

含水率对滑带土抗剪强度的影响

夏婷, 代张音*, 杨银凯, 赵昆

(贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:雨季公路旁滑坡频发,对人们的生命财产造成威胁。滑带土是滑坡的重要组成部分,其物理力学性质对分析滑坡的形成与发展至关重要,滑带土抗剪强度的研究对滑坡识别与预测具有重要意义。本文以大方县某公路旁滑坡滑带土为研究对象,在滑带土基本物理力学分析基础上,开展不同含水率和不同法向应力的环剪试验,重点分析滑带土在不同含水率下的抗剪强度特性。试验结果表明:滑带土抗剪强度随含水率以较强线性关系衰减,含水率越大,二者之间差值越小;随着试样含水率增加,黏聚力先减小后增大,内摩擦角先增大后减小,且试样含水率未达到塑限及接近液限时,内摩擦角都很小;强降雨条件使土的含水率增加,抗剪强度降低,土颗粒之间摩擦强度降低,导致滑坡发生,且含水率越高,滑坡速度越快。

关键词:滑带土;含水率;环剪试验;抗剪强度

中图分类号:TU432

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2023)04-0060-07

Effect of Moisture Content on Shear Strength of Sliding Zone Soil

XIA Ting, DAI Zhangyin, YANG Yinkai, ZHAO Kun

(College of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Landslides occur frequently on the side of highways during the rainy season, posing a threat to people's lives and property. Sliding zone soil is an important part of landslide, and its physical and mechanical properties are very important for the analysis of landslide formation and development, thus the study of shear strength of sliding zone soil is of great significance for landslide identification and prediction. In this paper, taking the landslide soil next to a highway in Dafang County as the research object, on the basis of the basic physical and mechanical analysis of the slip belt soil, the ring shear test with different moisture content and different normal stresses is carried out, and the moisture content is selected with high water content, focusing on the shear strength characteristics of the slip belt soil under different moisture content. The experimental results show that the shear strength of the slip zone soil decays with a strong linear relationship with the moisture content, and the larger the moisture content, the smaller the difference between the two. With the increase of the moisture content of the sample, the cohesion first decreases and then increases, the internal friction angle increases first and then decreases, and the internal friction angle is very small when the moisture content of the sample does not reach the plastic limit and is close to the liquid limit. Heavy rainfall conditions increase the moisture content of the soil, reduce the shear strength, and decrease the friction strength between soil particles, resulting in landslides. The higher the moisture content, the faster the landslide speed.

Keywords: slip soil; moisture content; ring shear test; shear strength

滑带土抗剪强度是进行滑坡稳定性分析计算的基础性指标,对滑坡稳定性评价与预测预报至关重要^[1-3]。研究滑带土峰值强度和残余强度的变化规律,对滑坡稳定性分析与防治具有重要意义^[4-5]。环剪试

验是一种空心扭剪试验,其不但可进行无限制、连续的大位移剪切,且在整个剪切过程中剪切面积极少发生变化,同时,能准确对法向应力和剪切速率等进行动态控制,环剪试验对土体强度测试、滑坡稳定性分析与防治研究具有重要作用^[6-8].许多学者通过环剪试验对滑坡机理进行研究,如陈育民等^[9]对环剪仪剪切盒进行合理改造后,在环剪仪上直接完成微生物加固的演化过程;缪海波等^[10]对万州侏罗系风化泥岩残积土进行环剪试验,研究干湿循环对泥岩残积土强度和剪切速率的影响;朱国权^[11]对黏性滑带土开展不同剪切速率下的环剪试验,从宏观角度分析试样抗剪强度随剪切速率变化的规律;吴和秋等^[12]以环剪试验为基础,研究找出了滑坡体转化为泥石流的转化机理;张明等^[13]通过环形剪切试验模拟不同深度碎屑颗粒滑坡泥石流的远距离剪切过程,并根据试验结果分析滑坡致灾范围.此外,国内外学者也通过环剪试验研究含水率对滑带土抗剪强度的影响,魏占玺等^[14]采用环剪试验研究滑带土力学参数与含水率的关系,建立基于动态残余强度的应变软化模型,模拟滑坡在滑带土处于不同含水率阶段的发展情况;杨宇轩等^[15]通过环剪试验研究含水率和法向压力对滑带土强度的影响规律,结合滑坡渗流模拟开展了滑坡稳定性计算,得出滑坡在不同库水位的稳定性系数;文献[16-18]中,研究者利用环剪试验对降雨诱发型滑坡滑带土进行研究,得出土壤含水率与抗剪强度的关系,进一步揭示滑坡运动机制.综上,目前对滑坡滑带土抗剪强度的研究已经较为成熟,但已有研究对含水率的选取均在塑限附近上下波动,很少考虑滑带土含水率过高的情况.

本文以大方县某滑带土为试验对象,使用人工重塑试样进行环剪试验,并观察剪切带的颗粒分布、碎裂及表观形态等特征.通过处理相关试验数据,绘制滑带土试样剪切应力-剪切位移曲线,比较不同试验参数下的试验结果,分析含水率对滑带土抗剪强度的影响,为多雨地区滑坡稳定性评价及预测预报提供理论依据.

1 滑坡概况

大方县某滑坡位于贵州省毕节市大方县某公路旁,滑坡取样地点后壁大致呈矩形,主滑方向自东向西,最大滑动距离约为3 m.滑坡全长约4 m,宽约2 m,平均厚度约0.8 m,总体积约48.9 m³.滑坡堆积部分平均厚度约1 m,堆积体长3 m,宽约2 m,体积35 m³,滑坡堆积体占公路宽为1.5 m;在坡面流侵蚀下,表面滑带土部分被冲蚀.堆积体可分为二级平台,上覆1.0~1.5 m黄土层,表面分布少量砾岩.滑坡上覆植被矮小,黄土层附着力弱,易产生不稳定状态,引发滑坡.因有关部门已对滑坡现场进行清理,故本次试验土样取自清理后的现场,见图1.



图1 滑带土取样地点

2 环剪试验

2.1 试验仪器

本次试验仪器为ZSHJ-3型全自动伺服动态控制环剪仪(图2),试验装置配套液晶微机控制器,实时伺服控制.垂直荷载加载范围为0~5 kN,加载过程为微机控制自动加载,扭矩为300 N·m,下切盒转速为0.01~10.00(°)/min.环剪仪配套采集、控制、处理软件,不仅可以采集试验过程中的各种参数,实时观测数

据走向,还可以设置不同的全自动轴向控制及扭转控制,并进行处理分析.



图2 ZSHJ-3型全自动伺服动态控制环剪仪

2.2 试样制备

本次试验采用重塑土样,取样地点见图1.滑带土主要为黄土,胶结程度较高,经测试其基本物理性质见表1.

表1 滑带土试样物理性质

参数	天然密度/(g/cm ³)	液限/%	天然含水率/%	比重	塑限/%	塑性指数 I _p	孔隙比
测量值	1.302 4	52.89	40.05	2.57	38.74	14.15	2.343 8

试样制备过程如下:首先,用小锤将滑带土试样压碎,放入温度为105℃的烘箱中干燥24h以上,然后对干燥的试样进行筛分,取粒径小于等于2mm的部分,并分别配置成含水率为36%,40%,44%,48%和52%的试样土;然后用压实法将试样装入设备配套的制样盒制成圆饼状,即将称量好的试样分3层装入薄壁环刀内并压实,每装一层土之前要先进行刨毛处理,以便每层试样间更好地接触;最后将圆饼状试样装入剪切盒,切除中间部分,剩余部分即为试验所需环状试样.将剪切盒安装到环剪仪上即可开始试验.

2.3 试验方案

本次试验选用单级剪,将含水率(ω)和法向应力(σ)相同的试样在相应的法向应力下固结10min,此时试样固结稳定,然后以0.1mm/min的剪切速率进行剪切.同时,数据采集软件以1次/s的频率采集剪应力和剪切位移等相关试验数据.本次试验共测试15个试样,编号为S1~S15,分别设计5组不同含水率(ω)在3级不同的法向应力(σ)下进行试验,具体试验方案见表2.

表2 滑带土环剪试验方案

剪切速率/(mm/min)	试样编号	含水率 ω /%	法向应力 σ /kPa
0.1	S1~S3	36	20,50,80
	S4~S6	40	20,50,80
	S7~S9	44	20,50,80
	S10~S12	48	20,50,80
	S13~S15	52	20,50,80

3 试验结果分析

3.1 剪切带破坏表现形态特征

试验完成后进行试样取样观察,当含水率未达到塑限时(图3a),剪切带上的环状划痕明显,说明剪切面上的土颗粒发生了定向排列及长距离位移等现象;当含水率处于塑限与天然含水率之间时(图3b),土颗粒清晰;当含水率处于塑限和液限之间时(图3c、图3d),环状划痕和土颗粒均不清晰,试样具有明显剪切缝,且试样剪切带表面凹凸不平,可见明显划痕;当含水率快达到液限时(图3e),此时含水率过高,固结性差,剪切完后剪切带出现断裂.

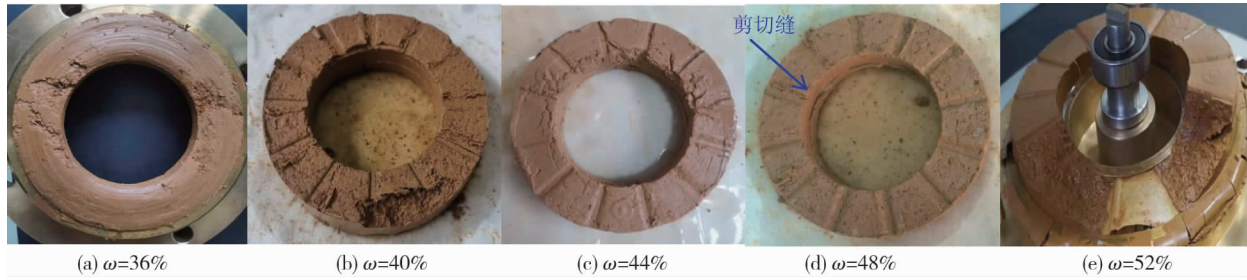


图 3 各含水率下试样剪切带形态

3.2 剪切应力-应变特征分析

根据 5 组不同含水率试样剪切试验数据,绘制出不同法向压力下对应的剪应力-剪切位移曲线(图 4).由图 4 可知:当剪切位移达到一定位移后,曲线上会出现峰值,即达到试样峰值强度(τ_p);随着剪切位移继续增大,曲线相对平缓,剪应力会在一个相对稳定的值上下波动,此时认为该试样已经达到残余强度(τ_r).虽然每组图中 τ_p 和 τ_r 以及其变化幅度和位移值各不相同,但由峰值强度到最终残余强度的过程都出现了应变软化现象.如在含水率为 36%、法向应力为 20 kPa 的剪应力-剪切位移曲线中,试样在剪切位移为 8.24 mm 时可认为试样达到峰值强度 208.49 kPa.

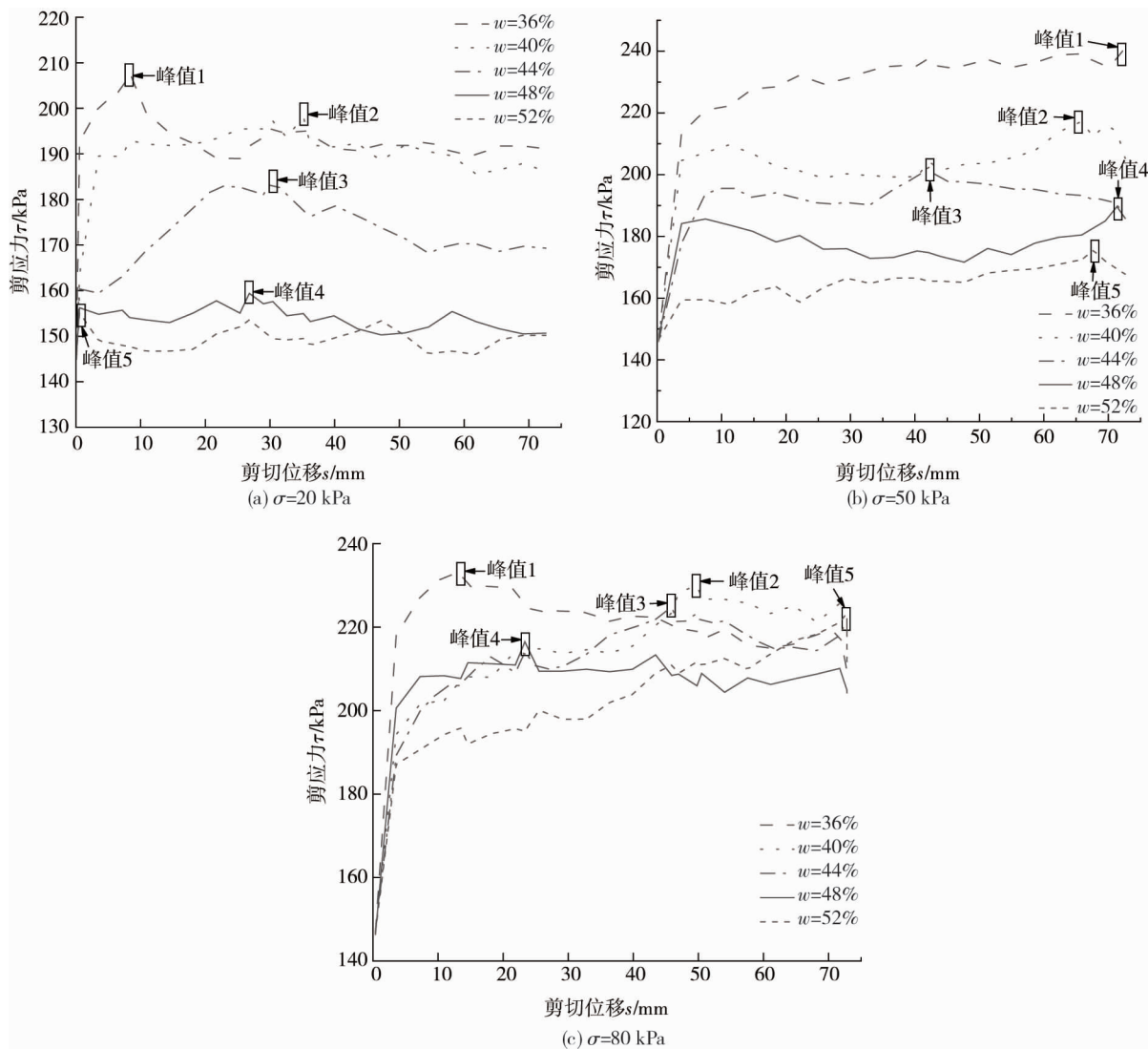


图 4 滑带土剪应力-剪切位移曲线

3.3 含水率对抗剪强度的影响

滑带土在含水率为 36%, 40%, 44%, 48% 和 52% 条件下的抗剪强度值如表 3 所示, 在法向应力相同的情况下, 抗剪强度随含水率的增加而降低。

表 3 试样峰值强度 (τ_p) 和残余强度 (τ_r)

含水率/%	法向应力/kPa					
	20		50		80	
	τ_p /kPa	τ_r /kPa	τ_p /kPa	τ_r /kPa	τ_p /kPa	τ_r /kPa
36	208.49	191.63	240.39	236.28	232.63	215.93
40	198.78	182.49	216.58	211.72	229.90	224.31
44	184.39	167.86	201.80	189.16	224.63	215.99
48	159.66	150.92	189.17	183.88	216.24	207.37
52	155.37	142.55	175.07	171.20	223.07	218.19

将其峰值强度和残余强度与含水率进行拟合, 拟合直线如图 5 所示. 由图 5 可知: 在法向应力相同的条件下, 随着试样含水率的增加, 滑带土峰值抗剪强度和残余抗剪强度均呈近乎线性衰减, 其中峰值抗剪强度较残余抗剪强度下降更为显著。

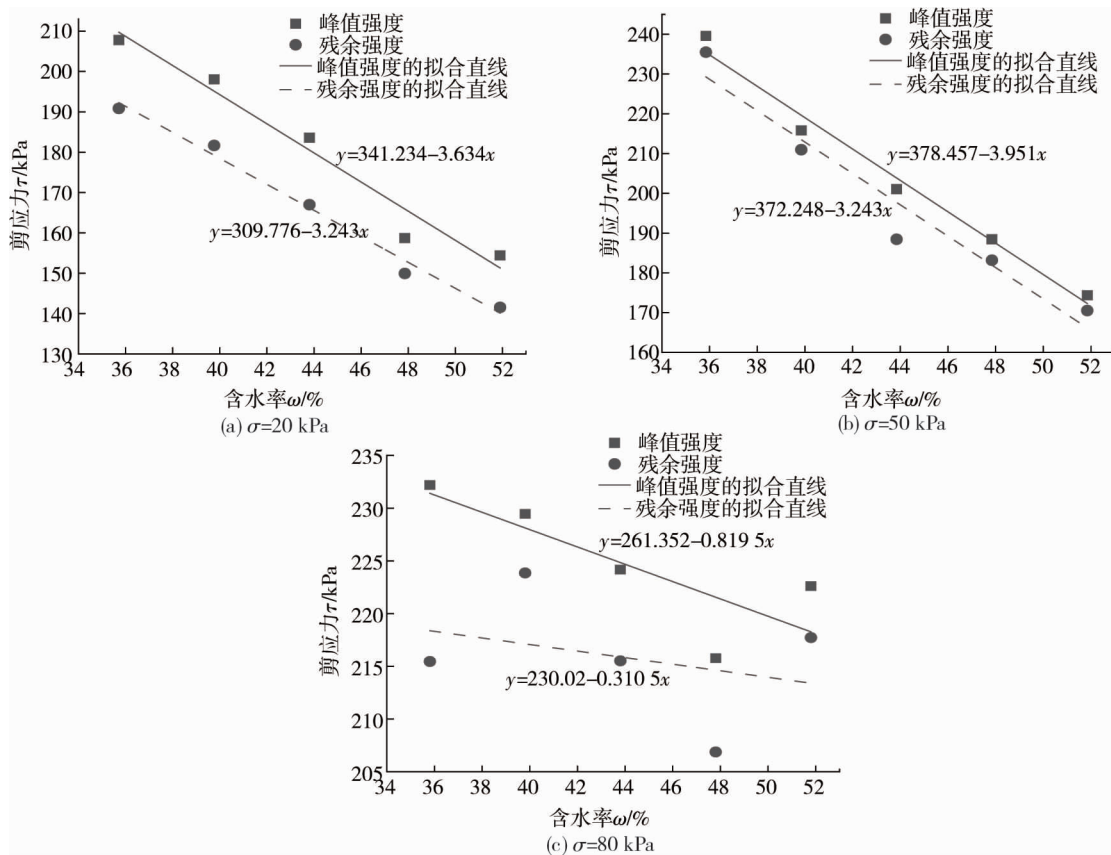


图 5 剪应力与含水率关系

3.4 抗剪强度参数分析

将法向应力与不同含水率峰值强度进行拟合, 拟合曲线如图 6 所示. 由图 6 可知: 含水率越低, 土体抗剪强度越高, 随着法向应力的增加其抗剪强度也增加, 但在不同含水率下增加速度不一. 含水率较低时, 土体本身就具有较大的抗剪强度, 因此其强度增加较慢; 含水率即将达到液限时, 土颗粒处于流动状态, 施加法向应力使土体快速得到固结, 土颗粒之间的摩擦强度增加, 因此其强度增加比较快. 抗剪强度计算公式见式(1).

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi. \tag{1}$$

式中: τ 为抗剪强度; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角.

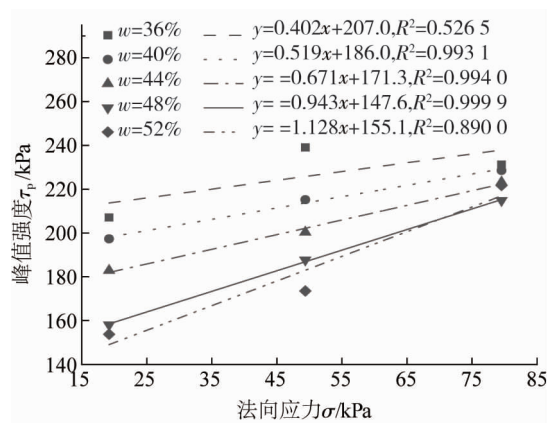


图 6 法向应力与抗剪强度的关系

依据拟合直线求出不同含水率下的黏聚力 c 和内摩擦角 φ (表 4),并将求出的值与含水率进行拟合,拟合曲线如图 7 所示.

表 4 滑带土的黏聚力和内摩擦角

含水率 $\omega/\%$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
36	207.0	4.26
40	186.0	32.54
44	171.3	32.20
48	147.6	31.09
52	155.1	15.11

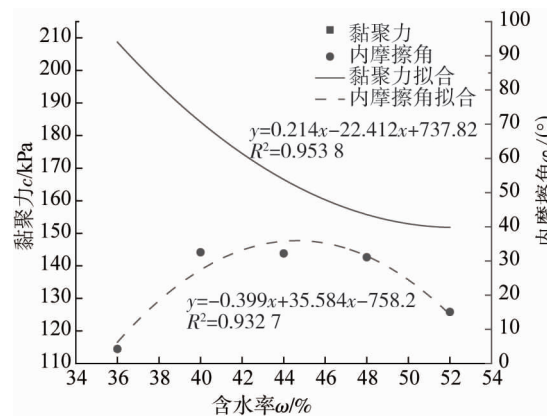


图 7 滑带土峰值强度参数与含水率的关系

结合表 4 和图 7 分析可知,总体来说黏聚力先减小后增大,而内摩擦角先增大后减小.当含水率为 36%,40%,44%,48%时, c 值随含水率的升高而降低,这是因为 c 值的大小由土颗粒间的物理化学作用力决定(如库仑力、胶结作用等),当 c 值与塑限相差不大时,含水率越低其胶结作用越强;而当含水率为 52%时, c 值出现升高,此时含水率过高,受孔隙水压力作用的影响,空气之间的空气减少,其黏聚力增加.而 φ 值由颗粒之间的摩擦强度决定,当含水率 36%时,此时含水率还没到达试样的塑限,颗粒之间的摩擦力小,因此其 φ 值最小;当含水率为 40%,44%,48%,52%时,此时均已达到试样的天然含水率,因此其 φ 值随含水率升高而降低;从含水率低于塑限的 36%到临近天然含水率的 40%, φ 值急剧升高,而含水率从 48%到 52%时,此时试样即将达到液限,土颗粒之间的摩擦强度弱, φ 值急剧下降;而含水率 40%,44%,48%均处于天然含水率与液限之间,三者 φ 值相差不大,最大相差仅 1.45° .

4 结论

1) 环剪试样完成后, 试样产生轴向压缩, 这是因为固结和剪切挤压共同作用造成滑带土试样沿试样盒与上剪切盘间缝隙挤出, 使试样厚度减小。

2) 虽各试样峰值强度和残余强度不同, 但由峰值强度到最终残余强度的过程都出现了应变软化现象, 且法向应力不同, 曲线间隔宽度也不同。

3) 滑带土峰值强度、残余强度均与含水率呈负相关关系, 且线性关系较强, 峰值强度下降速度比残值强度高。

4) 黏聚力先减小后增大, 内摩擦角先增大后减小。含水率未达到塑限和达到液限后, 试样的内摩擦角值很低; 含水率处于天然含水率与液限之间时, 黏聚力、内摩擦角均随含水率的升高而降低, 且内摩擦角值相差不大。

参考文献:

- [1] 祝艳波, 刘振谦, 李文杰, 等. 黄土-三趾马红土滑坡滑带土的长期强度影响因素研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 148-156.
- [2] 刘虎虎. 三峡库区侏罗系顺层滑坡滑带土强度特性研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- [3] 张昆, 郭菊彬. 滑带土残余强度参数试验研究[J]. 铁道工程学报, 2007, 24(8): 13-15.
- [4] 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.
- [5] 刘小丽, 邓建辉, 李广涛. 滑带土强度特性研究现状[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1849-1854.
- [6] 姜程程, 范文, 苑伟娜. 基于环剪试验的含钙质结核古土壤剪切特性[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(4): 809-817.
- [7] 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.
- [8] 汪发武. 高速滑坡形成机制: 土粒子破碎导致超孔隙水压力的产生[J]. 长春科技大学学报, 2001, 31(1): 64-69.
- [9] 陈育民, 张书航, 丁绚晨, 等. 微生物加固钙质砂强度演化过程的环剪试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文): 2022, 44(4): 10-17.
- [10] 缪海波, 沈艺璇. 干湿循环下万州侏罗系泥岩残积土的环剪试验[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7724-7730.
- [11] 朱国权. 不同剪切速率下滑带土强度特性及孔隙分形特征研究[J]. 矿产勘查, 2021, 12(5): 1256-1263.
- [12] 吴和秋, 杨龙, 金钢雄. 滑坡型泥石流的转化机理研究[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(5): 17-23.
- [13] 张明, 王正波, 孙琳. 滑坡碎屑流高速远程机制环剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊1): 2673-2681.
- [14] 魏占玺, 谢东武, 毋远召, 等. 基于动态残余强度的不同含水率条件下滑坡稳定性研究[J]. 水文地质工程地质: 2022, 44(4): 10-17.
- [15] 杨宇轩, 霍志涛, 方仕达, 等. 基于环剪试验的四方碑滑坡滑带土残余强度空间差异性和稳定性分析[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(2): 175-179.
- [16] 张怡颖, 郭长宝, 杨志华, 等. 四川茂县周场坪深层滑坡滑带土环剪试验强度研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 764-776.
- [17] 吴岱諝, 曹世超, 吴琦, 等. 蠕滑滑坡滑带土强度及其参数特性试验研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(7): 143-147.
- [18] WANG G H, SUEMINE A, SCHULZ W H. Shear-rate-dependent strength control on the dynamics of rainfall-triggered landslides, Tokushima Prefecture, Japan[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(4): 407-416.