

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.05.017

寒区交通工程冻土问题的研究要点与综述

武文娟

(中国兵器工业北方勘察设计研究院有限公司, 河北 石家庄 050011)

摘要: 寒区交通工程建设与维护的特殊性在于冻土稳定性问题。冻土是一种对环境极为敏感的土体介质,其在大气环境、地下水、冻融循环及行车荷载等环境荷载作用下的变化是诱发寒区交通工程病害的主要原因。因此,准确地认识其独特的热学性质、物理力学性质及动力特性是寒区公路工程建设首先要考虑的问题,也是研发与优化寒区公路工程新技术、新结构、新方法的前提和基础。结合国内交通工程中的冻土特征与实践结果,基于与冻土相关的研究内容与进展,论述了近年来在冻土及路基改良土的热学性质、物理性质及静、动力特性等方面取得的研究成果。

关键词: 交通工程;冻土;热学性质;物理性质;静力学;动力学

中图分类号: P642.14

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)05—0092—07

Research Progress and Summary of Frozen Soil Problems of Traffic Engineering in Cold Regions

WU Wenjuan

(China Ordnance Industry North Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050011, China)

Abstract: The particularity of traffic engineering construction and maintenance in cold regions lies in the stability of frozen soil engineering. Frozen soil is very sensitive to the environment, and it changes under the action of atmospheric environment, groundwater, freeze-thaw cycle and traffic load, which are the main causes of traffic engineering diseases in cold regions. Therefore, the accurate understanding of its unique thermal properties, physical and mechanical properties and dynamic characteristics is important in highway engineering construction in cold regions, and it is also the premise in the development and optimization of the new technologies, new structures and new methods of traffic engineering in cold regions. This paper also discussed the research results of thermal properties, physical properties, static and dynamic properties of frozen soil and subgrade improved soil fillings, combined with the research content and progress related to frozen soil in domestic traffic engineering in recent years.

Keywords: traffic engineering; frozen soil; thermal properties; physical properties; static mechanical properties; dynamic mechanical properties

中国的冻土分布面积约占领土面积的75%^[1]。随着寒区高等级公路建设和改建的大规模开展,对冻土研究的范围和深度也提出了更高的要求。研究多年冻土、季节冻土及各种路基改良土在低温、冻融作用及外荷载等条件下的热学性质、物理力学特性,是分析冻土及与之相关的构筑物在水、热、力等因素耦合作用下变形和稳定性的前提,也是开发和改进

公路修筑新技术的基础,对于寒区公路工程各类病害机理研究及防护设计具有十分重要的指导意义。

为系统梳理近年来交通工程冻土方面的研究进展,本文总结了冻土在热学、物理性质及静、动力特性等方面常用的指标及其意义,在此基础上对上述指标的一般规律和近年来取得的研究成果进行了分析,以期对相关研究提供参考。

收稿日期:2021-07-11

修稿日期:2021-08-08

作者简介:武文娟(1983—),女,硕士,高级工程师,主要从事勘察、岩土与地基基础工程设计、施工与管理工

E-mail:780516147@qq.com

1 冻土

冻土是指温度在 0°C 或 0°C 以下,并含有冰的各种岩石和土壤。冻土对温度极为敏感,且具有流变性,长期强度远低于瞬时强度。冻土研究主要包括已冻土的蠕变研究和土的冻融研究两方面,其中冻融作用是寒区工程中首先要关注的问题^[2]。持续3a或3a以上的冻土称为多年冻土。目前,一般将 -1.5°C 作为高温冻土和低温冻土的临界温度^[3]。由于工程活动及大气环境的影响,青海省公路沿线的不稳定型和过渡型多年冻土将大部分演变为“高温冻土”。例如,青藏公路穿越的多年冻土中高温冻土段长416 km,占了全部多年冻土长度的76%^[4]。高温冻土的温度敏感性强,容易出现冰-水剧烈相变,其物理力学性质具有较强的易变性和离散性,因此应侧重于高温冻土的研究。同时,低温、冻融作用、围压等环境荷载作用会改变土体的结构特征,不仅导致土体发生冻胀、融沉,也会引起土体物理力学性质的变化^[5]。

2 热学性质

冻土冻融变化过程属于传热学中具有相变热传导的范畴。温度场的数值计算是冻土工程热稳定性分析的主要手段之一,其计算精度主要受到导热系数、比热容等热学指标的影响^[6]。

导热系数与土体的结构、密度、含水率、温度等因素有关,是上述变量的函数。导热系数测定方法包括稳态法和非稳态法。稳态法包括平板法、护板法、热流计法等;非稳态法包括热线法、热盘法、激光法等^[7]。土的比热具有按成分质量加权平均的性质。导温系数是表示土体在临点温度变化时改变自身温度能力的指标,由比热和导热系数可间接求得。导温系数决定了温度场变化速率,用于研究不稳定热传导过程^[8]。

含盐量及成分是影响冻土的水、冰平衡及结构、构造的重要因素。青海省盐碱土分布广泛,且一般与冻土区重合,因此盐碱土也是冻土研究的重要内容。在同一负温下各种土质的比热和导热系数均随含盐量的增加而增大^[9]。

此外,由于冻土的变异性和系统的不确定性等原因,参数取值有较强的随机性和离散性。因此,通过合理的试验手段和概率统计方法才能得到可靠的热学参数。实验表明,正态分布对冻土热学参数分布规律的拟合效果较好^[10]。

3 物理性质

从物理特征看,冻土是一种多相体系,包括固相骨架颗粒、冰相孔隙冰、液相未冻水和气相。作为非连续介质,冻土具有结构性强的特点,细观结构、含水率等物理性质均会影响其变形规律、强度等宏观力学性质^[11]。低温、冻融作用等因素对冻土物理、水理性性质影响的研究集中在渗透性、孔隙比、干重度及土中水的迁移等方面^[12]。

3.1 未冻水含量

未冻水是指在负温条件下冻土中没有被冻结的液态水,成因包括毛细作用、表面效应、吸附作用和双电层结构等。未冻水是评价冻土水分迁移特性的重要指标。即使在较低温度下,冻土中仍然存在一部分未冻水,并随温度和外力的条件而动态改变,因此冻土的力学性质远比融土复杂^[13]。未冻水含量的检测方法包括量热法与测温法,前者根据能量守恒原理进行计算公式的推导,试验原理准确,并经过大量试验验证,测试精度较高;而后者则缺乏理论基础,存在概念混淆、不准确等缺点^[14]。

3.2 干密度

在补水的开放系统下,冻融循环是土体密度场、水分场、应力场重新分布的过程。冻融循环对土体密度有双重效应,干重度较大的土体会变得松散,密度降低;而干重度较小的土体会变得密实,密度增大^[15]。实验表明,冻融循环后土体干密度会趋于某一定值,且这一定值与初始干重度无关,而与土体种类有关。

3.3 孔隙比

孔隙比与干密度相对应,随着冻融循环次数的增加,密实土体和疏松土体的孔隙比分别呈逐渐增大和减小的相反趋势。可见,由于冻融循环对土体组成、结构及构造的影响,土体的干密度、孔隙比及渗透性等物理性质会逐渐趋于稳定^[16]。对于含盐冻土,土颗粒的位置和间距在土体冻融过程中水分和盐分的迁移和相变作用下会发生变化,破坏土体内部原有的平衡。融化时冻土表面温度高于中心温度,温度梯度会诱使水分和盐分向土体的中心方向迁移。冻结时水分迁移方向则与融化时相反,但融化时的盐颗粒仍带有结晶水,因此含盐冻土中的水分会随着冻融循环次数的增加逐渐减少^[17]。

3.4 渗透性

土的渗透性与孔隙比密切相关。初始含水率越高,冻融循环对土骨架的破坏程度越显著,孔隙比和

渗透系数的增幅越大^[18]。实验表明,松散土样的孔隙比和渗透性在反复冻融作用下会轻微减小;而密实土样的孔隙比与渗透性则有所增大^[19]。

4 静力学性质

冻土的力学性能是确保冻土地基上工程构筑物稳定性的基础,主要研究内容包括冻胀、融沉和冻融循环对土体力学性质的影响,以及冻土的强度、应力-应变关系和动力特性等^[20]。

4.1 强度特征

土体强度问题是进行地基稳定性分析与计算的关键,冻土强度特性也是冻土力学领域研究最为深入的课题之一。土体强度影响因素包括土粒矿物成分、土颗粒形状与级配、密度、含水率、结构以及孔隙水压力等。在寒区工程建设中则主要考虑冻融作用、冻结温度及围压的影响,冻融作用可分为冻胀、融沉及冻融循环的影响。

4.1.1 静强度

围压和温度是冻土强度的两个主要影响因素^[21]。大量试验表明,冻土无侧限抗压强度试验中的应力-应变曲线多表现为应变软化型。冻土强度随干重度的增加而增大。在含水率一定的封闭条件下,冻融循环对土样孔隙比和骨架的影响会逐渐降低,导致静强度随冻融次数的增加而趋于稳定^[22]。

4.1.2 抗剪强度

为了应用方便,冻土抗剪强度使用最多的还是仅具有黏聚力和内摩擦角两个参数的莫尔-库仑破坏准则^[23]。实验表明,随着冻融循环次数的增加,冻土黏聚力通常出现降低的趋势,表明土颗粒间距每经历一次冻融循环后将随之增大。经历多次冻融作用后,黏聚力会逐渐稳定。冻融循环和冻结温度对内摩擦角的影响则呈波动状态,无明确规律可循。冻土的快剪强度与温度一般呈正相关的关系。剪切速率也主要影响黏聚力分量,对内摩擦角的影响不大,一般等于或者略小于对应融土的内摩擦角。

上述冻土强度的研究主要还是沿用融土的强度理论,研究对象侧重细颗粒土。对于高应力下冻土压融现象的描述还不够科学与准确。此外,随着高速铁路、高速公路路基填料和填筑标准的提高,对于粗颗粒冻土强度特性的研究也有待深入。

4.2 变形特征

4.2.1 弹性模量

通常在土体小应变条件下求得,根据应力-应变关系曲线,取某固定轴向应变对应的偏应力增量

与轴向应变增量的比值^[24]。冻土弹性模量随温度的降低和含冰量的增大而增加。若冻融循环使冻土密度增大,弹性模量也会有所增加。由于冻土内部构造随机分布,即使在同一温度下,弹性模量及强度也不是某一确定值。随着土体变形的逐渐增大,参数取值的离散度会逐渐增大。实验表明,离散的实验结果是服从某一概率分布规律的随机变量,正态和对数正态分布能较好地反映高温冻土的弹性模量概率分布规律^[25]。

4.2.2 泊松比

泊松比在数值分析中对土体的强度和变形特征影响很大。环境温度、土质、密实度、有无水分补给、温降速度、冻结速率、受力方向及冻结锋面方向对冻土弹性常数的取值均有影响。泊松比会随着温度的降低和含冰量的增加而减小,但相比对弹性模量,泊松比增减不显著^[25]。

4.3 应力-应变关系

由于冻土的流变性,其应力-应变关系十分复杂。随着冻融循环次数的增加,冻土的应力-应变关系曲线由软化型向加工硬化型过渡,破坏形式由脆性破坏转变为塑性破坏。试验表明,粉砂土试样在多次冻融过程中有时会出现两次稳定状态^[26]。这是由于冰相和未冻水膜的存在,冻土中直接接触的颗粒并不多。冻土强度主要由冰强度、土骨架强度和冰土胶结强度三部分组成。在冻土的变形初始阶段,冰强度起主要作用,在变形后期土骨架强度才会逐渐发挥作用,因此随着应变的增大可能出现两个应力峰值,出现与否主要受实验应变速率和围压的影响。

4.4 蠕变

4.4.1 蠕变特征

蠕变、应力松弛和强度降低是冻土在长期荷载作用下流变特性的三种表现形式。其中蠕变特性表现得较为突出,因此蠕变模型是冻土本构模型研究的重点。冻土的蠕变破坏是由于冻土中非弹性变形积累的结果。应力较小时,冻土首先出现非稳定蠕变阶段和稳定蠕变阶段,随着应力增加,蠕变速率逐渐减小,达到最小值后进入渐进流阶段^[27]。从稳定蠕变阶段进入渐进流阶段的转折点称为蠕变破坏点,对应的应变、时间、应变速率称为破坏应变、破坏时间和最小蠕变速率,即蠕变三要素。蠕变影响因素包括加载频率、最大加载应力、温度和围压等,其中温度梯度会引起冻结过程中的水分场的重分布和宏观变形的非均匀分布^[28]。

对于同种土体,温度越低,则初始应变和破坏应变越小、破坏时间越长、最小蠕变速率越小。当温度一定而最大加载应力增大时,破坏应变增加、破坏时间缩短、最小蠕变速率变快。破坏应变和破坏时间都随频率的增加而减小,最小蠕变破坏速率随频率的增加而增加。围压对破坏应变影响较小,对破坏时间及最小蠕变速率影响较大。存在一个临界围压,当围压等于临界围压时,蠕变破坏时间最长,最小蠕变速率最小;当围压大于或小于临界围压时,则有相反的变化趋势^[29]。

4.4.2 蠕变模型

为定量描述和预测冻土蠕变过程,需建立蠕变模型。冻土蠕变模型通常是依据实验数据通过经验公式法建立的,主要包括 Vyalov 的第一阶段蠕变模型、Ladanyi 的工程蠕变模型和 Ting 的全过程蠕变模型等^[30]。传统整数阶微积分本构关系存在元件多等不足,在元件模型基础上引入分数阶导数,可建立稳定蠕变分数阶导数定常蠕变模型,再运用粒子群优化方法确定参数取值,可以很好地模拟冻土的蠕变规律^[31]。

5 动力学性质

冻土的动力学性质和静力学性质有很大差异。冻土动力学主要研究在地震、爆破及行车等动荷载作用下冻土的结构性、变形性、强度变化特征以及由此引起的地基承载力、稳定性等问题^[32]。目前主要研究土质、含水率、温度、围压、频率、应变幅值及最大应力等各种因素,对冻土及改良土动强度、动参数及动应力-应变关系的影响^[33]。

5.1 动强度

在一定的动应力振次动荷载实验中,将土体产生某一指定破坏应变所需要的临界动应力定义为动强度;而在恒应变速率等幅动应变三轴、单轴试验中,则将峰值动应力定义为动强度^[34]。同时,土质不同,动强度研究中的破坏标准也不同^[35]。冻土动强度的影响因素及机制复杂,一方面,在恒应变速率增长的等幅动应变作用模式下,荷载作用时间(循环效应)和振动频率与幅度(速率效应)综合影响着冻土动强度,同一围压下动剪强度随破坏振次的增加而非线性减小;另一方面,由于孔隙冰的压融和微裂隙的发育,循环振动荷载作用下冻土动强度随围压的增大表现出先增后减的非线性变化趋势^[36]。因此,存在一个临界围压,当围压小于临界围压时,动强度随围压的变大而变大;当围压大于临界围压

时,强度随围压增大而减小。若冻土的温度降低导致含冰量提高,则动强度增大^[37]。

此外,冻土与混凝土的接触面也广泛存在于冻土区各类工程结构中,冻土-混凝土接触面的动、静力特性也是一项重要的基础性研究工作。北京交通大学研制了一套低温动荷载直剪仪,可以测定冻土的动力学参数,并通过一系列的多因素接触面动直剪试验,揭示了冻土-混凝土接触面在动荷载作用下的力学特征及其影响因素和变化规律^[38]。

5.2 动力学变形参数

冻土变形特征受土质、含水率、含冰量、温度、围压、动荷载水平、振动频率、动荷载幅值等多个因素的影响^[39]。变形参数包括动弹性模量、动剪切模量、动泊松比及阻尼比。

5.2.1 动弹性模量

动弹性模量是表征冻土在弹性变形阶段动应力和动应变之间关系的一项重要指标,数值越大,表明冻土的弹性承载性能越好^[40]。动弹性模量有切线模量、偏移模量、割线模量、回弹模量等。实验表明,冻土的动弹性模量随频率、围压的增加和温度、应变幅值、冻融循环次数的减小而增大。含水率增加时,冻土的动弹性模量先增大后减小,在饱和含水率附近达到最大^[41]。根据二维波动理论,利用无侧限与有侧限动弹性模量的比值可求解动泊松比。

5.2.2 动剪切模量

冻土动剪切模量与动弹性模量的变化规律基本一致。当荷载振动频率相同时,冻土温度越低,动剪切模量越大。当冻土温度相同时,荷载振动频率越大,动剪切模量越大。但频率对模量的影响程度小于温度^[42]。试验所得动态模量一般随荷载振幅的增大而增大,这是由于结构阻尼既包括材料的内摩擦力,也包括试样接触面的摩擦力^[43]。

5.2.3 动阻尼比

阻尼比是衡量冻土对振动能量吸收能力的参数。影响动模量的因素都会影响动阻尼比特性,使动模量降低的因素通常使动阻尼比提高^[44]。冻土的动阻尼比随频率的增加或温度的降低而减小,且温度影响相对显著。因为温度降低后未冻水含量减少,冰的强度增加,导致加荷能量耗散降低的幅值增大。动荷载作用下,冰与土颗粒间有相对滑移,频率越大,这种滑移效果越明显,也会导致阻尼比变小。阻尼比总体上随含水率或围压的增加略有变大的趋势,但变化分散。在相同应变条件下,随着围压的增加,冻土的弹性模量增加而阻尼比降低^[45]。

5.3 动应力 - 应变关系

冻土的动应力 - 应变关系是表征动力学特性的基本关系,也是分析动力失稳特征的基础。目前,对冻土动本构关系的研究通常是基于各种试验结果,以黏弹性理论为基础,进行统计分析得出的一些经验模型^[46]。大量动三轴实验数据的拟合结果表明,冻土的动应力 - 应变关系可以用 Masing 类模型中的 Hardin - Drnevich 模型描述^[47]。

5.4 动蠕变

5.4.1 动蠕变强度

与静蠕变一样,冻土的动蠕变强度也与温度和破坏时间密切相关。对于相同的破坏时间,温度越低,动蠕变强度越大。温度相同时,动蠕变应力越大,破坏时间越短。实验表明,各种应力条件下,动、静蠕变的应变、蠕变速率随时间的变化规律以及破坏特征随加载应力的变化规律基本一致,但数值上有较大差别^[48]。根据动单轴和动三轴蠕变实验结果,国内提出了相应的动蠕变强度模型^[49]。

5.4.2 动蠕变模型

动蠕变模型一般在考虑动荷载特征的基础上,根据蠕变实验数据资料,选取合适的参数与系数,通过拟合应变 - 时间曲线或应变速率 - 时间曲线来建立^[50]。目前,大部分动蠕变模型均是在静蠕变模型的基础上,通过单轴或三轴动蠕变实验确定参数和系数取值而建立的。

6 寒区交通工程中的冻土问题

铁路、公路工程需要满足稳定性、耐久性和平顺性等要求,冻土的存在提高了上述要求的实现难度,首要任务为如何保持冻土的热学稳定性^[51-52]。

多年冻土退化会导致路基沉降变形和承载力下降,因此一直采用保护冻土的设计原则。多年冻土保护措施主要包括高路堤、保温材料、辐照反射材料等被动方法,即减小热量输入;以及块石层、通风管、热管等能够起到“积极降温”作用的主动冷却措施^[53-54]。近年来,业界还在发展基于人工制冷技术的全季节主动冷却措施,例如米维军等^[55]以氯化镱与氨为制冷工质对,设计一种多年冻土吸附式制冷系统。胡田飞等^[56-57]提出制冷系统在小型化、自动化、自驱化等方面的设计原则,并分别设计太阳能光伏压缩式制冷系统与太阳能光热吸附式制冷系统,通过现场应用验证其制冷性能。

冻胀病害是制约寒区各类交通基础设施建设与运营的主要难题之一。传统的冻胀防治技术主要包

括材料改良、保温隔冷、防排水等。近年来,业界尝试从主动调控温度的角度解决冻害问题,土工构筑物人工供热技术逐渐兴起。工程界将热泵换热段埋设于隧道^[58]、路面^[59]、地下连续墙等构筑物中,形成新兴的能源桩、能源隧道等设计理念。针对铁路、公路路基冻胀问题,胡田飞^[60]提出将热泵冷凝段与蒸发段分别埋设在路基冻胀层与附近地基稳定土层中,形成“热能转化式”主动温控路基,结果表明可以有效防治冻胀。

7 结 论

冻土工程的研究内容主要包括土的冻融过程及基本性质、冻土强度与蠕变、冻土细微结构、多年冻土保护技术、寒区工程冻害防治技术及升温背景下冻土构筑物稳定性预测分析等方面。冻土在各种影响因素作用下的热学性质、物理性质和静、动力学性质及其变化规律是上述研究的基础。本文总结归纳了上述四个方面研究的主要内容、指标及一般规律等结论:(1) 由于冻土的变异性 and 系统的不确定性,热学、物理、力学参数的获取应注意结合试验手段和概率统计方法;(2) 土体冻结过程同时存在固体冻缩和水分冻胀的影响,两个作用比例的相对关系是土体工程性质冻融循环效应多样化的原因;(3) 冻土的静、动力学特性与温度及含冰量密切相关;(4) 对于多年冻土退化融沉和季节冻土冻胀现象及其工程病害,温度是根本诱因,发展多年冻土人工制冷和季节冻土人工供热是防控冻土病害的有效途径之一。

鉴于冻土研究中所存在的一些问题,认为今后在以下几个方面值得进一步开展深入研究:(1) 从微观结构的定量分析角度对冻土宏观物理力学性质进行研究;(2) 随着交通工程路基填料和填筑标准的提高,对于粗颗粒冻土强度特性的研究有待深入。(3) 建立冻土的水、质、热、力耦合计算理论与方法,构建数值仿真分析平台;(4) 通过研究各种冻土保护技术的原理、适用条件和工艺,发展冻土路基热调控方法,建立冻土路基维护措施的成套技术。总之,应进一步将室内试验、模型试验、数值分析、现场原位试验和实际工程检测紧密结合,不断完善和改进冻土工程理论,并应用于工程实践中。

参考文献:

- [1] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社,2000.
- [2] 马 巍,王大雁. 中国冻土力学研究 50 a 回顾与展望

- [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 625-640.
- [3] 刘世伟, 张建明. 高温冻土物理力学特性研究现状[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 120-129.
- [4] 程国栋. 青藏高原多年冻土区路基工程地质研究[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 134-141.
- [5] Zhang Z, Ma W, Feng W J, et al. Reconstruction of soil particle composition during freeze-thaw cycling: a review [J]. *Pedosphere*, 2016, 26(2): 167-179.
- [6] 丁德文. 我国冻土热学理论研究[J]. 冰川冻土, 1988, 10(3): 312-318.
- [7] 孙振华. 多年冻土原状样热学性质研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [8] 王伟. 冻土传热性质试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [9] 张立新, 陶兆祥, 顾同欣. 氯化钠的掺入对冻土基本热学性质的影响[J]. 冰川冻土, 1995, 17(1): 49-53.
- [10] 吴晓光. 概率统计在高温冻土热学及力学性质研究中的应用[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [11] 王兴陈. 基于物理性质的土体强度和变形特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [12] 周泓, 张泽, 秦琦, 等. 冻融循环作用下黄土基本物理性质变异性研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 162-168.
- [13] 苏凯, 张建明, 刘世伟, 等. 高温-高含冰量冻土压缩变形特性研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 369-375.
- [14] 李东阳. 冻土未冻水含量测试新方法的试验和理论研究[D]. 徐州: 中国矿业大学(北京), 2011.
- [15] Viklander P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze-thaw [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, 35(3): 471-477.
- [16] 张泽, 马巍, 齐吉琳. 冻融循环作用下土体结构演化规律及其工程性质改变机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(6): 1904-1914.
- [17] 邴慧, 何平. 冻融循环对含盐土物理力学性质影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 1958-1962.
- [18] 肖东辉, 冯文杰, 张泽, 等. 冻融循环对兰州黄土渗透性变化的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1192-1198.
- [19] 连江波, 张爱军, 郭敏霞, 等. 反复冻融循环对黄土孔隙比及渗透性的影响[J]. 人民长江, 2010, 41(12): 55-58.
- [20] Qi J L, Ma W, Song C X. Influence of freeze-thaw on engineering properties of a silty soil [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 53(3): 397-404.
- [21] 程学磊, 李顺群, 孙世娟, 等. 围压和负温对冻土强度和微结构的影响研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2014, 39(1): 95-104.
- [22] 马立峰, 刘建坤, 牛富俊. 青藏高原多年冻土区斜坡段路基粉质粘土的试验研究[J]. 工程勘察, 2011, 39(12): 1-5, 16.
- [23] 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.
- [24] 李双洋, 赖远明, 张明义. 高温冻土弹性模量及强度分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S2): 4299-4305.
- [25] 王正中, 牟声远, 牛永红, 等. 横观各向同性冻土弹性常数及强度预测[J]. 岩土力学, 2008, 29(S1): 475-480.
- [26] Liu J K, Chang D, Yu Q M. Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of a silty sand [J]. *Engineering Geology*, 2016, 210(5): 23-32.
- [27] 张虎, 张建明, 苏凯, 等. 高温-高含冰量冻土原位旁压蠕变试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2103, 43(6): 1950-1957.
- [28] 赵晓东, 周国庆. 温度梯度冻土蠕变变形规律和非均质特征[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 390-394.
- [29] 董连成, 张公, 赵淑萍, 等. 冻土蠕变指标试验研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 130-136.
- [30] 陈军浩, 姚兆明, 徐颖, 等. 人工冻土蠕变特性粒子群分数阶导数模型[J]. 煤炭学报, 2013, 38(10): 1763-1768.
- [31] 李栋伟, 汪仁和, 胡璞. 冻粘土蠕变损伤耦合本构关系研究[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 446-449.
- [32] 王兰民, 孙军杰. 特殊土动力学的发展战略与展望[J]. 西北地震学报, 2007, 29(1): 88-93.
- [33] 赵淑萍, 朱元林, 何平, 等. 冻土动力学研究的现状与进展[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 681-686.
- [34] 高志华, 石坚, 张淑娟, 等. 高含冰量冻土动强度和残余应变的试验研究[J]. 2009, 31(6): 1143-1149.
- [35] 焦贵德, 赵淑萍, 马巍, 等. 循环荷载下高温冻土的变形和强度特性[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(8): 1553-1558.
- [36] 徐春华, 徐学燕, 耿永常, 等. 振动荷载作用下冻土结构弱化机理研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(12): 1513-1429.
- [37] 张淑娟, 赖远明, 李双洋, 等. 冻土动强度特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 595-599.
- [38] 吕鹏, 刘建坤. 冻土与混凝土接触面直剪试验研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(2): 106-110.
- [39] 石峰, 刘建坤. 109国道冻土路基动力融化固结研究[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(4): 59-63.
- [40] 罗飞, 赵淑萍, 马巍, 等. 分级循环荷载作用下冻土动应变幅值的试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35

- (1):123-129.
- [41] 罗 飞,赵淑萍,马 巍,等. 分级加载下冻土动弹性模量的试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(5):849-855.
- [42] 徐学燕,仲丛利. 冻土的动力特性研究及其参数确定[J]. 岩土工程学报,1998,20(5):77-81.
- [43] 王丽霞,胡庆立,凌贤长,等. 青藏铁路重塑冻结粉质黏土动剪切模量试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2007,27(2):177-180.
- [44] James K M, Kenichi S. Fundamentals of soil behavior [M]. John Wiley & Sons, 2005.
- [45] 赵淑萍,朱元林,何 平,等. 冻土动力学参数测试研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(S2):2677-2681.
- [46] 贺月香. 土和冻土的动态力学性能及本构模型研究[D]. 北京:北京理工大学,2014.
- [47] 崔颖辉. 基于冻土动荷载直剪仪的高温冻土动力特性研究[D]. 北京:北京交通大学,2015.
- [48] 赵淑萍,何 平,朱元林,等. 冻结粉土的动静蠕变特征比较[J]. 岩土工程学报,2006,28(12):2160-2163.
- [49] 李栋伟. 深部冻结黏土蠕变损伤耦合本构模型及应用研究[D]. 安徽:安徽理工大学,2011.
- [50] 朱元林,何 平,张家懿,等. 冻土在振动荷载作用下的三轴蠕变模型[J]. 自然科学进展,1998,8(1):60-62.
- [51] Wen Z, Sheng Y, Ma W, et al. In situ experimental study on thermal protection effects of the insulation method on warm permafrost[J]. Cold Region Science and Technology, 2008,53:369-381.
- [52] Ma W, Cheng G D, Wu Q B. Construction on permafrost foundations; Lessons learned from the Qinghai-Tibet Railroad[J]. Cold Regions and Science Technology, 2009,59:3-11.
- [53] Zhang M Y, Lai Y M, Li S Y, et al. Laboratory investigation on cooling effect of sloped crushed-rock revetment in permafrost regions [J]. Cold Region Science and Technology, 2006,44:27-35.
- [54] 吴青柏,牛富俊. 青藏高原多年冻土变化与工程稳定性[J]. 科学通报,2013,58(2):115-130.
- [55] 米维军,贾 燕,赵永虎,等. 太阳能制冷在多年冻土热稳定维护中的传热效果研究[J]. 铁道学报,2018,40(5):116-122.
- [56] 胡田飞,刘建坤,常 键,等. 面向多年冻土区路基的主动型压缩式制冷装置研究[J]. 中国铁道科学,2019,40(5):1-8.
- [57] Hu T F, Liu J K, Hao Z H, et al. Design and experimental study of a solar compression refrigeration apparatus (SCRA) for embankment engineering in permafrost regions [J]. Transportation Geotechnics, 2020(22):100311.
- [58] 张玉强,杨 勇,夏才初,等. 寒区隧道地源热泵型供热系统运行能效分析[J]. 现代隧道技术,2015,52(6):177-183.
- [59] 谭忆秋,张 驰,徐慧宁,等. 主动除冰雪路面融雪化冰特性及路用性能研究综述[J]. 中国公路学报,2019,32(4):1-17.
- [60] 胡田飞. 基于可再生能源供热技术的冻土区路基防冻胀方法研究[J]. 太阳能,2021(6):37-49.