

文章编号:1001-1986(2005)05-0058-03

网格法全局搜索土坡临界滑动面

朱益军^{1,2}, 朱向荣¹ (1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027;
2. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘要: 基于坡面网格提出了一种全局搜索土坡临界滑动面的几何优化方法。该方法较好地利用了几何优化的长处, 原理简单, 若辅以一定的经验分析, 它将能较为高效地得到土坡临界滑动面。两个计算实例表明, 该方法计算搜索结果具有较好的全局性, 并且能较好适用于一些复杂的工程土坡。

关键词: 土坡; 危险滑动面; 几何优化; 枚举法; 二分法

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A

Globally finding critical surface on soil slope by grids method

ZHU Yi-jun^{1, 2}, ZHU Xiang-rong¹

(1. Geotechnical Department of Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Provincial Institute of Communication Plan, Design and Research, Hangzhou 310006, China)

Abstract: Based on soil slope face grids, a new method is put forward to globally search critical slip face on slope. It has preferentially utilized the optimization advantages of geometrical model. Furthermore, its theory is easily intelligible. If assisted by experience analysis on some degree, it will more efficiently get the critical slip surface on soil slope. Two examples are given, their results are both of good integrity. It is applicable to some complex soil slopes.

Key word: soil slope; critical surface; geometrical optimization; enumerative method; two-division method

1 引言

土坡的危险圆弧滑动面搜索是一个非常古老但又富有活力的研究课题。长期以来, 很多学者都在该领域开展了卓有成效的工作, 并形成了变量解析法^[1~3]、几何优化法^[4]和数值优化法^[5~8]等3类。随着非线性科学理论、非连续介质理论、随机可靠性理论以及计算机技术的发展, 新的科学和技术为边坡稳定性问题的研究提供了新的途径和方法, 并呈现出了多学科的紧密融合与相互渗透。以有限元为代

表的数值分析方法为临界滑动面的安全系数分析提供了应力场; 以Monte Carlo法为代表的随机理论和以遗传算法为代表的、基于非线性的人工智能技术的引入则为非规则滑动面全局搜索提供了更为高效的算法, 临界滑动面的搜索技术得到了很大的提高^[9, 10]。因此, 能否确保计算方法的优化效率和样本的充分性是一种方法实现其工程应用效果优劣与否的技术关键。本文的目的在于提供一种半经验的、基于坡面网格的几何优化方法。

收稿日期: 2004-12-28

作者简介: 朱益军(1977—), 男, 浙江义乌人, 工程师, 浙江大学岩土工程研究所博士生, 主要从事路基防护设计、边坡工程的理论与实践研究。

4 结论

综上所述, 根据环境同位素组成和水文地质条件, 可将关中地下热水划分为3大类(图3):

第1类: 埋藏于渭河以北碳酸盐岩溶热储层中, 由现代降水补给的混合型地下热水, 如渭北西部地下热水。

第2类: 赋存于临潼—长安断裂带内和渭北碳酸盐岩溶热储层中, 由现代降水和古代降水补给的混合型地下热水, 如临潼、渭北东部热水。

第3类: 秦岭山前断裂带和临潼—长安断裂带内, 主要由古代降水补给的径流型地下热

水, 该类地下热水包括东西汤峪、西安、长安、户县热水。

参考文献

- [1] 陶书华. 西安附近地下热水的形成[J]. 水文地质与工程地质, 1996, 40(3): 6—11.
- [2] 马致远. 平凉隐伏岩溶水环境同位素研究[J]. 长安大学学报, 2003, 25(4): 60—65.
- [3] 马致远. 环境同位素地下水文学[M]. 西安: 陕西科技出版社, 2004.
- [4] Fournier, R O Rowe jj. Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot spring and wet—stream well. Am. [J]. Sci., 1996, 264: 685—697.
- [5] 徐步台, 张秋芳等. 浙江武义盆地地热水同位素地球化学研究[J]. 地球学报, 1999, 20(4): 357—361.

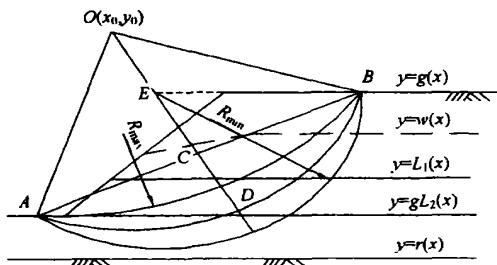


图 1 土坡几何轮廓方程

Fig. 1 Profile equation of soil slope

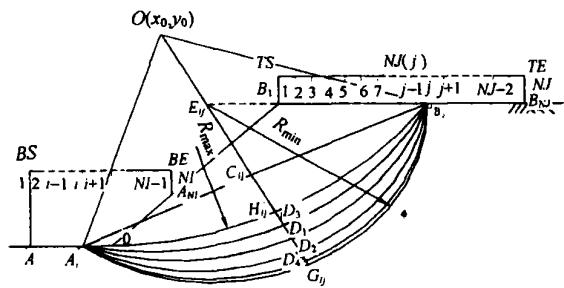


图 2 滑动面几何优化模型

Fig. 2 Geometry optimization model of critical surface

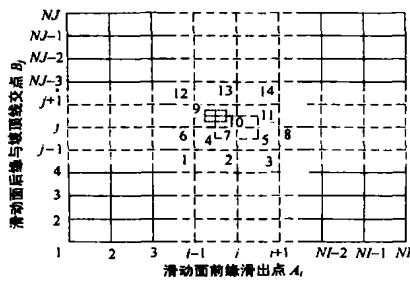


图 3 网格法搜索全局最优滑动面

Fig. 3 Finding the global critical surface based on grids
 $1 - K^{(0)}_{A_{i-1}B_{j-1}}; 2 - K^{(0)}_{A_iB_{j-1}}; 3 - K^{(0)}_{A_{i+1}B_{j-1}};$
 $4 - K^{(1)}_{A_{i-1}B_{j-1}}; 5 - K^{(1)}_{A_{i-1}B_{j+1}}; 6 - K^{(0)}_{A_{i-1}B_j};$
 $7 - K^{(0)}_{A_iB_j}; 8 - K^{(0)}_{A_{i+1}B_j}; 9 - K^{(2)}_{A_{i+1}B_{j+1}};$
 $10 - K^{(2)}_{A_{i+1}B_{j-1}}; 11 - K^{(1)}_{A_{i+1}B_{j+1}}; 12 - K^{(0)}_{A_{i-1}B_{j+1}};$
 $13 - K^{(0)}_{A_iB_{j+1}}; 14 - K^{(0)}_{A_{i+1}B_{j+1}};$

2 网格法优化搜索滑动面模型

如图 1, $y = g(x)$ 表示土坡的几何轮廓方程; $y = w(x)$ 表示坡体内部的水位线; $y = L_1(x)$ 、 $y = L_2(x)$ 表示不同土层的分界面, $y = r(x)$ 表示土坡的深层边界, 一般指硬土层或基岩顶面。为建立边坡的几何优化模型, 每个试算圆弧滑动面均用 3 点来表示, 即圆弧与边坡轮廓线的两个交点 $A(x_A, y_A)$ 、 $B(x_B, y_B)$ 以及 AB 垂直平分线上的土坡内点 $D(x_D, y_D)$, 那么, 该试算圆弧的基本方程可表示为: $S = S(x_A, x_B, x_D)$, 目标函数为 $K = \text{Min } F(S)$ 。

2.1 搜索共弦的局部优化滑动面

为了在坡面上取得充分的采样, 本文基于边坡的具体情况, 在坡面上设置两组特征点, 一组代表试算圆弧前缘的潜在滑出点 A_i ($1 \leq i \leq NI$), 另一组表示试算圆弧的后缘与坡顶交点 B_j ($1 \leq j \leq NJ$), 于是, 对任意的弦 A_iB_j , 边坡总是存在一系列的圆弧作为试算的随机样本, 从中可取得相对于弦 A_iB_j 最优滑动面(图 2)。

以图 2 为例, 工程上一般认为, 圆弧滑动面在 B_j 点与坡顶过 B_j 点的竖直线相切时, E_{ij} ($x_{E_{ij}}, y_{E_{ij}}$) 为土坡内对应弦 A_iB_j 之最小半径圆弧圆心。 A_iB_j 确定情况下, E_{ij} 和 G_{ij} 即可确定, G_{ij} 为对应弦 A_iB_j 的最小半径圆弧与 A_iB_j 的垂直平分线之交点, C_{ij} ($x_{C_{ij}}, y_{C_{ij}}$) 为弦 A_iB_j 的中点。然后再搜索确定对应弦 A_iB_j 圆弧的最大半径, H_{ij} 为对应弦 A_iB_j 的最大半径圆弧与 A_iB_j 的垂直平分线之交点, 半径无穷大时 C_{ij} 和 H_{ij} 重合。而 D_n (x_{D_n}, y_{D_n}) 为线段 $H_{ij}G_{ij}$ 上的随机点。本文采用半步长跳跃搜索法, 优化从 $H_{ij}G_{ij}$ 中点 $D1$ 开始, 接着试算 $D1$ 与 G_{ij} 的中点 $D2$, 如果 $F(S_{A_iB_jD2}) \leq F(S_{A_iB_jD1})$, 那么, 以半步长继续往 G_{ij} 方向搜索, 试算 $D2$ 与 G_{ij} 的中点 $D3$; 否则 $D3$ 取 H_{ij} 与 $D1$ 的中点。搜索依此进行, 直到 $F(S_{A_iB_jDn})$ 在 Dn 点取到一个满意的收敛值。于是 $F(S_{A_iB_jDn})$ 对应的圆弧就是过弦 A_iB_j 的最优圆弧, 记为 $K_{A_iB_j} = \text{Min } F(S_{A_iB_jDn})$ 。因此, 针对坡面的特征网格, 这样的初级优化圆弧有 $NI \times NJ$ 个, 其安全系数表达式为:

$$K_{A_iB_j} = \text{Min } F(S_{A_iB_jD_n}) \min F(S(x_{A_i}, x_{B_j}, x_{D_n})), \quad (1)$$

其中 $1 \leq i \leq NI, 1 \leq j \leq NJ, n$ 为 $F(S_{A_iB_jD_n})$ 在 Dn 点取到一个满意的收敛值时的 n 值。

2.2 搜索全局最优滑动面

为搜索全局最优滑动面, 对(1)式所得的搜索结果可以用网格来表示(图 3), 图中网格的每个结点均表示弦 A_iB_j 所对应的局部最优 $K_{A_iB_j}$ 值, 而结点坐标可以转化为其对应滑动面在坡面出露的位置。由此, 土坡滑动面搜索就成了在网格上寻找 $\text{Min}(K_{A_iB_j})$ 的问题。而解决该问题的方法很多, 如收敛域局部细分网格的枚举法、黄金分割法、Powell 法、二分法和模式搜索法等。这里介绍程序中的方法如下: 首先, 比较这些结点 $K_{A_iB_j}$ 值, 对满足条件(10)或(11)式的所有结点记为 $K_{A_iB_j}^{(0)}$, 记录其相应的结点坡面坐标(或控制点坐标), 然后针对这几个 $K_{A_iB_j}^{(0)}$

表 1 计算成果对比列表
Table 1 Comparison of calculation results

搜索方法	滑动面位置		计算方法	安全系数	计算时间/s
	圆心	半径/m			
张天宝法	(59.210, 134.715)	152.125	瑞典圆弧法	1.277	(解析解)
REAME 法	(57.368, 139.093)	152.582	BISHOP 法	1.358	≤ 1
理正程序	(61.000, 119.000)	138.253	BISHOP 法	1.364	二次迭代, ≥ 60
* 本文方法	(57.570, 144.124)	156.945	BISHOP 法	1.351	≤ 1

注: 表中 * 为分条条块宽度 1 m, $NI=10$, $NJ=10$ 时计算结果。

位置分别采用图 4 的方法进一步细分网格, 计算各结点的 $K_{A_i B_j}^{(1)}$ 值, 由(12)式取得 $K_{S_{A_i B_j}}^{(1)}$, 记录相应结点的坡面坐标(或控制点坐标), 并再次细分网格, 由(12)式取得 $K_{S_{A_i B_j}}^{(2)}$, 依此类推, 直到 $|\Delta| \leq \epsilon$ (ϵ 为人为设定的容许值), 从而可以得到一系列局部最优的 $K_{S_{A_i B_j}}^{(n)}$ 值。最后从这些局部最优值中, 可以得到边坡全局最优的临界滑裂面。

$$\Delta = K_{A_i B_j}^{(n)} - \min\{K_{A_{i-1} B_{j-1}}^{(n)}, K_{A_i B_{j+1}}^{(n)}, K_{A_{i+1} B_{j-1}}^{(n)}, K_{A_{i+1} B_{j+1}}^{(n)}\} \leq 0, \quad (10)$$

$$\Delta = K_{A_i B_j}^{(n)} - \min\{K_{A_i B_{j-1}}^{(n)}, K_{A_i B_{j+1}}^{(n)}, K_{A_{i+1} B_j}^{(n)}, K_{A_{i-1} B_j}^{(n)}\} \leq 0, \quad (11)$$

$$K_{S_{A_i B_j}}^{(n)} = \min\{K_{A_i B_{j-1}}^{(n)}, K_{A_i B_j}^{(n)}, K_{A_i B_{j+1}}^{(n)}, K_{A_{i-1} B_{j-1}}^{(n)}, K_{A_{i-1} B_j}^{(n)}, K_{A_{i-1} B_{j+1}}^{(n)}, K_{A_{i+1} B_{j-1}}^{(n)}, K_{A_{i+1} B_j}^{(n)}, K_{A_{i+1} B_{j+1}}^{(n)}\}. \quad (12)$$

在(10)、(11)、(12)式中, 上标 (n) 表示迭代次数, 初值为满足条件(10)或(11)的 $K_{A_i B_j}^{(0)}$ 值, 式中若 $i, j \leq 0$, $K_{A_i B_j}^{(n)} = 100$ 。若收敛域落在边界上, 则应重新确定 A_i, B_j 的坡面布置范围。

3 计算实例

实例 1: 如图 4, 引用文献[1]第 20 页算例, 边坡为简单均质土坡, 土坡坡比为 1:3.25, $\gamma=19.62 \text{ kN/m}^3$, $C=58.86 \text{ kPa}$, $\phi=11.3^\circ$ 。通过本文上述方法进行搜索(坡脚为特征点之一), 得到计算结果见表 1, 滑动面搜索优化结果见图 4、5。

从实例 1 可以得出以下结论: a. 对于简单的均质边坡, 直接采用坡面网格搜索和网格法几何优化搜索都能较好地实现优化效果; b. 由于本例最优滑面滑出点临近坡脚, 而坡脚又是必选的特征点之一。因此, 网格法几何优化搜索在特征点数目较小的情况下也很快就找到了满足要求的优化滑动面。c. $NI \geq 10$ 时, 两种方法的结果趋于一致, 而网格法几何优化搜索在本例中具有很好的收敛性, 计算结果也很稳定。d. 此外, 从表 1 和图 3 可以看出, 在最优滑动面的附近, 邻近滑动面的安全系数非常接

表 2 数值优化结果列表

Table 2 Optimization results of surfaces

圆弧编号	圆心位置 (x_0, y_0)	半径 R/m	安全系数 K
S1	(25.401, 28.802)	22.664	1.637
S2	(5.000, 71.360)	71.360	2.063
S3	(19.159, 33.801)	31.995	2.017
S4	(13.002, 63.496)	63.446	1.861
S5	(24.998, 34.005)	34.005	1.644

注: 本算例力学模型采用 BISHOP 法, 土条宽度 1 m。

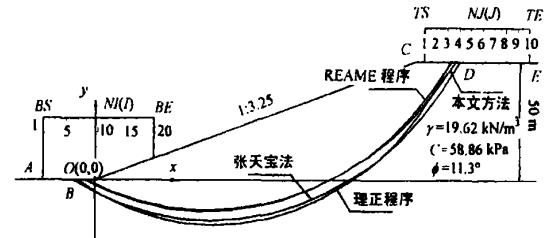


图 4 滑动面优化模型及其搜索结果

Fig. 4 Optimization model of critical surface and its results

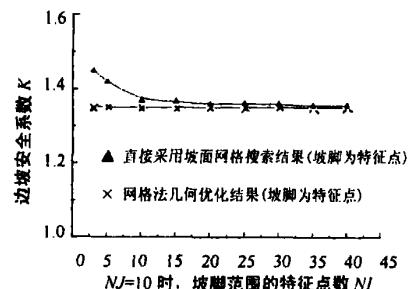


图 5 基于坡面网格数值优化收敛性

Fig. 5 Convergence property of optimization results

近, 危险滑面实质上是成簇分布出现的。

实例 2: 某边坡为非均质土坡, 土坡断面形式及其土层参数见图 6。为了搜索该边坡全局最优滑动面, 本文通过收敛域局部细分网格的枚举法得到了 5 个局部优化滑动面, 其中 S1 为最危险滑动面, $K_1=1.637$; S5 次之, $K_5=1.644$, 具体分析结果详见表 2。本例安全系数计算力学模型采用 BISHOP 法, 滑

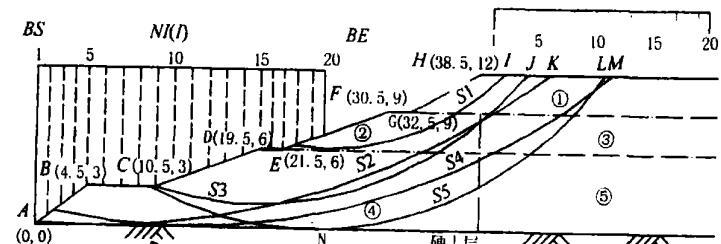


图 6 土坡滑动面优化模型及其搜索结果

Fig. 6 Optimization model of critical surface and its results

- ① — $\gamma=17.64 \text{ kN/m}^3$, $\varphi=23^\circ$, $c=0 \text{ kPa}$;
- ② — $\gamma=16.46 \text{ kN/m}^3$, $\varphi=23^\circ$, $c=2.45 \text{ kPa}$;
- ③ — $\gamma=16.46 \text{ kN/m}^3$, $\varphi=23^\circ$, $c=0 \text{ kPa}$;
- ④ — $\gamma=16.46 \text{ kN/m}^3$, $\varphi=23^\circ$, $c=6.86 \text{ kPa}$;
- ⑤ — $\gamma=16.46 \text{ kN/m}^3$, $\varphi=23^\circ$, $c=0 \text{ kPa}$;

文章编号:1001-1986(2005)05-0061-04

节理化岩体复合式滑移破坏的模型试验研究

余子华 (中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:针对节理化岩体的自身特点, 提出沿岩体层面产生的应力集中以及层面与节理之间的残余完整岩桥破坏, 将可能导致岩体产生复合式滑移破坏。并在室内利用岩石三轴刚性伺服机, 通过模型试验对岩体的层面和一组与层面正交的节理的情况进行模拟研究, 分析了结构面性状和围压对复合式滑移破坏的影响, 给出了在贯通性结构面(层面)倾角、非贯通性结构面以及围压等因素共同作用下, 节理化岩体发生复合式滑移破坏的条件以及破坏面特征。在与前人的试验资料进行对比分析的基础上得到可靠的结论, 期望为在将来的实践工作中正确评估节理化岩体的破坏模式提供指导性意见。

关键词:节理; 岩体; 滑移破坏; 模型

中图分类号:TU457 **文献标识码:**A

Model test research on multiple sliding failure of jointed rock mass

YU Zi-hua (Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: According to specificities for jointed rock mass, multiple sliding failure of a jointed rock mass is presented, due to accumulation of stress along bedded plane of rock mass and destruction of remnant intact rock bridges between bedded planes and joints. And Rock Triaxial Serve Testing System is used, through model test involving bedded planes and a set of joint normal to the bedded planes in rock mass, multiple sliding failure affected by properties of joints and confining pressure is analysed, the condition triggering multiple sliding failure and characteristics of failure plane are given, under the co-action of inclination of connective joints (bedded planes), interlocking conditions of critical joints and confining pressure. At last, data is compared with previous work, and on the basis of it reliable results are given, and the results would be useful for assessing probable modes of failure of a jointed rock mass for future practice.

Key words: joints; rock mass; sliding failure; model

收稿日期:2004-10-11

作者简介:余子华(1979—),男,安徽安庆人,中国地质大学硕士研究生,主要从事岩土体稳定性分析与评价。

面最高土条高度 ≥ 1 m。

根据例2的结果,本文通过网格上的枚举法能较好实现复杂土坡滑动面的全局最优搜索,并且在搜索的过程中能够获得一系列局部优化滑动面,这些滑动面同样对工程具有较好指导作用。此外,网格法几何优化搜索的特征点布置非常关键,其基于经验的合理布置可以大大降低试算圆弧的工作量,一般试算圆弧的数目为1 000~10 000时,搜索已经达到满意的效果。在例2中,NI=20,NJ=20,分条块宽度1 m时,计算机(内存256 M,CPU1.8 G)所耗搜索时间仅约5 s。

4 结论

本文提出的网格法全局搜索土坡危险滑动面的优化技术,对一些复杂的土坡问题具有较好的应用效果。其中,坡面特征点基于经验的非规则布置以及收敛域网格细分的几何优化技术,大大简化了以往其他许多方法在滑动面搜索过程中碰到的非线性多极值收敛问题,原理简单,并能较好地应用于土钉或锚杆挡墙的内部稳定性验算。其不足之处,如特征点的密度和布置范围对工程经验具有一定的依赖

性,有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 张天宝. 土坡稳定分析和土工建筑物的土坡设计[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1987.
- [2] 罗文强, 张倬元, 黄润秋, 王士天. 滑动面确定的变分法模型[J]. 长江科学院院报, 2000, 17(3): 35~37.
- [3] 蒋斌松, 吕爱钟, 蔡美峰. 纯粘土边坡稳定性的解析计算[J]. 工程力学, 2003, 20(5): 204~208.
- [4] Nguyen V U. Determination of critical slope failure surfaces[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(2): 238~249.
- [5] 王建锋. 斜坡临界滑动面随机模拟及稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 294~299.
- [6] CHEN Z Y, CHANG M S. Evaluation of factor of safety in slope stability analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25: 735~748.
- [7] 弥宏亮, 陈祖煜. 遗传算法在确定边坡最小安全系数中的应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 15(6): 671~675.
- [8] 李守巨, 刘迎曦, 何翔, 刘玉静. 基于模拟退火算法的边坡最小安全系数全局搜索方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 236~240.
- [9] ZHU D Y. A method for locating critical slip surfaces in slope stability analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(2): 328~337.
- [10] 王成华, 夏绪勇, 李广信. 基于应力场的土坡临界滑动面的蚂蚁算法搜索技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 813~819.