

文章编号: 1673-9469 (2018) 04-0060-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.04.013

库水位周期波动对抗滑桩加固效果影响研究

刘世杰, 苏生瑞, 黄 璜, 李 鹏

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 以安康水库东岸马家坡滑坡为研究对象, 采用现场调查、室内试验、数值模拟等方法, 对比分析了岩土体物理力学性质在不同饱水-失水循环次数下的劣化趋势, 验证支护设计的合理性及安全性, 研究水库水位周期性波动对于抗滑桩加固效果的影响。得出主要结论如下: (1) 滑体及滑带的主要成分即强风化千枚岩在饱水-失水循环条件下, 物理力学性质产生明显的劣化现象, 呈现出先快速下降后缓慢下降的趋势; (2) 坡体中前部设置抗滑桩后, 坡体稳定性有了较大的提高, 但随着水位变化次数增多, 抗滑桩的加固效果不断弱化, 且弱化速度为先快后缓; (3) 随着水位循环次数的增加, 位移及塑性应变带逐渐后移至滑坡后缘处, 滑带处桩身受到的作用力最大且其值缓慢增大。

关键词: 库岸滑坡; 水位循环变化; 劣化作用; 加固效果; 数值模拟

中图分类号: P642.3

文献标识码: A

Study on the reinforcement effect of anti-slide pile with reservoir water level fluctuation

LIU Shijie, SU Shengrui, HUANG Huang, LI Peng

(School of Geological Engineering and Geomatics, Chang' An University, Xi' an, ShaanXi 710054, China)

Abstract: Taking the landslide in AnKang reservoir as the research object, we adopt field investigation, laboratory test and numerical simulation to analyze the physical indexes and mechanical properties parameters of the rock under different water-dehydration cycles, and verify the rationality and safety of the supporting design. The effect of periodic fluctuation of reservoir water level on the reinforcement effect of anti-slide piles is studied. The main conclusions are as follows: (1) Under the water-dehydration cycle, the physical and mechanical properties of the strong weathering phyllite show the deterioration phenomenon, and there is a tendency to decrease slowly after the first rapid descent; (2) The stability of slope with the pile installed is improved greatly. With the increase of water level, the effect of anti-slide piles is weakened, and the speed is fast and then slow; (3) As water level cycles increases, the displacement and plastic strain bands gradually move to the trailing edge of the landslide, and the maximum force of the pile at the sliding zone is increased slowly.

Key words: reservoir landslide; water-dehydration cycles; deterioration; reinforcement; numerical simulation

库岸滑坡分为水位上升时诱发滑坡以及下降时诱发滑坡^[1-2]。目前, 在水位变化下的坡体稳定性、桩土相互作用方面已有大量研究成果^[3-10], 但对于水位周期性变化条件下的抗滑桩加固效果研究较少

^[11]。马家坡随库水位变化坡体岩土体物理力学性质降低^[12-14], 滑坡变形加剧。本文研究库水位周期波动对抗滑桩加固效果的影响, 为库水位周期波动条件下的抗滑桩设计提供经验, 对工程治理有指导意义。

收稿日期: 2018-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(4167020392); 省交通建设科技资助项目(2015A1-3)

作者简介: 刘世杰(1995-), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害方面的研究。

1 滑坡概况

马家坡滑坡位于安康水库东岸“V”谷斜坡地段，为一库岸基岩滑坡。后缘清晰为一高2 m的陡坎，剪出口位于前缘河岸，主滑向约为276°。滑坡平面形态近似长扇形，长80 m，宽320 m，坡度约35°。滑体主要为强风化千枚岩，上覆含碎石粉质粘土，平均厚度13 m，总体积 $2.7 \times 10^5 \text{ m}^3$ ，属中型滑坡；滑带位于强风化千枚岩与中风化千枚岩接触面，呈近弧形；滑床为中风化千枚岩。强、中千枚岩风化界线之间易形成滑动面，加之库水位的循环作用，最终导致坡体失稳。治理措施为在滑坡体前部设置1排抗滑桩，坡体上布设截排水工程。

2 岩体饱水－失水循环试验

对岩石试样进行密封饱和，再将饱和岩样烘干。每一次饱水－失水循环记为一个周期，对不同的岩样分别进行0、1、5、10、20、40次饱水－失水循环。在循环后，进行密度、吸水率、单轴抗压强度、抗剪强度的测定。

2.1 物理性质试验

对0、1、5、10、20及40次饱水－失水循环的同一试样组进行密度及含水率测定（表1）。

2.2 力学性质试验

2.2.1 单轴压缩试验

采用WAW-1000D型万能试验机测定不同饱水－失水循环次数下的单轴抗压强度。

表1 不同饱水－失水循环次数下千枚岩基本物理参数
Tab.1 The basic physical parameters of phyllite under different water saturation-dehydration cyclical times

岩性	循环 次数	密度			吸水率 /%
		天然	饱和	干燥	
		/(g·cm ⁻³)			
千枚岩	0	2.671	-	-	-
	1	-	2.714	2.653	2.30
	5	-	2.712	2.651	2.30
	10	-	2.708	2.646	2.33
	20	-	2.706	2.642	2.42
	40	-	2.703	2.638	2.51

试样在单轴压缩条件下，沿软弱结构面发生破坏（图1），随着水作用时间增加，破坏作用更加明显。随着循环次数的增加，试样抗压强度逐渐下降（表2），在循环次数为0～20次时下降较快，20～40次时下降速度减缓（图2）。

2.2.2 剪切试验

采用变角板剪切法测定千枚岩结构面抗剪强度指标。

试样沿着平行于层理面的方向发生剪破坏（图3），随循环次数的增加，结构面的抗剪强度减弱，因而从内部结构面发生破坏。根据抗剪强度指标变化（图4），随着循环次数的增加，内摩擦角与粘聚力均下降且速度减缓。其中，内摩擦角减小幅度较小，循环40次后下降约16.56%，而粘聚力的下降较多约38.21%。



图1 试样破坏

Fig.1 Specimen breakage

表2 不同饱水－失水循环次数下千枚岩单轴抗压强度
Tab.2 The uniaxial compressive strength of phyllite under different water saturation-dehydration cyclical times

循环次数	单轴抗压强度/MPa			平均值/MPa
0	41.890	53.911	49.719	48.507
1	39.897	49.574	47.256	45.576
5	36.012	34.951	45.566	38.843
10	36.547	31.257	34.360	34.054
20	34.012	22.947	13.534	23.498
40	9.521	16.744	21.930	16.065

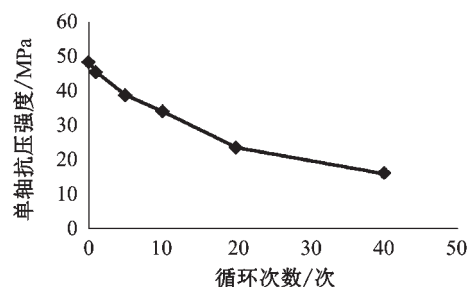


图2 单轴抗压强度变化趋势

Fig.2 The tendency of uniaxial compressive strength



图 3 试样破坏
Fig.3 Specimen breakage

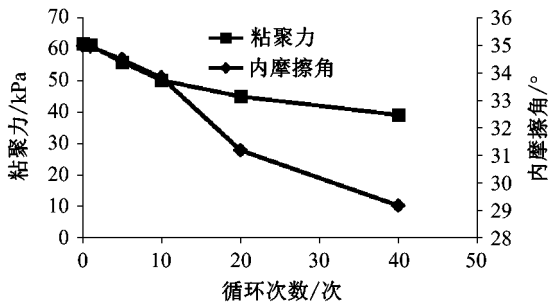


图 4 千枚岩抗剪强度变化趋势
Fig.4 The tendency of phyllite's shear strength

表 3 不同饱水－失水循环次数下千枚岩抗剪强度
Tab.3 The shear strength of phyllite under different water saturation-dehydration cyclical times

循环次数	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /°
0	61.830	34.984
1	61.239	34.957
5	55.921	34.489
10	50.119	33.820
20	44.975	31.172
40	39.085	29.168

2.3 劣化作用分析

对试样的内摩擦角、粘聚力、单轴抗压强度等参数相对于初始阶段试样的劣化程度进行分析。分析采用的公式如下：

$$D_j = \frac{x_i - x_0}{x_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中： D_j —相对于未循环时的劣化度； x_i —第 i 次循环时的参数； x_0 —未循环时的参数。各参数多次循环后劣化度见表 4。

随着循环次数的增加，千枚岩的力学性质不断降低，劣化度不断增大，总体呈现出在循环 20 次之前增大速度较快，而 20 次～40 次较缓的趋势。不同参数劣化程度不同：单轴抗压强度受到的劣化作用最强烈，为 66.88%；粘聚力受到水劣化作用次之，

表 4 不同循环次数下千枚岩劣化度

Tab.4 The phyllite's degree of deterioration under different water saturation-dehydration cyclical times

循环次数	劣化度 /%		
	粘聚力	内摩擦角	单轴抗压强度
1	0.96	0.08	6.04
5	9.56	1.41	19.92
10	18.94	3.33	29.80
20	27.26	10.90	51.56
40	36.79	16.62	66.88

为 36.79%；内摩擦角劣化作用最弱，为 16.62%。

3 水位周期变化抗滑桩加固效果模拟

3.1 模型建立

对马家坡滑坡的典型剖面进行数值模拟计算，X 轴负方向为主滑方向（水平），Y 轴负方向为重力方向（竖直）。原点为模型左角点，模型 X 向长 148.40 m，Y 向高 81.40 m。地质情况以野外勘察资料为主，在地层上主要划分为滑体、滑带、强风化千枚岩以及中风化千枚岩。将抗滑桩设置于坡体中前部，同时也是坡体位移较大的区域。网格情况划分如图 5，共计 1 325 个单元、1 478 个节点。

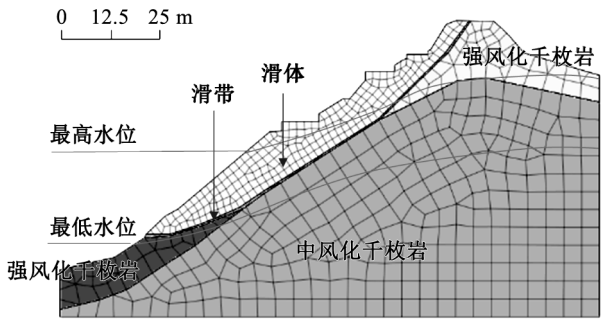


图 5 马家坡滑坡数值模型
Fig.5 The numerical model of Majiapo landslide

3.2 边界条件及模拟参数

位移边界：坡面为自由面，右侧面及下底面均设置位移固定约束。水头边界：参考安康水库各月合理水位^[15]，拟定其水位变化在 300 ～ 330 m 之间匀速波动，因此以模型左下角为原点，水位变化相对高度为 20 ～ 50 m。除自重荷载外，设置房屋荷载为 60、60、40 kPa。

模型中各地层物理力学参数根据室内物理力学试验结果并参考前人研究成果综合确定（表 5），抗

滑桩采用梁单元模型，其物理力学参数见表 6。

3.3 模拟结果分析

计算工况分为循环 1、5、10、20 及 40 次 5 个工况，对坡体在不同饱水 - 失水循环次数下的稳定性受力特点以及抗滑桩的应力应变关系进行分析。

3.3.1 稳定系数

坡体设置抗滑桩后的稳定性系数随着循环次数的增加开始下降 (图 6)，在 1 ~ 20 次之间，稳定系数近似呈直线下降；20 ~ 40 次时，下降趋势减缓，稳定性系数为 1.06，坡体仍处于基本稳定状态，但抗滑桩的加固效果已不满足设计要求。

3.3.2 位移

如图 7(a) 循环 5 次后最大位移范围较循环 1 次增大，集中在桩前。循环 10 次时如图 7(b) 位移向桩后延伸。循环 20 次时如图 7(c)，桩前位移范围未扩展。循环 40 次时如图 7(d)，位移有了较明显的变化，桩前桩后的位移范围相交，桩后位移变化范围增大，但最大位移增加较缓，较循环 20 次时的最大

位移仅增加 0.004 m。桩后最大位移在循环 1 ~ 20 次时逐渐增大，20 ~ 40 次时变化趋缓 (图 8)。

3.3.3 剪应变

坡体最大剪应变主要分布在坡脚强风化与中风化千枚岩的分界处。循环 5 次时如图 9(a)，最大剪应变向上延伸。循环 10 次时如图 9(b)，剪应变分布在坡体中部千枚岩风化分界处，呈未贯通带状。循环 20 次时如图 9(c)，桩后的剪应变带进一步扩展，但仍未贯通。循环 40 次时如图 9(d)，桩后形成了一条贯通的剪应变带，即桩后土体产生破坏，坡体沿该位置发生滑动。分析桩后剪应变带的数值大小并

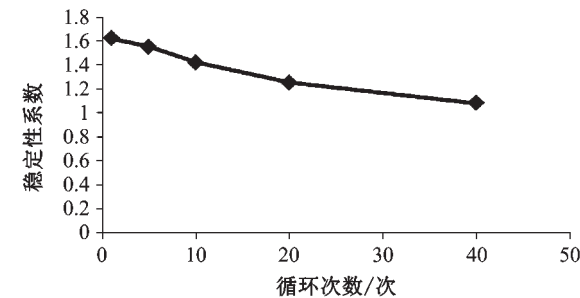


图 6 不同循环次数下坡体稳定性系数变化趋势
Fig.6 The stability coefficient under different cyclical times

表 5 岩土体物理力学参数
Tab.5 The physical and mechanical parameters of rock-soil mass

材料名称	循环次数	弹性模量 /MPa	泊松比	容重 /(kN·m ⁻³)	粘聚力 /kPa	摩擦角 /°	渗透系数 /(m·d ⁻¹)	本构模型
滑带	0	25	0.35	22.71	24.73	17.49	6.50e-2	摩尔 - 库伦
	1			21.47	24.50	17.48		
	5			21.45	22.37	17.24		
	10			21.42	20.05	16.91		
	20			21.39	17.99	15.59		
	40			21.36	15.63	14.58		
滑体	-	50	0.35	21.50	25.50	18.00	6.00e-2	摩尔 - 库伦
强风化千枚岩	-	50	0.32	25.70	45.20	28.00	4.50e-3	
中风化千枚岩	-	5 000	0.20	26.50	4500	36.20	4.32e-8	

表 6 抗滑桩物理力学参数
Tab.6 The physical and mechanical parameters of pile

名称	材料	类型	弹性模量 /MPa	泊松比	天然容重 /(kN·m ⁻³)
抗滑桩	各项同性	弹性	300 00	0.3	28
名称	材料	类型	最终剪力	剪切刚度模量 /(kN·m ⁻³)	法向刚度模量 /(kN·m ⁻³)
桩界面	界面和桩界面	桩界面	500	50 000	500 000

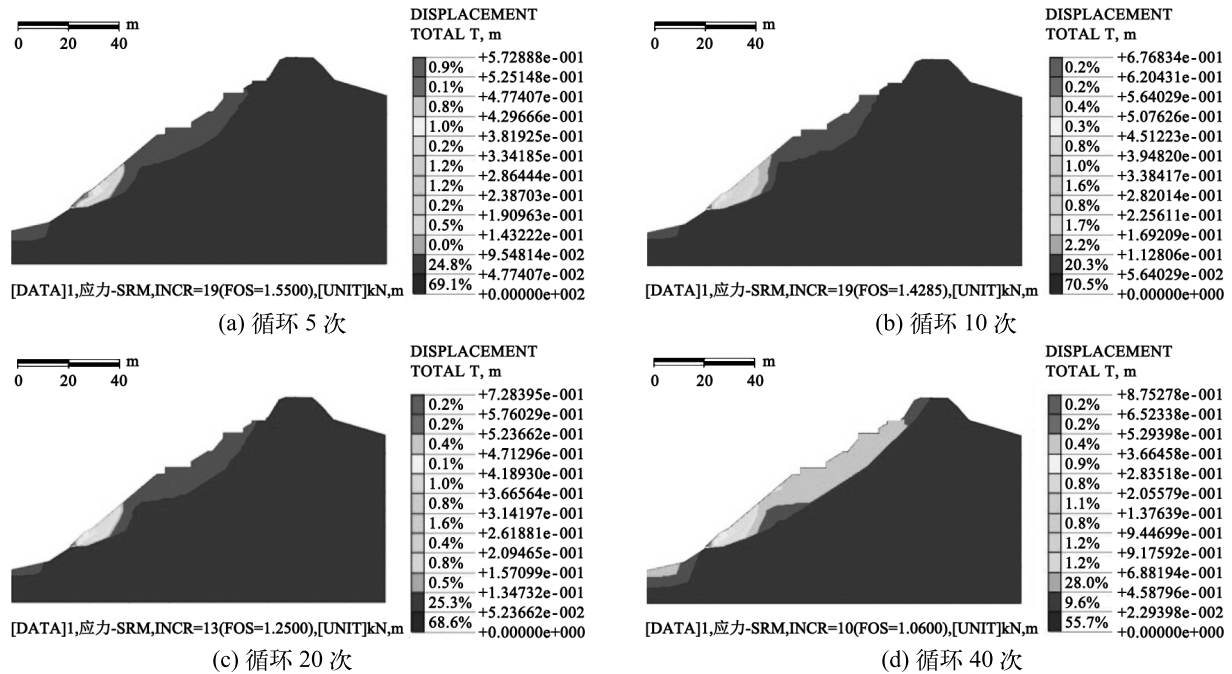


图 7 不同循环次数下坡体位移图

Fig.7 The displacement of landslide under different circulations

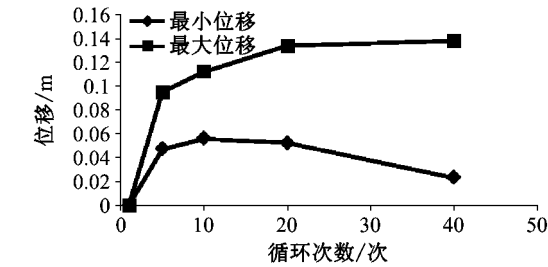


图 8 不同循环次数下桩后位移趋势

Fig.8 The displacement under different cyclical times

进行统计,随着循环次数的增加(图 10),桩后剪应变不断增大,在循环次数为 1 ~ 20 次时,增长速度较快,而在 20 ~ 40 次时增长速度减缓。

3.3.4 桩身弯矩

不同循环次数下桩身最大弯矩均位于距桩顶 16.2 ~ 16.3 m 之间,在强风化千枚岩与中风化千枚岩的岩层分界处产生应力集中,弯矩的分布中间大,

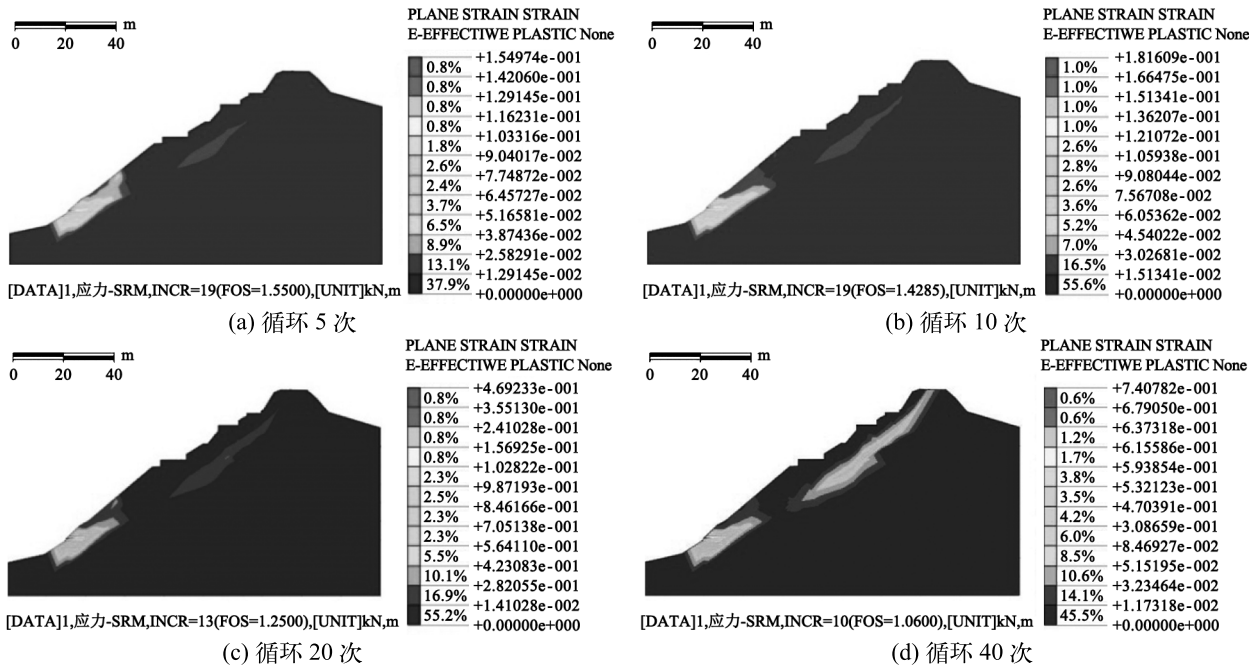


图 9 水位循环不同循环次数下坡体剪应变云图

Fig.9 The shear strain of landslide under different circulations

两端小。水位循环20次之前,最大弯矩增长速度较快,而从20~40次最大弯矩的增大幅度趋缓(图11)。

3.3.5 桩身剪力

桩身正应力及负应力的分界线与最大弯矩位置一致,为千枚岩风化分界面,在其上部的抗滑桩受力呈现出上小下大,近三角形分布。滑带下部的桩身则受到锚固段基岩的反作用力,因此受到相反方向的剪应力。在循环次数为20次之前,最大剪应力增大速度较快,但20~40次时,最大剪应力增大趋缓(图12)。

4 结论

1) 随着饱水-失水循环次数的增加,水对岩土体的劣化作用不断增加,力学性质指标不断下降,下降速度为先快后慢。

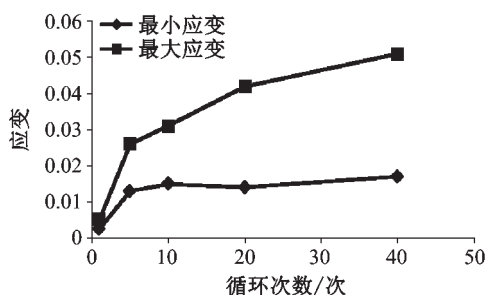


图10 不同循环次数下桩后剪应变趋势

Fig.10 The shear strain under different circulations

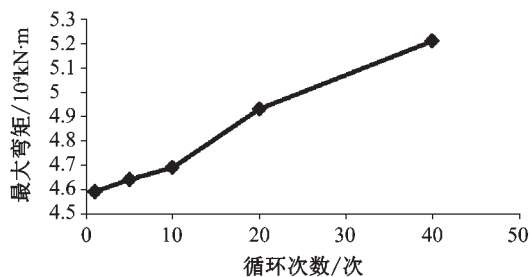


图11 不同循环次数下抗滑桩最大弯矩变化趋势

Fig.11 The piles' max moment under different circulations

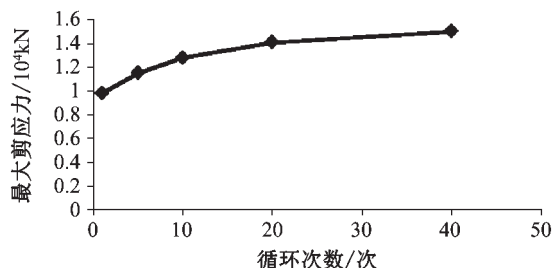


图12 不同循环次数下抗滑桩最大剪应力统计图

Fig.12 The piles' max shear stress under different circulations

2) 抗滑桩加固后的坡体随着水位循环次数的增加,位移及塑性应变带由坡体中前部逐渐后移至滑坡后缘处,最大值集中在桩前,滑带处桩身受到的作用力最大且其值缓慢增大。

3) 抗滑桩加固效果的减弱经历2个阶段,循环次数为20次之前,减弱较快;20次至40次时,减弱速度趋缓。

参考文献:

- [1] 刘才华. 库水位上升诱发边坡失稳研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 769-773.
- [2] 郭志华. 库水位变化对边坡稳定性影响[J]. 岩土力学, 2005, 26(Z): 29-32.
- [3] HODGE, FREEZE R. Groundwater flow systems and slope stability[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1977, 14: 446-476.
- [4] IVERSION, MAJOR M. Groundwater seepage vectors and the potential for hillslope failure and debris flow mobilization[J]. Water Resources Research, 1986, 22(11): 1543-1548.
- [5] 徐平. 考虑非饱和渗流作用下三峡库岸滑坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1837-1840.
- [6] 罗红明. 库水位涨落对库岸滑坡稳定性的影响[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2008, 33(5): 687-692.
- [7] 胡新丽. 库水位波动条件下不同桩位抗滑桩抗滑稳定性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3679-3684.
- [8] 苏国韶. 库水位骤降条件下涉水边坡抗滑桩加固效果[J]. 水利水电科技发展, 2013, 33(4): 22-30.
- [9] 孙森军. 库水作用下滑坡-抗滑桩体系变形时效规律与长期稳定性研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2015.
- [10] 冯永. 库水位波动作用下抗滑桩-土作用机理分析[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(3): 481-488.
- [11] 胡新丽. 三峡水库水位波动条件下滑坡抗滑桩工程效果数值研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2234-2238.
- [12] 傅晏. 干湿循环水岩相互作用下岩石劣化机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [13] 王新刚. 饱水-失水循环劣化作用下库岸高边坡岩石流变机理及工程应用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
- [14] 赵建军. 饱水条件下千枚岩软化效应试验分析[J]. 工程地质学报, 2017, 25(6): 1449-1454.
- [15] 薛金淮. 安康水库汛期分段控制效益研究[J]. 水电自动化与大坝检测, 2002, 26(1): 69-71.

(责任编辑 王利君)