

# 基于不同冻结试验模式分析控制冻胀规律

程晋源 周金生 商翔宇

(中国矿业大学建筑工程学院, 江苏徐州 221008)

**【摘要】** 对冻结技术应用中冻胀控制这一重要课题,通过试验比较了控制冻深的间歇冻结模式与传统连续冻结模式的冻胀量差异,试验结果表明:控制冻深的间歇冻结模式冻胀量为连续冻结模式的 48.8%,其等效条件下的冻胀量约为连续冻结模式的 71.2%,冻胀部分得到控制。针对该间歇冻结模式控制冻胀的规律,提出末透镜体层为冻胀控制的关键透镜体层。通过对试验的定性分析,指出控制冻深的间歇冻结模式在间歇段能够促使末透镜体分凝温度升高,形成速度减缓,继而出现停止形成的阶段,控制冻胀。分析指出控制冻深的间歇冻结模式是工程唯一可用的冻胀控制的冻结模式,且该模式较传统连续冻结模式更为经济。

**【关键词】** 间歇冻结;控制冻深;冻胀控制

**【中图分类号】** TU 472.9

**【文献标识码】** A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2009.03.002

## Base on Different Freezing Experiment Model Analying Heave-Preventing Mechanism

Cheng Jinyuan Zhou Jinsheng Shang Xiangyu

(School of Architecture & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China)

**【Abstract】** For heave-preventing problem of freezing technique application, the amount of heave was compared between frozen-depth-controlled intermittent freezing mode and traditional continuous freezing mode by experiments. The results showed that: the heave amount of intermittent mode was 48.8% that of continuous mode, and its equivalent heave amount was about 71.2% that of continuous mode, which meant frost heave was partially prevented. For heave-preventing mechanism of this intermittent mode, final ice lens was suggested as key ice lens. From qualitative analysis of experiments, heave-preventing mechanism for frozen-depth-controlled intermittent mode was indicated. Segregation temperature of final lens increased during intermittent phase for intermittent freezing mode slowed and even stopped the growth of final lens, and frost heave was thus controlled. Finally, frozen-depth-controlled intermittent freezing mode was indicated as the only applicable heave-preventing mode for engineering, and its more economic than traditional continuous freezing mode was also pointed.

**【Key words】** intermittent freezing; frozen-depth-controlled; frost heave controlling

### 0 引言

立井、隧道、城市地铁、超深基坑等工程中所遇到的含水、软弱、破碎、低强度的地层给施工带来了较大的难度。工程实践表明,人工地层冻结技术对于松散、含水地层进行加固具有适应性强、可靠性高、无污染、设备简单、技术经济效果好等特点。该技术在西欧国家的地下工程尤其是恶劣地质条件下的地下工程施工中应用十分广泛,近几年,在我国上海、广州等城市地下工程中也得到应用。

但是,人工冻结技术在实际应用中尚有许多问题远没有解决,冻胀问题<sup>[1-2]</sup>便是其中之一。文献<sup>[3-5]</sup>

基于分凝势数学模型,对冻胀问题进行了理论分析。土体冻结过程中所产生的冻胀往往使上部的结构或建筑物等遭到破坏,造成巨大的经济损失,因此,土体冻胀的有效控制便成为了冻结技术应用中需要解决的首要问题。

针对冻胀的控制,已经提出了许多方法包括有机械法、热物理法、物理化学法和综合法等。当工程条件一定时,土体的附加荷载、土性、地下水等均已确定,此时唯一可控因素即为冻结温度,冻结温度的变化决定了最终冻胀量。针对此,文献<sup>[6]</sup>提出了采用间歇冻结模式来有效控制冻胀的思想,指出间歇冻

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50534040)

作者简介:程晋源,1982年生,男,山西太原人,硕士研究生,主要从事土体与结构相互作用及冻土地下工程的研究。E-mail: c-jinyuan@163.com

结所形成的冻土区温度高、未冻土区温度梯度低、冻结速率小等结果一般有利于抑制冻胀的产生和发展。文献[7-9]对此进行了试验验证,分析了不同的冻结模式对土体冻胀的影响。采用间歇冻结模式控制人工冻土冻胀已得到一定认可,并有了初步的工程实践,但对其控制规律的认识尚缺乏系统性,极大的影响了工程应用。

本文使用经完善过的试验仪器,基于两种不同模式冻结试验结果的基础上,揭示以间歇方式控制冻胀的内在规律,为进一步更有效地控制冻胀打下了基础。

## 1 两种不同模式的冻结试验

### 1.1 试验概况

设备仪器系统包括制冷系统、温控系统、补水系统、数据采集系统,主要设备为三端制冷机。

试验选用冻胀敏感性的粉质粘土,试样的干密度约为  $1.50 \text{ g/cm}^3$ ,初始含水量为 30%。试样均制成高 13.0 cm、直径 10.1 cm 的圆柱体。

对试样在开放系统中进行自上向下的一维冻结,无外荷载作用。沿试样垂直方向间隔 1 cm 布置有热敏电阻以测定冻结过程中试样温度场变化,冻胀量测量采用精度 0.01 mm 的位移计。

表 1 试验边界温度参数

温度模式	起始冻结温度/℃	起始冻深标准/cm	变温幅度/℃	控制参数
连续冻结	-12			
控制冻深间歇冻结	-12	6.0	-0.5, -12	冻深波动 $\pm 0.4 \text{ cm}$

为了比较冻胀量,分别进行了控制冻深的间歇冻结试验及传统冻结工程中采用的连续冻结试验,冻结试验前,先对试样进行预冷,使试样温度稳定在  $+6^\circ\text{C}$ 。土样经过预冷后,底板温度统一设为  $+6^\circ\text{C}$ ,在连续冻结模式下,顶板温度设置为  $-12^\circ\text{C}$ ,直至试验结束;控制冻深的间歇冻结模式下,开始阶段仍然采用  $-12^\circ\text{C}$  连续冻结,在冻结锋面到达预定冻深时,分别以  $-0.5^\circ\text{C}$  和  $-12^\circ\text{C}$  交替冻结,使试样的冻结锋面始终在预定冻深  $\pm 0.4 \text{ cm}$  的范围内波动,表 1 为相应边界条件。

### 1.2 试验结果

两种冻结模式下冻胀量、冻结锋面随时间变化的曲线分别见图 1、图 2,从图中可以看出基本的试验结果:①两种冻结模式在初始阶段 960 min 以内均未产生冻胀,其中连续冻结模式在冻结锋面趋于

稳定后,冻胀开始产生,而控制冻深的间歇冻结模式在基本控制冻深后,冻胀开始发展;②冻胀产生后,两种冻结模式的冻胀曲线表现出定性与定量的差异,连续冻结模式下的曲线基本表现为递增,而控制冻深的间歇冻结模式下的曲线出现了许多无冻胀发展的台阶,其最终冻胀量仅为连续冻结模式下的 48.8%。

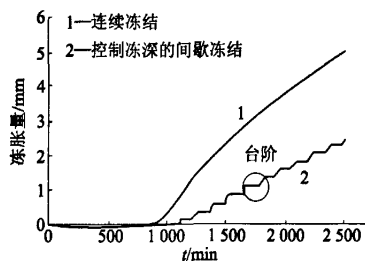


图 1 冻胀量随时间的变化曲线

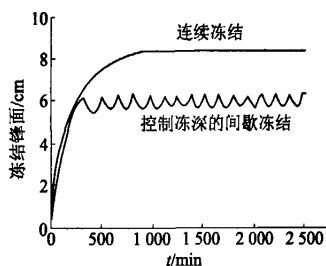


图 2 冻结锋面随时间的变化曲线

## 2 控制冻胀的规律分析

### 2.1 冻胀控制的关键在透镜体层

文献[10]建立的离散透镜体模型数值计算结果表明恒温连续冻结模式下,未透镜体发育状况最佳,其厚度对总体冻胀量影响最大。一组连续冻结试验经过二值处理后的冻土相片<sup>[11]</sup>见图 3,从图中可以清晰看出,未透镜层逐渐形成的过程。连续冻结试验结束后冻土相片见图 4,可看到未透镜层对于总体冻胀量起决定性作用。



(a) 连续冻结 500 min

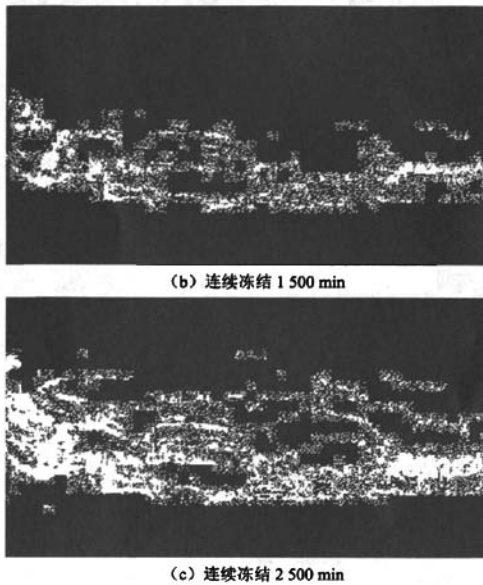


图3 连续冻结试验二值处理后的相片

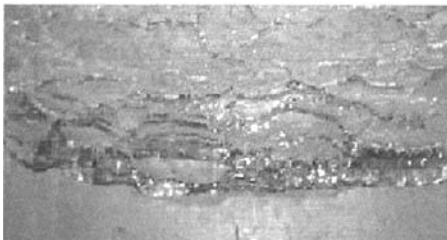


图4 连续冻结试验后的典型相片

实际上,对于传统的连续冻结模式,初始阶段由于冻结锋面的推进,出现的透镜体发育条件较差,冻胀基本不发展,于是锋面趋于稳定后具有较佳发育条件的末透镜体层成为了冻胀控制的关键透镜体层,控制关键透镜体层的发展便成为了传统冻结技术应用中冻胀控制的核心问题。

### 2.2 间歇阶段对关键透镜体层的抑制作用

试验研究表明,较高或较低的分凝温度均不利于末透镜体的形成,这是由于分凝温度较高时,末透镜体暖端的吸力过小,无法产生较大的吸水速率;分凝温度较低时,根据 Burt and Williams 和 Horiguchi and Miller 对不同温度的多类冻土的透水性的测定得出结论:冻土的导湿系数随温度的降低而急剧减小,而且冻土内的未冻水和融土内的孔隙水一样,其流动遵循达西定律,造成冻结缘内的水阻力过大,也无法产生较大的吸水速率。

试验表明,活动透镜体以上已冻土区域的水分迁移对冻胀量影响较小,因而末透镜体形成以后,冷端温度的改变其实是改变了末透镜体暖端的分凝温度<sup>[12]</sup>。在连续冻结模式下,960 min 后试验冻胀曲线以一定斜率直线延伸,是由于末透镜体分凝温度被稳定在末透镜体形成过程状态中,因而产生了持续稳定的冻胀;而控制冻深的间歇模式下,在试验冻胀曲线中出现的许多无冻胀发展的台阶,这是由于在间歇阶段分凝温度升高,末透镜体形成减慢,直至温度升高到一定状态,末透镜体形成完全停止。实现了间歇冻结模式通过抑制末透镜体层这一关键透镜体层的形成,控制冻胀的目的。

在连续冻结的初始阶段,出现了试验结果中图一的两组冻结模式在初始阶段 960 min 以内均未产生冻胀情况。由于锋面推进,反复出现的活动透镜体的分凝温度必然迅速降低,因而冻胀无法产生。但由于工程的需要,冻结锋面不能无限制的推进,当锋面不再推进时,末透镜体具备了较佳的发育条件,而间歇的方式便成为了此时冻胀控制的唯一途径。实际工程对于冻土体强度有要求,因而控制冻深也是必需的,因此可以说,控制冻深的间歇冻结模式是工程唯一可用的冻胀控制的冻结模式。

### 3 结论

1) 两组冻结模式下的试验结果表明,控制冻深的间歇冻结模式其冻胀量为连续冻结模式的 48.8%,考虑到冻深不同的修正后,间歇冻结模式在等效条件下的冻胀量约为连续冻结模式的 71.2%,冻胀部分得到了控制。

2) 提出末透镜体层为冻胀控制的关键透镜体层,通过间歇冻结抑制末透镜体这一关键透镜体层的形成,从而达到控制冻胀的目的。

3) 指出控制冻深的间歇冻结模式是工程唯一可用的冻胀控制的冻结模式,且由于需要较少的冷量,该冻结模式必然较以往传统的连续冻结模式经济。

### 参 考 文 献

- [1] 徐学祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社,2001.
- [2] 陈瑞杰,程国栋,李述训,等. 人工地层冻结应用研究进展和展望[J]. 岩土工程学报,2000,22(1):40-44.
- [3] Konrad J M, Morgenstern N R. A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils[J]. Canadian Geotechnical Journal,1980(17): 473-486.

- [4] 盛煜,马巍,侯仲杰. 正冻土中水分迁移的迁移势模型[J]. 冰川冻土,1993,15(1):140-143.
- [5] 周扬,周国庆,张琦. 土体冻胀透镜体生长的广义准静态模型研究[J]. 中国矿业大学学报,2008,37(3):333-338.
- [6] 周国庆. 间歇冻结抑制人工冻土冻胀机理分析[J]. 中国矿业大学学报,1999,28:413-416.
- [7] 周金生,周国庆,马巍,等. 间歇冻结控制人工冻土冻胀的试验研究[J]. 中国矿业大学学报,2006,35(6):708-712.
- [8] 商翔宇. 冻土冻胀与冻结模式关系的试验与数值模拟研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2005.
- [9] 别小勇. 人工冻土冻胀控制研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2002.
- [10] Nixon J F. Discrete ice lens theory for frost heave in soils [J]. Canadian Geotechnical Journal. 1991(28):843-859.
- [11] 郑飞. 二值图像的实现过程[J]. 信息技术,2008(4):106-108.
- [12] Mageau D W, Morgenstern N R. Observations on moisture migration in frozen soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1980(17):54-60.

收稿日期:2009-03-24

(上接第114页)

造成坍塌或破裂。洞门墙应变最大值出现在墙顶的临空部位,但量级较小,该地震强度对洞门建筑影响不大。

3)63%超越概率人工地震波作用下,原型洞口仰坡坡面位移变化幅度可达92.4 cm。试验过程中,模型坡面出现了微小拉裂缝,局部有细小掉块,表明该地震条件下,原型隧道洞口仰坡可能出现局部的拉裂或较小塌落。

综合分析模型试验结果可见,有害地震反应主要发生在隧道洞口和坡面,在加强洞口建筑整体性以及适当加固洞口坡体的前提下,63%超越概率地震波(相当于6.4级地震)对黄草坪2#隧道危害不大,这一结论与最近5.12汶川大地震后的隧道震害调查结果是基本一致的。

#### 参 考 文 献

- [1] 潘昌实. 隧道及地下结构物抗震问题的研究概况[J]. 世界隧道,1996(5):7-16.
- [2] 季倩倩,杨林德. 地下铁道震害与震后修复措施[J]. 灾害学,2001,16(2):31-36.
- [3] 王秀英,刘维宁,张弥. 地下结构震害类型及机理研究[J]. 中国安全科学学报,2003,13(11):55-58.
- [4] 李育枢. 山岭隧道地震动力响应及减震措施研究[D]. 上海:同济大学,2006.
- [5] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2005.
- [6] 来弘鹏,谢永利,杨晓华. 公路隧道衬砌断面型式模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(6):740-744.

收稿日期:2009-03-12