

考虑温度影响的高液限土变形特性试验研究

李邦武¹, 申殉宁², 张锐^{2,3*}, 陈彦蓉²

(1. 海南省交通工程建设局, 海南 海口 570208; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;
3. 长沙理工大学 极端环境绿色长寿道路工程全国重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为研究温度对高液限土中吸附结合水及变形特性的影响规律, 选取湖南和海南两地的高液限土进行试验, 通过温控水浴容量瓶试验测定温度对结合水含量的影响, 利用一维温控固结仪对试样进行固结试验, 分析在考虑结合水含量的修正孔隙比下高液限土变形受温度影响的变化规律。结果表明: 高液限土中吸附结合水含量随温度升高而降低。相同荷载梯度、不同恒定温度下, 温度越高试样的变形越大; 15 °C、45 °C 两个恒温条件下, 试样的孔隙比之差最大为 0.1; 相同初始荷载、温度作用下, 对已变形稳定的同一试样进行间隔 10 °C 一个梯度共计 3 个梯度的升温后, 发现试样能再度发生变形, 变形量最高可达 0.6 mm。该研究结果可为高液限土路堤压实及变形控制提供一定参考价值。

关键词: 道路工程; 高液限土; 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 Deformation Characteristics of High Liquid Limit Soil Considering the Effect of Temperature

LI Bangwu¹, SHEN Xuning², ZHANG Rui^{2,3*}, CHEN Yanrong²

(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; 3. National Key Laboratory of Green and Long-life Road Engineering in Extreme Environment, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: In order to study the influence of temperature on the absorbed bound water and deformation characteristics of high liquid limit soil, the high liquid limit soil in Hunan and Hainan provinces were selected for test. The influence of temperature on the content of bound water was measured by a temperature-controlled water bath volumetric flask test. The consolidation test was carried out on the samples with a one-dimensional temperature-controlled consolidometer, and the variation law of high liquid limit soil deformation affected by temperature was analyzed under the modified pore ratio considering the bound water content. The results show that the absorbed bound water in the high liquid limit soil decreases with the increase in temperature. Under the same load gradient and different constant temperatures, higher temperature causes greater deformation of the samples. At 15 °C and 45 °C, the difference in the pore ratio of the samples is 0.1 at most. The same sample with stable deformation under the same initial load and temperature is found to deform again after heating up for three gradients with an interval of 10 °C, and the deformation is up to 0.6 mm. The results can provide some reference for the compaction and deformation control of high liquid limit soil embankments.

Keywords: road engineering; high liquid limit soil; temperature; bound water adsorption; deformation characteristics

收稿日期: 2024-07-24 (修改稿)

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

作者简介: 李邦武, 男, 高级工程师. E-mail: libangwu@163.com

*通信作者: 张锐, 男, 博士, 教授. E-mail: zr@csust.edu.cn

0 引言

中国南方湿热地区广泛分布高液限土,其天然含水率高,亲水性强,水稳定性差,尤其是压缩特性一直是工程建设关注的重点。近似饱和的高液限土变形的关键在于土中水的变化,而高液限土中的水主要为弱结合水^[1]。弱结合水中存在部分性质近似固体的吸附结合水,其性质易受外界温度影响而发生变化,进而影响高液限土压缩变形特性^[2-3]。中国南方地区气候湿热,在路基施工过程及工后,高液限土中结合水易受高温影响,发生性质上的改变,从而造成路基沉降。因此,研究温度变化对高液限土中结合水及土体变形的影响,对高液限土路基工程建设具有重要意义。

结合水黏滞性强,抗剪强度大,不传递静水压力,冰点低,常温常压下很难排出,其含量的测试方法是一个研究热点。结合水测量方法多种多样,常用的有等温吸附法、核磁共振法、热分析法、容量瓶法等^[4]。其中,等温吸附法的吸附过程缓慢,试验过程中水分子大多吸附在土颗粒表面而非均匀分布,试验结果易受温度及相对湿度影响,试验条件难以控制,所得结合水含量并不精确^[5];核磁共振法操作复杂且设备昂贵,在试验室和工程中并未被广泛应用;热分析法单次只能检测一种土类的吸附结合水含量,且每次只能测试1 g土样,样品随机性较大,避免出现偶然误差;容量瓶法中土颗粒与水充分接触,利于土颗粒充分吸附水分子,且操作简单,便于试验室操作,在试验过程中试样都保持恒温水浴,受外界环境的扰动影响较小^[6]。

黏土的工程性质受温度影响显著,国内外研究表明^[7-10],黏土的强度、渗透性、压缩特性、蠕变等性质均与外界温度有关,而这种温度效应与结合水性性质变化相关。目前,有关温度影响黏土性质的研究大多围绕冻土展开,如王宁宁等^[11]通过改变温度对冻土开展压缩固结试验,监测其在不同温度条件下的孔隙水压力及位移变化,结果表明:温度越高,冻土的变形速率越高,孔隙水压力峰值越大;杨岁桥等^[12]通过室内单轴蠕变试验研究冻土在不同温度条件下的蠕变变形特性,得出高含冰量冻土变形随温度变化时,其变形程度相较于低含冰量冻土更大。但这部分研究的温度条件大多在0℃以下,且针对单一土类,不适用于中国南方地区湿热环境下高液限土路基工程建设。因此,有必要探究温度变化对高液限土吸附结合水的影响及土体变形规律。

本文基于温度对土中结合水性性质影响的国内外研究成果,以海南和湖南高液限土为主要研究对象,采用容量瓶法测定吸附结合水含量,通过一维温控固结试验测试高液限土压缩变形,研究温度对高液限土中吸附结合水含量的影响及结合水对路基变形特性的影响规律。

1 试验土样及其基本物理性质

海南、湖南两地气候湿热多雨,分布有大量高液限土。在海南文临高速公路和湖南衡永高速公路采集3种高液限土样,用于升温路径下土中吸附结合水含量及压缩变形特性试验研究。各土样基本物理性质指标见表1。

表1 试验土样基本物理性质指标
Table 1 Basic physical property indexes of soil samples for test

土样编号	取样位置	颗粒质量组成/%		天然含水率	液限	塑限	塑性指数
		粗粒	细粒	w/%	w _L /%	w _p /%	I _p
WL	文临高速公路 WLTJ11 标段	6	94	56.3	89.3	45.5	43.8
HY-1	衡永高速 K54+380	37	63	22.3	67.8	31.6	36.2
HY-2	衡永高速 K102+950	28	72	26.1	55.4	28.6	26.8

在文临高速公路和衡永高速公路采集的土样都具有高液限土特征,即天然含水率较高,细粒含量大,液、塑限高,塑性指数大。其中,文临高速公路所采集的高液限土,液、塑限均高于衡永

高速公路采集的高液限土。根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[13]中土的工程分类标准,WL为高液限黏土,HY-1、HY-2为含砾高液限黏土。

2 试验方法与方案

2.1 试验方法

鉴于容量瓶法操作简单且便于控制试验温度的优点,本文选择容量瓶法测试在温度影响下试验土样的吸附结合水含量变化规律。对设定修正孔隙比试验土样进行不同温度条件下的一维固结试验,对比研究升温路径下吸附结合水含量变化对高液限土变形的影响规律。

2.1.1 吸附结合水含量测试方法

根据文献[6]中介绍的步骤,利用容量瓶法测定试验土样的吸附结合水含量。其原理为:将完全烘干的土粒浸水后充分接触、吸附瓶中水分,根据吸附结合水重度(平均值为 13 kN/m^3)及渗透结合水重度(接近或等于 10 kN/m^3)的不同,自由水向结合水转化时,密度增大而体积减小。记录不同温度条件下容量瓶中水和土总体积变化,计算得到单位干土的吸附结合水含量。试验全程需保持试验土样、容量瓶及试验水体同温,增做“瓶加水”试验作为对照,校正蒸发带来的误差。不同条件下土样的吸附结合水含量 ω_g 计算式为:

$$\omega_g = \frac{\rho_{we} \rho_{wt}}{\rho_{we} - \rho_{wt}} \frac{\Delta V}{m_s} \quad (1)$$

式中: ρ_{we} 为吸附结合水的平均密度,取 1.3 g/cm^3 ; ρ_{wt} 为 $t^\circ\text{C}$ 时自由水的密度; m_s 为干土颗粒质量; ΔV 为蒸发校正后总体积减小量。

ΔV 的计算式为:

$$\Delta V = \frac{m_s}{\rho_w G_s} + V_0 - V_t - V_1 \quad (2)$$

式中: G_s 为用中性液体试验土的质量分数; V_0 为向容量瓶中加入的蒸馏水的体积; V_t 为液面稳定后的最终读数; V_1 为相同条件下蒸馏水蒸发量。

2.1.2 固结试验方法

强结合水性质接近于固体,密度为 $1.2 \sim 2.4 \text{ g/cm}^3$,只有当压力大于 3 MPa 或温度高于 50°C 时才有可能从土中排出^[14]。强结合水层的外层是吸附结合水,属于弱结合水,但其黏滞性大,不易流动,其余弱结合水所受静电引力最小,密度为 1.0 g/cm^3 。张锐等^[15]、符策源等^[16]基于吸附结合水类固相这一特点将其视为黏土颗粒固相的一部分,对土体的常规孔隙比进行修正,将吸附结合水视作固相的一部分后,

土体的三相组成如图1所示。

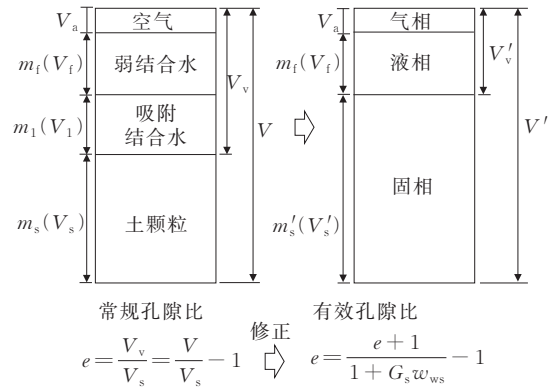


图1 土体三相组成

Figure 1 Composition of three-phase soil

吸附结合水因所受静电引力相对较小,在升温作用下,水分子运动加剧。对于较强结合水中水分子而言更易游离出水膜,向渗透结合水及自由水转化,导致结合水膜厚度变小,土颗粒之间相互作用力随之减小,土颗粒的三相组成随之发生变化,在宏观上表现为力学性质的变化。由于吸附结合水受温度影响会向渗透结合水及自由水转化,从而引起土体力学性质的改变。因此,本文选择3种相同修正孔隙比的土样,对其压缩特性开展试验,结合容量瓶法所得温度影响土中结合水变化规律,基于自主研发的温控装置(图2),开展不同温度条件下土体一维饱和固结试验,研究温度对高液限土吸附结合水及土体变形的影响。



图2 温控固结装置

Figure 2 Temperature-controlled consolidometer

2.2 试验方案

2.2.1 容量瓶试验

采用容积为 255 mL , 分度值为 0.05 mL 的容量瓶,分别对其进行编号。将试验土样研磨至通过 0.01 mm 土工筛,烘干后冷却至室温。取烘干后冷却至室温的 $20 \sim 30 \text{ g}$ 土样放入容量瓶中,加蒸馏水(室

温)至243 mL,振荡容量瓶使土水接触充分,且在试样浸泡24 h内增做1~2次振荡,加速土粒分散及排气。在瓶口包裹一层保鲜膜,防止杂物落入,在保鲜膜上扎出几个细小的孔以保证瓶内气压为大气压强。为确保试验准确性,对每一种土样都增设一组平行样,将装有土样的容量瓶置于调节温度为5℃的恒温水箱中,确保水箱中的水始终没过容量瓶底端球形部分。此外,为保证获得准确的结合水含量变化值,每组温度试验增设一个装有蒸馏水的容量瓶用以校正误差,每24 h对各容量瓶中液面读数,直至液面读数不再发生变化。将恒温水箱的温度分别调为15℃、25℃、35℃、45℃,其余条件不变,重复以上试验步骤。

2.2.2 温控固结试验

设置两种方案开展一维温控饱和固结试验,方案如表2所示。设定各土样的初始修正孔隙比为0.8,控制含水率为高液限土天然含水率的平均值。

焖料48 h后,将试样置于抽真空饱和器中浸泡,饱和48 h。试样饱和后,将其放置于温控固结仪上,确保水槽中的水始终没过试样,减少水分蒸发带来的误差。第一组试验为恒压升温固结试验,考虑到实际工程中路基上覆压力,施加400 kPa荷载静压。依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020),施加压力24 h后,观测试样变形量,当1 h内试样变形不超过0.01 mm时,将温度升高一级,按照15℃→25℃→35℃→45℃的梯度逐级升温,直至温度达到45℃。当温度升至45℃且试样固结稳定后,结束试验;第二组试验为恒温加压固结试验,依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020),对在恒定温度条件下的试样开展一维固结试验,试验过程中采用逐级加载的方式,每24 h加载下一级荷载,观测试验压缩变形总量,直至荷载加至400 kPa且时间间隔24 h后试样压缩变形量稳定,结束试验。

表2 试验方案
Table 2 Test plan

模式	编号	温度/℃	固结压力/kPa	升温判别标准	加压判别标准
恒压升温 模式	WL	15→25→35→45	400	试样变形不超过 0.01 mm	—
	HY-1				
	HY-2				
恒温加压 模式	WL	15	50→100→200→300→400		每隔24 h进行 下一级加载
	HY-1	25			
	HY-2	35			
		45			

3 试验结果及分析

3.1 温度对结合水含量的影响

不同温度条件下各土样中吸附结合水含量变化如图3所示。

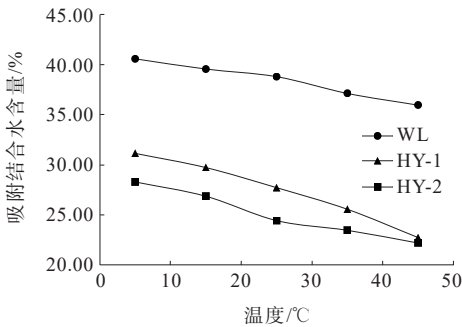


图3 不同温度下3种土样的吸附结合水含量变化
Figure 3 Variation of bound water content adsorbed by three kinds of soil samples at different temperatures

从图3可以看出:①相同温度下3种高液限土的吸附结合水含量各不相同,排序为:WL>HY-1>HY-2,不同温度下吸附结合水量也是变值;②3种高液限土的吸附结合水含量均随温度升高而降低,但降低变化速率(图中曲线斜率)各不相同,排序为:HY-1>HY-2>WL。

从微观上看,温度升高赋予水分子更大的能量,使吸附在土颗粒表面的部分吸附结合水分子具有挣脱静电引力的能力,游离出吸附水膜,向渗透结合水、自由水转化,使得吸附结合水含量减少,结合水膜厚度减小,引起宏观上土体的力学性质发生改变^[17-18]。为研究这种宏观上土体的固结变形特性的变化规律,在获得试验土样吸附结合水量随温度变化规律的基础上,开展不同温度下3种土样的固结变形试验研究。

3.2 温度对压缩变形的影响

图4给出了相同修正孔隙比下3种土样在400 kPa静压稳定后的固结压缩量随时间变化的发展曲线,其中“☆”代表温度升高一级(10℃)。

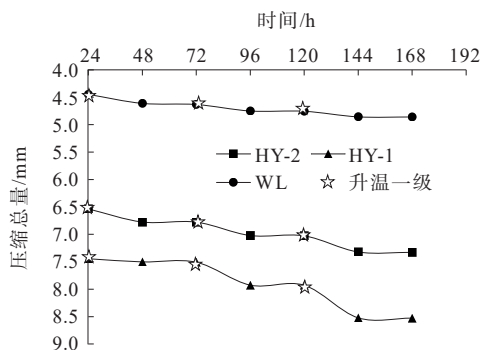


图4 不同温度下土样的固结压缩曲线

Figure 4 Consolidation and shrinkage curve of soil samples at different temperatures

由图4可知:土样沉降变化总体趋势为:在第一天加载400 kPa静应力后,沉降量迅速加大,然后随时间趋于稳定,这是由荷载引起的固结沉降。之后的7 d内,土样的沉降量随着温度变化而变化,当温度上升时,沉降量增大。

在图4条件下进一步给出了相同修正孔隙比试样的沉降量变化随温度升高的变化曲线。如图5所示。

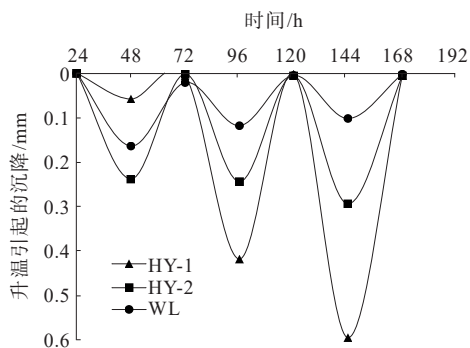


图5 不同温度下土样的沉降变化量曲线

Figure 5 Settlement variation curve of soil samples at different temperatures

由图5可知:① 温度升高一级,试样的沉降量也随之增大,随着每一级温度的稳定,试样的沉降量逐渐降低,即试样压缩变化减小;② 对于WL土样,每级升温引起的沉降量差随设定温度的升高变化不大;对于HY-1、HY-2土样,每级升温引起的沉降量差随着设定温度的升高而增大。

压缩量变化代表土体的可压缩性,由图4、5的结

果可知:在初始温度15℃恒温条件下,施加400 kPa静压24 h后试样已固结稳定,此时对试样升温至25℃后,试样再度发生变形,待试样在该温度下固结稳定后,对试样再度升温至35℃,发现试样仍会发生变形,如此重复,直至温度升至45℃后试样变形稳定。结合容量瓶试验结果分析可知,这是由于温度升高导致结合水含量降低,充当土颗粒固相的部分吸附结合水转化为自由水,试样的孔隙比减小,使得试样在相同静载压力作用下变形稳定后再度发生变形。温度升高WL土样的结合水含量变化小于HY-1、HY-2土样的变化,导致WL的沉降量变化较HY-1、HY-2小。

图6为3种相同修正孔隙比的土样在恒定温度条件下逐级加压的固结压缩曲线。

由图6可知:

随着温度增加,压缩曲线向下移动,与前人研究规律一致^[19]。其中HY-1、HY-2两种土样随着温度升高其孔隙比降低更明显,WL土样孔隙比变化量小于前二者,与其各自的结合水含量随温度变化规律相似。同一温度下,土样的孔隙比随着上覆压力的增加而降低;同一上覆压力作用下,试验环境温度越高的试样孔隙比越小,与上文恒压升温试验结论一致,即温度升高影响高液限土中吸附结合水含量变化从而影响土体压缩变形。

除了施工期间难以压实,高液限土路堤的另一个重要工程问题是在复杂环境影响下会产生过大工后沉降,其中包括温度变化引起的路堤变形。温度较高时,高液限土中具有类骨架作用的部分吸附结合水含量随之降低,导致土体孔隙比减小,路堤发生沉降变形。因此,建议在高液限土填方路基施工时预留一段平均气温较高的沉降期,且不应在受温度影响较大的路床和上路堤区域直接填筑高液限土。本文揭示了温度影响高液限土吸附结合水及变形规律,可为下路堤压实控制标准及控制其沉降变形提供一定参考。

4 结论

(1) 随着温度升高,WL、HY-1、HY-2高液限土的吸附结合水含量在5~45℃内呈线性降低,WL、HY-1、HY-2土样分别减少了4.62、8.42与6.10个百分点。WL土样中吸附结合水含量对温度的敏感性

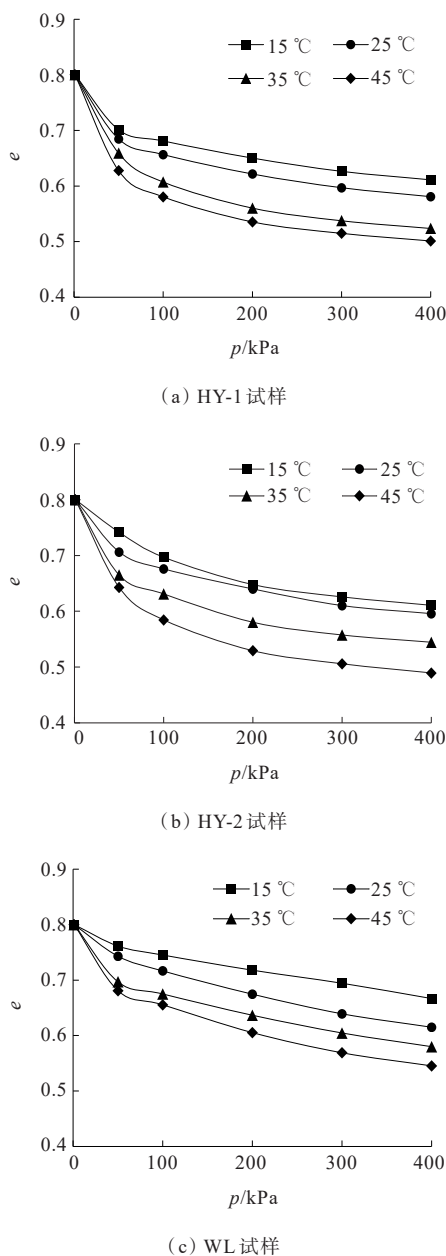


图6 不同温度下高液限土试样的一维固结压缩曲线
Figure 6 One-dimensional consolidation and shrinkage curves of high liquid limit soil samples at different temperatures

略低于其他两种土样。随着温度升高,3种土样的吸附结合水含量随温度的变化速率排序为HY-1>HY-2>WL。从微观角度分析,这是由于升温部分水分子获得了能量,具有游离出吸附水膜能力,使得高液限土中结合水膜变薄,吸附结合水含量减少。

(2) 温度升高影响高液限土中吸附结合水含量,从而在宏观上引起高液限土变形特性的改变。对恒定上覆荷载作用下固结变形稳定后的饱和高液限土试样进行梯度升温,发现随着温度升高,固结变形稳

定的高液限土试样会再度发生变形;对不同恒定温度条件下的高液限土试样开展固结试验,发现其孔隙比随着温度升高而减小。这是因为高液限土中具有土骨架作用的吸附结合水含量随温度升高而减小,导致高液限土性质改变,压缩性随吸附结合水含量减少而变大。

(3) 温度环境作用下,高含水率、低压实度的高液限土路堤工后会产生过大的变形问题。温度升高时,高液限土中部分吸附结合水含量降低,高液限土孔隙比随之减小,宏观看来即高温环境对土体压缩变形有一定影响,因此不建议将高液限土填筑在易受温度影响的路基工作区和表层边坡。在受温度影响较小的下路堤,建议考虑高温对高液限土路基变形影响,选在夏季高温情况下进行下路堤施工,宜留出一个夏季的自密沉降期。

参考文献:

References:

- [1] MIN F, PENG C, SONG S X. Hydration layers on clay mineral surfaces in aqueous solutions: A review[J]. Archives of Mining Sciences, 2014, 59: 489-500.
- [2] 费康,戴迪,付长鄂.热-力耦合作用下黏性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 Changyun. Experimental study on volume change behavior of clay subjected to thermo-mechanical loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(9): 1752-1758.
- [3] MIRONOV V L, KARAVAYSKIY A Y, LUKIN Y I, et al. Joint studies of water phase transitions in Na-bentonite clay by calorimetric and dielectric methods[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 153: 172-180.
- [4] 张锐,申娟宁,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.
- [5] 莫燕坤,刘观仕,牟智,等.黏土中结合水含量测试方法研究进展[J].土工基础, 2021, 35(3): 393-399.
MO Yankun, LIU Guanshi, MOU Zhi, et al. State of the art review of testing methods of bound water content in clay [J]. Soil Engineering and Foundation, 2021, 35(3): 393-399.

- [6] 吴凤彩.粘性土的吸附结合水测量和渗流的某些特点[J].岩土工程学报,1984,6(6):84-93.
WU Fengcai. Some characteristics of adsorption combined water measurement and seepage of cohesive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 6(6): 84-93.
- [7] 何俊,胡晓瑾,颜兴,等.黏土渗透性温度效应试验[J].水利水电科技进展,2017,37(3):55-60.
HE Jun, HU Xiaojin, YAN Xing, et al. Experiments on temperature effect of hydraulic conductivity of compacted clay[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(3): 55-60.
- [8] 何俊,阮晓晨,胡晓瑾,等.温度和模拟渗滤液作用下黏土的渗透性能研究[J].水文地质工程地质,2017,44(1):116-122.
HE Jun, RUAN Xiaochen, HU Xiaojin, et al. Effects of temperature and analog leachate on hydraulic conductivity of compacted clay[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(1): 116-122.
- [9] YAO C Q, WEI C F, MA T T, et al. Experimental investigation on the influence of thermochemical effect on the pore - water status in expansive soil[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(6): 04021080.
- [10] 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
- [11] 王宁宁,张虎,张建明,等.不同温度及排水条件下高温冻土孔隙水压力试验研究[J].冰川冻土,2018,40(6):1167-1172.
WANG Ningning, ZHANG Hu, ZHANG Jianming, et al. Experimental study of pore water pressure of high temperature frozen soil under different temperatures and drainage conditions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(6): 1167-1172.
- [12] 杨岁桥,王宁宁,张虎.高温冻土的蠕变特性试验及蠕变模型研究[J].冰川冻土,2020,42(3):834-842.
YANG Suiqiao, WANG Ningning, ZHANG Hu. Study on creep test and creep model of warm frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3): 834-842.
- [13] 交通部公路科学研究院.公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test methods of soils for highway engineering: JTG 3430—2020[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.
- [14] 李生林.土中结合水译文集[M].北京:地质出版社,1982.
LI Shenglin. Translation collection of adsorbed water in soil[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982.
- [15] 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.
- [16] 符策源,周世杰.吸附结合水对高液限土强度和渗透特性的影响试验研究[J].中外公路,2024,44(3):19-25.
FU Ceyuan, ZHOU Shijie. Experimental study on influence of adsorbed bound water on strength and permeability characteristics of high liquid limit soil[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(3): 19-25.
- [17] 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 & Technology (Natural Science), 2019, 16(4): 48-56.
- [18] 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.
- [19] DENG Y B, MAO W Y, KONG G Q, et al. Primary and secondary consolidation compression for saturated soil considering coupling effect of loading and heating[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(8): 2514-2526.