

高压旋喷桩在深基坑围护工程中的应用研究

黄圣峰

上海中勘纬地岩土科技有限公司, 上海 200072

DOI:10.61369/ERA.2026070004

摘 要 : 高压旋喷桩作为地基处理技术的一种, 近些年在深基坑围护工程中被广泛应用。本文主要对高压旋喷桩在深基坑围护中土体加固、止水帷幕的形成以及与灌注桩组合使用等主要技术进行研究, 对杂填土、暗浜、砂质粉土等复杂地质条件下成桩工艺及参数控制要点进行系统的分析。根据格科集团总部项目工程实践, 在复杂的地层中容易出现的浆液流失、高压旋喷桩施工和止水搭接质量控制等难题, 重点阐述了三管法旋喷、复喷工艺、喷射压力的优化控制、搭接区高压定喷及补浆加固等施工技术措施, 通过施工监测反馈对工艺参数进行动态调整。研究成果可为类似复杂的地质条件下深基坑围护工程中高压旋喷桩的设计与施工提供工程参考。

关 键 词 : 高压旋喷桩; 深基坑围护; 复杂地质; 地基处理

Research on the Application of High-Pressure Jet Grouting Piles in Deep Foundation Pit Support Engineering

Huang Shengfeng

Shanghai Zhongkan Weidi Geotechnical Technology Co., Ltd., Shanghai 200072

Abstract : As a foundation treatment technique, high-pressure jet grouting piles have been widely applied in deep foundation pit support engineering in recent years. This paper primarily investigates the key technologies of high-pressure jet grouting piles in deep foundation pit support, including soil reinforcement, the formation of water-stopping curtains, and their combined use with bored piles. It systematically analyzes pile formation techniques and parameter control points under complex geological conditions such as miscellaneous fill, concealed streams, and sandy silt. Based on the engineering practice of the Gekko Group headquarters project, this paper focuses on the challenges of grout loss, quality control in high-pressure jet grouting pile construction, and water-stopping overlap in complex strata. It elaborates on construction techniques such as triple-pipe jet grouting, re-jetting processes, optimized control of jetting pressure, high-pressure fixed jetting in overlapping zones, and grout reinforcement. Construction monitoring feedback is utilized to dynamically adjust process parameters. The research findings offer engineering references for the design and construction of high-pressure jet grouting piles in deep foundation pit support projects under similar complex geological conditions.

Keywords : high-pressure jet grouting piles; deep foundation pit support; complex geology; foundation treatment

引言

伴随着城市化进程的加快, 高层建筑、地下空间的开发越来越多, 深基坑工程在城市建设中所起的作用也越来越重要。深基坑围护工程施工质量的好坏直接影响到基坑的安全稳定, 也对周边环境的安全造成深远的影响。在众多地基处理技术当中, 高压旋喷桩技术因为具有高效、灵活、对环境影响小等特点, 渐渐成为深基坑围护工程中不可缺少的技术手段。不仅可以提高土体的承载能力、抗剪强度, 而且可以形成可靠的止水帷幕, 保证基坑施工的安全、稳定。因此研究高压旋喷桩在深基坑围护工程中的应用, 有重要的理论和现实意义。

一、高压旋喷桩概述

高压旋喷桩是一种先进的地基处理技术, 用高压水泥浆液注入土层中, 形成具有较高强度和稳定性的柱状体。这项技术最早出现在20世纪70年代的日本, 很快在全世界得到广泛的应用。

其主要原理就是利用钻机将带有特殊喷嘴的注浆管下到预定深度, 再用高压泵把水泥浆液以高速喷射出来, 切割、搅拌周围的土体, 使其和水泥浆充分混合凝固, 从而达到改良土体性质的目的。高压旋喷桩可以用于软弱黏性土、砂土、粉土、碎石土等各种土壤。不仅可以提高土体的承载能力, 减少不均匀沉降, 还可

以作为止水帷幕，有效地控制地下水的流动，特别适合地下水位较高的地区。另外由于施工灵活、适应性强，对周围环境影响小等特点，在城市建设和改造项目中更受欢迎。根据喷射方式的不同，高压旋喷桩可以分为单管法、双管法、三管法等，不同的方法有不同的适用场合和技术要求。随着工程技术的发展，高压旋喷桩除了用于地基加固外，还被广泛地应用到边坡防护、深基坑支护等工程中，是现代工程建设中不可缺少的一部分。

二、高压旋喷桩在深基坑围护工程中的技术应用

（一）土体加固

高压旋喷桩常被用作深基坑围护工程中土体加固。其主要作用就是利用高压喷射水泥浆液，把原位土体切割、搅拌，然后与浆液混合形成具有一定强度的固结体。该种加固方法能明显提高软弱土层的承载力，减小地基变形和沉降。尤其在淤泥质土、粉细砂等较差的地质条件下，传统方法很难满足基坑开挖的安全要求，采用高压旋喷桩可以改善土体性能。化学反应使土体和水泥浆液结合成稳定的复合结构，物理填充作用提高土颗粒之间的联系性。两种机制一起作用，使加固后的土体抗剪强度、抗压能力得到提高，进而提高整个基坑支护体系的稳定性。根据土层情况、地下水情况及基坑深度等因素合理布置旋喷桩位置和间距。旋喷桩一般布置成格栅状或者连续墙体形式，以满足不同的加固要求。基坑角部或者临近重要地下管线处，适当增加桩位可以更好地控制地层变形，保证施工安全。高压旋喷桩施工过程比较灵活，在不扰动周边环境的情况下可以完成施工。因此，在城市密集区或者已有建筑物附近的深基坑工程中具有较强的适用性。从整体上看，高压旋喷桩是土体加固的一种高效、可靠的手段，在深基坑围护工程中起着不可替代的作用。

（二）止水帷幕

在深基坑工程中，地下水渗透会造成较大的施工风险。高压旋喷桩可以在土层中形成一定厚度、连续的止水帷幕，阻断地下水流动路径，防止基坑涌水、管涌等。因此它成为解决地下水控制难题的一种重要手段。止水帷幕的形成依靠旋喷桩的连续性、密实度。施工时通过调节喷射压力、提升速度、浆液配比等参数来控制桩体直径、搭接程度，使相邻桩之间紧密连接。这样的结构在地下水压力的作用下能够保持稳定，起到良好的隔水作用。特别是在高水头差的环境下，高压旋喷桩止水帷幕可以起到持续有效的防水作用。旋喷桩比传统的钢板桩、深层搅拌桩更适合于复杂地层。卵石或砂砾土层中，普通搅拌桩由于搅拌不均造成止水性能下降，高压旋喷桩可以高速喷射穿透障碍物，达到更均匀的加固和止水效果。同时止水帷幕的设计要考虑地质条件、基坑深度、周围环境的影响。若基坑靠近河道、地铁隧道或其它地下设施，止水帷幕要适当加厚，并配合其它排水措施，保证施工安全和后期结构稳定。在某些特殊工程中还可以把旋喷桩与其它止水材料配合使用，比如与灌注桩组合成复合止水结构，从而提高防渗性能。高压旋喷桩是止水帷幕的构建方式，可以提高基坑施工的安全性，也可以给地下水控制提供更加灵活的技术选择。

（三）与灌注桩组合应用

深基坑围护工程中，单靠一种类型的支护结构很难达到整体稳定、安全的要求。高压旋喷桩和灌注桩的组合使用，给解决此类问题提供了一条新的思路。该种组合形式可以发挥各自的优势，达到更好的支护效果。灌注桩主要是用来承担上部荷载，提供垂直支撑力。高压旋喷桩多用于土体加固、止水。两者结合之后，就可以形成一个既有承重能力又有良好止水性能的复合支护体系。在基坑外设置灌注桩作为主要支挡结构，内部分布高压旋喷桩进行土体加固和止水，该做法在多个大型工程中得到成功运用。旋喷桩一般布置在灌注桩之间或围绕灌注桩形成局部加固带。这样既可以提高整体结构的刚度，又可以减少基坑开挖时产生的侧向位移和地表沉降。对于地下水丰富场地，旋喷桩可以作为灌注桩之间的止水连接，防止水流从桩间渗入基坑。旋喷桩和灌注桩的施工顺序也要合理安排。一般先施工灌注桩，待其达到一定强度后再进行旋喷桩作业，可以避免施工扰动影响灌注桩的稳定性。同时还要根据现场地质情况动态调整施工参数，使两种桩型的协同作用最大。虽然增加了施工工序，但是从长远来看提高了工程的整体质量和安全性。旋喷桩和灌注桩在复杂工况下协同使用具有更好的适应性、可靠性。

（四）复杂地质条件下的应用

地质条件复杂的地方，深基坑围护工程遇到的困难更大。高压旋喷桩由于具有灵活性、适应性强的特点，在该类环境中具有较好的应用前景。无论是含砂层、卵石层或者有溶洞的岩层，只要合理调整工艺参数，也能达到较好的加固效果。砂性土层中由于土体松散、自稳性差，常规支护方式容易出现塌孔或者失稳。高压旋喷桩利用高压喷射水泥浆液，可以很快地和砂粒结合成稳定的加固体，提高土体的整体性。虽然卵石层中钻进难度大，但是通过调节喷嘴角度和浆液压力，依然可以完成切割填充，形成比较均匀的加固柱体。对有溶洞、裂隙发育的岩层，高压旋喷桩利用浆液渗透填充空隙，封堵潜在的渗流通道，提高地基密实度和抗渗性。此种处理方式适合于地下水流速较快或者局部存在薄弱面的情形，有利于避免基坑开挖过程中出现突涌或者塌陷事故。在实际施工中，施工人员根据不同的地质情况调节喷射参数，即压力、流量、旋转速度、提升速度等。有时还要配合先导钻探或者地质雷达探测，提前掌握地下情况，保证旋喷桩施工的准确性、有效性。在地质条件复杂的地区施工难度增大，但是在科学设计、精细管理下高压旋喷桩依然能发挥出优良的工程性能。为它在更多种特殊环境中的推广使用打下基础。

三、案例分析

（一）项目概况

格科集团总部项目桩基工程专业承包项目位于上海市浦东新区张江镇43-01地块，东至规划绿地，南至康南路，西至盛荣路，北至规划十二路，占地面积2.84万 m^2 ；地块总建筑面积16.5万 m^2 ，地上建筑面积约11万 m^2 ，地下建筑面积约5万 m^2 。拟建构筑物为80m大型钢构办公楼，地下为面积2.5万 m^2 、两层挖深超

10m 的深基坑, 基坑边线距建筑红线最近约 4m。建筑场地位于市区, 周围建筑密集, 地下管线较多; 西侧临近学校出入口, 环境条件比较复杂。

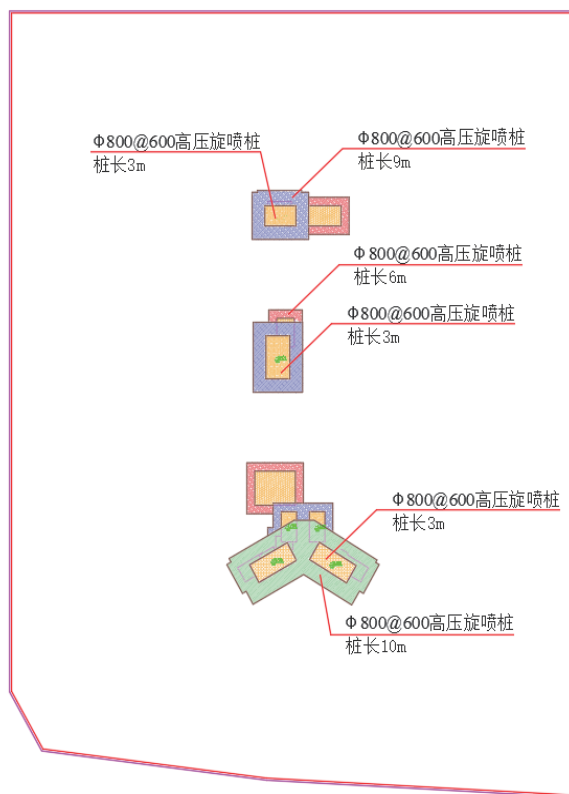


图1 高压旋喷桩分布示意图

(二) 项目难点和解决对策

(1) 复杂地质条件下成桩质量控制难

项目场地地层复杂, 有杂填土、暗浜、砂质粉土等, 其中③层淤泥质粉质粘土、④层淤泥质粘土易坍塌, ⑤层砂质粉土透水性强, 高压旋喷桩施工时易出现浆液流失、桩体连续性差等问题。

解决对策: 暗浜、杂填土区采用三管法旋喷, 先用 35MPa 高压水切割障碍物, 再注入 1~5MPa 水泥浆和 0.7MPa 压缩空气, 提高土体破碎和浆液混合效果, 砂质粉土层适当降低提升速度至 10~15cm/min, 增加浆液滞留时间和水泥掺量至 25% 提高抗渗性。在施工过程中用压力传感器实时监测注浆压力和流量, 当压力突然下降时立即停止提升并原地重复喷射注浆, 对砂层等容易流失的地方采用第一次喷浆提升后立即以 5~10cm/min 的速度重复喷射的“复喷工艺”来提高桩体的连续性。施工前用地质雷达或钎探探明地下障碍物, 对深度 $\leq 3\text{m}$ 的障碍物机械开挖清除并回填素土夯实, 深度 $> 3\text{m}$ 的障碍物用引孔钻机预破除, 保证旋喷桩顺利下入设计深度。

(2) 受环境约束条件下高压旋喷桩施工难度大

项目西侧紧邻学校出入口, 施工时对施工的振动和噪声控制要求较高, 高压旋喷桩必须在灌注桩、立柱桩成桩并达到一定强度之后才能进行施工, 施工空间狭小、工序交叉频繁, 容易对旋

喷成桩质量及既有桩体稳定性造成不利影响。

解决对策: 为减小旋喷施工对周围环境及既有结构的扰动, 项目采用 XP-50 型高压旋喷桩机, 在设备底座设置减震垫, 减小施工影响。在旋喷参数控制方面, 使用低提升速率和间歇性喷射施工工艺, 把连续喷射时间控制在 60s 到 90s 之间, 单次提升高度不超过 20cm, 有效减小高压喷射对周围土体的瞬时扰动。同时在靠近学校一侧适当降低旋喷压力 10% ~ 15%, 延长喷射时间来补偿加固效果, 保证满足成桩强度要求的同时控制施工振动和噪声。

根据旋喷桩需要在灌注桩、立柱桩之间插入施工的特点, 项目采用先主体桩、后旋喷加固的技术路线。灌注桩和立柱桩施工完成后达到设计强度的 70% 时再进行旋喷桩施工, 防止旋喷高压射流对新成桩体产生扰动。旋喷施工采用跳孔施工、分区推进的工艺, 相邻旋喷桩施工时间间隔不小于 24h, 防止新成桩体因邻孔喷射产生剪切破坏。同时用全站仪精确放样, 控制旋喷桩轴线的位置, 使旋喷桩与排桩、立柱桩之间空间关系满足设计要求, 防止偏孔造成局部加固薄弱。

(3) 高压旋喷桩与既有支护体系协同止水难度大

项目围护体系采用三轴搅拌桩止水帷幕加钻孔灌注桩的方式, 高压旋喷桩主要用在坑内深坑加固和局部堵漏, 要与既有三轴桩紧密搭接, 防止出现接缝渗漏。

解决对策: 第一, 使用全站仪确定旋喷桩孔位, 再用钢尺复核与三轴桩的搭接距离 (设计要求 $\geq 200\text{mm}$), 施工时控制旋喷桩中心线与三轴桩边缘间距在 100~150mm 之间, 保证搭接区重叠注浆形成复合止水结构。第二, 搭接区域用高压定喷工艺, 到达搭接深度后停止提升, 保持 20~25MPa 喷射压力持续注浆 30~60 秒来提高接缝密实度, 施工完成 28 天后用钻孔取芯检测桩身强度 (要求 $\geq 1.0\text{MPa}$) 和注水试验检测渗透系数 ($\leq 10^{-6}\text{cm/s}$), 对不合格区域用袖阀管补浆加固。第三, 开挖时若出现接缝渗漏, 在渗漏点两侧 300mm 处立即补打旋喷桩, 用压力 $\geq 30\text{MPa}$ 、提升速度 5cm/min 的“大压力、小提升”方式形成应急止水墙, 并在坑底设排水盲沟和集水井及时抽排渗漏水防止事态。

(三) 心得体会

在格科集团总部项目深基坑围护工程中, 高压旋喷桩技术的应用让我深深体会到施工技术的复杂性以及重要性。针对复杂地质条件和严格环保要求, 优化施工参数和工艺, 解决了成桩质量控制、与周边环境及相邻工序协同施工、与既有支护体系协同止水等难题。在复杂的地质条件下, 采用三管法旋喷工艺和复喷工艺, 提高了成桩质量以及抗渗性能。通过实时监测注浆压力、流量, 及时调整施工参数, 保证桩体连续、密实。在和周边环境的协同施工中, 使用减震垫、隔音罩、间歇式喷射工艺, 有效地降低了施工振动、噪音, 减小了周边环境的影响。同时利用施工图纸深化标注、现场全站仪放样定位、合理的施工顺序安排, 避免了相邻桩体相互扰动, 保证施工顺利进行。止水方面, 采用双测放制度、高压定喷工艺保证旋喷桩与三轴搅拌桩紧密搭接, 形成可靠的止水帷幕。通过本项目的实践可知, 施工技术的优化与创新是解决复杂工程问题的主要途径。合理的技术方案、严格的施

工管理可以提高工程质量，降低施工风险，给项目的顺利实施提供有力的保障。

四、结束语

高压旋喷桩技术在深基坑围护工程中应用，很好地体现了它在复杂地质条件下、多样化工程需求下所具有的独特优势。采用土体加固、止水帷幕和灌注桩相结合的方式，高压旋喷桩对基坑

围护结构的稳定、安全起到提高作用，也对工程整体性能起到改善的作用。其在格科集团总部项目桩基工程专业承包中取得的成功应用，再一次证明了该技术的灵活性和可靠性，给深基坑工程的施工提供强有力的技术支持。随着工程实践的不断积累和技术的不断发展，高压旋喷桩将在更多的领域起到重要的作用，给现代工程建设提供更加有力的保障。

参考文献

[1] 李忠宝, 黄贺, 王峰. 高压旋喷桩在富水咬合桩围护体系堵漏中的应用 [J]. 建筑工人, 2023, 44(09): 35-38.

[2] 张鹏, 邓智平, 蔡亮亮, 等. 基于某近海深基坑高压旋喷桩施工工艺的改进 [J]. 中国水运, 2023, 23(04): 130-132.

[3] 许丽忠. 浅谈市政工程基坑施工中高压旋喷桩的应用 [J]. 散装水泥, 2022, (04): 117-119.

[4] 朱兴旺, 史景革, 李春秀. 高压旋喷桩在深基坑地基处理中的应用研究 [J]. 土工基础, 2022, 36(02): 127-130.

[5] 陈勇, 罗志浩, 屈坤玉, 等. 高压旋喷桩内插 H 型钢在基坑支护中的应用 [J]. 建筑施工, 2021, 43(07): 1193-1195.