

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.04.015

水-力耦合条件下膨润土-砂混合物的体变特性研究

陈志国¹, 唐朝生¹, 叶为民², 王德银¹, 王 鹏¹, 孙凯强¹, 施 斌¹

(1. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部工程重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 在高放核废物处置库中, 膨润土-砂混合物是一种可选的缓冲/回填材料, 掌握其在水-力耦合条件下的体变特征对正确评价处置库的长期安全性有重要意义。按照不同的石英砂掺量 (0%~50%) 配制了 6 组膨润土/砂混合物, 依次进行了单轴侧限压缩、有荷膨胀 (轴向应力为 0.2 MPa) 和饱和再压缩试验, 获得了混合物在不同水-力路径下的变形特征, 并着重分析了砂掺量的影响。结果表明: (1) 膨润土-砂混合物的压缩性与掺砂量、饱和状态和密实度有关。在非饱和及密实度较低 ($\rho_d < 1.7 \text{ g/cm}^3$) 的条件下, 混合物的压缩指数随砂掺量的增加近似线性减小; 当混合物压缩到较高的密实度 ($\rho_d > 1.7 \text{ g/cm}^3$) 并且饱和后, 压缩指数受掺砂量的影响不明显, 但其值远小于非饱和及低密实度状态。(2) 混合物的最终膨胀率随着掺砂量的增加呈指数减小, 随膨润土有效干密度的增加而呈指数增加。掺砂量达到 40% 时, 膨胀过程伴随有体积回落现象, 且体积回落率随砂掺量的增加而加剧。(3) 混合物在不同水-力路径中及不同砂掺量条件下呈现的体变差异性与膨润土和砂在试样中的分布状态及二者对土体骨架的主导作用有关, 总体上, 掺砂量越高或试样密实度越大, 砂对体变的主导作用越强。(4) 混合物的膨胀力随掺砂量的增加而减小, 通过引入膨润土有效干密度参数, 建立了混合物膨胀力与该参数间的指数定量关系, 可对膨胀力进行预测, 并从蒙脱石的体积变化率与质量分布率的角度进一步分析了混合物膨胀力的作用机制。

关 键 词: 核废物地质处置; 膨润土-砂混合物; 缓冲/回填材料; 压缩性; 膨胀性; 膨胀力

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017)04-1041-12

Volume change characteristics of bentonite-sand mixture under hydro-mechanical coupling condition

CHEN Zhi-guo¹, TANG Chao-sheng¹, YE Wei-min², WANG De-yin¹,
WANG Peng¹, SUN Kai-qiang¹, SHI Bin¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The bentonite/sand mixture is an optional buffer/backfill material in the geological disposal of high level nuclear waste. Understanding the volume change characteristics of this mixture under coupled hydro-mechanical condition is highly significant for evaluating the long-term safety of the repository. In this investigation, six groups of bentonite/sand mixtures were prepared with different contents of quartz sand, i.e. 0%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50%. Then a series of experiments including uniaxial confined compression (to a final dry density of 1.7 Mg/m^3), saturation (under 0.2 MPa vertical pressure) and reloading tests was carried out in sequence. The volume change behavior of bentonite/sand mixtures was understood, in addition, the effect of sand content was also analyzed emphatically. It is found that: (1) The compression behaviour of mixture significantly depends on sand content, saturation state and density. As the mixture is unsaturated and at relative low dry density ($\rho_d < 1.7 \text{ g/cm}^3$), the compression index decreases linearly with increasing sand content. However, as the mixture is saturated and at relative high dry density ($\rho_d > 1.7 \text{ g/cm}^3$), the compression index of mixture is independent of sand content, and the corresponding value is much less than that at unsaturated and loose state. (2) The final swelling strain of the mixture decreases exponentially with increasing sand content, while increases exponentially with effective bentonite dry density. As the sand content in the mixture is higher than 40%, volume collapse can occur during saturation, and collapse extent is enhanced by increasing sand content. (3) The observed volume change characteristics of the

收稿日期: 2015-12-02

基金项目: 基金项目优秀青年科学基金(No. 41322019); 国家自然科学基金(No. 41572246); 岩土及地下工程教育部重点实验室 (同济大学) 开放基金项目(No. KLE-TJGE-B1105); 国家自然科学基金重点项目(No. 41230636); 江苏省“青蓝工程”(2014); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2015)。This work was supported by the National Science Foundation for Excellent Young Scholars (41322019), the National Natural Science Foundation of China (41572246), the Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering (Tongji University) of Ministry of Education (KLE-TJGE-B1105), the Key Project of National Natural Science Foundation of China (41230636), the Qing Lan Project of Jiangsu Province(2014)and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2015).

第一作者简介: 陈志国, 男, 1992 年生, 硕士研究生, 主要从事核废料地质处置方面的研究工作。E-mail: chenzygnju@163.com

通讯作者: 唐朝生, 男, 1980 年生, 博士, 教授, 主要从事工程地质和环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: tangchaosheng@nju.edu.cn

mixture under different hydro-mechanical conditions or at different sand contents are mainly related to the distribution of bentonite and sand in the mixture, and their dominant effect on soil skeleton. Generally, the higher sand content and higher density, the volume change behavior the mixture is more conditioned by sand. (4) The swelling pressure of mixture decreases with increasing sand content. A parameter terms as “effective bentonite dry density” is introduced to quantitatively describe the swelling pressure of the mixture, and an exponential relationship between these two parameters is developed which can be used to predict mixture swelling pressure. Moreover, the swelling mechanism of bentonite/sand mixture is further analyzed based on volume change ratio and mass distribution ratio of montmorillonite in the mixture. In conclusion, this work is a reference for the selection and performance optimization of buffer/backfill materials.

Keywords: nuclear waste disposal; bentonite-sand mixture; buffer/backfill material; compression behaviour; swelling behaviour; swelling pressure

1 引言

以缓冲回填材料为基础的工程屏障是高放废物地质处置库设计和施工中的重要组成部分,其综合性能在很大程度上决定处置库的安全性和功能性^[1]。压实的膨润土以其高蒙脱石含量、低渗透系数、高吸附性和优良的力学性能是目前许多国家所认可的缓冲回填材料^[2-3]。

针对缓冲回填材料的变形要求,国内外学者主要从吸湿膨胀的角度开展了大量试验,分别在控制荷载与吸力的条件下研究了缓冲回填材料的膨胀变形规律。刘月妙等^[4]研究了轴向荷载对膨胀率的影响,发现增加轴向荷载能够抑制试样膨胀,相同初始干密度条件下,轴向荷载越大,最终膨胀率越小;王志俭等^[5]对砂-膨润土混合物的膨胀特性进行了研究,发现最终膨胀率与初始含水率无关,但膨胀速率受含水率影响很大;叶为民等^[6]在非饱和状态下建立了膨润土膨胀变形与吸力的关系,并从微观结构的角度探讨了变形机制;Cui等^[7]归纳了膨胀变形的三阶段性特征,并提出增加砂掺量可以抑制混合物的膨胀。此外,秦冰^[8]、孙文静^[9]等还对初始压实条件、孔隙水溶液性质和掺砂量等因素的影响进行了研究,得到了一系列结论。在膨胀力研究方面,刘泉声等^[10]发现,膨胀力主要受干密度控制,干密度越大,则膨胀力越大,该结论与叶为民^[6]、Sun等^[11]的一致。马利科^[12]、唐朝生^[13]等研究发现,孔隙水的性质、边界条件与试验方法也是影响膨胀力的重要因素。秦冰^[14]和孙发鑫^[15]等分别对高庙子膨润土和膨润土-砂混合物的三向膨胀力进行了研究,探究了不同向膨胀力间的关系和影响因素。此外,Komine^[16]、张龙^[17]等在试验的基础上,进一步建立关于膨胀力与膨胀率的预测模型;孙发鑫等^[15]也提出了关于三向膨胀力的经验模型,从而实现通过控制某一参数对缓冲回填材料膨胀性能的预测。

在缓冲回填材料的压缩特性研究方面,刘月妙

等^[18]在研究高庙子膨润土的压实特性时发现,压制压力和蒙脱石含量是影响其压实度的重要因素,且含水率为15%的样品压实成型最好。Ye等^[19-20]研究了温度与吸力对高庙子膨润土压缩性的影响,同时也探究了其二次压缩特性。此外,Ye等^[21]还研究了溶液盐分对其压缩性能的影响,发现压缩指数 C_c 随着溶液浓度的增加而减小,这与盐溶液中大量离子的相互作用有关。关于膨润土与骨料添加剂混合物的压缩性能,也有学者进行了相应的研究。张虎元等^[22]研究了不同掺砂量对膨润土-砂混合物压实性能的影响,得到最大干密度与最优含水率、掺砂量与最优含水率之间的关系,借助这些关系,最终确定了膨润土合适的掺砂量为10%~30%。孙德安等^[23]研究了吸力控制下膨润土-砂混合物的压缩特性,结果表明,随着施加吸力的增大,膨润土掺砂混合物的屈服应力增大,压缩指数变小。此外,张虎元等^[24]对不同掺砂量的膨润土-砂混合物进行有侧限压缩试验,并引入有效黏土密度的概念,建立了膨润土-砂混合物压缩系数与有效黏土密度的关系。

事实上,在高放废物处置库的建造运营过程中,缓冲回填材料的膨胀与压缩过程并非完全独立的,而是相互关联的。比如,缓冲回填材料都需要预先压实才能入库,压缩性是衡量缓冲回填材料工程屏障性能和处置库经济可行性的重要指标。而在处置库的运营过程中,由于地下水入侵,缓冲回填材料会产生膨胀变形并同时受到废物罐和围岩的限制和反压力。在长期运营过程中,不可预知的地质构造活动或者地质环境变化有可能导致围岩对缓冲回填材料产生附加应力,由此而产生的再压缩变形也不容忽视。因此,系统掌握水-力耦合条件下缓冲回填材料的变形特性对评价其综合性能有重要意义。

本文以膨润土-砂混合物为研究对象,根据不同阶段其所处的环境和受力状态,设计开展了一系列单轴侧限压缩、有荷膨胀、饱和再加载试验以模

拟其在工厂预压实阶段、入库吸水膨胀阶段和受荷再压缩阶段的体变过程,研究了膨润土-砂混合物在不同水-力路径下的压缩、膨胀及再压缩变形特性,重点分析了水-力耦合条件下石英砂掺量对混合物体变特性的影响及机制,相关结果对高放废物处置库缓冲回填材料的选取和性能优化有重要参考意义。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

本文采用的石英砂为人工加工标准石英砂,其基本性质如下:粒径为 0.5~1.0 mm,硅石含量为 99.45%,相对密度为 2.65。试验所用膨润土为商用钙基膨润土,其物理力学性质指标如表 1 所示。

表 1 膨润土的基本物理性质指标
Table 1 Basic physical property indexes of bentonite

相对密度	天然含水率	液限	塑限	塑性指数	最大干密度	蒙脱石含量
G_s	$w/\%$	$w_l/\%$	$w_p/\%$	I_p	$\rho_d/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$/\%$
2.71	9.26	153.3	33.3	120	1.69	85.3

2.2 试样制备

将试验用的膨润土和石英砂置于烘箱中,在 105 °C 下烘干 24 h 后立即配样,分别配置石英砂掺量为 0%、10%、20%、30%、40%、50% 的膨润土-砂混合物。配样完成后,将混合物装入保鲜袋中,并置于干燥器内备用,以限制其吸湿。根据试样的目标干密度 1.7 g/cm³、厚度 10 mm 和直径 39.1 mm 计算压样所需混合物的重量,称量后倒入直径为 39.1 mm 的固结模具(见图 1)预压实到一个初始较低的干密度以备。其中石英砂掺量为 0%~30% 的混合物压实到初始干密度为 1.15 g/cm³;石英砂掺量为 40%、50% 的混合物压实到初始干密度为 1.4 g/cm³,表 2 为各试样的初始参数。

2.3 试验方法

依次对上述预压实的试样进行单轴侧限压缩、有荷膨胀和饱和加载试验,对应的试验路径如图 2 所示,实时监测试样在各路径下的变形特性,具体试验步骤如下:

(1) 首先将表 2 中压制好的试样置于三联高压固结仪上进行单轴侧限压缩试验,共分 12 级荷载,分别为 0.200、0.230、0.262、0.325、0.450、0.700、0.949、1.199、2.199、4.198、8.197、10.196 MPa。由于试样为干燥状态,压缩过程中不存在孔隙水压力消散问题,因此,采用了相对较快的压缩方法,即试样在每级荷载下压缩 1 h,最后一级荷载维持 24 h。该过程使用 T 字型活塞,在试样被压至目标干密度后可限制其继续受压变形。为了减小试样在压缩过程中受空气湿度的影响,在活塞顶部包裹一层保鲜膜,并关闭固结模具底部的阀门,从而阻断试样吸湿路径。压缩结束后,采用烘干法测试了 T_0 的实际含水率,约为 1.06%,说明试样在整个试验过程中不可避免地吸收了少量水分,但在可接受范

围之内。

(2) 在上述分级压缩试验完成后,将试样统一压实到干密度为 1.7 g/cm³,对应高度均为 10 mm,再将轴向荷载减小到 0.2 MPa (试样有轻微回弹变形),在该应力条件下向固结模具中通水对试样进行饱和,开展有荷膨胀试验,直至试样的变形稳定,即 2 h 内试样变形量不超过 0.01 mm。

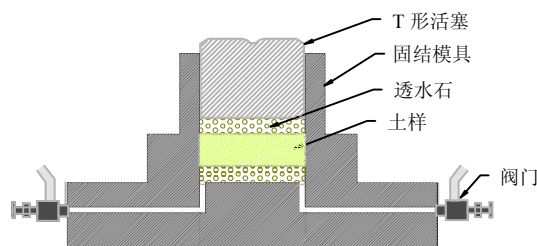


图 1 固结模具示意图

Fig.1 Schematic of oedometer cell

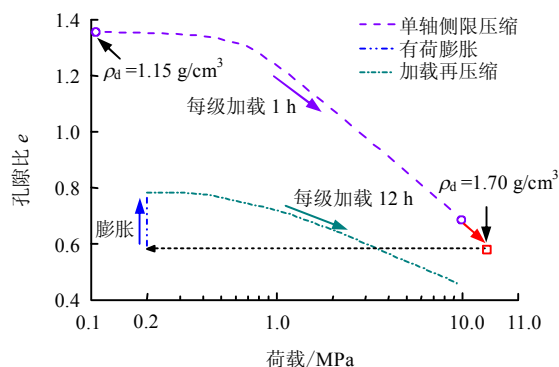


图 2 试验应力路径示意图

Fig.2 Schematic of test path

(3) 有荷膨胀完成后,试样基本处于饱和状态,再次对试样进行分级加载压缩,分级荷载与第 1 步压缩试验相同。由于时间关系,本文重点研究试样

的压缩系数, 暂不考虑加载过程中的次固结变形效应, 以施加每级压力后每小时变形小于 0.01 mm 作为稳定标准, 根据观测, 确定每级荷载的维持时间为 12 h。

表 2 各试样的初始参数
Table 2 Initial parameters of specimens

试样编号	砂掺量 /%	初始干密度 /(g/cm ³)	初始高度 /mm	试样直径 /mm
T ₀	0	1.15	14.84	39.1
T ₁	10	1.15	14.84	39.1
T ₂	20	1.15	14.84	39.1
T ₃	30	1.15	14.84	39.1
T ₄	40	1.40	12.15	39.1
T ₅	50	1.40	12.15	39.1

3 试验结果分析

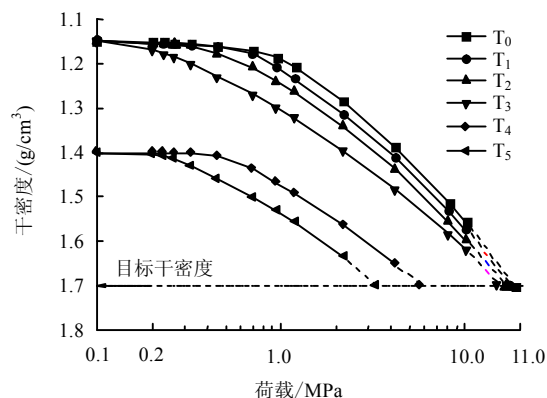
3.1 单轴侧限压缩过程

图 3 为单轴侧限压缩过程中不同石英砂掺量下膨润土砂混合物的压缩曲线, 其中图 3(a)、3(b)分别为干密度 ρ_d 与孔隙比 e 随荷载 P 的变化曲线。由图 3(a)可知, 随着轴向荷载的增加, 试样的干密度逐渐增大, 而孔隙比逐渐减小, 试样由疏松的体系被压实为致密的体系。对于不同砂掺量的试样, 其干密度随荷载的变化呈现出不同的特征:

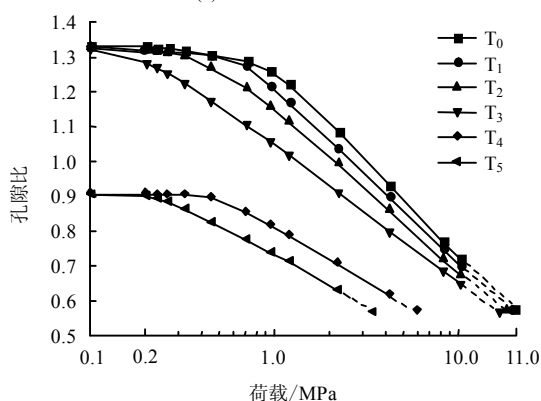
(1) 低砂掺量的试样 T₀~T₃ 在经过完整的加载过程后, 仍未达到目标干密度 (1.7 g/cm³), 而掺砂量高的试样 T₄ 与 T₅ 分别在加载至第 11 级 (8.197 MPa) 和第 10 级 (4.198 MPa) 荷载时就已经达到目标干密度;

(2) 在相同的荷载条件下, 试样能达到的干密度随着掺砂量的增加而增加。换言之, 当把试样压缩到同一干密度时, 所需荷载随掺砂量的增加而减小。如把所有试样都压缩到 1.5 g/cm³ 的干密度时, 未掺砂的试样 T₀ 所需压力约为 7.5 MPa, 而掺砂量达到 50% 时, 对应压力约为 0.65 MPa, 前者是后者的 11.5 倍, 说明在膨润土中掺砂, 能显著降低压实功能和降低工程成本。

对比不同掺砂量试样孔隙比随荷载的变化关系 (图 3(b)), 发现经过相同的荷载阶段, 孔隙比 e 的变化程度差别很大。比如 T₀ 试样经过前 5 级荷载后, e 减小了约 4%, 而 T₅ 试样则减小了约 11%。这种差异主要是因为混合物的不同配比产生不同的孔隙结构及在前期预压实过程产生的超固结性造成的, 关于掺砂量对结构及压缩性 (本文均采用压缩指数 C_c 衡量) 的影响将在后文进行具体分析。



(a) 干密度-荷载关系



(b) 孔隙比-荷载关系

图 3 试样压缩曲线

Fig.3 Compression curves of samples

对比相同孔隙比下不同试样的轴向应力 (见图 4) 发现, 随着试样压实度的提高, 轴向应力差异逐渐减小。特别是掺砂量较低的试样 T₀~T₃, 在孔隙比为 0.6 时对应的轴向应力更加接近。

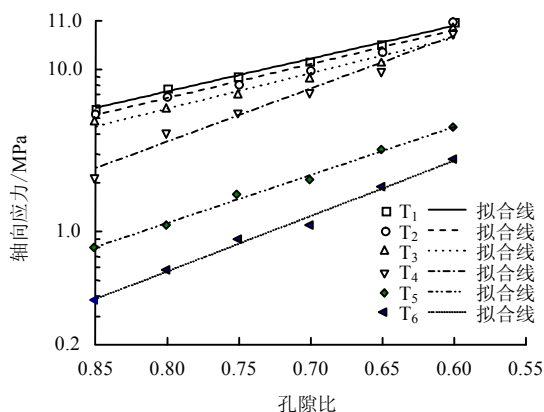


图 4 轴向应力与孔隙比关系

Fig.4 Relationships between axial stress and void ratio

求取 e -lg P 曲线中直线段的斜率, 得到不同掺砂量下试样的压缩指数 C_c , 将结果进行拟合得到压缩指数与掺砂量 α 的关系 (见图 5)。可以发现, 压

缩指数 C_c 随着石英砂掺量的增加而线性减小, 满足如下关系式:

$$C_c = 0.55 - 0.00557\alpha \quad (1)$$

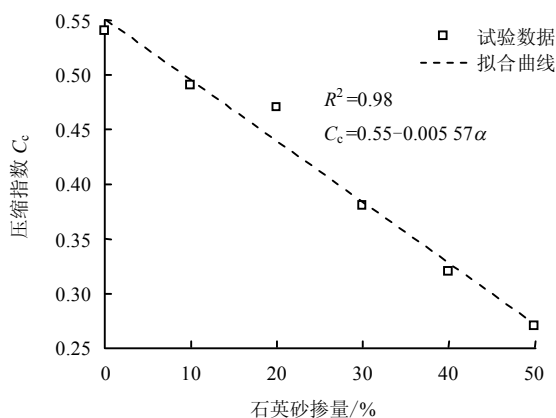


图5 压缩指数随掺砂率的变化曲线

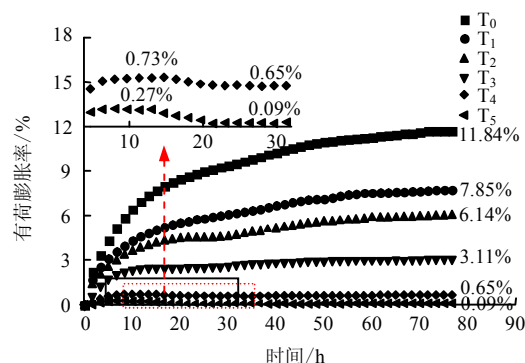
Fig.5 Relationship between compression index and sand ratio

混合物压缩性随掺砂量的增加而减小的现象可以通过骨架结构进行解释。在膨润土砂混合物中, 膨润土颗粒的粒径与石英砂的粒径相差很大, 分别代表细颗粒与粗颗粒。对于掺砂量较低的试样, 石英砂颗粒数量相对较少, 悬浮于膨润土基质中, 此时的混合物结构中细颗粒占优势, 膨润土颗粒的相互联接构成了整个混合物的骨架结构, 总体孔隙比较高。虽然颗粒间联接点多, 但联接点的力学作用较弱, 抗变形能力较差, 在外力作用下容易发生重排, 因而表现出较高的压缩性。对于掺砂量较高的试样, 尽管石英砂颗粒数目远小于膨润土颗粒, 但其大粒径与高掺量能够使砂颗粒之间的联接构成新的骨架, 膨润土颗粒则充填于石英砂颗粒之间, 此时混合物结构中粗颗粒占优势, 外力作用主要通过砂颗粒形成的骨架进行承担, 砂颗粒在整个体系中发生滚动、滑动及重排所需克服的阻力较大, 抗变形能力较强, 因此, 压缩性较低。

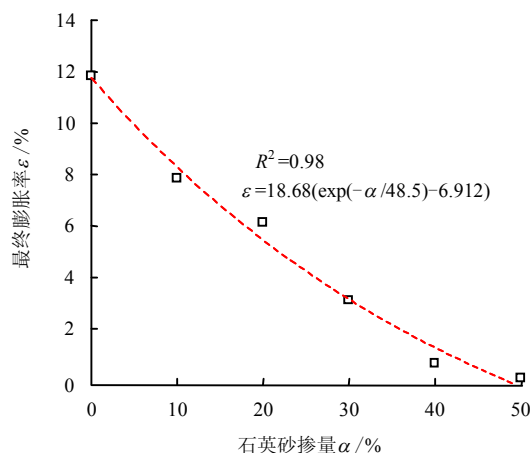
3.2 有荷膨胀过程

图 6(a)给出了试样在 0.2 MPa 下膨胀率随时间的变化曲线。如图所示, 随着时间的增加, 试样的膨胀变形不断增加。无论在哪个阶段, 低石英砂掺量的膨胀率都高于高石英砂掺量的膨胀率, 且最终膨胀率随石英砂掺量指数减小 (见图 6(b))。其中, T_0 与 T_5 的最终膨胀率分别为 11.84%、0.09%, 前者比后者高 130 倍。从图 6(a)中还可以发现, 膨胀变形大致可以分为 3 阶段, 即快速膨胀阶段、缓慢变形阶段和稳定阶段。对试样 T_1 而言, 在 20 h 前曲线较陡, 说明此时膨胀速率较快; 而 20~70 h 之间,

曲线逐渐平缓, 膨胀速率变慢; 在 70 h 之后, 曲线平稳, 此时试样趋于稳定。并且, 随着石英砂掺量的增加, 试样膨胀稳定所需的时间逐渐减少。根据徐永福等^[25]的研究, 尽管与本文使用的试验材料不同, 但均呈现出相同的阶段性特征, 说明钠基与钙基膨润土具有相似的膨胀机制, 区别在于钠基膨润土需要更长的时间才能达到稳定阶段。



(a) 膨胀率-时间关系



(b) 最终膨胀率-石英砂掺量关系

图6 膨胀过程的体积变化

Fig.6 Volume changes in the process of swelling

此外, 对比 $T_0 \sim T_3$ 与 $T_4 \sim T_5$ 试样的膨胀率曲线, 可以发现, 前者的膨胀曲线呈现单调增加的趋势, 而后者的膨胀率首先增加达到峰值, 之后出现减小的现象, 说明在膨胀过程中发生了再压缩, 其他学者如唐朝生^[26]、Ye^[27]、Imbert^[28]等也在研究中发现了类似现象。本文引入体积回落率来对该现象进行描述, 其定义为峰值膨胀率和最终稳定膨胀率之差与峰值膨胀率的比值, 用百分数表示。如 T_4 的峰值膨胀率为 0.73%, 最终稳定后的膨胀率为 0.65%, 经计算体积回落率为 11.0%; T_5 的峰值膨胀率为 0.27%, 最终稳定后的膨胀率为 0.09%, 体积回落率为 66.7%。该结果说明, 砂掺量越高, 试样

饱和过程中再压缩变形越显著。

膨润土-砂混合物的膨胀性是由其中可膨胀矿物及膨润土吸水膨胀引起的,而石英砂颗粒不发生膨胀,随着石英砂掺量的增加,混合物中可膨胀矿物含量减小,所以最终膨胀率也减小。为了更好地描述膨润土-砂混合物的膨胀特性,本文引入 Dixon^[29]、Agus^[30]等提出的膨润土有效干密度这一参数进行分析。膨润土有效干密度 ρ^* 是指充填在石英砂颗粒之间的膨润土基质的干密度,其值为混合物中膨润土的干质量与膨润土加孔隙的体积之比:

$$\rho^* = \frac{m_b}{V - V_s} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{m_s}{m_b + m_s} \quad (3)$$

$$\rho_d = \frac{m_b + m_s}{V} \quad (4)$$

$$V_s = \frac{m_s}{\rho_s} \quad (5)$$

联立式 (2) ~ (5), 得

$$\rho^* = \frac{\rho_d \rho_s (1 - \alpha)}{\rho_s - \alpha \rho_d} \quad (6)$$

式中: ρ^* 为膨润土有效干密度; m_b 为试样中膨润土的干质量; V 为试样总体积; V_s 为试样中砂的体积; α 为石英砂掺量; m_s 为石英砂质量; ρ_d 为试样干密度; ρ_s 为石英砂相对密度。

图 7 为试样最终稳定膨胀率与干密度 1.7 g/cm^3 条件下的膨润土有效干密度之间的关系曲线。由图可见,试样的膨润土有效干密度越大,最终稳定的膨胀率越高,且膨胀率与膨润土有效干密度呈指数增长关系,即

$$\varepsilon = 5.32 \times 10^{-5} \times 1\,424.06 \rho^* \quad (7)$$

式中: ε 为最终稳定膨胀率。张虎元^[31]和崔素丽^[32]等在研究膨润土-砂混合物的膨胀特性时也得到了类似的结果。

3.3 再加载过程

在有荷膨胀稳定之后 (24 h 内膨胀率变化小于 0.01%), 按照压缩过程的加载顺序, 对试样再次进行加载压缩, 得到图 8 所示的再压缩曲线。与第 1 次压缩相比, 随着荷载的增加, 试样被压实到了更低的孔隙比, 且最终孔隙比随着砂掺量的增加而减小; 同时, 各条再压缩曲线间具有很高的相似性。

即在低压力段, 孔隙比变化很小, 但随着荷载的增加, 孔隙比迅速减小, 且近似呈一条直线。

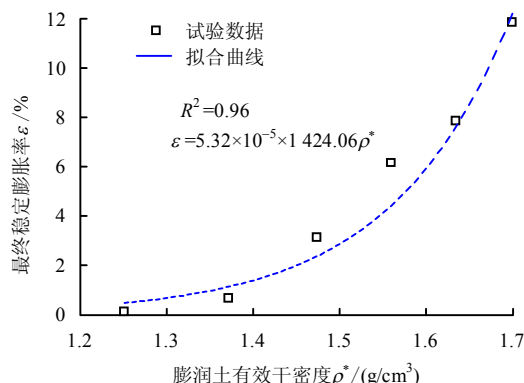


图 7 最终稳定膨胀率与膨润土有效干密度的关系曲线
Fig.7 Relationship between final stable swelling ratio and effective dry density of bentonite

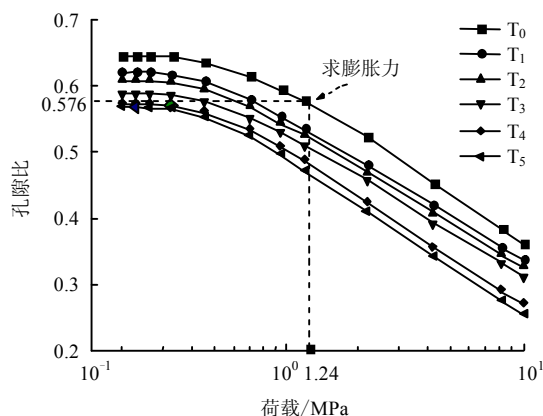


图 8 再压缩曲线
Fig.8 Recompression curves

根据膨胀试验前各试样的孔隙比, 可在再压缩曲线上确定对应的荷载, 即得到干密度为 1.7 g/cm^3 时试样的膨胀力 (见图 8), 相关结果如表 3 所示。可以看出, 随着掺砂量的增加, 在相同干密度条件下试样孔隙比有小幅减小, 而膨胀力则迅速下降。

表 3 干密度 1.7 g/cm^3 时孔隙比与膨胀力
Table 3 Void ratio and swelling pressure at 1.7 g/cm^3

试样	孔隙比 e	膨胀力 P/MPa
T ₀	0.576	1.24
T ₁	0.574	0.77
T ₂	0.573	0.62
T ₃	0.571	0.47
T ₄	0.569	0.31
T ₅	0.567	0.22

为定量描述膨胀力的变化规律, 仍然采用前文中的膨润土有效干密度 ρ^* 进行分析。如图 9 所示, 膨胀力随着膨润土有效干密度呈指数增长, 且满足

如下关系:

$$P = 0.158 + 0.061 \exp\left(\frac{\rho^* - 1.251}{0.157}\right) \quad (8)$$

相同干密度、不同掺砂量的试样, 其膨润土有效干密度分布在 $1.25 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$ 之间, 而其膨胀力则在 $0.22 \sim 1.24 \text{ MPa}$ 范围内变化, 其中最大与最小值相差 5.6 倍, 可见膨润土干密度的有效性对膨胀力有显著影响。

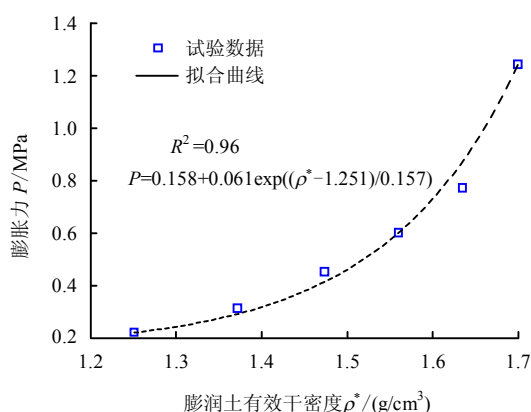


图9 膨胀力与膨润土有效干密度关系

Fig.9 Relationship between swelling pressure and effective dry density of bentonite

按照本文膨润土有效干密度的定义, 对其他学者基于 GMZ 及其他膨润土取得的膨胀数据进行了计算, 得到如图 10 所示的结果。从图中可以明显地看出, 本文与其他学者的研究结果分布在两条不同的拟合曲线上。这种差异可能主要是因为试验材料不同, 文献[6, 7, 31]使用的是 GMZ 钠基膨润土, 文献[10]使用的是经钠化后的信阳钙基膨润土, 而本文使用的为一般商用钙基膨润土。当有效干密度低于 1.2 g/cm^3 时, 钠基和钙基膨润土的膨胀力差异较小; 当有效干密度大于 1.2 g/cm^3 时, 钠基膨润土的膨胀力明显高于钙基膨润土, 二者之间的差值随有效干密度的增加而增加。尽管不同的膨润土在具体的膨胀力数值上有差异, 但总体随有效干密度呈指数增长的趋势具有相似性。

钠基与钙基膨润土的膨胀力差异性主要与其亲水性能和微观结构有关。相比较而言, 钠基膨润土具有更强的亲水性, 黏土矿物在饱和过程中表面能形成更厚的水化膜, 从而表现出更大的膨胀势。Marcial 等^[33]也指出, 钠基膨润土比钙基膨润土具有更好的分散性, 同等条件下前者比后者水化作用更强烈、更充分。当干密度较低时, 由于试样中存在较多的大孔隙, 水化分散后的黏土颗粒首先会对大

孔隙进行填充, 对膨胀力的贡献有限。随着干密度的增加, 试样的孔隙比和孔隙尺寸越来越小, 黏土颗粒水化反应对膨胀力的贡献越来越显著, 从而导致图 10 中两种膨润土的膨胀力差异随有效干密度增加而增加的趋势。

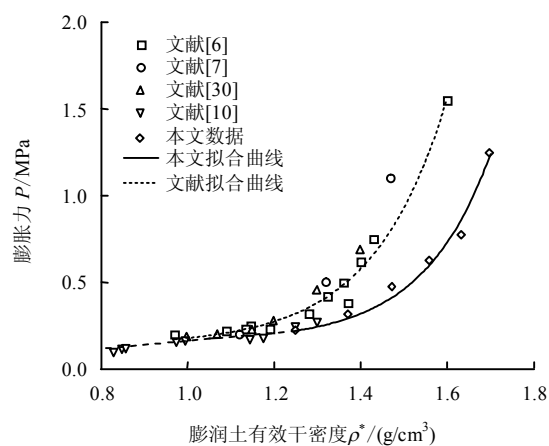


图10 膨胀力对比

Fig.10 Comparison of different swelling pressures

4 讨论

4.1 压缩性比较

图 11(a)为整个试验路径中各试样孔隙比随荷载的变化关系。根据其中压缩曲线直线段的斜率, 可以分别得到试样在第 1 次压缩和再压缩阶段的压缩指数, 如图 11(b)所示。第 1 次压缩过程的压缩指数均大于再压缩过程的压缩指数, 这是由于经过第 1 次压缩, 土体本身已经处于较为致密的状态, 压缩性大大下降。对第 1 次压缩来说, 压缩指数随着掺砂量的增加近似线性减小, 但再压缩过程所得压缩指数基本稳定在 $0.20 \sim 0.25$ 之间, 与掺砂量无明显关系。

这主要是因为第 1 次压缩时, 土体基本处于完全干燥的状态, 此时的压缩性主要与孔隙结构、颗粒级配相关, 压缩变形量主要来源于颗粒重新排列导致的孔径减小。正如前文所述, 随着掺砂量的增加, 土体内部的骨架结构逐渐由膨润土骨架过渡到石英砂骨架, 颗粒间发生相对位移需克服的阻力增加, 抗变形能力增强, 因此, 压缩指数随掺砂量增加呈线性减小。

再压缩阶段发生在土体吸水饱和并膨胀完成以后, 此时各试样虽然发生了一定的膨胀变形 (见图 6(a)), 但在较小的压力条件下便又达到了膨胀变形前的密实度, 即干密度约 1.7 g/cm^3 。根据图 3、4 及图 11(b)的结果及前文的分析可知, 在该密实度条

件下各试样压缩曲线非常接近,说明压缩性差异开始减弱。尤其对于掺砂试样,随着干密度的进一步增加,砂颗粒之间的距离逐渐减小,最终都可能过渡到由石英砂构成主体骨架的状态,对压缩变形起控制作用,这解释了试样 $T_1 \sim T_5$ 在第2次压缩过程中压缩指数相当且不受掺砂量影响的现象。对于 T_0 而言,由于不含石英砂,再压缩过程不仅与孔隙结构调整有关,可能还与土体的排水特性有关。当试样处于饱和状态时,压缩引起的体积变化全部来自于孔隙水的排出。饱和后亲水性蒙脱石矿物又吸附了大量结合水,持水能力较强,随着加载过程中孔径的减小,一些渗流通道被堵塞,孔隙水难以排出,使压缩性降低。尽管如此, T_0 在再压缩阶段的压缩指数依然略高于掺砂试样 $T_1 \sim T_5$ 。

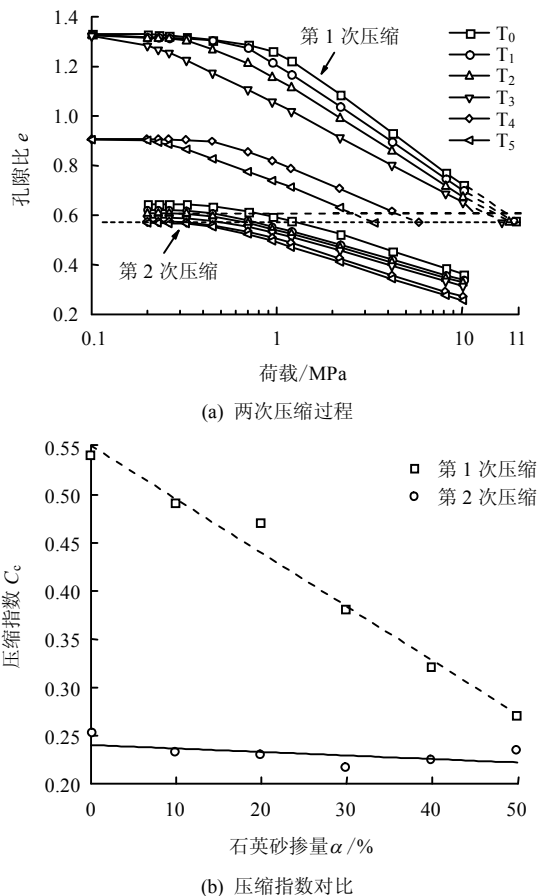


图 11 两种压缩指数对比

Fig.11 Comparison of two compression indexes

4.2 膨胀率变化特性

在有荷膨胀过程中, T_4 与 T_5 的膨胀率-时间曲线呈现出与其他 4 个试样不同的变化特征(见图 6(a)),即在膨胀过程中出现了体积回落现象(也有文献称这种现象为结构塌陷)。一些学者在研究其他土体的膨胀性时也得到了类似结果,如唐朝生^[26]和

Ye^[27]等分别在研究 CO_x 土、GMZ01 土的膨胀特性时均观察到不同程度的体积回落现象。总体上,这种现象易发生在试样干密度较低或者轴向压力较高的状态。其主要原因是试样中存在较大的孔隙,或者是由于饱和过程弱化了颗粒间的联接力,结构软化,颗粒骨架无法继续承受荷载作用而发生压缩变形。Imbert 等^[28]的研究还发现,试样在经历一次体积回落后膨胀变形又会继续增加,并最终趋于稳定,这与本文 T_4 、 T_5 的膨胀过程非常相似,说明试样在有荷条件下饱和时压缩变形和膨胀变形是同时存在的,关键是二者谁起主导作用。 T_4 与 T_5 之所以出现体积回落,主要因为掺砂量较高,由砂颗粒组成的骨架之间会形成较大的孔隙,膨润土位于这种孔隙中,遇水后发生膨胀变形,当膨胀变形受到周边砂颗粒骨架的约束时,会产生膨胀力,这种膨胀力作用类似于孔隙水压力的增加,其结果会导致砂颗粒间的有效应力降低(见图 12),摩擦阻力减小,进而在荷载作用下发生压缩变形,颗粒重新排列到更加稳定的状态。

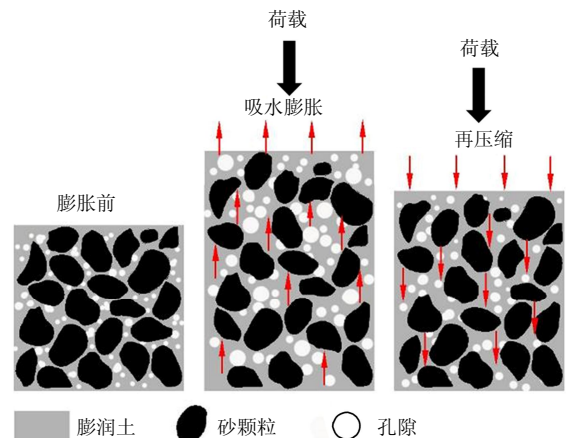


图 12 有荷条件下膨润土-砂混合物吸水膨胀再压缩变形示意图

Fig.12 Schematic of swelling-recompression of bentonite/sand mixture under loading

对 $T_0 \sim T_3$ 的试样,其膨胀过程分为明显的 3 阶段:快速膨胀阶段、缓慢变形阶段和稳定阶段,其超过 70% 的膨胀率增长发生在快速膨胀阶段。根据 Tang 等^[34]的研究,吸湿路径和吸湿能力是影响膨胀速率的重要原因。随着膨胀的进行,试样含水率增加,内部吸力即吸湿能力逐渐降低,蒙脱石的水化速率随着孔隙吸湿能力的减弱而减小。此外,由于试样是从底部开始饱和,底部的蒙脱石矿物水化后形成的水化膜会对孔隙水的传输通道产生阻塞作用,渗透性减小,上部土体的水化速率逐渐下降,

这也是导致阶段性膨胀的一个重要因素。

除此之外, 膨胀变形的阶段性与饱和过程中的微观结构调整也有一定关系。通常情况下, 在膨润土-砂混合物的内部存在3种尺度的孔隙, 分别为砂颗粒之间的大孔隙、膨润土聚集体之间的中等孔隙和黏土矿物层间的小孔隙。饱和过程中, 水分最先进入大孔隙, 集集体遇水后会发生崩解剥落, 分散成许多小的颗粒, 迅速对大孔隙进行填充。此外, 由于集集体崩解后体积显著增加, 因此, 导致膨胀变形在前期快速发展。此后, 水化作用主要局限在小的膨润土土颗粒内部, 变形量及其对结构的影响也局限在较小范围内, 后期测得的膨胀变形总体上是大量小颗粒水化的综合反映, 往往持续较长的时间, 直到所有土颗粒的水化作用完成。

4.3 膨胀力分析

膨胀力为土体膨胀变形受限而产生的抵抗力。目前来说, 膨胀力的测量有4种方法^[35], 分别为: 恒体积法(constant-volume)、预膨胀法(pre-swell)、零膨胀法(zero-swell)和膨胀-压缩法(swell-consolidation)。不同的试验方法可以模拟处置库中缓冲回填材料所处的不同环境边界条件, 得到的膨胀试验结果也往往各不相同。本文采用上述第4种膨胀试验方法, 根据Thompson等^[36]的研究, 这种方法得到的膨胀力略大于其他几种方法, 主要是由于试样中的亲水性黏土矿物在前期的水化过程中受到的限制很小, 能够充分吸水膨胀, 在后期受压过程中能产生更大的抵抗力。

由表3的结果可知, 从 T_0 到 T_5 , 膨胀力减小了82%。由此可见, 在膨润土中加入石英砂能显著减小其膨胀力。通常认为, 膨胀力仅与膨润土中的膨胀性矿物有关(蒙脱石为主), 而与膨润土中的非膨胀性矿物和骨料添加剂无关。许多学者的研究也表明, 纯膨润土或膨润土骨料混合物的膨胀力主要受干密度和膨润土含量的影响。学界建立的诸多膨胀力预测模型中, 基本都将这种影响归一化为某一新的参数, 如有效黏土密度^[26]、蒙脱石的质量比率^[30]和蒙脱石体积膨胀系数^[37]等。比较并分析这些参数发现, 膨润土-砂混合物的膨胀力实际上由蒙脱石的体积变化率 χ 与蒙脱石的质量分布率 ψ 决定, 其中体积变化率 χ 定义为膨胀后与膨胀前蒙脱石体积之比, 而蒙脱石的质量分布率 ψ 定义为单位体积内蒙脱石的质量。对于给定的蒙脱石的质量分布率 ψ 的土样, 其膨胀过程的任意阶段的膨胀力将随体积变化率 χ 的增加而减小; 而对于给定的某一体积变化率 χ , 土样的膨胀力随质量分布率 ψ 的增加

而增加。这种特征可以用下面的例子进一步解释:

①通过恒体积法测定某种土样的膨胀力, 正常情况下测得的力为 P_1 , 而假设仪器发生故障, 土样体积发生了轻微膨胀, 此时测得的力为 P_2 , 则 $P_1 > P_2$, 这正是因为 χ 的增加使得膨胀力下降; ②同样使用恒体积法测定 T_1 和 T_5 的膨胀力, 结果显然是前者更大, 因为 T_1 具有更高的蒙脱石的质量分布率 ψ 。

不妨认为, 吸水后的蒙脱石具有一定的膨胀势能, 其值等于应产生的膨胀力和膨胀率的能量之和, 但在试验过程中, 由于阻力(包括重力、轴向压力和摩擦力)的存在, 实际的膨胀率与膨胀力的能量之和必然小于其膨胀势能。膨胀势能消散的方式主要有两种: 一是在膨胀过程中, 膨润土克服自身重力和外力摩擦对外做功; 二是随着土体体积的增加, 在该方向上运动的膨胀力也会做功消耗能量。蒙脱石的体积变化率 χ 反映了能量消散的程度, 蒙脱石的质量分布率 ψ 则决定了初始膨胀势能的大小。对于一定质量分布率 ψ 的膨润土来说, 其吸水饱和和后的总的膨胀势能是一定的; 随着体积变化率 χ 的增加, 其在克服阻力和膨胀力对外做功过程中消耗的能量增加, 大部分膨胀势能消耗在对外做功上, 因此, 最终的膨胀力将减小; 而对于逐渐减小的体积变化率 χ 而言, 只有小部分能量用于对外做功, 剩余的大部分势能仍然存在于土体中, 因此, 最终的膨胀力也比较大。考虑两种极限的情况, 即恒体积试验和自由膨胀试验。在恒体积试验中, 膨胀势能无处消散, 仍然以势能的形式储存, 因而测得的膨胀力很大; 在自由膨胀试验中, 所有的膨胀势能消耗在对外做功上, 因而最终膨胀力为0。

5 结 论

(1) 在膨润土中添加石英砂能够显著降低压实功, 节约成本。但随着密实度的提高, 因掺砂量不同导致的轴向应力的差异逐渐减小。因此, 在缓冲回填材料的工厂加工过程中, 应充分考虑压实功、骨料掺量对施工成本的影响, 从而选择最优的压实方案。

(2) 膨润土-砂混合物的压缩变形特性受掺砂量、饱和状态、密实度等因素的影响非常明显。在非饱和及密实度较低($\rho_d < 1.7 \text{ g/cm}^3$)的条件下, 混合物的压缩指数随掺砂量的增加近似线性减小。而在饱和及密实度较高($\rho_d > 1.7 \text{ g/cm}^3$)时, 压缩指数与掺砂量无明显关系。

(3) 膨润土-砂混合物在有荷条件下膨胀时, 掺砂量对膨胀变形过程及最终膨胀率有重要影响。试

样的最终膨胀率随石英砂掺量的增加而呈指数减小。掺砂量达到 40% 时, 膨胀过程伴随有明显的体积回落现象, 且体积回落率随掺砂量的增加而加剧。本质上, 膨润土-砂混合物的膨胀性能取决于膨润土有效干密度。

(4) 膨润土-砂混合物的膨胀变形呈阶段性特点, 前期膨胀率增加较快, 此后逐渐减小并最终趋于稳定。该现象与试样饱和过程中的吸水能力、吸水路径及微观结构调整有关。

参 考 文 献

- [1] 崔玉军, 陈宝. 高放核废物地质处置中工程屏障研究新进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 843—847.
CUI Yu-jun, CHEN Bao. Advanced on geological disposal of high-level radioactive nuclear waste in engineering barrier[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(4): 843—847.
- [2] 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(1): 12—20.
- [3] 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.
LIU Yue-miao, CHEN Zhang-ru. The feasibility of GMZ bentonite inner Mongolia as a backfill material for high-level radioactive waste repository[J]. **Acta Mineralogica Sinica**, 2001, 21(3): 541—543.
- [4] 刘月妙, 徐国庆, 刘淑芬, 等. 我国高放废物处置库缓冲/回填材料压实膨胀特性研究[J]. 铀矿地质, 2001, 17(1): 44—47.
LIU Yue-miao, XU Guo-qing, LIU Shu-fen, et al. Study on compactibility and swelling property of buffer/backfill material for HLW repository[J]. **Uranium Geology**, 2001, 17(1): 44—47.
- [5] 王志俭, 刘泉声. 密实砂-膨润土混合物膨胀特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 331—334.
WANG Zhi-jian, LIU Quan-sheng. Experimental study of swelling characteristics of compacted sand-bentonite mixture[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(4): 331—334.
- [6] 叶为民, SCHANZ T, 钱丽鑫, 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(2): 3861—3865.
YE Wei-min, SCHANZ T, QIAN Li-xin, et al. Characteristics of swelling pressure of densely compacted Gaomiaozi bentonite GMZ01[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(2): 3861—3865.
- [7] CUI S L, ZHANG H Y, ZHANG M. Swelling characteristics of compacted GMZ bentonite-sand mixtures as a buffer/backfill material in China[J]. **Engineering Geology**, 2012, 141: 65—73.
- [8] 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): 1005—1010.
QIN Bing, CHEN Zheng-han, LIU Yue-miao, et al. Swelling-shrinkage behaviour of Gaomiaozi bentonite[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(7): 1005—1010.
- [9] 孙文静, 刘仕卿, 孙德安, 等. 掺砂率对膨润土与砂混合物膨胀特性的影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1642—1648.
SUN Wen-jing, LIU Shi-qing, SUN De-an, et al. Influence of sand mixing ratio on swelling characteristics of bentonite-sand mixtures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(6): 1642—1648.
- [10] 刘泉声, 王志俭. 砂-膨润土混合物膨胀力影响因素的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1054—1058.
LIU Quan-sheng, WANG Zhi-jian. Influence factors of sand-bentonite mixtures on the swelling pressure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(7): 1054—1058.
- [11] SUN D A, CUI H B, SUN W J. Swelling of compacted sand-bentonite mixtures[J]. **Applied Clay Science**, 2009, 43: 485—492.
- [12] 马利科, 刘月妙, 曹胜飞, 等. 高庙子膨润土膨胀力影响因素研究[C]//第三届废物地下处置学术研讨论文集. 北京: [出版者不祥], 2010.
MA Li-ke, LIU Yue-miao, CAO Sheng-fei, et al. Influence factors of bentonite on the swelling pressure[C]//Proceedings of the 3rd Seminar on Geological Disposal of High-level Radioactive Nuclear Waste. Beijing: [s. n.], 2010.
- [13] 唐朝生, 黄立明, 叶为民, 等. GMZ01 缓冲/回填材料在柔性边界条件下的膨胀特性[C]//第四届废物地下处置学术研讨会论文集, 北京: 中国原子能出版社, 2012.
TANG Chao-sheng, HUANG Li-ming, YE Wei-min, et al.

- Swelling deformation characteristic of GMZ01 backfill/buffer material under the soft boundary conditions[C]//Proceedings of the 4rd Seminar on Geological Disposal of High-level Radioactive Nuclear Waste. Beijing: China Atomic Energy Press, 2012.
- [14] 秦冰, 陈正汉, 刘月妙, 等. 高庙子膨润土 GMZ001 三向膨胀力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 756—763.
- QIN Bing, CHEN Zheng-han, LIU Yue-miao, et al. Characteristics of 3D swelling pressure of GMZ001 bentonite[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(5): 756—763.
- [15] 孙发鑫, 陈正汉, 秦冰, 等. 高庙子膨润土-砂混合料的三向膨胀力特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 200—207.
- SUN Fa-xin, CHEN Zheng-han, QIN Bing, et al. Characteristics of three-dimensional swelling pressure of Gaomiaozi bentonite-sand mixture[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(1): 200—207.
- [16] KOMINE H, OGATA N. Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33(1): 11—22.
- [17] 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(12): 3447—3454.
- ZHANG Long, SUN De-an, LIU Yue-miao. Comparison between swelling properties of two Gaomiaozi Na-bentonites[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(12): 3447—3454.
- [18] 刘月妙, 蔡美峰, 王驹, 等. 高放废物地质处置库预选缓冲材料压缩性能研究[J]. 铀矿地质, 2007, 23(2): 91—95.
- LIU Yue-miao, CAI Mei-feng, WANG Ju, et al. Compressibility of buffer material for HLW disposal in China[J]. **Uranium Geology**, 2007, 23(2): 91—95.
- [19] YE W M, ZHANG Y W, CHEN B, et al. Investigation on compression behaviour of highly compacted GMZ01 bentonite with suction and temperature control[J]. **Nuclear Engineering and Design**, 2012, 252: 11—18.
- [20] YE W M, LAI X L, WANG Q, et al. An experimental investigation on the secondary compression of unsaturated GMZ01 bentonite[J]. **Applied Clay Science**, 2014, 97—98(4): 104—109.
- [21] YE W M, ZHANG F, CHEN B, et al. Effects of salt solutions on the hydro-mechanical behavior of compacted GMZ01 Bentonite[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2014, 72(7): 2621—2630.
- [22] 张虎元, 梁建, 刘吉胜. 混合型缓冲回填材料压实性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2585—2592.
- ZHANG Hu-yuan, LIANG Jian, LIU Ji-sheng. Compaction properties of bentonite-sand mixture as buffer material for HLW disposal[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(12): 2585—2592.
- [23] 孙德安, 闫威, 孙文静. 非饱和膨润土掺砂混合物的水力和力学性质[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2010, 16(2): 196—202.
- SUN De-an, YAN Wei, SUN Wen-jing. Hydraulic and mechanical behavior of unsaturated sand-bentonite mixture[J]. **Journal of Shanghai University (Nature Science Edition)**, 2010, 16(2): 196—202.
- [24] 张虎元, 贾灵艳, 周浪. 高效废物处置库的混合型缓冲回填材料压缩特性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1546—1552.
- ZHANG Hu-yuan, JIA Ling-yan, ZHOU Lang. Compression behaviors of compacted bentonite-sand mixtures as buffer material for HLW disposal[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(6): 1546—1552.
- [25] 徐永福, 孙德安, 董平. 膨润土及其与砂混合物的膨胀试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 451—455.
- XU Yong-fu, SUN De-an, DONG Ping. A investigation in swelling characteristics of bentonite-sand mixture[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(3): 451—455.
- [26] 唐朝生, 崔玉军, Tang Anh-Minh, 等. 重塑 CO_x 泥岩在饱和过程中应力应变的演化规律[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1166—1171.
- TANG Chao-sheng, CUI Yu-jun, TANG Anh-Minh, et al. Stress and strain evolution of remoulded CO_x argillite during saturation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(8): 1166—1171.
- [27] 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(1): 281—288.
- [28] IMBERT C, VILLAR M V. Hydro-mechanical response of a bentonite pellets/powder mixture upon infiltration[J]. **Applied Clay Science**, 2006, 32: 197—209.