

文章编号: 1001-8166(2005)08-0887-08

# 冻融作用对土工程性质影响的研究现状<sup>\*</sup>

齐吉琳<sup>1,2</sup>, 程国栋<sup>1</sup>, P. A. Vermeer<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>·中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000;

<sup>2</sup>·Institute of Geotechnical Engineering, Stuttgart University, Pfaffenwaldring 35, D-70569 Stuttgart, Germany)

**摘要** 冻融过程中土结构受冷生作用的影响, 可导致土的工程性质发生变化。在冻土地区进行路堑开挖、新消边坡的加固和路基修建时, 由于新近暴露的土受到冻融风化作用, 在相关的变形和稳定性分析中, 选择土性参数时必须考虑土工程性质的变化。在查阅大量文献的基础上, 从试验仪器和研究方法、冻融作用下土的物理性质和力学性质的变化及其机理等几个方面, 对土的工程性质受冻融循环影响而改变的研究现状进行了总结和分析, 列出了典型的研究成果。文献研究表明, 土经过冻融后, 渗透性会增大, 松散土和密实土的密度具有不同的变化趋势, 原状超固结土的结构性受到破坏, 因而三轴试验的应力应变曲线峰值受到削弱, 一维压缩试验中表现为前期固结压力降低; 强度的变化则有诸多不同的试验结果。针对目前的研究现状并根据作者的相关工作, 提出了进一步研究的思路。

**关键词** 冻融循环 土的物理性质 土力学性质 变化机理

中图分类号: P642.14 文献标识码: A

## 0 前言

自从1937年Tzytovich出版第一本俄文版《冻土力学原理》以来, 冻土力学经历了大半个世纪的发展。作为一门交叉学科, 冻土力学继承了大量土力学理论和方法<sup>[1,2]</sup>, 同时借用了相近学科的研究成果, 如冰力学理论和高温金属的蠕变理论<sup>[3]</sup>。冻土的力学性质尤其是蠕变的研究现状和进展在不同的时期已经有多位研究者进行过总结<sup>[1,4-6]</sup>。同时期对冻结作用的研究现状分析主要讨论了冻胀和热质迁移的机理和模型<sup>[7,8]</sup>, 而Slunga等<sup>[9]</sup>也仅用数百字对“冻结导致的物理化学变化”进行了叙述性的描述。在作者所查阅的几部冻土力学的专著中, 多数的篇幅在于描述已冻土的基本物理、力学性质方面<sup>[10-14]</sup>。冻融对土工程性质的影响很少提及, 迄今没有系统的总结和现状分析。本文在查阅大量文献

资料的基础上, 结合作者的工作经验, 一方面对这个领域的研究进行总结以期与同事们分享, 同时提出亟待解决的问题和进一步研究的思路, 与广大寒区工程工作者共同探讨。

土的冻融作用是冻土力学和工程中首先受到关注的问题。中文的“冻融”或者“冻融作用”往往根据作者侧重点的不同意义可以有较大差别。按照使用的频繁程度, 在英文文献中大致有“freeze-thaw”或者“freeze and thaw”、“frozen and thawed”、“freezing and thawing”以及“frost action”等几种说法。后两种说法更多的用来指正冻土和正融土。

在关于“冻融作用”的研究上, 一方面基于冻胀和融沉对工程影响的考虑, 大量研究致力于建立冻胀和融沉的预报模型。从工程角度来看, 典型的冻胀的预报模型如Konrad<sup>[15]</sup>的分凝势模型, 典型的融沉模型如Nixon等<sup>[16]</sup>的一维变边界条件的融沉模

\* 收稿日期: 2004-12-09 修回日期: 2005-04-11.

\* 基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目“青藏铁路工程与多年冻土相互作用及其环境效应”(编号: KZCX1-SW-04)资助.

作者简介: 齐吉琳(1969-)男, 山东昌邑人, 副研究员, 博士, 主要从事冻土力学与工程方面的研究工作.

E-mail: qjilin@igs.uni-stuttgart.de

型都具有一定的应用价值。另一方面,人们也认识到冻融作用作为强风化过程对土的工程性质会产生较大影响。如在加拿大魁北克的多年冻土地区,新的公路路基修建之后往往要等<sup>3~5</sup>年才铺设路面,已经成为一个基本常识,一定程度上就是基于这一考虑<sup>[17]</sup>。随着青藏铁路的建设和其他冻土地区工程建设的广泛开展,我国的寒区工程建设将遇到同样的问题,即冻土地区新近暴露的土层受冻融风化作用而性质发生变化对工程的变形和稳定性会产生影响,这是本文要讨论的问题。

冻融对土工程性质的影响大致可以从冻融对土的物理性质、水理性质的影响和对土力学性质的影响两个方面来分析,尽管它们是相互联系的,同时本文对试验方法和冻融对土工程性质影响的机理进行了总结。文中涉及土在冻融过程中的应力状态仅为机理分析,而正冻土和正融土的热动力学过程不在本文讨论的范围之内。

## 1 研究方法和试验仪器

室内冻融试验是经常采用的,试验一般采用圆柱状试样,放置在装有温度探测器的有机玻璃桶内,以检测试样内部的温度变化,并一同置于恒温箱中;试样上端和下端都接触与制冷设备相连的盖,对土端部进行冻结(也有仪器可以进行径向冻结),位移计置于试样的顶端,以测量土冻结和融化过程中的变形,此外,顶端可以施加压力,顶、底端都可以连接水源。特殊的冻融试验可以同材料试验机(MTS)结合进行,即在MTS上进行冻融然后进行力学试验,但材料试验机的精度必须能够测试融土力学性质(在kPa级)。野外现场试验相对较少,笔者没有查阅到使用特殊的方法和仪器,如Benson等<sup>[8]</sup>将击实土样埋置于土中,Starke<sup>[19]</sup>则将土从现场取回,置于室外暴露一个冬天,然后跟未经冻融的土样进行对比试验。这些试验重复性小,其试验数据的普遍意义就值得商榷。鉴于此,本文下面只讨论室内冻融试验。

不同研究者使用的冻融试验仪并没有太大的差异,但是试验方法不同将导致土的冻融效应具有较大的差别。按照施加冷源的位置,有单向冻融和双向冻融,按照施加冷源的方式,有恒温冻结和变温冻结,按照温度梯度的不同,有快速冻结和慢速冻结;按照试样接触水源的方式,有封闭系统冻结和开敞系统冻结,按照施加压力的方式,有加压冻融和自由冻融等。不同冻结方式下冻胀效应的差异,请参考

Konrad等的有关文献,这里不再赘述。需要指出的是,这些不同冻结方法主要是用来研究对土冻胀效应的影响。至于冻融对土工程性质的影响,则需先对土进行一定方式的冻融,然后对冻结前后的试样进行相应的土工试验,以考察土工程性质的改变。从作者所掌握的文献来看,由于涉及的试验量大,不同冻融方式对土工程性质的研究并不深入,多数研究只涉及一种或者两种冻结方式下的几个冻融循环,而没有进行系统的比较。可以设想,冻融作用对土工程性质的影响是由于分凝冰的出现改变了土骨架的结构所造成的,因此影响分凝冰或者分凝势的因素也必然影响冻融后土的工程性质。

## 2 土的物理性质和水理性质的变化

### 2.1 渗透性

冻融对土渗透性影响研究是最为活跃的,因为它不仅受到岩土工程领域的重视,而且也是土壤学和水力学领域需要考虑的因素。渗透性的改变经常跟土的内部因素如土的孔隙比(或者击实度)、含水量、塑限、冻胀敏感性以及粘土的矿物成分有关;此外还跟试验条件,如对土施加的温度梯度和受力状态有关。Chamberlain等<sup>[20]</sup>第一次发表了系统的研究成果,发现细粒土经过冻融循环后,尽管所采用的土的孔隙比通常会减小(后面专门讨论孔隙比的变化),但土的渗透性都有所增大,而且土的塑性指数越大,这种效应越强烈。他们认为原因是土的冻融使得土中形成一些裂隙,同时土孔隙中的细颗粒土可能在冻融过程减少。在孔隙比减小的情况下渗透性仍然增大似乎有悖于土力学常识,然而这一点却被其他研究所证实。后来的研究多在不同土的类型、性质和不同试验方法上展开,如压力对这种效应起到明显的阻碍作用(图1)<sup>[21]</sup>,冻融增大渗透性的效应与制样条件有关<sup>[22,23]</sup>等,但定量的关系始终没有提出。目前的大致认识是经过冻融循环,土的渗透系数大约会增大 $1\sim 2$ 个数量级<sup>[24,25]</sup>。至于孔隙比在冻融过程中减小的情况下渗透系数仍然会增大,则主要是由冻融过程中造成微裂隙或者冰晶融化后形成大孔隙所造成的<sup>[26]</sup>。

此外,在有压冻融时,不同循环次数的影响基本可以忽略,如图2所示,标识不同冻融循环次数的融化后变形量的符号重叠到一起,不易分辨<sup>[20]</sup>。

### 2.2 密度(或孔隙比)

研究渗透性的同时还发现,冻融经常会在一定程度上使土的孔隙比减小<sup>[20]</sup>,因此冻融对于土具有

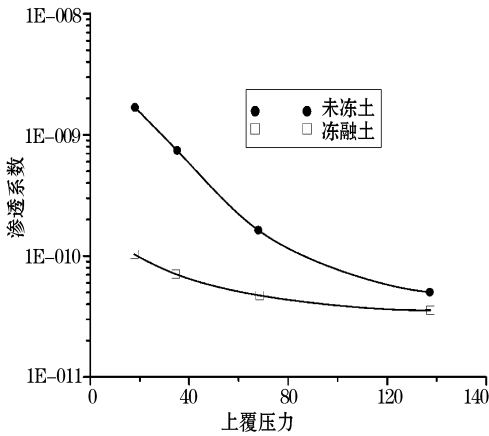


图 1 冻融导致土渗透性的增大及围压的阻碍作用<sup>[21]</sup>  
Fig.1 Freeze-thaw induced increase in permeability and the hindrance effect of overburden load<sup>[21]</sup>

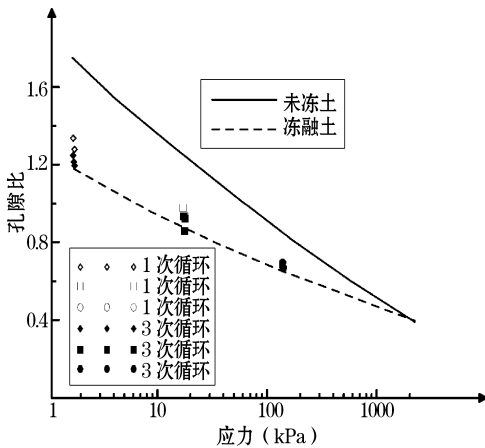


图 2 加压冻融过程中土孔隙比的变化<sup>[20]</sup>  
Fig.2 Change in void ratio of a clay submitted loaded freeze-thaw cycles<sup>[20]</sup>

类似击实(或者压密)的作用。后来的研究还发现,对于松散土,冻融会使孔隙比降低从而增加其密度,而对于密实土则相反。根据这一现象, Viklander<sup>[22]</sup>提出了基于冻融作用的残余孔隙比的概念,即松散土和密实土经过若干冻融循环后趋向一个稳定的孔隙比 $e^{res}$ 。尽管冻融循环对土孔隙比的双重作用的概念已经渐渐广为接受,但在残余孔隙比方面没有更多的研究成果。本文作者倾向于定义这个孔隙比为基于冻融循环(Freeze-Thaw Cycle, FTC)的临界孔隙比 $e_{FTC}^{cr}$ ,以对应于土力学中广为接受的剪切(shear)临界孔隙比 $e_s^{cr}$ 。进一步确认 $e_{FTC}^{cr}$ 的存在,并深入的研究这两个临界孔隙比之间的关系将有利

于冻土力学与常规土力学的有机结合。多数研究都发现土的渗透性和密度经 3 ~5 个冻融循环趋于稳定<sup>[21, 22, 27]</sup>,土体积与冻融循环次数的关系如图 3 所示。

值得注意的是,土的孔隙比在土的冻结和融化过程中的变化并不是单纯的冻结膨胀和融化下沉。试验证明,在土冻结的初期,土的体积可能会首先缩小<sup>[21]</sup>,而在撤掉冷源的初期,土的体积首先膨胀,然后持续大量下沉。这种似乎反常的现象我们将在本文第 4 部分详细讨论(图 4)。

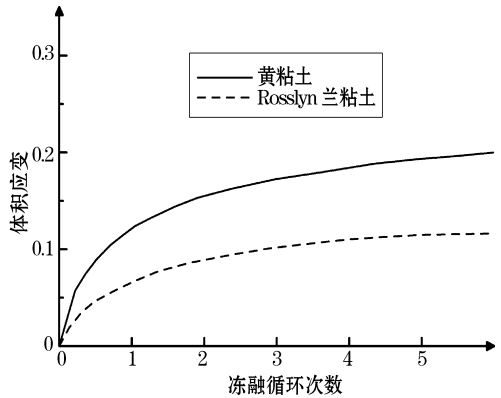


图 3 冻融导致土体积变化与循环次数的关系<sup>[17]</sup>  
Fig.3 Relationship between freeze-thaw induced volumetric strain and number of cycles<sup>[17]</sup>

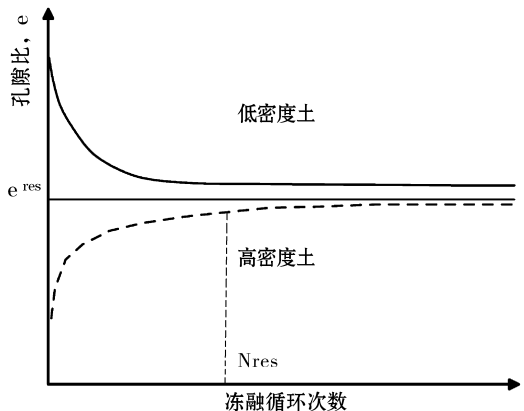


图 4 冻融残余孔隙比<sup>[22]</sup>

Fig. 4 Residual void ratio in terms of freeze-thaw<sup>[22]</sup>

### 2.3 界限含水量和液性

研究还发现,冻融循环也同时使土的液性指数甚至塑性指数发生变化<sup>[17, 28]</sup>。笔者认为液性指数的变化跟含水量和孔隙比有关系,不必单独考察。

尽管试验也表明,冻融循环确实可以使土的颗粒级配发生变化<sup>[29,30]</sup>,因此塑性指数发生变化似乎也应当是合理的,但从塑性指数求取的土工试验方法上看,笔者认为在没有证据表明颗粒级配发生较大变化的情况下,塑性指数的改变不会很明显。

此外, Konrad<sup>[31]</sup> 研究还表明,冻融循环可使分凝势下降达到 50% 之多,也就是说冻融循环会影响到后期的冻胀效应。

### 3 土力学性质的变化

#### 3.1 土应力应变关系

冻融循环对土应力应变的影响不仅与土的类型有关,而且与土工试验所采用的应力路径和排水路径有关,融土本身亦是如此。研究发现,常规三轴排水剪切试验中,松散的重塑粉质土,经过冻融后对剪应力都具有较高的抵抗性,因此应力应变曲线位于未经冻融土的上方<sup>[32]</sup>;在原状粘土的不排水试验中,经过冻融的土在相同应变时的孔隙水压力低于原状土,而剪应力的峰值在经过冻融的土中消失<sup>[33]</sup>,如图 5 所示。固结试验对比研究发现,原状土经过冻融后丧失了其超固结的“记忆”,压缩曲线位于原状未经冻融土的下方<sup>[34]</sup>,如图 6 所示。

笔者认为,正因为土所表现出的力学行为跟试验条件密切相关,比如有三轴(CD, CU, UU)、固结、单轴剪切、直剪等,在不同的试验方法中孔隙水的行为大不相同,导致土具有不同的力学行为。由于涉及试验量大,冻融对土应力应变行为影响的研究不多,尚没有很多共识,有必要探寻能够反映冻融对土

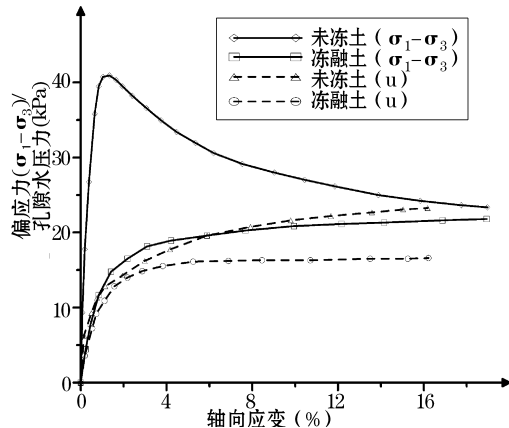


图 5 冻融前后土的三轴 CIU 曲线<sup>[33]</sup>  
Fig. 5 Triaxial CIU compression curves for an unfrozen and post-thawed clay<sup>[33]</sup>

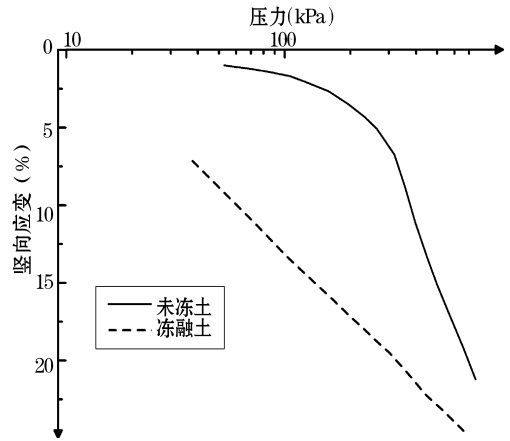


图 6 冻融前后土的固结曲线<sup>[34]</sup>  
Fig. 6 Consolidation curves for a clay at unfrozen post-thawed states<sup>[34]</sup>

力学性质影响的典型的土工试验。进一步研究还应当注意区分原状土和重塑土及其不同的初始状态如密度、含水量、超固结比等进行系统的对比研究,以便于得到更全面的解释。

#### 3.2 模量

模量是岩土工程中关心的一个参数,是土变形和稳定性分析中必须要用到的。通常要在小应变下求得,因此试样的微小扰动也必然导致结果的巨大差异。Elliott 等<sup>[35]</sup> 及以前的许多研究者都发现,经过很少几个冻融循环,土的模量都会有大幅度的降低; Lee 等<sup>[36]</sup> 研究证明,对于弹性模量大于 100 kPa 的未冻土,经过冻融模量的变化超过 50% 以上; Simonsen 等<sup>[37]</sup> 研究发现,根据土性的不同,冻融后的土的模量会降低 25% ~ 60%, 细粒越多降低幅度越大。可见,目前总的认识是冻融循环会导致模量的减小。然而仍有少数研究与此不符,如 Simonsen 等<sup>[38]</sup> 还发现在常围压下进行测量,冻融后土模量不总是降低,他们认为可能与通常用的变围压测量方法不同有关。然而,笔者认为土的初始状态可能起更大的控制作用。

值得关注的是,在模量变化的研究上,很多注意力放在了在冻融过程中的变化,以分析不同季节土的变形,请参考美国陆军寒区试验室(CRREL)的有关研究报告。

#### 3.3 强度

这方面的研究相对应力应变关系的研究要多一些。显然,单纯考察强度参数的变化比全面考察土

的力学性质的变化要容易得多。然而研究结果却差异较大,如有研究发现冻融后土的强度有所增加<sup>[28]</sup>;有研究发现冻融使得土强度有所降低<sup>[39,40]</sup>;还有研究发现冻结前后土的强度基本保持不变<sup>[41~43]</sup>。Aoyama 等<sup>[44]</sup>发现经过冻融土的粘聚力降低而内摩擦角变化很小;Ogata 等<sup>[45]</sup>对 2 种土的研究发现粘聚力降低而内摩擦角增大(笔者也观察到同样的结果,另文说明)。强度的增大或者减小一方面常被归因于冻结过程土密度的变化和冻融对土结构性的改变,另一方面也跟土的状态和试验条件有关,如有研究指出,如果冻融导致含水量增大,则强度就会降低,如果含水量不变则强度会增大<sup>[23]</sup>。

此外,Gotō 等<sup>[46]</sup>研究还发现,冻融循环对砂土的液化抵抗能力没有明显的改变,但是对含有细颗粒的砂土则具有明显的改变。

#### 4 冻融循环对土工程性质影响的机理

土的工程性质受冻融影响的种类和幅度依赖于许多因素,如土的类型<sup>[25]</sup>、密度<sup>[47]</sup>,以及众所周知的不同冻融条件和冻融循环的次数,这是研究者们得出的结论经常不一致的原因。然而,就冻融过程来讲,其对某种土工程性质的改变主要是从以下 2 个方面发挥的。

##### 4.1 土结构形态的变化

上述几乎所有的研究都提到冻融循环对土结构性的影响,并试图以此来解释工程性质的变化。对土结构性因素的分析多是建立在定性观察上的理性推测,如 Chamberlain 等<sup>[20]</sup>认为,冻融通过改变土的结构性如土中产生大孔隙、纵向微裂隙等,从而使其垂直方向的渗透性增大。反复冻融不仅破坏(确切地说是改变)了土颗粒间的联结力,同时使土颗粒得以重新排列。这类定性的研究很多,这里不一一列举。总之,广泛认为冻融循环可以从多方面改变土的工程形状,而这些都是通过改变土的结构性实现的。

##### 4.2 冻融过程中土颗粒联结的变化

冻融对土力学性质改变的机理最广为接受的解释由 Chamberlain 等<sup>[20]</sup>首先提出,如图 7 所示。假设一细粒土正常固结到达 a 点,此时外加荷载保持不变,试样一端施加冷源另一端能够自由接触水源,在冻结过程中较大的负孔隙水压力使得冻结锋面附近土中的有效应力立即增大,土受到较大的有效应力。随着冻结锋面的延伸,分凝冰可将连续的土样分成层,由于分凝冰层与冻结封面共同作用,总体

而言,整个土样受到较高的有效应力固结到达 b。当土融化时,土样中有效应力路径为 b-c 而不是回到 a 点,于是 e<sup>ac</sup> 就是由于冻结过程的超固结效应造成的孔隙比差。在此过程中总应力保持不变,因此总应力路径为 a-b-c, Morgenstern<sup>[2]</sup>也曾提出相似的机理。这个解释被广泛引用,有的研究也大致证实了这一点,如土在冻结初期土的体积不是增大而是缩小,是由于负孔隙水压力造成有效应力增大所导致<sup>[21]</sup>,但这只能在正常固结或弱超固结土中产生。

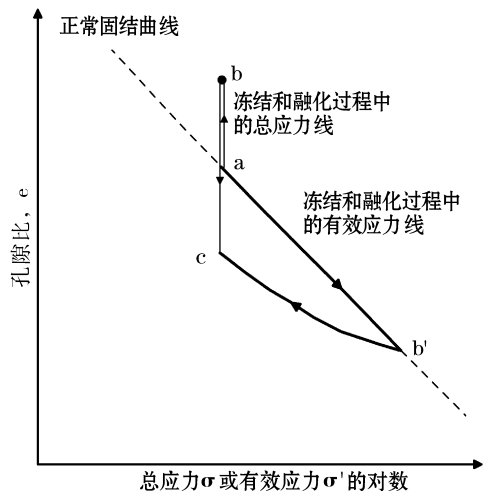


图 7 冻融过程中土的应力路径分析<sup>[20]</sup>

Fig. 7 Stress path during freeze-thaw process<sup>[20]</sup>

笔者对 2 种超固结土进行了研究,在 8 个试样中除 1 个在冻结初期记录到了可以忽略的非常小的下沉外,其他试样的冻融变形时程曲线均如图 8 所示,即在冷源撤掉的最初阶段,土样不是开始融化下沉而是猛然膨胀。毫无疑问,图 8 中箭头所示融化开始时的膨胀是由于冻结过程中冰晶的生长破坏了土颗粒间的粘聚力,当冷源撤销的短时间内,吸力突然降低,有效应力减小导致土骨架的回弹。因此,冻结初期是否会有短暂的下沉,融化初期是否会有短暂的膨胀,跟土的初始状态有关。一般来讲,对于正常固结或弱超固结土,前者会出现,后者不会明显出现,而对于超固结的土,前者一般不会出现,而后者往往会出现,而且超固结比越大越明显。既然是吸力降低导致的回弹,同时也必然跟影响吸力的因素如土的粘粒含量和含水量有关。因此冻融对土具有增加和破坏土颗粒间粘聚力的双重作用,冻结瞬时缩小和融化瞬时膨胀是基于土不同应力历史的正常现象。

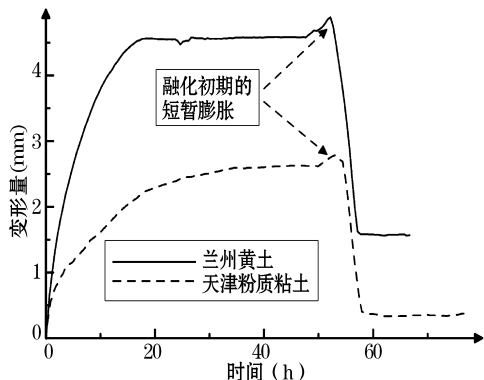


图8 冻融过程土样竖向变形时程(试样高度增加为正)

Fig.8 Deforming process of the samples during freeze-thaw process

同样可以解释土的强度参数的改变。土的强度有不受正应力影响的粘聚力部分和与正应力成正比的内摩擦部分,根据土状态的不同,这两个部分可以不向一个方向发展,即出现土的粘聚力降低而内摩擦角增大或者相反的情况。无论如何,Chamberlain等的解释将冻融过程和常规土力学的概念结合起来,是值得大力发展的研究方向。

## 5 讨论

本文从土的物理性质和力学性质的变化以及变化机理等 3 个方面总结了冻融对土的岩土工程性质影响的研究成果,简要总结如下:

冻融作用对土的物理性质影响的研究较多,得到公认的结论也较多。一般来说,细颗粒土经过冻融渗透性都增大,孔隙比则不然,密实土的孔隙比会增大,冻融对其具有扰动的作用,而松散土的孔隙比会减小,冻融对其具有类似击实或者压密的作用;由于冻融循环对土颗粒级配的影响,土的界限含水量可能会随之变化,但尚需要进一步研究证实。

冻融作用对土力学性质影响的研究相对比较薄弱。土经过冻融后,应力应变曲线发生变化,变化的形式和幅度与土性和试验类型有关系,强度有可能增大、减小或者不变,也可能内摩擦角和粘聚力具有不同的变化趋势,也跟土性和土的初始状态尤其是超固结比有关系;已有的研究多表明模量大致趋向于减小。

所有上述变化都归结为冻融对土结构性的改变,如产生微裂隙、导致出现大孔隙等;不同性质的土在冻融过程中内部应力状态对土骨架的作用效果

不同,可能导致瞬时的冻结缩小和融化膨胀,并影响冻融前后力学性质的对比关系。

在研究冻融对土工程性质的影响时,应当将考察的因素分离出来。前人在讨论冻融对土渗透性的影响时,强调了即使土的孔隙比减小其渗透性仍然会增大,这是极为可取的研究方法。然而许多研究并非如此,比如说“冻融有降低土强度的作用”就是比较含糊的结论,必须同时指明土的其他参数如含水量、孔隙比等的改变。因此,从试样制备,到冻融变形时程,到冻融前后的所有物理、力学参数作统一分析,才能得出准确的结论。

充分了解加荷冻融和常规某些土工试验方法对冻融效应的掩盖。笔者建议,在进行冻融前后土的强度的对比试验时,应当采用不固结裁剪,不排水剪切试验还应当考虑冻融对土结构的改变后对孔隙水压力的影响;粘性土强度的比较,单轴剪切强度(UCS)可能有代表意义。

总之,由于土的类型、冻结条件和冻融后的试验条件的多样性,目前系统的研究还远不完善,充分利用常规土力学的经验和方法,从土性、土的应力历史、冻融过程的行为和冻融前后的土工试验方法进行系统研究,建立能够反映冻融作用对土工程性质影响的力学试验方法体系,正确评价这一效应,对于冻土地区今后的建设大有裨益。

致谢 本文在写作过程中得到德国马普学会的大力支持,再此表示衷心的感谢!

## 参考文献(References):

- [1] Jessberger H L. State-of-the-art report—Ground freezing mechanical properties, processes and design [J]. *Engineering Geology*, 1981, 18(1-4): 5-30.
- [2] Morgenstern N R. Geotechnical engineering and frontier resource development [J]. *Geotechnique*, 1981, 31(3): 305-365.
- [3] Fish A M. Creep and yield model of frozen soil under triaxial compression [A]. In: *Proceedings of the Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference* [C]. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema, 1995, 1: 473-481.
- [4] Landanyi B. Mechanical behavior of frozen soils [A]. In: *Proceedings of the International Symposium on the Mechanics Behavior of Structure Media* [C]. Elsevier Science, Amsterdam, 1981. 205-245.
- [5] Sayles Francis H. State of the art: Mechanical properties of frozen soil mechanical properties of frozen soil [A]. In: *5th International Symposium on Ground Freezing* [C]. Rotterdam, the Netherlands: A. A. Balkema, 1989, 1: 143-165.
- [6] Sadosky A V, Maksimyak R V, Razbegn V N. State of the art:

- Mechanical properties of frozen soil [A]. In: 5th International Symposium on Ground Freezing [C]. Rotterdam, the Netherlands: A. A. Balkema, 1989, 2: 443-463.
- [7] Loch J P G. State-of-the-art report frost action in soils [J]. Engineering Geology, 1981, 18(1-4): 213-224.
- [8] Kay B D, Perfect E. State of the art: Heat and mass transfer in freezing soils [A]. In: 5th International symposium on ground Freezing [C]. Rotterdam, the Netherlands: A. A. Balkema, 1989, 1: 3-21.
- [9] Slunga E, Saarelainen Seppo. General report on frost action in soil [A]. In: 5th International Symposium on Ground Freezing [C]. Rotterdam, the Netherlands: A. A. Balkema, 1989, 2: 415-417.
- [10] Tsytoich N A. The Mechanics of Frozen Ground [M]. Washington DC: Scripta Book Company, 1975.
- [11] Andersland Orlando B, Anderson Duwayne N. Geotechnical Engineering for Cold Regions [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1978.
- [12] Phukan Arvind. Frozen Ground Engineering [M]. Englewood cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1985.
- [13] Williams Peter J, Smith Michael W. The Frozen Ground [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- [14] Andersland Orlando B, Ladanyi Branko. An Introduction to Frozen Ground Engineering [M]. New York: Chapman and Hall, 1994.
- [15] Konrad J M, Morgenstern N R. Mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils [J]. Canadian geotechnical Journal, 1980, 17(4): 473-486.
- [16] Nixon J F, Ladanyi B. Thaw consolidation [A]. In: Andersland O B, Anderson M, eds. Geotechnical Engineering for Cold Regions (chapter 4) [C]. New York: McGraw-Hill, 1978.
- [17] Eigenbrod K D. Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(4): 529-537.
- [18] Benson Craig H, Othman Majdi A. Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(2): 276-294.
- [19] Starke J O. Effects of freeze-thaw weather conditions on compacted clay liners [A]. In: Proceedings of 12th Annual Madison Waste Conference [C]. Madison, Wisconsin: University of Wisconsin-Madison, 1989, 412-420.
- [20] Chamberlain Edwin J, Gow Anthony J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils [J]. Engineering Geology, 1979, 13(1-4): 73-92.
- [21] Othman Majdi A, Benson Craig H. Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(2): 236-246.
- [22] Viklander Peter. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 471-477.
- [23] Kim Woon-Hyung, Daniel David E. Effects of freezing on hydraulic conductivity of compacted clay [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(7): 1083-1097.
- [24] Chamberlain E J, Iskander I, Hunsiker S E. Effect of freeze-thaw cycles on the permeability and macrostructure of soils [A]. In: Proceedings of International Symposium on Frozen Soil Impacts on Agricultural, Range and Forest Lands [C]. Spokane, Wash. U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Special Report 90-1, 1990, 145-155.
- [25] Zim m ie T F, LaPlante C. The effect of freeze-thaw cycles on the permeability of a fine-grained soil [A]. In: Proceedings of 22nd Mid-Atlantic Industrial Waste Conference [C]. Philadelphia, Pa: Drexel University, 1990, 580-593.
- [26] Chamberlain E J. Physical changes in clays due to frost action and their effect on engineering structures [A]. In: Proceedings of the International Symposium on Frost in Geotechnical Engineering [C]. Rotterdam, the Netherlands: A. A. Balkema, 1989, 863-893.
- [27] Boynton S S, Daniel D E. Hydraulic conductivity tests on compacted clay [J]. ASCE Journal of geotechnical engineering, 1985, 116(10): 1549-1567.
- [28] Yong R N, Boonsinsuk P, Yin C W P. Alternation of soil behaviour after cyclic freezing and thawing [A]. In: Proceedings of 4th International Symposium on Ground Freezing [C]. Rotterdam, the Netherlands: A. A. Balkema, 1985, 187-195.
- [29] Wang Jiacheng, Xu Xueu, Wang Yujie. Thermal sieve effect and convective migration of particles during unidirectional freezing [J]. Glaciology and Geocryology, 1995, 18(3): 252-255. [王家澄, 徐学祖, 王玉杰. 单向冻结时土颗粒位移的热筛效应及对流迁移 [J]. 冰川冻土, 1996, 18(3): 252-255.]
- [30] Viklander Peter, Eigenbrod Dieter. Stone movements and permeability changes in till caused by freezing and thawing [J]. Cold Regions Science and Technology, 2000, 31(2): 151-162.
- [31] Konrad J M. Effect of freeze-thaw cycles on the freezing characteristics of a clayey silt at various overconsolidation ratios [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26(2): 217-226.
- [32] Alkire Bernard D, Morrison James M. Change in soil structure due to freeze-thaw and repeated loading [J]. Transportation research record, 1983, 918: 15-21.
- [33] Leroueil S, Tardif J, Roy M, et al. Effects of frost on the mechanical behaviour of Champlain Sea clays [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28(5): 690-697.
- [34] Graham J, Au V C S. Effects of freeze-thaw and softening on a natural clay at low stresses [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985, 22(1): 69-78.
- [35] Elliott R P, Thornton S I. Resilient modulus and AASHTO pavement design [J]. Transportation research record, 1988, 1196: 116-124.
- [36] Lee Woonjin, Bohra N C, Altschaeffla G, et al. Resilient modulus of cohesive soils and the effect of freeze-thaw [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(4): 559-568.
- [37] Simonsen Erik, Janoo Vincent C, Isacsen Ulf. Resilient properties of unbound road materials during seasonal frost conditions [J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2002, 16(1): 28-

- 50.
- [38] Simonsen E, Isacsson U. Soil behavior during freezing and thawing using variable and constant confining pressure triaxial tests [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38(4): 863-875.
- [39] Broms B B, Yao L Y C. Shear strength of a soil after freezing and thawing [J]. *ASCE Journal of the soil mechanics and foundations division*, 1964, 90(4): 1-26.
- [40] Chuvilin Ye M, Yazynin O M. Frozen soil macro- and microstructure formation [A]. In: 5th International Conference on Permafrost [C]. Trondheim: Tapir Publishers, 1988. 320-323.
- [41] Bzdarenko G I, Sadovsky A V. Water content effect of the thawing clay soils on shear strength [A]. In: Proceedings of 7th International Symposium on Ground Freezing [C]. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema, 1991. 123-127.
- [42] Ono T, Mitachi T. Computer controlled triaxial freeze thaw-shear apparatus [A]. Proceedings of 8th International Symposium of Ground Freezing [C]. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema, 1997. 335-339.
- [43] Swan Christopher, Greene Christopher. Freeze-thaw effects on Boston Blue clay [J]. *Journal of Engineering and Applied Science, Soil Improvement for Big Digs*, 1998, 81: 161-176.
- [44] Aoyama K, Ogawa S, Fukuda M. Temperature dependencies of mechanical properties of soils subjected to freezing and thawing [A]. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing [C]. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema Publishers, 1985. 217-222.
- [45] Ogata N, Kataoka T, Komiyama A. Effect of freezing thawing on the mechanical properties of soil [A]. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing [C]. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema Publishers, 1985. 201-207.
- [46] Goto Shigeru. Influence of a freeze and thaw cycle on liquefaction resistance of sandy soils [J]. *Soils and Foundations*, 1993, 33(4): 148-158.
- [47] Benoit G R, Voorhees W B. Effect of Freeze Thaw Activity on Water Retention, Hydraulic Conductivity, Density and Surface strength of Two Soils Frozen at High Water Content [R]. USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Special Report 90-1, 1990.

## STATE-OF-THE-ART OF INFLUENCE OF FREEZE-THAW ON ENGINEERING PROPERTIES OF SOILS

QI Ji-lin<sup>1,2</sup>, CHENG Guo-dong<sup>1</sup>, P. A. Vermeer<sup>2</sup>

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Lanzhou 730000, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Stuttgart University, Pfaffenwaldring 35, D-70569 Stuttgart, Germany)

**Abstract:** It has become a common understanding that frost action is a kind of weathering process, which considerably changes engineering properties of soils due to cryogenical actions. Soils newly exposed to freeze-thaw in cold regions tend to change their properties. Therefore, care must be taken with respect to the freeze-thaw induced influence on stability and deformation of engineering constructions. With a view of the state-of-the-art, this paper reviews the general findings of the research on this topic on the basis of an extensive literature study. Technically, the following aspects of soil behavior regarding freeze-thaw are included: the means of investigation and testing techniques, physical and mechanical properties as well as mechanism analysis. Typical research results are taken from various resources and listed herein. The influences of freeze-thaw on soil properties can be summarized that, permeability of soils is generally increased despite of the change of density; densities of loose and dense soils are changed in the opposite way; structure of undisturbed soils can be changed, as the results peak in the stress-strain curve is not as pronounced as that in the pre-freezing ones; strength change is not well in agreement from the previous studies. The authors comments on previous studies and ideas for further investigation with regard to particularly concerned aspects are given. It is suggested that the original state, such as stress state, density and preconsolidation ratios should be taken into consideration for a more systematic investigation. Meanwhile, the deformation versus time during freezing and thawing may serve as a sound proof of change in particle bondings.

**Key words:** Freeze-thaw cycling; Physical and mechanical properties; Soil; Mechanism.