

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.02.010

# 不排水升温条件下黏性土孔压试验研究

张震雨,付长鄂,吴越

(扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225100)

**摘要:** 现今随着新技术的应用,地下结构周围土体必将承受着冷-热循环的温度作用,为保证工程安全,对黏性土的热力学响应进行进一步的研究。采用温控三轴试验系统对不同超固结比的饱和粉质黏土进行不排水升温试验。试验表明,粉质黏土在升温过程中,超孔压随着温度的增加而增加,但增长趋势随着循环次数的增加有所减小,且正常固结土在温度循环后存在残余的超孔压;对超固结土而言,在温度循环后出现负的超孔压,且幅值随着温度循环次数的增加而减小,随着超固结比的增大而增加。

**关键词:** 正常固结;黏性土;多次温度循环;超孔压

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)02-0059-05

## Experimental Study on Pore Pressure of Cohesive Soil Under the Condition of Undrained Temperature Rise

ZHANG Zhenyu, FU Changyun, WU Yue

(College of Architecture Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225100, China)

**Abstract:** With the application of new technology, the soil around the underground structure will be subjected to the temperature effect of cold-heat cycle. In order to ensure the safety of the project, the thermodynamic response of viscous soil should be further investigated. The temperature control triaxial test system was used to test saturated silty clay with different super consolidation ratios. It was shown that during the process of heating, the excess pore pressure increases with the temperature elevation, but the growth trend decreases with the increase of cycle times, and it remains excess pore pressure after temperature cycle in normal consolidated soil; for over-consolidated clays, negative excess pore pressure appears after temperature cycle, and the amplitude decreases with temperature cycle times elevation, and increases with OCR elevation.

**Keywords:** normally consolidated; clay; multiple temperature cycles; excess pore pressure

随着能源地下结构的应用、地热能的开发、核废料处理的开展,历经四季变化,地下结构周围土体必将承受着冷-热循环的温度作用。为保证工程安全,对黏性土的热力学响应的研究十分必要。

在实验研究方面,洪伟等<sup>[1]</sup>基于数值模拟的方法,得到不同条件下能量桩的换热量。黄勇等<sup>[2]</sup>对宁波地区的软黏土进行研究,开展了不同温度下土的应力路径试验,发现不同温度下饱和软黏土的有效应力路径形态大致相同,随着温度的升高,有效应力路径有一定的扩张现象。闫澍旺等<sup>[3]</sup>对采用修

正剑桥模型实现了对微单元体的超静孔压预测,并通过等压固结状态下减压三轴伸长试验得到固结围压越大,超静负孔压峰值越大,超静孔压由负转正时对应的轴向应变越大的实验规律。刘干斌等<sup>[4]</sup>通过开展饱和软黏土温控动三轴试验,发现土体的累积塑性应变、孔压、阻尼比均随着温度升高而减小,动弹性模量则随着温度升高而增大,土体表现出热硬化特征。Houston等<sup>[5]</sup>通过对未受扰动和彻底重塑的太平洋海底伊利土进行升温固结试验,发现在不排水状态下,温度升高引起土体孔隙水压力增大,

收稿日期:2019-12-07

修稿日期:2019-12-29

基金项目:江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目“温度对黏土孔隙水压力的影响”(201911117119Y);扬州大学研究生科创新计划项目“黏土力学特性的温度效应研究”(XKYCX18062)阶段性研究成果

作者简介:张震雨(1999—),男,江苏南京人,本科生,所学专业为建筑与土木工程。E-mail:1335056345@qq.com

通讯作者:付长鄂(1994—),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为岩土工程。E-mail:1445513444@qq.com

且通过土样在不同初始温度的状态下发现土样初始温度越高,相同温度增量引起的孔压增量越大,因此认为孔压的温度效应为非线性变化,孔压随温度升高的增量前期较快,后期较慢。王宽君等<sup>[6]</sup>对不同超固结比(OCR = 1 ~ 30)的超固结土的不排水升温条件下的孔压响应进行了研究,发现不排水升温条件下,温度对于超固结土的影响随着超固结比的增加而降低。卞夏等<sup>[7]</sup>开展了不同初始含水率重塑土孔隙水压力特性的试验研究,得到了不同初始含水率重塑土三轴不排水剪切试验过程中孔隙水压力与轴向应变的关系曲线。齐炎林等<sup>[8]</sup>研究了宁波地区典型软黏土,利用新型温控三轴试验系统对采集土样在不同的温度和围压作用下进行了固结试验和三轴剪切试验。通过对试验数据进行对比,研究了温度对软黏土固结特性、变形特性和强度特性的影响。白冰等<sup>[9]</sup>采用室内试验的方法研究一种饱和红黏土不同升温幅值温度荷载作用下的固结效应。发现温度载荷引起的孔隙水压力最大值随加热幅度的增大而增大,孔隙水压力与围压之比随围压的增大而减小,而孔隙水压力值增大。

在理论研究方面,陈卫忠等<sup>[10]</sup>认为温度对黏土力学特性具有重要影响,于是建立了考虑温度影响的下的加载面模型,采用该模型模拟 Pontida clay 和 MC clay 在不同压力下的排水加热试验和在不同温度下的三轴排水或不排水试验,模拟结果与试验结果对比发现,模型能合理地说明不同超固结比的黏土在温度变化时产生的体积变形以及温度对黏土强度的影响等。杨光昌等<sup>[11]</sup>研究了超固结比对不同温度路径下中空圆柱饱和粉质黏土热固结特性的影响,发现温度幅度越大,孔压也越大;升温或降温过程产生的体应变随着 OCR 的增大而减小,呈指数函数形式变化。Bai 等<sup>[12]</sup>分析了半无限体温度响应由瞬态到准稳态的演化过程以及准稳态条件下温度、孔压和位移等的波动特征,发现随着温度荷载作用时间的增长,热力学响应以波的形式向深处传导和扩散并趋于准稳态过程;随着介质深度的增加,热力学响应的波动幅值不断减小,其相位相应滞后。Samarakoon 等<sup>[13]</sup>对孔隙水压力进行研究,提出热致孔隙水压力预测模型,并运用此模型预测出高岭石黏土孔隙水压力值,基本吻合独立不排水加热试验测得的孔隙水压力值。

本文通过室内试验,基于温控三轴试验系统,重点讨论了不排水升温条件下正常固结土和超固结土的孔压响应,并施加一定次数的温度循环。试验共

考虑了两种不同应力下的正常固结土 E1 系列及三种不同超固结比 E2 系列下的三周温度循环不排水固结试验,每周温度循环包括升温、回温两个阶段,温度幅值为 40℃,共进行 3 周。并通过前人所推导出的公式进行验算。最后对于正常固结土和超固结土在单周温度循环和三周温度循环下进行了不排水升温过程的孔压响应分析。由于现阶段针对不排水升温过程中多次温度循环的孔压响应研究很少,本文也只做了初步的探索。

## 1 试验介绍

### 1.1 试验仪器

试验采用南京泰克奥公司研发的温控三轴试验系统,该试验系统主要由四个部分组成:数据采集系统、常规加载系统、温度控制系统和标准压力/体积控制系统。其温度控制系统通过在常规三轴压力室外侧增设水浴腔和真空腔,并在压力室外部包裹隔热泡沫材料,水浴腔通过包裹了隔热保温材料的 PVC 软管与恒温水浴箱连接,试验中通过水浴箱的循环水来调节土样的温度,利用真空腔来减少试样与外部环境的热交换,维持内部温度的稳定,温度变化范围为 5℃ ~ 80℃。

### 1.2 试验土样

试验用土采用苏州粉质黏土,使用 X 射线衍射仪对土样进行矿物成份分析,试验的结果显示土样矿物成分大致为:高岭石占 43%,伊利石占 35%,绿泥石占 10%,石英占 12%。其基本物理力学性质指标如表 1 所示。采用压样法分 6 层击实制作,控制制样干密度为 1.50 g/cm<sup>3</sup>。重塑试样为直径 39.1 mm、高度 80 mm 的圆柱体。为确保试样处于饱和状态,制样后首先将试样放入真空桶中进行抽气饱和,并在加入水后继续将试样放置 12 h,之后在三轴仪上进行反压饱和,直至孔隙水压力系数  $B$  达到 0.95 以上,此过程中围压与反压始终保持 20 kPa 的差值。

表 1 试样基本物理性质指标

土体	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 $I_p$	颗粒比重 $G_s$
粉质黏土	41.2	27.4	13.8	2.61

### 1.3 试验方案

试验在空调房内进行,室温维持在 22℃ ~ 24℃ 左右。试样饱和完成后,将试样在排水状态固结至预定的有效围压,之后关闭排水阀,使试样处于不排水状态,通过水浴箱调节温度变化,每周温度循环包

括升温、回温两个阶段,温度幅值为 40℃,共进行 3 周。为使试样在温度变化后孔压处于稳定的状态,经试验确定每级温度增量 5℃,共进行 8 级。当孔压读数稳定且温度施加时间超过 1 h 后,再继续施加下一级温度增量,直至最后一级温度加载完成。所有数据均通过电脑进行自动采集。

试验共考虑了两种不同应力下的正常固结土 E1 系列及三种不同超固结比 E2 系列下的三周温度循环不排水固结试验。具体试验方案见表 2。

表 2 试验方案

试验编号	有效围压 $p_0'$ /kPa	超固结比	温度路径
E1-100-1	100	1	三周温度循环
E1-400-1	400		
E2-2-1		2	
E2-4-2	100	4	
E2-8-3		8	

## 2 试验结果及分析

### 2.1 正常固结土不排水升温试验结果分析

#### 2.1.1 升温阶段分析

图 1 为正常固结土在不同有效围压  $\sigma_3$  (100 kPa 和 400 kPa) 作用在不排水条件下升温 40℃ 超孔压  $\Delta u$  与温度增量  $\Delta T$  之间的变化关系曲线。因试验通过分级升降温来施加温度荷载(每级 5℃,时间持续 1 h,共 8 级),为了使试验数据更加直观,文中所取的孔压试验数据点为每级温度加载,孔压稳定时的最终数值。从曲线趋势上可以看出,温度升高后,超孔压有增加的趋势,温度增加到 40℃ 时,超孔压增量分别为 100.57 kPa 和 281.50 kPa。

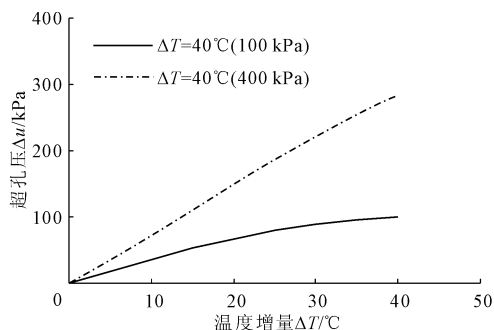


图 1 正常固结土不排水升温超孔压变化曲线

一般认为升温过程中土体超孔压的增加是因为水和土体的热膨胀系数不同导致的,水的热膨胀系数  $\alpha_w = 1.7 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ ,而土颗粒的热膨胀系数为  $\alpha_s = 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ,水的热膨胀系数约为土颗粒的 15 倍。

但通过图 1 分析可以发现,试样在不同有效围压下,其超孔压对温度的响应有所不同,将图 1 中的数据归一化为  $\Delta u/p'$ ,其中  $p'$  为初始有效围压,经过计算,得到升温结束后不同有效围压作用下的  $\Delta u/p'$  分别为 1.00 和 0.70。

Samarakoon 等<sup>[13]</sup>对饱和土不排水加热过程中产生的超孔压建立了预测模型,如式(1)所示:

$$\frac{\Delta u}{p_0'} = \frac{[n(\alpha_w - \alpha_s) + \alpha_{st}](1 + e_0)\Delta T}{(1 + \Lambda)\lambda} \quad (1)$$

式中: $\Delta u$  为超孔压; $p_0'$  为初始平均有效应力; $n$  为孔隙率,本文中试样  $n = 0.417$ ; $\alpha_s$  为土颗粒热膨胀系数; $\alpha_w$  为水的热膨胀系数; $\alpha_{st}$  为温度引起土体体积变化的物理化学系数; $e_0$  为初始孔隙比; $\Delta T$  为温度增量; $\Lambda = 1 - k/\lambda$ ,其中  $k$  为回弹指数, $k = 0.008$ ; $\lambda$  为压缩指数  $\lambda = 0.034$ 。

同时 Samarakoon 等<sup>[13]</sup>利用多组试验数据得出了  $\alpha_{st}$  与塑性指数  $I_p$  之间的拟合效果最好。用式(2)表示:

$$\alpha_{st} = 1.0 \times 10^{-4} e^{-0.014I_p} \quad (2)$$

对于以上参数本文的取值,列于表 3。

表 3 参数取值

$n$	$\alpha_s$	$\alpha_w$	$\alpha_{st}$	$e_0$	$k$	$\lambda$
0.417	0.00035	0.00017	0.000082	0.74	0.008	0.034

其中  $\alpha_s$  和  $\alpha_w$  也是大多数人在建立模型中选用的,如 Campanella 等<sup>[14]</sup>、Burghignoli 等<sup>[15]</sup>分别取了 0.00035/°C 和 0.00017/°C,并且在文献中指出不同矿物试验中的  $\alpha_s$  值对模型的预测效果没有显著的影响,本文中随机选用 Campanella 等<sup>[14]</sup>使用的数值来进行计算,计算效果如图 2 所示,可以看到,在较低有效围压下(100 kPa)的拟合效果并不是很理想,而在较高围压(400 kPa)下拟合效果较好。因为在所采用的公式中,当处于较低的有效围压时,体积模量接近于零,故按此公式计算出的结果会偏小。

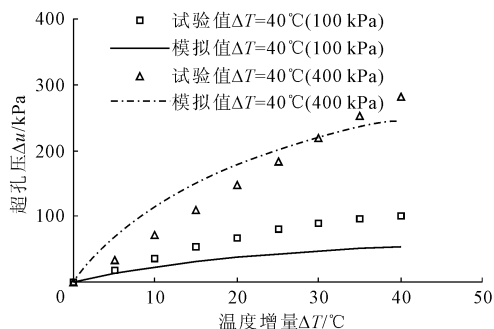


图 2 不同有效围压下模型计算超孔压与温度增量关系曲线

### 2.1.2 多周温度循环

本文试验中共设置了三周温度循环,降温阶段同升温阶段每级  $5^{\circ}\text{C}$ ,时间持续 1 h,共 8 级一致,降到最后一级孔压稳定为一个循环,之后开始另一周的温度循环。图 3 为正常固结土多周温度循环下土体超孔压变化曲线,随着温度循环次数的增加,残余孔压都存在着增加的趋势,且超孔压的增量随着温度循环次数的增加而减小。在有效围压 100 kPa 下三周温度循环的残余孔压分别为 33.5 kPa、53.1 kPa 和 61.5 kPa,在有效围压 400 kPa 下,三周温度循环后的残余孔压分别为 114.0 kPa、226.6 kPa 和 268.2 kPa,经过温度循环后,超孔压并没有回到初始的状态,即温度循环作用下,超孔压的增长是不可逆的。而单从升温阶段产生的孔压来看,同样具有随着温度循环次数的增加,超孔压的增量有减小的趋势,且可以看到超孔压的增量随着温度循环次数的增加而接近有效围压值,在第三次温度循环之后,超孔压分别为 100.1 kPa 和 400.9 kPa,有效围压越小,其超孔压增加的速率越快,100 kPa 下第一次升温时超孔压就已经达到了有效围压的数值,按有效应力原理来看,有效应力接近为零,土体成为“烂泥”状没有承载力,但实际情况并非如此,可能有效应力原理在此处并不适用,需要寻找新的理论来解释。

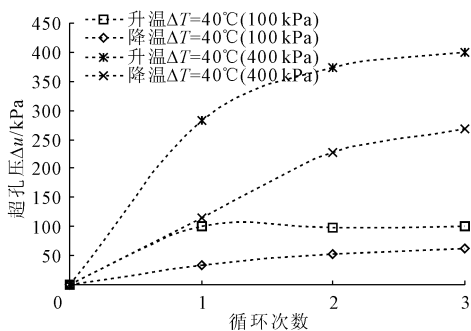


图 3 正常固结土超孔压增量与循环次数关系曲线

同样将数值进行  $\Delta u/p'$  归一化处理,在不同有效围压三次升温后的  $\Delta u/p'$  分别为 1.01、0.99 和 1.01;0.70、0.93 和 1.00。多次升温之后,不同有效围压下温度产生的超孔压逐渐接近,最终维持与有效围压相同。而三次降温之后的  $\Delta u/p'$  分别为 0.37、0.58 和 0.68;0.29、0.57 和 0.67。也可以看出,多次温度循环之后,有效围压对超孔压的影响逐渐减小,各有效围压下超孔压的增加幅度基本相同。结合温度循环次数的增加,超孔压的变化量有所减小,从微观上可以解释为第一次升降温的过程已经使土颗粒间作用力、土颗粒的排列与组合发生了相应的变化,而到之后再次施加温度荷载,对其影响相

应的有所减弱。基本可以认为温度对超孔压的影响随着温度循环次数的增加而有所减弱。

### 2.2 超固结土不排水升温试验结果分析

为获得不同超固结比的土体,本文中的土体首先固结到 200 kPa,待固结结束后,将有效围压设置为 100 kPa,从而获得超固结比为 2 的土体,OCR = 4.8 的土体分别是先固结到 400 kPa 和 800 kPa,而后降低至 100 kPa 来获得。从而能够得到初始有效围压一致的超固结土样,排除了不同的初始有效围压对不排水升温过程中的影响。

图 4 为不同超固结比 (OCR = 2、4、8) 在多次温度循环过程中超孔压  $\Delta u$  与温度增量  $\Delta T$  的变化关系。从图 4 可以看出不同固结比的土体超孔压发展趋势基本一致,随着温度的升高超孔压逐渐增大,随着温度的降低逐渐减小,并且出现了负的超孔压。同样可以看出在升温阶段超孔压的增量随着超固结比的增加有减小的趋势。在降温阶段,出现了负的超孔压,第一次温度循环后不同超固结土的超孔压分别为 -40.3 kPa、-44.1 kPa 和 -55.6 kPa,较第一次升温结束后减小量分别为 136.5 kPa、140.8 kPa 和 148.8 kPa,可以看出在降温过程中,超孔压的增量随着超固结比的增加而增大,与升温过程中超孔压增量的变化趋势刚好相反。

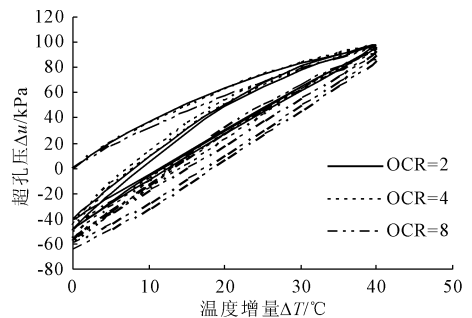
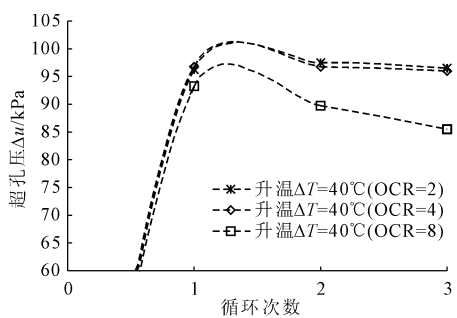


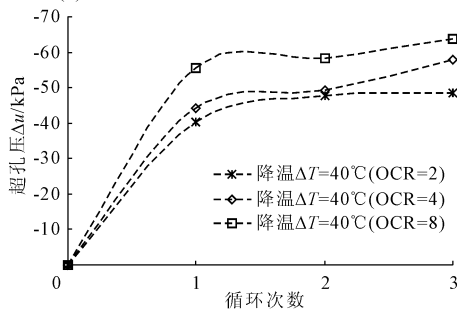
图 4 超固结土不排水温度循环超孔压变化曲线

为更加清楚的分析在温度循环后不同超固结土超孔压的量值关系,图 5 给出的是不同超固结比 (OCR = 2、4、8) 在多次温度循环过程中超孔压  $u$  与循环次数的变化关系。现阶段针对不排水升温过程中多次温度循环的孔压响应研究很少,本文也只做了初步的探索,分析数据可以发现,在升温阶段,较轻超固结土 (OCR = 2),随着温度循环次数的增加,其超孔压的增加幅度并没有多大的改变,具体数值分别为 96.2 kPa、97.4 kPa 和 96.4 kPa,而对 OCR = 4.8 的超固结土而言,其升温阶段的超孔压值随着温度循环次数的增加有减小的趋势,且 OCR 值越大,该趋势越明显,从具体数值上体现为,OCR = 4

三周温度循环超孔压分别为 96.7 kPa、96.8 kPa 和 96.1 kPa, OCR = 8 的土体分别为 93.2 kPa、89.7 kPa 和 85.6 kPa。对降温阶段,和正常固结土有着同样的规律,超固结土随温度循环次数的增加超孔压不断减小,且随着超固结比的增大,超孔压的降低幅度越大。针对这一现象,Pusch 等<sup>[16]</sup>认为对于超固结土体,升温引起的超孔压会产生不稳定的应力条件,导致土体内部结构产生不可逆的变形。在多次温度循环作用下,随着循环次数的增加,这种不可逆的变形就会逐渐趋于一个稳定的状态,从而导致了随着循环次数增加,超孔压在升温阶段的幅值有减小的趋势。



(a) 超固结土升温超孔压随循环次数变化曲线



(b) 超固结土降温超孔压随循环次数变化曲线

图 5 超固结土超孔压随循环次数变化曲线

### 3 结 论

本文通过温控三轴仪,研究了饱和粉质黏土不排水升温过程中的孔压响应,得到了以下结论:

(1) 粉质黏土在不排水升温过程中,超孔压随着温度的升高而增大。

(2) 正常固结土多次温度循环之后,存在残余超孔压,是不可逆的过程,随着温度循环次数的增加,残余超孔压逐渐累积,但幅值随着温度循环次数的增加而减小。

(3) 超固结土多次温度循环之后,出现负的超孔压,随着温度循环次数的增加,超孔压逐渐减小,且幅值随着温度循环次数的增加而减小,随着超固结比的增大而增加。

### 参考文献:

- [1] 洪伟,杨凯,钱建,等. 能量桩传热性能影响因素的数值模拟与分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 101-105.
- [2] 黄勇,刘干斌,祁良,等. 不同温度下饱和软黏土应力路径试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2): 83-87.
- [3] 闫澍旺,张京京,田英辉,等. 等向固结饱和黏土卸载孔压特性的试验与理论研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 775-781.
- [4] 刘干斌,范思婷,陈斌,等. 考虑温度影响的饱和软黏土累积变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1238-1245.
- [5] Houston S L, Houston W N, Williams N D. Thermomechanical behavior of seafloor sediments [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(11): 1249-1263.
- [6] 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.
- [7] 卞夏,洪振舜,曾玲玲. 初始含水率对重塑黏土孔压特性影响试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(4): 749-754.
- [8] 齐炎林,郭楨,潘旭东. 宁波软粘土热力学特性试验研究[J]. 城市建筑, 2016(33): 372-372.
- [9] 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.
- [10] 陈卫忠,龚哲,于洪丹,等. 黏土岩温度-渗流-应力耦合特性试验与本构模型研究进展[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1217-1238.
- [11] 杨光昌,白冰. 考虑超固结效应的不同温度路径下饱和粉质黏土的热固结[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 71-77.
- [12] Bai B, Su Z. Thermal responses of saturated silty clay during repeated heating-cooling processes [J]. Transport in Porous Media, 2012, 93(1): 1-11.
- [13] Samarakoon R, Ghaaowd I, McCartney J S. Impact of drained heating and cooling on undrained shear strength of normally consolidated clay [C]//Ferrari A, Laloui L. International Symposium on Energy Geotechnics. Springer, Cham, 2018: 243-249.
- [14] Campanella R G, Mitchell J K. Influence of the temperature variations on soil behaviour [J]. Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 94(3): 709-734.
- [15] 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.
- [16] Pusch R, Karland O. Physico/chemical stability of smectite clays [J]. Engineering Geology, 1996, 41(1/4): 73-85.