

不同阳离子盐溶液对 MX-80 膨润土力学性能的影响

项国圣¹,王鑫鑫¹,黄金坤²,宋绍辉¹,邵飞洋¹,金仁才²

(1.安徽工业大学建筑工程学院,安徽省马鞍山市 243002;

2.中国十七冶集团有限公司,安徽省马鞍山市 243002)

摘要:【目的】研究含盐地下水侵蚀下膨润土的力学性能变化,评估其对深层地质处置库安全运营的影响。【方法】通过模拟深层地质处置库的地下水环境,开展不同浓度盐溶液(NaCl、KCl、CaCl₂)侵蚀下 MX-80 膨润土的膨胀固结试验、剪切试验和渗透试验,探究含盐地下水侵蚀下膨润土力学性能的变化规律。【结果】①溶液浓度增加,蒙脱石层间距减小,膨胀率降低;蒙脱石集聚体发生团聚,抗剪强度和渗透系数增大。②Ca²⁺、K⁺与蒙脱石间发生离子交换反应,低浓度(0.1 mol/L)时,Ca²⁺与蒙脱石间的离子交换反应占主导地位,膨胀率次序为 NaCl>KCl>CaCl₂;高浓度(0.5 mol/L)时,K⁺充分置换 Na⁺后形成较强的 K-O 配位键,膨胀率次序为 NaCl>CaCl₂>KCl。③不同盐溶液对 MX-80 膨润土黏聚力提高程度不同,低浓度(0.1 mol/L)时,黏聚力大小顺序为 CaCl₂>KCl>NaCl,高浓度(0.5 mol/L)时,黏聚力大小顺序为 KCl>CaCl₂>NaCl,内摩擦角也遵循该顺序,但阳离子交换对内摩擦角的影响较小。④不同阳离子盐溶液对应的孔径变化趋势不同,低浓度(0.1 mol/L)时,CaCl₂ 溶液中膨润土渗流通道的大孔径最多,渗透系数 CaCl₂>KCl>NaCl,而高浓度(0.5 mol/L)时,KCl 溶液中膨润土渗流通道的大孔径最多,渗透系数 KCl>CaCl₂>NaCl。【结论】揭示了含盐溶液作用下膨润土力学性能的变化机理,为高放废物深层地质处置库缓冲屏障体系的设计与安全评估提供了理论依据。

关键词:MX-80 膨润土;膨胀;抗剪强度;K-O 配位键;渗透系数

中图分类号:TU411.7

文献标识码:A

高放废物的安全处理是当前核电发展亟待解决的重大难题之一,深层地质处置被认为是高放物核废料最理想的处理方式,膨润土具有低渗透性、高膨胀性和良好导热性等特点,被认为是处置库中良好的缓冲/回填材料^[1,2,3],对核废料长期储存的稳定性和安全性具有重要作用。然而,处置库长期运营过程中,一方面,围岩中含盐地下水入渗,高压实膨润土会吸水膨胀,并在围岩约束下的人工屏障内部产生机械应力^[4,5],将降低膨润土的膨胀性甚至诱发渗透固结,其体变性能会发生变化。另一方面,盐溶液的作用也会对膨润土的剪切强度、渗透特性产生影响^[6,7],将直接影响处置库的长期有效运营。因此,探究不同阳离子盐溶液对 MX-80 膨润土的膨胀变形规律、剪切强度及其渗透特性具有重要意义。

关于膨胀性能,项国圣等^[8]将 GMZ01 膨润土分别与 NaCl、CaCl₂、MgCl₂ 三种盐溶液混合进行膨胀变形试验,探究不同盐溶液入渗下对膨润土膨胀变形性能的影响,发现 NaCl 溶液对膨润土膨胀变形的抑制作用较小,而 CaCl₂、MgCl₂ 溶液对膨润土的

膨胀变形的抑制作用较大。于泽溪^[9]等探究了不同浓度 NaCl 和 CaCl₂ 溶液对钠基膨润土膨胀性能、渗透特性的影响,结果表明,浓度相同时,钠基膨润土在盐溶液中的膨胀指数 NaCl>CaCl₂,渗透系数 NaCl<CaCl₂;郭招群^[10]发现 0.5 mol/L 的 KCl、NaCl、CaCl₂、MgCl₂ 的溶液下,K⁺、Na⁺对膨润土的削弱能力大于 Mg²⁺、Ca²⁺,并且推测低价阳离子的盐溶液抑制效果要高于高价阳离子。ZHANG F 等^[11]认为饱和盐溶液中膨润土所吸收的水分和发生的膨胀均小于纯水的情况,且膨胀变形随着溶液浓度的增大而降低;YE W M 等^[12]对于干密度 1.7 g·cm⁻³ 的 GMZ01 高压实膨润试样进行膨胀变形试验,发现在相同浓度的溶液下膨胀应变大小顺序为:NaCl>CaCl₂>KCl。

关于抗剪强度,贾迪等^[13]探究了 GMZ07 膨润土及其掺砂混合物在不同 NaCl 溶液中的强度特征,结果表明,随着 NaCl 溶液浓度的升高,膨润土的剪切强度增加,内摩擦角增大,但黏聚力变化不大。杨俊等^[14]对膨润土开展直剪试验,发现随着竖向荷载的增大,试样的内摩擦角逐渐增大,而黏聚力逐渐减小。张虎

收稿日期/Received:2025-05-01

修回日期/Revised:2025-05-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41702311, 52409135);安徽省自然科学基金项目(2208085MD98);安徽省重点研究与开发计划项目(2023t07020018)。

第一作者:项国圣(1986—),男,江苏泰兴人,副教授,博士,从事复杂环境中膨胀性黏土岩土工程等方面的研究。

E-mail:xianggsh2011@163.com。

元等^[15]开展了膨润土-砂混合物的剪切试验,结果表明,随着掺砂率的增大,膨润土黏聚力及内摩擦角逐渐减小,即抗剪强度降低。ZHANG H Y 等^[16]探究了膨润土-砂混合物在盐溶液入渗下的抗剪强度,发现混合物的抗剪强度和摩擦角均随着盐溶液浓度的增加而增大,但黏聚力变化不明显。XU Y F 等^[17]开展了不同浓度盐溶液入渗下膨润土的直接剪切试验,发现膨润土及其混合物在蒸馏水和不同浓度的 NaCl 溶液中的峰值剪切强度 τ_f 和有效应力 p_e 在 τ_f - p_e 坐标轴下可用同一条直线表示。

关于渗透性能,许四法等^[18]研究了 Ca^{2+} 离子浓度对膨润土-砂混合物渗透性能的影响,发现相同沉降量的条件下, Ca^{2+} 离子浓度越大,发生渗透的时间越短,且 Ca^{2+} 离子浓度较大时,膨润土中 Na^+ 会和 Ca^{2+} 发生离子交换反应,转化为钙基膨润土,混合物的渗透性能下降。徐超等^[19]探究了阳离子价态、水化离子半径对织物膨润土垫 (Geosynthetic Clay Liner, GCL) 中膨润土渗透性能的影响,结果发现离子价越高,水化离子半径越大, GCL 的渗透系数也越大。CASTELLANIS E 等^[20]发现低密度和上覆应力水平较低时,压实 FEBEX 膨润土渗透系数随溶液浓度增大的程度愈加明显。JO H Y 等^[21]通过试验探究了不同类型和浓度盐溶液对膨润土渗透特性的影响,试验结果表明,盐溶液浓度和离子价态增大,钠质膨润土的渗透系数随之增大。

上述研究揭示了盐溶液对膨润土力学性能的影响,但多聚焦于单一力学特性,缺乏多参数耦合分析。目前,诸多国内外学者针对不同盐溶液入渗下膨润土的膨胀变形、膨胀力可能出现的变化提出了大量的研究和论证,但关于不同阳离子盐溶液作用下 MX-80 膨润土膨胀性能、抗剪强度和渗透性能影响规律之间的系统研究较少,尤其是阳离子对膨润土三大力学特性的影响机理之间的异同目前并无明确的论断。因此,本文以 MX-80 商用钠基膨润土为研究对象,开展了 NaCl、KCl、 CaCl_2 三种不同盐溶液入渗下膨胀变形、抗剪强度和渗透系数的测试,对不同浓度盐溶液入渗下力学特性的作用机理进行了深入而系统的分析,可为处置库缓冲屏障体系的建设提供科学的理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

MX-80 商用钠基膨润土为典型的钠基膨润土,是美国深地处置中人工屏障推荐缓冲/回填材料,因其容易获得,在世界范围内得到了广泛研究。因此,本文选用的土样为 MX-80 商用钠基膨润土,其基本

理化参数见表 1。

表 1 MX-80 商用钠基膨润土的物理性质
Tab. 1 Physical properties of commercial sodium bentonite

物理参数	物理指标
蒙脱石含量 C_m	86%
液限 w_L	221.7%
塑限 w_p	38.4%
土粒相对密度 G_s	175
比重 ω	2.75
自由膨胀率 δ_{ef}	160%
天然含水率 w	10%

制备表 2 所列的 3 种不同浓度浸泡盐溶液备用。(本文配制 0.1 mol/L 及 0.5 mol/L 两种浓度的溶液,因此,文章提到的低浓度代指 0.1 mol/L,高浓度代指 0.5 mol/L。)

表 2 浸泡溶液及浓度
Tab. 2 Soaking solution and concentration

类型	NaCl	KCl	CaCl_2
浓度(mol/L)	0.1、0.5	0.1、0.5	0.1、0.5

1.2 膨胀固结试验

首先,称取 1 000 g MX-80 商用钠基膨润土放入 105 °C 烘箱中,烘干 24 h 至干燥。均匀喷洒蒸馏水至烘干膨润土粉末并充分搅拌,将其配制至目标含水率 20%。然后,将配制好的土样放入密封袋内静置 48 h,保证溶液均匀分布于土体中。测量含水率,确保含水率处于最优含水率 $20\pm0.5\%$ 范围内,若超出该范围,则重新配制。

将 61.8 mm 内径×40 mm 高度的环刀固定于千斤顶承压面,再将预先称重的土样填入环刀,在环刀内放置配套垫块(直径 61.8 mm、高度 30 mm),然后采用静压法将土样压制成高度 20.0 mm,干密度 1.65 g/cm³ 的试样,待试样压到所需高度后静置 2~3 min,确保试样没有反弹趋势后再卸去压力,缓慢推出试样后备用。

将透水石和制备好的试样组装后一并放入固结仪内,施加 1 kPa 左右的预应力进行调平后安装百分表并将读数调零,向水槽里分别加入蒸馏水及表 2 所列浓度的溶液(NaCl、KCl、 CaCl_2)至固结室高度 4/5 处左右,让 MX-80 膨润土在 200 kPa 下饱和膨胀,然后对试样依次施加 400、600、800、1 200、1 600 kPa 的竖向荷载。每级荷载作用下,分别在 10 min,30 min,1 h,2 h,3 h,5 h 记录一次变形数据,之后每间隔 24 h 记录一次数据,24 h 内高度变化量小于 0.001

mm 时,认为当前荷载下 MX-80 膨润土固结达稳定。

1.3 剪切试验

称取一定质量含水率为 20% 的 MX-80 膨润土土样,按照膨胀变形试验的制样方法,将土样制备成干密度 1.65 g/cm^3 、直径 61.8 mm、高度 20 mm 的试样,对各组试样施加预设竖向荷载后,分别加入蒸馏水及表 2 所列浓度的溶液(NaCl、KCl、 CaCl_2)至固结室高度 4/5 处左右,待膨胀稳定后取出试样并放至直剪仪,施加与固结仪条件下一致的竖向荷载,设定剪切速率 0.8 mm/min ,启动仪器使其开始自动剪切试样,并实时记录数据,待直剪仪自动停止时即说明试样剪切破坏,若剪切到百分表读数的最大量程仪器仍未停止,则定义最大剪切位移为 10 mm。

1.4 渗透试验

使用定制设计的环切器,内径 61.8 mm,高度 40 mm,放置在钢垫上。将 61.8 mm 内径 $\times$ 40 mm 高度的环刀中的不锈钢垫块取出,分别在其底部和顶部放入 5 mm 和 10 mm 厚的透水石。为减少试验过程中盐溶液水分的挥发,特制了具有较好密封性的固结仪。将环刀装入固结仪中,开展固结压缩试验。加载路径为 200-400-600-800-1 200-1 600 kPa。采用百分表记录每级荷载下的压缩变形量,计时器记录时间,当每级荷载作用下百分表读数在 24 h 内变化小于 0.001 mm 视为稳定。

1.5 微观测试

本文的微观测试包括扫描电镜(Scanning

Electron Microscope,SEM)和压汞(Mercury Intrusion Porosimetry,MIP)试验。

扫描电镜(SEM)试验过程:将固结后膨润土试样取出,每个试样取出 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 左右的扁平块体样品,固定样品后进行金属喷镀处理,将处理完的试样置于扫描电镜样品台上并启动 SEM 真空泵排出空气,通过 SEM 系统的控制软件对样品进行位置和焦距调节,最后通过系统进行图像获取。

压汞(MIP)试验过程:将固结后的膨润土在 $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ 液氮环境中速冻,以保证试样的微观孔隙结构不发生改变,然后将试样放置冷干机中抽真空冷冻干燥。干燥后将试样用聚氯乙烯包裹密实,送至分析测试中心开展压汞试验。

2 试验结果与讨论

2.1 膨胀性能

根据《公路土工试验规程》(JTGE40—2007),将膨胀率 δ 定义为:

$$\delta = \frac{H - H_0}{H_0} \quad (1)$$

式中 H_0 为试样初始高度,20.0 mm; H 为某一荷载作用稳定后试样高度。

图 1 所示为不同盐溶液作用下 MX-80 膨润土膨胀率与荷载之间的关系。

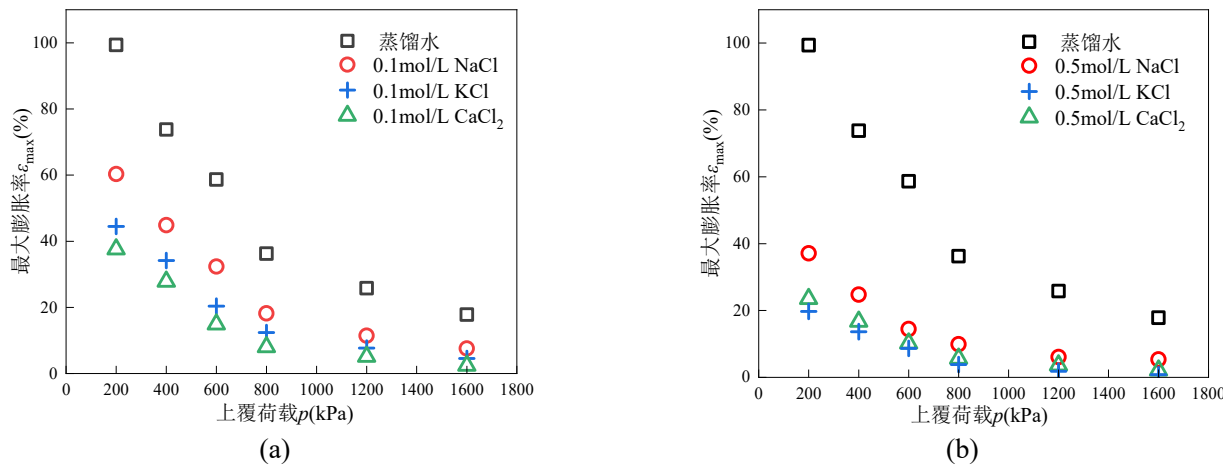


图 1 盐溶液下最大膨胀率随荷载的变化

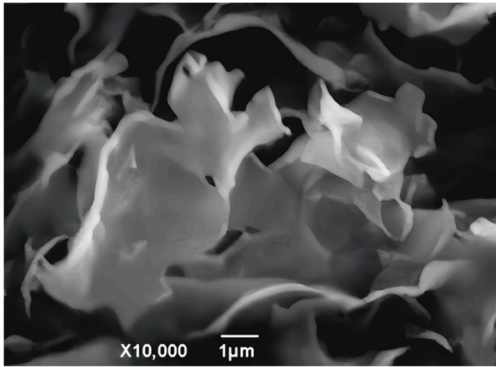
Fig. 1 Changes of maximum expansion rate with load in salt solution

由图 1 可知,随着荷载的增加,MX-80 膨润土膨胀率呈现下降趋势,这主要是由于荷载增大,MX-80 膨润土颗粒间孔隙被压缩,导致 MX-80 膨润土的膨胀能力降低。当荷载相同时,MX-80 膨润土的膨胀变形随溶液浓度增加而降低,这主要由于溶液浓度越

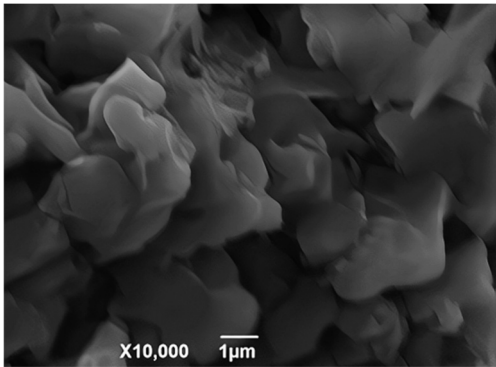
大,扩散离子双电层厚度越小^[22],蒙脱石吸附弱结合水的能力越弱,膨胀性能越弱。相同荷载下,盐溶液浓度为 0.1 mol/L 时,膨胀率的大小顺序为 $\text{NaCl} > \text{KCl} > \text{CaCl}_2$,这主要是由于 Ca^{2+} 的交换能力强于 K^+ 和 Na^+ ,在浓度较低时容易与 MX-80 膨润土之间发

生阳离子交换反应,更易置换附着在蒙脱石表面的 Na^+ ,同时由于 Ca^{2+} 的电荷密度较高,对蒙脱石静电引力作用较强,容易将蒙脱石层吸附在一起,降低了蒙脱石层间距,水分子难以进入蒙脱石层间,从而降低了膨胀性能。而盐溶液浓度为 0.5 mol/L 时,膨胀率大小顺序为 $\text{NaCl}>\text{CaCl}_2>\text{KCl}$ 。这主要是由于高浓度时, Ca^{2+} 与 K^+ 均与MX-80膨润土之间充分发生离子交换反应,但 K^+ 水合能较低、离子半径小,且与晶层中硅氧四面体六联环空间相近,会形成 K-O 配位键,使得蒙脱石层结合更加紧密,吸水膨胀更为困难,膨胀能力更弱,这与廖饶平等^[23]发现的结果一致。综合可发现,MX-80膨润土试样膨胀变形受盐溶液类型、盐溶液浓度以及荷载的影响。

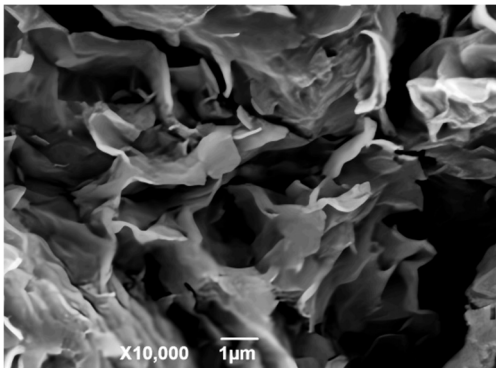
不同阳离子盐溶液中压实MX-80膨润土试样的扫描电镜(SEM)图,分辨率为 $1\text{ }\mu\text{m}$,如图2所示。



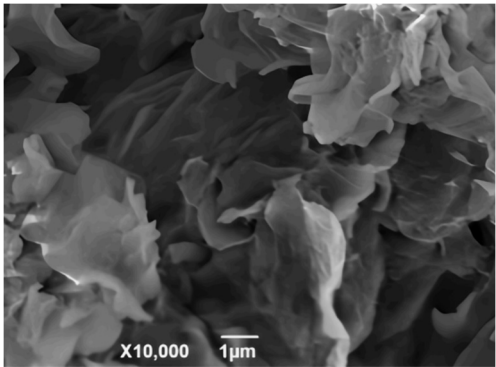
(a) 蒸馏水



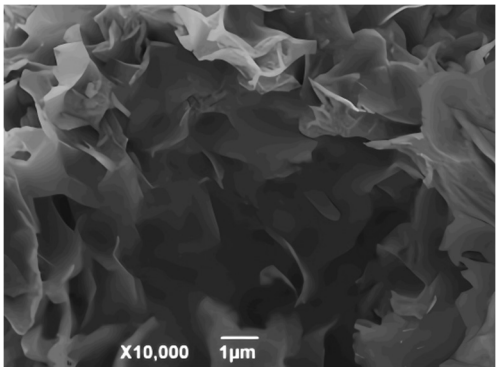
(b) 0.1 mol/L NaCl



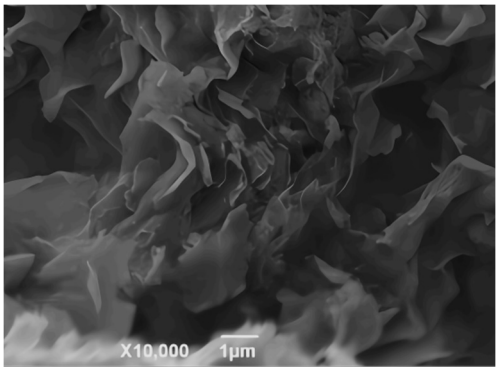
(c) 0.5 mol/L NaCl



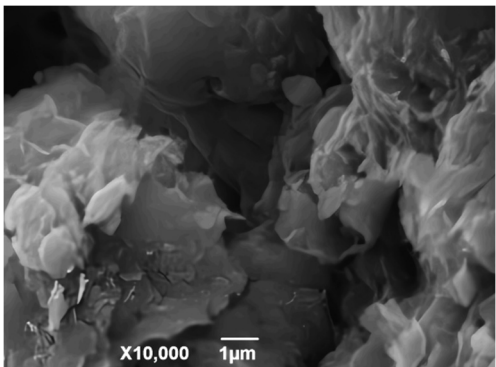
(d) 0.1 mol/L CaCl_2



(e) 0.5 mol/L CaCl_2



(f) 0.1 mol/L KCl



(g) 0.5 mol/L KCl

图2 不同浓度盐溶液中膨润土SEM图

Fig. 2 SEM images of bentonite in salt solutions of different concentrations

图2(a)为蒸馏水作用下MX-80膨润土的SEM图,可以观察到,蒸馏水条件下,MX-80膨润土的蒙脱石充分水化,表面有大片水化形成的白色羽状物,片

层晶莹蓬松,表现为分散结构。但 MX-80 膨润土中加入不同阳离子盐溶液后,膨润土中蒙脱石片层开始出现团聚现象,图 2(b)、(c)为 NaCl 溶液作用下膨润土的 SEM 图,可以看出,MX-80 膨润土试样经 0.1 mol/L 盐溶液浸泡后,蒙脱石集聚体团聚现象明显,形成块状的白色羽状物,随着溶液浓度增大到 0.5 mol/L,蒙脱石水化减弱,难以发现水化产生的白色羽状物,蒙脱石之间的结合较为致密,这导致了膨润土的膨胀性能随浓度的增加而减小。对比图 2(b)、(d)和(f),可以看出,0.1 mol/L 的低浓度时,CaCl₂ 溶液中的蒙脱石水化羽状物较 NaCl 溶液和 KCl 溶液中的团聚现象更明显,表明蒙脱石之间的结合更为紧密,水分子难以进入蒙脱石层间,这反映出 Ca²⁺对蒙脱石层具有较强的静电引力,导致低浓度时 CaCl₂ 溶液中的膨胀性能最低。对比图 2(c)、(e)和(g)可以看出,0.5 mol/L 的高浓度时,水化形成的白色羽状物基本消失,此时蒙脱石水化作用均较弱,尤其是 KCl 溶液中蒙脱石较 NaCl 溶液和 CaCl₂ 溶液作用下团聚程

度更大,出现明显的“板状”硬化状态,颗粒之间紧紧贴合,反映出 K⁺对蒙脱石层的键合作用更强,导致膨胀性能进一步降低。

2.2 抗剪强度

图 3 所示为试样施加 400 kPa 的竖向荷载时在蒸馏水及 0.1 mol/L 与 0.5 mol/L 的 NaCl、KCl 与 CaCl₂ 溶液中剪应力与位移的关系。由图 3 可知,试样在蒸馏水和 NaCl 溶液中均表现出应变软化特征^[24],即随着剪切位移的增加,剪切应力先增大后减小,且峰值剪切应力随着浓度的增大向右偏移。当荷载相同时,同种类型盐溶液高浓度的抗剪强度高于低浓度以及蒸馏水作用时膨润土的抗剪强度,这是由于低浓度时,溶液中阳离子浓度较小,双电层较厚,膨润土颗粒较为分散,抗剪强度偏低;高浓度时,溶液中阳离子浓度升高,阳离子交换作用增强,双电层被压缩,膨润土颗粒趋于团聚,形成团聚体,从而提高了抗剪强度。

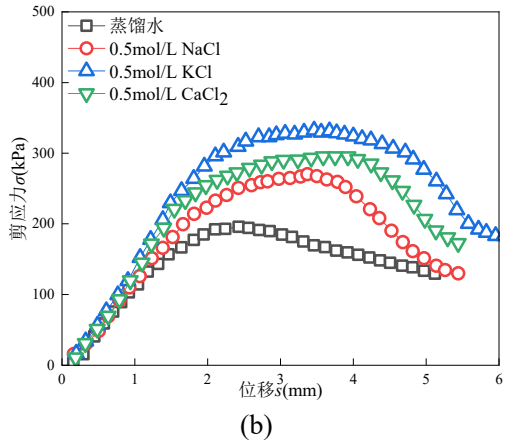
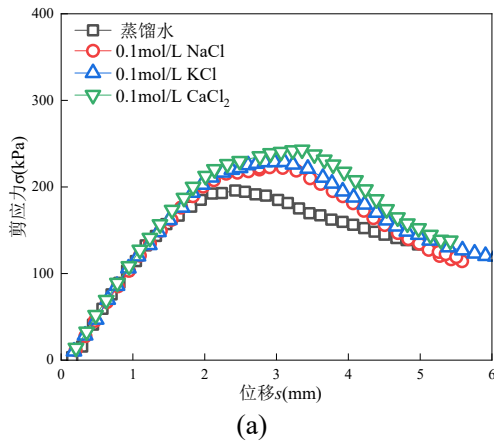


图 3 不同浓度溶液下剪应力与位移的关系

Fig. 3 Relation between shearing stress and displacement under different concentration solutions

MX-80 膨润土在蒸馏水、0.1 mol/L、0.5 mol/L NaCl、KCl 与 CaCl₂ 溶液入渗下峰值强度 τ_f 与竖向

荷载 p 的关系,如图 4 所示。

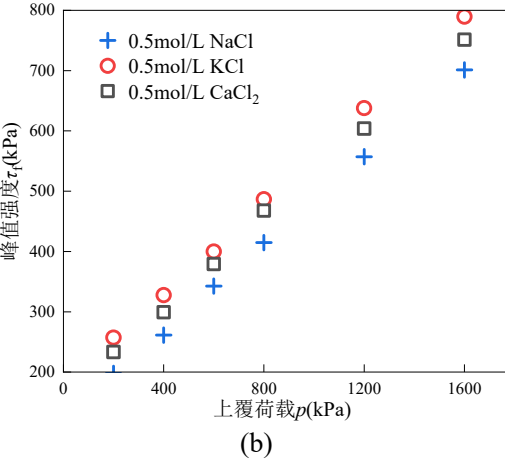
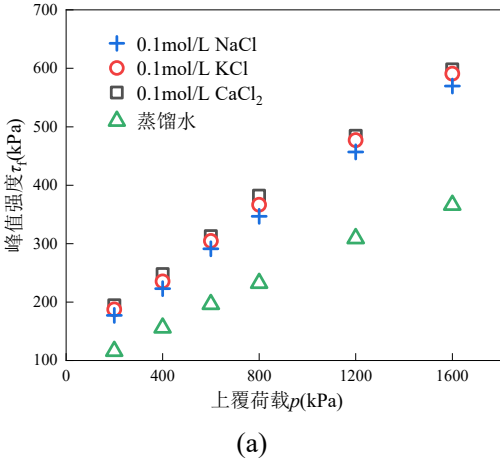


图 4 不同浓度溶液下峰值强度与竖向荷载的关系

Fig. 4 Relation between peak strength and vertical load under different concentration solutions

C·A·库伦(Coulomb,1 773)提出适用黏性土的抗剪强度函数,根据库伦公式,峰值强度 τ_f 与竖向荷载 p 可以用以下公式进行表示:

$$\tau_f = c + p \tan \varphi \quad (2)$$

式中: τ_f 为峰值强度; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; p 为上覆荷载。

根据公式(2)计算可以得到 MX-80 膨润土在不同浓度盐溶液中的黏聚力 c 与摩擦角 φ ,见表 3。从表 3 可以看出,蒸馏水作用下膨润土的黏聚力最小,盐溶液的加入提高了膨润土的黏聚力,且随着溶液浓度的增加黏聚力逐渐增加,这与任卫欣等^[25]发现的结果一致。这主要是由于在水中蒙脱石层间力包括静电斥力和范德华力,且表现出净斥力,而根据扩散双电层理论可知,溶液浓度越大静电斥力越小,使得蒙脱石层间的相互排斥力减小而黏结作用增强。同时可见,不同盐溶液对膨润土黏聚力提高程度表现出不同的规律,当溶液浓度为 0.1 mol/L 时,黏聚力大小次序为 $\text{CaCl}_2 > \text{KCl} > \text{NaCl}$,这是由于盐溶液入渗后, Ca^{2+} 对 Na^+ 进行置换,由于其表面电荷密度较大,对蒙脱石表面的静电引力作用增强,使得膨润土的黏聚力增大;而当溶液浓度为 0.5 mol/L 时,黏聚力次序为 $\text{KCl} > \text{CaCl}_2 > \text{NaCl}$,这是由于高浓度时, K^+ 充分置换 Na^+ 后可能形成较强的 K-O 配位键,这种键合作用使膨润土颗粒分散体系变得更集聚,因此其黏聚力增大。

从表 3 中还可以看出,内摩擦角随着溶液浓度的增加略有增长^[25]。结合 SEM 图像(图 2)可以看出,

在蒸馏水中蒙脱石充分水化形成分散体系,而孔隙水浓度增加后则逐渐转化成絮状体系,颗粒之间的接触更紧密,摩擦力增加。另外,蒙脱石吸水时可在其表面附近形成扩散离子双电层,其中的结合水形成了一种水膜,具有一定润滑效果,使得蒙脱石的摩擦角相对较低,而孔隙溶液浓度增加,水化效果减弱,扩散离子双电层厚度降低,即水膜厚度降低,摩擦加剧。同时内摩擦角也遵循 0.1 mol/L 时 $\text{CaCl}_2 > \text{KCl} > \text{NaCl}$,0.5 mol/L 时 $\text{KCl} > \text{CaCl}_2 > \text{NaCl}$,但相互之间的差距相对较小,反映出阳离子交换对内摩擦角的影响较小。

表 3 不同浓度盐溶液作用下膨润土的 c 与 φ

Tab. 3 c and φ of bentonite under different concentration of salt solutions

指标	水	0.1 mol/L			0.5 mol/L		
		NaCl	KCl	CaCl ₂	NaCl	KCl	CaCl ₂
c	66.2	121.4	129.4	136.4	125.8	181.3	159.4
φ	10.1°	15.4°	15.8°	15.9°	19.1°	20.1°	19.6°

2.3 渗透性能

采用太沙基一维固结理论间接计算 MX-80 压实膨润土的饱和渗透系数^[26,27]。不同溶液下膨润土渗透系数随上覆荷载变化的关系,如图 5 所示。由图可知,盐溶液浓度一定时,膨润土渗透系数随着荷载等级的增大而减小,这是由于荷载等级增大,蒙脱石层间孔隙被压缩^[28],渗流通道变小,渗透系数减小。

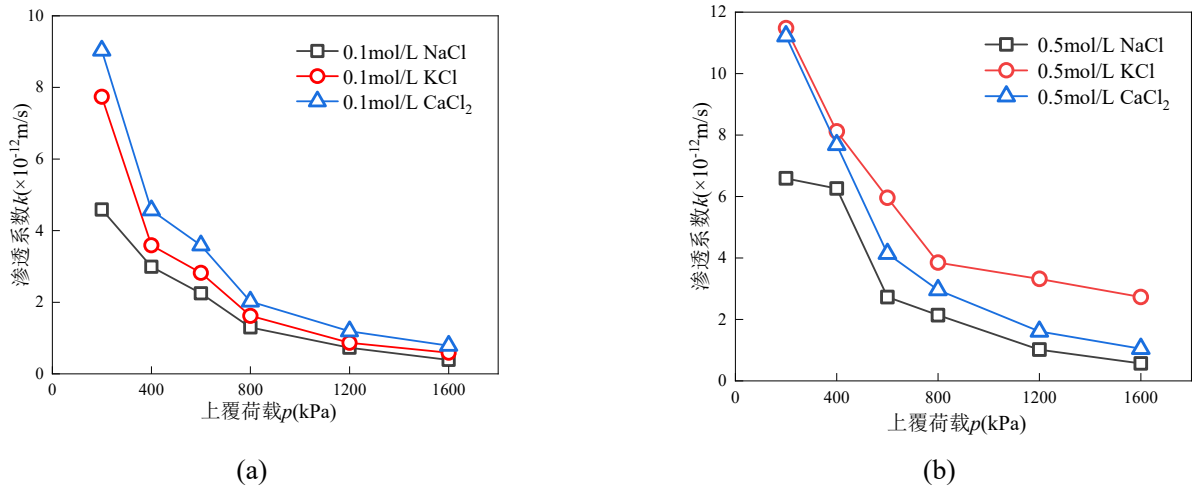


图 5 不同浓度溶液下渗透系数与荷载的关系

Fig. 5 The relationship between permeability coefficient and load in different concentration solutions

图 6 所示为不同阳离子盐溶液中 MX-80 膨润土的压汞(MIP)孔径分布,可以看出,各溶液中压实膨润土试样均呈现出双峰孔径分布,且膨润土孔隙均存在一个主峰,孔径半径 15 nm 左右相对应的峰值随

着溶液浓度升高逐渐降低,而在更大的孔径范围内峰值随溶液浓度的升高逐渐增加,说明溶液浓度增加,渗流通道的大孔径越多,进而导致渗透性能越强。同时,不同阳离子所对应的孔径也表现出不同的变

化趋势,当溶液浓度为 0.1 mol/L 时,大孔径占比 $\text{CaCl}_2 > \text{KCl} > \text{NaCl}$,而当溶液浓度为 0.5 mol/L 时,大孔径占比 $\text{KCl} > \text{CaCl}_2 > \text{NaCl}$,反映出低浓度时 (0.1 mol/L) CaCl_2 溶液中膨润土渗流通道的大孔径最多,高浓度时 (0.5 mol/L) KCl 溶液中膨润土渗流通道的大孔径最多,这导致了低浓度时 CaCl_2 的膨润土渗透性能最强,而高浓度时 KCl 的渗透性能最强。

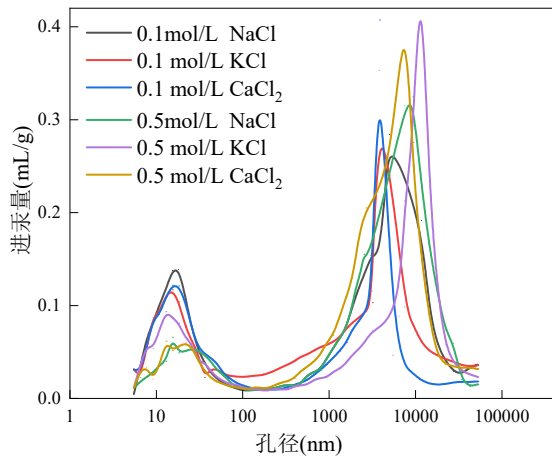


图 6 不同阳离子盐溶液下膨润土的进汞量-孔径分布

Fig. 6 Pore size distribution of bentonite under different cationic salt solutions

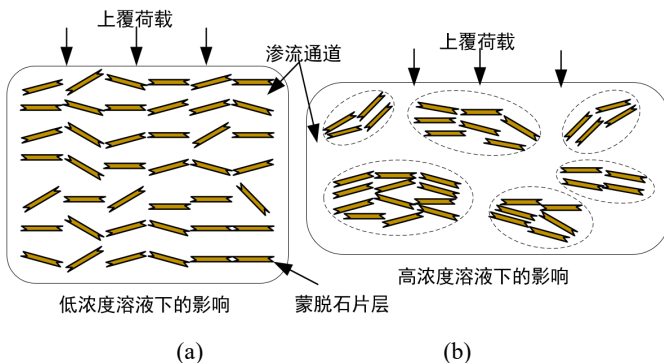


图 7 不同蒙脱石分散状态对渗透性能影响示意图

Fig. 7 Influence of different montmorillonite dispersion states on permeability

当荷载一定时,同种类型盐溶液的渗透系数随着浓度的增大而增大,这主要是由于溶液浓度升高,双电层厚度减小,蒙脱石层间距减小发生团聚。通过 SEM 图(图 2)可以发现,膨润土在水中饱和膨胀时,蒙脱石能形成单层分散体系,渗流发生于层与层之间的微观孔隙(图 7(a))。而浓度增加后蒙脱石层相互聚集,虽然团聚体内蒙脱石间距减小,渗流很难在层间发生,但团聚体之间的宏观孔隙却为渗流提供了优势通道(图 7(b)),蒙脱石团聚现象越严重,形成的团聚体颗粒越大,形成的宏观孔隙的孔径分布也越大(图 6)。

同时还可以看出,当溶液浓度为 0.1 mol/L 时,渗

透系数大小顺序为 $\text{CaCl}_2 > \text{KCl} > \text{NaCl}$;溶液浓度为 0.5 mol/L 时,渗透系数大小顺序为 $\text{KCl} > \text{CaCl}_2 > \text{NaCl}$ 。这是由于离子交换使得蒙脱石层发生了团聚,在低浓度时 Ca^{2+} 容易置换 Na^+ ,由于高电荷密度产生的静电引力使得蒙脱石团聚现象明显,且膨润土间宏观孔隙的孔径分布最大(图 6);而高浓度时 K^+ 也能充分置换 Na^+ ,形成了 K-O 配位键,使得蒙脱石层团聚现象更明显,宏观孔隙孔径分布显著增加(图 6),渗透性能更强。

3 结论

通过对 MX-80 商用钠基膨润土进行不同浓度盐溶液入渗下膨胀变形、抗剪强度以及渗透系数的测试,主要得到以下结论:

1) 盐溶液浓度增加,扩散双电层厚度降低,蒙脱石层间距减小,膨胀性能降低;孔隙水离子浓度的增加会降低蒙脱石层之间的排斥力,使得相互之间的黏聚力增强,促使蒙脱石相互堆叠形成叠堆体,加剧了摩擦,使得抗剪强度增强;团聚降低了层间小孔隙,但增加了颗粒之间的大孔隙,为渗流提供了良好的渗流通道,使得渗透性能增强。

2) 在低浓度 (0.1 mol/L) 时,由于离子交换能力的不同, Ca^{2+} 更容易置换 Na^+ 。同时由于 Ca^{2+} 电荷密度较高,造成蒙脱石层团聚性能增强,层间间距减小,使得 CaCl_2 溶液中膨润土的膨胀性能更小,黏聚力和渗透性能更大。

3) 浓度较高 (0.5 mol/L) 时, K^+ 水合能较低且离子半径小,因 K^+ 半径与晶层中硅氧四面体六联环空间相近,可以形成 K-O 配位键,造成蒙脱石层结合更紧密,团聚程度更强,使得 KCl 溶液中膨润土的膨胀性能最小,黏聚力和渗透性能最大。

参 考 文 献

- [1] 叶为民,王琼,潘虹,等.高压实高庙子膨润土的热传导性能[J].岩土工程学报,2010,32(6):821-826.[YE W M, WANG Q, PAN H, et al. Thermal conductivity of compacted GMZ01 bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(06): 821-826.]
- [2] 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 B, CHEN Z H, LIU Y M, et al. Characteristics of 3D swelling pressure of GMZ001 bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(5): 756-763.]
- [3] 项国圣,姜昊,徐永福.压实膨润土膨胀变形的分形计算方法[J].岩土力学,2015,36(04):1009-1014.[XIANG G S, JIANG H, XU Y F. Fractal calculation method for swelling

- deformation of compacted bentonite[J].Rock and Soil Mechanics,2015,36(04):1009-1014.]
- [4] 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(S2):3861-3865.[(YE W M,SCHANZ.T,QIAN L X,et al.Characteristics of swelling pressure of densely compacted GMZ01 bentonite.[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007(S2):3861-3865.]
- [5] 陈宝,田昌春,郭家兴,等.地下水对压实高庙子膨润土冲蚀作用研究[J].岩土力学,2016,37(11):3224-3230. [CHEN B, TIAN C C, GUO J X, et al.Erosion of compacted Gaomiaozi bentonite by groundwater flow[J].Rock and Soil Mechanics,2016,37(11): 3224-3230.]
- [6] 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(05):885-891.[LI X Y,XU Y F.Calculation of peak shear strength of bentonite in salt solutions[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(5):885-891.]
- [7] 孙文静,刘仕卿,孙德安,等.饱和高庙子膨润土的渗透特性[J].地下空间与工程学报,2015,11(1):115-119. [SUN W J, LIU S Q,SUN D A,et al.Permeability of saturated Gaomiaozi bentonite[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2015,11(1): 115-119.]
- [8] 项国圣,方圆,徐永福.阳离子交换对高庙子钠基膨润土膨胀性能的影响[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(5):931-936.[XIANG G S,FANG Y,XU Y F.Swelling characteristics of GMZ01 bentonite affected by cation exchange reaction[J].Journal of Zhejiang University(Engineering Science),2017,51(5):931-936.]
- [9] 于泽溪,李育超,陈冠.钠质膨润土渗透性与膨胀性及可塑性的相关性[J].哈尔滨工业大学学报,2020,52(11):97-106.[(YU Z X, LI Y C, CHEN G. Correlation between permeability,swelling, and plasticity of sodium bentonite[J].Journal of Harbin Institute of Technology,2020,52(11):97-106.]
- [10] 郭招群,刘俊新,甘建军,等.盐溶液对高庙子钠基膨润土膨胀性能的影响[J].西南科技大学学报,2017,32(3):22-26,10.[(GUO Z Q, LIU J X, GAN J J.The influence of the salt solution on swelling property of Gaomiaozi Na-bentonite[J].Journal of Southwest University of Science and Technology,2017,32(3):22-26+10.]
- [11] ZHANG F,YE W M,WANG Q,et al.An insight into the swelling pressure of GMZ01 bentonite with consideration of salt solution effects[J].Engineering Geology,2019,251:190-196.
- [12] YE W M,ZHANG F,CHEN Y G,et al.Influences of salt solutions and salinization desalinization processes on the volume change of compacted GMZ01 bentonite[J]. Engineering Geology,2017,222:140-145.
- [13] 贾迪,孙德安,张龙.盐溶液及掺砂率对高庙子膨润土强度的影响[J].上海大学学报(自然科学版),2018,24(6):1002-1013.[(JA D, SUN D A, ZHANG L.Effects of saline solution and sand rate on strength of GMZ bentonite[J].Journal of Shanghai University(Natural Science),2018,24(6):1002-1013.]
- [14] 杨俊,童磊,张国栋,等.不同垂直荷重对风化砂改良膨胀土抗剪强度影响研究[J].工程地质学报,2013,21(4):591-597.[(YANG J,TONG L,ZHANG C D,et al.Effects of different vertical loads on shear strength of weathered and modified expansive soil[J].Journal of Engineering Geology,2013,21(4):591-597.]
- [15] 张虎元,刘吉胜,崔素丽,等.石英砂掺量对混合型缓冲回填材料抗剪强度的控制机制[J].岩石力学与工程学报,2010,29(12):2533-2542.[(ZHANG H Y,LU J S,CUI S L,et al.Controlling mechanism of quartz sand content on shear strength of bentonite-sand mixtures as buffer/backfill material[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(12):2533-2542.]
- [16] 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,2012,242:115-123.
- [17] XU Y F.Peak shear strength of compacted GMZ bentonites in saline solution[J].Engineering Geology, 2019,251:93-99.
- [18] 许四法,吴雪辉,胡琦,等.Ca²⁺浓度对膨润土掺砂混合土渗透性能的影响[J].岩土工程学报,2017,39(6): 1145-1150.[(XU S F,WU X H,HU Q. Influence of Ca²⁺ concentration on hydraulic properties of bentonite-sand mixtures[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017,39(6):1145-1150.]
- [19] 徐超,李志斌,高彦斌.溶液特征对 GCL 膨胀和渗透特性的影响[J].同济大学学报:自然科学版,2009,37(1): 36-40.[(XU C,LI Z B,GAO Y B.Influence solution of characteristics on swelling and hydraulic performance geosynthetic clay liner[J].Journal of Tongji University (Natural Science),2009,37(1):36-40.]
- [20] CASTELLANO 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: 516-526.

- [21] JO H Y, KATSUMI T, BENSON C H, et al. Hydraulic conductivity and swelling of nonprehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(7): 557-567.
- [22] YAMAGUCHI T, SAKAMOTO Y, AKAI M, et al. Experimental and modeling study on long-term alteration of compacted bentonite with alkaline groundwater[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2007, 32(1-7): 298-310.
- [23] 廖饶平, 陈永贵, 刘聪, 等. 高压实膨润土与孔隙溶液物理作用机制研究进展[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(12): 2465-2475. [LIAO R P, CHEN Y G, LIU C. Advances in physical interaction mechanism between highly compacted bentonite and pore solution[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(12): 2465-2475.]
- [24] XIANG G, YE W, JALAL F E, et al. Shear strength of bentonite saturated with saline solutions exhibiting variety of cations[J]. *Engineering Geology*, 2022, 298: 106537.
- [25] 任卫欣, 曹胜飞, 戴文杰, 等. 高放废物处置库缓冲材料剪切特性研究进展[J/OL]. *材料导报*, 1-21[2025-07-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.tb.20250428.2123.018.html>. [REN W X, CAO S F, DAI W J. Progress on the shear characteristics of buffer materials for high-Level radioactive waste repositories [J/OL]. *Materials Reports*, 1-21. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.tb.20250428.2123.018.html>.]
- [26] MISHRA A K, OHTSUBO M, LI L, et al. Controlling factors of the swelling of various bentonites and their correlations with the hydraulic conductivity of soil-bentonite mixtures[J]. *Applied Clayence*, 2011, 52(1-2): 78-84.
- [27] DEMDOUM A, GUEDDOUDA M K, GOUAL. Effect of water and leachate on hydraulic behavior of compacted bentonite, calcareous sand and tuff mixtures for use as landfill liners[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2017, 35(6): 2677-2696.
- [28] 胡志杰, 项国圣, 付文青, 等. 荷载-溶液作用下膨润土压缩渗透性能研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2023, 19(6): 1851-1858. [Hu Z J, Xiang G S, Fu W Q. Investigation on compression and permeability behaviour of bentonite with the coupling of load-solution[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2023, 19(6): 1851-1858.

Effects of Different Cationic Salt Solutions on Mechanical Properties of MX-80 Bentonite

XIANG Guosheng¹, WANG Xinxin¹, HUANG Jinkun², SONG Shaohui¹, SHAO Feiyang¹, JIN Rencai²

(1. Department of Civil Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China;

2. China MCC17 Group Co., Ltd. Ma'anshan, Anhui 243002, China)

Abstract: [Objective] Study the changes in mechanical properties of bentonite under the erosion of saline groundwater and evaluate its impact on the safe operation of deep geological repositories. [Methods] By simulating the groundwater environment of deep geological repositories, the swelling consolidation tests, shear tests and hydraulic tests of MX-80 bentonite under the erosion of different concentrations of salt solutions (NaCl, KCl, CaCl₂) were carried out to explore the variation law of the mechanical properties of bentonite under the erosion of saline groundwater. [Result] The results show that: ① As the solution concentration increases, the interlayer spacing of montmorillonite decreases, and the swelling rate reduces; the aggregates of montmorillonite coalesce, and the shear strength and permeability coefficient increase. ② Ion exchange reactions occur between Ca²⁺, K⁺ and montmorillonite. At a low concentration (0.1 mol/L), the ion exchange reaction between Ca²⁺ and montmorillonite is dominant, and the order of swelling rate is NaCl > KCl > CaCl₂; at a high concentration (0.5 mol/L), K⁺ fully replaces Na⁺ and forms a strong K-O coordination bond, and the order of swelling rate is NaCl > CaCl₂ > KCl. ③ The extent to which different salt solutions increase the cohesion of MX-80 bentonite varies. At a low concentration (0.1 mol/L), the order of cohesion is CaCl₂ > KCl > NaCl. At a high concentration (0.5 mol/L), the

order is $\text{KCl} > \text{CaCl}_2 > \text{NaCl}$. The internal friction angle follows the same sequence, but the effect of cation exchange on the internal friction angle is relatively small. ④ The pore size variation trends of bentonite flow channels in solutions of different cationic salts are different. At low concentration (0.1 mol/L), the largest pore size of bentonite flow channels in CaCl_2 solution is the greatest, and the permeability coefficient is $\text{CaCl}_2 > \text{KCl} > \text{NaCl}$. However, at high concentration (0.5 mol/L), the largest pore size of bentonite flow channels in KCl solution is the greatest, and the permeability coefficient is $\text{KCl} > \text{CaCl}_2 > \text{NaCl}$. **[Conclusion]** The mechanism of the change in mechanical properties of bentonite under the action of salt solutions was revealed, providing a theoretical basis for the design and safety assessment of the buffer barrier system in deep geological repositories for high-level radioactive waste.

Keywords: MX-80 bentonite; Swelling; Shear strength; K-O coordination bond; Permeability coefficient

