



贵州公路旁边坡滑带土抗剪强度特性研究

黄淙葆, 代张音, 高威挺, 罗庆丽

贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025

摘要: 为了探究公路旁边坡滑带土的强度性质和法向变形性质的变化规律, 以贵州山区公路为例, 利用环剪仪研究了滑带土在不同含水率和不同法向应力下的抗剪强度特性。结果表明: 不同含水率滑带土的峰值强度和残余强度与法向应力间具有良好的线性关系; 法向应力越大, 试样达到峰值强度所需要的剪切位移也会越大; 含水率较高的条件下, 滑带土从峰值强度下降到残余强度期间内, 剪应力有增加的趋势; 随着含水率的增加, 黏聚力呈现增大的趋势, 内摩擦角在塑限附近达到峰值, 之后逐渐减小。滑带土性质的研究可为公路旁滑坡识别与预防提供科学依据。

关键词: 滑坡; 环剪试验; 滑带土; 含水率; 法向应力; 抗剪强度; 贵州省

SHEAR STRENGTH CHARACTERISTICS OF SOIL IN THE SLIDING ZONE ON HIGHWAY SLOPE IN GUIZHOU PROVINCE

HUANG Cong-bao, DAI Zhang-yin, GAO Wei-ting, LUO Qing-li

Mining college, Guizhou University, Guiyang 550025, China

Abstract: To explore the change rule of strength and normal deformation properties of soil in the sliding zone on highway slopes, taking the mountainous highway in Guizhou Province as an example, the paper studies the shear strength characteristics of sliding zone soil under different water content and normal stress by ring shear apparatus. The results show that there is a good linear relation between the peak strength and residual strength of sliding zone soil with different water content and the normal stress. The larger the normal stress is, the larger the shear displacement required for the specimen to reach the peak strength will be. Under the condition of high water content, the shear stress tends to increase when the sliding zone soil decreases from peak strength to residual strength. With the increase of water content, the cohesion shows an increasing trend, and the internal friction angle reaches the peak near the plastic limit and then gradually decreases. The study on the properties of sliding zone soil will provide scientific basis for the identification and prevention of highway landslides.

Key words: landslide; ring shear test; sliding zone soil; moisture content; normal stress; shear strength; Guizhou Province

0 引言

我国是世界上地质灾害最频繁、受灾最严重的国

家之一, 近年来, 我国地质灾害数量中滑坡灾害占比最大, 高达 60% 以上^[1]。贵州地区属于喀斯特地貌, 降雨

收稿日期: 2022-04-18; 修回日期: 2022-06-06. 编辑: 张哲.

基金项目: 贵州大学引进人才科研项目“采动顺层岩质斜坡变形破坏演化机理及稳定性分析”(贵大人基合字[2019]42 号).

作者简介: 黄淙葆 (1999—), 男, 硕士研究生, 资源与环境专业滑坡治理研究方向, 通信地址 贵州省贵阳市花溪区贵州大学矿业学院, E-mail//hcb181922@163.com

通信作者: 代张音 (1981—), 女, 土家族, 博士, 讲师, 从事矿山灾害预测理论及控制、采动滑坡研究, 通信地址 贵州省贵阳市花溪区贵州大学矿业学院, E-mail//zydai1@gzu.edu.cn

会加剧坡面产流、侵蚀过程及养分流失,高强度降雨使得雨水更容易渗入土壤中,坡面土壤承雨量增大而使得滑带土含水率增大^[2]。水是滑坡发生的最大诱因^[3],贵州地区滑坡黄土因降雨周期长从而其含水率普遍偏高,因此有必要对滑带土的抗剪强度特性进行分析。

目前,在地下水、降雨等外部水条件对滑坡发生影响研究方面,国内外学者通过环剪试验对滑带土力学特性的研究已经取得了一定的进展。孙萍萍等^[4]研究发现不同坡型的黄土斜坡对降雨条件具有明显不同的响应;Shriwanth等^[5]对5种滑坡土开展了排水直接剪切试验和5种滑坡土的未切割以及再成型试样的排水环剪试验研究;Wang等^[6]研究了融雪引起的滑坡灾害,并对该滑坡进行了破坏力学分析。雨水的化学性质会使滑带土的物理性质受到影响,相应的力学性质也会改变^[7-8]。黄土是一种土颗粒间黏结作用力易受外界因素影响的粉质土-粉质黏土,具有大孔隙、遇水湿陷等特点,在降雨或灌溉等水的作用下易发生滑坡^[9]。赵晓铭等^[10]提出通过实时降雨量计算滑坡实时概率的方法,发现降雨入渗增加了边坡的失效概率;任三绍等^[11]、张怡颖等^[12]指出强降雨作用使滑坡稳定性接近临界状态,渠水入渗和冻融作用直接诱发滑坡,强降雨增加了滑带土的含水率,高含水率会使滑带土抗剪强度显著降低。通过上述研究得出,水对滑坡的影响主要是增大土样的含水率,从而改变滑带土强度参数。对此现象,Bao等^[13]采用环剪试验模拟了某断层泥在不同应力状态和含水量下的剪切滑动行为,指出滑动划痕比与含水率、法向应力呈负相关;刘虎虎等^[14]通过研究滑坡地下水环境的变化,发现滑带土的含水率和离子浓度对滑坡的滑带土强度和变形参数具有很大影响;范志强等^[15]开展环剪试验,分析了滑带土剪切力学由法向应力区间而呈现的分区特性;谢强等^[16]通过单级剪切试验,拟合出了同时考虑法向应力和剪切速率的重塑饱和粉质黏土残余强度速率效应的经验公式及通用表达式;陈洁等^[17]对不同含水率的土体进行了不同加载方式下的多级环剪试验;谢辉辉等^[18]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;李姝等^[19]探究了不同饱水时间下重塑黄土的强度特性,进一步研究了地下水对黄土强度的作用;王伟等^[20]利用环剪仪对重塑黄土进行大剪切位移下的剪切试验,指出了不同正应力及剪切

方式对不同含水率的重塑黄土其残余强度的影响。综上所述,国内外关于含水率对滑带土的研究已经取得了诸多成果,但对于含水率偏高条件下滑带土的研究较少。

贵州地区的边坡滑带土塑限含水率较高。本文以贵州省大方县滑坡滑带土为研究对象,开展不同含水率和不同法向应力作用下滑坡滑带土的峰值强度和残余强度特性环剪试验,分析滑带土强度性质和法向变形性质的变化规律。

1 研究区滑坡概况

1.1 滑坡地质

贵州省大部分地区降水充沛,且6—9月间多暴雨和连阴雨天,其中取样地毕节市大方县是多雨区且降雨范围最大。所研究的滑坡位于大方县某公路旁,滑坡取样地点后壁大致呈矩形,主滑方向为自东向西,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。滑坡堆积体占据附近公路约一半位置,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。堆积体处形成一个二级坡面平台,上覆1~1.5 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,滑坡位置及取样地点如图1所示。

1.2 滑带土基本物理性质

采样时,试样主要提取滑带土堆积部分,在滑坡不同部位分别采集,采集面长0.3 m,宽0.2 m,厚0.1 m。经LP-100数显式土壤液塑限联合测定仪、电子天平、比重瓶和MT-1数显恒温电砂浴等实验仪器测得所取滑带土天然密度、液限等物理参数,如表1所示。

2 环剪试验

2.1 试样制备

在试样的制备过程中,首先把采集到的黄土样品放入温度为105℃的烘箱中,进行持续24 h以上的烘干,再将烘干后的土样碾磨过2 mm筛,取筛下后的土样。本次试验采取分层击实法制作土样,具体方法:根据环刀的容积和土样的干密度及含水率称取所需质量

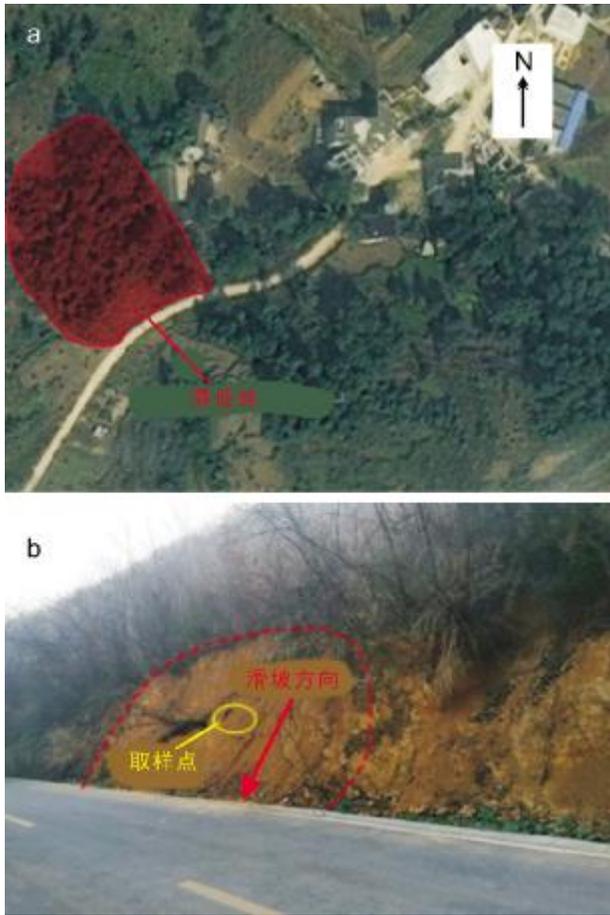


图 1 大方县公路滑坡发生地点

Fig. 1 Highway landslide site in Dafang County

a—滑坡平面位置图 (plan view of landslide location); b—取样地点 (sampling position)

表 1 滑带土基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of sliding zone soil

密度/ g·cm ⁻³	液限/ %	天然含水率/ %	比重 (G _s)	塑限/ %	塑性指数/ %	干密度/ g·cm ⁻³
1.30	52.89	40.05	2.57	38.74	14.15	0.77

的土样,并分别配置成含水率为 36%、40%、44% 的试样;三等分把土样分层装入击实筒中,用击锤依次锤击土样,直至土样充满击实筒,用刮刀修平顶部试样,放入环形剪切盒中去除中间部分得到环形试样。最后采取固结法,将环形土样放入环剪仪中,在 100 kPa 的静载下固结 1 h,制得的环剪试样(如图 2)。环剪试样的内径 60 mm,外径 100 mm,高度 20 mm。

2.2 试验方案

实验仪器采用 HJ-2 型全自动环剪仪,实验装置配套液晶微机控制器,实时伺服控制。法向加载范围



图 2 环剪试样

Fig. 2 Sample of ring shear test

为 0~1200 MPa,加载过程为微机控制自动加载,扭矩为 300 Nm;下剪切盒转速为 2.7810⁻⁶~1 r/min。环剪仪配套采集、控制和处理软件,不仅采集实验过程各种参数,还可以根据实验需要,设置不同的全自动轴向控制及扭转控制,并进行后处理分析。根据库伦定律,土的内摩擦力与剪切面上的法向压力成正比。剪切试验将同一种黄土分别制备成不同含水率的土样,分别在不同的法向压力下,沿固定的剪切面直接施加水平剪力,从而得到剪坏时的抗剪强度等参数值,剪切试验原理如图 3 所示。

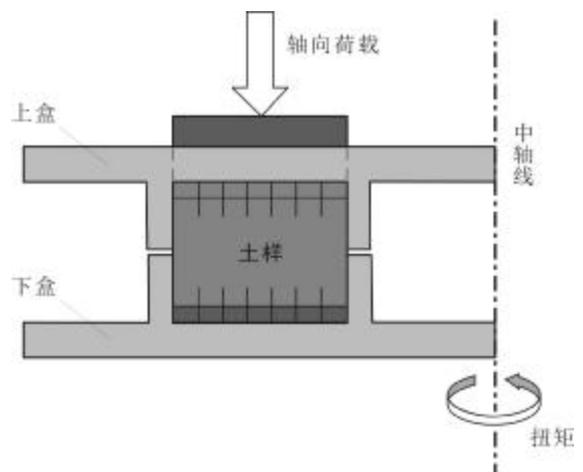


图 3 剪切试验原理

Fig. 3 Principle of shear test

根据自然含水率、饱和含水率、塑限液限等物性参数,开展9组固结不排水试验.具体实验方案如表2所示.

表2 滑带土环剪试验方案

Table 2 Ring shear test scheme of sliding zone soil

含水率 $\omega/\%$	法向应力 σ/kPa	试样编号
36	20, 50, 80	A-1, A-2, A-3
40	20, 50, 80	B-1, B-2, B-3
44	20, 50, 80	C-1, C-2, C-3

试样含水率分别为36%、40%、44%,法向应力选取20、50、80 kPa,选定剪切速率均为0.1 mm/min,本文采取的是单级剪的试验方法.

3 试验结果及分析

3.1 试样剪切面形态特征分析

剪切试验后,试样出现了不同程度的剪切破坏,如图4所示.

从图4a可以看出,剪切面处出现溢出现象,法向应力作用下,试样出现轴向压缩现象,形成剪切缝.试样出现溢出现象和轴向压缩现象与试样孔隙率及含水率有关,这是因为黄土较疏松,孔隙率大,在法向应力作用下,土颗粒重新发生排列且间隙变小;试样含水率较高,在剪应力作用下,试样剪切面处发生明显剪切破坏,剪切面的上下部分土颗粒发生相对位移,相互摩擦下土颗粒发生破碎,由于破碎的细粒与其他土层颗粒间的黏性很小,从而溢出表面.图4b中,试样剪切后,在试样内壁产生孔隙,这与土样的物理成分有关,试样中含有碳酸类等矿物,这些矿物小颗粒硬度较大,在剪切面附近,这些矿物颗粒较周围土粒发生相对位移产生孔隙,在与水分共同作用下,加剧土样剪切渗出,从而降低滑面的抗剪强度.在充分降水后,会加剧液化现象,这是贵州山区公路在强降雨后易发生滑坡灾害的主要原因.

3.2 抗剪强度特性分析

3种不同含水率重塑黄土在不同法向应力下的剪应力与剪切位移的曲线如图5所示.

由图5可见,随着剪切位移的增加,土样的抗剪强度逐渐增加,在达到各自的最大值即峰值强度(σ_{\max})后,剪应力开始降低,最后稳定在残余强度,此时土体

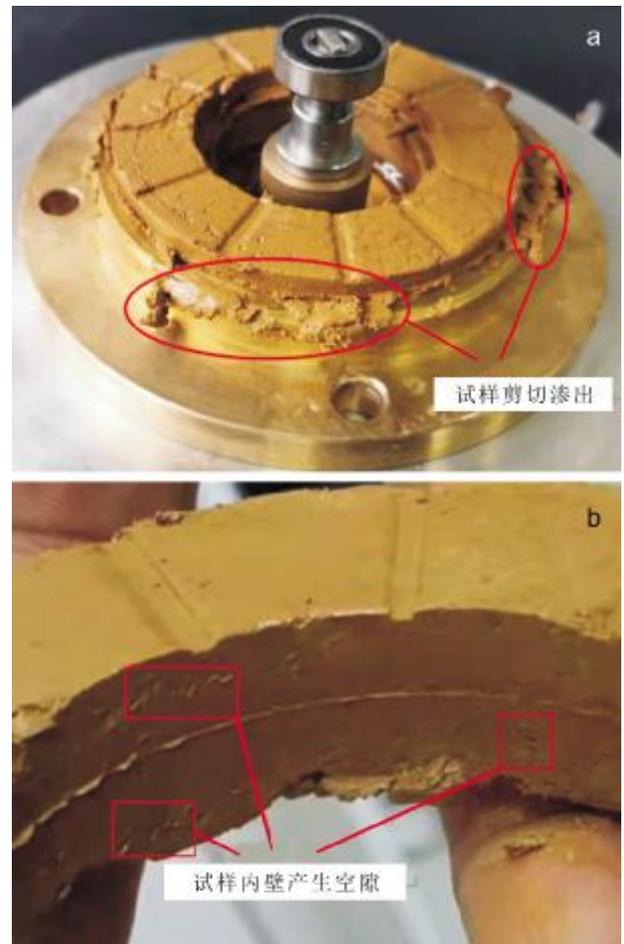


图4 剪切面及其形态

Fig. 4 Shear plane and its morphology

a—试样剪切渗出现象(overflow of shear specimen); b—剪切面孔隙(pores on shear plane)

已经被破坏.从含水率36%试样的试验(图5a)结果中发现,法向压力20 kPa时,试样达到峰值强度(即 $\sigma_{\max}=155.36$ kPa)所需要的剪切位移为1.5 mm;法向压力50 kPa时,试样达到峰值强度($\sigma_{\max}=210.98$ kPa)时的剪切位移为9.34 mm;法向压力80 kPa时,试样达到峰值强度($\sigma_{\max}=232.63$ kPa)时的剪切位移为14.83 mm;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,这说明同一级含水率情况下,抗剪强度大小与法向应力大小存在一定的正相关性.

在含水率40%试验(图5b)中,法向应力50 kPa下相较于法向应力20 kPa下,剪应力达到峰值时的剪切位移增加了19.15 mm;法向应力80 kPa时,其峰值位移相比于法向应力50 kPa时增加了4.82 mm.滑带土受到的法向应力增大的同时,其达到峰值剪应力所需

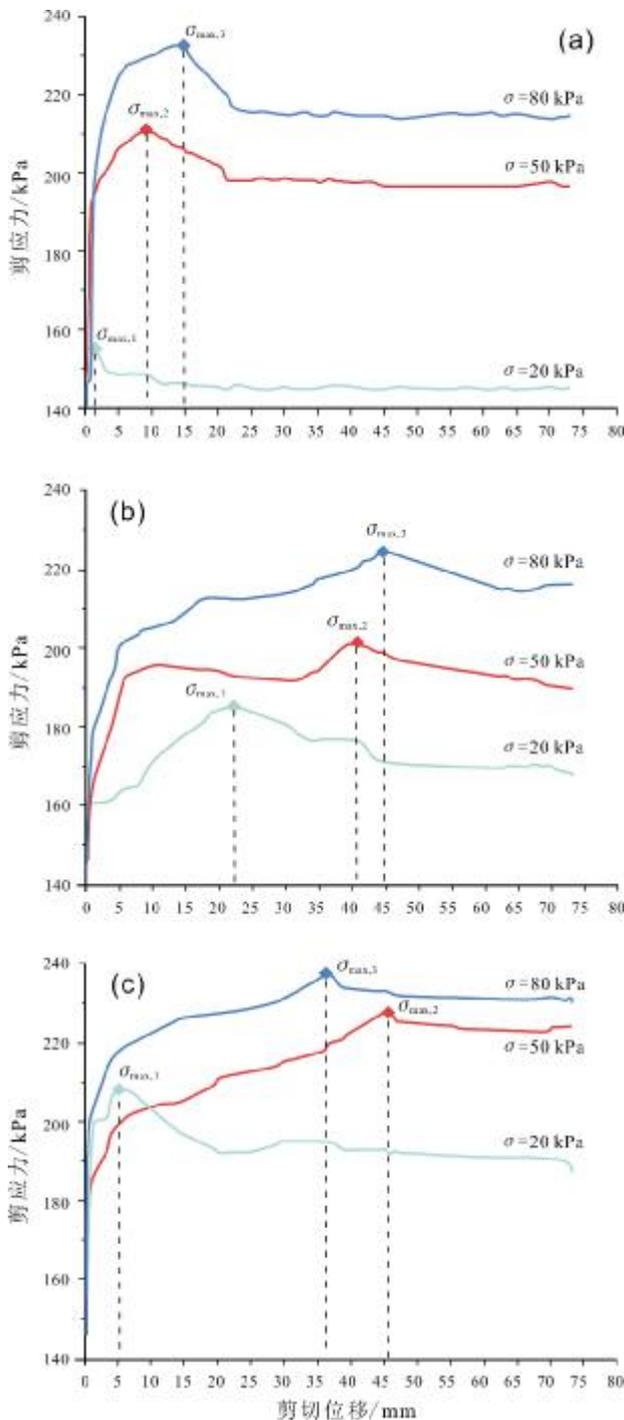


图5 不同含水率下剪应力与剪切位移曲线

Fig. 5 Shear stress and displacement curves under different water content

含水率(water content): a—36%; b—40%; c—44%

的位移也在不断增加,这一规律同样在另外两组含水率试验结果中得到证明.这是因为在法向应力的加载下,试样中的黄土颗粒间的咬合度增加,使得试样的剪切难度更高,需要足够多的位移来克服.

图5c与图5a、b不同的是,试样剪应力在达到峰值后,下降幅度较小,随着剪切位移增加,偶然出现缓慢增加的趋势,直至最后才达到稳定的残余强度值.分析其原因,含水率在大于塑限的情况下,饱和重塑黄土在剪应力达到峰值后,出现应变局部软化现象,强度减弱,但是应力加载始终保持不变,试样不断被剪切,剪切缝也被压缩,黄土颗粒发生定向排列,以至于咬合得更加紧密,从而使得剪应力有所增大,并最终形成残余强度.

3.3 剪切强度内在参数分析

图6所示为不同含水率下剪应力-法向应力关系曲线图.

由图6可知,3组法向应力下的峰值强度值和残余强度值均接近于拟合的直线.图6a(含水率36%)中,强度值与拟合直线值差值在8~16 kPa之间;图6b(含水率40%)中,与拟合直线值差值在1~10 kPa,呈现较好的线性关系;图6c(含水率44%)中,与拟合直线值的差值为6~23 kPa.拟合结果表明,试验滑带土的峰值强度和残余强度与法向应力大致上呈现线性关系,符合Mohr-Coulomb准则,从而说明在同一含水率和剪切速率下,滑带土的内摩擦角与法向应力是无关的,滑带土黏聚力受法向应力的影响很小.

通过对峰值强度值和残余强度值进行数据拟合,得到强度参数值,即峰值强度黏聚力 C_p 、峰值强度内摩擦角 φ_p 、残余强度黏聚力 C_r 、残余强度内摩擦角 φ_r .如表3所示.

由表3可见,随着含水率提升,黏聚力呈现增大趋势,当含水率从36%增加到40%时,峰值强度黏聚力(C_p)和残余强度黏聚力(C_r)分别增加36 kPa和19 kPa,而当含水率从40%增加到44%时, C_p 和 C_r 分别增加将近26 kPa和34 kPa.黏聚力的阶段性增加,说明在含水率超过塑限时,土体的可塑性逐步提高,土粒间的结合水膜增厚,胶结力仍然居高,使得颗粒重新定向排列,颗粒间的咬合度还在增加,但含水率达到大于塑限含水率的某一值时,颗粒的胶结作用逐渐丧失,黏聚力增加幅度减小,然后逐渐降低.

含水率的增加使得滑带土峰值内摩擦角和残余内摩擦角逐渐减小,对比含水率36%和44%的数据, φ_p 与 φ_r 分别减小24.16°和16.98°.与黏聚力相比,含水率对内摩擦角的影响较小.通过分析得出,内摩擦角

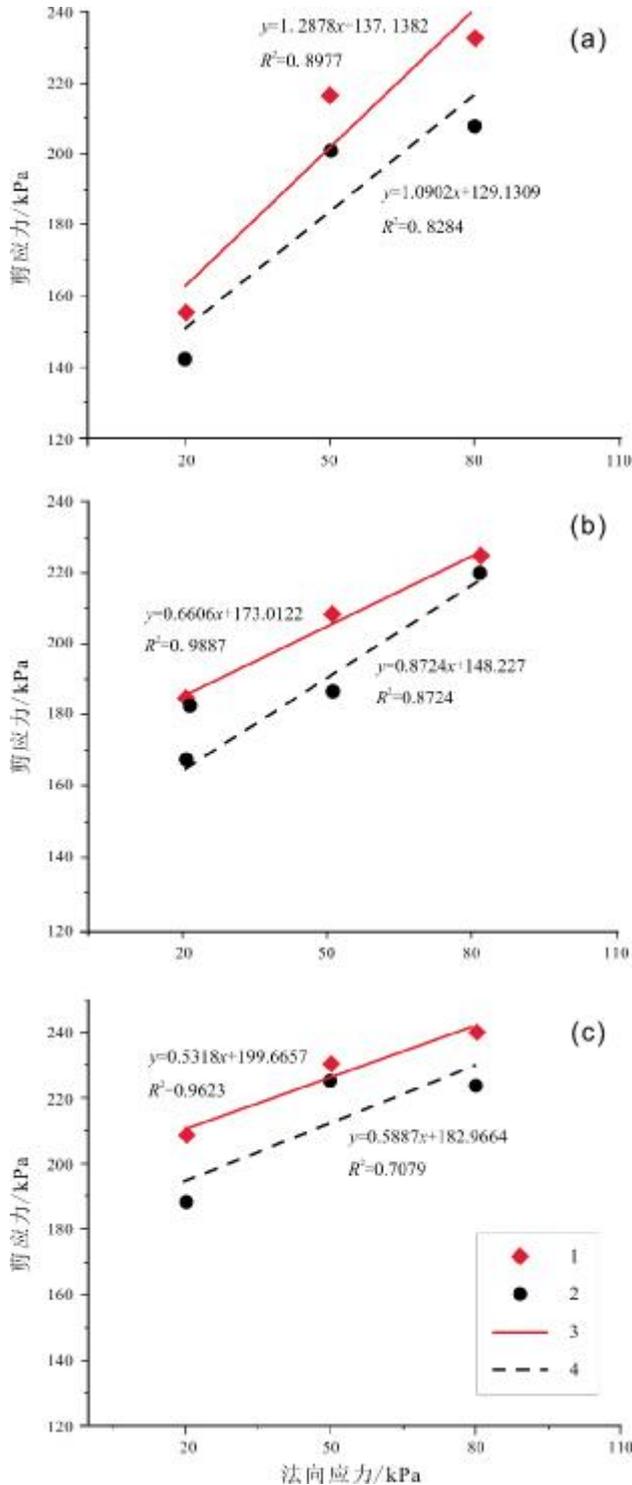


图 6 各含水率下剪应力-法向应力曲线

Fig. 6 Shear stress vs. normal stress curves under different water content

1—峰值强度(peak strength); 2—残余强度(residual strength); 3—峰值强度线性拟合 (linear fitting of peak strength); 4—残余强度线性拟合 (linear fitting of residual strength); 含水率(water content): a—36%; b—40%; c—44%

表 3 不同含水率滑带土的黏聚力与内摩擦角参数值

Table 3 Parameters of cohesion and internal friction angle of sliding zone soil with different water content

含水率/%	C_p /kPa	φ_p /($^\circ$)	C_r /kPa	φ_r /($^\circ$)
36	137.14	52.17	129.13	47.47
40	173.01	33.45	148.23	41.10
44	199.67	28.01	182.97	30.49

表现为颗粒间的摩擦、咬合作用,土体含水率接近塑限时处于可塑状态,土体颗粒间的摩擦强度趋近于峰值,当含水率超过塑限后,含水量的增加使得土粒胶结作用减小,内摩擦角逐渐减小.

4 结论

通过对大方县滑坡土样的环剪试验,分析不同含水率条件下的滑带土在不同法向应力作用下的抗剪强度特性和强度参数,主要得到如下结论:

(1)试样在剪切过程中,土样出现溢出和轴向压缩现象,试样内壁产生孔隙,这是因为法向应力的作用下,土颗粒之间的间隙变小,剪切面处的土颗粒因相对位移而破碎,从而降低滑面的抗剪强度.这是贵州山区公路在强降雨后易发生滑坡灾害的重要原因.

(2)不同含水率滑带土的峰值强度、残余强度随法向应力的增大而增大,呈线性关系,符合 Mohr-Coulomb 准则.同时法向应力越大,试样达到峰值强度时所需的位移也会不断增加.

(3)含水率较高时,试样持续剪切过程中,滑带土在形成稳定的残余强度前,剪应力存在突然增大的趋势.

(4)含水率对滑带土的抗剪强度有着很大影响,随着含水率的增加,峰值强度黏聚力和残余强度黏聚力增大,内摩擦角逐渐减小.但当含水率大于塑限某值时,黏聚力降低,内摩擦角在塑限附近达到峰值.

参考文献(References):

[1]刘伟.我国地质灾害调查统计与分析[J].采矿技术,2021,21(5):100-103.
Liu W. Investigation statistics and analysis of geological hazards in China[J]. Mining Technology, 2021, 21(5): 100-103. (in Chinese)
[2]郑伟,王中美.贵州喀斯特地区降雨强度对土壤侵蚀特征的影响[J].水土保持研究,2016,23(6):333-339.

- Zheng W, Wang Z M. Laboratorial simulation influences of different rainfall intensities on soil erosion in karst area, China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(6): 333-339.
- [3] 杨玲, 张柳金, 吴青波. 降雨型红层滑坡形成机理研究[J]. *地质与资源*, 2021, 30(4): 485-491, 520.
- Yang L, Zhang L J, Wu Q B. Formation mechanism of rainfall-induced redbed landslide[J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(4): 485-491, 520.
- [4] 孙萍萍, 张茂省, 江睿君, 等. 降雨诱发浅层黄土滑坡变形破坏机制[J]. *地质通报*, 2021, 40(10): 1617-1625.
- Sun P P, Zhang M S, Jiang R J, et al. Deformation and failure mechanism of rainfall-induced shallow loess landslide[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(10): 1617-1625.
- [5] Vithana S B, Nakamura S, Gibo S, et al. Correlation of large displacement drained shear strength of landslide soils measured by direct shear and ring shear devices [J]. *Landslides*, 2012, 9(3): 305-314.
- [6] Wang C X, Yamasaki H, Watanabe N, et al. Analysis of failure mechanics of the 2012 Kokugawa landslide caused by snowmelt, Niigata Prefecture[J]. *Journal of the Japan Landslide Society*, 2016, 53(2): 50-57.
- [7] 汤文, 姚志宾, 李邵军, 等. 水化学作用对滑坡滑带土的物理力学特性影响试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(10): 2885-2892.
- Tang W, Yao Z B, Li S J, et al. Effect of pore water chemistry on physical and mechanical properties of sliding-zone soil: An experimental study[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(10): 2885-2892.
- [8] 赵利云, 张茂省, 孙萍萍, 等. 基于原位监测的浅层黄土斜坡水分运移规律分析[J]. *地质与资源*, 2021, 30(4): 492-498.
- Zhao L Y, Zhang M S, Sun P P, et al. Analysis of water movement law in shallow loess slope based on in-situ monitoring[J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(4): 492-498.
- [9] 赵志强. 含水量对黄土强度特性影响的研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2016.
- Zhao Z Q. Influence of moisture content on shear strength of loess[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2016.
- [10] 赵晓铭, 李锦辉. 降雨诱发滑坡的实时概率分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2012, 8(S2): 1690-1694.
- Zhao X M, Li J H. Real-time probability analysis of rainfall-induced landslide[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2012, 8(S2): 1690-1694.
- [11] 任三绍, 郭长宝, 张永双, 等. 川西巴塘茶树山滑坡发育特征及形成机理[J]. *现代地质*, 2017, 31(5): 978-989.
- Ren S S, Guo C B, Zhang Y S, et al. Development characteristics and formation mechanism of Chashushan landslide in Batang, western Sichuan[J]. *Geoscience*, 2017, 31(5): 978-989.
- [12] 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.
- Zhang Y Y, Guo C B, Yang Z H, et al. Study on shear strength of deep-seated sliding zone soil of Zhouchangping landslide in Maoxian, Sichuan[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(3): 764-776.
- [13] Bao H, Qi Q, Lan H X, et al. Sliding mechanical properties of fault gouge studied from ring shear test-based microscopic morphology characterization[J]. *Engineering Geology*, 2020, 279: 105879.
- [14] 刘虎虎, 缪海波, 陈志伟, 等. 含水率和离子浓度对滑带土抗剪强度的影响[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(1): 228-234.
- Liu H H, Miao H B, Chen Z W, et al. Effect of water content and ion concentration on shear strength of sliding zone soil[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(1): 228-234.
- [15] 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 Z Q, Tang H M, Tan Q W, 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.
- [16] 谢强, 张国栋, 胡学文, 等. 饱和粉质黏土残余强度剪切速率效应试验研究[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(1): 52-55.
- Xie Q, Zhang G D, Hu X W, et al. Experimental researches on residual strength of saturated silty clay at different shear rates [J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2019, 41(1): 52-55.
- [17] 陈洁, 雷学文, 孟庆山, 等. 重塑红棕色玄武岩残积土的残余强度试验研究[J]. *人民长江*, 2016, 47(7): 86-90.
- Chen J, Lei X W, Meng Q S, et al. Study of residual strength test on remodeling reddish brown basalt residual soil[J]. *Yangtze River*, 2016, 47(7): 86-90.
- [18] 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.
- Xie H H, Liu Q B, Hu G Y. Research on shear strength characteristics of slide soil based on ring-shear test [J]. *Yangtze River*, 2018, 49(11): 108-113.
- [19] 李姝, 张立展, 许强, 等. 基于环剪试验的黄土完全软化强度研究[J]. *人民长江*, 2015, 46(21): 84-87.
- Li S, Zhang L Z, Xu Q, et al. Research on fully softened strength of loess based on ring shear tests [J]. *Yangtze River*, 2015, 46(21): 84-87.
- [20] 王炜, 骆亚生. 重塑黄土抗剪强度的环剪试验研究[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(5): 110-113, 122.
- Wang W, Luo Y S. Experimental study on shear strength of remolded loess by ring shear test [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(5): 110-113, 122.