

冻融循环对 GCL 渗透特性的影响

刘志彬¹, 刘 锋¹, 张书建², 白 梅¹

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 吉林省高等级公路建设局, 吉林 长春 130062)

摘 要: 为探究土工复合膨润土垫(GCL)在长期冻融循环作用下的防渗性能,以6 h的冷冻和6 h的融化为冻融周期对GCL进行冻融循环试验,研究了经历不同冻融次数后GCL渗透系数和自由膨胀率的变化规律.试验结果表明:4 h内GCL可以达到冻胀稳定状态;GCL经历冻融循环作用后,再经历冻结时易产生不均匀冻胀;GCL在经历较少(≤ 30 次)冻融循环次数情况下,渗透系数随冻融循环次数增加而减小,其最终渗透系数的量级在 $10^{-11} \sim 10^{-10}$ m/s之间;随着冻融循环次数的增加,GCL中膨润土的自由膨胀率先增大后减小,最后趋于稳定.

关 键 词: 土工复合膨润土垫;冻融循环;渗透特性;膨润土;自由膨胀率

中图分类号: TU 57 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2020)07-1027-06

Effect of Freeze-Thaw Cycles on Hydraulic Permeability of GCL

LIU Zhi-bin¹, LIU Feng¹, ZHANG Shu-jian², BAI Mei¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Jilin Provincial High Class Highway Construction Bureau, Changchun 130062, China. Corresponding author: LIU Zhi-bin, E-mail: seulzb@seu.edu.cn)

Abstract: To analyze the anti-seepage performance of geosynthetic clay liner (GCL) after long-term freeze-thaw cycles, the 6-hour freezing and 6-hour thawing cycle tests on GCL material were carried out. The permeability coefficient and free swelling ratio of GCL after different freeze-thaw cycles were studied. The results show that the frost heave of GCL can reach a stable state within 4 h, and when frozen again, differential frost heave can occur in the GCL sample after freeze-thaw cycles. When the number of freeze-thaw cycles is low (≤ 30 times), the permeability coefficient of GCL decreases with increase of the number of freeze-thaw cycles, and the permeability coefficient is between 10^{-11} m/s and 10^{-10} m/s. As the number of freeze-thaw cycles increases, the free swelling ratio of bentonite in GCL increases first, then decreases and finally reaches a steady value.

Key words: GCL (geosynthetic clay liner); freeze-thaw cycle; hydraulic permeability; bentonite; free swelling ratio

土工复合膨润土垫(geosynthetic clay liner, GCL)作为一种新型防渗材料,相比传统防渗材料,具有很强的抗冻融、干湿性能,因此在我国北部以及其他寒旱地区具有很好的环境适应能力,例如可以用于寒旱地区河渠以及垃圾填埋场防渗工程中^[1-2].

国内外论文中对GCL在冻融循环作用下渗透系数的分析普遍认为,冻融作用对材料防渗性

能影响较小.Hewitt等^[3]对经历了3次冻融循环的GCL材料进行了柔性壁渗透测试,结果表明在经历3次冻融循环后,GCL的渗透性没有发生显著变化.Rowe等^[4]利用水和航空煤油对GCL进行水化并进行冻融循环试验,发现航空煤油水化的GCL渗透系数比水化冻融后的渗透系数小一个数量级,且冻融循环次数的增加对GCL渗透系数影响较小.Makusa等^[5]模拟北美极端气候对

GCL 材料进行了 20 次冻融循环后发现其渗透系数未发生明显改变.

但上述研究通常建立在冻融次数较少(≤ 30 次)的试验基础上,且现阶段关于 GCL 的研究集中于垃圾填埋场以及河道沟渠的防渗性能研究,对经历长期冻融作用后 GCL 防渗性能的研究相对较少.另外,国外 GCL 中的膨润土以钠基膨润土为主,而国内膨润土以改性钙基膨润土为主,因此国外试验结果的适用性值得考量.本文结合国内外对 GCL 防渗性能的研究现状,通过试验对 GCL 经历长期冻融循环作用后的防渗性能进行研究,通过测定渗透系数和自由膨胀率对 GCL 经历冻融循环后的性质进行分析.

1 试验材料和试验方法

1.1 试样基本性质

本试验使用的 GCL 为江苏某土工合成材料厂家提供的缝合型 GCL,由一层黑色土工织物和一层白色纺织材料夹缝中间的膨润土组成.对夹层中的土颗粒进行筛分试验,可得级配曲线如图 1 所示.

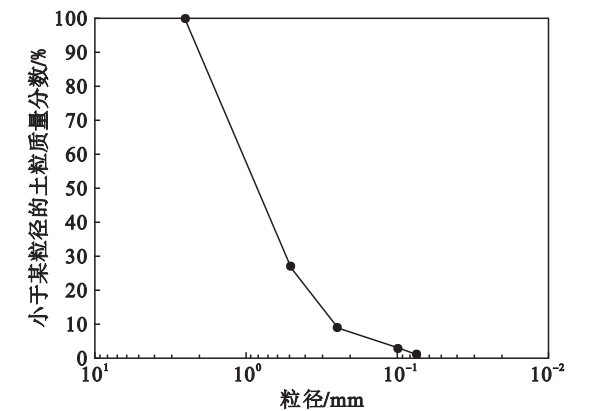


图 1 GCL 中膨润土级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of bentonite in the tested GCL

为了解 GCL 中夹缝土的基本性质,使用液塑限联合测定仪对土样进行了测定,得到该膨润土的塑限为 69.9%,液限为 392.9%.

1.2 冻融循环作用下 GCL 渗透试验方案

柔性壁渗透仪底座直径为 31 cm,考虑裁剪试样过程中可能导致边缘膨润土散落,故选择直径 33 cm 裁剪 GCL,如图 2 所示. GCL 饱和试验参照水利部土工试验方法标准^[6],使用真空饱和系统对裁剪后的 GCL 进行饱和.

考虑 GCL 试样中以膨润土为主,按照规范抽气 1 h,抽气过程中慢慢打开管夹,用进水管缓慢

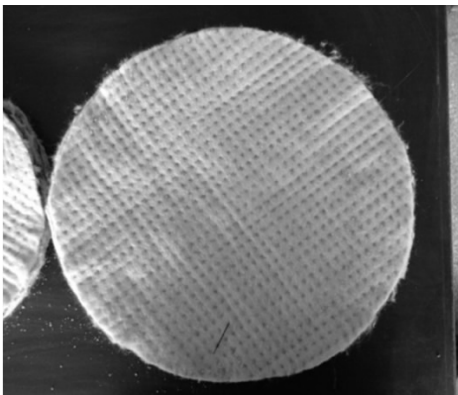


图 2 裁剪后 GCL 试样

Fig. 2 Cropped sample of the GCL

地将清水注入真空缸.在注水过程中,应注意观察真空计的数值,并根据数值变化调整管夹,保持真空计的数值基本不变,减少试验误差.当真空缸中的水表面完全浸没 GCL 试样之后,立即停止抽气,并从真空缸中取出进水管.同时,打开管夹使空气进入真空缸,将试样静置 24 h,使 GCL 试样在大气压下饱和.

参考 Qi 等^[7]、Ghazavi 等^[8]的研究,在冻融循环对土性质影响试验过程中,12 h 的冷冻和融化可以作为一个冻融循环.将试样放置在冻融箱中,并在试样底部垫上 6 mm 厚的棉垫或相似的透水材料.在不高于 $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下冷冻试样 6 h,再将试样转移至 100% 相对湿度的养护室中,在 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下放置样品 6 h,并使试样底部充分吸水.试样冻结过程中在 GCL 材料表面安置一个百分表,每小时进行读数,将结果数据绘制为试样冻胀过程隆起高度随时间变化曲线,如图 3 所示.

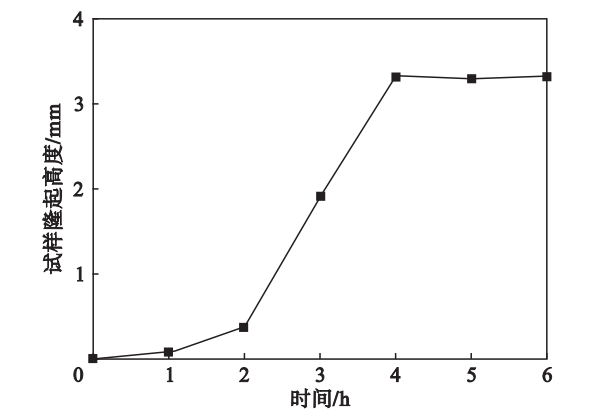


图 3 冻结过程中 GCL 试样隆起高度变化

Fig. 3 Rising height of GCL sample with time

由图 3 可知,经过 4 h 的冻结后 GCL 试样隆起高度几乎不变,试样已经达到冻结稳定阶段.由此可知采用 6 h 的冷冻和 6 h 融化为周期的冻融循环控制条件是适用于 GCL 的冻融循环研究的.

渗透试验采用 GEOTEST 公司生产的 GCL 柔性壁渗透仪及 2 台 GDS 标准控制器. 2 台 GDS 标准控制器分别用于施加围压和渗透压. 结合本试验的情况和规范要求,同时参照 ASTM D5887 GCL 柔性壁渗透试验规范^[9],采用较低的围压和渗透压. 试验中先施加 35 kPa 围压使样品固结排水,并记录排水量. 固结完成后施加 15 kPa 渗透压进行渗透试验. 渗流量测定时采用规范中流入渗出比 0.75~1.25 作为参考,最终采用稳定阶段的渗流量计算 GCL 试样的渗透系数.

本试验中,渗透过程保持水头为 1.5 m,属于常水头试验,根据达西定律可以得出

$$k=\frac{VL}{A\Delta ht}.$$

(1)

式中: k 为渗透系数, m/s ; V 为渗出水体积, m^3 ; L 为过水路径长度, m ; A 为渗透试验过水断面积, m^2 ; Δh 为渗透试验上下水头差, m ; t 为渗透时间, s .

使用式(1)计算试样渗透系数,作为试样渗透性的参考指标.

1.3 自由膨胀率试验

自由膨胀率试验参考美国 ASTM D5890-19 规范^[10]进行试验设计:将冻融结束后的 GCL 试样中的膨润土烘干;将烘干后的膨润土样研磨使其 80% 通过 0.5 mm 筛;使用自由膨胀率试验仪将土样填入 10 mL 容积的土杯中;将土样缓慢加入 100 mL 水中并搅拌均匀;将搅拌完成的试样注入容积为 500 mL 的量筒中,将液面填满至 500 mL 刻度处,静置 24 h 并读数.

2 渗透试验结果与讨论

2.1 冻融过程及其现象

冻融过程中,试样底部充分吸水,且在无侧向约束条件下自由膨胀. 经历多次冻融循环后,试样表面会出现较明显的隆起,隆起通常发生在试样中部,并且随冻融循环次数的增加,隆起部分厚度还会不断增大,图 4 为经历了 40 次冻融循环后的 GCL 试样,试样中部隆起位置厚度达到 60 mm,有明显的局部膨胀.

冻融循环过程中,试样边缘的膨润土会被侧向挤出. 当冻融循环次数较少时,GCL 试样中膨润土被侧向挤出的现象并不明显,但随冻融循环次数的增加,边缘土被挤出的现象越来越明显,边缘厚度相比饱和后未经历冻融循环的样品厚度有所减小,厚度约 10 mm. 表 1 为各试样冻融后厚度统计表.

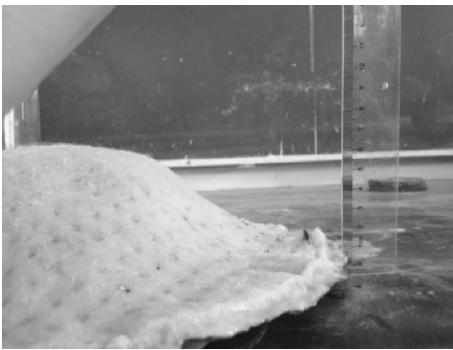


图 4 经历 40 次冻融循环试样膨胀现象
Fig. 4 Inflation of the sample after 40 freeze-thaw cycles

表 1 各试样冻融循环后厚度统计表
Table 1 Thickness of each sample after freeze-thaw cycles

冻融循环次数	0	5	17	30	40
最大厚度/mm	16	22	32	42	60
最小厚度/mm	14	18	16	12	10

由表 1 可见,冻融循环次数越多,材料边缘土侧向挤出与中部膨胀的现象就越明显,这可能是由于 GCL 中的膨润土本身具有吸水膨胀特性,由于试样本身没有达到完全饱和,因此冻融循环过程中,膨润土会进一步吸水膨胀;严晗等^[11]提出,在一维冻结条件下,表面土体首先发生冻结,使得试样表层土体与未冻结区之间形成温度梯度. 在温度梯度的作用下,未冻结区的水分和外界补水水源的水分向冻结锋面区域发生水分迁移,导致试样内部的含水率分布发生变化. 在经历多次冻融循环后,外界补水水源水分不断进入试样,使得试样含水量提高,表现为试样膨胀.

2.2 试样固结过程分析

为便于对试验固结过程进行分析,仅考虑开启控制器时间段内的固结,分析试验过程中固结排水量与时间的关系曲线,经历 5 次冻融循环试样固结排水量曲线如图 5 所示.

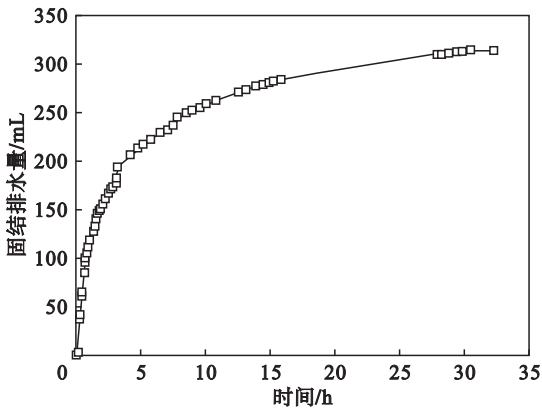


图 5 经历 5 次冻融循环后试样固结排水量曲线
Fig. 5 Consolidated discharge vs. time after 5 freeze-thaw cycles

由图 5 可以发现,固结时间约 32 h,曲线斜率不断变小,直至接近 0. 由于渗透仪围压腔密闭,故认为固结排水量即试样的体积变化量. 从曲线可知,固结过程开始时,试样固结变形速率很快,随着固结时间增加,试样变形速度持续变慢,最终达到稳定状态,固结过程结束,可以进行渗透试验.

再选取试验中经历 30 次冻融循环的试样进行分析,如图 6 所示. 考虑控制器容量问题,使用单向排水固结的方法在夜间对试样进行固结,固结排水量在中间时刻有增大现象. 这是由于试验中对围压控制器进行了一次补充脱气水,因围压卸荷导致试样受扰动产生回弹,因此当固结重新开始时,固结变形速度会有增加. 曲线最终仍然保持收敛趋势,因此认为固结过程结束,可以进行渗透试验.

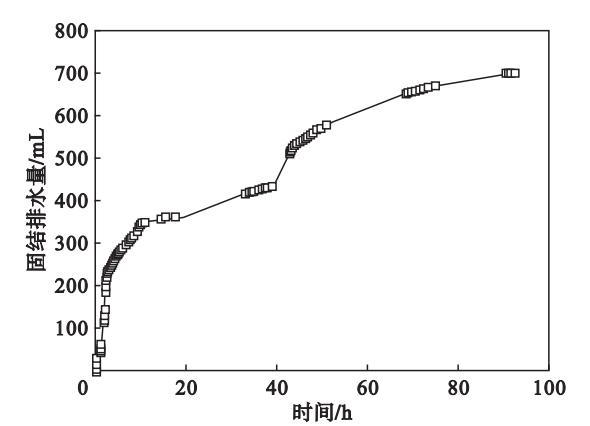


图 6 经历 30 次冻融循环后试样的固结排水量曲线
Fig. 6 Consolidated discharge vs. time after 30 freeze-thaw cycles

其余试样均采用了相同的分析方法,表 2 为各试样固结情况的统计.

表 2 各试样固结试验结果 Table 2 Test results of consolidation					
冻融循环次数	0	5	7	30	40
固结排水量/mL	90	313	584	700	926
试验时间/h	69	50	92	138	94
固结时间/h	12	32	32	92	72

随着冻融循环次数的增加,试样固结过程总排水量也随之增加,这一现象源于冻融循环过程中 GCL 试样中膨润土不断吸水. 试样经历冻融循环的过程中,试样内土颗粒含量保持不变或因侧漏而有所减少,但过程中试样不断吸水,因此固结排水量不断变大. 从表 2 可看出,试样固结时间也随冻融循环次数的增加而增加,部分样品的固结时间不完全符合此规律,可能是由于个别样品试

验过程中围压腔渗漏时需要卸载围压,并且拆开渗透仪,导致试样小幅回弹和扰动,从而影响了固结所需时间.

2.3 渗透试验结果分析

对于未经历冻融循环的试样,经过 3 h 的渗透,渗透很快达到稳定. 图 7 是未经历冻融循环试样渗透稳定的分析曲线. 由图 7 可以看出,开始时间段内,进入测试系统内的水分需要建立稳定的渗透压,因此流入水量比渗出水量大. 在 1 h 附近流量波动较大,原因是渗透压控制器进行注水,重新开启渗透压控制器,可以观察到渗水量重新回到之前的趋势,1.5 h 后渗出量与流入量基本相同,并最终达到稳定状态,因此判定试验渗透过程稳定.

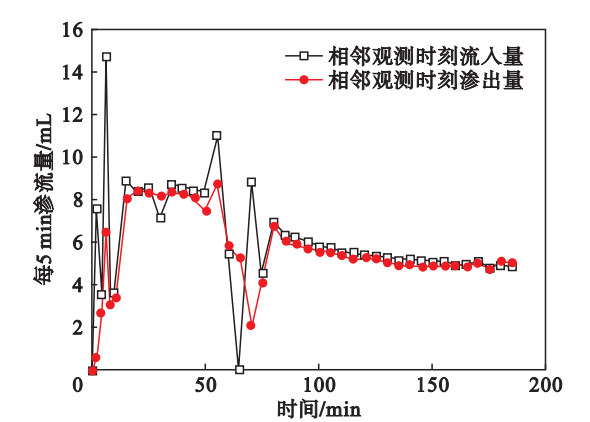


图 7 未经历冻融循环试样渗透水量曲线
Fig. 7 Seepage water volume curves of sample without freeze-thaw cycle

对于经历过冻融的试样,由于试验中测得的渗流量较小,并且达到稳定渗流状态所需时间较长,因此渗流过程通常经过 16 h 以上. 以经历 17 次冻融循环的试样为例,对经历冻融循环的试样渗透过程进行分析,图 8 为经历 17 次冻融循环后的试样在 0 ~ 3.6 h 的渗透水量曲线.

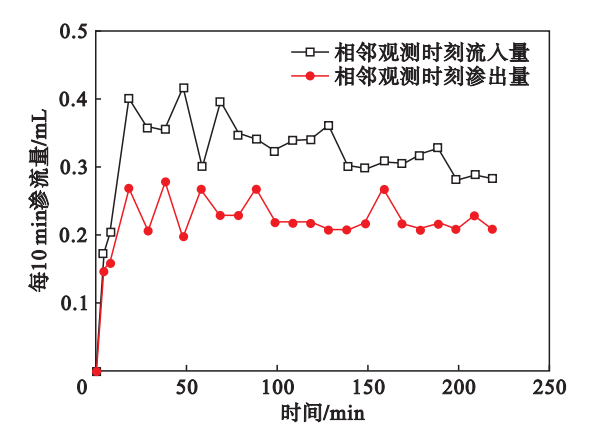


图 8 经历 17 次冻融循环试样渗透水量曲线
Fig. 8 Seepage water volume curves of sample after 17 freeze-thaw cycles

由图 8 可以发现,经历 17 次冻融循环试样的渗流量明显小于未经历冻融循环的试样.在渗透试验的 0~3.6 h 中,流入系统的水量一直高于渗出系统的水量,但差值在不断减小,故在 3.6 h 后未进行持续记录.经过 17 h 的渗流后,测得流入系统的水量为 23.6 mL,渗出系统的水量为

22.06 mL,渗流渗出与流入比值为 0.93,渗出与流入的水量基本持平,且满足比值在 0.75~1.25 之间的标准,由此判断渗透过程基本达到稳定.

表 3 为各试样渗透试验结果.试样过水断面为直径 31 cm 的圆面,过水断面面积约 760 cm²,试样固结的厚度即过水路径长,每个试样略有不同.

表 3 各试样渗透试验结果
Table 3 Results of the permeability tests

冻融循环次数	0	5	17	30	40
试样厚度/mm	13	16	17	15	17
过水断面面积/cm ²	760	760	760	760	760
渗水量/mL	70.4	51.4	23.6	24.7	26.3
渗流时间/s	3 900	71 100	64 200	68 100	64 800
渗透系数/(m·s ⁻¹)	2.6e-9	1e-10	5.5e-11	4.8e-11	6.1e-11

从表 3 中可得,经历冻融后的 GCL 试样渗透系数一般处于 10⁻¹¹ 量级,经历 5 次冻融循环的试样渗透系数为 1×10⁻¹⁰ m/s,仍比未经历冻融循环的试样渗透系数小,这与 Podgorney 等^[12], Kraus 等^[13]得到的冻融循环后 GCL 渗透系数下降的结论相符.经过分析,产生这一结果可能是由于:①钠基膨润土遇水完全膨胀需要 16 h 以上,试验中未经历冻融循环的 GCL 试样可能并未得到充分的吸水膨胀.②冻融循环过程会造成膨润土大颗粒的破碎效应,大颗粒含量减少^[14].经历冻融循环后试样中的膨润土能够吸收更多水分并在固结过程充分密实,从而使渗透系数降低.③由于本试验使用的是缝合型 GCL,此种 GCL 材料中,夹缝的膨润土受到约束,不能够完全自由地发生变形.因此膨润土若不能够充分吸水膨胀,则材料上下层土工织物与纺织材料间的缝线就容易形成渗流优势通道,渗透可能集中发生在材料缝线部分,造成渗透系数增大.

3 自由膨胀率试验结果分析

将试样中的膨润土取出,置于 105 ℃烘箱中烘干 48 h 并进行自由膨胀率试验.如图 9 所示,制备好的土样在与水混合搅拌过程中,可以观察到少量土粒快速沉淀,在充分搅拌后土样在量筒中成胶体状,没有明显的分层现象.长时间静置后,上层水有澄清迹象,但水中下层仍然有絮状胶体溶液.

图 9 中的虚线标示了各试样自由膨胀后的体积.对各试样进行自由膨胀率分析,表 4 为各土样自由膨胀率统计.

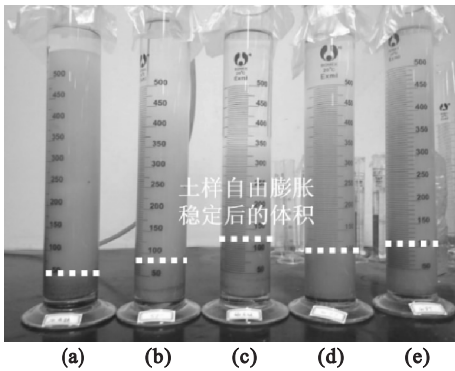


图 9 自由膨胀率试验
Fig. 9 Photo of the free swelling test
(a)—冻融循环 0 次;(b)—冻融循环 5 次;
(c)—冻融循环 17 次;(d)—冻融循环 30 次;
(e)—冻融循环 40 次.

表 4 自由膨胀率试验结果
Table 4 Results of free swelling tests

冻融循环次数	0	5	17	30	40
土样初始体积/mL	10	10	10	10	10
膨胀稳定后体积/mL	50	80	125	100	110
自由膨胀率/%	400	700	1 150	900	1 000

从表 4 中可发现,未经历冻融循环的试样自由膨胀率较小,约 400%.经历冻融循环次数较多的试样,自由膨胀率先增大后减小,然后趋于稳定,刘志彬等^[14]研究了不同冻融循环次数下 GCL 材料中膨润土膨胀指数的规律,结论与本研究上述结果一致.当试样经历较多次的冻融循环时,自由膨胀率在 1 000% 上下.未经历冻融循环的土样进行自由膨胀率试验时,上部水中没有一直保持稳定的悬液状态,长时间内没有明显澄清迹象,表明膨润土的水稳性很好,可能会造成自由

膨胀率试验的读数偏小. Ghazavi 等^[15] 研究认为冻融循环过程会导致膨润土颗粒中的水分冻结成冰,破坏膨润土颗粒之间的作用力,在自由膨胀时表现为体积增加.

4 结 论

1) 通过对 GCL 试样冻胀过程的连续观测发现,试样的冻胀过程在 4 h 后达到稳定状态,证明采用 6 h 冷冻和 6 h 融化为周期的冻融循环控制条件适用于 GCL 的冻融循环影响研究.

2) 缝合型 GCL 试样在经历冻融循环作用后,再经历冻结过程时容易产生不均匀冻胀,冻融循环次数的增加表现为试样鼓胀,若材料边界密封不牢固,容易发生侧漏.

3) 本试验中未经历冻融循环的试样渗透系数为 2.06×10^{-9} m/s,经历冻融循环的试样渗透系数在 $10^{-10} \sim 10^{-11}$ m/s 之间,说明 GCL 材料能够在长期冻融作用下保持较好的防渗性能.在冻融循环次数较少的情况下,渗透系数有随冻融循环次数增加而减小的现象.

4) 自由膨胀率测试表明,随着冻融循环次数的增加,GCL 中的膨润土的自由膨胀率先增大后减小然后趋于稳定.GCL 中膨润土颗粒的黏结特性在冻融过程中会受到影响,冻融循环作用使得土样分散性增强,土粒黏结减弱,表现为自由膨胀率增大.

参考文献:

[1] 周正兵,王钊,王俊奇. GCL——一种新型复合土工材料的特性及应用综述[J]. 长江科学院院报,2002,19(1):35-38.
(Zhou Zheng-bing, Wang Zhao, Wang Jun-qi. An overview about properties and application of a new geocomposite—GCL [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2002, 19(1): 35-38.)

[2] Feng S J, Peng M Q, Chen H X, et al. Fully transient analytical solution for degradable organic contaminant transport through GMB/GCL/AL composite liners [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2019, 47(3):282-294.

[3] Hewitt R D, Daniel D E. Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners after freeze-thaw [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(4):305-313.

[4] Rowe R K, Mukunoki T, Bathurst R J. Hydraulic conductivity to jet-A1 of GCLs after up to 100 freeze-thaw cycles [J]. *Géotechnique*, 2008, 58(6):503-511.

[5] Makusa G P, Bradshaw S L, Berns E, et al. Freeze-thaw cycling concurrent with cation exchange and the hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51(6):591-598.

[6] 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:中国计划出版社,1999:10-13.
(Ministry of Water Resources of the PRC. Standard for soil test method: GB/T 50123—1999 [S]. Beijing: China Planning Press, 1999: 10-13.)

[7] Qi J, Vermeer P A, Cheng G. A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2006, 17(3):245-252.

[8] Ghazavi M, Roustaei M. The influence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber reinforced clay [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 61(2):125-131.

[9] ASTM International. Standard test method for measurement of index flux through saturated geosynthetic clay liner specimens using a flexible wall permeameter: ASTM D5887/D5887M - 16 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2016:1-8.

[10] ASTM International. Standard test method for swell index of clay mineral component of geosynthetic clay liners: ASTM D5890 - 19 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2019:1-7.

[11] 严晗,王天亮,刘建坤. 粉砂土反复冻胀融沉特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(11):3159-3165.
(Yan Han, Wang Tian-liang, Liu Jian-kun. Experimental study of repeated frost heave and thaw settlement properties of silty sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(11): 3159-3165.)

[12] Podgornyy R K, Bennett J E. Evaluating the long-term performance of geosynthetic clay liners exposed to freeze-thaw [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(2):265-268.

[13] Kraus J F, Benson C H, Erickson A E, et al. Freeze-thaw cycling and hydraulic conductivity of bentonitic barriers [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(3):229-238.

[14] 刘志彬,王康达,刘松玉,等. 冻融循环对 GCL 材料中膨润土粒径分布及膨胀指数的影响 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(5):964-968.
(Liu Zhi-bin, Wang Kang-da, Liu Song-yu, et al. Influence of freeze-thaw cycles on particle size distribution and swell index of bentonite in geosynthetic clay liner [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2015, 45(5):964-968.)

[15] Ghazavi M, Roustaei M. Freeze-thaw performance of clayey soil reinforced with geotextile layer [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, 89(7):22-29.