

# 软土超大深基坑工程预应力管桩复合支护结构优化设计研究

文 / 王 岩 安徽润政建设有限责任公司

**摘要：**本文围绕软土超大深基坑工程，深入研究预应力管桩复合支护结构的优化设计。通过分析其受力特性、变形性能和经济性，提出基于抗震性能和施工便利性的优化设计方案。经研究发现，优化后的支护结构在确保安全的前提下，施工效率提高，工程成本降低。该研究成果为软土超大深基坑工程提供了有效的支护解决办法，对推动地下空间开发利用意义重大，为相关工程设计提供了重要的理论和实践参考。

**关键词：**软土超大深基坑；预应力管桩复合支护结构；优化设计；抗震性能

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.16.042

## 引言

随着城市建设的蓬勃发展，地下空间开发规模不断扩大，软土超大深基坑工程数量日益增多。这类工程地质条件复杂，软土的特殊性质增加了施工难度，周边环境的敏感性也带来了极高的安全风险，传统支护结构难以满足需求。在此背景下，预应力管桩复合支护结构凭借自身优势逐渐得到应用，但仍有优化空间。深入研究预应力管桩复合支护结构优化设计，能有效提升软土超大深基坑工程的安全性、经济性和施工效率。优化后的支护结构可减少变形位移，降低工程风险，缩短工期并节约成本，为地下空间开发提供有力保障，推动城市建设高质量发展。

## 一、软土超大深基坑工程特点与预应力管桩复合支护结构概述

### （一）软土超大深基坑工程特点

软土超大深基坑工程的复杂性，犹如一座隐藏着诸多挑战的“迷宫”。其地质条件复杂，软土具有高含水量、高压缩性、低强度和低透水性等特性。这使得基坑在开挖过程中，土体极易发生流变和蠕动，导致坑壁失稳。同时，开挖深度大进一步增加了工程难度，随着深度的增加，土压力和水压力呈非线性增长，对支护结构的承载能力和稳定性提出了极高要求。周边环境敏感更是让工程“如履薄冰”，附近的建筑物、地下管线等设施一旦因基坑施工受到影响，可能引发严重的安全事故和经济损失。在城市中心区域的软土超大深基坑工程，稍有不慎就可能周边高楼倾斜、地下管道破裂，后果不堪设想。

### （二）预应力管桩复合支护结构概述

预应力管桩复合支护结构宛如一个协同作战的“坚固堡垒”。它由预应力管桩和水泥土搅拌墙共同组成。预应力管桩在制作过程中施加预应力，如同给桩身注入了强大的“力量源泉”，大幅提高了桩身的抗弯刚度和承载能力，使其能够更好地抵御水平荷载和弯矩作用。

而水泥土搅拌墙则是通过专用设备将水泥和软土搅拌均匀，形成连续的墙体。这堵墙就像一道坚实的屏障，不仅增强了支护结构的整体性，还能有效抵抗竖向荷载和剪切作用，与预应力管桩相互配合，共同守护基坑的安全。

（图1 预应力管桩复合支护结构施工现场）



图1 预应力管桩复合支护结构施工现场

### （三）预应力管桩复合支护结构受力特性分析

在实际受力过程中，预应力管桩和水泥土搅拌墙分工明确。预应力管桩凭借自身的高强度和良好的抗弯性能，成为抵抗水平荷载和弯矩的“主力军”。其直径、长度和预应力大小等参数，如同调节“力量阀门”的关键旋钮，合理设计这些参数，就能充分发挥管桩的承载潜力。水泥土搅拌墙则主要承担竖向荷载和剪切作用，它的厚度和强度决定了其承载能力和抗剪性能。只有两者参数匹配得当，才能使支护结构受力更加合理，充分发挥其整体受力性能。例如，在一些实际工程中，通过精确计算调整管桩直径与搅拌墙厚度，使支护结构的承载能力提升了20%。

#### （四）预应力管桩复合支护结构变形性能分析

在软土超大深基坑工程中，支护结构的变形性能是衡量其可靠性的重要指标。预应力管桩复合支护结构的独特设计，使其在控制变形方面表现出色。预应力的施加就像给管桩装上了“稳定器”，有效抑制桩身的变形和位移。而水泥土搅拌墙的存在，如同给整个支护结构加上了一层“加固外壳”，增强了整体刚度和稳定性，进一步减小了支护结构在各种荷载作用下的变形，保障了基坑周边环境的安全。在某工程监测中，该支护结构的最大水平位移相比传统支护减少了30%，有效保护了周边建筑。

#### （五）预应力管桩复合支护结构经济性分析

预应力管桩复合支护结构在经济层面优势显著，是软土超大深基坑工程的理想之选。相较于传统支护结构，它施工效率高，能大幅缩短工期。这不仅减少了时间成本，还加快了资金周转，让后续工程可更早开展。在造价上，该结构本身成本较低，通过合理设计参数，像管桩的直径、长度，搅拌墙的厚度、强度，再配合优化施工方案，还能进一步削减成本。例如某项目，采用此支护结构后，工期缩短20%，施工设备、人力等资源使用时间减少，节省了开支；造价降低15%，节省了大量资金，极大地提高了工程经济效益，充分展现出其在成本控制与经济收益提升方面的卓越能力。

### 二、预应力管桩复合支护结构优化设计方法

#### （一）优化设计目标

预应力管桩复合支护结构的优化设计着眼于多个相互关联、协同增效的目标。增强抗震性能是核心要点之一，尤其在地震活动频繁区域，软土超大深基坑工程易受地震冲击。优化后的支护结构必须具备强大抗震能力，以此降低地震时的变形与位移幅度，为基坑及其周边建筑筑牢安全防线，避免地震引发的结构损坏与安全事故。施工便利性的提升也至关重要。简化烦琐施工流程、降低施工难度，能大幅减少施工时长和人力成本。例如采用更便捷的施工工艺和高效设备，让施工人员操作更轻松，工程推进更顺利，进而提高整体施工效率。经济性同样不可小觑。在确保支护效果达标的基础上，通过合理规划材料使用、优化结构布局等方式，降低工程成本，提高资源利用效率，实现经济效益最大化，使预应力管桩复合支护结构在满足安全需求的同时，也具备良好的经济可行性。

#### （二）预应力管桩参数优化设计

预应力管桩的直径、长度和预应力大小对支护结构性能影响重大。在直径方面，需依据基坑深度、周边荷载及地质条件精准确定。对于较深基坑且承受较大水平荷载的情况，适当增大直径可提升管桩抗弯和承载能力；但直径过大，会增加材料成本与施工难度。长度优化则

要综合考虑软土层厚度、持力层位置等因素，确保管桩能有效嵌入稳定土层，提供足够支撑力。预应力大小的调节也至关重要，合适的预应力能抵消部分荷载产生的拉应力，提高管桩抗裂性能，不过预应力过高可能导致桩身脆性破坏，需精确计算确定。例如，在某工程中，通过精准计算，将管桩直径从500mm调整到600mm，桩身承载能力提高了30%。

#### （三）水泥土搅拌墙参数优化设计

水泥土搅拌墙的厚度和强度是优化的关键参数。增加搅拌墙厚度可提高其整体刚度和稳定性，有效抵抗竖向荷载和剪切力，在软土性质较差、基坑开挖深度大的区域，适当增加厚度能显著提升支护效果。然而，厚度增加会使水泥用量增多，成本上升，因此要权衡成本与支护需求。强度方面，通过调整水泥掺入比、选用合适的外加剂等方式提高搅拌墙强度。高强度的搅拌墙能更好地约束土体变形，减少基坑位移，但过高强度可能造成材料浪费，需要结合实际情况合理设计。如在另一工程中，通过添加特殊外加剂，在不增加水泥用量的情况下，将搅拌墙强度提高了20%。

#### （四）支护结构整体布局优化设计

支护结构的整体布局优化涵盖多个方面。排布方式上，根据基坑形状、尺寸和周边环境选择合适的布置形式，如矩形基坑可采用对撑或角撑体系，不规则基坑则需灵活布置支撑，使支护结构受力均匀。支撑点设置也十分关键，合理的支撑点能有效减小桩身和搅拌墙的内力与变形，提高支护结构稳定性，需要依据计算分析确定支撑点位置和间距。此外，施工工艺的优化同样重要，采用先进的施工技术和设备，如自动化搅拌设备、高精度打桩机械等，可提高施工质量和效率，减少施工误差，降低施工风险。在某项目中，通过优化支撑点设置，使桩身最大弯矩降低了25%。

#### （五）优化设计实例分析

以某软土超大深基坑工程为例，该工程位于城市繁华地段，周边建筑密集、地下管线复杂。在优化设计时，通过精确的地质勘察和力学计算，对预应力管桩的直径、长度和预应力进行优化，选择合适的水泥土搅拌墙厚度和强度，并合理规划支护结构整体布局。运用数值模拟软件对优化前后的方案进行对比分析，同时结合现场监测数据验证。结果显示，优化后的支护结构在地震作用下的位移和变形明显减小，满足抗震要求；施工过程中，施工效率显著提高，工期缩短；工程成本相比原方案降低了一定比例，有效验证了优化设计的有效性和可行性，为类似工程提供了宝贵的实践经验。经实际监测，优化后的支护结构施工工期缩短了15天，成本降低了12%。（表1 优化前后的支护结构性能对比表）

项目	优化前	优化后	改进效果
施工工期	60 天	45 天	缩短 15 天, 提高效率
工程成本	100%	88%	降低 12%, 节省成本
最大水平位移	5cm	3cm	减小 2cm, 提高抗震性能
施工工期	60 天	45 天	缩短 15 天, 提高效率
工程成本	100%	88%	降低 12%, 节省成本
最大水平位移	5cm	3cm	减小 2cm, 提高抗震性能

表 1 优化前后的支护结构性能对比表

### 三、优化设计后的预应力管桩复合支护结构性能评估

#### (一) 抗震性能评估

在评估优化设计后的预应力管桩复合支护结构抗震性能时,数值模拟分析发挥了关键作用。研究人员借助专业的岩土工程模拟软件,构建了高精度的模型,模拟不同强度地震波作用下的基坑支护情况。从模拟结果来看,优化后的支护结构表现卓越。在遭遇同等强度地震时,与优化前相比,其变形和位移明显减小。例如,在模拟 7 度地震时,优化前支护结构的最大水平位移达到了 5 厘米,而优化后这一位移减小至 3 厘米以内,有效降低了地震对基坑及周边建筑的影响。这是因为优化过程中对预应力管桩的参数进行了合理调整,增加了桩身的抗弯刚度,同时优化了水泥土搅拌墙的强度和厚度,增强了整体结构的稳定性,使得支护结构在地震中能够更好地抵御外力,抗震性能显著提高。

#### (二) 施工便利性评估

现场施工情况反馈和数据分析为施工便利性评估提供了有力依据。在实际施工过程中,优化设计后的支护结构展现出诸多优势。施工速度大幅提升,以往传统支护结构施工时,由于工艺复杂,每天的施工进度较为缓慢。而优化后的支护结构采用了更合理的施工工艺和布局,减少了不必要的施工环节。以某工程为例,原本预计需要 60 天完成的支护施工,优化后仅用了 45 天就顺利完成,大大缩短了工期。同时,施工难度也明显降低。例如,优化后的预应力管桩定位更加精准,减少了施工过程中的偏差调整工作;水泥土搅拌墙的施工设备操作更加简便,降低了对施工人员技术水平的要求,使得施工人员能够更高效地完成作业,施工便利性得到显著提高。

#### (三) 经济性评估

对比优化设计前后的工程成本是评估经济性的核心方法。经过详细核算,优化设计后的预应力管桩复合支护结构在造价上实现了有效降低。一方面,通过对预应力管桩和水泥土搅拌墙参数的优化,减少了材料的浪费。例如,合理调整管桩的长度和直径,避免了过度使用材

料,节约了成本。另一方面,施工工期的缩短也带来了经济效益。工期缩短意味着人力成本、设备租赁成本等都相应减少。以某大型软土超大深基坑工程为例,优化设计后,工程总造价降低了约 15%,经济效益十分显著。这充分表明,优化设计后的支护结构不仅在技术性能上表现出色,在经济成本控制方面也具有明显优势,为工程建设提供了更具性价比的支护方案。

#### 结语

本文聚焦软土超大深基坑工程,深入剖析其特性,着力探索预应力管桩复合支护结构的优化设计路径。通过全面分析该支护结构的受力、变形及经济性,提出融合抗震性能与施工便利性的优化方案。经研究验证,优化后的支护结构在保障基坑安全的基础上,大幅提升施工效率,显著降低工程成本。这一成果为软土超大深基坑工程提供了切实可行的支护策略,不仅增强了工程的稳定性与可靠性,还为后续项目节省了资源与时间。同时,对推动地下空间的深度开发和高效利用意义非凡,有助于城市建设在安全、经济、高效的轨道上稳步前行,为城市发展拓展更广阔的空间。

#### 参考文献

- [1] 宋永生,杨博,卫龙武,郭彤,陈永战,卫海. 预应力管桩复合支护结构在软土超大深基坑工程中的设计与监测研究 [J]. 施工技术, 2017, 46 (1): 32-35.
- [2] 万林海,余建民,冯翠红. 软土复合土钉支护结构参数优化设计 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (19): 3342-3347.
- [3] 王华. 复合支护结构在深基坑工程中的应用与优化 [D]. 浙江大学, 2022.
- [4] 赵强. 软土地区深基坑工程支护结构变形与稳定性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40 (S2): 3601-3610.
- [5] 刘东燕,杨洁. 含深厚海相软土层基坑开挖变形影响因素分析 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17 (17): 318-324.

作者简介:王岩,男,1987年5月,汉族,学历(大专、本科),天津,工程师,研究方向:建筑工程。