

滑坡三维破坏概率计算

汤罗圣, 颜廷舟, 邓长青, 岳敏

(湖北省交通规划设计院, 湖北 武汉 430051)

摘要: [目的] 对滑坡的三维破坏概率进行计算和验证, 为滑坡稳定性定量评价提供一种新思路。[方法] 采用 FLAC 3D 数值模拟软件, 运用 Rosenblueth 方法计算滑坡的三维破坏概率, 将其计算结果与二维破坏概率进行对比研究。[结果] 以三峡库区某滑坡为例, 该滑坡在 2 种计算工况下的三维破坏概率分别为 13.57% 和 21.77%, 属低危险性, 与滑坡实际情况基本一致, 而滑坡二维破坏计算结果属中等危险性。[结论] Rosenblueth 方法计算的滑坡三维破坏概率能较好地评价滑坡的稳定性, 其评价结果比二维破坏概率评价结果更为可靠。

关键词: 有限元强度折减法; Rosenblueth 方法; 三维破坏概率

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)06-0164-04

中图分类号: X43

Failure Probability Calculation of Three-dimensional Landslide

TANG Luosheng, YAN Tingzhou, DENG Changqing, YUE Min

(Communications Planning & Design Institute of Hubei Province, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: [Objective] Landslide occurrence probability was calculated and verified using three-dimensional model to provide a new way for quantitative evaluation of landslide stability. [Methods] Rosenblueth method was used to calculate the probability of three-dimensional landslide by FLAC 3D numerical simulation software. Its result was compared with the one calculated by two-dimensional probability model. [Results] Taking a slope in the three gorges reservoir area as an example, we calculated the landslide probability under two kinds of working condition using two and three dimensional models. According to the result from the three dimensional model, the probability were 13.57% and 21.77%, respectively, both belonging to low risk level. These probabilities were thought to be the actual situation. However, the calculated probabilities from two-dimensional model were as high as medium risk level. [Conclusion] Rosenblueth method performed more reliable than two-dimensional probability evaluation models do in evaluating landslide stability.

Keywords: finite element shear strength reduction method; Rosenblueth method; three-dimensional failure probability

破坏概率是滑坡稳定性定量评价的主要方法之一, 目前关于滑坡破坏概率计算的研究成果较多^[1-9]。已有的研究虽然取得了很多成果, 但是主要集中在滑坡二维计算方面, 从三维角度计算滑坡的破坏概率的研究还很少。为此, 本研究运用 FLAC 3D 数值模拟软件, 采取 Rosenblueth 方法计算滑坡的三维破坏概率, 并将计算结果与二维破坏概率进行对比研究, 以三峡库区某滑坡为例对三维破坏概率计算结果进行验证。

1 Rosenblueth 方法简介

对于一般的滑坡稳定性问题, 建立状态函数:

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

式中: x_1, x_2, \dots, x_n ——凝聚力、摩擦系数、孔隙水压

力、容重等随机变量, 它们大部分都服从正态分布或者对数分布。

Rosenblueth 方法常用稳定性系数方程作为状态函数, 即: $Z = F(x_1, x_2, \dots, x_n) - 1 = 0$ 。

在随机变量 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的分布类型未知的情况下, 不用考虑它们的变化形态, 只在区间 (x_{\min}, x_{\max}) 上分别对称地选取两个取值点, 例如, 一般取均值 μ_{x_i} 的正负标准差, 即

$$\begin{cases} x_{i1} = \mu_{x_i} + \sigma_{x_i} \\ x_{i2} = \mu_{x_i} - \sigma_{x_i} \end{cases} \quad (2)$$

对于这 n 个随机变量, 就会有 $2n$ 个取值点, 取值点的所有可能的组合有 2^n 个。在这 2^n 个组合情况下, 根据极限状态函数计算公式, 可以求得 2^n 个极限状态函数 Z , 即有 2^n 个稳定性系数。

如果 n 个随机变量相互独立,每个组合出现的概率相同,则 Z 的均值估计表达式为:

$$\mu_z = \frac{1}{2^n} \sum_{j=1}^{2^n} Z_j \quad (3)$$

如果 n 个随机变量相关,并且每个组合出现的概率不同,则它们的概率值 P_j 的大小取决于随机变量间的相关系数 ρ ,即

$$P_j = \frac{1}{2^n} [1 + e_1 e_2 \rho_{12} + e_2 e_3 \rho_{23} + \dots + e_{n-1} e_n \rho_{(n-1)n}] \quad (4)$$

式中: $e_i (i=1, 2, \dots, n)$ 取值为:当 x_i 取 x_{i1} 时, $e_i = 1$; 当 x_i 取 x_{i2} 时, $e_i = -1$, $\rho_{(i-1)i}$ 表示随机变量 x_{i-1} 与 x_i 之间的相关系数。因此, Z 的均值估计表达式为:

$$\mu_z = \sum_{j=1}^{2^n} P_j Z_j \quad (5)$$

根据一阶原点矩和二阶中心矩的估计,可以通过推导得到极限状态函数概率分布的均值与方差。

(1) 一阶原点矩 M_1 。随机变量 Z 的一阶原点矩,也称为均值 μ_z ,其点估计为

$$M_1 = E(Z) = \mu_z = \sum_{j=1}^{2^n} Z_j P_j \quad (6)$$

(2) 二阶中心矩 M_2 。随机变量 Z 的二阶中心矩,也称为方差 σ_z^2 ,其点估计为

$$M_2 = E(Z - \mu_z)^2 = \sigma_z^2 = \sum_{j=1}^{2^n} P_j Z_j^2 - \mu_z^2 \quad (7)$$

设 $Z = F(c, \varphi)$ 服从正态分布,即 $Z \sim N(\mu_z, \sigma_z^2)$, 则可靠度指标 β 为:

$$\beta = (\mu_z - 1) / \sigma_z \quad (8)$$

$$\text{则滑坡的破坏概率为: } P_f = 1 - \varphi(\beta) \quad (9)$$

2 滑坡实例分析

2.1 滑坡简介

2.1.1 滑坡概述 该滑坡位于重庆市万州江南新区陈家坝办事处界内,位于长江右岸,滑体区内有一条镇级公路及一条村级公路东西向贯通整个滑体,交通较方便。

2.1.2 滑坡的空间形态及物质组成

(1) 滑坡空间形态。滑坡体前缘临江,左右均以冲沟为界,后缘基岩出露,剪出口位于长江岸边。滑坡体平面呈箕形,剖面呈凸形。滑坡体高程分布 130 ~ 325 m,长 1 000 m,宽 1 250 m,厚 5 ~ 35 m,坡度 $5^\circ \sim 15^\circ$,主滑方向 354° ,总面积 $1.25 \times 10^6 \text{ m}^2$,总体积 $2.50 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

(2) 滑坡的物质组成及结构特征。滑坡体由第四系崩积、坡积成因的黄褐色粉质黏土夹砂岩碎块石、泥岩角砾组成,结构松散,土体可塑—硬塑状,砂岩碎块石、泥岩角砾含量约 $5\% \sim 60\%$ 。滑带主要为灰白色、黄褐色粉质黏土(黏土)夹砂岩碎石、泥岩角

砾,可塑,细腻具滑感,吸水后泥化,黏性强。滑床主要为侏罗系中统沙溪庙组(J_2s)泥岩、粉砂岩及砂岩组成,地层产状 $153^\circ \angle 4^\circ$ 。泥岩为紫红色,泥质结构;粉砂岩为浅黄色,粉粒结构,主要成分为石英、长石,泥质胶结;砂岩为灰白色,中—细粒结构,主要成分为石英、长石,钙质胶结,具斜层理。

(3) 滑坡的水文地质条件。① 地表水特征:滑体右侧边界为一小溪,溪水向下直接流入长江,水量随季节变化。滑坡体上分布大量水塘,少量水塘积水可常年不干。② 地下水特征:滑坡区地下水为基岩风化裂隙水和第四系松散层孔隙水,主要由大气降水、灌溉水、生活污水的垂向补给和后缘地下水的侧向补给,向长江排泄或以湿地形式在前缘或低洼处出露。基岩风化裂隙水主要赋存于泥岩和砂岩风化带中,第四系松散孔隙水主要赋存于滑坡堆积的含碎块石粉质黏土中,富水性总体上较差。

2.2 滑坡三维破坏概率计算

2.2.1 滑坡三维地质模型建立 根据该滑坡的物质组成及结构特征可知,将滑坡的物理介质概化为滑体、滑带与滑床基岩三种介质,采用大型通用有限元软件 ANSYS 10.0 的前处理模块建模,滑坡地表通过点、线、面的生成顺序,建立滑坡的三维地质模型(图 1),并采用四面体单元进行网格剖分。模型共 37 806 个节点,194 758 个单元。

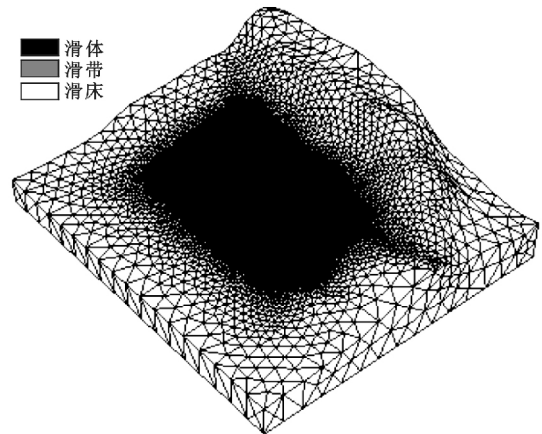


图 1 滑坡三维地质模型

2.2.2 计算工况选取 根据三峡库区运行经验及国内外学者的研究成果,同时参照三峡库区地质灾害防治工作指挥部负责编制的《三峡库区三期地质灾害防治工程地质勘查技术要求(2004 年)》,同时根据滑坡的实际变形情况,选取滑坡可能危险工况为滑坡的计算工况,即:工况①:自重+坝前水位从 175 m 降至 145 m;工况②:自重+坝前水位从 162 m 降至 145 m + 汛期 50 年一遇暴雨。

2.2.3 滑坡地下水渗流场模拟 对于滑坡二维地下水渗流场模拟,采用 Geostudio 数值模拟软件中的 seep/w 模块对滑坡计算剖面进行模拟,而对于滑坡三维地下水渗流场模拟,这里采用多个滑坡纵剖面先进行二维模拟,然后将模拟出的多个剖面二维水位线

连成面,即得到滑坡近似的三维地下水位面。

2.2.4 抗剪强度参数选取 根据该滑坡滑体地质勘查报告可知,滑坡滑带土的抗剪强度参数详见表 1。根据文献[10]中提供的滑坡抗剪强度取值方法,得到该滑坡的抗剪强度参数概率分布函数详见表 2。

表 1 滑坡滑带土抗剪强度参数室内试验值

土样编号	取样深度/m	天然直接快剪				饱和直接快剪			
		峰值		残值		峰值		残值	
		黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
ZK9-2	27.5—27.9	23	13.12	13	10.95	16	10.32	10	8.65
TJ1-1	4.9—5.2	26	13.55	14	11.70	18	10.97	11	9.22
TJ1-2	7.1—7.4	19	12.38	12	10.80	15	10.10	9	8.35
TJ2-1	4.8—5.1	21	15.18	13	13.45	16	12.67	11	10.30
ZK15-2	31.6—32.0	27	13.40	14	11.37	19	10.88	11	9.20
ZK18-1	20.5—20.9	26	13.62	13	11.92	17	11.22	10	9.62
ZK20	27.6—27.9	25	14.17	14	12.48	17	11.95	9	10.03

表 2 滑坡滑带土抗剪强度参数概率分布函数

项目	参数指标	分布形式	均值	方差
天然峰值	c	对数正态分布	3.411	0.129
	φ	正态分布	14.526	14.677
饱和峰值	c	对数正态分布	2.744	0.048
	φ	正态分布	12.325	19.654
天然残余值	c	对数正态分布	2.939	0.074
	φ	正态分布	11.601	11.537
饱和残余值	c	对数正态分布	2.539	0.101
	φ	正态分布	8.453	5.313

2.2.5 滑坡破坏概率计算 根据表 2 中的抗剪强度参数,采用前述 Rosenblueth 方法,运用 FLAC 3D 数值模拟软件计算滑坡的三维破坏概率,具体计算过程为:

(1) 工况①条件下:自重+坝前水位从 175 m 降至 145 m。

令滑坡的状态函数 $Z=F(c, \varphi)$, 由于考虑的随机变量只有 c, φ , 故可以得到 4 个稳定性系数函数值分别为:

$$\begin{aligned} Z_1 &= F(\mu_c + \sigma_c, \mu_\varphi + \sigma_\varphi) = 1.60 \\ Z_2 &= F(\mu_c + \sigma_c, \mu_\varphi - \sigma_\varphi) = 1.11 \\ Z_3 &= F(\mu_c - \sigma_c, \mu_\varphi + \sigma_\varphi) = 1.46 \\ Z_4 &= F(\mu_c - \sigma_c, \mu_\varphi - \sigma_\varphi) = 0.97 \end{aligned}$$

设随机变量 c 和 φ 相互独立, 即 $\rho_{c,\varphi} = 0$, 由公式

(3) 可得 $P_j = 1/4$

由公式(5)可得:

$$\mu_z = \frac{1}{2^n} \sum_{j=1}^{2^n} Z_j = \frac{1}{4} (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4) = 1.28$$

由公式(6)得:

$$\begin{aligned} \sigma_z^2 &= \sum_{j=1}^{2^n} P_j Z_j^2 - \mu_z^2 = \frac{1}{4} (Z_1^2 + Z_2^2 + Z_3^2 + Z_4^2) - \mu_z^2 \\ &= 0.06479 \end{aligned}$$

$$\sigma_z = 0.255$$

设 $Z=F(c, \varphi)$ 服从正态分布, 即 $Z \sim N(\mu_z, \sigma_z^2)$,

则可靠度指标 β 为:

$$\beta = \frac{\mu_z - 1}{\sigma_z} = \frac{1.28 - 1}{0.255} = 1.10$$

从而得到该工况条件下滑坡的三维破坏概率为:

$$\begin{aligned} P_f &= 1 - \varphi(\beta) = 1 - \varphi(1.10) \\ &= 1 - 0.8643 = 13.57\% \end{aligned}$$

(2) 工况②条件下:自重+坝前水位从 162 m 降至 145 m+暴雨。

$$Z_1 = F(\mu_c + \sigma_c, \mu_\varphi + \sigma_\varphi) = 1.48$$

$$Z_2 = F(\mu_c + \sigma_c, \mu_\varphi - \sigma_\varphi) = 1.02$$

$$Z_3 = F(\mu_c - \sigma_c, \mu_\varphi + \sigma_\varphi) = 1.33$$

$$Z_4 = F(\mu_c - \sigma_c, \mu_\varphi - \sigma_\varphi) = 0.896$$

根据前述运算过程得到该滑坡在工况②条件下的破坏概率为:

$$\begin{aligned} P_f &= 1 - \varphi(\beta) = 1 - \varphi(0.78) \\ &= 1 - 0.7823 = 21.77\% \end{aligned}$$

根据相关研究成果^[9]可知, Rosenblueth 方法和 Monte—Carlo 方法计算结果基本无差别, 因此采用 Geostudio 软件中 slope/w 模块的 Monte—Carlo 方法计算滑坡的二维破坏概率, 具体结果详见表 3。

表 3 滑坡破坏概率计算结果

计算方法	破坏概率	
	工况①条件下	工况②条件下
Rosenblueth 方法计算滑坡的三维破坏概率	13.57%	21.77%
Monte—Carlo 方法计算滑坡的二维破坏概率	41.08%	50.93%

结合表 4 中滑坡稳定程度分级标准,从表 3 可以看出,对于工况①和工况②,根据滑坡三维破坏概率的计算结果,滑坡整体为低危险性,而根据滑坡二维破坏概率计算结果,滑坡整体为中等危险性。

表 4 滑坡稳定程度分级^[11]

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

2.2.6 滑坡稳定性计算结果验证 根据重庆市万州环境监测站提供的监测数据,绘制了滑坡 12 个位移监测点的水平方向累积位移—时间曲线(监测点 WZ13-06 位移太大未在图中描绘),监测时间为 2007 年 3 月至 2009 年 11 月,监测周期为 1 个月 1 次,具体如图 2 所示。从图 2 可以看出,对于滑坡监测剖面 I—I', II-II', III-III', 滑坡前缘监测点 WZ₁₃₋₀₃, WZ₁₃₋₀₆, WZ₁₃₋₀₉ 的位移都较大,滑坡中部监测点 WZ₁₃₋₀₂, WZ₁₃₋₀₅, WZ₁₃₋₀₈ 的位移相对较小,滑坡后部监测点 WZ₁₃₋₀₁, WZ₁₃₋₀₄, WZ₁₃₋₀₇ 基本变形很小,基本处于稳定状态;而对于滑坡监测剖面 IV-IV', WZ₁₃₋₁₁, WZ₁₃₋₁₂ 变形很小,且一直处于平稳状态。

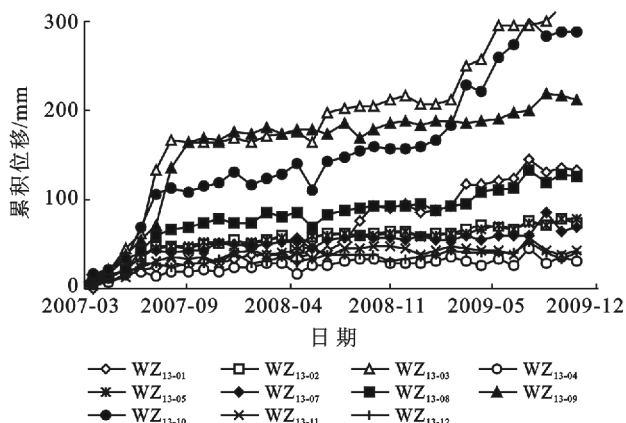


图 2 滑坡地表水平方向累积位移—时间曲线

根据滑坡监测分析结果可知,滑坡整体目前较稳定,主要是滑坡前缘局部发生变形,滑坡整体失稳的可能性较小,滑坡整体处于低危险性,所以滑坡三维破坏概率计算结果更可靠。

3 结论

(1) 在计算工况①和计算工况②条件下,滑坡三维破坏概率分别为 13.57%和 21.77%。

(2) 在计算工况①和计算工况②条件下,滑坡二维破坏概率分别为 41.08%和 50.93%。

(3) 对于工况①和工况②,滑坡三维破坏概率的计算结果为低危险性,而滑坡二维破坏概率计算结果为中等危险性。

(4) 根据现场调查及专业监测滑坡整体应处于低危险性,所以滑坡三维破坏概率计算结果比二维破坏概率计算结果更可靠。

[参 考 文 献]

[1] 马淑芝,贾洪彪,唐辉明,等. 稳定性可靠度分析在三峡库区二里半滑坡中的应用[J]. 地质科技情报,2005,24(S):177-179.

[2] 苏永华,赵明华,李青海,等. 稳定性系数为隐式函数的边坡可靠度近似计算方法[J]. 岩土工程学报,2006,28(10):1198-1203.

[3] 徐江,杨更社,刘慧. 基于蒙特卡洛模拟法的冻土边坡可靠度评价[J]. 地下空间与工程学报,2007,3(8):1433-1437.

[4] 尹小涛,王水林. 基于可靠度理论的滑坡稳定性及其影响因素分析[J]. 岩土力学,2008,29(6):1551-1556.

[5] 吴振君,王水林,汤华,等. 一种新的边坡稳定性因素敏感性分析方法:可靠度分析方法[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(10):2050-2055.

[6] 彭振斌,李俊,彭文祥. 基于 Bishop 条分法的边坡可靠度应用研究[J]. 中南大学学报:自然科学版,2010,41(2):668-672.

[7] 张璐璐,邓汉忠,张利民. 考虑渗流参数相关性的边坡可靠度研究[J]. 2010,27(1):114-119.

[8] 张亚国,张波,李萍,等. 基于点估计法的黄土边坡可靠度研究[J]. 工程地质学报,2011,19(4):615-619.

[9] 黄丽娟,刘超,李萍,等. 吉县水洞沟滑坡稳定性的可靠度分析[J]. 工程地质学报,2012,20(S1):544-549.

[10] 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.