

水库滑坡变形特征和预测预报的数值研究

唐晓松^{1, 2}, 郑颖人^{1, 2}, 唐辉明³, 刘志祥⁴

(1. 后勤工程学院, 重庆 400041; 2. 重庆市地质灾害防治工程技术研究中心, 重庆 400041; 3. 中国地质大学工程学院, 湖北 武汉 430074;
4. 北京金土木软件技术有限公司, 北京 100044)

摘要: 水库滑坡不同于一般山体滑坡, 其稳定性受水位波动的影响十分明显。由于水库滑坡的特殊性和重要性, 其变形特征和预测预报的研究已成为目前研究的热点和难点。库水水位的波动, 改变了水库滑坡的水力边界条件, 引起坡体内渗流场的非稳定渗流, 采用传统的分析方法很难对其变形破坏特征和稳定性的动态变化进行研究, 并对其失稳破坏进行预测预报。因此, 基于数值极限分析方法对水位下降过程中滑坡体的变形特征和稳定性的动态变化规律进行了研究; 通过位移-时间关系曲线以及位移-时间对数关系曲线对滑坡体的变形破坏特征进行了定量研究, 并提出利用水平位移陡升段(加速段)和水平方向的夹角作为滑坡临滑预报的判据, 为认清水库滑坡的破坏机制和提升其预报水平提供了新的思路。

关键词: 水库滑坡; 变形特征; 稳定性; 破坏机制; 预测预报

中图分类号: P642.22, TV698 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)05-0940-08

作者简介: 唐晓松(1979-), 男, 江苏海门人, 博士, 主要从事岩土工程稳定性及其数值模拟方面的研究工作。E-mail: hnm97@163.com。

Numerical researches on deformation characteristics and prediction of reservoir landslides

TANG Xiao-song^{1, 2}, ZHENG Ying-ren^{1, 2}, TANG Hui-ming³, LIU Zhi-xiang⁴

(1. Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China; 2. Chongqing Engineering and Technology Research Center of Geological Hazard Prevention and Treatment, Chongqing 400041, China; 3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 4. Civil King Software Technology Co., Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Reservoir landslide is different from other mountain landslides, and its stability is obviously influenced by the fluctuation of water level. Due to its particularity and importance, the researches on the deformation characteristics and prediction of reservoir landslides have become the focus and difficult points. The fluctuation of reservoir water level will change the hydraulic boundary conditions and lead to unstable flows in the seepage field of the slope. The traditional analysis method cannot study the failure characteristics of deformation, the dynamic variation of stability and the prediction of unstable failure. So based on the numerical limit analysis, the deformation characteristics of landslides during the descending of water level and the dynamic variation law of stability are studied. The deformation characteristics of landslides are quantitatively studied through displacement-time relationship curve and its logarithmic relationship curve. The angle between the section of steep rise (acceleration section) of horizontal displacement and horizon is put forward to be the criterion for sliding prediction. It provides a new idea for understanding the failure mechanism of reservoir landslides and the improvement of prediction.

Key words: reservoir landslide; deformation characteristic; stability; failure mechanism; prediction

0 引言

由于库水水位周期性的涨落, 水库滑坡经过反复浸泡, 土体强度参数的变化越来越小, 并趋于定值, 此时水库滑坡的稳定性受水位波动的影响十分明显^[1-3], 特别是水位变化速度的快慢与水库滑坡的稳定性关系更为密切, 一定的水位变化速度可缩短滑坡的演变历程, 使滑坡提前发生破坏失稳。

国内外因库水水位变化诱发的滑坡灾害并不鲜见, 但是水位波动在水库滑坡变形破坏中的作用机理及其定量表现, 却一直是研究中的难点。正是由于水库滑坡的复杂性, 其预测预报目前还是一个世界性的

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目
(2011CB710606)

收稿日期: 2012-08-23

科学难题。其中, 预报判据作为水库滑坡预报的核心之一, 很难找到一个统一的定量指标或阈值^[4]。

由于库水水位的波动, 改变了水库滑坡的水力边界条件, 引起了坡体内渗流场的非稳定渗流, 因此采用传统的分析方法很难对其变形破坏特征和稳定性的动态变化进行研究^[5-6], 而数值极限分析方法能较好的克服传统分析方法的不足, 为研究水库滑坡的变形破坏特征提供了一种有效途径^[7-9]。文章基于数值极限分析方法对水库滑坡算例在水位下降过程中滑坡体的变形破坏特征和稳定性的动态变化规律进行了研究, 通过流-固耦合分析定量研究了不同水位下降速度和不同渗透系数条件下坡体稳定性的动态变化规律; 通过位移-时间关系曲线以及位移-时间对数关系曲线对滑坡体的变形破坏特征进行了定量研究, 并提出利用水平位移陡升段(加速段)和水平方向的夹角作为滑坡临滑预报的判据, 为认清水库滑坡的破坏机制和提升其预报水平提供了一定依据。

1 基本方法

1.1 稳定分析

水位变化过程中水库滑坡稳定性的动态分析采用PLAXIS程序结合强度折减法实现, 该方法通过不断降低岩土强度, 直至达到极限破坏状态为止, 此时强度降低的倍数就是强度贮备安全系数^[10-14]。对于岩土中广泛采用的莫尔-库仑材料, 强度折减安全系数 ω 可表示为 $\tau = \frac{c + \sigma \tan \varphi}{\omega} = c' + \sigma \tan \varphi'$, 其中: $c' = \frac{c}{\omega}$, $\tan \varphi' = \frac{\tan \varphi}{\omega}$ 。

当坡体达到破坏状态时, 程序根据有限元的计算结果自动得到破坏滑动面, 并得到强度贮备安全系数。

1.2 渗流场分析

水库滑坡的稳定分析及其变形破坏特征的研究必须基于滑坡体内渗流场特征的准确描述。库区水位的波动引起滑坡水力边界条件的改变, 因此需要对每一时刻坡体内的浸润面位置进行研究。本文采用PLAXIS2012版, 它集成的地下水渗流模块不但可以进行水位变化、降雨和抽水等工程条件下, 饱和土和非饱和土中地下水的非稳定渗流计算, 还可以进行流-固耦合计算^[15-16]。

1.3 变形计算

滑坡预报的方法或手段有许多, 其中最常用的是位移监测。通过位移-时间曲线可以对滑坡体的变形破坏特征进行定量研究, 但是在滑坡监测过程中, 监测数据往往不够完善, 而利用数值方法, 采用时间外推, 可以对特征点水平位移随时间的变化进行预测, 并提出临滑预报的判据。由于滑坡的变形并不是瞬间

达到最大值的, 而是随时间不断发展的, 因此其变形具有明显的蠕变特点^[17-18]。为了模拟滑坡的蠕变变形行为, 分析中滑带土采用PLAXIS程序提供的三维SCC软土蠕变模型, 滑体土和滑床土采用莫尔-库仑模型。PLAXIS程序中三维SCC软土蠕变模型的主要输入参数包括土体重度 γ 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 和模型的3个刚度参数 k^* 、 λ^* 和 μ^* 。其中, k^* 为模型的修正膨胀系数指标, λ^* 为模型的修正压缩系数指标, μ^* 为模型的修正蠕变指标。这3个参数即可通过各向同性的压缩试验和固结试验求得, 也可通过反算得到。其中, 试验所得应力应变曲线中正常固结线的斜率就是 λ^* ; 通过卸荷曲线或膨胀曲线的斜率可以计算得到 k^* ; 通过测量试样长期的体积应变, 并绘制其与时间对数的关系曲线可求得 μ^* 。

2 数值模型与计算参数

采用三峡库区某水库滑坡工程作为算例, 其中滑带土采用三维SCC软土蠕变模型, 滑体土和滑床土采用莫尔-库仑模型。整个边坡区域的计算范围为435 m×115 m。计算区域的左右边界采用水平方向约束, 底部采用固定约束; 岩土体按均质各向同性材料考虑; 按平面应变条件, 采用6节点三角形等参元进行网格划分, 如图1所示; 岩土体物理力学参数和蠕变参数根据反算获得, 如表1所示。选取坡面上4个水平位移观测点(如图1所示)的水平位移数据进行变形破坏特征的定量研究。

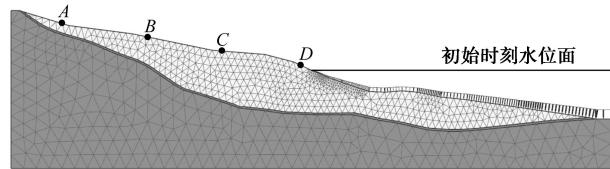


图1 计算模型网格划分示意图

Fig. 1 Mesh generation of model

2.1 不同水位下降速度条件下的稳定性动态分析结果

分别取水位下降速度等于0.5, 1.0, 2.0, 3.0 m/d, 分析不同水位下降速度对坡体稳定性的影响。水位降幅等于30 m, 对应不同水位下降速度, 水位下降的时间分别为60, 30, 15, 10 d。计算时间至水位下降时开始, 取200 d, 即对于水位下降速度等于1.0 m/d的情况, 水位降幅30 m, 水位下降时间等于30 d, 由于整个计算时间为200 d, 因此在后170 d水位保持不变。不同水位下降速度条件下安全系数和计算天数的关系曲线如图2所示。

从图2可以看出, 安全系数随时间的变化规律基本上都是先减小后增大。当安全系数下降至最低点后, 随着时间的增长, 安全系数逐渐增大。对于不同的水位下降速度, 安全系数最小值对应着不同的水位高

表 1 岩土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock and soil mass

土体名称	材料模型	排水条件	天然重度 /(kN·m ⁻³)	饱和重度 /(kN·m ⁻³)	黏聚力 c/kPa	摩擦角 φ /(°)	渗透系数 (m·s ⁻¹)	修正压缩指标 λ^*	修正膨胀指标 k^*	修正蠕变指标 μ^*
滑带	软土蠕变模型	不排水	19.20	19.4	14.4	12.5	1×10^{-5}	0.12	0.012	0.006
滑体	莫尔 - 库仑模型	不排水	19.20	19.4	18.4	17.8	1×10^{-5}			
滑床	莫尔 - 库仑模型	不排水	2.70	27.0	400.0	35.0	1×10^{-20}			

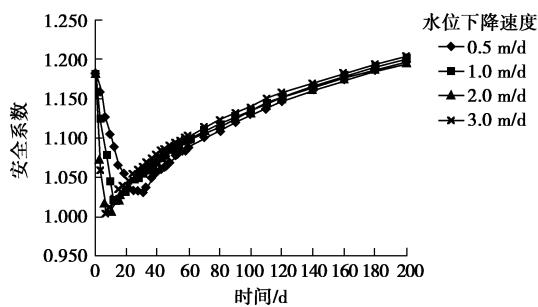


图 2 不同水位下降速度条件下安全系数随时间的变化曲线

Fig. 2 Variation curves of safety factor with time under different descending speeds of water level

度, 即“最不利水位”。实际工程中, 应以“最不利水位”对应的安全系数校核坡体的稳定性。从图 2 可以看出, 由于安全系数在整个计算时间的起始阶段变化相对较大, 因此以计算时间 3 d 为时间间隔, 重点对 0~42 d 坡体的稳定性进行研究。0~42 d 不同水位下降速度条件下安全系数的计算结果如表 2 所示。

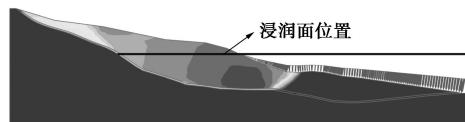
表 2 不同水位下降速度条件下安全系数的计算结果

Table 2 Calculated results of safety factor under different descending speeds of water level

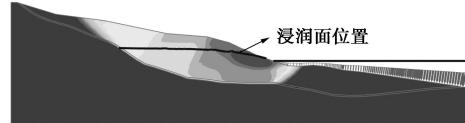
时间/d	水位下降速度/(m·d ⁻¹)			
	0.5	1.0	2.0	3.0
初始时刻 (0)	1.182	1.182	1.182	1.182
3	1.159	1.125	1.072	1.060
6	1.128	1.079	1.018	1.004
9	1.106	1.044	1.008	1.011
12	1.089	1.022	1.019	1.024
15	1.068	1.024	1.023	1.034
18	1.057	1.032	1.037	1.039
21	1.045	1.041	1.042	1.047
24	1.035	1.046	1.050	1.055
27	1.032	1.051	1.057	1.059
30	1.031	1.054	1.061	1.064
33	1.039	1.059	1.066	1.068
36	1.049	1.064	1.071	1.075
39	1.056	1.069	1.077	1.080
42	1.060	1.075	1.082	1.084

不同时刻滑坡体内滑面的形态如图 3 所示。从图 3 可以看出, 通过流 - 固耦合分析不仅可以直观地显示不同时刻滑坡体内的滑面形态, 还可以描述坡体内浸润面位置的变化过程。从滑面的形态可以看出, 初始阶段滑坡的破坏主要是坡体中、后部, 部分沿滑带局部失稳。随着水位的下降, 计算时间的增长, 滑坡的破坏特征也从部分沿滑带的局部失稳逐渐转化为沿

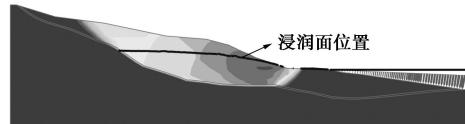
滑带的整体失稳。



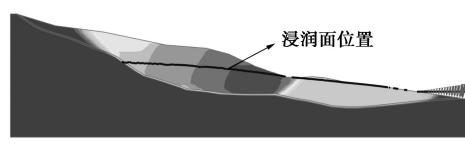
(a) 初始时刻滑面位置



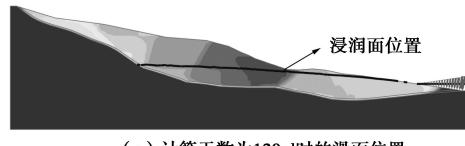
(b) 计算天数为 6 d 时的滑面位置



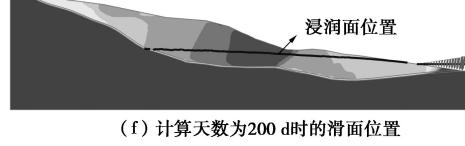
(c) 计算天数为 12 d 时的滑面位置



(d) 计算天数为 20 d 时的滑面位置



(e) 计算天数为 120 d 时的滑面位置



(f) 计算天数为 200 d 时的滑面位置

图 3 不同时刻滑面形态 (水位下降速度等于 2.0 m/d, 渗透系数等于 1×10^{-5} m/s)

Fig. 3 Sliding surface at different time (descending water level at speed of 2.0 m/d and permeability coefficient of 1×10^{-5} m/s)

相关研究结果表明^[18-19], 可采用滑坡的稳定安全系数对其进行定量预报, 如表 3 所示。依据表 3 的评价指标, 当稳定安全系数在 1.01~1.00 之间时, 滑坡处于临滑状态, 应进行临滑预报。根据表 2 的计算结果, 不同的水位下降速度对应的临滑预报的时间也不同, 当水位下降速度等于 2.0 m/d 时, 应在 6~12 d 这一时间段进行临滑预报。当水位下降速度等于 3.0 m/d

表3 滑坡蠕变破坏演化过程的阶段划分与评价指标

Table 3 Stage division and evaluation indexes of evolution process of creep failure

变形阶段	稳定状态	弱变形与较强变形状态	强变形状态	临滑状态
变形速度	零速率	等速变形	加速变形	剧速变形
稳定系数	>1.1	1.1~1.04	1.04~1.01	1.01~1.00
现场观察指标	边(滑)坡体及其上面的建筑物均无明显变形, 无地裂缝	主滑带剪应力超过其抗剪强度发生蠕动, 裂缝逐渐扩大并使牵引段发生拉裂; 边(滑)坡体无明显变形; 边(滑)坡后缘地表或建筑物上出现一条或数条地裂缝, 由断续分布而逐渐贯通; 滑坡两侧、滑坡前缘均无明显变形或滑坡两侧出现羽状裂缝。坡体中上部出现下沉、下错等现象。	主滑段和牵引段滑面形成, 滑体沿其下滑推挤抗滑段, 抗滑段滑带逐渐形成; 坡体中、上部下沉并向前进移动, 下部受挤压而抬升, 变松。后缘主拉裂缝贯通, 加宽, 外侧下错, 并向两侧延长; 滑坡两侧中、上部有羽状裂缝出现并变宽, 两侧剪切裂缝向抗滑段延伸; 前缘地面有局部隆起, 先出现平行滑动方向的放射状裂缝再出现垂直滑动方向的鼓胀裂缝, 时有坍塌, 泉水增多并混浊, 剪出口附近出现鼓丘	滑体开始整体向下滑移, 重心逐渐降低; 抗滑段滑面贯通, 从地面剪出, 整个滑动面贯通, 滑坡整体滑移。后缘裂缝增多, 加宽, 地面下陷, 滑坡壁增高, 建筑物倾斜; 两侧裂缝与后缘张裂缝及前缘剪出口裂缝完全贯通, 两侧壁出现; 前缘坍塌明显, 泉水增多并混浊, 剪出口附近出现鼓丘
监测数据指标	位移不大, 速度趋于零	位移逐渐增大, 速度时大时小, 趋于等速, 无明显加速, 处于等速变形阶段	位移快速增大, 由等速逐渐转向加速, 处于加速变形阶段	大多数测点位移与速度突然剧增, 并持续高速增长, 不再出现明显下降, 剧烈加速, 处于剧速变形阶段
数值计算指标	位移速率减少, 直至趋于零, 位移值趋于常数, 处于稳定状态	位移线性增大, 速度近似等速, 无明显加速, 处于等速变形和弱变形阶段	位移增速较大, 速度由等速转向加速变形, 处在加速变形与强变形阶段	位移与速度剧增, 有时位移增大两个数量级, 计算失真, 计算机已无法计算。处于剧速变形与临滑阶段

时, 临滑预报的时间则变为 3~9 d。

2.2 滑坡体变形破坏特征的定量研究

水位下降速度等于 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 m/d 时 4 个水平位移观测点的水平位移随时间的变化曲线如图 4~7 所示。

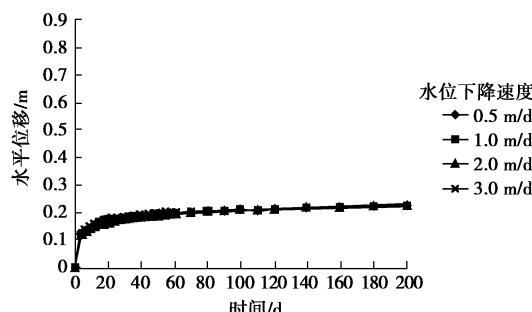


图4 点A水平位移随时间的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of horizontal displacement at point A with time

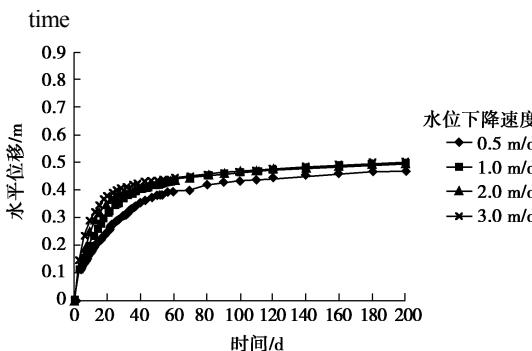


图5 点B水平位移随时间的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of horizontal displacement at point B with time

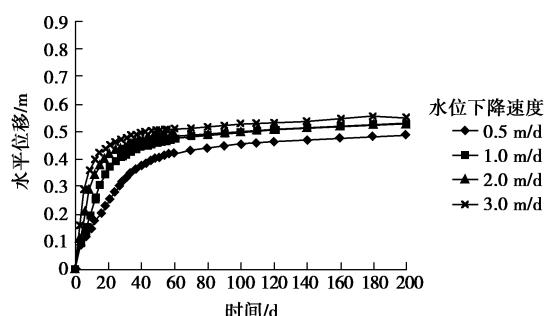


图6 点C水平位移随时间的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of horizontal displacement at point C with time

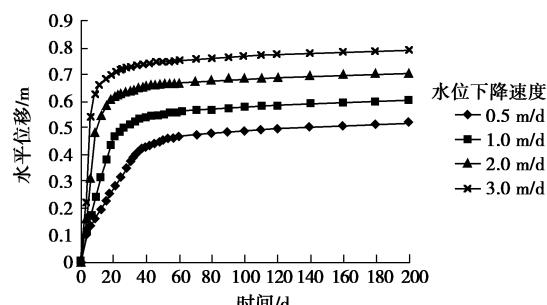


图7 点D水平位移随时间的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of horizontal displacement at point D with time

从图 4~7 中曲线的变化规律可以看出, 各点的水平位移在水位下降的初始阶段均呈现了陡升的现象, 这和前述坡体的稳定性在水位下降初始阶段显著降低的分析结果是一致的。同时, 水位下降速度越快, 水

平位移增长的幅度越明显。在水平位移经历了陡升阶段后，其增长速度逐渐减缓，并趋于稳定，各点水平位移随时间的变化曲线呈近似直线。

根据表 2 稳定安全系数的计算结果，由于水位下降引起坡体稳定性降低，安全系数小于 1.01 的计算结果主要集中在初始阶段至 12 d 这一时间段，对应的正是图 4~7 中曲线的陡升阶段。随着计算时间的增长，稳定安全系数在降低至最低值后逐渐升高，对应的则是图 4~7 中曲线的近似直线段。同时还可以看出，点 A, B, C 的水平位移明显小于点 D 的水平位移，这主要是和滑坡的破坏机制有关，在水位下降阶段，滑坡的破坏主要是坡体中、后部，部分沿滑带的局部失稳，由于点 D 位于滑体上，该点的水平位移相对较大，其水平位移的变化规律也最能反映滑坡的变形破坏特征。因此，无论是进行现场监测，还是对坡体的变形破坏特征进行数值研究，点 D 都比较适宜作为特征点。

对于水库滑坡的预报而言，显然滑坡体处于极限破坏状态的变形特征更具有研究意义，如图 4~7 采用等间距的水平（时间）坐标无法清楚显示滑坡体的变形特征。为了更清楚地显示滑坡体处于极限破坏状态的变形特征，考虑适当加大曲线陡升阶段水平坐标的间隔，而近似水平段水平坐标的间隔则可适当减少，因此可以采用水位位移和时间对数的关系曲线，如图 8~11 所示。为了便于直观地比较 4 个水平位移观测点变形特征的变化规律，图 8~11 采用统一的坐标系，即固定了水平坐标和竖直坐标的变化范围以及水平坐标和竖直坐标的长度比，由此避免了坐标系的变化所引起的曲线变化趋势的不同。其中，水平坐标为时间的对数值，计算时间为 0~200 d，相应的对数坐标值在 0~5.30 之间变化；竖直坐标为 4 个水平位移观测点水平位移的大小，在 0~0.9 m 之间变化。水平坐标和竖直坐标的长度比为 1.40 : 1。

由图 8~11 可以看出，各点的水平位移随时间对数的变化呈曲线变化。在水位下降初始阶段，水平位移的变化较明显，由于采用了时间对数坐标，因此相对较大的坐标间隔有助于分析这一阶段坡体的变形特征。采用多段直线近似描述水平位移随时间对数的变化曲线，如图 12 中 D 点水平位移随时间对数的变化趋势。从图 12 可以看出，由于 D 点位于滑坡体上（滑面位置如图 3 所示），因此其位移变化更剧烈，同时也更能表征滑坡体的变形破坏特征。从图中所示的变化趋势可以看出，D 点的水平位移受水位下降的影响，经历了变形发生（初始段）→变形急剧增大（加速段）→变形减缓（减速段）→趋于稳定（等速段）这 4 个阶段。在水位下降过程中，也存在水位下降速度越快，水平位移随时间对数的变化越明显的现象，这和前述水位下降

速度越快，坡体稳定性越差的分析结果是一致的。

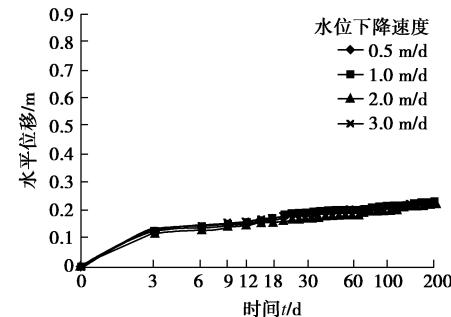


图 8 A 点水平位移随时间对数的变化曲线

Fig. 8 Logarithmic curves of horizontal displacement at point A with time

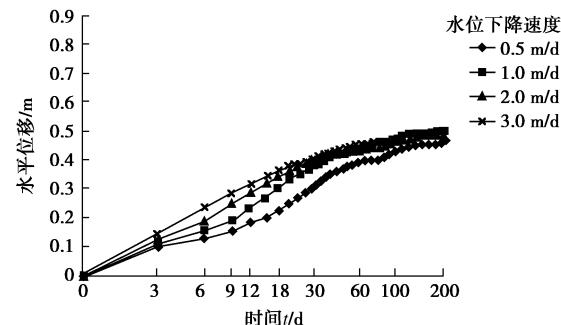


图 9 B 点水平位移随时间对数的变化曲线

Fig. 9 Logarithmic curve of horizontal displacement at point B with time

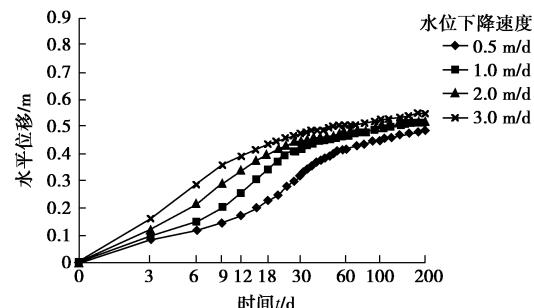


图 10 C 点水平位移随时间对数的变化曲线

Fig. 10 Logarithmic curves of horizontal displacement at point C with time

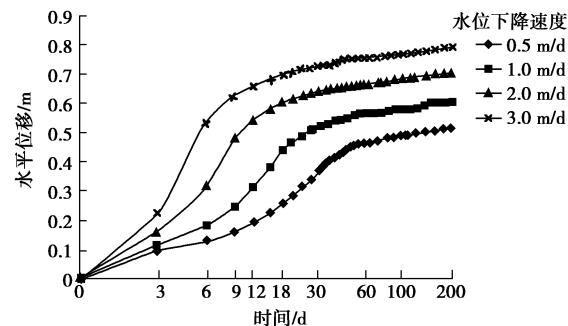


图 11 D 点水平位移随时间对数的变化曲线

Fig. 11 Logarithmic curves of horizontal displacement at point D with time

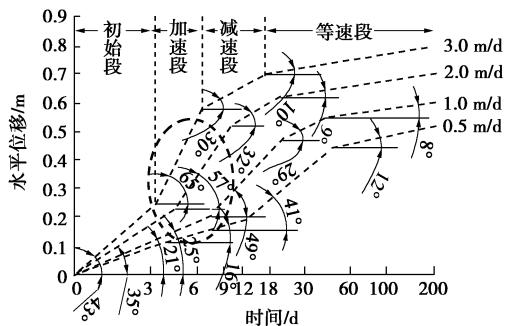


图 12 D 点水平位移随时间对数的变化趋势

Fig. 12 Variation trend of logarithmic curves of horizontal displacement at point D with time

通过图 12 和表 2 的对比分析可以看出, 不同水位下降速度条件下稳定安全系数降低幅度最明显的阶段正好对应图 12 中近似直线段和水平方向的夹角最大的阶段, 如水位下降速度等于 2.0 m/d 时 6~12 d 时间段和水位下降速度等于 3.0 m/d 时 3~9 d 时间段。

根据表 2 的计算结果, 以安全系数在 1.01~1.00 之间变化作为临滑状态的评价指标, 不同的水位下降速度对应着不同的时间段。当水位下降速度等于 2.0 m/d 时, 在 6~12 d; 以及当水位下降速度等于 3.0 m/d 时, 在 3~9 d 这两个时间段内, 坡体的安全系数可能降至 1.01~1.00 之间。对应这两个时间段, 图 12 中 D 点水平位移随时间对数的变化也十分剧烈, 均处于加速段, 直线段和水平方向的夹角分别为 57° 和 65°, 其余直线段和水平方向的夹角则相对较小。因此对于水库滑坡, 可以通过研究特征点的水平位移随时间对数的变化趋势, 即研究各近似直线段和水平方向的夹角, 把水平位移陡升段(加速段)和水平方向的夹角作为水库滑坡临滑预报的判据之一, 并结合监测数据和宏观现象进行综合预报, 这将为水库滑坡的临滑预报提供了一个新的思路。

2.3 渗透系数对稳定性和坡体变形破坏特征的影响

当水位下降速度等于 0.5, 1.0 和 2.0 m/d 时, 分别采用不同的渗透系数 1×10^{-4} , 1×10^{-5} , 5×10^{-6} m/s 分析渗透系数的大小对稳定性和坡体变形破坏特征的影响。计算结果如表 4~6 所示。

从表 4~6 安全系数的计算结果可以看出, 在不同水位下降速度条件下, 安全系数随时间的变化均遵循先减小后增大的变化规律。同时, 渗透系数越小, 安全系数降低的幅度越大, 这和已有的渗透系数越小, 水位下降引起的孔隙水压力越难消散, 坡体的稳定性越差的认识是一致的。

其中, 当水位下降速度等于 1.0 m/d 时, 渗透系数等于 5×10^{-6} m/s 对应的时间段 12~18 d; 当水位下降速度等于 2.0 m/d 时, 渗透系数等于 1×10^{-5} m/s 对应的时间段 6~12 d; 以及渗透系数等于 5×10^{-6} m/s

对应的时间段 6~18 d 这 3 个时间段, 坡体的安全系数均降至 1.01~1.00 之间, 应进行临滑预报。

表 4 不同渗透系数条件下安全系数的计算结果(水位下降速度 0.5 m/d)

Table 4 Calculated results of safety factor under different permeability coefficients (descending water level at speed of 0.5 m/d)

时间/d	渗透系数/(m·s ⁻¹)		
	1×10^{-4}	1×10^{-5}	5×10^{-6}
初始时刻(0)	1.182	1.182	1.182
3	1.166	1.159	1.158
6	1.147	1.128	1.125
9	1.134	1.106	1.100
12	1.124	1.089	1.080
15	1.120	1.068	1.059
18	1.117	1.057	1.046
21	1.118	1.045	1.027
24	1.122	1.035	1.052
27	1.129	1.032	1.045
30	1.138	1.031	1.046
33	1.147	1.039	1.050
36	1.160	1.049	1.053
39	1.160	1.056	1.052
42	1.190	1.060	1.033

表 5 不同渗透系数条件下安全系数的计算结果(水位下降速度 1.0 m/d)

Table 5 Calculated results of safety factor under different permeability coefficients (descending water level at speed of 1.0 m/d)

时间/d	渗透系数/(m·s ⁻¹)		
	1×10^{-4}	1×10^{-5}	5×10^{-6}
初始时刻(0)	1.182	1.182	1.182
3	1.141	1.125	1.122
6	1.116	1.079	1.076
9	1.101	1.044	1.038
12	1.098	1.022	1.014
15	1.110	1.024	1.009
18	1.136	1.032	1.018
21	1.157	1.041	1.029
24	1.179	1.046	1.022
27	1.186	1.051	1.028
30	1.194	1.054	1.029
33	1.213	1.059	1.034
36	1.225	1.064	1.038
39	1.235	1.069	1.041
42	1.244	1.075	1.044

根据前述的研究, 通过分析特征点 D 点的水平位移随时间对数的关系曲线分析滑坡的变形破坏特征。在统一的坐标系下, 不同渗透系数条件下 D 点水平位移随时间对数的变化曲线如图 13~15 所示。

从图 13, 14 可以看出, 与表 5, 6 中安全系数降至 1.01~1.00 的时间段相对应的水平位移陡升段(加速段)和水平方向的夹角均大于 62°, 因此通过研究水平位移陡升段(加速段)和水平方向的夹角, 并以此作为水库滑坡临滑预报的判据之一是可行的。

表 6 不同渗透系数条件下安全系数的计算结果 (水位下降速度 2.0 m/d)

Table 6 Calculated results of safety factor under different permeability coefficients (descending water level at speed of 2.0m/d)

时间/d	渗透系数/(m·s ⁻¹)		
	1×10 ⁻⁴	1×10 ⁻⁵	5×10 ⁻⁶
初始时刻 (0)	1.182	1.182	1.182
3	1.102	1.072	1.068
6	1.064	1.018	1.013
9	1.100	1.008	0.995
12	1.140	1.019	1.006
15	1.145	1.023	1.009
18	1.166	1.037	1.011
21	1.185	1.042	1.018
24	1.199	1.050	1.023
27	1.216	1.057	1.029
30	1.228	1.061	1.033
33	1.233	1.066	1.035
36	1.244	1.071	1.040
39	1.257	1.077	1.044
42	1.265	1.082	1.047

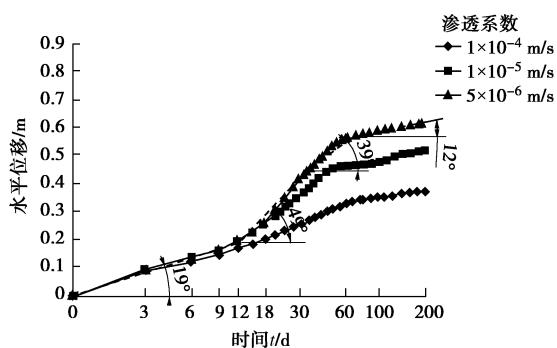


图 13 不同渗透系数条件下 D 点水平位移随时间对数的变化曲线 (水位下降速度等于 0.5 m/d)

Fig. 13 Logarithmic curves of horizontal displacement at point D with time under different permeability coefficients (descending water level at speed of 0.5 m/d)

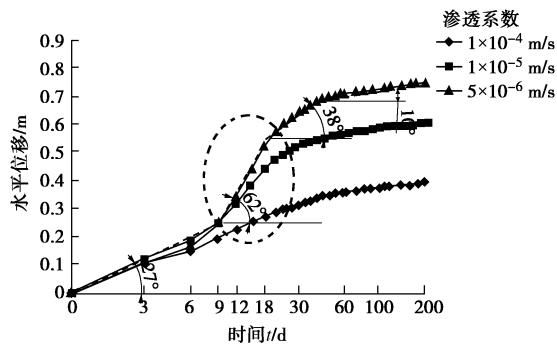


图 14 不同渗透系数条件下 D 点水平位移随时间对数的变化曲线 (水位下降速度等于 1.0 m/d)

Fig. 14 Logarithmic curves of horizontal displacement at point D with time under different permeability coefficients (descending water level at speed of 1.0 m/d)

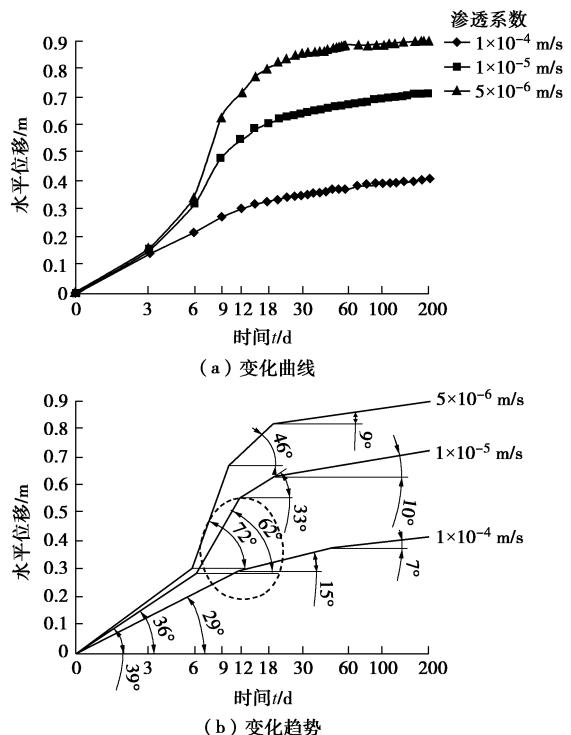


图 15 不同渗透系数条件下 D 点水平位移随时间对数的变化曲线和变化趋势 (水位下降速度等于 2.0 m/d)

Fig. 15 Logarithmic varition curves and trend of horizontal displacement at point D with time under different permeability coefficients (descending water level at speed of 2.0 m/d)

3 结语

水库滑坡的稳定性受库水水位波动的影响十分明显，采用传统的分析方法很难对其变形破坏特征和稳定性的动态变化进行定量研究，而数值极限分析方法能较好地克服传统分析方法的不足，为研究水库滑坡的变形破坏特征和其预报判据提供了一种有效途径。通过研究不同水位下降速度和渗透系数对稳定性的影响，即研究水位变化过程中坡体稳定安全系数的动态变化和水平位移随时间对数的变化趋势，可以定量、直观地研究水库滑坡的变形破坏特征。以水平位移陡升段（加速段）和水平方向的夹角作为水库滑坡临滑预报的判据之一，并结合监测数据和宏观现象进行综合预报，将为水库滑坡的预报提供了一个新的思路。

参考文献:

- [1] 黄润秋, 许 强. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 2008. (HUANG Run-qiu, XU Qiang. Catastrophic landslides in China[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese))
- [2] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433 - 454. (HUANG

- Runqiu. Large-scale landslide and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(3): 433 - 454. (in Chinese))
- [3] HU X L, POTTS M D, ZDRAVKOVI L, et al. Jinle landslide stability under water level fluctuation of Three Gorges reservoir[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2007, **32**(3): 403 - 408.
- [4] 章广成. 水位变化对滑坡稳定性的影响研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2005. (ZHANG Guang-cheng. The researches on the influence of the fluctuation of water level on landslide stability[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2005. (in Chinese))
- [5] 时卫民. 三峡库区滑坡与边坡稳定性实用分析方法研究[D]. 重庆: 后勤工程学院, 2004. (SHI Wei-min. The research on the practical method to analyzing the landslide and Slope Stability in the Three-gorge Reservoir Area[D]. Chongqing: China University of Geosciences, 2004. (in Chinese))
- [6] 时卫民, 郑颖人. 库水位下降情况下滑坡的稳定性分析[J]. 水力学报, 2004(3): 67 - 71. (SHI Wei-min, ZHENG Ying-ren. Analysis on stability of landslide during reservoir drawdown[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(3): 67 - 71. (in Chinese))
- [7] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Géotechnique, 1999, **49**(3): 387 - 403.
- [8] DESAI C S. Drawdown analysis of slopes by numerical method[J]. Journal of the Geotechnical Engineering, 1977, **103**(GT7): 667 - 676.
- [9] 唐晓松, 郑颖人. 应用 PLAXIS 有限元程序进行渗流作用下的边坡稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 2006, **23**(4): 13 - 16. (TANG Xiao-song, ZHENG Ying-ren. Stability analysis of soil slope under seepage by plaxis finite element program[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, **23**(4): 13 - 16. (in Chinese))
- [10] MATSUI T, SAN K C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique[J]. Soils and Foundations, 1992, **32**(1): 59 - 70.
- [11] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Géotechnique, 1975, **25**(4): 671 - 689.
- [12] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(19): 3381 - 3388. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Application of FEM strength reduction in soil slope and rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(19): 3381 - 3388. (in Chinese))
- [13] 郑颖人, 赵尚毅, 李安洪. 有限元极限分析法及其在边坡中的应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, LI An-hong. FEM limit analysis and its application in slope engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))
- [14] 郑颖人, 赵尚毅. 岩土工程极限分析有限元法及其应用[J]. 土木工程学报, 2005, **38**(1): 91 - 98. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Limit state finite element method for geotechnical engineering analysis and its applications[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, **38**(1): 91 - 98. (in Chinese))
- [15] 郑颖人, 唐晓松. 库水作用下的边(滑)坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2007, **27**(8): 1115 - 1121. (ZHENG Ying-ren, TANG Xiao-song. Stability analysis of slopes under drawdown condition of reservoirs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **27**(8): 1115 - 1121. (in Chinese))
- [16] 唐晓松, 郑颖人, 林成功. 水位下降过程中超孔隙水压力对边坡稳定性的影响[J]. 水利水运学报, 2007, **111**(1): 1 - 6. (TANG Xiao-song, ZHENG Ying-ren, LIN Cheng-gong. Effect of excess pore water pressure on stability of slopes under drawdown condition[J]. Hydro-Science and Engineering, 2007, **111**(1): 1 - 6. (in Chinese))
- [17] 陈卫兵, 郑颖人, 冯夏庭. 考虑岩土流变特性的强度折减法研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(1): 101 - 105. (CHEN Wei-bing, ZHENG Ying-ren, FENG Xia-ting. Study on strength reduction technique considering rheological property of rock and soil medium[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(1): 101 - 105. (in Chinese))
- [18] 谭万鹏, 郑颖人, 王凯. 考虑蠕变特性的滑坡稳定状态分析研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊2): 5 - 8. (TAN Wan-peng, ZHENG Ying-ren, WANG Kai. Stable state of landslide considering creep properties[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S2): 5 - 8. (in Chinese))
- [19] 谭万鹏, 郑颖人, 陈卫兵. 动态、多手段、全过程滑坡预警预报研究[J]. 四川建筑科学研究, 2010, **36**(1): 106 - 111. (TAN Wan-peng, ZHENG Ying-ren, CHEN Wei-bing. Studies on the land-slope forecast and early warning by more means in full dynamic discourse[J]. Sichuan Building Science, 2010, **36**(1): 106 - 111. (in Chinese))