

干湿循环下花岗岩残积土性能劣化试验研究

陈晓贞¹, 简文彬^{2,3*}, 宋丽琴¹

(1. 闽南理工学院智能建造工程学院, 福建 泉州 362700; 2. 福州大学紫金地质与矿业学院, 福建 福州 350108;
3. 福州大学地质工程福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350108)

摘要: [目的] 本研究旨在探究干湿循环下花岗岩残积土强度劣化规律, 及其与矿物成分、含量变化的相关性。[方法] 选取福州(试样1)、泉州(试样2)两地某边坡浅层花岗岩残积土开展室内试验, 模拟干湿循环对试样抗剪强度的劣化作用, 同时对试样2历经干湿循环后的样本进行X射线粉末衍射测试。[结果] 试验结果表明: 两地残积土黏聚力均随干湿循环次数增加而衰减, 衰减曲线可采用S型函数拟合, 内摩擦角无明显变化; 试样1黏聚力3次干湿循环前劣化速率较小, 3次后显著, 由15.74 kPa劣化为8.94 kPa, 劣化程度达43.20%, 试样2黏聚力3次循环前劣化速率快, 之后趋平缓, 由17.40 kPa降至10.85 kPa, 劣化程度37.64%, 试样1劣化程度略高于试样2; 干湿循环过程中, 长石矿物含量减少, 黏土矿物含量上升, 矿物含量阶段变化幅度与黏聚力在相近阶段的劣化程度基本契合。[结论] 花岗岩残积土矿物成分不同, 抗劣化能力不同, 劣化程度、劣化速率也不同, 矿物成分的改变与黏聚力劣化之间存在紧密的内在联系, 矿物成分的多样性及长石的水解作用是引起黏聚力劣化的重要原因。该研究成果可为进一步探究残积土性能劣化机制提供关键的矿物学依据。

关键词: 花岗岩残积土; 劣化机理; 干湿循环; 抗剪强度; 矿物成分

中图分类号: TU 43

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)06-1065-08

Experimental study on the deterioration of granite residual soil properties under wetting-drying cycles

CHEN Xiaozhen¹, JIAN Wenbin^{2,3*}, SONG Liqin¹

(1. College of Intelligent Construction Engineering, Minnan University of Science and Technology, Quanzhou 362700, China;
2. Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 3. Fujian University Engineering Research Centre for Geological Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: [Objective] This study investigates the strength deterioration rule of granite residual soil and its correlation with changes in mineral composition and content under wetting-drying cycles. [Methods] Laboratory experiment were conducted on shallow slope granite residual soils Fuzhou (S1) and Quanzhou (S2) to simulate shear strength degradation under wetting-drying cycles. X-ray powder diffraction analysis was also performed on S2 post-cycles. [Results] The test results indicate that the cohesion of both soils decreased as the cycles number increased, following an S-type attenuation curve, while the internal friction angle remained relatively stable. For S1, cohesion deterioration was slow before the 3rd cycle but significant afterward, decreasing from 15.74 kPa to 8.94 kPa, representing a 43.20% reduction. For S2, cohesion deterioration was rapid before the 3rd cycle and then gradually slowed, decreasing from 17.40 kPa to 10.85 kPa, resulting in a 37.64% reduction. S1 exhibited slightly higher deterioration degree. During cycles, feldspar content decreased while clay content increased, with mineral content fluctuation amplitude consistent with cohesion degradation at corresponding stages. [Conclusion] Differences in mineral compositions of granite residual soils result in distinct

收稿日期: 2024-10-31 录用日期: 2025-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(U2005205); 福建省中青年教育科研项目(科技类)(JAT220421)

* 通信作者: jwb@fzu.edu.cn

引文格式: 陈晓贞, 简文彬, 宋丽琴. 干湿循环下花岗岩残积土性能劣化试验研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(6): 1065-1072.

Citation: CHEN X Z, JIAN W B, SONG L Q. Experimental study on the deterioration of granite residual soil properties under wetting-drying cycles[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(6): 1065-1072. (in Chinese)



deterioration resistance capacities, as well as varying deterioration degrees and rates. There is a strong intrinsic relationship between mineral composition changes and cohesion deterioration. Mineral composition diversity and feldspar hydrolysis are key factors contributing to cohesion deterioration. These findings provide a critical mineralogical basis for further exploring the deterioration mechanisms of residual soil properties.

Keywords: granite residual soil; deterioration mechanism; wetting-drying cycle; shear strength; mineral composition

花岗岩残积土广泛分布于福建省, 该地区属暖湿亚热带海洋性季风气候, 高温期长、降雨充沛, 为花岗岩残积土的风化提供了有利条件, 季节性干湿循环致使其力学性能处于不断劣化的过程^[1], 直接影响边坡的长期稳定性及服务年限^[2-5]. 因此, 干湿循环下花岗岩残积土强度损伤的时间效应是一个不容忽视的理论与应用问题. 近年来, 闽东、南地区花岗岩残积土在干湿循环作用下的力学性能损伤规律、细观损伤机理及两者的关联性研究已取得了诸多有益成果. 简文彬等^[6]通过室内干湿循环模拟试验发现, 干湿循环下花岗岩残积土黏聚力随循环次数呈 S 型曲线衰减. 于佳静等^[7]结合模型试验与数值模拟, 指出干湿循环使花岗岩残积土的抗剪强度及边坡稳定系数减小. 安然等^[8-10]开展了三轴剪切、单轴压缩及多种微观测试(MRI、电阻率、SEM、 μ -CT 扫描与渗流模拟), 结果表明: 干湿循环会显著破坏花岗岩结构, 引起有效抗剪强度指标下降; 孔隙数量和体积增加, 孔隙率和孔隙连通率均与循环次数呈正相关; 强度与电阻率指标呈反向演化; 力学特性和微结构演化趋势较同步; 渗透系数随循环次数增大. 刘越等^[11]、杨雪菲等^[12]通过边坡模型试验发现, 裂隙宽度扩展符合 Logistic 模型, 裂隙深度与强度衰减具量化关系; 裂隙度与循环次数基本呈线性相关, 黏聚力随循环次数增加而减小, 裂隙扩展与强度降低相互促进. An 等^[13]基于 micro-CT 试验指出, 干湿循环会导致小孔隙转变为体积大、连通性高的裂缝, 渗透率与导水率明显增加. 周宇等^[14]的干湿循环下崩解试验表明, 随循环次数增加, 颗粒结构破坏、团聚性减弱, 平面孔隙率增大, 崩解加速.

可见, 干湿循环明显破坏花岗岩残积土结构, 导致裂隙延伸、空洞变化. 然而, 矿物成分也是决定其力学性能的重要因素^[15], 康馨等^[16]通过循环后游离氧化铁含量测定发现, 游离氧化铁含量下降是有效黏聚力减小的原因. 目前, 关于不同矿物成分花岗岩残积土对干湿循环的响应研究, 及反复干湿循环后抗剪强度与主要组成矿物含量变化的相关性研究极少. 本文选取福州、泉州两地某边坡浅层花岗岩残积土, 开展室内干湿循环试验, 定量比较其强度劣化规律, 并借助 X 射线衍射试验分析泉州试样在不同循环次数下各矿

物成分含量的变化, 从微观方面探讨干湿循环对花岗岩残积土强度劣化的影响机制, 揭示抗剪强度劣化与矿物成分含量变化的相关性, 为闽东南地区干湿循环下浅层花岗岩残积土边坡长期稳定性及支护耐久性设计提供重要参考.

1 干湿循环试验

1.1 岩土试样特征

试验试样分别取自福州地区某边坡(图 1)、泉州地区某边坡(图 2)浅层花岗岩残积土, 分别编号为试样 1、试样 2, 根据室内土工试验获得两试样初始物理力学参数(表 1 和表 2).



图 1 试验土样 1

Fig. 1 Soil sample 1



图 2 试验土样 2

Fig. 2 Soil sample 2

表 1 岩土样描述及矿物含量

Tab. 1 Description and mineral content of soil samples

编号	描述	碎屑物			
		石英	微斜长石	高岭石	伊利石
试样 1	褐黄色、肉红色,硬塑,饱和,黏性一般	20.7~47.6	0.4~24.2	49.4~69.1	—
试样 2	灰白色,硬塑,饱和,为粗粒花岗岩残积土	30.4~45.5	20.0~25.4	11.6~32.8	10.9~20.9

表 2 岩土样物理力学参数

Tab. 2 Physico-mechanical parameters of soil samples

编号	参数				
	湿密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	含水量 $w/\%$	饱和度 $S_r/\%$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
试样 1	1.84	23.8	82.0	15.74	34.02
试样 2	1.97	21.5	80.6	17.40	31.18

表 3 两地区试样不同循环次数的直剪试验结果

Tab. 3 Shear strength indexes of samples from two regions with different cycles

干湿循环次数/次	试样 1		试样 2	
	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
0	15.74	34.02	17.40	31.18
1	15.66	33.84	15.83	31.88
3	14.95	33.15	12.38	31.24
5	12.70	33.70	11.93	31.36
7	11.38	34.62	10.95	31.04
9	8.94	33.58	10.85	31.19

1.2 干湿循环作用试验方案

试验主要模拟季节性降雨-干燥的数次干湿交替后,再次经历强降雨饱和时边坡浅层花岗岩残积土的强度劣化规律及劣化机理.采用抽气饱和法进行吸水饱和以模拟降雨饱和作用,采用烘干法进行风干以模拟高温蒸发作用(温度保持在 105 °C 状态不变,开启除湿干燥风机,12 h 后取出),设计“饱和-风干-饱和”为 1 次完整循环.分别取经历 0 次、1 次、3 次、5 次、7 次、9 次干湿循环作用试样进行直接快剪试验,试验设计过程见图 3,同时取试样 2 各循环作用次数后的试件进行 X 射线粉末衍射测试.

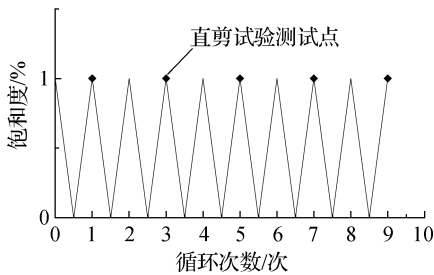


图 3 干湿循环试验方案

Fig. 3 The sketch of the wetting-drying cycles

1.3 试验结果及分析

1.3.1 抗剪强度指标劣化情况分析

两种残积土不同循环次数作用后的直剪试验结果见表 3,抗剪强度指标随干湿循环次数的劣化情况如图 4 和图 5 所示.

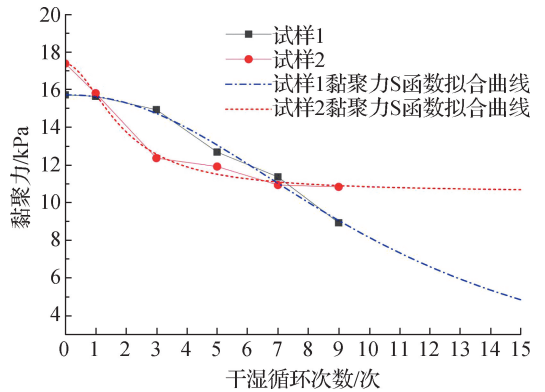


图 4 黏聚力与循环次数关系

Fig. 4 Relationship between cohesion and cycle number

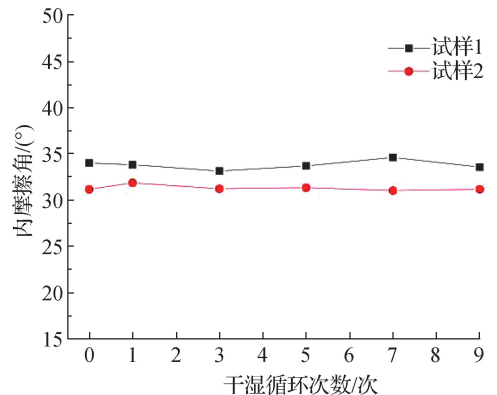


图 5 内摩擦角与循环次数关系

Fig. 5 Relationship between internal friction angle and cycle number

两地区花岗岩残积土的主要矿物成分包括石英、长石、黏土矿物(高岭石、伊利石),其中长石与石英颗粒共同构成残积土的土骨架,黏土矿物颗粒则填充于骨架颗粒之间,三者协同作用形成了残积土的抗剪强度. 石英矿物颗粒呈棱角状,彼此相互嵌挤,其含量越高,嵌挤作用越显著,抗剪强度也就越高;长石矿物颗粒与石英类似,呈棱角状时相互嵌挤使抗剪强度高,呈浑圆状时抗剪强度则低;而黏土矿物填充于颗粒间孔隙,是颗粒间黏结情况主要影响因素,填充越密实,颗粒间接触面积越大,黏结能力越强,抗剪强度越大,反之则越小.

3种主要组成矿物中,石英硬度高、抗风化能力极强,在水分和温度交替作用下,几乎不发生化学溶解作用,一般也不易产生机械破碎. 长石的抗风化能力相对较弱,在水分和温度交替作用下易向黏土矿物转化分解成细小颗粒,致使骨架结构被破坏,土体结构松散,有效接触面积减小,颗粒间黏结作用被削弱,黏聚力降低,进而抗剪强度劣化. 黏土矿物的抗风化能力最弱,含水率升高时,颗粒间发生离子交换,其表面吸附水分子形成水化膜. 同时,矿物吸水膨胀导致颗粒间距增大,使得颗粒间的表面吸附作用减弱,静电引力和胶结力降低,进而劣化土体的抗剪强度. 失水干燥时,矿物收缩并产生微裂隙,破坏颗粒间的连续性,导致黏聚力发生不可逆损失. 试样1黏土矿物含量居多,微斜长石和石英总含量较少,试样2则与之相反. 图4表明,两种花岗岩残积土的黏聚力均随干湿循环次数增加而衰减,试样1黏聚力在前3次干湿循环作用下劣化幅度较小,3次以后劣化明显;试样2黏聚力在前3次干湿循环作用下劣化幅度较大,3次以后劣化幅度变小并趋于稳定. 图5显示,两种花岗岩残积土内摩擦角随循环次数增加均无明显劣化趋势,但试样1的波动略大于试样2. 由此可见,干湿循环对两试样抗剪强度的劣化情况相同,但因矿物成分不同,残积土的劣化程度和劣化速率存在差异.

1.3.2 抗剪强度指标劣化程度分析

为了更直观探求不同干湿循环次数作用下两类花岗岩残积土黏聚力的劣化程度,研究其随循环次数增加的劣化速率,引入阶段劣化和平均阶段劣化概念. 以初始状态为基准,若干循环次数后的黏聚力劣化值与初始黏聚力的比值即为劣化程度(以百分数计),相邻两次循环作用的劣化程度之差即为阶段劣化,阶段劣化与阶段循环作用次数的比值即为平均阶段劣化.

由图6所示不同矿物组成花岗岩残积土的黏聚

力劣化程度可知,两种花岗岩残积土黏聚力对干湿循环作用的响应较为显著,劣化程度均随循环次数的递增而加剧. 其中,试样1劣化程度曲线呈现出在循环3次前相对平缓,3次后显著上升的态势;试样2劣化程度曲线则在循环3次前显著上升,3次后趋于平缓. 进一步结合图7发现,试样1循环3次前的劣化速率较小(低于2.26%/次),循环3次后劣化速率增大(升至7.75%/次),且未呈现出明显的规律变化趋势,也未趋近于零,若循环次数继续增加,可能会出现持续衰减的情况;试样2在循环3次前劣化速率较大(最高达到9.91%/次),循环3次后劣化速率减小,在9次循环后平均阶段劣化近乎为零,黏聚力趋于稳定. 可见,黏土矿物含量较高的试样1,其劣化程度和速度均高于石英、长石矿物总含量较高的试样2. 由于黏土矿物的膨胀收缩特性,随着干湿循环的持续进行,微裂隙扩展贯通,土体结构破坏,颗粒间作用力不断弱化,导致黏聚力持续加速劣化,因此试样1的黏聚力仍呈现出高速衰减的趋势.

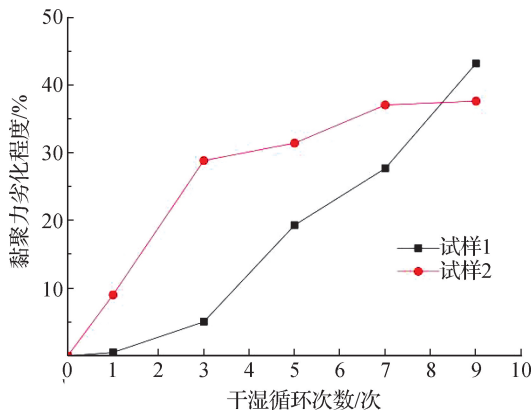


图6 黏聚力随循环次数的劣化程度

Fig. 6 Deterioration degree of cohesion with the number of cycles

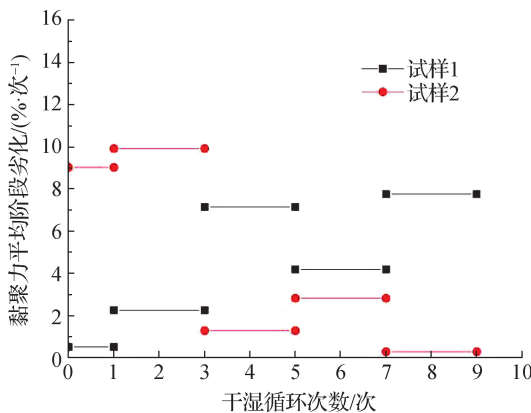


图7 黏聚力随循环次数的平均阶段劣化

Fig. 7 Average stage deterioration of cohesion with the number of cycles

1.3.3 劣化机理分析

干湿循环过程中,水分和温度交替作用使两地区花岗岩残积土黏聚力均随干湿循环次数的增加而劣化。其中,试样 1 黏聚力 3 次循环前平均阶段劣化较小,3 次后较显著,由 15.74 kPa 劣化为 8.94 kPa,劣化程度为 43.20%;试样 2 黏聚力 3 次循环前平均阶段劣化较大,3 次后较平缓,由 17.40 kPa 劣化为 10.85 kPa,劣化程度为 37.64%。干湿循环作用对花岗岩残积土黏聚力劣化的原因可以分为化学风化作用和物理风化作用两个方面。前者表现为残积土中长石矿物的水解作用和可溶性物质的溶解作用,导致土颗粒逐渐细化、结构趋于松散、孔隙度显著增加;土样浸水后,长石在水环境下形成 KOH 溶液及 SiO₂ 胶体,随水流失,或形成蛋白石(SiO₂·nH₂O)残留于原地,其余部分可形成难溶于水的高岭石而残留于原地;同时,土体中的可溶性物质呈溶解状态随水流失,难溶物质残留于原地,留下一些空洞;随着循环次数的增加,在土体中起胶结作用的游离氧化物的溶解量随之增加,胶结作用减弱,黏聚力变小^[16]。后者表现为温度和水的交替作用造成残积土的结构及物理状态变化:烘干过程中,高温作用使残积土矿物颗粒产生不均匀膨胀,导致内部裂纹的生成和扩展,孔隙率增大;饱水过程中,水分子通过裂隙楔入土体进入裂隙尖端,使裂隙不断加长、加宽,增大了颗粒之间的距离,削弱了颗粒之间的黏结力,使黏聚力降低;随着循环次数的增加,矿物颗粒反复收缩膨胀,内部损伤逐渐积累,颗粒之间的胶结作用迅速减弱,黏聚力随之下降。

干湿循环过程中,两地区花岗岩残积土内摩擦角随干湿循环次数的增加无明显变化,试样 1 内摩擦角保持在 33.15°~34.62°之间,试样 2 内摩擦角保持在 31.04°~31.88°之间。由于内摩擦角是由颗粒之间的滑动摩擦作用及相互咬合作用组成,而干湿循环过程中,花岗岩残积土颗粒未产生明显破碎,故颗粒的形状、级配及颗粒之间的接触关系没有明显改变,颗粒间的摩擦系数及相互咬合作用无显著变化,因此内摩擦角变化不大。

2 干湿循环后的 X 射线粉末衍射分析

为了进一步分析评价矿物成分变化同干湿循环下残积土黏聚力劣化之间的关系,针对试样 2,在其历经不同干湿循环次数后,开展 X 射线粉末衍射测试。由此绘制出相应的 X 射线衍射图谱(图 8),整理列出矿物含量变化表(表 4),并绘制矿物成分变化与黏聚

力劣化、黏聚力劣化程度关系图(图 9)。

由图 8、表 4 可以得知,试样 2 由多种矿物组成,主要矿物成分为微斜长石、石英、高岭石、伊利石。因其矿物组成多样,且不同矿物热膨胀系数、遇水膨胀与失水收缩特性均存在差异,干湿循环反复作用下,颗粒间易产生裂隙,抗剪强度指标随之降低。对于裂隙的促进劣化作用,以及裂隙扩展与矿物成分变化之间是否存在关联,可在今后研究中深入开展。表 4 中数据显示,石英矿物含量变化波动大且无规律,未呈现出劣化趋势,鉴于已有研究表明石英矿物具有不易被风化的特性^[17],在本文的研究范畴内,暂不探讨石英矿物与黏聚力劣化之间的关联性,为了更全面深入了解石英矿物在该环境下的行为表现,后续研究可考虑进一步增加循环次数,展开更为详尽的研究分析。

由图 9 可知,在循环进程中,微斜长石矿物含量随循环次数增多而降低,伊利石含量呈现出缓慢且持续的上升态势,高岭石含量呈 S 型曲线增长,黏土矿物含量的波动情况与高岭石近乎同步,并且各矿物在循环前期变化显著,后期渐趋平缓。深入分析发现,各矿物含量的阶段变化程度与试样 2 黏聚力在近似阶段的劣化程度大体契合,即循环前期微斜长石含量减少显著、黏土矿物(高岭石、伊利石)增加显著,黏聚力劣化显著;循环后期微斜长石含量减少缓慢,黏土矿物(高岭石、伊利石)变化较平缓,黏聚力劣化亦表现轻微劣化。更进一步分析发现,第 9 次循环后,各矿物含量均由平缓变化转为较明显地减小,而此时黏聚力仍保持平缓衰减,黏聚力劣化速率也随之降低,黏聚力开始趋于稳定。据此可以推断,在干湿循环前期,长石水解主要向高岭石和伊利石这两种黏土矿物转化,其中高岭石的生成和变化在黏土矿物的整体变化过程中占据主导地位。循环后期由于循环次数的累加,高温饱水反复作用导致微裂隙扩大、延伸,增大了颗粒与水的接触面积,促进微斜长石进一步分解,而高温饱水环境也为高岭石和伊利石进一步分解为铝土矿、蛋白石等矿物提供条件,进而导致各矿物含量降低,但由于这一系列后期转化反应的程度和范围相对有限,因此对黏聚力劣化的影响也相对较小,使得黏聚力逐渐趋于稳定状态。随着循环作用次数持续增加,微裂隙将不断扩展延伸,深部微斜长石的水解亦会持续深化,黏聚力将在一定阶段内保持相对稳定状态。然而,当宏观裂隙逐步发育形成,物理作用机制开始占据主导地位时,这种稳态将被打破,此后黏聚力可能呈现继续劣化趋势。上述现象表明矿物成分变化与黏聚力劣化之间存在显著的关联性与阶段性演化

特征. 这不仅为进一步探究残积土性能劣化机制提供了关键的矿物学依据, 还对深入理解干湿循环作用下矿物转化及性能演变规律具有重要的参考价值. 后续研究可在此基础上深入挖掘各矿物转化路径和转化

饱和机制, 剖析化学作用与物理作用的动态转化机制, 量化各因素对花岗岩残积土宏观性能的影响, 从而为相关工程应用提供更为精准的理论支持和实践指导.

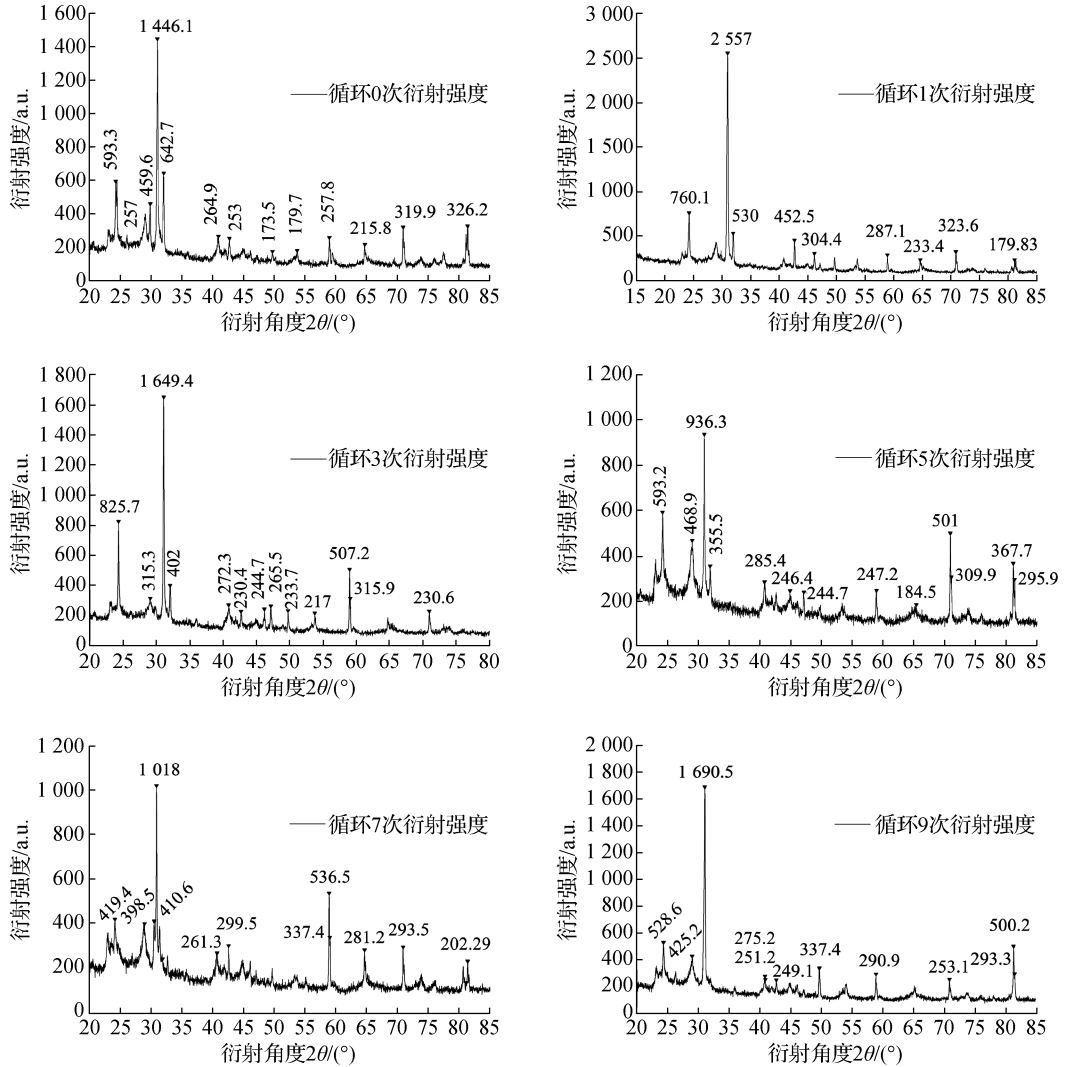


图 8 不同干湿循环次数下残积土的 X 射线衍射图谱

Fig. 8 X-ray diffraction patterns of residual soil after different wet-dry cycles

表 4 不同循环次数作用后花岗岩残积土的矿物含量变化

Tab. 4 The change of mineral content of granite residual soil after different cycles

化学式	矿物名称	矿物含量						
		0 次	1 次	3 次	5 次	7 次	9 次	
KAISi_3O_8	微斜长石	34.1	23.9	26.0	26.1	26.2	21.9	
SiO_2	石英	27.0	39.9	35.0	20.7	21.2	31.3	
$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	高岭石	20.0	17.4	16.7	30.5	29.2	24.4	
$\text{K}(\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_9(\text{OH})_3)$	伊利石	18.9	18.8	22.3	22.8	23.4	22.4	
—	黏土矿物	38.9	36.2	39.0	53.3	52.6	46.8	

注: 表中黏土矿物含量为高岭石与伊利石含量之和.

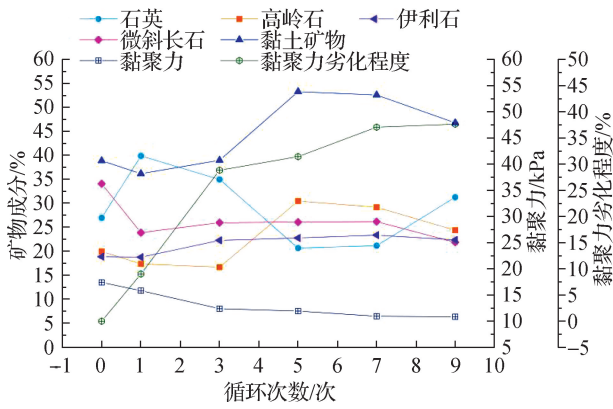


图 9 干湿循环下矿物含量变化

Fig. 9 The change of mineral content under dry-wet cycles

3 强度衰减曲线的函数拟合

岩土边坡长期稳定性主要取决于其自身的抗剪强度,由上述试验结果表明干湿循环多次作用后会使得花岗岩残积土黏聚力发生劣化.为了探讨干湿循环对

边坡长期稳定性的影响,根据劣化曲线特点采用 S 型函数进行拟合,拟合曲线如图 4 所示,拟合公式见式(1),拟合结果见表 5.

$$c = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + \left(\frac{N}{B}\right)^P}, \quad (1)$$

式中: c 为黏聚力, N 为干湿循环次数, A_1 为初始黏聚力, A_2 为极限黏聚力, B 和 P 为拟合参数.

拟合相关系数 R^2 大于 0.98,说明选用 S 型函数能够较好地体现花岗岩残积土抗剪强度在干湿循环下的劣化规律.根据拟合结果分析,干湿循环引发的矿物作用机制对不同矿物组成试样的黏聚力影响存在显著差异:对于试样 1 而言,该作用机制足以致使其黏聚力完全丧失,衰减至零;而试样 2 所受其影响相对有限,该机制不足以使其黏聚力完全丧失,黏聚力将稳定于 10.56 kPa.拟合结果对于分析闽东南地区花岗岩残积土边坡季节性干湿循环作用下的长期稳定设计及边坡支护设计具有参考价值.

表 5 干湿循环下黏聚力衰减曲线拟合结果

Tab. 5 Fitting results of cohesion attenuation curve under dry-wet cycle

土样	参数								统计		
	A_1		A_2		B		P		Reduced Chi-Sqr	R^2 (COD)	调整后 R^2
	值	标准误差	值	标准误差	值	标准误差	值	标准误差			
试样 1	15.74	0	0	0	10.353	0.395	2.183	0.192	0.076 8	0.992	0.990
试样 2	17.40	0	10.56	0.429	1.881	0.240	1.846	0.338	0.081 0	0.994	0.989

4 结 论

两种花岗岩残积土黏聚力均随循环次数增大而产生渐进式衰减,内摩擦角未表现出明显劣化现象.9 次干湿循环作用内,试样 1 黏聚力前期变化缓慢后期变化幅度大,且表现为持续衰减趋势,而试样 2 黏聚力前期劣化幅度大后期趋于稳定,平均阶段劣化趋于零.黏土矿物含量较高的试样 1 劣化程度和速度要高于石英和长石总含量较高的试样 2,可见,花岗岩残积土矿物成分不同,对干湿循环作用的响应及敏感度不同.

试样 2 经历干湿循环作用后的矿物成分分析显示:随着循环次数的递增,微斜长石经水解作用后含量减少,黏土矿物(包括高岭石、伊利石)含量增加;各

矿物含量在不同阶段的变化幅度与黏聚力在相近阶段的劣化程度大体契合,具体表现为各矿物成分在循环前期变化显著,后期变化平缓;但值得注意的是,历经 9 次循环后各矿物成分出现了相对明显的降低,而黏聚力劣化仍不明显.综合上述现象可以明确:1) 花岗岩残积土组分多样以及长石水解后黏土矿物含量的增加是导致强度指标劣化的重要原因;2) 矿物成分变化与黏聚力劣化之间存在紧密的内在联系;3) 干湿循环 9 次后,由于高温饱水反复作用,土体内部裂隙逐渐萌生并持续扩展,为各矿物的进一步转化提供条件,致使各矿物含量减少,但由于转化反应的程度和范围相对有限,因此对黏聚力劣化的影响也相对较小,使得黏聚力保持平缓状态;随着循环次数的增加,物理作用机制将逐渐取代化学作用机制而占主导地位,此时黏聚力可能继续产生劣化.事实上,矿物的不

均匀热膨胀及水的楔入作用导致裂隙变化与矿物成分含量变化之间是否存在相关性,及综合考虑两因素与抗剪强度劣化的相关性是需要进一步探究的重要问题。

干湿循环下黏聚力衰减曲线可采用 S 型函数进行拟合,拟合相关系数 R^2 大于 0.98,说明选用 S 型函数能够较好地体现花岗岩残积土强度在干湿循环下的衰减规律。若仅基于矿物作用机制下的干湿循环作用,试样 1 的黏聚力将完全丧失,而试样 2 则趋于稳定,最终黏聚力维持在 10.56 kPa。拟合结果对于分析闽东南地区花岗岩残积土浅层边坡对反复干湿循环的响应机制具有参考价值。

内摩擦角在 9 次干湿循环次数以内未表现出明显的变化趋势,对于内摩擦角几次循环后开始劣化及其劣化规律将于后续研究中开展。

参考文献:

- [1] HOSSAIN M D S. Effect of drying-wetting cycles on saturated shear strength of undisturbed residual soils[J]. American Journal of Civil Engineering, 2016, 4(4): 159.
- [2] 张鹏超. 干湿循环作用下花岗岩残积土性能劣化及边坡稳定性分析[J]. 工程勘察, 2020, 48(9): 19-23.
- [3] 王德咏, 周树津, 韩雨薇, 等. 干湿循环下花岗岩残积土路堑边坡稳定性研究[J]. 公路, 2021, 66(1): 1-6.
- [4] 许旭堂, 鲜振兴, 杨枫, 等. 水-力耦合及干湿循环效应对浅层残积土斜坡稳定性的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 28-36.
- [5] MAO Q, GUO K, ZHANG J W, et al. Response of granite residual soil slopes under dry-wet cycles[J]. Frontiers in Earth Science, 2024, 11: 1333668.
- [6] 简文彬, 胡海瑞, 罗阳华, 等. 干湿循环下花岗岩残积土强度衰减试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 592-597.
- [7] 于佳静, 陈东麗, 王晖, 等. 干湿循环下花岗岩残积土抗剪强度及边坡稳定性分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2019, 58(4): 614-620.
- [8] 安然, 孔令伟, 黎澄生, 等. 炎热多雨气候下花岗岩残积土的强度衰减与微结构损伤规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(9): 1902-1911.
- [9] 安然, 孔令伟, 柏巍, 等. 单轴荷载下残积土的电阻率损伤模型及干湿循环效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S1): 3159-3167.
- [10] 安然, 陈昶, 牛玉璋. 考虑干湿循环影响的残积土 μ -CT 扫描与渗流模拟[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(2): 228-235.
- [11] 刘越, 陈东霞, 王晖, 等. 干湿循环下考虑裂隙发育的残积土边坡响应分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(7): 1933-1943, 1982.
- [12] 杨雪菲, 陈东霞, 刘越. 干湿循环下花岗岩残积土裂隙演化及边坡稳定性[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2022, 61(4): 591-599.
- [13] AN R, KONG L W, ZHANG X W, et al. Effects of dry-wet cycles on three-dimensional pore structure and permeability characteristics of granite residual soil using X-ray micro computed tomography[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(3): 851-860.
- [14] 周宇, 陈东霞, 于佳静, 等. 干湿循环下花岗岩残积土裂隙演化及边坡稳定性[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(1): 153-160.
- [15] 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.
- [16] 康馨, 赵士成, 刘鹏. 干湿循环下花岗岩残积土胶结物溶蚀-微结构演化规律与力学行为[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(1): 159-169.
- [17] 孙银磊, 汤连生. 化学成分对花岗岩残积土抗拉张力学特性的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2018, 57(3): 7-13.

(责任编辑:汪 军)