

DOI:10.11918/201909158

# 非饱和分散性黏土多次冻融特性试验

王理想<sup>1,2</sup>, 袁晓铭<sup>1</sup>, 苏安双<sup>2</sup>, 李兆宇<sup>2</sup>

(1. 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室(中国地震局工程力学研究所), 哈尔滨 100080;  
2. 黑龙江省水利科学研究院, 哈尔滨 100086)

**摘 要:** 针对中国季节性冻土区分散性黏土, 通过室内非饱和冻融试验, 探索其在不同初始含水率、干密度、多次冻融下的冻胀融沉特性. 结果表明: 分散性黏土的冻融特性明显区别于一般性非分散性黏土, 其冻胀量远大于非分散土; 多次冻融后, 分散性黏土冻胀表现为冻胀后松散特性, 而非分散土冻胀表现为冻融密实特性; 初始含水率、干密度和冻融次数对融沉系数和冻胀率影响较大; 初始含水率越大, 冻胀量和融沉量越大; 多次冻融后, 分散性黏土内部含水率重新分布, 初始含水率越低, 相应部位含水率增大百分率越大; 在有外界补水下, 初始含水率较高的分散性黏土经过2次以上冻融后均可表现为强冻胀; 不同干密度的分散性黏土, 融沉系数随冻融次数增大而增大, 后趋于稳定. 试验得到的新认识可为“一带一路”北线黑龙江和吉林两省公路、铁路和水利工程建设提供指导, 以采用必要措施减小分散性黏土冻融破坏.

**关键词:** 非饱和分散土; 多次冻融; 季节性冻土区; 冻胀率; 融沉系数

**中图分类号:** U441      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2021)05-0141-07

## Experimental study on properties of unsaturated dispersive clay after multiple freezing-thawing cycles

WANG Lixiang<sup>1,2</sup>, YUAN Xiaoming<sup>1</sup>, SU Anshuang<sup>2</sup>, LI Zhaoyu<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration of China Earthquake Administration (Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration), Harbin 100080, China;  
2. Heilongjiang Province Hydraulic Research Institute, Harbin 100086, China)

**Abstract:** The frost heaving and thawing characteristics of dispersive clay in seasonal frozen soil region of China were studied by freezing-thawing test with different initial moisture contents, dry densities, and multiple freezing-thawing cycles. Results show that the freezing-thawing characteristics of dispersive clay were significantly different from those of non-dispersive clay, and the frost heaving amount of dispersive clay was much larger than that of non-dispersive clay. After several cycles of freezing-thawing, the dispersive clay exhibited loose property after frost heaving, while the non-dispersive clay showed compaction property. The initial moisture content, dry density, and freezing-thawing times had great influence on the thawing settlement coefficient and frost heave rate. The larger the initial moisture content was, the larger the frost heaving amount and the thawing settlement were. After multiple freezing-thawing cycles, the internal moisture content of the dispersive clay was re-distributed, and the lower the initial moisture content was, the higher the percentage increase of moisture content was in the corresponding part. In the case of external water replenishment, the dispersive clay with higher initial moisture content exhibited strong frost heaving after more than two times of freezing-thawing. For dispersive clay with different dry densities, the thawing settlement coefficient increased with increasing numbers of freezing-thawing cycles, and then tended to be stable. The experiment results will provide guidance for the necessary measures to reduce freezing-thawing damages of dispersive clay in the construction of highways, railways, and water conservancy projects in the northern line of “Belt and Road” in Heilongjiang and Jilin provinces.

**Keywords:** unsaturated dispersive clay; freeze-thaw cycles; seasonal frozen soil region; frost heave rate; thawing settlement coefficient

收稿日期: 2019-09-20

基金项目: 中央级公益性研究所基本科研业务费专项重点项目(2018A01); 国家自然科学基金(51378164); 黑龙江省自然科学基金(ZD2019009)

作者简介: 王理想(1987—), 男, 工程师, 博士研究生;  
袁晓铭(1963—), 男, 研究员, 博士生导师

通信作者: 袁晓铭, yxmim@163.com

分散性黏土作为一种特殊土, 广泛分布在世界各地. 20 世纪 50 年代最先发现于澳大利亚昆士兰地区, 之后在美国、以色列、南非、墨西哥、巴西、泰国以及中国东北松嫩平原和湖北、浙江、广西、山东和河南等地发现其广泛分布. 澳大利亚和美国的学者开始对其分散性机理和鉴定进行了试验研究. 20 世

纪 80 年代,中国水利科学研究院对黑龙江省南部引嫩工程分散性黏土渠道的冲蚀破坏进行了试验研究,提出了分散性黏土筑坝和破坏治理的方法<sup>[1]</sup>. 西北农林科技大学樊恒辉和中国科学院武汉岩土力学研究所孔令伟等<sup>[2]</sup>对分散性土进行了系统的研究并出版了一本专著.

国内外学者主要对土的冻胀融沉特性影响因素、有荷载作用下的冻胀特性以及土的矿物成分对冻胀影响方面的研究为主. Everest<sup>[3]</sup>提出了第一冻结理论. Han 等<sup>[4-5]</sup>通过大比例土体模型试验,研究了土体的冻融特性. Klinova 等<sup>[6]</sup>通过试验研究了土体融沉与含水率、干密度、孔隙率之间的关系. 吴礼舟等<sup>[7]</sup>对封闭系统下的非饱和黏土的一次冻胀融沉过程进行了研究,提出不同饱和度和密度下冻胀融沉变形特性,重点研究冻胀过程中冻结锋面的移动规律. 王颖<sup>[8]</sup>对吉林西部地区分散性黏土采用自制的恒温箱进行冻胀融沉试验,但是控制箱分 3 层,每层控制温度均不同且为三维冻结,实际工程现场为半无限体场地的一维冻结. 杨成松等<sup>[9]</sup>通过试验研究了冻融作用对土体干密度和含水率的影响. 梁波等<sup>[10]</sup>研究了土的多次冻融,然而控制条件为封闭条件下,这往往与工程实际不符. 严晗等<sup>[11]</sup>对粉砂土反复冻融特性进行了研究,试验采用冻结和融化温度也比较高,对高寒地区工程指导意义有限. 林超<sup>[12]</sup>针对黏土矿物对冻胀的影响,采用由蒙脱土、伊利土、高岭土、硅粉与玻璃微珠按照一定比例混合制备而成的人工配比试样,对一定温度、补水条件下黏性土的冻胀量进行了系统研究. 但这些研究主要针对一般黏性土和砂土,国内外对分散性黏土多次冻胀融沉研究尚少.

中国东北高寒区分散土筑堤起于 20 世纪 80 年代,分散土在松嫩平原上广泛分布,深度约 1.5 m,在这种区域筑坝和渠道无法避免使用分散土. 国家 172 项重点水利工程之一的新建尼尔基水库引嫩扩建工程南引引水渠道现场踏勘中发现,新建渠道护坡和堤顶道路路基由于冻胀融沉发生了变形破坏. 由于筑坝采用的分散性黏土中含较多的钠基蒙脱石和伊利石,施工过程中土体内部的水分很难排出,工程完工后经历了两个冻融期后护坡产生了远大于其他护坡的冻胀变形,严重威胁了工程的质量与安全. 需要特别指出的是,工程上对一般黏性土冻胀灾害采用的土层置换方法,对于中国广泛分布分散土的东北高寒地区并不适宜. 由于缺乏置换土源,置换成本每公里高达上千万,只能另辟蹊径. 因此,研究

探索分散土冻融特性,对解决东北高寒地区的工程问题有重要的意义.

本文以黑龙江省大庆地区广泛分布的分散性黏土为研究对象,通过严格控制试验条件来模拟现场条件,研究土体内部水分的迁移、温度冷锋传播和分布特点、与一般性非分散性黏土冻胀融沉的不同以及冻胀融沉特性与土体含水率、干密度和冻融次数的关系.

## 1 非饱和和分散性黏土的破坏

从目前国内外已有的研究成果来看,分散性黏土具有低液限、易受侵蚀的特点. 在高寒和地下水位较高地区,分散性黏土又具有很强的冻胀性. 图 1(a)为分散土渠道护坡在高寒地区出现的冻胀破坏,现场监测发现冻胀变形为强冻胀,冻胀量达 5~10 cm,这种冻胀特性明显有别于非分散土渠道冻胀的特性. 图 1(b)为经历冻融后的分散土路基受降雨侵蚀后发生破坏,多次冻融作用对分散土的劣化影响使其更易被冲蚀,严重威胁到工程质量安全. 这种破坏往往是由于先期发生冻融变形而使得土体变得更为松散,在降雨和遇水浸泡作用下分散土渠道发生滑坡和侵蚀.



(a) 分散土渠道冻胀破坏



(b) 分散土路基侵蚀破坏

图 1 分散土冻胀和侵蚀破坏

Fig. 1 Frost heave and erosion damages of dispersive clay

2 试验设计

2.1 试样的制备与试验工况

土样取自尼尔基水库引嫩扩建工程南部引嫩工程料场,实验室通过碎屑试验、针孔试验、交换钠质量分数和双比重计法综合判断该土料为分散性黏土. 根据 GB/T 0123—1999《土工试验方法标准》,对

土料的颗粒组成、液塑限、最大干密度和最优含水率等指标进行试验. 根据试验,该土定名为低液限粉质黏土 CL, 液限 35%, 塑限 19%, 最大干密度 1.65 g/cm<sup>3</sup>, 最优含水率 19.6%. 现场填筑控制压实度 0.93 (控制干密度 1.53 g/cm<sup>3</sup>), 控制含水率  $w_{\text{ol}} \pm 2\%$ . 该土样的物理性质见表 1, 土样的分散性鉴定见表 2.

表 1 分散土的物理性质  
Tab. 1 Physical properties of dispersive clay

| 相对体积<br>质量 | 液限 $\omega_L$ | 塑限 $\omega_P$ | $w$ (黏土矿物)/% |     |     | 颗粒组成/mm |               |        | pH   | $w$ (有机质)/% |
|------------|---------------|---------------|--------------|-----|-----|---------|---------------|--------|------|-------------|
|            |               |               | 蒙脱/伊利混层      | 伊利石 | 高岭石 | >0.075  | 0.075 ~ 0.005 | <0.005 |      |             |
| 2.71       | 35            | 19            | 72           | 14  | 7   | 30      | 47            | 23     | 9.44 | 0.78        |

表 2 土样的分散性鉴定  
Tab. 2 Dispersibility of soil sample

| 碎屑试验 | 双比重计试验<br>分散度/% | 针孔试验                      |       |        |                            |    | $w$ (可交换钠)/% | 判定结果 |
|------|-----------------|---------------------------|-------|--------|----------------------------|----|--------------|------|
|      |                 | 干密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 水头/mm | 终了孔径/倍 | 终了流量/(mL·s <sup>-1</sup> ) | 水色 |              |      |
| 分散   | 96.6            | 1.53                      | 50    | 3      | 1.7                        | 浑浊 | 23.15        | 分散土  |

注:土样分散性判定采用美国土壤保持局推荐方法标准、美国 ASTM D4647—1993 和 SL251—2000《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》中所列方法和标准.

土样烘干研磨过 2 mm 筛,根据试验方案加蒸馏水调制试验所需含水率土样并焖土 24 h. 待土样含水率分布均匀后,制备试验所需试样,试样直径 10 cm,高度 10 cm,分 5 层击实. 试验采用开放系统,补水条件下的单向一维冻结融化,试样外层用 5 层土工布做保温处理. 试验方案设计如表 3 所示,考虑到现场调研尼尔基水库南部引嫩工程渠道经过 2 次冻融后护坡已经破坏,本次试验冻融次数定为 4 次. 第 9 号和第 10 号样为不具有分散性的一般粉质黏土对比样,经过实验室鉴定该土样颗粒组成与试验分散性黏土颗粒组成近似,该土物理性质见表 4.

表 3 试验方案设计  
Tab. 3 Design of test schemes

| 序号 | 土样<br>编号   | 冻融<br>次数 | 初始含<br>水率/% | 干密度/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 冻结温<br>度/℃ | 融化温<br>度/℃ |
|----|------------|----------|-------------|-------------------------------|------------|------------|
| 1  | W18D1.53   | 4        | 18          | 1.53                          | -20        | 20         |
| 2  | W20D1.53   | 4        | 20          | 1.53                          | -20        | 20         |
| 3  | W22D1.53   | 4        | 22          | 1.53                          | -20        | 20         |
| 4  | W24D1.53   | 4        | 24          | 1.53                          | -20        | 20         |
| 5  | W18D1.55   | 4        | 18          | 1.55                          | -20        | 20         |
| 6  | W18D1.59   | 4        | 18          | 1.59                          | -20        | 20         |
| 7  | W18D1.61   | 4        | 18          | 1.61                          | -20        | 20         |
| 8  | W18D1.63   | 4        | 18          | 1.63                          | -20        | 20         |
| 9  | W20D1.53-1 | 4        | 20          | 1.53                          | -20        | 20         |
| 10 | W24D1.53-1 | 4        | 24          | 1.53                          | -20        | 20         |

注:编号 W18D1.53 表示含水率为 18%、干密度为 1.53 g/cm<sup>3</sup>.

表 4 一般粉质黏土的物理性质  
Tab. 4 Physical properties of silty clay

| 相对体积<br>质量 | 液限 $\omega_L$ | 塑限 $\omega_P$ | 颗粒组成/mm |               |        | $w$ (有机<br>质)/% |
|------------|---------------|---------------|---------|---------------|--------|-----------------|
|            |               |               | >0.075  | 0.075 ~ 0.005 | <0.005 |                 |
| 2.72       | 39            | 25            | 31      | 50            | 19     | 2.33            |

2.2 试验设备与试验过程

冻胀融沉试验装置如图 2 所示,该试验装置由试样罐(包括保温)、恒温冷浴和恒温暖端、位移传感器、温度传感器、补水瓶和电脑采集系统组成. 为了模拟黑龙江省南部引嫩工程渠道与堤顶路基现场工况,试验采用一维单向冻结融沉,顶部冷端温度采用最冷月(1 月份)平均温度约 -20 ℃,底部暖端温度与初始土体内部温度(夏季平均值)约 15 ℃保持一致,融化时顶部温度为 20 ℃. 试样罐采用 5 层土工布做保温处理,温度控制精度为  $\pm 0.2$  ℃. 试样顶部采用位移传感器采集试样位移量,试样罐一侧安装 5 个温度传感器用于监测土样冻融过程中的温度变化,位置分别位于试样顶部向下 1,3,5,7 和 9 cm 处.

为了模拟现场冻融交替变化,制样完成后先将试样放在恒温箱里保存 12 h 至土温约为 15 ℃,然后将试样放入冻融试验箱里,冻融试验箱环境和暖端温度为 15 ℃. 调节顶部冷浴,顶部温度由 15 ℃迅速线性降低到 -20 ℃,一直保持这个温度单向冻结 12 h,然后调节顶部温度为 20 ℃,单向融化 12 h. 以此类推,再冻结 12 h,融化 12 h,完成表 3 所示的试

验. 补水瓶高度位于试样底部以上 2 cm 处,目的是模拟现场水位高度. 试验完成后,立即拆样称取试样重量确定补水量和试样不同部位的含水率,含水率取样部位从试样顶部算起 1,4,7 和 10 cm 处. 为了控制水分流动,将拆开的土样平放并用钢丝锯分别切开取样.

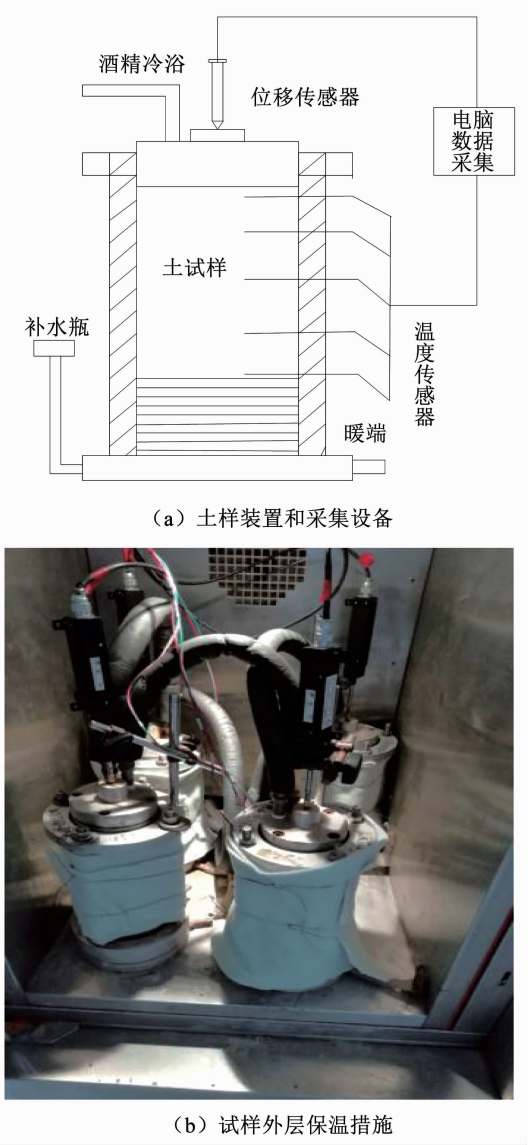


图 2 冻融试验装置

Fig. 2 Freezing-thawing test device

3 多次冻融过程分析

3.1 试样内部含水率分布

本试验由于顶部温度低,存在较大的温度梯度,试样内部的水分由底部向顶部迁移. 图 3(a)为不同初始含水率的试样内部不同部位含水率的变化,在孔隙比相同的情况下,试样各个部位的含水率均大于初始含水率且低温顶部部位的含水率较其他部位含水率大,试样底部(10 cm 处)由于接触补水的原因含水率也接近饱和状态. 图 3(b)为在相同孔隙比

的状态下,不同含水率试样在相同冻融次数下吸水能力(吸水能力是指土样较初始含水率增大的百分率)的差异. 初始含水率越低,吸水能力越强,试样需要补水量越大,其中初始含水率 18% 试样的补水量是初始含水率 24% 试样补水量的 2 倍以上. 试样内部的两个取样点(4 和 7 cm 处)由于分散土弱渗透性而补水不足,该部位的含水率较顶部和底部(接触补水)部位的含水率小.

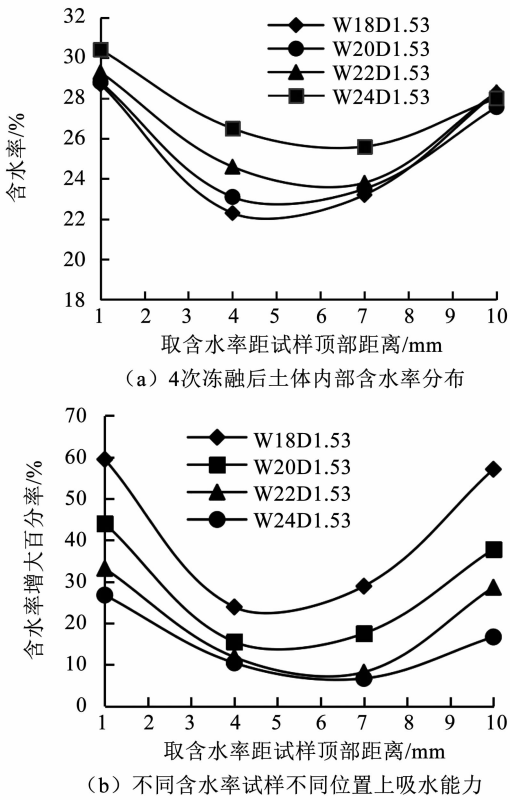


图 3 4 次冻融后土样内部含水率变化与吸水能力

Fig. 3 Internal moisture content distribution and water absorption of samples after four times of freezing-thawing

图 4 表明,在相同含水率(18%)下,对于分散性黏土经过 4 次冻融后各个部位含水率(距顶部距离 1,4,7,10 cm 处)随着干密度增大而减小,干密度的增大造成孔隙比减小,阻碍了水分的迁移.

3.2 试样内部温度分布

根据 GB/T 0123—1999《土工试验方法标准》规定,测得该非饱和分散性黏土的初始冻结温度为  $-0.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 图 5(a)为 W18D1.59 试样不同位置温度监测点在一个冻结过程中温度的变化. 试样在 2 h 内冻深约 1.5 cm,4 h 时冻深约 5 cm,10 h 冻深约 7.5 cm. 在试样内部初始温度相同下,冻结后试样内部温度沿高度方向上呈线性变化,其他试样亦具有相同的线性关系. 图 5(b)为土样冻结锋面随冻结时间的关系,土样冻结锋面前期 5 h 内移动与冻结时间呈线性关系,后期移动逐渐变慢并趋于稳定.

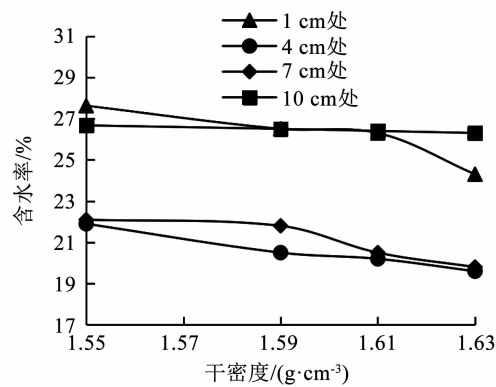
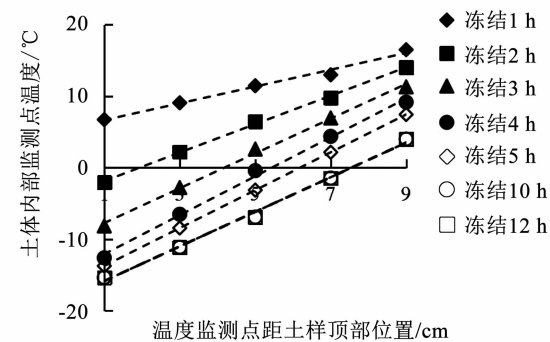
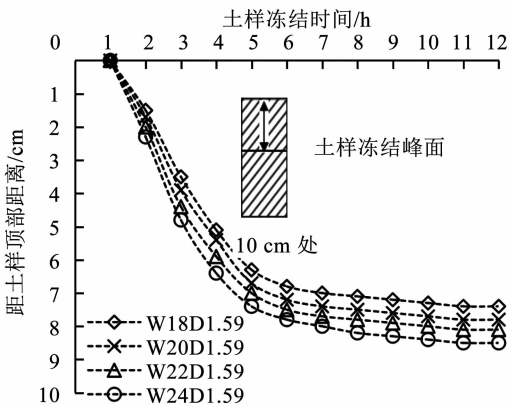


图4 4次冻融下相同初始含水率(18%)不同干密度试样各部位含水率变化

Fig. 4 Internal moisture content of samples at different parts with same initial moisture content (18%) and different dry densities through four times of freezing-thawing



(a) 5个温度监测点在一个冻结过程中的温度变化



(b) 冻结锋面移动与冻结时间的关系

图5 W18D1.59 试样内部监测点温度变化

Fig. 5 Temperature variation of internal monitoring points of sample W18D1.59

3.3 试样高度变化

图6为初始孔隙比相同,不同含水率下冻胀与融沉后试样高度变化,可以看出,初始含水率越大,冻胀量和融沉量也较大.

图7为不同初始干密度下试样冻融高度变化.可以看出,相同初始含水率下4次冻融后,当初始干密度为1.59 g/cm³时冻胀量最大,主要是因为初始干密度较小时,土中孔隙通道较大,不利于毛细水和

因温度梯度对水分的迁移作用;当初始干密度较大时,密实度较大,孔隙通道很小,对水分的迁移起到阻碍的作用.随着4次冻融循环,不同干密度下最终的冻胀量和融沉量逐渐趋于稳定.

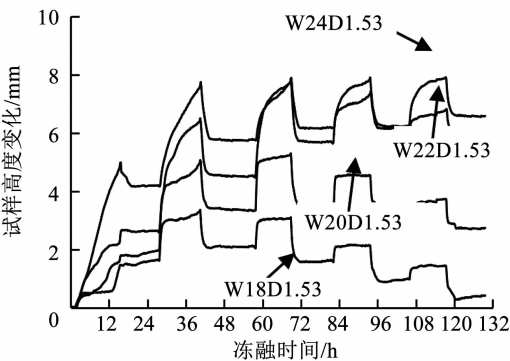


图6 不同初始含水率试样高度变化(正值为增大,下同)

Fig. 6 Variation of sample height under different initial moisture contents

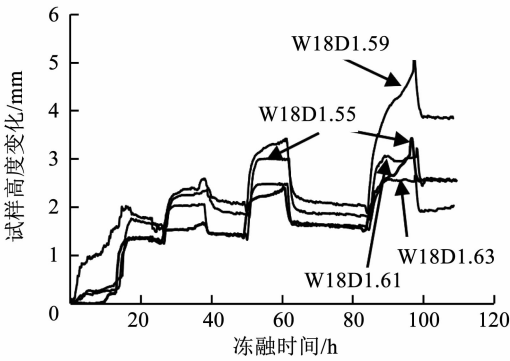


图7 不同初始干密度试样高度变化

Fig. 7 Variation of sample height under different dry densities

3.4 分散性黏土与一般黏性土冻融特性差异

采用颗粒含量近似的一般粉质黏土对比试验,一般粉质黏土的物理性质见表3,其他试验条件完全相同.在图8中,相同工况下分散土和非分散土在第一个冻融循环下,冻胀量和融沉量相差不大.在经历多次冻融循环后,分散土的冻胀量大于融沉量,并表现为冻胀量具有逐渐累积的性质,试样表现为冻融后松散的性质.非分散土多次冻融的冻胀量明显小于融沉量,表现为冻融后土体密实的性质.图8中分散土的冻胀量明显大于非分散土,主要因为分散土黏土矿物中蒙脱石和伊利石含量达到70%以上,蒙脱石和伊利石由于较大的比表面积而亲水性强,使分散土的冻胀量明显大于非分散土的.分散性黏土在多次冻融后并不像一般黏性土那样随着多次冻融孔隙水可以排出.

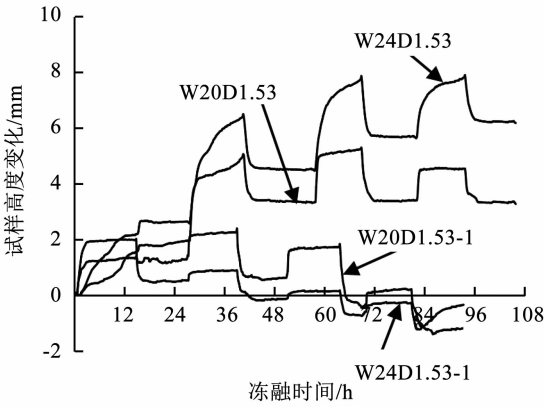


图 8 非分散性黏性土与分散性黏土多次冻融后试样高度变化  
Fig. 8 Variation of heights of dispersive clay and non-dispersive clay after repeated freezing and thawing

4 冻胀率与融沉系数影响因素分析

根据 GB/T 0123—1999《土工试验方法标准》，采用冻胀率和融沉系数评价非饱和和分散性黏土的冻胀融沉特性<sup>[13-17]</sup>。

冻胀率按下式计算

$$\eta = \frac{\Delta h}{H_f} \times 100.$$

式中： $\eta$  为冻胀率（%）， $\Delta h$  为试验期间总冻胀量（mm）， $H_f$  为冻结深度（mm）（不包括冻胀量）。这里的冻结深度采用温度监测点温度内插的方式近似计算。

融沉系数按下式计算

$$a_0 = \frac{\Delta h_0}{h_0} \times 100.$$

式中： $a_0$  为冻土融沉系数， $\Delta h_0$  为冻土融化下沉量（mm）， $h_0$  为冻土试验初始高度（mm）。

4.1 干密度的影响

图 9 表明，不同干密度非饱和和分散性黏土中，融沉系数随冻融次数增大而增大并趋于稳定，密度越大，稳定得越快，且融沉系数越小。图 10 为不同干密度下冻胀率关系，随着冻融次数增加，冻胀率逐渐增大。密度越大，冻胀率越小。在保证含水率情况下，有效提高土方填筑干密度可以有效减小分散性黏土冻胀量和融沉量。

4.2 初始含水率的影响

图 11 表明，非饱和和分散性黏土在不同初始含水率下，融沉系数随冻融次数增大而先增大后减小。图 12 表明，在不同初始含水率下，冻胀率随冻融次数先增大后缓慢减小并趋于不变。在初始含水率较高（大于 20%）时，经过 2 次以上冻胀土体表现为强冻胀，寒区工程建设中需要进一步对分散土内部排水和隔水进行研究。

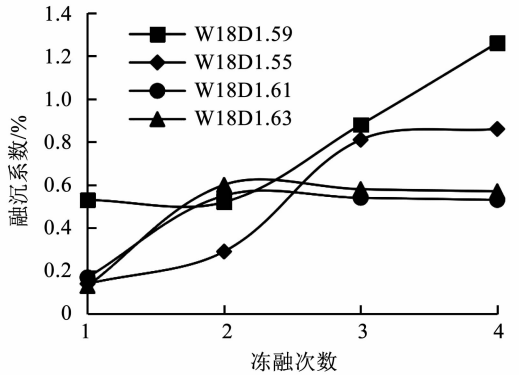


图 9 不同干密度下试样融沉系数关系  
Fig. 9 Curves of thawing settlement coefficient under different dry densities

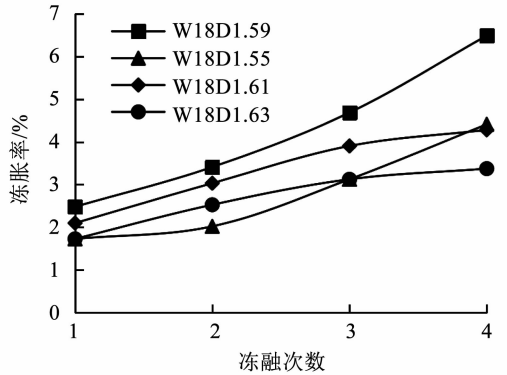


图 10 不同干密度下试样冻胀率关系  
Fig. 10 Curves of frost heave rate under different dry densities

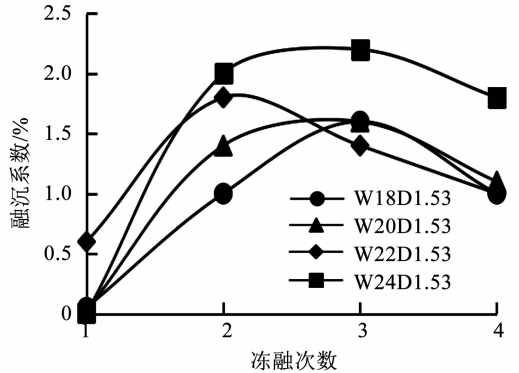


图 11 不同初始含水率下试样融沉系数关系  
Fig. 11 Curves of thawing settlement coefficient under different initial water contents

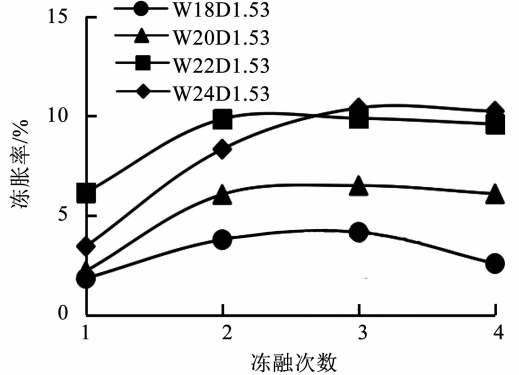


图 12 不同初始含水率下试样冻胀率关系  
Fig. 12 Curves of frost heave rate under different initial water contents

# 5 结 论

- 1) 分散性黏土的冻融特性明显区别于一般性非分散性黏土,其冻胀量远大于非分散土,对工程危害更为严重. 多次冻融后,分散性黏土冻胀表现为冻胀后松散特性,而非分散土冻胀表现为冻融密实特性.
- 2) 多次冻融后分散性黏土内部含水率重新分布,初始含水率越低,相应部位含水率增大百分率越大,吸水能力越强;在有外界补水下,初始含水率较高的分散性黏土经过两次以上冻融后均可表现为强冻胀.
- 3) 初始含水率对分散性黏土冻胀量和融沉量影响较大. 融沉系数随冻融次数增大先增大后减小;冻胀率随着冻融次数先增大后缓慢减小并趋于稳定.
- 4) 干密度对分散性黏土冻胀量和融沉量影响较大. 不同干密度的分散性黏土,融沉系数随冻融次数增大而增大,后趋于稳定;干密度越大融沉系数稳定越快,且融沉系数越小.
- 5) 控制初始含水率和干密度可以有效降低分散性黏土冻胀量和融沉量,在寒区工程建设中需进一步研究工程排水和隔水等措施,减小冻融对建筑物的破坏.

# 参考文献

[1] 王观平, 张来文, 阎仰中, 等. 分散性粘土与水利工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999  
WANG Guanping, ZHANG Laiwen, YAN Yangzhong, et al. Dispersible clay and hydraulic engineering [M]. Beijing: China Water & Power Press, 1999

[2] 樊恒辉, 孔令伟. 分散性土研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012  
FAN Henghui, KONG Lingwei. Study on dispersive soils [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012

[3] EVERETT D H. The thermodynamics of frost damage to porous solids [J]. Transactions of the Faraday Society, 1961, 57: 1541. DOI: 10.1039/TF9615701541

[4] HAN S J, GOODINGS D J. Practical model of frost heave in clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(1): 92. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:1(92)

[5] TANAKA T, HAUNG S, FUKUDA M, et al. A study on cold region pipeline design based on full-scaled field experiment [C]// Proceedings of 7th International Pipeline Conference. Calgary: ASME, 2009: 211. DOI: 10.1115/IPC2008-64068

[6] KLINOVA G, AKSENOV V I, DZHAKHANGIROVA N I. Thaw-induced deformation properties of frozen soils[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2010, 47(3): 102. DOI: 10.1007/S11204-010-9062-2

[7] 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, 32(4): 1025  
WU Lizhou, XU Qiang, HUANG Runqiu. Analysis of freezing-

thawing test process of unsaturated clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1025. DOI: 10.16285/j.rsm.2011.04.049

[8] 王颖. 吉林西部粘性土分散性判别及冻融试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010  
WANG Ying. Research on dispersive identification and freeze-thaw cycles of clay soil in the west part of Jilin [D]. Changchun: Jilin University, 2010

[9] 杨成松, 何平, 程国栋. 冻融作用对土体干容重和含水率影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊2): 2695  
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(S2): 2695. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2003.z2.033

[10] 梁波, 张贵生, 刘德仁. 冻融循环条件下土的融沉性质试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1213  
LIANG Bo, ZHANG Guisheng, LIU Deren. Experimental study on thawing subsidence characters of permafrost under frost heaving and thawing circulation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1213. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2006.10.007

[11] 严晗, 王天亮, 刘建坤. 粉砂土反复冻胀融沉特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3159  
YAN Han, WANG Tianliang, LIU Jiankun. Experimental study of repeated frost heave and thaw settlement properties of silty sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3159. DOI:10.16285/j.rsm.2013.11.012

[12] 林超. 粉质粘土中粘土矿物对冻胀影响试验研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017  
LIN Chao. Experimental study on the effect of frost heave of clay minerals in silty clays [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017

[13] 周扬. 冻土冻胀理论模型及冻胀控制研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009  
ZHOU Yang. Study on frost heave model and frost heave control of frozen soils [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009

[14] 胡坤. 冻土水热耦合分离冰冻胀模型的发展 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011  
HU Kun. Development of separated ice model coupled heat and moisture transfer in freezing soils [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011

[15] 李洪升, 张斌, 刘增利, 等. 一维冻结土体冻胀量的水热力耦合计算[J]. 大连理工大学学报, 1999, 39(5): 621  
LI Hongsheng, ZHANG Bin, LIU Zengli, et al. Calculation method for coupled moisture, heat and pressure of frost heave on one-dimensional freezing soil [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1999, 39(5): 621

[16] HERMANSSON A. Laboratory and field testing on rate of frost heave versus heat extraction [J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38(2/3): 137. DOI: 10.1016/j.coldregions.2003.10.002

[17] 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999  
Standard for soil test method: GB/T 50123—1999 [S]. Beijing: China Planning Press, 1999