

DOI: 10.11779/CJGE20221308

温度应力路径对原状海洋土强度特性影响研究

张鑫蕊^{1,3}, 孔纲强^{*1}, 杨 庆²

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 大连理工大学海岸与海洋工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
3. 苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘要: 室内温度和海底原位温度的差异导致传统测量所得海洋土物理力学参数存在一定差异。基于温控三轴仪, 对我国南海原状海洋土进行了固结不排水剪切试验, 实测了海洋土体变、强度、孔压以及模量的变化, 探讨温度、温度循环、围压、超固结比等因素对原状海洋土力学性质的影响规律。试验结果表明: 升温梯度增大会使正常固结海洋土热固结程度增大, 其对应的排水体积和强度也增大; 升温对超固结海洋土的排水体积具有增强作用, 而温度降低了海洋土的强度; 温度循环作用对超固结海洋土的排水体积具有增强作用, 其对应的强度也增大; 本文试验条件下, 当 $OCR=1$ 时, 海洋土 25°C 下不排水抗剪强度测量结果比 5°C 下测量结果提高 8.0%; 当 $OCR=4$ 时, 海洋土 25°C 下不排水抗剪强度测量结果比 5°C 下测量结果降低 1.9%; 经过温度循环 $5^{\circ}\text{C}-45^{\circ}\text{C}-5^{\circ}\text{C}$ 后的抗剪强度比 5°C 提高了 11.9%; 4 次或 10 次温度循环后分别提高了 13.8% 和 17.8%。

关键词: 海洋土; 强度特性; 应力路径; 温度效应; 三轴试验

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)02-0357-09

作者简介: 张鑫蕊(1995—), 女, 博士, 讲师, 主要从事土体热力学特性、海洋岩土工程方面的研究工作。E-mail: zhangxinruiqx@163.com。

Influences of temperature stress path on strength characteristics of undisturbed marine sediments

ZHANG Xinrui^{1,3}, KONG Gangqiang¹, YANG Qing²

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The difference between the room and the in-situ temperatures leads to that of the measured physical and mechanical parameters of marine sediments. Based on the temperature-controlled triaxial apparatus, the consolidated undrained shear tests are carried out on the undisturbed marine sediments from the South China Sea. The changes of deformation, strength, pore pressure and modulus of the marine sediments are measured, and the influences of temperature, temperature cycle, confining pressure and over-consolidation ratio (OCR) on the mechanical properties of the undisturbed marine sediments are discussed. The results show that the increase of the temperature gradient increases the degree of thermal consolidation of the normally consolidated marine sediments, and the corresponding drainage volume and strength also increase. The temperature increases the drainage volume of the over-consolidated marine sediments, while the temperature decreases the strength of the marine sediments. The temperature cycle can enhance the drainage volume of the over-consolidated marine sediments, and its corresponding strength also increases. When $OCR=1$, the measured undrained shear strength of marine sediments at 25°C is 8.0% higher than that at 5°C . When $OCR=4$, the measured undrained shear strength of marine sediments at 25°C is 1.9% lower than that at 5°C . The shear strength after the temperature cycle of $5^{\circ}\text{C}-45^{\circ}\text{C}-5^{\circ}\text{C}$ is 11.9% higher than that at 5°C . After 4 or 10 temperature cycles, the shear strength increases by 13.8% and 17.8%, respectively.

Key words: marine sediment; strength characteristic; stress path; temperature effect; triaxial test

0 引言

油气井口温度超过 149°C , 输油管道和周围环境会形成较大的温度梯度, 管道传热可能改变周围海洋

土和海水的温度, 从而影响海洋土的物理力学性质。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52331010, 52308368)

收稿日期: 2022-10-24

*通信作者 (E-mail: gqkong1@163.com)

表 1 试验所用海洋土基本物理指标

Table 1 Physical properties of soil samples in tests

水深/m	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 e	含水率 $w/\%$	相对质量密度 G_s	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	有机物含量 / %
2400	1.30	5.08	198.3	2.65	50.5	71.9	13.74

已有研究表明温度对土体的性质具有一定影响^[1]。海洋土在原位取样后, 将运送到陆地实验室进行试验研究。海洋土环境温度约 5℃, 而陆地实验室的温度一般为 20~25℃。室内温度和海底原位温度的差异导致测量所得海洋土物理力学参数存在一定差异。因此, 有必要研究温度对海洋土物理力学特性的影响。

针对土体强度温度效应问题, 相关学者开展了一些温控三轴固结不排水剪切试验。基于重塑高岭土, Kuntiwattanakul 等^[2]发现在正常固结状态下初始割线模量和抗剪强度都随着温度的升高而增大; 在超固结状态下只有初始割线模量随着温度的升高而增大, 但抗剪强度不受加热的影响。基于重塑伊利石黏土, Tanaka 等^[3]发现对于正常固结状态, 温度越高强度越大; 超固结状态, 温度与强度也有增强作用。针对重塑吹填土, 雷华阳等^[4]发现升温可以明显改善重塑吹填土的固结效果, 提高其抗剪强度。费康等^[5]认为温度效应与土的种类有关, 温度对重塑粉质黏土的抗剪强度没有影响, 而温度对重塑黏土的抗剪强度具有增强作用。温度对土体的抗剪强度增强作用主要与升温过程中土体发生的温度固结相关。

针对原状样, Houston 等^[6]进行了正常固结状态海洋土的温控三轴试验, 在排水条件下加热后进行不排水剪切试验, 抗剪强度增加。Abuel-Naga 等^[7]使用天然软曼谷黏土, 无论超固结比如何, 土体的不排水抗剪强度随温度的升高而增大。陆嘉楠等^[8]使用原状粉质黏土(来自浙江温州)进行了温控三轴试验, 发现温度对其抗剪强度具有降低的作用。现有研究针对原状土温度效应的影响研究相对不足, 对土体强度温度效应机理尚不清楚。虽然开展了一些升温对土体强度的影响, 但是温度循环作用对土体抗剪强度的作用机理尚不明确。

为此, 本文基于温控三轴仪, 探究了温度和围压对正常固结海洋土强度和刚度的影响, 以及温度和温度循环对超固结海洋土强度和刚度的影响, 分析海洋土热致体积应变、剪切过程中抗剪强度、割线模量、孔隙水压力的变化。

1 试验方法简介

1.1 南海海洋土试样

本文所用南海海洋土试样为国家自然科学基金委员会共享航次(航次编号: NORC2019-06)在中国南

海南部所取得的原状样, 取自 2400 m 水深的海底, 位于泥面以下 0.5~3 m 范围内。本次海底取样采用重力柱状取样器, 海洋土从海底取上来后, 保存于取样管中, 两头用管帽密封, 并用止水胶带和透明胶带缠绕, 将试样保存于低温恒湿环境中。运输过程中, 将取样管外用泡沫包裹, 尽量减少运输对海洋土结构造成的影响。采用 BT-9300H 型激光粒度分布仪测得其黏粒($d \leq 0.005 \text{ mm}$)含量为 33.76%, 粉粒($0.005 \text{ mm} < d \leq 0.075 \text{ mm}$)含量为 66.24%。所用试样的基本物理力学指标见表 1 所示, 土样为高液限粉土, 具有高含水率、低密度、高液限、高塑限的特点。海洋土矿物组成主要为方解石, 质量占比为 78.2%, 含有少量绿泥石(0.3%)、伊利石(7.2%)、石英(3.6%)和斜长石(0.7%)。

1.2 试验设备

试验设备采用的温控三轴仪, 包括温控系统、三轴试验机、量测控制仪以及计算机 4 部分(图 1)。压力室设有双层隔热玻璃, 外层玻璃为有机玻璃、内层玻璃为钢化玻璃、两层之间为空气夹层绝热。钢化玻璃的热膨胀系数 $3.25 \times 10^{-6}/\text{°C}$, 温度变化引起的变形能够满足压力室密封的要求, 具有良好的热稳定性。温度控制范围为 0~50℃。温控系统主要通过低温冷浴水箱连通压力室内螺旋管道来实现控制试验温度的功能, 螺旋管道布满整个压力室, 从而控制整个压力室内的环境温度。可循环低温冷浴水箱, 控制精度为 ±1℃。



图 1 温控三轴试验设备

Fig. 1 Temperature controlled triaxial test apparatus

1.3 试验系统误差分析

受到温度的影响, 压力室各部分都会发生膨胀或收缩: 试样轴向变形通过测量压力室的位移而得到, 温度对压力室外壳、试样的顶盖、传力杆以及透水石

等的作用会影响到实际测量值的准确性; 试样周围橡皮膜、透水石、滤纸以及与试样相连接的排水管受到温度的作用会影响到试样实际体积变化的测量。将压力室温度控制为 5℃, 分别控制压力室内有效压力为 50, 100, 200 kPa。温度循环 (5℃—45℃—5℃ 和 5℃—25℃—5℃), 温度变化速率为 5℃/h。在温度循环过程中, 排水阀门始终保持开启状态。反压管中水排出压力室为正、水进入压力室为负; 位移传感器测量得到的轴向位移向下移动为正、向上移动为负。由图 2 (a) 可知, 排水系统体积变化在整个温度循环中分为可逆和不可逆两部分: 单向升温时, 两部分一起用于修正海洋土的体积变化; 一次温度循环后, 不可逆部分用于修正海洋土的体积变化。由图 2 (b) 可知, 压力室经过一次温度循环后轴向变形是可逆的, 基本可以忽略不计。

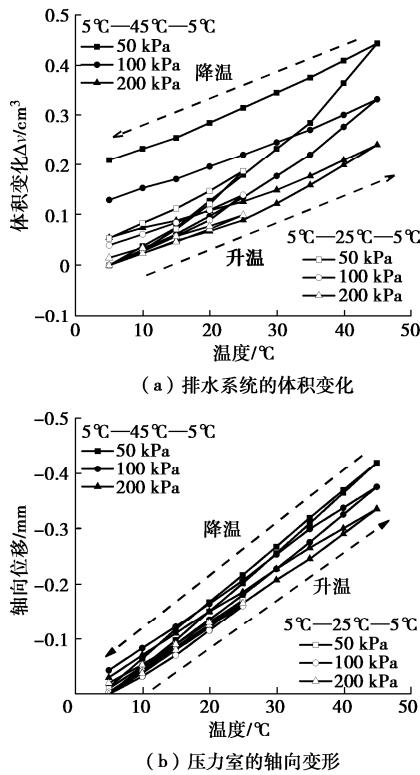


图 2 温控三轴仪矫正

Fig. 2 Instrument calibration

1.4 试验方案设计及步骤

基于海底温度、输油管道周围温度以及陆地实验室温度情况, 本文取 5℃ 变化到 25℃ 和 45℃ 为施加的温度荷载。在海底油气管道整个服役阶段中, 由于管道定期检修和事故维修, 管道不断启动、停止, 海底油气管道周围的海洋沉积物不断经历着温度的变化。每 5 a 对海洋石油总公司在役海底管道系统进行一次全面检测, 即每年对 20% 的管道系统进行检测。对运行 10 a 以上的管道, 检测的间隔时间更短。海底油气

管道的服役期一般都超过 20 a, 有的甚至高达 30 a。海底油气管道在其服役期按照规定检修次数最少为 4 次; 考虑到运行 10 a 以上的管道检测的间隔时间更短以及可能发生的油气泄露事故, 海底油气管道的检修次数可能高达 10 次。在经历第一次检修时, 对土体的影响最大。故而设置温度循环次数为 1, 4, 10 次。原状海洋土的 OCR 值一般为 3~5, 将原状海洋土在 200 kPa 下固结后, 降低围压到 50 kPa, 控制超固结状态的 OCR 值为 4。土体试验工况见表 2 所示。

表 2 试验方案

Table 2 Test schemes

试验序号	有效围压/kPa	温度/°C	OCR	循环次数
1	50, 100, 200	5	1	—
2	50, 100, 200	25	1	—
3	50, 100, 200	45	1	—
4	50	5, 25, 45	4	—
5	50	25, 45	4	1
6	50	45	4	4, 10

将原状海洋土土样制成直径 61.8 mm、高 100 mm 的试样。将制备好的试样在 5℃ 的环境温度中进行饱和、固结和卸载; 后进行温度荷载施加, 加温速率为 5℃/h, 应力路径如图 3 所示。三轴试样下设有一个温度传感器, 在整个试验过程中实时监控试样的温度, 升温到恒温结束时间为 12 h, 恒温时间足够长, 认为土样内部达到了统一温度。在整个试验过程中, 恒温系统不间断运行, 一直进行着三轴试验机内的温度循环, 水箱中温度控制精度为预设温度 ±1℃, 能够维持试验过程中的温度稳定。温度荷载施加完成后, 采用应变式控制对试样进行剪切, 剪切应变速率为 1.5%/h, 剪切过程中维持温度不变。

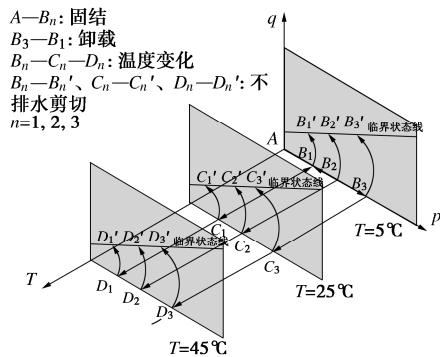


图 3 试验应力路

Fig. 3 Stress paths of test

2 试验结果与分析

2.1 单向温度变化对正常固结海洋土性质的影响

由图 4 可见, 在恒定有效应力下的排水加热试验

中, 海洋土呈现单一排水状态。正常固结的海洋土表现出不可逆的收缩状态。正常固结状态土体的热应变随温度的变化规律具有普遍的一致, 即海洋土的热应变变化规律与以往对软土的研究一致^[9-12], 热应变皆随着土体温度的升高而升高; 温度变化相同时, 随围压的增加, 土体热应变变小。不同土样的热应变随温度的变化趋势不同, 主要与升温操作方式和试验仪器误差有关。

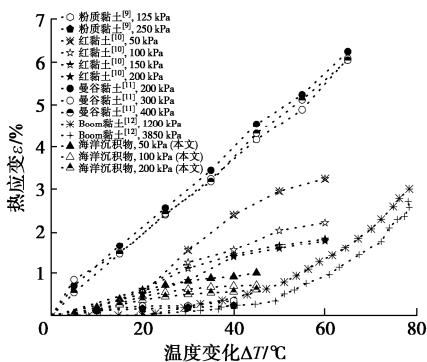


图 4 正常固结的海洋土升温过程中体变

Fig. 4 Volumetric variations induced by increasing temperature under normal consolidation

由图 5 (a) 可见, 在同一围压下, 抗剪强度随着温度的升高而升高, 即海洋土的所处环境温度越高, 不排水抗剪强度越大。海洋土的抗剪强度随所处环境温度变化呈现非线性增长: 海洋土的温度从海底温度升高到室温 25℃, 海洋土抗剪强度提高了 8.0%; 温度升高到室温 45℃, 海洋土抗剪强度提高了 20.0%。土颗粒和水有各自的热膨胀系数, 温度增加后土颗粒和水都发生膨胀, 土颗粒膨胀后孔隙体积变小, 而孔隙中液体也发生了膨胀, 因而孔隙中水流出, 发生排水固结现象, 从而剪切强度增强, 温度越高, 土颗粒和水的膨胀随温度的升高而增加, 较高温度下固结的海洋土排水体积越大(图 4), 试样的固结度更高^[1], 海洋土固体颗粒间的接触越密切, 试样破坏所需要的应力就越大。在剪切的初始阶段, 曲线斜率较大, 后逐渐趋于平缓, 剪切曲线分为弹塑性阶段和塑性阶段, 而弹性阶段应变较小, 可忽略不计; 海洋土在整个剪切过程中没有明显的峰值应力, 呈剪切硬化, 其强度变化规律与 Li 等^[1]、Kuntiwattanakul 等^[2]、雷华阳等^[4]以及祁良等^[13]研究结果相同。由图 5 (b) 可见, 孔压随轴向应变增加先快速增长, 之后增长速率逐渐降低, 其变化趋势与 Abuel-Naga 等^[7]得结果一致。孔隙水压力峰值随着温度的升高而降低, 但其影响并不明显, 从 5℃ 到 25℃, 孔隙水压力下降 4.0%; 从 5℃ 到 45℃, 孔隙水压力下降 9.0%。由图 5 (c) 可见, 不同温度的割线模量几乎重合, 最后趋于一致, 仅初始阶段有

明显的区别, 温度只影响海洋土的初始割线模量。由图 6 可见, 海洋土的初始割线模量随温度的增加而增加, 与陆嘉楠等^[8]、王宽君等^[14]、Li 等^[1]及 Kuntiwattanakul 等^[2]的研究结果一致, 温度对海洋土的小应变力学特性与陆地软土和重塑海洋土一致。

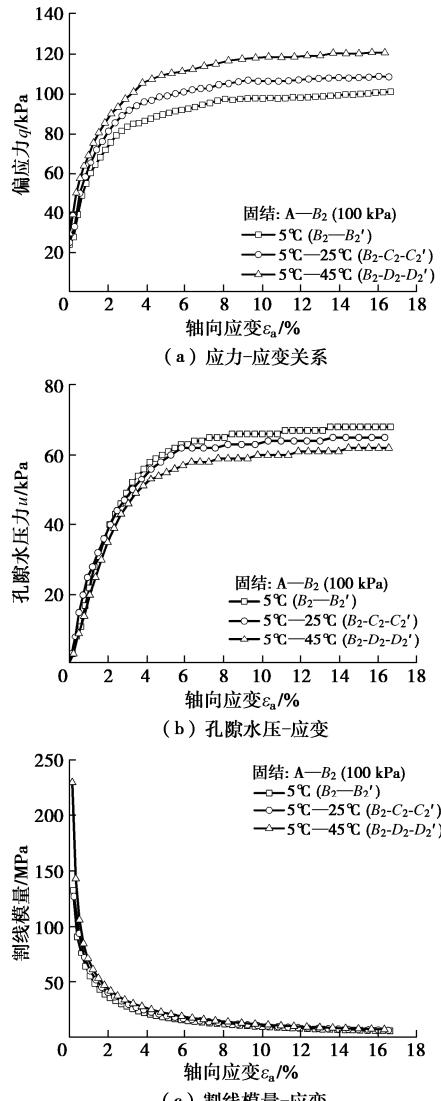


图 5 不同环境温度下海洋土剪切特征

Fig. 5 Shear characteristics of marine sediments under different temperatures

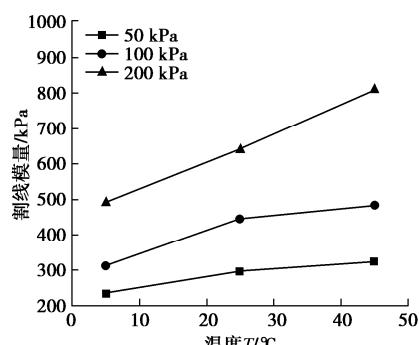


图 6 初始割线模量和温度增量的关系

Fig. 6 Relationship between secant modulus at strain of 0.1% and temperature

由图7可见, 拟合曲线的线性相关系数 R^2 均大于0.99。在5℃和25℃时, 黏聚力为11 kPa; 在45℃时, 黏聚力为12 kPa。在不同的温度下, 得到的黏聚力 c 基本不变, 说明温度对海洋土的黏聚力影响小。而内摩擦角在5℃, 25℃和45℃分别为15.24°, 16.30°和17.09°, 主要原因是升高土样的温度, 造成了土样发生了固结(排水), 改变了土体颗粒的结构, 从而改变了土体颗粒的摩擦力和咬合作用, 且温度越高对土体颗粒的结构改变越大。对土粒间分子引力形成的原始黏聚力和土中化合物胶结作用形成的固化黏聚力影响不大。Yavari等^[15]测量了高岭黏土的抗剪强度, 发现温度对土体的摩擦角影响不大, 而对黏聚力有减弱的作用。重塑土与本文海洋土原状土所得规律存在差异, 原状样具有较强的结构性, 土样经过重塑后, 结构性遭到破坏, 原状土和重塑土的性质已经完全不同^[16]。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。

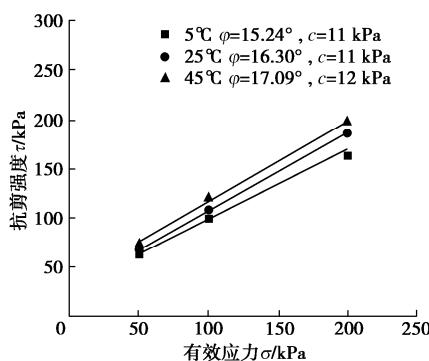


图7 不同温度下抗剪强度曲线

Fig. 7 Shear strengths under different temperatures

由图8可见, 正常固结海洋土试样在不同温度下加热后剪切, 其最大偏应力随温度升高而增大, Houston等^[6]和Abuel-Naga等^[7]使用的皆为原状海相软黏土, 与本文试验结果一致。海相软黏土具有高孔隙比、高含水率的特点, 在温度作用下进一步固结, 土样仍处于正常固结状态。在前期升温排水阶段, 试样发生排水固结, 试样强度增加。陆嘉楠等^[8]等发现温度对原状粉质黏土(来自浙江温州)的最大抗剪强度具有减弱的功效, 而在初期温度对其剪切强度具有增强作用。可推测温度对土体结构具有一定影响, 而温度对海相软土和陆地原状土的作用效果不同, 因为剪切强度变化规律不同, 仍需要大量陆地原状土强度与温度的关系来对其规律深层次原因进行分析。

由图9可见, 拟合所得临界状态线线性相关系数 R^2 均大于0.99。可以看出海洋土剪切时温度越高, 临界状态线的斜率 M 值就越大, 温度从5℃升高到25℃, M 值提高了4.9%; 温度升高到45℃, M 值提高了9.2%。

由图10可见, 土体 M 值随着温度的增加而增加。此外, 对于Pontida黏土^[17], 温度对其 M 值没有影响。温度对临界状态斜率 M 值的影响, 有不同的研究结果。本文所得海洋土的 M 值大于海洋土重塑土以及其他黏土。本文海洋土 M 值随温度梯度的变化斜率与杭州黏土和南海重塑黏土的变化斜率相似。对于初始 M 值, 宁波黏土和杭州黏土相似, 南海重塑黏土、吹填土和Boom黏土相似。Hueckel等^[17]认为, 温度对 M 值的影响与土本身的性质有关。Hueckel等^[17]也发现, M 值是 ΔT 的线性函数, 线性函数的斜率与土的种类有关, 本文海洋土的斜率为0.003。

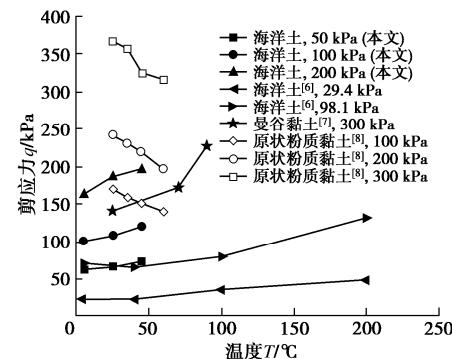


图8 剪应力随温度的变化

Fig. 8 Variation of shear strength with temperature

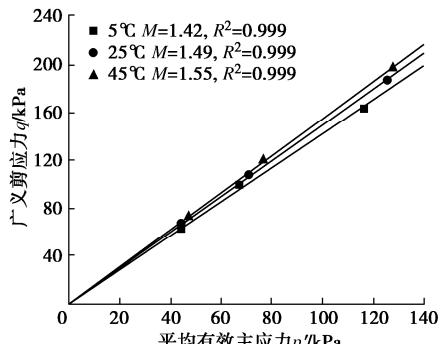


图9 不同温度下试样的 p' - q 曲线

Fig. 9 p' - q curves of samples under different temperatures

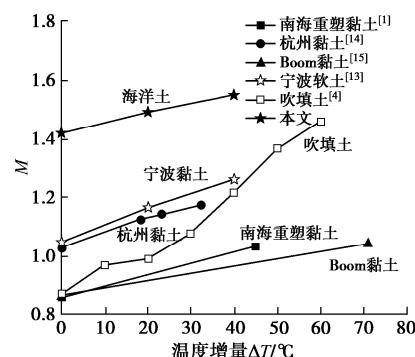


图10 不同黏土 M 值与温度的关系

Fig. 10 Relationship between value of M and temperature of different clays

2.2 单向温度变化对超固结状态海洋土性质的影响

由图 11 可见, 超固结的海洋土在升温过程中排水体积变化同正常固结状态一样, 皆为排水。超固结状态的海洋土的排水体积低于正常固结状态的排水体积。图 11 中也总结了曼谷黏土^[11]、Boom 黏土^[12]以及海相沉积淤泥质软土^[17]热应变随温度的变化, 曼谷黏土、高岭黏土和 Boom 黏土随温度增加先吸水后排水, 而本文海洋土和海相沉积淤泥质软土随温度增加持续排水。

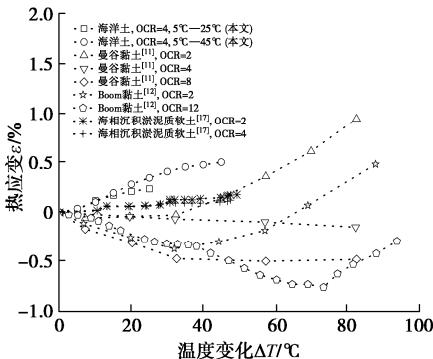


图 11 超固结海洋土的单向升温热应变

Fig. 11 Unidirectional heating thermal volumetric strains of over-consolidated sediments

由图 12 可见, 随着温度的升高, 超固结海洋土 (OCR=4) 抗剪强度呈现变小的趋势。温度升高到 25 °C, 海洋土抗剪强度降低了 1.9%; 温度升高到 45 °C, 海洋土抗剪强度降低了 3.9%。OCR=2.2, 8 的重塑高岭土^[2]的不排水剪切强度随温度的变化趋势与本文海洋土结果一致, 温度对抗剪强度都具有弱化作用。而在一定精度范围内, 由于试验误差的存在, 本文海洋土和重塑高岭土^[2]抗剪强度变化可忽略不计。而温度对超固结状态下重塑伊利石黏土^[3]和曼谷黏土^[11]的抗剪强度具有增强作用。推测温度效用作用与土样的超固结比有关: 当固结比小时, 热致体积变化为排水, 随着超固结比的增加, 试样的热致体积变化由排水转变为吸水状态, 从而导致土样的温度剪切强度由增强转变为减弱作用^[11]。本文海洋土试验有限, 需进一步研究不同固结比对土体温度效应的影响。

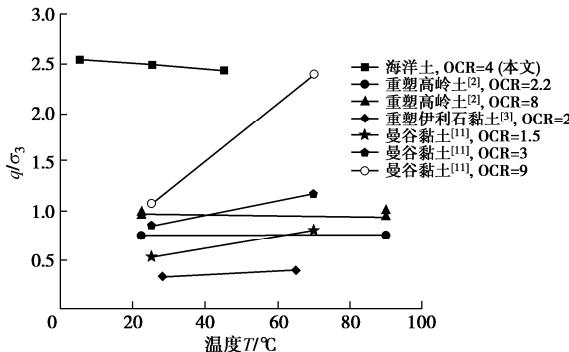


图 12 超固结状态单向升温下试样剪切特性

Fig. 12 Shear behaviors of over-consolidated sediments under unidirectional heating

由图 13 可见, 单向温度作用下, 在 OCR=4 时, 温度越高, 孔隙水压力越小。Abuel-Naga 等^[11]针对天然软曼谷黏土发现, 当 OCR 较小时, 孔隙水压力随温度增加而降低, 当 OCR 较大时, 孔隙水压力随温度增加而增加。

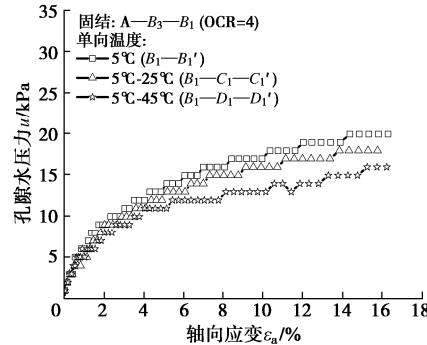


图 13 孔隙水压与轴向应变的关系

Fig. 13 Relationship between pore water pressure and axial strain

由图 14 (a) 可见, 所有的割线模量曲线几乎重合, 轴向模量随着轴向应变增加而趋近于 0 kPa。由图 14 (b) 可见, 温度荷载影响初始割线模量, 对于超固结海洋土, 初始割线模量随温度的升高而升高, 与 Kunti Wattanakul 等^[2]所得不同 OCR 土体的结果一致。

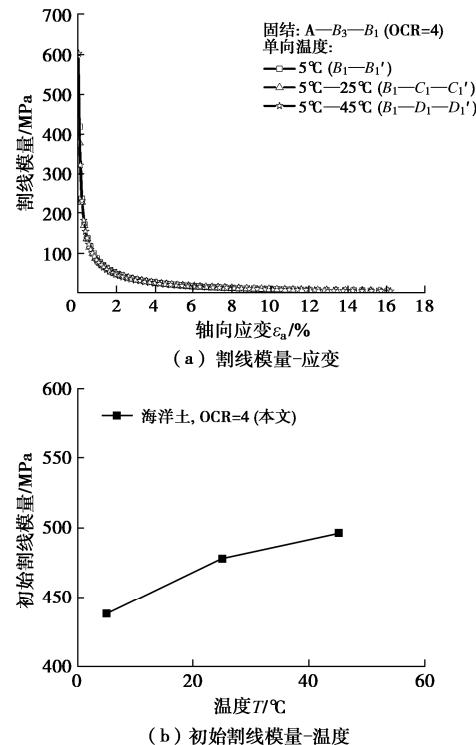


图 14 超固结状态下试样的割线模量

Fig. 14 Secant moduli of over-consolidated sediments

2.3 温度循环对超固结状态海洋土性质的影响

由图 15 可见, 超固结的海洋土在单次温度循环中, 升温阶段试样排水, 降温阶段试样吸水。在经过升温和降温后, 试样的排水体积没有完全恢复到初始

的状态, 尚存在排水体积。随着升温梯度的增加, 排水体积增加。由海相沉积淤泥质软土^[18]的结果可知, 当OCR超过一定值, 土样随温度变化会出现“吸水”现象。

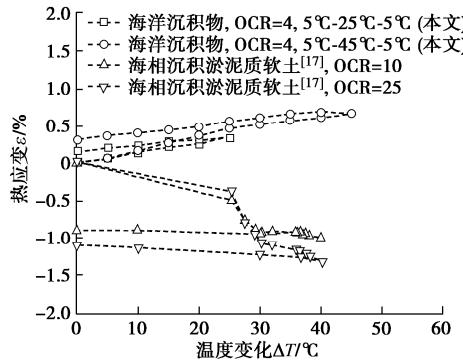


图 15 超固结海洋土温度循环过程中热应变

Fig. 15 Unidirectional heating thermal volumetric strains of over-consolidated sediments

由图 16 可见, 试样的累计排水体积随循环次数的增加而增大, 呈现排水体积累积增大的趋势, 后期变化缓慢。费康等^[19]对取自苏州的黏土进行了温度循环试验, 其结果趋势与本文海洋土的热应变相似。

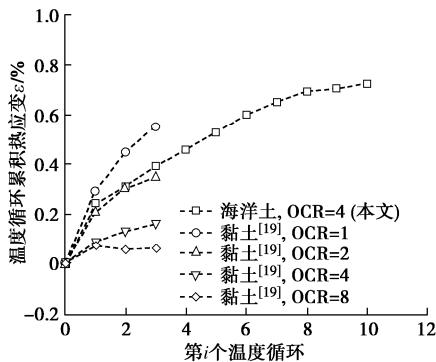


图 16 热应变随循环次数的变化

Fig. 16 Variation of thermal strain with temperature cycles

由图 17 可见, 1 次温度循环荷载后, 即海洋土温度变化: 5°C—25°C—5°C, 海洋土抗剪强度高于 5°C 下的抗剪强度; 改变循环温度为 5°C—45°C—5°C, 其抗剪强度进一步提高。1 次温度循环荷载后, 循环的温度梯度越大, 排水体积越多, 海洋土密度越大, 抗剪强度越大。经过温度循环 5°C—25°C—5°C 后, 海洋土抗剪强度比 5°C 提高了 7.0%; 经过温度循环 5°C—45°C—5°C 后, 海洋土抗剪强度比 5°C 提高了 11.9%。其强度变化规律与 Abuel-Naga 等^[7]研究结果一样, 如图 18 所示。海洋土经过多次温度循环 (5°C—45°C—5°C) 后, 发现循环次数越多, 抗剪强度越高; 温度循环过程中, 海洋土持续排水, 固结程度逐渐增加, 海洋土的抗剪强度持续增大。1 次温度循环后海洋土抗剪强度比 0 循环抗剪强度提高了 11.9%; 4 次温度循

环后海洋土抗剪强度比 0 循环抗剪强度提高了 13.8%; 10 次温度循环后海洋土抗剪强度比 0 循环抗剪强度提高了 17.8%。

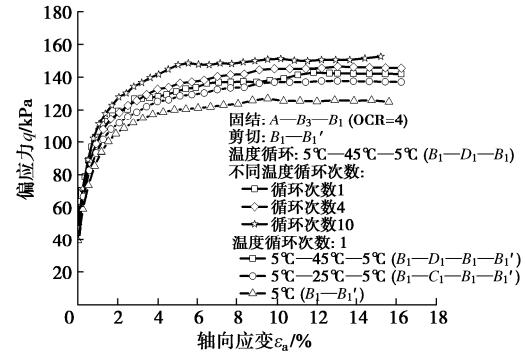


图 17 应力与应变关系

Fig. 17 Relationship between stress and axial strain

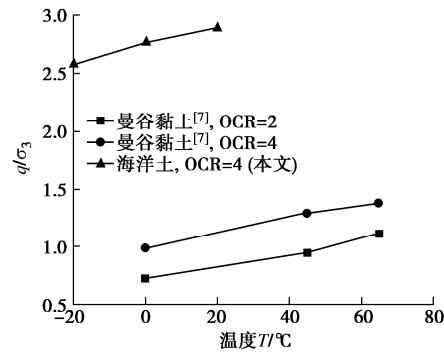


图 18 超固结状态一次温度循环后试样剪切特性

Fig. 18 Shear characteristics of samples after one temperature cycle in overconsolidated state

由图 19 可见, 1 次高温度循环后, 孔隙水压力较小。随着土体温度梯度的升高, 无论 OCR 值如何, 超孔隙水压力均降低^[7]。多次温度循环后对剪切过程中孔隙水压力的影响不大。

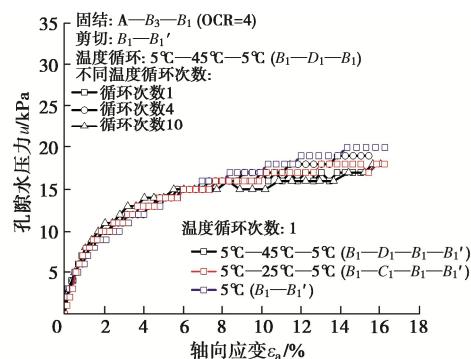


图 19 不排水剪切过程中孔隙水压与应变的关系

Fig. 19 Relationship between pore water pressure and axial strain in undrained shear process

由图 20 (a) 可见, 所有的割线模量曲线几乎重合, 割线模量随着轴向应变增加而趋近于 0 kPa。由图

20 (b) 可见, 对于超固结状态海洋土, 1 次温度循环后, 其初始割线模量随循环温度梯度的增大而增大。由图 20 (c) 可见, 随着温度循环次数增加, 其初始割线模量随循环温度次数的增加而增大, 最终趋于平缓。

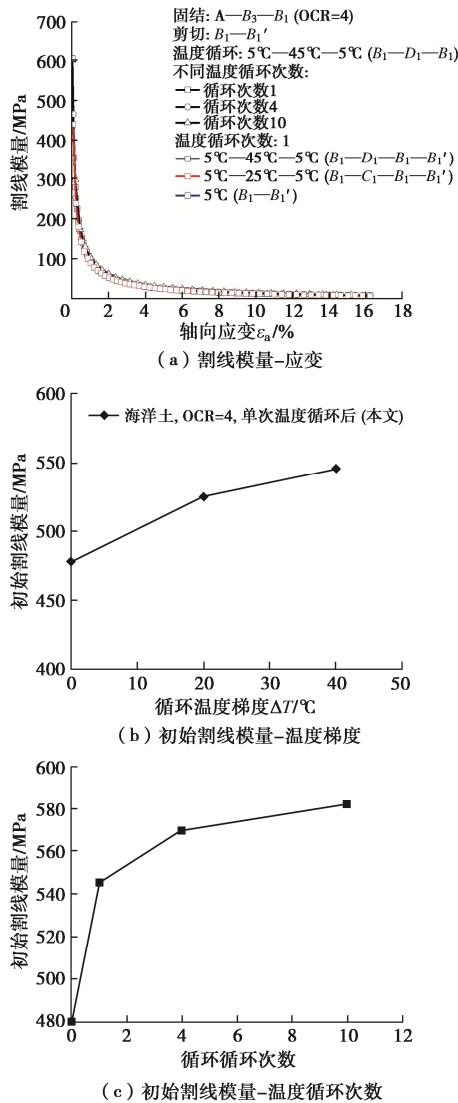


图 20 温度循环后不排水剪切过程中割线模量

Fig. 20 Secant modulus during undrained shear after temperature cycles

3 结 论

基于温控三轴试验, 本文研究了围压、温度和温度循环对原状海洋土固结不排水剪切 (CU) 试验的影响, 本文试验条件下, 得到以下 3 点结论。

(1) 当 $OCR=1$ 时, 在升温时海洋土呈现单一排水状态。当 $OCR=4$ 时, 海洋土升温时为单一排水, 排水体积随温度变化梯度的增加而增加; 降温时吸水, 在经过升温和降温后, 存在不可恢复排水体积; 随着升温梯度的增加, 不可恢复排水体积增加; 试样的累计排水体积随循环次数的增加而增加。

(2) 当 $OCR=1$ 时, 不排水抗剪强度随着围压的增加而增加, 不排水抗剪强度随着温度的升高而呈现线性升高; 海洋土的温度从海底温度 5°C 升高到室温 25°C , 海洋土抗剪强度提高了 8.0%。当 $OCR=4$ 时, 随着温度的升高不排水抗剪强度呈线性降低; 海洋土的温度从海底温度 5°C 升高到室温 25°C , 海洋土抗剪强度降低了 1.9%。

(3) 当 $OCR=4$ 时, 随着温度循环梯度的升高, 海洋土不排水抗剪强度提高: 随着温度循环次数的升高, 海洋土不排水抗剪强度越高。

本文进行的中国南海原状海洋土温控三轴剪切试验, 主要关注 $OCR=1$ 和 4 条件下的剪切试验, 后续有必要开展其他超固结比下的三轴试验。

参 考 文 献:

- [1] LI H, KONG G Q, WEN L, et al. Pore pressure and strength behaviors of reconstituted marine sediments involving thermal effects[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, **21**(4): 6021008.
- [2] 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.
- [3] TANAKA N, GRAHAM J, CRILLY T. Stress-strain behaviour of reconstituted illitic clay at different temperatures[J]. Engineering Geology, 1997, **47**(4): 339-350.
- [4] 雷华阳, 冯双喜, 郝琪, 等. 吹填土热力固结和强度特性试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, **53**(1): 17-26. (LEI Huayang, FENG Shuangxi, HAO Qi, et al. Experimental study on the thermal consolidation and strength characteristics of dredger fill[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, **53**(1): 17-26. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] HOUSTON S L, HOUSTON W N, WILLIAMS N D. Thermo-mechanical behavior of seafloor sediments[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(11): 1249-1263.
- [7] ABUEL-NAGA H M, BERGADO D T, BOUAZZA A. Thermally induced volume change and excess pore water pressure of soft Bangkok clay[J]. Engineering Geology, 2007,

- 89(1/2): 144-154.
- [8] 陆嘉楠, 徐洁, 陈永辉. 温度影响粉质黏土固结和强度特性的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(4): 598-603. (LU Jianan, XU Jie, CHEN Yonghui. Experimental study of temperature effects on consolidation and strength properties of silty clay[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(4): 598-603. (in Chinese))
- [9] DI DONNA A, LALOUI L. Response of soil subjected to thermal cyclic loading: experimental and constitutive study[J]. Engineering Geology, 2015, 190: 65-76.
- [10] 白冰, 张鹏远, 贾丁云, 等. 不同幅值温度荷载下一种饱和红黏土的固结效应[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 1972-1978. (BAI Bing, ZHANG Pengyuan, JIA Dingyun, et al. Consolidation effects of a saturated red clay subjected to temperature loading with different amplitudes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 1972-1978. (in Chinese))
- [11] 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.
- [12] SULTAN N, DELAGE P, CUI Y J. Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay[J]. Engineering Geology, 2002, 64(2/3): 135-145.
- [13] 祁良, 郑荣跃, 陶海冰, 等. 考虑温度影响的宁波软土临界状态参数研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5): 79-83. (QI Liang, ZHENG Rongyue, TAO Haibing, et al. A study of the critical state parameter of the Ningbo soft clay considering the effect of temperature[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(5): 79-83. (in Chinese))
- [14] 王宽君, 洪义, 王立忠, 等. 不排水升温条件下黏性土孔压响应[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(9): 2288-2296. (WANG Kuanjun, HONG Yi, WANG Lizhong, et al. Effect of heating on the excess pore water pressure of clay under undrained condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(9): 2288-2296. (in Chinese))
- [15] YAVARI N, TANG A M, PEREIRA J M, et al. Effect of temperature on the shear strength of soils and the soil-structure interface[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(7): 1186-1194.
- [16] 杨光华. 土力学发展的四个阶段的思考[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(9): 1730-1732. (YANG Guanghua. Thinking of four stages of development of soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(9): 1730-1732. (in Chinese))
- [17] HUECKEL T, FRANÇOIS B, LALOUI L. Explaining thermal failure in saturated clays[J]. Géotechnique, 2009, 59(3): 197-212.
- [18] 刘铨, 邓岳保, 毛伟赟, 等. 超固结比对黏土热固结特性的影响研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(4): 607-614. (LIU Quan, DENG Yuebao, MAO Weiyun, et al. The influence of over consolidation ratio on thermal consolidation properties of clay[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(4): 607-614. (in Chinese))
- [19] 费康, 付长鄂, 戴迪, 等. 循环温度荷载作用下饱和黏土的体积变形特性[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(4): 541-548. (FEI Kang, FU Changyun, DAI Di, et al. Volume deformation behavior of saturated clay under thermal cycles[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(4): 541-548. (in Chinese))