

# 冻融作用对膨润土防渗毯防渗特性的影响

周春生<sup>1,2</sup>, 史海滨<sup>1\*</sup>, 于健<sup>3</sup>

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古财经学院资源与环境经济学院, 呼和浩特 010051; 3. 内蒙古水利科学研究院, 呼和浩特 010010)

**摘要:** 为研究膨润土防渗毯 (Geosynthetic Clay Liner) 在寒旱区渠道衬砌应用中的防渗性能, 该文采用室内模拟方法对 3 种膨润土防渗毯 (分别为韩国、中国生产, 编号为 1#、2#、3#) 的抗冻特性进行了研究, 结果表明: 采用黄河水水化 31 次冻融后, 1#、2#、3# 膨润土防渗毯自由膨胀体积增加了 16.7%、4.5%、8.0%, 滤失量降低了 31.1%、28.9%、27.0%, 屈服值增加了 200.0%、23.3%、90.6%。31 次冻融循环后滤出液 EC 值分别降低 27.3%、27.0%、31.0%, 渗透系数均增加了 1 个数量级, 但渗透系数仍较小, 仅为渠床土壤渗透系数的 0.35%~0.72%; 研究表明, 膨润土防渗毯可用于西北干旱盐渍化地区渠道衬砌。

**关键词:** 膨润土, 剪切应力, 试验, 冻融循环, 滤失量, 渗透系数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.05.016

中图分类号: TV223.4(226)

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-05-0095-06

周春生, 史海滨, 于健. 冻融作用对膨润土防渗毯防渗特性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 95-100.  
Zhou Chunsheng, Shi Haibin, Yu Jian. Effect of freeze-thaw action on geosynthetic clay liner anti-seepage characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(5): 95-100. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

内蒙古河套灌区渠道衬砌的冻胀破坏是面临的主要问题, 目前该地区渠道衬砌的主要材料为混凝土板, 存在费用高、抗冻胀性能差、施工工期长、衬砌失效后固体废弃物难处理而存在的环境等突出系列问题, 因此筛选新型防渗衬砌新材料是当前灌区面临的重要问题<sup>[1]</sup>。不少学者针对该地区的渠道衬砌的抗冻问题进行了研究<sup>[2-3]</sup>, 如: 结构形式方面采用齿墙、不同的断面形式; 新材料方面: 用聚苯乙烯保温板进行保温防冻、土壤固化剂的抗冻性研究等<sup>[4]</sup>, 虽然取得一定效果, 但仍未能彻底解决抗冻胀与抗盐碱及成本问题, 至今还很难大面积推广。膨润土防渗毯是新型的天然绿色防渗材料, 具有防渗效果好、施工工艺简单、抗干湿循环能力强等优点, 研究在盐渍化地区的抗冻特性, 对解决该地区渠道衬砌面临的难题有重要意义。

膨润土防渗毯 (geosynthetic clay liner, GCL) 起防渗作用的是中间层的膨润土, 其主要成分为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。膨润土为 Si-Al-Si 结构体系, 有较强的亲水性,

水化时, 水分子沿 Si-Al-Si 结构单元的表面被吸附起来, 加大相邻结构单元之间距离。膨润土水化后表面阳离子呈水合状态, 吸收水分子后达到饱和, 形成凝胶。因此易受溶液离子、溶液离子浓度、冻融作用的影响。国内外众多学者对 GCL 防渗性能进行了大量的研究, 但主要集中在溶液中离子对膨润土膨胀特性的影响<sup>[5-6]</sup>, 研究认为离子交换是影响膨润土膨胀性能变化的主要原因<sup>[7-8]</sup>, 溶液中离子与蒙脱石中阳离子发生离子交换反应, 导致膨胀性能、黏度、滤失量发生改变<sup>[9-10]</sup>。研究方法上, 除用传统的研究方法外, 逐渐采用微观方法对膨润土颗粒微观结构进行研究<sup>[11-12]</sup>, 刘建国等<sup>[13]</sup>基于 Kozeny-Carman 方程, 采用分形方法进行计算, 将土的微观结构参数与渗透系数相结合进行研究; 冻融作用对 GCL 防渗性能的影响研究还较少<sup>[14]</sup>, 离子及冻融耦合作用下的防渗性能研究还未见文献。对含盐黏土的研究相对较多, 陈炜韬等<sup>[15]</sup>对含盐黏土冻融循环研究表明: 冻融循环后黏土黏聚力随  $\text{CaCl}_2$  含量增加而减小。发现细粒土冻融循环后孔隙比减小, 渗透性增强, 塑性指数增大, 土的体积随冻融次数的增加而增大, 但逐渐趋于稳定。经过 2 次冻融循环后出现较多的大孔隙, 而随着冻融循环次数的增多, 大孔隙反而减少, 粒间孔隙增多。在此基础上, 本文针对该研究区的特殊情况, 分析含电解质水化渗滤液、冻融循环耦合作用对膨润土特性及 GCL 防渗性能的影响。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

本研究选择市场上常见的国内外不同厂家 (分别为韩国, 中国生产) 的 3 种 GCL 试样进行研究, 分别编号为 1#、2#、3#。其技术指标见表 1、表 2。由表 1 可知 3

收稿日期: 2011-03-02 修订日期: 2011-12-15

基金项目: 国际科技合作重点计划项目 (2008DF70880); 国家农业转化资金项目 (2010GB2A400060); 国家科技支撑项目 (2007BAD88B04); 内蒙古农业大学科技创新团队资助计划。

作者简介: 周春生 (1977-), 男, 山东省单县人, 讲师, 博士, 主要从事灌区土壤水盐监测方面研究。呼和浩特 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 010018。Email: zhouchunsheng121@163.com

\*通信作者: 史海滨 (1961-), 男, 山西太谷人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事节水灌溉原理及应用研究。呼和浩特 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 010018。Email: shi\_haibin@sohu.com 中国农业工程学会会员 (E041200204S)

种试样的阳离子交换容量 (CEC) 值有较大的差异, 膨润土的 CEC 值愈大表示其带负电量愈大, 其水化、膨胀和分散能力愈强。由表 2 可知膨润土颗粒较小, 以小

于  $2\ \mu\text{m}$  的土粒为主, 3 试样小于  $2\ \mu\text{m}$  的颗粒含量分别为: 56.0%、58.0%、74.8%。试验用水取自黄河水, 离子成份及含量如表 3 所示。

表 1 膨润土基本特征参数  
Table 1 Basic parameters of bentonite

样号	阳离子交换量/(mmol·100g <sup>-1</sup> )					针刺密度/ (束·m <sup>-2</sup> )	面质量/ (kg·m <sup>-2</sup> )	GCL 厚度/ mm	膨胀体积/ (mL·2g <sup>-1</sup> )
	CEC	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>				
1#	122.9	0.4	59.6	0.2	1.0	$3.8 \times 10^4$	3.6	8.0	20.0
2#	57.3	0.2	59.5	0.3	0.4	$1.2 \times 10^4$	6.2	6.0	20.0
3#	75.3	0.2	71.4	0.7	1.0	$1.0 \times 10^4$	6.1	5.0	21.0

表 2 膨润土颗粒分布  
Table 2 Bentonite particle size distribution

粒径/ $\mu\text{m}$	<2	$\geq 2 \sim 5$	$\geq 5 \sim 10$	$\geq 10 \sim 50$	$\geq 50 \sim 100$	$\geq 100 \sim 250$	$\geq 250 \sim 500$	$\geq 500 \sim 1\ 000$	$\geq 1\ 000 \sim 1\ 500$	$\geq 1\ 500 \sim 2\ 000$	>2 000
质量 分数/%											
1#	56.0	12.8	5.2	11.2	9.8	3.3	0.6	0.3	0.2	0.2	0.3
2#	58.0	8.8	5.2	12.4	7.7	6.0	1.2	0.7	0	0	0
3#	74.8	4.0	2.0	2.8	2.7	2.0	1.8	3.7	2.6	2.7	1.0

表 3 黄河水主要离子成分及含量  
Table 3 Ion composition and content of Yellow River water

离子	Ca <sup>2+</sup> / (mmol·L <sup>-1</sup> )	Mg <sup>2+</sup> / (mmol·L <sup>-1</sup> )	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> / (mmol·L <sup>-1</sup> )	Cl <sup>-</sup> / (mmol·L <sup>-1</sup> )	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / (mmol·L <sup>-1</sup> )	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> / (mmol·L <sup>-1</sup> )	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / (mmol·L <sup>-1</sup> )	pH 值	含沙量/(g·m <sup>-3</sup> )
浓度	2.26	1.84	4.36	1.84	2.54	0	4.76	8.16	3390

## 2 试验仪器与方法

### 2.1 冻融作用对膨润土自由膨胀体积的影响

膨润土自由膨胀试验参照 ASTM5890 进行, 具体试验方法和步骤如下<sup>[16]</sup>:

1) 选择有代表性的 GCL, 取出其中的膨润土置于黄河水中水化 48 h, 将水化后试样置于低温 -40℃ 冰箱冻结 12 h 后, 置于室温下溶解 12 h, 完成 1 次冻融循环。分别循环 1、9、17、25 与 31 次, 将冻融循环后的试样置于 (105±5)℃ 烘箱中烘干备用;

2) 将烘干后的试样碾碎过筛, 使之 100% 通过 100 目 (0.154 mm) 标准筛, 200 目 (0.076 mm) 标准筛通过率不小于 65%;

3) 向 100 mL 的量筒中加入 90 mL 蒸馏水, 称取试样 2.0 g, 分 20 次加入, 每次加入 0.1 g, 待膨润土完全水化沉降后再次加入, 沉淀过程不可搅拌或晃动; 加完后, 沿量筒侧壁加入蒸馏水, 直至液体体积为 100 mL 为止; 24 h 后读取膨润土体积, 忽略低密度絮状物质。

### 2.2 冻融作用对膨润土流变性的影响

试验参照中国国标 GB/T 20973-2007 进行, 方法如下:

1) 每 350 mL 蒸馏水加 22.5 g 膨润土样品 (含水率小于 10%), 制备成悬浮体。在搅拌机边上边搅拌边把膨润土撒到水中, 5 min 后, 把黏在壁上的膨润土刮下, 继续搅拌 15 min; 室温下把悬浮体密封于容量瓶中放置 16 h;

2) 用搅拌机将放置后的悬浮体搅拌 5 min, 用黏度计测出 600 和 300 r/min 的读数。用式 (1)、(2) 计算悬浮体塑性黏度及屈服值。

$$P_v = \varphi_{600} - \varphi_{300} \quad (1)$$

式中,  $P_v$  为塑性黏度, MPa/s;  $\varphi_{600}$ 、 $\varphi_{300}$  为黏度计 600 和 300 r/min 时的读数。

$$r_p = 0.48(\varphi_{300} - P_v) \quad (2)$$

式中,  $r_p$  为膨润土悬浮体剪切应力屈服值, Pa。

悬浮体的流变学性质可用剪切应力  $\tau$  和剪切速率  $D$  之间的关系来描述, 用式 (3) 计算剪切应力。

$$p_v = \tau / D \quad (3)$$

式中,  $P_v$  为塑性黏度, MPa/s;  $\tau$  剪切应力, MPa;  $D$  为剪切速率, s<sup>-1</sup>。

### 2.3 冻融作用对膨润土滤失量的影响

本试验参照国标 GB/T 20973-2007 进行, 方法如下:

按 2.2 方法配置悬浮体, 测定完流变性后搅拌 1 min。将搅拌后的样品倒入滤失仪中, 至液面到顶缘的距离在 13 mm 以内, 放置滤纸, 装配好滤失仪。计时, 拧紧泄压阀, 调整调压器, 在 30 s 内加上 (700±35) kPa 的压力。7.5 min 后, 除去悬挂在排液嘴上的液体, 用干燥量筒收集滤液。每隔 5 min 记录渗滤液体积, 30 min 后, 取下悬挂在排液嘴上的液体并拿开量筒, 断开压力, 记下从 7.5~30 min 收集的液体体积。用式 (4) 计算滤失量。

$$FL = 2 \cdot V_2 \quad (4)$$

式中,  $FL$  为滤失量, mL;  $V_2$  为 30 min 末收集的滤液体积, mL。

### 2.4 冻融作用对 GCL 防渗性能的影响

将试样剪切为 300mm×300 mm 方块, 剪切边缘预先用水化液水化, 防止边缘膨润土洒落。将切割好的 GCL 用蒸馏水及黄河水水化 48 h, 把充分水化的 GCL 置于 -40℃ 低温冰箱 12 h, 再将冻结后的 GCL 取出置于室温下充分溶解 12 h, 即 1 次冻融循环结束。用软壁渗透仪测试冻融循环后的 GCL 渗透系数, 水化液及渗透液分别为

蒸馏水和黄河水，分析冻融作用对渗透系数的影响。为消除聚乙烯膜对试验结果的影响，对 1#试样进行了处理，将上下层粘合的聚乙烯膜剥离。测试滤出液电导率，通过电导率值变化分析冻融循环对膨润土离子交换及膨润土挤出量的影响。

### 3 结果分析

#### 3.1 冻融作用对自由膨胀体积的影响

图 1 为冻融作用对膨润土自由膨胀体积的影响曲线，由图 1 可以看出，膨润土自由膨胀体积随冻融循环次数增加有增大趋势，但增加幅度较小。蒸馏水水化 31 次冻融后 3 试样自由膨胀体积分别增加了 11.8%、19.1%与 25.0%；而水化液为黄河水时，增加了 16.7%、4.5%与 8.0%。2#、3#试样在蒸馏水中的自由膨胀体积较大，而 1#试样在黄河水中的自由膨胀体积较大，原因是水化液为蒸馏水时，水化瞬间黏结呈块状沉入量筒底部，限制了自由膨胀；而黄河水中阳离子的存在降低了膨润土的黏聚力，试验中发现黄河水中膨润土颗粒水化下沉过程中黏结成块现象减弱，分散性增强，因此膨润土颗粒更易充分水化膨胀，因此膨胀体积较大，另外 1#试样 CEC 值较大，而黄河水矿化度为 0.5 g/L，因此，离子交换对自由膨胀体积影响相对较小。2#、3#在黄河水中的自由膨胀体积较小，因为 CEC 值较小，膨润土水化时与黄河水中的阳离子发生离子交换反应，导致亲水能力降低，膨胀体积减小。含水膨润土冻融循环过程破坏了膨润土颗粒的黏结方式，导致颗粒分散性增强，比表面积增大，土体黏结力减弱，自由膨胀时表现为体积增加。

3 试样对比发现，3#膨润土的自由膨胀体积最大，1#自由膨胀体积最小，原因是 3#试样细小颗粒含量较多，比表面积较大，因此吸水膨胀更充分，水化下沉时呈分散状，膨胀体积较大。

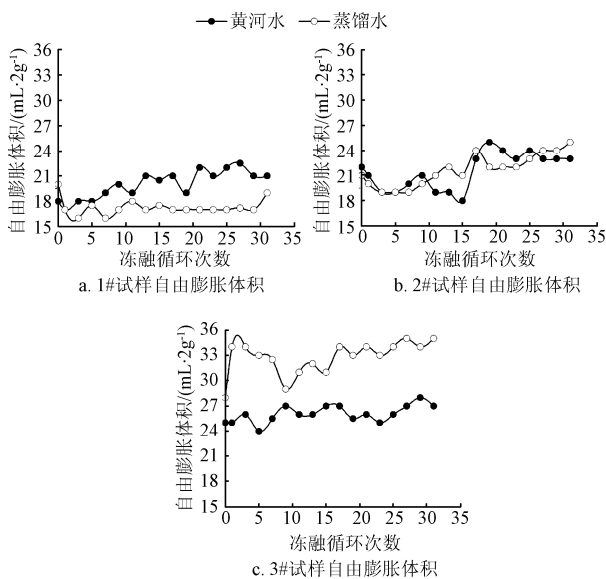


图 1 冻融次数与膨润土自由膨胀体积关系曲线

Fig.1 Curve of freeze-thaw times and bentonite free expansion volume

#### 3.2 冻融作用对膨润土流变性的影响

膨润土分散液的流变性是指它的流动和变形特性。膨润土分散液中，蒙脱石的颗粒呈单晶胞或多晶胞的附聚体，结构为晶层面和晶体端面搭接，或晶体端面和端面搭接，形成连续的网格状结构<sup>[17]</sup>。图 2 为冻融后膨润土悬浮体切应力变化曲线，随着冻融循环次数的增加，膨润土悬浮体剪切应力有增加趋势。原因是冻融作用破坏了膨润土颗粒的聚集方式，分散性增强，细小颗粒含量增加，悬浮体颗粒之间接触几率增加，剪切应力增加。3#试样的剪切应力最大，是因为 3#试样的细小颗粒含量较高（小于 2 μm 的含量为 74.8%），且分散性强，因此颗粒与颗粒之间的距离小，特别是黏性细颗粒的存在，使颗粒之间容易形成网格结构。颗粒之间的直接接触，增加悬浮液流动时的内摩擦力。

对比图 2 不同水化液膨润土悬浮体剪切应力可发现，在黄河水中膨润土切应力较大，造成此现象的原因是黄河水中含有 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>阳离子，导致蒙脱石晶层面的电动电位显著下降，产生晶层面搭接型聚集，聚集使分散相的表面积和分散度变小，更趋稳定，形成之后分散困难<sup>[17]</sup>。1#试样因 CEC 值较大表现不显著。对水化冻融后膨润土悬浮体剪切应力进行无交互作用的双因素方差分析知，两因素的  $F > F_{0.01}$ ，即冻融循环及不同试样间膨润土悬浮体剪切应力均有极显著影响。

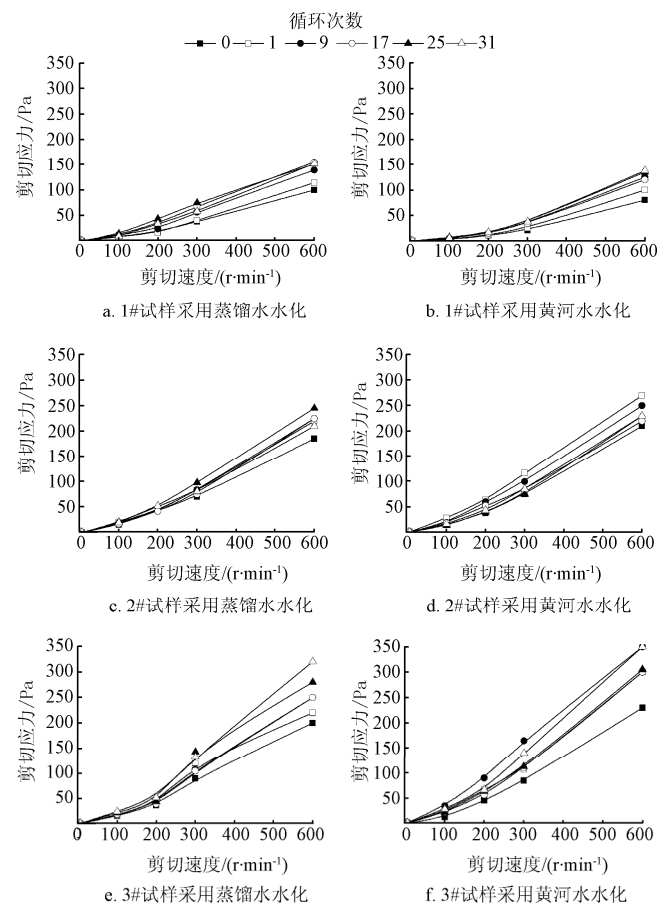


图 2 冻融次数与膨润土切应力关系

Fig.2 Effect of freeze-thaw times on shear stress of bentonite

### 3.3 冻融作用对膨润土特性的影响

图 3 为冻融循环后膨润土滤失变化过程线，由图 3 可知，随冻融循环次数增加滤出液累积量减小。31 次冻融后，3 试样 30 min 内滤出液累积量分别减小了 25.0%、17.8%、27.8%；即 3#变化幅度最大，2#变化幅度最小。随冻融次数增加滤失量减小的原因是冻胀融沉破坏了土体颗粒的黏结方式，分散性增强，小颗粒含量增加。通过电子显微照片可发现，冻融后土体大孔隙含量减小，小孔隙含量增加；分散的小颗粒在外力作用下更易进入小孔隙，形成密实滤饼，故滤出液体积减小。若不考虑膨润土颗粒挤出对防渗性能的影响，则冻融后 GCL 防渗性能增强。而冻融后 GCL 渗透系数测试中发现有细小膨润土颗粒挤出，导致 GCL 厚度变薄，渗透系数增加。

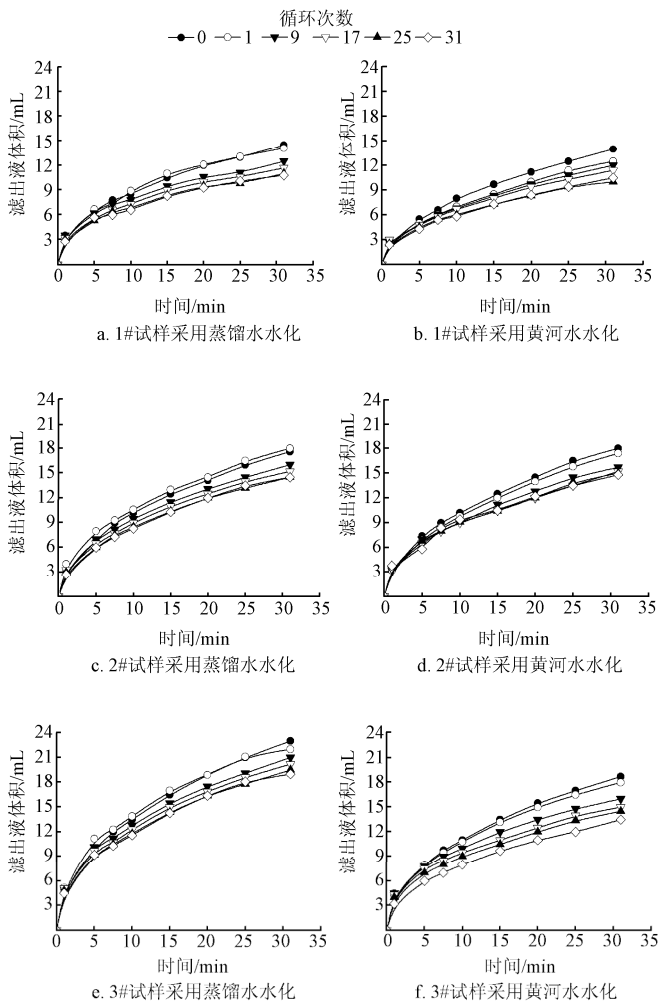


图 3 膨润土冻融后滤失过程曲线

Fig.3 Filter lost process curve after freezing and thawing

图 4 为冻融后膨润土滤失量及屈服值。由图 4 可知，随着冻融循环次数的增加，滤失量降低，主要原因是冻融作用破坏了膨润土颗粒的黏结方式，分散性增强，因此渗滤过程中形成致密滤饼，滤失量降低。水化液为黄河水时，1#、2#试样滤失量增加，黄河水中阳离子与膨润土发生离子交换反应，导致膨胀性降低，滤失量增加。而 3#试样较蒸馏水中滤失量降低，原因是 3#试样细小颗粒含量较高，比表面积较大，黄河水中的阳离子导致蒙

脱石晶层面的电动电位显著下降，产生晶层面搭接型聚集，聚集使分散相的表面积和分散度变小，更趋稳定，一旦形成之后分散困难，并且滤纸致密，渗滤开始没有细小颗粒滤出，因此滤失量较小<sup>[17]</sup>。双因素方差分析知，两因素的  $F > F_{0.01}$ ，即冻融循环及不同试样间滤出液累积量有极显著影响。

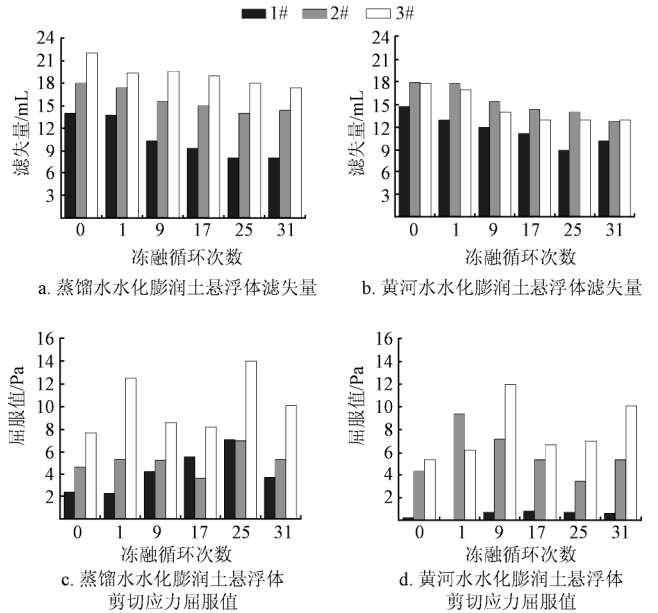


图 4 冻融后膨润土特性

Fig.4 Characteristics of bentonite after freezing and thawing

图 4c、4d 为冻融后膨润土悬浮体屈服值的变化，屈服值表征流体发生流动所需要的应力，对比 3 种试样可知，3#试样的屈服值较大，而 1#试样的屈服值较小。原因是：3#试样的小颗粒含量较高（小于  $2 \mu\text{m}$  的含量为 74.8%），颗粒间距较小，颗粒直接接触的几率增加，悬浮体流动时的内摩擦力增加，该悬浮体抵抗外力增大，即悬浮体发生流动所需要的应力较大；冻融循环次数对膨润土悬浮体屈服值影响较小。

### 3.5 冻融作用对 GCL 防渗性能的影响

图 5 为冻融作用后 GCL 渗透系数变化曲线，由图 5 可以看出，随冻融循环次数的增加 GCL 渗透系数并不稳定，有微小波动起伏，但总体上呈递增的趋势。31 次冻融循环后，渗透系数约增加了 1 个数量级，冻胀融沉作用导致膨润土颗粒的聚集方式发生了改变，黏聚力降低，分散性增强。融沉过程中，在水压力的作用下，细小颗粒移动至孔隙通道内，部分细小颗粒挤出土工织物，随渗滤液流出，因此渗透系数有增大趋势。

黄河水水化对 GCL 渗透系数的影响较蒸馏水略大，除上述原因外，与黄河水的离子发生交换反应导致膨胀性能降低，渗透系数增加；在冻胀过程中，存在盐晶析出现象，盐晶析出对膨润土颗粒的聚集破坏更强，因此对渗透系数的影响也相对更大<sup>[18]</sup>，因黄河水中离子含量较低，因此影响幅度较小。冻融后虽渗透系数有增加，但渗透系数仍较小，约为  $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ ，与衬砌前渠床土壤的入渗率相比，仅为土壤入渗率的 0.35%~0.72%。因此，黄河水水化冻融后的 GCL 仍有较好的防渗性能，在

类似地区可用于渠道衬砌防渗。

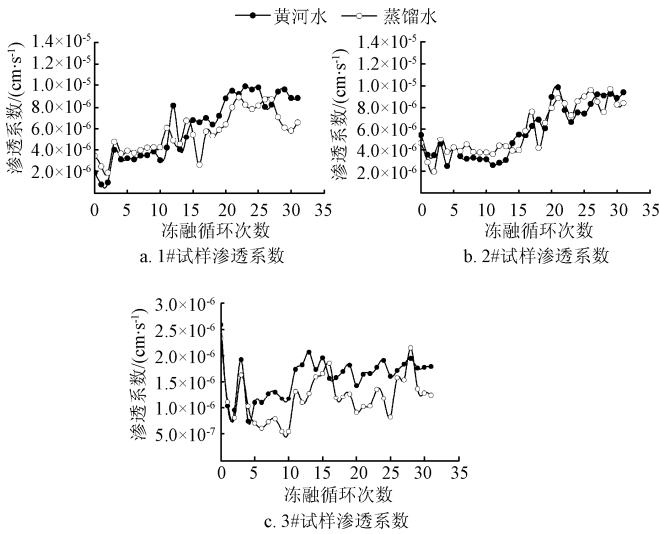


图 5 冻融次数与渗透系数关系

Fig.5 Effect of freeze-thaw times and permeability coefficient

### 3.6 冻融后渗滤液 EC 值变化

图 6 为冻融循环后滤出液的 EC 值变化曲线，由图 6 可以看出，随着冻融循环次数的增加，电导率呈逐渐降低的趋势，以蒸馏水为水化液及渗滤液时，滤出液 EC 值降低幅度较大，31 次冻融循环后，3 种试样滤出液的 EC 值由 1.81、1.30、1.45 mS/cm 降低到 0.74、0.64、0.66 mS/cm，分别降低了 59.1%、50.8%、54.5%；以蒸馏水为水化液时，滤出液的 EC 值与膨润土成分及含量有关，膨润土的阳离子交换量较大，则滤出液 EC 值也较大，冻融作用后滤出液的 EC 值下降幅度也较大。黄河水为渗滤液时 EC 值由 1.50、1.48、1.58 mS/cm 降低到 1.09、1.08、1.09 mS/cm，降低了 27.3%、27.0%、31.0%；黄河水为渗滤液时，滤出液的 EC 值及冻融后的下降幅度取决于黄河水的矿化度、膨润土的阳离子交换量。蒸馏水滤液中的 EC 值降低幅度较大，滤出液中的离子为膨润土中自由离子，随着膨润土中自由离子滤出量的增加，膨润土中自

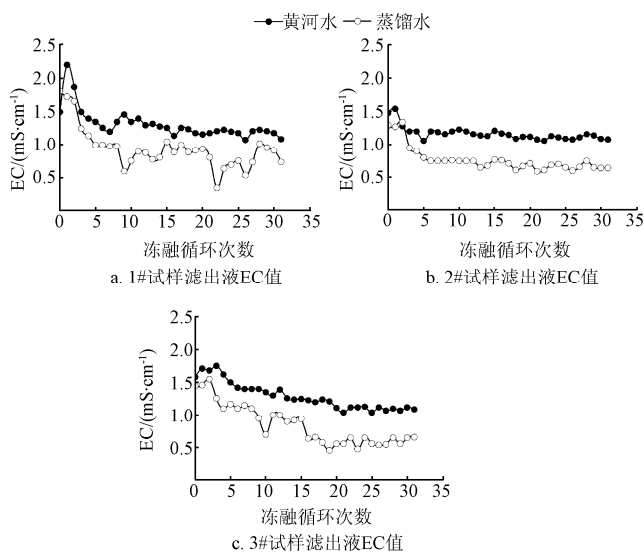


图 6 滤出液电导率变化

Fig.6 EC changes of filtrate

由离子量逐渐减小，故滤出液 EC 值也相应较低。以黄河水为渗滤液时，因滤液本身含有离子，因此滤出液中离子含量也相应较大。同时试验中发现，滤出液浑浊，即含有膨润土颗粒，也是滤出液 EC 值变化的原因。

## 4 结 论

GCL 在寒旱区用于渠道防渗，常受冻融作用的影响。本文针对冻融作用对 GCL 的防渗特性影响进行了研究，通过室内模拟方法研究了冻融作用对膨润土自由膨胀体积、滤失量、剪切应力、剪切应力屈服值、渗透系数等特性进行了研究，得到结论如下：

1) 31 次冻融循环后，膨润土的自由膨胀体积增加；黄河水中阳离子与膨润土发生离子交换反应，影响膨润土的自由膨胀体积，膨润土颗粒的黏结方式发生改变，细小颗粒含量增加，分散性增强。

2) 31 次冻融循环后，膨润土悬浮体剪切应力增加，滤出液累积量减少，滤失量降低。滤出液 EC 值降低。水化液为黄河水时，变化幅度较小。

3) 31 次冻融循环后，GCL 渗透系数增大 1 个数量级；水化液为黄河水时，冻融及电解质耦合作用对渗透系数的影响相对略大。冻融后渗透过程中有细小膨润土颗粒从 GCL 上下两层土工织物挤出。冻融后 GCL 渗透系数虽有增加，但渗透系数仍较小，仅为衬砌前渠床土壤渗透率的 0.35%~0.72%。

4) GCL 用于寒旱盐渍化地区渠道衬砌，虽然会受到冻融循环、盐分共同作用的影响，导致膨胀性能、滤失量、屈服值、渗透系数、滤出液 EC 值发生改变，但影响较小，在寒旱盐渍化地区可用于渠道防渗。

### [参 考 文 献]

[1] 于健, 周春生, 史海滨, 等. 膨润土防渗毯用于渠道衬砌及其老化因素对力学性能的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 170-175.  
Yu Jian, Zhou Chunsheng, Shi Haibin, et al. Effect of aging factor on mechanical properties of GCL as canal lining material[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(11): 170-175. (in Chinese with English abstract)

[2] 王正中, 刘旭东, 陈立杰, 等. 刚性衬砌渠道不同纵缝消减冻胀效果的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 1-7.  
Wang Zhengzhong, Liu Xudong, Chen Lijie, et al. Computer simulation of frost heave for concrete lining canal with different longitudinal joints[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 1-7. (in Chinese with English abstract)

[3] 王正中, 李甲林, 陈涛, 等. 弧底梯形渠道砼衬砌冻胀破坏的力学模型研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1):18-23.  
Wang Zhengzhong, Li Jialin, Chen Tao, et al. Mechanics models of frost-heaving damage of concrete lining trapezoidal canal with arc-bottom[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(1): 18-23. (in Chinese with English abstract)

[4] 程满金, 步丰湖, 王俊英, 等. 土壤固化剂新材料在衬砌

- 渠道中的应用研究[J]. 节水灌溉, 2010(4):33—36.
- Cheng Manjin, Bu Fenghu, Wang Junying, et al. Application of new soil solidifying agent material in canal lining[J]. Water Saving Irrigation, 2010(4): 33—36. (in Chinese with English abstract)
- [5] Mishra A K, Li L Y, Junboun T H. Effect of salt of various concentrations on liquid limit, and hydraulic conductivity of different soil-bentonite mixtures[J]. Environ Geol, 2009(57): 1145—1153.
- [6] Bensonl C H, Jo H Y, Abichou T. Forensic analysis of excessive leakage from lagoons lined with a composite GCL[J]. Geosynthetics International, 2004, 11(3): 242—252.
- [7] 周正兵, 王钊, 王俊奇. 离子交换对 GCL 防渗能力的影响[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(3): 39—42.
- Zhou Zhengbing, Wang Zhao, Wang Junqi. Influence of ion exchange on hydraulic conductivity of GCL[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002, 19(3): 39—42. (in Chinese with English abstract)
- [8] 孔维安, 郑水林, 白春华, 等. 膨润土在水溶液中的膨胀性能研究[J]. 非金属矿, 2010, 33(1): 42—44.
- Kong Weian, Zheng Shuilin, Bai Chunhua, et al. Study on swelling performance of bentonite in aqueous solution[J]. Non-Metallic Mines, 2010, 33(1): 42—44. (in Chinese with English abstract)
- [9] 孙志明, 于健, 郑水林, 等. 离子种类及浓度对土工合成黏土垫用膨润土保水性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(9): 1826—1831.
- Sun Zhiming, Yu Jian, Zheng Shuilin, et al. Effect of ion-type and concentration on Water-Retention capacity of Bentonite used in Geosynthetic Clay Liner[J]. Journal of Chinese Ceramic Society, 2010, 38(9): 1826—1831. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李志斌. 土工织物膨润土垫防渗有效性研究及相关机理分析[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2007.
- Li Zhibin. Research on Anti-Seepage Availability of Geosynthetic Clay Liners and Related Mechanism Analysis[D]. ShangHai: Tongji University School of Civil Engineering, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [11] 何俊. 基于微观分析的填埋场 GCL 中运移规律的理论研究[D]. 南京: 河海大学土木工程学院, 2006.
- He Jun. Theoretical Study of Transport Through GCL in Landfill Based on Microscopic Analysis[D]. NanJing: Hohai University School of Civil Engineering, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [12] Dananaj I, Frankovska J, Janotka I. The influence of smectite content on microstructure and geotechnical properties of calcium and sodium bentonites[J]. Applied Clay Science, 2005, 28: 223—232.
- [13] 刘建国, 王洪涛, 聂永丰. 多孔介质中溶质有效扩散系数预测的分形模型[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 459—462.
- Liu Jianguo, Wang Hongtao, Nie Yongfeng. Fractal model for predicting effective diffusion coefficient of solute in porous media[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(4): 459—462. (in Chinese with English abstract)
- [14] 周春生. 膨润土防水毯在北方盐渍化地区适用性的试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 2007.
- Zhou Chunsheng. Experimental study on Geosynthetic Clay Liner's Applicability in North and Saline Regions of China[D]. The College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agriculture University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [15] 陈炜韬, 王鹰, 王明年, 等. 冻融循环对盐渍土黏聚力影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2343—2347.
- Chen Weitao, Wang Ying, Wang Mingnian. Testing study on influence of freezing and thawing circulation on saline soil's cohesion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2343—2347. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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 Chao, Li Zhibin, Gao Yanbin. Influence of solution characteristics on swelling and hydraulic performance of geosynthetic clay liner[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(1): 36—40. (in Chinese with English abstract)
- [17] 姜桂兰, 张培萍. 膨润土加工与应用[M]. 化学工业出版社, 2005.4.
- [18] 张莎莎, 杨晓华, 戴志仁. 天然粗颗粒盐渍土多次冻融循环膨胀试验[J]. 中国公路学报, 2009, 22(4): 28—32.
- Zhang Shasha, Yang Xiaohua, Dai Zhiren. Freezing-thawing cycles and salt expansion test of crude coarse grain clay salty soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4): 28—32. (in Chinese with English abstract)

## Effect of freeze-thaw action on geosynthetic clay liner anti-seepage characteristics

Zhou Chunsheng<sup>1,2</sup>, Shi Haibin<sup>1</sup>, Yu Jian<sup>3</sup>

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College Inner Mongolia Agricultural University, Inner Mongolia Huhhot 010018, China;

2. Resource and Environmental Economics of Inner Mongolia Institute of Finance, Inner Mongolia Huhhot 010070, China;

3. Water Resources Research Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010020, China)

**Abstract:** In order to study the seepage control performance of Geosynthetic Clay Liner (GCL) in lining channel in the cold and arid regions, the antifreeze characteristics of three different GCL (produced in Korea and China, 1#, 2#, 3#) were studied with indoor simulation method. The results showed that by hydrating with the Yellow River water and after 31 times of freeze-thaws, the free swelling volume of 1#, 2#, 3# GCL increased by 16.7%, 4.5% and 8.0% respectively; The filtration loss reduced by 31.1%, 28.9% and 27.0% respectively; The yield value increased by 200.0%, 23.3% and 90.6% respectively, and the EC values of the filtrate reduced by 27.3%, 27.0% and 31.0% respectively. The permeability coefficient increased by one order of magnitude, but was still small, which was 0.35-0.72% in canal bed. These indicated the GCL can be used in canal lining in the northwest arid and saline regions.

**Key words:** bentonite, shear stress, expiment, freeze-thaw cycle, filtrate loss, permeability coefficient