

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.1194

LI Siqi, YANG Ping, ZHANG Ting, et al. Experimental study on the frost heave and thaw settlement properties of cement-improved silty clay[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(4):1102-1110. [李思齐, 杨平, 张婷, 等. 粉质黏土水泥土冻胀融沉特性研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(4):1102-1110.]

## 粉质黏土水泥土冻胀融沉特性研究

李思齐<sup>1,2</sup>, 杨平<sup>1</sup>, 张婷<sup>1</sup>, 鲍俊安<sup>1</sup>

(1. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 国网安徽省电力有限公司 铜陵供电公司, 安徽 铜陵 244000)

**摘要:** 为研究水泥土冻胀融沉特性,对南京地区典型粉质黏土进行了不同条件下的冻胀融沉试验。试验控制因素包括水泥掺入比、含水率、龄期、冷端温度和荷载等,各控制因素在包含基准数值的区间内选取代表性条件进行单一变量试验。试验采用自制冻胀融沉仪进行,冻胀融沉仪下部为制冷块,上部设置补水装置,模拟真实土体冻结时水分迁移过程。结果表明:粉质黏土水泥土冻胀率随水泥掺入比增大、龄期增加呈指数规律减小,随含水率增大、冷端温度升高和荷载减小呈线性增大;融沉系数随水泥掺入比变化规律与冻胀率类似,同一条件下融沉系数均大于冻胀率;水泥土完成融沉的时间随解冻温度升高而减少,但最终融沉系数相同;冻胀融沉存在合理水泥掺入比,粉质黏土的合理水泥掺入比为10%,此时冻胀率为1.56%,融沉系数为2.15%。据此提出,冻结法施工时,预先在土体中按合理水泥掺入比掺入水泥,既可有效抑制土体冻胀融沉,又可提高施工效率。

**关键词:** 水泥土; 水泥掺入比; 冻胀; 融沉

**中图分类号:** TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)04-1102-09

### 0 引言

近年来,采用人工冻结法进行止水和加固广泛应用于工程实际,其施工对周围环境的影响也日益凸显<sup>[1]</sup>。在施工过程中,土体冻结后融化,使冻结区产生冻胀融沉现象,如不及时控制,会引发地面隆起变形和地下土体结构破坏等现象,影响正常的施工进度,甚至造成工程事故<sup>[2-3]</sup>。冻胀现象的产生主要原因是水分的迁移<sup>[4-5]</sup>,因此在地下水丰富地区采用人工冻结法进行土体加固时冻胀现象尤为明显。而融沉作用机理较为复杂,一般分为“标准融化沉降”(包括融化引起的土体自身沉降和恒压沉降)和“可变压缩沉降”(上覆压力增加引起的沉降)两个阶段<sup>[6]</sup>。目前用于抑制冻胀融沉的方法较为被动,通常在冻胀融沉发生后通过改变土层特性来减小冻胀融沉量,如通过钻孔卸压减少冻胀量、在自然解冻过程中跟踪注浆减少融沉量。这些方法有较大的滞后性,且施工工艺复杂,很难从根本上解决

土体冻胀融沉问题<sup>[7-9]</sup>。

冻融变化程度受土体组分和外部因素共同作用。于琳琳<sup>[10]</sup>针对温度场、温度梯度、冻结锋面、含水率及干密度等因素对重塑土和原状粉质黏土进行冻胀试验,并验证了土中水分迁移现象。除此之外,击实度对土体冻胀影响也较为明显,含盐量较低时,冻胀与击实度成正比;含盐量较高时,冻胀与击实度成反比<sup>[11]</sup>。现场试验和室内试验结合研究表明,冰含量、冻结速率和冷端温度也是影响冻胀压力的重要因素<sup>[12-13]</sup>。而冻土融沉的影响因素主要为含冰量和干密度,含冰量大则冻土融化后的沉降量大,干容重较大的冻土,融沉系数较小<sup>[14]</sup>。

水泥土常被用于地层加固止水,改变土体微观结构可以有效降低土体渗透系数,研究发现其在抑制土体冻胀融沉方面效果显著。Sabry等<sup>[15-16]</sup>较早对掺入水泥后土体的冻融循环特性和长期耐久性进行了研究,发现改善材料的性质,可满足不同程

收稿日期: 2018-11-18; 修订日期: 2021-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478226)资助

作者简介: 李思齐, 助理工程师, 主要从事城市地下工程研究. E-mail: 997153982@qq.com

通信作者: 杨平, 教授, 主要从事岩土与地下工程研究. E-mail: yangping@njfu.edu.cn

度的耐久性要求。之后对水泥土冻融特性的研究逐渐兴起,通过对不同土体掺入水泥后的特性进行研究,发现水泥土冻结引起的最大地表隆起量和总体地表隆起量均减小,且水泥掺入量对土体冻胀融沉的抑制是有限度的,不同土体水泥掺入比存在适宜范围<sup>[17-19]</sup>。Hotineanu 等<sup>[20]</sup>、Makki-Szymkiewicz 等<sup>[21]</sup>研究了不同含水率下水泥土冻融后的抗压强度,发现含水率的增加使固化土抗压强度下降。王天亮等<sup>[22]</sup>、陆永港等<sup>[23]</sup>通过控制水泥掺量和颗粒级配方法研究碎石基床的冻融特性,发现掺入水泥稳定级配碎石代替普通碎石可以有效弥补粒径缺失导致的土体强度降低问题,添加 EPS 颗粒同样可以防止土体强度降低,减少冻融变形量<sup>[24]</sup>,但这两种方法均会增大土体干缩、温缩变形<sup>[25]</sup>。进一步研究表明在水泥土中添加脱硫石膏、粉煤灰和石灰等外加剂可明显提高复合水泥土强度、抗渗性和抗冻融耐久性<sup>[26-29]</sup>。杨国涛等<sup>[30]</sup>运用数理统计等手段,综合考虑细粒含量、颗粒粒径及水泥含量对冻胀量的影响规律,建立冻胀率的计算分析模型,对不同渗水性要求的路基需采用不同水泥掺量和颗粒级配。试验分析和理论研究显示,水泥改良地层控制冻胀融沉的基本机理是,水泥改良作用降低了土的渗透性,阻止了水分迁移量,减少了冰分凝作用,从而减少了冻胀<sup>[31]</sup>。

由以上可知,在土体中掺入水泥可有效抑制自

然或人工冻结条件下土体冻胀融沉,但水泥掺入比、含水率、龄期、冷端温度、荷载等因素对水泥土冻胀融沉影响的具体变化规律尚不清楚。特别是粉质黏土的物理力学特性较差<sup>[32-33]</sup>,冻胀融沉变形较大,采用水泥土改良来抑制冻胀融沉很有必要。为从理论上揭示粉质黏土水泥土冻胀融沉的规律,本文就这些因素对水泥土冻胀融沉特性影响进行了研究。

## 1 材料与方法

掺入比(水泥浆与重塑土的质量比值)作为单一自变量时,存在合理掺入比 $\lambda_n$ 。即当水泥掺入比为 $\lambda_n$ 时,水泥土抑制冻胀融沉的效果较好,满足实际工程中对冻胀融沉的要求,同时具有较好的经济效益。确定合理掺入比后,在后面的试验中均采用该值,以研究其他因素对水泥土冻胀融沉的影响。水泥标准养护时间为 28 天,此时水泥强度可达到设计强度的 90%,故取 28 天为试验基准龄期。一般把平均温度达到 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 作为冻结法施工的设计要求,故取 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 为试验基准冷端温度。参考固结试验方法,在试样上方预加 1 kPa 荷载代替无载试验,使试样表面与试验仪器接触紧密,消除系统误差,且不影响冻胀融沉发展过程,故取 1 kPa 作为基准荷载。融沉试验主要研究水泥掺入比和解冻温度对融沉的影响。具体试验规划见表 1 和表 2。

表 1 水泥土单因素冻胀试验规划

Table 1 Single-factor frost heave test plan of the cement-improved soil

掺入比	含水率/%	龄期/d	冷端温度/ $^\circ\text{C}$	荷载/kPa
0%, 1%, 3%, 5%, 7%, 9%, 11%, 15%, 20%	30	28	-10	1
$\lambda_n$	30	7, 14, 21, 28, 90	-10	1
$\lambda_n$	24, 26, 28, 30, 32	28	-10	1
$\lambda_n$	30	28	-2, -5, -10, -15	1
$\lambda_n$	30	28	-10	1, 50, 100, 200, 300

注:根据 2.1 节分析,本文取 $\lambda_n=10\%$ 。

表 2 水泥土单因素融沉试验规划

Table 2 Single-factor thaw settlement test plan of the cement-improved soil

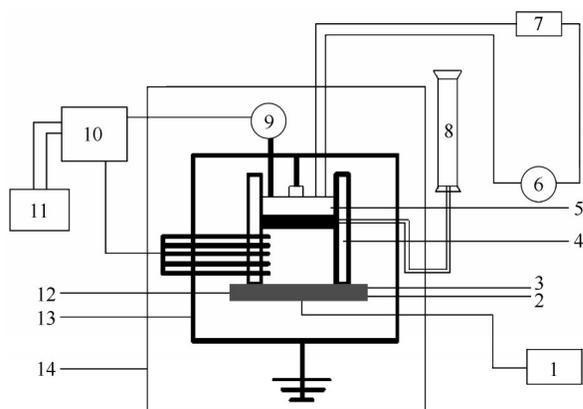
掺入比	含水率/%	龄期/d	解冻温度/ $^\circ\text{C}$	荷载/kPa
0%, 1%, 3%, 5%, 7%, 9%, 11%, 15%, 20%	30	28	30	1
$\lambda_n$	30	28	15, 30, 45, 60, 80	1

注:根据 2.1 节分析,本文取 $\lambda_n=10\%$ 。

试验用土为南京地区粉质黏土,含水率为 30%,密度为 $1.93\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,干密度为 $1.48\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,液

限和塑限分别为 32.8% 和 16.8%,为低液限粉质黏土。试验所用水泥为海螺牌 P. O 42.5 水泥。

试验仪器采用南京林业大学自制冻胀融沉仪(图1)进行试验。该仪器由恒温箱、试样盒、制冷系统、加热系统、温度数据采集系统、位移数据采集系统、加压系统和补水系统等组成,能够在负温条件下进行冻胀融沉试验,并自动采集数据绘制曲线。



注: 1. 温度控制器, 2. 循环冷水进口, 3. 循环冷水出口, 4. 试样筒, 5. 加压装置, 6. 循环水泵, 7. 恒温水槽, 8. 补水装置, 9. 位移传感器, 10. 数据采集仪, 11. 计算机, 12. 制冷块, 13. 加压设备, 14. 恒温箱

图1 冻胀融沉仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of frost heave and thaw settlement instrument

试样制作参考《土工试验方法标准》<sup>[34]</sup>和《水泥土配合比设计规程》<sup>[35]</sup>,为了模拟实际工程中水泥土的形成,将土样和水泥浆单独制作后再进行混合。土样烘干后按规划含水率加水搅拌,密封静置24 h后备用,水泥浆的水灰比为0.5,将水泥浆加入土样中充分搅拌形成水泥土。采用自制试样桶进行制样,试样为 $\phi 80\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的圆柱体,标准养护24 h后拆模,然后置于标准养护室养护至试验龄期。养护期间使用塑料薄膜对试样进行密封处理,防止水分蒸发,试验开始前对试样进行部分检算,含水率与规划含水率之差 $\leq \pm 0.1\%$ 。

## 2 结果与分析

图2所示为水泥土和常规粉质黏土冻融过程位移随时间变化的情况。其中,位移上升段为冻结阶段,位移下降段为融化阶段。水泥土与常规粉质黏土冻融变形的走势大致相同,但水泥土冻融持续过程时间较长,这是因为水泥导热系数较小,掺入水泥后土体导热系数减小,热传导效率降低,花费时间较长。显然,水泥土的冻融位移变形明显减小。

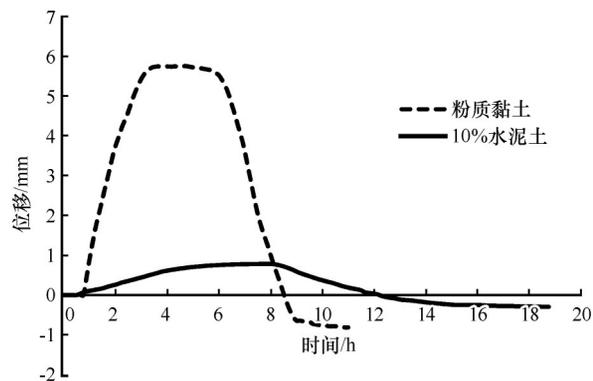


图2 不同土体冻融过程中位移与时间关系曲线(龄期为28天,冷端温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,含水率为30%,解冻温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 2 Relationships between displacement and time during freezing-thawing of 10% cement-improved soil and silty clay (Age is 28 days, cold junction temperature is  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , moisture content is 30%, and thawing temperature is  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

### 2.1 水泥掺入比对冻胀率的影响

不同水泥掺入比与粉质黏土水泥土冻胀率的关系如图3所示。由图可见,常规粉质黏土冻结后冻胀率很大,达到11.56%。随着水泥掺入比增大,冻胀率持续减小。当水泥掺入比较小时,图中曲线斜率较大,即冻胀率随水泥掺量增大减少较快。当水泥掺入比达到10%时,冻胀率为1.56%,仅为常规粉质黏土冻胀率的13.5%,此时曲线的斜率已趋于平缓。水泥掺入比大于10%后,冻胀率随水泥掺入比增加下降减缓。故本试验粉质黏土的合理掺入比 $\lambda_n$ 取为10%。

分析可知,水泥和土混合后,水泥水化产物包

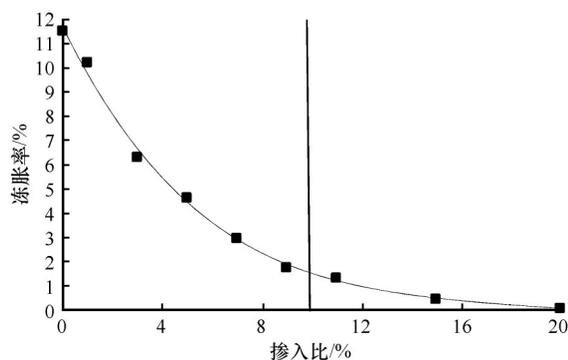


图3 水泥土冻胀率与掺入比关系曲线(龄期为28天,冷端温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,含水率为30%)

Fig. 3 Relationship between frost heaving ratio of cement-improved soil and mixing ratio of cement (Age is 28 days, cold junction temperature is  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and moisture content is 30%)

裹土颗粒,并随龄期增加而硬化。水化产物与土颗粒胶结形成网状结构土骨架,土体强度提高。同时,水泥水化产物填充土体空隙,进一步提高土体强度。冻结产生的冻胀力不足以完全破坏土体结构,造成冻胀率降低。

在土中掺入水泥可以有效减小土体冻胀,但这种效果并不是无限的,水泥掺量对冻胀的影响效果随水泥掺量的增大呈下降趋势。合理掺入比随土质不同而变化,在冻结法施工中,可采用预先注浆或搅拌等方式掺入水泥减少冻胀,在达到合理掺入比时也可满足经济性和工程性要求。

## 2.2 含水率对冻胀率的影响

含水率与粉质黏土水泥土冻胀率的关系见图4。由图可知,随着含水率增大,粉质黏土水泥土冻胀率基本呈线性增大。这是因为土体冻胀过程中,水结冰膨胀产生冻胀力,含水率越大,冻结过程中冰晶体积越大,冻胀力越强,土体冻胀率也就越大。同时,水泥与土体混合间接增大了水泥的水灰比,土体含水率越大,水泥土强度越低,冻胀力更容易使土体结构变形而产生冻胀。由计算可知,拟合曲线的斜率仅为0.08,即随含水率增大,冻胀率变化很小。该现象可解释为水泥土试样经过28天养护后,水泥的水化反应完成,形成的水泥土结构具有较高强度,可以完全抵抗冻胀力对水泥土结构的破坏,水泥土冻胀发生在弹性应变阶段,故冻胀率随含水率线性变化且冻胀率变化较小。

对试验结果进行拟合,可得冻胀率随含水率变化的关系式。

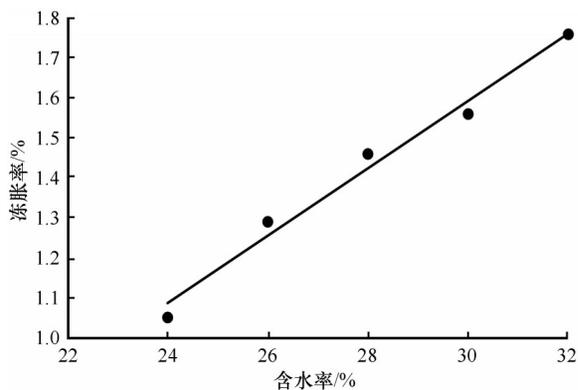


图4 水泥土冻胀率与含水率关系曲线(龄期为28天,冷端温度为 $-10^{\circ}\text{C}$ ,掺入比为10%)

Fig. 4 Relationship between frost heaving ratio of cement-improved soil and moisture content (Age is 28 days, cold junction temperature is  $-10^{\circ}\text{C}$ , and mixing ratio of cement is 10%)

$$\eta = 0.08w - 0.82 \quad (1)$$

式中: $\eta$ 为水泥土冻胀率(%); $w$ 为含水率(%)。

由式(1)可得,粉质黏土水泥土的初始冻结含水率( $\eta=0$ ) $w_0=10.25\%=0.61w_p$ ,临界冻结含水率( $\eta=1$ ) $w_c=22.75\%=1.35w_p$ 。一般来说,土体的初始冻结含水率和临界冻结含水率均小于土的塑限 $w_p$ ,约为塑限的90%左右<sup>[36-37]</sup>。在粉质黏土中添加水泥后,水泥水化产物填充土体中的孔隙,土体孔隙率降低,在含水率较小时土体已经饱和,冻结过程中水变成冰,体积增大,产生冻胀,因此初始冻结含水率降低。同时,水泥水化产物与土颗粒间的结合力大于土颗粒之间的结合力,提高了土骨架强度,产生相同冻胀率所需的冻胀力增大,因此临界冻结含水率超过原始土体的塑限。

## 2.3 龄期对冻胀率的影响

龄期与粉质黏土水泥土冻胀率的关系见图5。由图可知,粉质黏土水泥土冻胀率随龄期增长迅速下降,当养护到一定龄期后,冻胀率随龄期变化曲线突然减缓并趋于水平。水泥土处于早期时,冻胀率随龄期下降明显,说明掺入水泥后,早期可以有效抑制冻胀。

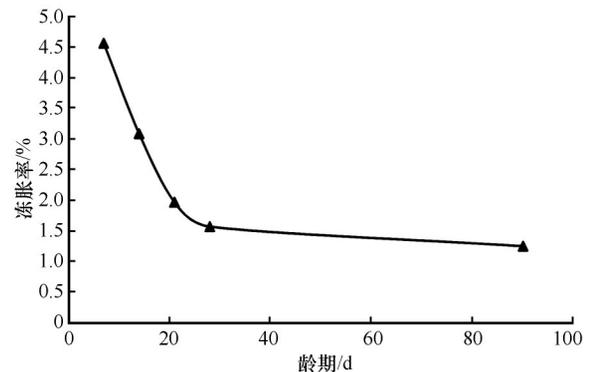


图5 水泥土冻胀率与龄期关系曲线(含水率为30%,冷端温度为 $-10^{\circ}\text{C}$ ,掺入比为10%)

Fig. 5 Relationship between frost heaving ratio of cement-improved soil and age (Moisture content is 30%, cold junction temperature is  $-10^{\circ}\text{C}$ , and mixing ratio of cement is 10%)

养护28天后,水泥土冻胀率减少至1.56%,仅为7天龄期冻胀率的34.21%,冻胀抑制效果明显。28天以后,水泥土冻胀率基本不再发生变化,养护90天和养护28天冻胀率仅相差0.32%。这是因为水泥水化反应通常在养护28天内已基本完成,龄期继续增加水泥土性质不再发生显著变化。在有较高环境要求的工程中,可以预先在冻结区土体中掺

入水泥形成水泥土,放置一段时间后再进行冻结法施工,以降低施工过程中土体冻胀对周围环境和施工质量的影响。

#### 2.4 冷端温度对冻胀率的影响

冷端温度对水泥土冻胀特性影响试验在开放条件下进行。由图6可知,在开放条件下进行单向冻结时,粉质黏土水泥土冻胀率随冷端温度降低而呈线性减少,冷端温度每降低1℃,冻胀率减少0.22%。这是因为当冷端温度较低时,冻结过程加快,冷端一侧土体冻结后,冻结锋面迅速向前推进,导致水分未完全迁移便已冻结,外部补水较少,因此冻胀率较小。反之,当冷端温度较高时,冻结锋面发展缓慢,水分迁移充分,在开放条件下外部补水较多,冻胀率增大。

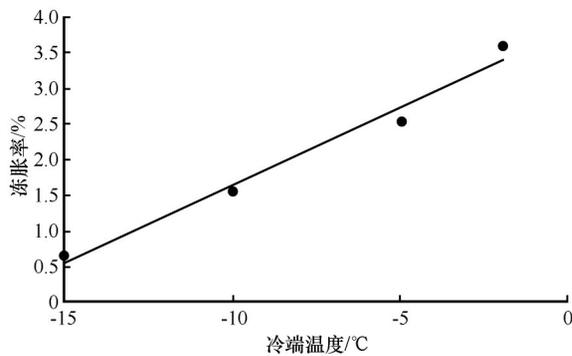


图6 水泥土冻胀率与冷端温度关系曲线(龄期为28天,掺入比为10%,含水率为30%)

Fig. 6 Relationship between frost heaving ratio of cement-improved soil and cold junction temperature (Age is 28 days, mixing ratio of cement is 10%, and moisture content is 30%)

#### 2.5 荷载对冻胀率的影响

进行水泥土冻胀融沉试验时,为使试样表面与仪器贴合完全,减少试验误差,在试验前预加1 kPa荷载,实际使用中发现其对试样冻胀融沉影响可忽略,因此研究荷载对水泥土冻胀率影响时也从1 kPa开始增加荷载,具体结果见图7。由图可知,冻胀率随荷载增大呈线性减小,增大荷载可明显抑制水泥土冻胀,300 kPa条件下,冻胀率仅为0.22%,较初始预加荷载条件下减少86%。在单向冻结试验中,冻结锋面自下而上发展,产生的冻胀力使土体发生向上的冻胀变形,而在试样上部施加向下的荷载后,抵消了部分冻胀力的作用。

同时,荷载作用使土体发生固结排水,孔隙水被排出,孔隙水压力逐步转变为由土骨架承受的有

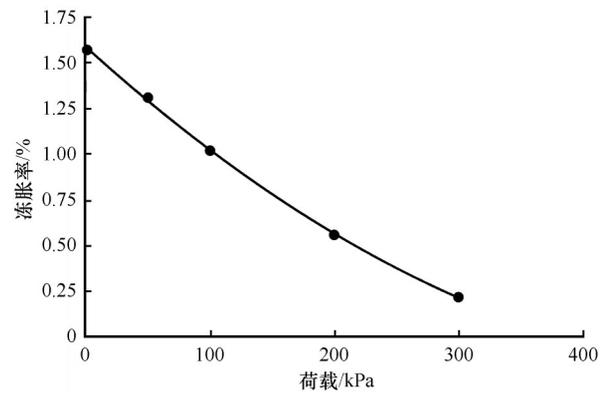


图7 水泥土冻胀率与荷载关系曲线(龄期为28天,冷端温度为-10℃,含水率为30%,掺入比为10%)

Fig. 7 Relationship between frost heaving ratio of cement-improved soil and load (Age is 28 days, cold junction temperature is -10℃, moisture content is 30%, and mixing ratio of cement is 10%)

效应力,土体产生压缩变形,减少因土体冻胀产生的变形。因此随着荷载增加,水泥土冻胀率减小。

#### 2.6 掺入比对融沉系数的影响

不同水泥掺入比对粉质黏土融沉系数的影响如图8所示。由图可知,未掺入水泥的粉质黏土融沉系数为13.14%,随着水泥掺入比增加,土体融沉系数迅速下降且速率逐渐减小。水泥掺入比达到10%时,融沉系数只有2.15%,为未添加水泥时的16.4%。通过比较融沉曲线和冻胀曲线发现,冻胀

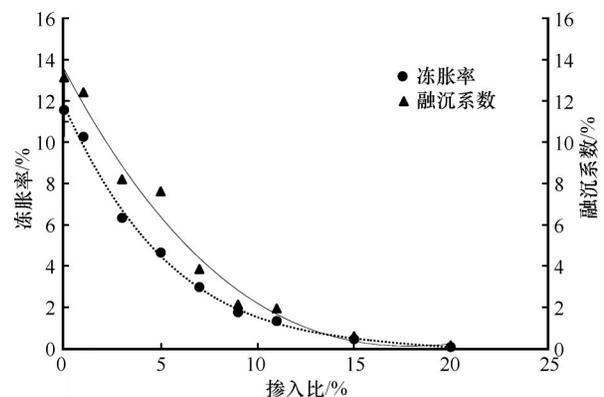


图8 水泥土冻胀率和融沉系数与水泥掺入比关系曲线(龄期为28天,含水率为30%,解冻温度为30℃)

Fig. 8 Relationships between frost heaving ratio/thaw-settlement coefficient of cement-improved soil and mixing ratio of cement (Age is 28 days, moisture content is 30%, and thawing temperature is 30℃)

率和融沉系数随水泥土掺量的变化规律相似。当掺入比小于10%时,随掺入比增加,融沉系数下降较快;掺入比大于10%时,融沉系数下降缓慢,增加

水泥掺量对融沉系数的影响减小,掺入比从10%增加到20%,融沉系数仅减少1.79%。由此可见,在粉质黏土中掺入10%水泥可以同时抑制冻胀和融沉,具有较好的经济性。

不同水泥掺入比水平下,粉质黏土水泥土的融沉系数均大于冻胀率,且水泥掺量越高,两者数值越接近。其原因是,试样经过冻胀后产生部分结构性损伤,冻结形成的冰晶支撑土体,进行应力重分布;而在融化过程中,土体除融化导致的热融沉陷外,又在自重应力下产生压缩沉降,沉降量必然大于冻胀量。因此,融沉系数大于冻胀率。随着水泥掺量增加,试样强度提高,冻结过程中土体结构损伤或破坏程度减小,故解冻时土体压缩沉降量减少,融沉系数和冻胀率差距减小。此外,水泥掺入后,与土中水发生水化反应,水化产物填充了土体缝隙,提高了土骨架强度,进一步降低解冻过程的融沉量。

### 2.7 解冻温度对融沉系数的影响

由于上覆土层的保温效果和土体本身热传导率较低等原因,自然解冻可能会持续数月,对施工组织安排造成一定困难,此时可在冻结管中通热水,进行强制解冻,加快土体融化速率。实验室条件下进行强制解冻时,需先将恒温箱温度从1℃调整为5℃,并关闭试样底部的低温循环系统,将连接试样顶部的恒温热循环系统设置为试验所需温度,试样受顶端恒温热循环传热,实现自上而下的单向融化下沉。

图9为不同解冻温度下试样融沉系数变化曲线

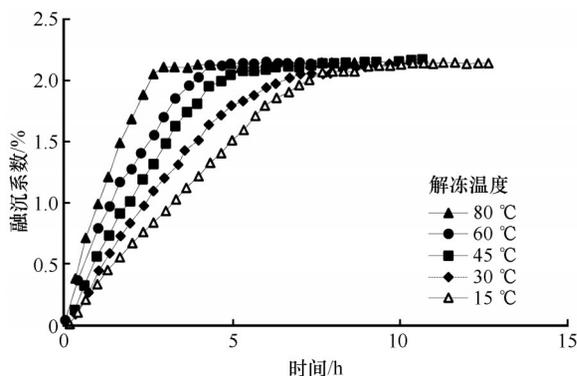


图9 不同解冻温度下水泥土融沉系数与时间关系曲线 (龄期为28天,含水率为30%,掺入比为10%)

Fig. 9 Relationships between thaw-settlement coefficient of cement-improved soil and time at different thawing temperatures (Age is 28 days, moisture content is 30%, and mixing ratio of cement is 10%)

线。由图可知,随着解冻温度升高,水泥土融沉速率加快,但最终融沉量相同,这与常规土强制解冻融沉规律相似<sup>[38]</sup>,即土体最终融沉系数不受解冻温度影响,解冻温度仅改变土体融沉速率。其原因是,粉质黏土中掺入10%(合理掺入比)水泥并养护28天后土体强度较大,此时的冻胀率和融沉系数仅相差0.59%,冻胀过程土体结构破坏较少,因此在不同解冻温度下,土体压缩沉降都较小。融沉量由热融沉陷主导,即冻土层冰融化、体积减少和水的自由消散导致的沉降,因此最终融沉系数相同。工程中可采用强制解冻,在融沉系数不变的情况下加快融沉结束时间,提高施工效率。

由图9还可知,水泥土融沉过程可分为2个不同融沉速率的阶段:前一阶段融沉速率较快,后一阶段融沉速率很慢。原因是前一段融沉过程为热融沉陷和压缩沉降两种沉降叠加,解冻开始后土体冰晶融化,融沉速率较大;当冰晶融化结束后,土体在自重作用下继续进行融沉,但水泥土强度较大,土体自重压缩较小,造成后一阶段融沉系数几乎不变。

### 3 讨论

南京地区的土质为典型粉质黏土,在这些类似的地质条件下,采用人工冻结技术处理相关问题难度较大。同时,根据实际经验,采用水泥土是抑制冻胀或融沉的一种优良方法,但其机理过程不清晰,影响因素复杂。例如,程培峰等<sup>[37]</sup>的研究显示含水率比冻结温度对粉质黏土冻胀影响大,且冻结温度降低,水泥土冻胀率提高。而针对南京地区典型粉质黏土水泥土研究显示,冷端温度对粉质黏土水泥土冻胀影响较大,且冷端温度降低,冻胀率减少。分析发现不同试验中对水泥土含水率的选择上有较大差异,以起始冻结含水率为基准时冻结温度与冻胀率呈正相关<sup>[39]</sup>,以塑限含水率为基准时冻结温度与冻胀率呈负相关<sup>[37]</sup>。这表明水泥土抑制冻胀融沉效果是多因素共同作用结果,在研究单因素作用基础上对各种因素进行正交分析<sup>[40]</sup>,对准确预测冻胀融沉变化具有重要意义。

研究分析不同控制因素对粉质黏土水泥土冻胀、融沉的影响,可直观反映环境变化对土体特性的影响。为进一步分析其机理过程,可通过CT扫描等技术手段对水泥土微观构造进行解释<sup>[41-42]</sup>以及可通过数值模拟与试验结合的分析方法,进一步揭

示不同因素下水泥土冻融特性差异机理,这些相关内容有待深入研究。

#### 4 结论

(1)粉质黏土中掺入水泥可有效抑制土体冻胀,随水泥掺入比增加冻胀率减小。水泥掺入存在合理掺入比 $\lambda_n$ ,在此条件下可同时满足工程性和经济性要求,粉质黏土的合理掺入比为10%。

(2)在开放系统中,冻胀率随龄期增大呈指数减少,但超过一定龄期后,冻胀率减少缓慢,粉质黏土水泥土龄期超过28天后冻胀率基本不再变化。

(3)粉质黏土水泥土冻胀率随着含水率增大、冷端温度升高呈线性增大;随荷载增加呈线性减小,荷载可有效抑制水泥土的冻胀。粉质黏土水泥土起始冻结含水率较常规粉质黏土小,临界冻结含水率较常规粉质黏土大。

(4)融沉系数随水泥掺入比增大呈指数规律减小,融沉系数和冻胀率随水泥掺量变化规律类似,在合理水泥掺入比条件下,粉质黏土水泥土冻胀率和融沉系数均较小。

(5)在相同水泥掺入比条件下,融沉系数均大于冻胀率,且二者差值随掺入比增大而减小;随着解冻温度提高,土体达到最终融沉量的时间减少,但最终融沉量不因解冻温度不同而变化。实际工程中如周围环境条件要求较高,可通过强制解冻缩短融沉作用时间,以便及时采取有效措施,较少环境影响。

#### 参考文献(References):

- [1] Zhang Ting, Yang Ping. The application and development of artificial freezing method in the subway construction[J]. *Forest Engineering*, 2012, 28(6): 74-78. [张婷, 杨平. 人工冻结法在地铁建设中的应用与发展[J]. *森林工程*, 2012, 28(6): 74-78.]
- [2] Wang Xiaobin, Yang Ping, Hu Jun, et al. A numerical simulation study on ground displacement field of thaw-settlement in artificial freezing soil[J]. *Coal Geology and Exploration*, 2011, 36(6): 54-57. [王效宾, 杨平, 胡俊, 等. 人工冻土融沉对地层位移影响的三维有限元分析[J]. *煤田地质与勘探*, 2011, 36(6): 54-57.]
- [3] Ke Jieming, Yang Ping. The advance of research on the frost heave and thawing settlement of frozen soil[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2004, 28(4): 105-108. [柯洁铭, 杨平. 冻土冻胀融沉的研究进展[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2004, 28(4): 105-108.]
- [4] Li Ping, Xu Xuezu, Chen Fengfeng. State and progress of research on the frozen fringe and frost heave prediction models[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(1): 90-95. [李萍, 徐学祖, 陈峰峰. 冻结缘和冻胀模型的研究现状与进展[J]. *冰川冻土*, 2000, 22(1): 90-95.]
- [5] Zhang Sheng, Teng Jidong, He Zuoyue, et al. Importance of vapor flow in unsaturated freezing soil: a numerical study[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 126: 1-9.
- [6] Nixon J F, Morgenstern N R. The residual stress in thawing soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1973, 10(4): 571-580.
- [7] Wu Fan, Yang Ping, Wan Chaodong, et al. The connecting passage freezing method thaw settlement grouting optimization study in accordance with measured thawing temperature[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2017, 41(4): 167-172. [吴繁, 杨平, 万朝栋, 等. 基于实测解冻温度的联络通道冻结法融沉注浆优化研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(4): 167-172.]
- [8] Cao Honglin. Thaw settlement control of subway tunnel construction by artificial ground freezing[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2010, 6(2): 387-390. [曹红林. 地铁隧道冻结法施工融沉控制方案及实施[J]. *地下空间与工程学报*, 2010, 6(2): 387-390.]
- [9] Pan Rongkai, Yang Ping, Wu Xiaosong, et al. Experimental study on diffusion pattern and regularity of grouting slurry in sand layer[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2018, 3(2): 136-142. [潘荣凯, 杨平, 吴小松, 等. 砂层注浆浆液扩散模式与规律试验研究[J]. *林业工程学报*, 2018, 3(2): 136-142.]
- [10] Yu Linlin. Experimental study on soil frost heave under different artificial freezing conditions[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. [于琳琳. 不同人工冻结条件下土的冻胀试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.]
- [11] Li Dongguo. Study on frost heaving and intensity attenuation characteristics due to repeated freezing-thawing of saline soil in Nong'an County[D]. Changchun: Jilin University, 2015. [李栋国. 农安盐渍土冻胀及反复冻融强度衰减特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.]
- [12] Wang Pingsheng, Zhou Guoqing. Frost-heaving pressure in geotechnical engineering materials during freezing process[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, 28(2): 287-296.
- [13] Wang Dong. Study on the characteristic of frost heave and thaw settlement of Lanzhou clay[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014. [王冬. 兰州粉质粘土冻胀融沉特性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.]
- [14] He Ping, Cheng Guodong, Yang Chengsong, et al. The evaluation of thawing-settlement coefficient of frozen soils[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(3): 608-612. [何平, 程国栋, 杨成松, 等. 冻土融沉系数的评价方法[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(3): 608-612.]
- [15] Sabry A S, Zaki A B. Simplified method to assess freeze-thaw durability of soil cement[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2001, 13(4): 243-247.
- [16] Sabry A S, Zaki A B. Long-term strength and durability of soil cement[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2001, 13(3): 161-165.
- [17] Terashi M. The state of practice in deep mixing methods[C]// *International Conference on Grouting & Ground Treatment*. New Orleans, Louisiana, USA: American Society of Civil Engineers, 2003: 25-49.
- [18] Bao Jun'an, Yang Ping, Zhang Xiangyu. Experimental study on thaw subsidence properties of cement-improved soil[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2013, 37(5): 97-102. [鲍俊安, 杨平, 张翔宇. 水泥

- 土融沉特性的试验研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 97-102.]
- [19] Bao Jun'an, Yang Ping, Wang Xunuo. Experimental study on frost heave properties of cement-improved soil[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2013, 34(1): 5-9. [鲍俊安, 杨平, 王许诺. 水泥土冻胀特性试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(1): 5-9.]
- [20] Hotineanu A, Bouasker M, Aldaood A, et al. Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays [J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 119: 151-157.
- [21] Makki-Szymkiewicz L, Hibouche A, Taibi S, et al. Evolution of the properties of lime-treated silty soil in a small experimental embankment [J]. Engineering Geology, 2015, 191 (29): 8-22.
- [22] Wang Tianliang, Song Hongfang, Guo Zhuohao, et al. Freeze-thaw characteristics of subgrade macadam fillings influenced by cement content and grain-size composition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12): 2180-2186. [王天亮, 宋宏芳, 郭卓豪, 等. 水泥掺量和颗粒级配碎石基床冻融特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2180-2186.]
- [23] Lu Yonggang, Xiao Hong, Chen Minzi. Analysis of the influence of bedding modified filler and insulation slope protection on temperature field of roadbed in seasonally frozen soil regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(4): 1059-1066. [陆永港, 肖宏, 陈民子. 季节冻土区基床改性填料与保温护坡对路基温度场的影响分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4): 1059-1066.]
- [24] Zhang Xiangdong, Ren Kun, Li Jun. Study on frost resistance of EPS particles modified soil as subgrade filler in cold regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(6): 1273-1280. [张向东, 任昆, 李军. EPS颗粒改良土作为寒区路基填料的抗冻性能研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(6): 1273-1280.]
- [25] Güneçyisi E, Gesoglu M, Özturan T, et al. Fracture behavior and mechanical properties of concrete with artificial lightweight aggregate and steel fiber[J]. Construction and Building Materials, 2015, 84(6): 156-168.
- [26] Yarbasi N, Kalkan E, Akbulut S. Modification of the geotechnical properties as influenced by freeze-thaw of granular soils with waste additives [J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 48(1): 44-54.
- [27] Ma Bing. Physico-mechanical properties and mechanism analysis of lime-solidified saline soil under freezing-thawing cycle conditions[D]. Changchun: Jilin University, 2018. [马冰. 冻融循环条件下石灰固化盐渍土物理力学性质研究及机理分析[D]. 长春: 吉林大学, 2018.]
- [28] Liang Jiahong. Experimental study on mechanical properties of cement-lime modified soft soil under freeze-thaw cycle[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2020, 34(3): 79-84. [梁家红. 冻融循环下水泥石灰改良软土力学特性试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34(3): 79-84.]
- [29] Zhang Shuling, Ni Jing, Ma Lei, et al. Experimental study on mechanical properties of cement soils and fly ash soils after freeze-thaw cycling[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(4): 196-201. [张淑玲, 倪静, 马蕾, 等. 冻融循环作用后水泥土及粉煤灰土的力学性能试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4): 196-201.]
- [30] Yang Guotao, Gao Liang, Wang Tianliang, et al. Experimental study on frost heaving properties of cement stabilized macadam subgrade bed of high speed railway in severe cold regions [J]. China Railway Science, 2016, 37(6): 1-10. [杨国涛, 高亮, 王天亮, 等. 严寒地区高速铁路水泥稳定碎石基床冻胀性能试验研究[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(6): 1-10.]
- [31] Hu Xiangdong. Laboratory research on properties of frost heave and thaw settlement of cement improved Shanghai's grey-yellow silt sand[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(3): 334-339. [胡向东. 上海灰黄色粉砂水泥改良土冻胀融沉性质实验[J]. 煤炭学报, 2009, 34(3): 334-339.]
- [32] Huang Jianxin. Study on mechanical behaviors of frozen cement-treated silty clay [D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2017. [黄建新. 水泥改良粉质粘土的冻土力学特性研究[D]. 江苏徐州: 中国矿业大学, 2017.]
- [33] Wang Xunuo, Yang Ping, Peng Yulong. Test research to freezing point and the thermal physical parameters of freezing cement soil [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(6): 96-100. [王许诺, 杨平, 彭玉龙. 水泥土冻结温度及热物理参数试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(6): 96-100.]
- [34] Standard for soil test method: GB/T 50123—1999 [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. [土工试验方法标准: GB/T 50123—1999[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.]
- [35] Specification for mix proportion design of cement soil: JGJ/T 233—2011 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. [水泥土配合比设计规程: JGJ/T 233—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.]
- [36] Leng Yifei, Zhang Xifa, Zhang Dongqing, et al. Study of frost heaving susceptibility of fine grain soil of highway subgrade in seasonally frozen ground regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(2): 211-216. [冷毅飞, 张喜发, 张冬青, 等. 季节冻土区公路路基细粒土冻胀敏感性研究[J]. 冰川冻土, 2006, 28(2): 211-216.]
- [37] Cheng Peifeng, Yin Chuanjun. Analysis of frost heaving characteristics of silty clay in seasonal frozen region [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(1): 44-49. [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, 31(1): 44-49.]
- [38] Wang Xiaobin. Study on the property and the influence to surrounding environment of artificial freezing soil's thaw-settlement [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009. [王效宾. 人工冻土融沉特性及其对周围环境影响研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.]
- [39] Bi Guiquan, Mu Lijing, Wang Dong. Frost-heaving and thaw-settling feature of silty clay along Lanzhou subway lines [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2018, 44(2): 113-116. [毕贵权, 穆丽静, 王冬. 兰州地铁沿线粉质黏土的冻胀融沉特性[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(2): 113-116.]
- [40] Ma Li, Cui Zizhi, Jing Xin. Study on frost heaving and thawing settlement characteristics of clayey soil modified by bentonite under closed system [J]. Yangtze River, 2021, 52(4): 214-218. [马利, 崔自治, 景鑫. 封闭系统条件下膨润土改性黏土的冻融特性研究[J]. 人民长江, 2021, 52(4): 214-218.]
- [41] Torrance J K, Elliot T, Martin R, et al. X-ray computed tomography of frozen soil [J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53(1): 75-82.
- [42] Chen Shijie, Zhao Shuping, Ma Wei, et al. Studying frozen soil with CT technology: present studies and prospects [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 193-200. [陈世杰, 赵淑萍, 马巍, 等. 利用CT扫描技术进行冻土研究的现状和展望[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 193-200.]

## Experimental study on the frost heave and thaw settlement properties of cement-improved silty clay

LI Siqu<sup>1,2</sup>, YANG Ping<sup>1</sup>, ZHANG Ting<sup>1</sup>, BAO Jun'an<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Tongling Electric Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Co. Ltd., Tongling 244000, Anhui, China)

**Abstract:** In order to study the frost heave and thaw settlement properties, experimental researches were carried out with silty clay in Nanjing region. Test control factors include the mixing ratio of cement, moisture content, age, cold junction temperature and load. Each control factor selects representative conditions within the interval containing the benchmark value to conduct a single variable test. The test was carried out with frost heave and thaw settlement instrument. The lower part of the instrument was equipped with a refrigeration block, and the upper part was equipped with a water supplement, to simulate water migration process when real soil is frozen. Frost heave of cement-improved silty clay declines exponentially with mixing ratio of cement and age increasing, enhances linearly with moisture content, cold junction temperature rising and load reducing. The mixing ratio of cement also influences thaw settlement of cement-improved silty clay, which is in line with the law in frost heave. Thaw-settlement coefficient is higher than frost heaving ratio in same situation. The time of completing thaw settlement declines with thawing temperature, while thawing temperature has no impact on final thaw-settlement coefficient. The reasonable mixing ratio of silty clay in Nanjing is 10%. Frost heaving ratio is 1.56% and thaw-settlement coefficient is 2.15% in reasonable mixing ratio. In conclusion, mixing cement into soil beforehand can control frost heave and thaw settlement effectively in artificial freezing construction and enhance productivity.

**Key words:** cement-improved soil; mixing ratio of cement; frost heave; thaw settlement

(责任编辑: 周成林; 编辑: 武俊杰)