

土木工程结构与地基加固技术分析

周太郎

中煤科工重庆设计研究院(集团)有限公司 重庆 402360

摘要: 本文系统探讨了土木工程结构设计的基本原则、荷载传递机制及其对地基性能的依赖关系,并深入剖析了当前主流的地基加固技术体系,包括物理加固法(如换填垫层、强夯、挤密桩)、化学加固法(如注浆、深层搅拌)以及复合地基技术(如CFG桩、碎石桩)。文章重点论述了结构-地基共同作用理论的内涵及其在工程实践中的指导意义,强调了从项目规划初期即需将地基条件作为结构选型与布局的关键约束因素。在此基础上,论文提出了基于全生命周期理念的结构-地基一体化设计策略,倡导通过精细化勘察、数字化协同平台(BIM)和性能化设计理念,实现二者在安全、经济、绿色等多维度的最优匹配。研究表明,打破结构与地基处理的传统割裂模式,构建深度融合的一体化技术路径,是应对未来复杂工程挑战、保障国家基础设施长治久安的根本保障。

关键词: 土木工程; 结构设计; 地基加固; 共同作用; 一体化设计

引言

土木工程旨在创造安全稳固且功能完备的环境,地基是其根基,“九层之台,起于累土”便凸显了地基的重要性。当下,我国城镇化深入,工程建设向地质复杂、环境敏感区域拓展,天然地基难满足现代建筑要求,地基加固技术由此与上部结构设计紧密相连。但传统工程实践中,结构与地基处理常独立进行。结构工程师专注上部结构,岩土工程师负责地基方案,这种割裂模式易致信息不畅、设计冲突,出现不合理现象。进入高质量发展新时代,面对“双碳”目标和韧性城市建设要求,粗放式设计思维难以为继。本文将系统梳理土木工程结构与地基加固技术,分析二者内在联系,探索以协同、集成、优化为核心的一体化设计新路径,为提升我国土木工程整体品质与可持续性提供理论支持。

1 土木工程结构设计的基本原理与地基依赖性

1.1 结构设计的核心原则与流程

现代结构设计遵循一套严谨的原则体系,主要包括安全性、适用性、耐久性、经济性与美观性。其基本流程通常始于对建筑方案的理解,继而进行结构体系选型(如框架、剪力墙、筒体、空间网架等),随后是精确的荷载分析与组合。根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009)等相关标准,设计师需考虑恒荷载、活荷载、风荷载、雪荷载及地震作用等多种荷载工况,并按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行最不利组合。之后,利用结构力学原理或有限元分析软件,计算出各构件的内力(弯矩、剪力、轴力等),并据此进行截面设计与配筋。整个过程环环相扣,任何一个环节的失误都

可能影响最终结构的安全。

1.2 荷载传递路径与地基的终极承载角色

任何作用于建筑物上的荷载,无论其来源如何,最终都将通过基础这一关键媒介传递至地基土体。上部结构可以被视为一个复杂的内力重分配系统,它将分散的楼面荷载、墙体自重等汇集到柱、墙等竖向承重构件,再由这些构件传递给基础。基础的形式(如独立基础、条形基础、筏板基础、桩基础等)则根据上部结构的类型、荷载大小及分布特征来确定,其核心功能是将集中的柱/墙荷载扩散为地基土体所能承受的压应力。因此,地基是整个荷载传递链条的终点,也是最终的承载者。地基的承载力不足会导致基础沉降过大甚至失稳,进而引发上部结构开裂、倾斜乃至倒塌;地基的不均匀沉降则会在上部超静定结构中产生附加内力,同样威胁结构安全。由此可见,上部结构的设计参数(如允许沉降值、基础反力分布)与地基的物理力学性质(如承载力、压缩模量、渗透系数)存在着密不可分的耦合关系。

1.3 地基条件对结构选型与布局的制约

在项目前期,详细的岩土工程勘察是结构设计不可或缺的依据。勘察报告提供的地层分布、地下水位、土体力学参数等信息,直接制约着结构工程师的决策。例如,在深厚软土地区,若采用天然地基,则可能需要选择对差异沉降不敏感的结构形式,如筒体结构或设置沉降后浇带的框架-剪力墙结构,并严格限制建筑的长高比^[1]。反之,若地质条件良好,承载力高且均匀,则可灵活选用多种结构体系。此外,对于高层或超高层建筑,其巨大的竖向荷载和倾覆力矩往往迫使设计师放弃天然地基,转而采用深基础(如桩基础),此时上部结构的

刚度与桩-土-结构的共同作用效应便成为设计的关键考量。可以说,不了解地基,就无法进行真正意义上的结构设计。

2 主流地基加固技术体系及其机理分析

2.1 物理加固法

物理加固法主要通过改变土体的物理状态(如密度、孔隙比)来提高其工程性能。(1)换填垫层法:适用于浅层软弱土或不均匀土层。其原理是将一定深度范围内的不良土体挖除,回填以强度高、压缩性低、性能稳定的材料(如砂石、素土、灰土等),并通过分层压实形成垫层。该垫层一方面能提高地基承载力,另一方面能起到应力扩散作用,减小下卧软弱层的附加应力,从而有效控制沉降。(2)强夯法:利用重锤(通常10-40吨)从高处(6-40米)自由落下产生的巨大冲击能,对地基土进行强力夯实。此过程能使土体产生瞬间的孔隙水压力和振动液化,随后在排水固结过程中,土颗粒重新排列,孔隙比减小,密度和强度显著提高。该方法适用于处理碎石土、砂土、低饱和度的粉土与黏性土等地基。(3)挤密桩法:包括土桩、灰土桩、砂石桩等。施工时,通过沉管、冲击或振动等方式在土中成孔,然后向孔内填入材料并分层夯实。成桩过程中,桩周土体受到强烈的侧向挤压,其密度得以提高,形成一个由桩体和挤密土组成的复合地基。这种方法不仅能提高承载力,还能消除湿陷性黄土的湿陷性。

2.2 化学加固法

化学加固法通过向土体中注入固化剂,使其与土颗粒发生物理化学反应,形成具有较高强度和稳定性的固结体。(1)注浆法:利用液压、气压或电化学原理,将水泥浆、化学浆液或其他固化剂注入地基的裂隙或孔隙中。浆液凝固后,能胶结松散颗粒,填充空洞,从而提高地基的整体性、强度和抗渗性。根据浆液性质和注入方式,可分为渗透注浆、劈裂注浆、压密注浆等,适用于多种地质条件下的加固与防渗^[1]。(2)深层搅拌法:使用特制的深层搅拌机械,在地基深处将软土与固化剂(通常是水泥浆或干粉)强制拌和,使二者发生一系列物理化学反应,最终形成具有一定强度的水泥土圆柱体(搅拌桩)。这些桩体与桩间土共同构成复合地基,能有效提高承载力并减少沉降。该方法特别适用于处理淤泥、淤泥质土、粉土等高含水量、低强度的软土地基。

2.3 复合地基技术

复合地基是指通过在天然地基中设置增强体(桩体),由增强体和桩间土共同承担上部荷载的地基形式。它是介于天然地基和纯桩基础之间的一种高效、经

济的地基处理方式。(1)CFG桩(水泥粉煤灰碎石桩)复合地基:CFG桩是由碎石、石屑、粉煤灰、水泥和水拌和而成的高粘结强度桩。其桩体强度远高于搅拌桩,但又低于钢筋混凝土桩。CFG桩通过置换、挤密和褥垫层的调节作用,与桩间土形成协同工作的复合地基,能大幅度提高承载力并有效控制沉降,广泛应用于多层和高层建筑的地基处理。(2)碎石桩复合地基:碎石桩主要依靠桩体的置换和挤密作用来改善地基性能。由于碎石桩本身具有良好的透水性,它还能加速桩间软土的排水固结,特别适用于处理饱和和软黏土地基,兼具加固和排水双重功效。

3 结构-地基共同作用理论及其工程意义

3.1 共同作用的基本内涵

结构-地基共同作用理论认为,上部结构、基础和地基是一个完整的、相互制约的力学系统。上部结构的刚度会影响基础的内力和变形分布;反过来,地基的柔度(即其抵抗变形的能力)也会显著影响上部结构的内力。具体而言,一个刚度很大的上部结构(如剪力墙结构)能够调整基础的不均匀沉降,使得地基反力趋向均匀;而一个柔性较大的上部结构(如排架结构)则对地基的不均匀沉降更为敏感,容易在柱脚处产生较大的次应力^[1]。同样,一个刚度很大的基础(如厚筏板)能有效跨越局部软弱区域,减小差异沉降;而柔性基础(如十字交叉梁)则会随地基变形而变形,其内力分布更依赖于地基的局部刚度。

3.2 共同作用对设计的影响

忽视共同作用可能导致两种极端情况:一是过分保守,为控制沉降而过度加大结构刚度或进行不必要的地基加固,造成经济浪费;二是过于危险,低估了地基变形对上部结构产生的附加内力,导致结构开裂甚至破坏。尤其是在以下情形中,考虑共同作用至关重要:(1)地基条件不均匀:当建筑跨越不同地质单元或存在局部软弱下卧层时,差异沉降是主要矛盾,必须通过共同作用分析来优化结构布置和基础形式。(2)上部结构刚度大:如框筒、筒中筒等超高层结构,其巨大的整体刚度会对地基反力产生强烈的调整作用,精确模拟这种效应是确保基础设计合理的关键。(3)采用柔性基础:如采用桩筏基础时,筏板的厚度和配筋设计必须考虑桩-土-筏板三者之间的荷载分担和变形协调。

4 结构与地基加固的一体化协同策略

4.1 规划与勘察阶段的深度融合

一体化设计应始于项目最早期。结构工程师应参与项目的选址和方案讨论,充分了解拟建场地的宏观地质

风险。同时,岩土工程师在进行详细勘察时,应与结构工程师充分沟通,明确上部结构的荷载特征、对沉降的敏感度等关键需求,从而有针对性地布置勘探点、进行原位测试和室内试验,为后续设计提供精准的数据支持。这种前置化的融合能从根本上避免因信息不对称导致的重大设计失误。

4.2 基于BIM的数字化协同平台

建筑信息模型(BIM)技术为实现结构与地基的一体化设计提供了强大的数字化工具。可以在统一的BIM平台上,集成地质模型、结构模型和基础模型。地质模型能直观展示地层的空间分布和物理参数;结构模型包含所有构件的几何与属性信息;基础模型则精确反映其与地质体的接触关系^[4]。通过这个集成模型,可以进行可视化的设计校审,提前发现潜在的冲突(如桩基与地下障碍物的碰撞),并利用专业的分析插件进行初步的共同作用模拟。更重要的是,BIM模型作为单一数据源,能确保结构、岩土等各专业团队始终基于同一套最新、最准确的信息开展工作,极大地提升了协同效率和设计质量。

4.3 多方案比选与全生命周期成本优化

在确定最终方案前,应进行多方案的技术经济比选。这不仅包括不同上部结构体系的比较,也应涵盖不同的地基处理方案(如天然地基+加强上部结构 vs. 桩基础+常规上部结构)。比选的维度不应局限于初始建设成本,而应扩展到全生命周期成本(LCC),包括未来的维护、修复、能耗乃至拆除成本。例如,一个初期投入稍高的高性能地基处理方案,可能会因其卓越的长期稳定性和极低的维护需求,而在几十年的使用周期内展现出更低的总成本。通过这种综合性的评估,才能选出真正最优的结构-地基组合方案。

4.4 性能化设计理念的全面贯彻

借鉴抗震设计中的性能化思想,可以将其推广至结

构-地基系统的整体设计中。即根据建筑物的重要性等级和业主的具体需求,设定明确的性能目标,如“在正常使用荷载下,最大沉降不超过50mm”、“在罕遇地震下,地基不失稳,上部结构可修复”。然后,通过精细化的数值模拟和分析,验证所选的结构体系和地基加固方案能否满足这些预设的性能目标。这种以目标为导向的设计方法,比单纯满足规范最低要求更具灵活性和科学性,能够更好地平衡安全、功能与经济之间的关系。

5 结语

土木工程结构设计与地基加固技术紧密相连,是建筑安全稳定的统一体。上部结构受地基性能制约,地基加固也需满足上部结构需求。系统分析表明,二者在荷载传递、变形协调等方面联系紧密,传统割裂设计模式存在局限。未来,土木工程发展要求我们摒弃旧思维,拥抱以协同、集成、优化为核心的一体化设计理念。这需从项目源头着手,借助深度融合的前期工作、强大的BIM数字化平台,基于全生命周期综合比选,运用先进性能化设计方法,将结构与地基统筹规划、精细设计。如此,才能在复杂地质环境中,打造出安全可靠、经济合理、绿色耐久的精品工程,为基础设施建设与人民安居乐业筑牢坚实基础。

参考文献

- [1]赵有强.土木工程结构设计中地基加固技术的实践标准与应用[J].大众标准化,2025,(14):142-144.
- [2]李雪峰.土木工程结构设计与地基加固技术[J].建材发展导向,2024,22(21):1-3.
- [3]温博.土木工程结构设计与地基加固技术分析[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(11):193-195.
- [4]李雪玲.土木工程结构设计与地基加固技术探究[J].大众标准化,2024,(05):46-48.