

物理化学效应对膨胀土收缩特性的影响机制

马田田¹, 于海文^{1,3}, 韦昌富¹, 伊盼盼¹, 姚传芹²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 上海师范大学 建筑工程学院, 上海 200233;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 膨胀土由于其骨架带有较多的固定负电荷, 层间存在与负电荷平衡的可交换阳离子, 使得土体呈现较强的胀缩性。研究表明, 膨胀土的胀缩性会受到孔隙溶液化学成分的影响。选用广西地区的强膨胀土作为研究对象, 开展了不同浓度的 NaCl 溶液对膨胀土土-水特征曲线和收缩曲线影响的试验研究, 引入了粒间应力的概念对收缩曲线进行描述, 该粒间应力考虑了渗透、毛细和吸附的影响。结果表明: 孔隙盐溶液是通过渗透吸力对土-水特征曲线产生影响, 对基质吸力的影响较小。土样在脱湿过程中的收缩变形是由粒间应力来控制的, 类似于加压固结现象。大部分的收缩都发生在毛细阶段, 为弹塑性变形; 吸附阶段的收缩较少, 为弹性变形。通过识别压缩曲线上的弹塑性分界点可以得出毛细和吸附作用的分界点, 该分界点与独立测量的不同密实度下的持水曲线结果一致。结果表明, 粒间应力能够更好地描述膨胀土的化学-力学行为, 特别是在低含水率条件下。

关 键 词: 膨胀土; 土-水特征曲线; 收缩曲线; 孔隙盐溶液; 粒间应力

中图分类号: TU341

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2024) 03-0697-08

Mechanism of physicochemical effect on the shrinkage of expansive soil

MA Tian-tian¹, YU Hai-wen^{1,3}, WEI Chang-fu¹, YI Pan-pan¹, YAO Chuan-qin²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Civil Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 200233, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Due to the fixed negative charges in the skeleton of expansive soil, there are exchangeable cations between the layers that balance the negative charges in expansive soil. That makes the soil exhibit strong expansion and shrinkage properties. The research results show that the expansion and shrinkage of expansive soil will be affected by the chemical composition of the pore solution. In this paper, based on the strong expansive soil in Guangxi, a series of tests are carried out to investigate the soil-water retention curve (SWRC) and the soil shrinkage curve (SSC) for the soil saturated with solutions of different NaCl concentrations. To address this issue, the concept of intergranular stress is introduced, which takes into account the effects of osmosis, capillary, and adsorption. The results show that pore saline solution affects the SWRC through osmotic suction, with a lesser effect on matric suction. The shrinkage deformation of soil samples during the drying process is controlled by intergranular stress, similar to the phenomenon of pressure-induced consolidation. The majority of shrinkage occurs during the capillary stage, exhibiting elastoplastic deformation; less shrinkage occurs during the adsorption stage, which is characterized by elastic deformation. A cutoff point on the compression curve is identified to distinguish between the regimes of capillarity and adsorption, consistent with the independently measured SWRCs at different compactness. The intergranular stress is shown to better describe the chemo-mechanical behavior of expansive soil, particularly at low water content.

Keywords: expansive soil; soil water retention curve; soil shrinkage curve; pore saline solution; intergranular stress

1 引言

由于土体骨架与孔隙水之间存在着强烈的物理化学作用,膨胀土在湿润/干燥循环中会发生明显的膨胀或收缩现象^[1]。相比膨胀土的膨胀行为,其收缩变形受到的关注较少。为了表征土体的收缩行为,引入了收缩曲线(soil shrinkage curve,简称 SSC)来描述土体变形(通常用孔隙比表示)与含水率之间的关系^[2]。对于重塑土,从饱和状态开始脱湿到干燥端时,SSC 可以分为 3 个阶段:饱和时的比例收缩,土体进入不饱和状态时的残余收缩和零收缩段^[2]。随着测量技术的发展,已经可以较为准确地测量土体的收缩变形。最近的研究表明,一些土壤即使达到缩限后仍然会继续变形^[3-5]。该阶段的变形较小,在测量精度不高时通常被忽略^[6]。

试验研究结果表明,孔隙流体的化学成分对 SSC 的形状具有一定的影响^[7-9]。Zhang 等^[10]证明了孔隙盐溶液可以抑制膨胀土的收缩。Thyagaraj 等^[7]认为是孔隙盐溶液对收缩行为的影响机制主要是因为土壤结构发生了变化。然而,其他试验结果表明,盐含量对低塑性土或高岭土的 SSC 影响微乎其微^[8-9]。因此,孔隙盐溶液对收缩行为的影响与材料的性质密切相关。

基于观察到的收缩现象,通过分析背后的机制,提出了很多方法来定量确定盐溶液作用对土体收缩曲线的影响机制。一些研究认为,基质吸力是在无外加荷载作用下干燥过程中体积减小的主要原因^[11-12]。从 SSC 结合持水曲线(soil water retention curve,简称 SWRC)建立了孔隙比-吸力关系曲线^[13-14]。然而,基质吸力是一种能量概念,用于描述孔隙水与土体基质的亲和力,而不是一个应力变量,因此采用基质吸力来描述收缩变形是不合适的^[15]。Lu 等^[3]基于吸力应力的概念可更好地描述干燥过程中的收缩行为,该吸应力可以通过颗粒间接触传递。

如前所述,在达到缩限之后的吸湿-脱湿作用仍然会导致基质膨胀或收缩,这种现象无法完全用传统的有效应力概念解释。为了解决这个问题,研究人员着眼于将微观表面应力纳入连续介质框架中,以描述由吸附和解吸引起的多孔介质的弹性变形^[16-18]。然而,这些方法在土体中的应用难度较大,因为有些假设涉及到难以定量的微观结构问题。

最近,Wei^[19]提出了粒间应力的表达式,考虑了土体骨架与孔隙溶液之间微观的物理化学作用,能够统一地描述渗透、毛细和吸附效应。通过试验

证明,该粒间应力公式在描述与盐溶液有关的力学行为时是有效的,包括变形、强度、膨胀压力等方面^[20-22]。值得注意的是,与传统的有效应力相比,该粒间应力公式在模拟极低含水率在土体的化学-力学行为方面具有更好的效果^[19, 23]。

本文通过试验研究了孔隙流体化学作用对压实膨胀土收缩行为的影响。在无外部荷载作用下,测量了不同浓度 NaCl 溶液作用下膨胀土的土-水特征曲线和收缩/回弹曲线。其中采用数字图像技术测量体积变形,蒸汽平衡法控制吸力,最后采用粒间应力模拟试验结果。

2 材料和方法

2.1 膨胀土性质

膨胀土取自广西宁明县,物性参数如表 1 所示。其石英、伊利石、蒙脱石、长石含量分别为 20%、9%、46%、25%。测量到的平均自由膨胀率为 370%,为强膨胀土。采用 X 射线衍射分析确定了其矿物组成,黏土矿物主要以蒙脱石为主,使其具有强烈的膨胀性。利用乙二醇乙醚(EGME)法测量了总比表面积;由于 N₂ 分子无法穿透黏土矿物的层间空隙,因此利用 N₂ 吸附等温线来确定外比表面积。两种比表面积的比较表明,该膨胀土的内比表面积(晶体内)是导致其强烈胀缩性的重要因素。

表 1 宁明膨胀土的物性参数

Table 1 Physical indexes of Ningming expansive soil

阳离子交换量 /(meq · 100g ⁻¹)	总比表面积 /(m ² · g ⁻¹)	外比表面积 /(m ² · g ⁻¹)	相对 密度	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数
52	484	43	2.77	218	58	160

首先将风干土研磨并通过 0.5 mm 筛,采用设定浓度的盐溶液配置成初始含水率为 15%的样品。将配置好的样品放置在塑料袋中超过 48 h,保证水分均匀分布。采用静压制样法制备了直径为 61.8 mm、高为 20 mm 的环刀样品,干密度设置为 1.2 g/cm³。采用抽真空方法和设定浓度的盐溶液来饱和样品,首先抽真空浸水饱和 12 h,然后再浸泡 48 h,以确保完全饱和。SWRC 测量中 NaCl 浓度设置为 0.0、0.1、0.2、0.5 和 1.0 mol/L,SSC 测量中 NaCl 浓度设置为 0.0、0.5 和 1.0 mol/L,其中 0.0 mol/L 表示去离子水。

2.2 测量不同 NaCl 浓度下的 SWRC

采用蒸汽平衡法测量膨胀土的 SWRC,在密闭的保湿缸中采用选定的饱和盐溶液来控制相对湿度(relative humidity,简称 RH)^[8, 24-25],其中相对湿

度与总吸力之间的关系采用 Kelvin 方程来描述:

$$s_T = -\frac{RT}{\nu_w} \ln RH \quad (1)$$

式中: s_T 为总吸力 (kPa); T 为绝对温度 (K); R 为普适气体常数 (8.314 J/(mol · K)); ν_w 为水的比体积 (m³/kmol)。该方法可以施加 3 MPa 以上的高吸力, 表 2 给出了所选饱和盐溶液种类及其在 27 °C 下对应的 RH 和总吸力值^[24]。首先将两个相同的饱和土样放置在设定相对湿度的保湿缸内进行脱湿。当土样质量 3 d 内变化小于 0.01 g, 即认为在该吸力下达到了平衡^[26], 其中每级吸力平衡的时间大约为 2 个月。当土样达到平衡状态后, 测量土样含水率。然后将土样移动到下一个相对湿度较低的保湿缸内重复上述过程, 直到达到最低的相对湿度。然后土样开始吸湿, 试验在环境温度为 27±1 °C 的实验室中进行。另外, 当土样在每级吸力达到平衡后, 采用 WP4 来校正总吸力。在整个试验过程中, 只有 1.0 mol/L NaCl 溶液的土样在最低相对湿度下出现了少量 NaCl 沉淀, 其他土样均未出现 NaCl 沉淀。因此, 本文不考虑 NaCl 沉淀。

表 2 选定的饱和盐溶液种类和对应的相对湿度和吸力 (27 °C)

Table 2 Selected types of saturated saline solutions and corresponding relative humidity and suction at 27 °C

饱和盐溶液	RH/%	吸力/MPa	饱和盐溶液	RH/%	吸力/MPa
CuSO ₄ ·5H ₂ O	97.1	4.08	NaCl	75.2	39.50
K ₂ SO ₄	96.9	4.36	K ₂ CO ₃ ·2H ₂ O	43.2	116.36
KNO ₃	93.1	9.95	MgCl ₂ ·6H ₂ O	32.6	155.20
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	90.0	14.61	LiCl	11.3	302.38
KCl	84.0	24.08	LiBr	6.4	382.18
(NH ₄) ₂ SO ₄	80.7	29.65			

2.3 测量不同 NaCl 浓度下的收缩曲线

在测量 SSC 时, 土样体积变形的精确测量对于孔隙比的计算至关重要。因此, 试验采用数字图像技术测量体变, 该方法具有较高的精度^[27]。同时, 吸力也是通过蒸汽平衡法进行控制的。将完全饱和的土样小心地从环刀中推出, 放置在样品架上。为了减少土样与板之间的摩擦, 在样品架上涂抹一层凡士林来消除支架对土样的限制, 能够保证土样在干燥过程中自由收缩。在整个测试过程中, 使用数字天平实时测量土样质量的变化来获得含水率。数字相机固定在支架臂上, 与土样中心位置对齐, 获取整个测试期间的土样图像。因为土样横截面面积与图像的像素成正比, 因此使用 ImageJ 软件通过图像像素的变化计算出径向变形量。在校准试验中,

采用数字图像技术同时测量了土样在脱湿过程中的垂直变形和径向变形, 试验结果表明在整个脱湿过程中, 垂直应变和径向应变几乎相同。校准试验表明土样呈现各向同性收缩, 因此在随后的测试中仅监测径向应变来确定总体积应变。通过将测得的含水率与体积应变相结合, 可以确定样品的饱和度。

在干燥过程中, 相对湿度降低速度较为缓慢以防止因不均匀水分分布而产生的裂缝。当脱湿完成后, 通过增加相对湿度来进行吸湿过程。在整个干湿循环中, 没有观察到任何土样出现肉眼可见的裂缝。

3 结果与讨论

3.1 不同 NaCl 浓度下脱吸湿过程中的土-水特征曲线

图 1 为不同 NaCl 浓度下压实膨胀土的干湿循环过程中的 SWRC, 其中横坐标为质量含水率 w 。值得注意的是, 质量含水率是一个与骨架变形无关的量。从图中可以看出, 在相同的含水率下, 随着 NaCl 浓度的增加, 总吸力 s_T 增大。这是由于孔隙水浓度的增加引起的渗透压导致总吸力增加。在较高的含水率下, 渗透吸力的影响更为显著, 该影响随着含水率的降低而减小。随着含水率的进一步降低, 所有的 SWRC 都集中在一条曲线附近, 此时渗透吸力的贡献较小。假设总吸力包括基质吸力 s_M 和渗透吸力 s_o 两个部分^[28], 可以推导出下面的表达式:

$$s_M = s_T - s_o \quad (2)$$

假设 NaCl 溶液是理想溶液, 则渗透吸力表示为 $s_o = 2c_0RT$, 其中系数 2 代表 Na⁺ 和 Cl⁻ 对渗透压的综合贡献, c_0 为土样中平衡溶液的浓度^[29]。在干燥过程中, 孔隙水蒸发, 盐留在土壤中。随着含水率的降低, 盐浓度增加。根据饱和土样的初始盐浓度 $c_{0,int}$ 与当前 w , 计算出当前的浓度 $c_0 = (c_{0,int} \times w_0) / w$, 其中 w_0 为初始含水率。当浓度达到饱和溶解度时 (27 °C 时 NaCl 浓度约为 6.2 mol/L), NaCl 会沉淀, 此时采用饱和溶解度对应的 NaCl 浓度来确定渗透吸力。

利用式 (2), 得出不同 NaCl 浓度下土样的基质吸力与质量含水率 w 之间的关系, 如图 2 所示。从图中可以看出, 当采用基质吸力来表征持水曲线时, 除了在高含水率下盐溶液可能会改变孔隙结构而降低持水性之外, 所有的 SWRC 都集中在一条曲线附近。离子浓度的增加可以增强絮凝和聚结作用,

导致大孔数量增加。使得土样在含水率较高时,随着盐含量的增加,持水能力会降低。然而,随着基质吸力的增加,结构变化对持水特性的影响变得不那么显著。

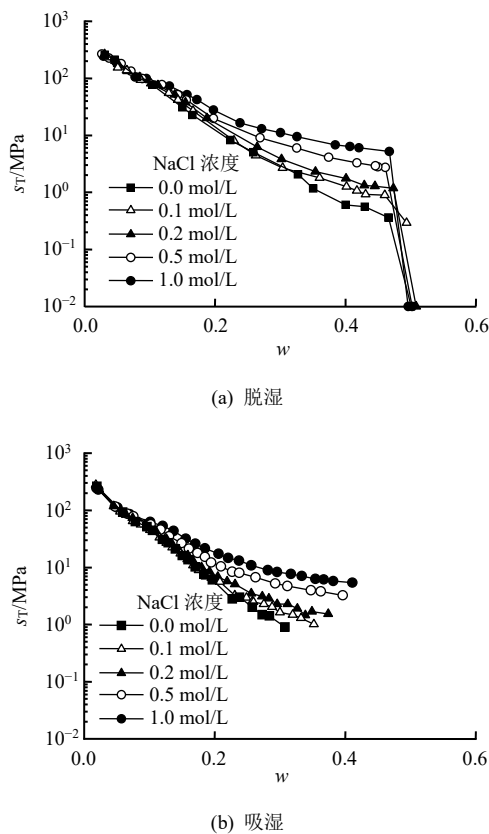


图1 不同 NaCl 浓度下的土-水特征曲线
Fig.1 SWRCs at different NaCl concentrations

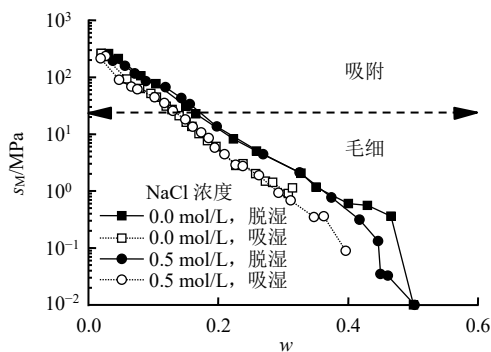


图2 基质吸力与含水率的关系
Fig.2 Relationship between matric suction and water content

在黏性土中,土体持水特性可以分为毛细作用和吸附作用,其中毛细作用在高含水率下占据主导地位,而吸附作用在低含水率下占据主导地位。在毛细区的 SWRC 受到压实条件的强烈影响,可以用杨-拉普拉斯方程描述。相反,吸附效应是由吸附力将水分子吸附到颗粒表面产生的,与压实作用无

关。Ma 等^[30]采用相同的膨胀土,通过测试不同压实条件下膨胀土的持水曲线,确定了该膨胀土区分毛细作用和吸附作用的基质吸力阈值,约为 24 MPa。将该值画在图 2 中,采用双箭头虚线所示。当基质吸力高于 24 MPa 时,吸附效应占主导地位;当基质吸力低于 24 MPa 时,毛细效应占据主导地位。

值得注意的是,在干湿循环中,SWRC 的吸附阶段也表现出了滞回现象。该滞回现象无法通过表征毛细段的“墨水瓶效应”来解释,在吸附区域,滞回现象可能与蒙脱石的可膨胀层间结构有关^[31]。然而,对于膨胀土来说,在干湿过程中的颗粒重排使得滞回现象更为复杂。

3.2 不同 NaCl 浓度下的干缩/湿胀曲线

图 3 为不同 NaCl 浓度下膨胀土的收缩/回弹曲线,即孔隙比 e 随着含水比 ϑ 的变化关系,其中含水比定义为孔隙水体积 V_w 除以固体体积 V_s 。在 SSC 中,对角 1:1 线表征孔隙体积等于孔隙水体积,即土体处于饱和状态。

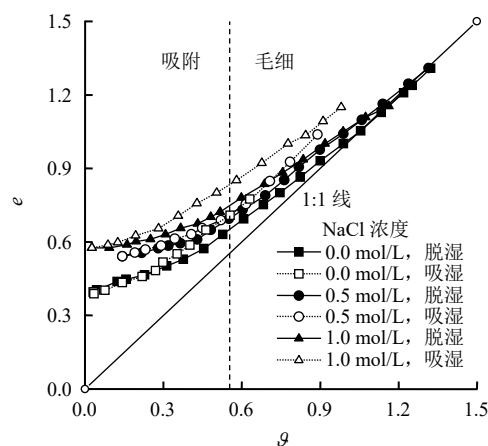


图3 不同 NaCl 浓度下脱、吸湿过程中的收缩/膨胀曲线
Fig.3 Shrinkage and swelling curves during a drying/wetting cycle of expansive soil at different NaCl concentrations

在脱湿开始时,膨胀土处于饱和状态并位于饱和线上。在早期脱湿阶段,土样仍然完全饱和,体积的减少相当于水的体积损失,这是比例收缩阶段。刚进一步脱湿时,空气进入聚集体孔隙,失去的水的体积小于土壤体积的减少,土体处于非饱和状态,此时为残余收缩阶段。收缩率逐渐降低,直到达到缩限。然而,图 3 表明,在达到缩限后,收缩变形仍然存在。传统上认为,在达到缩限后,为零收缩段,此时土体达到最密实的状态,当进一步脱湿时,土体体积保持不变^[32]。然而,最近的试验结果表明,即使对于粉砂土,当接近其干燥状态时,收缩变形仍然会继续发生^[3]。此外,在低相对湿度下对页岩

或其他多孔介质进行吸附-解吸试验也显示,即使在非常低的含水率下,弹性变形仍然会发生。尽管吸附诱导的变形对某些土体来说通常可以忽略不计,但对于膨胀土来说,该变形较大,如图3所示。

另外,孔隙盐溶液的浓度对SSC的形状有重要影响。图3显示,随着浓度的增加,SSC向上移动,表明具有更高浓度的土样在干燥过程中的体积变化较小。这意味着盐含量的增加降低了土样的收缩能力。从微观上看,随着盐浓度的增加,土样更加团聚化,使得土样刚度增大,收缩变形降低^[22]。此外,当NaCl浓度更高时,收缩曲线更快地脱离1:1饱和线,表明用盐溶液饱和的土样比无盐土样具有更低的进气值,这与SWRC的推断结果一致。

经过干燥过程之后,土样通过提高相对湿度来进行吸湿膨胀试验。值得注意的是,在此过程中观察到的体积应变是不可逆的,表明发生了塑性膨胀。当含水比 $\theta < 0.3$ 时,脱湿/吸湿循环期间的体积应变是可逆的,表明土样呈弹性行为。在这个阶段,水分子在干燥/湿润过程中被排放/吸收到黏土矿物的层间空隙中,导致弹性晶体收缩/膨胀。在晶体膨胀阶段,孔隙流体的盐度对膨胀变形影响较小,膨胀曲线几乎是平行的。随着水分含量的增加,扩散双层开始形成,此时膨胀依赖于孔隙水的化学性质。与含盐土样相比,无盐土样(0.0 mol/L 浓度)的膨胀变形由于扩散双层的快速发展更加强烈。采用前面得出的毛细和吸附的分界点来分析收缩曲线,如图3所示,大部分体积变形发生在毛细区,低水分含量的脱湿/吸湿与层间吸附有关,导致变形相对较小。

通过将SWRC(见图2)和SSC(见图3)相结合,可以将SWRC重新转化为基质吸力 s_m 和饱和度 S_r 之间的关系,如图4所示。不同浓度下 S_r-s_m 关系的差异比 $w-s_m$ 关系要明显得多,尽管这两种关系都代表相同土样的持水特性。这种差异主要是由于土样的体积变化造成的。因此,传统的SWRC在不测量体积应变的情况下确定是不足以描述膨胀土-水力行为的。此外,应从饱和度表示的SWRC中确定可变形土体的进气值。图4说明进气值随着NaCl浓度的增加而减小,与前面得到的结果是相符的。

4 采用粒间应力描述的压缩/膨胀曲线

含水率变化引起的变形与脱吸湿过程中有效应力的发展密切相关。如前所述,当给定吸力下,

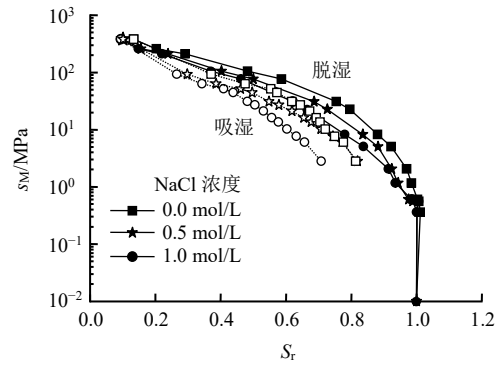


图4 采用基质吸力和饱和度表示的土-水特征曲线
Fig.4 SWRCs described by the relationship between matric suction and the degree of saturation

土体中的孔隙水可以分为毛细水和吸附水。因此,引起土体收缩的有效应力具有两个贡献,分别来自毛细和吸附作用。在传统的有效应力公式中,毛细效应已经得到了很好的描述,而吸附效应并没有得到令人满意的解决。这主要是归因于残余含水率概念的歧义以及对低含水率(吸附区域)土体孔隙水压力不完全的定义^[33]。

4.1 粒间应力

Wei^[19]提出了一个粒间应力的概念,考虑了孔隙水和固体基质之间的物理化学作用。该概念涵盖了渗透、毛细作用和吸附的影响,并通过颗粒间接触在整个土体骨架中传递。在脱湿过程中,假设各向均匀收缩,在不存在外力的情况下,粒间压力 p'' 可写为

$$p'' = n^i (s_m - \Pi) \quad (3)$$

式中: n^i 为孔隙溶液的体积分数(即体积含水率 θ),等于孔隙率 n 乘以饱和度 S_r ; Π 为广义渗透压,为微观物理化学作用的宏观描述:

$$\Pi = \Pi_D - \rho^w \Omega^i \quad (4)$$

式中: Π_D 为Donnan渗透压,来源于膨胀土中含由固定负电荷的黏土矿物; ρ^w 为纯水的质量密度(取 1.0 g/cm^3); Ω^i 为表面力势能,表示为

$$n^i \rho^i \Omega^i = n_0 \rho^i \Omega_0^i + \int_{n_0^i}^{n^i} (s_m - \Pi_D) dn^i \quad (5)$$

式中: ρ^i 为孔隙溶液的质量密度,对于稀溶液,大约等于纯水的质量密度 ρ^w ; n_0 为试样饱和状态下的初始孔隙率,也等于饱和体积含水率 n_0^i 。为简单起见,下文中将 ρ^i 和 ρ^w 互换使用; Ω_0^i 为饱和状态下的表面力势能。

联立式(3)~(5),可得出土样在脱湿过程中粒间压力的增量形式:

$$dp'' = n^i \cdot d(s_M - \Pi_D) \quad (6)$$

膨胀土由具有固定负电荷的黏土颗粒组成, 这些电荷被可交换阳离子中和。由于黏土层的负电荷, 这些土体表现出半透膜特性。该特性导致孔隙水和与孔隙水水力相连且处于平衡状态的平衡溶液之间的含盐量不同^[19]。因此, 由浓度差异产生了 Donnan 渗透压, 其表达式为

$$\Pi_D \approx \Delta c RT \quad (7)$$

式中: $\Delta c = c - c_0$, 为孔隙水中盐溶液浓度 c 和平衡溶液中盐溶液浓度 c_0 的差值。 c_0 可以通过 NaCl 溶液的初始浓度和当前含水率来计算。根据土样的初始状态 (孔隙度, NaCl 溶液浓度) 和物理指标 (阳离子交换量), 可以确定 Π_D 的值。关于式 (5) 和式 (7) 的详细推导可以在 Wei^[19] 或 Ma 等^[20-21] 的文献中找到。

表达式 (5) 中的表面力势与 Coussy^[34] 提出的界面能项具有相似性, 但在式 (5) 中包括了 Π_D 。 Π_D 可以解释含盐量对力学行为的影响, 而这在 Coussy^[34] 的表达式中被忽略了。通过将式 (6) 与测量到的 SWRC 结合, 可以计算出粒间应力。

4.2 脱湿诱导的压缩曲线

本节以饱和状态作为参考, 重点研究由含水率变化引起的粒间应力的发展。图 5 给出了膨胀土脱湿过程诱导的压缩曲线, 表示为孔隙比与粒间应力关系。该压缩曲线与在恒定饱和度或基质吸力下进行力学加载时获得的传统压缩曲线不同, 该曲线上每个数据点对应于不同的饱和度。如图 5 所示, NaCl 浓度较高的土样表现出较低的可压缩性。这是因为, 在相同的孔隙比下, NaCl 浓度较高的土样具有较低的含水率, 导致饱和度较小 (见图 3)。因此, 在同一孔隙比下, NaCl 浓度较高的土样刚度较大。

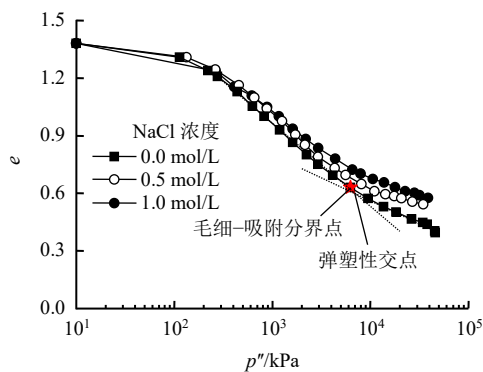


图 5 干缩导致的压缩曲线

Fig.5 Compression curves induced by drying shrinkage

压缩曲线呈 S 形, 脱湿过程可以视为两阶段变形过程: 毛细区的弹塑性变形和吸附区的弹性变形。弹塑性和弹性区域之间的边界点, 即两条虚线的交点, 可以使用 Casagrande 屈服应力方法^[35] 确定。如前所述, 该交点对应于毛细和吸附区之间的截止点。

采用不同压实水平土样的 SWRC 获得的毛细和吸附之间的交界点也在图中标出, 用红点表示。从图中可以看出, 上述两种独立的方法获得的毛细和吸附分界点, 对于所有 NaCl 浓度的土样, 这两个点都非常接近。因此, 采用上述粒间应力方程可以精确地描述土样在脱湿过程中的收缩变形, 其中大部分收缩发生在毛细区, 吸附区的变形较小, 并且是可逆的, 这与文献中多孔介质吸附诱导变形的试验结果一致^[16-18]。

4.3 膨胀土微观结构的变化

毛细区的弹塑性变形和吸附区的弹性变形与文献中相同膨胀土的微观结构演变的试验结果是相符的^[30]。压实膨胀性土具有明显的双孔隙结构, 包括集聚体间的大孔隙和集聚体内的微孔隙。在脱湿过程中, 大孔隙中的水分蒸发, 由于粒间应力的增大, 导致一些大孔隙发生不可逆的塌陷, 这种弹塑性变形一直持续到毛细区结束。

在吸附状态时, 收缩主要与微孔隙的压缩有关, 主要是由黏土层电荷、可交换阳离子以及水分子与黏土矿物的极性表面基团之间的相互作用所支配的^[36-37]。随着脱湿的继续进行, 黏土矿物层间间距缩小也会对吸附区的弹性变形产生影响。在这个过程中, 不会发生孔隙塌陷, 微观结构保持完整, 导致可逆变形。上述引入的颗粒间应力可以准确地捕捉这种行为。

5 结 论

本文从试验和理论两方面探究了孔隙水化学对膨胀土持水特性和收缩/膨胀行为的影响, 具体结论如下:

(1) 试验结果表明, 盐分仅对总吸力有贡献, 当采用基质吸力与质量含水率表示土-水特征曲线时, 盐分的影响较小, 其作用主要集中在基质吸力较低的部分。然而, 盐分对收缩/膨胀曲线有显著影响, 随着盐分的增加, 收缩性降低。通过结合收缩曲线, 确定了基质吸力与饱和度之间的关系, 揭示了盐分主要是降低了收缩变形, 使得膨胀土持水性降低。因此, SSC 是描述膨胀土-水力行为的关键参数。

(2) 在力学方面, 粒间应力的发展而非基质吸

力控制着土样的收缩/膨胀变形。通过引入粒间应力的概念重新解释了试验数据, 该粒间应力表达式可统一描述渗透压、毛细和吸附作用的影响。给出了脱湿过程诱导的压缩曲线, 表示为孔隙比和粒间应力之间的关系。该曲线表明收缩过程有两个明显的阶段: 毛细阶段的弹塑性变形和吸附阶段的弹性变形。大部分收缩发生在毛细阶段, 而吸附阶段只有相对较少的收缩。

(3) 利用 Casagrande 方法, 从压缩曲线中确定了区分毛细和吸附阶段的分界点。发现该分界点与在不同压实条件下测得的土-水特征曲线独立推断出的分界点基本相同。理论分析表明, 在较低的含水率下, 粒间应力能较好地描述膨胀性土的化学力学行为。

参考文献

- [1] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior(3rd edition)[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [2] RASA K, HORN R, RATY M, et al. Shrinkage properties of differently managed clay soils in Finland[J]. **Soil Use and Management**, 2009, 25(2): 175-182.
- [3] LU N, DONG Y. Correlation between soil-shrinkage curve and water-retention characteristics[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2017, 143(9): 04017054.
- [4] CHEN P, LU N. Generalized equation for soil shrinkage curve[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2018, 144(8): 04018046.
- [5] TAN Y, ZHANG H Y, WANG Y. Evaporation and shrinkage processes of compacted bentonite-sand mixtures[J]. **Soils and Foundations**, 2020, 60(2): 505-519.
- [6] MEBARKI M, KARECHE T, BENYAHIA S, et al. Volumetric behavior of natural swelling soil on drying-wetting paths[J]. **Studia Geotechnica et Mechanica**, 2020, 42(3): 248-262.
- [7] THYAGARAJ T, THOMAS S R, DAS A P. Physico-chemical effects on shrinkage behavior of compacted expansive clay[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2017, 17(2): 06016013.
- [8] ZHANG Y, YE W M, CHEN Y G, et al. Impact of NaCl on drying shrinkage behavior of low-plasticity soil in earthen heritages[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2017, 54(12): 1762-1774.
- [9] MISHRA P N, SCHEUERMANN A, BORE T, et al. Salinity effects on soil shrinkage characteristic curves of fine-grained geomaterials[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2019, 11(1): 181-191.
- [10] ZHANG H Y, TAN Y, ZHU F, et al. Shrinkage property of bentonite-sand mixtures as influenced by sand content and water salinity[J]. **Construction and Building Materials**, 2019, 224: 78-88.
- [11] TANG C S, SHI B, LIU C, et al. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer[J]. **Applied Clay Science**, 2011, 52(1-2): 69-77.
- [12] HU L B, PERON H, HUECKEL T, et al. Mechanisms and critical properties in drying shrinkage of soils: Experimental and numerical parametric studies[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2013, 50(5): 536-549.
- [13] FREDLUND M D, WILSON G W, FREDLUND D G. Representation and estimation of the shrinkage curve[C]//Proceedings of the Third International Conference on Unsaturated Soils. Recife: [s. n.], 2002.
- [14] LI X, ZHANG L M, WU L Z. A framework for unifying soil fabric, suction, void ratio, and water content during the dehydration process[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 2014, 78(2): 387-399.
- [15] BAKER R, FRYDMAN S. Unsaturated soil mechanics: critical review of physical foundations[J]. **Engineering Geology**, 2009, 106: 26-39.
- [16] DOLINO G, BELLET D, FAIVRE C. Adsorption strains in porous silicon[J]. **Physical Review B**, 1996, 54(24): 17919-17929.
- [17] GOR G Y, NEIMARK A V. Adsorption-induced deformation of mesoporous solids[J]. **Langmuir**, 2010, 26(16): 13021-13027.
- [18] ZHANG Y D. Mechanics of adsorption-deformation coupling in porous media[J]. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 2018, 114: 31-54.
- [19] WEI C F. A theoretical framework for modeling the chemomechanical behavior of unsaturated soils[J]. **Vadose Zone Journal**, 2014, 13(9): 1-21.
- [20] MA T T, WEI C F, CHEN P, et al. Chemo-mechanical coupling constitutive model for chalk considering chalk-fluid physicochemical interaction[J]. **Géotechnique**, 2019, 69(4): 311-324.

- 308-319.
- [21] MA T T, YAO C Q, DONG Y, et al. Physicochemical approach to evaluating the swelling pressure of expansive soils[J]. **Applied Clay Science**, 2019, 172: 85-95.
- [22] YAO C Q, CHEN P, MA T T, et al. Physicochemical effect on shear strength characteristics of clayey soils based on ring-shear experiment[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2020, 57(12): 1820-1831.
- [23] MA T T, WEI C F, XIA X L, et al. Constitutive model of unsaturated soils considering the effect of intergranular physicochemical forces[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2016, 142(11): 04016088.
- [24] ZHANG J, NIU G, LI X, et al. Hydro-mechanical behavior of expansive soils with different dry densities over a wide suction range[J]. **Acta Geotechnica**, 2020, 15: 265-278.
- [25] 孙德安, 徐钱垒, 陈波, 等. 广吸力范围内非饱和原状黄土的力学特性[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1586-1592.
- SUN De-an, XU Qian-lei, CHEN Bo, et al. Mechanical behavior of unsaturated intact loess over a wide suction range[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(9): 1586-1592.
- [26] 曾浩, 唐朝生, 刘昌黎, 等. 膨胀土干燥过程中收缩应力的测试与分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 717-725.
- ZENG Hao, TANG Chao-sheng, LIU Chang-li, et al. Measurement and analysis of shrinkage stress of expansive soils during drying process[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(4): 717-725.
- [27] DONG Y, LU N. Measurement of suction stress and soil deformation at high suction range[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2017, 44(2): 308-322.
- [28] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley and Sons, 1993.
- [29] TOURNASSANT C, STEEFEL C I, BOURG I C, et al. Natural and Engineered Clay Barriers[M]. [S. l.]: Elsevier, 2015.
- [30] MA T T, WEI C F, YAO C Q, et al. Microstructural evolution of expansive clay during drying-wetting cycle[J]. **Acta Geotechnica**, 2020, 15(2): 2355-2366.
- [31] AKIN I D, LIKOS W J. Evaluation of isotherm models for water vapor sorption behavior of expansive clays[J]. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, 2016, 31(1): D4016001.
- [32] 刘观仕, 赵守道, 牟智, 等. 结构性对膨胀土收缩特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(7): 1772-1780.
- LIU Guan-shi, ZHAO Shou-dao, MOU Zhi, et al. Experimental study of the influence of structure on the shrinkage characteristics of expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(7): 1772-1780.
- [33] ZHANG C, LU N. Unitary definition of matric suction[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2019, 145(2): 02818004.
- [34] COUSSY O. Poromechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [35] ONITSUKA K, HONG Z, HARA Y, et al. Interpretation of oedometer test data for natural clays[J]. **Soils and Foundations**, 1995, 35(3): 61-70.
- [36] RAO S M, THYAGARAJ T, RAO P R. Crystalline and osmotic swelling of an expansive clay inundated with sodium chloride solutions[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2013, 31(4): 1399-1404.
- [37] THYAGARAJ T, SALINI U. Effect of pore fluid osmotic suction on matric and total suctions of compacted clay[J]. **Geotechnique**, 2015, 65(11): 952-960.