

文章编号: 1000-7598-(2008) 09-2439-07

基于椭球滑动体假定和三维简化 JANBU 法的边坡稳定分析

李 亮^{1,2}, 迟世春¹, 郑榕明³

(1. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 大连 116024; 2. 中国水利水电科学研究院岩土工程研究所, 北京 100044;
3. 香港理工大学 土木与结构工程系, 香港 九龙)

摘 要: 采用一般椭球体模拟三维土坡的滑动体, 利用三维简化 JANBU 法计算其安全系数, 该法假定各个条柱底面的滑动方向在水平面上的投影相等, 借此可用一个变量来表达各个底滑面的滑动方向, 简便易行。此外, 综合借鉴粒子群优化算法和和声算法的优点, 提出了改进的粒子群算法, 并利用对 2 个三维土坡的最危险滑动体进行了搜索, 与已有结果进行了对比分析, 表明方法是可行有效的。

关 键 词: 边坡稳定; 极限平衡法; 椭球滑动体; 三维 JANBU 法; 粒子群算法; 和声算法

中图分类号: TU 454

文献标识码: A

Three-dimensional slope stability analysis based on ellipsoidal sliding body and simplified JANBU method

LI Liang^{1,2}, CHI Shi-chun¹, ZHENG Yung-ming³

(1. State Key laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China
3. Department of Civil and Structural Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong, China)

Abstract: The ellipsoidal sliding body is described by using eleven-variable equation, the new version of simplified three-dimensional JANBU method, in which only one variable is used to represent the sliding angles along all the column bases, is presented and is adopted to calculate the safety factor related to given ellipsoidal sliding body; in the case of determining critical sliding body of soil slopes, a new optimization algorithm which takes good advantages of particle swarm optimization and harmony search is presented. Two actual slopes in three dimensions are studied using the proposed method in order to demonstrate the effectiveness and applicability of the proposed method. Comparative studies have shown that the proposed method is applicable to three-dimensional slope stability analysis.

Key words: slope stability; limit equilibrium method; ellipsoidal sliding body; three-dimensional JANBU method; particle swarm optimization algorithm; harmony search algorithm

1 引 言

目前边坡稳定分析中, 二维极限平衡法是常用的方法, 但越来越多的工程实际问题提出了建立三维边坡稳定分析的要求。因为在实际工程中, 边坡的破坏体往往为多种土体的空间组合, 破坏面呈现复杂几何形状, 破坏体本身所承受的外力也不对称。严格地说, 考虑到边坡的这些空间复杂性, 边坡稳定应该进行三维分析, 以便更可靠地评价边坡稳定性。国内外学者相应地进行了大量的研究与探索,

国外专家 Hovland^[1]、Cheng 和 Chameau^[2]、Hung^[3]、Lam 和 Fredlund^[4]等分别基于摩尔-库伦破坏准则和不同的条柱间作用力假定推导了多种三维极限平衡安全系数求解方法, 取得较好的结果; 国内的研究人员也提出了各自的三维极限分析方法并应用于实际工程^[5-11]。最近, 谢谟文^[12]等利用 GIS 三维数据处理的优势, 集成 Hovland^[1]所提计算安全系数方法, 开发了三维极限平衡分析软件。综上所述, 众多研究者分别采取不同假定推导了不同的安全系数计算方法, 唯一不足之处就是三维临界滑动体的

收稿日期: 2006-12-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助 (No. 50639060)。

作者简介: 李亮, 男, 1977 年生, 博士, 讲师, 主要从事土坡稳定分析的相关研究。E-mail: liangli14@yahoo.com.cn

确定没有得到足够的重视。陈祖煜^[13,14]曾基于上限定理提出了三维边坡稳定分析方法,其间提出了采用模拟退火和随机数法来搜索最危险的滑动体,而且提出了构建三维滑动体的一般方法。其主要思路为:在假定的中性面上采用二维滑动面的构建方法形成一条滑动面,然后在垂直中性面方向上按假定的函数扩展形成滑动体,实施较为复杂。事实上,对于一般的工程应用,椭球体更易于被工程人员掌握,本文采用一般椭球体模拟不对称的滑动体,采用简化 JANBU 法计算对应的三维安全系数,综合利用粒子群算法及和声算法的优点,提出了快速粒子群算法搜索三维临界滑动体。对文献中已有的算例进行了分析对比,说明本文提出的方法是可行的。

2 三维 JANBU 法

作为二维简化 JANBU 法的扩展,新型三维 JANBU 法仅仅考虑力的平衡条件,不考虑力矩平衡条件。与二维条分法类似,首先要对边坡体离散化,所谓离散化即指将所涉及的整个边坡离散为垂直的条柱,典型条柱的受力情况如图 1 所示。其中上标 i 和 j 分别为条柱的位置,即第 i 行和第 j 列;下标 xz 和 yz 分别为平行于 $x-z$ 和 $y-z$ 平面; $W^{i,j}$ 为编号 (i,j) 的条柱重量; $P_z^{i,j}$ 为作用在条柱上的垂直荷载。相应地, $P_x^{i,j}, P_y^{i,j}$ 分别为作用在条柱上沿 x, y 方向的外荷载; $N^{i,j}$ 为底滑面的法向力; $S^{i,j}$ 为底滑面上的剪力,其在平行于 $y-z$ 平面上的分量记为 $S_{yz}^{i,j}$ 。类似地,在平行于 $x-z$ 平面上的分量记为 $S_{xz}^{i,j}$; $\alpha_{i,j}$ 为 $S^{i,j}$ 与 $S_{xz}^{i,j}$ 之间的夹角,该夹角在水平面 $x-y$ 上的投影记为 $\alpha_{i,j}^h$; $\theta_{i,j}$ 为 $S_{yz}^{i,j}$ 与 $S_{xz}^{i,j}$ 之间的夹角; $E_x^{i,j}, E_y^{i,j}$ 分别代表条柱侧面上沿坐标轴 x, y 方向的推力; $H_x^{i,j}, H_y^{i,j}$ 分别为在垂直于坐标轴 x, y 平面上的水平剪力; $X_x^{i,j}, X_y^{i,j}$ 分别为在垂直于坐标轴 x, y 平面上的垂直向剪力; $\{g_1^{i,j}, g_2^{i,j}, g_3^{i,j}\}$ 为底滑面 $N^{i,j}$ 的单位矢量; $\{f_1^{i,j}, f_2^{i,j}, f_3^{i,j}\}$ 为 $S^{i,j}$ 的单位矢量。黄景川^[15]详细推导了底滑面上 $N^{i,j}, S^{i,j}$ 的单位矢量,为叙述方便给出其最终结果,如式 (1) ~ (3) 所示。

$$\{g_1^{i,j}, g_2^{i,j}, g_3^{i,j}\} = \left\{ \frac{-\tan \alpha_{xz}^{i,j}}{J}, \frac{-\tan \alpha_{yz}^{i,j}}{J}, \frac{1}{J} \right\} \quad (1)$$

$$J = \sqrt{\tan^2 \alpha_{xz}^{i,j} + \tan^2 \alpha_{yz}^{i,j} + 1.0} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} f_1^{i,j} &= \frac{\sin(\theta_{i,j} - \alpha_{i,j}) \cos \alpha_{xz}^{i,j}}{\sin \theta_{i,j}}; f_2^{i,j} = \frac{\sin \alpha_{i,j} \cos \alpha_{yz}^{i,j}}{\sin \theta_{i,j}} \\ f_3^{i,j} &= \frac{\sin(\theta_{i,j} - \alpha_{i,j}) \sin \alpha_{xz}^{i,j} + \sin \alpha_{i,j} \sin \alpha_{yz}^{i,j}}{\sin \theta_{i,j}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

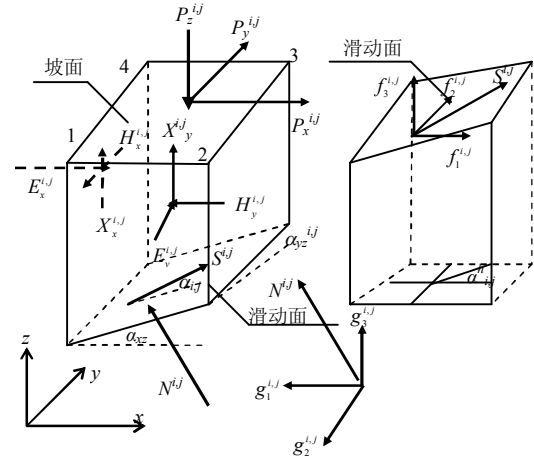


图 1 典型条柱上的力
Fig.1 Forces acting on typical column

此外,黄景川^[15]推导了 $\alpha_{i,j}^h$ 与 $\alpha_{i,j}$ 之间的关系:

$$\alpha_{i,j}^h = \tan^{-1} \left[\frac{\sin \alpha_{i,j} \cos \alpha_{yz}^{i,j}}{\sin(\theta_{i,j} - \alpha_{i,j}) \cos \alpha_{xz}^{i,j}} \right] \quad (4)$$

将式 (4) 稍作变换,可得到式 (5),本文简化 JANBU 法中假定各条柱底滑面的 $\alpha_{i,j}$ 在水平面投影后的 $\alpha_{i,j}^h$ 相等(记为 α^h),这样就可以用一个变量表达各个条柱底滑面的滑动方向,非常简便。

$$\alpha_{i,j} = \tan^{-1} \left[\frac{\sin \theta_{i,j}}{\cos \theta_{i,j} + \frac{\cos \alpha_{yz}^{i,j}}{\tan \alpha^h \cos \alpha_{xz}^{i,j}}} \right] \quad (5)$$

忽略条柱侧面上的 $H_x^{i,j}, H_y^{i,j}, X_x^{i,j}, X_y^{i,j}$, 根据摩尔-库仑准则,可得到下式:

$$S^{i,j} = \frac{c^{i,j} + (N^{i,j} - U^{i,j}) \tan \phi^{i,j}}{F_s} \quad (6)$$

式中: F_s 为整体安全系数; $c^{i,j}$ 为底滑面总的黏聚力; $U^{i,j}$ 为底滑面上的水压力; $\phi^{i,j}$ 为底滑面所处土层的摩擦角。根据 z 方向力的平衡条件得到下式:

$$N^{i,j} g_3^{i,j} + S^{i,j} f_3^{i,j} - (W^{i,j} + P_z^{i,j}) = 0 \quad (7)$$

由 x 方向的整体力平衡条件得到:

$$\begin{aligned} & -\sum \sum P_x^{i,j} + \sum \sum K_x W^{i,j} + \\ & \sum \sum N^{i,j} g_1^{i,j} - \sum \sum S^{i,j} f_1^{i,j} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

类似地, y 方向的整体力平衡条件得到:

$$\begin{aligned} & -\sum \sum P_y^{i,j} + \sum \sum K_y W^{i,j} + \\ & \sum \sum N^{i,j} g_2^{i,j} - \sum \sum S^{i,j} f_2^{i,j} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

联合式 (6) ~ (8), 可以得到 x 方向的安全系

数为

$$F_{sx} = \frac{\sum \sum A_x^{i,j} \left(f_1^{i,j} + \frac{f_3^{i,j} g_1^{i,j}}{g_3^{i,j}} \right)}{\sum \sum \left\{ \left[\frac{g_1^{i,j}}{g_3^{i,j}} (W^{i,j} + P_z^{i,j}) \right] - P_x^{i,j} + K_x W^{i,j} \right\}} \quad (10)$$

联合式 (6)、式 (7)、式 (9) 可以得到 y 方向的安全系数为

$$F_{sy} = \frac{\sum \sum A_y^{i,j} \left(f_2^{i,j} + \frac{f_3^{i,j} g_2^{i,j}}{g_3^{i,j}} \right)}{\sum \sum \left\{ \left[\frac{g_2^{i,j}}{g_3^{i,j}} (W^{i,j} + P_z^{i,j}) \right] - P_y^{i,j} + K_y W^{i,j} \right\}} \quad (11)$$

其中:

$$A_x^{i,j} = \frac{\left\{ c^{i,j} + \left[\frac{W^{i,j} + P_z^{i,j}}{g_3^{i,j}} - U_i \right] \tan \phi^{i,j} \right\}}{1 + \frac{f_3^{i,j} \tan \phi^{i,j}}{g_3^{i,j} F_{sx}}} \quad (12)$$

$$A_y^{i,j} = \frac{\left\{ c^{i,j} + \left[\frac{W^{i,j} + P_z^{i,j}}{g_3^{i,j}} - U_i \right] \tan \phi^{i,j} \right\}}{1 + \frac{f_3^{i,j} \tan \phi^{i,j}}{g_3^{i,j} F_{sy}}} \quad (13)$$

式中: K_x , K_y 分别为 x , y 向的地震系数。三维整体安全系数的具体求解步骤如下:

(1) 在合理范围内假定一个 α^h ;

(2) 分别利用式 (10)、式 (11) 迭代求解 F_{sx} 及 F_{sy} ;

(3) 若求得的 $F_{sx} = F_{sy}$, 计算停止, 安全系数 $F_s = F_{sx} = F_{sy}$; 否则, 重新假定 α^h , 转第 (2) 步继续迭代。

3 滑动体的椭球描述

在将边坡体离散为 $n \times m$ 个条柱后(沿 x 方向称之为行, 沿 y 方向称之为列, x , y 方向等间距离散, 其间距为条柱尺寸), 对给定的滑动体, 需要逐一检查每一个条柱顶面是否在滑动体内。若是, 则利用滑动体信息确定该条柱的底滑面; 若不是, 则该条柱不参与安全系数的计算。判断某条柱是否在滑动体内有两种途径, 一是 $Boundary = 0$, 即条柱顶面 4 个顶点中只要有一个不在滑动体内, 该条柱就不参与安全系数的计算; 二是判断条柱顶面的中心点是否在滑动体内。若是, 则参与安全系数计算; 否则, 不参与计算, 即 $Boundary = 1$ 。当条柱尺寸过大时, $Boundary = 0$, 能引起较大的误差, 建议条柱尺寸取小一些。图 2 中, (x_d, y_d, z_d) 和 (x_u, y_u, z_u) 是滑动体与坡体表面的两交点, x_o, y_o, z_o 是椭球体

的球心, 用户可考虑绕 x, y, z 3 个轴的转动 λ, χ, ζ , 利用坐标变换得到最终的椭球方程。

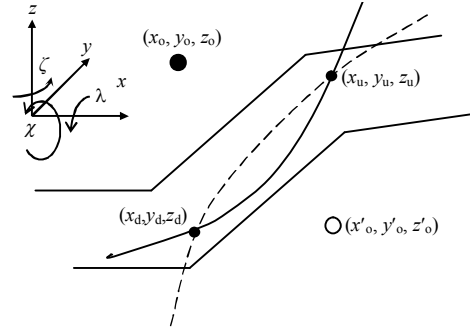


图2 滑动体模拟示意图

Fig.2 Schematic view of sliding body

应用椭球体模拟滑动体, 共需 11 个变量, 即 $x_u, y_u, x_d, y_d, x_o, a, b, c, \zeta, \lambda, \chi$ 。需注意以下约束条件:

(1) 根据 $(x_u, y_u, z_u), (x_d, y_d, z_d)$ 两点求解椭球球心时会得到如图 2 所示的两个球心 $(x_o, y_o, z_o), (x'_o, y'_o, z'_o)$, 根据坡体选择 (x_o, y_o, z_o) 作为可行的椭球球心。

(2) 如图 3(a)所示, 坡体表面(某条柱顶面沿 x 轴方向)与椭球体表面相交点, 位于椭球体与 $y = \text{Cons.}$ (Cons.为某定值) 平面相交所得椭圆的上半段, 这种情况应避免, 可行条件是交点位于下半段。

(3) 同约束条件 (2), 图 3(b)所示同样是不可行的, 坡体表面(某条柱顶面沿 y 轴方向)与椭球体表面相交点, 应位于椭球体与 $x = \text{Cons.}$ 平面相交所得椭圆的下半段。

(4) 如图 3(c)所示, 某一行(列)条柱中, 参与计算的条柱可能存在不连续分布的情况。此时, 应该沿滑动方向取连续的那些条柱参与计算, 其余不参与计算。

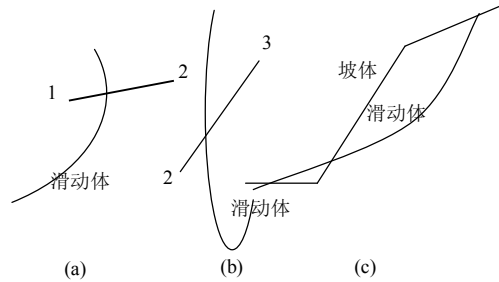


图3 几种约束条件示意图

Fig.3 Schematic view of several constraints

4 改进粒子群算法

粒子群优化算法 (PSO) 最早由 Kennedy 和

Eberhart 于 1995 年提出^[16], 其基本概念源于对鸟群捕食行为的研究。PSO 中, 每个优化问题的潜在解都是搜索空间中的一只鸟, 称之为“粒子”。所有的粒子都有一个由优化问题决定的适应值及一个速度来决定它飞行的方向和距离。在一个 D 维的目标搜索空间中, 由 M 个粒子组成一个群落, 第 i 个粒子的位置为一个 D 维的向量 $L_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$, $i = 1, 2, \dots, M$, 本文中 $D = 11$, 即 L_i 中各分量值与描述椭球的 11 个变量值相对应。根据优化问题的目标函数就可确定该粒子的适应值大小, 在此即椭球滑动体的三维极限平衡安全系数, 可由上节介绍的迭代步骤求得。第 i 个粒子的“飞翔”速度也是一个 D 维向量, 记为 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$, 第 i 个粒子的 $pbest$ 记为 $Q_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$, $i = 1, \dots, M$ 。全局极值 $gbest$ 记为 $Q_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$, 其相应的目标函数值为 f_g 。在当前迭代步 k , 采用下列公式对粒子进行操作以得到下一步的飞行速度和位置。

$$v_{ij}^{k+1} = wv_{ij}^k + c_1r_1(p_{ij}^k - x_{ij}^k) + c_2r_2(p_{gj}^k - x_{ij}^k) \quad (14)$$

$$x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \quad (15)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, M$; $j = 1, 2, \dots, D$ 。学习因子 c_1 和 c_2 为非负常数; r_1 和 r_2 为介于 $[0, 1]$ 之间的随机数; w 为惯性因子, 它对算法的全局收敛有重要影响, 一般较大值有利于跳出局部极小点; 反之, 则有利于算法收敛。

众所周知, 惯性因子对计算结果影响很大, 目前也没有较好地确定 w 的方法。究其原因, 笔者以为是不适当的 w 引起大量的粒子超越变量本身合理的取值范围所导致, 在这种情况下, 粒子群算法一般会将变量的边界值赋给那些越界粒子的相应分量, 这种处理方式有待改进; 其次, 粒子群算法在每次迭代步内会更新每个粒子的位置, 并计算其目标函数, 对于优化变量个数较少或者目标函数计算简单的优化问题而言是可行的, 但对于目标函数计算耗时多或者优化变量个数较多(多于 50 个)的问题, 每次迭代步中逐一更新每个粒子的位置, 并对其评估是一件耗时较大的工作, 本文拟在上述两个方面进行改进, 以适应三维边坡稳定分析的需要。本文中, 当粒子飞行越界时, 采用 Geem^[17,18]等人提出的和声策略处理, 该策略将乐器 i ($i = 1, 2, \dots, D$) 类比于优化问题中的第 i 个设计变量(如模拟椭球体的变量), 各乐器声调的和声(譬如给定变量值的椭球) H_j ($j = 1, 2, \dots, M$) 相当于优化问题的第 j 个解向量, 其中 $H_j = (hm_{j1}, hm_{j2}, \dots, hm_{jD})$, 评价类比于目标函数(譬如: 三维极限平

衡安全系数)。该策略利用和声记忆库 HM (Harmony Memory) 内的 M 个和声与 2 个参数 HR , PR 搜索新解 $H_{new} = (hm_{new,1}, \dots, hm_{new,D})$, 图 4 给出了和声策略产生每个分量的步骤。

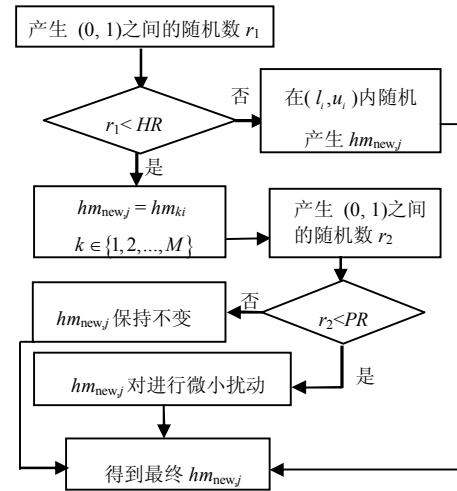


图 4 和声算法产生新解分量步骤

Fig.4 steps for generating element of new solution by harmony search algorithm

改进粒子群算法的迭代步骤如下:

(1) 初始化参数 $M, c_1, c_2, w, N_1, N_2, N_3$, 迭代次数计数器 $counter = 0$, 目前最优解、最优值 Q_{opt}, f_{opt} 。 $f_{opt} = 10\ 000.0$, $N_3 = N_1$ 。

(2) 随机给定 $L_i, V_i, i = 1, 2, \dots, M$, 并计算各个粒子的目标函数值, 更新 Q_g, Q_i , 所谓更新即判断目前群体最优值是否优于已有群体最优值。若是, 则替换已有群体最优值; 否则, 保持已有群体最优值不变, 对个体极值也有类似概念。

(3) 随机选择 N_z 个粒子, 利用式 (14)、式 (15) 更新它们的速度、位置。

(4) 对上述所得位置进行检查, 找出粒子越界的各个分量, 利用和声算法产生新解分量的策略(如图 6 所示)重新产生一个数值, 并赋给粒子越界的各个分量。

(5) 计算 N_z 个粒子的目标函数值, 更新 Q_g, Q_i , $counter = counter + 1$ 。

(6) 如果 $counter = N_3$, 则判断 $|f_{opt} - f_g| \leq \varepsilon$ 。若满足, 则停止; 若 $|f_{opt} - f_g| > \varepsilon$, 则 $f_{opt} = f_g$, $Q_{opt} = Q_g$, $N_3 = N_3 + N_2$, 转步骤 (3); 若 $counter \neq N_3$, 则转步骤 (3)。其中 N_1, N_2, N_3 用于控制算法的收敛判断, 即首先允许算法迭代 N_1 次, 记住此时的 Q_g , 再迭代 N_2 次。若 Q_g 没有改进, 则算法停止; 否则进行下一个 N_2 次迭代, 如此反复,

直至算法停止。在求解以下 2 个算例时, $c_1 = c_2 = 2.0, w = 0.5, N_1 = 100, N_2 = 20, HR = 0.98, PR = 0.1$ 。

5 算 例

5.1 算例 1

考虑坡角 η 为 45° 的均质土坡, 土坡材料的力学参数为: $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3, c = 0.0 \text{ kPa}, \varphi = 45^\circ$, 对于无凝聚力的均质土坡, 其理论解等于 $\tan \phi / \tan \eta$, 取边坡长度 (沿 y 轴方向)、宽度 (沿 x 轴方向) 均为 20 m , 利用本文提出的方法进行了计算。11 个优化设计变量取值的上下限设置如下: $2.0, 19.0; 11.0, 20.0; 2.0, 19.0; 1.0, 9.0; 2.0, 19.0; 1.0, 14.0; 2.0, 12.0; 1.0, 10.0; 0.0, 180.0; 00.0, 180.0; 0.0, 0.0$ 。条柱尺寸分别取 $0.1, 0.2, 0.4, 0.5 \text{ m}$, 采用 2 种判断方法确定参与计算的条柱个数, 计算得到的结果列于表 1 中。由表可见, 本文计算结果与理论解 1.0 基本一致, $Boundary = 0$ 时, 误差稍大, 图 5 给出了条柱尺寸为 0.1 m , $Boundary = 0$ 时所求结果对应滑动体的等轴侧视图, 图 6 为其相应的右视图。由图可见, 滑动方式是沿斜坡方向的表层滑动。

表 1 土坡 1 不同条柱尺寸下计算结果

Table 1 Summary of results under different column sizes

Boundary 值	条柱尺寸/m			
	0.1	0.2	0.4	0.5
0	1.034	1.015	0.986	0.979
1	1.015	1.012	1.005	0.996

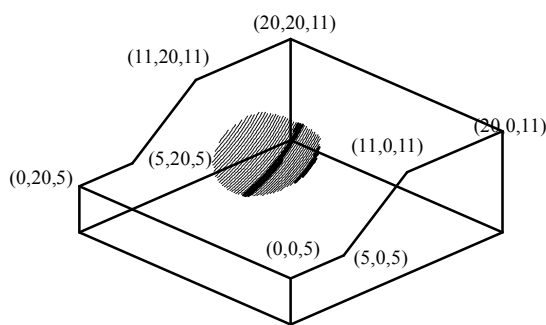


图 5 临界滑动体等轴侧视图

Fig.5 Normal axonometric view of sliding body

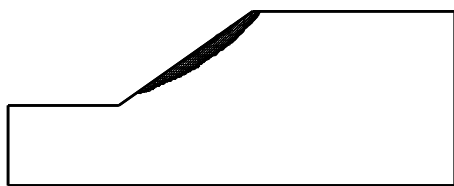


图 6 临界滑动体右视图

Fig.6 Right view of sliding body

由于算例 1 中仅考虑了自重荷载, 求得的

$\alpha^h = 0$, 即滑动沿 $-x$ 方向。假设固定 $K_x = 0.3, K_y$ 由 0.0 增长到 0.5 , 计算所得的安全系数与 α^h 示于表 2 中; 类似地, 固定 $K_y = 0.3, K_x$ 由 0.0 增长到 0.5 , 计算所得的安全系数与 α^h 示于表 3 中。

表 2 $K_x = 0.3$ 时, F_s, α^h 随 K_y 的变化

Table 2 Variation of F_s, α^h with K_y under $K_x = 0.3$

K_y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
F_s	0.564	0.535	0.525	0.510	0.493	0.472
$\alpha^h / (^\circ)$	0.00	8.74	17.10	24.78	31.61	37.57

表 3 $K_y = 0.3$ 时, F_s, α^h 随 K_x 的变化

Table 3 Variation of F_s, α^h with K_x under $K_y = 0.3$

K_x	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
F_s	0.92	0.762	0.627	0.510	0.409	0.321
$\alpha^h / (^\circ)$	30.96	28.57	26.57	24.78	23.21	21.83

从表 2 可以看出, K_x 固定为 0.3 下, 随着 K_y 由 0 逐渐增加到 0.5 , 安全系数从 0.564 减小到 0.472 , 滑动角度从 0 增加到 37.57° 。而由表 3 可见, 当 K_y 固定为 0.3 时, 随着 K_x 由 0 逐渐增加到 0.5 , 安全系数从 0.92 减小到 0.321 , 滑动角从 30.96° 减小到 21.83° 。这证明了本文方法的正确性。

5.2 算例 2

Arai K^[19]利用数学规划法和简化 JANBU 法计算过一个失稳的非均质土坡, 本文将其拓展到三维来验证本文方法的有效性。表 4 给出了其各层材料的计算参数。

表 4 土坡 2 土层参数

Table 4 parameters of example slope 2

土层	$\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^3$	c / kPa	$\varphi / (^\circ)$
1	18.82	29.4	12.0
2	18.82	9.8	5.0
3	18.82	294.0	40.0

分别取长度为 $30, 40, 60, 80, 120 \text{ m}$, 坡体宽度固定为 96 m , 取条柱尺寸等于 0.5 m , $boundary = 0$, 采用本文改进 PSO 和基本的 PSO 来搜索临界滑动体, 比较结果示于图 7。随着坡体长宽比的不断增大, 坡体的三维效应随之减弱, 一般长宽比大于 4.0 时, 即可简化为二维问题来求解。图 7 说明, 两种 PSO 均能模拟这种趋势, 随着长宽比的增大, 安全系数不断减小, 最后趋于平缓。但在相同长宽比下, 基本 PSO 算法搜索到的最小安全系数均比本文 PSO 算法大, 基本 PSO 由于不能处理好越界粒子的位置, 而易陷入局部最小值。图 8、图 9 分别示出了坡体长度等于 60 m 时所求得的临界滑动体

的等轴侧图和右视图, 分别取 $y = 10 \text{ m}$, $y = 20 \text{ m}$, $y = 30 \text{ m}$ 三个剖面, 所截得的滑动面与 Arai 提供的结果进行了比较, 如图 10 所示。比较可见, $y = 30 \text{ m}$ 剖面上的滑动面与 Arai 结果基本上一致。

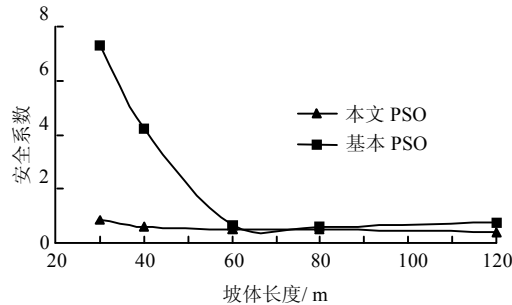


图 7 安全系数随坡体长度的变化

Fig.7 Variation of factor of safety with length of slope

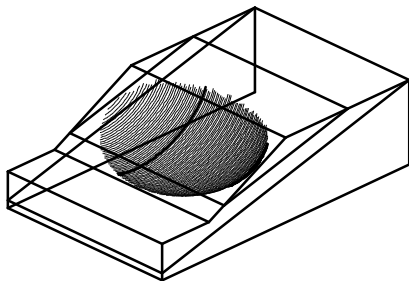


图 8 临界滑动体的等轴测图

Fig.8 Normal axonometric view of sliding body

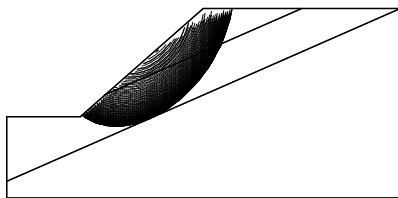


图 9 临界滑动体的右视图

Fig.9 Right view of sliding body

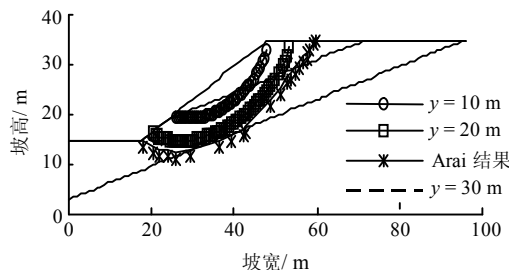


图 10 不同剖面上的滑动面比较

Fig.10 Comparison of sliding surfaces under different cross sections

6 结 论

基于二维简化 JANBU 法假定, 提出了一种简化的三维 JANBU 法以求解滑动体的安全系数, 该

法的特点是假定各个条柱底面的滑动方向在水平面上的投影相等, 借此可用一个变量来表达各个底滑面的滑动方向, 通过力的平衡来求解安全系数; 利用一般的椭球滑动体来模拟常见的滑动体, 通过分析由于不当 w 值引起的越界粒子而导致算法陷入局部最优, 借鉴和声算法产生新解的方式来处理越界粒子的位置, 提出了一种改进的粒子群算法, 利用均质土坡和复杂土坡来验证算法的有效性, 可以作为求解三维土坡稳定性的一种尝试。

参 考 文 献

- [1] HOVLAND H J. Three-dimensional slope stability analysis method[J]. *Journal of Geotechnic Engineering Division, ASCE*, 1977, 103: 971—986.
- [2] CHEN R H, CHAMEAU J L. Three dimensional limit equilibrium analysis for slopes [J]. *Geotechnique*, 1982, 32(1): 31—40.
- [3] HUNGR O. An extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis of three-dimensions [J]. *Geotechnique*, 1987, 37(1): 113—117.
- [4] LAM L, FREDLUND D G. A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, 30: 905—919.
- [5] 陈祖煜, 弥宏亮, 汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡法[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(5): 525—529.
CHEN Zu-yu, MI Hong-liang, WANG Xiao-gang. A three-dimensional limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(5): 525—529.
- [6] 弥宏亮, 陈祖煜, 张发明, 等. 边坡稳定三维极限分析方法及工程应用[J]. *岩土力学*, 2002, 23(5): 649—653.
MI Hong-liang, CHEN Zu-yu, ZHANG Fa-ming, et al. The 3D limit method for slope stability analysis and applications[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(5): 649—653.
- [7] 张均锋, 丁桦. 边坡稳定性的三维极限平衡分析方法及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(3): 365—370.
ZHANG Jun-feng, DING Hua. Generalized 3D limit equilibrium method for slope stability analysis and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(3): 365—370.
- [8] 张均锋. 三维简化 JANBU 法分析边坡稳定性的扩展[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(17): 2 876—2 881.
ZHANG Jun-feng. Extension of three-dimensional

- simplified Janbu's method for slope stability analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(17): 2 876—2 881.
- [9] 陈胜宏, 万娜. 边坡稳定分析的三维剩余推力法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(3): 69—73.
CHEN Sheng-hong, WAN Na. Study on three-dimensional residual thrust method for slope stability analysis[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2005, 38(3): 69—73.
- [10] 冯树仁, 丰定祥, 葛修润, 等. 边坡稳定性的三维极限平衡分析方法及应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 657—661.
FENG Shu-ren, FENG Ding-xiang, GE Xiu-run, et al. 3D limit equilibrium method for slope stability and its application[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(6): 657—661.
- [11] 李同录, 王艳霞, 邓宏科. 一种改进的三维边坡稳定性分析方法[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 611—614.
LI Tong-lu, WANG Yan-xia, DENG Hong-ke. An improved method for three-dimensional slope stability analysis [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(5): 611—614.
- [12] 谢谟文, 蔡美峰, 江崎哲郎. 基于 GIS 边坡稳定三维极限平衡方法的开发及应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 117—122.
XIE Mo-wen, CAI Mei-feng, ESAKI TETSURO. GIS-based three-dimensional slope stability limit equilibrium method and application [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 117—122.
- [13] CHEN ZUYU, WANG XIAOGANG, HABERFIELD C, et al. A three-dimensional slope stability analysis method using the upper bound theorem——part I :theory and methods[J].**International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2001, 38(3): 369—378.
- [14] CHEN ZUYU, WANG JIAN, WANG YUJIE, et al. A three——dimensional slope stability analysis method using upper bound theorem-part II :numerical approaches,applications and extensions[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2001, 38(3): 379—397.
- [15] HUANG C C, TSAI C C. New method for 3D and asymmetrical slope stability analysis [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2000, 126(10): 917—927.
- [16] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]// International Conference on Neural Networks. New Jersey:IEEE Service Center, Piscataway, 1995: 1 942—1 948.
- [17] GEEM Z W. Optimal cost design of water distribution networks using harmony search[J].**Engineering Optimization**, 2006 38: 259—280.
- [18] GEEM Z W, KIM J H, LOGANATHAN G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search [J]. **Simulation**, 2001, 76: 60—68.
- [19] ARAI K, TAGYO K. Determination of non-circular slip surface giving the minimum factor of safety in slope stability analysis [J]. **Soils and Foundations**, 1985, 25(1): 43—51.

书讯

地基处理技术与工程实例

建筑科学类, 赵锡宏主编, 16 开, 1 060 千字, 720 页, 平装, 估价: 99.00 元, 2008 年 3 月出版, ISBN: 978-7-03-021183-5

本书根据我国行业标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-2002)系统地介绍了我国应用的各种地基处理方法。全书共 16 章, 内容包括: 总论, 换填垫层法, 软土地基预压加固, 强夯法和强夯置换法, 振冲法, 砂石桩法, 水泥粉煤灰碎石桩法, 夯实水泥土桩法, 水泥土搅拌法, 高压喷射注浆法, 石灰桩法, 灰土挤密桩法和土挤密桩法, 柱锤冲扩桩法, 注浆加固地基, 树根桩基础托换和热桩法冻土地基处理, 深基坑支护工程实例。读者对象: 土木工程施工人员。

(摘自 新华书目报·科技新书目)