

# 模拟酸雨对红黏土抗剪性能影响的静态浸泡试验

钱春华

(国家林业局昆明勘察设计院, 云南 昆明 650000)

**摘要:** [目的] 模拟酸雨对红黏土抗剪强度特征的影响,并结合酸雨侵蚀后红黏土的微结构,分析影响强度机理,为酸雨区的基础设施建设特别是路基边坡防护和保障基础设施安全运营提供理论和工程指导。[方法] 以云南省昆明市某路基边坡红黏土为研究对象,采用静态浸泡试验,用纯水和配置不同浓度的酸液对红黏土进行7,14和28 d的浸泡和侵蚀,然后采用直剪试验对红黏土的抗剪强度进行测定,同时采用电镜扫描和能谱分析对侵蚀以后土样的微观结构进行解析以此来开展侵蚀机理研究。[结果] ① 酸液对红黏土应力应变特征影响是明显的,特别是在高浓度酸液的侵蚀下,应力应变曲线变得不稳定,呈台阶上升状,具有应变硬化特征。② 受酸液的侵蚀影响,红黏土的抗剪强度最高降低率可达到70%(7 d)和80%(14 d),在pH值为0的高浓度酸液侵蚀28 d以后,抗剪强度仅有5 kPa左右,强度基本完全损失;同时在高浓度酸液侵蚀下,不论侵蚀多长时间,黏聚力都最低,仅为4.99,2.19,0.02 kPa。随着浸泡时间和酸液浓度的增加,红黏土的抗剪强度指标黏聚力和内摩擦角均逐渐降低,且酸液浓度对强度及其指标的影响更为显著。③ 酸液导致倍半氧化物减少,粒间黏结性和黏结力降低,内部孔隙增大结构疏松,含水率增大是红黏土抗剪强度和黏聚力降低的原因,而酸液使粒径整体减小是内摩擦角降低的主要原因。[结论] 酸雨对红黏土路基边坡红黏土强度影响明显,酸雨浓度比降雨时长对强度影响更为显著,在路基边坡稳定性的预测与防治及保障公路基础设施安全运营时应予以重视。

**关键词:** 红黏土; 酸雨侵蚀; 静态浸泡试验; 抗剪强度

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2024)05-0010-09

**中图分类号:** U416.1<sup>+</sup>4, TU411

**文献参数:** 钱春华.模拟酸雨对红黏土抗剪性能影响的静态浸泡试验[J].水土保持通报,2024,44(5):10-18. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.002; Qian Chunhua. Static soaking test on impact of simulated acid rain on shear properties of red clay [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(5):10-18.

## Static Soaking Test on Impact of Simulated Acid Rain on Shear Properties of Red Clay

Qian Chunhua

(Kunming Survey and Design Institute of State Forestry Administration, Kunming, Yunnan 650000, China)

**Abstract:** [Objective] The effect of simulated acid rain on the shear strength characteristics of red clay was investigated and the influence strength mechanism and microstructure of red clay after acid rain corrosion was analyzed in order to provide theoretical and engineering guidance for the construction of infrastructure in acid rain area, especially the protection of roadbed slope and safe operation of infrastructure. [Methods] The red clay of a roadbed slope in Kunming City, Yunnan Province was used as the research object. The study adopted the static soaking test and used pure water and acid liquor with different concentrations to soak and erode the red clay for 7, 14, and 28 days. Thereafter, the shear strength of the red clay was measured using the direct shear tests, and the microstructures of the eroded soil samples were analyzed via electron microscope scanning and energy spectrum analysis to analyze the influence mechanism of strength. [Results] ① The effect of acid liquor on the stress-strain characteristics of red clay is significant, especially under high concentration acid. The stress-strain curve was unstable and increased like a step, with strain hardening characteristics. ② With the increase in soaking time and acid concentration, the shear strength of red clay and

收稿日期:2024-04-16

修回日期:2024-06-29

资助项目:芒市公路投资有限公司项目“云南省德宏州芒瑞大道建设”

第一作者:钱春华(1977—),男(汉族),云南省大理州人,高级工程师,主要从事公路工程与林业生态方面的工作。Email:947711@qq.com。

its index of cohesion and internal friction angle gradually decreased, and the acid concentration had a more significant effect on the strength and its index. ③ Acid liquor decreased the sequioxide and the interparticle adhesion and bonding force and simultaneously increased the internal pores, loosened the structure, and increased the soil moisture content, thereby resulting in a decrease in shear strength and cohesion; however, the overall decrease in particle size caused by acid was the main reason for the decrease in the internal friction angle. [Conclusion] Acid rain has a significant effect on the strength of red clay from roadbed slope, and the intensity of acid rain has a more significant effect on the strength than the duration of rainfall. Attention should be paid to the prediction and prevention of roadbed slope stability and the safe operation of highway infrastructure.

**Keywords:** red clay; acid rain corrosion; static soaking test; shear strength

酸雨科学上称为酸沉降,它通常指 pH 值低于 5.6,包括雪、雾、雹等其他形式的酸性降水<sup>[1-3]</sup>。近年来,随着世界工业化进程的快速推进,二氧化硫、氮氧化物等酸性气体超量排放加剧了酸雨环境污染,世界三大酸雨区酸雨污染范围及程度正逐步扩大。酸雨危害是多方面的,酸雨污染危害居民健康,腐蚀建筑材料,破坏生态系统,造成巨大经济损失,已成为制约社会经济发展的重要因素之一<sup>[4]</sup>。目前酸雨对工程材料的影响研究多集中于酸雨侵蚀对钢筋混凝土结构物理力学性能的影响及机制方面,钢筋混凝土作为最常见的工程材料之一,在酸雨下性质会无可避免衰减退化,产生耐久性不足而提前失效的安全隐患<sup>[5]</sup>。近年来,国内外对酸雨侵蚀混凝土的研究越来越多,例如袁晓露<sup>[6]</sup>、Yin Yushi 等<sup>[7]</sup>和 Xu Kaicheng 等<sup>[8]</sup>研究混凝土构件在酸雨侵蚀下力学性质的劣化规律及其侵蚀机理,研究手段以静态试验法即长期浸泡试验为常见,表征指标主要有耗酸量、中性化深度、质量、强度变化、应变与释放率和裂缝宽度。在酸雨对土体性质影响方面,研究多集中于农业土壤,包括酸雨影响下土壤的酸化程度,防御能力、土壤对酸性物质的缓冲程度等,也有部分针对工程土体的研究,例如酸雨条件下三峡库区土体的宏微观特性等<sup>[9]</sup>,相对于混凝土方面的研究,酸雨对工程土体的侵蚀研究相对少一些,相关的侵蚀规律和机理有待进一步深入了解和研究。

目前中国的酸雨区主要集中在长江以南的大部分地区,以及长江角、珠江三角以及西南地区,引发的酸雨污染问题日益严重<sup>[7]</sup>。云南省作为煤炭资源大省,钢铁、火电、冶金、化工等行业对煤炭的消耗量大,工艺过程中产生的  $\text{SO}_2$  等酸性气体加剧了云南省的酸雨污染程度<sup>[10]</sup>,早在 1998 年云南省的昆明市、曲靖市、玉溪市等就被国家列为“酸控区”<sup>[11]</sup>。昆明市嵩明县建有杨林工业园区,随着园区发展迅速,产业集群不断壮大,基地建设不断加强,工业的发展带来

酸性气体不断排放,形成的不断增强的酸沉降逐渐威胁到区域内工程设施的安全。根据现场调研发现嵩明县杨林工业园区的部分道路边坡有酸雨侵蚀的迹象,而在云南省广泛分布并作为天然材料的红黏土,常常形成道路工程边坡、房地地基挖填方工程边坡,由于特殊的物质组成,红黏土一旦受到酸雨侵蚀,其矿物物质组成、颗粒间胶结结构状态势必会发生变化,从而影响强度,其中又以表征边坡稳定性的抗剪性能最为典型。鉴于此,本文以取自于杨林工业园区旁某一路基边坡红黏土为研究对象,在室内配置不同 pH 值的模拟酸雨,采用静态浸泡方式的加速侵蚀试验模拟酸雨对红黏土抗剪强度特征的影响,并结合侵蚀后红黏土的微结构,分析影响强度机理,以期为酸雨区的基础设施建设特别是路基边坡防护和保障基础设施安全运营提供理论和工程指导。

## 1 取样点概况

本次试验所采用的红黏土取自于云南省昆明市嵩明县杨林镇一修建公路形成的人工边坡,取样点为典型红黏土分布区,母岩为碳酸盐岩,高约 10 m 的边坡由风化程度较高的碳酸盐岩残积土构成,斜坡顶面和侧边为当地居民开垦的耕地。不论是已经进行非典型格构式护坡或是未进行防护的边坡,由于物质长期暴露于地表,边坡表层的红黏土已经有很大程度的侵蚀破坏,严重影响到公路的行车环境并威胁到行车安全,由于取样点临近杨林工业园区,工业发展形成酸雨有可能进一步加速斜坡的侵蚀破坏,所以课题组于 2023 年 6 月 16 日对该处边坡红黏土进行取样开展相关的试验(试验时间为 2023 年 6 月 16 日至 7 月 15 日),研究具有较好的理论和运用价值。

## 2 材料与方法

### 2.1 待测土样和酸雨溶液的配制

(1) 待测土样。剥离去除取样点表面受风力和

水力侵蚀严重的约 10 cm 厚表层红黏土,用取土铲在新鲜表面约 10 cm 提取约 20 kg 的土样装入样品袋并带回实验室。在室内将土样烘干并过 2 mm 分离筛。结合覃绮平<sup>[12]</sup>的研究成果并参考陈智锋<sup>[13]</sup>,李涛等<sup>[14]</sup>,海龙等<sup>[15]</sup>研究方案,最终将过筛土样配置为 15% 含水率的供试土样。根据直接剪切试验的制样方法,制备红黏土直接剪切土样 48 个。

(2) 模拟酸雨配置。根据已有文献<sup>[1]</sup>表明,包括昭通、昆明、曲靖、玉溪市的云南省 7 个城市酸控区的降水年平均 pH 值在 4.13~8.85 之间,平均值为 6.18。因为现场试验耗时长且成本高昂,实际气候与环境条件复杂多变,环境因子无法准确控制<sup>[16]</sup>,所以浸泡加速试验被广泛应用<sup>[5]</sup>。本文购买市售稀硫酸标准溶液,用实验室制备得到的高纯水进行稀释相应的倍数,制备得到 pH 值分别为 0,1,2 的加速侵蚀酸液,并采用酸碱中和滴定法标定其浓度。

## 2.2 室内试验及方法

(1) 静态浸泡试验。先将制好的环刀样轻置于不锈钢盆内,随后将配置好的不同 pH 值的酸雨溶液缓慢加入到不锈钢盆内,体积以淹没土样约 1 cm 高度为准。参考已有研究中<sup>[9-10]</sup>关于侵蚀时间的选择,在采用浸泡加速试验情况下,本文选取 28 d 为侵蚀上限时间,7,14 和 28 d 为 3 组侵蚀时间。每组试验备用两个土样,所以纯水土样 6 个,pH 值分别为 0,1,2 土样分别是 14 个。需要说明的是,为保证在浸泡过程中,需要保持溶液 pH 值恒定不变,每隔 24 h 采用卡贝斯 pH 试纸和邦特 BTE-SDJ 系列 pH 值便携测量仪对溶液浓度进行测量,若 pH 值发生变化则采取加酸或者加纯水的方式调节。

(2) 直接剪切试验。本次剪切试验采用浙江土壤仪器厂生产的全自动直剪仪进行测定,试验方法严格按照国家规范《土工试验方法标准(GB/T50123-2019)》<sup>[17]</sup>进行。采用 0.8 mm/min 剪切速度开展竖向压力分别为 100,200,300,400 kPa 的 4 组直接剪切试验,需要说明的是,为了比较 pH 值和时间的腐蚀效应,同步开展了纯水浸泡 7 d 的土样直剪试验(编号为 CS)。在试验过程中,当达到预定浸泡时间时,提取盆内 4 个土样开展直剪,剩余土样继续浸泡,达到浸泡时间重复开展试验。试验结果采用软件自动采集的数据来绘制剪应力与剪切位移绘制曲线,根据曲线峰值剪切强度确定抗剪强度,即曲线有峰值时取该峰值为抗剪强度,不出现峰值时取剪切位移 4 mm 对应剪应力为抗剪强度,并按照库伦定理求得土样的  $c$  和  $\varphi$  值。

## 3 结果与分析

### 3.1 应力—应变关系

根据直接剪切试验结果,绘制剪切位移与剪应力关系曲线,结果图 1 所示。由图 1a 发现,同一垂向压力下,随着剪切位移的增加,剪应力逐渐增加,但增长速度由快及慢,直至剪切位移达到一定阶段土样被剪切破坏。变化幅度最小的为垂向压力 100 kPa 的曲线,整体上,曲线较为光滑,剪应力随着剪切位移增加变化较均匀变化,pH=2 时,浸泡液的不同天数试验结果的曲线与前者类似,曲线光滑以及变化均匀,但是峰值强度有所下降。对比图 1e-g,不同天数浸泡结果的曲线在逐渐上升过程中出现了不同程度的波动,在局部形成了台阶状变形模式,同时 100,200,300,400 kPa 曲线间有交替上升的情况。观察图 1h-j,在高浓度酸液的浸泡作用下,土体的组成和结构发生了较大程度的改变,其曲线与前 3 者有着明显的区别,在剪切过程中剪应力随着应变的增加波动更为复杂,更无规律可循,曲线不光滑,在较多位置处出现了突然上升或者突然下降的情况。综合对比发现,酸液对红黏土应力—应变特征影响是非常明显的,且这种影响程度随着酸液浓度和浸泡时间增加而增加,对该影响效应进行定量分析和评价是非常有必要的。

从图 1 还可以发现,仅有极少部分土样有着密实黏土相似的性质,曲线有明显的峰值,具有应变软化特征,可以直接按峰值读取土样抗剪强度。绝大多数土样剪应力随着剪切位移增加而增加并逐渐趋于某一稳定数值,且该剪应力随着酸液浓度和浸泡时间增加显得更不稳定,具有明显应变硬化特征,此时强度峰值无法直接读取,按照规定取剪切位移为 4 mm 对应的剪应力为抗剪强度。从红黏土应力应变曲线可以发现,酸液对土样抗剪特征影响是明显的,未受酸液影响的红黏土多数随剪切位移增加在上下盒接触面附近发生直接剪切破坏,在做完试验以后分离上下盒可以发现错动面和破坏面是明显的(图 2),上下盒边壁和上下透水面顶底面是相对干燥的,但是酸液浸泡以后的土样在剪切完成后上下盒贯通面不明显,且边壁有较多自由水溢出,酸液浸泡土样在受剪过程中沿接触面缓慢错动后,上下盒土粒和孔隙水相互作用更为明显导致土样应变硬化特性变得更明显,曲线没有出现峰值,甚至在剪切位移 4 mm 后曲线还有上升的情况。

### 3.2 抗剪强度及其指标

根据剪切位—剪应力移图计算得到各土样的抗剪强度,同时将不同浸泡条件下的土样的抗剪强度进行对比,结果见表 1。

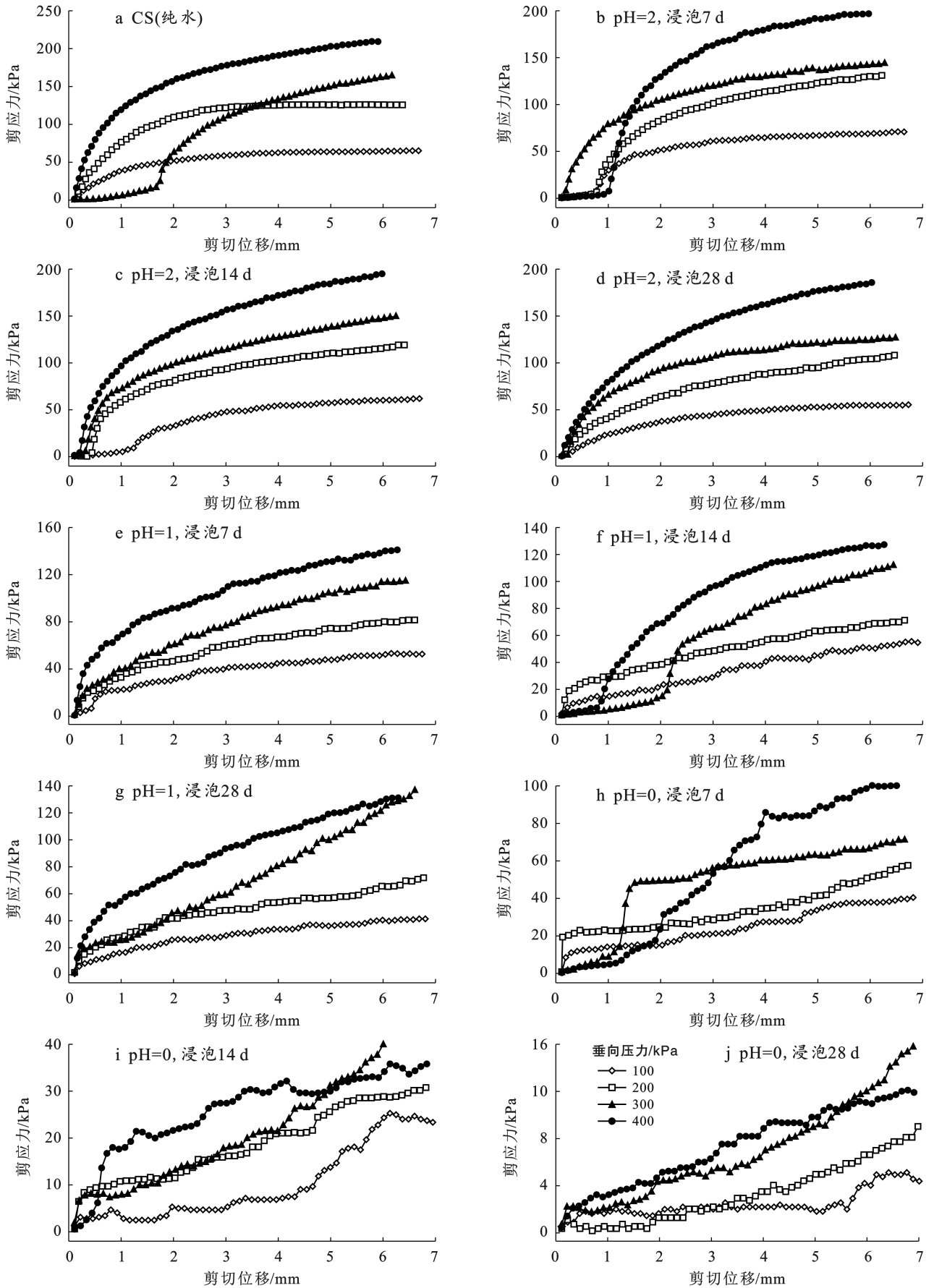


图 1 不同浸泡条件下土样剪切位移和剪应力关系

Fig.1 Relationship between shear displacement and shear stress of soil samples under different soaking conditions

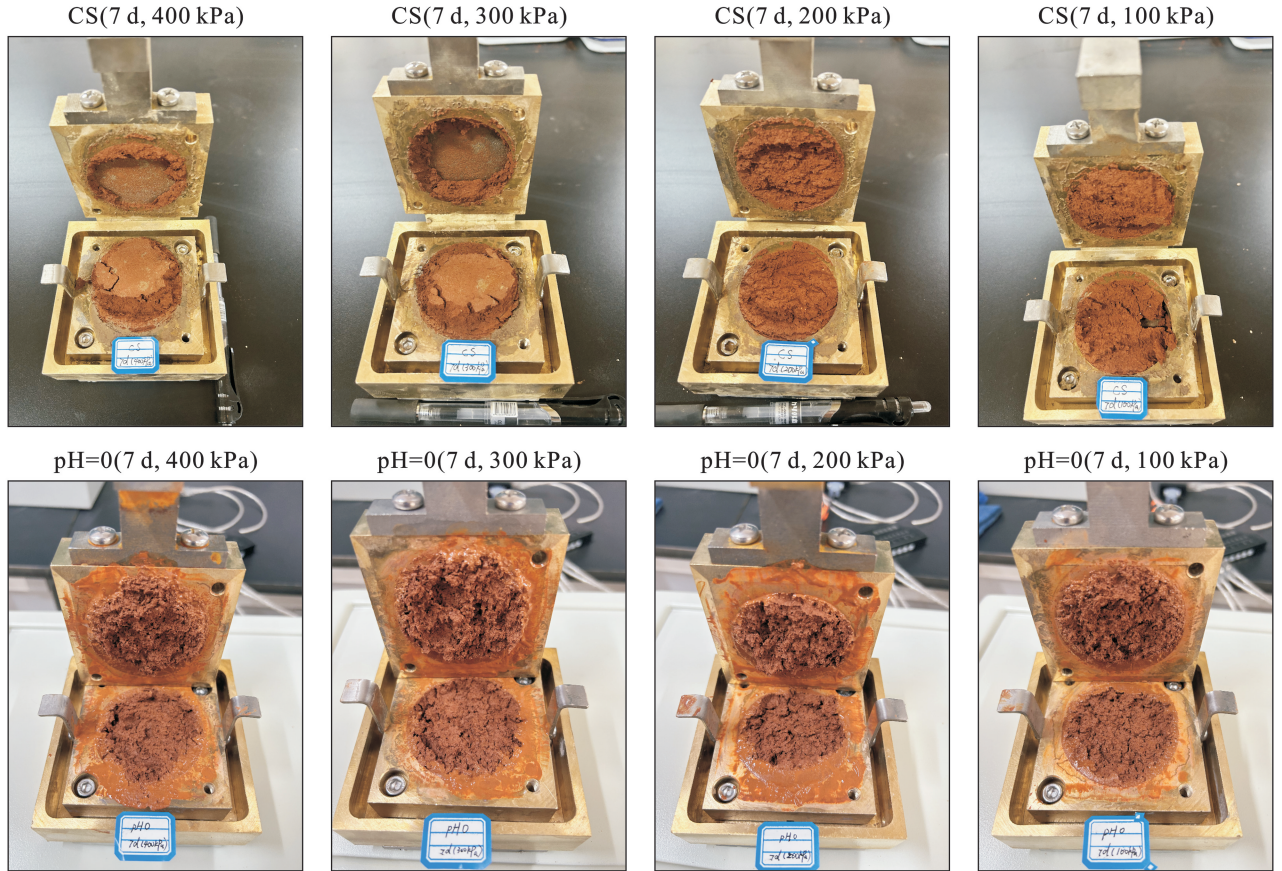


图 2 典型测试土样剪切破坏以后的状态

Fig.2 Post-shear failure state of typical test soil samples

表 1 不同浸泡条件下土样的抗剪强度值

Table 1 Shear strength values of soil samples under different soaking conditions

浸泡时间/d	酸液 pH 值	垂向压力/kPa			
		100	200	300	400
CS(纯水)		62.69	125.12	132.69	190.1
7	2	64.69	113.63	128.9	179.31
	1	44.7	67.21	92.12	119.11
	0	27.5	34.58	60.09	79.61
	2	53.97	102.07	126.81	171.99
14	1	37.63	55.2	81.13	110.43
	0	7.18	20.9	21.6	30.89
28	2	49.06	87.93	113.16	162.11
	1	33.8	53.41	80.29	105.14
	0	2.56	3.5	6.4	8.2

除了 pH=2 酸液浸泡 7 d 的土样抗剪强度为 64.69 kPa, 略高于纯水浸泡的强度 62.69 kPa 以外, 采用纯水浸泡的土样抗剪强度是最高的, 也就是未受酸液影响的土样结构是最好的, 而受酸液侵蚀以后土的强度不论是时间尺度上还是酸液浓度尺度上都有不同程度的影响。先从时间尺度上来分析, 当酸液对土样影响时间最短(7 d)时, 不同浓度酸液下土样的抗剪强度的降低值是最小的, 从 pH=2→pH=0, 100 kPa 垂

向压力下, 抗剪强度降低率(定义为纯水浸泡以后土样抗剪强度与某一浓度酸液下浸泡 7 d 以后土样抗剪强度的差值与纯水浸泡以后土样抗剪强度的比值, 后同, 结果如图 3a 所示)分别为 -3.19%, 28.70% 和 56.13%, 200 kPa 垂向压力时降低率分别为 9.18%, 46.29% 和 72.37%; 300 kPa 垂向压力时降低率分别为 2.86%, 30.58% 和 54.71%; 400 kPa 垂向压力时降低率分别为 5.68%, 37.34% 和 58.12%; 结合图 3d 的降低率均值分析发现, 在低浸泡时间时酸液还没有完全进入颗粒内部, 对土体结构影响是相对较小的, 特别是 pH=2 酸液浸泡时, 强度基本未降低。随着浓度的增加, 酸液对强度的影响也在加强, 当高浓度酸液浸泡时, 强度降低最高可以达到 70% 以上。当浸泡时间为 14 d 时, 随着垂向压力的增加, 强度降低率分别为 13.91%, 39.97% 和 88.55%; 18.14%, 55.89% 和 83.31%; 4.43%, 38.86% 和 83.72%; 9.53%, 41.91% 和 83.75%。浸泡时间 14 d 与 7 d 的结果比较可以发现, 在 pH=2 酸液作用下, 强度降低率最小, 随着酸液浓度增加, 强度降低率可达 40% (pH=1) 和 80% (pH=0) 以上, 浸泡时间对强度降低的影响效应是明显的。当浸泡时间达到 28 d, 强度降低率分别为

21.74%, 46.08% 和 95.92%; 29.73%, 57.32% 和 97.22%; 14.74%, 39.49% 和 95.18%; 14.72%, 44.69% 和 95.69%, 很明显 28 d 的浸泡时间对强度影响最大。在 pH=2 酸液作用时强度降低率为 20% 左右, pH=1

时降低率为 50%。需要注意的是,高浓度酸液浸泡以后,抗剪强度极低,仅有 5 kPa 左右,抗剪强度基本完全损失,具有明显软黏土甚至淤泥质黏土特殊不良土体的强度特征。

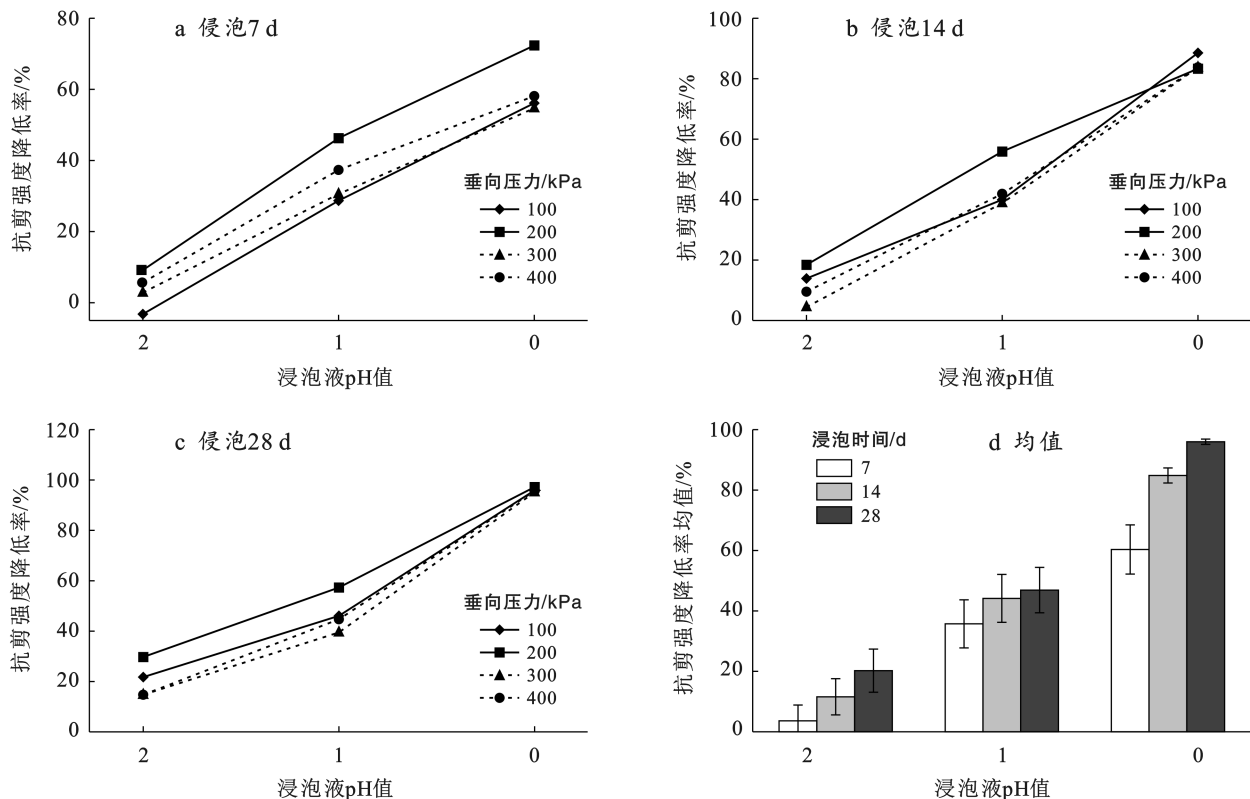


图 3 不同浸泡条件下土样抗剪强度降低率

Fig.3 Reduction rate of shear strength of soil samples under different soaking conditions

综合时间对强度影响效应上看, pH=2 时, 随着浸泡时间的增加, 降低率由 5% 到 10% 最后到 20%; pH=1 时, 降低率由 30% 到 40% 最后到 50%; pH=0 时, 降低率由 70% 到 85% 到 95%。不论是何种浓度, 随着浸泡时间增加降低率变化梯度一般在 5%~10% 之间。而综合浓度对强度的影响效应上分析, 我们同样可发现, 当浸泡时间为 7 d 时, 随着酸液浓度降低, 强度降低率由 5% 至 30% 最后到 70%, 浸泡时间为 14 d 时, 该值为 10% 至 40% 最后到 85%; 浸泡时间为 28 d 时, 该值为 20% 至 50% 最后到 95%, 所以, 每级浓度对降低率的影响一般在 30%~50% 之间。很明显, 酸液浓度对抗剪强度的影响效应要远远大于浸泡时间的影响, 但是限于本文仅制备了 3 组时间和 3 组浓度酸液开展相关的试验, 具有研究的局限性, 更加深入的时间和浓度对红黏土的影响效应可能需更进一步研究。

根据所得的各垂直压力下的抗剪强度, 结合库仑定律可以计算得到不同浸泡条件下土样的黏聚力和内摩擦角, 计算结果见图 4。纯水浸泡的土样黏聚力

和内摩擦角分别为 30.2 kPa 和 21.3° (为方便阅读该值未在图中列出)。首先分析黏聚力的变化情况, 黏聚力随着侵蚀时间增加而降低, pH=2 时, 浸泡时间为 7 d 时黏聚力为 31.82 kPa, 与纯水浸泡的 30.2 kPa 没有太大变化, 但随着浸泡时间增加, 黏聚力由 31.82 kPa 降低至 19.01 kPa 最后降至 11.97 kPa。当浸泡液高浓度时, 不论是何浸泡时间, 黏聚力都是最低, 仅为 4.99 kPa, 2.19 kPa 和 0.02 kPa, 特别注意的是, 当 pH=0 浸泡时间为 28 d 时, 土样的黏聚力为 0.02 kPa, 接近零, 即在高浓度酸液侵蚀足够长的情况下, 土样的黏聚力基本会损失。

从酸液浓度影响效应来看, 浸泡时间为 7 d 时, 酸液浓度的影响最明显, 土的黏聚力由 31.82 kPa 降低至 18.72 kPa 最后降至 4.99 kPa, 从各级浸泡时间和酸液浓度结果来看, 酸液浓度对黏聚力的影响要高于浸泡时间。从图 4 还可看出, 浸泡时间对内摩擦角影响现对较小, 特别是 pH=2 和 pH=1 时, 内摩擦角分别为 19.80°, 20.70°, 20.00° 和 13.90°, 13.70°, 13.50°, pH=0 时, 其值分别为 10.30°, 4.10°, 1.10°, 所以高浓

度时,酸液对内摩擦角的影响要高于前两者。 $pH=2$ 时,不同时间时内摩擦角分别为  $19.80^\circ$ ,  $20.70^\circ$  和  $20.00^\circ$ ,与纯水浸泡时的  $21.3^\circ$  相差无几,随着浓度增

加, $pH$  值降低,内摩擦角随之降低。通过对比抗剪强度及其指标,同样可知酸液浓度变化对黏聚力和内摩擦角的影响要高于浸泡时间。

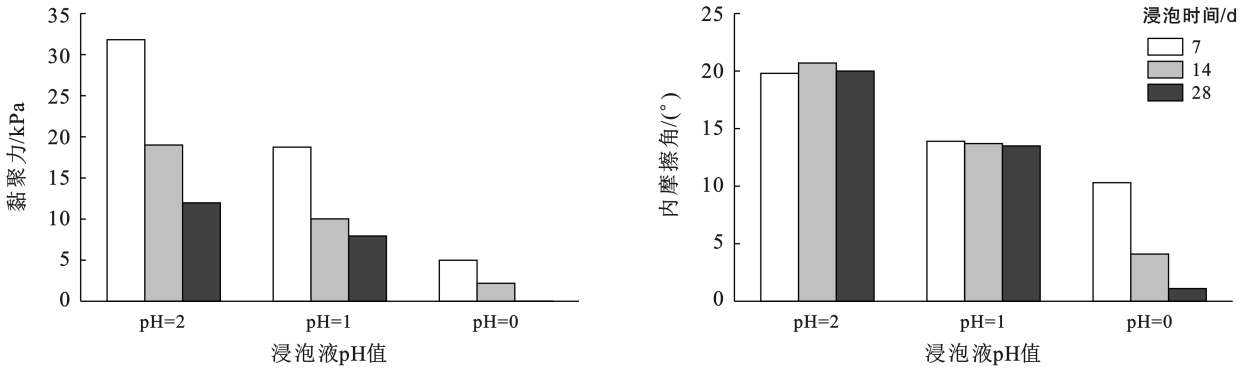


图 4 不同浸泡条件下土样的黏聚力和内摩擦角值

Fig.4 Cohesion and internal friction angle values of soil samples under different soaking conditions

综合以上分析可知,随着浸泡时间和酸液浓度的增加,土样的抗剪强度降低是明显的,同时土样的黏聚力和内摩擦角也一并呈现降低的趋势,且酸液浓度对上述强度及其指标的影响较浸泡时间更为显著。

### 3.3 影响机理分析

依据土力学基础理论可知,黏聚力和内摩擦角是土体抗剪强度的两个重要指标。本次试验采用的是去除大于 2 mm 颗粒的重塑红黏土,测试土样细粒颗粒含量明显较多,比表面积较大。随着酸液的侵蚀作用,酸对土中起胶结作用的倍半氧化物,氧化钙镁等的溶蚀,影响了土的粒间连接性,一些不溶性胶粒变成可溶性的离子也降低了粒间联结力和粘性;另外水膜中离子浓度的增加,铁铝等高价离子代换了低价离子,溶液  $pH$  值的降低,这些都会降低土粒胶体的双电层电位,扩散层变薄,结合水减少<sup>[18]</sup>,再者红黏土在酸液浸泡作用下,含水量的增加也会导致土粒表面扩散层弱结合水薄膜增厚,距离增大,造成黏聚力降低,导致土样抗剪强度随着侵蚀进程随之降低,抗剪强度和黏聚力的降低是塑性降低和含水率增加共同作用的结果<sup>[18]</sup>。根据贺蕊等<sup>[19]</sup>研究发现,红壤粒度测定时前处理加酸时粒度增粗是一个普遍现象,认为加酸促使红壤样品中的氧化铁和三水铝石胶体(两性胶体)带更多正电荷,与带负电荷的黏土矿物胶体之间的黏附作用增强,从而导致粒度变粗;伯桐震等<sup>[20]</sup>研究也发现红土受到酸污染后,抗剪强度减小,随酸浓度的增大及养护时间的延长,酸浓度的影响大于养护时间的影响,这与本文前述研究结果基本一致。研究还发现酸浓度相同时,随养护时间延长,低浓度组粉粒含量减小,高浓度组粉粒含量先增后减,这是由于腐蚀阶段红土颗粒被腐蚀,破坏了颗粒间的联结,引起颗粒减小;浓度较低时,成盐较少,分散作用较

强,颗粒更细小,导致粉粒含量降低。综合已有研究成果发现,酸液对红黏土的粒度有影响,且影响程度随着酸液浓度和侵蚀时间不同而不同,而内摩擦角主要表征的是粗糙摩擦以及不同颗粒在剪切过程中互相嵌入所产生的咬合力,垂向压力相同情况下粒间粗糙程度即粒度组成情况是主要的影响因素。由于本文所用的酸浓度相较于贺蕊等<sup>[19]</sup>采用的要高,同时结合潘泰等<sup>[21]</sup>研究结果发现在浓度较高的酸液与矿物颗粒作用时,对颗粒的破坏作用要高于促使黏土矿物胶体之间黏附作用,红黏土中细颗粒含量相对增加,红黏土整体上粒径会减小,颗粒间的摩阻力也随之减小,得到的内摩擦角也随之减小,所以内摩擦角随着酸浓度和侵蚀时间增加而呈现不同程度降低的本文研究结果主要是红黏土粒径的整体减小所导致的。

将接受不同浓度酸液浸泡 28 d 后的红黏土在不同倍数条件下开展电镜扫描观察,以期从红黏土微观结构的变化来分析酸液对抗剪强度及其指标的影响。图 5 为  $pH=2$ ,  $pH=1$  和  $pH=0$  酸液腐蚀的结果,在酸性环境中,红黏土与酸发生化学反应,红黏土中的物质成分特别是倍半氧化物,氧化钙镁等的溶蚀在酸作用下溶解流失(经过  $pH=0$  酸液腐蚀以后在 5 万倍视角下发现红黏土存在很多絮状/网状孔隙结构),一些不溶性胶粒变成可溶性的离子,降低红黏土粒间黏结性和黏结力,同时会增大内部孔隙,结构逐渐疏松,从而降低红黏土的抗剪强度,并且酸性越强,红黏土结构越疏松,化学元素成分损失就越多,大团聚体和团聚度均减少,抗剪强度就会越小<sup>[22]</sup>。酸液对红黏土结构的影响在不同  $pH$  条件下也是不同的,在  $pH=2$ (图 5a,b)和  $pH=1$ (图 5c,d)低浓度酸液腐蚀下主要以层状的铝硅酸盐类的矿物为主。通过对酸

液静态浸泡后红黏土微结构某一区域进行能谱分析发现,硅、氧、铝、铁、铜为主要元素,其中以硅、氧最为丰富,原子百分含量分别为 40.14% 和 55.06%,其余铝、铁和铜含量分别为 1.88%,1.48% 和 1.45%,硅和铝原子百分含量比为 21.35,与经历过强烈的脱硅富铝作用的红壤相比,元素含量相对较大,原因可能是取样位置植被不发育,生物作用较弱,另一方面土样经历过酸液侵蚀,倍半氧化物减少导致铝和铁的含量减少,这与牟春梅等<sup>[23]</sup>针对桂林地区酸影响红黏土

强度的内在原因研究结果基本一致,即酸液导致红黏土中起胶结作用的倍半氧化物  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  减少,使土颗粒间的胶结能力降低,土体抗剪强度降低。

本文采用静态浸泡试验揭示了红黏土抗剪强度及其指标降低的规律和原因,但是为快速获得相应的研究成果,采用了浸泡加速试验,这与实际酸雨侵蚀有一定偏差,所以在后续的研究中可以采取自然条件下受到酸雨侵蚀的斜坡土体为对象开展相关工作,会具有更好的实践指导意义。

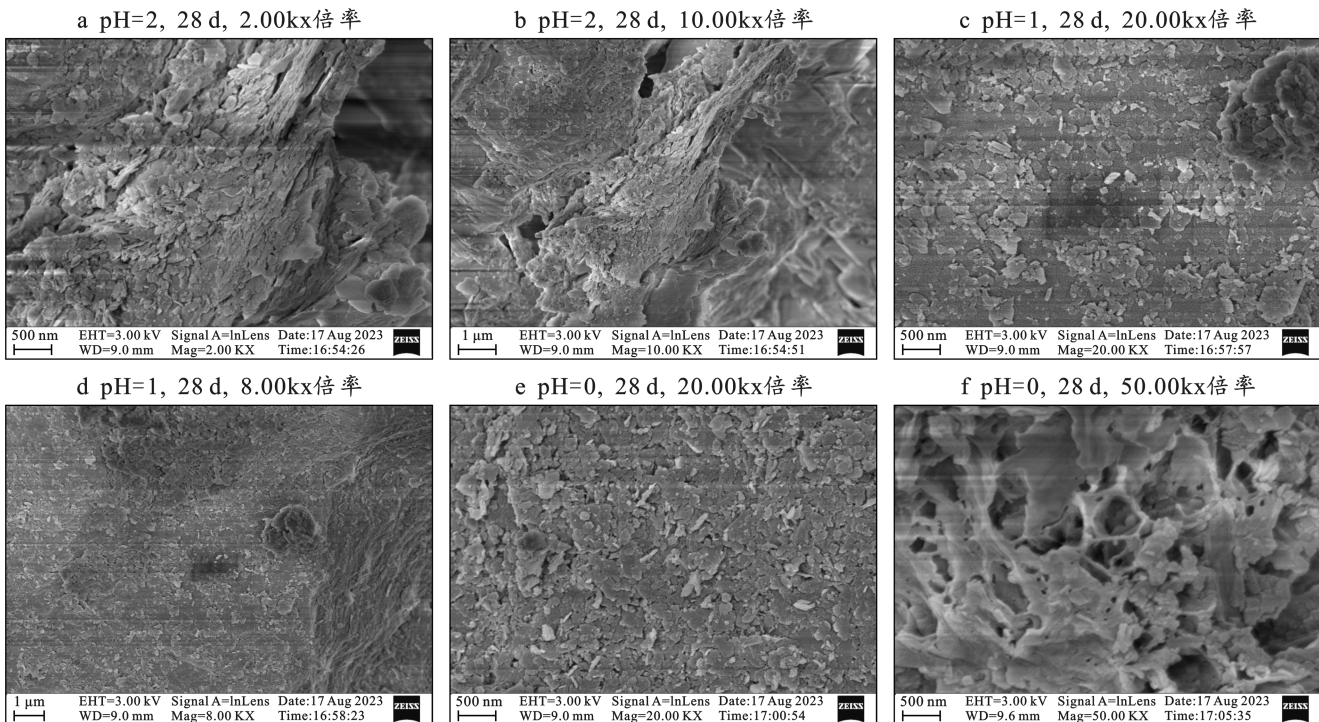


图 5 不同浓度酸液浸泡后红黏土微结构

图 5 Microstructure of red clay after soaking in different concentrations of acid

## 4 结论

(1) 纯水浸泡和低浓度酸液侵蚀的红黏土应力应变曲线较为光滑,随着剪切位移增加剪应力均匀增加,部分样品有峰值强度,但随着酸液浓度增加,应力应变曲线变得不稳定,呈现台阶状上升或下降趋势,具有应变硬化特征,酸液对红黏土应力应变特征影响明显。

(2) 红黏土的抗剪强度随浸泡时间和酸液浓度的增加逐渐降低,当酸液为低浓度时,抗剪强度降低不明显,当酸液为高浓度时,抗剪强度降低明显,侵蚀 28 d 时红黏土抗剪强度基本损失,仅有 5 kPa 左右。红黏土的黏聚力和内摩擦角指标也呈现逐渐降低的特点,在高浓度和长时间酸液侵蚀作用下,其黏聚力和内摩擦角均较低。同时对比分析发现酸液浓度比

浸泡时间对抗剪强度及其指标的影响更为显著。

(3) 通过电镜扫描和能谱分析并结合已有的研究成果发现,酸液会导致红黏土中倍半氧化物减少,粒间粘结性和黏聚力降低,内部孔隙增大结构疏松,含水率增多等原因是红黏土抗剪强度和黏聚力降低的原因,而酸液使粒径整体减小是内摩擦角降低的主要原因。

## 参考文献 (References)

- [1] 徐丽霞,向峰,邱飞,等.2016—2020 年云南省主要城市酸雨污染特征及趋势分析[J].灾害学,2022,37(1):96-101.
- Xu Lixia, Xiang Feng, Qiu Fei, et al. The characteristics and trend of acid rain pollution in the major cities in Yunnan Province from 2016 to 2020 [J]. Journal of Catastrophology, 2022,37(1):96-101.

- [2] Luan Haiyang, Fan Yingfang, Chen An, et al. Exploratory experimental study on flexural behavior of CFRP-reinforced concrete beams subjected to acidic loading effect [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2018, 21(14): 2184-2197.
- [3] Fan Yingfang, Hu Zhiqiang, Luan Haiyang, et al. A study of deterioration of reinforced concrete beams under various forms of simulated acid rain attack in the laboratory [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2014, 52(1): 35-49.
- [4] 刘昊. 模拟酸雨对 12 种常绿阔叶树幼苗叶绿素荧光特性的影响[D]. 浙江 杭州: 浙江林学院, 2008.  
Liu Hao. Effects of simulated acid rain on chlorophyll fluorescence characteristics of 12 species of evergreen broad-leaved seedlings [D]. Hangzhou, Zhejiang: Zhejiang Forestry University, 2008.
- [5] 任青阳, 靳红华, 肖宋强, 等. 模拟酸雨侵蚀环境下钢筋混凝土结构长期性能研究综述[J]. *交通运输工程学报*, 2022, 22(5): 41-72.  
Ren Qingyang, Jin Honghua, Xiao Songqiang, et al. Review on long-term performance of reinforced concrete structures under simulated acid rain erosion environments [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2022, 22(5): 41-72.
- [6] 袁晓露, 李北星, 祝文凯, 等. 酸雨对混凝土表层结构的侵蚀机理[J]. *材料导报*, 2022, 36(22): 221-226.  
Yuan Xiaolu, Li Beixing, Zhu Wenkai, et al. Corrosion mechanism of acid rain on surface structure of concrete [J]. *Materials Reports*, 2022, 36(22): 221-226.
- [7] Yin Yushi, Zhang Jun, Zhang Guanhua. Experimental study on reinforced concrete small-eccentricity compressive column after acid rain corrosion [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 364: 130002.
- [8] Xu Kaicheng, Huang Lingjuan, Zhang Liqing, et al. Experimental study on the seismic performance of prestressed concrete beams under low-cycle reciprocating load and simulated acid rain corrosion environment [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 408: 133629.
- [9] 张浚枫. 酸雨蚀变下云南红土的宏微观特性及机理研究[D]. 云南 昆明: 昆明理工大学, 2017.  
Zhang Xunfeng. Study on macro and micro characteristics and mechanism of Yunnan laterite altered by acid rain [D]. Kunming, Yunnan: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [10] 张星鹏. 酸雨作用下花岗岩残积土力学响应规律研究[D]. 湖北 武汉: 华中科技大学, 2021.  
Zhang Xingpeng. Study on mechanical response of granite residual soil under acid rain [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [11] 何玉芹, 许宏斌. 云南省酸雨控制区二氧化硫污染现状及综合防治措施[J]. *云南环境科学*, 2004, 23(S1): 140-142.  
He Yuqin, Xu Hongbin. Current situation and comprehensive prevention-treatment measures for SO<sub>2</sub> pollution in acid rain control zone, Yunnan Province [J]. *Environmental Science Survey*, 2004, 23(S1): 140-142.
- [12] 覃绮平. 土基回弹模量影响因素及其相关关系研究[D]. 陕西 西安: 长安大学, 2005.  
Qin Qiping. Study on Influencing factors and Correlation of soil foundation resilience modulus [D]. Xi'an, Shaanxi: Chang'an University, 2005.
- [13] 陈智锋, 李辉, 蒋宁山, 等. 冻融时间和含水率对紫穗槐加筋黄土抗剪强度的影响[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(2): 43-49.  
Chen Zhifeng, Li Hui, Jiang Ningshan, et al. Effects of freeze-thaw time and moisture content on shear strength of loess reinforced with *Sophora japonica* roots [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(2): 43-49.
- [14] 李涛, 吕春娟, 姜成刚, 等. 含水率和聚丙烯酰胺分子量对重构铁尾矿砂抗剪强度的影响[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(2): 89-97.  
Li Tao, Lyu Chunjuan, Jiang Chenggang, et al. Effects of water content and polyacrylamide molecular weight on shear strength of reconstructed iron tailing sand [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(2): 89-97.
- [15] 海龙, 谭世林, 徐博. 紫花苜蓿和通奶草根土复合体的力学特性[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(6): 57-64.  
Hai Long, Tan Shilin, Xu Bo. Mechanical properties of *Medicago sativa* and *Euphorbia hypericifolia* root-soil complex [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(6): 57-64.
- [16] Mahdikhani M, Bamshad O, Fallah Shirvani M. Mechanical properties and durability of concrete specimens containing nano silica in sulfuric acid rain condition [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 167: 929-935.
- [17] 中华人民共和国水利部. GB/T50123-2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T50123-2019 Standard for geotechnical testing method [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [18] 孙重初. 酸液对红黏土物理力学性质的影响[J]. *岩土工程学报*, 1989, 11(4): 89-93.  
Sun Zhongchu. Effect of acid solution on physical and mechanical properties of red clay [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, 11(4): 89-93.

- radiation and surface energy balance around the Ngoring Lake in source regions of the Yellow River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(6): 1462-1473.
- [22] 运志辉. 高原冻土路基边坡病害机制研究[D]. 陕西西安: 长安大学, 2023.
- Yun Zhihui. Study on disease mechanism of plateau permafrost subgrade slope [D]. Xi'an, Shaanxi: Chang'an University, 2023.
- [23] 苏培玺, 周紫鹃, 侍瑞, 等. 高寒草毡层基本属性与固碳能力沿水分和海拔梯度的变化[J]. *生态学报*, 2018, 38(3): 1040-1052.
- Su Peixi, Zhou Zijuan, Shi Rui, et al. Variation in basic properties and carbon sequestration capacity of an alpine sod layer along moisture and elevation gradients [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 1040-1052.
- [24] 王长燕, 郁耀闯, 黄土丘陵区退耕草地土壤稳定入渗率生长季变化[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(3): 107-113.
- Wang Changyan, Yu Yaochuang. Variation of soil stable infiltration rate in growing season for rehabilitated grassland in Loess Hilly Region [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(3): 107-113.
- [25] 于永堂, 刘争宏, 张继文, 等. 双环注水试验装置的研制及其应用[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(S1): 27-31.
- Yu Yongtang, Liu Zhenghong, Zhang Jiwen, et al. Development and application of double-ring infiltrometer [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(S1): 27-31.
- [26] 赵法锁, 李相然. 工程地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- Zhao Fasuo, Li Xiangran. *Engineering Geology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [27] 中华人民共和国建设部. 土的工程分类标准: GB/T 50145-2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB/T50145-2007 Standard for engineering classification of soil [S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [28] 韩冰, 吴钦孝, 李秧秧, 等. 黄土丘陵区人工油松林地土壤入渗特征的研究[J]. *防护林科技*, 2004(5): 1-3.
- Han Bing, Wu Qinxiao, Li Yangyang, et al. Study on the characteristics of soil infiltration of pinus tabulaeformis stand in the loess hilly areas [J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2004(5): 1-3.
- [29] 王经民, 吴钦孝, 韩冰, 等. 陕北黄土区土壤入渗模式的比较探讨[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2004, 20(4): 288-290.
- Wang Jingmin, Wu Qinxiao, Han Bing, et al. Distribution law on infiltration of loess hilly region [J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2004, 20(4): 288-290.
- [30] 程慧艳. 黄河源区高寒草甸草地覆被变化的水文过程与生态功能响应研究[D]. 甘肃兰州: 兰州大学, 2007.
- Cheng Huiyan. The hydrology process and ecological functions response under the vegetation coverage change of alpine-cold meadow in the headwater region of the Yellow River [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2007.
- ~~~~~
- (上接第 18 页)
- [19] 贺蕊, 苏怀, 李岫峰, 等. 滇东高原红壤酸处理后粒度增粗现象及原因探究[J]. *土壤*, 2018, 50(2): 428-433.
- He Rui, Su Huai, Li Xiufeng, et al. Phenomenon and reason of grain size increasing after adding HCl in red soil in eastern Yunnan Plateau [J]. *Soils*, 2018, 50(2): 428-433.
- [20] 伯桐震, 黄英, 石崇喜, 等. 酸污染红土物理性质的变化特征[J]. *水文地质工程地质*, 2012, 39(2): 111-115.
- Bo Tongzhen, Huang Ying, Shi Chongxi, et al. Variation characteristics of physical properties of acid pollution laterite [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(2): 111-115.
- [21] 潘泰, 赵贵涛, 黄英. pH 值对云南红黏土力学特性及微观结构的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(10): 3427-3434.
- Pan Tai, Zhao Guitao, Huang Ying. Effect of pH value on mechanical properties and microstructure of Yunnan laterite [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(10): 3427-3434.
- [22] 肖桂元. 酸雨作用下桂林红黏土损伤规律研究[D]. 湖北武汉: 中国地质大学, 2021.
- Xiao Guiyuan. Study on strength attenuation law of red clay subgrade under the action of acid rain [D]. Wuhan, Hube: China University of Geosciences, 2021.
- [23] 牟春梅, 付青, 刘奕畅. 桂林地区酸污染红黏土力学效应弱化试验[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(4): 52-57.
- Mu Chunmei, Fu Qing, Liu Yichang. Experimental of mechanical effect weakening of acid-contaminated red clay in Guilin [J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2019, 40(4): 52-57.