

冻土冻融过程研究综述

张 敏^{1*}, 袁克阔^{1,2}, 黄镇斌¹

¹西京学院土木工程学院, 陕西 西安

²陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2025年6月21日; 录用日期: 2025年7月11日; 发布日期: 2025年7月24日

摘 要

冻土作为一种由土颗粒、冰、未冻水和气体组成的特殊四相介质, 其复杂的物理力学性质对寒区工程建设提出了严峻挑战。本文系统综述了冻土工程特性、测试技术、力学行为及水热耦合机制的研究进展, 重点分析了超声波和核磁共振技术在冻土检测中的应用、冻土强度衰变规律、卸载力学特性以及升温作用下的变形特征。研究表明, 冻土区工程病害主要表现为冻胀和融沉, 其机理与冻土的多相结构和水热过程密切相关。通过SHAW模型等数值工具, 可有效模拟冻土对气候变化的响应。未来研究需进一步揭示冻土-结构相互作用机理, 为寒区基础设施的长期稳定性提供理论支撑。

关键词

冻土工程, 冻融特性, 水热耦合, 寒区基础设施

A Review of Research on Freeze-Thaw Process of Frozen Soil

Min Zhang^{1*}, Kekuo Yuan^{1,2}, Zhenbin Huang¹

¹Department of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

²Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xi'an Shaanxi

Received: Jun. 21st, 2025; accepted: Jul. 11th, 2025; published: Jul. 24th, 2025

Abstract

Frozen soil, as a special four phase medium composed of soil particles, ice, unfrozen water, and gas, presents severe challenges to engineering construction in cold regions due to its complex physical and mechanical properties. This article systematically reviews the research progress on the engineering characteristics, testing techniques, mechanical behavior, and hydrothermal coupling mechanism

*通讯作者。

文章引用: 张敏, 袁克阔, 黄镇斌. 冻土冻融过程研究综述[J]. 土木工程, 2025, 14(7): 1715-1722.

DOI: 10.12677/hjce.2025.147185

of frozen soil. The focus is on analyzing the application of ultrasound and nuclear magnetic resonance technology in frozen soil detection, the strength decay law of frozen soil, the unloading mechanical properties, and the deformation characteristics under temperature rise. Research has shown that engineering diseases in permafrost regions mainly manifest as frost heave and thaw settlement, and their mechanisms are closely related to the multiphase structure and hydrothermal processes of permafrost. The SHAW model and other numerical tools can effectively simulate the response of frozen soil to climate change. Future research needs to further reveal the mechanism of permafrost structure interaction, providing theoretical support for the long-term stability of infrastructure in cold regions.

Keywords

Frozen Soil Engineering, Freeze-Thaw Characteristics, Water Heat Coupling, Infrastructure in Cold Regions

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

冻土是由岩土颗粒、冰晶体、未冻水和气体组成的四相复合介质(soil-ice-water-air system)。当环境温度低于冰点时,孔隙水发生相变形成冰透镜体,导致土体结构发生显著改变。我国是世界上冻土分布最广的国家之一,多年冻土和季节冻土分别覆盖国土面积的 21.5%和 53.5%,主要分布在青藏高原、东北地区 and 西部高山地带。

随着国家经济建设的持续推进以及“一带一路”战略的深入实施,中西部寒冷地区的基础设施建设日益受到关注。寒冷地区工程建设具有高度复杂性,施工过程中普遍面临冻土带来的技术难题,冻土与普通土壤在物理特性及变化机理方面存在明显区别。具有以下特征:可见冰体含量丰富、颗粒级配范围宽广、孔隙率较高、结构密实度不足,其热融过程因粗细颗粒混合而呈现高度复杂性,冰水相变过程剧烈,融化后表现出较差的持水性能及特殊的融土状态。基于这些特性,多年冻土的特殊工程性质已成为我国中西部寒冷地区高速铁路、公路、机场及电力设施等重大工程建设中的关键性技术难题。表 1 列出了我国主要冻土工程的相关数据统计。

Table 1. Statistics of major frozen soil projects in China
表 1. 我国冻土主要工程统计

工程	冻土情况
青藏直流输电工程	该土层由含角砾的粗颗粒砂质冻土构成,其最大冻结与融化深度可达 2.8 米
中俄原油管道工程	在多年冻土分布区域,地层主要由砾石、碎石等粗粒径冻结土体构成
川藏铁路工程	在季节性冻土带,地层主要由粗颗粒土体构成,包括圆砾、角砾、卵石及碎石等类型

工程实践证实,多年冻土区域最易发生的工程病害主要为冻胀变形和热融沉降两类[1]-[3]。其中,粗颗粒冻土区的融沉现象表现尤为显著,具体表现为:在周期性冻融作用下,坡体结构失稳引发滑塌及剥落(图 1(a));受夏季异常高温、工程活动干扰等因素影响,冻土活跃层发生滑移,导致路基两侧土体产生热融滑塌(图 1(b));运营期间,冻土区桥梁桩基因长期热融作用引发墩柱偏移,进而造成梁体倾斜甚至脱

落(图 1(c))；冻土地基因融沉作用产生不均匀沉降等工程病害(图 1(d))。



Figure 1. Engineering disasters in frozen soil area

图 1. 冻土地区工程灾害

在多年冻土工程实践中，最为突出且广泛存在的技术难题是冻土层暴露后因温度上升导致的热力学弱化现象，进而引发显著沉降变形及抗剪强度劣化问题。目前针对冻土的科学探索仍处于探索阶段，尤其是多年冻土的温度敏感性劣化机理、热力学弱化特性等基础性研究亟待深化，现有理论体系尚不完善，这严重限制了冻土区重大工程建设和资源开发利用的进程。系统研究冻土的热融作用机理，对于准确掌握工程条件下冻土变形特性和强度演变规律具有重要的工程指导价值和理论意义。

2. 冻土融化过程测试试验研究现状

超声波检测技术作为研究冻土物理力学特性的重要手段，因其经济性、操作便捷性、检测高效性及非破坏性等优势，已在岩土工程检测领域获得广泛应用[8]。自上世纪 70 年代以来，众多学者通过系统研究验证了该技术在冻土工程应用中的可靠性，主要研究成果体现在以下几个方面：

国内外学者采用超声波技术对各类冻土的物理力学特性进行了系统研究。Wang 等[9]通过测定冻结黏土、黄土及砂土在不同负温条件下的纵横波速，揭示了波速及动态力学参数与土质类型和冻结温度的关联性，发现三类冻土的波速和动态模量均随温度升高而降低。

黄星等[10]基于冻结粉质黏土的超声波测试数据，阐明了温度和干密度对波速的影响规律。研究显示，在 -1°C 至 -7°C 温区内波速变化显著；当含水率恒定时，波速与干密度呈线性正相关；同时证实了波速与

强度指标间的强相关性,为利用超声波预测冻土强度提供了依据。凌贤长[11]的后续研究表明,哈尔滨粉质黏土的纵横波速与负温呈二次函数关系,而动弹性参数与温度则呈现非线性特征。

马芹永团队[12]采用 UVM-2 型声波仪观测到冻结粘土波速在 0℃至-4℃区间呈线性增长,当温度低于-17℃后变化趋于平缓。Christ 等[13] [14]的研究进一步揭示了波速变化与冰水相变的关联机制,发现纵波波速与未冻水含量密切相关,而横波波速主要受控于含冰量和土体结构。Nakano 等[15] [16]的试验数据表明,饱和冻土的波速随温度升高而递减,且横波对温度的敏感性低于纵波。

在核磁共振(NMR)技术应用于冻土未冻水检测的研究历程中,Tice 等学者[17]率先实现了技术突破,成功将核磁共振方法引入冻土未冻水检测这一新兴研究领域。随后,Kleinberg 研究团队[18]通过系统的核磁共振实验观测,首次在实验数据上证实了冻土沉积物中未冻水的持续存在性,其测量结果显示即使在-14℃的低温条件下,冻土体系中仍可检测到显著的未冻水信号。针对典型冻土介质的研究方面,Wen 等[19]以青藏高原粉质黏土为研究对象,通过精确的核磁共振测量发现,当环境温度降低至-15℃时,土样内部依然保持着约 3%的未冻水含量。在理论模型构建方面,Kong 等[20]创新性地提出了基于分段函数的土体冻结特征曲线数学模型,该模型为定量预测不同温度条件下冻土未冻水含量提供了新的理论工具和方法支撑。这些研究共同推动了冻土未冻水检测技术的发展,为冻土工程特性研究奠定了重要的实验和理论基础。

国内学者韩大伟等[21]采用 NMR 分层扫描技术,揭示了冻融循环过程中水分重分布规律。杜洋团队[22]的研究则表明,冻土-结构界面在-5℃时出现未冻水含量突变,且小孔隙冰晶优先融化。这些研究成果为深入理解冻土热力学行为提供了重要的实验依据。

3. 冻土强度衰变特性研究现状

冻土作为一种典型的多相复合介质,其强度特性研究在寒区工程实践中具有关键性的指导价值。自 20 世纪初苏联学者 Tsytovich [23]开创冻土力学研究以来,国内外科研团队相继开展了系统性探索,包括 Parameswaran [24]、Ladanyi [25]等国际专家[26],以及马巍、吴紫汪[27] [28]等国内学者,共同推动了冻土强度理论的发展。

在试验研究方面,张晋勋团队[29]通过三轴试验揭示了冻结砂卵石的力学响应特征:当环境温度低于-5℃且围压超过 3 MPa 时,材料呈现塑性破坏模式,其黏聚力和内摩擦角与温度呈负相关线性关系。王海航等[30]的研究证实,人工冻结砾石土的剪切强度特性符合 Mohr-Coulomb 准则,且强度参数随温度降低而单调递增。

针对特殊工况,朱磊等[31]发现季节性粗颗粒冻土在-15℃时强度趋于稳定,且粗粒含量越高,强度增长效应越弱。Chen 等[32]的研究则表明,非饱和粉质黏土在负温条件下表现出显著的应变硬化特征,其强度演化受总黏聚力主导。Niu 团队[33]通过控制初始含水量的试验,揭示了冻结粉质粘土力学行为的三阶段转变规律。

赵军霖[34]基于无侧限压缩试验,建立了冻结粗粒土强度与温度的定量关系模型。Liu 等[35]则通过三轴试验系统分析了颗粒级配对冻结混合土力学行为的影响,提出了基于应变演化的三阶段本构模型。这些研究成果为寒区工程设计与施工提供了重要的理论支撑和技术依据。

4. 冻土卸载力学特性研究现状

Li 等[36]通过创新的固结-径向卸荷三轴剪切试验,模拟了冻结凿井工程中的实际工况。研究发现,在-10℃条件下,当偏应力由 0.5 MPa 增至 1.0 MPa 时,冻土蠕变速率增幅超过 50%。该研究首次建立了双准则强度模型:高围压状态符合修正的 Zienkiewicz-Pande 抛物线屈服准则,低围压状态则遵循 Mohr-

Coulomb 强度准则, 模型拟合度达 0.95 以上。

汪科迪[37]基于剑桥模型框架, 通过三轴加卸载试验确定了重塑粉土的关键参数($\lambda=0.3$, $K=0.0126$, $M=1.16$)。研究揭示了卸载后土体强度增强效应, 其中卸载后摩擦角显著增大。Guryanov 团队[38]在 -5°C 条件下的对比试验表明, 卸荷状态下的抗剪强度高于加荷状态, 但内摩擦角呈现相反规律。

马巍等学者[39]通过系统的实验研究, 深入探讨了不同应力路径对冻土力学特性的影响规律。研究结果表明, 冻土在加载与卸载过程中均表现出典型的双曲线型应力-应变关系特征, 且通过对比分析发现, 加载工况下的抗剪强度参数(如黏聚力和内摩擦角)普遍高于卸载工况下的相应参数。这一发现为冻土工程中的应力路径设计提供了重要的理论依据。

在冻土时效特性研究方面, 王衍森等[40]设计并开展了长时固结-冻结-卸围压复合试验, 系统考察了人工冻结黏土的力学性能随时间演化的规律。试验数据表明, 冻土强度在固结后的 7 天内呈现显著增长趋势, 这一阶段主要受固结时间的影响; 然而, 当固结时间延长至 28 天后, 冻土强度增长逐渐趋于稳定, 表明其力学性能基本达到长期稳定状态。该研究为人工冻结法在工程实践中的时效控制提供了关键的科学依据。

董西好团队[41]采用 GCTS 三轴系统研究了冻结砂岩的卸荷特性, 发现材料呈现明显的弹-脆性特征, 其径向膨胀变形量可达轴向变形的 2 倍。这些研究为寒区地下工程的设计与施工提供了重要的理论基础。

5. 冻土温升作用下变形规律研究现状

Zhao 等[42]采用数值模拟方法研究了冻土层油管热融过程中的水热耦合效应, 揭示了永冻地层温升灾变的热力学机制, 发现水分迁移导致的相变过程会显著改变温度场分布特征。

温董瑶团队[43]通过动态三轴试验系统研究了温升条件下冻土路基材料的力学响应, 证实相同初始负温下, 温度梯度升高会导致强度显著劣化, 并观察到明显的应变软化现象。

刘亚等[44]基于控制变量的三轴试验, 阐明了温度梯度对冻土破坏模式的影响规律: 随着温升幅度的增大, 材料破坏模式从脆性向塑性转变, 强度折减过程呈现四阶段演化特征。

Li 等[45]创新性地对比研究了含不同冰形态(碎冰/块冰)冰碛土的力学行为: 块冰试样表现出更高的峰值强度和黏聚力, 其应力-应变曲线呈现典型应变软化特征; 热-力耦合试验进一步揭示了温升导致的强度骤降现象。

赵晓东等[46]的研究表明, 温度梯度与围压的交互作用会显著影响冻结黏土的破坏机制: 温升促使体积分形模式由收缩转为膨胀, 而围压变化会导致强度呈现先增后减的非单调变化规律。这些发现为寒区工程的热稳定性评估提供了重要依据。

6. 冻土水热模拟研究现状

自世界气候研究计划(WCRP)实施以来, 土壤-植物-大气连续体(SPAC)系统中的水热传输机制研究已成为环境科学领域的重要研究方向。水热耦合理论的奠基性工作可追溯至 1957 年, Philip 首次建立了综合考虑温度场与水分场相互作用的耦合控制方程, 开创性地揭示了温度梯度对土壤水分迁移的驱动机制, 为后续研究奠定了理论基础。

冻融过程涉及复杂的热力学-水力学-化学耦合作用, 包括相变潜热交换、溶质迁移及孔隙结构演变等多物理场过程。由于野外原位监测存在周期长、成本高等技术限制, 长期连续的水热观测数据匮乏成为制约季节性冻土气候响应研究的关键因素。在此背景下, 数值模拟方法因其经济性和可重复性优势, 成为评估冻土系统对气候变化响应的有效手段。

Fu 等[47]在呼伦贝尔河灌区的模拟显示, 2000~2017 年间冻融期土壤含水量呈显著增加趋势(增幅达 12%), 而温度场保持相对稳定; Lu 等[48]在河套灌区的验证试验证实, 模型对冻融锋面推进速率的预测误差小于 15%; Chen 团队[49]的系统评估表明, 模型温度模拟的均方根误差(RMSE)为 0.101°C ~ 2.139°C , 体积含水率误差控制在 $0.003\sim 0.081\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 范围内; 薛伟等[50]在青藏高原的跨气候带研究表明, 模型对不同海拔站点(玛曲、那曲、狮泉河)土壤温湿剖面的模拟决定系数 R^2 均超过 0.85; 王子龙[51]在松嫩平原的积雪-冻土相互作用研究中发现, 模型对 6 个土层(0~100 cm)温度模拟的平均绝对误差小于 2°C 。

7. 结论

本文从冻土融化过程测试试验研究、冻土强度衰变特性研究、冻土卸载力学特性研究、冻土温升作用下变形规律研究及冻土水热模拟研究五个方面进行了综述分析, 得到以下结论:

(1) 超声波和核磁共振(NMR)技术是研究冻土物理力学性质的重要手段。超声波技术通过纵横波速测定, 揭示了冻土动态模量与温度、土质类型的关联性, 并验证了波速与强度的相关性。NMR 技术则精准检测了未冻水含量及其分布规律, 证实即使 -15°C 时冻土仍存在未冻水。强度特性方面, 三轴试验表明冻土强度受温度、围压和含水量显著影响, 如冻结砂卵石在 -5°C 以下呈现塑性破坏, 而人工冻结砾石土符合 Mohr-Coulomb 准则。这些成果为工程设计提供了关键参数。

(2) 冻土在工程卸荷条件下表现出独特力学行为。卸载后土体强度增强效应(如摩擦角增大)被多学者验证。温升作用下, 冻土破坏模式从脆性向塑性转变, 强度折减呈现四阶段特征。热-力耦合试验表明, 块冰冻土比碎冰冻土具有更高峰值强度, 但温升会导致强度骤降。这些发现对寒区地下工程稳定性评估至关重要。

(3) SHAW 模型是模拟冻土水热过程的核心工具, 能准确预测土壤温湿度变化(误差 $< 2^{\circ}\text{C}$)。冻融过程的水分迁移受气候显著影响: 青藏高原活动层含水量随升温下降 25%, 而黑土区融冻期上层水分增加 15%~25%, 成为干旱区作物重要水源。浅层水分与降水呈指数关系, 深层水分则受冻融过程主导。区域异质性明显, 如西北沙漠水分迁移量受前期降水制约。这些研究为气候变化下冻土区水资源管理提供了科学依据。

(4) 冻土区工程病害主要表现为冻胀变形和热融沉降, 如路基滑塌、桥梁墩柱倾斜等。当前研究瓶颈包括冻土-结构相互作用机理、长期冻融循环累积变形预测等。未来需结合多尺度模拟(微观相变至宏观水文)和新兴检测技术(如原位 CT 扫描), 深化冻土热力学-水力学-化学耦合机制研究, 以应对气候变化背景下寒区工程可持续发展的挑战。

参考文献

- [1] Wu, Q., Liu, Y., Zhang, J., et al. (2002) A Review of Recent Frozen Soil Engineering in Permafrost Regions along Qinghai-Tibet Highway, China. *Permafrost and Periglacial Processes*, **13**, 199-205. <https://doi.org/10.1002/ppp.420>
- [2] Zhao, Y., Yu, B., Yu, G. and Li, W. (2014) Study on the Water-Heat Coupled Phenomena in Thawing Frozen Soil around a Buried Oil Pipeline. *Applied Thermal Engineering*, **73**, 1477-1488. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.06.017>
- [3] 马巍, 王大雁. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 39.
- [4] 艾秋池. 川藏铁路季节性粗颗粒冻土边坡长期演化特性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [5] 符进, 朱东鹏, 张会建. 共玉高速公路多年冻土特殊路基基底处理方法研究[J]. 公路, 2016, 61(1): 36-42.
- [6] 陈建兵, 熊治华, 李军, 等. 青藏高原冻土区桥梁使用状况调研及对新建工程的启示[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(2): 255-258.
- [7] 黄元生, 李鹏, 严福章, 等. 青藏直流输电线路冻土长期抗剪强度预测及影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2014, 22(3): 507-514.

- [8] 盛煜, 彭万巍, 福田正己. 超声波技术在冻土物性测试中的应用探讨[J]. 冰川冻土, 2001(4): 432-435.
- [9] Wang, D., Zhu, Y., Ma, W. and Niu, Y. (2006) Application of Ultrasonic Technology for Physical-Mechanical Properties of Frozen Soils. *Cold Regions Science and Technology*, **44**, 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2005.06.003>
- [10] 黄星, 李东庆, 明锋, 邴慧, 彭万巍. 冻土的单轴抗压、抗拉强度特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1346-1352.
- [11] 凌贤长, 徐学燕, 徐春华, 等. 冻结哈尔滨粉质黏土超声波速测定试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002(4): 456-459.
- [12] 马芹永, 彭万巍, 朱元林. 冻结粘土纵、横波速与温度的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 290-293.
- [13] Christ, M. and Park, J. (2009) Ultrasonic Technique as Tool for Determining Physical and Mechanical Properties of Frozen Soils. *Cold Regions Science and Technology*, **58**, 136-142. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.05.008>
- [14] Christ, M., Kim, Y. and Park, J. (2009) The Influence of Temperature and Cycles on Acoustic and Mechanical Properties of Frozen Soils. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **13**, 153-159. <https://doi.org/10.1007/s12205-009-0153-1>
- [15] Nakano, Y., Martin, R.J. and Smith, M. (1972) Ultrasonic Velocities of the Dilatational and Shear Waves in Frozen Soils. *Water Resources Research*, **8**, 1024-1030. <https://doi.org/10.1029/wr008i004p01024>
- [16] Nakano, Y. and Arnold, R. (1973) Acoustic Properties of Frozen Ottawa Sand. *Water Resources Research*, **9**, 178-184. <https://doi.org/10.1029/wr009i001p00178>
- [17] Tice, A.R., Anderson, D.M. and Sterrett, K.F. (1981) Unfrozen Water Contents of Submarine Permafrost Determined by Nuclear Magnetic Resonance. *Engineering Geology*, **18**, 135-146. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(81\)90053-3](https://doi.org/10.1016/0013-7952(81)90053-3)
- [18] Kleinberg, R.L. and Griffin, D.D. (2005) NMR Measurements of Permafrost: Unfrozen Water Assay, Pore-Scale Distribution of Ice, and Hydraulic Permeability of Sediments. *Cold Regions Science and Technology*, **42**, 63-77. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2004.12.002>
- [19] Wen, Z., Ma, W., Feng, W., Deng, Y., Wang, D., Fan, Z., et al. (2011) Experimental Study on Unfrozen Water Content and Soil Matric Potential of Qinghai-Tibetan Silty Clay. *Environmental Earth Sciences*, **66**, 1467-1476. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1386-0>
- [20] Kong, L., Wang, Y., Sun, W. and Qi, J. (2020) Influence of Plasticity on Unfrozen Water Content of Frozen Soils as Determined by Nuclear Magnetic Resonance. *Cold Regions Science and Technology*, **172**, Article ID: 102993. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.102993>
- [21] 韩大伟, 杨成松, 张莲海, 等. 基于分层核磁测试新技术的未冻水变化规律研究——以砂土冻融过程为例[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2): 667-683.
- [22] 杜洋, 唐丽云, 杨柳君, 等. 基于核磁共振下的冻土-结构正融过程界面特性研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(12): 2316-2322.
- [23] Tsytovich, N.A., Swinow, E. and Tschebotarioff, G. (1975) The Mechanics of Frozen Ground. Scripta Book Co.
- [24] Parameswaran, V.R. and Jones, S.J. (1981) Triaxial Testing of Frozen Sand. *Journal of Glaciology*, **27**, 147-155. <https://doi.org/10.3189/s0022143000011308>
- [25] Ladanyi, B. and Benyamina, M.B. (1995) Triaxial Relaxation Testing of a Frozen Sand. *Canadian Geotechnical Journal*, **32**, 496-511. <https://doi.org/10.1139/t95-052>
- [26] Sayles, F.H. (1966) Low Temperature Soil Mechanics. USA CRREL Internal Report.
- [27] 马巍, 吴紫汪, 盛煜. 围压对冻土强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1995(5): 7-11.
- [28] 马巍, 吴紫汪, 张长庆. 冻土的强度与屈服准则[J]. 冰川冻土, 1993(1): 129-133.
- [29] 张晋勋, 杨昊, 单仁亮, 等. 冻结饱水砂卵石三轴压缩强度试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 3993-4000+4016.
- [30] 王海航, 王鸥, 吴泽, 等. 人工冻结砾石土三轴剪切强度试验研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(2): 58-62.
- [31] 朱磊, 谢强, 任新红, 等. 川藏线季节性粗颗粒冻土抗剪强度特性试验研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(3): 107-111.
- [32] Chen, H., Guo, H., Yuan, X., Chen, Y. and Sun, C. (2020) Effect of Temperature on the Strength Characteristics of Unsaturated Silty Clay in Seasonal Frozen Region. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **24**, 2610-2620. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-1974-1>
- [33] Niu, Y., Wang, X., Liao, M. and Chang, D. (2022) Strength Criterion for Frozen Silty Clay Considering the Effect of Initial Water Content. *Cold Regions Science and Technology*, **196**, Article ID: 103521. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103521>
- [34] 赵军霖. 冻结粗粒土的强度特性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- [35] Liu, X., Liu, E., Zhang, D., Zhang, G., Yin, X. and Song, B. (2019) Study on Effect of Coarse-Grained Content on the Mechanical Properties of Frozen Mixed Soils. *Cold Regions Science and Technology*, **158**, 237-251.

- <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.09.001>
- [36] Li, D., Yang, X. and Chen, J. (2017) A Study of Triaxial Creep Test and Yield Criterion of Artificial Frozen Soil under Unloading Stress Paths. *Cold Regions Science and Technology*, **141**, 163-170.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.06.009>
- [37] 汪科迪. 杭州粉土固结和卸载强度特性的三轴试验研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江科技学院, 2019.
- [38] I.E. Guryanov, 马巍. 加荷与卸荷过程中的冻土强度特性[J]. 冰川冻土, 1996(1): 55-59.
- [39] 马巍, 常小晓. 加载卸载对人工冻结土强度与变形的影响[J]. 岩土工程学报, 2001(5): 563-566.
- [40] 王衍森, 贾锦波, 冷阳光. 长时高压 K0 固结再冻结黏土的卸围压强度特性[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1636-1644.
- [41] 董西好, 杨更社, 田俊峰, 等. 侧向卸荷条件下冻结砂岩变形特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2518-2526.
- [42] Zhao, Y., Yu, B., Yu, G. and Li, W. (2014) Study on the Water-Heat Coupled Phenomena in Thawing Frozen Soil around a Buried Oil Pipeline. *Applied Thermal Engineering*, **73**, 1477-1488.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.06.017>
- [43] 温董瑶, 蒋宁山, 张吾渝, 等. 温升和动荷载作用下寒区冻土动应力-动应变响应规律[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(4): 29-34+40.
- [44] 刘亚, 蒋宁山, 张吾渝, 等. 环境负温与升温梯度作用下冻土强度特性试验研究[J]. 公路, 2018, 63(4): 40-46.
- [45] Li, C., Wang, R., Gu, D., Wang, J., Chen, X., Zhou, J., *et al.* (2022) Temperature and Ice Form Effects on Mechanical Behaviors of Ice-Richmoraine Soil of Tianmo Valley Nearby the Sichuan-Tibet Railway. *Engineering Geology*, **305**, Article ID: 106713. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106713>
- [46] 赵晓东, 周国庆, 陈国舟. 温度梯度冻结黏土破坏形态及抗压强度分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1854-1860.
- [47] Fu, C., Xue, J., Chen, J., Cui, L. and Wang, H. (2024) Evaluating Spatial and Temporal Variations of Soil Water, Heat, and Salt under Autumn Irrigation in the Hetao Irrigation District Based on Distributed SHAW Model. *Agricultural Water Management*, **293**, Article ID: 108707. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108707>
- [48] Lu, X., Li, R., Shi, H., Liang, J., Miao, Q. and Fan, L. (2019) Successive Simulations of Soil Water-Heat-Salt Transport in One Whole Year of Agriculture after Different Mulching Treatments and Autumn Irrigation. *Geoderma*, **344**, 99-107.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.006>
- [49] Chen, J., Gao, X., Zheng, X., Miao, C., Zhang, Y., Du, Q., *et al.* (2019) Simulation of Soil Freezing and Thawing for Different Groundwater Table Depths. *Vadose Zone Journal*, **18**, 1-14. <https://doi.org/10.2136/vzj2018.08.0157>
- [50] 薛伟, 周毓彦, 刘建伟, 等. 基于 SHAW 模型的青藏高原季节冻土区土壤温湿度模拟与评估[J]. 冰川冻土, 2023, 45(1): 54-66.
- [51] 王子龙, 孙秋雨, 李航, 等. SHAW 模型模拟积雪覆盖下土壤热过程的不确定性分析[J]. 土壤, 2023, 55(2): 419-425.