

黄土高边坡三维最危险滑裂面的遗传算法搜索

张剑波 孙 静 张 帅 李 超

(中国地质大学 信息工程学院 湖北 武汉 430074)

Search for the Most Dangerous Slip Surface of 3D Loess-slope Based on the Genetic Algorithm

ZHANG Jianbo, SUN Jing, ZHANG Shuai, LI Chao

摘要: 根据黄土地震滑坡的几何统计特征和物理力学性质, 总结提出一种新的三维滑坡模型, 并采用归一化三维矩阵的表示形式。借用遗传算法(GA)的核心思想, 以归一化三维矩阵中的第三维元素作为搜索基因, 在特定的搜索域内进行选择、交叉和变异运算。经过若干轮循环, 可逼近相关条件下的最危险滑裂面。同时给出实例验算, 对该搜索方案进行验证。

关键词: 三维滑裂面; 稳定系数计算; 遗传算法(GA); Matlab

一、引言

黄土滑坡是黄土高原特有的常见地质灾害, 在华北高原地区发生的伤亡性地质灾害中占有一定比例。特别是近年来人类工程活动对自然环境的改变和破坏, 使得黄土地区地质环境变得更加脆弱, 黄土滑坡地质灾害日益严重, 防灾治灾亟待加强^[1]。

通过国内外学者的不断努力, 有关滑坡问题的研究至今已取得了丰富的成果。早期的滑坡研究主要集中在分析某一滑裂面的滑动与抗滑关系, 并以此为基础得出有效的稳定系数计算公式, 其中较为成熟的有极限平衡和有限元法。工程中比较常用的计算方法包括整体圆弧滑动法、瑞典条分法、毕肖甫法、简化条分法等。此后, 随着计算机技术的不断发展, 临界滑动面的问题得到了很大重视, 并提出了多种搜索算法和技术。其中, 遗传算法作为一种高效的全局寻优搜索算法, 也被逐步地引入滑坡预测预报研究中, 并在很大程度上提高了搜索效率^[2]。本文在极限平衡原理的基础上, 采用新的简化滑坡模型进行三维稳定性分析, 同时利用成熟的 Matlab 遗传算法工具箱函数并加以改进, 以实现最危险滑裂面的遗传算法搜索。

二、滑坡模型

早期的稳定分析多将滑坡作为一个二维问题来处理, 虽然可以满足工程要求, 但严格来讲, 滑坡稳定分析是一个三维问题。随着对滑坡模型研究

的不断深入, 目前已经取得了不少成果, 其中较为常用的是椭球型滑坡模型, 它利用控制参数模拟生成滑裂面, 虽然理论上满足要求, 但是与实际的滑裂面形状存在较大差别。

为了取得较好的搜索结果, 本文根据黄土地震滑坡滑裂面的几何统计特征和物理力学性质, 总结提出一种简化的三维滑坡模型, 在满足理论要求的基础上, 能更好地贴近实际的滑坡形态, 如图1所示。

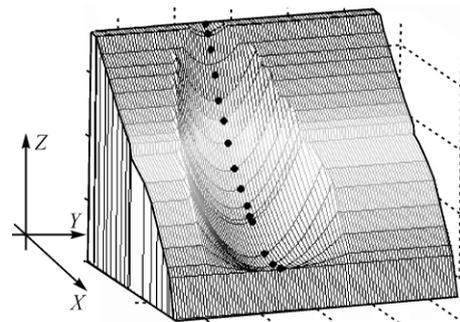


图1 三维滑坡模型

滑裂面边缘的投影为抛物线, 其形状可根据实际工程需要(如滑裂面的长度值与宽度值)单独设置, 如图2所示。同时, 利用成熟的二维随机搜索模型^[3]在XOZ平面内搜索可能的滑裂面(线), 作为三维滑坡的中心线, 整个滑裂面以此为中心线对称分布。滑裂面的中心线与边缘线之间同样是利用抛物线连接, 图3为模型的剖面图。

在搜索滑裂面中心线的过程中, 会产生一系列的搜索点, 这里称作中心线的节点, 即图3中圆点标记

收稿日期: 2011-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(41001225); 地震行业专项基金(2008419031)

作者简介: 张剑波(1975—), 男, 湖北武汉人, 博士, 副教授, 主要研究方向为栅格数据的空间分析理论与应用。

的部分。这些点一方面控制了滑裂面的形态,另一方面,节点上的第三元素,即Z坐标值,作为搜索基因在搜索域中发生交叉变异,从而产生新的滑裂面个体。

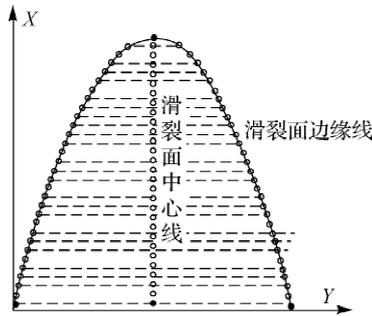


图2 滑裂面边缘线正射投影

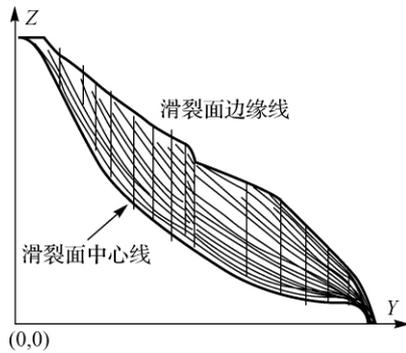


图3 滑裂面剖面图

三、遗传算法搜索最危险滑裂面

遗传算法(genetic algorithm , GA) 是一种高效并行的全局搜索方法,它模拟生物进化理论,自动获取和积累有关搜索空间的知识,在每一代种群中根据个体在问题域中的适应度值进行个体选择,并对群体反复进行交叉变异运算,经过多次循环求得满足要求的最优解^[4-5]。借用遗传算法的核心思想,对于黄土坡最危险滑裂面,可以采用一种比较有效的遗传算法方案进行搜索,其主要思路和步骤如下:

1) 对于有可能产生滑裂面的黄土边坡,根据实际经验人为地圈定出最危险滑裂面可能产生的范围 range(1) 。

2) 利用本文提出的三维滑坡模型,结合蒙特卡罗法^[3]在范围 range(1) 内随机生成 n 条候选滑裂面折线,并以此作为三维模型的中心线模拟生成第一代滑裂面种群。

3) 对第一代种群数据进行归一化处理,使其在 XOY 平面内形成统一格网,格网点的密度与位置相互之间一一对应,并利用矩阵形式存储滑裂面 X、Y、Z 坐标数据,形成归一化三维矩阵。其中 Z 值数据

作为矩阵的第三元素参与遗传运算。

4) 根据需要设置种群代沟、变异概率与交叉概率,在约束范围对归一化矩阵的第三元素进行选择、变异与交叉运算,个体之间相互配对组合,彼此随机针对某些区段进行基因交换,然后根据种群个体的稳定系数值,淘汰不符合要求的滑裂面个体。

5) 经过一次循环后,比较遗传下来的 m(m < n) 个子代滑裂面,即计算种群个体的稳定系数均值与最小值。若彼此形态及稳定系数相差较大,则补充新的个体使种群数量保持在 n 个个体,以防止过早收敛,然后进行新一轮遗传循环。最终,所有滑裂面个体形成一致收敛且稳定系数达到最小。

1. 目标函数

通常定义滑裂面的稳定系数计算公式作为目标函数,并将稳定系数值转换成对应的适应度值作为进行自然选择的唯一依据,用于区分群体中个体的好坏。因此,利用遗传算法搜索最危险滑裂面时,能否正确合理地选择稳定系数的计算方法,不仅影响最危险滑裂面的筛选,而且将直接影响搜索的效率。本文在极限平衡原理的基础上,采用计算机比较容易实现的条分法来计算稳定系数,图4为单元条柱受力分析图。

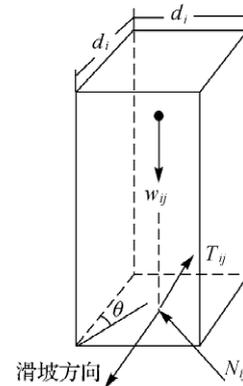


图4 单元条柱受力分析图

针对黄土地区地质疏松、地壳运动活跃、地震频发等地理特点,集中考虑地震因素对滑坡产生的影响,采用式(1) 计算滑坡的稳定系数值^[6]

$$F_{3D} = \frac{\sum_j \sum_i (c_{ij} \cdot A_{ij} + w_{ij} \cdot \cos \theta_{ij} \cdot \tan \varphi_{ij})}{\sum_j \sum_i w_{ij} \cdot \sin \theta_{ij} + \frac{a}{g} \sum_j \sum_i w_{ij}} \quad (1)$$

式中 F_{3D} 为三维边坡稳定安全系数; w_{ij} 为单元柱体的重量; A_{ij} 为单元柱体面积; c_{ij} 为单元柱体底面的粘聚力; θ_{ij} 为滑面的法线方向角; $i、j$ 分别为滑坡范围内单元柱体所在的行数和列数; a/g 为地震系数。

Matlab 遗传算法工具箱中的目标适应度函数是

按照最小值方向对个体进行排序的,因此,计算出种群中每个滑裂面的稳定系数后,可以利用相关的适应度值函数将其转化为个体的适应度值参与遗传选择。

2. 初始数据处理

在搜索滑裂面初始种群时,由于采用的是随机模型,滑裂面中心线具有不同的起点与终点,且搜索节点的个数也不相同,造成三维滑裂面的格网点个数与密度也不相同,增加了搜索难度。因此,为了减少参与搜索的变量,提高搜索效率,需对初始滑裂面种群作归一化处理^[7]。

利用 Matlab 的矩阵处理能力,以矩阵形式分别存储 X、Y、Z 坐标数据。并根据需要设定一个格网密度,将所有滑裂面转化成折点数及与其位置均一一对应的实值染色体个体,使其在 XOY 坐标面上形成规则统一格网,如图 5 所示。经过归一化处理,格网点的 Z 坐标值作为搜索基因发生变异并与其他滑裂面对应点上的基因进行交换。

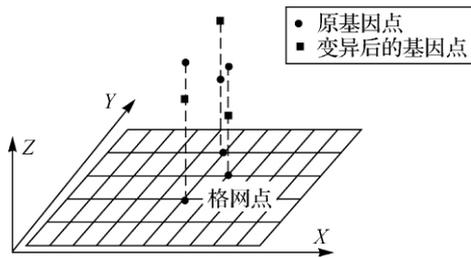


图5 遗传搜索中的变异交叉

3. 基础遗传算子及相关概念

遗传算法有 3 种基本运算:选择(selection)、交叉(crossover)和变异(mutation)。

1) 选择: 又称作复制,是根据个体的适应度值进行优胜劣汰操作,以使种群中的优良个体有机会作为父代为下一代繁殖子孙。选择运算有效地避免了有用遗传信息的丢失,提高了全局收敛性和计算效率。每个个体进入下一代的概率就等于它的适应度值与整个种群中个体适应度值之和的比例,即选择概率(selection rate),适应度值越高,进入下一代的概率就越大。

2) 交叉: 又称重组,是遗传算法中最主要的遗传操作,体现了信息交换的思想。两个相互配对的染色体按照交叉概率(crossover rate)交换它们之间的部分染色体,从而生成两个新个体。

3) 变异: 交叉运算是产生新个体的一种必不可少的辅助方法,决定了遗传算法的局部搜索能力。对群体中的每一个体以变异概率(mutation rate)改变某一个或某一些基因座上的基因值为其他的等

位基因。同生物界一样,遗传算法中变异发生的概率很低,变异为新个体的产生提供了机会。

另外,在遗传算法中,利用代沟(generation gap)这个概念来表示子代和父代之间的重叠程度,以控制每代中种群被替换的比例。假设父代种群个体总和为 N,遗传代沟值为 G,则每代有 $N(1 - G)$ 个父代个体被选中进入下一代种群。

4. 确定最危险滑裂面

图 6 是本文利用遗传算法进行最危险滑裂面搜索的流程图。

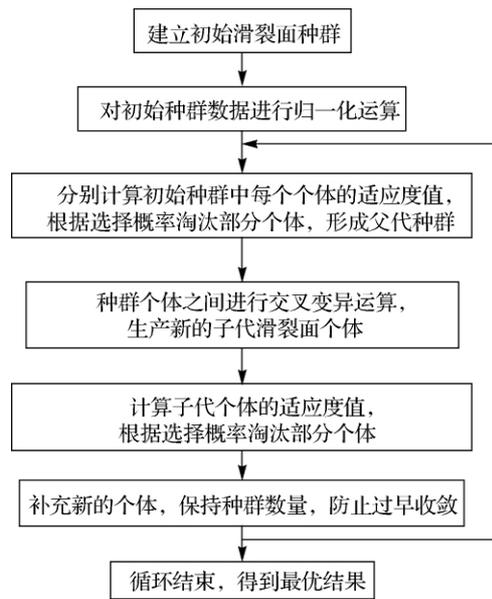


图6 最危险滑裂面遗传搜索流程图

为了提高搜索精度,初始滑裂面种群可以采用多种类型的滑裂面,即可以随机组合使用圆弧型、折线型及复合型滑裂面。

对初始种群数据进行归一化处理,利用式(1)计算种群个体的稳定系数值,然后转换为适应度值,并以此为依据设置一定的选择概率,选择若干染色体作为父代染色体。对父代染色体种群进行变异与交叉运算。变异概率与交换概率分别取(0.001, 0.1)和(0.4, 0.99)。本文采用线性搜索方式,即搜索变量以某种线性关系,沿着格网点的 Z 轴方向上下搜索变异点。这种搜索方法具有一定的连续性,可以在一定程度上提高搜索精度。经交叉变异后形成新的子代染色体种群,同样计算其适应度值,然后根据一定的选择概率淘汰不符合要求的滑裂面。

遗传算法要求在进行过程中保持群体规模不变。为了防止早熟收敛,在淘汰了部分个体后,需要补充新的滑裂面个体使种群个数始终保持在初

始种群的个体数量,然后进入新的循环,直至结束,最后输出最可能的滑裂面结果。

四、搜索实例

试验选取的边坡模型宽度为 150 m。根据需要,定义滑裂面中心线的搜索长度为 800 m,宽度为 70 m。表 1 是试验模型的常规参数表。为了提高搜索精度,本次试验的初始滑裂面种群采用多种类型的滑裂面,按照上文提出的滑坡模型随机搜索 9 条滑裂面,即圆弧型、折线型及复合型各 3 条。

表 1 试验模型的常规参数表

| 参数名称 | 取值 | 参数名称 | 取值 |
|------|------|--------|------|
| 代沟 | 0.8 | 循环次数 | 50 |
| 交叉概率 | 0.6 | 种群个体 | 9 |
| 变异概率 | 0.05 | 地震影响因子 | 0.15 |

经过 50 代搜索后,可以得到图 7 的结果,其稳定系数值为 1.302 5。

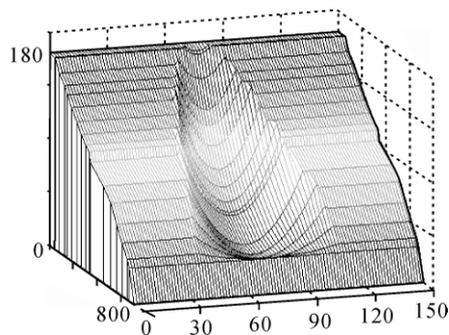


图 7 最危险滑裂面遗传搜索结果

图 8 反映了 50 次搜索过程中种群个体适应度值的变化,共两条曲线。其中,实线部分代表了 9 个滑裂面稳定系数的最小值变化;虚线则代表了种群稳定系数平均值的变化。

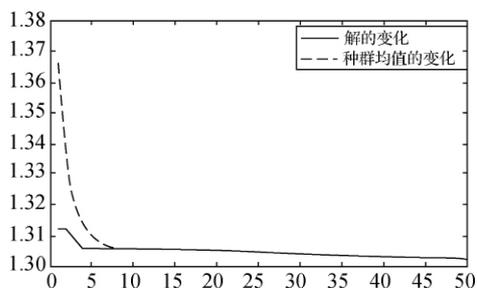


图 8 三维滑裂面遗传算法搜索结果

从图 8 中可以看出,5 次循环后种群均值从 1.37 急剧降低至 1.31 以下。之后,随着遗传算法搜

索的深入,种群均值缓慢变化,最后趋近于 1.30。同时,种群稳定系数的最小值也逐渐趋近于 1.30。最后,两条曲线基本重合,说明种群中 9 条滑裂面经过 50 次的遗传算法循环后,其稳定系数逐步收敛于一个相同的数值上,即 1.302 5,且该结果符合要求,可以采用。

五、结束语

目前直接搜索三维滑裂面的理论并不成熟,多是依赖控制参数模拟产生,如椭球型滑坡模型等。这些模型虽然满足了数理需要,但形态上与实际的滑坡有较大区别。因此,本文结合实际滑坡数据总结发现,由于黄土地区地势陡峭,土质结构疏松、黏着力小,当受到地震影响发生滑动时,产生的滑裂面往往平滑连续,对称性较好。在此基础上,本文利用成熟的二维搜索算法在 XOZ 平面内搜索出一条二维滑裂面(线),并以此作为三维滑坡的对称中心线,然后利用抛物线拟合原理模拟三维滑裂面。这一模型在很大程度上贴近了实际的滑坡形态,保证了搜索结果的准确性。

滑裂面中心线在搜索过程中产生了数个控制点,这些点一方面控制着滑坡的形态,另一方面作为搜索基因在搜索域中直接发生变异交叉,产生新的滑裂面个体。本文通过归一化处理,使种群中多个滑裂面在 XOY 方向产生统一格网,减少了参与搜索的变量,提高了搜索效率,节省了搜索时间。

参考文献:

- [1] 徐张建,林在贯,张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩土力学与工程学报, 2007, 26(7): 1297-1312.
- [2] 肖娴. 遗传算法在边坡测斜监测信息综合处理上的应用[D]. 四川: 西南交通大学, 2009.
- [3] 黄雅虹,甘卫军. 土坡最危险滑裂面的随机搜索和稳定性分析[J]. 内陆地震, 1992, 3(6): 54-62.
- [4] 雷英杰,张善文,李续武,等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- [5] 周正武,丁同梅,田毅红,等. Matlab 遗传算法优化工具箱(GAOT)的研究与应用[J]. 机械研究与应用, 2006, 12(19): 69-71.
- [6] 黄雅虹. 地震作用下黄土斜坡的稳定性分析预测[J]. 西北地震学报, 1998, 20(3): 52-58.
- [7] 甘卫军,黄雅虹,张培震. 黄土高边坡最危险滑裂面的遗传算法确定稳定性分析[J]. 工程地质学报, 1999, 7(2): 168-174.
- [8] 毛谦,陈胜宏,彭成佳. 三维边坡最不利滑裂面的遗传算法搜索[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1345-1350.