

DOI: 10.11779/CJGE201903024

氯化钠溶液饱和不同初始含水率膨润土的膨胀特性

于海浩^{1, 2}, 孙德安^{*1}, 韦昌富², 颜荣涛²

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 2. 桂林理工大学广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 5401004)

摘要: 采用不同初始含水率控制土颗粒扩散双电层的形成程度, 进行了一系列氯化钠溶液饱和膨胀试验, 探究了具有不同扩散双电层厚度膨润土样在不同浓度氯化钠溶液中的膨胀特性, 并对不同初始含水率膨润土样进行核磁试验。核磁试验结果表明, 当初始含水率小于10%时, 最优 T_2 值不随着含水率增加而增加, 根据 T_2 值与水的赋存半径关系, 说明此时土样只有强结合水存在, 即土样强结合水率为10%。这与用其它方法算出的强结合水率基本一致, 说明核磁共振技术可测定出土样的强结合水率。膨胀试验结果表明, 当初始含水率小于10%时, 不同浓度氯化钠溶液饱和试样时, 其膨胀性基本不变; 而用氯化钠溶液初始含水率大于10%试样时, 随着其浓度的增加, 膨胀率明显降低。造成上述差异的原因是, 当只有强结合水存在时, 试样被氯化钠溶液饱和后, 土颗粒会吸附水化的阳离子, 增加土颗粒固定电荷, 导致膨胀力增加, 增加试样的膨胀性, 而随着溶液浓度的增加双电层厚度与膨胀力降低, 会降低试样的膨胀性。

关键词: 膨润土; 双电层; 初始含水率; 膨胀; 核磁共振

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)03-0595-06

作者简介: 于海浩(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事黏土化学力学耦合作用研究。E-mail: yuhaihao_ch@163.com。

Swelling characteristics of bentonite with different initial water contents saturated by NaCl solution

YU Hai-hao¹, SUN De-an¹, WEI Chang-fu², YAN Rong-tao²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The effects of NaCl solution on the swelling characteristics of bentonite with different initial water contents are investigated by performing a series of wetting tests and nuclear magnetic resonance tests. The test results indicate that when the initial content is less than 10%, the optimal T_2 do as not change with the increasing initial water content, and according to the relation between T_2 and the radius of water, the soil has only strongly bound water. That is to say, the strongly bound water content is about 10% for the bentonite, which is the similar to that by other methods, thus the nuclear magnetic resonance can determine the water content of strongly bound water. The wetting test results indicate that when the initial water is less than 10%, the NaCl solution has no effects on the swelling. When the initial water content is larger than 10%, the swelling strain decreases with the increasing NaCl solution concentration. The reasons for the above results are as follows: when the soil has only strongly bound water, it generates cationic hydration to increase in the fixed charge density of soil after immersed by the NaCl solution. It results in an increase in the swelling pressure, and thus results in the increasing swelling strain. The thickness of diffuse double layers and the swelling pressure decrease with the increasing NaCl solution concentration.

Key words: bentonite; diffuse double-layer; initial water content; swelling; nuclear magnetic resonance

0 引言

当前, 在医学、工业、农业以及国防等领域, 核技术得到了广泛应用, 高放射性核废料随之增加。核废料处置不当将造成重大灾难, 因此核废料的处理是一个严峻的问题。目前, 国际上通用的处理方法为深地质处置, 即采用多重工程屏障系统将高放废物埋在距地表深约500~1000 m的地质体中, 使核废物与人类的生存环境隔绝, 以免对人类的生存环境造成污染。

膨润土由于其特殊的工程性质, 被视为人工屏障系统中缓冲/回填材料的最佳选择, 用于阻止含有复杂化学成分的地下水向处置库内入渗。当膨润土为土-水-电解质系统中的岩土介质时, 由于膨润土具有强烈的水

基金项目: 国家自然科学基金项目(1167217, 11562007); 广西自然科学基金项目(2017GXNSFAA198215)

收稿日期: 2018-02-23

*通讯作者 (E-mail: sundean@shu.edu.cn)

敏特性, 对其所在系统中的孔隙溶液非常敏感, 当孔隙溶液的浓度、组分等改变时, 会引起膨润土力学行为发生变化, 因此对这方面研究非常必要。

国内外学者对膨润土在盐溶液中的膨胀特性已经进行了大量研究。Rao 等^[1-2]通过控制氯化钠溶液浓度, 研究了不同渗透吸力作用下膨润土的膨胀特性, 发现渗透吸力能增加颗粒间的有效应力, 用氯化钠溶液浸水饱和膨胀土时, 试样的垂直应力与产生的膨胀力的相对值决定了试样的变形是膨胀还是压缩。项国圣等^[3]探究了压实膨润土在盐溶液中的膨胀特性, 试验结果显示盐溶液对于膨润土的膨胀有抑制作用, Studds 等^[4]对膨润土和砂混合的试样进行试验, 发现了同样的结果, 随着盐溶液浓度增加, 试样膨胀率降低。孙德安等^[5]用不同浓度盐溶液饱和高庙子膨润土, 研究其膨胀特性, 发现在同一干密度下, 膨胀力对数与总溶解固体浓度呈线性关系, 随着总溶解固体浓度的增加, 土体的膨胀力降低。Zhu 等^[6]采用 CaCl_2 溶液对高庙子膨润土进行了盐化—淡化循环试验, 试验结果表明, 第一次循环过程中盐溶液对其体积改变影响最大。众多研究结果都表现盐溶液能够改变膨润土的膨胀特性, 而盐溶液能改变膨润土的膨胀特性的一个重要原因是黏土颗粒表面存在扩散双电层。

Helmholtz^[7]最早提出了胶体中带电表面附近离子分布的理论, 之后 Gouy^[8]和 Chapman^[9]对其进行了修正。由于黏土颗粒表面带有负电荷, 因此黏土颗粒表面会吸附阳离子和水分子, 颗粒表面的阳离子浓度高于距离表面较远位置的浓度, 为了保持浓度平衡, 颗粒表面的阳离子有挣脱颗粒吸附向远离颗粒表面方向运动的趋势, 黏土颗粒这一性质与带电胶体表面离子分布非常类似, 因此许多学者基于扩散双电层理论对黏土的体积改变进行了研究, 指出扩散双电层理论能够在土—水—电解质系统中应用^[10-14]。黏土颗粒表面形成扩散双电层的一个必要条件是黏土颗粒表面存在水, 因此对于含水率为 0 的干土, 颗粒表面是不存在扩散双电层的, 如果要想土颗粒表面均匀存在扩散双电层, 土体必须达到一定的含水率。

虽然, 许多学者进行了大量的试验, 研究了盐溶液对膨润土膨胀特性的影响, 但是研究主要集中在试样已经形成了均匀扩散双电层, 而对于未形成均匀扩散双电层的干土研究较少。在北方, 经常会出现相对湿度低于 30% 情况, 实际工程实践中会遇到比较干燥的土, 因而土颗粒表面不存在均匀扩散双电层。所以, 对于盐溶液饱和初始含水率很低的膨润土的膨胀特性有待进一步研究。

本文对 4 种初始含水率的商用膨润土进行了浸水膨胀试验, 用不同浓度的氯化钠溶液饱和试样使其膨

胀。以此来研究被不同程度扩散双电层覆盖土样在盐溶液中的膨胀特性。

1 试验概况

1.1 试验材料

试验用的土样为商用膨润土, 其物理性质指标如表 1 所示。控制膨胀的主要矿物蒙脱石的含量为 30.9%, 石英含量为 29.5%, 同时还含有云母、斜发沸石、方英石、方解石、长石等矿物。

表 1 土样的物理性质指标

Table 1 Physical properties of clay

指标	液限 土样 /%	塑限 /%	颗粒相 对密度	自由膨 胀率/%	比表面积 /($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)
膨润土	81.3	27.2	2.69	78	92

1.2 试验方法

(1) 核磁共振试验

核磁共振技术通过利用位于一个均匀磁场(主磁场)中具有自旋磁矩的质子群在干扰射频磁场的作用下发生偏转后失去平衡, 当射频干扰停止后质子群从非平衡状态恢复到平衡状态, 测定核磁信号自由衰减(FID)曲线, 而 FID 曲线的形状与质子横向弛豫时间(T_2)有关。理论研究表明孔隙水 T_2 值与孔隙半径成正比, 据此, 土样的 T_2 时间分布曲线能反映岩土介质中孔隙水分布特征^[15-16]。为了探究不同含水率土样孔隙水的赋存状态, 对不同含水率压实样进行了一系列核磁共振试验。

首先将风干的土样放在烘箱中 12 h 以上, 烘箱温度为 105°C, 土样烘干后按照目标含水率均匀加入蒸馏水调拌土样, 将调拌好的土样放置于密封袋中 48 h 进行闷料, 48 h 后测量土样的含水率, 然后用自制模具进行压样, 压实样的目标干密度为 1.60 g/cm³。对压实样进行核磁共振试验, 试样的含水率分别为 6.5%, 8.0%, 8.7%, 9.9%, 12.6%, 14.0%, 17.9%, 21.9% 和 27.0%。

(2) 膨胀试验

膨胀试验分为无压力膨胀试验和有压力膨胀试样, 试样为压实样, 制样方法与核磁共振试验用的相同, 目标干密度也为 1.60 g/cm³。试样直径为 61.8 mm, 高度为 10 mm, 试验前将试样置于高度为 20 mm 环刀中间位置, 使试样在膨胀过程中只有竖直方向膨胀并不超过环刀两端。无压力膨胀试验目标含水率为 0%、6%、13% 和 26%。关于目标含水率 0% 试样的制作方法, 土样烘干后立即将试样倒入环刀模具中, 用千斤顶进行压制成样。根据实测, 烘干土样拿出烘箱, 暴露在试验室环境中 1 h 后含水率仅增加 0.15%。无压

力膨胀试验在膨胀仪上完成, 将制好的环刀样装入膨胀仪中, 记录百分表的初始读数, 分别将膨胀仪容器中加入氯化钠溶液, 其浓度分别为 0, 0.1, 0.5 和 1.0 mol/L。试样开始膨胀后记录竖向膨胀过程。

有压力膨胀试验目标含水率为 6% 和 26%, 施加的垂直压力分别为 12.5, 25, 50, 100 kPa, 其试验在固结仪上完成, 将制好环刀试样装入固结盒中, 记录百分表读数, 逐渐施加垂直压力至目标压力, 稳定后向固结容器中加入不同浓度氯化钠溶液。

2 试验结果及分析

图 1 为核磁共振试验得到的不同初始含水率压实样的 FID 曲线, 该曲线的形状为单峰, 说明压实膨润土样的孔隙水只赋存于一种孔隙中, 即集聚体内孔隙, 随着含水率的增加, FID 曲线的面积逐渐增加, 并与含水率成正比关系。图 3 为 FID 曲线峰值点对应的 T_2 值 (称为最优 T_2 值) 与试样含水率关系, 当含水率小于 10% 时, 峰值点对应的 T_2 值保持不变, 当大于 10% 时, 峰值点对应的 T_2 值随含水率增加而增加。

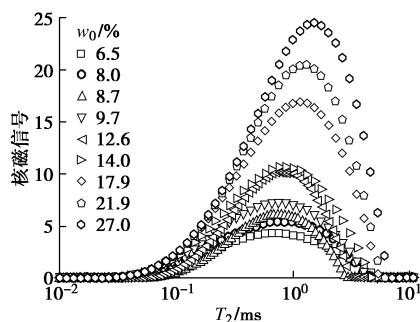


图 1 不同初始含水率压实样的 T_2 分布曲线

Fig. 1 Distribution curves of T_2 of specimens with different initial water contents

假设材料满足快速扩散条件^[15], 则土体中孔隙水的 T_2 值与其内部孔隙结构直接相关, 即

$$\frac{1}{T_2} \approx \rho_2 \frac{S}{V} \quad , \quad (1)$$

式中, ρ_2 为横向弛豫率, 与土体的物理化学性质有关^[17], S , V 分别为水分所处的孔隙表面积与体积大小。假设土体中孔隙形状为柱形, 则式 (1) 简化为

$$\frac{1}{T_2} \approx \rho_2 \frac{2}{R} \quad , \quad (2)$$

从式 (2) 可以看出, 孔隙水 T_2 值与孔隙半径 R 成正比。从图 2 的结果可知, 当含水率小于 10% 时, 含水率增加并不影响土试样中的孔隙水的最优 T_2 值, 结合式 (2), 当含水率小于 10% 时, 随着含水率的增加, 孔隙水的赋存半径并未改变, 即水被土颗粒约束的状

态没变, 故可认为此时孔隙水为强结合水。

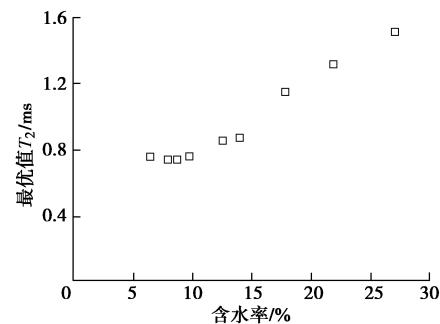


图 2 最优 T_2 值与初始含水率关系

Fig. 2 Relationship between optimal T_2 and initial water content

假设土体中水均匀分布在土颗粒表面, 则土颗粒表面水层厚度则可以用土的体积含水率 (cm^3/g) 除以土的比表面积 (cm^2/g) 计算^[19], 即

$$h_w = \frac{m_w}{S_a} \quad , \quad (3)$$

式中, h_w 为颗粒表面水层厚度, m_w 为体积含水率 (土体含有水的体积除以干土的质量), 由于水的密度近似等于 1.0 g/cm^3 , 因此体积含水率在数值上等于含水率, S_a 为土的比表面积。在双电层影响下的水膜称为吸着水, 因此双电层的厚度能够反映吸着水的厚度^[18], 吸着水由强结合水和弱结合水组成。

通过式 (3) 近似计算土颗粒表面形成均匀双电层时所需含水率。一般认为黏土的强结合水的水层厚度为 10 \AA ^[19], 根据表 1 所示的比表面积值 ($92 \text{ m}^2/\text{g}$), 可由式 (3) 得到此时的强结合水含水率为 9.2%, 与核磁共振试验得到的结果 (图 2) 相一致。从上述结果可知, 在本试验中, 初始含水率为 0% 和 6.7% 的试样颗粒表面并没有形成均匀的扩散双电层, 而初始含水率为 13.2% 和 27.1% 的试样颗粒表面形成了均匀的扩散双电层。

图 3 为用不同盐溶液浓度 (n) 溶液饱和不同初始含水率试样引起的膨胀率与时间关系, 图 3 (a) ~ (d) 的初始含水率分别为 0%, 6.7%, 13.2% 和 27.1% 试样的膨胀率与时间的关系曲线。从试验结果可以看出, 初始含水率为 0% 时, 用蒸馏水饱和试样的最终膨胀率与用氯化钠溶液饱和试样的最终膨胀率基本相同, 盐溶液对试样的膨胀只有微小的抑制作用。

从图 3 (d) 中的结果可以看出, 当土试样初始含水率为 27.1% 时, 得到的膨胀特性与初始含水率为 0% 时得到的结果有明显差别。当土试样初始含水率为 27.1%, 相比蒸馏水, 盐溶液明显抑制了土试样的膨胀, 浓度越小, 抑制的作用越弱。图 3 (b) 的结果与图 3 (a) 的结果相同, 盐溶液对试样的抑制作用很微弱, 而图 3 (c) 的结果与图 3 (d) 的结果相同, 盐

溶液明显的抑制了试样的膨胀。

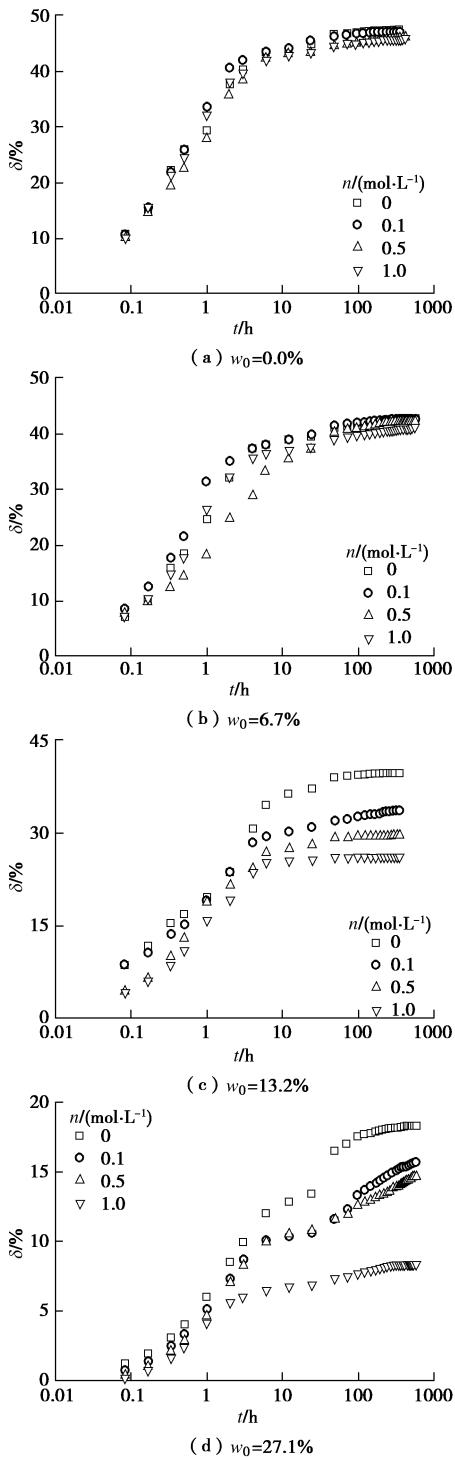


图3 不同初始含水率试样的膨胀应变与时间关系

Fig. 3 Relationship between swelling strain and time for soil specimens with different initial water contents

图4为有压力下的膨胀试验结果,从试验结果可以看出,用不同浓度氯化钠溶液饱和后的饱和孔隙比与垂直压力在半对数坐标下成线性关系。

在图4(a)中可以看出,随着氯化钠溶液浓度的增加,在相同垂直压力下试样的饱和孔隙比有所变小,但程度微弱;而图4(b)中相同垂直压力下试样的饱

和孔隙比则随着氯化钠溶液浓度增加明显变小。也即,在相同垂直压力下,氯化钠溶液对低含水率试样膨胀的影响很小,而对高含水率试样膨胀有明显抑制作用,无论是有压力膨胀和无压力膨胀表现出的结果都一致。

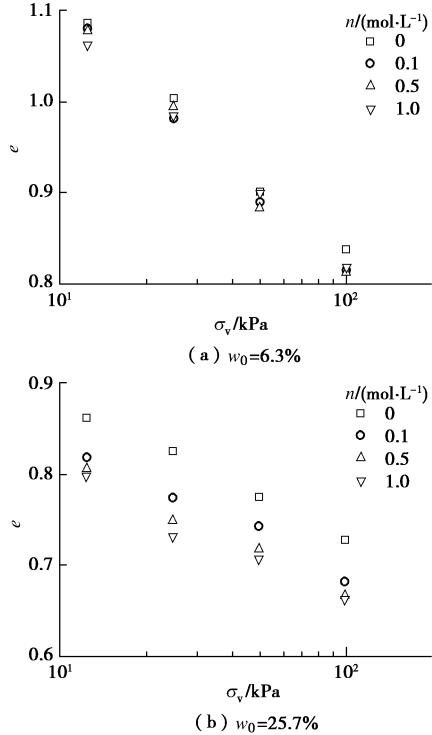


图4 盐溶液饱和后的试样孔隙比与垂直压力的关系

Fig. 4 Relationship between saturated void ratio and vertical pressure relation

土样与膨胀仪组成的系统中,土样孔隙中的溶液与膨胀盒中的溶液保持热力学平衡,但是由于颗粒表面扩散双电层的存在,使得颗粒表面的离子浓度与孔隙中的浓度不同,这导致了颗粒表面附近与孔隙溶液中产生了渗透压不相等,这个差值为Donnan渗透压^[20],Donnan渗透压为孔隙水压力的组成部分,Wei^[21]提出了考虑Donnan渗透压的有效应力公式:

$$\sigma' = \sigma - (p_w^l + \Pi_D - \rho_{\oplus}^{l_{H_2O}} \Omega^l), \quad (4)$$

其中, σ' 为有效应力, p_w^l 为传统意义上的孔隙水压力, Π_D 为Donnan渗透压, $\rho_{\oplus}^{l_{H_2O}}$ 为纯水的质量密度, Ω^l 为表面能。当孔隙溶液发生改变时,将导致 Π_D 发生变化。当土样饱和时, Π_D 受控于孔隙中溶液浓度 n_o 以及颗粒表面的固定电荷数 c_{fix} ,图5为 Π_D 的计算结果^[22]。在无压力膨胀试验中,没有施加任何外力,饱和后, $\sigma' = -(p_w^l + \Pi_D - \rho_{\oplus}^{l_{H_2O}} \Omega^l)$,因此试样的膨胀力大小即为 $p_w^l + \Pi_D - \rho_{\oplus}^{l_{H_2O}} \Omega^l$ 。

压实样的核磁试样结果显示,当初始含水率小于10%时,试样只有强结合水存在,此时颗粒表面没有足够的水形成均匀的双电层,颗粒表面存在很强的吸

附势, 因此, 初始含水率为 0% 和 6.7% 的试样, 在被溶液浸入后, 颗粒表面会吸附水化的阳离子^[23], 如图 6 所示, 形成双电层。水化阳离子被吸附后增加了土颗粒表面电荷数, 从图 4 可知, 随着表面电荷数的增加, Π_D 随之增加, 这会导致膨胀力增加。从图 5 同样可知, 随着孔隙溶液浓度增加, Π_D 降低, 导致膨胀力降低。另一方面, 随着浓度增加扩散双电层厚度减小, 图 7 为计算得到的双电层相对厚度随着 NaCl 溶液浓度变化规律, 从图中可以看出, 随着浓度增加, 双电层厚度降低, 这就导致试样的膨胀率降低。因此, 初始含水率 0% 和 6.7% 试样被盐溶液饱和后, 试样中存在两种相反的作用, 所以用蒸馏水饱和初始含水率 0% 试样的膨胀率与用盐溶液饱和试样的膨胀率差别不是很明显, 如图 3 (a) 中试验结果所示。在有压力膨胀试验过程中, 同样存在上述现象, 因此初始含水率 6.3% 试样在相同垂直压力下, 用不同浓度氯化钠溶液饱和后的饱和孔隙比减低很小。

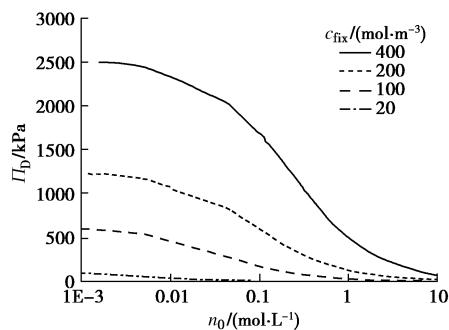


图 5 渗透压与溶液浓度变化规律

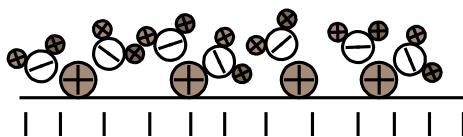
Fig. 5 Change of Π_D with n_0 

图 6 黏土表面吸附的水化阳离子

Fig. 6 Hydrated cation adsorbed on clay surface

对于初始含水率为 13.2% 和 27.1% 试样, 土颗粒表面能够均匀地存在吸着水, 土样中已经形成均匀的双电层。用盐溶液饱和试样时, 由于颗粒表面被水分子占据, 其电荷数不会改变。从图 5 可知, Π_D 随着浓度增加而降低, 而 $\rho_{\oplus}^{H_2O} \Omega'$ 不受盐溶液浓度影响, 因此试样的膨胀力随着盐溶液浓度增加而降低, 同时扩散双电层的厚度也随着浓度增加而减小, 上述两个结果减小土样的膨胀量, 因此, 用盐溶液饱和初始含水率 13.2% 和 27.1% 土样的膨胀率均小于用蒸馏水饱和得到的膨胀率, 且浓度越大, 膨胀率越小。同样, 在有压力膨胀试验中, 初始含水率 25.6% 试样的膨胀明

显受到了盐溶液的抑制。

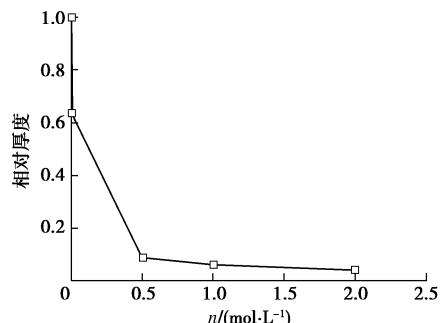


图 7 不同 NaCl 浓度试样扩散双电层的相对厚度

Fig. 7 Relative thickness of diffuse double layers for NaCl solution with different concentrations

3 结 论

本文对不同初始含水率的膨润土压实样进行了一系列不同浓度盐溶液饱和的膨胀试验和核磁共振试验, 得到了以下结论:

(1) 核磁共振试验结果表明, 试验用膨润土样的强结合水含水率约为 10%, 这一结果与用土质学中提出的土颗粒表面水层厚度的计算方法得到的结果基本一致, 说明核磁共振技术能有效确定土样的强结合水含水率。

(2) 当土样初始含水率几乎为零时, 土颗粒表面在制样时没有形成双电层, 盐溶液饱和土试样时, 颗粒表面吸附水化阳离子, 增加膨胀力, 同时随着盐溶液浓度的增加颗粒表面的双电层厚度和膨胀力逐渐降低, 以上两个过程对土样的膨胀性起着相反的作用, 因此盐溶液未明显抑制膨润土的膨胀性。

(3) 初始含水率大于 10% 后, 盐溶液明显抑制膨润土的膨胀性。当土试样初始含水率较大, 土颗粒表面在制样时已经形成双电层时, 盐溶液饱和时不会改变颗粒表面电荷数, 随着浓度增加扩散双电层厚度与膨胀力降低, 盐溶液相比蒸馏水表现出了抑制土样膨胀的作用。

(4) 在土颗粒表面双电层存在与否对膨胀试验结果有显著影响, 当土颗粒表面没有形成双电层时, 盐溶液对膨润土的膨胀性影响微弱; 而当土颗粒形成双电层后盐溶液会明显抑制膨润土膨胀。在实际工程中, 应确定膨润土颗粒表面均匀形成双电层的含水率, 以便在以后化学环境改变时能够判断土体的膨胀特性。

参考文献:

- [1] RAOS M, THYAGARAJ T. Swell-compression behaviour of compacted clays under chemical gradients[J]. Canadian

- Geotechnical Journal, 2007, **44**: 520 – 532.
- [2] RAO S M, THYAGARAJ T, THOMAS H R. Swelling of compacted clay under osmotic gradients[J]. *Géotechnique*, 2006, **55**(10): 707 – 713.
- [3] 项国圣, 徐永福, 姜昊. 压实膨润土在盐溶液中的膨胀变形特性[J]. *工程地质学报*, 2015, **23**(6): 1053 – 1058. (XIANG Guo-sheng, XU Yong-fu, JIANG Hao. Swelling behavior of compacted bentonite under osmotic suction[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, **23**(6): 1053 – 1058. (in Chinese))
- [4] STUDDS P G, STEWART D I, COUSENS T W. The effects of salt solutions on the properties of bentonite-sand mixtures[J]. *Clay Minerals*, 1998, **33**: 651 – 660.
- [5] 孙德安, 张龙. 盐溶液饱和高庙子膨润土膨胀特性及预测[J]. *岩土力学*, 2013, **34**(10): 2790 – 2795. (SUN De-an, ZHANG long. Swelling characteristics of Gaomiaozi bentonite saturated by salt solution and their prediction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(10): 2790 – 2795. (in Chinese))
- [6] ZHU C M, YE W M, CHEN Y G, et al. Impact of cyclically infiltration of CaCl_2 solution and de-ionized water on volume change behavior of compacted GMZ01 bentonite[J]. *Engineering Geology*, 2015, **184**: 104 – 110.
- [7] VON H. Studies of electric boundary layers[J]. *Annalen der Physik*, 1879, **7**: 337 – 382.
- [8] GOUY G. Electric charge on the surface of an electrolyte[J]. *Journal of Physics*, 1910, **4**(9): 441 – 501.
- [9] CHAPMAN D L. A contribution to the theory of electrocapillarity[J]. *Philosophical Magazine*, 1913, **25**: 475 – 481.
- [10] BOLT G H. Analysis of the validity of the Gouy-Chapman theory of the electric double layer[J]. *Journal of Colloidal Science*, 1955, **10**(2): 206 – 218.
- [11] MITCHELL J K. The application of colloidal theory to compressibility of clays[C]// Proceeding of a Seminar on Interparticle Forces in Clay-Water-Electrolyte Systems. Melbourne, 2016.
- [12] MERSI G, OLSEN R E. Consolidation characteristic of montmorillonite[J]. *Géotechnique*, 1971, **21**(4): 341 – 352.
- [13] SRIDHARAN A, RAO G V. Mechanisms controlling volume change of saturated clays and the role of effective stress concept[J]. *Géotechnique*, 1973, **23**(3): 359 – 382.
- [14] SRIDHARAN A, JAYADEVA M S. Double layer theory and compressibility of clays[J]. *Géotechnique*, 1982, **32**(2): 133 – 144.
- [15] JAEGER F, SHCHEGOLIKHINA A, AS H V, et al. Proton NMR relaxometry as a useful tool to evaluate swelling processes in peat soils[J]. *The Open Magnetic Resonance Journal*, 2010(3): 27 – 45.
- [16] JAEGER F, BOWE S, VANAS H, et al. Evaluation of 1H NMR relaxometry for the assessment of pore-size distribution in soil samples[J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, **60**(6): 1052 – 1064.
- [17] COATES G R, XIAO L L, PRAMMER M G. NMR logging principles and application[M]. Houston: Halliburton Energy Services Publication, 1999.
- [18] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (YIN Zong-ze. Soil theory[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese))
- [19] 高国瑞. 近代土质学[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (GAO Guo-rui. The modern soil science[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [20] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: Wiley, 2005.
- [21] WEI C F. A theoretical framework for modeling the chemo-mechanical behavior of unsaturated soils[J]. *Vadose Zone Journal*, 2014, **13**(9): 1 – 21.
- [22] MA T T, WEI C F, XIA X L, Chen P. Constitutive model of unsaturated soils considering the effect of intergranular physicochemical forces[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2016, **142**(11): 04016088.
- [23] KHORSHIDI M, LU N, KHORSHIDI A. Intrinsic relationship between matric potential and cation hydration[J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, **15**(11): 1 – 12.