

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S2.042

# 膨润土防水毯破损条件下渗流特性试验研究

盛金昌<sup>1</sup>, 白柯含<sup>1</sup>, 杨旭<sup>1</sup>, 郑忠巍<sup>1,3</sup>, 詹美礼<sup>1</sup>, 孙永军<sup>2</sup>, 杨慧<sup>2</sup>

(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)

**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破损处的防渗问题, 开发了由压力控制系统和模型试验系统两部分组成的渗流试验装置, 建立了针对坝体防渗工程中的防水毯破损情况的渗流物理试验方法, 并通过膨润土防水毯不同破损工况下的渗流试验, 初步探讨了影响破损防水毯与坝身土体联合抗渗的因素。结果表明, 对破损防水毯和土体的综合渗透系数的影响, 孔洞大小比破损率要敏感; 对于孔洞修复能力, 主要的敏感的因素包括孔洞直径  $D$  及防水毯规格 (材料本身性能)。在工程中要做好以下两点: (1) 工程中刺破孔洞直径  $D$  小于 0.5 cm, 超过 0.5 cm 的孔洞应当做修补; (2) 局部刺破率不宜大于 0.5%, 尽量保证防水毯接触面的平整。

**关 键 词:** 膨润土防水毯; 破损; 渗流特性

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598-(2015) 增 2-0315-06

## An experimental study of seepage properties of geosynthetic clay liner with defects

SHENG Jin-chang<sup>1</sup>, BAI Ke-han<sup>1</sup>, YANG Xu<sup>1</sup>, ZHENG Zhong-wei<sup>1,3</sup>,  
ZHAN Mei-li<sup>1</sup>, SUN Yong-jun<sup>2</sup>, YANG Hui<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy And Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Tianjin Hydraulic Research Institute, Tianjin 300061, China; 3. Huzhou Wuxing Drainage Station, Huzhou, Zhejiang 313000, China)

**Abstract:** For thorough research of the anti-seepage problem in terms of seepage flux and seepage stability due to the geosynthetic clay liner(GCL) defects, the seepage physical test method for the simulation of GCL with defects in dam anti-seepage hydraulic projects is established by means of developing the seepage experimental apparatus consisting of pressure control system and model test system. Factors which affect the joint impermeability of dam soil and GCL with defects are preliminarily discussed according to the seepage test of GCL with different defect conditions. The results show that the hole-defect's size can be more sensitive to the impact of overall permeability of GCL with defects and soil than the defect rate. The main sensitive factors for defect's healing capacity include hole-defect's diameter and GCL specifications (material's own performance). Therefore, two following points should be considered in the projects: (1) the hole-defect's diameter should be less than 0.5 cm in the projects, the ones larger should be repaired; (2) make sure the GCL interface is smooth and flat in case that the local defect rate becomes more than 0.5%.

**Keywords:** geosynthetic clay liner(GCL); defects; seepage properties

## 1 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<sup>[1]</sup>、体积小、重量轻、施工简便<sup>[2]</sup>、自愈性强<sup>[3]</sup>和抗剪和抗拉强度高<sup>[4]</sup>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, 上海太平桥公共绿地人工湖

设计时湖底和湖坡结构上采用铺有 GCL 的隔离层, 确保隔绝地下有害水源<sup>[5]</sup>; 北京国贸三期大厦地下工程底板大面及侧壁选用 GCL 进行防水施工, 渗透系数达到  $5 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ <sup>[6]</sup>。

理论上方面, GCL 本身的渗透系数极小, 一般在  $1 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ , 但在实际铺设过程中, GCL 可能遭受石块或其它尖锐物的穿刺破坏, 或因坝体变形、风浪和水位变化等因素而引起局部撕裂

收稿日期: 2015-01-27

第一作者简介: 盛金昌, 男, 1969 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程渗流及其流固热化学多场耦合研究。E-mail: sh901@sina.com

破损,产生一些孔洞,成为集中渗流通道,对坝体的安全稳定造成威胁。国内工程上对于 GCL 破损的影响尚无统一的认识,对于修复技术要求也不一<sup>[7-8]</sup>。国外学者对于 GCL 破损进行了一些试验,Mendes 等<sup>[9]</sup>测试了破损的 GM (geomembrane,土工膜)与 GCL 之间的界面流速,证明了 GCL 的结构和材料特点对于 GM-GCL 界面透射率和透过复合垫层的流速的影响很小,代入的解析解也证明了这一点。Rowe 等<sup>[10]</sup>试验研究了污染物通过与 GCL 直接接触的 GM 上的单个 10 mm 直径孔洞的运移情况,发现当渗透物质与 GCL 作用时,通过孔洞的渗流量由界面透射率而非 GCL 渗透系数控制。Egloffstein 等<sup>[11]</sup>研究了聚乙烯覆膜的 GCL 在聚乙烯膜被刺破情况下孔洞周围水分分布情况。在数值模拟方面,Saidi<sup>[12]</sup>研究了复合垫层中 GM 上两个毗邻的相互作用的方形破损孔洞对于对流的影响,发现其作用没有明显降低流量。李霞<sup>[13]</sup>研究了 HDPE+GCL 和 HDPE+导排层+GCL 两种防渗结构在 HDPE (high density polyethylene, 高密度聚乙烯,可用作土工膜材料)土工膜存在缺陷时的渗漏规律。总的来说,国外对于 GCL 破损处研究大都集中在 GM-GCL 复合垫层系统在 GM 破损情况下的渗透情况,较少考虑 GCL 直接破损情况。国内对于 GCL 破损处的了解还处于经验性施工阶段,缺少系统的试验数据;因此有必要专门开展 GCL 破损处 GCL 与坝身土体联合抗渗性能试验研究。

本次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 破损处的工作状态,对 GCL 破损处的施工提出技术要求。试验将考虑不同的破损率、破损洞口直径、孔洞直径组合和上下游水压力等因素,测定了 GCL 的渗透性、愈合能力及渗透破坏的极限条件,为 GCL 的破损修复和施工工艺提供依据。

## 2 GCL 破损渗流特性试验

GCL 中的钠基膨润土遇水时具有极强的膨胀能力,当防水毯发生刺破或穿孔后,膨润土与水产生体积膨胀,在沿厚度方向膨胀收到限制的情况下水化后的膨润土势必向孔洞处移动,对孔洞产生愈合作用。同时,膨润土在孔洞处溢出与坝身原土体接触结合,形成联合工作机制。原土对防水毯的愈合能力的影响可以分为两个,(1)控制流速:防水毯刺破后暂时起防水作用的是原土,原土防渗性能越好,流速越慢,防水毯内部的膨润土就越不易流失,就能良好地愈合。(2)补洞:与膨润土结合。

刺破后原土会填充到防水毯的刺破孔洞中,与膨润土共同工作。所以,刺破的防渗效果与原土有着很大的关系,本次试验中综合考虑了在防水毯上覆盖原土,对其进行防水毯刺破的研究。

### 2.1 试验原理

结合工程,考虑破损 GCL 与土体联合抗渗的综合渗透系数及破坏比降。

水流运动为层流状态,服从线性达西定律,则综合流速为

$$v = KJ = K \frac{\Delta H}{L_1 + L_2} \quad (1)$$

式中:  $K$  为综合渗透系数;  $J$  为水力坡降;  $\Delta H$  为上下游水头差(渗压差);  $L_1$  为防水毯厚度;  $L_2$  为工程原土的厚度。同时,综合流速  $v$  可由下式计算求得:

$$v = \frac{q}{s} = \frac{4q}{\pi D^2} \quad (2)$$

式中:  $s$  为试验装置筒内过水断面面积;  $D$  为筒内过水断面直径。综合渗透系数  $K$ :

$$K = \frac{v}{J} = \frac{4q(L_1 + L_2)}{\pi D^2 \Delta H} \quad (3)$$

### 2.2 系统组成

开发的仪器装置可由压力控制系统和模型试验系统两部分组成,如图 1 所示。

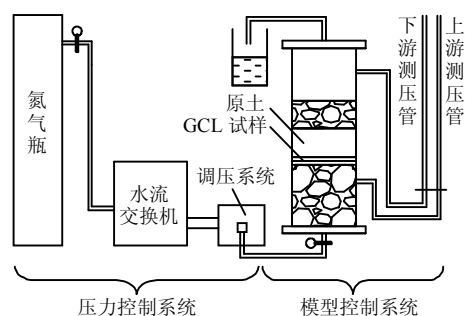


图 1 试验仪器

Fig.1 Experimental apparatus

#### 2.2.1 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 2 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。

#### 2.2.2 模型试验系统

模型试验系统主要由上筒和下筒组成。下筒中

装填稳流碎石和反滤料，设有进水管（配有进水阀）和上游测压管。上筒中装填被保护粉土（原土），上覆碎石层，设有出水管和下游测压管；上下筒之间固定 GCL 试样。在上下筒压力差的作用下水流从 GCL 破损处通过，实物见图 2。



图 2 模型试验系统  
Fig.2 Test model system

### 2.3 试验方案及步骤

本次试验主要研究防水毯破损率、孔洞直径、防水毯规格型号等因素对工程渗透特性的影响，破损率分为 0.3%和 0.5%两种，主要孔径分为 1.0 cm 和 0.5 cm 两种，防水毯规格型号分为 5 000 g/m<sup>2</sup> 和 5 500 g/m<sup>2</sup> 两种。采用优选正交法选择试验工况组合，具体见表 1。表中，试验中以所有孔洞总面积的

和作为破损面积，除以 GCL 试样总面积求得破损率。

具体试验步骤：

① 在筒中装填试样。将下筒筒壁安装在底板上，装填碎石填平，铺上反滤料，裁剪出需要大小的 GCL，按图中所示固定在下筒的顶部。在下筒上部安装上筒，接着在 GCL 上面填筑粉土，覆盖碎石。盖上顶板，拧紧螺丝固定，并保证密封性良好。

② 连接压力控制系统。安装好的仪器模型（见图 2）。然后，向下筒内注满水，连接加压管路，通过压力控制系统施加压力。等过一段时间下筒上游水头基本稳定，从上筒注水，连接下游测压管，使上筒饱和。

③ 进行试验。上下筒充分饱和一段时间后 GCL 充分膨胀，再通过压力控制系统输送压力，安装完后，用进水阀控制进水管的进水量，以调节上游水压力。下游水压力由于 GCL 与粉土共同防渗作用，几乎不变。当上下游水头差稳定后，测试渗流量，测完后，再稳定更高的一个水头差，测试数据。依次上升，直至破坏。

## 3 试验结果分析

各组试验所测得的渗透系数范围和渗透破坏时的临界渗透梯度值见表 2，后文分组讨论试验结果时分析所需具体数据可在表中查找。

表 1 GCL 局部破损条件下坝身土体抗渗试验组合

Table 1 Combinations of dam soil impermeability tests on condition of GCL local defects

试验组合编号	规格型号	上覆土体厚度	孔洞直径 /cm×孔洞个数 /个	破损率 /%
A	5 000 g/m <sup>2</sup>	10 cm 粉土+5 cm 石子	φ1.0×1+φ0.83×1	0.5
B	5 000 g/m <sup>2</sup>	10 cm 粉土+5 cm 石子	φ1.0×1	0.3
C	5 000 g/m <sup>2</sup>	10 cm 粉土+5 cm 石子	φ0.5×4+φ0.12×1	0.3
D	5 000 g/m <sup>2</sup>	10 cm 粉土+5 cm 石子	φ0.5×6	0.5
E	5 500 g/m <sup>2</sup>	10 cm 粉土+5 cm 石子	φ1.0×1+φ0.83×1	0.5
F	5 500 g/m <sup>2</sup>	10 cm 粉土+5 cm 石子	φ1.0×1	0.3
G	5 500 g/m <sup>2</sup>	10 cm 粉土+5 cm 石子	φ0.5×6	0.5

表 2 各组试验所测渗透系数范围与破坏时渗透梯度值汇总

Table 2 Summary of K and J on critical condition of seepage failure for each test series

试验组合编号	规格型号	最大孔径 /cm	破损率 /%	渗透系数 K / (m/s)	破坏时渗透梯度 J
A	5 000 g/m <sup>2</sup>	1.0	0.5	0.93×10 <sup>-7</sup> ~1.15×10 <sup>-7</sup>	7.64~9.72
B	5 000 g/m <sup>2</sup>	1.0	0.3	2.60×10 <sup>-8</sup> ~3.27×10 <sup>-8</sup>	8.62~13.94
C	5 000 g/m <sup>2</sup>	0.5	0.3	2.44×10 <sup>-9</sup> ~3.80×10 <sup>-9</sup>	13.65~15.95
D	5 000 g/m <sup>2</sup>	0.5	0.5	6.53×10 <sup>-9</sup> ~1.15×10 <sup>-8</sup>	10.8~12.0
E	5 500 g/m <sup>2</sup>	1.0	0.5	1.81×10 <sup>-8</sup> ~4.37×10 <sup>-8</sup>	8.9~10.10
F	5 500	1.0	0.3	6.92×10 <sup>-9</sup> ~1.04×10 <sup>-8</sup>	15.0~19.0
G	5 500	0.5	0.5	2.53×10 <sup>-9</sup> ~4.32×10 <sup>-9</sup>	19.3~20.7
粉土				1.80×10 <sup>-7</sup> ~7.50×10 <sup>-7</sup>	3.5~6.0

### 3.1 破损率对综合渗流特性的影响

本组试验主要研究在防水毯规格与破损孔洞直径相同工况下破损率变化对系统防渗效果的影响。

#### (1) A组试验与B组试验结果的对比

A组试验的破损率为0.5%，B组试验的破损率为0.3%，其他试验条件相同（最大刺破孔径为 $\phi 1.0$  cm，防水毯规格都为 $5000 \text{ g/m}^2$ ，上覆粉土为10 cm土+5 cm石子）。图3为A组与B组试验工况的渗透系数与渗流梯度关系对比。从图中可以看出，在土体发生渗透破坏之前A组的渗透系数约为B组的3.5倍左右。

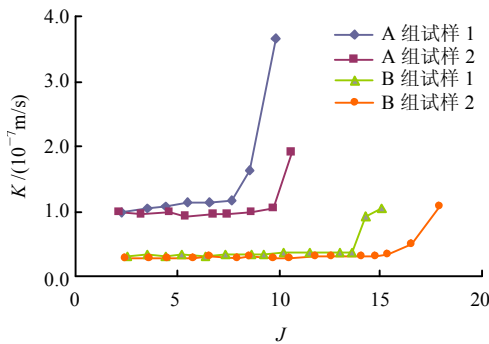


图3 A组与B组试验工况渗透系数与渗流梯度对比  
Fig.3 Relationships between  $K$  and  $J$  in team A and B

#### (2) C组试验与D组试验结果对比

D组试验的破损率为0.5%，C组试验的破损率为0.3%，其他试验条件相同（最大刺破孔径为 $\phi 0.5$  cm，防水毯规格都为 $5000 \text{ g/m}^2$ ，上覆粉土为10 cm土+5 cm石子）。图4为C组与D组试验工况的渗透系数与渗流梯度关系对比。土体发生渗透破坏之前D组的渗透系数约为C组的2.7~3.0倍。

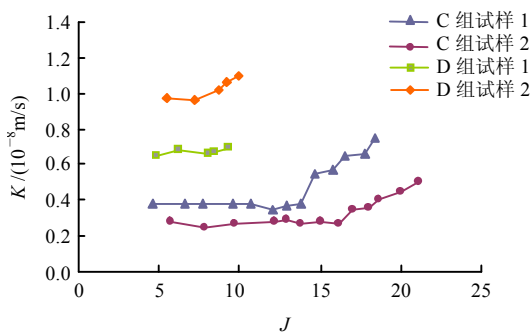


图4 C组与D组试验工况渗透系数与渗流梯度关系对比  
Fig.4 Relationships between  $K$  and  $J$  in team C and D

从这几组试验结果的对比可以看出，(1) 在破损孔洞直径不大于1.0 cm的条件下，0.5%以下破损

率对综合渗透系数的影响基本在同一量级以内；(2) 随着孔洞直径增大，破损率的影响也会随着增大。

### 3.2 孔洞破损直径对综合渗流特性的影响

本试验主要研究在防水毯规格与破损率相同工况下破损孔洞直径变化对系统防渗效果的影响。

#### (1) A组与D组试验结果对比

A组试验的最大破损孔洞直径为1.0 cm，D组试验的破损孔洞直径为0.5 cm，其他试验条件相同（破损率为0.5%，防水毯规格都为 $5000 \text{ g/m}^2$ ，上覆粉土为10 cm土+5 cm石子）。图5为A组与D组试验工况的渗透系数与渗流梯度关系对比。从图中可以看出，在土体发生渗透破坏之前，A组的渗透系数约为D组的10~14倍左右，相差在一个量级以上。

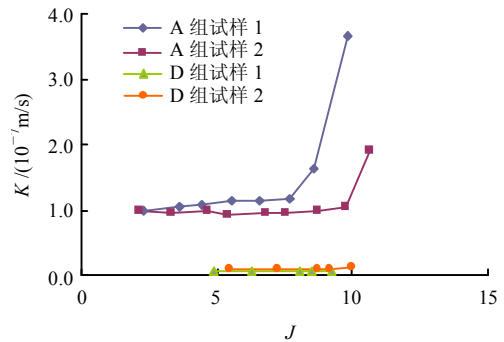


图5 A组与D组试验工况渗透系数与渗流梯度关系对比  
Fig.5 Relationships between  $K$  and  $J$  in team A and D

#### (2) B组与C组试验结果对比

B组试验的最大破损孔洞直径为1.0 cm，C组试验的破损孔洞直径为0.5 cm，其他试验条件相同（破损率为0.3%，防水毯规格都为 $5000 \text{ g/m}^2$ ，上覆粉土为10 cm土+5 cm石子）。图6为B组与C组试验工况的渗透系数与渗流梯度关系对比。在土体发生渗透破坏之前，B组的渗透系数约为C组的8.6~10.7倍，相差在一个量级左右。

从以上2组对比可见，破损孔洞直径对综合渗流特性的影响很大，当破损孔洞直径达到或超过1.0 cm时，见图7(a)，孔洞的四周残留着许多内部被水流带出来的膨润土，中间还非常薄弱，愈合状况较差，其综合渗透系数仅比粉土的略小；当GCL破损孔洞的直径小于1.0 cm时，见图7(b)，其所含的膨润土对破损处有较强的自愈修复功能，孔洞中间也充满膨润土，对坝体粉土具有较好的渗透保护作用。

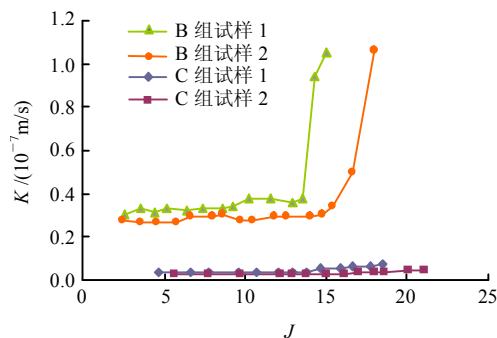


图 6 B 组与 C 组试验工况渗透系数与渗流梯度关系对比  
Fig.6 Relationships between K and J in team B and C

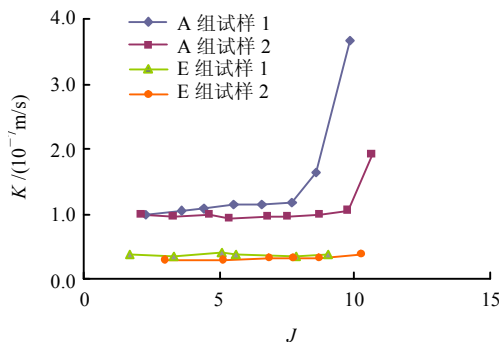
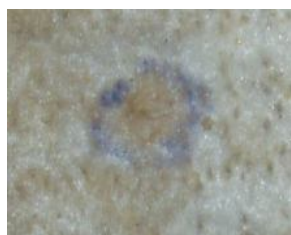


图 8 A 组与 E 组试验工况渗透系数与渗流梯度关系对比  
Fig.8 Relationship between K and J in team A and E



(a) 1 cm 孔洞



(b) 0.5 cm 孔洞

图 7 孔洞愈合情况  
Fig.7 Healing of holes

大刺破孔径为  $\phi 1.0$  cm, 破损率为 0.3%, 上覆粉土为 10 cm 土+5 cm 石子)。图 9 为 B 组与 F 组试验工况的渗透系数与渗流梯度关系对比。由对比结果可以看出, 在相同的破损率 (0.3%) 和孔洞直径 (1.0 cm) 的情况下 B 组的渗透系数是 F 组的 3~4 倍。

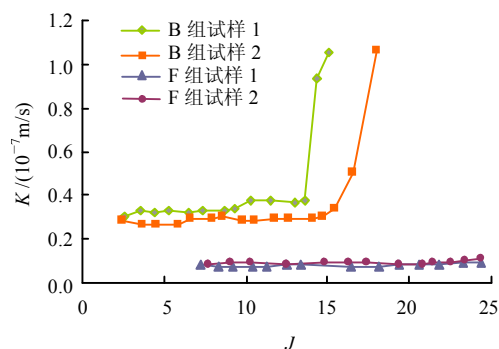


图 9 B 组与 F 组试验工况渗透系数与渗流梯度关系对比  
Fig.9 Relationship between K and J in team B and F

### 3.3 GCL 规格型号对综合渗流特性的影响

本试验主要研究在破损孔洞直径与破损率相同工况下防水毯规格变化对系统防渗效果的影响。

#### (1) A 组与 E 组试验结果对比

A 组试验的防水毯规格为  $5\ 000\ \text{g/m}^2$ , E 组试验为防水毯规格为  $5\ 500\ \text{g/m}^2$ , 其他试验条件相同 (最大刺破孔径为  $\phi 1.0$  cm, 破损率为 0.5%, 上覆粉土为 10 cm 土+5 cm 石子)。图 8 为 A 组与 E 组试验工况的渗透系数与渗流梯度关系对比。由对比结果可以看出, 在相同的破损率 (0.5%) 和孔洞直径 (1.0 cm) 的情况下 A 组的渗透系数是 E 组的 3~5 倍。

#### (2) B 组与 F 组试验结果对比

B 组试验的防水毯规格为  $5\ 000\ \text{g/m}^2$ , F 组试验的防水毯规格为  $5\ 500\ \text{g/m}^2$ , 其他试验条件相同 (最

#### (3) D 组与 G 组试验结果对比

D 组试验的防水毯规格为  $5\ 000\ \text{g/m}^2$ , G 组试验的防水毯规格为  $5\ 500\ \text{g/m}^2$ , 其他试验条件相同 (最大刺破孔径为  $\phi 0.5$  cm, 破损率为 0.5%, 上覆粉土为 10 cm 土+5 cm 石子)。图 10 为 D 组与 G 组

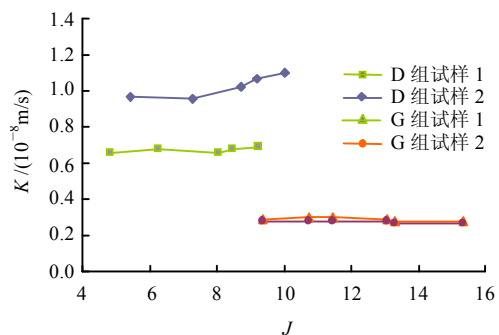


图 10 D 组与 G 组试验工况渗透系数与渗流梯度关系对比  
Fig.10 Relationship between K and J in team D and G

试验工况的渗透系数与渗流梯度关系对比。由对比结果可以看出,在相同的破损率(0.5%)和孔洞直径(0.5 cm)的情况下D组的渗透系数是G组的3~4倍。

在其他工况相同的情况下防水毯5 500 g/m<sup>2</sup>规格比5 000 g/m<sup>2</sup>规格渗透系数减小5倍不到,基本在同一数量级。但最大破坏坡降的增大值却随着最大孔径与破损率的减小而逐渐增大,当0.5 cm孔径与0.5%破损率组合时最大破坏渗透梯度能大上10左右,由此,当最大孔径和破损率不超过工程要求值时,5 500 g/m<sup>2</sup>规格的防水毯比5 000 g/m<sup>2</sup>规格修复能力强很多,防渗性能就会好很多。

## 4 结 论

(1) 工程中刺破孔洞直径应当小于0.5 cm,超过0.5 cm的孔洞应当做修补,0.5 cm左右的直接用膨润土防水浆将孔洞封闭即可。当洞孔为1 cm左右或大于1 cm的,宜在洞孔上覆盖同质量防水毯,补丁应大于破损边缘100~200 mm,并用水泥钉固定。同时,必须用膨润土防水浆将补丁周边封闭,经试验和工程经验证明,效果良好。

(2) 在破损孔洞直径不大于1 cm的条件下,破损率对综合渗透系数的影响并不显著,不大于0.5%的破损率对渗透系数的增大作用在一个量级以内,工程中可将破损率控制为不大于0.5%。

(3) 破损孔洞直径越大,破损率对渗透系数的影响程度越大,工程中综合考虑孔洞大小与破损率对破损防水毯和土体渗透系数的影响,可直接关注防水毯局部破损率的变化。对于防水毯与马道、坝脚、防渗墙等容易发生局部破坏的地方,可采用加厚膨润土垫层和混凝土覆盖的厚度等方式来预防刺破情况的发生和发展。

根据上述试验结果,建议在工程施工过程中GCL破损处理应满足上述要求,制定合理的GCL破损修复施工方案,以提高施工质量,保障坝填工程的长期安全运行。

## 参 考 文 献

- [1] ADU-WUSU C, YANFUL E K. Performance of engineered test covers on acid-generating waste rock at Whistle Mine, Ontario[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, 43(1): 1-18.
- [2] 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(Supp.1): 401-405.
- [3] SARI K, CHAI J. Self healing capacity of geosynthetic clay liners and influencing factors[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2013, 41: 64-71.
- [4] BERGADO D T, RAMANA G V, SIA H I. Evaluation of interface shear strength of composite liner system and stability analysis for a landfill lining system in Thailand[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2006, 24(6): 371-393.
- [5] 安玲, 李明章, 徐伟忠. 上海太平桥公共绿地人工湖建设中新技术的应用[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2003, 21(2): 156-159.  
AN Ling, LI Ming-zhang, XU Wei-zhong. New technology application in artificial lake construction in Shanghai Taipingqiao Greenland[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University(Agricultural Science)*, 2003, 21(2): 156-159.
- [6] 周竞天. 钠基膨润土防水毯在国贸三期地下工程中的应用[J]. *中国建筑防水*, 2007, 24(3): 35-39.  
ZHOU Jing-tian. Application of geosynthetic clay liner in underground project of Beijing international trade center, phase 3[J]. *China Building Waterproofing*, 2007, 24(3): 35-39.
- [7] 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 technique[J]. *Agricultural Technology*, 2011, 42(7): 590-593.
- [8] 张昊. 北京地铁工程中的膨润土防水毯施工技术[J]. *市政技术*, 2007, 25(6): 498-500.  
ZHANG Hao. Construction techniques of swelling soil waterproof layer be used in Beijing subway works[J]. *Municipal Engineering Technology*, 2007, 25(6): 498-500.
- [9] MENDES M J A, TOUZE-Foltz N, PALMEIRA E M, et al. Influence of structural and material properties of GCLs on interface flow in composite liners due to geomembrane defects[J]. *Geosynthetics International*, 2010, 17(1): 34-47.
- [10] ROWE R K, ABDELATY 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.
- [11] 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. [S. l.]: ASTM, 2013: 1-14.
- [12] SAIDI F, TOUZE-Foltz N, GOBLET P. Numerical modelling 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.
- [13] 李霞. 内蒙古克什克腾旗蒸发塘缺陷渗漏试验研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.