

边坡稳定性分析及治理设计软件 Slide CAD 的开发

王 珣¹ 张 斌^{1,2} 宋保强¹

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川成都 610059; 2. 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院, 四川成都 610041)

【摘 要】 以软件易用性为指导, 系统阐述了 Slide CAD 的设计开发思路和主要功能。该软件以交互式输入为主, 包括前处理, 求解器, 后处理 3 大模块。提供一系列滑面计算方法与搜索算法。同时为边坡治理提供对悬臂, 锚索, “人”字型抗滑桩等优化设计计算。

【关键词】 软件开发; 边坡稳定分析; 搜索算法

【中图分类号】 TU 413.62; TU 472

Development of Software Slide CAD for Slope Stability Analysis and Treatment Design

Wang Xun¹ Zhang Bin^{1,2} Song Baoqiang¹

(1. Environmental and Civil Engineering College, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059; 2. Sichuan Province Communications Department Highway Planning, Survey, Design And Research Institute, Chengdu Sichuan 610041 China)

【Abstract】 The side CAD software development method and its main function is systemically elaborated, and its usability is emphasized. The software includes front module, solution module and post processing module, which maintains the interactive input. Sorts of slope computation methods and search algorithms are provided. Meanwhile, cantilever anchor cable and inverse V-shaped anti-slide pile optimization designs are provided.

【Key Words】 software development; slope stability analysis; search algorithm

0 引言

在修建高速公路、铁路、机场等交通设施, 和在建造矿井、大坝等大型建筑工程方面都需要分析土坡的稳定性。边坡稳定性分析通常分为三大类: 极限平衡法^[1], 能量法以及有限元法。极限平衡法在 70 多年的工程实践中得到不断地发展。受其自身理论的限制, 不能考虑土体的应力应变关系。能量法则在一定程度上考虑了土体的应力应变关系, 但只能给出假定滑移面的应力场与速度场, 其计算精度未有根本的提高。有限元法能够考虑应力应变关系, 不仅满足了力的平衡, 也考虑了变形协调。但是有限元法也存在着一些不足之处, 材料本构关系与真实的岩土特性差异较大。且近年来, 岩土本构关系无突破性的进展, 造成此法在描述岩土特性方面的不准确性。

理论的发展需要工程实践的检验, 极限平衡法虽然有自身的局限性, 但是其理论本身却日趋完善,

并在大量工程实践中得到了检验与发展, 在岩土工程界得到了广泛的认可。当前国际上对极限平衡法在边坡稳定性的分析中有两大发展趋势: ①二维向三维分析的转换^[2]; ②引入新的计算分析理论进行边坡临界滑移面的搜索。

本文基于传统的极限分析理论, 系统阐述了 Slide CAD 的开发过程, 各模块的功能, 以及各模块之间的相互关系, 着眼于实际工程中的应用, 只提及了应用理论最起码的、最基本的一些概念。本文所用插图大部分为 Slide CAD 提供。

1 软件的功能

Slide CAD 分为前处理, 求解器, 后处理三个模块(见图 1)。前处理针对数据的处理, 本程序采用交互式输入方式, 为用户提供了相对完备的绘图功能, 可在程序中直接建立边坡模型并支持从 AutoCAD 中直接读取图形数据的功能, 容错性好。即使再复杂的边坡几何模型也可在很短时间里建立。程

序应用土体自动剖分算法,数据准备效率得到大幅度提高。

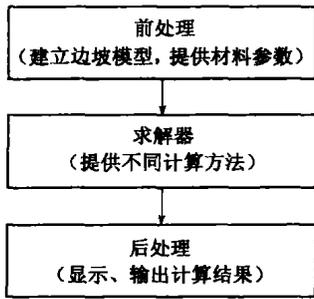


图1 模块关系简图

求解器模块可以考虑边坡破坏的三种滑面情况(折线型滑面,圆弧型滑面,组合型滑面),针对不同滑面形式提供不同的计算方法。同时,可处理坡面外载、坡外水位、孔隙水压(浸润线)、多层土等工况(见图2)。采用穷举法与退火遗传算法对边坡最危险滑移面进行搜索。在后处理中给出安全系数等值线图,云图以及退火遗传算法的搜索轨迹图,提供在边坡后期治理中所使用的悬臂桩,锚索桩,以及新型的人字型抗滑桩^[3]的优化设计与验算。所有计算结果均以计算书的形式输出。采用 Slide CAD 可在短短几分钟内完成从建模、计算到显示的整个边坡分析过程。

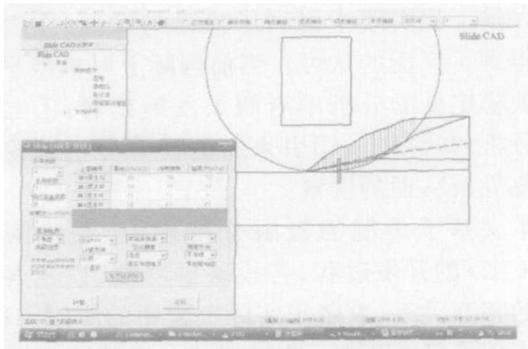


图2 Slide CAD 界面

1.1 前处理

在 Slide CAD 的前处理模块中,通过自身提供的相对完善的绘图功能,使模型的建立非常便捷,省去了以往繁琐的数据录入,减少了人为出错的机率。

1.1.1 土体剖分与材料参数确定

对于边坡自动进行坡体划分。首先程序对分界面的各个拐点进行存取,产生初始圆弧,利用笔者开发的求交点快速算法,计算圆弧的剪出口与后缘坐标,根据指定的条分数进行剖分,在每两条剖分线中,分别计算各土层分界线与土条剖分线的交点。

对于无交点的情况,则将上一层相同 X 坐标的交点数据赋予此层数据。在滑面参数确定中,程序则自下而上判断此层剖面面积(按上述算法,位于滑面以下的土层剖面面积自然为零)是否为零,当不为零时,便可将材料参数赋给滑面。退出再进入到下一个土条之中,重复上述过程即可快速准确的确定整个滑面的计算参数。

1.1.2 临界滑移面搜索

在求解边坡临界滑移面分析过程中,通常采用的方法有两类:穷举法(网格搜索法)^[3]和优化法^[4]。Slide CAD 应用穷举法与退火遗传算法来实现复杂边坡临界圆弧滑移面的搜索。

1.1.2.1 穷举法

其基本原理是预先给定一个圆心搜索范围及相应的半径控制界线(见图3),过某一圆心做半径控制线的垂线段,以此垂线段为半径画圆,则此圆被坡面线截成一段或若干段圆弧,按一定的规则选取一段弧,求此滑弧对应的安全系数。半径控制线有两条:一条是上界,对应深度最浅的滑弧;另一条是下界,对应最深滑弧。如在两条半径控制线之间再做 $n-1$ 条等距离的子线,每一条子线与一个圆心按上述原则均可形成一滑弧,则该圆心的安全系数为 $n+1$ 个(半径控制线上下界与该圆心也会形成两个滑弧)滑弧中安全系数的最小值。在搜索临界滑面时,程序提供了穷举搜索法,为“撒网式”搜索,即只需提供圆心搜索范围(矩形网格,见图3)和半径控制线,程序自动通过圆心与半径控制线相对位置计算圆弧半径。每一个圆心对应一安全系数,所有圆心安全系数中的最小值即为此搜索范围内的最小值,其对应的滑弧即为临界滑弧。这一搜索过程的实现须以土条剖分一节中提到的几个算法为基础。理论上讲,如将搜索范围扩大到足够大,便可得到全局最小值。本程序还能就各圆心的安全系数绘制等值线(见图4)与云图(见图5)。

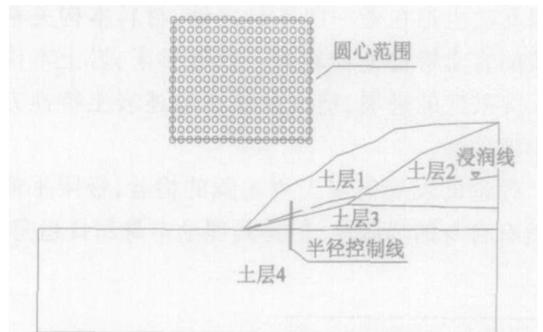


图3 搜索示意图

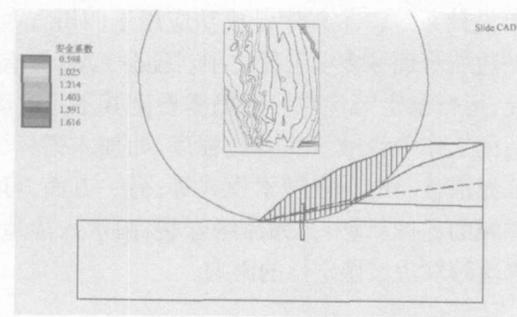


图4 复杂几何边界边坡的安全系数等值线图

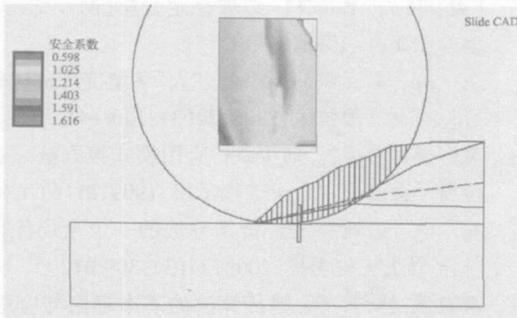


图5 复杂几何边界边坡的安全系数云图

1.1.2.2 退火遗传算法

退火遗传算法(SAGA)将遗传算法(GA)^[5]的全局搜索能力与模拟退火算法(SAA)^[6]的局部求精能力结合起来运用于边坡临界滑动面的搜索之中,从而克服了其他优化算法易在局部最小值收敛的问题。以下为退火遗传算法的具体求解过程。

1) 初始化,确定初始温度 T_0 、温度衰减因子 α 、种群规模 n 、染色体长度 L 、搜索空间 Θ (即圆弧滑动面的圆心范围以及半径控制线范围)、交叉概率 p_c 、变异概率 p_m ;随机产生初始种群 P_0 ;计算个体的适应度值 f_{0i} (f_{0i} 为每个滑动面所对应的安全系数平方的倒数,取安全系数的平方目的是为了提高安全系数的敏感度);计算种群的整体适应度。

$$F_1 = \sum_{i=1}^n f_i \quad (1)$$

2) 降温及算法终止。即令 $t = \alpha T_0$,如果 t 大于某一足够小的设定值 ϵ ,则进行下列各步;否则将当前解作为最优解输出,终止算法。

3) 产生新个体。按交叉概率 p_c 随机选择两个个体交叉,采用两点交叉的模式从而扩大搜索范围,使搜索能力更加健壮,交叉后随机选择个体按变异概率 p_m 进行某基因位的突变,从而得到新的个体。

4) 评价新个体。即计算它们的适应度值 f_{0i} ,随机产生 n 个 $[0, 1]$ 之间的随机数,按适应度比例值从而选择 n 个个体进入下一代。在评价新个体

中采用精英保留策略^[6],如产生的新一代最佳个体的适应度值小于上一代最佳个体的适应度值,则将上一代最佳个体直接复制替换新一代中的最差个体。此策略是复杂边坡临界滑动面的搜索结果收敛到最优解的基本保障。

5) 评价新种群。即重新计算新种群的整体适应度 $F_1 = \sum_{i=1}^n f_i$ 。对于需要求极小值问题,当 $F_1 < F_0$,则将新种群作为当前种群或父代种群 P_1 ,否则,根据 Metropolis 依概率 $e^{-[(F_1 - F_0)/t]}$ 接受新种群作为父代种群 P_1 。对于求极大值问题,如果 $F_1 > F_0$,则将新种群作为当前种群或父代种群 P_1 ,否则依概率 $e^{-[(F_0 - F_1)/t]}$ 接受新种群作父代种群 P_1 。

6) 令 $T_0 = t$, $P_0 = P_1$, $F_0 = F_1$,返回 2)。通过大量算例比较,Slide CAD 提供的此方法可以很好的克服了其他优化算法难以解决的多极值点边坡搜索问题。同时程序给出了此算法应用于边坡临界滑移面搜索时圆心与半径搜索轨迹图(见图 6)。

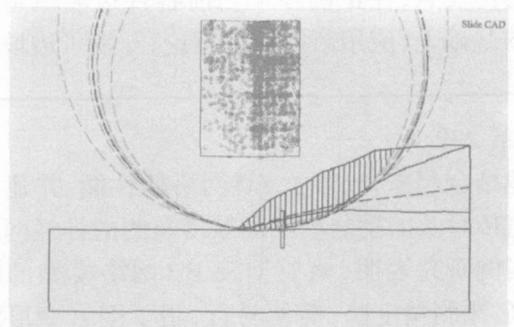


图6 采用退火遗传算法搜索轨迹图

1.2 水位线、外荷载与地震作用的考虑

水位线,程序将计算每个土条上水位线与滑移面之间的距离,从而计算出水头差。对于外荷载,程序自动将外荷载直接转化到相应土条,形成土条的外载分量。地震作用采用拟静力直接分解在垂直与平行滑面方向。

2 求解器

程序的好坏还取决于处理复杂问题的时间,在求解器中对计算格式进行了必要的处理,构造一系列容易收敛的迭代格式。目前 Slide CAD 可提供 Fellenius 法、简化 Bishop 法、简化 Janbu 法、不平衡推力法、陆军师团法、罗厄法、Spencer 法、7 种求解算法,完全可满足工程设计需求。

3 处理器

Slide CAD 的后处理器提供了分析、处理、显示

输出计算结果的功能,当采用退火遗传算法分析边坡,利用 Slide CAD 的后处理器,可得到到一条具有一定宽度的滑移带,这与工程实际是相符的。

在得到边坡稳定计算结果后,后处理中可进行一般支档结构设计(如悬臂桩,锚索桩与“人”字型抗滑桩)。Slide CAD 对三种类型的方法提供相应截面尺寸优化与锚索拉力调校(见图 7)。



图 7 结构设计对话框

4 结论

易用性作为软件开发的重要原则,本软件以易用性为出发点,在正确理解当前各种边坡稳定分析理论的基础上,应用新的计算理论,开发了边坡稳定

分析设计系统。本程序已成功应用于四川省西昌市美姑边坡治理等多项工程之中。Slide CAD 具有使用简便,运行稳定等优点。但仍需看到其不足之处,在今后的工作中将继续完善此程序,如加入锚杆、土钉和临界滑移面的路径搜索模式等;另一方面,可引入该领域的各种新理论,如后缘开裂,雨水入渗地下水位涨落等对边坡稳定性的影响。

参 考 文 献

- [1] [美]Huang Yang H. 边坡稳定分析[M]. 北京:清华大学出版社,1988,37-39.
- [2] 王,李云华,李树森. “人”字型抗滑桩优化设计[J]. 岩土工程技术,2006,20(3):140-143.
- [3] 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.
- [4] 邹广电. 边坡稳定分析条分法的一个全局优化算法[J]. 岩土工程学报,2002,24(3):309-312.
- [5] 李敏强,林丹,等. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [6] 王小平,曹立明. 遗传算法理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002.

收稿日期:2006-06-30

(上接第 239 页)

有机地结合起来,改善了 BP 网络的性能,并建立了基于遗传算法的围岩松动圈厚度预测的神经网络模型。实例研究表明,该模型较 BP 网络模型的收敛性能好、预测精度高,简便易行,用于围岩变形预测是有效的和可行的。

神经网络作为一种技术工具,它的深入发展离不开对岩土工程问题机理的全面、深入和正确的理解和认识。目前,对于神经网络在岩土工程中的应用问题应注意不能走两个极端,即神经网络无所作为、没有前途和实用价值的观点和神经网络无所不能、可以取代常规技术的观点,这两种观点都是错误的,让神经网络在岩土工程中发挥其力所能及的作用才是积极的客观的认识。

参 考 文 献

- [1] 董方庭,宋宏伟,等. 巷道围岩松动圈支护理论[J]. 煤炭学报,1994,19(1):21-32.
- [2] 靖洪文,傅国彬,郭志宏. 深井巷道围岩松动圈影响因素实测分析及控制技术[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(1):70-74.
- [3] 高 玮,郑颖人. 巷道围岩松动圈预测的进化神经网络

方法[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(5):658-661.

- [4] William C Carpenter, Margerry E Hoffman. Guidelines for the selection of network architecture[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing, 1997, 11(5):395-408.
- [5] 孙海涛,吴 限. 深基坑工程变形预报中神经网络法的初步研究[J]. 岩土力学,1998,19(4):63-68.
- [6] Holland J H. Adaptation in Natural and Artificial Systems [M]. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.
- [7] Goldberg D E. Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning [M]. New York: Addison-Wesley, 1989.
- [8] 罗先启,詹振彪,葛修润,等. BP 网络与遗传算法在水布垭工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(7):963-967.
- [9] Charles L K, Igor Y, Keith N. Solving inverse initial-value boundary-value problems via genetic algorithm[J]. Engineering Application of Artificial Intelligence, 2000, 13(6):625-633.
- [10] 王德润. 神经网络在煤巷围岩分类中的应用[J]. 矿山压力与顶板管理,1997(3-4):105-107.

收稿日期:2006-06-19