

DOI: 10.11779/CJGE201907005

水库运行期岸坡消落带红砂岩抗剪与抗压强度劣化机制

张振华, 王野*

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 目前在水库运行期岸坡消落带环境条件模拟方面, 对消落带岩石在库水位周期性升降条件下宏观强度劣化规律进行研究时, 主要侧重于“湿干”交替作用环境条件的单一模拟, 鲜见对水库运行期岸坡消落带岩石所处的岸坡应力、“湿干”交替和库水渗透综合作用的真实环境条件进行模拟。自主研发了能模拟岸坡应力、“湿干”交替和库水渗透综合作用环境的水库岸坡消落带软岩三轴试验系统, 以三峡库区马家沟滑坡红砂岩为研究对象, 开展红砂岩的单轴、三轴压缩试验, 并分析了岩石试样的破坏模式; 同时, 通过扫描电镜 (SEM) 和 X 射线衍射 (XRD) 等测试方法, 获得红砂岩的微观结构和黏土矿物成分随“湿干”交替作用次数增加的变化规律。研究结果表明: 红砂岩的峰值抗压强度随“湿干”交替作用次数增加逐渐劣化, 其中前 4 次“湿干”交替过程中, 峰值抗压强度劣化幅度较大; 第 6~8 次“湿干”交替过程中, 劣化幅度逐渐减小。随“湿干”交替作用次数的增加, 红砂岩的黏聚力也逐渐下降, 第 1~4 次“湿干”交替过程中, 黏聚力的下降幅度较大; 第 6~8 次“湿干”交替过程中, 黏聚力的下降幅度明显减小。随“湿干”交替作用次数的增加, 红砂岩的内摩擦角有所降低, 但变化规律不明显。红砂岩中的黏土矿物因水化反应产生不均匀膨胀、收缩, 导致碎屑矿物颗粒之间的胶结作用遭到一定程度的弱化, 在宏观上表现为抗剪强度、抗拉强度的劣化; 抗剪强度、抗拉强度的劣化使得红砂岩在轴向荷载的作用下更容易发生破坏, 是导致峰值抗压强度发生劣化的直接原因, 而红砂岩中胶结物胶结作用的变弱是红砂岩峰值抗压强度发生劣化的根本原因; 同时, 渗透压对峰值抗压强度、抗剪强度的劣化具有一定程度的促进作用。研究成果可为水库运行期岸坡稳定性动态分析与评价提供科学的依据。

关键词: “湿干”交替; 红砂岩; 强度劣化

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)07-1217-10

作者简介: 张振华(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事水库岸坡稳定性分析评价与加固工作。E-mail: zenithzhang@sina.com。

Degradation mechanism of shear strength and compressive strength of red sandstone in drawdown areas during reservoir operation

ZHANG Zhen-hua, WANG Ye

(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: So far, the researches on the degradation of macroscopic strength of rock under cyclic wetting-drying conditions in the course of reservoir operation mainly focus on simulations of single environmental conditions without considering the combined actions of slope stresses, wetting-drying cycles and seepage water pressures. The triaxial test system of soft rock in the drawdown areas is developed independently to simulate the combined actions of slope stresses, wetting-drying cycles and seepage water pressures. The red sandstone from Majiagou landslide is selected as the study object. The uniaxial and triaxial compression tests on the red sandstone are carried out, and the failure modes are analyzed after each wetting-drying cycle. Meanwhile, the variation of microstructure and clay mineral content of red sandstone undergoing different numbers of wetting-drying cycles is always explored by means of the scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). The results show that with the increasing number of wetting-drying cycles, the peak compressive strength of red sandstone decreases gradually. In the first four wetting-drying cycles, the peak compressive strength decreases obviously. After the sixth wetting-drying cycle, the decline trend of the peak compressive strength decreases gradually. With the increasing of wetting-drying cycles, the cohesion of red sandstone decreases gradually either, and the cohesion decreases a lot during the first four wetting-drying cycles. The reduction extent of cohesion is obviously reduced in the sixth to eighth wetting-drying cycles. The friction angle of red sandstone decreases with

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51579063, 51379106)

收稿日期: 2018-05-07

*通讯作者 (E-mail:yewangfylt@163.com)

the increasing number of wetting-drying cycles, but the change rate is small. The uneven expansion and shrinkage of clay minerals caused by hydration reaction weaken the cementation between clastic mineral particles to a certain extent, which embodies the deterioration of shear strength and tensile strength on the macro level. The deterioration of shear strength and tensile strength makes red sandstone more vulnerable to failure under the action of axial loads, which is the direct reason for the deterioration of the peak compressive strength. The weak cementation of detrital minerals is the fundamental reason for the deterioration of the peak compressive strength. Meanwhile, the seepage water pressures can promote the deterioration of the peak compressive and shear strength to a certain extent. The research results can provide a scientific basis for the dynamic analysis and evaluation of the slope stability during the operation of reservoirs.

Key words: wetting-drying cycle; red sandstone; strength degradation

0 引言

三峡工程竣工以来,库水位以年为周期在 145~175 m 水位之间周期性升降,使得岸坡消落带区域岩土体长期遭受周期性“湿干”交替作用。而对于砂岩岸坡来说,“湿干”交替作用会对砂岩造成不可恢复的渐进性损伤^[1],进而对砂岩岸坡的稳定造成极为不利的影响,严重时甚至发生失稳滑动。因此,研究水库岸坡消落带砂岩在“湿干”交替作用条件下的强度劣化规律及其作用机制,对水库岸坡的稳定性评价具有重要的意义。

近年来,国内外学者对涉水砂岩强度劣化的研究已经积累了一定的成果。周翠英等^[2-3]研究了红砂岩的抗压强度、抗拉强度和抗剪强度随饱水时间的变化规律,结果表明:随着饱水时间的延长,红砂岩的各力学强度指标均逐渐降低,最终趋于稳定;姚华彦等^[4]对“干湿”交替后饱和砂岩试样的各项力学参数进行测定,结果表明:经过不同次数的“干湿”交替作用后,砂岩的各项力学参数均呈现出不同程度的降低趋势;Li 等^[5]对“湿干”交替作用后砂岩的抗剪强度劣化规律进行研究,结果表明:随“湿干”交替次数增加,砂岩的抗剪强度呈下降趋势;刘新荣等^[6]、傅晏等^[7-8]研究了干湿循环对砂岩力学特性的影响,并采用 SEM 电镜扫描和 CT 扫描等测试手段,研究了砂岩的微观结构和细观损伤的演化规律;Zhang 等^[9]对“湿干”交替作用下红砂岩的抗压强度、抗剪强度进行研究的同时,还对其劣化机制进行了详细的探讨;邓华锋等^[10-14]研究了库水位的升降和浸泡—风干循环对砂岩、红层软岩的次生孔隙率、微观结构等指标的影响,研究结果表明:库水位的升降变化和浸泡—风干循环作用均可对岩石试样造成不可逆的累积性损伤,且浸泡—风干的次数越多,库水压力的变化幅度越大,对岩石试样的损伤作用越明显。

上述成果为研究水库岸坡消落带岩石的宏观强度劣化规律及劣化机制奠定了良好的基础,但目前对于水库岸坡消落带环境条件模拟方面的研究,大多侧重

于“湿干”交替单一环境条件的模拟^[4-9],这些研究多采用自然浸泡法和真空抽气法对岩石试样进行饱和,然后将其置于恒温干燥容器中以较高的温度进行风干,这样做虽满足了“湿干”交替作用条件,但这与水库岸坡消落带的“湿干”交替、岸坡应力和库水渗透综合作用的环境条件不完全相符。文献[14]在试验设计的过程中虽然考虑了库水位升、降变化对砂岩、红层软岩的强度造成的影响,但未模拟岸坡消落带岩石所承受的岸坡应力。

基于上述,笔者自主研发了能模拟岸坡应力、“湿干”交替和库水渗透综合作用环境的水库岸坡消落带软岩三轴试验系统,以三峡库区马家沟滑坡红砂岩为研究对象,开展红砂岩试样的单轴、三轴压缩试验;通过扫描电镜(SEM)和 X 射线衍射(XRD)等测试方法,获得红砂岩微观结构和黏土矿物含量随“湿干”交替作用次数增加的变化规律。最后,结合相关的试验结果,对红砂岩的抗剪强度、峰值抗压强度的劣化机制进行探讨。

1 试验设备研制

为了比较真实地模拟水库岸坡消落带的环境条件,笔者自主研发了能模拟岸坡应力、“湿干”交替和库水渗透综合作用环境的水库岸坡消落带软岩三轴试验系统(见图 1),该系统由压力室、轴压传感器、反力支架、主机和自动控制与数据采集终端 5 个部分组成,具有轴压、围压、渗透压和温度控制 4 个模块。其中,渗透压控制模块可以为岩石试样提供渗透压力,用于模拟水库岸坡消落带岩石所处的渗透湿化条件;温度控制模块通过控制压力室的温度来模拟水库岸坡消落带红砂岩的干燥条件。围压、渗透压和温度控制 3 个模块协调配合,可以模拟岩石试样在岸坡应力作用条件下的渗透湿化过程和干燥过程,与常规的“湿干”交替作用环境相比,更加接近水库岸坡消落带岩石所处的真实环境条件;自动控制与数据采集终端可以实时控制试验过程、记录试验测得的各项数据。本

文利用该系统开展水库岸坡消落带红砂岩的单轴、三轴压缩试验, 可以更准确地获得消落带岩石的抗压强度和抗剪强度。

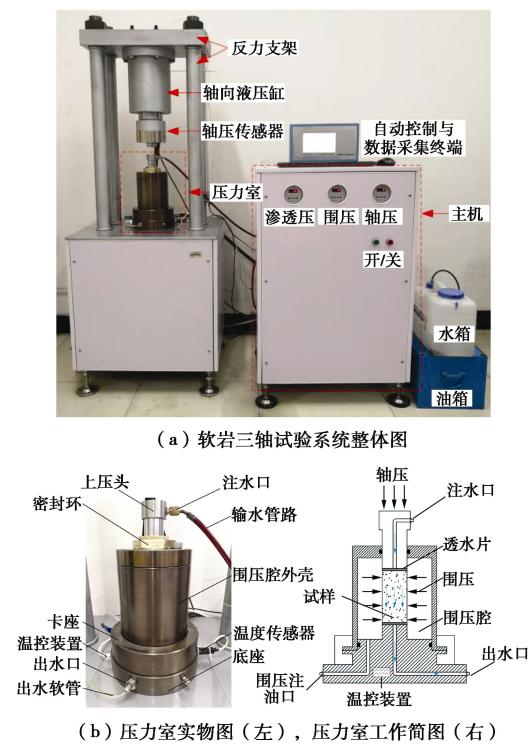


图1 水库岸坡消落带软岩三轴试验系统

Fig.1 Triaxial compressive system for soft rocks in a drawdown area

利用水库岸坡消落带软岩三轴试验系统对水库岸坡消落带岩石所处的岸坡应力、“湿干”交替和库水渗透综合作用条件的模拟方式如下: ①初始岸坡应力模拟, 试样安装完成后, 在自动控制与数据采集终端上设定与岸坡应力相等的围压值和持续时间, 通过对试样的侧向施加围压的方式来模拟初始岸坡应力。②渗透湿化过程模拟, 首先连接好主机与压力室之间的输水管路, 然后在自动控制与数据采集终端上设定试验所需的渗透压及其作用时间。在设定的时间范围内, 根据设定的渗透压对红砂岩进行渗透湿化, 以此来模拟红砂岩的湿化过程。③干燥过程模拟: 将连接压力室与主机的输水管路断开, 在自动控制与数据采集终端上设定干燥温度和干燥时间, 来模拟红砂岩的干燥环境。

根据三峡水库的蓄水运行情况, 一个周期的库水位升降引起消落带岩石的一次“湿干”交替作用, 是通过让干燥状态的岩石试样经历一次渗透湿化过程和一次干燥过程来模拟实现的, “湿干”交替作用结束后, 岩石试样处于干燥状态。

2 试验设计

2.1 试验试样的加工与选取

本文试验所用的红砂岩试样取自三峡库区秭归县马家沟滑坡, 试样的颜色呈暗红色, 其初始参数如下: 密度为 2.614 g/cm^3 , 干密度为 2.600 g/cm^3 , 颗粒密度为 2.499 g/cm^3 。典型薄片鉴定结果表明, 红砂岩的胶结类型为孔隙式泥质胶结(图2), 主要由碎屑矿物和胶结物组成。通过对原状样进行X射线衍射分析(XRD), 红砂岩原状样中主要含有石英38%, 长石19.1%, 方解石11.6%, 伊利石22%, 绿泥石4.9%, 高岭石4.4%等矿物, 其中伊利石、绿泥石和高岭石等黏土矿物作为胶结物填充于石英、长石等碎屑矿物周围^[15]。

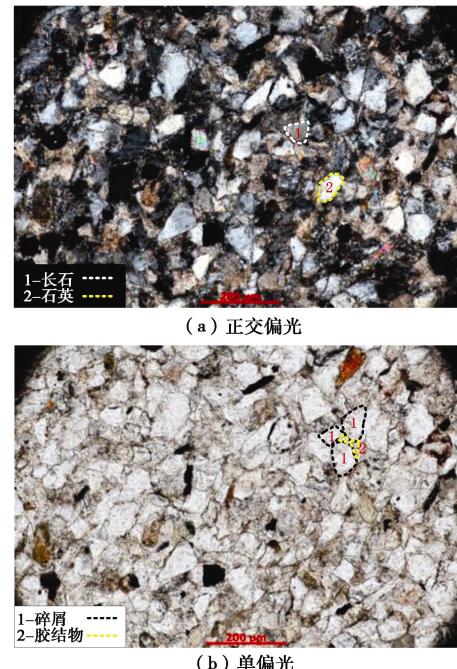


图2 红砂岩典型薄片微观结构图^[15]

Fig. 2 Microstructure of typical thin sections of red sandstone



图3 红砂岩圆柱体标准试样

Fig. 3 Cylinder standard specimens of red sandstone

将现场取回的大块岩石试样, 进行钻取岩芯、端面切割和端面磨平3道工序, 加工成直径50 mm、高100 mm的标准圆柱体试样(见图3), 试样的精度满足规范^[16]的要求。开展试验前, 为了减小试验结果的

离散性,首先剔除不完整和表面具有明显裂隙的试样,并测试每个试样的密度和纵波波速,最后选取密度和纵波波速相近的试样进行单轴、三轴压缩试验。

2.2 试验条件

根据水库岸坡消落带的实际条件,对“湿干”交替过程中所需施加的岸坡应力、渗透压、干燥温度和三轴压缩试验过程中所需施加的围压分别进行确定,具体如下:①根据红砂岩取样位置的典型地质剖面图,建立岸坡数值网格模型,采用数值模拟的方法对模型的初始地应力场进行计算,获得取样区域高程145 m附近岩层的初始应力范围为1~2 MPa,取其最大值2 MPa为“湿干”交替过程中施加的岸坡应力。②水库蓄水至175 m后,145 m附近岩层承受的水头约为30 m,因此在渗透湿化的过程中,对试样施加的渗透压为0.3 MPa。③三峡库区秭归县近4 a内5月—9月的平均气温约为26℃,故取26℃为试样的干燥温度。④根据规范^[16]的相关要求,采取等差级数确定三轴压缩试验的围压值分别为2, 4, 6 MPa。

2.3 试验方案

为了研究水库运行期岸坡消落带红砂岩在库水位周期性变化条件下峰值抗压强度、黏聚力和内摩擦角的劣化机制,本文选取三峡库区马家沟滑坡红砂岩为研究对象,按表1所述的试验方案开展相关试验。

3 试验结果与分析

3.1 预备试验结果

对3个红砂岩试样(编号分别为A19、A10、A08)进行渗透湿化过程模拟,并根据自动控制与数据采集终端所记录的数据,绘制出累计渗水量随渗透湿化时间的变化曲线(见图4),由图4可知:经历48 h后红砂岩试样A19、A10、A08的累计渗水量分别为11.789, 11.055, 10.691 mL, 平均值为11.178 mL, 此时, 3个试样的渗流流量(图4中渗透曲线的斜率)均达到比较稳定的状态,与出水口相连的出水软管中均有比较连续的渗流流出,所以当渗透湿化时间大于48 h且累计渗水量大于11.2 mL时,方可结束红砂岩试样的渗透湿化过程。根据红砂岩试样的渗透曲线,计算获得红砂岩试样的渗透系数为 9.619×10^{-9} cm/s。

表1 红砂岩试样的试验方案

Table 1 Experimental procedures

试验编号	试样分组	试验类型	试验步骤
1	1组(3个试样)	预备试验	①将试样安装在压力室中,先施加2 MPa的岸坡应力,然后施加0.3 MPa的渗透压,观察压力室出水口的出水情况并绘制累计渗水量随渗透时间的变化曲线,当与出水口相连的出水软管中有比较连续的渗流流出,且红砂岩试样的渗流流量(渗透曲线的斜率)达到比较稳定的状态时,所经历的时间即为渗透湿化时间;②将完全湿化的试样从压力室中取出并称量其质量,然后将其置于恒温干燥箱中以26℃进行干燥,每经历1 h称量一次质量,当试样的质量不再发生变化时所用的时间即为干燥时间
2	6组(每组12个试样)	单轴、三轴压缩试验	①根据规范 ^[16] 的相关要求,每个围压状态(包括0, 2, 4, 6 MPa)取3个试样进行平行试验,因此,在进行单轴、三轴压缩试验前,每组12个试样均需进行相应次数的“湿干”交替作用;②取第1组试样,置于26℃恒温干燥箱中,烘干至恒重,作为初始干燥样(0次“湿干”交替作用),直接进行单轴、三轴压缩试验;③将第2~6组试样分别安放在压力室中,对其进行1, 2, 4, 6, 8次“湿干”交替作用;④为了更准确模拟试样的应力条件,上述2~6组试样进行“湿干”交替作用后,直接在压力室中继续进行单轴、三轴压缩试验
3	6组(每组1个试样)	扫描电镜(SEM)	①取第1组试样,置于26℃恒温干燥箱中,烘干至恒重,作为初始干燥样;②将第2~6组试样分别安放在压力室中,对其进行1, 2, 4, 6, 8次“湿干”交替作用;③从上述6组试样上分别取下若干小岩块,再从岩块未受过扰动的新鲜面上刻取厚度约1 mm、长宽约5 mm的薄片作为扫描电镜(SEM)的样品;④对准备好的样品进行扫描电镜(SEM)观测
4	6组(每组1个试样)	X射线衍射(XRD)	①再从试验3的6组试样上分别取下若干小岩块(约20g)进行粉碎处理,并使其通过0.075 mm的标准筛,获得6组粒径小于0.075 mm的粉末状样品;②分别对该6组粉末状样品进行X射线衍射(XRD)测试分析

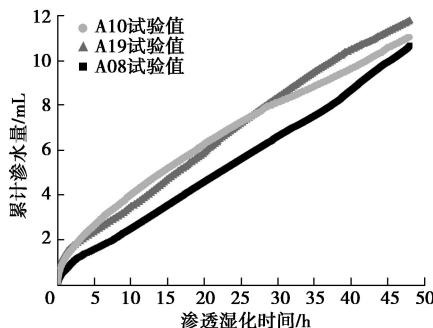


图4 红砂岩累计渗水量随时间增加的变化曲线

Fig. 4 Variation in cumulative seepage volume of water with time

如图5所示,红砂岩试样在26℃的恒温干燥箱中,经过8 h后质量基本不再发生变化,因此确定一个水库运行周期内红砂岩的干燥时间为8 h。

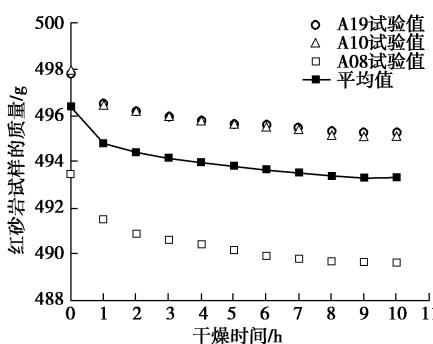


图5 红砂岩试样的干燥时间

Fig. 5 Drying time of red sandstone specimens

3.2 红砂岩峰值抗压强度、抗剪强度试验结果

经历初始干燥状态及1, 2, 4, 6, 8次“湿干”交替作用后, 红砂岩的黏聚力、内摩擦角和不同围压下的峰值抗压强度列于表2, 三者的演化规律曲线见图6~8。

根据表2和图6可以看出, 随着“湿干”交替作用次数的增加, 红砂岩在不同围压下的峰值抗压强度均呈指数关系下降, 下降的趋势基本一致。以围压为6 MPa的峰值抗压强度为例, 第1, 2, 4次“湿干”交替作用后, 红砂岩的峰值强度劣化幅度较大, 与初始干燥样相比, 单次分别劣化了12.77%, 8.91%, 6.98%; 第6, 8次“湿干”交替作用后, 峰值强度劣化幅度明显减小, 单次分别劣化了4.81%, 1.68%。

根据表2和图7可以得出, 随着“湿干”交替作用次数的增加, 红砂岩的黏聚力也呈指数函数关系下降, 第1, 2, 4次“湿干”交替作用后, 红砂岩的黏聚力劣化幅度较大, 单次分别劣化了10.71%, 11.02%, 13.07%; 第6, 8次“湿干”交替作用后, 红砂岩黏聚力的劣化幅度明显减小, 单次分别劣化了1.42%, 2.72%。

表2 试验结果

Table 2 Test results

作用次数	围压值 σ_3/MPa	峰值强度 σ_1/MPa	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$
初次干燥状态	0	70.53		
	2	90.54		
	4	102.91	12.70	50.88
	6	118.72		
1	0	62.16		
	2	73.17		
	4	90.13	11.34	48.94
	6	103.56		
2	0	51.11		
	2	68.38		
	4	78.29	9.94	48.03
	6	92.98		
4	0	33.86		
	2	51.04		
	4	60.13	6.62	48.01
	6	76.41		
6	0	27.61		
	2	48.84		
	4	58.01	6.26	45.37
	6	64.99		
8	0	25.36		
	2	42.64		
	4	51.44	5.57	45.14
	6	61.00		

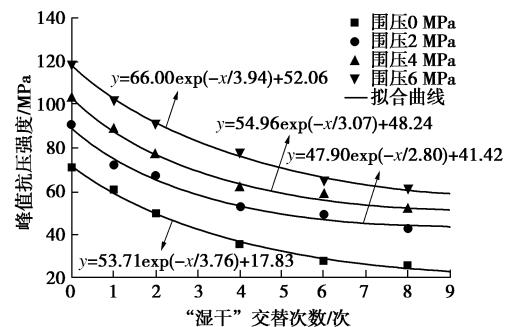


图6 红砂岩的峰值抗压强度变化曲线

Fig. 6 Curves of peak compressive strength vs. numbers of wetting-drying cycles

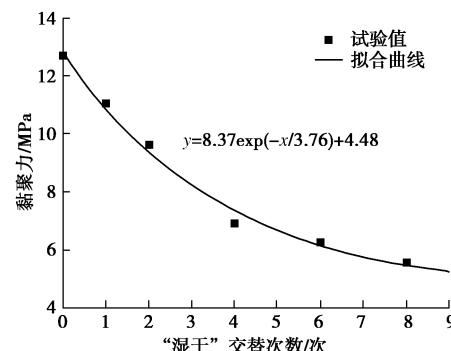


图7 红砂岩黏聚力的变化规律

Fig. 7 Variation in cohesion with increasing number of wetting-drying cycles

由表 2 和图 8 可知, 随着“湿干”交替作用次数的增加, 相比黏聚力而言, 红砂岩的内摩擦角劣化幅度较小且变化规律不明显, 经过 8 次“湿干”交替作用后, 内摩擦角仅劣化了 11.28%。

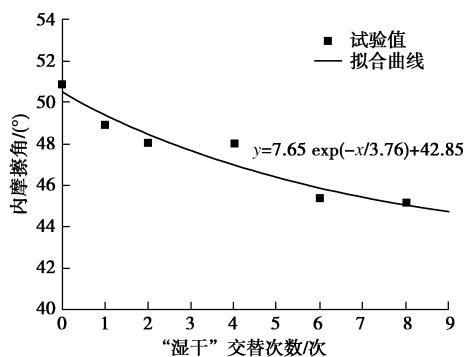


图 8 红砂岩内摩擦角的变化规律

Fig. 8 Variation in friction angle with number of increasing wetting-drying cycles

综上所述, 经历 8 次“湿干”交替作用后, 围压为 0, 2, 4, 6 MPa 的情况下, 红砂岩的峰值抗压强度分别劣化了 64.04%, 52.90%, 50.01%, 48.62%; 黏聚力、内摩擦角分别劣化了 56.14%, 11.28%。由此可知, 红砂岩的峰值抗压强度和黏聚力对“湿干”交替作用较为敏感。

3.3 岩石试样的破坏模式

随“湿干”交替作用次数的增加, 不同围压下红砂岩试样的破坏模式见图 9。围压为 0 MPa 时, 红砂岩试样的破坏模式主要为张拉破坏, 随着“湿干”交替作用次数的增加, 张拉裂纹的数量逐渐增多; 围压为 2~4 MPa 时, 红砂岩试样上的张拉裂纹明显减少, 主破坏模式为剪切破坏或 Y 型破坏, 其中 Y 型破坏是张拉破坏和剪切破坏共同作用的结果^[17]; 围压为 6 MPa 时, 红砂岩试样张拉裂纹的数量进一步减少, 主破坏模式呈现为单一断面的剪切破坏。



图 9 红砂岩试样的破坏模式

Fig. 9 Failure modes of specimens

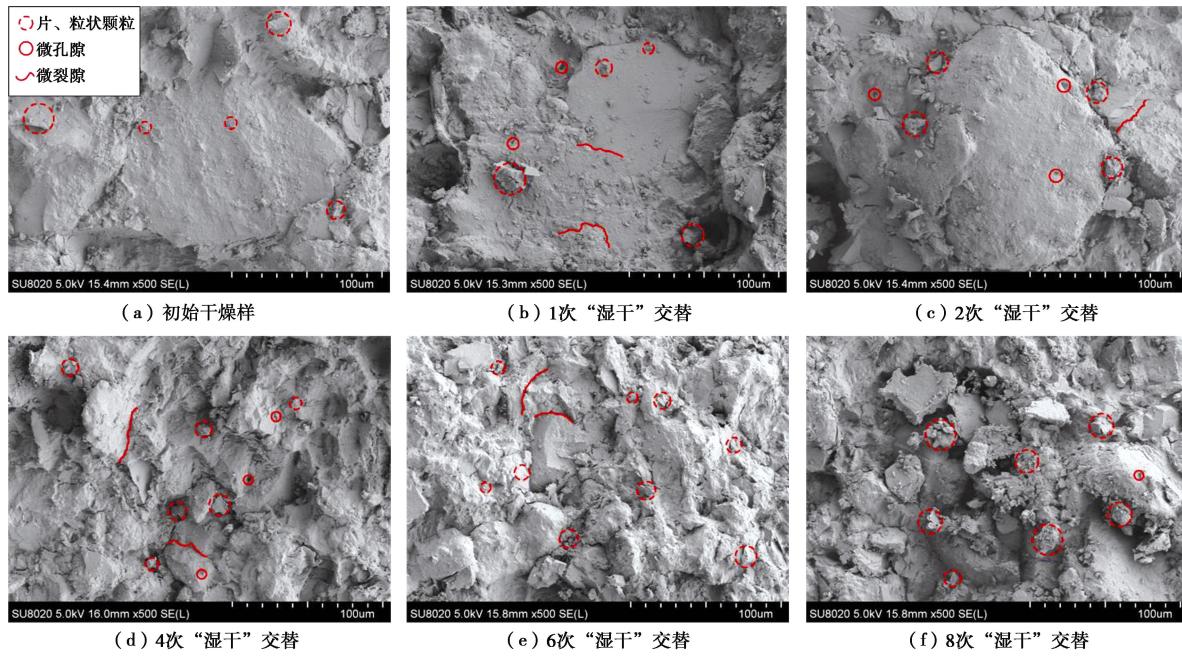


图 10 “湿干”交替作用下红砂岩的微细观形貌图 (×500)

Fig. 10 Microstructural photo of specimens under cyclic wetting-drying conditions ($\times 500$)

3.4 微细观结构的观测结果

采用场发射扫描电子显微镜(SEM)观察每次“湿干”交替作用后红砂岩试样的微细观结构, 观测结果见图 10。

红砂岩原始干燥样的表面微观结构比较紧密, 仅分布着少量的片状、粒状颗粒; 1 次“湿干”交替作用后, 红砂岩试样表面出现了少量的微孔隙、微裂隙; 2 次“湿干”交替作用后, 红砂岩表面微孔隙、微裂隙的数量明显增加, 表面结构不再紧密, 出现了明显的松散现象; 4 次“湿干”交替作用后, 红砂岩表面变得破碎, 并伴随着更多的粒状、片状颗粒从试样的表面脱落; 6 次“湿干”交替作用后, 红砂岩试样表面的破碎程度加剧, 粒状、片状颗粒进一步增多; 8 次“湿干”交替作用后, 与 6 次“湿干”交替的试样相比, 片状、粒状颗粒的数量略有增加。

3.5 黏土矿物组成及含量测试结果

对每次“湿干”交替作用后的红砂岩试样进行 X 射线衍射(XRD)测试分析。获得红砂岩中黏土矿物的含量随“湿干”交替作用次数增加的变化趋势(见图 11)。

根据图 11 可知, 红砂岩黏土矿物含量随“湿干”交替作用次数的增加逐渐下降。第 1 次“湿干”交替作用后, 黏土矿物的总量下降的最为明显, 单次下降了 4.2%; 第 2、4 次“湿干”交替作用后, 黏土矿物总量的下降幅度略有减小, 单次下降含量分别为 2%、1.5%; 第 6、8 次“湿干”交替作用后, 黏土矿物总量的下降幅度明显减小, 单次下降含量分别为 0.5%,

0.55%。

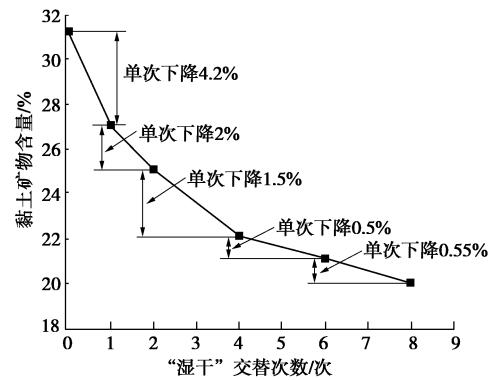


图 11 红砂岩中常见黏土矿物总量变化趋势

Fig. 11 Total variation trend of clay minerals of red sandstone

4 试验结果讨论

红砂岩的典型薄片鉴定结果(见图 2)表明: 红砂岩的胶结形式为孔隙式泥质胶结, 胶结物中主要含有伊利石、高岭石和绿泥石等黏土矿物, 而黏土矿物具有吸水体积膨胀, 失水体积收缩的特性, 伊利石的膨胀性较强, 高岭石、绿泥石相对较弱, 已有的研究成果表明^[18]: 伊利石吸水膨胀后其体积会增加 50%~60%。另外, 在渗透压的作用下, 微裂隙端点处的应力集中现象容易诱使微裂隙进一步扩张, 此过程为黏土矿物的水化反应提供了更多的反应表面, 进而引起更多的黏土矿物发生水化反应, 因此渗透压对黏土矿物的水化反应具有一定的促进作用^[13]。

在渗透湿化的过程中, 水分子在渗透压的作用下

首先沿着试样表面的微孔隙、微裂隙向其内部渗透，此时，胶结物中黏土矿物的水化反应和渗透压对水化反应的促进作用促使红砂岩内部的微裂隙发生扩张，对红砂岩的紧密结构，尤其是胶结物的结构造成一定程度的损伤。在干燥的过程中，黏土矿物的不均匀收缩使得部分微裂隙无法正常闭合，试样内部的损伤作用进一步加剧。因此，“湿干”交替作用会对红砂岩造成不可逆的损伤。由于伊利石、高岭石和绿泥石等黏土矿物存在于胶结物中，这种损伤对胶结物的影响较大，而对碎屑矿物（石英、长石）影响较小。实际上，砂岩的黏聚力取决于碎屑矿物颗粒间的胶结强度，内摩擦角取决于碎屑矿物颗粒的大小、排列方式等，所以在“湿干”交替作用下，红砂岩黏聚力的劣化幅度远大于内摩擦角。

在轴向荷载的作用下，岩石试样内部的初始损伤（微裂隙）周围形成显著的应力集中^[19]，随着荷载的增大，微裂隙的端部所承受的局部拉应力、剪应力逐渐的大于红砂岩的抗拉强度、抗剪强度，致使红砂岩试样上产生宏观的张拉、剪切裂纹（图 9（a）），最终发生破坏。在“湿干”交替作用下，红砂岩的黏聚力和内摩擦角发生劣化的同时，其抗拉强度也发生了一定程度的劣化^[15]。对“湿干”交替作用后的红砂岩试样进行单轴、三轴压缩时，红砂岩试样上产生宏观的张拉、剪切裂纹所需的局部拉应力、剪应力较“湿干”交替作用前小，造成“湿干”交替作用后红砂岩试样的峰值抗压强度发生劣化。另外，围压对轴向荷载施加过程中轴向张拉裂纹的产生具有抑制作用，“湿干”交替作用次数相同的情况下，围压越大，抗拉强度对峰值抗压强度的影响越小，红砂岩的峰值抗压强度越大，其破坏模式越接近于单一断面的剪切破坏（图 9（a）～（d））。

第 1~4 次“湿干”交替过程中，黏土矿物水化反应对红砂岩内部胶结物的损伤作用较强，使得峰值抗压强度和黏聚力大幅度劣化，微细观结构的变化情况可以较好的印证这一点，即随着“湿干”交替作用次数的增加，红砂岩试样的紧密结构（图 10（a））逐渐变得松散（图 10（c）），甚至变得破碎（图 10（d））；在黏土矿物水化反应对红砂岩的胶结物造成影响的同时，会有部分片状、粒状颗粒（包括黏土颗粒）从胶结物上脱落，在渗透压的作用下，这些细小颗粒会被渗透的水溶液带出孔隙，因此，胶结物中黏土矿物的含量也逐渐下降且幅度较大（图 11）。

第 6~8 次“湿干”交替作用后，红砂岩的峰值抗压强度和黏聚力的劣化幅度明显减小，胶结物中的黏土矿物含量的下降幅度也逐渐减小（见图 11），表明从胶结物上脱落下来的细小颗粒逐渐减少，黏土矿物

的水化反应对红砂岩胶结物的损伤作用逐渐减弱。从微细观结构变化情况来看，随着“湿干”交替作用次数的增加，红砂岩试样破碎程度和片、粒状颗粒的数量虽略有增加（图 10（e）～（f）），但相对于第 4 次“湿干”交替作用（图 10（d）），微细观结构的变化程度明显变小。

综上所述，红砂岩胶结物中黏土矿物发生水化反应引起胶结物的胶结强度变弱，致使红砂岩的抗拉强度、抗剪强度发生了劣化。抗剪、抗拉强度的劣化使得红砂岩在轴向压缩荷载的作用下更易发生破坏，峰值抗压强度发生劣化。峰值抗压强度、抗剪强度的劣化幅度主要取决于微细观结构和胶结物中黏土矿物含量的变化情况；而渗透压的作用引发微裂隙的扩张，促使更多的黏土矿物发生水化反应，对峰值抗压强度、抗剪强度劣化具有一定程度的促进作用。

5 结 论

(1) 本文自主研发了能模拟岸坡应力、“湿干”交替和库水渗透共同作用环境的水库岸坡消落带软岩三轴试验系统，与常规三轴试验系统相比，该系统既能更真实、有效地模拟水库岸坡消落带岩石所处的环境条件，又可以实时控制试验过程、自动记录试验获得的各项数据，为水库岸坡消落带红砂岩峰值抗压强度和抗剪强度的测定提供了良好的设备基础。

(2) 在岸坡应力、“湿干”交替与库水渗透综合作用条件下，红砂岩的黏聚力与内摩擦角均呈逐渐下降的趋势。在前 4 次“湿干”交替过程中，红砂岩的黏聚力下降幅度较大；第 6~8 次“湿干”交替过程中，黏聚力的下降趋势逐渐变缓。在整个“湿干”交替过程中，红砂岩内摩擦角的劣化幅度较小且变化规律不明显。经历 8 次“湿干”交替作用后，红砂岩的黏聚力和内摩擦角分别劣化了 56.14%，11.28%。

(3) 在岸坡应力、“湿干”交替与库水渗透综合作用条件下，红砂岩的峰值抗压强度呈逐渐下降趋势。在前 4 次“湿干”交替过程中，红砂岩的峰值抗压强度呈大幅度下降趋势；第 6~8 次“湿干”交替过程中，峰值抗压强度的下降幅度逐渐减小。不同围压下的峰值抗压强度变化规律基本一致，经历 8 次“湿干”交替作用后，围压为 0, 2, 4, 6 MPa 的条件下，红砂岩的峰值抗压强度分别下降了 64.04%，52.90%，50.01%，48.62%。

(4) 在岸坡应力、“湿干”交替与库水渗透综合作用条件下，渗透压和黏土矿物的水化反应导致碎屑矿物颗粒周围的胶结物受到一定程度的损伤，是抗剪强度发生劣化的主要原因，而抗剪强度的劣化幅度主要取决于微细观结构和黏土矿物含量的变化情况。其

中, 黏土矿物水化反应在抗剪强度劣化的过程中起主导作用, 渗透压对抗剪强度的劣化起到一定程度的促进作用。

(5) 红砂岩经历“湿干”交替作用后, 由于抗拉强度和抗剪强度发生劣化, 在轴向压缩荷载的作用下, 初始损伤(微裂隙)扩展成宏观的张拉、剪切裂纹所需的剪应力和拉应力随之下降, 致使红砂岩试样的轴向抗压承载能力降底, 最终导致其峰值抗压强度发生劣化。结合结论(4)可知, 抗剪强度和抗拉强度发生劣化是红砂岩峰值抗压强度发生劣化的直接原因; 红砂岩中胶结物的胶结作用变弱是红砂岩峰值抗压强度劣化的根本原因。

参考文献:

- [1] 张鹏, 柴肇云. 干湿循环条件下砂岩强度劣化试验研究[J]. 金属矿山, 2013, 42(10): 5–7. (ZHANG Peng, CHAI Zhao-yun. Sandstone strength degradation experiments under the condition of dry-wet circulation[J]. Metal Mine, 2013, 42(10): 5–7. (in Chinese))
- [2] 周翠英, 彭泽英, 尚伟, 等. 论岩土工程中水–岩相互作用研究的焦点问题——特殊软岩的力学变异性[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 124–128. (ZHOU Cui-ying, PENG Ze-ying, SHANG Wei, et al. On the key problem of the water-rock interaction in geoengineering: mechanical variability of special weak rocks and some development trends[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(1): 124–128. (in Chinese))
- [3] 周翠英, 邓毅梅, 谭祥韶, 等. 饱水软岩力学性质软化的试验研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 33–38. (ZHOU Cui-ying, DENG Yi-mei, TAN Xiang-shao, et al. Experimental research on the softening of mechanical properties of saturated soft rocks and application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 33–38. (in Chinese))
- [4] 姚华彦, 张振华, 朱朝辉, 等. 干湿交替对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3704–3708. (YAO Hua-yan, ZHANG Zhen-hua, ZHU Chao-hui, et al. Experimental study of mechanical properties of sandstone under cyclic drying and wetting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3704–3708. (in Chinese))
- [5] LI K G, ZHENG D P, HUANG W H. Experiment research on shear characteristics of sandstone considering cyclic drying-wetting effect[J]. Disaster Advances, 2013, 6: 83–87.
- [6] 刘新荣, 李栋梁, 张梁, 等. 干湿循环对泥质砂岩力学特性及其微观结构影响研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1291–1300. (LIU Xin-rong, LI Dong-liang, ZHANG Liang, et al. Influence of wetting-drying cycles on mechanical properties and microstructure of shaly sandstone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(7): 1291–1300. (in Chinese))
- [7] 傅晏, 刘新荣, 张永兴, 等. 水岩相互作用对砂岩单轴强度的影响研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(6): 54–58. (FU Yan, LIU Xin-rong, ZHANG Yong-xin, et al. Study of the influence of water-rock interaction to the strength of sandstone[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(6): 54–58. (in Chinese))
- [8] 傅晏, 王子娟, 刘新荣, 等. 干湿循环作用下砂岩细观损伤演化及宏观劣化研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1653–1661. (FU Yan, WANG Zi-juan, LIU Xin-rong, et al. Meso damage evolution characteristics and macro degradation of sandstone under wetting-drying cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1653–1661. (in Chinese))
- [9] ZHANG Z H, JIANG Q H, ZHOU C B, et al. Strength and failure characteristics of Jurassic Red-Bed sandstone under cyclic wetting-drying conditions[J]. Geophysical Journal International, 2014, 198(2): 1034–1044.
- [10] 邓华锋, 李建林, 王孔伟, 等. 饱和–风干循环过程中砂岩次生孔隙率变化规律研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 483–488. (DENG Hua-feng, LI Jian-lin, WANG Kong-wei, et al. Research on secondary porosity changing law of sandstone under saturation-air dry cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 483–488. (in Chinese))
- [11] 邓华锋, 李建林, 刘杰, 等. 浸泡–风干循环作用对砂岩变形及破坏特征影响研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1620–1626. (DENG Hua-feng, LI Jian-lin, LIU Jie, et al. Influence of immersion-air dry circulation function on deformation and fracture features of sandstone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1620–1626. (in Chinese))
- [12] 邓华锋, 李建林, 朱敏, 等. 饱水–风干循环作用下砂岩强度劣化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3306–3312. (DENG Hua-feng, LI Jian-lin, ZHU Min, et al. Experimental research on strength deterioration rules of sandstone under “saturation-air dry” circulation function[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3306–3312. (in Chinese))
- [13] 邓华锋, 周美玲, 李建林, 等. 水–岩作用下红层软岩力学特性劣化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊2): 3481–3491. (DENG Hua-feng, ZHOU Mei-ling, LI Jian-lin, et al. Mechanical properties deteriorating change rule research of red-layer soft rock under water-rock interaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2016, **35**(S2): 3481 – 3491. (in Chinese))
- [14] 邓华锋, 张恒宾, 李建林, 等. 水–岩作用对砂岩卸荷力学特性及微观结构的影响[J]. 岩土力学, 2018, **39**(7): 2344 – 2352. (DENG Hua-feng, ZHANG Heng-bin, LI Jian-lin, et al. Effect of water-rock interaction on unloading mechanical properties and microstructure of sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(7): 2344 – 2352. (in Chinese))
- [15] 张振华, 黄翔, 崔强. 水库运行期岸坡消落带红砂岩抗拉强度劣化机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(11): 2731 – 2740. (ZHANG Zhen-hua, HUANG xiang, CUI qiang. Experimental study on tensile strength deterioration mechanisms of red sandstone during the operation of reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(11): 2731 – 2740. (in Chinese))
- [16] SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程 [S]. 2001. (SL264—2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. 2001. (in Chinese))
- [17] 周辉, 孟凡震, 刘海涛, 等. 花岗岩脆性破坏特征与机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(9): 1822 – 1827. (ZHOU Hui, MENG Fan-zhen, LIU Hai-tao, et al. Experimental study on characteristics and mechanism of brittle failure of granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(9): 1822 – 1827. (in Chinese))
- [18] 刘长武, 陆士良. 泥岩遇水崩解软化机理的研究[J]. 岩土力学, 2000, **21**(1): 28 – 31. (LIU Chang-wu, LU Shi-liang. Research on mechanism of mudstone degradation and softening in water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(1): 28 – 31. (in Chinese))
- [19] 凌建明. 压缩荷载条件下岩石细观损伤特征的研究[J]. 同济大学学报 (自然科学版), 1993, **21**(2): 219 – 226. (LING Jian-ming. Study on the mesoscopical characteristics of rock damage under compressive loading[J]. Journal of Tongji University (Nature Science), 1993, **21**(2): 219 – 226. (in Chinese))

岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学) 2019年度开放课题申请指南

重点实验室自2007年2月由教育部正式批准在同济大学立项建设以来,按照教育部重点实验室的开放要求,自2008年起面向国内外公开征集开放基金项目,连续十年批准了50余项国内外访问学者的申请,取得了持续对外开放、合作与交流的良好效果。经研究,本年度继续设立专项开放研究基金,资助国内外学者和科技工作者来实验室开展科研工作。

资助范围: 开放课题应紧密围绕本重点实验室的主要研究方向,资助意义重大、具有重要科学意义和应用前景的研究项目。本年度开放课题主要资助的研究方向如下:①软土力学理论与变形稳定控制;②宏微观土力学理论与环境土工灾变;③岩土体多场耦合理论与灾害控制;④软弱岩土体地质灾害与防治加固;⑤地下工程安全理论与风险控制;⑥城市地下空间与岩体地下工程。

申请资格: 同济大学校外从事与岩土与地下工程有关的国内外高级、中级科技人员、青年科技工作者均可申请本实验室的开放基金。

资助金额: 申请者必须本着实事求是的原则申请资助金额,开放基金的资助强度一般每项不超过3万元,总计拟资助6至8项。

项目执行期限: 每个项目实施期限为两年,即2019年10月1日至2021年9月30日。

考核标准: 每个开放基金资助课题应在国际学术期刊发表1篇被SCI检索的论文(有正式的检索号),且同济大学合作者需列为论文的共同作者,作者单位之一必须标注为本重点实验

室,并注明课题批准号。

项目的实施与管理: 批准的开放课题资助经费实行一次核定,两批拨款。项目批准后,即拨付课题资助经费的50%至课题负责人所在单位;其余50%待课题结题验收后即拨付。项目负责人应当按照项目计划书组织开展研究工作,做好资助项目实施情况的原始记录,填写项目中期报告。自项目资助期满之日起60日内,项目负责人应当撰写结题报告、编制项目资助经费决算;取得研究成果的,应当同时提交研究成果报告。

如由于客观原因不能按期完成研究计划的,项目负责人应当于项目资助期限届满90日前提出延期申请,申请延长的期限不得超过1年。

申报程序: ①开放基金申请人应认真阅读有关申请说明,申报课题必须符合本实验室的研究方向,属于2019年资助研究内容的范畴,并具有本重点实验室固定研究人员合作。同济大学有关研究人员的介绍,可查阅: <http://geotec.tongji.edu.cn/keylab/yjry>; ②本年度开放课题申请截止时间为2019年7月31日(以邮戳日期为准)。申请书须以纸质一式2份寄给: 上海市杨浦区四平路1239号同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室(邮政编码200092),刘琦老师收(电话: 021—65985200, 13917983456 E-mail: liuqi472@tongji.edu.cn),除纸质申请材料,申请人须提供申请书及附件的电子文件(PDF格式),并注意纸质申请书与电子版申请书的内容应严格一致。③最终结果将于2019年10月公布。