

文章编号: 1000-7598 (2009) 03-0613-05

水-岩相互作用对库岸边坡稳定的影响研究

刘新荣, 傅 晏, 王永新, 黄林伟, 秦晓英

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 在三峡水库运营后, 将按计划进行周期蓄、排水。对于构成库岸边坡的岩体来说, 将受到库水“饱水-风干”水-岩循环作用造成的岩性劣化, 进而对坡体稳定性构成严重危害。以砂岩为代表岩体, 通过试验模拟了库岸边坡岩体在库水涨落情况下水-岩作用的过程, 得出了砂岩受库水“饱水-风干”水-岩循环作用后抗剪强度的劣化规律。结合试验结果, 运用 FLAC 进行了水-岩循环作用下岸坡稳定性的数值模拟, 为库岸边坡的稳定性分析提供了有益的依据。

关 键 词: 水-岩作用; 岩性劣化; FLAC; 库岸边坡

中图分类号: TU 443; TB 115

文献标识码: A

Stability of reservoir bank slope under water-rock interaction

LIU Xin-rong, FU Yan, WANG Yong-xin, HUANG Lin-wei, QIN Xiao-ying

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Periodic impoundment and drainage of the reservoir water will be implemented as planned after the Three Gorges Reservoir operation. The rock masses which constitute the reservoir bank will have lithology deterioration under “saturated water-air drying” water-rock circulation function, which will further constitute a great damage on bank stability. An experiment models the process of water-rock interaction on reservoir bank under reservoir water fluctuation with sand rock as a representative. And the result of the experiment is applied to numerical stimulation of the stability of reservoir bank under water-rock interaction with FLAC. The deterioration rule of sand rock's shear strength under “saturated water-air drying” water-rock interaction of reservoir water is concluded, which provides a favorable evidence for the bank stability analysis.

Key words: water-rock interaction; lithology deterioration; FLAC; reservoir bank slope

1 引 言

水-岩相互作用 (Water-Rock Interaction, 简称 WRI) 这一术语由水文地球化学学科的奠基人之一、前苏联 A. M. Овчинников 于 20 世纪 50 年代提出。WRI 研究主要有两个主要分支: 一支侧重水化学研究, 另一支侧重水动力学研究。岩体周期饱水-风干造成岩性劣化的过程是一个效应累积的水-岩作用损伤过程。国内外在有关水化学损伤方面以及循环荷载作用下岩石疲劳变形损伤破坏方面已有不少的研究成果^[1-7], 但对有关岩体在 (库) 水“饱水-风干”循环作用下的岩石物理力学性质劣化状况的研究并不多见。三峡工程竣工后, 库水每年都将按“冬蓄夏洪”的调度计划在 145 m 的防洪水位和 175 m 的蓄水发电水位之间或缓慢或快速的升降。库区水

位的涨落, 使岸坡部分岩土体处于饱和和疏干的交替动态, “饱水-风干”水-岩循环作用将造成岩性劣化, 从而影响到库岸边坡的稳定性。本文以三峡库区砂岩为代表岩石设计了“饱水-风干”水-岩循环试验, 通过试验得出砂岩 (黏聚力 c 、内摩擦角 φ) 的变化规律, 并将此规律应用到岸坡稳定性分析上, 揭示了水-岩循环作用对岸坡稳定性的影响及库岸改造的规律。

2 试验设计及结果

2.1 试验设计

结合库区岸坡岩组情况, 砂岩在岸坡岩组中占较大比重, 故本试验选定砂岩为代表岩石进行试验研究。岩样采自三峡库区某库岸边坡, 采取的岩样位于表层下 3.4 m 左右, 系中风化砂岩。试验的目

收稿日期: 2008-03-03

基金项目: 国家留学回国人员科研启动基金重点项目 (教外司留[2002]247 号); 教育部“新世纪优秀人才支持计划” (No. NCET-05-0763); 国家自然科学基金创新群体基金 (No. 50621403)。

第一作者简介: 刘新荣, 男, 1969 年生, 博士, 教授, 博导, 主要从事岩土工程、隧道与地下空间工程教学科研工作。

的是得到砂岩黏聚力 c 、内摩擦角 φ 在水-岩作用下的变化规律。

岩样为圆柱体, 尺寸为: 直径 $D=50\text{ mm}$, 高 $H=150\text{ mm}$ 。以 3~5 个试件为一组。经不同次“饱水-风干”作用过程后, 用 INSTRON 电液伺服三轴压力机对分组试件的力学参数 (σ_1 、 σ_3) 进行测定。考虑库岸边坡岩体的实际工程环境, 饱水采用自由浸水饱和法。先将试件竖直置放于饱和缸中, 第一次加水至 $1/4 H$ 高度, 以后每隔 2 h 加水至 $1/2 H$ 和 $3/4 H$ 高度, 6 h 后试件全部淹没于水中。48 h 后取出, 此时试件已经完全饱和。然后将试件置于烘箱中, 将温度保持在 60°C 不变, 开启除湿干燥风机, 48 h 后取出, 测定试件的含水率基本趋于 0。这就是试验设计的一个“饱水-风干”作用过程^[8]。

2.2 试验结果及分析

21 组试件的试验结果如表 1 所示, 根据“莫尔-库仑”准则, 通过所测的 σ_1 和 σ_3 , 可以求出相应的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。

表 1 试验数据结果
Table 1 Data results of experiment

试件分组	压前特征描述	σ_1 / MPa	σ_3 / MPa	φ / ($^\circ$)	c / MPa
I	1 组	128.01	10	42.97	16.36
	2 组	180.83	20		
	3 组	233.65	30		
II	4 组	104.17	10	39.39	14.05
	5 组	148.90	20		
	6 组	193.63	30		
III	7 组	96.65	10	38.37	13.04
	8 组	139.38	20		
	9 组	182.11	30		
IV	10 组	86.69	10	36.57	11.88
	11 组	126.17	20		
	12 组	165.65	30		
V	13 组	78.39	10	35.25	10.64
	14 组	115.69	20		
	15 组	152.99	30		
VI	16 组	69.41	10	32.15	10.03
	17 组	102.16	20		
	18 组	134.91	30		
VII	19 组	61.86	10	29.90	9.35
	20 组	91.74	20		
	21 组	121.62	30		

注: 大组编号为罗马数字, 小组编号为阿拉伯数字 (每组包含 3~5 个试件), σ_1 、 σ_3 值为一小组试件的平均值。

试验结果表明, “饱水-风干”水-岩循环作用对砂岩的力学性质产生了比较明显的影响。为了更直观的揭示水-岩循环作用的影响规律, 故对试验所得

数据进行数值拟合。从岩石风化的角度上看, 当“饱水-风干”作用若干次 (即 $N \rightarrow \infty$) 之后, 黏聚力应为 0 (即完全风化为砂), 内摩擦角 φ 应非常小, 但不能为 0。因此, 为了反映出以上两个特点, 根据最小二乘法拟合的公式如下:

$$c = c_0 - 1.666 \cdot 5 \ln(N+1) \quad (1)$$

$$\varphi = (0.492 e^{-0.0416N} + 0.508) \varphi_0 \quad (2)$$

式中: N 为“饱和-风干”水-岩循环作用次数; c_0 为未经“饱和-风干”循环作用的含水饱和砂岩的黏聚力; φ_0 为未经“饱和-风干”循环作用的含水饱和砂岩的内摩擦角; c 为经 N 次“饱和-风干”循环作用后的含水饱和砂岩的黏聚力; φ 为经 N 次“饱和-风干”循环作用后的含水饱和砂岩的内摩擦角。

3 数值模拟及分析

目前, 水对岸坡的稳定性影响分析主要是考虑水的力学作用^[9-14], 而对材料本身的弱化考虑较少。由以上试验结果可知, 砂岩 (黏聚力 c 、内摩擦角 φ) 的变化必然会影响库岸边坡的稳定性。为此, 选取一典型均质岸坡模型进行水-岩作用分析, 以直观地反映出涨落的库水对岸坡稳定性的影响及再造的过程。计算模型定义了两组材料, 一组为 *rockslope*, 即不会受到库水水-岩循环作用的岩体, 其材料性质固定不变; 一组为 *interlayer*, 即受到库水水-岩循环作用的岩体, 其材料性质随水-岩循环作用次数的改变而改变。分析软件采用 FLAC, 由软件自动考虑库水的渗流及与岩石的流-固耦合作用, 本构模型采用摩尔-库仑模型, 通过 FISH 函数控制 *interlayer* 组岩石 (黏聚力 c 、内摩擦角 φ) 的改变。模型参数如表 2 所示, 计算模型如图 1 所示, 分析流程如图 2 所示, 塑性区开展如图 3 所示。

表 2 FLAC 基本计算参数表
Table 2 Basic parameters for calculating FLAC

杨氏模量 E / MPa	泊松比 ν	体积模量 K / MPa	剪切模量 G / MPa	岩石自然密度 ρ / (kg/m^3)	岩石饱和密度 ρ_w / (kg/m^3)
5 800	0.23	3 580	2 360	2 600	2 800

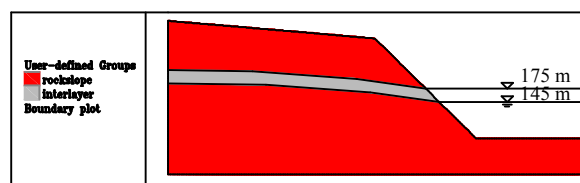


图 1 计算模型简图

Fig.1 Graph of calculating model

数值分析结果表明, 砂岩岸坡经历 2 837 次水-岩循环作用后, c 值按式 (1) 从 14.05 MPa 降至 0.8 MPa, φ 值按式 (2) 从 39.39° 降至 20.01°, 在 interlayer 组材料的最左端开始出现剪切塑性区, 并随着黏聚力 c 的变化不断向右开展延伸, 在黏聚力 c 降至 0.08 MPa 时, 剪切塑性区几乎贯通, 并开始出现拉塑性区, 剪切塑性区和拉塑性区不断开展, 最终导致在砂岩经历 4 477 次水-岩循环作用后, $c = 0.04$ MPa 时边坡破坏, 并发生应力重分布。意即对于完整砂岩边坡, 按照库水循环一次/年的频率, 需要 2 837 年, 岸坡才开始出现塑性区, 需要 4 477 年, 岸坡发生破坏。

由图 5 图可知, 水-岩循环作用下, 边坡塑性区的变化反映了整个边坡破坏是一个损伤累积并扩大发展直至破坏的渐变过程。这也正是水-岩循环作用劣化坡体岩性, 从而造成边坡破坏的一个过程。图 (图 5(f)) 所示, 边坡坡肩处已经出现大幅受拉塑性区, 并开始滑动, 坡肩滑动后, 剪切塑性区又将再从边坡的最左端开始开展, 直到贯通为止, 库水不断剥蚀坡肩, 如此循环, 即为库水对均质岸坡的自然改造过程。

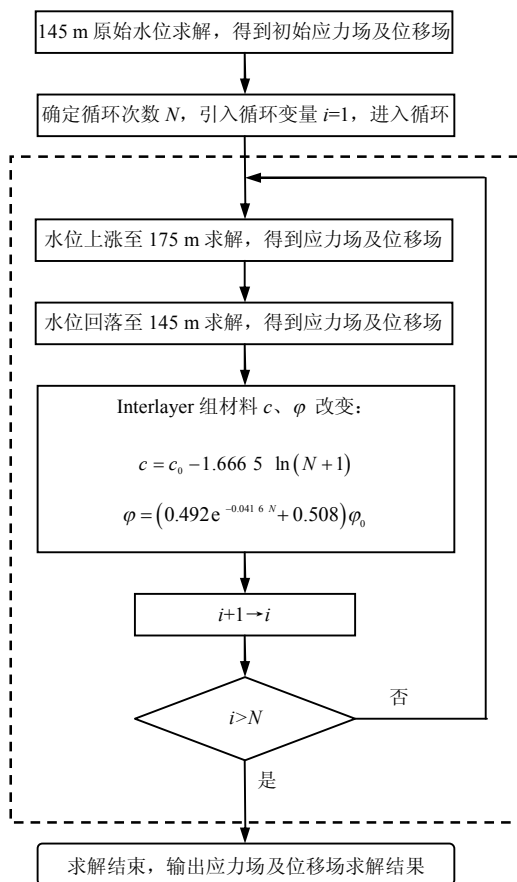


图 2 FLAC 分析流程图

Fig.2 Analytical flow chart of FLAC

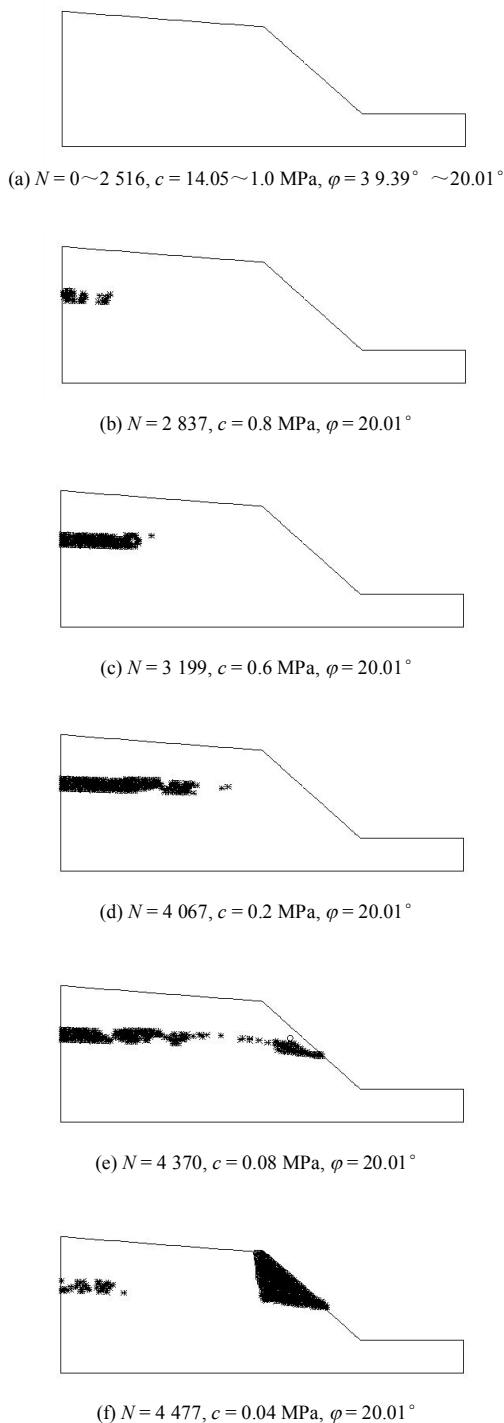


图 3 塑性区开展图

Fig.3 Graph of plastic zone

4 结 论

(1) 通过室内试验, 得到不同频次下“饱水-风干”水-岩循环作用对砂岩力学性质改变的规律, 主要反映在砂岩黏聚力和内摩擦角的不断下降, 库区消落带岩土材料性质不断劣化等方面, 进而影响库岸边坡的稳定性。

(2) 由试验得到的砂岩黏聚力和内摩擦角下降规律, 结合岩土体风化的特点, 用最小二乘法拟合

出水-岩循环作用下,砂岩黏聚力 c 和内摩擦角 φ 随循环次数 N 变化的曲线公式: $c=c_0-\alpha\ln(N+1)$ 、 $\varphi=(\beta e^{-\gamma N}+\lambda)\varphi_0$ (其中, α 、 β 、 γ 、 λ 为通过试验测定的常数)。该公式不但可以应用在砂岩强度参数变化上,还可应用在库区其他岩石上,只需通过试验测定公式中的待定常数即可。需要特别指出的是,以上公式是通过15次水-岩循环作用下拟合得到的,可以作为静水循环作用下岩性劣化规律的借鉴和探讨。但对于库水长期作用(成千上万次循环)仍需做好定期的岸坡勘察监测工作,因为库水对岸坡的长期作用已经不仅仅表现在弱化其物理力学性质,更多的表现为综合性影响(物理、化学、力学、热的耦合作用)。

(3) 根据砂岩黏聚力、内摩擦角的下降规律,结合数值分析软件对某库岸边坡进行了稳定性分析,数值模拟结果表明,均质砂岩边坡需要经历数千次水-岩循环作用才开始出现塑性区,直至破坏。塑性区开展图反映出水-岩循环作用造成的库岸边坡破坏是一个渐进过程。数值模拟仅仅是对室内试验结果的一个直观反映和应用探讨,要将式(1)和式(2)用于实际边坡工程中仍需谨慎。

(4) 均质砂岩边坡受水-岩循环作用影响小主要是因为中风化砂岩初始(c 和 φ)较高,并且在室内试验中考虑的水-岩作用影响因素仅仅是静水循环。然而,岸坡岩体本身存在大量裂隙面及软弱夹层,这些裂隙面和软弱夹层又可能处于库水升降影响的区域,其物理力学性质远不及中风化砂岩,而且在自然环境中的影响因素复杂多变,那么库岸边坡受库水水-岩循环作用的影响将更加显著,其稳定性的下降将加快。

(5) 随着三峡库区库水的不断上涨,库区消落带的岸坡稳定性问题越来越值得关注。应该加强水-岩循环作用机制的研究,进行不同类型岩石在不同条件下的水-岩循环作用试验,以得到相应的试验参数,从而能够更好地为滑坡防治工作提供科学借鉴和依据。

参考文献

- [1] 汤连生, 张鹏程. 水化学损伤对岩石弹性模量的影响[J]. 中山大学学报, 2000, 39(5): 126—128.
TANG Lian-sheng, ZHANG Peng-cheng. Influence of chemical damage of water on elastic modulus of rocks[J]. *ACTA Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2000, 39(5): 126—128.
- [2] 汤连生, 王思敬. 水-岩化学作用对岩体变形破坏力学

效应研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, 14(5): 433—439.

TANG Lian-sheng, WANG Si-jing. Progress in the study on mechanical effect of the chemical action of water-rock on deformation and failure of rocks[J]. *Advances in Earth Sciences*, 1999, 14(5): 433—439.

- [3] 汤连生. 水-岩土反应的力学与环境效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 681—68.

TANG Lian-sheng. Mechanical and environmental effects of interaction between water and rock or soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(5): 681—68.

- [4] 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.

- [5] 葛修润, 蒋宇, 卢允德, 等. 周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1581—1585.

GE Xiu-run, JIANG Yu, LU Yun-de, et al. Testing study on fatigue deformation law of rock under cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(10): 1581—1585.

- [6] 席道瑛, 刘云平, 刘小燕, 等. 疲劳荷载对岩石物理力学性质的影响[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 292—295.

XI Dao-ying, LIU Yun-ping, LIU Xiao-yan, et al. Influence of fatigue loading on physical mechanical characteristics of rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(3): 292—295.

- [7] 王国民. 软质粉砂岩变形与强度的试验分析[J]. 岩土力学, 2000, 20(4): 340—342.

WANG Guo-min. Experimental study on deformability and strength of soft siltstone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 20(4): 340—342.

- [8] GB/T 50266—99 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.

- [9] 程强, 周永江, 黄绍槟. 近水平红层开挖边坡变形破坏特征[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1311—1314.
CHENG Qiang, ZHOU Yong-jiang, HUANG Shao-bin. Distortion and failure character of excavation slope in approximate level red beds[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(8): 1311—1314.
- [10] 王汉辉, 王均星, 王开治. 边坡稳定的有限元塑性极限分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 733—738.
WANG Han-hui, WANG Jun-xing, WANG Kai-zhi. Plastic limit analysis of slope stability using finite element[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(5): 733—738.
- [11] 王均星, 李泽, 陈炜. 考虑孔隙水压力的土坡稳定性的有限元下限分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1258—1262.
WANG Jun-xing, LI Ze, CHEN Wei. Lower bound analysis of soil slope stability using finite elements subjected to pore water pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(8): 1258—1262.
- [12] NGUYEN T S, BOGESSON L, CHIJIMATSU M, et al. Hydro-mechanical response of a fractured granitic rock mass to excavation of a test pit-the Karnaishi Mine experiment in Japan[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38: 79—94.
- [13] REJED B D. Hydromechanical effects of shaft sinking at the Sella fields sites[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38: 17—29.
- [14] INDRAJITNA P G, RANJITH G W. Single phase water flow through rock fractures[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 1999, 17: 211—240.