

# 温度对高液限土吸附结合水及其变形影响的试验研究

訾银辉<sup>1</sup>, 申娟宁<sup>2</sup>, 张浩<sup>1</sup>, 张锐<sup>2</sup>, 李露<sup>2</sup>

(1.海南省交通工程建设局, 海口 570208; 2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**为研究温度变化对高液限黏土吸附结合水含量的影响及高液限黏土路堤的变形规律, 该文选取海南高液限黏土为主要研究对象, 并与湖南低液限砂土进行对比研究。通过核磁共振试验, 探究温度对高液限黏土吸附结合水含量的影响规律; 通过温控固结仪开展固结试验, 分析温度对高液限黏土路堤变形的影响规律; 借助分子动力学模拟软件, 从微观层面探究温度对高岭石吸附水分子影响机制。结果表明: 温度由5℃上升至45℃, 高液限黏土中吸附结合水减少4.3个百分点, 远大于低液限砂土减少量(1.4个百分点)。恒定温度、相同荷载路径下, 高液限黏土孔隙比随温度升高变化较大, 而低液限砂土几乎不受影响, 说明高液限黏土温敏性更强。恒定压力下, 温度升高对高岭石吸附水有削弱作用; 相同的升温路径下, 压力越大高岭石吸附的水分子量越多。

**关键词:**高液限黏土; 温度; 吸附结合水; 变形特性

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

## Experimental Study on Effect of Temperature on Bound Water Adsorption and Deformation of High Liquid Limit Soil

ZI Yinhui<sup>1</sup>, SHEN Xuning<sup>2</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>2</sup>, LI Lu<sup>2</sup>

(1. Hainan Transportation Engineering Construction Bureau, Haikou, Hainan 570208, China; 2. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

**Abstract:** In order to study the effect of temperature change on the bound water content adsorbed by high liquid limit clay and the deformation law of high liquid limit clay embankment, the high liquid limit clay in Hainan Province was selected as the primary research object and compared with the low liquid limit sand in Hunan Province. The effect of temperature on the bound water content adsorbed by high liquid limit clay was explored through a nuclear magnetic resonance test. In addition, the effect of temperature on the deformation of high liquid limit clay embankments was analyzed through the consolidation test with a temperature-controlled consolidometer. The molecular dynamics simulation software was used to reveal the mechanism of temperature affecting water adsorption by kaolinite from the microscopic level. The results show that when the temperature rises from 5 °C to 45 °C, the bound water adsorbed by high liquid limit clay decreases by 4.3 percentage points, much greater than that adsorbed by low liquid limit sand (a decrease by 1.4 percentage points). Under constant temperature and the same load path, the pore ratio of high liquid limit clay changes significantly with the temperature increase. In contrast, low liquid limit sand is almost unaffected, indicating that high liquid limit clay is more temperature-sensitive. The rise in temperature under constant pressure can weaken water adsorption by kaolinite. Under the same heating path, higher pressure indicates more water adsorbed by kaolinite.

**Keywords:** high liquid limit clay; temperature; bound water adsorption; deformation characteristics

收稿日期: 2023-04-28

基金资助: 国家自然科学基金资助项目(编号: 52278432, 51978085); 海南省地方标准制修订项目(编号: 2021-Z043)

作者简介: 訾银辉, 男, 高级工程师. E-mail: 574497094@qq.com

## 0 引言

在中国南方湿热地区,广泛分布压缩性高、亲水性强、水稳定性弱、天然含水率高的高液限黏土,其路用性能较差,用作路基填料时难以达到常规压实控制标准。而高液限黏土中存在类固相性质的吸附结合水,已有研究表明可将这部分吸附结合水视作高液限黏土中固相的一部分,从而可以适当地降低高液限黏土压实控制标准<sup>[1-2]</sup>。在南方湿热地区温度影响下,高液限黏土路堤内部受热不均,上下路堤温差较大,导致高液限黏土路堤内部变形程度不一。由于高液限黏土细粒含量高、天然含水率高,其变形是由高液限黏土中水的变化主导的,当外界温度急剧升高时,会加剧土中水分子的运动,使得吸附结合水会向自由水转化,无法继续充当土骨架,从而显著影响高液限黏土压缩变形特性<sup>[3]</sup>。因此,研究温度变化对高液限黏土中结合水含量的影响及黏土路堤变形规律,对中国高液限黏土路基工程建设具有重要理论和实际意义。

黏土性质受环境因素影响较大,对温度的变化具有强敏感性。雷华阳等<sup>[4]</sup>通过温控三轴试验,研究软黏土孔隙水压力变化,发现软黏土渗透系数随温度升高而增大;升温模式下,软黏土受围压和温度双重作用,其孔隙水压力更易消散;张宇宁等<sup>[5]</sup>通过对高液限黏土进行一维固结压缩试验研究发现,在低温条件下,黏土的压缩系数更大,认为这是由于温度升高使得土颗粒发生热膨胀;曹光形等<sup>[6]</sup>对软土开展温控固结试验,发现通过常温加载待固结变形基本稳定后开始变温试验,得出荷载相同时孔压的大小与温度变化成正比关系;Zhang等<sup>[7]</sup>对饱和粉质黏土

在不同温度梯度、不同供水条件下进行4次单项冻结试验发现,黏土变形量随着温度梯度的增加而增大,且冻结峰面的移动速度与温度梯度呈线性关系。目前中国有关温度影响黏土性质的研究大多集中在冻土领域,关于高液限黏土路基变形的研究中,鲜少关注湿热地区温度对其影响,也较少将温度效应下土中吸附结合水的变化与土体的变形相联系。此外,现有研究内容较少涉及其他种类的土质。因此,这部分研究所得到的规律并不完全适用于中国南方地区湿热环境下的路基工程施工。

本文基于国内外在温度影响土中结合水性质方面的成果,以海南高液限黏土为主要研究对象,并与采集的湖南低液限砂土作对比,探究受温度影响较大的高液限黏土上路堤,考虑是否需要控制由吸附结合水变化引起的变形;受温度影响较小的下路堤,考虑是否可以直接利用高液限黏土填筑,所得研究成果可为南方湿热地区高液限黏土路基工程施工提供参考。

## 1 试验土样及其基本物理性质

在海南文昌高速公路采集一种高液限黏土,为研究温度对高液限黏土变形的影响,在湖南长沙校园采集一种低液限砂土作为对比。各土样基本物理性质指标见表1。从表1可以看出:海南文昌高速公路所采集的高液限黏土土样,其天然含水率较高,液塑限高,塑性指数大,且细粒含量远高于低液限砂土。根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)中土的工程分类标准,海南土样为高液限黏土(CH),湖南土样为黏土质砂(SC)。

表 1 试验土样基本物理性质指标

Table 1 Basic physical property index of soil sample

取样地点	颗粒质量组成/%		天然含水率/ %	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	相对 密度	定名
	粗粒	细粒						
文昌高速公路	6	94	56.3	86.3	45.5	43.8	2.73	CH
湖南长沙校园	27	73	18.3	29.8	15.6	14.2	2.69	SC

## 2 温度对高液限黏土吸附结合水含量影响试验研究

### 2.1 试验方法及方案

目前国内外常用的测定土中吸附结合水含量的

方法有热分析法、等温吸附法、容量瓶法和核磁共振法。张锐等<sup>[8]</sup>对国内外结合水测试方法进行综述时提出,等温吸附法需保持试验温度恒定,对温度条件限定较为严格,不适用于温度变化下测定结合水含量;热分析法操作复杂,试验仪器昂贵,所需试样用

量极少,易出现偶然情况;容量瓶法在操作过程中,需将干燥的土颗粒倒入容量瓶中后再加入纯水,使得土颗粒与水完全接触,但路基工程中土颗粒都存在一定的干密度,不可能完全分散;核磁共振法拥有快速、无损测定的优点。因此,本文采用核磁共振法,探究温度对高液限黏土中吸附结合水含量的影响规律。

核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance)是指在主磁场中按一定频率绕自轴旋转的原子核,如 $^1\text{H}$ 、 $^{13}\text{C}$ 等,受外界射频磁场的影响,原有运动方向发生改变,产生塞曼跃迁,吸收特定射频辐射的现象。弛豫现象是当射频场消失后宏观磁化矢量由高能态逐渐恢复成平衡状态的过程,这一过程所用时间称为弛豫时间,弛豫时间又分为纵向弛豫时间 $T_1$ 与横向弛豫时间 $T_2$ 。核磁共振 $T_2$ 谱能更好地反映黏土结合水饱和度、渗透率等参数,本文对横向弛豫时间 $T_2$ 谱进行分析。弛豫时间 $T_2$ 与其原子核所在的分子的运动性相关,原子核所处的分子若运动性越高,则 $T_2$ 弛豫时间越长,因此可以根据弛豫时间的不同来区分土中水的状态。 $T_2$ 曲线中结合水和自由水的临界点称为截止值。

横向弛豫时间 $T_2$ 与材料的比表面积有关:

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \left( \frac{S}{V} \right)_{\text{pore}} = \frac{\rho_2}{r} F_s = \frac{C}{r} \quad (1)$$

式中: $T_2$ 为弛豫时间(ms); $\rho_2$ 为 $T_2$ 对应的表面弛豫率; $(S/V)_{\text{pore}}$ 为土中孔隙表面积与孔隙内部流体的体积之比( $\text{cm}^{-1}$ ); $F_s$ 为孔隙形状因子,有 $S/V = F_s/r$ , $r$ 为试样孔隙半径。对于黏土来说,可将表面弛豫率及孔隙形状因子视为常数,则 $C$ 也是常数。

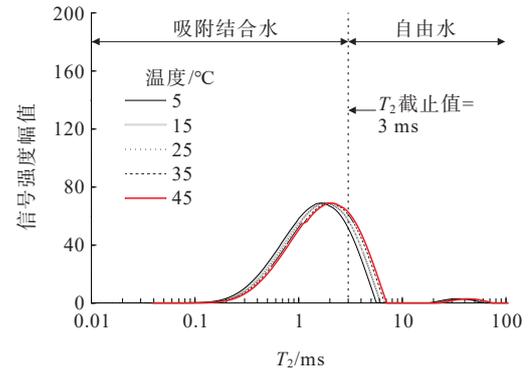
试验所采用的仪器试管,其有效检测范围为高100 mm,直径60 mm。选取海南高液限黏土为主要研究对象,并选取低液限砂土作为对比样本,开展核磁共振试验。首先,采用湿法将土样初始含水率配至塑限附近,并控制试件制样的孔隙比为0.90;再将试验土样制成高度为76 mm、直径为38 mm的土柱;最后将试样置于温控箱中,调至指定温度(5℃、15℃、25℃、35℃、45℃),待试样在温控箱中达到温度平衡后,立即开展核磁共振试验。

## 2.2 试验结果及分析

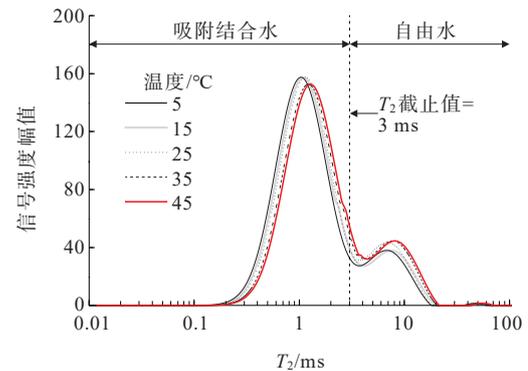
不同土类的 $T_2$ 截止值略有不同,但大量研究所得 $T_2$ 截止值范围为1.65~5.80 ms,陆云龙等<sup>[9]</sup>总结前人研究,得出学者普遍采用3 ms作为黏土的 $T_2$ 截止

值。综合考虑大量前人研究结果,本文选取 $T_2$ 截止值为3 ms。

图1为在温度5~45℃下高液限黏土与低液限砂土的核磁共振试验结果。土颗粒-水分子之间所受的束缚力越大,水分子密度越大,弛豫时间也就越小。随着温度的升高,两种试验土样曲线均向右移动,说明温度升高导致吸附结合水含量减少。



(a) 高液限黏土试样



(b) 低液限砂土试样

图1 不同恒定温度下土样的吸附结合水含量变化

Figure 1 Changes in bound water content absorbed by soil samples at different constant temperatures

土中不同状态水的弛豫时间 $T_2$ 与其所受到的吸附力呈负相关, $T_2$ 值越小说明此部分水所受到的吸附力越大。当 $T_2 < 3$  ms时,这部分水受到的吸附力较大,围成的面积代表土中的结合水; $T_2 > 3$  ms部分受到的吸附力较小,围成的面积代表土中的自由水。从图1可以看出:不同土样的 $T_2$ 曲线主要分布在0.1~11.0 ms,大多只有一个或两个波峰,且 $T_2 < 3$  ms的部分占比较大,试验土样含水率越高,信号幅值越强, $T_2$ 曲线面积越大。

土中结合水含量可通过式(2)进行计算:

$$w_g = \frac{A_g}{A} w \quad (2)$$

式中: $w_g$ 为结合水含量(%); $A_g$ 为 $T_2$ 曲线中 $T_2 < 3$  ms时的面积(曲线所围成的面积通过origin计算得到); $A$ 为 $T_2$ 曲线的面积; $w$ 为初始含水率(%).

由此可计算得到两种土样吸附结合水含量随温度变化曲线,如图2所示。

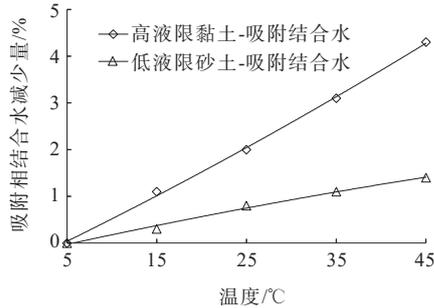


图2 土样的吸附结合水含量随温度变化规律

Figure 2 Variation of bound water content absorbed by soil samples with temperature

从图2可以看出:在相同温度路径下,高液限黏土吸附结合水减少量远高于低液限砂土,从5℃升温至45℃,高液限黏土吸附结合水含量减少了4.3个百分点,而低液限砂土的吸附结合水含量仅降低

了1.4个百分点,说明由于高液限黏土中吸附结合水含量远高于低液限砂土,因而对于温度的变化敏感性更强。

### 3 温度对高液限黏土变形影响试验研究

#### 3.1 试验方法及方案

为探究温度对高液限黏土固结特性的影响,开展室内饱和温控固结试验,获得高液限黏土在不同恒定温度下的固结压缩指标。根据文昌高速实际施工情况,对于两种试验土样,统一采用了在海南土样压实度为88%时所对应的孔隙比0.90,考虑到高液限黏土的特殊性质,为了获得最佳的填筑效果,建议将路堤填筑含水率控制在最佳含水率与天然含水率之间,并确保干密度略低于最大干密度<sup>[10]</sup>。因此,本文控制试样的含水率接近测试对象的塑限附近来制备试验土样。为验证高液限黏土受温度影响显著是否主要由吸附结合水量的变化引起,对试验土样在相同常规孔隙比 $e=0.9$ 的条件下进行温控饱和固结试验,选取结合水含量相对较低的长沙低液限砂土作为对比试验。试验方案如表2所示。

表2 温控固结试验方案

Table 2 Temperature-controlled consolidation test plan

模式	试样	孔隙比	温度/°C	固结压力/kPa	加压判别标准
恒温加 压模式	海南高液限黏土、 湖南低液限砂土	常规孔隙比 $e=0.9$	5	50→100→200→300→400	每隔24 h进行 下一级加载
			15		
			25		
			35		
			45		

根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)进行一维固结试验,按照50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa的顺序逐级加载。值得注意的是,向固结底座内注入的水温应控制为试验设定温度,打开温控装置开关,确保水温恒定。每级荷载加载完毕后,记录读数。

#### 3.2 试验结果及分析

试验完成后,绘制各个恒定温度、相同常规孔隙比条件下试验土样的固结曲线,如图3所示。

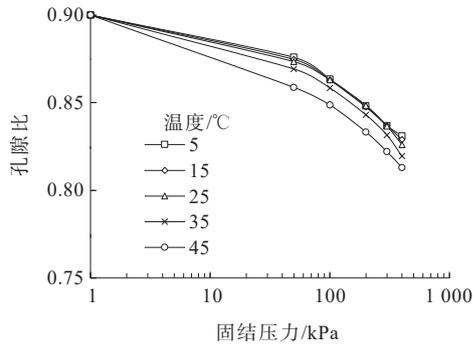
从图3可以看出:

(1) 随着上覆压力的增大,高液限黏土试样的孔隙比变化量随着温度的升高而增大,而在不同温度

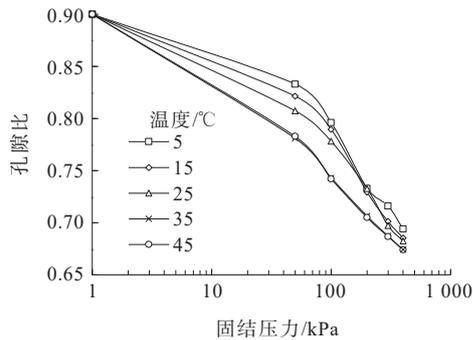
下低液限砂土试样的孔隙比变化量趋于相等,说明温度对低液限砂土试样孔隙比变化量的影响小于高液限黏土,这种差异与吸附结合水含量随温度变化的趋势相关,并且与上文核磁共振试验结果相符合。

(2) 温度越高,试样的孔隙比越小,沉降量越大。张锐等<sup>[11]</sup>通过对比固结试验高液限黏土试样在试验前后的含水率,得出在400 kPa压力作用下,吸附结合水仍很难被排出。因此,在本文温控固结试验中,不考虑因上覆压力作用导致吸附结合水转换为自由水的情况。

(3) 两种试验土样在同一上覆压力作用下,随着温度升高,高液限黏土试样的孔隙比降低得更快,结



(a) 高液限黏土试样固结曲线



(b) 低液限砂土试样固结曲线

图3 相同孔隙比条件下土体固结曲线图

Figure 3 Soil consolidation curve under same pore ratio conditions

合上文核磁共振试验结果分析,孔隙比的降低是由于吸附结合水受温度影响向自由水转化,自由水受上覆压力作用排出引起的,而高液限黏土中吸附结合水高于低液限砂土,随着温度的升高,水分子热运动加剧,使得吸附结合水向自由水转化,从而增大了高液限黏土试样的变形。

在温度5~45℃条件下,高液限黏土的吸附结合水含量随温度的升高而减少且土体变形增大,若考虑到温度与荷载耦合作用,高液限黏土变形程度则会进一步加剧。因此,施工期不宜选择高温条件较多的时段。在受外界环境影响大的上路堤和路床,还应考虑到温度及应力等多种因素耦合作用下土体塑性变形过大的问题,采用土质改良措施或弃土换填等手段,以有效控制路堤变形,确保路堤整体安全性。郑健龙等<sup>[12]</sup>通过对中国南方地区路堤温度进行长期监测表明,在湿热气候条件下,下路堤除了边坡浅表层,其余部分受温度影响较小。因此,受温度影响较小的高液限黏土下路堤,适当降低压实控制标准也不会产生过大变形,可以合理运用高液限黏土填筑。

## 4 温度对高液限黏土吸附结合水影响机制

### 4.1 试验方法及方案

高岭石作为本文主要研究对象——高液限黏土的主要矿物组成成分,研究其在温度影响下的变化对从微观机理层面上分析温度对高液限黏土吸附结合水的影响机制具有重要意义。本文通过Material Studio软件,从微观层面对高岭石吸水过程进行模拟,分析温度对高岭石吸水的内部影响机制。

#### 4.1.1 高岭石超胞模型构建

运用Materials Studio软件2020版本,参考学者Bish已得出的结构模型参数,设定好高岭石的晶胞参数,见表3。在软件中,使用Visualizer模块,首先构建高岭石初始构型。通过输入高岭石分子模型晶胞参数,得到高岭石初始构型。在此基础上,进一步建立了 $4a \times 2b \times 2c$ 的高岭石超晶胞模型。杨泽前等<sup>[13]</sup>提出,高岭石易沿(001)面发生解理,且(001)面在高岭石总面积的占比最大,故选择对高岭石的(001)面进行切割。由于高岭石的晶层间距为0.72 nm<sup>[14]</sup>,但由高岭石单胞模型扩大而得的超胞模型的层间距远小于0.72 nm。因此,需要在高岭石的(001)面上添加厚度为0.72 nm的真空层,由此得到高岭石超胞模型如图4所示。

表3 高岭石分子模型晶胞参数

Table 3 Cell parameters of kaolinite molecular model

$a/\text{nm}$	$b/\text{nm}$	$c/\text{nm}$	$\alpha/(\text{°})$	$\beta/(\text{°})$	$\gamma/(\text{°})$	Space group
0.515	0.894	0.739	91.926	105.046	89.797	$P_1$

注: $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为晶胞的长、宽、高; $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 为建立高岭石模型的晶胞参数的3个棱间夹角。

#### 4.1.2 水分子模型构建

为研究不同温度下高岭石的吸水特性,需构建水分子模型。本文直接运用Material Studio软件中的Visualizer模块构建水分子。水分子的分子式为 $\text{H}_2\text{O}$ ,其中,键角为 $109.471^\circ$ ,O—H键的长度是0.1 nm。

本文采用Forcite模块中的Geometry Optimization对高岭石超胞模型进行几何优化,静电势采用Ewald方法,范德华势采用Atom based方法进行统计处理,能量计算的质量采用Ultra-fine。选择Dreiding力场对高岭石及水分子模型进行几何优化,优化后的体系总能量大幅下降,代表体系已达到稳定。

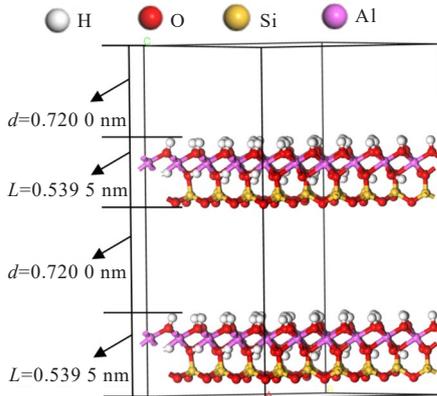


图4 高岭石超胞模型

Figure 4 Kaolinite supercell model

#### 4.1.3 模拟过程

基于 Sorption 模块对高岭石模型开展等温等压吸附的计算,选用蒙特卡洛法,模拟计算共  $1 \times 10^7$  步,前  $5 \times 10^6$  步用于平衡体系,后  $5 \times 10^6$  步用于输出计算。计算过程中选择 Fix pressure 任务设置压力与温度。

### 4.2 试验结果及分析

#### 4.2.1 不同温度下高岭石对水的吸附量

使用 Materials Studio 软件进行模拟吸附水分子时,计算出模型所吸附的水分子个数。图5为不同温度下高岭石对水的吸附量的变化曲线。

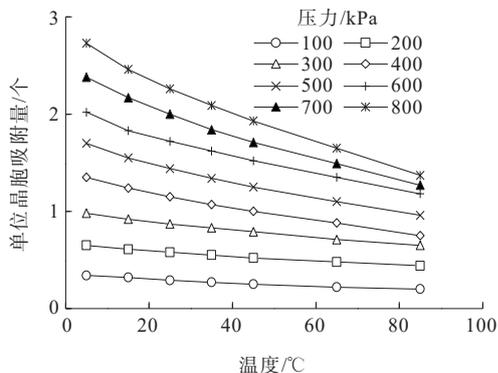


图5 不同压力下高岭石对水的吸附量随温度的变化

Figure 5 Variation of adsorption capacity with temperature under different pressures

由图5可以看出:在相同温度条件下,高岭石吸水能力随压力的增大而提升。这是由于高岭石受更高的压力影响出现新的吸附位,从而可以吸附更多的水分子。若压力不变,可以看出,高岭石对水的吸附量随温度的升高而减小。压力为 100 kPa 时,吸附量由 5 °C 的 0.34 个晶胞减少为 85 °C 的 0.20 个晶胞;压力为 800 kPa 时,吸附量由 5 °C 的 2.73 个晶胞减少

为 85 °C 的 1.37 个晶胞。这是由于温度的升高使得水分子活性增大,升温给予水分子挣脱高岭石吸附作用的能量,导致水分子最终游离出高岭石表面。温度升高抑制了高岭石对水分子的吸附作用,这与前文中宏观室内试验核磁共振法所得规律一致。

#### 4.2.2 吸水机理分析

水可以发生极弱的电离:  $2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$ ,  $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{OH}^-$ 。而黏土矿物易发生同晶替代,高岭石中的高价阳离子(如  $\text{Si}^{4+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ )易被其他低价阳离子(如  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ )替换,导致产生了过剩的负电荷,高岭石最终呈电负性,因此高岭石易吸附  $\text{H}^+$ 、 $\text{H}_3\text{O}^+$  离子中和电性。此外,高岭石是由硅氧四面体和铝氧八面体按照 1:1 的比例排列而成的层状矿物。铝氧八面体是由上下各 3 个氧原子包围一个铝原子堆积而成,铝氧八面体之间通过结构上下的氧原子连结,而由于氧的电价不饱和,常吸附一个氢原子形成氢氧;硅氧四面体是由 4 个氧原子包围一个硅原子堆积而成的四面体,4 个氧原子为四面体的顶点,其中,底部 3 个顶点氧原子在同一平面上,这 3 个氧原子通常与其他 2 个硅氧四面体中的硅原子相连,形成电中性的结构,而顶部的单个氧原子只与单个硅氧四面体中的硅原子相连,再吸附一个氢原子饱和电价。因此,高岭石结构单位层间由 O—OH 或 OH—OH 连接构成,单位层间通过范德华键与氢键相互连接。当极性更强的物质(如水)受温度升高的影响时,会进入高岭石的层间,破坏其中的氢键,并紧紧吸附在高岭石表面上。

## 5 结论

(1) 基于核磁共振法结果可知:高液限黏土和低液限砂土中的吸附结合水含量均随温度升高而降低。其中,高液限黏土中吸附结合水的含量随温度升高的减少速率远高于低液限砂土,因此,高液限黏土具有更强的温度敏感性。

(2) 在相同固结压力及恒定温度下,两种黏土的孔隙比下降速率呈以下规律:高液限黏土大于低液限砂土。结合水含量更高的高液限黏土在温度影响下的变形量远大于结合水含量较低的低液限砂土,说明温度影响下土中吸附结合水的变化影响了黏土变形。

(3) 通过分子动力学模拟,从微观层面模拟了升温环境下高岭石的吸水过程,发现高岭石对水的吸

附量随温度升高而减少。

(4) 高液限黏土温敏性远大于低液限砂土。在受外界温度影响大的上路堤和路床,应综合考虑温度及应力等多种因素的耦合作用对土体塑性变形的影响,建议采用土质改良或弃土换填等手段来确保路堤整体安全性。而在受温度影响较小的下路堤部分,可以适当降低压实控制标准,并合理利用高液限黏土作为填料。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 张锐,肖宇鹏,刘闯,等.考虑吸附结合水影响的高液限土路基压实度控制标准[J].中国公路学报,2020,33(1):32-40,50.  
ZHANG Rui, XIAO Yupeng, LIU Chuang, et al. Control standards for degree of compaction of high liquid limit soil subgrade considering effects of adsorbed bound water [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(1): 32-40,50.
- [2] ZHANG R, XIAO Y P, WU M L, et al. Measurement and engineering application of adsorbed water content in fine-grained soils[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(5):1555-1569.
- [3] ZYMNIS D M, WHITTLE A J, GERMAINE J T. Measurement of temperature-dependent bound water in clays[J]. Geotechnical Testing Journal, 2019, 42(1):232-244.
- [4] 雷华阳,郝琪,冯双喜,等.不同温度模式下软黏土孔隙水压力变化规律与应力-应变特性研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(11):2308-2318.  
LEI Huayang, HAO Qi, FENG Shuangxi, et al. Study on development of pore water pressure and stress-strain characteristics of soft clay under different temperature modes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(11):2308-2318.
- [5] 张宇宁,陈宇龙,李博.饱和黏土的一维热固结特性试验研究[J].东北大学学报(自然科学版),2016,37(12):1794-1799.  
ZHANG Yuning, CHEN Yulong, LI Bo. Experimental study of one-dimensional thermal consolidation of saturated clays[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(12):1794-1799.
- [6] 曹光形,邓岳保,李红军,等.循环变温条件下滨海软土热固结特性测试研究[J].中国测试,2022,48(8):170-176.  
CAO Guangxing, DENG Yuebao, LI Hongjun, et al. Test on thermal consolidation characteristics of coastal soft soil under cyclic varying temperature[J]. China Measurement & Test, 2022, 48(8):170-176.
- [7] ZHANG M Y, ZHANG X Y, LI S Y, et al. Effect of temperature gradients on the frost heave of a saturated silty clay with a water supply[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2017, 31(4):04017011.1-04017011.11.
- [8] 张锐,申殉宁,杨相展,等.黏土结合水分类及测试方法研究综述[J].中外公路,2022,42(3):1-10.  
ZHANG Rui, SHEN Xuning, YANG Xiangzhan, et al. Review on classification and testing methods of clay-bound water[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3):1-10.
- [9] 陆云龙,崔云江,朱猛,等.核磁共振测井黏土束缚水计算新方法[J].石油地球物理勘探,2022,57(3):713-718,497.  
LU Yunlong, CUI Yunjiang, ZHU Meng, et al. A new method for calculating clay bound water in NMR logging [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(3):713-718,497.
- [10] 吴立坚,钟发林,吴昌兴,等.高液限土路基填筑技术研究[J].中国公路学报,2003,16(1):32-35,39.  
WU Lijian, ZHONG Falin, WU Changxing, et al. Study of subgrade construction from high liquid limit soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1):32-35,39.
- [11] 张锐,吴梦丽,刘闯,等.结合水对高液限土固结压缩特性的试验研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(4):48-56.  
ZHANG Rui, WU Mengli, LIU Chuang, et al. Experimental study on consolidation and compression characteristics of high liquid limit soil with combined water[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 16(4):48-56.
- [12] 郑健龙,缪伟.膨胀土路基温度现场观测分析与研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2007,4(4):12-15.  
ZHENG Jianlong, MIAO Wei. Analysis and study on temperature field observing in the expansive soil subgrade [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2007, 4(4):12-15.
- [13] 杨泽前,柴肇云,张海洋,等.电场对高岭石表面水分扩散特性的影响[J].煤炭学报,2021,46(增刊1):222-230.  
YANG Zeqian, CHAI Zhaoyun, ZHANG Haiyang, et al. Effect of electric field on water diffusion characteristics of kaolinite surface[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46 (sup 1):222-230.
- [14] ZHANG L, WANG C J, YAN Z F, et al. Kaolinite nanomaterial: Intercalation of 1-butyl-3-methylimidazolium bromine in a methanol-kaolinite pre-intercalate[J]. Applied Clay Science, 2013, 86:106-110.