

DOI: 10.11779/CJGE201708004

非饱和粉质黏土冻结温度和冻结变形特性试验研究

刘振亚¹, 刘建坤¹, 李 旭^{*1, 2}, 房建宏²

(1. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 多年冻土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室青海研究观测基地,
西宁 青海 810001)

摘要: 为掌握冻土冻结变形规律, 揭示冻结变形机理, 采用自行研制的温控体变仪精确测量不同饱和度、孔隙比土样的冻结变形, 为计算冻土的体积含冰量, 对非饱和粉质黏土冻结温度进行了测量。室内试验结果及其数据分析表明: ①非饱和粉质黏土冻结温度(冰点)主要由土样初始基质吸力决定, 基质吸力越大, 冻结温度越低。②非饱和粉质黏土冻结变形随饱和度变化存在两种截然不同的机制, 饱和度较低时, 冰水相变影响较小, 土体呈冻缩特征; 饱和度较高时, 冰水相变占主导作用, 导致土体结构破坏, 呈冻胀特征。③非饱和粉质黏土冻结体应变与土体体积含冰量和初始孔隙比具有良好的经验关系, 可以基于体积含冰量和初始孔隙比预测土体冻结体应变, 其中体积含冰量由土体冻结温度、温度、饱和度、干密度计算得到。

关键词: 非饱和粉质黏土; 冻结温度; 冻胀; 冻缩; 冻融循环

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)08-1381-07

作者简介: 刘振亚(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事冻土路基变形等的相关研究工作。E-mail: zhya_liu@163.com。

Experimental study on freezing point and deformation characteristics of unsaturated silty clay subjected to freeze-thaw cycles

LIU Zhen-ya¹, LIU Jian-kun¹, LI Xu^{1,2}, FANG Jian-hong²

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Qinghai Research and Observation Base, Key Laboratory of Highway

Construction & Maintenance Technology in Permafrost Regions, Ministry of Transport, Xining 810001, China)

Abstract: To obtain a predictive model of freezing deformation, three-dimension deformational tests are carried out to study the deformation characteristics of samples with various degrees of saturation and void ratios. To obtain the ice content in frozen soils, the freezing points of soils are also measured. The test results demonstrate that: (1) The freezing point of soils is mainly dependent on the initial matric suction of soils. (2) There are two different deformation phenomena for soils after being frozen: one is the frozen shrinkage if the degree of saturation of soils is low, the other is the frozen expansion if the degree of saturation is high. (3) The volumetric strains of soils after being frozen have a linear empirical relation with the ratio of volumetric ice content to initial void ratio of soils, where the volumetric ice content of soils can be calculated by the degree of saturation, freezing point, temperature and dry density of soils.

Key words: unsaturated silty clay; freezing point; frost heave; frozen shrinkage; freeze-thaw cycles

0 引言

冻土是由土颗粒、孔隙气、孔隙水和孔隙冰所组成的四相体系^[1]。土体体积会随着土体冻结状态的改变而发生较大的变化, 这是冻土病害滋生的主要原因之一。土体冻结变形由多种因素共同作用, 不仅与其颗粒级配、土壤盐分有关, 还深受土体的密度, 饱和度、冻结温度、地下水补给等状态和环境因素的影响^[2]。一般来说, 土体冻胀是由于土体含冰量的增加所引起的, 其主要原因在于: 一方面水结冰相变会撑大土壤孔隙体积, 导致的土体结构破坏; 另一方面冰水相变后, 孔隙水会向冻结锋面迁移聚集并冻结, 进一步增大孔

隙冰的体积, 甚至形成聚冰层, 导致原土体结构的破坏和体积膨胀。齐吉琳等^[3]和赵学文^[4]研究发现, 土体体积的变化并不是简单的冻胀融沉, 也会出现冻缩融胀的现象, 这与土体初始孔隙比及饱和度有关。齐吉琳等^[3]发现冻土存在低密度土被压密, 高密度土密度减小的现象。何平等^[5]也认为含水率是影响冻土体

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479001, 41471052); 中央高校基本科研业务费专项项目(2014JBZ013); 北京市自然科学基金项目(8152024)

收稿日期: 2017-01-20

*通讯作者(E-mail: ceXuLi2012@163.com)

变的重要指标。吴礼舟等^[6]研究了非饱和土的冻结体变规律,指出相同含水率情况下,干密度大的土体冻胀量大,而饱和土体干密度越大,冻结变形越小;其原因可能是对于非饱和土来说,含水率相同时,干密度越大土体饱和度越高所引起的,而饱和土干密度越大,土体含水率越低。

自 Everett^[7]提出第一冻胀理论后,许多学者对水分迁移作用下土体的冻胀机理进行了详细的研究,尤其是针对冻土水分迁移机理,水分聚集、冰透镜生长作用下的冻胀机理和模型,以及水热力耦合作用进行了研究。

冻土单元体冻结变形本构模型和水分迁移聚集、冰透镜生长模型是进行冻结变形本构模型冻土冻结变形数值模拟的两个关键问题。然而目前土体冻结变形规律多着重于水分迁移,即考虑在水分迁移作用下,土体的最终冻结变形情况^[8-10],针对冻土单元体的冻结变形的研究较少,缺少成熟的冻土单元体冻结变形本构模型。在补水条件或者水分迁移作用下,土体内孔隙水、孔隙含冰量、冻胀量都是不均匀的。因此,这些试验数据无法直接用于冻土单元冻结变形本构模型的建立。不补水条件下的各向等温冻结变形试验能够减小水分迁移的影响,获得相对均质的冻胀单元土体,有助于建立较精确的冻土冻结变形本构模型。本文通过室内不补水条件下各向等温冻结变形试验研究不同饱和度和孔隙比条件下的非饱和粉质黏土冻结变形规律,结合试验数据分析非饱和状态下土体的原位冻胀机理,并通过试验数据回归,建立非饱和土冻结变形预测模型。

1 土样及试验设计

1.1 土样及其基本物理性质

试验土样取自青海省橡皮山国道 214 沿线,土样的基本性质:最大干密度=1.877 g/cm³,最优含水率为13.2%,液限=31.2%,塑限=18.3%,颗粒比重=2.72,粉粒含量=38.2%,黏粒含量=25.1%。该土样为低液限粉质黏土。击实试验的结果表明,该土样的最大干密度为 1.877 g/cm³,最优含水量为 13.2%^[11]。

表 1 试验方案

Table 1 Test schemes

试验类型	孔隙比	饱和度/%	冻融循环	试验说明
冻结温度试验	1.0,0.8,	0.4,0.5,0.6,	—	保持控温室 1℃持续 12 h,然后降温到-6℃,降温速率为 0.5℃/h。
	0.6,0.5	0.7,0.8,0.9		
三维等温冻结变形试验	1.0,0.8,	0.4,0.5,0.6,	1,2,3,4,	冻结时从 10℃降到-10℃,降温速率为 0.1℃/10min;融化条件和冻结条件相反。
	0.6,0.5	0.7,0.8,0.9	5,6,7,8	
土水特征曲线试验	1.0,0.8,	0.4,0.5,0.6,	—	采用 Whatman No.42 滤纸进行
	0.6,0.5	0.7,0.8,0.9		

1.2 试验方案

为研究饱和度、初始孔隙比对粉质黏土的冻结变形的影响,室内冻结变形试验采用的孔隙比 e_0 为 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 试验采用的饱和度 S_r 为 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 共 6 个水平,共采用 24 个试样进行试验,试验方案见表 1。

为了计算土体当中孔隙冰含量,还需要测量土体冻结温度(冰点),冻结温度试验土样和冻结变形试验土样对应,同样为 24 个试样。

为了研究冻结温度的主要控制因素,还采用滤纸法^[12]测量了该土体的土水特征曲线,实测土水特征曲线及 VG 模型拟合结果如图 1 所示。

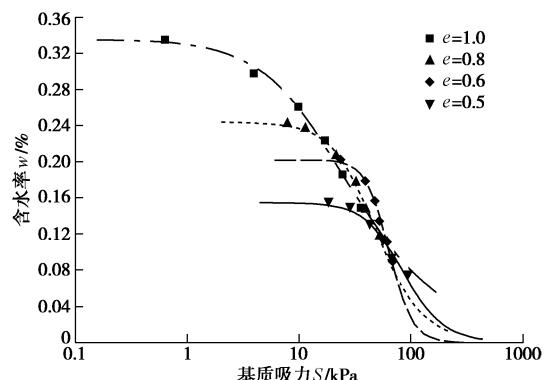


图 1 实测与 VG 模型拟合基质吸力曲线

Fig. 1 Experimental data and VG model-fitted SWCC curves

1.3 试样制备方法

本试验需使用不同压实度和饱和度的土样,具体制样步骤如下:①配置不同含水率的粉末状土,并养护 24 h,让土样含水率分布均匀;②通过静力压实,分层压缩得到给定干密度的土样,其中冻结变形试验是用 4 cm×Φ6.18 cm 的环刀土样,冻结温度试验采用 8 cm×Φ3.91 cm 的三瓣膜土样。

1.4 冻结温度试验方法

土样在冻结过程中,孔隙水并不会全部转化成冰,未冻水是一直存在的,且未冻水含量与冻土温度和冻结温度(冰点)有关^[13]。因此,有必要测量土样的冻结温度(冰点),并用于计算冻土中的未冻水含量和孔隙冰含量。

在冻结温度(冰点)测量试验中, 温度传感器采用 PT100 型, 其测量精度为 $(0.15+0.002|t|)^\circ\text{C}$, 其中 t 为测量温度, 即在本试验的测量范围内约为 $\pm 0.19^\circ\text{C}$ 。控温室采用 thermo fisher scientific 恒温冷浴机进行温度控制, 该冷浴机的温度控制精度是 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 对于本文的控温室其制冷量实测具有 $2^\circ\text{C}/\text{h}$ 的制冷能力, 因此本文调节冷浴机的控温系统, 可以控制其降温速率在 $0.5^\circ\text{C}/\text{h}$, 当试样内部温度达到给定降温温度后, 再手动将冷浴机目标温度调节到下一级温度。试样用塑料薄膜包裹完毕, 将温度传感器插入土样一定深度, 放置于恒温室内, 连接好温度传感器和数采仪, 如图 2 所示。首先将温度调整到 1°C , 当土样温度稳定, 内部温度一致后, 将控温室温度设定为 -6°C , 采用 $0.5^\circ\text{C}/\text{h}$ 的速率降温。降温过程中, 利用数据采集仪记录数据, 进而基于温度-时间曲线确定该土样的冰点^[14]。



图 2 控温箱及冻结温度测量

Fig. 2 Temperature-controlled apparatus and measurement of freezing point

1.5 不补水条件下各向等温冻结变形试验方法

本研究冻结变形试验在不补水条件下进行, 试验仪器如图 3 所示, 为自行研制的三维各向等温体变测量仪。如图 3 所示, 该系统采用双腔设计; 将试样置于内腔中, 并包裹橡皮膜, 注入冷冻液直至量筒读数合适为止; 外腔连接 Thermo Fisher 恒温冷浴机控制控温室内的环境温度, 温度控制精度为 0.1°C 。

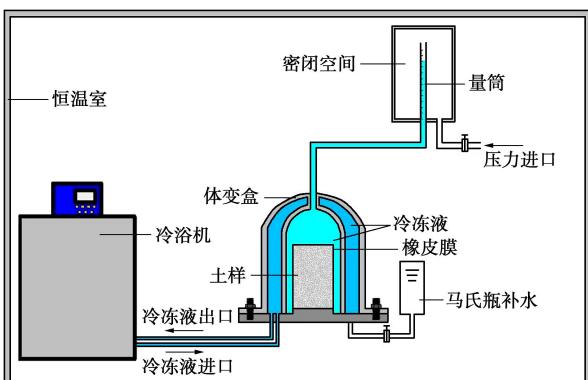


图 3 三维各向等温体变测量仪

Fig. 3 Isotropic temperature control device with accurate volumetric measurement

如图 3 所示, 体变盒中采用冷冻液降温, 试样四周和顶面温度边界条件相同, 进行三维各向等温冻结变形试验。由于当温度降低至 -10°C 以后, 土体的未冻水含量变化趋于平缓^[15], 因此本文选取 -10°C 为冻土最终温度, 并维持该温度直至土体体积不再发生变化。该系统通过压力室内冷冻液体积变化(由和压力室相连的玻璃管读出)精确测量土样冻结融化过程中的体积变形。

为消除体变盒内腔中冷冻液热胀冷缩对土样变形测量结果的影响, 对实测体积变形进行了内腔冷冻液的热胀冷缩量的修正, 具体热胀冷缩量为

$$\Delta V = cV\Delta T \quad (1)$$

式中 c 为该冷冻液在 $-6^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ 区间的平均热胀冷缩系数, 本研究中所选冷冻液为 60% 乙二醇溶液, c 值约为 0.98578, 和 ASHARE 基础手册 2009^[16] 结果一致; V 为内腔冷冻液体积; ΔT 为两次体积变形测量时的温度差值。

本研究中的冻结变形试验, 均在大气压进行, 未考虑外界荷载对冻结变形的影响, 无需对实测体积变形进行压力修正。

本文冻结变形试验尺寸为直径 6.18 cm , 高 4 cm , 不算太大, 且冻结过程中采用三维冻结, 降温速率适中, 冻结过程中不补水, 因此很大程度上降低了水分迁移的影响, 降低了水分迁移导致的冻结土样水分不均匀性。可以认为在本文试验中, 水分迁移对冻结变形的影响是有限的, 本文的试验可以看作一个单元体试验。

2 非饱和粉质黏土冻结温度(冰点)数据

分析

冻结温度(冰点)试验数据表明, 该非饱和粉质黏土冻结温度和土样含水率存在较规律的关系, 如图 4 所示。由图可知, 非饱和粉质黏土的冻结温度主要由初始含水率决定, 初始含水率越大, 冻结温度越高(趋近于 0°C)。

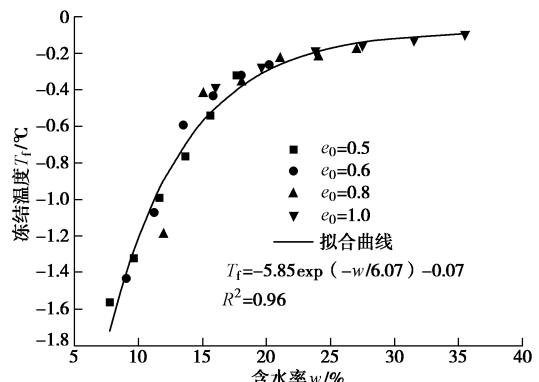


图 4 含水率与冻结温度(冰点)关系曲线

Fig. 4 Water content-freezing point curves

图 4 试验结果和文献中的结果一致: 周家作等^[14]和张婷等^[17]均发现冻结温度随着初始含水率升高而升高的现象。不同类型土体冻结温度和土体含水率之间的关系见图 5。

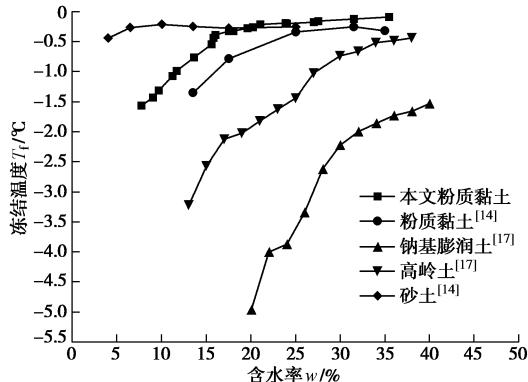


图 5 不同类型土体冻结温度曲线

Fig. 5 Freezing points of soils

由图 5 可知, 不同类型土体冻结温度和含水率之间的关系不同。按照 Gibbs-Thomson^[18]方程和开尔文公式^[19], 土体冻结温度和土体基质吸力存在与土体类型无关的唯一关系,

$$T_f = -\frac{\sigma T_m}{2T_s \rho_i L_f \cos \alpha} S \quad (2)$$

式中 S 为土体基质吸力; T_m 为标准大气压下纯水的冻结温度 (273.15 K); T_f 为土体孔隙水的冻结温度; T_s 是水的表面张力, 0°C 时, 其取值为 75.64×10^{-3} N/m; ρ_i 为孔隙冰密度, 取 0.9×10^3 kg/m³; α 为孔隙毛细水表面水膜的接触角, 一般在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 之间; L_f 为单位质量水冻结释放的潜热, 取值为 334.5 kJ/kg。 σ 为冰水表面自由能, Hardy 等^[20]给出了纯水的冰水界面自由能 σ 的取值范围为 $11.6 \times 10^{-3} \sim 23.8 \times 10^{-3}$ J/m²。将各项常数代入式 (2) 可得

$$T_f \approx aS \quad (3)$$

式中, a 为一个常数, 与冰水界面自由能的取值和孔隙毛细水表面水膜的接触角等因素有关, 其值约为 $-0.069 \sim -0.015$ 。

结合图 4 和在脱湿过程中测得的非饱和粉质黏土的土水特征曲线 (图 1), 可得该非饱和粉质黏土的冻结温度和基质吸力之间的关系曲线, 如图 6 所示。对于本次试验中的粉质黏土, 基质吸力和冻结温度之间的关系和式 (3) 的理论关系接近, a 值约为 -0.015 。但由于实际土样情况复杂, 与理论结果并不完全一致。

3 各向等温冻结变形试验数据分析

图 7 为多个冻融循环过程中, 土样孔隙比变化曲线。由图 7 可知, 非饱和粉质黏土冻结变形由如下特征:

(1) 初始饱和度较低时 ($S_{r0}=0.4, 0.5, 0.6$), 冰水相变影响较小, 土体呈冻缩特征。

(2) 初始饱和度较高 ($S_{r0}=0.8, 0.9$) 时, 冰水相变占主导作用, 导致土体结构破坏, 呈冻胀特征。

(3) 对于初始孔隙比为 1.0, 0.8, 0.6 的土体在 $S_{r0}=0.7$ 时均表现为冻缩融胀, 而初始孔隙比为 0.5 的土体在 $S_{r0}=0.7$ 时均表现为冻胀融沉。

饱和度较低土体冻缩原因可能是: 冻结之后, 土体基质吸力有非常大的增加, 孔隙水毛细吸力提高所产生的毛细黏聚作用和孔隙冰胶结黏聚作用会引起土体有效应力的增加, 从而导致土体体积收缩。而此时由于土体中的含冰量不高, 由冰水相变导致的体积增加并不能填满土样的孔隙, 不会造成土体孔隙结构的破坏, 引起土体体积的膨胀。因此, 饱和度较低的土样都有冻缩融胀的趋势。而初始孔隙比越低, 这种冻缩融沉影响越弱, 孔隙比在冻结时的降低也越不明显。

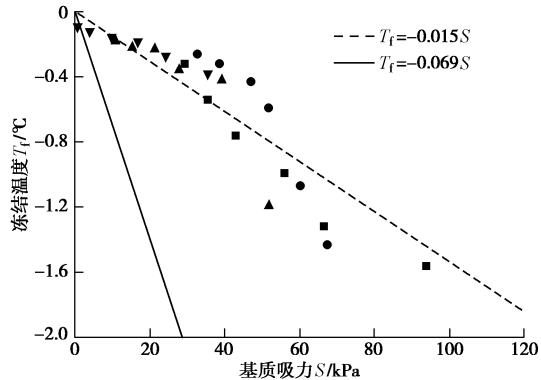
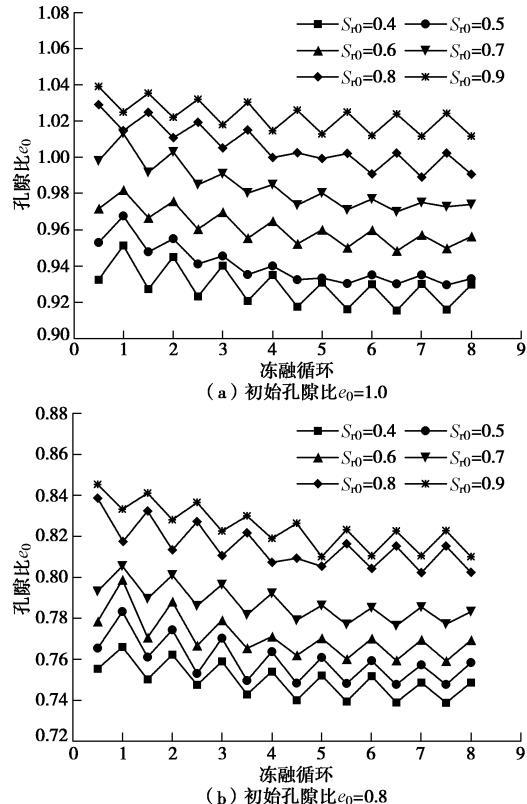


图 6 基质吸力与冻结温度关系曲线

Fig. 6 Matric suction-freezing point curves



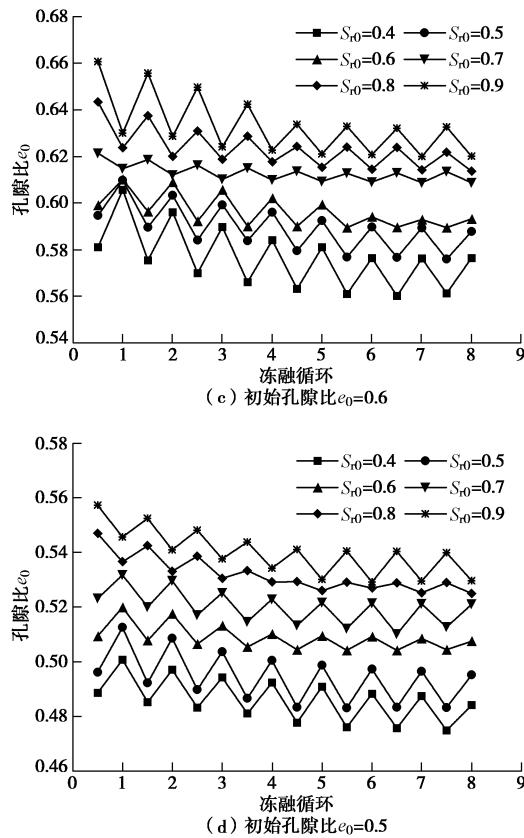


图 7 不同饱和度和初始孔隙比土体冻融循环中孔隙比变化曲线

Fig. 7 Variation of ratio with different degrees of saturation and initial void ratio during freeze-thaw cycles

饱和度较高土体冻胀原因可能是：当饱和度较高时，孔隙冰增多，大量孔隙冰的产生撑大了原有的土体孔隙，破坏了土体孔隙结构，引起土体体积的增加。而此时虽然基质吸力增加，毛细黏聚和冰胶结黏聚的作用并不明显，土样宏观体积变形表现出冻胀融沉。由图 7 的试验数据可知，土体在经历 5 次或者 6 次冻融循环以后土壤孔隙比基本有趋于稳定的趋势。在冻融循环的过程中，土样孔隙比变化与其冻结状态有关。如果土样有冻胀融沉现象，则孔隙比会随着冻融循环次数增加而逐渐增大并趋于稳定。如果土样具有冻缩融胀特征冻胀现象，则土样孔隙比会随着冻融循环次数增加而逐渐减小并趋于稳定。

取第 5 次冻结状态的试验数据，进行土体体应变分析。在体应变计算中，初始体积 V_0 取为上一个冻融循环稳定的土样体积。在本文以后讨论中，取体应变膨胀为正，压缩为负。第 5 次冻融循环过程中的体应变 ε_v 与初始饱和度 S_{r0} 关系曲线如图 8 所示。

4 冻融变形机理及模型

基于土样冰点和冻土温度，能够对冻土中的未冻水含量进行计算，本研究采用徐学祖等^[13]的经验模型：

$$w_u = w_0 \left(\frac{T}{T_f} \right)^b \quad (T < T_f) \quad . \quad (4)$$

式中， T_f 为土体冰点 (°C)； w_0 为土样初始含水率； w_u 为土样在温度 T 下的未冻水含量； b 为一个与土类和含盐量有关的经验系数，对于非饱和粉质黏土， b 值约为 0.51^[13]。

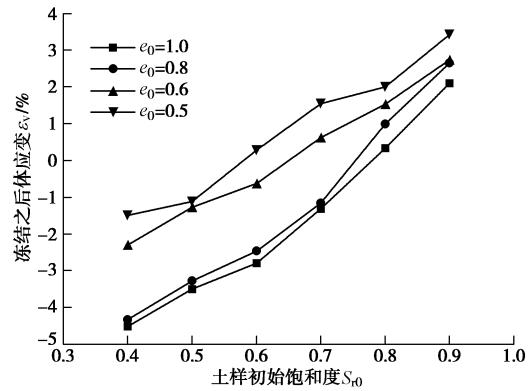


图 8 饱和度和体应变关系曲线

Fig. 8 Degree of saturation-volumetric deformation curves

基于式 (4) 的未冻水含量，考虑到水变成冰，体积变成原来的 1.1 倍，可以得到体积含冰量的计算公式：

$$\theta_i = \frac{S_r(G_s - \rho_d)}{G_s \left[1.1 \left(\frac{T}{T_f} \right)^b - 1.1 \right] + G_s} \quad (T < T_f) \quad , \quad (5)$$

式中， S_r 为土样饱和度， G_s 为土颗粒比重， ρ_d 为土样干密度， T 为土样温度。

依据图 8 的试验结果，绘制不同初始孔隙比条件下体积含冰量与土体冻结变形之间的关系，如图 9 所示。由图 9 可知，土体体应变随着体积含冰量的增加而增加，随着初始孔隙比 e_0 的减小而增加。

进一步的回归分析，发现体应变 ε_v 和体积含冰量和初始孔隙比 e_0 之间的比值存在线性经验关系，如图 10 所示。

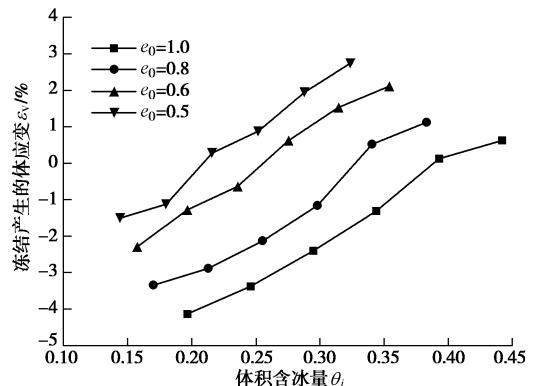


图 9 体积含冰量与体变关系曲线

Fig. 9 Volumetric ice content-volumetric deformation curves

由图 10 可知, 非饱和粉质黏土冻结变形存在以下关系

$$\varepsilon_v = k \frac{\theta_i}{e_0} + c \quad , \quad (6)$$

式中, k 与 c 为和土体类型有关的经验系数, 对于本研究中的低液限粉质黏土, $k \approx 0.15$, $c \approx -0.066$ 。

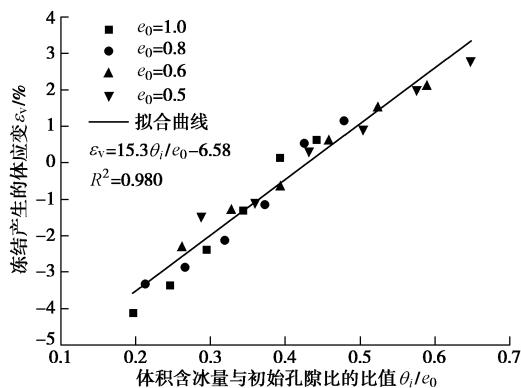


图 10 体积含冰量、初始孔隙比与体应变关系曲线

Fig. 10 Relationship among volumetric ice content, initial void ratio and volumetric deformation

将式(6)的冻结变形预测公式应用于程培峰等^[21]的粉质黏土冻结变形试验数据分析, 分析结果如图 11 所示。采用式(6)的冻结变形公式对图 11 中的数据进行拟合, 发现该粉质黏土 $k \approx 0.18$, $c \approx -0.09$, 而拟合优度为 0.93, 说明该公式具有良好的适应性。因此, 可以认为体积含冰量与初始孔隙比之间的比值是建立冻胀本构模型较合适的物理量, 它综合反映了压实度, 冻土温度, 初始含水率, 冻结温度等多种因素的影响。

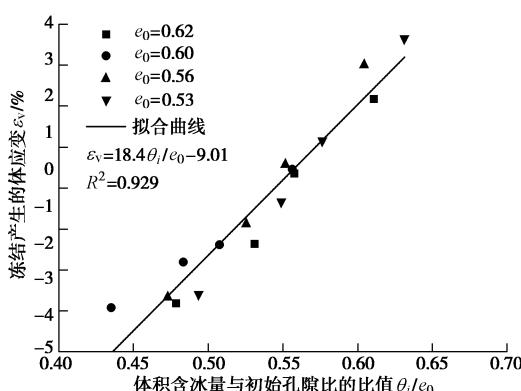


图 11 程培峰等^[21]的粉质黏土冻结体应变关系曲线

Fig. 11 Volumetric deformation of a silty clay after being frozen reported by Cheng et al.^[21]

5 结 论

本文针对非饱和粉质黏土冻结变形特性展开室内

试验研究, 结合冻结温度估算冻土冰含量用于试验数据分析, 研究结果表明:

(1) 非饱和粉质黏土冻结温度(冰点)在-1.6~0℃, 随着土样初始含水率升高而提高, 而土体冰点和土样初始基质吸力之间近似呈线性关系。

(2) 随着孔隙比的减小, 土体冻结前后体积变形量减小, 即较密实的土体冻结变形量较小。冻土体变趋势经过 5 到 6 次以上循环后, 趋于稳定。但不同的孔隙比试样没有出现趋于同一稳定孔隙比的趋势。

(3) 非饱和粉质黏土冻结过程中, 由于毛细黏聚和冰胶结黏聚增加, 会引起土体有效应力升高, 从而导致饱和度较低土体存在冻缩现象。当饱和度较高时, 冰水相变导致的孔隙结构破坏, 引起土体体积增大, 变形出冻胀特征。

(4) 回归分析表明, 土体冻结体应变和土体体积含冰量和初始孔隙比之间的比值具有良好的线性关系可以基于体积含冰量和初始孔隙比预测土体冻结体应变, 其中体积含冰量由土体冻结温度、温度、饱和度、孔隙比计算得到。

参 考 文 献:

- [1] 齐吉琳, 马 巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 133~143. (QI Ji-lin, MA Wei. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 133~143. (in Chinese))
- [2] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000. (ZHOU You-wu, GUO Dong-xin, QIU Guo-qing. Geocryology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese))
- [3] 齐吉琳, 马 巍. 冻融作用对超固结土强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2082~2086. (QI Ji-lin, MA Wei. Influence of freezing-thawing on strength of overconsolidated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2082~2086. (in Chinese))
- [4] 赵学文. 冻胀融沉试验方法及黏土冻胀特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014. (ZHAO Xue-wen. The experimental technique for studying the soil deformation in the freezing-thawing cycles and the freezing induced deformation feature of clay[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese))
- [5] 何 平, 程国栋, 杨成松, 等. 非饱和冻土的强度分析[J]. 冰川冻土, 2002(3): 260~263. (HE Ping, CHENG Guo-dong, YANG Cheng-song, et al. Analysis of strength of unsaturated frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002(3): 260~263. (in Chinese))

- [6] 吴礼舟, 许 强, 黄润秋. 非饱和黏土的冻胀融沉过程分析[J]. 岩土力学, 2011(4): 1025 - 1028. (WU Li-zhou, XU Qiang, HUANG Run-qiu. Analysis of freezing-thawing test process of unsaturated clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011(4): 1025 - 1028. (in Chinese))
- [7] EVERETT D H. The thermodynamics of frost damage to porous solids[J]. Transactions of the Faraday Society, 1961, 57(5): 1541 - 1551.
- [8] MILLER R D, O' NEILL K. Exploration of a rigid ice model of frost heave[J]. WaterResources Research, 1985, 3(21): 281 - 296.
- [9] NIXON J F. Discrete ice lens theory for frost heave in soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991(28): 843 - 859.
- [10] 曾桂军, 张明义, 李振萍, 等. 饱和正冻土水分迁移及冻胀模型研究[J]. 岩土力学, 2015(4): 1085 - 1092. (ZENG Gui-jun, ZHANG Ming-yi, LI Zhen-ping, et al. Study of moisture migration and frost heave model of freezing saturated soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015(4): 1085 - 1092. (in Chinese))
- [11] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 2007. (JTG E40—2007 Test methods of soil for highway engineering[S]. 2007. (in Chinese))
- [12] 陈振新, 孙德安. 非饱和上海软土的土-水和变形特性[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2012(1): 98 - 103. (CHEN Zhen-xin, SUN De-an. Soil-water and deformation characteristics of unsaturated shanghai soft clays[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2012(1): 98 - 103. (in Chinese))
- [13] 徐学祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991. (XU Xue-zu, DENG You-sheng. Experimental study on water migration in freezing and frozen soils[M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese))
- [14] 周家作, 谭 龙, 韦昌富, 等. 土的冻结温度与过冷温度试验研究[J]. 岩土力学, 2015(3): 777 - 785. (ZHOU Jia-zuo, TAN Long, WEI Chang-fu et al. Experimental research on freezing temperature and super-cooling temperature of soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015(3): 777 - 785. (in Chinese))
- [15] 谭 龙, 韦昌富, 田慧会, 等. 冻土未冻水含量的低场核磁共振试验研究[J]. 岩土力学, 2015(6): 1566 - 1572. (TAN Long, WEI Chang-fu, TIAN Hui-hui, et al. Experimental study of unfrozen water content of frozen soils by low-field nuclear magnetic resonance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015(6): 1566 - 1572. (in Chinese))
- [16] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Ashare handbook of fundamentals[S]. 2009.
- [17] 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. (ZHANG Ting. Study on artificial freezing soil's specialty of frost-heaving and thaw-settlement experimenation[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2004. (in Chinese))
- [18] WATANABE K, WAKE T. Hydraulic conductivity in frozen unsaturated soil[C]// The 9th International Conference on Permafrost. Fairbanks, 2008.
- [19] LU Ning, LIKOS W J. Unsaturated soil mechanics[M]. BeiJing: Higher Education Press, 2012.
- [20] HARDY S C, CORIELL S R. Morphological stability and the ice-water interfacial free energy[J]. Journal of Crystal Growth, 1968, 4(3): 569 - 573.
- [21] 程培峰, 尹传军. 季冻区粉质黏土冻胀特性分析[J]. 公路交通科技, 2014(1): 44 - 49. (CHENG Pei-feng, YI Chuan-jun. Analysis of frost heaving characteristics of silty clay in seasonal frozen region[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014(1): 44 - 49. (in Chinese))