

DOI: 10.11779/CJGE2017S1043

水化状态对含针刺 GCL 复合衬里抗剪强度的影响分析

林 海^{1, 2}, 章玲玲³

(1. 南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室(河海大学), 江苏 南京 210098;
3. 江西交通职业技术学院建筑工程系, 江西 南昌 330013)

摘要: 针刺 GCL 和 HDPE 土工膜 (GM) 在防渗工程中应用广泛, 含多层界面的复合衬里整体抗剪强度是边坡稳定性分析的关键。介绍了含针刺 GCL 复合衬里的大单剪试验方法, 并且对比分析了针刺 GCL 初始状态分别为干燥和完全水化两种情况下的复合衬里抗剪强度。结果表明, 复合衬里的剪切破坏不会发生在干燥针刺 GCL 内部界面, 而 GCL 干燥状态下的复合衬里单剪强度未必高于 GCL 完全水化状态下的复合衬里单剪强度。结合含 GCL 复合衬里的剪切破坏机理, 阐述了针刺 GCL 的水化状态对复合衬里抗剪强度的影响。含 GCL 复合衬里在不同水化状态下的界面滑移稳定性都应引起工程人员的重视。

关键词: 针刺 GCL; 单剪; 水化状态; 破坏模式; 抗剪强度

中图分类号: TU411.99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2017)S1-0219-05

作者简介: 林 海(1986-), 男, 江西上饶人, 讲师, 从事土力学与基础工程教学和环境岩土工程研究工作。E-mail: linhai@ncu.edu.cn。

Effect of hydration state on shear strength of composite liner with needle-punched GCL

LIN Hai^{1, 2}, ZHANG Ling-ling³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of the Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Department of Architectural Engineering, Jiangxi V&T College of Communication, Nanchang 330013, China)

Abstract: Needle-punched GCL and HDPE geomembrane (GM) are widely used in impermeable engineering, and the whole shear strength of multi-layer composite liner with GCL is crucial for the slope stability. A large simple-shear testing method for composite liner with needle-punched GCL is introduced, and the whole peak shear strength of composite liner with dry GCL is compared with that with GCL in hydration state. The results show that the shear failure of composite liner does not occur at the dry GCL internal face. The shear strength of composite liner with dry GCL is not always larger than that with hydrated GCL. Combined with the shear failure mechanism of composite liner with GCL, the influence of GCL hydration state is illustrated for the shear strength of composite liner. The translational interface stability of composite liner with GCL in different hydration states should draw engineers' attention.

Key words: needle-punched GCL; simple shear; hydration state; failure mode; shear strength

0 引言

针刺 GCL 通常作为良好的防渗结构材料应用于填埋场和水利工程当中^[1]。由于 GCL 中钠基膨润土遇水后强度会变得极低, GCL 的内部及界面抗剪强度成为研究人员的关注对象。室内土工试验是人们研究和认识 GCL 强度特性的重要手段, 已有研究手段包括常规小尺寸直剪、大直剪、环(扭)剪和斜板剪切试验等^[2]。GCL 和 HDPE 土工膜 (GM) 通常一起使用, 并且中国《生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范》CJJ 113—2007 规定, 填埋场底部衬垫 GCL 必须

下铺厚度大于 75 cm 的压实黏土层^[3]。含 GCL 复合衬里内部可能会存在两个或多个潜在的危险滑动面, 复合衬里内部的最危险滑动面在不同法向压力条件下甚至会发生转移^[4-6]。Fox 等一些专家针对水化完全的 GCL 试样开展了 GCL 内部或 GCL/GM 界面抗剪强度试验^[7-11]。

基金项目: 江西省青年科学基金项目(2016BAB216115); 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室开放基金项目(GH201404); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ150072)

收稿日期: 2016-11-28

在城市卫生填埋场复合衬里系统的修建中, GCL 通常是干燥地铺设于现场。随着时间的增加, GCL 逐渐从下覆黏土层中吸收水分^[12]。含水率对 GCL 内部抗剪强度及 GCL/HDPE 界面强度都有显著影响。Daniel 等曾经对膜式未加筋 GCL (Gundseal 类型) 中钠基膨润土在不同初始含水率情况下的内部抗剪强度进行了试验^[13]。Daniel 等试验得到钠膨润土随含水率的增加强度减小, 但含水率超过 50% 后膨润土强度下降就基本平缓。虽然完全水化状态代表了 GCL 在底部衬垫中的最危险状态, 干燥或部分水化应该是 GCL 在运行期间实际最常见含水率。并且已有研究都是将 GCL 内部强度或 GCL 与相邻界面强度从复合衬里中分离出来单个进行研究, 这忽略了复合衬里整体剪切时内部材料间的协调变形和相互作用。

林海等^[14]利用大型土工直剪仪, 提出了一种含 GCL 复合衬里的单剪试验方法, 实现了复合衬里整体剪切过程中 GCL 内部位移和 GCL 与其实材料界面位移的量测。本文将不同初始水化状态下的含 GCL 复合衬里单剪试验结果对比, 分析了含水率条件对含 GCL 复合衬里强度特性的影响。

1 单剪试验方法及材料介绍

大型单剪仪的竖向荷载通过控制电脑自动调节液压油泵进行施加, 仪器的竖向应力可调幅度较大, 最大可实现 2.8 MPa 的竖向加载。剪切盒的内部尺寸为直径 300 mm 的圆形面积。剪切力的施加为通过两个步进电机调节齿轮的转动速度进使下剪切盒被匀速地拉动。为了量测复合衬里中 GCL 的内部和界面位移, 设计加工了一系列不锈钢金属薄片 (1~2 mm 厚)。试验过程中, GCL 的两层土工布面分别与一块金属薄片固定, 从而 GCL 的剪切位移可以通过金属薄片的移动来情况来确定。试验最大剪切位移设置为 35 mm, 复合衬里试样各层面的位移量由位移传感器量测读取。大型单剪试验以土工膜 (GM) + 干燥 GCL+ 压实黏土复合衬里为试样对象, 试验布置如图 1 所示。

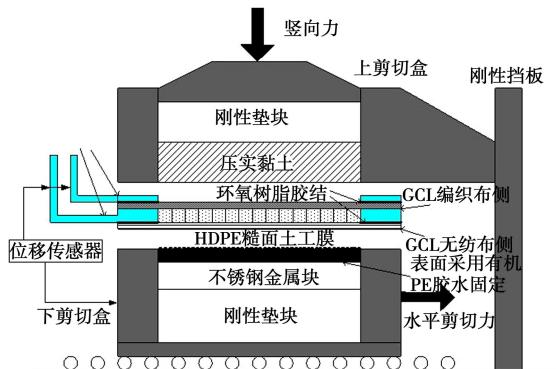


图 1 复合衬里(GM+GCL+压实黏土)的大单剪试验

Fig. 1 Large simple-shear tests on composite liner (GM+GCL+compacted clay)

考虑到在高竖向压力下试样会产生沉降, 将糙面土工膜放在下剪切盒中, 土工膜的下部放置刚性金属垫块。金属薄片的平面加工外部尺寸与下剪切盒尺寸相同 (370 mm×370 mm), 薄片中部 300 mm 直径的空心面积为测试面积, 与上下剪切盒的试样剪切面积相重合。不锈钢金属薄片通过环氧树脂与 GCL 土工布侧进行黏结, 从而使得金属薄片在剪切过程中会随着 GCL 土工布侧的移动而移动。通过对金属薄片位移的量测可以得到 GCL 内部和界面所发生的相对位移。试验过程中发现, 高强度环氧树脂胶水无法固定高压下的土工膜/不锈钢垫块表面。固定不牢必然会引起试验误差并得到显著奇异剪切应力 - 位移关系^[15]。本次试验中土工膜的固定统一采取如图 2 所示的方式。糙面土工膜的光面黏结在直径 298 mm 的圆形不锈钢垫块上。通过特种有机 PE 胶水和土工膜自身的抗拉性能共同来固定土工膜, 试验完成后肉眼观察证实即使在高压下土工膜的固定仍然较好。

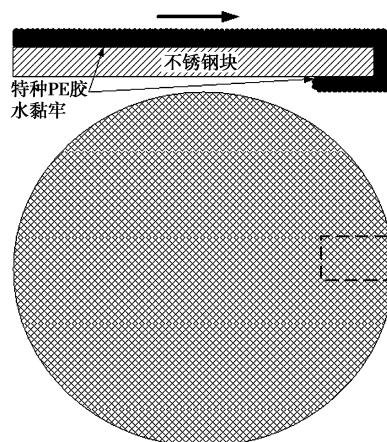


图 2 土工膜试样的固定形式

Fig. 2 Gripping/clamping type of GM

试验用针刺 GCL 材料由中国上海仁众实业有限公司提供, 将约 5 kg/m² 的钠基膨润土夹持在一层编织布和一层无纺布之间针刺加筋得到, GCL 的厚度约为 6 mm。GCL 内夹膨润土的液限为 240%, 其膨胀系数为 25 mL/g。关于 GCL 的岩土参数如表 1 所示。试验所采用的土工膜为 1.5 mm 厚的单面光滑, 单面粗糙的 HDPE 土工膜。采用单面粗糙 HDPE 土工膜的原因是为了便于试验过程中的固定。试验中用到的黏土选取为南京地区的一般黏土。黏土的土粒比重 2.73; 塑限和液限含水率分别为 23.0% 和 47.8%; 抗剪强度参数 c 和 ϕ 分别为 19 kPa 和 33°。黏土的风干含水率为 3.5%, 最优含水率 16% 时, 黏土的渗透系数为 1.9×10^{-6} cm/s。试验中黏土用水配制成 18% 的含水率(高于最优含水率 2%), 然后装入上剪切盒并进行压实。将湿黏土在上剪切盒中分层压实, 可以近似达到其最

表 1 土工合成材料的岩土参数
Table 1 Geotechnical parameters of geosynthetics

针刺 GCL	厚度	剥离强度	质量面积比	膨胀系数	拉伸强度	竖向渗透系数
	/mm	/(N·10 cm ⁻¹)	/(g·m ⁻²)	/(mL·2g ⁻¹)	/(N·10 mm ⁻¹)	/(cm·s ⁻¹)
	6	114	5000	25	1560	4.32×10 ⁻¹⁰
糙面土工膜	厚度	糙面高度	密度	屈服强度	屈服伸长率	刺入强度
	/mm	/mm	/(g·cm ⁻³)	/(N·mm ⁻¹)	%	/N
	1.5	0.26	0.94	27	12	521

大于干重度 (17.7 kN/m³)。复合衬里中压缩黏土层的厚度控制为约 3 cm。

试样按图 1 所示布置后开始施加法向荷载, 复合衬里试样的沉降约在法向压力开始施加后 2~3 h 达到基本稳定。为了统一试验条件, 将试样在开始剪切前的固结时间定为 6 h。研究表明, 当剪切速率小于 1 mm/s 时, GCL 剪切试验可以忽略应变率效应的影响, 本文中试验剪切速率都定为 0.3 mm/min^[6]。根据针刺 GCL 与相邻材料的接触情况, 复合衬里的剪切试验分为两个系列: 图 1 中 GCL 的无纺面与糙面土工膜 (GM) 接触的情况 (试验系列 A); 将 GCL 两侧反转, 即 GCL 编织布面与 GM 接触 (试验系列 B)。林海等^[14]开展了针刺 GCL 初始状态为水化饱和情况下的 GCL+GM 复合衬里单剪试验。通过比较针刺 GCL 不同初始状态条件下的复合衬里剪切试验结果, 分析不同水化状态对含 GCL 复合衬里抗剪强度的影响。

2 GCL 不同初始水化状态下复合衬里的破坏模式

GM+干燥 GCL+压实黏土复合衬里大单剪试验结果如表 2 所示, 其他具体详细试验结果见 Lin 等^[16]。结果可以看出, 风干状态下的针刺 GCL 不会发生内部剪切破坏。对试验系列 A, 随着竖向压力增加, 破坏面会从无纺 GCL-HDPE 膜界面转移至编织 GCL/黏土界面。而对于试验系列 B, GCL/GM 界面始终是抗剪强度最薄弱面。复合衬里在较小的法向压力 ($\sigma_n < 500$ kPa) 下主要以 GCL/GM 界面破坏为主, 这与完全水化情况下的 GCL+GM 复合衬里单剪破坏模式相似。为了分析针刺 GCL 不同初始含水率情况对试验结果的影响, 将同一破坏模式下的 GM+干燥 GCL+黏土复合衬里抗剪强度与文献^[14]中 GM+完全水化 GCL 复合衬里抗剪强度进行对比, 如图 3 所示。在法向压力不太大的情况 ($\sigma_n < 500$ kPa), GCL/GM 界面抗剪强度在完全水化时相近或稍高于风干时的情况。对于无纺 GCL/GM 界面, 竖向压力达到 500 kPa 时, 水化状态下的界面强度才开始显著低于干燥情况 (如图 3)。完全水化状态当竖向压力较大 ($\sigma_n > 500$ kPa) 时,

GCL/GM 界面抗剪强度不再成为最危险界面, 并且针刺 GCL 内部抗剪强度会随竖向压力增加变成破坏控制面^[14]。而对于 GCL 初始为干燥状态并且法向压力较大 ($\sigma_n > 500$ kPa) 时, 复合衬里的剪切破坏面转化为编织 GCL/黏土界面, 并且此时 GCL 内部和无纺 GCL/GM 界面强剪切度要显著高于对应界面在完全水化情况下的抗剪强度。从图 3 中可以看出, 对于编织 GCL/GM 界面强度而言, 法向压力较小时 ($\sigma_n \leq 500$ kPa), GCL 的水化状态对界面抗剪强度的影响不大。而随着竖向压力的增大, 水化状态时的编织 GCL/GM 界面强度会变得显著低于干燥 GCL/GM 界面强度。

表 2 GM+干燥 GCL+压实黏土复合界面单剪试验结果
Table 2 Simple-shear test results of GM+dry GCL+compacted clay composite liner

试验系列	竖向压力/kPa	峰值强度/kPa	峰值时的总位移/mm	破坏面位置
A	100	60.8	7	GCL/GM 界面
A	200	117.4	14	GCL/GM 界面
A	300	169.8	14	GCL/GM 界面
A	400	236.3	—	GCL/黏土界面
A	500	287.2	17	GCL/GM 界面
A	1300	592.8	—	GCL/黏土界面
A	1500	611.2	—	GCL/黏土界面
B	100	60.5	3.1	GCL/GM 界面
B	300	144.3	4	GCL/GM 界面
B	500	241.9	10.7	GCL/GM 界面
B	800	349.4	10.1	GCL/GM 界面
B	1300	615.4	13.9	GCL/GM 界面

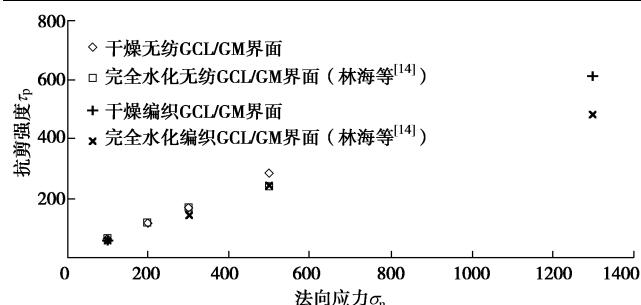


图 3 不同初始水化状态时的 GCL/GM 界面强度
Fig. 3 GCL/GM interface strengths in different initial hydration states

3 含 GCL 复合衬里的抗剪强度分析

通过不同初始水化状态下含 GCL 复合衬里抗剪强度的对比发现, 干燥状态下的含 GCL 复合衬里抗剪强度并不一定会明显高于完全水化状态的复合衬里抗剪强度。对于 GCL 无纺布面与 GM 接触的情况, 初始水化饱和使得 GCL/GM 界面强度存在一定幅度的增加, 而由水化饱和引起的 GCL/GM 界面强度增量值会随竖向应力的增加而减小。当竖向压力大于 300 kPa 时, 初始水化饱和则显著减小了 GCL/GM 界面抗剪强度。这说明填埋场衬里中干燥 GCL/GM 界面的滑移安全系数并不一定随 GCL 水化程度增加而减小。GCL 在施工完成后的一段时期内, GCL 的水化程度(含水率)会随时间而增加, 然而含 GCL 复合衬里在干燥状态下的界面滑移稳定性同样应引起工程人员的重视。

GCL/GM 界面剪切破坏机理复杂, 包括 GCL 表面土工布与 GM 表面之间的摩擦、GCL 土工布纤维在 GM 糙面上的勾扯和水化膨润土挤出的润滑效应等^[17-18]。在竖向压力 100 kPa 左右, 完全水化状态时膨润土的挤出量也几乎为零, 因此润滑效应可以忽略不计^[18-19]。而对于单纯的土工布(GT)/GM 界面剪切试验, 水下剪切得到的强度值会小于干燥时得到的界面强度值^[18]。纤维勾扯是 GCL/GM 界面强度的机理之一, 在相同竖向应力下干燥和水化两种状态下的勾扯效应可以基本认为是等效的^[19]。因此由分析可以得到, 对于 100 kPa 下的无纺 GCL/GM 界面强度而言, 膨润土的水化是造成界面强度稍许增加的原因。如图 4(a)所示, 干燥针刺 GCL 内夹膨润土主要为颗粒状, GM 糙面透过无纺布与膨润土的接触方式为点点接触, 剪切过程中膨润土颗粒容易发生翻滚。针刺 GCL 内夹膨润土遇水后膨胀, 形成了几乎连续的黏土体结构(如图 4(b))。如此一来, GM 糙面凸入到膨润土内部, GM 在无纺布面上剪切需要克服连续膨润土的阻力, 从而增加了 GM/GCL 界面抗剪强度。然而, 随着竖向压力的增加, 挤出到 GCL/GM 界面的膨润土量增加, 润滑效应引起的界面强度降低越来越明显。所以当竖向压力较高时, 完全水化 GCL/GM 界面抗剪强度变得显著低于风干状态。

对于编织 GCL/GM 界面, 当法向压力不大($\sigma_n \leq 500$ kPa)时, 界面抗剪强度在 GCL 分别为干燥或完全水化状态条件下基本相等; 而当竖向压力较大时, 水化编织 GCL/GM 界面强度显著低于 GCL 干燥的情况。这是由于水化 GCL 从编织布侧挤出的膨润土量要大于无纺布侧的挤出量, 膨润土水化引起的界面强度少量增加与挤出膨润土的润滑作用相互抵消, 所以在

较小压力下水化状态对含 GCL 复合衬里的抗剪强度影响不大; 随着法向压力的增加, 界面挤出膨润土的量显著增加, 润滑作用使得界面强度大大降低, 因此在较高法向压力下($\sigma_n > 500$ kPa), 完全水化状态下含 GCL 复合衬里的抗剪强度要显著小于含干燥 GCL 复合衬里的抗剪强度。

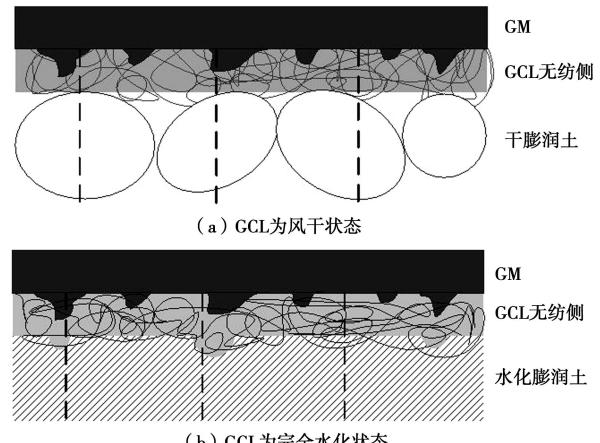


图 4 GCL 无纺面 - 糙面 HDPE 膜界面剪切机理示意图

Fig. 4 Schematic diagram for shear mechanism of nonwoven GCL/texture HDPE geomembrane interface

针刺 GCL 为干燥状态时, 复合衬垫不会出现 GCL 内部剪切破坏。然而, GCL 为完全水化条件下, 针刺 GCL 内部抗剪强度时成为高法向压力下复合衬垫剪切破坏的控制界面^[14]。这说明含水率的增加极大地减小了 GCL 的内部强度, 同时干燥膨润土在针刺 GCL 的内部抗剪强度中体现了重要贡献。和 GCL/GM 膜界面剪切破坏机理不同的是, GCL 的内部抗剪强度主要来自针刺加筋和内部膨润土两个方面。水化 GCL 的内部破坏面一般都发生在膨润土与夹持土工布的界面^[7-8]。干燥膨润土的内部抗剪强度较大, 加上针刺加筋技术作用, 所以内部强度较大。随含水率的增加, 膨润土强度越来越低, 由于针刺加筋限制了膨润土的自由膨胀, 存在一个最大的饱和含水率。完全水化状态代表 GCL 内部膨润土达到其最大含水率的情况, 即 GCL 内部抗剪强度在完全水化后达到其强度下限。

4 结论与建议

本文介绍了含 GCL 复合衬里的单剪试验方法, 将 GM+干燥 GCL+压实黏土复合衬里的剪切试验结果与 GM+完全水化 GCL 复合衬里的试验结果进行了对比分析, 得到以下几点主要结论:

- (1) 在所有测试压力下($\sigma_n \leq 1500$ kPa), 复合衬里的剪切破坏不会出现在干燥针刺 GCL 内部界面。
- (2) 在较小的法向压力下($\sigma_n < 300$ kPa), 含干燥 GCL 复合衬里的抗剪强度与含完全水化 GCL 衬里

的抗剪强度相近或甚至更低; 只在较大的法向应力下, 水化状态才显著影响含 GCL 复合衬里的抗剪强度。

(3) 针刺 GCL 内部抗剪强度随水化程度增加而降低; 而水化状态对 GCL/GM 界面抗剪强度的影响与法向应力大小存在一定联系。

参考文献:

- [1] 钱学德, 施建勇, 刘晓东. 现代卫生填埋场的设计与施工 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (QIAN Xue-de, SHI Jian-yong, LIU Xiao-dong. Design and construction of modern sanitary landfills[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese))
- [2] FOX P J, STARK T D. State-of-the-art report: GCL shear strength and its measurement[J]. Geosynthetics International, 2004, 11(3): 141 - 175.
- [3] CJJ 113—2007 生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范[S]. 2007. (CJJ 113—2007 Technical code for liner system of municipal solid waste landfill[S]. 2007. (in Chinese))
- [4] 钱学德, 施建勇, 刘慧, 等. 垃圾填埋场多层复合衬垫的破坏面特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 840 - 845. (QIAN Xue-de, SHI Jian-yong, LIU Hui, et al. Failure interface behavior of multilayer landfill liner system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 840 - 845. (in Chinese))
- [5] EID H T. Shear strength of geosynthetic composite systems for design of landfill liner and cover slopes[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29(3): 335 - 344.
- [6] FOX P J, ROSS J D. Relationship between NP GCL internal and HDPE GMX/NP GCL interface shear strengths[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(8): 743 - 753.
- [7] 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 - 944.
- [8] GILBERT R B, FERNANDEZ F, HORSFIELD D W. Shear strength of reinforced geosynthetic clay liner[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1996, 122(4): 259 - 265.
- [9] TRIPPLETT E J, FOX P J. Shear strength of HDPE geomembrane/geosynthetic clay liner interfaces[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(6): 543 - 552.
- [10] ZORNBERG J G, MCCARTNEY J S, SWAN J R H. Analysis of a large database of GCL internal shear strength results[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(3): 367 - 380.
- [11] MCCARTNEY J S, ZORNBERG J G, SWAN J R H. Analysis of a large database of GCL-geomembrane interface shear strength results[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(2): 209 - 223.
- [12] ANDERSON R, RAYHANI M T, ROWE R K. Laboratory investigation of GCL hydration from clayey sand subsoil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, 31(10): 31 - 38.
- [13] DANIEL D E, SHAN H Y, ANDERSON J D. Effects of partial wetting on the performance of the bentonite component of a geosynthetic clay liner[C]// Proceedings of Geosynthetics '93, Industrial Fabrics Association International. St Paul, 1993: 1483 - 1496.
- [14] 林海, 章玲玲, 阮晓波, 等. 水化针刺 GCL+GM 复合衬里的单剪破坏特征[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(9): 1660 - 1667. (LIN Hai, ZHANG Ling-ling, RUAN Xiao-bo, et al. Simple-shear failure characteristics of hydrated needle-punched GCL+GM composite liner[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(9): 1660 - 1667. (in Chinese))
- [15] FOX P J, KIM R H. Effect of progressive failure on measured shear strength of geomembrane/GCL interface[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(4): 459 - 469.
- [16] LIN H, SHI J, QIAN X, ZHANG L. An improved simple shear apparatus for GCL internal and interface stress-displacement measurements[J]. Environmental earth sciences, 2014, 71(8): 3761 - 3771.
- [17] HEBELER G L, FROST J D, MYERS A T. Quantifying hook and loop interaction in textured geomembrane-geotextile systems[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2005, 23(1): 77 - 105.
- [18] 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 Wei-an, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min, et al. Mechanism of bentonite extrusion of GCL/GM interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(6): 832 - 837. (in Chinese))
- [19] VUKELIC A, SZAVITS-NOSSAN A., KVASNICKA P. The influence of bentonite extrusion on shear strength of GCL/geomembrane interface[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(1): 82 - 90.