

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2015.04.002

# 不同外边界条件下冻结黏土冻胀力试验研究

陈军浩<sup>1,2</sup>, 张世银<sup>3</sup>

(1. 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118; 2. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118;  
3. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 在自行研制的一套温度、压力、位移、水分均可控的人工冻土多功能冻胀试验系统上,开展了不同外载荷、单、双向冻结模式、预留一定冻胀量等不同外边界条件下黏土冻胀力试验。得出外荷载对冻胀力发展有明显抑制作用,冻胀力变化曲线由上凸型逐渐向下凹型过渡;冻结模式对冻胀力影响很大,双向冻结模式条件下使冻胀力增长明显,但增幅随冷源温度降低呈二次曲线衰减;同一试样的冻胀力与冻胀量可用二次抛物线来拟合。试验获得了更接近工程现场实际冻结工况下黏土冻胀特性,为多排管冻结设计提供参考。

**关键词:** 冻土; 胀力; 冻胀量; 冻结模式; 冻胀空间

**中图分类号:** TD265

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4348(2015)04-0313-04

## Frozen clay frost force test under different boundary conditions

Chen Junhao<sup>1,2</sup>, Zhang Shiyin<sup>3</sup>

(1. Fujian Key Laboratory of Advanced Technology and Informationization in Civil Engineering, Fuzhou 350118, China;  
2. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;  
3. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** An artificial multifunctional frost heave test system was developed, which integrates the computer control of temperature, pressure, displacement and moisture. The heave force test of clay was conducted under various external loads, in uni-direction or two sideway freeze mode and reserving a certain amount of heaving space. The external load has obvious inhibition on frost force development, with the frost force curve changing from upper convex form to lower concave form. The freezing mode has great impact on frost force, with the frost heave force increasing significantly under the two-sideway freezing model, but the increase rate attenuated by quadratic curve with the lowering of the cold source temperature. The frost heave force and frost heave of the same sample can be fitted by quadratic parabola. Clay heave characteristics close to the actual freezing conditions of construction projects were obtained, which may contribute to multi-tube freezing design.

**Keywords:** frozen clay; frost force; frost heave; freezing mode; frost heave space

冻结工法加固技术来源于天然冻结现象,1862 年首次应用于英国基础工程加固中,1883 年应用于德国立井建设,随后在矿山建设领域广泛

应用。1955 年引入中国应用于开滦煤矿凿井。因冻结工法具有加固效果好、能有效隔绝地下水、适应性强、绿色施工等诸多优点,20 世纪 90 年代

收稿日期: 2015-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51504070);福建省教育厅中青年教育科研项目(JA15353);福建工程学院科研启动基金(GY-Z15004)

第一作者简介: 陈军浩(1986-),男,福建福州人,讲师,博士,研究方向:岩土与地下工程领域。

已逐步推广至矿山、基坑、隧道、地铁等复杂不稳定地层进行加固<sup>[1-2]</sup>。但冻结工法同时会带来土体冻胀现象,所产生的冻胀力将直接作用在围护结构上,使围护结构发生破坏,也会引起地表隆起,使地表建(构)筑物发生破坏<sup>[3-4]</sup>。

因此,在进行冻结工法设计时,土体冻胀力的取值是围护结构设计的一个重要参数<sup>[5-7]</sup>。国外从 20 世纪六七十年代开始, Everest、Harlan R L 等人虽然相继提出了各种冻胀理论,但都与实际冻胀情况存在一定差距<sup>[8-9]</sup>。近年来,张婷、蔡瑛、吕书清、唐益群、洪军等人相继开展了南京、上海等地区典型土质的冻胀试验,揭示了这些地区土体冻胀力和冻胀率发展的基本规律以及影响因素,但对不同外边界(如有载荷、温度变化)条件下的冻胀模型研究尚未涉及<sup>[10-14]</sup>。本文基于此,开展不同外边界条件下的土体冻胀力试验,为后期冻胀模型准确构建提供基础。

1 人工冻土多功能冻胀试验系统

土体冻胀力可以通过室内试验获得,其受冷源温度、试样含水率、外荷载三者因素影响很大。目前国内冻胀试验装置多数可控参数均仅为调节单向冷源温度与改变试样补水条件,对于外荷载则通过加压砝码来调节,因此试验所获得的仅是小荷载条件下土体冻胀力。随着工程建设工期的不断缩短,冻结加固工程普遍采用多排管冻结,试样冻结模式从早期的单向冻结模式转变为双向冻结模式。为更好地在试验时真实地反映冻结现场实际工况,研制了一套集温度、压力、位移、水分控制于一体的人工冻土多功能冻胀试验系统。试验系统由样品压力室、冷源、试验机主机、测量系统、加载控制系统等部分组成<sup>[15]</sup>。样品压力室主体结构见图 1。

2 冻结黏土冻胀力试验

试验所选用的黏土初始含水率 26.3%,湿密度 2.12 g/cm<sup>3</sup>,比热 1.528 J/(g·K),结冰温度 -1.0℃,常温与负温(-10℃)条件下导热系数分别为 1.324、1.725 W/(m·K)。本文采用重塑土样,试样直径 50 mm、高 100 mm,冻胀力试验在完全侧限条件下进行。

2.1 不同大荷载对黏土冻胀影响

为比较不同大荷载对黏土冻胀影响,试验采

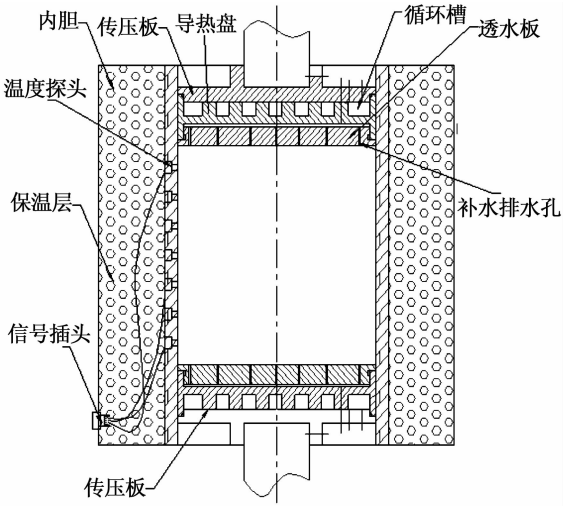


图 1 样品压力室主体结构图

Fig.1 Main body structure of sample pressure chamber

用位移闭环控制模式以增加预定载荷,并在该载荷下测定冻胀力。试验过程处于补水状态,保持试样底端 -10℃,顶端与环境温度均为 1℃不变,冷源在外荷载引起试样压缩变形稳定后开启。外荷载从 0 开始,逐步增大直至无冻胀现象发生,通过改变试样外荷载大小,获得不同大荷载条件下土体冻胀力变化情况。为更好地体现外荷载作用下黏土冻胀力值,将产生冻胀力小于外荷载阶段,即试样仍处于受压状态时,冻胀力做归零处理,试验结果见图 2。

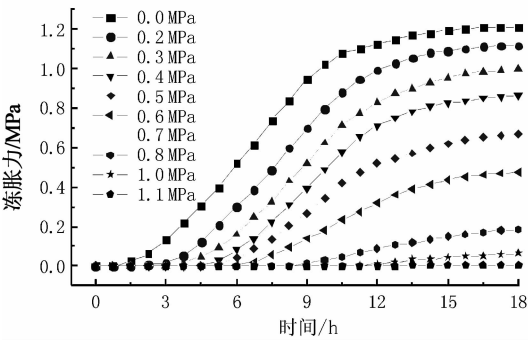


图 2 不同外荷载条件下土体冻胀力随时间变化

Fig.2 Frost heaving stress vs time under different loading conditions

从图 2、3 可以看出外荷载对黏土冻胀力的大小及出现时间影响都很大。当外荷载为 0 时,出现冻胀力时间仅需 1.5 h,随后冻胀力迅速增大,并最终稳定在 1.21 MPa 左右;外荷载为 0.2 MPa 时,出现冻胀力时间为 2.25 h,明显滞后于无外荷载条件,冻胀力最终稳定在 1.12 MPa 左右;在外

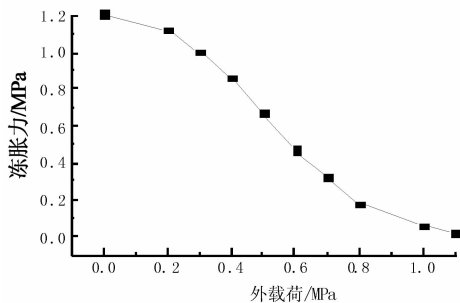


图 3  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下冻胀力变化与外荷载大小关系  
Fig. 3 Frost heaving stress vs external load under  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

荷载逐渐增大过程中,冻胀力减小幅度加大,如外荷载从  $0.4\text{ MPa}$  增至  $0.6\text{ MPa}$  时,冻胀力从  $0.86\text{ MPa}$  降至  $0.47\text{ MPa}$ ,减幅达到  $0.39\text{ MPa}$ ;当外荷载达到  $0.8\text{ MPa}$  时,减幅出现拐点,此时冻胀力已降至  $0.18\text{ MPa}$ ,且冻胀力出现时间增至  $9\text{ h}$ 。在外荷载不断增大过程中,冻胀力最大值曲线从上凸型逐渐向下凹型过渡,并最终在外荷载增至  $1.1\text{ MPa}$  时,冻胀力等于  $0$ 。

2.2 单、双向冻结对黏土冻胀影响

传统冻胀力和冻胀率试验均为单向冻结模式,即试样一端负温,另一端保持正温状态,冻结锋面从冷源逐步向另一端移动。该冻结模式与现场多排管冻结条件下土体双向冻结不符,双向冻结模式冻结锋面从两端向中心移动。二者对比见图 4。

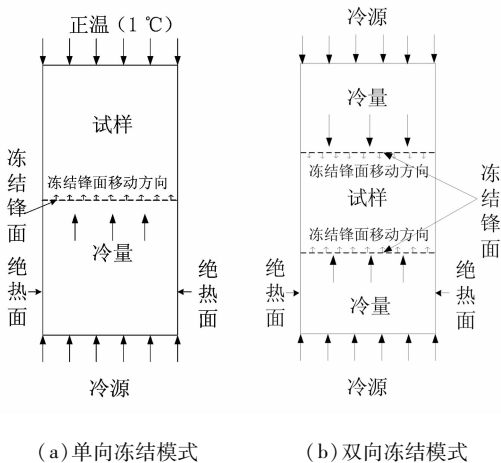


图 4 土体单、双向冻结模式  
Fig. 4 Unidirectional, two-sided freezing modes

借助人工冻土多功能冻胀试验系统进行两种冻结模式下黏土冻胀特性对比分析。试验安排

$-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  5 个冷源温度,环境温度  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。采用位移闭环控制模式以测定冻胀力,试样处于无外荷载、封闭不补水状态。获得两种模式下冻胀力随时间变化曲线,见图 5。

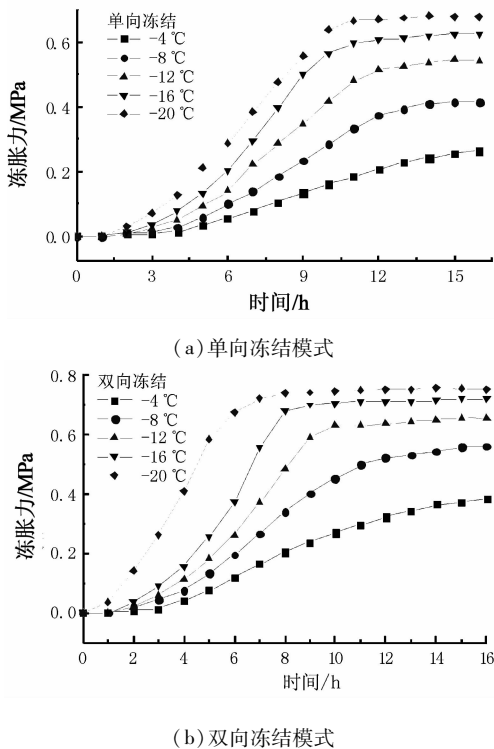


图 5 不同温度水平冻胀力随时间变化曲线  
Fig. 5 Curve of horizontal frost-heave forces vs time under different temperatures

从图 5 可以看出,双向冻结模式下,土体冻胀力出现时间明显早于单向冻结模式,且冻胀力增长速率较大,近乎为单向冻结的两倍。两种模式下冻胀力最大值随冷源温度变化均可用指数函数来描述,冷源温度降低,冻胀力增大幅度减小。5 个冷源温度水平单向冻结模式下冻胀力最大值分别为: $0.26$ 、 $0.42$ 、 $0.54$ 、 $0.62$ 、 $0.68\text{ MPa}$ ;对应双向冻结模式下分别为: $0.38$ 、 $0.56$ 、 $0.66$ 、 $0.72$ 、 $0.76\text{ MPa}$ ,冻胀力增幅分别为  $46.2\%$ 、 $33.3\%$ 、 $22.2\%$ 、 $16.1\%$ 、 $11.8\%$ ,增幅呈二次曲线衰减。

2.3 预留冻胀空间对黏土冻胀影响

传统冻胀力和冻胀率试验对试样冻胀力与冻胀量两个参数均为通过单独试验分开量测。本文基于人工冻土多功能冻胀试验系统,通过调整轴向给定目标给试样预留一定冻胀量空间后,再将控制系统调整为位移闭环模式测定冻胀力,可以直接获得冻胀率与冻胀力之间的关系。试验从预

留冻胀空间 0 cm 开始,每级 0.1 cm 逐级增大,直至无冻胀力出现为止。试验选取冷源温度为  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  做代表性分析,试验过程处于单向冻结模式、封闭不补水、无外荷载条件。试验结果见图 6。

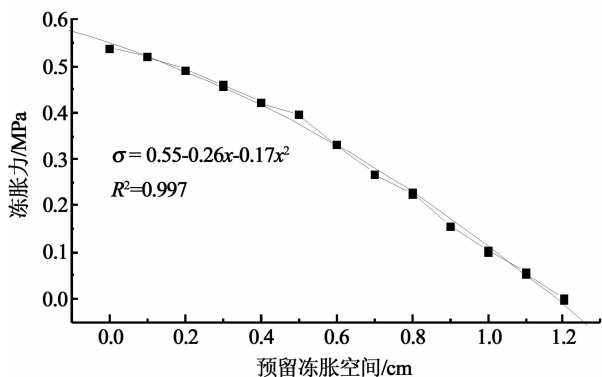


图 6 冻胀力与冻胀量的关系

Fig. 6 Relationship between frost force and heave

从图 6 可以看出,试样在无预留冻胀量时,冻胀力为 0.54 MPa,随着预留冻胀空间加大,冻胀力逐渐减小,并在预留空间达到 1.2 cm 时,无冻

胀力出现。预留冻胀空间等效于试样的冻胀量,因此试验获得的即为冻胀力与冻胀量之间的关系,呈二次抛物线下降趋势,相关系数达到 0.997。

### 3 结论

1) 外荷载对冻胀力发展有明显抑制作用,随着外荷载增大,冻胀力出现时间不断滞后,同时冻胀力最大值逐渐减小,变化曲线由上凸型逐渐向下凹型过渡。

2) 不同冻结模式对试样冻胀力大小及形成过程均有很大影响:在冻结过程中,双向冻结条件下冻胀力增长速率近乎为单向冻结的两倍,但二者冻胀力最大值随冷源温度降低逐渐减小,表现为增幅速率随冷源温度呈二次曲线衰减趋势。

3) 通过预留冻胀空间进行冻胀试验,可以直接获得冻胀率与冻胀力之间的关系。对于单一试样,给定冻胀量越大,冻胀力越小,二者关系可以用二次抛物线来表示。

### 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] 陈湘生. 地层冻结工法理论与实践[M]. 北京:煤炭工业出版社,2007.
- [3] 董长江,管枫年. 土的冻胀与建筑物冻害防治[M]. 北京:水利电力出版社,1985.
- [4] 徐学祖. 土体冻胀和盐胀机理[M]. 北京:科学出版社,1995.
- [5] 程国栋. 冻土力学与工程的国际研究新进展[J]. 地球科学进展,2010,25(3):293-299.
- [6] 唐永志,荣传新. 淮南矿区复杂地层大型矿井建设关键技术[J]. 煤炭科学技术,2010,38(4):40-44.
- [7] 金川. 淮南矿区冻结法凿井的几个关键技术问题[J]. 建井技术,2006,27(6):26-29.
- [8] Everest D H. The thermodynamics of frost damage to porous solids[J]. Trans Faraday Soc,1961,57:1541-1551.
- [9] Harlan R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. Water Resource Research,1973,9(5):1314-1323.
- [10] 张婷. 人工冻土冻胀、融沉特性试验研究[D]. 南京:南京林业大学,2004.
- [11] 蔡瑛. 深土冻融特性试验及工程应用研究[D]. 合肥:安徽理工大学,2007.
- [12] 唐益群,洪军,杨坪. 人工冻结作用下淤泥质黏土冻胀特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(5):772-776.
- [13] 于琳琳,徐学燕. 人工侧向冻结条件下土的冻结试验[J]. 岩土力学,2009,30(1):231-235.
- [14] 李岩,刘波,张建新. 竖向直排冻结条件水平冻胀力试验研究[J]. 岩土力学,2014,35(11):2299-2306.
- [15] 陈军浩. 多圈管冻结模型试验及人工冻土冻胀规律研究[D]. 合肥:安徽理工大学,2013.

(责任编辑:陈雯)