

高压旋喷桩在道路软基处理中的实施方法

文 / 金鑫 安徽建工公路桥梁建设集团有限公司

摘要：道路工程常面临软弱路基带来的沉降和稳定性问题。高压旋喷桩技术凭借其适应性强、施工高效、加固效果好等优势，成为软基处理的有效手段。本文系统阐述了高压旋喷桩加固道路软基的工作原理，详细介绍了其施工工艺流程，重点强调了材料、工艺参数、成桩质量等关键控制要点，并结合实际案例分析了其应用效果。高压旋喷桩技术在道路软基处理中的科学实施，可显著提高路基的承载力及整体稳定性，延长道路使用寿命，值得在道路工程领域推广应用。

关键词：道路工程；软基处理；高压旋喷桩；施工工艺；质量控制

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.16.066

引言

道路建设所经地区的复杂地质条件，尤其是软弱地基的存在，往往给路基施工和道路运营带来极大的困扰。如何在保证工期和质量的同时，有效提高软土路基的工程性能，是每一个道路工程都必须面对的课题。传统的软基处理手段，诸如强夯法、换填法、水泥粉煤灰桩法等，各有其局限性和不足之处。随着旋喷技术的发展，高压旋喷桩以其独特的优势脱颖而出，日益成为软基加固的新宠。然而，高压旋喷桩能否真正发挥其应有的效用，关键在于施工工艺是否科学、规范，质量控制是否得力。

一、高压旋喷桩的工作原理及优势

(一) 高压旋喷桩的工作原理

高压旋喷桩是利用高压旋喷设备，通过钻杆上的喷射器，将高压水泥浆液喷射到土层中，边旋转提升边搅拌土体，使土粒与水泥浆液强制混合，最终形成一个柱状固结体，从而达到加固软弱地基，控制沉降的目的。高压旋喷桩可分为单管、双管、三管旋喷，其中三管旋喷法同时喷射高压水、压缩空气和水泥浆液，破坏土体能力强，可形成直径更大的旋喷桩体。

(二) 高压旋喷桩在道路软基处理中的优势

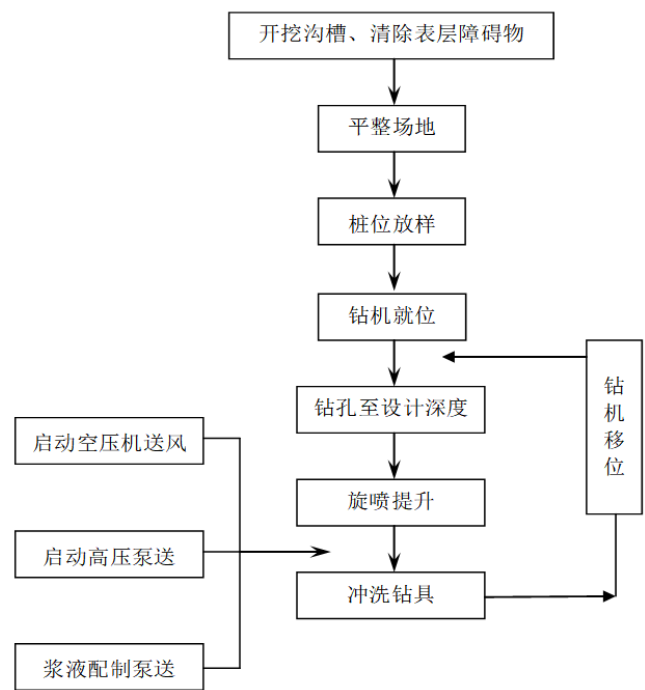
高压旋喷桩技术凭借其独特的优势，在道路软基处理中得到了广泛应用。它不仅适应性强，能够有效处理粉土、粘土、砂土及砾石等多种类型的软弱地层，特别是对于存在大孔隙、溶洞等复杂地质条件的软基具有良好的适用性，而且施工机械化程度高，无需开挖基坑，能够在狭小空间内高效施工，且噪音小、污染少，对周边环境影响小^[1]。更为关键的是，高压旋喷桩能够使水泥浆液与软土充分混合，形成均匀、密实的固结体，显著提高地基土的强度和刚度，有效控制路基沉降，确保路面的平整度和使用寿命。同时，旋喷桩施工过程中，桩间土也能受到一定程度的加固，从而改善了地基的整体性能。

二、道路软基高压旋喷桩处理的施工工艺

(一) 钻机就位与浆液制备

高压旋喷桩施工中，钻机就位和浆液制备是第一道关键工序。施工前，技术人员应根据设计图纸，利用全站仪或GPS定位仪，精确测定每个桩位的坐标和标高，

并用垂球或经纬仪复核桩位偏差，确保偏差控制在50mm以内。钻机就位时，操作人员应调整支腿的高度，确保钻机底座水平，避免因钻机倾斜导致钻杆偏斜。同时要将钻杆对准桩位中心，并控制钻杆的垂直度偏差在1%~1.5%的范围内^[2]。为防止钻进过程中发生倾斜，可在钻杆两侧设置导向架辅助定位。就位完毕后，技术人员应检查高压泵、空压机等设备的运行状态，确保性能良好、管路畅通。按照设计配合比，利用搅拌机制备水泥浆液。首先将计量好的水、水泥等原料投入搅拌罐，开启搅拌机低速搅拌5min，使其初步混合。



高压旋喷桩施工流程图

(二) 钻孔成孔

钻孔成孔是利用钻机将钻杆送入土层，形成桩孔的过程。施工时可根据地层情况和设计要求，选择单管、双管或三管旋喷工艺。当地层土质相对均匀，且不含大量砂砾石时，可采用单管法。启动钻机和高压泵，利用钻杆末端的高压旋喷头边旋转边将水泥浆喷射至土层中，借助射流动力和钻杆自重完成土体切削和钻进^[3]。若地层复杂多变，

可采用双管法,通过在钻杆周围设置套管,既可防止孔壁坍塌,又能避免水泥浆在上拔钻杆时外溢。对软硬土层交错分布、孔隙发育的地层,宜选用三管法。先用地质钻机钻进形成护壁,清除孔内残渣后,将三重管旋喷管下放至孔底,然后通过外环高压水射流冲切土体,中环压缩空气夹带切削下来的土粒排出孔外,内管经高压泵将水泥浆注入形成的环状空间,实现高喷嘴旋转提升的同时完成土体切削、置换与水泥浆搅拌。无论采用何种钻孔方式,都应严格控制钻进速度,确保达到设计桩深。当遇岩石、障碍物等阻碍钻进时,应及时调整钻具,必要时可采用冲击钻头或在水泥浆中掺入石子挤压成孔。

(三) 高压旋喷

高压旋喷是高压旋喷桩成桩的核心工序,其施工质量直接影响桩体的完整性和强度。当钻孔达到设计标高后,应及时停止钻进,保持钻杆低速旋转,同时启动高压泵,将水泥浆液通过旋喷管内的喷嘴以20~40MPa的高压喷射至土体中^[4]。喷射初期,泵压宜由低到高逐渐升高,当压力达到额定值后方可提升旋喷管。为保证水泥浆与土体充分混合均匀,提升速度应控制在0.3~0.5m/min。若土质粘性大,可适当降低提升速度。喷射过程中,技术人员应通过高压泵的压力表和流量计,实时监测喷射压力和注入量,确保各项参数满足设计要求。同时操作人员还需观察桩位的返浆情况。正常情况下,随着旋喷管提升,孔口会不断溢出剩余的水泥浆,当返浆量较少或突然中断时,说明旋喷参数可能存在问题,需要及时调整。对于砂层、砂砾石层等易漏浆地层,可通过提高泵压和降低提升速度来补偿浆液的渗失。

(四) 清洗封孔

高压旋喷施工完毕后,及时将钻杆和旋喷管缓慢提出,同时利用高压水对钻孔、钻杆、喷头等进行彻底冲洗,防止残留的水泥浆凝固堵塞设备,影响后续施工。尤其是在砂砾石层、孤石层等复杂地层施工结束后,更应注意冲洗喷嘴和钻头,必要时可拆除喷头进行人工清理。在清洗过程中,技术人员应密切关注孔内水位的变化情况^[5]。当因钻杆提升等原因造成孔内水位骤降时,应立即向孔内补充按1:1配比的水泥浆液,直至孔口溢出浆液并保持稳定为止。若使用含砂量较高的水泥浆,宜采用导管法封孔,即通过在孔内插入与钻孔直径相近的导管,边缓慢拔出导管边向导管内灌注水泥浆的方式进行封孔。需要注意的是,为确保桩头密实,封孔时应预留10~20cm高出地面的桩头,待其初凝后再进行桩头处理。

(五) 补浆完桩

高压旋喷桩施工中,由于水泥浆液具有一定的收缩性和泌水性,常会导致新成桩体出现体积收缩和强度降低等问题,尤其是在桩头区域更容易产生离析现象,形成桩头高度不足或夹杂软弱夹层。因此,在封孔完成后,技术人员应对桩头进行仔细检查,发现高度不足或存在蜂窝麻面等缺陷时,应及时采取补浆措施^[6]。补浆材料一般采用与桩体相同的水泥浆液,其水灰比通常控制在1:1左右。对于桩径不大于800mm的桩体,可直接采用

壶嘴法或导管法从桩顶向下灌注补浆液,直至孔口溢出浆液为止。对于桩径较大的桩体,宜采用袖阀管法进行补浆,即利用双重管在成桩范围内预埋一根带有袖阀的注浆管,待桩体初凝后,通过袖阀管向桩体内分段压注补浆液,由下而上逐段封闭袖阀,直至将桩头区域充填密实。补浆时应控制注入压力,避免过高的压力导致桩体膨胀或缺陷加剧。待补浆液终凝后,方可进行桩头的最终处理,并及时移机转场,开始后续桩位施工。

三、高压旋喷桩在道路软基处理实施中的质量控制要点

(一) 原材料质量控制

高压旋喷桩施工对水泥浆液质量有着严格要求,因此原材料的选用和质量控制至关重要。施工单位应选择强度等级不低于42.5MPa、安定性良好的普通硅酸盐水泥,进场前应仔细检查其出厂合格证、质保书等品质证明文件,确保水泥各项理化指标均满足现行行业标准。使用前可通过取样复验的方式,进一步检测水泥的细度、凝结时间、安定性等关键参数,尤其是负温环境下施工,更应重点关注水泥的抗冻性能。对于需要掺加引气剂、早强剂等外加剂时,应优选性能稳定、与水泥适应性好的品牌产品。外加剂的掺量宜通过室内配合比试验确定,既要满足强度、耐久性提升等功能需求,也要考虑成本和施工工艺的经济合理性。拌制水泥浆时,应根据设计要求严格控制水灰比,一般宜为0.6~1.0。若地层中砂砾石含量较高,可适当降低水灰比,以提高浆液的稳定性和泵送性能。若地下水位较高或土层渗透性强,可适度提高水灰比和水泥用量,以减少浆液流失。对于复杂土层条件下的大直径、深度旋喷桩,为确保浆液输送和喷射性能,水灰比可放宽至0.8~1.2。施工时应根据试桩情况和现场条件,及时调整浆液配比。

(二) 施工参数控制

高压旋喷桩能否形成高质量的桩体,施工参数的科学控制是关键。设计人员应根据详勘资料,并结合类似工程的经验,合理确定各项参数的初始值。现场试桩时,施工人员应在初始参数的基础上,通过调整钻进速度、提升速度、旋转速度、泵压、浆液配比和喷射方式等参数,优选出适合该场地土层特点的最佳工艺参数组合。钻进速度应根据土层的可钻性、湿陷性及渗透性来确定,一般宜控制在0.2~0.6m/min。提升速度是决定旋喷桩直径的关键参数,对于粘性土,提升速度以0.2~0.3m/min为宜;对于砂土,提升速度可适当加快,但最高不宜超过0.5m/min。采用三管旋喷法时,还需控制好高压水的压力和流量,一般高压水泵压控制在30~50MPa,水流量控制在80~150L/min。合理的旋转速度可有效提高桩体的均匀性,对于复杂地层,可采用慢速多转的原则,适当降低提升速度的同时提高旋转速度。施工时,技术人员应通过泵压表、流量计等仪器实时监测各项参数,发现异常应及时分析原因并调整如,表1所示。同时,还应密切关注桩位的返浆量和浆液密度,及时掌握成桩过程中可能发生的浆液流失、塌孔等问题,并采取相应的工艺优化措施。

表 1 施工参数控制表

参数名称	控制范围	备注
钻进速度 (m/min)	0.2 ~ 0.6	根据土层可钻性、湿陷性及渗透性确定
提升速度 (m/min)	粘性土: 0.2 ~ 0.3; 砂土: ≤ 0.5	决定旋喷桩直径的关键参数
旋转速度 (r/min)	根据地层复杂程度调整	复杂地层可采用慢速多转原则
高压水泵压 (MPa)	30 ~ 50	三管旋喷法控制参数
水流量 (L/min)	80 ~ 150	三管旋喷法控制参数
水灰比	0.6 ~ 1.2	根据地层条件及设计要求调整

(三) 桩位偏差控制

高压旋喷桩施工要满足设计要求, 必须从测量放线到成桩全过程加强桩位偏差控制。技术人员应严格按照设计图纸进行测量放线, 并用全站仪进行复核, 使桩位中心与设计坐标的偏差控制在 50mm 以内。钻机就位时, 应利用经纬仪或垂准仪对钻杆垂直度进行检查, 垂直度偏差应小于 1%, 超限时应及时调整机架、导向装置, 确保钻进方向正确。进入岩层、砾石层、孤石区等复杂地层钻进时, 遇阻力较大应及时更换钻头, 避免钻杆弯曲变形。若发现钻杆位移或倾斜, 应立即停机查明原因, 采取措施纠偏并重新钻进, 严禁带偏施工。同时, 对于桩间距较小的旋喷桩网格, 更应在成桩后及时进行桩位偏差复核, 若桩心距偏差超限, 可能会导致桩间土固结不完整、上部结构应力集中, 影响整体加固效果。一旦发现个别桩位偏差过大, 应及时与设计人员沟通, 并采取适当的纠偏措施, 如在偏位一侧补桩、调整桩径或间距等。在施工过程中, 技术人员还应做好原始记录, 详细记录各桩位的实际坐标、孔口标高、成桩日期等关键信息, 以便后期复核及健康监测。桩位偏差控制看似简单, 却需要施工各方密切配合, 时刻紧绷质量意识这根弦。

(四) 成桩质量检测

高压旋喷桩成桩质量的检测贯穿于施工过程和工程验收的始终。施工过程中, 技术人员应随时检查桩体的冒浆量、浆液密度、提升速度等指标, 初步判断单桩的成桩质量。对于冒浆量偏小、喷浆不连续的桩位, 要分析原因并及时采取工艺调整或补桩措施。待单桩终凝后, 应及时对桩头进行高程、直径和完整性检查, 发现桩头高度不足、直径小于设计值或桩身出现缩颈、裂缝等缺陷时, 应及时进行补浆加固, 重新成桩。在整个加固区域施工完成后, 应按设计要求留置检测桩, 并在龄期达到设计值后进行系统的质量检测。检测内容一般包括桩身完整性检测和钻芯取样检测。完整性检测可采用声波透射法或低应变法, 重点评估桩身的连续性和均匀性。钻芯法是最直观的检测手段, 应选择有代表性的桩位, 采用 $\phi 100\text{mm}$ 以上的双壁钻机钻取岩芯, 测定岩芯采取率, 观察桩芯的色泽、气味、结构, 并进行室内抗压强度试验, 综合评价旋喷桩的可靠度和有效直径。

四、典型案例分

某城市主干道路段地质勘探显示局部路基下伏 4 ~ 5m 厚的淤泥质软土, 且软土层中混杂有大量的砂砾颗粒, 路基施工难度很大。为了有效解决这一难题, 设计人员经过反复比选和方案优化, 最终确定采用三重管

高压旋喷桩技术来对既有软弱地基进行加固处理。根据现场条件和加固要求, 设计单桩直径为 800mm, 桩间距 1.5m, 桩长 8m, 水泥掺量为 450kg/m³。在正式施工前, 技术人员还进行了多点试桩, 并结合所取得的数据, 优化确定了施工工艺参数, 将旋喷提升速度控制在 0.2 ~ 0.3m/min, 旋喷压力控制在 20 ~ 30MPa 范围内。在整个施工过程中, 现场技术人员时刻严格把控钻进速度、提升速度、旋喷压力、水灰比等各项关键参数, 确保其均满足设计和规范要求。同时, 测量人员还对成桩后的桩位和垂直度进行了仔细复核, 及时发现并纠正超限的桩位偏差, 从而保证了旋喷桩体的施工质量。当路基软基处理全部完成后, 施工单位组织进行了系统的质量检测, 检测结果表明, 本工程旋喷桩加固后的路基沉降量和稳定性均得到了大幅改善, 所形成的桩体完整、均匀, 各项性能指标均达到了设计标准, 为保障道路工程的整体施工质量和使用性能提供了有力支撑。

结语

高压旋喷桩技术为道路软基处理带来了新的契机。通过对其工作原理及施工工艺的掌握, 制定科学的施工方案并严格质量控制, 定能充分发挥高压旋喷桩加固软土路基的功效。未来, 随着材料工艺的进一步改进和设备性能的不断提升, 高压旋喷桩技术必将在道路工程领域得到更广泛的应用。同时也应看到, 对于不同的软基类型和工程要求, 还需研发出与之相匹配的旋喷桩型式及配套工艺。只有实现技术与工程的良性互动, 高压旋喷桩才能在道路软基处理中大显身手, 为建设优质高效的道路工程作出更大贡献。

参考文献

[1] 田振. 高压旋喷桩在城市道路软基处理中的应用研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9 (17): 98-101.
 [2] 庄云翼. 高压旋喷桩在市政道路路基处理中的应用及效果分析 [J]. 中国建筑金属结构, 2022, (12): 25-27.
 [3] 谢之逸, 单君, 史宇宙. 高压旋喷桩在高压线下部公路软基处理的设计分析与应用 [J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45 (06): 10-12.
 [4] 杨治攀. 软基加固技术在道路施工中的应用 [J]. 交通世界, 2021, (08): 87-88+97.
 [5] 胡鹏, 潘桥泓. 浅谈高压旋喷桩在城市道路软基处理中的应用 [J]. 价值工程, 2020, 39 (07): 164-166.
 [6] 何本贤. 高压旋喷桩在软基处理中的应用 [J]. 现代物业 (中旬刊), 2020, (02): 152-153.