

DOI: 10.11779/CJGE201509014

膨润土防水毯搭接方式渗流特性试验研究

杨 旭¹, 盛金昌^{*1}, 郑忠巍^{1, 3}, 孙永军², 杨 慧², 詹美礼¹, 顾 洋⁴

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 天津市水利科学研究院, 天津 300061; 3. 湖州市吴兴区排涝站, 浙江 湖州 313000;
4. 西南交通大学力学与工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 为了从渗流量和渗透稳定角度深入研究膨润土防水毯搭接处的防渗问题, 开发了由压力控制系统和模型试验系统两部分组成的具有施加法向应力作用的接触面渗流试验装置, 建立了真实模拟设计提出的防水毯铺设工序的渗流搭接物理试验方法, 并通过不同工况下的膨润土防水毯搭接渗流试验, 初步探讨了搭接处膨润土发挥防渗作用的最佳状态。结果表明: 防水毯的搭接宽度宜大于 30 cm; 搭接处的膨润土添加量最好在 4000~5000 g/m² 之间选取; 取防水毯规格型号为 5000 g/m² 能满足防渗体的要求; 围压大小和加载路径对搭接处的渗透性影响均较大, 若围压先增大然后再减小, 搭接处仍能保持较为密实, 其渗透性变化不大。

关键词: 膨润土防水毯; 搭接; 渗流特性

中图分类号: TU44 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)09-1668-06

作者简介: 杨 旭(1990-), 男, 浙江绍兴人, 硕士研究生, 主要从事水利工程渗流研究。E-mail: sh901@sina.com。

Experimental study on seepage properties of GCL with different overlap methods

YANG XU¹, SHENG Jin-chang¹, ZHENG Zhong-wei^{1,3}, SUN Yong-jun², YANG Hui², ZHAN Mei-li¹, GU Yang⁴

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Tianjin Hydraulic Research Institute, Tianjin 300061, China; 3. Huzhou Wuxing Drainage Station, Huzhou 313000, China; 4. School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: For a thorough research on the GCL overlap anti-seepage problem in terms of seepage flux and seepage stability, an overlap seepage physical test method for the simulation of GCL installation process is established by developing an interface seepage experimental apparatus consisting of pressure control system and model test system under normal stress. The optimization of anti-seepage of the overlap bentonite is preliminarily discussed according to the tests under different conditions. The results show that the GCL overlap width should be more than 30 cm. The amount of bentonite added on the overlap should not be less than 4000 g/m², preferably between 4000~5000 g/m². GCL model specification 5000 g/m² is able to meet the requirements of impervious body. The magnitude of confining pressure and the load path both have great impact on the permeability of the overlap. The overlap remains dense and firm and its permeability changes a little if the confining pressure first increases and then decreases.

Key words: geosynthetic clay liner; overlap; seepage property

0 引言

钠基膨润土防水毯 (geosynthetic clay liner, 简称 GCL) 作为一种新型地下工程防水材料, 具有防渗性能好, 不受气温影响^[1-2], 吸附性强^[3], 防水材料和对象一体化, 自愈性强^[4], 体积小, 重量轻, 内部抗剪和抗拉强度高^[5], 施工简便^[6]和绿色环保等优点, 目前广泛应用于公路、铁路、市政、水利、环境及工民建中的地下防渗工程。例如, 在以 GCL 为主要防渗材料的北京奥林匹克森林公园垂直潜流人工湿地^[7]中, 湖水的 BOD₅, CODcr, 氮, 磷和叶绿素 a 等浓度发生了显著的降低; 在山西大同文瀛湖水库防渗改造工

程中^[8], 占湖底面积 15.6% 的渗漏区域被 GCL 修复后湖水每年的渗漏损失由 4.0 m³/m² 减少到 1.1 m³/m²。

理论上来讲, GCL 本身的渗透系数很小, 但在实际施工时, GCL 搭接处往往是渗流和强度的薄弱部位, 对一个大型的水库或人工湖来说, 整个防渗体系就是由无数块 GCL 搭接起来的, 施工搭接稍有不慎或因坝体不均匀沉降而受拉开裂, 则在一定的水压力作用下, GCL 搭接处就会成为集中渗流通道, 对坝体的

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51474204)

收稿日期: 2014-11-04

*通讯作者

安全稳定造成威胁。此外, 由水库调蓄引起的水位变化也会对搭接处造成一定影响。目前国内工程上对于搭接技术尚无统一的认识, 对于搭接宽度要求不一^[9-11]。国外学者对于 GCL 搭接进行了一些试验。Estornell 等^[12]测试了 3 种 GCL 分别在独立、搭接和与针刺土工织物组成复合垫层的工况下各组的渗透系数, 结果发现搭接组的渗透系数与独立未搭接的对照组相似; Benson 等^[13]观测了两个污水池的复合土工黏土垫层的渗漏情况, 其中试验组 GCL 搭接处添加了一半宽度的膨润土, 对照组则没有添加膨润土, 结果发现后者渗漏速率是前者的 8 倍; Brachman 等^[14]通过试验研究了垂向超载压力情况下 GCL 搭接边缘附近上层土工膜褶皱的变形情况以及其对于搭接处水力特性的显著影响, 结果发现土工膜褶皱的变形与搭接关系不大, 并且在 250 kPa 下 GCL 搭接处仍没有可见的开口; Egloffstein 等^[15]研究了聚乙烯覆膜的 GCL 在搭接宽度为 300 mm 和 150 mm 情况下的渗流情况, 结果发现前者几乎没有渗漏而后者有轻微渗漏现象。总的来说, 国内对于 GCL 搭接的了解还处于经验性施工阶段, 缺少系统的试验数据; 国外虽然对于 GCL 搭接处有一定研究, 对于搭接处的渗流特性认识并不全面。因此有必要专门开展 GCL 不同搭接方式以及搭接局部失效条件下坝身土体抗渗性能试验研究。

本文主要结合天津王庆坨水库的防渗工程, 从渗流量和渗透稳定控制角度重点研究 GCL 搭接处的合适工作状态, 对 GCL 搭接处的施工提出技术要求。试验研究不同上覆压力、不同水头作用、不同 GCL 规格, 搭接处不同的膨润土添加量、不同 GCL 搭接宽度等因素对 GCL 和坝身联合渗流特性的影响, 为膨润土防水毯的搭接设计和施工工艺提供依据。

1 GCL 搭接处渗流特性试验

1.1 试验原理

GCL 搭接渗流问题本质上是沿搭接结合面的水流渗透, 属于接触渗流问题, 如果情况严重会导致渗流接触冲刷, 由于土工织物和膨润土有很强的粘结力, 很难达到冲刷力, 故一般不会发生冲刷现象。

可认为水流运动为层流状态, 服从线性达西定律, 则有

$$K = \frac{v}{J} = \frac{v_1}{\alpha J} \quad , \quad (1)$$

式中, K 为渗透系数, v 表示流速, J 为水力坡降, v_1 表示单宽流量, α 表示过水断面厚度 (材料厚度)。

$$v_1 = \frac{q}{d} = \frac{Q}{td} \quad , \quad (2)$$

式中, q 表示单位时间的流量, d 表示材料的宽度 (内筒直径), Q 表示一段时间 t 内的渗流量。

$$J = \frac{\Delta H}{L} = \frac{P_1 - P_2}{L} \quad , \quad (3)$$

式中, ΔH 为水头差 (渗压差), P_1 为上游水压力, P_2 为下游水压力, L 为渗径, 即搭接宽度。

1.2 设计思路

经研究, 在搭接处影响渗透的主要因素有: ①搭接宽度; ②膨润土添加量; ③GCL 规格。根据实际工程现场取样, 采取相似的工程水力条件进行测试, 以获取各工况下的渗流数据, 对防渗效果进行评价。

图 1 为王庆坨水库坝体 GCL 铺设工艺示意图。本试验为模拟 GCL 搭接处渗流的实际工况, 即真实模拟设计提出的 GCL 铺设工序而设计出的渗流搭接试验, 见图 2, GCL 一侧为聚苯乙烯保温板, 另一侧为有机玻璃 (代替实际工程中的混凝土预制板, 有机玻璃和混凝土板均不透水), 模型试验中的围压即为实际工程中 GCL 搭接处的正压力, 引起 GCL 渗流的渗压水头则从内筒底部进水口输入, 围压和渗压均可由压力控

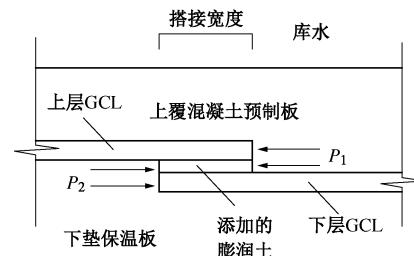
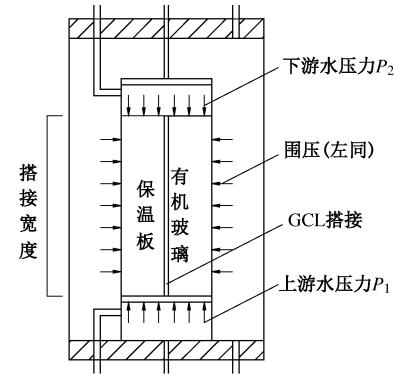
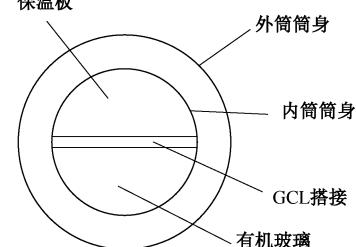


图 1 王庆坨水库 GCL 铺设搭接示意图 (P_1 和 P_2 为渗压)

Fig. 1 Installation of GCL overlap of Wangqingtuo Reservoir (P_1 and P_2 represent seepage pressure)



(a) 纵剖面图



(b) 横剖面图

图 2 模拟 GCL 铺设搭接工序的渗流试验示意图

Fig. 2 Seepage experiment simulating installation process of overlap

制统提供和调节,由此,可以获得不同围压(正压力)下,不同渗压(上下游水头差)时搭接处的渗流规律。

1.3 系统组成

根据接触渗流的特性,本文开发了具有法向应力作用的接触面渗流试验装置,整个仪器装置可由压力控制系统和模型试验系统两部分组成,具体见图3。

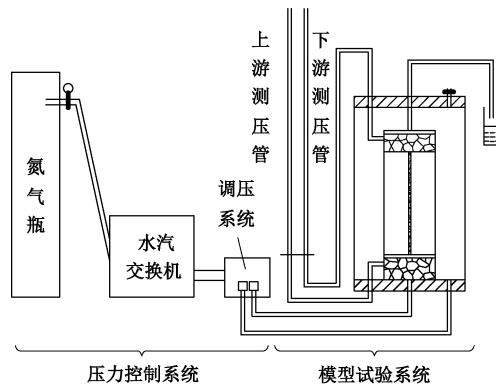


图3 试验仪器总图

Fig. 3 General plan of experimental apparatus

(1) 压力控制系统

压力控制系统主要由氮气瓶、水汽交换机和调压系统组成。氮气瓶作为压力源,提供气压,通过管道输送到水汽交换机,最大压力为10 MPa;水汽交换机内部有两个气囊,利用控制汽水平衡的原理,将从氮气瓶输送过来的气压转换成水压,并等压从管道输出;调压系统用于调压控制,设有调压阀,具体分为渗压调压阀和围压调压阀。

(2) 模型试验系统

模型试验系统主要由内筒和外筒组成。

内筒分为上中下3个部分,上下两个部分为稳流区,使水流均匀作用于试件表面。中部为试样区,用来放置GCL等渗透介质。实物图见图4(a)。

外筒主要由筒身和上下筒盖等结构组成,直径为30 cm。外筒是法向应力作用区,设有进水口,主要是用来对内筒施加围压,可以均匀作用在内筒表面,实物图见图4(b)。

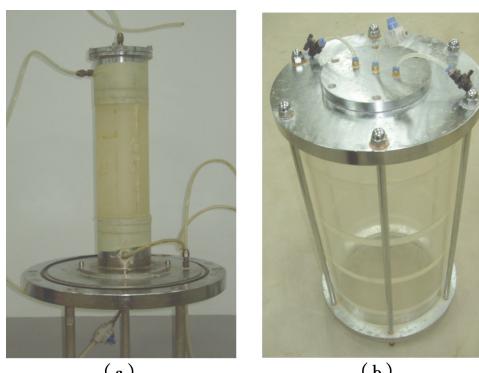


图4 内筒和外筒试验模型

Fig. 4 Test model of inner and outer cylinder

1.4 试验方案

具体试验步骤如下:

(1) 在内筒中按GCL搭接工序装填GCL、保温板和有机玻璃等材料,按图2所示固定在内筒的中部,再用乳胶膜将内筒整体包起来使其稳定,内筒的上部和下部都装填稳流碎石和反滤料。

(2) 安装外筒并连接压力控制系统,通过压力控制系统给内外筒之间施加压力,此压力通过乳胶膜传递到试样区,即为施加在试件上的围压。安装好的整体仪器模型如图3所示。

(3) 进行试验。首先通过压力控制系统以很小的水压力从底板进水口向内筒充水,由于试验组数和时间条件限制,等GCL试样饱和12 h以后将围压稳定在某一定值,对试样分级施加渗透压力,记录一个时间段内的渗流量和上下游水头。当渗压接近围压时,再调整围压,同前面步骤再次进行测量读数。

本试验的目的是研究GCL不同搭接方式下搭接处的抗渗性能。表1给出了不同条件下的GCL搭接渗透试验组合(各类试验组合平行开展1~3个试验),共开展了7组不同条件的试验。主要研究不同GCL规格:搭接处不同的膨润土添加量、不同GCL搭接宽度和库水位变化等因素对GCL渗流特性的影响。主要的试验工况如表1。

表1 GCL搭接渗透试验组合

Table 1 Combinations of GCL overlap seepage experiments

试验编号	围压 p/MPa	搭接宽度 b/cm	膨润土添加量 $m/(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$	规格型号 $s/(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$
1	0.02~0.30	30	4000	5000
2	0.02~0.30	20	4000	5000
3	0.02~0.30	30	5000	5000
4	0.02~0.30	20	5000	5000
5	0.02~0.30	30	3000	5000
6	0.02~0.30	20	3000	5000
7	0.02~0.30	30	4000	5000

2 试验结果分析

2.1 不同搭接宽度对搭接处渗流特性影响

(1) 试验对比工况:GCL搭接宽度分为30 cm和20 cm两种,即[#]1试验和[#]2试验。不同搭接宽度的单宽渗流量与渗流梯度的关系如图5所示。

(2) 试验结果

从表2中可以看出:

a) 当围压为0.08 MPa(相当于GCL搭接处的上覆压力约8 m水压力),搭接宽度为20 cm时搭接处的渗透系数为 $5.2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$,基本上与被保护粉土的渗透系数相当($1.9 \times 10^{-7} \sim 6.3 \times 10^{-7} \text{ m/s}$),即,搭接处的渗透系数偏大,对坝体粉土没有保护作用。而搭接宽度为30 cm时搭接处的渗透系数为 $2.79 \times 10^{-7} \text{ m/s}$,小于部分

坝身粉土的渗透系数, 对坝体有一定的保护作用。

b) 当围压为 0.14 MPa (相当于 GCL 搭接处的上覆压力约 14 m 水压力), 搭接宽度为 20 cm 时搭接处的渗透系数为 2.1×10^{-8} m/s, 渗透系数比被保护粉土小一个数量级。而搭接宽度为 30 cm 时, 其搭接处的渗透系数仅为 1.1×10^{-8} m/s, 更小于 20 cm, 对坝身粉土有很好的保护作用。

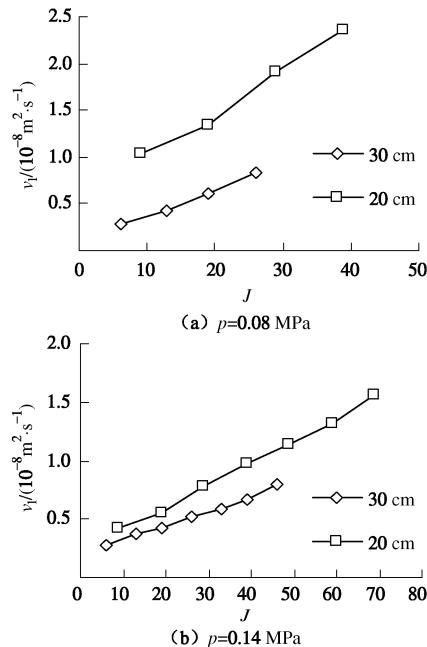


图 5 不同搭接宽度单宽渗流流量 - 渗流梯度对比

Fig. 5 Relationship between v_1 and J under different b

表 2 不同搭接宽度下搭接处渗透系数值

Table 2 K under different b

围压 p /MPa	搭接宽度 b /cm	K /($m \cdot s^{-1}$)
0.08	20	5.20×10^{-7}
0.08	30	2.79×10^{-7}
0.14	20	2.10×10^{-8}
0.14	30	1.10×10^{-8}

从上述试验结果可以看出: 结合工程, 由于 GCL 的工作环境基本上处于低围压状态下, 所以应考虑 GCL 的搭接宽度至少不宜小于 30 cm。

2.2 不同膨润土添加量对搭接处渗流特性影响

(1) 试验对比工况: GCL 搭接处膨润土添加量分别为 3000, 4000 和 5000 g/m², 搭接宽度分为 20 cm 和 30 cm 两种, 30 cm 时分别为 #1 试验、#3 试验和 #5 试验, 20 cm 时分别为 #2 试验、#4 试验和 #6 试验。不同膨润土添加量的单宽渗流流量与渗流梯度的关系见图 6, 7。

(2) 试验结果

从表 3 中可以看出: 当搭接处膨润土添加量为 3000 g/m² 时, 搭接处的渗透系数为 3.0×10^{-7} m/s, 基本上与被保护粉土的渗透系数相当 ($1.9 \times 10^{-7} \sim 6.3 \times 10^{-7}$ m/s); 当搭接处膨润土添加量分别为 4000 g/m² 和 5000 g/m² 时, 搭接处的渗透系数为 1.1×10^{-8} m/s 和 8.0×10^{-9} m/s, 渗透系数比被保护粉土小一个数量级。从这里同样可以看出, 搭接处膨润土添加量至少要达到 4000 g/m² 以上, 搭接处渗透系数才会达到防渗体的要求。

量级。对比以上 3 个工况可以看出, 当搭接处膨润土添加量达到 4000 g/m² 时, 搭接处渗透系数降低明显, 若再增加到 5000 g/m² 时, 搭接处渗透系数仍有所减小, 但减小幅度较小。从上述试验结果认为: GCL 搭接处的膨润土添加量应不低于 4000 g/m², 最好在 4000~5000 g/m² 之间选取。

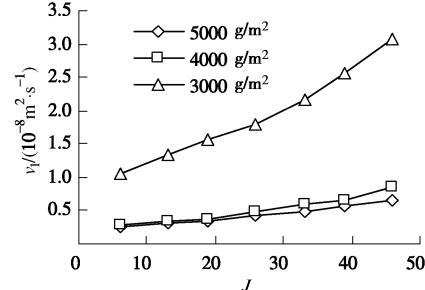


图 6 围压 0.14 MPa 不同膨润土添加量的单宽渗流流量 - 渗流梯度对比(搭接宽度为 30 cm)

Fig. 6 Relationship between v_1 and J under different m ($p=0.14$ MPa, $b=30$ cm)

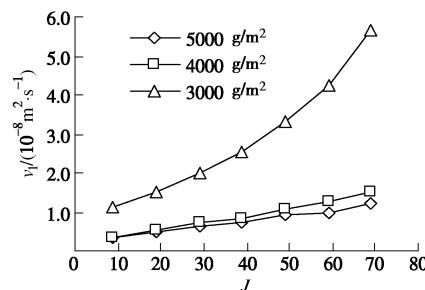


图 7 围压 0.14 MPa 不同膨润土添加量的单宽渗流流量 - 渗流梯度对比(搭接宽度为 20 cm)

Fig. 7 Relationship between v_1 and J under different m ($p=0.14$ MPa, $b=20$ cm)

表 3 不同膨润土添加量条件下搭接处渗透系数值 (搭接宽度为 30 cm)

Table 3 K under different m ($b=30$ cm)

围压 p /MPa	膨润土添加量 m /($g \cdot m^{-2}$)	K /($m \cdot s^{-1}$)
0.14	3000	3.0×10^{-7}
0.14	4000	1.1×10^{-8}
0.14	5000	8.0×10^{-9}

从表 4 中可看出: 当搭接处膨润土添加量为 3000 g/m² 时, 搭接处的渗透系数为 8.3×10^{-7} m/s, 比被保护粉土的渗透系数 ($1.9 \times 10^{-7} \sim 6.3 \times 10^{-7}$ m/s) 还大; 当搭接处膨润土添加量分别为 4000 g/m² 和 5000 g/m² 时, 搭接处的渗透系数为 2.1×10^{-8} m/s 和 9.8×10^{-9} m/s, 渗透系数比被保护粉土小一个数量级。从这里同样可以看出, 搭接处膨润土添加量至少要达到 4000 g/m² 以上, 搭接处渗透系数才会达到防渗体的要求。

上述试验结果进一步说明: GCL 搭接处的膨润土添加量应不低于 4000 g/m², 最好在 4000~5000 g/m² 之间选取; 此外, 搭接宽度对渗透性也有一定的影响。

表 4 不同膨润土添加量条件下搭接处渗透系数值 (搭接宽度为 20 cm)

Table 4 K under different m ($b=20$ cm)

围压 p /MPa	膨润土添加量 m /(g·m ⁻²)	K /(m·s ⁻¹)
0.14	3000	8.3×10^{-7}
0.14	4000	2.1×10^{-8}
0.14	5000	9.8×10^{-9}

2.3 不同 GCL 规格对搭接处渗流特性影响

(1) 试验对比工况: GCL 的规格型号分别为 5000 g/m² 和 5500 g/m² 两种, 与之对应的试验分别为^{#1} 试验和^{#7} 试验 (GCL 规格型号 5000 g/m² 是指 GCL 每平方米含 5000 g 的膨润土)。不同 GCL 规格的单宽流量与渗透梯度的关系如图 8。

(2) 试验结果

从表 5 中可以看出: 当 GCL 的规格型号为 5500 g/m², 围压为 0.08 MPa 时搭接处的渗透系数为 1.5×10^{-7} m/s, 渗透性有所降低 (与规格 5000 g/m² 相比), 比被保护粉土的渗透系数 (1.9×10^{-7} ~ 6.3×10^{-7} m/s) 略小; 围压为 0.14 MPa 时搭接处的渗透系数则为 8.6×10^{-9} m/s, 渗透性也有所降低 (与规格 5000 相比), 但比被保护粉土的渗透系数 (1.9×10^{-7} ~ 6.3×10^{-7} m/s) 小几十倍以上, 可以起到防渗体的防渗作用。

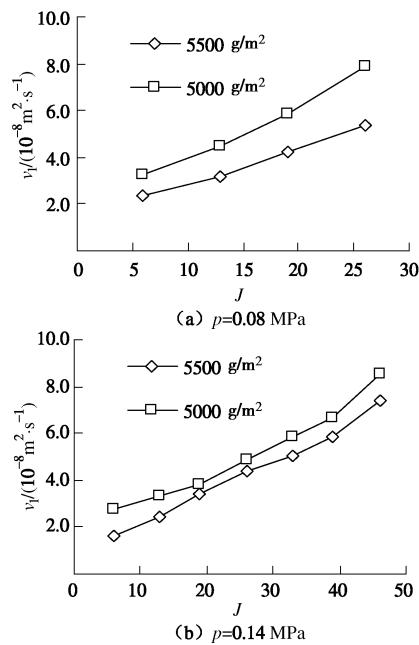


图 8 不同 GCL 规格下的单宽渗流量 - 渗流梯度对比

Fig. 8 Relationship between v_1 and J under different s

表 5 不同 GCL 规格下搭接处渗透系数值

Table 5 K under different s

围压 p /MPa	GCL 规格 s /(g·m ⁻²)	K /(m·s ⁻¹)
0.08	5000	2.26×10^{-7}
0.08	5500	1.50×10^{-7}
0.14	5000	1.30×10^{-8}
0.14	5500	8.60×10^{-9}

以上试验说明: GCL 规格型号为 5000 g/m² 能满足防渗要求, GCL 的规格型号为 5500 g/m² 时, 其搭

接处的渗透性相对更要小一些。

2.4 围压加压路径对搭接处渗流特性影响

(1) 围压增大再减小对搭接处渗流特性的影响

在上述试验中, 施加的围压有两个级别, 分别为 0.08 MPa 和 0.14 MPa。从中可以看出, 围压对 GCL 搭接处的渗透性影响很大, 围压加大, 搭接处的渗透性减小很多。本小节将模拟库水位周期变化, 研究围压加大然后再减小这样一个加载路径过程中搭接处渗流特性的变化情况。

试验条件: ^{#1} 试验条件, 即膨润土添加量为 4000 g/m², GCL 规格型号为 5000 g/m²; 搭接宽度 30 cm。

试验过程: 先在围压 0.08 MPa 下测定一组搭接处单宽渗流量和渗透梯度数据 (①数据); 然后将围压上升到 0.14 MPa 时再测定一组数据 (②数据); 最后围压从 0.14 MPa 降回到 0.08 MPa 测定一组数据 (③数据)。

由图 9 可见: ③数据线和②数据线非常靠近, 曲线的斜率也大致相同, 也就是说其渗透性反弹很小。这说明当搭接处膨润土压实后, 即使围压有所减小, 搭接处仍然能保持较为密实, 其渗透性变化不大。即搭接处在围压 0.14 MPa 密实一段时间后, 减小到 0.08 MPa 时其渗透性仍然能保持在 0.14 MPa 围压下同一数量级。

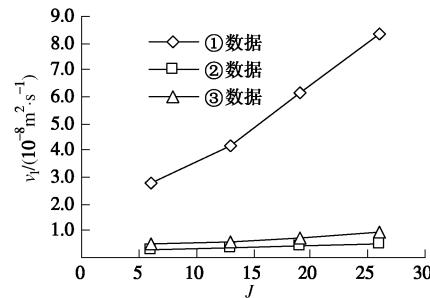


图 9 围压增大再减小搭接处单宽渗流量 - 渗透梯度关系的对比

Fig. 9 Relationship between v_1 and J when p increases and then decreases

(2) 本节将模拟库水位上升, 研究围压的递增过程与搭接处渗透系数的关系, 演示的是围压对搭接处渗流特性的影响。

试验条件: 同上, 为^{#1} 试验条件。由图 10 可见: 曲线有陡转为平缓。这说明了搭接处膨润土压实的一

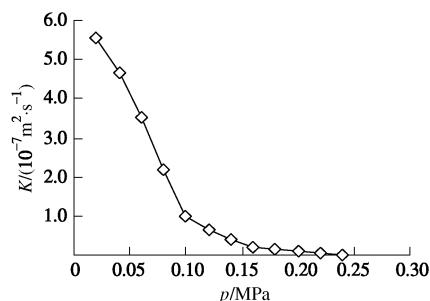


图 10 围压上升过程中搭接处渗透系数的变化

Fig. 10 Relationship between K and p

个过程中, 渗透系数与膨润土的密实度的关系。在 0.08 MPa 之前, 膨润土很容易被压实, 所以渗透系数变小的速度很快, 但基本也在同一数量级。0.08 MPa 至 0.14 MPa 的过程间, 曲线明显变缓, 渗透系数变化不大。0.14 MPa 之后, 渗透系数基本无变化, 表明膨润土的压实度已经达到了一个极限。若能让膨润土在 0.14 MPa 左右的围压下工作, 基本能发挥较好的防渗性能。

3 结 论

(1) GCL 的搭接宽度宜大于 30 cm, 而且搭接处应该有铆钉锚固。

(2) GCL 搭接处的膨润土添加量应不低于 4000 g/m², 最好在 4000~5000 g/m² 之间选取。

(3) GCL 的规格型号为 5000 能满足防渗体的要求。GCL 的规格型号为 5500 时, 其搭接处的渗透性相对要小一些。

(4) 围压对 GCL 搭接处的渗透性影响很大, 围压加大, 搭接处的渗透性大幅减小。围压的加载路径对搭接处的渗透性也有很大影响, 若围压先增大然后再减小, 搭接处仍能保持较为密实, 其渗透性变化不大。

根据上述试验结果, 建议在工程施工过程中, GCL 搭接应满足上述要求, 制定合理的 GCL 搭接施工方案, 以确定堤坝工程能长期安全运行, 并提高水库的蓄水效率。

本文仅初步研究了 GCL 搭接处影响渗流的主要因素, 还有很多其他问题, 例如如何在低围压下让膨润土发挥较好的防渗作用, 仍有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 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(2): 92~97. (JIE Yu-xin, PENG Tao, FU Zhi-bin, et al. A study on the permeability of geosynthetic clay liners[J]. China Civil Engineering Journal, 2009(2): 92~97. (in chinese))
- [2] PODGORNEY R K, BENNETTE J E. Evaluating the long-term performance of geosynthetic clay liners exposed to freeze-thaw[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(2): 265~268.
- [3] LANGE K, ROWE R K, JAMIESON H. The potential role of geosynthetic clay liners in mine water treatment systems[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(2): 199~205.
- [4] SARI K, CHAI J. Self healing capacity of geosynthetic clay liners and influencing factors[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, 41: 64~71.
- [5] 章美文, 侯毅凯. 坝体防渗设计中膨润土防水毯的应用[J]. 水利水电技术, 2008(1): 49~51. (ZHANG Mei-wen, HOU Kai-yi. Application of geosynthetic clay liner to anti-seepage system in dam body[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008(1): 49~51. (in Chinese))
- [6] 王 涛. 膨润土防水毯实际工程问题及应用进展综述[J]. 施工技术, 2010, 39(增刊 1): 401~405. (WANG Tao. Review on engineering problems and application prospect of GCL[J]. Construction Technology, 2010, 39(S1): 401~405. (in Chinese))
- [7] XIE X L, HE F, XU D, et al. Application of large - scale integrated vertical - flow constructed wetland in Beijing Olympic forest park: design, operation and performance[J]. Water and Environment Journal, 2012, 26(1): 100~107.
- [8] PAN G, ZHANG Z, LI L, et al. A case study of water retention and ecosystem functioning restoration in Wenying Lake (China)[J]. Lakes & Reservoirs: Research & Management, 2012, 17(3): 185~190.
- [9] 曲春珑, 周卉鑫. 膨润土防水毯施工技术的研究与应用[J]. 建筑技术, 2011, 42(7): 590~593. (QU Chun-long, ZHOU Hui-xin. Research and application of bentonite waterproof carpet construction technology[J]. Architecture Technology, 2011, 42(7): 590~593. (in Chinese))
- [10] 郝富增, 付立中. 膨润土防水毯在新乡医学院人工湖改造工程中的应用[J]. 中国建筑防水, 2011(10): 34~36. (HAO Fu-zeng, FU Li-zhong. Application of bentonite carpet in renovation of man-made lake of Xinxiang Medical University[J]. China Building Waterproofing, 2011(10): 34~36. (in Chinese))
- [11] 汪 武, 李爱军. 福州档案馆新馆人工湖工程防水技术[J]. 中国建筑防水, 2012(10): 27~29. (WANG Wu, LI Ai-jun. Waterproofing technology of artificial lake project of Fuzhou New Archives [J]. China Building Waterproofing, 2012(10): 27~29. (in Chinese))
- [12] ESTORNELL P, DANIEL D E. Hydraulic conductivity of three geosynthetic clay liners[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(10): 1592~1606.
- [13] BENSON C H, JO H Y, ABICHOU T. Forensic analysis of excessive leakage from lagoons lined with a composite GCL[J]. Geosynthetics International, 2004, 11(3): 242~252.
- [14] BRACHMAN R W I, JOSHI P, ROWE R K, et al. Physical response of geomembrane wrinkles near GCL overlaps[C]// Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering. ASCE, Dallas, 2011: 1152~1161.
- [15] EGLOFFSTEIN T A, KALSOW J, VON MAUBEUGE K P, et al. Multi-component geosynthetic clay liners: A product with new possibilities[C]// Current and Future Practices for the Testing of Multi-Component Geosynthetic Clay Liners. ASTM, 2013: 1~14.