

# 人工冻融软弱土融沉特性研究

庄惠敏, 杨平, 何文龙

(南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037)

**摘要:**随着人工冻结法在地铁建设中的广泛应用,控制工后融沉已成为软弱地层冻结需要解决的难题.以苏州地铁典型软弱土层为研究对象,通过室内试验研究,得出不同补水条件下原状土开放融沉系数大于封闭融沉系数;融前卸载加压方式下,融沉系数随上部荷载增大呈指数型减小;无黏性重塑土融沉系数与原状土接近,黏性土重塑后融沉系数变大,其差值随该土灵敏度增大而增大;对于非饱和黏土和淤泥质粉质黏土,开放冻融条件下融沉系数与干密度变化关系均存在临界干密度,对应土体融沉系数最小.

**关键词:**人工冻土;融沉系数;补水条件;荷载;干密度

**中图分类号:** TU445

**文献标志码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.201506022

## 0 引言

软弱地层地铁建设中,联络通道施工常需进行地层加固,加固方法有旋喷桩、深层搅拌桩、人工冻结法等,其中人工冻结法在软土地层中加固效果显著<sup>[1-5]</sup>.冻结法形成的冻结壁强度高,可有效隔绝地下水对施工的影响,但冻结易使地层产生冻胀融沉现象,引起联络通道和隧道主线的不均匀沉降,从而使隧道产生弯曲变形、接缝错开,发生漏水漏泥现象,最终造成邻近建筑物倾斜和开裂、地下管线破坏等危害<sup>[6-8]</sup>.如南京地铁四号线穿越的淤泥质粉质黏土补水条件下的融沉系数可达 16.08%<sup>[9]</sup>,故对于这种软弱土层,冻结法施工后的融沉控制尤为重要.

地处长三角的苏州地区土层较为软弱,因此在地铁联络通道建设中常使用冻结法加固土层.目前,对多次冻融循环条件下的人工冻土研究较多,主要分析了冻融特性<sup>[10]</sup>、渗透特性<sup>[11]</sup>等与冻融次数之间的关系;对单次冻融,主要研究了不同因素对人工冻土的抗压强度<sup>[12]</sup>、抗剪强度<sup>[13]</sup>等物理力学特性以及动力特性<sup>[14]</sup>的影响,而不同因素对冻土的融沉特性影响研究甚少.因此,针对不同补水条件、不同荷载条件,取苏州地铁典型土层

原状土进行融沉特性研究,并配制不同干密度的重塑土,从理论上研究分析干密度与融沉系数之间的关系,以更好地对冻结法施工后的融沉进行控制.

## 1 试验研究内容及方法

### 1.1 研究内容

以苏州地铁典型软弱土层③黏土、④<sub>1</sub>粉土、④<sub>2</sub>粉砂、⑤淤泥质粉质黏土(取自苏州轨道交通一号线滨河路站)为研究对象,对各土层原状土进行不同补水条件(开放和封闭系统)、不同荷载条件下的融沉特性研究;对原状土和重塑土相同含水率、相同干密度以及相同冻融条件下的融沉系数进行对比研究;对重塑土进行不同干密度对其融沉系数的影响规律研究;并从理论上分析其规律变化的内在机理.

### 1.2 试验方法

试验用土的基本物理参数见表 1.其中,试样尺寸  $\phi 80 \text{ mm} \times H 50 \text{ mm}$ ,试验仪器采用南京林业大学研制的冻胀融沉仪,示意图如图 1.试验前先将土样放在 1℃ 恒温环境下恒温处理 6 h,具体根据 GB/T50123—1999《土工试验方法标准》进行不同条件下的冻胀融沉试验<sup>[15]</sup>.

**收稿日期:**2015-06-11; **修订日期:**2015-08-07

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51478226);江苏省高校优势学科建设工程资助项目

**作者简介:**庄惠敏(1989—),女,江苏徐州人,南京林业大学硕士研究生,研究方向:环境岩土与地下工程, E-mail: 15295575668@163.com.

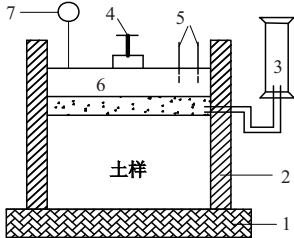
**通讯作者:**杨平(1964—),男,南京林业大学教授,博士生导师,主要从事岩土与地下工程教学与研究, E-mail: yangping@njfu.edu.cn.

**引用本文:**庄惠敏, 杨平, 何文龙. 人工冻融软弱土融沉特性研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 62-66.

表 1 试验土样基本物理参数

Tab.1 Physical indexes of the soil

土质	深度 $h/\text{m}$	含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho$ $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	干密度 $\rho_d$ $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	灵敏度系数 $S_i$
③黏土	2.6 ~ 8.7	30.1	1.91	1.468	13.80	0.71	1.9
④ <sub>1</sub> 粉土	5.3 ~ 8.0	28.9	1.93	1.497	8.33	1.35	—
④ <sub>2</sub> 粉砂	7.8 ~ 10.4	25.0	1.96	1.568	—	—	—
⑤淤泥质粉质黏土	7.3 ~ 18.4	33.7	1.90	1.421	12.40	0.99	3.4



1—制冷板；2—试样盒；3—补水装置；  
4—加压设备；5—解冻循环热水进出口；  
6—加热传压盖；7—位移传感器

图 1 冻胀融沉仪示意图

Fig.1 Schematic diagram of the frozen  
and thaw instrument

补水条件为封闭系统(冻结时不补水)和开放系统(冻结时补水),当试样中开始出现冻结锋

面时进行第一次补水,随后持续单向补水;荷载条件为加载和无载,加载时采用融前卸载方式,通过固结仪改装的杠杆式加压系统对土体进行加压;冻结冷端温度均为  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 试样冻结完成后,关掉制冷板电源,启动  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  热水循环系统进行解冻.

2 融沉特性试验结果与分析

融沉系数计算公式如下:

$$\alpha_0 = \frac{\Delta h_0}{h_0} \times 100\% . \tag{1}$$

式中: $\alpha_0$  为冻土融沉系数,%; $\Delta h_0$  为冻土融化下沉量,mm; $h_0$  为冻土初始高度,mm.

各土层原状土不同条件下的融沉系数结果见表 2.

表 2 原状土不同条件下的融沉系数

Tab.2 The thaw settlement of soil in different conditions

土层	补水条件	加载/kPa	融沉系数 $\alpha_0/\%$	土层	补水条件	加载/kPa	融沉系数 $\alpha_0/\%$
③黏土	封闭系统	无	9.15	④ <sub>2</sub> 粉砂	封闭系统	无	3.49
		无	14.00			无	5.01
		25	10.83			50	4.83
	开放系统	50	5.12		开放系统	100	3.26
		100	5.24			160	2.50
		160	3.19			240	1.68
		240	1.72			320	0.65
④ <sub>1</sub> 粉土	封闭系统	无	10.70	⑤淤泥质粉质黏土	封闭系统	无	11.24
		无	15.00			无	14.96
		50	8.83			50	6.54
	开放系统	100	5.20		开放系统	100	5.70
		160	3.11			160	4.92
		240	2.63			320	2.34
		320	2.05			400	0.78

2.1 原状土不同补水条件下的融沉特性

对无荷载作用相同含水率的各土层原状土进行封闭和开放系统条件下单向冻胀融沉试验,其融沉系数比较见图 2.

由图 2 可见,黏土、粉土、粉砂和淤泥质粉质黏土开放融沉系数均大于封闭融沉系数,增长量

分别为 4.85%、4.30%、1.52% 和 3.72%,其增长量排序为黏土 > 粉土 > 淤泥质粉质黏土 > 粉砂.

土体冻胀是由于土中的水冻结成冰体积增大,土中水分包括孔隙水和冻结时的水分迁移,孔隙水冻结成冰,自身体积增大 9%,水分迁移聚集在冻结锋面处,形成冰透镜体,使体积增大 1.09

倍. 因此,在初始含水率相同的条件下,开放系统中有水源不断补给,水分增加且迁移作用大,使土样产生较大冻胀,从而产生较大融沉. 同时,在相近含水率条件下粉砂融沉系数小于其他土层. 原因是砂土颗粒大,颗粒间黏聚力小,土中孔隙水毛细作用弱,导致水分迁移动力小,致使砂土补水冻胀不明显;而粉土和黏性土中颗粒较细,冻结过程中已冻区对土中未冻水有较强的吸附力,使得水分积聚冻结,体积膨胀增大. 由此可知,对软弱土层进行加固时可用砂土换填,在砂土层使用人工冻结法加固,效果明显.

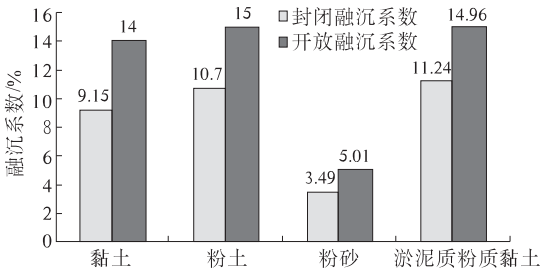


图2 各原状土层不同补水条件下融沉系数比较  
Fig.2 The thaw settlement coefficient of soil with water supply or not

2.2 原状土不同荷载条件下的融沉特性

人工冻结法施工地层上方已有荷载会对工后的融沉特性造成影响,为此研究了融沉系数与上部荷载关系,如图3所示. 其中补水条件均为开放系统.

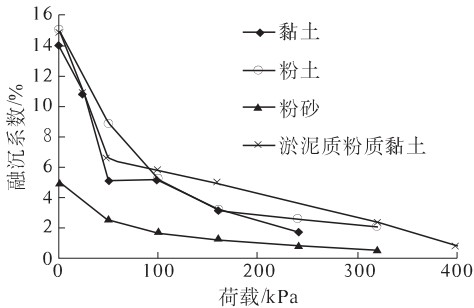


图3 融沉系数与上部荷载关系曲线  
Fig.3 The relationship between thaw settlement coefficient and upper load

由图3可见,对于苏州典型的4种土层,其融沉系数均随荷载的增大而减小,经回归,得减小规律呈指数型变化,具体关系式如表3所示. 且上部荷载小于100 kPa时融沉系数随荷载变化较大,大于100 kPa之后变化减小,说明初期荷载对土体融沉影响较大.

究其原因主要为:①随着外部附加压力的增

加,土颗粒间接触应力变大,土中水分相态转换受到影响,使冻土中未冻水含量增加,参与冻胀的水分减少,因而冻土整体冻胀融沉作用减弱;②外部荷载作用引起土内水分重分布,未冻土中水分向冻结锋面的迁移量减小,从而减小了冻胀,同时土体融化下沉时进行卸载,致使融沉系数减小;③单向冻结自下而上,荷载作用自上而下,温度梯度引起的水分迁移与应力梯度引起的水分迁移部分抵消,使上部荷载增大时冻胀量减小,相应的融沉系数随之减小.

表3 不同土层融沉系数与上部荷载关系式  
Tab.3 The relationship between thaw settlement coefficient and upper load

土层	关系式	相关系数 R
③黏土	$\alpha_0 = 11.612e^{-0.008p}$	0.924
④ <sub>1</sub> 粉土	$\alpha_0 = 11.523e^{-0.006p}$	0.909
④ <sub>2</sub> 粉砂	$\alpha_0 = 8.298e^{-0.008p}$	0.964
⑤淤泥质粉质黏土	$\alpha_0 = 11.991e^{-0.006p}$	0.932

由以上规律可知,采用人工冻结法施工时,对施工部位上方进行冻结时加压、融化时卸压的方式处理,可有效控制冻结法施工后的融沉.

2.3 原状土与重塑土融沉特性对比

对苏州地铁典型土层原状土与重塑土进行融沉特性对比试验,各土层相同含水率、干密度条件下的原状土与重塑土融沉系数对比见表4,补水条件均为开放系统.

表4 各土层原状土与重塑土融沉系数  
Tab.4 The thaw settlement coefficient contrast of undisturbed and remolded soil

土层	重塑条件	含水率 $\omega/\%$	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	融沉系数 $\alpha_0/\%$
③黏土	原状	30.1	1.468	14.00
	重塑	30.1	1.470	15.26
④ <sub>1</sub> 粉土	原状	28.9	1.497	15.00
	重塑	29.0	1.500	15.11
④ <sub>2</sub> 粉砂	原状	25.0	1.568	5.01
	重塑	25.0	1.560	5.03
⑤淤泥质粉质黏土	原状	33.7	1.421	14.96
	重塑	33.0	1.420	18.32

由表4可知,无黏性土层粉土和粉砂相同条件下原状土融沉系数与重塑土融沉系数非常接近;而黏土和淤泥质粉质黏土重塑后产生了较大变化,且原状土融沉系数均小于重塑土融沉系数,黏土和淤泥质粉质黏土重塑土融沉系数分别为原状土的1.09倍和1.22倍.

究其原因,粉土和粉砂土颗粒大,砂粒间缺少黏聚力,因而重塑后不会造成结构性的破坏影响;而天然黏性土中土颗粒与孔隙的形状和排列是有序的,颗粒之间存在黏结力,即黏性土有着很强的结构性,重塑后土体结构遭到破坏,其融沉特性受到影响.另外,从灵敏度的角度分析,土体灵敏度反应土体强度因结构破坏而降低的程度,灵敏度越高,土颗粒间胶结稳定性越强,则重塑后土体结构受到破坏越严重.淤泥质粉质黏土灵敏度 3.4,大于黏土的 1.9,相应淤泥质粉质黏土的融沉系数变化也大,说明灵敏度越高,对土体融沉特性影响越大.

因此,对于无黏性土和灵敏度较小的黏性土,重塑后对其融沉系数影响不大,可用重塑土代替原状土来研究其融沉特性.

2.4 不同干密度对融沉特性的影响研究

土体加固在最佳干密度时压实效果最好,据此可对软弱地层进行有效加固,同时,干密度也是影响土体融沉特性的重要因素,对苏州地铁黏土和淤泥质粉质黏土进行了不同干密度的融沉试验.补水条件均为开放系统,冻结冷端温度为 -10 ℃,试验条件和结果见表 5.

表 5 不同干密度重塑土融沉系数  
Tab.5 The thaw settlement coefficient of different dry density

土层	含水率 $\omega/\%$	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	融沉系数 $\alpha_0/\%$
③黏土	23	1.40	11.43
	23	1.42	10.50
	23	1.44	10.00
	23	1.46	9.94
	23	1.48	10.26
	23	1.50	10.81
⑤淤泥质粉质黏土	25	1.40	13.94
	25	1.42	12.81
	25	1.44	12.78
	25	1.46	13.36
	25	1.48	13.85
	25	1.50	14.00

图 4 为融沉系数与干密度关系曲线.由图 4 可见,相同含水率条件下,两种土质的融沉系数与干密度关系曲线类似,均存在一个临界干密度,其对应最小融沉系数.当干密度 < 临界干密度时,随干密度增大,融沉系数减小;相反,随干密度增大,

融沉系数增大.

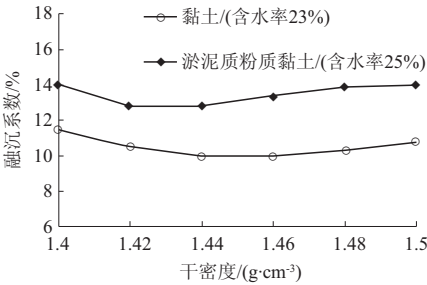


图 4 融沉系数与干密度关系曲线  
Fig.4 The relationship between thaw settlement coefficient and dry density

究其原因,当干密度小于临界干密度时,土中孔隙率较大,又因为黏性土冻结时水分迁移作用显著,使其冻胀量增大,随后土体融化不仅包括自由水排出引起的下沉,还包括土体自重应力引起的下沉,因此干密度较小时,干密度越小融沉系数越大.当干密度大于临界干密度时,孔隙率变小,因自重应力引起的下沉不再明显;从土体热传导能力的角度,干密度越大,土体热容量越大,热传导能力减弱,使非饱和冻土降温减慢<sup>[16]</sup>.由此可以解释,在补水条件下冻结时,干密度越大,土体冻结降温越慢,冻结锋面移动越慢,因此水分迁移增多,冰透镜体体积增大,且非饱和冻土孔隙水冻结成冰也增多,使得土体体积膨胀增大,最终造成冻胀率及融沉系数增大.

临界干密度与土质、含水率等冻结融化条件有关,随以上条件变化而变化.对苏州黏土和淤泥质粉质黏土不同干密度条件下的融沉试验数据进行回归,得融沉系数与干密度关系如下.

黏土:  $\alpha_0 = 476.79\rho_d^2 - 1388.2\rho_d + 1020.4$  . (2)

淤泥质粉质黏土:

$\alpha_0 = 378.57\rho_d^2 - 1092.1\rho_d + 800.68$  . (3)

适用范围:  $1.4\text{ g/cm}^3 < \rho_d < 1.5\text{ g/cm}^3$ .

通过上式求得,黏土和淤泥质粉质黏土的临界干密度分别为  $1.456\text{ g/cm}^3$  和  $1.442\text{ g/cm}^3$ .

3 结论

(1)各土层单向冻胀融沉的开放系统融沉系数均大于封闭系统,③黏土、④<sub>1</sub>粉土、④<sub>2</sub>粉砂和⑤淤泥质粉质黏土开放系统较封闭系统的融沉系数增长量分别为 4.85%、4.30%、1.52% 和 3.72%.

(2)融前卸载加压方式下,土体融沉系数随上部荷载增大呈指数型减小,且荷载小于 100 kPa 时对土体融沉特性影响较大.

(3)原状土与重塑土对比试验结果表明,无黏性重塑土融沉系数与原状土接近,黏性土灵敏度大小直接影响重塑后融沉系数的变化,灵敏度越高,对土体融沉特性影响越大;对于无黏性土和灵敏度较小的黏性土,重塑后对其融沉系数影响不大,可用重塑土代替原状土进行融沉试验。

(4)对于非饱和黏土和淤泥质粉质黏土,开放系统补水条件下融沉系数与干密度变化关系均存在临界干密度,其值大小分别为  $1.456 \text{ g/cm}^3$  和  $1.442 \text{ g/cm}^3$ 。

## 参考文献:

- [1] 秦爱芳,李永和.人工土层冻结法加固在盾构出洞施工中的应用[J].岩土力学,2004,25(S2):449-452.
- [2] 杨平,余才高,董朝文,等.人工冻结法在南京地铁张府园车站的应用[J].岩土力学,2003,24(S2):388-391.
- [3] KONRAD J M. Prediction of freezing-induced movements for an underground construction project in Japan[J]. Canadian geotechnical journal, 2002, 39(6): 1231-1242.
- [4] 方江华,张志红,张静钰,等.人工冻结法在上海轨道交通四号线修复工程中的应用[J].土木工程学报,2009,42(8):124-127.
- [5] 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.
- [6] LI G Y, YU Q H, MA W, et al. Laboratory testing on heat transfer of frozen soil blocks used as backfills of pile foundation in permafrost along Qinghai-Tibet electrical transmission line[J]. Arabian journal of geosciences, 2015, 8(5): 2527-2535.
- [7] 岳丰田,张水宾,李文勇,等.地铁联络通道冻结加固融沉注浆研究[J].岩土力学,2008,29(8):283-286.
- [8] 李述训,南卓铜.冻融作用对系统与环境间能量交换的影响[J].冰川冻土,2002,24(2):109-115.
- [9] 孙谷雨.南京地区典型土层人工冻土物理力学性能研究[D].南京:南京林业大学土木工程学院,2013.
- [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(4):1213-1217.
- [11] FOULI Y, CADE-MENUN B J, CUTFORTH H W. Freeze-thaw cycles and soil water content effects on infiltration rate of three Saskatchewan soils[J]. Canadian journal of soil science, 2013, 93(4):484-496.
- [12] 贺俊,杨平,何文龙,等.苏州地铁典型土层冻土力学特性研究[J].水文地质工程地质,2010,37(5):72-76.
- [13] 马玲,齐吉琳,余帆,等.冻结砂土三轴试验中颗粒破碎研究[J].岩土工程学报,2015,37(3):544-550.
- [14] HE P P, CUI Z D. Dynamic response of a thawing soil around the tunnel under the vibration load of subway[J]. Environmental earth science, 2015, 73(5): 2473-2482.
- [15] 国家质量技术监督局.土工试验方法:GB/T 50123—1999[S].北京:中国计划出版社,2000.
- [16] 吴礼舟,许强,黄润秋,等.非饱和黏土的冻胀融沉过程分析[J].岩土力学,2011,32(4):1025-1028.

## Study on Thaw Settlement Behavior of Soft Frozen Soil

ZHUANG Huimin, YANG Ping, HE Wenlong

(College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** With the extensive application of the artificial freezing method in subway construction, the thaw settlement controlling has become a problem to be solve in soft-soil freezing. The typical soft soil in Suzhou subway is taken as the research object. Related conclusions are obtained on the basis of the laboratory tests, which are as follows. The thaw-settlement coefficients with water supply are larger than those without, and it decreases exponentially with the increase of upper loads under the condition of loads removed before melting. The clay's thaw-settlement becomes larger after remolded and the difference increases with soil's higher sensitivity, while the non-cohesive soil has little change. As for the unsaturated clay and muddy silty clay, there existed a critical dry density between thaw-settlement coefficient and dry density change with water supply. And this corresponds to the minimum thaw-settlement coefficient.

**Key words:** artificial frozen soil; thaw-settlement coefficient; water source supply; load; dry density