

岩体滑动过程的可靠性分析*

郭怀志

(天津大学水资源与港湾工程系)

提 要

本文用可靠度分析方法研究了一例岩体滑动破坏过程的安全性,指出安全系数不能反映内平衡力对破坏过程的影响,而地应力对安全性的影响不应忽视。建议了破坏过程可靠度估值算法。

一、前 言

国内外工程界已采用以概率理论为基础的极限状态设计方法分析确定结构的可靠度。在岩土工程中应用可靠性分析或概率设计法早已开始,其中多数为土工工程方面的研究成果,它有力地揭示了土壤强度的变异性对土坡滑动安全的影响,随机性反应(如不均匀沉降)的统计规律性等等,形成了新的分支学科。本文通过算例分析,说明了概率分析方法在岩石工程中应用的可能性及其在阐明内平衡力对安全性的影响时的效用。

二、可 靠 度 分 析

描述岩体工作状态的功能函数记为 $g(X_1, X_2 \cdots X_n)$, 简记为 $g(\cdot)$ 。式中 $X_i (i = 1, 2 \cdots n)$ 为基本变量,系指作用于岩体的各种荷载(如建筑物传来的推力,渗透水压力等)和岩石的性能(如摩擦系数 f , 粘接力 c , 弹性模量 E , 容重 γ , 泊松比 ν , 强度等)以及岩体的几何尺度等。它们都具有一定程度的变异性,应视为随机变量。但在工程分析中,可以合理简化,将对功能影响微弱或变异系数很小的变量视为定值量,而忽略它们的变异性。

当功能函数 $g(\cdot) \geq 0$ 时,结构安全,小于0时结构失效。 $g(\cdot) = 0$ 时为极限状态。结构达到极限状态的条件可用极限状态方程 Z 描述

$$Z = g(X_1, X_2 \cdots X_n) = 0 \quad (1)$$

结构完成预定功能的概率即可靠度 p_s 为

$$p_s = P[g(\cdot) \geq 0] = 1 - F_Z(0) \quad (2)$$

式中 F_Z 为结构功能函数 Z 的概率分布函数。

*国家自然科学基金资助项目。

修改稿到稿日期: 1989年11月15日。

结构的失效概率为 $p_f = 1 - p_s$ 。如以结构可靠指标 β 表达结构的安全性时, 它与结构可靠度的对应关系为 $p_s = \Phi(\beta)$, Φ 为正态概率分布函数。

将基本变量(如 X_1, X_2)进行标准正态化变换, 在新的坐标系($\hat{X}_1 O \hat{X}_2$)中, 原点 O 至极限状态曲线(面)的距离即为可靠指标 β , 其垂足点 h^* 与验算点 (x_1^*, x_2^*) 对应(图 1)。

当极限状态方程为非线性时, 采用改进一次二阶矩法计算 β 值。将功能函数在验算点处用泰勒级数展开使之线性化, 再进行计算。例如岩体夹层单元的极限状态方程, 可按莫尔-库仑准则写为

$$Z = g(\cdot) = f \cdot N + c \cdot A - T \geq 0 \quad (3)$$

式中 A 为单元面积; N 为法向内力; T 为切向内力。其中 N, T 等项是基本变量(f, c 及荷载 F 等)的非线性函数, $N = N(f, c, F \dots), T = T(f, c, F \dots)$ 。线性化展开功能函数时, 其一阶导数为

$$\frac{\partial g}{\partial x_1} = \frac{\partial g}{\partial N} \frac{\partial N}{\partial x_1} + \frac{\partial g}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x_1} \dots \quad (4)$$

分析过程中由于工程结构条件复杂, 常用有限元法等求解, 有关偏导数常以差分逼近,

即取 $\frac{\partial g}{\partial x_1} \approx \frac{\Delta g}{\Delta N} \frac{\Delta N}{\Delta x_1} + \frac{\Delta g}{\Delta T} \frac{\Delta T}{\Delta x_1} \dots$ 。则极限状态方程为

$$Z \approx \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*) \left(\frac{\Delta g}{\Delta N} \frac{\Delta N}{\Delta x_i} + \frac{\Delta g}{\Delta T} \frac{\Delta T}{\Delta x_i} \right) \Big|_{x^*} \quad (5)$$

岩体的破坏是由局部破坏开始。随着荷载增加, 破坏范围扩展, 直至破坏面贯通, 形成整体移动的机构而破坏。每一阶段的极限状态方程, 按本阶段破损概率最大的单元 k 的条件列出, 即 $Z_k = fN_k + cA_k - T_k$ 。由于过程的渐进性, 此时结构的刚度矩阵等特性皆以 $k-1$ 个单元已产生滑移, 其余单元未破损的条件确定。

本文算例中所作岩体滑动破坏分析, 原由增量法计算, 分阶段以弹性解逼近, 故可按所得成果推算出每一阶段的极限状态方程。例如在 9, 1, 2, 4, 7 各单元滑移后, 单元 3 的内力(可参照表 1 推算)为

$$N = 3.26 + 0.0178 F$$

$$T_a = 13.16 - 0.062 F, T_b = -13.92 + 0.0336 F, T = (T_a^2 + T_b^2)^{1/2}$$

且 $f = 0.6, A = 14.64$, 故极限状态方程为

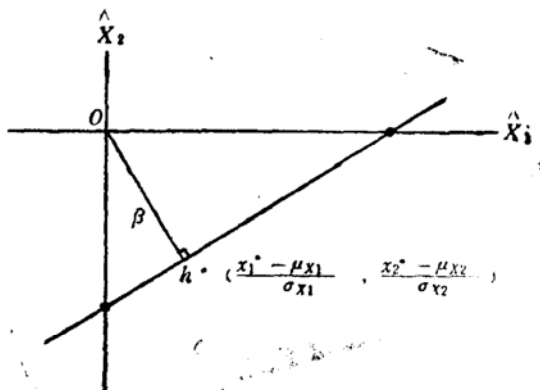


图 1

$$g_3 = 0.6(3.26 + 0.0178F) + 14.64c - [(13.16 - 0.062F)^2 + (0.0336F - 13.92)^2]^{1/2} \quad (6)$$

式中 g_3 是变量 F 的非线性函数。

可靠性分析取粘结力 c 为对数正态分布, $\sigma_c = \frac{2.5}{\sqrt{3}} = 1.443$, 故用改进的一次二阶矩法求解。在验算点处将其当量正态化, 试算得验算点 $c^* = 4.77$ (且 $F^* = 1501.6$), 当量的正态分布函数的参数为 $\mu_{c'} = 4.804$, $\sigma_{c'} = 1.35$ 。继而求得 $\beta_{(3)} = 0.026$, $p_{f(3)} = 0.4896$, $p_{s(3)} = 0.5104$

滑动破坏是由于一系列局部单元破坏事件相继发生, 并进而形成整体滑移机构的行程, 因此应视为并连系统。

由多个互不相关的事件组成的并连系统, 其可靠度为

$$p_{s上} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_{si}) \quad (7)$$

式中 p_{si} 为 i 事件的可靠度。

如果各事件完全相关, 则并连系统的可靠度由具有最大可靠度的事件代表, 即

$$p_{s下} = \max\{p_{s1}, p_{s2}, \dots, p_{sn}\} \quad (8)$$

实际情况常处于二者之间, 故 $p_{s上}$, $p_{s下}$ 给出过程的可靠度的上限、下限。

如例题所示, 在单元 3 滑移之前, 滑裂范围为单元 9, 1, 2, 4, 7。已知此过程可靠度为 $p_{s(9,1,2,4,7)} = 0.4651$, 则破坏范围达 9, 1, 2, 4, 7, 3 的过程可靠度为 $p_{s(9,1,2,4,7,3)} = 1 - (1 - 0.4651)(1 - 0.5104) = 0.7381$ 。

三、岩体滑动过程可靠度算例与讨论

本算例是一岩体的弹塑性稳定计算成果^[1], 计算模型如图 2 所示。岩体基体 A 与楔形体

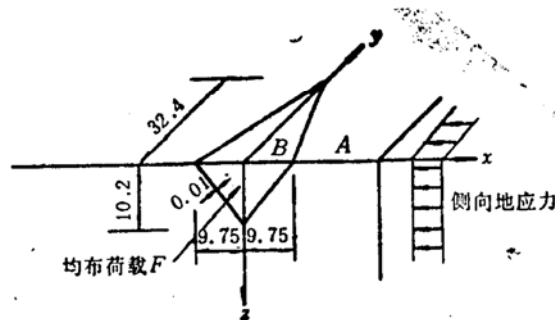


图2 岩体示意图

B 被软弱构造面分割, 作用于楔体侧面上的荷载 F 引起楔体滑动。

因为计算采用虚拟模型尺度, 故图文中均不注计量单位。计算中采用的参数亦为相对值, 即岩体容重 $\gamma = 1.0$, 泊松比 $\nu = 0.2$, 弹性模量 $E = 2 \times 10^3$; 软弱夹层的弹性模量

$E' = 1.85 \times 10^8$, 泊松比 $\nu' = 0.5$, 抗剪断摩擦系数 $f = 0.6$, 粘结力 $c = 5$, 残余摩擦系数为 0.6, 不计残余粘结力, 夹层厚度 0.1。以结点杆单元模拟夹层。

在不同水平的地应力作用下, 按荷载增量法计算了岩体破坏过程; 其他变量皆取为均值时, 结点单元的破坏顺序一般为 9, 1, 2, 4, 7, 3, 5, 8, 10, 6, 12, 11, 13, 14, 15, 如图 3 所示。

无地应力时侧面点的荷载-位移变化过程如图 4 所示。峰值荷载 1700, 结点单元的内力增长过程列于表 1 中。

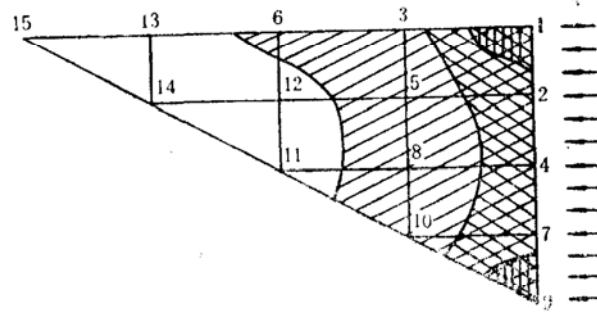


图 3 结点破坏顺序

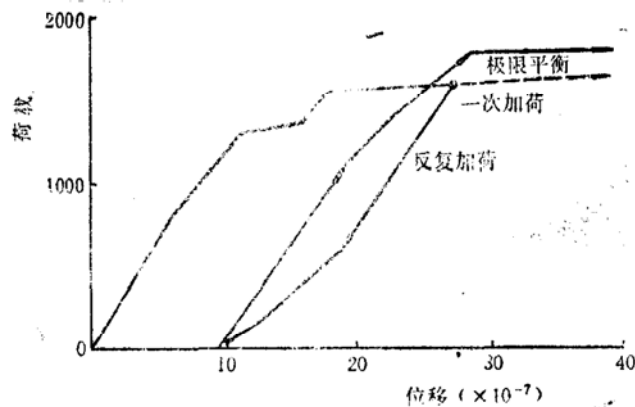


图 4 荷载-位移过程

由于现场试验条件复杂, 费用昂贵, 国内还没有在一个工程中取得足够的子样数据, 以资统计分析确定有关变量的参数。但已有资料的总趋势是: 岩石的抗剪断强度与土壤的相似, 摩擦系数的变异系数小, 有的为 0.1—0.2, 而粘结力变异系数大, 甚至可达 1.0, 且都随范围扩大而均化, 且二者呈负相关性。工程界^[2]提出采用优定斜率法确定抗剪指标, 即是忽略 f 值的变异性。据此, 本文分析在选取抗剪强度的概率参量时, 为了简化计算, 突出主要问题, 不计摩擦系数的变异性, 峰值抗剪摩擦系数及残余摩擦系数的标准差均以 0 计, 均值即为常量 0.60; 粘结力 c 为对数正态分布, 其均值 μ_c 为 5.0, 标准差 σ_c 为 2.5 (或 3.5), 即变异系数为 0.5 (或 0.7), 不计残余粘结力。高相关范围与最小单元面积 (4.88) 相当, 当接触单元面积较大时有均化效应, 其方差与单元面积成反比。

外荷载 F 为正态分布, 均值为 1500, 标准差 150。

可靠度计算见表 2, 表中列有剪摩公式及纯摩公式可靠度供参考。它们是按整体滑动的刚体平衡条件列出极限状态方程, 粘结力的方差取值与前述内部单元相同。

表1

破坏过程内力表

结 点			荷 载							
序号	面 积	内 力	0	400	800	1200	1400	1500	1600	1700
1	4.88	N	3.03	5.83	8.70	11.54	12.05	12.67	12.79	(极限平衡状态)
		T_a	0.89	-8.73	-18.45	-28.12	-6.58	-6.93	-7.00	
		T_β	0.02	4.26	8.62	12.92	2.99	3.13	3.15	
3	14.64	N	7.79	13.88	19.98	26.06	28.24	30.12	28.35	
		T_c	2.45	-8.32	-19.29	-30.17	-73.63	-79.86	-15.43	
		T_β	-3.20	2.31	8.07	13.71	33.14	36.51	7.15	
5	29.28	N	34.35	44.01	53.46	63.04	67.73	70.34	88.14	
		T_a	3.49	-17.35	-38.92	-60.12	-115.83	-125.33	-51.40	
		T_β	-34.79	-27.19	-18.95	-11.02	12.23	16.07	12.39	
7	14.64	N	53.11	62.13	71.93	81.39	90.05	92.57	90.67	
		T_a	-20.88	-45.25	-74.73	-101.72	-52.23	-52.96	-51.18	
		T_β	-30.40	-18.74	-2.92	10.91	13.84	16.74	18.46	
9	4.88	N	23.51	19.50	30.49	34.46	36.61	37.28	30.00	
		T_a	-12.76	-24.54	-18.26	-20.68	-21.96	-22.36	-18.00	
		T_β	-2.69	-2.37	-1.03	0.05	0.45	0.28	0.10	
11	14.64	N	55.16	53.92	52.41	51.74	51.41	51.12	65.34	
		T_a	17.09	12.47	7.71	3.28	-4.60	-6.14	-66.38	
		T_β	-27.94	-32.06	-35.99	-39.36	-43.75	-44.91	-30.27	
备 注					*9已剪移		*1, 2, 4, 7已剪移		*3, 5, 8, 6, 10已剪移	整体滑移

表2

可 靠 度 计 算 表

分析模型		粘结力 标准差	可 靠 度 增 长 过 程						可 靠 指标 β
剪摩公式		3.5	0.9999645						3.97
		2.5	0.9999998						5.07
弹 塑 性 分 析		破坏进程0,	9,	1,	2, 4, 7,	3,5,8,6,10,	12,11,13,14,15,	极限平衡	
	上 限	3.5	0.0681	0.3028	0.5047	0.7391	0.9055	0.9923	2.42
		2.5	0.0368	0.2691	0.4651	0.7381	0.9198	0.9935	2.49
	估 计 值	3.5	0.0681*				0.6627	0.9724	1.92
		2.5	0.0368*				0.7051	0.9759	1.98
	下 限	3.5						0.9183	1.39
		2.5						0.9183	1.39
纯摩公式		(不计)	0.9183						1.39

根据计算结果可以看出,楔体的破坏过程明显地分为6阶段。

1. 在同一荷载水平时相继破坏的单元视为同一事件,如单元3破坏后,内力重新分配,单元5,8,10,6随之破坏。视各阶段为互不相关时,按式(7)定出可靠度上限。认为完全相关时,按式(8)定出可靠度下限。

2. 根据A.H-S.Ang等提出的PNET法^[8],进行了各事件的相关分析,选择出代表性事件。如单元3破坏与极限平衡整体刚性滑动二事件的相关性小,为0.41,而与单元12破坏事件相关系数在0.9以上。按此法,将相关系数大于0.9视为完全相关,小于0.5视为不相关时,可将破坏过程区分为三个弱相关的阶段:①初始阶段,表层单元破坏,受其他因素影响很大(如温度应力);②中间阶段,承载力的峰值状态,各单元的极限状态方程近于完全相关,应取其可靠度最高的峰值;③整体滑移阶段,楔体已与基岩脱开,抗剪断强度丧失,处于刚体极限平衡状态。按此三阶段互不相关计算所得可靠度,可称为工程估计值,亦列于表2中。

3. 此楔体按一般纯摩公式计算可得其安全系数为1.10,按剪摩公式计算安全系数为3.43,似乎相差很多,但实践中工程界根据计算原理的不同,将计算公式、参数取值、安全指标配合使用,规定纯摩安全系数应大于1.1,剪摩安全系数应大于3.0,故二者都表明楔体基本安全。弹塑性有限元分析结果,详尽地揭示了破坏过程。但因缺乏根据实践经验规定的取值原则及安全指标,结果仅能供工程决策时参考。而可靠度分析给出了较窄的上下限界,工程估计值更可供比较。

4. 可靠度分析反映了变量变异性对安全性的影响。变异性降低则可靠度增加,这从表2中 σ_c 为2.5及3.5的结果对比中可以看到。

但当可靠指标小于0的(可靠度低于0.5,中心安全系数小于1.0)常规不安全情况时,则趋势相反,变异性增加可靠度提高(表中用*号示出)。这可以理解为当变量变异性趋小时,破坏概率趋近于1.0。

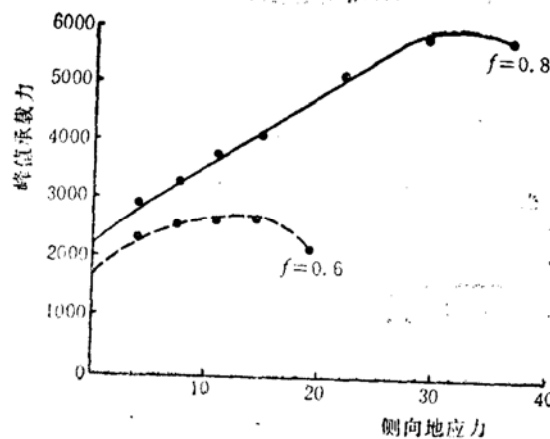


图5 地应力-峰值承载力关系图

5. 本文进一步分析了构造地应力对破坏过程的影响。图5为同一岩体,处于不同强度的地应力场内时,峰值承载力的变化曲线。承载力随地应力增长而增长,当夹层的摩擦系数为0.8时,影响更为显著。当地应力甚高时,这种影响转而趋向不利。

无论影响如何,如用刚体极限平衡公式分析,则有无地应力作用时的安全度毫无差别。因为刚体极限平衡原理认为地应力影响的前提为岩体不产生开裂分离。但在夹层滑移后,以滑裂面为界,形成与基岩不相粘连的分离体,岩体内应力都不作用于脱离体,故不影响极限平衡。

而过程可靠度分析表明,地应力提高了破坏过程的中间阶段峰值承载力;尽管最终极限承载力未获提高,但提高了过程的可靠度,有益于结构的安全(见表3)。

6. 岩体表层中存在的内应力,如表层温变应力,对岩体的初裂有影响,随着表层岩温变开裂,温度应力释放,内部单元应力不再随表层温变而变化。分析表明,温度作用影响初

表3 地应力对安全度的影响

粘 结 力 标 准 差 σ_s (均值5)	地 应 力 水 平	可 靠 指 标 β				
		极限平衡法 (1)剪摩公式	弹 塑 性 全 过 程 分 析			极限平衡法 (2)纯摩公式
			上 限	估 计 值	下 限	
3.5	0		2.42	1.92	1.39	1.39
	0.73	3.97	3.46	3.03	2.15	
	7.27		6.04	5.02	4.49	
2.5	0		2.49	1.98	1.39	1.39
	0.73	5.07	3.87	3.47	2.71	
	7.27		6.67	5.44	4.97	

裂可靠度,而对全过程可靠度影响甚微。

例如设单元9原已温变开裂,即其 $p_{s9} = 0$,则全过程可靠度的工程估计值由0.9759降为0.9750($\sigma_c = 3.5$),可以忽视。

四、结 语

本文希望通过破坏过程可靠度分析与岩体弹塑性分析方法的结合,来正确评定岩体抗滑稳定的安全性。

可靠度方法便于计算内平衡力对结构安全的影响,如地应力、温度作用对岩体稳定的影响即有区别。

可靠度分析能反映数据采集的精度、荷载的变动性和计算模式的正确性等方面的影响。本文方法要求对岩体现场试验给予更多的重视,对岩体抗剪强度特性有全局性了解。还需要研讨岩土工程的可靠度设计标准等问题。

黄涛,任培林协助进行了计算工作。

参 考 文 献

- [1] 黄涛、郭怀志,三维有限元混合法对岩坡稳定问题的研究,岩石力学数值解法讨论会,1986,江西吉安。
- [2] 刘克远,二滩水电站枢纽区岩体抗剪参数的选取,水电站设计,1986年第1期,第9—21页。

- [3] A. H-S. Ang, Tang, W. H., Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol II, John Wiley & Sons Inc., 1984, pp. 505—506.

Reliability Analysis of the Progressive Sliding of Rock Mass

Guo Huaizhi

(Tianjin University)

Abstract

In this paper, the reliability analysis method was applied to study the safety against the progressive sliding of rock mass, and it was shown that the safety factor can't represent the influence of the self-balancing interior forces on the structural behaviour, especially the dominant influence of initial stress in rock masses. The procedure for estimating reliability of failure process is recommended.