

市政道路软土地基处理中 混凝土搅拌桩的优化设计

丁国尚¹, 林天翔²

(1. 青岛迪蓝市政工程设计咨询有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 青岛能源热电集团有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要 混凝土搅拌桩是市政道路软土地基处理的主流技术, 兼具工艺简便、扰动小、成本可控等优势, 能够有效提升软基承载力、降低工后沉降量。但该技术在工程应用中仍存在场景适配性不足、施工质量缺陷、长期服役性能衰减及施工污染等问题。基于此, 本文阐述了混凝土搅拌桩的技术原理与软基处理适配性, 分析技术应用现存的短板, 从场景化设计、精细化施工、耐久性提升、环保优化四个维度提出优化设计措施, 以期为市政道路软土地基高效处理提供技术参考。

关键词 市政道路; 软土地基; 混凝土搅拌桩

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.036

0 引言

软土地基具有高压缩性、低承载力、沉降变形显著等特点, 直接影响市政道路的施工质量与服役寿命, 易引发路基沉陷、路面开裂等病害, 对交通运行安全构成威胁。混凝土搅拌桩通过固化剂与软土的物理化学反应形成复合地基, 可从根本上改善软土力学性能, 在市政道路工程中得到广泛应用。然而, 在实践过程中, 因技术方案缺乏针对性、施工管控粗放、耐久性设计不足及环保措施缺位等因素, 混凝土搅拌桩的软基处理效果未能充分发挥。基于此, 在市政道路建设期间, 需合理运用混凝土搅拌桩, 挖掘技术应用价值, 制定科学的设计方案, 提升该技术的工程适用性与应用成效。

1 混凝土搅拌桩技术概述

1.1 技术定义

混凝土搅拌桩本质上属于复合地基处理技术, 以水泥或是石灰作为固化剂, 现场操控搅拌机强力搅拌地基土体, 破坏土体原状结构, 同时向外喷射固化剂, 固化剂和软土颗粒充分混合后, 进行一系列物理化学反应, 将松散土体胶结形成高密度、高强度桩身, 即搅拌桩, 搅拌桩和桩间土体保持协同受力状态, 构成复合地基体系。从市政道路软基处理角度来看, 混凝土搅拌桩以化学固化、物理密实、协同受力作为软基加固作用机理。其中化学固化是利用水化产物把软土

颗粒胶结形成完整结构, 物理密实是通过挤压软土、排出部分自由水来提高土体密实度和抗剪强度, 协同受力则是多根搅拌桩和桩间土体共同承受上部荷载, 桩身实质上承受绝大多数的竖向荷载^[1]。

1.2 软基处理适配性

软土地基存在承载力不足、沉降变形量超标、自稳能力差三项典型问题, 直接影响道路使用性能和危及交通行车安全。市政道路建成通车以来, 出现肉眼可见的工后沉降现象, 瞬时沉降量和累计沉降量均超出现行规范要求, 并在道路边坡、交叉口等位置出现滑动破坏问题。相比其他软基处理技术, 混凝土搅拌桩技术高度适配市政道路软基处理需求, 从根本上解决上述工程问题。对于地基承载力问题, 利用大量水化产物来胶结土体颗粒, 把软土转变为复合土体, 实际强度保持在 1.5~3 MPa, 通过改变土体力学性质来提升地基承载力, 处理后的复合地基承载力特征值达到 150~300 kPa, 市政道路地基荷载要求为达到 150 kPa 以上。对于沉降变形问题, 搅拌成桩期间, 持续挤压软土地层, 提前完成固结沉降过程, 大幅降低地基压缩性, 预计可以减少 60%~80% 的工后沉降量, 剩余沉降量小于市政道路工后沉降限值^[2]。而对于自稳能力差的问题, 凭借桩身自身抗剪强度和复合地基协同受力效应, 大幅增强地基抗滑稳定能力, 无论是普通路段还是桥头引道等特殊路段, 在市政道路服役施工

作者简介: 丁国尚(1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 土木工程。

期间,均不会出现地基整体失稳、垮塌等安全事故。

2 市政道路软土地基混凝土搅拌桩技术现存问题

2.1 适配性不足

目前,技术方案适配性不足是混凝土搅拌桩技术在工程化应用阶段面临的首要问题,由于施工经验匮乏,缺少足够的工程案例作为参考,未能精准结合施工场景情况来差异化制定混凝土搅拌桩技术方案,软基处理效果大打折扣。例如:从地质条件角度来看,软土地基细分为高含水率软土、高有机质软土和多层软土,现有设计方案采取统一参数标准,实质上并不符合软基处理要求。对于高含水率软土,实际含水率超过 50%,所使用的泥浆稠度不足,搅拌次数偏少,极易出现桩体离析问题,且桩身无侧限抗压强度也有所降低。对于高有机质软土,有机质含量超过 5%,抑制水化反应进行,无法生成足够水化产物来胶结软土颗粒,致使复合地基承载力低于设计值。对于多层软土,即为存在软硬夹层的软土地基,常规设计方案采取等长桩,致使浅层软土过度加固,深层软土加固不足,后续在市政道路通车阶段出现局部差异沉降问题。

2.2 施工过程质量缺陷

早期市政道路工程普遍采取粗放型施工模式,完全按照现行规范文件来确定技术标准,技术内容缺失,无法为现场作业提供明确技术指导,高度依赖施工人员自身经验,容易出现错误操作,导致成桩质量和软基加固处理效果不受控制。根据现场施工情况来看,常见问题包括提升速度失控、桩径/桩位误差超标、缺少二次搅拌步骤、固化剂注入量和注入压力剧烈波动。例如:在某市政道路工程,为追赶施工进度、保证市政道路按时交付使用,施工单位违背规范要求,把提升速度由 0.5~0.8 m/min 提升至 1.0~1.2 m/min,浆液和软土颗粒未能均匀混合,导致不同深度部位的桩径值存在明显偏差,实际误差大于 ±50 mm。

2.3 长期服役性能衰减

市政道路工程有软基长期加固需求,而非短期加固需求,要求混凝土搅拌桩在市政道路服役期限内始终维持地基稳定状态,主动预防整体失稳、差异沉降等问题发生。结合往期工程案例来看,在外部环境侵蚀和动态交通荷载作用下,随着通车年限增加,桩体出现强度衰减现象,通车 5 年和 10 年后的桩体强度下滑比例大约为 20%~25% 和 35%~40%,伴随出现疲劳损伤问题,累计变形量和工后沉降量超出规范限值。如果市政道路位于寒冷地区,在冻融循环作用下,还将在桩体内部形成裂缝,微小裂缝自我发育形成贯穿性裂缝,大幅降低桩体承载能力。此外,复合地基体系长

期服役以来,还可能出现协同失效问题,桩体弹性模量远超桩间土体,在动态交通荷载作用下,二者出现差异变形现象,最终导致桩体剪切破坏或是弯曲破坏。

2.4 施工污染

市政道路工程位于核心城区,周边环境较为敏感,随着绿色施工模式的推广实施,提出日益严格的环保要求。传统施工工法未能满足当下提出的环保要求,违背绿色可持续发展理念,甚至扰乱正常施工秩序。结合现场施工情况来看,混凝土搅拌桩施工期间,伴随出现泥浆污染、粉尘污染和噪声污染问题,粉尘排放浓度超过 1.5 mg/m³,关键工序的施工噪声超过 85 dB,严重干扰周边居民日常作息,间接引起大气污染、土壤污染、地下水源污染等一系列生态问题,造成难以估量的生态损失。

3 市政道路软土地基混凝土搅拌桩优化设计措施

3.1 场景化设计

面对市政道路工程复杂的施工形势和要求,需引入场景化设计理念,提前掌握工程资料信息,区分施工场景类型,精准诊断不同场景下的软基加固处理需求,量身定制混凝土搅拌桩处理方案,才能保证实际软基加固效果完全达到设计要求。首先,施工前需组织专业技术团队开展详细的地质勘察工作,通过原位测试、室内土工试验等手段,明确各路段软土的含水率、有机质含量、孔隙比、承载力特征值等核心指标,以此作为场景划分的科学依据。结合往期工程案例来看,在市政道路软基处理领域,实际遇到施工场景包括高含水率软土路段、高有机质软土路段、管线密集路段、交叉口荷载集中路段、多雨地区路段和寒冷冻融路段,不同场景特征与技术难点有着显著差异。

以高含水率软土路段为例,实际含水率超过 50%,土体孔隙比为 1.2~1.6,地基承载力特征值仅为 50~80 kPa,搅拌成桩期间,极易出现离析和糊钻问题,桩体强度水平偏低。一方面,对桩体参数进行优化调整,桩径值从 500 mm 增加至 600~700 mm,按照等边三角形布设各处桩位,相邻桩体间距控制在 1.2~1.5 m,要求桩身完全穿透软土层,并按照软基实际含水率来控制水泥掺量,土体含水率越高,水泥掺量越高,具体控制在 15%~20% 区间,基准水泥掺量为 12%。另一方面,着手调整水泥浆配比方案,水灰比从 0.6~0.7 调整为 0.55~0.6,适当掺入 2% 石膏激发剂和 3%~5% 膨润土,分别用于加快水化进程和提高浆液稠度^[3]。

3.2 精细化施工

混凝土搅拌桩对施工精度有严格的要求,软基加固效果取决于多项工艺参数,任何一项工艺参数的实

际误差超出设计容许范围,都会削弱软基加固效果,导致桩身强度、地基承载力特征值低于预期指标。因此,为确保设计成果顺利转化为施工成果,方案设计阶段,必须主动代入现场施工视角,重点补充技术内容,明确提出各项工艺参数的标准值和允许偏差范围,并总结现场施工条件和工艺参数的内在关联,针对不同施工场景,差异化设定工艺参数。技术人员需结合地质勘察报告,对不同土层分布区域标注针对性施工要点,同时编制工艺参数动态调整手册,为现场施工人员提供清晰指引。施工前需组织专项技术交底会,对参数设定逻辑、设备操作规范及异常工况处置流程进行细致讲解,确保全员熟练掌握技术要求。例如:在软基含水率大于50%时,采取“慢沉慢提”工艺,把下沉速度调整为0.6~0.8 m/min,提升速度调整为0.4~0.6 m/min,同时增加1次复搅次数,确保桩体无侧限抗压强度满足设计要求。同时,现场部署智能施工系统,配备多种类传感器,多尺度跟踪监控混凝土搅拌桩施工过程,确认提升/下沉速度、注浆压力、注浆量、桩身长度、桩位偏差等工艺参数的实际误差量超出允许值后,自动发送报警信号,提醒施工班组纠正错误操作行为,对质量不合格部位进行返工整改^[4]。

3.3 提升耐久性

混凝土搅拌桩长期稳定性核心难点集中在性能衰减和复合地基协同失效双重维度,问题症结在于桩体环境适应能力不足和差异变形。从设计层面来看,分别以配比调整和增设褥垫层作为优化设计方向,方能从根本上解决问题。第一,配比调整。提前了解市政道路工程环境条件,基于场景特点,针对性提升抗冻性、耐腐蚀性、抗疲劳等使用性能,调整原材料种类,重新计算最佳用量比例,并掺入功能型外加剂。例如:针对多雨地区和地下水丰富地区,水泥浆内掺入有机硅防水剂或是膨胀剂,实际掺量分别控制在5%~8%和2%~3%,确保桩体抗渗等级超过P6。针对交通荷载规模庞大的城市快速路和主干道,以纤维抗裂作为优化思路,掺入微量聚丙烯纤维或是钢纤维,重点增强桩体韧性,延缓裂缝形成时间,提升疲劳寿命^[5]。针对年冻融循环次数超过50次的寒冷地区,则在常规配比方案基础上掺加3%~5%亚硝酸盐作为抗冻剂。第二,增设褥垫层。以褥垫层作为桩体和桩间土体的受力协调载体,桩体固化成型后,继续在桩顶部位铺设级配砂石与土工格栅,重要路段褥垫层厚度控制在30~35 cm,普通路段褥垫层厚度控制在20~25 cm,土工格栅层数设定在1~2层,桩体荷载分担比例下降至60%~70%^[6]。

3.4 环保优化

开展混凝土搅拌桩传统施工工法,需要在设计方案内补充环保内容,主动采取绿色施工措施,降低生态损失,确保施工现场周边环境免受污染,具体补充泥浆零排放、粉尘控制、噪声控制三项内容。第一,泥浆零排放。现场部署三级沉淀池和配置压滤机,废弃泥浆依次送入沉淀池、絮凝池和清水池进行处理,再把底层淤泥送入板框压滤机进行脱水处理,最终把固体污泥装车运往专业机构进行无害化处置,禁止在施工现场违规排放废弃泥浆和填埋固体污泥。第二,粉尘控制。借鉴同类工程施工案例,准确识别混凝土搅拌桩施工活动的粉尘污染源,采取针对性防治措施,如在搅拌桩机上部署封闭防尘罩,部署封闭式储罐作为水泥仓,出料口设置柔性密封接头,并在封闭式搅拌棚内搅拌浆液^[7]。第三,噪声控制。一方面,配备低噪声施工设备替换传统设备,如配备运行噪声小于75 dB的变频式搅拌桩机,替换运行噪声超过90 dB的柴油式搅拌桩机。另一方面,施工区域外围连续设置隔音围挡设施,底部设置隔音裙边,物理层面上切断噪声传播路径,缩小噪声扩散范围。

4 结束语

混凝土搅拌桩技术在软土地基加固处理领域展现出广阔的应用前景,已成为市政道路首选软基处理技术,并取得十分显著的加固效果。为进一步发挥该技术的应用成效,施工单位应系统性诊断混凝土搅拌桩施工问题,从设计层面发力,并采取场景化设计、精细化施工、提升耐久性、环保优化等策略,确保混凝土搅拌桩处理方案合理可行。

参考文献:

- [1] 薛轲.混凝土搅拌桩在市政道路软土地基处理中的优化设计与应用[J].水泥,2025(04):90-92.
- [2] 既有祥.市政道路软土地基处理设计中水泥搅拌桩的应用[J].大陆桥视野,2023(10):133-135.
- [3] 黄志华,曹雄,李蒙杰.换填硬壳层对软土区水泥土搅拌桩影响分析[J].公路,2023,68(10):124-132.
- [4] 史越.混凝土搅拌桩在市政道路设计软土地基中的应用[J].交通科技与管理,2024,05(03):72-74.
- [5] 熊乐举,夏伟.市政道路设计中的软弱土地基处理技术研究[J].交通世界,2024(Z2):179-181,196.
- [6] 张杰,夏昊,程雪斌,等.混凝土搅拌站绿色智能化技术研究[J].建筑机械,2025(10):10,296-298,303.
- [7] 苏文卓.预拌混凝土搅拌站绿色生产管理措施探究[J].居业,2025(06):203-205.