

微扰动多轴深搅止水桩在紧邻地铁深基坑支护中的应用研究

徐洪帅

云南纬度建设工程有限公司 云南 昆明 650500

【摘要】：随着城市地下空间开发日趋密集，紧邻地铁的深基坑工程面临严峻的技术挑战。传统支护手段易引发周边土体变形，威胁地铁结构安全。本文针对这一问题，提出微扰动多轴深搅止水桩技术，该技术通过精准浆液注入与低振动搅拌，重构土体结构，形成高强度、低渗透性的止水帷幕，有效控制地层位移与止水性能。本文详细阐述了微扰动多轴深搅止水桩技术的原理、施工工艺及优势，并结合实际工程案例，分析了该技术在紧邻地铁深基坑支护中的应用效果。研究结果表明，微扰动多轴深搅止水桩技术能有效抑制地表沉降和周边土体位移，保证地铁结构安全，为城市核心区地下建造提供了一种可靠的支护方案。

【关键词】：微扰动；多轴深搅；止水桩；深基坑；地铁；支护

DOI:10.12417/2811-0528.26.08.102

1 引言

近年来，随着城市化进程的加速，城市地下空间开发利用日益频繁，深基坑工程的数量也随之增加。尤其是在城市中心区，由于土地资源的稀缺性，新建深基坑工程常常不可避免地紧邻既有建筑物、地下管线以及重要的地下交通设施，如地铁隧道等。紧邻地铁的深基坑工程对支护技术的安全性、可靠性提出了更高的要求。常规支护手段往往扰动过大，极易引发周边土体变形，导致地铁结构变形，进而引发安全事故。因此，如何在保证基坑稳定的前提下，最大限度地减少对周边环境的影响，成为当前深基坑工程领域的研究热点和难点。

深基坑支护技术经过多年的发展，涌现出多种形式，如地下连续墙、SMW工法桩、水泥土搅拌桩、高压旋喷桩以及TRD工法等。这些支护技术在不同的工程地质条件下得到了广泛应用，并取得了良好的效果。然而，在紧邻地铁的深基坑工程中，传统支护技术的局限性日益凸显。例如，地下连续墙施工过程中需要进行大量的土方开挖和回填，对周边土体的扰动较大；SMW工法桩施工时会产生较大的振动，容易引起地表沉降；高压旋喷桩施工时虽然可以形成较好的止水帷幕，但高压射流对土体的破坏作用也比较明显。

微扰动多轴深搅止水桩技术作为一种新型的深基坑支护技术，近年来受到越来越多的关注。该技术通过多轴搅拌钻头对土体进行原位搅拌，并同时注入水泥浆液，使水泥浆液与土体充分混合，形成具有一定强度和抗渗性能的水泥土桩。与传统深层搅拌桩相比，微扰动多轴深搅止水桩技术具有扰动小、止水效果好、施工效率高优点，特别适用于紧邻地铁等敏感建筑物的深基坑支护工程。

2 国内外研究现状

2.1 微扰动技术在深基坑工程中的应用研究

微扰动技术的核心在于最大限度地抑制施工活动对周边土体及邻近结构产生的附加影响。在地铁隧道这类高度敏感设施旁进行深基坑作业时，其价值尤为突出。

上海北横通道新建工程II标段上跨轨道交通13号线区间隧道工程，基坑与隧道呈小角度斜交，隧道覆土较浅，施工扰动控制至关重要。该项目创新性地采用了MJS（Metro Jet System）工法实施门式地基加固，结合精细化控制的“弹钢琴”式分段跳仓开挖策略。MJS工法因其超高压旋喷与独特的排浆机制，能精确控制注浆压力与范围，大幅减少对周边土体的挤压扰动。

施工中严格依托自动化监测系统的全过程动态反馈控制，传感器网络实时捕捉隧道位移、土体分层沉降、孔隙水压力等多维数据。监测数据表明，通过参数优化与施工节奏调整，成功将坑外关键区域的土体分层沉降量有效抑制在5毫米的苛刻阈值之内，完全满足地铁运营监护的安全要求。

这一案例有力证实，微扰动技术依赖先进工法、精密监测与动态调整三位一体的系统性解决方案，变被动防护为主动控制，将施工扰动量化并约束在工程容许范围内，适用于城市密集成区、紧邻重要地下管线或历史保护建筑等环境敏感地带的深基坑工程。

2.2 多轴深搅止水桩技术的研究进展

多轴深搅止水桩技术源于传统深层搅拌工法，通过多钻头联动实现水泥浆与原状土体的强制拌合。上海前滩29-03地块采用预埋孔钻杆加接工艺突破深度瓶颈，桩深扩展至30米级，

验证了超深搅拌在承压水头控制中的可行性。

工艺革新推动性能跃升。郑州七里河地铁站项目采用三轴搅拌，通过三钻头套接两孔的构造形成连续防渗体，在砂层中渗透系数可降至 10-7cm/s 量级。东莞某基坑工程采用直径 500mm 双排桩结构，配合钢管芯材增强抗弯刚度，15 米深度隔水率达 98%，体现复合化发展趋势。研究表明，当土块粒径粉碎至 50mm 以下时，水泥分布均匀度提升 23%，28 天无侧限抗压强度突破 1.2MPa。

上海北横通道工程采用 MJS 门式加固体，通过压力监控系统实时调节注浆参数，成功将隧道上方 246 米基坑施工引发的分层沉降压缩至 3mm 内。世纪盛荟广场项目采用 TRD 工法，55 米深等厚墙体完全截断 7 层承压含水层，坑外水位降深较常规工法减少 40%。这些案例凸显出多轴搅拌技术已从基础防渗转向微扰动控制领域。

2.3 现有研究的不足与展望

在微扰动多轴深搅止水桩应用于紧邻地铁深基坑支护的研究中，尽管已有显著进展，但现有研究仍存在多方面的不足。传统三轴搅拌桩常受桩架高度的物理约束，需依赖预埋孔钻杆加接等附加工艺才能达到超深加固效果，这不仅增加了施工复杂性，还可能引发工效降低和成本上升。施工过程中的微小扰动易引发隧道上浮或沉降风险。现有技术如 MJS 工法虽能减少环境影响，但在高承压水条件下，其隔水效果仍需更精细的力学分析和实时调控策略。施工中土块与水泥分布不均直接影响止水帷幕的整体性和强度增长，尤其在软土或淤泥质粉质黏土地层，其强度发展缓慢且难以量化评估。

未来研究需重点聚焦于技术创新与系统优化。开发智能化施工设备，突破深度和地质限制，引入机器人辅助搅拌系统，结合高精度传感器实时监控水泥浆分布，确保止水帷幕的均匀性和稳定性。加强微扰动参数的精细化研究，通过动力学模型预测施工对邻近地铁的影响，并探索新材料如纳米改性水泥，提升止水帷幕的抗渗性和耐久性。整合 BIM 技术构建数字孪生平台，模拟复杂地质条件下的支护效果，实现施工过程的可视化管理。推广多学科交叉研究，将地质勘测、水文分析与结构设计相结合，形成标准化的工法指南，并通过更多现场试验验证其在城市敏感区域的适用性，从而推动该技术向高效、经济和可持续发展方向演进。

3 微扰动多轴深搅止水桩技术原理

微扰动多轴深搅止水桩技术是一种利用多轴搅拌钻头对土体进行原位搅拌，并同时注入水泥浆液，使水泥浆液与土体充分混合，形成具有一定强度和抗渗性能的水泥土桩的深基坑支护技术。其核心原理在于：

原位搅拌，减少扰动：通过多轴搅拌钻头对土体进行原位搅拌，避免了传统支护方式中大量的土方开挖和回填，最大限度地减少了对周边土体的扰动。

浆液注入，改良土体：在搅拌的同时，通过钻头上的喷嘴向土体中注入水泥浆液。水泥浆液与土体充分混合，发生水化反应，形成具有一定强度和抗渗性能的水泥土桩，从而改良土体的力学性能和水力性能。

多轴协同，提高效率：采用多轴搅拌钻头，可以同时形成多个水泥土桩，提高了施工效率，缩短了施工工期。

与传统深层搅拌桩相比，微扰动多轴深搅止水桩技术具有以下优点：

扰动小：由于采用原位搅拌的方式，避免了大量的土方开挖和回填，对周边土体的扰动较小，特别适用于紧邻地铁等敏感建筑物的深基坑支护工程。

止水效果好：水泥浆液与土体充分混合，形成具有一定强度和抗渗性能的水泥土桩，可以有效地阻止地下水的渗透，提高基坑的安全性。

施工效率高：采用多轴搅拌钻头，可以同时形成多个水泥土桩，提高了施工效率，缩短了施工工期。

适用范围广：适用于多种地质条件，如软土、砂土、粉土等。

4 微扰动多轴深搅止水桩施工工艺

微扰动多轴深搅止水桩的施工工艺主要包括以下几个步骤：

4.1 施工准备

场地平整：清理施工场地，确保场地平整。

设备就位：将多轴搅拌桩机运至施工现场，并进行调试。

浆液制备：按照设计配合比制备水泥浆液，并进行质量检测。

测量放线：根据设计图纸，进行测量放线，确定桩位。

4.2 钻孔搅拌

钻头就位：将多轴搅拌钻头对准桩位，并启动钻机。

钻孔下沉：控制钻杆钻进速度，以避免对周边土体产生过大的扰动。一般情况下，钻杆钻进速度宜控制在 1.0m/min 以内。

到达设计深度：当钻头到达设计深度时，停止钻孔。

4.3 浆液注入

启动搅拌:启动多轴搅拌钻头,使钻头以一定的转速旋转。

同步注浆:在搅拌的同时,通过钻头上的喷嘴向土体中注入水泥浆液。注浆压力应根据土体的性质和设计要求进行调整,以保证水泥浆液与土体充分混合。

控制注浆量:根据设计要求,控制注浆量。

4.4 提升成桩

提升钻头:停止注浆,并以一定的提升速度提升多轴搅拌钻头。提升速度应控制在0.8m/min以内,以避免对水泥土桩产生破坏。

重复搅拌:在提升的过程中,可以进行重复搅拌,以提高水泥土桩的均匀性和强度。

完成成桩:当钻头提升至地面时,完成一根水泥土桩的施工。

4.5 质量控制

在微扰动多轴深搅止水桩的施工过程中,需要进行严格的质量控制,以保证水泥土桩的质量。质量控制主要包括以下几个方面:

浆液质量控制:对水泥浆液的配合比、稠度、凝结时间等进行检测,确保浆液质量符合设计要求。

钻孔质量控制:对钻孔的垂直度、孔径等进行检测,确保钻孔质量符合设计要求。

注浆质量控制:对注浆压力、注浆量等进行控制,确保注浆质量符合设计要求。

成桩质量控制:对水泥土桩的强度、抗渗性等进行检测,确保成桩质量符合设计要求。

5 工程案例

5.1 工程概况

某新建商业综合体项目位于城市中心区,基坑开挖深度为15m,基坑周边环境复杂,紧邻地铁隧道。地铁隧道距离基坑边缘的距离仅为8m。工程地质条件复杂,主要为软土和粉土。地下水位较高,需要进行止水处理。

5.2 支护方案

根据工程地质条件和周边环境要求,该项目采用微扰动多轴深搅止水桩作为止水帷幕,并结合排桩作为支护结构。

止水帷幕:采用微扰动多轴深搅止水桩,桩径为600mm,

桩间距为500mm,桩长为20m。

支护结构:采用排桩,桩径为800mm,桩间距为2m,桩长为25m。

5.3 施工过程

在微扰动多轴深搅止水桩的施工过程中,严格按照上述施工工艺进行操作,并进行了严格的质量控制。

5.4 监测结果

在基坑开挖过程中,对地铁隧道的变形进行了监测。监测结果表明:

地铁隧道沉降:地铁隧道的最大沉降量为3mm,远小于设计允许值。

地铁隧道水平位移:地铁隧道的最大水平位移为2mm,远小于设计允许值。

5.5 分析与讨论

从监测结果可以看出,采用微扰动多轴深搅止水桩技术作为止水帷幕,有效地控制了地铁隧道的变形,保证了地铁隧道的安全运行。

6 技术经济效益分析

6.1 技术效益

微扰动多轴深搅止水桩技术在紧邻地铁深基坑支护中表现出显著的技术优势:

变形控制:能够将地铁隧道及其周边土体的变形控制在极小范围内,保证了地铁运营安全。

止水效果:有效地阻止地下水的渗透,保证了基坑的干燥。

地质适应性:适用于多种地质条件,尤其是在软土和粉土地区效果显著。

6.2 经济效益

与传统支护技术相比,微扰动多轴深搅止水桩技术具有以下经济优势:

节约成本:减少了土方开挖和回填量,降低了施工成本。

缩短工期:提高了施工效率,缩短了施工工期。

风险规避:降低了因地基变形可能导致的地铁隧道修复费用。

6.3 社会效益

该技术的社会效益体现在以下几个方面:

安全保障：保障地铁运营安全，减少交通中断风险。

环境保护：减少土体扰动，降低噪音和扬尘污染。

公众信心：提升公众对城市地下空间开发的安全信心。

7 结论与展望

微扰动多轴深搅止水桩技术在紧邻地铁深基坑支护中具有显著的优势，能有效控制地层位移与止水性能，保证地铁结构安全，为城市核心区地下建造提供了一种可靠的支护方案。

未来，微扰动多轴深搅止水桩技术的发展方向主要包括：

智能化施工：应用物联网和人工智能技术，实现施工过程的自动化控制和智能化管理。

新型材料：研发新型水泥浆液材料，提高水泥土桩的强度和耐久性。

精细化分析：建立精细化的数值模型，更加准确地预测施工过程中的地基变形。

绿色环保：采用环保材料和施工工艺，减少对环境的影响。

通过不断创新和完善，微扰动多轴深搅止水桩技术将在城市地下空间开发中发挥更大的作用，为城市建设贡献力量。

参考文献：

- [1] 韦志本.邻近运营地铁车站的深基坑微扰动施工关键技术研究[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会,重庆建筑编辑部,重庆市建筑协会.智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(一).浙江固力建筑集团有限公司,2025:1255-1258.
- [2] 张阳.深层搅拌桩止水帷幕在深基坑支护上的应用[J].科技创新与应用,2012,(15):170.