

DOI: 10.11779/CJGE20240842

应力和水-岩耦合作用试验系统研制及应用

邓华锋^{1,2}, 骆祚森^{1,2}, 李建林^{1,2}, 李焯芬^{1,2}, 王孔伟^{1,2}, 张景昱^{1,2}, 程其芬^{*1,2}

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 水-岩作用导致消落带岩体劣化已成为影响岸坡变形稳定的重要因素之一, 为了解决库岸边坡岩体赋存复杂水力环境和应力环境耦合作用试验模拟的瓶颈, 在系列水-岩作用试验设备研制基础上, 研制了YRQ-1000型岩石应力和水-岩耦合作用试验系统, 主要由水压力加载系统及控制单元、动静水模拟控制单元、烘干、风干装置及控制单元、轴向应力加载及测试单元、轴向、径向变形测试单元和软件控制单元等组成。该试验系统实现了应力与水压力、浸泡-风干过程循环耦合作用的真实模拟, 具备应力、变形、水压力、温度等参数测试和实时显示功能。系列试验结果验证表明, 该试验系统可以满足库水压力和应力耦合作用下岩石的蠕变试验、应力和水-岩耦合作用下岩石蠕变试验, 试验过程中的应力、水压力加载及控制满足稳定性要求, 各参数的测试工作状态良好, 试验系统整体运行可靠。该试验系统的研制, 为高坝大库水库蓄水及长期运行导致的库岸边坡岩体损伤劣化效应及机制分析提供了良好试验平台。

关键词: 岩石力学; 库岸边坡; 消落带; 应力和水-岩耦合作用; 试验系统

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)12-2644-08

作者简介: 邓华锋(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn。

Development and application of test system for stress and water-rock coupling interaction

DENG Huafeng^{1,2}, LUO Zuosen^{1,2}, LI Jianlin^{1,2}, LI Zhuofen^{1,2}, WANG Kongwei^{1,2}, ZHANG Jingyu^{1,2}, CHENG Qifan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang 443002, China; 2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The deterioration of rock mass in the water level fluctuation zone caused by water-rock interaction has become one of the important factors affecting the stability of bank slope deformation. In order to solve the bottleneck in the experimental simulation of the coupled effect of complex hydraulic environment and stress environment in the rock mass of the bank slope, the YRQ-1000 rock stress and water-rock coupling interaction test system is developed. Based on the development of a series of water-rock interaction test equipment. It is mainly composed of water pressure loading system and control unit, dynamic and static water simulation control unit, drying and air drying device and control unit, axial stress loading and testing unit, axial and radial deformation testing unit and software control unit. The test system realizes the authentic simulation of the axial stress and water pressure, and the cyclic coupling of the soaking-air-drying process. A series of verification test results show that the test system can meet the requirements of creep test of rock under the coupling action of reservoir water pressure and stress, and rock creep test under the action of stress and water-rock coupling. The stress, water pressure loading and control during the test meet the stability requirements, the test working condition of each parameter is good, and the overall operation of the test system is reliable. The development of the test system provides a good test platform for the analysis of the damage and deterioration effect and mechanism of the rock mass on the bank slope caused by the impoundment and long-term operation of the high dam reservoir.

Key words: rock mechanics; bank slope; water level fluctuation zone; stress and water-rock coupling interaction; test system

0 引言

库岸边坡变形稳定是影响高坝大库安全运行的重

要组成部分, 水库蓄水运行后, 一般伴随库水位数十米甚至数百米的大幅抬升, 而且根据防洪、发电等运

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U22A20600, 52327811) This work was supported by National Natural Science Foundation of China (Grant Nos.U22A20600 and 52327811).

收稿日期(Received): 2024-08-19 修回日期(Revised): 2025-03-04 接受日期(Accepted): 2025-03-13 网络出版日期(Online): 2025-03-14

*通信作者 (E-mail: terrychf@163.com)

© Editorial Office of Chinese Journal of Geotechnical Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

行调度需求, 库水位通常需要在一定范围内周期性升降变化^[1-2]。库水位的大幅度变化不仅会在短期内改变边坡岩体的应力状态, 直接导致库岸边坡的变形失稳; 而且也会加剧库岸边坡岩体原有水-岩作用的进程, 引起一些新的水-岩作用形式, 加速岸坡消落带岩体的损伤劣化。如图 1 所示, 三峡工程 175 m 试验性蓄水运行十余年来, 175 m 高程水位线已成为节理裂隙发育的分界线, 研究表明, 库岸边坡水-岩作用导致的坡脚区域岩体损伤劣化已经成为影响其变形稳定的主要因素之一, 很可能将三峡库区的地质灾害带入新的发展阶段。而且, 在乌东德、白鹤滩等一批 300 m 级高坝大库中, 库岸边坡长期安全稳定也存在类似问题。



图 1 典型库岸边坡消落带岩体损伤劣化

Fig. 1 Damage and deterioration of rock mass in typical reservoir bank slope

库岸边坡赋存环境条件非常复杂, 水下部分岩体长期处于库水浸泡和上覆岩层应力耦合作用下, 消落带区域岩体处于上覆岩层应力和库水位周期性升降变化耦合作用下。特别地, 如图 1 所示, 消落带区域的动态水-岩作用导致岩体损伤劣化尤为明显。三峡库区蓄水运行以来, 刘新荣等^[3]先后采用各种干湿循环试验模拟消落带干湿交替的作用过程, 发现干湿循环作用下各类岩石物理力学劣化趋势明显; 在此研究基础上, 较多学者逐渐认识到水压力的影响, 黄书岭等^[4]采用多场耦合试验设备进行了水-力耦合作用试验, 发现水压力对岩石裂纹扩展和损伤演化影响显著。这些试验研究为认识库岸边坡消落带水-岩作用提供了很好的思路。

同时, 较多学者考虑不同的水-岩作用环境, 研制了多台(套)专用仪器设备, 冯夏庭等^[5]研制了应力-水流-化学耦合的岩石破裂全过程细观加载系统; 张振华等^[6]研制了模拟库水位周期性变化的渗透仪和“湿

干”交替作用的岩石抗拉强度测试系统; 刘镇等^[7]研制了软岩水-力耦合的流变损伤多尺度力学试验系统; 邬爱清等^[8]研制了现场裂隙岩体水力耦合真三轴试验系统; 陈卫忠等^[9]研制了岩石节理面应力-渗流耦合流变试验系统; 为了准确模拟消落带的库水环境, 李建林教授团队先后研制了多套库岸边坡水-岩作用专用试验设备, 其中, YRK-1 岩石溶解试验仪, 实现了岩石浸泡过程中库水压力施加^[10]; YRK-2 岩石浸泡-风干试验仪, 实现了浸泡水压力上升、稳定、下降变化过程以及库水位下降后岩体的温控风干过程模拟^[11]。综合目前研究成果来看, 相关模拟库水环境及水力、应力等多场耦合的水-岩作用试验仪器设备研制得到了较快的发展, 但目前相关水-岩作用试验设备和还不能很好满足库岸边坡消落带岩体赋存的应力、水压力和浸泡-风干循环耦合作用过程模拟需求。

基于此, 在前期研究基础上, 研制应力和水-岩耦合作用试验系统, 以准确模拟库岸消落带岩体赋存的环境条件, 为消落带岩体损伤劣化分析提供试验平台。

1 设计方案

1.1 设计思想

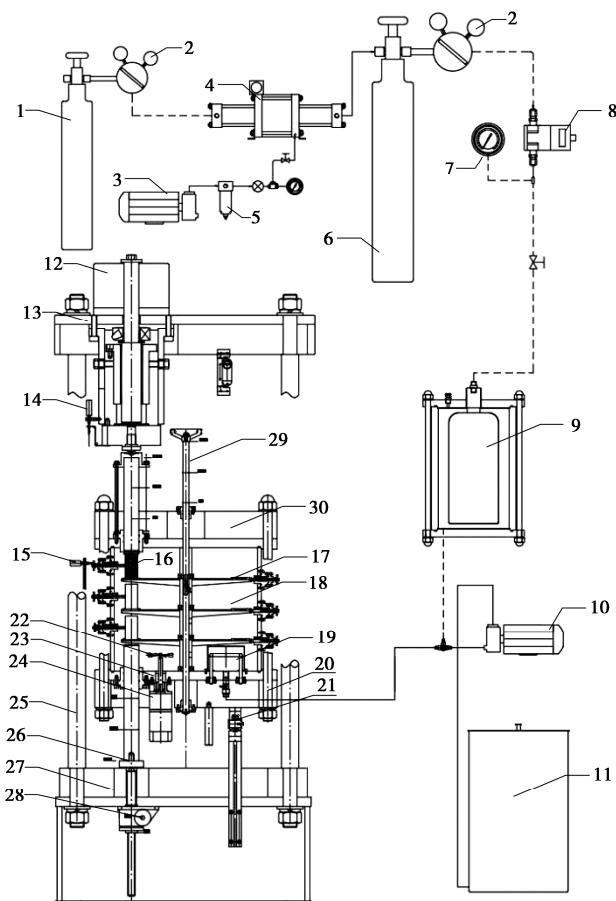
针对库岸边坡岩体所处的上覆岩层应力与库水位大幅度抬升及周期性升降变化的实际情况, 按照集成化、智能化的总体思想进行设计, 主要实现两方面的功能: ①复杂库水环境和应力条件及其耦合作用的模拟, 其中, 复杂库水环境包括水库蓄水产生的水压力增加、库水位升降变化导致的水压力升降变化及浸泡-风干循环作用过程; 应力条件主要模拟上覆岩层应力作用。②应力和水-岩耦合作用下多源参数实时测试及控制。试验过程中, 控制各项加载和测试单元, 包括岩样的应力、变形、温度等实时测试等。

1.2 系统结构设计

根据应力和水-岩耦合作用试验系统的主要功能, 总体结构如图 2 所示, 主要由 6 部分组成: ①水压力加载装置及控制单元; ②动、静水模拟控制单元; ③烘干、风干装置及控制单元; ④轴向应力加载装置及测试单元; ⑤轴向和径向变形测试单元; ⑥软件控制单元等。

(1) 水压力加载及控制单元, 实现水压力按照设计速率均匀增大、减小和稳压控制, 以模拟库水位的升降变化过程。主要由特制水压力室、水压力控制装置两部分组成。其中, 特制水压力室如图 3 所示, 内径和高度均为 50 cm, 水压力室要求密封性能好, 能承受 5 MPa 的内水压力, 参考 YRK-2 岩石浸泡-风干试验仪的制作方式^[11], 压力室的材料选择特制的不锈

钢和有机玻璃，并在接缝处采用橡胶圈进行压紧密封，保证在高水压力下不渗水；为了满足可视化的要求，在压力室侧面采用有机玻璃布置观察窗。



1-氮气气源；2-减压阀；3-空气压缩机；4-气驱气体增压器；5-气体过滤器；6-高压储气瓶；7-压力表；8-精密电气比例阀；9-皮囊式气水交换器；10-水泵；11-储水箱；12-轴向加压装置；13-上横梁；14-轴向变形传感器；15-侧向变形传感器；16-岩石试样；17-托盘；18-水压力室；19-加热管；20-压力室拉杆；21-水压力室导轨；22-搅拌叶；23-水压力室底板；24-搅拌电机；25-立柱；26-升降头；27-下横梁；28-升降机；29-回转轴；30-水压力室顶板

图2 岩石应力和水-岩耦合作用试验系统整体设计图

Fig. 2 Overall design diagram of rock stress and water-rock coupling test system

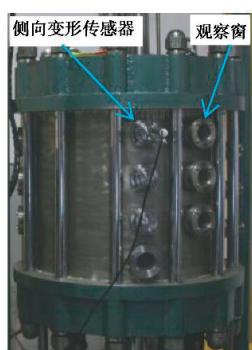


图3 特制水压力室

Fig. 3 Special water pressure chamber

水压力控制装置主要由气源（氮气）、减压阀、空气压缩机、气驱气体增压器、气体过滤器、高压储气瓶、精密电气比例阀、皮囊式气水交换器及阀门管路

等组成，工作原理是经过减压阀，将气源压力调制为200 kPa左右，经气驱气体增压器增压为5 MPa，进入高压储气瓶，形成高压稳定气源，试验过程中根据加载需要，向皮囊式气水交换器气囊中充气或者排气，进而控制水压力室内水压力的大小。

(2) 动、静水模拟控制单元，实现浸泡水溶液的流动，模拟库水不同的动水状态。为了达到上述目的，在压力室底部设置一个搅拌装置，搅拌装置主要由搅拌叶、搅拌轴、搅拌电机组成，电机工作时，带动搅拌叶转动，让压力室内部的水溶液流动，达到模拟库水的流动状态。

(3) 温控烘干、风干装置及控制单元，实现岩样温控烘干或者风干，模拟库水位下降后消落带岩体的风干过程。设置在压力室底部，主要由水箱、水泵、空气压缩机加热管及阀门管路组成。在模拟自然风干时，首先通过水泵将压力室内的水全部抽出，储存在水箱里面，然后通过空气压缩机提供气源，通过压力室底部的导管将气体导入压力室，对压力室内的试样进行风干；在模拟温控烘干时，启动烘干装置，使加热管工作，进行试样温控烘干。

(4) 轴向加载系统及测试单元，实现岩样的分级加载和长期稳定加载，模拟边坡岩体上覆岩层应力作用。主要由反力框架、滚珠丝杠副加压装置、升降工作台等组成。其中，轴向加载系统最大加载能力1000 kN，满足强度和刚度的要求；采用三菱伺服电机作为驱动源，满足按应变控制或应力控制加载要求。压力室设置了3层放置试样的托盘，升降工作台可以适应不同试样高度的要求。在加载端设置加压导向套、高刚度加压杆和加压头，加压杆穿过水压力室的顶板，加压导向套与水压力室顶板进行防水处理，在加载过程中，液压加载装置与加压头接触，通过加压杆传递荷载，从而保证轴向应力加载和水压力加载的正常耦合工作。在具体试验加载过程中，如图4所示，试验过程中，可以在托盘上安装多个试样进行浸泡，前一个试样完成加载试验后，转动托盘，即可进行下一个试样的加载试验。

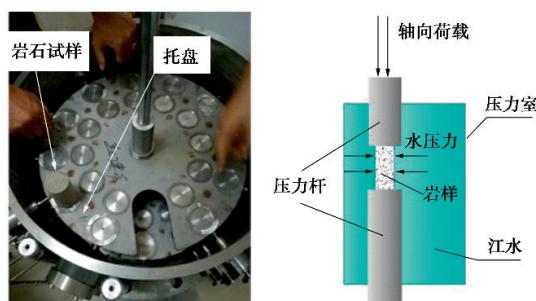


图4 试样安装示意图

Fig. 4 Sample installation diagram

(5) 位移测试单元, 实现岩样在加载过程中的轴向和径向变形的测试和记录。如图 5 所示, 侧向变形传感器安装在压力室侧壁外侧, 通过测量杆与内部岩石试样接触, 记录岩石试样侧向变形。轴向变形传感器安装在压力室顶部, 通过与轴向加压杆连接来记录竖向位移。为了满足防水要求, 在测量杆外面设置有导向套, 并在导向套与水压力室侧壁、顶板接触处进行了防水处理, 进而保证变形测试和水压力加载的正常工作。



图 5 位移测试系统

Fig. 5 Displacement test system

(6) 软件控制系统, 通过编制不同单元控制软件程序, 实现计算机控制一体化, 主要采集轴向应力、变形、温度、水压力等数据, 满足数据图表实时显示、存储和输出功能。

1.3 主要功能及技术性能指标

加工完成的 YRQ-1000 型岩石应力和水-岩耦合作用试验系统如图 6 所示。实现了应力条件和库水环境耦合作用的模拟, 其中, 应力条件主要是轴向应力加卸载; 库水环境包括浸泡水压力上升、恒定、下降过程, 以及岩样的温控风干、烘干过程。



图 6 YRQ-1000 型岩石应力和水-岩耦合作用试验系统

Fig. 6 YRQ-1000 rock stress and water-rock coupling test system

试验系统的技术性能与指标具体如下:

(1) 水压力室承压范围: 0~5 MPa; 水压力控制系统实现自动调压控制, 精度 0.001 MPa, 加压速率和时间可软件设定自动控制, 并能保持恒压。

(2) 轴压加载范围: 0~1000 kN; 精度为 0.001 kN; 加载速率为 0.001~100 kN/s。

(3) 轴向和侧向位移传感器: 量程为 10 mm, 精度为 0.001 mm。

(4) 搅拌装置: 时间可按实际需求设定, 转速为 0~60 rpm。

(5) 烘干、风干装置: 满足强制通风要求, 也可实现恒温干燥, 温度范围为 10~60°C, 温度波动范围 $\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$, 风干、温度和时间可自动控制。

(6) 试样安装与更换: 水压力室内设置了 3 层试样托盘和半自动换样装置, 可将待试验的标准岩样(直径 50 mm、高度 100 mm) 一次装进水压力室内的托盘上, 在不打开水压力室的情况下, 旋转托盘和调整升降工作台可完成岩样安装和更换。

2 试验系统的性能验证

根据前述设计, 按照功能要求和技术参数进行委托加工, 并在出厂之前和设备验收时对各项参数指标进行了检测分析。同时, 为了验证设备的性能及结果可靠性, 以三峡库区典型砂岩为试验对象, 进行了相关的验证试验, 主要包括岩石的常规单轴压缩试验、单轴压缩蠕变试验、库水压力和应力耦合作用下的蠕变试验。

2.1 单轴压缩试验和蠕变试验

为验证试验系统的加载性能, 选取 RMT-150C 岩石力学试验系统为参考对象, 典型单轴压缩试验应力-应变曲线如图 7 所示。两套试验系统测试得到的应力-应变曲线的变化趋势和形态基本一致, 岩样的单轴抗压强度 83.4~84.7 MPa, 差别不到 2.0%, 说明本试验系统的加载和测试性能是可靠的。

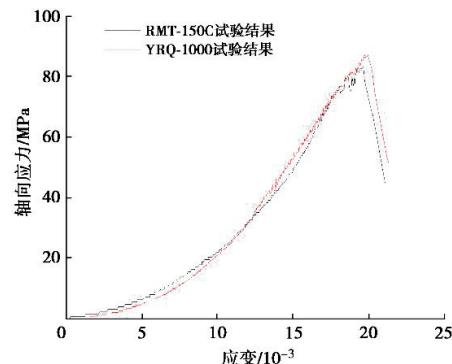


图 7 砂岩单轴压缩应力-应变曲线

Fig. 7 Uniaxial compressive stress-strain curves of sandstone

以常用的 RLW-2000 岩石三轴蠕变试验机为参考对象, 进行砂岩试样的单轴分级加载蠕变试验, 每隔 48 h 增加相同的应力直至试样发生蠕变破坏, 典型蠕变试验曲线对比如图 8 所示。

可以看出, 两条蠕变试验曲线各级应力下变化趋势一致, 应变增量大小相近, 且发生蠕变破坏的应力

值相同。这验证了 YRQ-1000 岩石应力和水-岩耦合作用试验系统进行岩石蠕变试验的可靠性。

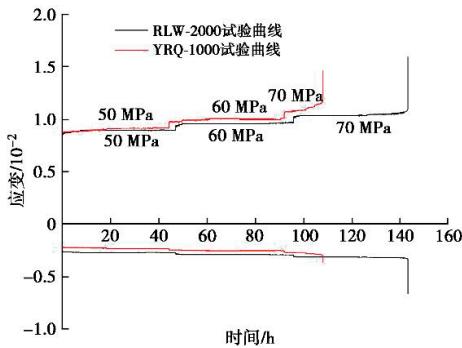


图 8 砂岩单轴分级加载蠕变曲线对比

Fig. 8 Creep curves of sandstone under uniaxial graded loading

2.2 库水压力和应力耦合作用蠕变试验

针对库岸边坡水下部分岩体,设计进行了一组库水压力作用下的单轴分级加载蠕变试验。试验步骤:将试样放入压力室内,然后将压力室内注满水,加载水压力至设定值后保持恒定;加载轴向应力至设计应力水平,之后每隔 48 h 按照要求增加轴向应力,直至试样破坏。典型蠕变曲线如图 9 所示。

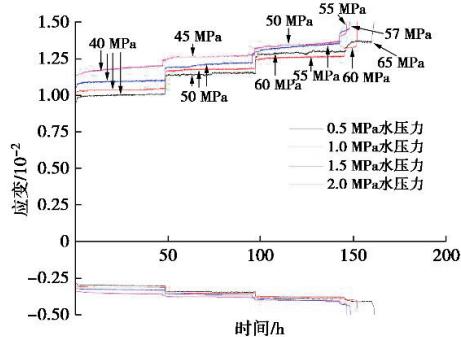


图 9 库水压力和应力耦合作用下砂岩分级加载蠕变曲线

Fig. 9 Creep curves of sandstone under uniaxial hierarchical loading and coupled action of reservoir water pressure and stress

图 9 的蠕变曲线与图 8 总体一致,但对比分析可以看出无水和有水环境下蠕变特性明显不同。典型的,当轴向应力水平为 50 MPa 时,无水环境下,试样进入稳态蠕变阶段的时间约为 6.7 h, 0.5, 2.0 MPa 水压力环境下试样进入稳态蠕变的时间分别为 7.03, 10.69 h;无水环境下试样蠕变破坏强度为 70, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 MPa 水压力环境下试样蠕变破坏强度分别为 65, 60, 57.5, 55 MPa。说明有水压力时,在设定的轴向应力水平下,达到变形稳定的时间明显增长,而且对应的蠕变破坏强度明显降低。

在水压力和应力耦合作用蠕变过程中,施加 0.5~2.0 MPa 的水压力,类似于对试样施加了侧向围压,但没有出现以往三轴试验中围压越大,强度越高的现

象。分析主要是由于常规三轴试验中围压是以面荷载的形式作用在试样表面,对试样内部的孔隙、裂隙有显著压密作用;而在本试验系统中,更真实地模拟了岸坡岩体的库水环境,水压力直接作用在试样的表面,与试样内部的渗流通道连通,压密效应明显减弱,而试样内孔隙、裂隙,特别是其尖端处的应力集中明显加剧,进而导致试样的承载性能进一步弱化。由此也可以看出,对于库岸边坡消落带以下区域的岩体,不能单纯的用软化系数去描述其性能的劣化,还要进一步考虑水压力变化及其长期水-岩作用损伤对物理力学特性的影响。

3 应力和水-岩耦合作用蠕变试验

针对库岸边坡消落带岩体,进行了一组应力和水-岩耦合作用蠕变试验。具体试验步骤如下:①将试样放入压力室内,加载轴向应力至设计应力水平(考虑到部分库岸边坡消落带岩体已经出现了明显的变形破坏迹象,应力水平取图 9 中接近破坏的一级应力值,60 MPa),保持 48 h 直至试样变形稳定。②保持轴向应力不变,将压力室内注满水,加载水压力至 0.5 MPa 保持恒定,直至岩样的变形趋于稳定(统一按照 48 h 控制),模拟库水位上升的浸泡阶段。③将水压力降低至 0,将压力室内浸泡水溶液排出,控制温度(30℃)进行岩样的风干,直至岩样的变形趋于稳定(统一按照 48 h 控制),模拟库水位下降后的风干过程;②和③如此为 1 个应力和水-岩耦合作用周期,保持轴向应力不变,循环进行②和③步骤的应力和水-岩耦合作用,直至岩样破坏。

3.1 蠕变变形特征分析

典型应力和水-岩耦合作用下砂岩蠕变试验曲线如图 10 所示。可以看出,恒定轴向应力作用下,在周期性的水压力升降变和浸泡-风干循环作用过程中,岩样的蠕变变形特征明显。典型的,在加压浸泡过程中,可以分为瞬时变形、衰减蠕变和稳态蠕变阶段(在破坏应力水平下,还存在加速蠕变阶段);在风干过程中,岩样表现一定的强化特征,变形有一定程度的恢复,可以分为瞬时恢复变形、衰减恢复变形和稳态恢复变形阶段。比较而言,在加压浸泡阶段,岩样的蠕变变形增长趋势尤为明显,进入稳态蠕变阶段的时间也明显较长;风干阶段,岩样变形有一定减小,但均小于加压浸泡阶段的变形增长量,而且也较快达到稳态蠕变变形阶段。因此,在周期性的水压力升降变化和浸泡-风干循环作用过程中,试样的蠕变变形整体呈增长趋势。经过 3 个周期的应力和水-岩耦合作用之后,岩样发生破坏,低于 2.2 节静水压力作用下蠕变

破坏强度 65 MPa, 说明周期性水压力升降变化和浸泡一风干循环作用对岩样造成了累积性损伤, 使得岩样在较低应力水平下发生蠕变破坏。

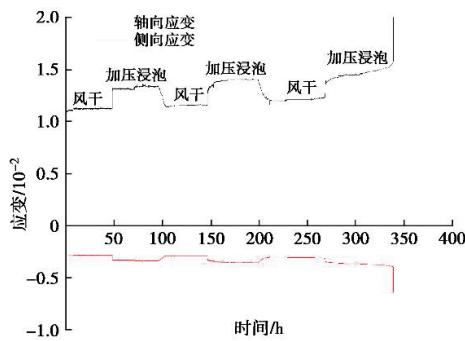


图 10 应力和水-岩耦合作用下砂岩蠕变曲线

Fig. 10 Creep curves of sandstone under stress and water-rock coupling

为了详细分析不同应力和水-岩耦合作用周期下砂岩蠕变变形特征, 统计了不同周期下加压浸泡阶段和风干阶段砂岩蠕变应变增量, 为了便于对比, 风干阶段蠕变应变的变化量取绝对值(后文一样处理)。同时, 对浸泡过程和风干过程中稳态蠕变阶段的应变速率进行了统计, 计算中分别取图 10 中 3 次风干、加压浸泡过程中稳态蠕变阶段曲线的斜率, 具体统计结果如图 11 所示。

根据图 11 可以得出: ①随着应力和水-岩耦合作用周期增加, 风干阶段和加压浸泡阶段的蠕变应变增量均不断增大, 表明应力和水-岩耦合作用过程中, 砂岩损伤劣化随着周期累积发展。在前 2 个周期, 加压浸泡阶段的蠕变应变略大于风干阶段, 在第 3 个周期, 试样在加压浸泡阶段发生了蠕变破坏, 导致其应变增量明显大于风干阶段(风干、加压浸泡阶段蠕变应变增量分别为 2.63×10^{-4} , 1.181×10^{-3})。说明周期性水压力升降变化和浸泡一风干循环导致试样的损伤劣化效应逐渐累积, 在相同外界条件变化情况下试样抵抗

变形能力逐渐降低。②随着作用周期的增加, 砂岩稳态蠕变阶段的速率均随之逐渐增大。具体表现为, 周期 n 为 1, 2, 3 时, 风干过程中稳态蠕变应变速率分别为 3.19×10^{-6} , 3.90×10^{-6} , $5.48 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$, 浸泡过程中稳态蠕变应变速率分别为 4.08×10^{-6} , 6.54×10^{-6} , $1.86 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$ 。

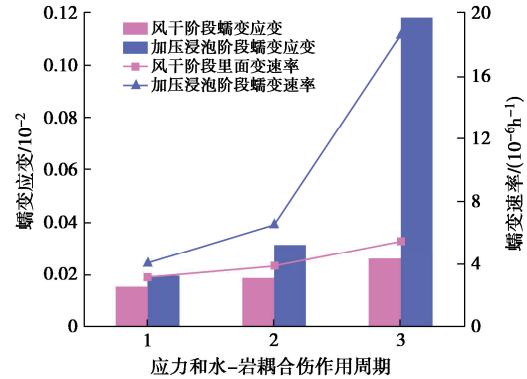


图 11 应力和水-岩耦合作用下砂岩蠕变应变增量统计图

Fig. 11 Creep strain increment of sandstone under stress and water-rock coupling

3.2 应力和水-岩耦合作用下砂岩劣化机理分析

结合应力和水-岩耦合作用过程和试验结果, 分析总结消落带岩体的劣化机理如图 12 所示。

(1) 在轴向应力加载过程中, 岩样内部部分孔隙、裂隙闭合, 在内部薄弱部位逐渐产生微破裂, 并在裂纹、裂隙尖端形成应力集中, 为后续水-岩作用提供了更多渗流通道和反应界面。在加压浸泡过程中, 水分子内渗, 一方面试样内孔隙、裂隙处水压力增大, 其尖端处的应力集中进一步加剧; 另一方面, 矿物颗粒间的胶结物发生溶蚀、溶解, 各类矿物发生水-岩物理、化学作用, 矿物颗粒逐渐软化和分解, 使得岩石微观孔隙、裂隙增多, 引起岩石内部的应力重分布及应力集中现象, 而且, 在应力耦合作用下, 这个水-

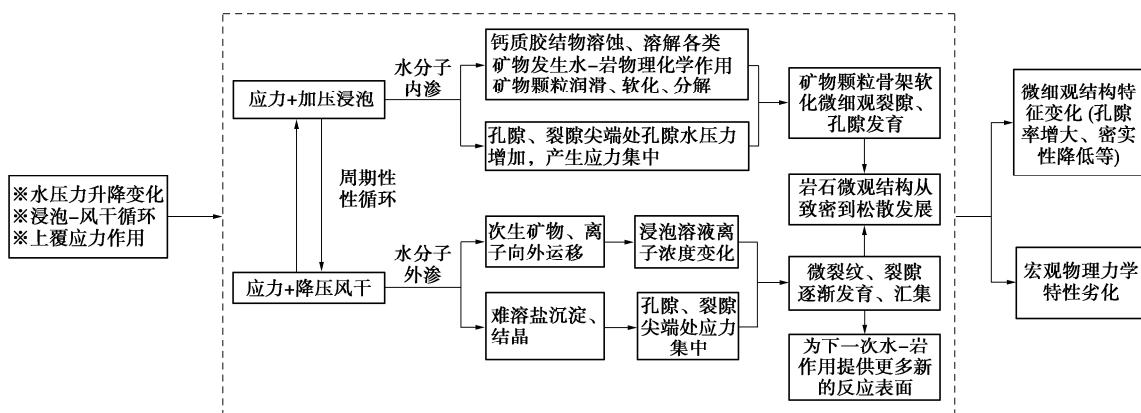


图 12 应力和水-岩耦合作用下消落带岩体劣化机理图

Fig. 12 Deterioration mechanism diagram of rock mass in the water level fluctuation zone under stress and water-rock coupling

岩作用损伤劣化效应及进程会明显增强^[12-13]。也即，在应力加载和加压浸泡过程中，岩样矿物颗粒骨架逐步软化，微细观孔隙裂隙逐步发育，对应承载性能逐步降低。

(2) 在水压力降低和风干过程中，水分子外渗，一方面岩样逐渐失水风干，其宏观物理力学性能逐渐产生一定程度的恢复，这与常规岩石含水状态变化是一致的；另一方面，溶解和溶蚀产生的次生矿物、碎屑及各种离子会随着渗流通道排出，导致孔隙、裂隙空间进一步扩展，同时，在孔隙、裂隙处滞留的溶液易形成沉淀、结晶，在应力作用下，孔隙、裂隙尖端处应力集中会进一步提升。也即，在应力作用和降压风干过程中，微细观裂隙、裂纹发育、汇集，为下一次加压浸泡过程中的水-岩物理、化学作用提供更多作用空间和反应表面，同时也进一步改变了岩样内部的应力分布和应力集中现象。

综上，在应力与水-岩耦合作用过程中，持续的应力作用、周期性的水压力升降变化和浸泡-风干循环作用，均会导致岩样内部的孔隙、裂隙等微细观损伤逐步累积，进而导致宏观物理力学性能劣化，而且这几个因素是耦合在一起的，互相促进，加剧岩样内部微细观结构损伤演化。也即，水-岩作用损伤、微细观节理裂隙发育扩展、应力状态调整三者间的循环促进作用造成消落带岩体产生持续的损伤劣化。3.1 节 60 MPa 应力作用下，岩样经历 3 个周期水-岩作用后即发生破坏，低于 2.2 节静水压力作用下蠕变破坏强度 65 MPa，也进一步说明了应力与水-岩耦合作用过程对累积损伤效应的影响，使得岩样在较低应力水平下发生蠕变破坏。因此，对于库岸边坡消落带岩体，不仅要考虑库水环境的变化，也要考虑上覆岩层应力的耦合作用。

4 结论与展望

(1) 研制的 YRQ-1000 型岩石应力和水-岩耦合作用试验系统，实现了消落带岩石的库水压力、浸泡-风干循环与应力耦合作用的准确模拟，为库岸边坡消落带岩体在长期水-岩作用下的劣化机理分析提供了良好试验平台；在试验过程中，可以同步测试岩样的应力、变形等参数，可为分析库岸边坡水-岩作用机理提供丰富的基础数据。

(2) 经出厂检测和验收测试，并结合系列验证试验分析，该试验系统可以满足岩石常规单轴压缩试验、库水压力和应力耦合作用下的蠕变试验、应力和水-岩耦合作用试验要求，试验过程中的应力、水压力加载及控制满足稳定性要求，各测试单元工作状态良好，

技术参数指标达到了预期设计要求，试验系统运行整体可靠。

(3) 库岸边坡消落带岩体处于上覆岩层应力、水压力升降变化和浸泡-风干循环耦合作用下，分析结果显示，水-岩作用损伤、微细观节理裂隙发育扩展、应力状态调整三者间的循环促进作用造成消落带岩体产生持续的损伤劣化。

(4) 在本试验系统中，主要实现了轴向应力与水-岩耦合作用过程的模拟，后续将结合岸坡岩体结构特征和实际赋存应力条件，进一步完善拉应力、剪切应力与水-岩耦合作用试验功能，以及动力作用与水-岩作用耦合的试验系统，以更好地满足高坝大库蓄水运行条件下岸坡岩体物理力学性能效应与劣化机理模拟分析需求。

致 谢：感谢南京土壤仪器厂有限公司对本试验系统研制的支持和帮助！

利益冲突声明/Conflict of Interests：所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions：邓华锋、骆祚森、王孔伟参与试验系统的研制，李建林、李焯芬提供了试验系统设计的指导，邓华锋、骆祚森、张景昱、程其芬参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This test system was designed by DENG Huafeng, LUO Zuosen and WANG Kongwei. The design of the test system were supervised by LI Jianlin and LI Zhuofen. The manuscript was drafted and revised by DENG Huafeng, LUO Zuosen, ZHANG Jingyu and CHENG Qifan. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献：

- [1] 王士天, 刘汉超, 张倬元, 等. 大型水域水岩相互作用及其环境效应研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1997, 8(1): 69-88. (WANG Shitian, LIU Hanchao, ZHANG Zhuoyuan, et al. Study on water-rock interaction and its environmental effect in large-scale waters[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1997, 8(1): 69-88. (in Chinese))
- [2] 王思敬, 马凤山, 杜永廉. 水库地区的水岩作用及其地质环境影响[J]. 工程地质学报, 1996, 4(3): 1-9. (WANG Sijing, MA Fengshan, DU Yonglian. Water-rock interaction in reservoir area and its geological environment influence[J]. Journal of Engineering Geology, 1996, 4(3): 1-9. (in Chinese))
- [3] 刘新荣, 傅晏, 王永新, 等. (库)水-岩相互作用下砂岩抗

- 剪强度劣化规律的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1298-1302. (LIU Xinrong, FU Yan, WANG Yongxin, et al. Deterioration rules of shear strength of sand rock under water-rock interaction of reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1298-1302. (in Chinese))
- [4] 黄书岭, 冯夏庭, 周辉, 等. 水压和应力耦合下脆性岩石蠕变与破坏时效机制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3441-3446, 3451. (HUANG Shuling, FENG Xiating, ZHOU Hui, et al. Study of aging failure mechanics and triaxial compression creep experiments with water pressure coupled stress of brittle rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3441-3446, 3451. (in Chinese))
- [5] 冯夏庭, 丁梧秀. 应力-水流-化学耦合下岩石破裂全过程的细观力学试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1465-1473. (FENG Xiating, DING Wuxiu. Meso-mechanical experiment of microfracturing process of rock under coupled mechanical-hydrological-chemical environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1465-1473. (in Chinese))
- [6] 张振华, 孙钱程, 李德忠, 等. 周期性渗透压作用下红砂岩渗透特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 937-943. (ZHANG Zhenhua, SUN Qiancheng, LI Dezhong, et al. Experimental study on permeability characteristics of red sandstone under cyclic seepage pressures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(5): 937-943. (in Chinese))
- [7] 刘镇, 周翠英, 陆仪启, 等. 软岩水-力耦合的流变损伤多尺度力学试验系统的研制[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 3077-3086. (LIU Zhen, ZHOU Cuiying, LU Yiqi, et al. Development of the multi-scale mechanical experimental system for rheological damage effect of soft rock bearing the hydro-mechanical coupling action[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 3077-3086. (in Chinese))
- [8] 邬爱清, 范雷, 钟作武, 等. 现场裂隙岩体水力耦合真三轴试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(11): 2161-2171. (WU Aiqing, FAN Lei, ZHONG Zuowu, et al. Development of an in situ hydro-mechanical coupling true triaxial test system for fractured rock mass and its application[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2020, 39(11): 2161-2171. (in Chinese))
- [9] 陈卫忠, 隋群, 王鲁瑀, 等. 岩石节理面应力-渗流耦合剪切流变试验系统的研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1729-1738. (CHEN Weizhong, SUI Qun, WANG Luyu, et al. Development and application of a hydro-mechanical coupling shear creep testing machine for rock joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9): 1729-1738. (in Chinese))
- [10] DENG H F, ZHOU M L, LI J L, et al. Creep degradation mechanism by water-rock interaction in the red-layer soft rock[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(12): 601.
- [11] 邓华锋, 王文东, 李建林, 等. 水-岩和重复剪切次序作用下节理岩体损伤效应及模型[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(3): 503-511. (DENG Huafeng, WANG Wendong, LI Jianlin, et al. Damage effects and model for jointed rock mass under water-rock interaction and repeated shear sequence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(3): 503-511. (in Chinese))
- [12] 冯夏庭, 丁梧秀, 姚华彦, 等. 岩石破裂过程的化学-应力耦合效应[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (FENG Xiating, DING Wuxiu, YAO Huayan, et al. Coupled Chemical-Stress Effect on Rock Fracturing Process[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [13] CIANTIA M O, CASTELLANZA R, DI PRISCO C. Experimental study on the water-induced weakening of calcarenites[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(2): 441-461.