

水泥粉喷桩施工技术在道路桥梁软土路基处理中的应用研究

付 炜

四川晟通检测有限公司 四川 攀枝花 617000

摘 要：水泥粉喷桩施工技术作为道路桥梁软土路基处理的重要手段，以其独特的加固机理和显著优势受到广泛关注。该技术通过深层搅拌将原位土与固化剂（如水泥）充分混合，引发一系列物理化学反应，形成高强度整体，有效提升了土体强度和路基承载力。本研究结合工程实例，详细探讨了水泥粉喷桩的施工流程、加固机理及影响因素，并总结了其在道路桥梁软土路基处理中的应用效果与注意事项，为同类工程提供了参考和借鉴。

关键词：水泥粉喷桩施工技术；道路桥梁软土路基处理；应用

引言：在道路桥梁建设中，软土路基处理一直是技术难题之一。软土地基的承载力低、变形大，易导致路基失稳和路面破损。水泥粉喷桩施工技术作为一种有效的软土地基加固方法，因其加固效果显著、施工简便、成本相对较低而备受青睐。本文旨在深入探讨水泥粉喷桩施工技术在道路桥梁软土路基处理中的应用，分析其作用机理、施工流程及质量控制，以期为解决软土路基处理问题提供新的思路和技术支持，推动道路桥梁建设行业的持续发展。

1 水泥粉喷桩施工技术概述

1.1 定义与原理

1.1.1 粉喷桩的概念及加固原理

粉喷桩是通过专用机械将干粉状固化剂喷入软土地基，经机械搅拌使固化剂与地基土充分混合，发生一系列物理化学反应，形成具有一定强度的柱状固结体，从而提高地基承载力、减少沉降的地基处理技术。其加固原理基于固化剂与土颗粒的水化反应、离子交换和胶结作用，使软弱土体形成整体性好、强度高的复合地基。

1.1.2 固化剂的选择与配比

常用固化剂有水泥、石灰等。水泥宜选用强度等级42.5级及以上的普通硅酸盐水泥，具有水化反应充分、强度增长快的特点；石灰需选用消解完全的CaO含量高的生石灰，适用于有机质含量较高的软土。配比需根据地质条件确定，水泥掺入量通常为被加固土质量的7%-15%，石灰掺入量多为8%-12%，应通过室内配比试验优化确定最佳掺量。

1.2 施工设备与工艺

1.2.1 搅拌机械的构成与工作原理

搅拌机械主要由钻机、粉体发送器、空气压缩机、

搅拌轴及叶片组成。钻机提供钻进动力，粉体发送器通过压缩空气将固化剂定量输送至钻头，搅拌轴带动叶片旋转，使固化剂与土体强制搅拌混合。工作时，压缩空气形成的气流将干粉送至桩底，随钻机提升均匀分布在土中，实现分层搅拌加固。

1.2.2 施工步骤与操作流程

施工步骤包括场地平整、桩位放线、钻机就位、钻进喷粉、提升搅拌、复搅复喷、钻机移位。操作流程为：钻机对准桩位调平，启动钻进至设计深度；开启粉体发送器，边提升钻杆边喷粉搅拌；至地面后关闭喷粉，重复下沉搅拌一次，确保均匀性；最后移至下一桩位^[1]。

1.3 应用条件与要求

1.3.1 原材料要求

水泥需符合GB 175《通用硅酸盐水泥》标准，受潮结块的水泥不得使用，进场应检验强度、安定性等指标；石灰需过筛，粒径应不大于5mm，有效钙镁含量不低于70%。原材料应存放在干燥通风的库房处，下垫毡布上盖彩条布，防止受潮变质，使用前需进行质量复检。

1.3.2 设计施工中的要求与限制

设计需根据地基承载力要求确定桩长、桩径（通常500-600mm）、桩间距，复合地基承载力需通过静载试验验证。施工时，桩位偏差不得大于50mm，垂直度偏差不超过1%，喷粉量误差控制在±5%以内。严禁在未达到设计深度时提前喷粉，或在提升过程中中断喷粉，软土地层中需控制钻进与提升速度，避免扰动地基。

2 水泥粉喷桩施工技术在道路桥梁软土路基处理中的应用

2.1 应用案例分析

2.1.1 沪宁高速公路昆山试验段应用案例

沪宁高速公路昆山试验段是我国早期大规模应用水泥粉喷桩处理软土路基的典范工程。该路段软土层厚度达5-10m,以淤泥质黏土为主,天然含水率50%-65%,孔隙比1.5-1.8,地基承载力仅50-70kPa,无法满足高速公路设计要求。工程采用水泥粉喷桩进行加固,设计桩长8-12m,桩径500mm,桩间距1.2-1.5m,呈正方形布置,水泥掺入量为15%。施工过程中,通过严格控制钻进速度、提升速度和喷粉压力,确保了桩体质量。竣工后,经检测复合地基承载力提升至180kPa以上,工后沉降控制在30cm以内,完全满足高速公路的使用要求。该案例不仅验证了水泥粉喷桩在高含水率软土地区的适用性,还为后续类似工程提供了宝贵的施工经验和参数。

2.1.2 京广线武广电化改造工程应用案例

京广线武广电化改造工程涉及大量软土路基处理,其中部分路段软土层厚度达10-15m,地质条件复杂,给工程施工带来了极大挑战。为确保铁路运营安全,该工程采用水泥粉喷桩与碎石垫层组合的处理方案。水泥粉喷桩设计桩长12-18m,桩径550mm,呈三角形布置,水泥掺入量12%-14%。施工中,针对铁路路基的受力特点,重点控制桩身完整性和复合地基刚度的均匀性。通过采用“两喷三搅”的施工工艺,保证了固化剂与土体的充分混合,提高了桩体强度。工程竣工后,经过长期监测,路基工后沉降小于20cm,满足铁路运营的安全要求。同时,该施工方案对既有线路的运营干扰小,大大缩短了施工周期,为铁路既有线路改造工程中的软土路基处理提供了新的思路和方法。

2.2 施工过程与质量控制

2.2.1 施工前的准备工作

施工前,首先要进行详细的现场勘察和地质复核,了解软土层的分布、厚度、含水率等物理力学性质,为设计和施工提供准确的地质资料。其次,需进行现场试桩,通过试桩确定最佳的施工参数,如钻进速度(1.0-1.5m/min)、提升速度(0.8-1.2m/min)、喷粉压力(0.4-0.6MPa)等。试桩数量不少于3根,试桩完成后,需对桩体进行质量检测,分析各项参数的合理性,并根据检测结果调整施工参数。同时,要对施工设备进行全面的调试和检修,特别是粉体发送器、搅拌轴等关键部件,确保设备性能良好,计量准确。此外,还需清理场地杂物,平整地表,设置排水系统,防止雨水浸泡地基,影响施工质量。最后,根据设计图纸,用全站仪进行桩位放样,划分桩位网格,确保桩位偏差不大于50mm^[2]。

2.2.2 施工过程中的关键控制点

在施工过程中,固化剂掺入量是保证桩体强度的关

键指标,必须通过电子计量系统实时监控,确保每根桩的喷粉量与设计值一致,喷粉量误差控制在±5%以内。若发现喷粉量异常,应立即停机检查,排除故障后方可继续施工。搅拌均匀度直接影响桩体的整体性和强度,施工中应采用“两喷三搅”的工艺,即钻进时不喷粉,提升至地面后再下沉搅拌,使固化剂与土体充分混合,避免出现桩身夹心层。同时,要控制好钻进和提升速度,确保搅拌时间充足。桩体垂直度也是重要的控制指标,需通过钻机上的水平仪实时调整,保证垂直度偏差不超过1%,防止桩体倾斜影响地基的受力性能。此外,桩顶标高应高出设计值50cm,待后期截除,以保证桩顶质量^[3]。

2.2.3 质量检测与验收标准

水泥粉喷桩施工完成28天后,需进行质量检测。检测项目主要包括桩身完整性、复合地基承载力和桩身强度。桩身完整性检测采用低应变动力触探法,抽检数量为总桩数的10%,要求桩身无明显缺陷,连续性好。复合地基承载力检测采用静载试验,抽检数量每10000平方米不少于3点,试验结果应满足设计要求。桩身强度检测通过钻芯取样,测定桩体的无侧限抗压强度,要求28天强度不低于1.2MPa。验收时,除满足上述检测要求外,还需检查桩位偏差、垂直度偏差等外观质量,桩位偏差不得大于±50mm,垂直度偏差不得超过±1%,喷粉量达标率需达到100%。只有各项指标均符合要求,方可通过验收。

2.3 技术优势与经济效益分析

2.3.1 与其他软土路基处理方法的比较

与换填法相比,水泥粉喷桩处理深度更大,可达20m以上,能有效处理深厚软土层,且无需大量外运弃土和回填材料,减少了对周边环境的影响。与塑料排水板联合堆载预压法相比,水泥粉喷桩施工周期短,可缩短50%以上的工期,无需长期堆载等待地基沉降稳定,能快速满足工程的使用要求。与碎石桩法相比,水泥粉喷桩桩身强度高,能提供更大的地基承载力和刚度,适用于对地基承载力要求较高的道路桥梁工程,且施工过程中无振动、无噪音,对周边建筑物和环境影响小。

2.3.2 工期、成本、环境等方面的综合效益分析

在工期方面,水泥粉喷桩施工机械化程度高,单桩施工时间仅30-40分钟,一台设备单日可完成80-100根桩,能快速推进工程进度,与其他软土处理方法相比,可节省60%以上的工期,大大缩短了工程的建设周期。在成本方面,水泥粉喷桩主要采用水泥作为固化剂,材料价格相对较低,单延米造价约80-120元,与旋喷桩相比,成本降低30%-40%;与换填法相比,可减少大量的土方开挖和回填费用,具有显著的成本优势。在环境方面,

水泥粉喷桩施工过程中无泥浆排放,粉尘污染可通过密封装置有效控制,施工噪音小,对周边生态环境和居民生活影响小,符合现代工程建设的环保要求。以一个10万平方米的软土路基处理工程为例,采用水泥粉喷桩处理可节约成本约200万元,减少碳排放500吨以上,兼具良好的经济效益和环境效益。

3 水泥粉喷桩施工技术在道路桥梁软土路基处理中的问题与对策

3.1 存在的问题

3.1.1 粉喷桩的支承式与悬浮式对沉降的影响

支承式粉喷桩桩端落在硬土层上,可有效传递上部荷载,沉降量较小,但当硬土层埋深较深时,桩长增加会导致施工难度和成本上升;悬浮式粉喷桩桩端处于软土层中,主要通过桩体与土的摩擦力承担荷载,易因桩体压缩和周围土体固结产生较大沉降。实际工程中,若两种形式设计不合理,可能出现不均匀沉降,尤其在过渡段易引发路基开裂、桥头跳车等问题。

3.1.2 地基土含水率对粉喷桩质量的影响

地基土含水率过高(超过60%)时,水泥固化剂易被稀释,水化反应不充分,桩体易出现松散、强度不足的现象;含水率过低(低于30%)则会导致土体黏性差,与固化剂搅拌时难以形成均匀混合物,出现“干搅”现象,桩体完整性受影响。在软土路基中,含水量波动还会导致桩身强度离散性大,降低复合地基的稳定性。

3.1.3 桩土置换率及粉体掺入量对复合地基强度的影响

桩土置换率过低时,桩体对地基的加固作用有限,复合地基承载力提升不明显;置换率过高则会增加施工成本,且可能因桩体间距过小导致相互干扰,影响整体受力。粉体掺入量不足时,桩体强度难以达标,无法有效分担荷载;掺入量过高则易出现“过搅”,破坏土颗粒结构,反而降低桩体强度,同时造成材料浪费。

3.2 解决方案与对策

3.2.1 提高机械设备性能

采用带实时计量功能的粉体发送器,确保喷粉量精准可控,误差不超过 $\pm 3\%$;升级搅拌叶片结构,采用多组螺旋式叶片,增强对高含水量土体的切削搅拌能力;配备自动垂直度调节系统,通过传感器实时监测钻机倾斜度,自动调整机身水平,保证桩体垂直度偏差 $\leq \pm 1\%$ 。

此外,加装GPS定位系统,实现桩位放样与施工轨迹的数字化管控。

3.2.2 优化施工工艺与参数

针对高含水量地基,采用“先干搅后喷粉”工艺,即先钻进搅拌土体降低含水量,再喷粉提升,水泥掺入量可提高2%-3%;对低含水率地层,适当洒水湿润土体,确保含水率控制在35%-55%区间。根据地质条件动态调整置换率,软土层厚度 $> 10\text{m}$ 时置换率取15%-20%, $< 5\text{m}$ 时取10%-15%;通过试桩确定最佳掺入量,一般控制在12%-18%,并采用“四搅两喷”工艺提升搅拌均匀性^[4]。

3.2.3 加强现场监测与管理

建立“施工-检测-反馈”闭环体系,每完成50根桩进行一次低应变检测,抽检比例提高至15%;采用埋设沉降观测标的方式,定期监测路基沉降,前3个月每周观测1次,之后每月观测1次,当沉降速率 $> 5\text{mm}/\text{天}$ 时及时预警。严格执行工序验收制度,喷粉量、桩长、垂直度等指标经监理验收合格后方可进行下道工序,同时加强施工人员培训,考核合格后方可上岗。

结束语

综上所述,水泥粉喷桩施工技术凭借其高效、经济、环保的特点,在道路桥梁软土路基处理中展现出广阔的应用前景。通过科学设计、精细施工和严格质量控制,该技术能显著提升软土地基的物理力学性能和承载力,有效控制路基沉降,保障道路桥梁的安全与稳定。随着材料科学、施工技术及检测手段的不断进步,水泥粉喷桩施工技术将进一步完善,为道路桥梁建设领域带来更多的技术创新和应用突破。未来,我们期待其在更多复杂地质条件下的成功应用。

参考文献

- [1]邓康乐.水泥搅拌桩在市政道路和公路工程软基处理中的应用[J].工程建设与设计,2021,(04):29-31.
- [2]张希庆.粉喷桩施工工艺在公路工程中的实施探索[J].科学技术创新,2020,(14):128-129.
- [3]徐文锐.粉喷桩施工工艺在公路施工中的实践探析[J].低碳世界,2020,(11):179-180.
- [4]焉妮.粉喷桩在公路软土路基处理中的施工分析[J].智能城市,2020,(21):137-138.