

山区高路堤稳定可靠度分析研究^①

陈华,周亦唐

(昆明理工大学建筑工程学院,云南昆明 650051)

摘要 采用可靠度分析的验算点法,对山区高路堤稳定问题进行了研究.研究了土性参数的各种统计特性对山区高路堤稳定可靠指标的影响和路堤高度与路堤稳定系数的关系,回归统计了可靠指标和稳定系数的近似直线关系方程.

关键词: 高路堤,可靠度,可靠指标,稳定系数

中图分类号: U213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2001)06-094-04

0 前言

目前我国公路路堤的设计是安全系数法和经验法并存的定值设计法,把土性参数视为定值,没有考虑其存在的变异性和不确定性.实际上,工程问题的每一环节都是在大量不确定的情况下进行的,由于土是自然历史的产物,每一点土性均存在差异,在施工中由于压实、含水量等情况的不同还会造成填土各点性质的差异.如果不考虑这些实际存在的变异性和不确定性,有可能造成计算的稳定系数满足了要求,而实际仍不安全的情况.为了能在设计中定量考虑这些不确定性,提出了考虑土性参数随机性的基于概率统计理论基础之上的可靠度设计方法,就可将结构安全度用概率的形式科学表达,并能反应工程实际存在的风险.岩土工程的可靠性研究已开展了多年,内容涉及到可靠性分析设计的方方面面,但由于各地岩土性能的复杂性和明显的区域性,仍存在大量需要研究的问题.山区路堤因地层和地貌分布复杂,路堤高度一般较高,大多要求单独设计,验算路堤稳定性,要求稳定系数不小于规定的安全系数.因此,有必要对山区高路堤的稳定可靠度进行深入研究.

1 可靠度分析方法

1.1 基本随机变量确定

土体的容重 γ , 饱和度 S_r , 比重 G 的变异系数一般小于 5%, 在可靠性计算时可忽略其变异性的影响, 作为确定性变量来处理不会带来过大误差^[3]; 车辆荷载敏感性分析结果表明, 车辆荷载的变异性对可靠指标的计算结果影响不大, 车辆荷载也可视为非随机变量; 在影响路堤稳定的诸多因素中, 对路堤稳定可靠性分析结果影响最大的主要是土体的抗剪强度指标 c 、 φ . 本文从工程实用出发, 仅选取 c 、 φ 作为基本随机变量, 研究其对稳定可靠度的影响.

1.2 极限状态方程建立

研究表明, 简化毕肖普法被认为是较为恰当的描述路堤稳定性的方法, 以此建立的极限状态方程能较准确地表达路堤稳定的极限状态. 本文也采用此法, 但从工程实际考虑, 将路堤填土和地基土分开考虑. 对通过路堤填土的滑弧部分, 采用路堤填土的快剪强度指标 c_q 、 φ_q ; 对通过地基土的滑弧部分, 采用地基土固结快剪指标 c_g 、 φ_g 代替有效应力剪切指标 c 、 φ . 从而, 路堤稳定的简化毕肖普法极限状态方程可表达为:

$$Z = g(X) = R(X) - S(X) = 0 \quad (1)$$

$$\text{抗力: } R(X) = \sum k_{di} + \sum k_{ii}, \text{ 荷载: } S(X) = \sum (w_{di} + w_{ii} + q_i b_i) \sin \alpha_i$$

① 收稿日期: 2001-04-23;

第一作者简介: 陈华, 男, 1973年生, 硕士. 研究方向: 特殊路基处理.

$$k_{di} = [c_{qi}b_i + (\omega_{di} + q_i b_i) \tan \varphi_{qi}] / m_{ai}$$

$$m_{ai} = \cos \alpha_i + \tan \varphi_i \sin \alpha_i$$

$$k_{di} = [c_{gi}b_i + \omega_{di} \tan \varphi_{gi} + u_i(\omega_{ii} + q_i b_i) \tan \varphi_g] / m_{ai}$$

各式中, b_i 为土条 i 的宽度, α_i 为土条滑裂面与水平面夹角, u_i 为土条 i 的孔隙水压力, q_i 为 i 土条上作用的均布压力, ω_{di} , ω_{ii} 分别为土条 i 地基土部分和堤土部分重量。

1.3 可靠指标计算

极限状态方程式(1)表示:当 $Z > 0$ 时,路堤处于稳定状态;当 $Z = 0$ 时,路堤处于极限平衡状态;当 $Z < 0$ 时,路堤处于失稳状态。路堤稳定的可靠度就是路堤处于稳定的可靠概率,即 $R = P\{Z > 0\}$;可靠指标 β 定义为 $\beta = m_z / \sigma_z$,因 β 与可靠度 R 存在一一对应关系 $R = 1 - \Phi(-\beta)$,求得 β 即可求得相应的可靠度 R 。

本文采用“验算点”法计算可靠指标值,其基本计算原理如下:确定与荷载和抗力效应相对应的随机向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,就路堤稳定分析而言,由岩土性能参数(如 c 、 φ 、 γ 等)、几何尺寸参数、各种荷载参数等构成。由随机向量建立如式(2)所示极限状态方程,式中 $Z = g(X)$ 称为“功能函数”;当功能函数为独立正态随机变量的函数时,式(3)代表以基本随机变量 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为坐标的 n 维欧氏空间上的一个曲面;将功能函数在验算点 p^* 按 Taylor 级数展开后只保留一次项,推导可知可靠指标 β 是标准正态随机空间坐标系中原点到极限状态曲面的最短距离,可靠指标 β 及验算点坐标 $p^*(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ 可用以下方程组迭代求得。

$$Z = g(X) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (2)$$

$$g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = 0 \quad (3)$$

$$x_i^* = m_{x_i} + \sigma_{x_i} \beta \cos \theta_{x_i} \quad (4)$$

$$\cos \theta_{x_i} = \frac{-\sigma_{x_i} \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{p^*}}{\sqrt{\sum_1^n \left(\sigma_{x_i} \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{p^*} \right)^2}} \quad (5)$$

当随机变量为非正态随机变量,则需进行当量正态标准化处理;当随机变量有相关性时,先采用正交变换,转化为互相独立的随机变量,然后利用(3)~(5)求解,同时还可求出相应的失效概率 $P_f = \Phi(-\beta)$ 。本文采用 STAB 95 土质边坡稳定分析程序进行可靠指标和稳定系数计算,采用单形法搜索最危险临界滑裂面,分别对 10m 以上高填方路堤和 5m 以上软基路堤进行了稳定分析研究。

2 计算结果分析

2.1 基本变量 c 、 φ 的概率模型对可靠指标 β 的影响

计算采用的山区土性统计参数 c 较符合对数正态分布, φ 较符合正态分布,但都不拒绝正态分布^[1];表 1 计算结果说明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要小,从而使计算结果偏于安全;因此在可靠性分析中,为简化而假定各指标为正态分布是可以的。下面的计算 c 、 φ 均取为正态分布。

表 1 土性参数不同概率模型对可靠指标的影响

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

注:只考虑路堤填土, c 、 φ 的均值分别为 24.50kPa, 15.13°。变异系数均为 0.25。

2.2 土性参数 c 、 φ 相关性对可靠指标 β 的影响

由于岩土材料的特殊复杂性,土性参数间互相关性对岩土工程可靠度分析的影响不容忽视。为简化仅考虑改变填土 c 、 φ 的相关系数,基本变量的其它统计特征不变,计算得到结果见图 1 所示。相关系数 $\rho_{c, \varphi}$ 对可靠指标 β 有一定影响,当 c 、 φ 呈正相关时, β 随相关系数 $\rho_{c, \varphi}$ 值增大而减小;当 c 、 φ 呈负相关时, β 随相关系数 $\rho_{c, \varphi}$ 绝对值增大而增大。虽然 c 、 φ 的相关性不是非常确定,一般认为 c 、 φ 大多呈负相关关系,因

而实际应用时忽略互相关性是偏于安全的。

2.3 土性参数 c 、 φ 的均值及变异性对可靠指标 β 的影响

稳定系数 K 一定, 只考虑堤土的变化时, 在不同均值 m_c 、 m_φ 下, 改变 c 、 φ 的变异性求出 β 值, 它们的关系由图 2(a), 图 2(b), 图 2(c) 中曲线可见:

(1) 当其它参量不变, 均值 m_c 、 m_φ 变化时, β 值将随之变化, 而且受均值的影响的程度不一样, β 对 m_c 的敏感性较 m_φ 强;

(2) 土性参数 c 、 φ 的变异性对 β 影响较大, 且其影响程度与 c 、 φ 均值有关, 即 c 、 φ 在整个稳定中起的作用大小有关, 作

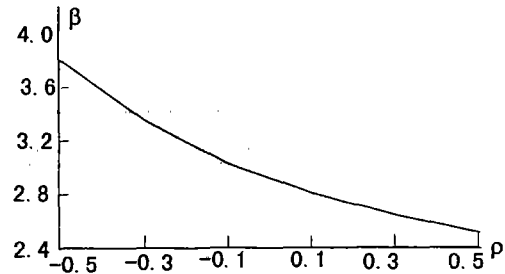
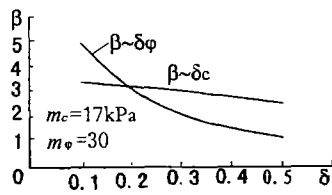
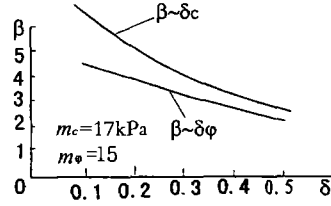


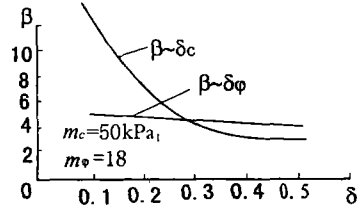
图1 可靠指标与相关系数的关系曲线



(a) β-δ的关系



(b) β-δ的关系



(c) β-δ的关系

图2 c 、 φ 均值的变异对可靠指标 β 的影响

用越大, 受影响越大;

(3) 当均值 m_c 、 m_φ 不变, β 随变异系数 δ_c 、 δ_φ 的增大而减小; 当 δ_c 、 δ_φ 不变时, β 随均值 m_c 的增大而减小, 随均值 m_φ 增大而增大;

(4) 对应于图中不同的 m_c 、 m_φ , 假设的稳定系数值不变, 但 β 却由于 c 、 φ 变异系数不同而发生较大改变, 即稳定系数为某一定值的同一滑裂面, 由于 c 、 φ 变异系数的不同, 可靠指标 β 却有可能相差很大. 这就是为什么有些路堤定值法计算是稳定的, 实际运行后却发生失效现象的原因。

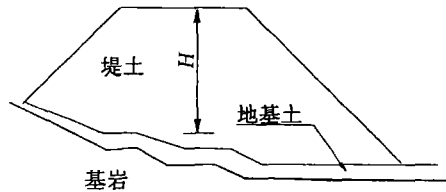
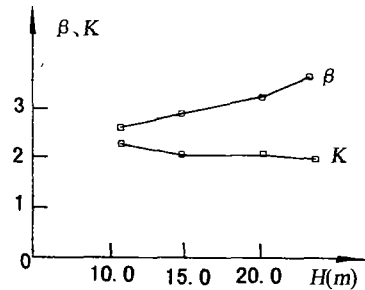


图3 倾斜地基时 β 、 K 与 H 的关系



2.4 地基地貌不同时可靠指标 β

和稳定系数 K 与堤高 H 的关系

(1) 倾斜地基: 图 3(a) 为高原山区某一断面由三个钻孔资料揭示的地基情况, 土性参数如表 2 所示, 当在其上填筑 10.0m, 15.0m, 20.0m, 25.0m 高的路堤时(以路中线计), 计算出相应的 β 和 K . 结果如图 3(b) 所示, K 随路堤高度 H 的增加而减小, 而 β 反而增加. 造成这一结果的原因主要是由于地基土层较薄, 滑弧穿越地基部分所占比例很少, 而堤土土性参数变异性显著小于地基土变异性, 同样均值时变异性越小获得的 β 越高, 随着路堤高度的增加影响越显著。

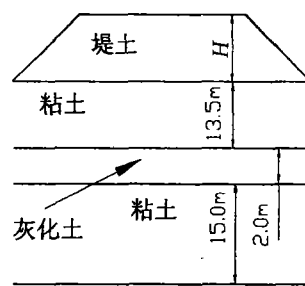
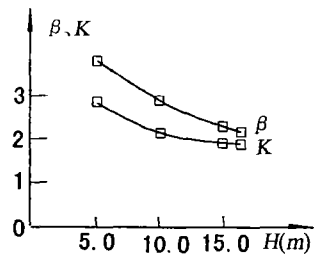


图4 水平地基时 β 、 K 与 H 的关系



(2) 水平地基: 图 4(a) 为高原湖泊区某一钻孔资料揭示的地基土情况, 土固结快剪强度指标如表 2 所示. 当在其上填筑 5.0m, 10.0m, 15.0m 高的路堤时, 计算出相应的 β 和 K . 结果如图 4(b) 所示, 随着路堤高度的增加, β 和 K 随之减小, β 比 K 减小更显著。

比较(1), (2) 计算分析结果, 可初步得出: 1) 稳定系数 K 随路堤高度的增加而降低是普遍规律; 可靠

指标 β 受土性参数均值及其变异双重影响,与路堤高度没有必然联系.2)山区地基路堤所处地层和地貌分布复杂,倾斜地基普遍遇到,其稳定与实际地层分布和地貌形态密切相关,应加强地基分布的勘探研究.

表2 水平地基和倾斜地基计算所采用土性参数

土质		指标				
		γ /kN.m ⁻³	c/kPa		$\varphi(^{\circ})$	
			均值	变异系数/%	均值	变异系数/%
水平地基	堤土	22.08	100.93	27.12	41.90	9.89
	粘土	16.80	24.50	53.47	15.13	25.56
	灰化土	14.65	17.50	59.77	15.76	23.22
倾斜地基	堤土	20.18	50.26	18.37	30.50	4.63
	地基土	19.00	73.15	40.02	17.65	28.44

2.5 可靠指标 β 与稳定系数K的关系

研究表明,在各基本变量的统计参数一定时,即不考虑土体容重和车辆荷载的变异性时,路堤稳定可靠指标 β 与K之间近似为双曲线关系,在通常K取值范围内($K=1.0\sim 1.6$),也可采用直线来近似.表3是由15段路堤统计回归及相关性检验的结果, $\beta\sim K$ 较好地符合双曲线和直线,若仅从相关系数看,直线略好,这与前人研究结果相一致^[2].随着稳定系数的提高,可靠指标显著增大;由于固结快剪指标的变异性普遍小于快剪指标,因此计算所得的 β 值比采用快剪指标时大.

表3 $\beta\sim K$ 的回归函数关系

曲线	指标			
	快剪		固结快剪	
双曲线	$\beta = 9.1348 - 7.3586/K$	$r = -0.80$	$\beta = 8.3213 - 7.8258/K$	$r = -0.77$
直线	$\beta = -2.0971 + 3.4284/K$	$r = 0.94$	$\beta = -1.7973 + 2.7258/K$	$r = 0.93$

3 结 语

从以上对山区高路堤稳定可靠度分析计算结果可总结得到如下结论:1)山区地层和地貌分布对高路堤稳定系数有影响,稳定系数随路堤高度的增加而降低;2)在通常的 $K=1.0\sim 1.6$ 范围内,可靠指标 β 和稳定系数K的关系可用直线关系近似;3)岩土土性参数分布概率模型、互相关性、均值及其变异性对可靠指标 β 都有影响,而且影响的程度和方式不一.因此,应加强地基土勘探研究和地基土、路堤填土的土性参数统计分析,建立区域性的土性参数数据库,并深入研究地面水、地下水、雨水对山区路堤土体稳定性的影响等值得重视的课题.

参考文献:

- [1] 试验工程的勘探与试验研究及土性参数分析. 云南省公路规划勘察设计院研究报告,1997.
- [2] 路堤边坡稳定可靠性分析的计算模式与计算方法的研究. 重庆公路科学研究所研究报告,1997.
- [3] 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,1985,25(4):59~67.
- [4] Morla-Catalam J, and Cornell, C. A. Earth Slope Reliability by a level Crossing Method, Geotechnical Engineering, 1976.

Research of Reliability on High-embankment Stability in mountain area

CHEN Hua, ZHOU Yi-tang

(The Faculty of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract Some problems of reliability analysis on high-embankment stability in mountain area are discussed by using test-point method, which is a reliability analysis method. The influence of the statistical characteristics of embankment fill shear strength on reliability index of high-embankment stability is discussed, also the influence of embankment height on factor of high-embankment stability. The relation curve between reliability index and factor of high-embankment stability is drawn by statistical method.

Key words: high-embankment; reliability; index of reliability; factor of stability