

软土地基深基坑复合支护结构的优化设计与变形协同控制研究

王旭 周敬庭 安家金

中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司 云南 昆明 650000

摘要：软土地基深基坑工程因地质条件复杂，面临诸多挑战，复合支护结构成为保障工程安全的关键。本文探讨了软土地基深基坑复合支护的重要性，分析了其特点与类型，包括桩锚与土钉墙复合、地下连续墙与内支撑复合等结构。深基坑工程通过优化地质勘察、支护选型及参数设计，结合变形协同控制策略，可提升支护性能，保障安全稳定，助力城市建设高质量发展。

关键词：软土地基深基坑；复合支护结构的优化设计方法；变形协同控制策略

引言

随着城市化进程的加速，高层建筑与大型地下交通枢纽等工程不断涌现，深基坑工程作为基础环节，其施工难度与安全性备受关注。软土地基因其特性给深基坑工程带来严峻挑战，土体易发生较大变形与位移，支护不当易引发安全事故，造成经济损失并危及周边环境。复合支护结构融合多种优势，协同增效提升稳定性。深入研究其优化设计与变形控制，对保障工程安全、推动城市建设发展意义重大。

1 软土地基深基坑复合支护的重要性

在城市现代化建设进程不断加速的当下，高层建筑、大型地下交通枢纽等工程项目如雨后春笋般涌现，深基坑工程作为这些项目的基础环节，其施工难度与安全性备受关注。软土地基因其天然含水量高、孔隙比大、压缩性高、强度低等特性，给深基坑工程带来了诸多严峻挑战。在软土地基上进行深基坑开挖，土体极易发生较大的变形与位移，若支护措施不当，极易引发基坑失稳、坍塌等安全事故，会造成巨大的经济损失，还会危及周边建筑物、地下管线的安全，影响城市的正常运行。复合支护结构作为一种先进的支护形式，在软土地基深基坑工程中发挥着不可替代的重要作用。它巧妙地融合了多种支护方式的优点，通过不同支护形式的协同作用，显著提高了支护结构的整体稳定性和承载能力。如将土钉墙与桩锚支护相结合，土钉墙能充分发挥土体的自稳能力，增强土体的抗剪强度；桩锚支护则利用桩体和锚杆的相互作用，为基坑提供强大的侧向支撑，有效限制土体的变形。复合支护结构还具有较强的适应性和灵活性，能根据不同的地质条件、基坑深度和周边环境要求，进行灵活的设计和调整，满足多样化的

工程需求。

2 软土地基深基坑复合支护结构的特点与类型

2.1 特点

软土地基深基坑复合支护结构的独特性能源于其对复杂工程环境的动态适配机制。在地质条件多变的软土区域，土体呈现高含水量、低抗剪强度及显著流变性等特征，单一支护形式往往难以满足工程需求。复合支护结构通过整合多种支护技术，构建起灵活可调的力学体系。如将刚性的排桩结构与柔性的锚杆系统结合，前者凭借较高的刚度抵御侧向土压力，后者则通过预应力施加主动约束力，两者协同作用有效应对不同深度、不同土质条件下的受力变化。针对周边环境复杂的深基坑工程，复合支护结构可根据邻近建筑物基础形式、地下管线分布等要素，定制化调整支护参数。当临近重要建筑时，可增加内支撑密度以减小基坑变形传递；在地下管线密集区域，则采用止水帷幕与支护桩组合，同步实现挡土与防渗功能。在变形控制方面，复合支护结构通过多道防线协同工作实现精准调控。以桩撑复合支护体系为例，支护桩作为首道防线承担主要土压力，内支撑系统则通过限制桩体侧向位移，形成二次约束。两者构成的空间受力框架，配合注浆加固等土体改良措施，可有效抑制基坑底部隆起与坑壁水平位移。这种协同作用显著降低了基坑变形对周边环境的影响，经实测数据表明，合理设计的复合支护结构可将基坑周边地表沉降控制在30毫米以内，满足多数城市地下工程对变形控制的严苛要求^[1]。

2.2 类型

(1) 桩锚与土钉墙复合支护结构在特定工程场景应用广泛。土钉墙基于原位土体加固，借密集土钉与土体

形成复合体,施工快且经济,但在软土地基中难应对大土压力与变形。桩锚支护靠灌注桩高刚度与锚杆主动约束,变形控制强但成本高。二者复合,灌注桩承担侧向荷载,土钉墙改善桩间土稳定性并降低成本,适用于地下水位低、浅层土体有自立性的软土地基,在多层建筑深基坑工程中效果良好。(2)地下连续墙与内支撑复合支护结构是应对高水位、深厚软土层的优选方案。地下连续墙作为现浇钢筋混凝土板式结构,通过成槽、钢筋笼吊装及水下混凝土浇筑工艺形成连续墙体,具有优异的截水防渗与挡土性能。在富水软土地层中,其密闭性可有效阻断地下水渗流,避免基坑突涌风险。内支撑系统由水平支撑与竖向立柱组成,能传递并分散墙体承受的土压力与水压力,维持墙体稳定。(3)将刚性支护(如地下连续墙)与柔性支护(如多层钢结构内支撑)相结合,可形成刚柔并济的支护体系,尤其适用于深度超15米的超深基坑。在地铁车站施工中,该体系能将墙体水平位移控制在安全范围,保障周边环境稳定。

3 软土地基深基坑复合支护结构的优化设计方法

3.1 地质勘察与分析

地质勘察作为软土地基深基坑复合支护结构优化设计的首要环节,通过多手段协同作业获取精准的地基信息。在勘察过程中,综合运用钻探、静力触探、标准贯入试验等原位测试技术,结合室内土工试验,系统测定地基土的物理力学指标。钻探技术能够获取不同深度的岩芯样本,直观呈现土层分布特征;静力触探则通过探头贯入阻力反映土体密实度和强度,可连续获取地层参数;标准贯入试验通过记录锤击次数,量化砂土和粉土的密实程度。这些方法相互验证,为地质模型的构建提供可靠数据支撑。对勘察数据的深度分析是优化设计的关键。通过对地基土的含水量、孔隙比、压缩模量、抗剪强度等参数的统计分析,识别软土的流变特性和固结特性。如高含水量和低压缩模量的淤泥质土呈现蠕变特性,在设计时需考虑土体长期变形对支护结构的影响;而粉砂层的存在可能引发流砂现象,需在支护方案中加强止水措施。水文地质勘察不容忽视,地下水动态影响土体应力分布,精准测定水文参数,可评估水压力作用,为支护设计提供依据,降低设计不确定性^[2]。

3.2 支护方式的选择与组合

(1)支护方式的选择与组合是软土地基深基坑复合支护结构优化设计的关键。不同支护方式在受力特点与适用条件上差异明显。排桩支护凭借桩体的抗弯刚度来抵抗土压力,常用于土质较好、对变形控制要求不高的场景;地下连续墙则因具备出色的整体刚度与止水性能,

成为复杂地质及深基坑工程的首选。(2)实际工程中,单一支护方式通常难以满足全部要求,复合支护结构通过优势互补,可有效应对复杂工况。在选择支护方式时,需着重考量基坑深度、周边环境及土体力学性质。对于深度较浅、周边环境简单的基坑,桩锚与土钉墙复合支护结构较为适用,能平衡安全与成本;当基坑深度超10米且临近重要建筑物时,地下连续墙与内支撑复合支护结构更具优势,可有效隔断地下水、控制墙体变形。(3)支护方式的组合还需兼顾施工工艺的兼容性。如SMW工法桩与锚杆组合时,要协调搅拌桩施工与锚杆成孔的先后顺序,防止相互干扰,保障施工效率与质量。综合评估多种因素,选择最优支护方式组合,才能实现支护结构性能的最大化,确保深基坑工程的安全与稳定^[3]。

3.3 设计参数的优化

设计参数优化是实现软土地基深基坑复合支护结构安全与经济平衡的关键步骤,依托数值模拟与理论计算技术,对结构参数进行精细化调整。在桩基础设计中,桩的直径、长度和间距直接影响其承载能力和变形特性。通过有限元软件建立三维模型,模拟不同桩径、桩长和间距组合下的土体应力分布和桩体位移,分析其对支护结构整体性能的影响。增加桩径可提高桩体的抗弯刚度,但会增加材料成本;调整桩间距需在保证桩间土稳定的前提下,实现经济效益最大化。反复试算和敏感性分析,确定最优的桩基础参数。锚杆作为复合支护结构的重要组成部分,其倾角、长度和预应力的优化同样关键。锚杆倾角影响其抗拔力的发挥,通过理论计算和数值模拟,分析不同倾角下锚杆的受力状态,选择最佳倾角以提高锚固效率;锚杆长度需根据土体性质和荷载要求确定,确保锚杆锚固段有足够的长度以提供稳定的锚固力;预应力的施加能够主动约束土体变形,但过大的预应力会导致土体局部破坏,需通过现场试验和数值模拟相结合的方式,确定合理的预应力值。对于内支撑系统,支撑的间距、截面尺寸和材料选择也需通过优化计算确定,在满足结构稳定性的前提下,降低支撑材料用量。

4 软土地基深基坑复合支护结构的变形协同控制策略

4.1 实时监测与反馈

(1)实时监测与反馈机制在软土地基深基坑复合支护结构变形协同控制中占据核心地位。借助多参数、立体化的监测体系,可精准捕捉支护结构与周边土体的动态行为。该监测系统集成了全站仪、静力水准仪、应变计、测斜仪等多种传感器,能全方位监测支护结构的水

平位移、沉降量、应力应变以及土体深层位移。(2) 各类传感器发挥着独特作用。测斜仪通过预埋在支护桩或土体中的测斜管,以毫米级精度获取不同深度的侧向位移数据;静力水准仪可连续监测基坑周边地表沉降,有效识别土体变形趋势。监测数据的实时传输与智能分析是实现精准控制的关键。利用物联网技术,将传感器数据实时上传至监测云平台,通过数据处理算法对原始数据进行滤波、降噪与趋势分析。当监测数据达到预设预警阈值时,系统自动触发多级预警机制,依据变形程度启动相应应急响应流程。(3) 通过“监测-分析-反馈”的闭环控制流程,确保支护结构与土体变形始终处于可控状态。当支护结构水平位移速率超过一定值时,系统立即生成变形分析报告,结合数值模拟模型预测变形发展趋势,为工程技术人员提供调整支撑预应力、增加临时支撑等决策依据,实现施工全过程的动态协同控制。

4.2 时空效应控制

软土地基的流变特性决定了深基坑工程需严格遵循时空效应控制原则。在空间维度上,采用分层分段开挖工艺,将基坑划分为若干施工单元,每个单元的开挖深度与宽度控制在合理范围内,避免土体应力集中释放。对于深度超过15米的基坑,分层厚度宜控制在3-5米,分段长度不超过20米,以减小单次开挖对土体的扰动范围。及时架设内支撑或施作锚杆,在开挖完成后24小时内完成支撑体系安装,确保支护结构快速形成承载能力,有效抑制土体回弹变形。时间效应控制着重于缩短基坑暴露周期,减少土体蠕变对变形的累积影响。通过优化施工组织设计,采用跳仓开挖、对称开挖等方式,平衡土体应力释放。如在地铁车站深基坑施工中,采用“盆式开挖”技术,先开挖基坑中部土体,保留周边土堤,待中部支撑体系形成后再对称开挖剩余土体,可有效降低基坑变形量。结合土体固结理论,利用有限元软件模拟不同施工进度下的土体变形过程,制定科学的施工进度计划,确保在土体蠕变发展初期完成关键支护工序,实现支护结构与土体变形的动态协调^[4]。

4.3 环境效应控制

(1) 环境因素对软土地基深基坑变形的影响复杂且隐蔽,需采取系统性措施降低其不利作用。地下水是关

键影响因素,设置降水井与回灌井相结合的降水系统,可实现按需降水。在基坑周边合理布置水位监测井,实时掌握地下水位变化情况,当水位下降会危及周边建筑物基础时,及时启动回灌系统,维持地下水位稳定。

(2) 采用帷幕止水技术,如高压旋喷桩、咬合桩等,构建封闭止水帷幕,隔断基坑内外水力联系,减少因地下水渗流引发的土体流失与沉降。周边荷载控制通过优化施工场地布置与荷载管理来实现。对基坑周边临时堆载、重型施工机械运行路线进行严格规划,确保荷载分布均匀且不超过设计允许值。在临近建筑物基础与基坑之间设置隔离桩或注浆加固区,通过调整土体应力传递路径,降低基坑开挖对建筑物的影响。(3) 针对季节性降雨、地下管线渗漏等动态环境因素,建立环境因素监测预警机制,提前采取防护措施。在雨季来临前,对基坑周边排水系统进行全面疏通,对渗漏的地下管线进行细致排查与修复,有效降低环境因素对基坑变形的耦合影响,保障支护结构与周边环境的安全稳定。

结束语

软土地基深基坑复合支护结构的优化设计与变形协同控制是保障工程安全的关键。通过地质勘察与分析获取精准地基信息,合理选择与组合支护方式,优化设计参数,可实现支护结构性能的最大化。实时监测与反馈、时空效应控制、环境效应控制等协同控制策略,有效降低了基坑变形对周边环境的影响。未来,技术进步应赋能智能化监测与控制,提升支护设计精准度及协同效率,为深基坑工程安全护航,助力城市建设攀上新台阶。

参考文献

- [1] 屈家旺.高层建筑软土地基深基坑支护变形控制方法分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(8):075-078.
- [2] 陆少峰.高层住宅小区软土地基深基坑支护变形控制研究[J].前卫,2023(34):0195-0197.
- [3] 王松.软土地基深基坑地下结构工程设计优化[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(9):156-159.
- [4] 伍天赐.软土地基深基坑地表竖向位移监测与分析[J].水利技术监督,2022(5):24-28+36.