

DOI: 10.11779/CJGE20220456

# 基于渗透-环剪试验的三峡库区童家坪滑坡滑带土强度特性研究

苗发盛, 赵帆程, 吴益平\*, 孟佳佳

(中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 滑带土对于滑坡的变形演化起到至关重要的控制作用, 开展不同渗透条件下滑带土强度特性研究, 对水库堆积层滑坡动态稳定性评价具有重要意义。针对目前在库岸堆积层滑坡滑带土渗透-力学特性方面研究薄弱的问题, 以三峡库区童家坪滑坡滑带土为研究对象, 采用 ARS 环剪仪和自主研发的渗透-环剪耦合装置, 开展了多种渗透条件下的环剪试验, 研究了不同渗透循环次数、循环渗透压变化量、初始渗透压以及恒定渗透压作用下滑带土残余强度特性。试验结果表明: 试样在渗透-环剪试验中易出现“应变软化”现象, 并且随渗透循环次数的增加而愈发明显; 渗透循环会显著削弱滑带土的黏聚力的大小; 在相同剪切应力条件下, 经渗透作用的各滑带土试样剪应力变化趋势基本一致, 残余强度与渗透压呈负相关关系。研究成果揭示了不同渗透-环剪条件下滑带土力学强度弱化规律, 为水库运行条件下堆积层滑坡力学机制研究提供了基础。

**关键词:** 三峡库区; 滑带土; 环剪试验; 渗透循环; 残余强度

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)07-1480-10

**作者简介:** 苗发盛(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土体物理力学性质方面的研究工作。E-mail: fsmiao@cug.edu.cn。

## Strength characteristics of slip zone soils of Tongjiaping landslide in Three Gorges Reservoir area based on seepage-ring shear tests

MIAO Fasheng, ZHAO Fancheng, WU Yiping, MENG Jiajia

(China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The slip zone soil plays an important role in controlling the deformation and evolution of landslides. It is of great significance to study the strength characteristics of slip zone soils under different seepage conditions for the dynamic stability evaluation of reservoir accumulation landslides. In view of the current weak researches on the seepage-mechanical properties of soils of reservoir accumulation landslides, the Tongjiaping landslide slip zone soil in the Three Gorges Reservoir area is taken as an example to study the residual strength characteristics based on the ring shear tests under different seepage conditions. The ARS ring shear apparatus and the self-developed coupling devices for seepage-ring shear are employed to operate different shear modes of cyclic seepage pressure on the strength variation characteristics of the slip zone soil. The experimental results indicate that the phenomenon of ‘strain softening’ easily appears, meanwhile, it is promoted by the increase of seepage cycle. Additionally, the seepage cycle significantly weakens the cohesion of the slip zone soil. Moreover, under the same shear stress condition, the change trend of the shear stress under the action of seepage is basically the same, however, the residual strength is negatively correlated with the seepage pressure. The research results reveal the weakening laws of mechanical strength of the sliding zone soil under seepage cycle, which provides a basis for the studies on the mechanical mechanism of accumulation landslides under reservoir operation.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; slip zone soil; ring shear test; seepage cycle; residual strength

## 0 引言

受地质体结构和三峡水库的影响, 库岸堆积层滑坡滑带具有不同的变形特性<sup>[1]</sup>。自水库蓄水以来, 库水位的周期性涨落致使库岸消落带岩土体组构与强度

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977244, 42007267); 湖北省自然资源科研项目(ZRZY2022KJ07, ZRZY2020KJ12)

收稿日期: 2022-04-17

\*通信作者(E-mail: ypwu@cug.edu.cn)

发生了劣化<sup>[2-3]</sup>,进而导致了大量堆积层滑坡变形和复活<sup>[4-5]</sup>。作为滑坡的重要组成部分,滑带土在滑坡的变形演化过程中起着至关重要的作用<sup>[6-7]</sup>。对此,开展库水周期性升降条件下库岸堆积层滑坡滑带土强度特征研究,揭示不同动态渗透压作用下滑带土力学特性,对于滑坡力学机制研究与动态稳定性评价具有重要意义。

滑带土力学特性受土体性质、矿物成分、干湿循环、剪切速率、以及含水率等因素影响变化显著<sup>[8-10]</sup>。目前大多数研究均立足于滑带土的剪切强度,着重于探索各因素的具体影响机制。例如,周翠英等<sup>[11]</sup>提出软土的抗剪强度与微观结构参数变化之间有着良好的一致性。曹世超等<sup>[12]</sup>研究发现黄土滑坡滑带土中的黏粒含量越高应变软化现象越明显,残余强度呈现非线性降低规律。Miao等<sup>[13]</sup>通过三轴试验发现反复地干湿循环会削弱滑移带土体的抗剪强度,并且弱化系数随循环次数的增加而减小。Skempton等<sup>[14]</sup>指出当黏土含量为50%左右时,残余强度几乎完全由黏土矿物的滑动摩擦控制,此后黏土含量的进一步增加对残余强度的影响不大。Gratchev等<sup>[15]</sup>研究表明,剪切强度不仅在剪切速率由慢变快时有所提高,而且在较高剪切速率降低时也有所提高。张荣等<sup>[16]</sup>证明了黄土滑坡滑带土在剪切过程中呈现出应变软化的特征,并且低含水率的滑带土其抗剪强度峰后软化现象表现地越明显。

环形剪切试验是一种能够测试土体在大剪切位移条件下的残余强度特征的空心扭剪试验,同时也能准确控制垂直应力和剪切速率等条件,并且在试验过程中可保持剪切面恒定<sup>[17-19]</sup>,通常被用于确定剪切过程中土体的剪切变形特征和力学强度规律。例如,王顺等<sup>[20]</sup>认为不同环剪试验下剪切带的形成与剪切位移相关,对于已经存在剪切带的滑带土,环剪时能很快达到残余强度状态。范志强等<sup>[21]</sup>在黄土坡滑坡浅层滑带土环剪试验的基础上,发现固结压力对残余强度的影响甚微,但对峰值强度影响较大。廖建民等<sup>[22]</sup>通过环剪试验指出有效法向应力越大,滑带土颗粒越容易沿剪切方向完成定向排列,并且同级有效法向应力下,饱和样达到残余强度所需的最小剪切位移比天然样的大。Nguyen等<sup>[23]</sup>利用环剪仪对90%高岭土和10%膨润土的混合样品进行了多阶段的加速剪切,试验结果表明在确定残余强度时可以忽略加速度的影响。Bhat等<sup>[24]</sup>在环剪仪中使用不同土样以研究滑坡土在残余剪切状态下的强度恢复,结果表明高塑性土样的残余强度恢复程度比低塑性土样更大。总而言之,尽管国内外学者针对滑带土的力学特性研究已取得诸多成果,但是考虑到库岸滑坡的变形复活与滑带土的渗透

特性,关于滑带土在不同渗透作用的剪切条件下力学特性的研究仍然薄弱。

本文以三峡库区童家坪滑坡为研究对象,采用ARS环剪仪和自主研发的渗透-环剪耦合装置,开展了多种渗透条件下的滑带土抗剪强度研究,重点探究滑带土在不同渗透环剪条件下抗剪强度变化规律,并利用环剪试验所获取残余强度、剪切位移等试验结果对各剪切条件下的滑带土强度特性进行分析,模拟堆积层滑坡滑带土在实际库水升降条件下强度演化规律,揭示库岸堆积层滑坡变形破坏力学机制。

## 1 童家坪滑坡概况

童家坪滑坡位于巴东县新城区,地处巫峡出口处长江东南侧岸坡地带。滑坡区东高西低,前缘高程约为67 m,宽约为640 m,坡形较为平缓。滑坡纵长700 m,主滑方向为310°,倾向为290°~310°,面积为35×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>,体积约为966×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。钻探资料表明滑体厚度为22~45 m,属大型深层滑坡。童家坪滑坡基岩为三叠系巴东组第二段(T<sub>2</sub>b<sup>2</sup>),岩性为粉砂质泥岩,其力学强度较低,属软弱岩类。根据钻孔资料,童家坪滑坡滑带平均深度约为28 m,滑坡中部滑带土层碎石以角砾为主,黏土含量较高,而后缘滑带土中的灰绿色钙质泥岩含量明显增多。滑坡地下水主要接受大气降雨入渗补给,水位埋深浅,动态变化大,主要以泉的形式排泄;孔隙裂隙水的分布和动态较稳定,地下水最低排泄基准面为长江水位高程,受其控制地下水位受长江水位的涨落而波动,地下水位一般以1~10的水力坡度向长江迳流。童家坪滑坡平面图及剖面图如图1、2所示。

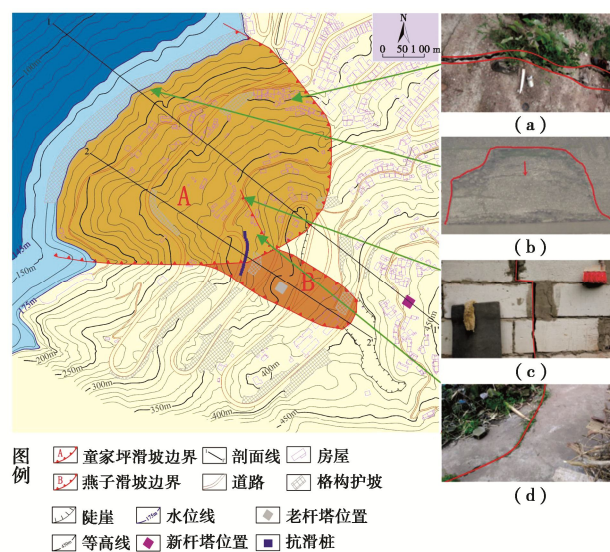


图1 童家坪滑坡平面图

Fig. 1 Plane of Tongjiaping landslide

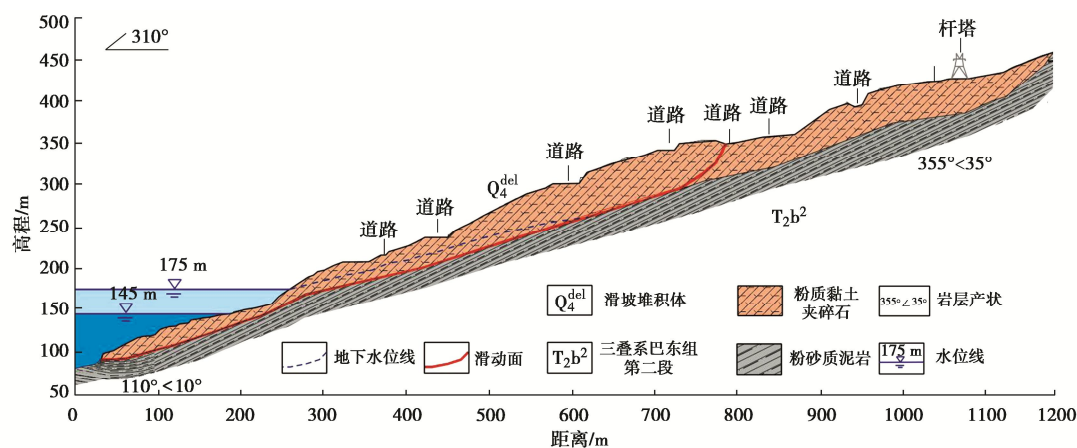


图2 童家坪滑坡剖面图

Fig. 2 Profile of Tongjiaping landslide

童家坪滑坡目前虽然处于较稳定状态,但存在局部变形,图1中分别展示了童家坪滑坡前缘和后缘的部分变形特征。滑坡前缘右边界公路下部待开挖平台上出现长约6 m、宽约3 cm的地裂缝(图1(a));另外滑坡前缘处的浆砌块石护坡也发生明显变形(图1(b));滑坡后部约300 m高程处,公路开挖上方出现滑移,整体向下方移动,房屋出现开裂现象(图1(c)),裂缝宽约1~2 cm,院中地表出现开裂痕迹,宽约1 cm(图1(d))。

2 试验设备与试验方案

本次试验研究采用了中国地质大学(武汉)三峡中心的全自动闭合回路控制环剪仪(ARS-E2型),如图3所示。ARS-E2型环剪仪最大法向应力为1000 kPa,最大剪切速率为200 mm/min,试验试样外径为150 mm,内径为100 mm,试样高度为30 mm,剪切面积为98.13 cm<sup>2</sup>。该仪器能连续监测滑带土在剪切过程中的应力(法向应力和剪应力)、应变(轴向位移)、孔隙水压力和温度的改变,可动态控制剪应力、剪切速率和位移来研究滑带土在不同剪切条件的剪切特性。试验获取的数据可通过全自动采集装置传输至计算机。

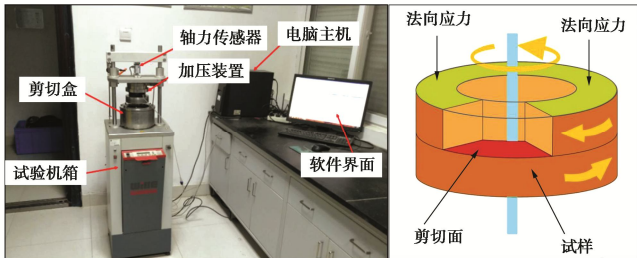


图3 ARS-E2型全自动闭合回路控制环剪仪

Fig. 3 Fully automatic ring shear apparatus (ARS-E2)

在渗透环剪试验时,首先要采用自主研发的渗透

仪对土样进行渗透处理,其原理如图4所示,利用加压气泵将空气压进水箱中,当水箱里的压力值达到要求后,经调压阀调压后,渗透液以一定的水压流入到下透水石和渗透仪下盖之间的水槽,接着流经下透水石、土样、上透水石,最后渗透液从上盖水槽流出,即完成了一个完整渗透过程。

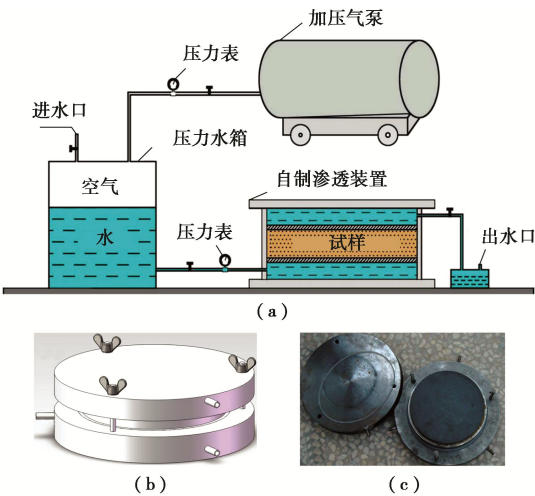


图4 渗透试验示意图

Fig. 4 Schematic diagram of seepage tests

滑带土试样的基本物理力学性质指标如表1所示。本次试验试样取自童家坪滑坡中部滑带土,室内试验测试表明,童家坪滑坡中部滑带土的天然含水率为19.58%,天然干密度为1.51 g/cm<sup>3</sup>。滑带土的颗粒级配曲线如图5所示。

表1 滑带土基本物理力学性质指标

Table 1 Basic physical and mechanical properties indexes of slip

zone soil						
天然含水率/%	饱和含水率/%	天然干密度/(g·cm <sup>3</sup> )	土颗粒相对质量密度	液限/%	塑限/%	土样性质
19.58	29.43	1.51	2.72	28.9	17.8	碎土石

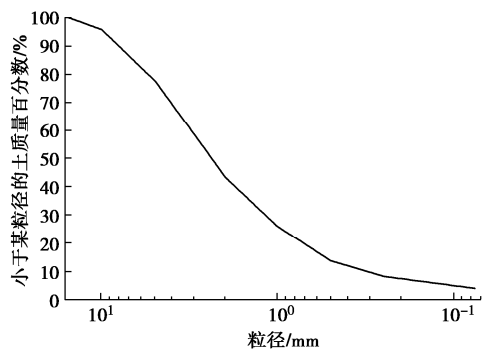


图 5 滑带土颗粒分析曲线

Fig. 5 Grain size distribution curve of soil samples

试验所用童家坪滑坡滑带土需进行重塑。首先在 105℃的环境下将新取的滑带土土样置于烘箱干燥 24 h 以上, 粉碎土样过 2 mm 筛, 并配置 20%含水率的重塑样, 封装静置 24 h 使水分均匀分布后再装入配套的制样模具。剪切开始前通过相应的法向应力对试样进行固结, 随后进行环剪试验。环剪试验终止的标准为滑带土出现明显的残余强度特征或者滑带土强度呈明显下降趋势。试验方案见表 2。

表 2 滑带土渗透环剪试验方案

Table 2 Scheme of seepage-ring shear tests on slip zone soil					
试样编号	渗透压力/kPa	循环次数	有效法向应力/kPa	剪切速率/(mm·min <sup>-1</sup> )	备注
S1-1	200~150	5	200	0.5	不同渗透压循环次数 $N$
S1-2		10			
S1-3		15			
S1-4		20			
S2-1	200~180	5	100, 200, 300	0.5	不同渗透压变化量 $\Delta p$
S2-2	200~160				
S2-3	200~140				
S2-4	200~120				
S3-1	100~50	5	100, 200, 300	0.5	不同初始渗透压 $p_0$
S3-2	150~100				
S3-3	300~250				
S3-4	400~350				
S4-1	100	—	100	0.5	恒定渗透压 $p_c$
S4-2	200				
S4-3	300				

(1) 库水位周期性变动对滑带土强度的影响主要是通过改变水位升降过程中的动态渗透压以及滑带土所受的法向应力来实现的。因此, 本次渗透试验控制变量包括循环次数  $N$  (如渗透压力从 200 kPa 降低到 150 kPa, 再上升至 200 kPa, 称为一次渗透循环); 渗透压变化量  $\Delta p$  (如  $\Delta p=-20$  kPa 表示渗透压力从 200 kPa 降低到 180 kPa); 初始渗透压  $p_0$ ; 恒定渗透压  $p_c$ 。

(2) 所有渗透环剪试验试样的渗透时间均为 12 h, 剪切速度均设定为低速剪切 (0.5 mm/min)。其中

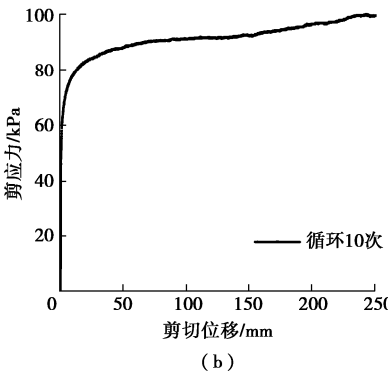
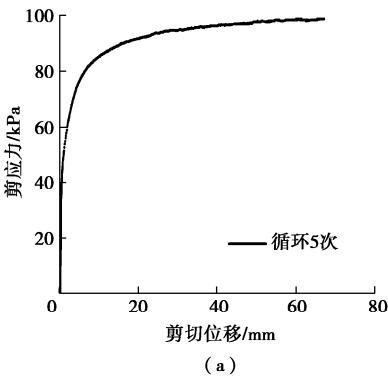
不同渗透循环次数滑带土试样共 4 组, 编号为 S1; 不同渗透压变化量滑带土试样共 4 组, 编号为 S2; 不同初始渗透压滑带土试样共 4 组, 编号为 S3; 不同恒定渗透压滑带土试样共 3 组, 编号为 S4。

(3) 为了探究不同法向应力作用下滑带土的剪切特性, 法向应力设定为 100, 200, 300 kPa。由于滑带土试样在法向应力为 100 kPa 时会出现完整的峰值强度到残余强度过程, 故残余强度值取稳定的最小值; 对于法向应力为 200, 300 kPa 时, 滑带土峰值强度一般不明显, 残余强度取相应法向应力下剪切强度的最小值。

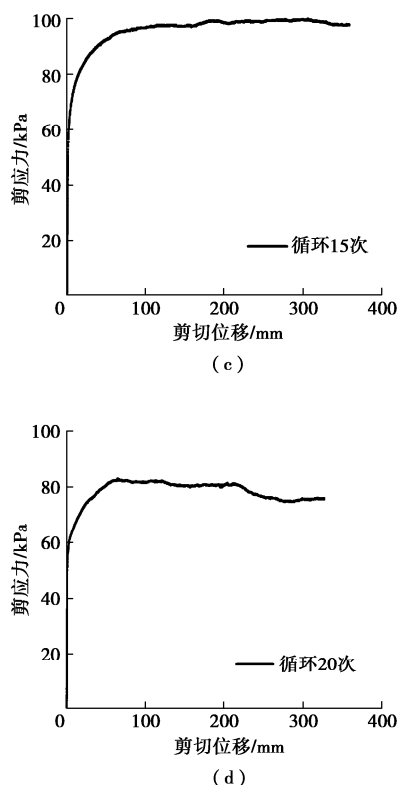
3 试验结果分析

3.1 不同渗透循环次数试验结果分析

本组渗透环剪试验试样共 4 组, 滑带土试样渗透压变化量均为 -50 kPa, 即渗透压力控制在 200~150 kPa, 每次渗透时间为 15 min, 改变每组试样的循环次数  $N$ , 并对渗透完成的滑带土试样在 200 kPa 法向应力下固结 12 h 后进行剪切, 所有试样均在 0.5 mm/min 的剪切速率下进行。图 6 展示了不同循环次数下的  $\tau$ - $t$  曲线。图 6 (a) ~ (d) 的循环次数分别为 5, 10, 15, 20。其残余强度分别为 99.51, 98.99, 98.01, 78.03 kPa。滑带土试样在经过渗透作用后, 随着循环次数提高, 逐渐出现“应变软化”的现象, 这是由于滑带土试样是重塑样所造成的, 并且反复地循环渗透会对土体结构造成破坏, 弱化滑带土的残余强度, 这种破坏程度会随着渗透循环次数的增加而更加显著。





图6 不同循环次数下的 $\tau$ - $s$ 曲线Fig. 6  $\tau$ - $s$  curves under different cycles

不同循环次数下滑带土残余强度特征如图7所示。当循环次数为5时,滑带土的残余强度最大;当循环次数为20时,滑带土的残余强度最小。滑带土残余强度与循环次数总体上呈负相关。当循环次数为5时,滑带土达到残余强度时的最小剪切位移最小;当渗透循环次数为15时,滑带土达到残余强度时最小剪切位移最大。渗透循环次数与滑带土达到残余强度时最小剪切位移量总体呈正相关。考虑到童家坪滑坡是三峡库区的涉水滑坡,当水库周期达到一定阈值(20次)时,滑坡土的强度将显著降低。因此,必须采取必要的防治措施,避免滑坡灾害的发生。

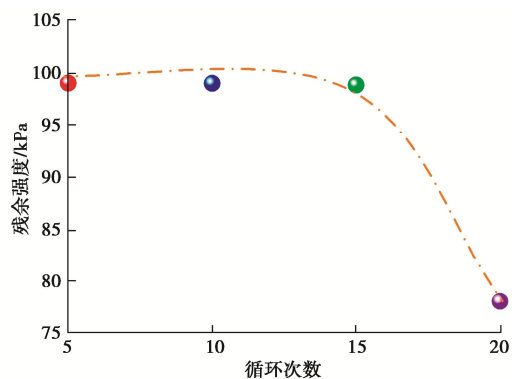
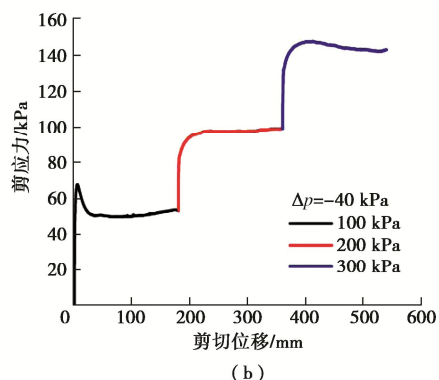
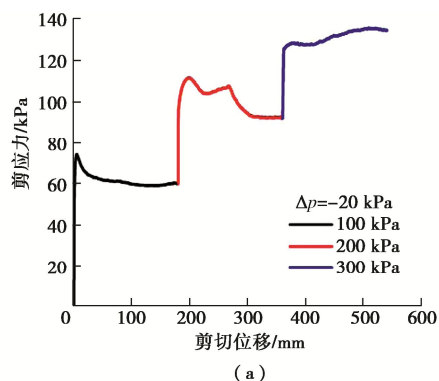


图7 不同循环次数下滑带土残余强度特征

Fig. 7 Residual strength characteristics of slip zone soil under different cycles

### 3.2 不同渗透压变化量试验结果分析

滑带土试样的初始渗透压力均设定为200 kPa,改变渗透压变化量 $\Delta p$ ,试样的渗透循环次数为5,每次渗透时间均为15 min,渗透完的试样采用“三级剪”的方式进行,即每级渗透压下的试样先在法向应力100 kPa下固结12 h,再以0.5 mm/min的速率进行剪切,继而施加下一级(200, 300 kPa)法向应力固结后再剪切,如此反复。不同渗透压变化量下的 $\tau$ - $s$ 曲线如图8所示,图8(a)~(d)的渗透压变化量分别为-20, -40, -60, -80 kPa,在100 kPa法向应力下的残余强度分别为:59.94, 54.03, 50.52, 40.29 kPa。当试样在100 kPa下进行固结剪切时,剪应力随着位移的变化迅速达到峰值强度,随后出现应力衰减现象后逐渐趋于平缓。当法向应力增加至200 kPa时,剪应力值再次随着位移的变化迅速增加,此后增长速率逐渐降低,伴随出现“应变软化”的现象,而随着渗透压变化量的增加,这一现象逐渐受到削弱并逐渐出现“应变硬化”的现象,且随渗透压变化量的增大而愈发明显,当法向应力增加至300 kPa时,逐渐出现“应变软化”的现象,且随渗透压变化量的增大而愈发明显。这与渗透作用对土体的弱化作用有关,渗透作用直接影响土的基质吸力,从而影响了土颗粒的定向排列,继而削弱土体力学性质。



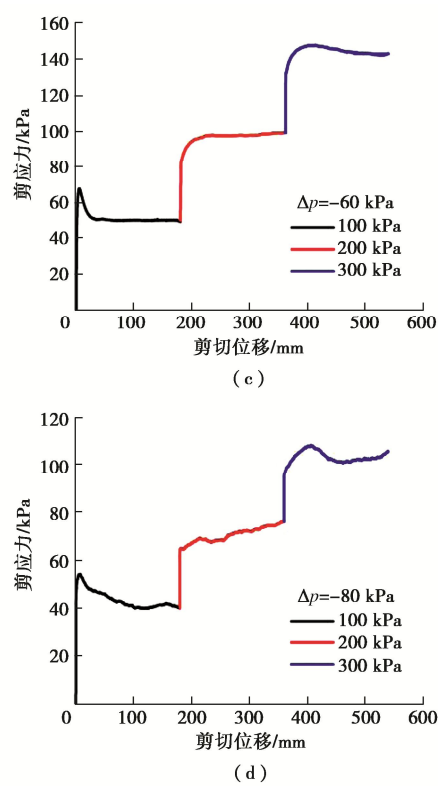


图 8 不同渗透压变化量下的  $\tau$ - $s$  曲线

Fig. 8  $\tau$ - $s$  curves under different change amounts of seepage pressure

不同渗透压变化量条件下滑带土残余强度特征（法向应力 100 kPa 下）如图 9 所示，当渗透压变化量为-20 kPa 时，滑带土的残余强度最大，且随着渗透压变化量的增加，滑带土残余强度总体上呈现出下降的趋势，当渗透压变化量从-20 kPa 增长至-80 kPa 时，滑带土残余强度从 59.94 kPa 下降至 40.29 kPa，下降率达到 32.78%。

图 10 所示为不同渗透压变化量下滑带土试样的残余强度包线，滑带土残余强度特征参数如表 3 所示，4 组试样的残余强度包线均出现较高的拟合度。研究表明，当黏土含量为 50%左右时，残余强度几乎完全由黏土矿物的滑动摩擦控制<sup>[14]</sup>。当渗透压变化量增加时，滑带土的残余强度总体上发生弱化，残余强度包线逐渐降低。试样的残余内摩擦和残余黏聚力均在渗透压变化量  $\Delta p=-60$  kPa 处达到峰值/谷值。滑带土残余黏聚力的变化区间是 6.36~24.20 kPa，滑带土试样残余内摩擦角的变化区间是 17.22°~24.23°，这表明渗透压变化量对滑带土残余强度的影响总体上起呈弱化效应，并且这一弱化效应对残余黏聚力更为显著。这是因为当渗透压不断增大时，土体内部的细小颗粒更易流失于在渗透作用下形成的通道，致使土体内部架空结构增大，削弱了土颗粒之间的咬合力，因此黏聚力也随之降低。

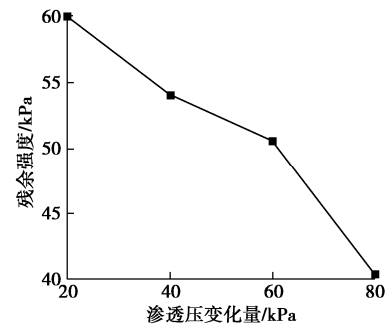


图 9 不同渗透压变化量下滑带土残余强度特征  
Fig. 9 Residual strength characteristics of slip zone soil with different change amount of osmotic pressure

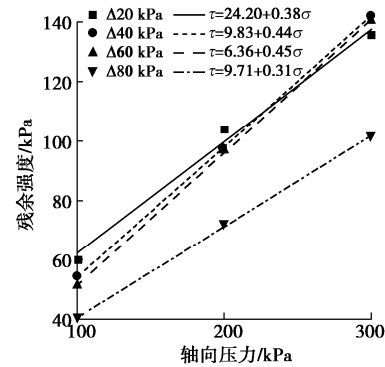


图 10 不同渗透压变化量条件滑带土残余强度包线  
Fig. 10 Residual strength envelopes of sliding zone soil under different change amounts of seepage pressure

表 3 不同渗透压变化量条件下滑带土残余强度特征参数  
Table 3 Residual strength characteristics of slip zone soil under different change amounts of seepage pressure

试验 编号	渗透压变 化量/kPa	不同轴压下残余 强度/kPa			残余强度 参数	
		100 kPa	200 kPa	300 kPa	$\varphi_r(^{\circ})$	$c_r/\text{kPa}$
S2-1	-20	59.94	103.67	135.42	20.81	24.20
S2-2	-40	54.03	97.49	142.00	23.75	9.83
S2-3	-60	50.52	97.00	140.00	24.23	6.36
S2-4	-80	40.29	71.72	101.87	17.22	9.71

3.3 不同初始渗透压试验结果分析

本组渗透环剪试验试样共 4 组，控制滑带土试样渗透压变化量均为-50 kPa，试样的渗透循环次数为 5 次，每次渗透时间均为 15 min，只改变各试样的初始渗透压  $p_0$ 。渗透完的试样同样采用“三级剪”的方式进行，即每级渗透压下的试样先在法向应力 100 kPa 下固结 12 h，再以 0.5 mm/min 的速率进行剪切，继而施加下一级（200，300 kPa）法向应力固结后再剪切，如此反复。不同初始渗透压下的  $\tau$ - $t$  曲线如图 11 所示，其中，图 11（a）~（d）的初始渗透压分别为 100，150，300，400 kPa，其在 100 kPa 法向应力下的残余强度分别为 85.21，57.96，42.06，45.76 kPa。与试样在不同渗透压变化量下的试验现象类似，试样在 100，200，300 kPa 的法向应力下进行剪切时，剪应力均迅

速升至峰值强度后出现应力衰减现象。当法向应力增加至 200, 300 kPa 时, 随着渗透压变化量的增加, 逐渐出现“应变软化”的现象, 并且随渗透压变化量的增大而愈发明显。

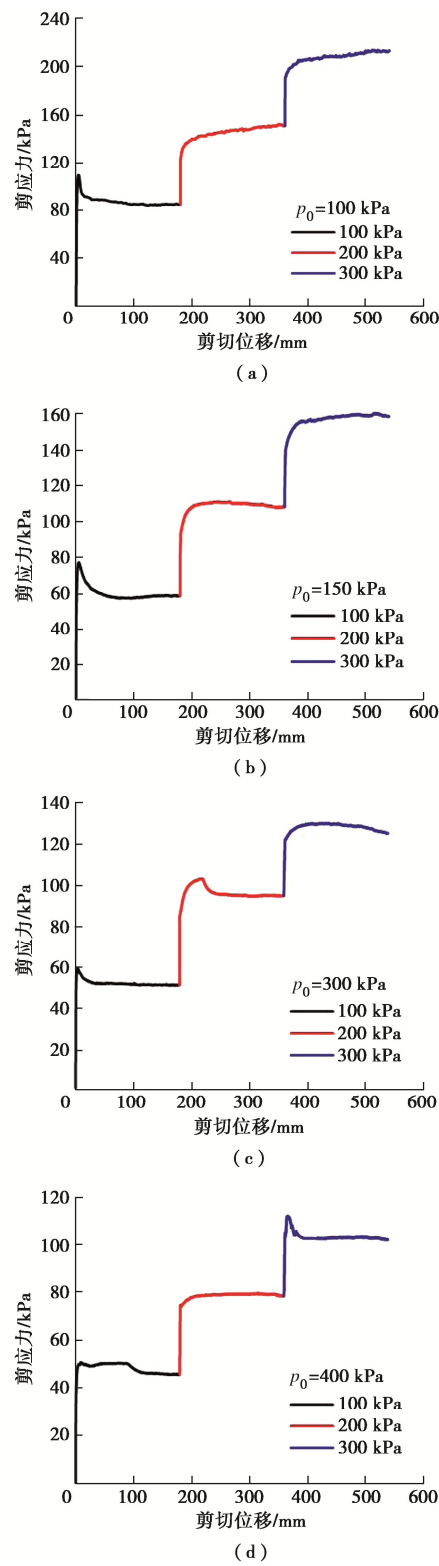


图 11 不同初始渗透压下的  $\tau$ - $s$  曲线

Fig. 11  $\tau$ - $s$  curves under different initial seepage pressures

不同初始渗透压条件下滑带土残余强度特征（法

向应力 100 kPa 下）如图 12 所示, 滑带土的残余强度与渗透压呈负相关。当初始渗透压为 100 kPa 时, 滑带土的残余强度最大, 且随着渗透压范围的增加, 滑带土残余强度总体上呈现出下降的趋势, 而当初始渗透压从初始增长至 400 kPa 时, 滑带土残余强度从 85.21 kPa 下降至 45.76 kPa, 下降率达到 46.30%。

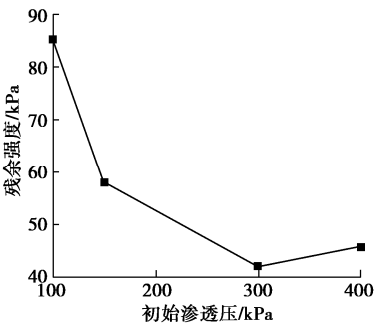


图 12 不同初始渗透压条件下滑带土残余强度特征

Fig. 12 Residual strength characteristics of slip zone soil under different initial seepage pressures

不同初始渗透压条件下滑带土试样的残余强度包线如图 13 所示, 滑带土残余强度特征参数如表 4 所示, 与试样不同渗透压变化量条件下的试验结果类似, 不同初始渗透压条件下的 4 组滑带土残余强度包线均出现较高的拟合度, 并且当初始渗透压增加时, 滑带土的残余强度发生弱化, 残余强度包线逐渐降低。

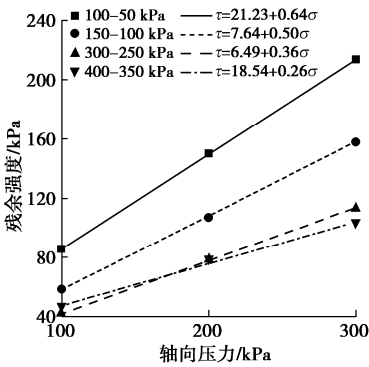


图 13 不同初始渗透压条件下滑带土残余强度包线

Fig. 13 Residual strength envelope of sliding zone soil under different initial seepage pressures

表 4 不同初始渗透压条件下滑带土残余强度特征参数

Table 4 Residual strength characteristics of slip zone soil under different initial seepage pressures

试验 编号	初始渗 透压/kPa	不同轴压下残余 强度/kPa			残余强度 参数	
		100 kPa	200 kPa	300 kPa	$\varphi_r/(^\circ)$	$c_r/\text{kPa}$
S3-1	100	85.21	150.22	213.69	32.72	21.23
S3-2	150	57.96	106.97	157.95	26.56	7.64
S3-3	300	42.06	77.86	113.31	19.61	6.49
S3-4	400	45.76	78.88	103.15	18.54	14.33

不同初始渗透压条件下的滑带土残余强度参数变化曲线如图 14 所示。不同初始渗透压力与滑带土残余强度的影响总体上呈负相关关系。当初始渗透压为 100 kPa 时,滑带土的残余黏聚力和残余内摩擦角都表现为最大值,滑带土残余内摩擦角随着循环初始渗透压的增加而下降,当初始渗透压力从 100 kPa 增加到 150 kPa 时,内摩擦角值迅速从 32.72° 下降到 26.56°,随后随着初始渗透压的增加,内摩擦角的下降速率开始减慢,试样初始渗透压力从 100 kPa 增加到 400 kPa 时,残余内摩擦角下降率达 43.33%。类似地,滑带土残余黏聚力随着初始渗透压的增大整体也呈减小趋势,初始渗透压从 100 kPa 增长到 150 kPa 时,残余黏聚力值从 21.23 kPa 急剧减小到 7.64 kPa,下降率达到 64.01%。在初始渗透压从 300 kPa 增加到 400 kPa 后,滑带土的残余黏聚力略有回升,试样初始渗透压力从 100 kPa 增加到 400 kPa 时,残余内摩擦角下降率达 32.50%。

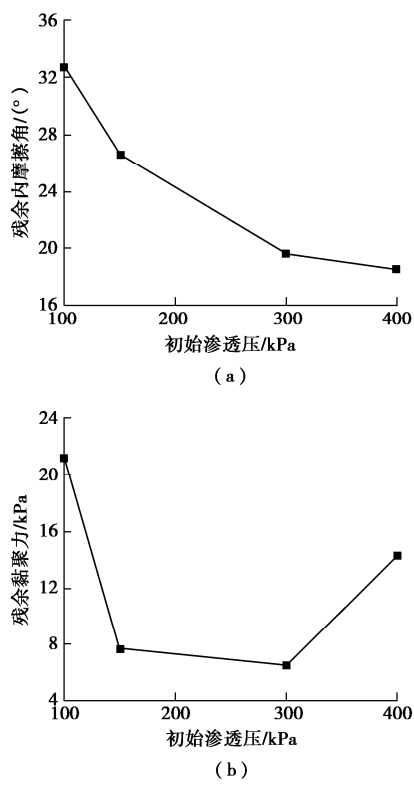


图 14 不同初始渗透压力条件下滑带土残余强度参数变化曲线  
Fig. 14 Variation curves of residual strength parameters of slip zone soil under different initial seepage pressures

3. 4 不同恒定渗透压试验结果分析

本组渗透环剪试验试样共 3 组,通过改变渗透压力  $p$  大小来研究滑带土强度受到恒定渗透作用的影响程度。试样的渗透压力分别为 100, 200, 300 kPa。所有试样的渗透时间均为 12 h,并对渗透完成的试样施加 100 kPa 法向应力固结 12 h,随后进行环形剪切。

滑带土试样在不同恒定渗透压下的  $\tau$ - $s$  曲线如图 15 所示,各级渗透压力下的残余强度分别为 65.96, 59.18, 52.50 kPa。3 组试样的剪切强度迅速地达到峰值,随后应力开始衰减并逐渐趋于平稳,并且在 100 kPa 的恒定渗透压力下,“应变软化”现象最为明显。

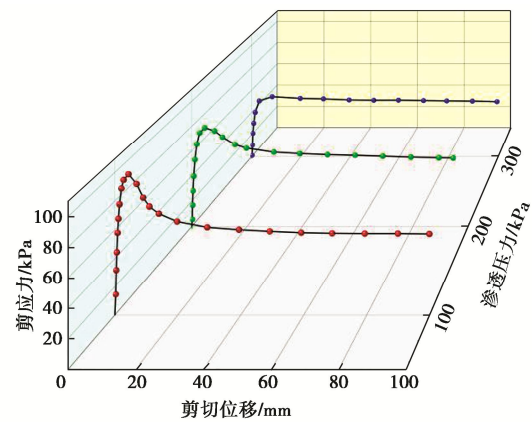


图 15 不同恒定渗透压下的  $\tau$ - $s$  曲线  
Fig. 15  $\tau$ - $s$  curves under different constant seepage pressures

不同恒定渗透压下滑带土残余强度特征如图 16 所示。分析可知:滑带土残余强度与渗透压呈典型负相关。这一现象表明渗透压力的持续增大会促使水分入渗,改变土体内的黏粒间的定向排列,劣化土体结构,进而削弱滑带土强度。由于恒渗试样的渗透时间为 12 h,远高于 15 min,因此在 100 kPa 下,恒渗试样的残余强度低于不同初始渗透压力下的残余强度。然而,当渗透压力达到 200, 300 kPa 时,恒定渗透压力试样的残余强度明显高于相同法向应力 100 kPa 下不同初始渗透压力试样的残余强度,这说明渗透压的变化明显影响滑带土的剪切强度,渗透压的持续变化致使滑带土试样土颗粒之间的咬合力受到削弱,土体结构发生破坏,进而造成土体强度劣化。

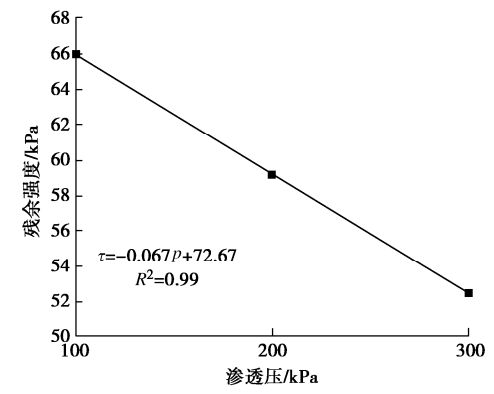


图 16 不同恒定渗透压下滑带土残余强度特征  
Fig. 16 Peak strength characteristics of slip zone soil under different constant seepage pressures



值得注意的是,在童家坪滑坡的演化过程中,随着库水周期波动引起动态渗透压的增大,滑带土的峰值强度将逐渐减小。在三峡库区发育有大量的堆积层滑坡,需密切监测该类滑坡在动态渗透压作用下的变形速度,并采取适当的防治措施,避免滑带土强度出现严重的弱化,从而诱发大规模的库岸滑坡乃至一系列的次生灾害。

## 4 结 论

本文以三峡库区童家坪滑坡滑带土为研究对象,采用 ARS-E2 环剪仪和自主设计的渗透-环剪耦合装置,开展了多种渗透作用下滑带土环形剪切试验,研究了不同渗透循环次数、循环渗透压变化量、初始渗透压以及恒定渗透压作用下滑带土强度变化特征,得到以下 4 点结论。

(1) 渗透试样达到峰值强度后易出现“应变软化”现象。并且随渗透循环次数的增加而愈发明显。当渗透循环小于 15 次时,滑带土残余强度弱化不明显。当渗透循环达到 20 次时,滑带土的残余强度迅速下降。

(2) 渗透循环会造成滑带土的内摩擦角和黏聚力显著减小,渗透压的增大对滑带土黏聚力削弱更为明显。

(3) 滑带土的残余强度与初始渗透压力呈负相关。当初始渗透压力从 100 kPa 增加到 400 kPa 时,残余强度从 85.21 kPa 相应降低到 45.76 kPa,降低率为 46.30%。

(4) 童家坪滑坡的演化过程中,在动态渗透压循环作用下滑带土的残余强度均逐渐减小。因此,需密切监测三峡库区堆积层滑坡变形速度,实施适当的防治措施以避免滑带土出现严重的强度弱化,进而诱发大规模的库岸滑坡乃至一系列的次生灾害。

## 参考文献:

- [1] TANG H M, LI C D, HU X L, et al. Evolution characteristics of the Huangtupo landslide based on *in situ* tunneling and monitoring[J]. *Landslides*, 2015, **12**(3): 511-521.
- [2] 黄波林,殷跃平,张枝华,等. 三峡工程库区岩溶岸坡消落带岩体劣化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(9): 1786-1796. (HUANG Bolin, YIN Yueping, ZHANG Zhihua, et al. Study on deterioration characteristics of shallow rock mass in water the level fluctuation zone of Karst bank slopes in Three Gorges Reservoir area[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, **38**(9): 1786-1796. (in Chinese))
- [3] 殷跃平,闫国强,黄波林,等. 三峡水库消落带斜坡岩体劣化过程地质强度指标研究[J]. 水利学报, 2020, **51**(8): 883-896. (YIN Yueping, YAN Guoqiang, HUANG Bolin, et al. Geological strength index of the slope rock mass deterioration process of the hydro-fluctuation belt in the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, **51**(8): 883-896. (in Chinese))
- [4] 贺可强,王荣鲁,李新志,等. 堆积层滑坡的地下水加卸载动力作用规律及其位移动力学预测:以三峡库区八字门滑坡分析为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(8): 1644-1651. (HE Keqiang, WANG Ronglu, LI Xinzhi, et al. Load-unload dynamic law of groundwater level and dynamic displacement prediction of debris landslide—a case study of bazimen landslide in Three Gorges Reservoir[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **27**(8): 1644-1651. (in Chinese))
- [5] 成国文,李善涛,李 晓,等. 万州近水平地层区堆积层滑坡成因与变形破坏特征[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(3): 17-23. (CHENG Guowen, LI Shantao, LI Xiao, et al. Forming causes and deformation-destruction characters of accumulative stratum landslide in horizontal stratum in Wanzhou[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, **16**(3): 17-23. (in Chinese))
- [6] 许 强. 滑坡的变形破坏行为与内在机理[J]. 工程地质学报, 2012, **20**(2): 145-151. (XU Qiang. Theoretical studies on prediction of landslides using slope deformation process data[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, **20**(2): 145-151. (in Chinese))
- [7] LIAO K, WU Y P, MIAO F S, et al. Effect of weakening of sliding zone soils in hydro-fluctuation belt on long-term reliability of reservoir landslides[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, **80**(5): 3801-3815.
- [8] 田 斌,戴会超,王世梅. 滑带土结构强度特征及其强度参数取值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(17): 2887-2892. (TIAN Bin, DAI Huichao, WANG Shimei. Strength characteristics of soil in slide zone and determination of its parameters[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(17): 2887-2892. (in Chinese))
- [9] TAN Q W, TANG H M, FAN L, et al. *In situ* triaxial creep test for investigating deformational properties of gravelly sliding zone soil: example of the Huangtupo 1# landslide, China[J]. *Landslides*, 2018, **15**(12): 2499-2508.
- [10] 龙建辉,李同录,雷晓锋,等. 黄土滑坡滑带土的物理特性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(2): 289-293. (LONG Jianhui, LI Tonglu, LEI Xiaofeng, et al. Study on physical

- properties of soil in sliding zone of loess landslip[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(2): 289-293. (in Chinese))
- [11] 周翠英, 牟春梅. 软土破裂面的微观结构特征与强度的关系[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(10): 1136-1141. (ZHOU Cuiying, MU Chunmei. Relationship between micro-structural characters of fracture surface and strength of soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(10): 1136-1141. (in Chinese))
- [12] 曹世超, 黄志全, 吴琦, 等. 巨型蠕滑滑坡滑带土特征强度特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2019, **27**(2): 341-349. (CAO Shichao, HUANG Zhiqian, WU Qi, et al. Experimental study on characteristic strength characteristics of slip zone of the giant creep landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, **27**(2): 341-349. (in Chinese))
- [13] MIAO F S, WU Y P, LI L W, et al. Weakening laws of slip zone soils during wetting-drying cycles based on fractal theory: a case study in the Three Gorges Reservoir (China)[J]. Acta Geotechnica, 2020, **15**(7): 1909-1923.
- [14] SKEMPTON A W. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory[J]. Géotechnique, 1985, **35**(1): 3-18.
- [15] GRATCHEV I B, SASSA K. Shear strength of clay at different shear rates[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, **141**(5): 06015002.
- [16] 张荣, 吴益平, 李小伟, 等. 不同含水率下滑带土抗剪强度特性研究[J]. 科学技术与工程, 2015, **15**(15): 195-199. (ZHANG Rong, WU Yiping, LI Xiaowei, et al. Research on shear strength of slide zone soil in different water content[J]. Science Technology and Engineering, 2015, **15**(15): 195-199. (in Chinese))
- [17] 吴迪, 简文彬, 徐超. 残积土抗剪强度的环剪试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(7): 2045-2050. (WU Di, JIAN Wenbin, XU Chao. Research on shear strength of residual soils by ring shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(7): 2045-2050. (in Chinese))
- [18] 刘动, 陈晓平. 滑带土环剪剪切面的微观观测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(9): 1827-1834. (LIU Dong, CHEN Xiaoping. Microscopic observation and analysis of ring shear surface of slip zone soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(9): 1827-1834. (in Chinese))
- [19] SUZUKI M, VAN HAI N, YAMAMOTO T. Ring shear characteristics of discontinuous plane[J]. Soils and Foundations, 2017, **57**(1): 1-22.
- [20] 王顺, 项伟, 崔德山, 等. 不同环剪方式下滑带土残余强度试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(10): 2967-2972. (WANG Shun, XIANG Wei, CUI Deshan, et al. Study of residual strength of slide zone soil under different ring-shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(10): 2967-2972. (in Chinese))
- [21] 范志强, 唐辉明, 谭钦文, 等. 滑带土环剪试验及其对水库滑坡临滑强度的启示[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(9): 1698-1706. (FAN Zhiqiang, TANG Huiming, TAN Qinwen, et al. Ring shear tests on slip soils and their enlightenment to critical strength of reservoir landslides[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(9): 1698-1706. (in Chinese))
- [22] 廖建民, 吴益平, 欧光照, 等. 采用环剪仪对滑带土抗剪强度特性的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013, **35**(10): 92-95. (LIAO Jianmin, WU Yiping, OU Guangzhao, et al. Shear strength behavior of slide zone soil in ring shear tests[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, **35**(10): 92-95. (in Chinese))
- [23] DUONG N T, SUZUKI M, VAN HAI N. Rate and acceleration effects on residual strength of Kaolin and Kaolin-bentonite mixtures in ring shearing[J]. Soils and Foundations, 2018, **58**(5): 1153-1172.
- [24] BHAT D R, YATABE R, BHANDARY N P. Study of preexisting shear surfaces of reactivated landslides from a strength recovery perspective[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, **77**: 243-253.