

边坡稳定有限元可靠度分析的有限步长迭代法

谭晓慧¹, 王建国², 吴礼年³, 崔可锐¹, 储诚富¹

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 土木建筑工程学院, 安徽 合肥 230009;
3. 安徽省电力设计院, 安徽 合肥 230022)

摘要: 边坡稳定一阶可靠度分析的常用方法是验算点法, 该方法在求解可靠指标时需要进行迭代计算。但是, 对于边坡稳定的有限元可靠度分析, 其功能函数形式常为高度非线性的, 采用常规的验算点法可能会出现迭代计算不收敛、无法计算可靠指标的问题。将结构可靠度分析中的有限步长迭代法引入边坡稳定的有限元可靠分析, 探讨有限步长迭代法中初始步长及步长调整系数的取值方法。在边坡的可靠指标计算方面, 采用以基于滑面应力分析的弹塑性随机有限元理论为基础的方法。其中功能函数的形式是以考虑滑面方向的 Mohr-Coulomb 屈服准则来建立的; 导数的求解采用的是基于增量切线刚度法及 Aitken 加速算法的偏微分法; 边坡整体可靠指标取的是所有可能滑面的可靠指标的最小值。算例分析表明, 将有限步长迭代法用于边坡稳定的有限元可靠度分析是可行的, 该方法可保证在功能函数为高度非线性时可靠指标的迭代计算也能收敛, 而且收敛速度较快, 从而大大提高有限元可靠度分析的计算速度。

关键词: 边坡工程; 边坡稳定性; 有限元; 可靠度分析; 有限步长迭代法; 可靠指标

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 1 - 2901 - 06

LIMIT STEP LENGTH ITERATION METHOD IN FINITE ELEMENT RELIABILITY ANALYSIS OF SLOPE STABILITY

TAN Xiaohui¹, WANG Jianguo², WU Linian³, CUI Kerui¹, CHU Chengfu¹

(1. School of Resources and Environment Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;
2. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;
3. Anhui Electric Power Design Institute, Hefei, Anhui 230022, China)

Abstract: Design point method, in which the iterative calculation is needed to computer the reliability index, is usually used for first-order reliability analysis of slope. However, there exist some cases when the iteration procedure is not covered in the design point method, since the limit state function is often highly nonlinear in the finite element reliability analysis. Therefore, limit step length iteration method(LSLIM), which is used in the structural reliability analysis, is adopted to perform the reliability analysis of slope stability; and the methods to determine the initial step length and step adjusting coefficient are discussed. As to the calculation of reliability index, the method based on the technique of sliding surface stress analysis and the elastoplastic finite element theory is adopted. The type of the limit state function is set up according to the Mohr-Coulomb yield criterion which can consider the direction of the slip surface; and the derivatives of the stress to the basic stochastic variables of the slope are computed by using partial differential method based on the incremental tangent stiffness

收稿日期: 2006 - 06 - 27; **修回日期:** 2006 - 12 - 13

基金项目: 安徽省水利厅科研项目; 安徽省教育厅青年基金项目(2005jq1021)

作者简介: 谭晓慧(1971 -), 女, 博士, 1992 年毕业于重庆大学资源与环境工程学院, 现任副教授, 主要从事岩土力学可靠度方面的教学与研究工作。E-mail: tantan9666@sina.com

method and the accelerating convergence method of Aitken. The overall reliability index is defined as the smallest one of the whole possible sliding surfaces. Analysis results demonstrate that it is feasible to use LSLIM in the finite element reliability analysis of slope stability. LSLIM can assure the convergence of the iteration of reliability index even when the limit state function is highly nonlinear.

Key words: slope engineering; slope stability; finite element; reliability analysis; limit step length iteration method(LSLIM); reliability index

1 引言

边坡的稳定性分析是岩土工程中一个十分重要的问题,目前常用的方法有各种极限平衡条分法、有限元法、极限分析法等^[1]。岩土工程中存在大量不确定性,如岩土材料参数的不确定性、荷载的不确定性等,因此应进行边坡稳定性的可靠度分析^[2]。

结构可靠度分析的常用方法是一阶可靠度分析方法,它包括中心点法和验算点法。一般而言,中心点法简单易用,适用性广,但精度较低;验算点法需要对可靠指标进行迭代求解,计算稍微复杂,但能克服中心点法的一些不足之处,因而计算精度较为理想^[3]。

在边坡稳定可靠度分析方面,目前常用的方法是将结构可靠度分析的一阶可靠度分析方法与边坡稳定性分析的各种极限平衡条分法相结合,从而进行边坡稳定的可靠度分析。如: B. K. Low 等^[4]利用电子表格法中的规划求解功能,采用通用条分法进行了边坡稳定的可靠度分析; A. M. Hassan 和 T. F. Wolff^[5]研究了边坡稳定可靠度分析中最小可靠指标面的确定方法; A. I. H. Malkawi 等^[6]通过 2 个算例的计算分析,比较了边坡稳定性分析的各种极限条分法及各种可靠度分析方法的可靠指标计算结果;作者^[7]以瑞典条分法及 Bishop 法为基础,研究了边坡稳定可靠度分析中导数的求解及可靠度分析方法的选择。

近年来,也有学者将一阶可靠度分析方法与有限元方法相结合,以求解边坡中各单元及整个边坡的可靠指标。刘宁^[8]通过有限元法,计算了边坡中各单元的可靠指标,做出了边坡剖面的可靠指标等值线图;作者^[9, 10]以强度折减法及滑面应力分析法为基础,研究了边坡整体可靠指标的求解方法。

上述研究中所采用的可靠度分析方法主要是中心点法或验算点法。笔者在进行边坡稳定的可靠度分析时发现,边坡的功能函数一般是高度非线性的,用验算点法进行可靠指标的迭代求解时常会遇到迭

代不收敛或发散的现象^[11, 12]。为此,本文拟以有限元为手段,研究一阶可靠度分析的另一种方法——有限步长迭代法在边坡稳定可靠度分析中的应用。

2 滑面整体可靠指标的求解

在进行边坡稳定的可靠度分析时,首要的问题是确定基本变量的概率分布类型及功能函数的形式。对于边坡中任一潜在的滑动面,可以按作者^[12]的研究结果,以下式作为边坡稳定有限元可靠度分析的功能函数:

$$Z = \sum_{i=1}^{n_c} Z_i \Delta l_i \quad (1)$$

式中: n_c 为滑弧上的单元个数; Δl_i , Z_i 分别为第 i 个单元切割的滑弧长度及功能函数,其中 Z_i 可按 Mohr-Coulomb 准则由下式求得

$$Z_i = \tau_f - \tau = -\sigma_n \tan \varphi + c - \tau \quad (2)$$

式中: τ_f 和 τ 分别为受剪面上的抗剪强度和剪应力; σ_n 为受剪面上的正应力,以受拉为正; c , φ 分别为岩土的黏聚力和内摩擦角。

设 θ 为单元所截滑弧切线方向与水平面间的夹角,则

$$\sigma_n = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos(2\theta) + \tau_{xy} \sin(2\theta) \quad (3)$$

$$\tau = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin(2\theta) + \tau_{xy} \cos(2\theta) \quad (4)$$

将式(3), (4)代入式(2),可得单元功能函数为

$$Z_i = - \left[\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos(2\theta) + \tau_{xy} \sin(2\theta) \right] \tan \varphi + c - \left[\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin(2\theta) + \tau_{xy} \cos(2\theta) \right] \quad (5)$$

由式(5)可知,单元功能函数 Z_i 是基本变量 c , φ 及应力向量 $\sigma = \{\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}\}^T$ 的函数,而应力向量 σ 又是基本变量 c , φ , ϕ , γ , E , ν (分别为土的

黏聚力、内摩擦角、膨胀角、容重、弹性模量、泊松比)的函数。设基本变量 $\mathbf{X}=\{c, \varphi, \phi, \gamma, E, \nu\}$, 则

$$Z_i = g_i(\mathbf{X}, \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{X})) \quad (6)$$

因此, 对于单元功能函数, 可以求得其对基本变量的偏导数为

$$\frac{\partial Z_i}{\partial \mathbf{X}} = \frac{\partial g_i(\mathbf{X}, \boldsymbol{\sigma})}{\partial \mathbf{X}} = \frac{\partial g_i(\mathbf{X}, \boldsymbol{\sigma}^*)}{\partial \mathbf{X}} + \frac{\partial g_i(\mathbf{X}^*, \boldsymbol{\sigma})}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial \mathbf{X}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial g_i(\mathbf{X}, \boldsymbol{\sigma}^*)}{\partial \mathbf{X}} = \{1, -\sigma_n \sec^2 \varphi, 0, 0, 0, 0\}^T \quad (8)$$

$$\frac{\partial g_i(\mathbf{X}^*, \boldsymbol{\sigma})}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \left\{ -\frac{1}{2} \{ [1 - \cos(2\theta)] \tan \varphi + \sin(2\theta) \}, \right. \\ \left. -\frac{1}{2} \{ [1 + \cos(2\theta)] \tan \varphi - \sin(2\theta) \}, \right. \\ \left. -\sin(2\theta) \tan \varphi - \cos(2\theta) \right\} \quad (9)$$

式中: 上标 “*” 表示在求导时视相应参数为常量。

很显然, 对于整个滑面的功能函数, 可以得出它对基本变量的偏导数为

$$\frac{\partial Z}{\partial \mathbf{X}} = \frac{\partial g}{\partial \mathbf{X}} = \sum_{i=1}^{n_s} \frac{\partial Z_i}{\partial \mathbf{X}} \Delta l_i \quad (10)$$

由式(7), (10)可知, 偏导数的表达式中含有应力对基本变量的偏导数 $\partial \boldsymbol{\sigma} / \partial \mathbf{X}$, 需要利用随机有限元程序进行迭代求解。本文基于增量切线刚度法, 采用 Aitken 加速算法, 用 Fortran 语言编写了相应的随机有限元计算程序, 详细步骤参见作者^[13]的研究。

由于边坡中最小可靠指标所对应的滑面是未知的, 本文计算边坡整体最小可靠指标的方法是先假定任一滑面, 按式(7), (10)求此滑面上功能函数对于基本变量的偏导数, 由此导数可进一步求得此滑面对应的可靠指标。然后, 对所有可能的滑面求解可靠指标, 则这些可靠指标的最小值就是整个边坡的最小可靠指标。当然, 这一步所求的最小可靠指标还不是边坡真正的可靠指标, 因为可靠指标的计算还需采用某种可靠度分析方法进行迭代求解。因此, 这里实际上包含了两层循环: 外层循环是可靠指标的迭代求解, 内层循环是滑面最小可靠指标的搜索。其中, 滑面最小可靠指标的搜索方法与边坡稳定性定值法分析中最小安全系数的搜索方法一致。下面讨论外层循环中可靠指标的迭代求解方法。

3 可靠度分析的基本方法

3.1 验算点法

验算点法是可靠度分析中的一种常用方法。该方法的主要思想是在通过极限状态超曲面 $Z = 0$ 上的一个验算点 $P^*(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ 处将功能函数 Z 展开成泰勒级数, 即在此点将非线性功能函数线性化。可以证明, 验算点 P^* 是标准化正态空间中极限状态超曲面 $Z = 0$ 上到原点最近的点, 此点不能事先确定, 需迭代求解。当基本变量是互为独立的正态变量时, 其迭代计算公式^[14]如下:

$$\alpha_{x_i} = \frac{-\frac{\partial g(\mathbf{X}^*)}{\partial X_i} \sigma_{x_i}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial g(\mathbf{X}^*)}{\partial X_j} \sigma_{x_j} \right)^2}} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial g(\mathbf{X}^*)}{\partial X_i} (\mu_{x_i} - x_i^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g(\mathbf{X}^*)}{\partial X_i} \sigma_{x_i} \right)^2}} \quad (12)$$

$$x_i^* = \mu_{x_i} + \alpha_{x_i} \beta \sigma_{x_i} \quad (13)$$

式中: μ_{x_i} , σ_{x_i} , α_{x_i} 分别为基本变量 X_i 的均值、均方差、方向余弦; β 为可靠指标。

3.2 有限步长迭代法

设基本变量是互为独立的正态随机变量, 贡金鑫^[14]推导了有限步长迭代法的基本公式, 列出了在标准正态空间中求解可靠指标的迭代步骤。由于有限元计算是在原始空间中进行的, 因此, 原始空间中可靠指标的计算可按下述步骤进行迭代:

(1) 选取迭代初始点 $\mathbf{X}^{(0)} = \{x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}\}^T$ 、初始步长 $\lambda^{(0)}$ 和步长调整系数 a (一般可取 $\mathbf{X}^{(0)} = \{\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n}\}^T$, $\lambda^{(0)} \leq 50.00$, $a = 1.2 \sim 1.5$);

(2) 按下式计算方向余弦 $\alpha_{x_i}^{(k+1)}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) (k 为迭代次数):

$$\alpha_{x_i}^{(k+1)} = \frac{\frac{x_i^{(k)} - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}} - \lambda^{(k)} \frac{\partial g(\mathbf{X}^{(k)})}{\partial x_i} \sigma_{x_i}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{x_j^{(k)} - \mu_{x_j}}{\sigma_{x_j}} - \lambda^{(k)} \frac{\partial g(\mathbf{X}^{(k)})}{\partial x_j} \sigma_{x_j} \right)^2}} \quad (14)$$

(3) 按下式计算可靠指标 $\beta^{(k+1)}$:

$$\beta^{(k+1)} = - \frac{g_X(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial g(\mathbf{X}^{(k)})}{\partial x_i} (\mu_{X_i} - x_i^{(k)})}{\sum_{i=1}^n \alpha_{X_i}^{(k+1)} \frac{\partial g(\mathbf{X}^{(k)})}{\partial x_i} \sigma_{X_i}} \quad (15)$$

(4) 按下式计算新的 $X_i^{(k+1)} (i=1, 2, \dots, n)$:

$$X_i^{(k+1)} = \mu_{X_i} + \alpha_{X_i}^{(k+1)} \sigma_{X_i} \beta^{(k+1)} \quad (16)$$

(5) 若前后 2 次迭代计算所得可靠指标之差满足 $\|\beta^{(k+1)} - \beta^{(k)}\| < \varepsilon$ (或前后 2 次迭代计算所得 2 点在标准正态空间的距离满足

$$\left\| \frac{\mathbf{X}^{(k+1)} - \boldsymbol{\mu}_{\mathbf{X}^{(k+1)}}}{\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{X}^{(k+1)}}} - \frac{\mathbf{X}^{(k)} - \boldsymbol{\mu}_{\mathbf{X}^{(k)}}}{\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{X}^{(k)}}} \right\| < \varepsilon$$

), ε 为规定的允许误差, 则停止迭代, 所求 $\beta^{(k+1)}$ 即为要求的可靠指标;

(6) 如果 $k < 1$, 则转至步骤(2)继续进行迭代;

如果 $\left\| \frac{\mathbf{X}^{(k+1)} - \boldsymbol{\mu}_{\mathbf{X}^{(k+1)}}}{\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{X}^{(k+1)}}} - \frac{\mathbf{X}^{(k)} - \boldsymbol{\mu}_{\mathbf{X}^{(k)}}}{\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{X}^{(k)}}} \right\| > \left\| \frac{\mathbf{X}^{(k)} - \boldsymbol{\mu}_{\mathbf{X}^{(k)}}}{\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{X}^{(k)}}} - \frac{\mathbf{X}^{(k-1)} - \boldsymbol{\mu}_{\mathbf{X}^{(k-1)}}}{\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{X}^{(k-1)}}} \right\|$, 则取 $\lambda^{(k+1)} = \frac{\lambda^{(k)}}{a}$, 否则取 $\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)}$, 转至步骤(2)继续进行迭代。

比较式(11)~(13)与(14)~(16)可知, 其主要区别是方向余弦的表达式有所不同。常规迭代方法中方向余弦的计算只与该点的导数值有关, 而有限步长迭代法中方向余弦的计算还与该点的坐标值有关。可以证明, 常规的验算点法是有有限步长迭代法中步长为无限值时的特例。

有限步长迭代法可以保证在极限状态函数为高度非线性时可靠指标的迭代计算过程亦可收敛, 但步长及步长调整系数仍需试算确定。因此, 本文拟以有限元计算为基础, 研究边坡稳定可靠度分析中的有限步长迭代法以及初始步长和步长调整系数的取值方法。

4 算例及成果分析

4.1 算例 1

已知结构功能函数为

$$g(X_1, X_2) = X_1^3 + X_2^3 - 4.0 \quad (17)$$

式中: X_1, X_2 均服从正态分布, 其平均值和标准差分别为 $\mu_{X_1} = 3.0, \mu_{X_2} = 2.9, \sigma_{X_1} = 1.0, \sigma_{X_2} = 1.0$ 。

对于本例, 其极限状态函数是高度非线性的, 采用传统的验算点法求解可靠指标时迭代不收敛。

贡金鑫^[14]取 $\lambda^{(0)} = 2.0, a = 1.5$, 求得可靠指标 $\beta = 2.3909$ 。

本文通过试算, 进一步研究了初始步长及步长调整系数这 2 个参数的取值与可靠指标迭代次数的关系, 试算结果如图 1 所示。图 1 中显示, 迭代次数达到 500 时迭代计算仍未收敛。

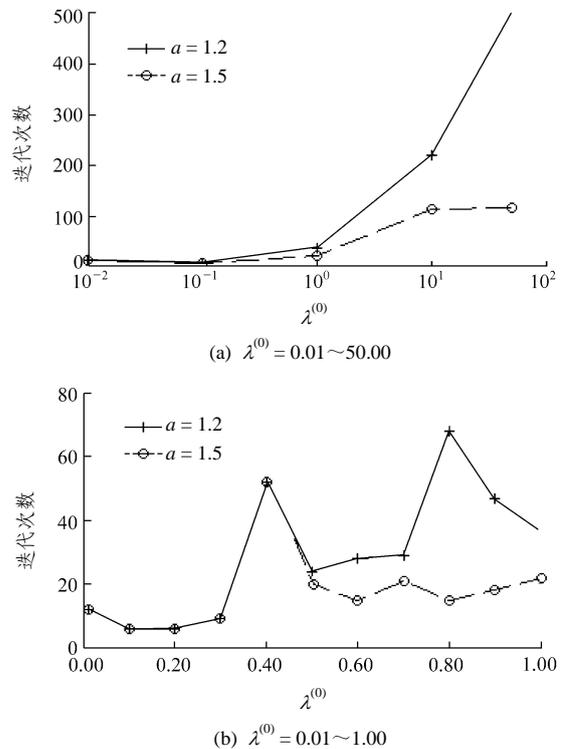


图 1 迭代次数与初始步长的关系
 Fig.1 Relationship between number of iteration and initial step length

图 1(a)的横坐标为对数坐标, 研究的是 $\lambda^{(0)}$ 在较大范围内变化时的情况 ($\lambda^{(0)}$ 分别取 $10^{-2}, 10^{-1}, 10^0, 10^1, 50.00$)。计算结果表明, $\lambda^{(0)} \leq 10^0$ 时, 迭代达到收敛时所需的迭代次数较少。随着 $\lambda^{(0)}$ 的增大, 计算达到收敛时所需的迭代次数明显增多。例如, 当 $\lambda^{(0)} = 50.00$ 且 $a = 1.2$ 时, 可靠指标的迭代进行了 500 次时仍未收敛。

虽然在较大范围内而言, $\lambda^{(0)}$ 越大, 所需迭代次数越多, 但这种变化趋势不是单调的。图 1(b)表明, 在 $\lambda^{(0)}$ 的局部变化范围内, 迭代次数与初始步长的关系是非单调多峰函数。此外, 由图 1(a), (b) 都可看出, 在 a 值的建议范围内 ($a = 1.2 \sim 1.5$), a 值越大, 计算达到收敛时所需的迭代次数就越少。

因此, 总体而言, $\lambda^{(0)}$ 对迭代计算的收敛性有重要影响。若 $\lambda^{(0)}$ 的值较大, 计算结果很可能不收敛。为保证计算的收敛性, 一般可取 $\lambda^{(0)} \leq 1$ 。 a 的

作用是对 $\lambda^{(0)}$ 进行折减, 以加速迭代计算的进程, 因此, a 值越大, 计算达到收敛时所需的迭代次数就越少。因此, 可取 $a = 1.5$ 。

4.2 算例 2

某覆盖于坚硬土层上的非均质 2 层不排水黏土堤坝边坡, 其几何外形见图 2^[15], 各层土的参数见表 1^[15]。

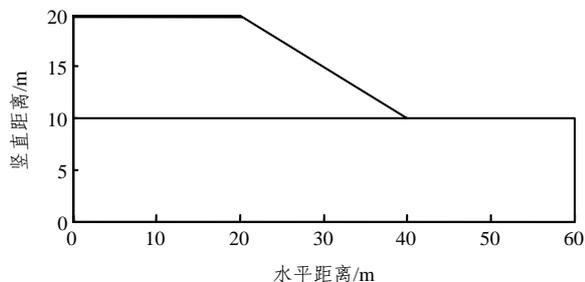


图 2 边坡几何外形图^[15]

Fig.2 Geometric shape of slope^[15]

表 1 土层参数表^[15]

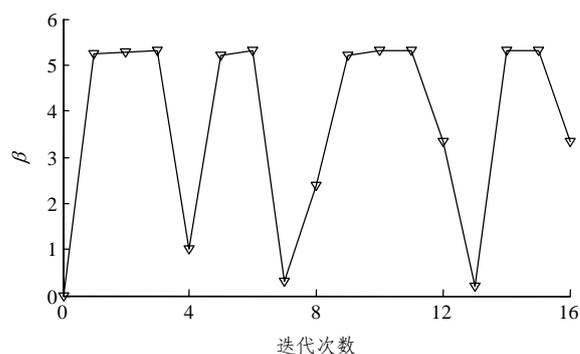
Table 1 Parameters of soil layers^[15]

土层号	c/kPa	$\varphi(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E/kPa	ν
1(上层)	50.0	0	0	20.0	10^5	0.3
2(下层)	73.1	0	0	20.0	10^5	0.3

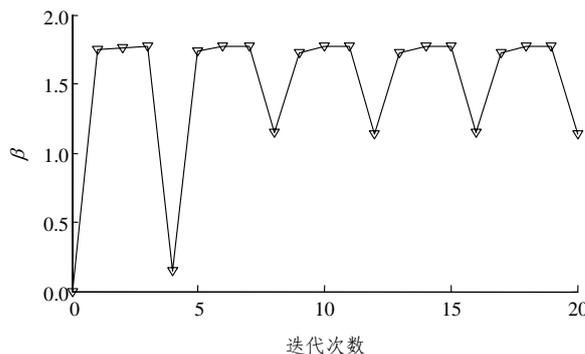
对于本例, 本文采用八节点四边形单元进行有限元可靠度分析, 具体方法见本文节 2。有限元建模时, 约束条件是底边界固定, 两侧边界水平约束。土体采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性模型。在可靠度计算时, 设 c, φ 为互为独立的正态随机变量, 其余参数为定值, 取 c, φ 的均值如表 1 所示, 其变异系数 δ_c 及 δ_φ 为 0.1, 0.2, 0.3^[16]。

计算结果表明: δ_c 及 δ_φ 分别为 0.1, 0.2, 0.3 时, 可靠指标的验算点法迭代计算出现发散现象。图 3 分别列出了 $\delta_c = \delta_\varphi = 0.1$ 及 $\delta_c = \delta_\varphi = 0.3$ 时的可靠指标与迭代次数关系。其中, 迭代收敛标准是 $\varepsilon = 0.001$ 。由图 3 可以明显地看出迭代过程是发散的。因此, 为了计算可靠指标, 本文又采用了有限步长迭代法进行了试算。试算时取 $a = 1.5, \lambda^{(0)}$ 的取值方式是由 1.0 逐渐递减, 直至计算收敛为止。

计算结果显示, 对于 $\delta_c = \delta_\varphi = 0.1$ 的情况, $\lambda^{(0)} = 0.1, a = 1.5$ 时计算是收敛的; 对于 $\delta_c = \delta_\varphi = 0.3$ 的情况, $\lambda^{(0)} = 0.01, a = 1.5$ 时计算是收敛的。这两种情况下的可靠指标迭代过程见图 4。比较图 3 与 4 可以看出, 用有限步长迭代法求解可靠指标, 不仅能求得可靠指标的收敛解, 而且大大减少了可靠指标的



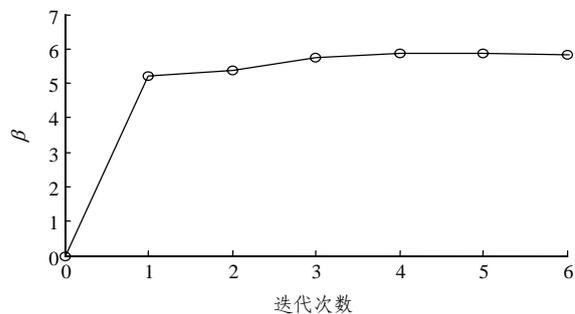
(a) $\delta_c = \delta_\varphi = 0.1$



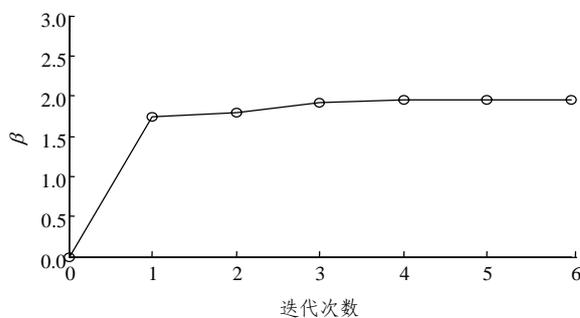
(b) $\delta_c = \delta_\varphi = 0.3$

图 3 可靠指标与迭代次数关系图(验算点法)

Fig.3 Relationship between number of iteration and reliability index β (design point method)



(a) $\delta_c = \delta_\varphi = 0.1(\lambda^{(0)} = 0.10, a = 1.5)$



(b) $\delta_c = \delta_\varphi = 0.3(\lambda^{(0)} = 0.01, a = 1.5)$

图 4 可靠指标与迭代次数关系图(有限步长迭代法)

Fig.4 Relationship between number of iteration and β (limit step length iteration method)

迭代计算次数。因为边坡稳定的有限元可靠度分析中,每次进行可靠指标的迭代求解时,均需计算应力、应力对基本变量的导数及所有滑面中最小可靠指标,因此,可靠指标的迭代次数的减少可以大大提高有限元可靠度分析的计算速度,节省程序的运行时间。

5 结 论

本文先通过结构工程的简单算例,研究了有限步长迭代法中初始步长及步长调整系数的取值。再结合边坡稳定的有限元可靠度分析,探讨了有限步长迭代法对于边坡工程的适用性。计算结果表明,将有限步长迭代法用于边坡稳定的有限元可靠度分析是可行的,该方法可保证在功能函数为高度非线性时可靠指标的迭代计算也能收敛,而且收敛速度较快,大大提高了边坡稳定有限元可靠分析的计算速度。在有限步长迭代法的2个参数中,初始步长 $\lambda^{(0)}$ 的选择对迭代的收敛性影响较大,对于高度非线性功能函数,此值应该取较小值;步长调整系数 a 的作用是对初始步长进行折减,以加速迭代计算的进程, a 值越大,计算达到收敛时所需的迭代次数就越小。

参考文献(References):

- [1] 陈祖煜. 土质土坡稳定分析——原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 239 - 248.(CHEN Zuyu. Soil slope stability analysis—theory, method and programs[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003: 239 - 248.(in Chinese))
- [2] 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 Chenggang. Several issues from the geotechnical engineering probability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(4): 94 - 98.(in Chinese))
- [3] 李继华, 林忠民, 李明顺, 等. 建筑结构概率极限状态设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 151 - 166.(LI Jihua, LIN Zhongmin, LI Mingshun, et al. Probabilistic limit state design of building structures[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1990: 151 - 166.(in Chinese))
- [4] LOW B K, GILBERT R B, WRIGHT S G. Slope reliability analysis using generalized method of slices[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(4): 350 - 362.
- [5] 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.
- [6] MALKAWI A I H, HASSAN W F, ABDULLA F A. Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability[J]. Structural Safety, 2000, 22: 161 - 187.
- [7] 谭晓慧. 边坡稳定可靠度分析方法的探讨[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2001, 24(6): 40 - 44.(TAN Xiaohui. Discussion on reliability analysis methods of slope stability[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science), 2001, 24(6): 40 - 44.(in Chinese))
- [8] 刘 宁. 可靠度随机有限元法及其工程应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 76 - 105.(LIU Ning. Reliability SFEM and its application[M]. Beijing: China Water Power Press, 2001: 76 - 105.(in Chinese))
- [9] 谭晓慧, 王建国, 刘新荣, 等. 边坡稳定的有限元可靠度分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(1): 102 - 104.(TAN Xiaohui, WANG Jianguo, LIU Xinrong, et al. Finite element reliability analysis of the stability of a slope[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science), 2006, 29(1): 102 - 104.(in Chinese))
- [10] 谭晓慧, 王建国, 刘新荣, 等. 边坡稳定的有限元可靠度计算及敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 115 - 122.(TAN Xiaohui, WANG Jianguo, LIU Xinrong, et al. Finite element reliability computation and sensitivity analysis of slope stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 115 - 122.(in Chinese))
- [11] 谭晓慧. 岩质边坡稳定的可靠性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增 1): 1 042 - 1 045.(TAN Xiaohui. The reliability analysis of a rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Supp.1): 1 042 - 1 045.(in Chinese))
- [12] 谭晓慧, 王建国. 边坡的弹塑性有限元可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 44 - 50.(TAN Xiaohui, WANG Jianguo. Slope reliability analysis using elastoplastic finite element method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 44 - 50.(in Chinese))
- [13] 谭晓慧. 边坡稳定的非线性有限元可靠度分析方法的研究[博士学位论文][D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.(TAN Xiaohui. Research on the method of nonlinear finite element reliability analysis of slope stability[Ph. D. Thesis][D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.(in Chinese))
- [14] 贡金鑫. 工程结构可靠度分析方法[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2003: 155 - 160.(GONG Jinxin. Computational methods for reliability of engineering structures[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2003: 155 - 160.(in Chinese))
- [15] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 2001, 51(7): 653 - 654.
- [16] 朱小林, 杨桂林. 土体工程[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996.(ZHU Xiaolin, YANG Guilin. Soil engineering[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1996.(in Chinese))