

文章编号: 1000-7598 (2014) 12-3611-08

一种基于数值应力场的强度各向异性边坡稳定性分析方法

陈立平^{1,2}, 张顶立¹, 房倩¹, 应国刚¹, 黄俊²

(1. 北京交通大学 城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 江苏省交通科学研究院股份有限公司, 江苏南京 210017)

摘要: 提出了一种基于数值应力场下的边坡临界滑动面和临界坡高的分析方法。该分析方法首先利用有限元得到边坡内部较为精确的应力场, 再通过边坡内部模拟类似于链式反应过程中粒子产生和运动规律, 在此基础上完成临界滑动面的搜索。主要结论如下: (1) 提出了一种基于数值应力场的边坡临界滑动面的搜索方法, 该方法可在不对边坡滑动面形状和位置进行干预的情况下完成潜在破坏路径的搜索。(2) 通过对算法中区域与边界、激发源、产物扩散路径、路径权值 4 方面要素进行合理控制, 可使算法在具有较高精度的同时又能保证较好的分析效率。(3) 算法能较为方便地考虑真实应力条件下地层强度各向异性对边坡稳定性的影响, 并能对临界坡高进行很好的分析。(4) 通过具体算例对本文算法的计算结果进行验证, 将所得结果与 PSO 和 Monte Carlo 两种方法得到结果进行对比, 对本文方法的可靠性进行了验证, 取得了较好的效果。

关键词: 边坡; 算法; 强度各向异性; 数值应力场; 临界滑动面; 临界坡高

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

A new search algorithm for strength anisotropy slope stability analysis based on numerical stress field

CHEN Li-ping^{1,2}, ZHANG Ding-li¹, FANG Qian¹, YING Guo-gang¹, Huang Jun²

(1. Key Laboratory for Urban Underground Engineering of Education Ministry, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Jiangsu Transportation Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210017, China)

Abstract: In this paper, an analysis algorithm which can be used to determine critical sliding surface and critical height of slope, based on numerical stress field, is presented. Upon the algorithm, firstly, the stress field of slope can be obtained by using the finite element analysis method to get more accuracy. Secondly, through simulation of slope, the laws of generation and movement of particles similar to the process of chain reaction are studied. Finally, the critical sliding surface can be determined. Therefore four conclusions can be drawn: (1) A method for determining the critical sliding surface of slope on account of numerical stress field is proposed, which can find potential failure path while no disturbance of the shape and location of slope sliding surface. (2) By controlling such four factors as range and boundary, excitation source, diffusion path and path metrics, the algorithm can get higher accuracy and simultaneously higher efficiency. (3) The algorithm takes the effect of strength anisotropy on stability of slope into consideration. And it is valid to compute the critical slope height. (4) A detailed calculation example has verified the proposed algorithm. Compared to calculation results obtained by the two methods of PSO and Monte Carlo, the reliability of the algorithm could also be proved.

Key words: slope; algorithm; strength anisotropy; numerical stress field; critical sliding surface; critical slope height

1 引言

在岩土工程中, 边坡是一种最为常见的构筑物

形式, 同时滑坡又是一种常见的地质灾害和工程灾害。我国目前正处于经济建设大发展时期, 水利、交通、矿业等领域的工程建设往往会形成数量众多,

收稿日期: 2013-08-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2010CB732102); 中央高校基本科研业务费专项资金(No. 2012JBM079); 北京交通大学优秀博士研究生创新基金(No. 2013YJS055)。

第一作者简介: 陈立平, 男, 1985年生, 博士研究生, 主要从事岩土破坏与变形机理方面的研究工作。E-mail: 11115302@bjtu.edu.cn

通讯作者: 张顶立, 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道及地下工程领域方面的教学与科研工作。E-mail: zhang-dingli@263.net

条件复杂的边坡。保障边坡的安全性不仅有利于工程的顺利进行,更关乎到现场人员及当地居民的人身财产安全。在近一个世纪,全球范围内灾难性滑坡时有发生,造成了巨大人员伤亡和财产损失^[1-2]。人类同滑坡灾害作斗争的努力一直没有中断过,这些努力表现在认识滑坡机制、完善边坡稳定分析理论和方法、开发滑坡治理技术和滑坡预报等方面^[3]。

边坡临界滑动面的确定是边坡研究中的重点和难点,是边坡稳定性分析、滑坡灾害预警预报以及边坡加固方案选取等的重要前提和依据。因此,边坡真实临界滑动面的搜索及其稳定性判别方法一直以来都是各国学者研究的热点课题^[4-5]。近些年来,随着计算机技术的发展,各种分析方法不断涌现^[6-8]。一些学者受到自然界各种现象和行为的启发,通过模拟这些现象和行为的发生过程和规律,提出了一系列解决复杂计算问题的优化算法。例如:模拟宇宙中万有引力现象和机制的引力搜索算法^[9-10];模拟生物进化过程中自然选择和遗传机制的遗传算法^[11-12];模拟蚂蚁在寻找食物过程中发现路径行为的蚁群算法^[13-16];模拟固体升温与降温过程中粒子能量变化规律的退火法^[17-18];受到飞鸟集群活动的规律性启发而发展起来的粒子群算法^[19-20];模拟大脑思维过程的人工神经网络算法等等^[21]。每一种算法的提出都为边坡稳定性分析提供了新的方法和思路。实际研究表明,对于较为复杂的边坡,采用任何单一搜索方法所得结果的精度和可信度及搜索效率尚难以令人满意。不同方法在临界滑动面的确定时还不同程度的存在一些不足之处,如:对边坡内部应力进行简化或忽略,使得系统受力处于非真实或非平衡状态(如在条分法基础上进行的算法经常对条间力进行简化或忽略);一些搜索方法容易掉进陷阱,陷入局部最优解,从而无法获得理想的结果(如传统蚁群算法);部分算法需对边坡破坏面的形状和位置进行事先假定或限制,实际临界滑动面往往是复杂多变,不同的工况可能出现不同的滑面形式,特别是在考虑强度各向异性的情况下,因此,事先假定的破坏面形式与真实情况存在差异。

针对上述研究中的可改进之处,本文提出了一种基于数值应力场下的边坡临界滑动面和临界坡高的分析方法。通过有限元得到边坡内部较为精确的应力场,避免了由于应力简化或忽略而导致的误差;通过在边体内模拟类似于链式反应过程中粒子产生和运动规律,在不对滑动面形状和位置进行事先假定的情况下完成临界滑动面的搜索;该方法可在分

析过程中考虑地层强度各向异性的影响,使分析结果能更加真实地反应实际情况。由于该搜索方法原理类似于链式反应的发生过程,可以简称其为 CRA (chain reaction algorithm)。

2 算法基本原理与实施过程

链式反应的产物中子会引起同类核反应继续发生,并逐代延续进行下去,最终蔓延至整个区域,直至中子被吸收而停止。如果在该过程中对反应产物的数量和运动规律进行人为限定,并与所要分析的问题相结合,便可衍生成为一种具备搜索功能的算法。

2.1 基本原理

如图1所示,以区域内某点作为初始裂变核,向外围激发出一定数量的中子,这些中子为1代产物。令它们运动一定距离后与路径上预先设定的裂变核相遇,并激发新的反应,产生出相应的2代产物,如此循环往复。如果区域范围是有限的,即具有一定的边界,则当反应进行到一定程度后,反应产生的中子将遍布整个区域。

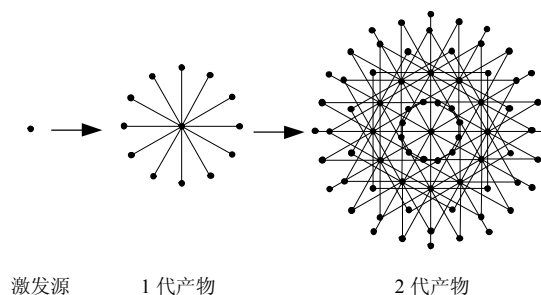


图1 算法搜索原理
Fig.1 Search principle of algorithm

用3种类型的边界划分和限定算法进行的区域,其中有两种真实存在的边界,分别为边坡的自然边界和地层参数过度边界,地层参数过度边界包括地层分界面、地下水位线等;另一种为虚拟计算限制边界,是在地层内部假定的对搜索区域进行限制的虚拟边界;自然边界和虚拟计算限制边界都具有束缚中子的特性,即当反应产生的中子遇到边界时就不再继续运动,而是滞留在边界上,不同之处是破坏路径只可能通过自然边界上各点。而限制边界认为是破坏路径不可能到达的极限位置。最终以到达自然边界上的中子为新的出发点,逐代向上回溯至反应原点,生产出从激发源到边界的路径。由于到达自然边界上的中子数量众多,通过逐代回溯就能得到数量众多的通往激发源的路径。理论上而言,只要各代产物中子数量足够大且裂变核之间距

离足够近,就会产生任何形状和任意分布规律的目标路径。根据研究问题的具体情况,对上述目标路径赋予相应的权值,最后通过寻找最大(最小)权值路径得到问题的最优解。

2.2 具体实施过程

下面就本文所研究的边坡稳定性问题,对算法主要的要素和具体实施过程进行详细说明,假设边坡如图 2 所示。

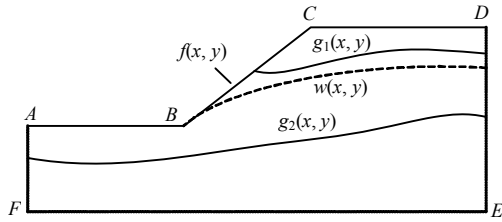


图 2 分析边坡模型
Fig.2 Analysis model of slope

(1) 区域与边界：区域就是拟解决问题的搜索范围,也就是图 2 中为 $ABCDEF$ 所围成的多边形范围。其中, AB 、 BC 、 CD 为目标边界,也就是自然边界,计算路径达到该边界时停止,并向上回溯得到一条可能的破坏路径。 DE 、 EF 、 FA 为计算限制边界,计算区域到达这些边界时停止,但不回溯形成新的路径。地层分界线 $g(x, y)$ 和地下水位线 $w(x, y)$ 是区域内的分层边界,即计算参数取值的变化边界。

(2) 激发源：激发源是算法的起点和回溯路径的终点,一般位于边界上。在图 2 所示的问题中,激发源取 D 点。需要说明的是,虽然计算起点和回溯最终点都是 D 点,但并不代表计算所得边坡临界滑动路径就一定要通过 D 点。原因是在路径回溯过程中,在到达 D 点以前,滑动面可能已经到达自然边界 CD 中间的某点,然后从该点延伸至 D 点,后文的计算结果充分体现了这一点(如图 3、12 所示)。这说明激发源只是作为一个计算区域的搜索起点,它往往不是在权值最小的路径上,这样可以保证所得结果是全局最优解。

(3) 产物扩散规律：这是控制算法计算精度与效率的关键,计算精度与运算效率之间往往存在矛盾。要得到高精度的计算结果可以通过增加计算量来实现,如增加发散中子数量,减小各级裂变核间的距离等。这就要求在计算过程中对反应产物数量和运动距离进行人为限定,使其在计算精度和效率之间取得平衡。

如图 3 所示,给出了一条可能破坏路径的搜索

过程。以激发源为路径出发点,在边坡地层内部进行路径的发散与计算,直到路径终点达到目标边界停止,连接各节点即获得一条潜在可能路径。图中只给出了一条路径,实际计算时类似的路径很多,当对每条路径都完成搜索并进行权值对比后,就能找出一条最可能的路径作为临界滑动面。

设初始激发点坐标为 $D_0(x_0, y_0)$,则下一代激发源的坐标为

$$D_i \left[x_0 + \cos \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n+1} \times i \right) r, y_0 + \sin \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n+1} \times i \right) r \right] \quad (1)$$

式中: i 表示产生中子的编号, $1 \leq i \leq n$, n 为发散中子的数量; r 为发散中子运动的距离。

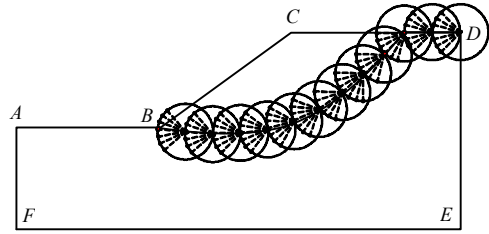


图 3 反应产物的产生与扩散规律
Fig.3 Reaction products production and diffusion rules

考虑到真实滑裂面在很小的一段距离内曲率不会发生很大变化,于是假设上、下级中子的运动满足如图 4 所示的关系,即下一阶段反应产生的中子运动路径被限制,分布在前阶段运动路径延长线两侧一定角度范围之内。即可对下一级路径的节点的坐标进行如下限定:

$$\left. \begin{aligned} y_{n+2} &> y_{n+1} + \sin \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_{n+1} + \theta \right) r \\ y_{n+2} &< y_{n+1} + \sin \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_{n+1} - \theta \right) r \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: y_{n+1} 、 y_{n+2} 、 α_{n+1} 、 θ 的意义如图 4 中标注所示。这样做的目的能提前排除一些不可能的路径,从而在不影响分析精度的基础上提高分析效率。

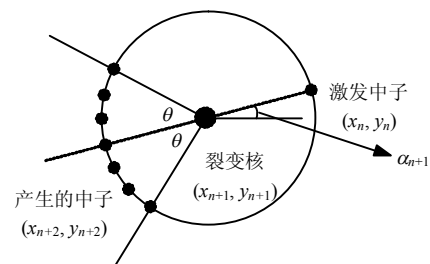


图 4 粒子扩散路径限制区域
Fig.4 Restricted diffusion areas of particles

(4) 路径权值: 路径回溯是完成路径搜索的重要环节, 该过程能产生大量的满足预设要求的可能路径。权值是选择问题最优解的参数, 是从海量路径中寻找目标路径的依据。

当所有路径搜索结束后, 就需要对这些路径的权值进行分析。权值的选取可以采用安全系数或富余平衡力进行表示。当安全系数或富余平衡力最小时所对应的路径认为是最危险路径。本文采用水平方向富余平衡力作为权值进行分析, 这样就可以不考虑竖直方向重力的影响, 有利于问题的简化。取图 5 所示的滑动块体单独进行研究, 在滑动路径上取一点进行分析, 该点的受力状态可用分别垂直和平行于滑动方向的正应力 σ_n 和剪应力 τ_n 表示, 可分别视为引起边坡失稳的主动力和阻止边坡失稳的被动反力。 τ_n 的最大值即为该点的抗剪强度, 可表示为

$$\tau_{\max} = \sigma_n \tan \varphi + c \quad (3)$$

式中: φ 、 c 分别为该点材料的内摩擦角和黏聚力。

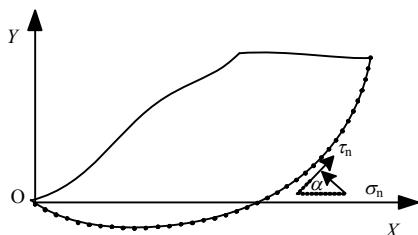


图 5 边坡滑动块体

Fig.5 Slide block in slope

如果将 σ_n 和 $\tau_{\max}$ 在水平向的合力作为该点的权值, 则将滑动面上各点的水平合力沿整个路径进行积分, 便可得到滑块整体水平富余应力, 并将其作为该路径的权值, 具体表示为

$$F = \int_s [(\sigma_n \tan \varphi + c) \cos \alpha - \sigma_n \sin \alpha] ds \quad (4)$$

式中: F 为路径 s 的权值; α 为 s 上积分点切线与水平轴夹角。由上式可知, F 越大, 对应的路径越稳定; 当 $F \leq 0$ 时, 边坡会沿对应的路径开始滑动。在全局范围内搜寻最小的权值 $F_{\min}$ 和其所对应的滑动路径, 则该路径为全局最不稳定路径。当 $F_{\min} = 0$ 时, 边坡处于极限平衡状态, 此时对应的坡高为临界坡高。

在以上研究的基础上, 可编制相应的程序对边坡临界破坏路径和临界破坏高度进行分析。其算法流程图见图 6。

3 边坡数值应力场

上述算法中的权值计算过程是基于实际地层的数值应力场而进行的, 分析过程中所用参数为 σ_n 、 α 、 c 、 φ 。其中 σ_n 为地层应力状态参数, c 和 φ 为地层强度参数, 它们都与路径几何参数 α 有关, 下面分别对其进行分析。

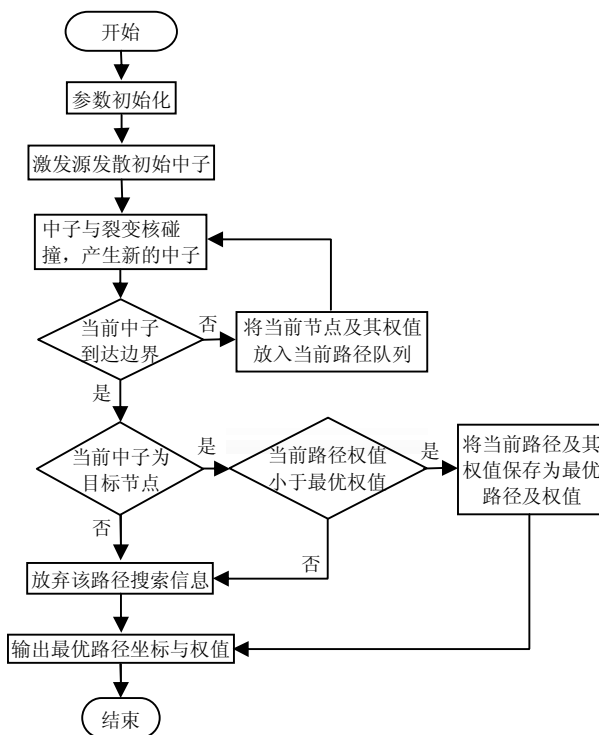


图 6 算法流程图

Fig.6 Flow chart of the algorithm

一些学者对边坡真实应力的解析公式进行了研究, 如在半无限楔形体应力理论的基础上得到的边坡应力场的近似弹性解答^[22]。由于解析公式对边坡条件要求比较苛刻, 目前是只能近似解决一些形状规则的均质各向同性边坡问题。而有限元能较好地模拟非弹性地层的应力场分布, 并能方便地进行提取, 因此, 笔者选用 FLAC3D 对边坡内的应力状态进行分析。

一般而言, 坡体内的竖向应力 σ_y 和水平应力 σ_x 较简单, 相对于竖向应力和水平应力, 边坡内部剪应力 τ_{xy} 的分布规律相对较复杂。竖向正应力和水平正应力近似满足如下关系:

$$\sigma_y = \gamma h, \quad \sigma_x = k \gamma h \quad (5)$$

式中: h 为地层中某点竖直方向覆土厚度; γ 为地层的重度; k 为侧压系数。通过对不同位置的水平剪应力提取结果进行分析, 发现 τ_{xy} 符合双高斯峰函

数分布规律。图 7 显示的是在不同埋深位置的水平剪应力在水平方向上的分布规律。

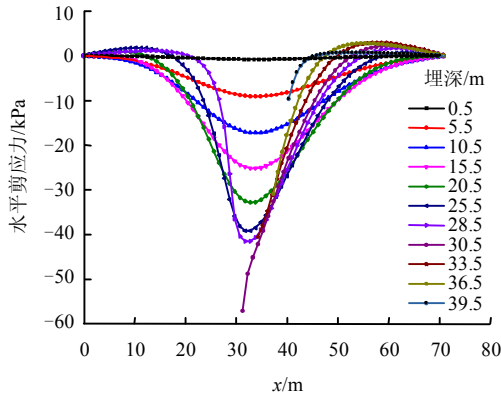


图 7 边坡内部水平剪应力分布

Fig.7 Horizontal shear stress distributions in slope

所以边坡中任意一点水平剪应力 τ_{xy} 的表达式可表示为

$$\tau_{xy} = \tau_0 + B e^{\frac{-(x-x_c)^2}{2w^2}} \quad (6)$$

$x \leq x_c$ 时, $w = w_1$; $x > x_c$ 时, $w = w_2$ 。

式中: τ_0 、 B 、 x_c 、 w_1 、 w_2 为计算参数, 是边坡形状和节点所处位置的函数, 可以通过提取的应力结果进行确定。

路径上积分点切线与水平轴夹角 α 表达式为

$$\alpha = \arctan \left(\frac{y_i - y_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} \right) \quad (7)$$

式中: x_i 、 y_i 、 x_{i+1} 、 y_{i+1} 分别为路径上先后两个节点的横坐标与纵坐标, 如图 4 所示。

由此, 对于某一特定的边坡可以将式 (5)~(7) 代入下面式 (8) 即可对 σ_n 进行计算, 得到滑动面正应力表达式为

$$\sigma_n = \sigma_x \sin^2 \alpha + \sigma_y \cos^2 \alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha \quad (8)$$

4 地层强度各向异性参数

自然状态下的地层强度往往具有各向异性, 例如水平截面抗剪强度较低, 而竖直截面抗剪强度较高。这种原生各向异性主要是沉积过程中材料受重力场的定向作用所致^[23]。当剪切面与沉积面之间夹角发生变化时, 剪切面具有不同的抗剪强度, 亦即具有不同的抗剪强度指标 c 、 φ ^[24]。本文所述算法能较方便地在临界滑动面搜索过程中对地层强度各向

异性的影响进行考虑。在不考虑强度各向异性的情况下, 土体黏聚力 c 和内摩擦角 φ 通常被视为一个不变的材料参数, 实际上它们会随剪切方向与沉积面夹角的变化而变化, 如图 8 所示。

参考前人研究成果, 地层强度参数的变化可表示如下^[25-26]:

$$c = a_3 \alpha^3 + a_2 \alpha^2 + a_1 \alpha + a_0 \quad (9)$$

$$\varphi = b_3 \alpha^3 + b_2 \alpha^2 + b_1 \alpha + b_0 \quad (10)$$

式中: a_i 、 b_i 分别为黏聚力和内摩擦角关于角度 α 的多项式系数。

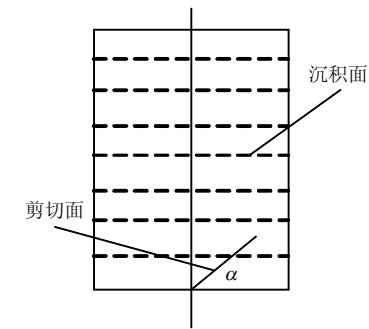


图 8 c 、 φ 值面的方向与层面夹角 α

Fig.8 Inclination α of plane with c , φ to cleavage plane

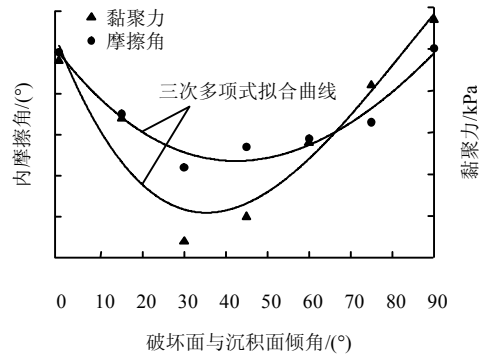


图 9 抗剪强度指标随沉积面倾角变化规律

Fig.9 Variations of shear strength indexes with bedding plane inclination

将式 (9)、(10) 代入式 (4), 即可考虑强度各向异性对边坡的影响。至此, 就可以利用算法程序, 对边坡临界滑动面和临界坡高进行分析。

5 算例分析

分别选取坡度比为 1:2 和 1:1 两种几何形态的边坡进行分析, 坡度比 1:2 的边坡算例在以往文献中研究较多, 可用于对比本文方法与其他方法的计算结果。坡度比为 1:1 的边坡算例又分均质边坡、分层边坡、强度各向异性边坡 3 组情况进行分

析,以便进行不同地层环境下的比较。

5.1 算例 1

为了说明本文算法的可靠性,取坡度比为 1:2 的标准边坡进行分析,将本文算法所得最危险滑动面与 PSO 和 Monte Carlo 两种方法得到的滑动面进行对比^[3]。结果表明,本文所得滑动面整体位置和形状与上述两种方法都差别不大,如图 10 所示。说明本文算法的可靠性能得以保证。本算例所用参数的取值均来源于文献^[3],固不在此一一列出。

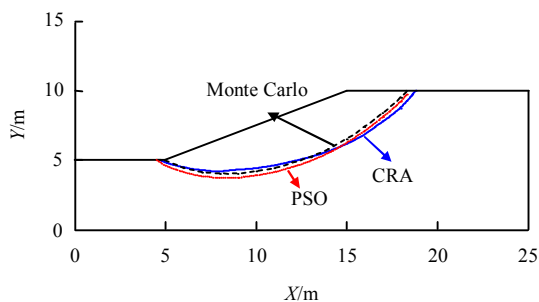


图 10 不同算法所得临界滑动面位置

Fig.10 Critical slip surface of different algorithms

5.2 算例 2

本算例边坡如图 11 所示,计算区域在坡顶和坡底水平方向分别向两边扩展各 2 倍坡高,坡底以下扩展 1 倍坡高。

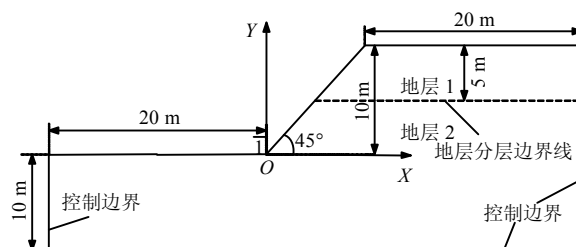


图 11 算例边坡几何模型

Fig.11 Slope geometric model for example calculation

地层参数和强度各向异性参数如表 1 所示,表 1 包含了 3 组边坡的地层参数。在计算均质边坡时,选用地层 1 参数;当不考虑各向异性时,只取表中 c , φ 表达式中的常数项,其他与角度有关的系数都赋值为 0 即可。

表 1 地层材料参数

Table 1 Material parameters of formations

地层	重度 (kN/m^3)	弹性模量 (MPa)	泊松比	黏聚力/ kPa				内摩擦角/($^\circ$)				侧压系数
				a_3	a_2	a_1	a_0	b_3	b_2	b_1	b_0	
地层 1	18	100	0.3	-4.6	16.4	-11.1	10	0.02	0.21	-0.27	0.35	0.43
地层 2	20	150	0.3	1.2	7.3	-7.9	20	-0.22	0.76	-0.54	0.53	0.43

将初始参数代入程序进行运算,输出全局最小权值所对应路径上各点的坐标,结果如图 12 所示。

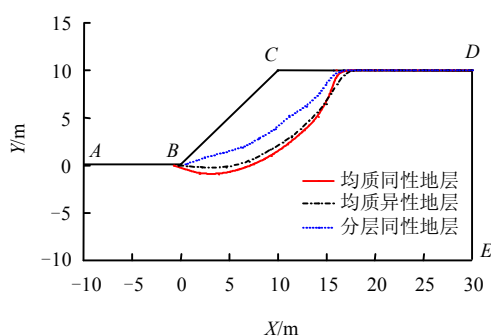


图 12 不同地层情况下临界滑动面

Fig.12 Critical sliding surfaces of different formations

本文所述的算法同样能对临界高度进行分析,具体方法为在材料参数不变的情况下调整坡高,若 $F_{\min} > 0$,则增加坡高,反之则减小坡高,目标是使 $F_{\min}$ 在最大程度上接近于 0,此时所对应的坡高为临界坡高。通过计算得到 3 种地层所对应的临界坡高如表 2 所示。

表 2 不同地层临界坡高

Table 2 Critical slope heights for different formations

地层类型	均质同性	均质异性	分层同性
临界坡高/m	11.7	10.2	16.6

由表可知,在本文计算参数的情况下,强度各向异性地层中边坡稳定性最差,分层地层中边坡稳定性最好。卡尔曼公式是一种比较经典的关于临界坡高的计算方法,是基于极限平衡状态理论,在破坏路径为直线的基础上发展起来的一种计算方法^[23],其表达式为

$$H_{cr} = (4c/\gamma) \sin \beta \cos \varphi / [1 - \sin(\beta + \varphi)] \quad (11)$$

以上式中 β 为坡角,其他参数意义与前文相同。该方法只能计算均质各向同性边坡,因此,只能与本文第 1 种均质各向同性地层情况的计算结果进行对比,将表 1 中地层参数代入式 (11) 得到临界坡高为 $H_{cr} = 14.1 \text{ m}$, 所得结果大于本文所得结果 11.7 m,由此可见,本文所得临界坡高是相对保守的,更偏于安全。也说明边坡沿如图 12 所示的路径滑动相对于直线路径更容易。

6 结 论

(1) 提出了一种基于数值应力场的边坡临界滑动面的搜索方法, 该方法可在不对边坡滑动面形状和位置进行干预的情况下完成潜在破坏路径的搜索。

(2) 通过对算法中区域与边界、激发源、产物扩散路径、路径权值 4 方面要素进行合理控制, 可使算法在具有较高精度的同时又能保证较好的分析效率。

(3) 算法能较为方便地考虑真实应力条件下地层强度各向异性对边坡稳定性的影响, 并能对临界坡高进行很好的分析。

(4) 通过具体算例对本文算法的计算结果进行验证, 将所得结果与 PSO 和 Monte Carlo 两种方法得到结果进行对比, 对本文方法的可靠性进行了验证, 取得了较好的效果。

参 考 文 献

- [1] 王恭先. 滑坡防治方案的选择与优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3867—3873.
WANG Gong-xian. Choice and optimization of landslide control plan[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.2): 3867—3873.
- [2] 王恭先. 滑坡防治工程措施的国内外现状[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(1): 1—9.
WANG Gong-xian. State of the art of landslide controlling engineering measures at home and abroad[J]. **Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 1998, 9(1): 1—9.
- [3] 李育超. 基于实际应力状态的土质边坡稳定性分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 1—9.
- [4] SUN Jian-ping, LI Jia-chun, LIU Qing-quan. Search for critical slip surface in slope stability analysis by spline-based GA method[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2008, 134(2): 252—258.
- [5] 罗先启, 袁恒. 求解边坡矢量和安全系数的三维条分法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 2865—2870.
LUO Xian-qi, YUAN Heng. Solution of vector sum factor of safety of slope by three-dimensional method of columns[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(Supp.1): 2865—2870.
- [6] 蒋水华, 冯晓波, 李典庆, 等. 边坡可靠度分析的非侵入式随机有限元法[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2347—2354.
- [7] 邓东平, 李亮. 水平条分法下边坡稳定性分析与计算方法研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 3179—3188.
DENG Dong-ping, LI Liang. Analysis of slope stability and research of calculation method under horizontal slice method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(8): 2347—2354.
- [8] 陈国庆, 黄润秋, 周辉, 等. 边坡渐进破坏的动态强度折减法研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1140—1146.
CHEN Guo-qing, HUANG Run-qiu, ZHOU Hui, et al. Research on progressive failure for slope using dynamic strength reduction method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(4): 1140—1146.
- [9] RASHEDI ESMAT, HOSSEIN NEZAMABADI-POUR, SARYAZD SAEID. GSA: A gravitational search algorithm[J]. **Information Sciences**, 2009, 179: 2232—2248.
- [10] MOHAMMAD KHAJEHZADEH, MOHD RAIHAN TAHA, AHMED EL-SHAFIE, et al. A modified gravitational search algorithm for slope stability analysis[J]. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 2012, 25: 1589—1597.
- [11] 肖专文, 张奇志, 梁力, 等. 遗传进化算法在边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 44—46.
XIAO Zhuan-wen, ZHANG Qi-zhi, LIANG Li, et al. Application of genetic evolutionary algorithm for slope stability analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(1): 44—46.
- [12] 薛新华, 张我华, 刘红军. 基于遗传算法和模糊神经网络的边坡稳定性评价[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2643—2648.
XUE Xin-hua, ZHANG Wo-hua, LIU Hong-jun. Evaluation of slope stability based on genetic algorithm and fuzzy neural network[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(12): 2643—2648.
- [13] 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.
WANG Cheng-hua, XIA Xu-yong, LI Guang-xin. Ant algorithm in search of the critical slip surface in soil

- slopes based on stress fields[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(5): 823—819.
- [14] 陈昌富, 龚晓南. 混沌扰动启发式蚁群算法及其在边坡非圆弧临界滑动面搜索中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3451—3454.
- CHEN Chang-fu, GONG Xiao-nan. Heuristic ant colony algorithm involving chaos operator and its application to search for critical slip surface of slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(20): 3451—3454.
- [15] 高玮. 基于蚁群聚类算法的岩石边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3476—3481.
- GAO Wei. Analysis of stability of rock slope based on ant colony clustering algorithm[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(11): 3476—3481.
- [16] 石露, 李小春, 任伟, 等. 蚁群算法与遗传算法融合及其在边坡临界滑动面搜索中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3486—3492.
- SHI Lu, LI Xiao-chun, REN Wei, et al. Hybrid of ant colony algorithm and genetic algorithm and its application to searching critical slope slip surface[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(11): 3476—3481.
- [17] 谭新, 丁万涛, 李术才. 一个新的非圆弧滑动全局最优优化算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2060—2066.
- TAN Xin, DING Wan-tao, LI Shu-cai. A new global optimization algorithm for analysis of non-circular slip surface[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(12): 2060—2066.
- [18] 张发明, 郭丙跃, 庞正江, 等. 基于模拟退火算法的边坡稳定分析方法[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 514—519.
- ZHANG Fa-ming, GUO Bing-yue, PANG Zheng-jiang, et al. Fractured rock slope stability analysis based on simulated annealing method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(4): 514—519.
- [19] 陈云敏, 魏新江, 李育超. 边坡非圆弧临界滑动面的粒子群优化算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1443—1452.
- CHEN Yun-min, WEI Xin-jiang, LI Yu-chao. Locating non-circular critical slip surfaces by particle swarm optimization algorithm[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(7): 1443—1452.
- [20] 徐飞, 徐卫亚, 刘造保, 等. 基于 PSO-PP 的边坡稳定性评价[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1708—1713.
- XU Fei, XU Wei-ya, LIU Zao-bao, et al. Slope stability evaluation based on PSO-PP[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(11): 1708—1713.
- [21] 刘沐宇, 冯夏庭. 基于神经网络范例推理的边坡稳定性评价方法[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 193—198.
- LIU Mu-yu, FENG Xia-ting. Evaluation of slope stability based on case-based reasoning integrated with neural network[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(2): 193—198.
- [22] 肖世国, 周德培. 边坡开挖应力场的近似解析解[J]. 水利学报, 2005, 36(1): 16—21.
- XIAO Shi-guo, ZHOUDe-pei. Approximate analytical solution for stress field of cutting slopes[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2005, 36(1): 16—21.
- [23] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 92—98.
- [24] 刘卡丁, 张玉军. 层状岩体剪切破坏面方向的影响因素[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 335—339.
- LIU Ka-ding, ZHANG Yu-jun. Influence factors on shear failure orientation of layered rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(3): 335—339.
- [25] 张玉军, 刘谊平. 层状岩体抗剪强度的方向性及剪切破坏面的确定[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 254—258.
- ZHANG Yu-jun, LIU Yi-ping. Anisotropy of shear strength of layered rocks and determination of shear failure plane[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(3): 254—258.
- [26] 卡森 M A, 柯克拜 M J. 边坡形态与形成过程[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 470.