

吸附结合水对高液限土强度和渗透特性的影响试验研究

符策源¹,周世杰²

(1.海南省交通工程建设局,海南 海口 570100;2.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:为揭示吸附结合水对高液限土强度和渗透特性的影响规律,通过不同浓度的氯化钠溶液控制湖南和海南高液限土试样的初始吸附结合水含量,采用热重分析法测定该含量,再分别开展直剪试验、无侧限抗压强度试验和渗透试验。试验结果表明:随着盐溶液物质的量浓度的增大,吸附结合水含量减小,强结合水含量基本不变;吸附结合水黏滞性大、活动性小,具有一定的类固相性质;随着吸附结合水含量的降低,试样的抗剪强度和抗压强度均减小;在渗流过程中,随着吸附结合水含量的降低,渗透系数先增大后减小,但最终渗透系数大于初始值。该研究成果可为高液限土用作路基填料提供参考。

关键词:道路工程;高液限土;吸附结合水;强度;渗透特性

中图分类号:U416

文献标志码:A

Experimental Study on Influence of Adsorbed Bound Water on Strength and Permeability Characteristics of High Liquid Limit Soil

FU Ceyuan¹, ZHOU Shijie²

(1.Hainan Transportation Engineering Construction Bureau, Haikou, Hainan 570100, China; 2.School of Traffic & Transport Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: In order to reveal the influence of adsorbed bound water on the strength and permeability characteristics of high liquid limit soil, the initial adsorbed bound water content of the high liquid limit soil specimens from Hunan and Hainan was controlled by different concentrations of sodium chloride solution, and thermogravimetric analysis method was used to determine the content. The direct shear test, unconfined compressive strength test, and permeability test were carried out. The results show that the adsorbed bound water content decreases with the increase in salt solution concentration, while the strong bound water content is basically unchanged. The adsorbed bound water has a high viscosity, low activity, and certain solid-like properties. With the decrease in the adsorbed bound water content, the shear strength and compressive strength of the specimens decrease. In the process of permeation, the permeability coefficient first increases and then decreases with the decrease in adsorbed bound water content, but the final permeability coefficient is greater than the initial value. The research results can provide a reference for the use of high liquid limit soil as subgrade filler.

Keywords: road engineering; high liquid limit soil; adsorbed bound water; strength; permeability characteristics

收稿日期:2023-06-20(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:符策源,男,大学本科,高级工程师.E-mail:26316948@qq.com

0 引言

高液限土是一种液限大于 50% 的土,在中国气候湿润的南方地区广泛分布。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]。随着中国公路建设迅猛发展,相关工程问题处置的不断尝试,人们发现可以直接利用高液限土填筑路基^[2-3],主要原因是高液限土中存在大量的吸附结合水。由于高液限土颗粒表面带负电荷形成双电层效应,在水中黏土颗粒会吸附大量结合水,其渗透结合水和毛细水因所受引力较小而密度不变^[4],进而对高液限土力学特性影响不大,但吸附结合水对高液限土的强度及渗透特性有明显影响^[5-7]。因此,研究高液限土中吸附结合水的强度及渗透特性,对中国南方地区的公路建设具有重要意义。

为更好地揭示吸附结合水对高液限土强度和渗透特性的影响规律,并指导相关工程应用,国内外学者做了大量的研究。Zhang 等^[8]通过热重分析法和容量瓶法对细粒土结合水含量进行测试,发现吸附结合水密度约为 1.3 g/cm^3 ;Morrow 等^[9]指出,黏土中不同矿物吸附结合水的能力不同,使土中结合水含量不同,从而影响土体的抗剪强度;张飞等^[10]、颜荣涛等^[11]通过直剪试验,研究不同含盐量下盐渍土和饱和黏土的强度特性,发现盐溶液的物质的量浓度对黏聚力有一定影响,但对内摩擦角影响不大,产生这一现象的原因是盐溶液产生的孔隙水化学作用不仅减小了双电层厚度,还会改变土体的孔隙状态和结构,从而改变土体强度;陈剑平等^[12]通过直剪试验研究含水率对分散土抗剪强度的影响,结果表明含水率的增加会使土体的剪切特性由脆性变形转为韧性变形;尹振华等^[13]通过离心机法和无侧限抗压强度试验,建立各组分水分和改良土强度间的关系,揭示水分转化的规律;Santana 等^[14]研究孔隙率对水泥改良土强度的影响规律,结果发现无侧限抗压强度随着孔隙率的降低而增加;陈维超等^[15]通过无侧限抗压强度试验,研究水泥改良砂土强度的变化规律,结果表明掺入水泥能有效增大改良土的强度,并提出了表征水泥改良土无侧限抗压强度变化的综合表征参数;李金峰^[16]通过无侧限抗

压强度试验对不同水盐含量的试样进行测试,研究不同水盐条件下试样的强度变化规律,结果发现试样含盐量为 1.5% 时无侧限抗压强度最大;党发宁等^[17]考虑结合水对黏土渗透特性的影响,对常用粗粒土的渗透系数经验公式进行了修正,得到更加适用于黏土的渗透系数经验公式;杨永亮等^[18]通过渗透试验,研究掺入偏高岭土对砂质水泥土渗透特性的影响规律,结果表明偏高岭土能增强水泥土的抗渗性能,且其掺入量为 3% 时抗渗效果最佳;陈永贵等^[19]通过渗透试验,研究不同 NaCl 溶液物质的量浓度对膨润土-红黏土混合土渗透系数的影响规律,结果表明膨润土掺量的增加和 NaCl 溶液物质的量浓度的提高均能降低混合土的渗透系数。

基于以上分析,本文以湖南和海南高液限土为研究对象,通过 X 射线衍射(XRD)试验和扫描电镜(SEM)试验获得高液限土的矿物组成和微观形态;采用不同物质的量浓度的 NaCl 溶液控制试样初始结合水含量,通过热重分析法测得结合水含量;并对高液限土进行直剪试验、无侧限抗压强度试验以及渗透试验,进一步揭示吸附结合水对高液限土强度和渗透特性的影响规律。

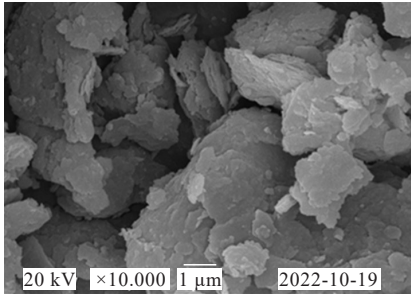
1 材料

试验用土取自湖南衡(阳)永(州)高速公路和海南 G360 国道,参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)对其开展基本物理特性试验、XRD 试验,土的基本物理特性及矿物成分如表 1 所示。由表 1 可知:两种高液限土的天然含水率均较大,细粒土的含量与液限均大于 50%,根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)中土的分类标准,湖南土样为高液限黏土,海南土样为高液限粉土。考虑到土体微观结构对物理性质的影响,开展扫描电镜试验,所用试样为重塑样,是由原状样烘干并过 0.5 mm 筛后加水制成。图 1 为高液限土的扫描电镜图片,从图中可看出湖南和海南两地的土样均含有大量叠片状黏土矿物,且海南高液限粉土的层片状矿物更多、孔隙更少、黏土矿物含量较高。结合两地土样的物理特性和矿物成分进行分析(表 1),可知高液限土中细粒土含量越高,土样的亲水性越强,天然含水率越高。

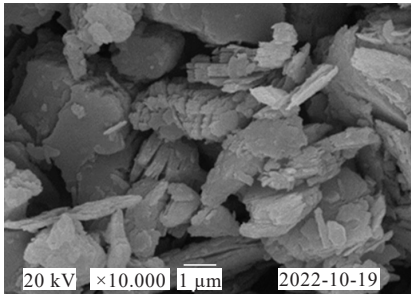
表1 土样基本物理性质指标及矿物成分含量

Table 1 Basic physical property indexes and mineral content of soil specimens

土样名称	颗粒质量分数/%		天然含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	相对密度	矿物质量分数/%			
	细粒土	粗粒土						石英	伊利石	高岭石	蒙脱石
湖南高液限黏土	77.2	22.8	34.5	64.2	32.4	31.8	2.70	42.8	32.9	23.1	1.2
海南高液限粉土	92.6	7.4	52.1	86.8	49.6	37.2	2.73	34.1	23.5	41.8	0.6



(a) 湖南高液限黏土



(b) 海南高液限粉土

图1 扫描电镜照片

Figure 1 SEM images

2 试验方法

2.1 热重分析法

采用STA 449 F5 Jupiter同步热分析仪进行试验,首先将高液限土碾磨成粉末状,通过0.075 mm的筛,再将其放入设定温度为105℃的烘箱中12 h,待其冷却至室温。为得到不同含量的吸附结合水,根据参考文献[20]中NaCl溶液物质的量浓度的选取,配制0.1 mol/L、0.5 mol/L、1.0 mol/L、2.0 mol/L共4种不同物质的量浓度的NaCl溶液。制样含水率一般取塑限值的0.853^[5],为了保证吸附结合水饱和,制样含水率取接近塑限值的0.900,并分别配制45%(海南高液限粉土)和30%(湖南高液限黏土)含水率土样,再放入收纳袋,然后将其放在湿度为100%、温度为25℃的环境中,每隔24 h用精度为0.1 μg的天平进行称量,直至试样质量不发生变化。将试样置于坩埚后再放入炉体中,设置升温速率为5℃/min,试验温度为25~200℃,最后启动程序开始试验。

2.2 直剪试验

本试验所用高液限土均为细粒土,根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020),采用饱和固结快剪试验。海南高液限粉土和湖南高液限黏土的制样含水率分别设定为45%和30%,压实度设定为90%。试验环刀样高20.0 mm,直径61.8 mm,体积60 mm³。在烘干土中加入盐溶液,使用模具静压,得到达到预设含水率的试样。按照试验规程,荷载依次为100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa,在荷载作用下进行24 h的饱和固结后,以0.8 mm/min的剪切速率进行剪切,并记录百分表读数。当剪切位移超过4.0 mm时结束。若水平百分表中的读数虽一直增大,但没有出现峰值的迹象,则在剪切位移为6 mm时停止试验。

2.3 无侧限抗压强度试验

本试验所用试样的含水率、压实度与直剪试验的一致,试验圆柱体试样直径39.1 mm,高80.0 mm;烘干土的含水率通过盐溶液配制成预设值,使用模具进行静压制样。轴向应变的施加速率为2%/min。当试样的竖向应变小于3.0%时,每产生0.5%的应变进行一次读数;当试样应变大于3.0%后,每产生1.0%的应变进行一次读数。试验结束的判定基准如下:当百分表读数出现峰值后,下降或者保持读数持续不变时,继续试验2 min后停止;若无峰值出现则试样竖直应变达到20%即可停止试验。

2.4 渗透试验

本试验所用高液限土均为细粒土,根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020),采用变水头试验。试验环刀样高40.0 mm,直径61.8 mm,制样方法及试样含水率、压实度与直剪试验一致。渗透试验主要步骤如下:试样进行真空饱和;仪器底部垫入透水石,并在周围孔隙处涂抹凡士林;将环刀样装入渗透容器中,上下垫透水石并盖好顶盖;连接渗透容器的进水管、变水头管及供水瓶中的引流管,关闭渗透仪进水口阀门,同时打开储存水箱阀门与变水头管控制阀;待变水头管内的水通过试样,渗透仪出水口开

始溢出水滴时,记录变水头管内水位高度 h_1 与开始时间 t_1 ,按预定时间间隔测量变水头管的高度与时间,记录溢出水的温度数据,试验结束时记录水头高度 h_2 与终止时间 t_2 。

记录不同吸附结合水含量试样的试验数据,并将其代入式(1),得到变水头渗透系数 k 。

$$k = 2.3 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \lg \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (1)$$

式中: a 为变水头试验管的内径面积; L 为试样的高度; A 为试样的过水面积。

3 试验结果与分析

3.1 吸附结合水含量

采用热重分析对试样的吸附结合水含量进行计算,结果如图2所示。

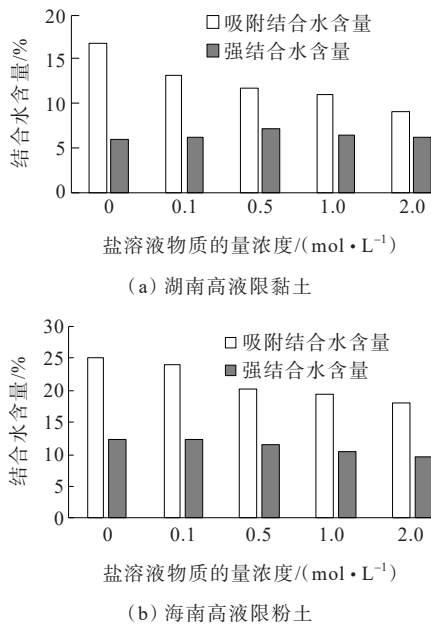


图2 不同盐溶液物质的量浓度处理下结合水的含量

Figure 2 Content of bound water treated with different concentrations of salt solution

从图2可以看出:试样的吸附结合水含量均随着盐溶液物质的量浓度的增大而降低,这是由于土颗粒表面吸附着一层阴离子,与盐溶液中的阳离子中和,使得结合水的含量降低,且随着物质的量浓度增大,强结合水含量并未明显降低,这是因为强结合水相对于吸附结合水受到的土颗粒吸附引力更强,进而形成更为稳定的吸附层。

3.2 抗剪强度及其指标

图3给出了不同垂直压力作用下土体的抗剪强

度;按照摩尔-库仑准则,计算得到不同吸附结合水含量下黏聚力和内摩擦角的变化规律,如图4所示。

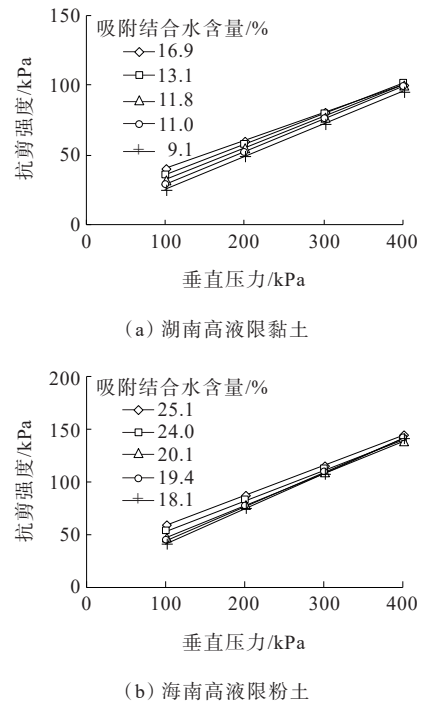


图3 不同吸附结合水含量下试样的抗剪强度

Figure 3 Shear strength of specimens with different adsorbed bound water content

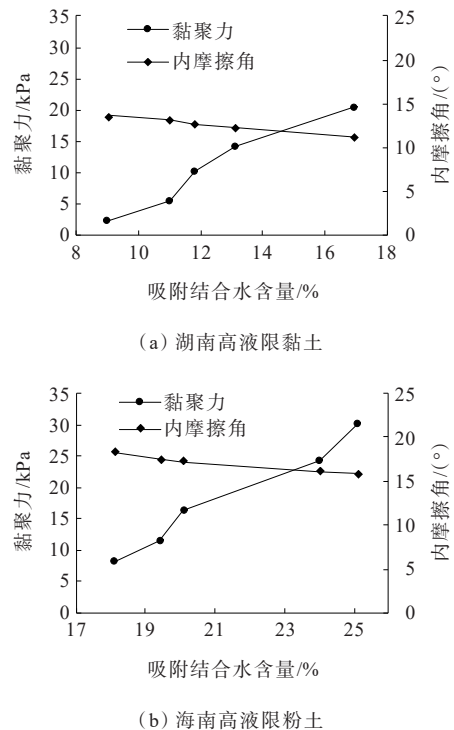


图4 试样吸附结合水含量与黏聚力、内摩擦角的关系

Figure 4 Relationship among adsorbed bound water content, cohesion, and internal friction angle of specimens

从图3可以看出:海南高液限粉土的抗剪强度总体上大于湖南高液限黏土;对于湖南高液限黏土,在吸附结合水含量由16.9%降低至9.1%的过程中,试样的抗剪强度随之下降;对于海南高液限粉土,在吸附结合水含量由25.1%降低至18.1%的过程中,试样的抗剪强度随之下降;随着垂直荷载逐渐降低,吸附结合水对试样抗剪强度的影响越明显。这是由于盐溶液在一定程度上能减小吸附结合水膜厚度,导致吸附结合水含量降低,进而降低试样的总体抗剪强度。

由图4可知:黏聚力随着吸附结合水含量的降低而降低,这是由于部分结合水受到双电层效应和范德华力的作用,紧紧吸附在土颗粒表面,因此具有强吸附力的结合水含量降低,进而使土体黏聚力降低。而内摩擦角随着吸附结合水含量的降低而平缓增大,这是由于溶盐液中的阳离子中和土颗粒表面的阴离子,从而使土颗粒间的斥力减小,引力增大,土颗粒之间更加紧密,从而改变土体的微观结构,形成絮凝结构,进而使内摩擦角稍微增大^[10,21]。

3.3 无侧限抗压强度

通过无侧限抗压强度试验,得到不同吸附结合水含量试样的无侧限抗压强度,如图5所示。

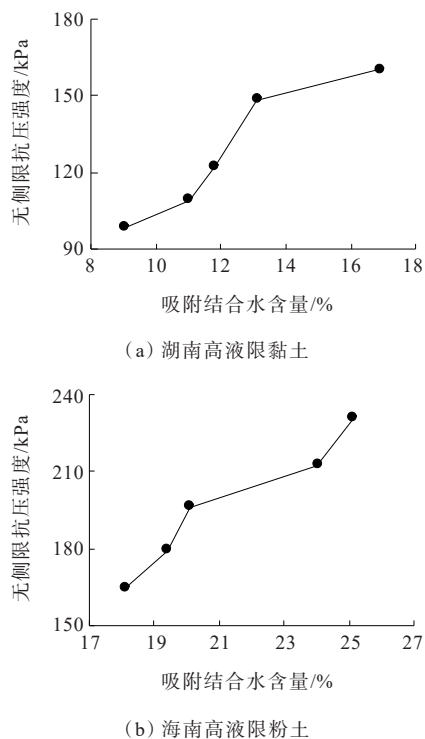


图5 不同吸附结合水含量下的抗压强度

Figure 5 Compressive strength at different adsorbed bound water content

从图5可以看出:对于湖南高液限黏土,在吸附结合水含量由16.9%降低至9.1%的过程中,试样的无侧限抗压强度随之下降;对于海南高液限粉土,在吸附结合水含量由25.1%降低至18.1%的过程中,试样的无侧限抗压强度随之下降。这是由于土体随着吸附结合水含量的降低,结合水膜变薄,土颗粒间引力增大,从而更易压缩,导致无侧限抗压强度降低。

3.4 渗透系数

根据式(1),得到不同初始吸附结合水含量试样的渗透系数变化曲线,如图6所示。

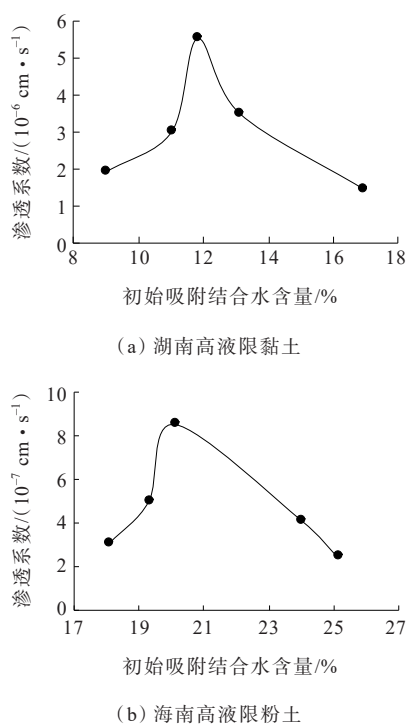


图6 不同初始吸附结合水含量下试样的渗透系数

Figure 6 Permeability coefficients of specimens at different initial adsorbed bound water content

从图6可以看出:湖南高液限黏土的渗透系数大于海南高液限粉土,对于湖南高液限黏土,在吸附结合水含量由16.9%降低至9.1%的过程中,渗透系数先增大后减小;对于海南高液限粉土,在吸附结合水含量由25.1%降低至18.1%的过程中,渗透系数亦是先增大后减小,但最终渗透系数也比初始值大。对于吸附结合水含量减小、渗透系数增大的阶段,由于吸附结合水比自由水更易受双电层作用的影响,从而吸附力更强,难流动、不易渗透,所形成的结合水膜占据了土体的渗透通道,阻碍了水的渗透,从而

随着结合水含量降低,渗透系数增大;在吸附结合水含量减小、渗透系数减小的阶段,由于盐溶液物质的量浓度的增大,离子交换作用使土颗粒间形成“边-面”、“边-边”或“面-面”的絮凝结构^[19]。这种絮凝结构使得土颗粒中叠片层状矿物变得更加复杂,从而造成试样渗透通道堵塞,进而导致渗透系数减小,但最终渗透系数也比初始值大。

4 结论

(1) 根据热重分析试验测定试样中吸附结合水含量的结果发现,随着试样中盐溶液物质的量浓度增大,土中吸附结合水含量降低,强结合水含量基本不变。

(2) 通过对不同初始吸附结合水含量下的试样开展直剪试验发现,随着吸附结合水含量的降低,抗剪强度降低、黏聚力降低、内摩擦角增大。

(3) 根据对不同初始吸附结合水含量下的试样开展无侧限抗压强度试验发现,随着吸附结合水含量的降低,结合水膜变薄,土颗粒间引力增大,从而更易压缩,导致无侧限强度降低。

(4) 通过对不同初始吸附结合水含量下的试样开展渗透试验发现,随着试样吸附结合水含量的降低,结合水膜占据了渗透通道,导致渗透系数增大;随着盐溶液物质的量浓度的增大使土颗粒表面形成絮凝结构,造成试样渗透通道堵塞,导致渗透系数减小,但最终渗透系数比初始值大。

参考文献:

References:

- [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.
- [2] 吴立坚, 郑甲佳, 邓捷. 高液限土路基的沉降变形规律[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊2): 351-355.
WU Lijian, ZHENG Jiajia, DENG Jie. Settlement law of high liquid limit soil embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(sup 2): 351-355.
- [3] 徐淑亮. 贵州高含水率高液限黏土压实控制方法研究[J]. 中外公路, 2023, 43(2): 31-35.
XU Shuliang. Research on compaction control method of high water content and high liquid limit clay in Guizhou province[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(2): 31-35.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [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] 张锐, 申炯宁, 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.
- [8] 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.
- [9] MORROW C A, MOORE D E, LOCKNER D A. The effect of mineral bond strength and adsorbed water on fault gouge frictional strength[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(6): 815-818.
- [10] 张飞, 胡小庆, 刘亚薇, 等. 含盐量对硫酸盐渍土抗剪强度影响试验研究[J]. 铁道建筑, 2014, 54(6): 162-164.
ZHANG Fei, HU Xiaoqing, LIU Yawei, et al. Experimental study on the influence of salt content on shear strength of sulfate-soaked soil[J]. Railway Engineering, 2014, 54(6): 162-164.
- [11] 颜荣涛, 梁维云, 杨德欢, 等. 氯化钠溶液对粘性土的强度影响[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(1): 88-93.
YAN Rongtao, LIANG Weiyun, YANG Dehuan, et al. Strength characteristics of clay saturated by pore sodium

- chloride solution with different chemical states[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2017, 37(1): 88-93.
- [12] 陈剑平, 刘经, 王清, 等. 含水率对分散性土抗剪强度特性影响的微观解释[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(3): 792-803.
- CHEN Jianping, LIU Jing, WANG Qing, et al. Microscopic interpretation of water content influence on shear strength of dispersive soil[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(3): 792-803.
- [13] 尹振华, 张建明, 张虎, 等. 水泥改良冻土过程水分转化规律及对强度的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(11): 136-144.
- YIN Zhenhua, ZHANG Jianming, ZHANG Hu, et al. Water transformation law of cement improved frozen soil and its effect on strength[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(11): 136-144.
- [14] SANTANA T, GONÇALVES J, PINHO F, et al. Effects of the ratio of porosity to volumetric cement content on the unconfined compressive strength of cement bound fine grained soils[J]. Infrastructures, 2021, 6(7): 96.
- [15] 陈维超, 杨伟军. 水泥改良砂土无侧限抗压强度试验研究[J]. 中外公路, 2019, 39(6): 188-196.
- CHEN Weichao, YANG Weijun. Experimental research on unconfined compressive strength of cement improved sand [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(6): 188-196.
- [16] 李金峰. 水盐影响非饱和土吸力与无侧限抗压强度的试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- LI Jinfeng. Experimental study on influence of water and salt on suction and unconfined compressive strength of unsaturated soil[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [17] 党发宁, 刘海伟, 王学武, 等. 基于有效孔隙比的黏性土渗透系数经验公式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1909-1917.
- DANG Faning, LIU Haiwei, WANG Xuewu, et al. Empirical formulas of permeability of clay based on effective pore ratio[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1909-1917.
- [18] 杨永亮, 王鹏云, 王林浩, 等. 偏高岭土对水泥砂土渗透性的影响研究[J]. 中外公路, 2018, 38(6): 232-234.
- YANG Yongliang, WANG Pengyun, WANG Linhao, et al. Influence of metakaolin on permeability of cement sand[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(6): 232-234.
- [19] 陈永贵, 雷宏楠, 贺勇, 等. 膨润土-红黏土混合土对NaCl溶液的渗透试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(4): 910-915.
- CHEN Yonggui, LEI Hongnan, HE Yong, et al. Experimental study of permeability of bentonite-laterite mixtures for salt solutions[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(4): 910-915.
- [20] 肖桂元, 朱杰茹, 徐光黎, 等. NaCl溶液引起红黏土界限含水率变化的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(9): 3314-3321.
- XIAO Guiyuan, ZHU Jieru, XU Guangli, et al. Experimental study on change of limit water content of red clay caused by NaCl solution[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(9): 3314-3321.
- [21] 姚传芹, 韦昌富, 马田田, 等. 孔隙溶液对膨胀土力学性质影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊2): 116-122.
- YAO Chuanqin, WEI Changfu, MA Tiantian, et al. Effects of pore solution on mechanical properties of expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(sup 2): 116-122.