

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.S1.035

# 饱和度对风化花岗岩边坡土体抗剪特性的影响

李 凯<sup>1</sup>, 王志兵<sup>1</sup>, 韦昌富<sup>1,2</sup>, 颜荣涛<sup>1</sup>, 卢有谦<sup>1</sup>

(1. 桂林理工大学 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

**摘 要:** 强降雨易诱发风化花岗岩边坡浅层滑坡, 其滑坡滑动面多位于具有较大孔隙尺寸的强风化带。通过对广西玉林与梧州交界处风化花岗岩边坡浅层滑坡的现场勘查和对不同层位的土体进行物理力学试验, 研究了饱和度对湿热地区风化花岗岩双层土质边坡抗剪强度的影响, 发现两个风化带土体都存在一个“最优饱和度”使抗剪强度达到峰值, 但饱和度对抗剪强度指标的影响规律不同, 即饱和度对黏聚力影响很大, 对内摩擦角影响很小; 花岗岩全风化带与强风化带土体性质差异明显, 尤其表现在饱和度影响下抗剪强度特性方面, 从基质吸力理论和颗粒间胶结作用角度分析所发现的现象, 可以清楚地解释产生差异的机制, 为风化花岗岩边坡的开挖和滑坡的防治提供理论基础。

**关 键 词:** 风化花岗岩; 饱和度; 抗剪强度; 基质吸力; 胶结作用; 浅层滑坡

**中图分类号:** TU 452

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2016) 增 1 - 0267 - 07

## Effect of saturation on shear strength characteristics of weathered granite slope soils

LI Kai<sup>1</sup>, WANG Zhi-bing<sup>1</sup>, WEI Chang-fu<sup>1,2</sup>, YAN Rong-tao<sup>1</sup>, LU You-qian<sup>1</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** The shallow landslides are often triggered by heavy rainfall in weathered granite soil slopes. These slope failures usually occur in a strongly weathered granite layer which has a big pore size. These can cause great casualties and property losses. Through field investigation and laboratory experiments, the effect of saturation on the shear strength of highly weathered soils and completely weathered granite soils taking from the intersection of Yulin and Wuzhou are investigated. It is found that there exists an "optimal saturation" at which the shear strength of the soil reaches the maximum. The influence of saturation on both cohesion and internal friction angle does not show a unique trend. It is also shown that the cohesion is significantly effect by the saturation of the soils; but the friction angle is not. Completely weathered granite soils and the highly weathered granite soils are significantly different in their lithological, composition, construction and shear properties. The characters of the highly weathered soil and completely weathered granite soil are significantly different, especially in the relationship between saturation and shear strength. Based on the analysis of cementation effect and the principles of matric suction, a sound explanation for the mechanisms underlying the above-observed discrepancy is provided.

**Keywords:** weathered granite; saturation; shear strength; matric suction; cementation; shallow landslide

## 1 引 言

2010 年 6 月 1~2 日广西东南部发生强降雨, 导致玉林市容县和梧州市岑溪县接壤地区约 300 km<sup>2</sup> 花岗岩分布区暴发群发型滑坡、泥石流地质灾害数百处, 造成了 43 人死伤。现场勘查发现该地区滑坡

面多位于强风化带, 具有厚度小、发生突然、运动距离短特点, 可定性为自然成因的花岗岩残积土边坡在强降雨诱发下的区域性浅层滑坡泥石流地质灾害。

风化花岗岩边坡由于风化程度的不同而表现出不同于一般均质边坡的特性<sup>[1]</sup>, 对该类边坡稳定

收稿日期: 2015-03-07

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (No.41302227); 广西自然科学基金项目创新研究团队项目 (No.2012GXNSFGA060001); 广西自然科学基金青年项目 (No.2012GXNSFBA053138)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41302227), The Natural Science Foundation of Guangxi (2012GXNSFGA060001, 2012GXNSFBA053138).

第一作者简介: 李凯, 男, 1989 年生, 硕士研究生, 主要从事岩土工程与边坡稳定性方面的研究。E-mail: likai8563793@163.com

通讯作者: 王志兵, 男, 1982 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程与边坡稳定性方面的研究。E-mail: wangzhibing@163.com

性研究也较复杂。胡厚田等<sup>[2]</sup>用离心模型试验研究了花岗岩边坡破坏特征,发现含水率对边坡破坏形式有很大影响,但试验中应变片的粘贴质量和试验的边界效应难以得到有效控制。张永波等<sup>[3]</sup>从粒度成分方面研究了风化花岗岩边坡的稳定性,把花岗岩残积土作为一种混粒土,寻求土体性质变化的界限指标,虽然证明了粒度成分对土性的影响,但忽略了饱和度这一重要因素的作用。刘云鹏等<sup>[4]</sup>研究中发现钾长花岗岩全风化带岩质软弱,遇水易软化,在强降雨条件下极易发生圆弧滑动,而成散体结构的强风化带也具备发生类似变形破坏的条件。目前很多研究发现花岗岩类滑坡的滑坡面大多位于抗剪强度较低的全风化带,但对桂东南地区典型花岗岩滑坡现场勘查发现滑动面多位于强风化带。

降雨导致土体内饱和度变化影响边坡抗剪强度,从而导致边坡浅层滑坡最主要和最普遍的因素<sup>[5-7]</sup>。尽管已开展许多研究工作,目前国内外研究中对饱和度改变条件下风化花岗岩抗剪强度的变化规律仍然缺乏系统地、深入地认识。本文针对频发于广西东南部地区的风化花岗岩双层土质边坡降雨诱发滑坡问题,利用直剪试验,探讨饱和度变化对花岗岩风化岩土体抗剪强度的影响规律,分析降雨诱发浅层滑坡的机制。

## 2 典型滑坡概况和土体物理性质

### 2.1 桂东南花岗岩残积土典型滑坡概况

花岗岩风化是一个连续的渐变过程,湿热的气候环境使广西东南部地区花岗岩风化速度较快、风化层较厚、风化剖面具有明显的分带性,该地区花岗岩边坡在雨季常发生滑坡,这些滑坡灾害中尤以浅层滑坡最为多见而备受重视<sup>[7-8]</sup>。现场勘察发现该地区大多边坡植被茂盛,人为活动极少,坡度为 $40^{\circ} \sim 55^{\circ}$ ,坡高 $10 \sim 30$  m不等。边坡土体在地表以上分为全风化带和强风化带,钻孔发现地表以下依次为中风化带、弱风化带和未风化带3个风化带,由上至下呈明显的“上细下粗”的结构特征,其坚硬状态从可塑向坚硬过度;土层不同深度均存在孤石与风化裂隙面,且自上而下数量逐渐增多。该地区大多数滑坡滑坡面位于强风化带,典型滑坡见图1,滑坡地质剖面图见图2。

### 2.2 风化花岗岩物理性质

对全风化带(距地表 $2 \sim 5$  m)和强风化带(距地表 $6 \sim 10$  m)土体进行了有代表性地取样和试验和对边坡剖面不同层位土样进行颗粒分析试验,试验结果如图3所示。试验结果表明,全风化带土体

中大于 $2$  mm的颗粒含量不超过 $5\%$ ,小于 $5$  mm的颗粒含量大于 $50\%$ ,呈砖红色或棕红色,夹杂少量白色石英颗粒,原岩结构完全破坏,黏粒、粉粒含量高,排列紧密,黏结强度高;强风化带土体中大于 $2$  mm的颗粒含量不超过 $20\%$ ,石英含量较残积土多,偶见中风化或弱风化花岗岩孤石,小于 $5$  mm的颗粒含量为 $50\%$ ,以黄褐色为主,夹杂红、灰、白等色,土体为粗碎屑结构或团粒状结构,具有一定的结构强度,但相对松散,用手可用力捏碎。

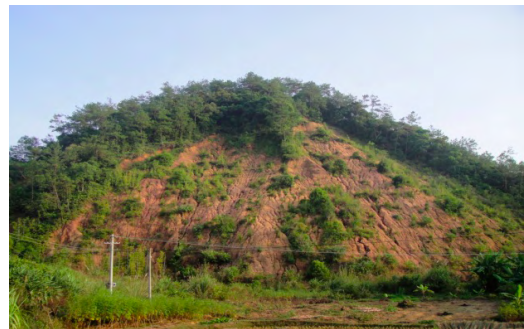


图1 花岗岩残积土滑坡图片  
Fig.1 Picture of granite residual soil and slide

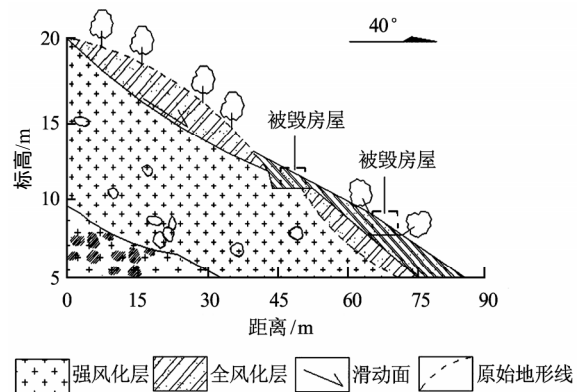


图2 花岗岩滑坡地质剖面图  
Fig.2 Geological profile of granite landslide

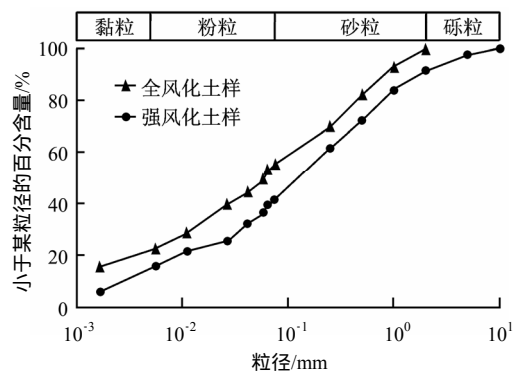


图3 颗粒分析曲线  
Fig.3 Gradation analysis curves of soil

根据土颗粒大小与结构特征,按《岩土工程勘

察规范》<sup>[9]</sup>，全风化带土体定名为粉质性黏土，强风化带土体定名为粉质性砂土。两层土的物理指标见表 1。对比 2 层土物理指标相发现，密度、液限、塑限、孔隙比和渗透系数都有随深度增加而增大的变化规律，而土粒相对密度和含水率随深度增加而降低。

表 1 基本物理参数

Table 1 Basic physical properties of samples

取样位置	土粒相对密度	天然含水率/%	天然密度/(g/cm <sup>3</sup> )	孔隙比	液限/%	塑限/%	渗透系数/(cm/s)
全风化带	2.71	21	1.82	0.69	45.8	30.3	5.59×10 <sup>-7</sup>
强风化带	2.66	17	1.73	0.77	43.7	28.6	1.45×10 <sup>-5</sup>

### 3 不同饱和度下风化花岗岩土体的直剪试验

饱和度对抗剪强度指标的影响很早以前就引起研究者的关注，现有的试验结果初步表明，饱和度与土体强度绝不是简单的线性关系或是此消彼长的关系<sup>[10-12]</sup>，如何从定量的角度建立土体饱和度与土体强度的关系，对于基础工程设计及边坡稳定性预测有着重要的意义。

#### 3.1 直剪试验方案

考虑到强风化带土体具有一定结构性，采用重塑土样所得结果对实际边坡稳定性更偏于安全，本次在控制土样不同饱和度条件下对风化花岗岩边坡两层土体重塑土样进行不排水直接剪切试验，分析饱和度对抗剪强度参数黏聚力和摩擦角的影响，对比饱和度对两层土体剪切性质影响的异同点。根据边坡两层土体性质特点，控制全风化带土样干密度 $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ ，过 2 mm 筛；强风化带土样干密度 $\rho_d = 1.5 \text{ g/cm}^3$ ，过 5 mm 筛。饱和度设定为 20%、40%、60%、80%、100%，对应的全风化带土体含水率为 5.1%、10%、15.4%、20.5%、25.6%；强风化带土体含水率为 5.9%、11.8%、17.6%、23.5%、29.4%。考虑到土样浸水易散性以及低含水率（饱和度为 20%）时制样难度较大，采用恒温恒湿箱对土样含水率进行控制，具体步骤：将现场取到的土样风干后分别过 2 mm 和 5 mm 筛，制成试验所用土样。按土样含水率 19%加水拌匀，静置 48 h 使土样吸湿后将试样分 3 层压实装入环刀，制成环刀样。将制成的含水率为 19%的环刀样放入恒温恒湿箱，设置湿度为 25%进行脱湿，对于含水率为 100%的试样直接进行抽气饱和。将达到设置饱和度的环刀样在 100、200、300、400 kPa 的垂直压力下进行不排水直剪试验。

### 3.2 试验结果与分析

#### 3.2.1 不同饱和度试样的应力-应变关系

图 4、5 分别为全风化带和强风化带不同饱和度试样在同一压力条件下应力-应变关系。两种土体均表现出相同的塑性变形特征，即应力前期增长较

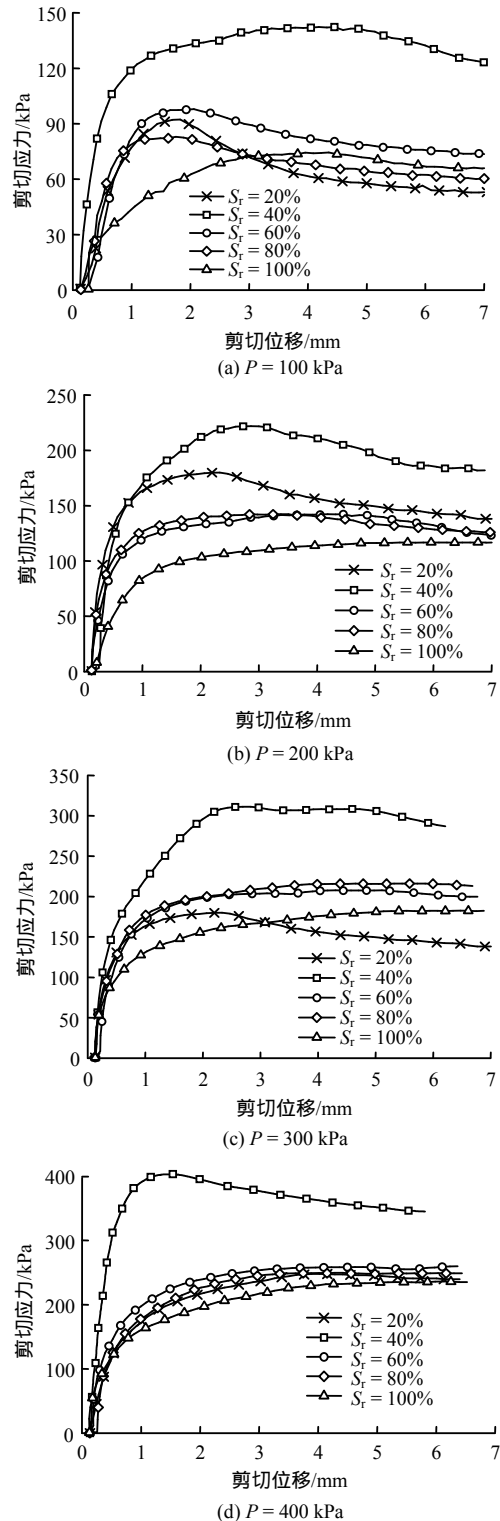


图 4 相同垂直应力下全风化带土样剪应力与剪切位移的关系

Fig.4 Relationships between shear stress and shear displacement of completely weathered zone soil samples under same vertical pressure

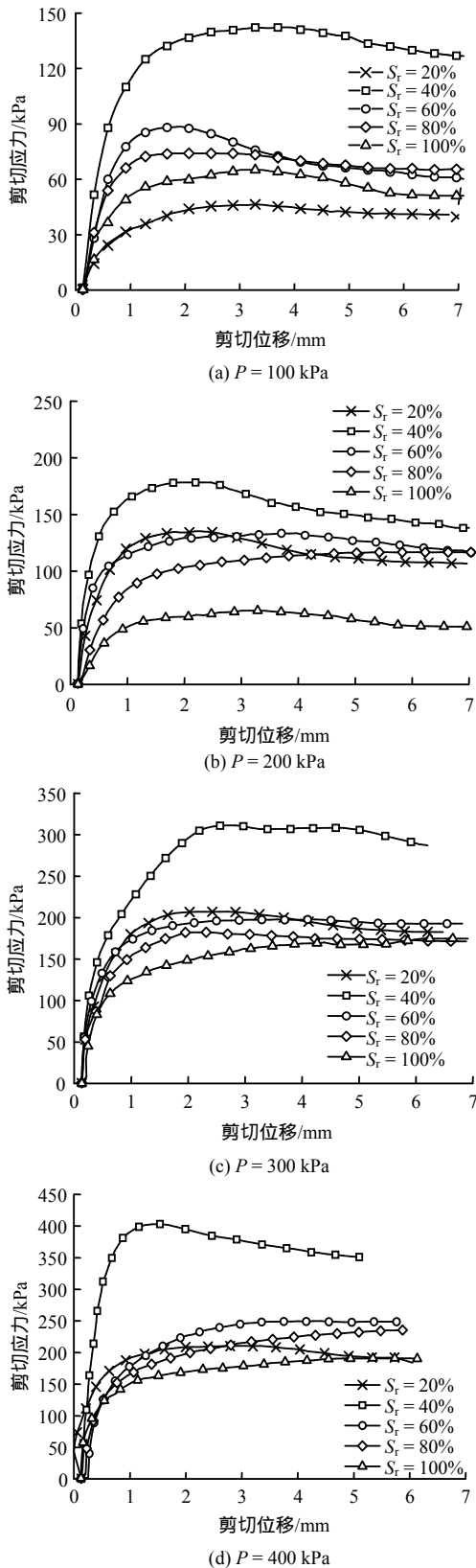


图5 相同垂直应力下强风化带土样剪应力与剪切位移的关系

Fig.5 Relationships between shear stress and shear displacement of samples highly weathered soil under same vertical pressure

快, 后期增长减缓, 曲线斜率(剪切刚度)由大到小呈现连续变化过程, 两种土均有明显的峰值强度,

残余强度变化很小, 且在相同饱和度和垂直压力下, 风化程度更高的全风化带土体的峰值强度明显高于强风化带土体的峰值强度。

3.2.2 不同饱和度试样的抗剪强度与垂直压力的关系

图6为全风化带和强风化带在土样不同饱和度条件下的抗剪强度与垂直压力关系。从图中可以看出, 在同一饱和度条件下土体抗剪强度随着垂直压力的增大而增大, 当  $S_r = 40\%$  时, 两种土抗剪强度均达到最大值; 相同饱和度条件下全风化带土体抗剪强度明显高于强风化带土体的抗剪强度, 与滑动面位于强风化带的现场勘查结果是相吻合的。

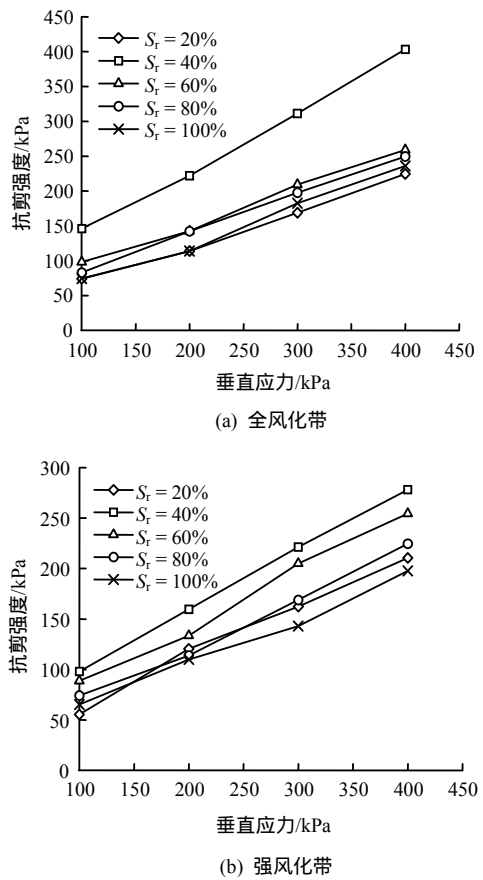


图6 不同饱和度试样的抗剪强度与垂直压力的关系  
Fig.6 Relationships between shear stress and vertical pressure of soil samples under different saturations

图7为花岗岩全风化带和强风化带土体不同饱和度试样的抗剪强度指标黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\phi$  随饱和度变化曲线。两种土黏聚力在不同饱和度影响下变化明显,  $S_r = 40\%$  左右时, 黏聚力出现峰值;  $S_r > 40\%$  时, 黏聚力呈下降趋势, 且强风化带土体减小的速率比全风化带土体大, 见图7(a)。两种土内摩擦角受饱和度影响很小, 不同饱和度下的内摩擦角均在  $26^\circ \sim 30^\circ$  间波动, 但  $S_r = 40\%$  左右时, 内摩擦角仍出现不明显的峰值现象, 见图7(b)。这种现

象说明，土体抗剪强度指标中黏聚力  $c$  对饱和度的变化更敏感，也可以看出在同一饱和度条件下全风化带土体黏聚力明显大于强风化带土体，而内摩擦角差异很小甚至无差异。

### 3.3 分析与讨论

由库仑定律  $\tau_f = c + \sigma \tan \varphi$  得知黏聚力  $c$  与内摩擦角  $\varphi$  是影响土体抗剪强度的重要因素，试验结果显示风化花岗岩岩土体黏聚力受饱和度影响很大，内摩擦角受饱和度影响很小。土体饱和度的变化仅仅是一种宏观表象，它引起土体的微观结构和性质的改变才是土体强度改变的直接因素。下文从基质吸力和胶结作用两方面分析饱和度对抗剪强度的影响。

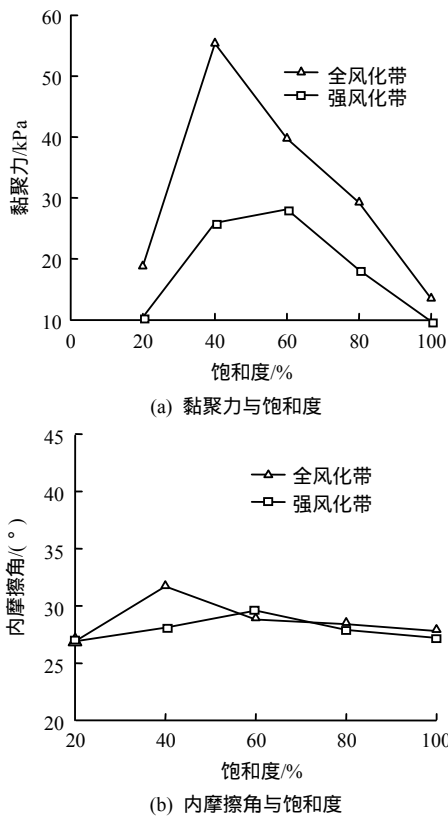


图 7 黏聚力和内摩擦角与饱和度关系

Fig.7 Relationships between cohesion and inter friction angle vs. saturation

#### (1) 基质吸力对抗剪强度的影响

基质吸力作为一个描述土体内部结构变化的状态变量，是影响非饱和土强度性质的重要因素<sup>[13-14]</sup>。结合 Bishop 提出的非饱和土力学平均有效应力定义，将参数  $\chi$  取为饱和度即  $\sigma' = (\sigma_n - u_a) + s_r(u_a - u_w)$ ，就可以将基质吸力与饱和度同时引入抗剪强度理论中。

由 Bishop 有效应力得出的抗剪强度理论为

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \varphi = c + (\bar{\sigma} + s_r s) \tan \varphi \quad (1)$$

式 (1) 可重新整理为如下形式：

$$\tau_f = (c + s_r s \tan \varphi) + \bar{\sigma} \tan \varphi = c' + \bar{\sigma} \tan \varphi \quad (2)$$

式中：有效黏聚力  $c' = c + s_r s \tan \varphi$  表示由包括范德华力等粒间物理化学在内的传统黏聚力  $c$  及湿吸力与可变结构吸力之和  $s_r s \tan \varphi$  组成。根据前人研究成果<sup>[15]</sup>及试验结果中内摩擦角随饱和度变化很小的特点，对饱和土与非饱和土统一取饱和土的内摩擦角计算，即  $\tan \varphi' = \tan \varphi$ 。

研究表明，基质吸力提供的土体黏聚力主要来自于土-水特征曲线的主要变化区(为毛细作用区)，而毛细作用主要发生在土-水特征曲线的过渡区<sup>[16]</sup>，如图 8 所示，此时土体中的水和空气是连通的，水-气界面的收缩膜上的表面张力的反作用力作用在土颗粒上产生压力，宏观表现为土的黏聚力增加<sup>[17]</sup>。若土的饱和度减少到一定值或增加至接近饱和时毛细作用消失，从而造成黏聚力下降。基质吸力对抗剪强度的贡献存在一个临界值，试验结果中表现为主要过渡区(饱和度为 40%~60%)的抗剪强度及黏聚力出现峰值。

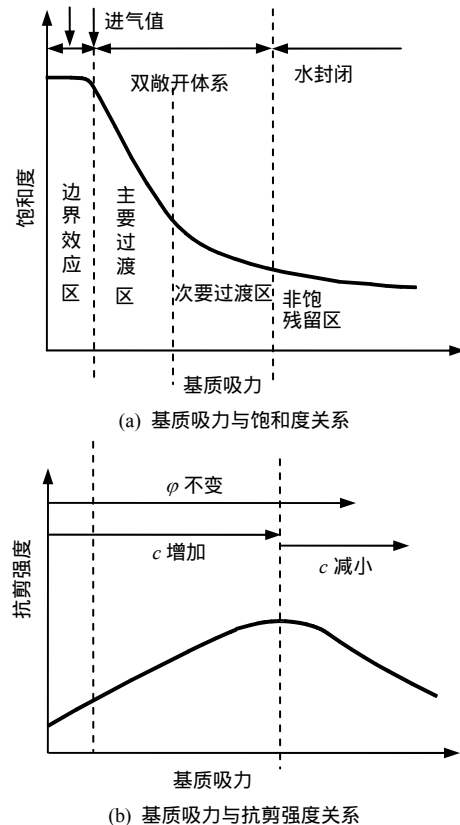


图 8 非饱和土抗剪强度和土-水特征曲线的关系示意图

Fig.8 Relationships between unsaturated soil shear strength and soil-water characteristic curve

#### (2) 胶结作用对抗剪强度的影响

当土体中饱和度达到一定值时，水分会和土中游离氧化铁颗粒形成溶胶胶体，而后填充在颗粒间

的孔隙中,并且与黏土矿物形成胶结体,引起土体常规黏聚力  $c$ ,代表了诸如范德华力等粒间物理化学力所产生的抗剪力大大提高,而土的含水率(饱和度)是决定胶结作用强弱的关键因素,土体在过低的含水率条件下不会形成溶胶胶体和团粒状胶体,过高的含水率会导致颗粒间水膜厚度增大,同样不会形成胶结体。研究发现,饱和度为 40%~60% 时胶结作用最强烈,对土体抗剪强度的贡献最大。为了探讨胶结作用对抗剪强度的影响机制,对土样进行了电镜扫描试验和常规硅酸盐化学全分析试

验,见图 9 和表 2。两种土中  $\text{FeO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  成分较多,起胶结作用的游离  $\text{FeO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  把土颗粒连接在一起,形成较大聚集体,加强了土颗粒间接触点的联结强度。扫描电镜结果也表明两种土体中存在有团粒状胶结体,但全风化带中颗粒细小,形成的胶结体体积较大且致密,见图 9(a)、9(b),而强风化带土体较好地保留了原岩结构特点,胶结形成的团粒体积较小,且粒间存在较大孔隙,因此导致降雨或外部荷载影响下强风化带具有较高的压缩变形,进而导致整体滑坡面的形成。

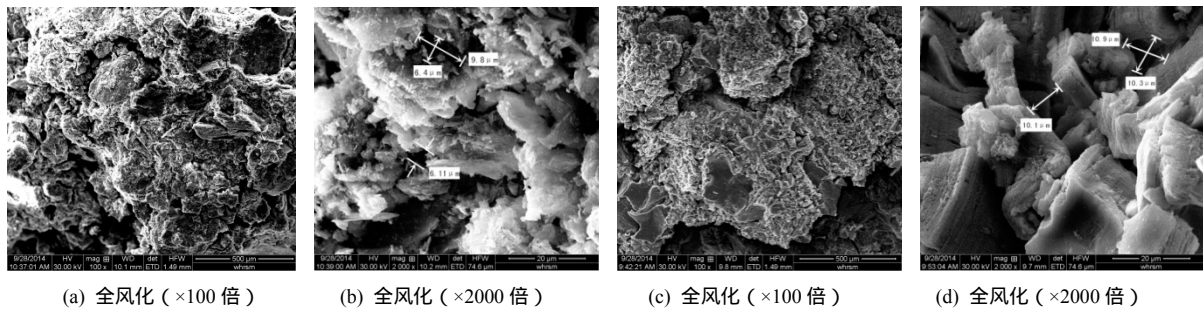


图 9 全风化带和强风化带土样在扫描电子显微镜下的形貌特征

Fig.9 SEM morphology of highly weathered soil and completely weathered soil

表 2 常规硅酸盐化学全分析分析结果

Table 2 Analysis results of silicate

检验土样	常规硅酸盐化学全分析分析结果/%								
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	烧失量
残积土	69.83	16.91	4.58	0.19	1.45	0.056	0.017	0.17	6.57
全风化土	68.28	16.36	3.07	1.14	4.31	0.230	0.032	0.65	4.97

### (3) 全风化花岗岩与强风化花岗岩抗剪性质对比

根据扫描电镜的结果分析,全风化带中矿物晶体已完全转变为细小黏土颗粒,部分已胶结成较大土块,土粒间微小孔隙普遍存在;颗粒间黏结絮状物质较多,说明该土体有较强的黏结强度(见图 9(a)、9(b))。强风带土体在一定程度上保留了原岩结构特点,具有一定结构性,晶体被细小黏土颗粒包围,少部分已风化变成黏土颗粒;晶体间存在明显较大孔隙和裂隙,方向性明显的片状残留物普遍(见图 9(c)、9(d)),具有较高的压缩性;直剪试验结果显示在同一饱和度情况下全风化带土体的抗剪强度和黏聚力明显高于强风化带土体(见表 3)。据此可以进一步分析,暴雨或持续降雨条件下边坡土体接近饱和,重度增大,胶结作用和基质吸力降低甚至消失,强风化带土体结构性遭到破坏,导致抗剪强度明显降低;此时全风化带抗剪强度明显高于强风化带,加之强风化带自身重力和受到上层全风化带下推力的作用,延斜坡表面的下滑力急剧增大,极易发生突发性浅层滑坡。

表 3 直剪试验结果

Table 3 Results of direct shear test

土样	饱和度 /%	试验组数 /组	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /( $^\circ$ )
残积土	20	8	15.00~24.00	26.9~31.0
	40	6	28.80~60.00	28.0~32.0
	60	6	25.00~45.00	27.6~30.0
	80	6	20.00~30.00	28.0~30.0
	100	6	10.00~20.00	27.0~29.0
全风化土	20	10	10.00~17.00	27.9~32.0
	40	8	25.90~39.00	29.0~32.0
	60	8	21.00~34.00	28.0~31.0
	80	8	18.16~24.60	27.8~30.0
	100	6	8.00~16.00	27.2~29.6

## 4 结 论

(1) 风化花岗岩岩土体的抗剪强度与饱和度呈非线性关系,且对全风化带和强风化带土体均在一个 40%~60% 的“最优饱和度”使抗剪强度达到峰值强度;此外,饱和度对抗剪强度指标的影响规律不同,对黏聚力影响很大,对内摩擦角影响很小。

(2) 土体饱和度的变化仅仅是一种宏观表象, 它引起土体的胶结结构和基质吸力的改变才是土体抗剪强度改变的直接因素。

(3) 暴雨或持续降雨条件削弱了土体胶结作用和基质吸力, 具有较大孔隙尺寸和较少黏土矿物含量的强风化带结构性遭到破坏, 抗剪强度明显低于全风化带, 加之其自身重力和上层土体的推力作用, 强风化带极易发生剪切破坏, 诱发浅层滑坡。

### 参 考 文 献

- [1] 林宗元. 试论红土的工程分类[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(1): 83 - 96.  
LIN Zong-yuan. Discuss the engineering classification of the red clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1989, 11(1): 83 - 96.
- [2] 赵晓彦, 胡厚田. 类土质边坡特性初探[J]. 工程地质学报, 2005, 13(1): 81 - 84.  
ZHAO Xiao-yan, HU Hou-tian. Preliminary study on a soil-like slope[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2005, 13(1): 81 - 84.
- [3] 张永波, 张云, 陈戈, 等. 花岗岩残积土工程类型划分体系研究[J]. 地球学报, 1997, 18(2): 200 - 204.  
ZHANG Yong-bo, ZHANG Yun, CHEN Ge, et al. The system of engineering category dividing of granite residual soils[J]. **Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences**, 1997, 18(2): 201 - 204.
- [4] 刘云鹏, 黄润秋, 霍俊杰. 某高速公路花岗岩边坡稳定性评价及防护措施研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(1): 19 - 25.  
LIU Yun-peng, HUANG Rui-qiu, HUO Jun-jie. Study on stability evaluation and protection measures of weathered granite slope in a certain expressway[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2008, 28(1): 19 - 25.
- [5] 刘新喜, 夏元友, 蔡俊杰, 等. 降雨入渗下强风化软岩高填方路堤边坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1705 - 1709.  
LIU Xin-xi, XIA Yuan-you, CAI Jun-jie, et al. Study on stability of high-filled embankment slope of highly weathered soft rock under rainfall infiltration[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(8): 1705 - 1709.
- [6] 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 Xiao-ping, ZHOU Qiu-juan, CAI Xiao-ying. Physical properties and shear strength characteristics of high liquid limit granite residual soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(6): 901 - 908.
- [7] 汤连生, 桑海涛, 宋晶, 等. 非饱和花岗岩残积土粒间联结作用与脆弹塑性胶结损伤模型研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2878 - 2885.  
TANG Lian-sheng, SANG Hai-tao, SONG Jin, et al. Research on soil particle joint function and brittle-elastoplastic cement damage model of unsaturated granite residual soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(10): 2877 - 2888.
- [8] 郭璇, 赵成刚, 于威威. 非饱和土边坡稳定的安全分析及进展[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(1): 14 - 18.  
GUO Xuan, ZHAO Cheng-gang, YU Wei-wei. Stability analysis of unsaturated soil slope and its progress[J]. **China Safety Science Journal**, 2005, 15(1): 14 - 18.
- [9] 魏宁, 茜平一, 傅旭东. 降雨和蒸发对土质边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 778 - 786.  
WEI Ning, QIAN Ping-yi, FU Xu-dong. Effects of rainfall infiltration and evaporation on soil slope stability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(5): 778 - 786.
- [10] 建设部综合勘察有限责任公司. GB 50021-2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.  
Comprehensive Institute of Geotechnical Investigation and Surveying Ministry of Construction. GB50021-2001 The code for prospecting the geological engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.
- [11] 赵建军, 王思敏, 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 Jian-jun, WANG Si-jing, SHANG Yan-jun, et al. Control factors on shear strength of completely decomposed granite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(4): 624 - 628.
- [12] 刘胜利, 陈善雄, 刘伟, 等. 风化片岩残积土剪切特性研究[J]. 岩土力学, 2005, 34(12): 3520 - 3526.  
LIU Sheng-li, CHEN Shan-xiong, LIU Wei, et al. Study of shear properties of weathered schist residual soil. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(12): 3520 - 3526.
- [13] LU N, Godt J W, WU D T. A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil[J]. **Water Resources Research**, 2010, 46(5): W05515.
- [14] 赵成刚, 李舰, 刘艳, 等. 非饱和土力学中几个基本问题的探讨[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1825 - 1831.  
ZHAO Cheng-gang, LI Jian, LIU Yan, et al. Discussion on some fundamental problems in unsaturated soil mechanics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(7): 1825 - 1831.
- [15] SEBOONG O H, NING Lu, KIM Y K, et al. Relation between the soil water characteristic curve and suction stress characteristic curve: Experimental evidence from residual soils[J]. **Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering**, 2012, 138(1): 47 - 57.
- [16] 王丽, 梁鸿. 含水率对粉质黏土抗剪强度的影响研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2009, 30(1): 170 - 174.  
WANG Li, LIANG Hong. The influence of the water ratio on the shearing strength of silty clay[J]. **Journal of Inner Mongolia Agricultural University(Natural Science Edition)**, 2009, 30(1): 170 - 174.
- [17] ZHAO C G, LIU Y, GAO F P. Work and energy equations and the principle of generalized effective stress for unsaturated soils[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2010, 34(9): 920 - 936.