

基于三峡库区库水位和降雨统计分析的 八字门滑坡稳定性评价

魏东¹, 王孔伟¹, 胡安龙², 靳宝萍¹, 朱伟¹

(1. 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; 2. 国家电网 国网甘肃经济技术研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: [目的] 分析三峡库区水位及降雨对八字门滑坡的影响, 为八字门滑坡的稳定性作出评价。[方法] 利用滑坡的监测资料对八字门滑坡的变形进行定性分析, 然后在库区水位及降雨定量分析的基础上确定 20 种工况, 利用 Geo-Studio 计算八字门滑坡的稳定性。[结果] 八字门滑坡 10 个 GPS 监测点累积位移监测曲线均为阶梯形状并随着时间呈增长趋势, 形态变化具有同步性。20 种工况下八字门滑坡稳定系数大于 1, 当库水工况不变降雨工况变化时, 最小稳定系数变化较小。当降雨工况不变库水工况变化时, 最小稳定系数变化较大。最小稳定系数在库水位稳定在 175 水位、库水位稳定在 145 水位、2014 年库水位波动、平均库水位、2013 年库水位波动 5 种工况下依次减小。[结论] 八字门滑坡整体处于稳定状态。降雨和库区水位对八字门滑坡稳定性存在影响, 库区水位对八字门滑坡稳定性的影响较大, 库区水位变化幅度越大, 八字门滑坡稳定性就越差。

关键词: 累积位移; 降雨; 库水位; 统计分析法; 稳定性分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)03-0174-06

中图分类号: P642.22

文献参数: 魏东, 王孔伟, 胡安龙, 等. 基于三峡库区库水位和降雨统计分析的八字门滑坡稳定性评价[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3):174-179. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.028. Wei Dong, Wang Kongwei, Hu Anlong, et al. Stability evaluation of Bazimen landslide based on reservoir water level and rainfall statistical analysis in Three Gorges reservoir[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3):174-179.

Stability Evaluation of Bazimen Landslide Based on Reservoir Water Level and Rainfall Statistical Analysis in Three Gorges Reservoir

WEI Dong¹, WANG Kongwei¹, HU Anlong², JIN Baoping¹, ZHU Wei¹

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area

Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;

2. State Grid Corporation of China, State Grid Gansu Economic Research Institute, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: [Objective] The impact of the Three Gorges reservoir water level and rainfall on Bazimen landslide is analyzed to evaluate its stability. [Methods] Landslide monitoring data were used for qualitative analysis of Bazimen landslide deformation. Based on the quantitative analysis of water level and rainfall in the reservoir area, 20 different kinds of working conditions were then determined, and the stability of Bazimen landslide was calculated through Geo-Studio. [Results] The accumulated displacement monitoring curves from 10 GPS monitoring points in the Bazimen landslide were all ladder-shaped and increased with time, and they showed a synchronous morphologic change. Under the 20 different kinds of working conditions, the stability coefficient of the Bazimen landslide was more than 1. When the rain fall condition changed, the minimum stability coefficient varied mildly under the constant reservoir water level. When the reservoir water level changed, the minimum stability coefficient varied greatly under the constant rainfall. The minimum stability coefficient was successively reduced under five different conditions including stable reservoir water level at

收稿日期: 2017-11-25

修回日期: 2017-12-25

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“复杂条件下库岸边坡变形破坏机理及防护”(51439003)

第一作者: 魏东(1993—), 男(汉族), 湖北省宜昌市西陵区人, 硕士研究生, 研究方向为工程地质及地质灾害形成机理。E-mail: 1437939779@qq.com.

通讯作者: 王孔伟(1966—), 男(汉族), 黑龙江省大庆市人, 博士, 副教授, 主要从事工程地质及地质灾害形成机理研究。E-mail: wangkongwei@126.com.

175 m and 145 m, reservoir water level fluctuation in 2014, average reservoir level, and reservoir water level fluctuation in 2013. [Conclusion] The Bazimen landslide is in a stable state, its stability is affected by rainfall and reservoir water level, and reservoir water level is the main factor. The stability of Bazimen landslide will be worse with the larger water level change in the reservoir area.

Keywords: cumulative displacement; rainfall; reservoir water level; statistical analysis method; stability analysis

滑坡的形成有内力和外力两方面因素,从地质作用来看,三峡库区库岸滑坡变形演化过程及分布与构造活动存在一定关系^[1-3];从外力作用来看,库水位变化和降雨作用对库岸滑坡的变形演化有重要影响^[4-8],不同变形阶段对应不同的主要影响因素和预测依据^[9-10]。彭令等^[11]以八字门滑坡为研究对象发现库水位变化和降雨量是导致滑坡季节性变化的主要因素;明成涛等^[12]通过分析滑坡变形速率与库水位、降雨之间的相关性关系,发现暴雨或久雨以及首次高水位浸泡是引起曾家棚滑坡变形的主要因素;代贞伟等^[13]通过研究三峡库区某滑坡变形特征发现滑坡的变形与库水位下降及集中降雨有明显关系。对三峡库区滑坡变形影响因素的分析,学者们主要采用通过以典型滑坡为研究对象进行定性分析^[11-15],而使用定量计算的方法分析滑坡主要变形因素的研究却很少^[16]。

本文拟以三峡库区八字门滑坡为研究对象,利用滑坡的监测资料对八字门滑坡的变形进行定性的分析,然后在库区水位及降雨定量分析的基础上确定20种工况,采用Geo-Studio计算八字门滑坡的稳定性,分析库水位及降雨对八字门滑坡的影响,为八字门滑坡的稳定性作出评价。

1 八字门滑坡基本情况

八字门滑坡位于三峡库区湖北省秭归县归州镇,

长江北岸支流香溪河右岸河口处。三峡水库已淹没滑坡体前缘55~156 m段。地理坐标为110°45'30"N, 30°58'16"E。岸坡呈南北走向,滑坡体呈撮箕状展布于岸坡坡脚,岩层产状为倾向292°∠29°,分布高程139~280 m,向东倾斜,滑体地面坡度10°~30°,呈阶梯状起伏。滑坡体长380 m,宽100~500 m,厚10~35 m,体积约2.00×10⁶。

2 八字门滑坡变形特征分析

八字门滑坡体上现有ZG110, ZG111, GSC1, GSC2, GSC3, GSC4, GSC5, GSC7, GSC8, GSC9等10个GPS监测点,其中ZG110, ZG111为2003年开始监测,其余的监测点从2013年9月才开始监测。本文在收集2007年1月到2014年12月八字门滑坡监测资料、库水位和降雨数据的基础上,作出八字门滑坡累积位移—月降雨量—库水位关系曲线(图1—2)。

由图1—2可知:①八字门滑坡10个GPS监测点累积位移监测曲线均为阶梯形状和随着时间呈增长趋势;②滑坡监测点的位移具有同步性,每年5—7月滑坡GPS监测点快速变形,其中2009年5—7月,2012年5—7月变形最为剧烈。每年8月到第2年的4月监测点缓慢变形。③降雨和库水位变化对滑坡监测点的位移存在影响。

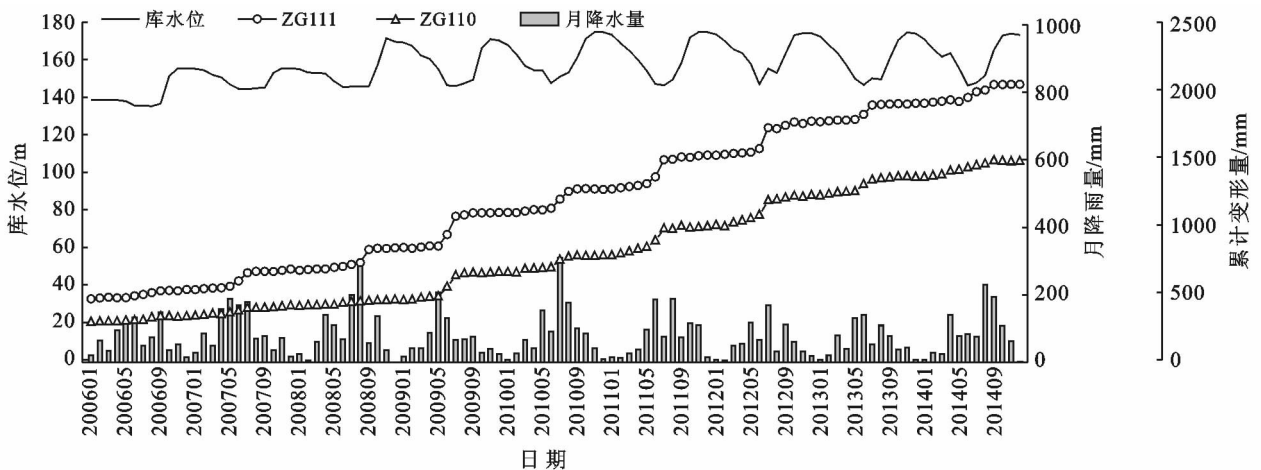


图1 八字门滑坡累积位移—月降雨量—库水位关系曲线1

(1) 库水位对八字门滑坡变形影响。三峡库区库水位每年均经历不同水位涨落,与各监测点累积位移

和月位移变化过程有很好的对应关系。库水位上涨及平稳水位运行阶段并未引起八字门滑坡明显位移变

化;而当库水位下降过程,则对滑坡位移变形影响很大,每次库水位下降均会导致滑坡累积位移上扬和月

位移出现尖三角形。2006—2014 年库水位经历了 9 次下降过程,累积位移变形曲线对应出现了 9 级台阶。

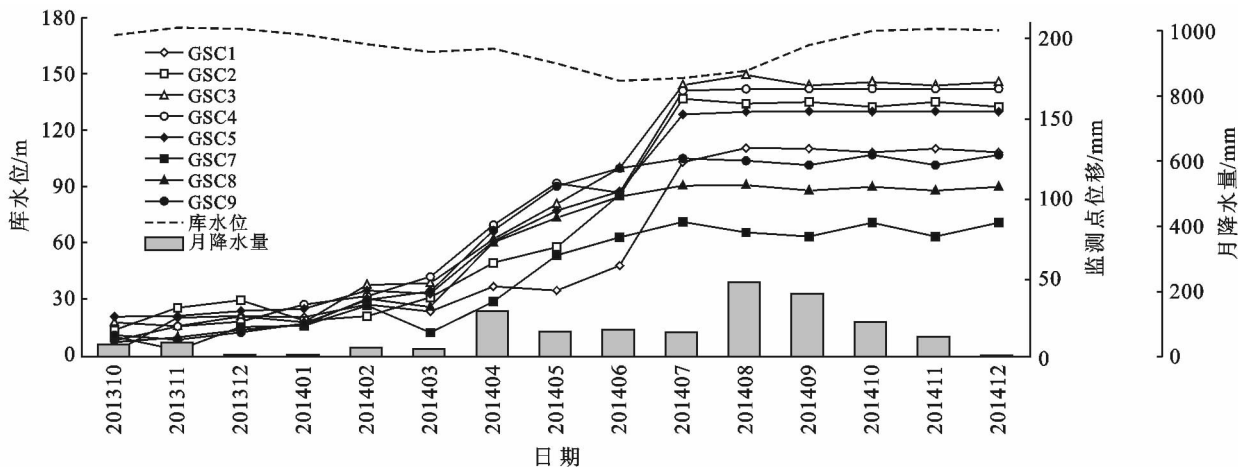


图 2 八字门滑坡累积位移—月降雨量—库水位关系曲线 2

(2) 大气降雨对八字门滑坡变形的影响。三峡库区降雨有明显季节性,而降雨量集中的时段,都是各监测点位移变形出现明显阶跃的时段,具体为:每年 10 月至次年 3 月,为降雨量较少的旱季,此阶段滑坡不出现明显位移变形;而当每年 4—10 月,库区进入汛期,降雨集中,此时滑坡开始有明显位移变形,尤其是 6 月和 7 月多发生 100 mm 以上的暴雨,这时段的滑坡位移变形往往更加明显。这说明集中降雨对滑坡的变形同样会产生重要影响。

3 滑坡稳定性分析

3.1 荷载工况

3.1.1 库水位分析 利用 Origin 做出 2006—2014 年三峡库区水位变化曲线(图 3),由图 3 可以看出三峡库区水位呈周期性变化。2006 年库水位蓄水至 156 m,2008 年试验蓄水至 172.8 m。2010 年首次蓄水至 175 m 之后,坝前水位在 145~175 m 波动。根据三峡库区水位变化规律将 2006—2014 年划分为 3 个阶段:第 1 阶段为 156 m 蓄水阶段(2006—2007 年),第 2 阶段为三峡库区 175 m 试验性蓄水阶段(2008—2009 年),第 3 阶段为三峡库区 175 m 蓄水阶段(2010—2014 年)。

统计 2006—2014 年库水位变化速率,上升的最大速率为 5.6 m/d,下降的最大速率为 4 m/d,主要速

率处于 $[0, 0.4 \text{ m/d}]$ 区间上。统计得出库水位变化变化速率在 $[-1.2, 1.2 \text{ m/d}]$ 区间的概率为 $0.9678 > 0.95$ 。因此进行边坡稳定性计算时三峡库区水位速率模拟值控制在 $[-1.2, 1.2 \text{ m/d}]$ 比较合理。

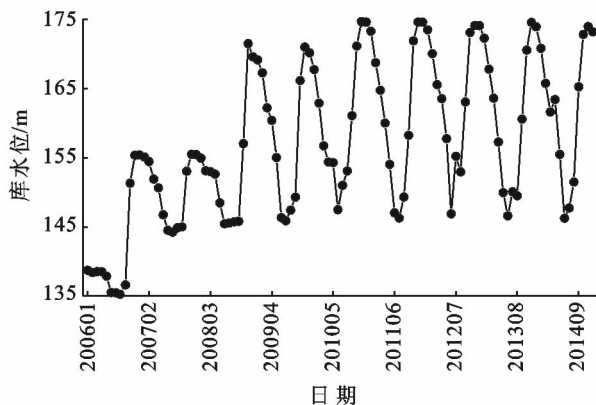


图 3 2006—2014 年三峡库区水位变化

3.1.2 库水位工况的确定 由于未来三峡库区水位变化主要为第 3 阶段 175 m 蓄水阶段,利用 MATLAB 软件统计出 2010—2014 年三峡库区水位变化的 6 个相关指标如表 1 所示。由表 1 可知,从 2010—2014 年,每年水位变化的时间基本稳定在 300 d 左右,水位总变化幅度在 105~137.6 mm。由于 2013 年水位变化总幅度最大,2014 年水位变化总幅度较小。因此将 2013 和 2014 年库水位变化作为 2 个基准工况。

表 1 2010—2014 年三峡库区水位变化相关指标

| 年份 | 水位下降 天数/d | 水位下降的 总幅度/m | 水位上升 天数/d | 水位上升的 总幅度/m | 水位变化的 天数/d | 水位总变化 幅度/m |
|------|--------------|----------------|--------------|----------------|---------------|---------------|
| 2010 | 195 | 60.10 | 102 | -65.40 | 297 | 125.5 |
| 2011 | 204 | 52.40 | 101 | -52.60 | 305 | 105.00 |
| 2012 | 193 | 57.88 | 111 | -56.88 | 304 | 114.76 |
| 2013 | 185 | 68.90 | 124 | -68.70 | 309 | 137.60 |
| 2014 | 211 | 54.80 | 112 | -53.10 | 323 | 107.90 |

由图4分析可知2010—2014年每年库水位变化都可以大致分为6个阶段,每个阶段都呈线性变化。故利用如下公式对每个阶段的库水位进行线性拟合分析。

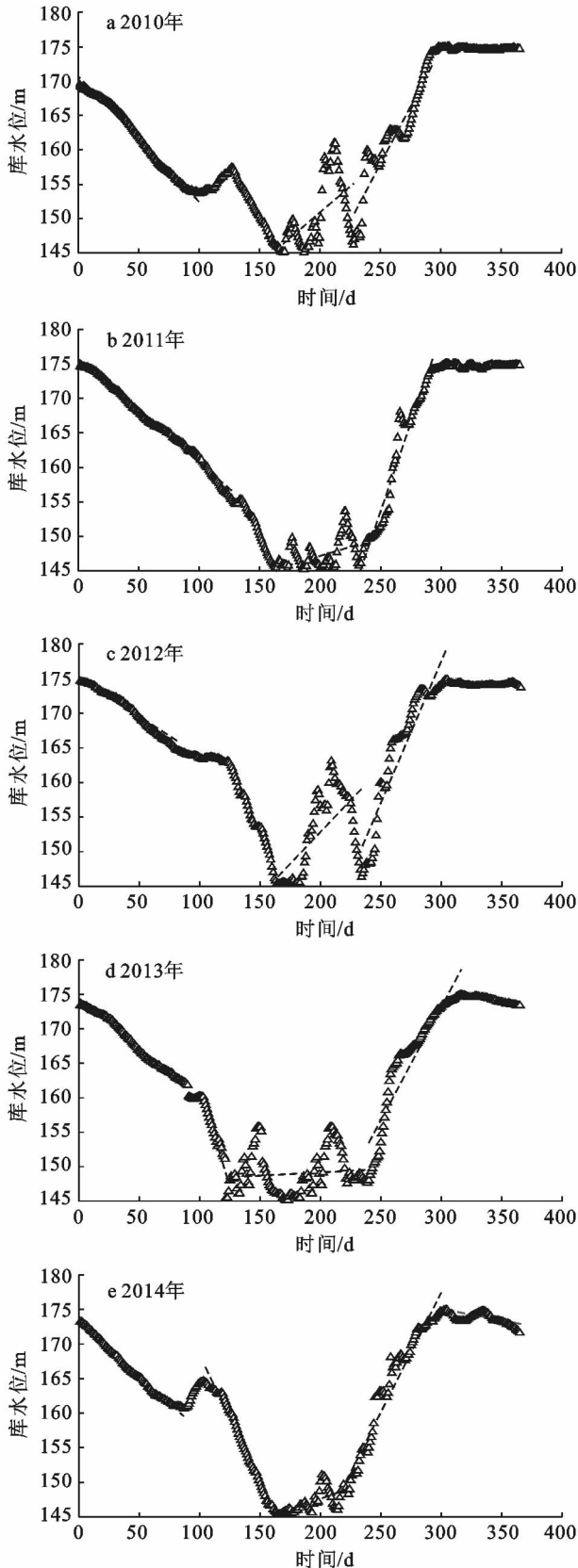


图4 2010—2014年三峡库区库水位分段线性拟合

$$y_{ij} = a_{ij} \times x_{ij} + b_{ij} \quad (1)$$

式中: y_{ij} ——第*i*年*j*阶段库水位(m); x_{ij} ——第*i*年*j*阶段时间(d); a_{ij} ——第*i*年*j*阶段斜率; b_{ij} ——第*i*年*j*阶段截距。

利用MATLAB对2010—2014年每年每个阶段的库水位进行线性拟合进行求解分析,可以得出2010—2014年每年库水位分段线性拟合结果如图4所示。

利用如下公式求出三峡库区库水位变化的平均工况。

$$y_k = c_k \times x_k + d_k$$

$$c_k = \text{mean} \left(\sum_{i=1}^5 a_{ij} \right) \quad (2)$$

$$d_k = \text{mean} \left(\sum_{i=1}^5 b_{ij} \right)$$

式中: y_k ——第*k*阶段平均库水位(m); x_k ——第*k*阶段时间(d); c_k ——第*k*阶段斜率; d_k ——第*k*阶段截距。

代入相关数据,求解出平均库水位相关数据。并做出三峡库区库水位变化平均工况结果如图5所示。

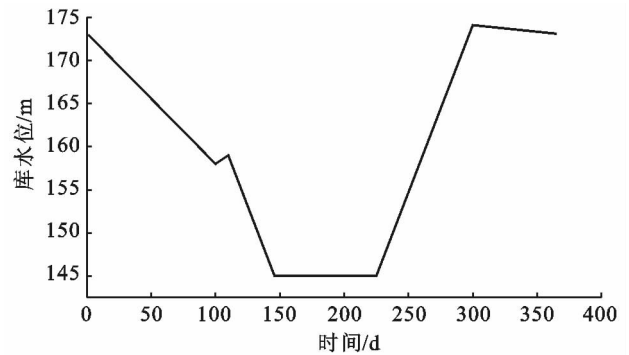


图5 三峡库区库水位变化平均工况

3.1.3 三峡库区降雨工况确定 利用概率统计方法对三峡库区2006—2014年降雨划15个区间进行统计分析,得到三峡库区降雨概率统计如表2所示。

由表2可知,2006—2014年三峡库区日降雨量为0~150 mm/d,因此本文确定的降雨工况为50,100,150 mm/d。

3.1.4 计算工况的确定 根据前期研究确定了3种库水位基准工况和3种降雨工况,组合库水位和降雨这2种工况可以确定出20种计算工况如表3。

3.2 滑坡稳定性的数值模拟分析

3.2.1 模型建立及参数选取 根据滑坡的结构特征,本文利用Geo-Studio建立模型。模型中参数选取主要是依据滑坡勘察报告中已有的岩土力学参数、

渗透试验及附近滑坡相似岩土体的参数,通过工程地质类比及地质分析法予以适当修正后确定(如表 4 所示)。

表 2 三峡库区降雨统计分析

| 三峡库区日降雨量划分区间/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$) | 频数 | 概率 |
|---|-------|----------|
| [0 10) | 3 028 | 0.921 20 |
| [1 020) | 145 | 0.044 11 |
| [2 030) | 54 | 0.016 43 |
| [3 040) | 26 | 0.007 91 |
| [4 050) | 11 | 0.003 35 |
| [5 060) | 10 | 0.003 04 |
| [6 070) | 6 | 0.001 83 |
| [7 080) | 1 | 0.000 30 |
| [8 090) | 4 | 0.001 22 |
| [90 100) | 1 | 0.000 30 |
| [100 110) | 0 | 0.000 00 |
| [110 120) | 0 | 0.000 00 |
| [120 130) | 0 | 0.000 00 |
| [130 140) | 0 | 0.000 00 |
| [140 150] | 1 | 0.000 30 |

表 3 三峡库区滑坡数值模拟计算工况

| 工况 | 计算结果 |
|----|------------------------|
| 1 | 库水位稳定在 145 水位 |
| 2 | 库水位稳定在 175 水位 |
| 3 | 阶段性线性平均库水位 |
| 4 | 2014 年库水位波动 |
| 5 | 2013 年库水位波动 |
| 6 | 工况 1 叠加暴雨 50 mm/d |
| 7 | 工况 2 叠加暴雨 50 mm/d |
| 8 | 工况 3 叠加 3 日暴雨 50 mm/d |
| 9 | 工况 4 叠加 3 日暴雨 50 mm/d |
| 10 | 工况 5 叠加 3 日暴雨 50 mm/d |
| 11 | 工况 1 叠加暴雨 100 mm/d |
| 12 | 工况 2 叠加暴雨 100 mm/d |
| 13 | 工况 3 叠加 3 日暴雨 100 mm/d |
| 14 | 工况 4 叠加 3 日暴雨 100 mm/d |
| 15 | 工况 5 叠加 3 日暴雨 100 mm/d |
| 16 | 工况 1 叠加暴雨 150 mm/d |
| 17 | 工况 2 叠加暴雨 150 mm/d |
| 18 | 工况 3 叠加 3 日暴雨 150 mm/d |
| 19 | 工况 4 叠加 3 日暴雨 150 mm/d |
| 20 | 工况 5 叠加 3 日暴雨 150 mm/d |

表 4 滑坡岩土体力学参数

| 岩层 | 容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$ | 黏聚力 c/kPa | 内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$ | 饱和渗透系数 $K/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$ | 残余含水率 $u/\%$ |
|----|---|--------------------|---------------------------|---|--------------|
| 滑体 | 21.5 | 35 | 23 | 1.03 | 0 |
| 滑带 | 20.5 | 19 | 16 | 0.03 | 0 |
| 滑床 | 25.5 | 300 | 38 | 0.001 | 0 |

3.2.2 模拟结果及分析 根据上述选取的参数及建立的模型,可以通过 Geo-Studio 计算出上述 20 种工况的最小安全系数(表 5)。并作出工况 4 一年 365 d 安全系数和库水位对比分析(图 6)。

表 5 八字门滑坡不同组合工况下的最小稳定系数 m

| 库水位 | 降雨量/($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) | | | |
|--------------|---|-------|-------|-------|
| | 0 | 50 | 100 | 150 |
| 库水位稳定在 145 m | 1.578 | 1.496 | 1.499 | 1.576 |
| 库水位稳定在 175 m | 1.685 | 1.610 | 1.624 | 1.603 |
| 平均库水位 | 1.414 | 1.405 | 1.414 | 1.443 |
| 2013 年库水位波动 | 1.390 | 1.382 | 1.390 | 1.390 |
| 2014 年库水位波动 | 1.417 | 1.408 | 1.417 | 1.418 |

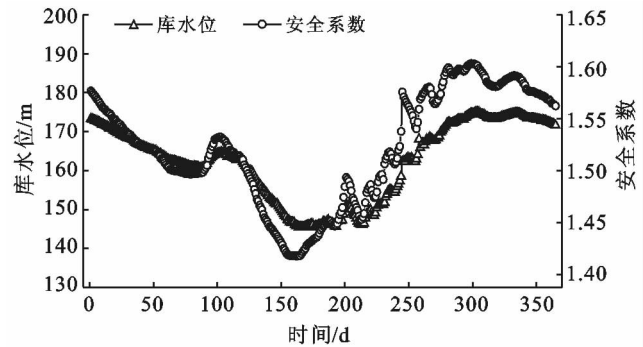


图 6 工况 4 稳定分析

由表 5 可知,20 种工况下八字门滑坡稳定系数大于 1,说明八字门滑坡整体处于稳定状态,但累积位移分析表明八字门滑坡存在局部不稳定。综上所述可知,八字门滑坡局部存在不稳定性,但整体处于稳定状态。

分别比对库水工况和降雨工况下的稳定系数,当库水工况不变降雨工况发生变化时,最小稳定系数变化相对较小。当降雨工况不变库水工况发生变化时,最小稳定系数在库水位稳定在 175 水位、库水位稳定在 145 水位、2014 年库水位波动、平均库水位、2013 年库水位波动 5 种工况下依次减小。结果表明,降雨和库区水位对八字门滑坡稳定性存在影响,库区水位对八字门滑坡稳定性的影响较大,库区水位变化幅度越大,八字门滑坡稳定性就越差。

由图6可知,当库水下降时八字门滑坡的安全系数变小,当库水位上升时八字门滑坡的安全系数变大。因此,可以说明库水位的变化与八字门滑坡的安全系数变化具有同步性。

4 结论

(1) 八字门滑坡累积位移监测曲线阶梯形状并随着时间呈增长趋势,其中监测点的位移具有同步性,每年5—7月滑坡监测点快速变形,每年8月到第2年的监测点缓慢变形。

(2) 每次库水位下降均会导致八字门滑坡累积位移上扬。2006—2014年库水位经历了9次下降过程,而相应的累积位移变形曲线对应出现了9级台阶。

(3) 八字门滑坡整体处于稳定状态。降雨和库区水位对八字门滑坡稳定性存在影响,库区水位对八字门滑坡稳定性的影响较大,库区水位变化幅度越大,八字门滑坡稳定性就越差。

(4) 当库水下降时八字门滑坡的安全系数变小,当库水位上升时八字门滑坡的安全系数变大,因此库水位的变化与八字门滑坡的安全系数变化具有同步性。

[参 考 文 献]

- [1] 邓清禄,王学平.长江三峡库区滑坡与构造活动的关系[J].工程地质学报,2008,8(2):136-142.
- [2] 张帆,王孔伟,罗先启,等.长江三峡库区构造特征与滑坡分布关系[J].地质学报,2007,81(1):38-46.
- [3] 王孔伟.三峡地区新构造活动与滑坡分布关系[J].世界地质,2007,26(1):26-32.
- [4] 刘新喜,夏元友,张显书,等.库水位下降对滑坡稳定性的影响[J].岩石力学与工程学报,2005,24(8):1439-1444.
- [5] 刘广宁,陈立德,伏永朋,等.降雨和库水位升降对滑坡的影响[J].水土保持研究,2011,18(6):200-203.
- [6] 王朋伟.库水作用下滑坡变形演化规律研究[D].武汉:中国地质大学,2012.
- [7] 赵艳南.三峡库区蓄水过程中滑坡变形规律研究[D].武汉:中国地质大学,2015.
- [8] 坤龙,杨顺安,方云.滑坡学[M].武汉:中国地质出版社,2000.
- [9] 李聪,朱杰兵,汪斌,等.滑坡不同变形阶段演化规律与变形速率预警判据研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(7):1407-1414.
- [10] 罗涛逸.三峡库区库水升降诱发滑坡变形机理及预警判据研究[D].成都:成都理工大学,2014.
- [11] 彭令,牛瑞卿.三峡库区白家包滑坡变形特征与影响因素分析[J].中国地质灾害与防治学报,2011,22(4):1-7.
- [12] 明成涛,肖诗荣,宋桂林,等.三峡库区曾家棚滑坡变形破坏影响因素分析[J].人民长江,2013,44(24):30-34.
- [13] 代贞伟,魏云杰,吕韬,等.三峡库区某滑坡变形影响因素的灰色关联分析[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(1):32-37.
- [14] 易庆林,张明玉,文凯,等.三峡库区白水河滑坡变形特征及影响因素的阶段分析[J].三峡大学学报:自然科学版,2017,39(1):38-42.
- [15] 乐琪浪,王洪德,薛星桥,等.三峡库区水位变化与花园养鸡厂滑坡变形特征关系[J].水文地质工程地质,2011,38(6):68-73.
- [16] 薛强,张茂省,朱立峰,等.基于多期DEM数据的滑坡变形定量分析[J].地质通报,2013,32(6):935-942.