

化-力耦合作用下 GMZ01 膨润土体变特性研究进展

叶为民^{1,2}, 张 峰¹, 陈 宝¹, 陈永贵¹

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 教育部城市环境与可持续发展联合研究中心, 上海 200092)

摘要: 基于既有研究成果, 归纳总结了化-力耦合作用下压实 GMZ01 膨润土体变特性方面的研究进展. 随着 NaCl 和 CaCl₂ 入渗溶液浓度的增加, 高压实 GMZ01 膨润土的膨胀力与膨胀变形不断减小; 在盐化-淡化循环过程中, 膨胀/收缩变形主要发生在第 1 次循环中. 压实 GMZ01 膨润土的压缩指数随 NaCl 溶液浓度的升高不断降低, 随初始饱和应力变化很小; 屈服应力随入渗溶液浓度或者初始饱和应力的升高而升高. 多离子类型的化学循环、微观机理分析及考虑化学影响的多场耦合研究应该是今后的研究重点.

关键词: GMZ01 膨润土; 化-力耦合; 膨胀性; 压缩性; 盐化-淡化循环

中图分类号: TU411

文献标志码: A

applied during the saturation process has negligible influence on the compressibility parameter; while the yield stress increases as the concentration of NaCl solution or the vertical stress applied on saturation increases. Clearly, investigations on cyclically salinization-desalinization with multiple cations solutions, the mechanism of micro-structure and the multi-field coupling tests with consideration of chemical effect should be conducted in the future.

Key words: GMZ01 bentonite; chemo-mechanical coupling; swelling behavior; compressibility; salinization - desalinization cycles

Advances on Investigations into Chemo - Mechanical Coupling Effects on the Volume Change Behavior of Compacted GMZ01 Bentonite

YE Weimin^{1,2}, ZHANG Feng¹, CHEN Bao¹, CHEN Yonggui¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. United Research Center for Urban Environment and Sustainable Development, the Ministry of Education, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the existing results from literature, contributions on the chemo-mechanical coupling effects on the volume change behavior of compacted GMZ01 bentonite were reviewed and presented. Results show that the swelling pressure and swelling strain of the GMZ01 bentonite decrease with the increase of concentrations of salt solutions. For a given concentration of salt solutions cyclically infiltrated, the total vertical displacement of the GMZ01 bentonite specimen mainly happens in the first salinization-desalinization cycle. The plastic compressibility parameter decreases as the concentration of NaCl solution increases, the vertical stress

国内外大量研究成果表明, 膨润土是高放射性废弃物深地质处置库(多屏障库)中最理想的缓冲/回填材料^[1-9]. 根据矿床位置、交通条件、矿床储量与开采技术等因素的综合比较, 内蒙古高庙子膨润土(GMZ01)被确定为我国高放废物深地质处置库首选缓冲/回填材料.

在多屏障处置库的概念设计中, 高压实膨润土的设计功能是吸水膨胀以填充膨润土块体与块体之间、块体与废物罐之间、块体与围岩之间的施工缝隙以及处置库近场围岩中固有和因开挖卸载而形成的缝隙, 从而有效阻止地下水向库内的入渗和库内核素向外的迁移.

在处置库建设与长期运营过程中, 由于近场围岩、缓冲/回填材料与混凝土构筑物等化学成分的影响, 部分矿物溶解于地下水, 形成具有一定化学成分的溶液^[2]; 加之废物罐内核废物衰变热的产生与耗散, 以及渗流场改变引起的地下水水位升降等都导致地下水化学浓度发生反复变化, 引发高压实膨润土工程屏障性能的改变. 此外, 处置库深部的高地应力(9~16 MPa^[1])也影响膨润土块体变形, 进而影响到膨润土的人工屏障性能. 由此可见, 基于我国处置

收稿日期: 2016-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(41527801; 41422207); 国防科工局资助项目(科工计[2011]1051号)

第一作者: 叶为民(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为非饱和土与特殊土.

E-mail: ye_tju@tongji.edu.cn



扫码
查看
作者
独家
介绍

库预选场地近场化学环境特征,开展高压实 GMZ01 膨润土体变特性研究,对于我国核废料处置库的建设具有十分重要的理论与工程实践意义。

为此,国内外一些学者针对不同类型的膨润土开展了化学溶液作用下的膨胀性和压缩性方面的相关研究^[4-18]. 结果表明,压实膨润土的膨胀性受温度、时间效应、PH 值、初始干密度、溶液成分、浓度以及盐化-淡化循环等因素的影响;而膨润土的压缩性受到初始状态(泥浆/压实)、矿物成分、初始应力状态、初始干密度、溶液浓度以及离子类型等因素的影响. 上述结果可用扩散双电层理论定性解释,随着溶液浓度的增加,黏土颗粒之间的斥力降低,从而压缩双电层,导致黏土的膨胀性和压缩性降低^[5-9].

基于相关研究工作^[5-9],本文归纳总结高压实 GMZ01 膨润土在化学溶液影响下的膨胀力、膨胀变形和压缩特性,探讨化-力耦合作用下高压实 GMZ01 膨润土的体变特性.

1 GMZ01 膨润土基本性质与北山地下水成分

所采用的高庙子(GMZ)膨润土为钠基膨润土,其中质量分数分别为:蒙脱石 75.4%,石英 11.7%、方英石 7.3%,长石 4.3%. 此外,黏土矿物中含有高岭石、伊利石以及碳酸盐(白云石、方解石等)等. GMZ01 膨润土的基本物理化学性质如表 1 所示^[19].

表 1 GMZ01 膨润土的基本物理化学性质^[19]

Tab. 1 Physical properties of GMZ01 bentonite^[19]

比重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	液限/ %	塑限/ %	总比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	阳离子交换容量/ ($\text{mmol} \cdot (100 \text{g})^{-1}$)			
2.66	276	37	597	77.3			
主要交换阳离子含量/ ($\text{mmol} \cdot (100 \text{g})^{-1}$)			主要矿物质量分数/ %				
Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	蒙脱石	石英	长石	长石英
43.36	29.14	12.33	2.51	75.4	11.7	4.3	7.3

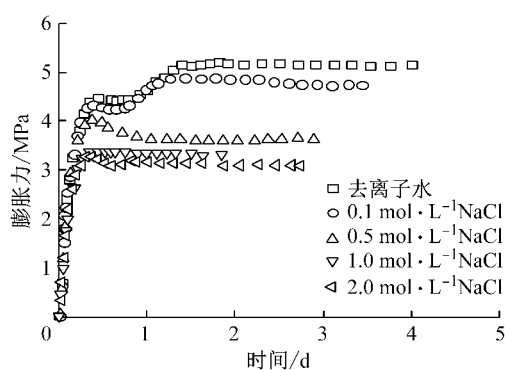
我国高放废物深地质处置库场址预选区为甘肃北山,其地下水中阳离子以 Na⁺ 和 Ca²⁺ 为主,阴离子以 Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 为主,总溶解固体(TDS)沿水流方向呈逐渐升高的趋势,上游地区一般小于 3 g · L⁻¹,下游地区 TDS 一般大于 8 g · L⁻¹,最大可达 80 g · L⁻¹^[20].

2 盐溶液对膨润土膨胀力的影响

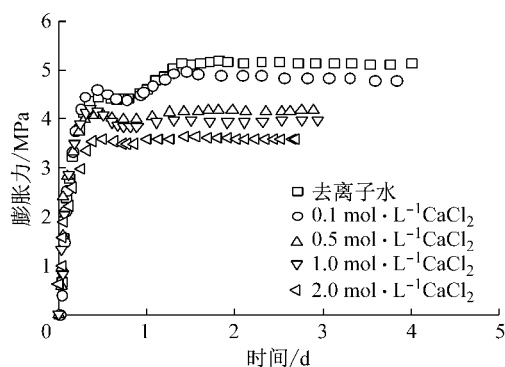
2.1 盐溶液浓度对膨胀力的影响

Zhu 等^[5]采用恒定体积膨胀-渗透仪,测得不同

浓度 NaCl 和 CaCl₂ 溶液入渗情况下,高压实(1.70 g · cm⁻³)GMZ01 膨润土的膨胀力结果,如图 1 所示. 图 1 表明,随着入渗溶液浓度的增加,高压实 GMZ01 膨润土的膨胀力不断减小;低浓度入渗时,膨胀力随时间变化呈现明显的“双峰结构”,但随着入渗溶液浓度(>0.5 mol · L⁻¹)的增加,“双峰结构”现象逐渐衰退.



a 去离子水及 NaCl 溶液



b 去离子水及 CaCl₂ 溶液

图 1 溶液浓度对膨胀力的影响^[5]

Fig. 1 Influence of concentrations of NaCl and CaCl₂ solutions on the swelling pressure of GMZ01 bentonite^[5]

上述入渗溶液浓度对膨胀力发展过程的影响机理可用晶体膨胀与扩散双电层膨胀来解释^[5]. 如图 2 所示,对于低浓度溶液入渗时,在恒体积条件下,膨润土晶体先吸水发生膨胀,当膨胀力曲线达到图 1 中的第 1 个峰值(阶段 I)后,膨润土继续水化,从而导致土体骨架坍塌,厚度较大的层叠体劈裂成一些较薄的层叠体并填充至集合体间的大孔隙中,从而导致此时的膨胀力减小(阶段 I 到阶段 II);随之,土体微观结构出现重新调整,并伴随着双电层膨胀的增强,土体继而发生再次膨胀,膨胀力再次增加直到第 2 个稳定的峰值(阶段 III).

随着高入渗溶液浓度的不断增大(> 0.5 mol · L⁻¹),膨胀阶段 I 和 II 与低浓度情况类似,且对于不

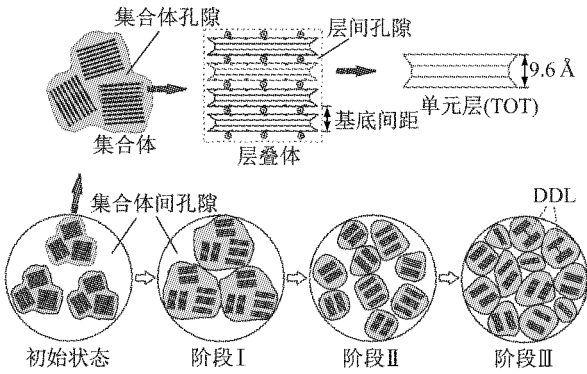


图 2 高压实膨润土恒体积膨胀过程微观结构示意图^[5]

Fig. 2 Conceptual diagrams of constant-volume swelling process and microstructure of compacted GMZ01 bentonite^[5]

同浓度和离子类型的入渗溶液, 膨胀力达到第 1 个峰值的时间(大约 10 h)基本不受影响. 这可能是由于初始晶体膨胀持续的时间仅取决于基质吸力的消散率而与入渗溶液的浓度无关^[21]. 当土体骨架坍塌后, 高浓度溶液降低黏土颗粒之间的斥力^[22], 抑制扩散双电层膨胀, 最终降低膨胀力^[4, 23]. 所以, 膨胀力几乎没有再次增加而直接达到最终稳定值.

2.2 离子类型对膨胀力的影响

入渗溶液浓度相同时, NaCl 溶液得到的高压实 ($1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) GMZ01 膨润土膨胀力低于 CaCl_2 溶液的膨胀力(见图 3, 图中 F 为膨胀力, c 为浓度, R^2 为相关系数), 且随着入渗溶液浓度的升高, 差值不断增大. 表明, 在恒定体积膨胀条件下, 入渗液中 Ca^{2+} 对高压实 GMZ01 膨润土膨胀力的削弱作用弱于 Na^+ ^[5].

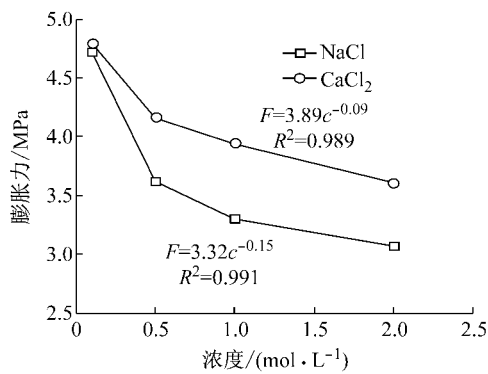


图 3 离子类型对膨胀力的影响^[5]

Fig. 3 Comparison of influence of cations types on the swelling pressure of GMZ01 bentonite^[5]

上述结论可用阳离子交换与离子水化作用来解释. 在 CaCl_2 溶液入渗 GMZ01 钠基膨润土后, 溶液中的 Ca^{2+} 置换膨润土中的 Na^+ , Ca^{2+} 成为主要的可

交换阳离子^[22]. 在恒定体积条件下, 高压实 ($1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) GMZ01 膨润土水化后, 层间形成不会超过 2 个水分子层厚的水化层. 当 Na^+ 作为层间主要吸附阳离子时, 第 1 和第 2 水化层厚度分别为 3.03 \AA 和 3.23 \AA ; 而当 Ca^{2+} 作为层间主要吸附阳离子时, 第 1 和第 2 水化层厚度分别为 3.89 \AA 和 2.75 \AA ^[24]. 也就是说, 此时钠基膨润土的基底间距小于钙基膨润土. 此外, 当 Na^+ 存在时, 结合水分子的键合力较弱, 阳离子可以相对自由移动; 而对于 Ca^{2+} , 则具有较强的键合力, 层间络合物是稳固的. 因此, NaCl 溶液入渗时得到的膨胀力低于 CaCl_2 溶液入渗时得到的膨胀力.

3 盐溶液对膨润土膨胀变形的影响

3.1 盐溶液浓度对膨胀变形的影响

为了研究入渗溶液浓度对膨胀变形的影响, Ye 等^[6]采用一维膨胀变仪针对不同浓度 NaCl 和 CaCl_2 溶液入渗高压实 ($1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) GMZ01 膨润土, 测得的膨胀应变随时间变化曲线如图 4 所示. 结果表明, 膨胀应变随着入渗溶液浓度的增加而减小.

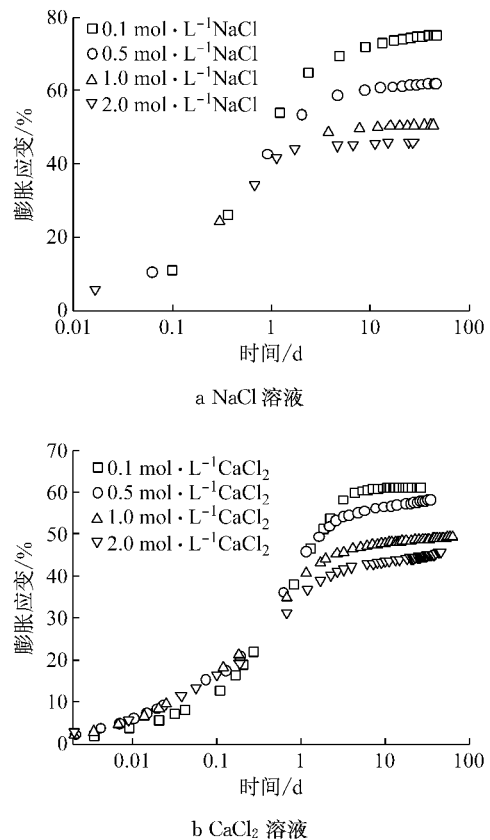


图 4 一维自由条件下不同溶液浓度对膨胀应变的影响^[6]
Fig. 4 Influence of concentrations of NaCl and CaCl_2 solutions on the swelling strains of GMZ01 bentonite^[6]

NaCl 溶液入渗时,随着浓度的增加,膨胀应变稳定的时间变短(图 4a);但当 CaCl_2 溶液入渗时,随着浓度的增加,膨胀应变稳定的时间有增加的趋势(图 4b). 这可能与阳离子交换反应有关,入渗的 Ca^{2+} 与 GMZ01 钠基膨润土中的 Na^+ 发生阳离子交换,从而延缓了膨胀变形的稳定时间.

3.2 离子类型对膨胀变形的影响

Ye 等^[6] 研究还发现(图 5),在相同浓度下, CaCl_2 溶液入渗时的膨胀应变小于 NaCl 溶液入渗时得到的膨胀应变. 这表明,在一维自由膨胀条件下,与 Na^+ 相比, Ca^{2+} 对高压实 GMZ01 膨润土膨胀量的削弱作用更强,特别是在低浓度 ($0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 时,膨胀应变差值达到 14%. 但是,这个差值随着入渗溶液浓度的增加而减小,直至几乎为零.

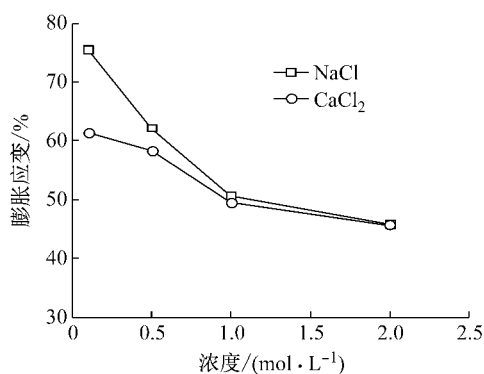


图 5 一维自由条件下离子类型对膨胀应变的影响^[6]

Fig. 5 Influence of cation types on the swelling strain of GMZ01 bentonite^[6]

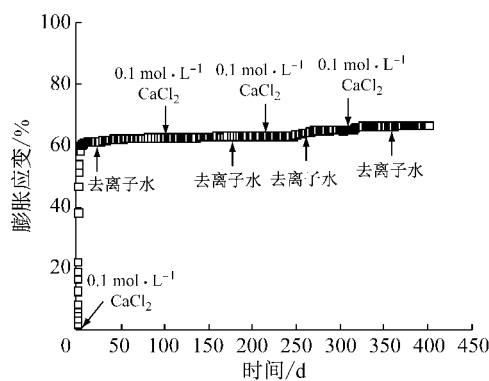
Ye 等^[6] 用阳离子交换与离子水化解释了不同入渗溶液离子类型对膨胀应变的影响. 一维自由膨胀条件下, NaCl 溶液入渗时, Na^+ 作为可交换阳离子可以形成 3、4 个水化层;而 CaCl_2 溶液入渗时,溶液中的 Ca^{2+} 置换膨润土中的 Na^+ , Ca^{2+} 成为主要的可交换阳离子,而 Ca^{2+} 最多可以形成 2 个水化层^[24-25]. 表明,钠基膨润土的基底间距大于钙基膨润土. 因此, NaCl 溶液入渗时得到的膨胀应变高于 CaCl_2 溶液入渗时得到的膨胀应变.

由此不难看出,这些学者从微观结构、阳离子交换以及离子半径等方面深入地解释了离子浓度和离子类型对膨润土膨胀性能的影响,扩展了理论分析方面的研究. 但这些微观结构参数很难与宏观力学指标建立联系,因此无法构建理论模型.

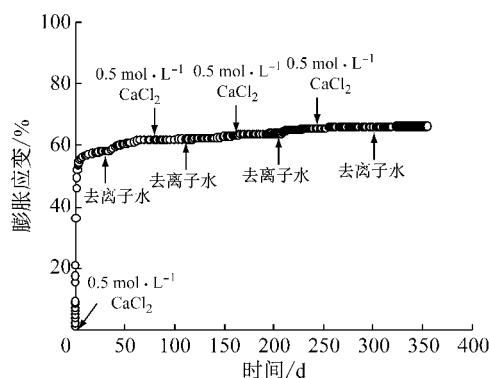
3.3 盐化-淡化循环对体变的影响

Zhu 等^[7] 分别对经历 3 个浓度 ($0.1, 0.5$ 和 $2.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 的 CaCl_2 溶液盐化后的 GMZ01 膨润土试样开展盐化-淡化循环试验,获得各组试样的体变

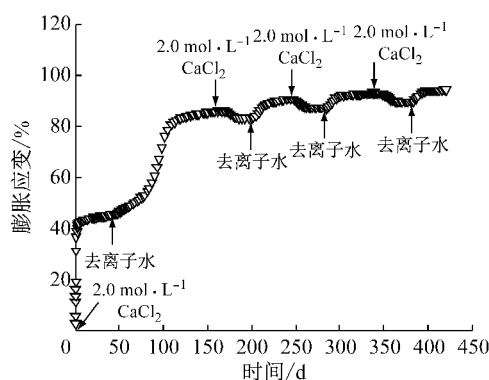
随时间变化的曲线,如图 6 所示. 结果表明,膨胀/收缩体变主要发生在第 1 次循环过程中. 在首次盐化过程中,入渗浓度越高,盐化后的膨胀应变越小. 这些学者仅对试验现象进行描述,并未给出该试验现象的机理. 可进一步通过压汞仪法 (MIP) 与衍射分析 (XRD) 试验,弄清发生该试验现象的微观机理.



a 初始盐化浓度为 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$



b 初始盐化浓度为 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$



c 初始盐化浓度为 $2.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

图 6 盐化-淡化循环对体变的影响^[7]

Fig. 6 Total strain develops with time for GMZ01 bentonite cyclically infiltrated with CaCl_2 solution and de-ionized water^[7]

4 盐溶液对膨润土压缩性能的影响

Zhang 等^[9] 针对在不同垂直应力 (初始饱和应

力)分别为 0.12、0.22、0.50、1.45 MPa 条件下的高压实膨润土试样分别采用不同浓度 NaCl 溶液入渗

至饱和,当膨胀变形达到稳定状态后,分级施加压缩应力至最大值 42 MPa. 结果如图 7 所示.

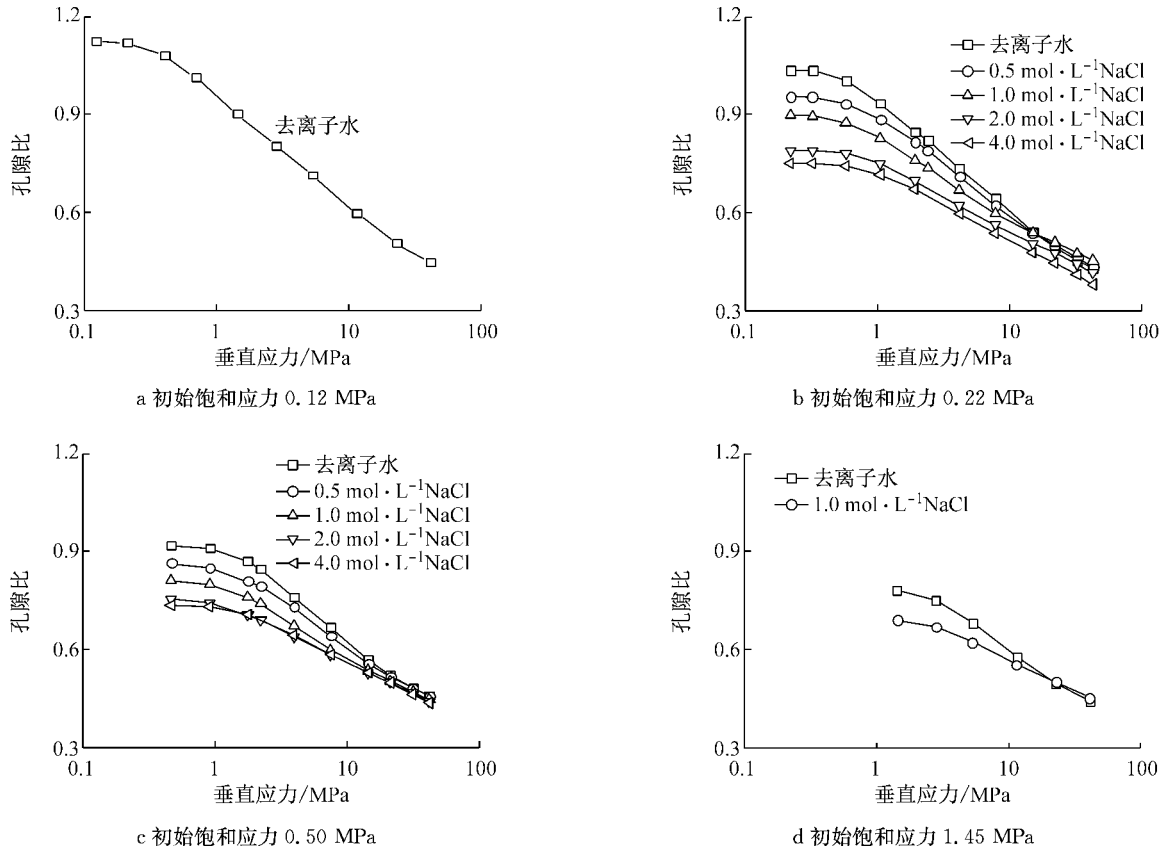


图 7 不同初始饱和应力下的压缩曲线^[9]

Fig. 7 Compression curves of GMZ01 bentonite saturated with solutions under different vertical stresses^[9]

4.1 初始饱和应力对压缩性的影响

基于去离子水饱和试样的压缩曲线, Zhang 等^[9]求取了高压实 GMZ01 膨润土的回弹指数(κ)、压缩指数(λ)和屈服应力(P_0)(如图 8 所示). 据此, Zhang 等^[9]进一步分析了不同浓度入渗液初始饱和

应力对压缩参数(回弹指数、压缩指数)和屈服应力的影响(如图 9、图 10 所示). 结果表明,初始饱和应力对压缩指数影响不大;随着初始饱和应力的增加,试样的屈服应力增加.

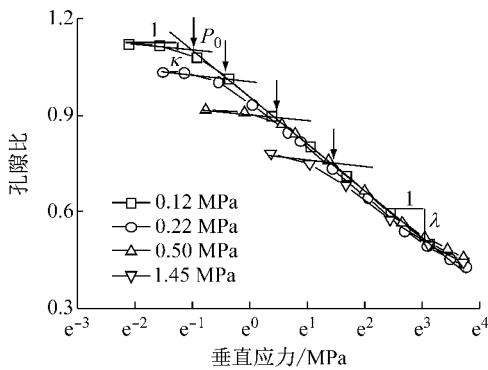


图 8 不同初始饱和应力下去离子水饱和试样的压缩曲线^[9]

Fig. 8 Determination of compressibility parameters of GMZ01 bentonite saturated with de-ionized water under different vertical stresses^[9]

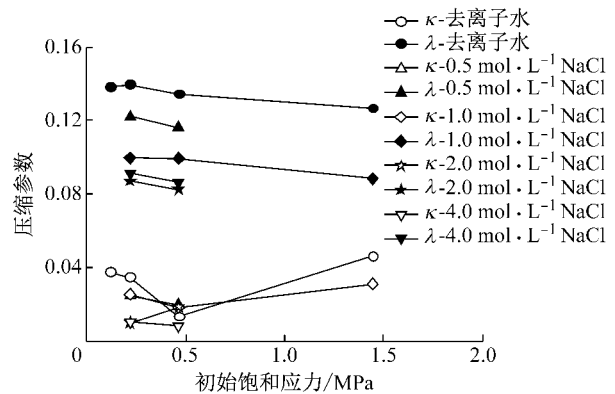


图 9 初始饱和应力对回弹指数和压缩指数的影响^[9]

Fig. 9 Influence of the vertical stress during saturation on the elastic and plastic compressibility parameters of GMZ01 bentonite^[9]

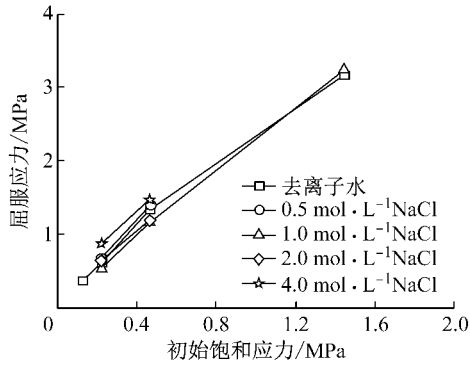


图 10 初始饱和应力对屈服应力的影响^[9]

Fig. 10 Influence of the vertical stress during saturation on the yield stress of GMZ01 bentonite^[9]

4.2 盐溶液浓度对压缩性的影响

Zhang 等^[9]研究发现,随着 NaCl 溶液浓度的增加,高压实 GMZ01 膨润土的压缩指数降低(图 11).当垂直应力超过试样的屈服应力后,膨润土的变形主要由集合体间的大孔隙和集合体的收缩控制^[20],入渗液浓度的增加相当于试样内部渗透吸力增加^[21],可以导致土体的渗透固结,这个过程伴随着集合体的收缩和集合体间大孔隙的形成,这也是渗透系数随入渗溶液浓度增加的原因^[5,8].由于集合体的变形随着渗透吸力的增加而降低,因此,压缩指数随着入渗液浓度的增加而降低.但当入渗液浓度超过 1.0 mol·L⁻¹后,塑性压缩系数变化很小,这一规律与 Loret 等^[26]和 Gajo 等^[27]采用不同浓度 NaCl 溶液入渗 Na 基膨润土泥浆进行压缩试验所取得的结果一致.浓度对屈服应力的影响同样可以归结于渗透吸力的作用.高浓度盐溶液入渗后,土的膨胀降低,从而导致试样变密实,屈服应力增加(图 12).

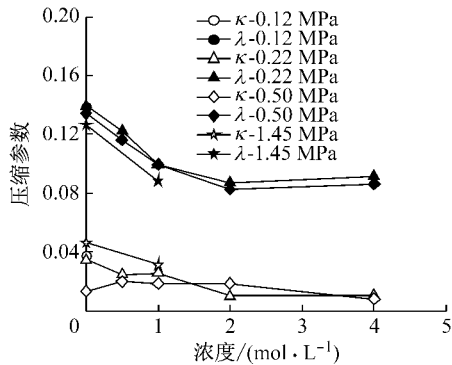


图 11 溶液浓度对回弹指数和压缩指数的影响^[9]

Fig. 11 Influence of concentrations of solutions on the elastic and plastic compressibility parameters of GMZ01 bentonite^[9]

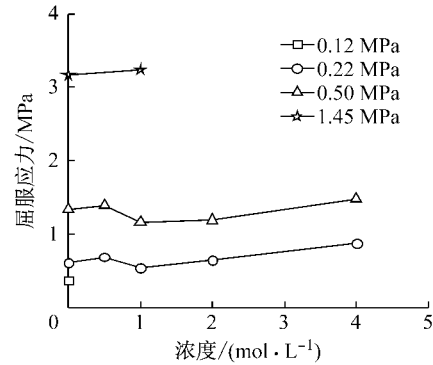


图 12 入渗溶液浓度对屈服应力的影响^[9]

Fig. 12 Influence of concentrations of solutions on the yield stress of GMZ01 bentonite^[9]

4.3 压缩参数的拟合

为了描述盐溶液浓度与初始饱和应力对 GMZ01 膨润土压缩指数的影响,Zhang 等^[9]提出采用式(1)计算压缩指数:

$$\lambda = \lambda(p) \left(\lambda_1 \tanh \left(\lambda_3 \frac{x - x_{dw}}{x_{sat} - x_{dw}} \right) + \lambda_2 \right) \quad (1)$$

式中: λ_1 、 λ_2 和 λ_3 为常数; x_{dw} 、 x_{sat} 分别为去离子水溶液浓度比与饱和溶液浓度比; x 为入渗溶液浓度比, $x=c/c_{sat}$, c_{sat} 为入渗溶液的饱和浓度; p 为垂直应力.由于初始饱和应力对压缩指数的影响很小,因此应力函数 $\lambda(p)$ 取值 1,计算结果如图 13 所示.由图可见,计算结果能较好地反应实测值.

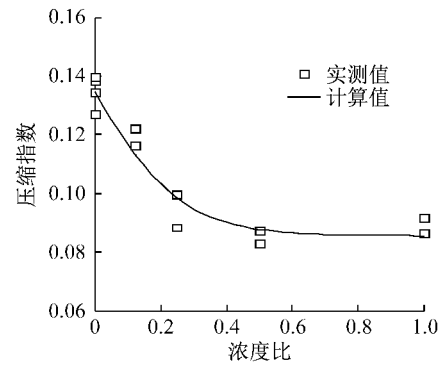


图 13 计算与实测塑性压缩指数比较^[9]

Fig. 13 Comparisons of the measured plastic compressibility parameters of GMZ01 bentonite to the calculated ones^[9]

为了描述盐溶液浓度和初始饱和应力对 GMZ01 膨润土屈服应力的影响,Zhang 等^[9]提出式(2)用于计算屈服应力:

$$P = P(p) P_{ref} \left(\frac{P_0^*}{P_{ref}} \right)^{\frac{\lambda(0) - \lambda}{\lambda(0) - \lambda}} \quad (2)$$

式中: $P(p)$ 为与应力有关的函数; P_{ref} 为参考应力; P_0^* 为去离子水入渗条件下土的屈服应力; $\lambda(0)$ 为

去离子水入渗条件下土的压缩指数; $\lambda(c)$ 为压缩指数计算结果,如图 14 所示.由图可见,计算结果能较好地反应实测值.

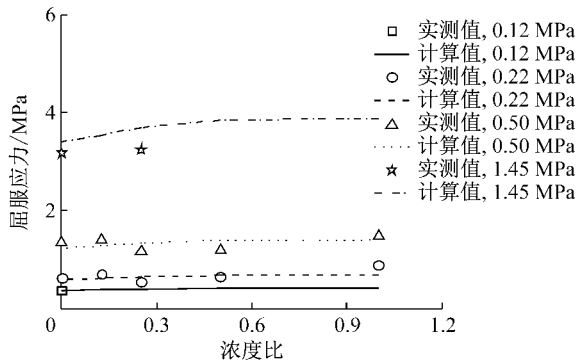


图 14 计算与实测屈服应力比较^[9]

Fig. 14 Comparisons of the measured yield stresses of GMZ01 bentonite to the calculated ones^[9]

由此可见,上述学者仅研究了单一盐溶液(NaCl)浓度对膨润土压缩性的影响,并未考虑不同离子类型的影响.

5 结论与展望

综上所述,关于盐溶液影响下高压实 GMZ01 膨润土的膨胀力、膨胀变形和压缩性方面的研究进展可归纳如下.

(1) 在 NaCl 和 CaCl₂ 溶液入渗作用下,高压实 GMZ01 膨润土的膨胀力均随着入渗溶液浓度的增加而减小.在相同浓度下,NaCl 溶液入渗得到的膨胀力低于 CaCl₂ 入渗得到的膨胀力.

(2) 在 NaCl 和 CaCl₂ 溶液入渗作用下,高压实 GMZ01 膨润土的膨胀变形均随着入渗溶液浓度的增加而减小.在相同浓度下,NaCl 溶液入渗得到的膨胀应变高于 CaCl₂ 入渗得到的膨胀应变.

(3) 在盐化-淡化循环过程中,膨胀/收缩变形主要发生在第 1 次循环中;采用 CaCl₂ 溶液进行初次盐化的试样的膨胀应变随入渗液浓度的增加而减小.

(4) 在 NaCl 溶液入渗作用下,高压实 GMZ01 膨润土的压缩指数随入渗溶液浓度的升高而降低,初始饱和和应力对压缩指数的影响很小;屈服应力随着入渗溶液浓度或者初始饱和应力的升高而升高.

针对化-力耦合作用下 GMZ01 膨润土体变特性方面的研究进展,以下几点应该是下一步工作的重点:①阳离子交换研究.定量描述阳离子交换对膨胀力、膨胀变形以及压缩性能的影响.②微观机理研

究.开展宏观水-力现象的微观机理研究,寻求定量描述微观机理的参数,建立相关理论模型.③考虑热-水-力-化的模型试验研究,为处置库的安全评估积累参数.

参考文献:

- [1] TRIPATHY S, SCHANZ T. Compressibility behaviour of clays at large pressures [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(3): 355.
- [2] LIU J, NERETNIEKS I. Physical and chemical stability of the bentonite buffer [R]. Stockholm: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management, 2006.
- [3] TRIPATHY S, SRIDHARAN A, SCHANZ T. Swelling pressures of compacted bentonites from diffuse double layer theory [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(3): 437.
- [4] 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, Parts A/B/C, 2008, 33: 516.
- [5] ZHU C M, YE W M, CHEN Y G, *et al.* Influence of salt solutions on the swelling pressure and hydraulic conductivity of compacted GMZ01 bentonite [J]. Engineering Geology, 2013, 166(10): 74.
- [6] YE W M, ZHU C M, CHEN Y G, *et al.* Influence of salt solutions on the swelling behavior of the compacted GMZ01 bentonite [J]. Environmental Earth Science, 2015, 74(1): 793.
- [7] ZHU C M, YE W M, CHEN Y G, *et al.* Impact of cyclically infiltration of CaCl₂ solution and de-ionized water on volume change behavior of compacted GMZ01 bentonite [J]. Engineering Geology, 2015, 184: 104.
- [8] 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 Science, 2014, 72(7): 2621.
- [9] ZHANG F, YE W M, CHEN Y G, *et al.* Influence of salt solution concentration and vertical stress during saturation on the volume change behavior of compacted GMZ01 bentonite [J]. Engineering Geology, 2016, 207: 48.
- [10] BOLT G H. Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays [J]. Géotechnique, 1956, 6(2): 86.
- [11] BARBOUR S, FREDLUND D. Mechanisms of osmotic flow and volume change in clay soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26(4): 551.
- [12] PRIYANTO D G, BLATZ J A, SIEMENTS G A, *et al.* The effects of initial conditions and liquid composition on the one-dimensional consolidation behavior of clay-based sealing materials [R]. Toronto: Nuclear Waste Management Organization, 2008.
- [13] ABDULLAH W S, ALSHIBLI K A, AL-ZOUBI M S. Influence of pore water chemistry on the swelling behavior of compacted clays [J]. Applied Clay Science, 1999, 15(5): 447.
- [14] HERBERT H J, KASBOHM J, SPRENGER H, *et al.* Swelling

- pressures of MX-80 bentonite in solutions of different ionic strength [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2008, 33(1): S327.
- [15] ZHANG H Y, CUI S L, ZHANG M, *et al.* Swelling behaviors of GMZ bentonite-sand mixtures inundated in NaCl - Na₂SO₄ solutions [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2012, 242(4): 115.
- [16] WANG Q, CUI Y J, TANG, A M, *et al.* Long-term effect of water chemistry on the swelling pressure of a bentonite-based material [J]. *Applied Clay Science*, 2014, 37(1): 157.
- [17] YE W M, ZHENG Z J, CHEN B, *et al.* Effects of PH and temperature on the swelling pressure and hydraulic conductivity of compacted GMZ01 bentonite [J]. *Applied Clay Science*, 2014, 101(1): 192.
- [18] DI Maio C, SANTOLI L, SCHIAVONE P. Volume change behaviour of clays; The influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state [J]. *Mechanics of Materials*, 2004, 36(5/6): 435.
- [19] 温志坚. 中国高放废物处置库缓冲材料物理性能[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(4): 794.
WEN Zhijian. 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.
- [20] 郭永海, 杨天笑, 刘淑芬. 高放废物处置库甘肃北山预选区水文地质特征研究[J]. *铀矿地质*, 2001, 17(3): 184.
GUO Yonghai, YANG Tianxiao, LIU Shufen. Hydrogeological characteristics of Beishan preselected area, Gansu province for China's high-level radioactive waste repository [J]. *Uranium Geology*, 2001, 17(3): 184.
- [21] RAO S M, THYAGARAJ T, THOMAS H R. Swelling of compacted clay under osmotic gradients [J]. *Géotechnique*, 2006, 56(10): 707.
- [22] MITCHELL J K, SOGA K. *Fundamentals of soil behavior* [M]. Wiley: John Wiley & Sons Inc, 2005.
- [23] MATA M C. Hydraulic behaviour of bentonite based mixtures in engineered barriers: The backfill and plug test at the Äspö HRL (Sweden) [D]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.
- [24] PUSCH R, YONG R N. *Microstructure of smectite clays and engineering performance* [M]. Abingdon: Taylor & Francis Group, 2005.
- [25] BRADBURY M H, BAEYENS B. Porewater chemistry in compacted re-saturated MX-80 bentonite [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2003, 61(1-4): 329.
- [26] LORET B, HUECKEL T, GAJO A. Chemo-mechanical coupling in saturated porous media: Elastic-plastic behaviour of homoionic expansive clays [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2002, 39(10): 2773.
- [27] GAJO A, LORET B, HUECKEL T. Electro-chemo-mechanical couplings in saturated porous media: Elastic-plastic behavior of heteroionic expansive clays [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2002, 39(16): 4327.

• 下期文章摘要预报 •

非一致地震激励下飘浮体系斜拉桥易损性分析

马 凯, 钟 剑, 袁万城, 党新志

利用 OpenSees 软件对一座主跨为 420 m 的斜拉桥建立有限元模型, 分别进行了仅考虑失相干效应、考虑失相干效应和行波效应、考虑失相干效应和场地效应以及综合考虑失相干效应、行波效应和场地效应这 4 种非一致激励情况下的易损性分析. 结合联合概率地震需求模型和蒙特卡罗方法抽样获得了基于构件的体系易损性曲线. 考虑地震动空间效应的飘浮体系斜拉桥损伤概率明显高于一致激励, 且失相干效应和场地效应的影响较为显著. 失相干效应越明显, 斜拉桥体系遭受地震损伤的概率越大. 场地效应的影响较为复杂, 总体上表现为相邻场地类型差异越大, 沿地震波传播方向场地类型由软变硬时, 体系损伤概率越大. 行波效应对飘浮体系斜拉桥地震损伤的影响较小, 易损性分析时忽略行波效应的影响不会造成较大的误差. 因此, 对飘浮体系斜拉桥进行非一致激励下的地震易损性分析应考虑失相干效应和场地效应的影响, 目前广泛采用的一致激励下的易损性分析高估了体系的抗震性能.