

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0082

WANG Dan, YANG Chengsong, MA Wei, et al. The status and review of frozen fringe in freezing soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4):1195–1201. [王丹, 杨成松, 马巍, 等. 正冻土冻结缘研究现状及展望[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4):1195–1201.]

正冻土冻结缘研究现状及展望

王 丹^{1,2}, 杨成松¹, 马 巍¹, 张莲海¹

(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)

摘 要: 湿土冻结过程中, 生长发育于冰透镜体与冻结锋面之间特殊的区间带称为冻结缘带。冻结缘作为温度场、水分场和应力场三场耦合作用的结果, 是冰分凝的水源补给站, 冰水相变发生的剧烈区域以及水分迁移的必经之路, 具有重要的研究意义, 也是深入认识冻胀机理的基础。通过系统地阐述冻结缘的形成过程、相关理论与试验、微结构特征、参数特征及冻结缘的模型构建等5个方面的研究进展及成果, 结合各个方向的发展趋势提出了冻结缘研究的重点, 即对冻结缘的研究应回归到试验研究, 利用新型测试技术深入对冻结缘微结构的观测, 结合物理参数及结构性参数变化构建耦合的冻结缘模型, 从而揭示其热力学机理, 为冻胀机制分析、冻土精确预报提供理论支撑。

关键词: 正冻土; 冻结缘; 微结构; 特征参数; 冻结缘模型

中图分类号: P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)04-1195-07

0 引言

土在冻结过程中, 冰水相变不只发生在冻结温度点处, 而是在一个温度范围内。在该温度范围, 因温度、压力、含水量、矿物颗粒表面能、水膜中水的活动性等平衡态遭到破坏, 温度较低处的水汽弹性较小, 土骨架的吸附力和冰晶的结晶力较大, 水膜中水分子的活动性较低, 此时沿着冷源方向上出现各种作用力梯度, 促使水分从未冻结区向冻结锋面方向迁移、积聚, 并分凝成冰造成土样体积膨胀^[1-2], 该温度范围所属区域即为冻结缘^[3-4], 其形成发育过程所涉及的未冻水运移和能态转变, 属热质迁移问题, 物理力学、化学过程相当复杂^[5]。水分经冻结缘区向冷端聚集产生冰透镜体, 冰透镜体生长的宏观表象为土体的冻胀变形, 冻胀被列为寒区典型冻害, 即在土温降到冰点以下, 土体原孔隙中的部分水冻结成冰造成体积膨胀, 以及水分迁移形成冰分凝所致^[1], 伴随冻胀产生冰水相变、水分迁移及冰分凝等过程。

关于冻胀的研究从 Taber^[6]开始后, 许多冻胀模型在 20 世纪 70 年代以后提出^[7-10], 土的冻胀机理及其影响的研究也越来越引起重视^[11]。在后期研究过程中, 科学家们认为未来冻胀机制的研究方向不应建立更多模型模拟, 而应回归到试验^[12]。实际上, 无论是现场还是室内试验观测, 均表明土冻胀的本质就是水分迁移致使冰透镜体不断增长的过程^[13], 而冻结缘作为冰透镜体的供给站及水分迁移的必经之路, 是冻胀机理研究不可或缺的因素, 对冻结缘形成演化过程的研究是充分认识冻胀过程中相变及水分迁移的基础, 也是描述冰分凝发育的关键。

1 冻结缘的形成

冻结缘提出以后, 冻结缘过程的认识成为揭示冻胀机理的重点。从热力学角度对冻结缘的形成过程进行定性解释^[13-15]: 土体在冻结过程中, 始终存在一定量的未冻水, 以水膜的形式吸附在颗粒的外围, 其分布的不均匀性, 决定着水分迁移的方向

收稿日期: 2018-04-19; 修订日期: 2019-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41630636; 41501072); 国家重点研发计划项目(2017YFC0405101)资助

作者简介: 王丹(1992—), 女, 甘肃张掖人, 2016年在长安大学获学士学位, 现为中国科学院西北生态环境资源研究院在读硕士研究生, 从事冻土物理学及微结构研究. E-mail: dwang1922@lzb.ac.cn

通信作者: 杨成松, 副研究员, 从事冻土物理力学与工程、冻土预报与制图研究. E-mail: ychsong@lzb.ac.cn.

和数量。土体在受单向冻结时,冻结锋面在较大的温度梯度作用下迅速向未冻土层推进,整个冻结体系处于极不稳定状态。此时,正冻土层中土颗粒周围的未冻水膜厚度减薄,而未冻土层中土颗粒周围的未冻水膜几乎不发生变化,使整个体系产生水势差,为了达到平衡状态,未冻土层的水分便不断向未冻水膜薄处迁移。若冻结锋面推移速度过快,而水分来不及向冻结锋面处迁移,造成土体的原位冻结,不产生冻结缘;若冻结锋面推移速度较慢,未冻土层的水分在温度梯度和水势梯度作用下不断的向冻结锋面附近迁移,部分薄膜水则通过分凝成冰来释放自由能,此阶段形成冻结缘,重建平衡状态^[16](图1)。

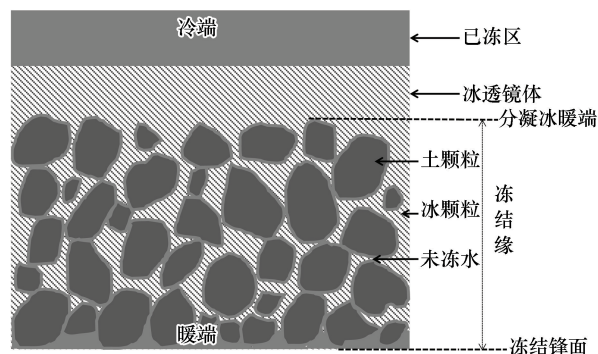


图1 冻结缘示意图

Fig. 1 Schematic view of frozen fringe

单纯从力学角度解释冻结缘的形成,则是由于该区各点处的水分驱动力与相变温度同时满足相变条件而形成^[17]。俄罗斯学者Golubev从微观角度论述了冻结缘的形成发育过程,土颗粒的表面有许多微畸点(缺陷)且密度高,冻结从这些微畸点中冰的成核开始,强调了冻结缘区未冻水膜取决于微畸点的形态,天然土的细分散性和多矿物性促使未冻水膜在冻结过程中产生同步性,致使相变表现在时间和空间上的“延伸”,导致冻结表现为不是一个“锋面”,而是一个“相变带”^[18]。该“相变带”,处于冰水共存状态,水分迁移最为剧烈,颗粒表面未冻水膜的存在为水分迁移提供了通道,水分在吸力的驱使下由未冻区向已冻区迁移,为冰分凝过程供给水分,被定义为冻结缘^[3]。

当然土体的粒度组分是决定土体是否产生冻结缘的基础,有关试验^[19]研究表明:土颗粒粒径大于0.1 mm的饱和粗颗粒土不存在水分向冻结锋面迁移的可能性,即不会产生冻结缘,而随着粒径的减小,土体的冻胀性增强,粒径在74 μm 左右的粉

质黏土具有最大的冻胀性,产生冻结缘且冻结期间冻结缘处的水分迁移非常强烈。冻结缘区域介于冰透镜体与冻结锋面之间,具有干密度增加和含水量减小的特点,是水分迁移、冰分凝和冰水相变的重要区域^[3,20]。进一步研究表明,冻结过程中,冻结缘区有孔隙冰形成^[12],改变了整个体系的冰水相压力,同时造成其微结构变化,甚至产生一定程度的固结^[21],动态变化过程复杂,很难建立完善的冻结缘模型来确定冻结缘特性及形成发育规律。

2 冻结缘理论及试验研究

冻结缘概念是建立在冻胀机制分析及不连续冰透镜体形成机理研究的基础上提出的,它是土体冻结过程中,温度场、水分场和应力场三场耦合作用的结果,涉及水分迁移及冰水相变等现象^[20],是揭示冻胀机理,提高冻胀预报准确性和可靠度的基础。

Taber最初通过饱和黏土的冻结试验,观测了不连续分凝冰的形成,同时揭示了控制冰层分凝的主要因素,作了冻胀机制启发性研究。Everett^[22]提出了在土粒子间隙中求吸水动力的想法,根据第一冻胀理论(即毛细理论)定量解释和估计冻胀和冻胀力,且得到了广泛的接受^[23-24]。然而,联系到实际冻胀过程中细颗粒土冻胀压力的差异,学者们很快认识到第一冻胀理论无法解释不连续冰透镜体的形成,局限的解释了水分迁移的源动力^[25]。基于此,Miller提出了第二冻胀理论(冻结缘理论),即将存在于冻结锋面和冰透镜体之间的,由未冻土向已冻土转变的过渡带定义为冻结缘,成冰与冻胀作用均发生在冻结缘区内。并运用薄膜水迁移理论,解释了在土冻结时,未冻水膜差异形成的水势差,促使水分产生迁移,补给冰透镜生长所需的水分,强调了冻结缘与水分迁移、促进非连续冰透镜体的产生及增长等现象的密切相关性。冻结缘理论的出现补充了第一冻胀理论的不足^[26],认识到水分迁移作用是导致土体冻胀的主要原因。

自第二冻胀理论提出以后,利用高精度的仪器设备动态监测冻结缘形成发育过程,使得关于冻结缘的研究逐渐明朗化。Akagawa^[27]利用X射线照相技术,分析了有压开放系统的亚黏土冻结试验中冻结缘厚度的变化情况。考虑到冻结过程中水分迁移等复杂物理过程对冻胀现象的影响,日本北海道大学低温科学研究所M.福田正已教授1993年联合

俄、中学者利用边界温度恒定的多孔岩盘进行冻胀试验,结果表明分凝冰层的水分则均由冻结缘取自未冻区段,阐述了冻结缘厚度的发育模式,以及冻结缘特征对解释水分迁移和冰分凝的重要作用。Takeda等^[28]利用分辨率可达几微米的CCD(Charge Coupled Device)照相机观测了黏土冻结锋面附近的微结构,指出冰分凝面上,冰、土颗粒和未冻水的活动很活跃,但对于冻结缘内微结构的变化特征没有给出统一的结论。随着试验设备的精度与测试手段的不断提高和改进,学者们利用荧光示踪剂结合延时成像技术,观察并记录了冻结缘的位置、厚度及分凝冰的成长过程^[29-30]。李萍等^[14]首次提出采用覆形膜推向数字化处理技术,分析了饱水正冻土中冻结缘成因和特征,并论述了冻结缘生长的三种模式,同时论述了冻结缘中的水势差形式与分凝冰发育模式的关系。

但到目前为止,对冻结缘的认识还比较粗浅,需要结合新型的技术设备及处理手段,探索冻结缘微结构变化,论述相对完善的冻结缘的形成发育模式,进而为冻胀机理研究提供理论支撑。

3 冻结缘微结构特征

冻结缘微观结构的研究不仅有利于其特征参数的确定,也是深刻认识冻结缘形成演化过程的基础。宏观上,Miyata基于水分迁移、热量输运和机械能平衡方程提出宏观冻胀理论,将冻结缘分为次冷带和平衡带,次冷带包含冰透镜体形成冻结锋面,有分凝冰发育;平衡带包含冻结锋面,仅有原位冻结^[31]。张莲海^[32]根据土体冻结过程中孔隙水压力的变化,把动态冻结缘模型划分为两区:在冻结缘Ⅰ区,由于冰核的产生,体积水迅速相变成冰,造成孔隙水压力及冰压力发生略微的增大;在冻结缘Ⅱ区,随温度的下降,弱结合水发生冻结,造成冰压力的迅速增大,孔隙水压力反而呈下降的趋势。

但目前,关于冻结缘微观结构的研究还相对模糊,冻结过程中,冻结缘区其微观结构是否产生了变化还存在较大的争议。Watanabe^[33]利用拉曼光谱仪观测黏土近冻结缘区的微结构,发现了孔隙冰的分布,破坏了矿物颗粒的骨架,为判断分凝冰的形成提供了依据。Azmatch等^[34]通过采用粒子图像测速法对照片进行分析,发现在近冻结缘区的冻结锋面处横断面形成有规律的六角方格,在纵向产生许多裂隙,水分通过方格和纵向裂隙从未冻区向冻

结区迁移,且该过程伴随着土体微结构的变化。同样冻结缘微结构的变化在明锋等^[35]的研究中也得到了证实,通过对冻结过程中的粉质黏土进行CT扫描,发现由于水分的迁移,导致冻结缘区结构发生剧烈变化,孔隙增加。但也有学者们^[28]认为冻结缘微结构并没有明显的变化,其结构特性和未冻土是一致的。关于冻结缘微结构的差异认识,究其根本原因是观测技术的限制,虽然李萍等^[36]通过覆形膜测定了冻结缘特征参数及其变化,但难以真实直观测定冻结缘微结构特征。

因此,急需解决的问题是:寻求一种新的技术手段来观测并确定冻结过程中冻结缘区的微结构的变化情况。结合数字图像技术在冻土上的有效应用^[37],可利用冷冻扫描电镜(cryo-Scanning Electron Microscopy, cryo-SEM),联合能谱仪,应用探索冻结缘微结构特征,直接观测冰的结构形态,突破了冻土中难以直接观测冰形态的难题,为冻结缘结构观测和形成演化过程分析提供重要的技术支持。

4 冻结缘特征参数研究

不同于冻结土样中其他冷生分区中水分的存在形式,冻结缘中的水是部分冻结的,导致其呈现复杂的物理特征,缘区内部结构形态差异大,影响着冻结过程中水分的迁移。从80年代开始,对冻结缘的研究越来越得到重视,学者们开展了大量的冻结缘试验,观测了冻结缘的结构和特征参数变化,建立了简单的冻结缘理论模型,初步探索了冻结缘形成发育过程,为冻胀机理的深入研究提供了相关参考。

未冻水含量,冰水相压力以及厚度作为冻结缘的特征参数,不但影响了未冻水迁移驱动力、迁移速度和迁移量,同时也影响着分凝冻胀速度和冻胀量^[38],因此对其进行深入研究,有利于我们进一步深入理解冻胀机理,促进冻害防治工作的进展^[27]。

4.1 未冻水含量

冻结缘的形成过程,涉及未冻水的迁移和能态的转变,说明了未冻水含量的重要意义。未冻水含量是反映冻土中水分迁移的重要指标,与负温保持着动态平衡,随温度降低,未冻水含量按指数规律衰减^[39],即存在同向的温度梯度与水势梯度。在冻结缘内,随温度下降,未冻水含量沿着冻结锋面到冰透镜体暖端温度下降,改变了吸水势的大小,决

定了未冻水迁移的方向和数量,进而影响了冻结缘的发育模式。同时,未冻水含量与冰之间也保持着动态平衡^[40],土体冻结过程中,随冰透镜体暖端温度的持续降低,其未冻水含量减小,而过多的薄膜水将以冰的形式存在,完成冻结缘中的冰水相变过程。

冻结缘中因温度不同,引起未冻水含量不等,导致由弯液面压力梯度和薄膜楔入压力梯度引起的水分迁移和冰分凝,是制约冻胀形成和发育最主要的因素之一。目前膨胀计测量法、绝热测热法、核磁共振法和时域反射法均可用于测定冻土中的未冻水含量,其中,膨胀计测量法和绝热测量法测量精度差,一般采用核磁共振法与时域反射法联合,简单、高效的测定冻结土样中的未冻水含量。

4.2 冰水相压力

冻结缘作为衔接未冻区与冻结区的过渡带,存在大量的自由水,是水分迁移及冰水相变的重要区域,伴随而生的冰水相压力随时间变化复杂,难以准确测定。Miller^[7]认为饱和正冻土中的冰水压力平衡与非饱和未冻土干燥过程中水汽压力平衡类似,关于冻结缘内的冰水相压力关系大多用经典克拉伯龙方程描述,假设为纯物质状态下的冰水相比,表达了单一物质在一阶相变平衡时各物理量的变化^[38]。但是随着学者们对冻结缘认识的深入,认为冰水相压力差是一种热分子力效应,大小由冰水界面能控制^[7],因而经典克拉伯龙方程的适用性越来越受限,Miller考虑到温度平衡和化学势平衡,对经典克拉伯龙方程进行了改进,得到了一个更完备的热力学冰水相比平衡关系,即广义的克拉伯龙方程。Loch^[41]考虑不同溶质的影响,对广义克拉伯龙方程进一步进行了拓展。除了利用稳态热力学模型说明广义克拉伯龙方程的物理意义外,在相平衡描述上大量的试验也证明了广义克拉伯龙方程在封闭系统中的有效性^[42]。Li等^[43]则证实出广义克拉伯龙方程仅在压力与温度不随时间变化的稳定假设下才适用。

而真实的冻结缘过程涉及到孔隙水压力、冰压力及有效应力等变量的演化和相互关系,是一个相对复杂的系统,因而广义克拉伯龙方程对其过程的描述受到了大量的质疑^[31,44]。而后张莲海^[32]对描述冰水相比的广义克拉伯龙方程及其适用性进行了详细的论述,认为广义克拉伯龙方程在稳定状态下冻结缘相变过程完全适用,而在非稳定状态下是不

适用的。同时发现在土体冻结过程中,广义克拉伯龙方程的成立可能只存在于冻结缘温度范围内,因为只有该区才发生冰水相比过程^[45]。根据水分迁移的理论和模型^[22,46],水分迁移驱动力与冰水界面处的冰水相压力变化有着密切的关系^[47],且在冰水界面位置产生大量的孔隙水压力降,从而导致水分的迁移,因此,可将孔隙水压力存在作为水分迁移的驱动^[48]。

冻结缘的形成演化是其中水势差和冰水相压力两种因素不断变化的过程。通过在冻结点测试过程中加入孔隙水压力测试,发现孔隙水压力能够反映土中水的微观单一的变化过程,未冻水膜的变薄产生水势差及冰水相比产生界面能的改变,是导致孔隙水压力的下降的主要原因。即孔隙水压力降能够表征冻结缘中的水势差和冰水相压力变化,是揭示冻结缘水热力过程的重要手段^[32]。

4.3 冻结缘厚度

冻结缘的厚度是指冻结锋面与分凝冰暖端之间的距离,因此冻结缘的厚度取决于两个变量:冻结锋面和分凝冰层暖端的位置,它是反映冻结缘发育程度的重要指标。冻结缘厚度的变化受压力和试验的边界条件影响,取决于冻结速度和冻胀速度两个因素^[49],其中冻结速度是影响分凝冰形成的重要因素,它通过控制整个系统的温度变化,改变未冻水水势梯度,进而影响水分迁移的速度^[29,50],改变冻结缘的厚度。该过程同时反应了冻结缘未冻水含量和孔隙水压力等特征参数的变化,可反演分析冻结缘的形成演化过程。徐敦祖等^[38]通过边界温度恒定的岩盘冻胀试验,提出了冻结缘厚度随冻结历时增大、恒定和减小3种发育模式。张莲海^[32]指出冰分凝过程依赖驱动力和约束力,当驱动力大于约束力时骨架破裂以及冰分凝,指出分凝冰下方的固结可能导致土体约束力的增加,进而增大冰分凝的难度,从而导致冻结缘厚度的增大。

关于冻结缘厚度的研究,Akagawa^[27]在有压开放系统对亚黏土做冻结试验,测得一定分凝温度下冻结缘厚度随持续时间从12 mm减小到10 mm。Radd等^[51]在高压条件下对饱和细粒土做高压冻结试验,测得冻结缘的厚度约为10 mm。Konrad^[52]在无压条件下测得其厚度仅为1.5~2.7 mm,李萍等^[36]通过对徐州饱和黏土进行无盐无压冻结试验,发现冻结缘的厚度集中在0.5~2.0 mm之间。冻结缘厚度与冰分凝温度的变化一般受时间、荷载、土

质、温度梯度和是否补水等多因素影响, 冻结缘厚度的测量值一般介于 1.5~10 mm 之间^[53]。

冻结缘形成演化过程中, 由于水分迁移, 导致其结构发生剧烈的变化^[33,35,54], 且在冻结缘厚度范围内, 由于水、冰的存在, 使得其表现出特殊的结构性。但由于冻结缘性质易变, 厚度较小, 难以捕捉, 受观测技术和实验手段的限制, 使得冻结缘厚度研究近些年成果不是很多, 特别其结构性研究甚少, 需新的观测手段不断探索研究。

5 冻结缘模型研究

在传统的冻胀研究中, 当温度梯度变化比较缓慢时冻结过程一般被看成是稳态的, 因此绝大部分的冻结缘模型模拟是建立在稳态模型基础上的, 比如, 水力模型^[55]、刚性冰模型^[56-57]、分凝势模型^[52]等。稳态模型假定土在冻结过程是准静态的。即土体在冻结过程中, 任意时刻的状态均保持为平衡状态, 而相应的热力学过程则可以表示为从前一时刻平衡态到下一个时刻平衡态之间的变化。张莲海^[32, 48]等假定稳态下土体冻结过程中冻结缘保持平衡状态, 根据实测的孔隙水压力数值, 构建了稳态情况下的冻结缘过程示意图。同时强调在稳态模型中, 孔隙水压力的最小值一般出现在分凝温度范围内, 而不是临界温度处, 发现由于在稳态的情况下, 一般分凝界面以后不再认为具有冰水相变过程。

而实际上土体在冻融过程中冻结缘变化更趋近于动态非相平衡过程。这种非相平衡主要是由于冻结过程中的水流耗散、温度耗散、冰耗散及土骨架耗散等耗散过程。因为在冻结过程中各种耗散过程是同时存在的, 但在冻结的某个阶段可能某个耗散占着主导地位。从而, 根据粒子的具体性质分析耗散的难易程度, 把土体冻结过程分为六个状态, 基于这种分类和实测孔隙水压力数值, 给出动态下冻结缘过程示意图^[48]。

无论稳态还是动态下冻结缘示意图, 不仅需要了解冻结缘形成演化机理, 而且需要结合该过程中结构的变化, 最终构建冻结缘形成演化模型。但目前受观测技术的限制, 对冻结缘区结构的认识还不够深入, 且冻结缘参数大都利用一些经验或半经验的公式来模拟, 缺少试验参数测试的验证。因而对于冻结缘这种复杂物理过程模型的构建, 应深化对冻结缘过程中的未冻水含量和冰、水相压力等特征

参数, 厚度以及微细观结构数据的分析, 使模型体现更加完善的耦合关系, 为冻胀机理的深入和冻胀预报参数的准确选择提供重要的参考。

6 结论及展望

伴随寒区基础设施的建设, 土的冻胀及其影响的研究也越来越引起重视, 冻结缘作为冻胀机制研究的基础, 其特征参数变化和形成发育过程成为研究的关键。土体冻结过程中冻结缘的形成和发育过程复杂, 只单纯考虑特征参数或结构某一方面的变化因素而揭示其形成机理, 对实际的研究指导意义不会很大。目前关于冻结缘的认识还不是很充分, 无论是其宏观力学行为还是微观形态变化都相对模糊, 形成发育过程中微结构是否变化还存在争议, 冻结缘厚度难以准确捕捉, 冻结缘区冰水相压力的确定目前也只是采取经验或半经验的方法, 不能准确的揭示冻结过程中冻胀机制和不连续冰透镜体成形机理。综上所述, 关于冻结缘的研究正从宏观表象研究走向微观机理分析, 将其形成过程中微观结构变化和宏观特征参数变化相结合, 构建相对完善的冻结缘模型, 即将成为未来冻结缘研究的主要方向。

当然, 受观测技术的限制, 直观研究冻结缘微结构变化还相当困难, 后期仍需大量的工作, 包括在保持冻结缘温度及结构完整性的前提下进行: 冻结缘区冰颗粒的存在状态及固相胶结形态确定、冰颗粒是否作为质发生迁移、缘区是否存在结构不同的分区、冻结缘形成发育过程中是否存在裂隙的发展等。这些工作对构建完善的冻结缘模型、深入冻胀机理的研究均具有重要的意义。

参考文献(References):

- [1] Qi Jilin, Ma Wei. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 132 - 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): 132 - 143.]
- [2] Chen Xiaobai, Liu Jiankun, Liu Hongxu, et al. Frost action of soil and foundation engineering [M]. Beijing: Science Press, 2016. [陈肖柏, 刘建坤, 刘鸿绪, 等. 土的冻结作用与地基[M]. 北京: 科学出版社, 2016.]
- [3] Miller R D. Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils[J]. Highway Research Record, 1972(393).
- [4] Qin Dahe. Cryosphere Science dictionary (revised edition) [M]. Beijing: Meteorological Press. 2016. [秦大河. 冰冻圈科学词典(修订版)[M]. 北京: 气象出版社. 2016.]
- [5] He Ping, Cheng Guodong, Zhu Yuanlin. The progress of study on heat and mass transfer in freezing soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(1): 92 - 98. [何平, 程国

- 栋, 朱元林. 土体冻结过程中的热质迁移研究进展[J]. 冰川冻土, 2001, 23(1): 92 - 98.]
- [6] Taber S. Frost heaving[J]. The Journal of Geology, 1929, 37(5): 428 - 461.
- [7] Miller R D. Frost heaving in non-colloidal soils[C]//Proceeding 3rd International Conference Permafrost. National Research Council of Canada, 1978: 707 - 713.
- [8] Takagi S. The adsorption force theory of frost heaving[J]. Cold Regions Science and Technology, 1980, 3(1): 57 - 81.
- [9] O'Neill K. The physics of mathematical frost heave models: A review[J]. Cold Regions Science and Technology, 1983, 6(3): 275 - 291.
- [10] Fowler A C, Krantz W B. A generalized secondary frost heave model[J]. Siam Journal on Applied Mathematics, 1994, 54(6): 1650 - 1675.
- [11] Ma Wei, Wang Dayan. Studies on frozen soil mechanics in China in past 50 years and their prospect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 625 - 639. [马巍, 王大雁. 中国冻土力学研究 50 年回顾与展望[J]. 岩土工程, 2012, 34(4): 625 - 639.]
- [12] Akagawa S, Nishisato K. Tensile strength of frozen soil in the temperature range of the frozen fringe[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 57(1): 13 - 22.
- [13] Sheng Daichao, Zhang Sheng, He Zuoyue. Assessing frost susceptibility of soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(3): 594 - 605. [盛岱超, 张升, 贺佐跃. 土体冻胀敏感性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 594 - 639.]
- [14] Li Ping. Experimental study on causes of formation and characteristics of the frozen fringe in saturated freezing soils[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2000. [李萍. 饱水正冻土冻结缘成因和特征的试验研究[D]. 北京: 中国科学院, 2000.]
- [15] Zhang Lianhai, Ma Wei, Yang Chongsong, et al. A review and prospect of the thermodynamics of soils subjected to freezing and thawing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1505 - 1518. [张莲海, 马巍, 杨成松, 等. 土在冻结及融化过程中的热力学研究现状与展望[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1505 - 1518.]
- [16] Xu Xiaozu, Deng Yousheng. Experimental study on water migration in frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 1991: 101 - 103. [徐教祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 101 - 103.]
- [17] He P, Cheng G, Yu Q, et al. A couple model of heat, water and stress fields of saturated soil during freezing[J]. J. Glaciol. Geocryol, 2000, 22(2): 135 - 138.
- [18] Xu Xiaozu, He Ping, Zhang Jianming. Progresses in the studies of soil freezing and frost heaving[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, 19(3): 280 - 283. [徐教祖, 何平, 张建明. 土体冻结和冻胀研究的新进展[J]. 冰川冻土, 1997, 19(3): 280 - 283.]
- [19] Liu Jiankun, Tong Changjiang, Fang Jianhong. Introduction to geotechnical engineering in cold regions[M]. Beijing: China Railway Press, 2005. [刘建坤, 童长江, 房建宏. 寒区岩土工程引论[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.]
- [20] Gilpin R R. A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils[J]. Water Resources Research, 1980, 16(5): 918 - 930.
- [21] Arenson L U, Azmatch T F, Sego D C, et al. A new hypothesis on ice lens formation in frost-susceptible soils[C]//Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska. 2008, 1: 59 - 64.
- [22] Everett D H. The thermodynamics of frost damage to porous solids[J]. Transactions of the Faraday society, 1961, 57: 1541 - 1551.
- [23] Penner E. Fundamental aspects of frost action[J]. AJP77, 1977, 2: 17 - 28.
- [24] Jones R H, Hurt K G. An osmotic method for determining rock and aggregate suction characteristics with applications to frost heave studies[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1978, 11(3): 245 - 252.
- [25] Loch J P G, Miller R D. Tests of the Concept of Secondary Frost Heaving 1[J]. Soil Science Society of America Journal, 1975, 39(6): 1036 - 1041.
- [26] Miller R D. Lens initiation in secondary heaving[C]//Proceedings of the International Symposium on Frost Action in Soils. 1977, 2: 68 - 74.
- [27] Akagawa S. Experimental study of frozen fringe characteristics[J]. Cold Regions Science and Technology, 1988, 15(3): 209 - 223.
- [28] Takeda K, Okamura A, Knutsson S. Microstructure of freezing front in freezing soils[C]//Ground Freezing 97: Proceedings of the 8th International Symposium on Ground Freezing and Frost Action in Soils, Luleå, Sweden. 15 - 17 April 1997. Rotterdam, the Netherlands: AA Balkema, 1997: 171 - 178.
- [29] Xia D, Arenson L U, Biggar K W, et al. Freezing process in Devon silt-using time-lapse photography[C]//Proceedings, 58th Canadian Geotechnical Conference. 2005.
- [30] Arenson L U, Sego D C. The effect of salinity on the freezing of coarse-grained sands[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(3): 325 - 337.
- [31] Miyata Y. A macroscopic frost heave theory-Coupling equations and criteria for creation of new ice lens[C]//Proc. Int. Conf. on Ground Freezing. 1997, 97: 131 - 138.
- [32] Zhang Lianhai. Study of pore water pressure and freezing fringe process in the process of soil freezing and thawing[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. [张莲海. 土体冻融过程中孔隙水压力测试及冻结缘过程研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.]
- [33] Watanabe K, Mizoguchi M, Ishizaki T, et al. Experimental study on microstructure near freezing front during soil freezing[J]. Transactions-Japanese Society of Irrigation Drainage and Reclamation Engineering, 1997: 53 - 58.
- [34] Azmatch T F, Arenson L U, Sego D C, et al. Measuring ice lens growth and development of soil strains during frost penetration using particle image velocimetry (GeoPIV)[C]//Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska. 2008, 1: 89 - 93.
- [35] Ming Feng, Li Dongqing, Chen Shijie. Impact of water migration on meso-structure of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 671 - 678. [明锋, 李东庆, 陈世杰. 水分迁移对冻土微观结构的影响[J]. 冰川冻土, 2016, 38(3): 671 - 678.]
- [36] Li Ping, Xu Xiaozu, Pu Yibin, et al. Analyses of characteristics of frozen fringe by using the digital technique of picture[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, 21(2): 175 - 180. [李萍, 徐教祖, 蒲毅彬, 等. 利用图像数字化技术分析冻结缘特征. 冰川冻土, 1999, 21(2): 175 - 180.]
- [37] Wang Yongtao, Wang Dayan, Ma Wei, et al. Development and application of frost heaving experimental system based on the digital image processing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(5): 1047 - 1056. [王永涛, 王大雁, 马巍, 等. 基于数字图像技术的土冻胀试验系统研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(5): 1047 - 1056.]
- [38] Xu Xiaozu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. Physics of frozen

- soil[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2010: 75 – 82. [徐敦祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2010: 75 – 82.]
- [39] Anderson D M, Pusch R, Penner E. Physical and thermal properties of frozen ground[J]. Geotechnical engineering for cold regions, 1978, 2: 37 – 102.
- [40] Xu Xiaozu, Tice A R. Soil-water potential and unfrozen water content and temperature[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1985, 7(1): 1 – 14. [徐敦祖, Tice A R. 土水势、未冻水含量和温度[J]. 冰川冻土, 1985, 7(1): 1 – 14.]
- [41] Loch J P G. Thermodynamic equilibrium between ice and water in porous media[J]. Soil Science, 1978, 126(2): 77 – 80.
- [42] Biermans M, Dijkema K M, De Vries D A. Water movement in porous media towards an ice front[J]. Journal of Hydrology, 1978, 37(1/2): 137 – 148.
- [43] Li N, Chen F, Su B, et al. Theoretical frame of the saturated freezing soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 35(2): 73 – 80.
- [44] Konrad J M, Duquennoi C. A model for water transport and ice lensing in freezing soils[J]. Water Resources Research, 1993, 29(9): 3109 – 3124.
- [45] Bronfenbrener L, Bronfenbrener R. Modeling frost heave in freezing soils [J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 61(1): 43 – 64.
- [46] O'Neill K, Miller R D. Exploration of a rigid ice model of frost heave[J]. Water Resources Research, 1985, 21(3): 281 – 296.
- [47] Dash J G, Rempel A W, Wettlaufer J S. The physics of premelted ice and its geophysical consequences [J]. Reviews of modern physics, 2006, 78(3): 695.
- [48] Ma W, Zhang L, Yang C. Discussion of the applicability of the generalized Clausius-Clapeyron equation and the frozen fringe process[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 142: 47 – 59.
- [49] Xu Xiaozu, Wang Jiacheng, Wang Lixin, et al. Mechanism of soil frost heaving and salt expansion [M]. Beijing: Science Press, 1995: 42 – 99. [徐敦祖, 王家澄, 王立新, 等. 土体冻胀和盐胀机理[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 42 – 99.]
- [50] Li Ping, Xu Xiaozu, Wang Jiacheng, et al. The study of the growth pattern of discrete segregating ice [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science), 2000, 36(5): 126 – 133. [李萍, 徐敦祖, 王家澄, 等. 不连续分凝冰发育规律的研究. 兰州大学学报, 2000, 36(5): 126 – 133.]
- [51] Radd F J, Oertle D H. Experimental pressure studies of frost heave mechanism and the growth-fusion behavior of ice [C]// North Am. Contrib. Sect. Int. Permafrost Conf. Washington, DC. 1973: 377 – 383.
- [52] Konrad J M, Morgenstern N R. A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1980, 17(4): 473 – 486.
- [53] Ma Wei, Wang Dayan. Mechanics of frozen soil [M]. Beijing: Science Press, 2014: 1 – 40. [马巍, 王大雁. 冻土力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1 – 40.]
- [54] Arenson L U, Azmatch T F, Sego D C, et al. A new hypothesis on ice lens formation in frost-susceptible soils [C]//Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska. 2008, 1: 59 – 64.
- [55] Harlan R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil [J]. Water Resources Research, 1973, 9(5): 1314 – 1323.
- [56] Sheng D, Axelsson K, Knutsson S. Frost heave due to ice lens formation in freezing soils 1. Theory and Verification [J]. Hydrology Research, 1995, 26(2): 125 – 146.
- [57] Sheng D, Axelsson K, Knutsson S. Frost heave due to ice lens formation in freezing soils 2. field application [J]. Hydrology Research, 1995, 26(2): 147 – 168.

The status and review of frozen fringe in freezing soils

WANG Dan^{1,2}, YANG Chengsong¹, MA Wei¹, ZHANG Lianhai¹

(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)

Abstract: A special interval zone called frozen fringe developed between the freezing front and ice lens during the freezing process of soil. Frozen fringe as the coupling result of temperature field, moisture field and stress field, which become a water source for ice segregation, the ice-water phase transition zone, and the only way for water migration during soil freezing. Frozen fringe becomes a basic factor to understand the mechanism of frost heave. Therefore, through literature reviewing, recent achievements and progress of the frozen fringe, including the formation of the frozen fringe, theories and experiments, microstructure, characteristic parameters, and the model construction of the frozen fringe, are presented. Furthermore, the development tendency of the frozen fringe is an experimental study. It is urgent to propose a new technique to observe the microstructure of the frozen fringe, and to build better a model with the change of characteristic parameters. Study of frozen fringe is reliable to provide theoretical support for the analysis of frost heave mechanism, and accurate to predict frozen soils.

Key words: freezing soil; frozen fringe; microstructure; characteristic parameters; frozen fringe model

(责任编辑: 周成林; 编辑: 周成林)