

土坡稳定分析最小折减安全系数评价体系研究

李 炜, 康海贵

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 借助简单均质土坡安全系数精确解析式, 采用最优化方法的枚举法搜索最小可靠指标 $\beta_{\min}$ 和安全系数 $F_{\min}$ (及对应的可靠指标 $\beta_{F\min}$)。对安全系数法和可靠指标法两大评价体系以及 $\beta_{\min}$ 和 $\beta_{F\min}$ 的相互关系和差异性等方面进行了例证比较分析, 同时揭示了传统条分法 (GLE 法) 计算值的保守性以及在某些滑弧出现反翘 (即存在被动土体区域) 情况下对滑弧形状的判断失误。考虑土性参数分布类型及变异特征的影响, 利用 Monte-Carlo 法求解各个假想滑弧的安全系数 F_s^i 和失效概率 P_f^i , 并以 P_f^i 对 F_s^i 进行折减 (定义为折减安全系数 $F_{sR}^i = F_s^i (1 - P_f^i)$) 建立了以最小折减安全系数 $F_{sR} = \min(F_{sR}^i)$ 为评价标准的边坡稳定联合评价体系。通过典型算例证明该评价体系与文献中的二元指标体系有很好的的一致性。

关键词: 土坡; 折减安全系数; 可靠指标; 失效概率; 最优化方法

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)05-0704-04

作者简介: 李 炜(1981-), 男, 山东淄博人, 博士研究生, 从事工程结构可靠度评定方法的研究。E-mail: weil018@163.com。

Reduced safety factor evaluation system for soil slopes

LI Wei, KANG Hai-gui

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the accurate calculation formulae of safety factor, the minimum reliability index ($\beta_{\min}$) and the minimum safety factor ($F_{\min}$) (with the reliability index $\beta_{F\min}$) of simple soil slopes are searched directly. The difference between the safety factor method and the reliability index method, and the relationship between $\beta_{\min}$ and $\beta_{F\min}$ are investigated. The results reveal that the traditional slices method (GLE method) is conservative, and it may give an unrealistic evaluation, especially for the circle arch surface failure with resisting soil part. Considering the probability distribution type and variable characters of strength parameters, the safety factor (F_s^i) and failure probability of each slip surface are calculated by use of Monte-Carlo method. And the reduced safety factor is given by $F_{sR}^i = F_s^i (1 - P_f^i)$. A slope stability evaluation system is founded using the minimum reduced safety factor $F_{sR} = \min(F_{sR}^i)$. Several typical examples are studied. The results show that the evaluation system is in good agreement with the dual index system by others.

Key words: soil slope; reduced safety factor; reliability index; probability of failure; method of optimization

0 引 言

安全系数法和可靠指标法是边坡稳定评价体系中的两大常规方法。前者属于传统的定值方法^[1-3]范畴, 最大的缺陷在于对土性参数分布类型及变异特征影响的忽视; 后者体现了概率论的思想^[4-6], 能够充分考虑这种影响, 但是工程实践经验较为缺乏。鉴于此, 一些学者对安全系数与可靠性耦合的评价体系进行了研究^[6]。本文从简单土坡所具备的理想状态入手, 借助安全系数精确解析式^[7]采用最优化方法的枚举法实现了最小安全系数 $F_{\min}$ (对应的可靠指标 $\beta_{F\min}$) 及最小可靠指标 $\beta_{\min}$ 的直接搜索。对 $\beta_{F\min}$ 和 $\beta_{\min}$ 的相互关系 ($\beta_{F\min} \geq \beta_{\min}$) 和差异做了对比分析, 进一步揭示

了以最小安全系数对应的可靠指标 ($\beta_{F\min}$) 为可靠性评价判据^[9-10]的不合理性; 同时, 在与传统条分法 (GLE 法) 的对比中揭示了条分法计算值的保守性以及出现滑弧反翘 (存在被动土体) 情况下对滑弧形状的判断误差。

对各输出参数的研究发现: 可以通过利用每个设定的假想滑动弧最小可靠指标相应的失效概率 P_f^i 对其安全系数 F_s^i 进行折减的方式, 将土性参数变异性的影响作用融入其中, 从而对传统“安全系数”的“中值性质”进行改良, 使其兼顾安全系数法拥有的大量

工程实践经验和可靠指标法的概率统计特征。由此建立了安全系数法与可靠指标法相耦合的, 以最小折减安全系数 $F_{SR}=\min(F_{SR})$ 为评价指标的边坡稳定联合评价体系。实例证明该体系与文献[6]的二元指标体系有很好的一致性。

1 方法原理

1.1 概述

利用简单边坡所具备一些理想化条件, 可以得到一些可拓展到复杂边坡问题的规律性结论^[7]。笔者借助此前推导的针对简单边坡的安全系数精确解析式开展了本文的诸项研究。现将涉及的解析式列于此, 详细参数意义见文献[7]:

有被动土体情况:

$$F_s = \frac{M_R}{M_s}$$
$$= \frac{H_C(A_1^I + A_1^{II}) + f[(A_2^I + A_2^{II}) + k_C(A_3^I - A_3^{II})]}{-(A_3^I - A_3^{II}) + k_C(A_2^I + A_2^{II})}, \quad (1)$$

无被动土体情况:

$$F_s = \frac{M_R}{M_s} = \frac{H_C I_1 + f(I_2 - k_C I_3)}{(I_3 + k_C I_2)} \quad . \quad (2)$$

由此, 建立求解可靠指标的功能函数模型

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = F_s - 1 \quad . \quad (3)$$

1.2 枚举法

最优化方法的枚举法是一种原始简单的方法, 是根据一定的模式比较不同变量的目标函数, 通过筛选确定最小值。如图 1 所示的圆弧滑裂面, 任意一个圆弧可由其圆心坐标 (x_c, y_c) 和半径 r 确定。相应的目标函数, 即安全系数表达式为

$$F_s = f(x_c, y_c, r) \quad , \quad (4)$$

求解可靠指标的功能函数同式 (3)。

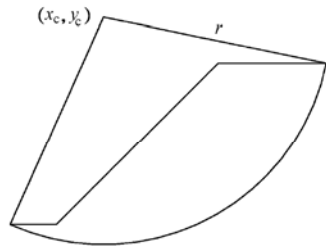


图 1 圆弧滑裂面

Fig. 1 Slip surface

显然该问题包含三个自由度, 采用枚举法, 通过设定各自由度搜索域范围, 不断改变数值, 通过设定的步长增量, 逐一比较相应的安全系数或可靠指标, 最终得到最小值。

以上安全系数精确解析式 (1), (2) 恰为三个自由度问题, 可以利用以上方法进行搜索。

1.3 方法原理流程

程序运作流程见图 2 所示。

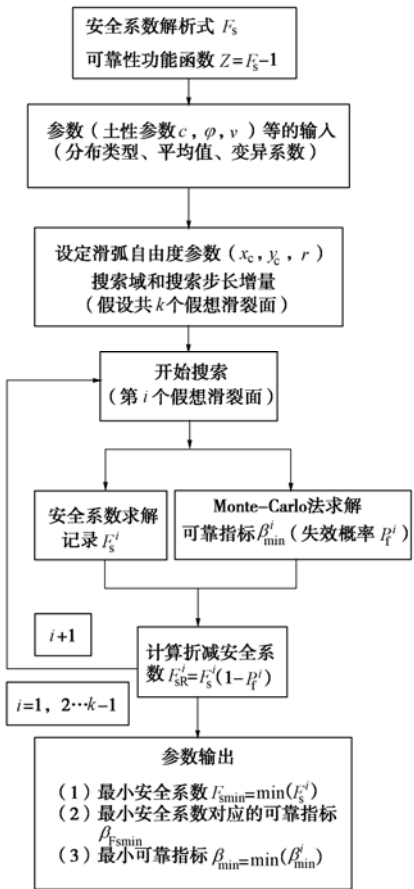


图 2 流程图

Fig. 2 Flow chart

1.4 分析项目、内容及研究意义

(1) 比较传统条分法 (GLE 法) 的最小安全系数值和相应的滑弧形状。简单土坡能够用积分思想推导安全系数精确解析式, 因此通过搜索得到的最小安全系数及滑裂面形状更加精确, 借助这一点, 可以与条分法 (GLE 法) 进行比对, 从而对条分法的保守性和近似特征产生的影响进行估计和判断。

(2) 参数变异性 (大、小变异) 对可靠指标计算结果的影响。

(3) 分析最小安全系数对应的可靠指标 β_{Fsrmin} 与最小可靠指标 β_{min} 的差异。通常确定边坡可靠性是先计算最小安全系数, 以其对应的可靠指标作为判据, 但一般情况下, 最小安全系数对应的可靠指标 β_{Fsrmin} 和最小可靠指标 β_{min} 并不等价 (即 $\beta_{Fsrmin} \geq \beta_{min}$)。

(4) 最小安全系数 F_{srmin} 、最小可靠指标 β_{min} 对应的滑弧形状比较。由分析项目 (3) 中所述, β_{Fsrmin} 与 β_{min} 的差异也导致了滑裂面形状的 (3) 差异, 本项分

析是从滑弧形状角度的分析比对。

(5) 最小折减安全系数评价体系合理性验证。

二元指标体系的适用性已经在文献中得到证实,本文以该体系为标准,进行比对,从而对本文评价体系的合理性和实用性进行验证。

2 两种评价体系特征比对

2.1 二元指标体系^[6]

二元指标体系根据矩估计法,取用变量均值 μ_{x_i} 的正负一个标准差 σ_{x_i} ,即

$$\left. \begin{aligned} x_{i1} &= \mu_{x_i} + \sigma_{x_i}, \\ x_{i2} &= \mu_{x_i} - \sigma_{x_i} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

建立变量的多种组合方式并求解相应的安全系数,计算安全系数的均值 $E(F)$ 和方差 $D(F)$,再由式(6)求解可靠指标,并根据其对应的失效概率 P_f 以 $F_s(1-P_f)$ 对中值安全系数 F_s 进行折减,作为评价指标。

$$\beta = \frac{1 - E(F)}{\sqrt{D(F)}} \quad (6)$$

2.2 最小折减安全系数评价体系

本文建立的联合评价体系不是对中值安全系数的折减,而是建立在搜索过程中,针对每个假定滑弧进行运作,可以概括为“边搜索,边折减,定全局”。对于每个假定的滑弧,可根据土性参数的分布类型和变异特征利用 Monte-Carlo 法求解最小可靠指标 $\beta_{\min}^i$ 及对应的失效概率 P_f^i ,进而联合该滑弧安全系数 F_s^i 计算相应的折减安全系数 $F_{sR}^i = F_s^i(1 - P_f^i)$,最终统计比对得到所有假定滑裂面折减安全系数的最小值 $F_{sR} = \min(F_{sR}^i)$,并以其作为工程边坡稳定性的评判指标。可见,该评判指标是安全系数法与可靠指标法的耦合方法,既保存了传统安全系数法丰富的工程实践经验,又突出了可靠指标法概率统计特征的全面性。

综上所述,两种评价体系是从不同途径,按不同方式对各自的目标安全系数进行折减建立起来的。理论上,两者应该具有较好的一致性,以下实例分析也充分证明了这种一致性。

3 算例

以下算例中土性参数变异系数根据文献[8~10]及松尾稔的总结取值。

例1 已知坡高 $H=10$ m,坡率 $m=1$,黏聚力 $c=40$ kPa,摩擦角 $\varphi=20^\circ$,土体重度 $\gamma=19.6$ kN/m³。变异系数依次分别为:小变异时: $V_c=0.2$, $V_\varphi=0.1$, $V_\gamma=0.01$;大变异时, $V_c=0.5$, $V_\varphi=0.2$, $V_\gamma=0.03$ 。假设发生圆弧面破坏。

计算结果见表1,滑裂面图示见图3。

表 1 例 1 计算结果统计

Table 1 Calculated results for Example 1

方法	变异性	被动土体	$F_{\min}$	$\beta_{F\min}$	$\beta_{\min}$	F_{sR}
GLE	—	有	1.999	—	—	—
本文	小	无	1.9303	3.2905	3.2389	1.9293
方法	大	无		1.3832	1.3358	1.7639
二元	小	无		3.2905	3.3598	1.9295
指标	大	无		1.3832	1.3394	1.7561

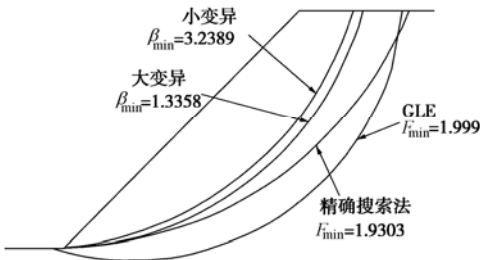


图 3 例 1 滑裂面图

Fig. 3 Slip surface for Example 1

例2 已知坡高 $H=20$ m,坡率 $m=1$,黏聚力 $c=40$ kPa,摩擦角 $\varphi=20^\circ$,土体重度 $\gamma=20$ kN/m³。变异系数取值同例1。假设发生圆弧面破坏。

计算结果见表2,滑裂面图示见图4。

表 2 例 2 计算结果统计

Table 2 Calculated results for Example 2

方法	变异性	被动土体	$F_{\min}$	$\beta_{F\min}$	$\beta_{\min}$	F_{sR}
GLE	—	无	1.289	—	—	—
本文	小	无	1.2291	1.5220	1.5189	1.1505
方法	大	无		0.6548	0.6526	0.9141
二元	小	无		1.5220	1.5213	1.1503
指标	大	无		0.6548	0.6007	0.8923

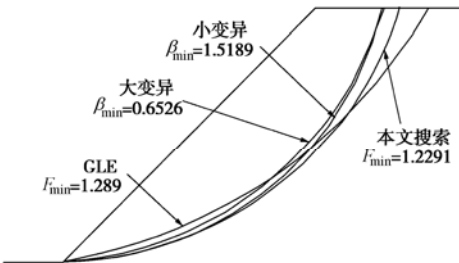


图 4 例 2 滑裂面图

Fig. 4 Slip surface for Example 2

例3 已知坡高 $H=5$ m,坡率 $m=1$,黏聚力 $c=20$ kPa,摩擦角 $\varphi=0^\circ$ (纯黏性土),土体重度 $\gamma=12.5$ kN/m³。变异系数取值同例1。假设发生圆弧面破坏。

计算结果见表3,滑裂面图示见图5。

表 3 例 3 计算结果统计
Table 3 Calculated results for Example 3

方法	变异性	被动土体	$F_{\min}$	$\beta_{F\min}$	$\beta_{\min}$	F_{sR}
GLE	—	有	1.8190	—	—	—
本文方法	小	有	1.7998	2.2368	2.1973	1.7746
二元指标	大	有		0.8963	0.8963	1.4668
	小	有		2.2368	2.2193	1.7760
	大	有		0.8963	0.8878	1.4627

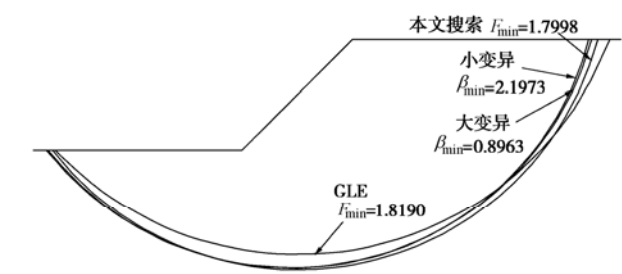


图 5 例 3 滑裂面图
Fig. 5 Slip surface for Example 3

4 结 论

(1) 传统条分法的精确程度与条块划分的数目有关, 是一种近似的方法, 从以上例题中安全系数计算结果可见这种近似性在土性参数变异性较小的情况下是可以接受的, 而在较大变异时, 这种所谓的保守还是存在较大的失稳风险, 原因就在于安全系数是依托变量(土性参数)平均值计算出的中值解。

(2) 条分法对最危险滑动面的判断可能会存在较大的失误, 有时这种误差是不容忽视的。例如算例1中条分法得到的滑弧有“反翘”(存在被动土体区域), 而通过精确解析式得到的滑弧没有出现被动土体。由此出现了滑弧形状的较大差异。

(3) 土性参数分布类型和变异特征对边坡稳定分析的影响不容忽视。算例显示: 变异性的增大导致了可靠指标的显著降低和滑弧形状的扩大。

(4) 安全系数法和可靠指标法各自的特点决定了建立两者耦合的评价体系的实用性和必要性。本文利用失效概率参与安全系数折减的思想, 建立了最小折减安全系数评价体系。算例显示出的与二元指标体系的良好一致性验证了本文体系的合理性和适用性, 为其拓展到复杂边坡问题提供了依据。

本文提出的评价体系是对安全系数法与可靠性方法的耦合, 适用于实际工程问题, 但仍需深入研究以便在实际的更为复杂的边坡问题中得到推广应用。

参考文献:

[1] SPENCER E E. A method of the analysis of the stability of

embankments assuming parallel inter-slice forces[J]. Geotechnique, 1967, 17: 11 - 26.

[2] BISHOP A W. The use of slip circle in the stability analysis of slopes[J]. Geotechnique, 1955, 5: 7 - 17.

[3] FELLENIUS W. Calculation of the stability of earth slope[C]// Transactions of 2nd Congress on Large Dams, Washington, D C. 1936: 45 - 62.

[4] 何满潮, 苏永华, 景海河. 块状岩体的稳定可靠性分析模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 343 - 348. (HE Man-chao, SU Yong-hua, JING Hai-he. Reliability analysis model of blockyrockmass stability and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 343 - 348. (in Chinese))

[5] 黄志全, 李华晔, 马 莎, 等. 岩石边坡块状结构岩体稳定性分析和可靠性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4200 - 4205. (HUANG Zhi-quan, LI Hua-ye, MA Sha, et al. Stability analysis and reliability evaluation of slope of block construction for rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4200 - 4205. (in Chinese))

[6] 罗文强, 王亮清, 龚 珏. 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 Wen-qiang, WANG Liang-qing, GONG Jue. 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))

[7] 康海贵, 李 炜. 边坡稳定安全系数及其与土性参数及失效概率关系的研究[J]. 大连理工大学学报, 2008, 48(6): 856 - 862. (KANG Hai-gui, LI Wei. Study on the slope factor of safety and its relationship with shear strength parameters and probability of failure[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2008, 48(6): 856 - 862 (in Chinese))

[8] 李 猛, 王复明. 相关变量下边坡稳定可靠度的蒙特卡罗模拟[J]. 河南科学, 2004, 22(1): 76 - 79. (LI Meng, WANG Fu-ming. Monte-Carlo simulation of reliability of slope stability for correlated basic variables[J]. Henan Science, 2004, 22(1): 76 - 79. (in Chinese))

[9] 韩玉芳, 刘德辅, 董 胜. 边坡整体稳定的可靠性分析方法[J]. 海岸工程, 2001, 4: 7 - 13. (HAN Yu-fang, LIU De-fu, DONG Sheng. Reliability analysis method of slope stability[J]. Coastal Engineering, 2001, 4: 7 - 13. (in Chinese))

[10] MALKAWI A I H, HASSON W F, ABDULLA F A. Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability[J]. Structural Safety, 2000, 22: 161 - 187.