

高庙子膨润土的胀缩变形特性及其影响因素研究

秦冰¹, 陈正汉¹, 刘月妙², 王驹²

(1. 后勤工程学院, 重庆 400041; 2. 核工业北京地质研究院, 北京 100029)

摘要: 以高庙子钠基膨润土为对象, 研究了干密度、竖向压力、浸泡液体、吸湿方式对其膨胀变形的影响, 探讨了浸泡液体变化引起的渗析变形以及加卸载循环中的变形规律。试验表明膨润土的水-力-化学耦合作用非常复杂: 干密度、竖向压力、浸泡溶液及其浓度均对膨润土的膨胀变形有显著影响; 无荷状态下, 饱和蒸气吸湿与浸水饱和两种方法得到的膨胀变形存在巨大差异; 先在氯化钠溶液、再在蒸馏水中浸泡的试样的膨胀变形小于直接在蒸馏水中浸泡的试样的膨胀变形。浸泡液体由氯化钠溶液调整为蒸馏水, 试样膨胀; 而由蒸馏水换为氯化钠溶液, 试样则压缩。在高浓度盐溶液中浸泡的初始干密度低的试样, 浸泡液体调整为蒸馏水后, 初始可产生压缩变形。加卸载循环中的规律比较独特, 既表现出塑性压缩变形, 亦存在塑性膨胀变形, 用巴塞罗那膨胀土模型对其进行了解释。

关键词: 膨润土; 胀缩变形; 水-力-化学耦合; 高放废物

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)07-1005-06

作者简介: 秦冰(1984-), 男, 博士研究生, 主要从事非饱和土与膨润土的研究。Email: bingqin1984@163.com。

Swelling-shrinkage behaviour of Gaomiaozi bentonite

QIN Bing¹, CHEN Zheng-han¹, LIU Yue-miao², WANG Ju²

(1. Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China; 2. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

Abstract: An experimental study was carried out on compacted samples of Gaomiaozi sodium bentonite. Complex coupled hydro-mechanical-chemical behaviour of bentonite was observed. The influence of dry density, vertical stress and soaking liquid on swelling of bentonite was studied, and the swelling deformation was obviously effected by all these factors. There was large difference of swelling deformation obtained under zero stress between the conditions of soaking with water and exposing to saturated vapor. An investigation of the osmotic deformation induced by changing soaking liquid was also attempted. The samples dilated when the soaking liquid changed from the sodium chloride solution to the distilled water, while they shrunk when the soaking liquid changed from the distilled water to the sodium chloride solution. However, an initial collapse, after changing the soaking liquid to the distilled water, was observed for a sample with the low dry density and ever soaked in high salinity solution. The swelling deformation obtained for the samples soaked directly in the distilled water was larger than that immersed first in the sodium chloride solution and then in the distilled water. After swelling deformation or osmotic deformation reached the equilibrium, the samples were subjected to cyclic stress, and both plastic compression and plastic expansion were induced. This phenomenon would be explained with Barcelona Expansive Model.

Key words: bentonite; swelling-shrinkage deformation; hydro-mechanical-chemical coupling; high-level radioactive waste

0 引言

在高放废物深地质处置中, 若处置库围岩为花岗岩, 通常采用压实膨润土作为缓冲/回填材料^[1]。在处置库工作环境下, 膨润土受到复杂的水-力-化学耦合作用^[2-3]。一些学者对初始含水率很高(大于液限)的膨润土, 研究过荷载、浸泡溶液对其变形的影响^[4-8], 但有关压实膨润土在水-力-化学耦合作用下的变形特性的研究很少^[9-10]。

选定内蒙古高庙子膨润土矿床作为我国高放废物处置库缓冲/回填材料的首选矿床^[11]。国内学者对高庙

子膨润土的基本力学特性做了一些研究^[12-13], 但是均未见关于高庙子膨润土水-力-化学耦合作用研究的报道。

本文针对高庙子钠基膨润土(GMZ001), 研究干密度、竖向压力、浸泡液体以及吸湿方式对其膨胀变形的影响, 探讨浸泡液体变化引起的变形以及加卸载循环中的变形规律。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10672182)

收稿日期: 2007-07-25

1 试样制备与试验方案

试验用土为高庙子钠基膨润土(GMZ001)。其主要矿物为黏土矿物蒙脱石(含量为73.2%),伴生矿物为石英、长石和 α -方英石,另外还含有微量的伊利石和高岭石。高庙子膨润土GMZ001的基本物理化学性质见表1。

表1 GMZ001 膨润土的基本物理化学性质

Table 1 Basic physical-chemical properties of GMZ001 bentonite

G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	CEC 值 $/(meq \cdot g^{-1})$
2.65	325	42	283	0.76

使用固结仪进行试验。试样底面积为 30 cm^2 ,高度为 1 cm ,在13%的含水率下静力压实。为研究干密度、竖向压力、浸泡液体以及吸湿方式对膨润土膨胀变形的影响,共进行了14个试验。采用两个不同的干密度:1.34, 1.53 g/cm^3 ;两个不同的竖向压力:0, 500 kPa;两种不同吸湿方式:直接在液体中浸泡与在饱和水蒸气中吸附水分;浸泡液体有3种:蒸馏水、1 mol/L NaCl 溶液以及5 mol/L NaCl 溶液。各试验的概况见表2。其中,#13, #14 试样在饱和蒸气中放置了3个月后测量其膨胀变形。#7, #8 试样膨胀变形试验历时37 d,其它试样均为22 d。拆样后发现,无荷状态下直接浸泡的试样(#7~#12)会从环刀下部挤出,如图1所示(试样倒放)。因此,表2给出的#7~#12试样的膨胀率有一定的误差。

表2 膨润土膨胀变形试验概况

Table 2 Basic information of the swelling tests

试样编号	干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	含水率/%	荷载/kPa	溶液浓度 $/(mol \cdot L^{-1})$	膨胀率/%
#1	1.34	13	500	0	-0.40
#2	1.35	13	500	1	-2.40
#3	1.34	13	500	5	-3.10
#4	1.53	13	500	0	10.20
#5	1.51	13	500	1	5.20
#6	1.53	13	500	5	3.21
#7	1.36	13	0	0	156.90
#8	1.54	13	0	0	195.90
#9	1.33	13	0	5	51.87
#10	1.55	13	0	5	56.03
#11	1.34	13	0	1	62.28
#12	1.51	13	0	1	63.11
#13	1.34	13	0	饱和蒸气	18.80
#14	1.56	13	0	饱和蒸气	21.80

待膨胀变形稳定后,#1, #4 试样进行加卸载循环,依次经历的荷载量值为:500, 800, 500, 200, 500, 200, 500, 800, 500, 200, 500 kPa。

而对于#2, #3, #5, #6 试样,首先研究浸泡液体由NaCl 溶液换成蒸馏水的影响,并且多次换水以保证效果,试验历时16 d。然后用初始浓度的NaCl 溶

液取代蒸馏水进行浸泡,待变形稳定后,再进行加卸载循环,依次经历的荷载量值为:500, 800, 500, 200, 500 kPa。



图1 #11 试样试验后照片(试样倒放)

Fig. 1 Photo of sample 11 after test

2 试验结果与讨论

2.1 干密度、竖向压力、浸泡液体以及吸湿方式对膨胀变形的影响

不同干密度、不同竖向压力以及不同浸泡液体下,膨润土的膨胀率(膨胀变形/初始高度)见表2。负值表示试样压缩。干密度、竖向压力、盐溶液浓度均会显著影响膨胀变形:干密度小、竖向压力大、盐溶液浓度高,则膨胀变形小;反之,膨胀变形大。在竖向压力500 kPa下,低干密度试样(#1, #2, #3)浸水后,产生压缩变形;而高干密度试样(#4, #5, #6),最终可产生较大的膨胀变形。其中,#1 试样变形很小($<0.5\%$),可认为干密度为 1.34 g/cm^3 ,含水率等于13%下,膨胀力约为500 kPa。

#13, #14 试样置于饱和蒸气中3个月后,测得最终膨胀率分别为18.8%和21.8%。#13, #14 试样与#7, #8 试样相比,主要的不同是,在饱和蒸气中的试样(#13, #14)通过吸附水蒸气获得水分,而#7, #8 试样可直接吸收水分。但两种情况的最终膨胀率却相差极大(8~9倍)。膨润土的膨胀变形可以分为两部分:蒙脱石颗粒(即叠片体)自身的膨胀和颗粒之间的膨胀^[14-15]。对于钠基蒙脱石颗粒,不管是直接浸水还是从饱和蒸气中吸附水分,都可最多获得三层层间水化物^[15]。因此,浸水饱和法和蒸气吸湿法引起的蒙脱石颗粒自身的膨胀不会有显著差异。但是,膨润土直接浸水时,颗粒之间可以形成非常厚的扩散双电层^[15],无荷状态下更是如此;而当膨润土在饱和蒸气中吸附水分时,由于没有足够的水分供应,很难形成较厚的扩散双电层。这就可以解释在无荷状态下,浸水饱和与蒸气吸湿两种方法所引起的膨胀变形的巨大差异。膨润土浸水后形成的扩散双电层易受压力的影响,随着压力的增大,双电层的厚度减小,两种吸附状态下

膨润土膨胀变形的差异亦减小。由文献[16]对某西班牙膨润土的研究可知, 在膨胀力试验中(若干密度为 1.65 g/cm³, 膨胀力约 8 MPa), 直接浸水得到的膨胀力与在饱和蒸气中吸附水分得到的膨胀力基本相同, 也就是说, 在等于膨胀力的荷载作用下, 两种吸湿方式引起的变形基本相同。

2.2 调整浸泡液体引起的渗析变形

待膨胀变形稳定后, 对于#2, #3, #5, #6 试样, 将浸泡液体由 NaCl 溶液调整为蒸馏水。各试样的最终变形率和相对变形量(调整浸泡液体引起的变形, 以膨胀为正)如表 3 所示, 其中, 试样最终变形率 = $\frac{\text{渗析变形稳定后的试样高度}}{\text{试样初始高度}} \times 100\% - 100\%$ 。将浸泡

液体由 NaCl 溶液调整为蒸馏水, 所有试样均发生膨胀, 即所谓的渗析膨胀。对于初始干密度高的试样, 在 1 mol/L NaCl 溶液中浸泡过的试样(#5)的渗析膨胀量小于在 5 mol/L NaCl 溶液中浸泡过的试样(#6)的渗析膨胀量; 而对于初始干密度低的试样, 在 1 mol/L NaCl 溶液中浸泡过的试样(#2)的渗析膨胀量大于在 5 mol/L NaCl 溶液中浸泡过的试样(#3)的渗析膨胀量, 这可能是因为调整浸泡液体后, #3 试样最初产生过一个较大的压缩变形(0.07 mm); 而对于其它几个试样(#2, #5, #6), 则未观察到此压缩变形。尽管调整浸泡液体后各试样膨胀, 但其最终高度均小于直接在蒸馏水中浸泡的试样的最终高度, 且在 5 mol/L NaCl 溶液中浸泡过的试样的最终高度小于在 1 mol/L NaCl 溶液中浸泡过的试样的最终高度, 也就是说浸泡在 NaCl 溶液中产生了不可逆的影响。当膨润土浸泡在 CaCl₂ 溶液中时, Ca²⁺ 会对晶体结构产生不可逆作用, 当 Ca²⁺ 浓度减小直至零时, 晶面间距 d_{001} 并不会随之增大^[6]。GMZ 膨润土浸泡在 NaCl 溶液中时, 可能会存在类似的作用, 导致先在 NaCl 溶液再在蒸馏水中浸泡的试样的膨胀变形小于直接在蒸馏水中浸泡的试样的膨胀变形。

对于干密度低的压实膨润土, 初始的大孔隙比较多^[17], 浸泡在浓度高的盐溶液中后, 较大的团粒能够保存下来^[18-19], 所以此时试样中可能会存在一部分大孔隙, 也就是说宏观结构相对疏松。当再用蒸馏水取代盐溶液浸泡时, 颗粒之间的连接会削弱^[15], 相对疏

松的宏观结构在压力作用下(本试验中为 500 kPa)就会塌陷。这就可以解释浸泡液体由 NaCl 溶液调整为蒸馏水后#3 试样的初始压缩变形。

随后再将浸泡液体由蒸馏水调整为初始浓度的 NaCl 溶液, 各试样的最终变形率和相对变形量见表 3。浸泡液体调整回原浓度的 NaCl 溶液, 所有试样均产生压缩变形, 即所谓的渗析固结。换回原浓度 NaCl 溶液, 不论初始干密度如何, 5 mol/L NaCl 溶液中的试样变形均大于 1 mol/L NaCl 溶液中的试样变形。文献[7]认为, 如果孔隙水中的阳离子与蒙脱石的可交换阳离子相同, 则孔隙水中阳离子浓度变化引起的影响是可逆的; 反之, 孔隙水中阳离子浓度变化引起的影响是不可逆的, 并且使用 Ponza 膨润土(可交换阳离子主要是 Na⁺)验证了这一说法。对于 Ponza 膨润土, Na⁺ 浓度变化引起的效应是可逆的, 也就是说, 在 NaCl 溶液 - 蒸馏水 - NaCl 溶液的浸泡液体循环中, 产生的渗析固结变形与渗析膨胀变形相等。而在本文试验中, 对于 1 mol/L NaCl 溶液的情况(#2, #5), 渗析膨胀变形大于渗析固结变形, 试样膨胀。对于 5 mol/L NaCl 溶液的情况, #6 试样的渗析膨胀量与渗析固结量基本相同; 而#3 试样的渗析固结变形远大于渗析膨胀变形, 试样明显压缩。这可能与浸泡在 NaCl 溶液中发生的阳离子交换、浸泡过程中复杂的水 - 力 - 化学耦合作用有关。

2.3 加卸载循环中的变形规律

#1, #4 试样膨胀变形稳定后, 进行加卸载循环, 加卸载循环的 $e - \lg p$ 曲线如图 2, 3 所示。在 800 kPa—500 kPa—200 kPa ($b - c - d$) 的卸荷过程中, $e - \lg p$ 曲线明显不是直线, 500 kPa—200 kPa ($c - d$) 卸荷引起的膨胀变形较大。在两个 500 kPa—800 kPa—500 kPa ($a - b - c, g - h - i$) 的循环中, 均表现出塑性压缩变形。而从 800 kPa 卸荷到 500 kPa 开始的两个 500 kPa—200 kPa—500 kPa ($c - d - e, i - j - k$) 的循环中, 则表现出塑性膨胀变形。连续两个 500 kPa—200 kPa—500 kPa 循环中的第二个循环 ($e - f - g$), 产生的塑性膨胀变形较小, 可近似认为是弹性的。在第一个 500 kPa—800 kPa—500 kPa—200 kPa—500 kPa ($a - b - c$

表 3 浸泡液体调整引起的渗析变形

Table 3 Osmotic deformation induced by changing soaking liquid

试样编号	调整浸泡液体之前试样膨胀率/%	NaCl 溶液→蒸馏水		蒸馏水→NaCl 溶液	
		最终变形率/%	调整浸泡液体引起的相对变形量/(10 ⁻² mm)	最终变形率/%	调整浸泡液体引起的相对变形量/(10 ⁻² mm)
#2	-2.40	-1.06	13.4	-1.91	-8.5
#3	-3.10	-2.34	7.6	-6.84	-45.0
#5	5.20	8.22	30.2	6.95	-12.7
#6	3.21	7.08	38.7	3.12	-39.6

-d-e) 的循环中, 产生的塑性膨胀变形与塑性压缩变形基本相等; 而第二个 500 kPa—800 kPa—500 kPa—200 kPa—500 kPa (g-h-i-j-k) 的循环中, 产生的塑性膨胀变形明显小于塑性压缩变形。

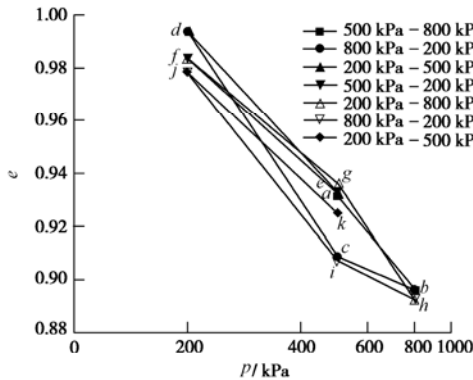


图 2 #1 试样加卸载循环 e - lgp 曲线

Fig. 2 Variation of void ratio during stress cycles (Sample 1)

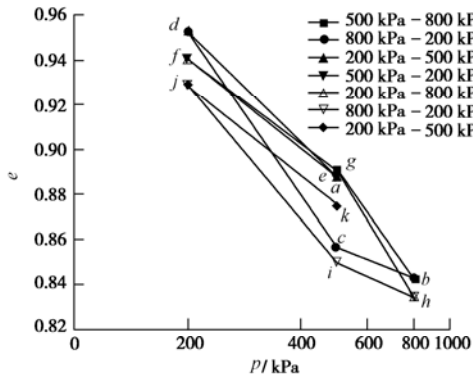


图 3 #4 试样加卸载循环 e - lgp 曲线

Fig. 3 Variation of void ratio during stress cycles (Sample 4)

#5, #6 试样加卸载循环的 e - lgp 曲线如图 4, 5 所示。在 500 kPa—800 kPa—500 kPa (a-b-c) 的循环中, 均表现出塑性压缩变形。而在 500 kPa—200 kPa—500 kPa (c-d-e) 的循环中, 则表现出塑性膨胀变形。在 500 kPa—800 kPa—500 kPa—200 kPa—500 kPa (a-b-c-d-e) 的循环中, 产生的塑性膨胀变形明显小于塑性压缩变形。#2, #3 试样的规律类似。

下面使用 Alonso 等提出的巴塞罗那膨胀土模型 (BExM 模型) [20-21] 解释 #1, #4 试样加卸载循环中的变形规律。首先简要介绍一下 BExM 模型。

在 BExM 模型中, 区分两种不同的结构: 微观结构和宏观结构。微观结构考虑了活性矿物 (如蒙脱石) 膨胀的影响, 而宏观结构代表着团粒之间的相互作用。该模型通常假定两个结构层次的吸力是相同的, 采用了如下 3 个屈服面 (图 6):

LC 屈服面
$$p_0 = p_c \left(\frac{p_0^*}{p_c} \right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(s)-\kappa}}, \quad (1)$$

SI 屈服面
$$p + s = s_i, \quad (2)$$

SD 屈服面
$$p + s = s_0. \quad (3)$$

式中 p, s 为土体当前的压力与吸力; s_i, s₀ 分别为 SI, SD 屈服面的屈服值; λ(0) 与 λ(s) 分别为饱和与非饱和状态下土的正常压缩线的斜率; κ 为土体卸载回弹线的斜率; p₀^{*}, p₀ 分别为饱和与非饱和状态下的屈服应力; p_c 为参考应力。

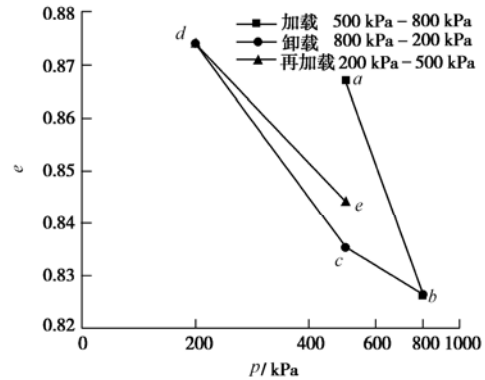


图 4 #5 试样加卸载循环 e - lgp 曲线

Fig. 4 Variation of void ratio during stress cycles (Sample 5)

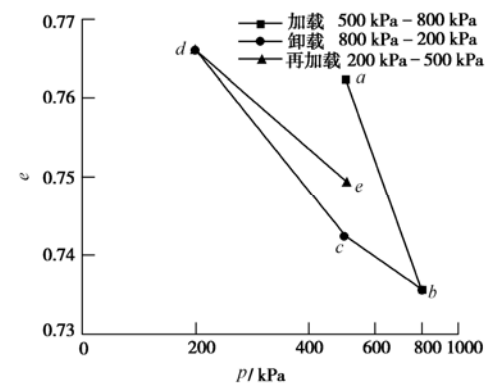


图 5 #6 试样加卸载循环 e - lgp 曲线

Fig. 5 Variation of void ratio during stress cycles (Sample 6)

SI 屈服面和 SD 屈服面的硬化由 SI, SD 屈服面移动所产生的总的塑性体应变控制, 即

$$d\alpha_1 = d\varepsilon_{vSI}^p + d\varepsilon_{vSD}^p. \quad (4)$$

SI 屈服面与 SD 屈服面的移动是相互耦合的。而 LC 屈服面的硬化由 SI, SD, LC 3 个屈服面移动所引起的总的塑性体应变控制, 即

$$d\alpha_2 = d\varepsilon_{vSI}^p + d\varepsilon_{vSD}^p + d\varepsilon_{vLC}^p. \quad (5)$$

SI, SD 屈服面的移动会影响 LC 屈服面的位置。其中, dα₁ 为 SI, SD 屈服面的硬化参数, dα₂ 为 LC 屈服面的硬化参数, dε_{vSI}^p, dε_{vSD}^p, dε_{vLC}^p 分别为 SI, SD, LC 屈服面移动所引起的塑性体应变。

文献[5, 6]指出, 卸荷引起的饱和和膨润土的膨胀变形, 主要是由蒙脱石吸水所致, 力学膨胀只占其中很小一部分。在 BExM 模型中, 微观结构表达了活性

矿物(如蒙脱石)所起的作用。因此,下面借助 BE_xM 模型,解释^{#1},^{#4} 试样加卸载循环中所观察到的现象。在整个加卸载循环中, $p-s$ 平面上屈服轨迹的变化如图 6 所示,图中的序号(a, b, c 等)与图 2, 3 中的相对应。在浸水膨胀变形稳定后,可认为土体饱和, LC 屈服面屈服应力为 500 kPa。由于之后的试验是一直在浸水状态下进行的,吸力可始终视为零。在第一个 500 kPa—800 kPa—500 kPa ($a-b-c$) 的循环中,产生了塑性压缩变形,可认为 LC 屈服面移动,屈服应力增大到 800 kPa,而 SI 屈服面未动。当从 500 kPa 卸荷到 200 kPa ($c-d$) 时, $p+s$ 从 500 kPa 减小到 200 kPa,这样就可能激活 SD 屈服面,引起可观的塑性膨胀变形,这就可以解释图 2, 3 中 500 kPa—200 kPa ($c-d$) 卸荷引起的较大的膨胀变形。同时,由式(5)知, LC 屈服面会向内移动,相应屈服应力减小。

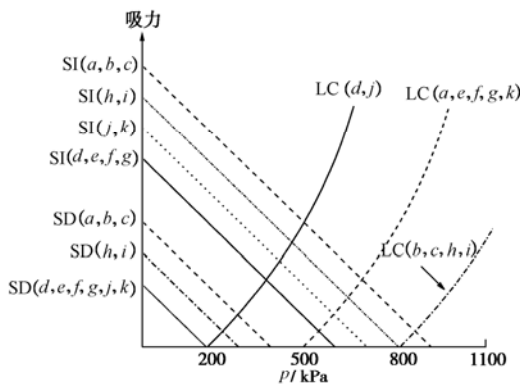


图 6 ^{#1},^{#4} 试样加卸载循环中 $p-s$ 平面上屈服轨迹的变化

Fig. 6 Evolution of yielding loci in $p-s$ plane during stress cycles (Sample 1, 4)

再加载至 500 kPa (e) 时,由图 2, 3 可见,此 200 kPa—500 kPa ($d-e$) 加荷曲线的斜率与初始 500 kPa—800 kPa ($a-b$) 加荷曲线的斜率相近,可认为之前 500 kPa 卸荷至 200 kPa ($c-d$) 时, LC 屈服面屈服应力最终减小到 200 kPa。而在此 200 kPa—500 kPa ($d-e$) 加荷过程中, LC 屈服面将向外移动,屈服应力最终增加到 500 kPa,土样产生塑性压缩变形,而 SI 屈服面仍未激活。由式(4)知,若 SI 屈服面未移动,SD 屈服面亦不会移动。所以当又卸荷至 200 kPa (f) 时,不会激活 SD 屈服面,不引起塑性膨胀变形。因此,在这个 200 kPa—500 kPa—200 kPa ($d-e-f$) 循环过程中,表现出塑性压缩变形, LC 屈服面屈服应力最终维持在 500 kPa。

而又重新加载至 500 kPa (g) 时,既未超过 LC 屈服面屈服应力,又不会激活 SI 屈服面,所以加荷曲线与之前的卸荷曲线基本重合。再加荷至 800 kPa (h) 时,加荷曲线 ($g-h$) 的斜率大于初始 500 kPa—800

kPa ($a-b$) 加荷曲线的斜率,可认为 LC, SI 屈服面同时被激活。由于 SI 屈服面移动,SD 屈服面亦会移动,即 SD 屈服面: $p_0=p+s>200$ kPa,所以当再次由 500 kPa 卸荷到 200 kPa ($i-j$) 时,SD 屈服面将又一次被激活,土体产生较大的塑性膨胀变形,但小于第一次 500 kPa—200 kPa ($c-d$) 卸荷引起的膨胀变形,这可能是由于第一次激活的 SD 屈服面在 $p-s$ 平面内更靠上(即 $p_0=p+s$ 更大)。因此,初始的 SI 屈服面在 $p-s$ 平面内亦更靠上(即 $p_i=p+s>800$ kPa),这也支持了初次 500 kPa—800 kPa 加荷 ($a-b$) 时, SI 屈服面未被激活的假定。

3 结 论

(1) 干密度、竖向压力、浸泡液体均会显著影响膨胀变形。在无荷状态下,直接浸水与饱和和蒸气吸湿两种方法得到的膨胀变形存在巨大差异。

(2) 浸泡液体由 NaCl 溶液调整为蒸馏水会引起渗析膨胀,而由蒸馏水换成 NaCl 溶液会引起渗析固结。先在 NaCl 溶液、再在蒸馏水中浸泡的试样的最终高度小于直接在蒸馏水中浸泡的试样的最终高度。在高浓度盐溶液中浸泡的初始干密度低的试样,浸泡液体换为蒸馏水后,尽管试样最终膨胀,但最初可观察到压缩变形。 Na^+ 浓度变化引起的效应较复杂。

(3) 加卸载循环的规律比较独特,既存在塑性压缩,又会产生塑性膨胀,并可用巴塞罗那膨胀土模型对之解释。

参考文献:

- [1] 徐国庆. 缓冲/回填材料与添加剂的选择[J]. 铀矿地质, 1996, 12(4): 238 - 244. (XU Guo-qing, Selection of buffer/backfill materials and their additives[J]. Uranium Geology, 1996, 12(4): 238 - 244.)
- [2] STEPHANSSON Ove, TSANG Chin-fu, JING Lanru, KAUTSKY Fritz. Decovalex project 1992 - 2006: purposes, tasks and main achievements[C]// Advances on Coupled Thermo-hydro-mechanical-chemical Processes in Geosystems and Engineering. Nanjing, 2006: 149 - 162.
- [3] XIE Ming-liang, BAUER Sebastian, KOLDITZ Olaf, et al. Numerical simulation of reactive process in an experiment partially saturated bentonite[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2006, 83: 122 - 147.
- [4] MESRI G, OLSON E. Shear strength of montmorillonite[J]. Géotechnique, 1970, 20(3): 261 - 270.
- [5] MESRI G, OLSON R E. Consolidation characteristics of montmorillonite[J]. Géotechnique, 1971, 21(4): 341 - 352.

- [6] SRIDHARAN A, RAO S M, MURTHY N S. Compressibility behaviour of homoionized bentonites[J]. *Géotechnique*, 1986, **36**(4): 551 - 564.
- [7] MAIO C Di. Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects[J]. *Géotechnique*, 1996, **46**(4): 695 - 707.
- [8] GAJO A, MAINES M. Mechanical effects of aqueous solutions of inorganic acids and bases on natural active clay[J]. *Géotechnique*, 2007, **57**(8): 687 - 699.
- [9] HUSSAIN A Alawaji. Swell and compressibility characteristics of sand-bentonite mixtures inundated with liquids[J]. *Applied Clay Science*, 1999, **15**: 411 - 430.
- [10] CASTELLANOS E, GENS A, LLORET A, ROMERO E. Influence of water chemistry on the swelling capacity of a high-density bentonite[C]// *Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils*. Carefree, 2006: 962 - 972.
- [11] WANG Ju, SU Rui, CHEN Wei-ming, GUO Yong-hai, et al. Deep geological disposal of high-level radioactive wastes in china[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(4): 649 - 658.
- [12] WEN Zhi-jian. Physical property of china's buffer material for high-level radioactive waste repositories[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(4): 794 - 800.
- [13] CHEN Bao, QIAN Li-xin, YE Wei-min, et al. Soil-water characteristic curves of Gaomiaozi bentonite[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(4): 788 - 793.
- [14] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (TAN Luo-rong, KONG ling-wei. *Soil geology of special geotechnical engineering*[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [15] PUSCH Roland, YONG Raymond N. Microstructure of smectite clays and engineering performance[M]. London and New York: Taylor & Francis, 2006.
- [16] LLORET A, VILLAR M V, SANCHEZ M, et al. Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes[J]. *Géotechnique*, 2003, **53**(1): 27 - 40.
- [17] DELAGE P, MARCIAL D, CUI Y J, RUIZ X. Ageing effects in a compacted bentonite: a microstructure approach[J]. *Géotechnique*, 2006, **56**(5): 291 - 304.
- [18] SUZUKI S, PRAYONGPHAN S, ICHIKAWA Y, CHAE B. In situ observations of the swelling of bentonite aggregates in NaCl solution[J]. *Applied Clay Science*, 2005, **29**: 89 - 98.
- [19] SANTAMARINA J C, KLEIN K A, PALOMINO A, GUIMARAES M S. Micro-scale aspects of chemical-mechanical coupling: Interparticle forces and fabric[C]// *Chemo-mechanical Coupling in Clays: From Nano-scale to Engineering Applications*. Maratea, 2001: 47 - 60.
- [20] ALONSO E E. Modelling expansive soil behaviour[C]// *Proceedings of the Second International Conference on Unsaturated Soils*. Beijing, 1998: 37 - 70.
- [21] ALONSO E E, VAUNAT J, GENS A. Modelling the mechanical behaviour of expansive clays[J]. *Engineering Geology*, 1999, **54**: 173 - 183.