

DOI:10.11918/201907039

# 钠质膨润土渗透性与膨胀性及可塑性的相关性

于泽溪<sup>1,2</sup>, 李育超<sup>1,2</sup>, 陈冠年<sup>1,2</sup>

(1. 软弱土与环境土工教育部重点实验室(浙江大学), 杭州 310058; 2. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310058)

**摘要:** 盐溶液与钠质膨润土的化学相容性研究对评估防污屏障的服役性能起到重要作用, 为此, 采用渗透试验、自由膨胀试验和界限含水率试验研究不同浓度的 NaCl 溶液和 CaCl<sub>2</sub> 溶液对钠质膨润土渗透性、膨胀特性、可塑性的影响规律. 结果表明, 随着溶液中阳离子浓度增加, 钠质膨润土的渗透系数增大, 膨胀指数先增长再下降, 塑性指数减小; 相同浓度下, 钠质膨润土在 NaCl 溶液中的渗透系数低于在 CaCl<sub>2</sub> 溶液中的渗透系数, 膨胀指数高于 CaCl<sub>2</sub> 溶液中的膨胀指数, 塑性指数高于 CaCl<sub>2</sub> 溶液中的塑性指数; 12~800 kPa 的固结压力范围内, 在 CaCl<sub>2</sub> 溶液中, 渗透系数分别与膨胀指数、塑性指数具有较好的相关性; 在 NaCl 溶液中, 当溶液浓度超过临界浓度(200 mmol/L)时, 渗透系数与膨胀指数、塑性指数也具有较好的相关性. 因此, 界限含水率测试和自由膨胀试验可作为工程中初选渗透系数的手段.

**关键词:** 钠质膨润土; 渗透系数; 膨胀指数; 界限含水量; 结合水

**中图分类号:** TU47; X50 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)11-0097-10

## Correlation between permeability, swelling, and plasticity of sodium bentonite

YU Zexi<sup>1,2</sup>, LI Yuchao<sup>1,2</sup>, CHEN Guannian<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering (Zhejiang University), Ministry of Education, Hangzhou 310058, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** The chemical compatibility study between salt solution and sodium bentonite plays an important role in evaluating the service performance of the antifouling barrier. Effects of different concentrations of NaCl solution and CaCl<sub>2</sub> solution on the permeability, swelling characteristics, and plasticity of sodium bentonite were studied by hydraulic conductivity test, free swell test, and water ratio limit test. Experimental results show that as the concentration of the cations in the solution increased, the hydraulic conductivity of the sodium bentonite increased, the swell index first increased and then decreased, and the plasticity index decreased. At the same concentration, the hydraulic conductivity of the sodium bentonite in NaCl solution was lower than that in CaCl<sub>2</sub> solution, and the swell index and plasticity index were both higher than those in CaCl<sub>2</sub> solution. Within the consolidation pressure range of 12~800 kPa, the hydraulic conductivity had a strong correlation with the swell index and plasticity index in CaCl<sub>2</sub> solution; in NaCl solution, when the solution concentration exceeded the critical concentration (200 mmol/L), the hydraulic conductivity also had a strong correlation with the swell index and plasticity index. Therefore, it is feasible to replace the hydraulic conductivity test with water ratio limit test and free swell test.

**Keywords:** sodium bentonite; hydraulic conductivity; swell index; water ratio limit; bound water

膨润土是一种蒙脱石含量为 70%~95% 的黏土. 蒙脱石比表面积大(800 m<sup>2</sup>/g)且带有大量的负电荷<sup>[1]</sup>, 在水化过程中可吸附大量的阳离子和水分子, 使蒙脱石层间距离增加, 体积增大数倍<sup>[2-3]</sup>, 可阻碍自由水流动, 因此膨润土具有低渗透性<sup>[4-5]</sup>. 蒙脱石层间的阳离子以一价钠离子为主的膨润土和以二价钙离子为主的膨润土分别为钠质膨润土和钙质膨润土. 相比钙质膨润土, 钠质膨润土的剩余表面电荷和可交换 Na<sup>+</sup> 的量较多, 以上特征使钠质膨润土

具有较强的水化膨胀能力和低渗透性<sup>[6]</sup>, 因此, 钠质膨润土被广泛用作填埋场与污染场地防污屏障材料. 防污屏障利用低渗透性的土质或人工材料对污染物或受污染土水进行围封<sup>[7]</sup>, 将地下污染源与周边水土隔离, 可有效防止填埋场和污染场地中的污染液(渗滤液或污水)扩散至周边的地下水或土壤.

防污屏障根据其布置形式及功能分为水平屏障和垂直屏障. 与其他水平屏障和垂直屏障相比(如压实黏土衬垫、水泥系隔离墙等), 土工聚合黏土衬垫(GCL)和膨润土系隔离墙具有防渗能力强、成本低廉等优点, 在污染水土风险管控和治理中得到广泛应用<sup>[8]</sup>. 然而, 填埋场中的渗沥液、污染场地中被污染的地下水及沿海地区的地下水含有大量离子, 防污屏障中的膨润土与之发生化学反应后渗透系数

收稿日期: 2019-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(41672284)

作者简介: 于泽溪(1994—), 女, 硕士研究生;

李育超(1978—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 李育超, 21612201@zju.edu.cn

大幅度增加,对污染物的阻滞功能减弱<sup>[9]</sup>,甚至达不到相关规范的要求. Shackelford 等<sup>[10]</sup>将化学溶液对膨润土工程特性(如渗透特性、膨胀特性和固结特性等)的影响称为膨润土与化学溶液的化学相容性,其是评价膨润土服役性能的重要指标. 因此,设计防污屏障时,必须考虑膨润土与盐溶液的化学不相容造成的不利影响,以避免防污屏障渗透系数过小评价造成服役寿命的错误评估.

目前,国内外关于盐溶液与钠质膨润土的化学相容性进行了一些研究. Jo 等<sup>[11]</sup>通过试验分析了盐溶液中阳离子的浓度和价态对膨润土渗透性和膨胀特性的影响,试验结果显示,随着阳离子浓度的增加,钠质膨润土的渗透系数增大、膨胀指数减小;相同浓度下,随阳离子价态升高,钠质膨润土的渗透系数增大、膨胀指数减小,但未研究渗透系数和膨胀指数变化间的相关性. Katsumi 等<sup>[12]</sup>通过试验分析了盐溶液中阳离子的浓度和价态对膨润土液限的影响,试验结果显示,随着阳离子浓度的增加,钠质膨润土的液限减小;相同浓度下,随阳离子价态升高,钠质膨润土的液限减小. Katsumi 等<sup>[12]</sup>未研究渗透系数和液限变化间的相关性.

本文以膨胀指数和塑性指数作为评价指标,采

用不同浓度的 NaCl 溶液和 CaCl<sub>2</sub> 溶液作为试验溶液,通过自由膨胀试验、界限含水率试验和不同压力下的渗透试验,研究盐溶液对钠质膨润土渗透性和基本物理特性的影响,探究固结压力对膨润土渗透系数变化的影响,并根据试验结果分析膨胀指数、塑性指数与渗透系数之间变化的相关性,提出将操作简便、试验周期短的自由膨胀试验和界限含水量试验作为工程中初选渗透系数的手段,并评估其可行性.

## 1 试 验

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 钠质膨润土

采用的膨润土是美国怀俄明膨润土,通过 X 射线衍射分析测得该膨润土的矿物组成质量分数为 71.4% 蒙脱石、12.3% 石英、12.7% 中长石、3.6% 伊利石,通过比重瓶法测得颗粒相对体积质量为 2.55,通过液塑限联合测定法测得液限和塑限(去离子水)分别为 267.0 和 24.8,塑性指数为 242.2,通过自由膨胀试验测得膨胀指数(去离子水)为 26.5 mL/2 g. 通过快速法测试的阳离子交换量和 Shackelford 等<sup>[13]</sup>测试的怀俄明膨润土阳离子交换量见表 1.

表 1 膨润土的阳离子交换量  
Tab.1 Cation exchange capacity of bentonite cmol·kg<sup>-1</sup>

| 方法          | 阳离子交换量 | 可交换阳离子量        |                 |                 |                 | 可交换阳离子总量 |
|-------------|--------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|
|             |        | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | Ca <sup>+</sup> | Mg <sup>+</sup> |          |
| 本文          | 76.5   | 0.03           | 47.4            | 12.8            | 5.4             | 65.7     |
| Shackelford | 62.9   | 1.30           | 29.8            | 18.6            | 7.4             | 57.1     |

由表 1 可知,除 Na<sup>+</sup> 的可交换阳离子量略高于 Shackelford 等<sup>[13]</sup>的测试结果,其他离子的可交换阳离子量基本一致. 根据 GB/T 20973—2007《膨润土》<sup>[14]</sup>,怀俄明膨润土为钠质膨润土.

#### 1.1.2 试验溶液

收集测试了江苏沿海多地的地下水阳离子浓度,见表 2. Na<sup>+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 为浓度最多的阳离子,故采用 NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 两种溶液作为试验溶液,对比一价

和二价阳离子对膨润土膨胀特性、界限含水量和渗透性的影响规律. 另外,采用去离子水进行相关试验,为化学相容性的试验结果对比分析提供基础数据. 由表 2 可知,调查城市的地下水中一价阳离子和二价离子的常见浓度分别为 100 和 20 mmol/L. 为获取较为完整的变化规律,试验选取较大的浓度范围,见表 3.

表 2 江苏典型沿海城市地下水阳离子浓度  
Tab.2 Cation concentration of groundwater in typical coastal cities of Jiangsu province

| 地区       | c/(mmol·L <sup>-1</sup> ) |                  |                |                  |
|----------|---------------------------|------------------|----------------|------------------|
|          | Na <sup>+</sup>           | Ca <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | Mg <sup>2+</sup> |
| 江苏连云港    | 466.2                     | 11.2             | 7.2            | 57.9             |
| 江苏盐城(大丰) | 80.9                      | 9.9              | 0.6            | 6.6              |
| 江苏盐城(滨海) | 135.7                     | 11.4             | 2.9            | 15.6             |
| 江苏靖江     | 136.0                     | 11.0             | —              | —                |

表 3 钠质膨润土工程特性相关性试验方案

Tab. 3 Engineering characteristic correlation test scheme of sodium bentonite

| c(溶液)/(mmol·L <sup>-1</sup> ) | 自由膨胀试验 |                   | 界限含水量试验 |                   | 渗透试验 |                   |
|-------------------------------|--------|-------------------|---------|-------------------|------|-------------------|
|                               | NaCl   | CaCl <sub>2</sub> | NaCl    | CaCl <sub>2</sub> | NaCl | CaCl <sub>2</sub> |
| 0.5                           |        | ✓                 |         |                   |      |                   |
| 1                             | ✓      | ✓                 |         |                   |      |                   |
| 2                             | ✓      | ✓                 |         |                   |      |                   |
| 5                             | ✓      | ✓                 |         | ✓                 |      | ✓                 |
| 10                            | ✓      | ✓                 |         |                   |      |                   |
| 20                            | ✓      | ✓                 | ✓       | ✓                 | ✓    | ✓                 |
| 50                            | ✓      | ✓                 |         |                   |      |                   |
| 75                            |        | ✓                 |         |                   |      |                   |
| 100                           | ✓      | ✓                 | ✓       | ✓                 | ✓    | ✓                 |
| 200                           | ✓      | ✓                 | ✓       | ✓                 | ✓    |                   |
| 500                           | ✓      | ✓                 | ✓       | ✓                 | ✓    | ✓                 |
| 1 000                         | ✓      | ✓                 | ✓       |                   | ✓    |                   |
| 2 000                         | ✓      |                   |         |                   |      |                   |

1.1.3 膨润土泥浆制备

本文试验的泥浆由质量分数 6% 的膨润土和 94% 的盐溶液或去离子水制成,其制备方法为:采用自动搅拌器将怀俄明膨润土与盐溶液或去离子水以 800 r/min 的转速搅拌 15 min 制成泥浆,将所制泥浆倒入烧杯中密封静置 24 h 后,再次用自动搅拌器以 800 r/min 的转速搅拌 5 min,然后进行相关试验.

1.2 试验方法

1.2.1 自由膨胀试验

自由膨胀试验参照 ASTM D5890<sup>[15]</sup>,将 2 g 烘干的膨润土加入 100 mL 盐溶液中,静置 24 h 后记录量筒中沉降后膨润土的体积.还测试上清液中 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 4 种阳离子的浓度.

1.2.2 界限含水率试验

采用液、塑限联合测定法测定膨润土的界限含水量,试验步骤参照 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》<sup>[16]</sup>.用盐溶液将钠质膨润土调成 3 种不同稠度状态的试样,放入调土皿中,浸润 24 h.使用联合测定仪测试圆锥在 3 个试样中的下沉深度,并测量 3 个试样的含水量.

1.2.3 渗透试验

结合改进滤失试验和柔壁渗透仪测试方法进行渗透试验.改进滤失试验源自滤失试验<sup>[17]</sup>,该方法能够快速、简便地测试膨润土泥饼的渗透系数<sup>[18-20]</sup>.由于膨润土泥饼的有效应力沿高度方向变化——泥饼顶部的有效应力为零,泥饼底部的有效应力等于施加的气压,泥饼的孔隙比沿高度方向是不均匀的,泥饼的渗透系数沿高度方向变化<sup>[18]</sup>.采用改进滤失试验只能得到膨润土试样的垂直等效渗

透系数.使用柔壁渗透仪测试膨润土泥饼的渗透系数,可得到整个试样在有效应力相同条件下的渗透系数.

柔壁渗透试验中膨润土泥饼的制作方法是整个过程的关键步骤,本文提出了以下方法.将泥浆注入 RCLF-1A 型中压滤失仪中,接通气压并将压力调至 12 kPa 进行压滤.压滤结束后抽取剩余的上覆泥浆,将定制的杯型橡胶膜套在中压滤失仪上(见图 1(a)).向橡胶膜中注满水,并在泥饼顶部放置表面平整的重物(见图 1(b)),接通气压并将压力调至 12 kPa.橡胶膜中的水将压力传递给膨润土泥饼使其继续固结,固结时间为 24 h(见图 1(c)),得到有效应力均匀的膨润土泥饼,泥饼的高度约为 20 mm(见图 1(d)).

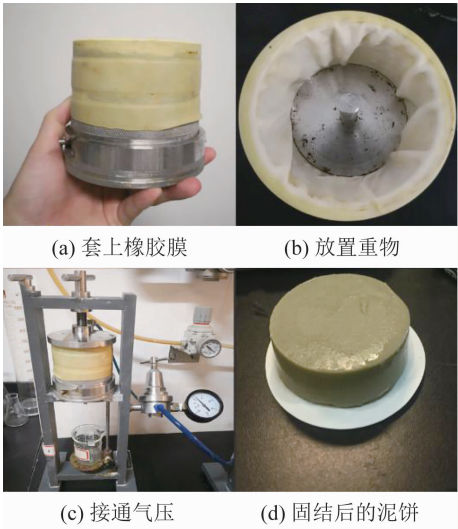


图 1 膨润土泥饼的制备过程

Fig. 1 Preparation process of bentonite cake

将直径为 70 mm 的环刀缓慢的垂直压入膨润土泥饼中,获得直径为 70 mm 的膨润土泥饼.将取得的膨润土泥饼试样放置在柔壁渗透仪底座的透水石上进行装样.采用柔壁渗透仪对膨润土泥饼分级加载,施加的有效固结应力为 12, 25, 50, 100, 200, 400, 800 kPa, 对应的渗透系数测试采用的压差为 6, 14, 24, 60, 126, 260, 260 kPa.

当试验满足 ASTM D5084<sup>[21]</sup> 标准后即可计算膨润土泥饼的渗透系数,需同时满足:1) 在最后连续 3 次的测试中,每个渗透压差下的顶帽入流量与底座出流量的比值在 0.75 ~ 1.25;2) 每个压差下的渗透试验,最后 3 次测得的流量值应在平均流量值的 0.75 ~ 1.25;3) 在最后 3 次测试中,顶帽入流量和底座出流量不应该有显著的上升或下降的趋势.

## 2 试验结果

### 2.1 膨胀指数

#### 2.1.1 溶液阳离子浓度对膨胀指数的影响

采用不同浓度 NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 溶液测得的膨胀指数见图 2.膨润土在去离子水中的膨胀指数 26.5 mL/2 g.随着 NaCl 溶液和 CaCl<sub>2</sub> 溶液浓度增加,膨胀指数都先增长再减小:在 20 mmol/L NaCl 溶液中膨胀指数达到峰值 42.5 mL/2 g,比在去离子水中增加了 16 mL/2 g.当 NaCl 溶液的浓度从 200 mmol/L 增加到 500 mmol/L 时,膨胀指数下降速度最为显著,从 28.5 mL/2 g 陡降至 11.5 mL/2 g,占总下降值的 45.3%.当 NaCl 溶液浓度大于 1 000 mmol/L 时,膨胀指降低至 5 mL/2 g 左右,趋于稳定不再变化;在 5 mmol/L CaCl<sub>2</sub> 溶液中,膨胀指数达到峰值 38 mL/2 g,比在去离子水中增大了 11.5 mL/2 g.当 CaCl<sub>2</sub> 溶液的浓度从 5 mmol/L 增加到 10 mmol/L 时,膨胀指数下降速度最为显著,从 38 mL/2 g 陡降至 18 mL/2 g,占总下降值的 62.5%.当 CaCl<sub>2</sub> 溶液的浓度大于 100 mmol/L 时,膨胀指降低至 6 mL/2 g 左右,阳离子浓度的变化对膨胀指数的影响较小.

#### 2.1.2 溶液阳离子价态对膨胀指数的影响

阳离子价态对膨润土膨胀指数的影响见图 2.除了浓度很低 ( $\leq 5$  mmol/L) 时,相同浓度下,膨润土在 NaCl 溶液中的膨胀指数均高于 CaCl<sub>2</sub> 溶液中的膨胀指数.因此,二价阳离子对膨润土膨胀性能的抑制作用强于一价阳离子.膨润土在不同浓度的溶液中,其膨胀指数受阳离子价态的影响程度不同.从试验结果上看,中等浓度 (20 ~ 100 mmol/L) 下阳离子价态对膨胀指数的影响最大.膨润土在 NaCl 溶液中的膨胀指数比 CaCl<sub>2</sub> 溶液中高出 22 ~ 28 mL/2 g,差距非常明显;当溶液浓度很高 ( $\geq 1\ 000$  mmol/L) 时,

膨润土在 NaCl 溶液和 CaCl<sub>2</sub> 溶液中的膨胀指数都下降至 5 mL/2 g 左右,二者非常接近,阳离子价态的变化对膨胀指数基本没有影响.

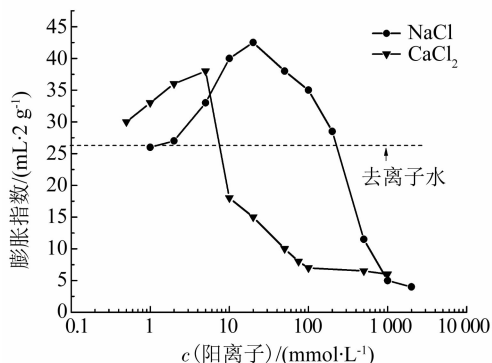


图 2 阳离子浓度和价态对膨润土膨胀指数的影响

Fig. 2 Effect of concentration and valence of cation on swell index of bentonite

总体上,一价阳离子溶液中膨润土的膨胀指数变化程度更大:当膨胀指数呈上升趋势时,膨润土的膨胀体积在 NaCl 溶液中增加了 16.5 mL/2 g,在 CaCl<sub>2</sub> 溶液中只增加了 8 mL/2 g;当膨胀指数呈下降趋势时,膨润土的膨胀体积在 NaCl 溶液中减少了 38.5 mL/2 g,在 CaCl<sub>2</sub> 溶液中减少了 32 mL/2 g.

#### 2.1.3 讨论

钠质膨润土水化膨胀分为两个阶段:结晶膨胀和渗透膨胀<sup>[1,22-23]</sup>.渗透膨胀是影响钠质膨润土膨胀特性的关键因素,而蒙脱石层间一价阳离子的数量及阳离子的总浓度是影响渗透膨胀的关键因素<sup>[24-25]</sup>.一价阳离子数量越多、阳离子总浓度越低,渗透膨胀发生后蒙脱石层间距离越大,膨润土的膨胀特性越好<sup>[6,11,13,26]</sup>.

根据试验溶液的原浓度和上清液中离子浓度的测试结果,可计算出膨润土中蒙脱石层间阳离子的变化,结果见图 3.在 NaCl 溶液中,当溶液浓度很低 ( $< 20$  mmol/L) 时,膨润土释放  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ,阳离子总浓度降低,层间一价阳离子数量减少,二者对渗透膨胀起相反的作用.当溶液浓度较高 ( $\geq 20$  mmol/L) 时,膨润土释放  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ,吸收  $\text{Na}^+$ ,吸收阳离子量大于释放阳离子量,因此,阳离子总浓度升高,层间一价阳离子数量增加,二者也对渗透膨胀起相反的作用.因此,存在某一最优浓度 ( $c(\text{Na}^+) = 20$  mmol/L),最有助于膨润土的渗透膨胀,在该浓度下钠质膨润土的膨胀指数达到峰值.当溶液浓度很低 ( $< 20$  mmol/L) 时,蒙脱石层间一价阳离子数量是影响渗透膨胀的主要因素,随浓度增加,  $\text{Na}^+$  释放量减小,一价阳离子数量增加,因此,膨胀指数增大.当溶液浓度较高 ( $> 20$  mmol/L) 时,蒙

脱石层间阳离子总浓度是影响渗透膨胀的主要因素,随浓度增加,Na<sup>+</sup>吸收量远远超过 K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 释放量的总和,阳离子总浓度增加,因此,膨胀指数减小.

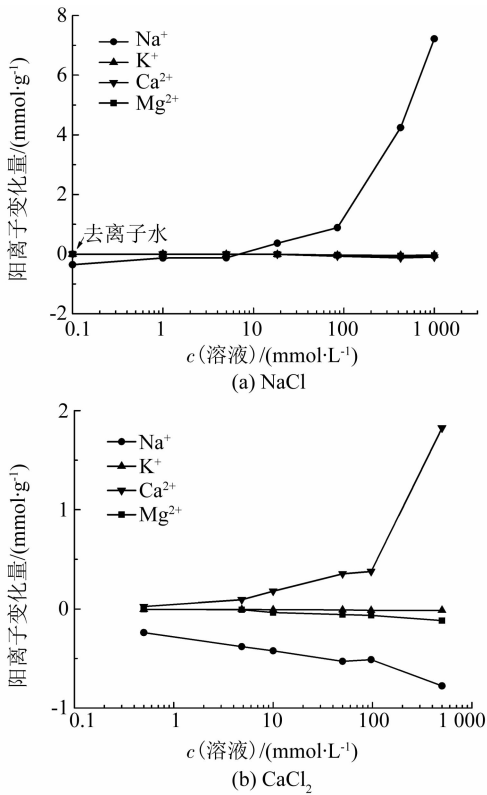


图 3 膨润土自由膨胀试验中阳离子变化量

Fig. 3 Cation variation of bentonite during free swell test

在 CaCl<sub>2</sub> 溶液中, Ca<sup>2+</sup> 会置换蒙脱石层间的 Na<sup>+</sup>. 随溶液浓度增加,膨润土吸收 Ca<sup>2+</sup> 量和释放 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 量增大. 相比 Na<sup>+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 的变化量很小. 膨润土释放的 Na<sup>+</sup> 量高于吸收的 Ca<sup>2+</sup>, 中低浓度 (≤100 mmol/L) 下, 阳离子总浓度降低, 层间一价阳离子数量减少, 二者对渗透膨胀起相反的作用, 存在某一最优浓度 (c (Ca<sup>2+</sup>) = 5 mmol/L), 最有助于膨润土的渗透膨胀, 在该浓度下膨润土的膨胀指数达到峰值. 当溶液浓度很低 (<5 mmol/L) 时, 蒙脱石层间阳离子总浓度是影响渗透膨胀的主要因素, 随浓度增加, 阳离子的净释放量增加, 阳离子总浓度减小, 膨胀指数增大. 当溶液浓度较高 (>5 mmol/L) 时, 蒙脱石层间一价阳离子数量是影响渗透膨胀的主要因素, 随浓度增加, Na<sup>+</sup> 释放量增大, 一价阳离子数量减少, 膨胀指数降低. 当溶液浓度很高 (=500 mmol/L) 时, 膨润土吸收的 Ca<sup>2+</sup> 量高于释放的 Na<sup>+</sup> 量, 阳离子总浓度升高, 层间一价阳离子数量减少, 二者皆不利于渗透膨胀, 膨胀指数减小. 因此, 膨润土的膨胀指数在 CaCl<sub>2</sub> 溶液中先增大再减小.

Ca<sup>2+</sup> 会置换蒙脱石层间的一价阳离子 (Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>), 导致层间距离被压缩. 因此, 在相同浓度下 (除浓度很低 (≤5 mmol/L) 时), 相比 NaCl 溶液, 在 CaCl<sub>2</sub> 溶液中膨润土的膨胀性更差. 当溶液浓度很高 (≥1 mol/L) 时, 蒙脱石层间距离被压缩至极限, 因此, 膨润土的膨胀指数不受价态的影响.

2.2 界限含水量

2.2.1 溶液阳离子浓度对界限含水量的影响

阳离子浓度对膨润土塑限和液限的影响见图 4. 塑限随 NaCl 溶液和 CaCl<sub>2</sub> 溶液浓度增加而增大, 当 NaCl 溶液的浓度从 20 mmol/L 增加到 1 000 mmol/L 时, 塑限从 31.4 增加到 41.0; 当 CaCl<sub>2</sub> 溶液的浓度从 5 mmol/L 增加到 500 mmol/L 时, 塑限从 29.5 增加到 37.9. 膨润土塑限增长的速度随溶液浓度的增加变缓.

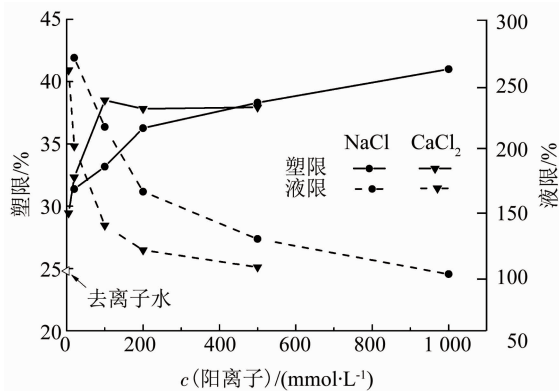


图 4 阳离子浓度和价态对膨润土塑限和液限的影响

Fig. 4 Effect of concentration and valence of cation on plastic limit and liquid limit of bentonite

液限随 NaCl 溶液和 CaCl<sub>2</sub> 溶液浓度增加而减小, 当 NaCl 溶液浓度从 20 mmol/L 增加到 1 000 mmol/L 时, 液限从 269.2 下降到 95.6; 当 CaCl<sub>2</sub> 溶液的浓度从 5 mmol/L 增加到 500 mmol/L 时, 液限从 259.2 下降到 101.1. 当浓度较低 (c (Na<sup>+</sup>) ≤200 mmol/L、c (Ca<sup>2+</sup>) ≤100 mmol/L) 时, 液限下降的速度十分显著. 随着溶液浓度的增加, 液限下降的速度逐渐变缓. 阳离子浓度的变化对膨润土塑限的影响不大, 对膨润土液限的影响明显.

2.2.2 溶液阳离子价态对界限含水量的影响

阳离子价态对膨润土塑限和液限的影响见图 4. 去离子水制成的膨润土试样的塑限和液限分别为 24.8 和 267.0. 相同浓度下, CaCl<sub>2</sub> 溶液制成试样的塑限大于 NaCl 溶液制成的试样, 且二者的塑限都大于去离子水配成试样的塑限. 由此可见, 离子价态越高, 塑限越大. 但是, 总体上离子价态对膨润土塑限的影响较小. 相同浓度下, CaCl<sub>2</sub> 溶液和 NaCl 溶液制成的试样, 二者之间塑限的差距不超过 5. 当溶



液的浓度很高 ( $\geq 500$  mmol/L) 时, 二者的塑限基本相同。

相同浓度下, NaCl 溶液制成试样的液限大于  $\text{CaCl}_2$  溶液制成的试样, 且二者的液限都小于去离子水配成试样的液限 (除 20 mmol/L NaCl 溶液配成试样的液限为 269.2, 略高于去离子水制成的试样)。结果表明, 离子价态越高, 液限越小。随着浓度的增加, 两种溶液制成试样液限之间的差异减小, 其他研究也得到相同的规律<sup>[27]</sup>。中等浓度 ( $\leq 100$  mmol/L) 下, NaCl 溶液制成试样液限比  $\text{CaCl}_2$  溶液制成试样的液限高 70 左右。当溶液浓度很高 ( $= 500$  mmol/L) 时, NaCl 溶液制成试样的液限仅比  $\text{CaCl}_2$  溶液制成试样的液限高 22.5。

当黏土的含水量接近液限时, 土颗粒之间被自由水隔开, 土体不能承受任何剪应力, 而呈流动状态。盐溶液浓度增加会导致膨润土中蒙脱石层间结合水含量减小, 即膨润土水化所需结合水含量降低、自由水更早出现。因此, 随着溶液浓度增加, 液限下降明显。相同浓度下, 在  $\text{CaCl}_2$  溶液中膨润土水化所需结合水含量更少。因此, 离子价态越高, 液限越小。

### 2.2.3 溶液阳离子对膨润土结合水含量的影响

由于阳离子的存在会使膨润土的塑限增大、液限减小, 所以, 随着溶液浓度的增加, 塑性指数呈下降趋势。当 NaCl 溶液的浓度从 20 mmol/L 增加到 500 mmol/L 时, 塑性指数从 237.8 下降到 54.6; 当  $\text{CaCl}_2$  溶液的浓度从 5 mmol/L 增加到 200 mmol/L 时, 塑性指数从 229.7 下降到 63.2。相比液限, 阳离子价态和浓度对塑限的影响非常小。因此, 膨润土塑性指数的变化规律与液限非常接近, 见图 5。

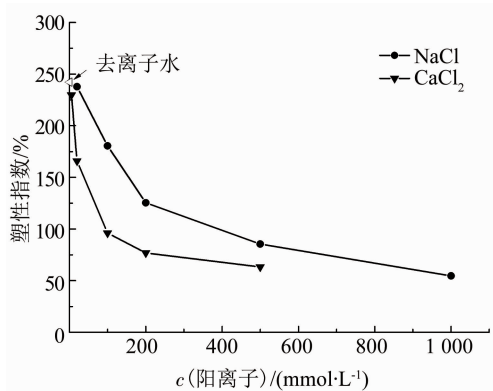


图 5 阳离子浓度和价态对膨润土塑性指数的影响

Fig. 5 Effect of concentration and valence of cation on plasticity index of bentonite

塑性指数越小, 膨润土处于可塑状态的含水量范围越小, 这就代表膨润土中结合水的可能含量越小。当溶液浓度很低时, 阳离子对于塑性指数的影响很小。随着溶液浓度的增加, 溶液中的阳离子与膨润

土中的阳离子发生置换, 使膨润土中蒙脱石层间结合水含量降低。溶液中的阳离子价态越高, 置换后结合水含量越低。所以, 表现为相同浓度下,  $\text{CaCl}_2$  溶液制成试样的塑性指数小于 NaCl 溶液制成试样的塑性指数。

## 2.3 渗透系数

### 2.3.1 固结压力对渗透系数的影响

测定的固结压力与膨润土渗透系数的关系如图 6 所示。随着固结压力的增加, 膨润土的渗透系数降低, 二者在双对数坐标中呈线性关系。膨润土的渗透系数降低是由于固结压力增加导致其孔隙比降低<sup>[28]</sup>。当固结压力为 800 kPa 时, 相比 12 kPa, 其渗透系数降低  $1/1\,000 \sim 1/500$ 。由此可见, 固结压力对渗透系数的影响很大。当固结压力由 12 kPa 增加到 800 kPa 时, 膨润土在 1 000 mmol/L NaCl 溶液中渗透系数与 20 mmol/L NaCl 溶液中渗透系数的比值 ( $k_{1\,000}/k_{20}$ ) 由 5.8 降低到 2.7, 二者之间渗透系数的差距减小。当渗透溶液为  $\text{CaCl}_2$  溶液时也可观察到类似的现象: 当固结压力由 12 kPa 增加到 800 kPa 时, 膨润土在 500 mmol/L  $\text{CaCl}_2$  溶液中渗透系数与 20 mmol/L  $\text{CaCl}_2$  溶液中渗透系数的比值 ( $k_{500}/k_{20}$ ) 由 8.4 降低到 3.7。由此可见, 固结压力越大, 盐溶液浓度变化对膨润土渗透性的影响越小, Shackelford 等<sup>[13]</sup>的试验结果也反映了该规律。

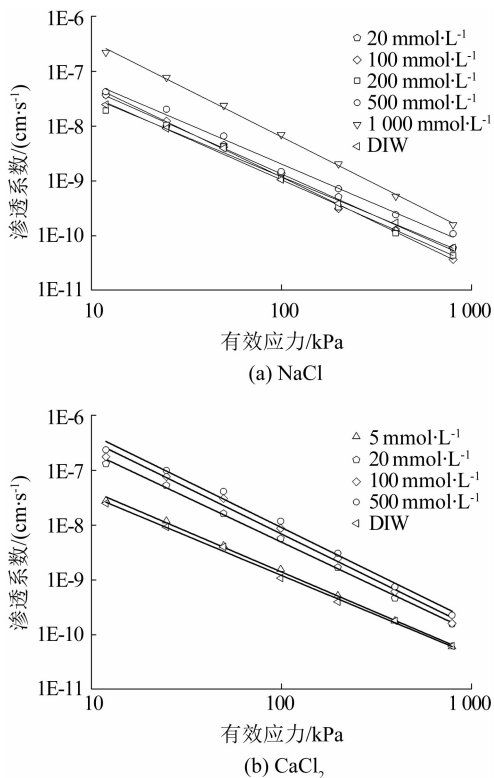


图 6 固结压力与膨润土渗透系数的关系

Fig. 6 Relation between consolidation pressure and hydraulic conductivity of bentonite

2.3.2 溶液阳离子浓度对渗透系数的影响

溶液阳离子浓度对膨润土渗透系数的影响见图 7。在 12 ~ 800 kPa 的固结压力下,随着溶液浓度的增加,膨润土的渗透系数增大,且都高于其在去离子水中的渗透系数(除 12 kPa 下 200 mmol/L NaCl 溶液中的渗透系数较明显地低于去离子水中的渗透系数,由于二者非常接近,这个现象是由仪器误差造成的),当溶液处于中低浓度( $\leq 200$  mmol/L)时, $\text{Na}^+$ 浓度的变化对渗透系数的影响很小,渗透系数在 NaCl 溶液中几乎没有明显的变化,并且与去离子水中的渗透系数十分接近。当溶液浓度很高( $\geq 500$  mmol/L)时,膨润土在 NaCl 溶液中的渗透

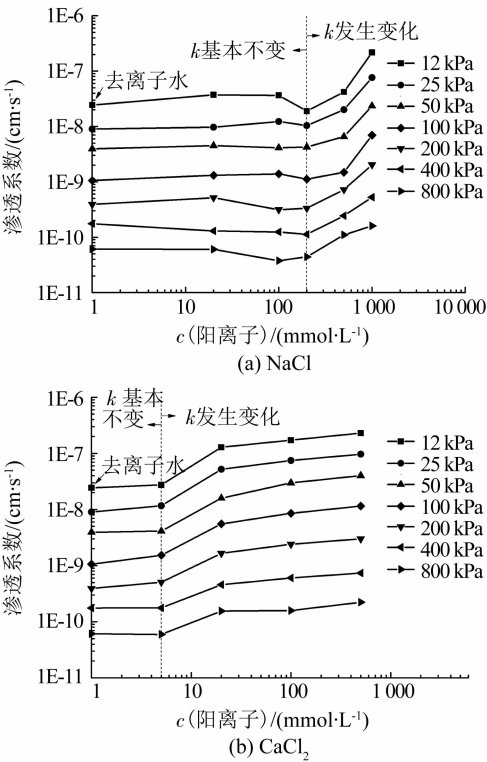


图 7 阳离子浓度对膨润土渗透系数的影响  
Fig. 7 Effect of concentration of cation on hydraulic conductivity of bentonite

系数显著上升( $k_{1000}/k_{200} = 3.6 \sim 11.5$ ). 当溶液浓度较低( $\leq 20$  mmol/L)时,膨润土在  $\text{CaCl}_2$  溶液中的渗透系数显著上升( $k_{20}/k_5 = 2.6 \sim 4.7$ ). 当溶液处于中等浓度和高浓度时,膨润土在  $\text{CaCl}_2$  溶液中渗透系数的增长速度变缓( $k_{100}/k_{20} = 1 \sim 1.9$ ,  $k_{500}/k_{100} = 1.2 \sim 1.4$ ).

2.3.3 溶液阳离子价态对渗透系数的影响

溶液阳离子价态对膨润土渗透系数的影响见图 8。在 12 ~ 800 kPa 的固结压力范围内,膨润土在  $\text{CaCl}_2$  溶液中的渗透系数均高于相同浓度 NaCl 溶液中的渗透系数( $k_{\text{CaCl}_2}/k_{\text{NaCl}} = 2 \sim 7.7$ ). 由此可见,膨润土的渗透系数随阳离子价态升高而增大。当溶液浓度较低( $= 20$  mmol/L)时,阳离子价态对渗透系数的影响较弱( $k_{\text{CaCl}_2}/k_{\text{NaCl}} = 2.6 \sim 3.5$ ). 在中等浓度(100 mmol/L)下,阳离子价态对渗透系数的影响最大( $k_{\text{CaCl}_2}/k_{\text{NaCl}} = 4.2 \sim 7.7$ ). 随着溶液浓度的升高,在高浓度(500 mmol/L)下,阳离子价态对渗透系数的影响作用降低( $k_{\text{CaCl}_2}/k_{\text{NaCl}} = 2.0 \sim 6.1$ ).

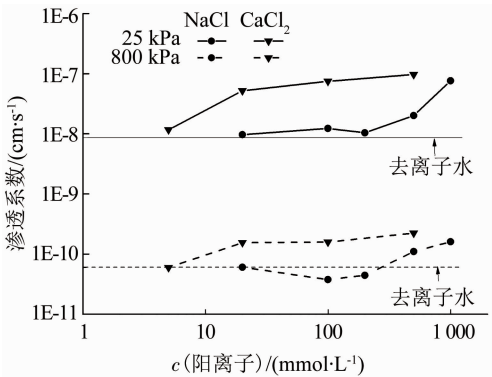
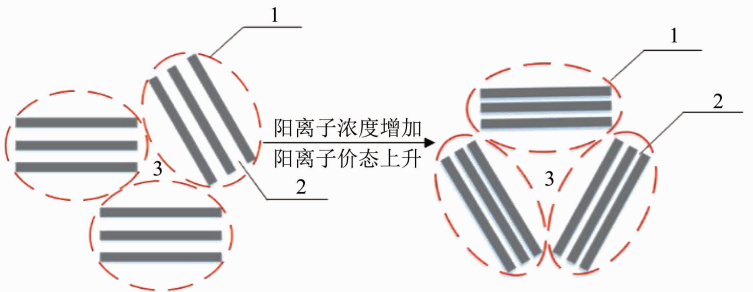


图 8 阳离子价态对膨润土渗透系数的影响  
Fig. 8 Effect of valence of cation on hydraulic conductivity of bentonite

上述试验表明,阳离子的浓度和价态均会影响膨润土的渗透系数,这是由于影响蒙脱石层间结合水导致的。如图 9 所示,阳离子浓度增加或价态上升均会导致膨润土中蒙脱石层间的结合水含量减小,



1—膨润土颗粒;2—蒙脱石层间距;3—自由水流通空间  
图 9 层间结合水含量对渗透性影响机理示意  
Fig. 9 Schematic diagram of effect of interlayer bound water content on permeability

层间距被压缩<sup>[26,29-30]</sup>,膨润土颗粒间自由水占比增大,微流径发展成较大流径<sup>[31]</sup>,流通空间增大,因此,膨润土的渗透系数增大。

### 3 结果分析

盐溶液会影响膨润土的基本物理特性和渗透性,其根本原因是盐溶液会影响膨润土中蒙脱石层间结合水的含量.这些结合水分子被蒙脱石结构层间的负电荷紧紧吸附,其性质接近固体、不可流动.当结合水含量增加时,蒙脱石层间距离变大,在宏观尺度上表现为膨胀指数增加;同时结合水占据更多孔隙空间,可供自由水流动的孔隙体积减小,流动的路径更小、更曲折<sup>[32]</sup>,导致渗透系数降低.膨胀指数和渗透系数的相关性如图 10 所示.由于在 12 ~ 800 kPa 下,膨胀指数与渗透系数的关系曲线趋势非常相似,选择 50 和 100 kPa 下的关系曲线作为代表曲线进行说明。

在 NaCl 溶液中,膨胀指数和渗透系数之间的变化规律可分为 3 个阶段.首先,随着溶液浓度的增加,膨胀指数减小,渗透系数基本不变.到达临界浓度(200 mmol/L)后,膨胀指数发生陡降,渗透系数发生变化开始增大.当浓度较高(>500 mmol/L)时,膨胀指数下降速度变缓,渗透系数显著增大.总体上,膨胀指数和渗透系数在 NaCl 溶液中的相关性较弱,但膨润土的渗透系数和膨胀指数在 NaCl 溶液中的敏感浓度基本一致,超过临界浓度后二者都发生较为显著的变化。

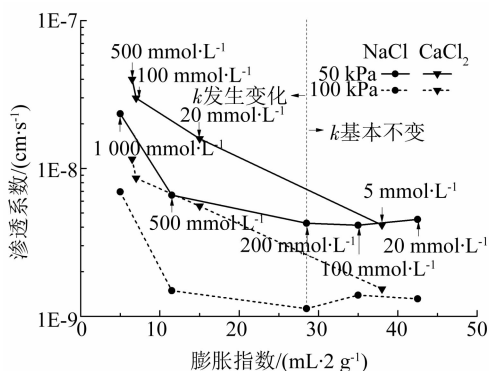


图 10 膨润土渗透系数和膨胀指数的关系

Fig. 10 Relation between hydraulic conductivity and swell index of bentonite

在  $\text{CaCl}_2$  溶液中,膨胀指数和渗透系数在半对数坐标系中呈现出较良好的相关性.除溶液浓度很高( $\geq 100$  mmol/L)时,渗透系数的变化幅度高于膨胀指数.因此,可根据膨胀指数在  $\text{CaCl}_2$  溶液中的试验结果推测渗透系数的变化规律,这在工程上具有重要的意义.自由膨胀试验操作简单、试验周期短,

渗透试验操作复杂、耗时长,建立膨胀指数和渗透系数之间的关系后,可以用自由膨胀试验代替渗透试验进行测试.虽然膨胀指数和渗透系数在 NaCl 溶液中的线性相关性较弱,但二者的临界浓度相同,故可根据膨胀指数的试验结果推测渗透系数的临界浓度,即当溶液浓度高于临界浓度后,渗透系数将发生较为明显的变化。

塑性指数代表膨润土处于可塑状态含水量的变化范围,因此,膨润土可吸附的结合水含量越多,可塑状态含水量变化范围越大.随着膨润土中蒙脱石层间结合水含量的增加,在宏观尺度上表现为渗透系数降低,塑性指数增加.塑性指数和渗透系数之间的相关性如图 11 所示.由于在 12 ~ 800 kPa 下,塑性指数与渗透系数的关系曲线趋势非常相似,选择 50 和 100 kPa 下的关系曲线作为代表曲线进行说明。

在 NaCl 溶液中,塑性指数和渗透系数之间的变化规律可分为 3 个阶段.首先,随着溶液浓度的增加,塑性指数减小,透系数基本不变.到达临界浓度(200 mmol/L)后,塑性指数保持相同的速度继续减小,渗透系数发生变化开始增大.当浓度较高(>500 mmol/L)时,塑性指数减小的速度变缓,渗透系数显著增大.塑性指数和渗透系数在 NaCl 溶液中的敏感浓度并不一致,塑性指数在试验中未表现出突变的趋势。

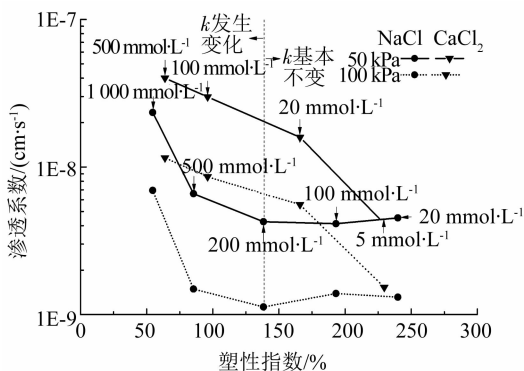


图 11 膨润土渗透系数和塑性指数的关系

Fig. 11 Relation between hydraulic conductivity and plasticity index of bentonite

在  $\text{CaCl}_2$  溶液中,塑性指数和渗透系数在半对数坐标系中呈现出较为良好的相关性.除溶液浓度较低( $\leq 20$  mmol/L)时,渗透系数的变化幅度高于膨胀指数.同样地,可根据塑性指数在  $\text{CaCl}_2$  溶液中的试验结果推测渗透系数的变化规律.界限含水量试验操作简单、试验周期短,也可作为渗透试验的替代选项。

以上结果表明,怀俄明膨润土在  $\text{CaCl}_2$  溶液中的膨胀指数、塑性指数均与渗透系数之间存在较为



良好的相关性.虽然怀俄明膨润土在 NaCl 溶液中的膨胀指数、塑性指数和渗透系数之间的整体相关性较差,但当溶液浓度超过临界浓度 (200 mmol/L) 后,膨胀指数、塑性指数均和渗透系数也存在较好的相关性.由此可见,用简单的界限含水量测试和膨胀指数测试代替渗透试验具有较好的可行性.

## 4 结 论

1)随着 NaCl 溶液和  $\text{CaCl}_2$  溶液浓度增加,膨润土的膨胀指数先增大再减小.除了浓度很低 ( $\leq 5$  mmol/L) 时,相同浓度下,膨润土在 NaCl 溶液中的膨胀指数都高于  $\text{CaCl}_2$  溶液中的膨胀指数.

2)随着 NaCl 溶液和  $\text{CaCl}_2$  溶液浓度增加,膨润土的塑限增大、液限和塑性指数减小.溶液中阳离子浓度的变化对膨润土塑限的影响不大,对膨润土液限和塑性指数的影响明显.相同浓度下,膨润土在  $\text{CaCl}_2$  溶液中的塑限更大、液限和塑性指数更小.

3)随着固结压力的增加,膨润土的渗透系数降低,二者在双对数坐标中呈线性关系.随着溶液浓度的增加,膨润土的渗透系数增大.膨润土在  $\text{CaCl}_2$  溶液中的渗透系数均高于相同浓度 NaCl 溶液中的渗透系数.

4)膨润土在  $\text{CaCl}_2$  溶液中的膨胀指数、塑性指数均和渗透系数之间存在较为良好的相关性.在 NaCl 溶液中膨胀指数、塑性指数与渗透系数之间的整体相关性较差,但是当溶液浓度超过临界浓度 (200 mmol/L) 后,膨胀指数、塑性指数均与渗透系数也存在较好的相关性.因此,自由膨胀试验和界限含水量试验可作为工程中初选渗透系数的手段.

## 参考文献

- [1] MCBRIDE M. Environmental chemistry of soils [M]. New York: Oxford University Press, 1994
- [2] GRIM R. Clay mineralogy [M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1968
- [3] MITCHELL J K. Fundamentals of soil behavior [M]. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005
- [4] MESRI G, OLSON R E. Mechanisms controlling the permeability of clays [J]. Clay and Clay Minerals, 1971, 19(3): 151. DOI: 10.1346/ccmn
- [5] LAGERWER J V, NAKAYAMA F S, FRERE M H. Hydraulic conductivity related to porosity and swelling of soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1969, 33(1): 3. DOI: 10.2136/sssaj1969.03615995003300010008x
- [6] GLEASON M H, DANIEL D E, EYKHOLT G R. Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(5): 438. DOI: 10.1061/(asce)1090-0241(1997)123:5(438)
- [7] 陈云敏. 环境土工基本理论及工程应用 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 1
- CHEN Yunmin. A fundamental theory of environmental geotechnics and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 1. DOI: 10.11779/CJGE201401001
- [8] 杨玉玲, 杜延军, 范日东, 等. 分散剂改良土-膨润土竖向隔离墙材料黏度试验研究 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2014, 44(3): 650
- YANG Yuling, DU Yanjun, FAN Ridong, et al. Experimental study on viscosity of soil-bentonite vertical cut-off wall backfills amended with dispersant [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44(3): 650. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2014.03.035
- [9] 钱学德, 朱伟, 王升位, 等. 填埋场和污染场地防污隔离屏障设计与施工 [M]. 北京: 科学出版社, 2017
- QIAN Xuede, ZHU Wei, WANG Shengwei, et al. Design and construction of antifouling barrier for landfill and contaminated sites [M]. Beijing: Science Press, 2017
- [10] SHACKELFORD C D, SAMPLE-LORD K M. Hydraulic conductivity and compatibility of bentonite for hydraulic containment barriers [C] // Proceedings of Geo-Congress 2014. Atlanta, Georgia: ASCE, 2014. DOI: 10.1061/9780784413265.030
- [11] 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. DOI: 10.1061/(asce)1090-0241(2001)127:7(557)
- [12] KATSUMI T, ISHIMORI H, ONIKATA M, et al. Long-term barrier performance of modified bentonite materials against sodium and calcium permeant solutions [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(1): 14. DOI: 10.1016/j.geotextmem.2007.04.003
- [13] SHACKELFORD C D, BENSON C H, KATSUMI T, et al. Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2000, 18(2): 133. DOI: 10.1016/s0266-1144(99)00024-2
- [14] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 膨润土: GB/T 20973—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Bentonite: GB/T 20973—2007 [S]. Beijing: China Standards Press, 2007
- [15] ASTM. D5890 Standard test method for swell index of clay mineral component of geosynthetic clay liners [S]. Philadelphia: ASTM, 2002
- [16] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for geotechnical test methods: GB/T 50123—1999 [S]. Beijing: China Standards Press, 1999
- [17] RAZAKAMANANTSOA A R, BARAST G, DJERAN-MAIGRE I. Hydraulic performance of activated calcium bentonite treated by polyionic charged polymer [J]. Applied Clay Science, 2012, 59/60: 103. DOI: 10.1016/j.clay.2012.01.022
- [18] CHUNG J, DANIEL D E. Modified fluid loss test as an improved measure of hydraulic conductivity for bentonite [J]. Geotechnical Testing Journal, 2008, 3(31): 243. DOI: 10.1520/gtj100005
- [19] LIU Yang, GATES W P, BOUAZZA A, et al. Fluid loss as a quick method to evaluate hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners under acidic conditions [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51(2): 158. DOI: 10.1139/cgj-2013-0241

- [20] 沈胜强, 杜延军, 张润, 等. 基于改进滤失试验的  $\text{CaCl}_2$  溶液作用下膨润土滤饼渗透系数[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(增刊1): 179  
SHEN Shengqiang, DU Yanjun, ZHANG Run, et al. Hydraulic conductivity of bentonite filter cakes in concentrated calcium chloride solutions based on modified fluid loss test[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(S1): 179. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2016.S1.032
- [21] ASTM. D5084 Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter[S]. Philadelphia: ASTM, 2016
- [22] VAN OLPHEN H, HSU P H. An introduction to clay colloid chemistry[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1977
- [23] PROST R, KOUTIT T, BENCHARA A, et al. State and location of water adsorbed on clay minerals: Consequences of the hydration and swelling-shrinkage phenomena[J]. Clays and Clay Minerals, 1998, 46(2): 117. DOI: 10.1346/ccmn.1998.0460201
- [24] ZHANG Fushan, LOW P F, ROTH C B. Effect of monovalent exchangeable and interlayer distance in montmorillonite[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1995, 173(1): 34. DOI: 10.1006/jcis.1995.1293
- [25] NORRISH K. The swelling of montmorillonite[J]. Discussions of the Faraday Society, 1954, 18: 120. DOI:10.1039/d9541800120
- [26] PETROV R J, ROWE R K. Geosynthetic clay liner (GCL)—chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(6): 863. DOI:10.1139/t97-055
- [27] MISHRA A K, DUTTA J, CHINGTHAM R. A study on the behavior of the compacted bentonite in the presence of salt solutions[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 9(4): 354. DOI:10.1179/1939787914y.0000000074
- [28] PETROV R J, ROWE R K, QUIGLEY R M. Selected factors influencing GCL hydraulic conductivity[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(8): 683. DOI:10.1061/(asce)1090-0241(1997)123:8(683)
- [29] LEE J, BENSON C H, SHACKELFORD C D, et al. Correlating index properties and hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(11): 1319
- [30] LIN Lingchu, BENSON C H. Effect of wet-dry cycling of swelling and hydraulic conductivity of GCLs[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(1): 40. DOI:10.1061/(asce)1090-0241(2000)126:1(40)
- [31] 杨玉玲, 杜延军, 范日东, 等. 膨润土系隔离墙材料渗透特性研究综述[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊2): 210  
YANG Yuling, DU Yanjun, FAN Ridong, et al. Advances in permeability for bentonite-based hydraulic containment barriers[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S2): 210. DOI: 10.11779/CJGE2015S2040
- [32] MESRI G, OLSON R E. Mechanisms controlling the permeability of clays[J]. Clays and Clay Minerals, 1971, 3(19): 151. DOI:10.1346/ccmn.1971.0190303

(编辑 刘 彤)