

DOI: 10.11779/CJGE202009012

# 温度对饱和黏性土剪切特性影响的试验研究

费 康, 周 莹, 付长郢

(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, 考虑不同的温度 – 应力路径, 对两种正常固结的饱和黏性土进行了固结不排水和固结排水剪切试验, 研究了温度变化对土体强度、应力应变关系、孔压响应和流动法则等的影响。结果表明, 温度效应的强弱与土的类别有关, 温度变化对粉质黏土的剪切特性基本没有影响, 但对黏土的影响不容忽视。随着温度的增加, 黏土的不排水和排水峰值强度有明显的提高, 临界摩擦角基本保持不变。不同温度下黏土不排水剪切过程中均产生正的超孔压, 排水剪切中土体体积均持续减小, 表明高温下偏应力偏应变曲线出现软化的原因与强超固结土的剪胀机理有区别。黏土剪切特性的变化程度与温度 – 应力路径相关, 先升温后固结试样的不排水强度比固结后升温试样的低。温度循环一周后, 黏土的不排水强度较室温下有明显提高。

**关键词:** 黏土; 粉质黏土; 三轴试验; 剪切特性; 温度效应

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)09-1679-08

作者简介: 费 康(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事地基基础等方面的教学和科研工作。E-mail: kfei@yzu.edu.cn。

## Experimental study on effect of temperature on shear behavior of saturated clays

FEI Kang, ZHOU Ying, FU Chang-yun

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

**Abstract:** The effect of temperature on shear behavior of saturated clays is investigated by means of the temperature-controlled triaxial tests. Two kinds of normally consolidated saturated clays are tested. The test program involves different heating and consolidation sequences and drained conditions. The influences of the temperature change on the shear strength, the stress-strain relationship, the excess pore water pressure response and the flow rule are analyzed. The experimental results show that the temperature change significantly affects the shear behavior of the clay, while the temperature effect on the shear behavior of the silty clay is negligible. An increase in temperature increases the undrained and drained peak strength, but the critical friction angle does not change. The excess pore water pressures built up during undrained shear of clay specimens at different temperatures are all found to be positive, and the volume changes under drained shear are always contractive. It implies the reason that the stress-strain softening behavior at high temperature is not shear dilatancy, which is usually used to explain the softening behavior of heavily over-consolidated clays. The temperature effect on the shear behavior is also relevant with the temperature-stress path. The undrained shear strength of the specimen subjected to heat after consolidation is smaller than that of the specimen first heated. After a temperature cycle, the undrained shear strength increases markedly.

**Key words:** clay; silty clay; triaxial test; shear behavior; temperature effect

## 0 引言

在能源地下结构应用、核废料处置等问题中, 土体会经历明显的温度变化<sup>[1-2]</sup>。为保证工程安全, 需深入了解温度对土体剪切特性的影响。早期学者们主要关心温度对土体剪切强度的影响, Noble 等<sup>[3]</sup>首次系统考虑了土样固结和剪切时的温度对黏土不排水强度的影响。试验结果表明固结温度越高, 不排水强度越大; 但对在同一温度下固结的土样, 强度随剪切温度的增加而减小。Uchaipichat 等<sup>[4]</sup>指出当温度从 25℃增加 60℃后, 粉土的峰值强度下降了 15%~25%。研究表明

温度对强度的影响还与变温时的排水条件有关。Sherif 等<sup>[5]</sup>认为若在不排水的条件下提高正常固结黏土试样的温度, 土颗粒与水热膨胀系数之间的差异会使得孔隙水压力上升, 有效应力下降, 黏土的无侧限抗压强度随之减小。Mitchell 等<sup>[6]</sup>总结的数据表明, 排水升温后黏土的强度明显提高。Ladd<sup>[7]</sup>指出不排水剪切过程中的孔压增长规律也受到温度的影响, 其对强

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778557); 扬州大学研究生科研创新计划项目(XKYCX19\_088)

收稿日期: 2019-11-18

度也有影响。Kantiwattanakul 等<sup>[8]</sup>发现了相似的规律,他们对重塑饱和黏土进行了不同温度下的固结不排水剪切试验,结果表明正常固结土在剪切过程中产生的孔压随温度增加而减小,不排水强度随温度的增加而增加。Tanaka 等<sup>[9]</sup>也得到了类似的结果,他们还指出虽然温度增加会提高黏土的峰值强度,但温度不影响临界状态强度(残余强度)的大小。

现有基于弹塑性理论的本构模型一般认为屈服面尺寸随温度升高而减小<sup>[10-12]</sup>。对正常固结土,为保证应力状态点仍落在屈服面上,等应力排水升温过程中土体将产生塑性体积应变,塑性体积应变的硬化效应将弥补温度的热软化效应。按照这一观点,正常固结黏土升温后还处于正常固结状态,后续剪切过程中应力应变关系的变化可能与流动法则随温度的改变有关。目前这方面的研究还较少,试验数据也没有统一的规律,如 Abuel-Naga 等<sup>[13]</sup>认为塑性体积应变与塑性偏应变之比  $d\varepsilon_p^p/d\varepsilon_q^p$  随温度的增加而增加, Graham 等<sup>[14]</sup>认为其与温度无关,而 Ghahremannejad<sup>[15]</sup>的试验数据表明其随温度的增加而减小。另外,一周温度循环之后热软化效应消失,残留的温度塑性体积应变是否会引起剪切硬化,是否与同等大小的力学塑性体积应变有相似的效果还缺乏试验数据支撑。Bai 等<sup>[16]</sup>、杨光昌等<sup>[17]</sup>基于颗粒物质热动力学理论,通过构建热力学恒等式建立了土体的本构关系,理论上能更深入地描述土体的能量耗散机理与宏观力学特性之间的关系,但模型的能力也需要更多试验数据的支撑。

为了进一步了解温度变化对剪切特性的影响规律,为热弹塑性本构模型建立和验证提供数据支撑,本文采用温控三轴仪,考虑不同的温度-应力路径,对两种黏性土进行了固结不排水和固结排水剪切试验,研究了温度变化对土体强度、应力应变关系、孔压响应和流动法则的影响。

## 1 试验介绍

### 1.1 试验仪器

试验采用温控三轴仪进行,其在三轴压力室的外侧设有水浴腔和真空腔。真空腔外包有隔热泡沫材料,水浴腔与恒温水浴箱相连,试验中通过循环水浴腔中的水改变土样的温度,温度变化范围为 5℃~80℃。温控三轴仪的围压和反压由标准压力/体积控制器控制,压力分辨率 1 kPa, 体积变化分辨率 1 mm<sup>3</sup>。孔压传感器测量精度 0.1 kPa。温度测量精度 0.1℃。

### 1.2 试验材料

试验用土包括黏土和粉质黏土两种,物理性质见表 1。试样为直径 39.1 mm、高度 80 mm 的圆柱体,

采用击样法制作,控制干密度分别为 1.35 g/cm<sup>3</sup>(黏土)和 1.50 g/cm<sup>3</sup>(粉质黏土),制样含水率为塑限+2%。为保证饱和,试样先在真空桶中抽气 24 h,然后在三轴仪上进行反压饱和,直至孔隙水压力系数  $B$  大于 0.95。

表 1 试验土样基本物理性质

Table 1 Physical properties of test soils

土体	液限 /%	塑限 /%	塑限 指数	颗粒相对 密度
黏土 (C)	52.5	28.0	24.5	2.67
粉质黏土 (S)	41.2	27.4	13.8	2.61

### 1.3 试验方案

试验在空调房间内进行,室温在 22℃~25℃左右。考虑不同的温度-应力路径组合,试验设计了 E1-E3 三类方案。试验编号见表 2。试验编号中的字母 C 和 S 分别代表黏土和粉质黏土,字母 U 和 D 分别代表不排水剪切和排水剪切。试验中升、降温阶段分级进行,每级温度增量 3 度,待孔压完全消散且时间不小于 1 h 后施加下级温度增量。不排水和排水条件下剪切速率分别为 0.02 mm/min 和 0.004 mm/min,当轴向应变达到 20%时停止试验。

表 2 试验方案

Table 2 Test plan

试验编号	剪切排水 条件	温度增量 /℃	剪切前有 效围压 /kPa	温度 - 应力历 史
E1-C/S-U-1		0	100	
E1-C/S-U-2		0	200	
E1-C/S-U-3	不排水	0	400	
E1-C/S-U-4		40	200	固结后
E1-C/S-U-5		60	200	升温
E1-C-D-1		20	200	
E1-C/S-D-2	排水	40	200	
E1-C/S-D-3		60	200	
E2-C/S-U-1		40	200	升温后
E2-C-U-2	不排水	60	200	固结
E3-C/S-U-1	不排水	40	200	固结后 温度循 环一周

## 2 试验结果及分析

### 2.1 温度对不排水强度的影响

#### (1) 黏土

图 1(a)~(c) 分别给出了黏土在不同温度下的偏应力  $q$ 、有效主应力比  $\sigma'_1/\sigma'_3$  和超孔压  $\Delta u$  随偏应变  $\varepsilon_q$  的变化关系,图 1(d) 是对应的有效应力路径。试验结果表明室温下黏土呈现出应变硬化的特点,偏应力和超孔压均随轴向应变的增加而增加,有效应力路径向左侧发展,直至达到临界状态线 (CSL) 后偏应力和孔压达到稳定值。不同围压下的试验结果有较好的规律性,有效主应力比曲线基本吻合。

温度变化后, 应力应变曲线的形态发生改变。温度越高, 应力应变曲线的应变软化特性越明显, 峰值不排水剪切强度越大。围压 200 kPa, 升温 40°C、60°C 后的峰值不排水强度分别为 194.7 和 224.4 kPa, 较室温下的 147.4 kPa 分别提高了 32.1% 和 52.2%。相比而言, 剪切过程中超孔压的变化不大, 升温 40°C、60°C 后超孔压最大值分别为 118.4, 113.0 kPa, 孔压比室温下的 124.7 kPa 分别降低了 5.1% 和 9.4%。剪切强度的提高不完全是超孔压减小、有效应力增加的结果。这与图 1(c) 中有效主应力比的变化规律对应。该图表明温度越高, 土体剪切过程中的峰值有效主应力比越大, 意味着升温过程中土体结构性发生了变化, 剪切特性与室温下有明显的区别。

另外注意到, 不同温度的有效主应力比曲线在大应变下逐渐趋于同一值。这说明虽然黏土的峰值摩擦角随温度的增加而增加, 但残余或临界摩擦角可认为与温度无关。从图 1(d) 中的有效应力路径也可得到同样的结论。温度越高, 剪切初期的有效应力路径越靠右, 但剪切结束时的有效应力路径逐渐趋于室温下的临界状态线, 临界状态线在  $p' - q$  平面上的斜率  $M = 1.18$ , 对应的临界摩擦角  $\phi'_{cs} = 29.5^\circ$ 。与从微观上来看, 升温过程中土颗粒间作用力、土颗粒的排列与组合将有所变化。这种改变对抗剪性能的影响主要发生在剪切的中前期, 当土粒之间发生足够的剪切滑移之后, 土体的剪切特性将主要取决于土体的矿物组成、级配等固有性质, 温度的影响逐渐消失。

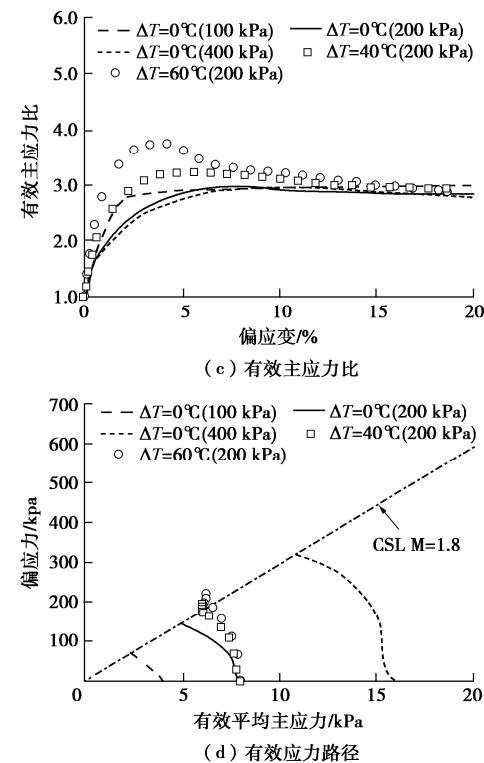
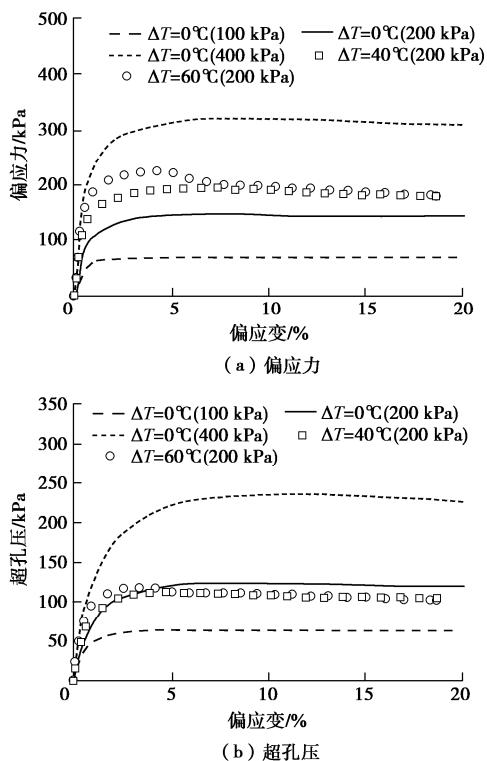


图 1 黏土不同温度下固结不排水试验结果

Fig. 1 Results of CU tests on clays at different temperatures

现有研究通常认为等应力排水升温后, 正常固结土仍处于正常固结状态<sup>[18]</sup>, 因此不同温度下的剪切将具有相同的应力状态起点(图 2 中的屈服面  $Y_0$  与横坐标的交点)。试验结果表明, 高温下的有效应力路径相对靠右, 如果屈服面的形状不发生变化, 意味着此时屈服面的尺寸较大(图 2 中的  $Y_2$ )。根据体积应变硬化机理, 此时土体应具有较大的塑性体积应变。在不排水条件下, 较大的塑性体积应变将对应较大的超孔压, 与试验现象相矛盾。这意味着屈服面随着温度的变化而变化, 高温下屈服轨迹右侧更陡(图 2 中的  $Y_3$ )。

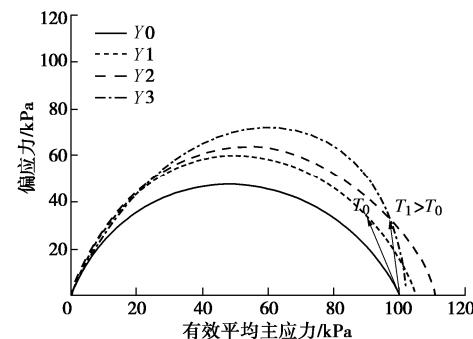


图 2 屈服面随温度变化示意图

Fig. 2 Sketch of evolution of yield surface with temperature

## (2) 粉质黏土

图 3 是粉质黏土的固结不排水剪切试验结果。室温下的粉质黏土不排水剪切的应力应变曲线上没有明显的破坏点, 偏应力随偏应变的发展持续提高。对比

孔压的发展规律来看, 室温下轴向应变达到2.2%之后, 孔压从上升转为下降, 表明粉质黏土有剪胀的趋势, 有效应力随孔压的下降而提高, 有效应力路径转而向右上发展, 土体能承受更大的偏应力。图3(b)的有效主应力比随应变的软化特征也表明土体有剪胀的趋势, 有效围压越小, 有效主应力峰值越大, 剪胀越明显, 但大应变下各围压下的主应力比曲线趋于一稳定值。试验结束时偏应力、超孔压仍有一定的变化趋势, 未完全达到临界状态。考虑到土体从剪缩转为剪胀的相转点对应的应力比与临界状态应力比相近, 据此得到的临界状态线在图3(b)中给出, 其 $M=1.40$ , 对应的临界摩擦角 $\varphi'_s=34.6^\circ$ 。

温度升高后, 粉质黏土的剪切特性没有本质变化, 试样仍然有剪胀的趋势, 超孔压随剪切的进行先增加后减小, 最大超孔压增量随温度的增加而减小, 相应的偏应力应变曲线要高一些, 但幅度不大, 有效主应力比曲线在一狭窄的范围之内, 各温度下的有效应力路径也趋于室温下的临界状态线, 表明温度对临界摩擦角的影响不大。

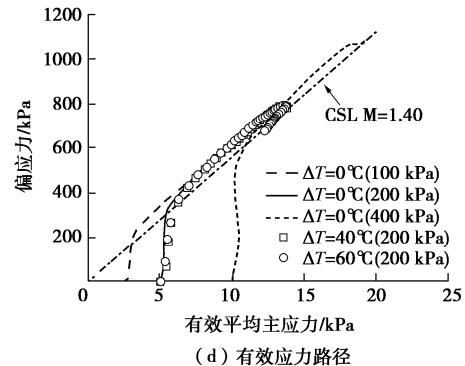
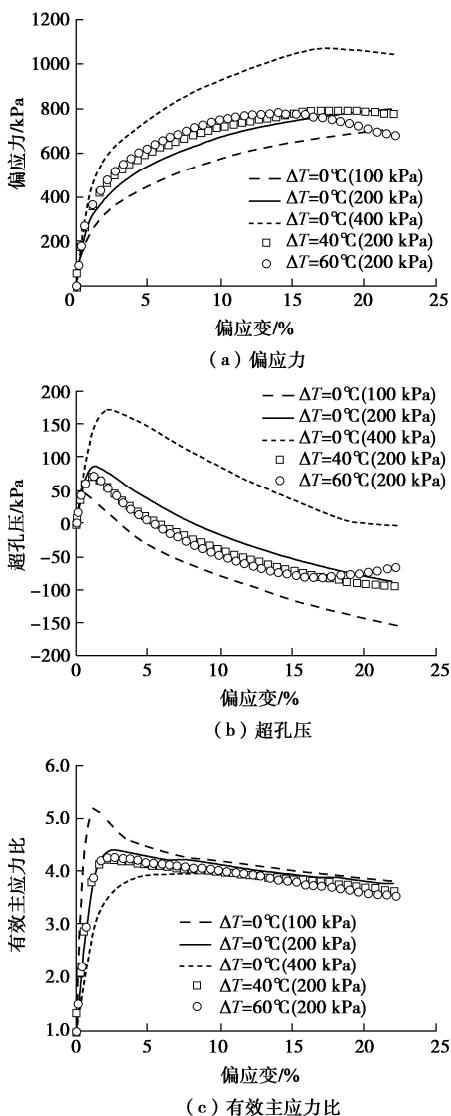


图3 粉质黏土不同温度下固结不排水试验结果

Fig. 3 Results of CU tests on silty clays at different temperatures

## 2.2 温度对排水强度的影响

### (1) 黏土

图4是不同温度下黏土的固结排水剪试验结果。因为排水条件下偏应力与主应力比的变化规律一致, 这里只给出了偏应力的试验结果。图4(a)表明, 偏应力应变曲线形态随温度改变。各温度下的临界强度基本接近, 但升温40℃和60℃试样的曲线存在峰值, 呈典型的应变软化型。温度越高, 黏土的排水剪切强度越大,  $\Delta T=0^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$ 的峰值强度分别为316.6, 354.6, 403.8和424.4 kPa。在经典的临界状态土力学中, 应力应变曲线的软化通常在强超固结土中才会发生, 其解释为剪切过程中发生塑性膨胀应变, 屈服面缩小, 应力状态向临界状态变化。但注意到本次试验中土样均为正常固结试样, 若认为升温后仍处于正常固结状态, 应力应变曲线理论上应为应变硬化型, 这意味着传统的临界状态模型在模拟这一特性时可能有不足。

另外, 尽管高温下应力应变曲线呈现出应变软化的特点, 图4(b)中不同温度下的体积应变 $\varepsilon_v$ 却均随剪切应变 $\varepsilon_q$ 增加, 并逐渐趋于稳定值。 $\Delta T=0^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$ 的体积应变分别达到4.7%, 4.0%, 2.9%和3.2%, 大体上随着温度的增加而减小。这种现象与海相黏土等拟超固结土的特性类似, 马时东<sup>[19]</sup>指出这类黏土虽然没有经历过应力加、卸载过程, 但由于在沉积过程中受到次固结、化学胶结、干燥应力等因素的影响, 产生了与孔隙比减小和薄膜阻力增加的附加结构强度, 强度特性与超固结土类似, 但不排水剪切过程中均不产生负孔压, 也即没有剪胀。类似的, 可以认为高温下应力应变曲线的软化特征主要与温度引起的附加结构强度有关, 与强超固结土的剪胀机理不同。

为进一步分析不同温度下黏土的剪胀性, 图4(c)给出了剪胀因子 $\psi$ 随应力比 $\eta$ 的变化。剪胀因子 $\psi$ 为

$$\psi = \frac{d\epsilon_v^p}{d\epsilon_q^p} \approx \frac{d\epsilon_v}{d\epsilon_q}, \quad (1)$$

式中,  $d\epsilon_v^p$  和  $d\epsilon_q^p$  分别是塑性体积和塑性偏应变增量, 忽略弹性分量, 可近似按总应变增量估算。对比见, 图 4(c) 中同时给出了剑桥模型(式(2))和修正剑桥模型的剪胀因子(式(3)),  $M$  取图 1(d) 中的数据 1.18。

$$\psi = M - \eta, \quad (2)$$

$$\psi = (M^2 - \eta^2)/2\eta. \quad (3)$$

试验结果表明, 室温下黏土的  $\psi$  随  $\eta$  的增加而减小, 与剑桥模型的结果接近。随着温度的增加,  $\psi$  逐渐变大。应力比  $\eta$  越大, 温度的影响越明显。

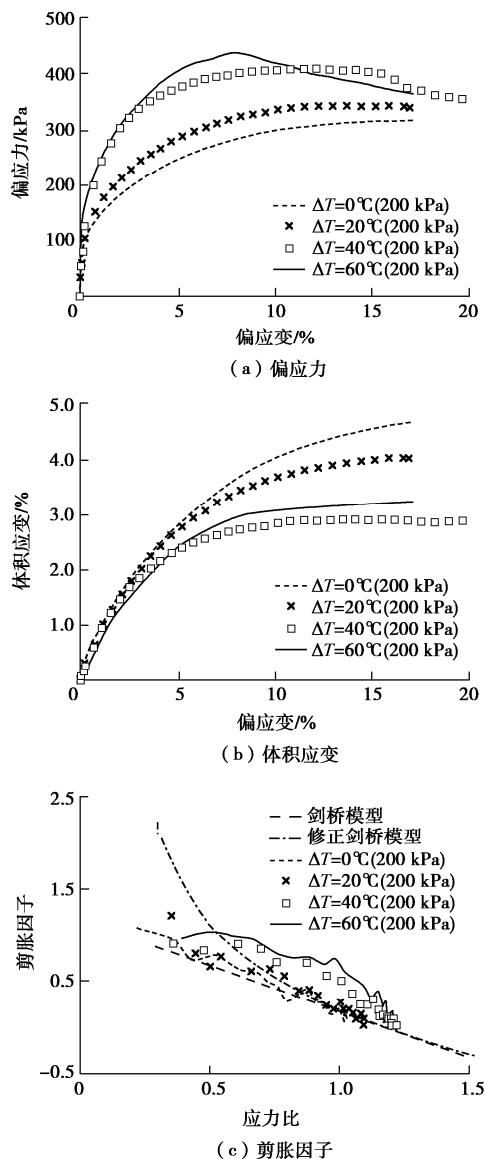


图 4 黏土不同温度下固结排水试验结果

Fig. 4 Results of CD tests on clays at different temperatures

## (2) 粉质黏土

粉质黏土不同温度下固结排水剪的试验结果绘制于图 5。与黏土相比, 粉质黏土排水剪切特性受温度

的影响较小, 偏应力应变曲线基本重合, 都表现出轻微软化的特点。体积应变大小与温度之间没有明确的规律, 但量值变化范围较小。剪胀因子  $\psi$  随温度的变化也较小, 与剑桥模型更接近。

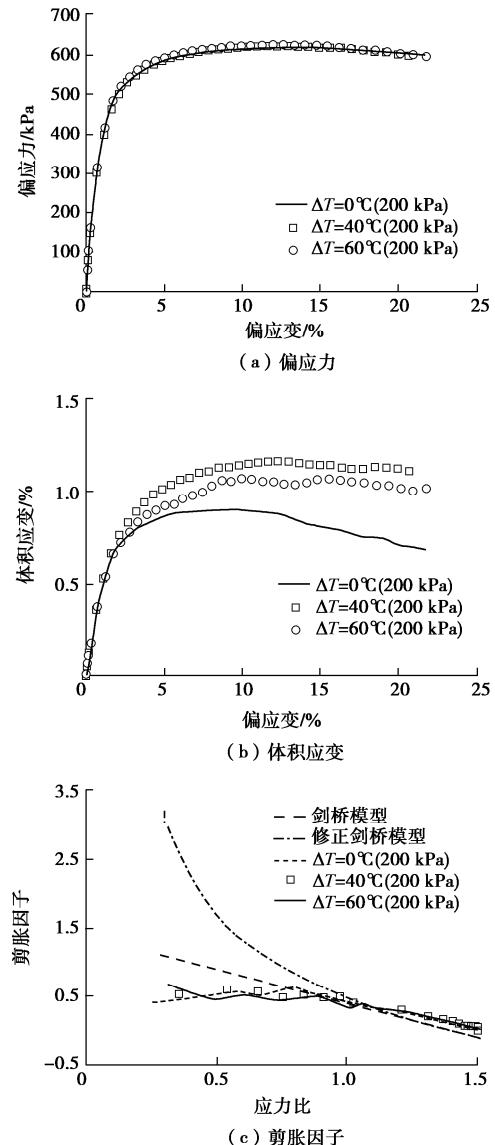


图 5 粉质黏土不同温度下固结排水试验结果

Fig. 5 Results of CD tests on silty clays at different temperatures

## 2.3 温度 - 应力路径对不排水强度的影响

图 6 和图 7 分别是围压 200 kPa 下不同温度应力 - 路径的黏土和粉质黏土的固结不排水试验结果。对比见, 室温下的试验结果一并给出。由于粉质黏土各方案的结果区别不大, 这里主要对黏土进行讨论。试验表明, 升温后黏土不排水强度均大于室温下的结果, 但剪切特性与温度 - 应力路径相关, 先升温后固结试样剪切过程中的超孔压比固结后升温试样的略大, 不排水强度则要低一些,  $\Delta T = 40^\circ\text{C}$  和  $60^\circ\text{C}$  下的峰值剪应力分别减小了约 11.2% 和 14.5%。从有效主应力比的结果来看, 升温后固结试样的应变软化特征要低一

些, 峰值有效主应力比较小。各方案下的有效主应力比有趋于同一数值的趋势, 剪切结束时有效主应力比变化范围约 8%左右, 应力路径均逐渐接近按室温固结不排水试验确定的临界状态线。

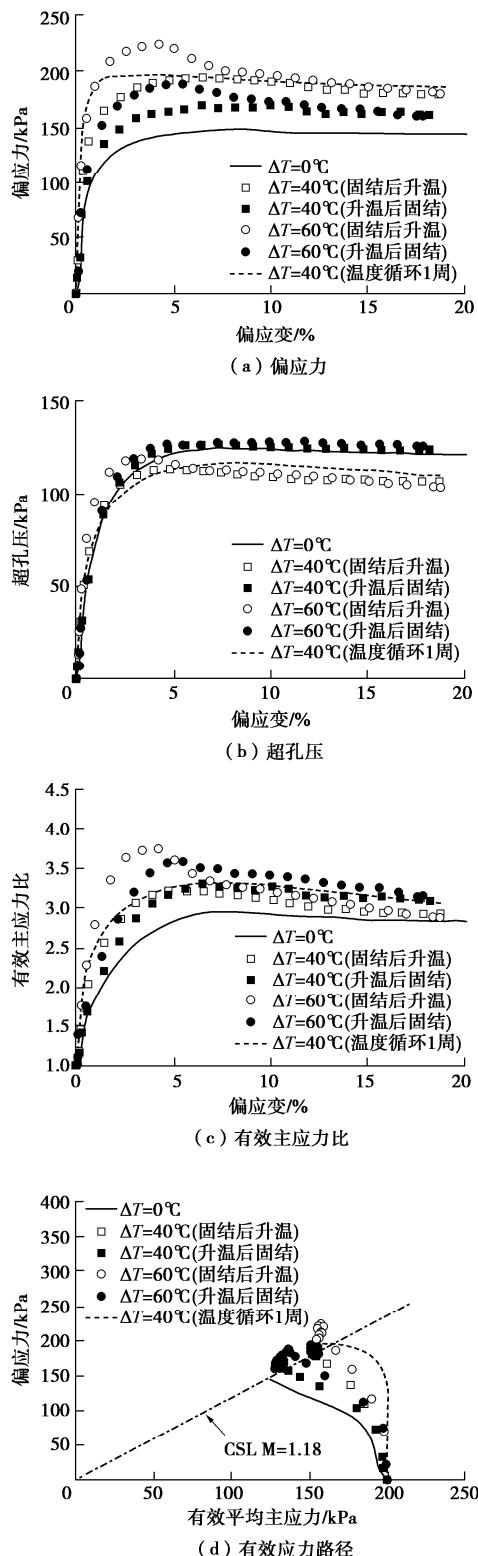


图 6 黏土不同温度 - 应力路径下固结不排水试验结果

Fig. 6 Results of CU tests on clays under different temperatures-stress paths

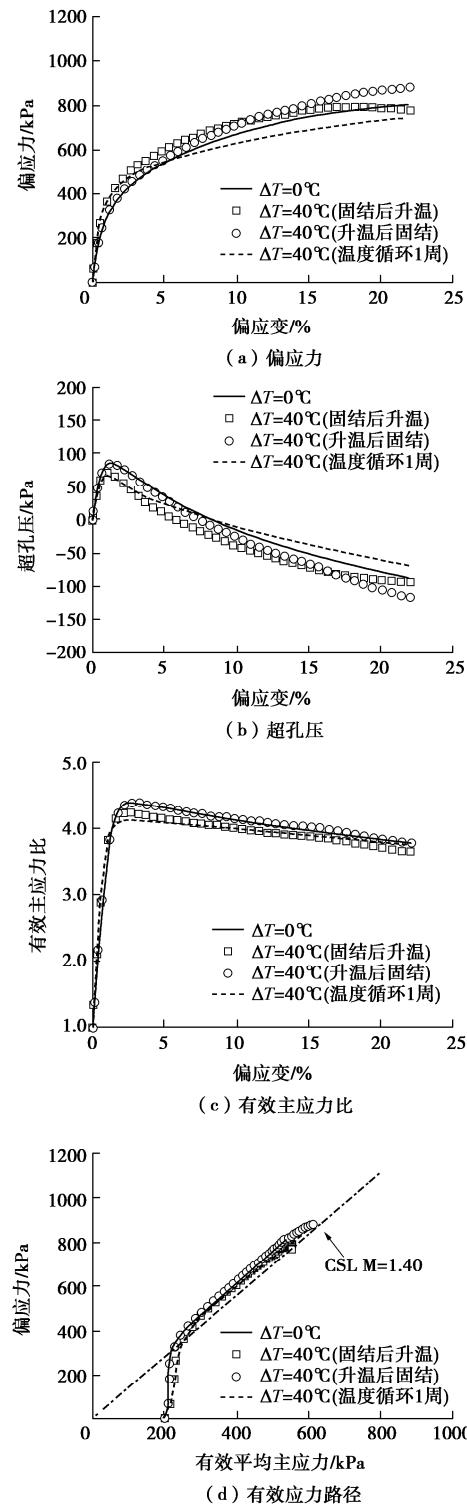


图 7 粉质黏土不同温度 - 应力路径下固结不排水试验结果

Fig. 7 Results of CU tests on silty clays under different temperatures-stress paths

费康等<sup>[20]</sup>在研究温度对黏性土体积变形特性的影响时指出, 单次温度循环中黏性土产生的体积应变随循环周数的增加而减小, 即存在所谓温度历史效应。但若将土体重新加载固结到新的应力状态, 温度历史的影响将被覆盖, 温度循环将引起新的塑性体积应变, 且量值及发展规律与初始温度循环下类似。对应的,

可以认为升温再固结的试样, 温度历史的效应被全部或部分覆盖, 不排水剪切强度的提高幅度要低一些。

图6还表明, 温度循环一周后, 黏土的偏应力应变曲线为应变硬化型。这可能是因为温度变化对双电层厚度及作用力的影响大部分是可逆的, 温度回到室温后, 薄膜黏着应力对强度影响消失。但黏土温度循环1周后的不排水强度仍有较明显的提高, 比室温下增加了40%。

学者们<sup>[12, 21]</sup>在研究黏土压缩特性的温度效应时认为正常固结黏土在等应力排水升温一回温后, 土体中存在残余塑性体积应变, 屈服面随之硬化, 土体存在超固结土的特点。为验证强度变化与温度循环过程中体积变化之间的关系, 图8给出了温度变化引起的黏土和粉质黏土体积应变。相比而言, 黏土对温度的响应更明显, 升一回温40℃将产生1.24%的塑性体积应变, 屈服应力 $p_c$ 按下式估算为271 kPa, 对应超固结比约为1.36。

$$p_c = p_{c0} \exp(\beta \Delta \varepsilon_v^p) \quad (4)$$

式中,  $\beta = (1+e)/(\lambda - \kappa)$ ,  $e$ 为固结完成后的孔隙比, 取0.852;  $\lambda$ 和 $\kappa$ 分别是压缩和回弹指数, 按试验确定为0.10和0.025;  $\Delta \varepsilon_v^p$ 是塑性体积应变。

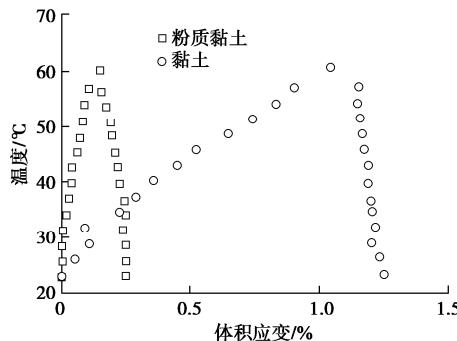


图8 土体温度体积应变

Fig. 8 Thermal volumetric strains of soils

为验证升一回温过程中的塑性体积应变是否与力学作用产生的塑性体积应变有相似的硬化作用, 在室温下对超固结比为OCR=1.5的黏土试样进行了固结不排水剪切试验, 得到的偏应力偏应变曲线绘制于图9。

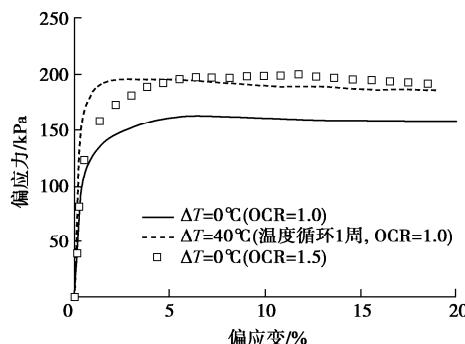


图9 不同超固结比下黏土的剪切特性

Fig. 9 Shear behaviors of clays at different OCRs

由图9可见, OCR=1.5的试样与经历过温度循环的试样强度相近, 可以认为试样抗剪强度的提高与温度循环过程中产生的塑性体积应变有较好的对应性。

### 3 结 论

本文采用温控三轴仪, 研究了饱和黏土和粉质黏土剪切特性的温度效应, 得到以下结论:

(1) 温度对土体剪切特性的影响程度与土的类别有关。与粉质黏土相比, 黏土剪切特性的温度效应更明显。

(2) 温度越高, 黏土固结不排水剪切中的偏应力-偏应变曲线的应变软化特性越明显。温度增加40℃, 60℃后, 峰值不排水剪切强度较室温下分别增加了32.1%和52.2%, 超孔压分别减小了5.1%和9.4%, 剪切强度的提高不完全是超孔压减小、有效应力增加的结果。

(3) 不同温度固结排水剪切中, 黏土塑性应变增量方向随温度而改变, 同一应力比下的剪胀因子随温度的增加而增加。黏土体积随剪切的进行持续减小, 不发生剪胀。高温下应力应变曲线的软化特征主要与温度引起的附加结构强度有关, 与强超固结土的剪胀机理不同。

(4) 黏土剪切特性与温度-应力路径相关, 先升温后固结试样的不排水强度比固结后升温试样的低。

(5) 与力学塑性体积应变类似, 温度循环过程中产生的塑性体积应变也会造成土体硬化。温度循环一周后, 黏土不排水强度较室温下有明显提高。

### 参考文献:

- [1] 刘汉龙, 孔纲强, 吴宏伟. 能量桩工程应用研究进展及PCC能量桩技术开发[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 176-181. (LIU Han-long, KONG gang-qiang, NG C W W. Applications of energy piles and technical development of PCC energy piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 176-181. (in Chinese))
- [2] BRANDL H. Energy foundations and other thermo-active ground structures[J]. Géotechnique, 2006, 56(2): 81-122.
- [3] NOBLE C A, DEMIREL T. Effect of Temperature on Strength Behavior of Cohesive Soil[M]. Washington D C: Highway Research Board, Special Report 103, 1969: 204-219.
- [4] UCHAIPICHAT A, KHALILI N. Experimental investigation of thermo-hydro-mechanical behaviour of an unsaturated silt[J]. Géotechnique, 2009, 59(4): 339-353.
- [5] SHERIF M A, BURROUS C M. Temperature Effects on the Unconfined Shear Strength of Saturated, Cohesive Soil[M].

- Washington D C: Highway Research Board, Special Report 103, 1969: 267 – 272.
- [6] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of Soil Behavior[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [7] LADD C C. Physico-Chemical Analysis of the Shear Strength of Saturated Clays[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1961.
- [8] KUNTIWATTANAKUL P, TOWHATA I, OHISHI K, et al. Temperature effects on undrained shear characteristics of clay[J]. Soils and Foundations, 1995, **35**(1): 147 – 162.
- [9] TANAKA N, GRAHAM J, CRILLY T. Stress-strain behaviour of reconstituted illitic clay at different temperatures[J]. Engineering Geology, 1997, **47**(4): 339 – 350.
- [10] YAO Y P, ZHOU A N. Non-isothermal unified hardening model: a thermo-elasto-plastic model for clays[J]. Géotechnique, 2013, **63**(15): 1328 – 1345.
- [11] 白冰, 赵成刚. 温度对黏性土介质力学特性的影响[J]. 岩土力学, 2003, **24**(4): 533 – 537. (BAI Bing, ZHAO Cheng-gang. Temperature effects on mechanical characteristics of clay soils[J]. Rock and Soil Mechanics, **24**(4): 533 – 537. (in Chinese))
- [12] ZHOU C, FONG K Y, NG C W W. A new bounding surface model for thermal cyclic behaviour[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2017, **41**(16): 1656 – 1666.
- [13] 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.
- [14] GRAHAM J, TANAKA N, CRILLY T, et al. Modified Cam-Clay modelling of temperature effects in clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, **38**(3): 608 – 621.
- [15] GHAHREMANNEJAD B. Thermo-Mechanical Behaviour of Two Reconstituted Clays[D]. Sydney: University of Sydney, 2003.
- [16] BAI B, YANG G, LI T, et al. A thermodynamic constitutive model with temperature effect based on particle rearrangement for geomaterials[J]. Mechanics of Materials, 2019, **139**: 103180.
- [17] 杨光昌, 白冰. 基于颗粒物质热力学理论的非饱和土热水力耦合模型研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(9): 1688 – 1697. (YANG Guang-chang, BAI Bing. A thermo-hydro-mechanical coupled model for unsaturated soils based on thermodynamic theory of granular matter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(9): 1688 – 1697. (in Chinese))
- [18] XIONG Y, YANG Q, SANG Q, et al. A unified thermal-hardening and thermal-softening constitutive model of soils[J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, **74**: 73 – 84.
- [19] 马时冬. 拟似超固结黏土的应力-应变-强度特性[J]. 岩土工程学报, 1987, **9**(1): 53 – 60. (MA Shi-dong. On the stress-strain-strength characteristics of quasi-overconsolidated clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, **9**(1): 53 – 60. (in Chinese))
- [20] 费康, 戴迪, 付长云. 热-力耦合作用下黏土体积变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(9): 1752 – 1758. (FEI Kang, DAI Di, FU Chang-yun. Experimental study of the volume change behavior of clay subjected to thermo-mechanical loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(9): 1752 – 1758. (in Chinese))
- [21] DI D A, LALOUI L. Response of soil subjected to thermal cyclic loading: experimental and constitutive study[J]. Engineering Geology, 2015, **190**: 65 – 76.