

DOI: 10.11779/CJGE201505021

周期性渗透压作用下红砂岩渗透特性试验研究

张振华^{1,2}, 孙钱程², 李德忠², 杜梦萍², 姚华彦^{1,2}

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 三峡大学三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 水库运行期水位的周期性变化使软岩岸坡防洪限制水位以下的岩体长期处在周期性变化渗透压作用的环境中, 这种周期性变化的渗透作用对软岩的渗透特性将产生很大的影响。以三峡库区红砂岩为研究对象, 利用自主研发的“具有模拟库水位周期性变化环境下水压变化条件的渗透仪”对红砂岩进行周期性渗透试验, 探讨防洪限制水位以下的红砂岩在周期性渗透压作用下的渗透特性变化规律。试验结果表明, 随着周期性渗透压的变化, 红砂岩的渗水量在第一个渗透周期增长最快, 而后逐渐减小; 随着周期性渗透压的变化, 红砂岩的渗透速度和渗透系数也呈周期性变化; 不同岩样的累计渗水量、渗透速度和渗透系数的变化存在一定的差异, 但经过4个渗透周期之后, 红砂岩的累积渗水量、渗透速度和渗透系数随压力的变化范围稳定, 且变化趋势一致。研究结果说明, 三峡水库岸坡防洪限制水位以下的红砂岩在水库运行期经历4次周期性水位变化之后, 渗透特性逐渐趋于稳定。

关键词: 红砂岩; 防洪限制水位; 周期性渗透压; 渗透特性

中图分类号: TU458 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)05-0937-07

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。E-mail: zenithzhang@sina.com.

Experimental study on permeability characteristics of red sandstone under cyclic seepage pressures

ZHANG Zheng-hua^{1,2}, SUN Qian-cheng², LI De-zhong², DU Meng-ping², YAN Hua-yan^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Collaborative Innovation Center for

Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Hubei Province, Yichang 443002, China)

Abstract: The cyclic fluctuations of reservoir water level make the soft rock in bank slope below the flood control level (FCL) under cyclic seepage pressures and will bring great effects on its permeability characteristics. In order to obtain the variable characteristics of the soft rock under cyclic seepage pressures, permeability tests on red sandstone specimens from Three Gorges Reservoir area, China under cyclic seepage pressures are conducted to simulate cyclic fluctuation of reservoir water level by using the self-developed equipment. The test results show that the cumulative volume of water infiltration has a fastest growth under the first periodic seepage pressures and then decreases under the following cyclic seepage pressures, while the penetration rate and permeability coefficient of the sandstone specimens periodically change with the cyclic variation of seepage pressures. There are some differences in the change of the cumulative volume of water infiltration, penetration rate and permeability coefficient for different specimens. But after four infiltration cycles, the cumulative volume of water infiltration, penetration rate and permeability coefficient of red sandstone vary in the same trend and within a stable range. The study indicates that the permeability characteristics of the red sandstone in bank slope below FCL in Three Gorges Reservoir Area gradually begin to be stabilized after a few number of cyclic fluctuations of reservoir water level.

Key words: red sandstone; flood control level; periodic seepage pressure; permeability

0 引言

水的渗透是影响岩石工程变形破坏的重要因素之一, 随着人类工程活动的增多, 这种影响也表现得越来越明显。以往的研究结果表明, 水在隧道中的渗透可能使岩体引起裂缝扩展、剪切变形和位移^[1-2]; 坝基及坝体的层间错动带在长时间的渗透作用下会形成管涌^[3-4], 危害坝体安全; 大多数岩质边坡的破坏都是地

下水在裂隙中渗流而引起的^[5-10]。对于水库岩质岸坡而言, 水库运行期岸坡岩体长期处于渗透水压变化作用的环境中, 准确地获得岸坡岩体在变化的渗透水压作用下渗透规律是评价水库岩质岸坡在水库运行期稳定性的重要前提。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379106, 50909053)

收稿日期: 2014-07-08

目前, 国内部分学者针对水库岩质岸坡岩石的渗透特性做了研究, 如朱珍德等^[11]对水库高边坡的灰岩采用全应力-应变过程的渗透性试验, 发现其渗透性与变形破坏形式有关; 陈祖安等^[12]针对大庆某岩质边坡的砂岩做了渗透试验, 研究了渗透率随静压力变化的规律; 张彦洪等^[13]采用理论推导和数值模拟的方法分析了多种水位变化条件下裂隙岩体的水头分布, 其虽然考虑了水库水位升降对岸坡岩体渗流特性的影响, 但未考虑水库运行期水位周期性变化对岩石渗透特性的影响, 因此得到的渗透规律与实际工程应用还有一定的距离。然而, 水库运行期库水位周期性变化使防洪限制水位(防洪限制水位是指水库在汛期允许蓄水的上限水位, 也是水库在汛期允许兴利蓄水的上限水位, 三峡水库在汛期的防洪限制水位为 145 m, 防洪限制水位以下的岩石常年浸泡在库水中, 如图 1 所示)以下的岩石长期一直处在周期性变化渗透压的作用下, 这种周期性变化渗透压对岸坡岩石渗透特性的影响到底有多大, 目前国内外尚未见到相关文献的报道。

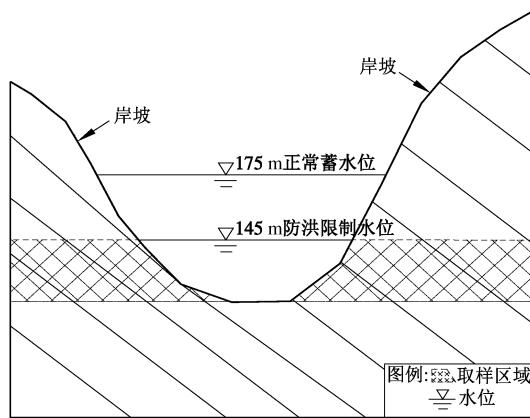


图 1 红砂岩取样区域示意图(三峡库区)

Fig. 1 Sketch map of sampling location on bank slopes (Three Gorges Reservoir area, China)

鉴于此, 本文采用自主研发的“具有模拟库水位周期性变化环境下水压变化条件的渗透仪”对三峡水库岸坡防洪限制水位以下红砂岩遭受的周期性变化渗透压作用环境进行模拟, 通过周期性循环渗透压作用下的红砂岩试件渗透试验, 探讨周期性循环渗透压作用下红砂岩渗透特性的变化规律。

1 渗透试验

1.1 试验设备研制

试验设备由加压、稳压、渗透、数据采集四部分组成, 其结构示意图和实物图分别见图 2, 3。通过周期性改变试样所受水压力的大小, 可以实现水库运行期库水位周期变化条件下防洪限制水位以下岸坡岩体所处的周期性变化渗透压作用环境的模拟。

1.2 试验材料

为了研究周期性循环渗透压作用下红砂岩的渗透特性, 取三峡库区千将坪岸坡^[14]侏罗系聂家山组红砂岩作为研究对象。红砂岩试样的组成成分为 73% 的石英、15% 的长石、9%~10% 的黏土和 2% 的云母。所有岩样均在同一区域钻孔取芯, 取芯后加工成圆柱形试件, 试件尺寸为直径 50 mm×高度 100 mm(见图 4)。

1.3 试验过程

由于试样来自取样区的不同位置, 初始含水率不同, 为了避免初始含水率对试验结果的影响, 试验前将试样进行 4 h 抽真空, 再用蒸馏水饱和 48 h, 使试样达到饱和状态^[15]。红砂岩试样的渗透试验按如下步骤进行:

(1) 将与试样尺寸相同的圆柱形钢块侧壁抹上凡士林之后缠上生胶带, 套上橡皮膜后再用生胶带稳固, 将装好的钢块放在试样容器内固定; 连接好设备, 在储水箱中注入充足的蒸馏水。

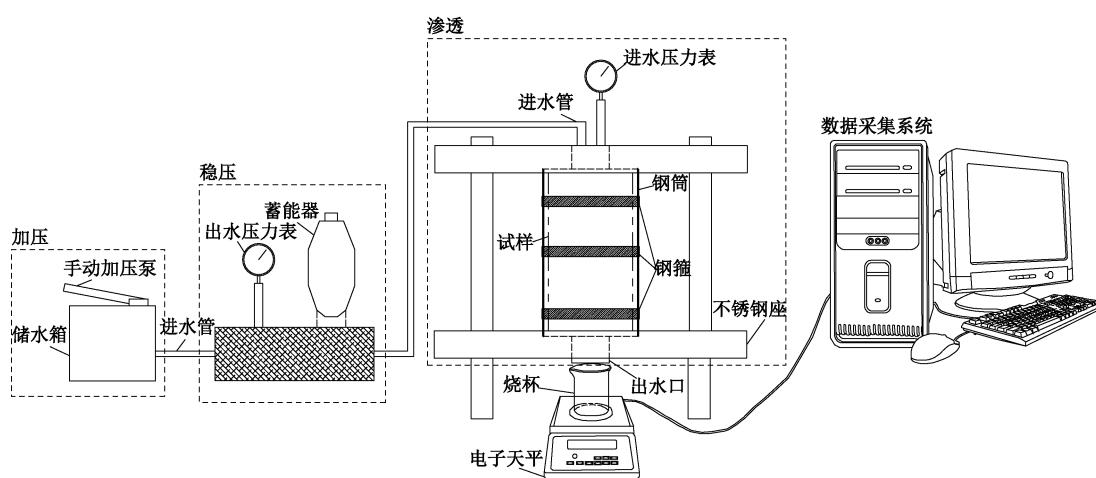


图 2 渗透试验设备结构图

Fig. 2 Sketch map of equipment for permeability tests

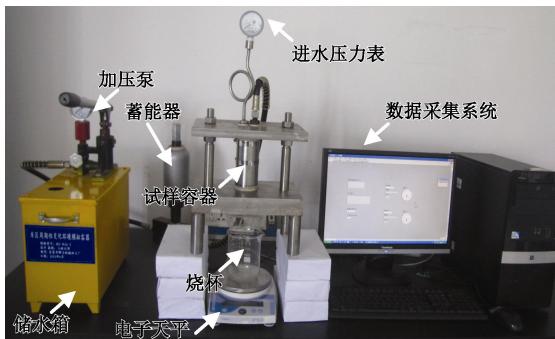


图 3 渗透试验设备

Fig. 3 Photograph of equipment for permeability tests



图 4 砂岩试样

Fig. 4 Photograph of red sandstone specimens

(2) 启动加压泵, 向试样容器内的钢块轴向加 0.1 MPa 的水压, 观察压力表示数是否稳定, 试件周围是否漏水, 以检查仪器设备管路接口的密闭性。

(3) 观察压力表, 若表中示数维持稳定在 0.1 MPa, 依次增大轴向水压力至 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 MPa, 在每个压力作用下观察压力表的示数。若压力表示数在每个压力状态下均稳定, 且试样容器底部没有水渗出, 则说明橡胶模和试样容器内壁、橡胶模和圆柱形钢块侧壁是封闭不漏水的, 可进行下一步的操作。

(4) 对饱和后的试样进行波速测试, 根据测试结果取波速非常相近的试样作为渗透试验的试样。

(5) 将试样侧壁抹上凡士林之后缠上生胶带, 套上橡皮膜后再用生胶带稳固, 把包好的试件放在装样容器内并固定, 确保试件侧壁与容器壁无缝隙; 连接好设备, 在储水箱中注入充足的蒸馏水。

(6) 启动加压泵, 给试样的轴向加 0.1 MPa 的水压, 观察压力表度数是否稳定、试件周围是否漏水, 以检查仪器设备管路接口的密闭性。

(7) 观察压力表, 若表中示数维持稳定在 0.1 MPa, 试样累计渗水量稳定增加时, 利用数据采集系统每隔 5 min 记录 1 次累计渗水量。当砂岩试样轴向渗透压稳定维持在 0.1 MPa 的时间达到 200 min 时,

结束轴向渗透压 0.1 MPa 的渗透过程。

(8) 将砂岩试样轴向渗透压增大至 0.2 MPa, 重复步骤(7), 分别按顺序加载轴向渗透压至 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 MPa, 并记录相应的渗水量。

(9) 试样完成 0.9 MPa 的渗透过程后, 拧开蓄能器阀门将渗透水压力降至 0.8 MPa, 拧紧蓄能器阀门后观察压力表, 若表中示数维持稳定在 0.8 MPa, 试样渗水稳定后, 利用数据采集系统每隔 5 min 记录 1 次累计渗水量。当砂岩试样轴向渗透压稳定维持 0.8 MPa 的时间达到 200 min 时, 结束轴向渗透压 0.8 MPa 的渗透过程。

(10) 将砂岩试样轴向渗透压减小至 0.7 MPa, 重复步骤(9), 分别按顺序卸载轴向渗透压至 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1 MPa, 并记录相应的渗水量。

(11) 步骤(7)~(10)为试样的一个完整周期性渗透过程, 重复该过程, 按图 5(图中渗透压变幅为 0~0.9 MPa, 完全能覆盖水库蓄水前长江水位 90 m 至水库蓄水后正常蓄水位 175 m 之间的渗透压范围 0~0.85 MPa)所示的渗透压与时间的变化过程连续完成 8 个周期的渗透过程。

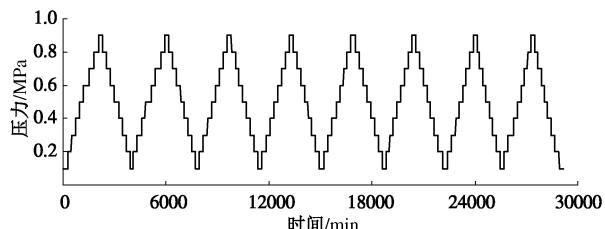


图 5 渗透压随时间变化过程线

Fig. 5 Curve of seepage pressure vs. time

2 试验结果及分析

试验过程中直接测量的物理量为渗水量, 渗水量是通过支承盛水烧杯的电子天平(梅特勒 AL204)测量烧杯质量的变化, 并经由数据采集程序换算得到。以测量获得的渗水量为依据, 通过计算, 可间接获得岩样的渗透速度和渗透系数。岩样在渗透过程中的累计渗水量、渗透速度和渗透系数随周期性渗透压变化的过程曲线见图 6~8。

2.1 试样累计渗水量随时间变化的规律

试验所有试样在 8 次周期性渗透过程中累计渗水量平均值与时间之间的关系曲线如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 试样在前 5 个渗透周期内每个周期结束时单周期内渗水量占总量的比例逐渐减小。其中, 第 1 次周期性渗透之后, 累计渗水量达到单周期最大值, 占总量的 33.95%; 第 2 个渗透周期结束时, 该周期内的渗水量占总渗水量的 13.70%; 而第 3 个渗透周期结

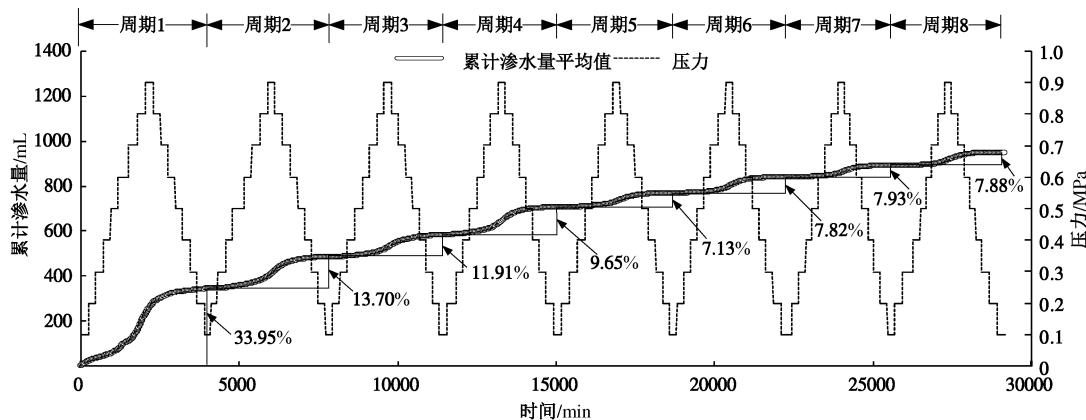


图 6 试样累计渗水量与时间的关系曲线

Fig. 6 Curve of cumulative volume of water infiltration vs. time

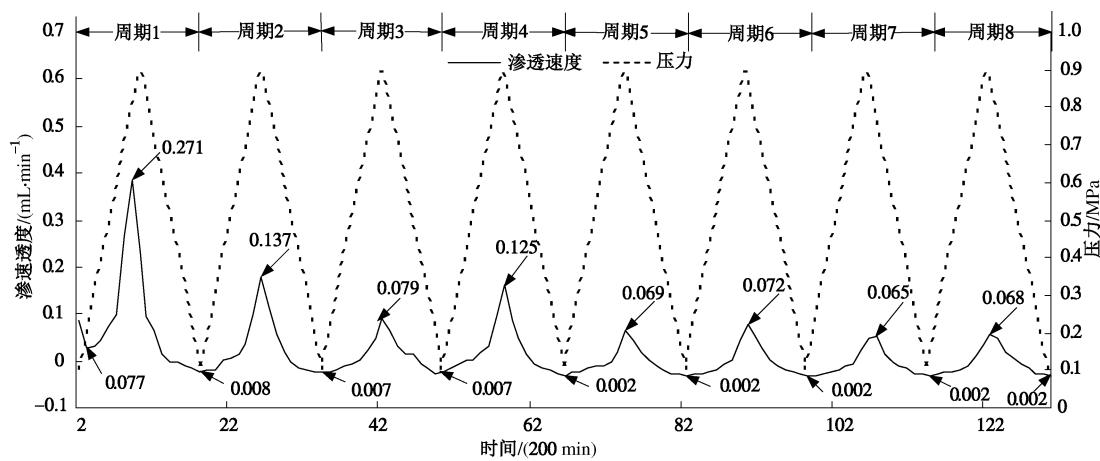


图 7 渗透速度与压力的关系曲线

Fig. 7 Curves of permeability coefficient vs. seepage pressure

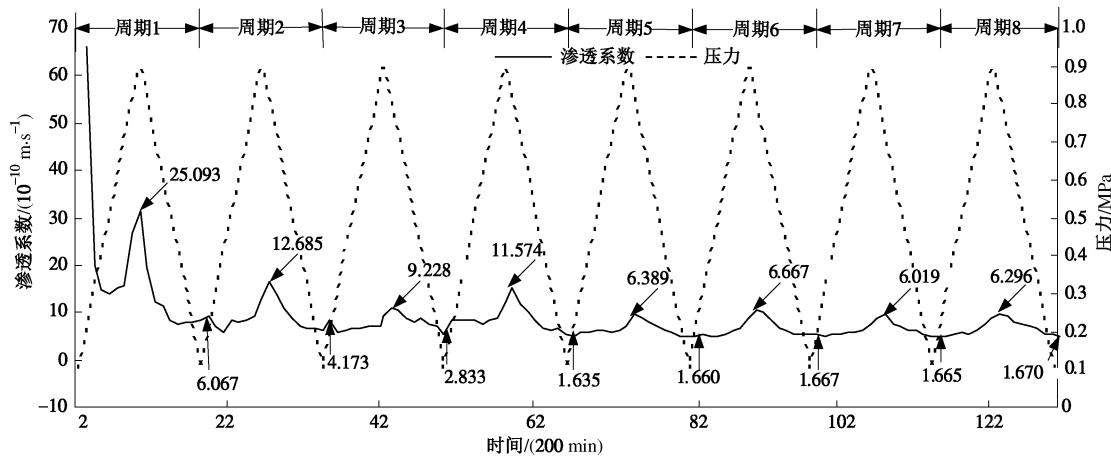


图 8 渗透系数与压力的关系曲线

Fig. 8 Curves of permeability coefficient vs. seepage pressure

束时, 该周期内的渗水量减少至总渗水量的 11.91%; 在第 4 个渗透周期结束时, 第 4 周期内渗水量只占总量的 9.65%。此后, 每个周期内的渗水量在每个周期结束时的变化幅度相差不大, 自第 5 个渗透周期起, 每次周期性渗透结束时单周期内的渗水量占总渗水量的比例分别为 7.13%, 7.82%, 7.93%, 7.88%, 这说

明第 4 次周期性渗透结束后砂岩试样的渗透性能已经逐渐趋于稳定。

2.2 试样渗透速度随压力变化的规律

试验所有试样在 8 次周期性渗透过程中渗透速度平均值与压力之间的关系曲线如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 试样在前 3 个渗透周期中, 渗透速度的最

大值都是逐渐减小的, 在第4次渗透过程中最大值相对前一次有所增长,但在后面的渗透过程中又减小了。其中, 第一次周期性渗透之后, 渗透速度的最大值和最小值分别是0.271, 0.008 mL/min; 第2个渗透周期之后, 渗透速度的最大值和最小值分别减小到0.137, 0.007 mL/min; 而第3个渗透周期过后, 渗透速度的最大值减小到0.079 mL/min, 渗透速度的最小值基本不变; 在第4个渗透周期结束时, 渗透速度的最大值和最小值分别是0.125, 0.002 mL/min, 最大值相对前一次在数值上增大了0.046 mL/min, 最小值则是减小了0.005 mL/min; 自第5个渗透周期起, 每次周期性渗透结束后, 渗透速度的最小值都在0.002 mL/min附近, 而渗透速度的最大值则在0.065~0.072 mL/min之间变化, 说明经历4次周期性渗透后, 砂岩试样渗透速度的最大值和最小值在每个周期的变化幅度相差不大, 并且变化趋势一致。

2.3 试样渗透系数随压力变化的规律

杨琼^[16]认为, 虽然在岩石试验的前期, 试样的渗水量与压力并不是线性增长的, 但是, 试样内的渗流稳定后, 在渗透水压力差保持稳定时, 渗水量与时间是线性增长的, 则可认为该时段内渗流符合达西定律。胡大伟等^[17]认为, 当岩样的渗透率大于10⁻¹⁶ m²时, 可视为稳定渗流。初期试验发现, 本试验中红砂岩的渗透率在10⁻¹⁰~10⁻⁶ m²范围内, 岩样透水性较好, 计算试样在不同压力下的渗透系数可采用达西定律计算:

$$K = \frac{Q\gamma L}{\Delta p A} , \quad (1)$$

式中, Q 为流量 (m³/s), γ 为流体重度 (kN/m³), L 为试样的长度 (m), Δp 为水头压力 (kPa), A 为试样的截面面积 (m²)。

根据计算结果可得到试样在8个渗透周期中渗透系数与压力之间的关系(见图8)。岩样的渗透系数在前4个渗透周期差别较大, 在第1个渗透周期结束时, 渗透系数的最大值与最小值分别为25.093×10⁻¹⁰, 6.067×10⁻¹⁰ m/s; 但经历第2次周期性渗透之后, 渗透系数的最大值与最小值分别为12.685×10⁻¹⁰, 4.173×10⁻¹⁰ m/s; 第3次周期性渗透之后的渗透系数的最大值与最小值继续减小至9.228×10⁻¹⁰, 2.833×10⁻¹⁰ m/s; 直到第4个渗透周期结束, 渗透系数的最大值在前一次的基础上有所增大, 变为11.574×10⁻¹⁰ m/s, 而渗透系数的最小值还是继续减小至1.635×10⁻¹⁰ m/s。此后, 随着周期性渗透次数的增加, 试样渗透系数的最大值在6.019×10⁻¹⁰~6.667×10⁻¹⁰ m/s之间变化, 渗透系数的最小值在第4

次周期性渗透之后就在1.670×10⁻¹⁰~1.635×10⁻¹⁰ m/s之间波动, 渗透系数的最大值与最小值的波动范围均很小, 且趋于稳定。

3 试验现象分析及机理探讨

在渗透压力作用下, 红砂岩内部松散颗粒等会被渗流水带出孔隙, 在每个渗透周期结束时烧杯底部都有岩样孔隙流出的碎屑。随着经历周期性渗透次数的增加, 岩样碎屑的流出量逐渐减少。在第1个循环周期结束时烧杯底部出现明显可见的红砂岩试样碎屑(图9), 第4次周期性渗透结束时烧杯底部残留的红砂岩岩样碎屑明显变少(图10)。

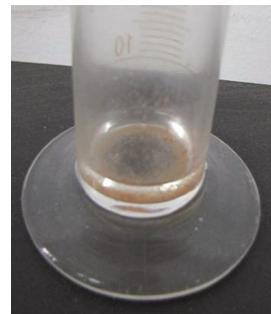


图9 第1次渗透结束时从岩样流出的碎屑

Fig. 9 Detritus from red sandstone samples after first penetration



图10 第4次渗透结束时从岩样流出的碎屑

Fig. 10 Detritus from red sandstone samples after fourth penetration

通过对每个渗透周期结束时从岩样(4个)流出的碎屑进行收集, 采用滤纸过滤后烘干, 称量其质量, 通过拟合获得从4个岩样流出的碎屑质量平均值随周期性渗透次数的变化关系曲线(见图11)。

从图11可以看出, 随着周期性渗透次数的增加, 从岩样流出的碎屑是逐渐减少的。在第1次周期性渗透结束时, 从岩样流出的碎屑质量平均值为0.45 g; 在第2次周期性渗透结束时, 从岩样中流出的碎屑质量平均值为0.42 g, 相对第1次周期性渗透结束时减少0.03 g; 第3次和第4次周期性渗透完成时, 从岩样中流出的碎屑质量明显减小, 它们的平均值分别为

0.17 g 和 0.08 g; 在第 5 次周期性渗透结束时, 从岩样中流出的碎屑质量为 0.05 g, 相对稳定的渗透通道已基本形成, 致使在第 5 个及后续周期性变化渗透压作用下红砂岩渗水量、渗透速度以及渗透系数在量值上的变化范围基本稳定。

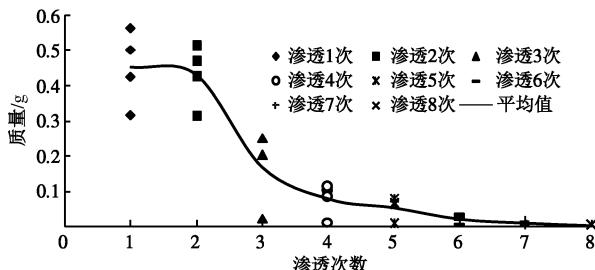


图 11 烧杯底部岩样碎屑质量与周期性渗透次数的关系

Fig. 11 Curves of detritus quality of samples in beaker vs. number of penetration cycles

综上所述, 红砂岩在初期 4 个周期性渗透压作用下, 红砂岩原始孔隙和矿物碎屑周围的胶结物(主要为黏土矿物)(见图 12)遇水后容易失去胶结能力^[18], 孔隙周围的矿物碎屑易在渗透力的作用下发生流动, 试件孔隙发生相对剧烈的调整, 促使周期性渗透压作用下红砂岩的累积渗水量、渗透速度和渗透系数变化范围较大; 当经历了 4 个周期性渗透压作用后, 原始孔隙周围的胶结物与水的作用基本趋于稳定, 新的相对稳定的渗透孔隙通道基本形成, 后续周期性渗透压作用下红砂岩的累积渗水量、渗透速度和渗透系数的变化范围较小且趋于稳定。

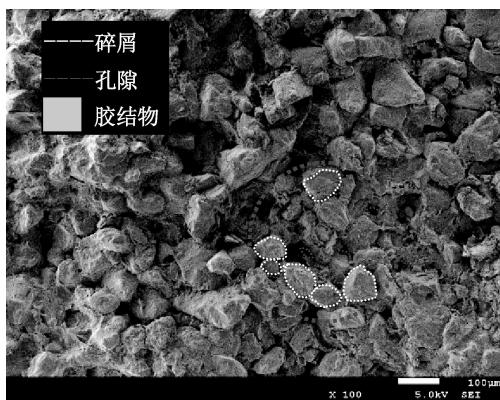


图 12 红砂岩岩样表面 SEM 图像 ($\times 100$ 倍)

Fig. 12 SEM microphotograph of surface of sandstone specimen (magnification of 100 times)

4 结 论

本文利用自主研发的“具有模拟库水位周期性变化环境下水压变化条件的渗透仪”对三峡水库岸坡侏罗系红砂岩试样施加 0.1 MPa—0.9 MPa—0.1 MPa 周

期性变化的渗透压作用, 研究防洪限制水位以下红砂岩渗透特性的变化规律, 得到以下 3 点结论。

(1) 随着周期性渗透压的变化, 红砂岩试件渗水量在第一个渗透周期增长最快, 而后逐渐减小; 随着周期性渗透压的变化, 红砂岩的渗透速度和渗透系数也呈周期性变化。在周期性渗透压作用下, 红砂岩试件在最初 4 个库水位变化周期内, 渗水量、渗透速度和渗透系数变化的范围较大; 但随着库水位周期性变化次数的增加, 其渗水量、渗透速度和渗透系数的变化较小, 且波动范围基本不变。

(2) 红砂岩在库水位周期性变化条件下, 孔隙周围的黏土胶结物在前面 4 个渗透周期内部分失去胶结能力, 孔隙间的部分矿物碎屑在周期性变化渗透力作用下被水带出, 促使红砂岩的渗透孔隙在前面 4 个渗透周期内出现相对剧烈调整, 而后逐渐趋于稳定。这是红砂岩在周期性渗透压作用下渗透特性发生上述规律性变化的根本原因。

(3) 防洪限制水位以下的红砂岩在经历 4 次周期性库水位变化之后, 其渗透特性逐渐趋于稳定。这表明由于三峡水库库水渗透引起该类岩石岸坡的破坏程度将随着水库运行周期次数的增加而逐渐降低, 并在经历 4 个水库运行周期后趋于稳定。

参 考 文 献:

- [1] 靳晓光, 李晓红, 张燕琼. 越江隧道施工过程的渗流—应力耦合分析[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(1): 62–67.
(JIN Xiao-guang, LI Xiao-hong, ZHANG Yan-qiong. Seepage-stress coupling analysis of river-crossing tunnel excavating[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(1): 62–67. (in Chinese))
- [2] 倪小东, 王媛, 陆宇光. 隧洞开挖过程中渗透破坏细观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 4194–4201. (NI Xiao-dong, WANG Yuan, LU Yu-guang. Study of meso-mechanism of seepage failure in tunnel excavation process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 4194–4201. (in Chinese))
- [3] 张世殊. 溪洛渡水电站坝基层内错动带现场渗透变形试验成果及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 537–539. (ZHANG Shi-shu. Results and analysis of in-situ seepage tests in fault zones of dam foundation rock-masses in xiluodu hydroelectric station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 537–539. (in Chinese))
- [4] 郭见扬. 防汛堤坝、坝基结构与渗透变形[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 674–678. (GUO Jian-yang.

- Percolation deformation related to structures of bank and bank foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, **17**(6): 674 - 678. (in Chinese))
- [5] 梁宁慧, 刘新荣, 陈建功, 等. 岩体渗透特性对边坡稳定性影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, **2**(6): 1003 - 1006. (LIANG Ning-hui, LIU Xin-rong, CHEN Jian-gong, et al. Numerical analysis of the rock seepage character for the influence of slope's stability[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, **2**(6): 1003 - 1006. (in Chinese))
- [6] 梁尧箎. 渗透水流对边坡稳定性的影响[J]. 水文地质工程地质, 1982(5): 26 - 28. (LIANG Yao-hu. The influence of seepage flow on the slope stability[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1982(5): 26 - 28. (in Chinese))
- [7] 张电吉, 白世伟. 渗透水压力对节理裂隙岩质边坡的影响 [J]. 西部探矿工程, 2003(2): 4 - 6. (ZHANG Dian-ji, BAI Shi-wei. Influence of seepage forces on fractured rock slope[J]. West-china Exploration Engineering, 2003(2): 4 - 6. (in Chinese))
- [8] 胡其志, 周辉, 肖本林, 等. 水力作用下顺层岩质边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(11): 3594 - 3598. (HU Qi-zhi, ZHOU Hui, XIAO Ben-lin, et al. Analysis of stability of rock bedded slope under hydraulic pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(11): 3594 - 3598. (in Chinese))
- [9] 盛金昌, 李凤滨, 姚德生, 等. 渗流—应力—化学耦合作用下岩石裂隙渗透特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(5): 1016 - 1025. (SHENG Jin-chang, LI Feng-bin, YAO De-sheng, et al. Experimental study of seepage properties in rocks fracture under coupled hydro-mechanochemical process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(5): 1016 - 1025. (in Chinese))
- [10] 郭玉龙. 渗流与应力耦合作用对边坡稳定性影响的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005. (GUO Yu-long. Study on the interaction of the coupling of seepage and stress to slope stability[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005. (in Chinese))
- [11] 朱珍德, 张爱军, 徐卫亚. 脆性岩石全应力 - 应变过程渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 2002, **23**(5): 555 - 558+563. (ZHU Zhen-de, ZHANG Ai-jun, XU Wei-ya. Experimental research on complete stress-strain process seepage characteristics of brittle rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(5): 555 - 558+563. (in Chinese))
- [12] 陈祖安, 伍向阳, 孙德明, 等. 砂岩渗透率随静压力变化的关系研究[J]. 岩石力学与工程学, 1995, **14**(2): 155 - 159. (CHEN Zuan, WU Xiang-yang, SUN De-ming, et al. Study on relationship between permeability of sandstone and hydrostatic pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, **14**(2): 155 - 159. (in Chinese))
- [13] 张彦洪, 柴军瑞. 水库水位升降影响下库岸裂隙岩体渗流特性分析[J]. 工程勘察, 2010(5): 26 - 30+73. (ZHANG Yan-hong, CHAI Jun-rui. Seepage features in bank fractured rock mass under the influence of reservoir upstream water level rising or drawdown[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010(5): 26 - 30+73. (in Chinese))
- [14] 文宝萍, 申健, 谭建民. 水在千将坪滑坡中的作用机理 [J]. 水文地质工程地质, 2008(3): 12 - 18. (WEN Bao-ping, SHEN Jian, TAN Jian-min. The influence of water on the occurrence of Qianjiangping landslide[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008(3): 12 - 18. (in Chinese))
- [15] SL 264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 2001. (SL 264—2001 Water resources and hydropower engineering rock testing procedures[S]. 2001. (in Chinese))
- [16] 杨琼. 低渗透砂岩渗流特性试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2004. (YANG Qiong. Experimental study on seepage characteristics of low permeability sandstone[D]. Beijing: 2004. (in Chinese))
- [17] 胡大伟, 周辉, 潘鹏志, 等. 砂岩三轴循环加卸载条件下的渗透率研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(9): 2749 - 2754. (HU Da-wei, ZHOU Hui, PAN Peng-zhi, et al. Study of permeability of sandstone in triaxial cyclic stress tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(9): 2749 - 2754. (in Chinese))
- [18] 柴波, 殷坤龙, 简文星, 等. 红层水岩作用特征及库岸失稳过程分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, **40**(4): 1092 - 1097. (CHAI Bo, YIN Kun-long, JIAN Wen-xing, et al. Analysis of water-rock interaction characteristics and bank slope failure process of red-bed[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, **40**(4): 1092 - 1097. (in Chinese))