

Analysis and Research on the Influencing Factors of Foundation Bearing Capacity in Geotechnical Engineering Based on Particle Flow Theory

Yan Cao Shoujin Xiao Min Yu Jingting Xu Mingyue Cai

China Machinery Third Survey and Design Institute of Geotechnical Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430024, China

Abstract

This paper independently analyzes the key influencing factors and their mechanisms on the foundation bearing capacity in geotechnical engineering based on the particle flow theory. The study categorizes the influencing factors into four dimensions: particle characteristics, macroscopic geological and environmental conditions, loading conditions, and numerical simulation parameters. By employing single-factor analysis and multi-factor coupling analysis, the paper clarifies the influence laws and micro-mechanisms of each factor on the bearing capacity and identifies the dominant factors under different working conditions. The results show that the particle flow theory can break through the limitations of traditional macroscopic analysis, precisely correlate the micro-behavior of particles with the macroscopic bearing capacity, and its numerical simulation method provides an efficient tool for complex scenario analysis. This research provides theoretical support for the optimization of foundation engineering design and stability assessment.

Keywords

Particle flow; Foundation bearing capacity; Influencing factors

颗粒流在岩土工程中地基承载力影响因素分析和研究

曹岩 肖守金 余敏 许婧婷 蔡明月

中机三勘岩土工程有限公司, 中国·湖北 武汉 430024

摘要

本文基于颗粒流理论, 独立分析岩土工程中地基承载力的关键影响因素与作用机制。研究从颗粒自身特性、宏观地质与环境、荷载条件、数值模拟参数四类维度梳理影响因素, 借助单因素分析、多因素耦合分析等方法, 阐明各因素对承载力的影响规律与细观机理, 明确不同工况下的主控因素。结果显示, 颗粒流理论可突破传统宏观分析局限, 精准关联颗粒细观行为与宏观承载力, 其数值模拟方法为复杂场景分析提供了高效工具。本文研究为地基工程设计优化与稳定性评估提供理论支撑。

关键词

颗粒流; 地基承载力; 影响因素

1 引言

地基承载力是岩土工程结构稳定的核心, 关乎工程安全与造价, 但传统宏观理论难以捕捉岩土体离散颗粒的非线性响应, 复杂工况下分析存在局限。颗粒流通过还原颗粒运动与相互作用, 能揭示承载力演化的细观根源, 基本具备参数调控、模拟场景复杂的优势。基于此, 本文聚焦颗粒流视角下地基承载力的关键影响因素, 通过分析梳理作用机制, 完善相关理论应用, 为工程实践提供一定的科学依据。

2 颗粒流理论在岩土体细观分析中的优势与应用价值

颗粒流理论作为离散介质力学体系下的核心分析方法, 在岩土体细观分析中展现出不可替代的独特优势, 其核心价值源于对岩土体本质构成与力学行为的精准还原, 岩土体作为由大量离散颗粒组成的复杂介质, 其宏观力学响应本质上是颗粒个体运动、颗粒间接触作用及细观结构演化的综合体现, 而传统宏观连续介质理论往往基于“均质、各向同性”的简化假设, 难以捕捉这种细观层面的非线性与随机性, 导致对承载力演化机制的解释停留在现象层面, 无法触及根本成因。相比之下, 颗粒流理论摒弃了连续介质的平均化假设, 将岩土体抽象为离散颗粒的集合体, 通过数值模拟手段可实时追踪每个颗粒的运动轨迹与受力状态, 清晰呈现地基从受

【作者简介】曹岩(1982-), 女, 满族, 中国辽宁抚顺人, 硕士, 高级工程师, 从事岩土工程研究。

力初期的接触力链形成、荷载传递路径构建,到荷载递增过程中局部颗粒滑移、力链断裂与重分布,再到最终整体破坏模式显现的完整动态过程,有效破解了传统理论“重宏观、轻细观”的局限性。同时,颗粒流理论具备极强的参数调控灵活性,能够通过独立设定或调整颗粒粒径与级配、颗粒形状与细观摩擦系数、粘结强度、孔隙率等关键细观参数,以及岩土体宏观结构、荷载类型、地下水渗流等外部条件,系统开展单因素或多因素耦合作用下的承载力分析,无需依赖复杂且成本高昂的室内试验或现场测试,即可精准剥离不同因素对承载力的独立影响与耦合效应。其应用价值不仅体现在为地基承载力影响因素的系统性识别提供了细观视角的理论支撑,更在于能够模拟传统方法难以覆盖的复杂场景,揭示不同工况下细观机制对宏观承载力的调控规律,为建立细观参数与宏观承载力之间的量化关联、优化地基工程设计中的参数选取、提升地基稳定性评估的精准度提供了兼具理论深度与实践指导意义的分析工具,同时也为岩土工程中细观力学与宏观工程应用的深度融合搭建了关键桥梁^[1]。

3 颗粒流视角下地基承载力关键影响因素分类

3.1 颗粒自身特性因素

颗粒自身特性是决定地基承载力的内在核心因素,其物理力学属性直接塑造了岩土体细观相互作用的基础模式。颗粒粒径与级配分布通过影响颗粒间的咬合程度、孔隙填充效果调控承载力,合理的级配能使颗粒形成更稳定的骨架结构,提升荷载传递效率;颗粒形状与细观摩擦特性显著影响接触面积和抗滑移能力,不规则颗粒的咬合作用与较高的细观摩擦系数可有效抑制颗粒相对运动,增强承载力;孔隙率与密实度反映颗粒排列的紧凑程度,密实度越高、孔隙率越小,颗粒间接触点越多,力传递路径越通畅,地基抵抗变形和破坏的能力越强;而颗粒粘结特性则直接决定颗粒体系的团聚状态,有粘结颗粒可通过胶结作用形成整体受力单元,粘结强度越高承载力越优,无粘结颗粒则主要依赖颗粒间的摩擦与咬合维持承载力。

3.2 宏观地质与环境因素

宏观地质与环境因素作为外部约束条件,通过改变颗粒体系的受力背景、存在状态及细观结构稳定性,间接调控地基承载力的演化规律。不同岩土体类型的细观结构存在本质差异,砂土以刚性颗粒为主,细观结构依赖颗粒间的摩擦与咬合,承载力对颗粒级配和密实度更为敏感;粉土因颗粒粒径更细,存在一定的毛细粘结作用,细观结构兼具砂土的离散性与粘性土的微弱胶结性;粘性土则富含胶体颗粒,通过结合水膜与离子作用力形成较强的天然胶结,细观结构的整体性更强,承载力受含水量与压实程度影响显著。地基埋藏深度与上覆压力通过有效应力原理改变颗粒体系的初始压实状态,埋藏越深,上覆土层产生的有效应力越大,颗粒被挤压得更为紧密,初始孔隙率降低,承载力的起始阈值

随之提升,且这种初始压实效应会改变颗粒接触力链的初始分布,使荷载作用下的力传递更趋稳定。地下水的作用具有双重性,动态渗流会产生渗透力,不仅降低颗粒间的有效应力,还可能通过冲刷效应带走细小颗粒,弱化颗粒接触状态,导致地基承载力下降;而静态地下水虽不产生渗流力,但会通过孔隙水压力抵消部分有效应力,同时可能软化颗粒间的粘结物质,尤其对粘性土、有胶结的岩土体影响更为明显。岩土体细观结构各向异性的形成多与沉积环境、应力历史相关,如河流沉积形成的层理结构、长期水平应力作用导致的颗粒定向排列,这种各向异性会使承载力呈现显著的方向性差异,平行于颗粒排列方向的荷载传递过程中,颗粒间滑移阻力更小,力链连续性更强,承载力相对更高,而垂直于排列方向则易出现局部应力集中,承载力有所降低^[2]。

3.3 荷载条件因素

荷载条件作为地基承载力演化的直接驱动力,其作用方式和特性直接调控着颗粒体系的力学响应路径与破坏模式。荷载类型的差异对承载力影响显著,竖向荷载主要考验颗粒体系的竖向抗压与抗剪切能力,水平荷载则侧重颗粒的侧向约束与抗滑移性能,而复合荷载、偏心荷载会使颗粒受力分布不均,易引发局部应力集中,降低整体承载力;加载速率与加载方式决定了颗粒的响应时间与适应程度,快速加载时颗粒难以充分重排,易形成脆性破坏,承载力相对较低,而单调加载与循环加载的差异则会导致颗粒疲劳损伤程度不同;荷载作用的时间效应不可忽视,长期荷载下颗粒会发生蠕变变形,颗粒间粘结也可能逐渐衰减,导致地基承载力随时间缓慢下降,尤其在粘性土或有粘结颗粒体系中更为明显^[3]。

3.4 数值模拟参数因素

数值模拟参数是颗粒流方法分析地基承载力的方法学基础,其合理设定直接影响分析结果的准确性与可靠性。颗粒接触模型的选择需适配岩土体颗粒的实际受力特性,线性接触模型适用于简化场景下的弹性受力分析,Hertz-Mindlin接触模型更贴合颗粒间的非线性接触行为,粘结接触模型则针对有胶结的颗粒体系,不当的模型选择会扭曲细观力学响应;细观参数具有显著敏感性,参数取值的微小波动可能导致宏观承载力结果的较大偏差,需通过理论校准确保参数与实际岩土体特性匹配;数值模型的尺度效应与边界条件设定同样关键,模型尺寸过小会忽略颗粒体系的整体相互作用,边界条件的不合理设定会改变荷载传递路径,需通过理论分析确定合理的模型尺度与边界形式,保障影响因素分析的有效性。

4 影响因素作用机制与分析方法

4.1 单因素作用机制分析

单因素作用机制分析聚焦于各关键因素与地基承载力之间的量化关联及细观驱动逻辑,通过剥离其他干扰条件,

清晰呈现单一因素对承载力的独立影响规律与内在机理。从量化规律来看,颗粒级配的优化会使承载力呈现非线性增长,当级配曲线接近最佳密实曲线时,承载力达到峰值;颗粒细观摩擦系数与承载力呈正相关,在一定范围内摩擦系数每提升一个阈值,承载力会对应增长一定比例;孔隙率每降低 1%,承载力会因有效接触点增加而呈现稳步提升趋势;粘结强度则存在临界值,低于该值时承载力随粘结强度增长显著,超过后增长速率逐渐放缓。从细观机理来看,这些量化规律的本质是颗粒体系细观行为的宏观体现:颗粒级配优化通过增强颗粒间的几何咬合作用,减少滑移空间,使接触力链分布更均匀;细观摩擦系数的提升直接增大颗粒间的滑动阻力,抑制局部剪切变形;孔隙率降低意味着颗粒排列更紧密,接触力链的连续性与承载能力更强;粘结强度的增强则通过胶结作用固定颗粒相对位置,避免力链过早断裂,使颗粒体系能承受更大荷载而不发生整体失稳,不同因素对应的细观破坏模式也存在差异,如无粘结颗粒体系多表现为颗粒滑移导致的剪切破坏,有粘结体系则以粘结断裂引发的局部坍塌为主要破坏形式^[4]。

4.2 多因素耦合作用分析

多因素耦合作用分析核心是揭示因素间相互作用对承载力的综合效应,主要表现为协同与拮抗两种形式。颗粒级配优化与密实度提升属于协同作用,叠加后承载力提升幅度远超单一因素效果;地下水作用与颗粒粘结特性呈拮抗效应,渗流会软化粘结、降低有效应力,抵消部分承载力增益。耦合作用下承载力演化具有非线性,荷载初期由宏观地质因素与密实度主导,荷载增大后颗粒细观特性与荷载类型的耦合效应凸显,临近破坏时地下水与细观各向异性的耦合会加速承载力衰减,本质是细观多机制的叠加与制衡。

4.3 影响因素显著性排序理论

影响因素显著性排序理论以灵敏度分析为核心方法,通过系统化各因素对地基承载力的影响权重,识别不同工况下的主控因素,为工程实践中针对性优化承载力提供理论依据。常用的灵敏度分析方法各有侧重:单变量控制法通过固定其他因素、仅改变目标因素,直观获取该因素的影响幅度,适用于初步筛选关键因素;正交试验设计通过合理安排试验方案,在减少计算量的前提下,同时获取多个因素的主效应与交互效应,精准量化耦合作用下的因素重要性;方差分析法则通过分解荷载效应的方差来源,定量计算各因素对承载力变异的贡献度,明确其显著性水平。不同工况下主控因素的动态变化规律尤为关键:在干燥、浅埋、竖向均布荷

载工况下,颗粒级配与密实度通常是主控因素,贡献度可达 40%-50%;在地下水丰富、深埋工况下,地下水作用与上覆压力的影响权重显著提升,成为主控因素;在复合荷载、长期作用工况下,荷载类型与时间效应的贡献度会逐渐超过其他因素,而数值模拟中接触模型的选择与细观参数校准则在理论分析中占据主导地位,其合理性直接决定分析结果的可靠性,不同工况下主控因素的转换本质是细观主导机制的切换,如从颗粒咬合主导转为有效应力主导、从静态力链主导转为动态蠕变主导^[5]。

4.4 颗粒流数值分析方法

颗粒流数值分析方法是研究核心工具,需通过科学的模型构建、参数校准与结果表征保障分析可信度。模型构建需匹配岩土体实际特性,合理设定颗粒参数、模型尺寸与数量,避免尺度效应干扰。参数校准需建立细观参数与宏观力学指标的映射关系,利用理论或试验数据反推合理参数组合。敏感性分析结合单变量控制法与正交试验设计,分别探究单因素独立影响与多因素耦合效应。结果表征兼顾宏观与细观指标,同时需通过调整时间步长、验证颗粒数量等确保模型收敛性与稳定性。

5 结语

综上所述,本文围绕颗粒流与地基承载力影响因素研究,梳理四类关键因素,明确其调控逻辑、耦合效应及主控因素动态规律。验证了颗粒流数值模拟及相关分析方法的有效性,可突破传统局限,关联细观机制与宏观响应。成果完善了相关理论体系,为地基设计优化与稳定性评估提供指导,后续可拓展多场耦合与长期荷载研究。

参考文献

- [1] 刘长宝,朱鹏程,王谷剑,等.基于DEM和CFD法的超高压喷射注浆提高地基承载力的机理研究[J/OL].水利水电技术(中英文),1-13[2025-11-08].
- [2] 王永洪,徐泽强,张明义,等.黏性土中不同直径静压桩贯入特性室内模型试验及颗粒流数值模拟[J].吉林大学学报(地球科学版),2025,55(05):1619-1628.
- [3] 张峰峰,杜鹏刚,姚梦飞,等.基于数值模拟的软土地基水泥搅拌桩加固效果分析[J].建筑技术,2025,56(14):1760-1764.
- [4] 党琳.颗粒流数值模拟复合土钉支护基坑的应用研究[J].山西交通科技,2025,(03):87-92.
- [5] 许腾,李炜,曹俊仁.基于PFC2D的路基填料细观参数影响研究[J].天津建设科技,2025,35(01):30-32+80.