

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.016

石灰改良土的土水特征曲线及其冻结特征曲线*

王叶娇¹, 王有为¹, 靳奉雨¹, 马田田^{2,3}

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071;
3. 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 土水特征曲线反映了非饱和土的持水特性, 与土体的水力特性及力学特性密切相关。土的冻结特征曲线表示土体中液态水的势能与含水率之间的关系, 也可以用来描述土体的持水特性。以黄土为研究对象, 利用低温恒温冷浴结合核磁共振系统(NMR)测得未处理黄土以及石灰改良土的冻结特征曲线, 根据冻结温度降低法计算出试验土样0℃时对应的土水特征曲线。另外, 采用滤纸法在0℃附近得到实测的土水特征曲线, 将这两结果进行对比分析, 并讨论了抽真空饱和过程对土样的土水特征曲线的影响。通过滤纸法测得的土水特征曲线与非饱和土样的冻结特征曲线具有较好的一致性, 两者之间存在差异很小。土样在饱和状态下利用冻结温度降低法得到的孔隙水总势能 ψ 与质量含水率 ω 关系曲线位于非饱和土样结果的下方, 这可能是因为饱和土样在冻结过程中会发生冻胀现象, 土样结构被破坏, 孔隙增大, 土样持水性能下降。

关键词: 土水特征曲线; 冻结特征曲线; 非饱和土; 核磁共振技术

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)06-0967-07

Soil-water Characteristic Curve and Freezing Characteristic Curve of Lime Improved Soil

WANG Yejiào¹, WANG Youwei¹, JIN Fengyu¹, MA Tiantian^{2,3}

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;
2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Wuhan 430071, China;
3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The soil-water characteristic curve (SWCC) indicates the water retention properties of unsaturated soil, which is strongly related to soil hydro-mechanical behavior. The freezing characteristic curve of the soil represents the relationship between the potential energy of the liquid water in the soil and the water content. It can also represent the water retention behavior of unsaturated soil. In this study, loess was selected as the research object. The freezing characteristic curves of untreated loess and lime-treated soil were obtained from a cryogenic thermostat cold bath and nuclear magnetic resonance (NMR) system, and then the soil-water characteristic curve at 0℃ was deduced by applying the freezing temperature reduction method. In addition, the measured soil-water characteristic curve was obtained by using the filter paper method at around 0℃. The two results were compared and analyzed, and the influence of the vacuum saturation process on the soil-water characteristic curve of the soil

* 收稿日期:2020-05-05;修回日期:2020-09-11

基金项目:国家自然科学基金项目(41702306)资助

作者简介:王叶娇(1988-),女,讲师,博士。主要从事非饱和土力学方面的研究。Email:yejiaowang@shu.edu.cn

sample was discussed. The soil-water characteristic curve measured by the filter paper method has a good consistency with the freezing characteristic curve of the unsaturated soil samples. The deduced SWCC by NMR test of saturated sample was settled below that of unsaturated soil sample. This can be due to frost heaving during the freezing process inside the saturated soil sample. More large pores were formed during this process because more soil structures were destroyed. And it led to a decreasing water retention capacity.

Keywords: Soil-water characteristic curve; freezing characteristic curve; unsaturated soil; NMR

引言

非饱和土的持水特性是指非饱和土内吸力与含水量(重力含水率、体积含水率或饱和度)之间的关系,反映这种关系的本构函数曲线被称为土水特征曲线(SWCC)^[1]。土水特征曲线的准确量测是预测非饱和土强度、渗透性以及本构关系的重要基础^[2]。随着“一带一路”倡议的实施,在相关工程设计和建设过程中,非饱和特殊土的工程问题日益增加^[3]。黄土是广泛分布于我国西北地区的一种特殊土,其特殊工程性质会给工程建设带来诸如滑坡、地基湿陷等严重问题。黄土路基处理一直是西北地区的重要课题,工程中广泛采用添加石灰材料的方法来改善路基等,位于甘肃省定西市通渭至榜罗革命遗址公路采用3%的石灰改性黄土(有效CaO含量为65%)来避免路床承载力不足、路基不均匀沉降等问题。从颗粒组成的角度来看,黄土属于细粒土,但是黄土又具有大孔隙、弱胶结的结构特点,使其比一般细粒土结构性更为复杂,对持水性能的影响也更大,为了准确预测西北地区土体的强度、变形及渗透性等性质,对黄土及其改良土的持水特性进行研究显得尤其重要。

通常在实验室内主要通过滤纸法、压力板法和蒸汽平衡法等方法来量测非饱和土的土水特征曲线^[4-6]。这些传统方法通常测量时程较长且较为繁琐。冻结特征曲线表示冻结温度和未冻水含量之间的关系,也可以作为土体持水特性的表征^[7]。由于冻结特征曲线测量精确度高且速度快,一些学者利用两者的相似性通过冻结特征曲线快速精确地得到土水特征曲线。E.J.A.Spaans等^[8]研究了SWCC和SFC的关系,得出两者之间具有很好的一致性;R.W.R.Koopmans等^[9]在较大的温度范围内,同时测量土样的冻结温度和未冻水含量,利用Clapeyron方程通过土样温度计算冻土的水势,在实验中

确定冻结特性,得出冻土的冻结特性与水分特性有关;M.Bitteli等^[10]设计了一种仪器来测量多孔介质20~0℃的冻结特征曲线,将得到的冻结特征曲线与蒸气压法进行了比较,结果表明两者之间显示出良好的一致性,并且整个特征曲线可以在24小时内确定;马田田等^[7]采用低温恒温冷浴结合核磁共振系统(NMR)获得粉土和黏土的冻结特征曲线,并与传统方法得到的土水特征曲线进行比较,指出两种方法测得的特征曲线存在的差异主要由于冰和气体使得土颗粒对孔隙水的相互作用不同导致。然而,冻结温度降低法计算出的是0℃时的势能与含水率之间的关系^[7],多数研究并没有将其直接与0℃时得到的土水特征曲线进行对比。另外,采用冻结温度降低法通常将土样进行抽真空饱和过程,该过程是否影响非饱和土的土水特征曲线尚不清楚。因此,对于冻结特征曲线与土水特征曲线之间的关系还有待进一步研究。

本文利用低温恒温冷浴结合核磁共振系统(NMR)测得了未处理黄土以及石灰改良土的冻结特征曲线,根据冻结温度降低法计算得出0℃时的土水特征曲线。另外,采用滤纸法在0℃附近得到实测的土水特征曲线,将这两结果进行对比分析,并讨论了抽真空饱和过程对土样的土水特征曲线的影响。

1 试验材料

本试验所用土样取自甘肃兰州的Q4黄土,相关的基本物理力学指标见表1^[11]。土样取回后经室温风干,碾碎后进行土样重塑。

本试验制备了未处理土样以及石灰处理土样。土样的含水率取为17%,干密度为1.6 g/cm³。参数选取参考文献[11]。石灰处理土样采用生石灰(CaO)进行处理,石灰掺量为2%,养护龄期分别为28 d与90 d。

表1 黄土的基本物理力学指标^[11]

Table 1 Basic physical indexes of loess

物性指标	土粒比重 G_s	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_p/\%$	液性指数 $I_p/\%$	黏粒含量/ $\%$	最大干密度/ $(g \cdot cm^{-3})$
数值	2.68	27.4	15.9	11.5	20.1	1.63

称取一定质量的风干土颗粒,与2%的生石灰粉末充分混合,喷洒蒸馏水至目标含水量并充分拌合。用保鲜袋将拌好后的土样密封保存,静置12 h,使得土样中的水分分布均匀。采用静态压实方法严格控制土样的最终干密度,土样高度为10 mm、直径为61.8 mm。取出后密封养护至不同龄期(28 d或90 d)。

2 滤纸法测定土水特征曲线

采用滤纸法测定3种土样在0℃时的土水特征曲线。首先将土样放置在密封盒中,土样与滤纸间放置一层塑料纱网,使土样不直接接触滤纸,然后扣紧密封盒放入恒温恒湿箱中,为了不出现负温,避免结冰现象,将试验温度设置为0.5℃,稳定后温度波动 $\leq \pm 0.1$ ℃。静置7 d,使滤纸中水分平衡。然后,取出密封盒,按照ASTM D5298^[12]方法测量滤纸含水率,并测量土样水气平衡后的实际质量含水率,从而得到0℃附近的土水特征曲线^[11],如图1所示。

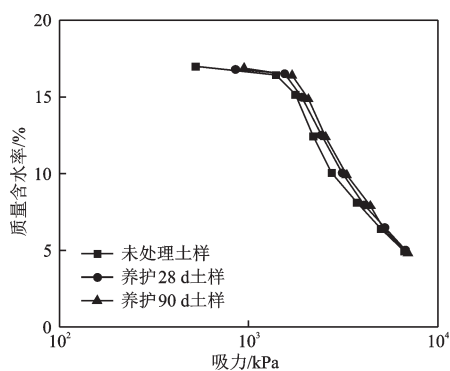


图1 0℃下的土水特征曲线

Fig.1 Soil-water characteristic curves at 0℃

从图1可以看出,当土样的质量含水率 $\omega=12\%$ 时,未处理土样、养护28 d土样和养护90 d土样的吸力值分别为:2 190.4、2 416.6、2 550.9 kPa,分别增长10.32%和16.46%;当土样的质量含水率 $\omega=8\%$ 时,未处理土样、养护28 d土样和养护90 d土样的吸力值分别为:3 725.6、4 081.0、4 401.5 kPa,分别增长9.54%、18.14%。试验结果说明在添

加石灰材料后,黄土的持水能力明显增加,并在养护期间不断增加,这主要与石灰的水化反应有关,同时水化反应的产物与黄土中的活性氧化硅、活性氧化铝等成分发生反应,生成水化硅酸钙(C-S-H)和水化铝酸钙(C-A-H)等产物,进一步提升改良黄土的持水能力。

3 冻结特征曲线

3.1 试验仪器

本次试验仪器为苏州纽迈公司生产的PQ-001型低磁场核磁共振分析仪。设备永久磁体磁场强度为 (0.5 ± 0.08) T,磁体温度为32℃左右,仪器主频率为21.3 MHz。

3.2 理论基础

核磁共振试验(NMR)的原理如图2所示。质子群具有较大的自旋磁矩,在均匀磁场中会被磁化而定向排列,当对其施加一个干扰射频磁场后,质子群则会发生偏转,横向矢量增加^[13]。停止干扰射频磁场后,质子群的横向磁化矢量逐渐减弱,核磁共振分析器测量这一过程中核磁信号自由感应衰减(FID)曲线^[14]。相关研究及试验已验证,FID曲线的峰值点(第一个点)与土样所含质子数成正比^[15],因而土样的含水率可根据该峰值点来测定。

根据居里定律,当土样处于正温区内时,孔隙水的核磁信号强度随着温度的升高而线性降低,利用这种线性关系可采用正温区内核磁信号实测数据绘制顺磁回归线。由于NMR技术只能检测到土样中液态水的核磁信号,无法检测到固态水的核磁信号,所以当温度下降到孔隙水的冰点时,土样中部分孔隙水结成冰后,这部分水的核磁信号便不能被检测,导致FID峰值点数值明显下降,故而当某一实测数据值明显低于顺磁回归线的值时,便可反推温度已达孔隙水的冰点。现假设正温区的顺磁线性回归线可以应用于负温区,则某一负温 T 下土样的未冻水含量为^[16]:

$$\omega_T = \frac{a}{b} \omega \quad (1)$$

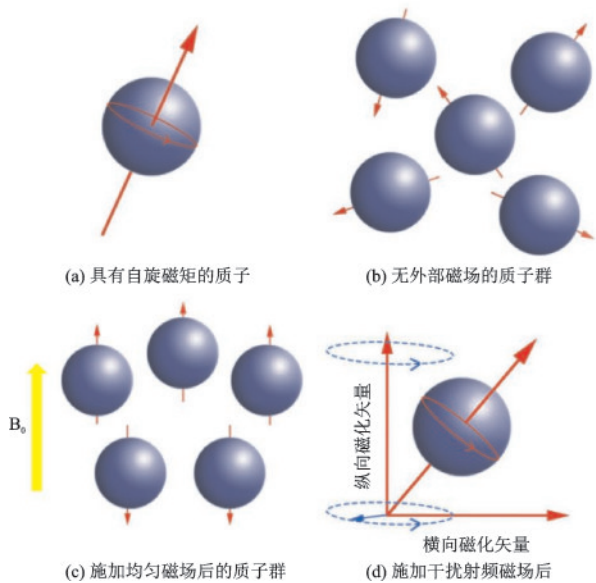


图2 核磁共振原理示意

Fig.2 Schematic of NMR

式中, ω_T 为土样的未冻水含量; a 为实测对应温度 T 时的 FID 峰值点; b 为顺磁线性回归线上温度 T 对应的 FID 峰值点; ω 为土样在正温区的含水率。

根据 E.J.A. Spaans 等^[8] 来计算孔隙水总势能, 为方便将冻结特征曲线与土水特征曲线进行对比, 公式两侧同乘水的密度 (1000 kg/m^3), 用压力势表示孔隙水总势能, 得到:

$$\Psi = -712380 \times \ln \frac{T}{T_0} + 5545 \times (T - T_0) - 3.14 \times (T^2 - T_0^2) \quad (2)$$

式中, Ψ 为未冻水的总势能, kPa; T 为某时刻土样温度, K; T_0 为相变点, 对于水来说 $T_0 = 273.15 \text{ K}$ 。

3.3 试验步骤

分别对非饱和土样以及经过抽真空饱和后的土样在不同温度下进行 NMR 试验, 具体试验步骤如下:

(1) 将土样切成小于 $10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的块状, 称量土样质量, 用保鲜膜将其包好放入密封袋, 尽可能地将袋内空气挤出。

(2) 将密封袋放入恒温冷浴箱中, 正温试验升温过程为 $0 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 5 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 10 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 15 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 20 \text{ }^\circ\text{C}$, 负温试验升温过程为 $-10 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow -7 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow -4 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow -3 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow -2 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow -1.5 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow -1 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow -0.5 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 。为保证土样内外温度一致和冻结平衡, 在负温区第一级温度 ($-10 \text{ }^\circ\text{C}$) 下恒温冷浴 24 h, 其他负温试验恒温冷浴 6 h, 正温试验恒温冷浴 4 h。采用热敏数显测温

装置实时测量土样温度, 以更加准确的测量温度。

(3) 将标准油样放入核磁共振仪试样管中, 寻找中心频率, 确定所需的脉冲宽度。

(4) 放入平行土样, 在电脑上点击脉冲序列 \rightarrow 硬脉冲 CPMG, 设置相应序列参数。除温度外, 该平行土样与试验土样均相同。

(5) 放入试验土样, 操作系统软件, 采集数据, 得到 FID 曲线。

(6) 设置温度, 重复操作 (4)~(6)。

(7) 假定试验土样在温度变化过程中含水率不变, 试验后采用烘干法测定土样的含水率。

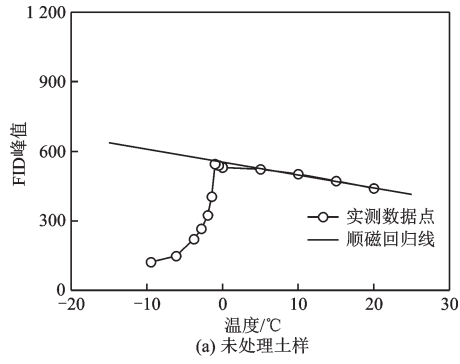
(8) 绘制土样的顺磁线性回归线, 计算得到不同温度下土样的未冻水含量, 用压力势表示孔隙水总势能, 绘制土样冻结特征曲线。

3.4 试验结果

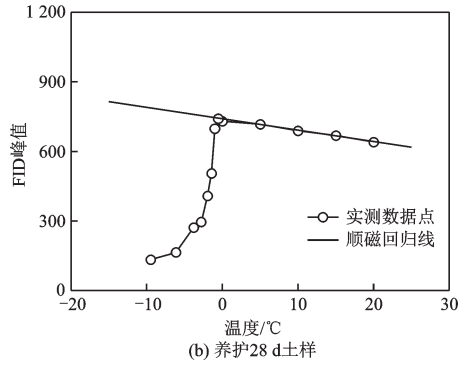
对非饱和土样和饱和土样进行核磁共振试验, 图 3 和图 4 分别为三种土样非饱和状态以及饱和状态时在不同温度时 ($-10 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$) 的实测 FID 峰值点以及对正温区数据进行拟合得到的顺磁回归线。试验所用土样非饱和状态以及饱和状态时的质量含水率见表 2。

从图 3 和图 4 中可以看出: ① 正温区内 FID 峰值随着温度升高而线性减小; ② 非饱和土样的 FID 峰值点在温度低于 $-1 \text{ }^\circ\text{C}$ 开始低于顺磁回归线, 而饱和土样的 FID 峰值点在温度低于 $-0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 后便明显低于顺磁回归线。说明非饱和土样孔隙水的冻结温度为 $-1 \text{ }^\circ\text{C}$, 而饱和土样中孔隙水的冻结温度为 $-0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。通过式 (1) 结合表 2 计算出对应每一级温度下的未冻水含量, 则可计算得到土样的冻结特征曲线, 如图 5 所示。

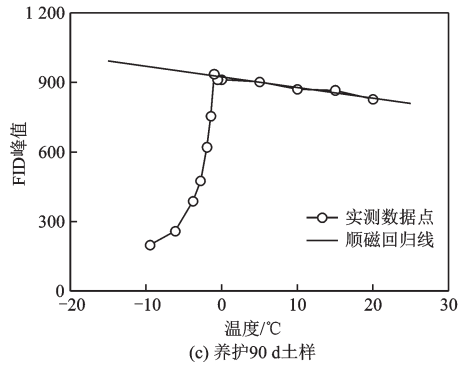
从图 5 中可以看出, 在同一冻结温度下饱和土样的未冻水含量低于非饱和土样, 且二者差值随冻结温度升高而增大。非饱和土样的 3 条曲线存在明显的差异。当温度为 $-1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 未处理土样、养护 28 d 土样和养护 90 d 土样的质量含水率分别为: 11.46% 、 12.15% 、 13.72% ; 当温度为 $-3.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 未处理土样、养护 28 d 土样和养护 90 d 土样的质量含水率分别为: 6.09% 、 6.49% 、 6.97% 。非饱和土样添加石灰材料后, 黄土的持水能力明显增加, 并在养护期间不断增加, 并且这一效应在含水率较高时更加明显, 这点与滤纸法所得出结论一致。但是同时还可以看出, 饱和土样在添加石灰材料之后, 3 条



(a) 未处理土样



(b) 养护28 d土样



(c) 养护90 d土样

图3 非饱和土样的顺磁回归线

Fig.3 Paramagnetic regression line of unsaturated soil sample

表2 试验所用土样的质量含水率
Table 2 The mass water contents of samples

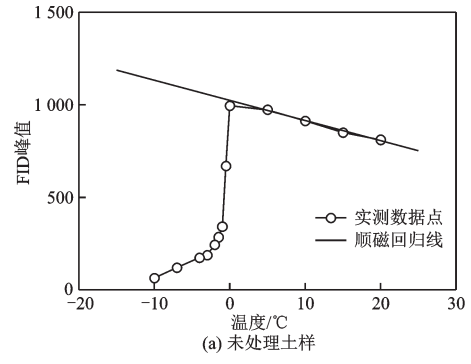
土样类型	土样状态	
	非饱和	饱和
未处理	16.88	24.84
养护 28 d	16.96	24.57
养护 90 d	16.91	24.15

单位: %

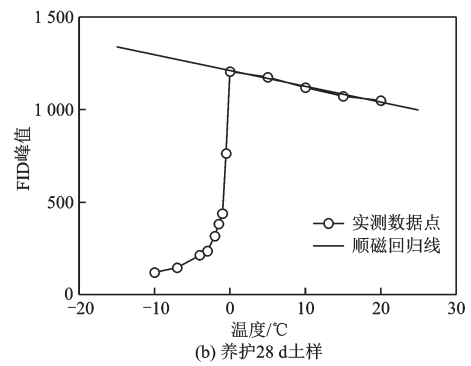
曲线几乎重合,持水能力并没有较明显的改变。

4 结果对比与分析

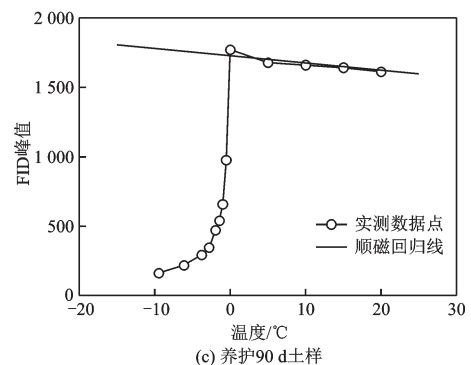
冻结温度降低法通常用于饱和土试验,利用土



(a) 未处理土样



(b) 养护28 d土样



(c) 养护90 d土样

图4 饱和土样的顺磁回归线

Fig.4 Paramagnetic regression line of saturated soil sample

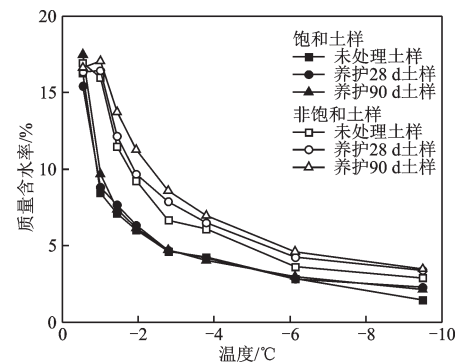


图5 土样的冻结特征曲线

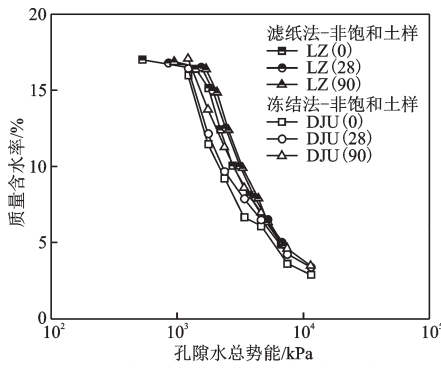
Fig.5 Freezing characteristic curves

样的冻结特征曲线结合 Clapeyron 方程来反算土样中孔隙水的势能^[7,17]。

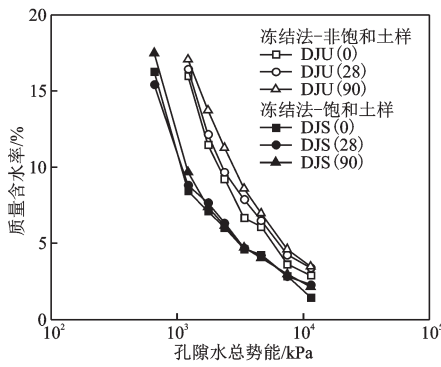
通过式(2)结合土样的未冻水含水量与冻结温

度的关系曲线可转化得到土样孔隙水总势能 Ψ 与质量含水率 ω 的关系,并与滤纸法测得的试验结果对比,如图6所示。其中LZ(0),LZ(28),LZ(90)代表滤纸法测得的未处理土样、养护28 d土样和养护90 d土样的孔隙水总势能与含水率的关系;DJU(0),DJU(28),DJU(90)代表利用冻结温度降低法得到的非饱和的未处理土样、养护28 d土样和养护90 d土样的孔隙水总势能与含水率的关系;DJS(0),DJS(28),DJS(90)代表利用冻结温度降低法得到的饱和情况下未处理土样、养护28 d土样和养护90 d土样的孔隙水总势能与含水率的关系。

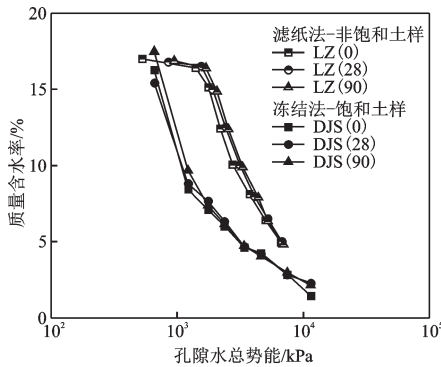
从图6中可以看出,通过滤纸法测得的土水特



(a) 滤纸法与冻结法测定的非饱和土样



(b) 冻结法测定的非饱和与饱和土样



(c) 滤纸法测定的非饱和土样与冻结法测定的饱和土样

图6 不同方法测定的土水特征曲线对比

Fig.6 Soil-water characteristic curves obtained by different methods

征曲线与非饱和土样的冻结特征曲线具有较好的一致性,两者之间存在差异很小。在同一含水率情况下,滤纸法测的孔隙水势能稍大于核磁共振法测得的孔隙水势能,这可能是由于土水特征曲线的滞回特性导致的^[17],冻结特征曲线是在土样融化过程中测得的,近似于土水特征曲线的吸湿曲线;而滤纸法的测量路径是脱湿过程。并且这种差异随着含水率的降低逐渐缩小。两种曲线之间的相似性表明在非饱和土的研究过程中可以通过土样的冻结特征曲线来推算土水特征曲线。

同时还可以看出,饱和土样利用冻结温度降低法得到的孔隙水总势能 ψ 与质量含水率 ω 关系曲线位于非饱和土样结果的下方,即在同一含水率情况下饱和土样的孔隙水势能低于非饱和土样的孔隙水势能。这可能是因为饱和土样在冻结过程中会发生冻胀现象,土样结构被破坏,孔隙增大,导致孔隙水不易融化,且土样持水性能下降;非饱和土样由于含水率较低则不会发生明显的结构破坏^[18]。由此可以得知,在非饱和土研究过程中利用土样的冻结特征曲线来推算土水特征曲线是可行的,但是当土样饱和或含水率较高时,冻结过程可能导致土样结构发生变化,这种方法便不再适用。

5 结论

(1)黄土在经过石灰处理并养护后持水能力会提高,且随着养护龄期的增加,土样持水能力进一步增加。

(2)非饱和土样的FID峰值点在温度低于 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时出现明显下降,而饱和土样的FID峰值点在温度低于 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后迅速下降。表明非饱和土样的冻结温度为 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 而饱和土样的冻结温度为 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3)非饱和土样测得的冻结特征曲线和滤纸法测得的土水特征曲线存在较好的一致性,两者之间的差异很小,饱和土样测得的冻结特征曲线显著低于非饱和土样测得的冻结特征曲线和滤纸法测得的土水特征曲线。表明在非饱和土的研究过程中可以通过土样的冻结特征曲线来推算土水特征曲线。

参考文献:

[1] 卢宁,力科思.非饱和土力学[M].北京:高等教育出版社,2012.
Lu N, Likos W J. Unsaturated soil mechanics[M]. Bei-

- jing: Higher Education Press, 2012. (in Chinese)
- [2] 高游, 孙德安. 单峰和双峰土水特征曲线基本参数的确定[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1884-1891.
Gao Y, Sun D A. Determination of basic parameters of unimodal and bimodal soil water characteristic curves [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(10): 1884-1891. (in Chinese)
- [3] 陈正汉, 郭楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 1-54.
Chen Zh H, Guo N. New developments of mechanics and application for unsaturated soils and special soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 1-54. (in Chinese)
- [4] 党进谦, 李靖, 王力. 非饱和黄土水分特征曲线的研究[J]. 西北农业大学学报, 1997, 25(3): 62-65.
Dang J Q, Li J, Wang L. Research on water characteristic curve of unsaturated loess [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 1997, 25(3): 62-65. (in Chinese)
- [5] 孙德安, 刘文捷, 吕海波. 桂林红黏土的土-水特征曲线[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3345-3351.
Sun D A, Liu W J, Lyu H B. Soil-water characteristic curve of Guilin lateritic clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3345-3351. (in Chinese)
- [6] 陈存礼, 褚峰, 李雷雷, 等. 侧限压缩条件下非饱和原状黄土的土水特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 610-615.
Chen C L, Chu F, Li L L, et al. Soil-water characteristic of unsaturated undisturbed loess under confined compression condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3): 610-615. (in Chinese)
- [7] 马田田, 韦昌富, 周家作, 等. 土体的冻结特征曲线和持水特性[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增1): 172-177.
Ma T T, Wei Ch F, Zhou J Z, et al. Freezing characteristic curves and water retention characteristics of soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(Sup1): 172-177. (in Chinese)
- [8] Spaans E J A, Baker J M. Soil freezing characteristics: its measurement and similarity to soil moisture characteristic [J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(1): 13.
- [9] Koopmans R W R, Miller R D. Soil freezing and soil water characteristic curves [J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1966, 30: 680-685.
- [10] Bittelli M, Flury M, Campbell G S. A thermodielectric analyzer to measure the freezing and moisture characteristic of porous media [J]. Water Resources Research, 2003, 39(2): 1041.
- [11] 靳奉雨, 王叶娇, 孙德安, 等. 不同龄期下石灰改良土持水特性的温度效应[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(3): 24-31.
Jin F Y, Wang Y J, Sun D A, et al. Temperature effect on the water retention curve of lime-treated soil during curing [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(3): 24-31. (in Chinese)
- [12] Standard test method for measurement of soil potential using filter paper: ASTM D5298-94 [S]. ASTM International, 1992.
- [13] Coates G R, Xiao L L, Prammer M G. NMR logging principles and application [M]. Houston: Halliburton Energy Services Publication, 1999.
- [14] 田慧会, 韦昌富, 魏厚振, 等. 压实黏质砂土脱湿过程影响机制的核磁共振分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2129-2136.
Tian H H, Wei Ch F, Wei H Zh, et al. A NMR-based analysis of drying processes of compacted clayey sands [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(8): 2129-2136. (in Chinese)
- [15] Ishizaki T, Maruyama M, Furukawa Y, et al. Premelting of ice in porous silica glass [J]. Journal of Crystal Growth, 1996, 163(4): 455-460.
- [16] 泰斯 A R, 奥利丰特 J L, 朱元林, 等. 用脉冲核磁共振法及物理解吸试验测定的冻土中冰和未冻水之间的关系[J]. 冰川冻土, 1983, 5(2): 37-46.
Tice A R, Oliphant J L, Zhu Y L, et al. Relationship between the ice and unfrozen water phases in frozen soils as determined by pulsed nuclear resonance and physical desorption data [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983, 5(2): 37-46. (in Chinese)
- [17] Wan M, Delage P, Tang A M, et al. Water retention properties of the Callovo-Oxfordian claystone [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, 64(12): 96-104.
- [18] 刘振亚. 非饱和冻土力学特性及微观机理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
Liu Zh Y. Mechanical characteristics and microstructure mechanism of unsaturated soil subjected to freezing condition [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)