

软土地基岩土勘察特征及加固处理技术研究

黄耀琦

(广西壮族自治区地球物理勘察院, 广西 柳州 545005)

摘要 为解决软土地基承载力低、压缩性大导致的工程病害问题, 本研究基于软土地基岩土勘察实践, 系统梳理勘察核心特征, 重点研究实用加固处理技术。通过勘察指标体系分析与勘察方法适配性研究, 明确软土工程地质特性; 深入探讨水泥土搅拌桩技术、预压排水固结技术、CFG 桩复合地基技术的作用机理、关键参数与施工控制要点, 构建加固技术选型方法与全流程效果验证体系。研究表明, 水泥土搅拌桩技术、预压排水固结技术、CFG 桩复合地基技术这三种加固技术可有效提升软土地基承载力, 控制沉降变形, 适配不同场地条件与工程要求。

关键词 软土地基; 岩土勘察; 水泥土搅拌桩; 预压排水固结; CFG 桩

中图分类号: TU195; TU472.33; TU447 **文献标志码**: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.019

0 引言

软土地基广泛分布于我国沿海、江河三角洲及内陆湖盆地区, 其天然含水率高、承载力低、压缩性大的工程特性, 易导致上部结构出现不均匀沉降、失稳等病害, 严重制约工程建设质量与安全。岩土勘察作为软土地基工程建设的前置环节, 精准揭示其工程地质特征是后续加固处理技术选型与参数设计的核心依据^[1]。郭将(2025)提出软土地基加固技术的适用性直接取决于勘察数据的完整性与准确性, 勘察环节的疏漏将导致加固方案失效风险显著提升; 林署炯(2025)指出当前软土地基加固技术应用中存在勘察与设计脱节问题, 需强化两者的耦合关联以提升工程实效^[2]。本文基于工程地质勘察实践, 系统梳理软土地基岩土勘察核心特征, 重点研究主流实用加固处理技术的作用机理、适用条件及参数控制, 为软土地基工程的安全高效实施提供技术参考。

1 软土地基岩土勘察核心特征

1.1 勘察指标体系及判释标准

软土地基岩土勘察指标体系涵盖物理性质指标、力学性质指标及渗透性质指标三大类, 各指标的精准测定是判释软土工程特性的关键^[3]。物理性质指标包括天然含水率 ω 、天然密度 ρ 、孔隙比 e 、液限 ω_L 、塑限 ω_P 及塑性指数 I_p , 其中天然含水率 ω 与孔隙比 e 是反映软土松软程度的核心指标, 当 $\omega > \omega_L$ 且 $e > 1.0$ 时, 软土呈现高压缩性与低承载力特征; 力学性质指标包含压缩模量 E_s 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 及地基承载力特

征值 $f_{(ak)}$, 压缩模量 E_s 直接决定软土的压缩变形能力, 其值越小表明压缩性越强; 渗透性质指标以渗透系数 k 为核心, 软土的 k 值通常小于 10^{-6} cm/s, 属于低渗透性土层, 这一特征直接影响排水固结类加固技术的应用效果。勘察指标判释需结合区域工程地质背景, 采用多指标综合验证方式, 避免单一指标判释带来的偏差。例如: 通过天然含水率与塑性指数的协同分析, 可精准界定软土的灵敏度等级, 为后续加固技术选型提供依据。

1.2 勘察方法的适配性应用

软土地基岩土勘察需结合场地条件选用适配的勘察方法, 确保勘察数据的代表性与可靠性。常用勘察方法包括钻探、原位测试及室内试验, 钻探主要采用回转式钻探方式, 取样间距控制在 $1.0 \sim 2.0$ m, 取样过程需采用薄壁取土器以减少对软土试样的扰动, 保证试样的天然结构完整性; 原位测试以静力触探试验、十字板剪切试验为主, 静力触探试验可连续获取软土的锥尖阻力 q_c 与侧壁摩阻力 f_s , 通过经验公式换算得到地基承载力特征值与压缩模量, 适用于大面积软土分布区域的快速勘察; 十字板剪切试验可直接测定软土的不排水抗剪强度 τ_u , 该指标是评估软土地基稳定性的核心参数, 尤其适用于饱和软黏土场地。室内试验需针对钻探获取的试样开展, 重点进行含水率、孔隙比、压缩试验及直剪试验, 室内试验参数与原位测试参数的对比分析, 可实现勘察数据的相互验证, 提升勘察成果的精准度。不同勘察方法的协同应用, 可全面揭示软土地基的空间分布特征与工程地质特性, 为加固处理技术设计提供完整的勘察数据支持。

作者简介: 黄耀琦(1984-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 岩土工程。

2 软土地基实用加固处理技术研究

2.1 水泥土搅拌桩加固技术

水泥土搅拌桩加固技术通过特制搅拌机械将水泥浆与软土强制搅拌均匀,水泥浆与软土发生一系列物理化学反应,形成具有一定强度与整体性的水泥土桩体,桩体与桩间软土共同构成复合地基,从而提升地基承载力并减少沉降变形^[4]。该技术适用于处理淤泥、淤泥质土、粉质黏土等饱和软土地基,尤其适用于处理深度在5~15 m的软土地基。其作用机理主要包括水泥的水化反应、离子交换反应及硬凝反应,水化反应生成的水化硅酸钙、水化铝酸钙等胶凝物质将软土颗粒胶结在一起,离子交换反应使软土颗粒表面电位降低,颗粒间凝聚力增强,硬凝反应则进一步提升水泥土的强度与稳定性。

水泥土搅拌桩加固技术的关键参数包括水泥掺量、搅拌次数、桩长及桩间距。水泥掺量通常控制在12%~20%(以干土质量计),掺量过低无法保证水泥土的强度,掺量过高则会增加工程成本且易导致桩体产生裂缝;搅拌次数需确保水泥浆与软土充分混合,通常采用“二次搅拌、二次提升”的施工工艺,搅拌速度控制在0.8~1.2 m/min,提升速度控制在1.0~1.5 m/min;桩长设计需穿透软土层到达承载力较高的持力层,桩端进入持力层的深度不小于0.5 m;桩间距根据复合地基承载力要求确定,通常为1.0~2.0 m,采用正方形或等边三角形布置方式。

水泥土搅拌桩复合地基的承载力特征值 $f_{(spk)}$ 可通过下式计算:

$$f_{spk} = m \cdot \frac{R_a}{A_p} + \beta \cdot (1-m) \cdot f_{sk} \quad (1)$$

式(1)中, m 为面积置换率,无量纲; R_a 为单桩竖向承载力特征值,kN; A_p 为单桩截面积, m^2 ; β 为桩间土承载力发挥系数,无量纲,对于淤泥质土取0.4~0.6; f_{sk} 为桩间土承载力特征值,kPa。单桩竖向承载力特征值 R_a 可通过室内水泥土试块抗压强度试验确定,也可通过现场单桩静载荷试验验证。

施工过程需重点控制搅拌均匀性与成桩质量,成桩后需采用低应变法对桩身完整性进行检测,检测数

量不小于总桩数的10%;采用单桩静载荷试验与复合地基静载荷试验对加固效果进行验证,试验数量分别不小于总桩数的1%且不少于3根。

2.2 预压排水固结加固技术

预压排水固结加固技术通过施加预压荷载促使软土孔隙水排出、体积收缩实现固结,进而提升地基承载力与稳定性。该技术适用于饱和软土、淤泥质土等低渗透性地基,分为堆载预压、真空预压两类,真空联合堆载预压因兼具两者优势,适配沉降控制要求高的工程。技术核心为排水系统设置与预压荷载施加:排水系统含塑料排水板(等效直径0.07~0.10 m,间距1.0~2.0 m)及级配砂石水平垫层(厚度0.5~0.8 m);荷载施加遵循分级原则,堆载为设计荷载的1.1~1.2倍,真空预压真空度80~90 kPa。

软土的固结度 U_t 是评估预压排水固结效果的核心指标,其计算式如下:

$$U_t = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 c_v t}{4H^2}} \quad (2)$$

式(2)中, n 为正整数; c_v 为软土的竖向固结系数, cm^2/s ; t 为预压时间, s ; H 为排水距离, m ,对于单面排水取软土层厚度,对于双面排水取软土层厚度的1/2。固结系数 c_v 需通过室内固结试验确定,其值直接影响预压时间的设计, c_v 越小表明软土的排水固结速度越慢,所需预压时间越长。

预压过程需进行沉降观测与孔隙水压力观测,沉降观测点布置在预压区域的中心及边缘,观测频率在加载期每1~2天观测一次,稳定期每3~7天观测一次;孔隙水压力观测采用孔隙水压力计,布置深度与软土层厚度适配,观测频率与沉降观测一致。当连续10天的沉降速率小于0.5 mm/d时,可判定软土地基已达到稳定固结状态,可停止预压加载。表1为某软土地基真空联合堆载预压加固观测结果,数据表明经过60天的预压处理,软土的固结度达到85%以上,沉降量趋于稳定,加固效果显著。

2.3 CFG桩复合地基加固技术

CFG桩复合地基加固技术以水泥、粉煤灰、碎石为原料,经搅拌压制成型为CFG桩(水泥粉煤灰碎石桩),

表1 某软土地基真空联合堆载预压加固观测结果

预压时间(d)	真空度(kPa)	堆载荷载(kPa)	累计沉降量(mm)	日均沉降速率(mm/d)	孔隙水压力(kPa)	固结度(%)
10	85	50	185	4.2	62	32
30	88	100	420	1.5	45	65
60	89	150	580	0.4	18	86

与桩间土、褥垫层共同构成复合地基，依托置换、挤密及应力扩散作用提升地基承载力并控制沉降^[5]。该技术适用于黏性土、粉土、淤泥质土等多种软土地基，处理深度可达 30 m，尤其适配高承载力要求的工业与民用建筑地基。其作用机理明确：置换作用以高强度桩体替代低强度软土提升整体强度；挤密作用增强桩周软土密实度；褥垫层采用级配砂石（厚度 10~30 cm），调整桩与桩间土应力分布，保障协同工作。关键参数含桩径 400~600 mm、桩长需穿透软土进入持力层不小于 1.0 m、桩间距 1.5~3.0 m（正方形或等边三角形布置）、混凝土强度不低于 C15 及适配褥垫层厚度，施工重点控制钻孔深度、混凝土浇筑质量与桩顶标高

表 2 CFG 桩复合地基加固技术参数与检测结果

桩径 (mm)	桩长 (m)	桩间距 (m)	混凝土强度等级	褥垫层厚度 (cm)	复合地基承载力特征值 (kPa)	加固前地基承载力特征值 (kPa)	最大沉降量 (mm)
500	18.0	2.0	C20	20	320	70	35
600	22.0	2.5	C25	25	410	70	28

上部结构类型与荷载、沉降要求，场地施工条件、周边环境限制及工程成本、工期。选型采用多指标综合比选法，选取地基承载力提升幅度、沉降控制效果（权重各 0.3）、施工难度、工程成本（权重各 0.2）、工期（权重 0.1）量化评分，择综合评分最优方案。适配场景明确：浅部低渗透性淤泥质土、上部荷载较小时优先水泥土搅拌桩；深层、高沉降控制要求地基选用 CFG 桩；大面积处理优先预压排水固结以控成本。

3.2 加固效果验证体系构建

软土地基加固效果验证体系采用“施工过程监测+竣工质量检测+后期沉降观测”的全流程验证模式，确保加固效果满足设计要求。施工过程监测重点包括桩体施工质量监测、预压荷载监测、沉降监测与孔隙水压力监测，桩体施工质量监测通过施工参数控制与现场取样检测实现，确保桩体强度与完整性；预压荷载监测确保加载速率与荷载值符合设计要求；沉降监测与孔隙水压力监测实时掌握软土的固结变形过程，及时调整施工参数。

竣工质量检测采用原位测试与室内试验相结合的方式，原位测试包括单桩静载荷试验、复合地基静载荷试验、静力触探试验等，重点检测地基承载力与桩体承载力；室内试验针对加固后的土样与桩体试样开展，检测其强度、压缩性等指标。后期沉降观测在工程竣工后进行，观测周期不少于 1 年，观测频率在竣工后 3 个月内每月观测一次，3~6 个月每 2 个月观测一次，6~12 个月每 3 个月观测一次。通过后后期沉降

防断桩缩颈。质量检测采用低应变法（检测桩身完整性，占比 $\geq 10\%$ ）与复合地基静载荷试验（检测承载力，占比 $\geq 0.5\%$ 且不少于 3 根）。表 2 数据证实，该技术可有效提升软土地基承载力，沉降控制效果良好，满足上部结构设计要求。

3 加固技术选型与效果验证体系

3.1 加固技术选型原则与方法

软土地基加固技术选型遵循因地制宜、经济合理、技术可行原则，核心是结合勘察揭示的软土工程地质特征与上部结构荷载、沉降要求开展多方案比选。选型需重点考量软土类型、分布、厚度及工程地质参数，

观测数据的分析，验证加固地基的长期稳定性，确保上部结构的安全使用。全流程的效果验证体系可实现对加固技术应用效果的精准评估，及时发现并解决加固过程中存在的问题，保障工程质量。

4 结束语

软土地基勘察需精准揭示其物理力学特性与空间分布，合理选配勘察方法。水泥土搅拌桩适用于中浅层，预压排水固结适用于大面积低渗透性软土，CFG 桩复合地基适用于深层高承载力需求。三者均具施工简便、成本可控、效果可靠等优点。建立全流程加固效果验证体系，可精准评估加固成效。未来应加强勘察与加固设计的耦合，提升参数设计精度，保障工程安全高效实施。

参考文献：

- [1] 郭将. 公路工程中软土地基的岩土工程勘察技术应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(34):107-109.
- [2] 林署炯. 软土地基的岩土工程勘察研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(25):191-193.
- [3] 李兴龙. 复杂地质条件下建筑软土地基勘察技术研究[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(16):91-93.
- [4] 张船舶, 朱颖, 张玉婷, 等. 水利工程软土地基勘察及处理技术[J]. 科技风, 2024(05):64-66.
- [5] 邢江朋. 珠海滨海地区软土地基勘察及基础分析[J]. 石材, 2024(02):79-81.