

鄂东南崩岗区花岗岩风化岩土体抗剪强度的异向性

娜荷芽¹, 魏玉杰^{1,2}, 陈敏³, 丁树文^{1,2}, 蔡崇法^{1,2}, 李依潺³, 宋萍³

(1.华中农业大学资源与环境学院,武汉 430070;2.农业部长江中下游耕地保育重点实验室,武汉 430070;3.长江水利委员会水土保持监测中心站,武汉 430010)

摘要: 旨在从岩土力学性质的角度为崩岗侵蚀提供理论依据,采用直接剪切实验,对鄂东南崩岗区典型花岗岩风化岩土体剖面不同方向上原状土的抗剪强度进行测定,并分析了花岗岩风化岩土体抗剪强度在剖面尺度上的异向性及其影响因素。结果表明,饱和条件下,花岗岩风化岩土体黏聚力和内摩擦角的变化范围分别为 3.19~19.26 kPa 和 26.50°~32.42°,其中 B₂ 层黏聚力最大,而各层次间内摩擦角的差异并不明显($p>0.05$);黏聚力和内摩擦角均存在明显的异向性,其中水平方向总体大于垂直方向,且黏聚力的异向性较内摩擦角更明显。不同方向上抗剪强度的影响机理不同,其中,垂直于剖面方向上,黏聚力主要受毛管孔隙度($r=-0.97, p<0.01$)和粉粒含量($r=0.94, p<0.05$)的影响,而水平方向上仅与粉粒含量($r=0.91, p<0.05$)显著相关;而液限对水平方向上的内摩擦角影响显著($r=-0.99, p<0.05$)。对于花岗岩风化岩土体抗剪强度的异向性而言,其主要受自然含水率($r=-0.98, p<0.01$)、有机质($r=-0.93, p<0.05$)和塑限($r=-0.97, p<0.05$)影响。研究结果对于从力学稳定性角度揭示崩岗的发生机理具有重要意义。

关键词: 崩岗; 抗剪强度; 异向性

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2019)06-0113-07
DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.016

The Anisotropy of Shear Strength for Granitic Soils in Collapsing Gully Erosion Area of Southeastern Hubei

NA Heya¹, WEI Yujie^{1,2}, CHEN Min³, DING Shuwen^{1,2}, CAI Chongfa^{1,2}, LI Yichan³, SONG Ping³

(1.College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070; 2.Key Laboratory of Arable Land Conservation for Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture, Wuhan 430070; 3.Yangtze Soil Conservation Monitoring Center, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010)

Abstract: To reveal the mechanism of collapsing gully erosion from a perspective of soil mechanic, the anisotropic characteristics of shear strength and the related influencing factors for undisturbed granitic soils from a typical granite weathered soil profile in southeastern Hubei were investigated by direct shear test. In accordance with the obtained results, the cohesion and internal friction angle of granite weathered soils ranged from 3.19 kPa to 19.26 kPa and 26.50° to 32.42° at saturation, and the maximum cohesion occurred for soils in the B₂ layer, while the difference of the internal friction angle along the investigated soil profile was less significant ($p>0.05$). In addition, cohesion and internal friction angle with significant anisotropy were larger in the horizontal direction than those in the vertical direction. Soil physicochemical properties that influencing of shear strength varied with profile direction. Specifically, the cohesion was mainly affected by capillary porosity ($r=-0.97, p<0.01$) and silt content ($r=0.94, p<0.05$) for soils in the vertical direction, and it was conditioned by silt content ($r=0.91, p<0.05$) for soils in the horizontal direction. However, the significant correlation between soil physicochemical properties and internal friction angle was solely observed for soils in the horizontal direction in which the variation of internal friction angle was influenced by liquid limit ($r=-0.99, p<0.05$). Furthermore, the anisotropy of shear strength of granitic weathered soils was mainly affected by natural water content ($r=-0.98, p<0.01$), organic matter ($r=-0.93, p<0.05$), and plastic limit ($r=-0.97, p<0.05$). These results would facilitate the understanding about the formation and development of collapsing gully erosion in southeastern China.

Keywords: collapsing gully; shear strength; anisotropy

崩岗是指在水力和重力综合作用下山坡土体受破坏而崩塌和冲刷的侵蚀现象,在我国南方热带、亚热带花岗岩丘陵地区广泛分布,并已成为华南地区最严重的水土流失形式,对区域生态环境和当地人民的生命财产安全造成了很大的危害。据中国水利部 2005 年对崩岗的统计,华南丘陵花岗岩地区约有 239 100 个沟壑^[1],崩岗侵蚀的年平均侵蚀模数约为 59 000 t/(km²·a)^[2],导致的土壤流失量约为 60 万 t,造成了严重的土壤退化,是制约当地经济发展的主要因素。因此,近年来有关花岗岩地区的土壤侵蚀机制和工程特性受到广泛关注。

花岗岩中常见不均匀分布的岩脉,因其抗风化能力的差异,导致岩土体各项物理力学指标随着风化程度的变化呈现明显的剖面异质性^[3]。Lan 等^[4]发现,花岗岩土壤的大多数物理和力学性质与风化程度密切相关。此外,Mareschal 等^[5]研究发现,侵蚀和斜坡破坏的广泛发生在很大程度上可归因于风化花岗岩土壤剖面的异质性。Yusof 等^[6]也认为,质地特征对工程性质的影响比花岗岩土壤的矿物学更重要。由于剪切强度与侵蚀和岩土体稳定性密切相关^[7-8],有关花岗岩风化岩土体的抗剪强度在土壤侵蚀领域也得到了越来越多的关注^[9-12]。林金石等^[13]对福建安溪花岗岩发育的崩岗红土层进行了三轴试验和直剪试验,探究了不同剪切方式下抗剪强度随水分的变化规律;夏振刚等^[14]对鄂东南花岗岩崩岗的岩土体抗剪强度进行了研究,发现干湿交替条件下,裂隙发育,碎屑层土体主要以垂直方向上的变形为主。目前已有关于花岗岩风化岩土体抗剪强度的研究多是对重塑土或者剖面垂直方向的原状土^[15-18]。然而,崩岗侵蚀过程中岩土体临空面的形成导致土体在垂直和水平方向上应力分布不均匀,从而导致其力学强度的各向异性^[19]。此外,土壤沉积过程中,长宽比大于 1 的针状、片状、棒状等土壤颗粒的排列会在沿颗粒长边的水平方向上保持稳定,后期的固结过程中,由于上覆重力引起土体中的应力不均匀,导致各向异性的应力分布^[20-21]。张文华^[22]通过对深圳地区花岗岩残积土的边坡进行野外调查发现,80%以上的土体失稳是由花岗岩土壤的各向异性造成的。抗剪强度作为重要的力学性质指标,与土壤侵蚀密切相关^[23]。因此,探究岩土体抗剪强度的异向性对揭示崩岗侵蚀的机理具有重要的意义。

目前对于花岗岩发育崩岗的研究^[24-26]主要集中在岩土特性、侵蚀机理、治理及危害等方面,而对于土体抗剪强度各向异性主要通过真三轴测定,耗时耗

力,成本高,且主要针对人工重塑土。然而,花岗岩剖面本身结构复杂,其微观结构也会随深度发生变化,若不采用原状土样进行试验观测,其力学行为复杂,难以模拟^[19,27-28]。直剪试验作为获取抗剪强度参数的常规方法,操作简单,应用更广泛^[29]。因此,有必要通过相对简单的方法对花岗岩风化岩土体原状样品抗剪强度的异向性进行探究。基于以上研究背景,本文以鄂东南崩岗侵蚀区,剖面层次保存完整的花岗岩风化岩土体为研究对象,通过直剪试验探究其抗剪强度的异向性及其影响因素,以期为揭示崩岗侵蚀机理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与采样方法

研究区位于湖北省东南部的通城县(29°12′39″N,113°46′26″E),海拔 126 m,属亚热带季风气候,年平均气温 16.1℃,降水量 1 520 mm。该区的花岗岩形成于燕山期,多为细、中粒结构,矿物成分以石英、长石为主,同时还含有一些云母。主要土壤类型为花岗岩发育的红壤,土地利用类型为天然次生林,主要是马尾松。

根据崩壁土壤发生层及土壤颜色,将崩壁土壤剖面从上到下进一步划分为 5 个层次(图 1(a)),分别为 A 层(0—45 cm)、B₁层(45—110 cm)、B₂层(110—170 cm)、C₁层(170—430 cm)及 C₂层(>430 cm),自下而上逐层采集原状样及散土样。原状样用于抗剪强度试验(H 20 mm× Φ 62 mm)和饱和导水率试验(H 40 mm× Φ 62 mm),散土样用于理化性质分析。同时,为研究花岗岩发育崩岗土体的异向性剪切行为,对垂直和水平方向的圆柱形土壤(H 20 mm× Φ 62 mm)进行取样(图 1(b))。

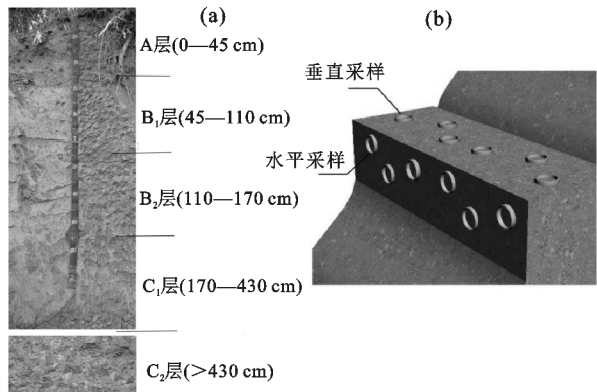


图 1 剖面和采样示意

1.2 试验方法

将 5 个土层、2 个方向下采集的所有环刀样品(H 20 mm× Φ 62 mm)放置在叠式饱和器中完全饱

和,使用四重直接剪切设备(ZJ 型)进行不排水饱和直接剪切试验。所有剪切试验均在 4 个法向应力(σ 为 50,100,150,200 kPa)下进行,每个压力重复 3 次,剪切速率设定为 2.4 mm/min(12 r/min)以减少测试期间含水量的变化。常认为剪切强度最大时土体发生破坏,若在剪切过程中未出现剪切峰值,则取侧向位移的 10%处为破坏时的抗剪强度(ASTM D3080—902004)。在剪切试验期间,以 10 s 的间隔自动记录水平位移,当剪切位移达到 6 mm 时终止试验。此外,各层采集的散土样风干过筛,使用常规的测定方法对理化性质进行测定,测试土壤的理化性质见表 1。

1.3 数据计算与分析

根据直接剪切试验得到的抗剪强度,利用库伦公式计算土壤黏聚力和内摩擦角。

异向性系数 λ , 定义为水平方向($L-h$)和垂直方向($L-v$)的抗剪强度、黏聚力和内摩擦角之比,用于表征花岗岩岩土体的异向性剪切行为。

本文图表采用 SPSS 和 Origin 2017 软件进行处理。使用 ANOVA($p<0.05$)对土壤层次,取样方向及其相互作用对土壤抗剪强度的影响进行统计分析。采用 Person 相关分析,对土壤理化性质对土壤剪切强度参数的垂直和水平方向的影响进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

剖面内的土壤理化性质见表 1。土粒密度的变

化范围为 2.51~2.57 g/cm³, 由于供试土壤源自同样的母质, 因此土粒密度的变异性较小(变异系数 CV=0.01)。随着土层深度的增加, 容重和有机质逐渐减小。剖面自上而下, 毛细孔隙度的最小值 36% 出现在 B₂ 层, 且下面两层(C₁、C₂)的毛细孔隙度之间没有观察到显著差异($p<0.05$)。同样, 非毛细孔隙度显示出类似的变化趋势, 先下降后上升。土壤液限小于 50%, 属于低液限土, 且随着土层深度的增加, 黏粒含量逐渐降低, 而砂粒含量逐渐增加。饱和导水率出现相对较大的变化, 其最小值和最大值分别在 B₂ 层和 A 层, 分别为 1.4, 27.2 cm/h。A 层中较大的 K_s 可能是由于根系和生物的扰动, 而 B₂ 层中较小的 K_s 可能是由于该层中相对较大的密度和较多的细颗粒含量。

同时还测定了各层土壤的铁、铝氧化物和黏土矿物类型及相对含量。通常铁和铝氧化物的含量随着土层深度的增加而降低, 与风化程度沿剖面的变化一致。游离态的铁、铝氧化物比非晶质的铁、铝氧化物含量高, 且游离铁的氧化物的含量(4.96~22.49 g/kg)明显高于游离铝的氧化物的含量(1.43~6.18 g/kg)。除 A 层中含有少量的蛭石之外, 各层土壤的黏土矿物类型主要为高岭石、水云母和 1.4 nm 过渡矿物, 均属于非膨胀矿物。土壤中高岭石含量最高, 均处于 92%~94% 的范围内, 其次是云母和 1.4 nm 过渡矿物, 高岭石的含量随土层深度的增加而降低。

表 1 供试土壤的理化性质

理化性质	土层				
	A	B ₁	B ₂	C ₁	C ₂
密度/(g·cm ⁻³)	2.53±0.01b	2.57±0.02a	2.54±0.01ab	2.54±0ab	2.51±0.03b
容重/(g·cm ⁻³)	1.42±0.04a	1.42±0.01a	1.38±0.02ab	1.32±0.05c	1.36±0.02bc
毛细孔隙度/%	37±1b	40±1a	36±0b	41±2a	42±1a
非毛细孔隙度/%	12±2.1abc	9±1.2ab	7±2.3bc	4±1.2c	14±0a
土壤有机质/(g·kg ⁻¹)	20.9±1.0a	13.4±2.3b	11.3±2.7b	10.0±1.4b	1.0±0.4c
饱和导水率/(cm·h ⁻¹)	27.2±0.8a	4.0±0.7c	1.4±0.8d	5.6±2.0cd	10.5±2.3b
塑限/%	27.3±4.2a	28.0±2.7a	25.6±1.9a	—	—
液限/%	42.2±3.6a	45.9±4.2a	45.6±3.7a	—	—
自然含水量/%	26.5±3.2a	23.2±2.1a	23.8±1.6a	22.9±0.7ab	18.5±1.2b
非晶质铁氧化物/(g·kg ⁻¹)	0.62±0.04a	0.59±0.02a	0.51±0a	0.10±0b	0.01±0b
游离铁氧化物/(g·kg ⁻¹)	19.33±0.01a	22.49±0a	20.12±0.02a	6.20±0.01b	4.96±0b
非晶质铝氧化物/(g·kg ⁻¹)	2.52±0.02a	2.60±0.01a	2.40±0a	1.53±0.01b	0.89±0.01b
游离铝氧化物/(g·kg ⁻¹)	5.87±0.03a	6.18±0.01a	5.20±0a	2.30±0.01b	1.43±0b
蛭石/%	2	0	0	0	0
1.4 nm 过渡矿物/%	0	2	2	0	0
伊利石/%	5	4	5	6	8
高岭石/%	93	94	93	94	92
黏粒/%	34.90±0.13a	36.43±0.25a	31.06±0.15ab	13.85±0.17c	6.96±0.32d
粉粒/%	30.06±0.65b	28.97±0.12bc	35.30±0.08a	27.55±0.12c	25.78±0.24c
砂粒/%	35.04±0.20c	34.60±0.15c	33.64±0.21c	58.60±0.18b	67.26±0.12a
土壤质地	黏壤	黏壤	黏壤	砂壤	砂壤

注:表中数字为平均值±标准差;数字后不同小写字母表示土层之间差异显著($p<0.05$);土壤质地按 USDA 土壤分类系统进行分类。

2.2 抗剪强度

图 2 为 4 种法向应力下的土壤在 2 个方向上的抗剪强度—剪切位移曲线。饱和条件下,各层土壤的抗剪强度均随法向应力的增加而增加,逐渐趋于稳定,总体表现为应力硬化特征。对比不同的土层,相

同法向应力下的抗剪强度通常随着土层深度的增加而减小,A 层和 B₁ 层的抗剪强度较高,而 C₁ 层抗剪强度最低,其中 A 层的峰值抗剪强度为 36.62~142.56 kPa,是 C₁ 层的 1.15~1.23 倍,这与不同层次间颗粒组成的差异一致。

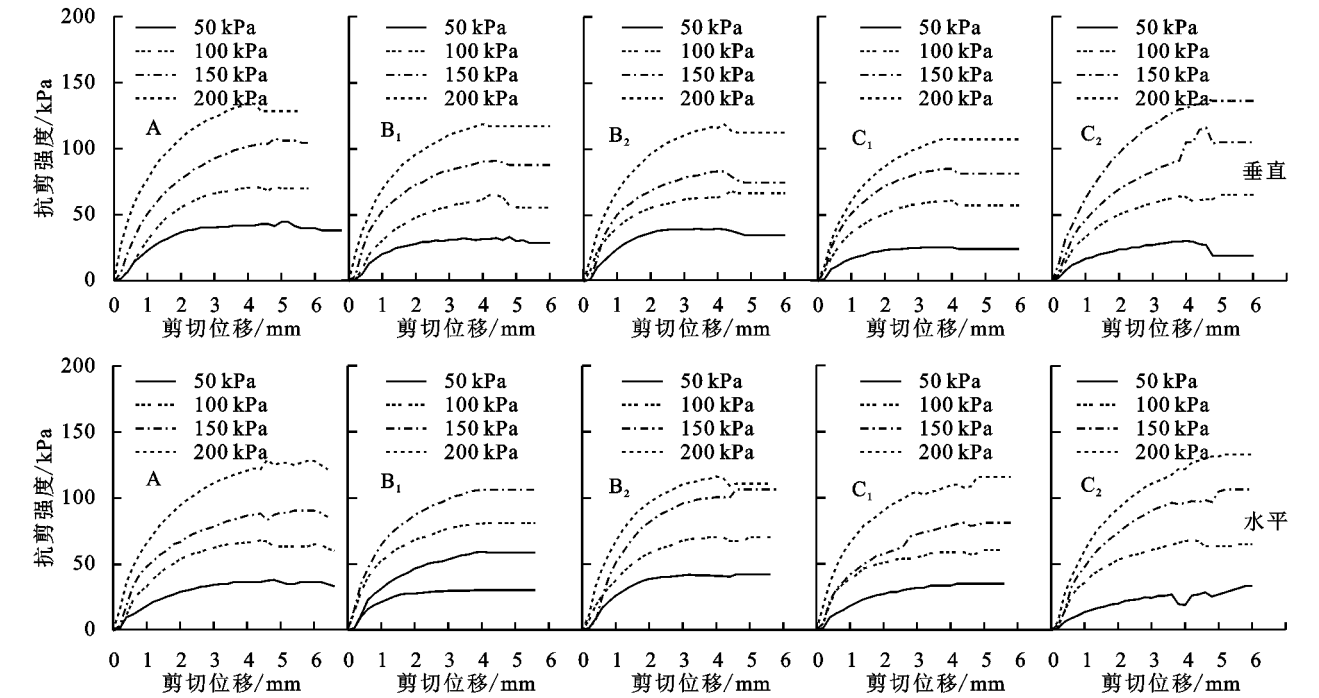


图 2 不同方向下的土壤抗剪强度—剪切位移曲线

在整个土壤剖面内,土壤黏聚力的变化趋势与抗剪强度一致(图 3a)。黏聚力包括土粒间引力形成的原始黏聚力和土中化合物的胶结作用形成的固化黏聚力^[30]。A 层和 B₁ 层黏聚力较大,而 C₁ 层和 C₂ 层的黏聚力较小,最大黏聚力 14.50~19.26 kPa 出现在 B₂

层(110—170 cm)。土体的内摩擦角则主要由土壤颗粒之间的咬合摩擦力、土壤颗粒粗糙面之间的滑动摩擦力和土壤受力产生形变颗粒重新分布共同决定。相同方向下的内摩擦角随深度变化程度较小(图 3b),其中 C₂ 层土壤的内摩擦角最大,为 30.86°~32.42°。

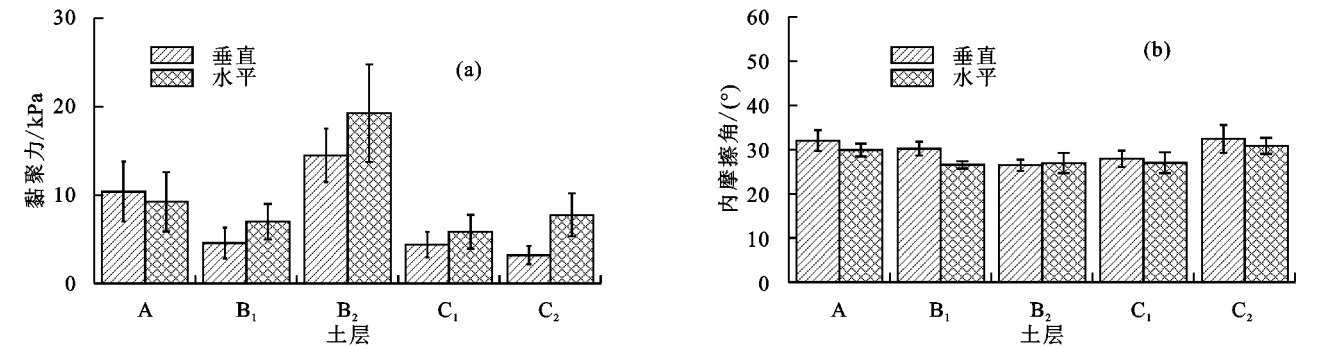


图 3 不同方向下土壤的黏聚力和内摩擦角

不同方向土壤的黏聚力和内摩擦角与土壤理化性质间的相关分析(表 2)表明,饱和条件下,花岗岩风化岩土体的黏聚力主要受毛细孔隙度和粉粒含量的影响,其中毛细孔隙度($r=-0.97, p<0.01$)和粉粒含量($r=0.94, p<0.05$)是导致垂直方向上岩土体黏聚力变化的主要原因,而粉粒含量($r=0.91, p<0.05$)则引起水平方向上的黏聚力变化。水平方向下的内摩擦角与液限呈显著负相关($r=-0.99, p<0.05$)。

2.3 异向性

从图 4 可以看出,B₂ 层水平方向上的抗剪强度总体上小于垂直方向的抗剪强度,C₁ 层和 C₂ 层的抗剪强度在 2 个方向下无明显差异。对抗剪强度在 2 个方向上随法向应力的变化做统计分析发现,当法向应力大于 150 kPa 时,抗剪强度在 A 层(CV=0.13)和 B₁ 层(CV=0.10)土壤的 2 个方向上变化较大。随着法向应力的增加,石英在单轴压应力作用下破碎,填充解理或裂隙,导致 2 个方向的抗剪强度波动^[6]。

表 2 各影响因素与黏聚力和内摩擦角的皮尔逊相关分析

研究 对象	$\rho_s/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	BD/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	CP/ %	NonP/ %	SOM/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Ks/ ($\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)	PL/ %	LL/ %	$w_o/$ %	$\text{Fe}_a/$ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{Fe}_d/$ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{Al}_a/$ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{Al}_d/$ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Ver/ %	1.4 nm/ %	Illite/ %	Kao/ %	Clay/ %	Silt/ %	Sand/ %
$c-v$ 相关系数	0.03	0.33	-0.97 *	-0.15	0.51	0.09	-0.94	-0.17	0.62	0.62	0.60	0.60	0.56	0.40	-0.44	-0.10	-0.10	0.58	0.94 *	-0.70
$c-h$ 相关系数	-0.04	0.16	-0.79	-0.13	0.10	-0.26	-0.99	0.27	0.24	0.38	0.44	0.37	0.34	-0.06	0.56	-0.22	-0.26	0.35	0.91 *	-0.50
$\varphi-v$ 相关系数	-0.40	0.38	0.37	0.88	-0.03	0.70	0.82	-0.70	-0.21	-0.08	-0.16	-0.25	-0.11	0.48	-0.52	0.35	-0.48	-0.14	-0.65	0.26
$\varphi-h$ 相关系数	-0.85	0.06	0.20	0.85	-0.23	0.70	0.12	0.99 * *	-0.31	-0.33	-0.42	-0.50	-0.39	0.47	-0.69	0.69	-0.84	-0.42	-0.45	0.45

注：* 表示在 0.05 水平上(双尾)相关性显著；* * 在 0.01 水平上(双尾)相关性显著。下同。

水量($r=-0.98, p<0.01$)和有机质($r=-0.93, p<0.05$)的影响。而内摩擦角的异向性主要受塑限($r=-0.99, p<0.05$)的影响。

表 3 花岗岩剖面内黏聚力和内摩擦角的方差分析结果

抗剪强度参数	源变量	变量	DF	MS	F
黏聚力	A	D	1	2339.89	14.59 * *
	B ₁	D	1	510.67	4.14
	B ₂	D	1	264.27	1.71
	C ₁	D	1	399.81	5.95 *
	C ₂	D	1	189.83	5.84 *
	layer		4	6669.90	61.96 * *
	总样本	D	1	2.18	0.02
	D×layer		4	925.57	8.60 * *
	A	D	1	79.60	0.28
	B ₁	D	1	39.50	1.85
内摩擦角	B ₂	D	1	357.08	13.39 * *
	C ₁	D	1	0.79	0.01
	C ₂	D	1	16.26	0.50
	layer		4	101.62	1.18
	总样本	D	1	25.70	0.30
	D×layer		4	116.88	1.36

表 4 抗剪强度及相关参数的异质性变化

参数	A	B ₁	B ₂	C ₁	C ₂
λ_τ	0.96	0.91	1.08	1.13	0.99
λ_c	0.89	1.53	1.33	1.33	2.43
λ_φ	0.93	0.88	1.02	0.97	0.95

注： λ_τ 为不同土层抗剪强度的平均值。

表 5 各影响因素与抗剪强度参数异质性的皮尔逊相关分析

参数	$\rho_s/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	BD/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	CP/ %	NonP/ %	SOM/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Ks/ ($\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)	PL/ %	LL/ %	$w_o/$ %	$\text{Fe}_a/$ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{Fe}_d/$ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{Al}_a/$ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{Al}_d/$ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Ver/ %	1.4 nm/ %	Illite/ %	Kao/ %	Clay/ %	Silt/ %	Sand/ %
λ_c	-0.42	-0.33	0.71	0.44	-0.93 *	-0.34	0.07	0.97	-0.98 * *	-0.70	-0.59	-0.77	-0.68	-0.60	-0.12	0.75	-0.56	-0.71	-0.55	0.72
λ_φ	-0.43	-0.55	-0.38	-0.37	-0.25	-0.29	-0.99 *	0.09	-0.05	-0.27	-0.25	-0.22	-0.31	-0.22	0.00	0.29	-0.29	-0.29	0.53	0.12

3 讨论

通过对鄂东南崩岗区花岗岩岩土体的抗剪强度及其影响因素进行研究发现,饱和条件下,各层土壤表现出应力硬化特征,表明饱和时,花岗岩风化岩土体的剪切特性主要受大孔隙影响,在外力作用下容易发生剪缩。总体上,垂直方向和水平方向下,抗剪强度和黏聚力均在 A 层和 B₁层较高,而在 C₁和 C₂层较低,这主要受颗粒组成、胶结物质及风化程度的影响^[31,12,8]。A 层和 B₁层风化程度较高,富含比表面积

大、颗粒间结合强的细颗粒,导致上层土壤的抗剪强度和黏聚力较大,其中,A 层受根系的影响导致其抗剪强度较 B₁层略低,黏聚力在 B₂层达到最大值,这与已有研究^[32]结论相似,即土壤黏聚力在特定土层深度达到最大值。而靠近母质层的 C₁层和 C₂层,风化程度弱,因富含结合力差,松散结合的粗颗粒,导致其抗剪强度和黏聚力下降^[5,29]。至于内摩擦角,由于饱和条件下水分充分填满,使得土壤颗粒之间的间距变大,接触减少,导致饱和条件下颗粒分布对内摩擦角

没有显著的影响^[19],故其在相同方向下随深度变化不大。但在 C_2 层内摩擦角达到最大值,这可能是其粗颗粒含量较高,土壤颗粒间的咬合力增大所致^[11]。

剖面自上而下,抗剪强度的异向性系数在 A 层和 B_1 层分别为 0.96 和 0.91,表现为剖面水平方向上的抗剪强度小于垂直方向,因此 A 层和 B_1 层以径向形变为主。而 B_2 层和 C_1 层抗剪强度的异向性系数为 1.08 和 1.13,土体以轴向形变为主。以往也有类似的研究结果,如 Russell 等^[33]对伦敦风化牛津黏土的异向性进行研究,发现强度异向性值从未风化物质中的约 0.7 增加到强风化黏土中的约 2.0,且这种变化与风化剖面中含水量的变化以及化学风化有关。不同层次间抗剪强度异向性的差异主要是由岩土体风化程度的差异引起的^[8],其中 A 层和 B_1 层以片状黏土颗粒为主(图 5),片状颗粒因其在垂直方向上的层状结构导致采样时,垂直方向和水平方向土壤颗粒间接触不同,故异向性明显^[34-35]。而 B_2 层、 C_1 层和 C_2 层则以球状砂土颗粒为主,其异向性不明显。对于黏聚力异向性系数而言,A 层分布有较多的根系,造成不均匀的土壤结构,导致其产生明显的黏聚力异向性^[36]。此外, C_1 层和 C_2 层的黏聚力异向性推测可能是由于土壤中石英颗粒的排列和颗粒形状造成的^[4,28],其中 C_2 层的黏聚力异向性最为明显,表明花岗岩土壤的黏聚力对颗粒组成的敏感性大于内摩擦角;同时表明,在饱和条件下,垂直方向的黏聚力比在水平方向上更弱,径向变形易产生竖向裂隙,进而降低土壤抗剪强度,在重力作用下,花岗岩剖面更容易在垂直方向发生坍塌现象。至于内摩擦角的异向性系数在不同层次变化程度较小,主要是由于水的润滑促进土壤颗粒的旋转和滚动,这可能会削弱近饱和条件下剪切强度的各向异性^[37]。

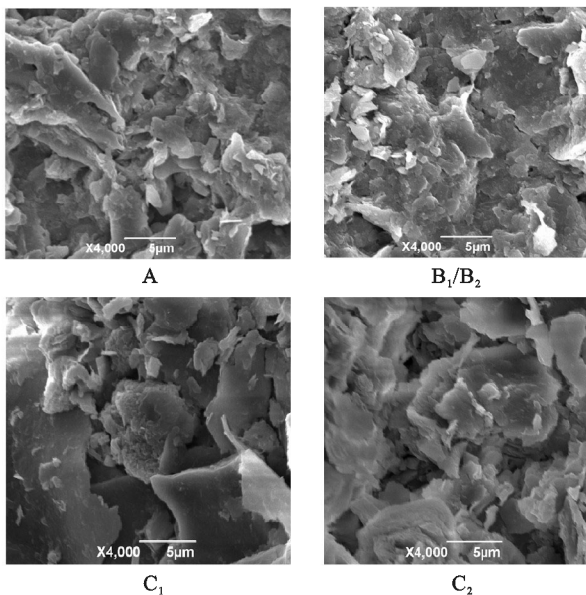


图 5 不同层次土壤颗粒形状的 SEM

总体而言,上面 3 层土壤因富含胶结物质和细颗粒而具有较高的抗剪强度,抗侵蚀能力较强而排水能力较差,易产生地表径流侵蚀下层土体。而下面 2 层土壤以粗颗粒为主,缺乏胶结物质,抗剪强度差,且以径向变形为主,易发生垂直崩塌,伴随着溯源侵蚀的发生,崩壁后退,逐渐形成崩岗。

4 结论

饱和条件下,花岗岩风化岩土体的抗剪强度受风化程度的影响,随着土壤剖面深度的增加而降低,其中毛管孔隙度、粉粒含量和液限对抗剪强度的影响极显著。黏聚力和内摩擦角存在不同程度的异向性,砂土层的异向性最明显,且水平方向上的抗剪强度明显大于垂直方向。总体而言,表土层的抗剪强度最大,是整个岩土体稳定性的关键区域,而砂土层的抗剪强度最小。因此,当上层较为黏结的表土层、红土层和表下红土层被侵蚀掉之后,下层抗剪强度弱的砂土层发生内蚀和崩塌,促进整个岩土体的崩塌失稳,从而导致崩岗的进一步发展。

参考文献:

- [1] Deng Y S, Duan X Q, Ding S W, 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.
- [2] Zhong B B, Peng S Y, Zhang Q, et al. Using an ecological economics approach to support the restoration of collapsing gullies in southern China [J]. Land Use Policy, 2013, 32: 119-124.
- [3] Rahardjo H, Satyanaga A, Leong E C, et al. Variability of residual soil properties [J]. Engineering Geology, 2012, 141: 124-140.
- [4] Lan H X, Hu R L, Yue Z Q, et al. Engineering and geological characteristics of granite weathering profiles in South China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2003, 21(4): 353-364.
- [5] Mareschal L, Turpault M P, Ranger J. Effect of granite crystal grain size on soil properties and pedogenic processes along a lithosequence [J]. Geoderma, 2015, 249: 12-20.
- [6] Yusof N, Zabidi H. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of granitic rock from Hulu Langat, Selangor [J]. Procedia Chemistry, 2016, 19: 975-980.
- [7] Azami A, Yacoub T, Curran J. Effects of strength anisotropy on the stability of slopes [C]//65th Canadian Geotechnical Conference, CGS Geo-Manitoba, 2012.

- [8] Wuddivira M N, Stone R J, Ekwue E I. Influence of cohesive and disruptive forces on strength and erodibility of tropical soils[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 133: 40-48.
- [9] 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.
- [10] 魏玉杰, 吴新亮, 蔡崇法. 崩岗体剖面土壤收缩特性的空间变异性[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 153-159.
- [11] 张勇. 不同层次花岗岩残积土抗剪强度影响因素研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [12] 陈嘉林. 崩岗土体胶结物质与其抗剪强度的关系研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
- [13] 林金石, 庄雅婷, 黄炎和, 等. 不同剪切方式下崩岗红土层抗剪特征随水分变化规律[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 106-110.
- [14] 夏振刚, 邓羽松, 赵媛, 等. 鄂东南花岗岩崩岗岩土抗剪强度与含水量的关系[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(6): 26-34.
- [15] 李凯, 王志兵, 韦昌富, 等. 饱和度对风化花岗岩边坡土体抗剪特性的影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊1): 267-273.
- [16] Lin J S, Zhu G L, Wei J, et al. Mulching effects on erosion from steep slopes and sediment particle size distributions of gully colluvial deposits[J]. Catena, 2018, 160: 57-67.
- [17] 干湿效应下崩岗区岩土抗剪强度衰减非线性分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 241-245.
- [18] Tao Y, He Y B, Duan X Q, et al. Preferential flows and soil moistures on a Benggang slope: Determined by the water and temperature co-monitoring[J]. Journal of Hydrology, 2017, 53: 678-690.
- [19] Wei Y J, Wu X L, Xia J W, et al. The effect of water content on the shear strength characteristics of granitic soils in South China[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 187: 50-59.
- [20] 李广信. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 43-44.
- [21] 刘亚栋. 考虑土体强度各向异性的边坡稳定性研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
- [22] 张文华. 花岗岩残积土的抗剪强度及土质边坡稳定性析[J]. 水文地质工程地质, 1994(3): 41-43.
- [23] Rose C W, Hairsine P B, Proffitt A P B, et al. Interpreting the role of soil strength in erosion processes[J]. Catena Supplement, 1990, 17: 153-165.
- [24] 吴丽珍. 南方崩岗侵蚀的岩土特性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2006.
- [25] 牛德奎. 华南红壤丘陵区崩岗发育的环境背景与侵蚀机理研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- [26] 马媛, 丁树文, 何溢钧, 等. 崩岗“五位一体”系统性治理措施探讨[J]. 中国水土保持, 2016(4): 65-68.
- [27] Goodman R E. Introduction to rock mechanics[M]. New York: Wiley, 1989.
- [28] Wakatsuki T, Tanaka Y, Matsukura Y. Soil slips on weathering-limited slopes underlain by coarse-grained granite or fine-grained gneiss near Seoul, Republic of Korea[J]. Catena, 2005, 60(2): 181-203.
- [29] 魏玉杰. 花岗岩风化岩土体力学参数的试验研究与稳定性数值模拟[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [30] 潘良福. 氧化铁胶体对崩岗土体抗剪特性的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
- [31] Knapen A, Poesen J, Govers G, et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2007, 80(1/2): 75-109.
- [32] Zhang W G, Zhang R H, Han L, et al. Engineering properties of the Bukit Timah Granitic residual soil in Singapore[J]. Underground Space, 2019, 4(2): 98-108.
- [33] Russell D J, Denness B, McCann D M. Shear-strength anisotropy variations in weathered Oxford clay[J]. Engineering Geology, 1978, 12: 337-344.
- [34] Fredlund D G, Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley and Sons, 1993.
- [35] Guo N, Zhao J D. The signature of shear-induced anisotropy in granular media[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 47: 1-15.
- [36] 吴美苏, 周成, 王林, 等. 根系和裂隙对土体水力和力学特性影响数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(310): 519-526.
- [37] Tong Z X, Fu P C, Zhou S P, et al. Experimental investigation of shear strength of sands with inherent fabric anisotropy[J]. Acta Geotechnica, 2014, 9(2): 257-275.