DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0086
LEI Lele, XIE Yanli, WANG Dayan, et al. Laboratory studies of frozen soil statics: recent progress and prospect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(4): 802 -811. [雷乐乐, 谢艳丽, 王大雁, 等. 冻土静力学室内试验研究进展[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 802 -811.]

冻土静力学室内试验研究进展

雷乐乐[1,2], 谢艳丽[3], 王大雁[1], 陈 敦[1,2], 靳 潇[2,4]

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 国网青海省电力公司 电力科学研究院, 青海 西宁 810008; 4. 中国科学院 西北生态环境资源研究院
寒区旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 冻土力学是冻土工程学的理论基础, 以解决冻土工程问题为归宿。冻土力学分为冻土静力学和冻土动力学两个方面, 而冻土静力学是冻土力学的重要部分。为此, 对常规冻土静力学室内试验的研究进展进行了总结, 系统地阐述了其在冻土的强度特性、变形特性及理论模型等方面所取得的重要研究成果, 并指出研究中存在的一些不足之处。最后结合冻土静力学研究的特点及实际冻土工程建设的需要, 对冻土静力学研究的未来发展进行了展望。

关键词: 冻土静力学; 室内试验; 冻土强度; 变形特性; 研究进展
中图分类号: P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)04-0802-10

0 引言

从 20 世纪初开始, 多年冻土区工程建设日益频繁, 如穿越阿拉斯加的美国 Norman Wells 输油管线, 穿越西伯利亚的苏联铁路, 穿越青藏高原的青藏公路以及青藏铁路。这些工程的修建和维护为冻土区工程建设积累了宝贵的经验, 也为认识冻土的力学性质提供了历史机遇[1]。冻土力学以研究温度、土质、含水量、加载速率以及应力路径等因素对冻土力学性质的影响为出发点, 以解决冻土工程问题为归宿, 在冻土地区进行工程建设, 必须深入研究冻土的力学特性, 以确保冻土地基上工程建筑物的安全性、稳定性及耐久性。冻土静力学作为冻土力学的重要一部分, 国内外学者对此开展了一系列相关方面的研究工作, 为在试验中尽可能地模拟实际工程中冻土的受力状态, 借助冻土室内试验仪器, 改进和提出多种试验方法, 在常规冻土的强度特性、变形特性以及理论模型等方面取得了显著的研究成果。

本文阐述了常规冻土静力学室内试验的研究进展, 总结了静力学研究中冻土的强度特性、变形特性及理论模型等方面所取得的研究成果。这些成果在冻土静力学研究中和寒区工程建设中起到了重要作用, 但也存在一些不足之处。最后结合冻土静力学研究的特点及实际冻土工程建设的需要, 对冻土静力学研究的未来发展提出几点建议。

1 试验仪器及试验方法

冻土是由土颗粒、未冻水、冰和气体组成的四相体, 由于冰的存在使得冻土的力学性质对温度极为敏感, 因此冻土的力学性质与非冻土力学性质之间有较大差别, 其力学试验不能直接套用非冻土中的试验方法, 需要通过具体的室内试验来确定冻土力学室内试验方法。

现有冻土的力学试验机主要有冻土单轴仪、冻土三轴仪、冻土直剪仪及最新研发的冻土空心圆柱仪。表 1 列出了冻土力学试验仪器的加载能力。

冻土单轴试验机是较早应用于冻土力学研究中的仪器, 汪仁和等[2]根据冻土力学性能的特点, 对单轴试验机进行了改进, 设计出冻土蠕变强度试验

收稿日期: 2017-11-19; **修订日期:** 2018-01-24
基金项目: 国家自然科学基金项目(41671069; 41630636); 冻土工程国家重点实验室自主研究项目(SKLFSE-2T-31)资助
作者简介: 雷乐乐(1991 -), 男, 河南洛阳人, 2014 年在内蒙古大学获学士学位, 现为中国科学院西北生态环境资源研究院在读博士研究生, 从事冻土力学与寒区工程研究. E-mail: leilele3917@163.com
通信作者: 王大雁, E-mail: dywang@lzb.ac.cn.

表 1　冻土试验仪器的加载能力

Table 1　Loading ability of the test apparatus for frozen soil

设备名称	主应力幅值变化	主应力方向变化
冻土单轴试验仪	σ_1 可变	σ_1 方向固定不变
冻土三轴试验仪	σ_1 可变，$\sigma_2=\sigma_3$ 且恒定（当 σ_1 突变为 σ_3 时，转为 $\sigma_1=\sigma_2$ 恒定）	σ_1、σ_2、σ_3 方向均固定不变，或 σ_1 与 σ_3 方向正交突变互换
冻土动直剪仪	σ_1、σ_3 均可变	σ_1、σ_2、σ_3 方向均固定不变，或 σ_2 方向固定不变而 σ_1 和 σ_3 在垂直于 σ_2 方向的平面上连续旋转（但主应力轴转角限制很大，且 $\Delta\sigma_1$、$\Delta\sigma_3$ 方向固定不变）
冻土空心圆柱仪	σ_1、σ_3 均可变	σ_2 方向固定不变，σ_1 和 σ_3 在垂直于 σ_2 方向的平面上连续旋转（主应力轴转角无限制，$\Delta\sigma_1$、$\Delta\sigma_3$ 方向也可连续旋转）

和冻土单轴抗压强度试验的微机控制系统一体机。

中国科学院冻土工程国家重点实验室从美国 MTS 公司购进的冻土三轴试验机（MTS-810），丰富了加载的应力路径，可以进行冻土的动、静力下恒载或恒变形速率单轴拉、压试验和三轴拉、压试验。余基宁[3]在常规三轴加载系统中安装与之配套的低温恒温循环系统，研制出低温冻融三轴试验机，可以进行不同冻融次数等条件下的单轴和三轴试验。Yao 等[4]为了更好地了解冻土的力学性能，对三轴仪器的控温和应变测量系统进行了改进，使控温精度更高，并且可以精确地测量冻土的 k_0 值，使深部冻土的力学研究更加精确。徐湘田等[5]在低温三轴仪上进行了两种各向等压试验和两种三轴剪切加卸载试验，还根据试验机新增的控制程序，提出了等 p 试验方法的具体加载方案。为研究深部冻土力学性质，马巍等[6]提出先将试样按一定方式进行 k_0 固结，然后在受力状态下将其冻结来测定冻土力学性质是室内研究深部冻土较为可行的方法。崔颖辉[7]在分析现有室内试验仪器的基础上，开发了冻土动荷载直剪仪，同时确定了直剪试验系统相关部件的参数。

冻土空心圆柱仪由中国科学院冻土工程国家重点实验室与美国 GCTS 公司联合研制，是现有冻土室内试验仪器中能较好实现复杂应力路径加载的试验仪器。现已初步完成仪器的调试工作，仪器各项指标均符合冻土力学试验要求，郭妍等[8]根据试验机的加载能力提出主应力轴方向保持不变的定向剪切试验方法。

2　强度特性

2.1　抗压强度

冻土抗压强度是冻土静力学研究的重要内容之一，国内外学者对冻土的抗压强度开展了一系列室内试验，借助冻土单轴仪和三轴仪，研究温度、加载速率、含水率和围压等因素的影响。

（1）温度

冻土中由于冰的存在使得强度受温度的影响显著。在温度不低于 −30 ℃的情况下，冻结粉土的强度随温度的降低呈线性增大，尤其在应变速率较大的情况下，其强度变化可以用直线近似地描述[9]，但温度的强化作用只能达到某一限度，对于冻结砂土这个温度约为 −50 ℃，而对于细颗粒土要更低一些[10]。其他学者还发现冻土的强度随温度并非呈线性关系变化，当试验温度在 −3 ~ −7 ℃ 范围内，其强度增大的速率缓慢，而到了 −10 ℃ 时，冻土强度开始明显增加，再到达 −20 ℃ 时，强度增长速率也开始明显增加[11]，且随着温度的降低，冻土的脆性越来越强[12-13]。在三轴抗压强度研究中，吴紫汪等[14]、赵晓东等[15]发现温度的升高，冻结砂土的塑性及应变硬化性能都会得到增强，轴向破坏应变也增大，体积变形从体缩逐渐演化为体胀；温度的降低，砂土的极限偏应力强度增加。

（2）含冰量

冻土中含冰量的高低会对冻土的强度产生较大影响：冻土的强度随着含冰量的增大而增大，达到最大值后随着含冰量的继续增大，强度会出现降低的趋势，最后趋向冰的强度[16-18]。这是因为随着含冰量的增加，在冰的胶结作用下土颗粒和冰相互作用，共同受力，使冻土的强度增加；随着含冰量的继续增加，土颗粒之间被冰隔开，土颗粒在抵抗变形中发挥的作用逐渐减小，导致土体的抗压强度呈现降低的趋势；随着含冰量再增加，当土颗粒呈悬浮状态存在于冰中，冻土的抗压强度基本上就等

于冰的抗压强度值。

（3）加载速率

除了试验温度和含水量的影响之外，加载速率对冻土抗压强度的影响也不容忽略。冻土的强度随加载速率的增加而增大，基本上呈指数关系变化，但当变形发展到脆性变形范围内或者较高温度下较大应变速率加载时，应变速率的变化对强度的影响就很小[19-23]。加载速率的变化会使冻土受力时间发生变化：随着力作用时间的增长，冻土中的冰会产生缓慢塑性流动，使得冻土的强度降低；而应变速率的增大，减小了荷载作用的时间，降低了冰的塑性流动，使冻土的瞬时强度增大。

（4）围压

在常规土力学中，围压只是应力状态的一个分量，而在冻土力学中，围压的增加既可以抑制膨胀软化效应，也可诱导膨胀软化现象。

冻土的强度随着围压的增大会出现最大值，随后随着围压的继续增大，强度逐渐降低，而当围压再继续增大时，强度又会有所增大，产生强度随围压变化的双峰曲线[24-26]。Ting 等[27]认为产生双峰现象是因为冻土中冰和未冻水的存在，使得冻土中颗粒的直接接触并不多，冰的力学性质在变形的初始阶段起到至关重要的作用，而到变形后期土骨架的作用逐渐增强。即第 1 个峰值主要受冰相的控制，第 2 个峰值主要受土颗粒骨架的影响。齐吉琳等[1]对三轴试验中出现双峰现象的研究进行了总结，发现双峰现象的发生与应变速率有较大关系，在已有研究中出现双峰现象的应变速率在 10^{-4} ~ 10^{-5}量级范围之内。围压对冻土强度的影响主要是因为一方面会使土颗粒压密，增大颗粒之间的摩擦力，使强度增加；另一方面随着围压作用时间的增长，冻土中的冰被压融使含水率增加，或土颗粒被压碎，使得冻土强度降低，变形增大。

2.2 抗拉强度

冻土的抗拉性能也是冻土工程中常见的冻土力学特性之一。目前室内试验测定冻土抗拉强度的方法主要有直接法和间接法，直接法以直接拉伸试验（包括三轴拉伸试验）为主，间接法包括轴向压裂法、径向压裂法和劈裂法等。

国内外对冻土抗拉强度的研究比较少，Haynes 等[28]首先研究了应变速率对冻结粉砂抗拉强度的影响，发现在应变速率 $\dot{\varepsilon}=10^{-2}\ \mathrm{s}^{-1}$时发生塑性－脆性破坏过渡。即当 $\dot{\varepsilon}<10^{-2}\ \mathrm{s}^{-1}$时，冻结粉土的抗压和抗拉强度几乎相同，抗拉强度随 $\dot{\varepsilon}$ 增加而增加，而当 $\dot{\varepsilon}>10^{-2}\ \mathrm{s}^{-1}$时，抗拉强度则远小于抗压强度，且抗拉强度随着 $\dot{\varepsilon}$ 增加而减小；对于冻结兰州粉土，其过渡应变速率要大一些，为 $\dot{\varepsilon}=8.5\times10^{-2}\ \mathrm{s}^{-1}$。Zhu 等[29]发现若试样发生脆性破坏，冻结粉砂的极限抗拉强度随应变速率的增加略微降低，而对于发生塑性破坏的试样，极限抗拉强度则随应变速率的增加大幅增大。

在三轴试验中，冻土的抗拉强度随加载速率增加均呈线性增加趋势，保持轴压越高，抗拉强度增长速率越小[30-31]。冻土的抗拉强度随温度降低逐渐增加，当温度低于 －5 ℃时增加得更快，在 －20 ℃时达到抗拉强度最大值，此后抗拉强度随着温度降低而呈现出降低的变化趋势[32-33]；含水率在 14% ~25% 区间，冻土的抗拉强度随着含水率的增加而降低；温度在 －5 ℃以下，含水量大于 17% 时，冻土的抗拉强度随着含水率的增加而缓慢降低[34]。沈忠言等[35-36]首次提出轴向压裂法和径向压裂法来测试冻土的抗拉性能，通过试验验证了该方法的可行性，并得出冻土的抗拉强度随应变速率和温度变化具有良好的规律性。

目前关于冻土抗拉强度的研究大多是单个影响因素下的强度变化规律，相关方面的研究工作还较少。在实际工程中冻土所处的环境条件复杂，存在多个影响因素的共同作用，因此还需开展两个或多个影响因素下冻土抗拉性能的试验研究。此外，增加试验土体类型，特别是寒区工程中常见的一些土体，使试验结果能够更好地为实际工程服务。

2.3 抗剪强度

冻土的抗剪强度是计算多年冻土区冻土地基极限强度以及计算受外界荷载作用时冻土土体稳定性的依据，对冻土地基基础设计与施工参数的确定有着重要的作用。

冻土的抗剪强度随温度的降低近似成正比增大，而当温度降低到一定值后，强度基本不再发生变化，产生这种现象是因为随着温度降低，冻土中的未冻水逐渐冻结成冰，冰的胶结作用使得颗粒间的摩擦力增大，从而使冻土的抗剪强度逐渐增大。

针对衡量冻土抗剪强度大小的两个重要力学参数——黏聚力和内摩擦角的变化情况，国内外学者也开展了相关方面的试验研究工作。青藏冻土力学研究组[37]发现冻结黏土的黏聚力具有强烈的松弛性，其松弛曲线服从 Maxwell 方程，且长期黏聚力与负温的关系可用指数方程描述。若初始含水量较低，黏聚力随着含水量的增加而增加；若初始含水

量较高，则随着含水量的增加而减小；而内摩擦角随含水量的变化不大。土质不同也会影响内摩擦角随温度的变化趋势，对于冻结黏土而言，内摩擦角均小于0.5°，随着温度的降低逐渐减小；而对于冻结砂土，内摩擦角在1.5°~4.0°之间，随着温度的降低逐渐增大；黏聚力均随温度的降低有增大的趋势[38]。冻结时间的长短也会对冻土的抗剪强度有影响，内摩擦角随冻结时间的增加总体上呈上升趋势，黏聚力随冻结时间的增加呈下降趋势[39]。

在冻土三轴试验中，围压对冻土的抗剪强度有明显影响。吴紫汪等[40]通过试验得出围压的增大明显增强了冻土的塑性，在一定围压范围内，冻土的抗剪强度随围压的增加而增加，呈明显的线性关系，与应变速率呈指数关系，当围压超过这一范围时，其抗剪强度随围压的增加而减小。其后刘寒冰等[41]、何伟朝[42]也得出相似的研究结论。

3　常规变形特性

在寒区基础设计中，除要检算地基承载力外，还必须进行地基变形稳定性验算，而要进行变形验算，必须了解冻土的变形特性。为此研究者们在进行冻土强度研究的同时，还进行了冻土的变形特性试验，旨在建立冻土的变形模型，以预报冻土在外荷载作用下的变形过程。

3.1　应力-应变关系

朱元林等[43]发现冻土的应力-应变关系随着应变速率的增大呈现出由塑性－硬化－软化的变化趋势。马巍等[6,44]发现应力-应变曲线的初始切线模量会随围压的升高而线性增大，加卸载应力路径下屈服强度的应力差也会随着围压的增大和温度的降低而逐渐增大，但破坏时的变形却无较大差异，均随围压的增大而增大。徐湘田等[5,45]发现围压的变化会导致应力-应变曲线从软化现象过渡到硬化现象。在深部冻土力学研究中，马巍等[6]发现当使用已有冻土静力学的研究成果去设计深部冻结壁，往往会造成冻结壁径向变形量过大甚至淹井等较大工程事故，提出先将试样按一定方式进行 k_0 固结，然后在受力状态下将其冻结来测定冻土力学性质。借助该试验方法，马巍等[46-49]、Wang 等[50-52]、王大雁等[53-57]发现初始切线模量随围压的升高而线性增大；初始弹性模量基本不随围压的变化而发生变化；偏主应力随围压升高或温度降低都会出现增大的趋势；在低初始围压状态下，冻土的破坏强度受温度变化影响不明显，但随着初始围压增大，破坏强度受温度的影响也逐渐明显。在剪切试验中，冻土的应力-应变曲线均呈双曲线型，其曲线变化过程可分为以下三个阶段：应变随应力线性增加的完全弹性阶段，应变硬化阶段和屈服（流动）阶段；在卸载过程中，其特征类似于理想刚塑性应力-应变曲线。

3.2　蠕变特性

当对冻土施加稳定荷载后，应变会不断发展，当非弹性应变积累到一定程度，土体便会失去稳定性甚至发生破坏，这便是冻土的蠕变特性。根据冻土应变曲线随时间的发展情况，研究者们将冻土的蠕变过程分为衰减蠕变过程和非衰减蠕变过程，并探索了含冰量、温度、应力状况等因素对蠕变过程的影响。

（1）含冰量

冻土含冰量是决定冻土蠕变特性的一个关键因子，通常情况下，冻土中含冰量越高，相同应力状况下其蠕变发展越明显。吴紫汪等[58]发现当冻土中含冰量超过一定数量时，即使在较小荷载下亦属非衰减型蠕变。含冰量对试样破坏应变的影响也存在一个临界值，在临界值以下，破坏应变随温度降低和含冰量的升高而增大；在临界值以上，随温度降低和含冰量的升高而减小，最终破坏应变趋于冰的破坏应变[59-60]。总之，含冰量对冻土蠕变的影响存在如下规律：存在一个界限值，当小于该界限值，土颗粒成为冻土的基本骨架，表现出典型冻土的蠕变特性；当含冰量大于该界限值，冰成为冻土的基本骨架，冻土表现出冰的蠕变性质。

（2）温度

受温度的影响，冻土中含冰量会产生显著变化，因此其蠕变特性也表现出强烈的温度敏感性。汪承维等[61]对经历 k_0 固结后再冻结的冻土试样的研究发现应力-应变曲线的弹性变形范围非常小，约为0.05%，屈服应变受温度变化的影响较小，但破坏应变会随温度的降低而逐渐减小，二者之间呈双曲线形变化，同时温度存在一个临界值，在临界值以上，破坏应变随温度的升高而增大，当低于该临界值，破坏应变基本不随温度发生变化。Zhao 等[62]、赵晓东等[63]研究温度梯度对冻土蠕变变形的影响，发现应变率 $\Delta\varepsilon_a/\Delta t$ 随时间的增加和温度梯度的减小而减小，当轴向应变小于1%时，蠕变应力有明显的增加，而当轴向应变大于1%后，增加的速率有所缓和；径向蠕变速率小于轴向蠕变速率，且轴向蠕变速率与蠕变应力之间满足指数函数

关系。

（3）应力状况

应力状况改变时冻土的蠕变变形也会发生明显变化。在变载条件下，应力增加过程中衰减蠕变表现为老化材料性质，而非衰减蠕变过程主要受流动控制[64]。加载应力越大，冻土试样越先出现流变和破坏，加载速率的变化同样会对该过程产生较大影响[65-66]。随着荷载作用时间的延长，冻土蠕变变形不断增加，该过程受温度影响，温度越高蠕变变形量越大[67]。

4 理论模型

4.1 强度模型

现有冻土的强度模型主要是通过对单轴试验和三轴试验结果的分析，得到单因素或多因素影响下冻土的强度模型。苏联冻土学家崔托维奇[19]发现冻土单轴强度与温度在半对数坐标中近似线性变化。若把温度限制在一定范围内，温度的指数近似等于1[8]；冻土单轴强度与应变速率在半对数坐标中也近似为线性变化[52]。朱元林[68]在对单轴试验数据分析的基础上将冻土的应力-应变类型分为9种，并分别给出了相应的应力-应变方程，在冻土力学研究和工程建设中都得到广泛应用。刘增利等[69]采用连续介质力学与热力学方法，建立了含损伤的冻土单轴压缩损伤本构模型和冻土损伤与应变之间的关系，为进一步研究冻土的复杂受力提供了基础。

在三轴试验研究中，陈湘生[70]基于考虑温度对冻土强度的影响提出冻土的瞬时强度模型；但此模型不能涵盖围压的影响，为此 Fish[71]、马巍等[72]建议采用广义 Drucker-Prager 准则。何平等[73]依据连续介质力学和热力学原理，建立了冻土黏弹塑损伤耦合本构理论，同时分析了围压对冻土的强化及弱化机理，建立了与球应力相关的未冻水含量状态方程以及黏塑性耗散势函数。王大雁等[54]给出了 Duncan-Chang 双曲线模型的修正方程，来描述深土冻土在轴向加载条件下的应力-应变行为。赖远明等[74]在研究冻土三轴强度模型时发现，用广义的双曲线模型并不能很好地描述 -6 ℃ 冻结砂土在围压大于 3.0 MPa 时的应力-应变关系，Duncan-Chang 模型也不能理想地反映围压小于 3.0 MPa 时 -6 ℃冻结砂土的应变软化特性，因此提出既能描述应变软化现象又能描述应变硬化现象的改进 Duncan-Chang 模型。

在抗剪强度研究中，丁靖康等[75]提出冻土抗剪强度与破坏时间之间的对数关系模型。齐吉琳等[1]认为需要将温度和围压对黏聚力的影响共同考虑进去，才能建立冻土合理的强度准则，同时也做了大胆尝试，将 Duncan 等[76]提出的非冻土的抗剪强度模型扩展到冻结砂土中，进而提出了冻结砂土新的快剪强度准则，且该准则能较好反映冻结砂土强度受围压影响的特性。

在抗拉强度研究中，沈忠言等[77]采用径向压裂法，提出了冻土抗拉强度随温度和加载速率等变化的模型方程，即

$$\sigma_t = -0.146\,4\theta - 0.152\,6\theta V^{0.25} - 0.477\,3V^{-0.08} + 0.746\,4 \tag{1}$$

式中：σ_t为径压法抗拉强度；θ 为试验温度；V 为加载速率。

4.2 蠕变模型

20 世纪 60 年代维亚洛夫[78]在大量试验成果基础上，结合非线性蠕变理论首先提出了能够描述冻土蠕变全过程的经验本构模型。随后，大批学者在研究冻土蠕变时提出描述冻土蠕变特性的理论模型，大致可分为以下几类：

①冻土蠕变的微观结构模型。该模型以热力学和损伤力学为理论基础，描述岩土材料在蠕变变形过程中的微观结构变化情况[73,79]，但由于该模型中的可变因素较多，很难应用到实际工程中。李志敏[80]、李栋伟等[81-82]基于该模型建立了冻土的损伤本构关系，提高了从理论上研究冻土变形破坏的准确性。

②亚塑性流变模型。这个模型以热力学为理论基础，模拟岩土材料的应力-应变行为，并直接建立应力速率与应变速率之间的关系表达式[83-85]。在该模型基础上，Xu 等[86]提出了一个亚塑性流变模型，在大变形情况下，建立土体的应力-应变关系和蠕变模型方程，并且通过试验验证该模型能够准确描述蠕变发展的三个阶段。

③黏弹塑性蠕变模型。由于其物理意义清晰，关系表达式比较明确，研究者们提出了多种适合冻土的蠕变模型，将冻土蠕变的屈服、硬化、塑性流变阶段及长期强度的预测都包含其中[87-89]。在此基础上，蔡中民等[90]提出了以破坏时间为损伤变量的黏弹塑性本构模型及模型中材料参数的确定方法，并对比了试验蠕变曲线和模型计算所得蠕变曲线，发现该模型同样能够较好地描述冻土蠕变全过程。李栋伟等[91]采用抛物线型屈服面对模型中的

黏塑性项进行修正，从而得到冻土蠕变本构模型。Hou 等[92]将硬化参量和损伤参量加入到模型方程中，建立了一个三维的蠕变模型方程，发现该模型能很好地描述人工冻土的蠕变变形过程。

④一维流变模型。该模型以等速线理论和修正 Cam-Clay 模型为基础，在半对数坐标系中，建立了蠕变变形与时间的线性关系。由于该模型中的试验参数可以通过经典土力学试验直接获得，使得该模型较好应用在冻土力学研究中。Den Haan[93]、刘萌心等[94]在该模型基础上，将应力历史的影响加入到模型方程中，发现所得出的模型方程能够较好反映应力历史对蠕变过程及蠕变速率发展规律的影响。

以上强度和蠕变理论模型的提出极大地丰富了冻土静力学的研究，但也可以发现现有冻土力学模型研究大多是通过对室内试验结果的分析，得出应力-应变之间的关系表达式，再以室内试验结果验证模型的正确性，因此使得模型的适用范围比较小，还没有形成一个统一的冻土本构模型。

5　小结与展望

冻土力学自 20 世纪 30 年代成为一门独立的学科至今，已走过 80 多年。冻土静力学作为冻土力学研究中的重要组成部分，在大批学者的不懈努力下，在试验方法、强度、变形特性及理论模型等方面都取得了丰硕的研究成果。冻土力学研究的宗旨是为寒区工程建设服务，现有关于冻土静力学室内试验研究的成果大多数是在简单应力状态下考察冻土的强度和蠕变特性，而随着冻土区工程建设的不断发展，遇到的冻土力学问题会更加复杂(如车辆荷载作用下冻土路基中主应力轴方向发生往复旋转，人工冻土工程中不同深度冻结壁中的主应力轴方向也不相同)，这就需要在冻土中开展复杂应力路径下的力学试验研究，探索冻土在复杂应力状态下的强度和变形特性，也有助于在全应力空间中建立冻土的强度准则[95]。因此，为了更进一步探索冻土的力学问题，使冻土力学研究成果更好地服务于冻土区工程建设，对冻土力学研究的未来发展提出展望：

(1) 研发新的试验仪器。现有室内冻土试验仪器主要有冻土单轴仪、三轴仪、直剪仪和空心圆柱仪，随着冻土力学研究的发展，这些仪器均无法较好地解决遇到的新问题。因此，需要综合冻土的受力特点及其试验所需的条件，研发新的试验仪器。同时，以新仪器可能实现的加载方式为基础大胆尝试探索新的试验方法，更好地模拟冻土在实际工程中的受力状态。

(2) 现有冻土强度研究主要从温度、含水量、围压等因素方面开展，而土体单元内主应力轴方向角、平均主应力等的变化也会对冻土的强度产生较大影响，因此下一步研究中需要将这些因素的影响也考虑在内。

(3) 加强学科间的交流与合作。冻土作为一种特殊材料，与传热学、力学等学科都有联系，因此要结合冻土力学研究的特点加强与相关学科的交流、合作、学习。在冻土强度模型研究中，可以从多个物理场的场方程入手，建立多场耦合方程，设定边界条件，导出冻土的强度模型方程，再以室内试验结果进行验证，使冻土力学理论方面的研究更进一步。

(4) 冻土的室内试验研究偏重于冻土单元体力学特性研究，而在实际工程中冻土和结构物之间存在相互作用关系。因此，需要在试验中开展大模型试验，模拟冻土和结构之间真实的受力状态，观察冻土强度和变形的发展规律。并在已有单元体力学试验研究的基础上，引入数值计算与数值模拟来更好地解决冻土工程中的实际问题。

参考文献(References)：

[1] Qi Jilin, Ma Wei. State-of-art research on mechanical properties of frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 133 – 143. [齐吉琳, 马巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 133 – 143.]

[2] Wang Renhe, Wang Xiuxi, Cui Hao. A study and application on computer control system for frozen soil experiments[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(2): 248 – 252. [汪仁和, 王秀喜, 崔灏. 冻土试验微机控制系统研究与应用[J]. 实验力学, 2005, 20(2): 248 – 252.]

[3] Yu Jining. Design of low temperature triaxial testing machine and experimental study on cyclic freeze-thaw on the mechanical of silty clay[D]. Wuhan: Wuhan Insitute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007. [于基宁. 低温三轴试验机研制及粉质粘土冻融循环力学效应试验研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007.]

[4] Yao Xiaoliang, Qi Jilin, Yu Fan, et al. A versatile triaxial apparatus for frozen soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 92(10): 48 – 54.

[5] Xu Xiangtian, Wang Jiwei, Zhang Mingyi. Experimental study of the mechanical properties of frozen Helin loess[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 685 – 691. [徐湘田, 王继伟, 张明义. 冻结和林黄土力学性质的试验研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(3): 685 – 691.]

[6] Ma Wei, Wang Dayan, Chang Xiaoxiao. Study on stress-strain characteristics of frozen soil under different initial confining pressures after k_0 consolidation[J]. Progress in Natural Science,

2004, 14(3): 344 – 348. [马巍, 王大雁, 常小晓. 模拟 k_0 固结后不同初始围压下冻土应力-应变特性研究[J]. 自然科学进展, 2004, 14(3): 344 – 348.]

[7] Cui Yinghui. Study of the dynamic characteristics of warm frozen soil based on permafrost dynamic direct shear apparatus[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. [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.]

[8] Guo Yan, Wang Dayan, Ma Wei, et al. Development and application of frozen hollow cylinder apparatus[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(12): 114 – 120. [郭妍, 王大雁, 马巍, 等. 冻土空心圆柱仪的研发与应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 114 – 120.]

[9] Haynes F D, Karalius J A. Effect of temperature on the strength of frozen silt: CRREL report 77-3[R]. Hanover, NH, USA: US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1977.

[10] Sayles F H. State of the art: mechanical properties of frozen soil [C]// Proceedings of the 5th International Symposium on Ground Freezing. Rotterdam, the Netherlands: A. A. Balkema Publishers, 1988: 143 – 165.

[11] Xiao Haibin. The relationship between uniaxial compressive strength and temperature and water content of artificial frozen soil [J]. Geotechnical Engineering World, 2008, 11(4): 62 – 63. [肖海斌. 人工冻土单轴抗压强度与温度和含水率的关系[J]. 岩土工程界, 2008, 11(4): 62 – 63.]

[12] Ma Qinyong. Tensile strength, uniaxial compressive strength test on artificially frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 1996 (3): 76 – 81. [马芹永. 人工冻土单轴抗拉、抗压强度的试验研究[J]. 岩土力学, 1996(3): 76 – 81.]

[13] Yu Haolin, Xu Xueyan, Dong Jianfeng, et al. Experimental study on uniaxial compressive strength in Mohe permafrost region [J]. Heilongjiang Electric Power, 2013, 35(1): 79 – 81. [于皓琳, 徐学燕, 董鉴峰, 等. 漠河多年冻土单轴抗压强度试验研究[J]. 黑龙江电力, 2013, 35(1): 79 – 81.]

[14] Wu Ziwang, Ma Wei, Zhang Changqing, et al. Strength characteristics of frozen sandy soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, 16(1): 15 – 20. [吴紫汪, 马巍, 张长庆, 等. 冻结砂土的强度特性[J]. 冰川冻土, 1994, 16(1): 15 – 20.]

[15] Zhao Xiaodong, Zhou Guoqing, Shang Xiangyu, et al. Deformation failure and energy properties for frozen soils with thermal gradients[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2350 – 2354. [赵晓东, 周国庆, 商翔宇, 等. 温度梯度冻土压缩变形破坏特征及能量规律[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2350 – 2354.]

[16] Tsytovich N A, Sumgin M I. Principles of mechanics of frozen ground[R]. Hanover, NH, USA: US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1959.

[17] Li Jialing. Analysis of uniaxial compressive strength and the basic parameters of clay soil[C]// Proceeding of the 2007 National Conference on Mine Construction. Xi′an: Xi′an Cartographic Publishing House, 2007: 255 – 258. [李嘉玲. 黏土单轴抗压强度与土工基本参数的试验分析[C]//2007 全国矿山建设学术会议. 西安: 西安地图出版社, 2007: 255 – 258.]

[18] Tsytovich N A, Swinzow E, Tschebotarioff G. The mechanics of frozen ground[M]. New York: McGraw-Hill, 1975.

[19] Tsytovich N A. Mechanics of frozen soil[M]. Zhang Changqing, Zhu Yuanlin, trans. Beijing: Science Press, 1985. [崔托维奇 H A. 冻土力学[M]. 张长庆, 朱元林, 译. 北京: 科学出版社, 1985.]

[20] Parameswaran V R. Deformation behaviour and strength of frozen sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1980, 17(1): 74 – 88.

[21] Zhu Yuanlin, Carbee D L. Creep and strength behavior of frozen silt in uniaxial compression: CRREL report 87-10[R]. Hanover, NH, USA: US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1987.

[22] Bragg R A, Andersland O B. Strain rate, temperature, and sample size effects on compression and tensile properties of frozen sand[J]. Engineering Geology, 1981, 18(Suppl 1/2/3/4): 35 – 46.

[23] Chen Youliang, Wang Peng, Wang Ming, et al. Experimental study on uniaxial compressive strength of frozen clay in Shanghai [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2012, 33(2): 303 – 308. [陈有亮, 王鹏, 王明, 等. 上海冻结土单轴无侧限抗压强度试验研究[J]. 力学季刊, 2012, 33(2): 303 – 308.]

[24] Goughnour R R, Andersland O B. Mechanical properties of a sand-ice system[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 94(4): 923 – 950.

[25] Chamberlain E, Groves C, Perham R. Mechanical behaviour of frozen earth materials under high pressure triaxial test conditions [J]. Geotechnique, 1972, 23(1): 136 – 137.

[26] Wu Chao, Zhang Shujuan, Zhou Zhiwei, et al. A study of the effect of confining pressure path on strength and deformation of frozen silty sand[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(6): 1575 – 1582. [吴超, 张淑娟, 周志伟, 等. 围压路径对冻结粉质砂土变形行为及强度的影响研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1575 – 1582.]

[27] Ting J M, Martin R T, Ladd C C. Mechanisms of strength for frozen sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109 (10): 1286 – 1302.

[28] Haynes F D, Karalius J A, Kalafut J. Strain rate effect on the strength of frozen silt: report N350[R]. Hanover, NH, USA: US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1975.

[29] Zhu Yuanlin, Carbee D L. Strain rate effect on the tensile strength of frozen silt[C]// Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing, Sapporo, Japan, 1985: 153 – 157.

[30] Chen Youliang, Wang Ming, Xu Shan, et al. Tensile and compressive strength tests on artifical frozen soft clay in Shanghai [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31 (7): 1046 – 1051. [陈有亮, 王明, 徐珊, 等. 上海人工冻结软黏土抗压抗拉强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31 (7): 1046 – 1051.]

[31] Wu Xuyang, Liang Qingguo, Niu Fujun, et al. Deformation failure mechanism in tensile test on remolded loess from Jiuzhou, Lanzhou[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39 (4): 842 – 849. [吴旭阳, 梁庆国, 牛富俊, 等. 兰州九州重塑黄土的抗拉变形破坏机理[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 842 – 849.]

[32] Zhu Yuanlin, Carbee D L. Tensile strength of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1986, 8(1): 15 – 28. [朱元林, 卡皮 D L. 冻结粉砂的抗拉强度[J]. 冰川冻土, 1986, 8(1): 15 – 28.]

[33] Huang Xing, Li Dongqing, Ming Feng, et al. Experimental study of the compressive and tensile strengths of artificial frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(5): 1346 – 1352. [黄星, 李东庆, 明锋, 等. 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.]

[34] Zhao Jingfeng. An experimental study on the relationship between tensile strength and temperature and water ratio of frozen soil [J]. Geology and Exploration, 2011, 47(6): 1158 – 1161. [赵景峰. 冻土抗拉强度与冻温及含水率关系的试验研究[J]. 地质与勘探, 2011, 47(6): 1158 – 1161.]

[35] Shen Zhongyan, Liu Yongzhi. Application of the radial-splitting method to determining tensile strength of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, 16(3): 224 – 231. [沈忠言, 刘永智. 径向压裂法在冻土抗拉强度测定中的应用[J]. 冰川冻土, 1994, 16(3): 224 – 231.]

[36] Shen Zhongyan, Peng Wanwei, Liu Yongzhi, et al. Preliminary research on axial splitting method for determining tensile strength of frozen soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(1): 33 – 39. [沈忠言, 彭万巍, 刘永智, 等. 轴向压裂法测定冻土抗拉强度初步研究[J]. 冰川冻土, 1995, 17(1): 33 – 39.]

[37] The Qinghai-Tibet Permafrost Dynamics Research Group. A preliminary study on some properties of the frozen soil of Qinghai-Tibet Highway[M]// Collected papers of Lanzhou Institute of Glaciology, Geocryology and Desert, Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press, 1976: 76 – 88. [青藏冻土力学研究组. 青藏公路冻土力学若干性质的初步研究[M]//中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所集刊. 北京: 科学出版社, 1976: 76 – 88.]

[38] Sun Huijing. Study on numerical regression model of shear strength of frozen soil with application to frozen ground engineering[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. [孙会敬. 冻土抗剪强度的数值回归模型研究及其在冻土工程中的应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.]

[39] Dong Simeng, Zheng Haijun, Xu Qiang. Study on the influence of freezing on Chengdu clay shear strength index[J]. China Water Transport, 2009, 9(4): 184 – 185. [董思萌, 郑海君, 许强. 冻结作用对成都粘土抗剪强度指标的影响研究[J]. 中国水运, 2009, 9(4): 184 – 185.]

[40] Wu Ziwang, Ma Wei. Strength and creep of frozen soil[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1994. [吴紫汪, 马巍. 冻土强度与蠕变[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994.]

[41] Liu Hanbing, Wang Jing, Wei Haibin, et al. Correlation of subgrade soil shear strength and plasticity index under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2011, 41(Suppl 2): 149 – 152. [刘寒冰, 王静, 魏海斌, 等. 冻融循环下路基土抗剪强度与塑性指数相关性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(增刊 2): 149 – 152.]

[42] He Weichao. Research on shear strength and microstructure of subgrade soil under the effect of freeze-thaw cycles[D]. Changchun: Jilin University, 2013. [何伟朝. 冻融循环作用下路基土的剪切强度及其微观结构研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.]

[43] Zhu Yuanlin, Zhang Jiayi, Peng Wanwei, et al. Constitutive relations of frozen soil in uniaxial compression [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1992, 14(3): 210 – 217. [朱元林, 张家懿, 彭万巍, 等. 冻土的单轴压缩本构关系[J]. 冰川冻土, 1992, 14(3): 210 – 217.]

[44] Ma Wei, Chang Xiaoxiao. Influence of loading and unloading on strength and deformation of frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5): 563 – 566. [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, 23(5): 563 – 566.]

[45] Xu Xiangtian, Lai Yuanming, Zhou Zhiwei, et al. Laboratory investigation on the deformation and damage characteristics of frozen loess under triaxial cyclic and monotonic loading conditions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1184 – 1191. [徐湘田, 赖远明, 周志伟, 等. 循环与单调加载作用下冻结黄土的变形与损伤特性[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1184 – 1191.]

[46] Ma Wei, Wu Ziwang, Chang Xiaoxiao. Effects of consolidation process on stress-strain characters of tjaeles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3): 198 – 221. [马巍, 吴紫汪, 常小晓. 固结过程对冻土应力-应变特性的影响[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 198 – 221.]

[47] Ma Wei, Chang Xiaoxiao. Comparison of strength and deformation of artificially frozen soil in two testing manners[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(2): 149 – 154. [马巍, 常小晓. 两种不同试验模式下人工冻结土强度与变形的对比分析[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 149 – 154.]

[48] Ma Wei, Wang Dayan. Status quo and reflections of the deep frozen soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 1123 – 1130. [马巍, 王大雁. 深土冻土力学的研究现状与思考[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 1123 – 1130.]

[49] Ma Wei, Wu Ziwang. Analysis of microstructural changes in frozen sandy soil under confining pressures using scaning electronic microscope[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(2): 152 – 158. [马巍, 吴紫汪. 围压作用下冻结砂土微结构变化的电镜分析[J]. 冰川冻土, 1995, 17(2): 152 – 158.]

[50] Wang Dayan, Ma Wei, Chang Xiaoxiao. Analyses of behavior of stress-strain of frozen Lanzhou loess subjected to k_0 consolidation [J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 40(1/2): 19 – 29.

[51] Wang Dayan, Ma Wei, Wen Zhi, et al. Study on strength of artificially frozen soils in deep alluvium[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(4): 381 – 388.

[52] Wang Dayan, Ma Wei, Wen Zhi, et al. Stiffness of frozen soils subjected to k_0 consolidation before freezing[J]. Soils and Foundations, 2007, 47(5): 991 – 997.

[53] Wang Dayan, Ma Wei, Chang Xiaoxiao, et al. Physico-mechanical properties changes of Qinghai-Tibet clay due to cyclic freezing and thawing[J]. Chinese Jounal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4313 – 4319. [王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 冻融循环作用对青藏粘土物理力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4313 – 4319.]

[54] Wang Dayan, Ma Wei, Chang Xiaoxiao. Study of behavior of stress-strain for frozen soils subjected to k_0 consolidation by unloading triaxial shear tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1252 – 1256. [王大雁, 马巍, 常小晓. k_0固结后卸载状态下冻土应力-应变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1252 – 1256.]

[55] Wang Dayan, Ma Wei, Chang Xiaoxiao, et al. Study on resistance to deformation of artificially frozen soil in deep alluvium [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 418 – 421. [王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 深部人工冻土抗变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 418 – 421.]

[56] Wang Dayan, Ma Wei, Chang Xiaoxiao, et al. Small-strain stiffness properties of frozen soils in deep alluvium[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1447 – 1451. [王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 深部人工冻土在小应变条件下的刚度特性[J].

岩土力学, 2006, 27(9): 1447 – 1451.]
[57] Wang Dayan, Ma Wei, Chang Xiaoxiao, et al. Study on the strength characteristics of frozen soil in artificial freezing sinking [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(2): 168 – 172. [王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 模拟人工冻结凿井状态下冻土强度特性研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 168 – 172.]
[58] Wu Ziwang, Zhu Yuanlin. Effect of water on rheology of frozen soil[C]// Proceedings of the 2nd National Conference on Geocryology. Lanzhou: Gansu People's Publishing House, 1983: 309 – 313. [吴紫汪, 朱元林. 水分对冻土流变的作用[C]// 第二届全国冻土学术会议论文选集. 兰州: 甘肃人民出版社, 1983: 309 – 313.]
[59] Du Haimin, Ma Wei, Zhang Shujuan, et al. Effects of strain rate and water content on uniaxial compressive characteristics of frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(5): 1373 – 1379. [杜海民, 马巍, 张淑娟, 等. 应变率与含水率对冻土单轴压缩特性影响研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1373 – 1379.]
[60] Sun Yiqiang. Experimental research on shear strength under negative temperature for silty clay[D]. Harbin: Harbin University of Sicience and Technology, 2017. [孙义强. 粉质黏土负温抗剪强度试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.]
[61] Wang Chengwei, Li Dongwei. Study on triaxial shear test of deep artificial freezing clay under stress path[J]. Coal Engineering, 2013, 45(7): 118 – 120. [汪承维, 李栋伟. 应力路径下深部人工冻结黏土三轴剪切试验研究[J]. 煤炭工程, 2013, 45(7): 118 – 120.]
[62] Zhao Xiaodong, Zhou Guoqing, Lu Guilin. Strain responses of frozen clay with thermal gradient under triaxial creep[J]. Acta Geotechnica, 2017, 12(1): 183 – 193.
[63] Zhao Xiaodong, Zhou Guoqing. Creep deformation and heterogeneous characteristics for soils with thermal gradient[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 390 – 394. [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.]
[64] Sheng Yu, Wu Ziwang, Zhu Yuanlin, et al. Geometric analysis on the creep of frozen soil under increasing stress using creep theories[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(Suppl 1): 51 – 57. [盛煜, 吴紫汪, 朱元林, 等. 应用蠕变理论对冻土在增应力过程中蠕变规律的几何分析[J]. 冰川冻土, 1995, 17(增刊1): 51 – 57.]
[65] Dong Liancheng, Zhang Gong, Zhao Shuping, et al. Experimental study of the creep indexes of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 130 – 136. [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.]
[66] Cai Cong, Ma Wei, Zhao Shuping, et al. Uniaxial tests on frozen loess and its constitutive model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 879 – 887. [蔡聪, 马巍, 赵淑萍, 等. 冻结黄土的单轴试验及其本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 879 – 887.]
[67] Zhang Xiangdong, Fu Qiang. Experimental study of triaxial creep properties of frozen soil and thickness determination of flat frozen soil wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2261 – 2266. [张向东, 傅强. 冻土三轴蠕变特性试验研究及平面冻土墙厚度的确定[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2261 – 2266.]
[68] Zhu Yuanlin. Studies on strength and creep behaviour of frozen soils in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, 10(3): 332 – 337. [朱元林. 我国冻土强度与蠕变研究[J]. 冰川冻土, 1988, 10(3): 332 – 337.]
[69] Liu Zengli, Zhang Xiaopeng, Li Hongsheng. A damage constitutive model for frozen soils under uniaxial compression based on CT dynamic distinguishing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 542 – 546. [刘增利, 张小鹏, 李洪升. 基于动态 CT 识别的冻土单轴压缩损伤本构模型[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 542 – 546.]
[70] Chen Xiangsheng. Experimental study on strength of artifically frozen soil under transient triaxial compression[J]. Mine Construction Technology, 1992(6): 38 – 40. [陈湘生. 人工冻土瞬时三轴剪切强度特征的试验研究[J]. 建井技术, 1992(6): 38 – 40.]
[71] Fish A M. Strength of frozen soil under a combined stress state [C]// Proceedings of the 6th International Symposium on Ground Freezing. Rotterdam, the Netherlands: A. A. Balkema, 1991: 135 – 145.
[72] Ma Wei, Wu Ziwang, Zhang Changqing. Strength and yield criterion of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993, 15(1): 319 – 322. [马巍, 吴紫汪, 张长庆. 冻土的强度与屈服准则[J]. 冰川冻土, 1993, 15(1): 319 – 322.]
[73] He Ping, Cheng Guodong, Zhu Yuanlin. Constitutive theories on viscoelastoplasticity and damage of frozen soil[J]. Science in China: Series D, 1999, 42(Suppl 1): 38 – 43. [何平, 程国栋, 朱元林. 冻土粘弹塑损伤耦合本构理论[J]. 中国科学: D 辑, 1999, 29(增刊1): 35 – 39.]
[74] Lai Yuanming, Cheng Hongbin, Gao Zhihua, et al. Stress-strain relationships and nonlinear Mohr strength criterion of frozen sand clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1612 – 1617. [赖远明, 程红彬, 高志华, 等. 冻结砂土的应力-应变关系及非线性莫尔强度准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1612 – 1617.]
[75] Ding Jingkang, Lou Anjin, Xu Xueyan. Long-term shear strength of frost-thaw thansite zone[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993, 15(2): 283 – 288. [丁靖康, 娄安金, 徐学燕. 冻融过渡带土的长期抗剪强度[J]. 冰川冻土, 1993, 15(2): 283 – 288.]
[76] Duncan J M, Byrne P, Wong K S, et al. Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stress and movements in soil masses[J]. Journal of Consulting and Clinical Psychology, 1980, 49(4): 554 – 567.
[77] Shen Zhongyan, Peng Wanwei, Liu Yongzhi. The effect of length of specimen on the results in radial splitting test[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, 16(4): 327 – 332. [沈忠言, 彭万巍, 刘永智. 径压法冻土抗拉强度测定中试样长度的影响[J]. 冰川冻土, 1994, 16(4): 327 – 332.]
[78] Vyalov S S. The rheological principle of soil mechanics[M]. Du Yupei, trans. Beijing: Science Press, 1987. [维亚洛夫 C C. 土力学的流变原理[M]. 杜余培, 译. 北京: 科学出版社, 1987.]
[79] Miao Tiande, Wei Xuexia, Zhang Changqing. Microstructure damage theory for the creep process of frozen soil[J]. Sciences in China: Series B, 1995, 25(3): 309 – 317. [苗天德, 魏雪霞, 张长庆. 冻土蠕变过程的微结构损伤理论[J]. 中国科学: B 辑, 1995, 25(3): 309 – 317.]
[80] Li Zhimin. Study on elastoplastic damage constitutive model of frozen soil based on energy dissipation theory[D]. Huainan, Anhui: Anhui University of Science and Technology, 2009. [李志敏. 基于能量耗散理论的冻土弹塑性损伤本构模型研究[D]. 安徽淮南: 安徽理工大学, 2009.]
[81] Li Dongwei, Wang Renhe. Study on creep constitutive model of

frozen soil based on statistical damage theory[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2008, 25(1): 133 – 136. [李栋伟, 汪仁和. 基于统计损伤理论的冻土蠕变本构模型研究[J]. 应用力学学报, 2008, 25(1): 133 – 136.]

[82] Li Dongwei, Wang Renhe, Hu Pu. Study of frozen soil creep damage-coupling constitutive function[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 446 – 449. [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.]

[83] Dafalias Y F. Bounding surface plasticity (I): mathematical foundation and hypoplasticity[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1986, 112(9): 966 – 987.

[84] Wu Wei, Kolymbas D. Numerical testing of the stability criterion for hypoplastic constitutive equations[J]. Mechanics of Materials, 1990, 9(3): 245 – 253.

[85] Wu Wei, Niemunis A. Failure criterion, flow rule and dissipation function derived from hypoplasticity[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2015, 1(2): 145 – 163.

[86] Xu Guofang, Wu Wei, Qi Jilin. A triaxial creep model for frozen soil based on hypoplasticity[J/OL]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2017 [2017-06-06]. http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2017.1344145.

[87] Yang Yugui, Lai Yuanming, Dong Yuanhong, et al. The strength criterion and elastoplastic constitutive model of frozen soil under high confining pressures[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 60(2): 154 – 160.

[88] Li Dongwei, Fan Juhong, Wang Renhe. Research on visco-elastic-plastic creep model of artificially frozen soil under high confining pressures[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65(2): 219 – 225.

[89] Wang Songhe, Qi Jilin, Yin Zhengyu, et al. A simple rheological element based creep model for frozen soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 106/107: 47 – 54.

[90] Cai Zhongmin, Zhu Yuanlin, Zhang Changqing. Viscoelastoplastic constitutive model of frozen soil and determination of its parameters[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1990, 12(1): 31 – 40. [蔡中民, 朱元林, 张长庆. 冻土的粘弹塑性本构模型以及材料参数的确定[J]. 冰川冻土, 1990, 12(1): 31 – 40.]

[91] Li Dongwei, Wang Renhe, Zhao Yanhui, et al. Research on parabolic yield-surface creep constitutive model of artificial frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1943 – 1948. [李栋伟, 汪仁和, 赵颜辉, 等. 抛物线型屈服面人工冻土蠕变本构模型研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1943 – 1948.]

[92] Hou Feng, Lai Yuanming, Liu Enlong, et al. A creep constitutive model for frozen soils with different contents of coarse grains [J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 145: 119 – 126.

[93] Den Haan E J. A compression model for non-brittle soft clays and peat[J]. Géotechnique, 1996, 46(1): 1 – 16.

[94] Liu Mengxin, Yao Xiaoliang, Qi Jilin, et al. 1D creep model for frozen soil taking account of stress history[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 898 – 903. [刘萌心, 姚晓亮, 齐吉琳, 等. 考虑应力历史的冻土一维蠕变模型[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 898 – 903.]

[95] Xu Xiangtian, Lai Yuanming, Liu Feng, et al. A study of mechanical test methods of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(5): 1132 – 1138. [徐湘田, 赖远明, 刘峰, 等. 冻土中几类力学试验方法的探讨[J]. 冰川冻土, 2011, 33(5): 1132 – 1138.]

Laboratory studies of frozen soil statics: recent progress and prospect

LEI Lele[1,2], XIE Yanli[3], WANG Dayan[1], CHEN Dun[1,2], JIN Xiao[2,4]

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Qinghai Electric Power Research Institute, State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China; 4. Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Frozen soil mechanics is the theoretical foundation of geocryology and is the key for solving engineering problems in cold regions. It is necessary to study mechanical properties of frozen soil for the sake of constructions in cold regions, so as to guarantee their stability. The frozen soil mechanics includes the frozen soil statics and the frozen soil dynamics, and its statics plays an important role in the study of frozen soil mechanics. In this paper, the research progress in laboratory test of conventional frozen soil statics is summarized, as well as the studies on strength, deformation and theoretical model. The important role of frozen soil mechanics in cryospheric science and the construction in cold regions is affirmed, and its shortage at present is also pointed out. At last, the development trend for studying the frozen soil mechanics is predicted according to the characteristics of frozen soil mechanics and construction demand.

Key words: frozen soil statics; laboratory test; frozen soil strength; deformation characteristics; research progress

（本文编辑：武俊杰）