

市政工程中的土壤固化技术及其应用

张肖冬

沧州市市政工程股份有限公司 河北 沧州 050051

摘要：土壤固化技术作为提升土体工程性能的关键手段，在市政工程建设中发挥重要作用。水泥固化、石灰固化及高分子材料固化等技术凭借各自特性，广泛应用于道路、给排水、边坡与基坑等工程领域。然而，实践中存在固化剂选型不当、施工管控不足及环境耐久性隐患等问题。通过优化固化剂配比、强化施工管理及发展环保型技术等对策，可有效提升土壤固化效果，推动市政工程建设可持续发展。

关键词：市政工程；土壤固化技术；应用

引言

市政工程建设常面临各类不良土质条件，土壤固化技术是改善土体物理力学性能、保障工程质量的核心技术。随着城市基础设施建设规模不断扩大，对土壤固化技术的适用性、经济性和环保性提出更高要求。本文系统阐述市政工程中常见的土壤固化技术，分析其在不同工程领域的应用实践，深入探讨应用过程中存在的问题，并针对性提出解决对策，旨在为市政工程建设中土壤固化技术的科学应用提供参考。

1 土壤固化概述

土壤固化是通过物理、化学或生物手段，改善土壤工程性能，增强其稳定性与承载能力的技术体系。其核心在于调控土壤颗粒间的相互作用，优化孔隙结构，从而改变土壤的物理力学性质。土壤颗粒以不同级配组成复杂体系，黏土矿物特有的表面活性及亲水性，使得细粒土在含水量变化时呈现显著的塑性特征，这一特性既是土壤固化需要解决的问题，也是实施改良的切入点。在物理固化层面，通过掺入惰性材料如砂、砾石等，调整土壤级配，降低细粒土占比，减少水分迁移对土体的影响。这种方法尤其适用于砂土改良，可有效提升其密实度与抗液化能力。化学固化则利用胶凝材料与土壤发生水化反应，生成具有胶结作用的水化产物，如硅酸盐水泥、石灰等添加剂，能与土壤中的活性硅、铝成分发生火山灰反应，形成稳定的结晶化合物，包裹并胶结土壤颗粒，显著提高土体强度与水稳定性。例如，在软土地基处理中，水泥土搅拌桩技术通过原位搅拌，将水泥与软土强制混合，形成复合地基，大幅提升地基承载力。生物固化近年来成为研究热点，微生物诱导碳酸钙沉淀（MICP）技术利用巴氏芽孢杆菌等微生物的新陈代谢，将尿素水解产生碳酸根离子，与环境中的钙离子结合生成碳酸钙晶体，填充土壤孔隙并胶结颗粒。该技术

绿色环保，可定向提升土体局部强度，在文物保护、边坡防护等领域展现出独特优势。土壤固化技术的选择需综合考量土壤类型、工程需求、环境条件及经济成本等因素，通过科学配比与工艺优化，实现对土壤性能的精准调控，为土木工程建设、生态修复等领域提供可靠的技术支撑。

2 市政工程中常见的土壤固化技术

2.1 水泥固化技术

水泥固化技术以硅酸盐水泥为核心固化剂，凭借其水化反应生成的水化硅酸钙、水化铝酸钙等胶凝物质，将松散土壤颗粒紧密胶结，有效改善土壤的物理力学性能。水泥中的 C_3S 、 C_4AF 等矿物成分与土壤中的水分发生反应，形成具有胶结能力的凝胶体，填充土壤孔隙，降低土体孔隙比，提升密实度与强度。该技术适用于多种类型的土壤，尤其对粉质土、黏土改良效果显著，通过调整水泥掺量可精准控制固化土强度，满足道路基层、地基处理等不同工程需求。在施工过程中，需严格控制水泥与土壤的拌和均匀度、含水量及压实度，确保水泥充分发挥水化作用，使固化后的土体具备良好的抗压强度、水稳定性和耐久性。经水泥固化处理后的土壤，其承载能力可显著提升，有效减少道路及建筑物地基的沉降变形，为市政工程建设提供稳定可靠的基础^[1]。

2.2 石灰固化技术

石灰固化技术利用生石灰或熟石灰与土壤发生离子交换、火山灰反应等物理化学作用，实现土壤性能的优化改良。石灰中的钙离子与土壤颗粒表面的钠离子、钾离子等进行交换，改变土壤颗粒的表面性质，使土壤颗粒凝聚成团，改善土体结构。石灰与土壤中的活性硅、铝氧化物发生火山灰反应，生成不溶性的水化硅酸钙和水化铝酸钙等胶凝物质，进一步增强土壤的整体性与强度。该技术对高塑性黏土的改良效果突出，可有效降低

土壤的塑性指数,提高其液限和塑限,改善土壤的压实性能。在市政工程中,常用于道路底基层、软土地基处理等场景,能够显著提升地基的承载力,减少软土地基的沉降量。石灰固化技术还具备一定的防水抗渗性能,可有效阻止水分对土体的侵蚀,增强土体的长期稳定性,为市政工程的耐久性提供保障。

2.3 高分子材料固化技术

高分子材料固化技术依托高分子聚合物的特殊性能,通过物理包裹、化学交联等作用,实现对土壤的高效固化。高分子材料分子链上的活性基团与土壤颗粒表面的官能团发生化学反应,形成化学键,将土壤颗粒牢固连接;高分子聚合物在土壤中形成连续的网状结构,物理包裹土壤颗粒,增强土体的整体性与抗变形能力。该技术具有固化速度快、用量少、环境友好等显著优势,可根据不同工程需求选择相应的高分子材料,如聚丙烯酰胺、聚氨酯等。在市政工程中,高分子材料固化技术适用于对工期要求紧、施工条件复杂的项目,可快速提升土壤强度和稳定性,减少土壤的透水性和压缩性。其固化后的土体具备良好的柔韧性和抗冻融性能,能有效抵御外界环境因素的影响,在道路修复、边坡防护等工程中展现出优异的应用效果,为市政工程建设提供了高效、环保的新型土壤固化解决方案。

3 土壤固化技术在市政工程中的应用领域

3.1 道路工程

(1)在道路路基处理方面,土壤固化技术通过添加特定固化剂与土壤颗粒发生物理化学反应,改善土壤的颗粒级配与力学性能。对含水量高、承载力低的软土路基,固化剂能降低孔隙比、增强密实度,让松软路基有稳定支撑,减少道路建成后沉降,提升路基整体强度与稳定性,保障道路长期使用性能。(2)应用于道路基层施工时,土壤固化技术能够将就地取材的土壤转化为高强度基层材料。通过精确控制固化剂掺量与搅拌工艺,使固化后的土壤基层具备良好的抗压、抗剪性能和水稳定性,相较于传统基层材料,不仅可降低材料运输成本,还能缩短施工周期,同时满足道路对基层承载能力与耐久性的要求。(3)对于道路维修与改造工程,土壤固化技术可有效处理破损道路的路基和基层病害。针对因长期荷载作用导致的路基土强度衰减、基层材料松散等问题,利用固化技术对病害区域进行加固处理,能恢复道路结构强度,延长道路使用寿命,且施工过程对周边环境影响较小,可实现道路的快速修复与通行。

3.2 给排水工程

(1)在给排水管道基础施工中,土壤固化技术可优

化管道基础的承载性能。对于含水量大、地质条件复杂的施工区域,通过固化处理能够提升基础土体的密实度与抗变形能力,为给排水管道提供稳定的支撑环境,有效避免因基础沉降导致的管道断裂、接口渗漏等问题,保障给排水系统的正常运行与使用寿命。(2)应用于给排水构筑物地基处理时,土壤固化技术能够增强地基土体的整体性与承载能力。针对水池、泵站等对地基稳定性要求较高的构筑物,采用固化技术处理地基,可改善土体力学性能,提高地基的抗滑、抗倾覆能力,确保构筑物在运行过程中保持结构稳定,减少因地基问题引发的工程事故风险。(3)在给排水工程的沟槽回填环节,土壤固化技术可有效解决回填土压实难题。通过对回填土进行固化处理,使土体具备更好的压实特性,降低回填土的孔隙率,增强回填土的密实度与水稳定性,避免沟槽回填后出现沉降、塌陷等问题,同时提高回填施工效率,保证给排水管道上方道路或地面的正常使用功能^[2]。

3.3 边坡与基坑工程

(1)在边坡防护工程中,土壤固化技术可增强边坡土体的抗剪强度与稳定性。在边坡土体里掺入合适固化剂,可改善其物理力学性质,增大内摩擦角与粘聚力,有效抑制土体滑动趋势,避免滑坡等地质灾害,同时固化后的边坡土体抗风化、抗雨水冲刷能力良好,能延长边坡防护的使用寿命。(2)应用于基坑工程的土体加固时,土壤固化技术能够提高基坑侧壁土体的强度与稳定性。在基坑开挖过程中,对周边土体进行固化处理,可形成具有一定强度的加固土体,增强土体对基坑侧壁的支撑作用,减少基坑变形与坍塌风险,为基坑内的施工创造安全稳定的作业环境,保障基坑工程的顺利实施。(3)对于边坡与基坑工程中的临时或永久挡土结构,土壤固化技术可优化结构与土体的协同工作性能。把固化土体作为挡土结构的一部分或使之与之紧密结合,可形成协同受力体系,有效增大土体与结构间的摩擦力和粘结力,强化整体稳定性,让挡土结构更有效承受土体侧压力,减少安全隐患,提升工程可靠性。

4 土壤固化技术在市政工程应用中存在的问题与对策

4.1 存在的问题

4.1.1 固化剂选择缺乏针对性

市政工程涉及的土壤类型多样,包括黏土、砂土、粉土等,不同土壤的颗粒级配、矿物成分、含水率等特性差异显著。在实际工程中,固化剂选择往往未能充分考量这些特性,简单套用通用固化剂。这种做法导致固化剂与土壤的化学反应不充分,难以形成理想的固化结构。例如,对高塑性黏土若使用普通水泥类固化剂,

因黏土矿物对水泥水化产物的吸附作用，会阻碍有效固化，致使固化土强度增长缓慢、耐久性不足，无法满足市政工程对地基承载能力和稳定性的要求。

4.1.2 施工工艺控制不严

土壤固化施工过程中，诸多环节需精准把控。土壤含水率直接影响固化剂与土壤的混合均匀度和水化反应程度，若含水率过高或过低，都会降低固化效果；搅拌深度与速度影响固化剂在土体中的分布均匀性，搅拌不充分易产生固化土强度离散性大的问题。压实度对固化土的密实度和强度起关键作用，压实不足会使固化土孔隙率大、承载能力低。在实际施工中，由于缺乏严格的施工参数监测与控制机制，操作人员经验不足等因素，导致上述环节控制不当，严重影响固化土质量和工程整体性能^[3]。

4.1.3 环境与耐久性问题

土壤固化后长期处于复杂的自然环境中，其耐久性面临多重挑战。大气中的酸雨、工业废气等污染物，土壤中的酸碱性物质、微生物等，会与固化土中的成分发生化学反应，侵蚀固化土结构。冻融循环作用下，固化土孔隙中的水分反复冻结、融化，产生冻胀力，破坏固化土的内部结构。地下水的流动和侵蚀作用，也会使固化土中的有效成分流失，导致强度降低、结构破坏。这些环境因素对固化土耐久性的影响，使得市政工程设施的使用寿命缩短，后期维护成本大幅增加。

4.2 对策

4.2.1 优化固化剂选型与配比

为实现土壤固化的最佳效果，需建立系统的固化剂选型方法。通过对工程现场土壤进行全面的物理化学性质分析，包括颗粒分析、液塑限测定、矿物成分分析等，明确土壤特性。在此基础上，结合市政工程对固化土强度、耐久性等性能要求，开展不同固化剂及配比的室内试验研究，测试固化土的无侧限抗压强度、抗渗性、耐久性等指标。根据试验结果，筛选出最适配的固化剂类型和配比，确保固化剂与土壤能充分发生化学反应，形成稳定、高强度的固化结构，满足工程实际需求。

4.2.2 强化施工过程管理

建立严格的施工质量控制体系是保障土壤固化施工质量的关键。在施工前，根据土壤特性和设计要求，精确计算并确定最佳施工参数，如土壤含水率控制范围、搅拌深度与速度、压实遍数与压力等。施工过程中，运用先进的监测设备，实时监测土壤含水率、搅拌深度、压实度等关键参数，确保施工参数符合设计标准。加强对施工人员的专业培训，提高其操作技能和质量意识，规范施工流程，避免因人为操作不当导致的质量问题，实现施工过程的精细化管理。

4.2.3 发展环保型固化技术

面对环境与耐久性问题，研发环保型固化技术势在必行。第一，探索新型环保固化材料，如利用工业废料、生物质材料等作为固化剂或辅助材料，既能降低固化成本，又可减少传统固化剂生产对环境的污染。第二，研究开发具有抗侵蚀、抗冻融等优异性能的复合固化体系，通过优化固化剂配方和添加功能性材料，提高固化土的环境适应性和耐久性。开展环境友好型固化技术的工程应用研究，验证其在不同环境条件下的实际效果，推动环保型固化技术在市政工程中的广泛应用^[4]。

结语

综上所述，土壤固化技术是市政工程建设的重要技术支撑，不同固化技术在各工程领域展现出独特优势。固化剂选择、施工工艺及环境耐久性问题仍制约其应用效果。未来需进一步深化土壤固化技术研究，加强新型环保固化剂研发，完善施工标准与规范，提升技术智能化水平，以更好地满足市政工程高质量建设需求，推动行业绿色可持续发展。

参考文献

- [1]陈兴帅.环保型土壤固化剂在市政道路工程路基处置中的应用[J].山东交通科技,2021(6):157-159.
- [2]孙剑峰,张迅,任毅.较高含水率条件下土壤固化技术应用研究[J].公路工程,2023,48(3):90-96.
- [3]季节,梁霖,韩秉焯,等.中国道路工程中土壤固化技术综述[J].交通运输工程学报,2023,23(2):47-66.
- [4]赵张明.土壤快速固化应用技术研究[J].智能建筑与工程机械,2023,5(2):98-100.