

# 四川盆地红层水岩作用岩石弱化时效性研究

王运生, 吴俊峰, 魏 鹏, 王晓欣, 韩丽芳, 李月美, 马宏宇, 邵虹涛, 徐鸿彪

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘要:** 通过对四川地区 16 个水库采样点现场调查及所采集的岩石样品进行室内微观分析及软化系数测定, 红层岩石具有经历长时间浸泡后软化系数随年代逐渐变小的规律, 这种强度的降低是水库库水变幅带的“化学风化作用”及“浸泡软化作用”共同叠加的结果。试验结果表明, 红层经过 30~50 a 水库浸泡后, 泥岩的软化系数较目前设计部门给出的降低 10%~20%, 粉砂质泥岩浸泡后软化系数降低 15%左右, 低于泥岩降低幅度。

**关键词:** 岩石力学; 红层; 岩石弱化; 水岩作用; 时效性; 四川盆地

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)增 1 - 3102 - 07

## RESEARCH ON TIME EFFECT OF ROCK WEAKENING BY WATER-ROCK INTERACTION OF REDBEDS IN SICHUAN BASIN

WANG Yunsheng, WU Junfeng, WEI Peng, WANG Xiaoxin, HAN Lifang, LI Yuemei,  
MA Hongyu, SHAO Hongtao, XU Hongbiao

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology,  
Chengdu, Sichuan 610059, China)

**Abstract:** Through experiments on 16 sets of samples of red beds collected from 16 reservoirs, the law that the softening coefficients of long-term water-soaked redbeds decrease is obtained. Rock weakening is the result of long-term softening and weathering co-action in lower water level of the rock in the region between the highest and lower water levels. Analytical results show that the softening coefficient of mudstone can be reduced 10% - 20% after 30 - 50 years soaking compared with that obtained in laboratory, while the softening coefficient of silty mudstone can be reduced about 15% after 30 - 50 years soaking compared with that obtained in laboratory.

**Key words:** rock mechanics; redbeds; rock weakening; water-rock interaction; time effect; Sichuan Basin

## 1 引 言

红层是红色调为主的碎屑沉积岩地层, 在我国西南地区广泛分布。红层以泥岩、砂质泥岩及砂岩为主<sup>[1, 2]</sup>。水岩相互作用一般理解为水与岩体之间的物理作用和化学作用。库水位变幅带是边坡稳定

的敏感地带, 其中水对库区岩体的长期反复作用是影响该带边坡稳定的关键因素, 工程领域最为关注的就是水对泥岩及粉砂质泥岩的软化及泥化作用, 因为无论是软化还是泥化作用都能导致岩石强度的降低(弱化)。

水对泥岩的软化作用十分突出<sup>[3~9]</sup>, 一般情况下实验室获取的软化系数为 0.5<sup>[3]</sup>, 但在水中浸泡数

**收稿日期:** 2009 - 02 - 09; **修回日期:** 2009 - 03 - 09

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(40672174)

**作者简介:** 王运生(1960 -), 男, 博士, 1983 年毕业于成都地质学院找矿系区域地质普查及调查专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事工程地质等方面的教学与研究。E-mail: wangys60@163.com

十年后, 由于软化和泥化的双重作用, 泥岩软化系数(与通常所指的软化系数定义有一定区别)是否会进一步降低, 降低幅度有多大, 现在实验室常规求软化系数的试验无法回答这些问题, 因为这种作用是在一个相对开放的环境中进行的, 无论是时间还是风化过程在实验室都是无法做到的。本文通过从不同年代修建的水库水位变幅带(时有暴露, 水利工程中 3~5 月份为低水位期, 对水电站而言, 一般是 7~8 月份为低水位期)采集浸泡多年的岩样, 分别进行微观分析和单轴抗压强度试验, 获得相应的岩石结构及软化系数的变化。研究显示, 库岸水位变幅带红层软化作用与红层岩样在实验室浸泡弱化作用不仅透水条件及封闭条件不同, 更为重要的是, 库岸水位变幅带岩石强度的降低是浸泡软化与化学风化(泥化)二者共同作用的结果。这种弱化作用的试验结果对库水位变幅带边坡稳定性评价具有重要的参考价值。

## 2 采样点及其地质概况

采样集中在四川盆地已建或在建的水电及水利工程, 其中修建最早的水库已有近 70 a 的历史, 最新的仅 5 a, 空间上囊括了龙泉山地区、川东及川东北地区(见图 1)。

采样点的基本情况如下:

(1) 黑龙滩水库。该水库位于仁寿县城以西 16 km 的清水镇杨柳乡境内, 距成都市 68 km。1972 年 1 月蓄水, 至今已蓄水 36 a。库区岩性为侏罗系蓬莱镇组(J<sub>3p</sub>)的砖红色泥岩、粉砂质泥岩和粉砂岩以及白垩系灌口组(K<sub>2g</sub>)的紫红色钙质黏土岩夹薄层粉砂岩及砂质黏土岩。

(2) 三岔水库。该水库位于四川省沱江支流绵溪河上游简阳市的三岔镇, 于 1977 年 3 月蓄水, 至今已蓄水 31 a。库区岩性为蓬莱镇组(J<sub>3p</sub>)的砖红色

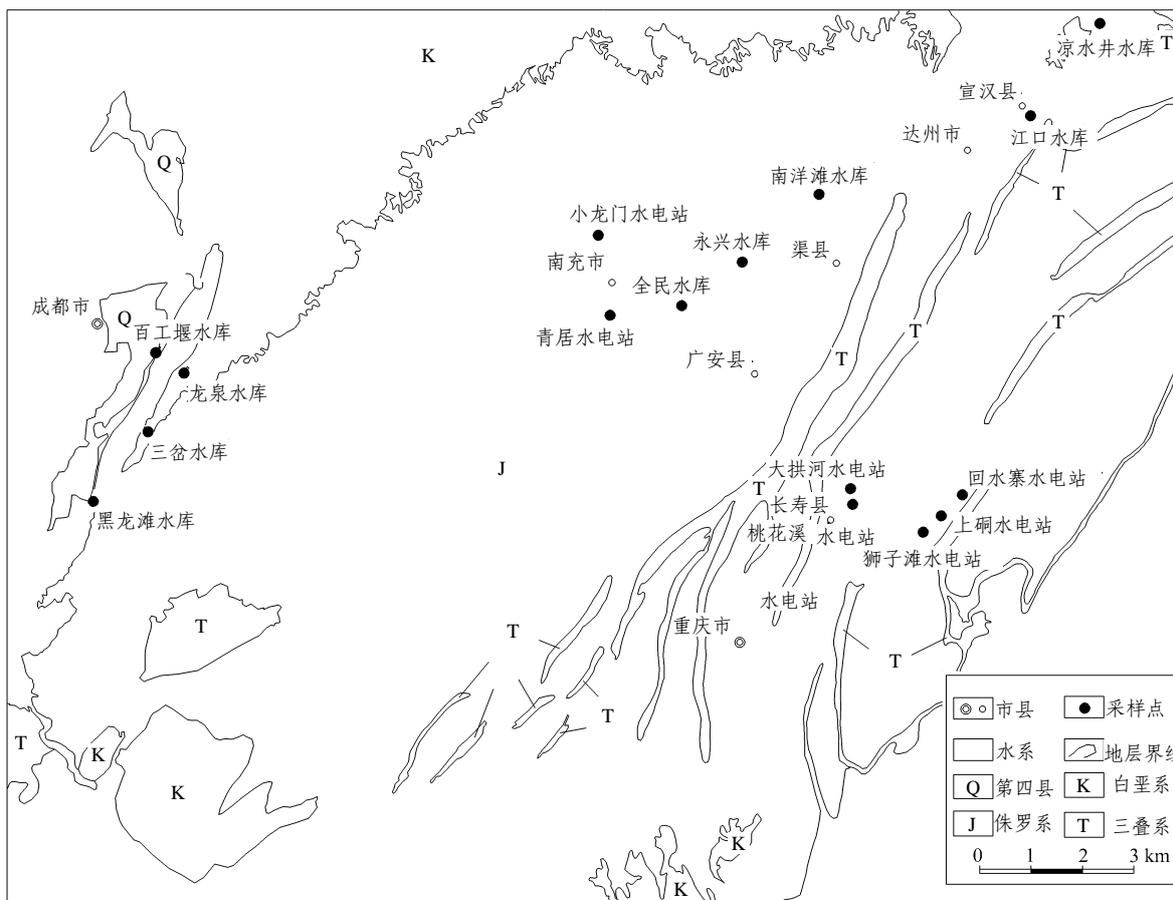


图 1 采样区地质简图

Fig.1 Simplified geological map of sampling region

泥岩、粉砂质泥岩和粉砂岩以及苍溪组(K<sub>1</sub>cx)的灰紫、灰绿色砂岩夹砖红色粉砂岩和泥岩。

(3) 百工堰水库。该水库位于龙泉镇百工堰村西江河支流的百工溪上, 于 1958 年蓄水, 距今已蓄水 50 a。库区岩性为苍溪组(K<sub>1</sub>cx)的灰紫、灰绿色砂岩夹砖红色粉砂岩和泥岩。

(4) 龙泉湖水库。该水库位于成都市城东龙泉山上的简阳市石盘镇, 距成都 37 km, 离简阳 28 km, 于 1979 年蓄水, 距今已蓄水 29 a。库区岩性为苍溪组(K<sub>1</sub>cx)的灰紫、灰绿色砂岩夹砖红色粉砂岩及泥岩。

(5) 大洪河水电站。该水电站位于重庆市长寿县西北部, 大洪河支流东河上, 坝址集水面积 1 317 km<sup>2</sup>, 于 1959 年底开始蓄水, 距今已蓄水 49 a。库区岩性为沙溪庙组砂岩及泥岩。

(6) 狮子滩水电站。位于龙溪河河口以上 25 km。于 1956 年蓄水发电, 距今已蓄水 52 a。库区岩性为沙溪庙组及蓬莱镇组紫红色泥岩及砂岩。

(7) 上碛电站。该电站为龙溪河阶梯水电站的第二级电站, 于 1954 年蓄水发电, 距今已蓄水 54 a。库区岩性为沙溪庙组砂岩及泥岩。

(8) 回龙寨电站。该电站为龙溪河阶梯水电站的第三级电站, 于 1958 年蓄水发电, 距今已蓄水 50 a。库区岩性为沙溪庙组砂岩及泥岩。

(9) 桃花溪电站。该电站位于重庆市长寿县境内的桃花溪上, 于 1938 年建成, 距今已蓄水 70 a。库区岩性为沙溪庙组砂岩及泥岩。

(10) 青居水电站。该电站位于南充市, 于 2003 年开始蓄水, 距今已蓄水 5 a, 为本次采样点中蓄水时间最短的一个水利水电工程。库区岩性为遂宁组的砖红色、紫红色、鲜紫红色泥岩, 偶夹粉砂岩, 上部夹透镜状细砂岩。

(11) 小龙门水电站。该水电站位于青居水电站附近, 目前在建设中, 该点的试验数据是在实验室常规条件下得出的软化系数。库区岩性为遂宁组的粉砂质泥岩夹砂岩以及上沙溪庙组的砂岩、泥岩互层。

(12) 全民水库。该水库位于广安区龙安镇, 于 1962 年蓄水, 距今已蓄水 46 a。库区岩性为上沙溪庙组的红色砂岩、泥岩。

(13) 永兴水库。该水库位于渠县, 蓄水时间为 1974 年, 距今已蓄水 34 a。库区岩性为上沙溪庙组的紫红色、暗紫红色, 富含粉砂质、钙质的泥岩。

(14) 南洋滩水库。该水库位于渠县巴河上, 于 1965 年蓄水, 距今已蓄水 43 a。库区岩性为遂宁组的泥岩、砂岩。

(15) 江口水库。该水库位于州河支流上, 于 1989 年蓄水, 距今已蓄水 19 a。库区岩性为蓬莱镇组的泥岩及粉砂岩。

(16) 凉水井水库。该水库位于州河支流上, 于 1979 年 2 月蓄水, 距今已蓄水 29 a。库区岩性为蓬莱镇组的泥岩及粉砂岩。

### 3 试验结果分析

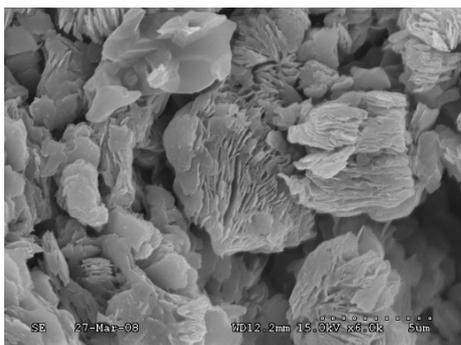
#### 3.1 岩石结构及成分的变化

本文对库水位以上未受库水浸泡的岩样及经库水长期浸泡的岩样分别进行了薄片鉴定, 并对部分软化明显的岩样进行了电镜扫描。结果显示, 岩石在与库水的长期作用下其成分、结构、构造均发生了一定的变化(见表 1)。

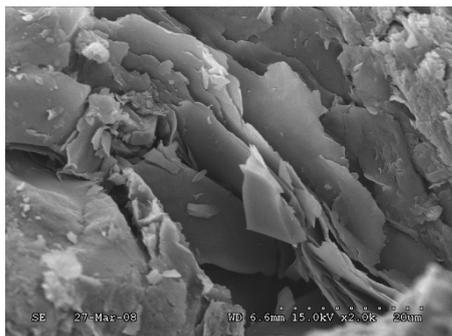
表 1 四川盆地红层水岩作用后成分及结构变化  
Table 1 Changes of composition and texture of red beds in Sichuan Basin after water-rock interaction

岩样类型	矿物成分	显微镜下观察对比
干样	高岭石、云母、石英等及自生矿物如方解石等	隐晶质致密块状, 以紫红色黏土矿物组成, 含少量石英、云母碎屑及碳酸盐组分。黏土矿物组成岩石主体, 以显微片状集合体无序散布, 正低突起, 干涉色为一级灰白色为主, 最高达黄红色, 主要由高岭石组成。石英碎屑含量 < 3%, 细粒、不等粒, 粒径为 0.02~0.05 mm, 无色透明, 干涉色一级灰白色, 波状消光强烈。云母含量约为 5%, 以细粒不规则为主, 干涉色最高达二级, 平行消光; 碳酸盐含量较多, 为 10% 左右, 细至微粒, 呈不规则团斑状集合体, 颗粒可见发育的解理和明显的闪突起, 结合手标本为方解石矿物组成。镜下定名为泥岩
湿样	高岭石、伊利石、方解石、石英	显微隐晶质片状及粒状结构, 块状构造, 岩石组分主要由黏土矿物和较多细粒方解石组成。黏土矿物含量 > 60%, 显微隐晶质纤维状集合体呈无序分布, 切片无色, 但都含少许细粒土状褐铁矿质点。粒间被细粒碳酸盐, 偶见微粒云母、石英充填, 碳酸盐常被褐铁矿呈不同程度浸染, 造成岩石宏观呈砖红色调, 镜下也相对较浑浊, 但黏土矿物大部分以无色透明为主, 低突起, 干涉色较低, 以一级最高达黄红色, 主要由水云母组成。碳酸盐主要由泥晶方解石组成, 围岩界线清晰, 切片近于无色透明, 含少许细粒土状杂质。镜下定名为泥岩

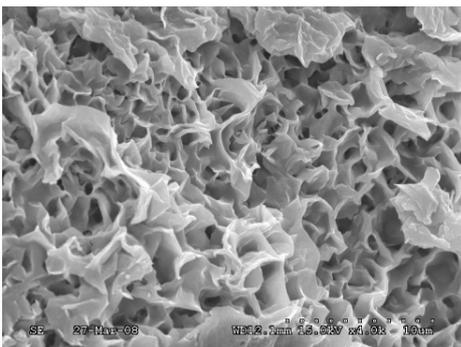
水岩作用后的岩样在电镜下观察时发现泥化现象相当明显。矿物以片状、花瓣状或蜂巢状为特色(见图 2), 与岸上干样粒状和片状结构形成鲜明的对比<sup>[10, 11]</sup>。



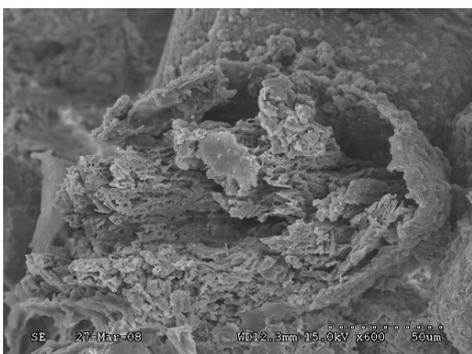
(a) 叠片状(每个颗粒均有多层相连组成, 颗粒间空隙较大)



(b) 分层片状(边-边相连, 结构较松散)



(c) 蜂窝状(空间结构明显, 空隙大, 稳定性差)



(d) 条形碎屑状(颗粒间空隙相对较小, 呈条形碎屑排列, 内部结构交松散)

图 2 水岩作用后泥岩电镜扫描照片

Fig.2 SEM photos of mudstone after water-rock interaction

### 3.2 岩石软化系数试验结果分析

无侧限单轴抗压强度试验在成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室的岩土力

学多功能仪上进行。采集的样品分为干样和湿样两种: 干样采集于库区最高水位线以上, 为未经库水浸泡的较新鲜岩样; 湿样采集于水位变幅带的岩石。分组试验的干样和湿样岩性相同。所采岩样为泥岩、粉砂质泥岩两种岩性。

实验室把岩石浸水饱和后强度明显减低的性质称为软化性, 用软化系数 ( $K_R$ ) 表示。其定义为岩石的饱和抗压强度  $R_{cw}$  与干燥抗压强度  $R_c$  的比值, 即

$$K_R = \frac{R_{cw}}{R_c}$$

下面分别对泥岩和粉砂质泥岩的软化系数试验结果进行分析。

#### (1) 泥岩软化系数试验结果分析

四川盆地红层泥岩软化系数试验结果见表 2。

表 2 四川盆地红层泥岩软化系数试验结果

Table 2 Experimental results of softening coefficients of mudstone from red beds in Sichuan Basin

采样点	饱和抗压强度 $R_{cw}/\text{MPa}$	干燥抗压强度 $R_c/\text{MPa}$	软化系数 $K_R$	蓄水年限 /a
桃花溪电站	2.550	7.260	0.350	70
上碛电站	4.390	12.200	0.360	54
狮子滩水电站	2.590	7.060	0.367	52
百工堰水库	1.054	4.640	0.227	50
回龙寨电站	3.120	5.860	0.532	50
大洪河水电站	0.770	1.980	0.389	49
南洋滩水库	3.340	7.100	0.477	43
黑龙滩水库	1.932	6.655	0.290	36
永兴水库	2.350	6.210	0.378	34
龙泉湖水库	2.653	7.090	0.374	29
凉水井水库	1.770	3.710	0.477	29
青居水电站	3.130	6.300	0.497	5
小龙门水电站	2.730	5.450	0.500	-

通过试验发现, 除小龙门水电站的泥岩未经过浸泡其软化系数为 0.500 外, 其他采样点的泥岩软化系数均小于 0.500, 软化系数最小的样品是在龙泉山地区百工堰水库中采取的浸泡时间长达 50 a 的表层泥岩(泥化程度高)样本, 仅为 0.227。绝大多数样品的软化系数与样品浸泡时间有较好的相关性(见图 3), 表明红层地区泥岩的水岩作用确实具有时效性, 泥岩在水中浸泡的时间越久远, 则软化系数越低, 并趋于一个渐近值。

百工堰水库、回龙寨电站、南洋滩水库和凉水

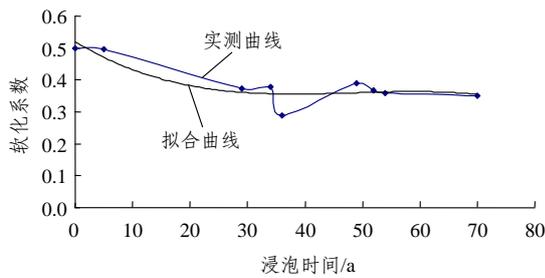


图3 泥岩浸泡时间与软化系数关系图

Fig.3 Relationship between soak period of mudstone and softening coefficient

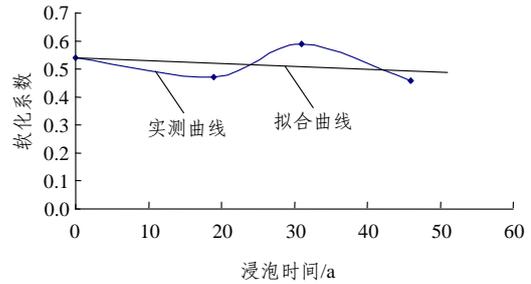


图4 粉砂质泥岩浸泡时间与软化系数关系

Fig.4 Relationship between soak period of silty mudstone and softening coefficient

井水库的软化系数值并没有参与图3的拟合，这是由于在百工堰水库采取的湿样较松散，整体性不好，其抗压强度偏小；回龙寨电站、南洋滩水库和凉水井采取的湿样位于水库的枯水水位线以下，岩石的封闭条件较好，因此其软化系数偏高。

(2) 粉砂质泥岩软化系数试验结果分析

四川盆地红层粉砂质泥岩软化系数试验得到的数据较少，见表3。

表3 四川盆地红层粉砂质泥岩软化系数试验结果

Table 3 Experimental results of softening coefficients of silty mudstone from red beds in Sichuan Basin

采样点	饱和抗压强度 $R_{cw}/\text{MPa}$	干燥抗压强度 $R_d/\text{MPa}$	软化系数 $K_R$	蓄水年限 /a
全民水库	4.890	10.700	0.457	46
江口水库	5.450	11.560	0.471	19
三岔水库	4.002	6.797	0.589	31
小龙门水电站	7.200	13.410	0.540	-

试验结果显示，三岔水库的粉砂质泥岩软化系数为0.589，具有较大的离散性。由于三岔水库所采岩样是紫灰色钙质粉砂质泥岩，胶结程度好，遇水不易分散，因此软化系数较高，与其他采样点岩样存在明显差异。粉砂质泥岩软化系数最小的样品是采于川东北地区的全民水库，其浸泡时间长达46 a，软化系数为0.457。试验结果表明，红层地区粉砂质泥岩的水岩作用也具有时效性，岩样在水中浸泡的时间越久远，其软化系数越低。岩样的软化系数与浸泡时间也具有较明显的相关性(见图4)。

从图3和4可以直观地看出，随着浸泡时间的增加，泥岩及粉砂质泥岩软化系数总体上呈减小并且呈逐渐收敛的趋势，但泥岩软化系数减小的速

率明显大于粉砂质泥岩。由图中的拟合趋势线可以推测出四川盆地红层地区泥岩及粉砂质泥岩在浸泡若干年后的软化系数：泥岩在浸泡100 a后其软化系数降低幅度可达30%，而粉砂质泥岩软化系数降低幅度可达18%。由于岩石成分在各采样点存在着一定的差异，库水环境也不尽相同，每年各采样点水位变幅带暴露时间差异等造成样品试验结果有一定的离散型，但这不影响软化系数降低的总体趋势。

#### 4 水岩作用时效性分析

红层岩体矿物成分多以片状黏土矿物为主，且以泥质成分胶结，故其强度低，遇水易分解。水与红层长期接触，会逐渐渗入岩体空隙并破坏颗粒间原有的连接，使结构间的作用力减弱，强度迅速降低，岩石被弱化，如果岩石颗粒中含有易溶于水的成份，则更加促进了软化作用<sup>[7]</sup>，白垩纪红色泥岩中含有细小的膏盐晶体，软化作用明显高于侏罗纪泥岩。周翠英等<sup>[12~15]</sup>认为，软岩的软化机制包括：黏土矿物吸水膨胀与崩解机制、离子交换吸附作用、易溶性矿物溶解与矿物生成、软岩与水作用的微观力学作用机制以及软岩软化的非线性化学动力学机制等，几种机制综合作用导致软岩力学性质降低。这些软化作用机制在四川红层软岩与水长期作用中均不同程度存在。但与实验室水岩作用试验一大明显差异是水库水位变幅带化学风化作用占有较大比重，因为在水库蓄水过程中，由于高低水位的交替，浸泡在水中的岩石在水库低水位时暴露于空气中，空气营力作用和氧化作用会使岩石表面的风化程度加剧<sup>[8, 9]</sup>，并改变岩石的矿物组成或结

构。随着风化程度的加深, 岩石的空隙率也随之增大, 高水位时库水会更容易渗入岩体内部。需要说明的是, 即使在暴露期间, 库水位变幅带岩石风化作用仍然与水有密切关系, 调查中发现库水位变幅带岩石基本呈潮湿状态。这种反复作用会使破碎岩石中的颗粒分散, 含水量增大, 进而使岩石处于塑性状态, 强度降低。总之, 本次试验所测的岩石强度的降低是红层软化(以物理作用为主)和泥化(化学作用)共同作用的结果, 较好地反映了实际工程环境水岩作用岩石的弱化效应, 试验结果正是库岸岩体稳定性评价所需的关键性参数。结合前人实验室研究成果, 蓄水初期水岩物理软化作用明显, 蓄水 1 a 以后, 化学风化作用逐渐占主导地位, 而且这种作用随时间具有累加效应, 因此, 同种岩性随蓄水时间的增加软化系数降低<sup>[5]</sup>的结论从软化机制上来讲是有依据的。

本次试验另一收获是泥岩和粉砂质泥岩两种岩性软化速率不同, 粉砂质泥岩浸泡后降低幅度低于泥岩。

## 5 结论与建议

通过四川盆地红层地区库水位变幅带泥岩及粉砂质泥岩长期浸泡后软化系数试验, 获得如下几点认识:

(1) 水库水位变幅带长期水岩作用效应是浸泡软化及低水位暴露风化双重作用的结果, 岩石结构及成份均发生不同程度变化, 泥化作用明显, 比普通实验室测得的软化机制要复杂得多。

(2) 软化系数试验结果表明, 库水位变幅带泥岩经 30~50 a 浸泡后软化系数降低幅度为 10%~20%。

(3) 粉砂质泥岩试验组数较少, 软化系数降低幅度为 12%~16%, 比泥岩软化系数降低幅度小。

(4) 从总体来看, 实测数据较实验室在岩样饱水状态下试验得出的软化系数低, 而且随着岩样浸泡时间的增加, 软化系数呈降低并收敛的趋势, 说明水岩作用具有时效性。

尽管各水库水位变化存在差异, 但总体差异不会太大, 依据水库真实环境测得的由多因素共同作用的岩石弱化效应对红层地区水电站定期安全检查

具有重要参考价值。水库库区边坡稳定性验算时采用的软化系数, 不应按设计提出的实验室软化系数进行计算, 而应使用考虑了红层水岩相互作用时效性的软化系数。当边坡稳定不符合设计要求时, 应积极采取加固措施, 防患于未然。

## 参考文献(References):

- [1] 彭 华, 吴志才. 关于红层特点及分布规律的初步探讨[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(5): 109 - 113.(PENG Hua, WU Zhicai. A preliminary study on the characteristics and the distribution of red beds[J]. Acta Scientiarum Naturailium Universitatis Sunyatseni, 2003, 42(5): 109 - 113.(in Chinese))
- [2] 程 强, 寇小兵, 黄绍槟, 等. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 34 - 40.(CHENG Qiang, KOU Xiaobing, HUANG Shaobin, et al. The distributions and geologic environment characteristics of red beds in China[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(1): 34 - 40.(in Chinese))
- [3] 吉随旺, 宋广润, 邓荣贵, 等. 川中红色砂泥岩岩石力学特性研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(1): 72 - 75, 78.(JI Suiwang, SONG Guangrun, DENG Rongui, et al. On the rock mechanical properties of mudstones and sandstones in the middle part of Sichuan red basin[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2000, 11(1): 72 - 75, 78.(in Chinese))
- [4] 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. Research on the water-rock interaction and its environmental effects in reservoir areas[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1997, 8(1): 69 - 88.(in Chinese))
- [5] 张永安, 李 峰, 陈 军. 红层泥岩水岩作用特征研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(1): 22 - 26.(ZHANG Yong'an, LI Feng, CHEN Jun. Analysis of the interaction between mudstone and water[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(1): 22 - 26.(in Chinese))
- [6] 王思敬, 马凤山, 杜永康. 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 Yongkang. On the rock-water interaction in reservoir areas and its geoenvironmental effect[J]. Journal of Engineering Geology, 1996, 4(3): 1 - 9.(in Chinese))
- [7] 孔德坊. 工程岩土学[M]. 北京: 地质出版社, 1992.(KONG Defang.

- Rock and soil engineering[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.(in Chinese))
- [8] 徐红梅, 侯龙清, 罗嗣海. 红层工程性质指标相关性研究[J]. 东华理工学院学报, 2005, 28(1): 43 - 47.(XU Hongmei, HOU Longqing, LUO Sihai. Research on regression equation of red beds engineering property indexes[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2005, 28(1): 43 - 47.(in Chinese))
- [9] 吴益平, 余宏明, 胡艳新. 巴东新城区紫红色泥岩工程地质性质研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1 201 - 1 203, 1 208.(WU Yiping, YU Hongming, HU Yanxin. Research on engineering geological characters of aubergine mudstone of Badong new city zone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1 201 - 1 203, 1 208.(in Chinese))
- [10] 张述兴, 王昌贤. 黏土岩微结构研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(4): 614 - 617.(ZHANG Shuxing, WANG Changxian. Research on microstructure of clay stone[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2008, 27(4): 614 - 617.(in Chinese))
- [11] 周翠英, 邓毅梅, 谭祥韶, 等. 软岩在饱水过程中微观结构变化规律研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(4): 98 - 102.(ZHOU Cuiying, DENG Yimei, TAN Xiangshao, et al. Research on the variation regularities of microstructures in the test of interaction between soft rocks and water[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universities Sunyatseni, 2003, 42(4): 98 - 102.(in Chinese))
- [12] 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 Cuiying, DENG Yimei, TAN Xiangshao, 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))
- [13] 谭罗荣. 关于黏土岩崩解、泥化机制的讨论[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 1 - 5.(TAN Luorong. Discussion on mechanism of disintegration and argillitization of clay-rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1): 1 - 5.(in Chinese))
- [14] 成永刚. 边坡失稳的水岩相互作用机制分析[J]. 路基工程, 2006, (1): 3 - 5.(CHENG Yonggang. Mechanism analysis of water-rock interaction for slope failure[J]. Subgrade Engineering, 2006, (1): 3 - 5.(in Chinese))
- [15] 刘长武, 陆士良. 泥岩遇水崩解软化机制的研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 28 - 31.(LIU Changwu, LU Shiliang. Research on mechanism of mudstone degradation and softening in water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(1): 28 - 31.(in Chinese))