

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201904011

GCL材料用于路基工程抗碾压性能试验研究*

白梅¹, 刘志彬¹, 张书建², 谢世平³, 刘锋¹, 张锦鹏¹

(1.东南大学交通学院岩土工程研究所,江苏南京 211189; 2.吉林省高等级公路建设局,吉林长春 130062;
3.天津中联格林科技发展有限公司,天津 301617)

摘要:为研究GCL材料应用于路基工程时的抗碾压性能,选用颗粒型双层无纺布GCL和颗粒型GCL进行室内击实损伤试验和现场碾压试验。首先统计击实试验后两种GCL破坏情况,然后将GCL材料放入土柱模型槽内测试模拟降雨后材料的隔水性能,最后测试现场碾压试验后两种GCL的拉伸强度和渗透系数。试验结果表明,击实损伤试验造成的GCL破坏主要表现为刺穿型孔洞和表面无纺布的破坏,击实损伤试验后两种GCL隔水性能均有下降。现场碾压试验后,两种GCL拉伸强度均有小幅下降,渗透系数增大,但它们的值仍符合钠基膨润土防水毯的力学与抗渗要求。因此,GCL具有较好的抗碾压性能。

关键词: GCL; 现场碾压; 隔水性能; 拉伸强度; 渗透系数

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0629-06

Experimental Study on Roll-resistance Performance of GCL for Subgrade Engineering

BAI Mei¹, LIU Zhibin¹, ZHANG Shujian², XIE Shiping³, LIU Feng¹, ZHANG Jinpeng¹

(1.Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;

2.High grade highway construction Department of Jilin Province, Changchun 130062, China;

3.Tianjin Zhonglian Gelin Science and Technology Development Co., Ltd., Tianjin 301617, China)

Abstract: To study the roll-resistance performance of GCL for subgrade engineering, the granular GCL with double-layer non-woven and the granular GCL cloths were studied through compaction damage tests in laboratory and rolling tests in the field. The damage conditions of GCL after compaction damage tests were evaluated at first, and then the waterproof performance of damaged GCL were investigated using rainfall simulation tests. The tensile strength and permeability coefficient of GCL after rolling tests were obtained. The results show that GCL had piercing holes after compaction damage tests and the non-woven cloth of GCL damaged. The waterproof capacity of the granular GCL and the granular GCL with double-layer non-woven cloth had a reduction after compaction damage tests. Although the tensile strength of the two kinds of GCL decreased slightly and the permeability coefficients increased after rolling tests, these values meet the mechanical and impermeability requirements

* 收稿日期:2019-04-04;修回日期:2019-09-24

基金项目:吉林省交通运输科技项目(2016-1-16-2)、国家自然科学基金资助项目(41877240,41672280)资助

作者简介:白梅(1992—),女,博士研究生。主要从事路基岩土工程问题方面的研究。E-mail: 230198270@seu.edu.cn

通讯作者:刘志彬(1976—),男,副教授,博导,博士。主要从事环境岩土工程、地质工程方面的研究。

E-mail: seulzb@seu.edu.cn

of GCL for subgrade engineering.

Keywords: GCL; on site rolling experiment; waterproof performance; tensile strength; permeability coefficient

引言

钠基膨润土防水毯(Geosynthetic clay liner, GCL),是将膨润土通过针刺、缝合或粘合等方式固定在两层土工合成材料之间形成的一种土工合成材料,它是在压实性黏土衬垫(Compacted clay liner, CCL)的基础上发展而来的。与CCL相比较,GCL具有渗透率低,抗冻融循环能力强等优点,且GCL单位厚度抗剪强度高、柔性好,施工方便。

GCL从20世纪90年代引入国内以来,在工程建设中取得了广泛引用。由于其较好的防渗性能,常用于垃圾填埋场的防渗系统建设。此外,由于GCL材料相比传统防渗材料,具有很强的抗冻融和干湿循环性能,因此不仅应用于传统防渗工程也应用于寒、旱地区河渠防渗工程^[1-3]。目前对于GCL的研究主要集中于渗透系数、干湿及冻融对防渗性能影响、耐久性以及膨润土流变特性等方面^[4-8]。介玉新等^[5]通过室内试验研究发现GCL在冻融循环和饱和风干情况下都能保持良好的防渗性能。王宝等^[9]考虑将GCL应用于矿山废弃物处置场中,并通过室内试验证明GCL的渗透系数与其所受有效应力的大小紧密相关,使用GCL时必须考虑其在场地中的受力状态。工程中应用GCL时通常是将其埋设在具体的使用位置,但是在实际铺设过程中可能遭受石块或其它尖锐物的穿刺破坏,国内外对于GCL的破损研究主要集中于GM/GCL复合垫层系统在GM(Geomembrane, GM)破坏情况下的渗透问题^[10-13],较少考虑GCL直接破损情况^[14]。然而GCL上存在的刺穿孔洞可能会成为渗流通道,造成其隔水性能折减,甚至危及工程安全,因此研究GCL在恶劣工况下(如与含碎石土体相接触)的抗碾压性能是十分必要的。

本文以土石混合料路基中使用GCL隔水为背景,选取颗粒型GCL和颗粒型双层无纺布GCL为研究对象,对其进行击实损伤试验和现场碾压试验,通过对比试验前后GCL的外部形貌、隔水性能、拉伸强度和渗透系数的变化,评价GCL的抗碾压性能。

1 试验材料与内容

1.1 试验材料

试验中采用的GCL均为针刺法GCL。其中颗粒型双层无纺布GCL与现场碾压试验采用的颗粒型GCL为天津中联格林科技发展有限公司生产,击实损伤试验采用的颗粒型GCL为江苏某企业生产。如图1 GCL的结构示意图所示,颗粒型双层无纺布GCL克重5 967 g/m²,上下无纺布克重均为270 g/m²,编织布克重为125 g/m²。颗粒型GCL克重为5 000 g/m²,其中无纺布克重为200 g/m²,编织布克重为110 g/m²。

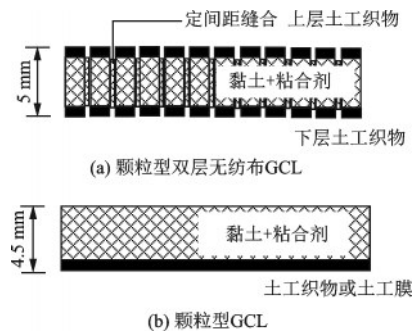


图1 GCL的结构示意^[1]

Fig.1 Illustration of the structure of GCL^[1]

试验中使用低液限黏土和二灰土,黏土的主要物理性质如表1所示。根据《公路路面基层施工技术细则》^[15],试验所用石子为粒径20 mm的碎石。

表1 黏土的主要物理性质

Table 1 Main physical properties of the clayey soil

液限/%	塑限/%	塑性指数	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)
31.8	17.5	14.3	15.0	1.914

1.2 击实损伤试验

将GCL放入如图2所示的击实装置内进行击实损伤试验。装置内径10.0 cm、高12.7 cm。首先在装置底部铺设4.0 cm厚的碎石层,之后将GCL放置在碎石层上,随后再在GCL上再铺设4 cm厚的

碎石层,击锤从高于装置顶部45.0 cm处下落击实。在不同的击实功下对GCL进行击实损伤试验,之后取出GCL统计破损情况。

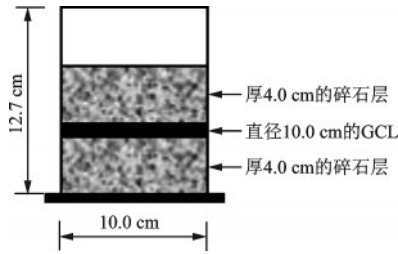


图2 击实装置

Fig.2 Compaction apparatus

击实损伤试验后的GCL放入如图3所示的模拟下雨装置中测试GCL的隔水性能。将含水率为7%的黏土,分两层按90%的压实度填筑在直径30.0 cm的有机玻璃模型中,第一层的填筑高度13.0 cm,铺设GCL后进行第二层填筑,第二层的填筑高度为10.0 cm,铺设GCL时在其边缘位置均匀撒满干燥的膨润土,防止水分从边缘处的缝隙进入下部土体。填筑过程中,在土柱10.0 cm和20.0 cm处埋设FDR传感器实时监测土体水分的变化,利用MP406数据采集器采集数据,花洒在模拟降雨过程中洒水量根据北方地区典型降雨设定为3 528 g/h。

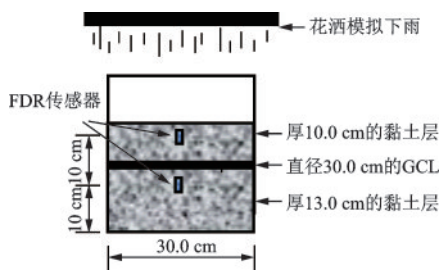


图3 模拟下雨装置

Fig.3 Rain simulator

1.3 现场碾压试验

现场碾压试验在天津市静海县杨成庄乡村公路杨成庄段进行。如图4所示,将颗粒型GCL和颗粒型双层无纺布GCL铺设在碾压后的二灰碎石土路基上,之后再再GCL上铺设厚度10.0 cm二灰碎石土,经柳工18-21压路机碾压,压路机的操作质量18 000 kg,满载工作质量21 000 kg。碾压三次后,分别测量GCL的拉伸强度和渗透系数。拉伸强度和渗透系数的测定分别根据《土工布及其有关产品

宽条拉伸试验》^[16]和《钠基膨润土防水毯》^[17]进行。



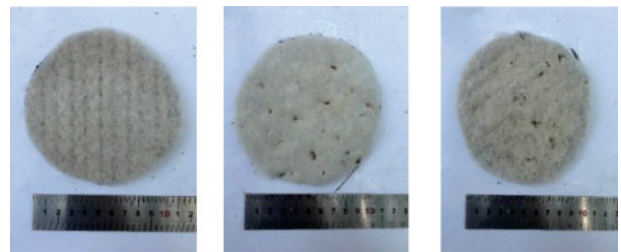
图4 GCL摊铺二灰碎石土

Fig.4 Installation of lime fly-ash stabilize gravel

2 试验结果与讨论

2.1 GCL的破坏现象

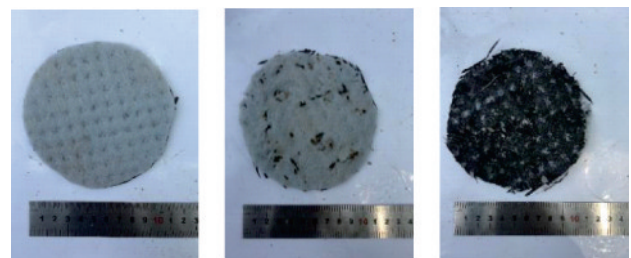
如图5所示为2 687 J/m³击实功下颗粒型双层无纺布GCL破坏情况,GCL的正反面均遭到了破坏,破洞在GCL上均匀分布。由图5(b,c)所示,直径为10 cm的GCL样品上存在8个刺穿的孔洞,其余均是表面无纺布破坏,中间的编织布未遭到破坏。颗粒型GCL破坏情况如图6所示,从GCL的无纺布一侧的表面可见颗粒型GCL破坏比颗粒型



(a) 完好GCL (b) 刺穿GCL正面 (c) 刺穿GCL反面

图5 颗粒型双层无纺布GCL破坏情况

Fig.5 Damage of the granular GCL with double-layer non-woven cloth



(a) 完好GCL (b) 刺穿GCL正面 (c) 刺穿GCL反面

图6 颗粒型GCL破坏情况

Fig.6 Damage of the granular GCL

双层无纺布 GCL 严重,刺穿的孔洞有 12 个,说明在受到外力作用时,GCL 外侧的无纺布起到了缓冲的作用,而颗粒型 GCL 的单层无纺布发挥的缓冲作用小于双层无纺布。所以相同大小的外力作用时,颗粒型 GCL 更易遭到破坏。

图 7 为不同击实功下颗粒型双层无纺布 GCL 和颗粒型 GCL 的破坏情况。由图 7 可知,随着击实功的增大,GCL 的破坏变得严重,且在击实功相同时,颗粒型 GCL 的破坏比颗粒型双层无纺布 GCL 严重。在《公路土工试验规程》^[18]中重型击实标准下的击实功 2.69 kJ/m³时,颗粒型双层无纺布 GCL 和颗粒型 GCL 样品上刺穿孔洞分别为 0.10 个/cm² 和 0.15 个/cm²。若破损率等于孔洞面积除以样品总面积,且根据击实损伤试验后 GCL 的破坏情况统计假设刺穿孔洞的尺寸为 5 mm×2 mm,则颗粒型双层无纺布 GCL 和颗粒型 GCL 的破损率分别为 1.0% 和 1.5%。

图 8 为现场碾压后颗粒型双层无纺布 GCL 的破坏情况,GCL 样品上未见明显刺穿的孔洞,破洞

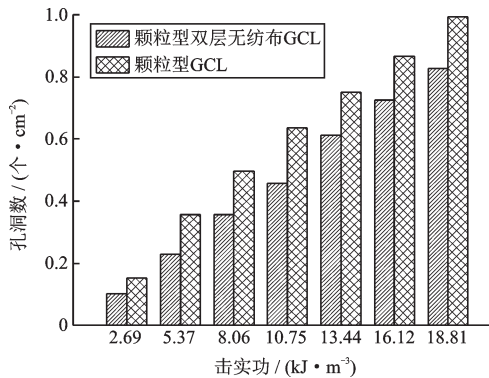


图 7 不同击实功 GCL 击穿孔洞的分布情况

Fig.7 Holes distribution of GCL under different compaction energy



图 8 现场碾压后颗粒型双层无纺布 GCL 的破坏情况

Fig.8 Damage of granular GCL with double-layer non-woven cloth after road roller runs over

直径大多小于 5 mm。现场碾压后的颗粒型 GCL 和颗粒型双层无纺布 GCL 的拉伸强度分别为 840 N/10 cm 和 1 260 N/10 cm,比未碾压时分别降低了 2.89% 和 1.95%,说明碾压造成 GCL 拉伸强度损失很小,在工程应用中可以忽略碾压造成的力学性能下降。

2.2 GCL 的防渗性能折减

图 9 为颗粒型双层无纺布 GCL 在模拟刺穿试验前后的隔水性能对比。

由图 9 中 GCL 上层土体的含水率变化可知,GCL 破坏前后土体含水率的峰值几乎相同,随着时间的增长完好 GCL 和破坏 GCL 上层土体含水率均在下降,且在 150 min 后达到稳定,但是完好 GCL 上层土体含水率的下降幅度小于破坏 GCL 上层土体的。出现此现象的原因可能是土体中的水分通过 GCL 上的刺穿孔洞进入到下层土体中,从而降低了上层土体的含水率。如图 9 中 GCL 下层土体的含水率变化所示,试验开始的 50 min 内,土体的含水率几乎保持不变,说明 GCL 起到了较好的隔水作用。随着时间的增长,土体的含水率急剧增长,说明水分穿过 GCL 进入到下层土体中。但是,完好 GCL 下层土体含水率的峰值以及稳定值均小于破坏 GCL 上层土体的,约小 17%,说明碾压使 GCL 的隔水能力降低。图 10 为颗粒型 GCL 在击实损伤试验前后的隔水性能对比,GCL 上下层土体的含水率变化趋势同颗粒型双层无纺布 GCL 的几乎相同,但是完好颗粒型 GCL 下层土体的含水率稳定值比刺穿 GCL 的高 22%。相同的情况下颗粒型 GCL 的隔水性能损失比颗粒型双层无纺布 GCL 更大,出现此现象可

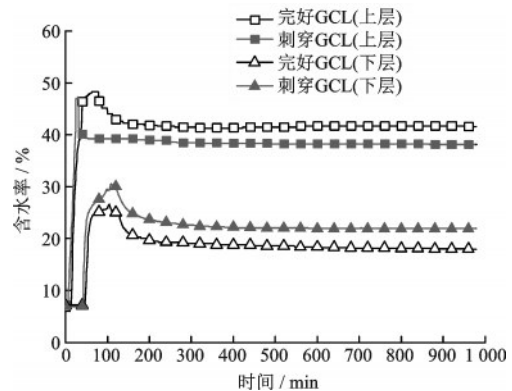


图 9 颗粒型双层无纺布 GCL 土体含水率

Fig.9 Soil water contents with granular GCL with double-layer non-woven cloth

能的原因是颗粒型GCL的破损率比颗粒型双层无纺布GCL大,也可能是颗粒型双层无纺布GCL的克重大于颗粒型GCL的,其有更大的自修复能力^[14]。此外,试验中两种GCL的隔水性能损失远小于按其破损率计算得到的隔水性能损失,可能的原因是两种GCL的破坏孔洞的直径较小,当GCL中的膨润土与水反应时产生体积膨胀,在沿厚度方向膨胀受到限制的情况下水化后的膨润土向孔洞处移动,封堵孔洞,减小了GCL隔水性能的损失。

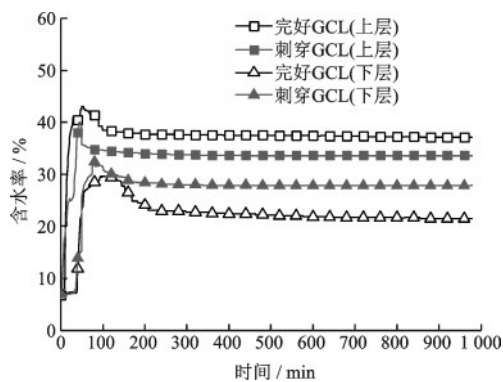


图10 颗粒型GCL土体含水率

Fig.10 Soil water contents with granular GCL

对压路机碾压后的GCL进行渗透系数测试,测得颗粒型双层无纺布GCL的渗透系数为 4.38×10^{-11} m/s,颗粒型GCL的渗透系数为 4.27×10^{-11} m/s。GCL的渗透系数一般在 $1 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-10}$ m/s之间^[14],说明造成的影响较小。

3 结论

(1)击实损伤试验造成的GCL破坏主要表现为表面无纺布的破坏和刺穿孔洞,颗粒型双层无纺布GCL和颗粒型GCL的破损率分别为1.0%和1.5%。

(2)击实损伤试验后颗粒型双层无纺布GCL和颗粒型GCL的隔水性能均下降,且下降值分别为17%和22%,但是由于GCL的自修复作用,其隔水性能实际下降值远小于理论下降值。

(3)现场碾压试验后,颗粒型双层无纺布GCL和颗粒型GCL的拉伸强度分别降低了1.95%和2.89%,在工程实践中使用时可以忽略碾压造成的力学性能损失。颗粒型双层无纺布GCL和颗粒型GCL的渗透系数分别为 4.38×10^{-11} m/s和 $4.27 \times$

10^{-11} m/s,其值仍符合钠基膨润土防水毯的抗渗要求。

(4)考虑碾压后的防渗性能,颗粒型双层无纺布GCL比颗粒型GCL更适合在路基工程中使用。

参考文献:

- [1] 陈小红. GCL室内剪切试验研究及在垃圾填埋场的应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007: 5-11.
Chen X H. Research on laboratory shear tests of geosynthetic clay liners and the application in MSW landfill [D]. Wuhan: Wuhan university of technology, 2007: 5-11. (in Chinese)
- [2] 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 Zh B, Wang Zh, Wang J Q. An overview about properties and application of a new geocomposite-GCL [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002, 19(1): 35-38. (in Chinese)
- [3] 周春生, 张文娟, 赵盼盼, 等. 用于寒旱灌区渠道防渗的人工钠化GCL特性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(4): 152-159.
Zhou Ch Sh, Zhang W J, Zhao P P, et al. Research on anti-seepage properties of artificial sodium GCL in cold drought irrigation area [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(4): 152-159. (in Chinese)
- [4] 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 Zh B, Xu Ch. Swelling characteristics and hydraulic properties of GCLs under vertical stress [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(12): 1876-1880. (in Chinese)
- [5] 介玉新, 彭涛, 傅志斌, 等. 土工合成材料黏土衬垫的渗透性研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(2): 92-97.
Jie Y X, Peng T, Fu Zh B, et al. A study on the permeability of geosynthetic clay liners [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(2): 92-97. (in Chinese)
- [6] 谢世平, 何顺辉, 张健. 影响GCL防渗性能因素分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增1): 56-61.
Xie Sh P, He Sh H, Zhang J. Factors for anti-seepage performance of GCL [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Sup1): 56-61. (in Chinese)
- [7] 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 Zh B, Wang K D, Liu S Y, 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. (in Chinese)
- [8] Sirieix C, Genelle F, Barral C, et al. Characterizing the ageing of a geosynthetic clay liner through electrical resistivity[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(3): 423-430.
- [9] 王宝,董兴玲.不同有效应力下矿山渗滤液对土工合成黏土衬垫渗透特性影响的试验研究[J].岩土力学, 2017, 38(5):1350-1358.
Wang B, Dong X L. Hydraulic conductivity of mine leachate through geosynthetic clay liners under different effective stresses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(5):1350-1358. (in Chinese)
- [10] Saidi F, Touze-foltz N, Goblet P. Numerical modeling of advective flow through composite liners in case of two interacting adjacent square defects in the geomembrane [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(2): 196-204.
- [11] Rowe R K, Abdelatty K. Leakage and contaminant transport through a single hole in the geomembrane component of a composite liner[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 139(3): 357-366.
- [12] 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 W A, Zhan L T, Chen Y M, et al. Mechanism of bentonite extrusion of GCL/GM interface[J], Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(6):832-837. (in Chinese)
- [13] 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 H W, Lin W A, Zhan L T, et al. Experiment study on shear strength of GM /GCL interface[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(2): 123-130. (in Chinese)
- [14] 盛金昌,白柯含,杨旭,等.膨润土防水毯破损条件下渗流特性试验研究[J].岩土力学, 2015, 36(增2): 315-320.
Sheng J Ch, Bai K H, Yang X, et al. An experimental study of seepage properties of geosynthetic clay liner with defects [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Sup2): 315-320. (in Chinese)
- [15] 公路路面基层施工技术细则: JTGT F20—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015:6-9.
Technical guidelines for construction of highway roadbases: JTGT F20—2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015:6-9. (in Chinese)
- [16] 土工布及其有关产品 宽条拉伸试验: GB/T 15788—2005[S]. 北京:中国标准出版社,2005:1-6.
Geotextiles and geotextile-related products—Wide-width tensile test: GB/T 15788—2005 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2005:1-6. (in Chinese)
- [17] 钠基膨润土防水毯: JG/T 193—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006:6-8.
Sodium bentonite geosynthetic clay liner: JG/T 193—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006:6-8. (in Chinese)
- [18] 公路土工试验规程: JTG E40—2007[S]. 北京:人民交通出版社,2007:132-138.
Test Methods of Soils for Highway Engineering: JTG E40—2007[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2007:132-138. (in Chinese)

(本文责编:苏泽云)