



# 人工冻结作用下淤泥质黏土冻胀特性试验研究

唐益群<sup>1,2</sup>, 洪军<sup>2</sup>, 杨坪<sup>1,2</sup>, 王建秀<sup>1,2</sup>, 胡向东<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 冻结法施工在上海软土地区隧道附属设施建设中(如隧道旁通道、地下泵房等)得到较多地应用。上海地铁隧道一般位于第④层饱和淤泥质黏土层中, 饱和淤泥质黏土层冻胀变形使地铁隧道管片破裂、渗水或漏泥, 严重影响隧道管片质量与地铁安全运营。以上海第④层饱和淤泥质黏土为研究对象, 通过室内冻胀试验, 研究冷端温度对土体的冻胀力以及冻胀率的影响规律, 结果显示土样冻胀率以及冻胀力与冷端温度具有较好的线性关系。通过冻结温度试验测出了土体的冻结温度, 同时建立了第④层饱和淤泥质黏土的冻结温度场, 进一步揭示了冻结锋面的发展与时间的关系。研究成果为上海地铁隧道冻结法设计、施工与地铁安全运营提供了有价值的参考。

**关键词:** 饱和淤泥质黏土; 人工冻土; 冻结温度; 冻胀率和冻胀力; 冻结温度场

**中图分类号:** TU111.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2009)05-0772-05

**作者简介:** 唐益群(1952-), 男, 江苏常熟人, 教授, 博士生导师, 主要从事工程地质与环境地质方面的教学与研究。

E-mail: tangyiqun2@tongji.edu.cn.

## Frost-heaving behaviors of mucky clay by artificial horizontal freezing method

TANG Yi-qun<sup>1,2</sup>, HONG Jun<sup>2</sup>, YANG Ping<sup>1,2</sup>, WANG Jian-xiu<sup>1,2</sup>, HU Xiang-dong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** With the development of underground structures in Shanghai, the ground freezing method has been more and more widely used in the construction of appurtenant parts of tunnels (such as the soil reinforcement of passways and pump house of tunnels). Exploring frost-heaving behaviors of artificial freezing soil is a key technology and an important research about artificial freezing method for municipal underground space. After the frost-heaving tests, the relationship between frost-heaving and freezng end temperature is studied. The frost-heaving ratio and the frost-heaving stress are in linear relation with the freezng end temperature. The freezng temperature of soil is measured by freezng temperature tests, and the freezng temperature distribution field of the soil samples is established. The relationship between freezng front and time is further revealed.

**Key words:** saturated mucky clay; artificial freezng soil; freezng temperature; frost-heaving ratio and frost-heaving stress; freezng temperature distribution field

## 0 引言

冻结法施工在上海软土地区隧道建设中(如隧道旁通道、地下泵房等)得到较多的应用, 也曾引发过严重的地质灾害(如上海地铁 4 号线外滩段隧道旁通道冻结法施工引发的地质灾害)<sup>[1]</sup>。上海地区地铁隧道一般位于第④层淤泥质黏土层中, 冻结使地铁隧道周围饱和淤泥质黏土层冻胀变形引起隧道轴线沉降, 使地铁隧道管片破裂、渗水或漏泥, 严重影响隧道管片质量与地铁安全运营。

随着人工冻结法在地下工程中的广泛引用, 施工过程中常伴随有土体冻胀和融沉现象, 对土的工程性质以及相邻建筑物产生不良影响甚至破坏。因此, 研

究土体冻胀、融沉的影响规律十分必要。早在 17 世纪后期, 人们就已经注意到冻胀现象, 但是直到 20 世纪, 人们才逐渐认识到水分迁移作用是导致土体冻胀的主要根源<sup>[2]</sup>。Everett 首先提出了第一冻胀理论即毛细理论。然而, 毛细理论不能解释不连续冰透镜是如何形成的, 并且该理论低估了细颗粒土中的冻胀压力。认识到毛细理论的不足之处, Miller 提出在冻结锋面和最暖冰透镜底面存在一个低含水率、低导湿率和无冻

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50578120); 国家自然科学基金项目(40872178); 上海市重点学科(地质工程)建设项目(B308)

**收稿日期:** 2008-04-14

胀的带,称为冻结缘<sup>[3]</sup>。冻结缘理论克服了毛细理论的不足,称为第二冻胀理论。Jessberger做了人工冻土工程(冻结凿井中冻结壁)方面的离心机模拟试验,模拟了冻结凿井中冻结壁温度场及蠕变的位移场,得出了深冻结井冻结壁温度场和位移场在开挖后随时间而变化的规律<sup>[4]</sup>。在国内,周国庆在试验研究的基础上,探讨了饱水砂层的竖向冻结及融化过程中土中结构切向受力的变化<sup>[5]</sup>。陈湘生等在清华大学离心机上进行了土壤冻胀离心模拟试验,验证了土壤中温度传递、冻胀缩比等的可靠性<sup>[6]</sup>。

但是上述理论用于指导解决上海地区饱和淤泥质黏土中地铁隧道冻结法设计与施工(在饱和淤泥质黏土中水平隧道施工)问题时存在一定的局限性。因此,针对性地选取上海地区饱和淤泥质黏土为研究对象,对地铁隧道周围饱和淤泥质软黏土冻胀特性进行研究,对于预测饱和淤泥质黏土层冻胀变形引起隧道轴线沉降、防止地铁隧道管片的损坏十分必要。

本文结合本课题组此前的研究成果<sup>[1]</sup>,通过室内冻胀试验,研究冷端温度对土体的冻胀力以及冻胀率的影响规律,结果显示土样冻胀率以及冻胀力与冷端温度具有较好的线性关系。通过冻结温度试验测出了土体的冻结温度,同时建立了土样的冻结温度场,进一步揭示了冻结锋面的发展与时间的关系。为上海地铁隧道冻结法设计、施工与地铁安全运营提供了有价值的参考。

## 1 试样基本性质及试验简介

试验所用的土样取自上海静安区(上海地铁2号线静安寺站附近)第④层淤泥质黏土。该土层为 $Q_4^2$ 的滨海—浅海相沉积,该层属天然含水率高、孔隙比大、高压缩性、低强度、流塑状态的黏土层。土层的部分物理力学参数统计见表1。试验仪器采用冻土冻胀试验仪,试样尺寸 $\phi 50 \times 100$  mm,分别进行冻胀率、冻胀力以及自重状态下的融沉试验。试验冷端温度分别为 $-5^\circ\text{C}$ ,  $-10^\circ\text{C}$ ,  $-15^\circ\text{C}$ ,  $-20^\circ\text{C}$ 。冻胀试验采用封闭系统单向冻结试验。

表1 土层的部分物理力学性质

取值	含水率/%	孔隙比	液限/%	塑限/%
平均值	50.2	1.4	43.4	23.2
最大值	58.3	1.7	50.6	25.8
最小值	44.5	1.3	38.8	20.4

## 2 冻胀试验步骤

(1)将直径100 mm、高50 mm的圆柱状土样装入试样筒内(让其自由滑落在底板上),整个试样筒

放置在一个自制的试验箱内以达到保温效果。

(2)放入 $1^\circ\text{C}$ 的恒温箱内,将6个温度传感器通过试样筒侧边的预留小孔插入土样(一侧3个,由下而上的顺序分别为1,3,5;2,4,6)土样在 $1^\circ\text{C}$ 环境中恒温6 h。

(3)底板在 $1^\circ\text{C}$ 恒温6 h,然后将底板温度降至 $-2^\circ\text{C}$ 并保持0.5 h。

(4)冷端温度保持试验中设计的某一恒定的负温值,冻胀试验结束以土体冻胀变形趋于稳定为标志(在此期间箱体和顶板温度始终保持 $1^\circ\text{C}$ )。

(5)冻胀率和冻胀力试验的操作步骤相同,冻胀率试验用应变计采集土样的冻胀量,冻胀力试验采用测力计采集土样的冻胀应力。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 冻胀率

对第④层淤泥质黏土土样进行室内冻胀试验时,在开放系统下,土体在单向冻结过程中其冻胀量随冻结锋面不断发展、冻结范围不断扩大而增加。经过一定时间后,冻胀发展趋于稳定。以土样在1 h内的变形增量小于原土样高度的0.05%为止,取此时的冻胀量为最大冻胀量。

根据《土工试验方法标准》,将冻胀率定义为冻胀量与土样冻结前高度的比值,用百分数表示<sup>[7]</sup>,

$$\eta = \frac{\Delta h}{H} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $\eta$ 为冻胀率(%), $\Delta h$ 为冻胀量(mm), $H$ 为土样高度(mm)。

曲线表明:在封闭系统中,第④层淤泥质黏土的冻胀率均随冷端温度降低而增大。在试验的冷端温度范围内,淤泥质黏土的冻胀率与冷端温度之间满足如图1所示的线性规律。在单向冻结试验中,回归公式

$$\eta = 0.366|T| \quad (2)$$

冷端温度 $T$ 前的影响系数反映了土体在对应冻结条件下冻胀率随冷端温度的变化程度。冷端温度每降低 $1^\circ\text{C}$ 时冻胀率增大0.366%。

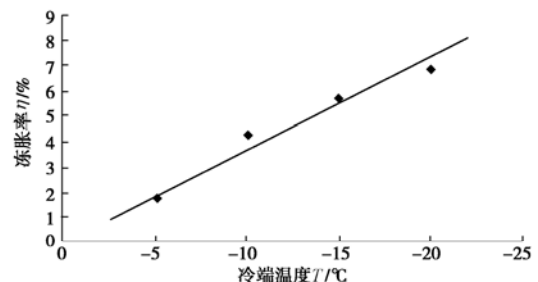


图1 冻胀率与冷端温度关系曲线

Fig. 1 Relationship between frost-heaving ratio and cold end temperature

从图2可看出,在一定的冷端温度下,冻胀率随时间变化规律基本相似,第④层淤泥质黏土土体冻胀过程基本可分为四个阶段:

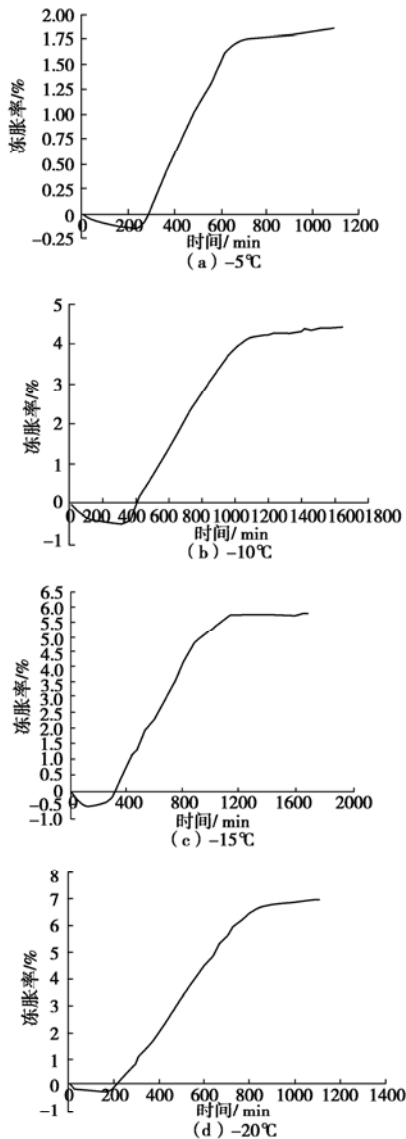


图2 冻胀率随时间变化曲线

Fig. 2 Variation of frost-heaving ratio with time

(1) 冻缩阶段:此阶段内冻胀率为负值即发生冻缩现象,约1~2 h后土样体积增大,冻胀开始。在这个阶段中,由于土颗粒受冷收缩,孔隙水结冰后增大的体积,不足以抵消土粒收缩体积,此外水在约4℃时的密度最大<sup>[8]</sup>,土样所含水分此时的体积最小,这对土的冻缩也有一定的影响,因此,土样体积不但不会膨胀而且反而缩小。当到达某一起始冻胀温度后,冻胀量超过土粒冻缩体积,冻胀开始。

(2) 冻胀快速增长阶段:此阶段析冰作用非常强烈,聚集在冻结锋面处的水分冻结成冰时,将排开土颗粒而形成零星的小冰透镜体,出现冰分凝现象,冻胀率开始快速增大。

(3) 冻胀缓慢增长阶段:此阶段内,冰分凝已经比较充分,冻结锋面附近形成的冰透镜的厚度及连续程度加大,冻胀率几乎匀速增长。

(4) 稳定阶段:冻结锋面基本稳定,冰透镜体停止生长,冻胀曲线趋于平缓。

### 3.2 冻结温度

土的冻结温度指土体中孔隙水稳定冻结的温度,土体孔隙水的冻结有其自身特点,这是由于水与土体矿物颗粒表面的相互作用和水中具有某种数量的盐分所决定的。本次冻结温度试验通过杭州雪中炭公司研制开发的冻土冻结温度测量通讯软件完成(如图3),由数据分析得出,第④层淤泥质黏土土样的冻结温度为-0.52℃。

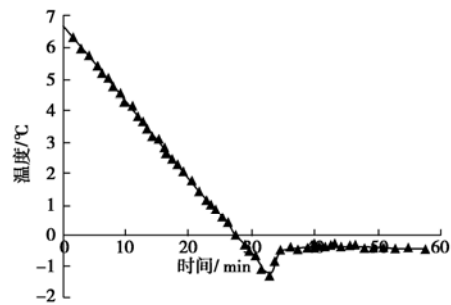


图3 冻结温度曲线

Fig. 3 Curves of freezing temperature

### 3.3 土体冻结时温度场变化

图4为各路传感器记录的温度与时间的关系图,从图中可以看出,冷端温度的变化对土样距离冷端30 mm范围内的影响较为明显,且曲线基本平行,降温速率一致,土体上端温度只随试验时间增长而缓慢降低,并且大部分处于大于-1℃的温度区,冷端温度变化对此段土中温度场没有产生较大影响。

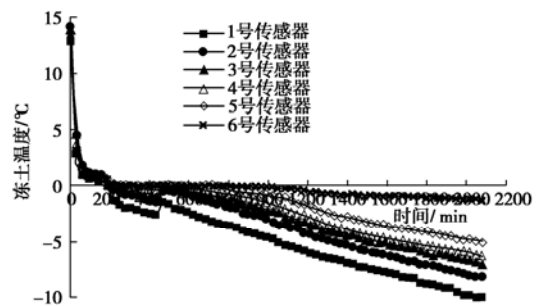


图4 传感器显示温度与时间关系曲线

Fig. 4 Relationship between temperature and time

图5为第④层淤泥质黏土土样比较典型的温度场的分布曲线,其设定冷端温度为-15℃。曲线表明:土样在单向冻结温度场中,随着时间的增长,土体温度随距离冷端范围不同而变化显著,在距离冷端10 mm处温度变化较大,平均每3 h土样在该点的温度降低1

℃, 而在顶端 50 mm 处 36 h 内土样温度仅变化了 1℃。

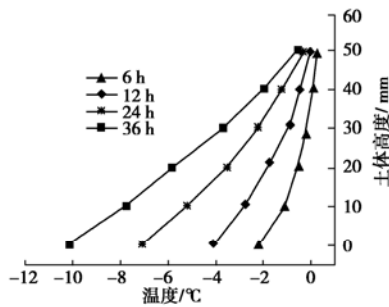


图 5 土样温度场分布曲线

Fig. 5 Temperature distribution curves of soil

### 3.4 冻结锋面

天然土体的冻结是由大气向地表提供冷源, 发生由地表向地下的一维冻结, 其冻结规律符合一维热传导方程。为了在试验中使土样在冻结时按一维条件冻结, 首先应保证土样在 1℃ 左右的恒温环境中养护。然后, 在试样的底端施加冷源, 使土体由底端向顶端冻结即单向冻结。所以冻结锋面是自下而上扩展的。在一定范围内, 由于土层的层状分布变化不大, 且在相同时间内提供的冷量也是均匀的, 因而冻结锋面是一个平面。土的起始冻结温度用于判断土处于冻结状态的起点, 即作为确定冻结锋面所在位置的依据。

冻结锋面发展深度与时间二者之间呈平方根正比关系,

$$H = 1.525\sqrt{t} \quad (3)$$

式中,  $t$  为时间 (min)。

第④层淤泥质黏土冻结锋面在试验初始 3 h 内发展较快 (如图 6), 随后以稳定的速度向土体上端推进, 土中冻结锋面随时间的发展与土体靠近冷端位置的温度随时间变化规律是一致的。在初始 3 h 内温度降低较快, 此时冻结锋面前进速度较快, 随着冻结锋面逐渐上移, 温度变化逐渐减缓, 当冻胀变形稳定后, 土样温度变化缓慢, 此时土样中温度场分布基本稳定。

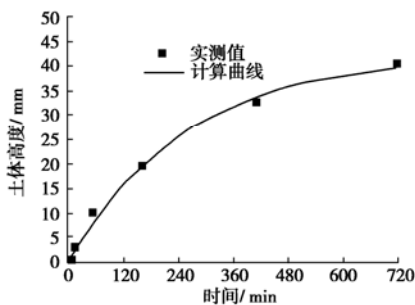


图 6 土体冻结锋面随时间发展曲线

Fig. 6 Variation of freezing front with time

### 3.5 冻胀力

冻胀力是试样在无侧向变形且上下端面限制 (无

变形) 的条件下, 经单向冻结后所产生的单位面积轴向推力的平均值。试验测得试样在 -5℃, -10℃, -15℃, -20℃ 四个冷端温度下冻胀力随时间变化曲线图 (图 7) :

从图中可以看出, 随着冷端温度的降低, 第④层淤泥质黏土土样的冻胀力逐渐增大。从冻胀力与时间曲线的变化规律来看, 与冻胀率极其相似也可分为冻缩、冻胀快速增长、冻胀缓慢增长和稳定四个阶段。比较图 7 可看出, 土样的最大冻胀力与设定的冷端温度呈较好的线性关系 (如图 8)。

$$F = 0.0258|T| \quad (4)$$

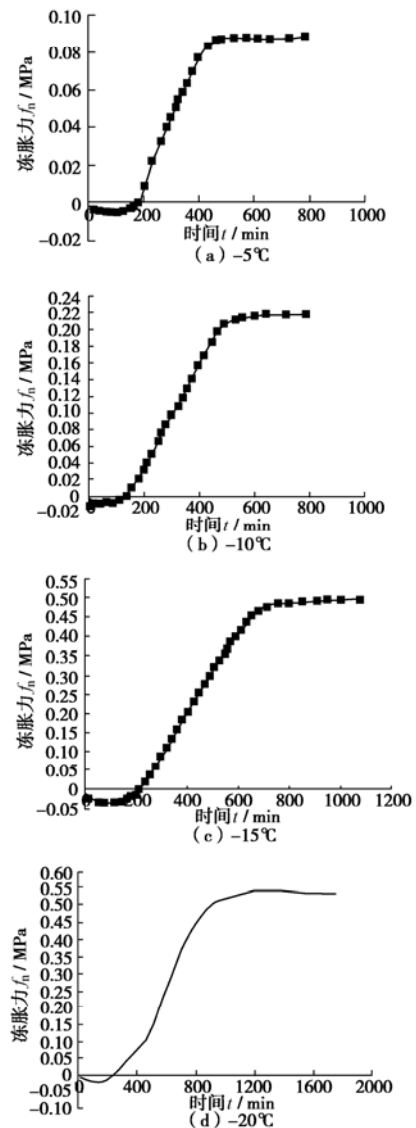


图 7 冻胀力随时间变化曲线

Fig. 7 Variation of frost-heaving stress with time

冷端温度  $T$  前的影响系数反映了土体在对应冻结条件下冻胀力随冷端温度的变化程度。冷端温度每降低 1℃ 时冻胀率增大 0.0258 MPa。

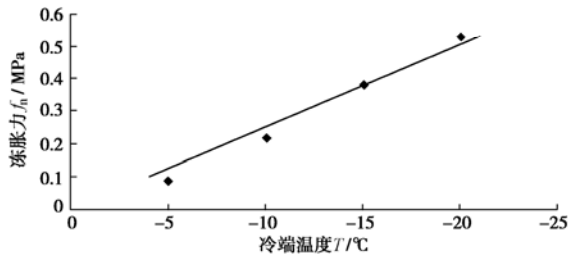


图8 冻胀力与冷端温度关系曲线

Fig. 8 Relationship between frost-heaving stress and cold end temperature

## 4 结 语

由以上结果可知,在封闭系统试验中,上海地区第④层淤泥质黏土土样的冻胀率和冻胀力均随冷端温度降低而增大,并且具有较好的线性关系;在一定的冷端温度下,上海地区第④层淤泥质黏土冻胀率和冻胀力随时间变化规律具有相似性:冻结温度场距离冷端越远,其温度变化越小,而冻结锋面发展深度与时间二者之间呈平方根正比关系。研究成果对于预测饱和淤泥质黏土层冻胀变形引起隧道轴线沉降、防止地铁隧道管片破裂、渗水或漏泥问题以及为上海地铁隧道冻结法设计、施工与地铁安全运营提供了有价值的参考。

### 参考文献:

[1] 唐益群,沈 锋,胡向东,等. 上海地区冻融后暗绿色粉质黏土动本构关系与微结构研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1249 - 1252. (TANG Yi-qun, SHEN Feng, HU Xiang-dong, et al. Study on dynamic constitutive relation and microstructure of melted dark green silty soil in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1249 - 1252. (in Chinese))

[2] 李 萍,徐学祖,陈峰峰. 冻结缘和冻胀模型的研究现状与进展[J]. 冰川冻土, 2000, 22(1): 90 - 95. (LI Ping, XU Xue-zu, CHEN Feng-feng. State and progress of research on the frozen fringe and frost heave prediction models[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(1): 90 - 95. (in Chinese))

[3] MILLER R D. Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils[J]. Highway Research Record, 1972, 39: 1 - 11.

[4] JESSBERGER Hans L, WOLFGANG Ebel. Proposed method for reference tests on frozen soil[J]. Engineering Geology, 1980, 18(1): 31 - 34.

[5] 周国庆. 饱水砂层中结构的融沉附加力研究[J]. 冰川冻土, 1998, 20(2): 120 - 123. (ZHOU Guo-qing. An extra-force on a structure due to thaw settlement of saturated sand[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(2): 120 - 123. (in Chinese))

[6] 陈湘生,濮家骝,罗小刚,等. 土壤冻胀离心模拟试验[J]. 煤炭学报, 1999, 24(6): 615 - 619. (CHEN Xiang-sheng, PU Jia-liu, LUO Xiao-gang, et al. Geotechnical centrifuge model tests of soil frost heave[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6): 615 - 619. (in Chinese))

[7] 人工冻土物理学性能试验[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996. (Physical and mechanical tests on manually frozen soil[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1996. (in Chinese))

[8] 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, ZAHNG Li-xin, et al. Frozen soil physics[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))