

针刺 GCL 内部剪切强度的试验研究

徐超¹, 李志斌²

(1. 同济大学 岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 上海市长宁区建设与交通委员会, 上海 200050)

摘要: 通过室内直剪试验研究了土工合成材料膨润土垫(GCL)内部剪切强度及其影响因素, 并对直剪仪进行了改造. 研究表明: 针刺 GCL 的内部剪切强度主要受针刺纤维的抗拉和缠绕作用控制, 其他因素对 GCL 内部剪切强度贡献很小; 正应力和水化液类型对 GCL 内部剪切强度均有影响, 表现为内部剪切强度随着正应力的增大而逐渐增大, 水化液为蒸馏水时 GCL 的内部剪切强度最大; 在实际工程应用中, GCL 铺设完成后在堆载之前应采用自来水进行事先水化, 可提高防渗工程的稳定性.

关键词: 针刺土工合成材料膨润土垫; 内部剪切强度; 水化液; 试验研究

中图分类号: TU 472.3

文献标识码: A

Key words: needle-punched geosynthetic clay liners(GCL); internal shear strength; hydration liquid; experimental research

Experimental Research on Internal Shear Strength of Needle-punched GCL

XU Chao¹, LI Zhibin²

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Changning Construction and Traffic Commission, Shanghai 200050, China)

Abstract: The paper presents a research on the internal shear strength of a type of needle-punched GCL and the influencing factors on the basis of the laboratory direct shear test. The direct shear apparatus is modified to meet the research requirements. Experimental results show that the internal shear strength of GCL is controlled by the needle-punched fiber, and other elements have minor influence on the internal shear strength; normal stress and hydration liquid both have impacts on GCL's internal shear strength. Shear strength increases with the increasing of normal stress, and the strength reaches the largest value when GCL is hydrated by deionized and distilled water; in practice, GCLs should be pre-hydrated with tap water before being loaded, this measure can increase the stability of barrier systems.

土工合成材料膨润土垫(Geosynthetic Clay Liner, 简称 GCL)是 20 世纪 90 年代在美国开发的一种新型防水材料, 因为具有较低渗透系数, 所以在土木工程防渗领域得到了广泛应用. 在垃圾填埋场的封盖或衬里系统、湖泊或者河流的底部衬里、池塘以及水库等工程都用到了 GCL^[1]. 在实际工程应用中, 如用于填埋场的封盖或边坡衬里, GCL 会长期承受剪切应力, 因此它的耐久性和内部抗剪强度受到重视并加以研究. 在这方面, Gilbert 和 Scranton 等^[2]通过试验研究后指出: GCL 试样的水化条件和剪切速率对室内剪切试验的结果存在很大的影响; Fox 和 Rowland 等^[3]采用大型直剪仪对粘合 GCL、缝合 GCL 和针刺 GCL 的内部剪切强度进行了试验研究. 所采用的直剪仪可以量测出 GCL 的峰值剪切强度和残余剪切强度. 研究内容包括正应力、GCL 类型和水化条件对 GCL 内部的峰值剪切强度和残余剪切强度的影响规律; Zornberg 和 McCartney 等^[4-5]总结了 414 组采用大型直剪仪进行的 GCL 内部剪切强度试验成果, 探讨了 GCL 的不同类型、正应力和剪切速率等因素对 GCL 内部剪切强度的影响规律.

已有的研究虽然涉及到了正应力条件、GCL 类型、水化条件和剪切速率对 GCL 内部剪切强度的影响, 但都是针对加筋 GCL 的直接剪切, 所得内部剪切强度包含了针刺或缝合纤维本身对抗剪强度的贡献, 无法反映 GCL 长期内部剪切强度.

GCL 中针刺纤维的强度随着时间推移会发生衰减. 它的主要成分是聚丙烯纤维, Vink 和 Fontijn、Hsuan、Mengjia 和 Hsuan 通过试验研究发现聚丙烯

收稿日期: 2009-03-16

基金项目: 上海市重点学科建设资助项目(B308)

作者简介: 徐超(1965—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为地基加固与土工合成材料的应用研究.

E-mail: c_axu@tongji.edu.cn

纤维随着时间推移抗拉强度逐渐降低^[6-8]. 强度衰减的速度与聚丙烯纤维所处环境的氧气含量、氧气压力、温度等因素有关. Vink 和 Fontijn^[6] 发现在 100 °C 和氧气压力为 0.2 MPa 条件下, 聚丙烯纤维的抗拉力随着时间的衰减非常迅速, 抗拉强度在 50 d 之内就衰减为零. Mengjia 和 Hsuan^[8] 发现温度对聚丙烯纤维强度的影响比氧气含量和气体压力的影响更大. 虽然 GCL 应用于实际防渗工程时一般埋置于土体或其他材料内部, 不会暴露于空气中, 所承受的氧气压力和温度不一定能够达到上述试验条件, 但是聚丙烯纤维强度随时间而衰减的规律是明显存在的.

通过对传统直剪仪的改造, 研究针刺 GCL 内部剪切强度, 然后剔除针刺纤维, 直接对 GCL 内部膨润土进行直剪试验, 获得非加筋 GCL 或 GCL 加筋纤维完全衰减后的内部剪切强度. 研究结果显示加筋与非加筋 GCL 的内部抗剪强度差别很大, 而且针刺 GCL 的内部剪切强度主要受针刺纤维的抗拉和缠绕作用控制, 其他因素对 GCL 内部剪切强度贡献很小. 水化液类型对 GCL 内部剪切强度存在一定影响, 采用蒸馏水或自来水水化后, 有利于 GCL 内部抗剪强度的发挥.

1 试验材料与剪切仪

所用 GCL 是将颗粒状的钠基膨润土通过针刺的方式包裹在两层土工织物之间, 属于 Bentomat 类型, 单位面积质量为 $5.32 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 底层土工织物是编织土工织物, 上层土工织物是针刺土工布. 通过试验测得所用 GCL 中天然钠基膨润土的含水量为 17.0%, 对蒸馏水的自由膨胀量为 $14.0 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}$. X 射线荧光光谱分析的结果表明膨润土中 SiO_2 的含量为 57.2%, Al_2O_3 的含量为 16.1%, Fe_2O_3 的含量为 5.7%. 通过对 X 射线衍射曲线的分析可知该膨润土中蒙脱石含量为 67%, 高岭土含量为 14%, 伊利石含量为 12%, 正长石含量为 4%, 石英含量为 2%.

试验选用蒸馏水(以下简称 DDW)、自来水(以下简称 TW)、老港垃圾填埋场场内池塘水(以下简称 PW)和老港垃圾填埋场垃圾渗滤液(以下简称 MSWL)作为试验所用的水化液.

剪切试验在改进后的常规室内直剪仪上进行. 将剪切盒下盒用硬木塞住, 木块表面距离剪切盒顶面 4 mm, 采用强力胶将水化后 GCL 的下层编织土工织物固定到木块上. GCL 的上部放置一块带有小

钉子、面积为 30 cm^2 的木块, 小钉子突出木块 1 mm, 刺入到 GCL 上层的无纺土工布中, 如图 1 所示. 改进后的直剪仪可以使剪切位移达到 20 mm.

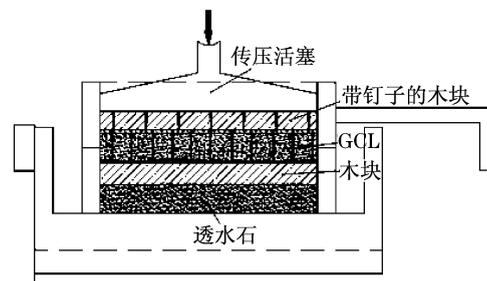


图1 GCL剪切试验装置示意图

Fig.1 Layout of shear test of GCL

2 试样准备

对于针刺 GCL 的直剪试验试件, 分别采用自来水和垃圾填埋场渗滤液进行水化, 持续时间为 4 d, 达到水化稳定后, 可剪取规定尺寸的 GCL 进行直剪试验. 试件所受的法向应力为 50 kPa, 剪切试验采用应变控制式, 剪切速率为 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

为获得非加筋 GCL 或 GCL 加筋纤维完全衰减后的内部剪切强度, 试样制作分为两个阶段进行: ① 水化阶段, 使膨润土发生限制水化, 时间为 2 d; ② 加压固结阶段, 将水化后的试样放置到固结仪中进行固结, 时间为 2 d. 在水化过程中, 为了模拟膨润土包裹在 GCL 水化的情况(竖向变形受到上、下层土工织物和针刺纤维的限制), 采用限制膨润土试样竖向变形的的方法, 试件制作的具体方法和步骤如下:

(1) 取 $10 \times 10 \text{ cm}$ 的 GCL 试样, 测量初始厚度, 然后放置到装有水化液体的容器中水化, 2 d 后取出 GCL 试样, 再次测量厚度, 结果见表 1.

(2) 取 5 块面积为 30 cm^2 的圆形 GCL 试样, 先将 GCL 中的针刺纤维剔除, 完全取出其中膨润土, 分别称量膨润土的重量, 取平均值, 可以得到面积为 30 cm^2 的 GCL 中所包含膨润土的质量.

(3) 限制膨润土膨胀仪器高度为 40 mm, 面积为 30 cm^2 , 计算使膨润土限制膨胀后高度为 40 mm 所需膨润土的质量, 如表 1 所示.

(4) 将称好的膨润土放到限制膨胀仪器中, 然后放入液体中水化. 2 d 后打开膨胀仪器, 取出试样放到固结仪中加压固结, 再过 2 d 后取出, 切下高度为 20 mm 的一块, 放到直剪仪中进行剪切试验.

对每种液体水化后的 GCL 进行 6 个法向应力等

级的剪切试验,依次为 25, 50, 100, 150, 200, 300 kPa,每组试验水化时间为 2 d,加压固结试验为 2 d.剪切过程采用的是应变控制式的固结快剪,剪切速率为 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

表 1 GCL 中膨润土的性能指标
Tab.1 Indexes of bentonite in GCLs

水化液体	初始厚度/mm	自由水化后厚度/mm	所需膨润土质量/g
MSWL	6.84	8.28	89.81
PW	6.73	9.42	76.01
TW	6.78	10.10	69.63
DDW	6.65	11.08	62.11

3 试验结果与分析

3.1 针刺 GCL 的内部剪切强度试验结果

图 2 给出了分别采用自来水和垃圾填埋场渗滤液水化后针刺 GCL 的剪应力-位移关系曲线.

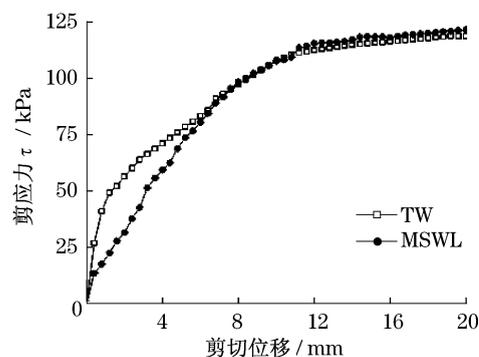


图 2 针刺 GCL 剪应力与位移关系曲线(法向应力为 50 kPa)
Fig.2 Relationship between shear stress and displacement of needle-punched GCL(under normal stress of 50 kPa)

从图 2 可以看出:① 直剪试验的最大位移达到 20 mm 时用自来水和垃圾填埋场渗滤液水化后针刺 GCL 的内部剪应力分别达到了 119.4 kPa 和 121.4 kPa,差别非常小;② 当剪切位移小于 6 mm 时,两种液体水化后的 GCL 的剪应力存在差别,采用自来水水化的 GCL 的剪应力大于用垃圾填埋场渗滤液水化的,说明针刺 GCL 内部抗剪应力除了由针刺纤维提供外,GCL 内部的膨润土也有贡献.另外,试验结束后取出 GCL 进行观察,发现剪切位移达到 20 mm 时,GCL 内部针刺纤维仍然没有被拉断(破坏).由以上的分析和观察可知,测得的 GCL 剪切强度主要是反映了针刺纤维的抗拉强度以及针刺纤维与上下土工织物之间的缠绕作用,内部膨润土的抗剪强度的

贡献很小,特别是当剪切位移较大时(如超过 8 mm),试验结果难以反映出水化液体类型对 GCL 内部剪切强度的影响.

3.2 非加筋 GCL 内部剪切强度的试验结果

图 3a 和图 3b 分别给出了水化液为自来水和垃圾填埋场渗滤液时剪应力-剪切位移的关系曲线(其它溶液水化后膨润土的剪切曲线与此类似).可以看出:无论采用何种液体作为水化液,随着位移的增大 GCL 内的膨润土剪应力都迅速出现峰值,出现峰值时剪切位移均小于 1.8 mm,超过峰值强度后的残余强度衰减很慢;随着法向应力的增大,GCL 内的膨润土剪应力峰值随之增大;在相同的法向应力条件下,采用 DDW 水化的试件的剪切强度明显大于采用 MSWL 水化的试件.

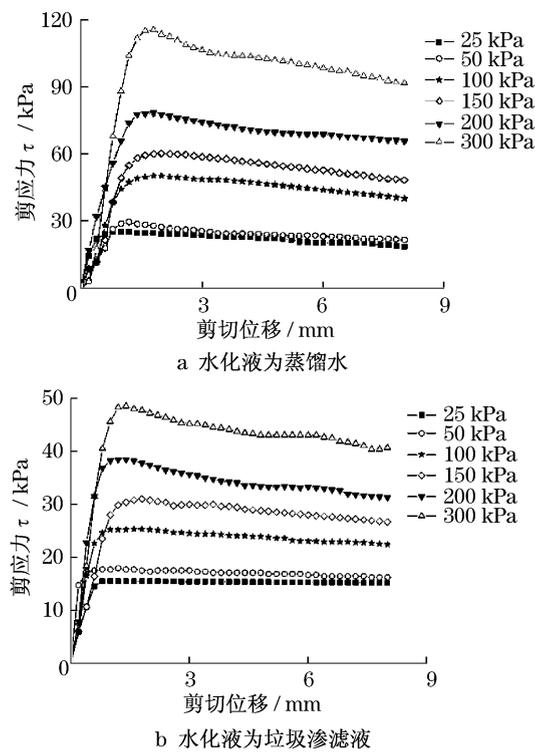


图 3 剪切试验曲线
Fig.3 Shear test curves

表 2 汇总了 GCL 在不同液体中水化后在各级法向应力下峰值剪切强度.图 4 揭示了峰值强度随法向应力的变化规律以及不同水化液的影响.

从图 4 和表 2 中可以看出:随着法向应力的增大,GCL 内的膨润土剪切强度随之增大;在同一种法向应力作用下,不同液体水化后膨润土的峰值剪切强度从大到小依次为 $DDW > TW > PW > MSWL$,采用 DDW 水化后膨润土的抗剪切能力最强,而采用 MSWL 水化的最弱;不同水化液对 GCL 内部膨

润土剪切强度的影响随着法向应力的增大而越发显著.

表2 不同法向应力下 GCL 的剪切强度(单位:kPa)
Tab.2 GCL's shear strength under different vertical stresses

水化液	正应力/kPa					
	25	50	100	150	200	300
MSWL	15.57	17.99	25.39	31.09	38.49	48.75
PW	17.61	22.39	29.63	37.37	48.84	63.66
TW	24.23	29.67	40.04	47.25	60.48	96.39
DDW	25.52	29.86	50.46	60.48	78.44	115.67

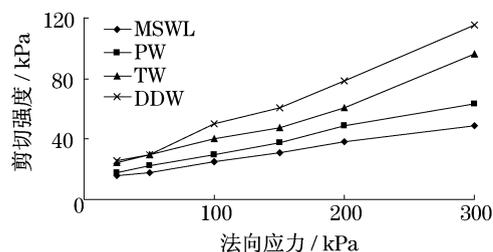


图4 不同溶液水化后 GCL 剪切强度与正应力的关系曲线
Fig.4 Curves of shear strength with the normal stresses of GCL after hydration in different types of liquid

对表2中的试验数据进行整理,得出采用不同溶液作为水化液时 GCL 内部膨润土的剪切强度参数,列入统计表3,从表3中可以看出:采用四种液体水化后膨润土的剪切强度参数差距很大,说明水化液液体特征对 GCL 内部膨润土的剪切强度影响显著.因此工程实践中,当 GCL 应用到承受较大荷载的部位时,应事先用自来水进行水化.

表3 GCL 剪切强度统计表
Tab.3 Statistics of GCL's shear strength

水化液	粘聚力/kPa	内摩擦角/°
MSWL	12.63	7.0
PW	13.36	9.6
TW	14.88	14.2
DDW	15.07	18.1

3.3 结果分析

从图2和图3可以看出加筋 GCL 和非加筋 GCL 内部强度的差别:当有加筋(针刺纤维)时,在加筋纤维被拉断之前,GCL 的内部抗剪强度随着剪切位移的增大而一直增大,而非加筋 GCL 的内部剪应力随着位移的增大很快达到峰值,然后逐步衰减;而且在相同的法向应力下,加筋 GCL 的内部抗剪强度比非加筋 GCL 要高得多.本试验研究中,在法向应力为 50 kPa 条件下,加筋 GCL 能够提供 120 kPa 的抗剪

强度,而非加筋 GCL 提供的抗剪强度不足 20 kPa.加筋 GCL 的内部抗剪强度不仅远高于一般粘性土的强度,而且也高于不同土工合成材料之间(如复合衬里中土工织物与土工膜)的界面强度,因此可以认为在 GCL 铺设初期,加筋 GCL 内部不应是最危险的潜在破坏面.

对于非加筋 GCL,或者在特定环境条件下加筋 GCL 的加筋纤维因老化而强度衰减殆尽,根据本文的研究结果可知,其内部抗剪强度受水化液特征的影响而表现出不同的强度,总的趋势是水化液中离子浓度越低,溶液越简单,GCL 水化后内部强度越高,同时这一趋势还受到 GCL 所承受的法向荷载的影响.这一现象对于 GCL 用于实际工程的设计和施工具有借鉴意义.

GCL 作为低渗透性材料,主要用于现代垃圾填埋场底层衬里和封盖、河道与人工湖、池塘底部防渗结构中,以及其他水利工程和环境工程的防渗部位.由于使用部位的不同,材料所承受的荷载也不同,有时 GCL 内部承受较大的剪应力.在工程设计中,需要考虑环境条件而选择合适的设计参数,因为 GCL 的水化环境不同,强度参数随之不同,蒸馏水水化后 GCL 强度最高,自来水次之.从防渗角度讲,GCL 的渗透特性与水化液的种类和特性密切相关,试验结果同样表明^[9]:采用蒸馏水或自来水充分水化后,可使 GCL 的渗透性保持在较低的水平,从而有效地发挥防渗作用.因此,在实际使用过程中,特别是对于非加筋 GCL,为了提高 GCL 内部抗剪强度和降低 GCL 的渗透性,在工程正式投入运营之前,采用自来水对 GCL 事先进行水化作业,可以提高 GCL 内部抗剪稳定性和抗渗有效性.

4 结论

通过室内剪切试验,检验了加筋与非加筋 GCL 内部剪切强度之间的区别,研究了 GCL 内部剪切强度的变化规律以及影响因素,得到以下结论:

(1) 加筋 GCL 的内部抗剪强度明显大于非加筋 GCL,而且在加筋纤维被拉断之前,GCL 的内部抗剪强度随着剪切位移的增大而一直增大,而非加筋 GCL 的内部剪应力随着位移的增大很快达到峰值.

(2) 针刺 GCL 的内部剪切强度主要受针刺纤维的抗拉强度和缠绕作用控制,其他因素对 GCL 内部剪切强度贡献微小.

(3) 对于非加筋 GCL,水化液体特征对 GCL 的

内部剪切强度存在一定的影响.采用蒸馏水水化后 GCL 的内部剪切强度最大,而采用垃圾渗滤液水化后剪切强度最小.总的趋势是水化液中离子浓度越低,溶液越简单,GCL 水化后内部强度越高.

(4) 在 GCL 实际工程应用中,内部强度设计参数的选取应考虑 GCL 的实际环境,铺设后在承受荷载之前应使用自来水对 GCL 进行充分水化,提高防渗工程的稳定性.

参考文献:

- [1] LaGatta M D, Boardman B T, Cooley B H, et al. Geosynthetic clay liners subjected to differential settlement [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123 (5):402.
- [2] Gilbert R B, Scranton H B, Daniel D E. Shear strength testing for geosynthetic clay liners [C]// *Testing and Acceptance Criteria for Geosynthetic Clay Liners*, ASTM STP1308. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1997:121-138.
- [3] Fox P J, Rowland M G, Scheithe J R. Internal shear strength of three geosynthetic clay liners [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124(10):933.
- [4] Zornberg J G, McCartney J S, Swan R H. Analysis of a large database of GCL internal shear strength [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131 (3):367.
- [5] McCartney J S, Zornberg J G, Swan R H. Effect of shear displacement rate on the internal shear strength of GCLs [C]// *Geotechnical Special Publication*. [s.l.]: ASCE, 2005: 4301-4306.
- [6] Vink P, Fontin H F N. Testing the resistance to oxidation of polypropylene geotextiles at enhanced oxygen pressures [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2000, 18:333.
- [7] Hsuan Y G. Approach to the study of durability of reinforcement fibers and yarns in geosynthetic clay liners [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2002, 20:63.
- [8] Mengjia L, Hsuan Y G. Temperature and pressure effects on the degradation of polypropylene tape yarns-depletion of antioxidants [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2004, 22:511.
- [9] 徐超,李志斌,高彦彬.溶液特征对 GCL 膨胀和渗透特性的影响与分析 [J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2009, 37(1):36.
XU Chao, LI Zhibin, GAO Yanbin. Influence of solution characteristics on swelling and hydraulic performance of geosynthetic clay layer [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2009, 37(1):36.