

深厚软土地基CFG桩复合地基桩土协同作用机理与参数优化

赵豪彬

中国电建集团江西省水电工程局有限公司 江西南昌 330000

摘要:深厚软土地基具有承载力低、压缩性高、变形稳定时间长等特点,直接影响工程建设的安全性与经济性。CFG桩复合地基凭借造价适中、承载力提升显著、施工便捷等优势,成为深厚软土地基处理的主流技术之一。桩土协同作用是CFG桩复合地基发挥承载效能的核心,其机理复杂且受多种设计参数影响。本文系统分析深厚软土地基中CFG桩复合地基的协同作用机理,探讨桩长、桩径、桩间距、褥垫层参数等关键因素对协同效应的影响规律,提出基于沉降控制、承载力提升与经济性的综合参数优化方法。研究旨在为深厚软土地基CFG桩复合地基的设计与施工提供技术支撑,推动该技术在工程实践中的高效应用。

关键词:深厚软土地基; CFG桩复合地基; 桩土协同作用; 参数优化

引言

在我国交通、建筑、水利等基础设施建设快速发展的背景下,工程建设不断向沿海、沿江等深厚软土分布区域拓展。深厚软土地基的不良工程特性易导致建筑物沉降过大、结构失稳等问题,严重威胁工程安全。CFG桩复合地基通过桩体、桩间土与褥垫层的协同工作,有效改善软土地基的承载性能,减少地基变形,在各类工程中得到广泛应用。桩土协同作用是CFG桩复合地基工作的核心机制,其本质是通过合理设计使桩体与桩间土共同承担上部荷载,实现荷载的优化分担与变形的协调控制。然而,深厚软土地基的复杂性导致桩土协同作用机理尚未被完全掌握,设计参数选择不合理往往会导致协同效应难以充分发挥,出现承载力不足、沉降超标或造价过高等问题。因此,深入研究深厚软土地基中CFG桩复合地基的桩土协同作用机理,明确关键设计参数的影响规律,建立科学的参数优化方法,对于提升工程设计质量、保障工程安全、降低工程造价具有重要的理论与实践意义。

一、深厚软土地基中CFG桩复合地基的协同作用机理

(一) 桩间土的应力分担与变形特性

在CFG桩复合地基中,桩间土是承载体系的重要组成部分,其应力分担与变形特性直接影响复合地基的整体工作性能。深厚软土地基中,未加固的桩间土承载力低、压缩性高,在受到上部荷载作用时,易产生较大的塑性变形。通过CFG桩的置换与挤密作用,桩间土的物

理力学性质得到改善,孔隙比减小,密实度提高,抗剪强度与承载力显著增强。

当上部荷载施加于复合地基时,荷载首先由桩间土承担,随着荷载增加,桩间土发生压缩变形,桩体逐渐发挥承载作用,荷载开始向桩体转移。桩间土的应力分担比例与荷载水平、桩体刚度、桩间距等因素密切相关。在荷载初期,桩间土承担较大比例的荷载;随着荷载增大,桩体的荷载分担比例逐渐提高,但桩间土始终参与工作,并未完全失效。桩间土的变形与桩体变形相互协调,共同控制复合地基的总沉降,其变形特性直接影响复合地基的沉降量与沉降速率。

(二) 桩体荷载传递与承载特性

CFG桩作为复合地基的主要受力构件,其荷载传递与承载特性是桩土协同作用的关键。CFG桩具有较高的强度与刚度,相较于桩间土,能够承担更大比例的上部荷载。荷载通过基础传递至桩顶后,沿桩身向下传递,桩体通过侧摩阻力与端阻力将荷载传递至深层稳定土层。

在深厚软土地基中,桩体的荷载传递规律呈现明显的深度依赖性。桩身上部受到的侧摩阻力较大,随着深度增加,软土的抗剪强度逐渐变化,侧摩阻力呈现相应的分布特征。当桩体达到极限承载力时,可能出现桩身屈服或桩端刺入破坏。桩体的承载特性不仅取决于自身的材料强度,还与桩周土的性质、桩长、桩径等因素密切相关。合理的桩体设计能够充分发挥桩体的承载潜力,与桩间土形成良好的协同效应,提升复合地基的整体承载力。

(三) 褥垫层在协调桩土变形中的作用

褥垫层是CFG桩复合地基中协调桩土变形、保障协

同作用的关键环节。深厚软土地基中，桩体与桩间土的刚度差异较大，若缺乏有效的协调机制，易导致荷载过度集中于桩体，桩间土难以充分发挥作用，甚至出现桩体破坏或基础开裂等问题。褥垫层通过自身的变形调节，实现桩体与桩间土的变形协调，确保两者共同工作^[1]。

褥垫层的变形特性使其能够缓冲桩体与桩间土的变形差异，当上部荷载作用时，褥垫层发生压缩变形，使基础能够均匀下沉，桩体与桩间土同步受力。同时，褥垫层还能起到扩散应力的作用，将桩顶的集中荷载扩散至桩间土，提高桩间土的荷载分担比例。此外，褥垫层还能保护桩顶，避免桩顶因集中应力过大而发生破坏，为桩土协同作用的实现提供保障。

二、影响桩土协同作用的关键设计参数

(一) 桩长、桩径与桩间距的影响

桩长是影响CFG桩复合地基协同作用的核心参数之一。在深厚软土地基中，桩长直接决定桩体的受力深度与荷载传递路径。桩长过短，桩体无法穿透软弱土层到达深层稳定土层，端阻力难以充分发挥，复合地基的承载力提升有限，且易产生较大沉降；桩长过长，虽然能提高承载力，但会增加施工难度与工程造价，同时可能导致桩体应力集中，影响协同效应。合理的桩长应使桩端坐落于承载力较高的土层，确保桩体与桩间土能够协同承担荷载。

桩径的大小影响桩体的刚度与承载面积。桩径越大，桩体的刚度与承载能力越强，能够承担更多的上部荷载，但桩径增大会增加材料用量与施工成本，且可能导致桩间土的挤密效果降低。桩径过小，桩体刚度不足，荷载分担比例有限，难以有效改善地基承载性能。桩间距则影响桩间土的挤密效果与荷载分担比例。桩间距过大，桩间土的挤密作用不明显，承载力提升有限，桩体荷载分担比例过高，易导致桩体超载；桩间距过小，桩间土挤密过度，可能出现桩间土隆起，同时增加施工干扰与工程造价。

(二) 褥垫层厚度与模量的影响

褥垫层厚度对桩土协同作用的协调效果具有重要影响。厚度过小，褥垫层的变形能力不足，难以有效协调桩体与桩间土的变形差异，荷载易集中于桩体，桩间土难以充分参与工作；厚度过大，褥垫层的压缩变形过大，会导致复合地基的总沉降增加，且可能降低荷载传递效率，影响复合地基的承载力。深厚软土地基中，褥垫层厚度需根据桩体刚度、桩间土性质与上部结构要求合理确定，以实现桩土变形的协调控制^[2]。

褥垫层的模量直接影响其应力扩散能力与变形特性。模量过高，褥垫层的刚性过大，变形协调能力不足，难以发挥缓冲作用；模量过低，褥垫层的压缩变形过大，荷载扩散效果不佳，桩顶应力集中现象明显。合理的褥垫层模量应与桩体、桩间土的刚度相匹配，既要保证足够的变形协调能力，又要确保荷载能够有效扩散至桩间土，实现桩土的协同承载。

(三) 桩体强度与置换率的影响

桩体强度是保障桩体承载能力的基础，直接影响桩体的荷载传递与抗破坏能力。桩体强度过低，在荷载作用下易发生桩身开裂或屈服，导致承载能力丧失，无法与桩间土协同工作；桩体强度过高，虽然能提高桩体的承载能力，但会增加材料成本，且可能因桩体刚度过大而影响桩土变形协调。桩体强度需根据上部荷载大小、桩体受力情况与施工工艺合理确定，确保桩体在工作过程中不发生破坏。

置换率是指桩体截面积与复合地基总面积的比值，是影响复合地基承载力与变形特性的关键参数。置换率越高，桩体在复合地基中的比例越大，承载能力越强，但置换率过高会增加工程造价，且可能导致桩间土挤密效果不佳；置换率过低，桩体的荷载分担比例有限，难以有效改善地基承载性能，复合地基的沉降量较大。在深厚软土地基中，置换率需结合桩体强度、桩间距、桩间土性质等因素综合确定，以实现承载力提升与经济性的平衡^[3]。

三、基于协同作用的复合地基参数优化方法

(一) 以控制沉降为目标的参数优化原则

以控制沉降为目标的参数优化，核心是通过调整设计参数，使复合地基的总沉降量满足上部结构的要求。深厚软土地基中，沉降控制是工程设计的关键指标之一。在参数优化过程中，首先应当优先考虑并确保桩体具备足够的穿透能力，以便能够有效地穿透覆盖于地表的软弱土层。为此，需要通过科学分析和精确计算，精心选择恰当的桩长，确保桩端能够稳固地坐落于深层的稳定土层之上，从而有效减少地基在施工完成后可能出现的沉降现象。此外，在设计和施工过程中，还应适当增加桩体的直径以及置换率，这样做不仅可以显著提升复合地基的整体刚度，还能有效降低地基在受到外部荷载作用时产生的压缩变形，进而提高地基的稳定性和使用寿命。

褥垫层参数的优化应注重变形协调，选择合适的厚度与模量，使桩体与桩间土的变形相互匹配，避免因变

形差异过大导致局部沉降超标。某高速公路路基工程中,深厚软土地基处理采用CFG桩复合地基,以控制沉降为主要目标,通过优化桩长至20米,确保桩端进入粉质黏土层,调整桩间距为1.8米,置换率为15%,褥垫层采用厚度20厘米的级配砂石,模量控制在20MPa,最终复合地基的工后沉降量控制在15厘米以内,满足工程要求。

(二) 以提高承载力为目标的参数优化原则

以提高地基承载力为目标的参数优化工作,其核心宗旨在于通过科学合理地设计和调整各项关键参数,充分挖掘和发挥桩体本身以及桩间土体的协同承载潜力,从而确保复合地基的整体承载力能够有效满足上部结构所施加的荷载需求。在具体参数的选择和优化过程中,应当有针对性地适当增加桩体的长度和直径,这样做不仅可以显著提升桩体自身的承载能力和刚度,还能有效增强桩体在整体荷载分担中的比例,使其在承载体系中发挥更为关键的作用。同时,还需对桩间距进行精细化的优化调整,确保桩间土体在施工过程中能够得到有效的挤密处理,进而大幅提升桩间土体的承载力水平。通过这样的综合优化措施,最终实现桩体与桩间土体之间形成一种高效、稳定的协同承载效应,为整个复合地基系统提供坚实可靠的支撑保障^[4]。

褥垫层应选择合适的厚度与模量,确保荷载能够有效扩散至桩间土,避免荷载过度集中于桩体。同时,合理提高桩体强度与置换率,增强复合地基的整体承载能力。某工业厂房地基处理工程中,针对深厚软土地基承载力不足的问题,采用CFG桩复合地基技术,通过优化桩径至600毫米,桩长18米,桩间距1.5米,置换率为20%,褥垫层厚度15厘米,桩体强度等级为C25,复合地基的承载力较原地基提高了3倍,满足了厂房的荷载要求。

(三) 考虑经济性的综合优化策略

为了实现经济性的综合优化策略,我们必须在确保满足工程承载力和沉降要求的基础上,通过科学合理的参数优化手段,有效降低整个工程造价,从而实现技术先进性与经济合理性的完美统一。在具体的参数优化过程中,我们应当避免陷入盲目追求高参数指标的误区,而是要紧密结合工程项目的实际需求和具体条件,精准合理地确定诸如桩长、桩径、置换率等关键参数的具体数值。在确保工程质量达到标准要求的前提下,我们应优先考虑那些施工过程更为便捷、成本投入相对较低的参数组合方案,以最大限度地提升工程项目的经济效益

和综合竞争力。

合理优化桩间距与置换率,在满足承载力要求的同时,减少桩体数量,降低材料用量与施工成本。褥垫层材料应选择性价比高的天然材料或工业废料,降低材料成本。某住宅小区地基处理工程中,通过综合优化设计,将桩间距从1.5米调整为1.8米,置换率从20%降至15%,桩长保持15米不变,褥垫层采用当地丰富的级配砂石,在满足承载力与沉降要求的前提下,工程造价降低了18%,取得了良好的经济效果^[5]。

结语

深厚软土地基中CFG桩复合地基的桩土协同作用是其发挥承载效能的核心,其机理涉及桩体、桩间土与褥垫层的相互作用与协调工作。桩长、桩径、桩间距、褥垫层参数、桩体强度与置换率等关键设计参数直接影响桩土协同效应的发挥,合理选择设计参数是保障复合地基性能的关键。基于协同作用的参数优化需根据工程实际需求,分别以控制沉降、提高承载力为目标,结合经济性原则进行综合设计。通过科学的参数优化,能够充分发挥桩体与桩间土的协同承载潜力,在满足工程安全要求的前提下,降低工程造价。在工程实践中,应深入分析深厚软土地基的工程特性,结合具体工程条件,合理确定设计参数,确保CFG桩复合地基的协同作用得到充分发挥,为工程建设提供安全、可靠、经济的地基处理方案。随着工程技术的不断发展,CFG桩复合地基的协同作用机理与参数优化方法将得到进一步完善,为深厚软土地基处理提供更有力的技术支撑。

参考文献

- [1]张帅.CFG桩与高压旋喷桩复合地基加固效果分析[J].2021.
- [2]孟资成.CFG桩在深厚软土地基处理中的应用[J].云南建筑,2022(002):000.
- [3]商拥辉,徐林荣,陈钊锋.高铁CFG桩—筏复合地基固结解析解及特性[J].中国铁道科学,2021,042(001):1-8.DOI:10.3969/j.issn.1001-4632.2021.01.01.
- [4]曾华健,梅军,刘慧芬,等.CFG桩网复合地基加固物流地坪深厚软土地基的三维数值模拟分析[J].建筑施工,2021.DOI:10.14144/j.cnki.jzsg.2021.03.047.
- [5]曹金春,孟令峰,张本科.CFG桩处理软土地基方案设计参数优化研究[J].土工基础,2021.