

公路工程施工技术在软土地基中的应用研究

钟树青

巴林左旗公路管护和运输保障中心 内蒙古 赤峰 025450

摘要: 软土地基具有高含水量、低强度、高压缩性等特性,对公路施工的稳定性和耐久性影响显著。本文聚焦公路工程中软土地基处理技术,系统梳理了物理处理(如换填法、排水固结法)、化学处理(如水泥搅拌桩、高压喷射注浆)及复合处理(如碎石桩复合地基)等技术的原理与适用条件。结合典型工程案例,分析其施工控制要点及效果,并探讨智能化监测、绿色材料应用等技术优化方向,为提升软基处理效率与工程质量提供理论参考与实践指导。

关键词: 公路工程; 施工技术; 软土地基; 应用

引言: 软土地基因其高含水量、低承载力及易变形等特性,成为公路工程建设中的关键技术难题。若处理不当,易引发路基沉降、路面开裂等病害,威胁行车安全并增加后期维护成本。随着我国交通基础设施向复杂地质区域延伸,传统软基处理技术面临工期长、成本高、环保性不足等挑战。因此,系统研究软土地基处理技术的创新应用与优化策略,对提升公路工程质量、实现绿色低碳建设目标具有重要的现实意义与工程应用价值。

1 软土地基的工程特性与分类

1.1 软土的定义与成因

(1) 软土的物理力学性质: 软土是指天然含水量高、压缩性大、抗剪强度低、承载力差的粘性土或淤泥质土,其物理力学指标具有显著特征。含水量普遍在35%~80%之间,远超液限,土体呈流塑或软塑状态;压缩性极强,压缩系数 α_{1-2} 多大于 0.5MPa^{-1} ,属于高压缩性土,受荷载后易产生大幅沉降;抗剪强度低,内摩擦角通常小于 15° ,粘聚力 c 值多在 $5\sim 15\text{kPa}$ 之间,难以承受较大荷载;同时渗透系数小,多为 $10^{-6}\sim 10^{-8}\text{cm/s}$,排水固结过程缓慢。

(2) 软土的分类标准: 按成因可分为滨海沉积软土、湖泊沉积软土、河滩沉积软土、沼泽沉积软土等,不同成因软土分布具有地域性,如滨海软土多分布于沿海公路沿线。按工程性质可分为淤泥、淤泥质土、软粘性土三类,其中淤泥含水量最高、工程性质最差;淤泥质土介于淤泥与软粘性土之间;软粘性土相对而言压缩性和含水量略低,工程适应性稍好。

1.2 软土地基对公路施工的影响

(1) 沉降变形问题: 软土地基受公路路基荷载作用后,易产生不均匀沉降和工后沉降。不均匀沉降会导致路面开裂、平整度下降,影响行车舒适性与安全性;工后沉降若超过设计限值,可能引发路基失稳、桥涵与路基衔接处错台等病害,增加后期维修成本。

(2) 稳定性

风险: 在公路路基填筑过程中,软土地基承载力不足,若加载速率过快,易引发路基边坡滑坡、基底坍塌等稳定性事故。尤其在雨季,软土含水量进一步升高,抗剪强度急剧降低,边坡稳定性大幅下降,可能导致路基整体失稳,延误施工进度并造成经济损失^[1]。

(3) 施工周期与成本增加: 为解决软土地基的沉降和稳定性问题,需增设专项处理工序,如排水固结、复合地基加固等,导致施工流程增多,施工周期延长30%~50%。同时,处理过程需消耗大量材料、设备和人工,大幅增加工程直接成本,据统计,软基处理费用通常占公路路基工程总造价的20%~40%。

2 公路工程施工技术在软土地基中的分类与原理

2.1 物理处理技术

(1) 换填法: 适用条件为软土层厚度较薄(通常小于3m)、承载力要求不高的公路路基段。施工流程主要包括基坑开挖、基底清理、分层回填、压实验收;材料选择以级配砂石、碎石、灰土等强度高、透水性好、稳定性强的材料为主,需避免选用有机质含量高或易风化的填料。

(2) 排水固结法: 核心原理是通过设置排水通道,加速软土内部孔隙水排出,促进土体固结硬化。其中砂井排水是在软土中钻孔填入砂料形成排水通道,适用于土层渗透性较差的区域;塑料排水板则凭借轻便、施工效率高的优势,广泛应用于大面积软基处理,尤其适合深层软土排水。

(3) 预压法: 堆载预压通过分级施加荷载模拟公路运营压力,迫使软土排水固结,适用于软土层较厚但渗透性中等的区域,缺点是工期较长;真空预压利用真空负压加速孔隙水排出,无需堆载材料,施工周期更短,对周边环境影响小,但设备投入成本较高,适用于对工期要求严格的工程。

2.2 化学处理技术

(1) 水泥搅拌桩: 单轴搅拌桩适用于软土厚度较浅、

承载力要求一般的路段,双轴搅拌桩搅拌更均匀、加固效果更好,适用于深层软土处理。施工要点包括控制钻进速度与提升速度、保证水泥浆配比准确、确保桩身垂直度,避免出现断桩、夹泥等质量问题。(2)高压喷射注浆法(旋喷桩):适用范围涵盖淤泥、淤泥质土、粘性土等多种软土,可用于路基加固、基坑支护等场景。质量控制核心是控制喷射压力(通常20~40MPa)、旋转速度与提升速度,确保浆液均匀扩散,形成连续完整的加固桩体^[2]。(3)化学加固剂改良法:材料选择以水泥、石灰、粉煤灰等为主,辅以石膏、早强剂等外加剂;配比优化需根据软土含水量、孔隙比等指标调整,确保改良后土体承载力提升明显,同时控制收缩裂缝风险,兼顾经济性与实用性。

2.3 复合处理技术

(1)碎石桩复合地基:施工工艺采用振动沉管或冲击成孔法,将碎石填入孔中并压实形成桩体。承载力提升机制是通过桩体分担荷载、挤密周围软土,形成“桩-土共同作用”体系,显著提高地基整体承载能力,适用于处理松散饱和软土。(2)土工合成材料加固法:土工格栅凭借高抗拉强度,可约束土体侧向变形、增强路基整体性,常用于路基边坡加固与路基底面铺设;土工布主要发挥过滤、排水、隔离作用,如在路基与软土接触面铺设,防止不同土层混杂。典型应用案例包括高速公路软基路段路基加筋、边坡防护工程。(3)组合技术:排水+预压+化学加固的组合技术通过排水通道加速排水、预压促进固结、化学加固提升土体强度,实现协同效应。例如真空预压结合塑料排水板与水泥搅拌桩加固,既缩短固结工期,又大幅提升地基承载力,适用于复杂地质条件下的高等级公路软基处理^[3]。

3 公路工程施工技术在软土地基中的应用案例分析

3.1 案例一:某高速公路软土地基处理

(1)工程概况与地质条件:该高速公路标段全长6.2km,途经滨海沉积软土区域,软土层厚度5~12m,含水量62%~75%,孔隙比1.8~2.3,属于高压缩性淤泥质土,地基承载力仅45~60kPa,无法满足路基设计要求。路段设计时速120km/h,对路基沉降控制要求严格,工后沉降限值 ≤ 30 cm。(2)选用的技术方案:结合地质条件与工期要求,采用“塑料排水板排水固结+碎石桩复合地基”组合技术。塑料排水板间距1.2m,深度穿透软土层;碎石桩直径0.8m,间距1.5m,与排水板呈梅花形布置,兼顾排水固结与承载力提升。(3)施工过程控制与监测数据:施工中严控塑料排水板插打深度与垂直度,碎石桩采用振动沉管法施工,确保桩体密实度。设置沉降观测点

32个,监测周期6个月,数据显示:加载期最大沉降速率12mm/d,固结完成后最终沉降量22cm,工后沉降8mm,均满足设计限值。(4)效果评价:沉降控制效果显著,路基平整度达标;工期较单一排水固结法缩短30%,仅4.5个月完成软基处理;成本较换填法降低42%,实现工期与成本的双重优化,后续运营期未出现路基病害。

3.2 案例二:某桥梁工程软基处理对比分析

(1)不同技术方案的适用性对比:桥梁桥台基础软基段分别采用“水泥搅拌桩”和“真空预压+塑料排水板”两种方案。水泥搅拌桩适用于桥台荷载集中区域,承载力提升快,但施工受地下水位影响大;真空预压法适用于桥台周边路基拓宽段,对周边环境扰动小,但工期较长,不适用于荷载集中部位。(2)长期稳定性监测结果:监测周期2年,搅拌桩区域地基承载力从55kPa提升至180kPa,沉降量15cm,无后期沉降;真空预压区域承载力提升至120kPa,沉降量18cm,后期沉降量 ≤ 3 mm,两种方案均满足长期稳定性要求。(3)经济性与环保性综合评估:经济性方面,搅拌桩方案单方造价180元/m³,真空预压法120元/m³,后者更经济;环保性方面,真空预压法无需水泥等化学材料,无废弃物排放,环保优势显著。综合来看,荷载集中区选用搅拌桩,开阔区域选用真空预压法,实现技术适配与环保经济的平衡。

4 公路工程施工技术在软土地基中的优化与创新

4.1 现有技术的局限性分析

(1)施工周期长、成本高的问题:传统软基处理技术普遍存在工期与成本矛盾。如单一排水固结法需6~12个月完成土体固结,难以适配工期紧张的工程;换填法虽施工简便,但对于深层软土,需大量开挖与回填材料,运输及施工成本显著攀升。同时,部分技术需分级施工、多次监测调整,进一步延长工期,叠加人工、设备租赁费用,导致综合成本居高不下,制约了在低造价公路项目中的应用。(2)对环境的影响(如化学污染、噪声):化学处理技术中的水泥、石灰等加固材料,在施工与后期降解过程中可能渗入地下水,造成土壤与水体污染;高压喷射注浆、振动沉管等施工工艺产生的高频噪声,会干扰周边居民生活。此外,换填法大量开挖原生土层,易破坏地表植被与土体结构,引发水土流失,与绿色公路建设理念存在冲突。

4.2 新技术应用前景

(1)真空联合堆载预压技术的改进:改进后的该技术通过优化真空度控制与堆载分级施加节奏,解决了传统技术固结不均匀、后期沉降大的问题。采用智能真空控制系统,可实时调节负压值,配合超载预压,使固结

周期缩短40%以上,且承载力提升幅度较传统技术提高25%,适用于深层、高含水量软土路段,在高等级公路建设中前景广阔^[4]。(2)生物加固技术(微生物诱导碳酸钙沉淀)的探索:该技术利用微生物代谢产生的酶催化碳酸钙沉淀,胶结软土颗粒形成稳定结构,具有绿色环保、无化学污染的优势。目前实验室研究已实现软土承载力提升3~5倍,且施工过程温和、噪声低。虽处于工程应用初期,但随着菌种培育与施工工艺的成熟,有望成为生态敏感区软基处理的优选技术。(3)智能化监测与动态施工控制技术:依托物联网、大数据技术,构建包含沉降、位移、孔隙水压力等多参数的智能监测系统,实时采集施工数据并传输至控制中心。通过预设阈值触发施工调整指令,实现“监测-分析-调控”闭环管理,可有效规避施工风险,减少盲目施工造成的成本浪费,目前已在多个大型公路项目中试点应用,效果显著。

4.3 技术优化方向

(1)施工工艺的标准化与精细化:针对现有技术施工参数不统一、质量波动大的问题,需制定分区域、分地质条件的标准化施工手册,明确各工序操作规范。通过精细化控制施工机械参数、材料配比、施工时序,提升技术应用的稳定性,降低质量缺陷率,如制定搅拌桩成桩质量分级标准,实现施工过程的可追溯与可管控。(2)绿色环保材料的研发与应用:重点研发可降解、低污染的新型加固材料,如生物基固化剂、工业废料改性填料等,替代传统水泥、石灰等高污染材料。同时推广再生骨料在换填与复合地基中的应用,实现废料资源化利用,降低工程对原生资源的依赖,契合绿色交通发展要求^[5]。(3)数值模拟与人工智能在施工设计中的辅助作

用:利用有限元、离散元等数值模拟技术,精准预测软土固结过程与地基变形规律,优化技术方案参数;借助人工智能算法,基于历史工程数据训练模型,实现施工方案智能选型与参数优化,减少人为设计偏差,提升设计效率与科学性,为复杂地质条件下的软基处理提供技术支撑。

结束语

软土地基处理是公路工程质量控制的核心环节,其技术选择直接影响工程安全性与经济性。本文通过系统分析物理、化学及复合处理技术的原理与应用案例,验证了组合技术、智能化监测及绿色材料在提升施工效率、控制沉降变形方面的显著优势。未来,随着新材料研发与数字化技术的深度融合,软基处理将向精准化、生态化方向演进。工程实践需结合地质条件动态优化方案,以实现技术可靠性与环境可持续性的双重目标,为公路建设高质量发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1]杨智.软土路基的施工技术在公路工程中的应用[J].四川建材,2023,49(08):126-127.
- [2]韦艳卫.软土地基处理技术在公路工程施工中的应用[J].运输经理世界,2023,(22):22-24.
- [3]胡立志.软土地基处理技术在公路工程施工中的实践研究[J].运输经理世界,2022,(03):133-135.
- [4]林育军.软土路基处理技术在公路工程施工中的应用[J].黑龙江交通科技,2021,44(11):252-254.
- [5]刘杰.公路施工质量控制与软土地基处理技术研究[J].运输经理世界,2023(26):31-33.