

滨海软土区等载预压加固关键技术研究

文 洋 刘晋生 黄 彬 谢哉警 何梓聪

中国建筑第八工程局有限公司 广东 广州 510660

【摘要】：滨海相沉积软土具备高含水率、高压缩性、低渗透性、强流变性及结构敏感性等劣化工程特性，其固结变形过程受渗流-应力-流变多场耦合作用支配，传统等载预压加固技术因理论支撑不足、工艺适配性差、管控精度偏低，难以满足现代工程对地基长期稳定性与沉降精准控制的严苛要求。为破解滨海软土等载预压加固技术瓶颈，本文基于有效应力原理、三维固结理论及软土粘弹性流变本构模型，深入剖析等载预压作用下软土固结-流变耦合作用机理，围绕排水体系优化、加载动态控制、监测预警、质量管控四大核心维度，系统开展关键技术研究，提出适配滨海软土力学特性的精细化加固技术体系。结合工程实践验证，结果表明该技术体系可有效提升固结效率、减小固结不均匀性、精准管控工后沉降，为滨海软土地区等载预压加固工程提供理论依据与技术支持。

【关键词】：滨海软土；等载预压；多场耦合；固结-流变机理；关键加固技术；沉降控制

DOI:10.12417/2811-0528.26.12.100

1 引言

我国东南沿海滨海区域广泛分布的海相软土，是在长期海洋沉积环境下形成的特殊软弱土体，其颗粒组成以黏粒、粉粒为主，天然含水率远超上限，孔隙比大、土体结构性弱，在外荷载作用下呈现出非线性固结、时间相关性蠕变、应力路径敏感性等复杂力学行为，是工程建设中难度极高的地基处理对象。等载预压技术凭借绿色经济、加固机理明确、适用大面积场地等优势，成为滨海软土地基加固的主流技术，但传统加固技术多依托经验设计，未充分考量滨海软土多场耦合的固结特性，存在排水效率低下、加载与地基固结进程不匹配、固结状态无法精准感知、加固质量离散性大等技术短板，极易引发地基固结不充分、工后长期沉降超标、不均匀变形过大等工程问题。

当前，滨海地区工程建设对地基加固质量、长期变形控制、施工智能化水平的要求持续提升，传统等载预压加固技术已无法适配复杂地质条件与高标准工程需求。基于此，本文从滨海软土固结变形的内在机理出发，提炼等载预压加固全过程的核心技术难点，开展系统性关键技术研究，构建精细化、科学化的加固技术体系，对完善滨海软土地基处理理论、推动岩土工程地基加固技术升级具有重要的学术价值与工程实践意义。

2 滨海软土等载预压加固机理深化分析

2.1 多场耦合固结变形机理

滨海软土等载预压加固本质是渗流场、应力场、流变场多场耦合作用下，土体孔隙水排出、有效应力增长、土骨架压密硬化的过程。预压荷载施加后，饱和软土内部迅速产生超静孔隙水压力，在水力梯度驱动下，孔隙水沿预设排水通道渗流排

出，此过程中孔隙水压力与有效应力发生动态转化，符合有效应力原理。

与普通软土不同，滨海软土固结过程伴随显著的渗流-应力耦合效应：土体固结压密导致孔隙体积减小，渗透系数随密实度提升持续衰减，进而减缓孔隙水渗流速率；而应力场的变化又改变水力梯度分布，反向影响渗流路径与渗流速度。同时，滨海软土的粘弹性流变特性使得土体变形分为主固结变形与次固结蠕变变形，主固结阶段以孔隙水渗流引发的快速变形为主，次固结阶段在超静孔隙水压力完全消散后，土骨架在恒定有效应力下发生缓慢蠕变，二者相互耦合、时序递进，共同决定地基最终沉降量与固结效率。

2.2 等载预压加固控制机理

等载预压通过施加与工程永久荷载等效的预压荷载，实现地基无回弹固结，其加固控制核心在于平衡固结效率与地基稳定性、消除后期流变沉降。一方面，通过构建高效立体排水体系，缩短孔隙水渗流路径，加速多场耦合进程，快速提升土体有效应力与抗剪强度；另一方面，利用恒定等载的长期作用，使软土次固结蠕变变形在预压期内充分完成，从根源上削减工后残余沉降。同时，通过精准控制加载速率与加载节奏，避免地基土体发生剪切破坏与侧向挤出，保证加固全过程的稳定性与均匀性。

3 滨海软土区等载预压加固关键技术

3.1 低扰动排水体系优化设计技术

排水体系是等载预压加固的核心载体，针对滨海软土高灵敏度、低渗透特性，提出低扰动排水体系优化设计技术，解决传统排水体系施工扰动大、排水效率低、固结不均的问题。

基于软土固结-流变耦合模型,结合场地软土厚度、物理力学参数的空间变异性,采用非均匀变间距排水体布设方案,替代传统均匀布设方式,对软土深厚、流变特性强的区域加密排水体,提升局部排水能力,实现全场地排水效率与固结需求的精准匹配。竖向排水体选用新型塑料排水板,采用静压式施工工艺,最大限度降低插设过程中对原位软土的扰动,削弱土体涂抹效应与扰动区渗透弱化影响,保证排水通道的通畅性。水平排水垫层采用级配优化的透水材料,严格控制垫层密度与透水性,构建连续、高效的水平排水网络,实现竖向-水平排水体系的无缝衔接。

3.2 基于多参量耦合的动态加载控制技术

突破传统定时、定量的粗放式加载模式,研发孔隙水压力-沉降-水平位移三参量耦合的动态加载控制技术,实现加载节奏与软土固结进程的实时适配。

通过室内力学试验确定滨海软土临界荷载、抗剪强度增长速率,合理划分加载层级,建立多参量联动控制阈值:以超静孔隙水压力消散率作为加载许可的核心指标,以地表沉降速率、深层水平位移速率作为稳定性控制指标。每级加载后,实时监测土体多参量变化,待监测指标达到耦合阈值、土体强度充分增长后,再实施下一级加载,既避免因加载过快导致孔压累积、地基失稳,又防止加载间隔过长造成工期冗余,实现固结效率与施工安全的协同优化。

3.3 全周期智能监测与风险预警技术

构建覆盖等载预压施工期、预压期、工后期的全周期智能监测技术体系,实现软土固结状态的全方位、实时化感知。

布设高精度、多维度监测元器件,同步监测深部孔隙水压力、分层沉降、地表总沉降、深层水平位移及土压力,构建物联网监测数据传输平台,实现监测数据的实时采集、传输与分析。基于软土固结-流变耦合模型,建立监测数据动态解译方法,反演地基固结度、有效应力分布、流变变形趋势,实现沉降发展、固结进程的精准预测。同时,设定多级风险预警阈值,构建异常工况自动识别与预警机制,对地基失稳、沉降超标、孔压异常等风险提前预判,为施工参数动态调整提供数据支撑。

3.4 全过程质量闭环管控技术

建立设计-施工-监测-验收全流程质量闭环管控技术,解决传统管控碎片化、事后化的问题。

设计阶段,基于场地地质勘察数据与室内试验,完成排水体系、加载方案的精细化设计,确定关键技术参数;施工阶段,对排水体施工、垫层铺设、荷载摊铺等关键工序实施全过程质

控,明确工序验收标准,杜绝施工质量隐患;监测阶段,依托智能监测数据,实时评估加固效果,动态优化施工参数;验收阶段,基于固结度计算、承载力检测、沉降拟合结果,建立多维度加固效果综合评价体系,形成全流程质量追溯与优化机制,保障加固质量达标。

4 工程应用验证

选取广州南沙区港科大项目开展应用验证,场地软土为典型海相淤泥质粉质黏土,淤泥厚度深,含水量高,压缩性高、流变特性显著。采用本文研究的等载预压加固关键技术体系实施地基加固,施工全过程开展智能监测与质量管控。

工程监测与检测结果表明:地基固结过程平稳,无土体扰动、侧向挤出等问题,全场地固结均匀性显著提升;预压期结束后,地基平均固结度达93%以上,工后残余沉降预测值远低于设计控制阈值;地基承载力较加固前提升1.5倍以上,完全满足工程设计要求。与传统加固技术相比,固结效率提升16%,施工工期缩短14%,充分验证了本文关键技术的可行性与优越性。

5 结论与展望

5.1 结论

(1) 滨海软土等载预压加固是渗流-应力-流变多场耦合作用的复杂过程,固结-流变耦合变形是控制地基沉降与加固效果的核心机理,传统技术未契合该力学特性是引发加固缺陷的根本原因。

(2) 本文提出的低扰动排水体系优化、多参量耦合动态加载、全周期智能监测、全过程质量闭环管控四大关键技术,可有效适配滨海软土复杂力学行为,破解传统加固技术的核心瓶颈。

(3) 动态加载与智能监测的深度融合,实现了等载预压加固的科学化、精准化调控,既能加速软土固结进程,又能精准管控工后沉降,提升地基长期稳定性。

(4) 该关键技术体系具备较强的理论深度与工程实用性,可广泛应用于滨海软土地区各类工程的等载预压加固,技术经济效益显著。

5.2 展望

未来可进一步结合数字孪生、人工智能技术,构建等载预压加固全过程仿真模型,实现施工参数智能优化与加固效果提前预判;针对超深厚滨海软土、复杂荷载场地,进一步优化多场耦合固结理论与关键技术参数;研发绿色环保型排水材料与高效施工装备,推动滨海软土等载预压加固技术向智能化、绿

色化、长效化方向发展。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部.公路软土地基路堤设计与施工技术规范(JTG/T D36-01-2019)[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [2] 龚晓南.软土地基加固理论与实践[M].北京:科学出版社,2018.
- [3] 陈云敏,胡亚元.软土排水固结多场耦合机理及应用[J].岩土工程学报,2020,42(01):1-8.