

公路软土地基处理方案对比分析

周冰倩

济宁鲁南公路工程公司 山东 济宁 272000

摘要：公路工程中，软土地基因含水量高、抗剪强度低、承载力弱，易引发沉降、开裂等病害，严重影响工程质量与使用寿命。本文阐述软土地基理论基础及常用处理方案，从技术性能、经济指标、环境与工期影响三大维度，对比传统、新兴及特殊场景处理方案的优劣势，总结各类方案适用条件，提出针对性选型建议，为公路软土地基处理工程的方案优化、成本控制及质量保障提供实用参考，助力工程高效推进。

关键词：公路；软土地基；处理方案；对比

引言：随着我国公路建设向沿海、河湖洼地等软土集中区域延伸，软土地基处理成为工程建设的核心难点。软土地基的高压缩性、低渗透性等特性，易导致路基失稳、桥头跳车等问题，增加施工与养护成本。目前处理方案种类繁多，各有适配场景与优劣，缺乏系统对比分析易造成方案选型不合理。因此，开展各类处理方案的全面对比，明确选型依据，对提升公路工程稳定性、延长使用寿命具有重要现实意义。

1 公路软土地基相关理论基础

1.1 软土地基的定义与分类

（1）软土地基的定义：公路工程中，软土地基是指天然含水量高、孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低、承载力弱，在公路荷载作用下易产生较大沉降和不均匀变形，影响公路工程质量和使用寿命的一类地基。其核心特征是“软”，通常由淤泥、淤泥质土、冲填土、杂填土等软弱土层构成，广泛分布于沿海、河湖洼地、沼泽地带及山间谷地等区域。（2）软土地基的分类：按成因可分为天然软土地基和人工软土地基，天然软土由自然地质作用形成，人工软土由人类工程活动形成，如填土、弃土；按土层性质可分为淤泥类软土、冲填类软土、杂填类软土，其中淤泥类软土含水量最高、工程性质最差，是公路工程中最常见的处理对象。

1.2 公路软土地基的工程特性

（1）物理力学性质：天然含水量通常大于液限，孔隙比大于1.0，部分可达1.5以上；密度小、渗透性差，排水固结速度缓慢；抗剪强度极低，内摩擦角小，承载力远低于公路工程设计要求，易发生剪切破坏。（2）力学行为与变形特征：在公路荷载作用下，变形具有时效性和累积性，初期产生瞬时沉降，后期伴随排水固结产生固结沉降，易出现不均匀沉降；长期荷载作用下会发生蠕变变形，导致公路路面开裂、桥头跳车等问题。（3）

工程危害表现：短期易导致路基失稳、边坡坍塌，影响公路施工安全；长期会引发路面沉降、开裂、破损，降低公路通行质量；桥头、涵洞等构造物处易出现差异沉降，形成桥头跳车，严重影响行车舒适性和安全性，增加养护成本^[1]。

1.3 软土地基处理的核心原则与目标

（1）核心处理原则：遵循“因地制宜、按需处理”原则，结合软土分布、厚度、工程性质及公路等级、荷载要求，选择经济、合理、可行的处理方案；坚持“排水固结、增强强度”核心，通过改善软土排水条件、提高抗剪强度，减少沉降变形；兼顾安全性与经济性，在保证工程质量的前提下，控制处理成本，缩短施工周期。（2）具体处理目标：短期目标是提高软土地基的承载力和稳定性，满足公路施工期间的荷载要求，防止施工过程中出现路基失稳、坍塌等事故；长期目标是控制软土地基的总沉降量和不均匀沉降量，使其符合公路设计规范要求，避免后期路面开裂、桥头跳车等病害，保障公路长期安全、稳定通行，延长公路使用寿命。

2 公路软土地基常用处理方案及技术要点

2.1 传统软土地基处理方案

（1）换填法的技术原理与施工要点：技术原理是挖除路基范围内的软弱土层，换填强度高、稳定性好的填料，如级配砂石、灰土、素混凝土等，通过压实增强地基承载力，减少沉降变形。施工要点：先精准放线确定换填范围和深度，挖除软土时避免扰动周边土层；换填填料需分层铺设，每层厚度控制在20-30cm，采用压路机分层压实，压实度需达到设计要求（通常不低于95%）；换填底部应铺设排水垫层，防止地下水浸泡新填土层。

（2）预压法的技术原理与施工要点：技术原理是通过施加外部荷载（堆载）或抽真空形成负压，加速软土排水固结，提高抗剪强度和承载力。堆载预压施工要点：分

级施加荷载,避免一次性加载过快导致路基失稳,每级荷载施加后需静置沉降稳定再进行下一级;设置排水盲沟和砂垫层,加快排水速度。真空预压施工要点:密封地基表面,防止漏气,真空度需维持在80kPa以上,持续抽真空至沉降达到设计要求后停止^[2]。(3)砂桩法的技术原理与施工要点:技术原理是通过沉管、振动等方式将砂料打入软土层,形成砂桩复合地基,改善软土排水条件,提高地基承载力和整体稳定性。施工要点:控制砂桩的间距、深度和直径,确保符合设计要求;砂料需选用洁净中粗砂,含泥量不超过3%;施工过程中避免出现断桩、缩颈现象,施工后需检查砂桩密实度。

2.2 新兴软土地基处理方案

(1)深层搅拌法的技术原理与施工要点:技术原理是利用搅拌机械将水泥、石灰等固化剂与软土就地搅拌均匀,形成水泥土搅拌桩复合地基,通过固化剂与软土的化学反应提高地基强度。施工要点:控制搅拌桩的深度、直径和间距,确保搅拌均匀;固化剂掺量需符合设计要求,搅拌时间不少于规定时长;施工后需养护7-14天,检测桩体强度和复合地基承载力。(2)化学加固法的技术原理与施工要点:技术原理是向软土层中注入化学浆液,如水泥浆、水玻璃等,浆液与软土发生化学反应,胶结软土颗粒,形成稳定的加固体,提高地基承载力。施工要点:精准控制注浆压力、注浆量和注浆速度,避免浆液流失;注浆孔间距需合理布置,确保加固范围全覆盖;注浆后需养护一定时间,检测加固效果。

(3)真空联合堆载预压法的技术原理与施工要点:技术原理是结合真空预压和堆载预压的优势,通过抽真空形成负压和堆载施加荷载,双重作用加速软土排水固结,缩短处理周期,提高处理效果。施工要点:先铺设砂垫层和排水盲沟,密封地基表面;同步进行真空抽气和分级堆载,控制堆载速度与真空度匹配;实时监测沉降和孔隙水压力,确保施工安全^[3]。

2.3 特殊场景处理方案

(1)桥头软土地基处理方案:针对桥头易出现差异沉降、桥头跳车问题,采用PHC管桩或筒桩处理。PHC管桩施工要点:采用静压或锤击法沉桩,控制桩长、桩径和桩间距,确保桩端嵌入硬土层;筒桩施工要点:通过沉管成孔,浇筑混凝土形成筒桩,增强地基承载力,减少桥头沉降,施工后需检测桩身完整性和承载力。(2)深层软土地基处理方案:针对软土厚度大于10m的深层地基,优先采用深层搅拌桩、高压旋喷桩或PHC管桩复合地基方案。施工要点:根据软土厚度和性质选择合适的桩型和桩长,确保桩端穿透软土层进入持力层;加强施

工过程中的质量控制,防止出现桩身缺陷,确保处理后地基满足设计荷载要求。

2.4 各类方案的适用范围界定

(1)按软土厚度划分的适用范围:软土厚度小于3m时,适用换填法;厚度3-10m时,适用预压法、砂桩法;厚度大于10m时,适用深层搅拌法、高压旋喷法、PHC管桩等深层处理方案;真空联合堆载预压法适用于各类厚度的软土地基,尤其适合深厚软土。(2)按工程工况划分的适用范围:公路路基、小型构造物地基,且工期较宽松时,适用预压法、砂桩法;工期紧张、承载力要求较高的路段,适用换填法、深层搅拌法;桥头、涵洞等对沉降控制严格的部位,适用PHC管桩、筒桩;对环保要求较高、不允许大面积扰动土层的区域,适用真空预压法、化学加固法。

3 公路软土地基处理方案对比分析

3.1 技术性能对比

(1)加固效果与沉降控制能力对比:深层搅拌法、PHC管桩等方案加固效果最优,能显著提升地基承载力,沉降控制精度高,可将不均匀沉降控制在规范允许范围内,适用于沉降要求严格路段;真空联合堆载预压法次之,排水固结充分,沉降控制稳定;换填法、砂桩法仅适用于浅层软土,加固深度有限,沉降控制能力一般;传统堆载预压法沉降控制周期长,深层软土处理效果欠佳。(2)施工难度与技术成熟度对比:换填法、传统堆载预压法技术最成熟,施工工艺简单,设备常规,难度低,适合基层单位操作;砂桩法、真空预压法技术成熟度中等,需控制施工参数,难度适中;深层搅拌法、化学加固法施工难度较大,对设备精度和施工人员技术要求高;PHC管桩、筒桩需专用设备,难度较高,技术成熟度持续提升;真空联合堆载预压法需协调真空度与堆载进度,难度中等^[4]。(3)耐久性与后期维护难度对比:PHC管桩、筒桩耐久性最优,桩体强度高、抗腐蚀抗老化,后期基本无需维护;深层搅拌法、化学加固法耐久性较好,固化体强度稳定,维护成本低;换填法、砂桩法耐久性一般,长期受地下水浸泡易出现填料流失、强度下降,需定期养护;预压法、真空联合堆载预压法后期需监测沉降,异常时需补加固,维护难度中等。

3.2 经济指标对比

(1)前期施工成本对比:换填法、砂桩法前期成本最低,填料、设备成本低廉,施工工序简单,适合低成本工程;传统堆载预压法成本中等,主要成本集中在堆载材料和工期占用;真空预压法、化学加固法成本较高,真空设备、化学浆液价格偏高;深层搅拌法、PHC

管桩、筒桩前期成本最高,专业设备租赁、材料费用占比大,施工成本显著高于传统方案。(2)全生命周期成本对比:PHC管桩、深层搅拌法全生命周期成本最低,前期投入高但后期维护少、使用寿命长,综合成本最优;换填法、砂桩法全生命周期成本中等,前期成本低但后期维护频繁,累计维护费用较高;预压法、真空联合堆载预压法全生命周期成本较高,工期占用导致间接成本增加,后期需持续监测维护;化学加固法全生命周期成本最高,化学浆液老化后需补加固,维护成本高。

(3)材料损耗与资源利用效率对比:换填法材料损耗较大,挖除的软土难以回收利用,资源浪费明显;砂桩法、深层搅拌法材料损耗适中,砂料、固化剂可按需配比,利用率较高;PHC管桩、筒桩材料损耗低,预制构件精度高,几乎无浪费;预压法、真空联合堆载预压法无需大量耗材,资源利用效率最高;化学加固法材料损耗低,但化学浆液可能造成资源浪费,资源利用效率中等。

3.3 环境与工期影响对比

(1)施工对周边环境的影响对比:真空预压法、真空联合堆载预压法对周边环境影响最小,无噪音、无扬尘,不产生废弃填料;化学加固法可能产生化学废液,若处理不当会污染地下水,环境影响较大;换填法、砂桩法施工产生扬尘、噪音,挖除的软土需妥善处置,易造成环境污染;深层搅拌法、PHC管桩施工噪音较大,对周边居民影响明显。(2)施工工期长短对比:换填法工期最短,工序简单,适合工期紧张的浅层软土处理;PHC管桩、筒桩工期较短,预制构件施工效率高,可快速完成加固;深层搅拌法、化学加固法工期中等,需完成搅拌、注浆、养护等工序;真空联合堆载预压法工期较长,需持续抽真空和堆载沉降;传统堆载预压法工期最长,排水固结周期可达数月。(3)环保性与可持续性对比:真空预压法、真空联合堆载预压法环保性最优,无污染物排放,软土可原位固结,可持续性强;深层搅拌法、砂桩法环保性较好,耗材可回收利用,对环境破坏小;换填法环保性一般,软土废弃处置易造成环境负担;化学加固法环保性最差,化学物质可能污染土壤和

地下水,可持续性弱^[5]。

3.4 对比结论与初步选型建议

(1)各类方案的优劣势总结:传统方案如换填、堆载、砂桩,优势是成本低、技术成熟,劣势是加固深度有限、沉降控制不佳;新兴方案如深层搅拌、化学加固、真空联合堆载,优势是加固效果好、适用范围广,劣势是成本高、施工难度大;特殊方案如PHC管桩、筒桩,优势是耐久性强、沉降控制精准,劣势是前期投入高、对施工技术要求高。(2)基于单一指标的选型建议:优先考虑加固效果和沉降控制,选用深层搅拌法、PHC管桩;优先考虑经济性,选用换填法、砂桩法;优先考虑工期,选用换填法、PHC管桩;优先考虑环保性,选用真空预压法、真空联合堆载预压法;优先考虑耐久性和后期维护,选用PHC管桩、深层搅拌法。

结束语

公路软土地基处理需兼顾安全性、经济性、环保性与工期要求,不存在绝对最优方案。通过对比可知,传统方案适配浅层软土与低成本需求,新兴方案适配深层软土与高精度要求,特殊方案针对性解决桥头等关键部位病害。实际工程中,需结合软土性质、工程工况等灵活选型,同时注重施工质量管控。后续可进一步优化施工工艺,提升方案适配性与经济性,为公路软土地基处理提供更完善的技术支撑。

参考文献

- [1]王伟.高速公路软土路基加固效果及沉降变形的数值模拟研究[J].建筑技术.2025,56(6):78-81.
- [2]郑旭莲.农村公路施工中软土地基处理技术分析[J].运输经理世界.2025,11(7):94-96.
- [3]刘永东.高速公路拓宽工程软土地基处理方案的设计和施工技术[J].工程建设与设计.2025,33(5):215-218.
- [4]刘鑫,张艳林.水泥土搅拌桩在高速公路软土地基处理中的应用[J].建筑安全.2025,40(4):113-116.
- [5]王燕丽.公路软土地基处理方法及其工程应用[J].汽车周刊.2025,14(5):83-86.