

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.01.012

用于咸寒地区渠道衬垫的 GCL 特性试验

吴诗阳,蔡正银,黄英豪,吴志强,耿之周

(南京水利科学研究院岩土工程研究所,江苏 南京 210029)

摘要: 为了研究 GCL 膨润土防水毯用于咸寒地区渠道衬垫系统的有效性,对膨润土防水毯进行水化试验、干湿循环试验、冻融循环试验、自愈能力试验,研究 GCL 的膨胀和渗透特性,分析影响材料渗透系数的因素。结果表明:水化液对材料的渗透性影响较大,离子浓度越高,渗透系数越大,未经水化的材料不能直接用于施工中;材料经历干湿循环后,渗透系数变化不大,并具有良好的自愈性;随着冻融循环次数的增加,渗透系数逐渐减小,GCL 在严寒条件下能保持良好的防渗性;膨润土的压缩率与渗透系数呈正相关,变形随着冻融次数的增加而减小,抗变形能力增加,GCL 可用于北疆严寒区渠道防渗。

关键词: 咸寒地区渠道;防渗渠道衬垫;膨润土防水毯;材料膨胀特性;干湿循环试验;冻融循环试验;渗透系数

中图分类号:TV441

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2016)01-0072-06

Experimental studies on characteristics of GCL used for channel liner in cold regions

WU Shiyang, CAI Zhengyin, HUANG Yinghao, WU Zhiqiang, GENG Zhizhou

(Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to investigate the feasibility of using geosynthetic clay liner (GCL) for channel liner systems in cold and salty soil regions, several tests were conducted, including a hydration test, drying-wetting cycle test, freeze-thaw cycle test, and self-healing test. The swelling and permeability characteristics of GCL were studied, and the factors influencing the permeability coefficients of GCL were analyzed. The results show that the hydration solution greatly affects the permeability of the material: the higher the ion concentration is, the greater the permeability coefficient is; and the material cannot be used in construction without hydration. After drying-wetting cycles, the permeability coefficient of the material changes a little, owing to its high self-healing capability. The permeability coefficient gradually decreases with the increase of the number of freeze-thaw cycles, indicating that the material can maintain high impermeability under cold conditions. The bentonites' compressibility and permeability coefficient are positively correlated; the degree of deformation decreases with the increasing number of freeze-thaw cycles, meaning that the ability of resistance to deformation of the material increases. GCL can be used in channel liner in cold regions, in the northern China.

Key words: channel in cold region; waterproof channel liner; geosynthetic clay liner; material swelling characteristics; drying-wetting cycle test; freeze-thaw cycle test; permeability coefficient

新疆地处欧亚大陆腹地,属于典型的干旱、半干旱地区,存在着严重的资源性缺水^[1]。针对新疆的缺水问题,20 世纪建设了一批长距离输水明渠。由于建设水平不高,并因新疆地区冬季严寒且持续时间长(最冷月平均气温零下 20℃),灌渠衬垫容易受到冻胀破坏,造成水资源利用率低,浪费严重,每年维修费用高,严重影响渠道的正常运行。因此,若考虑把膨润土防水毯(geosynthetic clay liner, GCL)应用于渠道衬垫,其具

收稿日期:2015-01-23

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201201037);南京水利科学研究院国家重点实验室基本科研业务费项目(Y314006)

作者简介:吴诗阳(1990—),男,安徽青阳人,博士研究生,主要从事土工合成材料和砂土本构研究。E-mail: 718228381@qq.com

有施工便捷、价格低廉的优点,对解决北疆地区渠道冻害现象具有重要研究应用背景。

GCL 是 20 世纪 90 年代在美国开发的一种新型防水材料,由于具有较低的渗透系数,使其在土木工程领域中得到了广泛应用^[2]。GCL 最先应用于垃圾填埋场的底部衬垫系统和封盖场覆盖系统中,我国于 2005 年才开始使用 GCL,且主要用于垃圾填埋场中^[3],在咸寒地区渠道衬垫中的使用相当少。由于这类地区的纬度高、冬季气温低,并伴随盐渍化现象,使得普通防渗材料在该类地区应用存在一定的局限性。

国外学者对膨润土防水毯研究较早。Kelly 等^[4]认为 GCL 能适用于严寒地区是因为反复冻融和干湿循环对材料性能影响很小。Abdelmalek 等^[5]认为在蒸馏水中进行干湿循环试验对 GCL 的透气性影响不大,但在 CaCl_2 溶液中得出的渗透系数往往偏大。Ashe 等^[6]发现在倾斜放置的 GCL 中,一旦有水渗入,所有测试的样品都会出现一定程度的侵蚀现象。McCartney 等^[7]认为材料在低应力下,内部的剪切强度随着剪切速率的增加而增加,但在高应力下则呈现相反的规律。Rowe 等^[8]通过不同水化液的冻融循环试验,探讨了渗透系数和孔隙比随着冻融次数变化的规律。

国内在 GCL 研究方面,林伟岸等^[9]通过加载试验分析水化液、正应力、加载顺序、加载速率等对膨润土挤出的影响;张宏伟等^[10]通过大型直剪仪对 GCL 界面剪切强度特性进行研究;徐超等^[11]研究溶液对 GCL 膨胀和渗透特性的影响等。但是,针对 GCL 用于咸寒地区渠道衬垫系统的研究很少,并且研究的成果存在很大争议。周春生等^[12]认为膨润土防水毯的渗透系数随着冻融循环次数的增加而增大;王芳等^[13]、陈生水等^[14]则认为渗透系数会随着冻融次数的增加而减小。良好的防渗性是 GCL 最重要的性质,在各种外界条件下 GCL 的变化是首先应该明确的基本规律,这对于 GCL 在渠道防渗防冻工程中的应用具有重要指导价值。因此,笔者通过系列水化试验、干湿循环试验、冻融循环试验,分析水化液、干湿过程、冻融过程对 GCL 膨胀和渗透特性的影响。

1 试验材料

所用 GCL 是产自江苏省苏州市太仓县的双面针刺膨润土防水毯,该材料总共 5 层,自上而下依次为:无纺土工布、膨润土颗粒层、裂膜丝编织土工布、膨润土颗粒层、无纺土工布;该 5 层结构通过穿刺工艺固定连接在一起,这种结构的好处是弥补了土工布与无纺布之间膨润土颗粒少的缺陷。材料的单位面积质量为 8 kg/m^2 ,通过试验测得含水率为 14.8%,在蒸馏水中的自由膨胀容为 12.9 mL/g 。

2 试验仪器和方法

含水率试验和膨胀指数试验参照 GB/T 20973—2007《膨润土》^[15]进行;渗透试验参照 SL 235—2012《土工合成材料测试规程》^[16]进行。其中渗透试验仪器是由南京水利科学研究院和南京土壤仪器厂共同研制的 GCL-1 型土工合成黏土衬垫渗透仪(原理见图 1),为新一代的柔性壁三轴渗透仪。试验方法如下:将膨润土垫裁剪成规定尺寸的圆形(直径为 100 mm),然后测定材料的初始状态(厚度、直径、质量等)。裁好的试样准备安装,先将透水石放置在渗透仪的底端,在上面覆上 1 层滤纸和试验试样,将另 1 张滤纸放在试样上面,随后加上透水石和顶盖;试样周围用橡胶膜包裹,橡胶膜的上下端分别套上 O 形密封圈;安装压力室,连接各管线,向压力室注入水或其他液体,仔细检查各通水管线,确保无气泡。安装结束,以 70 kPa/min 的速度增加围压和反压,直至围压最后加至 550 kPa ,反压至 515 kPa 。保持围压 550 kPa 和试样内反压 515 kPa 情况下 48 h,使试样能够完全水化达到饱和,再进行渗透试验。渗透系数采用常水头试验测定,将试样底部压力提高到 530 kPa 分别记录进水管和出水管水头读数,采用式(1)进行计算:

$$k = \frac{q\delta}{\Delta h} \eta \quad (1)$$

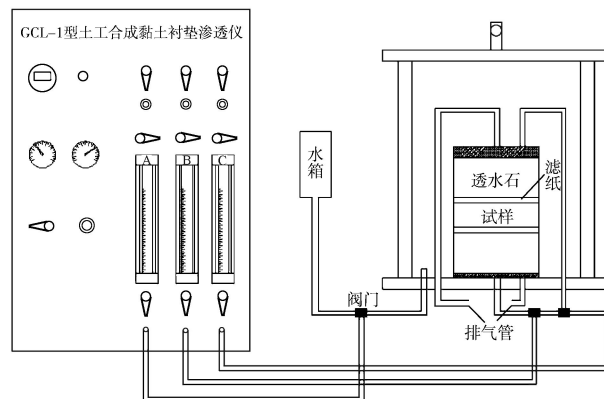


图 1 渗透仪原理示意图

Fig. 1 Principle of penetration meter

其中

$$q = \frac{Q}{At}$$

式中: k ——渗透系数, m/s ; q ——流速, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; δ ——试样厚度, mm ; Δh ——水头差(压强为 15 kPa 时, 水头差为 1 503 mm); η ——水温修正系数, 取 0.91; Q ——流量, 按流入和流出的平均值计算, m^3 ; A ——透水石横截面积, 0.00785 m^2 ; t ——试验所用的时间, s 。

冻融循环试验采用上海一华仪器设备有限公司生产的高低温交变湿热试验箱, 该箱控制温度变化范围为 $-70 \sim +100 \text{ }^\circ\text{C}$, 温度波动度 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 温度均匀度 $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, 降温速率 $0.7 \sim 1 \text{ }^\circ\text{C/min}$ 。设定试验温度为 $-20 \sim +20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。试样厚度的测量按照上述试验规程进行, 取 3 个测量值的平均值作为计算厚度。

3 水化液对 GCL 渗透性的影响

选取自来水(用 W_T 表示)、NaCl 溶液(用 W_{NaCl} 表示)、蒸馏水(用 W_D 表示)3 种溶液作为水溶液和渗透液。根据规定选取 NaCl 溶液质量浓度为 5 g/L, 并加入未水化的试样进行对比试验。通过试验测得在 W_T 中 GCL 的渗透系数为 $4.24 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$, 在 W_{NaCl} 中 GCL 的渗透系数为 $4.31 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$, 在 W_D 中 GCL 的渗透系数为 $3.46 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$, 可见不同水化液下的 GCL 渗透系数不同, 其中在 W_{NaCl} 中 GCL 的渗透系数比在 W_T 中的大 10 倍之多, 可见溶液中离子浓度越大则 GCL 材料的渗透系数越大。表 1 给出了 GCL 在不同水化液下的膨胀率, 从表 1 中可以看出 GCL 的自由膨胀率随着离子浓度的增加而减小, 进而可以看出 GCL 吸水膨胀后的厚度对其渗透性有很大的影响, 厚度越大, 防渗效果越好。表 2 给出了 GCL 在试验过程中不同水化液下的压缩程度, 从表 2 中可以看出在 W_{NaCl} 中压缩量最大, 蒸馏水中最小, 结合之前渗透试验可以得出渗透系数越小, 材料在试验过程中的压缩量也越小的结论。经试验测得未水化的 GCL 的渗透系数为 $9.1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$, 比在 W_D 中水化的渗透系数大 263 倍, 防渗作用已不明显, 因此在施工过程中需对材料预先水化, 方可使用。

表 1 不同水化液下 GCL 的膨胀率

Table 1 Swelling rate of GCL with different hydration solutions

水化液	GCL 厚度/mm		膨胀率/%
	水化前	水化后	
W_T	8.517	14.846	74.32
W_{NaCl}	8.444	12.233	44.87
W_D	8.514	15.014	76.35

表 2 不同水化液下 GCL 的压缩程度

Table 2 Degree of compression of GCL with different hydration solutions

水化液	GCL 厚度/mm		压缩率/%
	水化前	水化后	
W_T	16.074	14.486	9.88
W_{NaCl}	13.035	11.543	11.45
W_D	15.573	14.330	7.98

4 干湿循环对 GCL 渗透性的影响

咸寒区灌渠每年秋季即停止供水, 春季才开始逐步供水, GCL 不可避免地会经历干湿循环过程。因此取 W_T 和 W_D 水化试样进行干湿循环试验, 循环次数为 1 次。干湿循环试验的流程为正常渗透试验后, 拆除试样, 将试样放置于阴凉干燥处风干 2~3 d, 直至试样完全干燥(试样表面出现明显褶皱), 待膨润土垫试样干燥后, 进行预水合作用, 再重复渗透试验的步骤进行干湿循环试验。

此次试验取 W_D 水化的 2 个试样和 W_T 水化的 1 个试样进行干湿循环试验, 结果显示 W_D 试样 1、 W_D 试样 2 和 W_T 试样在循环试验前的渗透系数分别为 $3.46 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ 、 $3.86 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ 、 $4.14 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$, 在循环试验后的渗透系数分别为 $3.53 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ 、 $3.41 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ 、 $4.41 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$, 该结果表明干湿循环对 GCL 的渗透系数影响较小, 第 1 个试样干湿循环后渗透系数有所增大(增大了 2.02%), 第 2 个试样干湿循环后渗透系数有所减小(减小了 11.66%), 第 3 个试样干湿循环后渗透系数增大了 6.52%。因此, 可以认为干湿循环对 GCL 的渗透性影响很小, 在 10^{-9} 数量级中, 可以忽略不计, 这与 Ling 等^[17]和 Kelly 等^[4]的研究成果相似(他们指出干湿循环对材料的渗透性影响很小, 但经过反复多次的循环会导致渗透系数增加)。这是因为饱和膨润土试样在风干过程中无侧限和无上覆荷载约束, 容易失水收缩, 形成多条裂隙, 反复多次的循环, 导致

裂隙在吸水过程中无法愈合而形成渗流通道,进而提高了渗透性。因此,在实际应用中要保证膨润土垫在一定条件下使用,并尽可能保证材料的湿润性,提高材料的使用寿命。

图2显示的是干湿循环试验过程中2个不同的试样。图2(a)是试验结束后的试样,表面比较均匀,图2(b)是静置2~3d后的试样,表面上有明显的褶皱,因失水收缩造成,但经吸水饱和后可以恢复到与图2(a)相似的外观,并经试验测得渗透系数变化很小,表明材料具有良好的自愈性,在极端情况下也能保持很好的防渗效果。



(a) 正常试样

(b) 干湿循环后的试样

图2 干湿循环试样

Fig. 2 Samples in drying-wetting cycle test

5 冻融循环对 GCL 渗透性的影响

北疆咸寒地区冬季极端气温低于 -40°C ,夏季气温高于 30°C ,季节性温差大,冬季负温时间较长(从10月到次年4月),渠道容易受冻融的影响而破坏,为了了解 GCL 在经历多次冻融循环后防渗效果是否会发生变化,将预先水化饱和的试样置于 -20°C 试验箱中24h,再将冻结后的 GCL 置于室温下融48h,即为1次冻融循环,共进行7次冻融循环试验。试验结果见图3、图4。

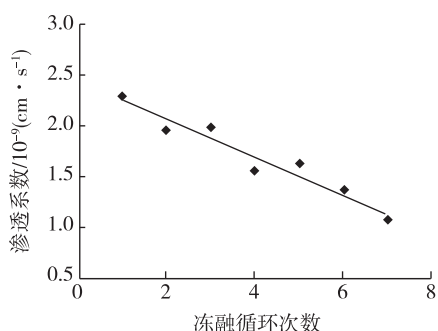


图3 冻融循环次数与渗透系数关系

Fig. 3 Relationship between number of freeze-thaw cycles and permeability coefficient

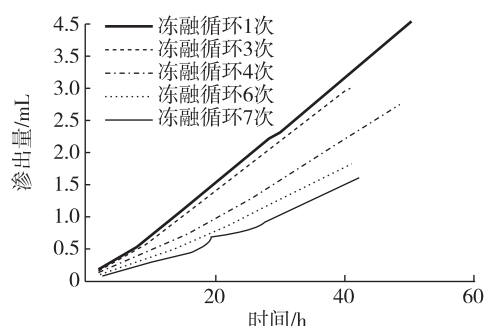


图4 时间与渗出量关系

Fig. 4 Relationship between time and seepage amount

由图3可知:渗透系数随着冻融循环次数的增加而逐渐减小,并呈线性减小趋势。由图4可知:溶液通过 GCL 的渗出量与时间呈线性增长关系,说明当 GCL 吸水饱和后,就能保持良好的防渗性,不会随着时间增长出现波动或不稳定现象;不同的冻融次数,曲线斜率不同,冻融次数越多,斜率越小,渗透系数越小,防渗效果越好。该现象可以解释如下:当材料处于 -20°C 低温下,膨润土中自由水和结合水几乎冻结,冻结完成后放入室温中进行融解,膨润土在经历冻融循环后会发生颗粒破碎,随着土体内水分的蒸发,破碎后的细小颗粒会随着毛细水的牵引力挤进土体的孔隙中,使土体的孔隙率降低,土体更加致密,不易被压缩,因此提高了材料的防渗能力。

此次试验结果与前人研究的成果相似(Kelly 等^[4]指出经过多次冻融循环后材料可以保持良好的防渗性,陈生水等^[14]通过试验得出冻融循环对材料渗透性影响不大的结论)。但他们没有明确指出渗透系数与冻融循环次数的关系,本文通过多次试验发现它们呈线性增长趋势,并通过渗出量的测量,发现饱和的 GCL

能保持稳定的防渗性能。然而,本文结果与周春生等^[12]研究的成果有很大差异,他们认为冻融循环导致材料渗透性增强。

6 冻融循环对 GCL 膨胀特性的影响

进行试验前测出试样的厚度,试验结束后再次测得试样的厚度,如图 5 所示。由此图可知,随着冻融循环次数的增加,试验前后试样的厚度差越来越小,膨润土的抗变形能力增加,经历冻融循环 7 次后,试验前的厚度和试验后的厚度几乎一致,膨润土压缩量很小,可以忽略不计。主要是因为冻融循环导致膨润土颗粒破碎,破碎过后的细小颗粒在膨润土融化的过程中由于水牵引力作用被带进细小的孔隙中,使膨润土更加致密,使得膨润土在反复冻融情况下,不易被压缩。为了反映膨润土压缩量和渗透系数的关系,取冻融 1~7 次的试样,用式(2)计算其压缩率 s :

$$s = \frac{h_1 - h_2}{h_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: h_1 ——试验前试样厚度,mm; h_2 ——试验结束后试样厚度,mm。

所得结果如图 6 表明,压缩率越小,渗透系数越小。该结果与表 2 结果吻合,说明试样在渗透过程的压缩量也是影响渗透系数的一个因素。

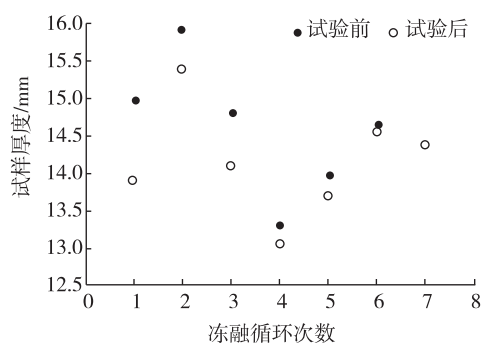


图 5 冻融循环次数与试样厚度关系

Fig. 5 Relationship between number of freeze-thaw cycles and sample thickness

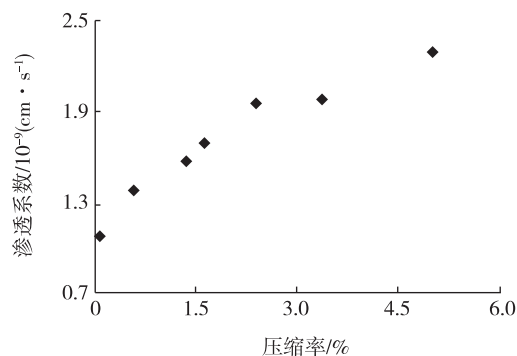


图 6 压缩率与渗透系数关系

Fig. 6 Relationship between compressibility and permeability coefficient

7 结 论

a. 水化液对 GCL 的渗透系数影响较大,离子浓度越大,渗透系数越大;水化过的 GCL 材料与未水化的相比,渗透系数后者比前者大 263 倍;未经水化过的 GCL 不能直接应用于防渗工程中。

b. 干湿循环对材料的渗透性影响很小,总的趋势是使渗透系数有所增加,并且材料具有良好的自愈性。

c. GCL 的渗透系数随着冻融循环次数的增加而减小,几乎呈线性减小趋势,吸水饱和后就能保持稳定的防渗性能,在咸寒区渠道能起到很好的防渗作用,防止渠道因渗透导致的冻胀破坏。

d. 冻融循环不仅影响材料的渗透性,还影响材料的变形性能,随着冻融循环次数的增加,材料变形减小、抗变形能力增加;饱和膨润土的压缩量越小,防渗效果越好。

参考文献:

- [1] 周春生,史海滨,于键,等. GCL 用于内蒙古河套灌区渠道防渗的适用性研究[J]. 内蒙古农业大学学报,2010,31(2):253-259. (ZHOU Chunsheng, SHI Haibin, YU Jian, et al. Study applicability of GCL for seepage of canal in HETAO irrigation district inner Mongolia[J]. Journal of Mongolia Agricultural University, 2010,31(2):253-259. (in Chinese))
- [2] 李志斌,徐超. 竖向应力作用下 GCL 的膨胀特性和渗透性能[J]. 岩土工程学报,2007,29(12):1876-1880. (LI Zhibin, XU Chao. Swelling characteristics and hydraulic properties of GCLs under vertical stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007,29(12):1876-1880. (in Chinese))
- [3] 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,2007.
- [4] KELLY M, HENRY F, GREG G. Design consideration for GCLs used in Alaska landfills[J]. Gold Regions Engineering, 2002,

- 5:922-937.
- [5] ABDELMALEK B, THAVEESAK V, STEPHAN J. Effect of wet-dry cycles and cation exchange on gas permeability of geosynthetic clay liners[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006,132(8):1011-1018.
- [6] ASHE L E, ROWE R K, BRACHMAN R W I, et al. Laboratory study of downslope erosion for 10 different GCLs[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015,141(1):1-8.
- [7] McCARTNEY J S, ZORNBERG J G, SWAN R H. Effect of shear displacement rate on the Internal shear strength of GCLs[J]. *Geosynthetics Research and Development in Progress*, 2005,6:1-6.
- [8] ROWE R K, TOSHIFUMI M, RICHARD J B. Compatibility with jet-1 of a GCL subjected to freeze-thaw cycles[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006,132(12):1526-1537.
- [9] 林伟岸,詹良通,陈云敏,等.GCL/GM 界面膨润土挤出机理研究[J].*岩土工程学报*,2010,32(6):832-837. (LIN Weian, ZHAN Liangtong, CHEN Yunmin, et al. Mechanism of bentonite extrusion of GCL/GM interface[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010,32(6):832-837. (in Chinese))
- [10] 张宏伟,林伟岸,詹良通,等.土工膜/GCL 界面剪切强度特性的试验研究[J].*土木工程学报*,2013,46(2):123-130. (ZHANG Hongwei, LIN Weian, ZHAN Liangtong, et al. Experiment study on shear strength of GM/GCL interface[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013,46(2):123-130. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] 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]. *Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012,28(5):95-100. (in Chinese))
- [13] 王芳,杨明昌,严丽雪,等.土工合成材料膨润土垫渗透特性的试验研究[C]//中国水利学会岩土力学专业委员会.第一届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会论文集.北京:中国水利水电出版社,2006:973-974.
- [14] 陈生水,郑澄锋,杨明昌.新型防渗材料膨润土垫的试验研究[J].*水利水运工程学报*,2006,3(3):34-38. (CHEN Shengshui, ZHENG Chengfeng, YANG Mingchang. Experimental study of a new type of GCL anti-seepage material[J]. *Hydro Science and Engineering*,2006,3(3):34-38. (in Chinese))
- [15] 中国建筑工业协会. GB/T 20973—2007 膨润土[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [16] 南京水利科学研究院. SL 235—2012 土工合成材料测试规程[S].北京:中国水利水电出版社,2012.
- [17] LING Chulin, GRAIG H B. Effect of wet-dry cycling on swelling and hydraulic conductivity of GCLs[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000,126(1):40-49.