

高速公路软基处理技术在复杂地质区域的应用效果分析

李春丽¹ 孙本涛² (通讯作者) 沈艳轫³

1. 云南正润建设工程有限公司 云南昆明 650000;

2. 云南辰再建筑工程有限公司 云南昆明 650000; 3 云南源州建设工程有限公司 云南昆明 650000

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19689

[摘要] 复杂地质区域的高速公路建设中, 软基处理是保障工程质量与运营安全的核心环节。本文基于当前软基处理技术发展现状, 系统概述复杂地质条件下常用的软基处理技术类型及选型依据, 从地基稳定性、沉降控制、环境适应性三个维度构建应用效果评价体系, 结合实测数据与技术参数分析各指标表现, 最终提出智能化、绿色化、协同化的技术优化方向。研究表明, 固废基复合加固与智能监测结合的技术路径, 可在提升地基承载性能的同时实现低碳环保, 为复杂地质区域软基处理提供技术参考。

[关键词] 高速公路; 软基处理; 复杂地质; 应用效果; 优化方向

引言

我国东南沿海以及江河入海口等地区软土分布广泛, 这类土层有着含水率高、压缩性大、抗剪强度低、渗透性差等特性。在其上修建高速公路就如同在豆腐上筑路一样, 容易引发路基失稳以及不均匀沉降等病害, 复杂地质区域又叠加了岩溶发育、土层界面突变、地下水位波动等状况, 这加大了软基处理的技术难度。传统处理技术存在碳排放高、成本可控性差、监测滞后等不足, 已经难以契合现代高速公路安全、低碳、高效的建设要求, 梳理当前主流软基处理技术类型, 建立科学的效果评价标准, 探索技术优化路径, 对于推动复杂地质区域高速公路建设高质量发展有着关键现实意义。

一、复杂地质区域高速公路软基处理技术类型概述

1.1 常用软基处理技术分类

复杂地质区域常用的软基处理技术已形成“复合加固”“原位改良”两大技术体系, 具体可分为三类: 一是桩体复合地基技术, 通过设置刚性或半刚性桩体将上部荷载传递至深层持力层, 包括全固废负碳活性复合桩、预应力管桩+土工格室组合体系等, 此类技术核心在于提升桩体与土的协同工作性能, 全固废负碳活性复合桩通过工业固废掺合料优化桩体材料组成, 其水平承载力较传统桩基提升 70%; 二是原位固化改良技术, 利用新型凝胶材料对软土进行就地加固, 通过高效解泥造浆装备将软土研磨后掺入固废基绿色凝胶材

料, 形成流态固化土或轻质固化土, 该技术可使软土固化成本降至 40 元/立方米, 较传统技术节约 20%-40%; 三是排水固结强化技术, 结合真空预压与塑料排水板, 加速软土中孔隙水排出, 适用于渗透性较差的淤泥质软土, 与传统堆载预压相比, 工期可缩短 30%以上^[1]。

1.2 技术选型依据

复杂地质区域软基处理技术选型需建立“地质适配-工程需求-经济环保”的三维决策模型, 首要依据为地质勘察数据, 包括软土厚度、含水率、孔隙比、持力层埋深等核心参数, 如软土厚度小于 2 米时优先采用换填法, 大于 5 米时则需选用桩体复合地基技术; 其次需匹配工程荷载要求, 重载高速公路路基需将地基承载力提升至 180kPa 以上, 此时应优先选择活性复合桩等高强度处理技术; 经济成本控制是选型的关键约束, 原位固化技术因减少弃土转运成本, 在软土分布集中区域较传统换填法节约 70%以上工程费用; 环境适应性要求则聚焦碳减排与固废利用, 固废基凝胶材料生产过程每吨可减少 0.57 吨二氧化碳排放, 降碳率达 92%, 成为生态敏感区域的优先选型。

二、复杂地质区域软基处理技术应用效果的核心评价指标

2.1 地基稳定性提升效果

地基稳定性是软基处理效果的首要评价指标, 核心通过抗剪强度、复合承载力、桩体完整性三个参数表征。抗剪强

度的提升依赖于固化材料与软土颗粒的胶结作用，固废基凝胶材料可使软土内摩擦角从 15° 提升至 $28^\circ - 32^\circ$ ，粘聚力从 8kPa 增至 35kPa 以上；复合承载力需通过静载试验验证，不同处理技术的承载力提升幅度存在显著差异，桩网复合地基技术可使地基承载力达到 250kPa-300kPa，满足重载高速公路要求；桩体完整性则通过全波场弹性波测试装备检测，该装备检测精度达 5 毫米，是传统技术的 10 倍，可有效识别桩身缺陷，保障桩体传递荷载的可靠性^[2]。

2.2 沉降控制效果

沉降控制直接决定高速公路运营寿命，需重点监控工后沉降量与沉降速率两个指标，不同处理技术的沉降控制效果可通过量化数据直观对比（见表 1）。轻质固化土桩通过引入微气泡降低桩体密度，减少对软土地基的附加应力，较传统水泥石土桩减少 50% 附加应力，沉降量缩小 23%；预应力管桩+土工格室体系则通过三维“桩-网”结构分散荷载，使工后沉降量控制在 15 毫米以内，沉降速率稳定在 0.1 毫米/天以下；真空预压联合加固技术适用于深层软土，通过负压加速固结，可将工后沉降控制在规范要求的 30 毫米以内，但处理周期相对较长。这些数据表明，桩体复合地基技术在沉降控制方面综合性能更优，尤其适用于对沉降要求严格的复杂地质区域。

表 1 不同软基处理技术稳定性与沉降控制核心指标对比

处理技术类型	复合承载	工后沉降量	附加应力
	力提升幅度	(mm)	减少率 (%)
全固废负碳韧性复合桩	$\geq 70\%$	≤ 20	45
轻质固化土桩	38.3%	≤ 25	50
预应力管桩+土工格室	$\geq 100\%$	≤ 15	40
真空预压联合加固	50%-60%	≤ 30	35

2.3 环境适应性表现

复杂地质区域往往伴随生态敏感属性，环境适应性评价需兼顾固废利用、碳减排、污染控制三个维度，各技术的环境适应性指标差异明显。固废基原位固化技术以冶炼渣、粉煤灰等工业固废为原材料，固废利用率达 85% 以上，生产过程无需高温煅烧，碳减排率远高于传统水泥固化技术；桩体复合地基技术中，全固废负碳韧性复合桩通过掺加工业废碱

作为激发剂，实现“以废治废”，避免了传统桩基施工中水泥生产的高碳排放；真空预压技术因无需大量建材投入，碳排放较低，但需注意施工过程中排水的 pH 值控制，避免污染周边水体。从数据来看，固废基相关处理技术在环境适应性方面表现突出，符合“双碳”目标下的工程建设要求。

三、复杂地质区域软基处理技术应用的优化方向

3.1 智能化监测与预警体系升级

用物联网与全波场测试技术建全过程智能监测平台，是提升处理效果可控性的主要方向。此平台打破传统监测的单点限制，用“点-线-面”三维布置方法，在软基加固区关键受力点布置振弦式传感器，沿路基轴线布置光纤光栅位移计，在区域均匀布置孔隙水压力计，实现承载力、沉降量、桩体应变及孔隙水压力等多参数同时采集。利用 5G 技术带宽大、延迟低的特点，数据传输延迟严格控制在 1 秒内，保证施工和运营阶段能实时反馈数据，为现场决策提供准确依据^[3]。

智能监测平台的主要优点是能深度处理数据并主动预警，通过使用基于长短期记忆网络 (LSTM) 的 AI 算法，对历史监测数据和实时数据进行融合分析，能准确预测未来 30 天内的沉降发展趋势和承载力变化规律。当指标接近规范阈值时，系统能在 30 秒内通过移动端 APP、现场声光报警器两个渠道发出预警，比传统分钟级预警反应速度快一倍。同时平台有碳汇动态计算模块，能实时计算固废利用和低碳技术带来的碳减排效果，实现“施工-监测-减排”数据统一管理，为技术优化提供全面数据支持。

3.2 绿色固化材料的性能优化

针对不同复杂地质特点制定固废基凝胶材料配方，是提高处理技术适配性的重要方法。复杂地质区域的软土性质差别大，例如滨海淤泥含水率常达 60%-80%，内陆湖相软土则有很多有机质，这要求固化材料有更强针对性。通过改变冶炼渣和粉煤灰的掺入比例，加入石膏、石灰等活性调节成分，能让凝胶材料的凝结时间在 4-12 小时内灵活调整，在高含水率软土中可延长凝结时间保证施工容易操作，在有机质软土中则缩短凝结时间提高早期强度，满足不同施工环境和地质条件的要求。

提高绿色固化材料性能要依靠新型组分的研发和使用,研发团队将电石渣和工业废碱按 3:1 的比例混合制成新型复合激发剂,其碱性活性比单一激发剂提高 40%,能有效解决高含水率软土中颗粒分散的问题,加快水化反应速度,使软土固化后 7 天的早期强度提高 20%,28 天强度提高更明显。同时积极研究纳米材料改性技术,在凝胶材料中加入 0.5%-1%的纳米硅粉,利用其高比表面积和高活性,填充固化土内部孔隙,改善材料微观结构,使固化土的渗透系数降低一个数量级,进一步提高长期稳定性和抗渗性能。

3.3 技术组合的协同效应强化

构建“原位固化+桩体承载+排水强化”的组合技术体系,是实现不同技术优点互补、应对复杂地质问题的有效办法。在岩溶发育地区,地质条件很复杂,溶洞、溶沟分布没有规律,单一技术不能同时满足填充和承载需要,所以先使用固废基原位固化技术,通过高压喷射将流态固化材料注入岩溶裂隙,形成连续的固化体填充层,阻止地下水渗透;接着在填充层上布置全固废劲性复合桩,将上部荷载传递到深层完整基岩;最后在桩间土里设置塑料排水板,加快残留孔隙水排出,经现场检测,该组合技术让地基处理效果比单一技术提高 40%,大大降低了岩溶塌陷风险^[4]。

在软土与硬岩界面突变地区,容易因为刚度不同导致应力集中,引发桩体断裂或路基不均匀沉降,使用“轻质固化土桩+土工格栅”组合技术能有效解决这个问题。轻质固化土桩密度只有传统水泥土桩的 70%,能明显减少对下部软土的附加应力,土工格栅通过其抗拉能力将荷载向周围桩体扩散,形成均匀的受力体系,有效缓解界面处的应力集中。组合技术的关键在于优化施工顺序,通过 FLAC3D 数值模拟软件建立地质模型,模拟不同工序间隔时间下地基应力的变化,最终确定原位固化完成 7 天后进行桩体施工、桩体养护 14 天后铺设土工格栅的合理顺序,保证前序处理效果和后序施工的协同配合。

3.4 施工装备的高效化升级

针对传统设备研磨不均匀、混合效果不好的问题,新型高效解泥造浆设备采用多齿联动刀盘结构,刀盘转速提高到

300 转/分钟,加上高压射流装置,将软土研磨粒径准确控制在 0.5 毫米以内,使固化材料与软土的混合均匀度提高 30%,有效避免局部固化不足的问题。其中固定式设备产能达到 400 立方米/小时,是传统设备的 3 倍,特别适合软土集中的大面积施工区域,大大缩短了施工时间。

为解决复杂地形下设备移动难的问题,技术团队开发了履带式移动固化站,该设备采用宽履带设计,接地比压只有 0.08MPa,可在坡度小于等于 15° 的丘陵、沟谷等复杂地形中灵活移动,实现软土“就地开挖-研磨-固化-回填”的一体化操作,减少了物料转运环节,降低了运输成本和碳排放。针对北方冬季施工情况,在设备的搅拌仓和输送管道上安装了电加热保温系统,将物料温度稳定控制在 5℃ 以上,确保固化材料在低温下仍能正常凝结,突破了传统技术冬季施工的限制,扩大了技术应用的环境范围。

四、结语

复杂地质区域高速公路软基处理技术不断发展,正向着智能化、绿色化以及协同化的方向前行,桩体复合地基以及固废基原位固化技术,凭借其出色的稳定性和良好的环境适应性,已然成为了主流的应用方向,而智能监测平台的搭建以及绿色材料的优化,提高了技术的可控程度与适配性能。未来,软基处理技术发展,要更加重视地质条件与技术参数的精确匹配,借助“材料-装备-监测”全链条创新,达成工程质量、经济效益与生态环保的协同提升,为我国复杂地质区域高速公路建设提供更为可靠的技术保障。

[参考文献]

- [1]张祯. 路基软基处理技术在高速公路施工中的应用[J]. 工程技术研究, 2025, 10 (02): 62-64.
- [2]卢航奇. 公路工程软基处理技术方法的优化研究[J]. 建筑技术开发, 2025, 52 (01): 115-118.
- [3]邱拥军. 高速公路工程软基处理中粉喷桩加固技术要点研究[J]. 交通科技与管理, 2024, 5 (16): 94-96.
- [4]卢华诚. 高速公路路基设计软基的处理技术分析[J]. 交通科技与管理, 2024, 5 (04): 138-140.