

考虑位移监测的滑坡稳定性综合评价研究^{*}

汤罗圣¹, 殷坤龙¹, 陈丽霞²

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 滑坡稳定性评价方法目前主要有极限平衡法、概率分析方法和有限元法, 但是这些方法都仅从力学的角度出发, 而很少从滑坡的实际变形角度来考虑。为此, 在运用 Morgenstern-Price 法、蒙特卡洛 - 破坏概率方法和强度折减法从二维和三维的角度计算滑坡稳定性系数和破坏概率的基础上, 提出了考虑滑坡位移监测的 R/S 分析方法对滑坡稳定性进行综合评价。以三峡库区青龙咀滑坡为例, 采用上述四种方法对该滑坡稳定性进行综合评价。结果表明, 该滑坡在计算工况条件下处于稳定状态, 其危险性为中等。

关键词: Morgenstern-Price 法; 蒙特卡洛 - 破坏概率方法; 强度折减法; R/S 分析方法; 滑坡稳定性综合评价; 三峡青龙咀滑坡

中图分类号: P642.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2013)01-0050-04

0 前言

滑坡稳定性评价方法目前主要有极限平衡法、概率分析方法和有限元法, 国内外很多学者对其进行了研究。例如祝辉等^[1]、郑晓晶等^[2]、廖武坚^[3]采用传递系数法、Morgenstern-Price 法等极限平衡法对滑坡在降雨、库水位等作用下的稳定性及相应的防治对策进行了研究。周春梅等^[4]、汤罗圣等^[5]、肖莉丽等^[6]基于蒙特卡洛法, 采用剩余推力法的原理对滑坡在各种工况条件下的破坏概率进行了探讨, 并对滑坡的危险性进行了评价。黄显贵等^[7]、李红卫等^[8]运用有限元强度折减法理论, 采用 FLAC^{3D} 等数值模拟软件对滑坡在地下水等因素作用下的稳定性系数及稳定性评价方法进行了研究。

虽然以上研究已取得了很多成果, 但是这些方法都仅从力学的角度出发, 而很少从滑坡的实际变形角度来考虑。为此, 在运用 Morgenstern-Price 法、蒙特卡洛 - 破坏概率方法和强度折减法从二维和三维的角度计算滑坡稳定性系数和破坏概率的基础上, 提出了考虑滑坡位移监测的 R/S 分析方法对滑坡稳定性进行综合评价。以三峡库区青龙咀滑坡为例, 采用上述四种方法对该滑坡稳定性进行综合评价。

1 R/S 分析方法简介

R/S 分析方法最早是由 H E Hurst 提出来的^[9-12], 其刚开始主要运用于分形理论方面, 后经 B B Mandelbrot 等人的不断完善, 使该分析方法

在许多方面应用得越来越广泛, 滑坡时间预测预报就是其中一方面。其基本原理如下。

对于某一时间序列 $\{\xi(t)\} (t=1, 2, 3 \dots)$, 则在时间 τ 内该时间序列的均值为:

$$(\xi)_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t), (\tau=1, 2, 3 \dots) \quad (1)$$

时刻 t 的累计离差为:

$$X(t, \tau) = \sum_{\mu=1}^t (\xi(\mu) - (\xi)_{\tau}), (1 \leq t \leq \tau) \quad (2)$$

极差为:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} (X(t, \tau)) - \min_{1 \leq t \leq \tau} (X(t, \tau)), (\tau=1, 2, 3 \dots) \quad (3)$$

标准差为:

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - (\xi)_{\tau})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, (\tau=1, 2, 3 \dots) \quad (4)$$

统计规律表明:

$$R/S = k \left(\frac{\tau}{2} \right)^H \quad (5)$$

式中: k 为比例参数, H 为赫斯特指数。由式(5)

可知赫斯特指数 H 为 $\ln(R/S) - \ln(\frac{\tau}{2})$ 双对数坐标中线性趋势线的斜率。

H E Hurst 及其他学者研究证明:

(1) 如果 $\{\xi(t)\}$ 是相互独立, 则 $H=1/2$ 。

(2) 如果 $H>1/2$, 则所研究的时间序列是相关的, 说明时间序列所代表的过程具有持久性, 事物所处状态不发生变化, H 越偏离 $1/2$, 随机成分越少。

* 收稿日期: 2012-05-03

修改日期: 2012-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41002103; 41101515); 中央高校基本科研业务费专项资金优秀青年教师基金(CUGL100213)

作者简介: 汤罗圣(1984-), 男, 湖北石首人, 博士研究生, 主要从事滑坡机理及预测预报研究。E-mail: homeandm@163.com

(3) 如果 $0 < H < 1/2$, 说明时间序列所代表的过程具有反持久性, 事物状态发生向相反方向转变, H 越接近 0, 随机成分越少。

2 滑坡实例简介 - 青龙咀滑坡

2.1 滑坡概述

该滑坡位于三峡库区云阳县巴阳镇姜子村 2 组, 巴阳溪左岸斜坡中下部。斜坡构造上处于黄柏溪向斜西北翼、铁峰山背斜南东翼。斜坡形态平直, 沿南西方向展布的反向斜坡, 属低山丘陵剥蚀地貌。

滑体左侧以冲沟为界, 右侧边界以冲沟和岩层节理面为界, 后缘以陡壁为界, 前缘以堆积层与基岩为界。平面形态呈舌形, 剖面形态呈凸形。滑坡体前缘高程 179 m, 后缘高程 323 m。滑坡中前部坡度较陡, 大概 30° 左右, 中后部稍缓, 大约 21° 左右。滑坡体主滑方向 265° , 滑坡长约 440 m, 宽约 400 m, 土层平均厚度 20 m, 滑坡面积为 $17.6 \times 10^4 \text{ m}^2$, 滑体总变形规模 352 万 m^3 , 属二级大型土质滑坡(图 1)。

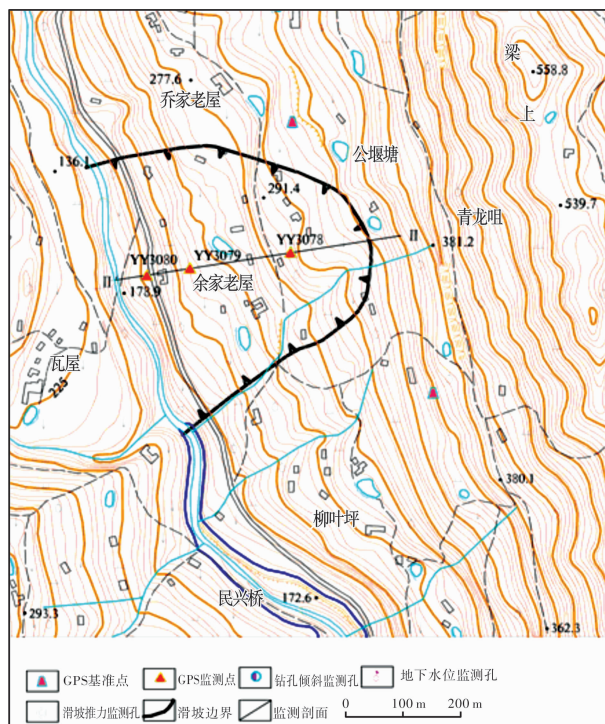


图 1 滑坡平面图

2.2 滑坡物质组成

滑坡体物质主要由第四系全新统崩坡积粘性土夹碎块石土组成, 粘性土呈可塑状, 碎块石含量占 15% ~ 30%, 直径一般在 10 ~ 50 cm, 结构松散。

滑坡位于斜面坡体的中下部, 根据现场调查, 属崩坡积层下伏基岩面滑面, 其滑动主要沿着第

四系堆积体与下伏基岩面发育, 形成以该界面形态为主的滑面。

滑坡属第四系土层沿基岩面的线性滑坡, 滑床为侏罗系中统(J_2s)紫红色、灰白色砂岩, 岩层产状 $115^\circ \angle 7^\circ$, 岩体节理裂隙、风化裂隙发育(图 2)。

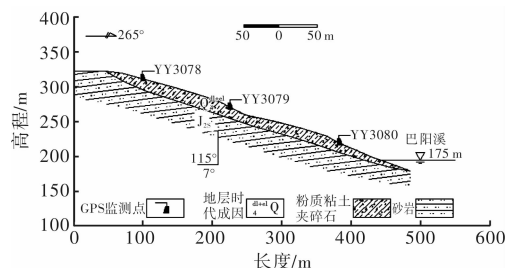


图 2 滑坡剖面图

2.3 滑坡变形监测情况

该滑坡共有 GPS 桩 5 个, 其中变形监测点 3 个, 另外 2 个为布置在滑坡体外稳定岩层上的基准点(见图 1)。由于监测资料有限, 本文这里选取 2007 年 1 月 ~ 2009 年 10 月的监测数据进行分析, 滑坡三个变形监测点这段时间的累积位移 - 时间曲线如图 3 所示。

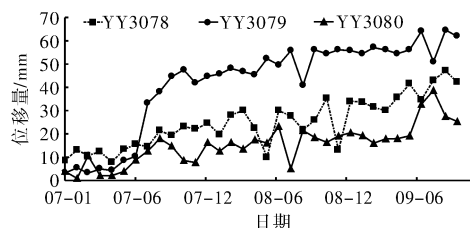


图 3 滑坡累积位移 - 时间曲线

3 滑坡稳定性评价

3.1 计算工况及抗剪强度参数选取

为了采用以下方法对滑坡稳定性进行综合评价, 而监测数据只有 2007 年 1 月 - 2009 年 10 月这段时间的, 所以这里选取的工况为滑坡 2009 年 10 月所处的实际工况。根据三峡水库水位调度情况可知, 此时坝前库水位高度大约为 159 m, 所以本文的计算工况为: 自重 + 坝前 159 m 水位。

根据基于工程地质类比方法及三峡库区二期项目中的区域统计成果^[13-14], 得到了该滑坡抗剪强度参数内聚力和内摩擦角均服从正态分布, 其具体值如表 1 所示。

表 1 滑坡抗剪强度参数概率分布

参数名称	天然强度		饱和强度	
	均值	方差	均值	方差
内聚力/kPa	24.1	7.1	19.7	5.75
内摩擦角/(°)	20.2	3.85	17.8	2.79

3.2 稳定性计算

结合滑坡实际变形情况、区域统计规律及参数反演分析,这里稳定性计算时采用的抗剪强度参数值如表2所示。

表2 滑坡抗剪强度参数	
内聚力/kPa	内摩擦角/(°)
20.0	19.0

3.2.1 二维滑坡稳定性计算

采用 Geostudio 中的 slope/w 模块对该滑坡的二维稳定性进行计算,其条块划分及滑坡渗流场如图4所示。

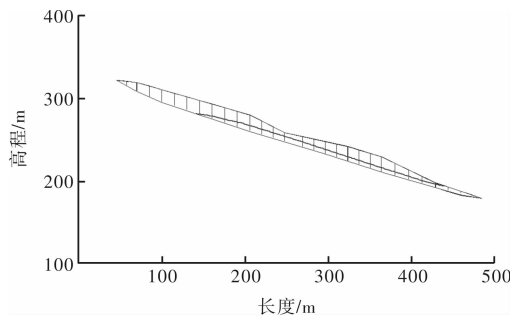


图4 滑坡条块划分及渗流场

采用 slope/w 中的 Morgenstern-Price 法进行稳定性计算,最后计算得到该滑坡的稳定性为 1.06。

3.2.2 三维滑坡稳定性计算

采用大型通用有限元软件 ANSYS 10.0 的前处理模块建立该滑坡的三维地质模型,滑坡地表通过点、线、面的生成顺序,依次建成,滑动面的生成,主要依据 I-I 剖面,空间剖面数据采用自动差值方法进行读数。滑坡的三维地质模型如图5所示。

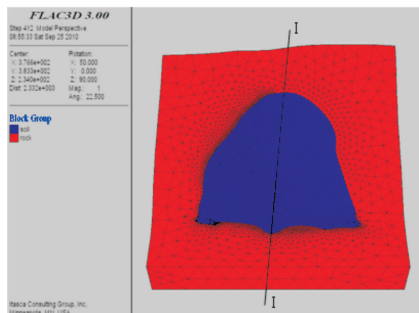


图5 滑坡三维地质模型

采用有限元强度折减法,运用 FLAC^{3D} 软件进行计算,得到该滑坡的稳定性系数为 1.21。

3.2.3 滑坡稳定性计算结果分析

从二维和三维滑坡稳定性计算结果可知,其稳定性系数均大于 1,共同说明滑坡处于稳定状态这一结论的正确性。而对于两种计算结果的区别,三维情况下计算的结果更具有说服力,因为二维

情况下考虑的稳定性仅仅是滑坡的主剖面。从两者的对比可知,其稳定性系数相差还比较大,特别对于滑坡设计方面。因此,对于目前规范推荐的二维稳定性计算方法有必要进行进一步探讨。

3.3 破坏概率

考虑到滑坡在自重 + 坝前 159 m 水位工况条件下模拟的该滑坡滑带大部分地下水位线以下,这里进行破坏概率计算时其抗剪强度参数选取表1中饱和强度的概率分布来进行计算。

采用 Geostudio 中的 slope/w 进行计算,得到了该滑坡在所选工况下的稳定性系数概率分布图和其破坏概率(图6),由图6可知该滑坡的破坏概率为 50.88%。

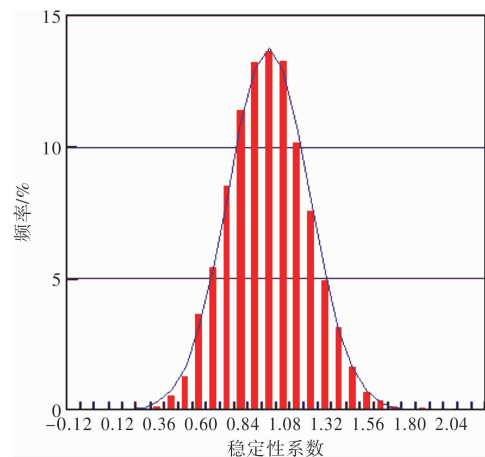


图6 滑坡稳定性系数分布密度

3.4 R/S 分析

采用公式①~⑤,并结合滑坡3个监测点的监测数据,得到了滑坡2007年、2008年和2009年3年的 Hurst 指数值,具体如表3所示。

表3 滑坡 Hurst 指数值一览表

监测点	2007 年	2008 年	2009 年
YY3078	0.89	0.84	1.03
Hurst 指数 YY3079	0.91	0.88	0.77
YY3080	1.05	0.89	1.06

3.5 滑坡稳定性综合评价

从滑坡二维和三维稳定性计算结果可知,其稳定性系数均大于 1,说明滑坡无论是整体还是局部均处于稳定状态;而依据边坡稳定程度分级表4可知,滑坡破坏概率在 30% ~ 60% 之间,说明此时滑坡的危险性为中等;从滑坡位移 R/S 分析结果可知,滑坡的 Hurst 指数值均大于 0.5,说明滑坡 2007 - 2009 年这 3 年一直处于稳定状态,与稳定性计算结果一致,正好相互验证了结果的准确性。所以总的来说,在选取计算工况条件下该滑坡处于稳定状态,危险性为中等。

表 4 边坡稳定程度分级^[15]

破坏概率 $P_f/\%$	≤ 5	5 ~ 30	30 ~ 60	60 ~ 90	≥ 90
危险程度	安全	低危险性	中等危险性	高危险性	不安全

4 结论

通过以上研究, 得到以下结论:

(1) 在选取工况条件下, 青龙咀滑坡二维和三维稳定性计算结果分别为 1.06 和 1.21。

(2) 滑坡在选取工况条件下的破坏概率为 50.88%。

(3) 由滑坡位移时间序列 R/S 分析结果可知, 滑坡三个监测点在 2007–2009 年 3 年的 Hurst 指数值均大于 0.5, 说明滑坡这段时间一直处于稳定状态。

(4) 稳定性计算结果与 R/S 分析结果具有一致性, 正好相互验证了各自的准确性。

(5) 由上述四种滑坡稳定性评价方法得到该滑坡的综合评价结果为: 该滑坡在计算工况条件下处于稳定状态, 其危险性为中等。

参考文献:

- [1] 祝辉, 唐红梅, 李明, 等. 重庆—贵州高速公路向家坡滑坡稳定性分析及防治对策研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 2687–2693.
- [2] 郑晓晶, 殷坤龙. 基于非饱和渗流的水库库岸滑坡稳定性计算[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(2): 29–32.

- [3] 廖武坚. 广东省大埔县赤羌坪滑坡稳定性评价及防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(4): 39–43.
- [4] 周春梅, 殷坤龙. 滑坡破坏概率分析及其在浙江张村滑坡中的应用[J]. 安全与环境工程, 2004, 11(2): 1–4, 13.
- [5] 汤罗圣, 殷坤龙, 李德营. 基于推广 Bayes 方法参数优化的滑坡稳定性评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2010, 21(4): 33–37.
- [6] 肖莉丽, 殷坤龙, 翟月, 等. 渐进式滑坡破坏概率的分析及应用[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(5): 20–25.
- [7] 黄显贵, 陈植华, 汪斌. 有限元强度折减系数法在北门沟坡滑坡稳定性评价中的应用[J]. 工程地质学报, 2006, 14(5): 665–669.
- [8] 李红卫, 马惠民, 张忠平. 强度折减法在高含水滑坡稳定性分析中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(3): 27–30.
- [9] 刘文军, 贺可强. 堆积层滑坡位移矢量角的 R/S 分析——以新滩滑坡分析为例[J]. 青岛理工大学学报, 2006, 27(1): 32–35, 67.
- [10] 樊晓一, 乔建平. 三峡水库区滑坡时间记录的 R/S 分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(2): 99–101.
- [11] 李远耀, 殷坤龙, 程温鸣. R/S 分析在滑坡变形趋势预测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2010(8): 1291–1296.
- [12] 贺可强, 孙林娜, 王思敬. 滑坡位移形变参数 Hurst 指数及其在堆积层滑坡预报中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1107–1115.
- [13] 殷坤龙, 汪洋, 吴益平, 等. 三峡库区三期地质灾害防治监测预警工程专业监测崩塌滑坡灾害点涌浪分析与危害评估研究报告[R]. 宜昌: 三峡库区地质灾害防治工作指挥部, 2008.
- [14] 李远耀, 殷坤龙, 柴波, 等. 三峡库区滑带土抗剪强度参数的统计规律研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1419–1424, 1429.
- [15] 吕杰堂, 朱继永, 李钟. 边坡破坏概率分析及其在渔洞河古滑坡稳定评价中的应用[J]. 岩土工程技术, 2000(4): 195–199.

Comprehensive Assessment on Landslide Stability Considering Displacement Monitoring

Tang Luosheng¹, Yin Kunlong¹ and Chen Lixia²

(1. Engineering Faculty, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: Evaluation methods on landslide stability at present mainly include limit equilibrium method, probability analysis method and finite element method, which are all based on just mechanics nor actual deformation of landslide. Therefore, by using Morgenstern-Price method, Monte Carlo failure probability method and strength reduction method, from the 2-d and 3-d direction, based on which stability coefficient and failure probability are calculated, R/S analysis method considering the displacement monitoring of landslides is suggested to comprehensively assess the landslide stability. A case study on Qin Longzui landslide in the Three Gorges reservoir area is conducted by using the 4 methods mentioned above, and results show that the landslide is in a stable state and its risk is of medium on the condition of calculation cases.

Key words: Morgenstern-Price method; Monte Carlo failure probability method; strength reduction method; R/S analysis method; comprehensive assessment on landslide stability; Qin Longzui landslide in the Three Gorges reservoir area