

DOI: 10.11779/CJGE2023S10001

# 升降温作用对黏性土剪切特性影响的试验研究

丁诗佳, 张哲安, 费康

(扬州大学岩土工程研究所, 江苏 扬州 225127)

**摘要:** 采用温控三轴仪, 对升降温作用后的正常固结饱和黏土进行了固结不排水剪切试验, 研究了升降温作用对土体强度、有效应力路径、超孔压等的影响。结果表明, 在 100, 200, 400 kPa 固结围压下, 土样在升降温作用后呈现出类似超固结土的特性, 固结不排水剪切强度分别提高了 25.8%, 22.1%, 14.8%。强度的变化主要表现为黏聚力的提高, 临界摩擦角基本保持不变。对比室温下不同超固结比 (OCR) 土样的固结不排水剪切试验结果, 发现升降温作用后土样的峰值强度与 OCR=1.5 的土样相近, 但升降温作用过程中产生的塑性体积应变增量远小于力学加-卸载所产生的, 表明升降温作用对土体的硬化作用与超固结土的体积硬化机理有所区别。

**关键词:** 黏土; 升降温; 三轴试验; 剪切特性

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S1-0132-04

**作者简介:** 丁诗佳(1997—), 男, 硕士, 主要从事地基基础等方面的科研工作。E-mail: jwj2035@163.com。

## Experimental study on effects of heating-cooling cycles on shear characteristics of clay

DING Shijia, ZHANG Zhean, FEI Kang

(Institute of Geotechnical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

**Abstract:** The consolidated undrained shear tests on the normally consolidated saturated clay after heating-cooling are carried out by using the temperature-controlled triaxial apparatus. The effects of the heating-cooling on the soil strength, effective stress path and excess pore pressure are studied. The results show that under the confining pressures of 100, 200, 400 kPa, the soil samples exhibit similar characteristics to those of the overconsolidated soil after heating-cooling, and the consolidated undrained shear strength increases by 25.8%, 22.1% and 14.8%, respectively. The change of strength mainly shows the improvement of cohesion, and the critical friction angle basically remains unchanged. By comparing the consolidated undrained shear test results of the soil samples with different OCRs at room temperature, it is found that the peak strength of the soil samples after heating-cooling is similar to that when OCR=1.5, but the increment of plastic volumetric strain generated during heating-cooling is much smaller than that generated by mechanical loading and unloading, which indicates that the hardening effects of heating-cooling on soil are different from the volumetric hardening mechanism of the overconsolidated soil.

**Key words:** clay; heating-cooling; triaxial test; shear characteristic

## 0 引言

在地热资源开发、核废料处理等工程中, 都需要考虑温度对土体的影响, 如能量桩在服役过程中会经历循环往复的升-降温<sup>[1-2]</sup>, 导致桩周土体剪切强度等力学特性改变, 对工程的安全性产生一定威胁, 因此升降温作用对土体强度特性的影响受到学者们的广泛重视。Abuel-Naga 等<sup>[3]</sup>对曼谷软黏土进行了三轴剪切试验, 发现正常固结土在经过升降温作用后, 其不排水剪切强度高于室温条件下的土样。Wang 等<sup>[4]</sup>对产自马来西亚的高岭土进行了固结不排水剪切试验, 发现经过升降温作用后, 土样的不排水剪切强度较室温下提高了 8%。Burghignoli 等<sup>[5]</sup>对 Todi 黏土进行了不排

水三轴压缩试验, 结果显示升降温作用对土样强度的影响与围压的大小有关, 在 196 kPa 围压下, 升降温作用试样的不排水剪切强度始终高于室温下的土样; 而在 98 kPa 围压下, 升降温作用试样的峰值剪切强度低于室温下的土样。

学者们<sup>[6-8]</sup>通常将升降温作用引起的强度提高归结于升-降温过程中产生的塑性体积应变, 费康等<sup>[6]</sup>认为变温引起热塑性体积应变, 并具有与力学塑性体积应变相似的硬化机理, 也即升降温作用后土体产生类似超固结土的特点, 白冰等<sup>[7]</sup>将这种现象称为似超

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51778557)

收稿日期: 2023-07-05

固结效应, 但似超固结效应对土体的硬化作用与超固结土的硬化机理是否相同还缺少试验数据的支持。

为研究升降温作用对土体的硬化作用与力学加-卸载的体积硬化机理的异同点, 本文采用温控三轴仪, 对升降温作用后的正常固结饱和黏土进行了固结不排水剪切试验, 并与室温下不同超固结比土样的剪切结果进行了对比, 重点讨论了温度对土体强度、超孔压和有效应力路径的影响。

## 1 试验介绍

### 1.1 试验装置和材料

试验在厂家型号温控三轴仪上进行, 其在常规三轴仪压力室外增设了水浴腔和真空腔, 试验时通过水浴箱调节温度, 以实现水温的精准控制。

试验用土为商业购买的水洗高岭土, 液限为 48.6%, 塑限为 29.1%,  $G_s$  为 2.63。试样采用击实法制成, 直径为 39.1 mm, 高度为 80 mm, 制样含水率为 35%, 制样干密度为 1.20 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 试验过程和方案

土样先在饱和器中进行抽真空饱和, 再装上三轴仪进行反压饱和, 直至孔隙水压力系数  $B$  大于 0.95。待土样在预定围压下固结完成, 再在排水条件下进行 25℃→65℃→25℃的升降温作用, 为避免温度上升过程中超孔压对试验结果的影响, 温度分级变化, 每级变温 3℃, 待超孔隙水压力完全消散后, 再施加下一级温度增量, 共施加 13 级 (最后一级 4℃)。最后, 在室温 (25℃) 下进行不排水剪切试验。试验方案见表 1。

表 1 试验方案

Table 1 Test plan

试验编号	超固结比	温度历史/℃	有效围压/kPa
NN100	1	25	100
NN200	1	25	200
NN400	1	25	400
NC100	1	25→65→25	100
NC200	1	25→65→25	200
NC400	1	25→65→25	400
ON11	1.13	25	200→225→200
ON12	1.25	25	200→250→200
ON13	1.5	25	200→300→200
ON14	2	25	200→400→200

注: NN 为正常固结土室温下的三轴试验, NC 为正常固结土升降温作用下的三轴试验, ON 为超固结土室温下的三轴试验。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 强度特性

图 1 为室温下的土样在 100, 200, 400 kPa 固结围压下, 偏应力与轴向应变的关系曲线, 其中偏应力

$q = \sigma_1 - \sigma_3$ 。从图 1 可知, 各土样的偏应力均随着轴向应变不断增长, 达到峰值后基本保持不变, 呈现出应变硬化特征, 且随着前期固结压力的增加, 偏应力的峰值也逐渐增大。根据不排水强度的确定指标<sup>[9]</sup>, 当关系曲线为应变硬化型时, 取轴向应变 15% 时的偏应力作为不排水强度, 因此不同固结压力下土样的不排水剪切强度分别为 97, 163, 296 kPa。

图 1 中同时绘有升降温作用后土样的偏应力与轴向应变的关系曲线。在温度的影响下, 曲线的形态并没有发生明显改变, 仍为应变硬化型, 这是因为升降温作用对双电层厚度及作用力的影响大部分是可逆的, 当温度回到室温后, 薄膜黏着应力对强度的影响就会消失<sup>[6]</sup>。但是土体的峰值强度提高明显, 不同固结压力下的峰值强度分别为 122, 199, 333 kPa, 与室温下土样的峰值强度相比分别提高了 25.8%, 22.1%, 14.8%, 强度的提高幅度随着固结围压的增大而减小, 这也与白冰等<sup>[7]</sup>的研究结论相一致。这是因为孔隙水的热膨胀系数远大于土颗粒, 当温度变化时, 孔隙水与土颗粒的体积变化不一致, 导致土颗粒间位置发生调整, 相互接触更紧密, 导致剪切强度增强, 但随着固结压力的提高, 土样中所含的水分减少, 温度的影响作用也相应降低。

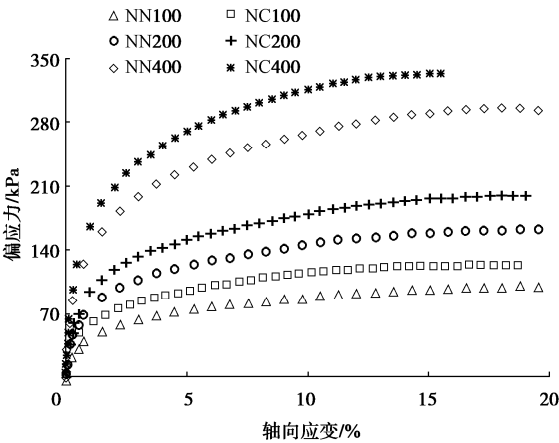


图 1 偏应力-轴向应变曲线

Fig. 1 Curves of deviatoric stress-axial strain

### 2.2 超孔压

图 2 为土样在不排水剪切阶段超孔压与轴向应变的关系曲线。从图 2 可以看出, 对于正常固结的重塑土, 经历升降温作用后的孔压曲线与室温下的形态相似, 在剪切过程中均产生正的超孔压, 在小应变时, 孔压随着轴向应变的发展近似呈线性增长, 随后孔压增长速率逐渐减缓并达到峰值, 在较大应变情况下略有减小。就具体数值而言, 在 100, 200, 400 kPa 有效围压下, 室温下土样的孔压峰值分别为 49.3, 103.1, 213.5 kPa, 经过升降温作用后的孔压峰值分别为 53.8,

104.8, 211.2 kPa, 二者的孔压峰值差别很小, 表明升降温作用对剪切阶段的超孔压几乎没有影响, 因此不能简单地从孔压减小有效围压上升的角度去解释土体强度的提高。

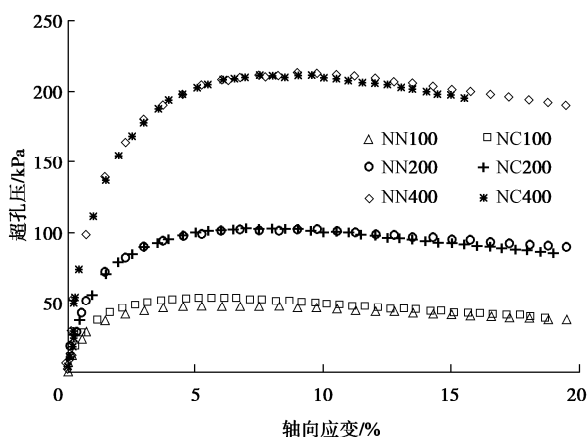


图2 超孔压-轴向应变曲线

Fig. 2 Curves of excess pore water pressure-axial strain

### 2.3 有效应力路径

图3为 $p'$ - $q$ 平面内绘制的有效应力路径, 其中横坐标为平均有效应力 $p'$ ,  $p' = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3$ , 纵坐标为偏应力 $q$ 。由于土样在常规的试验条件下很难达到临界状态, 而土体从减缩转为剪胀的相转点对应的应力比与临界状态点数值相近<sup>[6]</sup>, 因此, 本文将有效应力路径上的相转点与原点连成的直线作为临界状态线, 室温下土样的临界状态线斜率 $M=0.95$ , 对应的临界摩擦角为 $\varphi'_{cs}=24.2^\circ$ 。如图3所示, 室温下的正常固结重塑土在不同围压下的应力路径形态均呈“S”型, 表现出先减缩后剪胀的性状, 即平均有效应力先随着偏应力逐渐增大, 很快到达第一个拐点; 之后偏应力继续增大, 而平均有效应力逐渐减小, 曲线向左上方发展, 最终落到临界状态线上; 随后有效应力路径发生第二次偏转, 朝坐标轴右方发展, 表现出“剪胀”特性。

图3中同时绘有升降温作用后土样的有效应力路径, 其形态与室温下相似, 均表现出先减缩后剪胀的“S”型; 在相同的有效围压下, 升降温作用后的有效应力路径均位于室温下的右侧, 即在相同的偏应力作用下, 土体产生的超孔压更小, 表现出更大的有效均应力值。同时, 升降温作用后有效应力路径的相转点均位于室温情况下的右上方, 这表明土体从“减缩”转为“剪胀”状态时具有更高的偏应力和有效均应力, 致使升降温作用后的临界状态线斜率虽与室温下的相同, 但临界状态线的延长线并不经过原点, 其与 $Y$ 轴有一个正截距, 表明升降温作用对土体黏聚力有明显的提升作用, 而对内摩擦角的影响不大。这是因为重

塑土的土粒间分子引力形成的黏聚力更容易受到温度的影响; 而影响内摩擦角的主要因素是土颗粒的形态、矿物组成和粒径分布等<sup>[10]</sup>, 升降温作用并不会改变土体的上述特征, 因此内摩擦角的变化对升降温作用并不敏感。

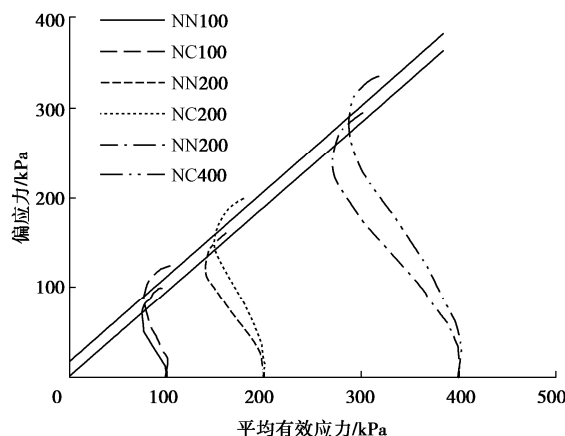


图3 有效应力路径

Fig. 3 Effective stress paths

### 2.4 超固结试验

图4为不同超固结比土样的偏应力与轴向应变的关系曲线, 为方便比较, 将升降温作用后土样 NC200 的强度曲线同时绘于图4。就曲线的形态而言, NC200 土样为应变硬化型, 而超固结土样的偏应力在较大应变下会有轻微的软化。同时, 随着超固结比的增大, 偏应力的峰值逐渐升高, OCR=1.13, 1.25, 1.5, 2.0 土样的峰值强度分别为 168, 179, 207, 271 kPa, 不难发现当超固结比提高到 1.5 时, 超固结土样的峰值强度与 NC200 土样的峰值强度 (199 kPa) 相近。

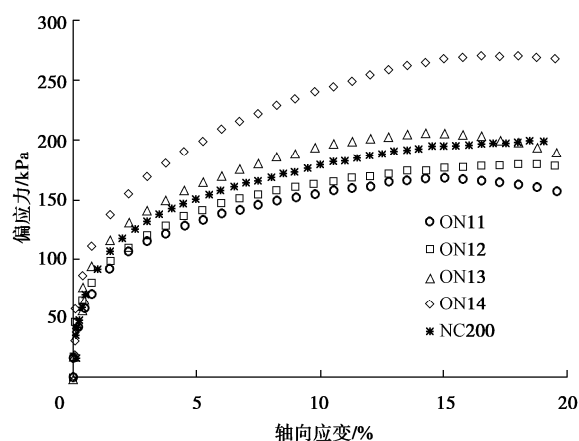


图4 偏应力-轴向应变曲线

Fig. 4 Curves of deviatoric stress-axial strain

图5为 NN200、NC200 和 ON13 土样在剪切过程中, 超孔压与轴向应变的关系曲线。从图5可直观看出, 升降温作用后土样的孔压曲线除在较大应变下具有更显著的软化趋势外, 其余阶段和室温下的孔压曲

线高度重合;OCR=1.5 土样的孔压曲线为应变软化型, 在小应变时, 超孔压的增长速率明显慢于其余两个土样, 导致超固结土样的孔压曲线整体位于室温下和升降温作用后土样的下方, 其孔压峰值为 78.3 kPa, 远小于升降温作用后土样的 103.1 kPa。同时, 力学加-卸载所产生的塑性体积应变为 2.08%, 远大于升降温作用导致的 0.14% 的塑性应变, 这表明升降温作用对土体的硬化与超固结土的体积硬化机理有所区别。

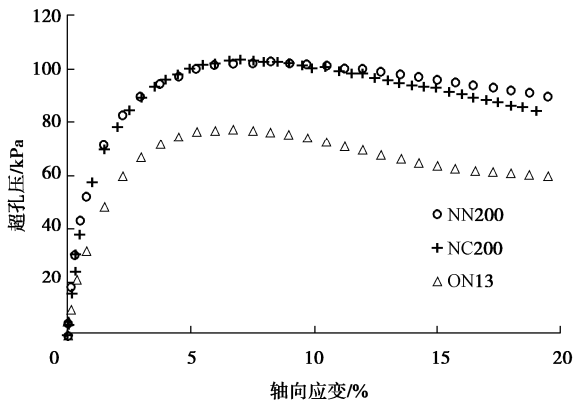


图 5 超孔压-轴向应变曲线

Fig. 5 Curves of excess pore water pressure-axial strain

### 3 结 论

(1) 升降温作用能够提高黏性土的不排水剪切强度, 强度的提高幅度随固结围压的增大而减小; 而升降温作用对剪切过程中的超孔压几乎没有影响, 因此土体强度的提高不能简单归结于超孔压的降低。

(2) 升降温作用对土样的残余摩擦角大小和有效应力路径形态均没有影响, 土体强度的变化主要表现为黏聚力的提高, 临界摩擦角基本保持不变。

(3) 升降温作用后土样的峰值强度与 OCR=1.5 的土样相近, 但升降温作用过程中产生的塑性体积应变增量远小于力学加-卸载所产生的, 两者的超孔压峰值也相差明显, 表明升降温作用对土体的硬化与超固结土的体积硬化机理有所区别。

### 参考文献:

- [1] FADEJEV J, SIMSON R, KURNITSKI J, et al. A review on energy piles design, sizing and modelling[J]. *Energy*, 2017, **122**: 390-407.
- [2] NG C W W, MA Qi-jie. Energy pile group subjected to non-symmetrical cyclic thermal loading in centrifuge[J]. *Géotechnique Letters*, 2019, **9**(3): 173-177.
- [3] ABUEL-NAGA H M, BERGADO D T, LIM B F. Effect of temperature on shear strength and yielding behavior of soft Bangkok clay[J]. *Soils and Foundations*, 2007, **47**(3): 423-436.
- [4] WANG K J, SHAN Z G, SHEN K M, et al. The thermo-mechanical behaviour of clay in different stress and temperature paths[M]// STEYN W J, WANG Z X, HOLLERAN G. *Transportation Infrastructure Engineering, Materials, Behavior and Performance: GeoChina 2021, Sustainable Civil Infrastructures*. Cham: Springer International Publishing, 2021: 150-165.
- [5] BURGHIGNOLI A, DESIDERI A, MILIZIANO S. A laboratory study on the thermomechanical behaviour of clayey soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, **37**(4): 764-780.
- [6] 费康, 周莹, 付长郢. 温度对饱和黏性土剪切特性影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(9): 1679-1686. (FEI Kang, ZHOU Ying, FU Changyun. Experimental study on effect of temperature on shear behavior of saturated clays[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(9): 1679-1686. (in Chinese))
- [7] 白冰, 桑有为, 杨光昌. 循环温度荷载引起的饱和粉质黏土的超固结效应[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2018, **26**(4): 863-871. (BAI Bing, SANG Youwei, YANG Guangchang. The over-consolidation effect of saturated silty clay caused by cyclic thermal loading[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, **26**(4): 863-871. (in Chinese))
- [8] ABUEL-NAGA H M, BERGADO D T, RAMANA G V, et al. Experimental evaluation of engineering behavior of soft Bangkok clay under elevated temperature[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, **132**(7): 902-910.
- [9] 凌道盛, 李奖, 王文军, 等. 人工制备土的结构性及其对应变局部化的影响[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, **53**(9): 1689-1696. (LING Daosheng, LI Jiang, WANG Wenjun, et al. Structure of artificial soils and its influence on strain localization[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, **53**(9): 1689-1696. (in Chinese))
- [10] 郑海君, 李洋, 蔡国军, 等. 升降温作用条件下粉土质砂的物理力学特征研究[J]. *中国测试*, 2016, **42**(2): 15-18. (ZHENG Haijun, LI Yang, CAI Guojun, et al. Physical and mechanical characteristics of silty sand under temperature cycling conditions[J]. *China Measurement & Test*, 2016, **42**(2): 15-18. (in Chinese))

(编校: 明经平)