

DOI: 10.11779/CJGE201403022

高庙子膨润土膨胀力时效性试验研究

赖小玲¹, 叶为民^{1, 2, 3*}, 刘毅¹, 陈宝¹, 王琼¹

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 教育部城市环境与可持续发展联合研究中心, 上海 200092;

3. 灾害防控协同创新中心, 四川 成都 610059)

摘要: 针对高庙子膨润土在不同含水率和不同干密度条件下膨胀力时效性进行了试验研究。首先采用静力压实法将3种不同含水率的高庙子膨润土粉末压实为两种不同密实状态的试样, 随后在保持压实试样的体积和含水率不变的条件下, 分别静置0, 1, 7, 15, 30和90 d, 最后采用膨胀仪对完成静置试样的膨胀力进行量测; 同时结合静置过程, 完成了部分试样的扫描电镜(SEM)试验。试验结果表明: 高庙子膨润土的膨胀力随静置时间的增长不断减小, 且前期减小明显, 后期逐渐趋于稳定; 膨胀力的时效性与试样初始条件有关, 试样含水率和干密度越大, 膨胀力随静置时间的衰减越明显, 即时效性越强。SEM试验结果表明, 静置90 d后, 高庙子膨润土内的蒙脱石发生了水化, 集合体分解, 颗粒相互黏结, 微观孔隙结构趋于均质化, 呈现点阵式的絮状结构; 试样静置过程中不同微观结构层次之间的水分重新分布导致的蒙脱石水化是高庙子膨润土静置过程中膨胀力降低的主要内在原因。

关键词: 高庙子膨润土; 膨胀力; 时效性; 扫描电镜试验; 蒙脱石的水化

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)03-0574-06

作者简介: 赖小玲(1984-), 女, 湖北随州人, 博士研究生, 从事非饱和土研究工作。E-mail: xllai0284@163.com。

Experimental investigation on ageing effects on swelling pressure of unsaturated GMZ01 bentonite

LAI Xiao-ling¹, YE Wei-min^{1, 2, 3}, LIU Yi¹, CHEN Bao¹, WANG Qiong¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. United Research Center for Urban Environment and Sustainable Development, the Ministry of Education, Shanghai 200092, China;

3. Collaborative Innovation Center of Geohazard Prevention(CICGP), Chengdu 610059, China)

Abstract: The ageing effects on the swelling properties of GMZ01 bentonite with different water contents and dry densities are investigated. Firstly, GMZ01 bentonite powder with three different water contents is statically compacted to samples with two dry densities. Then, the compacted samples with different initial conditions are kept for various periods of time (0, 1, 7, 15, 30 and 90 days) under constant volume and water content conditions. Afterwards, the aged samples are subjected to swelling pressure tests using the swelling apparatus. At the same time, the SEM tests are conducted on some samples after experiencing different ageing time. The test results show that the swelling pressure of GMZ01 bentonite decreases with the ageing time. The pressure decreases fast at the early days of ageing and then turns to stabilize after 30 days of ageing. The ageing effects on the swelling pressure of GMZ01 bentonite depend on the initial conditions of the samples. The higher the initial water content and dry density, the stronger the ageing effects. The SEM test results indicate that the smectites hydration occurs in the 90-day aged samples. Aggregates decompose, particles bond with each other and the void distribution seems to be more homogenous, leading to a matrix type macrostructure. The smectites hydration induced by water redistribution between different microstructure levels is the main mechanism for the decrease of the swelling pressure of GMZ01 bentonite.

Key words: GMZ01 bentonite; swelling pressure; ageing effect; SEM; smectites hydration

0 引言

目前, 世界上许多国家如中国, 法国, 德国, 比利时, 瑞典和日本均采用深地质处置法对高放射性核废料(HLW)进行处置。在高放废物深地质处置库的概念设计中, 高压实膨润土因具备低渗透性, 良好的

基金项目: 国家自然科学基金项目(41030748); 国防科工局资助项目(科工计[2011]1051号); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1029)

收稿日期: 2013-08-20

***通讯作者**

膨胀性和热传导性, 高离子交换能力, 以及足够的机械缓冲性能等特性, 而被选作深地质处置库中的缓冲/回填材料^[1-3]。高压实膨润土的设计功能是: 膨润土遇水吸湿引起土体膨胀变形, 以密封高压实膨润土块体在砌置时形成的块体之间和块体与围岩之间的施工缝隙、以及围岩中因处置库开挖卸载引起的裂缝, 形成阻碍围岩中地下水渗入内库引起核素迁移, 以及库内高放废物辐射扩散的人工屏障。因此, 高压实膨润土膨胀性能(膨胀力和膨胀变形)的研究是处置库核素安全隔离研究中的首要问题。

在过去的几十年里, 许多学者针对高压实膨润土的膨胀性能进行了广泛研究^[4-10]。上述研究中, 高压实膨润土的膨胀特性试验一般在块体压实结束后立即进行, 而工程实践中, 膨润土块体从预制结束到完成砌置、直至吸水膨胀这一过程一般需数月至数年。在此期间, 高压实膨润土的微观结构将发生显著变化, 进而影响其缓冲性能^[11]。Gehling 等^[12]指出, 压实膨胀性黏土自压实结束后, 保持其含水率不变静置一段时间, 试样轴向会发生明显的膨胀变形, 且随静置时间不断发展, 最终趋于稳定, 说明压实膨胀性黏土块体的膨胀变形具有明显的时效性。因此, 为了更准确的了解高压实膨润土的膨胀特性, 有必要对膨润土自压实结束到吸水膨胀这段时间内的变化规律即膨胀特性时效性进行研究。

实际上, 许多学者(如 Barber^[13], Gizienski等^[14], Nalezny等^[15], Kassiff等^[16], Day^[17]和Subba Rao等^[18]等)都曾对压实膨胀性黏土的膨胀性能时效性进行过试验研究, 结果发现, 膨胀性黏土的膨胀性能随静置时间的增长逐渐减弱。

Nalezny等^[15]对比分析了静置3 d和无静置条件下膨胀性黏土膨胀变形和膨胀力的差异性, 指出流变削弱了黏土的膨胀势。Kassiff等^[16]采用三轴仪对静置时间为90 d的压实黏土试样进行膨胀力和自由膨胀试验。结果表明, 高初始干密度试样的膨胀力随静置时间首先呈增大趋势, 而后逐渐降低到无静置试样的膨胀力, 静置试样膨胀力和膨胀变形的峰值为无静置试样膨胀力和膨胀变形的2~3倍, 且该峰值与试样初始含水率和干密度有关。Day^[17]对美国某地区膨润土进行了干湿循环试验。试验过程中, 先将膨润土在一定初始条件下压制成型, 然后放入干燥皿中保持含水率不变分别静置2 d和20 d, 达到预定静置时间后取出试样进行干湿循环试验。试验结果表明, 静置时间降低了压实膨润土的膨胀性。Subba Rao等^[18]基于前人的研究成果, 对印度卡纳塔克邦膨胀土(液限100%)进行了考虑时间影响的膨胀性和干湿循环特性试验研究。试验过程中, 将膨胀土压制到指定干密度, 然后分别

静置7, 15, 30和90 d, 结束后取出试样并分别进行压缩一回弹, 一维膨胀和干湿循环试验。试验结果表明, 试样的抗压强度随静置时间的增长而增强, 而膨胀性能却随静置时间的增长而减小; 随着干湿循环次数的增多, 静置时间对试样膨胀变形的影响逐渐减弱, 多次循环后几乎消失。因此认为静置时间对土样膨胀特性影响的根本原因在于试样应力重分布和颗粒黏结的形成。

针对不同含水率、不同干密度的压实高庙子膨润土试样, 在保持含水率和体积不变条件下, 分别静置0, 1, 7, 15, 30和90 d, 再开展膨胀力和微观结构试验, 并据以分析不同初始条件下膨胀力随静置时间的变化规律及其产生机理。

1 试验材料与方法

1.1 高庙子膨润土及其基本特性

高庙子膨润土产自中国内蒙古高庙子地区, 目前已被确定为中国高放废物深地质处置库的首选缓冲/回填材料。试验所采用的高庙子膨润土为钠基膨润土, X射线衍射矿物定量分析试验结果见图1和表1。总阳离子交换能力是77.30 meq/100g, 其中Na⁺为43.36 meq/100g, Ca²⁺为29.14 meq/100g, Mg²⁺为12.33 meq/100g, K⁺为2.51 meq/100g。其他基本性能如下: 比重为2.66, pH值为8.68~9.86, 液限为276%, 塑限为37%。在实验室条件下(相对湿度60%, 吸力67 MPa, 温度20℃), 该膨润土为颗粒状白色粉末, 吸湿含水率为10.8%。

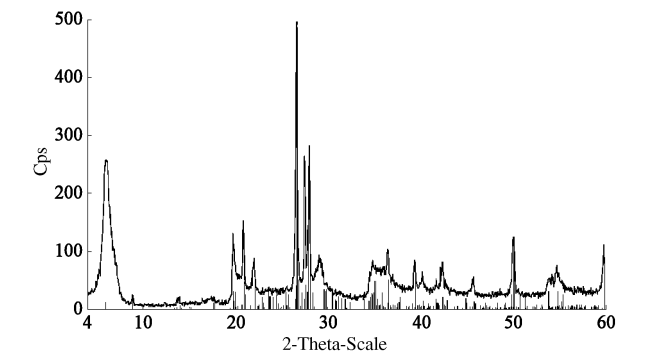


图 1 高庙子膨润土的 X-射线衍射结果

Fig. 1 XRD results of GMZ01 bentonite
表 1 高庙子钠基膨润土 X 射线衍射矿物定量分析
Table 1 XRD results of GMZ01 bentonite (%)

样品	石英	长石	方英 石	蒙脱 石	伊利 石	高岭 石	碳酸 盐
GMZ-1	11.7	4.3	7.3	75.4	—	0.8	0.5 (方解 石)

1.2 试样制备

(1) 粉末吸力平衡

试样压制之前,采用气相法控制膨润土粉末(初始含水率为10.8%)吸力,使其达到设定含水率。气相法^[19]吸力控制的基本原理是利用给定饱和盐溶液所对应的饱和蒸汽对试样施加相应的相对湿度,并经过反复的水汽交换,使得试样中的相对湿度与饱和盐溶液所对应的饱和蒸汽相对湿度达到平衡,此时试样中的吸力即为饱和蒸汽所对应的吸力。为此,将膨润土粉末充分拌匀后分成若干等份,分别放入盛有K₂SO₄和NaCl溶液的器皿中进行吸力控制试验,根据Kelvin定律可得其饱和蒸汽对应的吸力分别为4和38 MPa。吸力控制过程中,定期称量粉末重量直至基本恒定,平衡状态下粉末含水率分别为18.4%和13.3%。将经吸力控制的两种含水率粉末连同含水率为10.8%的粉末一并用于下文压实试验。

(2) 试样制备

根据膨润土粉末的初始含水率和目标干密度,计算所需膨润土粉末的质量,称取相应质量,倒入压样模具中,采用数控压力机将膨润土粉末压实至直径50 mm、厚为10 mm,干密度为1.7 g/cm³和1.4 g/cm³的圆饼状试样。压实过程采用变形控制,加载速率为0.1 mm/min,以尽量保证压实试样的均匀性。试验参数见表2。

考虑到压实膨胀土的高膨胀性和时效性试验的精度要求,采用了专门研制的环形不锈钢试样环,实现从试样压制、静置到后续的膨胀力试验等不同环节之间的转换过程中,样环与环中试样同时移动,避免了试样转移过程对试验结果可能产生的影响。

首先采用压实模具与特制的试样环将膨润土粉末压实到试样环中;压实完成后,取出试样环及其中的压实试样,采用盖板固定样环顶、底端,使环中试样处于密封的恒体积侧限状态,再放置于密封塑料盒中,保持含水率不变静置至设定时间;静置结束后,移除试样环顶、底盖板,再将试样连同样环一并装入特制的饱和膨胀渗透仪中进行膨胀力试验;另从平行样中取部分试样进行冷冻、干燥,用于扫描电镜SEM试验。

表 2 试验方案

Table 2 Test programs								
编号	干密度 /(g·cm ⁻³)	含水率 /%	静置时间/d					
SP-1	1.7	10.8	0	1	7	15	30	90
SP-2	1.7	13.3	0	1	7	15	30	90
SP-3	1.4	13.3	0	1	7	15	30	90
SP-4	1.4	18.4	0	1	7	15	30	90

(3) 试验装置与试验方法

本套试验装置样室内预置了环形中空结构,供压

实试样连同用于压样的试样环同时转移至膨胀室内。试验仪器如图2所示,包括底座、试样环、透水石、密封圈、不锈钢活塞、顶盖和力传感器。

试验方案如表2所示。

试验步骤如下:首先,将带有试样环的试样整体安装到膨胀仪中;再通过膨胀仪底座上的进水口向仪器内通入蒸馏水,待另一侧出水口有连续水流排出时,关闭出水口;采用无纸记录仪实时记录试验过程中膨胀力的变化,待膨胀力稳定后,结束试验。



图 2 膨胀仪

Fig. 2 Swelling pressure apparatus

2 试验结果分析

2.1 静置时间对膨胀力的影响

图3为干密度1.7 g/cm³、含水率10.8%的试样分别静置0, 1, 7, 15, 30和90 d后膨胀力与水化时间的关系曲线。由图3可知,静置不同时间后,试样膨胀力随水化时间的发展规律基本一致,均呈现出明显的双峰结构,这点与文献[10]所得结果相一致;图3还表明,膨胀力第二峰值大于第一峰值,最大膨胀力(膨胀力最终稳定值,以下简称膨胀力)随静置时间的增长不断减小。

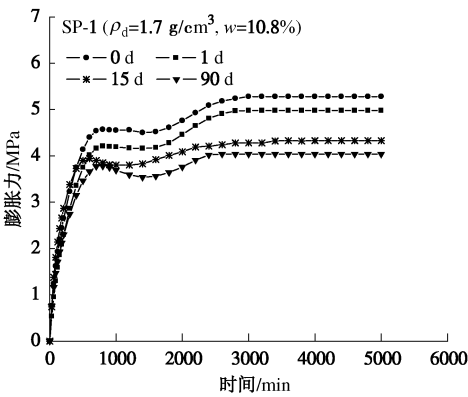


图 3 不同静置时间条件下膨润土水化膨胀曲线

Fig. 3 Curves of swelling pressure with hydration time at different ageing time

图4为实测不同初始条件试样的膨胀力与静置时

间之间的关系。图4表明, 膨胀力随静置时间的增长而减小; 静置前期, 膨胀力下降较快, 静置后期下降较慢。初始含水率10.8%的高压实试样, 静置0 d到1 d膨胀力平均下降率为0.30 MPa/d; 静置1 d到7 d膨胀力平均减小速率为0.059 MPa/d; 静置30 d以后膨胀力衰减基本稳定, 静置30 d到90 d试样膨胀力平均减小速率仅为0.002 MPa/d。

Subba Rao等^[18]通过对印度卡纳塔克邦膨胀土(液限100%)进行膨胀力时效性试验研究后认为, 颗粒重分布和颗粒黏结的形成是静置期间膨胀力衰减的主要原因。

Delage 等^[11]指出, 膨润土试样自压实结束后, 在吸力平衡作用下, 试样内水分发生重分布, 集合体间大孔隙中的水分子逐渐向集合体内小孔隙移动, 导致晶层间水分子层数增多, 蒙脱石水化, 集合体内厚的层叠体逐步裂开成更多更薄的层叠体, 集合体随之分解, 集合体间大孔隙减少, 集合体内小孔隙增多, 彼此之间距离减小, 内部逐渐趋于均匀化。在土中水的作用下, 集合体之间将相互黏结, 形成一个整体的絮状结构, 内部凝聚力增大, 膨胀力降低。

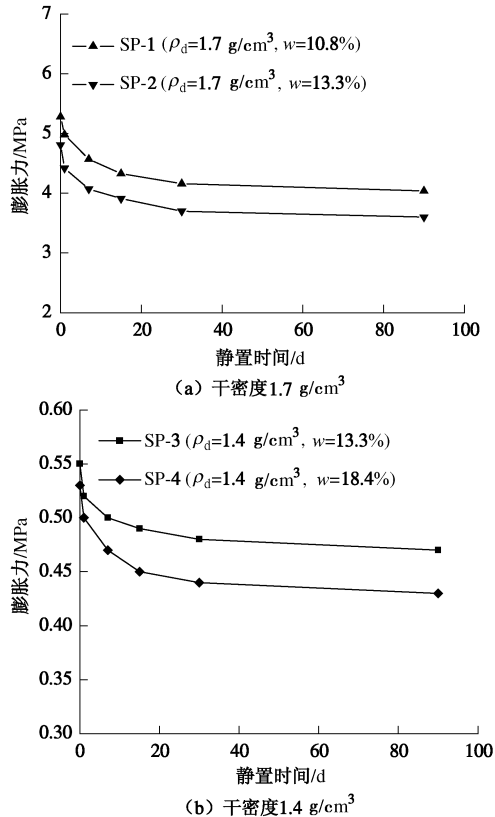


图4 膨胀力与静置时间的关系

Fig. 4 Change of swelling pressure with ageing time

2.2 膨胀力时效性影响因素

(1) 含水率

为定量描述试样膨胀力随静置时间的增长而减小, 这里引入膨胀力衰减率 (η) 的概念, 定义:

$$\eta_i = \frac{p_0 - p_i}{p_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中 p_0 为静置0 d时试样水化最大膨胀力; p_i 为静置*i* 天时试样水化最大膨胀力。式 (1) 表明, 衰减率 η 越大, 膨胀力随静置时间的衰减越明显。

根据式 (1) 的定义, 计算得不同初始状态试样膨胀力衰减率 η 与静置时间的关系, 如图5。图5显示, 不同初始状态的膨润土试样膨胀力衰减率 η 随静置时间的变化规律基本一致, 即随静置时间的增长而增大, 且静置前期增长速率较快, 后期较慢。此外, 图5还表明, 相同静置时间条件下, 相同初始干密度试样的膨胀力衰减率 η 随初始含水率的增加而增大。如静置90 d之后, 干密度1.7×10³ kg/m³, 含水率10.8%和13.3%的膨胀力衰减率 η 分别为23.5%和25.2%, 两者相差1.7%; 干密度1.4×10³ kg/m³, 含水率13.3%和18.4%的膨胀力衰减率 η 分别为14.5%和18.9%, 两者相差4.4%。由此认为, 试样含水率越大, 膨胀力随静置时间的衰减越明显, 即膨胀力时效性越强。Delage等^[11]的研究成果表明, 干密度一定时, 试样静置期间, 颗粒内部水分重分布与土中水的含量有较大关系, 初始含水率较大时, 土中水含量大, 蒙脱石水化更充分, 集合体内小孔隙明显增多, 黏土颗粒相互之间更容易形成黏结, 因此, 膨胀力衰减率随含水率的增加而增大。

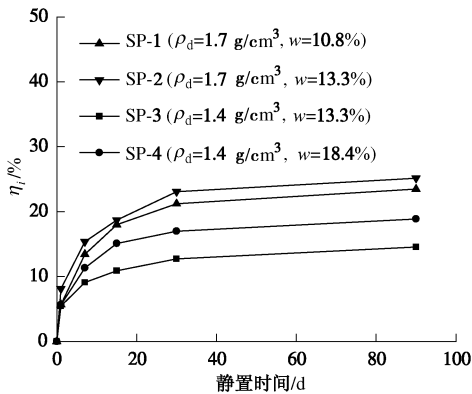


图5 膨胀力衰减率与静置时间的关系

Fig. 5 Relationship between decreasing ratio of swelling pressure and ageing time

(2) 干密度

图5还表明, 相同静置时间条件下, 相同初始含水率试样的膨胀力衰减率 η 随初始干密度的增加显著增大。含水率13.3%, 干密度分别为1.7 g/cm³和1.4 g/cm³的试样静置1 d后的膨胀力衰减率 η 即开始出现明显差异; 静置90 d后, 初始干密度1.7 g/cm³试样的膨胀力衰减率 (25.2%) 明显大于初始干密度1.4 g/cm³条件下的衰减率 (14.5%)。由此可见, 膨胀力随静置时间的衰减对试样初始干密度的变化非常敏感, 初始干密

度越大, 膨胀力随静置时间的衰减越明显。

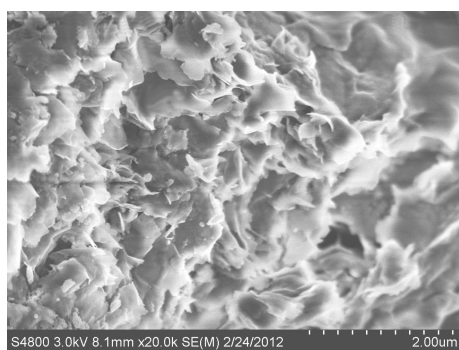
产生上述现象的主要原因是, 初始干密度较大时, 膨润土内部结构紧密, 颗粒间孔隙较小, 在土中水的作用下更容易形成相互黏结的絮状结构, 导致膨润土强度增加, 膨胀性能减弱。这点可以从SEM微观结构试验结果得到验证。

2.3 机理解释

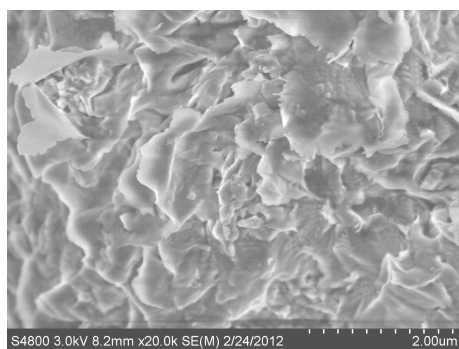
为了更好地从微观机理层面对上述高庙子膨润土膨胀力时效性进行解释, 开展了典型试样静置不同时间条件下的扫描电镜 (SEM) 试验。

试样SP-2 ($\rho_d = 1.7 \text{ g/cm}^3$, $w = 13.3\%$) 静置结束后, 一部分用于膨胀力试验, 另一部分冷冻干燥, 用于SEM试验。SEM试验的具体步骤如下: 首先将冷冻干燥后的试样研磨至粉末状, 然后将粉末状样品以1%~2%的浓度分散在乙醇中, 超声分散10 min后直接将混浊液滴于S-4800环境扫描电镜的样品台上, 之后进行喷金镀膜处理。选择离子溅射仪工作距离为50 mm, 真空度0.05 mbar, 电流控制在30 mA, 溅射时间40~60 s, 喷金厚度大于5 nm。然后将样品放入扫描电镜抽真空, 随后施加一定电压, 调整束斑尺寸, 聚焦清晰后, 获取形貌和结构图像, 如图6所示。

图6为试样SP-2 ($\rho_d = 1.7 \text{ g/cm}^3$, $w = 13.3\%$) 静置1 d和90 d后的扫描电镜SEM图。从图6中可以看出, 静置1 d时, 试样中集合体特征较明显, 集合体间孔



(a) 1 d



(b) 90 d

图6 试样SP-2 ($\rho_d = 1.7 \text{ g/cm}^3$, $w = 13.3\%$) 静置不同时间后SEM图

Fig. 6 SEM pictures of samples SP-2 ($\rho_d = 1.7 \text{ g/cm}^3$, $w = 13.3\%$)

隙较大; 静置90 d后, 试样内蒙脱石发生水化, 集合体分解, 孔隙分布均匀, 呈现出点阵式的絮状结构。产生上述现象的主要原因是: 静置过程中, 集合体间大孔隙和集合体内小孔隙之间的水分重分布, 大孔隙中的水分子不断向小孔隙中移动, 导致晶层间吸附水分子层数增多, 蒙脱石水化, 集合体分解, 集合体间大孔隙减少, 集合体内小孔隙增多, 孔隙结构趋于均匀化。

因此可以认为, 试样静置过程中的不同微观结构层次之间的水分重分布导致的蒙脱石水化是高庙子膨润土静置过程中膨胀力衰减的主要内在原因。

3 结 语

采用膨胀仪对高庙子膨润土静置不同时间后的膨胀力进行了试验研究, 试验结果表明, 静置时间对高庙子膨润土膨胀力具有显著影响, 且该影响与试样的初始条件有关。具体结论如下:

相同初始条件下, 高庙子膨润土的膨胀力随静置时间的增长不断衰减, 且前期减小较明显, 后期逐渐趋于稳定。

干密度一定时, 试样含水率越大, 膨胀力随静置时间的衰减越明显, 膨胀力时效性越强;

含水率一定时, 试样干密度越大, 膨胀力随静置时间的衰减越明显, 膨胀力时效性越强;

SEM试验结果表明, 静置90 d后, 试样内蒙脱石发生水化, 集合体分解, 颗粒相互黏结, 微观孔隙结构趋于均质化, 呈现出点阵式的絮状结构。

试样静置过程中不同微观结构层次之间的水分重分布导致的蒙脱石水化是高庙子膨润土静置过程中膨胀力衰减的主要内在原因。

参考文献:

- [1] Swedish Nuclear Fuel, Waste Management CO. SKB91 final disposal of spent nuclear fuel. Importance of the bedrock for safety[R]. SKB Technical Report, 92-20, 1992.
- [2] Atomic Energy of Canada. Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste[R]. AECL-10711, COG-93-1, 1994.
- [3] JAPAN NUCLEAR CYCLE DEVELOPMENT INSTITUTE. H12: Project to establish the scientific and technical basis for HLW disposal in Japan[R]. Supporting Report 2, Repository Design and Engineering Technology, 1999.
- [4] KOMINE H, OGATA N. Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 478 - 490.

- [5] DELAGE P, HOWAT M D, CUI Y J. The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay[J]. *Engineering Geology*, 1998, **50**: 31 – 48.
- [6] TRIPATHY S, SRIDHARAN A, SCHANZ T. Swelling pressures of compacted bentonites from diffuse double layer theory[J]. *Can Geotech J*, 2004, **41**: 437 – 450.
- [7] VILLAR M V, LLORET A. Influence of dry density and water content on the swelling of a compacted bentonite[J]. *Applied Clay Science*, 2008, **39**(1/2): 38 – 49.
- [8] KOMINE H, YASUHARA K, MURAKAMI S. Swelling characteristics of bentonites in artificial seawater[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, **46**(2): 177 – 189.
- [9] YE W M, CHEN Y G, CHEN B, et al. Advances on the knowledge of the buffer/backfill properties of heavily-compacted GMZ bentonite[J]. *Engineering Geology*, 2010, **116**: 12 – 20.
- [10] YE W M, WAN M, CHEN B, et al. Temperature effects on the swelling pressure and saturated hydraulic conductivity of the compacted GMZ01 bentonite[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **68**: 281 – 288.
- [11] DELAGE P, MARCIAL D, CUI Y J, et al. Ageing effects in a compacted bentonite: a microstructure approach[J]. *Géotechnique*, 2006, **56**: 291 – 304.
- [12] GEHLING W Y Y, ALONSO E E, GENS A. Stress-path testing of expansive compacted soils[C]// *Proc 1st Int Conf on Unsaturated Soils*. Paris, 1995, **1**: 77 – 82.
- [13] BARBER E S. Discussion of ‘Engineering properties of expansive clays’ by W. G. Holtz and H. J. Gibbs[J]. *Trans Div ASCE*, 1956, **121**: 669 – 673.
- [14] GIZIENSKI S F, LEE L J. Comparison of laboratory swell tests to small scale field tests; engineering effects of moisture changes in soils[C]// *Proceedings of the International Research and Engineering Conference on Expansive Soils*. College Station, 1965: 108 – 119.
- [15] NALEZNY C L, LI M C. Effects of soil moisture and thixotropic hardening on the swell behaviour of compacted expansive soils[M]. *Highway Res Rec Washington D C: Highway Research Board*, 1967: 209.
- [16] KASSIFF G, BAKER R. Ageing effects on swell potential of compacted clay[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1971, **97**(3): 529 – 540.
- [17] DAY R W. Swell-shrink behaviour of expansive compacted clay[J]. *J Geotech Engng, ASCE*, 1994, **120**(3): 618 – 623.
- [18] SUBBA RAO K S, TRIPATHY S. Effect of aging on swelling and swell-shrink behaviour of a compacted expansive soil[J]. *ASTM Geotech Test J*, 2003, **26**: 36 – 46.
- [19] 叶为民, 白云, 金麒, 等. 上海软土土水特征的室内试验研究. *岩土工程学报*, 2006, **28**(2): 260 – 263. (YE Wei-min, BAI Yun, JIN Qi, et al. Lab experimental study on soil-water characteristics of Shanghai soft clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(2): 260 – 263. (in Chinese))