

土坡稳定可靠度分析中若干规律的探讨

孙慕群

符向前

(湖北省水利水电科学研究所, 武汉 430070) (武汉水利电力大学, 武汉 430072)

【摘要】 采用可靠度分析的JC法,对土坡稳定可靠度分析中的若干规律进行了探讨。指出了土的抗剪强度指标的均值及变异系数对可靠指标的不同影响,并对可靠指标和安全系数二者之间的关系进行了讨论,绘制了可靠指标与安全系数的关系曲线。

【关键词】 土坡;可靠度;可靠指标;安全系数

【中图分类号】 TU413.6⁺2

【Abstract】 Some regularity of reliability analysis on soil slope stability is discussed by using JC method which is a reliability analysis method. The influence of the averages and variation coefficient of shear strength on reliability index is jointed out. The relationship between reliability index and safety factor are researched and their relation curve is drawn.

【Key words】 soil slope; reliability; index of reliability; factor of safety

0 引言

国内外对土坡稳定问题的分析仍广泛采用传统的定值分析方法,它以安全系数 F_s 为度量指标,建立在极限平衡理论的基础之上。定值分析方法主要有:瑞典法、简化 Bishop(毕肖普)法、Janbu(强勃)法及 Morgenstern-Price(摩根斯坦-普赖斯)法、Spencer(斯宾赛)法等。

定值法经过长期的发展已经形成了一个比较成熟和完整的理论体系,但是这种方法存在一个最大的缺陷:没有考虑实际存在的种种不确定性因素。它把土看作具有某种“平均”性质的“均质”材料。实际上,这一工程问题的每一环节都是在大量不确定的情况下进行的,因此,若能在设计中定量的考虑这些不确定性,并在此基础上进行分析,这从概念上讲当然更切合实际。这种基于概率统计理论基础之上,以随机变量和随机过程作为研究对象的新方法,就是可靠度分析方法。

1 可靠度分析方法

1.1 确定基本变量

很多学者的研究表明,在影响土坡稳定的诸多因素中,对土坡稳定分析成果的可靠性影响最大的主要是土体的抗剪强度指标 c 、 φ 。土体的重度 γ 由于其自变异系数较小(一般只有 2%~3%),在可靠性计算时可忽略其变异性的影响^{[1][2]},将重度 γ 作为确定性变量来处理不会带来过大的误差。本文从工程实用角度出发,仅选取 c 、 φ 作为基本随机变量。

1.2 建立极限状态方程

在定值法分析计算的基础上,选定某些参数为基本变量,并令按定值法计算得到的安全系数 $F_s=1$,则可得出相应于各种分析方法的极限状态方程。

由图1所示的瑞典法计算简图可建立如下极限状态方程:

图 3 所示的简单土坡, 采用本文的可靠度分析程序对其进行最危险滑弧搜索, 计算结果见表 1。

表 1 不同概率分布类型对可靠指标 β 的影响

概率分布类型	最小可靠指标 β
c, φ 均为对数正态分布	3.519
c 为对数正态分布, φ 为正态分布	3.373
c, φ 均为正态分布	3.163

注: c, φ 的均值分别为 13 kPa, 12° , 变异系数均为 0.3。

由表 1 可见, 基本变量的分布类型对可靠度分析结果有一定影响。在其它条件相同时, 对基本变量采用正态分布的概率模型比采用对数正态分布的概率模型计算的可靠指标 β 值要小, 从而使计算结果偏于安全。

根据现行研究结果^{[2]、①}, c 多呈对数正态分布, φ 多呈正态分布。下面的计算中均取 c 为对数正态分布, φ 为正态分布。

2.2 土性参数 c, φ 的变异性对于 β 值的影响

利用上述程序分别计算三种不同的 μ_c, μ_φ 值下, 改变 c, φ 变异性的 β 值, 可得出图 4 的关系曲线

由计算结果分析可知:

①由图 4 中曲线可看出, 土性参数 c, φ 的变异性对可靠指标 β 值有很大的影响, 且其影响程度与 c, φ 均值的大小有关, 即与

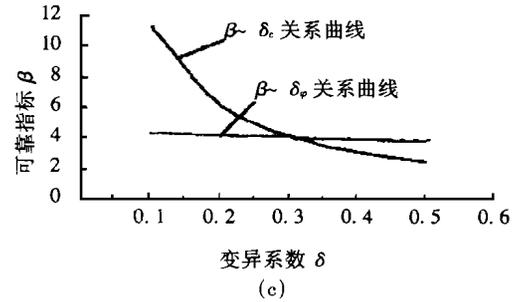
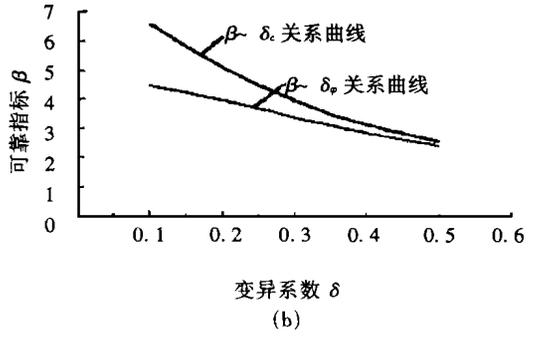
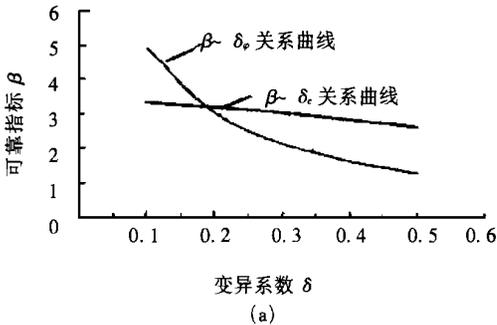


图 4 变异系数 δ 与可靠指标 β 关系图
(a) $\mu_c = 6 \text{ kPa}, \mu_\varphi = 20^\circ$ (b) $\mu_c = 13 \text{ kPa}, \mu_\varphi = 13^\circ$
(c) $\mu_c = 20 \text{ kPa}, \mu_\varphi = 6^\circ$

c, φ 在整个稳定中起的作用大小有关。 c, φ 在整个稳定中起的作用愈大, 则 β 值受其变异性的影响也愈大。

计算结果表明: 在 $\mu_c = 6 \text{ kPa}, \mu_\varphi = 20^\circ$ 的情况下, 固定 $\delta_\varphi = 0.2$, 当 δ_c 从 0.1 增至 0.5 时, β 值的减少量为 0.67; 固定 $\delta_c = 0.3$, 当 δ_φ 从 0.1 增至 0.5 时, β 值的减少量为 3.587, 可见 β 值对 δ_φ 的敏感性明显大于对 δ_c 的敏感性。

在 $\mu_c = 20 \text{ kPa}, \mu_\varphi = 6^\circ$ 的情况下, 固定 $\delta_\varphi = 0.2$, 当 δ_c 从 0.1 增至 0.5 时, β 值的减少量为 8.707; 固定 $\delta_c = 0.3$, 当 δ_φ 从 0.1 增至 0.5 时, β 值的减少量为 0.375, 此时 β 值对 δ_c 的敏感性则大大高于对 δ_φ 的敏感性。

②土性参数 c, φ 的变异性对可靠指标 β 值的影响很大。对应于图中的任一组 μ_c, μ_φ 值, 安全系数 F_s 值是不变的, 而可靠指标值却由于 c, φ 变异系数的不同发生很大的改

①范明桥. 土压力(参数)的概率特性和设计. 南京水利科学院土工研究所研究报告, 1994

变。也就是说,对于按定值法计算的安全系数 F_s 为某一定值的同一滑裂面,由于 c 、 φ 的变异系数的不同,用可靠度理论计算的 β 值却有可能相差很大。这就是为什么有些土坡按定值法计算是安全的,而实际运行后却发生失效现象的原因。

③上图中只给出了简化毕肖普法的计算结果。计算结果表明,在可靠度分析中,由瑞典典得出的可靠指标值要比简化毕肖普法得出的可靠指标值偏于安全,这与定值法中的规律是一致的。

由于简化毕肖普法具有更好的精确度,以下的计算中均采用简化毕肖普法。

2.3 土性参数 c 、 φ 的均值对于 β 值的影响

当其它参量不变,而仅 c 、 φ 的均值发生变化时, β 值将随之变化。本文取定 c 、 φ 的变异系数为 $\delta_c=0.3$, $\delta_\varphi=0.2$, 分别对以下两种情况进行了计算, 所得结果如下: ①固定 $\mu_c=13$ kPa, 当 μ_φ 由 10° 增至 13° 时, β 值从 1.116 增加到 3.982, 增加量为 2.866; ②固定 $\mu_\varphi=13^\circ$, 当 μ_c 从 10 kPa 增至 13 kPa 时, β 值从 0.661 增加到 3.982, 增加量为 3.321。由此可见,土坡稳定的可靠度指标 β 受 c 、 φ 均值影响的程度是不一样的,其中, β 对 μ_φ 的敏感性较 μ_c 差一点。

2.4 可靠指标 β 与安全系数 F_s 的关系

当安全系数 F_s 一定时,可靠指标 β 值与极限状态方程中各基本变量的统计参数密切相关。如果基本变量的统计参数(如变异系数 δ)发生变化,则可靠指标 β 值也将随之改变。那么,在各基本变量的统计参数一定的条件下,可靠指标 β 值与安全系数 F_s 之间是否有一定的规律可循呢?

笔者利用本文程序,针对这个问题进行了以下两种情况的计算:

①固定 $\mu_c=13$ kPa, $\mu_\varphi=13^\circ$, 改变 c 、 φ 的变异系数,可得出 c 、 φ 均值一定,不同变异系数下的 $F_s \sim \beta$ 关系曲线,见图 5。

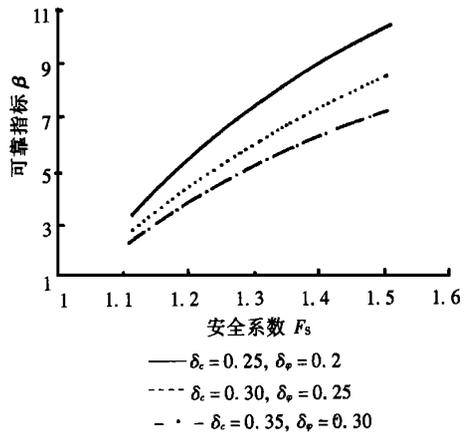


图 5 c 、 φ 均值一定,不同变异系数下 F_s - β 关系曲线

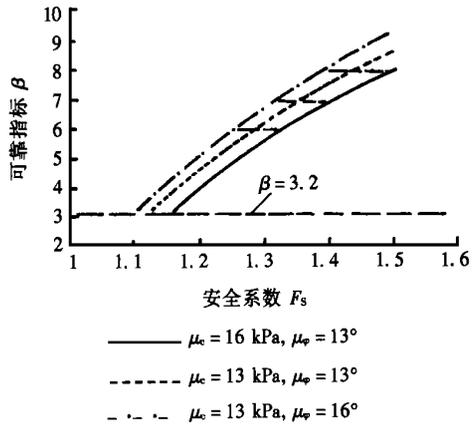


图 6 c 、 φ 变异系数一定,不同均值下 F_s - β 关系曲线

②固定 $\delta_c=0.3$, $\delta_\varphi=0.2$, 改变 c 、 φ 的均值,可得出 c 、 φ 的变异系数一定,不同均值下 $F_s \sim \beta$ 的关系曲线,见图 6。

1) 图 5 表明,在安全系数 F_s 一定的条件下,可靠指标 β 值随着 c 、 φ 变异系数的增大而减小。

2) 图 6 表明,在安全系数 F_s 一定的条件下,可靠指标 β 值随着 μ_c 的增大而减小,随着 μ_φ 的增大而增大。

3) 图 5 及图 6 均表明,在 c 、 φ 的统计参数一定的条件下,可靠指标 β 值随着安全系

数 F_s 的增大而增大, 它们之间近似成抛物线性的关系; 并且随着安全系数 F_s 的提高, 可靠指标 β 值有显著增大。

4) 若目标可靠指标 β_0 参照结构构件承载力极限状态设计时采用的可靠指标 β 值, 取 $\beta_0=3.2$ 为衡量标准, 则在 $\delta_c=0.3$ 、 $\delta_\varphi=0.2$ 时, 相应于图 6 中三条不同曲线的安全系数 F_s 值应分别近似为 1.115、1.125 和 1.15。

2.5 变量间互相关性对可靠指标 β 值的影响

由于岩土材料的特殊性, 在进行岩土工

程可靠度分析时, 土性指标间互相关性的影响是不容忽视的。

此处仍采用图 3 所示的简单土坡来考虑变量 c 、 φ 的互相关性对于可靠指标 β 值的影响, 计算中假定: c 的均值和方差分别为 13 kPa 和 0.3, φ 的均值和方差分别为 13° 和 0.2。

在基本变量 c 、 φ 的其他统计特征均不变的情况下, 改变 c 、 φ 的相关系数, 得到的计算结果见表 2。

由表 2 数据可绘出 $\beta \sim \rho$ 的关系曲线, 见图 7。

表 2 基本变量的相关系数对可靠指标的影响

相关系数 ρ	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
可靠指标 β	3.670	3.453	3.271	3.118	2.985	2.877	2.765	2.675	2.592	2.518	2.450

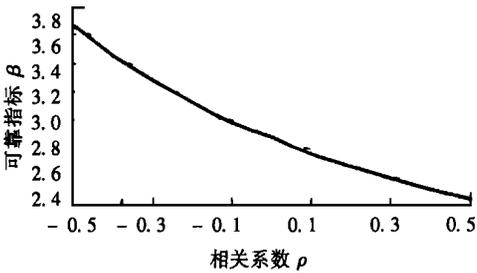


图 7 可靠指标 β 与相关系数 ρ 关系曲线

上述结果表明:

① 相关系数 $\rho_{c, \varphi}$ 对可靠指标 β 值的确有一定的影响。如 $\rho_{c, \varphi}$ 从 -0.5 增加到 0.5, 可靠指标 β 值从 3.670 减少到 2.450, 减少量为 1.22;

② 当 c 、 φ 呈现正相关关系时, 可靠指标 β 值随相关系数 $\rho_{c, \varphi}$ 值的增大而减小; 当 c 、 φ 呈现负相关关系时, 可靠指标 β 值随相关系数 $\rho_{c, \varphi}$ 的绝对值的增大而增大。

由于土性抗剪强度指标 c 、 φ 通常存在负相关关系, 因而实际应用时忽略变量间互相关性的影响是偏于安全的。但若在实际工程中能取得准确的相关系数 $\rho_{c, \varphi}$, 则应在计

算中考虑其影响。

3 结 语

① 基本变量的分布类型对可靠度分析结果有一定影响。在其它条件相同时, 对基本变量采用正态分布的概率模型比采用对数正态分布的概率模型计算的可靠指标 β 值要小。

② 土性参数 c 、 φ 的变异性对可靠指标 β 值有很大的影响, 且影响程度与 c 、 φ 均值的大小有关, 即与 c 、 φ 在整个稳定中起的作用大小有关。 c 、 φ 在整个稳定中起的作用愈大, 则 β 值受其变异性的影响也愈大。

对于按定值法计算的安全系数 F_s 为某一定值的同一滑裂面, 由于 c 、 φ 的变异系数的不同, 用可靠度理论计算出的 β 值却有可能相差很大。这就是为什么有些土坡按定值法计算是安全的, 而实际运行后却发生失效现象的原因。

③ 在可靠度分析中, 瑞典法得出的可靠指标值比简化毕肖普法得出的可靠指标值偏于安全, 这与定值法中的规律是一致的。

④ 土坡稳定的可靠度指标 β 受 c 、 φ 均

系。

根据野外勘察和室内分析整理,选择本区6个典型边坡按各因子进行打分,求出每个边坡各因子权重及其重要性排序,并得出

表4 边坡稳定性综合评价各因子打分及评价结果

边坡号	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	P	P_f	稳定性
1	4.6	6.7	5.8	7.7	4.8	6.1	6.7	7.8	5.6	6.323	1.150	基本稳定
2	4.2	6.7	6.2	7.0	2.4	3.0	6.5	3.7	2.0	4.888	0.889	基本不稳定
3	4.0	6.7	6.7	8.0	4.5	6.1	6.1	4.5	6.7	6.04	1.098	基本稳定
4	3.4	4.5	6.7	5.0	1.7	1.7	5.2	4.5	7.6	4.494	0.817	基本不稳定
5	4.5	6.7	6.7	6.3	4.5	8.0	6.9	6.7	2.0	6.059	1.102	基本稳定
6	4.5	6.7	6.7	6.1	1.7	1.7	5.6	4.5	1.7	4.575	0.832	基本不稳定

分析一致,也和本区2、4、6号边坡中有滑体存在的事实相吻合。

5 结 语

在岩石地区进行工程建设,边坡稳定性评价是工程地质勘察必不可少内容。实际应用表明,本文提出的这一方法综合性强、效果较好,简便易行,便于在工程实际中应用。但若干评价因子中尚存有一定的人为经验性,有待在今后的实践中不断改进。

参 考 文 献

- 1 徐茂其,张大泉.斜坡稳定性综合评价探讨.

各个边坡稳定性评价结果(见表4)。

对照表3可知,1、3、5号边坡稳定性较好,属基本稳定区,2、4、6号边坡稳定性差,属基本不稳定区。这结果与用其他方法所作

见:中国岩石力学与岩土工程学会主编.自然边坡稳定性分析暨华蓥山边坡变形研讨会论文集.北京:地震出版社,1992.112~117

- 2 Carson M A & Kirkby M J. Hillslope Form and Process. Cambridge at the University Press, 1972. 120~205
- 3 徐茂其.胜天水库区部分非生物因子综合质量评价.重庆环境科学,1988(2):14~19
- 4 黄纯颖.工程设计方法.北京:中国科学技术出版社,1989.98~99

收稿日期:2000-02-21

(上接第113页)

值影响的程度是不一样的,其中, β 对 μ_φ 的敏感性较 μ_c 差一些。

⑤在安全系数 F_s 一定的条件下,可靠指标 β 值随着 μ_c 的增大而减小,随着 μ_φ 的增大而增大。在 c 、 φ 的统计参数一定的条件下,可靠指标 β 值随着安全系数 F_s 的增大而增大,它们之间近似抛物线性的关系;随着安全系数 F_s 的提高,可靠指标 β 值有显著增大。

⑥相关系数 $\rho_{c, \varphi}$ 对可靠指标 β 值的确有一定的影响。当 c 、 φ 呈现正相关关系时,

可靠指标 β 值随相关系数 $\rho_{c, \varphi}$ 值的增大而减小;当 c 、 φ 呈现负相关关系时,可靠指标 β 值随相关系数 $\rho_{c, \varphi}$ 的绝对值的增大而增大。

参 考 文 献

- 1 高大钊.岩土参数的变异性及分布拟合.见《岩土工程技术文集》编辑组主编.岩土工程技术文集.西安:西安交通大学出版社,1989.287~291
- 2 高大钊.地基土力学性质指标的可靠性分析与取值.同济大学学报,1985.4.59~67

收稿日期:1999-09-02