

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230710

干湿循环过程中红层泥岩的力学与裂隙特征研究

王天奇¹, 葛 新²

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100091)

摘要: 干湿循环效应是影响红层泥岩库区边坡稳定性的重要因素。为研究原状风化泥岩在干湿循环过程中的力学和裂隙演化特征, 开展了三轴固结不排水剪切试验、CT扫描及高精度扫描电镜试验。结果表明, 红层泥岩在低围压下的应力-应变关系呈应变软化特征, 在高围压下呈应变硬化特征, 抗剪强度指标随干湿循环次数逐渐下降; 红层泥岩的裂隙体积含量随循环次数增加呈指数型衰减, 且与粘聚力呈负线性相关的函数关系; 泥岩的微观结构在干湿循环过程中逐渐破坏, 导致裂隙的连通和力学性能衰减。

关键词: 红层泥岩; 干湿循环; 三轴剪切试验; 裂隙

中图分类号: TU525; TV223.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)10-0163-04

1 引言

红层泥岩广泛分布于我国南方省份, 是一种典型的低强度、易崩解和弱膨胀性岩体, 其主要矿物成分包括碎屑石英矿物和亲水性粘土矿物, 红层泥岩的物理力学性能对环境湿度变化具有一定的敏感性^[1]。鉴于泥岩不良特性引起渠道边坡发生工程灾害的普遍性和治理的紧迫性, 当地政府高度重视泥岩工程灾害的治理工作。渠道边坡的失稳现象与泥岩在不同赋存条件下的强度演化特征密切相关^[2]。由于降雨量、蒸发量、气候变化、地下水位变化等导致的含水率变化会引起泥岩内部结构调整。在气候季节性更替的影响下, 边坡表面的泥岩会不可避免地经历吸水膨胀和干燥收缩的反复循环过程, 同时伴随着岩土体内部与外界的物质和能量交换过程。红层泥岩在干湿循环过程中发生剧烈变形导致细观裂隙的扩张和连通, 进而劣化其宏观力学性能, 最终诱发边坡稳定性显著降低^[3]。因此, 干湿循环条件是影响泥岩宏-细观变形特性的关键因素。当前对泥岩的强度、裂隙性、力学性能、微结构等性质受干湿循环的影响开展了大量研究^[4-6]。然而, 这些研究大多侧重于单独分析其强度的衰减规律, 从泥岩内部结构损伤角度认知环境效应对其力学特性的影响规律, 从定量角度揭示其在干湿循环与外部荷载

耦合作用下的强度演化细微观机理有待深入研究。本文以红层泥岩为例, 研究干湿循环条件下泥岩力学性能和裂隙演化规律, 并从宏观、细观和微观的三个角度对干湿效应进行了关联性讨论, 旨在为深入认识红层泥岩的工程性能提供科学参考。

2 试验材料

2.1 试验原材料

泥岩材料取样点为四川省金沙江流域某蓄水库区的边坡, 属于南方红层地区。取样前收集了水文地质与工程地质资料, 该地区为典型的侏罗系下沙溪庙组红色风化泥岩地层, 结合勘探取样了解地质演化过程, 收集降雨与气候等资料, 分析堑坡失稳的环境效应。采用液压式钻机取红层泥岩原状试样后开展室内试验。经过基本土性测试得到的天然含水率、密度、渗透系数和液塑限等指标见表1。由自由膨胀率测量结果发现泥岩具有弱膨胀性。由筛分法和比重瓶法得到颗粒级配, 结果表明, 该泥岩的颗粒组成主要为砂粒和粉粒。由XRD衍射结果得到泥岩的矿物结果, 该泥岩

表1 泥岩的基本物性指标

Tab. 1 Basic physical properties of mudstone

含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	渗透系数/(cm·s ⁻¹)	塑限/%	液限/%	孔隙率/%	自由膨胀率/%
18.4	1.73	2.05×10 ⁻⁶	27.9	66.7	0.75	52

收稿日期: 2023-04-04, 修回日期: 2023-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378532)

作者简介: 王天奇(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为土木工程材料, E-mail: qushui2@163.com

主要由石英(54.7%)、长石(25.2%)、粘土矿物(18.2%)和其他微量矿物(1.9%)组成。

2.2 试样制备

试验前,参考《土工试验方法标准》(GB/T 50123-1999)^[7]的方法制备泥岩的标准原状试样。使用土工制样器将泥岩试件剖切成标准尺寸的圆柱体(直径 50 mm,长度 100 mm)。然后,对红层泥岩试样进行干湿循环处理。干湿循环步骤由吸水饱和与干燥 2 个步骤组成。首先,将泥岩试件装入饱和器,在室温条件下用抽真空饱和的方法对泥岩试样进行饱和试验,使红层泥岩饱和度达到 95%以上;然后,将试样在自然条件下进行风干处理,风干过程中实时记录红层泥岩的质量,使饱和度低于 15%,完成干燥处理。在干湿循环过程中,采用湿侧的泥岩试样进行三轴不排水剪切试验,采用干侧的泥岩试样进行 CT 扫描试验和 SEM 试验。

3 试验结果与分析

3.1 泥岩的宏观力学性能

采用土工三轴剪切仪对红层泥岩进行固结不排水剪切试验,共测试了 100、200、300、400 kPa 四组围压下的泥岩应力—应变曲线,试样破坏模式见图 1。在试验中发现,当围压低于 200 kPa 时,泥岩试样发生结构性破坏,强度以咬合摩擦强度为主,破坏时有明显的剪切带;当围压超过 200 kPa 时,泥岩试样塑性变形明显,破坏形态为鼓胀型破坏。图 2 为由三轴剪切试验得到的应力—应变曲线。由图 2 可知,低围压下泥岩试样的应力—应变关系曲线符合应变软化型特征,在高围压下呈应变硬化型特征。红层泥岩的抗剪强度随着干

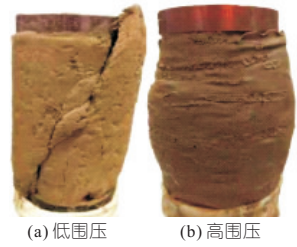


图 1 泥岩试样的破坏形态

Fig. 1 Failure mode of mudstone

湿循环次数的增加不断衰减,且在 0~2 次干湿循环过程中衰减幅度最大,6 次干湿循环后趋于稳定。三轴剪切试验结果表明,红层泥岩的结构性较明显,固结围压对其力学行为影响显著。

根据莫尔—库伦强度破坏准则,获取了红层泥岩的三轴抗剪强度指标,包括粘聚力 c 和内摩擦角 φ 。抗剪强度指标随循环次数增加的分布情况见图 3。由图 3 可知,在天然状态下,红层泥岩的粘聚力为 37.5 kPa,经过 8 次干湿循环后降为 23.6 kPa,降幅达 37.3%;在天然状态下,红层泥岩的内摩擦角为 22.6°,经过 8 次干湿循环后内摩擦角降为 20.8°,降幅为 7.5%,说明干湿循环对红层泥岩的粘聚力弱化程度远高于内摩擦角。此外,由试验结果发现,红层泥岩试样的抗剪强度指标降幅在 0~6 次干湿循环范围内变化明显,但在经过 6 次循环后趋于平稳。对试验数据进行拟合分析,发现泥岩的粘聚力、内摩擦角与干湿循环次数均符合对数函数关系。这种现象说明红层泥岩的强度损伤效应在干湿循环进行到一定次数后趋于稳定状态。

3.2 泥岩的细观裂隙特征

对 0~8 次干湿循环次数泥岩试样进行了 CT 扫描和三维重构。根据灰度值的差异,采用多阈值分割算法将 CT 扫描结果进行分割。以循

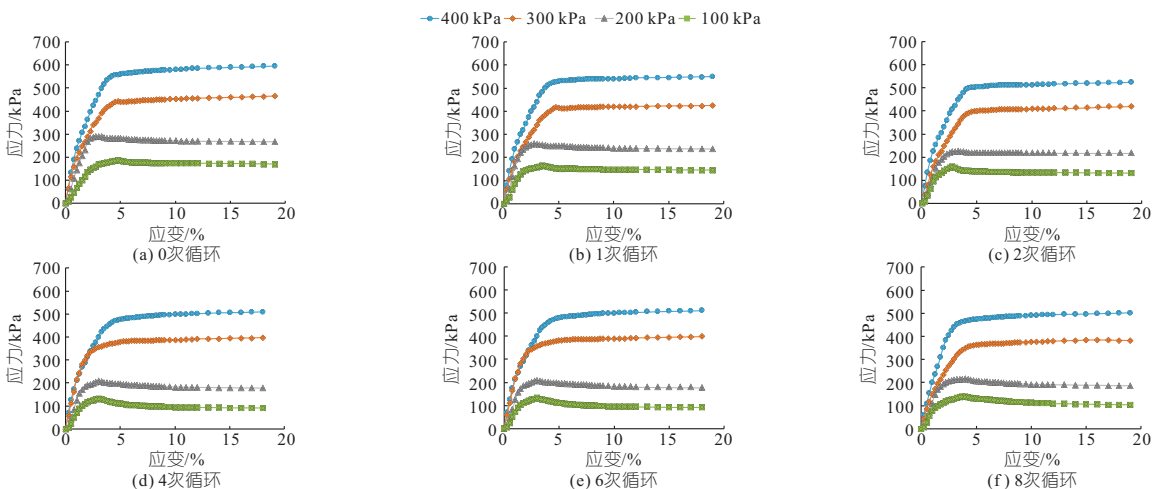


图 2 泥岩的应力—应变关系曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of mudstone

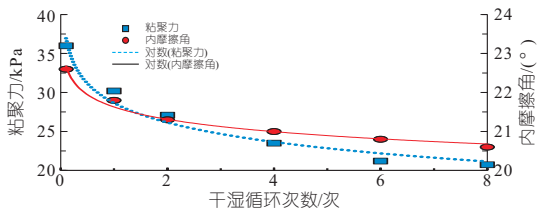


图 3 强度指标与干湿循环次数的关系曲线

Fig. 3 Relationship curves between strength index and time of drying and wetting

环次数为 0、2、4、8 次的试样为例,得到泥岩的三维数字模型见图 4。由图 4 可看出,干湿循环作用对泥岩的裂隙分布影响显著。红层泥岩的初始结构内部未出现连通的长裂隙,整体的结构密实程度较高;经过 1 次干湿循环后,泥岩内部出现了若干条长、宽较小的裂隙;经过 2 次干湿循环后,裂隙条数与尺寸迅速增加,在试样外缘出现了一条贯通裂隙(标记为 1);经过 4 次干湿循环后,泥岩的裂隙条数、长度和张开度均继续增加,贯通裂隙的开裂程度显著提高;在 4~8 次干湿循环过程中,裂隙条数和长度未出现明显增加,裂隙间的连通度处于一种相对稳定的状态,贯通裂隙的宽度略有增加。根据 CT 扫描的结果,将泥岩试样的裂隙演化过程分为 3 个主要阶段,其中,在 0~1 次干湿循环期间,裂隙数量开始增加,但发育程度仍不高,此阶段为裂隙演化的“启动期”;在 2~4 次干湿循环期间,大量裂隙开始连通,裂隙网络逐渐形成,此阶段为裂隙演化的“发展期”;经过 4 次干湿循环后,泥岩的裂隙网络处于一个相对平衡状态,裂隙演化过程进入“稳定期”。

经过 1、2、4、6、8 次循环后,泥岩裂隙体积含量由 0.82% 分别升至 3.21%、4.25%、5.86%、6.18%、6.53%。

泥岩试样的裂隙体积含量 R 和干湿循环次数 n 的关系曲线见图 5(a)。由图 5(a)可知,裂隙含量与干湿循环次数之间呈指数型关系,拟合曲线与实测数据的相关性系数大于 0.95,表明泥岩的裂隙体积含量随循环次数增加呈先快后慢的变化趋势,且二者关系采用指数型函数进行数据拟合的效果较好。对红层泥岩力学性能与裂隙损伤程度的关联程度进行评价,建立了粘聚力 c 与裂隙含量 R 的相关函数。图 5(b)为裂隙体积含量与粘聚力指标的关系。由图 5(b)可知,泥岩裂隙体积含量与粘聚力指标可采用线性拟合描述两者之间的数学关系,拟合公式的相关系数超过了 0.95。这种现象说明在干湿循环过程中,红层泥岩的宏观力学性能和微观结构的损伤规律具有一定的相关性。

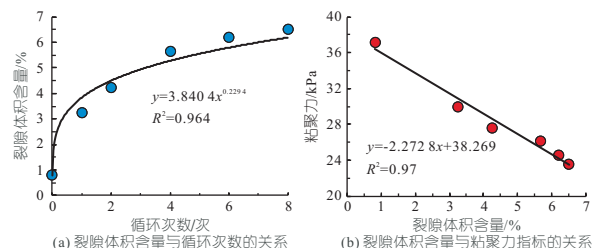


图 5 裂隙体积含量与循环次数、粘聚力指标的关系

Fig. 5 Relation between crack content vs. cycle number and cohesion

3.3 泥岩的微观结构特征

为了研究红层泥岩微观结构的干湿损伤特征,对不同干湿循环次数(0、2、4、8 次)下的泥岩试样开展扫描电镜(SEM)试验,见图 6。由图 6 可知,初始状态的红层泥岩粘土矿物颗粒呈絮凝状,颗粒间接触较为密实,仅存在少量小尺寸孔

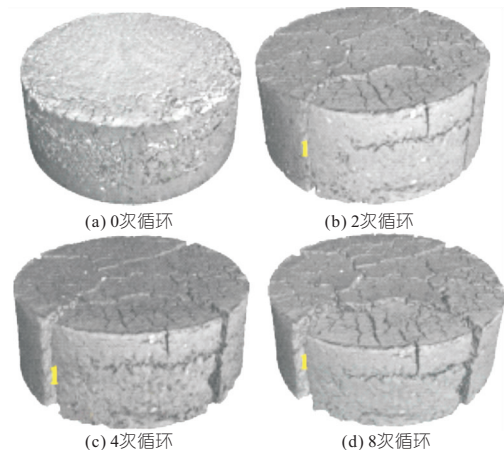


图 4 泥岩三维 CT 重构结果

Fig. 4 3D reconstruction results of mudstone from CT images

对 CT 图像进行二值化处理,统计了红层泥岩三维模型中裂隙的像素点数量,由此计算了不同泥岩试样中的裂隙体积含量 R :

$$R = [V_c / (V_c + V_r)] \times 100\% \quad (1)$$

式中, V_c 为裂隙体积; V_r 为泥岩的体积。

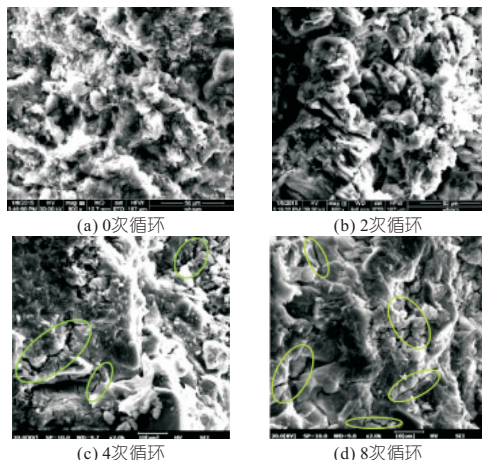


图 6 泥岩的 SEM 扫描图

Fig. 6 SEM scanning image of mudstone

隙。经过 2 次干湿循环后,开始出现了一些小裂隙相互连通的现象,同时伴随着新生小裂隙数量的增加,但裂隙间的连通度较低;经过 4 次干湿循环后,泥岩的孔隙数量继续增加,且孔隙尺寸与连通度有所增大;经过 8 次干湿循环后,泥岩的裂隙连通程度进一步提高,但裂隙数量无明显增加。SEM 结果说明在干湿循环过程中,红层泥岩的内部微观结构明显改变,泥岩颗粒结构趋向于疏松,孔隙逐渐扩张与贯通。

基于双电层理论和土颗粒相对作用力对泥岩的干湿循环损伤机理进行探讨。由于红层泥岩内部富含粘土矿物,在晶格置换作用下产生负电荷,在静电力作用下吸收阳离子,阳离子与水形成结合水膜,进而形成粒间双电层结构。在加湿过程中,水分子侵入泥岩使孔隙液浓度降低,结合水膜和双电层之间的自由水之间的平衡被破坏,自由水流入双电层区域导致粒间孔隙发生膨胀。在干燥过程中,双电层中的孔隙液离子浓度提高,孔隙水压力梯度与浓度梯度方向相反,孔隙水的迁移使土颗粒间产生收缩拉应力,进一步造成粒间孔隙的扩大。多次干湿循环使得颗粒间不断发生吸水膨胀和失水收缩,双电层结构出现疲劳损伤,加速了泥岩裂隙的扩展和连通^[8]。粘聚力主要取决于泥岩颗粒之间的粘结强度,而内摩擦角主要由颗粒的接触关系所决定,因此干湿循环的损伤效应在宏观上表现为粘聚力弱化程度明显高于内摩擦角的弱化程度。

4 结论

a. 干湿循环使红层泥岩的抗剪强度指标发生弱化,粘聚力与内摩擦角随循环次数增加近似保

持指数型衰减趋势,且粘聚力的弱化程度远大于内摩擦角。

b. 泥岩试样的裂隙体积含量与干湿循环次数呈正相关的指数型关系,说明宏、细观结构损伤程度具有一定的相关性。

c. 多次干湿循环使粘土矿物不断发生吸水膨胀和失水收缩,泥岩的双电层结构发生疲劳损伤,加速细观裂隙扩展和连通,最终使粘聚力大幅下降,进而削弱了红层泥岩的力学性能。

参考文献:

- [1] 张海康,肖曦,王展,等. 红层河谷区泥岩水化损伤特性试验及本构模型研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(2):147-150,175.
- [2] 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.
- [3] 赵春彦,黄启友,郎锋,等. 单因素和多因素作用下的水泥土强度评估模型试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(11):2788-2795.
- [4] 陈留凤. 干湿循环对泥岩水力特性影响规律宏观细观试验和数值研究[D]. 武汉:武汉大学, 2018.
- [5] 陈纪昌. 干湿循环及地震耦合作用下的库区红层泥岩边坡稳定性分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(4):133-136,203.
- [6] EUNHYE KIM, HOSSEIN CHANGANI. Effect of water saturation and loading rate on the mechanical properties of Red and Buff Sandstones[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2016, 88:23-28.
- [7] 国家质量技术监督局, 中华人民共和国建设部. 土工试验方法标准:GB/T 50123-1999[S]. 北京:中国计划出版社, 1999.
- [8] 曾志雄,孔令伟,田海,等. 膨胀岩崩解特性的干湿循环效应与粒度熵表征[J]. 岩土力学, 2017, 38(7):1983-1989.

Study on Mechanics and Fracture Characteristics of Red Mudstone Under Dry-wet Cycles

WANG Tian-qi¹, GE Xin²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100091, China)

Abstract: Dry-wet cycle effect is an important factor affecting slope stability in red mudstone reservoir area. Triaxial consolidation undrained shear experiments, CT scans and high precision scanning electron microscopy experiments were carried out to investigate the mechanical and fracture evolution characteristics of in situ weathered mudstones during dry and wet cycles. The results show that the stress-strain relationship of red-bed mudstone presents strain softening characteristics at low confining pressures and strain hardening characteristics at high confining pressures. The shear strength parameters of red-bed mudstone decrease gradually during the dry-wet cycle. The volume content of cracks decreases exponentially with the increase of the time of dry-wet cycles, and has a negative linear correlation with cohesion function. The microstructure of mudstone gradually breaks down in the process of dry-wet cycles, leading to the connectivity of cracks and the attenuation of mechanical properties.

Key words: red mudstone; dry and wet cycle; triaxial shear test; fissure