

文章编号: 1000-7598-(2006)增刊-0497-04

上海人工二次冻融土无侧限抗压强度研究

肖忠华¹, 胡向东¹, 皮爱如², 刘瑞锋¹

(1. 同济大学 地下建筑与工程系/岩土工程重点实验室, 上海 200092; 2. 安徽建筑工程大学 土工工程系, 合肥 230022)

摘 要: 随着上海地下空间的开发利用, 冻结法越来越广泛地用于隧道建设中。为了避免冻结法施工中可能产生的地质灾害问题, 有必要对上海软土地区的土体冻融过程中物理力学性能进一步地研究。通过对上海软土某工程 3 种不同的土样原状土、一次冻融土、二次冻融土进行不同状态下土力学试验, 得到了土体在二次冻融循环作用下物理力学特征的变化规律。研究结果对隧道的设计提供了有价值的参考。

关 键 词: 冻结法; 二次冻融; 冻土; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU 445

文献标识码: A

Study on uniaxial compressive strength of Shanghai soils under secondary freeze-thaw action

XIAO Zhong-hua^{1,2}, HU Xiang-dong^{1,2}, PI Ai-ru³, LIU Rui-feng^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering Tongji, Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Civil Engineering, Anhui Institute of Architecture & Industry, Hefei 230022, China)

Abstract: With the development of underground space in Shanghai, the ground freezing method is more and more widely used in tunnel construction. In order to avoid the problems of geological disaster which may happen in the freezing construction, it is necessary to do more researches on the physico-mechanical characters of Shanghai soft soil under freezing and thawing action. The characters of three kinds of soils from a certain project in different states (original state, freeze-thaw state, secondary freeze-thaw), are studied; and the change rules of soil characters under secondary freeze-thaw action are deduced. The results will be beneficial to the safety of the tunnel construction.

Key words: freezing method; secondary freeze-thaw; frozen soil; uniaxial compressive strength

1 引 言

上海黄浦江边某工程拟采用冻结法施工, 需要进行冻土物理力学试验, 为设计和施工提供冻土基本参数。一次冻结后土体的微观结构和物理力学性质(如抗剪强度、结冰温度、导热系数、冻胀率、融沉率等)会发生改变, 因冻结破坏土体再次冻结土体结构和物理力学性质是如何改变? 对其进行相关土体冻结试验和多次冻融试验研究显得必要, 以找出相应的土工参数和变化规律。根据查阅冻融循环试验相关文献可知, 密实土体在冻融循环状态下趋于松散, 冻土解冻时融沉增大, 而松散的土体在冻融循环条件下则趋于紧密, 解冻后相对于原状土

融沉减少^[1]。本次试验选择土层为层⑥、层⑦-1、层⑦-2, 提供在 4 种不同温度状态下 3 层土体的基本土工参数和物理力学参数及热力学参数。冻土试验依据《人工冻土物理力学性能试验》^[2], 常规土工试验按照《土工试验方法标准》^[3]进行。

2 试验内容和标准

拟冻结的土层⑥为黏土粉质粘土, 层厚 5 m; 层⑦-1 为草黄色砂质粉土, 层厚 6 m; 层⑦-2 为灰黄色粉砂, 层厚 30 m 左右。黏土和砂土是两种冻结效果性能差非常大的土质。

低温条件下的冻土力学试验比常温下试验增加

收稿日期: 2006-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50578120)。

作者简介: 肖忠华, 男, 1982 年生, 硕士研究生。主要从事地下与隧道工程, 冻结法方面的研究。E-mail: xzhonghua@163.com

论文联系人: 胡向东, 男, 1961 年生, 副教授, 主要从事地下与隧道工程冰结法方面研究。E-mail: anton.geotech@tongji.edu.cn

了控温系统,其技术难度大、系统复杂、要求高。冻土单轴试验和蠕变试验在 WDT-100 微机控制冻土试验机(图 1)上进行,试验装置最大加载能力为 100 kN,精度为 1%,最低温度可达 -50°C 。加载和数据由计算机根据设定好的参数自动控制和采集。



图 1 WDT-100 微机控制冻土试验机
Fig.1 WDT-100 PC-control tester for frozen soil experiments

试验前,土件必须在规定的负温下养护 48 h 以上,确保试件温度均匀,这一点非常重要,特别是在温度不太低时冻土对温度敏感性非常大。试验采用应变控制方式,为了克服加载时间长短对试验结果的影响,冻土无侧限抗压强度取试件破坏时的加载时间大约为 $(30\pm 5)\text{s}$ 的强度值。

3 试验结果

本次试验是在两次冻结过程中对土进行了常规土工试验和冻土力学性能试验,其中未冻土为现场取样后的原状土,一次、二次冻融土为试验室条件下用保鲜膜对土体密封后一次、两次冻结至 -10°C ,然后在密封条件下进行自然解冻。

3.1 常规土工试验结果与分析

常规土工试验结果见表 1。由试验结果可知,在试验室保持水份总量不变的条件下,由于冻结导致土体膨胀,融化后水份分布变化致使常规土工试验各项指标有所变化,总的变化趋势是:含水率略有降低,密度略有减小,渗透系数稍有变大,孔隙比变大,塑限、比重基本不变。

表 1 土工试验结果
Table 1 Experimental results of soils

编号及土状态	含水率 ω /%	密度 ρ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	渗透系数 K / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	孔隙比 e_0	塑限 W_p /%	比重 G
第 1 组	24.07	1.939	10.68×10^{-8}	0.71	19.3	2.72
层⑥	23.54	1.904	11.67×10^{-8}	0.74	18.5	2.70
(原状土)	23.52	1.90	11.62×10^{-8}	0.75	18.2	2.70
第 2 组	29.03	1.837	7.94×10^{-4}	0.75		2.70
层⑦-1	28.31	1.811	8.11×10^{-4}	0.77		2.69
(一次冻融土)	28.30	1.809	8.05×10^{-4}	0.79		2.67
第 3 组	27.17	1.903	1.66×10^{-3}	0.78		2.71
层⑦-2	26.87	1.871	1.72×10^{-3}	0.79		2.70
(二次冻融土)	26.85	1.868	1.70×10^{-3}	0.79		2.70

3.2 冻土力学性能试验结果与分析

表 2 为各层土经一次冻结和二次冻结无侧限单轴抗压强度值。表中第 1 组一次冻结土试验没有 -5°C 的而是 -8°C ,是因为试验过程中发现 -5°C 时试件不能出现正常的破坏情况,而是一开始加载就出现很强的流塑,试件被压坍塌,根据《土工试验方法标准》^[3],这种情况不能作为有效试验。图 2(a)和图 2(b)为各层土一次、二次冻结后单轴抗压强度随温度变化曲线,图 2(c)~2(e)为各层土一次、二次冻结单轴抗压强度随温度变化比较图。

表 2 无侧限单轴抗压强度
Table 2 Uniaxial compressive strengths of soils

组层	状态	温度 / $^{\circ}\text{C}$			
		-5	-8	-12	-20
第 1 组	一次冻结		1.20	3.66	5.84
层⑥	二次冻结	1.63		3.33	4.86
第 2 组	一次冻结		1.52	3.60	6.31
层⑦-1	二次冻结	1.85		3.33	5.44
第 3 组	一次冻结		2.98	5.37	7.98
层⑦-2	二次冻结	2.9		4.86	6.07

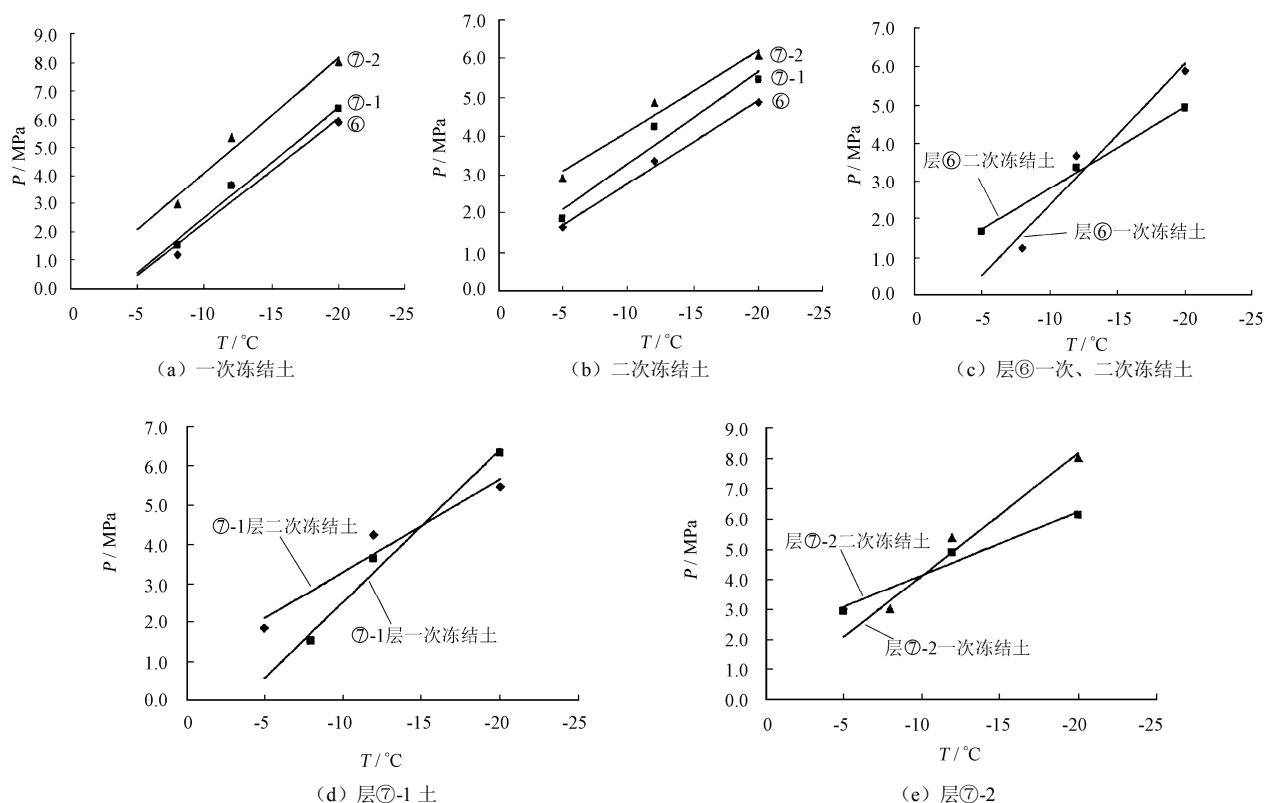


图2 各层土一次、二次冻结土无侧限单轴抗压强度

Fig.2 Uniaxial compressive strength

从图 2(a)、图 2(b)可以看到, 冻结土的极限抗压强度明显的依赖负温度, 已有研究成果^[4] 随温度变化的冻结曲线可以用式 (1) 很好地描述。

$$\sigma = a + b(T)^n \quad (1)$$

式中, a 、 b 、 n 为参数; T 为负温度的绝对值。 a 、 b 的值与土质固体颗粒大小以及级配等有关。根据前苏联科学院伊加尔卡科研站试验 (1959 年), 参数 n 的数值接近 $1/2$, 而舒舍丽娜及维亚洛夫的研究表明, 对于天然压密土可采用 $n=1$, 即抗压强度与负温之间呈线性关系, 将对一般工程应用有足够的精度, 在这里统一用 $n=1$ 来拟合曲线。

层⑥:

$$\left. \begin{aligned} \text{一次冻结: } \sigma &= -0.37t - 1.37, r^2 = 0.950 \ 2 \\ \text{二次冻结: } \sigma &= -0.21t + 0.62, r^2 = 0.995 \ 3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

层⑦-1:

$$\left. \begin{aligned} \text{一次冻结: } \sigma &= -0.39t - 1.40, r^2 = 0.999 \ 7 \\ \text{二次冻结: } \sigma &= -0.24t + 0.91, r^2 = 0.950 \ 5 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

层⑦-2:

$$\left. \begin{aligned} \text{一次冻结: } \sigma &= -0.40t + 0.06, r^2 = 0.973 \ 1 \\ \text{二次冻结: } \sigma &= -0.21t + 2.02, r^2 = 0.970 \ 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

从曲线拟合结果可见, 各层土不管是一次, 还是二次冻结, 系数 a 都有不同程度增大, 增大幅度都为 2。系数 a 的含义是指未冻土的极限抗压强度, 这说明经过二次冻融循环以后抗压强度提高了, 这种现象的解释是, 各层土由于取自江边, 属于饱和土, 含水率很高, 都在 26% 左右, 根据中国科学院兰州冰川冻土研究所提出的动土工程分类方法 (吴紫汪, 1982 年)^[5], 这样形成的冻土为富冰冻土或者饱冰冻土。第二次冻结与第一次冻结相比含水率略有降低, 强度有所增大。其次, 两次冻结作用导致水分有规律的迁移, 土体颗粒之间接触咬合更紧密, 产生固结效果, 因此强度也有一定程度增大。通过试验现场对未冻土、一次冻融土、二次冻融土试样的简单观测也能发现这种现象。这种现象说明, 即使是在封闭系统, 即外界与冻土没有物质交换, 水不会流进流出, 经由冻结再解冻以后土体力学性质不会回到初始状态, 土体的内部结构已经发生了变化。

从图 2(c)、图 2(e)可见, 各层土处在较高负温时二次冻结后强度要比一次冻结的高, 随着温度的降低, 两条冻结曲线在某个负温相交, 最终一次冻结强度将高于二次冻结强度。其解释是, 冻土的强度是由土中的颗粒机械结构和冰两部分组成, 当负

温较高时水冻结成冰数量和冰的强度比较低,而由前文所述,土体本身经由一次冻结以后有了固结作用,强度更高,此时二次冻结强度要高于一次强度。随着温度降低,一方面水冻结成冰数量和冰的强度增加,另一方面冰起的黏结作用提高,加强了土中颗粒与颗粒直接的相互作用,由于二次冻结以后土体膨胀,土体结构经过冻融遭到一定的破坏,即使含水率基本保持不变,最终二次冻结土体强度低于一次冻结土强度。

式(1)中 b 为土的极限抗压强度随温度降低强度增大的梯度,从图2(a)、图2(b)可知一次冻结、二次冻结中各层土的曲线斜率大致相等,而各层土斜率有所减小,二次冻结曲线斜率分别为一次冻结曲线斜率的50%~60%,曲线更平缓,可以预计这种高含水率土体在经历3次以上的更多次冻融循环以后,斜率将趋于平缓到某一个值,而不是趋于0,或者增大,而且随着温度降低到某个值产生的最高强度值也会逐渐降低至某一个值,因为经历多次冻结循环后土体内部机械结构发生变化,土颗粒之间的黏结力慢慢减小,对土体整体的骨架作用逐渐降低,土的最高强度值降低,可见 b 值是冻结土体本身内部颗粒结构性系数,反映了冻土冻结性能的好坏,表现为: b 值越大,冻土结构性越好,降低一定温度冻土强度越高,反之亦然。土体经由冻融后冻结性能减弱,形成的冻土强度降低。

4 结 论

根据已有的研究成果和本次试验结果,对冻土进行描述对冰结后强度影响及结论如下:

(1) 冻土力学性质主要由土颗粒机械结构和土的含水率决定。土颗粒机械结构包括土颗粒形状、大小、级配,强度及颗粒与水或冰结合能力等,这些决定了某种土的冻结性质,包括单位温度降低

冻土的强度提高率大小、冻土最终能够达到的最高强度的大小。土的含水率是冻土的关键影响因素。冻土中同时存在冰和未冻水,某个负温下土的含水率决定了冻土中未冻水的含量,而未冻水的含水率决定了该温度下冻土的强度,含量越高冻土强度越低。

(2) 冻土强度由土中冰和土颗粒机械结构两部分构成。随着温度降低,土中冰的含量和强度增加,但在-70℃左右冰自身强度达到最高,土颗粒之间由于冰的黏结作用相互结合力增加。随着温度降低,冰提供的自身强度与土体本身由于冰黏结作用增长的强度之比降低,因此土颗粒当其冻结至某一温度,土中冰应当在恰好填满土中孔隙时能够使得土的强度达到最高,此时的含水率是冻土的最佳含水率,这个值应当比饱和土的含水率低一些。

参 考 文 献

- [1] Viklander P. Laboratory study of stone heave in till exposed to freezing and thawing[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1998, 27: 141—152.
- [2] MT/T593.4-1996, 人工冻土物理力学性能试验[S].
- [3] GB/T50123-1999, 土工试验方法标准[S].
- [4] (苏)H.A.崔托维奇. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [5] 吴紫汪. 冻土工程分类[J]. 冰川冻土, 1982, (4): 43—48. WU Zi-wang. Classification of frozen soil in engineering constructions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1982, 4(4): 43—48.
- [6] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.