DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2022.01.18

# 复合土工膜 - 垫层材料界面摩擦特性试验研究

杨武1,刘亮1,吴远鹏2,李亚运2,张凤超2,李文浩2

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆兴农建筑材料检测有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘 要:复合土工膜防渗结构界面摩擦特性对工程的安全稳定性至关重要。为探寻复合土工膜-垫层界面摩擦特性,进行了室内直剪摩擦试验、斜板试验、室内拖板试验及现场原位试验,并统计分析一布一膜、二布一膜与砂浆垫 层及砂砾石垫层的界面摩擦性能。结果表明:对于不同垫层材料,砂砾石垫层界面摩擦特性较优,比砂浆界面的摩 擦角和凝聚力分别大5.0°和4.2 kPa;对不同类型的复合土工膜,二布一膜比一布一膜的界面摩擦角和凝聚力分别 大3.4°和1.2 kPa;在不同试验中,直剪摩擦试验与斜板试验结果相近,与拖板试验相比摩擦角偏小约30%,凝聚力 偏低约4~6 kPa;拖板试验结果与原位试验相近。因此,在防渗结构的设计中,垫层宜采用散粒体材料,复合土工 膜宜选用二布一膜,并以拖板试验结果进行评定。

# Experimental study on interface friction characteristics of composite geomembrane – cushion

YANG Wu<sup>1</sup>, LIU Liang<sup>1</sup>, WU Yuanpeng<sup>2</sup>, LI Yayun<sup>2</sup>, ZHANG Fengchao<sup>2</sup>, LI Wenhao<sup>2</sup>

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
2. Xinjiang Xingnong Building Materials Testing Co., Ltd., Urumqi 830052, China)

Abstract: The interfacial friction of composite geomembrane impermeable structures plays an important role in the safe and stable operation of an engineering project. In order to explore the interfacial friction characteristics of composite geomembrane - cushion, the indoor direct shear friction test, inclined plate test, indoor towing plate test and in situ test were carried out to statistically analyze the interfacial friction properties between two different geomembranes and cushions, including one piece of cloth & one piece of film, two pieces of cloth & one piece of film as the geomabranes, mortar and gravels as the cushions. The results show that for different cushion materials, the interfacial friction characteristics of sand and gravel cushion was better, its friction angle was 5.0 ° larger than that of mortar, and the cohesion was 4.2 kPa higher; for different types of composite geomembrane, the interfacial friction angle of two pieces of cloth & one piece of film was 3.4 ° larger than that of one piece of cloth & one piece of film, and the cohesion was 1.2 kPa higher. In different tests, the results of the direct shear test were closer to those of the inclined plate test; however the friction angle of the direct shear test was about 30 % smaller and the cohesion was about 4-6 kPa lower compared with the towing plate test. The results of the towing plate test were similar to those of the *in situ* test. Therefore, it is favorable to choose granular material as the cushion, and two pieces of cloth & one piece of film as the composite geomembrane in the design of the antiseepage structure, and the towing plate test is a better choice for the evaluation of its performance.

Key words: composite geomembrane; cushion material; friction characteristics; direct shear friction test; towing plate test; in situ test

收稿日期:2021-04-02; 修回日期:2021-07-09

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2017D01A42)

作者简介:杨武(1991-),男,四川南充人,博士,主要从事水利工程教学和科研工作。

通讯作者:刘亮(1978-),男,新疆乌鲁木齐人,副教授,主要从事水利工程教学和科研工作。

### 1 研究背景

复合土工膜由土工膜和土工织物组成,具有优 越的延展性及防渗性,不仅能够适应坝体的大变形, 而且可以发挥很好的防渗效果,主要应用于水利工 程<sup>[1-4]</sup>及垃圾填埋场等的防渗工程<sup>[5]</sup>。在工程应用 中,复合土工膜-垫层材料的界面摩擦特性将直接 影响工程的稳定性及安全可靠性。因此,复合土工 膜类型与垫层材料的选择,以及寻求能够准确评价 界面性能的试验方法对工程结构的安全稳定性至关 重要。

根据已有的报道,目前对界面摩擦角的测试大 多是采用室内直剪摩擦试验的方法<sup>[6]</sup>。如:徐超 等<sup>[7]</sup>、童军等<sup>[8]</sup>、杜常博<sup>[9]</sup>、Dembicki 等<sup>[10]</sup>、何水清 等<sup>[11]</sup>在室内通过直剪摩擦试验及斜板试验两种不 同的试验方法,对复合土工膜与垫层材料的界面摩 擦特性进行了研究,结果表明不同的试验方法得出 的界面摩擦性能并不相同。一般来说,室内试验较 为简单、重现性较好,测试结果往往比较有规 律<sup>[12-13]</sup>,研究成果也已在较多工程中应用。室内试 验受试样尺寸、结合面特性的限制,对试验结果有一 定影响。而现场原位试验在工程现场进行,虽然试 验难度大、耗费高,但其试验结果基本是工程现场情 况的真实反映<sup>[14-16]</sup>。因此,对试验研究而言,现场 原位试验的结果更加具有参考价值和实际意义。

在大量实际工程设计中,下垫层材料以砂浆垫 层及散粒体垫层材料最为常见<sup>[17-20]</sup>,复合土工膜常 用一布一膜和二布一膜,位于其上部的混凝土护坡 的稳定性将受控于复合土工膜与下垫层间的摩擦特 性。例如,2018年新建的新疆维吾尔族自治区某水 库工程,下部为砂浆垫层材料,复合土工膜为一布一 膜,在混凝土护坡板施工后不久,护坡板连同复合土 工膜发生大面积下滑,造成防渗复合土工膜被拉断 而失去防渗功能。

为研究复合土工膜类型、垫层材料及试验方法 对摩擦性能的影响,采用4种试验方法进行不同界 面的摩擦性能测定,分析膜-砂浆垫层界面、布-砂 浆垫层界面、膜-砂砾石垫层界面以及布-砂砾石 垫层界面的摩擦特性,通过对比试验结果,选择更加 符合实际工程情况的试验方法,为复合土工膜作为 防渗结构在土石坝斜墙中的工程稳定性分析提供科 学合理的依据。

# 2 试验材料与研究方法

#### 2.1 试验材料

本次试验采用的复合土工膜一布一膜为 SN/ PE-16.0-300-0.6、二布一膜为 SN2/PE-22.0-600-0.6,其基本力学性能见表 1。为真实 反映出实际施工情况,砂浆试块取样自某施工现场 砂浆垫层,为湿拌砌筑砂浆,其强度等级为 M10,按 照剪切盒内部尺寸进行切割制样。砂砾石材料取自 新疆某水利工程料场,最大粒径为 20 mm,干燥状 态,密度为 1.88 g/cm<sup>3</sup>,颗粒相对密度为 2.60 g/cm<sup>3</sup>,粒径组成见表 2。

种类	断裂强度/(kN・m <sup>-1</sup> )		断裂伸长率/%		CBR 顶破强力/	撕破强力/kN	
	纵向	横向	纵向	横向	kN	纵向	横向
一布一膜	17.4	16.8	65	74	3.1	0.50	0.52
二布一膜	26.4	25.9	57	67	4.2	0.79	0.80

表1 试验用复合土工膜的基本力学性能

表 2	试验用砂砾石材料的物理性质	
-----	---------------	--

密度/	$d_{10}$ /	$d_{30}$	$d_{_{60}}$	不均匀	曲率
$(g \cdot cm^{-3})$	mm	/mm	/mm	系数 C <sub>u</sub>	系数 C <sub>c</sub>
1.88	0.10	1.06	3.72	38.6	3.1

#### 2.2 试验方法

2.2.1 室内试验 在试验结果的处理中,为保证试验结果的准确性、消除复合土工膜材料本身带来的不均匀性,每种界面的试验结果均采用10组有效数据进行统计分析。本次试验根据质量控制的基本形

式,认为上、下警告线内的数值为有效数值,取有效数据的算术平均值作为试验结果。

(1) 直剪摩擦试验。直剪摩擦试验在 TZY -1 型土工合成材料综合测定仪上进行,剪切盒内部尺 寸为 20 cm × 20 cm × 5 cm(长×宽×高),直剪摩擦 试验的砂浆试块取自工程现场中的砂浆垫层,按照 剪切盒内部尺寸进行切割加工制得,并放置于上剪 切盒内,下剪切盒内为 C20 的混凝土试块,复合土 工膜放置在剪切盒中部,并将其固定于下剪切盒上。 法向应力选择 50、100、150、200 kPa,剪切材料在上 覆垂直力的作用下产生的法向应力 σ 均匀分布。 剪切速率为5 mm/min,试验温度为(20 ±2) ℃。分 别进行复合土工膜 – 砂浆、复合土工膜 – 砂砾石的 界面摩擦试验。直剪摩擦试验装置示意图见图1。



图1 直剪摩擦试验装置示意图

(2)斜板试验。斜板试验装置示意图如图 2 所 示,其工作平台长度为 50 cm,宽度为 20 cm,摩擦角 的测定范围为 0~90°,角度盘的精度为 30′,为了与 直剪摩擦试验具有可比性,将材料剪切盒尺寸取为 20 cm×20 cm×10 cm(长×宽×高),试验过程中可 保证接触面积不发生改变,竖向荷载由砝码施加。 试验时将仪器放在水平的台面上,用调平支座进行 调平。将试验材料装入试验盒内,砂砾石材料采用 分层击实的方法填入试验盒。匀速转动升降螺杆使 工作台缓慢倾斜,转动速率控制为(1°~3°)/min。 试样滑动时立即停止转动,观测角度测盘上的读数, 即为土工膜与剪切材料的摩擦角。



图 2 斜板试验装置示意图

(3)室内拖板试验。室内拖板试验装置示意图 见图 3 所示,其下部为矩形金属试验框架,矩形框尺 寸为1 m×1 m×0.1 m(长×宽×高),固定于水平 操作台上,框架内均匀填满细砂作为试验垫层材料。 上剪切盒为大型直剪试验盒,尺寸为 0.5 m× 0.5 m×0.1 m(长×宽×高),上剪切盒与下部试验 框架之间放置复合土工膜并固定于下部试验框架 上。当受剪切材料为砂砾石垫层时,将砂砾石均匀 填入上剪切盒内,试验时拖动上部试验盒;当受剪切 材料为砂浆垫层时,则移除上部剪切盒,将钢丝绳套 在砂浆试块上进行牵引。剪切材料在上覆竖向荷载 的作用下产生的法向应力 σ 为均匀分布,可通过在 上剪切盒或砂浆试块上部放置不同数量的砝码来改 变竖向荷载的大小,试验等同于将实际工程的各结 构倒置进行。试验过程中上剪切盒或砂浆试块由钢 丝绳施加牵引力匀速在复合土工膜上滑动,滑动速 率控制为5 mm/min。



图 3 拖板试验装置示意图

2.2.2 现场原位试验 原位试验选择新疆某水库 在建坝坡工程,在混凝土护坡板未进行施工时进行, 将已铺设完成的砂浆垫层表面清理干净,再将砂砾 石垫层沿斜面压实、平整,试验位置为混凝土试块上 边缘沿坝坡距坝顶5m处。在坡度为1:2.5的坝坡 垫层上分别铺设一布一膜及二布一膜(当复合土工 膜采用一布一膜时,将塑膜面分别与砂浆垫层、砂砾 石垫层接触),并在复合土工膜上立模板现浇混凝 土试验块,模板的内部尺寸为1.0m×1.0m×0.2 m(长×宽×高),内部布设一根Φ12 mm的U型钢 筋,钢筋与四周间距为100 mm,在上部两端钢筋露 出部位焊接弯头,用作试验时牵引,混凝土试块强度 为C25,待浇筑7d后进行试验。

布设位移传感器(600 mm,精度为0.05mm)用 于试验中的位移监测;剪切力由电机提供,并配置两 台转速比为1:40 的减速机配合使用,通过外接数显 控制器的频率调节进行剪切速率的控制;牵引力设 备布置在坝顶,将混凝土试块沿坝面斜向上牵引,同 时配备 ZL50CN 轮式装载机一台,进行坝顶部位牵 引设备的控制及配重,剪切速率为5 mm/min,试验 现场环境气温为20~24 ℃。以混凝土试块发生位 移时的牵引力作为界面摩擦特性计算标准。原位试 验现场见图4。

## 3 结果与分析

#### 3.1 试验结果

3.1.1 室内试验结果 目前,界面摩擦强度特性大 多参照摩尔 - 库伦强度准则,将黏聚力及内摩擦角 作为界面抗剪强度参数进行研究,以(σ,τ)曲线的 形式表示,界面摩擦角 φ 及黏聚力 c 可通过直线的 斜率和截距求出;正应力由施加的砝码质量与剪切 面面积的关系换算而来;斜板摩擦角测定仪试验结 果处理按照滑块理论进行。

以复合土工膜 – 砂浆界面的直剪摩擦试验为 例,其不同正应力下位移(s) – 剪切力(F) 关系曲线 及正应力( $\sigma$ ) – 抗剪强度( $\tau$ ) 关系线如图5所示。由 图5可以看出,不同正应力下对应的位移 – 剪切力 关系曲线变化趋势大致相同,均具有明显的峰值强 度和残余强度(图5(a)),随着正应力的不断增大, 峰值强度相应的位移也在不断增加;达到峰值强度 后,剪切力值开始减小并逐渐趋于稳定,表现为残余 强度,且正应力越大,残余强度的降低幅度越明显, 残余强度大致为峰值强度的70%~80%。对不同 正应力下的峰值强度及残余强度的试验数据点(σ, τ)进行抗剪强度线的线性拟合(图5(b)),其拟合 效果较为理想。



图 5 复合土工膜 - 砂浆界面直剪摩擦试验结果

以膜 – 砂浆、布 – 砂浆、膜 – 砂砾石和布 – 砂砾 石4种界面进行斜扳试验,得出各界面斜扳试验的正 应力( $\sigma$ ) – 抗剪强度( $\tau$ )关系线如图6所示。由图6可 以看出,各界面试验数据点( $\sigma$ , $\tau$ )的直线回归结果均 非常理想; 黏聚力的大小取决于两界面间的粗糙程 度,其大小排序为布 – 砂砾石 > 膜 – 砂砾石 > 布 – 砂 浆 > 膜 – 砂浆,总体反映出布与垫层材料界面的黏聚 力大于塑膜与垫层材料界面的黏聚力。



以拖板试验中复合土工膜的布 - 砂砾石界面为 例,不同正应力下的位移(s) - 剪应力(τ)关系曲 线如图 7 所示。由图 7 可以看出,各关系曲线变化 趋势大致相同,均具有较为明显的峰值强度及残余 强度,峰值强度发生在水平位移为 10 ~ 20 mm 时; 随着剪切位移的继续增大,剪应力开始减小并逐渐 趋于稳定,表现出了稳定的残余强度,残余强度约为 峰值强度的 60 % ~ 70 %。



关系的拖板试验结果

通过室内各试验方法测定的4种不同界面的黏 聚力(c)及摩擦角(φ)见表3。其中直剪摩擦试验 的测试结果与文献[7]~[10]的研究成果相近,表 明该试验结果较为可靠。由表3可以看出,复合土 工膜与砂砾石垫层的界面摩擦性能优于与砂浆垫层 的界面摩擦性能,对于相同的试验方法,复合土工膜 与砂砾石的界面摩擦角比与砂浆的界面摩擦角增大 了2.9°~8.1°,黏聚力增大了3.0~5.8 kPa;直剪摩 擦试验结果与斜板试验结果相近,而拖板试验测得 的界面摩擦角与黏聚力远大于直剪摩擦试验,直剪 摩擦试验与拖板试验相比界面摩擦角减小了2.2°~ 8.3°,黏聚力减小了1.8~4.3 kPa;二布一膜布界面 的摩擦性能优于一布一膜膜界面的摩擦性能,当砂 浆作为垫层材料时,布-砂浆比膜-砂浆界面摩擦 角增大了2.4°~4.1°,当砂砾石作为垫层材料时, 直剪摩擦试验和斜板试验测得的布-砂砾石界面摩 擦角比膜-砂砾石界面摩擦角仅增大了0.3°,相应 的黏聚力分别增大了2.1和1.5 kPa,而拖板试验相 应的界面摩擦角增大了5.1°,黏聚力增大了 3.9 kPa。

表 3	不同界面的黏聚力 $(c)$	及摩擦角( $\varphi$ )	的室内各类试验结果
-----	----------------	-------------------	-----------

	复合土工膜 – 砂浆界面				复合土工膜-砂砾石界面				
试验方法	膜-砂浆		布 – 砂浆		膜-砂砾石		布 - 奄	布 – 砂砾石	
	c∕kPa	$\varphi/(\circ)$	c∕kPa	$\varphi / (\circ)$	c∕kPa	arphi /( ° )	c∕kPa	arphi /(°)	
直剪摩擦试验	0.3	18.1	2.2	21.3	5.8	26.2	7.9	26.5	
斜板试验	0.0	18.2	1.4	20.6	3.1	25.5	4.6	25.8	
拖板试验	4.6	25.5	5.7	29.6	7.6	28.4	11.5	33.5	

3.1.2 现场试验结果 为提高试验结果的准确性, 原位试验每种界面的混凝土试块设置为3块(分别 标为1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>),各混凝土试块间隔一定的距离,以 保证在试验过程中相互不受干扰。试块滑动破坏标 准以发生初始位移时的牵引力作为界面摩擦特性的 测定标准。以复合土工膜二布一膜为例,试验过程 中位移(s) - 剪应力(τ)关系曲线见图8。



图 8 原位试验位移 (s) – 剪应力(τ) 关系曲线(二布一膜)

由图 8 可以看出,在试验条件相同的情况下,各 试块发生初始位移时的剪应力基本在同一水平,在 剪应力未达到峰值时,位移已经开始发生,而剪应力 达到峰值后出现快速下降的情况,随着位移的不断 增加,剪应力逐渐减小稳定为残余(滑动)应力,其 与发生初始位移时的剪应力大小相近。对现场原位 试验监测得到的不同界面的剪应力及位移数据进行 分析,得出各界面的黏聚力(c)及摩擦角(φ)如表 4 所示。 表 4 各界面的黏聚力(c)及摩擦角 $(\varphi)$ 原位试验结果

** 🖂	复合土工膜						
垫层 材料	膜(一石	布一膜)	布(二布一膜)				
14441	c∕kPa	arphi /(°)	c∕kPa	$\varphi / (\circ)$			
砂浆	4.4	24.9	6.6	29.3			
砂砾石	7.3	28.2	9.9	34.6			

通过比较表4中的原位试验结果可知,黏聚力 和摩擦角数据均体现出二布一膜的布界面摩擦性能 优于一布一膜的膜界面摩擦性能,布与砂浆界面的 摩擦角比膜与砂浆界面的摩擦角增大了4.4°,相应 的黏聚力增大了2.2 kPa,布与砂砾石界面的摩擦角 比膜与砂砾石界面的摩擦角增大了6.4°,相应的黏 聚力增大了2.6 kPa;砂砾石与复合土工膜界面的摩 擦角比砂浆与复合土工膜界面的摩擦角增大了 13.3%~18.1%。原位试验结果与室内拖板试验结 果基本相同,表明拖板试验更加符合现场实际情况。 3.2 讨论

在试验过程中,复合土工膜与垫层材料界面随着 剪切位移的增大而发生相对位移,界面之间的作用力 从单一的静摩擦力转为滑动摩擦力及复合土工膜与 材料间的咬合力。徐超等<sup>[7]</sup>通过试验研究发现,试验 结果产生差异的主要原因是试验原理与试验环境的 差别,包括试样的铺设形式、正应力的大小、试样尺寸 以及界面的不平整度。不同试验方法与不同界面类



型组合的黏聚力(c)及摩擦角( $\varphi$ )见图9。



图9 不同试验方法与不同界面类型组合的黏聚力(c)及摩擦角 $(\varphi)$ 

如图9(a)所示,各界面下不同试验方法黏聚力 的大小排序为拖板试验>直剪摩擦试验>斜板试 验,拖板试验与原位试验结果较为接近,不同试验方 法黏聚力最大差值反映在布 - 砂砾石界面上,差值 为6.9 kPa。如图9(b)所示,同一试验方法得出的 膜 - 砂浆垫层界面的摩擦角小于布 - 砂浆垫层界面 的摩擦角,膜 - 砂砾石垫层界面的摩擦角小于布 -砂砾石垫层界面的摩擦角,参考童军等<sup>[8]</sup>的研究成 果分析认为,破坏面主要发生在复合土工膜与下垫 层材料之间,土工布增强了复合土工膜与建筑材料 分子链间的作用力,布界面与建筑材料间存在部分 交织作用,具有一定的咬合力,从而增大了黏着摩擦 力,反映出材料表面越粗糙,则界面摩擦角越大, 布 - 垫层材料的界面剪应力表现为摩擦应力、部分 剪切应力以及织物的剥离应力。

直剪摩擦试验、拖板试验和原位试验均表现出 稳定的残余应力,拖板试验与原位试验的残余应力 约为其峰值强度的60%~70%,应力下降幅度大于 直剪摩擦试验结果。拖板试验与原位试验对界面摩 擦角与黏聚力的测试结果均大于直剪摩擦试验结 果,产生这种现象的原因可以从试验的方法及界面 的作用关系来解释,由于原位试验的试块尺寸相对 较大,因而垫层材料的不平整度及粗糙程度的影响 作用明显,在复合土工膜铺设完成后,上部为现浇混 凝土,在振捣过程中可适应并调节混凝土下部与下 垫层完全贴合,试验过程中的峰值应力实际上包含 了部分摩擦应力以及由于垫层结构面的不平整而产 生的咬合力,这与文献[16]、[19]的研究结论一致。 室内拖板试验与现场原位试验类似,下部为剪切材 料,上部试验框中的细砂可较为灵活地自行调整,来 适应下垫层表面的不平整程度,在试验过程中,剪切 面面积维持恒定,较好地反映了实际的工程情况,因

而拖板试验是模拟复合土工膜结构界面较为合理的 试验技术手段。直剪摩擦试验与斜板试验由于试块 尺寸较小,而且并不能适应剪切材料表面的不平整 度,在剪切面中很可能仅有部分接触,属于点荷载作 用或少部分面荷载作用,另外,由于直剪摩擦试验盒 边界的影响,随着复合土工膜与剪切材料间相对位 移的增大,剪切面逐渐减小,会引起界面法向条件的 变化。

# 4 结 论

(1)在与复合土工膜形成的防渗结构中,复合 土工膜 - 砂砾石垫层形成的"软结构"界面的摩擦 性能优于复合土工膜 - 砂浆垫层形成的"硬结构" 界面的摩擦性能。

(2) 塑膜表面较为光滑,界面摩擦强度较低,因此,复合土工膜采用二布一膜对防渗结构的抗滑稳 定性更为有利。

(3)不同试验方法的测定结果表明,直剪摩擦 试验与斜板试验相当,室内拖板试验与原位试验基 本一致。

(4)大型现场原位试验反映的是工程现场的实际情况,试验结果更加具有参考价值和实际意义。 但现场原位试验难度大、耗费高、投入多,因此,建议 采用室内拖板试验结果进行土石坝斜墙防渗结构的 设计验算。

#### 参考文献:

- [1] 楚跃先. 土工膜面板堆石坝设计方法与实践探讨[J]. 水 力发电学报,2020,39(2):1-15.
- [2] ATAPOUR H, MOOSAVI M. The influence of shearing velocity on shear behavior of artificial joints[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(5): 1745 – 1761.

(下转第143页)

(5):106-113.

- [13] 杜万军. 单裂隙辐射流耦合特性参数分析及数值模拟 [D]. 西安:西安理工大学,2015.
- [14] LANGER S, SWANSON R C. On boundary-value problems for RANS equations and two-equation turbulence models [J]. Journal of Scientific Computing, 2020, 85 (1): 20.
- [15] BASSI F, GHIDONI A, PERBELLINI A, et al. A highorder discontinuous Galerkin solver for the incompressible RANS and k - ε turbulence model equations [J]. Computers & Fluids, 2014, 98: 54 - 68.
- [16] 甘德清,闫泽鹏,薛振林,等.考虑壁面滑移效应的充填料 浆管道输送阻力研究[J].金属矿山,2020(9):26-32.
- [17]何丽娟,吴心伟,王 荻,等. 基于 Fluent 的涡流管性能及三维强漩流流动的数值模拟[J].太阳能学报,2020,41(11):143-148.

- [18] 李思成,吴迪,崔光耀,等. 低雷诺数沟槽表面湍流/非 湍流界面特性的实验研究[J]. 力学学报,2020,52
   (6):1632-1644.
- [19] 冯喜平,赵胜海,李进贤,等. 不同湍流模型对旋涡流动的数值模拟[J]. 航空动力学报,2011,26(6):1209-1214.
- [20] 张 鑫. 粗糙单裂隙渗流与岩体应力特性分析[D]. 西 安: 西安理工大学, 2019.
- [21] 姜谙男,郑 帅,申发义,等.不同接触状态的环向单裂 隙渗透特性试验研究[J].地下空间与工程学报,2018, 14(S2):529-535.
- [22] 程友良,汪 辉,赵洪嵩. 超临界雷诺数下旋转圆柱绕流 的三维大涡[J]. 可再生能源,2017,35(7):1094-1100.
- [23] TANG Yuezhao, WANG Yang, WANG Wanhu, et al. Analysis of the wave propagation and the flow characteristics around cylinder due to dam break water[J]. Marine Science Bulletin, 2020, 22(2): 23 - 35.

(上接第135页)

- [3] 陈仕明,印泾经.复合土工膜在水库除险加固工程中的 应用[J].中国水运(下半月),2017,17(12):190-191.
- [4] 王艳丽,刘 晶,王永明,等.复合土工膜与防渗墙连接的 大型剪切试验研究[J].长江科学院院报,2021,38(4): 75-80.
- [5] CEN Weijun, HE Haonan, LI Dengjun. Influence of geomembrane defect on seepage property of earth – rock dams and measures of seepage control [J]. Water Resource. 2017, 37(3): 61 – 65.
- [6] 中华人民共和国水利部. 土工合成材料测试规程: SL 235—2012 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
- [7] 徐 超,廖星樾,叶观宝,等. 土工合成材料界面摩擦特性的室内剪切试验研究[J]. 岩土力学,2008,29(5): 1285-1289.
- [8] 童 军,胡 波,龚壁卫,等. 复合土工膜砂砾料界面摩擦特 性研究[J]. 长江科学院院报,2014,31(3):73-76.
- [9] 杜常博. 土工格栅 尾矿复合体界面力学特性及工程应 用[D]. 辽宁工程技术大学,2020.
- [10] DEMBICKI E, ALENOWICZ J. Determination of frictional properties of geotextile [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1987, 6(4): 307 - 314.
- [11] 何水清,高鹏飞. 土工合成材料层间摩擦试验研究[J]. 中国矿业,2021,30(S1):385-390.

- [12] 姜海波. 土石坝坝体、坝基和水库库区土工膜防渗体力 学特性及渗透系数研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大 学,2011.
- [13] 束一鸣,吴海民,姜晓桢. 中国水库大坝土工膜防渗技 术进展[J]. 岩土工程学报,2016,38(S1):1-9.
- [14] 岑威钧,温朗昇,和浩楠.水库工程防渗土工膜的强度、 渗漏与稳定若干关键问题[J].应用基础与工程科学学 报,2017,25(6):1183-1192.
- [15] 邵杰,王恒诗,单兰涛,等.复合土工膜在小水库防渗 中的应用[J].中国水利,2019,1123(8):44-45.
- [16] 王 琦, 臧光文. 横山水库除险加固工程的安全论 证——土工膜与结构面摩擦试验[J]. 岩土力学,2003 (S1):83-85.
- [17] 束一鸣. 我国水库大坝土工膜防渗工程进展[J]. 水利 水电科技进展,2015,35(5):20-26.
- [18] 张 冬. 防渗土工膜与坝体垫层材料的接触剪切本构模型[J]. 水电能源科学,2015,33(11):69-71.
- [19] 陈 丹,王 军,夏姝珺. 堆石坝防渗土工膜界面力学特性 的直剪试验方法探索[J]. 长江科学院院报,2016,33 (1):130-133.
- [20] 彭 凯,殷彦高,王国辉,等.土工膜在江坪河水电站工 程中的应用[J].水力发电,2020,46(6):53-56+85.