

地基基础与上部结构协同工作机理研究

夏传建¹ 韩小燕²

1. 山东法恩泰科技有限公司有限公司 山东 青岛 266520

2. 中汽迈赫(天津)工程设计研究院有限公司青岛分公司 山东 青岛 266520

摘要:地基基础与上部结构作为建筑物的核心组成部分,二者相互依存、相互影响,共同承担荷载并维持结构稳定性。然而,传统设计常将二者视为独立部分,忽略了其协同工作的重要性,导致设计偏差。本研究深入剖析地基基础与上部结构的协同工作机理,运用理论分析、数值模拟等方法,探讨三者在接触部位的变形协调条件及内力和变形规律,旨在为工程设计提供更为科学、可靠的依据,提高建筑工程的设计水平和结构安全性。

关键词:地基基础;上部结构;协同工作机理

引言:在建筑工程领域,地基基础与上部结构的相互作用直接关系到建筑物的稳定性和安全性。随着建筑高度的不断增加和地质条件的复杂性,地基基础与上部结构的协同工作显得尤为重要。本研究旨在深入探讨地基基础与上部结构的协同作用机理,通过理论分析和实验验证,揭示其相互作用规律,为建筑工程的设计、施工和维护提供理论依据和技术支持,推动建筑工程领域的发展与进步。

1 地基基础与上部结构协同工作的基本概念

1.1 地基基础与上部结构的定义与功能

(1)地基是建筑物的天然或经处理的支撑体,并非人工构建构件,主要功能是承接由基础传递的建筑物全部荷载,包括竖向自重、活荷载及水平风荷载、地震荷载等,并将荷载均匀传递至下部深层地层,避免荷载集中引发地层破坏,是建筑稳定的根本保障。(2)基础作为连接地基与上部结构的过渡构件,需人工设计建造,核心作用是将上部结构的荷载扩散后传递给地基,同时通过合理结构形式(如条形、筏板基础)调整建筑物各区域沉降,减少不均匀沉降对上部结构的影响,防止结构开裂。(3)上部结构是建筑物的主体部分,涵盖梁、板、柱、墙体等构件,直接承担使用过程中的各类荷载,如人员、设备重量等,同时通过力学设计维持建筑空间形态与结构稳定性,满足居住、办公等使用功能需求。

1.2 协同工作的定义与内涵

(1)其定义核心是将地基、基础和上部结构视为一个不可分割的整体系统开展研究,不再单独计算各部分受力与变形,而是充分考虑三者间的相互作用,从整体视角评估结构工作性能,使分析结果更贴合工程实际。(2)协同工作的关键内涵是满足接触部位的变形协调条件:在荷载作用下,地基沉降、基础变形与上部结构位

移需在接触界面(如地基与基础、基础与柱连接面)保持连续,无明显突变。基于此,通过力学分析可精准计算三者的内力分布与变形程度,为结构设计、施工提供科学依据,保障建筑长期安全稳定。

2 地基基础与上部结构协同工作的机理分析

2.1 地基刚度对协同工作的影响

(1)当地基刚度增大时,其抵抗变形的能力增强,基础所受弯矩、剪力等内力会相应减小,同时基础各部位的相对挠曲差缩小,能更均匀地传递荷载;反之,地基刚度减小时,基础易因地层变形不均产生较大相对挠曲,导致内力集中,甚至引发基础开裂。例如,在软土地基中,地基刚度较低,基础常出现明显的中间沉降大于边缘的现象,需通过调整基础形式平衡内力。(2)不同地基模型适用于不同协同工作场景:线弹性模型假设地基受力与变形呈线性关系,适用于荷载较小、地层变形平缓的情况,计算简便但难以反映大变形特性;非线性弹性模型可模拟地基刚度随荷载增大而衰减的规律,更贴合中等荷载下的协同工作分析;弹塑性模型则能考虑地基进入塑性阶段后的变形与破坏特征,适用于荷载较大或地层稳定性较差的工程,可精准评估协同工作的极限状态,但计算复杂度更高^[1]。

2.2 基础刚度对协同工作的影响

(1)基础刚度增大时,会增强对上部结构的约束作用,减少上部结构的内力响应(如梁、柱的弯矩),同时基础自身承担的荷载比例提升,内力随之增大;若基础刚度减小,上部结构需承担更多由地基变形引发的附加内力,易出现结构变形超标。例如,筏板基础刚度大于独立基础,采用筏板基础时,上部框架结构的内力通常小于采用独立基础的情况。(2)绝对刚性基础(如刚度无穷大的理想基础)在荷载作用下无挠曲变形,能将上部荷载均

匀传递给地基,地基沉降呈线性分布,适用于分析地基均匀性好、荷载较小的简单工程,但忽略了基础实际变形,与工程实际存在偏差;绝对柔性基础(如刚度趋近于零的基础)仅能传递竖向压力,无法抵抗弯矩和剪力,基础变形完全随地基沉降变化,适用于如油罐底板等柔性较大的结构,但其协同工作中上部结构需承担全部水平力与弯矩,对上部结构刚度要求更高。

2.3 上部结构刚度对协同工作的影响

(1) 上部结构刚度越大,对基础的约束能力越强,能有效限制基础的不均匀沉降和转动,进而减少地基的局部变形集中。例如,高层建筑的框架-剪力墙结构刚度远大于多层砌体结构,其对基础的约束作用更显著,可降低地基的差异沉降量;反之,上部结构刚度较小时,对基础和地基的约束较弱,易因地基变形引发上部结构开裂。(2) 梅耶霍夫等代刚度梁法是简化协同工作分析的常用方法,它将上部结构等效为具有一定刚度的梁,与基础、地基共同构成分析模型,通过计算等效梁的内力与变形,间接反映上部结构对协同工作的影响。该方法计算效率高,适用于规则体型的中低层建筑,但存在局限性:难以准确模拟不规则上部结构的刚度分布,且忽略了结构节点的非线性变形,在复杂高层建筑或大跨度结构中,分析精度可能不足^[2]。

2.4 变形协调条件在协同工作中的作用

(1) 在协同工作系统中,地基、基础、上部结构的接触部位(如地基与基础的接触面、基础与柱的连接面)必须满足变形协调,即各部位的位移(沉降、水平位移、转角)保持连续,无突变。若变形不协调,会在接触部位产生附加内力,如地基与基础间出现间隙时,基础局部受力骤增,可能导致结构损坏,因此接触部位的变形协调是三者形成整体工作状态的前提。(2) 分析时需先建立三者的力学模型,明确各部位的变形关系(如基础沉降量等于地基在对应位置的沉降量,上部结构柱底位移等于基础顶面位移),再结合材料力学公式与平衡条件,将变形协调方程与内力平衡方程联立求解,从而得到地基的应力分布、基础的内力大小以及上部结构的变形值,为结构设计提供精准的力学参数。

3 地基基础与上部结构协同工作的研究方法

3.1 理论分析法

(1) 数值法以离散化思想为核心,适用于复杂边界条件与非线性问题分析:有限单元法将地基、基础、上部结构划分为若干小单元,通过建立单元刚度矩阵与整体平衡方程,求解各部位的内力与变形,可模拟不同地层分布、结构形式及荷载组合,在高层建筑筏板基础

与软土地基协同分析中应用广泛;有限差分法通过将微分方程转化为差分方程,计算离散节点的力学响应,优势在于计算效率高,适合分析地基固结变形与结构长期协同工作的时间效应,但对不规则几何模型的适应性较弱。(2) 解析法基于经典力学理论推导解析公式,计算过程简洁直观:结构力学法将协同系统简化为梁-地基模型(如文克尔地基梁、弹性半空间地基梁),通过弯矩、剪力平衡方程求解基础内力,适用于中小型浅基础与简单上部结构的协同分析;弹性力学法基于弹性理论建立应力-应变关系,可精准计算地基内部的应力分布与位移场,但受限于均匀、各向同性地基假设,难以模拟复杂地层条件。

3.2 数值模拟方法

(1) 主流有限元分析程序(如ANSYS、ABAQUS、PLAXIS)在协同工作分析中优势显著:可构建三维整体模型,考虑材料非线性(如地基土的弹塑性、混凝土的开裂)、接触非线性(如地基与基础的接触面滑移)及施工过程模拟(如分层开挖、分步加载);能输出任意截面的内力、变形云图及时间-位移曲线,为结构优化提供直观依据。例如,在桩筏基础与高层建筑协同分析中,可通过模拟桩土相互作用,优化桩的布置数量与长度^[3]。(2) 数值模拟在实际工程中已有成熟应用案例:某软土地区高层建筑项目,通过PLAXIS建立地基-桩筏基础-上部框架整体模型,对比分析不同地基处理方案(水泥土搅拌桩、碎石桩)下的协同工作性能,最终确定水泥土搅拌桩方案,使地基差异沉降量控制在规范允许范围内;某储罐工程中,利用ABAQUS模拟柔性底板基础与地基的协同变形,验证了储罐充水过程中基础应力分布的均匀性,避免局部应力集中导致的底板破坏。

3.3 试验研究方法

(1) 现场试验与室内模型试验常结合开展:现场试验(如载荷试验、桩基静载试验、沉降观测)可直接获取实际地层的力学参数与结构的长期变形数据,例如通过建筑物沉降观测,记录地基-基础-上部结构的协同变形规律,验证设计方案的合理性;室内模型试验(如缩尺地基-基础-上部结构模型试验)可通过控制变量(如地基刚度、基础形式),研究单一因素对协同工作的影响,且试验条件可控、数据获取便捷,弥补了现场试验成本高、周期长的不足^[4]。(2) 试验数据是协同工作分析的重要验证依据:某桥梁桩基项目,通过室内模型试验获取不同荷载下桩身内力与地基沉降数据,与有限元模拟结果对比,修正了数值模型中的桩土接触面参数,使模拟误差从15%降至5%以内;某住宅项目中,将现场载荷

试验得到的地基承载力特征值代入理论公式,计算基础内力与上部结构变形,确保理论计算结果与实际工程情况一致,避免因理论假设偏差导致的设计风险。同时,试验数据还可用于优化理论模型参数,提升协同工作分析的可靠性。

4 地基基础与上部结构协同工作的工程实践

4.1 高层建筑地基基础与上部结构的协同工作案例分析

4.1.1 工程概况与设计要求

某32层剪力墙结构住宅项目,位于软土地区,地下2层,地上层高3m,总高度96m。上部结构采用剪力墙体系,要求最大差异沉降 $\leq 20\text{mm}$,基础选型为筏板基础(厚度1.8m),地基采用水泥土搅拌桩处理(桩长12m),需满足抗震设防烈度8度、正常使用年限50年的设计要求,同时控制地基-基础-上部结构协同变形,避免剪力墙开裂。

4.1.2 协同工作分析方法的应用与结果

采用“有限元法+现场监测”结合的分析方式:通过ABAQUS建立地基-筏板-剪力墙整体模型,模拟地基土弹塑性变形与结构协同工作;结果显示,地基经搅拌桩处理后刚度提升30%,基础最大挠曲值12mm,上部剪力墙最大拉应力0.8MPa,均满足规范要求;现场沉降观测6个月,累计最大沉降18mm,差异沉降5mm,与模拟结果吻合度达90%。

4.1.3 工程实践中的经验教训与改进措施

经验:软土地区需优先通过地基处理提升刚度,为协同工作奠定基础;教训:初期未考虑施工加载顺序,模拟时未计入分层开挖对地基刚度的影响,导致首次计算偏差15%;改进措施:后续分析加入施工阶段模拟,采用“分层开挖-分层回填-分步加载”模式,同时在基础薄弱部位增设暗梁,进一步控制基础挠曲。

4.2 岩溶地基等特殊地质条件下的协同工作策略

4.2.1 岩溶地基的特点与稳定性评价

岩溶地基存在溶洞、溶沟等地质缺陷,具有承载力不均、易发生突发性沉降的特点;稳定性评价需结合钻探与物探(地质雷达、地震波CT),重点判断溶洞规模

(直径 $> 2\text{m}$ 需处理)、顶板厚度(小于3倍洞径易坍塌)及充填物性质(流塑状充填物需加固),确保地基满足协同工作的刚度均匀性要求。

4.2.2 溶洞探测与处理技术在协同工作中的应用

某商业综合体项目采用“地质雷达初探+钻孔验证”探明23处溶洞,对直径1-2m的小溶洞采用压力注浆填充(注浆压力0.8-1.2MPa),对直径 $> 2\text{m}$ 的大溶洞采用“钢筋混凝土盖板+注浆加固”处理;处理后通过载荷试验验证,地基承载力特征值提升至300kPa,刚度变异系数降至0.15,为基础与上部结构协同工作提供稳定地基条件。

4.2.3 特殊地质条件下协同工作的挑战与解决方案

挑战:溶洞分布随机性大,易导致地基刚度突变,引发基础不均匀沉降;解决方案:采用“柔性基础+刚度调节”策略,选用筏板基础并在溶洞处理区域增设桩基础,通过桩与筏板协同受力平衡刚度差异;同时在上部结构设置温度缝与沉降缝,释放附加内力,结合长期沉降监测,动态调整上部结构荷载分布,确保协同工作稳定。

结束语

地基基础与上部结构协同工作机理研究,不仅是对传统设计理念的一次革新,更是确保现代建筑结构安全与稳定的关键所在。通过深入的理论探讨、数值模拟及实践验证,我们更清晰地认识到了协同工作的重要性,以及如何更有效地实现地基、基础与上部结构间的协调与平衡。未来,随着科技的进步,我们将继续探索更为精细、高效的分析方法,以推动建筑结构的持续优化与安全升级。

参考文献

- [1] 闫韦淇.结构与地基加固技术在土木工程设计中的应用[J].居舍,2020,(09):78-79.
- [2] 王雪,钟美慧,贺全德.土木工程结构设计与地基加固技术探究[J].江西建材,2021,(10):86-87.
- [3] 田建军.关于土木工程建设中结构与地基加固技术的运用探讨[J].建材与装饰,2021,(12):117-118.
- [4] 孔荣森.结构加固技术与地基加固技术的应用要点分析[J].四川水泥,2022,(06):67-68.