耐久性的水泥石桩体结构。

2.3 桩与桩搭接施工间隔对连续墙整体性的影响

桩间搭接施工间隔时间，直接决定深层搅拌桩连续墙的整体完整性与防渗效果。相邻桩施工间隔过长时，先成桩已进入初凝甚至硬化状态，后施工桩无法在搭接位置有效融合，界面易产生薄弱夹层与微裂缝，大幅降低墙体整体受力和隔水连续性（见图1）。软土天然含水率高、渗透性弱，搭接滞后会使先成桩周边扰动土体的超孔隙水压力无法及时消散，阻碍新旧桩体水泥浆相互渗透胶结。若连续墙用作基坑支护或隔水帷幕，搭接缺陷易形成渗流通道，引发管涌及局部边坡失稳^[2]。施工中需严格把控相邻桩作业时序，保证后桩在前桩处于可塑状态时完成搭接搅拌，形成密实过渡胶结带。地质复杂、地下水流速较大地段，还应进一步缩短搭接间隔，防止土体回弹、水流冲刷带走搭接区水泥浆，保障连续墙结构完整与防渗稳定。

3 深层搅拌桩施工工艺针对软土特性的改进措施

3.1 采用复搅与叶片结构调整增强桩体搅拌效果

软土路基处置里，复搅工艺及搅拌叶片结构的改良是保障深层搅拌桩搅拌均匀性与成桩品质的核心技术，初次搅拌喷浆结束后复搅再次下钻提升搅拌，让水泥浆与高含水、低强度软黏土实现更充分融合，减少夹泥、结块及浆液离析等问题，结合软土流变性突出、抗剪强度偏弱的特性，搅拌叶片多采用多层双螺旋或异形刀片构型，叶片间距设定在 300 至 500 毫米，切削角度调至 15° 至 25°，强化对软土的破碎与翻拌效能，不少工程采用四翼或六翼复合式搅拌头，将搅拌半径拓展至 600 毫米以上，相同桩径下扩大土体扰动范围，助力水泥浆向桩周渗透，复搅需在初凝前完成，提升速度把控在 0.5 至 0.8 米/分钟，搭配 0.3 至 0.6 兆帕注浆压力，保障二次搅拌时浆液的流动性，进而在桩体内部形成致密均质的水泥石构造，改善桩身强度与整体稳固性。

3.2 根据软土分层变化实施分段注浆压力调控

软土竖向普遍具备显著层理构造，不同深度土层含水率、孔隙比与抗剪强度差异突出，采用恒定注浆压力施工极易出现浅层软土冒浆、深层浆液渗透不充分的工程问题。分段注浆压力调控技术依托地质勘察及现场钻探成果划分土层单元，在搅拌下沉与提升全过程动态调节注浆泵输出压力。地表以下 3~8 米高含水率淤泥质黏土层，将注浆压力控制在 0.2~0.4MPa，规避压力过大造成地表隆起和浆液上涌隐患；埋深 8~15 米的下部粉质黏土及砂质夹层，逐级把注浆压力提升至 0.5~0.7MPa，有效克服土体密实度增大产生的浆液扩散阻力。注浆系统搭载实时压力传感器与自动调节阀，配合搅拌头深度编码器实现压力与深度联动调控，精准匹配各土层水泥浆注入量和土体置换需求，使全桩长形成连续均匀、结构密实的水泥石桩体，从根本上优化桩体成型质量，显著增强复合地基整体承载能力与工程稳定性。

3.3 优化桩位布置顺序缩短搭接施工间隔时间

在软土路基处理中，深层搅拌桩常以连续搭接形式形成防渗或支挡结构，其整体性能高度依赖相邻桩体的有效连接。若桩位施工顺序安排不合理，先打设的桩体在软土环境中经历较长时间后，水泥石初凝甚至部分硬化，后续桩难以与其充分融合，搭接界面易形成胶结薄弱的施工缝。为避免此类问题，需对桩位布置顺序进行系统优化，采用跳打结合、分区域流水作业或由中心向两侧推进等策略，使相邻桩的施工间隔控制在水泥石初凝前的关键窗口期内。合理的布桩路径可减少机械频繁转向与移位时间，提升施工连续性，同时确保新旧桩体在塑性状态下完成交叉搅拌，增强搭接区的密实度与胶结强度^[3]。尤其在高含水率、低强度软土层中，缩短搭接间隔有助于抑制侧向土体扰动引起的浆液流失，维持桩体几何形态完整性，从而

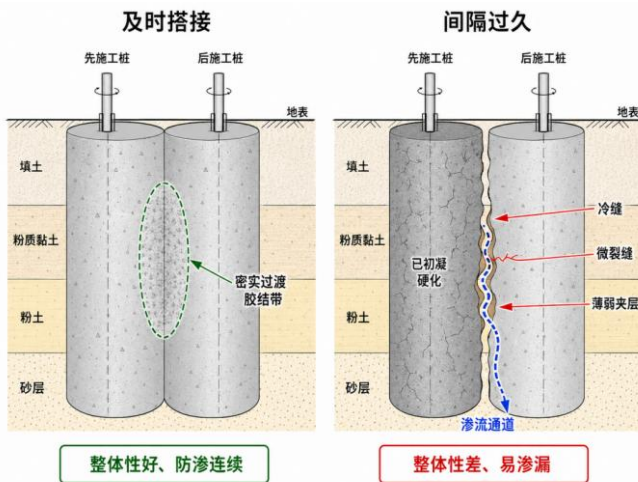


图 1 桩与桩搭接施工间隔对连续墙整体性的影响示意图

保障连续墙结构的整体性和隔水效果。

4 深层搅拌桩施工工艺在软土路基中的效果验证与修正

4.1 成桩后桩身强度与均匀性的现场检验标准

成桩后桩身强度及均匀性,主要采用钻芯取样、轻型动力触探、静力触探等原位方法开展现场检验。钻芯法从桩体不同深度截取芯样,直观判定水泥土搅拌均匀性、胶结状况,排查夹泥、断桩等缺陷,同时开展无侧限抗压试验,校核桩身强度是否满足设计要求。轻型动力触探依据锤击数判定桩身密实度,适合检测浅部桩体软硬异变与搅拌不均问题。深层搅拌桩连续墙需沿轴线多点布设检测点位,保障纵横方向强度均匀性。检验深度需全覆盖加固层,重点核查软土交界面、地下水水位波动带等易出现强度衰减区段^[4]。检测数据结合地质条件与施工记录综合对比分析,一旦发现局部强度偏低、桩身均匀性较差,可从成桩间隔、浆液配比、施工机械参数等方面溯源成因,为后续施工工艺优化调整提供可靠依据。

4.2 工艺偏差引起的桩土协同变形异常特征识别

工艺偏差引发的桩土协同变形异常,主要体现为路基沉降不均、侧向位移骤变及局部隆起等病害。搅拌桩施工提升速度过快、缺少复搅或浆液供给中断,会造成桩身强度偏低、出现断层缺陷,削弱桩土间荷载传递能力,上部荷载易局部集中,进而产生差异沉降。路基横断面若桩间距布设不合理、桩间搭接超时形成冷缝,会加大横向沉降梯度,诱发纵向裂缝。搅拌不均区域桩体抗弯刚度下降,在侧向土压力作用下易出现非协调变形,与完好桩体产生明显错动。软土层含砂透镜体、高塑

性黏土层时,未及时调整注浆参数易引发桩体膨胀、缩颈,破坏桩土结构整体性。依托沉降板、测斜仪与多点位移计联合监测,可识别变形速率突变、深度集中及空间分布失衡等特征,为判别施工工艺偏差提供可靠依据。

4.3 针对检验不合格桩体的工艺回溯与参数修正方法

针对检验不合格的搅拌桩,需全面回溯施工全过程关键工艺参数,比对搅拌头下沉提升速度、转速、喷浆压力、供浆流量及停浆位置等原始数据与设计标准。若无侧限抗压强度、钻芯检测发现桩体夹泥、断桩、水泥分布不均,应重点核查对应深度喷浆连续性与复搅落实情况。缺陷集中区域,需研判是否未及时适配软土高含水率、高有机质等土层特性,导致水泥固化反应受阻。依据溯源结果,可优化水灰比提升浆液渗透性,放缓提升速率、增加复搅次数改善土体拌合均匀性,同类地层提前试桩校准注浆压力与搅拌叶片倾角。对不合格桩体按缺陷等级采用补桩、高压旋喷或局部注浆加固处理,同时将优化后的工艺参数纳入后续施工管控标准,形成闭环管控,杜绝同类质量缺陷重复出现。

5 结语

深层搅拌桩作为软土路基处理的关键技术,其施工质量直接受制于土体特性与工艺参数的匹配程度。面对高含水率、高压缩性软土带来的成桩难题,需从问题识别、机理分析到工艺优化形成系统应对策略。通过复搅强化、分段注浆调控及搭接时序优化等措施,可显著提升桩体均匀性与整体性。同时,依托现场检验与变形监测,对不合格桩体实施精准回溯与参数修正,构建动态反馈机制,是保障复合地基长期稳定的核心环节。

参考文献:

- [1] 杜修光.软土地基处理中的深层搅拌桩施工工艺分析[J].低碳世界,2020,10(05):144+146.
- [2] 张文贵.研究深层搅拌桩在软土路基处理中的应用[J].黑龙江交通科技,2021,44(04):58+60.
- [3] 刘堰陵,王强.深层搅拌桩在软土路基处理中的应用[J].工程技术研究,2020,5(13):55-56.
- [4] 赵青华.深层水泥搅拌桩在软土路基加固处理中的应用[J].交通世界,2022,(29):115-117.
- [5] 陈愿.CFG 桩复合地基在深层软土路基处理中的应用[J].价值工程,2023,42(02):104-106.