

# 酸蚀环境花岗岩残积土饱和含水率的时变特征试验

张茂林<sup>1</sup>, 谢清忠<sup>1</sup>, 傅鹤林<sup>2</sup>, 张蒙<sup>1</sup>, 李青隆<sup>3</sup>, 董辉<sup>3\*</sup>

(1. 中交第四公路工程局有限公司, 北京市 100022; 2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075;

3. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105)

**摘要:**为了明晰饱和含水率变异性与斜坡稳定的相关性,重点开展花岗岩残积土的饱和含水率受酸影响的特征试验,通过直剪试验测试在竖向受载和酸化时长双因素影响下的饱和含水率变化规律及其特征值,并以电镜扫描获知的结构特征推断其变异内因。研究结果表明:① 竖向压力 $\sigma=300$  kPa时为线性与非线性关系转折点,且在同一竖向压力作用下,酸化时长与饱和含水率呈正相关;② 在酸化时长30 d、pH=4时,矿物颗粒表层离子与酸液中离子交换效能最高,因此pH=4是影响饱和含水率的酸度特征值;且在pH>4酸蚀下的饱和试样水化学反应接近完全时存在峰值饱和含水率;③ 微观结构反映了酸蚀作用下饱和含水率变化主要与其胶结类型有关,总结了不同酸度及时间下产生的胶结类型模式。

**关键词:**花岗岩残积土;酸蚀作用;饱和含水率;时变特征;胶结类型

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

## 0 引言

工程地质灾害的发生主要与土体中的饱和含水率密切相关,常作为在斜坡失稳计算与评估方面的重要计算指标。然而,在试验室中饱和含水率却被视为物理恒定特性进行处理,实际中由于研究对象所处环境的差异性,如温度、气压、受载、化学等因素的影响,饱和含水率并非恒值,而是一个动态值,视为空值必然对工程稳定性有影响。土在酸性条件下,酸中的介质会对土体结构产生破坏或与土中粒子进行化学或电化学反应而发生一系列变化。因此有学者研究饱和含水率(量)在酸蚀条件下的变化规律,例如顾剑云等<sup>[1]</sup>配置了pH=3.4的HCl溶液,观察到酸蚀作用下土体饱和后的含水率受到影响,但受样本数和酸化时长影响较小,土样饱和后的含水率与酸化时长没有明显的相关规律;梁冰等<sup>[2]</sup>在研究酸碱淋溶对尾矿砂含水率和重金属含量的影响时,测得不同pH溶液动态淋溶后的尾矿砂含水率,结果表明:经酸碱溶液淋溶后尾矿砂土体的含水率出现增加的现象,说明研究对象受酸碱淋溶后其饱和含

水率也将存在变化;于海浩等<sup>[3]</sup>指出土体被氯化钠溶液饱和后,土颗粒会吸附水化的阳离子,增加土颗粒固定电荷,导致膨胀力增加,而随着溶液浓度的增加双电层厚度与膨胀力降低,会降低试样的膨胀性。而土体的膨胀过程会导致空隙率变化,从而改变饱和含水率量值。目前,虽然未完全掌握化学环境对土体饱和含水率的影响程度和规律,但是一定程度证明了饱和含水率易受化学环境的影响。

为了更好地应对国家基建工程中复杂地质条件下岩土灾害问题的理论指导需求,本文以湖南临湘詹桥花岗岩残积土斜坡流滑灾害为例,开展酸蚀环境下花岗岩残积土饱和含水率的动态变化特征研究。通过试验控制竖向压力和酸化时长双因素条件,测试不同工况下饱和含水率的动态变化,并通过电镜扫描试验分析酸蚀后试样的微观形貌特征。以便为偏酸性环境下的坡地岩土体稳定性精准评估提供理论参考。

## 1 花岗岩残积土天然酸性环境差异

室内土工试验通常在工程现场取得原状土,但原状土内部存在的化学环境差异,必然导致土体的

收稿日期:2021-06-18

基金项目:湖南创新型省份建设专项经费资助项目(编号:2019RS1059);湖南省教育厅重点项目(编号:19A477)

作者简介:张茂林,男,大学本科,高级工程师.E-mail:366403910@qq.com

\*通信作者:董辉,男,博士,教授.E-mail:donghui@xtu.edu.cn

物理力学性质变化。已有研究发现:相邻地段取土位置或深度不同,其物理力学特性也存在差异,而土体酸蚀作用的差异主要由时空变异性所致,主要与两个方面有关:①与地质构造作用相关,花岗岩侵入岩脉或其风化壳与周围岩土体物理力学性质差异较大,造成斜坡的坡体结构、渗流场和岩土体物理力学性质的差异化<sup>[4]</sup>,因而导致了成土酸性环境的差异;②与土体的风化作用相关,不同风化程度导致了不同的地质化学过程,而通常所说的岩土体风化包括物理风化和化学风化,其化学风化主要来源于降(酸)雨和地下水,在长期的侵蚀、矿物成分转化、干湿循环作用下相邻岩土体矿物颗粒表面存在化学成分积累差异,从而导致同一取样点位置的土体内部酸性环境存在差异。

## 2 试验概况与试验方法

### 2.1 试验概况

取湖南临湘詹桥滑坡处的花岗岩残积土进行一维X衍射试验分析,矿物成分及质量百分比检测结果如表1所示。购置商用矿物配比重塑土[图1(a)],重塑花岗岩残积土与天然滑坡处的残积土密度和含水率相同,天然密度为 $1.57\text{ g/cm}^3$ ,含水率为 $15.17\%$ 。避免酸性腐蚀下含水率变化受 $d>0.5\text{ mm}$ 颗粒分布的影响<sup>[5]</sup>;重塑土按最大粒径 $0.5\text{ mm}$ 上限配制,配比重塑土颗粒级配曲线如图1(b)所示,其中配比重塑花岗岩残积土的液限 $w_L=30.17\%$ ,塑限 $w_P=21.70\%$ 。

表1 花岗岩残积土矿物成分及百分比含量 %

蒙脱石	伊利石	正长石	高岭石	石英	闪透石
9	12	44	18	13	4

### 2.2 试验方法与步骤

试验采用 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 和 $\text{HNO}_3$ 混合配制的酸性溶液,试验将浓硫酸(浓度 $98\%$ )和浓硝酸(浓度 $57\%$ )各自稀释至 $3\text{ mol/L}$ ,再按体积比 $V(\text{H}_2\text{SO}_4):V(\text{HNO}_3)=2:1$ 混合。由于内陆地区降雨以 $\text{pH}=5$ 作为酸雨的界限值,同时最小能达到 $\text{pH}=2.6^{[6-7]}$ 。故采用超纯水配制成 $\text{pH}=5, 4, 3$ 共3种酸性溶液供试验使用。

依据相关学者研究化学环境对岩土体的浸泡时间一般控制为 $1\sim 28\text{ d}^{[8]}$ ,并且矿物演化反应在数周内发生<sup>[9]</sup>,故本试验方案中酸化时长设计为3组(1 d、

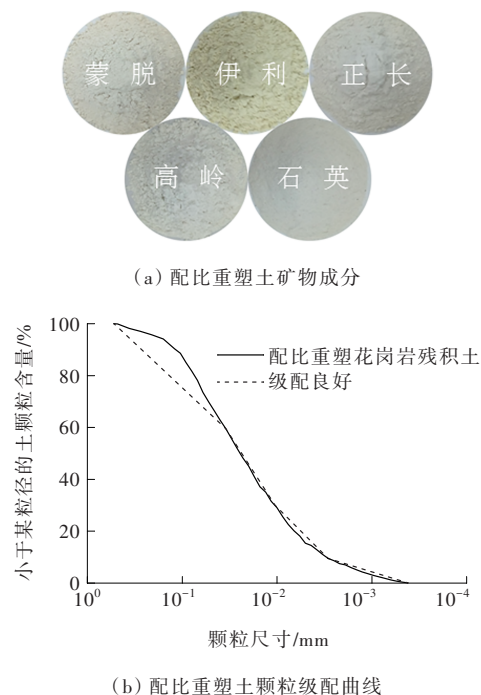


图1 配比重塑花岗岩残积土矿物成分与颗粒级配曲线

15 d、30 d),压力为4组( $100\text{ kPa}$ 、 $200\text{ kPa}$ 、 $300\text{ kPa}$ 、 $400\text{ kPa}$ ),每组4个试样,总计48个试样。取已备好的 $\text{pH}=5, 4, 3$ 这3种酸性溶液和 $\text{pH}=7$ 中性溶液,击实制样,并抽真空饱和,然后分别浸泡1 d、15 d和30 d;此外,所用制样溶液、浸泡溶液和固结溶液是同一酸性或中性溶液,以消除试样与外部溶液交换瞬时试样内、外部反应的时间滞后性<sup>[2]</sup>。试样切取示意图见图2。

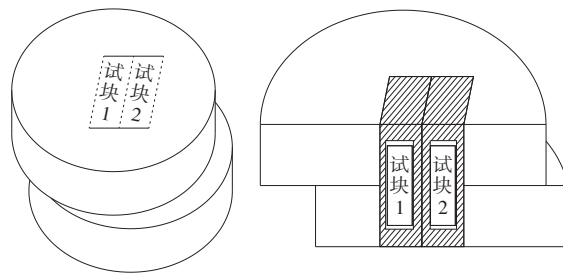


图2 试样切取示意图

依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),按2 h每级进行分级加载试验,再按剪切速度 $0.8\text{ mm/min}$ 进行快剪试验。剪切结束后,即刻烘干并记录相应数值。

## 3 酸蚀作用下饱和含水率时变特性

### 3.1 竖向压力对饱和含水率的影响

图3为不同 $\text{pH}$ 值下竖向压力 $\sigma$ 与饱和含水率 $w$

关系曲线,表2为竖向压力作用下饱和含水率变化量。

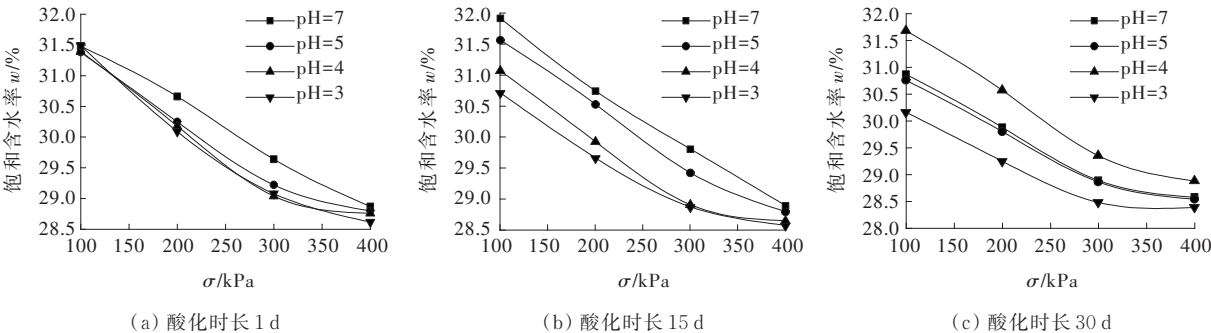


图3 不同pH值下竖向压力与饱和含水率关系曲线

表2 竖向压力作用下饱和含水率变化量

酸化时长/ d	压力 300 kPa 和 400 kPa 处的饱和含水率之差/%				饱和含水率最大值降低率/%			
	pH=3	pH=4	pH=5	pH=7	100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa
1	0.46	0.28	0.42	0.77	0.35	1.86	2.02	0.87
15	0.30	0.26	0.63	0.91	3.76	3.54	3.12	1.89
30	0.19	0.45	0.32	0.31	4.80	4.32	2.97	1.70

从图3和表2可知:

(1) 试样的饱和含水率随竖向压力增大而降低,且在压力为100~300 kPa时大致呈线性相关;酸蚀试样的饱和含水率在压力300 kPa处出现拐点,对比发现 $\sigma=300$  kPa与 $\sigma=400$  kPa的饱和含水率差异程度较小(表2)仅为0.19%~0.63%,在100 kPa、200 kPa竖向压力作用下,酸化时长与饱和含水率最大值降低率呈正相关;当 $t=30$  d同竖向压力状态下饱和含水率最大值降低率达4.80%。

(2) 当酸化时长30 d时,在 $\sigma=300$  kPa,无酸蚀试样的饱和含水率降低幅度开始变缓,且pH=7、5的曲线基本重合,表明酸化时长达数周后,无酸和弱酸试样内部的水化学效能对饱和含水率的影响程度相近;经pH=4酸蚀后的饱和含水率明显比其他酸

蚀或无酸蚀的要高,由于pH=4时矿物颗粒表层离子与酸液中离子交换效能更高,容易使低价的 $K^+$ 、 $Na^+$ 释放到溶液中,因此颗粒从溶液中可选择被吸附的离子浓度也就最大,结合水增多进而影响到饱和含水率。

将酸蚀花岗岩残积土饱和含水率与竖向压力进行参数拟合。酸蚀花岗岩残积土( $pH<7$ )的饱和含水率与竖向压力曲线符合对数公式(1):

$$w=a\ln \sigma+b \tag{1}$$

式中: $a$ 为酸度对饱和含水率的影响因子; $b$ 为酸化时长影响因子。

参数拟合结果见表3。公式(1)能直接反映出竖向压力对饱和含水率的影响,可预测荷载作用下不同埋深处的饱和含水率大小。

表3 酸蚀花岗岩残积土饱和含水率与竖向压力的拟合参数

pH	不同酸化时长(d)时饱和含水率与竖向压力的拟合参数								
	1			15			30		
	$a$	$b$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$
5	-1.908	40.217	0.991	-2.015	40.962	0.982	-1.655	38.426	0.987
4	-1.982	40.542	0.984	-1.820	39.468	0.986	-2.078	41.341	0.983
3	-2.112	41.222	0.997	-1.586	38.026	0.994	-1.352	37.320	0.981

3.2 饱和含水率的时间效应分析

时间效应也是试验中必不可少的考虑参量之一(涉及到岩土体内部物质的运动、变化的持续性、发

生的顺序性)。

图4为不同pH值下酸化时长与饱和含水率关系曲线。

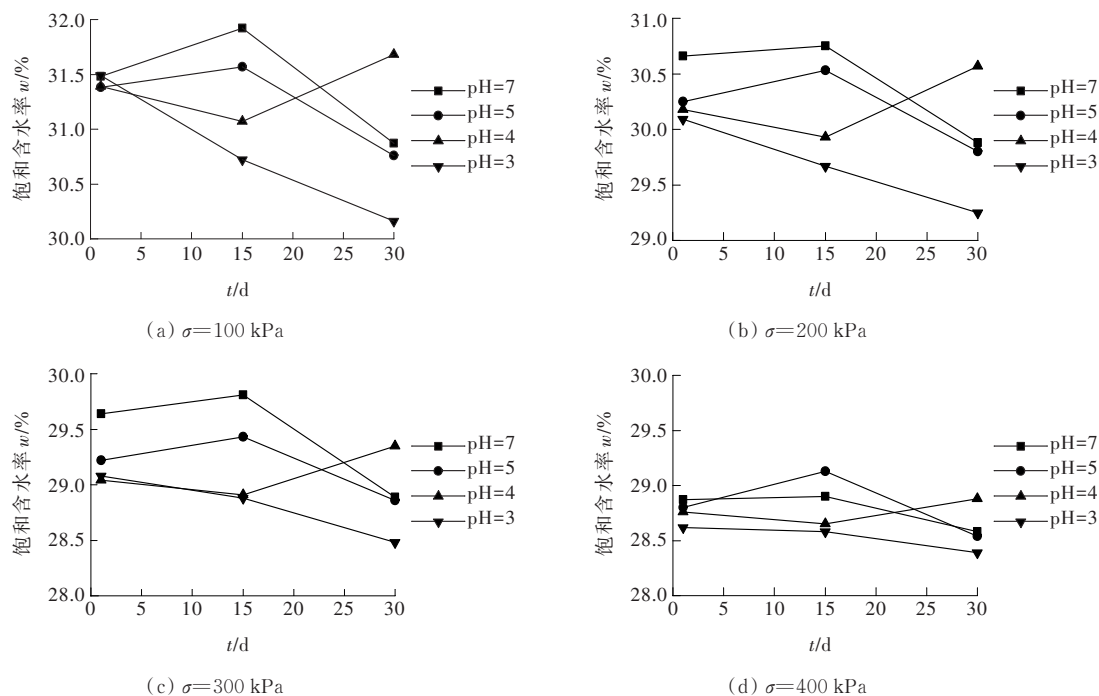


图 4 不同 pH 值下酸化时长与饱和含水率关系曲线

从图 4 可知: pH=5、7 时, 在  $t=15$  d 试样的饱和含水率达到峰值, 随后下降, 表明 pH 值较大时花岗岩残积土的饱和含水率在水化学反应达到数周后存在峰值饱和含水率, 但 pH=3 时试样的饱和含水率随酸化时长增加呈单调下降趋势。在 pH=4 且  $t=15$  d 时饱和含水率最小, 推测与酸度特征值有关, 可能是与该 pH 值下矿物成分转化相关, 这一结果与赵宇等<sup>[9]</sup>在研究抗剪强度演化与酸雨引发滑坡的关系时的结论相契合, 即浸泡过程中发生了水化学反应, pH 值差异导致试样结构性变化, 酸蚀后留下孔洞(图 5)。因此酸蚀花岗岩残积土饱和含水率时变特征具有 pH 特征值可得到印证。

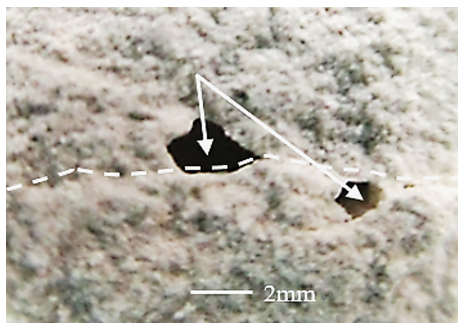


图 5 试样剪切破坏后的剖视图

从表 2 中发现: 较低压力(100 kPa、200 kPa)状态下, 花岗岩残积土的饱和含水率最大值降低率变化幅度随酸化时长的增大而升高; 在较高压力(300

kPa、400 kPa)状态中,  $t=15$  d、30 d 时饱和含水率变化幅度相近, 在微观结构上体现为试样内部反应受到约束, 从离子反应上可能是反应接近完全的现象, 与前人研究酸污染条件下花岗岩残积土崩解特性试验中描述的双电层结构趋于稳定时致使浸泡 28 d 相对于浸泡 14 d 崩解增加量不明显<sup>[10]</sup>的结论是相似的。

### 3.3 强度指标及水化学作用分析

强度指标与酸化时长的关系曲线见图 6。

从图 6(a)中发现: 饱和试样内摩擦角变化不大, 说明内摩擦角受酸度及酸化时长的影响较小。另外酸蚀下的饱和花岗岩残积土存在滑动摩擦, 其表达式为:

$$\mu = \frac{T}{N} = \tan \varphi_{\mu} \quad (2)$$

式中:  $\mu$  为摩擦系数;  $N$  为正压力;  $T$  为表面摩擦力;  $\varphi_{\mu}$  为滑动摩擦角。

实际上饱和试样在剪切过程中黏土颗粒不可能是平面接触, 剪切面必存在颗粒重新排列和颗粒破碎现象, 内摩擦角在小范围波动主要是咬合作用所致。内摩擦角随酸化时长关系曲线变化趋势与图 4 中不同 pH 值下酸化时长与饱和含水率关系变化基本一致, 表明内摩擦角主要受酸化时长影响。在图 6(b)中: 黏聚力基本随 pH 值减小而降低, 且 pH=4 时发生突变, 而在 pH 值和酸化时长两种条件下黏聚力的变化差异主要受颗粒间胶结作用的影响。



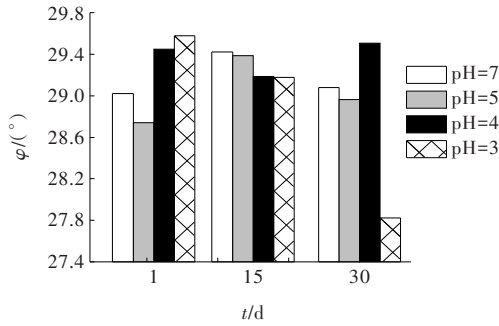
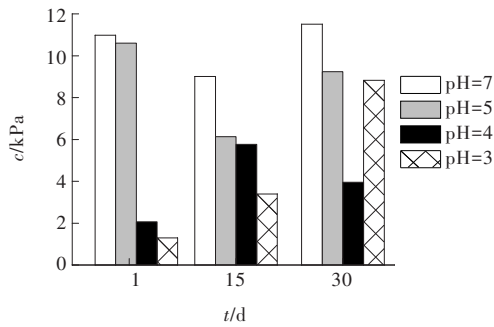
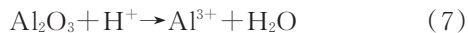
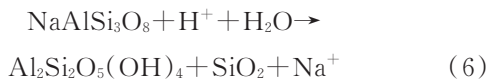
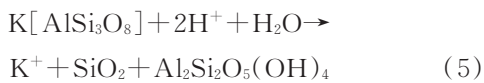
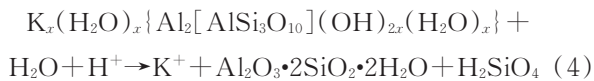
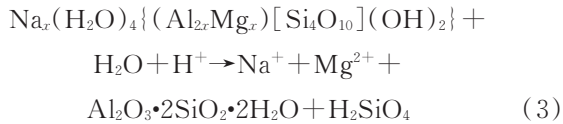
(a) 内摩擦角  $\varphi$  与酸化时长关系(b) 黏聚力  $c$  与酸化时长关系

图6 强度指标与酸化时长关系曲线

研究表明:抗剪强度指标( $c$ 、 $\varphi$ )一般随含水率的增加而减小<sup>[11]</sup>,酸蚀作用下饱和试样的抗剪强度指标影响存在差异,而黏土矿物和非黏土矿物与酸发生复合化学反应程度不同,矿物颗粒在酸性溶液中主要存在以下离子反应:



从反应式(3)~(7)中可以看出:蒙脱石[式(3)]、伊利石[式(4)]、钾长石[式(5)]、钠长石[式(6)]和其他[式(7)]与酸反应后生成高岭石或高岭土、硅酸盐和胶凝物质,并伴随矿物之间的转化可以从强度指标与酸化时长关系曲线中得到反映。

### 3.4 酸蚀作用下饱和含水率与界限含水率的对比

已有研究表明:含水率升高而基质吸力单调减

小,土体的基质吸力与抗剪强度直接相关。由此扩展结论,饱和度最小时,基质吸力最大,土体越稳定<sup>[12-13]</sup>。当达到饱和含水率时,基质吸力为零,则易造成土体失稳。从斜坡稳定性角度而言,饱和含水率相对界限含水率更具优势。因此,本节将对酸蚀作用下饱和含水率与界限含水率的差异性。

图7为pH值不同时,红黏土界限含水率<sup>[14]</sup>与本文酸蚀下花岗岩残积土的饱和含水率对比关系曲线。

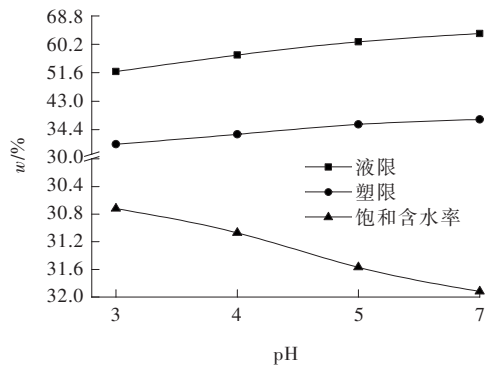


图7 酸蚀作用下饱和含水率与界限含水率对比图

从图7中可发现:酸蚀下的红黏土界限含水率与花岗岩残积土饱和含水率变化趋势相似,基本为线性单调递增,表明在相同酸化时长条件下饱和含水率和界限含水率变化趋势均受酸蚀影响。伯桐震<sup>[15]</sup>指出酸污染红土的液、塑限及塑性指数随酸浓度的增大而减小;酸浓度相同时,酸污染红土的液、塑限及塑性指数随养护时间的延长呈先减后增再减小的变化趋势;这与本文研究中的pH=7、5、3时的变化规律存在迥异(图4),却与pH=4时相似。比对结果表明:不同pH值对界限含水率和饱和含水率的影响不完全一致,由此有必要掌握饱和含水率时变特性,这对斜坡稳定性评估具有积极意义。

## 4 pH值与饱和含水率关联的微结构

土的微观结构是土体结构单元反映的表征,水土化学特征对微观结构的改变效应不同于压实结构效应,且微观结构变化会引起饱和含水率变化。因此从微观结构认识水化作用的影响,可以从花岗岩残积土经历浸润、溶蚀、胶结、溶解等作用后饱和含水率变化规律来加以剖析。酸蚀花岗岩残积土微观结构和胶结模型见图8、9。

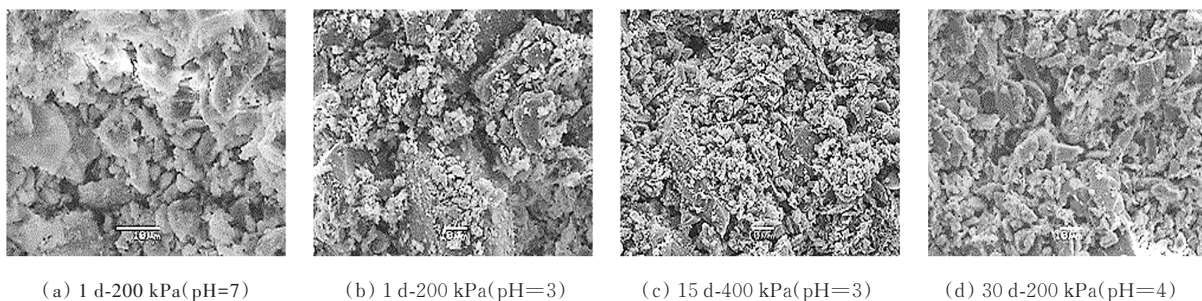


图 8 酸蚀花岗岩残积土微观结构

从图 8(a)~(d)可知:在酸化时长和竖向压力条件下试样与酸反应剧烈程度明显存在差异,片状矿物周围包裹着沉淀和结晶,pH 值越小酸化时长相对越久微观结构的絮状沉积物越多,但图 8(d)絮状矿物较少,这实际上是部分沉淀和晶体不稳定,随溶液性质变化可以自身溶解。另外竖向压力大于 200 kPa

时,内部反应剧烈程度更高,絮状结构也会显著增多,然而 $\sigma=300$  kPa、400 kPa 时可以发现两者微观分形结构相似度较高(图 9),则在这两种竖向压力下试样整体结构自相似,因此推测可能就是 $\sigma=300$  kPa 时为非线性饱和含水率拐点的原因。

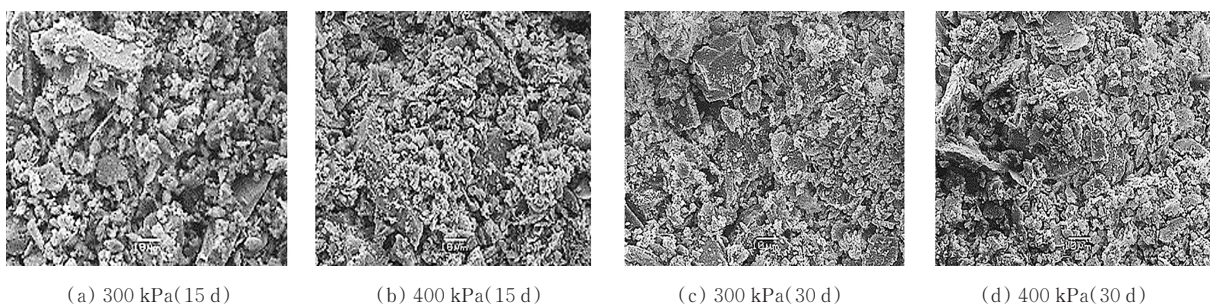


图 9 pH=3 试样微观结构图

酸蚀试样的饱和含水率的改变取决于结构类型,而胶结物是影响土体结构的重要成因。花岗岩残积土的物质组成主要是粒状或块状的石英、片状黏土矿物、易溶盐形成的胶结物、水稳性胶结物,经水溶液浸泡后试样中部分易溶的胶结物质溶解、流失,但经酸液浸泡后试样中水稳性较好的铝质、铁质胶结物能与酸液发生化学反应而溶解、流失<sup>[16]</sup>。此外石英、长石、黏土矿物等属于自身矿物,碎屑沉积物一旦沉积,孔隙水就会和颗粒发生反应<sup>[17]</sup>;生成的胶结物来源有两个层面:一是饱和试样中的沉淀形

成新的自身矿物,二是矿物发生的溶解形成。借助电镜扫描发现花岗岩残积土微观结构中胶结物与矿物还存在不同胶结方式,而胶结方式的差异反映的是微观结构联结方式,进而影响饱和含水率。参考于兴河<sup>[18]</sup>在碎屑岩系油气储层沉积学中提出的胶结模型,结合本试验结果总结出花岗岩残积土的 4 种胶结模型,如图 10 所示。

(1) 体积膨胀式胶结。主要为蒙脱石、伊利石、正长石等直接与水发生水化或水解反应,使矿物轮廓增大。

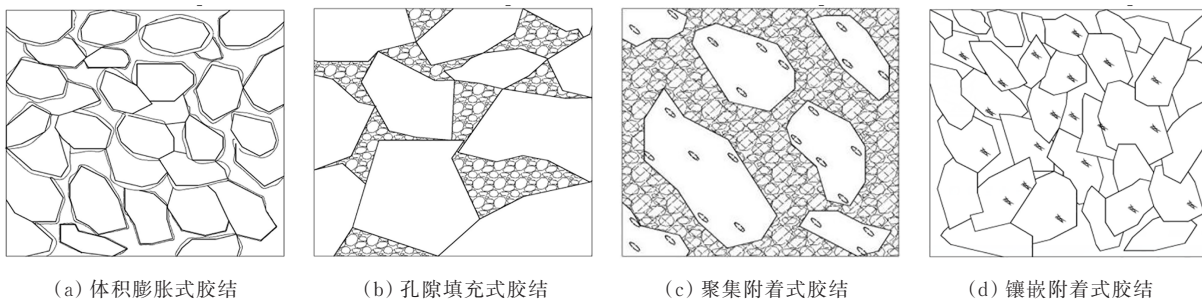


图 10 酸蚀花岗岩残积土胶结模型图



(2) 空隙填充式胶结。指结晶、沉淀物主要分布于矿物之间的空隙中。

(3) 聚集附着式胶结。自生矿物与酸反应时生成新的矿物和絮凝团聚体,它们附着或包裹大颗粒矿物,使流体流动通道曲折多变。

(4) 镶嵌附着式胶结。主要是黏土矿物在长时间酸化作用下,大部分胶结物分解、流失,形成均匀镶嵌分布的片状和粒状矿物,而在矿物表层贴附少量胶结物。

试验结果表明:酸化时长1 d,  $\text{pH} \geq 5$  时为体积膨胀式胶结,而  $\text{pH} \leq 4$  主要是空隙填充式胶结;酸化时长15 d且  $\text{pH} \leq 4$  时为聚集附着式胶结和空隙填充式胶结两种混合模式;酸化时长30 d,  $\text{pH} \leq 4$  主要为镶嵌附着式胶结,以空隙填充式胶结为辅。从结果可看出:胶结类型改变了土体微观结构,以致影响花岗岩残积土的饱和含水率。

## 5 结论

为精准评估偏酸蚀环境下的坡地岩土体稳定性,本文通过试验,控制竖向压力和酸蚀条件下酸化时长等条件,对花岗岩残积土饱和含水率的时变特性进行研究,得出如下结论:

(1) 在竖向受载与酸蚀环境对花岗岩残积土饱和含水率的影响方面,  $\sigma = 300 \text{ kPa}$  时为线性与非线性关系转折点,且在同一竖向压力作用下,酸化时长与饱和含水率呈正相关。

(2) 在酸化时长为30 d、 $\text{pH} = 4$  时,矿物颗粒表层离子与酸液中离子交换效能最高,因此  $\text{pH} = 4$  是影响饱和含水率的酸度特征值;且  $\text{pH} > 4$  时在酸蚀下的饱和试样水化学反应接近完全时存在峰值饱和含水率。

(3) 微观结构反映了酸蚀作用下饱和含水率变化的原因,主要与胶结类型有关,总结了不同酸度及酸蚀时长下花岗岩的残积土的胶结类型模式。

## 参考文献:

[1] 顾剑云,程圣国,杨云华,等.酸雨对滑坡土体抗剪强度参

数影响试验研究[J].水利水电技术,2011,42(10):36-39.

[2] 梁冰,郑训臻,金佳旭,等.酸碱淋溶对尾矿砂含水率和重金属含量的影响[J].广西大学学报(自然科学版),2012,37(3):539-543.

[3] 于海浩,孙德安,韦昌富,等.氯化钠溶液饱和不同初始含水率膨润土的膨胀特性[J].岩土工程学报,2019,41(3):595-600.

[4] 张晨阳,张明,张泰丽,等.侵入岩脉风化壳对中林村残积土滑坡渗流场和稳定性的影响[J].岩土力学,2018,39(7):2617-2625,2631.

[5] 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.

[6] 吴丹,王式功,尚可政.中国酸雨研究综述[J].干旱气象,2006,24(2):70-77.

[7] 肖桂元,陈学军,韦昌富,等.酸雨作用下红黏土渗透性影响机制及压实度控制[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S1):3283-3290.

[8] 崔强,冯夏庭,薛强,等.化学腐蚀下砂岩孔隙结构变化的机制研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(6):1209-1216.

[9] 赵宇,崔鹏,胡良博.黏土抗剪强度演化与酸雨引发滑坡的关系:以三峡库区滑坡为例[J].岩石力学与工程学报,2009,28(3):576-582.

[10] 金旭,熊传祥,钟富林.酸污染条件下花岗岩残积土崩解特性试验研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(6):194-198.

[11] 刘新荣,涂义亮,王鹏,等.基于大型直剪试验的土石混合体颗粒破碎特征研究[J].岩土工程学报,2017,39(8):1425-1434.

[12] 熊承仁,刘宝琛,张家生.重塑粘性土的基质吸力与土水分及密度状态的关系[J].岩石力学与工程学报,2005,24(2):321-327.

[13] 蒋坤,丁文其,陈宝,等.郑开下穿越工程非饱和土土-水特征曲线室内试验研究[J].岩土力学,2009,30(4):1078-1082.

[14] 李善梅,刘之葵,蒙剑坪. $\text{pH}$ 值对桂林红黏土界限含水率的影响及其机理分析[J].岩土工程学报,2017,39(10):1814-1822.

[15] 伯桐震.酸污染红土的宏微观特性研究[D].昆明:昆明理工大学,2012.

[16] 姬凤玲,李强.酸性溶液对花岗岩残积土物理力学特性的影响[J].地下空间与工程学报,2017,13(6):1506-1510,1530.

[17] 朱筱敏.层序地层学[M].青岛:中国石油大学出版社,2000.

[18] 于兴河.碎屑岩系油气储层沉积学[M].2版.北京:石油工业出版社,2008.