

非饱和土力学特性及其在岩土工程中的应用

罗镇城

广东省岩土工程勘察院有限公司 广东湛江

【摘要】非饱和土作为岩土工程中的重要组成部分，具有复杂的力学特性。其独特的湿度、应力和变形行为直接影响工程的稳定性与安全性。本研究通过对非饱和土力学特性的深入分析，探讨了其在不同工程环境中的表现及应用，尤其是在基础工程、边坡稳定性和地下工程等方面的应用。文中提出了一些理论模型和实验方法，旨在为岩土工程中非饱和土的设计与施工提供指导和参考。通过对土壤水分特性曲线、土壤弹性模量等重要力学参数的研究，阐明了非饱和土在不同环境条件下的力学表现。结合工程实践，提出了非饱和土力学特性在现代岩土工程中的应用前景与挑战。

【关键词】非饱和土；力学特性；岩土工程；应用；土壤水分特性曲线

【收稿日期】2025 年 6 月 11 日

【出刊日期】2025 年 7 月 10 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250305

Mechanical properties of unsaturated soils and their applications in geotechnical engineering

Zhencheng Luo

Guangdong Geotechnical Engineering Survey Institute Co., Ltd., Zhanjiang, Guangdong

【Abstract】As an important component in geotechnical engineering, unsaturated soils exhibit complex mechanical properties. Their unique behaviors in terms of moisture, stress, and deformation directly affect the stability and safety of engineering projects. This study conducts an in-depth analysis of the mechanical properties of unsaturated soils, exploring their performance and applications in different engineering environments, particularly in foundation engineering, slope stability, and underground engineering. Several theoretical models and experimental methods are proposed in this paper, aiming to provide guidance and references for the design and construction involving unsaturated soils in geotechnical engineering. Through research on key mechanical parameters such as soil-water characteristic curves and soil elastic modulus, the mechanical performance of unsaturated soils under different environmental conditions is clarified. Combined with engineering practice, the application prospects and challenges of the mechanical properties of unsaturated soils in modern geotechnical engineering are put forward.

【 Keywords 】Unsaturated soil; Mechanical property; Geotechnical engineering; Application; Soil-water characteristic curve

引言

非饱和土的力学特性一直是岩土工程领域的研究热点。与饱和土相比，非饱和土在自然状态下表现出不同的水力学和力学行为，其含水量的变化对土体的稳定性、变形特性及工程安全具有显著影响。随着现代工程技术的不断发展，非饱和土的研究不仅对土力学理论的完善起到了推动作用，更为岩土工程中的设计与施工提供了新的视角。特别是在边坡稳定性、地下水位变化和基础施工等方面，非饱和土的行为对工程的影响不可忽视。深入研究非饱和土力学特性，并结合具体应用案例，已成为提升岩土工程设计与施工技术的重要

途径。

1 非饱和土的力学特性及其影响因素

非饱和土的力学特性在岩土工程中具有重要意义。非饱和土的含水量通常低于其饱和状态，这意味着土体中的水分分布不均，导致土粒间的相互作用更为复杂。这种不均匀的水分分布会直接影响土体的孔隙水压力、剪切强度、变形行为等关键力学特性。非饱和土的变形特性在湿度变化过程中表现出较大的非线性特征。对于非饱和土，土壤水分特性曲线（SWCC）是评估其力学行为的核心工具，特别是它对渗透性、膨胀性和收缩性的影响。水分的变化影响着土体的孔隙率、渗

透性等特性,进而决定了土体的变形和力学行为。

非饱和土力学特性的影响因素较多,其中水分含量是最为关键的因素之一。随着含水量的变化,土体的力学特性会发生显著变化。较高的含水量通常导致土体的刚度和强度减弱,尤其在非饱和状态下,土体表现出较强的非线性应力-应变关系。土壤类型、粒径分布、土体密实度、土壤结构等因素也在一定程度上影响非饱和土的力学特性。不同类型的土壤,其内部孔隙结构及其水力特性差异,导致了非饱和土的行为在不同条件下的不同反应。比如,粘性土的孔隙结构较为复杂,其力学特性受水分影响的程度较大;而砂土在非饱和状态下的变形与强度变化相对较小。

在不同的环境条件下,非饱和土的力学特性还会受到温度、压力以及外部载荷等因素的影响。在较高的温度下,水分的蒸发加速,导致土体失水,从而使得土体的粘结力降低,进一步影响其力学行为^[1]。而当土体承受较大的外部压力时,孔隙水压力的变化可能导致土体的应力-应变关系发生显著变化。非饱和土的复杂性使其在岩土工程应用中不可忽视,尤其是在地下工程、基础施工及边坡稳定性等领域。

2 非饱和土力学模型的建立与分析方法

建立非饱和土的力学模型是理解其复杂力学特性的基础。通常,非饱和土的力学模型可分为连续介质模型、非线性弹性模型以及应力-应变模型等几类。连续介质模型基于土体的微观结构与宏观力学行为之间的关系,能够较为准确地模拟非饱和土的力学响应。在这种模型中,考虑了土体水分与力学行为之间的耦合效应,以及土粒间的相互作用力。非线性弹性模型则强调了非饱和土在应力作用下呈现的非线性特征,它能够较为真实地描述土体的非线性应力-应变关系和变形特性。

在非饱和土的力学分析中,常常需要考虑土壤水分特性曲线(SWCC)以及相应的土体弹性模量^[2]。这些参数的建立通常依赖于实验室试验和现场试验数据。实验室中的土壤水分特性曲线实验通过改变土壤的水分含量并监测土壤的吸水特性,可以得到水分与土体强度、变形及渗透性等力学特性之间的关系。SWCC可以通过数学公式进行拟合,常见的拟合方法有 Van Genuchten 模型、Brooks-Corey 模型等。通过这些模型,可以更好地理解土体在不同水分条件下的力学响应。

有限元分析方法在非饱和土的力学分析中已成为一种重要工具。通过构建适当的有限元模型,能够综合考虑土体的水分迁移、孔隙水压力变化以及土体在不

同荷载下的变形特性。该方法能够准确地预测非饱和土在各类工况下的力学响应,包括土体的变形、强度变化以及破坏模式。尤其是在面对复杂地质条件时,如地下隧道、基础设施建设等工程项目,有限元分析提供了深入的数值模拟,帮助工程师评估不同施工方案的安全性与可行性,进而优化设计,避免因非饱和土行为不稳定导致的工程风险。

3 非饱和土在岩土工程中的实际应用

非饱和土在岩土工程中的应用非常广泛,尤其是在边坡稳定性、地下水位控制、基础施工等领域。非饱和土的水力与力学特性直接影响着工程项目的设计与施工,特别是对于大规模基础工程,如何合理预测非饱和土的行为是确保工程安全与稳定的关键。非饱和土的湿度变化通常对土体的稳定性产生较大的影响,尤其是在边坡的设计与施工过程中。湿度变化可能导致土体发生膨胀或收缩,进而影响边坡的稳定性,评估非饱和土的力学特性对于边坡稳定性分析至关重要。

地下工程,如隧道与地下室等,其设计和施工也严重依赖非饱和土的力学特性。地下工程通常面临水位变化和土体湿度变化的挑战,这会影响到土体的强度、变形以及渗透特性。在这些工程中,必须考虑非饱和土的力学响应,以确保地下结构的安全。通过对非饱和土水分特性与力学特性之间关系的深入分析,可以更好地预测地下工程中土体的行为,避免出现由于土体不稳定或变形过大而导致的工程质量问题。非饱和土在基础施工中的应用也日益增多。在基础设计时,工程师需要充分了解土体的水分含量、强度、压缩性等特性,以确保基础的稳固性和耐久性^[3-7]。通过合理选用土壤力学模型,可以在基础设计过程中模拟非饱和土的力学行为,为施工提供科学依据。考虑到不同地区土壤的差异性,非饱和土的特性研究还可以为区域性的岩土工程提供宝贵的数据支持。

4 非饱和土力学特性研究的挑战与发展方向

尽管非饱和土的力学特性在近年来得到了许多研究和进展,但实际应用中的挑战仍然存在。非饱和土的力学特性复杂且具有较强的非线性,现有的理论模型和实验方法往往无法准确地全面描述其力学行为。即使在实验室中通过试验数据进行拟合,如何在各种复杂的工况和环境条件下精确预测非饱和土的力学响应依然是一个难题。土壤的水分含量、温度变化和外部荷载对土体力学性质的影响,可能会导致土体在不同环境下呈现出不同的力学表现。这些因素的相互作用使得非饱和土的行为更加难以预测,因此研究人员亟需

进一步发展新的理论模型和实验方法,以实现更加准确和可靠的分析。

在非饱和土的实际工程应用中,多种因素的共同作用使得其力学特性更为复杂。不同类型的土壤水分条件以及外部荷载的变化,都会影响非饱和土的力学行为。土壤的水分含量直接关系到土体的强度和变形特性,而外部荷载的作用则可能引发土体的应力-应变响应发生变化。由于这些因素的综合影响,非饱和土的力学响应往往表现出较大的不确定性^[8]。在复杂的工程环境中,如边坡稳定性、地下水位变化等,如何在这些动态因素的作用下准确预测非饱和土的力学行为,是目前研究中的一个重要难题。需要发展更加细致和全面的理论模型,以描述不同土壤类型和水分条件下非饱和土的复杂行为。

非饱和土在工程中的应用不仅要考虑静态的力学特性,还需要关注其在长期环境变化和动态荷载作用下的力学响应。随着时间的推移,土体的水分和压力会发生变化,影响其强度、变形及稳定性。在地下工程和基础建设中,土体的湿度变化和水位波动可能会引起土体的膨胀、收缩或变形,从而影响工程的稳定性和安全性。未来的研究应将重点放在如何准确评估和预测非饱和土在动态荷载作用下的行为。开发适用于非饱和土的动态模型,能够更好地为工程设计提供依据,特别是在需要考虑长期环境变化的情况下。这不仅能提升工程设计的精度,也能为工程施工提供更为科学的指导。

非饱和土在工程中的广泛应用要求研究者在不同地区和工程条件下制定具体的设计标准和施工方案。考虑到非饱和土的物理特性及其对工程稳定性的影响,在不同的地质环境和工程项目中,土壤的性质可能会有所不同。为了确保工程的安全性和稳定性,需要结合具体的工程需求和环境特点,设计相应的土壤力学模型和参数。这一方向的研究将有助于将理论成果与工程实践更好地结合,推动岩土工程技术的进一步发展。在未来,针对不同地区的土壤特性,制定细化的设计方案,不仅能提高工程质量,还能降低工程风险,提升非饱和土在实际工程中的应用效果。

5 结语

非饱和土作为岩土工程中的重要研究对象,具有

复杂的力学特性和多变的工程表现。尽管已有一定的理论和实践成果,但其在实际应用中仍面临诸多挑战,如非线性特性、环境因素的影响以及动态变化的复杂性。未来的研究应关注如何准确建模和预测非饱和土的力学行为,特别是在不同工况和长期环境变化下。通过深化理论模型、完善实验技术,并结合实际工程需求,可以为非饱和土的广泛应用提供更加科学和可靠的支持,推动岩土工程领域的技术进步与发展。

参考文献

- [1] 林存刚,秦家贵,陶旭光,等.不同饱和状态砂土渗漏流化特性及水力准则[J/OL].岩石力学与工程学报,1-15[2025-07-10].
- [2] 王之鲁,王凯,吕闻起.考虑冻融因素的石灰改良黄土力学特性及边坡稳定性分析[J].科学技术与工程,2025,25(15):6453-6462.
- [3] 毛正君,王木楠,张瑾鸽,等.梯田型黄土滑坡隐患非饱和土抗剪强度特性[J].西安科技大学学报,2025,45(02):328-339.
- [4] 周跃峰,李从安.饱和至风干状态某渠坡欠压实填料的力学特性[C]//中国水利学会.2023 中国水利学术大会论文集(第三分册).长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室,2023:259-267.
- [5] 吴宏伟,周超,张帅,等.状态相关非饱和土力学理论及应用[J].中国科学:技术科学,2023,53(10):1728-1746.
- [6] 胡淑旗.干湿循环条件下不同粉粒含量高吸力非饱和土的力学特性研究[D].河北建筑工程学院,2023.
- [7] 崔宏环,胡淑旗,訾亚丹.粉粒含量对高吸力作用下非饱和土力学行为的影响[J].工业建筑,2023,53(12):182-189+197.
- [8] 杨校辉.非饱和横观各向同性填方地基力学特性与沉降计算研究.甘肃省,兰州理工大学,2023-04-30.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

