

# 人工冻融土地基极限承载力模型试验

王贵虎<sup>1</sup> 周红<sup>2</sup> 胡璞<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学土木工程系, 淮南 232001; 2. 东南大学土木工程学院, 南京 210096)

**【摘要】** 为了减小人工冻结法带来的负面影响和扩展其应用范围, 通过模型试验研究了冻融土地基极限承载力的变化规律。为合理地进行冻融土地基承载力设计和改善冻融土承载力提供了科学依据。

**【关键词】** 人工冻融土; 地基极限承载力; 模型试验

**【中图分类号】** TU 445

## Model Experiment for Ultimate Bearing Capacity of Foundation Made by Artificial Frost-thawed Soils

**【Abstract】** In order to reduce the bad effect of freezing method and extend its application scope, through model experiment, studying the changing principle of ultimate bearing capacity of foundation made by artificial frost-thawed soils. The results provide a scientific basis for the design of foundation made by artificial frost-thawed soils.

**【Key words】** artificial frost-thawed soils; ultimate bearing capacity of foundation; model experiment

### 0 引言

人工冻融土地基承载力问题是与人工冻土学和人工冻结施工技术相联系的。经历了冻胀和融沉的循环过程, 土中水在温度的作用下迁移, 冻结在增加冻土的强度的同时, 也产生了土体冻胀和冻结结束时的融沉现象<sup>[1]</sup>。人工冻土的冻胀和融沉又和天然冻土有所不同。人工冻土的温度梯度是根据施工进度的需要人为制定的, 一般低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[2]</sup>。冻结时析冰作用和融化时冰的融化, 改变了土体原来的物理力学性质, 而使冻融土的承载力下降。人工冻结法是岩土工程界近年来所关注的一种环保的施工方法。它的应用可以不改周围的环境, 利用土体的本身的组成, 把不利因素—水变为提高富水水体或软土的强度, 并隔断地下水。在城市地下空间的利用中, 人工冻结法有独到的优势<sup>[3]</sup>。但是由于冻融土承载力的变化, 而发生周围建筑的开裂和地基沉陷。加之, 在矿山建设中, 以临时井架代替

永久井架是缩短矿井建设周期的最可行、最有效的办法。但在实践中, 由于对冻融土承载力变化知之甚少, 导致了陈四楼副井等矿井发生严重倾斜。鉴于这种情况对冻融土承载力进行了相似模型试验, 为冻融土地基设计和提高融土承载力提供科学依据。

### 1 试验方法和物理模型设计

#### 1.1 冻结试验和承载力试验的方法

通过相似模型试验对人工冻土实际的冻结、融化过程进行模拟, 冻融前后土的承载力的变化以及冻融土的极限承载力。第一部分是冻结阶段, 模拟深井冻结过程; 第二部分为测定冻融土地基承载力。

土的物理性质和工程分类的相关试验一般按照国家标准《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)进行。

#### 1.2 物理模型试验的相似准则

##### 1.2.1 模拟深井冻结过程的相似准则

模拟土体冻结融沉时, 所考虑的主要因素

有:土体的温度、土体的导温系数、土体冻结时水的结冰潜热、外荷载、冻结时间、冻胀力、导热系数、几何尺寸、冷源温度。

因此,影响土体冻融的主要因素可表达为:

$$f(t, \zeta, \alpha, \delta, p, \tau, p_1, \lambda, x, (t_0 - t_1)) = 0 \quad (1)$$

式中:  $t$ ——土中温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\zeta$ ——冻结冷源位置,  $\text{m}$ ;

$\alpha$ ——土体的导温系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;

$\delta$ ——土中水的结冰潜热,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;

$p$ ——外荷载,  $\text{Pa}$ ;

$\tau$ ——冻结时间,  $\text{s}$ ;

$p_1$ ——冻胀力,  $\text{Pa}$ ;

$\lambda$ ——土体的导热系数,  $\text{J}/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;

$x$ ——几何尺寸,  $\text{m}$ ;

$t_0$ ——土体初始温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_1$ ——冷源温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

其  $\Pi$  项式为:

$$[\Pi] = t^a \zeta^b \alpha^c \delta^d p^e \tau^f p_1^g \lambda^h x^i (t_0 - t_1)^j = 0 \quad (2)$$

在模型设计时,只要保证模型与原型对应的同名准则数值相同,则模型与原型是相似的。第一步,考虑模型的几何缩比。由傅利叶准则可知,时间缩比是几何缩比的平方。同时,考虑到试验仪器的精确性和试验条件的许可,确定物理模型的几何缩比为  $C_1 = 16$ ,则模型中的几何尺寸相当于原型的 16 分之一。几何缩比  $C_1 = 16$ ,则时间缩比  $C_\tau = 256$ 。

模型采用与实际工程相似的原形土,则  $C_\alpha = C_\lambda = C_\delta = 1$ 。由科索维奇准则知,  $C_t = 1$ ,也就是模型中所测的温度与原型是相同的。

### 1.2.2 地基承载力试验部分影响因素及相似准则

冻结结束后,进行地基承载力试验部分的研究。冻融土和常温土的极限承载力试验均在模拟冻结圈径 8 m 的物模上进行,具有科学性和创新价值。影响地基压缩性质变化的主要因素有:弹性模量  $E$ 、土体中应力  $\sigma$ 、外荷载  $q$ 、几何尺寸  $y$ 、沉降量  $s$ 。无量纲量  $\epsilon, \mu$  可以自适应相似。

故上述影响因素可表达为:

$$\varphi(\sigma, y, q, E, s, \tau) = 0$$

$$\Pi(\sigma^a, y^b, q^c, E^d, s^e \tau^f) = 0 \quad (3)$$

式中:  $\sigma$ ——土中应力,  $\text{N}/\text{cm}^2$ ;

$y$ ——几何尺寸,  $\text{cm}$ ;

$q$ ——外荷载,  $\text{N}$ ;

$E$ ——弹性模量,  $\text{N}/\text{cm}^2$ ;

$s$ ——沉降量,  $\text{cm}$ ;

$\tau$ ——冻结时间,  $\text{s}$ 。

已知冻胀融沉试验的几何缩比为 16,则加载荷载等级不变,加载量是原地基加载量的 1/256。故加载装置上的传压板的面积为原位试验的 1/256。物理模型模拟圈径为 8 m 的冻结盘。因此,模型冻结圈径为 500 mm。按现场静载荷试验的影响范围计算  $B$ (试验影响宽度),则  $B = 500 \text{ mm}$ ;  $B \geq 3b$ ,取方形压板,传压板边长  $b$  为 170 mm。土体沉降量  $s$  与几何尺寸  $y$  有相同的几何缩比 16。也就是模型变形 1 mm,原型变形 16 mm。

### 1.3 试验系统

整个试验装置主要包括以下几个部分:试验台、制冷系统<sup>[5]</sup>及供电系统、温度控制系统(XSL 智能检测仪)、加载系统<sup>[6]</sup>、保温隔热系统、数据采集系统和数据处理系统。各部分的结构简图见图 1、图 2。

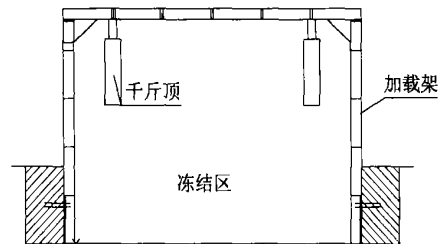


图1 载荷试验台

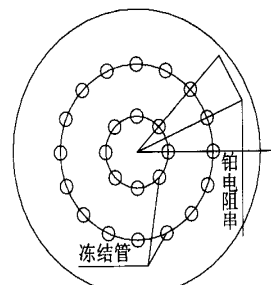


图2 载荷试验台冻结区冻结管布置和测温铂电阻串布置图

## 2 试验设计及操作过程

### 2.1 试验土体

试验土体为淮南地区常见的天然地基土—典型粘土。其物理性质见表 1。

### 2.2 试验设计及操作过程

首先,在试验台中对土体进行冻结。加载架一端千斤顶下的土体不冻结。(矿井都是圆

形的,对称温度分布及边界条件),在其上先进行常温土的地基承载力试验。在不同标高的主面、界面、共主面设 45 个测点<sup>[5]</sup>。各温度测点的温度每 0.5 h 测一次。冻胀量和融沉量每 4 h 读一次。其次,进行常温土的承载力试验。用油压千斤顶分级加荷,加载大小用压力传感器读出,反力由钢架承担<sup>[6]</sup>。

表 1 试验土样的物理性质

土 样	含水量 $w/\%$	密 度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙率 $n/\%$	饱和度 $S_r/\%$	液 限 $w_L/\%$	塑 限 $w_p/\%$
常温粘土	23.2	1.788	70.8	100	35.6	19.3
冻融粘土	24.6	1.7	72	100	33.1	19.05

## 3 试验结果分析

从试验结果表明:

- 1) 冻结前后土的强度变低。
- 2) 冻胀现象不明显。

在第一个 24 h 内,土体出现了明显的冻缩。在温度降低到一定程度,土体也有微小的体积收缩。

### 3) 地基应力与变形的关系

①从常规土的沉降和时间曲线看出,地基变形分为 3 个阶段,即直线变形阶段;局部剪切阶段;完全破坏阶段。

②冻融土的破坏形式接近于局部剪切破坏,常规土的破坏基本是整体剪切破坏。由物理模型试验得到冻融土地基承载力极限值为  $f_u=41.84$  kPa;常规土地基承载力极限值为  $f_u=115.06$  kPa。常规土极限承载力是该冻融土极限承载力的 2.75 倍。

③本文针对于土体破坏的极限情况,建筑物沉降按发生的次序分为 3 个主要部分:初始沉降、主固结沉降、次固结沉降。在本模型试验结果曲线中仅表示两个部分:初始沉降、主固结沉降。次固结沉降存在于地基中土粒骨架在持续荷载下发生蠕变的情况,土体中有效应力已经不变或变化很小,但是地基并不发生剪切破坏,不是研究的重点。

### 4) 承载力试验结果曲线

承载力试验结果见图 3、图 4。

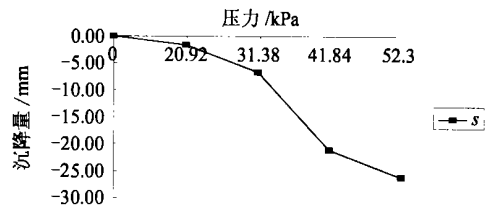


图 3 冻融土压力-沉降曲线

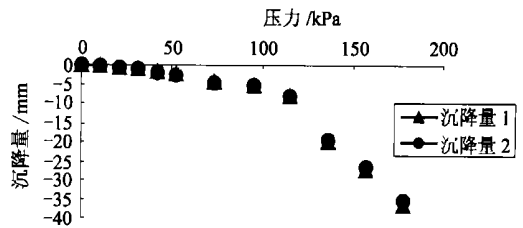


图 4 常规土压力-沉降量曲线

## 4 结 论

从冻融土和常规土的土工参数的试验和地基承载力物理模型试验,可以得出以下结论:

1) 冻融前后地基极限承载力大幅度降低。从试验结果得到,常规粘土地基极限承载力是冻融土的 2.75 倍。常规土地基承载力试验的实际破坏形式为整体剪切破坏,而冻融土地基承载力试验的实际破坏形式为冲剪破坏,地基极限承载力较低,沉降较大。

2) 对于矿山建设冻结法凿井,临时井架作为永久井架的施工方案要充分考虑地基承载

(下转第 275 页)

察的目的。

## 5 结 论

高密度电阻率法与常规电法相比而言,其基本原理是相同的,从具体应用来讲高密度电阻率法有自己的特点:

1)一次测量可布设几十到上百个电极,通过转换开关实现各个电极的测量,既提高了观测速度,又避免了因电极布设而引起的故障或干扰。

2)测量系统的多电位电极系再配以电极转换装置,能进行多种电极装置的视电阻率测定,获得多种参数,从不同侧面反映地下地电结构的地质信息,可进行多种参数解释。

3)实测数据的采集、收录全部实现自动化,使野外施工时间大大缩短,也避免了人为的操作失误。

4)实施了资料的现场实时处理或脱机处

理,在施工现场用便携机就可打印原始数据或绘制基本图件,直观反映出观测结果,对可疑处可立即采取相应处理手段。

5)该方法点距较密,极距变化多,因此对浅部的信息反映灵敏,再加上其智能化程度高、效率高、信息丰富和解释方便等特点,使它在工程勘测中有着广阔的应用前景。

根据其原理和上述特点,高密度电阻率法可以广泛的应用于寻找地下水、水文工程、环境地质勘探、工程地质勘探、金属与非金属矿产资源勘探、能源勘探、城市物探、铁道及桥梁工程勘探、地热勘探。

## 参 考 文 献

- 1 DL 5010—92 水利水电工程物探规程
- 2 常士骧主编.工程地质手册(第三版).北京:中国建筑工业出版社,1995.114~130

收稿日期:2003-05-20

(上接第 267 页)

力显著下降的因素,对井架基础做加固处理,或改进井架的设计调整井架的变形。

3)对于城市地下建筑如隧道、地铁深基坑支护,为不影响已有相邻建筑和上部建筑,建议对冻融土地基做准确的设计,采取措施减小冻胀量和融沉量及沉降量。可以采用压密注浆法等加固。

## 参 考 文 献

- 1 童长江,管枫年.土的冻胀与建筑物冻害防治.北京:水利电力出版社,1985.17

- 2 王建平,王文顺,史天生等.人工冻结土体冻胀融沉的模型试验.中国矿业大学学报,1999,28(4):303~306
- 3 陈瑞杰,程国栋等.人工地层冻结应用研究和展望.岩土工程学报,2000,22(1):40~44
- 4 朱林楠,李冬庆,郭兴民.无外荷载作用下冻土模型试验的相似分析.冰川冻土,1993,15(1):166~169
- 5 翁家杰.井巷特殊施工.北京:煤炭工业出版社,1991.29~33
- 6 夏才初,李永盛.地下工程测试理论与监测技术.上海:同济大学出版,1999.94~100

收稿日期:2003-06-20