

# 某滑坡滑带土的多级剪切试验及分析

周四保<sup>1</sup>, 孟颂颂<sup>2</sup>, 华兴林<sup>2</sup>, 钱 招<sup>3</sup>

(1. 当涂县水利局, 安徽 马鞍山 243100; 2. 南京市水利规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210014

3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**滑带土的强度特性对于研究滑坡形成机制具有重要意义。通过一系列多级环剪试验研究不同剪切速率下滑带土的强度特性。研究发现:剪切速率对土体残余摩擦系数影响较小,而剪切时的有效法向应力对土体残余摩擦系数影响较大,有效法向应力越小,残余摩擦系数越大,可能是与剪切面的发育程度有关;土体的轴向位移在初始剪切阶段受剪切速率影响较大,随着有效法向应力的增大,轴向位移变化趋势趋于相似;试验完成后测定滑带土含水量变化,发现剪切完成后滑带处含水率与土体的塑性指数大致相等。

**关键词:**滑带土; 环剪试验; 剪切速率; 残余摩擦系数; 法向应力

中图分类号:TV41

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2023)05-0030-0005

## Study of soil shear test on a landslide slip zone

ZHOU Sibao<sup>1</sup>, MENG Songsong<sup>2</sup>, HUA Xinglin<sup>2</sup>, Qian Zhao<sup>3</sup>

(1. Dangtu County Water Conservancy Bureau, Dangtu 243100, China;

2. Nanjing Water Conservancy Planning and Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210014, China;

3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The strength characteristic of slip zone soil is of great significance to study the formation mechanism of landslide. A series of multistage ring shear tests were carried out to study the strength characteristics of soil in sliding zone with different shear rates. It was found that the shear rate has a small effect on the residual friction coefficient of the soil, while the effective normal stress in shear has a large effect on the residual friction coefficient of the soil, and the smaller the effective normal stress the larger the residual friction coefficient, probably related to the degree of development of the shear plane; The axial displacement of soil is greatly affected by the shear rate in the initial shear stage, and the variation trend of axial displacement tends to be similar with the increase of the effective normal stress. After the test, the water content of slip soil was measured. It was found that the water content of slip zone was roughly equal to the plastic index of soil.

**Key words:** slip soil; ring shear test; shear rate; residual friction coefficient; normal stress

残余强度参数是进行已有滑坡和边坡稳定性评价和治理设计的极其重要的岩土参数。残余强度的产生被认为是岩土体颗粒在经历大位移剪切条件下沿着潜在滑动面(节理、断层等)定向排列结果。环剪仪是一种测量岩土力学参数的土工试验仪器,由于环剪仪可以使土体在剪切过程中沿着一

个方向剪切至无限位移,因此它被认为是测定土体残余强度最合适的仪器。不同剪切速率,残余强度测量值可能有所不同,那么在通过测量残余强度值来确定高精确性和稳定性好的设计参数时,应该考虑剪切速率对残余强度值的影响作用。孙涛等<sup>[1]</sup>利用环剪仪研究发现超固结比对超固结黏土的峰值

收稿日期: 2022-12-24

作者简介: 周四保(1973—),男,工程师,本科,主要从事水利工程建设与管理工。E-mail: dtejhjdz@163.com

强度和残余强度有着明显的影响;胡明鉴等<sup>[2]</sup>通过不同剪切速率下的环剪试验以及排水和不排水条件下的对比环剪试验分析高速滑坡的形成原因;张明等<sup>[3]</sup>通过环剪试验探讨了滑坡型泥石流转化机制;王顺等<sup>[4]</sup>研究了不同环剪方式下滑带土残余强度试验研究;刘动等<sup>[5]</sup>对滑带土试样的剪切面微观结构进行了定量分析,探讨了滑带土宏观力学特性的微观机制;王伟<sup>[6]</sup>结合滑坡的发育规律,研究了环剪试验下不同状态黄土在不同条件下(有效法向应力、剪切方式及固结比)的变形和强度特性;李小伟等<sup>[7]</sup>利用环剪试验研究表明滑带土的峰值强度和残余强度均随着法向应力的增大而增大,并呈现出较强的线性关系;孟颂颂等<sup>[8]</sup>利用环形剪切仪对粉砂类滑带土在不同前期固结压力下的抗剪强度特性进行试验研究,研究不同超固结比对粉砂类滑带土抗剪强度特性的影响,尤其是前期固结压力对滑带土残余强度的影响;崔圣华等<sup>[9]</sup>结合2008年5·12汶川地震触发了大量滑坡灾害,对滑带土在环剪试验条件下进行研究,研究表明试样在不排水条件下具有很高的剪切液化能力,且动剪应力下容易液化;谢辉辉等<sup>[10]</sup>利用环剪仪研究了滑带土重塑样在不同法向应力与剪切速率下的抗剪强度特性;赵帆程等<sup>[11]</sup>开展了不同剪切速率下的剪切试验,研究了等速剪切、加速剪切以及减速剪切作用下滑带土强度变化特征。

目前利用环剪仪测试残余强度的方法主要包括3种:单级剪切试验、预剪切试验和多级剪切试验。在进行环剪试验的单剪时,每一个土样不会有相同的抗剪性能,即使土样取自相同的位置。这将导致不能获得正确的残余强度值,并且在试验过程中所需要的土样也较多。在对土体试验参数进行线性回归时,强度包络线的准确性也受到了试验数目的限制。多级剪切试验便能很好地克服上述不足。多级剪切试验得到的残余强度非常接近通过边坡滑动反分析所得到的残余强度值,尤其是滑动面是受基岩面控制时。

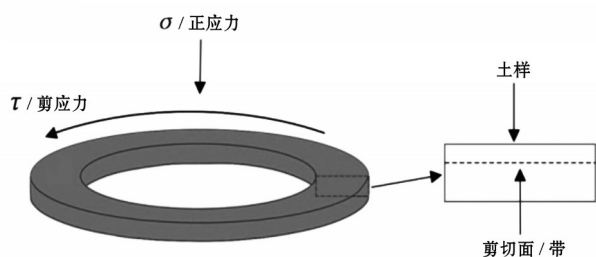


图1 环剪试验原理示意

因此本文主要采用中国地质大学(武汉)ARS环剪仪对滑带土进行一系列多级剪切试验,研究滑坡滑带土在不同速率条件下的剪切规律,并结合该试验研究土体的轴向位移在整个剪切过程中的发展规律以及试验完成后滑带土含水率变化趋势。

## 1 试验土样和试验内容

### 1.1 试验土样

试验土样取自某滑坡前缘滑动面出露处,在进行试验之前,分别测量天然土样的密度、含水量、颗粒级配以及稠度界限等基本物理性质。在对颗粒级配和稠度界限进行测定时,首先在实验室内对土样进行烘干,用橡皮锤对土样碾碎,目的是为了避开碾碎过程中对砂粒等大颗粒物质的破坏,并过2 mm筛备用。土样过2 mm筛后被分为筛上和筛下两类,对筛下土样进行物理性质分析。用密度计法对筛下土样进行颗粒分析试验,用液塑限联合测定法对土样进行液塑限测定试验的结果见表1,图2是试验土样的界限含水量落入卡萨格兰德塑性图的具体位置,它是由A、B、U线构造的土的统一分类系统,可知试验土样为低塑性无机黏土。

### 1.2 试验内容

在工程地质领域,滑坡按滑动速度可分为慢速滑坡、快速滑坡、高速滑坡。由于本文主要研究慢速、快速条件下滑带土的剪切规律,因此试验方案如表2所示;为保证试验的可比性,5次试验均在滑带土前期固结压力600 kPa下完成固结后,再设置剪切命令进行试验。

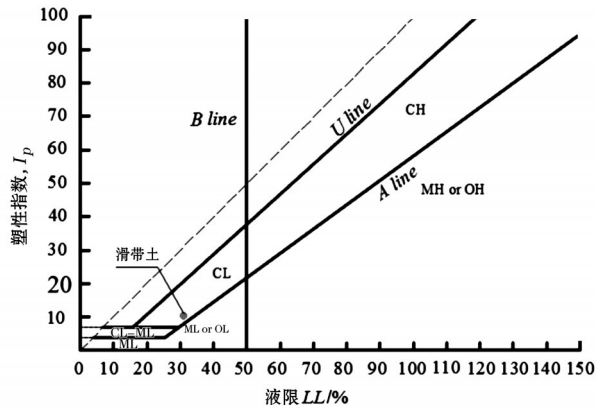
## 2 试验结果与分析

### 2.1 剪切特性

图3~7是不同剪切速率下剪切位移-剪应力曲线,可以发现当剪切速率越小时,剪切位移-剪应力曲线波动越小,表现为在剪切过程中剪切力不会出现较大的波动,主要因为试验为排水剪切试验,在剪切速率较小时产生的孔隙水压力能够及时消散,所以应力-位移曲线波动较小;而对于相同有效法向应力下的残余强度,当位移达到一定值时,在不同剪切速率下的值相近,原因是由于各种剪切速率下孔隙水压力的消散达到了一个平衡。由图3~7还可以发现,当剪切速率为0.06 mm/min时,每一级剪切达到残余时的剪位移均小于15 mm;剪切速率为0.6 mm/min时,每一级剪切达到残余时的剪位移在120 mm左右;剪切速率为2 mm/min时,每一级剪切

表1 滑带土基本物理性质

天然密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	天然含水量/%	颗粒粒度/%			液限 $LL$ / %	塑限 $PL$	塑性指数 $I_p$	土样性质
		砂粒	粉粒	黏粒				
2.05	20.3	48.6	27.8	23.6	31.0	20.7	10.3	低塑性无机黏土



CL:低塑性无机黏土;CH:高塑性无机黏土;ML:低塑性无机粉土;OL:有机粉土;MH:高塑性无机粉土;OH:有机黏土

图2 土样可塑性点位

表2 试验研究方案

试验编号	剪切速率/ ( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )	多级剪切中有效 法向应力/kPa
SH1	0.06	50~100~200
SH2	0.60	50~100~200
SH3	2.00	50~100~200
SH4	6.00	50~100~200
SH5	10.00	50~100~200

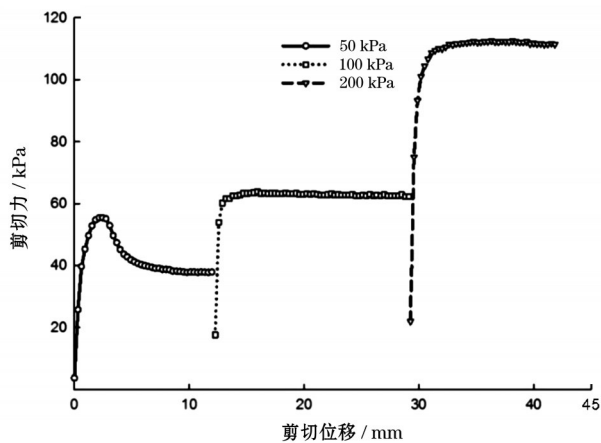


图3 试验SH1剪切位移-剪切力成果

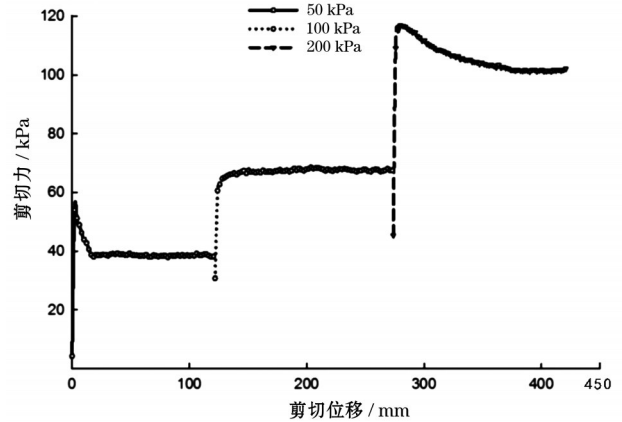


图4 试验SH2剪切位移-剪切力成果

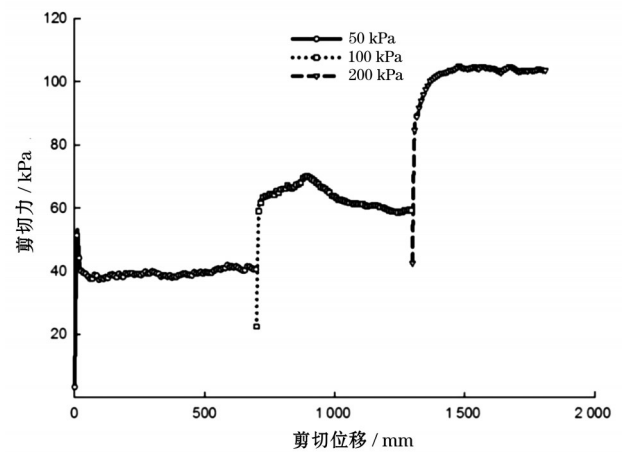


图5 试验SH3剪切位移-剪切力成果

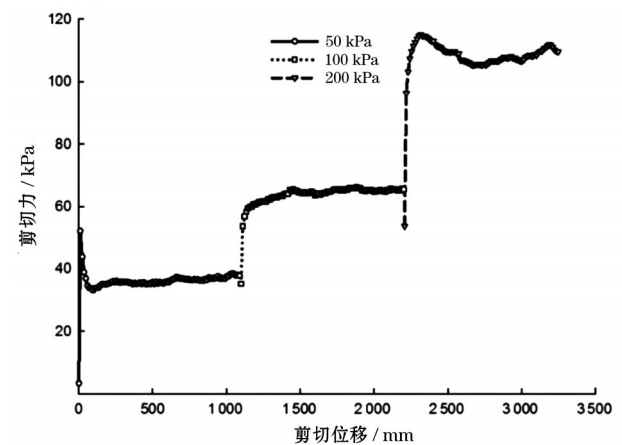


图6 试验SH4剪切位移-剪切力成果

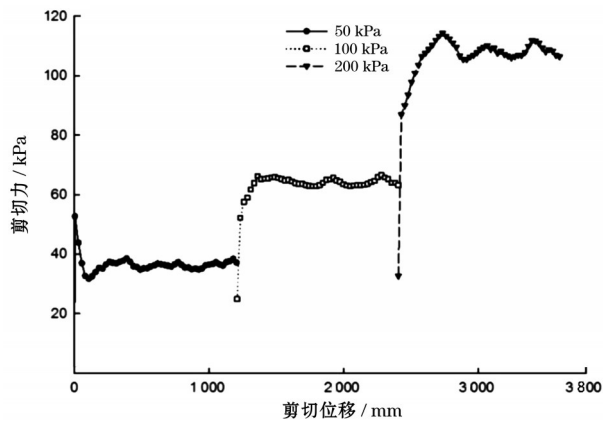
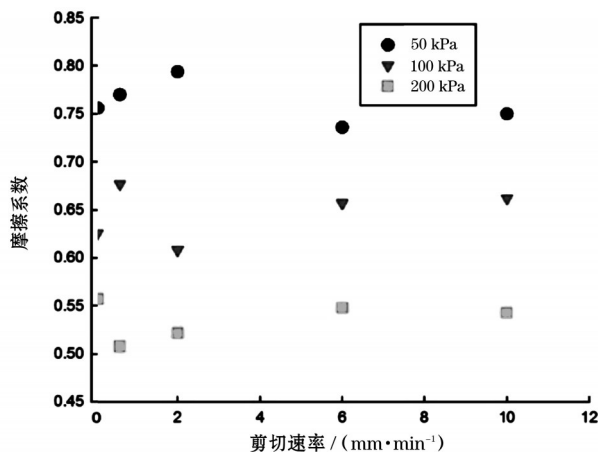


图7 试验SH5剪切位移-剪切力成果

达到残余时的剪位移在600 mm左右、剪切速率为6 mm/min和10 mm/min时每一级剪切达到残余时的剪位移均在1 m以上,可以看出剪切速率对土体达到残余强度时的剪切位移影响也较大。

## 2.2 残余内摩擦系数、有效法向应力、残余强度参数之间的关系

残余内摩擦系数被定义为土体达到残余时,残余强度与有效法向应力之比,此时认为土体之间的内聚力为0。定义残余内摩擦系数用 $\tau_r/\sigma_n'$ 表示,而残余内摩擦角用 $\Phi_r$ 表示。图8表示的是不同剪切速率下 $\tau_r/\sigma_n' - \sigma_n'$ 的关系曲线,可以发现残余摩擦系数在有效法向应力为50 kPa时的变化范围为0.73~0.79,平均值是0.76;在有效法向应力为100 kPa时的变化范围为0.60~0.68,平均值是0.64;在有效法向应力为200 kPa时的变化范围为0.51~0.56,平均值0.54;相对应的残余强度参数的变化范围和平均值分别是 $(36.4^\circ \sim 38.5^\circ, 37.5^\circ)$ 、 $(31.3^\circ \sim 34.1^\circ, 32.7^\circ)$ 和 $(26.9^\circ \sim 29.1^\circ, 28.0^\circ)$ 。可以发现有效法向应力较小时,摩擦系数较大,这是由于黏土颗粒的重新排列

图8 相同固结比不同剪切速率下 $\tau_r/\sigma_n' - \sigma_n'$ 的关系曲线

是影响残余强度的重要因素,有效法向应力越大越有利于黏土颗粒的定向排列,因此残余强度也就越小。从这个观点来看,不同剪切速率下残余摩擦系数的差异在低的有效法向应力下可能与不发达的剪切面有关系。剪切速率影响下的残余摩擦系数的差异和有效法向应力有关。它直接影响着剪切面处颗粒的重排列的发展。根据Stark et al.的研究,在液限低于50%时剪切速率与残余内摩擦角 $\Phi_r$ 没有一定的规律性,这与试验的结果相同。

## 2.3 沉降位移与有效法向应力的关系

土体剪切过程中的轴向位移变化,反映了一定的剪切机制,因此应对剪切过程中轴向位移的变化进行研究。图9、图10分别是不同速率下的轴向位移变化情况。研究发现,在有效法向应力为50 kPa情况下,剪切速率为0.06 mm/min和0.6 mm/min时,土体达到残余状态时的轴向位移仍为负值,说明土体回弹量大于剪切过程中的挤密;在剪切速率为2 mm/min、6 mm/min、10 mm/min时,虽然剪切初始阶段也产生了应变回弹,可是随着剪切的进行,土体挤密量大于回弹量。有效法向应力在100 kPa、200 kPa时,从剪切开始土体挤密量便大于回弹量,说明剪切过程中的土样轴向位移可能是由于颗粒的破碎和颗粒的重排列。Binod Tiwari认为是一些黏性颗粒附着于大颗粒之上,在剪切过程中与大颗粒分离挤密。Tika et al.在高速环剪试验中也描述了相同的机制。Binod Tiwari也对剪切面的厚度进行了测量,发现平均厚度为1.25 mm,他认为,剪切带的厚度可能会受滑带上部土的干扰,由于增加正应力而导致的土体挤密(见轴向位移值),这些被压

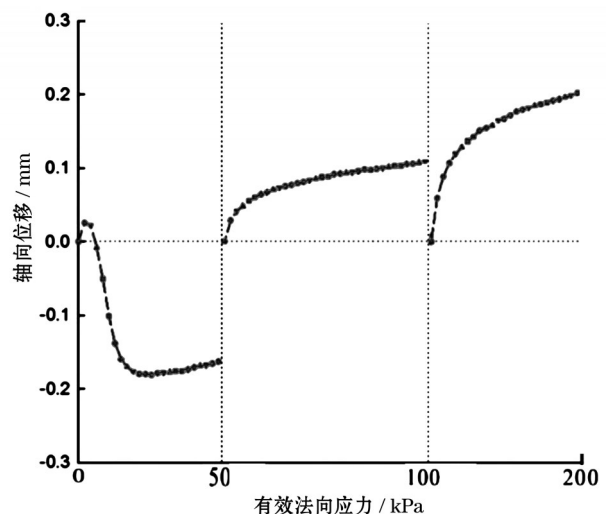


图9 试验SH1有效法向应力-轴向位移成果



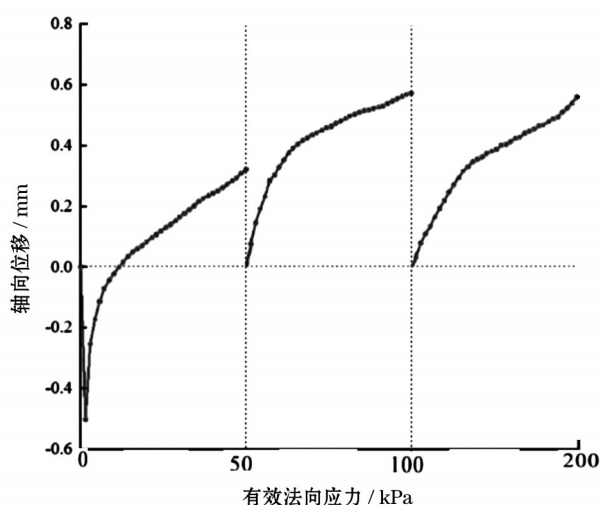


图10 试验SH 5有效法向应力-轴向位移成果

密的土体可能残余了剪切运动,致使剪切带的厚度增加。

## 2.4 剪切面含水量

为了对比剪切前后剪切面附近含水率的变化情况,对试验前后剪切面附近的土体含水率分别进行了测定,测定结果见表3。

表3 不同试验条件下土体含水量变化

剪切速率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	试验前含水率 (饱和后)/%	试验后 含水率/%
0.06	26.22	18.69
0.60	22.48	19.24
2.00	23.85	18.96
6.00	27.38	19.24
10.00	23.79	20.40

从表3可知,土样饱和后的含水率变化范围是22.48%~27.38%,平均值为24.93%;饱和含水率不同可能是由于土体密实度的不同引起的;试验完成后分别测定剪切面附近滑带土含水率,其变化范围是18.69%~20.40%,平均值为19.31%,其值和天然土样的塑性指数20.7相近,这个含水量被称为平衡含水量。也就是说土体达到残余状态与土体的塑性指数具有一定的相关性。同时说明不同剪切速率下土体达到残余强度的值相近也可能与剪切完成时剪切带附近土中含水率相近有关系。

## 3 结 语

滑带土的残余强度是受土体特性例如黏粒粒

组、稠度界限、黏土矿物、有效法向应力的大小控制的。通过本次试验研究可知:

(1)不同的剪切速率影响土体剪切模式,剪应力-剪位移曲线波动不同,但当剪位移达到一定值时其残余强度相差不大。同时各种剪切速率下土体达到残余状态时的剪位移具有一定的规律性;

(2)在相同的有效法向应力下剪切速率对于土体的残余强度参数影响较小,而真正影响残余强度参数的是有效法向应力的大小;

(3)剪切初始阶段,土样均出现应变回弹现象,当剪切速率较小时有效法向应力为50 kPa时的回弹量大于压缩量,其余情况下均是压缩量大于回弹量;

(4)试验完成后分别测定剪切面附近滑带土含水率,发现其与天然土样的塑性指数相近,说明土体达到残余状态与土体的塑性指数具有一定的关系。

### 参考文献:

- [1] 孙涛,洪勇,栾茂田,等.采用环剪仪对超固结黏土抗剪强度特性的研究[J].岩土力学,2009,30(7):2000-2004,2010.
- [2] 胡明鉴,汪发武,程谦恭.基于高速环剪试验易贡巨型滑坡形成原因试验探索[J].岩土工程学报,2009(10):1602-1606.
- [3] 张明,胡瑞林,殷跃平,等.滑坡型泥石流转化机制环剪试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010(4):822-832.
- [4] 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(10):2967-2972.
- [5] 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(9):1827-1834.
- [6] 王伟.重塑黄土残余强度的环剪试验研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [7] 李小伟,吴益平,张荣,等.滑带土抗剪强度特性的环剪试验研究[J].科学技术与工程,2014,14(27):273-276,282.
- [8] 孟颂颂,李德营,李仕波,等.不同前期固结压力下粉砂类滑带土抗剪强度环剪试验研究[C]//第十届全国工程地质大会论文集,成都:中国地质学会,2016:1355-1361.
- [9] 崔圣华,裴向军,王功辉,等.基于环剪试验的汶川地震大型滑坡启动机理探索[J].岩土工程学报,2017,39(12):2268-2277.
- [10] 谢辉辉,刘清秉,胡桂阳.基于环剪试验的滑带土抗剪强度特性研究[J].人民长江,2018,49(11):108-113.
- [11] 赵帆程,苗发盛,吴益平,等.不同环剪条件下三峡库区童家坪滑坡滑带土强度特性[J].地质科技通报,2022,41(2):315-324.