

图像处理技术在分凝冰演化规律研究中的应用

周金生¹, 周国庆¹, 张琦², 商翔宇¹, 周扬¹

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 通过一维开放系统的不同温度梯度人工冻土连续冻结试验, 采用动态图像采集和数字分析技术, 实现了在冻结过程中获取的分凝冰生长信息在空间和时间分布上的一致性。根据试验中获得的即时图像信息, 经过二值化处理后, 可以定量地确定分凝冰形成的时间、位置、厚度及发展规律等主要信息。结果表明, 图像分析获得的分凝冰厚度与位移计测得的冻胀量基本吻合, 分凝冰演化过程可以划分为 3 个主要阶段: 初始阶段几乎不产生分凝冰; 第二阶段冻结锋面推进速度减缓, 分凝冰以不连续薄冰层形式少量出现; 第三阶段冻结锋面趋于稳定, 分凝冰的产生主要为末透镜体的生长。在连续冻结试验中, 温度梯度与末透镜体的形成时间近似成线性关系, 温度梯度越大, 出现末透镜体的时间越早。

关键词: 人工冻土; 图像处理; 分凝冰; 演化规律; 温度梯度

中图分类号: TU41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)01-0123-05

作者简介: 周金生(1967-), 男, 河北唐山人, 副教授, 从事冻土力学与工程研究。E-mail: zjscumt@126.com。

Application of image processing in researches on evolving rules of segregation ice

ZHOU Jin-sheng¹, ZHOU Guo-qing¹, ZHANG Qi², SHANG Xiang-yu¹, ZHOU Yang¹

(1. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, CUMT, Xuzhou 221008, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The consistency in position and time of segregation ice in frozen soils is obtained by use of dynamic photograph and image processing in continuously freezing experiments of one-dimensional open system with different temperature gradients. According to the binarization images of frozen soils, the initiation time, position, thickness and evolving rules of segregation ice can be obtained quantitatively. The thickness of segregation ice obtained from the image analysis is consistent with the frost heave tested by displacement transducer. Three phases of evolving process in the ice segregation can be divided according to the results of the image processing: the early freezing, the growth of thin and discontinuous segregation ice and the final ice lens. There is nearly a linear relationship between the initiation time of the final ice lens and the temperature gradient in continuously freezing experiments. The initiation time of the final ice lens will move up with the increase of the temperature gradient.

Key words: artificially frozen soil; image processing; segregation ice; evolving rule; temperature gradient

0 引言

冻土冻胀主要是水分迁移导致的冰分凝现象的宏观表现。同时, 在地层冻结过程中, 由于水分迁移而产生的冻胀变形将引起较大的冻胀力。过量的冻胀往往使上部结构或建筑物等遭受破坏。开展对土体冻结过程中分凝冰演化规律的研究, 是揭示人工冻土冻胀产生、发展机理的关键, 也是解决冻胀控制问题的重要理论和应用基础。

随着试验技术和分析手段的进步, 冻土冻胀的微观研究逐步得到发展。冻结缘理论的提出^[1], 将冻胀机理研究和各类冻胀模型的建立引向深入。在实验证实冻结缘的存在后^[2-4], 基于冻结缘理论的第二冻胀理论得到迅速发展^[3-7], 获得了冻结缘的主要特征参数,

如冻结缘内的冰水分布^[8-10]、导湿系数^[11-12]、冰水相压力变化及相互关系和冰透镜体形成条件^[5, 13-14]等。徐学祖等^[15]通过边界温度恒定的岩盘冻胀试验提出, 冻结缘的厚度取决于冻结速度和冻胀速度两个变量, 且具有随冻结历时增大、恒定和减小的 3 种模式, 冰分凝最容易在无结构联系处形成, 冰分凝温度随冷端面温度降低而降低, 并利用未冻水含量与温度关系曲线及土的起始冻结温度和冷端面温度估算冰分凝温度。不同的冻结速度和水分迁移速度可以引起冻结缘内水分场和温度场的变化, 从而造成不同的不连续分

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50534040); 国家科技支撑计划项目(2006BAB16B01)

收稿日期: 2009-07-17

凝冰发育模式和规律,可能形成不同层数、厚度各异的分凝冰结构,而这一结构具有一定的规律性^[16-17]。

上述研究推动了对冻结缘以及与其紧密联系的分凝冰的试验和理论研究工作。然而,既有实验条件的单一性,使得目前对于水分迁移机制以及土体内分凝冰形成的规律及其演化的认识,仍主要滞留在唯象和静态范畴,描述的仅是个别因素和孤立作用的影响,所给出的结论大多是定性的,而且,由于各模型参数选择不一致,导致最终的结果很难形成统一的学说。

李萍等^[12]在中国首次采用复形膜技术,实现了冰分凝静态试验结果向分凝过程动态分析的转化,成功地分析了饱水正冻土中冻结缘成因和特征。为更准确的获得分凝冰演化过程信息,本文利用实时动态照相装置,拍摄得到试验过程中的冻结试样图像,通过对图像的数字化处理,获得分凝冰演化规律,以掌握人工冻土冻胀的形成机理和发展规律,为冻土冻胀研究提供了有益的技术手段,进而为实现冻胀控制提供支持。

1 试验简介

1.1 试验系统

该试验系统由温度控制系统、测试系统、补水系统、冻结试样筒 4 个部分组成。

(1) 采用冷柜作为试验箱体,并控制环境温度,试样温度控制采用低温恒温循环器。

(2) 测试系统包括 4 个部分:①温度场测试,采用误差为 $\pm 0.1\%$ 的热敏电阻,沿试样高度每间隔 1 cm 布置一个热敏电阻,实时采集试验过程中试样内的温度变化;②冻胀量测试,采用量程为 50 mm、精度为 0.01 mm 的位移传感计;③动态实时监测,采用具有 50 倍数字放大功能的视频显微镜和高分辨率的摄像头,试验中拍摄像素设置为 640×480,拍摄间隔时间为 10 min;④测试数据采集,使用 Datataker 数据采集仪。

(3) 为便于试验过程中的信息采集,一维冻结试验使用的试样筒为有机玻璃制成的方形筒,其内部尺寸为 110 mm×110 mm×150 mm,有机玻璃的透光率为 95%,壁厚为 10 mm。

1.2 土样参数

试验土样选取冻胀敏感性粉质黏土,经过晒干、碾碎、加水后制成重塑土样,土样颗粒分析的结果:粒径为 0.25~0.075 mm 占 1.6%,0.075~0.05 mm 占 3.9%,0.05~0.02 mm 占 23.5%,0.02~0.01 mm 占 21%,0.01~0.005 mm 占 17%,0.005~0.002 mm 占 18%,0.002~0.001 mm 占 15%。

1.3 温度模式

为研究连续冻结模式下不同温度梯度对分凝冰演化规律的影响,本文进行了 3 个不同冷端温度边界条件的一维连续冻结试验。表 1 为试验中的温度控制模式。3 个试验全部在开放补水情况下进行,无外载作用。为保证试样初始温度条件的一致性,每次冻结试验开始前,土样均经过预冷处理。

表 1 连续冻结试验温度控制方案

Table 1 Temperature control schemes of continuously freezing experiment

编号	冷端温度/℃	暖端温度/℃	环境温度/℃
A1	-18	+12	+2
A2	-22	+12	+2
A3	-26	+12	+2

2 图像处理

2.1 图像二值化处理方案

图像的二值化是指将灰度图像转化为只包含黑、白两个灰度(灰度值设置为 0 或 255)的二值图像,使整个图像简单化,数据量减小,目标轮廓突出,易于识别图像的结构特征,有利于图像的进一步处理。为此,需要首先对试验图片进行灰度处理,选取有用区域进行直方图统计,并确定阈值大小。

在获取的冻土分凝冰图像中,对象和背景占据不同的灰度级范围。由直方图可以知道图像的大部分像素灰度值较低,其余像素均匀地分布在其它灰度级上。由此可以设一个阈值 T ,把直方图分成两个部分,如图 1 所示。所有灰度大于或等于阈值的像素被判定为属于特定物体,其灰度值重新分配为最大灰度(255),否则这些像素点被排除在物体区域以外,重新分配以最小灰度(0),这样就可以组成一个新的二值图像,并成功的把对象从背景中显露出来。 T 的选择原则: B_2 应尽可能包含与背景相关联的灰度级,而 B_1 则应包含物体的所有灰度级。

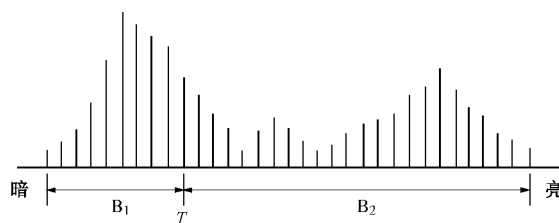


图 1 图像 $f(x,y)$ 的直方图

Fig. 1 Histogram of image $f(x,y)$

利用灰度直方图阈值进行二值化的方法:图像 $f(x,y)$ 的灰度级范围是 $(z_1 \sim z_k)$, 设 T 是 z_1 和 z_k 之间的一个值,即阈值,那么二值图像 $f_1(x,y)$ 可表示为

$$f_1(x,y)=\begin{cases} 255 & (f(x,y)\geq T) \\ 0 & (f(x,y)< T) \end{cases} \quad (1)$$

阈值二值化图像算法模块的结构框图见图 2。

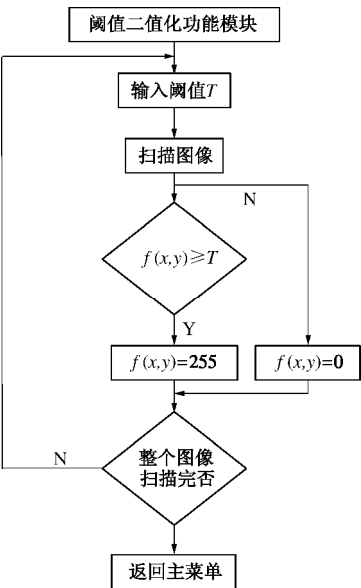


图 2 阈值二值化算法模块结构框图
Fig. 2 Flow chart of threshold binarization

2.2 生成二值化图像信息

利用基于 Visual Basic 6.0 编程的图像处理程序，可以获得原始图像的色素值文本和以该文本生成的二值化图像，进而获得冻结试验过程中的分凝冰生长演化信息。

图 3 为按上述方案处理后获得的一维连续冻结试验(A3)中每间隔 800 min 的分凝冰以及土和冻土的二值化图像。图像中的白色素点代表试验过程中生成的分凝冰，黑色素点代表试样中的土和冻土，由此可以比较准确地得到冻结过程中不同时刻的分凝冰分布和发展变化等状态信息。

2.3 确定分凝冰厚度

根据输出的数据文本，经统计能够得到图像中所

有的白色素点个数，除以横向的白色素点个数后，可以得到平均每列竖向白色素点的个数，再与标尺进行换算即可得到冻结试验过程中某一时刻试样中总的分凝冰厚度，表 2 即为图像分析获得的对应时刻点分凝冰厚度值。

表 2 图像分析分凝冰厚度

Table 2 Thickness of segregation ice from image analysis		
序号	冻结时间/min	分凝冰厚度/mm
1	800	0.463
2	1600	2.685
3	2400	4.259
4	3200	5.463
5	4000	6.204
6	4800	7.037

3 试验结果分析

3.1 连续冻结土体中的分凝冰生长阶段划分

通过对 3 个一维连续冻结试验(A1~A3)所获得的 1000 多张图像分析，发现在连续冻结试验过程中分凝冰演化具有明显的阶段性。根据冻结过程中的典型时刻，可以将连续冻结的分凝冰生长过程划分为 3 个主要阶段。

(1) 第一阶段，冻结初期，由于冻结锋面推进速度比较快，在快速推进的过程中，水分没有足够的时间向冻结锋面迁移，试样中原位冻结占主导地位，几乎不产生分凝冰。

(2) 第二阶段，随着冻结锋面推进速度减缓，来自未冻区的水分开始向冻结锋面迁移，试样中出现了少量不连续的薄层分凝冰。

(3) 第三阶段，冻结锋面趋于稳定，一层可以贯穿整个冻结推进面的分凝冰开始生成，并不断生长，成为末透透镜体。在第三阶段，分凝冻胀主要是由末透透镜体的生长引起的。

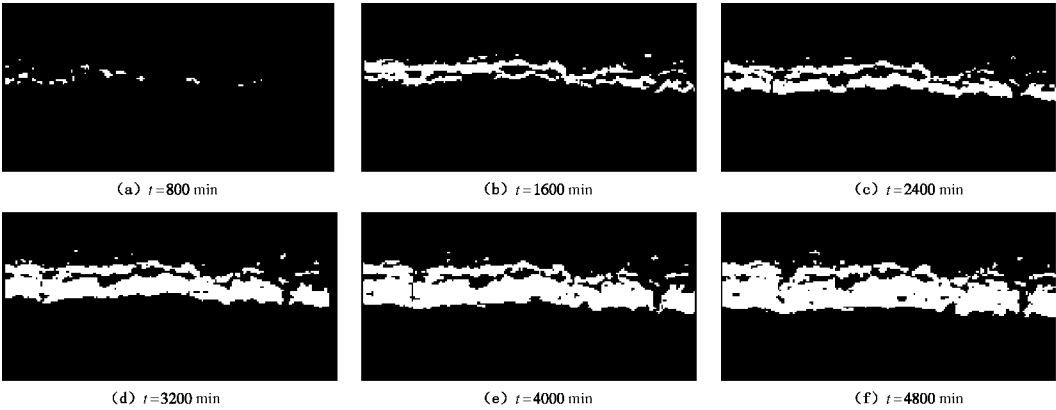


图 3 分凝冰和土的二值化图像

Fig. 3 Binarization images of segregation ice and soils

表 3 为经图像分析得到的 3 个连续冻结试验各阶段具体时间分布。

表 3 图像分析三阶段具体时间

Table 3 Three phases from image analysis

试验编号	时间/min		
	第一阶段	第二阶段	第三阶段
A1	0~740	740~1080	1080~4560
A2	0~660	660~960	960~4990
A3	0~630	630~870	870~4960

3.2 温度梯度对末透镜体形成的影响

在连续冻结模式下，试验初始阶段冻区的温度梯度随时间的增加而减小，未冻区的温度梯度随时间的增加而增大，在此期间，试样中冻深迅速发展而分凝冰几乎不出现，末透镜体无法形成；连续冻结的第二阶段，试样内温度梯度的变化速率降低，冻结锋面的推进速度减慢，分凝冰开始少量出现，为末透镜体的形成创造了条件。

末透镜体的形成为第三阶段开始的标志，此时，试样内的温度梯度趋于稳定，外界系统补充的水分有足够的时间在冻结锋面附近结冰，而结冰释放的潜热又进一步延缓了冻结锋面的推进速度，导致末透镜体的不断生长。根据图像分析结果，3 个连续冻结试验第三阶段开始时间分别为 1080 min，960 min 和 870 min。图 4 为温度梯度与末透镜体形成时间的关系曲线，可以看出温度梯度和末透镜体的形成时间近似成线性关系，而且温度梯度越大，出现末透镜体的时间也就越早。

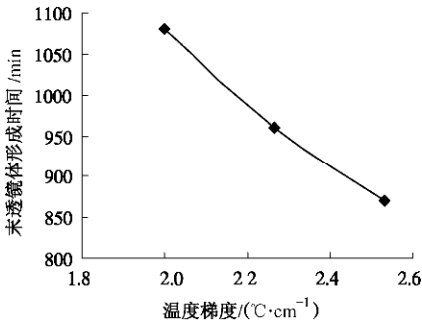


图 4 温度梯度和末透镜体形成时间关系

Fig. 4 Relation between temperature gradient and final lens time

3.3 连续冻结试验分凝冰厚度分析

按照前述图像处理流程对连续冻结试验（A1~A3）的图像进行处理后，得到图 5~7 中总的分凝冰厚度与时间的关系曲线。由于在连续冻结的第三阶段只有末透镜体生长，因此可以认为在第三阶段出现的冻胀量等于末透镜体厚度，图中末透镜体厚度与时间关系曲线即根据位移计测得的第三阶段冻胀量得出的。

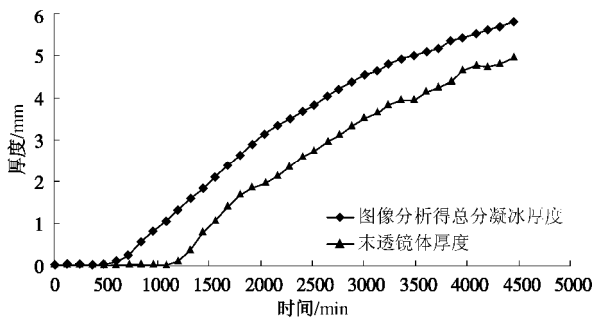


图 5 连续冻结(A1)总分凝冰和末透镜体厚度

Fig. 5 Thickness of whole segregation ice lens and final lens in continuously freezing experiment (A1)

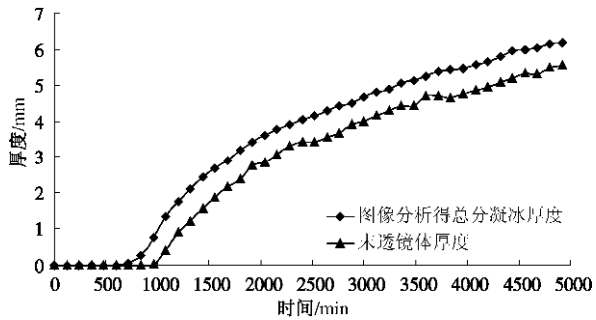


图 6 连续冻结(A2)总分凝冰和末透镜体厚度

Fig. 6 Thickness of whole segregation ice lens and final lens in continuously freezing experiment (A2)

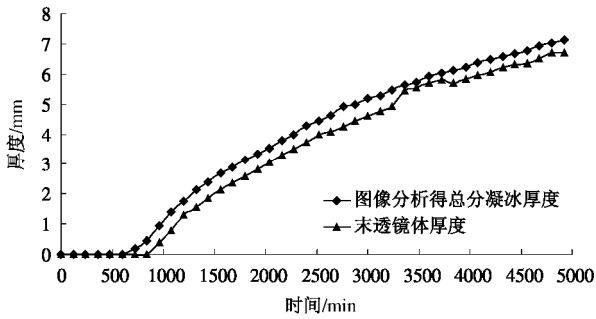


图 7 连续冻结(A3)总分凝冰和末透镜体厚度

Fig. 7 Thickness of whole segregation ice lens and final lens in continuously freezing experiment (A3)

从图 5~7 可以看出，连续冻结试验总分凝冰厚度与时间关系曲线和末透镜体厚度与时间关系曲线整体趋势非常吻合，在分凝冰演化的第三阶段两条曲线近似平行（由于 A3 试验过程中出现位移计滑移，导致部分区间数据波动）。

在 3 组不同温度梯度的连续冻结试验中，总的分凝冰厚度比末透镜体的厚度分别大 0.953, 0.688, 0.447 mm，这一差距主要是在分凝冰演化第二阶段内出现的不连续薄层分凝冰造成的。由此可以证明，在第三阶段只有末透镜体的生长，以末透镜体的厚度加上第二阶段产生的不连续的薄层分凝冰厚度来代表总的分

凝冰的厚度是可行的, 第三阶段出现的冻胀量等于末透镜体的厚度。

4 初步结论

(1)动态图像采集和处理技术解决了获取冻结过程中分凝冰信息在空间和时间分布上的一致性, 根据处理后的二值化图像信息, 可以定量确定分凝冰在不同时刻的生长发育情况。

(2)图像分析获得的连续冻结试验中分凝冰厚度与通过位移计测得的冻胀量整体趋势吻合, 图像分析结果真实可靠。

(3)在连续冻结过程中分凝冰演化具有明显的阶段性。根据冻结过程中的典型时刻可以将连续冻结的分凝冰生长过程划分成冻结初期、不连续薄层分凝冰生长和末透镜体生长3个主要阶段。不连续薄层分凝冰数量较少, 分凝冻胀主要是由第三阶段分凝冰的生长, 即末透镜体生长引起的。

(4)连续冻结试验中, 温度梯度与末透镜体的形成时间近似成线性关系, 温度梯度越大, 出现末透镜体的时间越早。

参考文献:

- [1] MILLER R D. Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils[J]. Highway Research Record, 1972(393): 1 - 11.
- [2] RADD F J, OERTLE D H. Experimental pressure studies of frost heave mechanisms and the growth fusion behavior[C]// 2th Int Conf on Permafrost Washington: Washington D.C. National Academy Press. 1973: 377 - 384.
- [3] KONRAD J M, MORGENSTERN N R. The segregation potential of a freezing soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1981(18): 483 - 491
- [4] SATOSHI Akagawa. Experimental study of frozen fringe characteristic[J]. Cold Regions Science and Technology, 1988, **15**: 209 - 223
- [5] GILPIN R R. A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils[J]. Water Resources Research, 1980(16): 918 - 930.
- [6] PENNER E. Aspects of ice lens growth in soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 1986, **13**(1): 91 - 100.
- [7] KONRAD J M, DUQUENNOI C. A model for water transport and ice lens in freezing soils[J]. Water Resources Research, 1993(29): 3109 - 3123.
- [8] TAKEDA K, OKAMURA A. Microstructure of freezing front in freezing soils[C]// Ground Freezing 97. Netherlands: Lulea, University of Technology, 1997.
- [9] WATANABLE, et al. Experimental study on microstructure near freezing front during soil freezing[C]// Ground Freezing 97, Netherlands; Lulea University of Technology, 1997.
- [10] ANDERSON D M, TIEE A C. Predicting unfrozen water contents in frozen soil from surface area measurements[J]. Highway Research Record, 1972(393): 12 - 18.
- [11] BURT T P, WILLIAMS P J. Hydraulic conductivity in frozen soils[J]. Earth Surface Processes, 1976(1): 349 - 360.
- [12] 李 萍, 徐学祖, 蒲毅彬, 等. 利用图像数字化技术分析冻结缘特征[J]. 冰川冻土, 1999, **21**(2): 175 - 180. (LI Ping, XU Xiao-zu, PU Yi-bin, 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. (in Chinese))
- [13] GUYMON G L, LUTHIN J N. A coupled heat and moisture transport model for arctic soils[J]. Water Resources Research, 1974(10): 995 - 1001.
- [14] VIGNES M, FIJKEMA K. A model for the freezing of water in a dispersed medium[J]. Colloid Interf Sci, 1974(49): 165 - 172.
- [15] 徐学祖, 王家澄, 张立新, 等. 土体冻胀和盐胀机理[M]. 北京: 科学出版社, 1995. (XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin, et al. Mechanisms of frost heaving and salt expansion of soils[M]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese))
- [16] 李 萍, 徐学祖, 王家澄, 等. 不连续分凝冰发育规律研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2000, **36**(5): 126 - 133. (LI Ping, XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, et al. The study of the growth pattern of discrete segregating ice[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2000, **36**(5): 126 - 133. (in Chinese))
- [17] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Physics of frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))