

DOI: 10.11779/CJGE202203001

高压实膨润土孔隙结构特征研究进展

李昆鹏^{1, 2}, 陈永贵^{*1, 2}, 叶为民^{1, 2}, 崔玉军³

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 法国国立路桥大学, 法国 巴黎 74455)

摘要: 在详细阐述高压实膨润土孔隙结构组成及其界限孔径确定方法的基础上, 全面总结了处置库近场条件下孔隙结构演化规律及其对水力特性影响的研究成果。结果表明: 高压实膨润土具有由晶层间孔隙、层叠体间孔隙、集合体间孔隙组成的三孔结构, 而描述本构关系时通常简化为由宏观孔隙和微观孔隙构成的双孔结构。双孔结构中宏、微观孔隙界限孔径的确定方法尚未取得共识。孔隙结构演化规律受深地质处置库近场环境影响, 包括温度场、渗流场、应力场、化学场, 目前对多场耦合作用的研究还不够深入。孔隙比及孔径分布特征无法准确反映膨润土的孔隙结构, 尤其体现在孔隙形态及其空间分布规律, 应用于讨论孔隙结构对水力特性的影响时存在局限性。基于此, 选取适用于描述高压实膨润土本构关系的界限孔径确定方法、揭示热-水-力-化多场耦合作用下孔隙结构演化规律、构建科学合理的孔隙结构量化指标体系并建立相应的水力特性预测模型, 是今后需要深入研究的方向。

关键词: 深地质处置库; 高压实膨润土; 孔隙结构; 水力特性; 研究进展

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)03-0399-10

作者简介: 李昆鹏(1995—), 男, 陕西西安人, 博士研究生, 主要从事环境工程地质及非饱和土力学方面研究。E-mail: kunpeng_lee@tongji.edu.cn。

Advances in studies on pore structure of highly compacted bentonite

LI Kun-peng^{1, 2}, CHEN Yong-gui^{1, 2}, YE Wei-min^{1, 2}, CUI Yu-jun³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Ecole des PontsParisTech, Paris 74455, France)

Abstract: Based on the detailed description of pore structure of highly compacted bentonite and approaches used to determine delimiting diameter, the evolution of pore structure under the near-field environment in repository and its influence on hydraulic behavior of the bentonite are summarized. The results show that the pore structure is made up of three classes of pores, including inter-layer, inter-particle and inter-aggregate pores. When describing the constitutive model for bentonite, the pore structure is always simplified as dual pore structure consisting of macro-and micro-pores. The approaches used to determine the delimiting diameter have not reached a consensus. The evolution of pore structure is affected by the near-field conditions of deep geological repository, including temperature, seepage, stress and chemical fields. However, less studies have considered the influences of multi-field coupling on the evolution. The pore ratio and pore-size distribution cannot accurately reflect the actual pore structure, especially the pore shape and spatial distribution. Hence, there are some limitations when the pore ratio and pore-size distribution are used to explore the relationship between the pore structure and the hydraulic behavior of the bentonite. Based on the above, the following aspects should be deeply studied in the future: the optimal approach used to determine the delimiting diameter for describing the constitutive model, the evolution law of pore structure under the coupled T-H-M-C conditions, the scientific and reasonable index system reflecting the actual pore structure, and the prediction model for hydraulic characteristics based on the above index system.

Key words: deep geological repository; highly compacted bentonite; pore structure; hydraulic behavior; advances

0 引言

高压实膨润土因具有低渗透性、高膨胀性、强吸附性, 被视为高放废物深地质处置中最理想的缓冲/

基金项目: 国家自然科学基金项目(42125701, 41977232, 41772279, 42030714); 中央高校基本科研业务费项目

收稿日期: 2021-05-11

*通信作者(E-mail: cyg@tongji.edu.cn)

回填材料^[1]。处置库运营过程中,高压实膨润土长期遭受近场热-水-力-化(T-H-M-C)耦合作用(图1),持水、渗透、膨胀等水力特性不断演化。如何准确评价高压实膨润土的水力特性,是深地质处置研究亟需解决的关键问题之一。

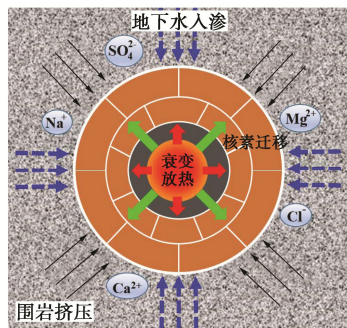


图1 深地质处置库近场环境

Fig. 1 Typical near-field environment in HLW repository

高压实膨润土孔隙结构对其水力特性有显著影响。Romero等^[2]发现高压实膨润土的渗透、持水、体变特性与其孔隙结构特征密切相关;崔玉军等^[1]、Delage^[3]提出开展孔隙结构特征研究,有助于解释热-水-力耦合作用下高压实膨润土的宏观力学、吸力和温度效应;叶为民等^[4]认为微观孔隙结构演变不可避免地影响高压实膨润土的缓冲特性。由此可见,开展高压实膨润土孔隙结构特征研究对合理评价其水力特性具有重要意义。

针对高压实膨润土孔隙结构特征的研究,可划分为3个阶段:①1958年—1979年^[5-9]:学者们并未将高压实膨润土从压实黏土中单独区分,成果主要涉及压实黏土的孔隙结构特征;②1979年—20世纪末期^[10-12]:自Pusch提出将高压实膨润土作为缓冲/回填材料以来,学者们开始对其孔隙结构特征开展专门研究,并通过压汞试验(MIP)、扫描电镜(SEM)技术逐步揭示了由集合体间孔隙、层叠体间孔隙和晶层间孔隙组成的三重孔隙结构;③21世纪以来,环境扫描电镜(ESEM)^[13-14]、微米CT^[15]等新型高分辨率微观测试手段的发展,促进了孔隙结构演化规律、孔隙结构可视化的研究。

本文在详细阐述高压实膨润土孔隙结构组成及界限孔径确定方法的基础上,全面总结了处置库近场条件下孔隙结构演化规律及其对水力特性影响的研究成果,并分别指出各方面今后的研究重点,以期为中国高放废物深地质处置库工程屏障系统的设计和性能评估提供借鉴。

1 孔隙结构组成及界限孔径确定方法

1.1 孔隙结构组成

针对高压实膨润土孔隙结构组成的研究始于压实黏土。早期学者们讨论压实黏土的微观结构特征时,主要聚焦于黏土颗粒结构而非孔隙结构。1958年提出的基于双电层理论和絮凝-分散概念的Lambe模型^[5],认为压实黏土颗粒基本单元是单一的黏土晶体片层。随后,Aylmore等^[6]和Olsen^[7]发现颗粒基本单元为多个晶体片层聚集所形成的集合体。1970年,Diamond^[8]基于MIP和SEM发现了集合体之间存在明显孔隙,认为孔径分布特征有助于解释宏观特性。至此,学者们开始关注压实黏土孔隙结构。

1979年,瑞典科学家Pusch^[10]通过大量试验研究,认为高压实膨润土是最合适的缓冲/回填材料。之后,学者们将压实膨润土从压实黏土中区分,开始专门研究其孔隙结构。Pusch^[11]基于SEM技术观测到压实膨润土集合体之间的孔隙。Delage等^[16]利用MIP方法发现Champlain黏土不仅存在集合体之间的孔隙,还存在集合体内部的孔隙。在此基础上,Delage等将黏土内部孔隙划分为集合体间孔隙(inter-aggregate pores)和集合体内孔隙(intra-aggregate pores),并通过比较最大压力条件下的注汞体积与土体总孔隙体积,来判断黏土中的孔隙是否完全被汞填充。然而,上述理论仅适用于低塑性黏土,对于以高压实膨润土为代表的高塑性黏土,因存在无法被MIP探测到的晶层间孔隙(interlayer pores),致使最大压力条件下的注汞体积明显小于总孔隙体积,上述方法显然不适用^[3]。

目前,普遍认为高压实膨润土内部孔隙有晶层间孔隙、层叠体间孔隙、集合体间孔隙3部分组成,其中晶层间孔隙和层叠体间孔隙共同构成集合体内孔隙(图2)^[3, 12, 17-18]。由图2可知,蒙脱石单元晶层为2:1型结构,由两层硅氧四面体夹一层铝氧八面体组成,数个至数百个单元晶层呈平行层状堆积形成层叠体,若干个层叠体聚集形成集合体。相应地,蒙脱石单元晶层之间的孔隙为晶层间孔隙,但其孔径范围过小,无法通过压汞试验观测;而层叠体间孔隙和集合体间孔隙可被压汞试验观测^[17]。

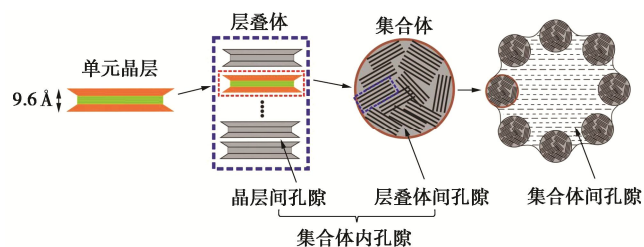


图2 高压实膨润土微观结构组成^[18]

Fig. 2 Microstructure of highly compacted bentonite^[18]

1.2 界限孔径确定方法

在描述高压实膨润土的本构关系时,多采用非饱

和膨胀土弹塑性本构模型, 即 BExM 模型^[19]。该模型将高压实膨润土三孔结构简化为由宏观孔隙(集合体间孔隙)和微观孔隙(集合体内孔隙)构成的双孔结构。双孔结构的重点在于不同孔隙结构层次的划分, 而采用不同的界限孔径划分方法, 势必导致集合体间孔隙、集合体内孔隙划分结果的差异, 影响模型准确性。为此, 学者们就不同孔隙结构层次的合理划分, 开展了大量研究。

表 1 总结了 5 种常见的界限孔径确定方法。Lloret 等^[17]基于不同干密度试样孔径分布特征 (pore size distribution, PSD), 认为机械压实只会压缩集合体间孔隙, 而对集合体内孔隙几乎无影响, 据此定义集合体间与集合体内孔隙的界限孔径为 150~200 nm, 如图 3 (a) 所示。Delage 等^[16]根据压汞试验的注汞/退汞曲线, 认为集合体内孔隙在注汞/退汞过程中仅发生弹性、可逆的变形, 集合体间孔隙在退汞时将滞留汞液, 从而提出截留孔隙对应集合体间孔隙, 自由孔隙对应集合体内孔隙 (图 3 (b))。Romero 等^[2]对比不同干密度试样持水曲线 (water retention curve, WRC), 将持水曲线交汇点吸力依据 Laplace 方程换算的孔径定义为界限孔径, 见图 3 (c)。另外, Romero 等^[20]、Yuan 等^[21]分别依据饱和试样孔径分布曲线峰值 (图 3 (d))、孔径分布曲线双峰间谷值 (图 3 (e)) 来划分集合体间孔隙和集合体内孔隙, 其各自适用性有待进一步研究。因此, 探讨不同界限孔径确定方法对 BExM 模型准确性的影响, 从而选取适用于描述高压实膨润土本构关系的界限孔径确定方法, 是未来亟需开展的工作。

表 1 界限孔径确定方法		
Table 1 Approaches used to determine delimiting diameter		
方法名称	理论基础/假设	文献
PSD 法	机械压实只会压缩集合体间孔隙, 而对集合体内孔隙几乎无影响	Lloret 等 ^[17]
注汞/退汞法	集合体内孔隙在注汞/退汞过程中仅发生弹性、可逆的变形, 集合体间孔隙在退汞时将滞留汞液	Delage 等 ^[16]
WRC 法	机械压实不会影响集合体内孔隙水的赋存特征	Romero 等 ^[2]
峰值法	将饱和试样孔径分布曲线峰值孔径作为界限孔径	Romero 等 ^[20]
谷值法	将压实试样孔径分布曲线谷值孔径作为界限孔径	Yuan 等 ^[21]

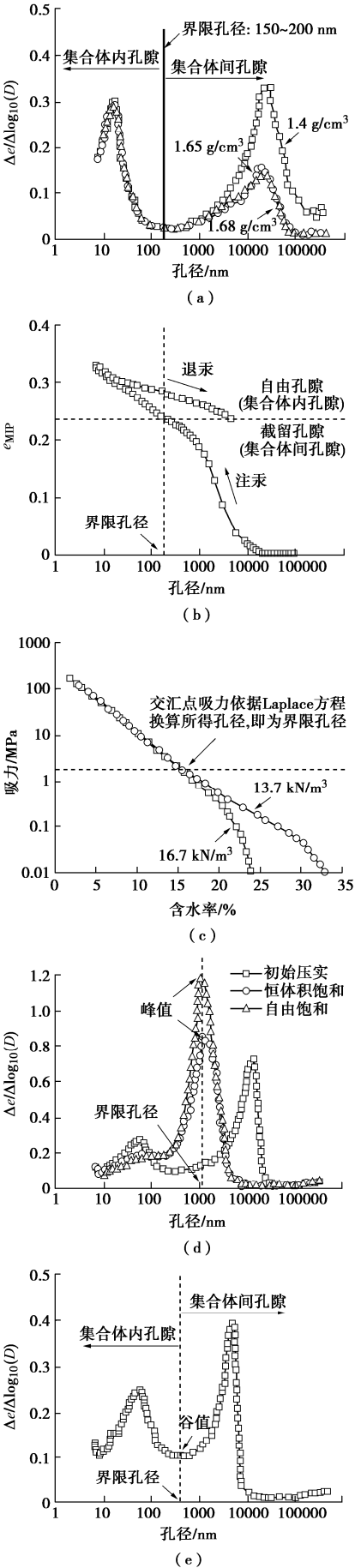


图 3 双孔结构划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of dividing dual-pore structure

2 近场条件下孔隙结构演化规律

高压实膨润土孔隙结构受环境条件影响显著。近年来,学者们围绕处置库近场环境,深入研究了温度场、渗流场、应力场、化学场影响下高压实膨润土孔隙结构的演化规律。

2.1 温度场影响

高放废物被封存后将持续向外释放衰变热,在高压实膨润土内部形成温度场,导致膨润土孔隙结构不断演化。如图 4 所示^[22],集合体间孔隙峰值将随着温度的升高而出现右移,集合体内孔隙峰值几乎不受影响,而集合体间孔隙、集合体内孔隙体积皆会随着温度的升高而增大。此外,温度升高会引起宏观干缩裂隙发育,出现大于 10^4 nm 的孔隙。

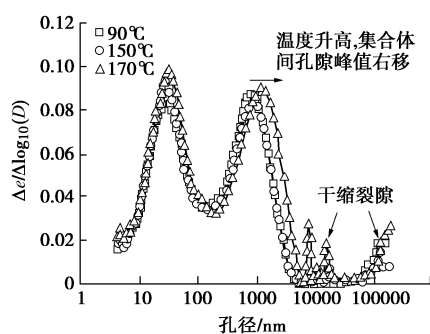


图 4 不同温度下高压实膨润土的孔径分布曲线^[22]

Fig. 4 Pore-size distribution curves of highly compacted bentonite under various temperatures^[22]

国内外学者针对温度场作用下,膨润土孔隙结构演化机理进行了许多有益的探索。结果表明,温度变化范围不同,温度场对孔隙结构的影响机理存在差异。低于 100°C 时,温度主要通过脱去物理吸附水和部分层间结合水的方式影响膨润土的孔隙结构^[23];高于 100°C 时,主要通过一系列物理化学反应,如胶凝作用^[24]、硅质胶结物的生成^[25]、蒙脱石向伊利石转化^[26]等,来改变膨润土的孔隙结构。

2.2 渗流场影响

处置库建成运营后,地下水入渗将在工程屏障内形成渗流场。在渗流场及温度场作用下,膨润土可能经历湿化及湿化—干燥循环过程。

(1) 湿化过程

湿化过程中,水分子逐渐进入蒙脱石晶层间孔隙,导致层叠体裂解与集合体膨胀^[27]。自由边界条件下,膨胀导致膨润土宏观体积增大,集合体间和集合体内孔隙增多(图 5(a));恒体积条件下,膨润土体积不变,膨胀导致集合体间孔隙封闭,部分集合体间孔

隙转化为集合体内孔隙,使集合体间与集合体内的孔隙分别呈现减小和增大的趋势^[28](图 5(b))。

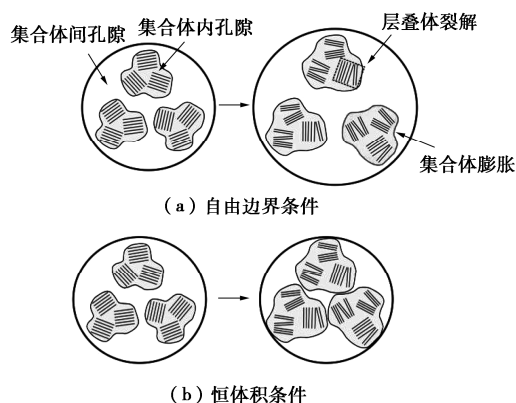


图 5 湿化过程中孔隙结构演化示意图^[28]

Fig. 5 Evolution of pore structure during wetting process^[28]

研究表明,尽管不同边界下土体孔隙结构演化规律存在差异,但随着湿化程度增大,孔隙结构最终趋于均匀化。图 6^[27]显示了膨润土孔隙结构随吸力降低的演化特征,当吸力降低至 0 时,膨润土达到湿化饱和状态,集合体结构基本消失,取而代之的是发生裂解后的蒙脱石片层,孔隙结构呈现均匀化特征。

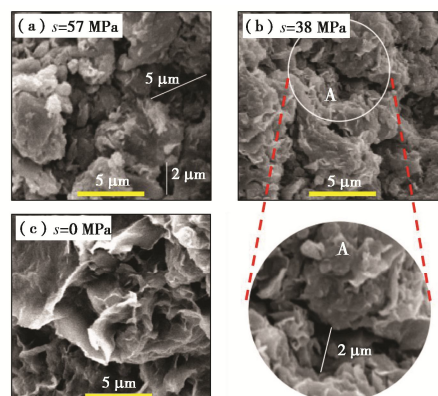


图 6 不同吸力下高压实膨润土的 ESEM 图像^[27]

Fig. 6 ESEM photos of highly compacted bentonite at various suctions^[27]

值得说明的是,湿化饱和并不等同于湿化均匀。Tomioka 等^[15]基于 μ -CT 发现,饱和初期高压实膨润土的湿化部分主要为集合体外侧的层叠体(率先湿化形成胶体融合结构),而集合体内部的层叠体无显著变化(图 7),此时试样尚未达到湿化均匀状态。Wang 等^[29]通过对比湿化饱和 15~90 d 的高压实膨润土孔径分布特征,发现随着饱和时间延长,集合体间孔隙、集合体内孔隙会持续转化为孔径介于二者之间的新孔隙群,促使试样在微观层次趋于各向同性。然而,即使湿化饱和 90 d 后,上述转化仍在持续,表明湿化均

匀过程十分漫长。因此, 如何对不同湿化阶段的孔隙结构均匀化程度进行定量表征, 需要进一步研究。

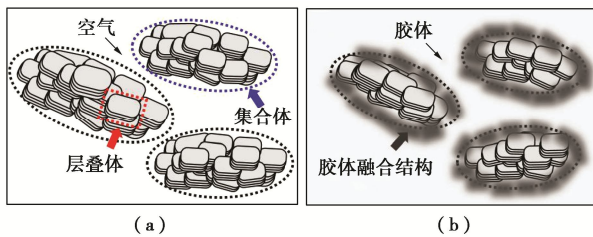


图7 干燥及湿化饱和和初期高压实膨润土的微观结构示意图^[15]

Fig. 7 Micro-structures of highly compacted bentonite in dry state and wetting-saturated state^[15]

(2) 湿化—干燥循环过程

Sun 等^[14]通过控制 ESEM 观测腔内相对湿度, 研究了湿化—干燥循环过程中自由边界高压实膨润土孔隙结构的演化规律。结果表明, 湿化—干燥循环过程中集合体内孔隙的变化几乎可逆, 而集合体间孔隙则受循环作用影响显著。如图 8 所示, 尽管集合体间孔隙在湿化、干燥路径上分别发生扩张与收缩, 但集合体间孔隙经过湿化—干燥循环后开度增大, 存在明显的塑性积累。

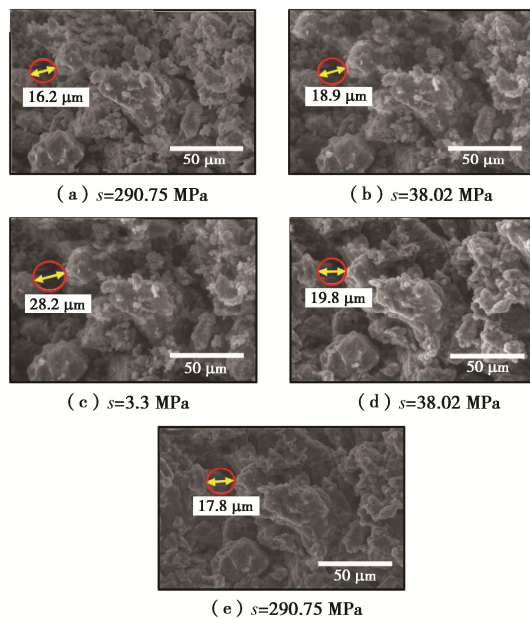


图8 湿化—干燥过程中集合体间孔隙的演化特征^[14]

Fig. 8 Evolution of inter-aggregate pore during wetting-drying path^[14]

然而, 湿化—干燥循环中的塑性积累并不会持续产生。Nowamooz 等^[30]认为当循环次数达到一定时, 孔隙结构的演化将达到某一平衡状态, 此时湿化—干燥循环对孔隙结构演化的影响将完全可逆, 试样呈现纯弹性特征。在此基础上, Nowamooz 等定义该状态下的孔隙比为弹性孔隙比 e_{el} , 用来表征试样在湿化—干燥循环中的平衡状态。

2.3 应力场影响

受围岩应力场的影响, 高压实膨润土在服役过程中可能会经历加载及加载—卸载循环过程。

(1) 加载过程

以往, 学者们大多通过将试样压制至不同干密度的方式, 来研究加载过程中孔隙结构的演化规律。结果表明: 加载过程只会压缩集合体间孔隙, 对集合体内孔隙几乎无影响 (图 3 (a))^[17]。实际上, 通过对比不同干密度试样孔隙结构特征的差异并不能完全反映加载的影响, 这是因为干密度仅能反映加载终值的差异, 而无法反映加载速率、加载路径等加载过程因素的作用。虽然大量试验^[13, 31]已经证实加载过程仅会压缩集合体间孔隙, 但集合体间孔隙的压缩效果 (如压缩后孔隙形态、连通度等) 是否与加载速率、加载路径等因素存在关联, 目前尚未见报道。

(2) 加载—卸载循环过程

研究表明, 卸载—卸载过程会导致土体产生塑性积累^[32]。基于此, 可将加载诱导膨润土集合体间孔隙的变形分为弹性变形和塑性变形。随着卸载过程的进行, 弹性变形完全恢复, 而塑性变形将逐渐累积。与湿化—干燥循环类似, 加载—卸载循环中的塑性累积并不会持续产生。随着加载—卸载循环次数的增加, 塑性变形逐渐减少; 当达到一定循环次数时, 加载—卸载过程所导致的集合体间孔隙的变形将几乎可逆, 试样接近完全弹性状态。

2.4 化学场影响

处置库近场化学环境对膨润土孔隙结构具有重要影响。目前, 学者们主要针对围岩地下水作用下的盐溶液条件、考虑混凝土衰解作用的碱溶液条件, 来探讨化学场影响下膨润土孔隙结构演化规律。

(1) 盐溶液条件

盐溶液对恒体积高压实膨润土孔径分布特征的影响见图 9^[33]。可以看出, 相比于蒸馏水, 1.0 mol/L NaCl 溶液饱和试样集合体间孔隙体积较大、集合体内孔隙体积 (根据总孔隙比 e_t 与集合体间孔隙比 e_m 的差值判断) 较小, 这一现象与 Mata 等^[34]、Mokni 等^[35]的研究一致。基于扩散双电层理论, 扩散双电层厚度与离子浓度的平方根呈反比, Na^+ 浓度升高将导致扩散双电层被压缩, 层叠体间排斥力减小, 进而抑制集合体膨胀、降低集合体间孔隙的封闭程度^[36]。

(2) 碱溶液条件

研究表明, 处置库内混凝土衰解所形成的碱性环境也会影响膨润土孔隙结构的演化。如图 10 所示^[37], 相较于蒸馏水, 0.6 mol/L NaOH 溶液饱和试样集合体间孔隙与集合体内孔隙体积均有所增大, 且集合体间孔隙峰值出现明显右移现象, 这主要是由于: ①碱性环境会诱发蒙脱石碎片化及溶蚀, 试样总孔隙比由 e_t

增至 e_{TF} ，使得集合体间孔隙与集合体内孔隙体积同时增大；②蒙脱石溶蚀会导致溶蚀孔隙的出现，增大集合体间孔隙平均孔径，促使集合体间孔隙峰值右移^[37-38]。

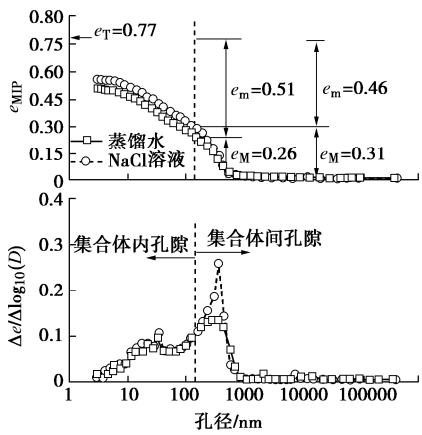


图 9 盐溶液对高压实膨润土孔径分布特征的影响^[33]

Fig. 9 Effects of salt solution on pore-size distribution of high-pressure bentonite^[33]

实际上，高压实膨润土在长期服役过程中遭受着温度场、渗流场、应力场、化学场所形成的多场耦合作用。考虑到不同场因素彼此之间也存在相互影响及制约，多场耦合作用下的膨润土孔隙结构演化规律往往更为复杂，不能简单的理解为单场效应间的叠加，而目前在此方面的研究还不够深入。因此，未来有必要针对热-水-力-化多场耦合作用下的膨润土孔隙结构演化规律，开展更为系统的研究。

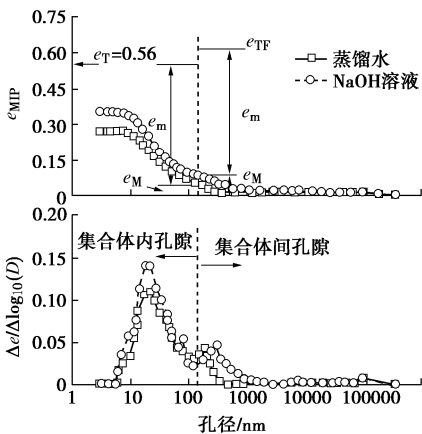


图 10 碱溶液对高压实膨润土孔径分布特征的影响^[37]

Fig. 10 Effects of alkali solution on pore-size distribution of high-pressure bentonite^[37]

3 孔隙结构对水力特性的影响

高压实膨润土水力特性是指其在渗流作用下的力学响应，主要包括持水、渗透和膨胀特性。近年来，

学者们大多基于孔隙比及孔径分布特征，来研究高压实膨润土孔隙结构对水力特性的影响。

3.1 持水特性

高压实膨润土的持水特性指其含水状态（含水率、饱和度等）与吸力的关系，常以持水曲线进行描述。图 11 为不同孔隙比高压实膨润土在恒体积条件下，经湿化路径所测定的持水曲线。由图 11 可知，高吸力范围内持水曲线几乎重合，孔隙比对持水性能的影响不显著；低吸力范围内，含水率随孔隙比增加而增大，这主要是由于不同吸力范围内膨润土的持水机制不同造成的^[2, 20]。高吸力范围内，膨润土主要通过吸附作用持水，而低吸力范围膨润土主要通过毛细作用持水，前者与气-液-固界面性质有关，后者主要受孔隙结构特征控制^[39]。

常见的持水曲线预测模型，如 BC 模型、VG 模型、FX 模型等，尽管都包含与土体孔隙结构特征有关的参数，但这些参数大多缺乏明确的物理意义。Gallipoli 等^[40]考虑孔隙比对土体持水曲线的影响，对 VG 模型进行了修正，如下式：

$$S_r = \left[\frac{1}{1 + (\phi e^\psi s)^n} \right]^m, \quad (1)$$

式中， S_r 为饱和度， e 为孔隙比， s 为吸力， ϕ ， ψ ， m ， n 分别为拟合参数。

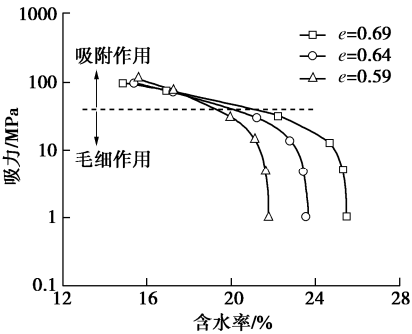


图 11 不同孔隙比高压实膨润土的持水曲线^[17]

Fig. 11 Water retention curves of highly compacted bentonite with different void ratios^[17]

在此基础上，有学者进一步讨论了孔径分布特征与持水特性的相关关系^[41]。结果显示，孔径累积分布函数 $F(D)$ 与土体饱和度 S_r 的数学表达形式相同（式（2），（3）），结合 Laplace 方程中孔径和吸力的对应关系（式（4）），可实现基于孔径分布特征的持水曲线预测（式（5））。

$$F(D) = \frac{V_p}{V_{Mmax}} = \frac{V_{Mmax} - V_M}{V_{Mmax}} = 1 - \frac{V_M}{V_{Mmax}}, \quad (2)$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_p}{V_v} = \frac{V_{Mmax} - V_M}{V_{Mmax}} = 1 - \frac{V_M}{V_{Mmax}}, \quad (3)$$

$$s = \frac{2T_s \cos \theta}{D}, \quad (4)$$

$$S_r = F(D) = F\left(\frac{2T_s \cos \theta}{s}\right) = f(s), \quad (5)$$

式中, D 为孔隙直径, V_p 为孔径小于 D 的孔隙体积, V_{Mmax} 为压汞试验所测得的孔隙总体积, V_M 为孔径大于 D 的孔隙体积, V_w 为孔隙水体积, V_v 为孔隙总体积, V_p 为孔径小于 D 的孔隙体积, T_s 为水的表面张力, θ 为接触角。

考虑到晶层间孔隙孔径范围过小, 无法通过压汞试验观测, 因而取压汞试验所测得的孔隙总体积作为膨润土实际的孔隙总体积 (式 (3)) 势必会造成结果偏差, 使计算出的饱和度偏低。未来研究中, 如何在压汞试验所测孔径分布特征的基础上, 结合晶层间孔隙体积或孔径分布特征, 来构建更为准确的高压实膨润土持水特性预测模型, 是值得探索的课题。

3.2 渗透特性

国际上作为缓冲/回填材料的高压实膨润土饱和渗透系数随孔隙比的变化规律见图 12^[17, 42-46]。由图 12 可知, 半对数坐标内, 高压实膨润土饱和渗透系数随孔隙比的增大而呈现线性增大趋势。

Yuan 等^[47]讨论了宏观孔隙比 e_M 和微观孔隙比 e_m 对高压实膨润土饱和渗透系数的影响, 结果见图 13。显然, 饱和渗透系数与 e_M 存在较强相关性, 而与 e_m 相关性较差。饱和状态下, 微观孔隙中水分子受双电层作用, 几乎不会移动, 渗流过程基本是在宏观孔隙中实现的, 因而饱和渗透系数受 e_M 影响更为显著。

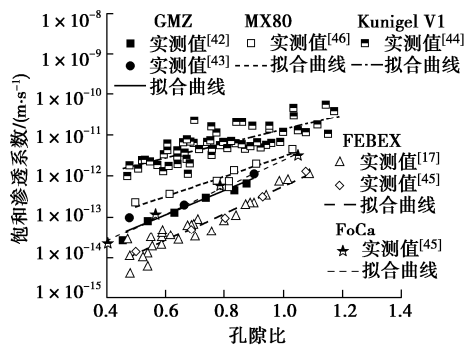


图 12 高压实膨润土饱和渗透系数随孔隙比的变化^[17, 42-46]

Fig. 12 Evolution of saturated permeability of highly compacted bentonite with void ratio^[17, 42-46]

综合图 13 (a)、图 14^[47]还可以看出, 尽管 A、B 点试样的初始孔隙比 e_0 、宏观孔隙比 e_M 相等, 孔径分布特征相似, 但饱和渗透系数却相差 2 个数量级。这表明孔隙比、孔径分布特征并不能完全反映膨润土实际的孔隙结构, 尤其是其迂曲性特征, 会显著影响水分在膨润土中的渗流过程。

此外, 也有学者尝试采用三维扫描成像技术研究膨润土孔隙结构特征对渗透特性的影响。宋帅兵^[48]基

于不同尺度孔隙结构模型, 通过叠加、融合构建了高压实膨润土在全尺度范围内的孔隙结构模型, 如图 15。然而, 受观测精度及重构算法准确性的限制, 重构模型中有效孔隙率、迂曲度等特征指标均与实际情况存在差异, 由此计算得到的渗透系数与试验结果难以完全契合。尽管如此, 通过提升观测精度、优化重构算法来建立更为真实的膨润土三维孔隙结构模型, 仍是未来研究渗透性随孔隙结构特征演化的主要手段之一。

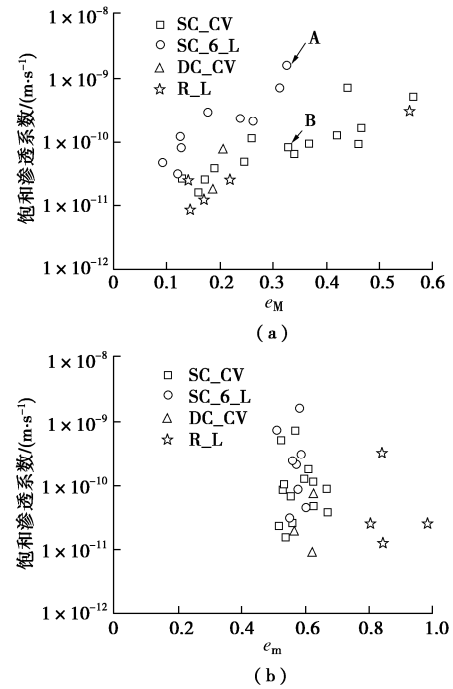


图 13 高压实膨润土饱和渗透系数随 e_M 及 e_m 的变化^[47]

Fig. 13 Evolution of saturated permeability of highly compacted

bentonite with e_M and e_m ^[47]

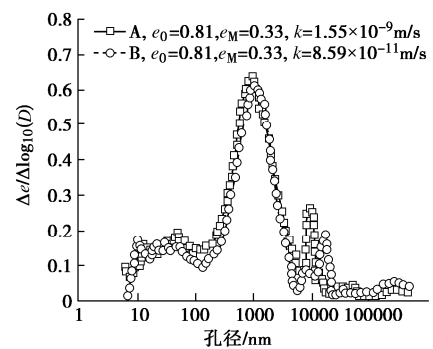


图 14 试样 A 与试样 B 的孔径分布曲线^[47]

Fig. 14 Pore-size distribution curves of samples A and B^[47]

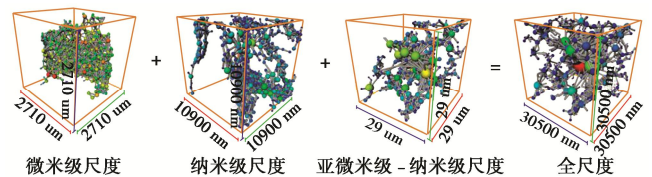


图 15 不同尺度高压实膨润土孔隙结构模型^[48]

Fig. 15 Model for pore structure of highly compacted bentonite with different scales^[48]

3.3 膨胀特性

膨胀特性是高压实膨润土封闭施工接缝的关键。常见作为缓冲/回填材料的高压实膨润土最大膨胀力与孔隙比关系曲线见图 16^[17, 49-52]。由图 16 可知, 半对数坐标内, 高压实膨润土最大膨胀力随孔隙比的增大而呈现线性减小趋势, 相应的拟合方程见表 2。

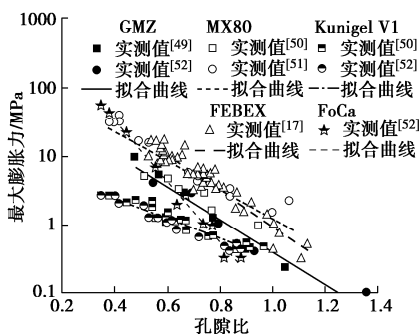


图 16 高压实膨润土最大膨胀力随孔隙比的变化^[17, 49-52]
Fig. 16 Evolution of maximum swelling pressure of highly compacted bentonite with void ratio^[17, 49-52]

表 2 高压实膨润土最大膨胀力与孔隙比的拟合方程
Table 2 Fitting relationships between maximums welling pressure of highly compacted bentonite and void ratio

膨润土类型	拟合方程	R^2
GMZ	$\lg P_{sf} = 1.995 - 2.395e$	0.949
MX80	$\lg P_{sf} = 2.205 - 2.146e$	0.812
Kunigel V1	$\lg P_{sf} = 0.969 - 1.461e$	0.926
FEBEX	$\lg P_{sf} = 2.562 - 2.585e$	0.905
FoCa	$\lg P_{sf} = 3.266 - 4.396e$	0.985

进一步研究表明, 高压实膨润土膨胀特性也与孔径分布特征密切相关。文献[53]对比了相同膨润土掺量、相同孔隙比条件下膨润土-黏土岩混合物、膨润土-砂混合物的膨胀力差异, 发现二者间膨胀力差值 ΔP_{sf} 与集合体间孔隙体积占总孔隙体积百分比的差值 $\Delta(V_{VM}/V_V)$ 呈显著线性关系。

实际上, 孔隙比、孔径分布特征并不能完全反映高压实膨润土的孔隙结构, 相同孔隙比、孔径分布特征下的孔隙结构也可能有所差异, 尤其体现在孔隙形态及其空间分布规律上^[48]。因此, 构建科学合理的孔隙结构量化指标体系, 在此基础上建立相应的水力特性预测模型, 是未来探索孔隙结构对水力特性影响的主要研究方向。

4 结论及建议

高压实膨润土孔隙结构对水力特性影响显著。本文针对高压实膨润土孔隙结构组成及其界限孔径确定方法、近场条件下孔隙结构演化规律、孔隙结构对水力特性的影响等方面研究成果, 开展了扼要地论述和讨论, 结论如下:

(1) 高压实膨润土具有由晶层间孔隙、层叠体间孔隙、集合体间孔隙组成的三孔结构, 而在描述本构关系时, 常将其简化为由宏观孔隙(集合体间孔隙)和微观孔隙(集合体内孔隙)构成的双孔结构。

(2) 双孔结构的重点在于宏、微观孔隙界限孔径的确定, 目前常用的确定方法包括 PSD 法、注汞/退汞法、WRC 法、峰值法、谷值法 5 种, 但不同方法对本构关系准确性的影响还有待讨论。

(3) 高压实膨润土孔隙结构演化规律受处置库近场环境影响显著, 目前研究主要涉及温度场、渗流场(湿化及湿化—干燥循环)、应力场(加载及加载—卸载循环)、化学场(盐溶液及碱溶液作用)4 方面, 缺乏对多场耦合作用的深入考虑。

(4) 由于缺乏合理的孔隙结构量化指标体系, 现有研究多基于孔隙比与孔径分布特征来分析高压实膨润土孔隙结构对水力特性(持水、渗透、膨胀)的影响。考虑到孔隙比与孔径分布特征无法准确反映膨润土的孔隙结构, 尤其体现在孔隙形态及其空间分布规律上, 应用于讨论孔隙结构对水力特性的影响时存在一定的局限性。

综上可知, 目前关于高压实膨润土孔隙结构特征的研究仍旧十分有限, 选取适用于描述高压实膨润土本构关系的界限孔径确定方法、揭示热-水-力-化多场耦合作用下孔隙结构演化规律、构建科学合理的孔隙结构量化指标体系并建立相应的水力特性预测模型, 是今后值得深入研究的方向。

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): 842 - 847. (CUI Yu-jun, CHEN Bao. Recent advances in research on engineered barrier for geological disposal of high-level radioactive nuclear waste[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 842 - 847. (in Chinese))

[2] ROMERO E, GENS A, LLORET A. Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay[J]. Engineering Geology, 1999, 54(1/2): 117 - 127.

[3] DELAGE P. Microstructure features in the behaviour of engineered barriers for nuclear waste disposal[C]// Experimental Unsaturated Soil Mechanics, 2007, Berlin.

[4] 叶为民, 赖小玲, 刘 毅, 等. 高庙子膨润土微观结构时效性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2255 - 2261. (YE Wei-min, LAI Xiao-ling, LIU Yi, et al. Experimental study on ageing effects on microstructure of unsaturated GMZ01 bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2255 - 2261. (in Chinese))

[5] LAMBE T W. The structure of compacted clay[J]. Journal of

- the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1958, **84**(SM2): 1 - 34.
- [6] AYLMOORE L A G, QUIRK J P. Domain or turbostratic structure of clays[J]. *Nature*, 1960, **187**(4742): 1046 - 1048.
- [7] OLSEN H W. Hydraulic flow through saturated clays[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1960, **9**(1): 131 - 161.
- [8] DIAMOND S. Pore size distributions in clays[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1970, **18**(1): 7 - 23.
- [9] AHMED S, LOVELL C W, DIAMOND S. Pore sizes and strength of compacted clay[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1974, **100**(4): 407 - 425.
- [10] PUSCH R. Highly compacted sodium bentonite for isolating rock-deposited radioactive waste products[J]. *Nuclear Technology*, 1979, **45**(2): 153 - 157.
- [11] PUSCH R. Mineral-water interactions and their influence on the physical behavior of highly compacted Na bentonite[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1982, **19**: 381 - 387.
- [12] YONG R N. Overview of modeling of clay microstructure and interactions for prediction of waste isolation barrier performance[J]. *Engineering Geology*, 1999, **54**(1): 83 - 91.
- [13] ROMERO E, SIMMS P H. Microstructure investigation in unsaturated soils: a review with special attention to contribution of mercury intrusion porosimetry and environmental scanning electron microscopy[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2008, **26**(6): 705 - 727.
- [14] SUN H, MAŠÍN D, NAJSER J, et al. Bentonite microstructure and saturation evolution in wetting-drying cycles evaluated using ESEM, MIP and WRC measurements[J]. *Géotechnique*, 2019, **69**(8): 713 - 726.
- [15] TOMIOKA S, KOZAKI T, TAKAMATSU H, et al. Analysis of microstructural images of dry and water-saturated compacted bentonite samples observed with X-ray micro CT[J]. *Applied Clay Science*, 2010, **47**(1/2): 65 - 71.
- [16] DELAGE P, LEFEBVRE G. Study of the structure of a sensitive Champlain clay and of its evolution during consolidation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1984, **21**(1): 21 - 35.
- [17] 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, Parts A/B/C*, 2007, **32**(8-14): 701 - 715.
- [18] AGUS S S. An Experimental Study on Hydro-Mechanical Characteristics of Compacted Bentonite-Sand Mixtures[D]. Weimar, Germany: Bauhaus-University Weimar, 2005.
- [19] ALONSO E E, VAUNAT J, GENS A. Modelling the mechanical behaviour of expansive clays[J]. *Engineering Geology*, 1999, **54**(1): 173 - 183.
- [20] ROMERO E, DELLA VECCHIA G, JOMMI C. An insight into the water retention properties of compacted clayey soils[J]. *Géotechnique*, 2011, **61**(4): 313 - 328.
- [21] YUAN S, LIU X, ROMERO E, et al. Discussion on the separation of macropores and micropores in a compacted expansive clay[J]. *Géotechnique*, 2020, **10**(3): 454 - 460.
- [22] 刘伟, 梁栋, 杨仲田, 等. 高温作用对膨润土孔隙结构的影响[J]. *化工新型材料*, 2018, **46**(增刊 1): 43 - 46. (LIU Wei, LIANG Dong, YANG Zhong-tian, et al. Influence of high temperature on the pore structure of bentonite[J]. *New Chemical Materials*, 2018, **46**(S1): 43 - 46. (in Chinese))
- [23] 徐颖, 邓利蓉, 芦玉峰, 等. 热处理对柯尔碱膨润土微观结构和物化性能的影响[J]. *岩矿测试*, 2019, **38**(3): 280 - 287. (XU Ying, DENG Li-rong, LU Yu-feng, et al. Effect of thermal treatment on the composition and physicochemical properties of bentonite from the Kerjian Region, Xinjiang[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2019, **38**(3): 280 - 287. (In Chinese))
- [24] COUTURE R A. Steam rapidly reduces the swelling capacity of bentonite[J]. *Nature*, 1985, **318**(6041): 50 - 52.
- [25] PUSCH R, BLUEMLING P, JOHNSON L. Performance of strongly compressed MX-80 pellets under repository-like conditions[J]. *Applied Clay Science*, 2003, **23**(1/2/3/4): 239 - 244.
- [26] INOUE A, WATANABE T, KOHYAMA N, et al. Characterization of illitization of smectite in bentonite beds at kinnekulle, Sweden[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1990, **38**(3): 241 - 249.
- [27] CUI Y J, LOISEAU C, DELAGE P. Microstructure changes of a confined swelling soil due to suction controlled hydration[J]. *Proceedings of the 3rd International Conference on Unsaturated Soils*, 2002, **2**: 593 - 598.
- [28] 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 - 3907.
- [29] WANG Q, CUI Y, MINH TANG A, et al. Time- and density-dependent microstructure features of compacted bentonite[J]. *Soils and Foundations*, 2014, **54**(4): 657 - 666.
- [30] NOWAMOOZ H, MASROURI F. Influence of suction cycles on the soil fabric of compacted swelling soil[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2010, **342**(12): 901 - 910.
- [31] LLORET A, VILLAR M V, SÁNCHEZ M, et al. Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes[J]. *Géotechnique*, 2003, **53**(1): 27 - 40.

- [32] SUDDEEPONG A, CHAI J, SHEN S, et al. Deformation behaviour of clay under repeated one-dimensional unloading - reloading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, **52**(8): 1035 - 1044.
- [33] 贺 勇. 化-水-力耦合作用下高压实 GMZ 膨润土体变特征研究[D]. 上海: 同济大学, 2017. (HE Yong. Volume Change Behavior of Highly Compacted GMZ Bentonite under Chemo-Hydro-Mechanical Conditions[D]. Shanghai: Tongji University, 2017. (In Chinese))
- [34] MATA C, ROMERO E, LEDESMA A. Hydro-chemical effects on water retention in bentonite-sand mixtures[C]// Proceedings 3rd International Conference on Unsaturated Soils, Recife, 2002, Brazil.
- [35] MOKNI N. Deformation and Flow Driven by Osmotic Processes in Porous Materials[D]. Barcelona: Polytechnic University of Catalonia, 2011.
- [36] LIU L, CHEN Y, YE W, et al. Effects of hyperalkaline solutions on the swelling pressure of compacted Gaomiaozi (GMZ) bentonite from the viewpoint of Na⁺ cations and OH⁻ anions[J]. Applied Clay Science, 2018, **161**: 334 - 342.
- [37] BAO C, JIAXING G, HUIXIN Z. Alteration of compacted GMZ bentonite by infiltration of alkaline solution[J]. Clay Minerals, 2016, **51**(2): 237 - 247.
- [38] SUN Z, CHEN Y, CUI Y, et al. Effect of synthetic water and cement solutions on the swelling pressure of compacted Gaomiaozi(GMZ) bentonite: The Beishan site case, Gansu, China[J]. Engineering Geology, 2018, **244**: 66 - 74.
- [39] 刘樟荣, 叶为民, 崔玉军, 等. 基于微孔填充和毛细管凝聚理论的持水曲线模型[J]. 岩土力学, 2021, **42**(6): 1549 - 1556. (LIU Zhang-rong, YE Wei-min, CUI Yu-jun, et al. A micro-pore filling and capillary condensation theories based water retention model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(6): 1549 - 1556. (in Chinese))
- [40] GALLIPOLI D, WHEELER S J, KARSTUNEN M. Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil[J]. Géotechnique, 2003, **53**(1): 105 - 112.
- [41] 费锁柱, 谭晓慧, 董小乐, 等. 基于土体孔径分布的土水特征曲线预测[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(9): 1691 - 1699. (FEI Suo-zhu, TAN Xiao-hui, DONG Xiao-le, et al. A micro-pore filling and capillary condensation theories based water retention model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(9): 1691 - 1699. (in Chinese))
- [42] 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.
- [43] WEN Z. Physical property of China's buffer material for high-level radioactive waste repositories[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(4): 794 - 800.
- [44] MITACHI T. Mechanical behavior of bentonite-sand mixtures as buffer materials[J]. Soils and Foundations, 2008, **48**(3): 363 - 374.
- [45] RAO S M, K. R. Hydro-mechanical characterization of Barmer 1 bentonite from Rajasthan, India[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, **265**: 330 - 340.
- [46] WANG Q, MINH TANG A, CUI Y, 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 - 245.
- [47] YUAN S Y, LIU X F, BUZZI O. Effects of soil structure on the permeability of saturated Maryland clay[J]. Géotechnique, 2019, **69**(1): 72 - 78.
- [48] 宋帅兵. 高庙子膨润土孔隙结构多尺度特征及其渗流特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020. (SONG Shuai-bing. Multi-scale Characteristics of Pore Structure and Seepage Characteristics of GMZ Bentonite[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020. (in Chinese))
- [49] 叶为民, 刘樟荣, 崔玉军, 等. 膨润土膨胀力时程曲线的形态特征及其模拟[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(1): 29 - 36. (YE Wei-min, LIU Zhang-rong, CUI Yu-jun, et al. Features and modelling of time-evolution curves of swelling pressure of bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(1): 29 - 36. (in Chinese))
- [50] KOMINE H, OGATA N. Predicting swelling characteristics of bentonites[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, **130**(8): 818 - 829.
- [51] TRIPATHY S, SRIDHARAN A, SCHANZ T. Swelling pressures of compacted bentonites from diffuse double layer theory[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, **41**(3): 437 - 450.
- [52] SUN H Q. Prediction of swelling pressure of compacted bentonite with respect to void ratio based on diffuse double layer theory[C]// Proceedings of the 1st GeoMEast International Congress and Exhibition, 2017, Giza.
- [53] SOUZA R F C, PEJON O J. Pore size distribution and swelling behavior of compacted bentonite/claystone and bentonite/sand mixtures[J]. Engineering Geology, 2020, 275: 105738.