DOI：10.16285/j.rsm.2017.1808

高庙子膨润土强度时效性试验研究

孙德安[1]，张乾越[1]，张 龙[1]，朱赞成[2]

（1. 上海大学 土木工程系，上海 200444；2. 台州学院 建筑工程学院，浙江 台州 318000）

摘 要：本文用试验方法研究了静置时间对不同含水率高庙子钠基（GMZ07）膨润土强度的影响。在保持试样干密度和含水率不变的情况下，将初始含水率为 10%、18%和 24%（饱和）3 组压实试样分别静置 0、5、15、30、90 d，之后采用精度较高的直剪仪在 400、800 和 1 600 kPa 垂直压力下进行剪切试验；同时完成了部分试样的压汞试验。结果表明：GMZ07 膨润土的剪切强度随静置时间增长而减小；静置前期，强度下降较快；静置时间超过一定天数后，其剪切强度逐渐趋于稳定。根据 3 种含水率试样的强度包线可得到：随着静置时间增加，饱和试样的内摩擦角略微下降而黏聚力变化不大；含水率 10%和 18%试样的黏聚力明显变小而内摩擦角几乎不变。根据 Alonso 等提出的非饱和土有效应力，结合压实膨润土试样的孔径分布，认为集聚体内孔隙增多是非饱和膨润土强度随静置时间而变小的原因。

关 键 词：高庙子膨润土；剪切强度；时效性；黏聚力；内摩擦角

中图分类号：TU 443 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2018)04－1191－06

Experimental study on ageing effect on shear strength of Gaomiaozi bentonite

SUN De-an[1], ZHANG Qian-yue[1], ZHANG Long[1], ZHU Zan-cheng[2]

（1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Taizhou University, Taizhou, Zhejiang 318000, China）

Abstract: The ageing effect on the shear strength of Gaomiaozi (GMZ07) bentonite with different water contents were investigated in this paper. Water contents of 10%, 18% and 24% (saturated) of compacted bentonite specimens were kept constant during curing periods of 0, 5, 15, 30 and 90 days under constant volume conditions. Then, the shear tests on the aged specimens were performed at vertical pressures of 400, 800 and 1 600 kPa by using the shear testing apparatus. At the same time, the microstructure features of the aged bentonite specimens were characterized by means of mercury intrusion porosimetry (MIP) test. The test results show that the shear strength of Gaomiaozi bentonite decreases with the ageing time. The shear strength significantly decreases at the early ageing days and then tends to stabilize when the curing time is over certain days. According to the failure envelopes of three specimens with different water contents, the internal friction angles slightly reduce and the cohesion changes little for saturated specimens with the increase in curing time. For the specimens with water contents of 10% and 18%, the cohesion evidently decreases but the friction angles remain almost unchanged. According to the effective stress of unsaturated soils proposed by Alonso et al and the pore-size distribution, it is considered that the increment in the intra-aggregate pore is the reason for the decrease in the shear strength of the unsaturated bentonite with ageing time.

Keywords: Gaomiaozi bentonite; shear strength; ageing effect; cohesion; internal friction angle

1 引 言

目前，深层地质处置法是国际上普遍认可的处理高放废料的方法[1]。深地质处置库包括：核废物固化体、废物罐、缓冲材料和天然地质体等。由于高压实膨润土具有高膨胀性、低渗透性和优良的核素吸附性等，因此，膨润土被选为深层地质处置工程中缓冲和回填材料的基材。我国经过长期勘察研究，将内蒙古兴和县高庙子膨润土作为高放废物地质处置库中的首选缓冲/回填材料[2−3]。

深层地质处置库是一个工期极长的工程，膨润土块体从工厂中预制结束到完成砌置直至吸水膨胀

收稿日期：2017-08-31
基金项目：国家自然科学基金(No. 11672172)；台州市科技计划项目(No. 1702gy09)。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (11672172) and the Taizhou Science and Technology Planning Project(1702gy09).
第一作者简介：孙德安，男，1962 年生，博士，教授，主要从事土力学方面的研究工作。E-mail: sundean@shu.edu.cn

这一过程一般需数月至数年，并且在安装砌置后，膨润土砌体会受到来自核废料罐、周边砌块和围岩等不同方向和不同大小的压力。结合以上两点我们有必要考虑膨润土强度特性的时间效应。

国内外已有不少学者对膨润土微观结构时效性和微观结构对剪切强度影响进行了试验研究。如杨庆等[4]对不同含水率的非饱和膨胀土进行了膨胀力和抗剪强度试验，指出试样膨胀力的大小受含水率的影响很大，其抗剪强度也随含水率的变化而不断地变化。Day 等[5]将相同含水率的膨润土分别静置 2 d 和 20 d，并进行了干湿循环试验。结果表明，膨润土的膨胀性具有时间效应，静置时间影响压实试样的膨胀性。Delage 等[6]通过压汞试验和扫描电镜试验对不同干密度和不同含水率下压实 MX80 膨润土进行微观结构随静置时间变化的研究。结果表明，膨润土试样在压实结束后，孔隙中的水分在吸力平衡作用下发生重分布，集聚体间大孔隙中的水分子逐渐向集聚体内小孔隙移动。赖小玲等[7]对比分析了不同含水率和不同密实状态下的 GMZ01 膨润土在静置 0、1、7、15、30 d 和 90 d 膨胀力的差异。指出了 GMZ01 膨润土的膨胀力大小受静置时间的影响很大，膨胀力的时效性还与试样初始条件（如含水率和干密度）有关。Mokni 等[8]考虑 Boom clay 的微观结构变化，在不同的基质吸力和渗透吸力下进行剪切强度试验，得到了线性剪切强度破坏包络线，并用非饱和土强度理论进行预测。综上所述，国内外学者的研究主要集中于时间对膨润土微观结构的影响，有关时间效应对膨润土强度特性影响的研究还不够充分。

本文对不同含水率的高压实 GMZ07 膨润土试样，在保持干密度和含水率不变条件下，分别静置 0、5、15、30 d 和 90 d，进行剪切试验，得到了试样抗剪强度和强度指标随静置时间的变化规律。对部分试样进行了压汞试验，结合膨润土微观孔隙结构变化，分析了 GMZ07 膨润土抗剪强度随静置时间变化的机制。关于 GMZ07 膨润土与被较多研究使用的 GMZ01 膨润土在物理、化学及力学特性方面的比较，可参见文献[9]。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

GMZ07 膨润土的主要矿物成分为蒙脱石，伴生矿物为石英、方解石和长石等，其主要矿物成分和基本物理性质见表 1。由于膨润土具有极为活泼的阳离子交换特性，在试验过程中，为避免膨润土与试验用水发生离子交换而影响试样的力学特性，采用蒸馏水作为试验用水。

表 1 GMZ07 膨润土的主要矿物成分和物理参数
Table 1 Main mineralogical composition and physical parameters of GMZ07 bentonite

蒙脱石含量/%	土粒相对密度	液限/%	塑限/%	塑性指数
62	2.76	163	32	131

2.2 试验方法

试样制备：试样压制之前，将膨润土样在 105 ℃下进行烘干，待冷却后取适量干土粉末，用喷雾法喷洒一定量蒸馏水，使其达到 10%、18%和 24% 3 种设定含水率，并在容器中搅拌均匀。其中含水率 10%是该膨润土在 20 ℃左右的试验室内自然含水率，含水率 18%是最优含水率，而含水率 24%是饱和状态的含水率。将配制好的粉末装入聚乙烯袋，密封静置 48 h。

试样制备：根据膨润土粉末的含水率和目标干密度，计算出所需膨润土的质量，放入自制的压样模具中。采用千斤顶进行压实，制成环刀样。试样高度为 15 mm，直径为 50 mm，干密度为 1.68 g/cm^3。考虑到高压实膨润土时效性试验的精度要求，为了使试样在静置时含水率和体积不发生变化，设计了一套由不锈钢制作的恒体积试样固定器，如图 1 所示。恒体积试样固定器由 4 块不锈钢圆板和四根长螺栓组成。将压实后的试样包裹上聚乙烯膜后放入固定器的钢板之间，拧紧螺栓，使其处于恒体积状态，再将恒体积试样固定器放置于玻璃干燥器中，在保持试样含水率不变条件下，静置至目标时间后，供试验使用。

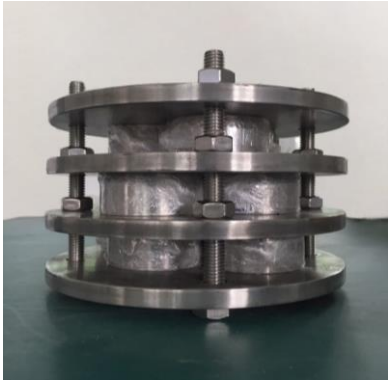


图 1 恒体积固定器
Fig.1 Constant volume holder

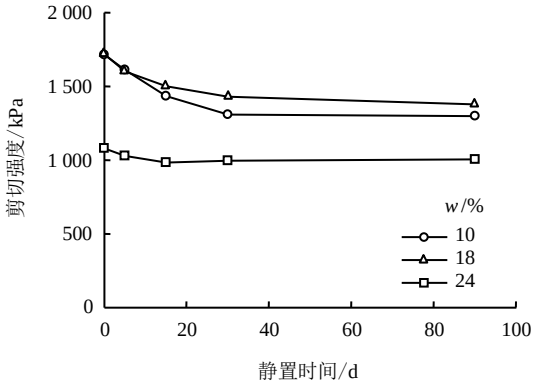
试验步骤：试验仪器采用美国 Humboldt 公司研制生产的 25SIXTY SHEAR 高压气动直剪仪。将静置完成的试样从模具中取出，放入剪切试样盒

中，并将试样盒固定在直剪仪上，设定好上部荷载后开始加载，记录竖向位移，直到 1 h 内竖向位移读数变化不大于 0.01 mm 时，视为固结完成。直剪试验的剪切速率设为 0.01 mm/min，当剪切位移达到 6 mm 时停机。

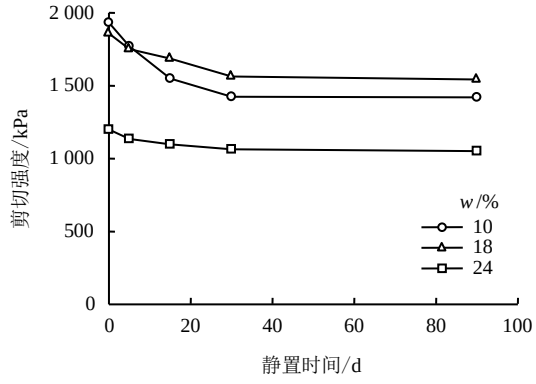
3　直剪试验结果和分析

图 2 为初始干密度为 1.68 g/cm^3、不同含水率的膨润土试样在 400、800 和 1 600 kPa 竖向压力下剪切强度与静置时间的关系曲线。综合分析所有剪应力与剪切位移关系的试验结果，发现均有峰值，故此处剪切强度都是峰值剪切强度。由图 2 可知，初始含水率对试样强度有明显的影响，在相同的垂直压力下，含水率 10%和 18%试样的剪切强度相差不大，且均比含水率 24%试样的要大。

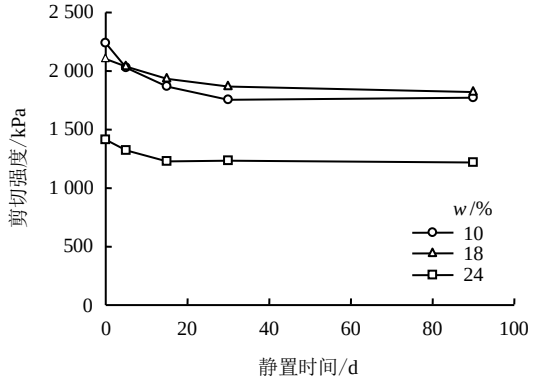
从图 2 还可以得出，试样抗剪强度与静置时间具有明显的相关性，即随着静置时间的增加，试样的抗剪强度减小。静置前期，随试样静置时间增加抗剪强度下降较快，在静置后期抗剪强度下降趋势明显变缓。抗剪强度随静置时间的衰减对试样含水率的变化非常敏感。从图 2 中可以看出：在 400 kPa 竖向压力下，含水率 10%和 18%试样的剪切强度在静置 30 d 后基本稳定，而含水率 24%试样在静置



(a) σ_v = 400 kPa



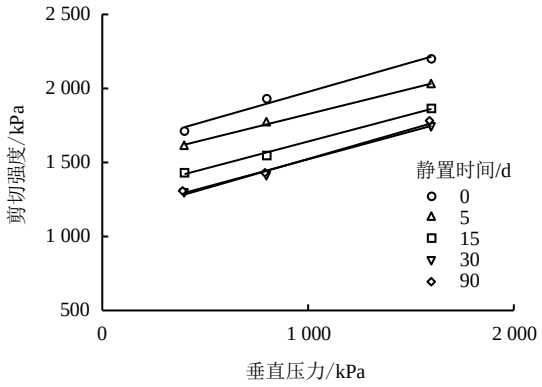
(b) σ_v = 800 kPa



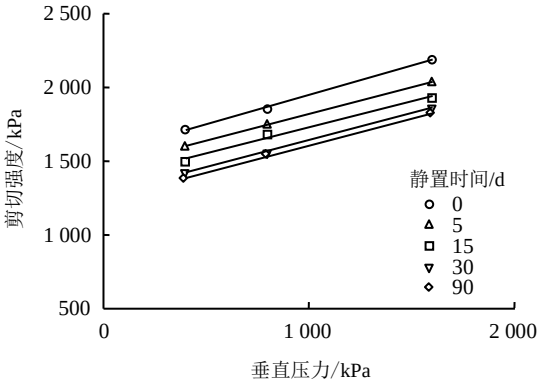
(c) σ_v = 1 600 kPa

图 2　峰值剪切强度与静置时间关系

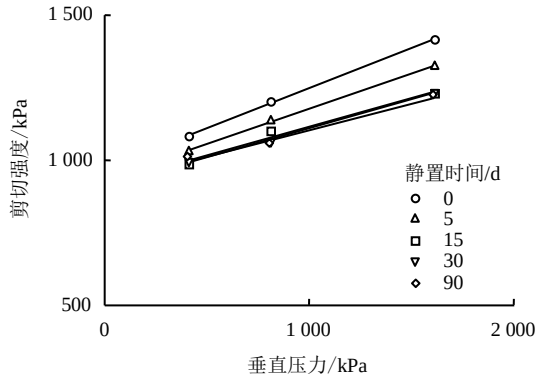
Fig.2　Changes of shear strength with ageing time



(a) w =10%



(b) w =18%



(c) w =24%

图 3　不同静置时间条件下峰值剪切强度和垂直压力关系

Fig.3　Relationships between normal stress and shear strength at different ageing times

15 d 后抗剪强度就不再减小。说明在较低的竖向压力下含水率越高，达到稳定状态的时间越短。但随着竖向压力增加，这一现象将逐渐消失，在 1 600 kPa 竖向压力下，3 种含水率试样强度都在静置 15 d 后基本稳定。

图 3 为含水率 10%、18%和 24%试样分别静置 0、5、15、30 d 和 90 d 后的抗剪强度与垂直压力的关系。由图可知：①静置时间对抗剪强度产生影响，对于同一含水率试样，随着静置时间的增加，抗剪强度包线逐渐下降。②静置时间对膨润土强度的影响程度与竖向压力和初始含水率有关。对于含水率 24%的试样，稳定后强度与刚制成样后的强度差值随着竖向压力增加而增加；而对于含水率 10%和 18%试样，竖向压力不影响强度差值。

通过图 3 中的强度包线可计算出膨润土试样的黏聚力 c 和内摩擦角 φ。将强度指标 c 和 φ 随静置时间的变化绘于图 4 和图 5 中，而强度指标 c 和 φ 的数值列于表 2 之中。

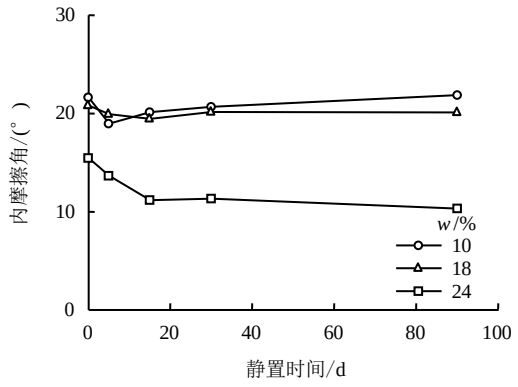


图 4 静置时间对内摩擦角的影响

Fig.4 Effects of aging time on angle of internal friction

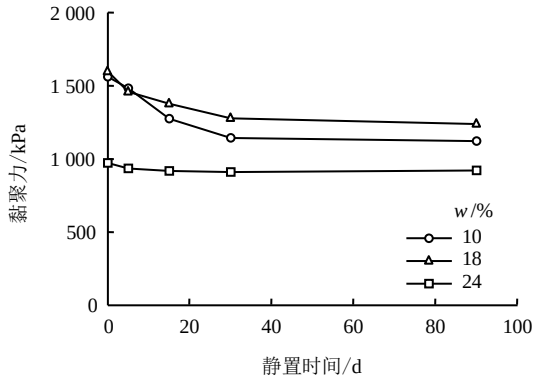


图 5 静置时间对黏聚力的影响

Fig.5 Effects of aging time on cohesion

从图 4 可以看出，试样的静置时间相同条件下，含水率 10%和 18%膨润土试样的内摩擦角大小相近，且均要比含水率 24%膨润土试样的大。含水率 10%和 18%试样的内摩擦角基本不随静置时间而变化，而含水率 24%膨润土的内摩擦角在静置前期随静置时间略微下降，在静置时间 15 d 之后，内摩擦角的变化逐渐趋于平缓。

从图 5 可知，含水率对于黏聚力变化有较大影响。在含水率 10%和 18%的情况下，试样的黏聚力随着静置时间的增加而减小，与图 2 中抗剪强度下降的趋势相似。但是饱和含水率 24%的试样，其黏聚力基本不随静置时间的增加而改变。

综合分析图 4、5 和表 2 可知，在试样含水率大致等于或低于最优含水率时，膨润土抗剪强度随静置时间而减小主要是由黏聚力降低引起的；当试样接近饱和时，抗剪强度的下降可认为是内摩擦角减小引起的。

表 2 不同静置时间的 GMZ07 膨润土抗剪强度参数

Table 2 Parameters of shear strength for GMZ07 bentonite at different ageing times

静置时间/d	含水率/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
0	10.4	1 561	21.6
5	10.4	1 483	19.0
15	10.4	1 274	20.1
30	10.4	1 143	20.7
90	10.4	1 122	21.9
0	18.2	1 597	20.8
5	18.2	1 458	19.9
15	18.2	1 377	19.5
30	18.2	1 278	20.1
90	18.2	1 238	20.1
0	23.5	972	15.5
5	23.5	934	13.7
15	23.5	918	11.2
30	23.5	910	11.3
90	23.5	921	10.3

4 膨润土强度随时间变化的微观机制解释

上述试验结果表明，3 种含水率试样的抗剪强度均有随静置时间增加而明显下降的现象，这可能与试样在静置过程中孔隙结构的变化有关。为了探讨膨润土抗剪强度随静置时间变化的原因，本文采用 Micromeritics AutoPore IV 9500 压汞试验仪对静置时间为 0 d 和 90 d，含水率为 10%和 18%压实 GMZ07 膨润土试样进行了压汞试验。

Lloret 等[10]认为，高密实膨润土集聚体间与集聚体内孔隙大小的分界点在 150 nm 左右，据此笔者认为，大于 150 nm 的孔隙为集聚体间大孔隙，

小于 150 nm 的孔隙为集聚体内小孔隙。因为总孔隙包括集聚体间孔隙与集聚体内孔隙，所以集聚体内小孔隙比 e_m 可表达为

$$e_m = e - e_l \tag{1}$$

式中：e 为总孔隙比；e_l 为孔径 d >150 nm 的孔隙比。

图 6 为干密度为 1.68 g/cm^3、含水率为 10%压实 GMZ07 膨润土在静置 0 d 和 90 d 后试样的累积压入曲线。从图中可观察到试样在刚制备完后（0 d）集聚体间孔隙比 e_l =0.192，90 d 静置后试样的 e_l 减小至 0.163，减小了 15.1%；由于总孔隙比在静置时保持不变（e=0.643），故集聚体内孔隙比 e_m 从 0.451 (0 d)增大至 0.480(90 d)，增大了 6.4%。因此，压实膨润土试样在静置 90 d 后微观孔隙结构发生变化，其中集聚体间大孔隙减少，而集聚体内小孔隙增多。

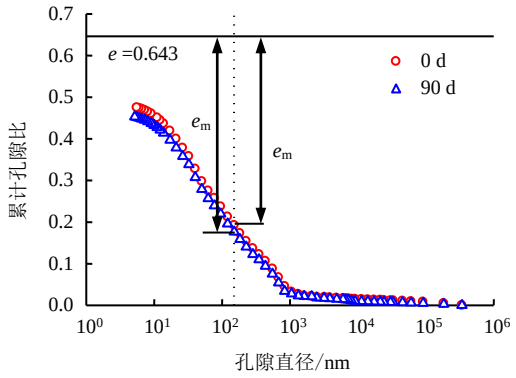


图 6　含水率为 10% GMZ07 膨润土的累计压入曲线

Fig.6　Relation between diameter and accumulated pore ratio of GMZ07 bentonite with water content of 10%

图 7 为干密度为 1.68 g/cm^3、含水率为 18%压实 GMZ07 膨润土在静置 0 d 和 90 d 后试样的累积压入曲线。静置时间对含水率 18%试样微观孔隙结构的影响与含水率 10%试样十分相似，但集聚体内孔隙增加更为明显。90 d 静置后 e_l 减小了 24.1%；集聚体内孔隙比 e_m 增大了 10.1%。

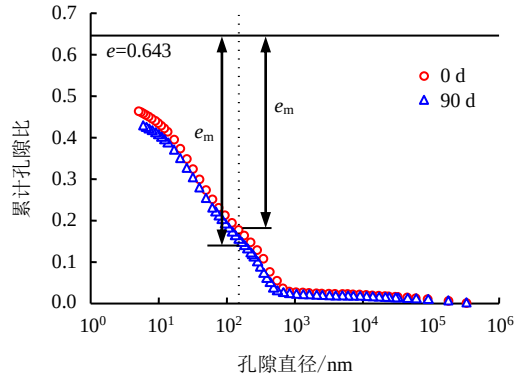


图 7　含水率为 18%GMZ07 膨润土的累计压入曲线

Fig.7　Relation between diameter and accumulated pore ratio of GMZ07 bentonite with water content of 18%

根据以上微观试验结果，取 150 nm 作为集聚体间与集聚体内孔隙大小的分界点，并结合 Alonso 等[11]提出的有效饱和度 S_1^e 概念，可解释抗剪强度随静置时间变化的原因。有效饱和度 S_1^e 为

$$S_1^e = \frac{S_r - \varsigma_m}{1 - \varsigma_m} \tag{2}$$

$$\varsigma_m = \frac{e_m}{e} \tag{3}$$

式中：S_r 为土样的饱和度；ς_m 为集聚体内孔隙比 e_m 与总孔隙比 e 的比值。

试样在静置 90 d 后，集聚体内孔隙比 e_m 明显增大，从式（2）、（3）中不难得出有效饱和度 S^e_1 随着 e_m 的增大而减小（式（3）中 ς_m 随着 e_m 的增大而增大，且饱和度 S_r <1，故式（2）中的有效饱和度 S_1^e 随着 ς_m 的增大而减小）。Alonso 等[12]认为，有效饱和度会影响非饱和土抗剪强度，在试样吸力不变的情况下，非饱和土的抗剪强度与有效饱和度成正比关系，即非饱和土的抗剪强度随有效饱和度减小而减小。

因此，压实 GMZ07 膨润土试样孔隙结构变化对其抗剪强度有显著影响，随着静置时间的增加，集聚体内的小孔隙体积增加导致试样抗剪强度下降。这就可解释图 2 和图 3 中的试验结果，在不同含水率条件下，静置时间引起了试样微观结构的变化，从而使试样抗剪强度随着静置时间的增加而减小。

5　结　论

（1）相同初始条件的情况下，压实 GMZ07 膨润土的剪切强度随静置时间的增长不断衰减，静置前期，强度衰减速度较快，随着静置时间的增加剪切强度变化逐渐趋于稳定。

（2）3 种含水率试样的强度包线随静置时间变化趋势不同，含水率 10%和 18%试样的黏聚力明显变小，而内摩擦角几乎不变；饱和含水率试样的内摩擦角有所减小而黏聚力变化不大。

（3）抗剪强度随静置时间而减小的特性可用非饱和膨润土试样的微观孔隙结构变化来解释。随着静置时间的增加，集聚体内的小孔隙逐渐增加，使得有效饱和度减小，从而抗剪强度随静置时间的增加而减小。

参 考 文 献

[1]　王驹，苏锐，陈伟明，等. 中国高放废物深地质处置[J].

岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 649－658.
WANG Ju, SU Rui, CHEN Wei-ming, 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.

[2] 温志坚. 中国高放废物深地质处置的缓冲材料选择及其基本性能[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(6): 583－586.
WEN Zhi-jian. Selection and basic properties of China′s buffer materials for high-level radioactive waste repository[J]. **Acta Petrologica ET Mineralogica**, 2005, 24(6): 583－586.

[3] 刘月妙, 徐国庆, 刘淑芬. 高放废物地质处置库缓冲/回填材料性能测试[J]. 辐射防护, 1998, 18(4): 290－295.
LIU Yue-miao, XU Guo-qing, LIU Shu-fen. Property test of buffer/backfill materials for HLW geological disposal[J]. **Radiation Protection**, 1998, 18(4): 290－295.

[4] 杨庆, 张慧珍, 栾茂田. 非饱和膨胀土抗剪强度的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 420－425.
YANG Qing, ZHANG Hui-zhen, LUAN Mao-tian. Testing study on shear strength of unsaturated expansive soils[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(3): 420－425.

[5] DAY R W. Swell-shrink behaviour of expansive compacted clay[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1994, 120(3): 618－623.

[6] DELAGE P, MARCIAL D, CUI Y J, et al. Ageing effects in a compacted bentonite: A microstructure approach[J]. **Géotechnique**, 2006, 56(5): 291－304.

[7] 赖小玲, 叶为民, 刘毅, 等. 高庙子膨润土膨胀力时效性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 574－579.
LAI Xiao-ling, YE Wei-min, LIU Yi, et al. Experimental investigation on ageing effects on swelling pressure of unsaturated GMZ01 bentonite[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(3): 574－579.

[8] MOKNI N, ROMERO E, OLIVELLA S. Chemo-hydro-mechanical behaviour of compacted Boom Clay: Joint effects of osmotic and matric suctions[J]. **Géotechnique**, 2014, 64(9): 681－693.

[9] 张龙, 孙德安, 刘月妙. 两种高庙子钠基膨润土膨胀特性比较研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 1001－1008.
ZHANG Long, SUN De-an, LIU Yue-miao. Comparison of swelling properties of two GMZ Na-bentonites[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 1001－1008.

[10] LORET A, VILLAR M V. Advances on the knowledge of the thermo-hydro-mechanical behavior of heavily compacted "FEBEX" bentonite[J]. **Physics and Chemistry of the Earth**, 2007, 32: 701－715.

[11] ALONSO E, PINYOL N, GENS A. Compacted soil behaviour: Initial state, structure and constitutive modelling[J]. **Géotechnique**, 2013, 63(6): 463－478.

[12] ALONSO E E, PEREIRA J M, VAUNAT J, et al. A microstructurally based effective stress for unsaturated soils[J]. **Géotechnique**, 2010, 60(12): 913－925.

第十届全国土动力学学术会议（二号通知）

2018 年 11 月 2～4 日，南京工业大学

第十届全国土动力学学术会议将于 2018 年 11 月 2～4 日在六朝古都南京召开。在汶川特大地震 10 周年之际，召开“第十届全国土动力学学术会议”，将是一次具有历史意义的学术盛会。

会议主题与内容：主题：围绕“一带一路”倡议、“建设海洋强国”和“西部大开发”战略中的重大工程灾害灾前预防与综合防范，本次会议重点研讨防灾减灾救灾工作“两个坚持、三个转变”新理念中遇到的前沿科学与关键技术问题，具体征文专题如下：（1）土的动力特性与本构关系；（2）土与结构动力相互作用；（3）土动力学数值与物理模拟研究；（4）土动力学室内试验方法与技术；（5）原位动力测试与表征技术；（6）砂土液化评价与防治；（7）强地震动与场地非线性效应；（8）近海工程的特殊土动力学问题；（9）环境振动与测试技术；（10）重大工程的土动力学问题；（11）工程场地地震损失评估与灾害保险；（12）桩基动力测试技术。

大会秘书处：联系人：庄海洋 13584050564，吴志坚 13919182444，陈炜昀 13770620150，赵凯 13951863149，王盛年 15077865785。

通讯地址：鼓楼区中山北路 200 号 南京工业大学虹桥校区实验楼 400-1 室，邮编：210009。

论文提交邮箱：王盛年 myresort@126.com，赵凯 zhaokai@njtech.edu.cn

重要时间：论文全文截止：2018 年 5 月 30 日；修改稿截止：2018 年 7 月 30 日；论文录用通知：2018 年 8 月 30 日。