

公路软土地基处理施工技术与案例分析

李富光

河北光太路桥工程集团有限公司, 河北 邯郸 056000

DOI:10.61369/ERA.2026010003

摘 要： 软土地基在公路建设中常因其承载力低、压缩性高、稳定性差等特点，严重影响道路工程的施工质量与使用寿命。本文围绕软土地基处理的关键施工技术展开探讨，系统梳理常用加固方法及其适用条件，并结合具体工程案例分析各类技术的实践效果。通过数据对比、技术评估，提出优化施工流程、提高处理效率和安全性的建议，为今后类似工程提供技术支持和参考依据。

关 键 词： 软土地基；公路工程；地基加固；施工技术；案例分析

Research on Construction Techniques and Case Studies for Soft Soil Foundation Treatment in Highway Projects

Li Fuguang

Hebei Guangtai Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd., Handan, Hebei 056000

Abstract： Soft soil foundations often significantly impact the construction quality and service life of highway projects due to their low bearing capacity, high compressibility, and poor stability. This paper explores key construction techniques for soft soil foundation treatment, systematically reviews commonly used reinforcement methods and their applicable conditions, and analyzes the practical effects of various techniques through specific engineering case studies. By comparing data and evaluating technologies, recommendations are proposed to optimize construction processes, enhance treatment efficiency, and improve safety, providing technical support and reference for similar future projects.

Keywords： soft soil foundation; highway engineering; foundation reinforcement; construction techniques; case analysis

引言

随着我国交通基础设施建设的快速推进，公路建设日益深入软土地区，软土地基问题逐渐凸显。科学、经济、高效地处理软土地基，成为工程质量控制和成本管理的关键。本文以实用技术为导向，系统总结软土地基处理的主流施工技术，并通过工程案例对其应用效果进行分析，旨在为今后公路工程地基处理提供可操作性的技术指导。

一、软土地基的工程特性与处理原则

（一）软土地基的物理力学特征

软土地基是指以饱和黏性土、淤泥质土或泥炭土为主要成分的地基类型，广泛分布于河流三角洲、湖泊岸边、滩涂区和沿海低洼地带。这类土体因沉积时间短、有机质含量高、水分充足，其物理力学性质普遍存在显著弱点，表现为承载力极低、压缩性极强、渗透性差、天然含水率高、剪切强度低，且在外界扰动或荷载作用下容易出现流变性。在施工过程中，一旦直接在未经处理的软土地基上进行荷载传递，常会引发严重的工后沉降、结构倾斜、开裂甚至滑移等工程病害，影响道路的正常使用和安全性。特别是在公路工程中，由于车辆荷载反复作用和长期运行需求，对地基的稳定性和承载力提出了更高要求。若不对软土地基

进行科学有效的加固处理，不仅施工过程风险高，还将大幅增加运维成本^[1]。因此，对软土地基的物理力学特性进行准确识别与参数掌握，是制定合理处理方案、保障工程质量的前提与基础。

（二）地基处理的基本目标

软土地基处理的核心目标在于全面提升地基的强度与稳定性，控制或减少总沉降量与不均匀沉降，确保公路路基结构的安全性与耐久性。一方面，通过置换、加固、注浆等手段提高地基的承载力，使其承载能力由原始的40 ~ 60kPa提升至不低于设计要求的120 ~ 150kPa，满足各类公路荷载需求；另一方面，通过增设排水通道（如塑料排水板）、施加真空预压或堆载荷载，促使孔隙水压力降低80%以上，加速超固结过程，使固结时间由自然状态下的1 ~ 2年缩短至3 ~ 6个月，显著提高施工效率。同时，通过改善土体结构与减小含水率，可有效提升地基的抗剪

强度与变形模量,降低结构物后期出现差异沉降、裂缝及失稳风险。此外,在工期紧张或场地狭窄环境下,需综合考虑施工周期、投资成本与设备可行性,在经济合理的条件下取得最佳加固效果,确保施工方案在技术可行性与经济性之间实现有效平衡。明确处理目标还能指导技术选型、控制工艺参数,并为竣工验收与质量评估提供依据。

（三）软土地基处理的适用判断原则

在软土地基处理过程中,必须依据详实的工程地质勘察资料,对地基土层分布、地下水位条件、原状土强度指标及拟建结构的荷载特征进行综合分析,科学判断是否需要处理以及确定合理的处理深度、范围与施工方法。一般来说,当软土层厚度大于3m,标准贯入试验N值小于4,孔隙比大于1.2,压缩模量小于3MPa时,地基承载力明显不足,应进行处理。根据不同等级道路荷载要求,高速公路路基设计承载力通常不低于120kPa,若实测值低于该标准,即需进行加固。同时结合沉降计算模型分析工后沉降值是否控制在规定范围内(如累计沉降<300mm,差异沉降<30mm),进一步判断处理的必要性。此外,还需综合评估施工区地下水位(高于地表1.5m以内需考虑降排水措施)、场地可作业面积、材料运输条件、工期及投资预算等因素,确保所选处理技术在安全性、适应性和经济性上均具优势。对于高填路堤、桥头搭接、软土厚度超过8m或存在复合地层的复杂场地,建议采用“真空预压+排水板+堆载”或“旋喷桩+换填”等多种复合技术组合,提高处理效果和工程安全系数。

二、常见软土地基处理施工技术

（一）换填法施工工艺

换填法是一种适用于浅层软土地基处理的传统技术,主要通过挖除原有强度较低的软弱土层,回填强度高、压缩性小的材料(如碎石、砂砾、石灰土等)来改善地基的承载性能。施工过程中需首先准确测定软土厚度和换填深度,以免换填深度不足而影响加固效果^[2]。开挖过程中应防止扰动边坡,避免发生边坡坍塌;回填材料要求分层铺设、逐层夯实或碾压,每层厚度控制在20~30cm,以确保整体密实度和稳定性。在地下水位较高的区域,换填施工前应进行排水处理,防止水土流失或泥化现象。该方法操作简便、施工周期短,适用于中低等级公路、便道或施工便桥等项目,但在软土厚度大于3m或填土后静载较大时不宜单独采用,需与其他加固措施配合使用。

（二）真空预压联合排水板法

真空预压法联合塑料排水板是一种高效、环保的软土地基预处理技术,特别适用于大面积、深厚软土区域的地基加固,常见于高速公路、机场跑道、港口堆场等工程。该方法以塑料排水板为垂直排水通道,在地表铺设密封膜,通过真空泵持续抽气,形成-80kPa至-90kPa的负压环境,使孔隙水沿排水板迅速排出,加快土体固结进程,提升地基承载力,并有效控制总沉降量和差异沉降^[3]。其标准施工流程包括:场地平整压实、插设排水板(插深615m,间距1.015m)、铺设导排砂垫层、安装真空管网与抽

气系统、覆盖密封膜及加压封边。真空系统运行过程中,要求密封膜漏气率小于 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,并设置沉降板、孔压计等进行24小时不间断监测,确保固结有效性。与传统堆载法相比,真空预压不仅减少对邻近结构物的附加影响,还可缩短处理周期30%~50%,节约填土量20%以上,具有显著的技术经济优势。但该技术对场地气密性控制、设备运行连续性和技术人员操作水平要求较高,需由专业团队进行系统化施工管理。

（三）高压旋喷注浆法

高压旋喷注浆法适用于深层软土地基加固,特别是在受限场地或重要结构物基础下方的地基增强工程中。该技术通过高压泵将水泥浆液或其他固化材料以30~40MPa以上的压力喷入地基土中,在喷头旋转的同时,浆液切割、搅拌原土并与其混合硬化,形成具有一定强度和刚度的桩体或加固体,构成柱状、墙状或复合结构,显著提高地基承载力与抗渗性能。施工前需进行地基注浆试验,确定喷浆压力、提升速度、旋转速度及配浆比例,以控制浆液扩散半径与成桩质量。施工中应严格控制喷嘴深度与注浆均匀性,防止浆液上涌、串浆或地面鼓胀等问题。该法特别适合于桥梁台背、软基深坑支护、高填方堤坝基础处理等,对施工设备和工艺控制精度要求较高,成本相对较大,但其加固效果稳定可靠,适应性强。

三、软土地基处理中的施工质量控制要点

（一）地基加固前的地质勘查与检测

地质勘查是软土地基处理前的首要环节,其准确性直接决定后续处理方案的科学性与合理性。在加固施工前,需通过钻探、取样、静力触探、标准贯入试验(SPT)等手段全面掌握地层分布、土性变化、地下水位、孔隙比及含水率等基础数据。一般而言,钻探深度应大于预计处理深度1.5倍,钻孔间距宜控制在20~30米之间,以提高勘查的代表性与准确度。对于厚度超过5米的软土,应增加原位测试密度,确保各层物理力学参数全面准确^[4]。实验室试验包括含水率、液限、塑限、压缩系数、无侧限抗压强度、剪切强度等指标,以确定软土的压缩性和承载力,指导施工设计。在一些对沉降控制要求严格的区域,还需布设孔压计、沉降板等自动化监测装置,为后续沉降控制提供预警依据。

（二）施工过程中的质量控制措施

施工过程中是保证软土地基处理效果的关键阶段,需实施全过程的质量控制体系。在换填法中,应严格控制每层填料的厚度不超过30cm,并采用1822t压路机碾压8遍以上,密实度应达到90%以上;在真空预压施工中,密封膜漏气率应控制在 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以内,抽气系统压力需稳定维持在-80kPa以下,每日沉降速率监测至少2次;高压旋喷注浆施工中,注浆压力控制在3040MPa之间,浆液水灰比一般为0.8~1.2,提升速度小于20mm/s,旋转速度不大于30rpm。施工过程中应设置专人负责沉降观测、孔压监测和地面位移测量,每日记录施工参数和监测数据。若发现异常沉降或压力波动,应立即调整施工工艺或暂停处理,避免引发结构损伤或质量隐患。此外,作业人员应持证上

岗，设备定期保养，确保施工稳定性和作业安全^[5]。

（三）加固后检测与验收标准

软土地基加固完成后，应按规范进行系统检测与综合验收，确保处理效果达标。常用检测方法包括静力载荷试验、轻便触探试验、动力触探、十字板剪切试验及室内土样分析等。静载试验是最直接的承载力评估方式，根据《建筑地基基础设计规范》（GB 50007-2011），试验结果中地基承载力应满足设计值要求，一般不小于120kPa；沉降量与加载速度需符合规范曲线趋势。若采用真空预压法处理，需持续跟踪沉降至其稳定后方可验收，沉降稳定标准为连续7天沉降速率小于2mm/d。施工单位需编制地基处理施工报告及检测成果报告，经监理单位审核通过后，方可进入上部结构施工阶段。验收过程中，尤其要关注不均匀沉降、渗漏、局部软弱夹层等潜在隐患，确保地基加固效果满足长期运营稳定性要求^[6]。

四、工程案例分析与技术评估

（一）某沿海高速软土地基处理案例概述

某沿海高速公路项目全长约18.6公里，位于典型海滨软土地带，地基主要由厚度6~12米的淤泥质黏土构成，天然含水率达55%以上，孔隙比约1.4，原始地基承载力仅为60kPa，远低于设计要求的130kPa。为保证高速公路路基稳定，项目采用“真空预压+塑料排水板+堆载预压”复合处理方式，处理区域总面积约54万平方米。施工设计阶段，根据勘察报告将排水板插入深度控制在12米，布设间距为1.2米；同时设沉降观测点106个，孔压监测点42个，确保数据采集全面。真空系统设置8套负压装置，连续运行90天，并分三阶段加堆载至设计荷载0.8倍，以加速沉降。处理区内地面封闭膜采用双层PE+土工布结构，确保气密性，真空压力控制在-85kPa左右，施工全过程由自动监测系统记录实时数据并联动报警控制^[7]。

（二）施工数据分析与处理效果对比

施工期间监测数据显示，在真空加载第30天时，地基沉降量

平均达182mm，第60天累计沉降平均为338mm，终期沉降量为428mm，沉降速率逐步降低至2mm/d以下，满足沉降稳定标准^[8]。孔隙水压力从初期的45kPa逐步降至5kPa以内，有效促进地基固结。通过对比处理前后标准贯入试验结果，N值平均由原始的3提升至11，承载力提高至146kPa以上，部分区域达到180kPa，明显超出设计目标。在填筑后180天内持续观测显示，沉降残值小于15mm，差异沉降控制在8mm以内，地基稳定性表现良好。相比传统堆载法，该项目沉降稳定周期缩短40%以上，地基承载力提升效果更明显，且有效减小施工对周边构筑物的扰动。

（三）技术经济性评价与推广建议

从技术经济性角度分析，真空预压联合排水板处理方式具有良好的适应性和投资效益。本项目单位处理成本约为85元/m²，相较于高压旋喷等深层处理技术节省投资约28%；施工周期控制在120天内，较常规预压法缩短约45天，节约工期成本近320万元。设备投入集中、人工成本较低，同时在材料采购与场地封闭方面采用模块化设计，大幅提高施工组织效率。此外，该方法环保性能突出，处理过程不产生固废、废浆等次生污染，符合沿海湿地生态保护要求。建议在未来沿海软土路基工程中推广使用此技术，尤其在大面积、沉降控制要求高的场地中联合采用真空+排水+堆载复合体系。同时，应加强地基信息化监测手段，引入智能化数据分析与风险预警系统，提升施工质量控制与运行安全保障水平。

五、结语

软土地基处理技术是保障公路工程稳定性与使用寿命的关键环节。通过对软土特性精准识别，科学选择施工方法，并在全过程中强化质量控制，能够有效提升地基承载力，控制沉降，确保施工安全。工程案例表明，真空预压联合排水板法在软基加固中具有良好的技术适应性与经济效益，值得广泛推广。未来应结合地质条件与工程需求，不断优化施工工艺，推进智能化监测与绿色施工，实现软土地基处理的高效、安全、可持续发展。

参考文献

[1] 李杰. 公路工程路基加固施工技术研究 [J]. 汽车周刊, 2025, (07): 237-239.
[2] 邓勇军. 公路桥梁施工中软土地基施工技术处理探究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (17): 105-107.DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202517035.
[3] 周晶晶, 周文轩. 软基处理技术在公路路基路面设计过程中的应用 [J]. 科学技术创新, 2025, (13): 109-112.
[4] 李红霞. 试析软土地区的公路路基设计 [J]. 产品可靠性报告, 2025, (05): 118-119.
[5] 李振亚. 公路桥梁软土地基施工技术的应用 [J]. 汽车画刊, 2025, (05): 119-121.
[6] 弓文俊. 软土地基施工技术在道路工程路基施工中的应用研究 [J]. 居业, 2025, (05): 64-66.
[7] 杜新宇. 公路工程软基处理绿色施工技术应用研究 [J]. 工程建设和设计, 2025, (08): 174-176.DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2025.04.256.
[8] 郑文波, 贺志成. 公路软土路基 CFG 桩施工技术分析 [J]. 运输经理世界, 2025, (12): 41-43.