

超载预压技术在软土路基工程中的应用实践与效益分析——以江北快速路武湖段为例

李扬, 谢模红

武汉航空港发展集团有限公司, 湖北 武汉 432200

DOI:10.61369/ERA.2025060005

摘要： 针对长江中下游地区软土地基路基沉降控制难题，以武汉市江北快速路武湖段工程为依托，开展超载预压技术的工程应用与管理效益研究。通过地质勘察精细化分析、加载参数优化设计、施工流程标准化管控及智能监测体系构建，系统阐述该技术在软基处理中的关键实施路径。研究表明：超载预压结合分层监测技术可将工后沉降有效控制在30 cm以内，较传统刚性桩法节约成本15%、缩短工期2个月，路面平整度达标率提升至98%。构建了“设计－施工－监测－管理”一体化技术体系，提供了可复制的“技术增效＋绿色管控”解决方案，对同类工程的沉降控制、成本优化及风险防控具有重要参考价值。

关键词： 软土路基；超载预压；沉降控制；动态监测

Application and Practice of Overload Preloading Technique in Soft Soil Subgrade Engineering and Benefit Analysis — Case Study of Wuhu Section of Jiangbei Expressway

Li Yang, Xie Mohong

Wuhan Aviation Port Development Group Co., Ltd. Wuhan, Hubei 432200

Abstract： To address the challenge of subgrade settlement control in soft soil foundations in the middle and lower reaches of the Yangtze River, this study focuses on the Wuhu Section of Jiangbei Expressway in Wuhan, investigating the engineering application and management benefits of surcharge preloading technology. Through refined geological survey analysis, optimized design of loading parameters, standardized construction process control, and the establishment of an intelligent monitoring system, the critical implementation pathways of this technology in soft soil treatment are systematically elaborated. The research demonstrates that surcharge preloading combined with layered monitoring technology effectively restricts post-construction settlement to within 30 cm, achieving a 15% cost reduction and a 2-month schedule acceleration compared to traditional rigid pile methods, while improving pavement flatness compliance to 98%. An integrated technical framework of 'design-construction-monitoring-management' is established, providing a replicable solution of 'technology-driven efficiency enhancement + green management.' This offers significant reference value for settlement control, cost optimization, and risk mitigation in similar projects.

Keywords： soft soil subgrade; overload preloading; settlement control; dynamic monitoring

引言

在我国长江中下游冲积平原区，软土地基具有高压缩性、低渗透性及流变性显著等工程特性，导致路基工后沉降控制成为高等级公路建设的核心技术难题^[1]。传统刚性桩法（如水泥搅拌桩、CFG桩）虽能快速提升地基承载力，但存在造价高昂、施工扰动大及环境影响突出等问题，难以满足绿色建设要求^[2-3]。超载预压技术通过超载荷载加速软土排水固结，兼具经济性与环保性，但其固结效率受地质条件、加载参数及监测精度影响显著，亟需结合工程实践开展技术优化与管理创新。

国内外学者针对超载预压开展了系列研究：张军民等^[4]通过室内试验揭示了超载预压下软土固结变形规律；凌道盛等^[5]分析了城市软基处理中超载预压的场地适应性限制；龚晓南等^[6]改进了基于双曲线模型的沉降预测方法，然而对“技术实施－过程管控－效益评价”一体化管理体系的研究仍显不足。

第一作者简介：李扬（1981－），男，高级工程师，硕士研究生，研究方向：市政工程与软基处理技术。

本文以江北快速路武湖段软基处理工程为背景，系统研究超载预压技术的参数优化、施工控制及监测反馈机制，重点分析其在沉降控制、成本节约、工期优化及绿色施工中的综合效益，以期同类工程提供技术借鉴与管理参考。

（一）项目背景与建设目标

（二）复杂地质条件分析

场区属长江左岸冲积平原,地基土呈典型“上软下硬”双层结构:表层为0.5~1.0 m厚淤泥(压缩模量2.26~3.88 MPa),中部为3.5~4 m厚淤泥质黏土(埋深9 m,压缩系数0.61 MPa⁻¹),下部为透水性粉砂层(渗透系数1×10⁻³ cm/s)。土层物理力学指标差异显著,易引发浅层压缩变形、深层工后沉降及新老堤防差异沉降等问题。

地下水系统呈“上部隔水层-下部透水层”双层结构,上部黏性土渗透系数为 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$ cm/s,下部粉砂层渗透系数达 1×10^{-3} cm/s,地下水动态受长江水位影响显著,加剧了软土固结过程的复杂性。

针对不同工况采用差异化处理方案：浅层软基，超挖换填法（处理深度2 m 内）；深层软基及结构物下地基，水泥搅拌桩复合地基；一般路段：超载预压技术（占比60%），充分发挥其成本与环保优势。

（一）技术方案设计与资源优化

本路段主要采用“超载预压+分层监测”的复合工艺,采用有限元软件模拟不同加载速率对地基稳定性的影响,确定最佳加载梯度为30cm/层,优化设计预压土方总厚度为3.09m,静载预压期不少于4个月。双标准控制:推算的工后沉降小于设计容许值,同时要求连续2个月观测的沉降量每月不超过5mm。

创新采用“挖填平衡”策略。预压土方采用挖方段的粉质黏

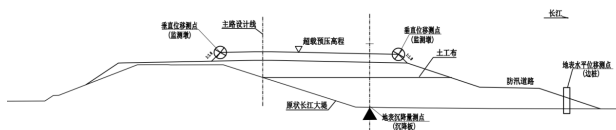
建立标准化施工工艺,明确各工序验收标准。清表阶段,清除耕植土厚度30cm,压实度检测 $\geq 95\%$;分层填筑,松铺厚度 $\leq 30\text{cm}$,振动压路机碾压6~8遍,压实度 $\geq 95\%$;超载加载,预压土压实度 $\geq 85\%$,加载速率与沉降监测实时联动。

（三）智能监测体系与风险控制

构建“地表+深层”立体监测网络(图1),每150m布置1条监测断面,采集地表沉降、水平位移、深层土体位移数据。施工期,监测频率每日1次;静压期,前2个月每周观测1次,其后每15天观测一次直至卸载。

2. 风险应对措施

针对可能出现的地基失稳风险,施工期制定二级响应机制:
①黄色预警(沉降速率 $5\sim 10\text{mm/d}$),暂停下一层加载;②红色预警(沉降速率 $>10\text{mm/d}$),全面停工,优化调整加载厚度及速率。



三、实施效果与管理效果分析

（一）沉降控制和管理提升

1. 沉降控制达标

预压期5个月后,典型断面累计沉降量28cm(K10+600断面),工后沉降推算值28cm,均小于设计限值30cm;沉降速率稳定在5mm/月以下(图2),满足路面铺筑条件;实际观测得到的沉降量与在设计阶段预估最终沉降量(22~28cm)相匹配,验证了设计方案的合理性和准确性。

2. 实体质量提升

通过超载预压,地基土承载力特征值有效提升,满足设计要求。路面平整度检测结果显示,IRI 值达标率近 98%,显著降低车辆荷载引起的附加沉降,延长路面使用寿命。

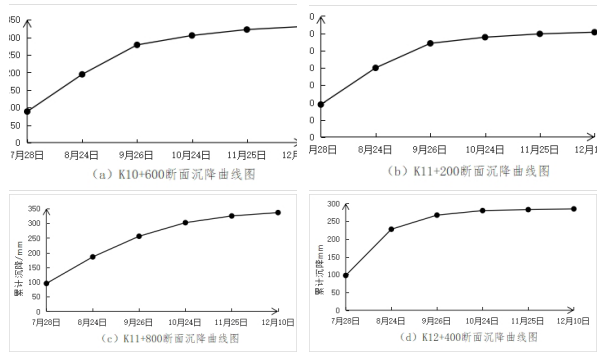


图2 预压期沉降曲线图

（二）成本节约与工期优化

1. 经济性优势显著

与传统刚性桩法相比，超载预压技术节约地基处理成本约15%；预压土循环利用减少弃土场租赁费用，降低材料采购成本。综合成本节约率达18%，超额完成项目成本控制目标。

2. 工期优化效果突出

通过动态加载控制和施工流程优化，软基处理阶段实际用时5.5个月，较计划工期（6个月）提前0.5个月，整体项目工期缩短2个月，提前实现通车目标，社会效益显著。

（三）安全环保与风险管理成效

1. 绿色施工达标

施工期噪声监测结果显示，超载预压作业区噪声值低于限值75dB；预压土运输采用封闭式渣土车，扬尘污染指数较刚性桩施工降低40%。

2. 风险可控性提升

智能监测体系累计采集数据10万条，预警响应及时率100%，精准识别K12+300段软土层厚度超设计15%的异常情况，通过分区加载（增加0.3 m 超载高度、延长预压15 d）避免沉降超标，提升风险应对效率。

四、技术局限性与改进措施

（一）场地适应性限制

超载预压需占用红线外场地作为堆载区，在城市密集区实施

时场地不足，可结合 BIM 技术进行场地三维建模，预留备用场地应对突发情况。

（二）边坡稳定性风险

坡度较陡或压实度不足堆载区易发生滑坡，可通过堆载前修筑反压护道、设置纵向排水沟和横向盲沟、采用加筋土工布包裹预压土体，提升整体稳定性。

（三）地质变异性影响

局部区域软土层厚度超设计值，导致沉降量超出预估，可通过建立地质动态勘察机制，实时更新 BIM 地质模型；采用“分区加载”策略，通过差异化设计确保处理效果。

五、结论与启示

（一）研究结论

超载预压技术，通过“荷载参数优化 + 动态监测控制”，可有效解决软土地基工后沉降问题，将工后沉降控制在设计范围内；融合绿色施工理念，通过材料循环利用与工艺优化，实现成本节约15%、工期缩短近2个月、有效提升环保效益，构建了技术与管理协同增效的软基处理模式；智能监测与风险预警体系，保障超载预压成功实施。

（二）工程启示

强化地质勘察精度，结合 BIM 技术优化堆载场地规划；建立多参量动态监测系统，实现“监测 - 分析 - 决策 - 调整”的智能化管理；推广预压材料循环利用技术，探索工业废料在超载预压中的应用，降低项目环境影响与资源消耗；制定分级预警与应急处理方案，提升项目抗风险能力。

参考文献

[1] 张军民, 李强, 王刚. 软土地基超载预压固结特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40(5): 890-896.
[2] 李建中, 陈伟, 刘洋. 高速公路软基处理技术经济性对比分析 [J]. 公路交通科技, 2020, 37(3): 25-32.
[3] JTG/T D31-02-2013, 公路软土地基路堤设计与施工技术规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
[4] 刘松玉, 吴春林, 章定文. 软土地基处理技术最新进展与工程实践 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2019: 120-135.
[5] 凌道盛, 郑刚, 周航. 城市软基处理中超载预压技术的应用限制与对策 [J]. 岩土工程技术, 2018, 32(2): 65-70.
[6] 龚晓南, 胡敏, 张杰. 基于双曲线模型的软基沉降预测方法改进 [J]. 岩土力学, 2021, 42(7): 2031-2038.