土木工程软土地基处理关键技术与质量控制研究

刘明军

吉林省骏天电力工程设计有限公司 吉林 长春 130041

【摘　要】：软土地基具有含水量高、孔隙比大、压缩性强及承载能力低等特征，处理不当容易引发基础沉降、结构开裂及局部失稳。针对勘察数据不准确、处理技术选择不合理、施工参数控制不严、检测验收衔接不足等问题，应根据土层条件、工程荷载及工期要求，合理应用换填垫层、排水固结、强夯、深层搅拌等关键技术，完善材料检验、过程监测、参数复核及沉降观测机制。通过技术选型同全过程质量控制相结合，可有效提高地基承载力，降低工后沉降量，增强基础结构稳定性，保证工程施工质量。

【关键词】：软土地基；地基处理；施工技术；质量控制；沉降监测

DOI:10.12417/2705-0998.26.14.036

引言

软土地基广泛分布于沿海、河湖冲积平原及城市低洼区域，其土体结构松散、天然含水量较高、抗剪强度偏低，在上部荷载作用下容易产生较大沉降及不均匀变形。部分工程因勘察深度不足、处理工艺选择偏差、施工参数执行不严，出现路基开裂、基础倾斜、管线变形等质量问题。软土层性质具有明显的区域差异，单一处理方法难以适应不同埋深、厚度及荷载条件。工程建设需要从地质资料复核、处理方案比选、施工工序控制、质量检测及沉降监测等环节形成完整管理链条，使各项技术参数符合设计要求，为地基承载能力提升及结构安全控制提供可靠基础。

1 软土地基工程特征及施工风险识别

1.1 软土物理力学性质判定

软土颗粒组成以粉粒和黏粒为主，孔隙比大、结构松散，内部结合力较弱，表现出显著的高含水状态与低抗剪强度特征。天然含水量常接近或超过液限，导致土体在外荷载作用下易发生塑性流动，剪切破坏形式以滑移为主。压缩系数较大且压缩模量偏低，在短期加载条件下即产生明显变形，固结过程受排水路径及渗透系数影响显著。微结构层面呈絮状排列，结构性强度随扰动迅速降低，重塑后强度衰减明显。对其物理力学性质的判定需结合原位测试与室内试验参数，对抗剪指标、固结特性及渗透性能进行系统分析，以支撑后续处理技术参数的精确设定。

1.2 地基沉降变形规律识别

软土地基沉降发展呈现明显的阶段性特征，初期以瞬时沉降和主固结沉降为主，随后进入长期缓慢发展的次固结阶段。沉降速率受土层厚度、排水条件及加载方式共同影响，竖向排水路径越短，固结速度越快[1]。不同深度土层压缩性能差异显著，易引发分层沉降及差异变形，进而对上部结构产生附加应力。侧向变形与竖向沉降存在耦合关系，在加载过程中土体产生横向位移，削弱整体稳定性。地下水位变化及施工扰动会改变孔隙水压力分布，影响固结进程与变形趋势。对沉降规律的识别需通过分层计算与监测数据结合，建立时间—沉降关系模型，为施工阶段控制提供依据。

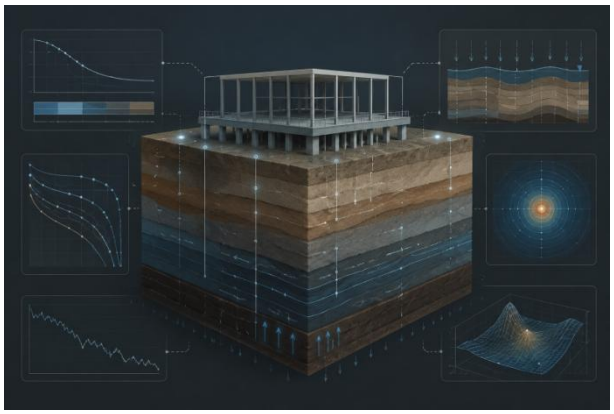

图 1 软土地基沉降演化机理图

1.3 基础失稳风险来源划分

基础失稳风险主要来源于承载力不足、差异沉降及侧向滑移三类因素。软土抗剪强度低，在荷载集中区域易出现局部剪切破坏，形成塑性区扩展并引发整体承载失效。土层厚度变化或处理不均导致刚度分布不连续，使结构受力不均，产生附加弯矩与裂缝扩展。施工荷载叠加与分阶段加载控制不当，会引起孔隙水压力快速积聚，降低有效应力水平，诱发瞬时失稳。地下水流动及排水条件变化改变土体强度发展过程，增加滑移破坏概率。施工机械振动及开挖扰动进一步削弱原状结构，使土体强度快速衰减。对风险来源进行分级划分，有助于针对不同失稳机制制定差异化控制策略，提升地基处理安全性。

2 软土地基处理环节主要质量问题

2.1 地质勘察数据准确性不足

勘察布点密度不足与取样深度控制不严，导致软土层厚度、分布范围及层间界面识别不清，关键参数存在较大离散性。原位测试方法选择单一，未能形成多手段交叉验证，孔隙水压力、压缩系数及抗剪强度指标缺乏可靠性。扰动取样过程未严格控制，使原状结构破坏，试验结果偏离实际状态。数据处理环节缺乏统一标准，统计分析未能反映土体空间变异特征，导

致设计参数取值偏差。信息化勘察手段应用不足，未实现数据实时采集与动态修正，制约后续处理方案的科学制定。

2.2 处理工艺选择缺乏适配性

处理方案制定未充分结合土层结构特征及工程荷载条件，工艺选型存在单一化倾向，忽视多技术组合应用的协同效果。排水固结、深层搅拌等方法在不同含水率及厚度条件下适应性差异明显，缺乏针对性比选分析，导致处理效果不均[2]。设计阶段对施工周期与沉降控制关系考虑不足，工艺匹配性与工期要求之间存在偏差。绿色施工理念落实不足，未综合考虑资源消耗与环境影响，技术选择缺乏系统优化。数字化仿真分析应用不足，未能通过模型预测不同工艺组合的实施效果。

2.3 施工参数执行存在偏差

关键施工参数控制不严格，排水板间距、搅拌深度及夯击能量等指标偏离设计要求，直接影响地基加固效果。施工过程缺乏动态监测与反馈机制，参数调整滞后，未能及时响应土体变化。设备运行状态不稳定，能量输出及施工精度存在波动，导致处理均匀性不足。施工记录与数据采集不完整，质量追溯依据缺失，难以进行全过程控制。智能化施工技术应用程度有限，自动控制与实时校正能力不足，制约参数执行的精细化水平。

3 软土地基处理关键技术配置

3.1 换填垫层技术适用控制

换填垫层技术以改善浅层软土承载性能为目标，通过置换低强度土体并构建高强度填料层，实现应力扩散与变形控制。适用控制需基于软土层厚度、地下水位及结构荷载进行综合判定，当软弱层厚度较小且施工条件允许开挖时优先采用。垫层材料应选取级配良好的碎石或砂砾，控制粒径分布与含泥量，以保证透水性与稳定性。填筑过程中分层铺设与分层碾压同步进行，压实度需满足设计要求，防止产生局部松散区。垫层厚度设计需结合应力扩散角及基础形式进行计算，确保荷载有效传递至下部稳定土层。基底处理应清除淤泥及有机质，避免界面滑移影响整体稳定性。施工过程中需设置排水措施，降低孔隙水压力积聚，提高固结效率。结合绿色施工理念，应优化材料运输与利用效率，减少资源浪费，并通过信息化手段对压实质量进行实时检测与反馈，提升换填效果的均匀性与可控性。

3.2 排水固结技术参数设计

排水固结技术依托缩短排水路径与加速孔隙水压力消散，实现软土强度提升与沉降控制。参数设计需综合考虑土体渗透系数、压缩特性及固结系数，对排水体间距、长度及布置形式进行优化。排水板间距应依据固结时间要求及目标沉降量计算确定，过大间距将延长固结周期，过小则增加施工成本。排水体埋设深度需穿透主要压缩层并进入相对稳定土层，以保证排水通道连续性[3]。预压荷载设计需结合结构荷载与安全储备进行叠加控制，分级加载可有效避免瞬时失稳。加载速率需与孔隙水压力消散速度相匹配，防止超孔压过高导致土体强度下降。真空预压技术应用时需确保密封系统完整性，维持负压稳定，避免漏气影响固结效果。全过程需布设沉降观测点与孔压监测设备，实时获取数据并动态修正设计参数。结合数字化管理理念，可通过数值模拟与监测数据耦合分析，实现固结过程的精细化控制。

3.3 深层搅拌技术施工要点

深层搅拌技术通过机械搅拌与固化剂反应形成复合加固体，提高软土强度与整体刚度。施工要点集中于搅拌均匀性、固化剂配比及成桩质量控制。固化材料应根据土体性质选择水泥或复合固化剂，严格控制水灰比及掺量，以保证反应充分且强度发展稳定。搅拌深度需覆盖全部软弱层并进入持力层一定范围，确保加固体连续性。施工过程中搅拌轴提升与下沉速度需保持稳定，避免出现断桩或夹层现象。旋转速度与搅拌次数直接影响土体与固化剂混合程度，应依据设计要求进行参数校核。成桩直径与间距需满足复合地基承载力计算要求，保证整体受力均匀。施工设备需保持良好运行状态，输出扭矩与搅拌能量稳定，以提高加固体质量一致性。

4 软土地基施工质量控制体系

4.1 施工材料进场检验控制

施工材料质量直接影响软土地基处理效果，需建立覆盖采购、运输及进场环节的全过程检验机制。填料类材料应重点检测粒径级配、含泥量及压实性能指标，确保满足设计对强度与透水性的要求；固化材料需对强度等级、凝结时间及化学稳定性进行复核，防止性能波动影响加固效果。材料进场后应实施批次抽检制度，通过标准化试验手段对关键指标进行验证，避免不合格材料进入施工环节。仓储条件需保持干燥与分区管理，防止受潮、混杂或性能退化。信息化管理手段应融入材料管理过程，对材料来源、检测数据及使用位置进行编码记录，实现全过程可追溯。绿色施工理念下，应优先选择低能耗、环保型材料，降低施工过程中的资源消耗与环境负荷，同时提升材料利用效率与工程整体质量稳定性。



图 2 施工材料进场质量控制闭环图

4.2 关键工序参数动态管控

关键工序参数直接决定地基处理质量，应构建以实时监测与反馈调整为核心的动态控制体系。排水板插设间距、搅拌深度、夯击能量及填筑压实度等参数需严格按照设计值执行，并在施工过程中进行连续监测。通过布设传感设备获取孔隙水压力、沉降量及位移数据，实现对施工状态的实时掌控。参数偏离设计范围时，应及时进行调整，避免局部处理效果不足或过度加固引发次生问题[4]。设备运行状态需纳入监控范围，对能量输出与施工精度进行校核，确保工序执行一致性。结合数字化施工管理平台，将监测数据与设计模型进行对比分析，形成闭环控制机制，提高参数调控的科学性与精准度。

4.3 隐蔽工程检测验收管理

隐蔽工程质量难以通过后期观察直接判断，需在施工过程中实施严格的检测与验收程序。各类地基处理结构完成后，应在覆盖前进行专项检测，对承载能力、加固深度及施工均匀性进行全面评估。检测手段包括静载试验、标准贯入试验及无损检测技术，通过多维度数据验证处理效果。验收流程需按照分层、分区原则进行，确保每一施工单元均达到设计要求后方可进入下一工序。检测数据应完整记录并纳入工程质量档案，实现信息化管理与长期可追溯。隐蔽部位施工过程应同步开展影像记录与数据采集，增强质量控制的透明度。结合智能检测设备与数据分析技术，提高检测效率与精度，确保隐蔽工程质量符合规范要求并具备长期稳定性。

5 软土地基处理成效评价机制

5.1 地基承载能力检测评价

地基承载能力检测需依据处理后地基的受力特征与结构需求开展，重点通过静载试验与原位测试手段获取极限承载力与变形模量参数。检测布点应覆盖不同处理区域与关键受力部位，反映地基整体均匀性与局部差异。加载过程需分级实施，记录荷载—沉降曲线变化特征，通过曲线转折点判定承载极限与变形阶段。检测数据需与设计值进行对比分析，评估处理技术对强度提升的实际效果。结合信息化技术建立数据分析模型，对检测结果进行统计与偏差识别，提高评价精度。检测过程应严格控制加载速率与观测精度，确保数据真实可靠，为后续工程安全运行提供基础支撑。

5.2 沉降变形数据跟踪分析

沉降变形跟踪需贯穿施工及运营初期阶段，通过布设沉降观测点与位移监测系统，实现对地基变形过程的连续记录。监测数据应按时间序列进行整理，分析沉降速率变化与稳定趋势，识别主固结与次固结阶段特征。不同区域沉降量对比可反映处理均匀性与结构受力分布情况，差异变化需结合土层性质与施工工艺进行综合分析[5]。孔隙水压力监测数据应同步纳入分析体系，揭示固结进程与沉降发展的内在联系。借助数字化监测平台实现数据自动采集与远程传输，提高数据完整性与实时性，为沉降控制与风险预警提供技术支撑。

5.3 处理质量综合判定标准

处理质量综合判定需构建多指标评价体系，将承载能力、沉降控制效果及施工均匀性纳入统一标准。评价指标应量化处理后地基的力学性能与变形控制水平，通过设定控制阈值实现分级判定。不同处理区域应分别进行评价，结合检测数据与监测结果形成整体质量判断。数据分析需考虑时间效应与空间差异，对长期稳定性进行动态评估。评价过程应引入信息化管理手段，将各类检测与监测数据进行集成分析，提升判定的科学性与系统性。质量判定结果需与设计目标进行对照，明确处理效果是否满足工程使用要求，并为后续维护与管理提供依据。

6 结语

软土地基处理需依托精准勘察数据、合理技术配置及全过程质量控制体系协同实施，确保各关键环节紧密衔接。通过强化施工参数管控与动态监测评价，地基承载性能与变形控制水平得到有效提升，工程结构安全性与稳定性获得可靠保障。

参考文献：

[1] 熊光华.道路桥梁工程软土地基施工分析[J].汽车画刊,2026,(1):113-115.

[2] 贺飞.公路工程软土地基处理中粉喷桩施工技术研究[J].汽车周刊,2026,(2):80-82.

[3] 纪和斌,金伟斌,王兆祥.软土地基处理技术在道路施工中的实践与效果分析[J].科技与创新,2025,(24):110-112.

[4] 徐亚淼,陆营部.市政公路桥梁工程施工中软土地基处理技术分析[J].建设机械技术与管理,2025,38(6):100-101+113.

[5] 徐亚慧.铁路工程软土地基处理施工技术分析[J].工程与建设,2025,39(6):1296-1298.