

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.04.010



土体抗剪强度指标变异水平对边坡稳定安全系数取值的影响

骆飞¹, 罗强¹, 蒋良淮¹, 吕杨², 孔德惠¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院; 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 成都 610031;

2. 四川城市职业学院 公共服务系, 成都 610110)

摘要:针对传统的边坡稳定极限平衡方法不能考虑土体抗剪强度指标变异性影响的问题, 基于极限状态的概率分析原理, 采用 Monte-Carlo 法对均质路堤边坡的稳定性开展了可靠度计算, 讨论了稳定安全系数一定的条件下边坡失效概率随土体抗剪强度指标变异水平的变化规律, 分析了安全系数与边坡可靠指标的对应关系及其随土体抗剪强度指标变异水平的变化特征。研究表明: 边坡可靠度受土体抗剪强度指标变异性影响显著, 呈现出随土体抗剪强度指标变异水平提高而急剧减小的趋势; 为保证边坡具有相同的可靠性, 安全系数的取值应与土体抗剪强度指标的变异性相适应, 据此提出了基于可靠指标和土体抗剪强度指标变异水平的安全系数取值原则及其对应的三参数函数关系式。

关键词:边坡稳定分析; 安全系数; 可靠指标; 土体抗剪强度指标变异性; Monte-Carlo 法

中图分类号: TU751.6; U416.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)04-0077-07

Influence of variation levels of soil strength indexes on the value of slope stability safety factor

Luo Fei¹, Luo Qiang¹, Jiang Liangwei Fei¹, Lyu Yang², Kong Dehui¹

(1. School of Civil Engineering; MOE Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. Department of Public Service, Urban Vocational College of Sichuan, Chengdu 610110, P. R. China)

Abstract: Traditional limit equilibrium methods of slope stability fails to consider the influence of soil strength indexes variability. Based on probability analysis principle of limit state, Monte-Carlo method is used to calculate the reliability of stability of homogeneous embankment slope. And with constant safety coefficient, changes of slope failure possibility with different levels of soil strength indexes are studied. The corresponding relationship between safety coefficient and reliability index of the slope and changes of safety factor with variation levels of soil strength indexes are analyzed. Results show that; the slope reliability is

收稿日期: 2015-03-13

基金项目: 国家基础研究发展规划项目(973计划)(2013CB036204)

作者简介: 骆飞(1991-), 男, 主要从事路基工程路堤边坡可靠度研究, (E-mail) 413662997@qq.com。

罗强(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) lqrock@home.swjtu.edu.cn。

Received: 2015-03-13

Foundation item: Chinese National Programs for Fundamental Research and Development (973 Program) (No. 2013CB036204)

Author brief: Luo Fei(1991-), main research interest; reliability of embankment slope of subgrade engineering, (E-mail) 413662997@qq.com.

Luo Qiang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail) lqrock@home.swjtu.edu.cn.

affected by soil strength indexes variability significantly, indicating sharp decreases with increase of soil strength indexes variation levels; in order to get the slope the identical reliability, safety coefficient should be changed according to soil strength indexes variability. The safety coefficient should be changed according to reliability index and soil strength indexes variation levels and based on which three parameters function is put forward.

Key words: analysis of slope stability; safety factor; reliability index; variability of soil strength indexes; Monte-Carlo method

边坡稳定性问题是土木工程领域的一个重要研究内容。传统边坡稳定性分析方法以安全系数作为衡量边坡安全状态的指标,已在长期的工程实践中积累了一定经验,但该方法忽略了土体的物理力学参数所固有的变异性等不确定因素,无法真实全面评价边坡的安全度^[1]。鉴于此,在边坡稳定性分析中,采用不确定性分析方法以考虑各项不确定因素对边坡稳定性的影响十分必要。

可靠性分析^[2]是一种以概率统计理论为基础的不确定性分析方法。该方法充分考虑边坡系统中的不确定性因素,通过计算边坡的可靠指标 β 或破坏概率 P_f 来评价边坡的稳定性,弥补了传统的稳定性分析方法仅以经验性安全系数来表示边坡稳定状况的不足,能够更合理地评价边坡的安全状况。可靠性分析在土木工程领域最早被用于评价工程结构的安全状态,之后发展迅速,目前已在结构工程设计中广泛应用。相对而言,可靠度理论在边坡工程中的应用则起步较晚。1970年 Wu等^[3]首次将不确定性概念引入到边坡稳定性分析中,可靠度理论开始应用于边坡工程。此后,边坡工程界逐渐从可靠度角度评价边坡的安全性,进而建立更为完善的边坡可靠度评价体系。

边坡工程评价和设计中的数学模型、基本变量及预测结果都包含着许多不确定性因素,大致可分为3类:物理不确定性、统计不确定性和模型不确定性^[1]。对此,众多学者进行了详细地研究。冷伍明等^[4]将土的固有变异性和系统不确定性作为土工参数不确定性的主要来源,引入随机场理论推导出了土性参数空间变异系数的综合计算式。张卫民等^[5]探讨了计算方法、土工参数变异性、地下水位、坡顶荷载等不确定性因素对安全系数取值的影响,对比分析后指出安全系数对土的抗剪强度指标的变异性更为敏感。张继周等^[6-7]系统总结了有关土性参数变异性的研究成果,通过对比分析两种土层剖面的建模方法,提出了一种基于随机场理论的土体空间变异性统计方法。罗文强等^[8]基于边坡稳定安全系数的正态分布假设,统计分析了不同中值安全系数

及其变异系数下的失效概率,据此建立了一种传统安全系数与可靠性耦合的边坡稳定性二元指标体系。黄景华等^[9]分析了土性参数中内摩擦角和黏聚力的变异性及其分布形式对边坡稳定可靠性的影响规律,指出应根据土体抗剪强度指标的变异水平合理选取参数的概率分布形式。对于土体抗剪强度指标变异性对边坡稳定性的影响这一问题,大多数文献仅给出了安全系数、可靠指标和失效概率的计算结果,未能系统研究抗剪强度指标的不同变异水平下稳定安全系数与可靠指标之间的相应关系,对安全系数的合理取值研究不够深入。传统边坡稳定性分析方法沿用至今,稳定安全系数取值已在大量的工程实践中积累了丰富的经验,而可靠度理论则欠缺相应的工程实践经验。掌握稳定安全系数和可靠指标在不同土体抗剪强度指标变异水平下的对应关系,以此优化安全系数的取值对基于可靠性原理的边坡稳定性设计具有积极指导意义。

为研究土体抗剪强度指标变异水平对边坡稳定安全系数取值的影响,基于均质路堤边坡稳定分析模型,运用 Monte-Carlo 法^[1]进行边坡稳定可靠性分析。在均值安全系数 $F_s=1.25$ 条件下,分析边坡失效概率随 c 、 φ 变异水平的变化规律,进而指出仅用同一安全系数取值来保证边坡安全性的不足,建议适当提高容许安全系数的取值;通过设定5个等级的可靠指标,分析其对应的土体抗剪强度指标均值在不同变异水平下安全系数的取值规律,并建立安全系数取值的回归关系式,对一定可靠指标下稳定安全系数的合理选取进行探讨。

1 土工参数不确定性与可靠度计算

1.1 土体抗剪强度指标变异性及水平划分

土工参数不确定性主要体现在其材料参数的变异性上,变异系数^[10]与方差、标准差类似,是反映数据离散程度的特征值,一般用 δ 表示。

$$\delta = \frac{\sigma}{\mu} \quad (1)$$

式中: μ 是土工参数的平均值; σ 是土工参数的标准

差,两者需通过大量且详细的工程勘察后统计分析得到。变异系数是无量纲量,反映单位均值上的离散程度,可用于比较不同参数之间的离散程度。

与其他工程材料相比,土工材料的各参数指标表现出较大不确定性。近几十年来,学者们对土工参数变异性进行了大量的研究,其中高大钊^[11]、Duncan^[12]、张继周^[6]、李小勇^[13]等总结了不同试验方法及不同地域所得部分土工参数的变异系数取值范围。根据上述资料,表1归纳了影响边坡稳定性的3个主要土工参数指标(容重、黏聚力、内摩擦角)的变异系数取值范围。

表1 主要土工参数变异系数取值范围

Table 1 Values range of coefficient of variation for main geotechnical parameters

容重 γ	黏聚力 c	内摩擦角 φ
<0.1	0.19~0.55	0.05~0.40

能否正确选取土工参数变异系数的大小将直接影响边坡可靠度结果^[14]。表1中容重 γ 的变异系数取值很小,在计算时通常将 γ 取为定值; c 、 φ 的变异系数取值较大,对边坡稳定性影响显著。吴兴正^[15]统计分析了6条铁路共13组土样中土体抗剪强度指标的勘察统计资料,归纳出 c 、 φ 的变异系数取值的变化规律,即 c 、 φ 的变异系数具有相同的取值趋势,呈现“同取大同取小”的变化特征。因此,有必要对 c 、 φ 的变异系数划分不同等级进行分析。为研究边坡稳定安全系数与可靠指标结果随土体抗剪强度指标变异性的变化规律,根据表1中参数的变异系数取值范围,将土体抗剪强度指标的变异水平划分为水平1~5共5种变异水平,具体分级标准见表2。

表2 土体抗剪强度指标变异水平划分

Table 2 Grade of coefficient of variation for soil strength indexes

变异水平	黏聚力	内摩擦角
水平1	0.20~0.25/0.20	0.05~0.15/0.10
水平2	0.25~0.30/0.25	0.15~0.20/0.15
水平3	0.30~0.35/0.30	0.20~0.25/0.20
水平4	0.35~0.40/0.35	0.25~0.30/0.25
水平5	0.40~0.55/0.40	0.30~0.40/0.30

注:表中“/”右侧数值为文中计算取值。

1.2 可靠度计算及边坡稳定分析

目前,边坡可靠度分析方法主要有可靠指标法、统计矩法、Monte-Carlo法和随机有限元法^[1]。其

中, Monte-Carlo法因原理清晰、操作简便、运行良好和结果准确而得到广泛应用。

Monte-Carlo法又称为随机模拟或统计试验法,是一种依据统计抽样理论,利用计算机研究随机变量的数值计算方法。该方法计算边坡可靠度的基本原理^[16]为:若已知土工参数随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n 的概率分布和极限状态方程 $g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 1$ (以边坡安全系数表达极限状态),依据随机变量的分布利用Monte-Carlo法生成一组随机数 x_1, x_2, \dots, x_n ,将其代入安全系数状态方程 $F_s = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$,可得一个安全系数 f_1 ,如式(2)所示。

$$f_1 = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

如此重复 N 次,得到安全系数 F_s 的一组样本,样本容量为 N ,样本值为 f_1, f_2, \dots, f_N 。若上述 N 个安全系数中有 M 个 $f_i < 1$,由Bernoulli大数定理^[10]可知,当 N 足够大时频率 M/N 的值收敛于边坡的实际失效概率 P_f ,则失效概率可用式(3)表示。

$$P_f = P\{F_s = g(x_1, x_2, \dots, x_n) < 1\} = \frac{M}{N} \quad (3)$$

若土工参数随机变量服从正态分布,上述安全系数 F_s 的样本均值为 μ_f ,样本标准差为 σ_f ,则可以利用式(4)计算得到工程可靠指标 β 。

$$\beta = \frac{\mu_f - 1}{\sigma_f} \quad (4)$$

GeoStudio^[17]能够模拟岩土工程、市政、水利和采矿工程中的各种复杂工况,是目前应用最广泛的岩土工程分析软件之一。SLOPE/W是GeoStudio的一个重要模块,可运用Monte-Carlo法分析土工参数的变异性等不确定性因素对边坡稳定性的影响。SLOPE/W根据用户输入的参数平均值、标准差和选用的安全系数计算方法计算出最小安全系数,确定最危险滑面;然后考虑参数变量的不确定性,在已确定的最危险滑面上进行指定次数的Monte-Carlo模拟,得出一组安全系数取值;最后对安全系数进行统计分析得出安全系数平均值 \bar{F}_s 、最大值 F_{smax} 、最小值 F_{smin} 、标准差 σ_f ,计算出边坡可靠指标 β 以及失效概率 P_f 。利用SLOPE/W软件以及Monte-Carlo法对均质路堤边坡开展可靠度计算,分析土体抗剪强度指标变异水平对边坡稳定安全系数取值的影响。

2 边坡稳定性分析

2.1 边坡稳定分析模型

边坡稳定分析模型按照《铁路路基设计规

范》^[18]确定土质路堤边坡模型的几何尺寸:坡高为 8 m、坡度为 1:1.5,边坡与地基的材料相同且为均匀的,如图 1 所示。考虑到路堤边坡的对称性,采用 1/2 模型进行计算,安全系数计算方法统一选用铁路工程技术规范采用的 Fellenius 法^[19]。

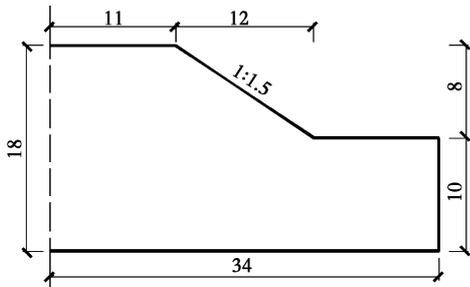


图 1 边坡稳定分析模型(单位:m)

Fig. 1 Analysis model of embankment slope (unit: m)

2.2 土体抗剪强度指标变异性对边坡可靠指标影响

为分析土体抗剪强度指标变异水平对边坡可靠指标的影响,将均质路堤边坡的 3 个主要土工参数均值取为定值,如表 3 所列,此时运用 SLOPE/W 计算出边坡稳定安全系数 $F_s = 1.25$ 。

表 3 边坡土工参数均值

Table 3 Mean values of geotechnical parameters of embankment slope

土工参数	容重 / (kN · m ⁻³)	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)
均值	20	10	21.47

考虑均质路堤边坡土工参数的物理不确定性,分析土体抗剪强度指标处于不同变异水平下可靠指标及失效概率的变化规律。采用 SLOPE/W 对边坡进行概率分析,土工参数均值按表 3 选取,变异水平按表 2 分级取值,经 Monte-Carlo 法模拟得到在不同变异水平下的安全系数均值 \bar{F}_s 、可靠指标 β 和失效概率 P_f 如表 4 所列,绘制失效概率随抗剪强度指标变异水平变化的统计直方图如图 2 所示。

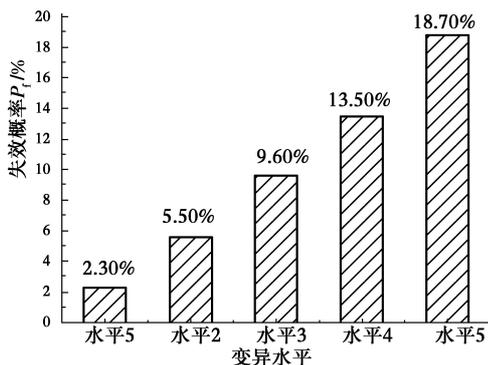


图 2 失效概率计算结果

Fig. 2 Results for failure possibility

表 4 不同变异水平下的计算结果

Table 4 Results for different coefficient of variation

变异水平	\bar{F}_s	可靠指标 β	失效概率 P_f / %
水平 1	1.263	1.945	2.30
水平 2	1.267	1.689	5.50
水平 3	1.271	1.418	9.60
水平 4	1.274	1.186	13.50
水平 5	1.280	0.939	18.70

计算表明,土体抗剪强度指标变异水平是影响边坡可靠性的关键因素。在同一稳定安全系数条件下,随着变异水平逐级增大,可靠指标逐渐减小,边坡失效概率急剧上升,依次从 2.4%、5.7%、9.5%、13.6% 上升至 18.6%。当抗剪强度指标变异水平处于水平 3 及以上水平时,边坡安全系数均值与水平 1 时相比变化并不明显,而可靠指标和失效概率变化显著,此时,采用同一安全系数取值来保证路堤边坡的安全具有较高风险。为保证路堤边坡具有与线路等级和线路基础结构相协调的失效概率水平,当土体抗剪强度指标变异水平较大时,要求的设计安全系数应适当增大。

2.3 可靠指标与安全系数关系分析

目前,《铁路路基设计规范》^[17]规定在验算路堤边坡稳定性时安全系数不得小于 1.25;《铁路工程地基处理技术规程》^[20]对不同列车设计行车速度下路堤边坡在施工期和运营期的稳定安全系数进行了相应规定,施工期的取值范围为 1.10~1.15,运营期的取值范围为 1.2~1.3(边坡稳定安全系数验算均选用 Fellenius 法)。上述规范均未考虑土体抗剪强度指标变异水平对边坡稳定安全系数取值的影响,也未对可靠指标与安全系数取值的对应关系进行探讨,可能会导致工程实践中土体抗剪强度指标变异性较大时盲目提高安全系数以保证边坡安全度的问题。利用可靠指标指导安全系数设计这一思想,通过设定不同的边坡可靠指标,分析抗剪强度指标在不同变异水平下安全系数取值情况,进而得出均值安全系数取值的变化规律及回归函数关系式,以此给出容许安全系数取值的相关建议进而指导边坡可靠性设计。

考虑到土工参数中容重 γ 的变异性较小,将其取为定值 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$,分析不同可靠指标下黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的取值情况及其在不同变异水平下均值安全系数 F_s 与安全系数均值 \bar{F}_s 的取值规律。 c 、 φ 的变异水平分 5 个等级参照表 2 选取,表 5

所列 5 个可靠指标等级条件下 c 、 φ 取值及其安全系数计算结果。

表 5 不同条件下安全系数计算结果
Table 5 Results of safety coefficient under different conditions

β	变异水平	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)	F_s	\bar{F}_s
1.0	水平 1	11	16.48	1.108	1.117
1.0	水平 2	11	17.27	1.137	1.143
1.0	水平 3	11	18.28	1.178	1.198
1.0	水平 4	11	19.39	1.216	1.239
1.0	水平 5	11	20.56	1.264	1.305
1.5	水平 1	13	15.92	1.172	1.183
1.5	水平 2	13	18.48	1.270	1.286
1.5	水平 3	13	20.52	1.349	1.358
1.5	水平 4	13	24.31	1.467	1.483
1.5	水平 5	13	23.87	1.642	1.687
2.0	水平 1	15	16.77	1.296	1.311
2.0	水平 2	15	19.52	1.404	1.418
2.0	水平 3	15	22.92	1.539	1.553
2.0	水平 4	15	29.12	1.799	1.826
2.0	水平 5	15	36.51	2.169	2.216
2.5	水平 1	17	17.41	1.411	1.423
2.5	水平 2	17	21.45	1.573	1.589
2.5	水平 3	17	27.46	1.746	1.775
2.5	水平 4	20	35.11	2.217	2.252
2.5	水平 5	30	36.45	2.866	2.901
3.0	水平 1	19	18.10	1.535	1.547
3.0	水平 2	19	23.86	1.752	1.763
3.0	水平 3	22	26.81	2.040	2.082
3.0	水平 4	37	32.18	2.971	3.017
3.0	水平 5	60	39.84	4.421	4.469

表 5 结果表明,在同一边坡可靠指标 β 和参数变异水平下,均值安全系数 F_s 略小于安全系数均值 \bar{F}_s ,但差异并不明显,差值在 0.05 内^[21]。根据表 5 结果作出不同变异水平下均值安全系数 F_s 随边坡可靠指标 β 的变化曲线,如图 3 所示。

计算表明,不同土体抗剪强度指标变异水平条件下,均值安全系数 F_s 随边坡可靠指标 β 的提高而增大。总体而言, F_s 随 β 的增加呈现出逐渐增长的趋势,增长速度在不同变异水平时有所差别。当抗剪强度指标变异性较小时(变异水平在水平 3 或以下水平),随着 β 的增大, F_s 的增长趋势较为平缓,

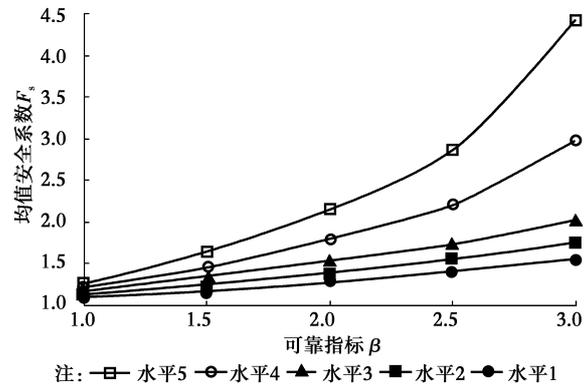


图 3 均值安全系数与边坡可靠指标关系曲线
Fig. 3 Curve of relationship between mean safety factor and slope reliability index

变化范围为 1.108~2.040;当抗剪强度指标的变异水平处于水平 4 或水平 5 时,曲线斜率逐渐加大, β 的增加引起 F_s 的明显增大, F_s 变化范围为 1.216~4.421。

另一方面,在同一 β 条件下, F_s 的取值随着土体抗剪强度指标变异水平的提高而呈现类似的增长规律,如图 4 所示。当 $\beta=1\sim 2$ 时,均值安全系数随着变异水平的提高增长趋势较为平缓;当 $\beta=2\sim 3$ 时,随着变异水平的提高, F_s 的增长幅度加大,取值变化明显。

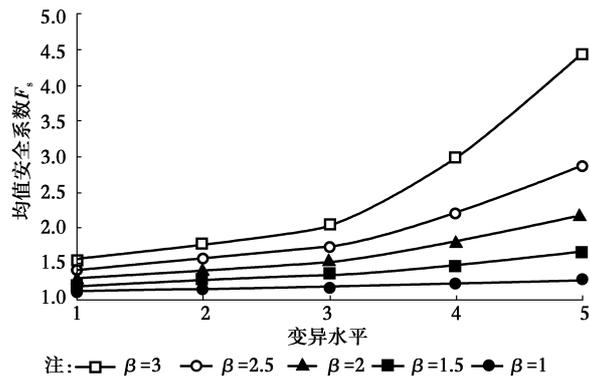


图 4 均值安全系数与变异水平关系曲线
Fig. 4 Curve of relationship between mean safety factor and variation levels

为定量分析不同土体抗剪强度指标变异水平下可靠指标 β 与均值安全系数 F_s 的对应关系,运用幂函数对表 5 结果进行回归分析^[22],建立可靠指标 β 与均值安全系数 F_s 的三参数函数关系式。

$$F_s = a_i \beta^{b_i} + c_i \quad (5)$$

式中: β 的取值范围为 $\beta=1.0\sim 3.0$, $i=1,2,3,4,5$ 分别表示土体抗剪强度指标的 5 种变异水平,对应回归参数如表 6 所列。

表 6 不同变异水平下的回归参数

Table 6 Regression parameters under different levels of variation

变异水平	i	a_i	b_i	c_i	R^2
水平 1	1	0.096 2	1.558	1.006	0.996 8
水平 2	2	0.128 6	1.616	1.013	0.999 4
水平 3	3	0.202 9	1.517	0.978	0.996 7
水平 4	4	0.156 3	2.259	1.078	0.998 5
水平 5	5	0.092 5	3.229	1.184	0.996 1

表 6 中拟合优度 R^2 取值均大于 0.99, 表明可靠指标 β 与均值安全系数 F_s 具有良好的幂函数回归关系, 两者可进行有效换算。回归参数中 a_i 、 c_i 的差异并不明显, b_i 的取值恰好反映出 F_s 随 β 的变化规律 ($i=1, 2, 3$ 时, b_i 取值在 1.5 左右, 曲线增长较平缓; $i=4, 5$ 时, $b_i > 2.2$, 曲线增长较快), 对应的回归关系式可为不同变异水平下容许安全系数的选取提供参考。

中国工程地勘资料统计表明, 土体抗剪强度指标普遍处于中等变异水平 (对应于表 2 中水平 3), 个别情况甚至达到大变异水平 (对应于表 2 中水平 5), 因而, 有必要对传统经验性安全系数的取值进行优化。参照表 5 的计算结果及所建立的幂函数表达式, 提出边坡安全系数的取值应与可靠指标和土体抗剪强度指标变异水平相适应的技术原则, 即以可靠性方法进行边坡稳定性设计时, 在选定分析模型和安全系数验算方法条件下, 应以可靠指标为基础, 同时考虑土体抗剪强度指标实际具有的变异水平合理选取稳定安全系数。

对于目前工程常用的设计安全系数 $F_s = 1.25$ 的条件, 根据文中计算结果可知, 在土体抗剪强度指标的变异水平处于水平 1 情况下边坡可靠指标 $\beta = 1.817$; 处于水平 3 时, 对应的 $\beta = 1.213$; 处于水平 5 时 $\beta = 0.901$, 已不能满足边坡稳定性基本要求。若要求可靠指标 $\beta = 2.0$, 对应于抗剪强度指标变异水平处于水平 3 条件下的安全系数需提高至 $F_s = 1.539$; 当变异水平处于水平 5 时, 则对应的安全系数将达到 $F_s = 2.169$ 。

3 结 论

针对均质路堤边坡稳定分析模型, 基于 Monte-Carlo 法讨论了土体抗剪强度指标变异性与边坡失效概率的关系, 分析了抗剪强度指标处于不同变异水平时均值安全系数 F_s 随边坡可靠指标 β 的变化规律, 得到如下结论:

1) 土体抗剪强度指标的变异性对路堤边坡失效概率影响显著。设计安全系数 $F_s = 1.25$ 在抗剪强度指标变异性较小时 (相当于文中水平 3 及以下水平) 较为合理, 在变异性较大时, 如文中变异水平抽样水平 5 时, $\beta = 0.901$, 不可接受; 对于通过常规地质勘查获取的抗剪强度指标变异水平多处于水平 3 (中等变异水平) 的情况, 即便只达到目标可靠指标 $\beta = 2.0$, 对应的 F_s 取值亦需提高至 1.539 以上。

2) 提出了基于可靠指标和土体抗剪强度指标变异水平的安全系数取值原则, 建立了土体抗剪强度指标在不同变异水平下, 边坡可靠指标 β 与均值安全系数 F_s 的三参数幂函数表达式。

参考文献:

- [1] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [2] 姚耀武, 陈东伟. 土坡稳定可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 80-87.
Yao Y W, Chen D W. Study on stability analysis of soil slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, 16(2): 80-87. (in Chinese)
- [3] Wu T H, Kraft L M. Safety analysis of slopes [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(2): 609-630.
- [4] 冷伍明, 赵善锐. 土工参数不确定性的计算分析[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 68-74.
Leng W M, Zhao S R. Analysis on the Uncertainties of Soil Properties [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(2): 68-74. (in Chinese)
- [5] 张卫民. 土体力学参数对土坡稳定安全系数影响分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
Zhang W M. Influence of soil parameters on soil slope safety factor of stability [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- [6] 张继周, 缪林昌, 刘峰. 岩土参数的不确定性及其统计方法[J]. 岩土力学, 2008, 28(6): 669-673.
Zhang J Z, Miao L C, Liu F. Uncertainties of soil properties and its statistical method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 28(6): 669-673. (in Chinese)
- [7] 张继周, 缪林昌, 王华敬. 土性参数不确定性描述方法的探讨[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1936-1940.
Zhang J Z, Miao L C, Wang H J. Methods for characterizing variability of soil parameters [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(12): 1936-1940. (in Chinese)
- [8] 罗文强, 王亮清, 龚钰. 正态分布下边坡稳定性二元指标体系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2288-2292.

- Luo W Q, Wang L Q, Gong J. Study on slope stability by dual index system based on normal distribution [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2288-2292. (in Chinese)
- [9] 黄景华,陈朝晖,莫玻,等. 参数特性及分布形式对边坡稳定可靠性影响的分析[J]. 四川大学学报:工程科学版,2014,46(3): 23-30.
Huang J H, Chen Z H, Mo B, et al. Influence analysis of characteristics and distribution types of soil parameters on slope reliability [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2014, 46(3): 23-30. (in Chinese)
- [10] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2008.
- [11] 高大钊. 土力学可靠性原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1989.
- [12] Duncan J M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(4): 307-316.
- [13] 李小勇. 土工参数空间概率特征[M]. 北京:原子能出版社,2006.
- [14] 包承纲. 谈岩土工程概率分析法中的若干基本问题[J]. 岩土工程学报,1989,11(4):94-98.
Bao C G. Reliability method in geotechnical engineering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(4): 94-98. (in Chinese)
- [15] 吴兴正. 路基边坡稳定可靠度计算中的不确定性问题研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
- Wu X Z. Study on the uncertainty of stability reliability of subgrade slope [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [16] 傅旭东,赵善锐. 用蒙特卡洛(Monte-Carlo)方法计算岩土工程的可靠度指标[J]. 西南交通大学学报,1996, 31(2):164-169.
Fu X D, Zhao S R. Appling the Monte-Carlo simulation to calculate the geotechnical reliability index [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1996, 31(2): 164-169. (in Chinese)
- [17] GEO-SLOPE International Ltd. 边坡稳定性分析软件 SLOPE/W 用户指南[M]. 北京:冶金工业出版社, 2011:30-32.
- [18] 中华人民共和国铁道部. TB 10001—2005 铁路路基设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2005.
- [19] 陈仲颐,周景星,王洪瑾. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社,1994.
- [20] 中华人民共和国铁道部. TB 10106—2010 铁路工程地基处理技术规程[S]. 北京:中国铁道出版社,2010.
- [21] 吕杨. 土质路堤边坡稳定可靠度分析方法探讨[D]. 成都:西南交通大学,2014.
Lyu Y. Discussion on the method of stability reliability of embankment slope [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [22] 李柏年,吴礼斌. MATLAB 数据分析方法[M]. 北京:机械工业出版社,2012.

(编辑 胡英奎)