

基于遗传算法的土坡三维可靠度分析

唐纯喜¹, 金伟良¹, 陈进²

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 边坡稳定分析的三维安全系数方法和三维可靠度分析方法一般均需人为给定一个与滑坡体宽度相关的参数或仅针对固定三维滑面进行分析计算。由于这样计算得到三维安全指标并不是最小值, 因此难以反映边坡真正的安全度水平。引入随机场局部平均计算模型, 考虑土性参数的空间相关性, 边坡存在一个最小可靠指标对应的三维滑坡形态, 这为采用优化方法进行土坡稳定三维可靠度分析奠定基础。对最小三维可靠度指标与三维临界滑面存在的缘由进行分析。遗传算法是一种优秀的全局寻优算法, 可以有效解决边坡稳定分析临界滑面搜索问题。引入土性参数的空间相关模型, 结合边坡稳定的三维简化毕肖普方法, 直接以边坡稳定的三维可靠度指标为优化目标, 建立基于遗传算法的边坡稳定三维可靠度分析方法。该方法无需滑坡宽度的假定, 可以得到真正的边坡稳定三维可靠指标及对应的三维临界滑面。算例说明该方法的有效性。

关键词: 边坡工程; 遗传算法; 土坡; 三维可靠度分析

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 2 - 4164 - 06

THREE-DIMENSIONAL RELIABILITY ANALYSIS OF SOIL SLOPE BASED ON GA METHOD

TANG Chunxi¹, JIN Weiliang¹, CHEN Jin²

(1. College of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

2. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: An assumption about the failure width of failing soil mass usually should be presented at first when slope stability is evaluated by three-dimensional factor of safety or three-dimensional reliability index. But, as a result of this assumption, the three-dimensional factor of safety or reliability index isn't the minimal one, which can not represent the real safety level of slope stability. Actually there should be three-dimensional critical slip surfaces which give the highest failure probability if spatial variabilities of soil parameters are taken into consideration. The minimal three-dimensional reliability index and the corresponding critical slip surface are investigated and illustrated. This makes it possible to get three-dimensional reliability index of soil slope by means of optimization techniques. Genetic algorithm(GA) is good for finding the global optimum solution of problem searching for the critical three-dimensional surface of soil slope. So, the model of spatial variabilities of soil parameters is adopted and the GA is used to search for the reliability index directly, then the three-dimensional reliability analysis method for slope stability, based on the GA, is proposed in combination with Bishop's simplified method. The minimal three-dimensional reliability index, which can represent the real safety level of slope stability, and the corresponding three-dimensional slip surface are achieved without assumptions about the

收稿日期: 2006 - 08 - 16; **修回日期:** 2006 - 09 - 30

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50539030 - 3 - 1); 国家科技支撑计划项目(2006BAC14B03)

作者简介: 唐纯喜(1973 -), 男, 博士, 1996年毕业于华北水利水电学院水利工程系, 现任工程师, 主要从事结构可靠度和风险分析方面的研究工作。E-mail: chunxitang@126.com

width of failing soil mass. This method is proven to be efficient by the examples.

Key words: slope engineering; GA; soil slope; three-dimensional reliability analysis

1 引言

采用传统的三维安全系数方法和三维可靠度方法进行边坡稳定分析时, 往往需要引入与滑坡体宽度有关的假定条件或仅仅针对给定滑面进行分析。谢谟文等^[1]将椭球滑面的宽深比设定为 0.8 的定值, 采用三维安全系数方法对边坡稳定问题进行分析; G. Auvinet 和 J. Gonzalez^[2]针对不同的滑坡体宽度假定条件计算了边坡稳定的三维可靠度。谢谟文等^[1, 3]的研究成果表明三维安全系数将随滑坡体宽深比的增加而减小, 且当滑坡体宽深比较小时, 变化幅度较大。本文随后的分析表明, 不考虑土性参数空间相关性时, 三维可靠度指标随宽深比的变化也存在上述规律。由于实际滑坡的宽深比通常不大, 因此不同的滑面宽度假定条件得到的计算结果往往差别较大。另外由于不同的宽度假定条件, 计算结果不同, 也使得这些方法得到的三维安全系数和可靠度指标并不是最小值, 所以其不是真正意义上的三维安全系数和可靠度指标, 难以反映边坡所具有的真实安全度水平。

土性参数不仅具有互相关性, 而且还具有空间自相关性^[4~6]。E. H. Vanmarcke^[6]最早提出了土性参数的空间相关型模型。M. S. Yucemen 和 A. S. Ai-homoud^[7]基于圆柱体滑面假定, 提出了考虑土性参数空间相关性的三维边坡可靠度计算方法, 但该方法采用在均值点展开求可靠度, 计算精度有限。梧松和吴玉山^[8]在 G. Auvinet 和 J. Gonzalez^[2]工作基础上, 基于椭球滑面假定, 对于拟定的滑坡体宽度, 进行了考虑土性参数空间相关性的三维可靠度分析。M. S. Yucemen 等^[7, 8]都注意到边坡存在一个最小可靠度指标对应的临界滑坡宽度, 但对于这种现象存在的缘由和必然性并没有进行进一步的研究和阐述。本文通过对比分析考虑和不考虑土性参数空间相关性情况下, 边坡三维可靠度指标随滑坡体宽度的变化规律, 对考虑土性参数相关性条件下边坡的最小可靠度指标及其对应的三维临界滑坡体存在的缘由和必然性进行了分析。三维临界滑坡体的存在为以可靠度分析方法为工具, 采用优化方法进

行边坡三维稳定分析奠定了基础。

遗传算法是一种优秀的全局寻优搜索算法, 具有群体搜索, 并行计算, 对可行解表示广泛等优点^[9], 在边坡二维可靠度分析方面有许多成功的运用^[10]。直接以边坡可靠度指标为寻优目标的可靠度分析方法比先由确定性模型获得临界滑面, 然后求解临界滑面的可靠度指标作为边坡最小可靠度指标的计算方法更为合理^[11~13]。

基于考虑土性参数空间相关性, 边坡存在最小三维可靠度指标这一前提条件, 本文引入土性参数空间相关模型, 利用遗传算法良好的寻找全局最优解的能力, 直接以土坡稳定最小三维可靠度指标为寻优目标, 建立了基于遗传算法的土坡稳定三维可靠度分析方法。本文方法求得的土坡稳定三维可靠度指标为边坡对应最小值, 能较好地反映边坡的安全度水平。

2 三维极限状态方程

简化 Bishop 法计算方便, 精度满足实用要求, 在三维土坡确定性分析和非确定性分析中广泛使用。简化 Bishop 法的三维模型由 O. Hungri^[3]首先提出, 其条块受力示意图见图 1。

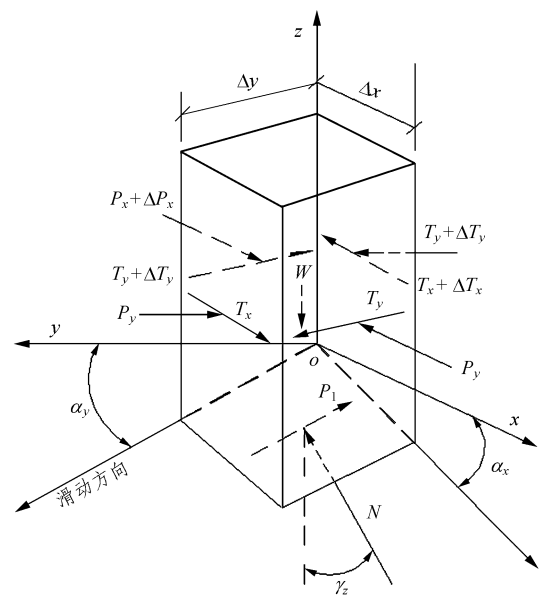


图 1 三维简化毕肖普方法分条示意图
Fig.1 Slices of three-dimensional simplified Bishop's method

三维 Bishop 方法的边坡安全系数为

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n [(W_i - u_i A_i \cos \gamma_{zi}) \tan \varphi_i + c_i A_i \cos \gamma_{zi}] / m_{\alpha i}}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_{yi}} \quad (1)$$

其中,

$$m_{\alpha} = \cos \gamma_{zi} \left(1 + \frac{\sin \alpha_{yi} \tan \varphi_i}{F \cos \gamma_{zi}} \right) \quad (2)$$

式(1), (2)中: F 为安全系数, n 为条分法分条块数, W_i 为土体所受重力, u_i 为孔隙水压力, c_i 为边坡土体的黏聚力, φ_i 为材料内摩擦角, A_i 为各条块滑面面积, α_{yi} 为滑动方向与 y 轴的夹角, γ_{zi} 为滑面的法线与 z 轴的夹角。

空间滑面假定为对称的椭球面, 如下式所示:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{(y - y_o)^2 + (z - z_o)^2}{b^2} = 1 \quad (3)$$

式中: a 为沿 x 轴方向的轴长, b 为沿 y 轴和 z 轴方向的轴长, (x_o, y_o) 为中心划弧的圆心点坐标。

将式(2)代入式(1), 取 $F = 1$, 而且考虑到

$\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_{yi} \geq 0$, 则得到基于三维简化 Bishop 法的土坡稳定的极限状态方程:

$$G(W, u, c, \varphi) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(W_i - u_i A_i \cos \gamma_{zi}) \tan \varphi_i + c_i A_i \cos \gamma_{zi}}{\cos \gamma_{zi} + \sin \alpha_{yi} \tan \varphi_i} \right] - \sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_{yi} \quad (4)$$

3 土性参数空间相关模型

随机场是随机过程由时域到空域的推广。采用平稳随机场来描述土性参数, 局部随机场的均值不发生变化。定义岩土性质参数 X 在空间三维滑弧曲面 S 上的局部平均方差 σ_s 如下:

$$\sigma_s^2 = \sigma_x^2 \gamma(S) \quad (5)$$

式中: σ_x 为土性参数变量的原始方差; $\gamma(S)$ 为滑坡体的空间三维滑弧曲面上的方差折减系数, 可以由下式计算得到:

$$\gamma(S) = \frac{1}{S^2} \int_S \int_S \rho(s_1, s_2) ds_1 ds_2 = \frac{1}{S^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho(x_{i0}, y_{i0}, z_{i0}, x_{j0}, y_{j0}, z_{j0}) s_i s_j \quad (6)$$

式中: S 为空间滑面的面积; s_i, s_j 分别为条分法第 i 和第 j 块空间滑面的面积; $\rho(\cdot)$ 为第 i 和第 j 条空

间滑面中间点 (x_{i0}, y_{i0}, z_{i0}) 和 (x_{j0}, y_{j0}, z_{j0}) 的相关系数。当分条数目足够大的时候, 该式将具有较好的精度。土性参数的相关函数模型主要有阶越型、三角型、指数型、二阶 AR 型和高斯型等几种, 本文采用如下下的指数相关模型^[2]描述土性参数的空间相关性:

$$\rho(x_{i0}, y_{i0}, z_{i0}, x_{j0}, y_{j0}, z_{j0}) = \exp \left\{ -2 \left[\frac{\sqrt{(x_{i0} - x_{j0})^2 + (y_{i0} - y_{j0})^2}}{\delta_H} + \frac{|z_{i0} - z_{j0}|}{\delta_V} \right] \right\} \quad (7)$$

式中: δ_H, δ_V 分别为水平方向和竖直方向的相关距离。

4 边坡三维可靠度随滑坡体宽度的变化规律

采用如图 2 所示单一材料土坡^[13], 研究边坡三维可靠度随滑坡宽度的变化规律, 土坡材料参数见表 1。本文采用二维分析方法得到的不考虑土性参数相关性的二维可靠度指标为 2.151 2, 对应的临界滑弧的圆心坐标为 $y_o = 17.063$ m, $z_o = 16.472$ m, 滑弧半径为 16.732 m。以该二维方法的临界滑弧作为空间椭球滑面的中心滑弧, 采用不同的椭球面轴长比 $\eta = a/b$, 计算边坡的三维可靠度指标。为了说明考虑土性参数黏聚力和摩擦力的空间相关性对可靠度指标的影响, 分别计算了计入和不计入土性参数空间相关性两种情况下的可靠度指标。土性参数随机场相关距离 $\delta_H = 50$ m, 计算结果绘于图 3, 4 中。

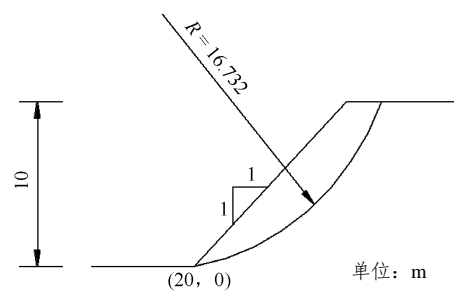


图 2 算例 1 边坡剖面图

Fig.2 Cross-section of soil slope in example 1

表 1 土性参数指标

Table 1 Statistical properties of soil parameters

黏聚力 c /kPa	摩擦因数 $\tan \varphi$	土体容重 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	孔隙水压力系数 r_u
18.0	0.577 3	18.0	0.20

注: 黏聚力、摩擦因数、土体容重、孔隙水压力系数的方差分别为 3.6, 0.057 7, 0.9, 0.02; 变异系数分别为 0.20, 0.10, 0.05, 0.10。

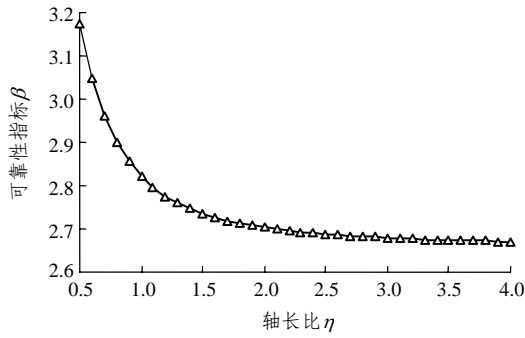


图 3 可靠度指标随轴长比的变化

Fig.3 Variation of reliability index with ratio of axis length

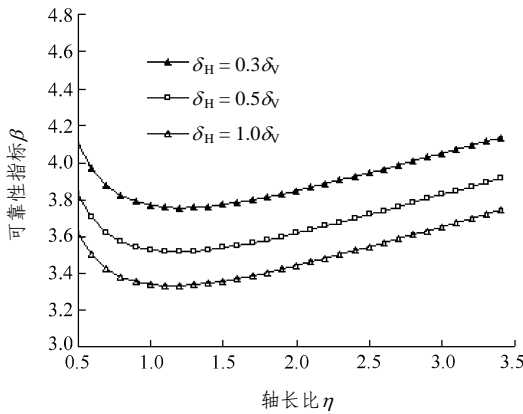


图 4 考虑土性参数空间相关性可靠度指标随轴长比的变化

Fig.4 Variation of reliability index with ratio of axis length when spatial variabilities of soil properties are taken into consideration

由图 3 可以看出, 不考虑土性参数的空间相关性, 三维边坡的可靠度指标随轴长比的增加而减小, 也就是随滑坡体宽度的增加而减小, 且当轴长比较小时变化幅度较大, 随着轴长比变大而趋于平缓。

由图 4 可以看出, 考虑土性参数的空间相关性, 土坡的三维可靠度指标比不考虑相关性的结果有所增加, 具体的增加幅度因滑坡体宽度和相关距离而异; 随着滑坡体宽度的增加, 可靠度先减小, 后增加, 出现一个极小值。出现极小值的原因可以结合图 5 进行解释。当考虑土性参数的空间相关性时, 随着滑坡体宽度的增加, 局部随机场的方差趋近于随机场的原始方差, 方差折减系数将趋近于 1, 而当参数的变异性减小时, 滑面对应的可靠度指标呈现变大的趋势; 而不考虑土性参数空间相关性影响, 可靠度指标又将随着滑坡体宽度的增加而减小。当上述两种趋势叠加在一起时, 便形成了可靠度指标随着滑面体宽度加大先降后升的结果, 如图 5 所示。

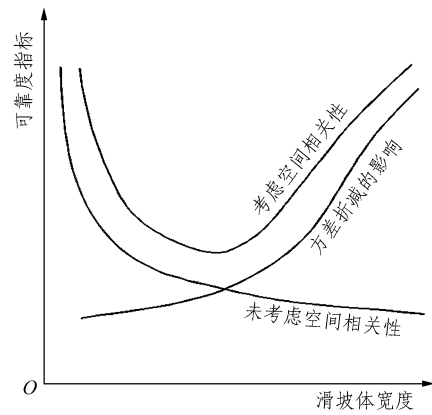


图 5 土性参数空间相关性对土坡三维可靠度指标的影响

Fig.5 Influence of spatial correlations of soil parameters on three-dimensional reliability index of soil slope

这说明正是由于土性参数空间相关性模型的引入, 才使得边坡稳定分析存在最小三维可靠度指标及其三维临界滑面。这一现象为采用优化方法搜索三维边坡稳定的可靠度指标和三维临界滑面奠定了基础。

5 基于遗传算法的三维可靠度计算

直接以最小可靠度指标为搜索目标的边坡稳定分析的三维可靠度分析方法通常包含以下两个步骤:

- (1) 对于给定的三维滑面求可靠度指标 β ;
- (2) 在所有可能的滑面中, 采用遗传算法寻找临界滑面, 使得其对应的可靠度 β 最小。

5.1 给定滑面三维可靠度计算

采用可靠度计算的几何方法^[14], 建立给定滑面的考虑土性参数空间相关性的土坡三维可靠度分析过程如下:

- (1) 对土坡进行空间几何划分, 建立边坡稳定的三维极限状态方程。
- (2) 计算基于随机场局部平均理论的土性参数局部方差。
- (3) 将相关随机变量 X 映射成独立的随机变量 Y_e ; 并将独立正态的随机变量 Y_e 标准化为 Y 。
- (4) 求极限状态方程的梯度 $\partial G/\partial Y$ 。
- (5) 求迭代移动方向 $\alpha = -\frac{\partial G/\partial Y}{\|\partial G/\partial Y\|}$ 。
- (6) 计算 $Y^{k+1} = \left[(Y^k)^T \alpha + \frac{G(Y^k)}{\|\partial G/\partial Y\|} \right] \alpha$, 由 X 与 Y 的变换关系求算新的迭代点 X^{k+1} 。

(7) 计算可靠指标 $\beta = \sqrt{\mathbf{Y}^T \mathbf{Y}}$ 。

(8) 判断 $G(X) < \varepsilon$ (给定精度) 是否满足, 若满足则计算结束, 得到可靠度指标和设计点, 若不满足则返回步骤(3)继续迭代。

5.2 遗传算法

传统的边坡稳定分析程序采用的优化方法一般为二分法, 模式搜索法, 单纯形法等, 这些方法针对简单边坡搜索时是快速有效的。但是当碰到多级边坡, 或土层多且土性差异较大的边坡时, 搜索容易陷入局部极小值, 无法得到全局最优解。遗传算法是以自然界自然选择和自然遗传机制为理论基础, 将生物进化过程中适者生存规则与群体内部染色体的随机信息交换机制相结合的全局随机搜索算法。基本遗传算法运用到边坡稳定分析中主要包含以下几个部分的内容:

(1) 目标函数的定义, 搜索变量及染色体长度的确定。

(2) 对待解决问题选择合适的编码方案进行编码, 将变量转换为染色体(数字串)。本程序中使用了理论成熟、应用广泛的基于二进制编码的遗传算法。

(3) 种群规模 N 确定, 随机初始化群体。

(4) 对当前群体中每个个体计算其适应度, 适应度表示了该个体的性能好坏, 可靠度指标即为适应度值。

(5) 应用选择算子产生中间代, 个体被选择的概率由其适应度值决定, 最通常的实现方法是轮盘赌模型。

(6) 将被选中的两个个体的基因链按概率 P_c 进行交叉计算, 生成两个新的个体。

(7) 将新个体的基因链的各位按概率 P_m 进行变异, 对二值基因链(0, 1 编码)来说即是取反。

(8) 确定循环中止条件。本文以最优适应度个体在指定代数内没有改善作为循环中止条件。

遗传算法的个体数 n 、基因链长度 l 、交叉概率 P_c 、变异概率 P_m 等系统参数对算法的收敛速度和计算结果影响较大, 应视具体问题选取和调整。

5.3 遗传算法三维可靠度分析的计算流程

遗传算法应用于三维边坡稳定分析中的数学模型如下:

$$\beta_0 = \min \beta$$

$$\begin{pmatrix} y_o^l \leq y_o \leq y_o^u \\ z_o^l \leq z_o \leq z_o^u \\ y_a^l \leq y_a \leq y_a^u \\ \eta^l \leq \eta \leq \eta^u \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中: y_a 为滑面中心圆弧的滑出点 y 轴方向坐标; 上标“1”和“u”分别表示取值的上下界; $\min \beta$ 为目标函数, 即为寻求最小的可靠度指标, 而最小可靠度指标对应的滑动面即是此边坡的三维临界滑动面。以 (y_o, z_o, y_a, η) 作为待搜索的数也就是遗传算法中所说的染色体, 利用经验分别大概确定上述 4 个未知数的范围, 此范围即为约束条件。综上给定滑面三维边坡稳定的可靠度计算方法和遗传算法原理, 建立基于遗传算法的三维边坡可靠度分析流程如图 6 所示。

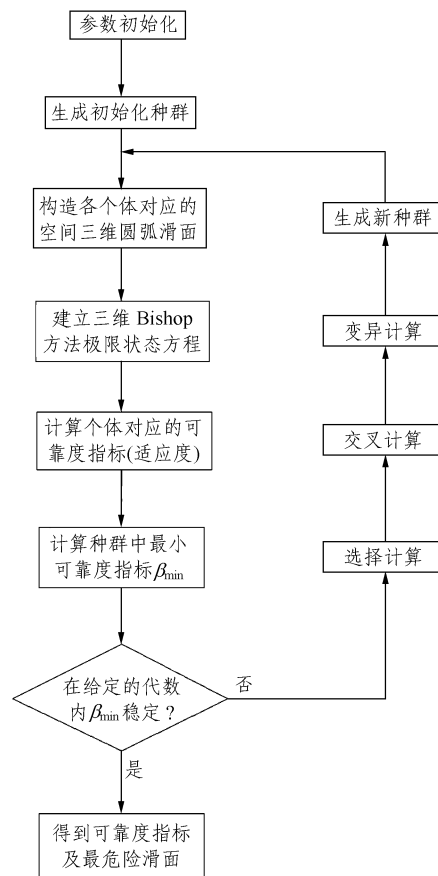


图 6 遗传算法边坡三维可靠度分析的流程图

Fig.6 Flowchart for three-dimensional reliability analysis of slopes based on genetic algorithm

6 算例

对于节 4 所列算例, 取土性参数黏聚力和摩擦因数的相关模型的水平相关距离为 30, 50, 70, 100, 150 m, 竖向相关距离取 $\delta_v = 0.1 \delta_h$, 通过自编的程序计算得到三维滑面和可靠度计算结果见表 2。

表 2 三维边坡可靠度指标计算成果表

Table 2 Results of reliability index of three-dimensional slope

δ_H/m	γ_o	z_o	γ_a	η	β_{min}
30	18.876 7	14.364 2	19.758 7	1.546 4	5.885 9
50	18.860 4	14.358 7	19.929 6	1.654 4	4.750 5
70	18.606 6	14.873 0	19.907 2	1.698 7	4.210 3
100	18.606 6	14.873 0	19.907 2	1.847 6	3.769 9
150	18.606 6	14.842 4	19.922 1	1.959 8	3.409 6

7 结 论

基于滑坡宽度假定条件的计算方法得到的三维安全系数和三维可靠度指标均不是边坡稳定问题对应的最小值, 并不能反映边坡的真正安全度水平。通过对比分析考虑和不考虑土性参数空间相关性两种条件下三维可靠度指标的变化规律可以发现, 考虑土性参数的空间相关性, 随着滑坡宽度的增加, 可靠度指标先减后增, 存在最小可靠度指标对应的空间三维滑坡形态。这为采用优化算法搜索最小边坡三维可靠度指标提供了有力的前期条件。

遗传算法是一种优秀的全局优化算法。考虑土性参数的空间相关性, 以三维椭球滑面中间断面的圆心点坐标值, 中心滑弧滑出点滑动方向上的坐标值以及椭球滑面的轴长比作为待搜索参数, 采用遗传算法, 直接以可靠度指标为寻优目标, 可以有效地解决三维土质边坡可靠计算问题。该方法不涉及滑坡宽度的假定, 得到的三维可靠度指标可以有效地反映边坡的安全度水平。

由于边坡稳定三维分析分析的复杂性, 国内外采用概率方法进行边坡稳定三维分析方面的研究并不是很多, 在边坡稳定的三维滑动确定性分析, 土性参数随机场的空间相关结构, 以及复杂多土层边坡的三维滑面形态等诸多方面都有待进一步研究。

参考文献(References):

[1] 谢谟文, 蔡美峰. 信息边坡工程学的理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2005.(XIE Mowen, CAI Meifeng. Theory and application of information slope engineering[M]. Beijing: Science Press, 2005.(in Chinese))

[2] AUVINET G, GONZALEZ J. Three-dimensional reliability analysis of earth slopes[J]. Computers and Geotechnics, 2000, 26(3/4): 247 - 261.

[3] HUNGR O. An extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis to three dimensions[J]. Geotechnique, 1987, 37(1): 113 - 117.

[4] SOULIE M, MONTES P, SILVESTRI V. Modelling spatial variability of soil parameters[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(5): 617 - 630.

[5] GRIFFITHS D V, FENTON G A. Probabilistic slope stability analysis by finite elements[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(5): 507 - 517.

[6] VANMARCKE E H. Probabilistic modeling of soil profiles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1977, 103(11): 1 227 - 1 246.

[7] YUCEMEN M S, AI-HOMOUD A S. Probabilistic three-dimensional stability analysis of slopes[J]. Structural Safety, 1990, 9(1): 1 - 20.

[8] 梧松, 吴玉山. 土质边坡三维可靠度分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 284 - 287.(WU Song, WU Yushan. Three-dimensional reliability analysis of earth slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 284 - 287.(in Chinese))

[9] MITCHEL L, MELANI E. An introduction to genetic algorithms[M]. Cambridge: MIT Press, 1996.

[10] 陈昌富, 王贻菘, 邹银生. 边坡可靠性分析分步混合遗传算法[J]. 土木工程学报, 2003, 36(2): 72 - 76.(CHEN Changfu, WANG Yisun, ZOU Yinsheng. Genetic algorithms slope reliability complex method feasible direction method[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(2): 72 - 76.(in Chinese))

[11] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 300 - 302.(CHEN Zuyu. Soil slope stability analysis—theory, methods and programs[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003: 300 - 302.(in Chinese))

[12] HASSAN A M, WOLFF T F. Search algorithm for minimum reliability index of earth slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(4): 301 - 308.

[13] BHATTACHARYA D, JANA S, CHKRABORTY O S. Direct search for minimum reliability index of earth slopes[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(6): 455 - 462.

[14] 佟晓利, 赵国藩. 一种与结构可靠度分析几何法相结合的响应面法[J]. 土木工程学报, 1997, 30(4): 51 - 58.(TONG Xiaoli, ZHAO Guofan. The response surface method in conjunction with geometric method in structural reliability analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(4): 51 - 58.(in Chinese))