

中国科技核心期刊 《中国科学引用文数据库》来源期刊 Caj-cd规范获奖期刊

THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL

全风化花岗岩残积土长距离剪切特性试验研究

毛无卫,潘 龙,冯晨锐,牟 旭,崔寅兵,郭 桢,黄 雨

Experimental study on long-distance shear characteristics of fully weathered granite residual soil MAO Wuwei, PAN Long, FENG Chenrui, MOU Xu, CUI Yinbing, GUO Zhen, and HUANG Yu

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202412048

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于模拟试验的强降雨条件下花岗岩残积土斜坡滑塌破坏机理分析

Experimental study on slope collapse characteristics of granite residual soil slope under heavy rainfall 胡华, 吴轩, 张越 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 92–97

甘肃舟曲江顶崖滑坡堆积层剪切特性与强度参数分析

Analysis of shear characteristics and strength parameters in Jiangdingya landslide, Zhouqu County 张卫雄,杨校辉,丁保艳,朱文杰,任永忠 中国地质灾害与防治学报. 2025, 36(1): 65–72

考虑抗剪强度衰减特性的膨胀土边坡稳定性分析

Stability analysis of expansive soil slopes considering shear strength decay characteristics 李晋鹏, 汪磊, 王俊, 陈洋, 徐永福 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(6): 29–36

秦巴山区典型碎石土抗剪强度变化规律及其在堆积层滑坡机理分析中的应用

Changing law of shear strength of typical gravel soil in Qinba Mountain area and its application in the analysis of landslide mechanism in accumulation layers

张昊天, 王新刚, 罗力, 王友林, 郭倩怡, 薛晨 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(5): 50-58

加锚贯通节理岩体宏细观剪切破坏特性

Macroscopic and microscopic shear failure characteristics of anchored penetrating jointed rock mass 宋洋, 赵玉兵 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 95-101

石灰改良高液限土强度特性的函数模型研究

Research on function model of lime-improved high liquid limit soil strength characteristics 胡宏坤, 邵珠山 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 109-117



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202412048

毛无卫, 潘龙, 冯晨锐, 等. 全风化花岗岩残积土长距离剪切特性试验研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(2): 96-106. MAO Wuwei, PAN Long, FENG Chenrui, et al. Experimental study on long-distance shear characteristics of fully weathered granite residual soil[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(2): 96-106.

全风化花岗岩残积土长距离剪切特性试验研究

毛无卫,潘 龙,冯晨锐,牟 旭,崔寅兵,郭 桢,黄 雨 (同济大学土木工程学院,上海 200092)

摘要:近年来,随着全球气候变化和人类工程活动的加剧,我国东南地区因降雨引发的群发性滑坡事件频发,严重威胁着人民的生命和财产安全。全风化花岗岩残积土作为这类滑坡灾害的主要地质载体,深入研究其力学特性对于揭示 群发性滑坡的孕育演化机制具有重要意义。文章选取全风化花岗岩残积土为研究对象,综合考虑正应力(20 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa)、含水率(0,5%,10%,20%和30%)和剪切速率(10°/min,20°/min,40°/min,和80°/min)的影响,开展了一系列 环剪试验,旨在探究全风化花岗岩残积土在滑坡启动阶段及长距离运动阶段的力学行为,尤其是长距离剪切特性。试验 结果表明:土体的抗剪强度与含水率有着密切关系,随着含水率的增加,抗剪强度先降低后升高再降低,当含水率达到 30%时,土体会出现明显的应变硬化现象。此外,土体的抗剪强度还与正应力、剪切速率和相对密实度密切相关。具体 表现为,正应力越大,土体的峰值抗剪强度和残余抗剪强度越高,且对峰值抗剪强度的影响更为显著,同时应变软化现象 也更加明显;剪切速率越大,土体的峰值抗剪强度和残余抗剪强度总体呈下降趋势,对峰值抗剪强度的影响大于对残余

关键词:花岗岩残积土;环剪试验;含水率;正应力;剪切速率;抗剪强度

中图分类号: P694 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2025)02-0096-11

Experimental study on long-distance shear characteristics of fully weathered granite residual soil

MAO Wuwei, PAN Long, FENG Chenrui, MOU Xu, CUI Yinbing, GUO Zhen, HUANG Yu (College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In recent years, with the intensification of global climate change and human engineering activities, mass landslide events triggered by rainfall have become frequent in southeast China, posing serious threats to the lives and property safety of the people. Fully weathered granite residual soil, as the main geological carrier of such landslide disasters, has significant importance for revealing the mechanisms of the formation and evolution of landslide clusters through in-depth study of its mechanical properties. This paper selects fully weathered granite residual soil as the research subject and considers the effects of normal stress (20 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa), water content (0, 5%, 10%, 20%, and 30%), and shear rate (10°/min, 20°/min, 40°/min, and 80°/min) to conduct a series of ring shear tests. The aim is to explore the mechanical behavior of fully weathered granite residual soil during the landslide initiation and long-distance movement phases, especially its long-distance shear characteristics. Experimental results show that the shear strength of the soil is closely related to its water content; as the

投稿网址: https://www.zgdzzhyfzxb.com/

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3012603)

收稿日期: 2025-01-01; 修订日期: 2025-03-02

第一作者:毛无卫(1986—),男,副教授,博士,博士生导师,主要从事地质灾害机理与防治相关的科研和教学工作。 E-mail: maowuwei@tongji.edu.cn

water content increases, the shear strength initially decreases, then increases, and decreases again. At a water content of 30%, the soil exhibits significant strain hardening. In addition, the shear strength of the soil is closely related to normal stress, shear rate, and relative density. Specifically, the higher the normal stress, the higher the peak and residual shear strengths of the soil, with a more significant effect on peak shear strength and more pronounced strain softening; the higher the shear rate, the overall downward trend in peak and residual shear strengths, with a greater effect on peak shear strength than on the residual shear strength, and lower the apparent viscosity. The findings of this study provide important theoretical support for the prevention and control of mass landslide disasters within this region.

Keywords: granite residual soil; ring shear test; water content; normal stress; shear rate; shear strength

0 引言

全风化花岗岩残积土广泛分布于我国东南沿海地 区^[1-3],具有孔隙比大,浸水软化,易崩解,物理力学性 质差等特性^[4-7]。我国东南沿海地区地形以山地丘陵为 主^[8],雨量丰沛,气象灾害频繁。全风化花岗岩残积土 广泛覆盖在区域内斜坡表面,厚度通常在6m以内^[9], 是区域内滑坡的主要地质载体^[10-14],在极端降雨条件 下,极易在区域内引发群发性滑坡,严重威胁人民生命 财产安全。并且随着经济建设的发展,切坡建房、修路 等人类工程活动对自然坡体的扰动日益加剧,坡体失稳 破坏现象更加频发。这类滑坡在失稳启动后,往往呈现 出滑动—流动的动力演化过程^[11],使其致灾效应进一步 增大。

国内外学者针对全风化花岗岩残积土的物理力学 特性,从不同方面开展了许多研究。例如,Lu等^[7]采用 直剪试验、X射线衍射试验和扫描电镜试验,研究了花 岗岩残积土的力学性能和响应机理,并分析了其结构特 征以及结构破坏机理;赵建军等[13]、尚彦军等[14]利用直 剪试验和三轴试验,发现了全风化花岗岩剪胀现象与孔 隙比和密实度相关;龙志东等[15]、许旭堂等[16]通过直剪 试验,测试了不同初始干密度、含水率、垂直压力以及 颗粒成分对抗剪强度指标的影响;郑武略等[17]开展三轴 加卸荷试验,探讨了不同应力路径与不同卸荷水平下花 岗岩残积土的力学特性;马勤国等[18]对不同含水率的原 状和重塑花岗岩残积土展开三轴试验,研究其剪切变形 特性;陈晓平等[19]应用反复剪切试验方法,研究高液限 花岗岩残积土的剪切性状,发现其有应变硬化规律; Hu 等^[20]利用三轴试验研究了粉煤灰对花岗岩残积土的 强度指数和渗透率的影响。

以上的研究中,大都基于直剪、三轴、反复剪切等 试验来探究花岗岩残积土在小变形或有限变形阶段的 力学性质,但针对滑坡长距离运动过程中的土体力学状态,上述相关试验方法并不能很好地反映土体的相关力 学特性。因此,为了能够更好地模拟土体的长距离剪切 破坏过程,深入探讨全风化花岗岩残积土的长距离剪切 力学特性,采用环剪试验方法进行相关力学参数测试更 为适宜^[21-24]。例如,Wang等^[25]利用环剪试验对滑坡前 后土体进行测试,结果表明含水率的增加会降低黏土的 抗剪强度;Bhat等^[26]采用环剪装置对不同塑性黏土进行 试验,得出了典型黏土的残余摩擦系数与剪切速率之间 的关系;Wang等^[27]通过改变正应力、含水率和剪切速 率,对4种典型黏土进行环剪试验,发现含水率对残余 强度的影响略大于剪切速率;Zhu等^[28]通过环剪试验, 研究了不同含水率的黄土滑带土在不同正应力和剪切 速率条件下的剪切行为,结果发现滑坡的高速长距离运 动机制与含水率和剪切速率的相互作用有关;Yuan等^[29] 利用环剪试验研究了改良黄土在不同固结状态下的剪

综上,目前针对全风化花岗岩残积土的力学行为有 一些前期研究,但针对其长距离剪切特性的研究较少。 因此,本文以全风化花岗岩残积土为研究对象,通过一 系列环剪试验探讨其长距离剪切过程的力学行为,并分 析不同含水率、不同密实度、不同剪切速率以及不同正 应力条件的影响规律,以期进一步认识其复杂力学行 为,为此类土体上孕育的滑坡灾害防灾减灾提供必要的 理论支撑。

1 试验概况

1.1 试验材料及仪器

试验土样取自浙江省丽水市松阳县象溪镇下麻厂 黄金福房后滑坡(图1),边坡案例现场坡高约18m,坡 向194.2°,坡度约32°。该滑坡岩体主要为花岗岩,受气 候影响,滑坡表层土体严重风化,根据《岩土工程勘察规 范》(GB 50021—2001)中岩体风化程度的划分^[30],将岩 体分为未风化、微风化、中等风化、强风化、全风化、残 积土6个风化等级,其野外鉴定的定性方法包括岩石矿 物颜色、结构、破碎程度和坚硬程度等^[31]。在本研究 中,取样土体主要成分为粗粒石英、强风化长石和高岭 土,呈砖红色,强度低,扰动后易溃散,为花岗岩残积土。



图 1 浙江省丽水市松阳县象溪镇下麻厂黄金福房后滑坡 Fig. 1 Landslide behind Huangjinfu house, Xiama factor, Xiangxi Town, Songyang County, Lishui City, Zhejiang Province 注: a 为滑坡全貌; b 为取样点。

1.2 试验设备

试验基于同济大学 SRS-150 Bromhead 型环剪仪开展,其剪切盒部分示意图如图 2 所示,包括上剪切盖和下剪切盒。仪器通过对上剪切盖施加荷载实现对剪切槽内试样的固结,并在剪切轴的作用下开始运行剪切。 环剪仪的主要参数如表 1 所示。为了更好地研究剪切带的颗粒材料在剪切变形过程中的力学性质,本文设计了一种新型上剪切盖,如图 2c 所示。本研究在上剪切盖的下表面均匀布置有 10 个延伸出来的铁片。这 10 个铁片从上盖下表面延伸出的长度均为 10 mm,厚度均为 1.5 mm,宽度均为 24.5 mm。如此,在试样剪切过程中剪切齿底部会形成一个随剪切位移不断发展的剪切带,以 模拟实际滑坡运动过程中剪切带土体内部的剪切过程。



图 2 SRS-150 型环剪装置 Fig. 2 SRS-150 ring shear apparatus 注: a 为环剪仪; b 为试样槽; c 为上盖及剪切刀片。

1.3 试样制备

制备土样时,首先将现场取回的土样粉碎,将土样 置入 105 ℃ 的恒温烘箱中进行干燥,12 h 后取出冷却

	instrument at Tongji University
Table 1	Main parameters of the SRS-150 ring shear
表 1	同济大学 SRS-150 型环剪仪主要参数

主要参数	大小
剪切盒内径/mm	100
剪切盒外径/mm	150
最大装填试样高度/mm	31
有效试样面积/cm ²	98
剪切速率/(°·min ⁻¹)	0.001 ~ 360
最大轴向压力/kN	10
峰值扭矩/(N·m)	250
轴向位移/mm	0 ~ 50

至室温,干燥过程完成,烘干后过2mm筛去除大颗粒, 并测得烘干后土样级配曲线如图3所示。按照《土工试 验方法标准》(GB/T 50123—2019)中制备试样要求,并 选取代表性试样进行多组土粒比重试验、密度试验和 相对密度试验,得出全风化花岗岩残积土体的物理性质 指标,试验结果见表2。同时对烘干冷却后的试样根据 不同含水率均匀喷洒不同量的水,搅拌至均匀,并用保 鲜膜包裹静止一段时间,确保水分充分混合均匀,具体 试样制备流程见图4。



图 3 全风化花岗残积土试样级配曲线

Fig. 3 Gradation curve of fully weathered granite residual soil sample

表 2 全风化花岗残积土物理特性 Table 2 Physical properties of the tested soil

参数	密度/(g·cm ⁻³)	天然含水率/%	比重	最大孔隙比	最小孔隙比
取值	1.066 ~ 1.698	10.451	2.644	1.477 6	0.555 2

1.4 试验方案

含水率会显著影响着土壤的力学性质^[28]。本次 现场取样的土样自然含水率为10.45%。在本次试验 中,含水率分别为0%(干燥)、5%、10%、20%和30%。 根据文献资料,全风化花岗岩残积层厚度大概在1~ 6 m^[32-33],因此,本研究选择20,50,100,150 kPa的正应



注: a 为比重试验; b 为试验土体; c 为烘干; d 为配制不同 含水率试样; e 为试样装入环剪槽。

力,进行剪切速率为10°/min的环剪试验。剪切速率对 滑动带土抗剪强度的影响也较为显著^[34-36]。因此本研 究也考虑了不同剪切速率(10°/min, 20°/min, 40°/min 和 80°/min)对土体长距离剪切行为的影响。文章通过在 环剪槽内添加不同质量(300, 350, 400 g)的土体试样, 并保证环剪槽内土体试样高度一致,来探究不同相对密 实度(14.68%、44.53%和71.83%)对土体抗剪强度的影 响。实验工况对应的相对密实度见表 3。

Tabla 2	ACJ . Ding	小穷瓜	·ション 上のL	andition
Table 5	King	siicai	testing	condition

试验	正应力	剪切速率	剪切位移	含水率	相对密实度
编号	/kPa	$/(\circ \cdot min^{-1})$	/mm	/%	/%
R1	20	10	130.8	0	71.83
R2	50	10	130.8	0	71.83
R3	100	10	130.8	0	71.83
R4	150	10	130.8	0	71.83
R5	20	10	130.8	5	71.83
R6	20	10	130.8	10	71.83
R7	20	10	130.8	20	71.83
R8	20	10	130.8	30	71.83
R9	50	10	130.8	5	71.83
R10	50	10	130.8	10	71.83
R11	50	10	130.8	20	71.83
R12	50	10	130.8	30	71.83
R13	50	20	130.8	0	71.83
R14	50	40	130.8	0	71.83
R15	50	80	130.8	0	71.83
R16	50	10	130.8	0	14.68
R17	50	10	130.8	0	44.53

本文采用称重-装样-分层压实的方法进行制样。 称重时,用精度为0.01g的电子天平预先称量好指定 质量的烘干后的全风化花岗岩试样。然后将称量好的 土颗粒倒入并放置在密闭容器中,并充分摇晃使其混合 均匀^[37]。

待土样称量准备好之后,将样品装入环剪仪的下剪 切盒并分层压实。分层压实时,采用分四层压实的方 法,即每装填100g试样,就对该层进行压实。将制备 好的试样按每100g缓慢均匀倒入下剪切盒中,然后用 剪切上盖从同一高度落下,对该层进行击实,并重复击 实操作20次;如此往复,直至最后一层试样装填压实 完毕。制备好的试样高度大概控制在28mm左右。 Sadrekarimi和Olson(2010)在环剪试验中研究发现,土 体剪切破坏后,剪切位移仅在宽度为平均粒径(D₅₀)的 10~14倍的剪切带内发展^[38]。由于本文中设计的上剪 切盖,其下表面所延伸出的铁片长度为10mm,所以剪 切带从试样1/3高度位置处逐渐向下发展,所以剪切带 的宽度满足平均粒径(D₅₀)的10~14倍的范围,避免了 上下界面尺寸效应对试验结果的影响。最后将制备 好完成后的试样用螺丝安装固定在试验台上,如图5 所示。



图 5 制备完成后的试样 Fig. 5 Specimen after preparation

2 试验结果

2.1 含水率对抗剪强度的影响

环剪试验在正应力为 20 kPa 和 50 kPa 时不同含水 率的应力-剪切位移变化如图 6 所示,可以看出花岗岩 残积土的应力曲线显著受到正应力和含水率变化的影 响。图 7—8 进一步展示了两种正应力下抗剪强度与含 水率的关系。结果表明,当含水率处于 0~5%,峰值抗 剪强度和残余抗剪强度随含水率的增加而降低(图 7— 8),这与 Wang 等^[27]研究结果一致;当含水率处于 5%~ 10% 时,试样的峰值抗剪强度和残余抗剪强度随含水率 的增加而上升;当含水率处于 10%~30% 时,土样的抗 剪强度再次随含水率增加而降低,且降低幅度较大。同 时,试样的应力-位移曲线在含水率处于 10%~20% 时, 出现较大的波动,含水率在 30% 时残余剪应力呈现上 升趋势,这与低含水率情况有较大区别,总体上随含水 率升高试样的抗剪强度出现大幅降低。(需要指出的

是,本研究中,不同试验工况的剪切距离是设计为相同 的,导致含水率 30% 时残余强度未得到理论残余强度 值,残余剪应力仍处于上升趋势,图7-8中已经做出标 记)。从土颗粒间的力学性质上看,在剪切过程中细颗 粒之间的结合会产生黏聚力,并且黏聚力大小主要取决 于土颗粒之间的微观黏聚力、分子之间的范德华力、水 膜连结和胶结作用。在低含水率(0~5%)下,试样固 气比大于其固液比,这会导致剪切过程中试样裂缝扩 大^[39]。同时,由于土样较干燥,导致土体应力分布不均 匀,发生不均匀收缩,进一步扩大了先前存在的裂缝^[40]。 因此,在低含水率下,其黏聚力很低,导致剪应力大幅降 低。随着含水率开始增加(10%~20%),土壤孔隙之间 的毛细管作用增强,导致黏聚力增加^[41]。滑带土壤的黏 土矿物在胶结作用下一定程度上增强了土体的强度。 导致在含水率的增加过程中,土壤的剪应力呈现上升 趋势。然而,随着含水率的不断提高(30%),胶结矿物 对土颗粒的黏结作用减弱,土粒-水膜-土粒之间的黏结 水膜厚度增加。土颗粒之间的黏结水膜最终由持续变 得间歇性,从而大幅降低了黏聚力,导致抗剪强度大幅 下降[42]。



Fig. 6 Shear stress-shear displacement curves (normal stress: 20 kPa and 50 kPa)

2.2 正应力对抗剪强度的影响

试验中我们进行了干燥(含水率 0%)条件下, 土样 在不同正应力和相对密实度情况下的环剪试验。结果 表明, 土体的剪切强度与正应力呈较好的相关性。如 图 9 所示可以看到, 正应力越大, 土体的剪应力也越大, 滑带土的抗剪强度受正应力的影响也更显著^[43]。在干 燥且剪切速率不变的情况下, 如图 10 所示, 试验结果表 明, 峰值抗剪强度和残余抗剪强度会随着正应力的增加 而增加。



Fig. 7 Relationship between shear strength and water content (normal

stress: 20 kPa)



图 8 抗剪强度与含水率的关系(正应力 50 kPa)

Fig. 8 Relationship between shear strength and water content (normal stress: 50 kPa)



在本试验中,试样明显表现出应变软化,残余抗剪 强度与峰值抗剪强度的差值与正应力呈正相关。如图 10 所示,在 20~150 kPa 的正应力范围内,差异分别为 6.34,



图 10 抗剪强度与正应力的关系

Fig. 10 Relationship between shear strength and normal stress

15.65, 18.09, 20.87 kPa。这表明试样的上覆压力是影响 土壤峰值抗剪强度的重要因素,上覆压力较大的试样具 有更大的密实度和更大的剪缩量。这一现象在图 12、 13 不同密实度下土体的应力--剪切位移曲线和抗剪强 度曲线中也得到很好的验证。结果显示,当土样相对密 度增大时土体的峰值抗剪强度与残余抗剪强度也随之 增大,其峰值抗剪强度与残余抗剪强度的差值分别为 7.13, 7.36, 15.65 kPa,并且如图 14 所示,土体的剪缩量 也随之减少,在正应力和相对密实度增加的情况下,土 颗粒的黏结、摩擦和互锁都得到了加强。因此,土体试 样的峰值抗剪强度更大。



2.3 剪切速率对抗剪强度的影响

为了探究剪切速率对花岗岩残积土力学性质的影响,试验中我们进行了干燥(含水率0%)条件下,土样在 不同剪切速率下的环剪试验。在试验中我们将剪切速 率设定为10,20,40,80°/min。从图15—16可以看出, 在其他条件不变时,随着剪切速率的增加,无论是土体



图 12 剪应力-剪切位移曲线(不同相对密实度)

Fig. 12 Shear stress-shear displacement curves (different relative densities)



图 13 抗剪强度与相对密实度的关系

Fig. 13 Relationship between shear strength and relative densities





的峰值抗剪强度还是残余抗剪强度,总体均呈现下降趋势,且对峰值抗剪强度的影响要大于残余抗剪强度。这是由于当剪切速度较慢时,颗粒有充足的时间进行自主排列,能使颗粒之间的摩擦效应发挥作用,而在高剪切速率的影响下,颗粒之间更容易发生定向排列,抵抗剪切的能力减弱,更容易发生剪切破坏。图 17 整体上看











图 16 抗剪强度与剪切速度的关系





Fig. 17 Axial displacement-shear displacement curve (different shear rates)

试样剪缩趋势无明显规律,但通过分析剪胀最高点 到剪缩最低点处的相对位移,结果表明除剪切速度 80°/min时,试样的相对剪缩效果随剪切速度升高而增 大。同时试验还发现,剪切速率对土体的表观黏度也有 显著影响,如图 18 所示,剪切速率与表观黏度呈现明显 的负相关性,且剪切速度为10°/min时要明显高于其他 剪切速度时试样的表观黏度。



3 讨论

中国东南沿海地区广泛分布花岗岩地层,由于区域 气候特点,时常出现短时强降雨、极端暴雨,引起土体 含水率短时突变,导致花岗岩地区频繁发生群发性滑坡 灾害。滑坡的变形破坏与花岗岩残积土的非饱和-饱和 过程联系紧密。含水率(w)是影响残余抗剪强度的重 要因素^[28, 39, 43]。Wang 等^[27]研究了不同正应力和剪切速 率下,含水率在(6%、9%、12%)时的滑带土的残余抗剪 强度变化。研究认为,残余抗剪强度随着含水率的增加 而略有下降,无论正应力和剪切速率如何变化,含水率 的增加都会有效地降低残余应力。黄淙葆等[44]基于贵 州某公路边坡土体材料的试验结果发现,当含水量较高 时,残余强度可能展示出较为复杂的变化特征,如先增 加,如减小等,难以达到相对平稳值。因此,含水量对土 体残余强度的影响值得进一步关注。试验结果表明,花 岗岩残积土的抗剪强度随含水率的增加呈现先下降(含 水率 0~5%),后上升(含水率 5%~10%)在大幅下降 (含水率10%~30%)的趋势。随着花岗岩残积土含水 率接近饱和,当含水率为30%时,土体在剪切的作用 下,土的应力-剪切位移曲线表现为应变硬化特征,且正 应力为 50 kPa 时试样的应变硬化程度要明显高于正应 力为 20 kPa 时,这可能与较高的正应力所引起孔隙水 压的变化有关。高含水率下土体出现应变硬化现象是 多种机制共同作用的结果,包括孔隙水压力的变化[45]、 颗粒间摩擦力的增加[46]、土体结构的重新排列以及局 部排水效应[44,47]等。在本试验中,一方面,含水率变化

影响了土体内部结构,改变了土体内部的水膜联结作用 和水膜润滑作用,高含水率时,土粒间的结合水膜增厚, 胶结力仍然居高不下,使得颗粒重新定向排列,颗粒间 的咬合度进一步增强,促使应变硬化现象发生。此外, 当含水率过高时,土壤中会出现自由水,在不断剪切的 作用下使得孔隙水压力不能及时消散,导致孔隙水向剪 切面迁移。由图 19 也可以看出,剪切面上的含水率明 显高于其他位置土体的含水率。一方面,这使得附着在 土颗粒上的水膜可以随土颗粒移动,起到润滑作用;另 一方面,土颗粒又在不断聚集,从而使土体密实度不断 增加,残余抗剪强度不断上升,出现应变硬化。



图 19 土样剪切后剪切带情况 Fig. 19 Shear band conditions of the soil sample after shearing

综合不同含水率条件下剪应力变化趋势可以看出, 试样的剪应力变化综合受到正应力与含水率的影响,在 不同条件下他们的影响效果各占优势。然而,这不仅仅 是含水率和正应力的贡献;对于正常的再固结土体,不 同正应力下,不同的含水率意味着不同的密实度。此 外,在剪切速率和正应力条件不变时,试验结果也表明 当含水率大于天然含水率时,土体的峰值强度和残余强 度均随含水率的升高而下降,证明了含水率的升高会降 低土体的力学性质,而这一现象恰恰发生在降雨后。这 也解释了为什么降雨是导致浅层滑坡滑移的关键因素。

研究还发现,相比于黄土和其他土体,本研究采用 的花岗岩残积土在不同含水率下土体的力学性质有较 大差异,出现的应变软化和应变硬化对应的含水率区间 也有较大差别。如对分散性土进行环剪试验时发现当 含水率为5%~14%、正应力为50kPa时出现应变软化 特征,此后含水率从17%增长至24%,试样均表现出应 变硬化的特性^[46];在黄土的环剪试验中,含水率8%~ 24%、正应力100~300kPa,除含水量为16%的土样在 300kPa应力作用下表现为应变软化外,土的应力-应变 曲线均表现为应变硬化特征^[28]。由此可以看出通过分 析花岗岩残积土特有的土体强度衰减规律和临界含 水率阈值,在滑坡排水防治中实现对含水率的精准控制 有着重要的现实意义。工程实践中,在我国东南沿海地 区应加强对人类活动区,特别是山体高切坡地段的排水 设施建设。在强降雨季节,应加强排水,以降低滑带岩 土体的含水率;在持续性降雨季节,需定期监测坡体岩 土体水量变,通过科学的工程设计和动态监测,有效降 低坡体含水率,提高稳定性,最大限度地减少滑坡灾害 风险。

剪切带上覆土层厚度的变化也会显著影响坡体滑 动过程中剪切带土力学性质的变化。上覆土层较厚会 使土体颗粒之间变得更加紧凑,导致滑动过程中颗粒间 相互作用更加强烈,颗粒之间相互挤压,碰撞,导致摩擦 力也随之增加。这一点在图 11 中可以得到很好的印 证,从图中可以看出,土体上覆荷载越大,其剪胀就越 小,剪缩也越大。剪切过程中的力更多地来自大颗粒之 间的摩擦力。也说明上覆土层越厚,滑坡的抗剪强度越 大,越不易发生滑动^[48]。随着土体试样的剪切破坏,在 上覆压力的作用下导致固结的颗粒发生滚动和重排,改 变了土体的强度,颗粒之间的黏结减弱,导致颗粒被压 实和挤压,强度降低^[7]。此时土样的抗剪强度主要由土 颗粒之间的摩擦主导^[49]。另一方面,在正应力较大的条 件下,土体颗粒也会发生颗粒破碎现象,导致细颗粒含 量增高[50-51]。在颗粒破碎和重排作用下在剪切带形成 由细颗粒组成的边界层,产生润滑效应[52],显著增加了 颗粒的流动迁移率。剪切带破碎颗粒的持续产生和颗 粒重排,特别是细颗粒的不断增加,也被认为是改变颗 粒系统的流变特性,促使滑坡以较高速率滑动的关键 因素[53]。

此外,研究也表明较高的剪切速率可以显著降低 土颗粒流动时的表观黏度,从而提高土体的流动性。 Davies^[54]研究了大型岩石雪崩的流态化机制,指出在高 剪切速率下,颗粒间会发生高脉冲接触应力,从而降低 基底摩擦系数,促进滑坡的长距离运动。因此,本试验 结果表明,全风化花岗岩残积土也具有类似的剪切稀化 特性,其长距离流动过程的动力致灾效益不可忽视。因 此针对距离坡体较近的下游居民区,在滑坡防治中仍需 考虑其长距离流动过程的动力致灾效应,综合采取"源 头控制-路径拦截-末端防护"的治理策略,结合监测预 警和应急管理,形成完整的防灾减灾体系,避免发生滑 坡长距离流动引发的次生灾害,保障下游居民安全。

4 结论

(1)全风化花岗岩残积土的力学性质与土体含水率 密切相关,土体的峰值强度和残余强度均随含水率的升 高而下降,在高含水率(30%)时出现应变硬化现象。

(2)全风化花岗岩残积土的峰值抗剪强度和残余抗 剪强度与正应力总体成正比关系,但峰值强度增长更为 明显。较大的法向应力导致残余强度的增量更小。

(3)全风化花岗岩残积土具有剪切稀化特征。剪切 速率越大,土体的峰值抗剪强度和残余抗剪强度越小, 表观黏度也越小。

参考文献(References):

- [1] 赵建军,王思敬,尚彦军,等.全风化花岗岩抗剪强度影响因素分析[J].岩土力学,2005,26(4):624-628.
 [ZHAO Jianjun, WANG Sijing, SHANG Yanjun, et al. Control factors on shear strength of completely decomposed granite [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4):624-628. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 高恺,段红鑫,李华,等.不同颗粒级配对全风化花岗岩 回填土抗剪强度的影响[J].地球科学与环境学报, 2024,46(5):689 - 701. [GAO Kai, DUAN Hongxin, LI Hua, et al. Effect of different particle grading on shearing strength of completely weathered granite backfill soil [J]. Journal of Earth Science and Environment, 2024, 46(5):689 -701. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张素敏,朱永全,高炎,等.全风化花岗岩流变特性试验 研究[J].地下空间与工程学报,2016,12(4):904-911.
 [ZHANG Sumin, ZHU Yongquan, GAO Yan, et al. Experimental investigation on rheological properties of completely weathered granite [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4): 904-911.
 (in Chinese with English abstract)]
- [4] 颜波,汤连生,胡辉,等.花岗岩风化土崩岗破坏机理分析[J].水文地质工程地质,2009,36(6):68-71.[YAN Bo, TANG Liansheng, HU Hui, et al. The mechanism of disintegration damage of granite weathered soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(6):68-71. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 王清,唐大雄,张庆云,等.中国东部花岗岩残积土物质成分和结构特征的研究[J].长春地质学院学报,1991,21(1):73-81. [WANG Qing, TANG Daxiong, ZHANG Qingyun, et al. A study on the structure and composition of granite residual soil in the Eastern China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 1991, 21(1):73-81. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 戴航,晏鄂川,谭延嗣,等.通城花岗岩残积土的物理力
 学特性及工程安全性对比研究[J].安全与环境工程,
 2020,27(2):132 139. [DAI Hang, YAN Echuan, TAN

Yansi, et al. Comparison of physical mechanics and engineering safety characteristics of granite residual soil in Tongcheng County [J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(2): 132 – 139. (in Chinese with English abstract)]

- [7] LU Yiwei, SHI Yujie, CHEN Bin, et al. Structural damage characteristics and mechanism of granite residual soil [J].
 Applied Rheology, 2024, 34(1): 20240011.
- [8] 王深法,王援高,胡珍珍.浙江山地滑坡现状及其成因
 [J].山地学报,2000,18(4):373-376. [WANG Shenfa, WANG Yuangao, HU Zhenzhen. Actuality of hill sliding and its cause in the mountainous region of Zhejiang Province [J]. Journal of Mountain Research, 2000, 18(4): 373-376. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 詹良通,李鹤,陈云敏,等.东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报雨强-历时曲线的影响因素分析[J].岩土力学,2012,33(3):872-880.[ZHAN Liangtong, LI He, CHEN Yunmin, et al. Parametric analyses of intensity-duration curve for predicting rainfall-induced landslides in residual soil slope in southeastern coastal areas of China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3):872-880. (in Chinese with English abstract)]
- BAI Huilin, FENG Wenkai, YI Xiaoyu, et al. Group-occurring landslides and debris flows caused by the continuous heavy rainfall in June 2019 in Mibei Village, Longchuan County, Guangdong Province, China [J]. Natural Hazards, 2021, 108(3): 3181 – 3201.
- [11] BAI Huilin, FENG Wenkai, LI Shuangquan, et al. Flow-slide characteristics and failure mechanism of shallow landslides in granite residual soil under heavy rainfall [J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19(6): 1541 – 1557.
- SEGUÍ C, RATTEZ H, VEVEAKIS M. On the stability of deep-seated landslides. The cases of vaiont (Italy) and shuping (Three Gorges Dam, China) [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2020, 125(7): e2019JF005203.
- [13] 赵建军,王思敬,尚彦军,等.香港全风化花岗岩饱和直 剪试验中的剪胀问题[J].工程地质学报,2005,13(1): 44-48. [ZHAO Jianjun, WANG Sijing, SHANG Yanjun, et al. Dilatation in direct shear tests of Hong Kong completely decomposed granite (cdg)[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(1): 44 - 48. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 尚彦军,岳中琦,赵建军,等.全风化花岗岩抗剪强度试验结果对比及影响因素分析[J].工程地质学报,2004,12(2):199-207.[SHANG Yanjun, YUE Zhongqi, ZHAO Jianjun, et al. Comparison of shearing strengths of the completely decomposed granite and analysis of contributing factors [J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(2): 199-207. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 龙志东, 王中文, 史斌, 等. 花岗岩残积土抗剪强度及其 影响因素试验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),
 2016, 13(3): 25 - 31. [LONG Zhidong, WANG Zhongwen,

· 104 ·

SHI Bin, et al. Experimental research for shear strength and its influencing factors of granite residual soil [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2016, 13(3): 25 – 31. (in Chinese with English abstract)]

- [16] 许旭堂,简文彬,柳侃.含水率和干密度对残积土抗剪强度参数的影响[J].地下空间与工程学报,2015,11(2): 364 - 369. [XU Xutang, JIAN Wenbin, LIU Kan. The influence of water content and dry density on shear strength parameters of residual soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(2): 364 - 369. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 郑武略,袁文俊,张富春,等.卸荷条件下红层花岗岩残积土力学特性试验研究[J/OL].岩土工程技术,(2024-12-18)[2024-12-28]. [ZHENG Wulue, YUAN Wenjun, ZHANG Fuchun, et al. Mechanical properties of redbed granite residual soil under unloading conditions [J/OL]. Geotechnical Technology, (2024-12-18)[2024-12-28]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3813.TU.20241216.1509.004.html. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 马勤国,郭皓公,罗晓晓.非饱和花岗岩残积土的剪切 特性与抗剪强度分析 [J].华南理工大学学报(自然科 学版), 2024, 52(11): 55 - 68. [MA Qinguo, GUO Haogong, LUO Xiaoxiao. Analysis on shear characteristics and shear strength of unsaturated granite residual soil [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(11): 55 - 68. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 陈晓平,周秋娟,蔡晓英.高液限花岗岩残积土的物理 特性和剪切特性[J].岩土工程学报,2011,33(6):901-908. [CHEN Xiaoping, ZHOU Qiujuan, CAI Xiaoying. Physical properties and shear strength characteristics of high liquid limit granite residual soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6):901-908. (in Chinese with English abstract)]
- [20] HU Bowen, HU Qizhi, LIU Yiming, et al. Research on the improvement of granite residual soil caused by fly ash and its slope stability under rainfall conditions [J]. Applied Sciences, 2024, 14(9): 3734.
- [21] 路昌明,王祚鹏,吴靓,等.基于环剪试验的蠕变型滑坡 滑带力学性质——以甘肃舟曲地区锁儿头滑坡为例
 [J].地球科学与环境学报,2024,46(5):677-688.
 [LU Changming, WANG Zuopeng, WU Liang, et al. Mechanical properties of creep-type landslide slip zone based on ring shear test: A case study of Suo'ertou landslide in Zhouqu area of Gansu, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2024, 46(5): 677 - 688. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 洪勇,孙涛,栾茂田,等.土工环剪仪的开发及其应用研究现状[J].岩土力学,2009,30(3):628-634.[HONG Yong, SUN Tao, LUAN Maotian, et al. Development and

application of geotechnical ring shear apparatus: An overview [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 628 – 634. (in Chinese with English abstract)]

- [23] 王振涛.滑带土长距离剪切强度及对滑坡启动的影响
 [J].人民长江, 2015, 46(9): 51-53. [WANG Zhentao. Long- distance shear strength of slide- zone soil and its effect on landslide initiation [J]. Yangtze River, 2015, 46(9): 51-53. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 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 with English abstract)]
- [25] WANG Tengfei, YIN Kunlong, LI Yuanyao, et al. Interpretation of the reactivation of slow-moving landslides based on ring shear tests and monitoring [J]. Natural Hazards, 2022, 114(3): 2991-3013.
- [26] RAJ BHAT D. Shear rate effect on residual strength of typical clay soils [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2021, 7(1): 36.
- [27] WANG Yanchao, CONG Lu. Effects of water content and shearing rate on residual shear stress [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019, 44(10): 8915 – 8929.
- [28] ZHU Rongsen, XIE Wanli, LIU Qiqi, et al. Shear behavior of sliding zone soil of loess landslides *via* ring shear tests in the South Jingyang Plateau [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(6): 244.
- [29] YUAN Weina, FAN Wen, JIANG Chengcheng, et al. Experimental study on the shear behavior of loess and paleosol based on ring shear tests [J]. Engineering Geology, 2019, 250: 11 - 20.
- [30] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001 [S].北京:中国建筑工业出版社, 2004.
 [Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for investigation of geotechnical engineering: GB 50021—2001 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese)]
- [31] 吴仕川.花岗岩风化带的野外划分方法[J].土工基础, 2013, 27(6): 105 106. [WU Shichuan. Field classification of granite weathering zone [J]. Soil Engineering and Foundation, 2013, 27(6): 105 106. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 陈敬业,王钧,宫清华,等.植被增渗效应对花岗岩残积 土浅层滑坡的影响机理研究[J].水文地质工程地质, 2023,50(3):115-124. [CHEN Jingye, WANG Jun, GONG Qinghua, et al. Influence mechanism of vegetation infiltration effect on shallow landslides of granite residual soil [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 115 -124. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 孙强,张泰丽,伍剑波,等.植被对台风暴雨型滑坡发育的促进作用[J].中国地质调查,2022,9(4):66-73.

[SUN Qiang, ZHANG Taili, WU Jianbo, et al. Promoting effect of vegetation on the landslide induced by typhoon rainstorm [J] . Geological Survey of China, 2022, 9(4): 66 – 73. (in Chinese with English abstract)]

- [34] KIMURA S, NAKAMURA S, VITHANA S B, et al. Shearing rate effect on residual strength of landslide soils in the slow rate range [J]. Landslides, 2014, 11(6): 969 – 979.
- [35] LI Y R, WEN B P, AYDIN A, et al. Ring shear tests on slip zone soils of three giant landslides in the Three Gorges Project area [J]. Engineering Geology, 2013, 154: 106 – 115.
- [36] WANG Gonghui, 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.
- [37] VALLEJO L E. Interpretation of the limits in shear strength in binary granular mixtures [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(5): 1097-1104.
- [38] SADREKARIMI A, OLSON S M. Shear band formation observed in ring shear tests on sandy soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(2): 366 - 375.
- [39] DOU Hongqiang, XIE Senhua, CHEN Feng, et al. Study on shear characteristics and a mechanics model of granite residual soil-rock interface [J] . Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(6): 212.
- [40] TANG Chaosheng, SHI Bin, LIU Chun, et al. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer [J]. Applied Clay Science, 2011, 52(1/2): 69 – 77.
- [41] TAKE W A, BOLTON M D. Seasonal ratcheting and softening in clay slopes, leading to first-time failure [J]. Géotechnique, 2011, 61(9): 757 – 769.
- [42] MORBIDELLI R, CORRADINI C, SALTALIPPI C, et al. Initial soil water content as input to field-scale infiltration and surface runoff models [J]. Water Resources Management, 2012, 26(7): 1793 – 1807.
- [43] DENG Yusong, DUAN Xiaoqian, DING Shuwen, et al. Suction stress characteristics in granite red soils and their relationship with the collapsing gully in south China [J]. Catena, 2018, 171: 505 – 522.
- [44] 黄淙葆,代张音,高威挺,等.贵州公路旁边坡滑带土抗 剪强度特性研究[J].地质与资源,2023,32(3):366-372. [HUANG Congbao, DAI Zhangyin, GAO Weiting, et al. Shear strength characteristics of soil in the sliding zone on highway slope in Guizhou Province [J]. Geology and Resources, 2023, 32(3): 366-372. (in Chinese)]

- [45] MA Penghui, PENG Jianbing, NAN Yalin, et al. The shear behavior of the slip zone loess and landslide mechanism [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2023, 257: 105833.
- [46] 陈剑平,刘经,王清,等.含水率对分散性土抗剪强度特性影响的微观解释[J].吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(3): 792 803. [CHEN Jianping, LIU Jing, WANG Qing, et al. Microscopic interpretation of water content influence on shear strength of dispersive soil [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(3): 792 803. (in Chinese with English abstract)]
- [47] 刘寒冰,张互助,王静.冻融及含水率对压实黏质土力 学性质的影响[J].岩土力学,2018,39(1):158-164.
 [LIU Hanbing, ZHANG Huzhu, WANG Jing. Effect of freezethaw and water content on mechanical properties of compacted clayey soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 158-164. (in Chinese with English abstract)]
- [48] DAI Mingjie, CUI Deshan, CHEN Qiong, et al. Reactivated mechanism of a slow-moving landslide with two shear zones based on ring shear test and *in situ* monitoring [J]. Landslides, 2024, 21(11): 2617 – 2634.
- [49] LI Zhe, LI Juqiang, HAN Meng, et al. Investigating the shear strength characteristics of slip zone soil based on *in situ* multiple shear tests [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2023, 27(9): 3793 - 3807.
- [50] XIAO Yang, YUAN Zhengxin, DESAI C S, et al. Effects of load duration and stress level on deformation and particle breakage of carbonate sands [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(7): 06020014.
- [51] YU Fangwei. Particle breakage and the drained shear behavior of sands [J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(8): 04017041.
- [52] LAI Zhiqiang, VALLEJO L E, ZHOU Wei, et al. Collapse of granular columns with fractal particle size distribution: Implications for understanding the role of small particles in granular flows [J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(24): 12181-9.
- [53] LIN Qiwen, CHENG Qiangong, LI Kun, et al. Contributions of rock mass structure to the emplacement of fragmenting rockfalls and rockslides: Insights from laboratory experiments [J].
 Journal of Geophysical Research (Solid Earth), 2020, 125(4); e2019JB019296.
- [54] DAVIES T R H. Spreading of rock avalanche debris by mechanical fluidization [J]. Rock Mechanics, 1982, 15(1): 9-24.