

重塑粘质黄土冻胀敏感性试验分析

许 健^{1,2}, 牛富俊¹, 牛永红¹, 林战举^{1,2}, 徐志英^{1,2}

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要:以沈哈高速铁路沿线具有代表性的粘质黄土为研究对象,在室内冻胀试验条件下,研究了非饱和含水量、冷端温度、冻结速率、补水条件以及冻融循环对土体冻胀特性的影响。试验表明,在封闭系统下,非饱和土体冻胀系数随含水量增大而增大,且最终趋于一个稳定数值;封闭系统下,随着冷端温度的降低,含水量较大土样的冻胀系数逐渐减小,含水量较小土样的冻胀系数逐渐增大;开放系统下,土样冻胀系数随冻结速率的减小逐渐增大,且增幅越来越大;外界补水条件下,土体冻胀量增加显著,但随含水量的增大,其影响逐渐减弱;干密度较小土样的冻胀总变形随冻融循环次数的增加呈指数递减的趋势,干密度较大土样则呈指数增加的趋势。

关键词:冻胀敏感性;含水量;温度;冻结速率;冻融循环

中图分类号:TU445 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2010)01-0024-07

Experimental Analysis of Frost Susceptibility for Remolded Clayey Loess

XU Jian^{1,2}, NIU Fu-jun¹, NIU Yong-hong¹, LIN Zhan-ju^{1,2}, XU Zhi-ying^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, P. R. China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

Abstract: A typical clayey loess obtained along the Shenyang-Ha'erbin Express Railway was taken as a case study. The effect of non-saturated water content, temperature, freezing rate, supplying water condition and freezing-thawing circulation on the frost susceptibility of soil were investigated with freezing and thawing experiments. It was shown that in the closed system, the frost heaving ratio of unsaturated soil increased with water content increasing and eventually reached a stable value. And for the soil samples with low water content, the frozen-heave rate increased with the decrease of temperature. While for the samples with relatively higher water content, the frozen-heave rate decreased with the increase of temperature. As regards the open system, the frost heaving ratio increased with a growing gradient as the freezing rate decreased. Water-feeding made the frost heave amount increase significantly, while less with the increase of water content. The frost heave deformation showed exponential decline trend with the increase the frequency of freezing and thawing for soil with low dry density, while exponential increase for the soil with high dry density.

Key words: frost susceptibility; water content; temperature; freezing rate; freezing-thawing circulation

收稿日期:2009-07-06

基金项目:中科院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-YW-Q03-04);中科院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-351);国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2008AA11Z103);国家自然科学基金重点资助项目(No. 40730736)

作者简介:许健(1980-),男,博士生,主要从事寒区岩土工程研究,(E-mail)xujian@lzb.ac.cn.

牛富俊(联系人),男,研究员,博士生导师,(E-mail)niufujun@lzb.ac.cn.

寒冷地区公路建设经验和研究结果表明,在季节性冻土区,尤其是在深季节性冻土区,由于路基经受年复一年的周期性冻融循环作用,冻害对公路路面寿命有着严重的影响^[1-2]。冻胀导致的病害除了直接引起的路面变形外,另一重要因素在于其对土体强度的弱化^[3]。冻害在铁路路基上的表现主要为:冬季在负温条件下,土体中水分结晶,引起土体体积增大,使路基产生不均匀变形,破坏轨道的平顺性;春季融化期,路基表层土融化,而下部仍处于冻结状态,未融化的土层便起到隔水层的作用使得水分不能及时排出,在上部动荷载反复作用和土体自身重力作用下就会形成道路翻浆,所有这些病害,对行车安全都是极为不利的^[4]。

目前,中国中、深季节冻土区最为重要的工程是哈大客运专线,线路穿越区域的浅层土主要为具冻胀性的粘质黄土。由于路基变形要求严格,冻胀处置的问题十分突出,现有规范、填料冻胀敏感性评价标准是否符合路基变形要求,如何准确评价原土层和处置后的路基土体的冻胀敏感性,都关系到工程建设的成功与否。许多学者在土体冻胀敏感性评价方面进行了大量的研究^[5-10],但由于冻胀受土的类型、水分补给条件、含水量、土中盐分、冻结速率、外部荷载等诸多因素的影响,使得研究人员在建立土体冻胀敏感性评价标准方面仍无法得到满意的效果,所得出的结论具有一定的片面性。因此,开展基于高速铁路路基要求的土的冻胀敏感性研究,结合工程实际,通过试验研究进一步探索不同影响因素下的冻胀敏感性评价与计算,不仅具有现实的工程意义,也将进一步细化、补充中国冻胀敏感性评价标准,推进中国在土体冻胀方面的研究。

为了使问题充分简化,试验的主要目标设计为:研究单向冻结模式下原始水分、冷端温度(封闭)、冻结速率(开放)、补水条件、反复冻融对路基土体冻胀特性的影响。

1 室内冻胀试验

1.1 沈哈线路基土基本物理性质

冻胀试验均采用重塑土,试验研究所采用的土为冻胀敏感性土:粘质黄土(黄褐色)和粘质黄土(灰褐色),取自在建沈哈线 DK673+820 处,土样具有一定的代表性。其颗粒分布曲线如图 1 所示,2 种土样的土性参数列于表 1。

表 1 试验土样的物性参数

土类	液限 w_L	塑限 w_p	塑性指数 I_p	土样分类
粘质黄土(灰褐色)	42	25	17	粘土
粘质黄土(黄褐色)	47.5	27	20.5	粘土

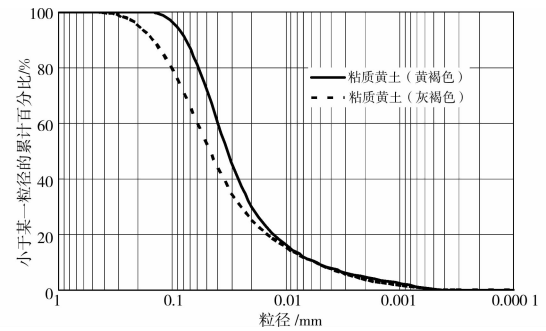


图 1 试验中两种土的颗分曲线

1.2 试验仪器

试验装置如图 2 所示。整套试验装置由冻融试样筒、恒温箱、制冷与温度控制系统、补水、变形监测等几个部分组成。其中:

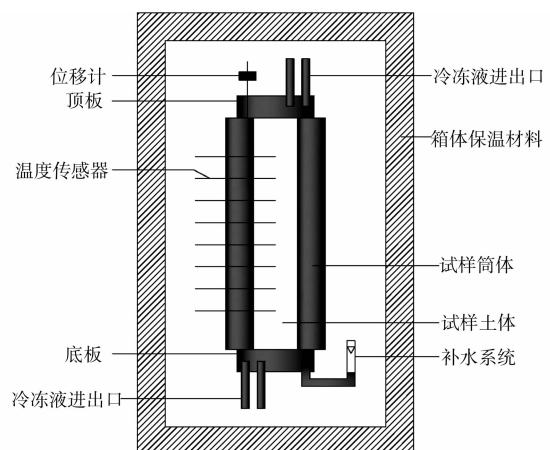


图 2 试验装置示意图

1)冻融试样筒是由绝热材料厚聚酯制成,内径为 101 mm,壁厚为 5 mm,高度为 185 mm;为了精确观测冻融界面的位置,沿垂直方向每 1 cm 布置一支热敏电阻温度计;容纳试样筒的恒温箱在冻融试验期间始终控制温度为 +1 °C,以减少侧向散热;顶底板控温系统可对待测样品进行温度控制;因为土体是有侧限变形,在土样的垂直上方安装位移传感器,测得土体垂直方向的位移量,以观测土样的冻胀和融沉变形。

2)封闭系统不补水。开放系统是对土样在进行测试时,对其给予补水的试验方法。补水系统由恒定水位的马廖特瓶通过塑料管与底板连接,水位设置高于底板与土样接触面 1 cm,试验过程中由人定时记录水位,以确定补水量。

3)冻胀(融沉)试验箱为 XT-5404 型土工冻胀(融沉)试验箱,具有正弦、线性(包括恒温)规律的复合编程能力,适用于 -40 °C ~ +60 °C 温度范围内(冻)土的冻胀(融沉)量以及冻胀力测定的冻胀试验等。

其它试验仪器包括:数据采集读数系统(DT500);热敏电阻温度传感器(冻土工程国家重点实验室自主研发,精度 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$);变形测量部件(FXg-81/ $\pm 25\text{ mm}$ 差动变压器式位移传感器,输出标准电压且精度 $0.001\text{ V}(0.01\text{ mm})$)。

1.3 试验方案

初始含水量、冷端温度(封闭)、冻结速率(开放)、补水条件、反复冻融是影响路基土体冻胀特性的主要因素,因此,试验研究的重点设定如下:

1)在设定相同的冷端温度(封闭)下,对不同初

始含水量的土样进行冻胀试验。

2)对相同含水量的土样,采取不同的冷端温度(封闭)检测土体的冻胀特性。

3)对相同含水量的土样,采取不同的冻结速率(开放)检测土体的冻胀特性。

4)对相同含水量的土样,在设定相同的温度梯度下,分别进行封闭和开放条件下的冻胀试验。

5)对相同含水量的土样,在设定相同的冷端温度(封闭)下,进行反复冻融条件下的冻胀试验。

试验条件如表 2 所示。

表 2 室内冻胀试验条件

土质	影响因素	分组号	样品编号	顶板温度/ $^{\circ}\text{C}$	补水条件	含水量/ $\%$	干密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
粘质黄土 (灰褐色)	含水量 (非饱和和土体)	1	1	-15	封闭	17.69	1.74
			2	-15	封闭	20.85	1.68
			3	-15	封闭	24.97	1.60
			4	-15	封闭	28.21	1.52
	冷端温度 (高含水量)	2	5	-2	封闭	27.31	1.57
			6	-5	封闭	27.31	1.57
			7	-10	封闭	27.31	1.57
			8	-15	封闭	27.31	1.57
	冷端温度 (低含水量)	3	9	-2	封闭	20.49	1.70
			10	-5	封闭	20.49	1.70
			11	-10	封闭	20.49	1.70
			12	-15	封闭	20.49	1.70
粘质黄土 (黄褐色)	冻结速率	4	13	-4	开放	23.48	1.66
			14	-8	开放	23.48	1.66
			15	-12	开放	23.48	1.66
	补水条件	5	16	-4	封闭	23.00	1.66
			17	-4	开放	23.00	1.66
			18	-4	封闭	27.03	1.58
			19	-4	开放	27.03	1.58
			20	-10	封闭	24.03	1.63
			21	-10	封闭	27.69	1.54

注:试验过程中箱温均设为 $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$;底板温度除 14 和 15 号试样为 $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以外,其余试样均为 $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.4 试验方法与步骤

1.4.1 土样制备 重塑土样制备满足 GB/T 50123-1999《土工试验方法标准》3.1.6 条内容规定,将土风干后过筛(筛孔直径为 2 mm),取筛下足够的土样放入干燥器内。冻胀试验土样制备采用压样法。土样规格为高 100 mm ,直径为 101 mm 的圆柱体;由于易溶盐成分和浓度会影响土体的冻胀过程,所

以试验中土样是用蒸馏水和干土混合配置的。

1.4.2 试验步骤 1)安装试样,保证试样只能单向冻结。

2)试验温度控制。由于试验的冻结温度模式较为复杂,因此试验温度主要采用温度测量控制软件来进行设定和调整。试验模拟试样初始温度为正温,故将试样在 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下恒温 6 h ,计算机

监控,使试样的各部分温度达到均匀,然后开始对试样进行冻胀试验。

3)冻结试验。给试样顶端施加恒定的负温条件,进行冻结,并测试土样不同深度的温度;观察冻结锋面和土体的变化,并记录水位。

4)冻胀试验在 120 h 内完成,冻胀试验结束后,关闭冷端,迅速从试验盒中取出土样,测量土样高度并判定冻结深度。

5)数据采集。用 DataTaker500 每隔 30 min 自动采集一次各测点温度和冻胀量数据。

2 试验结果及分析

2.1 初始含水量

由不同含水量的冻胀量与时间关系曲线图(图 3)可以看出,含水量较大时,冻胀量在初始冻结阶段增长较快,冻结 20 h 后,冻胀量趋于稳定。因为含水量较高的土体中自由水和毛细水占绝大部分,毛细水和自由水的冻结温度较高,很容易冻结。所以土样在较短的时间内就产生了很大的冻胀量。随着含水量的减小,在冻结初期存在一个“冻缩”现象,然后才有冻胀发生。当含水量特别小时,土体不能发生冻胀而是产生冻缩,这是因为土体中水分较少,水分冻结膨胀引起的体积增量不足以抵消土体温度降低引起的冷缩量。

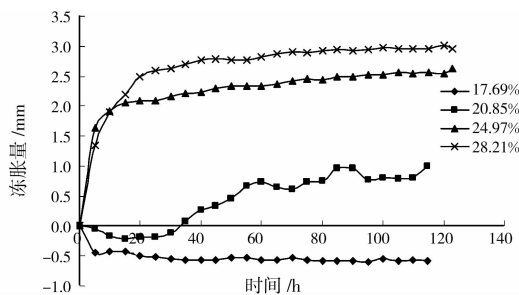


图 3 不同含水量的冻胀量与时间关系

对于非饱和土体,冻胀系数随土样含水量增大而增大,在一定的温度梯度下,土体中含水量必须超过起始冻胀含水量 W_0 才发生冻胀,如图 4 所示。 W_0 约为 18.63%,为土体塑限含水量 W_p (25%) 的 0.75 倍。

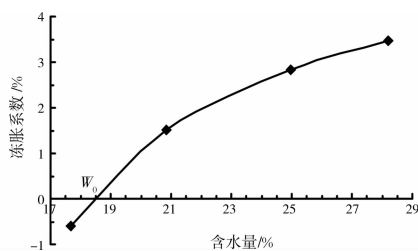


图 4 冻胀系数与含水量的关系

由图 4 还可以看出,在无外界水源补给的封闭体系中,对于非饱和土体,虽然其冻胀系数随含水量的增大而增大,但最终趋于一个稳定数值。冻胀系数与有效冻胀含水量 $(W - W_0)$ 之间的关系(图 5),可以用下面的幂函数公式较好的拟合:

$$\eta = k(W - W_0)^n \quad (1)$$

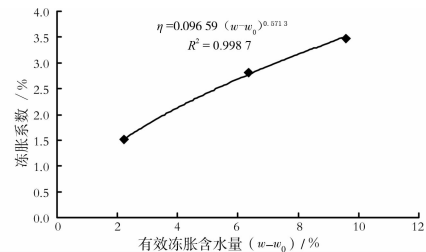


图 5 冻胀系数与有效冻胀含水量的关系

上述分析是针对非饱和土体而言的,由于试验样品的限制,饱和含水量对土体冻胀特性影响的试验没有进行。根据前人对饱和兰州黄土和青藏粘土的研究成果^[11],随含水量的增大,饱和土样的冻胀系数呈先增大后减小的趋势,即冻胀系数随含水量的变化规律存在一个临界含水量,在该临界含水量处,冻胀系数值达到最大。

2.2 冷端温度

大量的研究认为,在没有外界水分补给的封闭系统中,任何负温条件下,冻土总保持着负温度相应的未冻水含量,土体原位冻胀量也就随土中负温降低而增大,达到某一温度下的相对稳定值,具有未冻水含量随负温度的变化规律。然而上述结论具有一定的片面性,不能真实反映土体的冻胀规律。这是因为冻胀受多种因素的影响,在封闭系统条件下,随着温度变化,土体不一定总是发生原位冻胀的。试验研究结果表明,土体初始含水量的大小也是决定封闭系统条件下土体冻胀规律的一个重要因素。

2.2.1 含水量较大时冷端温度对土体冻胀敏感性影响分析 试验所采用土样的初始含水量为 27.31%,大于其塑限含水量 W_p (25%)。此种情况下,土体冻胀系数与冷端温度的关系曲线如图 6 所示。由图 6 可见,冻结冷端温度对土的冻胀特性影响很敏感。温度较低时,试验过程中土样的冻胀系数较小;随着冷端温度的升高,土样的冻胀系数逐渐增大,且增大的幅度越来越大。产生这一现象的原因是,冻结冷端温度不同,土样的冻胀机理是不同的。冷端温度较低($-15\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-10\text{ }^\circ\text{C}$)时,在冻结过程中,土体中的温度梯度比较大,会促使土中水分尽快发生冻结,冻结速率较快,下部土体中水分也来不

及迁移便在快速推进的冻结锋面作用下全部冻结,冻结时间持续较短,孔隙水主要发生原位冻结(胶结成冰作用),分凝冰层很细小,分布均匀;土中能量处于动态平衡状态,冻胀变形停止并在土中形成近似稳定的温度场,孔隙变化不大,其扩大不超过 9%(因为有未冻水存在),冻胀系数较小。随着温度的逐步升高(-5℃、-2℃),土体中的温度梯度逐渐减小,冻结速率也逐渐降下来,冻结锋面前进的速度较慢,迁移到锋面附近的水分增多,冻结状态持续时间较长,此时土中水逐渐由原来胶结成冰作用占主导地位向分凝成冰作用占主导地位过渡,土体中形成一系列相间隔的分凝冰层,分凝冰层逐渐变厚,主要分布在试样上部,试样会出现一些细微的裂缝;冰体积大大超过冻结前土体中的孔隙,土体冻胀系数相应较大。

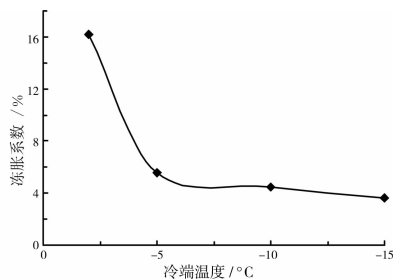


图 6 含水量较大时冻胀系数与冷端温度的关系曲线

2.2.2 含水量较小时冷端温度对土体冻胀敏感性影响分析 试验所采用土样的初始含水量为 20.49%,远小于其塑限含水量 W_p (25%)。由土体冻胀系数与冷端温度的关系曲线图(图 7)可以看出,土体冻胀系数随冷端温度降低而增大。这是由于土样含水量较小,干密度较大,处于坚硬、半坚硬状态,起始冻结温度大大降低。此种情况下,不论冻结冷端温度高低,土样的冻胀机理是相同的,均发生原位冻胀。故随着冷端温度的降低,冻胀系数逐渐增大,且应趋向于稳定。

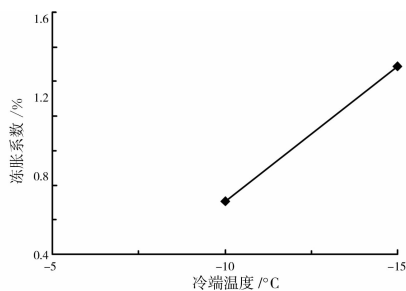


图 7 含水量较小时冻胀系数与冷端温度的关系曲线

值得注意的是,当冷端温度为 -2℃ 和 -5℃ 时,由于冷端温度高于土体的起始冻结温度,土体根

本没有发生冻结,也没有冻胀的产生,故在图 7 中没有考虑 -2℃ 和 -5℃ 冷端温度的影响。

2.3 冻结速率

图 8 所示为开放条件下土体冻胀系数与冻结速率之间的关系曲线图。从图 8 可以看出,随着冻结速率的减小,土体冻胀系数逐渐变大,且增大的幅度越来越大。产生这一现象的原因是,开放条件下,不论土体初始含水量的高低,随着冻结速率的变化,土体所表现出的冻胀机制是相同的,均为分凝冻胀。此种情况下,随着冻结速率的减小,冻结锋面推进的速度变缓,迁移到锋面附近的水分增多,分凝冰层逐渐变厚,因而冻胀系数变大。

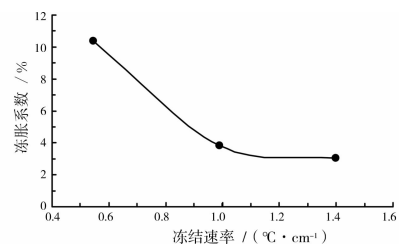


图 8 冻胀系数与冻结速率之间的关系曲线

2.4 补水条件

试验结果明显表明(图 9),补水后的冻胀量显著大于未补水的,因而外界补水是引起土体冻胀的一个重要因素。在温度梯度作用下,水分不断从暖段补水区向土体冻结锋面迁移,引起巨大的冻胀量。值得注意的是,补水后的冻胀量随初始含水量的增大而增大,由此说明,相对补水条件而言,土体初始含水量对冻胀起着决定性的作用。此外,随着初始含水量的增大,补水条件的影响逐渐减弱,当土体达到或接近饱和状态时,外界补水的影响就很弱了。

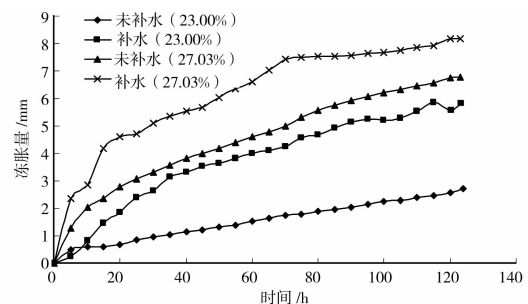


图 9 补水冻胀量与时间关系

基于上面的分析,在开放系统下,土体冻胀量增加显著。结合寒区其它铁路如青藏铁路、包兰铁路的调查结果,有外界水源补给地段冻胀量往往可以达到几十 mm。正在建设中的沈哈客运专线地下水位埋深较浅,稳定水位埋深 2.5~6.0 m,这为水分

迁移提供了源源不断的水源。因此,为了防治路基冻胀病害,必须降低地下水位和防止地表水渗入入路基。

2.5 反复冻融

已有的研究结果表明^[1-2,6-7],季节冻土地区路基病害主要是由冻土土体在季节变化条件下的冻融循环造成的,因而对冻土冻胀系数尤其是反复冻融循环条件下的冻胀系数研究将显得非常重要,但在这一方面的研究还相对较少^[12]。

试验拟选取东北粘质黄土(黄褐色)为代表性土质,通过室内冻胀试验探讨和研究其在不同含水率、密实度下,反复冻融过程中的冻胀特性。为了模拟季节冻土一年内的冻融交替,将冻胀和融沉试验结合在一起进行,即冻胀一天,融沉一天,再冻胀一天……,这样更能反映东北季节冻土冷暖季节交替的情形。

冻融过程是土体从不稳定态向动态稳定态的发展过程。反复冻融改变了原来土体的性状,使得土体向着新的动态稳定平衡状态发展。反复冻融作用导致土体的密度发生变化,颗粒定向化。研究指出^[13-15],冻融作用对土的密度具有双向作用,即使松散土密度增大,而密实土密度降低。但无论如何,多次冻融循环后,土体达到稳定态,此时冻胀后试样高度达到一个稳定值。冻胀后试样高度 h 可以按照下面的指数方程进行回归分析得到:

$$h_n = a \exp(-n/b) + h_\infty \quad (2)$$

式中: a 、 b 分别为回归参数; h_∞ 为多次冻融循环冻胀稳定后的高度。

图 10 为东北粘质黄土含水量从 24.03% 增加至 27.69% 时,经历 10 次冻融循环,冻融循环冻胀后试样高度与冻融次数的关系曲线图。从图 10 可以看出,含水量为 24.03% 时,随着冻融循环次数的增加,冻胀总变形呈指数增大的形式,最终趋向于一个稳定值。而当含水量增大到 27.69% 时,冻胀总变形则呈指数衰减的形式,最终也达到一个稳定值。这是因为当含水量为 24.03% 时,干密度相对较大,为 1.63 g/cm³,土体比较密实。此种情况下,冻融作用会使土的密度变小,使其变得相对较为松散,因而冻胀后试样高度呈现出增大的趋势。当含水量为 27.69% 时,干密度相对较小,为 1.54 g/cm³,土体比较松散。此时冻融作用会使土的密度变大,使其变得相对较为密实,因而冻胀后试样高度呈现出递减的趋势。

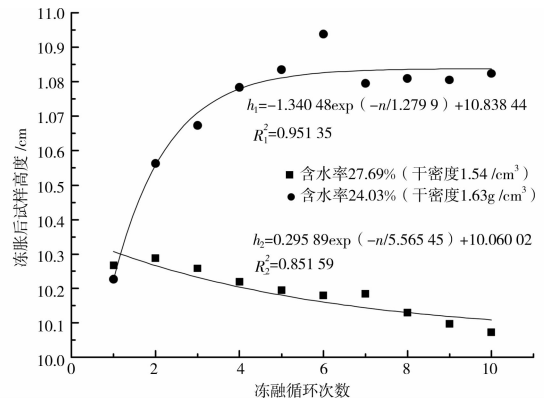


图 10 土体冻融循环冻胀后试样高度与冻融次数关系

对于冻胀而言,前面的回归分析是利用 n 次冻融循环后冻胀试样高度进行的,但在工程实践中,这一高度和循环次数有关,不便于直观的表达冻胀变化情况。为了预测冻融循环条件下的冻胀变化情况,引进土体的冻胀系数 η 和循环次数 n 的关系。用 η_n 代表 n 次冻融循环后的稳定冻胀量与土体稳定冻结深度之比,亦即冻融循环冻胀系数。这一循环冻胀系数与冻融循环次数的关系可表示为:

$$\eta_n = \frac{h_n^f - h_{n-1}^u}{h_f} \quad (3)$$

式中:符号 f, u 分别表示冻、融状态; h_n^f 为 n 次冻融循环冻胀后试样高度; h_{n-1}^u 为 $n-1$ 次冻融循环融沉后试样高度; h_f 为稳定冻结深度。

由式(2), h_n^f 可以表示为以下的形式:

$$h_n^f = a \exp(-n/b) + h_\infty^f \quad (4)$$

类似的, h_{n-1}^u 亦可以表达为以下的方程式:

$$h_{n-1}^u = c \exp[-(n-1)/d] + h_\infty^u \quad (5)$$

将式(4)和(5)代入式(3)中,可得:

$$\eta_n = \begin{cases} \frac{(a \exp(-n/b) + h_\infty^f - c \exp(-(n-1)/d) - h_\infty^u)}{h_f} & n \geq 1 \\ 0 & n = 0 \end{cases} \quad (6)$$

3 结 语

1)在封闭系统下,对于非饱和土体,冻胀系数随含水量的增加而增长,但最终达到一个稳定数值。随着有效冻胀含水量的增加,冻胀系数呈幂函数增加趋势。

2)在无外界水源补给的封闭系统中,对于初始含水量较大的土样,随着冷端温度的降低,土样的冻胀系数逐渐减小;而对于初始含水量较小的土样,随着冷端温度的降低,土样的冻胀系数逐渐增大。

3)在有外界水分补给的开放体系条件下,随着冻结速率的减小,土样的冻胀系数逐渐增大,且增大

的幅度越来越大。

4) 在开放系统下, 土体冻胀量增加显著, 但随着初始含水量的增大, 补水条件的影响逐渐减弱。

5) 对于初始干密度较小的土样, 随冻融循环次数的增加, 冻胀总变形呈指数递减的趋势; 而对于初始干密度较大的土样, 随冻融次数的增加, 冻胀总变形则呈指数增大的趋势。

6) 进行非饱和与饱和状态下初始含水量对土体冻胀敏感性影响的对比试验研究, 揭示土中气体对土体冻胀特性的影响规律, 将是下一步的工作。

参考文献:

- [1] 杜兆成, 张喜发, 辛德刚, 等. 季节冻土区高速公路路基冻胀试验观测研究 [J]. 公路, 2004(1): 139-144.
DU ZHAO-CHENG, ZHANG XI-FA, XIN DE-GANG, et al. Experiment research on subgrade frost heaving of expressway in seasonally frozen soil region [J]. Highway, 2004(1): 139-144.
- [2] 张冬青, 张喜发, 辛德刚, 等. 季节冻土区高速公路路基含水状况与冻害调查 [J]. 公路, 2004(2): 140-146.
ZHANG DONG-QING, ZHANG XI-FA, XIN DE-GANG, et al. Investigation on frost damage and water-bearing condition of expressway subgrade in seasonally frozen soil region [J]. Highway, 2004(2): 140-146.
- [3] ERIK SIMONSEN, ULF ISACSSON. Thaw weakening of pavement structures in cold regions [J]. Cold Regions Science and Technology, 1999, 29 (2): 135-151.
- [4] 郭韞武. 青藏铁路深季节冻土对路基工程的危害及处理 [J]. 西部探矿工程, 2004, 16 (4): 152-153.
GUO YUN-WU. The distresses to railway roadbed caused by deep seasonal frozen soil along the Qinghai-Tibet railway and the preventive measures [J]. West-China Exploration Engineering, 2004, 16 (4): 152-153.
- [5] 霍凯成, 黄继业, 罗国荣. 路基冻胀机制及冻害防范整治措施探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (7): 1099-1103.
HUO KAI-CHENG, HUANG JI-YE, LUO GUO-RONG. On mechanism of freeze-heave and its treatment in roadbeds [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (7): 1099-1103.
- [6] 杜兆成, 孙瑛琳, 蒋大恩. 季节性冻土区路基土的冻胀特性分析 [J]. 长春工程学院学报: 自然科学版, 2006, 7 (2): 17-20.
DU ZHAO-CHENG, SUN YING-LIN, JIANG DA-EN. The characteristic analysis on frost heaving of subgrade in the seasonally frozen ground region [J]. Journal of Changchun Institute of Technology: Natural Science Edition, 2006, 7 (2): 17-20.
- [7] 孙广利, 王慧娣. 季节性冻胀与路基稳定评价 [J]. 吉林建筑工程学院学报, 2006, 23 (1): 22-26.
SUN GUANG-LI, WANG HUI-DI. The analysis on season's frost swelling and subgrade stabilizations [J]. Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, 2006, 23 (1): 22-26.
- [8] 叶阳升, 王仲锦, 程爱君, 等. 路基的填料冻胀分类及防冻层设置 [J]. 中国铁道科学, 2007, 28 (1): 1-7.
YE YANG-SHENG, WANG ZHONG-JIN, CHENG AI-JUN, et al. Frost heave classification of railway subgrade filling material and the design of anti-freezing layer [J]. China Railway Science, 2007, 28 (1): 1-7.
- [9] DAI H M, WANG X L. Frost heave susceptibility of highway bridge foundation in seasonal frost region [J]. Cold Regions Science and Technology, 1992, 20 (2): 141-146.
- [10] SOKOLOVA O V, GORKOVENKO N B. Assessing the frost susceptibility of coarse-fragment soils with a silty-clayey filler [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1997, 34 (2): 46-51.
- [11] 宋春霞. 冻融作用对土物理力学性质的试验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2007: 33-35.
- [12] 张贵生, 梁波, 刘德仁. 冻融循环对土体压缩参数及冻胀、融沉性研究 [J]. 岩土工程界, 2007, 10 (10): 34-37.
ZHANG GUI-SHENG, LIANG BO, LIU DE-REN. Experimental study on compression parameter, frost heave and thawing subsidence characters of permafrost under freezing and thawing circulation [J]. Geotechnical Engineering World, 2007, 10 (10): 34-37.
- [13] QI JI-LIN, MA WEI, SONG CHUN-XIA. Influence of freeze-thaw on engineering properties of a silty soil [J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53 (3): 397-404.
- [14] BING HUI, HE PING. Frost heave and dry density changes during cyclic freeze-thaw of a silty clay [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2009, 20 (1): 65-70.
- [15] QI JI-LIN, PIETER A VERMEER, CHENG GUO-DONG. Review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2006, 17 (3): 245-252.

(编辑 胡英奎)