

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20220414003

文章编号:1672-9331(2024)06-0077-10

引用格式:曾重驰,成先阳,张锐,等.吸附结合水对高液限土变形特性影响的试验研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(6):77-86.

Citation: ZENG Chongchi, CHENG Xianyang, ZHANG Rui, et al. Experimental study on influence of adsorbed bound water on deformation characteristics of high liquid limit soils [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(6): 77-86.

吸附结合水对高液限土变形特性影响的试验研究

曾重驰¹, 成先阳², 张锐^{2,3}, 张家明¹, 万治佐¹

(1.长沙理工大学 国际工学院,湖南 长沙 410114;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 公路养护技术国家工程研究中心,湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】揭示荷载作用下高液限土中吸附结合水的形态及其变化规律。【方法】采用不同浓度的NaCl溶液调控土样的初始吸附结合水含量,并利用热重分析法对其进行定量测定。在此基础上开展静荷载作用下的固结试验和动荷载作用下的永久变形试验,并分析吸附结合水含量变化对试样变形特性的影响。【结果】随着NaCl溶液浓度的增加,土样吸附结合水含量逐渐减少,但强结合水含量基本保持不变。在动静荷载作用下,土样的塑性变形随着吸附结合水含量的降低而增加。在相同荷载条件下,动荷载导致的塑性变形较静荷载作用下的更大。这是因为静荷载主要压缩孔隙,排出自由水,但不影响吸附结合水,而动荷载可使吸附结合水转化为自由水并被排出,从而使塑性变形变大。【结论】本研究揭示了吸附结合水对高液限土变形特性的影响机制,为高液限土的变形控制提供了科学依据和技术参考。

关键词:高液限土;吸附结合水;热重分析法;变形特性

中图分类号:U416

文献标志码:A

Experimental study on influence of adsorbed bound water on deformation characteristics of high liquid limit soils

ZENG Chongchi¹, CHENG Xianyang², ZHANG Rui^{2,3}, ZHANG Jiaming¹, WAN Zhizuo¹

(1. International Engineering college, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. National Engineering Research Center of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] This paper aims to reveal the morphology of adsorbed bound water and its changing law in high liquid limit soils under loads. [Methods] The initial adsorbed bound water content of soil samples was regulated by NaCl solution at different concentrations and quantitatively determined by thermogravimetric analysis. On this basis, the consolidation test under static loads and the permanent deformation test under dynamic loads were carried out to analyze the influence of the change in adsorbed bound water content on the deformation characteristics of the samples. [Findings] With the increase in NaCl solution concentration, the adsorbed bound water content of

收稿日期:2022-04-14;修回日期:2022-05-20;接受日期:2022-05-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278432);国家大学生创新创业训练计划(202010536006)

通信作者:张锐(1980—)(ORCID:0000-0003-2451-7103),男,教授,主要从事特殊岩土路基工程方面的研究。

E-mail: zr@csust.edu.cn

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

the soil samples decreases, but the strong bound water content basically remains unchanged. Under static and dynamic loads, the plastic deformation of the soil samples increases with the decrease in adsorbed bound water content. Under the same load conditions, dynamic loads result in greater plastic deformation compared with static loads. This is due to the fact that static loads mainly compress the pore space and discharge the free water, but they do not affect the adsorbed bound water, while dynamic loads can make the adsorbed bound water converted into free water and discharged, thus aggravating the plastic deformation. [Conclusions] This study reveals the influence mechanism of adsorbed bound water on the deformation characteristics of high liquid limit soils and provides a scientific basis and technical reference for the deformation control of high liquid limit soils.

Key words: high liquid limit soil; adsorbed bound water; thermogravimetric analysis; deformation characteristic

Foundation items: Project (52278432) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (202010536006) supported by the National Innovation Training Program for College Students

Corresponding author: ZHANG Rui (1980—) (ORCID: 0000-0003-2451-7103), male, professor, research interest: special rock subgrade. E-mail: zr@csust.edu.cn

0 引言

高液限土是液限大于50%的细粒土,广泛分布于我国气候湿润的南方地区,在天然状态下其含水率高、持水性强、承载力低且可塑性大,是路基工程中的特殊土^[1]。高液限土具有特殊性质,在南方湿热地区,若利用不当,容易导致公路、铁路、水利和建筑工程中的地基及填方结构物发生较大变形^[2]。此外,高液限土的颗粒表面带负电荷,会形成双电层效应,这种效应使土颗粒在水中会吸附大量结合水,而这些结合水对高液限土的变形具有显著影响^[3-4]。因此,研究吸附结合水对高液限土变形的影响对于我国南方地区公路建设具有重要意义。

高液限土中结合水含量普遍较高,这是因为高液限土中含有大量的黏土颗粒,这些颗粒被其表面的羟基和氧化层所包围,与水分子接触作用后,黏土颗粒受双电层效应影响,会在其表面形成一层水膜,这层水膜则为土颗粒表面的结合水^[5]。颗粒具有不同的形态及性质,这些特性使得越靠近土颗粒表面的结合水受到的引力作用越强,因此往往需要施加更大的荷载才能将其排出。最内层的强结合水和吸附结合水在常温状态下具有一

定的固相性质^[6-7]。吸附结合水在外界作用下能够移动和转化,从而导致结合水水膜的厚度会发生变化,进而影响高液限土的物理性质及力学特性,主要表现为对土样稠度及变形特性的影响^[8]。

BHARAT等^[9]将扩散双电层理论运用到高塑性黏土固结压缩特性研究中,通过将理论与试验结果结合,并对其试验数据进行推导预测,发现吸附结合水对土体压缩变形具有显著影响。刘勇健等^[10-11]认为,与静荷载相比,动荷载改变土中结合水形态相对较容易,达到相同结合水变化量所需的动荷载小于静荷载,且作用时间也更短。郑晴晴^[12]基于工程实践中的重塑振动、原状振动、冲击荷载三种荷载条件进行了试验,发现经这三种加载方式作用后,土样的吸附结合水含量和比表面积均有所下降。具体而言,这三种荷载作用按照吸附结合水含量的降低幅度从小到大排序依次为重塑振动、原状振动、冲击荷载。综上所述,目前对高液限土强度及变形的研究成果主要集中在宏观性质方面,缺少对其内在机制的揭示,并且已有研究并未深入探讨应力作用下的吸附结合水变化情况,以及该变化对土体强度及变形的影响。

本文首先通过不同浓度NaCl溶液控制土样初始吸附结合水含量,并采用热重分析法对其含量进行测定;然后,在此基础上探究动静荷载作用下

的吸附结合水对高液限土变形特性的影响规律;最后,对比分析动静荷载作用对高液限土中吸附结合水的影响,以及在这两种荷载作用下土样的变形规律,并从吸附结合水角度分析内在原因。

1 试验土样

本文试验土样取自海南的国道 G360 公路 WLTJ10 标,并参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)对土样开展基本物理特性试验。土样的基本物理指标见表 1。

由表 1 可知,试验土样天然含水率较大,细粒土质量分数与液限均大于 50%。按照《公路土工

试验规程》(JTG 3430—2020)中的分类标准,试验土样为高液限粉土(MH)。

考虑到土体的微观结构特征是影响土体物理特性的主要原因,本文采用扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM)分析土颗粒表面矿物结构,图 1 为试验土样的 SEM 照片。从图 1 可以看出,试样中含有大量的叠片状黏土矿物,且有一定的微孔隙存在。采用 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)法对土体矿物成分的种类及含量进行测定,该试验结果显示,土样中的黏土矿物成分主要为高岭石、石英、伊利石和蒙脱石,这 4 种矿物成分的质量分数分别为 41.8%、34.1%、23.5%、0.6%。

表 1 土样相关物理指标

Table 1 Physical indicators related to soil samples

颗粒组成		液限 w_L /%	塑限 w_P /%	塑性指数 I_P	天然含水率/%	相对密度	土类代号
细粒土质量分数/%	粗粒土质量分数/%						
92.6	7.4	86.8	49.6	37.2	52.1	2.73	MH

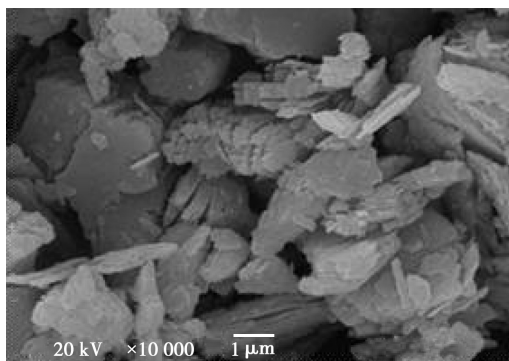


图 1 SEM 照片

Fig. 1 Scanning electron microscope (SEM) photo

如图 2 所示。从图 2 可以看出,黏土颗粒表面带负电荷,其表面会吸附阳离子或水分子并将其电位中和。当向土样中加入不同浓度的 NaCl 溶液时,溶液中 Na^+ 会与土颗粒表面的负电荷相互作用,土颗粒为保持电势平衡,其表面的初始阳离子和水分子有挣脱颗粒吸附向远离颗粒表面方向运动的趋势,从而使得土颗粒表面的结合水水膜变薄,结合水含量降低^[13]。

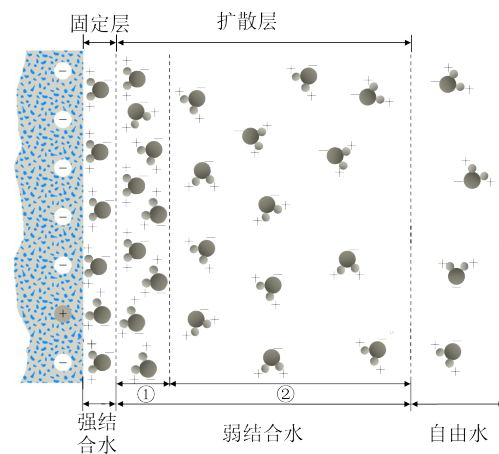
按照上述吸附结合水含量的控制方法,分别

2 试验方案

本研究首先通过不同浓度的 NaCl 溶液对试验土样的吸附结合水进行控制;接着,采用热重分析法测定处理后试样的吸附结合水含量;然后,开展静荷载作用下的固结试验和动荷载作用下的永久变形试验;最后,分析吸附结合水对高液限土变形特性的影响。

2.1 高液限土中吸附结合水的控制

本文通过不同浓度的 NaCl 溶液对高液限土中的吸附结合水含量进行控制。土中水的存在状态



注:① 为吸附结合水;② 为渗透结合水;+ 为水分子。

图 2 土中水存在状态示意图

Fig. 2 Occurrence state of water in soils

用4种浓度(0.1、0.5、1.0、2.0 mol/L)的NaCl溶液和蒸馏水将土样初始含水率调配至45.0%,并将制备好的土样闷料3~5 d,再通过热重分析法对试样吸附结合水含量进行测定。

2.2 热重分析法测试方案

本文采用STA 449 F5 Jupiter同步热分析仪进行试验。首先,将试验土样碾磨至粉末状,并过0.075 mm的筛,将过筛后的土样置于105 ℃的烘箱干燥约12 h,干燥完成后将其取出并装入收纳袋冷却至室温;然后,配置4种不同浓度的NaCl溶液,并利用配置好的NaCl溶液及自制的蒸馏水将烘干后的土样含水率调配至45.0%,并将调配好的土样再次放入收纳袋;最后,为确保土样中的水分完全均匀分布,将试样放在相对湿度为100%,温度为25 ℃的环境中,并使用精度为0.1 μg的天平每隔24 h进行一次称量,待试样质量不发生变化后,将试样放入仪器进行试验。

2.3 固结试验

高液限土具有较强的压缩性,且其压缩特性与结合水的吸附量之间存在重要联系^[14-16]。本文通过开展静荷载作用下的固结试验来研究吸附结合水对高液限土变形特性的影响。

根据高液限土天然含水率较高、翻晒时间长的工程特性,张锐等^[17]通过研究土中吸附结合水

对路基的影响发现,利用高含水率、低压实度的高液限土填筑的路堤在运营期内没有发生较大变形。因此,本文试样的初始含水率和压实度分别控制为45.0%和90.0%,并控制试样初始孔隙比为0.85。具体试验步骤如下:首先,使用不同浓度的NaCl溶液调配相同初始含水率的试样,从而获得具有不同初始吸附结合水含量的试样;然后,对制备好的试样进行固结试验,固结试验按照50、100、200、300和400 kPa的顺序逐级加载,每一级加载间隔至少24 h,当千分表的读数在2 h内变化不大于0.01 mm时才可进行下级加载,并记录每一级加载稳定后的千分表读数。

2.4 永久变形试验

为了验证在降低压实度的情况下,直接将高含水率的高液限土用作下路堤填料时,路基在动荷载作用下的可靠性,本文通过对不同初始吸附结合水含量的试样开展永久变形试验,揭示吸附结合水对高液限土永久变形的影响。

三轴试验试样的含水率、压实度均与固结试验中环刀试样的一致。本试验根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)中的要求制备试件,该试件尺寸为200 mm(高度)×100 mm(直径),并通过压力机分5层静压制样,最后进行加载试验。永久变形试验方案见表2。

表2 永久变形试验方案

Table 2 Permanent deformation test scheme

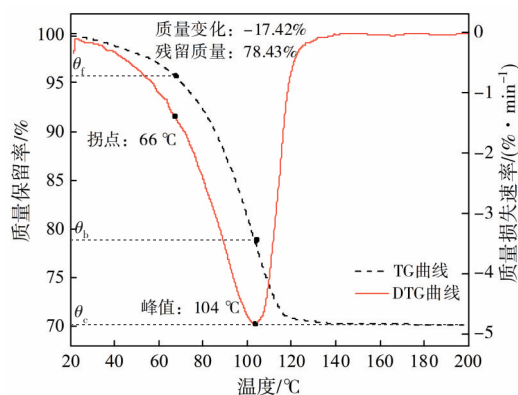
试验序号	荷载作用次数/次	加载波形	频率/Hz	加载作用时间/s	压实度/%	含水率/%	围压/kPa	偏应力/kPa
A-1	10 000	半正弦 波形	1.0	0.1	90.0	45.0	12	30
A-2								45
A-3								70
A-4								100
B-1							28	30
B-2								45
B-3								70
B-4								100
C-1							42	30
C-2								45
C-3								70
C-4								100

3 试验结果及分析

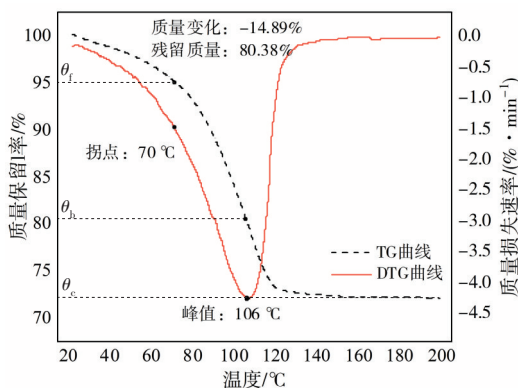
3.1 热重分析法测试结果及分析

图3为用不同浓度的NaCl溶液处理的试样的热重分析图。图中 θ_i 为在自由水完全脱去时,对应温度下的质量保留率; θ_b 为在弱吸附结合水完全脱去时,对应温度下的质量保留率; θ_c 为在强结合水完全脱去时,对应温度下的质量保留率。由图3可以看出,导出数据热重(thermogravimetry, TG)曲线没有明显的拐点。本文通过Proteus Analysis软件求取了TG的一阶导数并获得热重微分(derivative thermogravimetry, DTG)曲线,分析各个试样DTG曲线的拐点和峰值并将其标记,同时将TG和DTG曲线进行一定的平滑处理,使图片更加美观。

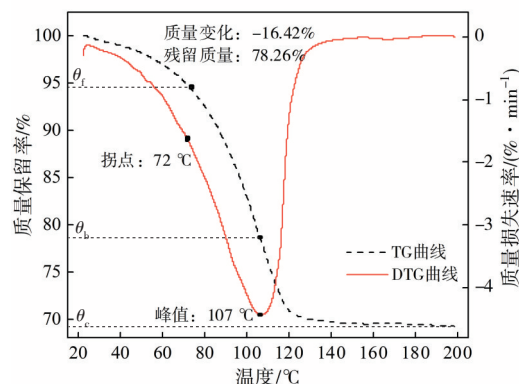
由图3可知,本文试验土样的自由水脱附完成的温度为65~85℃,吸附结合水完全脱附温度为100~115℃。随着处理试样的NaCl溶液浓度的提高,试验土样吸附结合水开始脱附的温度呈现一定的上升趋势。这是因为溶液中的阳离子与土颗



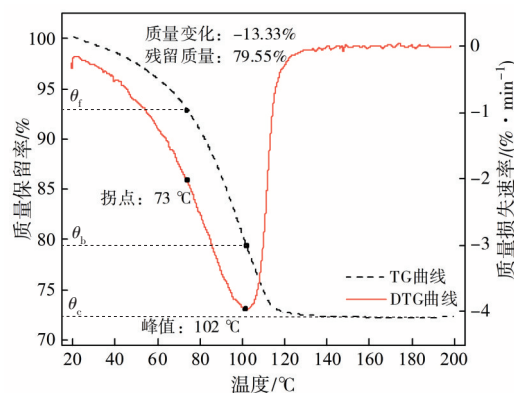
(a) 去离子水处理



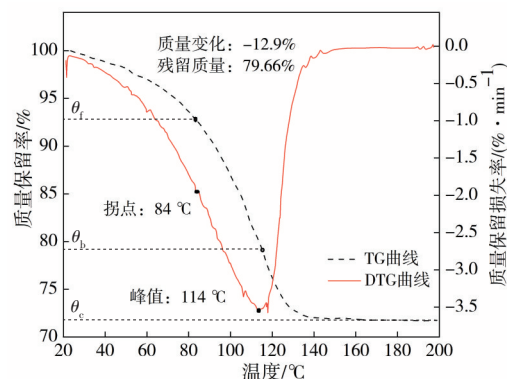
(b) 0.1 mol/L NaCl溶液处理



(c) 0.5 mol/L NaCl溶液处理



(d) 1.0 mol/L NaCl溶液处理



(e) 2.0 mol/L NaCl溶液处理

图3 热重分析图

Fig. 3 Thermogravimetric analysis

粒表面外层负电荷发生相互作用,导致表面吸附结合水的引力作用减弱,结合能降低,从而使部分结合水更易脱附。随着NaCl溶液浓度的进一步增加,土颗粒表面容易脱附的结合水减少,这在DTG曲线上表现为吸附结合水和自由水开始脱附的温度逐渐升高。

本研究首先通过软件找出DTG曲线的拐点和峰值,根据对应温度找到TG曲线上对应的点,再通过软件计算获得具体的质量损失、试验过后的

残余质量及试验结束后土样的质量。

根据图3,对试验土样的弱结合水质量分数进行计算,如式(1)所示:

$$w_g = \frac{M_i(\theta_f - \theta_b)}{M_0} \quad (1)$$

对试验土样的强结合水质量分数进行计算,如式(2)所示:

$$w_g' = \frac{M_i(\theta_b - \theta_c)}{M_0} \quad (2)$$

式(1)~(2)中: w_g 为土体的弱结合水质量分数; w_g' 为土体的强结合水质量分数, w_g 、 w_g' 均以干土的质量计; M_i 为试验土样初始质量; M_0 为升温结束后试样的残余质量。

由式(1)、式(2)分别计算土样的吸附结合水和强结合水的质量分数,计算结果如图4所示。由图4可知,试验土样的吸附结合水含量随着NaCl溶液浓度的升高而降低,这是由于土颗粒表面吸附的负电荷组成了一层有厚度的结合水膜,而NaCl溶液中的阳离子会与土颗粒表面的负电荷发生中和反应,从而使得吸附结合水的含量降低。然而,当NaCl溶液的浓度从0 mol/L升至2.0 mol/L时,土样的强结合水质量分数并未明显降低,仅降低了2.8个百分点。由此可推断,NaCl溶液中的阳离子不会中和具有强吸附能力的强结合水层,进而不会改变强结合水的含量。

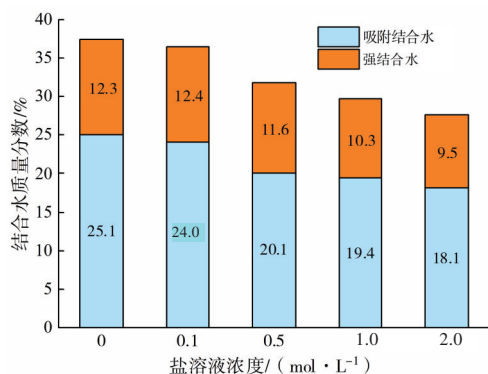


图4 不同浓度NaCl溶液处理下结合水的质量分数

Fig. 4 Mass fraction of bound water under treatment with NaCl solutions at different concentrations

3.2 静荷载作用下吸附结合水对高液限土变形特性的影响

根据试验数据,本文在控制试样初始孔隙比相同的情况下,绘制了不同初始吸附结合水质量分数的试样的固结曲线(图5)。图5中 p 为固结压力。

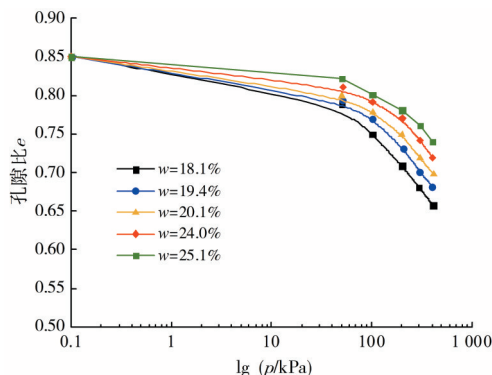


图5 不同吸附结合水质量分数下饱和土体固结曲线

Fig. 5 Consolidation curve of saturated soils with different mass fractions of absorbed bound water

由图5可以看出,随着上覆荷载的逐级递增,试验土样孔隙比 e 逐渐减小,土体也越密实,并且初始吸附结合水含量较小的土样更易被压缩,最终孔隙比也较小。由于在理论条件下,初始孔隙比相同的试样的最终压缩量应相同,因此这更进一步证明了吸附结合水具有类固相的性质,从而会影响土体的压缩性能。

本文对试样饱和固结后的含水率进行测定,不同初始结合水含量的土样在试验前后的含水率见表3。

表3 试验前后试样含水率

Table 3 Water content of samples before and after test

土样初始结合水质量分数/%	试验前含水率/%	试验后含水率/%	试验前后含水率降低百分点
25.1	49.3	45.2	4.1
24.0	49.3	43.7	5.6
20.1	49.3	42.5	6.8
19.4	49.3	41.7	7.6
18.1	49.3	41.0	8.3

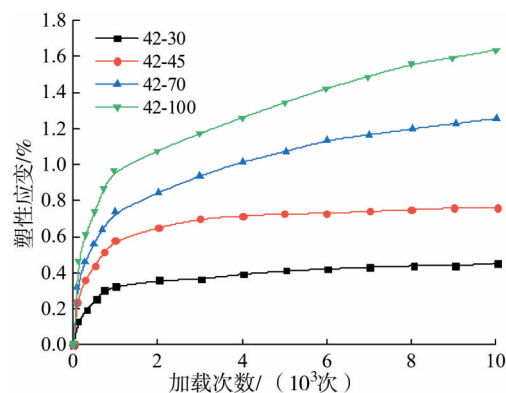
由表3可知,试验结束后试样的含水率均有降低,且含水率的下降幅度随初始吸附结合水含量的降低而增大,试验前后土样含水率最大降低8.3个百分点。在试样初始含水率和孔隙比相同且最终饱和含水率一致的情况下,受上覆荷载作用,一定量的自由水被排出,导致试样含水率降低。这是因为试样的初始吸附结合水含量越多,结合水膜则越厚,自由水含量越少,因此排出的自由水就越少,最终的压缩变形量越低,含水率降低值随之减小。此外,由于试验结束后试样的含水率大于弱结合水含量,因此可以认为在静力作用

下,试样压缩变形排出的均为自由水,吸附结合水不会被排出。

3.3 动荷载作用下吸附结合水对高液限土变形特性的影响

本文根据表2列举的试验方案开展了永久变形试验,试样在不同工况下的永久变形如图6所示,图中12-100表示围压为12 kPa、偏应力为100 kPa工况下的试样,其他以此类推。由图6可以看出,在加载过程中,塑性应变与加载次数成正相关,当加载2 000次时,试样的塑性应变已接近该试验加载全过程中最大塑性应变的80%。基于图形美观和数据合理性的双重考虑,本研究在加载的前1 000次中均以奇整百数作为取点,在1 000次后均以整千数作为取点。

由图6还可以看出,在相同围压下,试样在循环荷载作用下的塑性应变随着偏应力的增加而增加,100 kPa偏应力下的塑性应变约为30 kPa下的3~4倍。在围压较低的条件,当偏应力从30 kPa增加到45 kPa时,试样的塑性应变增加约一倍。结合图6(a)~6(c)可以发现,在相同偏应力作用下,试样最终的塑性应变随着围压的增加而减



(c) 围压为42 kPa时不同偏应力下的永久变形

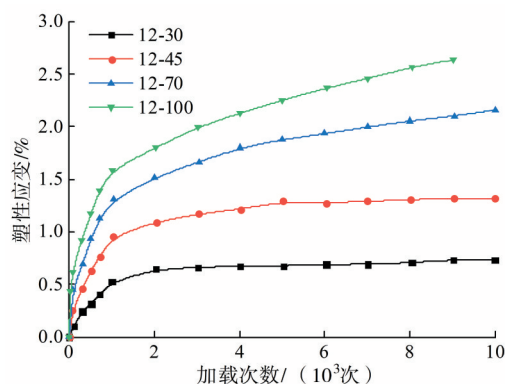
图6 高液限土在不同工况下的永久变形

Fig. 6 Permanent deformation of high liquid limit soils under different working conditions

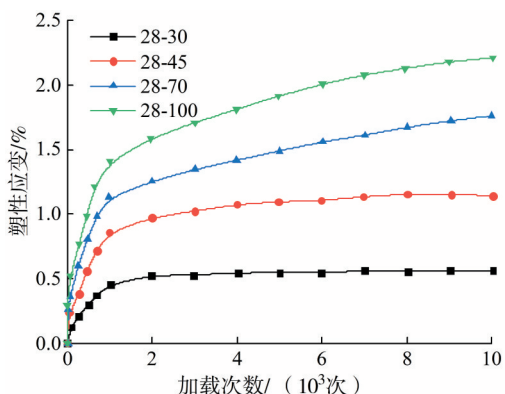
小,但是围压对试样的塑性应变的影响程度比偏应力的影响小。

WERKMEISTER等^[18]将荷载作用次数5 000次与3 000次的永久变形差值作为判定土颗粒发生塑性变形的三个状态,如图7所示。结合图6可以看出:当偏应力为100和70 kPa时,试样变形为塑性蠕变;当偏应力为30 kPa时,试样变形为塑性安定。经调研可知,下路堤顶面受到压应力作用,且随着深度的增加压应力逐渐消散并趋于稳定,其所受到的最大偏应力一般小于30 kPa,而高含水率、低压实度的试样在偏应力为30 kPa且围压较低的情况下,其变形仍为塑性安定。这表明,若路基填料在长期车辆循环动荷载作用下能够保持道路结构的稳定且不会产生明显变形,则这种材料可考虑作为下路堤填料。

为了研究吸附结合水对高液限土永久变形特



(a) 围压为12 kPa时不同偏应力下的永久变形



(b) 围压为28 kPa时不同偏应力下的永久变形

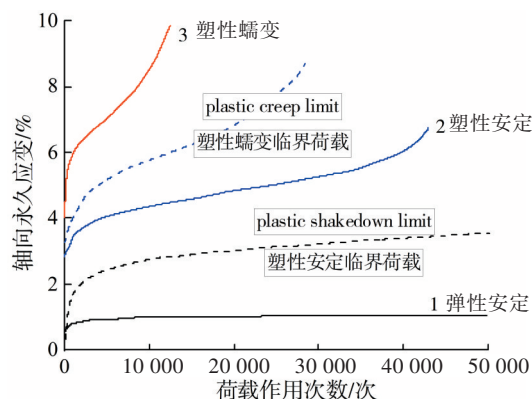


图7 在循环荷载下试样典型的动力行为^[18]

Fig. 7 Typical dynamic behavior of samples under cyclic loads^[18]

性的影响,本研究对不同初始吸附结合水质量分数的试样进行动三轴试验。为使塑性变形较为明显,试验设定偏应力为45 kPa。张军辉等^[19]认为我国建成公路在运营期间,路基土所受到的围压大约为28 kPa,故本试验设定围压为28 kPa。此外,加载频率为1.0 Hz,作用时间为0.1 s,荷载作用次数为10 000次。吸附结合水质量分数对高液限土永久变形的影响如图8所示。

从图8可以看出,随着试件初始吸附结合水含量的减少,试样的塑性应变逐渐增大。这是因为在初始含水率相同的前提下,试样中固相性质的吸附结合水含量越小,则自由水含量越多,在动荷载作用下自由水更易被排出,试样产生变形。因此在动荷载作用下,吸附结合水含量较少的试样更易产生较大的塑性变形,从而更易达到失稳状态。

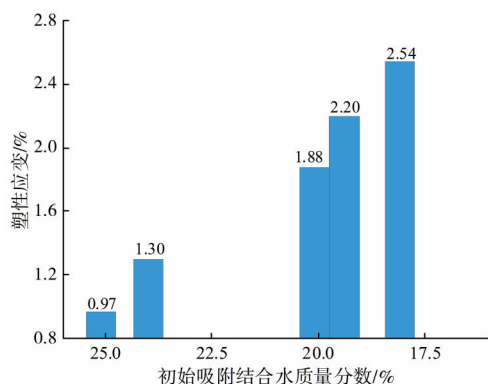


图8 吸附结合水质量分数对高液限土永久变形的影响

Fig. 8 Influence of mass fraction of adsorbed bound water on permanent deformation of high liquid limit soils

4 动静荷载对高液限土吸附结合水的影响及分析

本文通过试验已证明,在动静荷载作用下吸附结合水会影响高液限土的变形。此外,有学者提出荷载作用也会对土中结合水产生影响^[8]。本文为论证该观点并揭示其规律,开展了非饱和和固结试验和动三轴试验。在这两个试验中,试样含水率及压实度控制标准均一致,其中非饱和和固结试验为100 kPa单级加载,而动三轴试验将偏应力设定为100和70 kPa两种,围压为28 kPa,加载频率为1.0 Hz,作用时间为0.1 s,分别记录两个试验结束后试样的塑性应变,并通过热重分析法测定

试验前后试样的吸附结合水质量分数。试验结果见表4。

表4 动静荷载作用前后试样吸附结合水质量分数

Table 4 Mass fraction of adsorbed bound water of samples before and after static and dynamic loads

试验名称	偏应力/ kPa	最终塑性 应变/%	吸附结合水质量分数/%	
			试验前	试验后
非饱和 固结试验	100	1.38	25.1	24.9
动三轴试验	70	1.47		22.3
	100	2.06		18.4

由表4可知,在相同或更小的荷载作用下,试样在动荷载作用下产生的最终塑性应变比在静荷载作用下的大。从试验前后吸附结合水含量变化的角度来对比动静荷载作用下试样最终塑性变形,具体如下:在静荷载作用下,试验后试样吸附结合水的质量分数降幅为0.8%,基本可忽略不计;而在动荷载作用下,当偏应力分别为70、100 kPa时,试验后试样吸附结合水质量分数的降幅分别为11.2%和26.7%。在静荷载作用下,试样变形主要由自由水排出和孔隙压缩两部分组成,吸附结合水含量基本不变。然而,在循环动荷载作用下,试样中具有类固相性质的吸附结合水会向更容易流动的自由水转化,此时试样变形由自由水排出、孔隙压缩和吸附结合水转化三部分组成。因此,相对于静荷载作用,在相同动荷载作用下试样会产生更大的塑性变形。

5 结论

1) 采用热重分析法测定吸附结合水含量。测定结果显示,随着处理土样的NaCl溶液浓度的增加,吸附结合水含量降低,但强结合水含量基本不变。此外,高液限土的吸附结合水开始脱附的温度也稍有提高。

2) 通过对不同初始吸附结合水含量的试样开展固结试验发现,在固结压缩过程中,吸附结合水具有类固体相的特性,随着吸附结合水含量的减少,试样更易被压缩,且压缩后试样的孔隙比也越小。

3) 通过对高含水率、低压实度试样开展永久变形试验发现,在下路堤顶面承受最不利工况条

件下,在试验结束后,试样仍表现为塑性安定状态。这表明此类填料在特殊条件下作为下路堤填料是可靠的。

4) 通过对比静荷载和动荷载作用后试样的塑性应变发现,相较于静荷载,相同大小或更小的动荷载作用于试样时,产生的塑性变形更大。通过测定试验前后试样的吸附结合水含量变化发现,在常规上覆静荷载作用下,土中吸附结合水不会被排出,而在动荷载作用下,吸附结合水会发生相变,即向自由水转化,导致吸附结合水含量降低,试样的塑性变形较大。

[参考文献]

- [1] WANG J Z, WU L J, FENG R L. An experimental case study of a high-liquid-limit lateritic soil with its application in road construction[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017, 18(6): 1423-1433. DOI: 10.1080/14680629.2016.1211031.
- [2] LU Z, FANG R, ZHAN Y X, et al. Study on the dynamic deformation of road high liquid limit subgrade soil[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019(1): 4084983. DOI: 10.1155/2019/4084983.
- [3] ZHANG S Q, PEI H F. Determining the bound water content of montmorillonite from molecular simulations[J]. Engineering Geology, 2021, 294: 106353. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106353.
- [4] 李硕,王常明,吴谦,等.上海淤泥质黏土固结蠕变过程中结合水与微结构的变化[J].岩土力学,2017,38(10): 2809-2816. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.10.005. LI Shuo, WANG Changming, WU Qian, et al. Variations of bound water and microstructure in consolidation-creep process of Shanghai mucky clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 2809-2816. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.10.005.
- [5] 邵玉娴,施斌,刘春,等.黏性土水理性质温度效应研究[J].岩土工程学报,2011,33(10): 1576-1582. SHAO Yuxian, SHI Bin, LIU Chun, et al. Temperature effect on hydro-physical properties of clayey soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1576-1582.
- [6] ZHANG C, LU N. What is the range of soil water density? Critical reviews with a unified model[J]. Reviews of Geophysics, 2018, 56(3): 532-562. DOI: 10.1029/2018rg000597.
- [7] ZHU W, ZHANG C L, CHIU A C F. Soil-water transfer mechanism for solidified dredged materials[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(5): 588-598. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:5(588).
- [8] LI S, WANG C M, ZHANG X W, et al. Classification and characterization of bound water in marine mucky silty clay[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(5): 2509-2519. DOI: 10.1007/s11368-019-02242-5.
- [9] BHARAT T V, SRIDHARAN A. Prediction of compressibility data for highly plastic clays using diffuse double-layer theory[J]. Clays and Clay Minerals, 2015, 63(1): 30-42. DOI: 10.1346/CCMN.2015.0630103.
- [10] 刘勇健,符纳,林辉.冲击荷载作用下海积软土的动力释水规律研究[J].岩土力学,2014,35(增刊1): 71-77. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.s1.051. LIU Yongjian, FU Na, LIN Hui. Law study of dynamic discharge water of marine soft clay under impact loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Sup.1): 71-77. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.s1.051.
- [11] 刘勇健,陈浩然,彭建文,等.冲击荷载下软土的动力响应及结合水变化试验研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(2): 322-329. LIU Yongjian, CHEN Haoran, PENG Jianwen, et al. Experiment study on dynamic response and variation of bound water of soft clay under impact loading[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(2): 322-329.
- [12] 郑晴晴.间歇性循环荷载下杭州淤泥质软黏土宏观动力特性研究[D].杭州:浙江大学,2019. ZHENG Qingqing. Research on dynamic characteristics of Hangzhou soft clay under intermittent cyclic loading on macro and micro scales[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [13] 于海浩,孙德安,韦昌富,等.氯化钠溶液饱和不同初始含水率膨润土的膨胀特性[J].岩土工程学报,2019,41(3): 595-600. DOI: 10.11779/CJGE201903024. YU Haihao, SUN De'an, WEI Changfu, et al. Swelling characteristics of bentonite with different initial water contents saturated by NaCl solution[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(3): 595-600. DOI: 10.11779/CJGE201903024.
- [14] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.04.007. 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. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.04.007.

- [15] 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. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2024.03.002.
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. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2024.03.002.
- [16] 李邦武, 吴梦丽, 刘闯, 等. 吸附结合水对高液限土固结特性的影响[J]. 公路与汽运, 2020(6): 69-72, 75. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2020.06.018.
LI Bangwu, WU Mengli, LIU Chuang, et al. Effect of adsorption of bound water on consolidation characteristics of high liquid limit soil[J]. Highways & Automotive Applications, 2020(6): 69-72, 75. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2020.06.018.
- [17] 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. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.01.003.
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]. Chinese Journal of highway, 2020, 33(1): 32-40, 50. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.01.003.
- [18] WERKMEISTER S, DAWSON A R, WELLNER F. Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2001, 1757(1): 75-81. DOI: 10.3141/1757-09.
- [19] 张军辉, 尹志勇, 郑健龙. 南方湿热地区路基红黏土 Shakedown 临界应力水平试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(4): 1288-1292.
ZHANG Junhui, YIN Zhiyong, ZHENG Jianlong. Research on critical stress level of Shakedown of red clay in southern hot and humid areas [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(4): 1288-1292.

(责任编辑:刘平;校对:毛娜)