

冻融对饱和渠基土物理力学性质的影响

汪恩良 姜海强 付强 崔恩彤 解飞

(东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 冻融作用一直是寒区渠道破坏的主要诱因,为探究冻融作用对饱和粉质粘土物理力学性质的影响规律,在低温环境模拟试验箱内,对饱和土进行0~11次冻融后,结合室内土工试验,并用灰色关联度对其各项性质间交互影响效应进行分析。结果表明:随冻融循环次数的增加,饱和土黏聚力以单指数函数形式逐渐降低,内摩擦角逐渐升高。冻融作用对黏聚力的影响在初次冻融后衰减明显;损伤比系数 K_c 、 K_c 与冻融循环次数关系可分别用对数函数和指数函数描述;导热系数、平均干密度与冻融循环次数呈负相关关系,而平均孔隙率、渗透系数与冻融循环次数呈正相关关系;与冻融作用相比,平均孔隙率对黏聚力、导热系数、平均干密度和渗透系数的变化影响相对较大;对于单个试样而言,物理性质对力学性质的改变影响由大到小为:平均孔隙率、平均干密度、渗透系数、导热系数。

关键词: 冻融;黏聚力;内摩擦角;渗透系数;孔隙率;干密度

中图分类号: S152.9; S277 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)03-0287-08

Experiment on Effect of Freezing and Thawing on Physical and Mechanical Properties of Saturated Channel Foundation Soil

WANG Enliang JIANG Haiqiang FU Qiang CUI Entong XIE Fei

(School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Freezing-thawing effect is the main inducement for the damage of channel in cold region, and the different forms of damage caused by it have seriously restricted the grain production. To explore the influence of freeze-thaw on physical and mechanical properties of saturated silty clay, after 0~11 cycles for saturated soil in the low temperature environment simulation test chamber, indoor geotechnical engineering test was applied, and grey correlation degree was used to analyze the interaction effect of soil properties and the following conclusions were drawn: with the increase of freeze-thaw cycle times, the cohesive force of saturated soil was decreased gradually with the form of single exponential function and the internal friction angle was increased gradually. The effect of freeze-thaw on cohesion was obviously attenuated after initial freezing and thawing. With the increase of freezing and thawing cycles, the damage coefficient K_c was in a logarithmic function form change and the K_c was in an exponential function form change. The coefficient of thermal conductivity and average dry density was negatively correlated with freeze-thaw cycle times, whereas the average porosity rate and permeability coefficient were positively correlated with freeze-thaw cycle times. Compared with the freeze-thaw action, the average porosity rate had a greater influence on the cohesion force, thermal conductivity, average dry density and permeability coefficient. For a single specimen, the influence of physical properties on the change of mechanical properties was in a descending order of average porosity, average dry density, permeability coefficient and thermal conductivity.

Key words: freeze-thaw; cohesion force; internal friction angle; permeability coefficient; porosity; dry density

收稿日期: 2017-11-23 修回日期: 2018-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51541901)和黑龙江省应用技术与开发计划项目(GZ16B009)

作者简介: 汪恩良(1971—),男,教授,主要从事工程冻土及水工建筑物冻害防治技术研究, E-mail: HLJWEL@126.com

通信作者: 付强(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源优化利用与管理研究, E-mail: fuqiang0629@126.com

0 引言

寒区输、配水渠道由冻融作用发生的各种形式破坏始终是寒区农业工程领域亟待解决的技术难题。冻融作为一种强风化作用,引起渠基土物理力学性质发生改变,基础失稳严重影响渠道输水效率^[1]。因此,研究冻融前后土体物理力学性质的差异性对指导寒区农业工程设计、施工,保障国家粮食安全上显得尤为重要^[2]。长期以来,寒区工作者考虑不同因素影响,对冻融后土体物理力学性质变化规律进行了深入研究,获得了丰富的实践经验和理论成果。

土体在冻融过程中,由于冻结锋面的迁移和成冰作用的影响,在引起水分重分布的同时,还破坏了原有土颗粒的联结程度,使得孔隙率发生变化^[3-4]。张英等^[5]对非饱和青藏粉质粘土进行冻融后结合压汞试验,发现大颗粒和大孔隙变化较大,而小孔隙和小粒径几乎保持不变;夏祥友等^[6]对东北黑土进行反复冻融后,经CT扫描后得出冻融作用对粒径的影响下限为5 mm。VIKLANDER^[7]提出用“残余孔隙比”来描述经历冻融后的土体内部孔隙变化行为,这种变化行为的差异与土的初始密度相关;肖东辉等^[8-9]发现原状黄土和重塑黄土在冻融5次后内部孔隙达到稳定,此时土颗粒集中分布在0.01~0.05 mm。马骏骅等^[10]在研究冻融后重塑土孔隙率变化时得到冻融次数和温度梯度可显著改变土体内部疏松程度的结论,而渗透系数大小亦归结于孔隙率的变化。土体渗透系数的变化与孔隙率趋势相同,而与干密度变化趋势相反,原状土和重塑土在冻融后渗透系数在 $4 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$ cm/s。王铁行等^[11]发现土体渗透系数存在明显各向异性,原状黄土水平渗透系数大于垂直渗透系数且随着冻融次数的增加,二者之间比值减小;张婷等^[12]通过试验证实土的导热系数主要与固体颗粒、密实度、含水率、饱和度、晶体结构、化学组成密切相关,冻融作用下孔隙增大造成土颗粒之间联结强度弱化,降低了土颗粒之间换热路径和效率,从而使导热系数降低^[13]。

抗剪强度作为土力学中研究最为广泛的力学指标,其大小主要取决于黏聚力和内摩擦角。在对不同土质进行冻融循环试验后,无论冻融过程温度如何设定,黏聚力均降低,黏聚力的降低程度和速率随土样初始含水率和冻融次数增大而减小^[14],而内摩擦角在冻融作用下得到的变化规律与黏聚力的变化并不一致,多数学者认为冻融后其值无明显规律,也有人认为其值升高^[15-17]。

目前对冻融作用下土体物理力学性质的变化研究多集中在非饱和土,在温度控制上多为恒温控制,即在设定负温和正温下实现冻融过程。自然条件下温度变化多为正弦或余弦变化,温度控制模式不同,水分迁移速率也不同,设定的温度值不同,土体内部冻结过程中未冻水含量也不同,这些因素均会扩大试验结果与真实值之间的误差。因此,本文以饱和土为研究对象,通过简化年内温度变化过程,反映冻融作用下饱和土的物理力学性质变化规律,供寒区各类农业建筑设计、施工参考。

1 材料与方法

1.1 土的基本物理性质

试验土样取自哈尔滨市香坊区新仁灌区,取土深度1.5~2.0 m。根据GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》,定义为低液限粉质粘土,其他相关物理指标如表1所示。

表1 土的物理参数

Tab.1 Physical parameters of soil indicators

参数	数值	
颗粒分析/%	0.075~0.25 mm	0.7
	0.005~0.075 mm	66.7
	<0.005 mm	32.6
比重	2.69	
液限/%	44.9	
塑限/%	23.0	
塑性指数	21.9	
最大干密度/(g·cm ⁻³)	1.69	
最优含水率/%	18.1	

1.2 研究内容

主要研究饱和试样在反复冻融下指标的变化规律,包括:黏聚力(c)、内摩擦角(φ)、导热系数(λ)、平均孔隙率(\bar{n})、平均干密度($\bar{\rho}_d$)、渗透系数(K_T)。

1.3 试验设备

自行研制的低温环境模拟试验箱^[18](控制精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,温控范围: -40°C ~室温,可实现冻土的“单向冻结,双向融化”机制)、BHG型真空饱和缸装置、TST-55型渗透仪、CSY-20型低温冻土三轴仪、ISOMET 2114型热特性分析仪、游标卡尺、XT5405FSC型土工冻胀试验箱。

渗透系数测定以及试样的饱和参照GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》进行。

1.4 试验方案

1.4.1 试验布置和试验步骤

由于试样均为饱和状态,其本身性质较原状土存在明显差异性,故试验结果忽略其前期自然冻融

对原有土质结构的破坏和盐分迁移影响。

将土样粉碎后过 2 mm 筛,加入定量水制备成含水率为 20% 试样,分 5 层击实,试样尺寸 100 mm × 200 mm (直径 × 高),试样饱和和采用抽气饱和法,在框式饱和器中自上而下依次放置透水顶板、滤纸、试样、滤纸和透水地板,为防止抽气时真空缸内部进入空气,在盖与真空缸之间均匀涂抹凡士林。启动抽气机,抽气至真空压力表读数接近当地一个大气压值,且抽气时间大于 1 h 后注水,停止抽气后静置 10 h 左右,试样饱和后含水率在 27% 左右。在试样周围、侧壁用 1 mm 厚度铁皮和保鲜膜包裹,以减少冻融过程中侧向变形和水分蒸发。

待试样完成预定冻融循环次数后,取出试样用游标卡尺和精度为 0.001 g 的电子天平测量试样高度和质量。计算平均干密度 $\bar{\rho}_d$ 、平均孔隙率 \bar{n} ,变水头下测量渗透系数并计算其值;计算出不同冻融循环次数下土样的饱和度,如图 1 所示,可见无论在初始状态下还是经历冻融循环后,饱和度均大于饱和界限值 0.8,因此不同冻融循环次数下试样始终处于饱和状态。

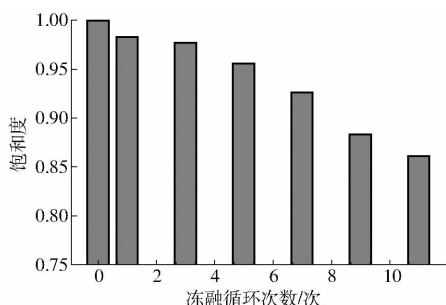


图 1 冻融过程中饱和度变化

Fig. 1 Change of saturation during freezing and thawing

三轴试验采用不固结不排水剪,围压为 50、100、200 kPa,剪切速率为 1.5 mm/min。

相关参数计算如下

$$\bar{\rho}_d = \frac{m}{\pi r^2 (h + \Delta h)} \quad (1)$$

$$\bar{n} = \frac{e}{1 + e} \times 100\% \quad (2)$$

其中
$$e = \frac{1.02G_s(1 + \omega)}{\bar{\rho}_d} - 1 \quad (3)$$

式中 h ——试样初始高度, cm

Δh ——冻胀量, cm

m ——试样质量, g

G_s ——土的比重

r ——试样半径, cm

e ——孔隙比 ω ——含水率, %

$$K_T = 2.3 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \lg \frac{h_2}{h_1} \quad (4)$$

式中 a ——变水头管的断面面积, cm²

L ——渗径, cm A ——试样断面积, cm²

t_1 ——测读水头的起止时间, s

t_2 ——测读水头的终止时间, s

h_1 ——起始水头, cm

h_2 ——终止水头, cm

$$S_r = \frac{\omega G_s}{e} \quad (5)$$

式中 S_r ——饱和度

1.4.2 相似准则的推导和降温制度的确定

冻融数学模型可用带有相变的热传导的控制微分方程(泛定方程)^[19]来表示

$$a^+ \left(\frac{\partial^2 t^+}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t^+}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial t^+}{\partial \tau} \quad (6)$$

($h_0 < y < h(x, \tau)$, 融化区内)

$$a^- \left(\frac{\partial^2 t^-}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t^-}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial t^-}{\partial \tau} \quad (7)$$

($h(x, \tau) < y < h_c$, 冻结区内)

式中 x, y, τ ——时间自变量

t^+, t^- ——融土、冻土的温度, °C

a^+, a^- ——融土、冻土的导热系数, m²/s

h_0 ——融化区上界位置

h_c ——冻结区下界位置

$h(x, \tau)$ ——冻融界面位置

应用积分类比法推导^[20],得到相似判据为

$$c_t = c_l^2 \quad (8)$$

式中 c_t ——时间比尺 c_l ——几何比尺

即模型时间比尺为几何比尺的平方。

根据哈尔滨地区万家试验站 2010—2012 年 3 年逐日气温平均值和 3 年最大冻深平均值,由试样高度 20 cm,3 年最大冻深平均值 180 cm,确定几何比尺为 1:9,在温度比尺为 1:1 前提下,时间比尺为 1:81。以此将全年气温变化简化为如图 2 所示的 4 个阶段,各阶段对应日期和时间如表 2 所示。简化前实际冻结指数为 1 788.38 °C · d,简化后冻结指数为 1 773.25 °C · d,简化前后相差 0.8%,证明简化后温度过程线可较好地代表真实气温变化。

土的初始状态和温度梯度对土的物理力学性质

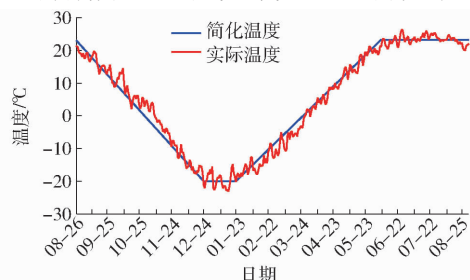


图 2 2010—2012 年度气温简化过程曲线

Fig. 2 Temperature simplification curve in 2010—2012

表2 气温简化范围和对应时间

Tab.2 Temperature range and corresponding time to simplify

温控阶段	日期范围	对应天数/d	温控范围/℃	对应历时/h
降温	8月26日—12月22日	119	23.3 ~ -20.0	35.25
恒负温	12月23日—1月22日	30	-20.0 ~ -20.0	8.89
升温	1月23日—6月5日	135	-20.0 ~ 23.3	40.00
恒正温	6月6日—8月25日	81	23.3 ~ 23.3	24.00

起到决定性作用。由于目前对冻融作用下饱和土物理力学性质方面的研究较少,笔者在考虑试验冻融循环次数上限时,依据非饱和土在冻融5~7次间达到稳定状态^[15,21-22],将冻融循环次数向外延伸为11次。

为确保试样在冻融过程中实现全部冻结和融化,增设相同物理指标的试样进行辅助观测,在观测试样内部纵向每隔4 cm安置精度为-0.1℃的温度传感器,传感器插入试样内部5 cm,观测冻融过程中温度场变化情况,如图3所示。可以看出,20 cm处传感器在一个冻融周期内最低温度为-5.5℃,融化后温度为0.7℃,可见试样全部实现冻结和融化过程。

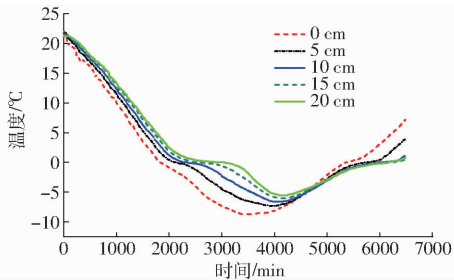


图3 试样内温度场变化曲线

Fig.3 Changes of temperature field in sample

2 试验结果与分析

2.1 冻融循环次数对土体抗剪强度的影响规律

土体的抗剪强度由滑动面上的黏聚力和内摩擦角两部分组成。为准确度量黏聚力、内摩擦角与冻融循环次数的关系,运用 Matlab 进行拟合,得到其量化表达式如图4、5所示,式中 x 为冻融循环次数, y 为不同冻融次数下对应物理指标值,以下代表含义相同。

由图4可以看出,黏聚力随冻融次数的增加而减小。GANDAH^[23]指出,融化过程中抗剪强度的衰减强度与土的类型有关,粉质粘土初次冻融后黏聚力的衰减最为明显,由25.32 kPa降低为19.41 kPa,衰减量为原值的23.34%。试样经过11次冻融后黏聚力为13.15 kPa。分析认为,冻融过程中由于冷

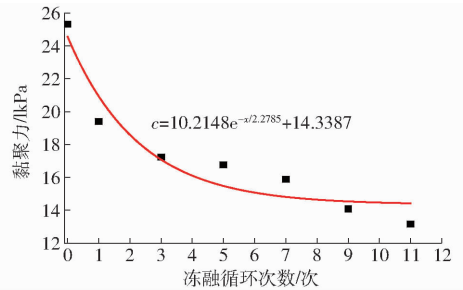


图4 黏聚力与冻融循环次数关系

Fig.4 Relationship between cohesion and number of freeze-thaw cycles

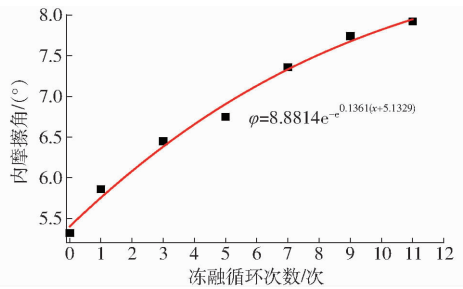


图5 内摩擦角与冻融循环次数关系

Fig.5 Relationship between internal friction and number of freeze-thaw cycles

生构造的产生,对试样内部原有构造产生破坏而使黏聚力降低。

如图5所示为内摩擦角与冻融循环次数关系,从图5可以看出,随着冻融循环次数的增加,内摩擦角呈增大趋势,但每次冻融后其增大的速率并不相同,5次冻融后其值基本保持不变,11次冻融循环后内摩擦角仅增大1.61°。内摩擦角反映土颗粒之间的摩擦特性,在冻融作用下,土颗粒粒径不断发生变化,使内部颗粒集中分布在一定的粒径范围内,粒径的均一化增大了内部颗粒之间的接触面积,因此内摩擦角会出现升高趋势。

在 Origin 9.0 上对曲线进行线性拟合,根据黏聚力和内摩擦角的变化规律,分别选择单指数衰减和戈玻兹(Gompertz)曲线进行拟合, R^2 分别为0.89、0.98。

针对黏聚力和内摩擦角随冻融循环次数所表现出的不同变化规律,建立二者的损伤曲线方程,定义损伤比系数 K_c 和 K_φ (表3),计算表达式为

$$K_c = \frac{C_n}{C_0} \quad (9)$$

$$K_\varphi = \frac{\varphi_n}{\varphi_0} \quad (10)$$

式中 C_0 ——未冻融土体黏聚力, kPa

C_n —— n 次冻融循环后黏聚力, kPa

φ_0 ——未冻融土体内摩擦角, (°)

φ_n —— n 次冻融循环后土体内摩擦角, (°)

表 3 损伤比系数 K_c 、 K_φ

Tab. 3 Damage ratio coefficient K_c and K_φ

系数	冻融循环次数 n						
	0	1	3	5	7	9	11
K_c	1	0.77	0.68	0.66	0.63	0.56	0.52
K_φ	1	1.10	1.21	1.26	1.28	1.29	1.30

对表 3 中不同冻融循环次数下的损伤比系数进行拟合,得到 1~11 次冻融循环下损伤比曲线和损伤曲线方程如图 6 所示。可见损伤比系数 K_φ 与冻融循环系数呈对数关系,而损伤比系数 K_c 与冻融循环次数的关系较为复杂,但就总体趋势而言, K_c 的大小随冻融循环次数的增加而呈降低趋势,且其降低幅度在前 3 次冻融循环作用下较为明显。

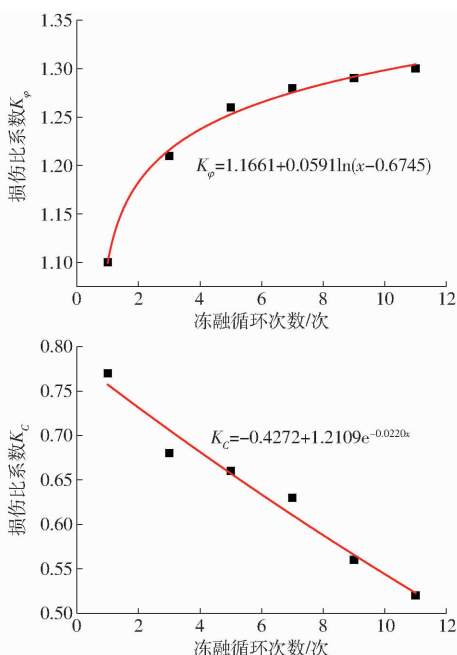


图 6 不同冻融循环次数下损伤比系数

Fig. 6 Damage ratio coefficient under different freezing and thaw cycles

2.2 冻融循环次数对土体物理性质的影响规律

土体的各项物理性质间影响作用是相互关联的。导热系数是衡量土体热特性和反映土体内部温度场变化的重要参数。土体导热系数与冻融次数的关系如图 7 所示,导热系数随着冻融循环次数的增加而减小,饱和试样在冻融作用下导热系数和黏聚力变化趋势基本相同,导热系数衰减仍以首次冻融作用为主,首次冻融后导热系数比原有值降低了 18.33%,随后导热系数与冻融次数间呈指数型负相关。

图 8 为平均干密度与冻融次数的关系,平均干密度随冻融次数增加而降低,降低速率随冻融次数增加逐渐减小。文献[24]认为,冻融作用对不同密实度的土具有双重作用并使密实度最终趋于稳定,

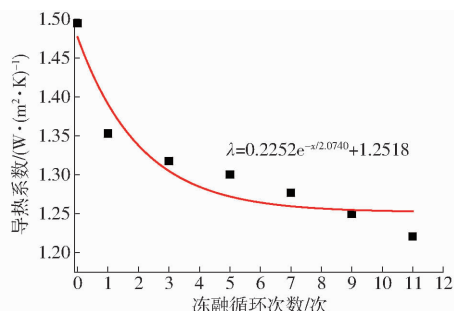


图 7 导热系数与冻融循环次数关系

Fig. 7 Relationship between thermal conductivity and number of freeze-thaw cycles

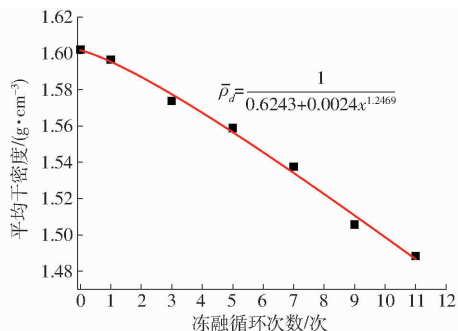


图 8 平均干密度与冻融循环次数关系

Fig. 8 Relationship between average dry density and number of freeze-thaw cycles

在土体内部实现由不稳定状态向稳定状态转变,土体内部状态改变的冻融次数在 5~7 次之间^[9,25-26],这与图 8 的试验结果差异性在于土颗粒粒径分布和饱和度不同。土粒越细,冻融对内部影响效应越显著,最终达到稳定状态所经历的冻融次数越多,试样饱和度越大,冻胀效应越明显,故 11 次冻融后平均干密度降低率减少但并未趋于稳定。平均干密度降低引起导热系数衰减,由于冻融作用中水分迁移和冰晶的生长,土体内部平均孔隙率增大,如图 9 所示。在 0~11 次冻融过程中,平均孔隙率随冻融循环次数的增多而持续增大,基本呈线性上升,平均上升速率为 38.54%/次,而平均孔隙率的改变又会对渗透系数产生显著影响。

通过对比图 9、10 发现,平均孔隙率与渗透系数

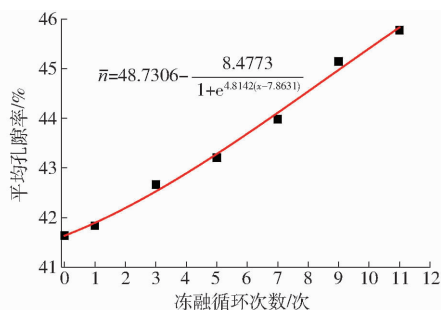


图 9 平均孔隙率与冻融循环次数关系

Fig. 9 Relationship between average porosity and number of freeze-thaw cycles

二者之间的变化趋势具有高度一致性,渗透系数与冻融循环次数呈正相关,可以认为冻融循环作用对渗透系数的影响是平均干密度变化的间接体现,冻融作用通过水分的相变对土颗粒产生作用力,使得内部孔隙在不断调整和改变中重新分布,其内部小孔隙和微裂隙在冻融的反复作用下逐渐发展为大孔隙和较大的裂隙,与此同时,冰晶的挤压将小颗粒不断团聚成大颗粒,较大颗粒之间的联通性得到加强,试样的完整性降低,宏观表现为渗透系数逐渐升高。对不同冻融次数下导热系数、平均干密度、平均孔隙率以及渗透系数变化进行拟合, R^2 分别为0.87、0.98、0.99、0.98,其各自所对应的拟合方程如图7~10所示,导热系数和平均干密度变化分别符合指数函数和反比例函数,平均孔隙率和渗透系数变化则为玻尔兹曼函数。

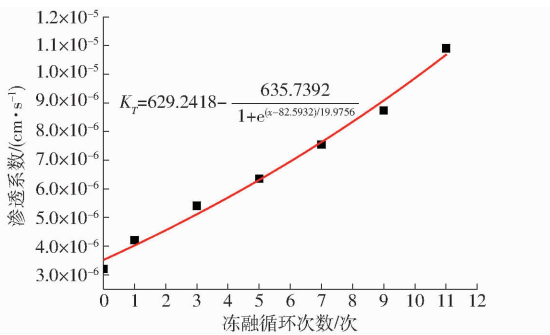


图10 渗透系数与冻融循环次数关系

Fig. 10 Relationship between permeability coefficient and number of freeze-thaw cycles

2.3 物理性质与力学性质的交互影响分析

冻融循环作用下,土体物理力学性质变化是相互关联、密不可分的。冻融作用提供了各项性质改变的诱发条件,是土体性质变化的外因,同时引起土体内部水分迁移和相变,对其微观结构产生影响,这种影响在宏观上最直接的体现即为平均孔隙率。由平均孔隙率的变化引起黏聚力、导热系数、平均干密度和渗透系数的变化,可以说平均孔隙率是分析土体微观结构在冻融过程中发生改变而引起其他物理力学参数产生相应改变的桥梁,因此将平均孔隙率看作宏观体现的内因,土体性质变化即为内外因作用下的共同结果。采用灰色关联分析,将内外因对其他性质影响大小进行分析(由于内摩擦角变化较小,只分析其他4项性质),结果如表4所示。

表4 内外因与其他性质的绝对关联度

Tab. 4 Absolute correlation degree between internal and external causes to other properties

	黏聚力	导热系数	平均干密度	渗透系数
冻融作用	0.55	0.54	0.56	0.51
平均孔隙率	0.66	0.65	0.64	0.63

由表4中可以看出,黏聚力、导热系数、平均干密度和渗透系数同时受到内因和外因的作用。平均孔隙率改变较冻融次数对其他4项指标的影响较为显著。不同次数冻融作用为其他性质的改变提供诱发条件,但本质上的改变则是由于平均孔隙率变化造成的。

对于黏聚力而言,平均孔隙率增大会降低颗粒之间密实程度,使得相邻之间土颗粒的接触深度减小,通过降低颗粒间胶结力而引起黏聚力衰减;而平均干密度和渗透系数与平均孔隙率的相互影响关系则表现更为直接,孔隙率越大,单位质量试样的体积越大,内部孔隙分布越多,也就造成平均干密度降低而渗透系数增大的现象。平均孔隙率增大,减少了颗粒之间的接触,使传热介质发生改变,将本来为固-固的热传导途径变为固-气-固,而常温下空气的导热系数仅为 $0.024 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,故平均孔隙率的增大会引起导热系数的降低。冻融循环作为外因,不断使平均孔隙率增大而加剧渗透系数升高。

由于试验数据分布不服从正态分布,故在分析物理性质对力学性质影响时仍采用绝对关联度系数度量。其中,导热系数、平均孔隙率、渗透系数和平均干密度与黏聚力和内摩擦角之间的绝对关联度如表5所示。

表5 物理性质与力学性质的绝对关联度

Tab. 5 Absolute correlation degree between physical properties and mechanical properties

	黏聚力	内摩擦角
导热系数	0.60	0.59
平均孔隙率	0.65	0.65
渗透系数	0.62	0.63
平均干密度	0.63	0.63

由表5可以看出,各项物理性质对黏聚力和内摩擦角的影响由大到小顺序为:平均孔隙率、平均干密度、渗透系数、导热系数。平均孔隙率与黏聚力和内摩擦角的绝对关联度最强,为0.65,这一结果也印证了平均孔隙率为冻融下土体其他性质发生改变的根本内因。而导热系数与黏聚力和内摩擦角的绝对关联度最弱,导热系数主要受平均孔隙率的影响,土体内部孔隙越多,土颗粒之间连接弱化导致导热能力降低,导热系数本质上是内部结构发生改变的体现。

3 结论

(1)随冻融循环次数的增加,饱和土黏聚力逐渐降低,内摩擦角逐渐升高,但升高幅度较小。二者与冻融循环次数的关系可用单指数函数及戈玻兹函

数表示,冻融作用对黏聚力的影响主要体现在初次冻融。

(2)损伤比系数 K_{ϕ} 与冻融循环次数关系可用对数函数来描述,而 K_c 与冻融循环次数关系则可用指数函数描述。

(3)导热系数、平均干密度与冻融循环次数呈负相关关系,而平均孔隙率、渗透系数与冻融循环次数呈正相关关系。

(4)平均孔隙率是分析土体微观结构在冻融过程中发生改变而引起物理力学参数产生相应改变的

桥梁,与冻融作用相比,平均孔隙率对黏聚力、导热系数、平均干密度和渗透系数的变化影响相对较大。

(5)对于单个试样而言,冻融作用下土体物理性质与力学性质变化是一个统一的整体。物理性质对力学性质的影响由大到小顺序为:平均孔隙率、平均干密度、渗透系数、导热系数。

(6)饱和土在近正弦的温控模式下冻融 11 次后内部状态仍然处于变化之中,从各方程的理论发展趋势上来看,土体内部稳定值一定存在。因此,反复冻融下饱和土稳态过渡次数及影响因素值得深入研究。

参 考 文 献

- 汪恩良,姜海强,张栋,等.冻融作用对土体物理力学性质影响研究进展[J].东北农业大学学报,2017,48(5):82-88.
WANG Enliang, JIANG Haiqiang, ZHANG Dong, et al. Research progress on the effect of freezing and thawing on the physical and mechanical properties of soil[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017, 48(5):82-88. (in Chinese)
- 陈军锋,郑秀清,臧红飞,等.季节性冻融期灌水对土壤温度与冻融特性的影响[J/OL].农业机械学报,2013,44(3):104-109. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130319&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.03.019.
CHEN Junfeng, ZHENG Xiuqing, ZANG Hongfei, et al. Effect of irrigation on soil temperature and soil freeze-thaw characteristics during seasonal freeze-thaw period[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3):104-109. (in Chinese)
- 胡田飞,刘建坤,房建宏,等.冻融循环下冷却温度对粉质黏土力学性质影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(7):1757-1767.
HU Tianfei, LIU Jiankun, FANG Jianhong, et al. Experimental study on the effect of cyclic freezing-thawing on mechanical properties of silty clay under different cooling temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(7):1757-1767. (in Chinese)
- 肖东辉,马巍,张泽,等.冻融与静荷载双重作用下土体中水分场变化规律模型试验研究[J].水文地质工程地质,2016,43(5):155-160.
XIAO Donghui, MA Wei, ZHANG Ze, et al. Model test on moisture's change law in the soil subjected to freezing-thawing and static load actions[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2016, 43(5):155-160. (in Chinese)
- 张英,郇慧.基于压汞法的冻融循环对土体孔隙特征影响的试验研究[J].冰川冻土,2015,37(1):171-173.
ZHANG Ying, BING Hui. Experimental study of the effect of freezing-thawing cycles on porosity characters of silty clay by using mercury intrusion porosimetry [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1):171-173. (in Chinese)
- 夏祥友,王恩姮,杨小燕,等.模拟冻融循环对黑土黏化层孔隙结构的影响[J].北京林业大学学报,2015,37(6):70-76.
XIA Xiangyou, WANG Enheng, YANG Xiaoyan, et al. Pore characteristics of mollisol argillic horizon under simulated freeze-thaw cycles[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(6):70-76. (in Chinese)
- VIKLANDER P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 35(3):471-477.
- 肖东辉,冯文杰,张泽,等.冻融循环对兰州黄土渗透性变化的影响[J].冰川冻土,2014,36(5):1192-1198.
XIAO Donghui, FENG Wenjie, ZHANG Ze, et al. Research on the Lanzhou loess's permeabilities changing with freezing and thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5):1192-1198. (in Chinese)
- 肖东辉,冯文杰,张泽.冻融循环作用下黄土孔隙率变化规律[J].冰川冻土,2014,36(4):907-912.
XIAO Donghui, FENG Wenjie, ZHANG Ze. The changing rule of loess's porosity under freezing-thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4):907-912. (in Chinese)
- 马骏骅,马可,徐贵娃.冻融循环作用下黄土状土孔隙分布分形几何研究[J].煤炭工程,2012(增刊2):129-132.
MA Junye, MA Ke, XU Guiwa. Fractal geometry study on pore distribution of loess soil under freeze-thaw cycles[J]. Coal Engineering, 2012(Supp. 2):129-132. (in Chinese)
- 王铁行,杨涛,鲁洁.干密度及冻融循环对黄土渗透性的各向异性影响[J].岩土力学,2016,37(增刊1):72-78.
WANG Tiexing, YANG Tao, LU Jie. Influence of dry density and freezing-thawing cycles on anisotropic permeability of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Supp. 1):72-78. (in Chinese)
- 张婷,杨平.不同因素对浅表土导热系数影响的试验研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(6):1233-1238.
ZHANG Ting, YANG Ping. Effect of different factors on the heat conduction coefficient of shallow top soil [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(6):1233-1238. (in Chinese)

- 13 俞亚南, 徐坚, 冯建江. 粉性土导热系数的室内实验研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2010, 44(1): 180-183.
YU Ya'nán, XU Jian, FENG Jianjiang. Laboratory experiment on thermal conductivity of silty clay[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44(1): 180-183. (in Chinese)
- 14 卢肇钧. 粘性土抗剪强度研究的现状与展望[J]. 土木工程学报, 1999, 32(4): 3-9.
LU Zhaojun. Problems on the research of shear strength of clayey soils[J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(4): 3-9. (in Chinese)
- 15 于琳琳, 徐学燕, 邱明国, 等. 冻融作用对饱和粉质黏土抗剪性能的影响[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2448-2452.
YU Linlin, XU Xueyan, QIU Mingguo, et al. Influence of freeze-thaw on shear strength properties of saturated silty clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2448-2452. (in Chinese)
- 16 王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 冻融循环作用对青藏粘土物理力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4313-4319.
WANG Dayan, MA Wei, CHANG Xiaoxiao, et al. Physico-mechanical properties changes of Qinghai-Tibet clay due to cyclic freezing and thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4313-4319. (in Chinese)
- 17 王硕, 刘占辉. 非饱和和重塑黄土抗剪强度影响因素的试验研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2010, 23(3): 86-89.
WANG Shuo, LIU Zhanhui. Performance test analysis of steel slag admixed with fly-ash pavement base course[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University: Natural Science Edition, 2010, 23(3): 86-89. (in Chinese)
- 18 汪恩良, 姜海强, 李冬凯, 等. 冻融循环模拟试验箱的研制与应用[J]. 低温与超导, 2017, 45(7): 86-91.
WANG Enliang, JIANG Haiqiang, LI Dongkai, et al. Development and application of simulation chamber for freezing and thawing cycle[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2017, 45(7): 86-91. (in Chinese)
- 19 丁德文, 罗学波. 冻土热工模型实验的理论基础[J]. 科学通报, 1979(8): 360-364.
- 20 魏先祥, 赖远明. 相似方法的原理及应用[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2001: 1-38.
- 21 王天亮, 卜建清, 王扬, 等. 多次冻融条件下土体的融沉性质研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 625-632.
WANG Tianliang, BU Jianqing, WANG Yang, et al. Thaw subsidence properties of soils under repeated freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 625-632. (in Chinese)
- 22 肖俊波, 孙宝洋, 李占斌, 等. 冻融循环对风沙土物理性质及抗冲性的影响试验[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 67-71.
XIAO Junbo, SUN Baoyang, LI Zhanbin, et al. Effect of freeze-thaw cycles on aeolian sand soil physical properties and soil anti-scourability[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 67-71. (in Chinese)
- 23 GANDAH L R. The damaging effects of frost action in roads over view of types of damage and preventive measures, VTI Report No. 230[R]. Linköping Sweden: Swedish Road and Traffic Research Institute, 1980.
- 24 杨成松, 何平, 程国栋, 等. 冻融作用对土体干容重和含水量影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊2): 2695-2699.
YANG Chengsong, HE Ping, CHENG Guodong, et al. Testing study on influence of freezing and thawing on dry density and water content of soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp. 2): 2695-2699. (in Chinese)
- 25 宋春霞. 冻融作用对土物理力学性质影响的试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
SONG Chunxia. Experimental study of the freeze-thaw effects on physical and mechanical properties of soils[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese)
- 26 毕贵权, 张侠, 李国玉, 等. 冻融循环对黄土物理力学性质影响的试验[J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(2): 114-117.
BI Guiquan, ZHANG Xia, LI Guoyu, et al. Experiment of impact freezing-thawing cycle on physico-mechanical properties of loess[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2010, 36(2): 114-117. (in Chinese)