

软基加固施工技术在市政道路施工中的应用研究

季 托, 郝建名

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430014)

摘 要 软土地基压缩性强、强度低、渗水性差, 易导致路面沉降、裂缝等病害, 影响道路使用安全。软基加固施工技术作为解决软土地基问题的关键技术, 在市政道路施工中得到广泛应用。本文研究了排水处理法、预应力管桩法、强夯加固法、土工编织物应用等多种软基加固施工技术, 分析了各技术的原理、适用条件及效果。研究表明, 合理选用软基加固技术可有效提升软基承载力与稳定性, 为市政道路施工提供质量保障, 确保道路安全运行。

关键词 软基加固施工技术; 道路施工; 排水处理法; 预应力管桩法; 强夯加固法

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.22.019

0 引言

软土地基问题是市政道路施工中常见的地质挑战, 其特性易导致路面沉降、裂缝等病害, 影响道路使用安全。随着城市化的推进, 对市政道路建设质量的要求越来越高, 软基加固技术成为解决这一问题的关键。本文研究多种软基加固技术, 分析其原理、适用条件及效果, 以为市政道路施工提供有效的技术参考。

1 软基加固施工技术概述

1.1 软土地基特性分析

软土地基的物理力学性质与病害类型对道路工程的稳定性与耐久性具有显著影响。具体而言, 软土具有高压缩性(因含水量高、孔隙比大, 在外荷载作用下易发生显著压缩变形, 进而导致道路沉降不均)、低强度(抗剪强度低且承载力不足, 难以满足道路结构对地基的要求, 易引发结构破坏)及差渗水性(渗透系数小, 排水固结缓慢, 长期固结过程中易产生次生沉降, 影响道路平整度)等特性; 而常见病害类型则主要包括沉降(软土地基在荷载作用下压缩变形, 导致路面高程降低, 形成不均匀沉降, 引发道路开裂、积水等问题)、裂缝(软基不均匀沉降导致路面结构应力集中, 形成横向、纵向或网状裂缝, 严重时可导致路面功能失效)和失稳(软土地基抗滑能力不足, 在车辆荷载或地震作用下易发生侧向滑动, 导致道路边坡坍塌或整体失稳)^[1]。这些特性与病害的存在, 使得软土地基处理成为市政道路施工中的关键环节。

1.2 软基加固施工技术分类

针对软土地基高压缩性、低强度、差渗水性等特性, 需采用针对性加固技术以提升其承载力与稳定性。以下为常见软基加固技术的原理、适用条件、优势及局限性分析: (1) 排水处理法通过设置竖向排水体(如砂井、塑料排水板)与水平排水层, 加速软土中孔隙水排出, 缩短固结时间, 从而提升地基强度; 其适用于高含水量、低渗透性的软土地基, 尤其适合深层软土处理, 具有固结效率高、成本可控(材料成本低且施工工艺成熟)、适用范围广(可结合预压法联合使用)等优势, 但需配合堆载预压或真空预压, 施工周期较长, 且对排水系统维护要求较高; (2) 预应力管桩法利用预应力混凝土管桩的高强度特性, 通过桩土相互作用将荷载传递至深层稳定土层, 提升地基承载力; 其施工流程包括场地平整与测量定位、管桩预制或采购、静压或锤击法沉桩、接桩与截桩处理、桩顶处理与承台施工, 具有高承载力(单桩承载力可达数千吨)、施工效率高(机械化程度高)、抗变形能力强(桩身刚度大, 可有效控制沉降与差异沉降)等优势, 但施工噪声与振动较大, 需采取降噪措施, 且对场地平整度要求高; (3) 强夯加固法通过重锤自由下落产生的冲击能, 使软土颗粒重新排列, 孔隙体积减小, 土体密度与强度提升; 其适用于浅层软土(厚度 ≤ 5 m)处理、松散填土或杂填土地基加固、湿陷性黄土及饱和粉土等特殊土质改良, 具有施工简便(设备轻便、操作灵活)、成本低廉(材料与设备投入少)及环境友

好（无化学污染）等优势，但对深层软土加固效果有限，且施工振动可能影响周边建筑物；（4）土工编织物应用通过土工编织物（如土工格栅、土工布）的隔离、排水、加筋作用，改善土体结构，提升整体稳定性；其作用机制包括隔离不同土层、防止混合污染，作为水平排水通道加速软土固结，以及限制土体侧向变形、提升抗剪强度，具有材料轻便（运输与铺设方便）、适应性强（可与其他加固技术结合使用）及耐久性好（抗老化、抗腐蚀）等优势，但需与土体紧密结合，铺设质量影响加固效果，且对施工工艺要求较高^[2]。

2 软基加固施工技术与适用性分析

2.1 排水处理法

排水处理法作为软土地基加固技术之一，其技术原理在于通过设置竖向排水体（如砂井、塑料排水板）与水平排水层，形成三维排水网络，进而加速软土中孔隙水的排出，缩短固结时间；其核心机制涵盖竖向排水体插入软土层提供垂直排水通道以降低孔隙水压力，水平排水层铺设于软土层顶部或底部作为水平排水通道将竖向排水体汇集的孔隙水排出地基，以及孔隙水排出后软土颗粒重新排列、土体密度增加、抗剪强度与承载力提升的固结效应^[3]。从适用性分析来看，该技术适用于高含水量、低渗透性的软土地基，深层软土处理（深度 $>5\text{ m}$ ）以及需要快速固结的工程（如工期紧迫的市政道路），具有固结效率高（通过排水体加速孔隙水排出，缩短固结周期，一般可缩短50%以上）、成本可控（材料成本较低，施工工艺成熟，适合大面积应用）及环保性（无需化学药剂，对环境无污染）等优势，但也存在需配合堆载预压或真空预压导致施工周期较长（通常需3~6个月）、对排水系统维护要求较高（需定期检查排水体是否堵塞或损坏）等局限性。为进一步优化该技术，可结合真空预压技术提升固结效率，采用新型排水材料（如复合排水板）提高排水性能，以及在软土层中设置水平排水盲沟增强排水效果。

2.2 预应力管桩法

预应力管桩法凭借预应力混凝土管桩的高强度特性，通过桩土相互作用将荷载传递至深层稳定土层，以此提升地基承载力；其核心机制体现在三个方面：一是在管桩制作过程中施加预应力，提高桩体的抗弯、抗压性能；二是管桩沉入软土后，桩侧与桩端阻力共同承担上部荷载，形成复合地基；三是荷载通过管桩传递至深层土层，减少软土层变形。从适用性角度分析，

该技术适用于深层软土（深度 $>10\text{ m}$ ）或承载力要求高的工程、高荷载道路（如快速路、桥梁引道）以及需要严格控制沉降与差异沉降的工程，具备高承载力（单桩承载力可达数千吨，满足高荷载需求）、施工效率高（机械化程度高，单桩施工速度快，约1小时/根）和抗变形能力强（桩身刚度大，可有效控制沉降与差异沉降）等优势，但也存在施工噪声与振动较大（需采取降噪措施）、对场地平整度要求高（需提前进行场地处理）以及成本相对较高（尤其是长桩施工）等局限性。为进一步优化该技术，可采用静压沉桩技术减少噪声与振动，结合后注浆技术提高桩端承载力，以及在软土层中设置碎石桩或水泥搅拌桩，形成复合地基，从而进一步提升加固效果^[4]。

2.3 强夯加固法

强夯加固法通过重锤（质量10~40吨）从10~40 m高度自由下落产生冲击能，使软土颗粒重新排列、孔隙体积减小、土体密度与强度提升；其核心机制涵盖冲击能传递（产生冲击波）、土体密实（冲击波使软土颗粒重新排列，孔隙水排出，土体密实度增加）以及强度提升（土体密实后，抗剪强度与承载力显著提升）。从适用性来看，该技术适用于浅层软土（厚度 $\leq 5\text{ m}$ ）或松散填土、湿陷性黄土和饱和粉土等特殊土质改良，以及需要快速加固的工程（如应急抢险），具有施工简便（设备轻便，操作灵活，无需复杂工艺）、成本低廉（材料与设备投入少，适合大面积加固）和环境友好（无化学污染，对周边环境影响小）等优势，但也存在对深层软土加固效果有限（一般有效加固深度不超过8 m）、施工振动可能影响周边建筑物（需采取隔振措施）以及夯击能控制要求高（过大的夯击能可能导致土体液化）等局限性^[5]。为进一步优化该技术，可采用分层强夯技术逐步提升加固深度，结合排水处理法在强夯前设置排水层以加速孔隙水排出，以及在夯击区设置隔振沟减少对周边建筑物的影响。

2.4 土工编织物应用

土工编织物（如土工格栅、土工布）凭借隔离、排水、加筋作用改善土体结构、提升整体稳定性；其核心机制体现为隔离作用（防止不同土层混合，避免污染土体）、排水作用（作为水平排水通道，加速软土固结）以及加筋作用（限制土体侧向变形，提升抗剪强度）。从适用性角度而言，该技术适用于软土层与填土层交界处、需要控制沉降与差异沉降的路段以及边坡防护与路基加固等场景，具备材料轻便（运输与铺设方便，施工效率高）、适应性强（可与其他加固技术如填土、

排水结合使用)和耐久性好(抗老化、抗腐蚀,使用寿命长)等优势,但也存在需与土体紧密结合(铺设质量影响加固效果)以及对施工工艺要求较高(需避免土工编织物破损或移位)等局限性。为进一步优化该技术,可采用双向土工格栅提升加筋效果,在土工编织物表面设置砂垫层增强排水性能,并结合监测技术实时评估土工编织物的加固效果。

3 软基加固施工技术效果分析

3.1 承载力提升

在软土地基加固技术对比与理论计算方面,排水处理法通过加速软土固结提升地基有效应力,进而提高承载力,在竖向排水体(砂井、塑料排水板)与水平排水层结合下,理论计算软土固结度可达 80% 以上,承载力提升幅度为 1.5 ~ 3 倍,如某沿海道路工程采用塑料排水板加固后,现场实测承载力从 45 kPa 提升至 120 kPa,与理论计算结果(115 kPa)高度吻合;预应力管桩法通过桩土相互作用将荷载传递至深层稳定土层显著提高地基承载力,其单桩承载力理论计算公式为 $Q_u = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A_p$ (其中 Q_{sk} 为侧阻力, Q_{pk} 为端阻力, u 为桩周长, q_{sik} 为侧阻力特征值, l_i 为桩长分段, q_{pk} 为端阻力特征值, A_p 为桩端面积),现场实测某桥梁工程采用该技术后复合地基承载力特征值从 80 kPa 提升至 280 kPa,满足设计要求;强夯加固法通过冲击能夯实土体提升土体密实度与强度,理论计算表明其加固后地基承载力与夯击能、夯击次数及土体含水量密切相关,如某湿陷性黄土地采用该技术后承载力从 60 kPa 提升至 180 kPa,与经验公式预测值(170 kPa)一致;土工编织物应用通过加筋作用限制土体侧向变形间接提升承载力,理论计算土工格栅加筋后地基承载力提升幅度为 10% ~ 30%,某路基工程采用该技术后现场实测承载力从 70 kPa 提升至 95 kPa。在现场实测数据验证方面,承载板试验通过现场静载试验获取地基承载力特征值,结果显示排水处理法、预应力管桩法、强夯加固法的加固效果显著优于未处理地基;动力触探试验通过标准贯入试验(SPT)或圆锥动力触探试验(CPT)评估土体密实度,结果显示强夯加固法与排水处理法对土体密实度的提升效果最为明显^[6]。

3.2 稳定性增强

在软土地基加固效果评估方面,从抗剪强度与变形模量变化来看,加固后软土内摩擦角与黏聚力显著提高,例如排水处理法使软土内摩擦角从 5° 提升至

15°,黏聚力从 10 kPa 提升至 30 kPa,预应力管桩法通过桩土相互作用形成复合地基,抗剪强度提升幅度达 2 ~ 4 倍;同时加固后土体压缩性降低,变形模量显著提高,如强夯加固法使软土变形模量从 5 MPa 提升至 20 MPa,预应力管桩法复合地基变形模量可达 50 ~ 100 MPa。在长期稳定性评估方面,通过沉降观测评估加固效果,例如某高速公路工程采用排水处理法后,工后沉降量从 30cm 降至 5 cm,满足设计要求(≤ 10 cm),预应力管桩法加固后工后沉降量几乎为零;通过极限平衡法或有限元分析评估边坡稳定性,例如某填方路基工程采用土工编织物加筋后,安全系数从 1.2 提升至 1.8,满足规范要求(≥ 1.3)。在环境影响评估方面,强夯加固法施工噪声达 100 dB 以上,振动可能影响周边建筑物,对土体扰动最大,可能导致液化,还可能破坏周边植被;预应力管桩法施工噪声约 80 dB,振动较小,对土体扰动较小,需占用一定场地;排水处理法与土工编织物应用无噪声污染,对土体扰动最小,对生态环境影响较小^[7]。

4 结束语

通过对多种软基加固施工技术的分析和研究,证实了合理选用加固技术对提升软土地基承载力和稳定性的重要作用。各种软基加固施工技术在实际应用中展现了显著的加固效果,为市政道路施工提供了可靠的质量保障。未来,软基加固技术将在市政道路建设中发挥更大的作用,确保道路的安全、稳定运行。同时,还需关注施工过程中的环境影响,采取有效措施减少对周边环境和生态的影响。

参考文献:

- [1] 付丽.软基加固施工技术在市政道路施工中的应用[J].住宅与房地产,2021(34):206-207.
- [2] 叶炳煊.软基加固技术在市政道路施工中的应用[J].江西建材,2021(11):247-248.
- [3] 马晓晓.软基加固施工技术在市政道路施工中的应用探究[J].中国设备工程,2023(11):254-256.
- [4] 王志建.基于软基加固的市政道路施工技术研究[J].工程技术研究,2023,08(19):20-22.
- [5] 王慧孜.基于软基加固技术的市政道路沥青混凝土路面施工方法[J].广东建材,2023,39(06):87-89.
- [6] 王伟年.软基加固施工技术在市政道路施工中的应用研究[J].工程技术研究,2024,09(20):57-59.
- [7] 梁玮.软基加固施工技术在市政道路施工中的应用[J].交通科技与管理,2023(19):155-157.