

文章编号: 1000-7598(2009)11-3447-06

土钉支护结构可靠度分析的电子表格法

谭晓慧¹, 王建国², 冯敏杰¹, 毕卫华¹

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 土建工程学院, 合肥 230009)

摘要: 岩土工程中存在大量的不确定性, 因此, 进行土钉支护结构的可靠度分析是十分必要的。利用 Excel 的规划求解及 VB 编程功能, 采用电子表格法, 建立了适用于分层土体的电子表格计算模型, 进行了土钉支护结构内部稳定的可靠度分析, 得出了最小可靠指标及其相应的临界滑面位置。建立的电子表格模型由数据输入模块、土钉计算模块、土层计算模块、可靠指标计算模块及优化求解模块 5 部分组成。模型建立之后, 只需改变电子表格中的输入数据, 即可适用于不同土钉支护结构的可靠度分析。算例分析表明: 方法正确, 计算过程简单直观。它既可用于不同工况下土钉支护结构内部稳定的可靠度分析, 也可简化为相应情况下的定值法分析。

关键词: 土钉支护; 电子表格; 可靠度分析; 可靠指标; 安全系数

中图分类号: TU 31

文献标识码: A

Reliability analysis of soil nailed structures using spreadsheet method

TAN Xiao-hui¹, WANG Jian-guo², FENG Min-jie¹, BI Wei-hua¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: It is very important to carry out the reliability analysis of soil nailed structures since there are lots of uncertainties in geotechnical engineering. Considering the function of Solver and VB programming of Excel, the spreadsheet computation model for the reliability analysis of soil nailed structures is set up. This spreadsheet model is suitable for layered soils and it can get the minimum reliability index and the location of the corresponding slip surface. The spreadsheet model is composed of five parts: module of input parameters; computation module of soil nailed structure; computation module of soil layers; computation module of reliability index and module of optimum calculation. Once the model is set up, it is very convenient to carry out the reliability analysis for different soil nailed structures. It is demonstrated that the method proposed is correct, simple and direct. It is easy to carry out the reliability analysis of soil nailed structures for different computation cases; and it can also be easily simplified to carry out the corresponding deterministic analysis.

Key words: soil nailed structure; spreadsheet; reliability analysis; reliability index; factor of safety

1 引言

土钉支护是基坑支护中一种较普遍采用的型式^[1-2], 它具有施工快速、简便、经济、可靠等显著特点。对于土钉支护结构, 其内部稳定性分析是评价其安全性的一个重要方面。在传统的定值法分析中, 土钉支护结构内部稳定性分析的重点是最小安全系数及其对应的临界滑面位置的求解, 如文献[3-5]分别用遗传算法、模拟退火-随机投点耦合算法、经验遗传算法-单纯形算法来进行土钉支护结构

的稳定性分析。但由于土钉支护结构的影响因素较多, 而这些影响因素又存在着大量的不确定性, 如土层参数的变异性、土体与土钉界面黏结强度的不确定性等等, 因此, 应进行土钉支护结构的可靠度分析, 以考虑不确定因素对其稳定性的影响。

在土钉支护结构的可靠度分析中, 首先, 必须确定极限状态函数的形式。当前多数文献中采用下式作为土钉支护结构的极限状态函数^[6-8]:

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_m) = R - S \quad (1)$$

式中: $Z = g(\cdot)$ 为极限状态函数, 它是基本变量

收稿日期: 2008-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50748033); 安徽省教育厅青年基金项目(No. 2005jq1021); 合肥工业大学博士专项基金项目(No. 2007GDBJ044)。
第一作者简介: 谭晓慧, 1971, 博士, 副教授, 主要从事岩土力学的教学与研究工作。E-mail: tantan9666@sina.com

$X = (X_1, X_2, \dots, X_m)$ 的函数; m 为基本变量的数目; R 和 S 分别表示抗力和荷载。

式 (1) 是基于如下形式的安全系数 F_s 的显式得到的:

$$F_s = \frac{R}{S} \quad (2)$$

当 F_s 无法用显式表示时, 按式 (1) 来确定极限状态函数就会存在困难。此外, 当前求解土钉支护内部稳定性的方法较多, 不同的方法有不同的求解安全系数的公式, 故对于不同的分析方法需建立不同的极限状态函数, 缺乏统一性。鉴于这一原因, 本文将采用新的方法建立极限状态函数的统一形式。

在土钉支护结构的可靠度分析中, 可靠度分析方法的选择也很重要。常用的可靠度分析方法有中心点法、验算点法、蒙特卡罗模拟法及响应面法等^[9]。其中, 验算点法由于其精度优于中心点法、计算效率优于蒙特卡罗模拟法而得到广泛使用。但用验算点法进行可靠度分析的难点在于求解极限状态函数对基本变量的导数。为了避免导数的求解, 可采用优化算法来求解可靠指标。由于 Excel 电子表格具有内嵌的优化求解功能及 VB 编程功能, 因此, 本文将利用 Excel 电子表格进行土钉支护结构内部稳定的可靠度分析。

综上所述, 本文将先提出土钉支护结构极限状态函数的统一形式, 在此基础上建立土钉支护结构内部稳定可靠度分析的通用电子表格模型。

2 基本原理

2.1 极限状态方程的建立

虽然当前求解土钉支护结构内部稳定性的方法较多, 不同的方法对应着不同的安全系数的求解公式, 但其最终结果都是可以求解出土钉支护结构内部稳定性的安全系数 F_s 。为此, 本文将参照一般的边坡稳定可靠度分析方法^[10], 建立如下形式的极限状态函数的统一形式:

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_m) = F_s(X_1, X_2, \dots, X_m) - 1 \quad (3)$$

由式 (3) 可知, 不管采用何种求解安全系数的方法, 其对应的极限状态函数形式都是一致的, 因而后续的可靠度分析过程相同。

为说明本文方法, 以下将按《基坑土钉技术规范》^[11]中的公式进行安全系数的求解。在图 1 所示的直角坐标系中, 沿土坡纵向取单位长度的支护体进行分析。设破坏面上的土钉只承受拉力, 且达到

最大抗力 R , 记土条数为 n , 土钉排数为 m (为简化起见, 图 1 中只绘了一排土钉), 则根据文献 [11—12], 可得任意圆弧滑裂面上安全系数 F_s 的计算公式为

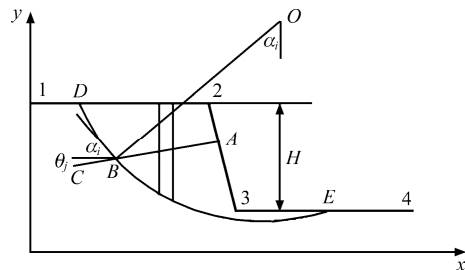


图 1 土钉支护结构稳定性计算简图

Fig.1 Schematic diagram of soil nailed structure's stability

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n [(W_i + Q_i) \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i (b_i / \cos \alpha_i)]}{\sum_{i=1}^n (W_i + Q_i) \sin \alpha_i} + \frac{\sum_{j=1}^m (T_j / S_{hj}) (\sin \theta_j \tan \varphi_j + \cos \theta_j)}{\sum_{i=1}^n (W_i + Q_i) \sin \alpha_i} \quad (4)$$

式中: W_i 、 Q_i 和 b_i 分别为第 i 土条的重力、外荷载和土条宽度; c_i 和 φ_i 分别为第 i 土条滑面中点所在土层的黏聚力和内摩擦角; α_i 为第 i 土条滑面中点处切线与水平线的夹角; S_{hj} 为第 j 排土钉的水平间距; φ_j 为第 j 排土钉与滑面交界点所在土层的内摩擦角; θ_j 为第 j 排土钉与滑面交界点处切线与土钉轴线间的夹角; T_j 为第 j 排土钉的最大抗力, 可取下列两式中较小值:

按土钉受拔条件, T_1 为

$$T_1 = \pi d_1 l_a \tau \quad (5)$$

按土钉受拉屈服条件, T_2 为

$$T_2 = 1.1 \frac{\pi d_2^2}{4} f_{yk} \quad (6)$$

式中: d_1 为土钉孔径; d_2 土钉钢筋直径; l_a 为土钉伸入稳定土体中的长度; τ 为钉土间界面黏结强度; f_{yk} 为钢筋抗拉强度标准值。由式 (4) 可知, 安全系数 F_s 的分子由两部分组成, 前者反映土体的作用, 后者反映土钉的作用。

2.2 可靠度分析的基本方法

可靠度分析的目的是求解结构的可靠指标及失效概率, 并依此评价结构的可靠性。可靠指标 β 的几何意义是在标准正态空间中, 从坐标原点到极限

状态曲面的最短距离。标准正态空间中, 极限状态曲面上到原点距离最近的点被称为验算点。由于验算点位置是未知的, 故可靠指标需要迭代求解, 其迭代公式如下^[9]:

$$\alpha_{X_i} = - \frac{\sum_{k=1}^n \frac{\partial g(\mathbf{x}^*)}{\partial X_k} \rho_{X_i X_k} \sigma_{X_k}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial g(\mathbf{x}^*)}{\partial X_i} \frac{\partial g(\mathbf{x}^*)}{\partial X_j} \rho_{X_i X_j} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j}}} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{g(\mathbf{x}^*) - \sum_{i=1}^n \frac{\partial g(\mathbf{x}^*)}{\partial X_i} (x_i^* - \mu_{X_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial g(\mathbf{x}^*)}{\partial X_i} \frac{\partial g(\mathbf{x}^*)}{\partial X_j} \rho_{X_i X_j} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j}}} \quad (8)$$

$$x_i^* = \mu_{X_i} + \alpha_{X_i} \beta \sigma_{X_i} \quad (9)$$

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; $\rho_{X_i X_j}$ 为变量 X_i 和 X_j 间的相关系数; $\mathbf{x}^*$ 为验算点的坐标; $g(\mathbf{x}^*)$ 及 $\partial g(\mathbf{x}^*)/\partial X_i$ 分别为验算点处极限状态函数值及其对基本变量 X_i 的导数。由式 (7) ~ (9) 求解可靠指标的方法即为验算点法。

由于可靠指标是在标准正态空间中从坐标原点到极限状态曲面的最短距离。因此, 为了避免导数的求解, 可利用可靠指标的这几何意义进行优化求解。此时, 可靠指标可写成下式^[13]:

$$\beta = \min_{\mathbf{x}^* \in F} \sqrt{\left(\frac{\mathbf{x}^* - \boldsymbol{\mu}_X}{\boldsymbol{\sigma}_X} \right)^T \boldsymbol{\rho}_X^{-1} \left(\frac{\mathbf{x}^* - \boldsymbol{\mu}_X}{\boldsymbol{\sigma}_X} \right)} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{x}^*$ 为优化求解过程中的随机变量 X 的迭代值; F 为失效域 (即 $Z = g(\mathbf{X}) \leq 0$ 的区域)。

3 电子表格计算模型的建立及求解

土钉支护结构内部稳定可靠度分析的电子表格法是建立在相应的定值法基础上的。因此, 二者可共用其中的定值法模块。土钉支护结构内部稳定定值法分析的电子表格法模型包括数据输入模块、土钉计算模块、土层计算模块和优化求解模块这四部分^[14]。相应地, 土钉支护结构内部稳定可靠度分析的电子表格法模型也需包括这 4 个模块。此外, 它还包括可靠指标计算模块。

3.1 数据输入模块

数据输入模块是其他计算模块的基础, 其作用是进行数据输入, 在电子表格中用特定颜色的单元格作为标记。数据输入模块由 4 类数据组成, 它们

分别是: 边坡参数、土层参数、土钉参数、初始滑面位置。其中, 边坡参数包括坡角、坡高、条分数、坡顶荷载等数据; 土层参数包括土层数、层厚、黏聚力、内摩擦角、重度、钉土间界面黏结强度; 土钉参数包括土钉排数、长度、倾角、孔径、钢筋直径、钢筋抗拉强度标准值、水平间距、竖直间距等参数。设边坡的临界滑动面为圆弧形, 则初始滑面位置参数为滑弧圆心坐标 x_0 、 y_0 和半径 r_0 。上述参数又可分为非随机变量及随机变量。对于非随机变量, 只需输入相应的参数值。对于随机变量, 需输入参数的均值 μ_X 、均方差 σ_X 及相关系数矩阵 ρ_X 。

3.2 土层计算模块及土钉计算模块

土层计算模块用于计算土层自身的抗力及荷载作用, 即式 (4) 的分子第 1 项及分母。土钉计算模块用于计算土钉的抗力, 即式 (4) 的分子的第 2 项。二者综合起来, 即可计算安全系数 F_s , 从而可由式 (3) 求解相应的功能函数值。

土层计算模块与土钉计算模块均需利用电子表格的 VB 编程功能来完成部分计算, 它们的模块结构与定值法中相应的模块相同, 详见文献^[14], 本文不再赘述。不同之处在于: 定值法中土层计算模块与土钉计算模块引用的数据是参数的均值; 而可靠度分析中土层计算模块与土钉计算模块引用的数据是随机变量 X 的迭代值, 即“可靠指标计算模块”中的 $\mathbf{x}^*$ 。

3.3 可靠指标计算模块

本模块的主要作用是计算土钉支护结构的可靠指标。取随机变量为各土层的黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、重度 γ 及钉土界面黏结强度 τ , 则本文建立的可靠指标计算模块由 8 列及 $4nm+1$ 行组成 (nm 为土层数)。以本文第 4 部分算例为例, 其模块结构如表 1 所示。表中每一横行为某一随机变量的相应参数, 各列数据分别表示土层号、随机变量的名称、随机变量的统一编号、迭代值 $\mathbf{x}^*$ 、均值 μ_X 、变异系数 δ_X 、均方差 σ_X 及标准化后的随机变量 NX 。其中, 均值和变异系数是已知值, 令它们分别等于数据输入模块中相应数据; 均方差为相应随机变量的均值与变异系数之积; $\mathbf{x}^*$ 为优化求解过程中的迭代值, 其初值可取随机变量的均值; NX 由下式求得:

$$NX = \frac{\mathbf{x}^* - \mu_X}{\sigma_X} \quad (11)$$

表 1 建立之后, 即可在某一单元格中输入求解可靠指标 β 的式 (10)。

表 1 可靠指标计算模块

Table 1 Computational module for reliability index

土层	参数	变量	x^*	μ_X	δ_X	σ_X	NX
1	c	X_1	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
1	φ	X_2	0.35	0.35	0.30	0.10	-0.01
1	γ	X_3	18.70	18.70	0.00	0.00	-0.01
1	τ	X_4	60.00	60.00	0.30	18.00	0.00
2	c	X_5	54.01	79.70	0.14	11.16	-2.20
2	φ	X_6	0.15	0.23	0.28	0.07	-1.31
2	γ	X_7	20.16	20.10	0.02	0.40	0.16
2	τ	X_8	21.31	60.00	0.30	18.00	-2.25

3.4 优化求解模块

本模块由 Excel 的规划求解功能来完成相应的计算。因此,需指定目标函数、自变量及约束条件。

3.4.1 目标函数

在土钉支护结构内部稳定的定值法分析过程中,求得土钉支护结构的最小安全系数 $F_{s\min}$ 是计算目标,而在相应的可靠度分析中,求解最小安全系数只是为求解可靠指标服务,而求解最小可靠指标 $\beta_{\min}$ 才是最终目的。因此,可取计算可靠指标 β 的单元格为目标单元格,并指定求其最小值。

3.4.2 自变量

在土钉支护结构内部稳定的定值法分析过程中,自变量只有反映滑面位置的圆心坐标 x_0 、 y_0 及滑弧半径为 r_0 这 3 个变量。而在相应的可靠度分析中,基本变量除了滑面位置参数外,还应包括随机变量的迭代值 x^* 。

3.4.3 约束条件

指定约束条件对于土钉支护内部稳定的可靠度分析十分重要。若约束条件有误,则可能会得到错误的求解结果或求解失败。如图 1 所示,设滑弧与土钉支护的两个交点分别为 D 、 E ,土钉支护的 4 个外形控制点分别为 1~4,点 1~2 及点 3~4 间的水平距离分别为基坑高度的 2 倍^[15],滑弧圆心点 O 至点 1~4 的距离分别为 $R_1 \sim R_4$,则约束条件为

$$y_{\text{top}D} = y_{\text{bot}D}, y_{\text{top}E} = y_{\text{bot}E} \quad (12)$$

$$R_{\min} \leq r_0 \leq R_{\max} \quad (13)$$

$$F_s \geq 0 \quad (14)$$

$$F_s \leq 1 \quad (15)$$

$$x^* \geq 0 \quad (16)$$

式中: y_{top} 、 y_{bot} 分别为土条分界点位置的坡顶纵坐标及滑弧纵坐标; $R_{\max}$ 和 $R_{\min}$ 分别为滑弧半径 r_0 的最大值和最小值, $R_{\max} = \min(R_1, R_4)$, $R_{\min} = \min(R_2, R_3)$ 。上述 5 个约束条件中,前 3 个与定值

法中相应的约束条件相同,后两个为可靠度分析中新增的约束条件。式(12)、(13)是对滑面位置合理性的约束;式(14)为对安全系数合理性的约束;式(15)为对极限状态函数值的约束,即限制 $z = F_s - 1 \leq 0$;式(16)为对随机变量取值合理性的约束,它要求随机变量值不是负数。

在土钉支护结构的可靠度分析中,实际上存在两种优化过程:一是对某一特定滑面,利用优化算法求解标准正态空间中坐标原点到极限状态面的最短距离,它对应于某一滑面的可靠指标;二是求解所有滑面中的最小可靠指标。因此,在利用电子表格进行优化分析时,亦可分两步进行,一是指定自变量为随机变量的迭代值 x^* ,求解在满足约束条件式(12)~(16)下的可靠指标;二是指定自变量为随机变量的迭代值 x^* 及滑面位置参数 x_0 、 y_0 、 r_0 ,求解在满足约束条件式(12)~(16)下的可靠指标,此时的可靠指标即为所有滑面中的最小可靠指标,相应的参数 x_0 、 y_0 、 r_0 即表示临界滑面的位置。

值得指出的是,对于该电子表格计算模型,若令变量 x^* 的迭代初值为均值 μ_X ,并在优化求解时指定目标单元格为 F_s 、约束条件为式(12)~(14),则可求解土钉支护结构的最小安全系数。

此外,该电子表格模型也可适用于不同计算工况下的求解。此时,只需改变数据输入模块中的边坡高度为特定工况下的开挖深度,并将此工况下尚未施工的土钉长度设为 0 即可。

4 算例分析

某基坑深度为 10.1 m,坡面直立,有 6 排土钉,水平间距为 1.0 m,竖直间距为 1.5 m,各层土钉的长度分别为 18、16、13、12、5、4 m,土钉倾角为 15°,前 3 排土钉的孔径为 0.12 m,后 3 排土钉的孔径为 0.10 m,不考虑土钉的抗拉屈服。土体由两层土组成,其厚度分别为 1.4 m 和 19.0 m。取各层土的黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、重度 γ 及钉土界面黏结强度 τ 为互为独立的正态随机变量,其参数如表 2 所示。

表 2 土层参数表

Table 2 Parameters of soil strata

土层 编号	均值				变异系数			
	μ_c /kPa	μ_φ /(°)	μ_γ /(kN/m ³)	μ_τ /kPa	δ_c	δ_φ	δ_γ	δ_τ
I	0.010	20.0	18.7	60.0	0	0.30	0	0.3
II	79.7	13.4	20.1	60.0	0.14	0.28	0.02	0.3

对于该土钉支护工程, 本文分 6 种工况进行了可靠指标的求解。为了验证电子表格模型的正确性, 笔者亦用 Visual Fortran 编写了相应的计算程序, 并用验算点法进行了可靠指标的计算。该程序采用中心差分法求解功能函数对基本变量的导数^[16]; 采用简单枚举法求解所有滑面中安全系数及可靠指标的最小值^[17]。各种工况下可靠指标 β 的计算结果见表 3。为了进行对比分析, 表中还列出了相应工况情况下定值法 (安全系数 F_s) 的计算结果。

表 3 计算结果的对比分析
Table 3 Comparative analysis of computing results

工况	开挖深度 /m	土钉 层数	F_s		β	
			电子表法	自编程序	电子表法	自编程序
1	2.0		1.301	1.300	1.975	1.924
2	3.5	1	3.143	3.146	4.881	4.883
3	5.0	1~2	3.066	3.065	4.584	4.585
4	6.5	1~3	2.736	2.736	4.414	4.416
5	10.1	1~4	1.734	1.734	3.272	3.271
6	10.1	1~6	1.826	1.826	3.416	3.415

由表 3 可知, 在各种计算工况下, 无论是对于安全系数 F_s 的计算结果, 还是对于可靠度指标 β 分析的计算结果, 采用电子表格的优化法与采用 Visual Fortran 自编程序的计算结果都非常接近。可见, 在土钉支护结构的内部稳定性分析中采用电子表格法是可行的。各种计算工况下, 在求得最小可靠指标或最小安全系数的同时, 还可得到相应的临界滑面位置, 如图 2 是对工况 6 进行可靠度分析时由 Excel 电子表格所绘的剖面图及临界滑面位置。

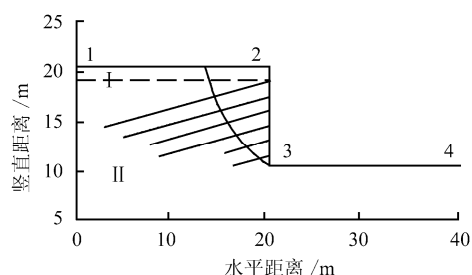


图 2 剖面图及临界滑面

Fig.2 Cross-section and critical location of slip surface

5 结 语

采用规范公式, 利用电子表格的规划求解及 VB 编程功能, 建立了土钉支护结构内部稳定可靠度分析的电子表格计算模型, 它既适用于不同工况下土钉支护结构的内部稳定可靠度分析, 也适用于相应情况下的定值法分析。算例分析表明, 本文建立的电子表格模型正确, 计算过程简单直观, 计算

模型以表格显示, 计算过程形象化。

计算模型建立之后, 只需修改输入单元格中相应数据, 即可进行其他土钉支护工程的内部稳定性分析。在所有输入数据中, 除了滑弧的初始位置及随机变量的迭代初值之外, 其他都是确定的。滑弧的迭代初值可结合土钉支护结构的剖面图来判断其合理性; 随机变量迭代初值的选择由试算确定, 它能影响可靠指标迭代计算的收敛性。

参 考 文 献

- [1] 贺若兰, 李宁, 张平. 土钉支护结构破坏模式和加固机制分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 197—202.
HE Ruo-lan, LI Ning, ZHANG Ping. Failure mode and reinforcement mechanism of soil-nailing structure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(1): 197—202.
- [2] 赵杰, 邵龙潭. 基坑土钉支护边坡有限元稳定性分析方法探讨[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1654—1658.
ZHAO Jie, SHAO Long-tan. Research of FEM stability analysis of soil nailing support for foundation pit[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(6): 1654—1658.
- [3] 贺可强, 阳吉宝, 王胜利. 遗传算法在土钉支护结构优化设计中的应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 567—571.
HE Ke-qiang, YANG Ji-bao, WANG Sheng-li. Application of genetic algorithms in the optimization of soil nail bracing[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(5): 567—571.
- [4] 邹广电, 蒋婉莹. 土钉支护稳定分析的模拟退火-随机投点耦合算法[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 37—44.
ZOU Guang-dian, JIANG Wan-ying. Stability analysis of soil nailing based on coupling algorithm of simulated annealing algorithm and random disposal-method of points[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(1): 37—44.
- [5] 杜修力, 王智慧, 李立云, 等. 土钉结构稳定验算的经验遗传-单纯形算法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 598—602.
DU Xiu-li, WANG Zhi-hui, LI Li-yun, et al. Interior stability analysis method of soil-nailed structure based on empirical genetic-simplex algorithm[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(4): 598—602.
- [6] YUAN J X, YANG Y W. New approach to limit equilibrium and reliability analysis of soil nailed walls[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2003, 3(2): 145—151.
- [7] 罗晓辉, 李再光, 何立红. 基于可靠性分析的基坑土钉支护稳定性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 480—484.
LUO Xiao-hui, LI Zai-guang, HE Li-hong. Evaluation on stability of trench stench strengthened with soil nail based on reliability analysis[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(4): 480—484.
- [8] 杨耀辉, 张钦喜, 潘旭亮, 等. 土体支护整体稳定的概率分析[J]. 北京工业大学学报, 2005, 31(6): 585—588.

- YANG Yao-hui, ZHANG Qin-xi, PAN Xu-liang, et al. Reliability analysis of whole stability of soil-nailing wall[J]. **Journal of Beijing University of Technology**, 2005, 31(6): 585—588.
- [9] 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.
- [10] 陈祖煜, 张广文. 关于“土坡稳定可靠度分析”一文的讨论[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(6): 126—128.
- CHEN Zu-yu, ZHANG Guang-wen. Discussion on ‘reliability analysis of soil slope’[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(6): 126—128.
- [11] 中国工程建设标准化协会标准. 基坑土钉支护技术规程 CECS96:97 [S]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 1997.
- [12] 祝方才, 何杰, 戴益民. 土钉支护稳定分析的规范公式研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(7): 1037—1040.
- ZHU Fang-cai, HE Jie, DAI Yi-min. Study on standard formula of stability analysis of soil nailing[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, 1(7): 1037—1040.
- [13] 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.
- [14] 谭晓慧, 冯敏杰, 王建国, 等. 土钉支护结构内部稳定性分析的电子表格法[J]. 合肥工业大学学报, 2008, 31(11): 1828—1832, 1847.
- TAN Xiao-hui, FENG Min-jie, WANG Jian-guo, et al. Internal stability analysis of soil nailed structures using spreadsheet method [J]. **Journal of Hefei University of Technology**, 2008, 31(11): 1828—1832, 1847.
- [15] 朱彦鹏, 李忠. 深基坑土钉支护稳定性分析方法的改进及其设计软件的开发[J]. 岩土工程学报, 2005, 27 (8): 939—943.
- ZHU Yan-peng, LI Zhong. Improvement on stability analysis of soil nailing in foundation excavations and its software development[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(8): 939—943.
- [16] 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, 2006, 29(1): 102—104.
- TAN Xiao-hui, WANG Jian-guo, LIU Xign-rong, et al. Finite element reliability analysis of the stability of a slope[J]. **Journal of Chongqing University**, 2006, 29 (1): 102—104.
- [17] 陈祖煜. 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.

《岩土力学》2009 年第 8 期被 EI 收录论文 (60 篇, 收录率 100 %) (1)

序号	论文题名	作者	页码
1	杭州湾浅层储气砂土应力路径试验研究	孔令伟, 钟方杰, 郭爱国, 等	2209—2214
2	环境侵蚀下水泥土的强度及细观破裂过程分析	宁宝宽, 陈四利, 丁梧秀, 等	2215—2219
3	黄土地基动力沉降特性试验研究	李华明, 蒋关鲁, 吴丽君, 等	2220—2224
4	纤维加筋土中单根纤维的拉拔试验及临界加筋长度的确定	唐朝生, 施 斌, 高 玮, 等	2225—2230
5	群桩扭转非线性模型	孔令刚, 张利民	2231—2236
6	单、双向塑料土工格栅与不同填料界面作用特性对比试验研究	史旦达, 刘文白, 水伟厚, 等	2237—2244
7	考虑温度损伤的盐岩蠕变本构关系研究	胡其志, 冯夏庭, 周 辉	2245—2248
8	缺级粗粒土管涌类型的判别方法	陈 群, 刘 黎, 何昌荣, 等	2249—2253
9	初始地应力对隧洞开挖爆生裂隙区的影响研究	陈 明, 卢文波, 周创兵, 等	2254—2258
10	底端嵌固桩与滑体相互作用的物理模型试验研究	魏作安, 李世海, 赵 颖	2259—2263
11	变荷载作用下轴对称饱和半空间均质地基 Biot 固结分析	耿雪玉, 蔡袁强	2264—2270
12	平行于水平面表面渗流对生态边坡中客土稳定性影响研究	王 亮, 谢 健, 朱 伟	2271—2275
13	甘肃省公路沿线典型地段含盐量对冻胀盐胀特性影响的试验研究	李国玉, 喻文兵, 马 巍, 等	2276—2280
14	岸坡地下水控制技术的试验研究	杨宇友, 姚爱军, 张在明, 等	2281—2285
15	离子土壤固化剂改性膨胀土的试验研究	刘清秉, 项 伟, 张伟锋, 等	2286—2290
16	含水率对煤系土抗剪强度的影响	胡 昕, 洪宝宁, 杜 强, 等	2291—2294
17	三江平原沼泽土微观特性试验研究	李丽华, 陈 轮, 高盛焱, 等	2295—2299
18	低频周期荷载下广义 Kelvin-Voigt 模型特性研究	黄 明, 刘新荣, 祝云华, 等	2300—2304
19	围压作用下型煤蠕变特性及本构关系研究	赵洪宝, 尹光志, 张卫中	2305—2308
20	低渗透砂岩型铀矿床增渗方法及其可行性研究	王 伟, 李小春	2309—2314
21	再论非饱和土的抗剪强度	姚攀峰	2315—2318
22	隧道钢纤维喷射混凝土单层衬砌试验研究	刘新荣, 祝云华, 李晓红, 等	2319—2323
23	复合式土压平衡盾构刀盘失效风险分析	黄宏伟, 闫玉茹, 胡群芳	2324—2330
24	考虑注浆材料流变的隧道施工土层变形计算	施建勇, 付 磊, 朱 宁	2331—2336
25	求解边坡失量和安全系数的条分法	吴振君, 葛修润	2337—2342
26	多级线性荷载下饱和软黏土一维大应变固结解析解	常林越, 王金昌, 朱向荣	2343—2347
27	模糊聚类在地层分析中的应用	张 鹏, 张在明, 杨宇友, 等	2348—2352
28	岩体结构面间距的双参数负指数分布研究	胡秀宏, 伍法权	2353—2358
29	工程区高地应力判据研究及实例分析	王成虎, 郭啟良, 丁立丰, 等	2359—2364
30	山岭隧道塌方风险模糊层次分析	陈洁金, 周 峰, 阳军生, 等	2365—2370

(未完, 见第 3459 页)