

相遇蚁群算法在边坡非圆弧临界滑动面 搜索中的应用研究

高 玮¹, 张飞君²

(1. 河海大学 土木与交通学院, 南京 210098; 2. 武汉建工(集团)有限公司, 武汉 430023)

摘 要: 边坡非圆弧临界滑动面搜索是边坡稳定计算中的一个关键问题, 其实质为安全系数最小的滑动路径搜索问题, 采用效果良好的路径搜索算法——蚁群算法是目前研究的热点。为了克服传统蚁群算法效率低、效果差的缺点, 基于蚂蚁正反向搜索相遇形成完整路径的原理, 提出了一种相遇蚁群算法。将该算法用于边坡非圆弧滑动面搜索问题, 提出了一种非圆弧临界滑动面搜索的新方法。通过 2 个边坡的算例计算及一个水库岸坡的工程应用, 验证了新算法的有效性。计算结果表明, 相遇蚁群算法无论是整个搜索范围还是从某一点起的搜索范围都要比一般蚁群算法大, 所以相遇蚁群算法在搜索边坡临界滑动面时所得解的多样性也要比一般蚁群算法好, 因此, 相遇蚁群算法的搜索范围能以较大的概率包含全局最优解, 算法最终也能以较大概率搜索到全局最优解。最终, 相遇蚁群算法可以在更大的范围内以更快的速度找到边坡的临界滑动面。

关 键 词: 边坡; 非圆弧临界滑动面; 搜索; 相遇蚁群算法

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Study of applications of meeting ant colony algorithm to search non-circular critical slip surface of slope

GAO Wei¹, ZHANG Fei-jun²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Wuhan Construction Engineering (Group) Co., Ltd., Wuhan 430023, China)

Abstract: The search of non-circular critical slip surface is a key problem in slope stability analysis. Essentially, this problem is a path search problem; so the ant colony algorithm is a very suitable method to solve this problem. To overcome the shortcomings of traditional ant colony algorithm, from the principle of combing one whole road by forward and reverse search of ants, here a new algorithm, meeting ant colony algorithm, is proposed. And then this meeting ant colony algorithm is used to locate the critical slip surface of slopes. Through two typical examples and an engineering application of a reservoir bank slope, the effectiveness of the new algorithm is verified. The results show that, from not only the whole search scope but also one point search scope, the meeting ant colony algorithm are all better than traditional ant colony algorithm; so the solutions diversity to search the critical slip surface of slopes by meeting ant colony algorithm is better. And then, to meeting ant colony algorithm, the global optimal solution can be included in the search scope by the larger probability; and the global optimal solution can be obtained by the larger probability. At last, by meeting ant colony algorithm, the critical slip surface of slopes can be found on larger scope and by larger speed.

Key words: slope; non-circular critical slip surface; search; meeting ant colony algorithm

1 引 言

大量研究已经表明, 边坡稳定分析中一个关键的问题就是搜索最危险的滑动面亦称临界滑动面。从 20 世纪 70 年代后期开始, 很多学者致力于非圆弧临界滑动面搜索技术的研究, 并提出了大量非圆弧临界滑动面搜索的方法^[1-5]。这些方法主要可以划

分为 6 类, 即变分法、模式搜索法、数学规划法、动态规划法、随机搜索法及智能搜索法。由于智能搜索法有很多显著的优点^[6-8], 目前已成为滑动面搜索研究的主流方法, 蚁群算法以其特有的组合优化优势, 在滑动面搜索研究中一直具有重要地位^[9-11]。传统蚁群算法是一种随机搜索方法, 存在搜索效率较低、易限于局部极值等缺点, 这些缺点一直是阻

碍算法工程应用的主要问题。为了克服传统算法的缺点,本文从改进蚂蚁路径形成机制出发,提出一种相遇蚁群算法,并基于此算法提出了一种新的非圆弧临界滑动面搜索方法,其中,非圆弧临界滑动面边坡的安全系数计算采用相对成熟的 Spencer 法。通过一个简单算例和一个复杂算例的典型算例研究及一个水库库岸边坡的工程应用实践,证明了算法的良好搜索效果和广阔的工程应用前景。

2 相遇蚁群算法

为了扩大搜索空间,提高搜索结果的多样性,避免“早熟”问题,并提高算法的搜索效率,本文提出一种相遇蚁群算法的基本思想是:在每次遍历中,当整个蚁群的搜索过程进行到大概 1/2 时,即当所有蚂蚁都大概访问了城市(搜索目标)总数的 1/2 时,对所有参与循环的蚂蚁进行检查以判断其能否与其他蚂蚁相遇。如果 2 只蚂蚁满足相遇的条件,那么它们将退出本次循环,它们所搜索过的城市相加便得到一个新搜索解,信息素也将在这新的相遇路径上更新。这样,整个蚁群搜索的时间将大大减小,而蚁群搜索的空间和搜索结果的多样性却会大大增加。但是,在实际算法实现过程中,每次遍历所用的蚂蚁数目是有限的,能相遇的蚂蚁数目也是有限的。为了使蚁群算法能正常运行,新算法中加入了一个阈值 v ,如果在某次循环中相遇蚂蚁的数目超过了该阈值 v ,那么信息素就在所有相遇蚂蚁产生的新路径上更新;如果某次循环中相遇蚂蚁的数目没有超过阈值 v ,整个蚁群的搜索过程继续进行直到所有的蚂蚁都完成自己的路径为止,此时信息素的更新过程同一般蚁群算法相同。

基于此思想编制了相遇蚁群算法的程序,算法的流程图见图 1。

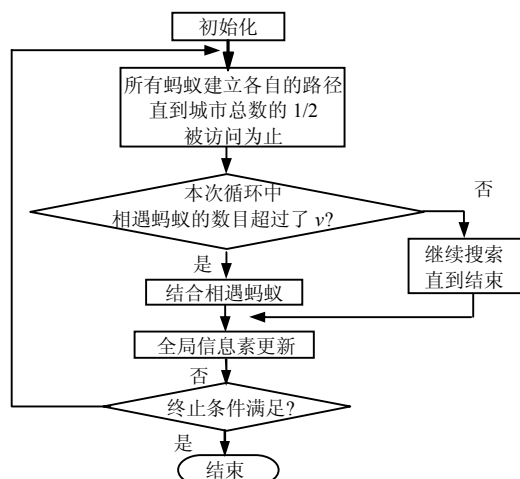


图 1 相遇蚁群算法流程图

Fig.1 Flow chart of meeting ant colony algorithm

相遇蚁群算法的具体实现过程如下:

(1) 参数初始化

开始前,所有参数都被赋予初始值。这些参数有算法常数 α 、 β 、 Q ,蚂蚁数目 m ,城市数目 n ,信息素挥发系数 ρ ,相遇蚂蚁数阈值 v ,路径上的信息素量的范围 $\tau_{\min}$ 、 $\tau_{\max}$ 和路径上信息素的初始浓度 τ_0 。

(2) 分配蚂蚁

根据随机选择规则,所有 m 只蚂蚁都被随机初始化为 n 个城市。

(3) 建立路径

每只蚂蚁依据随机选择规则以一定的概率选择一个要访问的城市,直到所有城市都被访问为止。

位于城市 i 的蚂蚁 k 选择下一个要访问城市 j 的概率为

$$p_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{[\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}]^\alpha [\eta_{il}]^\beta]}, (j \in N_i^k) \quad (1)$$

其中:

$$\eta_{ij} = 1/d_{ij} \quad (2)$$

式中: η_{ij} 为先验知识或称能见度; α 、 β 分别为决定信息素浓度和启发信息 η_{ij} 对蚂蚁转移概率影响的常数; N_i^k 为迄今为止未被蚂蚁 k 访问的城市列表(即蚂蚁选择 N_i^k 以外城市的概率为 0)。

(4) 相遇判断

每次遍历中,当搜索过程进行到 1/2,即当所有蚂蚁访问完大概城市总数的 1/2 时,检查所有蚂蚁以确定它们能否与其他蚂蚁相遇。如果 2 只蚂蚁禁忌表中的所有城市之和大于或等于城市总数,那么这 2 只蚂蚁就被标志为相遇蚂蚁,它们禁忌表中的城市将被相加以形成一条新的搜索路径。

新路径的具体形成过程为:如果这 2 只蚂蚁禁忌表中的城市总数恰好等于要访问城市的总数,那么这 2 个禁忌表中的所有城市都被挑选出来用以填充新的禁忌表,以形成新路径;如果这 2 只蚂蚁禁忌表中的城市数目大于要访问城市的总数,那么这 2 个禁忌表中重复的城市被剔除,以保证新禁忌表中城市的总数恰好为要访问城市的总数。这样新禁忌表中所有的城市便形成了一条新的路径。新路径的长度可根据禁忌表中的城市来计算,而信息素也将在新相遇路径上更新。在该算法中,只要相遇条件满足,一只蚂蚁可以同时与其他所有蚂蚁相结合以形成新相遇路径。

(5) 终止条件判断及信息素更新

如果本次循环中相遇蚂蚁的总数超过阈值 v ,

本次搜索过程结束, 信息素将在新相遇路径上更新; 如果本次循环中相遇蚂蚁的数目没有超过阈值 v , 蚁群的搜索过程将继续直到所有蚂蚁都完成遍历自己的路径为止, 这时信息素的更新机制和一般蚁群算法相同。

所有路径上的信息素更新都按照以下 2 个步骤进行:

信息素以一定的比率 ρ 挥发, 公式为

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij} \quad (3)$$

式中: $\rho \in (0, 1]$ 为信息素挥发系数。

当所有路径上的信息素浓度以一定概率消散后, 本次循环中各条路径上的信息素浓度以式 (4) 更新。

$$\tau_{ij} \leftarrow \tau_{ij} + \sum_{k=1}^v \Delta\tau_{ij}^k, (\forall (i, j) \in L) \quad (4)$$

式中:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} Q/T^k, & (\text{如果路径}(i, j) \text{属于 } T^k) \\ 0, & (\text{否则}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: τ_{ij} 为路径上信息素的浓度; $\Delta\tau_{ij}^k$ 为在本次循环中经过路径 (i, j) 的蚂蚁 k 所释放的信息素; Q 为一个常数, 表示蚂蚁循环 7 d 所释放的信息素量; T^k 为本次循环中蚂蚁 k 所建立的路径长度, 其他符号意义同前。

为了使搜索空间更大, 使搜索的结果更具有多样性, 每次循环中所有路径上的信息素量都被限制在一个范围 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ 内, 超出这个范围的值被强制设为 $\tau_{\min}$ 或 $\tau_{\max}$, 具体的实现过程为

$$\tau_{ij} = \begin{cases} \tau_{\min}, & (\tau_{ij} \leq \tau_{\min}) \\ \tau_{\max}, & (\tau_{ij} \geq \tau_{\max}) \end{cases} \quad (6)$$

3 滑动面搜索的优化模型

在蚁群算法搜索边坡滑动面时, 为便于计算机分析计算, 采用以下步骤来生成边坡滑动面和搜索边坡的最危险滑动面。

首先, 用滑动面滑入口和滑出口的位置确定出滑动面可能达到的最大范围, 同时用若干垂直条分线将其剖分成若干条块 (见图 2), 条分线的间距一般取等间距, 也可根据问题规模、要求精度和计算能力确定。

其次, 在每个条分线上划分若干个节点, 为了便于计算, 各节点之间的间距也取为等间距, 从计算精度的角度来考虑, 节点间距通常比条分间距 (即

条块宽度) 要小。

最后, 从入口区某点出发, 依据一定判断标准, 逐条追踪滑动面最有可能经过的节点, 比如, 从条分线 r 进入条分线 $r+1$, 按某种准则最终选择条分线 $r+1$ 上的节点 f , 得到条块底部滑动面 ef , 最终可以生成完整的滑动面 (如曲线 AB), 然后利用优化技术, 便可在这些滑动面中求出临界滑动面。

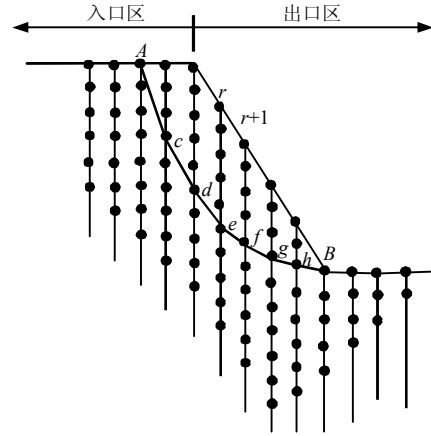


图 2 边坡滑动面的生成

Fig.2 Generation of general slip surfaces

一般来说, 边坡临界滑动面的搜索方式为: 将入口区和出口区坡面上的各点分别引向虚拟点 START 点和 END 点 (见图 3), 每次危险滑动面的搜索始于 START 点而终止于 END 点, 但要注意滑体入口点和逸出点分别至 START 点和 END 点间不作力学分析, 只作为辨识标志。这种方式为不定点危险滑动面搜索, 属于多阶段不完全序贯决策问题。

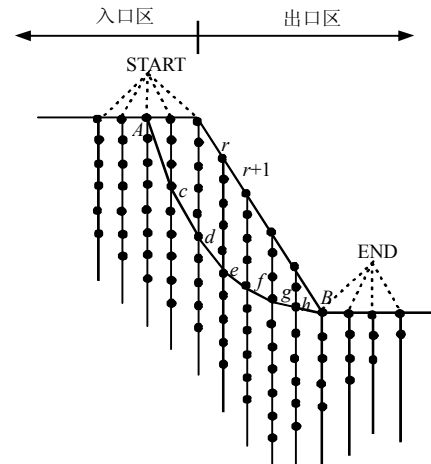


图 3 边坡临界滑动面的搜索方式

Fig.3 Searching pattern of critical slip surface of slope

为了提高滑动面的搜索效率, 实际搜索过程中还应该遵循形成合理滑动面的一些基本原则, 归纳

为以下几点:

(1) 滑动面上点序列的横坐标呈现递增或者递减趋势。

(2) 滑动面的滑入点、滑出点位于边坡的表面上。

(3) 边坡左右水平边界确定滑动面上各点横坐标的范围, 而边坡表面与滑动面可能区域(硬土层)之间的范围则决定滑动面上各点的纵坐标。

(4) 滑出段的倾角按经验在一定范围内取值, 通常为 $0^\circ \sim 45^\circ$ 。

(5) 一般情况下, 边坡的滑动面呈现凹形, 不会呈凸形或“之”字形, 即 $\alpha_{i-1} \leq \alpha_i$, α_i 为第 i 块滑面与水平线之间倾角。通常要求倾角变化较连续, 即满足 $\alpha_i - \alpha_{i-1} \leq \Delta\alpha$ 。

基于以上模型, 相遇蚁群算法搜索滑动面的过程如下:

(1) 初始化

每次参与循环的蚂蚁被随机初始化于滑入口或者是滑出口处的一些随机点, 所有路径上的信息素被初始化为一个随机值。

(2) 路径建立

每次循环中, 相遇的两只蚂蚁分别从滑入口与滑出口开始自己滑动面上的节点搜索, 直到最后在某一一条分线上的某一节点相遇为止。

(3) 信息素更新

和基本蚁群算法相似, 蚂蚁所经过的路径都要进行信息素的更新, 所不同的是, 在相遇蚁群算法中, 每条路径都是由相遇的蚂蚁建立, 因此, 信息素也在这些相遇路径上更新。

相遇蚁群算法搜索边坡滑动面的情况如图 4 所示。

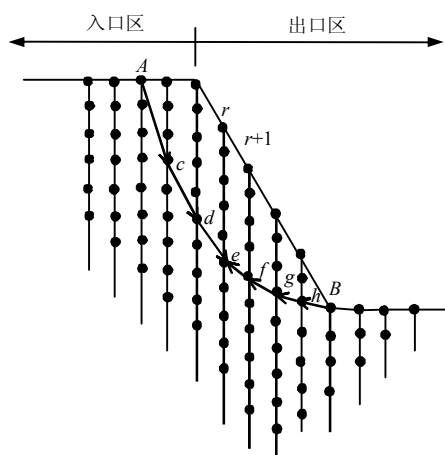


图 4 相遇蚁群算法搜索

Fig.4 Searching method of meeting ant colony algorithm

图 4 中, 2 只蚂蚁分别从入口区的 A 点和出口区的 B 点出发, 依次搜索每条条分线上的点, 最后 2 只蚂蚁在条分线 r 上的 e 点相遇, 从而建立了自己的路径 $A-c-d-e-f-g-h-B$ 。

4 算例

4.1 简单边坡算例

如图 5 所示, 一简单均质边坡, 高 11.54 m, 倾角为 30° , 边坡岩土体的黏聚力 $c = 19.6 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi = 10^\circ$, 重度 $\gamma = 16.66 \text{ kN/m}^3$ 。

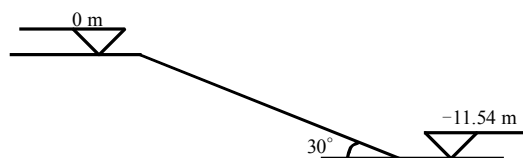


图 5 边坡几何形状及材料参数

Fig.5 Shape of slope and its materials' parameters

将该边坡用 20 条剖分线进行离散, 条分间距 6 m, 每条条分线上的节点间距 1 m, 如图 6 所示。

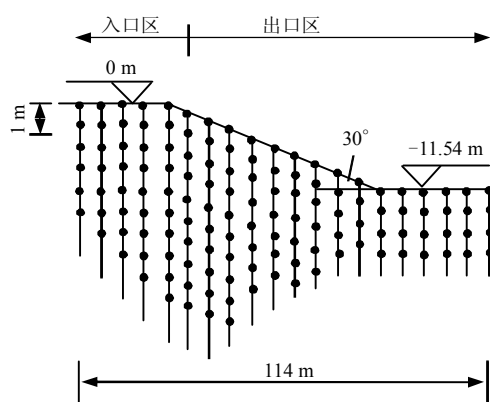


图 6 边坡剖分示意图

Fig.6 The subdivision sketch of slope

按照章节 4.1 的方法进行计算, 通过经验和试算得到算法参数取值: $\alpha = 1$, $\beta = 5$, $\rho = 0.5$, $\tau_0 = 1$, $\tau_{\min} = 0.00001$, $\tau_{\max} = 20$, $m = n = 50$, $Q = 100$, $v = 10$ 。

为了比较研究, 相遇蚁群算法和一般蚁群算法的参数取值相同, 即一般蚁群算法的参数为: $\alpha = 1$, $\beta = 5$, $\rho = 0.5$, $\tau_0 = 1$, $m = n = 50$, $Q = 100$ 。

把相遇蚁群算法所得的结果与一般蚁群算法所得计算结果, 与 STABL-5M 程序所得的分析结果及用 Castillo^[12]变分法所得的结果比较, 结果见表 1,

其滑动面形状和位置如图 7 所示。

表 1 计算结果比较

Table 1 Comparison of computation results

计算方法	安全系数	绝对误差	相对误差/%
变分法	1.040 0		
相遇蚁群算法	1.047 0	0.007 0	0.67
一般蚁群算法	1.055 0	0.015 0	1.44
STABL-5M 程序	1.104 2	0.064 2	6.17

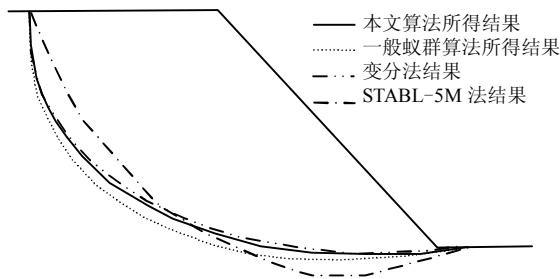


图 7 计算结果比较

Fig.7 Comparison curves of computation results

从表 1 可以看出, 相遇蚁群算法和一般蚁群算法所得解相近, 均已逼近最优解。由图 7 可见, 相遇蚁群算法比一般蚁群算法搜索到的临界滑动面要更靠近真实临界滑动面, 由于 STABL-5M 程序的搜索策略缺陷, 导致了程序所得的滑动面不够圆滑。

为了更清晰地说明相遇蚁群算法的搜索过程, 现将算法在第 50、75、100、125 次迭代的滑动面搜索图与 Castillo^[12]变分法所得的滑动面绘于图 8。

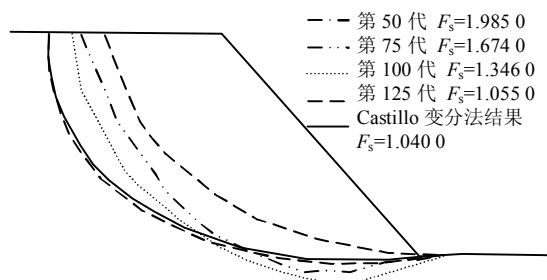


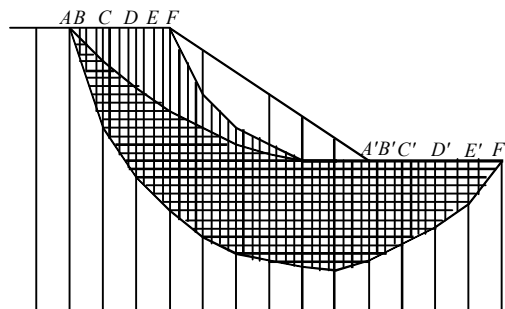
图 8 计算迭代结果图

Fig.8 Iteration results of the algorithm

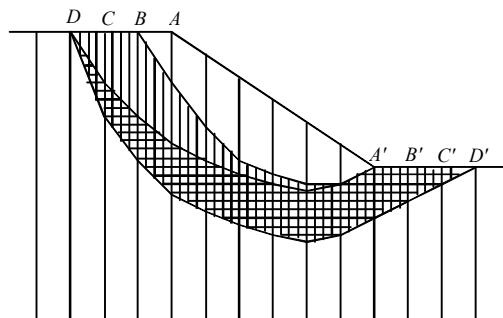
从图 8 可以看出, 相遇蚁群算法在迭代过程中逐渐向着最优结果靠拢, 并且算法的收敛速度较快, 大概在第 130 次迭代时可以找到本算例的解。

为了便于比较, 现将相遇蚁群算法和一般蚁群算法从同一点出发得的所有滑动面绘于图 9。图中, 竖线阴影部分为蚂蚁初始化于任意一点的滑动面搜索图, 而纵横线交错部分为初始化于某一点的蚂蚁

搜索滑动面的范围, 可见相遇蚁群算法无论是整个搜索范围还是从某一点起的搜索范围都要比一般蚁群算法大, 所以相遇蚁群算法在搜索边坡临界滑动面时所得解的多样性也要比一般蚁群算法好, 因此, 算法的搜索范围能以较大的概率包含全局最优解, 算法最终也能以较大概率搜索到全局最优解。



(a) 相遇蚁群算法



(b) 一般蚁群算法

图 9 滑动面搜索图

Fig.9 Searching results of slip surfaces

4.2 复杂边坡算例

为验证新算法的搜索效率及其在复杂边坡工程中的应用, 以澳大利亚计算机应用协会 (ACADS) 研究的一个考题作为本算法的验证算例^[13]。图 10 为算例的示意图。

该边坡为一个非均质边坡, 由 3 层材料构成, 各层材料的物理参数见表 2。

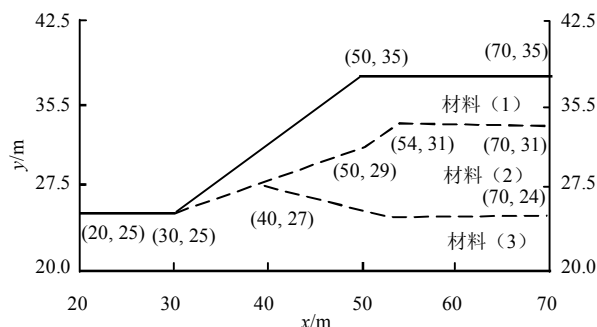


图 10 算例示意图(单位: m)

Fig.10 Sketch of example(unit: m)

表 2 算例地层材性参数

Table 2 Parameters of stratum materials for example

地层号	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$
1	0.0	39.0	19.5
2	5.3	23.0	19.5
3	7.2	20.0	19.5

通过试算,用 26 条剖分线对该边坡进行离散,条分间距为 2 m,每条条分线上的节点间距为 0.4 m。同样,通过经验和试算得到计算中的算法参数取值: $\alpha=1$, $\beta=5$, $\rho=0.5$, $\tau_0=1$, $\tau_{\min}=0.000\ 01$, $\tau_{\max}=20$, $m=n=60$, $Q=100$, $v=12$ 。

为便于比较研究,相遇蚁群算法和一般蚁群算法的参数取值相同,即一般蚁群算法的参数为 $\alpha=1$, $\beta=5$, $\rho=0.5$, $\tau_0=1$, $m=n=60$, $Q=100$ 。

为比较本文算法的有效性,图 11 中同时列出了相遇蚁群算法、一般蚁群算法和相应的考题中裁判程序计算出来的滑动面。从图中可以看出,相遇蚁群算法搜索得到的滑动面同考题中裁判程序得到的滑动面非常接近,说明这里的新算法可以搜索到比较合理的潜在滑动面,且相遇蚁群算法所得滑动面要比一般蚁群算法所得滑动面更靠近考题中所给出的临界滑动面。另外,原考题中给出的合理安全系数为 $F_s=1.344$,而相遇蚁群算法搜索得到的滑动面的 $F_s=1.348$,二者非常接近。说明相遇蚁群算法搜索得到的滑动面的确是一个潜在最危险滑动面,即相遇蚁群算法可以搜索到最危险的滑动面。

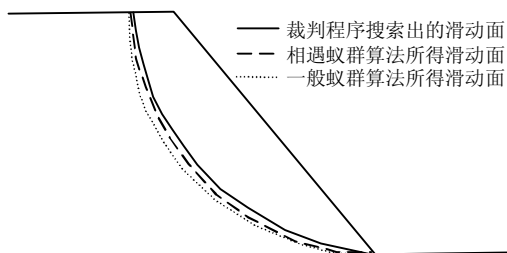
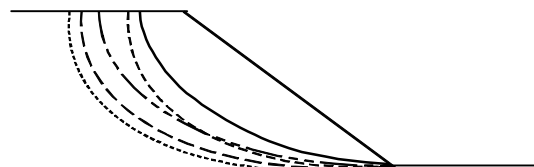


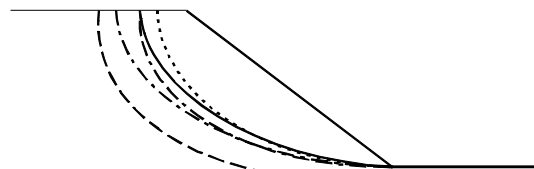
图 11 滑动面搜索结果比较

Fig.11 Comparison of searching results

为了清楚地显示出一般蚁群算法和相遇蚁群算法搜索边坡最危险滑动面的收敛过程,将一般蚁群算法和相遇蚁群算法搜索该例最危险滑动面的 500、1 000、1 500、2 000、2 500 次迭代所搜索到的滑动面绘于图 12。从算法迭代图可以看出,相遇蚁群算法搜索得到的最危险滑动面和裁判程序给出的最危险滑动面很接近,比一般蚁群算法所得结果要好;一般蚁群算法的搜索范围要比相遇蚁群算法小,说明了相遇蚁群算法可以在更大的范围内以更快的速度找到边坡的临界滑动面。



(a) 一般蚁群算法



(b) 相遇蚁群算法

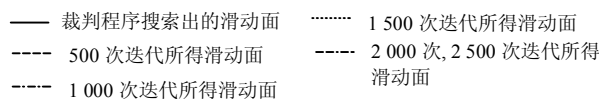


图 12 一般蚁群法和相遇蚁群算法计算迭代结果

Fig.12 Iteration results of ordinary ant and meeting ant colony algorithm

5 工程应用

以紫坪铺水库左岸堆积体边坡^[13]进行算法的工程应用验证。该工程堆积体边坡位于库首金沙坝前左岸汤家林、贾家沟一带,距大坝 618 m,距右岸引水隧洞进口最近处仅 250 m。上游界线在汤家林沟顺坡长约 1 600 m,由一系列不同高程平台和斜坡组成。斜坡坡度为 $20^\circ\sim 30^\circ$,沿江宽 300~870 m,初估方量为 2 500~3 000 万 m^3 。堆积体边坡的纵剖面如图 13 所示。

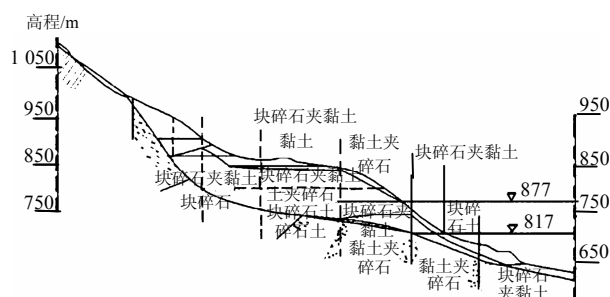


图 13 堆积体边坡的地质剖面图(单位: m)

Fig.13 Geological profile map of accumulation slope(unit: m)

堆积体外围岩石岩性复杂,主要由灰岩、白云质灰岩、岩质页岩组成,中夹少量灰绿岩脉。堆积体内部和附近发现一系列泉水。钻孔和竖井资料均显示具有一定的地下水位。

简易注水试验表明,土体渗透系数为 0.012~3.09 米/昼夜,属极弱透水~弱透水。勘探证实与基岩接触面处有一连续平直软滑带,厚 0.5~15.0 cm,由砾质重壤土组成。该层土性软弱,微透水,抗

剪强度低, 工程性质很差。堆积体从上至下可分为 7 层, 主要为坡碎石夹黏土、黏土夹坡碎石、块碎石土等。堆积体各土层强度指标见表 3。

表 3 堆积体边坡地层材性参数
Table 3 Parameters of stratum materials for accumulation slope

地层	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$	$\gamma_{\text{sat}}/(\text{kN/m}^3)$
堆积体	2.0	31.0	21.56	21.95
下部加泥层	1.0	16.0	21.56	21.95
上部加泥层	2.0	23.0	21.56	21.95
基岩	5.0	45.0	23.52	24.01
压重料	2.0	31.0	19.60	20.09

通过试算, 用 100 条剖分线对该边坡进行离散, 条分间距 16 m, 每条条分线上的节点间距为 10 m, 同样通过经验和试算得到计算中的算法参数取值: $\alpha=1$, $\beta=5$, $\rho=0.5$, $\tau_0=1$, $\tau_{\min}=0.000\ 01$, $\tau_{\max}=20$, $m=n=55$, $Q=100$, $\nu=13$ 。

对该堆积体边坡处于正常水库蓄水水位 877 m 计算, 如图 14 所示。

计算得到该边坡的安全系数 $F_s=0.981$, 文献[13]中得到的 $F_s=0.977$, 二者基本吻合, 均说明该堆积体边坡在水库正常蓄水情况下偏于不稳定, 应该对其进行加固处理。此情况和实际该堆积体边坡在工程中的状态基本一致, 说明本文算法可以较好地解决了这个工程问题。

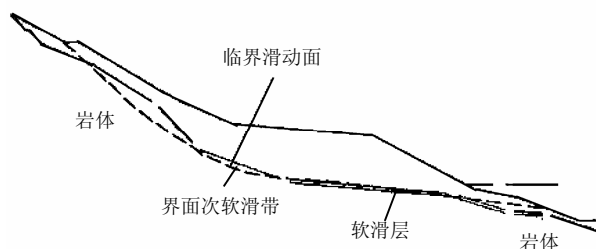


图 14 堆积体边坡计算结果
Fig.14 Computation result of accumulation slope

6 结 语

(1) 边坡潜在滑动面的搜索是边坡稳定计算中的首要问题, 通过对滑动区域的网格划分, 可以把网格点组成滑动面的搜索问题转换为一个标准的离散优化路径搜索问题。

(2) 相遇蚁群算法是解决路径搜索问题的效率较高, 效果较佳的好方法。本文采用这个工具解决边坡滑动面搜索这个典型的复杂路径优化问题, 从而提出了一种进行边坡非圆弧临界滑动面搜索的新

算法。通过 2 个边坡的典型算例及 1 个水库库岸堆积体边坡的工程实例, 证明了本文算法是一种解决边坡临界滑动面搜索的理想方法。

非圆弧临界滑动面搜索算法仅是一种初步研究, 也仅用简单算例及不多的一些工程实例对其进行验证, 更加复杂的工程应用是下一步的工作。

参 考 文 献

- [1] 王成华, 夏绪勇. 边坡稳定分析中的临界滑动面搜索方法述评[J]. 四川建筑科学研究, 2002, 28(3): 34—39.
WANG Cheng-hua, XIA Xu-yong. State-of-the-art: Methods for searching critical slip surface in slope stability analysis[J]. *Building Science Research of Sichuan*, 2002, 28(3): 34—39.
- [2] 莫海鸿, 唐超宏, 刘少跃. 应用模式搜索法寻找最危险滑动圆弧[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 696—699.
MO Hai-hong, TANG Chao-hong, LIU Shao-yue. Determination of the most dangerous slip surface with pattern search method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(6): 696—699.
- [3] YAMAGAMI T, UETA Y. Search for noncircular slip surfaces by the Morgenstem-Price method[C]//Proceedings of 6th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics. Innsbruck: [s.n.] 1988: 1335—1340.
- [4] HUSEIN M A I, HASSEN W F, SARMA S K. A global search method for locating general slip surface using Monte-Carlo techniques[J]. *Geotechnical and Geo-environmental Journal*, 2002, 127(8): 688—698.
- [5] CHEN Z. Random trials used in determining global minimum factors of safety of slopes[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, 29(2): 225—233.
- [6] CHENG Y M, LAU C K. Slope stability analysis and stabilization: New methods and insight[M]. New York: Taylor and Francis Group, 2008.
- [7] ZOLFAGHARI A R, HEATH A C, MCCOMBIE P F. Simple genetic algorithm search for critical non-circular failure surface in slope stability analysis[J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, 32(3): 139—152.
- [8] CHENG Y M, LI L, CHI S C. Studies on six heuristic global optimization methods in the location of critical slip surface for soil slopes[J]. *Computers and Geotechnics*, 2007, 34(6): 462—484.

- [9] 高玮, 张鲁渝, 张飞君. 边坡临界滑动面搜索的奖惩蚁群算法研究[J]. 水利学报, 2012, 43(2): 209—215.
GAO Wei, ZHANG Lu-yu, ZHANG Fei-jun. Search the critical slip surface of slope based on premium-penalty ant colony optimization[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2012, 43(2): 209—215.
- [10] 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): 3450—3453.
CHEN Chang-fu, GONG Xiao-nan. Heuristic ant colony algorithm involving chaos operator and its application to searching for critical slip surface of slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(20): 3450—3553.
- [11] 高玮, 冯夏庭. 基于仿生算法的滑坡危险滑动面反演(1)—滑动面搜索[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2237—2241.
GAO Wei, FENG Xia-ting. Back analysis of critical failure surface of slope based on bionics algorithm (1) — Location of critical failure surface[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(13): 2237—2241.
- [12] CASTILLO E, REVILLA J. The calculus of variations and the stability of slopes[C]//9th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engrg.. Tokyo: Society of Soil Mechanics and Foundations Engineering, 1977: 25—30.
- [13] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2002.