

文章编号: 1000-7598-(2007) 05-0861-05

基于临界滑动场的岩质边坡临界滑动面搜索方法

段荣福, 白世伟

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘 要: 在边坡稳定分析中临界滑动面搜索是关键问题。现行搜索算法包括数学规划法和智能搜索算法, 均是以圆弧或圆弧加折线为假定滑动面形式在计算土质边坡基础上发展起来的, 基本上不适用于岩质边坡计算。临界滑动场理论以余推力法和最优化理论为基础, 采用新的结构面处理方法, 可计算出与实际情况基本吻合的最大余推力方向场, 能方便追踪出各可能出口点的滑动面, 从而找出边坡整体临界滑动面。取一均质土质边坡算例对计算结果可信度进行验证, 与强度折减法和 Spencer 极限平衡法所得计算结果相吻合。另取一露天矿边坡对该方法的实用性进行了验证。

关 键 词: 临界滑动场; 结构面; 岩质边坡; 临界滑动面

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Searching method for critical slip surface in rock slope based on theory of critical slip field

DUAN Rong-fu, BAI Shi-wei

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Critical slip surface search is one of key problems in slope stability analysis. Present search methods include mathematic programming methods and brainpower search methods, which are based on the assumption of arc or arc-polyline slide style, and developed on basis of soil slope. It is not fit for rock slope. Critical slip field theory is based on residual thrust method and optimization theory. Using new structure surface processing method, it can calculate the biggest residual thrust field, which is almost consistent with actual condition and easily search slip surface of respectively possible exits. Therefore, it can find the whole slope critical slip surface. First of all, using example of homogeneous material slope validates credibility of calculation result to be consistent with the result of shear strength reduction technique and the Spencer's procedure of limit equilibrium. Then, an example of open strip mine side slope is given to validate the practicability of this method.

Key words: critical slip field; structural surface; rock slope; critical slip surface

1 引 言

临界滑动面的搜索方法是边坡稳定性分析的一个关键性技术问题。目前主流搜索算法包括数学规划法和智能搜索算法, 皆是在计算土质边坡基础上发展起来的。数学规划法应用比较广泛, 岩土工程中的边坡一般为非均质的, 在使用数学规划方法进行临界滑动面搜索时几乎所有的方法都存在易陷于局部极值而无法获得整体极值的问题。人工智能方法主要有模拟退火算法、遗传算法、神经网络和蒙特卡洛法等, 文[1~4]采用智能搜索算法得出较好的结果。智能搜索算法的计算量与目标变量个数呈指数关系, 到目前为止, 只适用于圆弧滑动面假

定等目标变量较少的搜索运算。

岩质边坡的破坏机理要比土坡更为复杂, 边坡的稳定性在很大程度上受结构面控制, 滑动面形状往往不能用圆弧描述。在计算土质边坡基础上发展起来的搜索算法因滑动面假定形状的改变, 失去了应用的前提条件, 因此需要寻找适用于岩质边坡的任意形状滑动面的搜索算法。朱大勇^[5]提出的临界滑动场理论是在极限平衡法和最优化理论基础上发展起来的, 能考虑到整个边坡体内的每个点, 适用于各种复杂地质情况, 在确定复杂地质情况下边坡的破坏形式方面有理论优势, 是搜索岩质边坡临界滑动面的一种新的方法。其结构面处理方法为设置为极薄的软弱层, 在层内至少设置一个离散点。在

计算各离散点的危险滑动方向和最大推力时, 先按无不连续面状况考虑, 得出危险滑动方向 a_0 及其推力 P_0 , 然后对处于软弱层中的点选定滑动面与不连续面重合, 计算其滑动方向 a_j 和推力 P_j , 按推力最大原理确定最终的危险滑动方向 a 和推力 P 。笔者认为, 结构面对附近区域各点应力状态均有较大影响, 该方法没有很好地表现结构面对处于结构面以外的离散点的应力状态的影响, 所得各离散点最大推力方向场与实际情况有较大差异, 同时在追踪滑动面时向结构面逼近会出现困难。另外, 强迫在软弱层内至少设置一个离散点也会给计算程序的编制带来不便。本文拟在临界滑动场的结构面处理方法上做探讨。

2 临界滑动场理论及算法设计

2.1 临界滑动场理论

临界滑动场理论是在极限平衡法和最优化原理基础上发展起来的理论, 其理论基础为边坡内任意一点都有唯一的最大剩余推力和产生最大剩余推力的方向, 通过极限平衡理论可以计算出该剩余推力和方向作为该点的存储信息, 即坡体内任一点均对应最大推力和危险滑动方向且只与滑向后方坡体有关。将坡体离散为众多离散点, 由于位于坡面的离散点作为可能滑动面的滑出点, 根据危险滑动方向反向逐步追踪出整个滑面, 即根据局部最优原理, 每步的追踪方向都是使滑动面剩余部分产生最大剩余推力的方向。

计算过程: ①用网格点离散计算区域, 如图 1 所示。②用剩余推力原理计算各离散点处可产生的最大剩余推力和产生最大剩余推力的方向, 具体计算方法是条分线自右向左编号, 假定计算区域以外部分对边坡的稳定无贡献, 条分线 1 受到右侧作用力为零, 条分线 2 上的离散点仅在重力作用下产生剩余推力, 其余各条分线上离散点计算在重力和上条块传递下来的剩余推力共同作用下的剩余推力。如图 2 所示, 以计算 $i+1$ 条分线上离散点 A 的最大剩余推力和方向为例, 假定 i 条分线上各离散点的最大剩余推力和方向已经求出。过 A 点倾角为 a 的滑面与条分线 i 交于 B 点, B 点最大剩余推力和倾角由 C 、 D 点插值求出:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E(i, j) \cos(a(i, j)) + (E(i, j+1) \cdot \\ &\quad \cos(a(i, j+1)) - E(i, j) \cos(a(i, j))) \frac{BC}{DC}; \\ E_y &= E(i, j) \sin(a(i, j)) + (E(i, j+1) \cdot \\ &\quad \sin(a(i, j+1)) - E(i, j) \sin(a(i, j))) \frac{BC}{DC} \end{aligned} \right\} (1)$$

$$E_B = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}; a_B = \arctan\left(\frac{E_y}{E_x}\right) \quad (2)$$

A 点倾角为 a 时的剩余推力为

$$E_a = w \sin(a) + kc w \cos(a) - [(w \cos(a) - kc w \sin(a) - ul) \tan(\varphi) + cl] / F_s + E_B ft \quad (3)$$

式中: $ft = \cos(a_B - a) - \sin(a_B - a) \tan(\varphi) / F_s$; w 为滑面以上条块重力; kc 为水平地震力系数; u 为水压力; F_s 为安全系数。

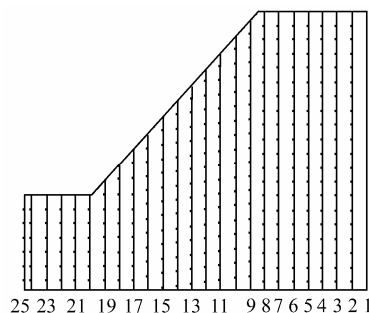


图 1 边坡离散点示意图

Fig.1 Sketch map of discrete point

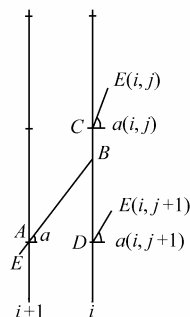


图 2 离散点剩余推力计算示意图

Fig.2 Sketch map of residual thrust calculation

取 a 的变化范围为: A 点与上一条分线第一个离散点连线与水平线夹角, A 点与上一条分线最后一个离散点连线与水平线夹角, 记录产生的最大剩余推力和此时的 a 作为该点的最大剩余推力和危险滑动方向。依次计算出各离散点的危险滑动方向, 可形成整个计算区域的危险滑动场。由所有可能作为滑坡出口的区域形成出口区, 由危险滑动方向场可追踪出每个出口点的危险滑动面。从出口点出发, 顺着该点的危险滑动方向向坡体后方追踪交于相邻条块线上, 交点的危险滑动方向可由相邻两离散点的危险滑动方向插值求出, 再沿着插值得到的危险滑动方向继续追踪, 直到追踪点出现在坡顶线上方, 或者位于非出口区的张裂缝区为止, 形成完整

的滑动面。追踪所有的出口点，便形成了完整的临界滑动场。

2.2 结构面处理方法

结构面对岩质边坡的稳定往往起控制作用，搜索岩质边坡的临界滑动面必须充分考虑结构面的影响。结合临界滑动场理论，整理出计算区域内所有结构面，结构面与各条分线的交点作为结构面的离散点。首先，计算各结构面离散点沿结构面方向的剩余推力，结构面方向为危险滑动方向。其次，计算各离散点最大剩余推力和方向。倾角为 α 时，当与上一条分线交点和结构面离散点距离小于离散点间距 d 时，交点取结构面离散点，上条块传递下来的剩余推力和方向取结构面离散点的剩余推力和方向，用结构面离散点坐标修正 α 值。此时需满足公式：

$$f_t = \cos(\alpha_f - \alpha) - \sin(\alpha_f - \alpha) \tan(\varphi) / F_s \quad (4)$$

式中 α_f 为结构面方向。

在追踪滑动面过程中，当追踪点和同一条分线上结构面离散点相近时（追踪点和结构面离散点间距小于 d ），追踪点转移到该结构面离散点。此举虽是对最优化理论的一定程度上的削弱，但对考虑断层的影响至关重要，对岩质边坡的临界滑动面搜索有实质性贡献，进一步控制离散点间距离，对最优化理论的影响可以忽略。记录追踪点类型，若上一追踪点为结构面离散点，则下一追踪方向沿结构面方向；若不是结构面离散点，判断追踪点和结构面离散点的关系。当本追踪点与上一追踪点连线和结构面相交时或与结构面离散点相近时，本追踪点转移到相近结构面离散点上。

2.3 临界滑动面搜索流程

①离散结构面和坡体。首先，计算各结构面离散点剩余推力。其次，计算坡体各离散点最大剩余推力和危险滑动方向，计算过程考虑结构面离散点的影响，形成包含结构面的危险滑动方向场。

②追踪各可能出口点的危险滑动面，任意两相邻追踪点间要满足传递系数式（4）为正。按照剩余推力法原理计算各危险滑动面的安全系数。

③选择计算所得的各安全系数中最小的系数，取代原来假定的安全系数，重复计算步骤①和②。

④若计算所得最小安全系数与上一循环计算安全系数之差在控制范围内，结束计算。输出各可能出口点追踪所得滑动面的安全系数和滑动面控制点坐标。所得最小安全系数为边坡整体安全系数，产

生最小安全系数的滑动面为危险滑动面。各可能出口点追踪所得滑动面和安全系数为局部可能滑动面和安全系数，所有追踪所得滑动面一起形成临界滑动场。计算流程见图3。

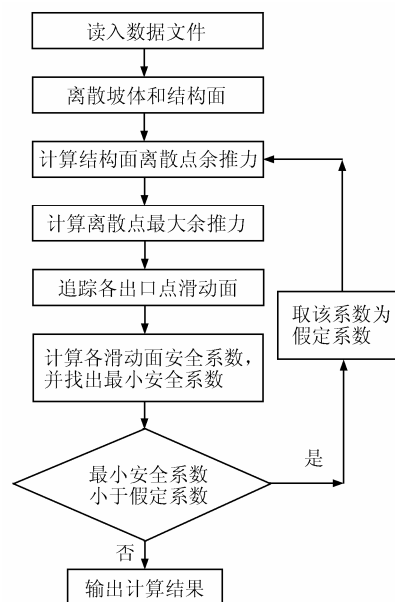


图3 计算流程图

Fig.3 Flow chart of calculation

3 计算程序的编制

采用 Visual Fortran 作为计算程序的编制语言。首先确定计算范围，将分条宽度和离散点距离作为参数输入，输入坡顶线、各介质层交界线、水位线及各介质层物理力学参数，也输入各结构面及其力学参数，计算各结构面离散点的剩余推力。判断各离散点所在介质层，计算各分条重力及各离散点最大剩余推力，计算各滑动面安全系数，取计算所得最小安全系数代替原假定安全系数，重复计算流程所得追踪结果会比原计算结果更接近实际。重复计算至所得最小安全系数与假定安全系数相差在精度要求范围以内。实际计算表明，该方法收敛极快，一般情况 10 次以内即可达到控制条件。

4 算例

例 1. 为验证算法和程序的可行性，取一均质土质边坡为例，与其他方法计算结果相验证。取边坡数据与文[6]数据相同，即坡高 20 m，坡面倾角为 45° ，不考虑水的因素，边坡介质为单一介质，力学参数 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ ， $c = 42 \text{ kPa}$ ， $\varphi = 17^\circ$ 。将计算结果与其结果相比较，本计算程序经过 3 次循环，

边坡整体安全系数收敛于 1.195, 滑出点在坡脚处, 整体搜索结果见图 4, 临界滑动面如图 5 所示。文[6]采用强度折减法用弹塑性有限元程序进行计算, 以位移与折减系数关系曲线的突变性为失稳判据时, 整体安全系数近似为 1.21, 以边坡内塑性区是否贯通作为失稳判据时, 整体安全系数近似为 1.21, 以数值计算是否收敛为失稳判据时, 整体安全系数为 1.38。对该例文[7]用 Spencer 极限平衡法所求得安全系数为 1.20。本计算程序所得结果与强度折减法和 Spencer 极限平衡法所得计算结果基本一致。

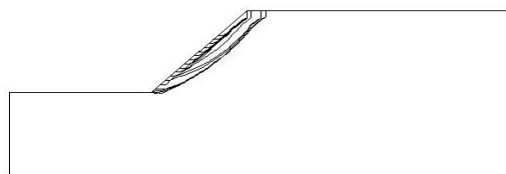


图 4 均质边坡临界滑动场计算结果
Fig.4 Result of critical slip field of homogeneous slope

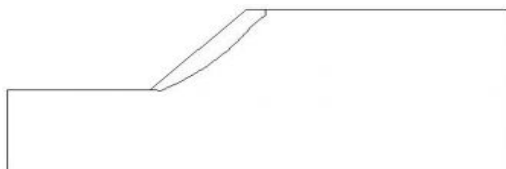


图 5 均质边坡临界滑动面
Fig.5 Critical slip surface of homogeneous slope

例 2. 取攀枝花铁矿朱家包包采场南帮一最终开采境界边坡剖面为算例验证实用性。根据资料, 边坡上层为矿体, 力学参数 $\gamma = 30.4 \text{ kN/m}^3$, $c = 0.7 \text{ MPa}$, $\varphi = 40^\circ$ 。下层为辉长岩, $\gamma = 30.4 \text{ kN/m}^3$, $c = 1.0 \text{ MPa}$, $\varphi = 40^\circ$, 内有 5 条顺坡向断层, $c = 50 \text{ kPa}$, $\varphi = 26^\circ$ 。整个边坡开采 8 个台阶, 整体坡高 250 m 左右。经过 5 次循环, 边坡整体安全系数收敛于 2.298, 计算结果如图 6 所示, 临界滑动面见图 7, 临界滑动面出口点在高程 180 m 台阶坡脚处, 与传统经验方法分析结果相吻合。

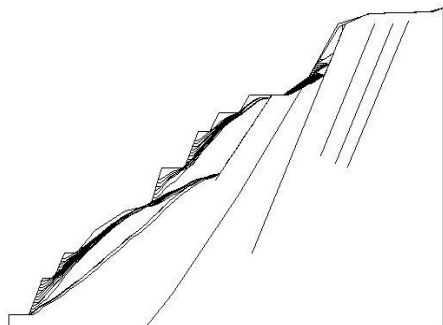


图 6 朱矿边坡临界滑动场计算结果
Fig.6 Result of critical slope field of slope-zhu

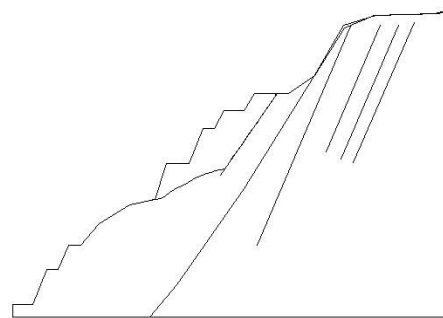


图 7 朱矿边坡临界滑动面
Fig.7 Critical slip surface of slope-zhu

5 结 论

(1) 临界滑动场理论在边坡计算过程中可统一考虑有无结构面两种情况, 在没有结构面情况下计算结果与传统极限平衡法和强度折减法所得结果十分接近, 对有结构面的情况, 计算结果与传统经验分析结果基本吻合。

(2) 对结构面的处理方法是岩质边坡临界滑动面搜索问题的关键。传统临界滑动场理论是在计算追踪方向场时把边坡按无结构面计算, 在追踪各出口点的滑动面过程中才考虑结构面的影响。笔者认为在计算追踪方向场时即应考虑结构面的影响, 所得到的推力方向场才与实际相吻合, 所得结果也更合理。

(3) 网格划分精度对计算结果会产生一定影响。本文方法中滑动面形式假定为折线形式, 网格划分足够小时可模拟任意形式滑动面。由于其灵活性及计算误差, 对岩质边坡追踪所得滑面与传统的直线或较少的折线连成的滑面假定有一定程度的不相符合。

参 考 文 献

- [1] 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..
- [2] 陈云敏, 李育超, 凌道盛, 等. 蒙特卡洛与有限元结合搜索边坡临界滑动面[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 75-80.
CHEN Yun-min, LI Yu-chao, LING Dao-sheng, et al. Locating critical slip surfaces by a method combining Monte Carlo technique and FEM[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(2): 75-80.

- [3] 夏元友, 李新平, 程康, 等. 用人工神经网络估算岩质边坡的安全系数[J]. 工程地质学报, 1998, (2): 155—159.
XIA Yuan-you, LI Xin-ping, CHENG Kang, et al. Estimating safety factors of rock slope by using artificial neural network[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1998, (2): 155—159.
- [4] 陆峰, 陈祖煜, 李素梅, 等. 应用遗传算法搜索边坡最小安全系数的研究[J]. 中国水利水电科学院学报, 2003, (3): 236—239.
LU Feng, CHEN Zu-yu, LI Su-mei, et al. Research on searching the least safety factor of slopes with genetic algorithm[J]. **Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research**, 2003, (3): 236—239.
- [5] 朱大勇, 钱七虎, 周早生, 等. 岩体边坡临界滑动场计算方法及其在露天边坡设计中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18 (5): 567—572.
ZHU Da-yong, QIAN Qi-hu, ZHOU Zao-sheng, et al. Technique for computing critical slip field of rock slope and its application to design open pit slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(5): 567—572.
- [6] 刘金龙, 栾茂田, 赵少飞, 等. 关于强度折减有限元方法中边坡失稳判据的讨论[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1 345—1 348.
LIU Jin-long, LUAN Mao-tian, ZHAO Shao-fei, et al. Discussion on criteria for evaluating stability of slope in elastoplastic FEM based on shear strength reduction techniques[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(8): 1 345—1 348.
- [7] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳, 等. 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 332—336.
ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, ZHANG Yu-fang, et al. Study on slope failure criterion in strength reduction finite element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(2): 332—336.