

冷端温度及解冻条件对原状海相软土冻融前后物理特性影响研究

杨平, 刁鹏程, 张婷, 杨国清

A study of the influences of freezing temperature and thawing conditions on physical properties of marine soft soil before and after freezing-thawing

YANG Ping, DIAO Pengcheng, ZHANG Ting, and YANG Guoqing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003010>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冻融循环作用下黄土无侧限抗压强度和微观规律的试验研究

Effect of freezing-thawing cycles on mechanical properties and microscopic mechanisms of loess

刘乐青, 张吾渝, 张丙印, 谷遇溪, 解邦龙 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 109-115

新疆塔县地区片麻岩冻融劣化机理与规律试验研究

Research on mechanism of freezing-thawing deterioration of gneisses in the Taxian area of Xinjiang

吕文韬, 杨龙, 魏云杰, 张明 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 95-95

昆仑山地区冻融土导热系数试验测试与预测模型研究

Research on experimental tests and prediction models of thermal conductivity of freezing-thawing soil in the Kunlun Mountains

刘志云, 张伟, 王伟, 崔福庆 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 105-113

“开敞系统”下单向冻融试验装置的研制与应用

Development and application of the unidirectional freezing-thawing test device under the “open-system conditions”

陈新瑞, 宋玲, 孙雯, 许清峰, 刘沛凯, 惠强, 李鑫鑫, 吴浩 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 69-78

融化压缩下水泥改良冻土的微观孔隙特征演变

Microcosmic pore characteristics evolution of the cement improved frozen soil after thawing compression

尹振华, 张建明, 张虎, 王宏磊 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 97-105

各向异性对软土力学特性影响的离散元模拟

Discrete element simulation of the influence of anisotropy on the mechanical properties of soft soil

赵洲, 宋晶, 刘锐鸿, 杨守颖, 李志杰 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 70-77



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003010

冷端温度及解冻条件对原状海相软土冻融前后物理特性影响研究

杨平,刁鹏程,张婷,杨国清
(南京林业大学土木工程学院,江苏南京 210037)

摘要: 海相软土冻融前后物理特性差异是研究人工冻结法工后融沉的关键,本文以宁波典型海相软黏土为研究对象,冷端温度(-5℃、-10℃、-15℃)和解冻条件(强制解冻、自然解冻)为影响因素,在室内模拟软黏土人工冻融过程,定量分析冻融前后物理性质差异,并揭示产生差异的原因。研究表明:冻融作用导致海相软黏土的含水率、干密度、孔隙比、渗透性等物理参数沿冻结梯度方向发生重新分布;随冷端温度每降低1℃,含水率、干密度、孔隙比变化程度减小4%~8%;采用强制解冻方式,土体含水率变化程度减小约23%,干密度和孔隙比的变化程度减小约50%;但究其本质,不同冻融条件影响物理参数变化各异的实质为不同条件下水分迁移与相变量不同,探究水分迁移并揭示对物理参数值的影响值得进一步深入研究。海相软土冻融前后物理参数变化与冷端温度及解冻方式密切相关,其变化程度易直接影响工后融沉,在进行海相软土冻结法设计与施工时,应选择合理的冻融方式,减小物理特性的差异性。

关键词: 人工冻融软土;物理特性;冷端温度;水分迁移;解冻条件

中图分类号: TU411.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)01-0096-09

A study of the influences of freezing temperature and thawing conditions on physical properties of marine soft soil before and after freezing-thawing

YANG Ping, DIAO Pengcheng, ZHANG Ting, YANG Guoqing
(School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: Difference in physical properties of marine soft clay before and after freezing-thawing is the key to study the thawing-settlement. This paper takes the typical soft clay in Ningbo as the research object, and the temperature (-5℃, -10℃ and -15℃) and the thawing conditions (forced thawing and natural thawing) are considered as the influencing factors. Indoor simulation experiment of freezing-thawing process was conducted to quantitatively analyze the differences in physical properties before and after freezing-thawing and to reveal the cause of the difference. The research results show that freezing and thawing results in the redistribution of physical parameters such as moisture content, dry density, pore ratio and permeability of the marine soft clay along the direction of freezing gradient. With the decrease in the cold junction temperature by 1℃, the change degree of water content, dry density and void ratio decreases by about 4% - 8%. When forced thawing is adopted, the change degree of soil moisture content is reduced by about 23%, and the change degree of dry density and void ratio is reduced by about 50%. However, the essential reason that different freezing-thawing conditions have various influences on physical parameters is the different amount of water migration and phase variables under different conditions. Thus, exploring water migration and revealing the effects on physical parameter is worthy of

收稿日期: 2020-03-07; 修订日期: 2020-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51478226)

第一作者: 杨平(1964-),男,教授,博导,主要从事岩土与地下工程研究。E-mail: yangping@njfu.edu.cn

further study. The change in physical parameters of marine soft clay before and after freezing-thawing is closely related to the cold junction temperature and the thawing method, and the degree of change is easy to directly affect thawing-settlement. When designing the freezing method of marine soft clay and constructing, reasonable freezing-thawing methods should be selected to reduce the difference in physical properties.

Keywords: artificial freezing-thawing soft soil; physical properties; cold end temperature; moisture migration; thawing condition

随着地下轨道交通的兴建,人工冻结法以其较强的适用性与可靠性广泛应用于各类软弱地层盾构工程、抢险工程等。但冻融作用会影响土的内部结构及物理力学特性^[1-2],这些特性的变化容易改变甚至劣化土体工程性质,对建筑和结构工后沉降与变形产生重要影响。我国沿海地区广泛分布着深厚的第四纪泻湖相、滨海相等海相沉积软土层,此类土层天然含水量大、孔隙比大、压缩系数高、强度低,并具有蠕变性、触变性等特殊的工程性质^[3],冻融后物理特性的变化更易产生不利影响,如软土在人工冻结法施工后压缩性变大^[4],在地铁运行后易导致长期沉降^[5],若沉降控制不当,容易引发联络通道开裂漏水、管片错位等问题^[6]。由于物理性质在一定程度上可以反映土的力学性质,因此研究此类软土冻融前后物理性质的差异对我国沿海地区广泛分布的海相软土进行人工冻结施工尤为重要。

土体冻融前后物理性质变化的研究成果较多。冻融作用后,试样会发生水分迁移,含水率出现重分布^[7-9];紧密土干密度减小,松散土干密度增大^[10-11],而孔隙比变化规律与之相反^[12-14];普遍认为多次冻融将导致土体的界限含水率发生改变,但具体变化方向与规律争议较大^[15-17],而单次冻融对界限含水率变化不明显^[18];紧密土经过冻融后渗透性会增大,松散土会减小^[16,19-20],且渗透性变化与孔隙比、干密度存在一定关联^[21-23];土粒比重主要与其矿物组成和有机质含量有关,冻融不能改变其矿物组成和有机质含量,因此比重不会产生变化^[18,24]。

以上研究选用的解冻条件较为单一,均为自然解冻,而实际工程中已开始应用强制解冻,相关研究尚不足,且对海相软土在不同冷端温度影响下的物理性质变化研究较少,而物理性质变化直接影响着冻融土的长期融沉。因此,为全面评价不同冻融作用对海相软土物理性质的影响,试验以不同冻结温度和不同解冻条件为变量,以宁波沿海典型软土为研究对象,分析各物理参数冻融前后差异性,获得一般性变化规律并深入揭示其机理,为人工冻结法融沉控制提供依据

和指导。

1 试验规划

试验土样取自宁波地铁5#线一期工程KC5102标,基本物理性质见表1,颗粒曲线见图1。土样中各粒组含量为:黏粒组占42.22%,粉粒组占47.69%,砂粒组占10.09%。塑性指数为21.4,大于17,根据土的分类标准,试验用土定名为黏土。试验研究在-5℃、-10℃、-15℃共3种冷端温度及强制解冻和自然解冻2种解冻条件(温度相同)下,宁波原状软黏土与冻融软黏土各项物理参数的差异性,分析不同温度、不同解冻条件对各参数的影响规律。试验方案见表2。

表1 软黏土土样基本物理性质

类别	含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	比重	液限/%	塑限/%	塑性指数	冻结温度/℃
平均	37.5	1.87	2.75	41.5	20.1	21.4	-0.40
最大	41.5	1.99	2.76	44.1	22.2	21.9	-0.41
最小	30.5	1.77	2.74	36.7	18.6	18.1	-0.38

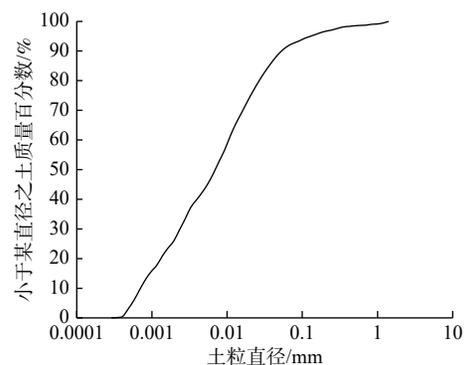


图1 颗粒分析曲线

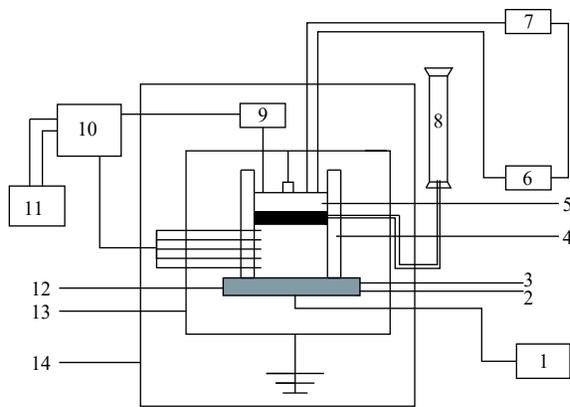
Fig. 1 Particle analysis curve

表2 试验方案

冷端温度/℃	解冻条件	物理试验	影响因素
-5	自然解冻	密度、含水率、孔隙比、 变水头渗透试验	温度
-10			
-15			
-10	自然解冻 强制解冻	密度、含水率、孔隙比试验	解冻条件

为模拟自然冻土与人工冻结均为由冷端向暖端的单向冻结过程,采用单向冻结方式研究冻融土物理参数的差异性更符合实际。

冻融试验采用南京林业大学自制冻胀融沉仪进行,试验装置示意图如图 2 所示。冻胀试验方法为:环境箱温度始终保持为 1 ℃,冻结开始前设置顶板和底板温度 1 ℃,在土样各高度温度均匀恒定于 1 ℃后,采用封闭系统底端单向冻结方式,将底板冷端温度设置到相变量开始单项冻结试验;当试样温度梯度恒定,且冻胀量在 2 h 内变化率小于 1%,视冻结完成。融沉试验采用自然解冻与强制解冻 2 种解冻方式:自然解冻方法为同时停止上、下端冷板供热,将恒温箱温度设定为 20 ℃,让土样缓慢融化下沉;强制解冻方法为将恒温箱温度设定为 1 ℃,停止下端冷板供热,增大上端冷板温度,使上端土样受 60 ℃ 的热水循环传热,实现土样自上向下的单向融沉,当试样完全为正温且位移变化 2 h 内小于 0.01 mm 时融沉完成。最后对原状土样和冻融后试样按照土工试验标准进行密度、含水率和孔隙比试验。



1—恒温冷源循环水槽; 2—循环冷水进口; 3—循环冷水出口;
4—试样筒; 5—上冷板; 6—循环水泵; 7—恒温热源循环水槽;
8—补水装置; 9—位移传感器; 10—数据采集仪; 11—计算机;
12—下冷板; 13—加压设备; 14—恒温箱

图 2 冻胀融沉仪原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of frost heaving and hawing settlement instrument

由于单向冻结存在温度梯度,不同高度处土样冻结情况不同,扰动情况不一,易导致各高度处渗透性变化不同,而试样渗透能力的大小由最小渗透系数决定,考虑到渗透试验试样较厚,采用单向冻融方式制得的试样不同高度渗透性存在差异,所得数据难以真实反映出变量对渗透性的影响。因此,本文研究渗透系数变化时,采用恒温环境冻融方式进行实验;同时由于采用恒温环境冻融方式,强制解冻与自然解冻差

别仅为提高了环境温度,加速了融沉,实质与自然解冻并无差别,故对渗透系数差异性的研究仅以温度为变量。

渗透系数试验试样由原状土在高低温交替试验箱中冻融后再进行环刀取样制得。试样在封闭环境中先进行 12 h 冻结,确保试样冻透后,将试验箱温度设定为 20 ℃,进行 8 h 自然解冻,获得冻融软黏土。制样采用 TST-55 型渗透仪专用环刀(Φ61.8×40 mm)对原状土和冻融土取样,同时测定试样的含水率和密度,制样后按照土工试验标准要求进行渗透试验。试样制备与试验方法见表 3。

表 3 试样制备与试验方法
Table 3 Specimen preparation schedule

冻融后物理试验	试样尺寸	试样数	解冻方式	冻结条件
含水率、干密度、 孔隙比试验	Φ80×100 mm	3	自然解冻	-5 ℃冷端温度冻结
		3	自然解冻	-10 ℃冷端温度冻结
		3	自然解冻	-15 ℃冷端温度冻结
		3	强制解冻	-10 ℃冷端温度冻结
		3	自然解冻	-5 ℃恒温环境冻结
变水头渗透试验	Φ100×50 mm	3	自然解冻	-10 ℃恒温环境冻结
		3	自然解冻	-15 ℃恒温环境冻结

2 试验结果分析

单向冻结达到稳定,试样存在冻结区与未冻区,不同温度条件下冻结区与未冻区厚度不同,充分了解二者厚度大小,有助于分析冻融后物理特性差异的原因。表 4 为本试验试样冻结稳定后不同高度的温度,对温度分布线性回归后,由冻结温度为-0.4 ℃可得冻结区的高度在-5 ℃时为 7.8 cm、-10 ℃时为 9.0 cm、-15 ℃时为 9.4 cm。

表 4 试样冻结稳定时不同高度处温度
Table 4 Temperature of different heights of the sample when the freezing is stable

高度/cm	温度/℃		
	-5 ℃	-10 ℃	-15 ℃
9	0.4	-0.5	-1.4
7	-1	-2.8	-4.3
5	-2.3	-5	-7.1
3	-3.5	-7.1	-10
1	-4.5	-9.2	-13.1

2.1 含水率差异分析

2.1.1 冷端温度对含水率分布的影响

3 种冷端温度下试样冻融前后不同高度处的含水

率变化量 Δw 如图 3 所示。由图 3(a) 可见, 试样在经历 1 次冻融后, 土样沿高度呈现的含水率的不同变化说明含水率出现了明显的重分布现象, 这是由于冻结过程中冻结区对未冻区存在吸力, 未冻区为负压, 水分在压力作用下迁移至冻结区冻结, 而底部冻结锋面自下而上推进直至稳定, 期间未冻区水分不断向下迁移相变成冰, 导致含水率发生重分布。封闭情况下, 因无水分持续补给, 随着上部未冻区水分在迁移作用下越来越少, 导致越早冻结的区域水分累积量越大, 而 0~2 cm 处由于冻结过快水分来不及全部迁移至此, 故 2~4 cm 处含水率增长最大, 这与前人封闭状态下冻融后水分迁移与分布规律研究成果基本一致^[25]。

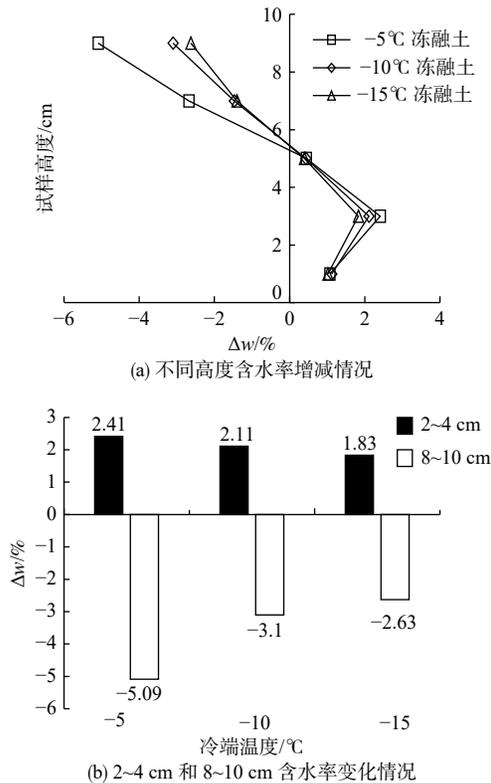


图 3 冷端温度对软黏土含水率变化影响

Fig. 3 Moisture content changes of the clay under the influence of different temperatures

为具体比较含水率增大与减小情况, 由图 3(a) 可见试样高度 8~10 cm (顶部) 和试样高度 2~4 cm (底部) 处 $|\Delta w|$ 最大, 分别绘制 2 个高度处含水率变化率与冷端温度关系曲线 (图 3b)。由图 3(b) 可知:

(1) 随冷端温度每降低 1°C, 含水率变化程度随之减小 4%~8%, 说明了水分迁移量随冷端温度降低而逐渐减小。这是由于冷端温度越低, 冻结锋面推进速度越快, 试样完成冻胀越快, 水分迁移时间就越短, 水

分迁移量随之减少。所以, 冷端温度的高低直接影响着冻土水分迁移量的大小。

(2) 相同冷端温度下, 试样底部含水率增长量总小于上部含水率减少量。这是由于封闭系统冻结含水率一定, 试样上部 (6~10 cm) 处含水率减小, 而中下部 (0~6 cm) 含水率增大, 试样含水率减少比增长更为集中, 使含水率最大增量小于含水率最大减量。

2.1.2 解冻条件对含水率分布的影响

自然与强制解冻条件下试样冻融前后不同高度处的含水率如图 4(a) 所示。由图 4(a) 可知, 虽然解冻方式不同, 但冻融土试样沿试样高度含水率变化规律相似, 且与图 3(a) 表现的规律相同。由此可见, 冻融土含水率重分布情况主要受冻结过程影响, 解冻条件对含水率重分布规律造成的差异性较小。

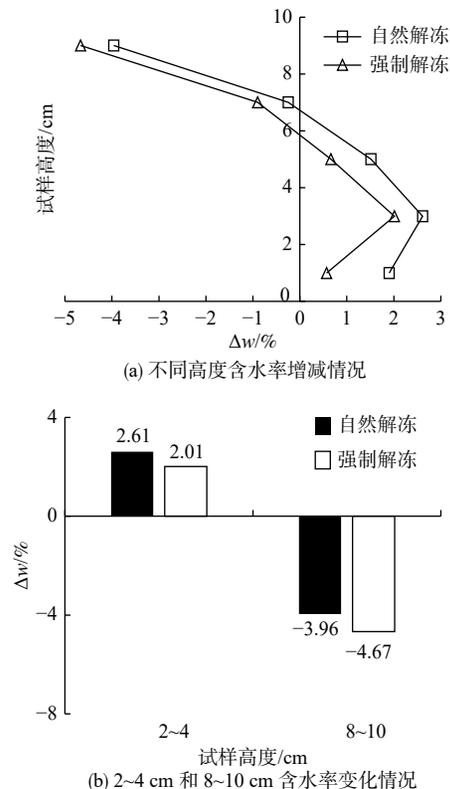


图 4 解冻条件对软黏土含水率变化影响

Fig. 4 Moisture content changes of clay under the influence of different thawing ways

依据上文比较方法, 将 2 种解冻方式下黏土冻融前后 2~4 cm 和 8~10 cm 处含水率差值绘于图 4(b) 中, 由图 4(b) 可知:

(1) 自然解冻的最大含水率增量比强制解冻多约 30%, 但最大含水率减量却相反。这种特殊差异的产生主要是由于自然解冻完成时间比强制解冻长, 融化

锋面推进较慢,水分在自重作用下向下迁移时间更为充足,造成自然解冻试样下部含水率增量大于强制解冻;而强制解冻时最大含水率减量更多,这是因为自然解冻采用提高环境温度的方式,过程平缓,水分挥发量少,而强制解冻方式为试样顶部冷板以恒定 60 °C 热水循环,试样在大温差下上部不仅迅速融化升温,水分损失也随之增大,从而造成这种现象。因此,强制解冻对冻土解冻过程中含水率的影响程度比自然解冻约低 23%。

(2)同一试样含水率最大增量总小于含水率减量,其原因与冷端温度影响下的冻融土含水率变化规律相似。

2.2 干密度与孔隙比差异分析

2.2.1 冷端温度对干密度和孔隙比的影响

对不同冷端温度冻融前后土样,分别在试样上(0~3 cm)、中(3.5~6.5 cm)、下(7~10 cm)段用环刀取样,测得各试样不同高度的干密度和孔隙比,绘制各高度处干密度与孔隙比变化率随冷端温度变化关系(图 5)。

由图 5 可知:

(1)冻融作用使土的干密度减小,孔隙比增大。这是由于冻结过程中存在水分迁移与重分布,使孔隙形态与分布发生改变,同时由于水成冰体积增大,挤压土颗粒,使其产生位移,一方面破坏了土样原有结构,另一方面使孔隙体积比增加。而冰融化时,在融化水分迁移和土颗粒自重的影响下,土粒再次位移,但由于土是非线弹性材料,已损伤的结构无法恢复,新增的孔隙无法消失。因此,冻融作用后土样干密度减小,孔隙比增加。

(2)随冷端温度每降低 1 °C,冻融作用对土样干密度和孔隙比的变化影响减小 4%~8%。由上文可知,随着冷端温度降低,水分迁移量与相变量减少,土颗粒受挤压和孔隙改变程度逐渐缓和,土体体积缩小量和孔隙增加量变少,因此干密度和孔隙比受到的影响程度减小。

(3)不同高度处,冻融土试样的干密度和孔隙比变化量均呈现上端最小、中间次之、下端最大的变化规律。这是由于试样采取自下向上的单向冻结方式,水分向下迁移,累积在冻结锋面处,而含水率越大,冻胀越强烈,这就造成试样结构不同高度受到损伤程度不同,孔隙的增加量也随之不同,干密度与孔隙比的变化程度也不同。

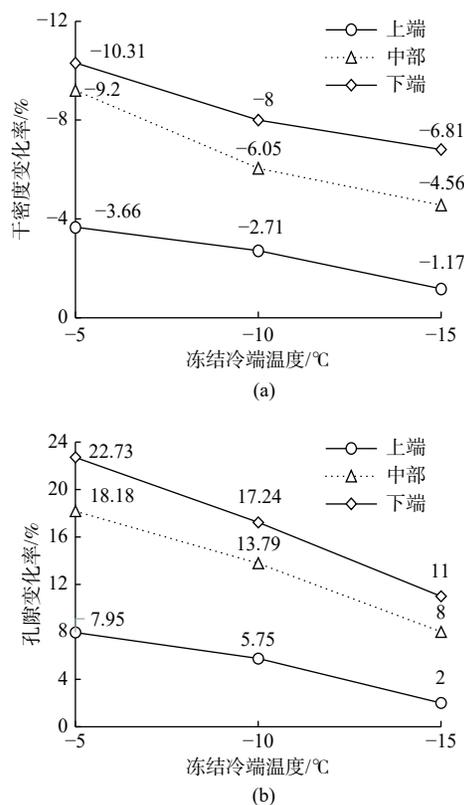


图 5 冷端温度对不同高度干密度和孔隙比影响

Fig. 5 Changes in dry density and void ratio at different heights under the influence of temperatures

2.2.2 解冻条件对干密度和孔隙比的影响

不同解冻条件下冻融土试样不同高度处干密度和孔隙比变化率如图 6 所示。

分析图 6 可知:

(1)自然解冻土样干密度经历冻融作用后减小,而孔隙比增大;强制解冻土样中、下段干密度减小,孔隙比增加,而上端干密度增加,孔隙比减小。自然解冻和强制解冻共存的干密度减小、孔隙比增大现象是因为冻融作用破坏了土体结构,土体不再致密且孔隙增加,从而导致干密度减小,孔隙比增大。而强制解冻试样上部却出现干密度增加、孔隙比减小的特殊现象,究其原因是强制解冻时,利用 60 °C 热源对顶部土样加热,在此过程中,试样上端温度上升至接近顶板温度,土体水分减少更多,同时在热融沉陷作用的影响下,上部土体孔隙量减少,土体变得更加密实,干密度不减反增,孔隙比反而减小。

(2)自然与强制解冻土样均呈现自上而下受冻融作用影响越来越大的规律,这与上文结论一致。

(3)自然解冻时冻融作用对土样干密度和孔隙比的影响更强烈,约为强制解冻的 2 倍。这是因为自然

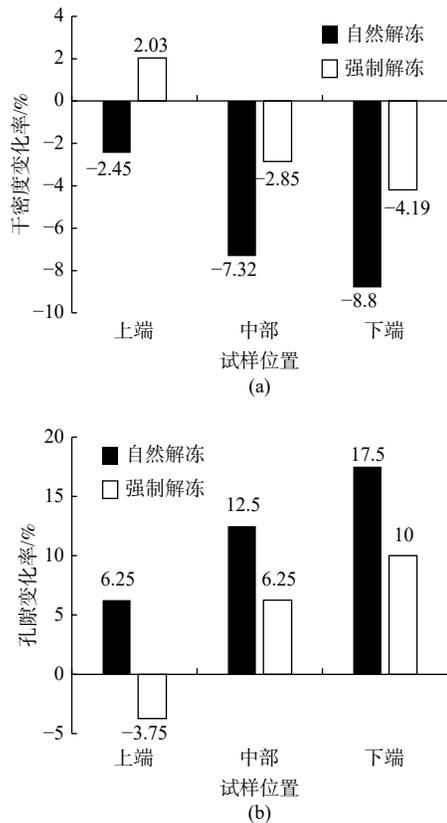


图6 解冻方式对不同高度干密度和孔隙比影响

Fig. 6 Changes in dry density and void ratio at different heights under the influence of different thawing ways

解冻,融沉过程平缓,融化锋面推进较慢,土中冰晶融化与水分迁移更充分,对土体结构产生的影响更大,促进了土颗粒的位移,且土体无法恢复原状结构,因此自然解冻对土体干密度和孔隙比的影响更大。

2.3 渗透性差异分析

本文对原状土及冻融土除进行变水头渗透试验,同时也测定相应试样含水率、干密度、孔隙比的物理参数指标,以探究温度影响下冻融作用对软黏土渗透性的影响规律。渗透试验成果如表5所示。

表5 不同温度渗透试验结果

Table 5 Results of permeability experiment under the influence of different freezing temperatures

土样	渗透系数/($\times 10^{-7}$ cm \cdot s $^{-1}$)	含水率/%	干密度/(g \cdot cm $^{-3}$)	孔隙比
原状土	4.839	37.43	1.82	1.02
-5℃冻融土	9.879	38.69	1.79	1.08
-10℃冻融土	11.49	39.07	1.77	1.11
-15℃冻融土	18.89	39.25	1.76	1.12

由表5对比分析可知:

(1)冻融作用后,黏土含水率略有增大,干密度略微减小,孔隙比稍有增大,渗透系数明显增大1~4倍。

含水率增大,这与冻融过程中不可避免接触空气中冷凝成冰的额外水分有关,且温差越大,冷凝水分越多;而干密度、孔隙比参数变化与上文冻融作用下的结论一致。由于土的颗粒形状、溶液性质、矿物成分、孔隙大小和分布等因素决定了土体的渗透性,冻融作用破坏了土体原有结构,减小了干密度,增大了孔隙比,导致渗透性增大。

(2)随冻结温度降低,渗透系数增大。究其原因:由于采取在恒温环境中进行整样12h的冻结方式,试样冻结由外向内,外部环境温度越低,土样内外的温度梯度愈大,冻结锋面的形成与推移愈快,水分冻结也随之加快,土体孔隙中水的相变作用也越剧烈,此时冻融作用对土体结构破坏越严重,土颗粒不再致密,干密度随之减小;同时,随着水成冰越剧烈,冰体积越大,导致土颗粒位移越大,孔隙数目增加越多,渗流孔隙面积越大,由于土颗粒表面积越大,液相表面的作用更强烈,这进一步增强了水的流动性,而冻土完全融沉后,无法恢复到原有结构。综合因素影响下,渗透性随环境冻结温度的降低而增大。

3 综合分析

(1)冻融海相软黏土渗透性与干密度和孔隙比的变化相关性较强。分别将干密度、孔隙比与渗透系数随温度变化的曲线绘制为图7。由图7可以看出:冻融软黏土的渗透性与孔隙比呈正相关性,与干密度呈负相关性。而考虑到土体的渗透性由土的颗粒形状、溶液性质、矿物成分、孔隙大小和分布等因素决定,在冻融作用不改变土的溶液性质和矿物成分的情况下,冻融土渗透性的变化直接受干密度和孔隙率的影响,因此,冻融前后的渗透系数产生差异性本质上仍是由水分迁移和水分相变引起的。

(2)相较于原状土,单向冻融作用下,随冷端温度降低,试样含水率、干密度和孔隙比三参数变化程度减小,而采取环境恒温冻结时,却呈现变化程度增大的现象,这并不矛盾。比较两种冻结方式后发现:单向冻融以位移变化量稳定为结束标准,此类冻结,冷端温度越高,水分迁移和相变量越多。而以恒温环境温度冻结,时间一定,温度越低时,土体中水分迁移与相变越剧烈,水分迁移和相变量越多,对土体结构破坏程度越大,干密度越来越小,孔隙比反之越来越大,渗透系数越大。因此不同冻结温度与冻融方式实质是影响水分迁移量和相变量大小,其变化量直接影响着冻融土物理参数的变化程度。

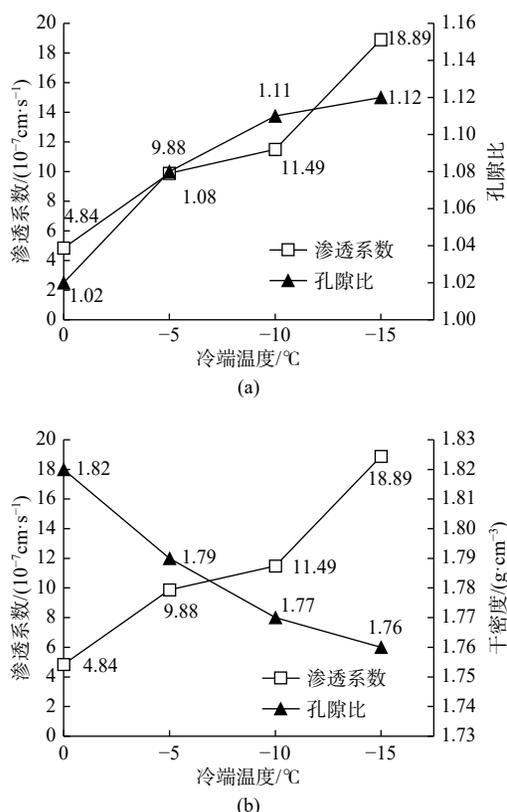


图 7 温度影响下渗透系数与孔隙比及干密度的变化曲线

Fig. 7 Changes in void ratio and permeability coefficient, dry density and permeability coefficient under the influence of different freezing temperatures

因此,冻融作用使土体发生水分迁移,导致含水率重分布,而水分的迁移与相变,扰动与挤压了土颗粒,破坏了土体结构,增大了孔隙比,减小了干密度,导致渗透性变大,这进一步使软黏土冻融后物理力学性质变差,且由于软黏土自身工程性质差,列车运营荷载易使冻融后的软黏土进一步沉降,产生长期融沉。除此之外,水分迁移量与相变量的大小直接影响着试样不同条件下和不同高度处各参数的变化量。由此可见,冻融土各物理参数彼此存在较大的关联,而它们共同受水分的迁移与相变影响,所以工程实际中,运用人工冻结法时,选择合理的制冷温度和强制解冻方式更有利于减小冻融软黏土的物理性质变化;同时,水分迁移机理的研究有助于深入揭示各参数的变化内在机理,而现阶段对水分迁移机理的研究尚无统一的定论,对水分迁移机理的研究有待进一步探讨。

4 结论

(1)冻融作用使软黏土内水分发生迁移和相变,含水率沿单向冻结方向发生重分布;干密度总体减小

并呈现上端最大、中间次之、下端最小的分布规律;而孔隙比与干密度变化呈负相关性,孔隙比总体增大并呈现上端最小、中间次之、下端最大的分布规律;渗透系数变化与孔隙比呈现正相关,与干密度呈现负相关的关系,冻融引起软黏土的干密度减小和孔隙比增大会导致黏土渗透系数增大。

(2)单向冻融作用中,随冷端温度降低,水分迁移越剧烈,完成时间越短,但水分迁移与相变量也减少,土体水分重分布的变化程度逐渐减弱,干密度和孔隙比变化量随之减小,冻结温度每降低 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,冻融作用对 3 个参数产生的影响减小 $4\% \sim 8\%$;而环境恒温冻融作用下,随冷端温度降低,水分迁移越剧烈,水分迁移与相变量越大,渗透系数随之增大 $1 \sim 4$ 倍。

(3)不同解冻条件下,含水率均出现重分布,其分布规律与温度影响下的冻融土相似;干密度呈现自然解冻下自上而下减小越多,而强制解冻下暖端却稍有增大的情况;孔隙比的变化则与干密度相反。与自然解冻相比,强制解冻对土体水分变化影响程度减小约 23% ,对干密度和孔隙比的影响程度减小约 50% 。

(4)冻融作用引起土样冻融前后物理性质产生变化的根本原因是土体冻融过程中存在水分迁移现象,对水分迁移机理的探究有助于揭示冻融土物理性质变化的内在机理,这有待于进一步深入研究。

参考文献 (References) :

- [1] ROMAN L T, ZHANG Z. Effect of freezing-thawing on the physico-mechanical properties of a Morianic clayey loam[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2010, 47(3): 96 - 101.
- [2] WANG D Y, MA W, NIU Y H, et al. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai -Tibet clay[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, 48(1): 34 - 43.
- [3] 杨国清, 杨平, 何文龙, 等. 海相人工冻土热物理特性试验研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(1): 170 - 176. [YANG Guoqing, YANG Ping, HE Wenlong, et al. Experiment study of thermal physical properties of marine artificial frozen soil[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2017, 41(1): 170 - 176. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 陶勇, 杨平, 杨国清, 等. 冻融作用对海相软土压缩性及抗剪强度影响研究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(3): 637 - 645. [TAO Yong, YANG Ping, YANG Guoqing, et al. A

- study on influence of freezing and thawing on compressibility and shear strength of marine soft soil[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(3): 637 – 645. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 丁智, 魏新江, 庄家煌, 等. 地铁列车荷载下冻融土刚度软化试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(4): 987 – 995. [DING Zhi, WEI Xinjiang, ZHUANG Jiahuang, et al. Experimental study on stiffness softening of frozen-thawed soil under subway loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(4): 987 – 995. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 丁智, 洪其浩, 魏新江, 等. 地铁列车荷载下人工冻融软土微观试验研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2017, 51(7): 1291–1299. [DINGZhi, HONGQihao, WEIXinjiang, et al. Experimental study on micro-structure of artificial freezing and thawing soft soil under subway train load[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2017, 51(7): 1291 – 1299. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 李国玉, 马巍, 李宁, 等. 冻融对压实黄土工程地质特性影响的试验研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2010, 8(4): 5 – 7. [LI Guoyu, MA Wei, LI Ning, et al. Experimental research on impact of freezing and thawing on geotechnical properties of compacted loess[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2010, 8(4): 5 – 7. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 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 of freezing-thawing cycle on physico-mechanical properties of loess[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2010, 36(2): 114 – 117. (in Chinese with English abstract)]
- [9] IWATA S. Driving force for water migration in frozen clayey soil[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1980, 26(2): 215 – 227.
- [10] 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(Sup2): 2695 – 2699. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 师华强, 倪万魁, 刘魁, 等. 冻融循环作用对黄土压缩性的影响[J]. *水文地质工程地质*, 2012, 39(3): 45 –
48. [SHI Huaqiang, NI Wankui, LIU Kui, et al. The impact of the freezing-thawing cycle to compression of the loess[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(3): 45 – 48. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 周泓, 张泽, 秦琦, 等. 冻融循环作用下黄土基本物理性质变异性研究[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(1): 162 – 168. [ZHOU Hong, ZHANG Ze, QIN Qi, et al. Research on variability of basic physical properties of loess under freezing-thawing cycles[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 162 – 168. (in Chinese with English abstract)]
- [13] KONRAD J M. Influence of overconsolidation on the freezing characteristics of a clayey silt[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1989, 26(1): 9 – 21.
- [14] TANG Y Q, YAN J J. Effect of freeze-thaw on hydraulic conductivity and microstructure of soft soil in Shanghai area[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(11): 7679 – 7690.
- [15] ZHENG Y, MA W, MU Y H, et al. Analysis of soil structures and the mechanisms under the action of freezing and thawing cycles[C]//16th International Conference on Cold Regions Engineering, July 19 – 22, 2015, Salt Lake City, Utah. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2015.: 25 – 33.
- [16] 郑郢, 马巍, 郝慧. 冻融循环对土结构性影响的试验研究及影响机制分析[J]. *岩土力学*, 2015, 36(5): 1282 – 1287. [ZHENG Yun, MA Wei, BING Hui. Impact of freezing and thawing cycles on structure of soils and its mechanism analysis by laboratory testing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(5): 1282 – 1287. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 房建宏, 陈鑫, 徐安花, 等. 冻融循环对青藏红黏土物理力学性质影响试验研究[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(1): 62 – 69. [FANG Jianhong, CHEN Xin, XU Anhua, et al. Experimental study of the influence of freezing-thawing cycles on physical and mechanical properties of Qinghai-Tibet red clay[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(1): 62 – 69. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 杨平. 原状土与冻融土物理力学性能差异性研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2001, 25(2): 68 – 70. [YANG Ping. Study on the difference of physical and mechanical properties between original and thawing soil[J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2001, 25(2): 68 – 70. (in Chinese with English abstract)]
- [19] VIKLANDER P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw[J]. *Canadian Geotechnical*

- Journal, 1998, 35(3): 471 – 477.
- [20] 肖东辉, 冯文杰, 张泽, 等. 冻融循环作用下黄土渗透性与其结构特征关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 43 – 49. [XIAO Donghui, FENG Wenjie, ZHANG Ze, et al. Research on the relationship between permeability and construction feature of loess under the freeze-thaw cycles[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 42(4): 43 – 49. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 许健, 王掌权, 任建威, 等. 原状与重塑黄土冻融过程渗透特性对比试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(2): 292 – 299. [XU Jian, WANG Zhangquan, REN Jianwei, et al. Comparative experimental study on permeability of undisturbed and remolded loess under freezing-thawing condition[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(2): 292 – 299. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 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-thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1192 – 1198. (in Chinese with English abstract)]
- [23] KONRAD J M, SAMSON M. Influence of freezing temperature on hydraulic conductivity of silty clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(2): 180 – 187.
- [24] 连江波, 张爱军, 郭敏霞, 等. 反复冻融循环对黄土孔隙比及渗透性的影响[J]. 人民长江, 2010, 41(12): 55 – 58. [LIAN Jiangbo, ZHANG Aijun, GUO Minxia X, et al. Influence of iterative freezing-thawing on void ratio and permeability coefficient of loess[J]. Yangtze River, 2010, 41(12): 55 – 58. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 张婷, 杨平. 土体单向冻结对土中水分迁移的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(1): 117 – 121. [ZHANG Ting, YANG Ping. Effects of unilateralist freezing on the moisture migration of soil[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2013, 37(1): 117 – 121. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张明霞