

高庙子钙基膨润土的膨胀特性

方雷, 孙德安, 孙文静
(上海大学土木工程系, 上海 200072)

摘要: 对高庙子钙基膨润土进行了膨胀变形试验、膨胀力试验及湿陷试验, 研究了其膨胀特性及湿陷特性. 试验结果表明: 膨胀力随初始干密度的增加而增大, 且膨胀力的对数与初始干密度大致呈线性关系; 浸水引起的膨胀应变随着竖向应力、初始含水量的增大而减小, 且随着初始干密度的增加而增大; 膨胀速率随初始干密度的增加而增大, 随竖向应力、初始含水量的增大而减小; 在相同竖向应力下, 3种试验方法得到的浸水饱和和稳定后的孔隙比大致相同, 在双对数坐标下, 孔隙比与竖向应力呈线性关系.

关键词: 高庙子钙基膨润土; 膨胀力; 膨胀变形; 膨胀速率; 湿陷

中图分类号: TU 443

文献标志码: A

文章编号: 1007-2861(2013)05-0508-05

Swelling Characteristics of Gaomiaozi Ca-Bentonite

FANG Lei, SUN De-an, SUN Wen-jing

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The swelling and collapse characteristics of compacted Gaomiaozi Ca-bentonite are studied by conducting a series of swelling deformation tests, swelling pressure tests and collapse tests. It is found that the swelling pressure increases with the increase of the initial dry density. There is a linear relation between them in semi-logarithmic scales. The swelling strain due to wetting decreases with the increase of the vertical stress or initial water content, but increases with the increase of the initial dry density. The swelling rate increases with the increase of the initial dry density, but decreases with the increase of the vertical stress or initial water content. The void ratios at full saturation by three different testing methods are almost the same for the same vertical stress. There is a linear relation between the void ratio at full saturation and the vertical stress in logarithmic scales.

Key words: Gaomiaozi Ca-bentonite; swelling pressure; swelling deformation; swelling rate; collapse

利用核能发电已成为解决我国能源短缺的一种主要方案. 随着核能作用的日益显著, 核废料也随核能消耗的不断增多. 高放射性核废料包括半衰期较长的核素, 因其放射性强、生物毒性大、发热量大, 在最终处置方面远比低放射性核废料复杂, 若不加以安全处置, 将会破坏生态环境, 威胁人类安全. 如何处理核废料已成为全球关注的问题.

国际上普遍认为, 高放射性核废料的永久处置应采用深地质处置方法. 该处置系统中的缓冲、回填材料计划采用具有极高膨胀性、极低渗透性和优良核素吸附等性能的膨润土. 内蒙古兴和县高庙子膨润土矿床已确定为我国缓冲、回填材料的首选供应基地^[1-2].

高庙子膨润土主要有钙基膨润土和钠基膨润土两类. 由于计划作为缓冲材料的钠基膨润土有一定的埋深, 开采成本较高, 为了节约处置工程成本, 使用处于地表的钙基膨润土作为回填材料已列入考虑范畴. 因此, 研究高庙子钙基膨润土的浸水膨胀特性等力学性质具有重要的实用意义.

目前, 国内外学者对高庙子钠基膨润土进行了较多的试验研究. 秦冰等^[3]研究了影响高庙子钠基膨润土膨胀变形的因素. 叶为民等^[4]采用恒体积试验法研究了高压实高庙子膨润土 GMZ01 的膨胀力特性. 张虎元等^[5]对不同掺砂比的钠基膨润土-砂混合物静力压实试样进行了室内试验. 孙文静等^[6]研究了膨润土

收稿日期: 2012-10-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41102163); 教育部博士点基金资助项目(20093108110017)

通信作者: 孙德安(1962—), 男, 教授, 研究方向为岩土工程. E-mail: sundean@shu.edu.cn

在侧限条件下由竖向荷载作用引起的变形及侧向应力的变化规律. 孙德安等^[7]根据蒙脱石孔隙比的概念, 统一整理了饱和时的高庙子钠基膨润土及其掺砂混合物的变形特性. Hussain^[8]通过压缩试验对膨润土加砂混合物的膨胀和压缩特性进行了研究. Komine 等^[9]研究了膨润土的膨胀变形特性.

本研究对高庙子钙基膨润土进行了固结和浸水膨胀试验, 研究了其膨胀特性和湿陷特性, 旨在为我国深层地质处置工程库中回填材料的比选提供试验数据.

1 试验方法

1.1 试验材料

试验采用的高庙子钙基膨润土与文献 [2] 所采用的 GMZ-Ca 黏土取自相同的地层. 该膨润土的主要矿物成分为蒙脱石, 伴生矿物为石英、方解石、长石等, 其主要物理参数如表 1 所示.

表 1 高庙子钙基膨润土的主要物理参数

Table 1 Main physical parameters of Gaomiaozi Ca-bentonite

蒙脱石含量 ^[2] /%	比重	液限/%	塑限/%	塑性指数
73~82	2.725	99	41	58

表 2 为通过 X 射线荧光光谱(X-ray fluorescence, XRF)分析方法测得的高庙子钙基膨润土的化学成分. 采用自由膨胀率试验测得高庙子钙基膨润土的自由膨胀率 δ_{ef} 为 115%, 根据 GBJ 112—87^[10]规定, 该膨润土属于高膨胀性土. 由于膨润土具有极为活泼的阳离子交换性, 为避免试验用水溶液与试样发生离子交换, 影响试样力学特性与变形特性, 试验采用蒸馏水.

1.2 仪器与方法

试验在固结仪上完成, 试验方法与文献 [7] 方法相同. 配制土样初始含水量约为 19.0%, 试样的底面积为 30 cm², 高度为 2 cm. 试样按照不同的初始孔隙比击实而成. 试样安装固结仪后, 使加载系统充分接触, 装上百分表, 便可进行膨胀变形试验、膨胀力试验和湿陷试验. 膨胀应变表示如下:

$$\varepsilon = \frac{(h_2 - h_1)}{h_1} \times 100\%, \quad (1)$$

式中, h_1 , h_2 分别为浸水前和浸水膨胀时的试样高度.

本试验按试样的初始干密度分为 4 组, 同一组内试样的初始干密度大致相同. 4 组试样的初始干密度分别为 1.00, 1.17, 1.32 和 1.45 g/cm³, 对应的编号分别为 A 组、B 组、C 组及 D 组. 在不同的竖向应力下对试样进行浸水膨胀变形和湿陷试验.

表 2 高庙子钙基膨润土的化学成分

Table 2 Chemical components of Gaomiaozi Ca-bentonite

成分	含量/%
SiO ₂	76.570
Al ₂ O ₃	12.670
MgO	4.290
Fe ₂ O ₃	2.560
CaO	2.210
K ₂ O	0.650
O	0.386
Na ₂ O	0.287
TiO ₂	0.204
SO ₃	0.046
MnO	0.038
SrO	0.031
Cr ₂ O ₃	0.030
ZrO ₂	0.021
Y ₂ O ₃	0.010

2 结果与分析

2.1 浸水膨胀变形试验结果

2.1.1 浸水膨胀应变、膨胀速率和时间的关系

图 1 显示了各种条件下浸水膨胀应变随时间的变化. 由图 1(a) 可知, 同一初始干密度和初始含水量的土样的膨胀应变随着竖向应力的增大而减小. 由图 1(b) 可知, 同一竖向应力和初始含水量的土样的膨胀应变随初始干密度的增大而增大. 由图 1(c) 可知, 同一竖向应力和初始干密度的土样的膨胀应变随初始含水量的增加而减小. 由图 1(a) 和 (b) 可知, 当具有较大的竖向应力或较小初始干密度的土样浸水时, 其体积不仅不会膨胀, 反而会收缩, 即产生土体湿陷.

图 2 为浸水膨胀速率随时间变化的关系曲线. 可见, 膨胀速率随时间的增加而减小. 膨胀变形过程可划分为两个阶段: 在第一阶段, 土颗粒表面水化引起膨胀, 吸力较大, 膨胀速率较大^[11]; 随着水分在土体内的深入, 膨胀速率不断减小; 试样接近饱和时, 其体积膨胀甚微, 即进入第二阶段, 其膨胀速率趋于 0.

把图 1 所示的试验结果用膨胀速率 $\dot{\varepsilon}$ 与时间 t 的关系进行整理, 结果如图 3 所示. 从图 3 可知, 同一初始干密度和初始含水量的土样的膨胀速率随着竖向应力的增大而减小(见图 3(a)); 同一竖向应力和初始含水量的土样的膨胀速率随初始干密度的增大而增大(见图 3(b)); 同一竖向应力和初始干密度土样的膨胀速率随初始含水量的增大而减小(见图 3(c)). 当竖向应力较大或初始干密度较小时, 膨胀速率为负值, 如图 3(a)和(b) 所示.

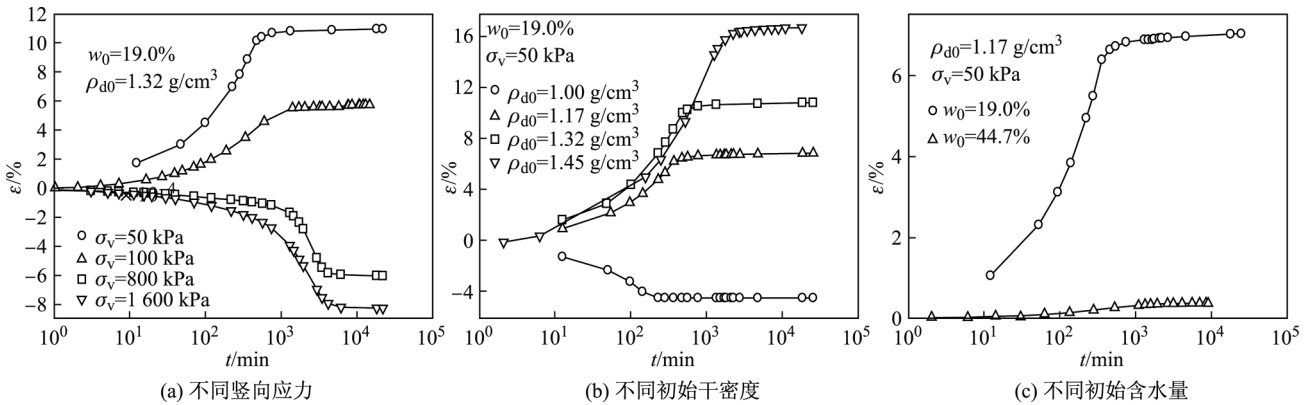


图 1 浸水膨胀应变随时间的变化规律

Fig. 1 Processes of swelling strain with time due to wetting

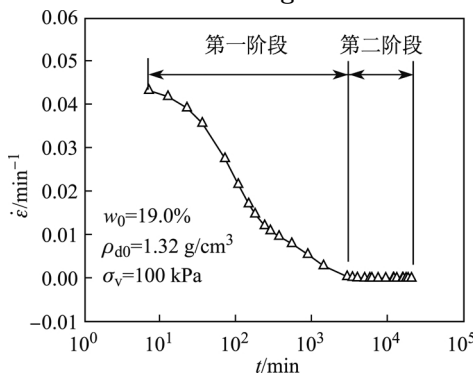


图 2 浸水膨胀变化的 2 个阶段

Fig. 2 Two stages of wetting-induced swelling

2.1.2 浸水膨胀变形规律

图 4 为 A, C, D 三组土样浸水引起的膨胀应变与竖向应力的关系. 同一初始干密度下的膨胀应变与竖向应力的对数值大致呈线性关系, 膨胀应变在同一初始干密度下随竖向应力的增大而减小, 膨胀应变在同一竖向应力下随初始干密度的增大而增大. 根据上述试验结果, 高庙子钙基膨润土浸水引起的膨胀应变 ε 可以表示为

$$\varepsilon = A_1 - A_2 \lg(\sigma_v/A_3), \quad (2)$$

式中, A_1 和 A_2 为试验参数, 与初始干密度有关, 具体数值如表 3 所示(其中 R 为相关系数), $A_3=1$ kPa.

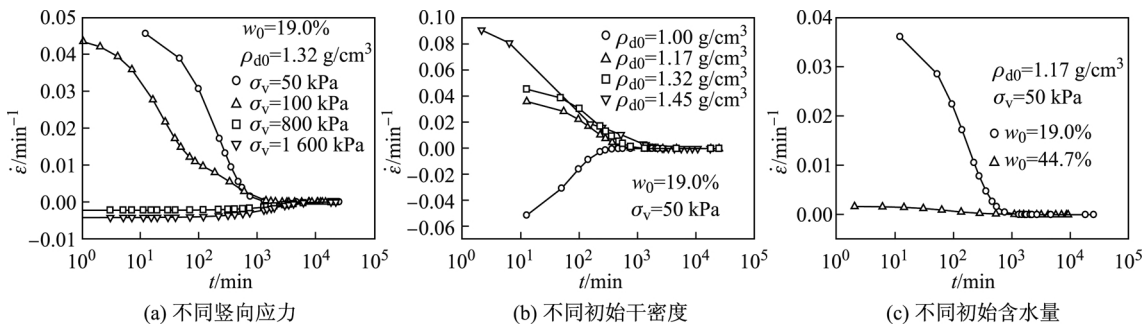


图 3 膨胀速率随时间变化的规律

Fig. 3 Processes of swelling rates with time

2.2 膨胀力试验结果

膨胀力是指土样的含水量不断增加而体积保持不变时所产生的应力. 本膨胀力试验采用平衡加压法, 也叫恒体积试验法^[4], 是在土样遇水开始膨胀时, 通过不断调整外荷载使土样保持原来的体积不变, 即浸水前后体积不变, 这里的体积是指土样的初始体积. 因此, 试验过程对土样结构破坏较小.

图 5 为膨胀力与初始干密度的关系曲线. 由图可见, 膨胀力随初始干密度的增大而增大, 且膨胀力的对

数值与初始干密度有良好的线性关系, 这与许多学者的试验结果一致.

膨胀力也可由加压膨胀法得到, 即对非饱和状态下的试样施加竖向荷载固结, 待固结稳定后开始浸水, 再通过不断增加外荷载来阻止试样吸水后的体积膨胀变形, 即浸水前后的土样体积不变. 注意此时的体积是指土样固结稳定后的体积, 而不是土样的初始体积, 初

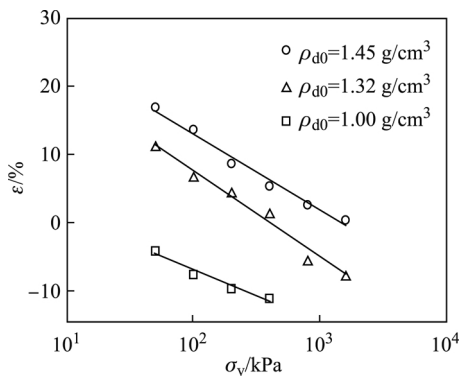


图 4 不同初始干密度下膨胀应变和竖向应力的关系
Fig. 4 Swelling strain versus vertical stress relation at different initial dry densities

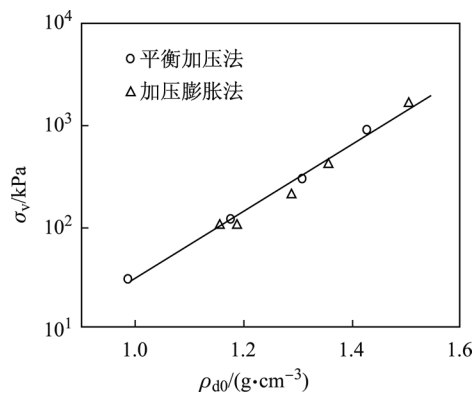


图 6 2 种膨胀力试验方法的比较
Fig. 6 Comparison of two test methods for determining swelling pressure

表 3 试验参数

Table 3 Test parameters

初始干密度/(g·cm ⁻³)	A ₁	A ₂	R ²
1.00	8.153	7.716	0.962 9
1.35	33.147	12.954	0.977 8
1.45	35.878	11.444	0.984 0

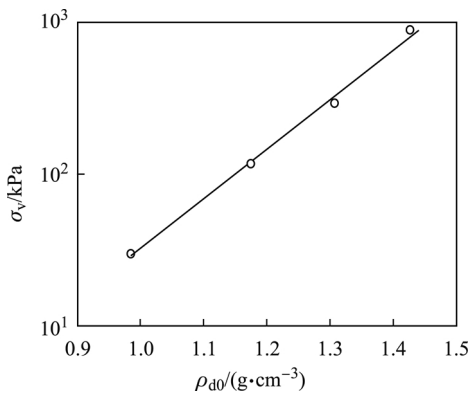


图 5 膨胀力与初始干密度的关系
Fig. 5 Swelling pressure versus initial dry densities relation

2.3 浸水湿陷变形试验结果

以上膨胀变形和膨胀力试验是在试样的初始干密度相对较大的情况下完成的. 如果试样的初始干密度较小, 即使膨润土浸水也有可能引起体缩, 即湿陷. 本湿陷试验先对初始干密度较小的试样逐级加载固结至预定荷载, 压缩变形稳定后浸水, 试样便产生湿陷. 这是因为膨润土的初始含水量低, 对应的吸力较大, 浸水之后, 土样的含水量增大, 吸力减小, 降低了土颗粒的粘聚力, 故引起土结构的迅速破坏, 土样收缩即湿陷变形发生. 图 7 中线 AB 表示非饱和试样的压缩曲线. 浸水引起体缩(湿陷)变形, 变形稳定后的孔隙比与竖向应力的对数关系大致呈线性关系, 如图 7 中的虚线.

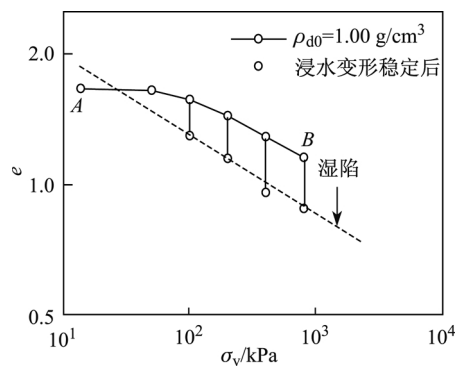


图 7 压缩和湿陷试验中孔隙比和竖向应力的关系
Fig. 7 Void ratio versus vertical stress during compression and collapse tests

始干密度为浸水前即固结稳定后的干密度. 图 6 显示了加压膨胀法和平衡加压法得到的膨胀力与开始浸水时的初始干密度的关系, 其中平衡加压法的膨胀力试验结果如图 5 所示. 由图 6 可知, 加压膨胀法和平衡加压法的膨胀力与浸水前的初始干密度的关系相同, 2 种膨胀力试验得到的膨胀力与初始干密度的关系可用下式表示:

$$\lg(\sigma_v/B_3) = B_1\rho_{d0} - B_2, \quad (3)$$

式中, $B_3=1$ kPa, B_1 和 B_2 为材料常数, 对于高庙子钙基膨润土, $B_1=3.348$ cm³/g, $B_2=1.899$.

2.4 3 种试验结果比较

图 8 所示为高庙子钙基膨润土的浸水膨胀变形试验、膨胀力试验以及浸水湿陷试验得到的浸水饱和后的孔隙比与竖向应力的关系. 由图可知, 不管采用何种试验方法, 对于高庙子钙基膨润土, 其饱和后的孔隙比与竖向应力的关系是相同的, 而孔隙比与竖向应力的对数呈唯一的线性关系.

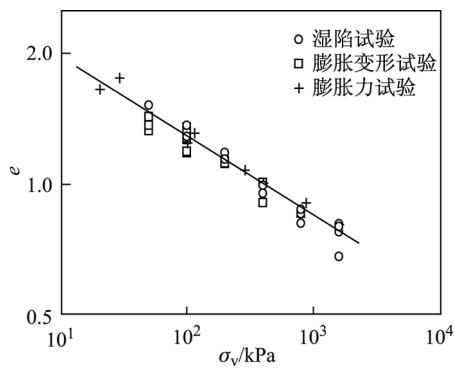


图 8 饱和后的孔隙比和竖向应力的关系

Fig. 8 Relation between void ratio and vertical stress at full saturation

2.5 膨胀变形和膨胀力的预测

根据图 8 所示的饱和后高庙子钙基膨润土的孔隙比与竖向应力的线性关系, 可预测任意初始干密度试样的膨胀力, 以及在给定应力下的浸水膨胀变形或湿陷变形。

浸水引起膨胀力的预测方法如下: 先根据浸水时的孔隙比 e , 由图 8 中的直线得到 σ_v , 此值即为高庙子钙基膨润土因浸水饱和和引起的膨胀力。

浸水引起的一维变形量的预测方法如下: 根据浸水饱和时的竖向应力, 由图 8 的直线求得浸水饱和时的最终孔隙比 e , 并与浸水前的孔隙比进行比较, 即可求得高庙子钙基膨润土因浸水引起的变形量。

3 结 论

(1) 平衡加压法和加压膨胀法得到的膨胀力与初始干密度的关系相同, 在半对数坐标上呈线性关系。

(2) 土体的膨胀应变和时间的对数值关系曲线呈 S 形, 且膨胀速率随着时间的增加而减小。

(3) 由膨胀变形试验、湿陷变形试验及膨胀力试验结果可知, 3 种试验得到的浸水变形稳定后的孔隙比与竖向应力的关系相同, 二者在双对数坐标系上呈线性关系。据此可预测任意初始干密度下高庙子钙基膨

润土的膨胀力, 以及在给定应力下的浸水膨胀变形或湿陷变形。

参考文献:

- [1] 刘月妙, 陈璋如. 内蒙古高庙子膨润土作为高放废物处置库回填材料的可行性 [J]. 矿物学报, 2001, 21(3): 541-543.
- [2] 刘月妙, 温志坚. 用于高放射性废物深地质处置的粘土材料研究 [J]. 矿物岩石, 2003, 23(4): 42-45.
- [3] 秦冰, 陈正汉, 刘月妙, 等. 高庙子膨润土的胀缩变形特性及其影响因素研究 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 1006-1010.
- [4] 叶为民, 钱丽鑫, SCHANZ T, 等. 高压实高庙子膨润土 GMZ01 的膨胀力特征 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(Z2): 3861-3865.
- [5] 张虎元, 崔素丽, 刘吉胜, 等. 混合型缓冲回填材料膨胀力试验研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3087-3095.
- [6] 孙文静, 孙德安, 闫威. 侧限应力状态下非饱和膨润土的变形特性 [J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2010, 16(1): 105-110.
- [7] 孙德安, 邵莉娜. 高庙子膨润土和砂混合物膨胀变形特性及其预测 [J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2013, 19(2): 197-202.
- [8] HUSSAIN A A. Swell and compressibility characteristics of sand-bentonite mixtures inundated with liquids [J]. Applied Clay Science, 1999, 15: 411-430.
- [9] KOMINE H, OGATA N. Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 478-490.
- [10] 城乡建设环境保护部. GBJ 112—87 膨胀土地区建筑技术规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1989.
- [11] 袁俊平, 陈剑. 膨胀土单向浸水膨胀时程特性试验与应用研究 [J]. 河海大学学报, 2003, 31(5): 547-551.