

DOI: 10.11779/CJGE201710013

# 考虑水-岩作用特点的典型岸坡长期稳定性分析

张景昱<sup>1</sup>, 宛良朋<sup>2</sup>, 潘洪月<sup>2</sup>, 李建林<sup>3</sup>, 骆祚森<sup>3</sup>, 邓华锋<sup>\*3</sup>

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002 2. 中国三峡建设管理有限公司乌东德工程建设部, 四川 成都 610000;  
3. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 大型水库库岸边坡长期经受库水位升降变化的影响, 其作用效应主要表现为两个方面, 一方面是水压力升降变化的影响, 另一方面是岸坡消落带岩土体的水-岩作用劣化效应。基于此, 在前期研究基础上, 考虑消落带水-岩作用的影响深度及时间效应, 建立了岩体强度劣化模型, 并结合典型库岸边坡进行了计算分析。研究表明: 库水位变化对库岸边坡稳定性影响明显, 尤其在一定时期以后, 在高水位运行期间安全系数将会出现骤减后迅速恢复的现象, 说明坡体下滑力与阻滑力的平衡被打破后又得到调整至新的平衡, 随着水-岩作用次数的增加, 这种骤减在年循环周期内, 逐渐向前推移, 且频率与减幅均有所增大, 进一步说明当水-岩作用程度越大时, 岩体平衡越容易被打破且库岸边坡稳定性越差, 而新的平衡对应的安全性逐年降低。这一现象符合重力背斜型滑坡在库水作用期间的破坏堆积过程, 研究成果对库区岸坡的稳定性计算具有一定指导意义。

**关键词:** 消落带; 水-岩作用; 强度劣化模型; 安全系数

中图分类号: TU 470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)10-1851-08

作者简介: 张景昱(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程研究。E-mail: 304428211@qq.com。

## Long-term stability of bank slope considering characteristics of water-rock interaction

ZHANG Jing-yu<sup>1</sup>, WAN Liang-peng<sup>2</sup>, PAN Hong-yue<sup>2</sup>, LI Jian-lin<sup>3</sup>, LUO Zuo-sen<sup>3</sup>, DENG Hua-feng<sup>3</sup>

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Wudongde Engineering Construction Department of China Three Gorges Construction Management Co., Ltd., Chengdu 610000, China; 3. Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area, China Three Gorges University, Ministry of Education, Yichang 443002, China)

**Abstract:** In large reservoirs, the bank slopes experience the effect of water level variation for a long time. This effect mainly contains two aspects: 1) the influence of hydraulic pressure going up and down; 2) the water-rock degradation effect of rock mass in hydro-fluctuation belt. Based on the above and the previous studies and considering the depth and time of water-rock effect, the strength degradation model for rock mass is established and used to analyze a typical bank slope. The study shows that water level variation has distinct influence on the stability of bank slope. Especially after a period of time, the safety factor decreases dramatically and regains quickly during high water level operating period. It is indicated that the balance of sliding force and anti-sliding force in the bank slope is broken and then comes to a new balance. With the increasing times of water-rock effect, the dramatic decrease of safety factor appears forward during a cycle time of a year, and the frequency and decrease amplitude both increase. Furthermore, the greater the degree of water-rock interaction is, the more easily the balance of rock mass is broken and the worse the stability of bank slope is. The safety factor of bank slope in the new balance decreases year by year. This phenomenon conforms to the damage accumulation process of gravity anticline type landslide during the period of reservoir water fluctuation. This study is of a certain guiding significance to the stability calculation of bank slopes in reservoirs.

**Key words:** hydro-fluctuation belt; water-rock interaction; strength degradation model; safety factor

## 0 引言

三峡工程蓄水后, 库水位每年都按防洪、发电等调度要求在 145 m 和 175 m 之间或缓慢或快速的升

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201401029); 国家自然科学基金项目(51439003)

收稿日期: 2016-08-05

\*通讯作者(E-mail: dnf8010@ctgu.edu.cn)

降, 形成一个高达 30 m 的库水消落带。在库水大幅度涨落的条件下, 消落带部分岩土体周期性处于干燥和饱和交替的动态, 地下水时而受库水补给, 时而排出, 使岸坡部分岩土体处于“饱水-风干”的交替动态, 这种“饱水-风干”交替作用对岩土体来说是一种“疲劳作用”, 将造成岩体性质劣化, 每一次的效应可能并不一定很显著, 但多次重复作用后, 损伤效应可能会累积性发展, 直到灾变发生。

目前, 关于库岸边坡消落带水-岩作用的试验模拟研究已有丰富成果。张梁<sup>[1]</sup>基于不同干湿循环作用下, 砂岩力学试验模拟, 分析了干湿循环, 砂岩物理力学效应; 王永新<sup>[2]</sup>、薛晶晶等<sup>[3]</sup>通过试验模拟, 得出: “饱水-风干”循环过程, 对岩体抗剪强度参数有显著影响; Estabragh 等<sup>[4]</sup>、Ekrem 等<sup>[5]</sup>认为干湿循环的过程伴随着累积性的发展<sup>[4-5]</sup>; 李克钢等<sup>[6]</sup>通过单轴压缩试验结果发现砂岩的破坏特征在于湿循环试验次数的影响下呈现一种从脆性到延性转化的破坏规律; Lin 等<sup>[7]</sup>对砂岩在干湿循环作用下的力学性质变化规律进行了研究; 张鹏等<sup>[8]</sup>通过砂岩的单轴压缩试验指出: 干湿循环作用对岩石内部结构, 因反复经历膨胀和收缩作用, 产生了损伤, 导致岩石孔隙率增大, 造成砂岩强度降低; 王莎莎等<sup>[9]</sup>研究发现随着干湿循环次数增加, 砂岩的质量损失率呈递增规律, 体现了砂岩内的矿物组成成分和岩石结构性质在不断发生变化; 汪然等<sup>[10]</sup>通过实验发现经过不同次数的“干湿”交替作用后, 砂岩的弹性模量和破坏脆性均有不同程度的降低; 现有研究显示“干燥-饱水”循环作用对砂岩的纵波波速、抗剪强度参数的劣化作用在循环初期的表现比较强烈, 随着“干燥-饱水”循环作用的继续进行, 其作用有所减弱, 且对黏聚力的劣化幅度大于对内摩擦角<sup>[11-15]</sup>。

上述成果主要着重于水-岩作用的效应和机理分析, 结合库岸边坡消落带岩体强度劣化效应对岸坡的安全稳定性研究还比较少。基于此, 本文拟结合前期考虑水压力升降变化和“饱和-风干”循环水-岩作用的试验结果, 从库岸边坡水-岩作用效应分析着手, 重点考虑库岸边坡水-岩作用的影响深度和范围, 分析建立水-岩作用下岩体强度的分布模型, 并结合典型库岸边坡进行长期稳定性计算。

## 1 水-岩作用下库岸边坡岩体强度劣化规律及模型

### 1.1 水-岩作用效应分析

三峡工程蓄水以来, 其库水位在 145 m 到 175 m 之间涨落, 涨幅为 30 m, 故消落带区域的岩体受最大水压为 0.3 MPa。其水压分布方式如图 1 所示。

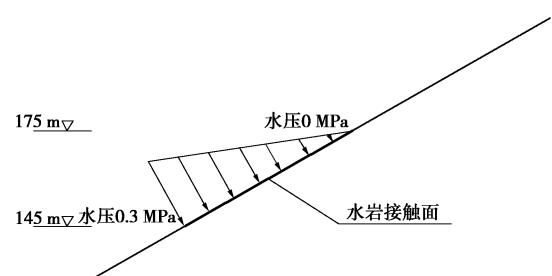


图 1 消落带区域水压分布

Fig. 1 Distribution of water pressure in hydro-fluctuation belt

文献[16]中, 针对砂岩在水-岩作用下的强度劣化开展了试验研究, 从地质学的岩石风化规律而言, 在“饱和-风干”循环若干次之后 ( $N$  足够大时), 砂岩理论上变成黏聚力为零的砂, 内摩擦角应该变成一个不为零的较小的角, 基于这个特点并结合试验数据可以用以下函数关系式较好的拟合:

$$y(N) = y_0 [1 + a \ln(1 + bN^c)] \quad (1)$$

该函数称之为劣化函数, 其中  $y$  为某一参数值,  $y_0$  为某一参数初始值,  $N$  为干湿循环次数,  $a$ ,  $b$  和  $c$  为劣化函数系数。

由于三峡库区消落带的典型库岸边坡长期受到库水位升降的影响, 因此定义消落带的岩层为库水干湿循环影响区 (如图 2 所示), 该区域表面受到干湿循环的影响最大, 随着深度的增加, 影响效应逐渐减弱。在具体计算中, 依据具体地质资料来确定干湿循环影响区域岩体的深度。

对于 145 m 水位以下的岩土体, 长期处于库水浸泡作用下, 且受到库水水压变化的影响, 将该区域定义为水压加卸载影响区, 如图 2 所示。

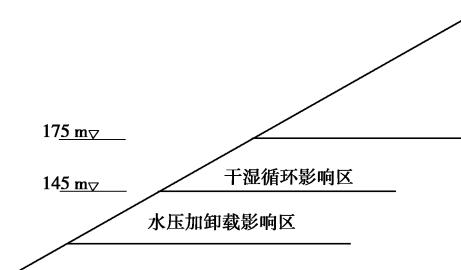


图 2 库岸边坡分区

Fig. 2 Partition in bank slope

### 1.2 考虑水-岩作用影响深度效应的岩体强度劣化模型

在天然状态下, 外部岩体对内部岩体具有一定的保护作用, 即内部岩体劣化速率低于外部岩体。由于水-岩作用随着岩体深度而递减, 起始面劣化最大, 终止面劣化微弱 (近似取零); 假设水-岩作用区域的岩体劣化效应随岩体深度呈线性递减变化, 那么库水干湿循环区域, 任一点的岩石强度, 可表示为

$$y(i, N) = y_0 \left[ 1 + \left( 1 - \frac{i-1}{n} \right) a \ln(1 + b N^c) \right]$$

或  $y(i, N) = y_0 \left[ 1 + \left( 1 - \frac{i-1}{n} \right) \Delta y \right] \quad (2)$

如图3所示, 将岩体水平向一定深度的距离分为  $n$  等分;  $n$  ( $n \geq 1$ ) 为其中任一等分,  $i$  越大代表水平向深度越深, 劣化效应越弱。

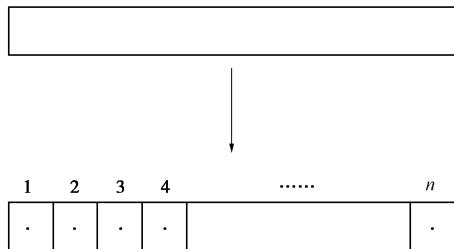


图3 岩体强度随深度变化

Fig. 3 Change of rock mass strength with depth

### 1.3 考虑水-岩作用影响深度效应的参数网格划分概化模型

在消落带水-岩作用区域岩体的强度随着库水水位和岩体深度的变化是不同的, 故在计算中使用同一参数值进行赋值, 并不能体现工程的实际情况, 这样以点参数代替整个区域参数的做法存在缺陷。本文尝试减小这种做法带来的误差, 设计将整个区域的岩体分成若干个小区域, 考虑不同高度、深度的点参数代替小区域参数的作法。当这种小区域最小时, 那么其力学参数将更符合实际赋存状态。

如图4所示, 将整个区域划分为  $m$  层和  $n$  列, 形成  $m \times n$  个单元网格, 然后以每个网格的中心点参数来代替该网格区域的参数。

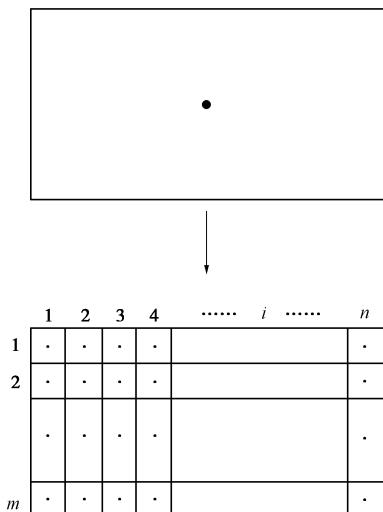


图4 网格划分

Fig. 4 Mesh generation

以库区岸坡干湿循环影响区域的岩体为例, 则考

虑网格划分模型的参数赋值方法: 将干湿循环影响区分为3层, 每层由外向内分为  $i$  等分, 如图5所示。当库水水位为175 m时, 干湿循环影响区最大水压为0.3 MPa, 分别采用0.05, 0.15和0.25 MPa库水压强来模拟第1, 2和3层的岩石干湿循环作用导致的岩石劣化的参数。

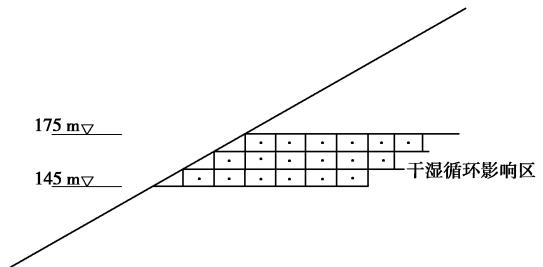


图5 消落带影响区域网格划分

Fig. 5 Mesh in influenced area of hydro-fluctuation belt

将式(2)中的劣化系数  $a$ ,  $b$  和  $c$  与库水水压  $p$  建立函数关系, 那么可以得到干湿循环影响区域的岩体参数与岩体深度、库水水压和水-岩作用循环次数的函数关系:

$$y(i, p, N) = y_0 \left[ 1 + \left( 1 - \frac{i-1}{n} \right) a(p) \ln(1 + b(p) N^{c(p)}) \right], \quad (3)$$

式中,  $p$  为库水水压与劣化函数系数  $a$ ,  $b$  和  $c$  存在一定关系。

用同样的方法也可以表示水压加卸载区域的岩体强度参数。

## 2 水-岩作用下典型库岸边坡长期稳定性分析

### 2.1 地质概况

该岸坡位于长江南岸, 谢家包背斜北翼与长江形成楔形区域开口处, 岸坡地质剖面图如图6所示, 紫红色粉砂质泥岩与厚层黄色中砂岩互层, 成软弱相间结构, 岩层倾角26°~28°。滑坡的中上部为顺层基岩滑动, 位于坡表以下约70 m, 在下部存在两种潜在滑动模式, 一种是滑面顺层间软弱面发育, 与基岩产状基本一致, 如图6中所示的“滑带1”; 另一种是沿着重力背斜弯曲破坏的界面剪切破坏, 如图6中所示的“滑带2”, 剪出口高程为130 m。

库区水位达到175 m时, 滑坡体前缘岩土体在浸泡作用下, 一方面岸坡的受力条件将发生变化, 库水的悬浮效应将减小滑坡体的抗滑能力; 另一方面水-岩作用会导致岩土体力学参数劣化; 再者, 滑坡体前缘受江水的冲刷、侵蚀, 滑坡前缘后退, 临空面增大, 这些变化可能会导致滑坡失稳, 对长江航运安全、库容等将产生较大影响。

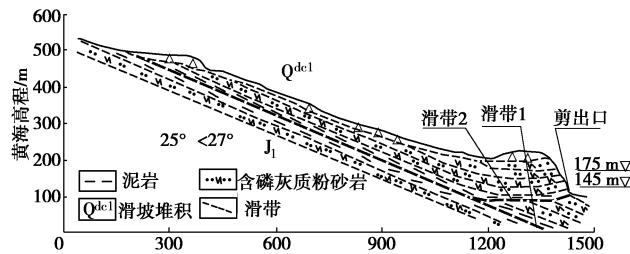


图 6 典型库岸边坡地质剖面图

Fig. 6 Geological profile of a landslide

因此,对该滑坡的长期稳定性进行分析评价是十分必要的,而且在前期研究中,对该滑坡消落带区域砂岩进行了考虑水压力升降变化和“饱和-风干”循环作用的试验研究<sup>[16]</sup>,相关的试验结果为其长期稳定性计算分析提供了较好的基础。

## 2.2 计算模型及初始力学参数

由于该岸坡滑体较厚,水-岩作用对基岩的影响较小,分析过程中主要考虑了175 m以下滑体部分在水-岩作用下的劣化效应,结合前面提出的岩体强度参数网格划分概化模型,将175 m水位以下的水-岩作用影响区域进行了网格划分,并根据库岸边坡地质剖面图,建立地质模型,如图7所示。图中由外到内包含了覆盖层,砂岩层,泥岩层和基岩层。

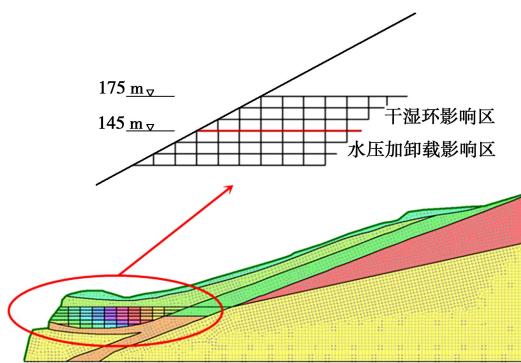


图 7 地质模型及库岸边坡岩体分区

Fig. 7 Geological model and partition in bank slope  
岩土体初始参数取值如表1所示<sup>[17]</sup>。

表 1 初始力学参数表

Table 1 Initial parameters

岩性	天然参数			饱和参数		
	$c$ /MPa	$\varphi$ (°)	$\gamma$ (kN·m <sup>-3</sup> )	$c$ /MPa	$\varphi$ (°)	$\gamma$ (kN·m <sup>-3</sup> )
覆盖层	0.032	29.0	19.80	0.027	19.0	21.0
砂岩	27.000	33.0	25.00	23.000	28.9	25.3
泥岩层	0.028	23.0	18.88	0.024	18.5	20.0
基岩	36.000	36.8	26.00	30.600	32.4	26.2

## 2.3 水-岩作用区域的岩体劣化模型构建

文献[16]对该滑坡消落带区域砂岩展开的一系列水-岩作用试验,本文在此基础上,分析建立岸坡消落带砂岩在干湿循环作用下的劣化模型。

根据三轴抗压强度的试验结果,应用莫尔-库仑强度准则公式,可以计算出不同静水压力情况下,不同循环次数试样的 $c$ , $\varphi$ 值,如表2所示。

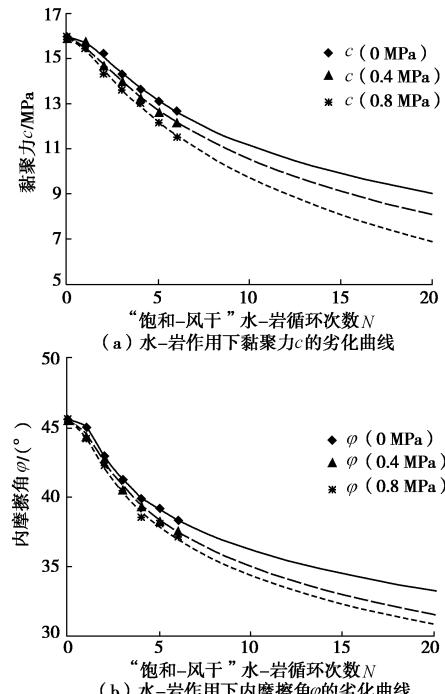
表 2 不同静水压力下岩循环次数下试样 $c$ , $\varphi$ 值变化统计表

Table 2 Statistical table of cohesion and internal friction angle of samples under different hydrostatic pressures and water-rock cycle numbers

静水 压力 /MPa	循环 次数	$c$ /MPa	单次降低 百分比/%		$\varphi$ (°)	降低百 分比/%	单次降 低百分 比/%
			分比/%	%			
0	初始	16.02	0.00	0.00	45.61	0.00	0.00
	1	15.62	2.50	2.50	45.02	1.29	1.29
	2	15.27	4.68	2.22	42.91	5.92	4.63
	3	14.35	10.42	5.75	41.23	9.60	3.68
	4	13.69	14.54	4.12	39.85	12.63	3.03
	5	13.15	17.92	3.37	39.17	14.12	1.49
0.4	6	12.71	20.66	2.75	38.30	16.03	1.91
	1	15.87	0.94	0.94	44.44	2.55	2.55
	2	14.78	7.74	6.77	42.85	6.03	3.48
	3	14.08	12.11	4.39	40.59	11.00	4.97
	4	13.34	16.73	4.60	39.40	13.62	2.62
	5	12.71	20.66	3.93	38.33	15.96	2.35
0.8	6	12.23	23.66	3.00	37.62	17.52	1.56
	1	15.49	3.31	3.31	44.19	3.12	3.12
	2	14.33	10.55	7.24	42.27	7.32	4.21
	3	13.63	14.92	4.40	40.42	11.37	4.05
	4	13.03	18.66	3.72	38.48	15.64	4.27
	5	12.18	23.97	5.31	37.51	17.76	2.13
1.2	6	11.56	27.84	3.87	37.11	18.63	0.88

注: 表中降低百分比为 $D_i = (c_i - c_0)/c_0 \times 100\%$ , 或者 $D_i = (\varphi_i - \varphi_0)/\varphi_0 \times 100\%$ , 单次降低百分比为 $D_i = D_i - D_{i-1}$ 。

根据表2,分别以 $c$ , $\varphi$ 为纵坐标,“饱和-风干”水-岩循环次数 $N$ 为横坐标作曲线图,如图8所示。

图 8 水-岩作用下黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 的劣化曲线Fig. 8 Deterioration of cohesion  $c$  and the cohesion  $\varphi$  under effect of water-rock interaction

根据表 2 及图 8 试验数据的分布特点, 对  $c$ - $N$  和  $\varphi$ - $N$  进行拟合, 得到在不同静水压力下黏聚力与内摩擦角的劣化函数如下:

(1) 静水常压

$$\left. \begin{array}{l} c = c_0 [1 - 0.093 \ln(1 + 0.1953 N^{2.1045})], \\ \varphi = \varphi_0 [1 - 0.0221 \ln(1 + 0.7706 N^{4.1765})] \end{array} \right\} \quad (4)$$

(2) 静水加压 (水压考虑 0.4 MPa)

$$\left. \begin{array}{l} c = c_0 [1 - 0.1478 \ln(1 + 0.222 N^{1.6082})], \\ \varphi = \varphi_0 [1 - 0.0464 \ln(1 + 0.6303 N^{2.3776})] \end{array} \right\} \quad (5)$$

(3) 静水加压 (水压考虑 0.8 MPa)

$$\left. \begin{array}{l} c = c_0 [1 - 0.1908 \ln(1 + 0.2343 N^{1.4639})], \\ \varphi = \varphi_0 [1 - 0.0499 \ln(1 + 0.7835 N^{2.2548})] \end{array} \right\} \quad (6)$$

将黏聚力  $c$  与内摩擦角  $\varphi$  的试验值与拟合值进行数据处理, 分别得到均值、标准差与变异系数, 如下表 3 所示。

表 3 试验值和拟合值的均值、标准差及变异系数

Table 3 Mean values, standard deviations and variable coefficients of experimental and fitted values

数据 静水 水压 /MPa	$c$			$\varphi$		
	均值 /MPa	标准差 /MPa	变异系 数/%	均值 /(°)	标准差 /(°)	变异系 数/%
试验 值	0	14.401	1.278	8.872	41.727	2.869
	0.4	14.147	1.487	10.513	41.263	3.090
	0.8	13.749	1.649	11.992	40.884	3.243
拟合 值	0	14.409	1.285	8.918	41.746	2.856
	0.4	14.110	1.419	10.057	41.283	3.079
	0.8	13.752	1.634	11.882	40.849	3.280

由表 3 可得: 试验值和拟合值的黏聚力与内摩擦角的变异系数均随着静水水压的增大而增大, 说明水压越大, 其劣化规律性越差; 同等条件下黏聚力变异系数均大于内摩擦角, 说明黏聚力劣化规律性, 差于内摩擦角, 这正体现出岩石内部结构发生变化, 抗剪强度调整的过程中, 黏聚力发生的劣化更为显著。整体上, 变异系数均小于 15%, 其拟合精度可靠。

通过黏聚力和内摩擦角劣化的拟合公式 (4)、(5) 和 (6), 可确定  $a$ ,  $b$  和  $c$  值与库水水压  $p$  之间的函数关系, 如图 9 所示。

通过图 9 中拟合公式, 可得出不同静水压力下, 对应的系数  $a$ ,  $b$  和  $c$  的值。

其中: 黏聚力劣化函数系数与水压的关系函数分别为

$$\left. \begin{array}{l} a(p) = 0.0369 p^2 - 0.1518 p - 0.093, \\ b(p) = -0.045 p^2 + 0.0848 p + 0.1953, \\ c(p) = 1.1 p^2 - 1.6807 p + 2.1045. \end{array} \right\} \quad (7)$$

内摩擦角劣化函数系数与水压的关系函数分别为

$$\left. \begin{array}{l} a(p) = 0.065 p^2 - 0.0868 p - 0.0221, \\ b(p) = 0.9172 p^2 - 0.7176 p + 0.7706, \\ c(p) = 5.2378 p^2 - 6.5924 p + 4.1765. \end{array} \right\} \quad (8)$$

式中,  $p$  为库水水压。

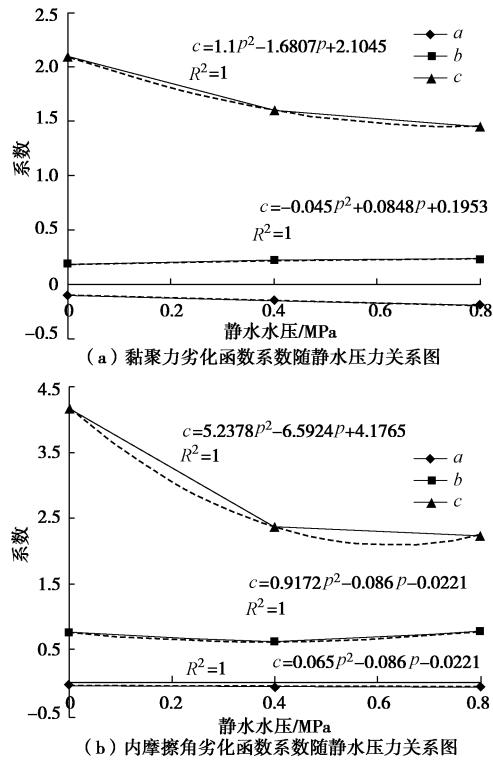


图 9 不同力学参数劣化函数系数与静水压力关系

Fig. 9 Relationship between degradation coefficient and hydrostatic pressure

$$\left. \begin{array}{l} c(i, p, N) = c_0 [1 + \left(1 - \frac{i-1}{n}\right) (0.0369 p^2 - 0.1518 p - 0.093) \cdot \ln(1 + (-0.045 p^2 + 0.0848 p + 0.1953) N^{(1.1 p^2 - 1.6807 p + 2.1045)})], \\ \varphi(i, p, N) = \varphi_0 [1 + \left(1 - \frac{i-1}{n}\right) (0.065 p^2 - 0.0868 p - 0.0221) \cdot \ln(1 + (0.9172 p^2 - 0.7176 p + 0.7706) N^{(5.2378 p^2 - 6.5924 p + 4.1765)})] \end{array} \right\} \quad (9)$$

## 2.4 考虑水-岩作用影响深度效应的参数赋值

由于三峡库区库水调度特点为每年 11 月到 12 月开始蓄水由 145 m 至 175 m, 保持库水位 175 m 至次年 4 月份开始泄洪, 其中 5~9 月为低水位期, 那么年周期库水升降引起的岩石干湿循环作用次数为 1 次, 那么  $T=N$ 。其中,  $T$  为时间, 单位为年;  $N$  为水-岩作用下干湿循环次数。

在本文计算中, 每年时间起点对应现实中 11 月份, 依次往后推一年, 为一周期; 考虑岸坡长期稳定性计算, 那么设置时间  $T$  分别为 1, 10, 20, 30, 40,

50, 60, 70, 80, 90, 100。

根据前文式(9)和图5, 干湿循环影响区域岩体综合力学参数的劣化模型为

第1层: 取库水水压  $p=0.05 \text{ MPa}$

$$\left. \begin{aligned} c(T) &= c_0 \left[ 1 - 0.1004 \left( 1 - \frac{i-1}{n} \right) \ln(1 + 0.1994 T^{2.0232}) \right], \\ \varphi(T) &= \varphi_0 \left[ 1 - 0.0262 \left( 1 - \frac{i-1}{n} \right) \ln(1 + 0.737 T^{3.856}) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

第2层: 取库水水压  $p=0.15 \text{ MPa}$

$$\left. \begin{aligned} c(T) &= c_0 \left[ 1 - 0.1149 \left( 1 - \frac{i-1}{n} \right) \ln(1 + 0.207 T^{1.8771}) \right], \\ \varphi(T) &= \varphi_0 \left[ 1 - 0.0336 \left( 1 - \frac{i-1}{n} \right) \ln(1 + 0.6836 T^{3.3055}) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

第3层: 取库水水压  $p=0.25 \text{ MPa}$

$$\left. \begin{aligned} c(T) &= c_0 \left[ 1 - 0.1286 \left( 1 - \frac{i-1}{n} \right) \ln(1 + 0.2137 T^{1.9211}) \right], \\ \varphi(T) &= \varphi_0 \left[ 1 - 0.0398 \left( 1 - \frac{i-1}{n} \right) \ln(1 + 0.6485 T^{2.856}) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

在文献[16]中, 通过试验对比分析表明, 长期浸泡导致岩体劣化的速率小于干湿循环作用下的岩体劣化速率。

参考长期浸泡水-岩作用的试验分析, 本文设置水压加卸载影响区(b区)岩体力学参数为: 第1层每等份的力学参数劣化速率为对应干湿循环影响区(a区)第一层的1半; 第2层每等份的力学参数劣化速率为对应干湿循环影响区(a区)第2层的一半; 第3层每等份的力学参数劣化速率为对应干湿循环影响区(a区)第3层的一半, 即  $\Delta y(b_{1i}) = \Delta y(a_{1i})/2$ ,  $\Delta y(b_{2i}) = \Delta y(a_{2i})/2$ ,  $\Delta y(b_{3i}) = \Delta y(a_{3i})/2, \dots, (i \geq 1)$ 。

## 2.5 不考虑水-岩作用影响深度效应的参数赋值

为了对比分析, 按照常规分析思路, 对干湿循环影响区和水压加卸载区域的岩体不考虑水-岩作用影响深度效应, 其中, 干湿循环影响区的岩体参数统一取水-岩作用区域岩体强度等效劣化速率的一半来考虑, 水压加卸载影响区的岩体参数则统一取水-岩作用区域岩体强度等效劣化速率的四分之一来考虑, 那么参数赋值如下公式:

干湿循环影响区:

$$y = y_0 \left[ 1 + \frac{1}{2} a(p) \ln(1 + b(p) N^{c(p)}) \right]. \quad (13)$$

水压加卸载的影响区:

$$y = y_0 \left[ 1 + \frac{1}{4} a(p) \ln(1 + b(p) N^{c(p)}) \right]. \quad (14)$$

## 2.6 计算结果分析

本文采用M-P极限平衡法, 通过Geo-slope计算分析该岸坡的稳定性。M-P极限平衡法是一种考虑土条之间相互作用力, 对滑动面的形状、静力平衡、多余未知数的选定等都不做要求的分析方法。通过假定安全系数, 迭代求得相应滑动面的安全系数。

考虑库水位升降作用, 计算得到模型中滑坡滑带1的安全系数曲线, 如图10所示。

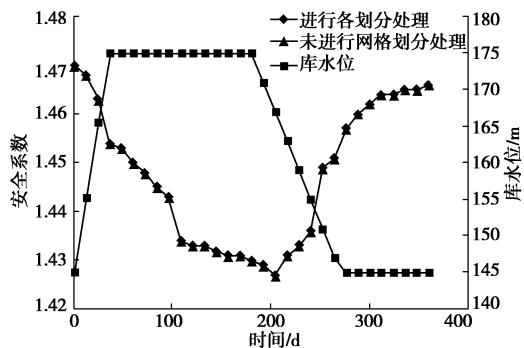


图10 滑带1安全系数随库水位变化图

Fig. 10 Change of safety factor of slip No. 1 with reservoir water level

考虑岩体强度深度效应与否, 无论在哪一个周期年中, 滑带1的安全系数变化趋势均为一致。

其中, 在库水位上升过程中, 滑坡滑带1的安全系数整体上随库水位变化呈反比例关系; 在高水位时, 安全系数出现减小的趋势, 体现出了高水位时, 库水内渗, 浮重度增加导致抗滑段抗滑能力下降的过程; 在低水位时, 滑带1的安全系数有增长的趋势, 体现了库水外渗浮重度逐渐消退的过程。说明水-岩作用效应对该滑坡深层的滑动影响较小。

而当考虑岩体强度深度效应和不考虑岩体强度深度效应时, 计算得到滑带2的安全系数曲线如图11和12所示。

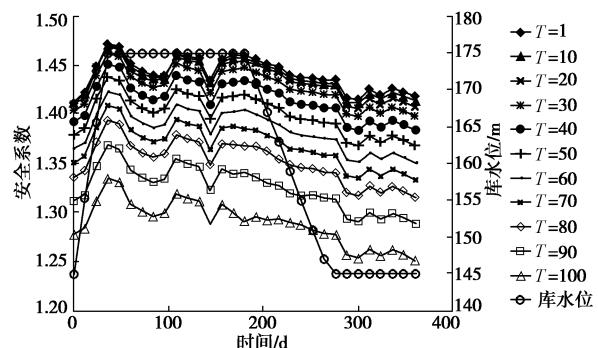


图11 考虑岩体深度效应时滑带2在不同周期年中安全系数  
Fig. 11 Safety factors of slip No. 2 considering rock mass depth during different cycle years

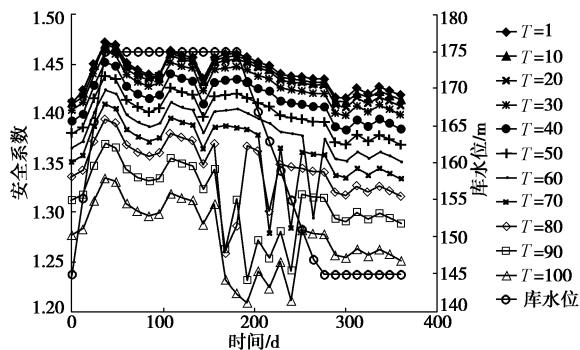


图 12 未考虑岩体深度效应时滑带 2 在不同周期年中安全系数

Fig. 12 Safety factors of slip No. 2 without considering rock mass depth during different cycle years

由图 11 和图 12 可以得到以下结论:

(1) 以考虑岩体强度深度效应时滑带 2 的安全系数为例, 在  $T=10$  周期年内, 当库区蓄水水位上升至 175 m 的过程中, 安全系数由 1.41 上升至 1.47; 在水位保持 175 m 的情况下, 安全系数出现小幅波动; 在库水位由 175 m 下降至 145 m 的过程中, 安全系数由 1.45 下降至 1.43; 在保持 145 m 低水位的情况下, 安全系数又出现小幅波动。

由此可见, 在库水位上升的过程中, 增加了消落带岩体受到的浮托力, 因此安全系数增大; 处于高水位时, 由于水-岩作用对消落带岩体有劣化效应, 使岩体强度降低, 形成新的平衡后安全系数回升, 当水-岩作用继续劣化岩体强度, 安全系数则又出现降低后回升; 库水位下降时, 消落带岩体受到的浮托力减小, 安全系数也随之减小; 处于低水位时, 由于水-岩作用继续降低水压加卸载区域岩体的强度, 使得安全系数出现波动。

(2) 前 50 年内, 考虑岩体深度效应和未考虑岩体深度效应时, 滑带 2 的安全系数整体变化不大, 说明水-岩作用的程度还比较小, 不足以破坏库岸边坡岩体的平衡, 故岸坡处于稳定阶段。

(3) 50 年后, 当影响区域岩体未考虑岩体深度效应时, 滑带 2 的安全系数出现骤减后迅速恢复的现象, 说明坡体力的平衡被打破后又得到调整至新的平衡, 随着时间的推进, 这种骤减在年循环周期内, 逐渐向前推移, 且减幅有所增大, 骤减次数逐年增多, 说明当水岩作用程度越大时, 岩体平衡越容易被打破, 而新的平衡对应的岸坡安全性逐年降低。

当影响区域考虑深度效应的岩体劣化模型时, 滑带 2 的安全系数未出现骤减的现象, 其各年份循环周期内的安全系数整体大于未考虑深度效应的岩体劣化模型下的安全系数, 说明对作用区域考虑岩体强度深度效应, 计算结果更能体现实际工程情况。

### 3 结 论

(1) 考虑库水水压作用效应和岩体深度效应, 建立了考虑库水水压和岩体深度的岩体强度参数的分布模型。

(2) 考虑三峡库区典型岸坡的水-岩作用特点, 对库岸边坡水-岩作用区域进行划分; 并对影响区域的岩体进行网格概化处理, 利用强度参数分布模型进行网格单元赋值。

(3) 以三峡库区某岸坡为工程背景计算岸坡的稳定性, 得到如下结论: ①水-岩作用程度越来越大时, 水-岩作用区域的岩体平衡越容易被打破; ②在库水位上升和下降的过程中, 该库岸边坡滑带 2 的安全系数整体上随库水位变化呈正相关, 体现了库水位上升和下降引起的消落带岩体浮托力增大和减小的过程; ③而在库水位上升和下降的过程中, 该库岸边坡滑带 1 的安全系数整体上随库水位变化呈反比例关系, 体现了库水内渗和外渗引起浮重度增加和减小的过程, 最终导致抗滑段抗滑能力的增加和减小。

### 参 考 文 献:

- [1] 张 梁. 酸性环境干湿交替作用下泥质砂岩宏细观损伤特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014. (ZHANG Liang. Study on macro-meso damage characteristics of argillaceous sandstone under dry-wet cycle in acidic condition[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014, (in Chinese))
- [2] 王永新. 水-岩相互作用机理及其对库岸边坡稳定性影响的研究[D]. 重庆: 重庆大学. 2006. (WANG Ying-xin. Study on the effect of water-rock interaction on stability of reservoir bank[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006, (in Chinese))
- [3] 薛晶晶, 张振华. 干湿交替中砂岩强度与波速关系的试验研究[J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2011, 33(3): 51 - 54. (XUE Jing-jing, ZHANG Zhen-hua. Experimental research on relationship between strength of sandstone and wave velocity during wet and dry cycles[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2011, 33(3): 51 - 54. (in Chinese))
- [4] ESTABRAGH A R, MOGHADAS M, JAVADI A A. Effect of different types of wetting fluids on the behavior of expansive soil during wetting and drying[J]. Soils and Foundations, 2013, 53(5): 617 - 627.
- [5] EKREM Kalkan. Impact of wetting-drying cycles on swelling behavior of clayey soils modified by silica fume[J]. Applied

- Flay Science, 2011, **52**(4): 345 – 352. (in Chinese)
- [6] 李克钢, 郑东普, 黄维辉. 干湿循环作用下砂岩力学特性及其本构模型的神经网络模拟[J]. 岩土力学, 2013, **34**(增刊 2): 168 – 173. (LI Ke-gang, ZHENG Dong-pu, HUANG Wei-hui. Mechanical behavior of sandstone and its neural network simulation of constitutive model considering cyclic drying-wetting effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(S2): 168 – 173. (in Chinese))
- [7] LIN M L, JENG F S, TSAI L S, et al. Wetting weakening of tertiary sandstones-microscopic mechanism[J]. Environ Geological, 2005, **48**: 265 – 275.
- [8] 张 鹏, 柴肇云. 干湿循环条件下砂岩强度劣化试验研究[J]. 金属矿山, 2013, **448**(10): 5 – 7, 11. (ZHANG Peng, CHAI Zhao-yun. Sandstone strength degradation experiments under the condition of dry-wet circulation[J]. Metal Mine, 2013, **448**(10): 5 – 7, 11. (in Chinese))
- [9] 王莎莎, 谢学斌, 肖崇春. 考虑干湿循环效应的砂岩边坡稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2015, **35**(6): 20 – 24. (WANG Sha-sha, XIE Xue-bin, XIAO Chong-chun. Impact of cyclic wetting and drying on stability of sandstone slope[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2015, **35**(6): 20 – 24. (in Chinese))
- [10] 汪 然, 朱大勇, 姚华彦. 温度对大理岩力学性能的影响[J]. 金属矿山, 2013, **442**(4): 49 – 53. (WANG Ran, ZHU Da-yong, YAO Hua-yan. Influence of temperature on the mechanical performance of marble[J]. Metal Mine, 2013, **442**(4): 49 – 53. (in Chinese))
- [11] 刘新荣, 傅 晏, 王永新. (库)水-岩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 Xin-rong, FU Yan, WANG Yong-xin. 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))
- Chinese))
- [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. (FU Yan. Study on water-rock interaction with the cyclic drying-wetting effect on rock[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese))
- [13] 邓华锋, 李建林, 王孔伟. "饱水-风干" 循环作用下砂岩损伤劣化规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, **7**(6): 1091 – 1096, 1120. (DENG Hua-feng, LI Jian-lin, WANG Kong-wei. Research on the deterioration rules of damaged sand rock under "saturation-air dry" cycles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, **7**(6): 1091 – 1096, 1120. (in Chinese))
- [14] 邓华锋, 李建林, 朱 敏. 饱水-风干循环作用下砂岩强度劣化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(11): 3306 – 3312. (DENG Hua-feng, LI Jian-lin, ZHU Min. Experimental research on strength deterioration rules of sandstone under "saturation-air dry" circulation function[J]. Rock and Soil Mechanic, 2012, **33**(11): 3306 – 3312. (in Chinese))
- [15] 黄维辉. 干湿交替作用下砂岩劣化效应研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014. (HUANG Wei-hui. Study on sandstone degradation effect under the action of alternating wet[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014. (in Chinese))
- [16] 邓华锋. 库水变幅带水-岩作用机理和作用效应研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010. (DENG Hua-feng. Study on the mechanism and effects of water-rock interaction under water level change region[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010. (in Chinese))
- [17] 林宗元. 岩土工程勘察设计手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1996. (LIN Zong-yuan. Geotechnical engineering survey and design manual[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1996. (in Chinese))