美启航，于晖，陈继. 冻土蠕变特性研究现状及展望[J]. 灾害学，2018，33(S1)：47 - 56. [MEI Qihang，YU Hui and CHEN Ji. Research Status and Prospect of Permafrost Creep Characteristics[J]. Journal of Catastrophology，2018，33(S1)：47 - 56. doi：10.3969/j.issn.1000 - 811X.2018.Z1.009.]

冻土蠕变特性研究现状及展望*

美启航[1,2,3]，于 晖[4]，陈 继[1,3]

(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. 中国科学院西北生态环境资源研究院 青藏高原北麓河冻土工程与环境综合观测研究站，甘肃 兰州 730000；4. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司，陕西 西安 710075)

摘 要：对目前冻土蠕变试验研究和模型研究的研究成果进行了总结。从微观蠕变试验和宏观蠕变试验两方面对冻土蠕变的试验研究进行介绍。分经验模型、流变模型和一般的应力 - 应变 - 时间模型对冻土蠕变本构模型研究进行分析总结。从试验研究和本构模型研究两方面介绍冻土的动蠕变研究进展。同时，也介绍了冻土与桩基之间冻结强度的研究。目前，冻土蠕变研究大都集中在短期冻结强度，尤其缺乏桩土之间蠕变变形及长期强度的相关研究。随着未来冻土区铁路、公路建设以及民用建筑等级的提高，桩基础将越来越多的被应用。为优化冻土区桩基的设计，在当前有必要加强冻土区桩基蠕变特性的研究。

关键词：冻土；蠕变变形；试验；本构模型；冻结强度
中图分类号：X43；P462 **文献标志码**：A **文章编号**：1000 - 811X(2018)S1 - 0047 - 10
doi：10.3969/j.issn.1000 - 811X.2018.Z1.009

冻土是指 0℃ 或 0℃ 以下含有冰的各种岩石或土[1]。冻土中冰的存在使其具有流变性，即外荷载作用下应力与应变随时间改变的特性，表现为冻土受力后产生蠕变变形和应力松弛等现象[2]。土的蠕变可以理解为在恒定荷载下土体变形随时间的推移而发生变化的过程[3]。

作为世界上海拔最高、线路最长的高原铁路，青藏铁路穿越连续多年冻土区 550 km，且多为高温冻土(温度高于 - 1.5℃ 的冻土)和高含冰量冻土[4]，因此对温度和工程活动具有很强的敏感性。为保证青藏铁路的长期稳定性，针对冻土路基沉降问题，研究人员分别从调控辐射、对流和传导等角度提出了多种防护措施，如设置通风管、抛石护坡、热管等[5]。然而，青藏铁路沿线的实测结果表明，即使采取了上述等工程防护措施，使得冻土层上限保持不变甚至稍微上升，青藏铁路路基仍然产生了由冻土蠕变产生的沉降变形[6]。因此，研究冻土的蠕变特性，对保持青藏铁路等寒区工程的稳定性具有重要意义。

冻土蠕变研究最早是在国外开展的。苏联始于 1930 年代初期，北美也在 1950 年代初开始进行冻土强度的研究，通过这些研究逐步建立了冻土强度与蠕变理论。随着寒区工程建设的进行以及人工冻结技术的应用，我国在 1960 年代初开始了冻土强度研究。但我国比较系统地研究冻土强度和蠕变是在 1970 年代开始的[7]。多年来，国内外学者在大量试验工作基础上，已经对冻土在不同温度下的蠕变特性有了较全面的认识，并且为工程设计提供了一些比较可靠的计算理论[8]。

由于冻土中冰包裹体的存在，冻土在很小的荷载作用下也会发生蠕变变形，这是冻土区别于其他固体和非冻土的首要区别[2]。根据前苏联冻土学家 Tsytovich[2] 的观点，将冻土蠕变分为两种类型：衰减型蠕变和非衰减型蠕变。

图 1 中的三条曲线描述了冻土蠕变过程应变随时间的变化情况[3]。曲线 1 反应塑性变形过程，应变率为常数的；曲线 3 为应变速率随时间减小的衰减型蠕变；曲线 2 为非衰减型蠕变，非衰减型蠕变由开始时非稳定蠕变阶段、匀应变率阶段(AB 段)以及最终的渐进流阶段组成。渐进流阶段这一术语由 Tsytovich 于 1939 年提出[2]，其特征是冻土蠕变应变率持续增大并以土体发生脆性或塑性破坏而告

* 收稿日期：201 - 03 - 05 修回日期：2018 - 07 - 11
第一作者简介：美启航(1992 -)，男，汉族，陕西西安人，在读硕士研究生，从事冻土力学与寒区工程研究.
E-mail：meiqihang17@mails.ucas.ac.cn
通信作者：陈继(1977 -)，男，汉族，河南永城人，研究员，主要从事寒区工程与环境方面研究. E-mail：chenji@lzb.ac.cn

终。Vyalov[9]以砂土的研究为例，指出了蠕变是由微裂隙的产生和发展以及土体中其他缺陷引起的。

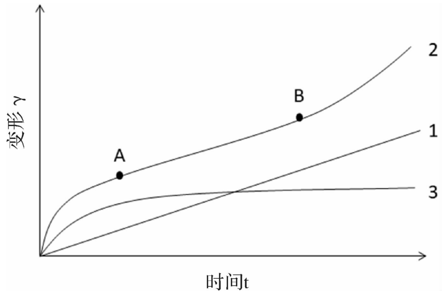


图1　蠕变变形随时间变化曲线[3]

在不同大小荷载作用下，蠕变随着荷载的增加，应变率增大，蠕变类型由衰减型蠕变转为非衰减型蠕变，土体越早发生破坏[3]。对于冻土蠕变由衰减型蠕变转为非衰减型蠕变时的最大应力，称之为冻土的长期强度。

对于冻土蠕变性质的研究，目前主要通过蠕变试验和构建冻土蠕变模型两种方法。本文对这两种主要研究方法现有进展进行了总结并对冻土动蠕变的研究进行了简单介绍，希望能对今后冻土的蠕变研究提供参考。

1　冻土蠕变试验研究

利用蠕变方程和试验得出的参数，可以预报冻土蠕变变形过程[10]。蠕变方程的建立也需要蠕变试验得到的数据。因此，针对冻土蠕变特性进行准确有效的试验研究十分必要。一般从微观和宏观两个方面对冻土进行蠕变试验研究。微观方面指通过使用光学、电子显微镜或者电子计算机断层扫描仪(CT)等方式观察蠕变过程中冻土内部微观结构的变化，对冻土的蠕变特性做出解释；宏观方面则是指通过从室内蠕变试验或现场试验获取的数据并进行处理，得到蠕变曲线和各冻土蠕变指标数据用以研究冻土蠕变特性。

1.1　蠕变微观试验研究

研究冻土应力—应变过程中的微结构变化是揭示冻土力学微观机理的重要途径。因此许多学者通过电子显微镜和CT等仪器对蠕变过程中冻土细微结构变化进行了一系列研究，并取得重要进展[11]。最早，Vyalov[3]、崔托维奇[2]等进行了一系列冻土蠕变微观试验并加以研究，且均在其所著冻土学相关专著中进行描述。他们通过晶体光学显微镜观察等手段发现：冻土衰减蠕变包含的微观过程有裂隙的闭合、冻土中矿物颗粒的不可逆相对剪切移动以及冻土冰的压融和二次冻结，直至变形速率趋向于零；而冻土非衰减蠕变微观过程表现为，在蠕变的前两个阶段微裂隙减小闭合、超载区水的挤出和再次冻结、矿物颗粒的剪切移动，并在第二阶段结构缺陷变化稳定至变形速率恒定，进入渐进流阶段后微裂隙则迅速发展，伴随着冰的重结晶和以其基面平行于剪切方向重新定向，应变速率迅速增加。

张长庆[12-13]、苗天德[14]等首次将现代损伤力学理论框架引人冻土力学领域的研究中，应用复型电镜技术系统开展了冻土蠕变试验与微观结构观测，通过探讨冻土蠕变过程微观结构变化，建立了冻土损伤理论。他们认为在冻土蠕变过程中，冰的胶结粘聚力、荷载作用下矿物颗粒的重新定向、以及微裂纹的产生和发展对蠕变破坏起控制性作用。并在此基础上引入冻土蠕变的耗散势函数，将其构造为含冰量、颗粒定向因子以及面积损伤因子等表征微结构变化的内变量的函数。建议了一个用一般应力分量表示的有单一表达式的屈服条件，从而建立了冻土蠕变三维损伤演化方程并提出了一个冻土长期强度方程。经过验证，此理论得到曲线与单轴蠕变试验曲线一致性良好。

CT检测作为一种有效的反映物质物理特性的手段，因具有能够在不破坏试样的基础上持续检测不同实验条件下冻土内部状况，而被蒲毅彬等[15]引入冻土试验研究当中，并在文章中对CT检测的技术原理、技术指标以及检测方法做出了详细说明。通过随后的研究，又给出了将CT检测结果用于定量分析的数学方程[16]。吴紫汪[17]、马巍[18]等首次用CT检测技术对冻土的单轴和三轴蠕变试验中各层面结构变化进行了动态监测，得出了冻土变形过程中结构强化、弱化的变化规律等相关结论。之后也有许多学者应用此技术针对冻土蠕变进行了研究，并取得成果。随着对仪器的不断改进，现在在利用三轴仪进行冻土的三轴加卸载试验的同时，配合医用CT机时可实现整个力学过程的实时动态扫描[19]。此外，陈世杰等[20]提出了在现有技术技术条件下应用CT扫描技术研究冻土问题仍存在的一些问题，并给出了一些可能解决方案。

1.2　蠕变宏观试验研究

1.2.1　室内蠕变试验

冻土力学是一门实验学科，它的理论发展与实际应用离不开室内试验[10]。作为研究土的蠕变特性的主要手段，室内试验和现场试验相比更加便于控制试验条件、排除次要因素，并具有可多次重复、便于长期观测且耗资少等特点[21]。

为解决冻土区工程蠕变沉降问题，国内外学学者进行了大量冻土蠕变实验研究。Andersland

等[22]通过采用差分蠕变试验(Differential creep test)研究冻土蠕变过程中应力、温度和土体结构对蠕变率的影响并给出了对应的方程。Parameswaran[23]等进行了渥太华砂进行密闭条件下的三轴试验，并对蠕变过程中冻土强度的变化规律做出了解释。朱元林等[24]在可变载蠕变试验机上进行了重塑粉砂的蠕变试验，并对高应力和低应力下的蠕变率ε－时间 t 曲线等试验结果进行了分析，对冻土蠕变破坏准则进行了研究。Yao[25]等进行了不同温度下的冻土蠕变试验，通过对试验结果的分析提出了一个以温度为自变量的冻土蠕变模型。

根据试验条件将冻土室内试验分为两大类：一类是考察温度、应变率、含水量及干密度等因素对冻土单轴强度影响的单轴蠕变试验；另一类是考察围压对冻土强度影响的三轴蠕变试验[26]。

此外，根据加载方式的不同，冻土蠕变试验还可以分为多试样的恒定荷载试验和单试样分级加载试验[10](图2)。恒定荷载试样的优点是由于对试样施加的荷载相同，排除了加载对试样结果的影响，所以结果比较可靠；缺点是由于不同试样间存在差异，使得试验数据间存在较大离散型。分级加载试验的优点则是由于试验对象相同，排除了试样差异性对试验结果影响；缺点在于蠕变过程中的压融、硬化等现象会对下一步试验结果造成影响，且试验结果还需进一步处理[10]。

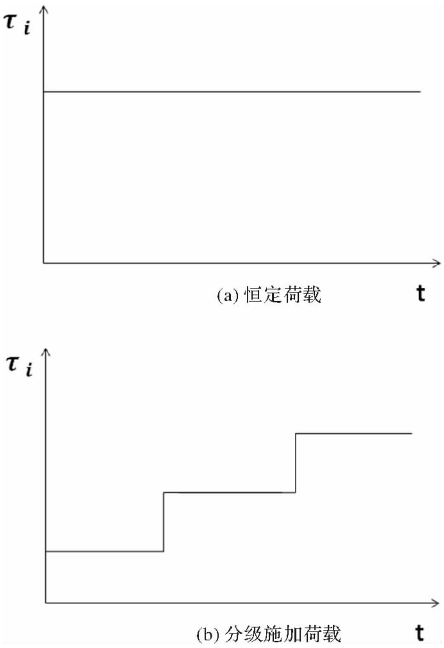


图2　冻土蠕变试验的加载方式[10]

对冻土室内蠕变试验步骤进行归纳，可以分为以下三个阶段：

(1)冻土试样制备阶段。彩雷洲[27]将常用的冻土试样制备方法总结为分层击实法、固结法、整体压密法三种。分层击实法通过分层锤击土样使其压密，再对土样进行冻结，适用于含冰量较低的冻土。固结法通过在试样顶部压载使其固结排水，该方法对试验设备要求高、过程复杂且不能批量制备试样。整体压密法是指在低温环境下用压力机静压试样成型，此方法的优点在于可一次成型。

(2)试验阶段。整个试验过程包括冻土蠕变试验条件的确定、蠕变试验前固结、进行蠕变试验等步骤。试验条件主要包括了恒温时间、围压固结时间、含水量和试验温度等条件。在土模加工成标准试样之后，需要在试验温度下进行一定时间的恒温处理。恒温时间过短会导致试样温度不均匀，影响试验效果；时间过长则造成浪费。常小晓等[28]通过进行不同恒温时间的冻土强度试验，确定合理的恒温时间为 12 h。在进行蠕变试验前需要对试样进行固结以尽可能模拟冻土蠕变的实际状态。常小晓等进行不同固结时间的强度试验后得出，固结时间超过 2 h 即可。这种先冻结后固结的试验结果适用于天然冻土以及浅地表冻土研究。而对于人工冻结工程中的人工冻土，考虑到冻结是在长期自然固结后产生，因此在进行试验时应采取先固结后冻结的试验步骤，这样更接近实际情况[29]。而试样含水量和含冰量的确定则需要根据试验具体情况进行设计。

冻土蠕变试验主要是在冻土三轴仪上进行。冻土的温度敏感性以及强度均高于常规土，因此不同于一般三轴仪，冻土三轴仪还应具有压力室温度可控和能提供较大围压、轴压等功能[10]。在我国，中国科学院冻土工程国家重点实验室[19]和长江科学院[30]等单位针对冻土三轴仪的设计、改进做了大量研究工作。

以恒定荷载冻土蠕变试验为例，蠕变试验过程为：首先对一个试样进行三轴强度试验确定其强度值，然后根据强度值确定施加的蠕变应力。蠕变应力加载时应在短时间内加载至目标值并保持稳定不变[10]。当试样变形稳定(应变速率小于 $0.0005\ h^{-1}$) 超过 24 h 或者试样发生破坏时(变形超过 30 mm)停止试验[31]。

(3)试验结果分析阶段。根据董连成等[31]的总结，可以用以下蠕变指标反映土体的内部变化和蠕变特性：蠕变曲线、初始应变 ε_0 和初始时间 t_0、蠕变起始应变 ε_m 与起始时间 t_m、蠕变破坏应变 ε_f 与破坏时间 t_f 以及相对蠕变指标。蠕变曲线指蠕变的应变－时间曲线(图1)，它反应冻土蠕变变形随时间的变化情况。初始应变指蠕变试验初期加载时产生的应变，也称瞬时应变，对应时间为初始时间。此阶段的应变为压缩变形，而非蠕

变变形。蠕变起始应变指蠕变由非稳定阶段进入稳定阶段的变化点的应变，对应时间为蠕变起始时间。蠕变破坏应变指蠕变由稳定阶段进入渐进段的变化点的应变，对应时间为蠕变破坏时间。他们还定义了一些相对蠕变指标，如相对初始时间(t_0/t_f)、相对流变时间($(t_m-t_0)/t_f$)、相对破坏时间($(t_f-t_m)/t_f$)、相对初始应变($\varepsilon_0/\varepsilon_f$)、相对流变应变($(\varepsilon_m-\varepsilon_0)/\varepsilon_f$)、相对破坏应变($(\varepsilon_f-\varepsilon_m)/\varepsilon_f$)等反映蠕变各个阶段的时间或应变占整个蠕变过程的比例，进一步表现冻土的蠕变特性。

1.2.2 现场蠕变试验

冻土蠕变室内试验大多是在低温(－30℃以下)、高压(300 kPa)等条件下进行，试验时间短，在发生二次蠕变前就停止试验。因此室内试验未能涉及长期低应力下发生二次蠕变等问题[32]。并且冻土的蠕变特性与其冻结历史、环境温度密切相关，因此通过钻取岩芯做室内蠕变试验很难得到可靠的蠕变参数[33]。因此在冻土蠕变性质的研究中，现场蠕变试验必不可少。

在冻土蠕变研究中，研究人员采用了多种手段进行冻土蠕变的现场试验。Wagner[34]对阿尔卑斯山石冰川(rock glacier)使用了坡度指示器(slope indicator)等仪器进行了观测。Savigny[35]和Bennett[36]等分别使用钻孔测斜仪系统(borehole inclinometer system)对加拿大近北极地区多年冻土进行原位试验，研究冻土蠕变速率和含冰量以及冻土蠕变速率和温度的关系。Wang[32]同样通过测斜仪对青藏高原风火山地区冻土进行了原位试验，来研究冻土蠕变变形和地面温度的关系。张虎等[37]则通过在青藏铁路北麓河段附近冻土区进行承台静载试验，观察冻土蠕变特性以确定蠕变参数和长期强度。在这个试验中，研究者布设了三个承载板设于多面冻土上限附近的承台，定期获取四个承台(另外一个为作为参照的天然地表)的地温、沉降数据，研究高温－高含冰冻土蠕变特性。

现场进行旁压试验可以在尽可能小的减少对土体扰动的情况下，获取原位土体性质。Ladanyi[38]于1971年首次将压力表应用于冻土的蠕变研究，并结合冻土蠕变特性对压力表进行了改进，提出了一套应用压力表进行冻土蠕变现场试验的程序，并给出了一种试验结果的理论解释方法。马小杰等[33]通过在青藏高原进行高温冻土旁压蠕变试验对高温冻土蠕变特性进行了研究。张虎等进行高温－高含冰量原位旁压试验验证了高温－高含冰量冻土的蠕变变形符合Ladanyi[39]的工程蠕变理论，并在此基础上对每个变形阶段的应变计算公式进行了改进，使得蠕变计算过程更加简单[40]。

常用于旁压试验的旁压仪布置如图3所示[33]。旁压试验的主要原理是：通过加压设备将加压液体充入压力探头，随压力增大探头体积增加，挤压土体使之变形。记录时间间隔和相应的体积V(代表压力探头的变形量)，绘制V－t曲线以判断土体的变形和强度特征[33]。

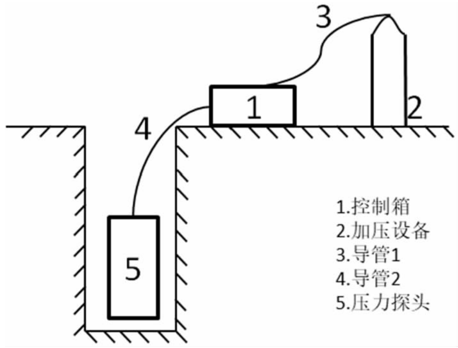


图3 旁压试验示意图[33]

2 冻土蠕变本构模型研究

建立考虑冻土应力－应变－强度特性随时间变化的蠕变本构模型，有助于解决工程应用中遇到的蠕变问题。研究人员从不同方向出发，提出了一系列用于预估冻土蠕变变形的模型。根据Liingaard[41]对土的蠕变模型的总结，可以将土的蠕变本构模型分为以下三类：1)经验模型；2)流变模型；3)一般的应力－应变－时间模型。

2.1 经验模型

经验模型主要是通过对试验数据进行拟合，得到包含一些试验参数的数学模型。经验模型通常能准确描述冻土蠕变行为，但是经验模型受限于特定的边界条件和加载条件，所以推广性受限。

通过分析冻土蠕变试验数据，Vyalov[42]最早提出了一个基于试验结果的冻土蠕变方程：

$$\in=\left(\frac{\sigma}{A(t)}\right)^{\frac{1}{m}}。\tag{1}$$

式中：$A(t)$指包含线性和非线性模量的总变形模量，随时间变化；m为小于1的强度因子。但是此模型预测结果只在低应力和初始蠕变阶段较准确，对于对高应力下的冻结粉土和黏土蠕变数据拟合性较差[10]。

Andersland[22]等通过分析重沉积高岭土的三轴剪切实验数据，发现蠕变应变率和应力加载速度存在一定联系。

之后，Sayles[43]进行了冻结渥太华砂的三轴试验，并根据试验数据提出在恒定压力和温度条件下，蠕变应变率和时间之间存在经验幂函数关系。提出了一个适用于衰减型蠕变的蠕变方程：

$$\varepsilon-\varepsilon_r=\begin{cases}[\dot{\varepsilon}_R/(t_R)^{1/n}][n/(n+1)][t^{(n+1)/n}-t_r^{(n+1)/n}], & n\neq1;\\ \dot{\varepsilon}_R/(t_R)^{\frac{1}{n}}\ln\left(\dfrac{t}{t_r}\right), & n=-1。\end{cases}\tag{2}$$

式中：t_r、t_R 为参考时间，参考时间大于零；$\dot{\varepsilon}_r$、$\dot{\varepsilon}_R$分别为对应参考时间 t_r、t_R 的参考应变率；n 为在对数坐标表中应变率－时间曲线的斜率。通过在特定温度和应力条件下进行短时间的蠕变试验确定 t_R 和 t_r 后，上式即可用来估算任意时刻的应变值。

考虑到已有主要模型均具有一定的局限性，不能统一的描述冻土蠕变的全阶段，Ting[44-45]通过对冻结砂的研究，提出了一个适用于全阶段的蠕变模型：

$$\dot{\varepsilon}=\mathrm{A}\mathrm{e}^{\beta t}t^{-m}。\tag{3}$$

式中：A，m 和 β 是试验确定的常数。本模型相较于其他模型，考虑了含冰量以及相对密度对冻土蠕变的影响。此模型适用于大多数冻结砂的无侧限蠕变，但是该模型仅适用于足以引起蠕变破裂的加载条件，对低应力下的衰减型蠕变适用性差。

朱元林和 Carbee[24] 根据 $\log\dot{\varepsilon}_\mathrm{m}-\log\sigma$ 曲线的拐点（$\dot{\varepsilon}_c$）（临界蠕变速度）和最小应变率$\dot{\varepsilon}_m$ 的大小关系，将蠕变分为短期蠕变和长期蠕变，并提出了不同的蠕变方程：

对于短期蠕变（$\dot{\varepsilon}_\mathrm{m}>\dot{\varepsilon}_\mathrm{c}$）：

$$\dot{\varepsilon}_\mathrm{m}=\dot{\varepsilon}_\mathrm{e}^{[-K(1/\sigma-1/\sigma_0)]}。\tag{4}$$

式中：$\dot{\varepsilon}_0$ 和 σ_0 为与温度 θ 无关的试验常数；K 则反应温度的影响。

蠕变（$\dot{\varepsilon}_\mathrm{m}<\dot{\varepsilon}_\mathrm{c}$）：

$$\dot{\varepsilon}_\mathrm{m}=\dot{\varepsilon}_\mathrm{c}\mathrm{e}^{[-K'(1/\sigma-1/\sigma_\mathrm{c})]}。\tag{5}$$

式中：$\dot{\varepsilon}_\mathrm{c}$ 为临界蠕变速度；σ_c 为临界蠕变强度，对应于$\dot{\varepsilon}_\mathrm{m}=\dot{\varepsilon}_\mathrm{c}$ 时的蠕变应力，与温度有关；K′则反应温度的影响。他们还根据 $t_m-\sigma$ 的关系（t_m为$\dot{\varepsilon}_\mathrm{m}$对应的蠕变破坏时间），针对两种类型的蠕变提出了各自的强度松弛方程，用于预报任何荷载作用时间下的蠕变极限强度。通过对不同类型的蠕变使用不同的模型，此模型预估的准确性得到提升。

Fish[46]则通过进行恒应变率试验和蠕变试验提出了一个包含应力、时间、温度等参数的基于热力学的蠕变方程。

在张长庆、苗天德等建立的冻土蠕变三维损伤理论的基础上，Lai[47]通过将损伤变量引入弹塑性本构模型，建立了弹塑性损伤本构模型。该模型可以同时反应围压的增强和减弱效应，对高围压下压融现象明显时冻土蠕变模拟效果较好。

2.2　流变模型

常用于金属、流体等的流变模型，也可用来描述土的流变性。流变模型可以分为三类[41]：1）微分方法；2）蠕变工程理论；3）遗传方法。

2.2.1　*微分方法*

微分方法用由基本单元组成的力学模型描述蠕变，并得到微分方程形式的蠕变方程，建立的模型也称为机械流变模型。此方法用于描述土的蠕变行为，具有概念直观、明确的优点，但对于复杂问题与实际相差较大[48]。常用的基本单元有三个（图4）：模拟弹性的弹簧、代表粘性的阻尼器以及表示塑性的滑片。常用的基本单元组成的蠕变力学模型有以下四个（图5）：

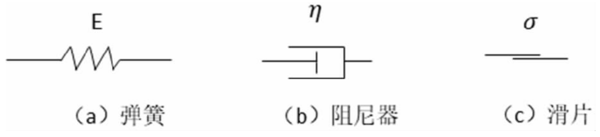


图4　基本流变单元

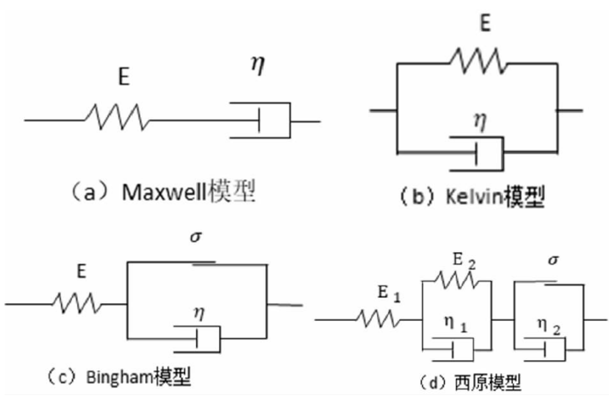


图5　力学元件模型

1960 年代 Vyalov[42]提出了一个由三个基本单元组成的力学模型（图6），但是这个模型未将冻土变形的线性和非线性过程结合起来，所以不能用于定量分析冻土的实际变形。

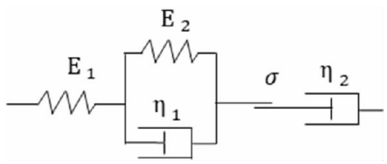


图6　力学模型结构[42]

为满足在工程中使用人工冻结技术时对高围压下人工冻土蠕变特性的需求，Wei[49]等通过对三轴试验结果进行分析，发现应力低于屈服应力时，冻土发生粘弹性变形；应力高于屈服应力时，发生粘弹塑性变形。并将抛物线屈服准则应用于西原模型中，提出了人工冻土的粘弹塑性本构模型（图7），蠕变方程分段表示为：

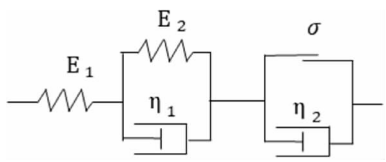


图7　粘弹塑性模型结构[49]

当屈服函数 F≤0 时：

$$\{\varepsilon_{ij}\}=\left\{\frac{1}{E_0}+\frac{1}{E_1}(1-e^{-E_1 t/\eta_1})\right\}\{\sigma_{ij}\}。\qquad(6)$$

当屈服函数 F > 0 时：

$$\{\varepsilon_{ij}\}=\left\{\frac{1}{E_0}+\frac{1}{E_1}(1-e^{-E_1 t/\eta_1})\right\}\{\sigma_{ij}\}+\left(\frac{F}{F_0}\times\frac{t}{\eta_2}\right)\{\sigma_{ij}\}。\qquad(7)$$

式中：F 为抛物屈服函数；E_0，E_1 为材料的弹性模量(MPa)；η_1，η_2 为材料的粘度系数(MPa·分钟)；t 为有效时间(min)。

Wang 等[50]通过分析冻土蠕变的典型特征，将 Maxwell、Kelvin 、Bingham 三种模型与马巍等提出的抛物线屈服准则结合，提出了一个简单的冻土蠕变模型(图 8)，该简单模型能合理描述冻结细砂的蠕变。

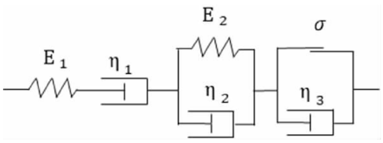


图 8 蠕变模型结构[50]

Hou 等[51]对冻结粉质黏土和不同含量粗颗粒土的混合物进行了三轴试验，依据试验结果提出了一个基于硬化和损伤的改进的西原模型。并得到了含硬化参数 H 和损伤变量 D 的蠕变方程。在较高应力下使用改进后的西原模型预测结果的误差比原西原模型小。

上述的模型都是整数阶模型，对于蠕变中的非线性渐进过程无法准确描述，而分数阶本构模型可以描述蠕变中应变的非线性渐进过程，并且分数阶模型具有参数少、形式简单等优点[52]。Yin 等[53]将经典西原模型中的阻尼器换为分数阶导数 Abel 阻尼器，建立了分数阶本构模型，并推导出了土的分数阶模型在蠕变、应力松弛、加载和卸载等不同条件下的解析公式。Abel 阻尼器是一种介于牛顿流体和理想固体之间的物质(图 9)，Abel 阻尼器的本构方程可以表示为：

$$\sigma(t)=E\frac{d^{\alpha}\varepsilon(t)}{dt^{\alpha}}。\qquad(8)$$

式中：E 为材料常数，α 为导数阶参数。

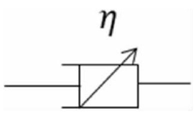


图 9 Abel 阻尼器

Yang[54]则通过引入 Abel 阻尼器，提出了冻结淤泥的分级阶蠕变本构模型(图 10)。通过选取不同的导数阶参数 α，分数阶本构模型可以描述不同应力水平下的蠕变模式。

2.2.2 蠕变工程理论

蠕变工程理论主要在金属、混凝土和冰等领

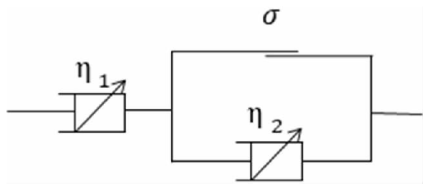


图 10 分级阶蠕变本构模型[54]

域应用，这一方法和经验模型方法类似，都是从实验结果出发建立模型。不同于经验模型方法之处在于蠕变工程理论用于材料的应力状态低于屈服极限时[41]。

2.2.3 遗传理论

遗传理论是基于叠加原理建立的，因此也称为积分表示法。遗传理论认为当前应变 $\varepsilon(t)$ 等于整个加载历史应变率的积分。遗传理论的方程形式为[55]：

$$\varepsilon(t)=\frac{1}{E}(t)\left[\sigma(\tau)+\int_0^t\sigma(\tau)\varphi(t-\tau)d\tau\right]。\qquad(9)$$

式中：$\varepsilon(t)$ 为 t 时刻的应变；$\sigma(t)$ 为 t 时刻的应力；$E(t)$ 为 t 时刻的弹性模量；τ 为 $0\sim t$ 内某时刻；$\varphi(t-\tau)$ 为蠕变核，和试验等因素有关。从数学形式上可以看出，在遗传理论中土的蠕变包含两个部分：t 时刻的瞬时应变(弹性部分)以及历史上蠕变变形的之和(积分部分)。但是由于必须要有大量实验数据才能建立准确的遗传理论模型，所以此方法在岩土中使用起来比较复杂[41]。盛煜等[56]通过室内试验，得到如下结论：在冻土衰减蠕变中，遗传理论模型预测结果基本正确；在冻土非衰减蠕变中，蠕变进入稳定流阶段后遗传理论模型失效；在冻土从衰减变向非衰减蠕变的增应力过程中，遗传理论得到的模型预测结果因未考虑衰减蠕变阶段的强化作用而产生误差，预测的冻土蠕变偏安全。

2.3 一般的应力 - 应变 - 时间模型

一般的应力 - 应变 - 时间模型即粘弹塑性模型。弹粘塑性模型将非粘弹性和时间依赖性塑性行为结合在一起。这种模型在编程时具有物理和数值意义明确的特点，所以在实际应用中比较推荐[50]。目前使用的粘弹塑性本构模型主要有两类：过应力模型(overstress models)和非稳态流动面模型(nonstationary flow surface models)。考虑到只有一个屈服面的冻土强度模型解决实际工程中三维问题时存在困难，Lai[57]从广义弹塑性力学出发，通过对冻结粉土的研究建立了冻结粉土的多屈服面三维弹塑性本构模型。此模型预测高、低围压下冻结粉土变形均比较贴合实际。

3 冻土的动蠕变研究

以上的冻土蠕变研究基本都是针对静蠕变，即冻土在静载作用下发生的蠕变。而在实际工程

应用中，冻土也常受动荷载作用发生动蠕变。如寒区道路工程路基及地基土在车辆荷载作用下发生的变形等[10]。同时，冻土的动蠕变特性也是寒区建设工程抗震设计的重要依据。而且冻土受快速变化的荷载作用时温度会发生改变，这也会造成冻土的蠕变特性发生变化[58]。因此，冻土的动蠕变特性研究已经引起人们的重视。针冻土的动蠕变特性，研究人员从试验出发，通过对试验结果的分析总结，对冻土的动蠕变特性有了进一步认识。下面从动蠕变试验研究和动蠕变模型研究两方面对冻土的动蠕变研究进行总结。

3.1　冻土的动蠕变试验研究

针冻土的动蠕变特性，研究人员通过动荷载试验方式，进行了一些动蠕变试验。朱元林[59]针对寒区工程中地基同时遭受静水压力和振动荷载这一实际情况，进行了冻土的动三轴蠕变实验。通过这个试验，发现在冻土动蠕变过程中，围压会对动蠕变破坏时间造成影响，但是不改变动蠕变破坏应变。同时通过对实验数据分析，作者提出了与静蠕变形式完全相同的动蠕变破坏准则：

$$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{m}} t_f^D = \varepsilon_f - \varepsilon_0。\tag{10}$$

式中：t_f 为动蠕变破坏时间，单位为分钟 ；$\dot{\varepsilon}$为最小蠕变率，单位为 min^{-1}；ε_f 为平均破坏应变；ε_0 为平均瞬时应变；p 为固定参数。

此外，针对影响动蠕变的各种因素，研究人员也进行了大量试验研究。何平等[60]通过对粉土进行大量室内单轴抗压试验，研究振动频率对冻土破坏的影响。赵淑萍等[61]（通过进行一系列不同温度、不同频率和不同最大加载应力的冻蠕变试验，研究温度、频率以及最大加载应力对冻结砂土冻蠕变特性的影响。此外，赵淑萍等[62]还进行了不同振幅动荷载下的冻土动蠕变试验，发现振幅大时蠕变变形大，破坏时间短。以上试验中荷载施加方式均为只施加一个动荷载，而实际工程中，冻土承受荷载的方式一般为静荷载作用加动荷载作用。比如如汽车行驶在公路上时，汽车对道路施加的力包括汽车自身重量荷载以及由于汽车颠簸等振动引发的振动荷载。针对这个问题，赵淑萍等[63]进行了更加贴合实际工程问题的试验，试验加载由轴向正弦波形周期荷载和轴向静荷载共同组成，根据试验结果比较分析了动蠕变变形和蠕变强度特征。

通过进行冻土的动、静蠕变试验比较，对冻土的动蠕变有以下结论[64]：

（1）冻土动蠕变变化趋势和静蠕变相同，可分为非稳定阶段、匀应变率阶段以及最终的渐进流阶段。其中非稳定阶段和静蠕变类似，持续时间短，但初始应变低于静蠕变。在匀应变率阶段冻土动蠕变应变小于静蠕变，但持续时间较短，动蠕变更早的进入渐进流阶段。

（2）比较冻土的动、静蠕变的蠕变速率可以看到：在初始阶段两者相差不大，随后动蠕变蠕变的蠕变速率明显大于静蠕变，且相差越来越大。（Parameswaran 对这一现象作出了解释[58]：动蠕变过程中循环荷载带来的机械能输入冻土并转化为热能，导致冻土中冰融化为液态水，增加了土体的流动性）。

（3）通过对动、静蠕变的破坏特征（破坏时间、破坏应变、最小蠕变速率）进行比较发现，由于动蠕变匀应变阶段持续时间短，所以蠕变破坏点较静蠕变更容易确定。在相同大小荷载（本实验中，动荷载的最大值等于静荷载）作用下，动蠕变的破坏应变小于静蠕变。

3.2　冻土的动蠕变模型研究

对试验得到的大量数据进行分析整理，可以建立冻土的动蠕变模型以及蠕变破坏理论。在冻土静蠕变模型研究的基础上，研究人员针对冻土动蠕变特性提出了用于动蠕变变形预测的本构模型。

何平等[65]通过对冻土动荷载试验数据进行回归统计分析后，得到冻土蠕变强度方程：

$$\sigma_f = A + B \cdot f + c \cdot f^2 + D \cdot \ln\left(1 + \frac{1}{\sqrt{\mathrm{t_f}}}\right)。\tag{11}$$

式中：σ_f 为动蠕变破坏强度（Mpa）；t_f 为破坏时间（min）；f 为频率（Hz）；A，B，C，D 为受温度影响的参数。朱元林等[66]通过对同时考虑围压和动荷载的冻土三轴蠕变试验结果进行分析，提出了用于描述冻土破坏前的动蠕变本构模型：

$$\varepsilon = A + B \cdot t + c \cdot t^{\frac{1}{3}}。\tag{12}$$

式中：ε 为轴向应变；t 为动荷载作用时间（s）；A，B，C 为与温度、偏应力及围压有关的参数。其中，A，$B \cdot t$，$c \cdot t^{\frac{1}{3}}$项分别对应冻土动蠕变的初始应变、匀速流阶段应变、非稳定阶段应。在此模型的基础上，之后进行的许多研究人员对此模型进行了不同的改进。如赵淑萍等[61]提出的应用于冻土动蠕变全过程预测的本构模型：

$$\frac{\varepsilon}{\sigma^{\mathrm{n}}} = B_1 + B_2 \cdot t^{\frac{1}{3}} + B_3 \cdot t。\tag{13}$$

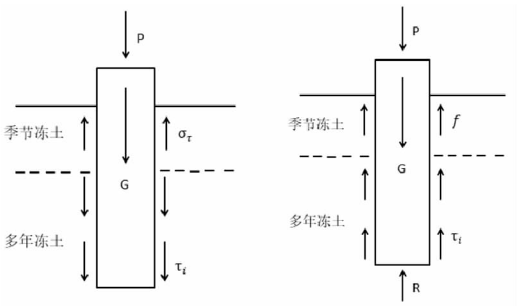
式中：ε 为轴向应变；σ 为荷载（MPa）；n，B_1，B_2，B_3 为与温度有关的参数。朱占元[67]根据青藏铁路北麓河粉质黏土低温动三轴试验的结果也给出了一个类似形式的冻土动荷载作用下的振陷模型。

4　冻土与桩基间的冻结强度研究

实践证明，在青藏铁路、公路等工程的地质条件复杂、冻土极易退化地区，采用“以桥代路”的方式通过可以取得更好的稳定性[68]。而桩基具有良好的承载力、适应性和稳定性，是冻土区桥梁最常应

用的基础形式[69]。目前针对冻土蠕变的短期冻结强度问题已经进行了大量研究，但是桩基和动土之间蠕变变形及长期强度的相关研究仍然较少。随着未来冻土区更高等级公路铁路以及民用建筑的建设，有必要加强对冻土区桩基蠕变特性的研究。

桩基埋入冻土部分和土颗粒通过冰晶胶结在一起，其中的胶结力称为桩基与冻土间的冻结强度，也称冻结力。冻结力可以看作是桩基础的承载力特征值。冻结力对桩基稳定性有两大作用[70]：抵抗冻胀的锚固作用和抵抗下沉的承载力作用(图11)。在图11a中，P为荷载，G为基础自重，σ_τ为切向冻胀力，τ_i为冻结力。当：$P+G+\sum\tau_i\geqslant\sum\sigma_\tau$时，基础稳定。在图11b中，$P$为荷载，$G$为基础自重，$\tau_i$为冻结力，$f$为摩擦力，$R$为基底承载力。当：$P+G\leqslant\sum\tau_i+\sum f+\sum R$时，基础稳定。



(a) 冻结力对基础的锚固作用　(b) 冻结力对基础的承载作用

图11　冻结力对基础的作用[70]

多年冻土中桩的沉降表现为蠕变变形。当荷载引起的桩侧剪切应力τ小于长期强度的极限值τ_∞时，发生衰减蠕变，桩和周围冻土变形连续。当$\tau>\tau_\infty$时，桩沿着冻结面分离开，进而发生非衰减蠕变，表现为桩在与土接触界面上发生移动[71]。加载条件下桩的沉降过程和冻土的蠕变过程类似。可以分为三个变形阶段(图12)：非稳定变形阶段(OA)，稳定变形阶段(ABA)和渐进流阶段(BC)。当变形进入渐进流阶段后桩与冻土之间的冻结发生破坏，进入此阶段就可以认为桩已经破坏[72]。

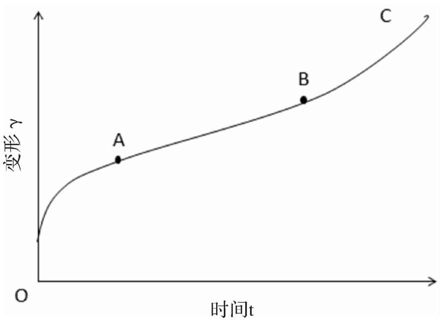


图12　桩的沉降过程

针对冻土中桩的沉降变形等问题，研究人员进行了一系列试验研究，提出了不同的试验研究方法。可以直接对试桩加载后沉降研究，如Domaschuk等[73]在－3℃冻结砂中进行了试验桩基的多级侧向荷载蠕变试验。通过对试桩施加35 kN，65 kN，115 KN荷载，发现桩基的蠕变为衰减蠕变，荷载为145 kN时为非衰减蠕变。并指出了总变形包含两部分：呈线性增长的初始变形和指数增长的蠕变变形。还可以研究冻土－桩接触面流变特性，通过进行冻土－桩的接触面蠕变试验，得到剪切位移和时间的关系并进行分析。刘俊俊[74]借助自主研发的冻土－结构接触面流变测试系统，进行了接触面剪切试验和蠕变试验。通过将分级加载的蠕变试验得到的应力－应变曲线根据“线性叠加原理”进一步处理，最终得到不同法向应力下的蠕变曲线。通过曲线进行分析，对接触面蠕变过程进行了说明，其论和Domaschuk所得结论基本一致。魏国帅[75]通过冻结细砂和混凝土接触面的蠕变试验得出蠕变强度和法向应力、温度、水膜厚度都有关系，并且在其余两个不变的情况下，随着法向应力增大、温度降低、水膜厚度增加，蠕变强度均增加。但是由于客观条件的限制，上述两个关于接触面的蠕变试验均有一定的局限性，都只是探究了单方面条件对实验结果的影响。如含水量、结构面表面情况等因素的影响均未考虑。

5　展望

通过以上对冻土蠕变研究现状的总结，结合当前冻土区桩基冻结强度研究进展，可以得到以下结论：

(1)目前对桩基的短期冻结强度研究已经取得很大进展。考虑到冻结强度的松弛作用，对工程实际而言，长期冻结强度的研究更加具有应用价值。由于存在现场土层温度季节性变化和室内长期试验试样含水率难以保持不变等问题，目前对长期冻结强度的研究存在困难，应当针对长期冻结强度的研究方法和内容做进一步研究。

(2)冻土和桩接触面的蠕变过程仍缺乏微观方面的研究，今后可考虑通过显微镜、CT等手段对接触面蠕变过程进行微观检测，以更好的解释接触面冻结强度的形成机理。

(3)接触面蠕变特性存在多种以影响因素，应当全面分析各个因素对接触面蠕变变形的影响。

参考文献：

[1]　秦大河. 冰冻圈科学辞典[M]. 北京：气象出版社，2016.
[2]　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.
[3] Vyalov S S. Rheological Fundamentals of Soil Mechanics [M]. New York: Elsevier, 1986.
[4] 程国栋. 用冷却路基的方法修建青藏铁路[J]. 中国铁道科学，2003，24(3)：1－？4.
[5] CHENG Guodong. A roadbed cooling approach for the construction of Qinghai－Tibet railway[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 42: 169－176.
[6] QI Jilin, SHENG Yu, ZHANG Jianming, et al. Settlement of embankments in permafrost regions in the Qinghai－Tibet plateau [J]. Norwegian Journal of Geography, 2007, 61: 49－55.
[7] 朱元林. 我国冻土强度与蠕变研究[J]. 冰川冻土，1988，10(3)：332－337.
[8] 马巍. 冻土的蠕变及蠕变强度[J]. 冰川冻土，1994，16(2)：113－118.
[9] Vyalov S S, Pekarskaya N K, Maksimyak R V. Physical essence of processes of deformation and failure of clayey soils [J]. Soil Mechaincs and Foundation Engineering, 1970, 7(1): 12－16.
[11] 马巍，王大雁，等. 冻土力学[M]. 北京：科学出版社，2014.
[12] 朱元林. 我国冻土力学研究新进展及展望[J]. 冰川冻土，1995，17(S1)：6－14.
[13] 张长庆，苗天德，王家澄，等. 冻结黄土蠕变损伤的电镜分析[J]. 冰川冻土，1995，17(S1)：54－59.
[14] 张长庆，魏雪霞，苗天德. 冻土蠕变过程的微结构损伤行为与变化特征[J]. 冰川冻土，1995，17(S1)：60－65.
[15] 苗天德，魏雪霞. 冻土蠕变过程的微结构损伤理论[J]. 中国科学，1995，25(3)：309－317.
[16] 蒲毅彬. CT 用于冻土实验研究中的使用方法介绍[J]. 冰川冻土，1993，15(1)：196－197.
[17] 蒲毅彬，吴紫汪，马巍，等. 冻土 CT 实验的数学方程[J]. 冰川冻土，1995，17(S1)：135－139.
[18] 吴紫汪，马巍，蒲毅彬，等. 冻土单轴蠕变过程中结构变化的 CT 动态监测[J]. 冰川冻土，1996，18(4)：306－311.
[19] 马巍，吴紫汪，蒲毅彬，等. 冻土三轴蠕变过程中结构变化的 CT 动态监测[J]. 冰川冻土，1997，19(1)：52－57.
[20] 陈世杰，马巍，李国玉，等. 与医用 CT 配合使用的冻土三轴仪的研制与应用[J]. 岩土力学，2017，38(2)：359－367.
[21] 陈世杰，赵淑萍，马巍，等. 利用 CT 扫描技术进行冻土研究的现状和展望[J]. 冰川冻土，2013，35(1)：193－200.
[22] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报，2007，26(6)：1061－1106.
[23] Andersland O B, Akili W. Stress effect on creep rates of a frozen clay soil[J]. Geotechnique, 1967, 17: 27－39.
[24] Parameswaran V R, Jones S J. Triaxial testing of frozen sand[J]. Journal of Glaciology, 1981, 27: 147－155.
[25] 朱元林，Carbee D L. 冻结粉砂在常应力下的蠕变特性[J]. 冰川冻土，1984，6(1)：33－48.
[26] Yao Xiaoliang, Qi Jilin, Zhang Jianming, et al. A one－dimensional creep model for frozen soils taking temperature as an independent variable[J]. Soils and Foundations, 2018: 1－14.
[27] 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.
[28] 彩雷洲. 青藏高温高含冰量砂质粘土蠕变试验研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015.
[29] 常小晓，马巍，盛煜，等. 试验条件对冻土力学指标的影响[J]. 冰川冻土，1995，17(S1)：151－155.
[30] 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)：198－200，221.
[31] 胡波，龚壁卫，童军，等. 单向冻结冻融循环三轴仪的研制及其应用[J]. 长江科学院院报，2015，32(2)：128－132.
[32] 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.
[33] Wang Baolai, French H M. In situ cree of frozen soil, Fenghuo Shan, Tibet Plateau, China[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(3): 545－552.
[34] 马小杰，张建明，郑波，等. 青藏高原高温冻土旁压蠕变试验研究[J]. 中国铁道科学，2008，29(6)：1－5.
[35] Wagner S. Creep of alpine permafrost, investigatedon the Murtel rock glacier[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 1992, 3(2): 157－162.
[36] Savigny K W, Morgenstern N R. In situ creep properties in ice－rich permafrost soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1986, 23(4): 504－514.
[37] Bennett L P, French H M. In situ permafrost creep, Melville Island, and implications for global change[C]// Proceedings of the 5th Canadian Permafrost Conference. Quebec City, Canada, 1990: 119－123.
[38] 张虎，张建明，郑波，等. 高温－高含冰冻土现场长期载荷试验研究[J]. 温州大学学报(自然科学版)，2010，31(S1)：45－53.
[39] Ladanyi B, Johnston G H. Evaluation of in situ creep properties of frozen soils with the pressuremeter[J]. Proceedings, 2nd Int ernational Permafrost Conference. Yakutsk, 1973: 310－318.
[40] Ladanyi B. An Engineering Theory of Creep of Frozen Soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1972, 9(1): 63－80.
[41] 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)，2013，43(6)：1950－1957.
[42] Liingaard M, Augustesen A, Lade P V. Characterization of models for time－dependent behavior of soils[J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4 (3): 157－177.
[43] Vyalov S S. Rheological of frozen soils [C]// In Proceedings of the 1st International Conference on Permafrost. Washington, D. C: National Academy of Sciences, 1966: 332－339.
[44] Sayles F H. 1973. Triaxial and creep Tests on Frozen Ottawa Sand [C] //Proceedings of 2nd International Permafrost Conference. Washington, D. C: National Academy of Sciences, 1973: 384～391.
[45] Ting J M. The Creep of Frozen Sands: Qualitative and Quantitative Models[D]. Massachusetts Institute of Technology, 1981.
[46] Ting J M. Tertiary creep model for frozen sands[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109 (7): 932－945.
[47] Fish A M. Thermodynamic model of creep at constant stress and constant strain rate[J]. Cold Regions Science and Technology, 1984, 9 (2): 143－161.
[48] Lai Yuanming, Jin Long, Chang Xiaoxiao. Yield criterion and elasto－plastic damage constitutive model for frozen sandy soil [J]. International Journal of Plasticity, 2009, 25 (6): 1177－1205.
[49] 王者超，乔丽苹. 土蠕变性质及其模型研究综述与讨论[J]. 岩土力学，2011，32(8)：2251－2260.
[50] 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, 62(2): 219－225.
[51] Wang Songhe, Qi Jilin, Yin Zhenyu, et al. A simple rheological element based creep model for frozen soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 106－107: 47－54.
[52] Hou Feng, LaiYuanming, 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.

[53] Schiessel H, Metzler R, Blumen A, et al. Generalized viscoelastic models: their fractional equations with solutions[J]. Journal of Physics A: Mathematical and General, 1995, 28: 6567-6584.
[54] Yin Deshun, Wu Hao, Cheng Chen, et al. Fractional order constitutive model of geomaterials under the condition of triaxial test [C]// Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences &Computers and Information in Engineering Conference. Washington, D. C, USA. 2011, 257-265.
[55] Yang Yugui, Gao Feng, Lai Yuanming, et al. Tiaxual creep characteristic and fractional order constitutive model of frozen silt[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 19: 3757-3768.
[56] 黄铭，黄伟，刘俊. 基于遗传蠕变理论的土石坝沉降监测混合模型[J]. 岩土力学，2004, 25(S1): 164-173.
[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]. 冻土力学，1995，17(S1): 47-53.
[58] Lai Yuanming, Yang Yugui, Chang Xiaoxiao, et al. Strength criterion and elastoplastic constitutive model of frozen silt in generalized plastic mechanics[J]. International Journal of Plasticity, 2010, 26(10): 1461-1484.
[59] Parameswaran V R, Effect of alternating stress on the creep of frozen soils[J]. Mechanics of Materials, 1985, 4(2): 109-119.
[60] 朱元林，何平，张家懿，等. 围压对冻结粉土在振动荷载作用下蠕变性能的影响[J]. 冰川冻土，1995，17(增): 20-25.
[61] 何平，张家懿，朱元林，等. 振动频率对冻土破坏之影响[J]. 岩土工程学报，1995，17(3): 78-81.
[62] 赵淑萍，何平，朱元林，等. 冻结砂土在动荷载下的蠕变特征[J]. 冰川冻土，2002，24(3): 270-274.
[63] 赵淑萍，马巍，何平，等. 不同振幅的振动荷载作用下冻结粉土的蠕变特征[C]// 第二届全国岩土与工程学术大会论文集(下册)，武汉，2006: 418-424.
[64] 赵淑萍，马巍，郑剑锋，等. 冻结粉土的动蠕变强度[J]. 实验室研究与探索，2007，26(10): 285-287, 293.
[65] 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.
[66] 何平，朱元林，张家懿，等. 饱和冻结粉土的动弹模与动强度[J] 冰川冻土，1993，15(1): 170-174.
[67] 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.
[68] 朱占元，凌贤长，胡庆立，等. 动力荷载长期作用下冻土振陷模型试验研究[J]. 岩土力学，2009，30(4): 955-959.
[69] 孙永福，青藏铁路多年冻土工程的研究与实践[J]. 冰川冻土，2004，27(2): 153-162.
[70] 王建州，李生生，周国庆，等. 冻土上限下移条件下高温冻土桩基承载力分析[J]. 岩石力学与工程学报，2006，25(S2): 4226-4232.
[71] 吴紫汪，马巍. 冻土强度与蠕变[M]. 兰州：兰州大学出版社，1994.
[72] C. C. 维亚洛夫. 冻土流变学[M]. 北京：中国铁道出版社，2005.
[73] 张建明，朱元林，张家懿. 动荷载下冻土中模型桩的沉降试验研究[J]. 中国科学(D辑)，1999，29(S1): 27-33.
[74] Domaschuk L, Shields D H, Fransson L. Reactive soil pressures along pile in frozen sand[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 1991, 5(4): 174-194.
[75] 刘俊俊. 冻结粉质粘土与混凝土桩接触面流变特性试验研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2016.
[76] 魏国帅. 冻结细砂桩周土冰膜流变特性试验研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2015.

Research Status and Prospect of Permafrost Creep Characteristics

MEI Qihang[1,2,3], YU Hui[4] and CHEN Ji[1,3]

(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. *Beiluhe Observation Station of Frozen Soil Environment and Engineering, Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*; 4. *CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an* 710065, *China*)

Abstract: We summarize the research results of creep test and model research of frozen soil and introduce the creep test of frozen soil from two aspects: microscopic creep test and macro creep test. Based on empirical model, rheological model and general stress-strain time model, we analyze and summarize the creep constitutive model of frozen soil. From the two aspects of experimental research and constitutive model, the research progress of dynamic creep of frozen soil is introduced. At the same time, the freezing strength between frozen soil and pile foundation is also introduced. At present, the study of frozen soil creep mostly focuses on short-term freezing strength, especially the study of creep deformation and long-term strength of pile-soil. With the improvement of railway and highway construction and civil building grade in the permafrost regions, pile foundations will be applied more and more. In order to optimize the design of pile foundation in permafrost regions, it is necessary to study the creep characteristics of pile foundations in permafrost regions at present.

Key words: frozen soil; creep deformation; test; constitutive model; freezing strength