

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.01.008

极端气候条件下南京附近黏土冻融强度试验

李卓¹, 刘斯宏¹, 王柳江¹, 傅中志², 刘康³

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024
3. 代尔夫特理工大学土木学院, 荷兰)

摘要: 针对极端气候下南方地区黏土的冻融强度与含水率、最低气温和冻融循环次数密切相关的特点, 对不同初始含水率的黏土在不同冻结箱温度下经历不同冻融循环次数后的试样进行不固结不排水三轴压缩试验。试验结果表明: 同一冻结箱内温度下, 冻融试样在开始1~4次冻融循环期间黏聚力和内摩擦角变化显著, 随着冻融循环次数的增加, 黏聚力减小, 内摩擦角增加; 同一冻融循环次数下, 随着冻结箱内温度降低, 冻融试样黏聚力增加, 内摩擦角减小。总结了冻融循环冻土损伤的特征。

关键词: 黏土含水率; 黏土冻融强度试验; 不固结不排水三轴压缩试验; 黏土强度参数; 南方地区极端气候条件; 南京附近黏土

中图分类号: TU43 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2014)01-0040-05

Freeze-thaw strength test of clay soil around Nanjing City under extreme climatic conditions

LI Zhuo¹, LIU Sihong¹, WANG Liujiang¹, FU Zhongzhi², LIU Kang³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;
3. Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands)

Abstract: The freezing-thawing strength of a clay soil in southern China under extreme climatic conditions is closely related with the moisture content, freeze-thaw cycle, and minimum temperature. An unconsolidated-undrained triaxial compression test was carried out on clay soil samples that had different initial moisture contents and experienced different freeze-thaw cycles at different temperatures of the freezing equipment. The results show that the cohesion of the tested clay soil decreased and the internal friction angle increased with the increase of the freeze-thaw cycles at the same temperature of the freezing equipment, especially from the first to the fourth freeze-thaw cycles. Also, the cohesion of the tested clay soil increased and the internal friction angle decreased with the decrease of the temperature of the freezing equipment within the same freeze-thaw cycles. The characteristics of frozen soil damage in the freeze-thaw cycles are summarized.

Key words: moisture content of clay soil; freeze-thaw strength test of clay soil; unconsolidated-undrained triaxial compression test; strength parameters of clay soil; extreme climatic conditions in southern China; clay soil around Nanjing City

近年来, 极端低温天气出现的频率有所增加, 极端天气造成南方建筑物损害引起了人们的重视。由于建筑物基础受极端天气冻融的作用, 普遍存在不同程度的冻胀破坏, 不仅影响工程的正常运行, 而且阻碍工程效益的有效发挥。因此, 极端气候条件下南方黏土的力学特性研究尤为迫切。

同时, 对渠道及其建筑物, 同一地点的相同渠道在相同负温下由于含水率不同所引起的冻胀程度不同,

收稿日期: 2013-10-15

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程项目(水利工程)(2011137); 江苏省博士后基金(1302111C)

作者简介: 李卓(1979—), 男, 宁夏隆德人, 博士研究生, 主要从事土石坝工程及水工建筑物防冻胀研究。E-mail: zhuoli@nhri.cn

而对同一渠道经过不同地方,由于负温和含水率不同所引起的冻胀程度也不同。针对上述问题,笔者进行了含水率、最低气温和冻融循环次数对黏土力学特性的影响研究。

黏土的力学性能与含水率、最低气温和冻融循环次数等多种因素有关。王铁行等^[1]研究了不同含水率的非饱和和原状黄土的冻融强度特性,结果表明含水率过低时冻融作用对非饱和黄土的黏聚力基本无影响,含水率较高时冻融循环后黄土的黏聚力较冻融前有所降低;宋春霞等^[2]研究了兰州黄土在不同冻结箱温度下的强度,得到相同密度的黄土随着冻结温度梯度增大其黏聚力降低、内摩擦角增大的结论。有关冻融循环次数影响的研究相对较多,譬如,Konrad^[3]研究表明冻融循环引起粉质黏土微观结构变化,从而影响其强度特性;Wang 等^[4]研究了青海-西藏黏土在不同冻融循环次数下的强度特性,得出随着冻融循环次数增加其黏聚力减小、内摩擦角增大的结论;齐吉琳等^[5-11]通过电镜扫描研究了冻融循环作用下超固结黏土的强度特性,解释了超固结黏土在冻融循环作用下强度变化的机理。

目前针对寒冷地区冻土力学特性的研究主要考虑含水率、最低气温和冻融循环次数 3 个因素中的某个因素进行,实际上,土的力学特性受含水率、温度、冻融循环次数的综合影响,对南方地区黏土的强度受极端低温天气影响及其综合考虑以上 3 个因素影响的研究尚未见报道。笔者对不同初始含水率的黏土在不同冻结箱内温度下经历不同冻融循环次数后的试样进行了系列不固结不排水三轴压缩试验,综合考虑含水率、最低气温和冻融循环次数的影响,有助于进一步认识南方地区黏土的力学特性。

1 试验情况

试验采用的黏土样取自南京附近,其颗粒质量分数分别如下:粒径 $d<0.075\text{ mm}$ 的占 18.1%, $0.075\text{ mm}<d<0.5\text{ mm}$ 的占 69.5%, $0.5\text{ mm}<d<2\text{ mm}$ 的占 4.9%, $d>2\text{ mm}$ 的占 7.5%;主要物性指标如下:天然含水率为 17.6%,干密度为 1.62 g/cm^3 ,液限为 36.4,塑限为 16.6,塑性指数为 19.8,饱和含水率为 38.1%。对取回的土样,一部分进行风干,一部分加水湿润,得到 3 种不同含水率的土样,含水率分别为 11.1%、17.6% 和 22.9%。

对于不同含水率的土样,按土工试验规程制备成若干个直径 $D=39.1\text{ mm}$ 、高度 $H=61.8\text{ mm}$ 的圆柱形试样,试样的干密度均为 1.42 g/cm^3 。

2008 年南方局部地区温度在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,试验选定的冻结箱内温度分别为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对于某一冻结箱内温度,试样置于恒温冷冻箱内冻结 24 h,单向、封闭系统中(无外界水源补给)冻结,然后打开冷冻箱顶盖在室温下(试验期间 4—5 月份,平均室温约 $10\sim15\text{ }^{\circ}\text{C}$)融化 24 h,此过程为一个冻融循环周期。试验装置见图 1。

对于 3 种不同初始含水率的土样分别在 3 种不同冻结箱温度下冻融循环 1 次,随即进行不固结不排水三轴压缩试验,其围压分别为 50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa;为了进一步研究冻融循环的影响,分别对 3 种不同含水率的土样在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冻结箱内继续进行 1 次、3 次、5 次、7 次、9 次、11 次冻融循环,每一阶段冻融循环(比如 3 次)结束后,取出试样进行不固结不排水三轴压缩试验。对于每种初始含水率的土样,在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冻结箱内共进行了 6 组(每组 4 个样)不同次数的冻融循环及不固结不排水三轴压缩试验。



图 1 冻融试验箱

Fig. 1 Freezing-thawing apparatus

2 试验结果及分析

2.1 初始含水率和最低气温的影响

为研究不同初始含水率和不同冻结箱内温度对黏土抗剪强度的影响,将初始含水率 ω_0 分别为 11.1%、17.6%、22.9% 的 3 种试样在恒温制冷箱中每种都分别在 $T=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的负温下冻结,之后在室温下融化。经过此次冻融循环后进行三轴压缩试验。围压 $\sigma_3=150\text{ kPa}$ 时冻融试样的应力-应变关系曲线如图 2 所示($\sigma_1-\sigma_3$ 为主应力差, σ_1 为大主应力, ε_a 为轴向应变)。从图 2 可以看出,对于初始含水率为 11.1% 的试样,3 种不同的冻结箱内温度下其应力-应变关系曲线形状基本相似;初始含水率为 17.6% 和 22.9% 的试样各自在 3 种不同冻结箱内温度下的应力-应变关系曲线形状差异较大,都是随着试样初始含水

率的增大,冻结箱内温度对其应力-应变关系曲线的影响增大。冻融作用相当于对土体结构的损伤作用,主要与土中的水分有关。含水率较高的试样,冻结温度越低其水分转化为冰的条件越充分,土体各组间的热膨胀性差异也越大,从而造成土在冻融循环后的内部冻融压力越大,导致土体结构的冻融损伤越大。

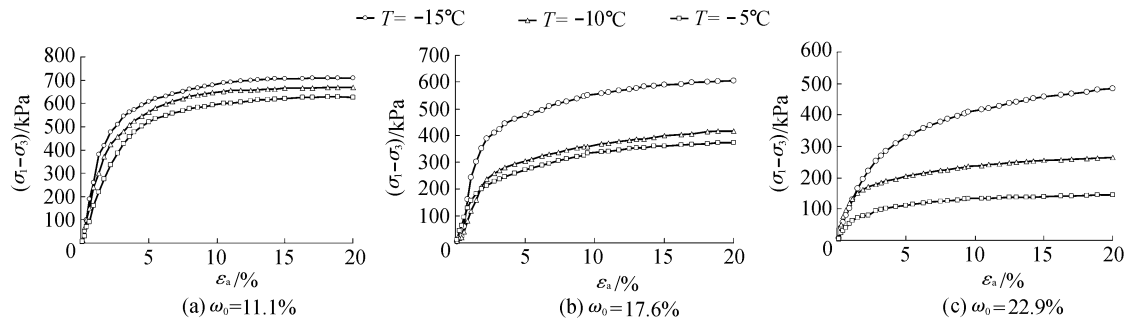


图2 不同初始含水率土样在不同的冻结箱温度下经过1次冻融循环后的应力-应变关系曲线($\sigma_3=150\text{ kPa}$)

Fig. 2 Stress-strain curves of clay soil with different initial moisture contents within one freeze-thaw cycle at different temperatures of freezing equipment ($\sigma_3=150\text{ kPa}$)

图3为3种不同初始含水率的试样经过1次冻融循环后的强度参数(黏聚力 c 与内摩擦角 φ)随冻结箱内温度的变化关系。从图3(a)中可以看出:试样的黏聚力随冻结箱内温度的降低和初始含水率的减小而增大;在同一冻结箱温度下黏聚力随初始含水率的减小而增大,而对同一初始含水率的试样,其黏聚力随着冻结箱温度降低而增大。从图3(b)中可以看出:试样的内摩擦角随着冻结箱温度的降低和初始含水率的增加而减小;在同一冻结箱温度下内摩擦角随着含水率的增加而减小,同一含水率试样的内摩擦角随着冻结箱温度的降低而减小。

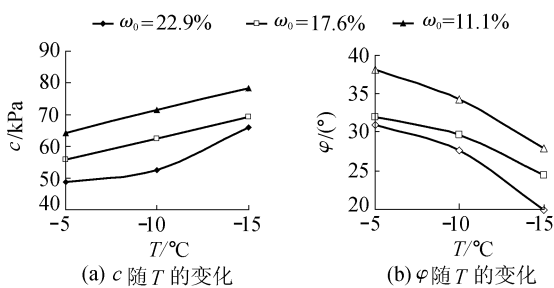


图3 不同初始含水率土样在不同的冻结箱温度下经过1次冻融循环后的强度参数变化

Fig. 3 Variation of strength parameter of clay soil with different initial moisture contents within one freeze-thaw cycle at different temperatures of freezing equipment

2.2 冻融循环次数的影响

图4为 $\sigma_3=150\text{ kPa}$ 时3种不同初始含水率试样在 $T=-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下分别经历1次、3次、5次、7次、9次、11次冻融循环后的应力-应变关系曲线。从图4可知,不同初始含水率的试样经历不同冻融循环次数后其应力-应变关系曲线均呈硬化抛物线型。对于同一初始含水率的试样,随着冻融循环次数的增加,其轴向应力呈现减小的趋势。

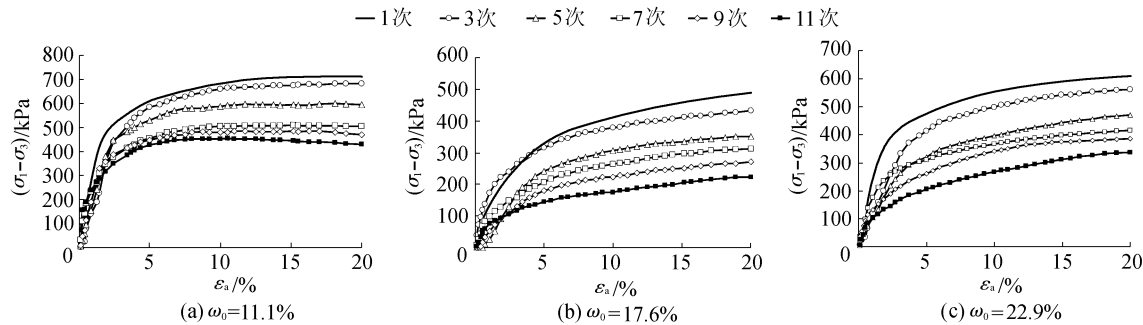


图4 $\sigma_3=150\text{ kPa}$ 时不同初始含水率试样经过不同冻融循环次数后的应力-应变关系曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of clay soil with different initial moisture contents after different freeze-thaw cycles when $\sigma_3=150\text{ kPa}$

图5为3种不同初始含水率试样在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冻结箱温度下经历不同冻融循环次数后强度参数的变化。从图5(a)中可以看出,冻融试样的黏聚力随着冻融循环次数和初始含水率的增大而减小。同一冻融循环次数条件下,黏聚力随初始含水率的增加而减小;同一初始含水率的试样,黏聚力随冻融循环次数的增加而减小。

小,在开始的几次冻融循环期间黏聚力的减小幅度较大,尤其是冻融循环 1 次和未经冻融循环的试样相比变化最明显,第 5 个冻融循环后试样的黏聚力渐趋稳定。冻融循环导致试样内部正负温度交替变化,从而产生温度应力,同时试样在负温下冻结,土体中孔隙水结冰而产生冻胀力。如果温度应力与冻胀力超过土颗粒间的作用力时,土体结构出现弱化,在融化时水分进一步渗入孔隙中,如此循环往复导致土体结构的连续损伤,使黏聚力降低。

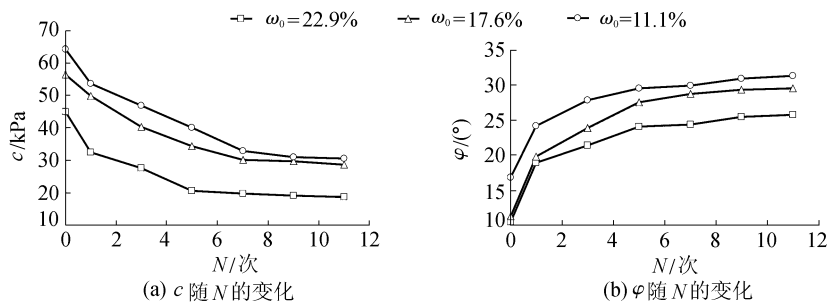


图 5 $T=-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同初始含水率土样的强度参数与冻融循环次数的关系

Fig. 5 Strength parameter of clay soil with different initial moisture contents vs. number of freeze-thaw cycles when $T=-15\text{ }^{\circ}\text{C}$

图 5(a) 的试验结果可以拟合成以下关系式:

$$c = (a\omega_0 + b)N^d \tag{1}$$

式中: N ——冻融循环次数; a 、 b 、 c ——试验常数,由试验确定, $a=-1.973\ 3$, $b=80.807$, $d=-0.25$ 。

图 5(b) 为不同初始含水率试样的内摩擦角与冻融循环次数的关系。可见,内摩擦角随冻融循环次数的增加和初始含水率的减小而增加。同一初始含水率的试样,内摩擦角随冻融循环次数的增加而增加,其变化幅度在第 1 次冻融循环内尤为明显,随后的冻融循环内其变化渐趋稳定。

图 5(b) 的试验结果可以拟合成以下关系式:

$$\varphi = (e\omega_0 + f)N^g \tag{2}$$

式中: e 、 f 、 g ——试验常数,由试验确定, $e=-0.945\ 8$, $f=44.048$, $g=-0.197$ 。

3 结 语

- a. 在同一冻融循环次数下,黏土的黏聚力随冻结箱温度的降低和初始含水率的减小而增加,内摩擦角随冻结箱温度的降低和含水率的增加而增加。
- b. 在同一冻结箱温度下,1~7 次冻融循环的黏土黏聚力随冻融循环次数和初始含水率的增加而减小,内摩擦角随冻融循环次数的增加和含水率的减小而增加。
- c. 土体的冻融强度与初始含水率、冻融循环次数和冻结箱温度密切相关。通过总结冻融循环冻土损伤特征,认为冻融作用可以解析为对土体结构的损伤作用。含水率较高的试样,冻结箱温度越低,水分转化为冰的条件越充分,土体中孔隙水结冰而产生的冻胀力越大,冻融循环在试样内部产生的温度应力也越大,导致土体结构的冻融损伤越大。
- d. 由于土体的冻融强度在初次冻融循环后变化较大,对于南方地区,在冬季经过多年不遇的冰雪灾害或罕见低温后应特别注意冻融作用对建筑物基础的影响。

参考文献:

[1] 王铁行,罗少峰,刘小军. 考虑含水率影响的非饱和原状黄土冻融强度试验研究[J]. 岩土力学,2010, 31(8):2378-2382. (WANG Tiehang, LUO Shaofeng, LIU Xiaojun. Testing study of freezing-thawing strength of unsaturated undisturbed loess considering influence of moisture content[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010,31(8):2378-2382. (in Chinese))

[2] 宋春霞,齐吉琳,刘奉银. 冻融作用对兰州黄土力学性质的影响[J]. 岩土力学,2008,29(4):1077-1086. (SONG Chunxia, QI Jilin, LIU Fengyin. Influence of freeze-thaw on mechanical properties of Lanzhou loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4):1077-1086. (in Chinese))

[3] KONRAD J M. Physical processes during freeze-thaw cycles in clayey silts[J]. Cold Regions Science and Technology, 1989, 16

(3), 291-303.

[4] WANG Dayan, MA Wei, NIU Yonghong, et al. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay[J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 48:34-43.

[5] 齐吉琳,马巍. 冻融作用对超固结土强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12):2082-2086. (QI Jilin, MA Wei. Influence of freeze-thaw on the strength of overconsolidated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12):2082-2086. (in Chinese))

[6] 齐吉琳,程国栋,VERMEER P A. 冻融作用对土工程性质影响的研究现状[J]. 地球科学进展, 2005, 20(8):887-893. (QI Jilin, CHENG Guodong, VERMEER P A. State-of the art of influence of freeze-thaw on engineering properties of soils[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(8):887-893. (in Chinese))

[7] LI Zhuo, LIU Sihong, WANG Liujiang. Experimental study on the effect frost heave prevention using soilbags[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 85: 109-116.

[8] LI Zhuo, LIU Sihong, FENG Youting. Numerical study on the effect of frost heave prevention with different canal lining structures in seasonally frozen ground regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 85: 242-249.

[9] 于孝民,任青文. 冻融循环作用下普通混凝土断裂能试验[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2010, 38(1):80-82. (YU Xiaoming, REN Qingwen. Fracture release energy for ordinary concrete with freeze thaw cycles [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(1):80-82. (In Chinese))

[10] QI Jilin, MA Wei, SONG Chunxia. Influence of freeze-thaw on engineering properties of a silty soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53:397-404.

[11] JAFARI M K, SHAFIEE A. Mechanical behavior of compacted composite clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(6):1152-1167.

+++++

· 简讯 ·

水文水资源与水利工程科学国家重点实验室
被评为优秀类国家重点实验室

据科技部发布的《2013 年材料领域与工程领域国家重点实验室评估报告》,水文水资源与水利工程科学国家重点实验室(河海大学·南京水利科学研究院)被评为优秀类国家重点实验室。

2013 年科技部委托国家自然科学基金委员会对材料领域与工程领域 64 个国家重点实验室进行了评估。工程领域中有 11 个实验室被评为优秀类实验室,28 个实验室被评为良好类实验室。科技部将依据评估结果,对优秀类国家重点实验室加大支持力度,同时实行末位淘汰制。

水文水资源与水利工程科学国家重点实验室在本评估期内面向国家重大需求,瞄准科学技术发展前沿,开展了大量创新性研究,取得了显著的研究成果。该实验室已成为我国在水文水资源、水利工程、水环境、水生态等领域开展创新性应用基础研究、解决重大工程关键技术问题、培养高层次人才以及进行高水平学术交流的重要基地。

(本刊编辑部供稿)