

深基坑桩锚支护与内支撑组合体系协同工作机理及优化设计

马川

青海大学土木水利学院, 青海 西宁 810016

摘要: 在城市立体空间开发持续深入的当下, 深基坑工程面临着地质条件复杂、周边环境敏感等多重挑战。深基坑桩锚支护与内支撑组合体系作为保障工程安全的核心技术, 其协同工作机理与优化设计成为行业关注焦点。本文系统剖析组合体系协同工作的力学本质, 挖掘影响协同效应的关键要素, 创新提出基于多学科融合的优化设计策略, 为提升深基坑支护体系性能、推动地下工程技术革新提供科学路径与实践指引。

关键词: 深基坑; 桩锚支护; 内支撑; 组合体系; 协同工作; 优化设计

引言

随着城市化进程迈向纵深, 高层建筑与地下空间开发如火如荼, 深基坑工程规模不断刷新纪录。传统单一支护形式在应对超深、超大基坑时, 逐渐暴露出稳定性不足、变形控制难等问题。桩锚支护与内支撑组合体系凭借其灵活的适应性和强大的承载能力, 成为复杂地质条件下深基坑支护的首选方案^[1]。

1 深基坑桩锚支护与内支撑组合体系协同工作的基本理论

1.1 桩锚支护与内支撑体系的工作原理

桩锚支护体系通过灌注桩或预制桩嵌入地层, 形成竖向承载结构, 抵抗基坑侧壁土体的侧向压力; 锚杆则将桩体与稳定地层相连, 利用锚固段土体的抗拔力, 限制桩体变形, 形成“桩-锚”受力共同体。内支撑体系通常由水平支撑梁、立柱等构件组成, 在基坑开挖过程中, 通过将土体侧向压力传递至周边稳定土体或支护结构, 有效控制基坑变形。水平支撑梁在受压状态下, 将力分散至立柱, 再由立柱传递至地基, 形成稳定的受力体系。两种支护形式各有优势, 桩锚支护适用于空间开阔、便于锚杆施工的基坑, 而内支撑体系对控制基坑

变形精度更高, 二者结合能充分发挥各自特性。

1.2 组合体系协同工作的概念与内涵

组合体系协同工作是指桩锚支护与内支撑在深基坑工程中, 通过力学性能互补与变形协调, 共同承担土体荷载, 实现支护体系整体稳定的工作模式^[2]。在受力方面, 桩锚支护主要承担基坑浅层土体压力, 锚杆的拉力有效减少桩体弯矩; 内支撑则侧重控制基坑深层土体变形, 通过水平支撑力限制桩体侧向位移。在变形协调上, 两者相互约束、相互影响, 当桩锚支护因土体压力产生变形时, 内支撑会通过调整受力状态, 协同控制变形发展, 反之亦然。

1.3 协同工作在深基坑支护中的重要意义

协同工作对深基坑支护至关重要。一方面, 它能显著提高支护体系的承载能力, 相比单一支护形式, 组合体系可更合理地分配荷载, 避免局部受力过大导致结构破坏。另一方面, 有效控制基坑变形, 通过桩锚与内支撑的协同作用, 将基坑变形量控制在安全范围内, 减少对周边建筑物、地下管线等环境的影响。此外, 协同工作还能降低工程造价, 通过优化两种支

护形式的参数,避免过度设计,在保障安全的前提下节约建设成本。

2 影响深基坑桩锚支护与内支撑组合体系协同工作的因素

2.1 地质条件对协同工作的影响

地质条件是影响组合体系协同工作的基础因素。不同的地层特性,如软土、砂土、岩石等,其物理力学性质差异显著。在软土地层中,土体强度低、压缩性高,基坑开挖易引发较大变形,桩锚支护的锚杆锚固力易受土体蠕变影响而降低,内支撑需承受更大的侧向压力;砂土中,土体渗透性强,易出现流砂、管涌现象,影响桩体稳定性与锚杆锚固效果,同时对支护结构的止水要求更高。地下水的存在也会加剧问题的复杂性,地下水位变化会改变土体有效应力,导致土体抗剪强度降低,增加支护结构受力,影响桩锚与内支撑的协同工作性能。此外,地质构造如断层、裂隙等,会削弱土体整体性,使荷载传递路径复杂化,降低协同工作效率。

2.2 支护结构设计参数的影响

支护结构设计参数直接决定组合体系的协同工作效果。桩的直径、长度、间距等参数影响其承载能力与变形特性,桩径过小或长度不足,可能导致桩体无法有效抵抗土体压力,影响与内支撑的协同;锚杆的直径、长度、倾角及锚固段长度等参数,关系到锚杆的抗拔力与稳定性,锚杆设计不合理,易出现锚杆失效或变形过大,破坏协同工作状态。内支撑的材料、截面尺寸、支撑间距等参数同样关键,支撑材料强度不足或间距过大,会降低内支撑的刚度,无法有效限制基坑变形,影响与桩锚支护的协同。此外,支护结构的连接方式,如桩与内支撑的连接节点设计,若连接不牢固或传力不顺畅,也会削弱协同工作能力。

2.3 施工工艺与施工顺序的影响

施工工艺与顺序对组合体系协同工作有

着重要影响。在施工工艺方面,灌注桩的成孔质量、锚杆的注浆工艺、内支撑的安装精度等,都会直接影响支护结构的性能。例如,灌注桩成孔过程中出现塌孔、缩径等问题,会降低桩体承载能力;锚杆注浆不密实,会导致锚固力不足。在施工顺序上,先施工桩锚还是内支撑,以及分层分段开挖与支护的顺序安排,都会改变土体应力释放过程和支护结构受力状态。不合理的施工顺序可能导致支护结构过早受力或受力不均,破坏协同工作机制。此外,施工过程中的时间效应也不容忽视,土体蠕变、支护结构的时效变形等,会随着施工进度不断变化,影响组合体系的协同工作性能。

3 深基坑桩锚支护与内支撑组合体系的优化设计方法

3.1 基于力学分析的优化设计思路

基于力学分析的优化设计思路以结构力学、土力学等理论为基础,通过建立精确的力学模型,分析组合体系的受力与变形特性。首先,对桩锚支护与内支撑分别进行力学分析,明确各自的受力特点与承载能力;然后,考虑两者的相互作用,建立组合体系的整体力学模型,分析协同工作时的内力分布与变形规律。通过改变设计参数,如桩径、锚杆长度、内支撑间距等,研究其对组合体系力学性能的影响,从而确定最优参数组合。此外,引入可靠度理论,对组合体系进行可靠性分析,评估其在不同工况下的安全性能,确保设计方案既经济合理又安全可靠。

3.2 考虑协同效应的参数优化方法

考虑协同效应的参数优化方法旨在通过量化协同工作效果,优化支护结构设计参数。采用数值模拟与理论分析相结合的方式,建立参数与协同效应之间的关系模型。例如,通过有限元软件模拟不同桩径、锚杆倾角、内支撑刚度等参数组合下组合体系的受力与变形情况,分析各参数对协同效应的贡献度。利用优

化算法,如遗传算法、粒子群算法等,对设计参数进行全局优化搜索,以最小化工程造价或最大化支护体系稳定性为目标,找到最优参数组合。同时,考虑工程实际约束条件,如施工场地限制、工期要求等,对优化结果进行调整,确保设计方案具有可操作性。

3.3 结合数值模拟的设计方案比选

结合数值模拟的设计方案比选是通过建立多种设计方案的数值模型,对比分析各方案的力学性能、变形控制效果与经济性。在数值模拟过程中,采用精细化建模方法,准确模拟土体、桩体、锚杆、内支撑等结构的材料特性与相互作用关系。对不同方案进行基坑开挖过程的动态模拟,分析各阶段支护结构的内力变化、基坑变形发展以及周边环境影响。从安全性、经济性、施工便利性等多维度对方案进行综合评价,选择最优设计方案。此外,还可通过敏感性分析,研究关键参数变化对设计方案的影响,为设计方案的优化调整提供依据。

4 深基坑桩锚支护与内支撑组合体系的工程应用要点

4.1 不同地质条件下的应用策略

在不同地质条件下,组合体系的应用策略需因地制宜。在软土地层,应加强桩体的刚度与稳定性,适当增加桩径和长度,采用双排桩或桩-连拱等形式提高支护能力;锚杆设计需考虑土体蠕变影响,增加锚固长度或采用预应力锚杆。砂土中,重点做好止水措施,可采用搅拌桩或高压旋喷桩形成止水帷幕;锚杆施工时注意防止砂土流失,可采用套管跟进等工艺。岩石地层中,桩体可嵌入岩石一定深度,充分利用岩石的承载能力;锚杆锚固段应选择稳定岩石层,确保锚固效果。根据不同地质条件,合理调整桩锚与内支撑的参数与布置形式,实现组合体系的最优应用效果。

4.2 施工过程中的协同控制措施

施工过程中的协同控制是保障组合体系协同工作的关键。在施工前,制定详细的施工组织设计,合理安排施工顺序,明确桩锚支护与内支撑的施工时间节点与工艺要求。施工过程中,加强监测工作,实时监测基坑变形、支护结构内力等数据,根据监测结果及时调整施工参数。例如,当发现基坑变形速率过快时,可暂停开挖,提前施工内支撑或对桩锚进行补强。同时,注重各工序之间的衔接与配合,确保桩锚与内支撑施工质量,如保证锚杆注浆强度达到设计要求后再进行下一步开挖,内支撑安装应保证连接节点牢固可靠^[3]。此外,建立应急预案,针对可能出现的突发情况,如锚杆失效、内支撑变形过大等,制定相应的处理措施。

4.3 与周边环境协调的设计要点

深基坑工程往往位于城市繁华区域,与周边环境关系密切,组合体系设计需充分考虑与周边环境的协调^[4]。在设计前,详细调查周边建筑物、地下管线等设施的分布与现状,评估基坑开挖对其影响程度。对于邻近建筑物,可采用隔离桩、地基加固等措施减少基坑变形对其影响;对地下管线,根据其重要程度和允许变形量,采取悬吊、搬迁或保护套管等措施。在设计过程中,合理控制基坑变形,将变形量控制在周边环境允许范围内。此外,优化支护结构布置,尽量减少施工对周边交通、居民生活等方面的影响,如采用装配式内支撑,减少现场施工时间与噪音污染^[5]。

5 深基坑桩锚支护与内支撑组合体系的研究展望

5.1 现有研究存在的不足

尽管深基坑桩锚支护与内支撑组合体系研究取得了一定成果,但仍存在诸多不足。在理论研究方面,现有协同工作理论多基于简化假设,对复杂地质条件下土体-结构相互作用的非线性特性考虑不足,难以准确描述组合

体系的真实工作状态。数值模拟研究中,土体本构模型的选择与参数确定缺乏统一标准,导致模拟结果与实际工程存在偏差;且现有模型对施工过程的动态模拟不够精细,无法全面反映施工过程对协同工作的影响。在工程应用方面,设计方法仍依赖经验,缺乏系统性的优化设计理论与方法;施工过程中的协同控制技术有待进一步完善,监测数据的分析与反馈机制不够健全,难以实现动态精准控制。

5.2 未来研究方向与重点

未来研究应聚焦于弥补现有不足,拓展研究深度与广度。理论研究方面,加强对复杂地质条件下土体 - 结构相互作用的非线性理论研究,建立更符合实际的协同工作力学模型;探索多场耦合理论在组合体系中的应用,研究渗流场、应力场、温度场等多场作用下的协同工作规律。数值模拟领域,开发更精准的土体本构模型与参数反演方法,提高模拟结果的准确性;优化数值计算方法,实现大规模复杂模型的高效计算,满足工程实时分析需求。工程应用方面,构建基于协同工作机理的系统性优化设计理论与方法体系;研发智能化施工协同控制技术,利用物联网、大数据、人工智能等技术,实现施工过程的智能监测、分析与决策,

提升协同控制水平。

5.3 新技术在该领域的应用前景

新技术的发展为深基坑桩锚支护与内支撑组合体系研究带来新机遇。人工智能技术可用于建立组合体系的智能预测模型,通过对大量工程数据的学习,实现对基坑变形、支护结构内力的精准预测,辅助工程决策。数字孪生技术能够构建深基坑工程的虚拟模型,实时映射物理实体的状态变化,实现对组合体系协同工作过程的可视化监测与分析,为优化设计与施工提供直观依据。物联网技术可实现监测设备的互联互通,构建智能监测网络,提高监测数据采集的实时性与准确性;同时,结合无线传感技术,可实现对支护结构关键部位的长期健康监测。

6 结论

本文通过系统研究其协同工作理论、影响因素、优化设计方法、工程应用要点及研究展望,构建了较为完整的研究体系。然而,面对复杂多变的工程实际,该领域仍需持续深入探索。未来,随着理论研究的深化、新技术的应用,组合体系的协同工作性能将不断提升,为城市地下空间开发提供更坚实的技术支撑,推动深基坑工程技术向更高水平发展。

参考文献

- [1] 贾艳清,高燃燃,薛奔艺.桩锚撑复合支护结构在深基坑中的应用[J].砖瓦,2025,(04):164-167.
- [2] 黄奕轩.土岩组合地区深基坑内支撑支护结构的施工技术优化与应用[J].中国新技术新产品,2024,(19):113-115.
- [3] 赵江伟.建筑深基坑工程中组合支护技术的运用探究[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(22):84-86.
- [4] 刘静.超深基坑桩锚支护受力特征及变形规律研究[D].昆明理工大学,2024.
- [5] 王迪.深基坑桩锚桩撑组合支护结构变形及影响因素的三维数值分析[D].安徽建筑大学,2024.