

多场作用下压实膨润土剪切特性研究进展

张伊然¹, 陈永贵^{1,2}, 戴文杰¹, 叶为民^{1,2}, 王琼¹, 孙翌¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092)

摘要: 膨润土剪切特性对维持深地质处置库工程屏障性能至关重要。概述了膨润土剪切特性受处置库近场环境作用的响应机理, 归纳了膨润土剪切强度预测模型的最新进展。应力作用下, 膨润土剪切强度增加有赖于单位体积内固相增多和孔隙数量减少; 吸力作用下, 剪切行为受控于吸附水膜的润滑和土颗粒间的摩擦作用等; 化学作用下, 溶液浓度、阳离子交换反应和矿物相变(碱性条件)是剪切行为改变的关键因素; 温度作用下, 伊利石化和微观结构重排使剪切强度出现不可逆增加; 多场耦合作用下, 剪切特性受各因素相互作用的复杂影响, 目前这方面研究还不够深入。现阶段吸力作用下剪切强度预测模型较为成熟; 化学作用下模型仅考虑化学溶液类型和浓度, 忽视了阳离子交换作用、矿物溶解等影响。综上, 对于多场耦合作用的剪切行为、膨润土裂缝自愈后剪切强度劣化问题和提高预测模型准确性等方面仍需展开进一步研究。

关键词: 深地质处置; 压实膨润土; 剪切特性; 多场作用

中图分类号: TU443

文献标志码: A

Review on Shear Properties of Compacted Bentonite Under Multi-field Action

ZHANG Yiran¹, CHEN Yonggui^{1,2}, DAI Wenjie¹, YE Weimin^{1,2}, WANG Qiong¹, SUN Zhao¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Shanghai 200092, China)

Abstract: The shear characteristics of bentonite are crucial for maintaining the engineering barrier performance of deep geological repositories. We summarize the response mechanisms of bentonite shear characteristics to the repository's near-field environment and review recent advancements in shear strength prediction models. Under stress, increases in bentonite

shear strength are influenced by a rise in solid phase content and a reduction in pore volume per unit. Under suction conditions, shear behaviors are governed by the lubricating effect of the adsorbed water film and the friction between soil particles. Chemical interactions affect shear behaviors through factors like solution concentration, cation exchange reactions, and mineral phase transitions (under alkaline conditions). Temperature effects, such as illitization and microstructural rearrangement, cause an irreversible increase in shear strength. Under multi-field coupling conditions, the shear properties are influenced by the intricate interactions among various factors, yet current research in this area remains insufficient. While current prediction models for shear strength under suction are well-developed, chemical interaction models mainly consider solution type and concentration, overlooking the roles of cation exchange and mineral dissolution. Given these limitations, further studies are needed to examine the shear behavior under multi-field coupling, assess the deterioration of shear strength following bentonite self-healing, and enhance the accuracy of prediction models.

Keywords: deep geological repository; compacted bentonite; shear characteristics; multi-field action

当前核电事业发展迅速, 由此必将产生大量高水平放射性废物, 国际上广泛采用深地质埋藏对其进行处置^[1]。基于天然屏障(围岩)、工程屏障(缓冲材料)、处置容器(废物罐)等多重屏障体系设计的深地质处置库中, 缓冲/回填材料具有减缓地下水入渗、维持围岩稳定、阻滞核素迁移、传导核素衰变热等关键作用, 是处置库最后一道人工屏障^[2-4]。诸多国家已选定膨润土作为缓冲/回填材料, 用于充填废

收稿日期: 2024-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(42430713); 国家杰出青年科学基金(42125701); 上海市教委科研创新计划(2023ZKZD26)

第一作者: 张伊然, 博士生, 主要研究方向为环境工程地质。E-mail: 2410060@tongji.edu.cn

通信作者: 陈永贵, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为环境工程地质、城市工程地质和非饱和土力学。

E-mail: cyg@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

物罐与围岩之间孔隙、密封处置廊道^[5-6]。然而,处置库长期运营过程中,受地下水渗流影响,膨润土产生差异水化膨胀,引起回填体剪切变形,严重时导致处置库倾斜或滑动^[7];同时,地震等极端情况引起的剪切错动^[8],可能引发废物罐发生剪切破坏甚至核素泄露。因此,膨润土剪切特性是维持处置库工程屏障性能长期安全稳定重要指标^[9-13]。

国内外学者围绕膨润土剪切强度和剪切变形进行了大量试验,发现应力、吸力、化学和温度等因素对膨润土剪切特性具有重要影响。Blatz等^[14]通过三轴试验发现,剪切强度随吸力增加而非线性增加,且强度增加速率与体积收缩曲线密切相关;Kim等^[15]发现,压实膨润土的剪切强度对孔隙水盐度有明显依赖性;Song等^[16]指出,压实膨润土剪切强度随NaCl溶液浓度升高而增加,且恒法向应力法比恒体积法下制备试样的剪切强度增加速率更快,该现象是由于恒法向应力法下NaCl溶液饱和过程对膨润土微观结构影响更大,从而产生更大的颗粒间应力;李晓月等^[17]基于盐溶液中膨润土的应力平衡和表面分型模型,建立了考虑溶液浓度的剪切强度预测模型;Watanabe等^[18]通过三轴试验发现,碱溶液条件下膨润土剪切强度与矿物蚀变模式密切相关;Chen等^[19]发现,对于干密度为 1.4 、 $1.6\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的压实膨润土试样,剪切强度随温度升高而增加,这主要是由于高温状态下吸附水向自由水转化导致基质吸力下降。目前还缺乏复杂溶液和多场耦合作用下膨润土剪切特性的微观机理和预测模型等方面相关研究。

本文归纳和总结了多场作用下压实膨润土剪切强度变化规律,揭示了膨润土剪切特性演化机制,阐释了膨润土剪切强度预测模型的应用范围和局限性。在此基础上,指出当前研究存在的不足和今后研究的主要方向,以期为我国高放废物深地质处置库工程屏障长期性能研究提供依据。

1 多场作用下剪切试验方法

深地质处置库中,膨润土需承载高放废物固化体造成的法向压力($1\text{ MPa}<\sigma_n<2\text{ MPa}$)^[20]、传递核废料衰变热($T<100\text{ }^\circ\text{C}$)^[21]以及承受地下水渗流和化学作用。为模拟实际工程,学者们对传统剪切试验装置进行改进,以获得更加准确的膨润土剪切试验数据。

传统直剪仪采用杠杆加载($<0.4\text{ MPa}$)和电动机加载($<0.8\text{ MPa}$),这远不能模拟处置库实际工

况。因此,学者们基于空气压缩原理^[22]或采用气动加载^[23]对直剪仪加压装置进行改造,将最大法向加载压力提高至 2 MPa 。通常,非饱和剪切试验主要有2种控制方式:①在剪切盒外部增加密闭压力室、底部放置高进气值陶土板,试验时利用轴平移技术,通过控制陶土板下的水压力和压力室中的气压对试样施加恒定吸力^[24],但该方法试验周期相对较长;②在土样压制前预先采用气相法或渗析法进行吸力平衡,并在试验过程中利用盐溶液气相循环维持环境吸力(见图1a)^[22,25],该方法在一定程度上缩短了剪切试验时间。受化学条件影响的剪切试验仍采用传统剪切装置,通过喷雾湿化法^[26]或溶液注入法^[16]制备试样后再进行剪切试验,这2种方法均能考虑溶液浓度和类型的影响,但需精确配制溶液并严格控制试验条件,避免非试验离子影响试验结果。针对温度对剪切性质的影响,Yavari等^[27]和Yang等^[28]采用水浴恒温箱密封剪切盒来维持试样温度恒定(见图1b),Di-Donna等^[29]、Ng等^[30]、Chao等^[31]采用热电阻嵌入剪切盒外壁或底部提供热源的方法(见图1c),这2种方法均需开展预试验,将热电偶插入土样确定试样温度与水温基本一致的时间(实际试验过程中为避免试样机械性能改变而不插入热电偶),但水浴加热法在温度较高时加热耗时较长,热电阻法存在试样受热不均和试样内水分流失等问题。

2 多场条件对膨润土剪切特性的影响

深地质处置库长期运营期间,压实膨润土剪切特性受地下水渗流、地下水化学元素、核素衰变热、围岩应力和上覆土层压力等影响较大,学者们对此展开了大量研究,以探求膨润土剪切特性的演化规律。

2.1 应力作用

处置库运营过程中,膨润土受围岩应力和上覆岩层自重产生的应力作用。Peng等^[32]和Xiang等^[33]分别研究了法向应力对初始干密度 ρ_0 为 1.38 、 $1.70\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时饱和高庙子(GMZ)膨润土剪切特性的影响。结果表明,较低初始干密度条件下,随着法向应力增加,剪切特性由应变硬化向应变软化转变;初始干密度较高时,试样出现应变软化行为,且法向应力越高软化现象越明显(见图2a、b)。这是由于含水率 ω 一定时,初始干密度越低,土颗粒之间排列越松散,分子间作用力减小,导致膨润土内摩擦角减小(见图2c)^[34];随着初始干密度增加,单位体积内固相

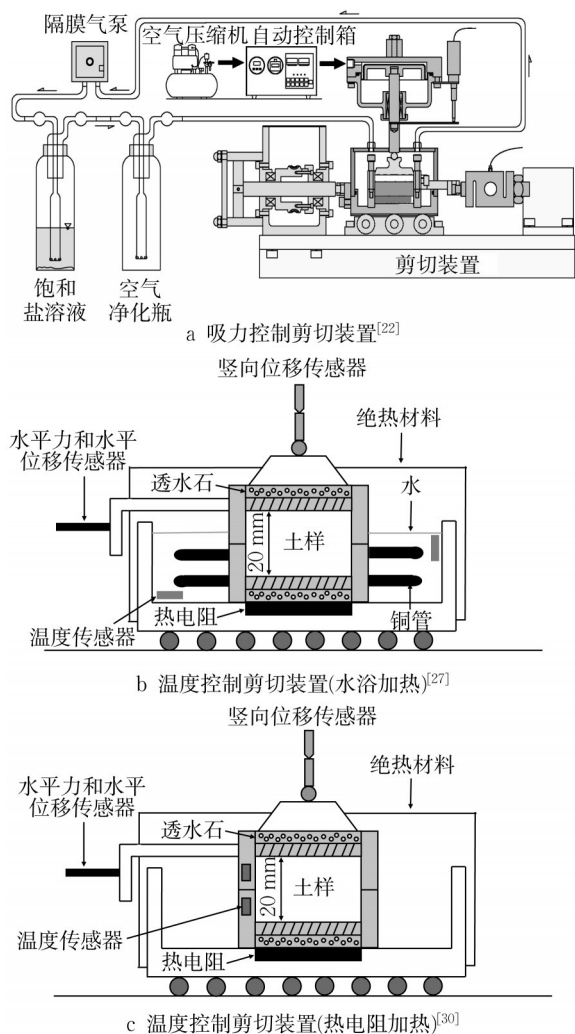


图1 改进的剪切试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of the improved shear device

占比上升,孔径减小、孔隙减少,土颗粒间吸附水膜厚度变薄,土颗粒间接触更加紧密,内摩擦角增大,进而剪切强度 τ_p 增大。

2.2 吸力作用

处置库建成后,压实膨润土将长期处于非饱和状态,此时吸力对膨润土剪切特性的影响不容忽视。如图3a所示,Nishimura^[35]发现,初始吸力 s 为0~105 MPa时,Kunigel-V1膨润土的剪切强度随初始吸力增加而增加;Dong等^[22]、Peng等^[32]发现,初始吸力为0~125.7 MPa时,GMZ膨润土剪切强度与Nishimura^[35]有相同结果,但当初始吸力范围达到125.7~367.5 MPa时,剪切强度出现一定回落现象。

研究表明,压实膨润土微观结构改变对吸力变化敏感^[36],直接影响内摩擦角和黏聚力。吸力对内摩擦角的影响机理主要表现为:①吸力降低使土体发生水化作用,层叠体裂解物填充集体间孔隙,集

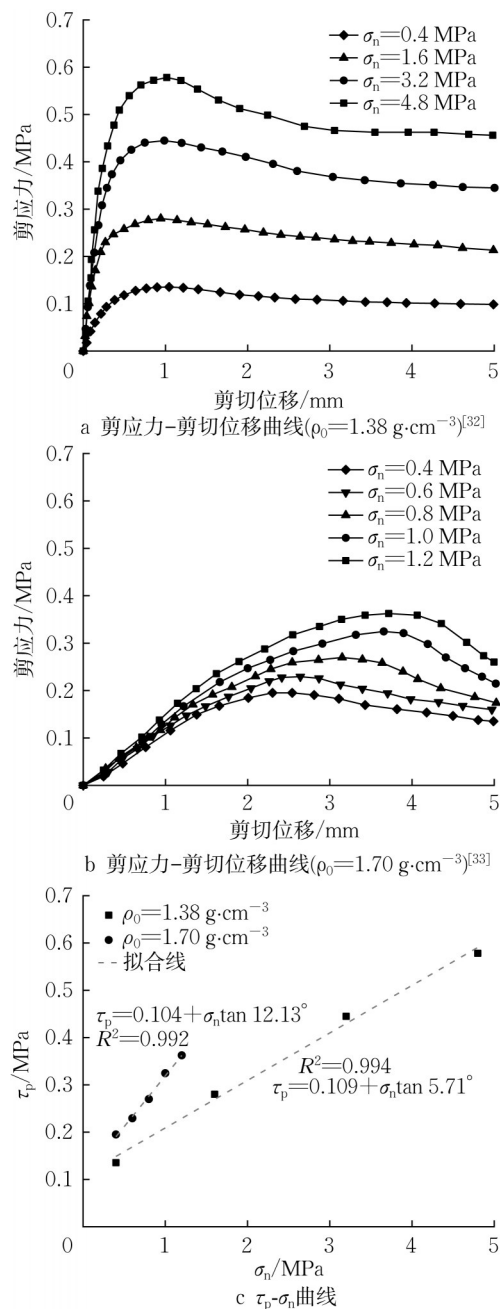


图2 法向应力对膨润土剪切特性的影响

Fig.2 Effect of normal stress on shear properties of bentonite

合体间孔隙部分转化为集体内孔隙,集体膨胀(见图3b)^[37],从而增加了固相之间接触的可能性;②集体外表面存在吸附水膜,吸附水膜较为光滑,具有一定润滑作用^[38],降低了固相之间的摩擦阻力。两者的拮抗作用使膨润土内摩擦角变化较为复杂。膨润土黏聚力随吸力降低而减小,这主要是由于膨润土富含蒙脱石矿物,因此土-水界面存在的物理化学作用因水分子浸入而遭到破坏,从而降低颗粒之间的挤压,减小膨润土的黏聚力^[39-40]。此外,高初始

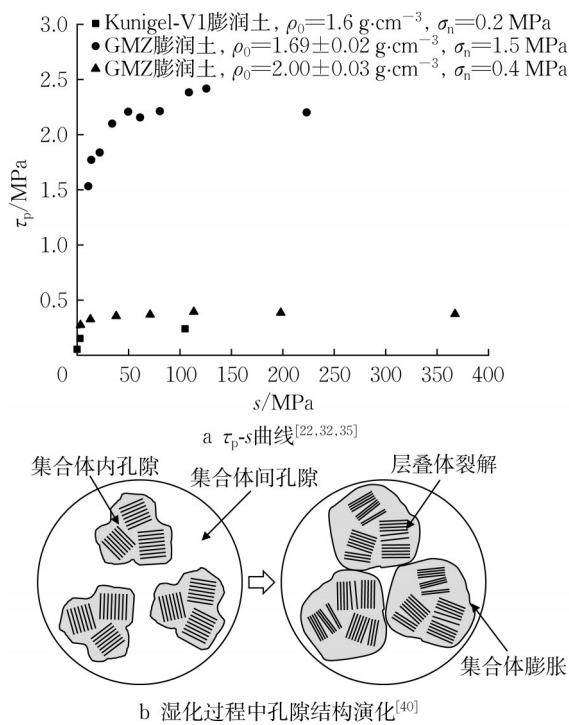


图 3 初始吸力对膨润土剪切特性的影响

Fig.3 Effect of initial suction on shear properties of bentonite

吸力 ($s > 125.7$ MPa) 条件下, 剪切强度存在一定的下降趋势, 这主要由吸附水膜较薄甚至消失, 物理化学作用太弱, 土颗粒间不能黏结而导致的^[22]。

值得说明的是, 约束条件下压实膨润土内水分均匀化具有一定延时性^[41]。膨润土压实后, 试样内部吸力或水分尚未达到完全平衡状态; 恒湿条件下, 随着充分水化, 膨润土剪切强度将进一步降低至稳定不变^[42](见图 4)。研究认为, 这是由非层间水分子运输或扩散至层间, 促进黏土层的进一步水化, 进而

导致微观结构发生变化造成的^[43]。然而, 目前针对膨润土剪切性能受时间效应的影响尚处于起步阶段, 微观结构演化机制仍需进一步研究。

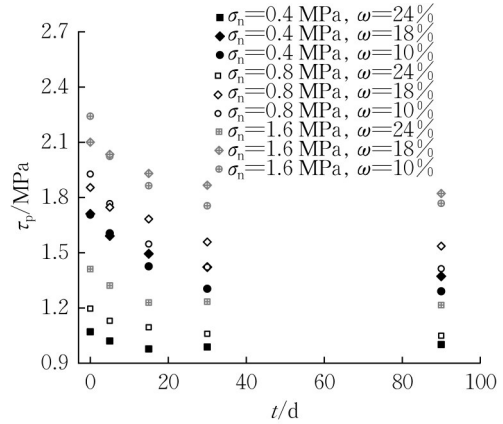


图 4 时间效应对膨润土剪切强度的影响^[23]

Fig.4 Effect of aging time on the shear strength of bentonite^[23]

2.3 化学作用

针对膨润土剪切特性受化学作用的影响, 现有研究主要围绕地下水中赋存的盐溶液和混凝土衰解产生的碱溶液开展研究。

2.3.1 盐溶液

大量试验结果表明, 盐溶液对压实膨润土剪切强度增加具有促进作用(见表 1), 不同类型盐溶液的强度曲线均呈现相似趋势(见图 5a)。随着盐溶液浓度 c 升高, 膨润土剪应力升高越明显, 剪切强度对应的剪切位移越小, 黏聚力和内摩擦角增加(见图 5b)。这是由于盐溶液的存在加剧了膨润土与孔隙流体中化学成分之间的物理化学作用, 进而提高膨润土剪切性能^[44]。

表 1 盐溶液对压实膨润土剪切强度的影响

Tab.1 Effect of salt solution on the shear strength of compacted bentonite

膨润土类型	干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	化学溶液		作用效果	剪切行为	参考文献
		类型	浓度/($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)			
Ponza 膨润土		KCl	1.0	促进	应变软化	Caterina ^[45]
		NaCl				
		CaCl ₂				
Bisaccia 膨润土		KCl	1.0	促进	应变软化	Caterina ^[46]
		NaCl				
Na/Ca-膨润土		NaCl	0~1.0	促进	应变软化	Spagnoli 等 ^[47]
		CaCl ₂				
Na-GMZ 膨润土	1.50	NaCl	0~1.0	促进	应变软化	Zhang 等 ^[48]
Laviosa 膨润土		NaCl	1.0	促进	应变软化	Caterina 等 ^[49]
Al-Qatif 膨润土	1.21	NaCl	1.0	促进	应变软化	Elkady 等 ^[50]
			4.0			
Na-GMZ 膨润土	1.50	Na ₂ SO ₄	0~1.0	促进	应变软化	郑新江等 ^[51]
Na-GMZ 膨润土	1.70	KCl	0.1	促进	应变软化	Peng 等 ^[32]
		NaCl	0.5			
		CaCl ₂				

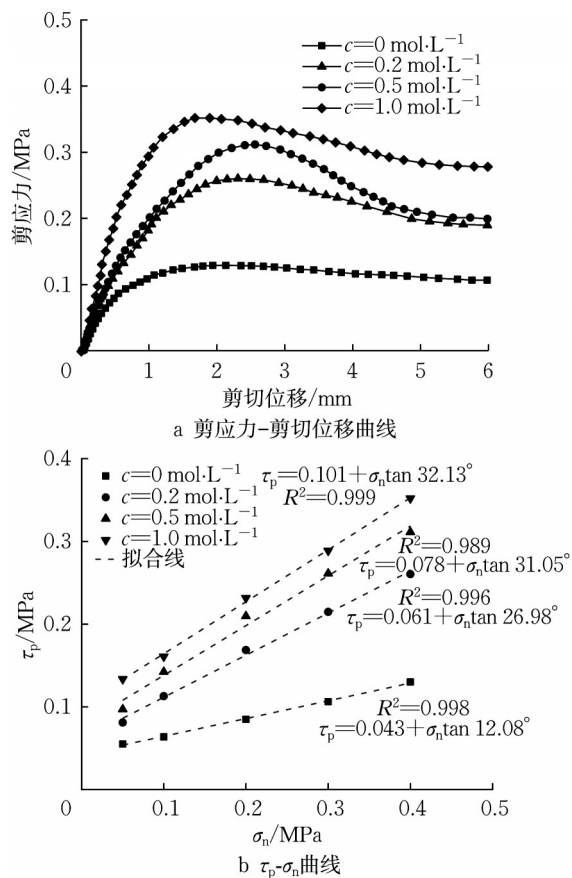


图5 Na₂SO₄浓度对膨润土剪切特性的影响^[26]

Fig.5 Effect of Na₂SO₄ concentration on shear properties of bentonite^[26]

研究表明,盐溶液对膨润土表面结构的影响较小^[33],但是盐分改变了膨润土孔隙流体浓度,诱导扩散双电层变化^[26]、孔隙流体迁移^[52]和阳离子交换反应^[53],进而影响黏聚力和内摩擦角。一方面,盐溶液浓度增加有利于产生膨润土颗粒絮凝结构;另一方面,由扩散双电层理论可知^[54],当膨润土表面电荷一定时,阳离子浓度增加导致表面电位降低,粒子间斥力减小,双电层厚度变薄。两者的协同作用使土颗粒间相互作用更加紧密,土颗粒内孔隙体积减小、数量减少^[55](见图6),黏聚力增强。值得注意的是,膨润土具有极低的渗透性,因此可将其视为一种半透膜。当钠基膨润土在富Na⁺环境中时,内外浓度差产生的渗透梯度给膨润土表面带来渗透应力的附加作用,加速蒙脱石夹层发生脱水、坍塌,进而产生更为紧密的结构^[26,56],使得膨润土的剪切强度随Na⁺浓度增加而增加。

2.3.2 碱溶液

在处置库设计年限内,混凝土基材料衰解将释放大量的K⁺、Na⁺、Ca²⁺、OH⁻等离子,导致处置库内

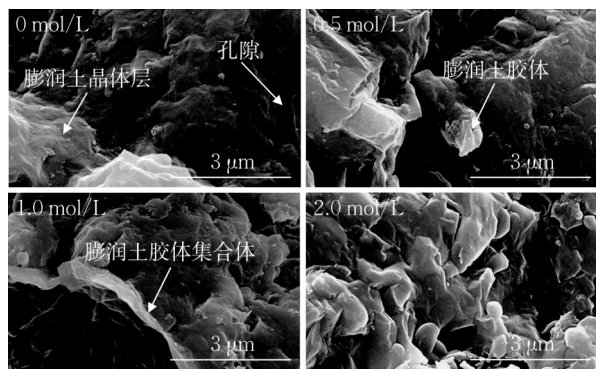


图6 盐浓度对膨润土孔隙结构影响的扫描电镜图像^[48]

Fig.6 SEM images of bentonite treated at different salt concentrations^[48]

孔隙水pH值呈碱性^[57]。Xiang等^[58]发现,随着KOH、NaOH溶液浓度升高,GMZ膨润土剪应力升高,且溶液浓度越高应变软化现象越明显,内摩擦角和黏聚力越大(见图7);相较于NaOH溶液,KOH溶液作用下,膨润土剪切强度更高的原因主要归结于K⁺具有较低的水化能,且K⁺直径(0.266 nm)与蒙脱石空腔直径较为相似,使得K⁺较Na⁺更容易进入空腔,从而形成更强的K-联结^[59]。

Watanabe等^[60]研究了KOH、NaOH、Ca(OH)₂、KOH-NaOH溶液对Kunibond膨润土剪切特性的影响,得到了相似的研究结果,认为碱溶液作用时间对剪切强度有复杂影响。与盐溶液相比,碱溶液还会造成膨润土内原生矿物溶解和次生矿物沉淀^[61],长期作用下剪切机制更为复杂(见图8):①蒙脱石开始溶解,边缘有凝胶状胶结物产生,土颗粒间胶结作用增加,膨润土黏聚力增大;②随着蒙脱石持续溶解,胶结物结构逐渐松散,产生一定的可溶性次生矿物,土颗粒原生结构被破坏、胶结作用降低,膨润土黏聚力减小^[62];③含Si、Ca等尺寸较小的次生矿物析出,蒙脱石表面变得粗糙,部分孔隙被充填^[63],使得膨润土内摩擦角增大、黏聚力增加,进而膨润土剪切强度永久性增大。

实际上,地下水环境赋存多种阴阳离子,离子间的相互作用关系复杂,单一溶液环境的研究尚不能探明复杂化学环境的作用机制。因此,未来有必要针对多离子赋存条件下膨润土剪切特性演化规律展开深入研究。

2.4 温度作用

处置库运行期间,受放射性核素衰变热影响,膨润土将长期处于较高温度水平,最高可达90~100℃。随着核素不断衰变,温度将逐渐稳定至60~70℃^[64]。因此,学者们通常选取60~80℃温度条件

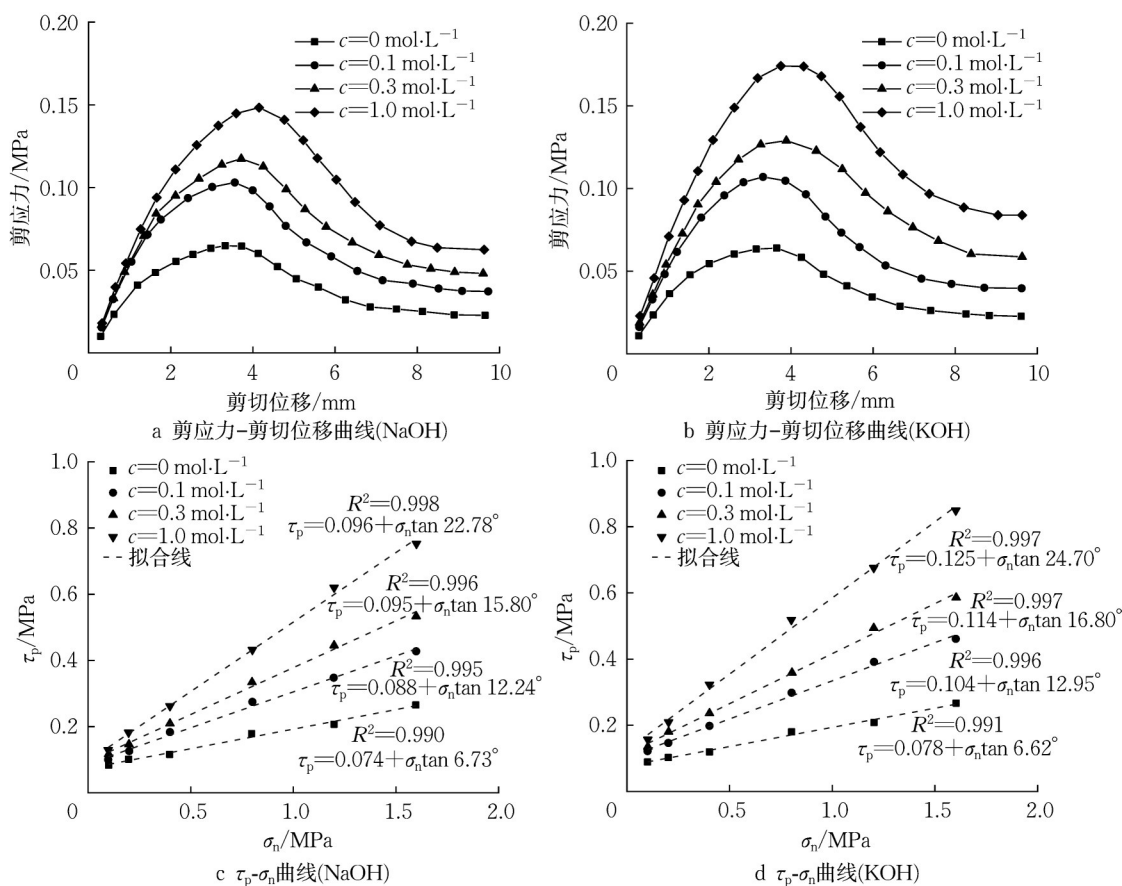


图 7 碱溶液对膨润土剪切特性的影响^[58]

Fig.7 Effect of alkali solution on shear properties of bentonite^[58]

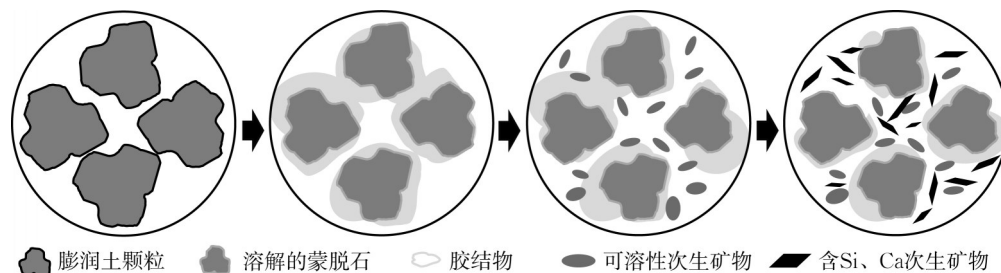


图 8 碱溶液中膨润土蚀变过程

Fig.8 Alteration process of bentonite in alkali solution

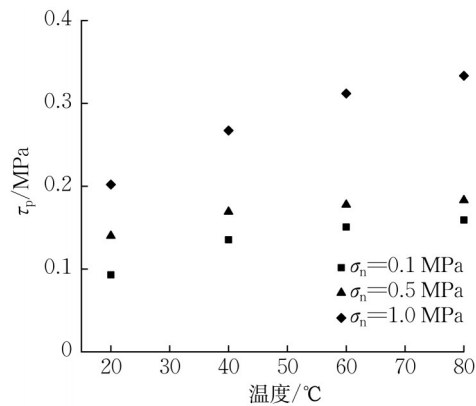
展开研究。结果表明,膨润土剪切强度随着温度升高逐渐增大,但高温会削弱剪切强度的增加程度(见图9)^[65]。

研究还发现,伴随着温度升高水分子热运动增强,使得温度较低时紧密排列在土颗粒表面的水分子运动活跃,水分子与土颗粒表面的相互作用减弱,土颗粒间吸附水的黏度减小^[66],部分水分子从吸附状态转变为自由状态,密度较大的吸附水膜含量降低,导致土颗粒间相互作用减弱、黏聚力降低^[67-68]。同时,膨润土微观结构出现不可逆重排,堆叠为更密集的结构^[21,69],使得内摩擦角增加。此外,当温度高

于 200 °C 时,蒙脱石矿物通过胶结和伊利石化转变为更稳定的硅酸盐矿物,也将促进膨润土剪切强度升高^[70]。

2.5 多场作用

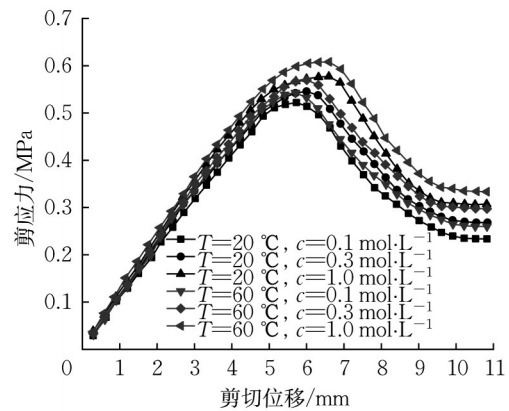
在处置库运营期间压实膨润土受热、水、力、化多场耦合作用。现有文献多在剪切试验设计中考虑多场耦合条件,鲜少对多场耦合作用下压实膨润土剪切特性开展深入研究。项国圣等^[71]考虑不同碱类型(NaOH、KOH)、浓度(0.1、0.3、1.0 mol·L⁻¹)和温度(20、60 °C)耦合作用下压实膨润土的剪切特性(见图10),发现碱性条件下温度升高促进膨润土剪

图9 温度对膨润土剪切强度的影响^[65]Fig.9 Effect of temperature on the shear strength of bentonite^[65]

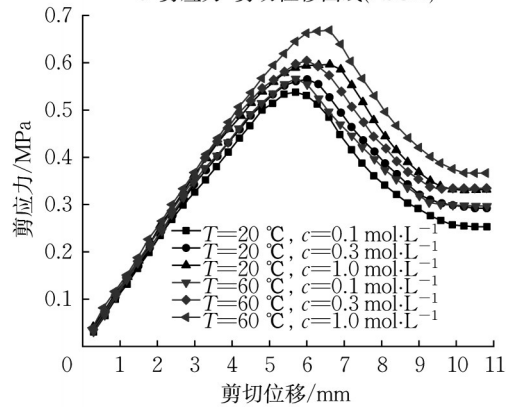
切强度增加。如2.3.2节所述,碱溶液环境中膨润土颗粒表面易形成尺寸更小的次生矿物,增加颗粒表面粗糙度;在此基础上,温度升高将加剧碱溶液对膨润土颗粒的侵蚀作用,加速蒙脱石分解和表面胶体腐蚀^[72],导致膨润土颗粒表面矿物尺寸更小、表面更粗糙,因而剪切强度进一步增加。

Hamidi等^[65]和Chen等^[73]开展了热-力耦合作用下膨润土基材料剪切试验(见图9、11),发现热-力耦合作用下膨润土基材料剪切强度增加,且 $T \leq 60^\circ\text{C}$ 时增速较缓。研究表明,温度增加能够影响分子活性状态,提高土颗粒表面水分子和阳离子的活度和能量^[74]。温度较低($T \leq 60^\circ\text{C}$)时,土颗粒表面水分子和阳离子活跃,使土颗粒表面吸附水层和双电层厚度增加,因而颗粒间黏聚作用增强。同时,双电层引起膨润土颗粒体积增加,压缩颗粒间活动空间;随着法向应力增加,土颗粒排布更加紧密,颗粒间摩擦效应增强。两者共同作用促进膨润土基材料剪切强度的增加。温度较高($T > 60^\circ\text{C}$)时,水分子更加活跃,易从土颗粒孔隙中脱出,加速土颗粒重新排列,受法向应力作用,颗粒间孔隙进一步坍塌,致使膨润土基材料剪切强度增加。

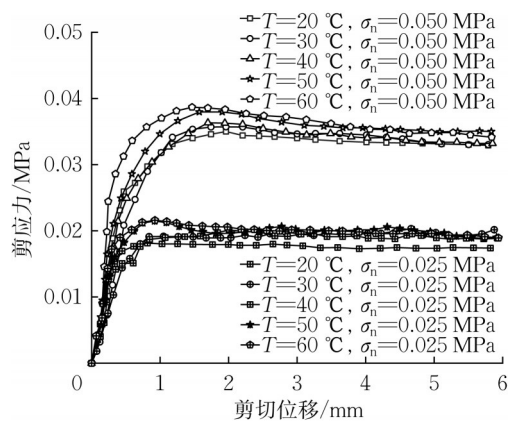
综上所述,膨润土块体受应力场、渗流场、化学场和温度场等单场作用的剪切特性研究已较为充分。然而,实际工程中,压实膨润土以砌块形式按一定排列置于废物罐与围岩之间,导致在膨润土-围岩、膨润土-膨润土和膨润土-废物罐间产生施工接缝。膨润土具有自封闭/自愈合能力^[75],在长期服役过程中膨润土不断充填接缝。同时,服役期间受多场之间耦合作用的相互影响和制约,压实膨润土的剪切特性演化规律更为复杂,亟待展开更为系统的研究。



a 剪应力-剪切位移曲线(NaOH)



b 剪应力-剪切位移曲线(KOH)

图10 热-碱耦合作用对膨润土剪切特性的影响 ($\sigma_n=0.4\text{ MPa}$)^[71]Fig.10 Effect of temperature-alkali interaction on shear properties of bentonite ($\sigma_n=0.4\text{ MPa}$)^[71]图11 热-力耦合作用对膨润土剪切特性的影响^[73]Fig.11 Effect of thermal-mechanical coupling action on shear properties of bentonite^[73]

3 剪切强度模型理论

饱和土剪切强度多采用莫尔-库伦强度理论,非饱和土大多采用Bishop单变量模型和Fredlund双变量模型预测剪切强度。然而,膨润土受多场作用时

发生离子交换、矿物相变等变化,这些模型将不能满足复杂环境下的剪切强度预测。为此,学者们对膨润土剪切强度预测模型进行了修正。

3.1 吸力作用下剪切强度模型

Vilar^[76]从非饱和土剪切强度包络线与吸力的非线性函数关系出发,提出了经验性双曲函数预测模型为

$$\tau_p = c' + (\sigma - \mu_a) \tan \varphi' + \frac{(\mu_a - \mu_w) \tan \varphi'}{1 + \frac{(\mu_a - \mu_w) \tan \varphi'}{c_{ult} - c'}} \quad (1)$$

式中: c' 为有效黏聚力; φ' 为有效内摩擦角; c_{ult} 为吸力趋于无穷大时的黏聚力; σ 为总应力; μ_a 为孔隙气压力; μ_w 为孔隙水压力; $(\sigma - \mu_a)$ 为净法向压力; $(\mu_a - \mu_w)$ 为基质吸力。该模型没有考虑土水特征曲线中的进气值或其他定量数据,且准确性依赖于试验数据的拟合情况,故模型应用存在局限性。

Dong等^[22]基于Han等^[77]的强度模型,结合Van Genuchten模型中对饱和度 S_r 的描述,给出以下剪切强度模型:

$$\tau_p = c' + \sigma \tan \varphi' + \chi \tan \varphi' \quad (2)$$

式中: χ 为有效应力参数(取 $\chi = (S_r)^\alpha$ 时预测值与实测值拟合效果最好, α 为拟合参数)。然而,该模型仅在11~223 MPa吸力范围内能够较为合理地预测不同初始吸力条件下GMZ膨润土剪切强度,其普适性和准确性仍需进一步验证。

Pham等^[78]基于多相(固相、水、空气和吸附水膜)连续介质力学,考虑土中水对非饱和条件下剪切强度的影响,提出了以下计算公式:

$$\sigma' = \sigma - \mu_a + (\mu_a - \mu_w) \left[\frac{1 - \theta_r^{\frac{2}{3}}}{1 - \theta_c^{\frac{2}{3}}} \right] S_r^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

$$\tau_p = c' + \sigma' \tan \varphi' + (\mu_a - \mu_w) [(1 - \theta_c) S_c] \tan \varphi' \quad (4)$$

式中: σ' 为有效应力; S_c 为有效饱和度; θ 为体积含水率; θ_r 为残余体积含水率; θ_c 为有效体积含水率。经大量试验数据验证,该模型在全吸力范围内有较好的预测结果,能够反映剪切强度、饱和度、体积含水率和基质吸力之间的非线性关系。

3.2 化学作用下剪切强度模型

Xu^[79]认为,NaCl溶液的渗透吸力会对膨润土颗粒产生相互作用力,因而基于膨润土表面分形模型^[80],对有效应力概念提出以下考虑渗透吸力的修正:

$$\tau_p = c' + p' \tan \varphi' \quad (5)$$

$$p' = \sigma + \sum_{i=1}^n \pi_i \left(\frac{\sigma}{\pi_i} \right)^{D_s} \quad (6)$$

式中: p' 为考虑渗透吸力的修正有效应力; π_i 为化学成分 i 引起的渗透吸力; D_s 为表面分形维数。Xiang等^[33,58]利用该模型模拟了不同盐/碱溶液作用下GMZ膨润土剪切强度,均得到了较好的拟合效果,并发现有效内摩擦角的大小与溶液类型无关。然而,该模型并未考虑化学条件下阳离子交换反应、矿物溶解和胶结作用及作用时间对剪切强度的影响。

Watanabe等^[60]依据Kunibond膨润土在碱溶液条件下的试验结果,从弹塑性角度出发,基于等效颗粒孔隙比概念,提出了与剪切强度呈正比关系的结构性参数为

$$\beta \rho_{d, \text{fine}} = \frac{\beta (m_{sm} + m_{snm})}{V_{sm} + V_{snm} + V_v} \quad (7)$$

式中: β 为胶结修饰因子(依据NH₄Cl溶液浸出试验中可溶性次生矿物设定); $\rho_{d, \text{fine}}$ 为试样中蒙脱石等细颗粒的干密度; m_{sm} 为蒙脱石质量; m_{snm} 为非蒙脱石质量; V_{sm} 为蒙脱石体积; V_{snm} 为非蒙脱石体积; V_v 为孔隙体积。该结构性参数侧重反映干密度和胶结物对剪切特性的影响,但对区分蒙脱石相变前后的成分和形态要求较高。

综上所述,现有模型预测吸力作用下膨润土剪切强度较为成熟,化学作用下剪切强度预测模型忽视了阳离子交换作用、矿物溶解等对剪切强度的影响。此外,鲜见考虑温度和多因素耦合作用下膨润土剪切强度预测模型的研究成果。

4 结论与展望

4.1 结论

(1)用于研究膨润土剪切强度的试验装置常采用增加气动加压装置、增设控制/维持吸力装置、增加保温/加热装置等方式来满足吸力和温度条件的试验要求。然而,复杂条件下的剪切强度仍需先制备试样再利用传统剪切试验装置进行试验。

(2)压实膨润土剪切行为受应力、吸力、盐/碱溶液、温度和时间效应等影响的研究已较为充分,但受多场耦合作用的研究尚在起步阶段。研究表明,膨润土剪切行为通常呈应变软化现象,且应力等单场作用和热-碱、热-力耦合作用可提高膨润土剪切强度,而时间效应降低膨润土剪切强度至稳定。上述现象归因于各因素对膨润土微观结构的影响,包括

土颗粒与土颗粒间、土颗粒与水分子/化学离子间的相互作用以及土颗粒的物理化学变化等。

(3)膨润土剪切强度预测模型主要从吸力和化学作用的角度构建。吸力作用的剪切强度模型预测结果较为准确,能够反映剪切强度与基质吸力之间的非线性关系,但低吸力范围内的预测尚不准确;化学作用下剪切强度预测模型通过引入分形维数来考虑化学成分引起的渗透吸力对剪切强度的影响,但忽略了阳离子交换作用、矿物溶解等对剪切强度的影响。

4.2 展望

(1)基于处置库地下水成分,开展多化学离子赋存的压实膨润土剪切试验,深入研究 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 OH^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 等化学离子协同/拮抗作用下膨润土力学行为和微观结构演化,并借助数值手段实现膨润土受地下水化学离子影响的强度预测。

(2)开展压实膨润土自愈合/自封闭后剪切特性劣化研究。实际工程中,压实膨润土块体与围岩、废物罐和膨润土之间存在孔隙,受地下水渗流影响膨润土不断膨胀充填孔隙,但仍长期处于薄弱状态。因此,明晰膨润土-围岩/废物罐/膨润土界面力学行为,是保证处置库长期安全稳定的重要前提。

(3)应研发适用于多因素条件的剪切仪器,开展多场耦合作用下压实膨润土剪切特性长期演化规律研究,明确膨润土剪切强度预测模型的关键参数,构建具有普适性的膨润土剪切强度预测模型。处置库服役过程中,膨润土长期受多场耦合作用,诱导其微观结构形态、粒间相互作用和矿物成分等发生改变,进而影响压实膨润土工程屏障性能发挥。因此,考虑热-水-力-化耦合作用下压实膨润土剪切行为演化是值得不断探索的方向。

作者贡献声明:

张伊然:调研文献,撰写论文。

陈永贵:搭建论文框架,优化论文内容,提供项目资助。

戴文杰:修改论文。

叶为民:提供论文思路。

王 琼:论文写作。

孙 翌:审阅论文。

参考文献:

- [1] WANG Q, TANG A M, CUI Y J, *et al.* The effects of technological voids on the hydro-mechanical behaviour of compacted bentonite-sand mixture[J]. *Soils and Foundations*, 2013, 53(2): 232.
- [2] 王驹, 陈伟明, 苏锐, 等. 高放废物地质处置及其若干关键科学问题[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006(4): 801.
WANG Ju, CHEN Weiming, SU Rui, *et al.* Geological disposal of high-level radioactive waste and its key scientific issues [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006(4): 801.
- [3] CHEN Y G, CUI Y J, TANG A M, *et al.* A preliminary study on hydraulic resistance of bentonite/host-rock seal interface[J]. *Geotechnique*, 2014, 64(12): 997.
- [4] 项国圣, 吕立勇, 葛磊, 等. 温度对GMZ膨润土的膨胀性能影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(1): 77.
XIANG Guosheng, LÜ Liyong, GE Lei, *et al.* Effects of temperature on swelling characteristics of GMZ bentonite [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(1): 77.
- [5] CHEN Y G, ZHU C M, YE W M, *et al.* Effects of solution concentration and vertical stress on the swelling behavior of compacted GMZ01 bentonite[J]. *Applied Clay Science*, 2016, 124: 11.
- [6] 曹胜飞, 刘月妙, 谢敬礼, 等. 高庙子膨润土热膨胀特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(2): 377.
CAO Shengfei, LIU Yuemiao, XIE Jingli, *et al.* Experimental study on thermal expansion properties of GMZ bentonite [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(2): 377.
- [7] GOWTHAMAN S, LEENA K T, LAURA T S. Shear resistance of bentonite backfill materials and their interfaces under varying hydraulic conditions in a deep rock nuclear waste repository[J]. *Applied Clay Science*, 2015, 104: 211.
- [8] PINTADO X, ROMERO E, SURIOL J, *et al.* Small-strain shear stiffness of compacted bentonites for engineered barrier system [J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2019, 18: 1.
- [9] LLORET A, VILLAR M V. Advances on the knowledge of the thermo-hydro-mechanical behaviour of heavily compacted "FEBEX" bentonite [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2007, 32(14): 701.
- [10] ZENG Z T, SHAO J S, SUN D A, *et al.* Effect of thermal ageing on physical properties of MX80 bentonite under high-temperature conditions [J]. *Engineering Geology*, 2022, 308: 106822.
- [11] DOHRMANN R, GENSKE D, KARNLAND O, *et al.* Interlaboratory CEC and exchangeable cation study of bentonite buffer materials: II. alternative methods [J]. *Clays and Clay Minerals*, 2012, 60(2): 176.
- [12] NAVEA I J, BALAGOSA J, YOON S, *et al.* Strain-dependent-deformation property of Gyeongju compacted bentonite buffer material for engineered barrier system [J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2024, 56(5): 1854.
- [13] WANG H, ITO D, SHIRAKAWABE T, *et al.* On swelling behaviours of a bentonite under different water contents [J]. *Geotechnique*, 2024, 74(1): 64.
- [14] BLATZ J A, GRAHAM J, CHANDLER N A. Influence of

- suction on the strength and stiffness of compacted sand-bentonite [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39 (5) : 1005.
- [15] KIM J, KUMPULAINEN S, FERRARI A, *et al.* Salinity-dependent ultimate shear strength of compacted Wyoming-type bentonite investigated by triaxial tests [J]. Applied Clay Science, 2024, 261: 107576.
- [16] SONG Z Y, ZHANG Z H, DU X L. Shear strength of compacted bentonite saturated with saline solutions under different specimen saturation methods [J]. International Journal of Geomechanics, 2024, 24(3): 04024004.
- [17] 李晓月, 徐永福. 盐溶液中膨润土峰值剪切强度的计算方法 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 885.
LI Xiaoyue, XU Yongfu. Calculation of peak shear strength of bentonite in salt solutions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 885.
- [18] WATANABE Y, YOKOYAMA S. Influence of alkaline alteration on the shear characteristics of a bentonite-sand mixture [C]//Geo-Chicago 2016, Sustainable Geoenvironmental Systems. Chicago: American Society of Civil Engineers, 2016: 448-457.
- [19] CHEN H, LÜ H B, CHEN Z H, *et al.* The research on strength and deformation behaviors of buffer/backfill material under high-temperature and high-pressure conditions [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 5064690.
- [20] 刘月妙, 王驹, 曹胜飞, 等. 中国高放废物地质处置缓冲材料大型试验台架和热-水-力-化学耦合性能研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2756.
LIU Yuemiao, WANG Ju, CAO Shengfei, *et al.* A large-scale THMC experiment of buffer material for geological disposal of high-level radioactive waste in China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10): 2756.
- [21] PARK S, YOON S, KWON S, *et al.* Temperature effect on the thermal and hydraulic conductivity of Korean bentonite buffer material [J]. Progress in Nuclear Energy, 2021, 137: 103759.
- [22] DONG X X, CHEN Y G, YE W M, *et al.* Effect of initial suction on the stiffness and strength of densely compacted Gaomiaozi bentonite [J]. Applied Clay Science, 2020, 194: 105696.
- [23] SUN D A, ZHANG Q Y, PENG F. Effect of aging on shear strength of compacted GMZ bentonite [J]. Engineering Geology, 2022, 302: 106632.
- [24] HAMID T B, MILLER G A. Shear strength of unsaturated soil interfaces [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46 (5): 595.
- [25] ZHAO N F, YE W M, CHEN B, *et al.* Investigation on unsaturated critical state and Hvorslev surface of compacted bentonite under high suction conditions [J]. Engineering Geology, 2019, 259: 105204.
- [26] ZHENG X J, LI X Y, XU Y F. Study on the shear strength and micro-structure of Gaomiaozi bentonite under chemical conditions in a repository [J]. Environmental Earth Sciences, 2022, 81(13): 352.
- [27] YAVARI N, TANG A M, PEREIRA J M, *et al.* Effect of temperature on the shear strength of soils and the soil-structure interface [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53 (7) : 1186.
- [28] YANG Y, SHI J Y, QIAN X D. Effect of temperature on internal shear strength mechanism of needle-punched GCL [J]. Sustainability, 2021, 13(8): 4585.
- [29] DI-DONNA, FERRARI A, LALOUI L. Experimental investigations of the soil-concrete interface: physical mechanisms, cyclic mobilization, and behaviour at different temperatures [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53 (4): 659.
- [30] NG C W W, MU Q Y, ZHOU C. Effects of soil structure on the shear behaviour of an unsaturated loess at different suctions and temperatures [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54 (2): 270.
- [31] CHAO Z, FOWMES G. Modified stress and temperature-controlled direct shear apparatus on soil-geosynthetics interfaces [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(3): 825.
- [32] PENG F, SUN D A, YAO Y P, *et al.* Effect of granular structure and initial suction on shear strength of GMZ bentonite for deep geological disposal [J]. Applied Clay Science, 2024, 249: 107249.
- [33] XIANG G S, YE W M, JALAL F E, *et al.* Shear strength of bentonite saturated with saline solutions exhibiting variety of cations [J]. Engineering Geology, 2022, 298: 106537.
- [34] SHEAHAN T C, LADD C C, GERMAINE J T. Rate-dependent undrained shear behavior of saturated clay [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(2): 99.
- [35] NISHIMURA T. Influence of shear speed on hydro-mechanical behavior for compacted bentonite [J]. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2016, 2: 1837.
- [36] DELAGE P, MARCIAL D, CUI Y J, *et al.* Ageing effects in a compacted bentonite: a microstructure approach [J]. Geotechnique, 2006, 56(5): 291.
- [37] DEVINEAU K, BIHANNIC I, MICHOT L, *et al.* In situ neutron diffraction analysis of the influence of geometric confinement on crystalline swelling of montmorillonite [J]. Applied Clay Science, 2006, 31(2): 76.
- [38] NASER A S. The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils [J]. Engineering Geology, 2001, 62(4): 319.
- [39] 凌时光, 张锐, 兰天. 膨胀土强度特性的研究进展与探究 [J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(6): 1.
LING Shiguang, ZHANG Rui, LAN Tian. Research progress and exploration on strength characteristics of expansive soil [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 20(6): 1.
- [40] YE W M, WANG Y, WANG Q, *et al.* Stress-dependent temperature effect on the swelling behavior of compacted GMZ

- bentonite [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(7): 3897.
- [41] WANG L, ZHOU A N, XU Y F, *et al.* Consolidation of partially saturated ground improved by impervious column inclusion: governing equations and semi-analytical solutions[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, 14(3): 837.
- [42] 孙德安, 张乾越, 张龙, 等. 高庙子膨润土强度时效性试验研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(4): 1191.
SUN De'an, ZHANG Qianye, ZHANG Long, *et al.* Experimental study on ageing effect on shear strength of Gaomiaozi bentonite [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(4): 1191.
- [43] PERDRIAL J N, WARR L N. Hydration behavior of MX80 bentonite in a confined-volume system: implications for backfill design[J]. *Clays and Clay Minerals*, 2011, 59(6): 640.
- [44] GUPT C B, BORDOLOI S, SAHOO R K, *et al.* Mechanical performance and micro-structure of bentonite-fly ash and bentonite-sand mixes for landfill liner application[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 292: 126033.
- [45] CATERINA D M. Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects [J]. *Geotechnique*, 1996, 46(4): 695.
- [46] CATERINA D M. Shear strength of clays and clayey soils: the influence of pore fluid composition [C]//CISM Course on Chemo-Mechanical Couplings in Porous Media, Geomechanics and Biomechanics. Berlin: Springer, 2004: 45-55.
- [47] SPAGNOLI G, FERNÁNDEZ S T, FEINENDEGEN M, *et al.* The influence of the dielectric constant and electrolyte concentration of the pore fluids on the undrained shear strength of smectite[J]. *Soils and Foundations*, 2010, 50(5): 757.
- [48] ZHANG L, SUN D A, JIA D. Shear strength of GMZ07 bentonite and its mixture with sand saturated with saline solution [J]. *Applied Clay Science*, 2016, 132/133: 24.
- [49] CATERINA D M, SCARINGI G. Shear displacements induced by decrease in pore solution concentration on a pre-existing slip surface[J]. *Engineering Geology*, 2016, 200: 1.
- [50] ELKADY T Y, AL-MAHBASHI A M. Effect of solute concentration on the volume change and shear strength of compacted natural expansive clay [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(14): 483.
- [51] 郑新江, 徐永福. 盐溶液饱和和高庙子膨润土的强度特性[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(4): 783.
ZHENG Xinjiang, XU Yongfu. Strength characteristics of GMZ bentonite saturated with salt solutions [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(4): 783.
- [52] RAO S M, THYAGARAJ T. Role of direction of salt migration on the swelling behaviour of compacted clays [J]. *Applied Clay Science*, 2007, 38(1/2): 113.
- [53] XIANG G S, XU Y F, YU F, *et al.* Prediction of swelling characteristics of compacted GMZ bentonite in salt solution incorporating ion-exchange reactions [J]. *Clays and Clay Minerals*, 2019, 67(2): 163.
- [54] DELLA VECCHIA G, MUSSO G. Some remarks on single- and double-porosity modeling of coupled chemo-hydro-mechanical processes in clays [J]. *Soils and Foundations*, 2016, 56(5): 779.
- [55] CASTELLANOS E, VILLAR M V, ROMERO E, *et al.* Chemical impact on the hydro-mechanical behaviour of high-density FEBEX bentonite [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2008, 33: S516.
- [56] BARBOUR S, FREDLUND D. Mechanisms of osmotic flow and volume change in clay soils [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1989, 26(4): 551.
- [57] NAKAYAMA S, SAKAMOTO Y, YAMAGUCHI T, *et al.* Dissolution of montmorillonite in compacted bentonite by highly alkaline aqueous solutions and diffusivity of hydroxide ions [J]. *Applied Clay Science*, 2004, 27(2): 53.
- [58] XIANG G S, YE W M, HU Z J, *et al.* Effects of alkaline solution on shear strength of GMZ bentonite as a buffer/backfill material in China[J]. *Acta Geotechnica*, 2023, 19: 2013.
- [59] HE Y, YE W M, CHEN Y G, *et al.* Effects of K⁺ solutions on swelling behavior of compacted GMZ bentonite [J]. *Engineering Geology*, 2019, 249: 241.
- [60] WATANABE Y, YOKOYAMA S. Effects of alteration on shear characteristics of compacted Ca-bentonite immersed in alkaline solutions [J]. *Soils and Foundations*, 2022, 62(5): 101199.
- [61] CUISINIER O, DENELEE D, MASROURI F. Shear strength behaviour of compacted clayey soils percolated with an alkaline solution[J]. *Engineering Geology*, 2009, 108(4): 177.
- [62] YAMAGUCHI T, SAWAGUCHI T, TSUKADA M, *et al.* Changes in hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures accompanied by alkaline alteration[J]. *Clay Minerals*, 2013, 48(2): 403.
- [63] FERNANDEZ R, ISABEL RUIZ A, CUEVAS J. The role of smectite composition on the hyperalkaline alteration of bentonite[J]. *Applied Clay Science*, 2014, 95: 83.
- [64] GOWTHAMAN S, LEENA K T, HENRY G. Effect of temperature on the interface shear resistance between precompressed bentonite backfill-blocks of a nuclear waste repository in Finland [C]//XV Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Amsterdam: IOS Press, 2015: 883-890.
- [65] HAMIDI A, SHIRASB A, AHMADI M M. Shear strength characteristics of a thermally cured sand-bentonite mixture [J]. *Scientia Iranica*, 2021, 28(6): 3030.
- [66] 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.
- [67] VILLAR M V, LLORET A. Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite [J].